地信网论坛
bbs.3s001.com

选矿手册

第一卷

冶金工业出版社

地信网论坛
bbs.3s001.com

选矿手册

第一卷

《选矿手册》编辑委员会

冶金工业出版社

地信网论坛
bbs.3s001.com

内 容 简 介

本分册是依照《选矿手册》编辑委员会拟定的编写大纲的要求编写的，包括选矿概论、矿产资源和工艺矿物学等三篇。选矿概论篇主要介绍选矿的发展史和技术成就、常用选矿术语以及金属和非金属矿选矿产品标准。矿产资源篇主要介绍矿产资源特点及其开发趋势、矿产勘查与储量分类、分级和矿产工业指标的一般要求。工艺矿物学篇介绍工艺矿物学的研究方法及研究内容，列出了解离参数测定、元素平衡计算和浮选小型试验产品考察实例等。

本书是一部工具书，可供初级以上选矿科技人员使用，亦可供有关大专院校选矿专业师生参考。

本分册除主编、副主编外，选矿概论篇的撰写人员有刘振中、孙传尧和王璧善。另外，陈祖荫、邱允贵审查了工艺矿物学篇，杨忠威整理了全稿。目录英文由胡力行翻译。

选 矿 手 册

第 一 卷

《选矿手册》编辑委员会

*

冶金工业出版社出版发行

（北京北河沿大街嵩祝院北巷39号）

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 14 3/8 字数 360 千字

1991 年 8 月第一版 1991 年 8 月第一次印刷

印数 00,001～4,000 册

ISBN 7-5024-0807-X

TD·135 定价 12.20 元

地信网论坛
bbs.3s001.com

《选矿手册》编辑委员会

主任委员：张卯均
副主任委员：胡为柏　童国光
编　委：（按姓氏笔划排列）
王　岚　王永德　石大鑫　丘继存　刘广泌
刘正适　朱家骥　余兴远　沈志诚　沈建民
汪淑慧　李毓康　罗中兴　苏仲平　吴威孙
胡熙庚　陶　敏　黄大雨　夏珠荣　赵涌泉
秘　书：赵涌泉（兼）
责任编辑：王迺琳　黄淦祥

本分册主编、副主编

第一篇　选矿概论
主　编：张卯均
副主编：石大新
第二篇　矿产资源
主　编：刘正适
副主编：赵涌泉　孙士良
第三篇　工艺矿物学
主　编：程希翱
副主编：葛书华　田福纯

地信网论坛
bbs.3s001.com

前　言

我国是世界上矿产资源比较丰富、矿物种类众多的国家之一。在辽阔的国土上，蕴藏着多种多样的有色金属、黑色金属、稀贵金属矿产以及化工、建材等非金属矿产，这是发展我国国民经济的雄厚物质基础。

我国的矿产资源，多数矿石的有用组分含量较低，矿物组成较复杂，必须经过选矿才能提高有价成分含量，改善质量，将复杂共生矿中的多种矿物分离，以适应市场商品规格或下一步加工技术的要求。

选矿是改善矿物原料性质的经济有效方法。当前，我国每年有近亿吨的有色金属矿石和约一亿五千万吨黑色金属矿石在冶炼前几乎全部需要选矿；化肥生产所需的磷、硫矿石以及建材等非金属矿石，也多半经选别后才能进一步加工或作为商品。可见，选矿在发展矿物原料工业中具有重要的地位。

新中国成立以来的三十多年中，选矿事业随着矿物原料工业的突飞猛进而迅速发展。全国大型重点选矿厂近千个，中、小型选矿厂星罗棋布；设置选矿专业的大专院校有二十多所；部、省属科研、设计院所有百余个；从事选矿事业的科学技术人员不下十万人，建立了一支完整的选矿科技队伍。在这三十多年的科研、设计、生产实践过程中，充实了理论，革新了工艺，增加了选矿药剂品种，创造了独特的重选设备，有益元素的综合利用取得了许多颇有成效的进展，形成了符合我国矿产资源特点的选矿技术。一些难选矿种的选矿技术已进入世界先进行列，如锡、钨细泥的处理等。选矿技术水平不断提高，应用领域不断扩大。

为了提高我国在选矿科研、设计、生产方面的水平和总结经验，推动选矿事业的进一步发展，中国金属学会选矿学术委员会

地信网论坛
bbs.3s001.com

于1983年8月决定组织编写我国第一部选矿专业大型工具书——《选矿手册》，由选矿学术委员会组成《选矿手册》编辑委员会主持编写工作，并成立了相应的编写组。参加撰写工作的有国内具有几十年教学、科研、设计、生产经验的专家、教授、高级工程师、工程师几百人。在整个编写过程中，实行三级审核规定，严格贯彻“主编责任制”和“编辑委员会最终审定制”。

《选矿手册》共分八卷、三十七篇，按十四个分册陆续出版。全书出版字数约为450万字。考虑到选煤另有专著，本《手册》不包括煤的洗选。《选矿手册》的内容有：总论、选矿前准备、选矿方法及选矿药剂、产品处理及辅助作业、取样、试验技术与选矿过程检测、数模和工艺过程控制、选矿厂设计、选矿实践等。

《选矿手册》是一部供初级以上选矿工作者及有关人员使用的工具书。编入了较成熟的选矿理论、方法、工艺、药剂、设备和生产实践，内容丰富、实用性强。参阅了国内外上万篇文献，收集了上千个厂、矿的生产实践资料，理论与实践兼备，以实践为主，选材以国内为主，同时辅以典型的国外资料，体现了近代选矿科学技术水平。是一部具有中国特色的《选矿手册》。

在《手册》编写过程中，得到了冶金工业部、中国有色金属工业总公司、化学工业部、国家建筑材料工业总局、地质矿产部、核工业部等及其所属的二十多个有关单位的大力支持，并得到了中国金属学会、中国有色金属学会、中国有色金属工业总公司生产部、凡口铅锌矿、化学工业部化学矿山局、鞍钢矿山公司及所属东鞍山烧结总厂、齐大山选矿厂、大孤山选矿厂、弓长岭选矿厂、矿山设计院、矿山研究所等的积极资助，在此，表示衷心的感谢！

《选矿手册》编辑委员会

地信网论坛
bbs.3s001.com

第一卷　目　录

1　选矿概论

1.1　选矿的目的和作用……3
1.1.1　选矿的目的和任务……3
1.1.1.1　金属矿产资源……3
1.1.1.2　非金属矿产资源……4
1.1.1.3　可燃性矿产资源……4
1.1.2　选矿在国民经济中的地位和作用……6
1.2　选矿发展史和技术成就……9
1.2.1　选矿发展史……9
1.2.2　选矿技术成就……11
1.2.2.1　大型、高效选矿设备……11
1.2.2.2　选矿新工艺和新技术……13
1.2.2.3　高效选矿药剂……14
1.2.2.4　自动控制……14
1.2.2.5　选矿理论……14
1.3　常用选矿术语……16
1.4　选矿产品的质量标准……25
1.4.1　黑色金属矿选矿产品质量标准……25
1.4.1.1　铁……25
1.4.1.2　锰……25
1.4.1.3　铬……27
1.4.1.4　钒……30
1.4.2　有色金属矿选矿产品质量标准……31
1.4.2.1　铜……31
1.4.2.2　铅……31
1.4.2.3　锌……31
1.4.2.4　钨……31

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.4.2.5 锡……31
1.4.2.6 钼……33
1.4.2.7 镍……33
1.4.2.8 锑……33
1.4.2.9 铋……37
1.4.2.10 汞……40
1.4.2.11 硫……40
1.4.2.12 铝……42
1.4.2.13 镁……42
1.4.3 稀、贵金属矿选矿产品质量标准……42
1.4.3.1 金、银……42
1.4.3.2 钽、铌……42
1.4.3.3 锂、铍……43
1.4.3.4 锆……48
1.4.3.5 钛……48
1.4.3.6 稀土金属矿物……48
1.4.4 非金属矿选矿产品质量标准……50
1.4.5 选矿厂工业污染物排放标准……50
参考文献……50

2 矿产资源

2.1 绪 论……55
2.1.1 矿产资源在国民经济中的作用……56
2.1.2 矿产资源的特点……56
2.1.3 矿产资源开发总的发展趋势……58
2.2 我国的矿产资源……61
2.2.1 矿产资源概况……62
2.2.1.1 能源矿产……63
2.2.1.2 黑色金属矿产……64
2.2.1.3 有色和贵金属矿产……67

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.2.1.4 稀有、稀土和分散元素矿产……71
2.2.1.5 化工原料非金属矿产……73
2.2.1.6 冶金辅助原料矿产……75
2.2.1.7 建材和其他非金属矿产……76
2.2.1.8 水资源……80
2.2.2 矿产资源分析……81
2.2.3 矿床规模划分和计算单位……86
2.3 矿产勘查与储量分类分级……87
2.3.1 矿产勘查……87
2.3.2 矿产勘查各阶段的选冶试验程度……89
2.3.3 矿产储量分类和分级……90
2.3.3.1 矿产储量分类……90
2.3.3.2 矿产储量分级……91
2.3.4 矿产储量有关名词解释……91
2.3.4.1 伴生矿……91
2.3.4.2 共生矿……91
2.3.4.3 矿床类型……91
2.3.4.4 工业品位……92
2.3.4.5 边界品位……92
2.3.4.6 矿石品级……92
2.3.4.7 矿床工业指标……92
2.3.4.8 地质储量、探明储量、可供建设设计储量……92
2.3.4.9 综合工业品位……93
2.3.4.10 可采厚度（或最低可开采厚度）……93
2.4 矿产工业指标的一般要求……94
2.4.1 能源矿产……94
2.4.1.1 煤……94
2.4.1.2 泥炭……95
2.4.1.3 油页岩……96
2.4.1.4 石油……97
2.4.1.5 天然气……97
2.4.1.6 铀……97

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.1.7 钍……98
2.4.2 黑色金属矿产……98
2.4.2.1 铁……98
2.4.2.2 锰……99
2.4.2.3 铬……101
2.4.2.4 钛……101
2.4.2.5 钒……103
2.4.3 有色金属矿产……103
2.4.3.1 铜……103
2.4.3.2 铅……103
2.4.3.3 锌……105
2.4.3.4 铝……105
2.4.3.5 钨……105
2.4.3.6 钼……106
2.4.3.7 汞……107
2.4.3.8 钴……108
2.4.3.9 镍……109
2.4.3.10 锑……111
2.4.3.11 铋……111
2.4.3.12 锡……111
2.4.3.13 金……112
2.4.3.14 银……113
2.4.3.15 铂族元素矿产……114
2.4.4 稀有金属矿产……116
2.4.4.1 锂……116
2.4.4.2 铷……116
2.4.4.3 铯……117
2.4.4.4 铍……117
2.4.4.5 铌与钽……117
2.4.4.6 锆与铪……118
2.4.4.7 锶……118
2.4.5 稀土金属元素和稀散元素矿产……119
2.4.5.1 稀土金属元素……119

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.5.2 稀散元素…… 120
2.4.6 非金属矿产…… 123
2.4.6.1 菱镁矿…… 123
2.4.6.2 蓝晶石类矿物…… 124
2.4.6.3 蛭石…… 124
2.4.6.4 磷…… 124
2.4.6.5 硫…… 125
2.4.6.6 钾盐…… 126
2.4.6.7 硼…… 127
2.4.6.8 天然碱…… 127
2.4.6.9 钠硝石…… 127
2.4.6.10 芒硝、钙芒硝…… 127
2.4.6.11 碘与溴…… 127
2.4.6.12 砷…… 128
2.4.6.13 重晶石、毒重石、硅钡石…… 128
2.4.6.14 明矾石…… 128
2.4.6.15 石棉…… 129
2.4.6.16 石墨…… 129
2.4.6.17 滑石…… 131
2.4.6.18 高岭土…… 131
2.4.6.19 硅灰石…… 133
2.4.6.20 膨胀珍珠岩原料（珍珠岩、松脂岩、黑曜岩）…… 133
2.4.6.21 叶蜡石…… 134
2.4.6.22 蛭　石…… 135
2.4.6.23 膨润土、漂白土…… 136
2.4.6.24 海泡石、凹凸棒石…… 137
2.4.6.25 沸石…… 138
2.4.6.26 石榴石、刚玉…… 139
2.4.6.27 宝石、玉石和雕刻石料…… 140
2.4.6.28 金刚石…… 142
2.4.6.29 云母…… 143
2.4.6.30 耐火粘土…… 144
2.4.6.31 白云岩…… 145

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.6.32 硅岩（石英砂岩、石英岩、脉石英）…… 145
2.4.6.33 石灰岩（冶金灰岩、化工灰岩）…… 145
2.4.6.34 铁矾土…… 146
2.4.6.35 含钾岩石…… 146
2.4.6.36 蛇纹岩、橄榄岩…… 147
2.4.6.37 石膏、硬石膏…… 147
2.4.6.38 陶瓷原料…… 147
2.4.6.39 石 材…… 148
2.4.6.40 水 晶…… 148
2.4.7 水资源…… 149
2.4.7.1 地下水…… 149
2.4.7.2 地下热水…… 153
2.4.7.3 矿泉水…… 153
2.4.7.4 可提取有用元素的热田…… 153
2.4.7.5 海水…… 153
参考文献…… 155

3 工艺矿物学

3.0 绪论…… 159
3.1 矿物的性质…… 161
3.1.1 矿物的化学性质…… 161
3.1.1.1 矿物的化学分类…… 161
3.1.1.2 矿物的化学式…… 162
3.1.1.3 矿物晶体化学…… 163
3.1.1.4 矿物中的水…… 169
3.1.1.5 矿物的氧化与还原作用…… 170
3.1.2 矿物的物理性质…… 171
3.1.2.1 晶体的几何形态…… 171
3.1.2.2 矿石的结构和构造…… 174
3.1.2.3 矿物的磁性…… 182
3.1.2.4 矿物的电性…… 202

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.1.2.5 矿物的发光性…… 211
3.1.2.6 矿物表面的润湿性…… 213
3.1.2.7 矿物的密度和硬度…… 219
3.1.2.8 矿物的热学性质…… 221
3.1.2.9 矿物的波谱性质…… 223
3.1.3 重要工业矿物的性质 …… 235
3.2 工艺矿物学研究方法 …… 296
3.2.1 矿物分离法 …… 296
3.2.1.1 重力分离法…… 296
3.2.1.2 磁力分离法…… 297
3.2.1.3 电选分离法…… 303
3.2.1.4 介电分离法…… 303
3.2.2 矿物物理性质研究法…… 306
3.2.2.1 矿物的密度测定…… 306
3.2.2.2 矿物的硬度测定…… 309
3.2.2.3 矿物的磁性测定…… 311
3.2.2.4 矿物的电性测定…… 312
3.2.2.5 矿物的发光性研究法…… 315
3.2.3 光学显微镜法 …… 316
3.2.3.1 实体显微镜鉴定法…… 316
3.2.3.2 透射偏光显微镜鉴定法…… 316
3.2.3.3 反射偏光显微镜鉴定法…… 316
3.2.4 化学成分分析 …… 324
3.2.4.1 简易分析法…… 324
3.2.4.2 化学分析法…… 326
3.2.4.3 仪器分析法…… 327
3.2.5 矿物微束分析 …… 327
3.2.5.1 电子探针分析法…… 327
3.2.5.2 透射电子显微镜分析法…… 329
3.2.5.3 扫描电子显微镜分析法…… 334
3.2.6 矿物谱学分析 …… 336
3.2.6.1 红外光谱分析法…… 336

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.6.2 电子顺磁共振分析法…… 339
3.2.6.3 核磁共振分析法…… 340
3.2.6.4 穆斯堡尔谱…… 340
3.2.7 矿物结构分析 …… 342
3.2.7.1 X-射线衍射分析法 …… 342
3.2.7.2 电子衍射分析法…… 345
3.2.7.3 中子衍射分析法…… 346
3.2.8 矿物表面分析 …… 346
3.2.8.1 离子探针分析法…… 347
3.2.8.2 光电子能谱分析法…… 347
3.2.8.3 俄歇电子能谱分析法…… 352
3.2.8.4 低能电子衍射分析法…… 353
3.2.8.5 场离子显微镜研究法…… 354
3.2.9 矿物的热分析 …… 354
3.2.9.1 差热分析法…… 355
3.2.9.2 热重分析法…… 357
3.2.10 矿物含量测定 …… 358
3.2.10.1 矿物含量的计算法…… 358
3.2.10.2 几何测定法…… 359
3.2.11 矿物粒度测定 …… 360
3.2.11.1 粒度概念与表示法…… 360
3.2.11.2 粒度测定方法…… 363
3.2.12 矿物解离测定…… 365
3.2.12.1 矿物解离及其表示法…… 365
3.2.12.2 测定方法…… 366
3.2.12.3 解离测定的立体校正…… 367
3.2.12.4 矿物解离度定量数学模型…… 368
3.3 工艺矿物学研究内容与程序 …… 373
3.3.1 地质评价可选性试验工艺矿物学研究 …… 373
3.3.2 选厂设计选矿工艺流程试验工艺矿物学研究 …… 383

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.3.3　选厂效率最佳化的选矿试验工艺矿物学研究 …… 385
3.3.4　选厂生产流程工艺矿物学考查 …… 385
3.3.5　实　例 …… 386
3.3.5.1　（实例1）解离参数测定与理论选别指标计算 …… 386
3.3.5.2　（实例2）元素平衡计算及其应用 …… 390
3.3.5.3　（实例3）某地铅锌氧化矿物质组成研究阶段报告 …… 390
3.3.5.4　（实例4）金的赋存状态研究 …… 408
3.3.5.5　（实例5）硅铁分离难选原因考查 …… 414
3.3.5.6　（实例6）浮选小型试验产品考查 …… 422
3.3.5.7　（实例7）钼选厂低品位钼中矿的考查 …… 423
参考文献 …… 425

地信网论坛
bbs.3s001.com

VOLUME 1

Contents

1 General Aspects

1.1 The Aim and Function of Mineral Processing..... 3
1.1.1 Purposes and Tasks of Mineral Processing..... 3
1.1.2 The Role and Function of Mineral Processing in National Economy 6
1.2 Historical Developments and Technological Achievements in Mineral Processing..... 9
1.2.1 Historical Developments..... 9
1.2.2 Technological Achievements.....11
1.2.2.1 Mineral Processing Equipment of Larger Size and Higher Efficiency 11
1.2.2.2 New technology and Techniques in Mineral Processing.....13
1.2.2.3 Reagents of Higher Efficiency 14
1.2.2.4 Automatic Control of Processes.....14
1.2.2.5 Theories of Mineral Processing 14
1.3 Common Terminology used in Mineral Processing 16
1.4 Quality standards of Final products.....25
1.4.1 Quality Standards of Final Products from Ferrous Ores 25
1.4.1.1 Iron 25
1.4.1.2 Manganese 25
1.4.1.3 Chromium 27
1.4.1.4 Vanadium.....30
1.4.2 Quality Standards of Final Products from non-ferrous Ores.....31
1.4.2.1 Copper 31
1.4.2.2 Lead 31
1.4.2.3 Zinc 31

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.4.2.4 Tungsten 31
1.4.2.5 Tin 31
1.4.2.6 Molybdenun 33
1.4.2.7 Nickel 33
1.4.2.8 Antimony 33
1.4.2.9 Bismuth 37
1.4.2.10 Mercury 40
1.4.2.11 Sulfur 40
1.4.2.12 Aluminum 42
1.4.2.13 Magnesium 42
1.4.3 Quality Standards of Final Products from Precious and Rare Metal Ores 42
1.4.3.1 Gold and Silver 42
1.4.3.2 Tantalum and Niobium 42
1.4.3.3 Lithium and Beryllium 43
1.4.3.4 Zirconium 48
1.4.3.5 Titanium 48
1.4.3.6 Rare Earth Minerals 48
1.4.4 Quality Standards of Final Products from Non-metallic Ores 50
1.4.5 Standards for Discarding Industrial Pollutants from Mills References 50
References 50

2 Mineral Resources

2.1 Introduction 55
2.1.1 The Significance of Mineral Resources in National Economy 56
2.1.2 Characteristics of Mineral Resources 56
2 1.3 General trend in Developing Mineral Resources 58
2.2 Mineral Resources in China 60
2.2.1 General View of Mineral Resources 62
2.2.1.1 Energy Minerals 63
2.2.1.2 Ferrous Minerals 64
2.2.1.3 Non-ferrous and Precious Minerals 67
2.2.1.4 Rare Metals, Rare Earths and Dispersive

地信网论坛
bbs.3s001.com

Elements 71
2.2.1.5 Non-metallic Minerals for Chemical Industry 73
2.2.1.6 Minerals as Auxiliary Raw Materials for Metallurgy 75
2.2.1.7 Building Materials and Other Non-metallic Minerals 76
2.2.1.8 Water resources 80
2.2.2 Analyses of Mineral Resources 81
2.2.3 Classification of Ore Deposit Scales and Calculation Units 86
2.3 Exploration of Mineral Resources and classification of Reserves 87
2.3.1 Exploration of Mineral Resources 87
2.3.2 Extents of Metallurgical Tests at Different Stages of Mineral Exploration 89
2.3.3 Category and Classification of Ore Reserves 90
2.3.3.1 Category of Ore Reserves 90
2.3.3.2 Classification of Ore Reserves 91
2.3.4 Explanation of Terms Used for Ore Reserves 91
2.3.4.1 Associated Minerals 91
2.3.4.2 Intergrown Minerals 91
2.3.4.3 Types of Ore Deposits 91
2.3.4.4 Commercial Grade 92
2.3.4.5 Cut-off Grade 92
2.3.4.6 Assortments of Ores 92
2.3.4.7 Commercial Parameters of Ore Deposits 92
2.3.4.8 Geological Reserve, Explored Reserve and Probable Working Reserve 92
2.3.4.9 Comprehensive Commercial Grade 93
2.3.4.10 Minable Thickness (or Minimum Minable Thickness) 93
2.4 General Requirements for Commercial Parameters of Minerals 94
2.4.1 Energy Minerals 94
2.4.1.1 Coal 94
2.4.1.2 Peat 95

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.1.3 Oil Shale 96
2.4.1.4 Petroleum....97
2.4.1.5 Natural Gas 97
2.4.1.6 Uranium 97
2.4.1.7 Thorium 98
2.4.2 Ferrous Minerals 98
2.4.2.1 Iron 98
2.4.2.2 Manganese 99
2.4.2.3 Chromium 101
2.4.2.4 Titanium 101
2.4.2.5 Vanadium.... 103
2.4.3 Non-ferrous Minerals 103
2.4.3.1 Copper 103
2.4.3.2 Lead 103
2.4.3.3 Zinc 105
2.4.3.4 Aluminum 105
2.4.3.5 Tungsten 105
2.4.3.6 Molybdenum 106
2.4.3.7 Mercury 107
2.4.3.8 Cobalt 108
2.4.3.9 Nickel 109
2.4.3.10 Antimony 111
2.4.3.11 Bismuth 111
2.4.3.12 Tin 111
2.4.3.13 Gold.... 112
2.4.3.14 Silver 113
2.4.3.15 Platinum Group Metals 114
2.4.4 Rare Metals 116
2.4.4.1 Lithium.... 116
2.4.4.2 Rubidium.... 116
2.4.4.3 Cesium 117
2.4.4.4 Beryllium.... 117
2.4.4.5 Niobium and Tantalum 117
2.4.4.6 Zirconium and Hafnium 118
2.4.4.7 Strontium.... 118
2.4.5 Rare Earths and Dispersive Elements 119
2.4.5.1 Rare Earths.... 119
2.4.5.2 Dispersive Elements 120
2.4.6 Non-metallic Minerals 123

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.6.1 Magnesite 123
2.4.6.2 Kyanite Family Minerals 124
2.4.6.3 Fluorite 124
2.4.6.4 Phosphorus 124
2.4.6.5 Sulfur 125
2.4.6.6 Potassium Salts 126
2.4.6.7 Boron 127
2.4.6.8 Natural Alkalis 127
2.4.6.9 Nitratine 127
2.4.6.10 Mirabilite and Calcium Mirabilite 127
2.4.6.11 Iodine and Bromine 127
2.4.6.12 Arsenic 128
2.4.6.13 barite, Barium Carbonate and Sanbornite 128
2.4.6.14 Alumstone 128
2.4.6.15 Asbestos 129
2.4.6.16 Graphite 129
2.4.6.17 Talc 131
2.4.6.18 Kaolin 131
2.4.6.19 Wollastonite 133
2.4.6.20 Raw Materials of Expanded Perlite 133
(Perlite, Cedarite and Hraftinna) 133
2.4.6.21 Pyrophyllite 134
2.4.6.22 Vermiculite 135
2.4.6.23 Bentonite and Floridin 136
2.4.6.24 Sepiolite and Attapulgite 137
2.4.6.25 Zeolite 138
2.4.6.26 Garnet and Corindon 139
2.4.6.27 Gem, Jad and Other Stone Materials for Carving 140
2.4.6.28 Diamond 142
2.4.6.29 Mica 143
2.4.6.30 Refractory Clays 144
2.4.6.31 Dolomite 145
2.4.6.32 Silicolites (Quartz Sandstone, Quartzite and Vein Quartz) 145
2.4.6.33 Limestone (Metallurgical and Chemical Grades) 145
2.4.6.34 Pedalfer 146
2.4.6.35 Potassium-containing Rocks 146
2.4.6.36 Serpentine and Olivinite 147

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.6.37 Gypsum and Anhydrite 147
2.4.6.38 Ceramic Raw Materials..... 147
2.4.6.39 Stone Materials 148
2.4.6.40 Rock Crystals 148
2.4.7 Water Resources..... 149
2.4.7.1 Underground Water 149
2.4.7.2 Underground Thermal Water 153
2.4.7.3 Mineral Springs 153
2.4.7.4 Thermal Field Possible for Recovery of Useful Elements 153
2.4.7.5 Brine (Seawater) 153
References..... 155

3 Process Mineralogy

3.0 Introduction 159
3.1 Properties of Minerals..... 161
3.1.1 Chemical Properties of Minerals..... 161
3.1.1.1 Chemical Classification of Minerals..... 161
3.1.1.2 Formulae of Minerals 162
3.1.1.3 Crystal Chemistry of Minerals..... 163
3.1.1.4 Water in Minerals..... 169
3.1.1.5 Oxidation and Reduction of Minerals 170
3.1.2 Physical Properties of Minerals 171
3.1.2.1 Geometric Forms of Crystals..... 171
3.1.2.2 Texture and Structure of Ore..... 174
3.1.2.3 Magnetic Properties of Minerals 182
3.1.2.4 Electric Properties of Minerals..... 202
3.1.2.5 Luminescene of Minerals..... 211
3.1.2.6 Wettability of Mineral Surfaces 213
3.1.2.7 Density and Hadness of Minerals..... 219
3.1.2.8 Thermal Properties of Minerals..... 221
3.1.2.9 Spectra of Minerals 223
3.1.3 Summary of Major Industrial Minerals..... 235
3.2 Research Methods in Process Mineralogy 296
3.2.1 Methods of Mineral Separation 296
3.2.1.1 Gravity Separation 296

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.1.2 Magnetic Separation 297
3.2.1.3 Electrical Separation 303
3.2.1.4 Dielectric Separation 303
3.2.2 Research Methods on Physical Properties of Minerals 306
3.2.2.1 Measurement of Minerals' Density 306
3.2.2.2 Measurement of Minerals' Hardness 309
3.2.2.3 Measurement of Minerals' Magnetic Properties 311
3.2.2.4 Measurement of Minerals' Electric 312
3.2.2.5 Method for Investigating Minerals' Luminescene Properties 315
3.2.3 Methods of Optical Microscopy 316
3.2.3.1 Determination by Stereoscopic Microscope 316
3.2.3.2 Determination by Transmission Polarizing Microscope 316
3.2.3.3 Determination by Reflection Polarizing Microscope 316
3.2.4 Analyses of Chemical Compositions 324
3.2.4.1 Simple Analysis 324
3.2.4.2 Chemical Analysis 326
3.2.4.3 Analysis by Instrumentation 327
3.2.5 Microbeam Analyses of Minerals 327
3.2.5.1 Analysis by Electronic Probe 327
3.2.5.2 Analysis by Transmission Electron-microscope 329
3.2.5.3 Analysis by Scanning Electronmicroscope 334
3.2.6 Spectroscopy of Minerals 336
3.2.6.1 Infra-red Spectra Analysis 336
3.2.6.2 Analysis by Electron-Paramagnetic Resonance 339
3.2.6.3 Analysis by Nuclear Magnetic Resonance 340
3.2.6.4 Mössbauer Spectra 340
3.2.7 Analyses of Minerals' Structures 342
3.2.7.1 Analysis by X-Ray Diffraction 342
3.2.7.2 Analysis by Electron Diffraction 345
3.2.7.3 Analysis by Neutron Diffraction 346
3.2.8 Mineral Surface Analyses 346
3.2.8.1 Ionic Probe Analysis 347

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.8.2 Photoelectron Energy Spectra Analysis 347
3.2.8.3 Auger Electron Energy Spectra Analysis..... 352
3.2.8.4 Low Energy Electron Diffraction Analysis..... 353
3.2.8.5 Field Ionic Microscope Research 354
3.2.9 Thermal Analyses of Minerals 354
3.2.9.1 Differential Thermal Analysis 355
3.2.9.2 Thermogravimetric Analysis 357
3.2.10 Analyses of Minerals' Contents..... 358
3.2.10.1 Calculations of Minerals' Contents..... 358
3.2.10.2 Geometric Determination 359
3.2.11 Determination of Minerals' Particle Size..... 360
3.2.11.1 Concept of Particle Size and Its Presentation 360
3.2.11.2 Determination Methods of Particle Size..... 363
3.2.12 Determination of Mineral Liberation..... 365
3.2.12.1 Mineral Liberation and Its Presentation 365
3.2.12.2 Methods of Determination..... 366
3.2.12.3 Stereometric Correction of Liberation Measurements 367
3.2.12.4 Quantitative Mathematic Models of Liberation Degree..... 368
3.3 Contents and Procedures of Process Mineralogy Researches..... 373
3.3.1 Process Mineralogy Study in Beneficiation Tests for Geological Evaluation..... 373
3.3.2 Process Mineralogy Study in Technological Process Tests for Design of Concentration Mills 383
3.3.3 Process Mineralogy Study in Process Tests for Optimizing the Operations of Mills 385
3.3.4 Process Mineralogy Examinations of the Industrial Processes of Operating Mills 385
3.3.5 Examples 386
3.3.5.1 (Example 1) Determination of Liberation Parameters and Calculation of Theoretical Beneficiation Performances 386

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.3.5.2 (Example 2) Calculation of Elemental Balance and Its Application 390
3.3.5.3 (Example 3) Intermediate Research Report on the Composition of an Oxidized Pb-Zn Ore 390
3.3.5.4 (Example 4) Research of Gold Occurrences 408
3.3.5.5 (Example 5) Investigation of the Difficulties in Ferrosilicon Separation..... 414
3.3.5.6 (Example 6) Examination of the Products of Small Scale Flotation Tests 422
3.3.5.7 (Example 7) Examination of the Low Grade Moly Middlings from a Moly Mill 423
References..... 425

地信网论坛
bbs.3s001.com

1 选矿概论

地信网论坛
bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.1 选矿的目的和作用

1.1.1 选矿的目的和任务

矿产资源是在地球内千百万年乃至几十亿年漫长的地质过程中，经过复杂的变迁而富集起来的一种极珍贵的自然资源。与其他资源不同，它们一旦被开采之后，在相当长的历史时期内绝大多数不可能再生，只供人们一次性使用。随着社会生产力的发展，矿产资源不断开发，储量当然越来越少。虽然由于地质工作的深化，一些大型矿床还将陆续地被勘探出来，但是目前许多矿产资源已日趋贫化，特别是那些优质、易探、易采和易选的矿产如今在世界上已是屈指可数。因此，如何最大限度地综合利用矿产资源，使其充分地为人类造福，历来是科学技术领域的重要课题。

矿产资源大都以固体的形式存在，少量呈液体或气体的形式存在，在工业上大体可分成金属、非金属和可燃性矿产资源。

1.1.1.1 金属矿产资源

黑色金属矿产：各类铁、锰、铬的矿石。

有色金属矿产：属于这一类的资源很多，例如铜、铅、锌、钨、锡、镍等单金属或多金属的硫化矿、氧化矿和混合矿石以及铝土矿等。

稀有金属矿产：富含锂、铍、铌、钽、锆、铪、铷、铯等稀有元素的矿石。

稀土矿产：含铈、镧、钕、钇等稀土元素的矿石，如氟碳铈矿、独居石矿和离子型稀土矿等。

放射性金属矿产：含铀、钍和镭的矿石，如晶质沥青铀矿、铜铀云母矿等。

贵金属矿产：含金、银、铂、钯、钌、铑、锇、铱等贵金属元素的矿石。

还有些稀散元素不是以单独的矿物存在，而是分散在某些金

地信网论坛
bbs.3s001.com

属矿物之中，如锗、铟、镓等。

1.1.1.2　非金属矿产资源

例如磷块岩和含硫化铁矿、石墨、石棉、滑石、石英、长石、云母、金刚石等矿物的矿石。这类矿产种类繁多，可作为化工、建材、耐火材料、陶瓷和硅酸盐等工业部门的原料。

1.1.1.3　可燃性矿产资源

此类矿产资源指在天然状态或经过加工后可作为燃料或化工原料的矿产资源。例如，煤、油页岩、石油、天然气等等。

矿产资源能否具有工业开采价值，取决于有用矿物的组分含量、价值、储量，矿产地的自然地理和经济地理状况，矿产的技术加工水平和其他的技术经济因素。在以上列举的矿产资源中，除极少数在开采后可直接利用外，绝大多数需要加工后才能利用，选矿就是主要的加工过程。

金属矿产资源的加工，最终目的是从矿石中提取纯金属或化合物。但是从地下开采的矿石大都金属含量很低，不可能直接送冶炼加工。例如，许多铜矿石含铜不足1%，铅锌矿石中铅锌含量往往不到10%，铍矿石氧化铍含量0.05～0.1%，贫铁矿含铁仅30%左右。而冶炼时需要原料的金属含量大都分别为含铜12～30%，含铅40～70%，含锌40～59%，含氧化铍8～10%，含铁60～65%。可见，对于开采后的矿石在送往冶炼之前，需将主金属的含量富集几倍、几十倍乃至几百倍才能满足冶炼工艺的要求。这种使矿物富集的过程要用选矿的方法来实现。

对于大多数矿石而言（特别是有色金属和稀有金属的复合矿石），常有多种有用矿物共生和伴生的特点。象铜-钼、铜-镍、铜-铅-锌-银、钨-锡-钼-铋、锂-铍-铌-钽、铅-锑-锡-银等。其中有价元素常以矿物集合体的形式共存于同一矿体之中。开采这类复杂矿石固然具有同时可以获得几种矿产品的优点，但相应地也使矿物原料分离加工过程复杂化。如果在冶炼之前不预先将几种有用矿物相互分离，不但冶炼过程无法进行，而且会造成多种有用元素的损失浪费。这种在冶炼前将同一种矿石中的多种有用矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

物相互分离的过程也只能借助于选矿技术才能实现。

矿石中除了有用矿物之外，还常含有对冶炼或其他加工过程有害的杂质。例如，对于高炉炼铁，硫、磷是有害杂质；用于造纸工业的粘土，微量的铁是十分有害的。如果不预先将这些有害元素排除，不仅会影响冶炼或加工产品的质量，还常使工艺过程复杂化，甚至无法进行。这种排除原料中有害杂质的任务也是由选矿来完成的。

由此可见，选矿的目的和任务就是将有用矿物同无用的脉石矿物分离，把彼此共生的有用矿物尽可能分离并富集成单独的精矿，综合回收有价元素，排除对冶炼和其他加工过程有害的杂质，提高选矿产品质量，以便充分、合理、经济地利用矿产资源。

为了达到上述目的，根据不同的矿石类型和对选矿产品的要求，在实践中常可采用不同的选矿方法。常用的选矿方法有：浮选法、磁选法和重选法。其中浮选法应用最广，磁选法多用在黑色金属和稀有金属的选矿，重选法则广泛地应用于黑色、有色、稀有金属和煤的选矿。

除上述常用的三种选矿方法外，还有电选法、光电选矿法、化学选矿法及其他特殊选矿法。各种选矿方法有时单独使用，也常见有几种选矿方法的联合应用。

矿石的选矿处理过程是在选矿厂里完成的。不论选矿厂的规模大小（小型选矿厂日处理矿石几十吨，大型选矿厂日处理矿石高达数万吨以上），工艺和设备如何复杂，一般是包括以下三个最基本的过程：

（1）矿石分选前的准备作业。包括原矿的破碎（某些砂矿选矿厂可不需破碎）、筛分、磨矿、分级等工序。本过程的目的是使有用矿物与脉石矿物（废石）单体解离，各种有用矿物相互间单体解离，此外还为下一步的选矿分离创造适宜的矿物颗粒特性。

（2）分选作业。借助于浮选、磁选、重选、电选和其他选

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿方法将有用矿物同脉石分离，并使有用矿物相互分离获得最终选矿产品（精矿、尾矿、有时还产出中矿）。

（3）选矿产品的处理。包括各种精矿的浓缩、过滤、干燥和包装，以及将尾矿输送至尾矿场堆存。

有的选矿厂根据矿石性质和分选的需要，在选别作业前设有洗矿，预选抛废（即在较粗的粒度下预先排除部分废石）以及物理、化学预处理等作业，如赤铁矿的磁化焙烧，氧化铜矿的离析焙烧等作业。

1.1.2　选矿在国民经济中的地位和作用

从宏观上讲，在矿物原料加工的整个过程中选矿是介于采矿与化工、冶金之间的学科。广义地说，选矿是综合研究物料分离技术的一门学科，它涉及到数学、物理学、化学、地质学、矿床学、矿物学、晶体化学、物理化学、表面化学、流体力学、电磁学、计算机技术、采矿、冶金学、机械、电力、自动控制、化工、近代物理和波谱学等多种学科和工程技术。选矿作为一种有效的分离手段它早已广泛地应用在黑色金属及有色金属冶金工业、煤炭工业、化学工业、硅酸盐、陶瓷与建筑材料工业。近年来在金属的再生工业和环境保护领域也日益发挥其重要作用。

选矿在冶金工业中得到最早、最广泛的应用。由于选矿可使矿石中的金属含量富集几倍至几百倍，而且在大多数情况下与冶炼过程相比，选矿成本低，因此在技术经济上有很大的优越性。选矿降低了冶炼成本。由于废石量大部分排除，减少了炉渣量，不仅降低了能耗，也相应地减少了煤渣中的金属损失，使冶炼回收率得以提高。选矿技术的应用和发展使矿石的工业品位的下限大幅度降低，这就使大量的，原来被抛弃的废石变为可利用的资源，相应地增加了金属矿产的储量。

我国铁矿石的地质储量比较丰富，但贫矿石很多。在仅有少量的富矿石中约有5%的矿石量因含杂质过高不能直接冶炼。除了矿石贫之外，其矿物颗粒嵌布细，组分复杂也给矿石的开发利

地信网论坛
bbs.3s001.com

用带来困难。矿石储量大但“贫、细、杂”的特点决定了我国绝大多数铁矿石要经选矿处理。钢铁工业生产的实践表明，高炉炼铁实行“精料方针”，可以降低焦炭和石灰石的用量，提高高炉利用系数。为此，在最佳选、冶经济效益的前提下，必须使铁矿石经过选矿尽量提高铁精矿品位。

在有色冶金工业，由于有色金属和稀有金属矿产资源中其金属含量大都很低，各种有用矿物相互之间和与脉石间共生的关系更为复杂，选矿就显得尤其重要。对于难选共生矿的开发利用，为了充分利用有价成分或提供下一工序的理想原料，往往需要多种选矿方法的联合和采用选冶联合流程，即以选矿方法处理原矿，得到精矿或中间产品，然后用火法和湿法冶金对选矿产品进一步处理。合理的流程结构应能获得选矿、冶炼两个过程总的技术经济效益并据此对流程作出综合评价。选矿也有作为冶炼工艺中的一个中间过程采用，即将冶炼中间产品或最终产品（炉渣）用选矿处理。例如，我国金川有色金属公司冶炼厂现有的生产流程是将铜镍混合精矿用电炉熔炼、转炉吹炼产出高冰镍，经过缓冷后，再破碎磨矿，用浮选法获得铜精矿和镍精矿，用磁选法得到合金，此后分别进入各自的冶炼系统提取金属铜、镍和贵金属。又如，在我国现代化的贵溪冶炼厂中，冰铜经转炉吹炼后的转炉渣中含铜约4.5%，经铸渣机缓冷后进行破碎，磨矿，再用浮选法获得渣铜精矿，返回闪烁炉中熔炼。选矿用于其他冶金炉渣的处理方面也有成功的实例。

煤炭的洗选是选矿技术在煤炭工业中的应用。选煤的主要任务是降低煤的灰分和含硫量，也就是使混杂在原煤中的矸石、煤矸和硫铁矿等杂质按密度（比重）、外型和物理化学性质的差异与纯净的煤炭相分离。常用的选矿方法有重选法（跳汰、溜槽、摇床、重介质等）、浮选法。有关煤炭的洗选另有专著，本手册不包括这一内容。

非金属矿物资源是化肥、陶瓷、建材、造纸、纺织、电工等工业部门的原料来源。天然的非金属矿物资源绝大多数也是多种

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿物共生，不经过分选提纯也无法直接利用。如高级陶瓷和造纸工业用的高岭土，其中铁的含量控制极严，用作化肥原料的磷灰石，其中氧化铝和氧化铁的含量一般不宜超过4%。其他供建材、电工等部门用的矿物原料也都有一定的成分要求，因此，对于非金属矿产资源的开发利用，选矿自然是重要的加工过程。

在地质部门中矿石的可选性试验，对评价一个矿床往往是不可缺少的重要资料来源。此外，对于岩矿鉴定和重砂工作所需的单矿物的分离，选矿又是一个有效的手段。

由于选矿的物料分离技术包含有多种高效的方法，除了上述在原料加工部门广泛应用之外，近年来已在不少经济领域内推广应用。例如，在固体废料（包括工业和城市垃圾）的处理和金属的再生工业中日益显示出它的优势。在化纤工业中可排除混入原料中的某些杂质（砂粒、玻璃屑等），在粮食谷物加工过程中用于选种、除杂等。特别应当指出的是，目前在环境工程里用浮选法处理废水已卓有成效。在这一领域中常用的浮选法有溶气浮选法、散气浮选法、电浮选法、离子浮选法、絮凝浮选法和载体浮选法等。

选矿过程离不开设备和检测技术。选矿技术水平和生产实践的发展促进了与之配套的机械仪表工业，形成了一个选矿设备的制造分支，这些先进的仪器、设备用于选矿工业和科研活动又促进了选矿学科自身的发展。

如上所述，国民经济的许多部门都离不开选矿这门技术科学。它的技术水平对许多经济部门产生较大的影响。选矿技术落后，会造成有价资源的损失浪费，选矿厂的产品成为无法利用的废物。反之，先进的选矿技术亦能产生“一矿变多矿，一厂变多厂”的好局面。从以古代的淘金术为代表的重力选矿的初级阶段到今天种类繁多的选矿新技术和新设备的不断出现，选矿学已发展成为一个独立的学科。可以预料，随着科学技术水平的提高和各国对原料、能源需求量的增加，选矿学科的技术水平将不断提高，所应用的范围和所发挥的作用也将越来越大。

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.2 选矿发展史和技术成就

1.2.1 选矿发展史

早期选矿是利用矿物间的物理性质或表面物理化学性质的差异，但不改变矿物化学组成的分选过程，主要用于处理金属矿石和煤炭，称“矿石选别”，以后扩展到非金属矿物原料的选别，称为“矿物选别”。后来，把化学方法回收矿物原料中的有用成分过程，也纳入选矿，称为“矿物加工过程”。用化学方法处理矿物原料的过程，称为“化学选矿”。选矿经历了从处理粗粒物料到细粒物料、从处理简单矿到复杂矿、从单纯使用物理方法向使用物理化学方法和化学方法的发展过程。

人们应用选矿技术可追溯到古代。中国湖北铜绿山矿冶遗址中的“船形木斗”就是2000多年前淘洗铜矿石的工具；西汉初年（公元前2世纪）就发现用铁从胆水（硫酸铜溶液）中置换铜的作用；唐樊绰著《蛮书》中有“麸金出雨水，盛沙淘汰取之”的记载，描述当时淘金选矿情况；持羽毛蘸油粘捕亲油疏水的金、银细粒，称为鹅毛刮金，迄今仍有应用；在五代初期（公元10世纪）开始用胆铜生产铜；明《天工开物》有矿石采出后“先经拣净淘洗”，然后“入炉煎炼”，以及分选铁矿砂和锡矿砂的记载；该书还记载，金银作坊回收废弃器皿和尘土中金、银粉末时“滴清油数点，伴落聚底”的作法，就是利用表面性质的差异进行分离的方法。在古希腊也有用油和沥青收集矿物的记载。

自18世纪第一次工业革命，选矿技术获得较快发展。1848年在德国出现了第一台机械传动活塞跳汰机；牛顿（Isaac Neloton）和G.G.斯托克斯（Stokes）于1851年提出的运动阻力公式，奠定了重力选矿的基础；1867年奥地利的P.K.V.雷廷格尔（Rittinger）提出等降现象，导致窄级入选；1880年T.B.奥斯本（Osborne）首次发明静电选矿机，用于选别谷物；1886年

地信网论坛
bbs.3s001.com

F.R.卡彭特（Carpenter）曾用带摩擦电荷的皮带来富集方铅矿和黄铁矿的干矿石；1890年，美国C.M.博尔（Boll）等发明了电磁磁系的圆筒式磁选机，并用于选矿，其后相继出现了多种结构的选别强磁性矿物的干式和湿式弱磁场磁选机；1893年美国A.威尔弗利（Wilfley）发明了摇床；19世纪时人们就曾用气化（煮沸矿浆）或加酸与碳酸盐矿物反应产生气泡浮选石墨，至19世纪末期，由于对金属的需求量不断增加，能用重选处理的粗粒铅、锌、铜硫化矿资源逐渐减少，在澳大利亚、美国及一些欧洲国家开始用浮选法选别细粒矿物，为冶炼提供精矿。初期，应用薄膜浮选法及全油浮选法，前者是将矿石粉洒于浮选机的流动水面上，疏水性矿物漂浮于表层被回收，后者是在矿浆中拌入一定数量的矿物油，粘捕疏水亲油矿物上浮至矿浆表面回收。

20世纪以来，选矿技术发展迅速。1906年泡沫浮选法取得专利权，并推广使用；1907年美国G.W.皮卡德（Pickard）发明电晕场电选机，选别效果远高于单纯的静电场，是电选的重大发展；同期，美国R.H.理查兹（Richards）及苏联的П.B.利亚申科（Лященко）对干涉沉降进行了系统研究，推动了重选发展；1915年，蔡斯（Zeise）首次合成黄药；1921年，应用重介质分选机选别块煤；1922年，用氰化物抑制闪锌矿和黄铁矿，发展了优先浮选工艺；1924年，用脂肪酸皂浮选氧化矿；1925年，推广使用黄药浮选硫化矿，其用量为矿石量的万分之几，选别物料的粒度下限可达10微米，使浮选的工业应用得到重大发展；同时，出现了盘式、带式及感应辊式等多种类型的中磁场、强磁场磁选机，但处理能力较低；1932年，美国的A.M.高登(Gaudin)著“浮选”、1933年苏联П.А.列宾捷尔（Ребиндер）著“浮选过程的物理化学”；1938年澳大利亚I.W.沃克（Wark）著“浮选原理”，该期间，浮选理论取得很大进展；1943年，美国使用I.B.汉弗莱（Humphreys）研制的螺旋选矿机从海滨砂中回收锆；同期，化学选矿应用于处理氧化铜矿、铀矿，以后又用来处理复杂、难选、细粒浸染的矿物原料；50年代，德国F.W.迈耶

地信网论坛
bbs.3s001.com

（Mayer）提出跳汰分层的势能假说；同期，英国R.A.巴格纳德（Bagnald）提出关于矿浆受剪切力松散的理论，促进了重选选矿设备的发展；铁氧体，铝、镍、钴合金等永磁材料的出现取代了电磁场磁选机；同一时期，还研制成功第一台工业型矿用光电拣选机。特别是化学选矿的应用与联合流程的发展，使过去难于解决的、性质非常相近的许多矿物分离问题得以解决；细菌浸出技术的问世为价廉而有效的利用贫矿、废石、尾矿和炉渣找到了途径。

20世纪60年代以来，随着科学技术的日新月异，应用电子激光等新技术的成就，实现了选矿过程中关键工艺参数的检测与控制，使选矿厂的生产和管理水平，进一步得到改善。针对矿产资源的不断贫瘠，复杂共生矿的开发利用，以及用户对精矿质量的更高要求，促使选矿技术也阔步前进。

1.2.2 选矿技术成就

选矿新工艺的应用，大型、高效新设备的发展，微细矿粒分选新工艺的创立，选矿药剂品种的增加，选矿过程自动控制技术的推广以及理论研究的深化是当前选矿技术成就的主要表现。

1.2.2.1 大型、高效选矿设备

碎矿设备　小时处理能力4000吨矿石的大型移动式碎矿系统；小时处理能力3000吨矿石的2103×1670毫米的复摆式颚式碎矿机；破碎比可达30～50的1950×1820毫米双转子反击式碎矿机；直径3000毫米高效圆锥碎矿机；破碎产品粒度80%小于6毫米的超细碎圆锥碎矿机等，为实现“多碎少磨”降低选矿能耗创造了有利条件。

磨矿设备　大型自磨机有的可取代中碎、细碎设备，可简化碎矿流程和降低基建费用，目前最大规格的自磨机直径为11米；最大规格的球磨机为6.5×10米；棒磨机为4.57×6.1米；还有塔式、离心式和振动磨矿机等高效细磨设备。橡胶-钢材复合材料以及铬、钼、镍合金等高强度、耐腐蚀衬板和磨矿介质等新型材

地信网论坛
bbs.12001.com

料，不仅可提高磨矿效率，并可降低能耗。

筛分和分级设备　各类型振动筛已达50多种。近年来，多角度筛分机、莫根筛、弧形筛以及德里克（Derrick）筛、超声波和旋流细筛等高效筛分设备不断出现。磨矿回路分级作业水力旋流器已逐步取代机械分级机；圆锥形二次分级机和莫兹利（Mozley）旋流器等高效分级设备已用于生产。

预选设备向高效和多性能方向发展，近年来出现的高效重介质选矿设备有重介质旋流器、DWP型旋流分选机以及Tri-Flo型两段重介质分选机等；拣选设备已由可见光拣选发展到红外线、紫外线、X-射线等拣选。75～350毫米的大块铁矿石利用磁滑轮和跳汰机预先分选，已用于生产。“预选丢废”技术已成为经济有效的选矿手段。

重选设备　由于重选具有生产成本低、能耗低以及无污染等优点，近年来重选设备发展较快，相继出现了直径3米的圆锥选矿机、直径7.5米圆形跳汰机、旋转螺旋溜槽、巴特莱-莫兹利（Bartles-Mozley）摇动翻床、横流皮带溜槽、离心选矿机和振摆溜槽等高效重选设备。

浮选设备　向大型、高效和多样化发展，常用的有充气式、机械搅拌式和充气机械搅拌式三种类型。目前不同牌号的浮选机已有数十种，其中最大规格的浮选机容积已达84米^3。最近还研制成功适于选别粗粒或细粒物料的高效浮选机。

磁选设备　弱磁场磁选机向永磁大筒径发展，如直径1200×3000毫米湿式永磁磁选机和用于预选的大型干式永磁磁选机；高效强磁场和高梯度湿式磁选机提高了分选效率，如琼斯(Jones)强磁选机和萨拉（Sala）高梯度磁选机已用于生产。近年来，还研制成功了超导磁选机和磁流体分选机。

电选设备　卡普科（Carpco）、拉皮德（Rapid）和DY型等高效电选机已用于选别钛铁矿、锆英石、锂铌矿以及钨锡矿等。

浓缩和过滤设备　向高效和大型化发展。目前，浓缩机的直径有达151米者，圆盘和圆筒过滤机的直径分别为3.8米和7米；

地信网论坛
bbs.3s001.com

拉默拉（Lamella）型浓缩机的效率比一般浓缩机高10～20倍；水平带式或水平盘式过滤机可显著提高过滤效率；拉勒克斯（Larox）型和拉斯塔（Lasta）型高效压滤机处理细粒物料时，滤饼水分可降至8%左右。

1.2.2.2 选矿新工艺和新技术

无氰分选工艺 应用二氧化硫加温浮选、电化学强化分离浮选以及反浮选等选别铜、铅、锌多金属矿取得了良好效果。

难选氧化铜矿和氧化铅锌矿的处理技术 应用浸出—置换—浮选、浸出—萃取—电积、就地细菌浸出法等处理难选氧化铜矿；用离析—浮选法处理结合氧化铜矿，采用击振细筛技术，提高铁精矿品位等，均已用于工业生产；应用选择性离子电极控制氧化铅锌矿的硫化技术、氧化锌胺浮选工艺以及用选—冶联合流程处理难选氧化铅锌矿石已取得良好效果。

微细粒浮选技术 美国蒂尔登选矿厂于70年代首次将选择性絮凝脱泥——阳离子捕收剂反浮选技术用于选别铁燧石；瑞典成功地应用剪切絮凝技术处理微细粒白钨矿；细粒锡石和钨矿物的浮选回收已成为提高回收率的重要手段。

炭浆法提金工艺 70年代以来，出现了高效浸出搅拌槽和其他新型设备，改善了浸出吸附、炭解吸、电解、炭再生等作业，使该工艺得到广泛应用。此外，树脂矿浆法提金技术在苏联已成功用于生产。上述方法具有省去固体分离作业，流程简单等优点，特别适于处理难过滤和浓缩的含细泥矿石。

此外，用磁化焙烧法处理赤铁矿矿石；烟化或氯化法处理锡中矿；水冶法处理钨钼中矿；堆浸法处理贫矿和老尾矿。利用选矿方法处理高冰镍、钴冰铜和铜转炉渣等中间产品以及黄铁矿烧渣、各种浸渣、阳极泥以及工业垃圾等亦用于生产。

随着选矿工艺和装备水平日臻完善，船上选矿厂得到发展，除采金船和近海采锡船外，近年来，加拿大的北极圈严寒地区在驳船上建立了一座规模为2050吨/日的铅锌选矿厂，为开发利用两极地区的矿产资源，提供了经验。另外，为处理分散的矿产资

地信网论坛
bbs.8s001.com

源，移动式选矿装置亦得到迅速发展。

1.2.2.3 高效选矿药剂

选矿药剂的发展方向是高效、无毒、低用量；从天然原料中提取走向人工合成；从使用单一药剂走向使用混合药剂。

硫化矿捕收剂　仍以黄药、黑药及其衍生物为主。近年来研制成功Z-200、硫氮腈脂、醚氨硫酯等多金属矿选择性的酯类捕收剂；十二烷基醇难选铜、镍、钼等矿物的强捕收剂；多种药剂协同效应的混合捕收剂。

氧化矿捕收剂　塔尔油、氧化石蜡皂、烷基磺酸盐等仍广泛用于浮选赤铁矿、锰矿、磷矿及稀土矿等；羟肟酸和烷基二羧酸是氧化铜矿的强捕收剂；磺化琥珀酸胺、苯乙烯膦酸和甲苯胂酸是黑钨矿和锡石高效捕收剂。

新型起泡剂　合成起泡剂具有更好的起泡性能和选择性，且原料来源广。高效的MIBC药剂、C_6～C_8混合醇、C_6～C_7仲醇、醚醇和一、三已氧基丁烷等合成起泡剂有取代松油、松油醇和樟油等天然起泡剂的趋势。

高效调整剂　常用的无机盐调整剂有硫化钠、水玻璃、碳酸钠、硫酸、诺克斯（Nokes）药剂等；有机调整剂具有更高的调整性能，如羧基甲纤维素、木质磺酸盐、乙二胺磷酸盐、古尔胶等有机调整剂已推广使用。

1.2.2.4 自动控制

自70年代以来，选矿自控技术和数学模型在科研和生产中发挥越来越大的作用。实践证明，选矿厂实现自动控制能提高科学管理水平，提高选矿厂的处理能力和节约能源，并可提高回收率和精矿质量，从而增加经济效益。目前，多数大、中型选矿厂已基本实现碎矿、磨矿、选矿和脱水作业的局部自动控制；一些新建和改进的大型选矿厂实现了全厂计算机稳定控制或回路作业的程序控制；个别先进选矿厂正在由稳定控制向最佳化控制方向发展。

1.2.2.5 选矿理论

地信网论坛
bbs.3s001.com

近年来，利用现代理论和分析仪器，在选矿新方法、新工艺、新设备和药剂等方面的理论研究取得较大进展。如碎磨功耗规律、破碎腔形状和磨矿参数研究；浮选动力学、矿物结晶构造对浮选的影响、药剂与矿物表面作用机理的研究；选择性絮凝、球形团聚、剪切絮凝浮选以及载体浮选等新工艺理论研究；重选过程中巴格诺剪切理论和流膜特性的研究；磁路计算、聚磁介质的磁场特性、磁流体特性以及超导磁选等理论研究所取得的成果，为选矿技术进一步发展创造了条件。

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.3 常用选矿术语

常用的选矿术语有如下52个。

（1）矿石和原矿：在技术经济条件允许下，能从中回收有用成分或产品的矿物集合体称为矿石。矿石的价值主要取决于其有用成分的含量及危害加工的杂质多少。矿石按所含有用成分数量可分为贫矿石和富矿石；按金属种类可分为金属矿石和非金属矿石。选矿所处理的、从矿山开采出的矿石称为原矿，即选矿厂的原料。

（2）有用矿物：选矿所要回收的、能为冶炼或其他工业部门利用的矿物。如，硫化物中的方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿等；氧化物中的磁铁矿、赤铁矿、锡石、黑钨矿及白钨矿等；以及硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、氢氧化物和卤化物等组成的矿物。

（3）废石：在选矿过程中丢弃的粒度大于数毫米的粗粒废弃物。废石通常在预选阶段以重选、重介质选、磁选和拣选等方式丢除。预选丢除废石，有助于降低选矿成本。

（4）脉石：选矿所处理原矿中有用矿物以外的矿物统称。脉石通常还包括围岩，在选矿过程中往往不需对脉石与围岩加以区分。

（5）块矿和粉矿：块状的矿石称为块矿，粉状的矿石称为粉矿。块矿和粉矿没有明确的划分标准，通常以15或20毫米为界。有时将小于5毫米部分称为矿粉。

（6）矿砂和矿泥：砂状矿石称为矿砂，泥状矿石称为矿泥，原矿中含有的矿泥叫原生矿泥，在破碎、磨碎过程中产生的矿泥叫次生矿泥。当原生矿泥含量多时，常导致破碎、筛分设备的堵塞，且其所含粘土类物质会影响选矿指标，故需预先进行洗矿。

（7）给矿：为选矿系统中给入某个作业或设备的矿石或矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

浆。当原矿品位波动较大时，需及时调整给矿作业，以免影响选矿效果。给矿粒度组成和数量的变化也会产生类似影响。为取得稳定的选矿效果，应加强采矿的计划性并做好原矿管理。

（8）矿石可选性：矿石可选程度的工艺评价。矿石可选性是矿石的组成和结构、有价和有害成分的种类和含量及赋存状态、选矿技术水平和对产品质量的要求等因素，通过小型选矿试验在选矿指标上的综合反映。其目的在于确定该矿石选别的可能性，用于地质储量评价或开发前的试采性研究。

（9）粗选、精选和扫选：对原矿进行选别使有用成分富集，但尚不能得出合格精矿或丢除最终尾矿的过程叫粗选，粗选所得富产物叫粗精矿。对粗精矿进行选别，以进一步提高其品位的过程叫精选。对粗选尾矿进行选别，使其品位再降低的过程叫扫选。

（10）精矿：通过选矿除去原矿或给矿中大部分脉石后得出富集了的有价矿物或有用成分的产品。每个选别作业和选别设备都有本身的精矿。选矿厂所产精矿为最终精矿，其化学组成、粒度和水分需满足冶炼厂和其他用户的要求。

（11）中矿：选矿过程中得出的有价矿物或有用成分含量低于精矿，但高于尾矿的中间产品，中矿需返回本作业或送到另一选别作业再选。如，中矿中的有用矿物与脉石或其他伴生有用矿物呈连生体存在时，需再磨碎后再选，也有时用化学选矿处理特定的难选中矿。

（12）尾矿：选矿过程中选出精矿和中矿后，得出有价矿物或有用成分含量低的产品。尾矿包括选矿厂产出的最终尾矿和从一个选矿作业或设备排出的尾矿。当其中有价矿物或有用成分含量低到不能再经济地回收时，称为最终尾矿，存于尾矿库。随着选矿技术的发展，尾矿有可能得到重新利用。

（13）品位：矿物原料及选矿产品中有用成分含量的重量百分比；对金银等贵金属矿，用克/吨表示。原矿、精矿和尾矿品位的高低，分别表示原矿的贫富、精矿的富集和尾矿的贫化程度。

（14）回收率：原矿或给矿中所含被回收的有用成分在精矿

地信网论坛
bbs.fs001.com

中回收的重量百分数，用来评价该有用成分的回收程度。精矿的实际回收率表示为：

$$\varepsilon_{(实际)}=\frac{\beta Q_k}{\alpha Q_u},\ \%$$

精矿的理论回收率表示为：

$$\varepsilon_{(理论)}=\frac{\beta(\alpha-\vartheta)}{\alpha(\beta-\vartheta)}\times 100,\ \%$$

式中 α——原矿或给矿品位；

Q_u——原矿重量；

ϑ——尾矿品位；

β——精矿品位；

Q_k——精矿重量。

回收率包括选矿作业回收率和选矿最终回收率。由于取样、计量、分析及矿浆机械流失等原因，计算出的理论回收率和实际回收率往往不一致。

(15) 选矿比：选矿过程中原矿重量与精矿重量之比，也就是产出一吨精矿所需要的原矿吨数。选矿比K表示为：

$$K=\frac{Q_u}{Q_k}=\frac{\beta-\vartheta}{\alpha-\vartheta}$$

(16) 富集比：精矿品位与原矿品位之比，即精矿品位比原矿品位高出的倍数，用来表示选矿过程中有用成分的富集程度。富集比E表示为：

$$E=\frac{\beta}{\alpha}$$

(17) 产率：精矿或选矿产品的重量占原矿或给矿重量的百分比，精矿产率是选矿比倒数的百分比，产率γ表示为：

$$\gamma=\frac{Q_k}{Q_u}\times 100,\%$$

理论产率表示为：

$$\gamma=\frac{\alpha-\vartheta}{\beta-\vartheta}\times 100,\%$$

地信网论坛
bbs.3s001.com

（18）选别效率：表示选别效果好坏的综合指标。理想的选矿是将原矿中的有用成分全部回收到精矿中去，而不回收脉石。因而，用精矿中有用成分回收率与脉石回收率之差作为衡量选别作业成绩的标准，即选别效率。选别效率V表示为：

$$V=\frac{\varepsilon-\gamma_k}{1-\alpha/\beta_{(纯)}}\times 100,\ \%$$

或

$$V=\frac{\beta_{(纯)}(\beta-\alpha)(\alpha-\theta)}{\alpha(\beta-\theta)(\beta_{(纯)}-\alpha)}\times 100,\ \%$$

式中 $\beta_{(纯)}$——有用矿物的纯矿物品位；

γ_k——精矿产率。

（19）粒度：表示选矿过程中矿物颗粒的大小。球体和立方体物料颗粒的粒度分别用直径和边长表示。对不规则物料颗粒，可用具有相同行为的球体直径作为其等效直径。通常测定矿物粒度的方法有筛分法、水析法和显微镜法。

（20）单体解离：使某种有用矿物颗粒从脉石或其他有用矿物中解离出来，以便用物理选矿方法作为精矿回收。破碎和磨矿是达到矿物颗粒单体解离的作业，但在选矿过程中，通常不能达到完全单体解离。单体解离出的有用矿物占该有用矿物总量的百分比叫单体解离度，用以表示单体解离的程度。

（21）矿浆：细矿粒在水中混合成的悬浊液。通常将矿石与矿浆（矿石＋水）重量的百分比称为矿浆浓度。矿浆浓度表示为：

$$D_P=\frac{W_O}{W_P}\times 100,\ \%$$

或

$$D_P=\frac{W_O}{W_O+W_W}\times 100,\ \%$$

式中 W_P、W_O和W_W——矿浆、矿石和水的重量。

矿浆浓度对重选、浮选均有较大影响。矿浆浓度的测定方法主要有称重法、压差法和放射性同位素测定法。

（22）功指数：矿石破碎、磨矿难易程度的指标，为将不限

地信网论坛
bbs.3s001.com

定粒度矿石碎至d_{80}=100微米粒度所消耗的单位功。功指数W_i的表达式为：

$$W_i = \frac{W}{\frac{10}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{80}}}}$$

式中 W——单位破碎功，kW·h/t；

D_{80}、d_{80}——矿石破碎前后的粒度（以80%重量通过的筛孔表示）。

（23）流程图：按作业顺序表示选矿过程的图解。各选矿作业可用图形、符号表示，亦可用文字表示，有时将选别指标及矿量、浓度等标在各有关作业处。不同的矿石有不同的选矿流程；即使同一类矿石，由于产地不同，选矿流程也有差异。适宜的选矿流程需根据选矿试验确定。

（24）选矿：用物理或化学或者物理与化学相结合的方法，将原矿中的有用矿物与脉石或有害矿物分开的过程。选矿可显著提高矿石的质量，减少运输费用，降低冶炼成本，并可实现综合利用。除少数富矿外，金属和非金属矿石几乎都需选矿。

（25）破碎：用压碎、击碎和劈碎方式使块状矿石碎裂，降低矿块粒度的过程。原矿粒度最大可达1500毫米，最终破碎产品粒度通常大于6毫米。破碎通常分三段进行，称为粗碎、中碎和细碎，分别采用相应的破碎机来实现。

（26）磨碎：用冲击和磨剥方式进一步降低破碎产品粒度的过程。磨碎主要通过钢棒、钢球、砾石或块矿等磨碎介质在磨矿机中进行。磨碎产品粒度一般小于2～3毫米。根据磨矿介质的不同，磨矿机有自磨机、半自磨机、棒磨机、球磨机和砾磨机等。

（27）破碎比和磨碎比：分别为破碎和磨碎给矿中最大矿块直径与破碎和磨碎产品中最大矿粒直径之比。采用多段破碎和磨碎时，总破碎和磨碎比分别等于各段破碎和磨碎比的乘积。

（28）筛分：使具有不同粒度的矿石颗粒通过一层或数层筛面，按筛孔大小分成不同粒级的过程。筛分时，通过筛孔的颗粒

地信网论坛
bbs.3s001.com

称为筛下产品；未通过筛孔的颗粒称为筛上产品。

（29）洗矿：用水力或机械力冲刷、擦洗受粘土粘结、胶结的矿石，使之碎散、解离并将细泥分出的过程。某些风化严重、含水份较高的矿石，选矿前常需洗矿。洗矿不仅有利于改善选别指标，还能避免由矿泥引起的破碎和筛分设备的堵塞。

（30）分级：根据不同粒度和密度（比重）的矿石颗粒在介质（一般为水）中沉降速度的不同，将矿石颗粒群分为两种或多种粒度级别的过程。分级的目的与筛分相似，但系按颗粒的等降性分成不同级别，且主要用于处理0～2毫米的细颗粒矿石。以气体作为介质的称风力分级。

（31）重选：利用矿石颗粒密度(比重)的差异和在介质（主要是水）中运动速度的不同，进行分选的过程。重选主要用于选别有用矿物与脉石密度（比重）差异较大的矿石。干旱缺水地区以及不宜在水中分选的物料，则以空气为重选介质。

（32）重介质选：利用密度（比重）介于矿石和脉石或围岩之间的重悬浮液进行分选的过程。重悬浮液主要由硅铁、磁铁矿等加重剂配制。重介质选主要用于预选，以便在选别作业前预先排除部分粗粒尾矿。

（33）重力浮选：在重选设备上同时进行重选和浮选的选矿过程。重力浮选的给矿通常是含两种以上可浮性差异较大而密度（比重）相近的重选粗精矿，粒度一般为0.2～3毫米。重力浮选设备主要有摇床和溜槽等。

（34）浮选：根据矿物颗粒表面物理化学性质的不同进行分选的过程。大多数矿物都能因本身的疏水性或由于经浮选药剂处理后获得的疏水性而粘着在气泡上并浮至矿浆表面而分离。浮出有用矿物，将无用矿物留在矿浆中作为尾矿排出的叫正浮选；反之叫反浮选。浮选机有机械搅拌式、充气机械搅拌式和充气式等。

（35）浮选药剂：用来调节和控制矿物颗粒表面和浮选介质（通常为水）的物理化学性质，以扩大欲回收矿物和欲抑制矿物

地信网论坛
bbs.3s001.com

之间的疏水和亲水性差别，有助于改善浮选分离条件的药剂。浮选药剂包括能提高矿物表面疏水性、改善其可浮性的捕收剂；有助于生成稳定气泡的起泡剂；增强矿物表面的亲水性，降低其可浮性的抑制剂；提高矿物表面与捕收剂作用能力的活化剂；通过调整矿浆酸碱度，造成对选浮有利的介质条件的 pH 调整剂；使矿粒分散的分散剂以及促使矿粒聚集成较大粒度的絮凝剂等。

（36）离子浮选：用捕收剂与溶液中的金属离子生成络合物或沉淀，附着于气泡上浮并分离的过程。离子浮选是从稀溶液中回收有用金属或消除废水中有害组分的较有效方法。

（37）选择性絮凝—浮选：用絮凝剂将某种矿物的细颗粒选择性地团聚起来形成较大絮团，脱泥后进行絮团浮选或者抑制絮团进行反浮选的分选过程。对由高品位矿石生成的絮团，也可以不通过选矿而直接用选择性絮凝和多次脱泥方式富集。絮凝剂有天然和合成之分，前者有淀粉、树胶等，后者有聚丙烯酰胺等。

（38）浮选过程动力学：研究浮选过程的速度和各种因素对浮选速度影响的学科。浮选动力学可以研究浮选的各基本方面，如矿粒附着于气泡的动力学，各种因素对矿粒与气泡附着的影响，以及浮选速度和选择性等。

（39）磁选：利用矿物颗粒的磁性差异，在不均匀磁场中进行分选的过程。磁选有干式和湿式之分。磁选机有强磁场、中磁场和弱磁场磁选机以及高梯度磁选机等。

（40）电选：根据矿物颗粒导电率的不同，在高压电场中进行干式分选的过程。电选可分选导体、半导体和非导体矿物，主要用于选别砂矿和分选某些粗精矿。电选机按电场可分为静电选矿机、电晕电选机和复合电场电选机；按矿粒带电方法可分为接触带电电选机、电晕带电电选机和摩擦带电电选机等。

（41）化学选：利用矿物化学性质的差异，用化学或物理与化学相结合的方法分离和回收原矿或中矿中的有用成分，以获得化学精矿的过程。化学选适应性强、效果好，但成本较高。

（42）离析：在矿石中添加适量的氯化物（氯化钠或氯化

地信网论坛
bbs.3s001.com

钾）和还原剂（煤粉或焦炭粉），在弱还原气氛中焙烧，使某些有色金属氧化物生成氯化物挥发并在炭粒表面还原成金属的过程。离析出的金属颗粒可用选矿方法回收。目前，离析法在生产上只限于处理氧化铜矿。

（43）混汞：利用汞能与金、银生成汞齐的性质，用以回收矿石中较粗粒金银的过程。浮选出现前，混汞法是回收金的主要方法，现在仍有使用。

（44）氰化：用稀氰化物溶液溶解并回收矿石颗粒中金、银的过程。氰化法主要用于处理铜、砷等硫化矿物含量较少，金和银粒度细的矿石和精矿。

（45）特殊选：除重选、浮选、电选、磁选和化学选外的其他选别方法，如拣选、摩擦与弹跳选等的总称。

（46）拣选：根据矿物物理性质的不同，用肉眼或机械从原矿中拣取出某种矿物的过程。拣选主要用作预选。人工手选只适于较粗粒矿石。机械拣选利用矿物的光学性质、放射性、磁性和导电性等的差异进行分选。

（47）摩擦与弹跳选：根据矿粒碰撞恢复系数和摩擦系数的不同，沿斜面运动时产生不同的运动轨迹而进行分选的过程。主要用于石棉等分选。

（48）产品脱水：选矿产品脱水的过程。包括有重力泄水、浓缩、过滤和干燥。重力泄水为利用矿粒自身重力脱水，适于粗粒产品脱水。浓缩系矿粒重力沉降并排出溢流的过程，主要在浓缩机中进行，也可用离心力加速矿粒沉降。过滤为在压差作用下使矿浆通过多孔过滤介质进行脱水，主要在过滤机中进行。干燥为用加热蒸发方法脱水，只在对精矿水分要求严格时使用，主要设备为圆筒干燥机。

（49）尾矿处理：选矿厂排出的尾矿的处理过程。选矿的尾矿和污水都需处理。尾矿通常送入尾矿库堆存，废水需澄清或用化学药剂处理并应尽量返回使用。尾矿库多由堤坝围堵而成，其中设有排水构筑物。

地信网论坛
bbs.3s001.com

（50）选矿工艺矿物学：将矿物的物理、化学、结构和嵌布等性质与矿物在选矿工艺中的行为联系起来进行研究的学科。特定的矿物性质要求特定的工艺条件。特定的工艺变量也会导致矿物特性的特定变化。将矿物性质与选矿工艺结合起来研究，可以解释和预测某种矿物在一定工艺流程中的行为。

（51）选矿过程数学模拟：在对选矿过程的数理统计和机理分析的基础上，建立起有关作业的数学模型并用电子计算机进行模拟运算，对模拟对象进行判断、控制和优化的过程。磨矿和浮选的数学模拟发展较快，其他也有发展。

（52）选矿过程自动控制：使用在线检测仪表、自动调节设备和计算机，对选矿过程中的特定参数、机组进行检测、自动调节以及对车间和全厂进行集中控制的过程。其目的在于稳定生产过程，提高选矿指标、劳动生产率和改善劳动条件。

地信网论坛
bbs.3s001.com

1.4 选矿产品的质量标准

选矿产品的质量标准一般指选矿厂所生产出的最终精矿的质量标准。精矿的质量主要取决于矿石性质、所采用的选矿方法以及用户和下一步加工对产品提出的技术条件等等。精矿质量包括两个方面，一是对主要金属（矿物或元素）含量的要求，二是对所含杂质量的要求。如果选矿厂所产精矿需要在运输距离长、运价高的情况下运送，那么在选矿时就应该最大限度地减少精矿中杂质（包括水分）的含量，尽可能地提高主要成分的含量，这在经济上是合理的；如果精矿中的某些杂质可作为下一步冶炼加工时的熔剂，此时产品的质量标准就要随原矿的性质而改变，所以选矿产品的质量标准也是随着资源的性质、产品的用途以及选矿厂与冶炼厂的运输条件（因为绝大多数选矿产品均作为冶炼厂的原料）而变化，这是一个综合的技术经济指标，每个国家的矿产资源条件不同，所以选矿产品质量标准也随资源条件而进行制订，并随着技术的不断进步而随之修订。基于此，各单位、各部门对各种选矿产品的质量提出了不同的技术要求，制订有国家标准、部门标准、经济共同体标准以及公司、厂矿自订的质量标准。

1.4.1 黑色金属矿选矿产品质量标准

1.4.1.1 铁

A 铁精矿按矿石类型和化学成分的质量标准

分为四个类型共十个品级，以绝对干品位计算，应符合表1.4.1规定。

B 铁精矿经烧结后的质量标准

除规定化学成分外，同时还有物理性能的要求。烧结铁矿质量标准列于表1.4.2。

1.4.1.2 锰

地信网论坛
bbs.3s001.com

锰精矿主要用于冶炼锰铁合金，此外尚有冶金用锰矿石以及化工用锰。在冶炼锰铁合金时铁是有益组分，但其含量一般不宜过高。故对矿石中的锰铁比根据各种牌号合金而有不同要求，一

表 1.4.1　铁精矿质量标准

铁精矿类型			磁性矿为主的磁铁精矿				赤矿为主的赤铁精矿				攀西式钒钛磁铁精矿	包头式多金属铁精矿
代　　号			C67	C65	C63	C60	H65	H62	H59	H55	P51	B57
化学成分，%	TFe		≥67	≥65	≥63	≥60	≥65	≥62	≥59	≥55	51.5	≥57
	TFe允许波动范围	Ⅰ	+1.0 −0.5				+1.0 −0.5				±0.5	±1
		Ⅱ	+1.5 −1.0				+1.5 −1.0					
	SiO_2	Ⅰ类	≤3	≤4	≤5	≤7			≤12			
		Ⅱ类	≤6	≤8	≤10	≤13	≤8	≤10	≤13	≤15		
	S	Ⅰ组	≤0.10～0.19				≤0.10～0.19				<0.60	<0.50
		Ⅱ组	≤0.20～0.40				≤0.20～0.40					
	P	Ⅰ级	≤0.05～0.09				≤0.08～0.19					<0.30
		Ⅱ级	≤0.10～0.30				≤0.20～0.40					
	Cu		≤0.10～0.20				≤0.10～0.20					
	Pb		≤0.10				≤0.10					
	Zn		≤0.10～0.20				≤0.10～0.20					
	Sn		≤0.08				≤0.08					
	As		≤0.04～0.07				≤0.04～0.07					
	TiO_2										<13	
	F											<0.3①
	K_2O+Na_2O		≤0.25				≤0.25					≤0.25
水份，%		Ⅰ	≤10				≤11				≤10	≤11
		Ⅱ	≤11				≤12					

注：铁精矿质量标准没有正式成为部颁标准，仅内部实施；

① 原为2.50，有误。——编者

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.2 烧结铁矿质量标准（YB421—77）

品级 \ 指标	化学成分							物理性能		
	铁，%			氧化亚铁 %	碱度波动范围	硫 %	残碳 %	热矿	冷矿	
	一等 >60	二等 57～60	三等 <57					转鼓指数(≥5mm) %	转鼓指数(≥5mm) %	筛分指数(≤5mm) %
一级品	≤±0.5			≤20.00	≤±0.05	≤0.08	≤0.40	≥78.00	≥78.00	≤10.00
二级品	≤±1.00			≤22.00	≤±0.10	≤0.10		≥75.00	≥75.00	≤13.00

般Mn：Fe=3～10。化工用锰矿石主要用于电池、医药、火柴、陶瓷、玻璃等部门。各种锰精矿的技术要求分述于下。

A 冶炼锰铁合金和富锰渣用的锰矿石

其标准分别列于表1.4.3和表1.4.4。

B 冶金用锰矿石

其标准列于表1.4.5。

C 化工用锰粉质量

其按二氧化锰的含量分为七个品级（表1.4.6）。

D 电池用锰矿

其工业指标列于表1.4.7。

E 碳酸锰矿粉

其主要用作生产电解锰、电解二氧化锰、锰盐等的原料。其质量标准列于表1.4.8。

1.4.1.3 铬

铬精矿主要用来冶炼铬铁合金或用于制作耐火材料及化工试剂。

A 冶炼铬铁合金用富矿（或精矿）质量要求

其质量要求列于表1.4.9。

B 耐火材料用铬矿石质量要求

其质量要求列于表1.4.10。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.3 冶炼各种铁合金对锰矿石的技术要求

合金种类	合金牌号	锰质合金主要成分，%			对锰矿石要求，%		
		Mn	Si	P	Mn	Mn/Fe	P/Mn
		不小于	不大于	不大于			
低碳锰铁	Mn0	80	2.0	0.30	40	8.4	0.00325
中碳锰铁	Mn1	78	2.0	0.30	40	7.7	0.00335
	Mn2	75	2.5	0.30	40	7.0	0.00345
碳素锰铁	Mn3	78	2.5	0.33	35	9.2	0.00370
	Mn4	75	2.5	0.38	35	7.2	0.00455
	Mn5	70	3.0	0.45	35	5.2	0.00586
	Mn6	65	4.0	0.45	35	4.0	0.00632
高炉锰铁	Mn7	75	2.0	0.60	30	7.0	0.00580
	Mn8	70～75	2.0	0.60	30	5.7	0.00625
	Mn9	65～70	2.0	0.60	30	3.7	0.00666
	Mn10	60～65	2.0	0.60	30	3.0	0.00725
	Mn11	55～60	2.5	0.70	30	2.3	0.00930
	Mn12	50～55	2.5	0.70	30	2.0	0.01110
硅锰合金	MnSi20	65	20	0.2	35	8.8	0.00244
	MnSi17	65	17	0.2	35	7.3	0.00244
	MnSi14	60	14	0.3	35	4.6	0.00435
	MnSi12	50	12	0.3	35	3.0	0.00520

表 1.4.4 冶炼富锰渣用锰矿石的技术条件

化学成分	Mn	Mn + Fe	$\frac{Mn}{Fe}$	$SiO_2 + Al_2O_3$	$\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
含量，%	>22	>38	0.9～3	<35	<0.3	>1.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.5 电炉、高炉和平炉用锰矿石（YB319—65标准）

品　　级	Mn 不小于 %	Mn:Fe 不小于	P:Mn 不大于
一	40	7	0.004
二	35	5	0.005
三	30	3	0.006
四	25	2	0.006
五	18	不限	不限

注：1. 三个指标应同时考核，其中一个指标不合规定时，应降级处理；

2. 粒度 电炉用锰矿要求3～75mm，3mm以下的不超过5%，大于75～200mm的不大于20%。高炉和平炉用的堆积锰矿要求小于5mm者不大于8%。对焙烧矿等要求10～200mm，其中小于10mm的含量不超过6%。

表 1.4.6 化工用二氧化锰矿粉质量标准（GB3713—83）

品　　级	二氧化锰，不小于 %
特级品	80
一级品	75
二级品	70
三级品	65
四级品	60
五级品	55
六级品	50

注：1. 产品的杂质成分及其含量根据不同用途，由供需双方议定；

2. 产品应通过100目筛，筛下重量占总重量的95%以上。如需方有不同要求，由供需双方协商。

C 化工制铬盐用铬矿石质量要求

其质量要求如下：

$Cr_2O_3 \geqslant 30\%$；$Cr_2O_3/FeO \geqslant 2 \sim 2.5$；$SiO_2$少量。

D 辉绿岩铸石用铬矿石质量要求

其质量要求如下：

$$Cr_2O_3 \geqslant 10 \sim 20\%;\ SiO_2 < 10\%$$

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.7　电池用锰矿的工业指标

品　级	一级	二级	三级	四级	五级
MnO_2，%≥	75	70	65	60	55
Fe，%≤	2.8	3.5	4.5	5.5	6.5
放电时间，min	570	510	450	340	330

注：影响放电的杂质是：Fe、Cu、Ni、Co、As、Pb、Zn等。

表 1.4.8　碳酸锰矿粉质量标准（GB3714－83）

品　级	锰，不小于%	杂质，不大于　%
		TFe
一级品	24	2.5
二级品	22	3.0
三级品	20	3.5
四级品	18	4.0

注：1.　需方对其它杂质含量的要求，由供需双方协商；

2.　产品中MnO_2不大于 2%。若大于 2%，则应从产品的锰含量中扣除大于 2 %部分的二氧化锰中的锰量；

3.　产品应通过100目筛，筛下重量占总重量的95%以上。

表 1.4.9　冶炼铬铁合金用矿质量要求

品　级	Cr_2O_3 含量，%	铬铁比 $\frac{Cr_2O_3}{(FeO)}$	铬铁比 $\frac{Cr_2O_3}{TFe}$	含P %	含S %	含SiO_2 %	适用情况
Ⅰ	≥50	>3	>3.85	—	—	<1.2	用于氮化铬铁
Ⅱ	≥45	≥2.5～3	≥3.2～3.85	<0.03	<0.05	<6	中低炭和微碳铬铁
Ⅲ	≥40	≥2.5	≥3.2	<0.07	<0.05	<6	电炉炭素铬铁
Ⅳ	≥32	≥2.5	≥3.2	<0.07	<0.05	<6	高炉炭素铬铁

注：1.　高炉冶炼炭素铬铁不小于20mm和不大于75mm；

2.　电炉冶炼铬铁合金不大于60～40mm（粉矿或精矿粉均可）。

1.4.1.4　钒

钒精矿主要用作直接法（湿法）生产五氧化二钒的原料。其质量标准列于表1.4.11。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.10 耐火材料用铬矿石质量要求

品级	化学成分，%			用途举例
	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	
一级品	≥35	≤8	≤2	天然耐火材料
二级品	≥30～32	≤11	≤3	铬砖、铬镁砖

注：1. 块度要求50～300mm；

2. 矿石中不允许有大于5～8mm夹石。

表 1.4.11 钒精矿质量标准

质量标准		TFe %	V_2O_5 %	TiO_2 %	SiO_2 %	S %	水分 %	粒度 % −180目
部颁标准	一级	≥60	≥0.72	<8	<2.5	<0.1	<10	>60
	二级	≥59	0.7～0.72	<8	<2.5	<0.1	<10	>60
	三级	≥58	0.65～0.69	<8	<2.5	<0.1	<10	>60
国家标准		60.5	0.78	<8	<2.5	<0.1	<10	−200目占65%

1.4.2 有色金属矿选矿产品质量标准

1.4.2.1 铜

铜精矿，按化学成分分为15个品级，列于表1.4.12。

1.4.2.2 铅

铅精矿，按化学成分可分为7个品级，列于表1.4.13。

1.4.2.3 锌

锌精矿，按化学成分可分为9个品级，列于表1.4.14。

1.4.2.4 钨

钨精矿，根据矿石类型（黑钨矿类型和白钨矿类型）、冶炼方法（火法冶炼和湿法冶炼）的不同，按化学成分分成3个级别共计20个品种，列于表1.4.15和表1.4.16；合成白钨质量标准列于表1.4.17。

1.4.2.5 锡

地信网论坛
bbs.3s001.com

锡精矿，按化学成分可分为2个类别，各8个品级，列于

表 1.4.12 铜精矿质量标准（YB112—82）

品级	铜 不小于 %	杂质，不大于 %			
		Pb	Zn	MgO	As
一级品	30	—	—	5	0.3
二级品	29	—	—	5	0.3
三级品	28	—	—	5	0.3
四级品	27	—	—	5	0.3
五级品	26	—	—	5	0.3
六级品	25	—	—	5	0.3
七级品	24	6	9	5	0.4
八级品	23	6	9	5	0.4
九级品	22	6	9	5	0.4
十级品	21	6	9	5	0.4
十一级品	20	6	9	5	0.4
十二级品	18	7	10	5	0.5
十三级品	16	7	10	5	0.5
十四级品	14	8	10	5	协议
十五级品	12	8	10	5	协议

注：1. 氧化镁不大于5%的规定，供电炉熔炼时不在此限；

2. 铜精矿中的金、银、硫为有价元素，应报出分析数据。

表 1.4.13 铅精矿质量标准（YB113—82）

品级	铅 不小于 %	杂质，不大于 %				
		Cu	Zn	As	MgO	Al_2O_3
一级品	70	1.5	5	0.3	2	4
二级品	65	1.5	5	0.35	2	4
三级品	60	1.5	5	0.4	2	4
四级品	55	2.0	6	0.5	2	4
五级品	50	2.0	7	协议	2	4
六级品	45	2.5	8	协议	2	4
七级品	40	3.0	9	协议	2	4

注：1. 铅精矿中金、银、铋为有价元素，应报出分析数据；

2. 精矿中MgO，Al_2O_3两项杂质作参考指标，暂不作交货依据。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.14 锌精矿质量标准（YB114—82）

品级	锌不小于%	杂质，不大于%					
		Cu	Pb	Fe	As	SiO_2	F
一级品	59	0.8	1.0	6	0.20	3.0	0.2
二级品	57	0.8	1.0	6	0.20	3.5	0.2
三级品	55	0.8	1.0	6	0.30	4.0	0.2
四级品	53	0.8	1.0	7	0.30	4.5	0.2
五级品	50	1.0	1.5	8	0.40	5.0	0.2
六级品	48	1.0	1.5	13	0.50	5.5	0.2
七级品	45	1.5	2.0	14	协议	6.0	0.2
八级品	43	1.5	2.5	15	协议	6.5	0.2
九级品	40	2.0	3.0	16	协议	7.0	0.2

注：1. 锌精矿中银、镉、硫为有价元素，应报出分析数据；

2. 精矿中SiO_2、F、Sn、Sb四项杂质作参考指标，暂不作交货依据。

表1.4.18。

1.4.2.6 钼

钼精矿，按化学成分和杂质含量，分为3个品级，9个小类，列于表1.4.19。

1.4.2.7 镍

镍精矿，由于选矿原料的不同，可分为镍精矿（由硫化铜镍矿石经选矿所得）和高冰镍精矿（亦称镍硫精矿，由高冰镍经选矿所得）。

A 镍精矿质量标准

镍精矿按化学成分分为11个品级，列于表1.4.20。

B 镍锍精矿质量标准

镍锍精矿按化学成分分为3个品级，以干矿品位计算，应符合表1.4.21规定。

1.4.2.8 锑

锑精矿，按矿石类型和化学成分，分为硫化锑精矿、混合锑精矿和氧化锑精矿3大类，前两类又分为粉精矿和块精矿两种。

A 硫化锑精矿质量标准

地信网论坛 bbs.3s001.com

表 1.4.15 钨精矿特级品质量标准(GB2825—81)

品种	WO_3 不小于 %	杂质 不大于 %														用途举例
		S	P	As	Mo	Ca	Mn	Cu	Sn	SiO_2	Fe	Sb	Bi	Pb	Zn	
黑钨特-Ⅰ-3	70	0.2	0.02	0.06	—	3.0	—	0.04	0.08	4.0	—	0.04	0.04	0.04	—	优质钨铁
黑钨特-Ⅰ-2	70	0.4	0.03	0.08	—	4.0	—	0.05	0.10	5.0	—	0.05	0.05	0.05	—	
黑钨特-Ⅰ-1	68	0.5	0.04	0.10	—	5.0	—	0.06	0.15	7.0	—	0.10	0.10	0.10	—	
黑钨特-Ⅱ-3	70	0.4	0.03	0.05	0.010	0.3	—	0.15	0.10	3.0	—	—	—	—	—	优质钨制品。特纯、化学纯三氧化钨和仲钨酸铵，钨材，钨丝等
黑钨特-Ⅱ-2	70	0.5	0.05	0.07	0.015	0.4	—	0.20	0.15	3.0	—	—	—	—	—	
黑钨特-Ⅱ-1	68	0.6	0.10	0.10	0.020	0.5	—	0.25	0.20	3.0	—	—	—	—	—	
白钨特-Ⅰ-3	72	0.2	0.03	0.02	—	—	0.3	0.01	0.01	1.0	—	—	0.02	0.01	0.02	合金钢（直接炼钢）、优质钨铁
白钨特-Ⅰ-2	70	0.3	0.03	0.03	—	—	0.4	0.02	0.02	1.5	—	—	0.03	0.02	0.03	
白钨特-Ⅰ-1	70	0.4	0.03	0.03	—	—	0.5	0.03	0.03	2.0	—	—	0.03	0.03	0.03	
白钨特-Ⅱ-3	72	0.4	0.03	0.05	0.010	—	0.3	0.15	0.10	2.0	2.0	0.1	—	—	—	优质钨制品。特纯、化学纯三氧化钨和仲钨酸铵，钨材，钨丝等
白钨特-Ⅱ-2	70	0.5	0.05	0.07	0.015	—	0.4	0.20	0.15	3.0	2.0	0.1	—	—	—	
白钨特-Ⅱ-1	70	0.6	0.10	0.10	0.020	—	0.5	0.25	0.20	3.0	3.0	0.2	—	—	—	

注：1. 表中“—”为杂质不限；

2. 本标准不包括人造白钨，该产品另订标准执行；

3. 精矿中钽铌为有价元素，供方应报出分析数据；

4. 根据用户需要和资源特点，钨精矿特级品可自订企业标准执行；

5. 黑钨精矿特级品Ⅰ类产品中Sb、Bi、Pb杂质要求和白钨精矿特级品Ⅱ类产品中Fe、Sb杂质要求暂不作交货依据，但供方应报出分析数据。

地信网论坛
bbs.3s001.com

硫化锑中含锑量与精矿中总含锑量之比大于85%。其质量标准列于表1.4.22。

B 混合锑精矿的质量标准

硫化锑中的含锑量与精矿中总含锑量之比在15～85%范围内。其质量标准列于表1.4.23。

C 氧化锑精矿的质量标准

表 1.4.16 钨精矿一级品、二级品质量标准（GB2825—81）

品种	WO_3 不小于 %	杂质 不大于 %									用途举例
		S	P	As	Mo	Ca	Mn	Cu	Sn	SiO_2	
黑钨一级Ⅰ类	65	0.7	0.05	0.15	—	5.0	—	0.13	0.20	7.0	钨铁
黑钨一级Ⅱ类	65	0.7	0.10	0.10	0.05	3.0	—	0.25	0.20	5.0	硬质合金、触媒、钨材
黑钨一级Ⅲ类	65	0.8	P+As 0.22		0.05	1.0	—	0.35	0.40	3.8	钨材、钨丝、硬质合金、触媒
黑钨二级	65	0.8	—	0.20	—	5.0	—	—	0.40	—	
白钨一级Ⅰ类	65	0.7	0.05	0.15	—	—	1.0	0.13	0.20	0.7	钨铁、硬质合金
白钨一级Ⅱ类	65	0.7	0.10	0.10	0.05	—	1.0	0.25	0.20	5.0	钨材、钨丝、硬质合金、触媒
白钨一级Ⅲ类	65	0.8	0.05	0.20	0.05	—	1.0	0.20	0.20	5.0	钨材、钨丝、硬质合金、触媒
白钨二级	65	0.8	—	0.20	—	—	1.5	—	0.40	—	

注：1. 表中“—”为杂质不限；

2. 精矿中钽铌为有价元素，供方应报出分析数据；

3. 供需双方在特殊要求和互利原则上，标准中规定的个别杂质项目指标及其它要求（如铁、锑、药剂等）可协商解决；

4. 钨细泥、钨杂砂以及钨难选物料等产品按国家统一价格规定执行。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.17 合成白钨质量标准（GB5192—85）

品级	种类	WO_3 不小于%	杂质，不大于%													H_2O 不大于%
			S	P	As	Mo	Mn	Cu	Sn	Si	Fe	Sb	Bi	Pb	Zn	
特级品	Ⅰ类	77	0.09	0.01	0.01	—	0.02	0.01	0.01	0.08	—	0.01	0.01	0.01	0.01	0.5
	Ⅱ类	77	0.10	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.0
一级品	Ⅰ类	75	0.20	0.20	0.20	—	0.05	0.01	0.01	0.20	—	0.03	0.02	0.02	0.02	1.0
	Ⅱ类	75	0.20	0.20	0.20	0.20	0.05	0.02	0.02	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	2.0
二级品	Ⅰ类	70	0.25	0.03	0.04	—	0.10	0.02	0.02	0.50	—	0.05	0.04	0.03	0.03	1.0
	Ⅱ类	70	0.30	0.03	0.05	0.04	—	0.03	0.03	0.10	0.10	—	—	—	—	3.0

表 1.4.18 锡精矿质量标准（YB736—82）

类别	品级	锡不小于%	杂质，不大于%					
			S	As	Bi	Zn	Sb	Fe
一类	一级品	65	0.4	0.3	0.10	0.4	0.2	5
	二级品	60	0.5	0.4	0.10	0.5	0.3	7
	三级品	55	0.6	0.5	0.15	0.6	0.4	9
	四级品	50	0.8	0.6	0.15	0.7	0.4	12
	五级品	45	1.0	0.7	0.20	0.8	0.5	15
	六级品	40	1.2	0.8	0.20	0.9	0.6	16
	七级品	35	1.5	1.0	0.30	1.0	0.7	17
	八级品	30	1.5	1.0	0.30	1.0	0.8	18
二类	一级品	65	1.0	0.4	0.4	0.8	0.4	5
	二级品	60	1.5	0.5	0.5	0.9	0.5	7
	三级品	55	2.0	1.0	0.6	1.0	0.6	9
	四级品	50	2.5	1.5	0.8	1.2	0.7	12
	五级品	45	3.0	2.0	1.0	1.4	0.8	15
	六级品	40	3.5	2.5	1.2	1.6	0.9	16
	七级品	35	4.0	3.5	1.4	1.8	1.0	17
	八级品	30	5.0	4.0	1.5	2.0	1.2	18

注：1. 一类是直接入炉锡精矿产品；二类是冶炼前需加工处理的锡精矿产品；

2. 锡精矿中铅、钨为有价元素，应报出分析数据；

3. 自产自用锡精矿产品，可自订企业标准执行。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.19 钼精矿质量标准（GB3200--82）

品级	种类	钼不小于%	杂质，不大于%						
			SiO_2	As	Sn	P	Cu	Pb	CaO
特级品	一类	51	7.0	0.05	0.04	0.03	0.2	0.30	2.8
	二类	51	8.5	0.03	0.02	0.02	0.2	0.15	1.4
	三类	51	5.0	0.10	0.10	0.05	0.5	0.60	1.5
一级品	一类	47	9.0	0.07	0.07	0.05	0.3	0.40	3.0
	二类	47	11.0	0.05	0.05	0.03	0.3	0.20	2.0
	三类	47	6.0	0.20	0.15	0.10	1.0	1.50	1.5
二级品	一类	45	12.0	0.07	0.07	0.07	0.3	0.50	3.3
	二类	45	13.0	0.06	0.06	0.04	0.3	0.30	2.0
	三类	45	6.0	0.25	0.15	0.15	1.5	1.50	2.0

注：1. 表中一类、二类系采用浮选方法生产的钼精矿产品，三类系钨锡钼等多金属矿综合回收的钼精矿产品；

2. 钼精矿中铼为有价元素，供方应报出分析数据。

表 1.4.20 锑精矿质量标准（YB724—82）

品级	锑不小于%	杂质，不大于%
		MgO
特级品	8	6
一级品	7.5	6
二级品	7	6
三级品	6.5	7.5
四级品	6	9
五级品	5.5	10.5
六级品	5	12
七级品	4.5	13.5
八级品	4	15
九级品	3.5	17.5
十级品	3	20

硫化锑中的含锑量与精矿中总含锑量之比小于15%。其质量标准列于表1.4.24。

1.4.2.9 铋

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.21 镍铳精矿质量标准（YB744—86）

品级	镍不小于 %	杂质，不大于 %
		Cu
一级品	65.00	3.50
二级品	63.00	4.00
三级品	62.00	5.00

表 1.4.22 硫化锑精矿质量标准（YB2419—82）

类别	品级	锑不小于 %	杂质，不大于 %	
			As	Pb
粉精矿	一级品	55	0.6	0.15
	二级品	45	0.6	0.15
	三级品	35	0.4	0.15
	四级品	30	0.4	0.15
块精矿	一级品	60	0.6	0.15
	二级品	50	0.6	0.15
	三级品	40	0.4	0.15
	四级品	30	0.4	0.15
	五级品	20	0.2	0.10
	六级品	10	0.2	0.10

表 1.4.23 混合锑精矿质量标准（YB2419—82）

类别	品级	锑不小于 %	杂质，不大于 %	
			As	Pb
粉精矿	一级品	55	0.6	0.15
	二级品	45	0.6	0.15
	三级品	35	0.4	0.15
	四级品	30	0.4	0.15
块精矿	一级品	60	0.6	0.15
	二级品	50	0.6	0.15
	三级品	40	0.4	0.15
	四级品	30	0.4	0.15
	五级品	20	0.2	0.10
	六级品	10	0.2	0.10

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.24 氧化锑精矿质量标准（YB2419—82）

类别	品级	锑 不小于%	杂质，不大于%	
			As	Pb
块精矿	一级品	60	0.6	0.2
	二级品	50	0.6	0.2
	三级品	40	0.4	0.15

注：1. 锑精矿中含金量达到工业品位时，应报出分析数据；
2. 自产自用锑精矿另订企业标准执行。

表 1.4.25 铋精矿质量标准（YB498—82）

品级	铋，不小于 %	杂质，不大于%		
		As	SiO_2	WO_3
一级品	60	0.5 1.0①	2	3
二级品	50	1.0	3	3
三级品	40	1.0	4	3
四级品	35	1.5	4	3
五级品	30	1.5	5	3
六级品	25	2.0	8	3
七级品	20	3.0	9	4
八级品	15	不限	10	4

注：1. 供方应报出硫、铁分析数据，但不作考核依据；
2. 铋精矿中的银、铅、铼为有价元素，供方应报出分析数据。
① 系指氯氧铋中砷的含量。

表 1.4.26 硃砂技术条件（YB784—70）

等级	硫化汞，不小于%	杂质，不大于%
		Se
特级品	98	0.10
一级品	97	0.20
二级品	96	0.40

注：1. 特级硃砂粒度规定 5mm 以上，如用户对粒度有特殊要求，可与生产厂协商解决；
2. 各级硃砂除硒（Se）以外的杂质，如用户有特殊要求，可与生产厂协商议定。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.27 温法朱砂质量标准 (GB3631—83)

品 级	硫化汞 不小于%	杂质，不大于 %	
		Se	Fe
一级品	99.00	0.050	0.10
二级品	98.00	0.100	0.10

注：1. 产品不得混入机械混合物；

2. 产品表面应清洁，洗涤液静置后应清澈透明，其pH值与当地天然水pH值之差应小于0.5。

表 1.4.28 钴硫精矿质量标准 (ZBD41001—84)

品 级	化学成分，%					
	Co	S	杂质，不大于			
	不小于	不小于	Cu	Mn	SiO_2	As
特级品	0.50	27.0	0.4	0.03	5.0	0.04
一级品	0.45	27.0	0.5	0.04	7.0	0.06
二级品	0.40	27.0	0.6	0.06	10.0	0.06
三级品	0.35	27.0	0.7	0.08	13.0	0.08
四级品	0.30	27.0	1.0	0.10	16.0	0.08
五级品	0.25	27.0	1.2	0.10	18.0	0.10
六级品	0.20	27.0	1.2	0.10	20.0	0.10

注：硫系指全硫。

铋精矿，为天然铋矿和钨、锡、铜、钼、铋等共生矿经选矿富集后的精矿、或者是含铋原料经化学富集的氯氧铋精矿。其质量标准列于表1.4.25。

1.4.2.10 汞

汞矿石经选矿所得产品为朱砂，有两类标准，分别列于表1.4.26和表1.4.27。

1.4.2.11 硫

钴硫精矿，为多金属矿石浮选后所得的精矿，其中硫品位应达到制酸工业原料的要求，以钴品位高低分为7个品级（表1.4.28）。硫铁精矿是制造硫酸和提炼硫的选矿产品，按化学成

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.29 硫精矿质量标准（YB733—86）

品级	化学成分，%			
	S	杂质不大于		
	不小于	As	F	Pb+Zn
特级品	43	0.05	0.05	1.00
一级品	40	0.15	0.10	1.50
二级品	37	0.20	0.15	2.00
三级品	34	0.80	0.30	2.50
四级品	31	1.50	0.40	—
五级品	28	1.5	0.50	—
六级品	25	2.00	1.00	—

注：1. “—”表示含量不规定；
2. 用户对产品如有特殊要求，由双方议定；
3. 四至六级品供方应报出铅、锌分析数据供参考。

表 1.4.30 铝土矿石质量标准（GB3497—83）

品级	化学成分		用途举例
	Al_2O_3:SiO_2（铝硅比）不小于	Al_2O_3 不小于 %	
一级品	12	73	刚玉型研磨材料、高铝水泥、氧化铝
		69	氧化铝
		66	氧化铝
		60	氧化铝
二级品	9	71	高铝水泥、氧化铝
		67	氧化铝
		64	氧化铝
		50	氧化铝
三级品	7	69	氧化铝
		66	氧化铝
		62	氧化铝
四级品	5	62	氧化铝
五级品	4	58	氧化铝
六级品	3	54	氧化铝
七级品	6	48	氧化铝

注：一～六级品适用于一水硬铝石型矿石；七级品适用三水铝石型矿石。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.31 菱镁石质量标准（GB9356—88）

牌号	化学成分，%				
	MgO	CaO	SiO_2	$Fe_2O_3+Al_2O_3$	其中：Fe_2O_3
LMT1-47	≥47	≤0.5	≤0.5	≤0.6	≤0.4
LMT-47	≥47	≤0.6	≤0.6	—	
LM-46	≥46	≤0.8	≤1.2	—	
LM-45	≥45	≤1.5	≤1.5	—	
LMG-44	≥44	≤1.0	≤3.5	—	
LM-41	≥41	≤6.0	≤2.0	—	
LMF-33	≥33	不规定	≤4.0	—	

注：LM-46牌号中根据用户要求可按CaO≤0.5%，SiO_2≤1.5%供货。

分分为7个等级，列于表1.4.29。

1.4.2.12 铝

铝土矿石的选矿，目前正在开展，以便获得铝硅比高的精矿供炼铝用。按化学成分和铝硅比的高低分为七个品级，列于表1.4.30。

1.4.2.13 镁

菱镁石，按化学成分分为7个品级，列于表1.4.31。

1.4.3 稀、贵金属矿选矿产品质量标准

1.4.3.1 金、银

金精矿，按化学成分分为11个品级，均以干矿品位计算，列于表1.4.32。

矿石经混汞、氰化、炭浆等方法生产的供提取纯金、纯银用的金银合金锭，按化学成分，分为3个品号，列于表1.4.33。

1.4.3.2 钽、铌

钽精矿、铌铁矿精矿质量标准，分别列于表1.4.34和表1.4.35。

铌铁矿精矿，一般由砂矿或原生矿经选矿后获得的褐钇铌矿精矿，分为2个品级，列于表1.4.36。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.32 金精矿质量标准（YB2430—88）

品级	金	杂质，不大于%
	不小于 g / t	As
一级品	180	0.30
二级品	160	0.30
三级品	140	0.30
四级品	120	0.35
五级品	100	0.35
六级品	90	0.35
七级品	80	0.35
八级品	70	0.40
九级品	60	0.40
十级品	50	0.40
十一级品	40	0.40

注：含铜金精矿、含铅金精矿一金精矿中铜或铅的含量大于最低计价品位规定，即含铜不小于1.0%，含铅不小于10%时，称为含铜金精矿或含铅金精矿，含铜金精矿中铅和锌含量均不大于3%，含铅金精矿中铜含量不大于1.5%；如果含铜金精矿或含铅金精矿金品位超过80 g / t 时，其含铅、锌或含铜可适当放宽，由供需双方协商解决。

表 1.4.33 矿产金银合金锭质量标准（GB8930—88）

品号	代号	金、银、铜含量	杂质，不大于%	
		不小于%	Pb	Hg
一号	AuAg-1	90	不规定	0.01
二号	AuAg-2	80	10	0.02
三号	AuAg-3	70	12	0.04

注：1. 一号、二号金银合金锭中金含量不小于40%；

2. 汞含量指标为参考指标，不作交货依据。

1.4.3.3 锂、铍

A 铍精矿

铍精矿主要以绿柱石精矿产出，其标准列于表1.4.37。

B 锂精矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.34 钽精矿质量标准（YB5000—87）

等级	品级	化学成分，%				
		$Ta_2O_5+Nb_2O_5$ 不小于	Ta_2O_5 不小于	杂质，不大于		
				TiO_2	SiO_2	WO_3
一等品	1 级	60	40	5	7	3
	2 级	55	38			
	3 级	55	35			
二等品	1 级	50	32	6	11	3.5
	2 级	45	29			
	3 级	45	26			
三等品		40	22	7	15	4

注：精矿中U_3O_8、ThO_2的含量应报分析数据，但不作考核依据。

表 1.4.35 铌铁矿精矿质量标准（YB5001—87）

级别		$(NbTa)_2O_5$ 不小于%	Ta_2O_5 %	杂质含量，不大于%				
				WO_3	TiO_2	SiO_2	Sn	P
特级	1 类	65.00	≥5.00	2.50	3.00	3.50	0.40	0.35
	2 类		<5.00					
一级	1 类	60.00	≥5.00	3.50	4.00	4.50	0.50	0.40
	2 类		<5.00					
二级	1 类	55.00	≥5.00	7.50	5.00	5.00	—	0.50
	2 类		<5.00					
三级	1 类	50.00	≥5.00	9.00	6.50	5.50	—	0.60
	2 类		<5.00					
四级	1 类	45.00	≥5.00		8.00	10.00	—	
	2 类		<5.00					

注：1. 精矿中$U_3O_8+ThO_2$含量如用户对精矿有特殊要求，由供需双方商定；

2. 表中“—”为杂质不限。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.36 褐钇铌矿精矿质量标准（YB831—75）

等级	$(Ta,Nb)_2O_5$ 不小于%	杂质，不大于%		
		TiO_2	SiO_2	P
一级品	35	4	4	0.5
二级品	30	5	6	0.5

注：精矿中 $(Ta, Nb)_2O_5$ 含量少于30%时，由供需双方商定。

表 1.4.37 绿柱石精矿标准（GB6899—86）

类别	品级	BeO 不小于%	杂质，不大于%			
			Fe_2O_3	Ca	F	Li_2O
块状精矿	一级品	11	1.5	0.47	0.40	1.00
	二级品	10	2.0	0.50	0.50	1.20
粉状精矿	一级品	9	2.5	0.53	1.00	1.50
	二级品	8	3.0	0.59	1.20	1.80
	三级品	7	3.5	0.65	1.50	2.00

表 1.4.38 锂云母精矿质量标准（GB3201—82）

锂盐用：

品级	主成分，不小于%	
	$Li_2O+Rb_2O+Cs_2O$	Li_2O
特级品	6	4.7
一级品	5	4.0

玻璃、陶瓷用：

品级	主成分，不小于%			杂质，不大于%	
	$Li_2O+Rb_2O+Cs_2O$	Li_2O	K_2O+Na_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3
一级品	5	4	8	0.4	26
二级品	4	3	7	0.5	28
三级品	3	2	6	0.6	28

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.39 锂辉石精矿标准（GB6898—86）

类别	品级	Li_2O 不小于%	杂质，不大于%			
			Fe_2O_3	MnO	Na_2O+K_2O	P_2O_5
低铁锂辉石	一级品	7	0.15	0.10	1.5	0.5
	二级品	6.5	0.20	0.15	1.8	
	三级品	6	0.25	0.20	2.0	
陶瓷用锂辉石	一级品	7	0.50	0.20	1.5	
	二级品	6.5	0.70	0.25	1.8	
	三级品	6	0.90	0.30	2.0	
化工用锂辉石	一级品	6.5	2.50	0.30	1.8	
	二级品	6	2.80	0.40	2.0	
	三级品	5.5	3.00	0.50	3.0	

表 1.4.40 锆英石质量标准（YB834—87）

品级	化学成分，%					
	二氧化(锆+铪) 不小于	杂质，不大于				
		TiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5	Al_2O_3	SiO_2
特级品	65.50	0.30	0.10	0.20	0.80	34.00
一级品	65.00	0.50	0.25	0.25	0.80	34.00
二级品	65.00	1.00	0.30	0.35	0.80	34.00
三级品	63.00	2.50	0.50	0.50	1.00	33.00
四级品	60.00	3.50	0.80	0.80	1.20	32.00
五级品	55.00	8.00	1.50	1.50	1.50	31.00

注：1. 如需方对产品有特殊要求，由供需双方商定；
2. 锆英石精矿中放射性物质含量按国家有关规定执行。

表 1.4.41 天然金红石精矿标准（YB839—87）

级别	化学成分，%			
	TiO_2，不小于	杂质，不大于		
		P	S	Fe_2O_3
一级品	93.0	0.02	0.02	0.5
二级品	90.0	0.03	0.03	0.8
三级品	87.0	0.04	0.04	1.0
四级品	85.0	0.05	0.05	1.2

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.42 高钛渣标准（ZBH31001—87）

品级	化学成分，%			
	TiO_2	TFe	CaO + MgO	MnO_2
	不小于	不大于		
一级品	94.0	8.0	1.0	4.5
二级品	92.0	4.0	1.5	4.5
三级品	80.0	5.0	11.0	4.5

注：三级品适用于攀枝花地区钛矿生产的高钛渣。

表 1.4.43 人造金红石质量标准（ZBH31002—87）

品级	化学成分，%			
	TiO_2	P	S	C
	不小于	不大于		
特级品	90.0	0.03	0.03	0.04
一级品	87.0	0.04	0.04	0.05
二级品	85.0	0.04	0.05	0.06

表 1.4.44 独居石精矿质量标准（YB832—87）

级别	化学成分，%			
	稀土及二氧化钍总量，不小于	杂质含量，不大于		
		TiO_2	ZrO_2	SiO_2
一级品	65.0	1.0	1.5	2.5
二级品	63.0	1.5	2.0	3.0
三级品	60.0	2.5	2.5	3.5
四级品	58.0	3.0	3.0	4.5

注：如需方对产品有特殊要求，由供需双方商定。

锂精矿常以锂云母精矿和锂辉石精矿产出。

锂云母精矿，分为锂盐用和玻璃、陶瓷用二级列于表1.4.38。

锂辉石精矿质量标准列于表1.4.39。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.45 氟碳铈矿-独居石混合精矿技术条件（YB833—82）

品级	稀土氧化物不小于,%	杂质，不大于 %			
		TFe	F	P	CaO
一级品	60	7	7	5	5
二级品	55	9	7		
三级品	50	10	7		
四级品	45	10	8		
五级品	40	10	9		
六级品	35	15	10		
七级品	30	18	12		

注：一级品中的P、CaO只提供数据，不做考核依据。

表 1.4.46 磷钇矿精矿质量标准（YB838—87）

级别	化学成分，%			
	Y_2O_3 不小于	杂质含量，不大于		
		TiO_2	ZrO_2	SiO_2
一级品	33.0	3.0	1.2	4.0
二级品	30.0	5.0	1.5	5.0
三级品	28.0	7.0	1.8	5.5
四级品	25.0	9.0	2.0	6.0
五级品	23.0	11.0	2.5	6.5

注：如需方对产品有特殊要求，由供需双方商定。

1.4.3.4 锆

锆精矿主要由冲积砂矿、海滨砂矿经选矿后获得，其质量标准列于表1.4.40。

1.4.3.5 钛

A 钛铁矿

钛铁矿精矿质量标准，天然金红石列于表1.4.41。

B 高钛渣和人造金红石

高钛渣和人造金红石质量标准列于表1.4.42和表1.4.43。

1.4.3.6 稀土金属矿物

A 独居石精矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 1.4.47 钢铁工业废水中污染物最高容许排放浓度

生产工艺	pH		悬浮物，mg/L	
	新建厂	现有厂	新建厂	现有厂
破碎厂废水	6～9	6～9	500	500
选矿厂洗矿水	6～9	6～9	400	400
尾矿场及浓缩池排水	6～9	6～9	300	300

表 1.4.48 轻金属和重有色金属工业矿山废水排放标准

项目 / 容许量 / 厂别	pH值	悬浮物 mg/L	Hg mg/L	Cd mg/L	Cr^{6+} mg/L	As mg/L	Pb mg/L	Cu mg/L	Zn mg/L	F mg/L	CN^- mg/L	油类 mg/L
矿山新建厂	6～9	200	0.05	0.1	0.5	0.5	0.5	1.0	4.0	15	0.5	10
矿山现有厂	6～9	300	0.05	0.2	0.5	0.5	1.0	2.0	5.0	15	1.0	15

地信网论坛
bbs.8s001.com

独居石精矿质量标准列于表1.4.44。

B 氟碳铈矿-独居石精矿

氟碳铈矿-独居石精矿质量标准列于表1.4.45。

C 磷钇矿精矿

磷钇矿精矿质量标准列于表1.4.46。

1.4.4 非金属矿选矿产品质量标准

请参阅本《手册》第八卷“选矿实践”第五分册、化工原料矿物选矿和建材非金属矿选矿。

1.4.5 选矿厂工业污染物排放标准

基于对环境保护的要求，国家环境保护局制订了钢铁工业污染物排放标准、轻金属工业污染物排放标准和重有色金属工业污染物排放标准，标准号相应为GB4911—85、GB4912—85和GB4913—85。摘录其中有关选矿厂工业污染物排放标准如下：

（1）钢铁工业废气粉尘排放标准。破碎、筛分、选矿部分，最高容许排放浓度：

新建厂 150毫克/米^3；现有厂 200毫克/米^3。

（2）钢铁工业废水中污染物最高容许排放浓度。最高容许排放浓度列于表1.4.47。

（3）轻金属和重有色金属工业的矿山破碎、筛分厂其废气排放标准。新建厂150毫克/米^3，现有厂200毫克/米^3。

（4）轻金属和重有色金属工业矿山工业废水最高容许排放标准，标准列于表1.4.48。

参 考 文 献

[1] 中南矿冶学院、东北工学院选矿教研组合编，选矿概论，中国工业出版社，1961，7—15页.

[2] Фишман М. А., Основы обогащения полезных ископаемых, 第一版, Металлургиздат, Москва, 1956, 7—20页.

地信网论坛
bbs.3s001.com

[3] WILLS, B. A., Mineral processing technology, 2nded., Pergamon Press, Oxford, 1981, 1—13.

[4] Nomen L. Weiss, SME Mineral processing Handbook, Published by Scociety of Mining Engineers of American of Mining Metallurgical and petroleum Engineers Inc, New york, 1985, Section3——Section 12.

[5] XVth International Mineral processing Congress, 1985, Tome I——Tome Ⅱ.

[6] О.С. Богданов, Справочник по обогашению руд, Изтательство «Недра», 1972, ТОМ первый——ТОМ Второй.

[7] 《黑色金属矿石选矿试验》编写组，黑色金属矿石选矿试验，冶金工业出版社，1978, 88—101页.

地信网论坛
bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

2 矿产资源

地信网论坛
bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.1 绪 论

矿产资源通常是指地壳中可供人类利用的固、液、气三种状态的矿物原料。它是由于地质作用的结果，在地壳中某些地段或部位形成矿物的富集，其质和量均能满足工业要求，目前经济技术条件下能够开采利用的自然堆积体。矿产资源的形成方式、产出特点、规模大小以及富集程度均受一定的成矿条件所制约。

矿产资源是自然资源的一部分，其含义包括两个方面：（1）有时间性，即矿产资源的概念不是一成不变的，它随人们对自然界认识的加深和国民经济的发展需要而变化，受工业技术水平的提高而不断扩大。（2）有经济性，即有用组分的含量应能达到工农业生产的要求，且能经济地加以利用。目前暂不能利用的岩石或矿物随着科学技术的进步，将来有可能成为重要的矿产资源。

矿产资源与其他自然资源不同的一大特点是基本上不能再生。因为它们都是在漫长的地质时期中形成的地质体，在人类短暂的历史中，是不可能再生的。随着社会的发展，矿产的开采和消耗成倍增长，越用越少，直至枯竭。因此，对矿产资源必须充分合理利用。

对矿产资源的利用程度是人类社会发展的重要标志之一，矿产资源开发利用的品种、数量和质量也是某一地区或国家技术水平高低和经济发达程度的一个重要体现。

充分利用矿产资源的途径有：（1）加强地质调查研究工作，提高地质科学理论水平和查明地下资源的能力，开辟新地区，开发新矿种，向深部找矿，向海洋极地找矿，向边陲地区找矿；（2）采用先进的科学技术和设备，大力开发矿石的选矿、加工试验研究，搞清物质组分和赋存状态、嵌布关系，开辟综合利用新途径，实行“综合勘探、综合评价、综合开发、综合利用”的政策；（3）积极研究或引进现代开发技术，特别是提高对“新”、“杂”、“贫”、“细”等难选矿石的选冶研究水平和积极组织现代

地信网论坛
bbs.3s001.com

化的采、选、冶、用的科学实验，提高矿山开发的采收率、选冶回收率和资源利用率，从而提高矿产资源的总回收率和经济效益；（4）加强矿产资源的管理，贯彻执行《矿产资源法》，通过法律形式，促进矿产资源的合理勘查和开发利用，防止遭受破坏和浪费，有计划、有步骤地满足社会主义建设对矿产资源的需求。

2.1.1 矿产资源在国民经济中的作用

一个国家的矿产资源状况是决定经济建设发展方针、布局、规模和建设速度的一个十分重要的因素，也是编制国土开发整治规划，制订国民经济发展计划和长远规划以及确定资源政策等方面不可缺少的决策依据。

矿产资源的调查、评价及合理开发利用，对增加工农业产值具有重要意义。例如苏联1983年底出口油气换汇达400亿美元；阿拉伯地区石油的开发成为世界人均产值最高的地区；澳大利亚的振兴也是靠出口矿产资源。而矿产资源的深加工又将成十倍、百倍地增加工业产值，加速经济发展。所以矿产资源对振兴我国经济将起着十分重要的作用。

2.1.2 矿产资源的特点

矿产资源有如下几个特点：

（1）矿产资源是国土资源的重要组成部分。人类社会存在及发展所必须的生产资料和生活资料，相当大的一部分取自矿产资源，人类社会的生产力发展也依赖于对矿产资源开发利用的广度和深度。随着经济建设和现代化工业发展，对矿产品的需求，无论是种类或数量都愈来愈多，愈来愈大，因此矿产资源开发利用的任务也愈来愈重要。

（2）矿产资源分布是不均匀的。矿产资源的形成受一定地质条件制约，其分布的不均匀性更为突出，这是由于地壳内物质分布本来就不均一，再加上各地质时期成矿作用及其范围的不均

地信网论坛
bbs.3s001.com

一性所造成的。只有根据本国资源的条件和需要，合理地部署工农业建设，才能发挥最大的经济效益和社会效益。

（3）矿产资源赋存状态复杂多样。随着找矿工作的进展，地表矿日益枯竭，绝大部分都埋藏在地下，只有很少一部分出露于地表。赋存状态的多种多样，又难以用一个模式概括。随着矿产开采速度和规模的不断扩大，近地表矿愈来愈少，找矿任务日益艰巨，采选治的工作也日益困难和复杂。

（4）矿产资源具有多组分共生的特点。自然界单一组分的矿床是很少的，绝大多数矿床都由多种可供利用的组分伴生和共生，此外，同一地质体或同一地质建造内，也可能蕴藏着两种或更多的矿体（层），如果地壳运动频繁，新老成矿作用多次叠加，将使矿床组分更加复杂多样，共生和伴生矿产多的特点更加突出。我国铁矿、有色金属矿普遍具有伴生组分多的现象，这就要求我们必须具有“综合找矿、综合评价、综合开发，综合利用”的观点。

（5）自然界，符合一定技术条件的矿产资源是有限的。随着大规模开采，易采、易选矿石，优质的地表矿愈来愈少，而尚未开采的大部分是那些不够理想的矿床，这就要求人们深入研究，扬长避短地合理开发利用，切不可浪费。要认真保护矿产资源，因为矿产是不能再生的资源，用一点少一点。要搞好综合利用，在回收主要成分的同时，回收伴生或共生组分，这样可以使一矿变多矿；对丢弃的尾矿、废渣再处理，可以相对扩大资源。因而综合利用对挖掘矿山潜力，提高经济效益具有重要意义。在资源开发过程中会产生大量的含有许多可用元素的废水、废渣、废气，不仅浪费了资源而且污染了环境，把综合利用与治理“三废”结合起来，可以变废为宝，化害为利，保护环境，造福人民。

（6）矿产资源具有开拓性和可变性。矿产资源具有开拓性和可变性是十分明显的，如斑脱岩过去不能用，随着粘土矿物的物化性能的深入研究，斑脱岩已成为具有广泛用途的膨润土矿资

地信网论坛
bbs.3s001.com

源了；又如昔日的玻璃原料石英砂，有可能成为今日的光导纤维原料。因此加强矿产资源的物化工艺性能测试和开发利用研究是世界各国十分重视的课题之一。某种矿产资源的新性能，新用途的发现，会使社会上产生新的产业部门，推动着国民经济建设的发展。

2.1.3 矿产资源开发总的发展趋势

矿产资源开发总的发展趋势是：品种不断扩大（现有160余种）；矿石品位愈来愈低；矿石类型日益增多；综合利用程度逐渐提高；合理利用研究程度愈来愈深；海底资源的利用已提上日程。随着科技的发展，需要提供的资源愈来愈多，在一定时期内或某一地区内对某些品种的资源会感到不足，因此各国对资源都采取保护措施，对不足的某些战略物资进行必要的储备。

随着地质普查勘探的深入和回收利用技术的进步，在可预见的将来，世界范围内大部分矿产资源是可以满足的，大部分矿产的产量都会继续增长。其基本特点如下：

（1）能源问题空前突出，油气开采量迅速增长，储采比逐步缩小，固体能源、新能源的开发受到重视。当前主要的能源消费结构中的油气、煤和水电比例60年代分别为56.76%，37.01%和5.98%，70年代为64.9%，32.4%和2.7%。1977年和1970年相比，石油产量增长了27%，天然气增长了32%。有人估计，今后一个时期内，世界能源消费的增长率为3.9%，在21世纪初，世界能耗量将为70年代的2～3倍。针对这种情况，国外在提高能源利用率的同时，在能源的勘查开发方面，出现了下述新动向：1）继续加强油气田的勘查工作，特别是海上和深部的油气勘探；2）努力加强煤炭、油页岩、沥青砂等固体燃料资源的开发和利用；3)努力发展原子能发电、大力勘查和利用铀钍等放射性能源；4)努力开发地热等一些新能源。在一些地热资源比较丰富的国家，地热资源的开发取得了显著进展。美国还努力研究和开发所谓地压地热资源，在煤和核能的比重逐步上升的同时，还利用

地信网论坛
bbs.3s001.com

地热、潮汐、风能、太阳能等。

（2）农用矿产需求量增长迅速，钾盐、硫、磷、泥炭的需求将会进一步增加。在这些矿产的消费量中，95%的钾盐、90%的磷和50%以上的硫都用于生产化肥、农药和饲料等农业方面；泥炭的三分之二用于改良土壤和用作肥料。从世界范围看，这些资源并不短缺，但由于资源分布不平衡，许多国家农用资源是紧张的，因此各国都从实际出发寻求新资源。

（3）用于冶炼高强度的低合金钢的合金种类和数量会明显增长，如钒、铬、钨、锰、镍、钼、铌和稀土等。由于生产高强度低合金钢和特种不锈钢的需要，使钒、稀土、钼、铌在钢铁工业中的用量显著上升，例如1970年稀土在冶金工业中用量仅占总消费量的7%，而70年代末，该消费比例已高达50%，从而使冶金工业成为稀土最主要的消费领域。

（4）多数有色金属需要量继续增长，但需求的迫切性相对有所减少，这类资源的紧张问题有所缓和。产生这种现象的原因主要有：1)汞、锑、铋由于环保要求，使用量受到限制，虽然资源紧张，但随用量下降有所缓和；2)近期大型斑岩型矿床不断发现，储量增长很快；3)由于军事上和电气工业以铝代铜、以铝代钢、以铝代锡的范围不断扩大。

（5）贵金属特别是金和铂对世界范围来说不存在紧张问题，但对我国和大多数国家来讲，贵金属资源急待进一步寻找和开发。我国未来金银等贵金属供不应求的局面不可能迅速扭转，应密切注意寻找微细浸染型金矿，大而贫的沉积热液型和火山热液型的斑岩型银矿。多金属矿床中伴生的贵金属应加强综合回收，硫化物型铜镍矿床仍将是铂族元素的最主要来源。

（6）非金属矿资源开发迅速。全世界矿产总储量、矿产的总产值中，非金属占比例很大，在开采矿产总产值中，非金属矿占50～60%。我国所占比例甚小，应不断加强。近年来，各国都加强了岩石和非金属矿产物化性能的研究，发现了一些非金属矿产的新矿产和新用途，例如：利用Ⅱ型金刚石对远红外光的透光

地信网论坛
bbs.3s001.com

性能做卫星上的精密光学仪器；利用蛭石生产火箭燃料；利用珍珠岩或蛭石作天然轻质建筑材料；以高铝矿物作高温膨胀性耐火材料；以硼作绝缘玻璃纤维原料等。此外，特种非金属的用途也在不断扩大。因此非金属的开发利用研究已成为各国的一个重要研究方向。

（7）稀散元素的用途尚处于探索和发展阶段之中，应积极组织科研力量深入研究。人们认为，这些元素的未来需求状况还难以预料，现有资源足以保证未来一个较长时期的需要，重要的是开辟新用途和更好的保护资源。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.2 我国的矿产资源

新中国成立前，我国只发现10多种矿产，数千个矿点，没有一种矿产资源有探明储量，还被认为是一个“缺铁少油”的国家。新中国成立后，广大地质工作者经过30多年的辛勤劳动，现已发现了各类矿产160多种，矿床和矿点达几十万处。已探明储量的矿种近140种，矿区1万多处，非金属矿产70余种，还查明了大量地下水资源。在已探明储量的矿产中，我国至少有20多种矿产储量居世界前列，从45个主要矿产储量折算价值比较，我国也居世界前列。世界上有些稀有矿产，在我国并不稀少。从资源远景形势估价，我国是世界上资源比较丰富，矿种比较齐全的少数几个国家之一，许多矿产的探明储量相当充裕，特别是煤炭、一部分有色金属和非金属资源十分丰富。资源的潜力也比较大，特别在我国中西部地区勘查程度低，资源很有远景。只要加强地质工作，绝大多数矿产资源可基本满足国内需要。据统计，我国钨、锑、锌、钛、钒、锂、萤石、石膏、菱镁矿、稀土、膨润土、硫铁矿、石墨、重晶石、明矾石和岩盐等在世界上占首位；锡、钼、汞、钽、滑石、煤、铌和石棉居世界第二、三位；铅、铁、锰、镍居世界第四，五位；金、银、铂族、磷、天然碱、硼、铜和铝土矿居世界第六、七位。此外，还发现了一批特大型矿床。1987年是我国近年来新发现矿产地最多的一年。但从可供目前建设需要的资源状况来看，我国的矿产资源形势又比较严峻，这主要表现在我国人均资源占有率低、底子薄、技术经济落后；资源的品种、质量和可供设计、生产的数量存在着不足，特别是大宗矿产满足程度差，如铁、石油、铜等；好矿富矿少，世界级的大矿不多。同时还存在着贫矿多，采选难、分布不均等问题，需要认真对待。

在分析我国资源时，既要看到矿产资源潜力大的有利一面，也必须看到我国资源有限，满足不了目前开采需要的现状。因此，必须加强地质找矿工作，特别是对那些在国民经济建设中急

地信网论坛
bbs.3s001.com

缺，但暂时又较难突破而难于做出结论的少数矿种，如金刚石、铜、钾盐、富铁、富铀等矿产，更应下大功夫。同时还要适时而又谨慎地合理开发现有资源，为实现四个现代化发挥更大作用。

我国地质找矿研究工作和发达国家相比，还有差距。东部沿海地区地质工作较深，中、西部地区不够；浅部地质工作较深，深部很不够。因此，在已有成绩的基础上，要加强在经济发达地区找隐伏矿（盲矿），找深部大矿体；在中、西部地区寻求更多的矿床；对已探明的矿床要加深开发利用研究，改善测试手段；寻找更多，更好地利用有价成分的新用途。我国的非金属矿产资源丰富，分布较均匀，前景也很乐观，但普遍存在着地质勘查程度浅，测试手段和工艺性能研究薄弱，迫切需要大幅度的提高。

2.2.1 矿产资源概况

全国已探明储量的矿产138种，按矿产的特征和用途可划分9大类。

（1）能源矿产：有7种，包括煤、石油、天然气、油页岩、铀、钍和地热。

（2）黑色金属矿产：有5种，包括铁、锰、钒、铬和钛。

（3）有色金属矿产：有20种，包括铜、铅、锌、铝土、镍、钴、钨、锡、铋、钼、锑、汞及贵金属如金、银和铂族元素。

（4）稀有、稀土和分散元素矿产：有28种，包括铌、钽、锂、铍、锆、锶、铷、铯和稀土元素（轻稀土铈族和重稀土钇族）。分散元素有镓、铟、锗、铊、铪、铼、镉、钪、硒和碲。

（5）冶金辅助原料矿产：有10种，包括熔剂石灰岩、熔剂白云岩、硅石、菱镁矿、耐火粘土、萤石、铁钒土、铸型用砂、铸型用粘土和高铝矿物原料，如蓝晶石、红柱石和硅线石。

（6）化工原料矿产：有24种，主要有自然硫、磷、硫铁矿、钾盐、钾长石、含钾岩石、明矾石、蛇纹石、橄榄岩、化肥用白云石、化肥用硅石、化工用石灰石、泥炭、硼、岩盐（含池盐，井盐），芒硝、天然碱、钠芒硝、镁盐、碘、溴、砷、重晶

地信网论坛
bbs.3s001.com

石和毒重石。

（7）特种非金属矿产：有7种，主要有压电石英、熔炼石英、光学水晶、冰洲石、光学萤石、金刚石和蓝石棉。

（8）建材和其他非金属矿产：有37种，主要有云母、高岭土、石棉、石墨、石膏、滑石、水泥灰岩、泥灰岩，水泥混合材料，水泥配料（粘土和砂岩等），玻璃用砂（含石英岩），玻璃用白云石，长石、陶瓷粘土、砖石粘土，硅灰石，建材大理岩，花岗岩，建筑用石材，方解石、铸石玄武岩、辉绿岩、珍珠岩类（珍珠岩、松脂岩、黑曜岩）、沸石、蛭石、硅藻土、膨润土、凹凸棒土、海泡石、累托石、浮石、叶腊石、刚玉、石榴石、天然油石、玛瑙、玉石。

（9）水：包括海水、地下水、地下热水、矿泉水等。

应当指出：上述分类并不准确和完善，因为一种矿产有时有几种用途，况且还在不断发展。另外，气态资源也未包括在内，如二氧化碳、硫化氢、氦、氡等。随着工艺矿物学和测试方法的深入发展，情况还会发生新的变化：一种用途的矿产可能会增加新的用途；许多岩石也可能被当作有用矿物而加以利用；某些气体甚至会成为珍贵的资源。比如，氦气，它广泛分布于空气中，在岩石或天然气中也有不同的含量，当其在临界温度（−260℃）时有电阻为零的超导现象，将会引起人们利用它的兴趣。还有一些矿产，原来很重要，但逐渐被其他有机或无机物代替之后，也就降低了它的价值。所以，矿产的分类并不是一成不变的。

下面就我国几大主要矿产资源，作一概括介绍。

2.2.1.1 能源矿产

我国煤炭资源丰富，品种齐全，品质优良，分布广泛，开发条件较好，可以成为长期依赖的能源矿产。1987年公布的统计数字，我国千米以浅预测储量为18945亿吨，千米以浅总的资源量预测为26637亿吨。截至1985年，累计探明储量7822.34亿吨。我国煤炭分布除上海外，在全国28个省（市、自治区）2282个县中有1349个县均有煤炭资源，产地4594处，是我国重要矿产资源中分布最

地信网论坛
bbs.3s001.com

广、数量最多的一种矿产。探明储量超过100亿吨的省、区有12个，其中山西、内蒙古、宁夏最多，占50%以上。在分布特点上，南方煤少，北方煤多；东部煤少，西部煤多，因此北煤南运、西煤东运的状况将长期存在，而且运量会越来越大。我国煤种齐全，从褐煤到无烟煤各变质阶段的煤种都有，炼焦用煤占31.5%，无烟煤华东，西南两区占75.1%，华北和两淮地区的气煤中含油率较高，C_{13}煤层含油率最高达20%两淮地区尚有各种煤层受到接触变质作用而生成的天然焦，预测可达10～20亿吨，探明储量5亿吨以上，可综合利用。东北的油页岩和褐煤是一种很好的能源和化工原料。存在问题是西部地区水资源严重短缺，制约了能源开发、大部分煤的灰硫有害杂质普遍较高。低热值的燃料也很多，如石煤等。

石油和天然气虽有探明储量，但不多，产量也不高，供不应求。现世界人均占有850公斤油产量，我国仅140公斤，即使到2000年也只有191公斤，大大低于世界人均数，仍不能满足国家需要。从地质成矿条件分析，会有较大远景，东海油气的普查，在平湖构造上已有三口井见油，为揭示东海油气田提供了依据，塔里木盆地和川西北油气普查也取得了重要进展。

铀矿探明储量较多，但富矿不多、一部分开采条件较差。世界上已有20多个国家拥有运转的反应堆，总功率10255万千瓦，我国已在华东、西南、中南筹建核电站，铀储量可满足目前我国核电站建设的需要，但仍需扩大储量。钍主要用于非能源方面，常与铀、稀土元素伴生，海滨砂矿是目前钍的主要来源。

我国水能资源十分丰富，可供利用的主要分布在西部和西南地区，居世界首位。地热资源也不断发现，西藏发现的高温地热资源带为我国三大地热带之冠，其分布范围和热水量都是广东-福建地热带和京津-华北地热带不可比及的。八羊井地热田已建装机容量达13000千瓦，发电1.8亿千瓦·时。

2.2.1.2 黑色金属矿产

铁矿分布在我国27个省、市、自治区600多个县，但主要分

地信网论坛
bbs.3s001.com

布在辽宁的鞍本地区，四川的攀西地区，河北的冀东和邯邢地区，湖北的大冶和鄂西地区，内蒙的白云鄂博地区，安徽的马芜地区以及山西、山东和云南等省。我国铁矿资源特点是蕴藏量大，分布广泛但又相对集中；贫矿为主、富矿很少；可供目前建设的储量有限；多组份铁矿比例大，共生矿产价值高；成矿地质条件多种多样，矿床类型齐全。主要有鞍山式铁矿（含铁石英岩）；攀西的钒钛磁铁矿（含铁20～40%，硫0.5%，铜0.03%，五氧化二钒0.2～0.4%，钴0.01～0.03%，镍0.01～0.02%，钛氧化物6～16%）；内蒙白云鄂博铁矿的沉积-热液交代变质铁矿床（含铁28～51%、稀土氧化物1.5～8.6%、铌氧化物0.1%，萤石（F）2～9%），具有成矿元素多(57种)，矿物种类多(67种)，综合利用多，矿石类型多，各种有用矿物结晶粒度细，矿石结构构造复杂，矿物组份复杂的特点；马芜-庐枞地区的含钒磁铁矿。还有宁乡式和宣龙式的鲕状构造铁矿。这两者沉积时代不同，但矿物组成和结构特点基本相同（宁乡式更难些），主要分布在长江以南的湖北、湖南、广西、江西、云南、贵州和四川等，以湖北最多，总储量近40亿吨。这种矿石分布广，大都处在缺铁地区；贫矿多、富矿少；建设和开采条件差；物质组成复杂，嵌布粒度细；含磷高难于除去。鲕状铁矿难选，开发利用经济效果不好。因此应积极的从科学技术方面去研究、探讨，提高开发利用铁矿资源的经济效益。我国铁矿已供矿山建设的储量仅占已探明储量的36.6%，三分之二的资源均由于难选或开采条件不理想，经济效果差等原因而未充分利用，铁矿建设后备基地深感不足，近期来，不仅要贯彻“国内和国外矿石同时并用”的方针，而且还必须充分利用贫矿，难选矿，加强采选冶新技术的研究，走“人造富矿”的道路，这样，我国的铁矿资源是可以满足的。我国有一批品位低，易采或易选的矿石，可以走优纯铁精矿的道路，冶炼优质钢和特种钢，可以免去烦杂而成本高的冶炼工艺，达到超低硫、磷的高效钢，这也是一条充分利用资源，扬长避短发展钢铁工业的路子。国外铁矿分布广泛但储量非常集中，苏

地信网论坛
bbs.8001.com

联、巴西、加拿大、澳大利亚、印度和美国，许多矿区储量都在100亿吨以上。苏联达千亿吨以上的矿区、主要以含铁石英岩(鞍山式）矿石为主。世界富矿储量占总储量五分之一，约1400亿吨。

锰矿资源丰富，分布广泛。据21个省、市、自治区统计，已探明储量有上亿吨，但质量较差，品位较低，氧化锰矿少，碳酸锰矿多。主要分布在南方的广西、湖南、贵州、云南、四川和福建等省。广西下雷碳酸锰矿的工业合理利用研究已被国内外所重视，但技术经济方面尚待进一步研究解决。我国目前锰矿产量远远不能满足国家建设需要，预计到1990年锰的产量只能满足需要量的50%，1987年地矿部门在广西宜山洛富，武鸣百开，山西岚县榆湾等地发现了三个大型富氧化锰矿，预计远景储量数百万吨。世界锰矿主要集中在南非（阿扎尼亚）和苏联，占世界总储量80%以上。

铬矿是我国极缺矿产，探明储量有限、又分布在边陲地区。新疆、西藏、甘肃、内蒙等，占全国总储量的85%，但因交通运输困难，开发条件差而资源利用率低。最近在新疆西准噶尔盆地北缘的超基性岩带内找到埋藏在300米以下的隐伏矿体，是我国目前最大的铬矿床之一。就世界范围而言，铬矿资源分布极不均匀，仅南非（阿扎尼亚）、苏联和津巴布韦（罗德西亚）三国，即占世界总储量97%。美国是铬矿的主要消费国，最近它研究从低品位铬矿或铬红土中回收铬的新工艺。铬矿是冶金和国防工业不可缺少的物质，我国资源不足，应加强找矿研究工作。

钒钛资源在我国十分丰富，探明储量居世界首位，但90%以上是为铁矿的伴生或共生矿物。主要分布在四川攀西地区、湖北、广西、河北、陕西等省。钒单独矿床很少、主要伴生在钒钛磁铁矿和含钒磁铁矿中，四川攀西和安徽的宁芜地区铁矿中均含钒，可供综合利用。

钛有钛铁矿和金红石两种形式。钛铁矿除伴生在钒钛磁铁矿矿床外还以砂矿形式产出，与原生钛铁矿相比，砂矿钛铁矿含

地信网论坛
bbs.3s001.com

TiO_2高，杂质少，冶炼工艺较为成熟，但我国钛铁砂矿分布分散，不利机械化开采，相反，钒钛磁铁矿中钛铁矿分布集中，易综合回收。金红石主要分布在长江中下游，一般规模较小。钛金属从1950年开始投入工业生产，目前主要用于航空、航天工业，制造海水脱盐设备，发电设备，石油、化工设备以及优质电焊条等，将来钛有可能成为潜艇和开发海底矿产及食品工业设备的主要结构材料。

海底锰结核作为潜在的锰资源，除锰外还有许多有价元素，开发锰结核越来越引起大家注意，锰结核在大洋中广泛分布，含锰量在8.2～50.1%，因地而异，锰矿物是钡镁锰矿、钠水锰矿和δ-二氧化锰等。

2.2.1.3 有色和贵金属矿产

我国有色金属矿产品种齐全，储量也较大。钨、锡、铜、铋、锑、锌等是我国优势矿种，主要分布在南方各省和西南地区。铜、铅、铝、镍也都比较丰富，主要是开发利用不够。钴和贵金属金和银探明储量不足，铂族元素和银主要靠综合利用回收。

世界主要产铜国家是智利、美国、赞比亚、中国等。铜主要来自斑岩型。我国铜矿主要分布在长江中下游地区的江西、湖北、安徽等省和西南的川滇地区，约占全国储量一半。德兴斑岩铜矿为特大型。其次有甘肃河西走廊，山西中条山，西藏玉龙铜矿带。现有大型矿山18座，主要首先开发交通便利地区，开采条件较好的地方。最近在山东地区探明了一个以铜为主的富多金属矿床，矿体集中，品位高，并伴生金、银、硫、钼、砷、锑等矿物，均达到了开采和综合利用要求，西藏玉龙铜矿带已探明储量居全国第二位，带上富矿多且资源潜力大。

我国铅锌资源丰富，锌多于铅，锌居世界前茅，铅也占重要位置。铅锌分布广泛，以南岭、川滇、滇西、秦岭-祁连山和内蒙狼山等五地区最为集中，占全国总储量60%以上。近年来在辽宁、内蒙、河北都发现铅锌或铅锌等多金属矿，规模很大。铜、铅、锌硫化矿又称多金属硫化矿，除铜、铅、锌外，还常含有

地信网论坛
bbs.3s001.com

铁、硫、镉、铋、锑、锡、钴、镍、钼、铟、镓、锗、铊、硒、碲……等许多稀有及稀散元素，并且含金、银等贵金属。我国白银厂的黄铁矿型多金属矿是以铜、硫、金、银为主的多金属矿，而白银厂的小铁山矿床是一个含硫、锌、铅、铜并伴生金、银、镉、铟、硒、镓、铋等的多金属硫化矿。这些多金属矿虽然选矿复杂，但矿床经济价值高。我国多金属矿床前景较好，新、老矿区储量不断增长，规模也有大型或特大型。

铝土矿是一种综合利用价值高的矿产，尤其在能源充足地区发现铝土矿，经济意义更大。我国铝土矿分布比较集中，主要在晋、豫、黔、桂四省，占全国总储量80%以上。过去发现的铝土矿属一水型硬铝石为主的矿石，最近在桂西南、滇东、湘西及鲁中的矿床中都发现了新型矿石，开发条件好，为一水软铝石为主矿石。迄今为止，我国铝矿资源不断增长，找到了可供露采、易加工的矿床，为我国铝业发展奠定了坚实的基础。

钼矿是我国优势矿产，主要分布在辽宁、陕西、河南一带，湖南、广东有铜钼矿、钨钼矿，此外北京、安徽、浙江、福建、河北亦有一定规模。钼矿常伴生铼、铅、硫和稀土等元素。我国三大钼矿是杨家杖子，金堆城和栾川。世界主要产钼矿地有美洲的七个即克莱麦克斯、亨德森、查斯塔、尤德拉、恩达科、博斯山和红山；苏联有两个即花岗斑岩钼矿床选矿厂和西北利亚钼选厂。

我国钼矿或铜钼矿床有四种类型，即矽卡岩型、细脉浸染型、铜钼过渡带矿石和含炭质页岩的铜钼矿床。由于类型不同，选矿难易亦不同，指标也就各异。各矿床的含铼量有差异，铼随钼富集而提高，从冶炼中回收。

钨矿是我国优势矿产，主要分布在赣、湘、桂、滇、闽等省，占全国总储量89%。钨主要分二组：一组是黑钨矿，其中主要矿物有黑钨矿、钨锰矿和钨锰铁矿；另一组为白钨矿。钨矿床中常伴生大量有价元素，综合利用价值高。江西大吉山钨矿属石英大脉型钨矿；上坪属石英细脉型；还有某地的一种石英细网脉—

地信网论坛
bbs.3s001.com

云英岩一矽卡岩型钨多金属矿。

锡矿主要分布于华南和内蒙等省、区，广西大厂是我国著名的锡矿基地，以黄锡矿、锌黄锡矿和蔷薇黄锡矿为主。大多数锡矿以锡石产出，并伴生大量有价元素。最近在江西赣南发现了一个大型锡矿床，矿体集中，埋藏浅，品位较富，易采易选，具有很高经济价值。

汞矿主要分布在贵州，其次有陕西和广西等地。主要含汞矿物为辰砂。近年来，加强了这些矿产的地质工作，新发展了一批矿床和远景区。70年代初，汞的产量总趋势是上升，70年代后，汞产量、消费量一直下降，主要是汞对环境污染之故。为了消除污染，各国政府和环境部门对汞的应用实行了严格的限制政策，但由于汞的特殊物理-化学性能和缺乏理想的代用品，消费量将会有所增长，主要用于电气和电子工业。

镍矿主要分布在我国西北甘肃金昌市，金川镍矿已成为我国镍矿的基地，属超基性岩型硫化铜镍矿，矿石中除含镍铜外尚有钴、铂、钯、金、银等有价元素20多种，其镍储量占我国80%以上。东北和西南也有不同类型的镍矿床。1987年，是我国近年来地质找矿取得进展最大的一年，新疆哈密地区的铜镍矿取得了突破性进展，将成为我国又一个新的镍基地。但是金川一矿区露天矿的氧化矿和原生矿由于氧化程度不同，泥多，矿物结构及成分不稳定，可浮性差，矿浆中水溶性盐高等种种原因，产量低，采、选、冶的回收率低，综合利用系数也不高，有待进一步改善。

锑矿无论在矿产储量、产品数量和质量方面，我国都居于世界第一位。湖南锡矿山锑矿素有“世界锑都”之称。目前我国虽是世界产锑的主要国家，但大型锑矿储量日益减少，渐渐向中小型、复合矿发展，如钨锑矿、金锑矿、钨金锑矿和多金属矿等。我国出口锑主要以精锑为主，但随着发达国家对蓄电池等用精锑量大大减少，而阻燃剂，锑白及其他锑化物的用量增加，我国出口锑应转向锑白等锑化物，以利提高经济效益和节约锑资源。目前我国对锑矿石中伴生的砷、金、银、汞等元素与锑的分离技术

地信网论坛
bbs.3s001.com

和冶炼途径还没有很好解决。

铋主要来源是在处理铜、铅、钨、钼、镍等多金属矿石时作伴生组分而回收。广东有一石英脉型铋矿床。

我国是世界上最早应用钴的文明古国之一，在陶瓷制品中用钴作蓝色颜料。钴有单独钴矿床，如广东、新疆等地的砷化钴、硫化钴和钴土矿；还有伴生或共生钴矿床，其中铁矿伴生是获得钴金属的重要原料之一。其次尚有含钴黄铁矿，多金属矿、铜矿、沉积钴锰矿，硫化铜镍矿以及硅酸镍矿等亦含钴。

四川攀西地区和河北大庙钒钛磁铁矿含钴0.01～0.03%，可选得含钴0.2～0.4%的钴精矿；长江中下游的部分铁矿床也伴生钴，可供回收。

黄金和白银历来被人们视为国力的象征。我国黄金、白银勘查储量近年来成倍增长，1986年新发现88处金银矿，1987年新发现金矿74处，银矿14处，其中大中型矿地占多数，金矿资源跃居世界第五位，开发前景令人振奋。但从目前金矿来看，其基本特点是：找矿难度大、储量利用率高，后备基地紧张；资源分布广泛又相对集中；中小型矿床多，大型矿床少、世界级更少；伴生金较多，受开采条件限制。金矿生产有“等米下锅”的状态。我国银矿资源丰富，成矿条件好，但找银工作起步晚，银产量远远低于世界产银国家。资源特点是：分布广泛又相对集中，已探明储量中以伴生银为主，资源利用率高，保证程度不高。

金矿有脉金、砂金和伴生金三种。脉金主要集中在胶东、小秦岭、吉林、黑龙江等地。最近在上述地区和湖南、贵州、陕西、四川、甘肃、广东都发现了新产地、新类型金矿。继贵州发现板其式金矿后，湖南又发现微细浸染型金矿；河南嵩县发现的金矿是继小秦岭金矿之后的又一成矿远景区；新疆、山东、云南等地远景储量都十分可观。更可喜的是历来被认为贫金银的长江中下游地区也发现了4个大型金矿。银矿在多金属矿床中普遍伴生，河北、江西、辽宁、内蒙、吉林西部，广西北部，也都成了大型银产地。

地信网论坛
bbs.3s001.com

砂金主要分布在我国北部(黑龙江、内蒙)、中南和西南地区，四川砂金丰富。伴生金主要分布在山东和长江中下游铜矿床中。

但是，应当看到，我国金、银储量与国外相比还是有限的，不足的。在世界黄金总储量中，南非占了一半，其次是苏联，而美国、加拿大、澳大利亚，巴西等国都有世界级金矿床。80年代以来，世界范围内又发现了6个100吨级的特大型金矿，如加拿大赫姆洛(Hemlo)金矿（590吨），巴布亚新几内亚的利海尔岛金矿（311吨）和彼格拉金矿（287吨），美国金坑金矿(127吨)，日本菱刈金矿（120吨）和苏联的穆龙套金矿。因此，我国必须加强后备基地的找矿工作。

银矿也以苏联、美国、墨西哥、加拿大等国为主。

我国铂族（铂、钯、铑、铱、钌、锇）矿产资源居世界第6位，探明的金属储量居世界第三位。但国内资源分布极不平衡，主要集中在云南、甘肃、四川等省，主要有与铜镍硫化矿有关的铂族金属矿床，如金川铜镍矿；与铜硫化物有关的铂族矿床；与含钛磁铁辉石岩有关的铂族金属矿床；单铂型铂族金属矿床；与铬铁矿有关的铂族金属矿床；砂铂矿床以及与镍钴元素的黑色岩系有关的铂金属矿床等7个类型。与国外相比，我国发现的铂族矿床（矿化）矿石品位低，成矿母岩规模较小，岩类不全，出露构造位置单一，岩体围岩时代新等是其致命弱点。据我国实际生产情况来看，缺口很大，因此应当充分利用本国资源，开展低品位矿石的利用研究，积极扩大副产品和综合回收途径。

2.2.1.4 稀有、稀土和分散元素矿产

稀有金属矿产有锂、铷、铯、铍、铌、钽、锆、铪、锶等。

我国锂矿资源丰富，保有储量居世界第一位，主要集中在青海柴达木盆地盐湖中的氯化锂；川、赣和新疆等地的锂辉石；其次，锂云母也较多。还有近年来在西藏盐湖发现的固体富锂镁硼酸盐矿床。

铷和铯矿产中，铷无单独的工业矿物，常分散在锂云母、铁锂云母中；我国西部某锂、铷、铯、铍、铌、钽花岗伟晶岩矿床

地信网论坛
bbs.3s001.com

伴生有铷和铯。

铍矿是国防工业重要材料，铍铜合金是制造多种仪器、电器元件、特种轴瓦等最佳材料。绿柱石、硅铍石等含铍矿物为主要铍资源矿物；香花石和顾家石是我国首次发现的含铍矿物。铍矿资源主要分布在我国中南和西部地区。

铌、钽、铍矿探明储量是较多的，铌的储量居世界前茅；钽资源基本能满足国内需要。我国内蒙白云鄂博铁矿中铌品位虽低但量大，其他铌钽矿主要分布在江西、广东、广西、湖南、湖北等省。我国的铌矿资源优势还未充分发挥出来，最近在闽西北又发现了以铌钽为主的稀有金属矿产资源基地。

锆和铪常伴生一起。我国锆矿主要以沿海砂矿为主，锆与铪有一定含量比值，但随矿区不同而异，含铪高的锆矿经济价值高。

锶主要以天青石产出，我国的四川、云南和江苏都有发现。

我国稀土金属矿产十分丰富，居世界首位，主要分布在内蒙白云鄂博的铁矿中。该矿是铁、稀土、铌和萤石为主的多金属共生的巨型稀土矿，主要矿物氟碳铈矿和独居石等，为重要的轻稀土金属矿床。除内蒙外，尚有南方沿海独居石砂矿，山东郯山矿等。其次有离子吸附型稀土矿床，稀土以阳离子状态被吸附于高岭石为主的层状铝硅酸盐类矿物表面而得到富集，形成了具有工业价值的离子吸附型稀土矿。这是国内外罕见的新型稀土矿床，其稀土品种齐全，有含量占稀土总量85%以上的重稀土矿床，又有含量占10%左右中稀土(钐、钆、钇)的矿床，还有以轻稀土为主的矿床。这种离子吸附型稀土矿规模大，分布面积广，易采不选，提取工艺简单，成本低、产品放射性低、质量好、经济效益高。

稀土在冶金、电子、仪表等行业应用广泛；在农业上施用稀土元素肥料于蔬菜，具有早熟、产量高、果实光泽度好、口味佳等优点。稀土的其他用途正在广泛的研究中。

稀散元素矿产主要有锗、镓、铟、铊、铪、镉、硒、碲等元素。锗常分散在铅锌多金属矿、煤、赤铁矿、铜和富银矿、铁镁

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿石中。镓主要赋存在闪锌矿、霞石、白云母、锂辉石、铝土矿及煤矿中。铟主要赋存在铁闪锌矿、赤铁矿、多金属矿、钨、锡、铜、钼等矿床中。铊主要来源于有色金属硫化矿中，铼主要来自于铜矿的烟尘和钼精矿冶炼过程中。镉主要来自铅锌多金属矿，常与闪锌矿伴生。硒、碲主要从多金属矿床中回收。

迄今为止，世界上还没有发现工业上可以单独开采利用的分散元素矿床，其工业来源是在提取主金属的同时，把它们作为副产品加以回收的。分散元素的利用在一定程度上反映一个国家的冶金工业水平和科技水平。分散元素的利用仍处于探索之中，新用途不断出现，老用途又常被取代，使消费构成变化较大。美国是分散元素的最大消费国，其次是苏联、日本和西欧。

2.2.1.5 化工原料非金属矿产

非金属矿产是除金属矿产、燃料矿产和地下水资源以外的所有能被现代工业利用的矿物与岩石的总称。化工原料非金属矿产亦是非金属矿产组成部分，包括有：磷矿、钾盐、硫、镁盐、硼矿、天然碱、芒硝、碘……等。

我国磷矿资源居世界的第三、四位，主要分布在云、贵、川、湘、鄂、赣、内蒙、陕西、江苏等省区，南方磷多，北方缺磷，地区分布不均。胶磷矿占全国磷矿储量70%以上，铁、镁、铝等有害杂质高，选矿、加工难度增加。北方磷矿品位低，要富集后方可加工。磷矿分布过于集中，由于交通条件限制，矿山多年来尚未摆脱“以运定产”局面。今后磷矿资源开发利用方向是因矿制宜、因地制宜、因农制宜，大力开展综合利用如碘、铀、铁、钾、钒和稀土等。

钾盐保有储量2亿多吨，主要分布在青海盐湖卤水中，西藏亦有。我国钾肥资源严重短缺，已有资源因交通不便，大规模开发困难，含钾岩石很多，但因加工中能耗太大而不能有效使用。

世界钾盐主要集中在苏联、加拿大、德意志民主共和国、德意志联邦共和国和以色列等国。苏联和加拿大占总储量80%，主要产于第三纪以前的层状矿床中，加拿大主要产于萨斯喀彻温地

地信网论坛
bbs.3s001.com

区，K_2O平均为20～30%；苏联主要分布在乌拉尔、白俄罗斯等四个地区，K_2O平均为10～30%。世界含钾矿床类型按主要成份有三种：氯化物型、硫酸盐型和混合型。

硫资源有硫铁矿、自然硫和硫化氢。硫铁矿是我国优势矿产，分布广泛，主要从硫化矿床，多金属矿床和黄铁矿床中回收，以广东、安徽、甘肃、内蒙储量最丰富。自然硫资源尚待寻找，目前仅青海一处。从油气田中的硫化氢生产硫在国外发展很快，成为硫酸主要原料，我国起步较晚，酸性天然气（有硫化氢）经处理析出硫磺制酸。

盐和芒硝探明储量居世界首位，内蒙、新疆、青海、湖北、湖南、安徽、江西等省都有丰富资源。

镁盐用于制取镁化合物及金属镁，山西运城盐湖镁盐矿含$MgSO_4$ 5～20%。

硼矿是一种用途广泛的化工矿物，是国防航天工业的燃料，是超高温、超硬度材料的原料，我国硼矿有硼镁石、硼镁铁矿和盐湖硼矿。硼的产量满足不了生产需要，资源主要分布在辽宁、湖南，藏北、青海、新疆等地。辽宁的含铀铁硼矿是一个新类型、多元素共生的大型矿床，主要有用元素为铁、硼、铀、镁。选冶技术解决后，这一类矿床将会成为我国重要钢铁和硼化工原料基地。

天然碱是含水的碳酸盐矿物，又分固体矿石和卤水两种，内蒙和河南有一定储量，可作制碱原料，是我国短缺原料之一。

芒硝、无水芒硝和钙芒硝是化工制取硝酸盐的重要原料，我国资源尚不能满足目前建设需要，主要分布在新疆、青海、四川等地。

碘呈分散状态赋存在钠硝石矿床及各种盐类矿床、地下卤水、泥火山沉积物或石油废水中，工业上无单独要求，需综合回收。碘也是短缺资源，世界碘资源很丰富、地下卤水、智利硝石、海藻及海水中都含碘。日本从地下卤水中提取，约占世界总储量70%，被称之为日本国宝，为世界之首，其次是智利，苏联

地信网论坛
bbs.3s001.com

和美国。

溴是制取溴盐的基本原料，主要从天然卤水、海水、盐湖、光卤石、钾盐、石盐和天然碱中综合回收。我国四川自贡卤水含溴20～50毫克/升。

蛇纹岩和橄榄岩主要作钙镁磷肥原料，资源丰富，分布在江西、河南、内蒙、江苏等地。

砷以硫化物形式存在。砷矿主要提炼元素砷，制造砷酸和砷的化合物，有毒性，环境污染严重，但又是杀虫剂、除草剂等农药原料，也是冶金、军事、玻璃工业不可缺少原料，主要分布在湖南、广西、云南等地。

重晶石、毒重石是制钡和钡化物、钻井加重剂和锌钡白原料，我国重晶石资源十分丰富，福建、湖北、广西、浙江、安徽等地广泛分布，最近总储量从过去名列全国第十名的贵州省突然跃居到全国第一位；硫酸钡含量高达95%以上，有50%的矿可列为Ⅰ级品。

2.2.1.6 冶金辅助原料矿产

我国的菱镁矿资源非常丰富，辽宁、西藏、山东等地的菱镁矿是我国传统出口矿产。萤石也是我国传统出口矿产，主要分布在东南沿海一带，如浙江、安徽、福建、广西、内蒙、湖南等地。熔剂灰岩和白云岩分布广泛，质地优良、就地可取。耐火粘土和硅石探明储量比较丰富。新型高铝耐火材料资源也有一定储量。近年来发展很快，高铝耐火材料包括红柱石、蓝晶石和硅线石，是同质异形体，此外有蓝线石（含硼）、黄玉，它们有一个共同特点是，当加温到1300℃以上时，转变成莫来石。莫来石具有极高耐火性，当加温到1810℃时，仍十分稳定，体积不膨胀，机械强度很高，在高温下也不减弱，化学稳定性强，不受一般酸的侵蚀，因此它是一种不定型耐火材料，我国对这类矿产已有大量发现，如江苏、山西、河北、陕西等地的蓝晶石；黑龙江、吉林等地的硅线石和红柱石。这类矿产国外以美国为主，印度、巴西、南非、苏联、法国和澳大利亚为次。我国已经开始应用国产

地信网论坛
bbs.3s001.com

资源于宝钢高炉建设。

我国冶金辅助原料资源十分丰富，可以做到就地取材，品种齐全，开采方便。

2.2.1.7 建材和其他非金属矿产

我国建材和其他非金属矿产十分丰富，品种齐全，质地优良，现仅将主要资源作一概述。

石棉是一种纤维结构的非金属，可分蛇纹石石棉（温石棉）和角闪石石棉，角闪石石棉又分青石棉（蓝石棉），铁石棉，直闪石石棉和透闪石石棉。温石棉主要用于纺织制品，蓝石棉还可作过滤材料，铁石棉用于绝缘和建材。评价石棉主要依据类型、纤维长度和物化工艺性能。我国石棉储量较多，66%集中于青海和四川两地，但长纤维含量较少，加工过程纤维损伤也较严重，此外陕西、辽宁、云南也有。寻找石棉的代用品是国外发展的方向，但还不能完全取代，主要原因是：代用品制造复杂，成本高；代用品也是有害物质；从物化性能上完全取代不可能。因此，应根据我国石棉优势，采取积极稳步方针，加强防尘措施，提高产品质量，打入国际市场。

云母种类很多，主要有白云母、金云母、黑云母、锂云母、铁锂云母等，工业用得最多的是前两种。我国云母矿产资源在世界上占有一定地位，88%储量集中于新疆、四川和内蒙等地。我国云母主要是质优片大的甚少，小片云母多，因此积极寻找国防和电子工业用材十分重要。

我国是滑石主要生产国之一，资源十分丰富，质地优良，产地分布广，在国际市场上较有声誉，主要生产滑石块和滑石粉。滑石微粉为小于5微米粒度，它改进了滑石粉的物理性能，如表面积，不透明度，可弥散性和吸附性等，经济价值高。主要分布在辽宁、山东、广西等省，其中以辽宁海城滑石矿最为驰名，每年创汇近2000万美元。

石墨成分是碳，虽属非金属，但它又有金属矿物的导电、导热性能，还具有有机塑料的可塑性、耐高温性、化学稳定性、润

地信网论坛
bbs.3s001.com

滑性和可敷性等。石墨的结晶程度愈好、片度愈大、碳的纯度愈高、杂质含量愈少，其矿物特性就愈显突出，其工艺性能也愈好。石墨分鳞片石墨和无定形石墨，又称晶质石墨和土状石墨。

现已探明并开采的山东南墅石墨矿在世界有名。我国石墨成矿条件好，分布在山东、黑龙江、安徽、内蒙、湖南等地，按石墨大鳞片含量多少，大体可分三类：（1）灵宝兴和等矿床，+100目（0.15毫米）石墨含量大于40～60%；（2）柳毛、三岔垭等矿床，+100月石墨含量为20～40%；（3）主要为 −100 目的细鳞片的金溪等石墨矿床。

硅藻土是一种十分微小的单细胞植物在大量死亡后，以硅质为主组成的壳壁和与它共生的生物遗骸一起沉积在水底，在特定条件下而形成的。硅藻土的质量评价往往依据用途不同而异，但与硅藻土层中硅藻壳体含量多少有关，壳体含量多则质量就好，反之，岩层中的硅藻属种繁多，壳体含量较少则质量就差。我国的硅藻土形成于中新世之后，主要矿区有吉林长白县、山东山旺、浙江嵊县和云南寻甸以及黑龙江、广东、湖南、四川、山西等省。硅藻土是理想的过滤介质，用于固液分离和液体净化，又是优质隔热保温材料、优良的催化剂载体，新型的工业填料和不可缺少的水泥混合材料，用途十分广泛。美国是世界上最大的硅藻土生产国和消费国，也是资源优势国。

明矾石是钾铝含水硫酸盐矿物，可综合利用提取钾、铝、硫等有益元素，也可作沉淀剂和合成氨的催化剂。我国明矾石资源丰富，分布广泛，其中以浙江平阳、安徽庐江、福建等地最为著名。

海泡石是近年来新发现的粘土矿物，我国湖南、江西、河北都有发现，主要用于地热和深海石油钻井中作优质泥浆，其次作吸附剂，脱色剂和净化剂等，在工业上的应用有待于开发。

凹凸棒石也是海泡族一类的粘土矿物，其性能与海泡石类似，我国苏皖一带玄武岩地层中广泛分布，尤以安徽最多。

膨润土和漂白土都是以蒙脱石为主组成的一种粘土矿产，膨

地信网论坛
bbs.3s001.com

润土可分钠基、钠钙基和钙基等，以钠基性能最好，经济价值亦高。我国膨润土矿分布十分广泛，几乎各省都有，以浙江、安徽、辽宁、吉林、新疆、广西等省为主，是一种优势非金属资源、潜力也很大。

高岭土是以江西景德镇附近的高岭村而得名、以高岭石为主的粘土矿物。最初用以烧瓷或制各种电磁绝缘体。当前高岭土国际市场极为活跃，尤其是对涂料、填料和煅烧高岭土的消费急剧增加。刮刀涂料级高岭土是造纸工业生产高级铜板纸的主要原料。由于国外人均纸张耗量增长，涂料级高岭土需要量猛增。我国高岭土以江苏苏州产地为最佳，但随着涂料级高岭土需要量增加，不得不大量进口，以满足造纸工业的需要，耗费大量外汇。我国高岭土资源丰富，有花岗岩风化残积型的矿床和北方煤系的沉积型矿床，江苏、浙江、福建、江西、广东、安徽、河南、辽宁、山东、湖南等地都广泛分布，最近在福建和广东发现了两处储量大的高岭土矿床，高岭土含量虽不高，但经过水洗、提纯等加工处理便可成为优质涂料级高岭土，具有粒细、白度高、质地疏松、埋藏浅、易开采、不用剥离、工艺简单，成本低廉的优点。我国高岭土资源虽丰富，但选矿加工技术没有过关，剥片和除杂技术落后，使许多矿床无法作为涂料级造纸用，另外有一部分高岭土属管状结构并不具备片状结构，一般只能作填料或配料用。世界上质量好的高岭土矿山也较少，主要分布在美国、英国、巴西和澳大利亚。

硅灰石(透闪石、透辉石)由于其与硅铝在较低温条件下易于流动，减少加温时间并使裂缝减少，可提高生瓷坯的强度和良好的受压性，同时应用硅灰石可提高制品白度、强度、节省能源、降低成本，是一种新的工业矿物原料。主要分布在吉林、湖北、安徽等省。国外近20年来，每年以10%的速度在递增，其用途正在不断扩展。

金刚石是自然界稀有贵重矿物。金刚石不但是重要工业原料，同时也是国防、科研、电子、航天等技术研究的战略物资。

地信网论坛
bbs.3s001.com

我国金刚石储量居世界第十位，主要分布于山东辽宁、湖南等省，探明储量少且粒级细，远远满足不了需要，产量仅为需要量的十分之一。目前要开辟找矿新领域，同时开展人造金刚石工业。Ⅱ型金刚石具有超导热性能、半导体性能，耐高温，还具有较高机械强度和抗腐蚀等性能，其价值比宝石级金刚石还高，为了发挥我国Ⅱ型金刚石储量丰富的资源优势，应加强应用研究，在没有开展应用之前，应先收购贮存起来。近悉，国外从钾镁煌斑岩中发现了巨大金刚石。

根据地质勘查认为，我国宝石、玉石成矿地质条件良好，分布地域广阔，品种繁多，储量可观，质量上乘。我国传统宝石有金刚石，绿柱石、石榴石、长石、电气石及其他硅酸盐，含氧盐类等数十种，并在国内首次找到天河石、暗绿玉等新品种。蓝宝石尤为突出，在海南、闽西、苏北、黑龙江等地多处找到较大规模的矿床。金刚石在辽宁、安徽、江苏、新疆都有新发现。玛瑙在内蒙北部、吉林、浙江、广西均有重要收获，在内蒙北部发现玛瑙湖。玉石品种有蛇纹石玉、角闪石玉、斜长石玉、镁绿泥石玉。斜长石玉有河南南阳独山玉，山西紫水晶，新疆的和田玉。总之我国的宝、玉石前景是良好的。

我国的各种建筑石材十分丰富，大理岩、饰面石材、耐酸石材、耐碱石材、铸石、工艺雕刻品石料等都有，品种和颜色齐全，分布范围很广，主要是加工技术比较落后，成材利用率低，高档制品少，需要提高。

水泥原料主要指石灰质原料（如石灰石，大理岩、白垩等），粘土质原料（如粘土、黄土、泥岩、页岩等）、硅质原料（砂、砂岩）及铁质原料等一般都能就地满足。白水泥、特种水泥原料也能满足。

玻璃原料包括硅质原料（石英砂岩、石英砂、石英岩、脉石英等）及其配料（白云岩、石灰岩），资源也能满足需要。特点是类型齐全，分布广泛；中低等质量矿石多，优质矿石少；矿床开发条件一般较好，可供综合开发利用主要产地有广东、青海、

地信网论坛
bbs.3s001.com

辽宁、江西、河北五省。

天然沸石具有独特的矿物结构和结晶化学性质，其工业用途在我国尚处于摸索阶段，矿物定量和选矿提纯也还存在问题，初步了解，其用途十分广泛，我国沸石资源分布在东南沿海，如山东、浙江、安徽等地。

水晶是透明的石英，分压电水晶、光学水晶、熔炼水晶和工艺水晶四种。我国水晶资源虽有一定储量，但尚属短缺矿产。

2.2.1.8 水资源

我国地下水资源比较丰富，但分布不匀，南方占80%，而广大的北方仅占20%，西部和西北部缺水更加严重。南方耕地少而水多，华北水源也缺。初步估计，全国地下水储量约8000亿立方米/年，在世界上占第五位，但全国人均水资源低，约为世界平均数的四分之一，西北黄土高原环境遭到破坏，水土流失严重。城市用水近年来矛盾也愈显突出，工业用水量迅速增加，补给不足。由于地下水过量开采，地下水位下降，地面沉降、海水入侵，水质污染等问题，都给国民经济带来损失，因此加强水资源的调查，合理利用水资源，防止水质污染，应当引起重视。

矿泉水也是一种重要水资源，全国矿泉水资源十分丰富。譬如近期，吉林省在长白山和松辽平原的广大地区发现矿泉地38处，泉点近百个。吉林已查明的矿泉水产地数量居全国之首，东起长白山，横跨松辽平原，直至西北部大兴安岭山地均有矿泉水，且集中为群、成带出露。矿泉水的类型也较齐全，有碳酸型矿泉水，硅酸型矿泉水，硅质矿泉水，放射性氡矿泉水，含锶矿泉水等。山东郯城继崂山矿泉之后又发现优质矿泉水。

在湖北发现地下热水点68处，其中温泉58处、温泉水温可高达73℃，地下热水最高为80℃，甚至达97℃，据统计60～80℃高温热水点6处，40～60℃中温热水点17处。全省各热水点总流量为每天11万多吨，大都为医疗矿泉。西藏热水源更多。

我国对水资源的调查虽取得了较大成绩，但许多方面还有待于进一步解决。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.2.2 矿产资源分析

正确了解我国矿产资源的品种、质量、分布和埋藏特点，对国民经济发展具有重要意义，对从事地质、采矿、选矿、冶炼、加工、利用和国土整治与规划的科学工作者都有帮助。

我国探明的矿产，就品种和质量而言，有如下基本特点：

（1）有一批得天独厚的矿产资源。这些资源不仅规模大，而且质量好，如煤，品种齐全、炼焦煤多、炼油煤也丰富，多数可露采。世界各国的焦煤都比较紧张，而我国的远景储量十分乐观。有色金属中钨和锑品位高，储量也不断在增长。辽宁的菱镁矿大而集中，质量优良，其中低品位矿石也易选。对这些优势矿产要更好地保护并合理利用。

（2）综合性，多组分的复合矿比例较大。如有色金属中大多数属于综合性矿床，伴生多达十几种，几十种，而且成分复杂，嵌布较细，因此综合利用十分重要。目前世界主要工业国家都根据矿产综合开发利用的原则制定资源开发政策，在找矿、勘探和评价阶段都增加了地质经济、岩石矿物成分查定、组分赋存状态和分布规律的研究和评价工作，并提出了综合品位指标、矿物原料综合利用率、原料综合利用相对系数、原料利用完全程度等新概念。苏联从多金属矿石中生产12种主要有色金属，回收62种元素，金属矿副产品产值占总产值的25%以上，许多企业综合利用系数达83～85%，出现了许多无尾矿的企业。由此看来，我国伴生矿床多，更应重视综合利用。我国的铁矿一般组分都比较复杂，有一批大型、特大型的多组分铁矿，经济价值高，选冶攻关项目多，如内蒙白云鄂博矿、四川钒钛磁铁矿、辽宁含铀硼铁矿以及含多种有色金属的铁矿等，如果不重视综合利用工作，就会造成开采一个矿山却同时丢弃了几个“矿山”的局面，或者给下一代留下严重的环境污染。

（3）相当一部分矿种存在着“品位低、质量差”的状况。铁矿平均品位小于34%，大多数在30%左右，需要选矿的占

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.2.1　矿床规模划分标准参考资料

顺序号	矿种名称		储量单位	矿床规模		
				大型	中型	小型
1	煤	（煤田）	原　煤，亿t	>50	10～50	<10
		（煤矿区）	原　煤，亿t	>10	5～10	<5
		（井田）	原　煤，亿t	>2	0.6～2	<0.6
2	泥　炭		万t	>1000	100～1000	<100
3	石　油		原　油，万t	>10000	1000～10000	<1000
4	天然气		气　量，亿t	>1000	100～1000	<100
5	油页岩		矿　石，亿t	>20	2～20	<2
6	铀		U　，　t	>3000	1000～3000	<1000
7	铁	贫　矿	矿　石，亿t	>1	0.1～1	<0.1
		富　矿	矿　石，亿t	>0.5	0.05～0.5	<0.05
8	锰		矿　石，万t	>2000	200～2000	<200
9	铬铁矿		矿　石，万t	>500	100～500	<100
10	钒		V_2O_5　，万t	>100	10～100	<10
11	钛	金红石原矿	TiO_2　，万t	>20	5～20	<5
		金红石砂矿	矿　物，万t	>10	2～10	<2
		钛铁矿原生矿	TiO_2　，万t	>500	50～500	<50
		钛铁矿砂矿	矿　物，万t	>100	20～100	<20
12	铜		Cu　，万t	>50	10～50	<10
13	铅		Pb　，万t	>50	10～50	<10
14	锌		Zn　，万t	>50	10～50	<10
15	铝土矿		矿　石，万t	>2000	500～2000	<500
16	镍		Ni　，万t	>10	2～10	<2
17	钴		Co　，万t	>2	0.2～2	<0.2
18	钨		WO_3　，万t	>5	1～5	<1
19	锡		Sn　，万t	>4	0.5～4	<0.5
20	铋		Bi　，万t	>5	1～5	<1
21	钼		Mo　，万t	>10	1～10	<1
22	汞		Hg　，　t	>2000	500～2000	<500
23	锑		Sb　，万t	>10	1～10	<1
24	金	岩　金	Au　，　t	>20	5～20	<5
		砂　金	Au　，　t	>8	2～8	<2
25	银		Ag　，　t	>1000	200～1000	<200
26	铂　族		金　属，　t	>10	2～10	<2
27	锂	原生矿	Ta_2O_5　，　t	>1000	500～1000	<500
		砂　矿	矿　物，　t	>500	100～500	<100

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 2.2.1

顺序号	矿种名称		储量单位		矿床规模		
					大型	中型	小型
28	铌	原生矿	Nb_2O_5，	万t	>10	1～10	<1
		砂 矿	矿 物，	t	>2000	500～2000	<500
29	铍		BeO ，	万t	>1	0.2～1	<0.2
30	锂	矿物锂矿	Li_2O ，	万t	>10	1～10	<1
		盐湖锂矿	LiCl ，	万t	>50	10～50	<10
31	钪	钪黄石	矿 物，	万t	>20	5～20	<5
32	铷	（盐湖中铷另计）	Rb_2O，	t	>2000	500～2000	<500
33	铯		Cs_2O ，	t	>2000	500～2000	<500
34	锶	天青石	$SrSO_4$，	万t	>20	5～20	<5
35	稀土	砂矿	独居石，	t	>10000	1000～10000	<1000
			磷钇矿，	t	>5000	500～5000	<500
		原生矿	TR_2O_3，	万t	>50	5～50	<5
		风化壳矿床	铈族稀土氧化物总量，	万t	>10	1～10	<1
		（风化壳矿床）	钇族稀土氧化物总量，	万t	>5	0.5～5	<0.5
36	镉		Cd ，	t	>3000	500～3000	<500
37	锗		Ge ，	t	>200	30～200	<50
38	镓		Ga ，	t	>2000	400～2000	<400
39	铟		In ，	t	>500	100～500	<100
40	铪		Hf ，	t	>500	100～500	<100
41	铼		Re ，	t	>50	5～50	<5
42	铊		Tl ，	t	>500	100～500	<100
43	硒		Se ，	t	>500	100～500	<100
44	碲		Te ，	t	>500	100～500	<100
45	钪		Sc ，	t	>10	2～10	<2
46	石灰石	熔剂灰岩	矿 石，	亿t	>0.5	0.1～0.5	<0.1
		水泥灰岩	矿 石，	亿t	>0.8	0.15～0.8	<0.15
		制碱灰岩	矿 石，	亿t	>0.5	0.1～0.5	<0.1
		电石灰岩	矿 石，	亿t	>0.5	0.1～0.5	<0.1
47	白云岩		矿 石，	亿t	>0.5	0.1～0.5	<0.1
48	硅 石	熔剂用硅石	矿 石，	万t	>2000	200～2000	<200
	玻璃硅质料		矿 石，	万t	>1000	200～1000	<200
49	菱镁矿石		矿 石，	亿t	>0.5	0.1～0.5	<0.1
50	耐火粘土		矿 石，	万t	>1000	200～1000	<200

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 2.2.1

顺序号	矿种名称	储量单位	矿床规模		
			大型	中型	小型
51	萤石(不含伴生萤石)	CaF_2，万t	>100	20～100	<20
52	蓝晶石类	矿　物，万t	>200	50～200	<50
53	铁矾土	矿　石，万t	>1000	200～1000	<200
54	铸型用粘土	矿　石，万t	>1000	200～1000	<200
55	铸型用砂	矿　石，万t	>1000	100～1000	<100
56	硫铁矿	矿　石，万t	>1500	200～1500	<200
57	自然硫	S　，万t	>500	100～500	<100
58	磷　矿	矿　石，万t	>5000	500～5000	<500
59	钾盐　固　态	KCl，万t	>1000	100～1000	<100
	液　态	KCl，万t	>5000	500～5000	<500
60	钾长石	矿　物，万t	>100	10～100	<10
61	含钾岩石	矿　石，亿t	>1	0.2～1	<0.2
62	明矾石	矿　物，万t	>1000	200～1000	<200
	化肥用蛇纹岩				
63	橄榄岩	矿　石，亿t	>1	0.1～1	<0.1
64	芒　硝	Na_2SO_4，万t	>1000	100～1000	<100
	钙芒硝	Na_2SO_4，万t	>10000	1000～10000	<1000
65	天然碱	$Na_2CO_3+NaHCO_3$，万t	>1000	200～1000	<200
66	镁　盐	$MgCl_2/MgSO_4$，万t	>5000	1000～5000	<1000
67	钠　盐	NaCl，亿t	>10	1～10	<1
68	钠硝石	$NaNO_3$，万t	>500	100～500	<100
69	碘	碘，t	>5000	500～5000	<500
70	溴	溴，t	>50000	5000～50000	<5000
71	重晶石、毒重石	矿　石，万t	>1000	200～1000	<200
72	砷	As　，万t	>5	0.5～5	<0.5
73	硼（内生硼矿）	B_2O_3，万t	>50	10～50	<10
74	云　母	工业原料云母，t	>1000	200～1000	<200
75	石　棉　超基性岩型蛇纹石石棉	矿　物，万t	>500	50～500	<50
	镁质碳酸盐型蛇纹石石棉	矿　物，万t	>50	10～50	<10
76	蓝石棉	矿　物，t	>1000	100～1000	<100
77	金刚石　原生矿	矿　物，万克拉	>100	2～100	<20
	砂　矿	矿　物，万克拉	>50	10～50	<10

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 2.2.1

顺序号	矿种名称	储量单位	矿床规模		
			大型	中型	小型
78	压电水晶	矿 物，t	>2	0.2～2	<0.2
79	熔炼水晶	矿 物，t	>100	10～100	<10
80	光学水晶	矿 物，t	>0.5	0.05～0.5	<0.05
81	工艺水晶	矿 物，t	>0.5	0.05～0.5	<0.05
82	冰洲石	矿 物，t	>1	0.1～1	<0.1
83	光学萤石	矿 物，t	>1	0.1～1	<0.1
84	石墨 晶质	矿 物，万t	>100	20～100	<20
	隐晶质	矿 石，万t	>1000	100～1000	<100
85	滑 石	矿 石，万t	>500	100～500	<100
86	石 膏	矿 石，万t	>3000	1000～3000	<1000
87	水泥混合材	矿 石，万t	>2000	200～2000	<200
88	水泥粘土质原料	矿 石，万t	>2000	500～2000	<500
89	高岭土	粘土量，万t	>500	100～500	<100
90	砖瓦粘土	矿 石，万t	>2000	00～2000	<500
91	膨润土	矿 石，万t	>5000	500～5000	<500
92	硅藻土	矿 石，万t	>1000	200～1000	<200
93	海泡石	粘土量，万t	>500	100～500	<100
94	凹凸棒石	粘土量，万t	>500	100～500	<100
95	叶腊石	矿 石，万t	>200	50～200	<50
96	浮 石	矿 石，万t	>300	50～300	<50
97	沸 石	矿 石，万t	>5000	500～5000	<500
98	蛭 石	矿 石，万t	>100	20～100	<20
99	珍珠岩	矿 石，万t	>2000	500～2000	<500
100	泥灰石	矿 物，万t	>100	20～100	<20
101	铸石（辉绿岩，玄武岩）	矿 石	>1000	200～1000	<200
102	建筑大理石	矿 石	>1000	200～1000	<200
103	建筑石材花岗岩	矿 石	>5000	1000～5000	<1000
104	刚 玉	矿 物	>1	0.1～1	<0.1
105	石棉石	矿 物	>500	50～500	<50
106	天然油石	矿 石	>100	10～100	<10
107	供水水源地	允许开采量，m^3/d	>50000	10000～50000	<10000
108	地热田	发电能量，kW	>50000	10000～50000	<10000

注：1.有些矿产是按有用组分（元素或矿物）或矿石量计算储量和划分规模的，还有一些是按有用组分和矿石量同时计量，这样本表只列出一种并据以划分矿床规模；

2.关于小型矿床规模的下限和需否进一步划分小型矿床及其规模，尚待总结实践经验拟定。

地信网论坛
bbs.3s001.com

95%，如何以最经济的办法走“人造富矿”的道路，值得深入研究。

铜品位也不高，某些国家把铜品位2～3%均列入低品位矿石，而我国铜品位在1%以上的均不多见。稀有金属矿产也有类似的情况。非金属矿产虽资源丰富，但普遍存在着中等质量的多，优质品级不足的状况，对非金属的物化工艺特性及合理开发利用研究不够，一哄而起生产初级品，造成销路不广，资源积压。因此提高低品位的矿产资源的质量，扩大产品用途是摆在我们面前的重要课题。

（4）存在着一些难选、难用的矿产资源。如一水型硬铝矿、难选胶磷矿、鲕状铁矿、嵌布细的铁锡矿以及新型粘土类矿，都应当组织力量深入研究。

新中国成立40年来，探明了一大批矿产资源，但是也有不足之处，主要表现在忽视了经济效果和社会效益，使某些已探明的矿产资源与可供近期开采的储量之间有较大差距，有些矿产地质工作做得过深，也有一些矿床忽视了物质组成的详细研究、矿物工艺学和选冶试验研究程度不足，特别是对首采地段的资源技术经济评价研究程度不够，给矿山建设带有一定困难。

2.2.3 矿床规模划分和计算单位

根据我国实际情况，对矿床规模划分和储量计算单位提供如以参考资料（表2.2.1）。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.3 矿产勘查与储量分类分级

2.3.1 矿 产 勘 查

矿产勘查工作通常是在一定地区内，以客观地质体为研究对象，独立编制地质工作设计，通过观察和分析、测试计算和研究，并提交地质报告。

矿产勘查工作划分为普查、详查和勘探三个阶段。普查阶段之前，为区域地质调查工作，勘探阶段之后为矿山开发地质工作。

勘查工作划分阶段的目的是为了缩短周期，避免盲目性，减少风险度，使矿产勘查工作与矿山基本建设程序紧密衔接，从而进一步提高矿产勘查和矿山建设的经济效果和社会效益，更好地为社会主义建设服务。

2.3.1.1 普查阶段

普查阶段的目的和任务是对已发现的矿点和地质、物化探等异常进行普查工作，查明是否有进一步工作的价值。提交普查报告，一般探求$D+E$级储量，为是否要进行详查阶段工作提供依据，一般要求是：

（1）大致查明普查区内地质、构造情况。

（2）对矿体（层）的形状、产状和分布情况，矿石品位、物质成份，结构构造，自然类型等的控制和研究程度，应达到探求相应储量级别的要求。

（3）对矿产的加工、选冶性能进行对比和研究，做出是否可能作为工业原料的评价。

（4）大致了解矿床水文地质，工程地质和其他开采条件。

（5）对矿床进行概略的技术经济评价。

2.3.1.2 详查阶段

地信网论坛
bbs.3s001.com

详查阶段的目的和任务是对经过普查阶段工作证实具有进一步工作价值的矿床，做出是否具有工业价值的评价，提交详查报告，一般探求$C+D$级储量，其中C级储量：一般金属矿要10～20%，非金属矿要20～50%，为是否进行勘探阶段工作提供依据，并可提供矿山总体规划和作矿山建设项目建议书使用，一般要求是：

（1）基本查明详查区内地质，构造情况

（2）对矿体（层）的形状、产状和空间位置，矿石品位、物质成份、结构构造、工业类型和品级等的控制和研究程度，达到探求相应储量级别的要求。

（3）对矿产的加工选冶性能进行对比和研究，做出是否有工业价值的评价。

（4）基本搞清矿床水文地质，工程地质和其他开采技术条件。

（5）对矿床进行初步的技术经济评价。

2.3.1.3 勘探阶段

勘探阶段的目的和任务是对经过详查阶段工作证实具有工业价值，并拟近期开采利用的矿床进行勘探，按全国储量委员会制定的有关规范探求各级储量，提交勘探报告，作为矿山建设可行性研究和设计依据，一般要求是：

（1）详细探明勘探区的地质、构造情况。

（2）对矿体（层）的形状、产状和空间位置，矿石品位，结构构造和工业类型、品级种类及其比例等的控制和研究程度，达到探求相应储量级别和矿山建设设计的要求。

（3）对矿产加工选冶性能进行研究，做出是否具有可供工业建设设计的评价。

（4）详细探明水文地质，工程地质和其他开采技术条件。

（5）对矿床进行详细的技术经济评价。

矿产勘探普查工作一般应按规定的阶段循序渐进，对特别复杂的，难以正规设计开采的矿床，可以边探边采，个别地质条件

地信网论坛
bbs.3s001.com

简单的矿种或正在开采矿山外围和深部的矿床勘查阶段，也可按实际情况简化或合并，但应经有关上级主管部门批准。

由详查阶段转入勘探阶段，一般应与使用部门对口，具有使用单位的委托书或与使用单位签订的承包合同书，或局级以上（含局级）矿产勘查主管部门下达的项目任务书。

未提交出上一阶段的报告，不得转入下一阶段工作，否则要经上级主管部门批准。

2.3.2 矿产勘查各阶段的选冶试验程度

矿产选冶试验程度分五类。

（1）可选（冶）性试验：通常是在实验室规模条件下，采用当前具有工业意义的选冶方法和常规的流程，用物理或化学方法研究探索，以获得目的产品反映的技术指标，为判别试验对象是否可作为工业原料提供依据。

（2）实验室流程试验：在可选（冶）性试验的基础上，利用实验室规模设备，进一步深入研究在什么样的流程条件下获得较好的选冶技术指标而进行的流程结构及其条件的方案比较试验。

（3）实验室扩大连续试验：对实验室流程试验推荐出来的一个或数个流程，串组为连续的，类似生产状态的操作条件下进行试验，试验因素和指标是在动态平衡中反映出来，一般说来，已具有一定的工业模拟度，其成果是可靠的。

（4）半工业试验：在专门的试验车间或实验工厂，从事矿产选冶工业模拟试验、以验证实验室扩大连续试验结果，工业模拟度较强，成果更为可靠。

（5）工业试验：建厂前的一项准备工作，借助生产装置的一部分，一个或数个系列，性能相近、处理量相当的设备，进行局部或全流程的试验，实质上具有试生产的性质。

普查阶段，工业利用已成熟的易选矿产和工业利用尚成熟的一般矿产可以进行类比评价，不做选冶试验。对于组分复杂，矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

物嵌布粒度细，在国内工业利用尚无成熟经验的矿产，应进行可选（冶）性试验，甚至实验室流程试验。

详查阶段，对生产矿山附近的，有类比条件的易选矿产，可以进行类比，不做选冶试验，否则应进行可选(冶)性试验。难选矿产又属国家急需，经上级同意，必须在详查阶段进行实验室扩大连续试验。

勘探阶段，一般应进行实验室流程试验，或实验室扩大连续性试验；对生产矿山附近的，有类比条件的易选矿产进行可选(冶)试验，甚至实验室流程试验；难选矿产进行半工业试验；建设大型矿山必要时还要作工业试验。

新类型矿产的选冶试验程度一般按难选矿产的选冶试验程度对待。

选冶试验试样必须具有与勘查阶段相适应的代表性，并有相应勘查阶段的矿产物质组成和工艺矿物学的研究。

一般在上一阶段的矿产选冶试验成果未达到相应要求时，不能转入下阶段的勘查工作。

具有工业价值的伴生元素（组分）或共生矿产，未进行综合勘查和选冶试验的，不能批准其报告。

某些非金属矿产，由于有其独特的物化工艺性能和加工工艺方法，可以参照上述原则，在目前尚无成熟的评价方法时，可视具体情况而定。

2.3.3 矿产储量分类和分级

2.3.3.1 矿产储量分类

矿产储量可分为如下二类。

（1）能利用储量：是指符合当前工业技术经济条件的储量，即矿产储量表内储量，简称“表内储量”。

（2）暂不能利用储量：是指由于有益组分或矿物含量低、有害组分含量高又不易处理、矿石技术加工方法尚未解决和矿体厚度小、矿石开采技术条件或水文地质、工程地质条件特别复杂

地信网论坛
bbs.3s001.com

等因素，不能符合当前生产技术经济条件，工业上暂不能利用，将来有可能利用的储量，即矿产储量表外储量，简称“表外储量”。

2.3.3.2 矿产储量分级

矿产储量分级可分为*A*、*B*、*C*、*D*、*E*级（表2.3.1）。

各级储量的条件可参阅储量规范，每级储量都有明确要求和规定。

表 2.3.1 储量分级表

A 级	*B* 级	*C* 级	*D* 级	*E* 级
编制采掘计划依据的储量	矿山首期开采地段设计依据储量	矿山建设设计依据的主要储量	为进一步布置地质勘探工作和矿山远景规划	已发现矿床探明储量之外的预测储量

2.3.4 矿产储量有关名词解释

2.3.4.1 伴生矿

指同一矿床内，除主要矿种外，并含有许多种可供工业利用的成分，这些成分即称为伴生矿产，其储量应按矿种分别计算，储量级别应符合有关规定。

2.3.4.2 共生矿

指同一矿区内，产于不同层位或部位，在勘查阶段中，同时查明并达到工业要求的多种矿产，称共生矿，其储量应按矿种分别统计。

2.3.4.3 矿床类型

是指矿床的工业类型或成因类型。有工业类型的矿床应列工业类型，没有工业类型的矿床，可列成因类型。对沉积矿产还应列出沉积时代（或层位）。如铁矿的工业类型可分为：（1）岩浆晚期型铁矿，如攀枝花式、大庙式；（2）接触交代—热液型铁矿，如邯邢式、大冶式；（3）火山—侵入活动有关的矿床，如宁芜式，豫西式；（4）沉积型铁矿，如宣龙式、宁乡式；（5）变质型铁矿，如鞍山式、庙儿沟式；（6）风化淋滤型等。

地信网论坛
bbs.gis001.com

2.3.4.4 工业品位

矿产工业品位是指最低工业可采品位或最低平均可采品位。

是指工业上可利用的矿段或矿体的最低平均品位。只有矿段或矿体的平均品位达到工业品位，并在工业利用上技术可行，经济合理时，才能计算为“能利用的储量”，介于工业品位和边界品位之间的储量应列入“暂时不能利用储量”。

平均品位是指整个矿区（矿体、矿层或矿段）工业矿石的总平均品位，是用以衡量整个矿区矿石贫富程度的指标。

2.3.4.5 边界品位

是圈定矿体，计算储量的一项主要指标或依据，是用以圈定矿体的单个样品中有用组分含量的最低标准，作为划分矿与非矿（围岩或夹石）界限的最低品位。边界品位应高于选矿后尾矿中的含量。

2.3.4.6 矿石品级

是指根据矿石有益有害组分的含量，物理性能，质量差异以及不同用途的要求等，将矿石（矿物）划分不同的品级，如贫矿、富矿；一级品、二级品等。

2.3.4.7 矿床工业指标

是指矿床的某些特定涵义。是在当前技术经济条件下，工业部门对矿产质量和开采条件所提出的要求，是评价矿床工业价值，圈定矿体、计算储量的标准和依据。一般工业指标只能作为普查阶段和详查阶段评价矿床和计算储量的参考。在勘探阶段，为提供矿山建设设计使用的勘探报告中所采用的工业指标，由地勘单位提出有关地质资料和对工业指标的初步意见，经设计部门在技术经济条件比较基础上，按隶属关系上报工业主管部门批准。

2.3.4.8 地质储量、探明储量、可供建设设计储量

地质储量又称预测储量，是根据区域地质调查，矿产分布规律或根据区域构造单元，结合已知矿产的成矿地质条件所预测的储量，它一般只能作为是否进一步勘查工作的依据。

探明储量是指经地质勘查工作及所求得的储量，即 D 级或 D

地信网论坛
bbs.3s001.com

级以上的矿产储量。

可供建设设计储量是指地质勘探报告期内或审批的可供建设设计的地质报告中的储量。

2.3.4.9 综合工业品位

在某些矿床或矿体中，有两种或两种以上矿产，其中任一种都达不到各自单独的工业品位要求，按等价原则，将其折算为某一主组份的等价品位或是按几种矿产品的综合价格制定综合工业品位，并据此确定相应的综合边界品位。

2.3.4.10 可采厚度（或最低（可）开采厚度）

是圈定矿体，计算储量的一项重要指标，它是根据当前采矿技术经济条件确定的矿体（或矿层或脉）最低的开采厚度。一般情况下，小于这一厚度不得视作工业矿体。当矿体（层）厚度小于可采厚度，但品位较富，可用矿体（层）的厚度乘以该矿体（层）样品的品位（或含矿率）即“米百分值”（米百分率）来衡量，凡大于或等于“工业品位与可采厚度的乘积”的，仍可视为工业矿体。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4 矿产工业指标的一般要求

矿产工业指标，有的称矿产工业要求或简称工业指标。它是各矿产工业部门根据国家当前资源供需状况，通过技术经济核算、对比所提出的、用于矿区勘探、圈定矿体、划分矿石类型、品级、计算储量的技术标准或要求。本章推荐的矿产工业指标为一般的工业指标，就某一矿产而言，均系近30年来有关工业部门对这类矿产所确定的工业指标的汇集和归纳，可供普查和详查工作中参考使用。制订出的一般工业指标是可变的，它随当时的技术经济条件而变化。对于勘探阶段来说，一般应遵循由地质单位提出书面意见与工业对口部门（包括设计和生产单位）共同协商，最后由有关工业设计部门制订的原则，来确定合理的工业指标。按现行管理体制，大中型矿区的工业指标要由省或省以上有关工业部门批准下达，根据下达指标，圈定矿体，计算储量，最终提交勘探报告。

2.4.1 能源矿产

2.4.1.1 煤

煤可分泥炭、褐煤、烟煤和无烟煤四大类。烟煤又分贫煤、瘦煤、焦煤、肥煤、气煤、弱粘结煤、不粘结煤和长焰煤等。炼焦用煤包括粘结性强或较强的瘦煤、焦煤、肥煤和气煤等，要求灰分、硫和磷含量愈低愈好，一般要求灰分<10%；硫<1%；磷<0.05%。动力用煤包括粘结性弱的或不粘结的，如贫煤、弱粘结煤、不粘结煤和长焰煤等。煤油用煤主要是褐煤、长焰煤及部分气煤，当含油率大于7%时可作炼油煤。腐殖酸包括各种风化烟煤。挥发分高的长焰煤还可作化工原料。泥炭可作民用燃料、肥料、化工原料、改良土壤等用。褐煤可作动力用、炼油用和化工原料。无烟煤可作动力煤，化工用，优质可代焦煤高炉喷吹用。一般工业指标列于表2.4.1至表2.4.3。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.1 煤的有机成分元素表

种　类	碳，%	氢，%	氧，%	氮，%	发热值① J/g
泥　炭	59	6	30	2.3	22572
褐　煤	69	5.5	20	1.5	28006
烟　煤	82	5.0	10	1.7	35112
无烟煤	95	2.2	2	0.8	33858

① 指高位发热值。

表 2.4.2 煤的一般工业要求

煤的种类			炼焦用煤		非炼焦用煤		褐　煤	
储量类别*			I①	II②	I①	II②	I①	II②
最低可采厚度，m	矿井开采	<25°	0.7	0.6	0.8	0.7	1.0	0.8
		25°～45°	0.6	0.5	0.7	0.6	0.9	0.7
		>45°	0.5	0.4	0.6	0.5	0.8	0.6
	露　采		1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5
最高可采灰分A^g，%			40	50	40		40	

注：1.非炼焦煤和褐煤在灰分，发热量两项中有一项合格即可；

2.可选性差煤（高灰分、高硫）不配作炼焦用煤；

① 可供利用储量；

② 暂不能利用储量。

煤区通常与油页岩、黄铁矿、磷矿、铝土矿、粘土矿类共生；煤层常伴生铀、锗、镓、铟等，应注意综合回收。

2.4.1.2 泥炭

泥炭可生产腐殖酸类肥料、营养土和用作土壤改良剂、植物生长刺激素、饲料添加剂等。

一般工业要求：优质肥料，灰分<40%，腐殖酸40～70%；普通肥料，灰分40～70%，腐殖酸15～40%；优质建材，灰分

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.3 缺煤地区煤的一般工业要求

煤的种类			炼焦用煤		非炼焦用煤		褐煤	
储量类别			I ①	II ②	I ①	II ②	I ①	II ②
最低可采厚度，m	矿井开采	<25°	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.7
		25°～45°	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7	0.6
		>45°	0.4	0.3	0.5	0.4	0.6	0.5
最高可采灰分A^g，%			40	50	—	—	—	—
最低发热值Q^g_{DW}，kJ/kg					12540	10450	10450	

注：1.非炼焦煤和褐煤在灰分、发热量两项中有一项合格即可；

2.可选性差煤（高灰分、高硫）不能作炼焦用煤。

① 可供利用储量；

② 暂不能利用储量。

25～35%，纤维含量>60%；优质燃料，灰分25～35%，发热量>10450千焦/千克；普通燃料，灰分>35%，发热量≥8360～10450千焦/千克。可采厚度≥0.5米，露采剥离系数≤2.5。

泥炭的综合利用和伴生有价元素的回收，我国正处于开发阶段。

2.4.1.3 油页岩

油页岩是一种高灰分（40～80%）的可以燃烧的有机岩石，化学成分主要为碳、氢、氧、氮、硫等元素，一般含油率为3.5～15%，个别高达20%以上，油页岩的发热量为4180～16720千焦/千克。一般工业要求的最低含油率：露天4%，坑采5%；平均含油率：露天>5%，坑采>6%。燃烧用时的最低发热值：露天7106千焦/千克。最低可采厚度：露天1米，坑采1米。夹石剔除厚度：露天0.7米，坑采0.5米，剥离比<5米。油页岩有时与煤，泥炭，粘土共生，应综合评价。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.1.4 石油

石油是以碳、氢为主，组成非常复杂的碳氢化合物。石油常与天然气、沥青共生，有时还有油页岩等，应注意综合评价。最低工业油流标准列于表2.4.4。

表 2.4.4 最低工业油流标准

井深，m / 产量，t/d		<500	500～1000	1000～2000	2000～3000	>3000
原油	陆地	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0
	海上		10	20	30	50

注：1.一般含油圈闭均应有3口以上的探井发现工业油流后，初步搞清产油层位，储层岩性、物性和原油性质条件下可以计算探明储量才叫油田；

2.面积小于1km²的油田，有一口探井获工业油流也可计算储量(探明储量)。

2.4.1.5 天然气

天然气是一种气态的矿物能源资源，还是重要的有机化工原料，由于天然气资源丰富，使用经济效益好，其用量正在增长。天然气与石油关系密切，煤和油页岩矿区也常有天然气，天然气油田中常有一定量硫化氢、氮、氦，应注意综合回收，最低工业气流标准列于表2.4.5。

表 2.4.5 最低工业气流标准

产井深，m		<500	500～1000	1000～2000	2000～3000	>3000
产量，m³/d	陆地	500	1000	3000	5000	10000
天然气	海上		10000	30000	50000	100000

2.4.1.6 铀

铀是放射性物质，具有核裂变现象，是现今原子能能源，既是核工业原料，又是发电能源。铀矿物和含油矿物已发现170多种，其中有实用意义的约20～30种，主要有沥青铀矿、晶质铀矿、钙铀云母、钒钾铀矿、钒钙铀矿、钛铀矿等。一般工业要

地信网论坛
bbs.3s001.com

求：边界品位0.03%；工业品位0.05%，可采厚度0.7米，夹石剔除厚度0.7米，小于可采厚度的薄矿体可采用米百分值。在火山岩型、砂岩型、碳硅泥岩型等铀矿床中，一般含有Mo，Re，Ag，Pb，Zn，，Cu，Ni，Ge，Se，F，P，V等有用元素，应注意综合回收。

2.4.1.7 钍

钍也是放射性物质，可用于能源和非能源，目前主要用于非能源方面。主要矿物：方钍石，钍石，独居石。一般工业要求：独居石型钍矿床的独居石矿物100～300克/米^3，独居石含ThO_2 4%；方钍石、钍石矿床，含$ThO_2$0.1%。

2.4.2 黑色金属矿产

2.4.2.1 铁

铁在自然界中大多是铁的氧化物、硫化物和含铁碳酸盐以及含铁硅酸盐等矿物。主要有：磁铁矿、赤铁矿、镜铁矿、菱铁矿、褐铁矿和针铁矿。一般工业要求列于表2.4.6，表2.4.7和表2.4.8。

表 2.4.6 炼钢用铁矿石一般工业要求（原称平炉富矿）

矿石类型	TFe %	SiO_2 %	S %	P %	Cu %	Pb、Zn、As、Sn %
磁铁矿石 赤铁矿石	≥50～60	≤8～13	≤0.1～0.15	≤0.1～0.15	≤0.2	均≤0.04

注：1.平炉矿石入炉块度一般为25～250mm；
2.转炉矿石入炉块度一般为10～50mm。

铁矿床中常伴生钒，钛，钴，铜，镍，铅，锌，锡，铬，钼，硫，磷，镓，锗，硼，铂族元素，稀有、稀土元素及铀等。当这些元素超过一定量时，成为有害组分，通过选矿分离并富集后，它又变成了有用组分，在勘探中应查明伴生元素情况并作出评价。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.7 炼铁用铁矿石一般工业要求（高炉富矿）

矿石类型	TFe，%	SiO_2，%	S，%	P，%	其他，%
磁铁矿或赤铁矿石	≥50		≤0.3	≤0.25	Cu≤0.1～0.2 Pb≤0.1 Zn≤0.05～0.1 Sn≤0.08 F≤0.1 As≤0.04～0.07
褐铁矿石或菱铁矿石	≥50		≤0.3	≤0.25	
自熔性矿	≥40	≤10	≤0.3	≤0.25	

注：1.入炉块度：一般为8～40mm；

2.菱铁矿含量是指扣除烧损后的含量；

3.其他：碱性矿石为$(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)>1.2$；

自熔性矿石为 $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)=0.8\sim1.2$；

酸性矿石为 $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)<0.5$；

半自熔性矿石为 $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)=0.5\sim0.8$；

磁铁矿石为MFe/TFe≥85%（MFe即磁性铁）；

混合矿石为MFe/TFe85～15%（TFe全铁）；

赤铁矿石为MFe/TFe≤15%；

可采厚度为2～4m，夹石剔除厚度1～2m（露采）；

可采厚度为1～2m，夹石剔除厚度1m（地下开采）。

表 2.4.8 需选矿石一般工业要求

矿石工业类型	TFe①，%	
	边界品位	工业品位
磁铁矿石	20	25
赤铁矿石	25	28～30
菱铁矿石	20	25
褐铁矿石	25	30

① 如果易采易选，经济效果好或含有可供综合回收有价元素则TFe品位可要求低些；如硅酸铁、硫化铁，铁白云石含量较高时则TFe可要求高一些。

其参考指标列于表2.4.9。

2.4.2.2 锰

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.9 铁矿中伴生有价元素回收参考指标

元素	Co	Cu	Ni	Pb	Zn	Mo
含量，%	0.02	0.1～0.2	0.1～0.2	0.2	0.5	0.02
赋存于	硫化物	硫化物	硫化物	硫化物	硫化物	硫化物
元素	S	V_2O_5	P_2O_5	U	Sn	TiO_2
含量，%	2～4	0.15～2	1～2	0.005	0.1	5
赋存于	硫化物	铁矿物	磷灰石	均质油	铁精矿	钛铁矿

表 2.4.10 冶金用锰一般工业要求

自然类型	工业分类	品级	Mn，% 边界品位	Mn，% 单工程平均品位	Mn+Fe %	Mn/Fe	每1%Mn允许含磷量，%	SiO_2 %
氧化锰矿石	富锰矿石	I	35	40		≥6	≤0.004	≤15
		II	30	35		≥4	≤0.005	≤25
		III	18	30		≥3	≤0.006	≤35
	贫锰矿石		10～15	18				
	铁锰矿石	I	20	25	≥50		≤0.2（P总量）	≤25
		II	15	20	≥40		≤0.2（P总量）	≤25
		III	10	15	≥30		≤0.2（P总量）	≤35
碳酸锰矿石	富锰矿石		15	25		≥3	≤0.005	≤25
	贫锰矿石		10	15				
	铁锰矿石		10	15	≥25		≤0.2(P总量)	≤35
	含锰矿石		8	12	碱性矿石			

注：1.灰质氧化矿（脉石以方解石为主，碱度≥0.8，烧失量≥18%）的评价以碳酸锰处理；
2.自熔性碱性锰矿石可酌量降低其富锰指标；
3.当碳酸锰矿石烧失量较高，原锰略低于25%，焙烧后锰含量可达氧化锰矿石标准时，也可作为富锰矿石；
4.可采厚度≥0.5～0.7m，夹石剔除厚度≥0.2～0.3m，堆积矿净矿石含矿率≥15%。

地信网论坛
bbs.3s001.com

锰以氧化物、氢氧化物、硫化物、碳酸盐、硅酸盐和硼酸盐状态产出。主要矿物有：硬锰矿、软锰矿、黑锰矿、菱锰矿、水锰矿、锰方解石等150多种。锰矿石可作冶炼用锰；电池用锰；化工用锰，碳酸锰矿粉，富锰渣和锰烧结矿等用。

一般工业要求列于表2.4.10。综合评价锰矿石时应根据：

（1）锰矿石的用途不同，对矿石含锰量等亦不同，高锰矿石可制作电池，应单独圈出。

（2）在锰矿中常有铁、钴、镍及有色、贵金属等伴生，应综合利用。伴生元素综合利用参考指标列于表2.4.11。

表 2.4.11 锰矿伴生元素综合利用参考指标

元素或组分	Co	Ni	Cu	Pb	Zn
含量，%	0.02～0.06	0.1～0.2	0.1～0.2	0.4	0.7
元素或组分	Au	Ag	B_2O_3	S	含锰灰岩熔剂
含量，%	0.2g/t	5～10g/t	1～3	2～4	Mn=4～8

2.4.2.3 铬

自然界已发现的铬矿物和含铬矿物近30种，主要为铬尖晶石类矿物，其通式为：$(Fe, Mg)O\cdot(Cr, Al, Fe)_2O_3$。有工业价值的铬矿物有：铬铁矿、铝铬铁矿。铬尖晶石类是由五种基本组分组成，各组分之间广泛存在着类质同象的置换，其Cr_2O_3含量变化在18～62%。一般工业要求列于表2.4.12和表2.4.13。

铬矿中常伴生铂族（以锇，铱，钌为主）及钴镍等元素，当$\Sigma Pt>0.2$克/吨，$Co>0.02\%$，$Ni>0.2\%$时，应作出评价。铬铁矿的围岩如橄榄岩，蛇纹岩等可作耐火材料和钙镁磷肥配料；围岩里有石棉、滑石、水镁石、菱镁矿等，也应注意回收。

2.4.2.4 钛

含钛矿物种类繁多，主要有三种：金红石；钛铁矿；钛磁铁

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.12 冶金用铬一般工业要求

类型		Cr_2O_3，%		有害杂质允许含量，%		
		边界品位	工业品位	SiO_2	P	S
原生矿	富矿	≥25	≥35	≤10	≤0.07	≤0.05
	贫矿	≥5～8	≥8～10	—	—	—
砂矿		≥1.5	≥1.5	—	—	—

注：1.可采厚度≥0.3～1m（露采可适当加大）夹石剔除厚度≥0.3～0.5m；

2.铬铁比应≥2，当低时，即使Cr_2O_3高也难以冶炼高标号铬铁合金；

3.MgO含量不应过高。

表 2.4.13 耐火材料用铬铁矿要求

品级	Cr_2O_3 %	SiO_2 %	CaO %	用途
Ⅰ	≥35	≤8	≤2	作铬砖及铬镁砖用
Ⅱ	≥32	≤11	≤3	

注：1.可采厚度≥0.5～1m；

2.夹石剔除厚度≥0.3～0.5m；

3.化工用铬铁矿Cr_2O_3≥30%，$\frac{Cr_2O_3}{Fe}$≥2～2.5，SiO_2少量。

表 2.4.14 一般工业要求

矿石类型		边界品位	工业品位	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
原生矿，TiO_2%	金红石	1	1.5	≥0.5～1	≥0.5～1
砂矿，kg/m³	金红石	≥1	≥2		
	钛铁石	≥10	≥15		

矿。一般工业要求列于表2.4.14。钛铁矿综合评价是：钛铁矿一般伴生于钒钛磁铁矿床中；原生金红石矿床中常伴生独居石、锆石(铪)、石榴石等；高岭土矿、石墨或硅线石矿中常伴生金红石。砂矿中也常伴生钛铁矿。要注意综合评价。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.2.5 钒

自然界的钒多呈分散状态，常与其他元素伴生产出，富集成工业矿床很少。较重要的含钒矿物有：绿硫钒矿、钒云母、硫钒铜矿、钒铅锌矿。

一般工业要求：(1) 单独矿床，边界品位$V_2O_5$0.5%，工业品位$V_2O_5$0.7%；(2) 钒为伴生组分矿床，V_2O_5≥0.1~0.5%。

钒的单独矿床很少，多伴生在磁铁矿、煤矿（石煤）、铀矿、磷矿和铝土矿等矿床中，应注意回收。国外发现在多金属矿氧化带中、杂色岩系中的钒钾铀矿和钒云母矿床中含钒铀铜；磷块岩的个别矿床中含$V_2O_5$0.4%；沥青岩矿床含钒最富地段V_2O_5 40%，一般为6.2%。可综合回收钒的沉积矿床有海滨金红石、钛铁矿砂矿、高硫石油和鲕状铁矿等。美国霞石正长岩与结晶片岩之间的泥岩带内，V_2O_5高达1%。粘土矿物是钒的主要富集矿物。

2.4.3 有色金属矿产

2.4.3.1 铜

自然界中含铜矿物主要有铜的硫化物、铜的氧化物、自然铜、铜的硫酸盐、碳酸盐、硅酸盐等，约280种。其中主要的有16种。如自然铜、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、黝铜矿、砷黝铜矿、硫砷铜矿、赤铜矿、黑铜矿、孔雀石、蓝铜矿、硅孔雀石、水胆矾、氯铜矿及硫酸铜等。目前主要利用的是黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿和孔雀石等。一般工业要求列于表2.4.15。当伴生元素达到表2.4.16所列含量时，应作出综合评价。

2.4.3.2 铅

我国已发现的铅矿物和含铅矿物有42种，具有工业意义的有11种，常见的有方铅矿、车轮矿、白铅矿、铅矾、钼铅矿、砷铅矿、磷氯铅矿。

一般工业要求列于表2.4.17。在铅锌矿床中常伴生铜、钨、锡、钼、铋、砷、汞、钴、镍、金、银、铂族、稀有、稀散、铀

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.15 铜矿一般工业要求

项 目	硫化矿石		氧化矿
	坑 采	露 采	
边界品位Cu，%	0.2～0.3	0.2	0.5
工业品位Cu，%	0.4～0.5	0.4	0.7
可采厚度，m	≥1～2	≥2～4	≥1
夹石剔除厚度，m	≥2～4	≥4～8	≥2

注：1.硫化铜矿含氧化铜<10%（Cu中占有率）；

2.混合矿含氧化铜10～30%(Cu中占有率)；

3.氧化矿含氧化铜30%以上(Cu中占有率)；

4.铜精矿中有害组分为As、F、Zn、MgO。

表 2.4.16 铜矿伴生元素综合评价参考表

元素或组分	Pb	Zn	Mo	Co	WO_3	Sn	Ni	Bi	Au	Ag	Cd
含量，%	0.2	0.4	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1g/t	1g/t	>0.001

元素或组分	Se	Te	Ga	Ge	Re	In	Tl	铂族	As	S	Sb
含量%	0.001	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	>0.001	—①	—①	—①	—①

①视按情况而定。

表 2.4.17 铅矿一般工业要求

项 目	硫化矿	混合矿	氧化矿
边界品位，%	0.3～0.5	0.5～0.7	0.5～1.0
工业品位，%	0.7～1.0	1～1.5	1.5～2.0
可采厚度，m	≥1～2	≥1～2	≥1～2
夹石剔除厚度，m	≥2～4	≥2～4	≥2～4

注：1.硫化矿的氧化率<10%，氧化矿的氧化率>30%；

2.小于可采厚度时，可按米百分值计算；

3.铅锌矿可按Pb+Zn4～5%(硫化矿)，6～8%(混合矿)，8～10%(氧化矿)计算。

地信网论坛
bbs.3s001.com

及硫铁矿、萤石、天青石、重晶石等应注意回收。美国有含铅锌的油田水。

2.4.3.3 锌

锌常见矿物有闪锌矿、纤维锌矿、铁闪锌矿、菱锌矿、异极矿、水锌矿等。

一般工业要求列于表2.4.18。在铅锌矿床中常伴生有价元素或矿物，如铜、钨、锡、钼、铋、砷、汞、钴、镍、金、银、铂族、稀有、稀散、铀、黄铁矿、萤石、天青石、重晶石等（表2.4.18），应注意综合回收。

表 2.4.18 铅锌矿伴生组分综合评价一般要求

伴生元素	Cu	WO_3	Sn	Bi	S	Sb	CaF	Au	As	Ag	Cd	In
品位，%	0.06	0.06	0.08	0.02	4	0.4	5	>0.1g/t	0.2	>2g/t	0.01	0.001

伴生元素	Ga	Ge	Se	Te	Tl	Hg	Cl
品位，%	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.02

2.4.3.4 铝

铝矿在自然界中有250种，主要有刚玉，一水硬铝石，一水软铝石，三水铝石、高岭石、红柱石、蓝晶石、矽线石，明矾石、霞石、水铝英石等。

一般工业要求列于表2.4.19。铝土矿含有镓、钒、铌、钽、钛、铈族及放射性元素，目前已综合回收的有镓。沉积型铝矿常共生硫铁矿、熔剂灰岩，煤层，油页岩等，红土型铝矿常伴生钴土。国外把提取氧化铝后的红泥作中和酸性土壤的土壤调节剂和颜料，铝土矿的副产品有镍、钴、铂、金、银、铌和钍等。

2.4.3.5 钨

钨矿物和含钨矿物有20余种，主要有黑钨矿、白钨矿。一般工业要求列于表2.4.20。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.19 一水硬铝石型一般工业要求

矿床类型		一水硬铝石型	
		沉积型矿床	
项目		露采	坑采
边界品位	Al_2O_3/SiO_2	1.8～2.6	1.8～2.6
	Al_2O_3，%	≥40	≥40
块段工业品位	Al_2O_3/SiO_2	≥3.5	≥3.8
	Al_2O_3，%	≥55	≥55
可采厚度，m		0.5～0.8	0.8～1
夹石剔除厚度，m		0.5～0.8	0.8～1
剥采比，m^3/m^3		10～15	

注：1.其他类型矿床工业要求尚待研究；

2.有害成分为S、CO_2、MgO、P_2O_5、Fe；

3.Al_2O_3/SiO_2简写A/S；

4.根据含铁(Fe_2O_3)可分低铁型(<3%)，含铁型(3～6%)，中铁型(6～15%)，高铁型(>15%)；

5.根据硫可分低硫型(≤0.3%)，中硫型(0.3～0.8%)、高硫型(>0.8%)。

钨矿综合回收有价元素很多，除表2.4.21中有关组分外，尚有砷、磷、压电水晶和熔炼水晶、萤石等。

2.4.3.6 钼

自然界已知钼矿物和含钼矿物约有30种，其中有工业价值的是辉钼矿，其他矿物尚有钼华、钼铅矿、铁钼华、钼钙矿和蓝钼矿。

一般工业要求列于表2.4.22。钼矿中常伴生钨、铋、铜、铅、锌、钴、铁、金、铌、钽、铼、铟、硒、碲、铀、硫等，尤其是铼（表2.4.23）。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.20 钨一般工业要求

矿床类型	石英大脉型	石英细脉带	石英细脉浸染型	层控型	砂卡岩型
边界品位WO_3%米百分值	0.08～0.1 0.064～0.08	0.1	0.1	0.1	0.08～0.1
工业品位WO_3%米百分值	0.12～0.15 0.096～0.12	0.15～0.2	0.1～0.2	0.15～0.2	0.15～0.2
应用米百分值厚度，m	<0.8				
可采厚度，m		1～2	1～2	0.8～2.0	1～2
夹石剔除厚度，m		3	2～5	2～3	3

表 2.4.21 钨矿综合回收参考指标

元素或组分	含量，%	元素或组分	含量，%
Cu	0.05	Ta_2O_5	0.01
Zn	0.5	Nb_2O_5	0.08
Pb	0.2～0.3	BeO	0.03
Co	0.01	Sb	0.5
Sn	0.03	Li_2O	0.3
Mo	0.01	TR_2O_3	0.03
Bi	0.03	S	2

注：1.对Au、Ag、Ga、Ge、Cd、In、Sc含量有多少回收多少；
2.Ta_2O_5和Nb_2O_5指呈单矿物含量；
3.其他元素也应考虑回收。

有的矿床伴生萤石、钽、钪。钼精矿含铼数克/吨，铜钼矿床中铼可达400～800克/吨，钨钼矿床中含铼通常小于30克/吨，有时可达130克/吨。

2.4.3.7 汞

汞矿物和含汞矿物约20多种，主要有自然汞、辰砂、灰硒汞矿、辉汞矿、甘汞等。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.22 钼矿一般工业要求

矿石类型	硫化矿石	
	露采	坑采
边界品位Mo，%	0.03	0.03～0.05
工业品位Mo，%	0.06	0.06～0.08
可采厚度，m	≥2～4	≥1～2
夹石剔除厚度，m	≥4～8	≥2～3

表 2.4.23 钼矿伴生组分综合回收参考表

元素	WO_3	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Bi	Re	Sc
含量，%	0.06	0.1	0.2	0.4	10	1	0.03	10g/t	—

一般工业要求列于表2.4.21。汞矿常伴生分散元素硒、铊、放射性铀等，应注意综合回收。砷、锑对冶炼不利。硒、铁也是汞产品（朱砂）的有害杂质。此外尚伴生铜、钼、锑、砷、金、银、萤石等。

表 2.4.24 汞矿一般工业要求

项目	含量
边界品位Hg，%	0.04
工业品位Hg，%	0.08～0.1
可采厚度，m	≥0.8～1.2
夹石剔除厚度，m	≥2～4
含矿系数×矿体平均品位	≥0.04

注：1.低于可采厚度时可采用厚度×品位表示；

2.一般矿床平均品位应在0.12～0.15%才详查。

2.4.3.8 钴

已知钴矿物和含钴矿物约100多种，多伴生于镍、铜、铁、铅、锌等矿床中，含量较低，在铁矿中注意钴。单独钴矿床一般分为砷化钴矿床、硫化钴矿床和钴土矿三类，前两种工业利用性能和工业要求大体相同。一般工业要求列于表2.4.25。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.25 钴矿一般工业要求

矿石	边界品位Co %	工业品位Co %	边界含矿率 kg/m³	工业含矿率 kg/m³	可采厚度 m	夹石剔除厚度 m	剥离比
硫化钴砷化钴	≥0.02	≥0.03～0.06			≥1	1	
钴土矿	≥0.3	≥0.5	≥1	3～5	≥0.3～1		≤1

注：1.钴土矿粒度>0.3cm；

2.含矿率指钴土矿矿物含量；

3.边界和工业品位指钴土矿中指钴金属在钴土矿中含量。

钴除单独矿物外，大量分散在矽卡岩型铁矿、钒钛磁铁矿、热液多金属矿、各类型铜矿、沉积钴锰矿、硫化铜镍矿和硅酸镍等矿床中，其品位虽低但规模较大，是提取钴的主要来源。一般选冶性能好的矿床含钴量在0.01%，黄铁矿中钴品位在0.2%就有价值，如多金属矿而综合回收效果好，则有多少算多少，回收困难的矿含钴高（万分之几的）也不行。

海底锰结核是含钴的一种潜在资源，主要分布于太平洋洋底，据分析，结核中所含有价值的金属百分比为：锰24；镍1.6；铜1.4；钴0.21其他0.3。世界红土型含钴铁-镍矿或铬的红土矿含铁38～50%；钴0.01～0.1%；镍1～2.00%；铬2.75%。

2.4.3.9 镍

镍矿物主要有镍黄铁矿、紫硫镍（铁）矿、针镍矿、红砷镍矿、砷镍矿、暗镍蛇纹石、镍绿泥石、绿高岭石、绿镍矿、镍磁铁矿等。一般工业要求列于表2.4.26。

硫化镍按硫化率即呈硫化物状态的镍与全镍之比将矿石分为：

原生矿： $S_{Ni}/T_{Ni}>70\%$；

混合矿： S_{Ni}/T_{Ni} 45～70%；

氧化矿： $S_{Ni}/T_{Ni}<45\%$。

硅酸镍按氧化镁含量分为：铁质矿石：MgO<10%；铁镁

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.26 镍矿一般工业要求

项目	硫化镍矿			氧化镍硅酸镍矿
	原生矿		氧化矿	
	坑采	露采		
边界品位Ni，%	0.2～0.3	0.2～0.3	0.7	0.5
工业品位M，%（单工程，单矿层计算）	0.3～0.5	0.3～0.5	1	1
可采厚度，m（真厚度）	≥1	≥2	同原生矿	1
夹石剔除厚度，m(真厚度)	≥2	≥3	同原生矿	1～2

注：1.混合矿与原生矿同要求；

2.可采用米百分值于薄矿层。

表 2.4.27 镍矿中伴生组分要求

伴生元素	Pt，Pd	Ir,Os,Ru,Rh	Au	Ag	Co	Sc	Te
含量%	0.03g/t	0.02g/t	0.05～0.1 g/t	1.0g/t	0.01	0.0005	0.0002

注：在蛇纹岩中常含镍。

表 2.4.28 一般工业要求

边界品位Sb，%	工业品位Sb，%	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
0.7	1.5	≥1	≥2

质矿石MgO10～20%；镁质矿石：MgO＞20%。镍矿石主要有害杂质是铜（在硅酸镍矿）铅、锌、砷、氟、锰、锑、铋、铬等。

硫化镍普遍含铜，其次常伴生铁、铬、钴、锰、铂族、金、银、硒和碲。部分伴生组分含量要求列于表2.4.27。加拿大萨德伯里硫化铜镍矿居世界第一位，镍品位0.7～1.46%，铜0.8～1.9%，个别矿体钴0.006～1%，并伴生金、银、铂、钯、硒和碲。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.3.10 锑

已知锑矿物和含锑矿物120种，有工业价值仅10种，辉锑矿是主要锑矿物，其次有方锑矿、锑华、天然锑、黝铜矿、硫汞锑矿。一般工业要求列于表2.4.28。

我国锑矿常与金、钨、铅、锌、汞以及锡、铜、铋、砷、硫、铁、镍、钴、锰、镉、铂、钯、钌、硒等伴生。当杂质超过As>0.05%；Fe>0.02%；硫>0.04%；铜>0.01%或总杂质>0.15%时不能以锑锭出售。我国锑矿多系单金属矿床，近年来锑多金属共生矿有所增加，锑多与钨、金、汞或铅、锌共生，应考虑综合评价。

2.4.3.11 铋

铋矿物主要有辉铋矿、泡铋矿、铋华、自然铋、菱铋矿、铜铋矿、方铅铋矿。铋矿床很少，都与铅、锌、钨、钼、铜、锡等伴生，在单独开采时，最低工业品位为Bi0.5%。伴生综合回收矿床铋在0.1～0.05%或更低（最低工业平均品位Bi）均可回收。

2.4.3.12 锡

在自然界中锡主要呈自然元素，金属互化物、氧化物、氢氧化物、硫化物、硫盐、硅酸盐、硼酸盐等形式存在，有工业意义的主要矿物有锡石、黄锡矿、圆柱锡矿、硫锡铅矿和辉锑锡铅矿。一般工业要求列于表2.4.29和表2.4.30。

原生锡矿中常伴生钨、铅、锌、铜、锑、铌、钽、铍、铋

表 2.4.29 原生锡一般工业要求

项目	要求
边界品位Sn，%	0.1～0.2
工业品位Sn，%	0.2～0.4
可采厚度，m	0.8～1
夹石剔除厚度，m	2

注：1.坑采矿体厚度小，可按米百分值计；

2.胶体锡、硫化锡含量占总量大于10%时，应提高指标。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.30 砂锡矿一般工业要求

项目	化学法	重砂法(Sn>60%)
边界品位Sn，%	0.02	锡石100～150g/m³
工业品位Sn，%	0.04	锡石200～1300g/m³
可采厚度，m	≥0.5	≥0.5
夹石剔除厚度，m	≥2	≥2

注：指锡石纯度>60%才行。

等，有时还有硫、砷、铁。砂锡矿通常共生或伴生褐钇铌矿、白铅矿、闪锌矿、方铅矿、自然金、黑钨矿、白钨矿、独居石、金红石以及铌、钽等稀有元素，应注意回收。

2.4.3.13 金

已发现的金矿物近20种，分自然元素、天然合金和金属互化物，硫化物，硒化物，碲化物和锑化物等。主要以自然金产出，其次是碲化物。金与硫化矿床或硫化物关系密切，也常与银共生。

一般工业要求列于表2.4.31和表2.4.32。综合评价要求列于表2.4.33。

金矿床伴生有用组分多，岩金中有银、铜、铅、锌、钨、

表 2.4.31 岩金矿一般工业要求

项目	指标
边界品位Au，g/t	1～2
工业品位Au，g/t	3～5
矿床平均品位Au，g/t	5～8
可采厚度，m	≥0.8～1.5
夹石剔除厚度，m	≥2～4
无矿段剔除长度	上、下坑道对应时10～15m
同上	上、下坑道不对应时20～30m

注：微细粒浸染金矿床①以极细颗粒(<10μm)浸染于砂质，含炭质灰岩中，新西兰某沉积岩中含该类型金85g/t，银500g/t。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.32 砂金矿一般工业要求

项目	露采						地下开采
	全面开采						
	采金船开采				水枪开采	分别开采	
	南方		北方				
	50～100L	150～300L	50～100L	150～300L			
混合砂边界品位，g/m³	0.05～0.07	0.04～0.06	0.06～0.08	0.05～0.07	0.1	0.3～0.5	
块段最低工业品位，g/m³	0.16～0.18	0.14～0.16	0.18～0.20	0.16～0.18	0.3	0.6～1.0	
最小可采厚度，m	30～35	40～60	30～35	40～60	20		
无矿地段剔除宽度，m	30～35	40～60	30～35	40～60			
矿体最低可采量，万m³	150～450	900～2000	100～300	1000～1400			
矿砂层边界品位，g/m³							1
最低工业品位，g/m³							3
采幅高度，m							1.3～1.5

表 2.4.33 岩金矿伴生综合回收要求

元素	Cu	Pb	Zn	WO_3	Sb	Mo	S
含量，%	0.1	0.2	0.4	0.05	0.4	0.01	2

注：1.表中均指硫化物含量；

2.金矿中普遍含银。

锑、铋、钼、硫、钇等，在砂金中有金红石，石榴石，钛铁矿、白钨矿，独居石，刚玉等。

2.4.3.14 银

银矿物有自然银、金银矿、辉银矿、硫锑铜银矿、角银矿、淡红银矿、硒银矿、碲银矿等。上述银矿物除独立矿物存在外还

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.34 银矿一般工业要求

项目	指标
边界品位Ag，g/t	40～50
工业品位Ag，g/t	100～120
可采厚度，m	≥1
夹石剔除厚度，m	≥2～4

与方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等呈微细的连晶，也呈分散状态赋存在上述矿物中。一般工业要求列于表2.4.34。作为伴生组分，银和金一样，在冶炼铅、锌、金、铜时，可顺便回收，伴生银的工业指标一般未作规定。

银矿床中伴生有价元素铅、锌、金、镉、锗、镓、硫等。有色金属矿床中伴生大量金和银，有的小型铜矿伴生金相当于一个中型金矿储量，一个中型铅矿或铅锌矿、硫化矿（或氧化矿）中伴生银相当一个大型或特大型银矿，因此要正确评价，对金和银的赋存状态要重视研究，对金、银矿中伴生有价元素要综合回收。

2.4.3.15 铂族元素矿产

铂族元素包括铂、钯、铑、铱、钌、锇、铂族元素主要呈自然元素，自然合金、锑化物、硫化物、硫砷化物和铋碲化物的单矿物存在，部分呈类质同像存在于硫化物中，铂族矿物已发现80种，加上变种和未定名的已达200个。如自然铂矿、碲钯矿、硫锇矿、硫砷铱矿、砷钌矿、硫砷铑矿等。

一般工业要求列于表2.4.35。原生铂矿常与铜、镍、钴、铬、金、硒、碲等共生，其围岩也可利用。铂砂矿中铂常与金共并注意和基性岩，超基性岩有关矿床的矿产以便综合回收。

铂族元素过去认为与基性或超基性岩有关，如硫化铜镍矿、铬铁矿型，近年来在斑岩型铜钼矿，黄铁矿型铜矿，黑色页岩型铜矿、含铂锡石硫化物矿床。含铂铀硫化物矿床和岩浆晚期热液（中、低温）型矿床也发现铂族，如苏联塔尔纳赫矿床的铂族金

地信网论坛 bbs.3s001.com

表 2.4.35 铂族元素矿产一般工业要求

类型	类型	金属种类	边界品位 g/t	工业品位 g/t	块段品位 g/t	最小可采厚度 m	夹石剔除厚度 m
原生矿	超基性含铜镍矿床	(4:1) Pt+Pd	0.3～0.5	≥0.05	1.0	1～2	≥2
		Pt	0.25～0.42	≥0.42	0.84	1～2	≥2
		Pd	1.25～2.1	≥2.10	4.20	1～2	≥2
	伴生矿床	Pt, Pd		0.03			
		Os,Zr,Ru,Rh		0.02			
砂矿	松散沉积型矿床	Pt+Pd	0.03g/m³	≥0.1g/m³		0.5～1	≥1
		Pt	0.025g/m³	0.085g/m³		0.5～1	
		Pd	0.125g/m³	0.42g/m³		0.5～1	
	砂砾岩型矿床	Pt+Pd	0.1～0.5g/m³	1～2g/m³		0.5～1	
		Pt	0.85～0.42g/m³	0.84～1g/m³		0.5～1	
		Pd	0.42～2.1g/m³	4.2～8.4g/m³		0.5～1	

注：1.本表在金价<铂价时，提出的一般要求，如金价≈铂价，则一般工业要求可参考金的要求；2.铜镍矿床中铂族元素有多少算多少；3.其他类型矿床中铂族元素要注意其回收途径和难易再确定工业指标。

地信网论坛
bbs.3s001.com

属矿物中有大量铅、铋、锡和锑存在，说明这里的铂族金属是从低温热液中沉淀的。

2.4.4 稀有金属矿产

2.4.4.1 锂

已知锂矿物和含锂矿物有150种，常见20多种，主要是锂辉石、锂云母、铁锂云母。一般工业要求列于表2.4.36。锂常与铌、钽、铍、铷、铯、云母长石、萤石伴生。盐湖锂矿常伴生钠盐、钾、芒硝、镁盐，天然碱、硼、溴、碘等，要注意综合评价。

表 2.4.36 锂矿一般工业要求

矿床类型	边界品位，%		工业品位，%		可采厚度 m	夹石剔除厚度 m
	机选 LiO_2	手选锂辉石①	机选 LiO_2	手选锂辉石①		
花岗伟晶岩类矿床	0.4～0.6		0.8～1.1	5～8	≥1	≥2
碱性长石花岗岩类矿	0.5～0.7		0.9～1.2		≥1～2	≥1
盐湖矿床（卤水中氯化锂）			100mg/L			

①手选粒度>3cm，矿物品位>2～3%就适合手选，反之适于机选。

2.4.4.2 铷

铷无单独工业矿物，常分散在锂云母、铁锂云母、铯榴石和盐矿层中，矿泉水中亦有。一般工业要求列于表2.4.37。

表 2.4.37 铷矿一般工业要求

矿床类型	边界品位①（机选）%	工业品位①（机选）%
含锂云母矿石的碱性长石花岗岩类与花岗伟晶岩类	0.04～0.06	0.1～0.2
盐湖矿床		0.06

①品位指Rb_2O含量。

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.4.3 铯

目前已知铯矿物四种，常见有铯榴石。铯大多数分散在锂辉石、锂云母、铁锂云母中。钾长石、天河石、钾盐和光卤石等矿物中与钾、钠、锂呈类质同像。

铯矿一般工业要求：花岗伟晶岩类矿床，手选铯榴石工业品位为0.3%；含锂云母矿石的碱性长石花岗岩类与花岗伟晶岩类矿床机选氧化物0.05～0.06%；盐类矿床、机选氧化物为0.02%。

依国外报导，富含镁钙钠的高矿化地下水和氯质盐水中铯高达11.8毫克/升和铷5～20毫克/升。

2.4.4.4 铍

铍矿物有60多种，主要是绿柱石，似晶石，金绿宝石等。铍的一般工业要求列于表2.4.38。铍矿床中锂、钽、铌、铯、钨、锡、铅、锌及云母等伴生。

表 2.4.38 铍矿的一般工业要求

矿床类型	边界品位，%		工业品位，%		可采厚度 m	夹石剔除厚度 m
	机选BeO	手选绿柱石	机选BeO	手选绿柱石①		
气成热液矿床	0.04～0.06	0.05～0.1	0.08～0.12	0.2～0.7	0.8～1.5	≥2
花岗伟晶岩矿床	0.04～0.06	0.05～0.1	0.08～0.12	0.2～0.7	0.8～1.5	≥2
碱性长石花岗岩矿床	0.05～0.07		0.1～0.14		1～1.5	≥4
残坡积类矿床		0.6kg/m³		2～2.5kg/m³		

① 手选粒度大于0.5cm，品位大于0.1～0.2%。

2.4.4.5 铌与钽

已知铌、钽矿物和含铌钽矿物有130种，常见30多种，主要有铌铁矿、钽铌铁矿、铌钽铁矿、钽铁矿等，$Ta_2O_5<15\%$称铌铁矿；$Nb_2O_5<10\%$称钽铁矿；$Nb_2O_5>Ta_2O_5$称钽铌铁矿，反

地信网论坛
bbs.3s001.com

之称铌钽铁矿；$\frac{Fe}{Mn}<1$时称铌锰矿、钽锰矿系列。

铌、钽矿一般工业要求列于表2.4.39。铌、钽常与锂、铍、铯、锆、锡、钍等伴生，在砂矿中常与独居石、锡石、金红石、钛铁矿、锆英石伴生。长石、石英、宝石、玉石和彩石中均有可能伴生，应注意回收。

表 2.4.39 铌、钽矿一般工业要求

矿床类型	$\frac{Ta_2O_5}{Nb_2O_5}$	边界品位，%	
		$(Ta+Nb)_2O_5$	Ta_2O_5
花岗伟晶岩类型	>1.0	0.012～0.015	0.007～0.008
碱性长石花岗岩类	>1.0	0.015～0.018	0.008～0.01
风化壳类		0.008～0.01	80～100g/m³
原生铌矿类		0.05～0.06	
河流类砂矿床		0.004～0.006	40g/m³

矿床类型	工业品位，%		最小可采	夹石剔除
	$(Ta+Nb)_2O_5$	Ta_2O_5	厚度，m	厚度，m
花岗伟晶岩类型	0.022～0.026	0.012～0.014	0.8～1.5	≥2
碱性长石花岗岩类	0.024～0.028	0.012～0.015	1.5～2.0	≥4
风化壳类	0.016～0.02	250～280g/m³	0.5～1.0	
原生铌矿类	0.08～0.12		5.0	≥5
河流类砂矿床	0.01～0.012	>250g/m³	0.5	≥2

铌、钽是战略物资，也是工业必需品，目前正在积极寻找代用品。

2.4.4.6 锆与铪

已知锆矿物有50种，主要有锆石、含铪锆石、异性石。一般工业要求列于表2.4.40。锆石常与烧绿石、钛铌钙矿伴生，砂矿中常与钛铁矿、金红石、独居石、磷钇矿、锡石、铌铁矿伴生。

2.4.4.7 铯

铯矿物以天青石，菱锶矿为主。一般工业要求列于表2.4.41。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.40 锆与铪矿一般工业要求

矿床	边界品位		工业品位		最小可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
	ZrO_2，%	锆英石 kg/m³	ZrO_2，%	锆英石 kg/m³		
海滨砂矿	0.04～0.06	1～1.5	0.16～0.24	4～6	0.5	
风化壳矿	0.3		0.8		0.8～1.5	
内生矿	3.0		8.0		0.8～1.5	≥2
含铪矿床	锆精矿中含$HfO_2$0.5～2%时可作铪精矿，低于此数时可综合回收					

表 2.4.41 锶矿一般工业要求（天青石）

项目	指标	
边界品位	$SrSO_4$，%	≥15
工业品位	$SrSO_4$，%	≥25
可采厚度	m	≥1
夹石剔除厚度	m	≥1

锶与钙、镁元素化学性质相近，在白云岩、石灰岩，含石膏粘土层，岩盐、卤水中有锶时，应综合评价。

2.4.5 稀土金属元素和稀散元素矿产

2.4.5.1 稀土金属元素

稀土元素包括重稀土即钇组稀土：钇、铽、镝、钬、铒、铥、镱、镥共九种，轻稀土即铈组稀土：镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕七种，另有钪共17种元素。已知稀土矿物和含稀土矿物250种，我国主要稀土矿物有独居石、氟碳铈矿、氟菱钙铈矿、磷钇矿、硅铍钇矿、褐钇铌矿、褐帘石、烧绿石等。一般工业要求列于表2.4.42。

稀土矿石或砂矿与钛铁矿、锆英石、金红石、锡石、黑钨矿富集在一起，铌-稀土-铁矿床可回收铁、铌。另外还有锰、钍、钛、锆等。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.42　稀土元素一般工业要求

项　目	轻稀土		重稀土
	含氟碳铈矿，独居石矿	独居石砂矿，g/m³	含钇花岗岩和碳酸盐矿
边界品位，%	Ce_2O_3 1	矿物100～200	
工业品位，%	Ce_2O_3 2	矿物300～500	Y_2O_3 0.05～0.1%
可采厚度，m	≥2	≥1	≥1～2
夹石剔除厚度，m	≥2	≥1	≥2

项　目	重稀土	风化壳离子吸附型稀土	
	磷钇矿砂矿，g/m³		
边界品位，%	矿物 30	TR_2O_3，%	重稀土0.05 轻稀土0.07
工业品位，%	矿物50～70	TR_2O_3，%	重稀土0.08 轻稀土0.10
可采厚度，m	≥0.5	≥1	
夹石剔除厚度，m	≥2	≥2	

注：1.铁矿体含稀土不单独圈指标；

2.铁矿体夹层边界品位TR_2O_3≥1%，工业品位TR_2O_3≥2%；

3.铁矿体上下盘稀土白云岩；

4.离子型稀土可按TR_2O_3，边界品位0.03%，工业品位0.05%；富矿品位0.1%，可采厚度1m；

5.离子型稀土当花岗斑岩型时边界品位0.07%，工业品位0.1%；为熔岩型时边界品位0.05%，工业品位0.08%，可采厚度1m，夹石剔除厚度4m。

钪主要赋存在铌铁、水锆石、锂云石、白云石、锡石、黑钨矿、绿柱石、电气石中，独立矿物有钪钇石，目前主要从黑钨矿、锡石精矿中回收，当Sc_2O_3含0.02%以上时（矿物中）就可回收。

2.4.5.2　稀散元素

锗　一般工业要求列于表2.4.43。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.43 锗的一般工业要求

矿　石	铅锌矿石	锌精矿	氧化铅锌矿	煤　矿
含量Ge，%	0.001	0.01	1.0.002以上 2.0.004～0.005	0.001～0.1

矿　石	赤铁矿石	铜或富银矿石	铁镁矿石	温泉水中	炼焦烟尘中
含量Ge，%	0.008	0.002	0.001～0.01	0.005	不限

镓　一般工业要求列于表2.4.44。

表 2.4.44 镓的一般工业要求

矿　石	铝土矿石	黄铁矿石	闪锌矿石	锗石中	煤矿中
含量Ga，%	0.01～0.002	0.02～0.03	0.01～0.02	0.1～0.8	0.003～0.005

矿　石	明矾石中	岩浆岩中	煤灰中	煤气厂灰尘中
含量Ga，%	0.0022～0.0044	0.01～0.04	0.01～0.1	0.3～0.5

铟　一般工业要求列于表2.4.45。

表 2.4.45 铟的一般工业要求

矿　石	赤铁矿石中	含Cu、Pb、Zn的锡石、黑钨矿	铜钼矿石	多金属硫化矿	含锌黄铁矿
含量In，%	0.1	0.01～0.03	0.001～0.003	0.0005～0.001	0.001～0.03

铊　一般工业要求列于表2.4.46。

铼　一般工业要求列于表2.4.47。

镉　一般工业要求列于表2.4.48。

硒　一般工业要求列于表2.4.49。

碲　一般工业要求列于表2.4.50。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.46 铊一般工业要求

矿 石	铊矿床	白铁矿，黄铁矿中	黄铁矿和铜矿石	锑汞矿石中
含量Tl，%	0.01～0.1	0.1～0.2	0.0025～0.1	>0.01

矿 石	铅锌矿石	变质锰矿床氧化锰矿	盐类矿中
含量Tl，%	0.001～0.01	>0.01	0.002～0.008

表 2.4.47 铼一般工业要求

矿 床	钼矿和铜钼矿石中	铜钼精矿	辉铜矿精矿	辉钼矿精矿
含量Re，%	0.0002	0.005～0.009	0.001～0.03	0.001～0.2

表 2.4.48 镉一般工业要求

矿 石	锌矿或铅锌矿石	铅锌精矿中
含量Cd，%	0.01～0.09	0.03～0.2

表 2.4.49 硒一般工业要求

矿 石	铜镍矿硫化物中	硒矿床	铜锌黄铁矿石
含量Se，% 含硒凝灰岩，灰质页岩中黄铁矿中 0.7～1.8	0.002～0.017 自然硫矿床 0.2～0.3	0.08 火山灰及斑脱岩中 0.003～0.005	0.0025～0.006 硫化物铁帽 0.01～0.1

矿 石	含铜黄铁矿	辉钴矿或辉锑矿碲化物矿	汞矿中
含量Se，% 含硒凝灰岩，灰质页岩中黄铁矿中 0.7～1.8	0.001～0.012 含铜砂页岩 0.002	0.0001～0.002 磷 块 岩 0.02	0.003 铀矿床中 0.002～0.01

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.50 碲一般工业要求

矿石	铜镍矿石	自然硫矿	含铜黄铁矿	含铜黄铁矿	铜钼硫化矿
含量Te，%	0.0002～0.0006	0.001～0.02	0.001～0.016	0.01～0.08	0.0008～0.005

矿石	铜钼矿石	铜铅锌矿	辉钴矿碲化物-硒化物矿	低温碲金矿
含量Te,%	0.03	0.001	0.0002～0.0007	0.001～0.01

2.4.6 非金属矿产

非金属种类很多，用途很广，要全面介绍受篇幅和资料所限，只能重点叙述。我们着重描述非金属的主要物化工艺性能、一般工业要求和综合评价等方面。随着开发利用的深入研究，开拓领域会不断扩大。

2.4.6.1 菱镁矿

菱镁矿主要作耐火材料，提炼金属镁及其化合物。镁合金、粘合剂、广泛用于冶金、化工、建筑、纺织、航天和精密仪器制造业。一般工业要求列于表2.4.51。

表 2.4.51 菱镁矿一般工业要求

项目	成分，%				可采厚度，m	夹石剔除厚度，m	用途
	MgO	CaO	SiO_2	$Fe_2O_3+Al_2O_3$			
耐火材料	≥47	≤0.6	≤0.6	≤6	2	1～2	高纯镁砂
	≥45	≤1.5	≤1.5	—	2	1～2	制砖镁砂
	≥43	≤1.5	≤5	—	2	1～2	镁硅砂
	≥41	<6	≤2	—	2	1～2	冶金镁砂

注：1.一般要求品位(MgO)愈高愈好；

2.橡胶用的菱镁矿要有高分散性，不含锰；

3.水泥要求原料不高。

菱镁矿常与白云岩、大理岩、蛇纹岩、石棉、滑石、石膏、盐矿等共生，尤其超基性岩蛇纹石岩化的菱镁矿含铂、钴、镍等，

地信网论坛
bbs.3s001.com

应综合回收。

2.4.6.2 蓝晶石类矿物

蓝晶石类矿物包括蓝晶石、红柱石和矽线石。它们具有在高温下膨胀冷却后不收缩以及高温下（1100～1650℃）转变成莫来石的特点而作高级耐火材料，制作高铝轻质硅铝合金或烧制耐烧蚀技术陶瓷。一般工业要求列于表2.4.52和表2.4.53。

表 2.4.52 蓝晶石类矿物一般工业要求

项 目	蓝 晶 石	矽 线 石
边界品位，含矿率，%	≥5	≥10
工业品位，含矿率，%	≥10	≥15
可采厚度，m	≥1～2	≥1～2
夹石剔除厚度，m	≥1～2	≥1～2

表 2.4.53 蓝晶石类矿物化学成分表

项 目	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O+Na_2O	体积膨胀系数
蓝晶石	≥60	—	≤2.5	≤1.5	<1～1.6	15
红柱石	59±3	38±3	≤0.5	≤2	—	2
矽线石	57±3	37±3	—	≤2	—	2

蓝晶石常伴生有云母、石墨、刚玉等，应综合评价。

2.4.6.3 萤石

萤石用于冶金熔剂，起脱硫脱磷作用；化工上制氢氟酸及其衍生物；玻璃、陶瓷工业的重要配料；光学仪器、工艺品及纯度高的萤石含Nd等稀土到一定含量时，还可作激光材料。

一般工业要求列于表2.4.54。伴生矿产常有重晶石、铅锌硫化物、石膏、方解石、白云石等，应注意回收。萤石还可做人造血和火箭燃料。

2.4.6.4 磷

磷主要用于制造化肥及化工原料、氟磷灰石作激光发射材

地信网论坛
bbs.3s001.com

料。主要矿物磷灰石，常因杂质不同而不同，如氟、碳、氢、氯等，此外尚有硫磷铝锶矿。矿石有磷灰石型和磷块岩型。一般工业要求列于表2.4.55。磷矿常伴生氟、碘、稀土、放射性元素以及锰，并含钒钛磁铁矿、钛铁矿、石墨、蛭石等有价成分，当磷矿中含铀大于0.02～0.03%，碘大于0.004～0.005%，铁大于12%就能综合利用。

表 2.4.54 萤石矿一般工业要求

品级		工业指标			
		CaF_2，%	S，%	可采厚度，m	夹石剔除厚度 m
富矿	边界品位	≥55	≤1.0	0.7	0.5～0.7
	工业品位	≥65			
贫矿	边界品位	≥20		1	1～2
	工业品位	≥30			

表 2.4.55 一般地区磷矿工业要求

项目	磷灰岩及磷灰石型	磷块岩型
边界品位P_2O_5，%	5～6	8～12
工业品位P_2O_5，%	8～11	12～15
可采厚度，m	0.7～2	0.7～2
夹石剔除厚度，m	1～2	1～2

注：缺磷地区应因地制宜选用指标，以保证实际需要和充分利用资源。

2.4.6.5 硫

硫矿包括硫铁矿（黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿三种）和自然硫。主要用途是制酸和炼硫磺。硫酸主要用于制化肥，也用于农药、化工等部门，烧渣可炼铁（高品位）或水泥铁质校正原料（低品位）。除自然硫外，炼硫主要原料还有石膏、硬石膏、明矾石及硫化氢（天然气井）等。一般工业要求列于表2.4.56。

硫矿常与有色金属、贵金属、稀有、稀散元素共生或伴生，也常与煤、铝土矿、耐火粘土等共生，应注意综合评价。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.56 硫矿一般工业要求

边界品位S，%	工业品位S，%	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
≥8	≥12	0.7～2	1～2

碳，%	砷，%	氟，%	铅+锌，%
≤5～8	0.1（酸洗）或0.2（水洗）	0.05（酸洗）或0.1（水洗）	≤1

注：1. 当含明矾石、石膏等硫酸盐类时应剔除其含量；
2. 硫短缺地区可适当放宽；
3. 有害杂质超标时，单独圈出。

2.4.6.6 钾盐

主要生产钾肥及部分化工原料，在加工中还可回收伴生元素，钾盐亦钾石盐、氯钾盐，主要矿物有光卤石、杂卤石、钾镁矾等。一般工业要求列于表2.4.57。钾盐常与岩盐、镁盐、芒硝、石膏等伴生，并有硼、锂、碘、溴、铯、铷等，应综合评价。

表 2.4.57 盐湖型钾盐露采要求

边界品位KCl，%	工业品位KCl，%	富矿KCl，%	贫矿KCl，%	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
固位矿2	6	≥12	6～12	富矿0.3 贫矿0.5	0.5
卤水0.5	1	—	—	— —	—
伴生锂盐	KCl≥0.5%即可计算储量				

表 2.4.58 硼矿一般工业要求

项目	硼镁石矿	盐湖硼矿	含硼卤水及晶间卤水	硼镁铁矿
边界品位B_2O_3，%	3	1.5	400 mg/L	1
工业品位B_2O_3，%	5	2	1000 mg/L	6
可采厚度，m	≥1	≥0.3	—	1
夹石剔除厚度，m	≥1	≥0.6	—	1

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.6.7 硼

硼是一种广泛的化工原料，也是高能喷气燃料，在化工、冶金、轻工和国防航天工业上有重要用途。硼矿物百余种，主要有硼镁石、水方硼石、硼镁铁矿、硼砂等。一般工业要求列于表2.4.58。硼矿中，硼镁石与铁共生，常含放射性元素，含锂、石盐、芒硝、钾、溴、碘等，应综合评价。

2.4.6.8 天然碱

天然碱包括天然碱和天然苏打，有固体矿和卤水矿两种，固体天然碱一般工业要求列于表2.4.59。

2.4.6.9 钠硝石

钠硝石又称智利硝石，主要做肥料，也可制硝酸和炸药等，一般工业要求列于表2.4.59中的实例。

2.4.6.10 芒硝、钙芒硝

芒硝和钠芒硝是制取硫酸钠、硫酸铵、硫酸和硫化钠的重要化工原料，这些产品可用于纸浆、印染、油漆、橡胶、人造纤维等。一般工业要求列于表2.4.59。

表 2.4.59 几种非金属矿的一般工业要求

项　　目	固体天然碱	钠硝石（实例）	芒硝矿（实例）
边界品位，%	$Na_2CO_3+NaHCO_3$ 20	$NaNO_3$ 2	Na_2SO_4 ≥15
工业品位，%	$Na_2CO_3+NaHCO_3$ 25	$NaNO_3$ 5	Na_2SO_4 ≥20
可采厚度，m	≥0.5～1	≥0.2	2
夹石剔除厚度，m	—	露　采	1.5

项　　目	碘　（实例）	溴　（实例）
边界品位，%	卤水中：　40～50mg/L	海水中：　50g/m³
工业品位，%	磷矿岩中：0.04～0.06%	地下水：　200g/m³
可采厚度，m	综合回收	卤水中：　300g/m³
夹石剔除厚度，m		石油废水中：　50g/m³

2.4.6.11 碘与溴

碘除一般工业和人体需要外，还可作为尖端技术和军事重要

地信网论坛
bbs.3s001.com

物资。溴是制取各种溴盐的基本原料。碘与溴均为伴生物，分散于其他矿床中，一般工业要求尚待确定，可参考表2.4.59中实例。

2.4.6.12　砷

砷主要以硫化物形式存在，用于提炼砷化物，均有毒，但砷在冶金工业、农药、轻工、军事、医药方面有广泛用途，因此对砷既要开发利用，同时开发利用时又要防止环境污染。一般工业要求列于表2.4.60。

表 2.4.60　砷矿一般工业要求

项　　目	雄　黄，雌　黄	毒　　砂
边界品位　As，%	5	3～5
工业品位　As，%	10	5～6
可采厚度，m	0.5～1	0.5～1
夹石剔除厚度，m	1	1

2.4.6.13　重晶石、毒重石、硅钡石

重晶石（$BaSO_4$）、毒重石（$BaCO_3$）是制取钡和钡化物的重要工业矿物原料。主要用于制化学品、重晶石粉和锌钡白。硅钡石含钡50%，亦可作钡原料。一般工业要求列于表2.4.61。

表 2.4.61　重晶石矿一般工业要求

项　　目	边界品位	工业品位	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
含量$BaSO_4$，%	≥30	≥50	≥1	≥1

毒重石可参考表2.4.61指标。

它们常与各种硫化物及其氧化物以及石英、碧玉、菱镁矿、菱锰矿、天青石、萤石等共生，常伴生在有色金属矿金、银、稀土矿中，应回收。

2.4.6.14　明矾石

地信网论坛
bbs.3s001.com

明矾石是钾铝含水硫酸盐矿物，含K_2O11.4%；$Al_2O_3$37%；硫酐$SO_3$38.6%；水13%，是可综合利用的复合矿物。一般工业要求列于表2.4.62。

表 2.4.62 明矾石矿一般工业要求

项　　目	边界品位	工业品位	富　矿	贫　矿	可采厚度，m	夹石剔除厚度，m
含量(明矾石)，%	≥20	≥35	≥45	35～45	≥2	≥1

明矾石中伴生镍、黄铁矿、金红石、红柱石、叶腊石等。

2.4.6.15 石棉

石棉的工业价值高低最主要是依据其纤维长度和物理技术性能如机械性能、热性能、化学性质（耐蚀）稳定性能以及加工性能而定。

蓝石棉矿的主要技术指标是过滤性能优劣，其他有许多物理性能，可参阅专门文献。石棉依纤维分级列于表2.4.63，矿石品位要求及蓝石棉一般工业要求分别列于表2.4.64和表2.4.65。

有些石棉矿产伴生有镍、铬、钴、铂族、菱镁矿、滑石、硬玉、软玉等，某些闪石类石棉伴生虎睛石（硅化石棉），可作工艺石料，应综合评价。

2.4.6.16 石墨

表 2.4.63 石 棉 纤 维 分 级

品　　级	筛　　号	筛孔，mm	纤维长度，mm	注
AA（特　级）	手　选		>18	纺织用
Ⅰ　级	4	8	16	
Ⅱ　级	6	6.3	12	
Ⅲ　级	8	4	9	
Ⅳ　级	12	2.3	5.5	橡胶制品
Ⅴ　级	20	1.6	2.5	水泥制品
Ⅵ　级	60	0.5	1	制动制品
Ⅶ　级	80	0.25	0.7	保温制品

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.64 矿 石 品 位 要 求

品 级	边界含棉率，%	工业含棉率，%
AA—Ⅳ级	>0.4	>1
其中*AA*—Ⅴ级>总棉率25%时	0.3	0.5
其中*AA*—Ⅲ级>总棉率25%时	0.2	0.4

表 2.4.65 蓝石棉一般工业要求

品 级	纤维长度 mm	指 标	指 标
Ⅰ 级	≥20	手 选	
Ⅱ 级	5.5～20	手 选	筛 选
Ⅲ 级	2.5～5.5		筛 选
Ⅳ 级	0.7～2.5		筛 选
品位，g/m^3	边界品位	工业品位	
Ⅰ—Ⅳ级	30	150	
Ⅰ—Ⅳ级	350	1800	
可采厚度，m	≥0.4～0.5	（也可用米百分率表示薄矿层）	
夹石剔除厚度，m	≥1		

石墨不仅具有金属的优良性能而且还具有涂敷性、润滑性、耐高温、耐腐蚀、可塑性、导热、导电、化学稳定性等，用途十分广泛。

一般工业要求列于表2.4.66。煤系中隐晶质石墨可伴生瓷土和稀有元素锗；晶质石墨中伴生铀、钒、钛、金、银、黄铁矿、稀土、磷灰石、高铝矿物等，应综合评价。

表 2.4.66 石墨矿一般工业要求

矿 种	晶质石墨（风化矿）	晶质石墨（原生矿）	隐晶质（土状）石墨
边界品位 C，%	2～3	2.5～3.5	≥55
工业品位 C，%	2.5～3.5	3～8	≥65
可采厚度，m	≥2～4	≥2～4	≥0.7～1.4
夹石剔除厚度，m	≥1～4	≥1～4	≥1～3
剥 采 比	≤3～4：1	≤3～4：1	

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.6.17 滑石

滑石分四类：块滑石、片状滑石、透闪石滑石和混合滑石。滑石工业用途十分广泛，其质量依用途有不同要求，如：

（1）涂料油漆：$SiO_2$40～56%，MgO20～32%，灼减量4～7%，挥发份<7%，吸油指标30～60，能溶于水物质<0.5%，筛余量<2%，溶酸碱物质<0.1%，颜色洁白，片状，纤维状，325目>98.5～99.5%，有害杂质石膏，硬石膏。

（2）陶瓷原料：滑石含量30～70%，CaO4～6.5%，$\frac{CaO}{MgO}=\frac{1}{4}$，耐火度高，色好，具固定收缩性。

（3）填料：含量30～70%，+100目<0.1%。

（4）造纸：$CaCO_3$1～2%±，$Fe_2O_3$1～2%±，烧失量10～15%，水分<1%，325目级筛上<2%，200目级筛上<2%，洁白，没云母片，应测白度、细度、密度等。

（5）绝缘材料：Fe<0.5%，不含粗粒，烧后不收缩，不变形，紧密坚硬。

（6）纺织工业：挥发分<0.5%，325目筛上物<2%，白色有滑腻感。

（7）农药杀虫剂：Fe_2O_3+FeO0.5～2%，洁白、细小、质纯。

（8）日用化工及食品医药：质纯、细软、洁白、不含细粒。

一般工业要求列于表2.4.67和表2.4.68。滑石与蛇纹石或菱镁矿共生，注意镍、钴的回收。

2.4.6.18 高岭土

不同工业部门对高岭土质量要求不同，陶瓷工业、造纸工业、耐火材料工业各有具体要求，陶瓷工业和造纸工业要求，分别列于表2.4.69和表2.4.70。

在实际工作中，中小型高岭土的质量与使用单位联系确定。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.67 滑石的一般工业要求，%

品 级	SiO_2	MgO	Fe_2O_3
I	≥60	≥30	≤0.8
II	≥40	≥25	≤1.8

注：可采厚度≥1m，夹石剔除厚度≥1m。

表 2.4.68 滑石的一般工业要求

品 级	特 级	I 级	II 级	III 级	IV 级
白 度	≥90	≥85	≥80	≥70	≥60
滑石含量，%	≥90	≥85	≥80	≥70	≥50

注：可采厚度0.5(单层)～1m(复层)，含矿率≥50%，Fe_2O_3<1%，CaO<1.5%。

表 2.4.69 陶瓷高岭土一般工业要求

矿 石		化学成分，%		
		Al_2O_3	$Fe_2O_3+TiO_2$	
			总 量	TiO_2
高岭土	原 矿	>18～30	<2	<0.6
砂质高岭土	原 矿	>14	<2	<0.6
砂质高岭土	淘 精① (−325目)	>24	<2.5	<0.7

① 指淘洗率>15%的溢流部分。

表 2.4.70 造纸涂料级高岭土一般工业要求

矿石类型		白度 %	粘 度 Pa·s	精矿淘洗率 %	露采 可采厚度 m	露采 夹石剔除厚度 m	露采 平均剥采比 t/t
高岭土	精矿	>80	<0.5		≥1	≥1	<6～8
砂质高岭土	精矿	>80	<0.5	>13	≥1	≥1	<6～8

注：1. 本标准为暂订稿，仅供参考；
2. 要求白度高，造浆性能好，颗细，片状为好；
3. −2μm大于80%鳞片状。

地信网论坛
bbs.3s001.com

开采条件：1.单层矿体可采厚度≥1米（露采0.7～2米）某些粘土中的块状高岭土可放宽至0.2米。

2．夹石剔除厚度≥1米（露采≥1～2米）。

3．露采：剥离比<2～3，需淘高岭土淘洗率>13～15%。

2.4.6.19 硅灰石

硅灰石主要用作建筑陶瓷原料、电焊条助熔剂、冶金保护渣、涂料油漆；其次是橡胶、塑料的填充料。

一般工业要求列于表2.4.71。

表 2.4.71 硅灰石矿的一般工业要求

项目	手选矿床		机选矿床		建筑用
	含矿系数，%		硅灰石含量，%		
	露采	坑采	露采	坑采	
边界品位	≥20～30	≥25～35	≥40	≥40	1．矿物量≥60%，石英≤20%
工业品位	≥25～35	≥30～40	≥45	≥50	2．Fe_2O_3≤1.7%
					3．方解石≤13%

项目	油漆用	冶金保护渣用	电焊条用
边界品位	1．SiO_2≥49%，CaO≥45%，Fe_2O_3≤0.2%	1．硅灰石含量≥50%	1．SiO_2 45～55%
	2．吸油量20～25%	2．方解石≤50%	2．CaO35～45%
工业品位	3．水溶物≤0.5%	3．石英≤5%	3．MgO≤8%
	4．pH=7～9	4．S≤0.01%	4．S≤0.03%
	5．325目≥90%	5．P≤0.01%	5．P≤0.03%

注：1． 可采厚度：露采≥1～2m，坑采≥1m；

2． 夹石剔除厚度：露采≥1～2m，坑采≥1m。

2.4.6.20 膨胀珍珠岩原料（珍珠岩、松脂岩、黑曜岩）

珍珠岩类矿石在高温下(1200℃)，体积迅速膨胀数倍至30倍不等，是制作优质超轻绝热材料，具有容重轻（40～250千克/米^3）、导热系数小（0.03×4.1868～0.06×4.1868千焦/米·时·℃）、使用温度范围广（−250～+800℃）、吸音性能好、吸湿性小等特性，广泛用于冶金、石油、化工、电力、建筑和国防等工业的热工设备及厂房、窑炉、冷热管道、仓库、气体液化和贮运

地信网论坛
bbs.3s001.com

的保温保冷工程设备上，亦可作无机过滤材料，作助滤剂。制疏水珍珠岩用于处理海水污染，制轻质建筑构件，可节约钢材。此外，在运输、农业、食品以及制药方面也有广泛应用。

珍珠岩成份：$SiO_2$68～74%，$Al_2O_3$12%±，$Fe_2O_3$0.5～3.6%，MgO0.3%，CaO0.7～1%，K_2O2～3%，Na_2O4～5%，H_2O2.3～6.4%。

一般工业要求：（1）膨胀倍数K_0>7～10（黑曜岩>3可用），$K_0=5.2[K-0.8]$，K为实验室马弗炉下求得的膨胀倍数。K_0为工业条件下膨胀倍数。（2）松散密度（容重）≤80～250千克/米^3。（3）化学成分：$SiO_2$70%±，H_2O4～6%，Fe_2O_3+FeO<1%（优质）。一般工业要求列于表2.4.72。

表 2.4.72 珍 珠 岩 工 业 要 求

类 别	容重 kg/m³	K（倍）	K_0（倍）	(Fe_2O_3+FeO) %	用 途
Ⅰ	≤80	≥3.5	≥15	<1.0	保温材料
Ⅱ	≤150	≥2.5	≥8	<2.0	轻质填料
Ⅲ	≤250	≥2.0	≥3		混凝土细骨料

注：1. 可采厚度 ≥1～2m；
2. 夹石剔除厚度 ≥1～2m。

2.4.6.21 叶蜡石

叶蜡石分子式为$Al_4[Si_8O_{20}][OH]_4$，熔点1700℃。当加热到1000℃时，叶蜡石便失去其化合水，加热到1150℃时，它过渡到富铝红柱石和方英石，如有镁（MgO）存在时，这种变化能在更低的温度下，约1060℃发生，而在900℃时，常能形成镁尖晶石，这一变化和性质使叶蜡石用作耐火材料，还可作陶瓷、建材、杀虫剂、轻工填料用，此外在人造金刚石、石油、玻璃纤维、电气及医药方面也有用途。光泽好，颜色美观的叶蜡石可作美术工艺品原料，如寿山石、青田石、鸡血石、冻石等。叶蜡石主要成分为$Al_2O_3$28.3%，$SiO_2$66.7%，H_2O5%以及微量Fe、Ti、S、P、K、Na、Ca、Mg等。一般工业要求列于表2.4.73。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.73 叶蜡石矿一般工业用途和要求

化学成分	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	可采厚度 m	夹石剔除厚度	耐火用
含量，%	≥16	≤75	≤1.0	1～2m	1～2m	Al_2O_3≥20～24 Fe_2O_3≤1～2 CaO，MgO均<1% 耐火度≥1630℃

化学成分	陶瓷用	填料用	精采用	橡胶用	工艺美术用
含量，%	1. Al_2O_3≥10 2. Fe_2O_3≤0.5 3. K_2O+Na_2O <0.6～1.2%	白度>70～80% 叶蜡石 >80～85%	As <0.0014%	Fe_2O_3<1～1.5% 烧失<8% 水分<0.5% 叶蜡石量 >80～85%	1.光泽好 2.颜色美观

2.4.6.22 蛭石

蛭石外观形状似云母，与黑云母、金云母密切相关，常按黑云母和金云母成假象。为黑云母和金云母经低温热液作用蚀变的产物。蛭石分子式为 $(Mg, Ca)_{0.7}(Mg, Fe^{3+}, Al)_{6.0}[(Al, Si)_{8.0}O_{20}][(OH)_4 \cdot 8H_2O]$，蛭石由黑云母风化作用形成，亦有热液蚀变加风化作用形成的，一般认为具有工业意义的矿床往往与伟晶岩，碱性辉石岩或碳酸盐杂岩的接触交代蚀变或风化作用有关。

蛭石在800～1000℃焙烧0.5～1分钟，体积膨胀8～15倍，最高可达30倍。膨胀后松散密度（容重）100～130千克/米^3，故有优良保温性能，其热传导系数与温度有关，列于表2.4.74。

表 2.4.74 蛭石热传导系数与温度的关系

温 度，℃	0	20	50	100	250	500
热传导系数 (4.1868kJ/m^3·h·℃)	0.04	0.045	0.047	0.051	0.060	0.096

蛭石用途：焙烧后蛭石具有密度小，耐冻，保温，隔热，消音的特性，可作充填料、涂饰材料、润滑剂等。

地信网论坛
bbs.3s001.com

一般工业要求列于表2.4.75。技术条件列于表2.4.76。

表 2.4.75 蛭 石 质 量 要 求

密 度	烧后密度	导热系数	膨胀系数	耐热温度	熔 点	吸声系数	烧失量(干)
t·m³	t·m³	×4.1868 kJ·m²·h·℃	倍	℃	℃	在100～4000 Hz时	%
2.6	0.06～0.20	(0.04～0.06)	2～25	1000～1100	1370～1400	0.06～0.60	10

注：粉末容许密度为0.2t·m³。

表 2.4.76 蛭 石 技 术 条 件

项 目	Ⅰ 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	Ⅳ 级
体积膨胀倍	10～25	5～10	2～5	—
外观	黄铜色或浅绿色	暗绿铜黄色	暗色或近黑色	—
粒度，mm	>15	4～15	2～4	<2

2.4.6.23 膨润土、漂白土

膨润土又称膨土岩、斑脱岩，是主要以蒙脱石为主的粘土矿物。由于蒙脱石具有特殊的结晶结构，使其有吸水性、膨胀性、胶结性、阳离子交换性和分散性及润滑性，广泛用于球团，铸造，钻井泥浆，润滑脂稠化及造纸、橡胶填料。

漂白土有较好吸附能力，能吸收大量色素，粘液，胶状物及其他杂质，工业上利用的漂白土有两种，一种是活性白土，一种是天然漂白土，本身具有漂白性，用酸处理或少量酸处理再高温处理后获得的漂白土吸附性能一般优于天然漂白土。

膨润土矿物成分除蒙脱石外，还有其他粘土矿物，非粘土矿物和可溶性盐类。其他粘土矿物有伊利石、高岭石、埃洛石、绿泥石、水铝英石，大都呈机械混合一起，也可以构成规则或不规则的间层矿物。非粘土矿物有沸石、方英石、石英、蛋白石、长石、方解石、黄铁矿以及火山岩屑、晶屑和铁的氧化物。可溶性盐类有钾、钠、钙、镁的碳酸盐、硫酸盐、硝酸盐或氯化物等。

地信网论坛
bbs.3s001.com

蒙脱石是两个硅氧四面体中夹一个铝（镁）氧（氢、氧）八面体组成的2：1层型，四面体中有不大于1/15的Si^{4+}被Al^{3+}置换，八面体中有1/3～1/6的Al^{3+}被Mg^{2+}置换，造成晶层间产生永久性负电荷(电荷约0.25～0.6)，它靠在晶层间吸附阳离子求得电荷平衡，晶层间被吸附的阳离子是可交换的，类质同像置换是蒙脱石产生一系列重要性质的根源，改性也据于此原理。

膨润土可分（据层间阳离子的不同）为钙蒙脱石、钠蒙脱石、镁蒙脱石、铝（氢）蒙脱石及锂蒙脱石等，又根据上述蒙脱石的相对含量不同，还可分钙基、钠基、镁基、钠钙基、镁钠基等膨润土；还可分高层电荷型和低层电荷型。以铝（氢）基为主的膨润土称天然漂白土。

评价指标：1.钙基、钠蒙膨润土：蒙脱石边界品位50%，最低工业品位（平均）60%，膨胀倍≥6毫升/克。2.漂白土：脱色力≥70%。

$$(\text{蒙脱石含量}M=\frac{B}{K}\times 100=\frac{\text{吸蓝量(毫克当量/100克土)}}{\text{换算系数}}\times$$

100换算系数：$K=150$即表示蒙脱石相对含量100%时每100克土吸附150毫克当量亚甲基蓝)通过吸蓝量求蒙脱石含量。

具体测试项目根据用途选定。

膨润土是一种多用矿产，其用途主要取决于蒙脱石含量、分散性等。评价时，首先对蒙脱石的含量和胶质价进行确定，其次测试其脱色率、交换量、湿压强度、膨胀倍等，一般工业要求尚待完善。

2.4.6.24 海泡石、凹凸棒石

海泡石是一种富镁的纤维状粘土矿物，比表面积很大，达229米^2/克，质轻，吸附性强，因此具有吸附、脱色、热稳定、抗腐蚀、抗辐射及隔热、绝缘等性能，主要用作地热钻井、超深钻井和用作海上钻井最理想的泥浆原料，在高温下不发生絮凝，在盐水中不受带电荷离子影响。还可用作油脂脱色，净化葡萄糖和酒类中的蛋白残渣。在环保中作吸附剂。此外还可作建材、电

地信网论坛
bbs.3s001.com

绝缘体、温和磨料、粘结剂、农药载体以及纺织、化工、树脂、陶瓷、国防及空间科学用。

海泡石测试：化学全分析、X-射线衍射分析、差热分析、红外线分析、电镜分析、脱色力、造浆率及含量等。其一般工业要求列于表2.4.77。

表 2.4.77 海泡石族矿产的一般工业要求①（暂定）

矿石类型	海泡石	凹凸棒石
边界品位，%	海泡石含量10	凹凸棒石含量≥10造浆率≥4m³/t
工业品位，%	海泡石含量15	凹凸棒石含量≥35%（Ⅱ级品）；≥60%（Ⅰ级品）；≥80%特级品
造浆率	4m³/t	原土：≥7.5m³/t；≥10m³/t；≥12.5m³/t
脱色率	100%（5%HCl处理）	吸附级≥150（4%HCl处理）
可采厚度，m	≥1	≥1
夹石剔除厚度，m	≥1	0.5～1

① 由于海泡石是新近发现的粘土矿，各矿山评价项目不同，仅供参考。凹凸棒石也是类似情况，待成熟后制定。

凹凸棒石也是海泡族类矿物之一，其性质与海泡石十分相似，因此其用途也很相似，现将特征描述列于表2.4.78。

海泡石和凹凸棒石粘土矿的应用，有关单位正在大力开展多种研究，我们深信会有新成绩。

2.4.6.25 沸石

天然沸石具有独特的矿物结构和结晶化学性质，如阳离子交换性的交换的选择性、吸附性和筛分性、反应性、稳定性等，为此用途十分广泛。主要用于水泥混合材料、轻质骨料、轻质建材；环境保护方面，沸石和沸石制品可以处理废气废水对环境的污染，用沸石作载体，以贵金属铂为主要活性组分制作处理有机废气的高活性催化剂，沸石可以以其钠、钙、钾离子选择性地交换溶液中有害阳离子，从而可用于处理工业废水及核污染；还可代

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.78 海泡石与凹凸棒石比较表

项　　目	海　泡　石	凹　凸　棒　石
矿物特征	含水镁铝硅酸盐矿物	含水镁铝硅酸盐矿物
晶体形态	纤维状棒状，集合体为束状，毛发状	棒状，纤维状，集合体为束状，毛发状
晶体结构	属三个辉石链组成个体，个体之间靠氧原子连接	属两个辉石链组成个体，个体之间靠氧原子连接
分子式	$(OH)_4Mg_8\cdot Si_{12}O_{30}(OH_2)_4\cdot 8H_2O$	$(OH)_2(Mg, Al, Fe)(OH_2)_2Si_8O_{20}\cdot 4H_2O$
沿C轴横截面通道大小	$0.5\times 1.1nm$	$0.37\times 0.6nm$
性　质	吸附、脱色、热稳定、造浆、抗腐蚀	吸附、脱色、热稳定、抗盐、造浆
用　途	优质泥浆、脱色剂、吸附剂、载体等	优质泥浆、脱色剂、吸附剂、载体等
矿物组成（矿床）	蒙脱石、高岭石、凹凸棒石、滑石、石英、碳酸盐	蒙脱石、高岭石、水云母、海泡石、石英、蛋白石、白云石等

替三聚磷酸钠等缩合磷酸盐，作洗涤剂助剂；还可做改良土壤，提高保水保肥能力，还可软化水，降氚，用于氧氮分离、干燥和净化天然气、食品保鲜等。

沸石是碱或碱土金属的含水铝硅酸盐矿物（$Mz_n\cdot Me_nAl_pSi_qO_2(p+q)\cdot\gamma H_2O$）式中：M表示碱金属离子，通常为$K^+$、$Na^+$、$Li^+$等，Me表示碱土金属离子，通常为$Ca^{2+}$、$Ba^{2+}$、$Mg^{2+}$等，氧的数目是铝和硅的两倍，沸石矿物有斜发沸石、丝光沸石、方沸石、浊沸石等。

沸石一般工业要求尚未拟定，表2.4.79是初步推荐。

2.4.6.26 石榴石、刚玉

石榴石是一种铝（钙）硅酸盐，按成分不同分镁铝榴石、铁铝榴石、锰铝榴石、钙铝榴石及钙铁榴石等。

一般呈大小不等，硬度6.5～7.5、熔点高（1180～1200℃）等特性，制研磨材料、轴承、工艺品等。

一般工业要求为砂矿的边界品位：矿物4千克/米^3，工业品位：矿物6千克/米^3，可采厚度0.5米。原生矿的工业品位：矿物>

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.79 沸石矿产的一般工业要求

序	质量要求	开采技术条件和其他
1	边界品位	K^+交换量≥13mg/g±或NH_4^+交换量≥100mL/100g±（相当于沸石总量40%±）
2	工业品位	K^+交换量≥13mg/g±或NH_4^+交换量≥130mL/100g±（相当于沸石总量55%±）
3	K^+、NH_4^+交换量	K^+交换量<13mg/g但NH_4^+交换量≥130mL/100g的矿石另圈，单独计算并确定沸石类
4	表外矿要求	K^+交换量等于10~13mg/g，NH_4^+交换量等于100~130mL/100g±
5	最低可采厚度，m	2.0
6	夹石剔除厚度，m	≥1.0
7	其他	X衍射、红外光谱、差热分析、电镜、岩矿鉴定判断沸石种类含量、表面积、孔径、吸附性等物化性能，以及化学全分析氧化钙吸收值（做水泥混合材料时）

14%。

刚玉是一种结晶氧化铝，常含一定混入物而呈不同颜色，如含铬则为红色、含钛为蓝色、含铁为棕色、含锰为玫瑰色。刚玉硬度大（莫氏硬度9），主要做研磨材料、轴承、宝石等。

一般工业要求：砂矿的工业品位，即含矿率(矿物)7.7千克/米^3；刚玉矿物（Al_2O_3）>94%；Fe_2O_3<3.53~4.35%，灼烧量0.06~0.23%，可采厚度0.5米。原生矿工业品位，即矿物30%。

2.4.6.27 宝石、玉石和雕刻石料

宝石：一般为透明的结晶体。半透明或不透明的宝石必须有猫眼、星光或特殊的色彩。硬度（一般在莫氏硬度)大于7，有一定重量，是自然界十分稀少的，价值高昂的矿物原料(表2.4.80)。在宝石中，最著名的有七大宝石，它们是：红宝石、祖母绿、钻

地信网论坛
bbs.3s001.com

石、蓝宝石、变石、猫眼石和欧泊石。

表 2.4.80 宝石名称表

品名	艺名
金刚石	钻石
刚玉	贵刚玉、红宝石、蓝宝石、照殿红、碧珠、青宝石等
绿柱石	祖母绿、纯绿宝石、水蓝宝石、海蓝宝石、红绿宝石
蛋白石	白宝石（欧泊石）、贵蛋白石
金绿宝石	即破尖晶石、变石、金绿猫眼石、猫儿眼、祖母绿
石榴子石	子牙乌（镁铝、铁铝、锰铝、钙铁、钙铝、钙铬榴石）
尖晶石	晶宝石、玻玕
电气石	碧玺（红电气石）、绿碧玺、黑碧玺

玉石：适用于雕琢玉器的岩石。常为单矿物或多矿物集合体，致密块状，半透明或不透明，硬度（莫氏）4～7左右，原料以吨或公斤计；成品以件或尺寸大小计，按其经济价值大小和工艺性

表 2.4.81 玉石表

翡翠类		刚玉
玉类	软玉	白玉、粉玉、阳起石、羊脂玉、阗玉、新疆碧玉
	蛇纹石	岫岩玉、南方玉、安绿玉
晶石类	水晶	水晶、水精、水玉、发晶、墨晶、黄晶
	萤石	萤石
	石英猫眼石	又名木变石、猫睛、石英猫眼睛石
彩石类	绿松石	又名松石、土耳其玉
	青金石	又名青玺
彩石类	孔雀石	孔雀石、绿青
	玉髓	玛瑙、血滴石、红石髓
	石英类	即铬云母石英岩（东陵石）、蔷薇石英、贵翠、芙蓉石
	菊花石	菊花石
	蔷薇辉石	又名桃花石，粉翠
	皂石	又名玉色翡翠
	大理石	汉白玉、点苍石

地信网论坛
bbs.3s001.com

能又可分翠、玉、晶、石四小类，列于表2.4.81。

雕刻石：是适用于石刻工艺品岩石，常为矿物或集合体，硬度小、价低。主要雕刻石列于表2.4.82。

表 2.4.82 雕 石 表

印章类	砚石类	装饰类
叶蜡石，高岭石，迪开石，滑石，皂石等	粉砂岩，板岩，泥灰岩等	有各种颜色结构美丽的低硬度岩石有图案花纹的生物化石
品种有，寿山石，青田石，昌化石（鸡血石），巴林石，莱州石等	品种有，端砚石，歙砚石，青州砚石，绛州砚石，贺蓝石等	品种有：燕石，宝塔石，松林石，绵状大理石，汉白玉等

一般工业要求是：宝石决定其个体大小、透明度、颜色和数量；玉石决定于质地、颜色、透明度（色彩）、硬度、光泽、构造和块度等。

截止目前，各国无统一工业要求。

2.4.6.28 金刚石

一般工业要求列于表2.4.83和表2.4.84。

表 2.4.83 原 生 矿

项目	岩脉型		岩管型	
	低指标	高指标	低指标	高指标
边界品位，mg/m^3	20	40	10	20
工业品位，mg/m^3	30	60	15	30
最小回收颗粒，mm	0.2	0.2	0.2	0.2
毫米克拉值，mg/m	30	60	—	—

有关金刚石的用途详见本《手册》第八卷第五分册37.3.1.1。

金刚石砂矿中常伴生黄金和锆石；原生矿中伴生钙钛矿、白钛矿、铌、铈、镧及烧绿石、磷灰石等，应综合评价。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.84 砂 矿

项 目	一般要求	实例一	实例二
边界品位，mg/m³	1.5	1.5	1.5
工业品位，mg/m³	2.0	2	2
可采厚度，m	0.2~0.6	0.6	0.2

2.4.6.29 云母

云母种类很多，在工业上应用最多的是白云母和金云母，锂云母。白云母和金云母均有高的电绝缘性和耐热性，强的抗酸、抗碱、抗压能力，并能分剥成有弹性透明的薄片，所以主要用作电气设备和电工器材的绝缘材料，也可用于冶金和机械工业。碎云母和云母粉可加工成云母纸，代替云母片，降低成本。由于碎云母具有高度分散性和在粘性介质中的悬浮性因而广泛应用于油漆，橡胶，塑料的填料及建材工业中。

云母的一般工业要求是指矿山采出的云母原矿，经初选而得的云母块，其有效面积≥4厘米²，具体要求有：(1)质量要求；(2)品位要求；(3)开采技术条件。

A 质量要求

a 外观质量条件

外观质量条件有：（1）在有效面积内不允许有裂缝、穿孔、砂眼、粘结、严重皱纹、嵌填物、连生物和羽毛状的梗子层；（2）在有效面积内不允许有失去弹性和挠曲性能的严重风化和水锈的云母；（3）在云母晶体内，不允许有易于脱落的云母碎块，边沿上的非云母物径向不得超过3毫米，凹入角内的非云母矿物其深度不得超过7毫米，同时也不允许凸出于云母晶体表面的非云母物；（4）楔形云母最厚边的最大厚度不得超过10毫米。

b 工业原料云母分类

工业原料云母分类列于表2.4.85。

c 工业原料云母分级

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.85 工业原料云母分类

类 别	任一面的最大一块有效面积，cm^2	最大轮廓面积 cm^2	注
特类	≥65	≥420	两栏数据不能对应时，应以有效面积分类为主
Ⅰ类	≥40	≤420	
Ⅱ类	≥20	≤240	
Ⅲ类	≥10	≤120	
Ⅳ类	≥4	≤60	

注：有效面积是指云母片内能划出的最大内接矩形，边长比1：1～1：3。

工业原料云母分为二级。甲级：斑点占有效面积≤25%；乙级：斑点占有效面积>25%。

d 厚片云母

厚度为0.1～2毫米，有效面积大于4厘米²的云母片又可分甲、乙、丙三级(略)。

e 一般电气性能要求

要求列于表2.4.86。

表 2.4.86 云母的一般电气性能要求

薄片云母厚度 μm	击穿电压，kV			
	白云母		金云母	
	平均	最低	平均	最低
15±5	2.2	1.4	1.8	1.0
25±5	4.0	1.9	3.2	1.7

B 品位要求和开采技术条件

品位要求和开采技术条件列于表2.4.87。

2.4.6.30 耐火粘土

耐火粘土是指耐火度大于1580℃的粘土，依其理化性能，矿石特征和工业用途分为软质粘土，半软质粘土，硬质粘土和高铝

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.87 品位要求及开采技术条件

边界品位 kg/m³	工业品位 kg/m³	可采厚度 m	夹石剔除厚度 m
1	4	≥1	≥0.5(矿体变化大时为1)

注：薄矿体按m含矿率计算。

粘土四种，耐火粘土主要用于冶金工业（占70%），其次用于机械、轻工、化工、建材和国防工业。

耐火粘土中主要矿物有：一水硬铝石、一水软铝石、三水铝石、高岭石、埃洛石、水白云母、伊利石和蒙脱石等，有关工业要求可参看冶金部颁布的标准和有关材料，也可参考一些矿山，如河北古冶、山西阳泉、河南焦作、四川沙湾、吉林水曲柳、四川二滩或广元等制订的标准。

2.4.6.31 白云岩

白云岩是以白云石为主（含量占95%）的碳酸盐。白云石烧至700～900℃时，成为氧化钙和氧化镁混合物，称苛性白云石。煅烧至1500℃成为方镁石和α-CaO，结构致密耐火度可达2300℃，抗渣性较强。白云石主要用于冶金耐火材料和熔剂，化工和水泥、建材，还可用于陶瓷、铸石、提炼金属镁等。有关质量标准可参阅冶金工业部部颁标准YB 2415—81和用户要求。

2.4.6.32 硅岩（石英砂岩、石英岩、脉石英）

硅石主要用以制酸性耐火砖、熔剂、石英玻璃、结晶硅（制单晶硅、硅铝和有机硅）、硅酸盐水泥、玻璃、陶瓷、磨石、油石和砂纸等。

质量可参阅冶金工业部部颁标准YB 2416—81和有关用户要求。制玻璃用石英砂的工业要求列于表2.4.88。

2.4.6.33 石灰岩（冶金灰岩、化工灰岩）

石灰岩主要成分是$CaCO_3$，以方解石为主，含少量白云石、菱镁矿及其他碳酸盐类矿物和粘土质，铁质等。

石灰岩用途如下：（1）熔剂灰岩，主要用于制铝氧、制活性

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.88 玻璃原料的质量要求

类 别	矿石品级	SiO_2，%	Al_2O_3，%	Fe_2O_3，%	TiO_2，%
一类	Ⅰ级	>99	<0.5	<0.05	<0.06
一类	Ⅱ级	>98	<1.0	<0.1	
一类	Ⅲ级	>96	<2.0	<0.2	
一类	Ⅳ级	>90	<4.0	<0.5～1	
二类		>89	<6.0	<0.35	

类 别	Cr_2O_3，%	备 注
一类	<0.001	用于特种技术玻璃
一类		用于工业技术玻璃和高级器皿
一类		用于一般平板玻璃
一类		用于有色玻璃
二类		配料后能达到Ⅲ级时才有用

石灰、制电石、制碱、化肥、陶瓷、制糖、玻璃和水泥等；(2)冶金用石灰岩，可参考ZBD 60001—85。

2.4.6.34 铁矾土

铁矾土是含铁高的耐火粘土和铝土矿，其工业要求列于表2.4.89。

表 2.4.89 铁矾土的工业要求

品 级	Al_2O_3，%	Fe_2O_3，%	可采厚度，m	夹石剔除厚度 m
Ⅰ 级	≥50	≤10		
Ⅱ 级	≥45	≤15	≥0.7	≥0.5
Ⅲ 级	≥35	≤19		

2.4.6.35 含钾岩石

指含钾砂岩、页岩、海绿石砂岩、伊利石粘土岩、水云母粘土岩，粗石岩等，这些含钾岩石均属硅酸盐钾矿物的非水溶性含钾岩石，需要转化为水溶性钾，工艺技术上可行，但能耗大、成

地信网论坛
bbs.3s001.com

本高，最好选择低热值的燃料与含钾岩石制取钾和水泥配料，达到综合利用。

目前无正式工业指标，可举几个实例:(1) 北京琉璃河水泥厂利用含钾页岩代替粘土作水泥配料，回收窑灰钾肥，原料含钾岩石K_2O≥9%;(2) 江苏丰县钾砂岩、页岩含K_2O13.39%，$Al_2O_3$17.67%，$SiO_2$56～57%，生产一吨氯化钾，铝氧粉0.80吨，碳酸钠0.5吨，残渣作高标号水泥;(3) 浙江温州伊利石矿，钾长石K_2O≥9%;(4) 山西闻喜县钾长石矿工业品位大于9%;(5) 安徽寿县孔家山钾长石矿，工业品位均大于9%。

2.4.6.36 蛇纹岩、橄榄岩

蛇纹岩、橄榄岩可以用来制钙镁磷肥，其一般工业要求：边界品位 (MgO)≥25%；工业品位 (MgO)≥32%。

2.4.6.37 石膏、硬石膏

石膏有多种用途，不同用途质量要求不同，工业用石膏质量要求列于表2.4.90。

表 2.4.90 工业用石膏对矿石质量的要求

用途	水泥、农用	建筑	模型	医用、食品	硫酸	纸张填料	油漆填料
要求 $CaSO_4$，%	≥55	石膏≥75	石膏≥85	石膏≥95	≥85	白度>95	≥97

硬石膏最低工业品位≥55%；可采厚度：露采2米，坑采1米；夹石剔除厚度：露采2米，坑采1米。

纤维石膏含$CaSO_4 \cdot 2H_2O$95% (工业品位)，最低线含矿率14% (可采厚度2厘米)，可采厚度：坑采≥1.7米；夹石剔除厚度：坑采≥1米。

2.4.6.38 陶瓷原料

陶瓷主要原料有粘土类 (高岭土、瓷土及瓷石)、长石类(从岩石中提取)、石英类和其他辅助原料 (滑石、硅灰石、叶蜡石)等。

地信网论坛
bbs.3s001.com

高岭土作搪瓷用参看建材局部标JC 319—82，用作日用陶瓷、电瓷、无线电瓷、耐火材料、砂轮、化工、涂料等用，参看国家建材局部标JC 88—82。

2.4.6.39 石材

A 大理石

大理石参看国家建材局天然大理石荒料部颁标准JC 202—76和JC 79—76。

B 饰面板材

饰面板材荒料参看建材局部标准JC 204—85。

C 铸石材

铸石材参看建材局部颁标准JC 242—81。

2.4.6.40 水晶

水晶是透明的石英晶体，一般无色。按其特性和用途可分压电水晶、光学水晶、熔炼水晶及工艺水晶四种。

压电水晶系指大于12×12×12毫米^{3}的单晶。目前人造压电水晶已基本过关。

光学水晶系指原料纯净，透明的石英晶体，能透过波长为210纳米以上的紫外线，透过率大于85%（以10毫米厚度的无缺陷晶体薄片进行测定）。

熔炼水晶主要以二氧化硅纯度来评价，其次是透明度，按透明部分占每块晶体体积百分比分四级，即大于90%；70%；40%和10%。熔炼水晶工业指标为压电水晶的100倍计算，压电水晶工业品位：原生矿0.5～1克/米^3（四级以下岩石为0.5克/米^3，四级以上岩石为1克/米^3）；地下开采为3克/米^3；砂矿：水采为0.3克/米^3，旱采为0.5克/米^3。

工艺水晶是分选和加工光学水晶，压电水晶原料时剔出来的水晶，在透明度、颜色、尺寸、可用部分占整块晶体比例符合规定要求时，可作工艺水晶用。

非金属矿产尚有多种，如冰洲石、电气石、天然油石、黄玉、天然沥青、浮石、白垩、陶粒原料、铸石原料（辉绿岩、玄武

地信网论坛
bbs.3s001.com

岩)、砖瓦粘土、地蜡、镁盐、方解石、累托石、铸型用砂等，其工业要求目前尚不十分成熟，有待审定。

非金属的用途十分广泛，一种矿产多种用途，一种用途又可用多种矿物，甚至用人造品代用，今后应加强测试手段和开发利用研究。

2.4.7 水资源

2.4.7.1 地下水

地下水是一种重要的矿产资源，一般具有水质好，水量稳定，不易受污染的特点，广泛用于工农业生产和人民生活，特别是干旱地区，水源不足地区，对当地人民生活和建设发展都有重要意义。

地下水可以按以下条件分类：

（1）按矿化度的大小，把水分5类，列于表2.4.91。

（2）按硬度大小，把水分5类，列于表2.4.91。

（3）按水的pH值，把水分5类，列于表2.4.91。

表 2.4.91 水质分类表

按矿化度分	水的类型	淡 水	微咸水	咸 水	盐 水	卤 水
	总矿化度 g/L	<1	1～3	3～10	10～50	>50
按硬度分	水的类型	极软水	软 水	微硬水	硬水	极硬水
	Ca^{2+}(Mg^{2+})浓度 mmol/L	<3 (<8.4)	3～6 (8.4～16.8)	6～12 (16.8～33.6)	12～18 (33.6～50.4)	≥18 (≥50)
按pH值分	水的类型	强酸性	弱酸性	中 性 水	弱 碱 性	强碱性
	pH值	<5.0	5～6.5	6.5～8	8～10	≥10

地信网论坛
bbs.3s001.com

A 农田灌溉水

农田灌溉水质量标准列于表2.4.92。

表 2.4.92 农田灌溉用水水质标准（TJ24—79试行）

编号	项目	标准 mg/L
1	水温	＜35°C
2	pH值	5.5～8.5
3	全盐量	＜1500mg/L（非盐碱土）
4	氯化物（Cl计）	＜300mg/L（非盐碱土）
5	硫化物（S计）	＜1
6	汞及其化合物（Hg计）	＜0.001
7	镉及其化合物（Cd计）	＜0.01
8	砷及其化合物（As计）	＜0.05
9	六价铬化物（Cr^{6+}计）	＜0.1
10	铅及其化合物（Pb计）	＜0.1
11	铜及其化合物（Cu计）	＜1.0
12	锌及其化合物（Zn计）	＜3.0
13	硒及其化合物（Se计）	＜0.01
14	氟化物（F计）	＜3
15	氰化物（按游离氰根计）	＜0.5
16	石油类	＜10
17	挥发性酚	＜1
18	苯	＜2.5
19	三氯乙醛	＜0.5
20	丙烯醛	＜0.5

B 肥水

肥水指含有硝态氮和其他可溶盐的地下水，是含氮有机物分解成硝酸盐经淋滤渗下，聚集在地下水中而形成，硝态氮含量在15毫克/升以上。

C 生活用水

生活饮用水质标准列于表2.4.93，开采技术条件列于表

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.93 生活饮用水水质标准（GB5749—85试行）

编号	项　　目	标　　准，　mg L
1	色	色度<15度，不得出现异色
2	浑浊度	<3度(特殊情况不超过5度)
3	嗅和味	不得有臭、异味
4	肉眼可见的	不得含有
5	pH值	6.5～8.5
6	总硬度（$CaCO_3$计）	450
7	铁	0.3
8	锰	0.1
9	铜	1.0
10	锌	1.0
11	挥发酸类(以苯酚计)	0.002
12	阴离子合成洗涤剂	0.3
13	硫酸盐	250
14	氯化物	250
15	溶解性总固体	1000
16	氟化物	1.0
17	氰化物	0.05
18	砷	0.05
19	硒	0.01
20	汞	0.001
21	镉	0.01
22	铬（6价）	0.05
23	铅	0.05
24	银	0.05
25	硝酸盐(氮计)	20
26	氯　仿	60μg/L
27	四氯化碳	3μg/L
28	苯芘	0.01μg/L
29	滴滴涕	1μg/L
30	六六六	5μg/L
31	细菌总数	1mL中不超过100个
32	大肠菌群	1L水中不超过3个
33	游离性余氯	（1）在接触30分后应不低于 0.3mg/L，（2）水厂管网末稍水不低于 0.05mg/L，（3）出厂水同（1）
34	总α放射性	0.1P/L
35	总β放射性	1P/L

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.94。

表 2.4.94 生活饮用水开采技术条件

地下水埋藏及开采深度	
埋藏深度	开采深度，m
浅型：0～10m，可使用离心泵提取	浅井：≤40
中型：10～50m，可使用机井泵提取	中深井：≤300
深型：50～150m，可使用深井泵提取	深井：≥300
满足及可采水量	
宜井地区单井出水量	供水水源地采水量，万m^3/d
饮用满足2.54cm以上泵抽取 农田灌溉满足7.62cm以上泵抽取 工业用水满足15.24cm以上泵抽取	小型：≤1 中型：1～5 大型：5～15 超大型：≥15

表 2.4.95 地热水分类

相	热水类型	温度界线	主要用途
液相	低温热水	20～40℃	农灌、饮用、医疗、洗涤、人工孵化
	中温热水	40～60℃	锅炉、生活、采暖、温室、调节灌溉水源
	高温热水	60～100℃	锅炉、工业用水、采暖
液-气相	低温过热水	＞100℃	发电、动力
	高温过热水	＞374℃ (水临界温度)	发电与综合利用

地信网论坛
bbs.3s001.com

2.4.7.2 地下热水

地下热水可用于发电、供暖、工业、农副业、医疗浴和提取有用组分和饮料。

地下热水分类列于表2.4.95，地热水医疗水分类列于表2.4.96，按放射性分级列于表2.4.97。

表 2.4.96 医疗水分类（温度）

类型	冷的	微温的	温的	热水	高热水
泉水温度，℃	<25	25～33	34～37	38～42	>42

表 2.4.97 按放射性分级

分级	氡水中放射气含量 埃曼	镭水中镭含量 g/L	注
强放射性水	>300	$>10^{-9}$	埃曼为放射气含量单位
中放射性水	100～300	10^{-10}～10^{-9}	镭水对人体有害，已停止用于医疗
弱放射性水	35～100	10^{-11}～10^{-10}	

2.4.7.3 矿泉水

矿泉水可作医疗用，亦可作饮料，其标准分别列于表2.4.98和表2.4.99。

2.4.7.4 可提取有用元素的热田

可提取有用元素的热田指标列于表2.4.100。

热田开采深度和发电规模列于表2.4.101和表2.4.102。

2.4.7.5 海水

海水经人工淡化制取淡水（饮用水、工业用水）和综合利用。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.98 医疗矿泉水标准（1981年青岛会议通过）

名 称	氡 泉	碳酸泉	硫化氢泉	铁 泉	碘 泉	溴 泉	砷 泉	硅酸泉	重碳酸盐泉	硫酸盐泉	氯化物泉	放 泉	说 明
矿化度 g/L									>1	>1	>1	<1	
主要成分（阴离子）									HCO_3	SO_4	Cl		
（阳离子）									Ca，Na Mg	Na，Ca Mg	Na，Ca Mg		Fe 包括2价和3价
特殊成分 mg/L	Rn>3	CO_2>1	点S量大于2	Fe>10 (Fe^{2+}+Fe^{3+})	I>5	Br>25	As>0.7	H_2SiO_3 大于50					Rn 以马赫作单位

表 2.4.99 饮料矿泉水标准（1986年地矿部试行标准）

化学成分 mg/L	游离二氧化碳	氡	偏硅酸	二价和三价铁	锂	锶	氟	溴	偏硼酸	碘	钼	锌	硒
饮料矿泉水标准	>250	>3.5	>25	5～10	0.2～2	0.2～4	1～2	0.2～1	1～5	0.2～1	0.05～0.5	0.2～5	0.01～0.1
备 注	命名标准>1000	命名标准>5.5	命名标准>50	命名标准>10					以H_3BO_3计				

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 2.4.100 综合评价（热田）

项　　目	碘（I）	溴(Br)	铯(Cs)	锂(Li)	铷(Rb)	锗(Ge)
单位	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
含量	20～30	20～200	>80	>25	>200	>5

表 2.4.101 开采深度

温　　度，　℃	开　采　深　度，　m
<40	<1000
40～60	1000～1500
60～100	1500～2500
>100	>2500

表 2.4.102 热田发电规模

项　　目	大　　型	中　　型	小　　型
发电量，万kW	>5	1～5	<1

参 考 文 献

[1] 冶金地质动态，1978年，第5期.
[2] 全国储委办公室主编，矿产工业要求参考手册，地质出版社，1986. 3.
[3] 《黑色金属矿石选矿试验》编写组编，黑色金属选矿试验，冶金工业出版社，1978.
[4] 〔苏〕B. H. 维诺格拉多夫著，综合性矿物原料的经济评价，冶金工业出版社，1984.
[5] 矿产综合利用，1986年，第1期.
[6] 中国地质报，1986, 7.
[7] 中国地质报，1988, 3.
[8] 日本金属学会报，1978年，第3期.
[9] 光明日报，1979, 2, 22.
[10] 杨敏之、任英忱、邓禹仁，铂族元素及铂矿地质，科学出版社，1973.

地信网论坛
bbs.3s001.com

[11] 工业レアメタル，1970—1978，№3.
[12] World Energy Supplies, 1970—1973, 1972—1976.
[13] Развадка и Охрана Недр, 1973, №11.
[14] Горный Журнал, 1978, №7.
[15] Mineral Trade Notes, 1978, Vol. 775, №2.
[16] Canadian Mining Journal, Vol. 98, №2, 1977, p.91
[17] 《稀土》编写组编，稀土，冶金工业出版社，1978.
[18] World Mining, 1978, Vol. 31, №6.

地信网论坛
bbs.3s001.com

3 工艺矿物学

地信网论坛
bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.0 绪 论

工艺矿物学是在矿物学和矿物原料工艺学之间发展起来的边缘学科。它是随着矿物处理和矿物原料加工工业的不断发展，在应用矿物学领域内出现的以解决矿物处理和矿物原料加工工艺过程中存在的矿物学课题为主要内容的学科。虽然就其产生的历史而言，可以追溯到本世纪初叶甚至更早一些，但从理论体系、研究内容与方法和研究对象等方面发展成为一门真正独立学科却是最近十几年的事。

实践证明，工艺矿物学在地质勘探、选矿与提取冶金工艺以及化工、建材、玻璃、陶瓷、耐火材料和能源等各个领域中所作出的卓有成效的应用，展示了它的广阔前景。本手册所讨论的重点是选矿工艺矿物学。

在合理开发和利用矿产资源中，选矿工艺矿物学的地位与作用越来越为人们所重视。多年的科研、生产实践表明，若能从矿点的发现或地质勘探阶段就重视工艺矿物学的研究，将会使人们获得对矿床更全面的认识，因而能作出更为正确的评价；若能在矿山、选矿厂建设前期就对矿石进行详尽的工艺矿物学研究，这将会对选矿试验方案的选择和最佳工艺流程的确定起到重要的指导作用。在工艺流程试验、扩大试验、半工业试验乃至建厂投产调试或选厂现行流程改造过程中，也都必须进行工艺矿物学研究，因为它能够查明选矿工艺各阶段矿物或元素的性状；查找影响产品质量的因素；评价流程的合理性，为提高选矿指标和现厂挖潜、节能提供改造工艺流程的准确可靠的矿物学信息。

选矿工艺矿物学的主要内容是：不仅研究各类矿石的化学组成和有益、有害元素的赋存状态与分配；同时要查明有用矿物和杂质矿物的嵌布粒度、嵌布形态和它们在破磨过程中的解离特性，把握有用矿物或杂质元素在选矿工艺过程中的性状、行为和有用

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿物的回收效果。以完成指导选矿可能以何种途径将其分离、提取与利用的基本任务。

实践证明，对工艺有指导作用的工艺矿物学工作内容是非常广泛的。于今已不限矿物定性定量，元素赋存状态考查，有关矿物粒度分析和测定某些矿物的物理性质。进一步的发展已涉及到微观领域的变化所引起的对选矿工艺产生影响的研究。当然，要同时进行这方面的研究是困难的，也不是完全必要的。正确的做法是在为工艺提供一般的基础资料后全力以赴去查找影响选矿指标的主要问题，并能对存在问题尽快地作出正确判断。

总之，无论是评价矿区、研究和开发矿产资源、或是确定合理选矿工艺流程以及提高选厂生产指标，进行生产问题的分析等，都必须掌握矿石或选矿物料的物质成分与工艺特性，离开工艺矿物学的研究来谈新的选矿工艺的诞生是不可思议的。特别是当前面临着日益增加的低品位、高杂质、难选矿石的选别和二次资源的综合利用，要想充分回收有用矿物和促使提取有价金属的技术高度发展，只有靠选矿工作者与工艺矿物学工作者进行创造性的合作，才有可能实现。

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.1 矿 物 的 性 质

矿物性质是矿物本身的内在属性，可分为化学性质及物理性质。这些性质是矿石加工处理的基础，是制定选冶工艺流程的依据。

3.1.1 矿物的化学性质

矿物的化学性质包括化学成分的变化、矿物化学分类、矿物化学式、同晶现象、类质同象、晶体化学、矿物的可溶性、矿物的氧化和还原等。这些性质直接关系到选矿产品的优劣及选矿流程的选择。

矿物的化学成分有单质，如自然金、自然铜、自然银；有简单化合物，如赤铁矿（Fe_2O_3）、石英（SiO_2）、磁黄铁矿（FeS）、盐（NaCl）；也有复杂化合物，特别是复盐，如白云石（$(CaMg)[CO_3]$），钠长石（$NaAlSi_3O_8$）。

3.1.1.1 矿物的化学分类

矿物学一般都是按化学成分分类的。通用的分类法是：元

表 3.1.1 矿物的化学分类

类别	阴离子	实例
自然元素	无	自然铜(Cu)
硫化物及类似化合物	S^{-}及类似的阴离子	黄铁矿(FeS_2)
氧化物及氢氧化物	O^{2-}, OH^{1-}	赤铁矿(Fe_2O_3)，水镁石$Mg(OH)_2$
卤化物	Cl^{1-}, F^{1-}, Br^{1-}, I^{1-}	食盐(NaCl)
碳酸盐及类似化合物	CO_3^{2-}及类似阴离子	方解石($CaCO_3$)
硫酸盐及类似化合物	SO_4^{2-}及类似阴离子	重晶石($BaSO_4$)
磷酸盐及类似化合物	PO_4^{3-}及类似阴离子	磷灰石($Ca_5F(PO_4)_3$)
硅酸盐	SiO_4^{2-}	辉石($MgSiO_3$)

地信网论坛
bbs.3s001.com

素、硫化物、卤化物和含氧化合物。由于含氧化合物的种类和数量很多，所以又以晶体化学为基础进一步再分为：氧化物、氢氧化物（无络负离子），含平面络负离子的硝酸盐、碳酸盐、硼酸盐（图3.1.1）；硅酸盐的种类和数量较其他盐类多，因而按硅氧四面体构造排列方式划分若干亚类。矿物化学分类及硅酸盐的构造分类列于表3.1.1和表3.1.2。

表 3.1.2 硅酸盐的构造分类

亚 类	构 造 排 列	Si：O	实 例
岛状硅酸盐	独立的四面体	1：4	镁橄榄石($Mg_2[SiO_4]$)
群状硅酸盐	两个硅氧四面体共用一个氧	2：7	异极矿($Zn_2[(OH)_2|Si_2O_7]\cdot H_2O$)
环状硅酸盐	每个硅氧四面体环共用两个氧	1：3	绿柱石($Be_3Al_2Si_6O_{18}$)
链状硅酸盐	连续的两个单链硅氧四面体共用两个氧	1：3	顽火辉石($Mg[SiO_3]$)
	连续的双链硅氧四面体交替共用两个及三个氧	4：11	直闪石($Mg_7[(OH)_2|Si_4O_{11}]$)
层状硅酸盐	每个连续硅氧四面体层共用三个氧	2：5	金云母($KMg_3[(OH)|AlSi_3O_{10}]$)
架状硅酸盐	每个连续硅氧四面体的网架共用所有的四个氧	1：2	石英(SiO_2) 霞石($NaAlSiO_4$)

3.1.1.2 矿物的化学式

矿物化学式可以表示矿物化学建造单元数量的比例关系。矿物的化学成分是矿物分类的基础。化学式按照定比定律确定各元素的量。化学式也称实验式，可由化学分析结果直接计算而得。矿物化学式多数情况下不等于分子式，但有时一致。矿物的化学简式与单位晶胞数的乘积则为分子式。例如，磁铁矿的化学式为$FeFe_2O_4(FeO, Fe_2O_3)$，而分子式为$Fe_8Fe_{16}O_{32}$；金红石的简式与锐钛矿、板钛矿的化学简式相同，都为TiO_2，而分子式分别为Ti_2O_4（金红石），Ti_4O_8（锐钛矿）及Ti_8O_{16}(板钛矿)；化学式表示简单的成分比例，分子式表示单位晶胞中TiO_2总量。

矿物化学式的书写方法按规定：对于矿物可以互相置换的元素放在圆括号内，用逗号分开，例如铬尖晶石((Fe,Mg)(Al,

地信网论坛
bbs.3s001.com

$Cr, Fe)_2O_4$），镍黄铁矿（$(Ni, Fe)_9S_8$），角银矿（$Ag(Cl, Br)$）。如果置换（或类质同像交代）数量是有限的，将次要元素用小号字表示，例如，淡红砷铜矿（Cu_9As），As可达12%；闪锌矿（$(Zn, Fe)S$），Fe可达20%。如果，固溶体混晶中没有化学结构关系，而可以增加或减少质的置换，其化学式为：CaF_2—YF_3混晶，写为$(Ca, Y)F_{2-3}$；Na_2SO_4--$CaSO_4$混晶写为$(Na, Ca)SO_4$；$LiMnPO_4$—$FePO_4$混晶写为$Li_{<1}(Mn, Fe)PO_4$。圆括号内可置换元素的排列通常按数量的主次，由多到少。

络负离子化合物的矿物化学式的书写是将络负离子放在方括号内，如果是混合负离子，把外来的络负离子与络负离子用竖线隔开放在方括号内的左边。正离子放在方括号外的左边，排列顺序按离子半径递减，如榍石($CaTi[O|SiO_4]$)，白云母($KAl_2[(OH)_2|AlSi_3O_{10}]$)，磷灰石（$Ca_5[F|(PO_4)_3]$）。外来负离子放在左边更靠近正离子的原因是因为它们与正离子单独结合的缘故。有的与正离子、又与络离子结合。这些规定不要求严格执行。

3.1.1.3 矿物晶体化学

矿物是结晶质，结晶质是由化学建造单元中原子、离子、分子在三度空间作周期性排列而成的，因此形成了空间格子构造，或者说晶体是由无数细小而成分和构造相同的单位晶胞组成的。每个晶胞具有一定的大小，晶格结点间的距离用晶格常数a_0、b_0、c_0表示。晶格中原子排列是对称的，化学建造单元的数量比例用化学式表示，大小用原子半径和离子半径表示。键性是由原子价和离子价和电子建造产生的。

结晶建造单元是原子、离子和分子。一般可以把它们的作用范围看作理想或稍有畸变的球体。各种原子或离子的半径根据试验所确定的大小约为0.2～2.0埃（Å）之间。作用范围大小受配位数的多寡略有变化。原子半径一般随其配位数的增加而略有增大。结晶格子是解释晶体表面性质的重要判据。结晶格子可分为：

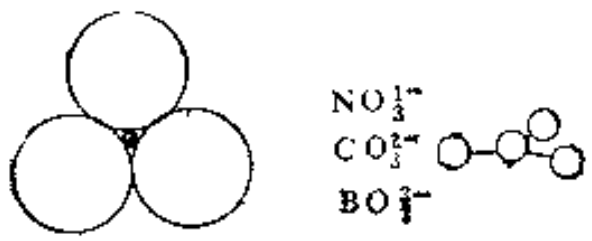
A 离子晶格

离子晶格是矿物晶格中最广泛的一种类型，包括各种盐类、

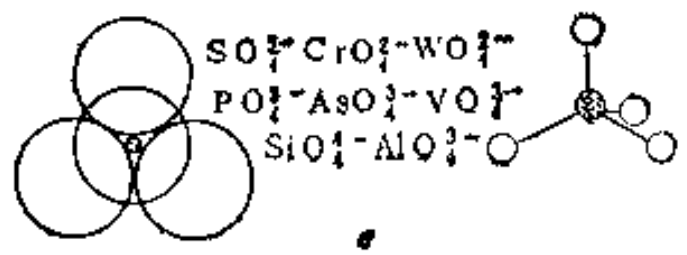
地信网论坛
bbs.3s001.com



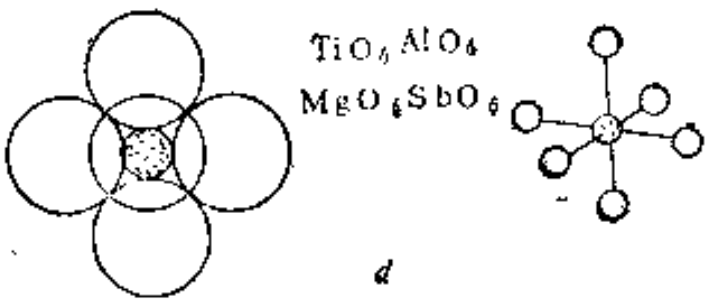
a



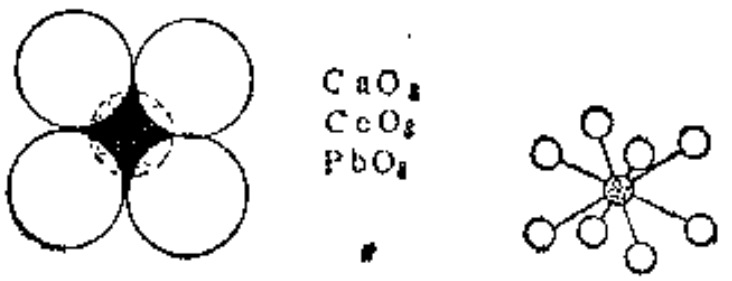
b



c

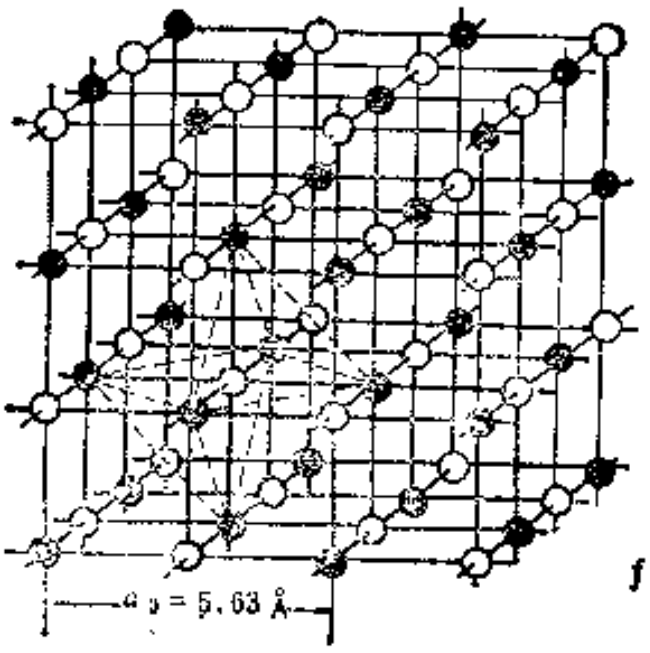


d

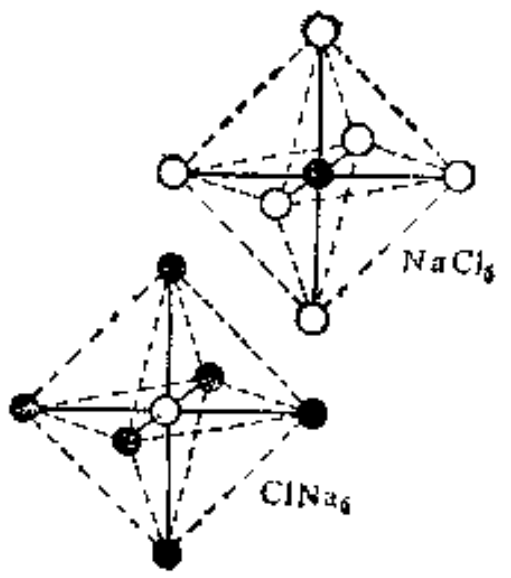


e

图 3.1.1 晶体常见的配位群
a—Cl^{1-}、F^{1-}、OH^{1-}、O^{2-}的负离子；b—硝酸盐、碳酸盐、硼酸盐的基，NO_3^{1-}、CO_3^{2-}、BO_3^{3-}；c—硫酸盐、磷酸盐、硅酸盐等的酸基，SO_4^{2-}、PO_4^{3-}、SiO_4^{4-}；d—钛酸盐、铝酸盐等的基，TiO_6、AlO_6；e—较少见的基；f—食盐$NaCl_6$的配位群晶体



f



地信网论坛
bbs.3s001.com

卤化物、氧化物等。具有离子晶格的矿物几乎占80%以上，如碳酸盐、硅酸盐、磷酸盐、氯化物、氟化物、氧化物等。

离子晶格是由正负离子相互交替排列而成。相反电荷之间的库伦引力是离子晶格的化学键能，即晶格能，它等于化学键形成时所放出的能量，或化学键破裂时所吸收的能量，由于这种能量使晶格保持住一定的构造和性质。可用配位图表示正负离子的空间关系。在四面体配位中分为四个分价线，八面体配位中分为六个分价线，立方体配位中分为8个分价线（图3.1.1*b*,*d*)。食盐的配位中每个Na^+和Cl^-周围都是6个分价线，每条分价线为1/6价（图3.1.1*f*），构成八面体图形。在萤石（CaF_2）中，Ca^{2+}的周围有8个分价线，每条分价线相当于2/8价，F的周围有4个分价线，每条相当于1/4价（图3.1.2）。

离子晶格类型中有许多属于络负离子，在络负离子内部的结合比正离子与络负离子的结合更加紧密。在这种结合中有时为同极键，如CO_3、SO_3、SO_4、PO_4、SiO_4等，在$CaCO_3$(方解石)晶体构造中每个O以4/3价与C结合，而以2/3价与2个Ca结合（图3.1.3），O的总价为3/4+2/6+2/6=2。按静电价定律L.（鲍凌等），O分价的总和永远是2或近子2，它适合于极复杂的氧化物晶体。

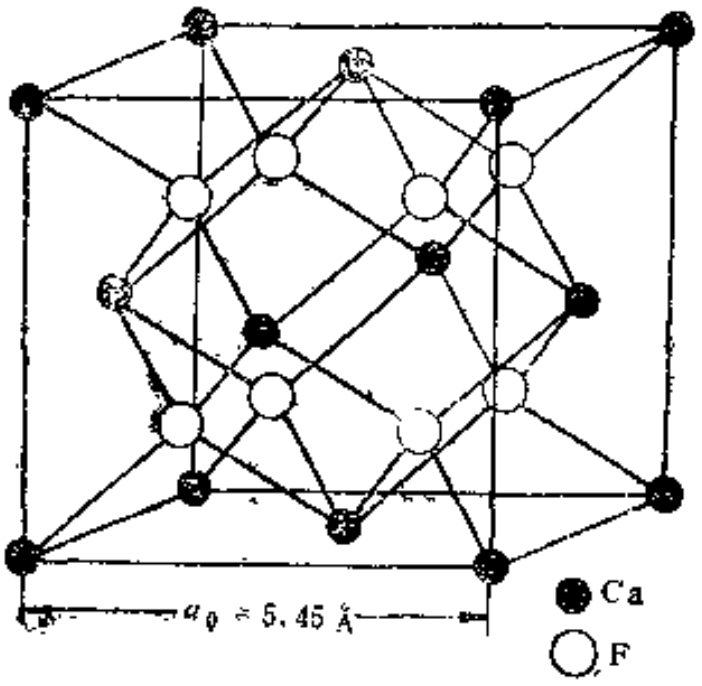
离子晶格矿物具有高硬度、高熔点、能透明、绝缘性中等的特点。

B 金属晶格

金属晶格特点是原子的自由电子在整个晶体中自由移动，是金属键结合而成的晶格。原子结合是通过易分离的价电子构成的键性，电子像电子云一样在相邻原子所构成的晶格之间自由移动。金属晶格的几何形态是简单的，晶格能是中等的。由于电子在晶格中自由移动，晶体具有强的导电性及反射力，以及延展性和可塑性。金属键晶格除金属和合金之外也见于许多硫化物和砷化物。石墨具有两种形式的化学键，金属键和分子键过渡类型，层内为金属键晶格，具有良好的导电性，层与层之间为分子晶格

地信网论坛
bbs.3s001.com

的距离，金属键力较弱，容易断裂。



石萤CaF_2

(a_0=5.46)

图 3.1.2 萤石的立方体格子

Ca为8F所包围，F为4Ca包围

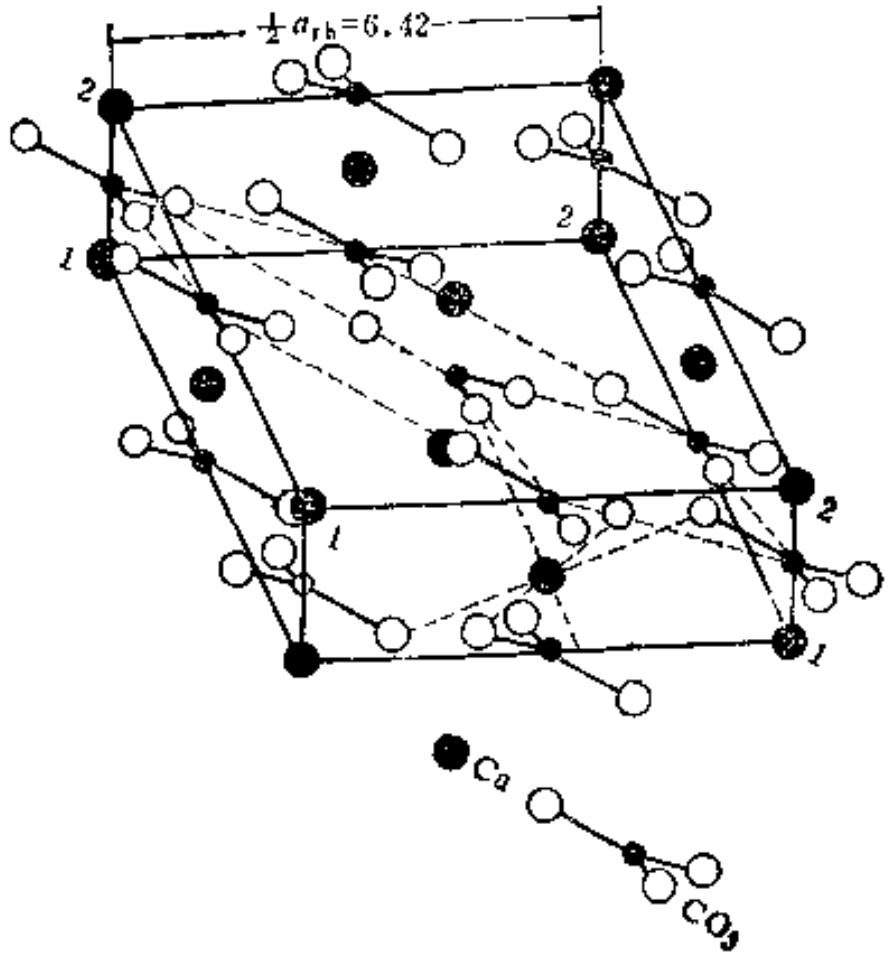


图 3.1.3 方解石的菱形格子

O以4/3价与C结合，以2/3价与2个Ca结合，总价为2

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属晶格具有很高的配位数，如铜、金、银、铂等。每个原子为12个相邻的原子包围成立方—八面体状。八面体的面就是原子排列最紧密的晶格面。金属晶格应属原子晶格类。

C 原子晶格

原子之间是以共价键结合而成的晶格，电子同时属于两个原子所共有，配位数偏低。金刚石的晶格是典型的原子晶格，其中碳原子以同极键形成相互包围的立方体，每个碳原子被另外四个碳原子包围，每个碳原子同时属于两个相邻的碳原子。电子轨道固定得很牢固，结果形成了不导电、高硬度、透明、非金属光泽、高熔点的特征。这类矿物除金刚石外还有硅、锗等晶体。

D 分子晶格

分子晶格各点之间是由分子键结合起来的晶格。分子与分子之间是以极弱的余价结合，这种结合力称范德华力。每个分子内部原子间的距离比分子与分子之间的距离小很多，如斜方硫为环状的S_8分子，分子内部原子之间的距离为2.12Å。分子之间的最短距离为3.3Å。分子晶格中由于分子间结合力弱而硬度低，易变形和易熔融，不导电。斜方硫的晶格如图3.1.4。

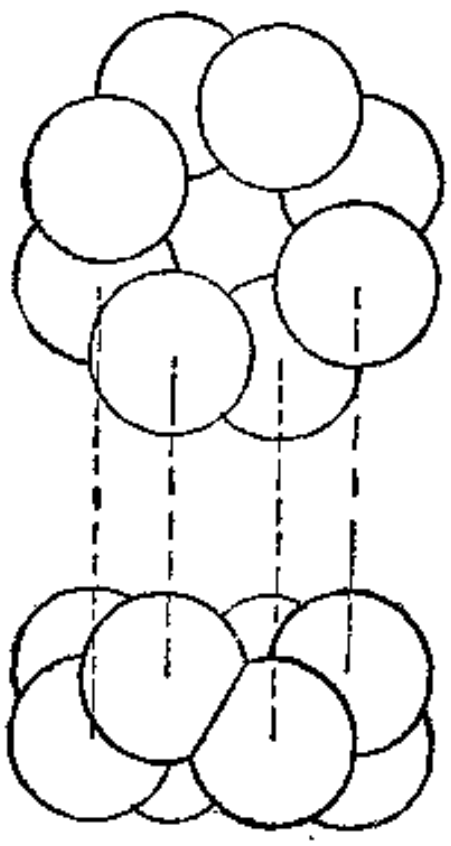


图 3.1.4 硫的分子结构八个S排列成环状

地信网论坛
bbs.3s001.com

分子与分子的间隙大，结合力弱，容易开裂，其开裂面呈原子价饱和状态，与水亲和力小，在浮选矿中容易浮起。但是，完全为分子结构的矿物并不多见，有些矿物具有两种晶格类型，即分子晶格和离子或金属晶格兼有，如滑石、辉钼矿、辉钨矿、石墨、叶蜡石等。

E 同晶现象

在矿物晶体中某些原子、离子或分子的位置，部分或全部被其他原子、离子或分子所占据，或者说晶体中的化学成分不同而晶体结构完全相同，属于同一构造类型的结晶体，称为同晶现象。造成同晶现象的原因是化学建造单元数量比例及大小比例相同或相似之故。例如，NaCl-PbS-MgO之间、CaF_2-CeO_2-Na_2S之间、$NaNO_3$-$CaCO_3$-$MgCO_3$-$FeCO_3$-$MnCO_3$-$InBO_3$之间都属于同晶现象。同晶现象的含义是总化学式相似，晶系和空间群相同，晶格常数和原子坐标值以及各原子所占据的点位相似。

同晶现象包括了类质同像，但是并不意味着它是否可能造成混晶。

F 类质同象

类质同象是同晶现象中的特殊现象，但是在自然界矿物中是极普遍的。类质同象是指晶体结构中某些原子、离子或分子的位置被化学性质相似、半径相近、电价相等的原子、离子或分子置换，但是，仍保持原有晶体结构类型、化学键型及离子正负电荷的平衡，唯有晶胞参数和物理性质随其置换数量的多寡而作线性变化。具有类质同象的晶体称为固溶体或混晶。

类质同象的置换性可使我们进一步认识各种晶体彼此之间的关系和它们的建造单元。例如，铁和锌在离子晶格的碳酸盐中可以任意比例互相置换（$FeCO_3$-$ZnCO_3$），在Fe_2SiO_4（铁橄榄石）中发生有限置换，而在Zn_2SiO_4中不发生置换。闪锌矿（ZnS）中的Zn可以被Fe作有限置换，而在磁黄铁矿（FeS）中又不能置换。

由于类质同象不是指整个晶体的置换，而是晶体中某些单独

地信网论坛
bbs.3s001.com

组分变化。所以，不同比例混合均匀的晶体，用机械选矿法不可能将其分离。

G 同质异象

同质异象也称同质多象、同质异形、同素异构或同质异晶等。顾名思义，即相同化学成分，不同结构的矿物晶体。如果是单质则称同素异构或同素异形体，如石墨和金刚石的成分都是由碳组成，前者为六方晶系，后者为等轴晶系，物理性质完全不同；铁在<910℃时为α-Fe（体心立方格子），在910～1400℃之间变为γ-Fe（面心立方格子），在>1400℃时又为体心晶格的δ-Fe。如果是化合物应为同质多象或同质异象，如金红石、锐钛矿、板钛矿其成分都为TiO_2，但是结构完全不同，金红石为四方晶系，$z=2$（单位晶胞数）；锐钛矿也为四方晶系，但是$z=4$；板钛矿为斜方晶系，$z=8$。又如方解石和霰石（也称文石）的成分均为$CaCO_3$，低温时为三方晶系的方解石，较高温度时则为斜方晶系的霰石。

同质异象是由于不同温度和压力的结果，许多矿物晶体随着温度和压力的改变而不稳定，转为另外一种晶形，从而改变成另一种物理性质。在工业上就利用这种特性达到所要求的目的。碳在高温及高压以及触媒的作用下生成硬度很大的金刚石，而在高温常压下生成石墨；Al_2O_3有三种同质异象变体，α-Al_2O_3三方晶系，最稳定，可在500～1500℃之间形成；β-Al_2O_3在高温时（1500～1800℃）稳定，当缓慢冷却时转为α-Al_2O_3；γ-Al_2O_3为等轴系，在950℃灼热一水软铝石形成，温度更高时转为α-Al_2O_3。

3.1.1.4 矿物中的水

含水矿物数量较多，按水在矿物中的基本存在形式可分为三种类型。

A 结晶水

在矿物的结晶格架中占据固定的位置。水分子和其他成分一样成简单整数比。例如石膏（$CaSO_4 \cdot 2H_2O$），碱（$NaCO_3 \cdot$

地信网论坛
bbs.3s001.com

$10H_2O$）。含结晶水的矿物也称含水化合物。在加热时结晶水容易脱出，脱水方式可分为一次性的，或多次性的。在脱水的同时结晶格架发生改变。水分子和主要化合物保持一定的比例，例如胆矾（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）的脱水，开始时可形成$CuSO_4 \cdot 3H_2O$，接着生成$CuSO_4 \cdot H_2O$，最后变成$CuSO_4$。不同的矿物具有不同的脱水温度范围和时间。有的矿物在室温下即可脱水，当然也可以增水；另外一些矿物需要在较高的温度下脱水，脱水后矿物的密度（比重）、折光率和颜色等都可能发生改变。

B　结构水

结构水是以$(OH)^{1-}$或$(H_3O)^{1+}$离子形式参加晶体结构，具有固定的配位位置和确定的含量。可以替换F^{1-}、Cl^{1-}等离子。加热时不易逸出，只有在灼热条件下化为水气逸出，例如孔雀石（$Cu_2[CO_3][OH]_2$）等。在化学分析中$[OH]^{1-}$当作H_2O的形式进行测定。

C　游离水

在矿物中不参与结晶格架，加热时容易失去，没有固定的脱水温度，而是渐变的脱水，不象结晶水是跳跃式的。游离水有三种形式，即沸石水、胶体水、附着的毛细管水。沸石晶体呈有通道的管状，水存在于细小的通道管中，在一般室温条件下不容易失去，加热80～400℃时能脱除。胶体水实际上是附着水，它与微粒物质表面以极弱的结合力保持着，不参与矿物的结晶格架。毛细管水是保持于矿物的细小缝隙中，以表面张力维持着，加热100～110℃时即可脱除。

3.1.1.6　矿物的氧化与还原作用

许多矿物在氧化还原条件下不稳定，容易发生氧化或还原，有的矿物消失，有的矿物产生。氧化还原作用是改变矿物性质的重要方式。自然界的氧化还原作用常使某些容易浮选的硫化矿石变得难选，而难分选的矿物组合又可利用氧化还原作用使之彼此分开。例如，赤铁矿难磁选，当采用还原焙烧会使赤铁矿变为磁铁矿，因而变得易选。

地信网论坛
bbs.3s001.com

$$3Fe_2O_3 + CO \xrightarrow{\Delta} 2Fe_3O_4 + CO_2 \uparrow$$

未氧化的硫化矿最容易浮选，但是破碎后的硫化矿石不能久放，因为硫化物在空气中表面容易氧化，产生氧化膜使疏水性的表面变成亲水性的而影响浮选效果。滑石与辉钼矿的组合难分离，当采用氧化处理后则可使其辉钼矿表面发生氧化，改变矿物的疏水性，从而使之分开。

3.1.2 矿物的物理性质

从宏观形态到内部结构，以及成分上的微小变化都能引起矿物物理性质的变化。矿物的物理性质是制定选矿工艺流程的重要依据。

3.1.2.1 晶体的几何形态

晶体几何形态遵循结晶学的基本定律即面角守恒定律，有理指数定律，晶面趋向最小定律及对称定律。自然界晶体的外形因受生成时的环境所限，晶面发育通常很不完善，因此宏观结晶学的研究逐渐为微观结构的研究所代替。

A 面角守恒

可由结晶完好的宏观晶面夹角证实，也可由晶体内部结构的晶格研究来判断。同一类单晶外形的面角相等。在相同成分、温度、压力条件下所形成的晶面夹角相等。在面角守恒的研究中推导出结晶轴率和各轴之间的夹角。结晶轴用 a、b、c 表示；轴率用 $a:b:c$ 表示；夹角用 α，β，γ 表示。用 X-射线仪器测定的轴率 $a_0:b_0:c_0$ 与宏观结果一致。晶体的十四种空间格子如图 3.1.5所示。

B 有理指数定律

任何晶体的晶面和晶轴切割时则产生简单的整数比，用 $ma:nb:pc$ 或 $p:q:\gamma$ 符号表示。截轴表示晶面时称晶面符号。现在通用的晶面符号是米勒符号 (hkl)，米勒符号为晶面标轴系数的倒数比，即 $\frac{1}{p}:\frac{1}{q}:\frac{1}{\gamma}=h:k:l$。米勒晶面符号使用简

地信网论坛
bbs.3s001.com

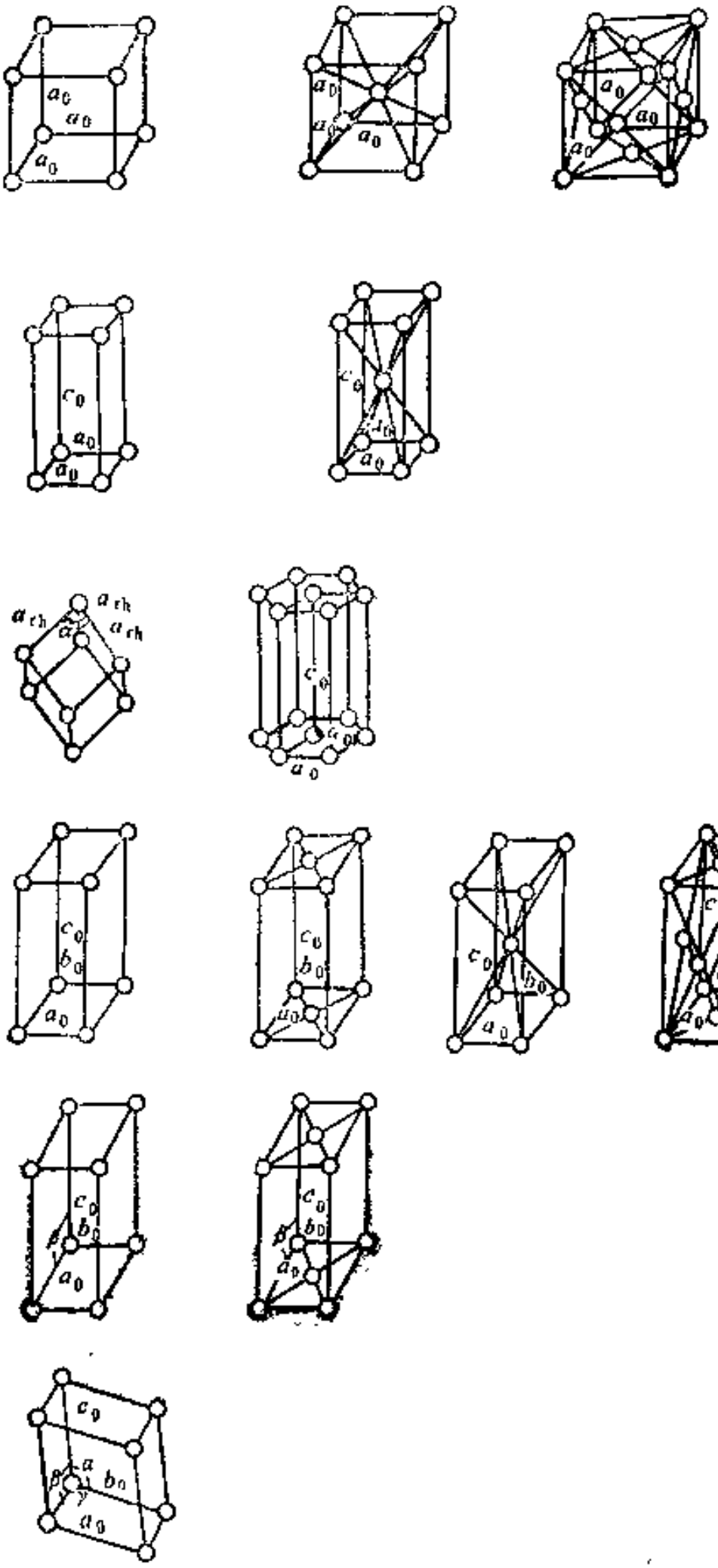
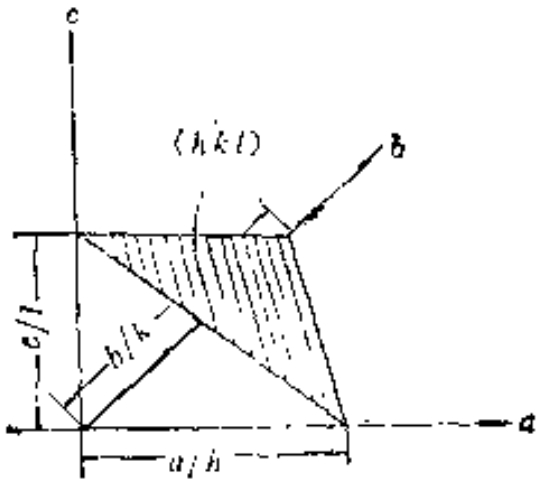


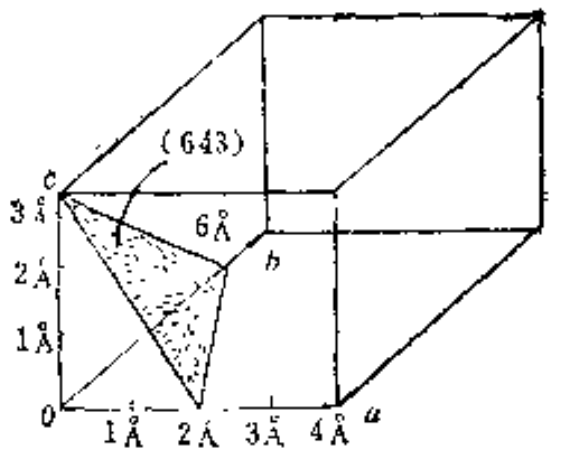
图 3.1.5 晶体的14种空间格子

地信网论坛
bbs.3s001.com

便，晶面指数与晶面的平面方程式的系数完全一致，(hkl) 即用来表示晶面指数，也即晶面符号。(hkl) 晶面在晶轴上的截距关系如图3.1.6*a*,*b*所示，a/h、b/k、c/l；其分数截距为$1/h$、



(a)



(b)

图 3.1.6 晶面符号与晶轴截距之间的关系

$1/k$、$1/l$。从示意图上的数据可知其关系如下：

晶轴长	$a=4$Å	$b=8$Å	$c=3$Å
晶轴截距	2Å	6Å	3Å
分数截距	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
米氏符号	2	4/3	1
	6	4	3

C 晶面能最小定律

晶体均以晶格中最紧密的面网形成包围晶体的表面，以便能减少表面能、形成稳定状态，而有理晶面的自由表面能为最小。

地信网论坛
bbs.3s001.com

D　晶体构造

空间格子是晶体构造中的结点在三度空间排列而成的。空间格子单位是平行六面体，即单位晶胞。晶胞的大小和形状用a_0、b_0、c_0和轴角α、β、γ表示（图3.1.7）。

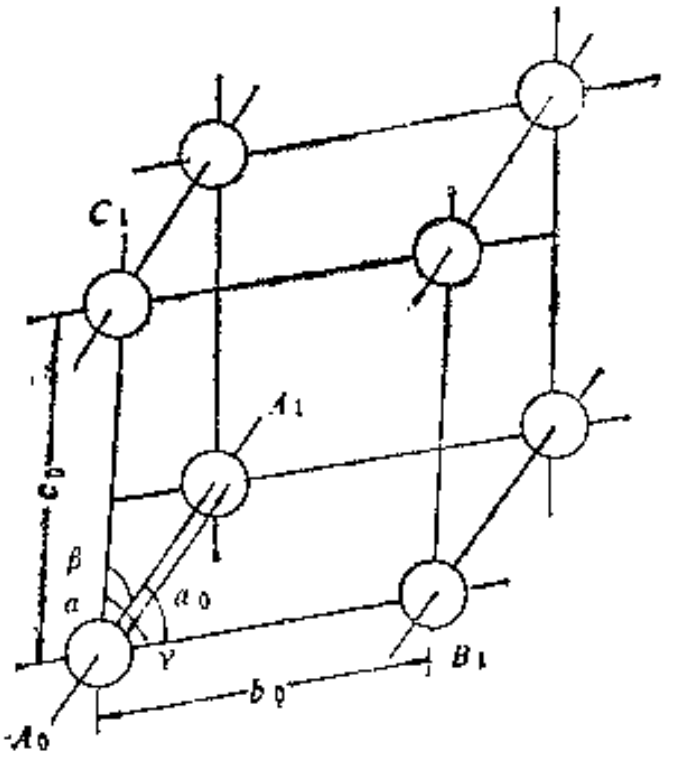


图 3.1.7　晶体的最小单位——晶胞平行六面体

晶体的空间格子共14种，其名称是根据晶胞形状和结点分布确定的。14种格子可分为7个晶系（6个晶系，将三方和六方晶系合并）。各晶系空间格子的晶胞参数特征如图3.1.5所示。

3.1.2.2　矿石的结构和构造

矿石的结构和构造是选矿工艺矿物学的重要内容，是矿石破碎、磨矿和选矿工艺必须考虑的因素之一。

A　矿石的结构

系指目的矿物的形状、大小和镶嵌关系。这些因素直接影响着选矿效果。矿物的形状和大小对破碎、磨矿、筛分及重选过程的影响尤为重要。不同的形状在考虑粒度分析、图像处理及沉降分析中所给定的校正系数也不相同，在矿物粒径测量中也必须考虑形状的影响。

a　矿物的形状

矿石在破碎后随着矿物自身的形状和解理发育程度不同而出

地信网论坛
bbs.3s001.com

现不同的形状，如云母类矿物呈片状，硅线石呈针柱状，蓝晶石呈板柱状，磁铁矿及黄铁矿呈不规则粒状等。矿物形状与自由沉降速度有一定的关系。球体具有规则对称的外形，作为理论上的颗粒在同体积的物体中球体的表面积为最小，因此用球体的表面积与同体积的其他形状矿粒的表面积之比作为球形系数，用 x 表示，差值愈大愈偏离球形。

$$\text{球形系数}x=\frac{\text{球体表面积}}{\text{同球体体积的他形表面积}} \tag{3.1.1}$$

表 3.1.3 矿粒球形系数

矿粒形状	球形	似球形	多角形	长条形	扁平形
球形系数 x	1.0	1.0～0.8	0.8～0.65	0.65～0.5	<0.5

在粒度测量中按照破碎、磨矿及筛分的规律，粒径大小的测定必须考虑矿物的形状。球形颗粒为等轴状，各向均等，可用直径 d 表示。自然界的矿物为他形结晶体占多数，如磁铁矿、菱铁矿、黄铁矿、石英等，破碎后也多为不规则的颗粒，三维轴不等但相近，用长轴表示粒径 d。片状矿物，有完全的 {001} 解理，在破碎后而成很薄的片状，片晶的平面轴相等或相近，测定时以平行于晶片的长轴代表粒径 d。柱状及针状矿物的 a 轴和 b 轴相等或相近，而 c 轴$>a$、b轴，一般用$d=\frac{a+c}{2}$表示粒径；如果 c 轴$\gg a$、b轴，则 用$d=\frac{a+b+c}{3}$表示粒径。板状矿物，如铌铁矿、钛铁矿、黑钨矿等，三维轴不等，相差较大，$d=\frac{\text{长轴}+\text{短轴}}{2}$表示粒径。

矿物形状的分类

矿物按形状可分成：

（1）非晶质或显微晶质。此类矿物有：鲕状绿泥石、铁蛇

地信网论坛
bbs.3s001.com

纹石、黑硬绿泥石、胶磷矿、海绿石，微晶高岭石。

（2）球状（球壳放射状）晶体。此类矿物有：方英石、玉髓、菱铁矿、碳磷灰石。

（3）颗粒状。此类矿物有：石髓、海绿石、方解石、胶磷矿、白云石、铁蛇纹石、赤铁矿。

（4）皮壳状微晶质或非晶质。此类矿物有：海绿石、碳磷灰石、针铁矿、三水铝石、白云石、褐铁矿。

（5）雏晶纤维状晶体。此类矿物有：阳起石、透闪石、纤闪石（角闪石）。

（6）纤维状晶体。此类矿物有：玉髓、钠闪石、硅线石、硬玉、纤维蛇纹石、蓝线石、直闪石、石膏。

（7）纤维针状晶体。此类矿物有：长石（微晶熔岩中长石）、霓石、针钠钙石、普通辉石、黝帘石（斜黝帘石）、阳起石、透闪石、绿帘石、直闪石、硅灰石、铁闪石、硅线石、角闪石、蓝闪石、电气石、金红石、钠闪石、钠铁闪石、文石、磷灰石、菱锶矿、硼镁铁矿、硼铁矿、针铁矿。

（8）针状放射状晶体。此类矿物有：直闪石、辉沸石、斜黝帘石、阳起石、柱沸石、绿帘石、方钠石、电气石、杆沸石。

（9）叶片状晶体。此类矿物有：钠长石、黝帘石、绿帘石、硅线石、硅灰石、普通辉石、硬石膏、霓石、蓝晶石、角闪石。

（10）片状晶体。此类矿物有：白云母、黑云母、锂云母、金云母、滑石、高岭石、叶蜡石、伊利石、石墨、绿泥石、蒙脱石、硬绿泥石、辉钼矿。

（11）片状集合体。此类矿物有：绢云母、滑石、高岭石、伊利石、蒙脱石、水镁石、三水铝石、叶蜡石、辉钼矿。

（12）自形晶体。

（13）柱状晶体。柱状晶体又可分成六方、正方、斜方、单斜和三斜柱状。

六方柱状。主要矿物有：霞石、电气石、绿柱石、刚玉。

地信网论坛
bbs.3s001.com

正方柱状。主要矿物有：黄长石、符山石、方柱石、锆石、金红石、黄铜矿、锡石。

斜方柱（假六方）。主要矿物有堇青石及文石（少见）。

斜方柱。主要矿物有顽火辉石、紫苏辉石、直闪石、橄榄石、黝帘石、黄玉、红柱石、十字石、铌铁矿-钽铁矿。

单斜柱。主要矿物有：单斜辉石、角闪石、斜黝帘石、绿帘石。

三斜柱。主要矿物有蓝晶石。

（14）板状晶体。板状晶体又可分成不同晶形。

六方。主要有赤铁矿、钛铁矿。

斜方。主要有黝帘石、硬水铝石、重晶石、粒硅镁石、独居石。

单斜。主要有长石、斜黝帘石、绿帘石。

三斜。主要有长石、蓝晶石。

（15）楔状晶体。主要矿物有斜方：毒砂；单斜：榍石；三斜：斧石；假等轴：方英石（假八面体）。

（16）菱形晶体。主要矿物有：方解石组、明矾石（假立方体）；白云石组、菱沸石（假立方体）、白钨矿。

（17）等轴状晶体。此晶体可分成立方体、四面体、八面体。

立方体。主要矿物有：方铅矿、黄铁矿、方镁石、钙钛矿、石盐、萤石。

四面体。主要矿物有：白榴石、方沸石。

八面体。主要矿物有钙钛矿、方镁石、磁铁矿、尖晶石、铬铁矿、方英石、白榴石。

（18）十二面体。主要矿物有：石榴石组、方钠石组。

（19）特殊形状和集合体。此形状和集合体有包裹或嵌晶：紫苏辉石及普通辉石镶嵌于基性岩或超基岩中。角闪石、直闪石-铝直闪石；堇青石、红柱石、十字石。

（20）共生状或共结状。此类可分成如下不同形状。

地信网论坛
bbs.3s001.com

微文象状：石英与正长石、微斜长石与钠奥长石共生。

蠕虫状：钠长石或奥长石中石英呈蠕虫状共生。

条纹状：正长石或微斜长石中钠长石或奥长石的共生。

固溶体分解的共生：钛磁铁矿中磁铁矿与钛铁晶石及钛铁矿的共生，斑铜矿与辉铜矿的共生，斑铜矿与黄铜矿共生，斑铜矿与黝铜矿的共生；辉铜矿与铜蓝、辉铜矿与硫铜银矿、黄铜矿与方黄铜矿、黄铜矿与黝铜矿、黄铜矿与磁黄铁矿、黄铜矿与铜磁黄铁矿、方铅矿与辉银矿、方铅矿与硫银铋矿、磁黄铁矿与镍黄铁矿、闪锌矿与黄铜矿、闪锌矿与磁黄铁矿、黄锡矿与铜磁黄铁矿、银与辉银矿、硫锰矿与磁黄铁矿、辉铋矿与辉银矿、斑铜矿与脆硫铜铋矿、方黄铜矿与磁黄铁矿、方铅矿与深红银矿或淡红银矿共生……。岩石中也常见有紫苏辉石与透辉石、易变辉石与透辉石、普通辉石与紫苏辉石共生等。

此外还有：他形粒状、溶蚀状、港湾状、残余状、乳滴状、羽状、角砾状、碎屑状、挤皱状等。

b 矿物的大小

原生矿物晶体或集合体的大小直接影响矿物的可选性及单体解离情况。有效的选矿工艺要求有效的粒度范围。原生粒度是制定破碎及磨矿的依据。矿物细小难解离，也难分选。粒度范围与选矿作业的关系 如 图3.1.8所示。

在矿石结构构造的描述中人们常以粗粒、中粒、细粒等相对量来描述矿石中目的矿物的大小。为了使用方便把这种称谓分六级，并规定了尺寸范围（表3.1.4）。

根据矿物大小可以描述各种具有一定尺寸的颗粒结构，如粗粒结构，微粒结构。

c 矿物的内部结构

解理是矿物内部结构性质之一。矿物内部结构质点群在三维空间排列的距离不同，在相同方向完全一致，在质点相距较远的平面最容易裂开。当晶体受力后沿键力弱的方向裂开，形成光滑的平面称之解理。矿物解理是一种普遍现象，但解理发育的程度

地信网论坛
bbs.3s001.com

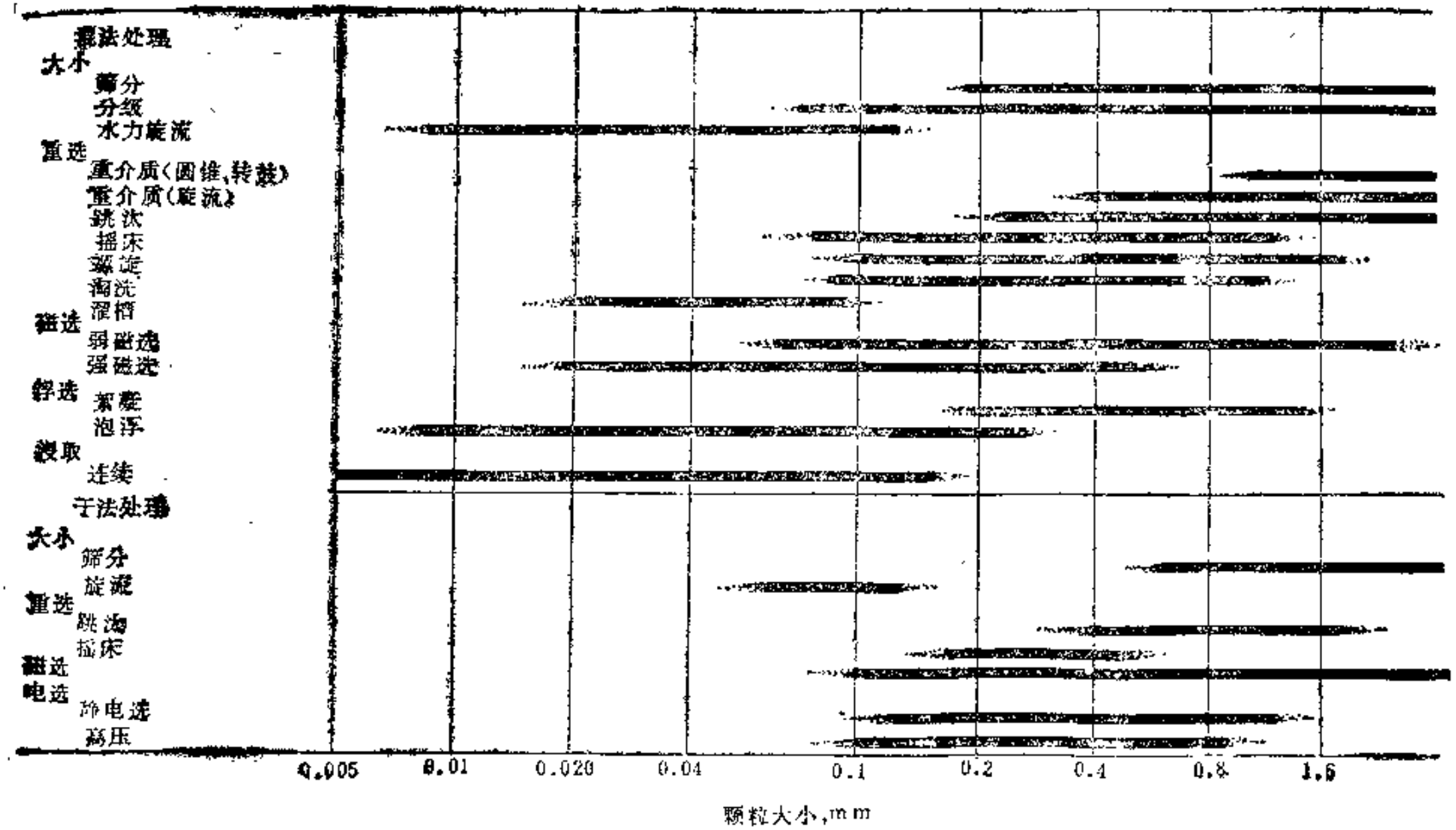


图 3.1.8 原生矿物粒度或大小与选矿作业的关系

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.4 粒级的划分

尺寸范围 mm	>20	20~2	2~0.2	0.2~0.02
	极粗粒砾	粗 粒 粗 砂	中 粒 中粒砂	细 粒 细 砂
尺寸范围 mm	>20	0.02~0.002	≤0.002	注
	极粗粒砾	微 粒 粉砂 微砂	极微粒 粘 土	矿 石 沉积物

随矿物种类不同而异。解理发育的矿物容易破碎，破碎后的颗粒具有明显的规则状，云母类矿物呈薄片状裂开，石棉以纤维状裂开，无解理的矿物如石英、石榴石等呈不规则裂开。矿物解理对矿石矿物的破碎和磨矿十分重要。矿物解理发育的程度不同，可分为一组、两组、三组、四组解理。表3.1.5和表3.1.6分别列出一组和两组解理的矿物

两组解理相交56°及124°的矿物：角闪石类矿物，两组解理为柱状，解理面为{110}及{1$\bar{1}$0}，解理平直而完全。

三组解理的立方体矿物：方铅矿、方沸石、方镁石。

三组解理六方柱状矿物：钙霞石、钠菱沸石。

三组解理菱形矿物：菱沸石、方解石、赤铁矿（裂理）、刚玉（裂理）、白云石组。

三组轴面及柱面解理的矿物：浊沸石{110}{010}、文石{110}{010}、菱锶矿{110}{010}、天青石{110}{001}、重晶石{110}{001}、硬石膏{110}{001}。

三组全轴面解理的矿物：硅灰石{100}{001}{102}、蓝晶石{100}{010}{001}、硬石膏{100}{010}{001}、石膏{100}{010}{101}。

四组八面体解理的矿物：萤石、紫硫镍矿。

四组二柱面解理的矿物：硬柱石{010}{001}{110}。

六组十二面体解理的矿物：方钠石、闪锌矿。

B 矿石矿物的构造

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.5 一组解理的矿物

矿 物	解理面	矿 物	解理面
白云母	{001}	橄榄石	{010}
黑云母	{001}	十字石	{010}
金云母	{001}	针铁矿	{010}
锂云母	{001}	一水硬铝石	{010}
绿泥石	{001}	铜 蓝	{001}
滑 石	{001}	磁黄铁矿	$\{10\bar{1}0\}$
叶蜡石	{001}	赤铁矿	{0001}
高岭石	{001}	水镁石	{0001}
片沸石	{010}	三水铝石	{001}
杆沸石	{010}	独居石	{001}
石 墨	{0001}	黄 玉	{001}
辉沸石	{010}	斜黝帘石	{001}
柱沸石	{010}	斧 石	{100}
黝帘石	{010}	辉钼矿	{0001}
硅线石	{010}		

表 3.1.6 两组解理成90°或近于90°的柱状矿物

矿 物	解理面	矿 物	解理面
辉 石	{110}	方柱石	{100}
锂辉石	{110}	红柱石	{110}
钠沸石	{110}	中沸石	{301}
钙沸石	{110}		

矿石的构造是指目的矿物群的形状、大小、数量和空间上的分布特征。前两种在结构描述中已涉及，不再重复。数量的变化在具体构造描述中要涉及。目的矿物的分布均匀程度与选矿工艺有关，不均匀分布的矿石可采用粗粒抛尾矿或手选。矿石矿物的均匀度定义为：

$$\text{矿石矿物的均匀度} = \frac{\text{含矿单元数}}{\text{测量单元数}} \times 100\% \qquad (3.1.2)$$

矿石矿物的均匀度分类列于表3.1.7。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.7 矿石矿物的均匀度分类

分布均匀类型	极均匀分布	均匀分布	较均匀分布	不均匀分布	极不均匀分布
均匀度，%	>95	95～75	75～25	25～5	<5

矿石构造一般是指宏观可见的，肉眼可以直接识别的，常见的构造类型有：(1)浸染状构造，此构造包括：星散浸染状构造，目的矿物<10%；稀疏浸染状构造，目的矿物10～30%；中等浸染状构造，目的矿物30～50%；稠密浸染状构造，目的矿物50～80%；块状构造，目的矿物>80%；(2)细脉状构造；(3)团块状构造；(4)胶状构造；(5)片状构造；(6)网脉状构造；(7)角砾状构造；(8)鲕状构造；(9)碎裂状构造；(10)斑状构造；(11)条带状构造；(12)结状构造；(13)糜棱状构造。

3.1.2.3 矿物的磁性

矿物产生磁性的根本原因是物质内部分子或原子中电子运动的结果。电子运动形成分子环流，因而产生磁场。电子运动方式一是围绕原子核作轨道运动；二是电子自身的自旋运动。轨道运动产生的磁矩很弱，可以忽略不计，而自旋运动产生的磁矩较强，是物质产生磁性的主要根源。矿物在未磁化之前内部磁矩取向紊乱，所以不显示磁性。当置于磁场中被磁化时，矿物内部磁矩取向一致，因而显示磁性。矿物磁性可分为抗磁性、顺磁性和铁磁性。

抗磁性物质：物质的分子本身不具磁矩，也不显示磁性，在外磁场作用下磁感应比实用磁场低，原子的磁矩方向与外磁场磁矩方向相反，因此磁性十分微弱，磁化率值为负值，当磁场撤去之后磁性立即消失。磁化强弱不受温度的影响。抗磁性矿物不能用磁选方法富集，如石英、方铅矿、黄玉、长石等。

顺磁性物质：本身具有永久性的原子磁矩，是因为原子中含有未被抵消的自旋磁矩和轨道磁矩的结果。在未被磁化时磁矩的方向是紊乱的，不显示磁性。但是，在外磁场作用下显示磁性，

地信网论坛
bbs.3s001.com

当撤去磁场时磁化现象立即消失。顺磁性物质的磁化强弱随温度的升高而成反比的变化，当温度升至居里点时而磁性消失，而温度降低时又恢复原有的磁性。这种现象是由于分子热运动的结果，造成晶体无度增大，因而磁性减弱。顺磁性矿物数量很大，如钛铁矿、金红石、黑钨矿、独居石、菱铁矿、磁黄铁矿、铬铁矿、赤铁矿及锰矿物组等。有些矿物本身就是顺磁性的，如镍、钴、锰、铈、钛、及铂族金属的矿物。

铁磁性物质：铁磁性应当被认为是顺磁性的特殊情况。本身具有很强的磁性，在外磁场作用下磁化强度很大，并随其磁场强度的增强而增强，当磁场达到一定的强度时不再增加，此时称磁饱和现象。当磁场撤去之后铁磁性物质保留剩磁。这些特征可用磁畴理论解释。铁、镍、钴及稀土元素钕制成的合金磁钢和某些氧化物具有很强的磁性。钕合金钢的磁性可以吸引起比自身重600多倍的铁磁性物质。磁铁矿是典型的铁磁性矿物。

磁选工艺是借助矿物在外磁场作用下磁化强度大小选择分离条件的。在矿物磁选分类、对比、描述常用磁滞曲线及磁饱和、剩磁、矫顽力等原理解释矿物在磁选中的行为。

磁化率是常用的参数，已测得的数据列入以后的表内。磁化率是指矿物在外磁场作用下被磁化的程度，用下列公式表示：

$$k = \frac{J}{H} \tag{3.1.3}$$

式中 k——磁化率（或磁化系数）；

H——磁场强度，Oe(应换算为A/m，1Oe≅(1000/4π) A/m)；

J——物质被磁化的强度（单位体积内产生的磁矩）。

比磁化率$\chi = k/\delta$，δ—密度，kg/m^3。

磁化率为无量纲，但是人们常赋予单位，即cgs电磁单位(emu)/厘米^3，或电磁单位(emu)/克表示，后者称比磁化率(χ)，在国际单位制$MKSA$中其数值为高斯单位中的4π倍。矿物磁性大致可分为四大类，比磁化率$\chi > 600 \times 10^{-6}$厘米^3/克为

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.8 矿物、岩石及磁性物质的矫顽力

名 称	矫顽力 A/m(Oe)	注
磁铁矿	1590	纯（24℃）
	(20)	
赤铁矿	60420	纯（24℃）
	(760)	
	34185	纯（24℃）
	(430)	合成
磁黄铁矿	1192.5～1590	纯
	(15～20)	
磁铁矿矿石	23850～76320	TiO_2<1%
	(300～960)	
红砂岩	198750～477000	英国12个样
	(2500～6000)	
土壤	1590～1987.5	
	(20～25)	
角砾岩（月岩）	1192.5～9540	
	(15～120)	
辉长岩（月岩）	795	
	(10)	
斜长岩（月岩）	636～1192.5	2 个样
	(8～15)	
基性岩	636～1590	有的为（21～100）
	(8～20)	〔Oe〕(160～225)
铁	7.95～159	淬火样
	(0.1～2)	
镍	39.75～238.5	淬火样
	(0.5～3)	
	1192.5～2862	冷加工样
	(15～36)	
钴	397.5～1590	淬火样
	(5～20)	
	2385～7155	冷加工样
	(30～90)	
钢	143.1	冷轧Fe98.5%
	(18)	
纯铁	79.5	Fe99.91%
	(1)	

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.8

名　称	矫顽力 A/m(Oe)	注
硅铁	39.75 (0.5)	Fe96%
45号透磁合金	5.565 (0.07)	Fe54.7% Ni45% Mn0.3%
镍铁高导磁合金	3.975 (0.05)	Fe18% Ni75% Cr2%, Cu5%
镍铁铝超导磁合金	0.159 (0.002)	Fe15.7%, Ni79% Mo5%, Mn0.3%
铁钴磁性合金	159 (2)	Fe49%, Co49%, V2%
碳钢	3975 (50)	Fe98.1% Mn1%, C0.9%
钴钢	11925 (150)	Fe71.75%, Co17% C0.75%, Cr2.5%W8%
铝镍钴永磁合金 I	34980 (440)	Fe63%, Al12%,Ni20% Co5%
同　上 IV	55650 (700)	Fe55%,Al12%,Ni28%, Co5%
同　上 VI	59625 (750)	Fe49%, Al8%,Ni15%, Co24%, Cu23%, Ti7%
铬铁氧体	79500 (1000)	$Fe_2O_3$3%, $Fe_3O_4$44%, $Cr_2O_3$26%
铂钴合金	286200 (3600)	Pt77% Co33%

表 3.1.9 矿物、岩石、金属的磁性饱和居里点及奈耳温度

矿　物	磁　性①	居里点T_c 奈耳温度 T_N, ℃②	磁性饱和	
			cgs emu/cm³	*MKS* A/m, ×10³
磁铁矿 (Fe_3O_4)	铁磁性	578	480	480
			510	510
			575	575
		580		
		575		

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.9

矿　物	磁　性①	居里点T_c 奈耳温度 T_N，℃②	磁性饱和	
			cgs cmu cm³	*MKS* A/m，×10³
	Ti0.6%		410～430	410～430
	Ti0.06%		480～500	480～500
钛磁铁矿		210		
钛铁晶石 (Fe_2TiO_4)	抗铁磁性	−153		
磁赤铁矿 (γ-Fe_2O_3)	铁磁性	675④	407③	407
			417	417
			545～675⑤	545～675
			750	750
赤铁矿 (α-Fe_2O_3)	抗铁磁性	675	2.6	2.6
		670	2.1	2.1
		680	2.6，2.2	2.6，2.2
	有"缺陷"⑥	725		
钛赤铁矿		≈10		
辉　石 ($FeSiO_3$)	抗铁磁性	−233		
磁黄铁矿 ($Fe_{1-x}S$)	抗铁磁性	300～325	62	62
		320	90	90
		300		
陨硫铁 (FeS)	抗铁磁性	320		
软锰矿 (MnO_2)	抗铁磁性	−189		
二氧化铬 (CrO_2)	铁磁性	−119	515	515
菱铁矿 ($FeCO_3$)	抗铁磁性	−233		
菱锰矿 ($MnCO_3$)	抗铁磁性	−243		
铁 (Fe)	铁磁性	770	1714	1714
镍 (Ni)	铁磁性	358	485	485
钛铁矿	抗铁磁性	−205		

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.9

矿　物	磁　性[1]	居里点T_c 奈耳温度 T_N，℃[2]	磁性饱和	
			cgs emu/cm³	*MKS* A/m，×10³
($FeTiO_3$)		−216		
方铁矿	抗铁磁性	−87		
(FeO)		−83		
针铁矿	抗铁磁性	120		
(α-$FeOOH$)				
正方纤铁矿	抗铁磁性	−196		
(β-$FeOOH$)		23		
镁铁矿	铁磁性			
($MgFe_2O_4$)		310	110	110
		440	110	110
			140	140
黑镁锰铁矿	铁磁性[3]	300	416	416
Jacobsite			400	400
($MnFe_2O_4$)			408	408
铬铁矿	铁磁性	−185		
($FeCr_2O_4$)				
铁镍尖晶石	铁磁性	585	270	270
			300	300
			267	267
锌铁尖晶石	铁磁性	−258		
($ZnFe_2O_4$)		−264		
铁橄榄石	抗铁磁性	−147		
(Fe_2SiO_4)				
镍	铁磁性		510	510
(Ni)		360		
		370		
钴	铁磁性	1120	1420	1420
(Co)			1445	1445
硅-铁		69		
4%		440		
		400		
铁钴合金		980		
砂岩	（红色）		0.2～0.012	0.2～0.012
基性岩	（钛磁铁矿）	200～400		

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.9

矿　物	磁　性①	居里点T_c 奈耳温度 T_N，℃②	磁性饱和	
			cgs emu/cm³	*MKS* A·m，×10³
	月岩	760	0.2～2.2	0.2～2.2
角砾岩			0.05～2	0.05～2
钙长角砾岩		765	0.145	0.145
斜长岩			0.2～2.6	0.2～2.6
火成岩		60～790		
角砾岩及细晶岩		745～790		
4 铁陨石 (如Ni-Fe)		600～780		

① 在居里点及奈耳温度以下的磁性状态是反磁质的；

② T_c为居里点温度，适合于铁磁质；T_N为奈耳(Néel)温度，适合于抗磁质；

③ 由其他磁性饱和单位计算来的；

④ 可以转化成赤铁矿；

⑤ 出现于自然界样品，由于晶格不完整的效果；

⑥ 尖晶石结构，标准式$A^{+2}B_2^{+3}O_4$。

表 3.1.10 主要铁矿物的比磁化率

(室温测定结果)

矿　物	密　度 g/cm³	比磁化率 χ	
		cgs，×10⁻⁶	*MKS*，×10⁻⁶
磁铁矿 Magnetite (Fe_3O_4)	5.18 (纯)	19305～308880	243～3881
	5～5.4 (自然的)	平均96500	1212
		38610～250965	485～3154
		57915～772200	728～9704
		58000～154000	729～1935
(Fe69.6%，$V_2O_5$0.59%)		94000	1181
(Fe68.6%　<200μm)		92000	1156
钛磁铁矿		13000	917
Titanomagnefite (Fe63.7%，$TiO_2$6.9%， $V_2O_5$0.9%，<400μm)			

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.10

矿物	密度 g/cm³	比磁化率，χ	
		cgs，×10⁻⁶	MKS，×10⁻⁶
赤铁矿 Hematite (a-Fe_2O_3)	5.26	105	1.32
(镜铁矿) (a-Fe_2O_3)		80～600	1.00～7.54
(非晶质) (a-Fe_2O_3)		8～95	0.10～1.19
钛铁矿 Ilmanite	4.72	28600	359
($FeTiO_3$，Fe46.4%)		80～90	1.00～1.13
褐铁矿 Limonite		25～32	0.31～0.4
($Fe_2O_3 \cdot H_2O$)			
铬铁矿 Chromite	4.5～5.1 平均 4.8	50～1958 平均 125	0.628～24.6 1.57
($FeCr_2O_4$)			
黑镁锰铁矿 Jacobsite	4.95	404	5.07
($MnFe_2O_4$)			
锌铁尖晶石 ($ZnFe_2O_4$)	5.1～5.3	6923	86.99
菱铁矿 Siderite	3.96	100 98	1.25 1.23
($FeCO_3$)			
辉石 Pyroxene		73	0.917
($FeSiO_3$，FeO24%，$Fe_2O_3$1%)		40	0.503
黑云母 Biotite	2.7～3.1	58～78	0.728～0.98
(FeO19.2%，$Fe_2O_3$7.9%)			
铁橄榄石 (Fe_2SiO_4)	4.39	100	1.25

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.11 镍矿物的比磁化率

(室温：20～30°C，粒度－270目)

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		cgs，$\times10^{-6}$	MKS，$\times10^{-6}$
镍华 Annabergite (密度3.07g/cm³)	$Ni_3As_2O_8\cdot8H_2O$		
	$Ni_3As_{2.74}O_8\cdot8H_2O$	6.01	0.075
	$Ni_3As_{2.15}O_8\cdot8H_2O$	5.98	0.075
辉砷镍矿 Gersdorffite (密度5.9g/cm³)	$(Ni_{0.95}Fe_{0.03}Co_{0.02})As_{1.04}S_{0.90}$	0.18	0.002
	$(Ni_{0.94}Fe_{0.04}Co_{0.02})As_{1.07}S$	0.19	0.002
红砷镍矿	$(Ni_{0.91}Co_{0.09})As_{1.00}S_{0.14}$		
	$Ni_3As_{2.12}O_8\cdot8H_2O$	6.11	0.076
红锑镍矿 Breithauptite (密度7.5～8.5g/cm³)	$NiSb+NiAs$	0.045	0.0006
方钴矿 Skutterudite (密度6.5～6.84g/cm³)	$(Ni_{0.64}Co_{0.36})As_{2.88}$	0.063	0.0007
斜方砷镍矿 Rammelsbergite (密度7.1g/cm³)	$(Ni_{0.89}Co_{0.11})As_{2.00}$	0.06	0.0007
	$(Ni_{0.94}Co_{0.06})As_{1.92}$	0.024	0.0003
	$(Ni_{0.96}Co_{0.04})As_{2.02}$	0.072	0.0009
	$(Ni_{0.91}Co_{0.09})As_{2.07}$	0.101	0.0013
	$(Ni_{0.51}Co_{0.41}Fe_{0.08})(As_{0.89}S_{2.11})_{3.00}$	0.073	0.0009
针镍矿 Millerite (密度5.3～5.6g/cm³)	$(Ni_{0.95}Fe_{0.05})S$	0.242	0.0030
	$(Ni_{0.98}Fe_{0.04})S$	0.039	0.0005
	$(Ni_{0.98}Fe_{0.02})S$	0.130	0.0016
	$(Ni_{0.91}Fe_{0.09})S$	0.703	0.0088
Nicolite (密度7.7～7.8g/cm³)	$(Ni_{0.92}Fe_{0.06}Co_{0.02})As_{1.00}S_{0.07}$	0.099	0.001
	$NiAs_{1.07}$	0.052	0.0006
	$(Ni_{0.83}Fe_{0.12}Co_{0.04})As_{1.04}$	0.113	0.0014
辉镍矿 Polydymite (密度4.5～4.8g/cm³)	$Ni_{2.91}Fe_{0.09}S_{3.61}$	0.343	0.0043
	$Ni_{2.61}Fe_{0.27}Co_{0.06}S_{4.01}$	0.417	0.0052

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.11

矿　物	化　学　式	比磁化率 χ	
		cgs, $\times10^{-6}$	MKS, $\times10^{-6}$
锑硫镍矿	$(Ni_{0.94}Co_{0.04}Fe_{0.02})$ $As_{0.48}Sb_{0.7}S_{1.05}$	0.110	0.0014
Ullmannite（密度6.7g/cm³）			
暗镍蛇纹石	$(Ni_{0.82}Mg_{0.18})SiO_3\cdot H_2O$	11.71	0.147
Garnierite（密度2.27～2.89 g/cm³）	$(Ni_{0.87}Mg_{0.13})(SiO_3)_{1.19}$ $(H_2O)_{1.11}$	11.89	0.149

注：比磁化率值是由磁化率除以密度计算而来，密度采用中值，磁化率采用平均值。

表 3.1.12 钴矿物的比磁化率

（室温，20～23°C，粒度：－270目）

矿　物	化　学　式	比磁化率 χ	
		cgs, $\times10^{-6}$	MKS, $\times10^{-6}$
硫铜钴矿	$Co_{1.94}Cu_{1.59}Ni_{0.02}Fe_{0.17}S_{4.00}$	0.580	0.0073
Carrollite	$Co_{1.94}Cu_{1.80}Ni_{0.06}Fe_{0.03}S_{4.00}$	0.127	0.0016
（密度4.5～4.8g/cm³）	$Co_{2.02}Cu_{1.14}Fe_{0.06}S_{4.00}$	0.153	0.0019
	$Co_{1.76}Cu_{0.81}Fe_{0.05}S_{4.00}$	0.658	0.0083
	$Co_{1.85}Cu_{0.97}Ni_{0.02}Fe_{0.04}S_{4.00}$	0.365	0.0046
方硫钴矿	$Co_{0.76}Ni_{0.05}Fe_{0.24}S_{2.00}$	4.081	0.0513
Cattierite			
（密度4.8g/cm³）	$Co_{0.91}Ni_{0.09}Fe_{0.15}S_{2.00}$	2.912	0.0036
辉钴矿	$Co_{0.94}Fe_{0.07}As_{0.98}S_{1.00}$	0.102	0.0013
Cobaltite			
（密度6.3g/cm³）	$Co_{0.80}Fe_{0.05}Ni_{0.09}As_{0.98}S_{1.00}$	0.095	0.0012
	$Co_{0.96}Fe_{0.05}As_{0.97}S_{1.00}$	0.054	0.0007
水钴矿	Co=53.8,Fe=4.6,Cu=1.1	1.007	0.0128
（密度4.32g/cm³）	Co=42.5,Fe=1.1,Cu=1.8 Mg=3.4, SiO_2=4.2	1.166	0.0146
	Co=53.8, Cu=5.6	1.104	0.0139

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.12

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		cgs, $\times 10^{-6}$	MKS, $\times 10^{-6}$
斜方砷钴矿 Safflorite (密度7.2g/cm³)	$(Co_{0.31}Fe_{0.69})As_2+35FeS_2$	0.127	0.0016
	$(Co_{0.53}Fe_{0.42})As_2+87FeS_2$	0.107	0.0013
	$(Co_{0.57}Fe_{0.43})As_2+72FeS_2$	0.110	0.0014
硫镍钴矿 Siegenite (密度4.5～4.8g/cm³)	$Co_{0.72}Ni_{0.88}Fe_{1.00}Cu_{0.19}S_4$	1.989	0.0250
	$Co_{1.02}Ni_{1.81}Fe_{.18}Cu_{0.09}S_4$	0.174	0.0022
方钴矿 Skutterudite (密度6.5～6.84g/cm³)	$(Co_{0.51}Ni_{0.02}Fe_{0.47})As_{2.11}S_{0.06}$	0.121	0.0015
	$(Co_{0.82}Ni_{0.05}Fe_{0.13})As_{2.59}S_{0.16}$	0.032	0.0004
	$(Co_{0.38}Ni_{0.07}Fe_{0.56})As_{2.09}$	0.100	0.0013
	$(Co_{0.54}Ni_{0.37}Fe_{0.09})As_{2.06}$	0.064	0.0008
	$(Co_{0.54}Ni_{0.14}Fe_{0.32})As_{1.98}$	0.057	0.0007

注：比磁化率值是由磁化率值除以密度计算而来密度变化者采用中值。

表 3.1.13 锰矿物的比磁化率

（室温：20～23°C，粒度：－270目）

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		cgs, $\times 10^{-6}$	MKS, $\times 10^{-6}$
硫锰矿 Alabandite (密度4g/cm³)	MnS	15.6	0.197
方锰矿 Manganosite (密度4.3～5.2g/cm³)	$(Mn_{0.94}Mg_{0.01}Sn_{0.05})O$	13.98	0.176
	$(Mn_{0.96}In_{0.04})O$	13.93	0.175
	MnO（合成）	14.08	0.178
方锰铁矿 Bixbyite (密度5.0g/cm³)	$Mn_{0.78}Fe_{1.22}O_3$	9.64	0.121
	$Mn_{1.76}Si_{0.24}O_3$	25.76	0.324
	$Mn_{1.92}Si_{0.24}O_3$	35.76	0.449
	Mn_2O_3（合成）	17.78	0.223
软锰矿 Pyrolusite	MnO_2	6.94	0.075

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.13

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		$cgs \times 10^{-6}$	$MKS \times 10^{-6}$
（密度 5）	MnO_2	5.84	0.073
软锰矿	MnO_2	5.32	0.067
Polianite	MnO_2	6.08	0.076
（密度 5 g/cm³）			
恩苏塔矿	MnO_2	8.49	0.107
Nsutite			
（密度4.2～4.7g/cm³）			
水锰矿	MnO(OH)	6.93	0.087
Manganite			
（密度4.3g/cm³）	MnO(OH)	6.58	0.083
硬锰矿	$Ba_{0.35}Mn_5O_{10}(OH)_4$	7.76	0.098
Psilomelane			
（密度4.7g/cm³）			
	$Ba_{1.02}MnMn_8O_{16}(OH)_4$	8.53	0.107
隐钾锰矿	KMn_8O_{16}	9.51	0.119
Cryptomdane	KMn_8O_{16}	12.57	0.158
密度4.7g/cm³			
锌铁尖晶石	$(Mn_{0.18}Zn_{0.82})O \cdot Fe_2O_3$	160.1	2.012
Flanklinite	$(Mn_{0.3}Zn_{0.7})O \cdot Fe_2O_3$	38.29	0.481
（密度5.07~5.22g/cm³）			
黑锰矿	Mn_3O_4	12.3	0.155
Hausmanite	Mn_3O_4	9.16	0.115
（密度4.8g/cm³）			
黑锌锰矿	$ZnMn_2O_5 \cdot 2H_2O$	8.04	0.101
Chalcophanite			
（密度3.98g/cm³）			
菱锰矿	$(Mn_{0.95}Ca_{0.02}Mg_{0.03})CO_3$	28.3	0.355
Rhodochrosite	$(Mn_{0.44}Ca_{0.39}Fe_{0.17})CO_3$	38.7	0.487
（密度3.70g/cm³）	$(Mn_{0.81}Ca_{0.39}Fe_{0.80})CO_3$	44.3	0.556
硼镁锰矿	$Mg_3MnMn_{2.2}B_{1.8}O_{10}$	16.8	0.211
Pinakiolite			
（密度2.6~3.30g/cm³）			
铁磷锂矿	$Li(Mn_{0.33}Fe_{0.67})PO_4$	18.8	0.236
Triphylite			

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		$cgs\times10^{-6}$	$MKS\times10^{-6}$
(密度3.4～3.6g/cm³)	$Li(Mn_{0.21}Fe_{0.79})PO_4$	19.2	0.241
锰磷锂矿	$Li(Mn_{1.78}Fe_{0.22})PO_4$	16.0	0.201
Lithiopholite	$Li(Mn_{0.77}Fe_{1.23})PO_4$	21.5	0.270
(密度3.5g/cm³)			
磷锂锰矿	$(Li_{0.43}Mn_{0.45}Fe_{0.12})PO_4$	25.9	0.325
Sicklerite			
(密度3.45 g/cm³)			
异磷铁锰矿	$(Fe_{0.61}Mn_{0.34})PO_4$	13.2	0.166
Heterosite	$(Fe_{0.80}Mn_{0.20})PO_4$	14.2	0.178
(密度3.2～3.5g/cm³)			
磷铁锰矿	$(Mn_{0.88}Fe_{0.10}Ca_{0.02})PO_4$	27.68	0.348
Triplite			
(密度3.79g/cm³)			
黑钨矿	$(Mn_{0.52}Fe_{0.47})WO_4$	5.74	0.072
Wolframite			
(密度7.2～7.5g/cm³)			
钨锰矿	$(Mn_{0.99}Fe_{0.0})WO_4$	5.75	0.072
Hubnerite	$(Mn_{0.98}Fe_{0.02})WO_4$	5.54	0.070
(密度7.2g/cm³)	$(Mn_{0.95}Fe_{0.05})WO_4$	5.22	0.066
钨铁矿	$(Fe_{0.86}Mn_{0.14})WO_4$	5.24	0.066
Feberite			
(密度7.5g/cm³)			
蔷薇辉石	$(Mn_{0.55}Ca_{0.36}Mg_{0.05}Sn_{0.01})SiO_3$	14.1	0.177
Rhodonite			
(密度3.58g cm⁻¹)	$(Mn_{0.54}Ca_{0.34}Mg_{0.02}Fe_{0.10})SiO_3$	20.75	0.260
锰三斜辉石	$(Mn_{0.56}Fe_{0.44})SiO_3$	48.6	0.610
Pyroxmangite			
(密度3.61g/cm³)			
日光榴石	$Mn_{0.08}Fe_{1.92}(Mn_2S)Be_3(SiO_4)_{2.98}$	13.66	0.171
Helvine			
(密度3.22～3.28g/cm³)	$Mn_{0.28}Fe_{1.72}(Mn_2S)Be_3(SiO_4)_3$	20.2	0.253
锰橄榄石	$(Mn_{0.74}Fe_{0.19}Mn_{0.09})SiO_4$	23.8	0.299
Tephroite			
(密度4.1g/cm³)	$(Mn_{0.69}Fe_{0.31})SiO_4$	23.97	0.301
锰铁橄榄石	$(Mn_{0.28}Fe_{0.65}Mg_{0.07})SiO_4$	35.4	0.445
Kneblite			
(密度3.9～4.17g/cm³)			

注：比磁化率值是由磁化率值除以密度计算而来，密度变化者采用中值。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.14 铜、铅、锌矿物的比磁化率

（室温20～23°C，粒度－270目，样重25～150mg，
按丹纳（Dana）矿物学的化学分类排列）

矿物	化学式	密度 g/cm³	比磁化率 χ	
			$cgs\times10^{-6}$	$MKS\times10^{-6}$
微晶砷铜矿 Algodonite	$Cu_{6\sim7}As$	8.6	−0.07	0.0009
砷铜矿 Domeykete	Cu_3As	7.7	−0.03	0.0004
淡红砷铜矿 Whitneyite	Cu_9As	8.5	0.18	0.0023
辉铜矿 Chalcocite	Cu_2S	5.5～5.8	0.06	0.0008
蓝辉铜矿 Digenite	Cu_9S_5	5.5～5.8	0.29	0.0037
硫铜银矿 Stromeycrite	$Cu_{1+x}Ag_{1-x}S$	6.26	0.13	0.0017
红硒铜矿 Umangite	Cu_3Se	6.78	0.008	0.0001
斑铜矿 Bornite	Cu_5FeS_4	5.0～5.1	1.46	0.0184
黄铜矿 Chalcopyrite	$CuFeS_2$	4.1～4.3	3.84	0.0483
黄锡矿 Stannite	Cu_2SnFeS_4	4.3～4.5	3.33	0.0418
铜蓝 Covellite	CuS	4.67	0.038	0.0005
黝铜矿 Tetrrahedrite	$4Cu_2S\cdot Sb_2S_3$	4.4～5.1	2.83	0.0355
砷黝铜矿 Tennantite	$4Cu_2S\cdot As_2S_3$	4.4～5.1	1.095	0.0137
银黝铜矿 Freibergite	Ag可达20%	4.4～5.1	1.107	0.0139
硅孔雀石 Chrysocolla	$CuSiO_3\cdot 2H_2O$	2.40	2.804	0.0352
斜硅铜矿 Shattuckite	$Cu_5(SiO_3)_4(OH)_2$	4.11	2.714	0.0341

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.14

矿物	化学式	密度 g/cm³	比磁化率 χ	
			cgs×10⁻⁶	MKS×10⁻⁶
纤硅铜矿 Plancheite	$Cu_8Si_{12}O_{36}(OH)_8$	3.36	3.169	0.0398
斜铝硅铜矿 Ajoite	$Cu_6Al_2Si_{11}O_{29}\cdot 5H_2O$	2.96	1.682	0.0211
方铅矿 Gelena	PbS	7.6	−0.065	0.0008
细硫砷铅矿 Gratonite	$9PbS\cdot 2As_2S_3$	6.22	0.034	0.0004
灰硫砷铅矿 Jordanite	$27Pb\cdot 7AsS_3$	6.4	0.033	0.0004
斜辉锑矿 Meneghinite	$Cu_2S\cdot 26PbS\cdot 7Sb_2S_3$	6.36	−0.017	0.0002
硫锑铅矿 Boulangerite	$5PbS\cdot 2Sb_2S_3$	5.6～6.5	−0.049	−0.0006
硫砷铅矿 Dufrenoysite	$2PbS\cdot 2As_2S_3$	5.5～5.6	−0.056	−0.0007
斜方辉铋铅矿 Cosalite	$2PbS\cdot Bi_2S_3$	6.7～6.8	0.008	0.0001
脆硫锑矿（毛矿） Jamesonite	$4PbS\cdot FeS\cdot Sb_2S_3$	5.63	0.936	0.0118
硫砷铅矿 Baumhauerite	$3PbS\cdot 2As_2S_3$	5.05	−0.049	−0.0006
辉锑铅矿 Zinkenite	$PbS\cdot Sb_2S_3$	5.36	1.934	0.0243
硫钒铜矿 Sulvanite	Cu_3VS_4	3.9	2.648	0.0333
锡黝铜矿 Colusite	Mo可达8.8%	4.4～5.1	−0.043	−0.0005
硫砷铜矿 Enargite	Cu_3AsS_4	4.4	−0.004	0.00006
车轮矿 Bournonite	$2PbS\cdot Cu_2S\cdot Sb_2S_3$	5.8	−0.046	−0.0006
赤铜矿 Cuprite	Cu_2O	5.8～6.15	−0.010	−0.0001

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.14

矿物	化学式	密度 g/cm³	比磁化率 χ	
			$cgs\times10^{-6}$	$MKS\times10^{-6}$
黑铜矿 Tenorite	CuO	5.8～6.4	0.934	0.0117
戴氏赤铜矿 Delafossite	$CuFeO_2$	5.52	0.344	0.0043
氯铜矿 Atacanite	$Cu_2Cl(OH)_3$	3.78	2.513	0.0316
羟铜铅盐矿 Diaboleite	$2PbCl\cdot Cu(OH)_2$	5.4～5.42	0.322	0.0040
绿铜锌矿 Aurichalcite	$(Zn,Cu)_5(OH)_6(CO_3)_2$	3.64	1.341	0.0168
孔雀石 Malachite	$CuCO_3\cdot Cu(OH)_2$	4.05	3.061	0.0385
蓝铜矿 Azurite	$2CuCO_3\cdot Cu(OH)$	3.8	3.159	0.0397
胆矾 Chalcathite	$Cu(SO_4)\cdot 5H_2O$	2.282	3.113	0.0391
水胆矾 Brochantite	$Cu_4(SO_4)\cdot(OH)_6$	3.88～3.97	2.723	0.0342
羟铜矾 Antlerite	$Cu_4(SO_4)\cdot(OH)_6$	3.88	3.155	0.0396
青铅矾 Linarite	$PbCu(SO_4)\cdot(OH)_2$	5.4	1.093	0.0137
假孔雀石 Pseudomalachite	$Cu_5(PO_4)_2(OH)_4$	4.0～4.3	2.607	0.0327
钒铅锌矿 Descloizite	$PbZn(VO_4)(OH)$	5.9～6.26	0.234	0.0029
羟钒铜铅矿 Mottramite	$PbCu(OH)(VO_4)$	5.9～6.2	0.559	0.0070
橄榄铜矿 Olivenite	$Cu_2(OH)AsO_4$	3.9～4.4	1.990	0.0260
透视石 Dioptase	$CuSiO_3\cdot H_2O$	3.5	2.466	0.0310
铅丹 Minium	Pb_3O_4	8.925	0.088	0.0011

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.14

矿物	化学式	密度 g/cm³	比磁化率 χ	
			$cgs \times 10^{-6}$	$MKS \times 10^{-6}$
白铅矿 Cerussite	$PbCO_3$	6.5	−0.033	−0.0004
硫酸铅矿 Anglesite	$PbSO_4$	6.38	−0.067	−0.0008
铬铅矿 Crocoite	$Pb(CrO_4)$	6.06	−0.030	−0.0004
磷氯铅矿 Pyromorphite	$Pb_5[Cl(PO_4)_3]$	7.04	0.018	0.00023
砷铅矿 Mimetite	$Pb_5[Cl(AsO_4)_3]$	7.24	−0.029	−0.00036
钒铅矿 Vanadinite	$Pb_5[Cl(VO_4)_3]$	7.0±	0.057	0.0007
钼铅矿 Wulfenite	$PbMoO_4$	6.5～7.0	0.018	0.0002
钨铅矿 Stolzite	$PbWO_4$	7.9～8.4	0.034	0.0004
硅铅矿 Barysilite	$Pb_3Si_2O_7$	6.72	0.961	0.0121
闪锌矿 Sphalerite	ZnS	3.5～4.2	−0.143	−0.0180
纤锌矿 Wurtzite	ZnS	3.98	2.079	0.0261
锌铁尖晶 Franklinite	$ZnFe_2O_4$	5.0～5.2	92.61	1.164
红锌矿 Zincite	ZnO	5.4～5.7	0.342	0.0043
锌锰矿 Hetaerolite	$ZnMn_2O_4$	4.85～5.18	5.600	0.0703
菱锌矿 Smithsonite	$ZnCO_3$	4.398	0.061	0.0007
绿铜锌矿 Aurichalcite	$(Zn,Cu)[(OH)_6\cdot(CO_3)_2]$	3.62	1.348	0.0169
皓矾 Goslarite	$ZnSO_4\cdot 7H_2O$	1.978	3.028	0.0381

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.14

矿物	化学式	密度 g/cm³	比磁化率 χ	
			cgs×10⁻⁶	MKS×10⁻⁶
磷锌矿 Hopeite	$Zn_3(PO_4)_2\cdot 4H_2O$	3.03	0.00	0.00
水砷锌矿 Adamite	$Zn_2[OH,AsO_4]$	4.35	0.002	0.00003
硅锌矿 Willemite	Zn_2SiO_4	3.9～4.2	7.578	0.0952
锌黄长石 Hardystonite	$Ca_2ZnSi_2O_7$	4.35	2.022	0.0254
异极矿 Hemimorphite	$Zn_4[(OH)_2Si_2O_7]\cdot H_2O$	3.4～3.5	−0.058	−0.0007
钙硅铅锌矿 Esperite	$(Ca,Pb)ZnSiO_4$ (Pb≈Ca)	4.28	0.00	0.00

注：比磁化率是由磁化率除以密度计算而来，采用平均值，密度采用中值。

表 3.1.15 其他矿物的比磁化率

（按拼音字母顺序排列）

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		cgs×10⁻⁶	MKS×10⁻⁶
B			
白云母	$KAl_2[(OH,F)_2AlSi_3O_{10}]$	2.93	0.0368
包头矿	$Ba_4(Ti,Nb,Fe)_9O_{16}[Si_4O_{12}]Cl$	6.50	0.0817
C			
雄黄	As_2S_2	−0.25	−0.0031
D			
独居石	$Ce[PO_4]$	18.61 11.32	0.2338 0.1423
毒砂	FeAsS	0.63	0.0079
F			
符山石	$Ca_{10}(Mg,Fe)_2Al_4[(OH)(SiO_4Si_2O_7)_5F_2]$	14.13	0.1775
氟钙铈矿	$Ca(Ce,La)_2[(CO_3)_3F_2]$	12.59	0.1582
氟磷铁锰矿	$(Mn,Fe)_2[F,PO_4]$	73.52	0.9239
氟碳钡铈矿	$Ba(Ce,La,Nd)_2[F(CO_3)_3]$	5.66	0.0711

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.15

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		$cgs\times10^{-6}$	$MKS\times10^{-6}$
氟碳铈矿	$(La,Ce,Dy)[F,CO_3]$	11.34	0.1425
芥石	$Ca_2(Fe,Mn)Al_2BO_3[Si_4O_{12}]OH$	24.77	0.3113
复铌金矿	复杂的稀土、稀有元素的氧化物	18.88	0.2373
G			
钙铁榴石	$Ca_3Fe_2[SiO_4]$	84.40	1.0606
磷灰石	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	0.58	0.0073
磷锂铝石	$LiAl[OH,PO_4]$	0.53	0.0066
磷铁锂矿	$LiAl[OH,PO_4]$	73.50	0.9236
磷钇矿	$Y[PO_4]$	28.88	0.3629
菱锶矿	$SrCO_3$	−0.14	−0.0017
绿帘石	复杂硅酸盐	20.94	0.2631
绿层硅铈钛矿	同上	2.49	0.0313
绿柱石	$Al_2Be_3[Si_6O_{18}]$	5.27	0.0662
M			
镁铝榴石	$Mg_3Al_2[SiO_4]_3$	15.50	0.1947
锰铝榴石	$Mn_3Al_2[SiO_4]_3$	68.01	0.8546
N			
钠铁闪石	复杂硅酸盐	55.01	0.6913
霓石	$NaFe[Si_2O_6]$	45.69	0.5742
		57.25	0.7194
铌铁矿	$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$	37.38	0.4697
		32.03	0.4025
P			
泡铋矿	$Bi_2[O_2(CO_3)]$	−0.096	−0.0012
锆石	$ZrSiO_4$	0.12	0.0011
硅灰石	$CaSiO_3$	2.67	0.0335
硅镁石	$Mg_7[(OH)F_2SiO_4]_3$	22.86	0.2873
硅铍钇矿	$Y_2FeBe_2[O,SiO_4]_2$	51.81	0.6511
H			
滑石	$Mg_3[(OH)_2Si_4O_{10}]$	14.60	0.1835
黄河石	$BaCe[CO_3]_2F$	5.84	0.0734
黄玉	$Al_2[FeSiO_4]$	−0.36	−0.0045
褐帘石	含稀土、铁、铝等硅酸盐	26.84	0.3373
黑云母	$KMg_3[(F,OH)_2AlSi_3O_{10}]$	54.24	0.6816

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.15

矿物	化学式	比磁化率 χ	
		$cgs\times10^{-6}$	$MKS\times10^{-6}$
黑稀金矿	(Y,Er,Ce,U,Pb,Ca)[(Nb,Ta,Ti)$_2$(O,OH)$_6$]	20.21	0.2540
辉钼矿	MoS_2	−0.009	−0.0001
辉锑矿	Sb_2S_3	1.66	0.0209
J			
金绿宝石	Al_2BeO_4	4.92	0.0618
金云母	复杂硅酸盐	11.40	0.1433
L			
蓝石棉	钠、镁、铝、铁硅酸盐	22.85	0.2871
蓝柱石	Al[Be(SiO$_4$,OH)]	1.41	0.0177
锂辉石	LiAl[Si$_2$O$_6$]	−0.21	0.0026
锂云母	KLi$_2$Al[(F,OH)$_2$Si$_4$O$_{10}$]	0.58	0.0666
铍镁晶石	Al$_4$MgBeO$_8$	15.5	0.1948
S			
铯榴石	(Cs,Na)[Al,Si$_2$O$_6$]	0.11	0.0014
蛇纹石	Mg$_6$[(OH)$_8$Si$_4$O$_{10}$]	15.79	0.1984
十字石	Al$_4$Fe[O,(OH),SiO$_4$]$_8$	20.28	0.2548
T			
透辉石	CaMg[Si$_2$O$_6$]	11.52	0.1448
透闪石	Ca$_2$(Mg,Fe)$_5$[OH,Si$_4$O$_{11}$]$_2$	6.89	0.0866
铁铝石榴石	Fe,Al$_2$[SiO$_4$]	77.66	0.9759
钍 石	Th[SiO$_4$]	4.17	0.0524
U			
铀钍石	(Th,U)[SiO$_4$]	0.94	0.0118
X			
锡 石	SnO_2	0.83	0.0104
Y			
萤 石	CaF_2	0.51	0.0064
Z			
正长石	K[(Si,Al)$_4$O$_8$]	−0.33	0.0041
重晶石	Ba[SO$_4$]	−0.30	0.0037

地信网论坛
bbs.3s001.com

强磁性矿物；χ<600×10⁻⁶厘米³/克>15×10⁻⁶厘米³/克为弱磁性矿物，如各种锰矿物；χ<15×10⁻⁶厘米³/克为非磁性矿物，如金、硫、萤石等。比磁化率为负值的矿物为抗磁性的。

矿物的比磁化率、矫顽力（H_c）、磁性饱和强度、居里点等参数列于表3.1.8至表3.1.15。矫顽力是当恒温剩磁减少到零时所需要的磁场强度，有时称剩磁矫顽力，剩磁不总是可以减少到零。磁饱和强度是指当磁场强度增加到磁性物质的磁化强度不再增加时，磁化强度达到饱和，即样品中全部原子的磁矩都以最大的有序化状态排列时的总磁矩。磁性饱和强度（J_s）随其温度的升高而逐渐减少，当减至为磁化现象消失时的温度称为居里点（T_c）。从这些磁性参数中可以了解矿物在不同磁场强度和不同温度的磁性变化规律。

3.1.2.4 矿物的电性

矿物的导电性及介电常数是分选矿物的重要参数。按现代的习惯，导电性的米·公斤·秒（MKS）制单位为西〔门子〕每米(S/m)。实际上在地球物理实践中惯用的导电单位为导电性的倒数，即电阻。介电常数(即电容率)的米·公斤·秒（MKS）制单位为法每米（F/m）。介电常数常用物质电容率与真空电容率之比表示。表内所列物质的电容率须乘其真空电容率（8.85×10⁻²法/米）。

物质一般分成导体、半导体及绝缘体。导体电性大于10^5西〔门子〕每米为导体；小于10^{-8}西每米为绝缘体；介于二者之间的为半导体。

矿物的电性对于某些特定化学组分的矿物是固定的，但是多数情况下矿物的组分是变化的，尤其是类质同象矿物，尽管它们是同名称，由于其中某些元素的变化会导致电性的变化。电性可分为两类：参数量的电性和实际存在的电性。在此只列出矿物参数量的电性。

金属导体。自然界存在的金属导体以铜和金较为广泛和重要，铂、铱、锇和铁在自然界出现极其稀少。石墨是非金属，但是具有金属的导电性，所以也属于此类。金属导体矿物和金属的

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.16 金属导体和矿物导体的电阻率

（频率为零）

金属 0℃	电阻率，Ω·m ×10⁻⁸	金属 0℃	电阻率，Ω·m ×10⁻⁸	金属 0℃	电阻率，Ω·m ×10⁻⁸	金属和导体矿物 0℃	电阻率 Ω·m
银 (Ag)	1.5	钴 (Co)	6.3	铬 (Cr)	15.3	自然铜	1.2～30×10⁻⁸
铜 (Cu)	1.6	镍 (Ni)	6.3	铯 (Cs)	18	石墨	36～100×10⁻⁸
铅 (Pb)	1.9	镉 (Cd)	6.7	金 (Au)	20		（电流平行解理）
铝 (Al)	2.5	铟 (In)	8.5	铪 (Hf)	29		28～9900×10⁻⁶
镁 (Mg)	4.0	锂 (Li)	8.5	锶 (Sr)	33		（电流横切解理）
钙 (Ca)	4.2	铁 (Fe)	9.0	砷 (As)	35	红锑镍矿	9.0～120×10⁻⁵
钼 (Mo)	4.3	锇 (Os)	9.1	锆 (Zr)	42	锑硫镍矿	3.0～50×10⁻⁸
钠 (Na)	4.3	铂 (Pt)	9.8	钽 (Ta)	59		
铼 (Re)	4.5	锡 (Sn)	10.0	镧 (La)	59		
铱 (Ir)	5.0	钯 (Pd)	10.0	铈 (Ce)	71		
钨 (W)	5.0	铷 (Rb)	11.6	钛 (Ti)	83		
锌 (Zn)	5.5	钌 (Ru)	11.7	铋 (Bi)	100		
铍 (Be)	5.5	碲 (Te)	14				
钾 (K)	6.3	钽 (Ta)	14				

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.17 半导体矿物的电阻率（频率为零）

矿物	电阻率，Ω·m
金刚石（C）	2.7
硫化物	
白铁矿（FeS_2）	$1\sim150\times10^{-3}$
斑铜矿（$Fe_2S\cdot nCu_2S$）	$1.6\sim6000\times10^{-5}$
磁黄铁矿（Fe_7S_8）	$2\sim160\times10^{-6}$
方铅矿（PbS）	$6.8\times10^{-5}\sim90\times10^{-3}$
黄铜矿（$Fe_2S_2\cdot Cu_2S$）	$150\sim9000\times10^{-6}$
黄铁矿（FeS_2）	$1.2\sim600\times10^{-3}$
褐硫锰矿（MnS_2）	10～20
黑辰砂（HgS）	$2\times10^{-5}\sim9\times10^{-5}$
辉铋矿（Bi_2S_3）	3～570
辉钼矿（MoS_2）	0.12～7.5
辉铜矿（Cu_2S）	$8\sim100\times10^{-6}$
辉银矿（Ag_2S）	$1.5\sim2.0\times10^{-3}$
镍黄铁矿（$(Fe、Ni)_9S_8$）	$1\sim11\times10^{-6}$
闪锌矿	$2.7\times10^{-3}\sim1.2\times10^{-4}$
针镍矿（NiS）	$2\sim4\times10^{-7}$
硫锑化物	
辉锑锡铅矿（$Pb_3Sn_3Sn_2S_{14}$）	1.2～4
辉铁锑矿（$FeSb_2S_4$）	0.008～2.0
硫锑铋镍矿（$Ni_9(Bi, Sb)_2S_8$）	$1\sim83\times10^{-6}$
硫锑铅矿（$Pb_5Sb_4S_{11}$）	$2\times10^{-3}\sim4\times10^{-4}$
圆柱锡矿（$Pb_3Sn_4Sn_2S_{14}$）	2.5～60
脆硫锑铅矿（$Pb_4FeSb_6S_{14}$）	0.02～0.15
黝铜矿（Cu_3SbS_3）	0.30～30000
砷硫化物	
毒砂（FeAsS）	$20\sim300\times10^{-6}$
辉钴矿（CoAsS）	$6.5\sim130\times10^{-3}$
辉砷镍矿（Ni，AsS）	$1\sim160\times10^{-6}$
硫砷铜矿（Cu_3AsS_4）	$0.2\sim40\times10^{-3}$
铁硫砷钴矿（(Co，Fe)AsS）	$5\sim100\times10^{-6}$
锑化物	
锑银矿（Ag_3Sb）	$0.12\sim1.2\times10^{-6}$
砷化物	
方钴矿-1（$CoAs_3$-1）	$1\sim400\times10^{-6}$

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.17

矿　　物	电阻率，Ω·m
方钴矿-2 ($CoAs_2$—2)	$1\sim12\times10^{-5}$
碲化物	
碲汞矿 (HgTe)	$4\sim100\times10^{-6}$
碲金矿 (AuTe)	$6\sim12\times10^{-6}$
碲铅矿 (PbTe)	$20\sim200\times10^{-6}$
碲银矿 (Ag_2Te)	$4\sim100\times10^{-6}$
叶碲金矿 ($Pb_6Au(S, Te)$)	$20\sim80\times10^{-6}$
针碲金矿 (AgAuTe)	$4\sim20\times10^{-6}$
氧化物	
钡硬锰矿 ($(Ba, Na, K)Mg_8O_{16}$)	$2\sim100\sim10^{-3}$
磁铁矿 (Fe_3O_4)	52×10^{-6}
赤铜矿 (Cu_2O)	10～50
黑铜矿 (CuO)	60000
金红石 (TiO_2)	29～910
晶质铀矿 (UO_2)	1.5～200
软锰矿 (MnO·OH)	0.007～30
锡石 (SnO_2)	$4.5\times10^{-4}\sim10000$
水锰矿 (MnO·OH)	0.018～0.5
钛铁矿 ($FeTiO_3$)	29～910
硬锰矿 ($KMnOMnO_2\cdot nH_2O$)	0.04～60000

表 3.1.18 矿物的高频介电常数

矿　　物	产地或方位	介电常数	
		无线电频率	光学频率
硫化物			
方铅矿 (PbS)		17.9	
闪锌矿 (ZnS)	日本	7.9	
	日本	12.1	
	美国	69.9～7.88	
	德国	69.7～7.88	
氧化物			
赤铁矿 (Fe_2O_3)		25.0	
	沿光轴		8.65

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.18

矿物	产地或方位	介电常数	
		无线电频率	光学频率
	横切光轴		10.33
刚玉（Al_2O_3）	沿光轴		3.10
	横切光轴		3.14
		11.0～13.2	
金红石（TiO_2）	沿光轴		6.82
	横切光轴		8.42
		31～170	
锐钛矿（TiO_2）		425	
锡石（SnO_2）		23.4～24.0	
	沿光轴		3.93
	横切光轴		4.36
硬水铝石(AlO·(OH))	沿 a 轴	7.7	2.90
	沿 b 轴	8.38	2.96
	沿 c 轴	7.27	3.05
卤化物			
钾盐（KCl）		4.39～6.20	2.20
食盐（NaCl）		5.70～6.20	2.39
萤石（CaF_2）	日本	6.26	
	德国	6.60～6.61	
	日本	6.27	
	瑞士	6.25	
	英国	6.30	
碳酸盐		6.8～8.0	
白云石($CaMg(CO_3)_2$)	横切光轴	7.53	2.28
	沿光轴	6.11	2.85
方解石（$CaCO_3$）	横切光轴		2.21
	沿光轴		2.75
		7.80～8.50	
文石（$CaCO_3$）	波西米亚		
	沿 a 轴	6.46	2.34
	沿 b 轴	9.72	2.82
	沿 c 轴	7.55	2.84
磷酸盐			
蓝铁矿（$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$）		6.07	2.49～2.67

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.18

矿物	产地或方位	介电常数	
		无线电频率	光学频率
磷灰石		7.40～10.47	
($Ca_5(F, Cl)(PO_4)_3$)	日本		
	横切光轴	7.60	2.69
	沿光轴	10.0	2.71
硫酸盐			
铅矾（$PbSO_4$）		74.0～500	3.52～3.59
石膏($CaSO_4 \cdot 12H_2O$)		5.00～11.5	
	沿 a 轴	11.2	2.31
	沿 b 轴	12.0	2.32
	沿 c 轴	5.40	2.34
天青石（$SrSO_4$）	西西里，沿 a 轴	7.60	2.62
	沿 b 轴		2.64
	沿 c 轴	8.26	2.66
无水石膏（$CaSO_4$）		5.70～6.3	
	沿 a 轴		2.48
	沿 b 轴		2.49
	沿 c 轴		2.61
重晶石（$BaSO_4$）		6.99～12.2	
	沿 a 轴	7.10	
	沿 b 轴	8.85～10.0	
	沿 c 轴	6.72～7.60	
硅酸盐			
白榴石（$KAlSi_2O_6$）	意大利	7.13	
	横切光轴		2.27
	沿光轴		2.27
白云母		6.19～8.00	
($KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$)	沿 a 轴		2.46
	沿 b 轴		2.55
	沿 c 轴		2.60
冰长石（$KAlSi_3O_8$）	沿 a 轴	5.55	2.30
	沿 b 轴	5.80	2.33
	沿 c 轴	4.50	2.34
蛋白石($SiO_2 \cdot nH_2O$)	日本	7.15	2.10
	日本	7.43	
玻璃蛋白石	日本	4.21	
电气石	斯里兰卡	6.6～7.10	

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.18

矿物	产地或方位	介电常数	
		无线电频率	光学频率
复杂硅酸盐	垂直光轴	6.75	2.76
	平行光轴	5.52	2.89
	美国，垂直光轴	6.76	
	平行光轴	5.46	
方沸石 ($NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$)		5.88	2.21
锆石 ($ZrSiO_4$)		8.59～12.0	≈3.84
硅线石 ($Al_2SiO_4(F, OH)_2$)	沿 a 轴		2.78
	沿 b 轴		2.79
	沿 c 轴		2.84
黑云母 ($K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)$)		6.19～9.30	
	沿 a 轴		2.50
	沿 b 轴		2.68
	沿 c 轴		2.68
黄玉 ($Al_2SiO_4(F, OH)$)		6.30～7.60	
	沿 a 轴		2.66
	沿 b 轴		2.66
	沿 c 轴		2.68
金云母 ($KMg_3Al_2Si_3O_{10}(OH)$)	沿a轴		2.44
	沿b轴		2.58
	沿c轴		2.58
绢云母		19.55～25.35	
复杂硅酸盐			
绿帘石($Ca_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$)	沿a轴	7.60±0.13	3.01
	沿b轴	9.99±0.14	3.11
	沿c轴	15.36±0.04	3.17
绿柱石 ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$)		5.48～7.80	
	横切光轴	6.59	
	乌拉尔，沿光轴	6.18	
	横切光轴	5.67	
普通辉石 ($Ca(Mg, Fe, Al)(Al, Si)_2O_6$)		6.90～10.27	
	沿a轴	6.60	
	沿b轴	6.90	
	沿c轴	7.10	

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.18

矿物	产地或方位	介电常数	
		无线电频率	光学频率
石英 (SiO_2)		4.19～5.00	
	横切光轴	4.96	
	沿光轴	5.05	
	日本，垂直光轴	4.11	
	平行光轴	4.27	
石英（双锥形）	美国 垂直光轴	4.09	
	平行光轴	4.27	
斜长石系列			
钠长石 ($Ab_{94}An_6$)	挪威	5.63	2.36
($Ab_{95}An_5$)		5.57	2.36
($Ab_{96}An_4$)	瑞士	5.52	2.36
($Ab_{97}An_3$)	日本	5.58	2.33
($Ab_{98}An_2$)		5.45	2.34
($Ab_{99}An_1$)	乌拉尔	5.55	2.33
奥长石 ($Ab_{28}An_{24}$)	北卡罗里纳	6.03	2.39
($Ab_{77}An_{23}$)	挪威	6.06	2.39
中长石 ($Ab_{52}An_{48}$)	日本	6.30	2.43
($Ab_{61}An_{39}$)	朝鲜	6.47	2.41
($Ab_{65}An_{35}$)	挪威	6.20	2.41
拉长石 ($Ab_{43}An_{57}$)	意大利	6.61	2.45
($Ab_{45}An_{55}$)	北美	6.51	2.45
钙长石 (Ab_2An_{98})	日本	7.14	2.51
(Ab_4An_{96})	日本	7.24	2.51
(Ab_7An_{93})	日本	7.05	2.49

电阻率如表3.1.16所示。

半导体。半导体的导电作用是靠电子在物体中的移动而实现的，导电性比金属低，原因是能导电的电子数量较少。半导体与金属导体的差异在于在晶体中从一原子移动一个电子到邻近原子所需要的能量显著，这种能量是由热提供；高纯度和内部结构完整的半导体，在极低的温度下几乎不导电，但随着温度的增高导电性增大，电阻迅速减小。表3.1.17中所列的半导体物质的电阻率

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.19 常见矿物的介电常数测定值①

（按汉语拼音字母排列）

（测定条件：电源220V，60Hz/s，粒度－250目
介电液：甲醇 四氯化碳 水）

矿物	介电常数测定值	矿物	介电常数测定值
奥长石	6.37	铬铁矿	11.03
白榴石	6.78	硅灰石	6.57
白铅矿	5.47	硅线石	9.29
白铁矿	>33.7 <81	硅锌石	5.55
白云母	10	海绿石	11.65
白云石	8.45	褐铁矿	6.95
斑铜矿	>81	黑云母	9.28
倍长石	5.78	红锌矿	33.7
冰长石	8.13	红柱石	8.28
雌黄	7.24	滑石	9.41
磁黄铁矿	>81	黄铜矿	>81
磁铁矿	>33.7 <81	黄玉	6.09
辰砂	8.43	辉锑矿	5.02
赤铁矿	>81	辉钴矿	>33.7 <81
赤铜矿	16.20	辉钼矿	>81
蛋白石	6.74	辉锑矿	11.15
电气石	5.17	辉铜矿	>81
毒砂	>81	辉银矿	>81
方沸石	6.44	金刚石	4.58
方解石	6.36	金红石	5.85
方铅矿	>81	金云母	7.00
符山石	6.14	尖晶石	6.77
斧石	6.15	拉长石	6.98
钙长石	6.88	蓝晶石	7.18
钙铝榴石	7.64	锂辉石	8.42
钙铁榴石	6.35	锂云母	7.36
橄榄石	6.77	磷灰石	5.72
刚玉	5.35	磷铈镧矿	7.98
锆石	6.09	菱镁矿	6.99
高岭石	11.18	菱锰矿	6.77

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.19

矿　物	介电常数测定值	矿　物	介电常数测定值
菱铁矿	6.74	天青石	6.94
硫砷铜矿	>81	透辉石	7.16
绿帘石	6.17	透闪石	7.03
绿泥石	8.63	顽火辉石	8.33
绿柱石	5.73	微斜长石	6.91
铝铅矿	6.29	文石	7.44
钠长石	6.02	钨锰铁矿	12.51
硼砂	6.55	锡石	27.75
普通辉石	6.72	霞石	6.82
普通角闪石	7.37	异剥石（辉石）	7.41
葡萄石	6.52	萤石	7.11
蔷薇辉石	7.10	硬石膏	6.09
铅矾	7.02	黝铜矿	~81
软锰矿	>81	紫苏辉石	6.85
蛇纹石	11.84	自然铋	>81
闪锌矿	5.29	自然金	>81
石墨	>81	自然硫	3.62
石膏	6.83	自然铜	>81
石榴	8.08	自然银	>81
石英	6.53	针镍矿	11.70
十字石	6.80	正长石	6.20
水镁石	7.77	直闪石	8.44
水锰矿	>81	中长石	6.57
钛铁矿	>81	重晶石	7.86

①介电常数测定值，即为相对介电常数εr，无量纲。

值，范围很窄，是由所测数量有限所致。表3.1.18至表3.1.20列出了矿物介电常数。

3.1.2.5 矿物的发光性

矿物在某种能量的激发下可以导致发光，利用这种性质可进行矿物鉴定及矿物分选。使矿物发光的方法，最常用的有光致发光及阴极发光。光致发光中最广泛应用的有紫外线激发发光。热致发光及α-质点发光也有实用价值。

矿物的发光性能可分为荧光及磷光，当激发能停止，矿物的

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.20 极化作用下矿物的介电常数

（电子或离子极化作用）

矿物	介电常数 pF/m
硫化物	
方铅矿PbS	158
闪锌矿ZnS	69.7
卤化物	
钾盐KCl	38.8～54.8
食盐NaCl	50.4～54.8
萤石CaF_2	55.4～60.0
碳酸盐	
白云石$CaMg(CO_3)$	60.1～70.7
方解石$CaCO_3$	69.0～75.2
文石$CaCO_3$	57.1～86.0
磷酸盐、硫酸盐	
磷灰石$Ca_5(F, Cl)(PO_4)_3$	65.5～92.8
铅矾$PbSO_4$	644～4400
石膏$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	47.7～106
天青石$SrSO_4$	47.7～106
无水石膏$CaSO_4$	50.5～55.7
重晶石$BaSO_4$	69.5～109
氧化物	
赤铁矿Fe_2O_3	221
刚玉Al_2O_3	97.2～117
金红石TiO_2	274～1500
水H_2O	721
硅酸盐	
白榴石$KAlSi_2O_6$	63
白云母$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	54.8～70.7
方沸石$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	52.0
锆石$ZrSiO_4$	76.0～106
黑云母$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}$	54.8～82.3
黄玉$Al_2SiO_4(F, OH)_2$	55.7～59.2
绢云母（复杂硅酸盐）	173～224
绿帘石（同上）	67.3～136
绿柱石$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	50.2～58.3
普通辉石（复杂硅酸盐）	61.0～76.0

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.20

矿　　物	介电常数 pF/m
石英SiO_2	82.3～64.0
正长石$KAlSi_3O_8$	39.8～51.3
斜长石系列	
钠长石（复杂硅酸盐）	48.2～49.1
奥长石（同上）	53.3～53.6
中长石（同上）	54.8～57.2
拉长石（同上）	57.6～58.5
钙长石（同上）	62.3～64.0

发光立即停止称荧光；而能保持一定的时间称磷光。矿物的荧光及磷光可显示各种不同的颜色，有绿、橙、蓝等色。

光致发光是矿物中某些元素原子的核外电子在光的激发下产生能级的跃迁而致。常见的光致发光矿物如表3.1.21所示。

3.1.2.6 矿物表面的润湿性

矿物与液体接触时，在固液间发生相互附着现象称为润湿现象。因水是最广泛的液体，故常把矿物润湿性能的优劣称为亲水性和疏水性。润湿性的本质是固、水、气三相体系内相互作用的界面自由能的结果。矿物表面润湿性的大小，可用矿粒在水溶液中气泡和颗粒间的接触角表示。接触角越大则润湿性越差，矿物的天然可浮性越好。当接触度大于60°时矿物的天然可浮性就成为可能。如果用药剂处理会增加矿物表面的接触角。矿物的接触角与天然可浮性的关系如表3.1.22所示。

矿物润湿性是由矿物本身的结晶化学性质决定的。矿物表面的化学键性不同，对水的亲和力不同。分子晶格的矿物具分子键，分子间结合力弱，表面原子价为饱和状态，呈疏水性，可浮性最好；有些矿物分子键及离子键兼有，但是裸露面以分子晶格为主，所以也具有良好的可浮性，如滑石及辉钼矿等。金属键和共价键矿物的润湿性中等，对水亲和力介于分子键和离子键之间，有些矿物共价键和离子键兼有，可浮性较前二者差，但是又

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.21 光致发光矿物

(按汉语拼音字母顺序排列)

矿石	紫外线照射	阴极射线照射
白铅矿	黄、鲜绿蓝、淡蓝	淡蓝
白钨矿	淡蓝	淡蓝
白云石	黄	
电气石		红
方解石	黄、紫	红黄
方柱石		玫瑰红
钙铀云母	鲜绿	
高岭石		淡蓝色
锆石	橙黄	
刚玉	紫红	淡蓝绿
		淡蓝
		红宝石色
硅灰石	淡蓝、黄	淡蓝、黄
硅酸锌矿	鲜绿	
滑石	山楂红	山楂红
黄玉	蓝	蓝
红尖晶石	浓红	
金刚石	山楂橙	淡蓝
	蓝	绿
蓝晶石		紫红色
锂云母	淡绿	
拉长石		淡蓝
磷灰石	玫瑰红	山楂橙
	黄、灰白、紫	黄、淡紫
菱镁矿	黄	紫粉红
菱锰矿		白淡蓝
菱铁矿		山楂红
硫酸铅矿	玫瑰红	
绿柱石	紫	淡蓝
明矾石	紫	淡紫
钼铅矿		红
钠长石	淡蓝、淡紫	灰蓝，淡紫
奥长石	淡绿	
葡萄石	红	亮绿

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.21

矿　　物	紫外线照射	阴极射线照射
闪锌矿	红	红
蛇纹石	黄	
石膏	淡绿、淡绿蓝	紫
石棉	黄	
石英	蓝	
硬石膏	红	山楂红
异极矿	黄、淡紫	淡蓝、淡紫
正长石		淡蓝、暗淡蓝
重晶石	玫瑰红、黄、紫	紫
透闪石	黄	紫、金黄绿
微斜长石	黄	淡蓝
文石	淡黄、绿、紫	淡紫
萤石	黄、绿、紫、暗紫	绿、暗绿，紫、亮紫

较全离子键较强的矿物的可浮性好。强离子键结合的矿物可浮性最差，但是在药剂的作用下仍是可浮的。按矿物浮选难易程度可分为下列几类。

A 极易浮选的矿物

矿物表面呈分子键，或裸露面以分子键为主，浮选时用非极性捕收剂和起泡剂即可浮选。如，自然硫、辉钼矿、滑石、叶蜡石、石墨、砷华、煤。

B 易浮选矿物

用黄药类作捕收剂可浮选裸露面为金属键、共价键及部分离子键的矿物。如，自然铜、自然银、金刚石，辉铜矿、黄铜矿、黝铜矿、砷黝铜矿、铜蓝、方铅矿、闪锌矿，黄铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、针硫镍矿、辉砷镍矿、红镍矿、砷镍矿，硫钴矿、砷钴矿，辉锑矿、辉铋矿，辰砂、雄黄、雌黄，辉银矿。

C 难浮选的矿物

矿物表面具有强的离子晶格，键性强，亲水性强，可浮性差，必须加入可浮性药剂，不同的矿物使用不同的捕收剂和抑制剂等，才能得到良好的浮选效果。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.22 矿物与水的接触角和天然可浮性

矿物与水接触角，度	标准矿物	天然可浮性	晶格特征
78	自然硫	最好	分子晶格，分子与分子之间以极弱的分子力结合，易破裂晶面原子价为饱和态，为分子键，属于疏水性
69 60 60	滑石 石墨 辉钼矿	好	分子晶格和离子晶格等混合型，以分子键力裸露面为主。晶体为层状重叠，层理与 c 轴垂直。层与层之间为极弱的分子力，层面的原子价为饱和态，呈疏水性。层内为离子键，共价键或金属键
47 47 46 41 30～33	方铅矿 黄铜矿 闪锌矿 萤石 黄铁矿	差	离子晶格和原子晶格为主，以强键力结合，表面有不饱和态原子价，亲水性能较上述矿物强，天然可浮性差。 离子晶格，强键力结合，接触角很小
30 20 0～10 0	重晶石 方解石 石英 云母	最差	

a 某些盐类矿物和氟化物

用脂肪酸类作捕收剂浮选效果良好，但必须加入有效抑制剂，并细心调整pH值，如，白钨矿、白云石、方解石、萤石、重晶石、磷钙土。

b 某些有色金属氧化物及盐类矿物

此类矿物在硫化后用黄药类捕收剂或阳离子捕收剂及脂肪酸捕收剂，可以浮选。如，孔雀石、赤铜矿、硅孔雀石、白铅矿、砷铅矿、铅矾、钼铅矿、硅酸锌矿、菱锌矿、红锌矿、硅锌矿、菱钴矿、锑华、方锑矿、黄锑矿、锑赭石、海铋矿、白砷矿、臭葱石、铋华。

c 某些氧化物及硅酸盐矿物

此类矿物用脂肪酸或阳离子捕收剂可浮，但需注意pH值的

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.23 极性矿物分类

1 组	2 组	3 组 a	4 组	5 组
极	性	增	强	
方铅矿	重晶石	白铅矿	赤铁矿	锆 石
铜 蓝	硬石膏	孔雀石	磁铁矿	异极矿
斑铜矿	钒 矾	蓝铜矿	针铁矿	绿柱石
辉铜矿	石 膏	彩钼铅矿	铬铁矿	长 石
黄铜矿		3 组（b）	刚 玉	石榴石
辉锑矿		萤 石	软锰矿	石 英
辉银矿		方解石	褐铁矿	
针镍矿		菱锰矿	黑钨矿	
黄铁矿		白云石	铌铁矿	
闪锌矿		磷灰石	钽铁矿	
雌 黄		白钨矿	金红石	
雄 黄		菱锌矿	锡 石	
自然金		菱铁矿		
自然银		独居石		
自然铂				
自然铜				

调整以及抑制剂和活性剂的选择。如，磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、钛铁矿、铬铁矿、菱锰矿、褐锰矿、软锰矿、钨锰铁矿、铌钽铁矿、金红石、锡石；硅酸盐矿物有：锆石、绿柱石、锂辉石、石英、电气石、铁铝榴石、黄玉、橄榄石、绿帘石、透闪石、榍石、蔷薇辉石、辉石、钙长石、黑云母、白云母、拉长石、霞石、正长石、堇石、蓝晶石、红柱石、高岭石、石棉、钠硼解石，还有磷酸盐矿物独居石。

有些可溶性碱金属盐类矿物遇水溶解，如果采用浮选只能在本身的饱和溶液中进行，用脂肪酸或阳离子捕收剂可浮选。如，石盐、钾盐、钾镁矾、杂卤石、硼砂、单斜方硼石、钾芒硝、芒硝。

具有离子键的矿物属于极性矿物，在极性表面表现出高的自由能值，极性表面同水分子起作用，具有天然亲水性。共价键矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.24 主要粘土矿物的差热分析特征

矿物	1 温度区，℃	2 温度区 ℃	3 温度区，℃
水铝英石 ($XSiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$)	100～200 ↓		900～1000 ↑
硅铁石 ($XSiO_2 \cdot Fe_2O_3$)	100～200 ↓		900～1000 ↑
埃洛石 ($(Al_2)[Si_2]O_5(OH)_4 \cdot H_2O$)	100～200 ↓	500～600 ↓	900～1000 ↑
准埃洛石 ($(Al_2)[Si_2]O_5(OH)_4$)	100～200 ↓	500～600 ↓	900～1000 ↑
蒙脱石 ($([E_{0.33}](Al_{5/3}Mg_{1/3})[Si_4]O_{10}(OH) \cdot nH_2O$)	100～200 ↓ 200～300 ↓	700 ↓	900～1000(S)
绿脱石 ($(E_{0.33})(Fe_2)[Si_{1\ 1/3}Al_{1/3}]O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$)	100～200 ↓ 200～300 ↓	400～700 ↓	900～1000(S)
皂石 ($(E_{0.33})(Mg_3)[Si_{1\ 2/3}Al_{1/3}]O_{10}(OH) \cdot nH_2O$)	100～200 ↓ 200～300 ↓		900 ↓
蛭石 ($(E_{0.6\sim0.9})(Mg_3)[Al,Si]_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$)	100～200 ↓ 200～300 ↓		900～1000(S)
海泡石 ($(Mg_8)[Si_{12}]O_{30}(OH)_4(OH_2)_4 \cdot 8H_2O$)	100～200 ↓	300 ↓ 500 ↓	800～1000(S)
绿坡缕石 ($(Mg_5)[Si_8]O_{20}(OH)_2(OH_2)_4 \cdot 4H_2O$)	100～200 ↓ 200～300 ↓	300 ↓ 500 ↓	800～1000(S)
云母类粘土	100～200 ↓ 200～300 ↓	500～800 ↓	900 (S)
海绿石 ($2R_2O_3 \cdot 2(RO \cdot R_2O) \cdot 8SiO_2 \cdot 4\frac{1}{4}H_2O$)	100～200	550～600 ↓	950 (S)
绿鳞石 ($R_2O_3 \cdot 3(RO \cdot R_2O) \cdot 8SiO_2 \cdot 5H_2O$)	100～200 ↓	600 ↓	950 (S)
叶蜡石 ($(Al_2)[Si_4]O_{10}(OH_2)$)		600～800 ↓	

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.24

矿　　物	1 温度区，℃	2 温度区 ℃	3 温度区，℃
滑石 $((Mg_3)[Si_4]O_{10}(OH)_2)$			900～1000↓
叶蛇纹石 $((Mg_3)[Si_2]O_5\cdot(OH)_4)$		600～700↓	900～1000↓
绿泥石（多Mg）		600～700↓	800～900(S)
含水铁铝硅酸盐			
地开石 $((Al_2)[Si_2]O_5(OH)_2)$		600～700↓	900～1000↑
珍珠陶土 $((Al_2)[Si_2]O_5(OH)_2)$		600～700↓	900～1000↑
高岭石 $((Al_2)[Si_2]O_5(OH)_2)$		600～700↓	900～1000↑
镁磷铝钙石	300↓	500～600↓	
三水铝石 $(Al(OH)_3)$	220～500↓		
硬水铝石 $(AlO\cdot OH)$	500～600↓		
勃姆石 $(AlO\cdot OH)$	500～600↓		

注：1．样品不含杂质，化学式中R—阳离子，E—1价阳离子；

2．升温度为10℃/min，部分为10～15℃/min。

物也属于极性矿物，但呈微弱的极性，有许多硫化物为多键性矿物，但以共价键为主，也列入此类。根据极性强弱可分为5组，如表3.1.23。极性从1组至5组渐增，但在3组（a）中的矿物在碱性介质中矿物表面的硫化作用而呈现疏水性。1组矿物是以共价键为主的硫化物，而5组矿物是以离子键很强的硅酸。

3.1.2.7 矿物的密度和硬度

矿物的密度为其重量与体积的比值，单位为克/厘米^3。而当矿物的重量与4℃时同体积的水的重量之比时，称谓矿物的比重。比重为无量纲，因而也无单位。矿物的比重值列入表3.1.29。

重力选矿的重要依据是矿物的比重差。不同矿物有不同的比

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.25 硫化物固溶体转变温度

（根据实验确定的，前者为溶剂矿物）

硫化物矿物系列	转变温度，℃，大于此温为均一相，小于此温为不混溶相
斑铜矿—辉铜矿（Cu_5FeS_4—Cu_2S）	175～225
斑铜矿—黄铜矿（Cu_5FeS_4—$CuFeS_2$）	475
斑铜矿—硫锑铜矿（Cu_5FeS_4—$Cu_{12}Sb_4S_{13}$）	275
辉铜矿—铜蓝（Cu_2S—CuS）	75
辉铜矿—硫铜银矿（Cu_2S—$Cu_2S\cdot Ag_2S$）	300
黄铜矿—方黄铜矿（$CuFeS_2$—$CuFe_2S_3$）	450
黄铜矿—白铁黄铁矿（$CuFeS_2$—$CuFe_2S_6$）	255～450
黄铜矿—磁黄铁矿①（$CuFeS_2$—FeS）	600（黄铜矿）300（磁黄铁矿）
黄铜矿—硫锑铜矿（$CuFeS_2$—$Cu_{12}Sb_4S_{13}$）	500（？）
方铅矿—辉银矿（PbS—Ag_2S）	？
方铅矿—硫铋铅矿（PbS—$AgPbS_2$）	210～350
磁黄铁矿—白铁黄铁矿（FeS—$CuFe_2S_6$）	350～550
磁黄铁矿—镍黄铁矿（FeS—(Fe, Ni)S）	425～450
闪锌矿—黄铜矿①（ZnS—CuFeS）	？
闪锌矿—磁黄铁矿（ZnS—FeS）	138～894
黄锡矿—铜磁黄铁矿（Cu_2FeSnS_4—$CuFeS_2$）	500
银—锑银矿（Ag—Ag_3Sb）	275～350

① 二者皆可作溶剂。

重。相同粒度的矿物因比重的不同在同一介质中的沉降速度也不同。利用这种差值分离矿物称之为重力选矿，比重差越大，越容易分开。

硬度是矿物的重要性质之一，与碎矿和磨矿直接相关。低硬度矿物容易破碎和磨细，硬度高的矿物可作为磨料。矿物硬度有三种表示法，即刻划硬度，显微硬度和抗磨硬度。最常用的是刻划硬度，也称相对硬度或莫氏硬度（H_M），是划分十个硬度等级，以十种硬度大小不同的矿物作为硬度计，即滑石（1），石膏（2），方解石（3），萤石（4），磷灰石（5），长石（6），石英（7），黄玉（8），刚玉（9），金刚石（10）。未知硬度的矿物与其刻划而求得硬度值。显微硬度是根据矿物抵抗压入物的

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.26 根据不混溶结构推测的硫化物固溶体

（形成温度不详）

硫化物矿物系列
硫锰矿—磁黄铁矿（MnS—FeS）
辉铋矿—辉银矿（Bi_2S_3—Ag_2S）
方铅矿—淡红银矿（PbS—Ag_3AsS_3）
硫钴矿—针镍矿（Co_2S_4—NiS）
斑铜矿—脆硫铜铋矿（Cu_5FeS_4—$Cu_6Bi_4S_9$）
辉铋矿—硫铜铋矿（Bi_2S_3—$Cu_2Bi_2S_4$）
斜方辉铅铋矿—斜硫锑铅银矿（Pb_2Bi_2S—$Ag_2PbSb_2S_5$）
方黄铜矿—磁黄铁矿（$CuFe_2S_3$—FeS）
方铅矿—辉铋矿（PbS—Bi_2S_3）
方铅矿—黝铜矿（PbS—$Cu_{12}Sb_4S_{13}$）
砷黝铜矿—方铅矿（$Cu_{12}AsS_{13}$—PbS）
砷黝铜矿—黄铜矿（$Cu_{12}AsS_{13}$—$CuFeS_2$）
黄锡矿—黄铜矿（Cu_2FeSnS_4—$CuFeS_2$）
黄锡矿—黝铜矿（Cu_2FeSnS_4—$Cu_{12}Sb_4S_{13}$）
黄锡矿—黄铁矿（Cu_2FeSnS_4—FeS_2）
黄锡矿—方黄铜矿（Cu_2FeSnS_4—$CuFe_2S_3$）
闪锌矿—磁黄铁矿（ZnS—FeS）
斑铜矿—硫钴矿（Cu_5FeS_4—Co_4S_3）

能力而测得常以维氏硬度（Hv）表示，压入硬度有时也称绝对硬度。压入硬度与刻划硬度可用下式进行换算：

$$\text{刻划硬度值 Hm} = 0.675 \cdot \sqrt[5]{\text{Hv}} \qquad (3.1.4)$$

抗磨硬度$F = V^{-1}$，V表示单位时间内被磨损的体积。抗磨硬度与压入硬度和表面能（γ）有关，其函数关系为：

$$F = V^{-1} = f(\text{Hv},\ \gamma) \qquad (3.1.5)$$

3.1.2.8 矿物的热学性质

矿物随其温度的升高而变得不稳定，可发生再结晶、相变、固溶体转变、脱水、膨胀、分解或在不同的气氛下发生氧化或还原。天然矿物成分复杂常含有可替换的元素，易引起矿物热性质

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.27 矿物相变温度

相 的 变 化	转变温度，℃
铋—α·铋	75
黄铁矿—α-白铁矿	91
碲银矿—α-碲银矿	149
螺状硫银矿—辉银矿	179
碲金矿—α-碲金矿	184
硫银铋矿—α-硫银铋矿	210
α-石英—β-石英	573
β-石英—鳞石英	870
辉钴矿—α-辉钴矿	830～900
铁闪锌矿—纤锌矿（含Fe17%）	880
闪锌矿—纤锌矿	1020

变化，所以描述矿物的热学性质一般是指标准成分下的矿物热学性质，如熔点等。

A 粘土矿物的差热分析特征

粘土矿物在差热分析中具有明显的峰和谷特征，一般相变、脱水、分解和晶体转变是吸热，而结晶、氧化和一些分解反应产生放热效应。如表3.1.24所列。矿物加热时，吸热效应出现谷，放热效应出现峰。表内数字表示温度℃值，箭头↓表示吸热谷，箭头↑表示放热峰。S符号表示峰或谷的形状呈S形，是由吸热谷和放热峰连续发生所致。

1温度区的吸热谷主要是由矿物表面附着水、层间水或沸石水的脱出引起的，如埃洛石、蒙脱石等。

2温度区的吸热谷主要是由（OH）的脱出引起的，如高岭石、绿泥石、叶蛇纹石、云母粘土矿物及蒙脱石群。

3温度区的放热峰主要是由于加热物质的再结晶引起的，如高岭石、绿泥石、蒙脱石、叶蛇纹石及云母粘土矿物。在放热峰前面伴有连续的吸热谷，因而构成S形峰。产生原因各异，高岭土的S形是再结晶之前的膨胀引起的；面绿泥石是由2:1层的（OH）脱出引起的。

地信网论坛
bbs.3s001.com

B 硫化物固溶体转变

许多硫化物矿物具有固溶体现象，在较高温度时为均一相，而当温度降低时又转变为两个相，或者在不同的温度区间出现不同的相，如表3.1.25所示。

3.1.2.9 矿物的波谱性质

波谱学可定义为物质与电磁辐射（EMR）相互作用的研究。电磁辐射用波长大小表示，单位为埃（Å），毫微米(nm)，或微米（μm）；频率单位用波数（cm^{-1}）；能量大小以焦（J）或电子伏特（eV）为单位，换算关系为：

10000埃＝1000毫微米＝1微米＝10^{-4}厘米；

10^4厘$^{-1}$＝11.951×10^4焦(2.859×10^4卡)

＝1.24电子伏特

辐射波的范围包括可见光及红外线为0.35～40微米。此范围内的内部作用是电子跃迁或振动过程。固体吸收或反射的辐射波是物质能量转换的结果，这种转换称为跃迁，它发生在物质的不连续能级或能带之间。这可能是电子能级或振动能级，电子能级的跃迁形式通常表现为可见光（0.35～0.75微米）或近红外（0.7～2.5微米）；振动能级的形式为红外线范围（1.2～40+微米）。

确定一种固体的吸收、反射、或发射的光谱特征，最基本的性质是光学常数，即折光率（n）及消光（或吸收）效应（k）。其他参数，如表面状况、颗粒大小及分布、照射角、温度、压力对光谱的形貌有影响。但是，所有这些成分的特征信息都包含在n及k中。由于光学行为的跃迁发生在能级之间的缘故，则n及k值依赖于波长（图3.1.9）。

矿物的红外光谱（2.5～40.0微米）

固体物质受到红外射线激发后而成分中的原子或分子团产生振动。不同的物质具有不同的红外线信息，特征的信息是研究矿物的基础。

固体物质的红外光谱受许多因素影响。如记录光谱的形式，

地信网论坛
bbs.3s001.com

样品的状况和环境状况。记录光谱可分透射、反射和散射；样品可有光面、糙面和粉末；环境包括温度、压力、日照角和变化

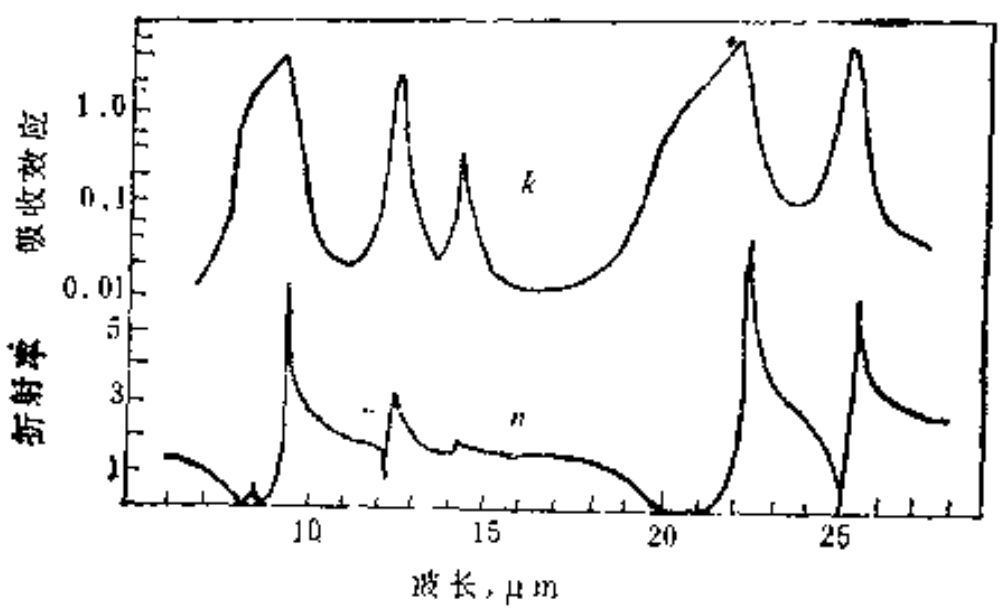


图 3.1.9 石英的光学常数

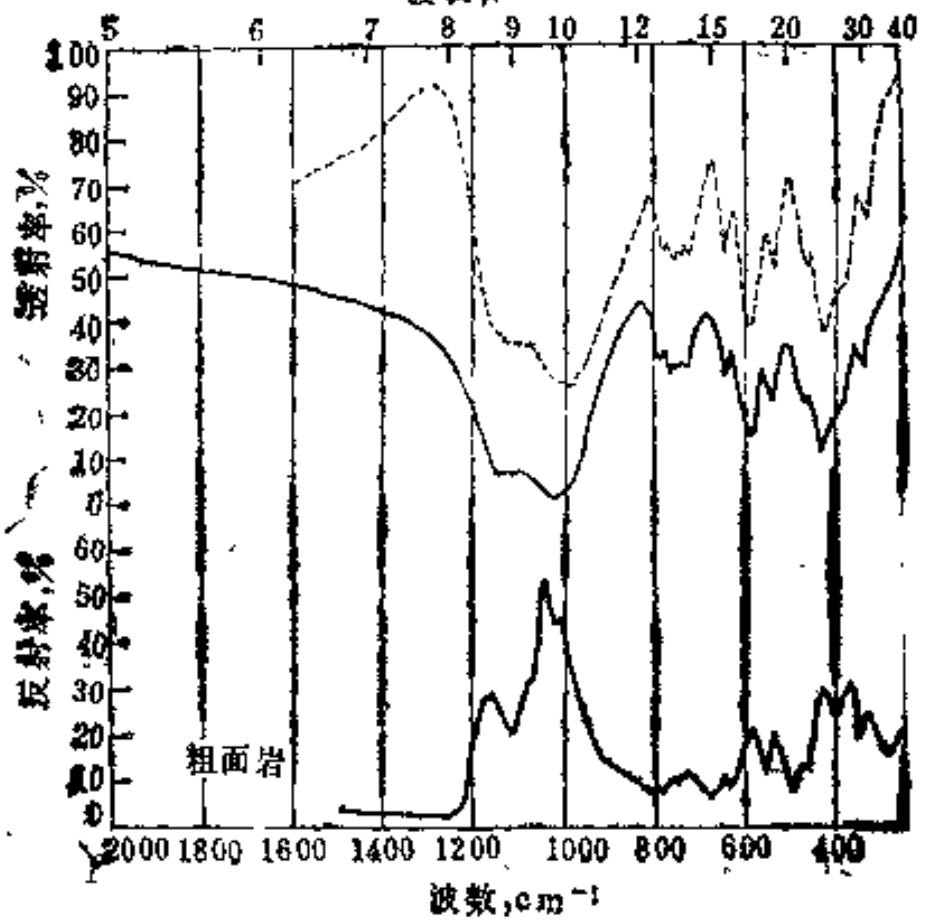


图 3.1.10 粗面岩在不同条件下的光谱

上面的虚线是在空气中测试的透射谱；

下面的实线是在KBr中测试的透射谱；

底部是光片的反射谱

地信网论坛
bbs.3s001.com

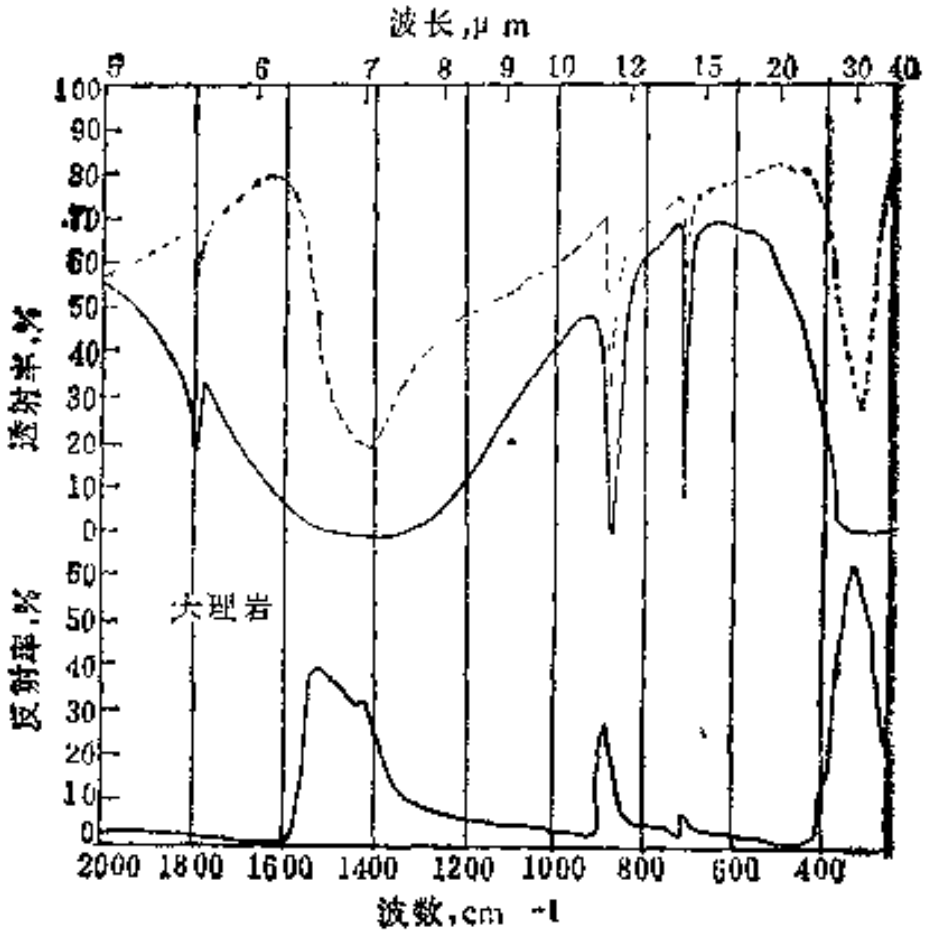


图 3.1.11 纯白大理岩在不同实验条件下的光谱

上面的虚线是在空气中测定的透射谱；

下面的实线是在KBr中测定的透射谱；

底部为反射谱

率。各种因素的变化都会改变红外光谱特征，所以在对比谱线时必须考虑影响谱线特征的因素，不然就必须注明实验条件。

固体物质的红外光谱，大部分发生在吸收系数k值（也称消光系数）上，在共振区可达到最高值，特别是在接近10及20微米的硅酸盐内。这些变化伴有异常的色散现象产生，并且与折光率n值的较大变化有关。当物体表面光滑、光入射角小时，产生特殊的反射；而对糙面或粉末物质产生吸收。当光谱中所出现的最大和最小与共振频率相重合时，称之克里蒂安逊(Christiansen)效应的结果。

透射谱和反射谱的特征如图3.1.10至图3.1.12所示。反射谱为自身倒数，虚线表示粉末样品在空气条件下的透射现象，实线表示粉样在KBr中的透射现象。二者的主要区别是虚线上升至最

地信网论坛
bbs.3s001.com

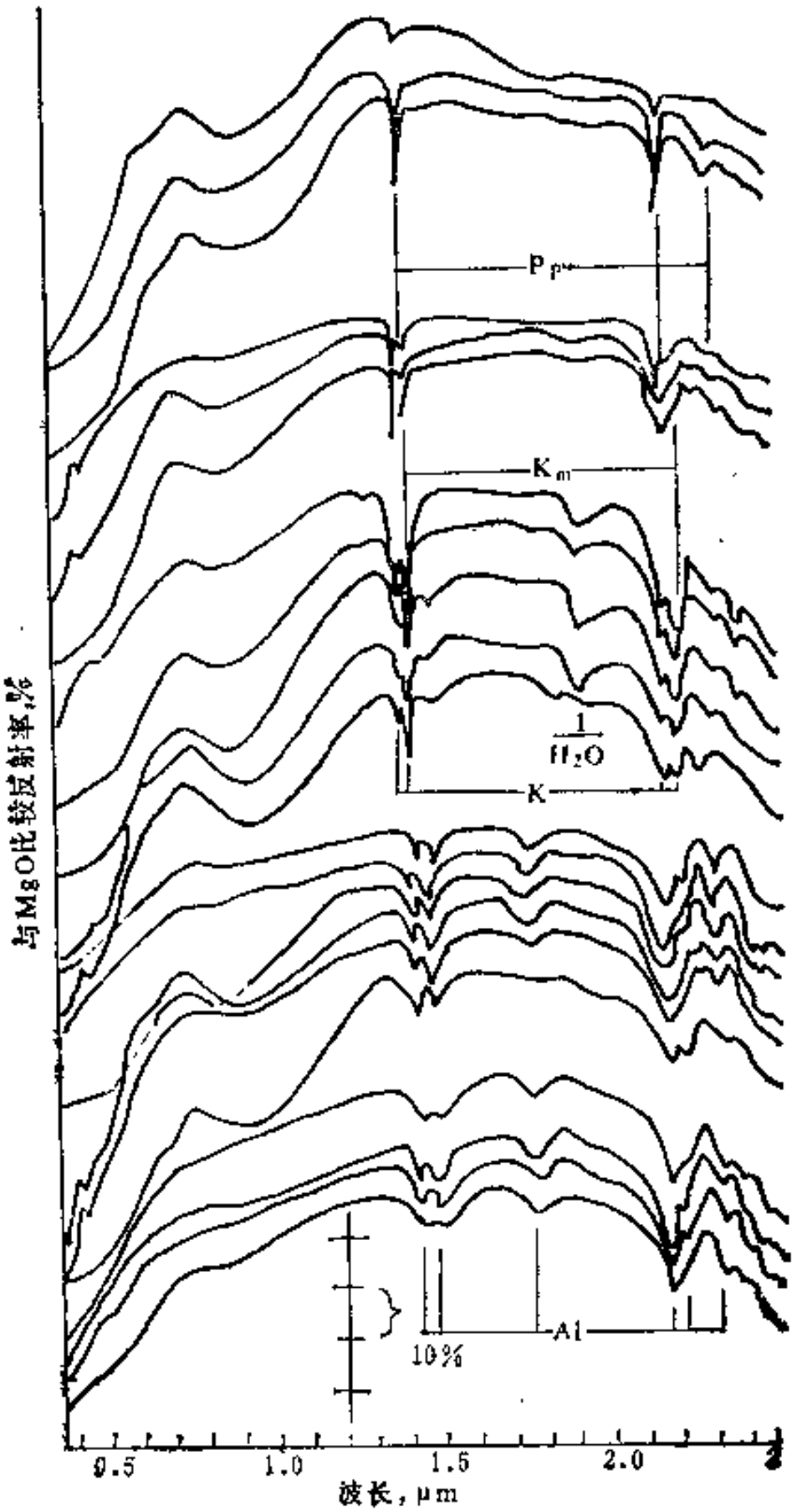


图 3.1.12 高级陶土粉末样品的反射谱变化

谱形都为粒状矿物的谱形，图谱是垂直移置的

Pp—叶蜡石；Km—钾云母；K—高岭石；Al—明矾石

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.28 矿物的红外吸收资料（4000～250cm^{-1}）

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
硫 化 物	
辉铜矿（Cu_2S）	415～412强，345～340中至弱
斑铜矿（Cu_5FeS_4）	351～345强
闪锌矿（(Zn，Fe) S）	306～280强
方铅矿（PbS）	无吸收
黄铜矿（$CuFeS_2$）	372～370肩状，359～355强，316～315中
辰砂（HgS）	346～342强
铜蓝（CuS）	无吸收
磁黄铁矿（$Fe_{1-x}S$）	无吸收
雄黄（AsS）	365～362中，358～355中，339～338强
雌黄（AsS_3）	390极弱，380～378中，362～360肩状，345～344中，30(极强
辉锑矿（Sb_2S_3）	335～332肩状
黄铁矿（FeS_2）	415～410强，348～345中，392～385弱
白铁矿（FeS_2）	419～418强，398～396强，252～350中，328～325中
毒砂（FeAsS）	435～431强，369～362中强
辉钼矿（MoS_2）	381～380强
硫砷铜矿（Cu_3AsS_4）	379～377强，260～255中弱
氧 化 物	
赤铜矿（Cu_2O）	625～615强
尖晶石（$MgAl_2O_4$）	685～677强，515～505强，301中
磁铁矿（Fe_3O_4）	575～570强
锌铁尖晶石（(Zn.Mn,Fe)$(FeMn)_2O_4$）	565～555强，435～428强
铬铁矿（$(Mg,Fe)Cr_2O_4$）	635强
刚玉（Al_2O_3）	607～595强，460～450强
金绿宝石（$BeAl_2O_4$）	975～945中，438～433中
赤铁矿（Fe_2O_3）	550～540强，471～460中强，333中
钛铁矿（$FeTiO_3$）	545～540强，461～440中强，325强
硬锰矿（$(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}$）	715中，535～533强
金红石（TiO_2）	530～512强，402～395强，315～305强
软锰矿（MnO_2）	550～532强，418～405中
锡石（SnO_2）	620～613强，540～525强
板钛矿（TiO_2）	425～410强，340～335中强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
氢氧化物	
水镁石 ($Mg(OH)_2$)	3698～3695，362～358强
勃姆石 (AlO(OH))	3290强，3100～3090强，1072～1065强，525～500强
水锰矿 (MnO(OH))	510～500弱中
针铁矿 ($HFeO_2$)	3140极宽强，904～883中，803～790中，415～402强
三水铝石 ($Al(OH)_3$)	3540～3525强，970～960中，418～405中
卤化物	
石盐(NaCl)，钾盐 (KCl)	无吸收
萤石 (CaF_2)	305～280强
氯铜矿 ($Cu_2(OH)_3Cl$)	3340～3335强，598～593强，410～399强
光卤石 ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$)	1638～1630强，3000中强
碳酸盐	
方解石 ($CaCO_3$)	1440～1420强，877～870中，715～708弱中，315～307中强
菱镁矿 ($MgCO_3$)	1450～1435强，887～885中，750～740中，380强
菱铁矿 ($FeCO_3$)	1425～1410强，866～864中，740～737中，335～325强
菱锰矿 ($MnCO_3$)	1435～1410强，867～865中，730～725中，307～300强
菱锌矿 ($ZnCO_3$)	1435～1415强，871～867中，744～743中，300肩状
白云石 ($CaMg(CO_3)_2$)	1450～1435强，881～875中，730～722弱中，360～358强
铁白云石 ($CaFe(CO_3)_2$)	1450～1440强，877～875中，727～726中
文石 ($CaCO_3$)	1470～1420强，866～854中，712～709弱，699～696弱
毒重石 ($BaCO_3$)	1445～1435强，860～855中，695～693中
菱锶矿 ($SrCO_3$)	1470～1452强，860～858中强，708～706中，695～693中
白铅矿 ($PbCO_3$)	1405～1390强，841～832中，677～670中
孔雀石 ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$)	3409～3405中强，3322～3320中强，1425～1423强 1395～1392强，430～428弱中
蓝铜矿 ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$)	3430～3424中，1466～1463强，1418～1413强，460～450中
天然碱 ($Na(CO_3) \cdot Na(HCO_3) \cdot 2H_2O$)	3470强，1700～1688强，1472～1462强，600～595强
硝酸盐	
硝酸钠 ($NaNO_3$)	1390～1382强，1122～1095中强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
硼 酸 盐	
硬硼钙石 ($CaB_3O_4(OH)_2 \cdot H_2O$)	3603～3600中强，1365～1360强，1046～1030中，581～580中
四水硼砂 ($NaB_5O_4(OH) \cdot 3H_2O$)	3552～3550中弱，1375～1358强，1020～1010强，832～825中弱，553弱
三斜硼钠钙石 ($NaCaB_5O_5 \cdot 8H_2O$)	3600～3590强，1325～1318强，1065～1050中，868～854强，450～442中
硫 酸 盐	
重晶石 ($BaSO_4$)	1180～1170强，1085～1079强，614～607强
天青石 ($SrSO_4$)	1190～1172强，1085～1076强，613～605中强
无水石膏 ($CaSO_4$)	1159～1150强，1130～1110强，676～671中，616～610中 597～593中
硫酸铅 ($PbSO_4$)	1108～1090强，625中，600～594中
钙芒硝 ($Na_2Ca(SO_4)_2$)	1142～1135强，1108～1101强，635～631中，611～607中
石膏 ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	3572～3555强，1150～1135极强，605～595中，460～450中 1150～1140强，657～655中强，598～595中
胆矾 ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)	1150～1153强，1000～995强，663～658强，612～604中
泻利盐 ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	1160～1655宽中，1100～1085强，630～617强，430～425中
水胆矾 ($Cu_4SO_4(OH)_6$)	1119～1113强，1088～1067 873～868中，602～597强，421～415弱中
羟铜矾 ($Cu_3SO_4(OH)_4$)	1157～1150中强，1115～1105中强，1075～1071中强，990～987弱 517～514强，462～460强
黄钾铁矾 ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)	1100～1090强，690～685中弱，638～623中，512～510强
铬 酸 盐	
铬铅矿 ($PbCrO_4$)	858～850强，840～835肩状
钼及钨酸盐	
黑钨矿 ($(Fe, Mn)WO_4$)	625～605中，530～525宽肩状
钨铁矿 ($FeWO_4$)	818～800中，625～615中，535宽肩状
白钨矿 ($CaWO_4$)	808～775强
钼铅矿 ($PbMoO_4$)	785～772极强，374～372中，305～304中

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
磷 酸 盐	
独居石 ((Ce,La,Y,Th)PO_4)	1050极宽，955～940强，620弱
锂磷铝石 ((Li,Na)Al$(PO_4)_2(OH)_2$)	3375～3373强，1085～1083强，815～812中，485～475中，强，324～318中
胄金石 ((Mg,Fe)-$Al_2(PO_4)_2(OH)_2$)	3405～3400中，1010～1004中，812～804中，652～646中，430～426弱
磷灰石 ($Ca(PO_4)_3(F,Cl,OH)$)	1095～1090强，1050～1038强，605～600强，575～560中，318～310中强
银星石 ($Al_3(PO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$)	3520强，1025～1015强，452～443强
磷氯铅石 ($Pb_6(PO_4)_3Cl$)	1030～1020强，970～960极强，575～558强，543～538中
钙铀云母 ($Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10～12H_2O$)	1125～1120强，1023～1005强，545～538中
砷 酸 盐	
钴华 ($Co(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$)	784～783强，452～446中
镍华 ($Ni(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$)	832～825弱，795中，460～455弱，427～424弱
砷铅矿 ($Pb_5(AsO_4)_3Cl$)	790～783强，418～413中强
钒 酸 盐	
钒铅矿 ($Pb_5(VO_4)_3Cl$)	810～801强，745～739强
岛状硅酸盐	
橄榄石 ($(Fe,Mg)_2SiO_4$)	985～980强，890～880强，612～605中强，505～504强，416～414强，360～355强～中
硅锌矿 (Zn_2SiO_4)	980～975强，931～929强，872～868强，575～570强，460弱中
红柱石 (Al_2SiO_5)	1015～1010强，950～930中强，585～520强，460弱中
硅线石 (Al_2SiO_4)	1185～1175强，915～900强，545～544强，510～509强，490～488强，440～434强
蓝晶石 (Al_2SiO_4)	1040～1030强，1010～990强，727～720强，630～628强，598～597强，470～460强，442～430强
十字石 ($FeAl_4(SiO_4)_2O_2(OH)_2$)	3420～3410弱中，1090～1080强，695～685强，595～586强，435～430强
黄玉 ($Al_2SiO_4(OH,F)_2$)	1171～1158中，1010～990强，620～609强，483～474中，445～443强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
铁铝榴石($Fe_3Al_2(SiO_4)_3$)	1090～1085肩状，970～963强，872～870强，570～569中强，480强，455强
镁铝榴石 ($Mg_3Al_2(SiO_4)_3$)	1097～1080肩状，970～962强，872～870强，575～565中强，482～472强，384～378强
钙铝榴石($Ca_3Al_2(SiO_4)_3$)	1080～1070肩状，915～905强，840强，540～538强，450～444强
钙铁榴石($Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$)	1090肩状，895～885强，840～828强，512～510强，438～435中强
钙铬榴石($Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$)	1080～1072肩状，960～945强，910～900强，855～840强，470～455极强，445～425极强
锆石 ($ZrSiO_4$)	1040～1000宽强，618～600宽中，438～430强
榍石($CaTi(SiO_4)(O,OH,F)$)	960～953肩状，871～865强，570～560中，470～440中强，433～424强
硅硼钙石($Ca(OH)BSiO_4$)	3492～3490强，1050～1034强，1015～998强，853～847强，478～473强，455～451中
蓝线石 ($Al_2O_3(BO_3)(SiO_4)_3$)	1380～1370中，1078～1050强，490～461强，435～430弱
硅铍石 (Be_2SiO_4)	1040～1035肩状，985～972强，945～935强，780～774强，645～635中，427～423强
赛黄晶 ($CaB_2(SiO_4)_2$)	1142～1130强，1000～971强，950～948强
群状硅酸盐	
符山石 ($Ca_{10}Mg_2Al_4(Si_2O_7)_2(SiO_4)_5(OH)_4$)	3570～3560强，870～860中，580～570中强，450强
斜黝帘石 ($Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH)$)	1108中强，948强，640强，455强，397强
绿帘石 ($Ca_2(Al,Fe)_3Si_3O_{12}(OH)$)	3360中，1120～1100中，950～944强，650～640中，455～450中，398～389中强
环状硅酸盐	
绿柱石 ($Be_3Al_2Si_2O_{18}$)	3700～3698弱，1025～1010肩状，975～953强，686～678中强，497～490强，440～432强
堇青石 ($(Mg,Fe)_2Al_4Si_5O_{18}$)	1170强，965～960强，768～765中强，487强，458～448强，372强
电气石 ($Na(Mg,Fe)_3Al_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(OHF)_4$)	3585～3555宽，1350～1330肩状，1285～1240中，982～972强
锂一电气石[7]	1365～1355中，1310～1290中，1040～1030强，1008～985强，620～400极宽强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
链状硅酸盐	
顽火辉石 ($MgSiO_3$)	1060～1025强，691～662弱中，504～482强，350～340中
紫苏辉石 ($(Fe,Mg)SiO_3$)	1070～1035强，945～900强，638～632中，508～490强，335～325中
透辉石 ($CaMgSi_2O_6$)	1080～1070强，970～965强，868～860强，513～510强，405～400强
钙铁辉石 ($CaFeSi_2O_6$)	1078～1062强，970～958强，870～860强，515～509强，405～398中
普通辉石 ($(Ca,Na,Mg,Fe Mn)(Fe,Al,Ti)(Si,Al)_2O_6$)	1070～1062强，970～963强，862～860强，515～505强，410～401强
易变辉石 ($(Mg,Fe,Ca)(Mg,Fe)Si_2O_6$)	1066强，960强，503强，465强，325强
锥辉石 ($NaFeSi_2O_6$)	1060～1048强，960～939强，643～638弱中，505～502中强，465～451中强
硬玉 ($NaAlSi_2O_6$)	1068～1053强，995～980强，668～655中，590～580强，475～462强，437～429强
锂辉石 ($LiAlSi_2O_6$)	1095～1080强，1035～1020强，612～635中，595～588强，475～470强，405～398弱中
硅辉石 ($CaSiO_3$)	1088～1085强，968～964中，570～567中，475强，455强
针钠钙石($Ca_2NaHSi_3O_9$)	1060～1050强，1010～995强，677～669中，450强，416～412中
蔷薇辉石 ($MnSiO_3$)	1064～1060强，946～943强，578～576中，455～451强，420～415肩状
直闪石 ($(Mg,Fe)_7Si_8O_{22}(OH)_2$)	3680弱中，1010极强，667强，462极强，892强
镁铁闪石($(Fe,Mg)_7Si_8O_{22}(OH)_2$)	978强，690弱，492中强，433中强
透闪石 ($Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$)	3668弱，994强，956强，504强，465强，445强，388中
阳起石 ($Ca_2Fe_5Si_8O_{22}(OH)_2$)	3670～3660弱，1105～1098强，1000～993强，952～950强，508～505强，465～461强，356～355中
普通角闪石 ($NaCa_2(Mg,Fe,Al)_5Si_8O_{22}(OH)_2$)	965～955强，510～505强，465～450强
蓝闪石 ($Na_2(Mg,Fe,Al)_5Si_8O_{22}(OH)_2$)	1125～1124强，1078～1070强，980～964强，538～536中，453～450强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
层状硅酸盐	
高岭石 ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)	3705～3691中强，3672～3660中，1038～1030强，545～535强，475～465中强
埃洛石 ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)	3710～3702弱中，3629～3620中，1650～1640弱，1034～1020强，550～530强，474～465中强
蒙脱石（复杂硅酸盐）	3640～3620中弱，920～910中宽肩状，525～515强，470～465强
叶蜡石($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$)	1120～1115强，1070～1065强，951～946中强，542～535强，485～480强
蛇纹石($Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$)	3690～3675强，1080～1075强，990～985强，410～398强
滑石 ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)	1020～1010极强，674～663中，466～457强，428～420强，388～385中
白云母 ($KAl_2(Al,Si_3)O_{10}(OH)_2$)	1030～1016强，540～525强，480～467强，348～345中
金云母($KMg_3(Al,Si_3O_{10})(OH)_2$)	1005～995强，695～690弱中，466～460
黑云母 ($K(Mg,Fe)_3(Al,Si_3O_{10})(OH)_2$)	1002～986强，692～660肩状，弱，465～440强，352～335弱～中
锂云母 ($KLi_2Al(Si_4O_{10})(OH)_2$)	1022～1001强，535～525中强，482～472强，445～432中
珍珠云母($Ca_2Al_4(Si_4Al_4)O_{20}(OH)_4$)	3635～3634中，940～915强，697～690中，490～485强，390中
绿泥石 ($(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$)	980强，760中，438强，368中
鱼眼石 ($KFCa_4(Si_8O_{20})\cdot 8H_2O$)	3560～3555中，1695～1687弱中，1016～1010强，502～498强，415～414弱中
架状硅酸盐	
石英 (SiO_2)	1170～1162中强，1085～1078极强，780～773中，462～454强，370～366中
方英石 (SiO_2)	1100～1098强，800～790弱中，485～475中，435～428中
蛋白石 ($SiO_2\cdot nH_2O$)	1100～1085强，790～785中，476～470强
透长石 ($(K,Na)(Al,Si)_4O_8$)	1026～1015强，639～632中，546～537中，430～423强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表　3.1.29

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
正长石 ($(K,Na)AlSi_3O_8$)	1050～1030强，647～638中，542～534中，430～420强
微斜长石($(K,Na)AlSi_3O_8$)	1050～1040强，650～640中，538～533中，430～418强
钠长石 ($NaAlSi_3O_8$)	1010～997强，650～641中，541～529中，428～412强
奥长石 ($(Na,Ca)(Al,Si)AlSi_2O_8$)	1010～1000强，643～625中，538～532中，430～420中
中长石 ($(Na,Ca)(Al,Si)AlSi_2O_8$)	1011～995强，639～632中，543～528中，430～420中
拉长石 ($(Ca,Na)(Al,Si)AlSi_2O_8$)	995～990强，625～620中，538～535中，428～422中
培长石 ($(Ca,Na)(Al,Si)AlSi_2O_8$)	1000～987强，628～620中，542～538中，425～422中强
钙长石 ($CaAl_2Si_2O_8$)	988～985强，624～619中，540～536中，433～425中
方柱石 ($(Na,Ca)_4Al_3(Al,Si)_3Si_6O_{24}(Cl,CO_3)$)	1175～1160强，1015～1000强，545～541中，465～462中强
白榴石 ($KAlSi_2O_6$)	1038～1028强，722～720弱中，436～435中强
霞石 ($NaAlSiO_4$)	1000～990强，700～690中强，513～509中强，472～469强
片沸石 ($CaAl_2Si_7O_{18}\cdot 6H_2O$)	1635～1632中，1040～1025极宽强，602～595中，465～450强
辉沸石($NaCa(Al_5Si_{13})O_{36}\cdot 14H_2O$)	1645～1640弱，1030～1020强，449～435中强，415～395肩状
菱沸石 ($CaAl_2Si_4O_{12}\cdot 6H_2O$)	1650～1645中，1030～1010强，630～625中，465～460中 415～408中强
方沸石 ($NaAlSi_2O_6\cdot H_2O$)	1635～1630中弱，1030①～1020强，635～620弱中，465～445强

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.28

矿物名称和化学式	选出的频率范围和吸收强度
钠沸石 ($Na_2Al_2Si_3O_{10}\cdot 2H_2O$)	1640～1630弱，980～975强，633～620中，417～416中

①红外吸收波谱范围为4000～250cm^{-1}，原数据为1010～1020，1030为推测值。

高点时不在短波一侧。主要的克里蒂安逊频率在KBr中的样品特征不明显，而在短波一侧是明显的。

透射谱。红外吸收能带很强，无法把样品制成能透过共振频率的薄度，所以通常是把样品研磨成细粉末，然后在不同条件下测试红外光谱。一是在空气中测试；二是在KBr介质中测试样品的红外光谱。矿物的吸收光谱资料列入表3.1.28内。

反射谱。由光面反射所记录下来的光谱，具有最大反射强度的形貌，与共振密切相关。反射率（R）在一定的波长范围内，可用光学常数n及k的关系式表示：

$$R=\frac{(n-1)^2+n^2k^2}{(n+1)^2+n^2k^2} \tag{3.1.6}$$

反射光谱的变化如图3.1.12所示。

3.1.3 重要工业矿物的性质

重要工业矿物的性质列表表示（表3.1.29），表内矿物主要为工业矿物，排列方式以矿物化学成分中主要有用金属或元素分组排列，如钛铁矿列入钛金属组，硼镁石列入硼组，辰砂列入汞组；含有多金属或元素的矿物，选其中重要的元素排列，如黄铁矿主要是提硫用，烧渣作为副产品可用来炼铁，放在硫组；而石膏主要是直接利用，因含钙而放入钙组；萤石可直接作助熔剂也可提氟，只放入钙组，氟不再重复列出。可直接应用的矿物用☆号标在名称的右上角。

分组排列的顺序及组内各矿物的排列顺序以汉语拼音A，B，C……排列，但不注拼音。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.1.29 重 要 矿

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
钡(Ba)组矿物	毒重石 Witherit	$BaCO_3$ BaO77.7	1.斜方晶系 2.集合体、球状、肾状 3.无	白色常染成灰黄色	δ4.29 H_M3～3.5
	重晶石☆ Barite	$BaSO_4$ FaO65.7	1.斜方晶系 2.板状，粒状 3.{100} 完全	白色，黄红棕灰色	δ4.3～4.7 H_M3～3.5
铋(Bi)组矿物	铋(自然铋) Bismuth	Bi 有的可含铂、钯、金可达5%	1.六方晶系 2.枝状，片状 3.清楚，完全	银白色带微黄粉末灰色	δ9.7～9.8 H_M2～2.5 Hv.10～19 kg/mm²
	辉铋矿 Bithmuthinite	Bi_2S_3 Bi81.2 Pb、Sb、Te可代替Bi	1.斜方系 2.长柱状放射状 3.{010} 完全	白色铅灰色粉末灰色	δ6.8 H_M2～2.5
	泡铋矿 Bithmutite	$(BiO)_2CO_3$	1.正方系 2.块状，壳状	黄、灰、绿、棕	δ7～7.4 (8.15) H_M2.5～3.5
铂(Pt)组矿物	钯 Palladium	Pd Pd86.2～100	1.等轴系 2.钟乳状、粒状 3.无	银白色	δ11～12 H_M4.5～5
	铂(自然铂) Platinum 包括 铱自然铂 钯自然铂 铑自然铂 铜自然铂	Pt 常含 Ir≤28 Pd≤37 Cu≤13 Fe≤20 Rh≤7 Ni≤3	1.等轴系 2.粒状，葡萄状 3.无	锡白色粉末银白烟灰	δ21.5 H_M4 Hv.595 kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

物 工 业 性 质

比磁化率χ		电 性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times10^{-6}$	MKS $\times10^{-6}$				
			1. 1740℃ 2. 811℃变为六方系，982℃为均质相 805或835℃分解	1.溶 2.溶 3.生成 $BaSO_4$	产于热液矿床，与重晶石及方铅矿共生
0.30	0.0038	1. 7.86 2. 699～12 3. 10^{11}～$10^{15}\Omega\cdot m$	1. 1580℃ 2. 1149℃变为单斜	3.微溶于 H_2SO_4	用塔尔油，pH 7.5～9时可选 用油酸钠，pH 10～11可浮选
		1. >81 2. $100\times10^{-8}\Omega\cdot m$	1. 271.3℃ 沸点1560±5℃	1.有反应 2.溶	与其他硫化物共生、伴生
		3.3～570 $\Omega\cdot m$		1.有反应 2.溶	与其他硫化物矿物共生：如方铅矿、黄铁矿、黄铜矿
0.096	0.0012		3. 吸热 500℃中大 620℃中小 720℃中小		与其他铋矿物和硫化物共生
		3.10×10^{-8} $\Omega\cdot m$	1. 1552℃	1.不溶 2.不溶	与其他铂族矿物共生，也与铬铁矿、辉石、橄榄石、硫化物共生
0.13～(−0.57)	0.0016～(0.0071)	3. $9.8\times10^{-8}\Omega\cdot m$	1. 1769℃	1.不溶 2.不溶 3.不溶	可用(Cu^{2+}活化)丁基黄药pH2～4浮选 与其他铂族矿物、硫、砷化物共生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铂(Pt)组矿物	六方锇铱矿 Nevyanskite	$Os_{0.5\sim0.38}$ $Ir_{0.5\sim0.62}$	1.六方系 2.粒状板状 3. {0001} 完全	锡白色	δ17.1~21.1 H_M6.9~7.1 Hv = 1080~1160kg/mm²
	硫铂矿 Cooperite	PtS Pt86.89	1.正方晶系 2.粒状、柱状 3. {011} 解理可见	钢灰色	δ9.5 H_M5.5
	砷铂矿 Sperrylite 包括：铑砷铂矿 依砷铂矿	$PtAs_2$ Pt56.6 有时含Rh，Ir>5%	1.等轴系 2.立方体，粒状 3.不完全	锡白色	δ10.58 H_M6~7
	铱锇矿 Syserstkite	$Os_{0.8-0.5}$ $Ir_{0.2-0.5}$ Os41.8~86.5 Ir12.3~48.9 Ru10.9~18.6	1.六方系 2.板状 3. {0001} 完全	银白色	δ20~22.5 H_M5.6~7.6 Hv 806~1600kg/mm²
碲(Te)组矿物	碲金矿 Calaverite	$AuTe_2$ Te56.41 Ag可以代替部分金	1.单斜系 2.板状，针状 3.无	黄色 粉末绿—黄色	δ9.10~9.40 H_M2.5~3 Hv 223kg/mm²（平均）
	碲金银矿 Petzite	Ag_3AuTe_2 Ag41.71，Au25.42 Te32.87	1.等轴系 2.粒状，块状 3.无	钢灰色 铁灰色	δ8.7~9.4 H_M2.5~3 Hv 35~49 kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[8]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
				1.不溶 2.不溶 3.不溶 不溶于王水	产于超基性岩与其他铂族矿物共生伴生
				1. 2. 3. 无反应 不溶于王水	与砷铂矿、自然铂共生产于铜镍硫化矿床
1.12～0.21	0.0141～0.0026	1. 14,16.3 3. 10～$10^6\Omega\cdot m$		1. 2. 3. 无反应	与其他铂族矿物共生产于铜镍硫化矿床用(Cu^{2+}活化)，pH2～4丁基黄药可浮选
(−0.81)～(−0.58)	(−0.0102)～(−0.0073)	1. 81[4] 3. 10^{-3}～$10^{-10}\Omega\cdot m$		1. 2. 3. 无反应	同 上
		3. 6～12×$10^{-6}\Omega\cdot m$	1. 464℃ 2. 184℃转为α-硒金矿	2.溶、并产生铁锈色金沉淀	与其他稀化物、自然金、硫化物共生，产于金矿脉中
		3. 4～12×$10^{-6}\Omega\cdot m$		2.有反应，染棕色	同上

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
D碲(Te)组矿物	针碲金银矿 Sylranite	AgAuTe Te62.59	1.单斜系 2.板状，柱状、粒状 3.{010} 完全	银白色	δ8.16 H_M1.5～2 Hv.109～137 kg/mm²
	碲铅矿 Altaite	PbTe Te38.09，Pb61.91	1.等轴系 2.粒状集合体，柱状 3.{100}	锡白色带黄	δ8.19 H_M3 Hv.53kg/mm²（平均）
	碲银矿 Hessite	Ag_2Te Te37.14 Ag 62.86	1.单斜 2.粒状，短柱 3.{100}不完全	铅灰钢灰色	δ8.24～8.45 H_M2～3
	自然碲 Tellurium	Te 常含硒，可达30%	1.三方系 2.细小，针柱状 3.{010} 完全	锡白	δ6.1～6.3 H_M2.25～3
F钒(V)组矿物	钒铅矿 Vanadinite	$Pb_5(VO_4)_3Cl$ $V_2O_5$19.3，PbO78.3	1.六方系 2.肾状、放射状柱状 3.无	黄色褐色红色	δ6.66～7.10 H_M3
	钒钾铀矿 Carnotite	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2\cdot 3H_2O$ $V_2O_5$20.16 K_2O10.44 $UO_3$63.41	1.斜方系 2.板状，土状 3.{001} 完全	黄绿色	δ4.46 H_M2～2.5
	钒钛磁铁矿 Titano-magnetite	$Fe_3O_4+Fe_2TiO_4$含V	1.等轴系 2.粒状集合体块 3.缺	黑色	δ4.771 H_M6 Hv 715～734kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
				2. 有反应、染棕色	与其他碲化物，硫化物矿物共生
		3. 20～200 $\times 10^{-6}$ $\Omega \cdot m$		1. 有反应、染彩 2. 溶	与其他碲化物、硫化物共生 产于Te-Au-Ag矿脉
		3. 4～100 $\times 10^{-6}$ $\Omega \cdot m$		2. 溶，变褐与H_2SO_4变白	同 上
		3. 14 $\times 10^{-6}\ \Omega \cdot m$	1. 449°C	2. 3. 溶	同 上
0.029 0.039 0.020 0.027	0.0004 0.0005 0.0026 0.0003				产于铅矿床的氧化带，为次生矿物
4.75 3.84	0.0569 0.0483			1. 2. 3. 溶	产于沉积岩，为次生变化的产物
				1. 溶	与辉石，橄榄石共生钛铁晶石可以转变为钛铁矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
G 钙(Ca)组矿物	白云石 Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$ CaO30.4 MgO21.9	1.三方系 2.粒状集合体 3.菱形解理极发育	白色 有时为灰白 淡黄色	δ2.85 H_M3.6～4
	方解石 Calcite	$CaCO_3$ CaO56	1.三方系 2.粒状集合体板状，片状 3.菱形解理极发育	白色 有时为淡黄 灰色	δ2.6～2.8 H_M3
	氟石 Fluorite (萤石)	CaF_2 Ca51.2 F48.8	1.等轴系 2.致密块状、集合体 3.发育	黄、绿、天青、紫 加热可退色	δ3.18 H_M4
	钙铝榴石 Grossularite	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ CaO37.3 $Al_2O_3$22.7	1.等轴系 2.粒状，块状 3.无	黄、棕红，无色	δ3.35 H_M6.5～7
	钙铁榴石 Andradite	$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$ CaO33.0, $Fe_2O_3$31.5 可与钙铝榴石呈连续固溶体	1.等轴系 2.粒状，块状 3.无	黑，棕红色	δ3.83 H_M6.5～7

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[8]	热学性质[9]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
		1. 60.1～70.7 3. 10^{12}～$10^{14}\Omega\cdot m$	3.①吸热760℃中930℃中大 ②吸820℃大1010℃大 1550～1650℃再结晶	1.易溶 2.可溶 3.可溶	与方解石，密切共生700～750°分解 铁白云石970℃分解
1.52	0.0191	1. 69.0～75.2 3. 10^{7}～$10^{12}\Omega\cdot m$	1. 1290℃(在110气压) 3. 吸热 ①990℃很大 ②920℃～940℃很 ③840℃ 750℃开始分解	1.易溶 2.可溶 3.可溶	可形成单矿物岩石—石灰岩 油酸＋柴油，pH 8～10.5可浮选
0.51	0.0064	2. 55.4～60.0	1. 1360℃有红色火焰 M.P.896℃	3.溶，生成HF	与石英，长石等共生 紫外光下：黄绿、紫色 阴极射线：蓝绿色 紫色
		1. 7.64	800℃以上为等轴系，低温为异常光性	1. 2. 3. 无反应 预烧后可与酸反应	产于变质岩，与其他硅酸盐广泛共生
84.4	1.060	1. 6.35	同上	1. 3. 溶，慢，析出硅胶	同上

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
钙(Ca)组矿物	硅灰石 Wollastonite	$Ca_3[Si_3O_9]$或 $CaSiO_3$ CaO48.3	1.三斜系 2.纤维状，放射状 3.{100}完全	白色 肉红色	δ2.78～2.91 H_M4.5～5
	石膏 Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ CaO32.5 $SO_3$46.6	1.单斜系 2.粒状、柱状板状 3.{001}完全	白色 淡黄色	δ2.32 H_M2
	硬石膏 Anhydrite (无水石膏)	$CaSO_4$ CaO41.2 $SO_3$58.6	1.斜方系 2.粒状，柱状 3.{001}完全	白色 淡蓝 淡灰	2.8～3.0 H_M3～3.5
锆(Zr)组矿物	锆石 Zircon	$ZrSiO_4$ $ZrO_2$67.1 常含铪HfO_2可达4%	1.正方系 2.柱状、粒状 3.无	无色 有时为黄橙红色	δ4.68～4.70 H_M7～8
	斜锆石 Baddeleyite	ZrO_2	1.单斜 2.板状	无色至黑色	δ5.4～6.02 H_M6.5
铬(Cr)组	铬铁矿（族） Chromite	$(Mg,Fe)(Cr,Fe,Al)_2O_4$ $Cr_2O_3$18～62 FeO 0～18 $Al_2O_3$0～33 $Fe_2O_3$2～30	1.等轴系 2.粒状 3.无	黑色 粉末黑棕	δ4.0～4.8 H_M5.5～7.5
汞(Hg)组	辰砂 Cinnabar	HgS Hg86.2	1.六方系 2.柱，粒 3.柱状解理完全	红色 朱红色	δ8～8.2 H_M2～2.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
2.67	0.0335	1. 6.57	1. 154℃	1. 分解，析出硅胶	紫外光下：淡蓝，黄 阴极射线：淡蓝，黄
		1. 6.83 2. 5.00～11.5	3. 120℃失水3/4 163℃水消失	1.溶（慢）	盐湖、死海沉积物常呈单矿物层 紫外光下：淡绿，淡蓝绿
		1. 6.09 2. 5.7～6.3	1. 1450℃ 2. 170°～500℃为β相	1.溶 3.溶	与石膏伴生、盐湖、死海沉积物 紫外光下：红
0.0439（平均） 0.12	0.0005（平均） 0.0015	1. 1.609 2. 8.59～12.0	锆坩埚可耐3000℃高温加热有吸热及放热反应	1. 2. 3. 不溶	产于花岗岩、砂岩、等岩石中 紫外光下：橙、黄
0.10 0.88	0.0012 0.0111		1. 2500℃ 2. 1008℃转为正方系 1900℃转为六方系	3.溶（慢）	
1.36	0.0171	1. 11.03	1. >1800℃ $FeCr_2O_4$ M.P2453℃	1. 2. 3. 不溶	与橄榄石、辉石及蛇纹石共生 肥皂、油酸，pH8可浮选
0.90～(−0.11)	0.0113～(−0.0014)	1. 8.43 3. 2×10^{-6}～1×10^{-3} Ω·m		1.不溶 2.缓溶(煮)溶于王水	与其他硫化物共生交代黄铁矿、黄铜矿用戊基黄药pH6.5可浮选

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
硅(Si)组	石英 Quartz	SiO_2	1.六方系 2.柱状、粒状 3.无	无色 紫黄色	δ2.65 H_M7
钴(Co)组矿物	钴镍黄铁矿 Coboltpentlendite	$(Co,Ni,Fe)_9S_8$ 含钴可达66.6	1.等轴系 2.他形粒状 3.缺	淡黄色	δ $H_M4.5$ H_V 24.5～363kg/mm²
	方钴矿 Skutterudite	$(Co,Ni,Fe)As_{3-x}$	1.等轴系 2.粒状	白色 黄色	δ6.5～6.84 H_M5 H_V.652kg/mm²
	辉钴矿 Cobaltite	CoAsS	1.斜方系 2.他形粒状集合体 3.清楚	白色 淡粉红	δ6.3 $H_M5.5$ H_V.948～1367kg/mm²
	硫钴矿 Linnaeite	Co_3S_4 Co可被Fe,Ni取代	1.等轴系 2.八面体粒状多见 3.{100}	白色 淡红	δ4.5～4.8 $H_M4.5$～5.5
	铁硫砷钴矿 Glaucodot	(Co，Fe)AsS 与毒砂呈类质同像	1.斜方系 2.粒状 3.清楚	白色 乳白色	δ6.0 H_M5 H_V.911kg/mm²
J钾(K)组矿物	白榴石 Leucite	$K[AlSi_2O_6]$或 $K_2O\cdot Al_2O_3\cdot 4SiO_4$ K_2O21.5， $Al_2O_3$23.5	1.正方系 2.粒状 3.无	白色 淡黄 灰色	δ2.45～2.50 H_M5～6

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电性[5]	热学性质[4]	可溶性[3]	其他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
(−0.41)～(−0.53)	(−0.0052)～(−0.0066)	1. 6.53 2. 4.19～5.00	1. 1713℃ 2. 573℃为β相870～1470℃为磷石英	1. 2. 不溶 3. 溶于HF酸	分布极广，与长石等造岩矿物共生 阴极射线下：蓝
				2. 反应生成蓝色沉淀	与磁黄铁矿伴生
0.077（平均）	0.0009（平均）	3. 1～400 $\times 10^{-6}$ 1～12 $\times 10^{-6}\ \Omega\cdot m$		2. 有反应，溶	与其他硫化物共生，可交代黄铁矿
0.081（平均）	0.0010（平均）	1. >33.7 <81 3. 6.5～130 $\times 10^{-3}\ \Omega\cdot m$	2. 830～900℃转为α型	3. 热溶	与其他硫化物共生
				2. 热溶	与其他铁、铜、钴硫化物共生
		3. 5～100 $\times 10^{-6}\ \Omega\cdot m$		2. 热溶	同上
		1. 6.76 2. 7.13	1. 1686℃ 2. 620℃以上为等轴系	1. 溶，后析出胶	产于碱性岩与霞石、正长石共生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理	颜色	密度(δ)和硬度②
K钾(K)组矿物	白云母 Muscovite	$KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$ K_2O11.8 $Al_2O_3$38.5	1.单斜系 2.片状 3.{001}完全	白色 淡绿 淡灰	δ2.76～3.10 H_M2～3
	光卤石 Carnallite	$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ K14.1	1.斜方系 2.粒状，块状 3.无	无色 有时铁染成玫瑰红	δ1.60 H_M2～3
	黑云母 Biotite	$K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,Fe]_2$ K_2O6.18～11.43 $Al_2O_3$9.43～31.69	1.单斜系 2.片状 3.{001}完全	黑、棕、褐色	δ3.02～3.12 H_M2～3
	钾长石 微斜长石 Microcline	$K[AlSi_3O_8]$ 有时含Cs及Rb	1.三斜系 2.他形粒状 3.{001}{010}完全	肉红色 无色	δ2.54～2.57 H_M6～6.5
	正长石 Orthoclase	$K[AlSi_3O_8]$ K_2O16.9 $Al_2O_3$18.4	1.单斜系 2.他形粒状 3.{001}{010}	肉红色 无色	δ2.54～2.57 H_M6～6.5
钾(K)组矿物	钾盐 Sylvite	KCl K52.5，Cl47.5	1.等轴系 2.自形的立方体 致密块状 3.{100}极完全	无色 乳白色	δ1.97～1.99 H_M1.5～2
	钾明矾 Potash alum	$KAl[SO_4]_2 \cdot 12H_2O$ K_2O9.9，$Al_2O_3$10.8	1.等轴系 2.土块状	无色	δ1.76 H_M2

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
2.93	0.0368	1. 10 2. 6.19～8.00		1. 2. 3. 不溶	与长石、石英共生，产于位晶岩，花岗岩 捕收剂：月桂胺，pH8.5～9
				溶于水	产于盐湖
54.24	0.6816	1. 9.28 2. 6.19～9.30 3. 10^7～$10^{12}\Omega\cdot m$		1.微溶 2.不溶 3.溶，析出硅胶	与长石、石英共生，广泛分布于花岗岩，位晶岩中
		1. 6.91	1. 1170℃		与石英，云母共生，广泛分布于花岗岩中 紫外光下：黄色
−0.33	−0.0041	1. 6.20	1. 1170℃	1. 2. 3. 无反应	与石英、云母共生，广泛分布于花岗岩中 紫外光下：淡蓝、暗淡蓝
			1. 776℃	2.溶 也溶于水	产于盐湖，与光卤石、杂卤石共生
				易溶于水	产于硫化矿床的氧化带下部

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
钾(K)组矿物	钾盐镁矾 Kainite	$KMg[SO_4]Cl\cdot 3H_2O$	1.单斜系 2.致密块状 3.{001}完	白色 灰白色 有时红色	δ2.1 H_M2.1
	明矾 Alunite	$KAl_3[SO_4]_2(OH)_6$ K_2O11.4，Al_2O_3 37.0	1.六方系 2.细粒土状假立方形或板状 3.{0001}清楚	白色 浅灰 浅黄 浅红	δ2.6～2.8 H_M3.5～4
	杂卤石 Polyhalite	$K_2MgCa_2[SO_4]_4\cdot 2H_2O$	1.三斜系 2.纤维状集合体 3.{110}中等	白色 淡灰，淡黄有时为红色	δ2.72～2.78 H_M2.5～3
镓(Ga)锗(Ge)组	锗石 Germanite	$Cu_3(Fe,Ge,Ga)S_4$ Ge6.2～10.9 Ga0.8～1.99	1.等轴系 2.细粒集合体		δ4.6 H_M3 H_V 372～450kg/mm²
金(Au)组矿物	碲金矿 Calaverite	$AuTe_2$ Au43.59	1.单斜系 2.板状 3.无	黄色	δ8.7～9.4 H_M2.5～3
	银金矿 Electrum	AuAg	1.等轴系 2.不规则状 3.无	淡银白色 淡黄色	δ12～15 H_M2～3 H_V 72（平均）kg/mm²
	自然金 Gold	Au 常含Ag，Cu，Bi，Pd等	1.等轴系 2.不规则状 3.无	金黄色	δ15.6～18.3 H_M2～3 H_V 31（平均）kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
				易溶于水	盐湖产物从13～95℃水溶液中制取 不吸水
				1.不溶 2.难溶	与粘土矿物，硫酸化的碱性火成岩伴生
					盐湖产物，与硬石膏、硫酸镁互层
				溶于王水	与黄铜矿、黄铁矿、方铅矿共生，与硫铜锗石可以构成连晶
		3. 6～12 $\times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$	1. 464℃ 2. 184℃转为α型	2. 溶，并产生褐色	产于金矿床中，经常与其他硫化物共生
				2.溶	产于金矿床中，经常与其他硫化物矿物共生
(−0.64)～(0.12)	(−0.0080)～0.0015	1. >81 3. 10^{-2}～$10^{-6}\Omega \cdot m$	1. 1063℃强导热性	1. 2. 3. 无反应 溶于王水及氰化钾液	砂金，产于河流冲积层中；岩金有石英脉及绿岩 用黑药，丁基黄药可选

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属（元素）组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
锂（Li）组矿物	锂辉石 Spodumene	$LiAl[Si_2O_6]$ Li_2O 8.1 Al_2O_3 27.4	1.单斜系 2.柱状 3.柱面解理完全	灰绿 黄绿 紫色	δ3.13～3.20 H_M 6.5～7
	锂云母 Lepidolite	$Li_{1.5}Al_{1.5}[Si_3AlO_{10}][F,OH]$ Li_2O 1.23～5.9 K_2O 4.82～13.85 有时含Rb 1.19～3.46	1.单斜系 2.片状 3.{001}完全	玫瑰色 淡紫色 白色	δ2.8～2.9 H_M 2～3
	铁锂云母 Zinnwaldite	$KLiFeAl[Si_3AlO_{10}][F,OH]_2$ Li_2O 2.61～2.71	1.单斜系 2.片状 3.{001}完全	灰色 褐色 暗绿色	δ2.9～3.2 H_M 2～3
磷（P）组矿物	磷灰石 Apatite	$Ca_5[PO_4]_3F$, $Ca_5[PO_4]_3Cl$ P_2O_5 42.3 41	1.六方系 2.柱状，粒状 3.{00}清楚	无色 绿、紫、黄色	δ3.18～3.21 H_M 5
	菱磷铝锶矾（磷硫铝锶矿） Svanbergite	$SrAl_3[PO_4][SO_4][OH]_6$ SrO 17.99, P_2O_5 17.55 Al_2O_3 32.68	1.三方系 2.粒状，菱形，假立方体 3.{0001}清楚	无色 黄玫瑰红，红褐	δ3.20 H_M 5
硫（S）组矿物	磁黄铁矿 Pyrrhotite	$Fe_{1-x}S$（$x=0$～0.2） 经常含Ni, Co Fe大部分为Fe^{2+} Fe 61.5	1.六方系（$x=0.10$） 单斜系（$x=0.12$） 2.他形粒状 3.{0001}可见	黄玫瑰色 淡粉红色	δ4.6 H_M 4 H_V 250～305kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[5]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
0.21 4.86	0.0026 0.0611	1. 8.42 非导体	1. 1380℃ 3. 吸热1080℃	1. 不溶 溶于 H_3PO_4	产于位晶岩，与长石、石英共生 先用NaOH擦洗，用油酸，油酸钠可选有效抑制剂硝酸钙及糊精
1.18 2.24～0.82	0.0148 0.0281～0.0103	1. 7.36 3. 10^{11}～$10^{14}\Omega\cdot m$非导体	3.吸热910℃中	1. 2. 3. 无反应	产于云英岩、与长石、石英共生，同时常有白云母、电气石等。 用月桂胺作捕收剂可选
			3.吸热915℃小 放热 340℃很小 480℃很小		同 上
0.63	0.0066	1. 5.72	3.吸热390℃（宽） 很小 放热 510℃中小	1. 2. 3. 溶	分布广泛的矿物与多种矿物伴生如石英、长石、云母
				1. 2. 3. 不溶	产于石英岩，花岗岩与石英岩的接触带与高岭石、叶蜡石水硬铝石等伴生
27173 （平均）	341.477	1. >81 3. 2～160 $\times 10^{-9}$ $\Omega\cdot m$	1. 1195℃M.P.	2.溶 3.溶 在HF中溶	与其他硫化物矿物广泛伴生

地信网论坛
bbs.8s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
硫(S)组矿物	黄铁矿 Pyrite	FeS_2 常含Co,Ni,Au Fe46.7	1.等轴系 2.立方体，他形粒状 3.无	黄色粉末暗绿	δ5.1 H_M6～6.5 Hv 1295 1714 kg/mm²
	自然硫 Sulphur	S	1.斜方系 2.厚板状，双锥状	黄色	2.60 Hv 1.5～2.5
铝(Al)组矿物	八面沸石 Faujasite	$(Na_2Ca)_{1.75}Al_{3.5}Si_{8.5}O_{24}\cdot 16H_2O$ Al_2O_3 16.81 Si/Al = 3～2	1.等轴系 2.八面体，立方体 3.{111}清楚	白、淡灰淡绿 肉红	δ1.92 H_M5
	多水高岭石 Halloysite (埃洛石)	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8\cdot 4H_2O$ Al_2O_3 36.58	1.单斜系 2.针状，柱状胶状集合体	白、淡黄红、褐、蓝	δ2～2.2 H_M1～2
	刚玉 Corundum	Al_2O_3	1.三方系 2.粒状、板状、桶状、锥状 3.无	白、淡黄灰、蓝、红紫、淡红	δ3.98～4.02 H_M9
	高岭石 Kaolinite	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ Al_2O_3 39.5	1.三斜系 2.细小片状 3.{001}完全	白色	δ2.61 H_M2～2.5
	黄玉 Topaz	$Al_2[SiO_4](OH,F)$ Al_2O_3 55.4 F 20.7	1.斜方系 2.柱状 3.{001}完全	淡黄亮灰绿红、天蓝	δ3.565 H_M8

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3,1,29

比磁化率 χ		电 性[4]	热 学 性 质[4]	可溶性[4]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
25.49（平均）	0.6497	1. >83.7 <81 3. 1.2～600×10^{-6} Ω·m	1. 642℃ 91℃时转为α-白铁矿	2.溶，不析出S 3.不溶在H_2O_2中溶解在王水中析出S	与其他硫化物广泛伴生 用丁基黄药，在pH=3～5时可选
		1. 3.62		溶于四氯化碳	产于火山口、温泉、具良好的天然可浮性
			150～400℃失水不破坏晶格	1. 2. 溶 3.	产于蚀变碱性侵晶岩，火山凝岩，辉绿岩中
			吸热130℃小 560℃大 放热930℃		产于风化较强的铝酸盐矿物带
0.20～10	0.0025 0.1256	1. 5.35 2. 11.0～13.2 3. 10^{8}～10^{11} Ω·m	1. 2050℃M.P.	3. >200℃时溶于H_2SO_4	产于富铝的变质岩，用肥皂作捕收剂在pH 3～5时可选
		1. 11.18	1. 1780℃ 吸热560℃大 放热970℃小	3.热溶	长石风化的产物，也有热液蚀变成因的分布最广泛
0.86	0.0045	1. 6.09	吸热400℃小宽 1180℃尖大	3.部分溶解	产于云英岩，与长石石英共生 用油酸钠在pH=6.8时可选

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铝(Al)组矿物	红柱石 Andalusite	$Al_2O[SiO_4]$ Al_2O_3 63.2	1.斜方系 2.柱状 3.{110}良好	淡红 玫瑰红 黄、白、紫绿	δ3.154 H_M 6.5～7.5
	蓝晶石 Kyanite	$Al_2O[SiO_4]$ Al_2O_3 63.2	1.三斜系 2.柱状 3.{100}完全	蓝、灰、绿、黄、淡红、白、黑	δ3.63 H_M 4～7
	菱沸石 Chalbazite	$CaAl_2Si_4O_{12}\cdot 6H_2O$ Si/Al = 3～2	1.三方系 2.似立方体，菱面体 3.缺	无色 灰白色	δ2.05 H_M 4.5
	毛沸石 Erionite	$(Na_2,K_2Ca,Mg)_{4.5}[Al_9Si_{21}O_{72}]\cdot 27H_2O$ Si/Al>3	1.六方或三方系 2.纤维状	白色	
	镁碱沸石 Ferrierite	$(Na,K)_4Mg_2[Al_6Si_{30}O_{72}](OH)_2\cdot 18H_2O$ Si/Al>3	1.斜方系 2.板状 3.{001}完全	白色	δ2.15 H_M 3～3.5
	莫来石 Mullite	$Al_6Si_2O_{13}$ Al_2O_3 61.6（分析）	1.斜方系 2.柱状，针状 3.{001}完全	白色 灰色 玫瑰红色	δ3.23 H_M 6～7

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3,1.29

比磁化率 χ		电 性[5]	热 学 性 质[4]	可溶性[6]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
0.43	0.0054	1. 8.28 3. 10^{10}～$10^{12}\Omega\cdot m$	放热1520℃很小 1300℃转为莫来石及玻璃	1. 2. 不溶 3.	产于富铝的变质岩，与云母、刚玉、蓝晶石伴生 用肥皂，在pH 3～5时可选
1.13	0.0142	1. 7.18	1. 1816℃M.P 吸热 850℃ 很小 放热1400℃主、中 1450℃中 约在1300℃开始转为莫来石及玻璃	1. 2. 不溶 3. 溶于H_3PO_4	产于富铝的变质岩，与云母、刚玉伴生，用油酸＋十六偏磷酸钠在pH＝8时可选
			150～400℃失水	1.溶	产于玄武岩孔洞及温泉沉积中孔径0.35～0.43mm，孔容积＞40%
				1.溶 也溶于酒精及有机溶剂	产于流纹岩裂隙及玻璃质凝灰岩，与片沸石共生，孔径0.35～0.43mm，孔容积30～40%
				1.不溶	产于玄武岩孔洞孔径0.35～0.43mm，孔容积＞40%
			1810℃转为刚玉及液相	1. 2. 不溶 3.	产于火成岩中千板岩俘虏体及陶瓷体

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属（元素）组沉	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度（δ）和硬度②
铝(Al)组矿物	丝光沸石（发光沸石）Mordenite	$(Ca,Na_2,K_2)[Al_2Si_{10}O_{24}]\cdot 7H_2O$ Si/Al>3	1.斜方系 2.针状，纤维状	白色 红色 黄褐色	δ2.12～2.15 H_M3～5
	矽线石 Sillimanite	$Al_2O[SiO_4]$ Al_2O_3 63.2	1.斜方系 2.纤维状，针状 3.{010}完全	白、黄、灰绿 淡蓝、绿	δ3.23～3.27 H_M6.5～7.5
	叶蜡石 Pyrophyllite	$Al_2[Si_4O_{10}][OH]_2$ Al_2O_3 28.64(分析)	1.单斜系 2.片状集合体 3.{001}完全	白、黄 淡蓝、灰 褐绿	δ2.65～2.90 H_M1～2
M镁(Mg)组矿物	白云石 Dolomite	$(Ca,Mg)[CO_3]_2$ CaO 30.4 MgO 21.9 常含Al，Fe	1.三方系 2.粒状集合体 3.发育而完全	白色 淡粉红色	δ2.8～2.9 H_M3.5～4.0
	橄榄石 Olivine	$(Mg,Fe)_2SiO_4$ MgO不固定	1.斜方系 2.粒状 3.无	绿色 黄绿色	δ3.33 H_M7
	滑石 Talc	$Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2$ MgO 30.22（分析）	1.单斜系 2.片状集合体 3.(001)完全	白色 淡绿色	δ2.58～2.83 H_M1

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性[5]	热学性质[4]	可溶性[3]	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁶				
			吸热100℃ 170℃主、中大 240℃	1.不溶	产于火成岩，沉积物，火山玻璃孔径0.35～0.43mm 孔容积＞40%
0.09 0.03	0.0011 0.0003	3. 10^{12}～$10^{14}\Omega\cdot m$	1. 1816℃M.P. 1545 ℃转为莫来石及液相；然后在1810℃转为刚玉及液相	1. 2.} 不溶 3. 在H_3PO_4中溶	产于富铝变质岩与刚玉、尖晶石伴生用油酸＋苏打灰在pH＝8～9时可选
			吸热 880℃小 775℃中 633℃中小	3.热溶	产于富铝的变质片岩，与云母，石英伴生
2.7	0.0339	1. 8.43 2. 6.8～8.0 3. 10^{12}～$10^{14}\Omega\cdot m$	放热 900°～950°C	1. 2.}溶 3.	沉积岩，与方解石共生 用肥皂，油酸钠在pH 7～8.5时可选
		1. 6.77		1.溶，析出硅胶	产于基性及超基性火成岩，与辉石共生
14.60	0.1835	1. 9.41	吸热 ① 950℃ ② 999℃ 940℃	1. 2.} 不溶 3.	超基性岩的蚀变岩及富镁的变质岩 天然可浮性良好 紫外光下：山楂红色

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
镁(Mg)组矿物	尖晶石 Spinel	$MgAl_2O_4$ MgO 28.20 Al_2O_3 71.8	1.等轴系 2.粒状，八面体 3.无	红色	δ3.55 H_M7.5～8
	金云母 Phlogopite	$KMg_3(AlSi_3O_{10})(F,OH)$ MgO 27.25 K_2O 9.83	1.单斜系 2.片状 3.{001}完全，发育	绿色 银白色 琥珀色 琥珀红色	δ2.956 H_M2～3
	菱镁矿 Magnesite	$MgCO_3$ 常含$CaCO_3$，$FeCO_3$，$MnCO_3$	1.三方系 2.致密块状 3.解理发育而完全	白色 淡红色	δ2.96～3.02 H_M3.5～4.5
	镁铝榴石 Pyrope	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ MgO 19.11 Al_2O_3 22.06	1.等轴系 2.粒状，十二面体 3.无	红色 薄片：红—黄褐	δ3.510 H_M7
	蛇纹石 Serpentine	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ MgO 43.0 常含 Ni，Fe	1.? 2.片状，纤维状 3.{001}完全	暗绿色	δ2.5～2.7
	水镁矾 Kieserite (硫酸镁石)	$MgSO_4 \cdot H_2O$ MgO 29.13 SO_3 57.85	1.单斜系 2.柱状，块状	白色 灰黄色	δ2.571 H_M3.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
41.17～44.3	0.5174～0.5567	1. 6.77	1. 2135℃	1. 2. 不溶 3. 部分溶	产于超基性岩及变质岩 用油酸＋煤油在 pH＝8～9时可选
11.14	0.1399	1. 7.00 3. 不导电		3. 易溶	产于长英岩、片麻岩、位晶岩，与透辉石尖晶石、长石、白云石伴生
		1. 6.99	350℃开始放CO_2 700～1000℃成为轻烧镁1400～1700℃成为重烧镁（方镁石）	1. 溶 2. 溶 3. 缓溶	热液作用生成与白云石伴生
15.50	0.1947			1. 2. 3. 无反应	产于变质岩，与云母石英等伴生
15.79	0.1984	1. 11.84		1. 分解 3. 分解	超基性岩蚀变生成与辉石、橄榄石伴生
			吸热 60℃ 110℃ 很小 150℃主、大 376℃中小 745℃小	溶于水	产于盐层中，与石盐、光卤石、硬石膏、杂卤石伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
镁(Mg)组矿物	水氯镁石 Bischofite	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ Mg 11.96 Cl 34.87	1.单斜系 2.柱状，纤维状	白色	δ1.59～1.604 H_M1～2
	泻利盐 Epsomite	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ MgO 16.36 SO_3 32.48	1.斜方系 2.纤维状，钟乳状 3.{010} 完全	白色 粉红 绿	δ1.678 H_M2～2.5
	皂石 Saponite	$(Mg,Al,Fe)_3[(OH)_2$ $(Si,Al)_4O_{10}]$ MgO 22.50	1.? 2.细鳞片状 3.底解理完全	油脂白	δ2.66
	蛭石 Vermiculite	$(Mg,Fe)_3[(Si,Al)_4$ $O_{10}]\cdot[OH]_2 \cdot 4H_2O$	1.单斜系 2.片状 3.{001} 完全	淡黄、绿、褐	δ2.4～2.7 H_M1～1.5
钠(Na)组矿物	钼铅矿 Wulfenite	$PbMoO_4$ Mo 26.2（分析） MoO_3 39.3，PbO60.7	1.正方系 2.柱状 3.清楚	黑色	δ6.5～7.0 H_M3
	冰晶石 Cryolite	Na_3AlF_6 Na32.86，32.41（分析） F54.29，54.28（分析）	1.单斜 2.柱状、粒状 3.无	白色	δ3.0 H_M2.5
	芒硝 Mirabilite	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ Na_2O19.24（分析）	1.单斜系 2.短柱、板状、粒状 3.{100} 完全	白色	δ1.490 H_M1.5～2

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电性[8]	热学性质[1]	可溶性[9]	其他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁶				
			吸热 140℃ 210℃ } 中大 260℃ 放热 640℃	溶于水 易潮解	产于盐层中，与石盐、光卤石、硬石膏、杂卤石伴生
			吸热96℃ 107℃ 154℃ } 很大 192℃ 370℃很小 放热1020℃	溶于水	产于盐湖、与石盐共生
			吸热 100～200℃ 200～300℃		产于火成岩及蛇纹岩
			吸热100～200℃ 200～300℃ 900～1000℃出现S形 导热系数λ = 0.04～0.05大卡/米/小时		黑云母的蚀变产物与黑云母伴生
0.081 0.013	0.0010 0.0002			1.溶，生成PbCl	产于氧化带，与针铁矿、辉钼矿伴生
			吸热 570℃中小 972℃中大	3.溶，析出HF	多为人工合成物
			吸热 32℃ 104℃ 240℃ } 很大 884℃小	溶于水	产于盐湖，与其他硫酸盐伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
钠(Na)组矿物	钠长石 Albite	$NaAlSi_3O_8$	1.三斜系 2.板柱状，粒状 3.{001}完全	白、黄、淡红、灰	δ2.61～2.63 H_M6～6.5
	钠硝石 Sodaniter	$NaNO_3$	1.三方系 2.粒状，菱面体 3.发育而完全	白、红、褐、灰、黄	δ2.24～2.29 H_M1.5～2
	石盐 Halite	NaCl	1.等轴 2.立方体 3.{100}完全	白色	δ2.16～2.17 H_M2.7
	苏打 Soda	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ Na_2O 21.6	1.单斜系 2.菱形、板状粒状集合体	白色	δ1.42～1.47 H_M1～1.5
镍(Ni)组矿物	暗镍蛇纹石 Garnierite (硅镁镍矿)	$(Ni,Mg)_4[Si_4O_{10}][OH]_4 \cdot 4H_2O$ Ni4.3～36.1	2.纤维状集合体土状	暗绿褐色土色	δ2.3～3.8 H_M2
	方硫镍矿 Vaesite	NiS_2 Ni47.8	1.等轴系 2.立方体，八面体 3.立方体解理	灰色	δ4.28 H_M3.5
	红砷镍矿 Niccolite (红镍矿)	NiAs Ni43.9，As56.1	1.六方系 2.他形，致密块状 3.不完全	铜红色	δ7.6～7.8 H_M5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性④	热 学 性 质④	可溶性⑤	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
		1. 6.02 2. 5.58	1. 1118° M.P. 吸热 820℃	1. 2. 3. 不溶	产于酸性火成岩与石英伴生 紫外光下，淡蓝、淡紫
			能燃烧	溶于水，潮解	形成于硝石沼地，与芒硝、石膏、石盐伴生
		1. 7.33	1. 750℃M.P.	溶于水	产于盐湖、岩盐、海盐
			1. 34.5°	1.溶，放出气泡	同 上
9.803 9.967	0.1232 0.1252		吸热 620℃中大 625℃中小 925℃很小 放热 800℃	1.溶	产于超基性或基性岩风化带
					产于硫化矿床伴生矿物针镍矿、辉镍矿、硫钴矿等硫化物
0.058 0.097	0.0007 1.2189	良导体		2.溶 〃	产于硫化矿床与其他砷化物、硫化物伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
锰(Mn)组矿物	褐锰矿 Braunite	Mn_2O_3 MnO44.8 MnO_2 55.2 通常含有Al_2O_3及SiO_2	1.正方系 2.粒状集合体，致密 3.{111}清楚	黑色粉末黑褐	δ4.7～5.0 H_M6
	黑锰矿 Hausmanite	$MnMn_2O_4$ MnO62.0 MnO_2 38 Mn 72 常含FcO及Fe_2O_3	1.正方系 2.粒状，八面体	黑色	δ4.7～4.9 H_M5
	菱锰矿 Rhodochrosite	$MnCO_3$ MnO 55.74(分析)	1.三方系 2.粒状集合体，柱状，板状	玫瑰色 粉红、黄灰褐、褐黄	δ3.646 $H_M3.5$～4
	蔷薇辉石 Rhodonite	$MnSiO_3$ MnO46～30	1.三斜系 2.粒状集合体 3.柱面完全	玫瑰红 粉红	δ3.4～3.75 $H_M5.5$
	锰方解石 Manganocalcite	$(Ca,Mn)CO_3$ $MnCO_3$42.17(分析)	1.三方系 2.粒状 3.菱面体解理发育完全	玫瑰红	δ3.143 H_M3
	软锰矿 Pyrolusite	MnO_2 含杂质$Fe_2O_3 \cdot SiO_2$及H_2O	1.正方系 2.针状，煤烟状 3.{110} 完全	黑色	δ4.7～5.0 H_M5～6

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性③	热学性质④	可溶性⑤	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
28.3 (平均)	0.3556			1.溶 2.热溶 3.溶	产于热液交代矿床及区域变质的沉积矿床，与各种锰、铁矿物及重晶石、石英伴生
10.75 (平均)	0.1351			1.溶 2.分解 3.溶（缓）	产于交代及热液矿床与其他锰矿物共生
28.5 (平均)	0.3591	1. 6.77	吸热 ① 640°C中大 ② 550°C 630°C大 放热 755°C中 840°C中	1.热溶	产于热液矿床及沉积矿床，与硫化物方解石、蛋白石伴生
18.59 (平均)	0.2336		1. 1200°C M.P. 吸热 910°C	1.微溶	产于含锰沉积区域变质区及热液矿床，与菱锰矿，钙蔷薇辉石伴生
				1. 2.} 溶 3.	产于沉积矿床及热液矿床，与黄铁矿蛋白石，方解石伴生
6.453 (平均)	0.0811	1. >81	550～650°C变为β-褐锰矿	1.溶 2.缓溶 3.易溶	产于锰矿床氧化带与其他锰矿物伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
锰(Mn)组矿物	水锰矿 Manganite	MnO OH MnO 62.5 50～62（分析）	1.单斜系 2.柱状 3.发育、完全	黑色	δ4.2～4.3 H_M4
	硬锰矿 Psilomelane	MnO及MnO_2变化 MnO_2 60～80 MnO 8～25 H_2O 4～6	1.斜方系 2.致密块状	黑色	δ4.4～4.7 H_M4～6
钼(Mo)组矿物	辉钼矿 Molybdenite	MoS_2 Mo60	1.正方系 2.片状 3.{001} 完全	黑色 钢灰色	δ4.7～4.8 H_M1
	辉镍矿 Polydymite	Ni_3S_4 Ni 57.9 可含Fe,Co,Co	1.等轴系 2.八面体，等轴粒状 3. $\{10\bar{1}1\}$ 及 $\{01\bar{1}2\}$ 完全	黄色	δ4.5～4.8 H_M4.5～5 H_V 437～444 362～449 kg/mm²
	辉砷镍矿 Gersdorffite	NiAsS Ni 35.4（26～40） As 45.3（37～56）	1.等轴系 2.八面体，立方体，粒状集合体 3.少	银白 钢灰	δ5.6～6.2 $H_M5.5$
	硫铁镍矿 Bravoite（方硫铁镍矿）	(Fe,Ni,Co)S_2 FeS_2-NiS_2-CoS_2固溶体系列，可含钼10%	1.等轴系 2.微晶集合体 3.无	粉红色 棕色	δ4.62 $H_M5.5$～6
	镍黄铁矿 Pentlandite	$(Fe,Ni)_9S_8$ Fe≥Ni（34.22） 可含少量Co，Ag	1.等轴系 2.粗-细粒自形-他形晶 3.{111} 清楚	黄色	δ4.96 $H_M3.5$～4 H_V 209 215kg/mm²

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁶				
		1. >81	容易转为软锰矿	1.溶 3.热溶	产于锰矿床氧化带与其他锰矿物伴生
8.073 (平均)	0.1014			1.易溶 3.易溶于亚硫酸	产于锰矿床的氧化带及沉积矿床 与其他锰矿物伴生
1.263 (平均)	0.0158	1. >81			产于接触交代矿床气成热液及高温热液矿床，与其他硫化物共生
0.335 (平均)	0.0042			2.溶，析出S	产于硫化矿床与黄铁矿、黄铜矿、针镍矿、方铅矿、闪锌矿伴生
0.181	0.0023	导 电		2.溶	同 上
				2.溶	同 上
		导电 3. 1～11×10⁻⁶Ω·m		2.溶	同上，与各种硫化物矿物伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(d)和硬度②
钼(Mo)组矿物	针镍矿 Millerite	NiS Ni 64.8	1.三方系 2.针状 3.{10$\bar{1}$1}{01$\bar{1}$2}完全	黄色 淡黄色	δ5.3～5.7 H_M3～4
	紫硫镍矿 Violarite	$FeNi_2S_4$ Ni 38.8	1.等轴系 2.他形粒状集合体 3.立方体解理发育	紫色 红棕色	δ4.5～4.8 H_M4.5～5.5 H_V241～373 kg·mm^2
铌(Nb)组矿物	铌铁矿—钽铁矿 Columbite—Tantalite	$(Fe,Mn)O\cdot(Nb,Ta)_2O_5$—$(Fe,Mn)O\cdot(Ta,Nb)_2O_5$	1.斜方系 2.板状，柱板状、粒状集合体 3.{100}清楚	黑色 粉末暗棕色	δ5.2（铌为主）7.9（钽为主） H_M6 H_V240～1021 kg/mm^2
	烧绿石 Pyrochlore	$A_2B_2X_7$ A=Ca,Nb,U,Ce Y Fe,Th,Mn,Mg Sr,Pb,Cs,Sb B=Nb,Ta,Ti,Fe,Sb X=O,OH,F或Cl	1.等轴系 2.自形，粒状集合体 3.无	灰色 多变	δ4.3～6.4 H_M5～5.5 H_V255～826 kg/mm^2
铍(Be)组矿物	绿柱石 Beryl	$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$ Be14.1,$Al_2O_3$19.0 有时含Rb,Cs	1.六方系 2.柱状 3.不清楚	淡绿 绿白	δ2.63～2.9 H_M6.4

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
$c_{\cdot}s$ $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
0.136 (平均)	0.0017	1. ≤33.7 3. $-4\times 10^{-1}\Omega\cdot m$		2.溶 溶于王水	产于硫化矿床，与黄铁矿、黄铜矿、针镍矿、方铅矿、闪锌矿伴生
				2.溶 在H_2O_2中分解	同上，与镍黄铁矿密切伴生
7.188 (铌)	0.0903	3.(10^{3}～10^{-2}) —(10^{3}～10^{-3})		1. 2. 3. 不溶	产于花岗岩、位晶岩、细晶花岗岩，与长石、石英、白云母伴生
0.262 (平均)	0.0033	非导体 3. 10^{7}～$10^{-2}\Omega\cdot m$		1. 2. 不溶 3.溶	同上 捕收剂：$C_{24}H_{35}O_{25}SO_3$ pH3.6；Na油酸 pH7.5有效抑制剂：$(NH_4)_2SO_4$ + 水玻璃
1.902	0.0239	1. 5.73	放热 1150℃很小	1. 2. 3. 不溶	产于位晶岩，花岗岩，云英岩，与长石、石英、云母伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铍(Be)组矿物	日光榴石 Helvine	$Mn_3FeBe_6Si_6O_{24}S_2$ BeO 13.6	1.等轴系 2.四面体，八面体	密黄褐红	δ3.22～3.28 H_M6
硼(B)组矿物	β-方硼石 β-Boracite	$Mg_6[B_{14}O_{26}]Cl_2$ B_2O_3 62.1 MgO 30.7	1.斜方系 2.粒状集合体 3.无	白色 灰，黄色 淡绿	δ2.96 H_M7
	硼镁石 Szaibelyite	$Mg_2[B_2O_4(OH)](OH)$ B_2O_3 38.40(分析)	1.单斜系 2.纤维状，柱状板状，粒状 3.{110} 完全	白，黄色	δ2.8 $H_M3～4$
	硼镁铁矿 Ludwigite	$(Mg,Fe)_2FeBO_5$ B_2O_3 17.02	1.斜方系 2.纤维状 3.缺	黑绿色	δ3.6～4.3 H_M5 H_V 537～1486 kg/mm²
	硼钠钙石 Probertite (斜硼钠钙石)	$NaCaB_5O_9·8H_2O$ B_2O_3 43.0 Na_2O 7.7 CaO 13.8	1.单斜系 2.粒状，针状，丝状 3.{110} 完全	白色	δ1.65 H_M1
	硼砂 Borax	$Na_2B_4O_7·10H_2O$ B_2O_3 36.51 (分析)	1.单斜系 2.短柱状 3.{100} 完全	白色 灰色 蓝，绿色	δ2.75 $H_M2～2.5$

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
				1. 分解，析出H_2S	产于位晶岩，与长石、石英、白云母伴生
			α-方硼石加热至250℃转为*β*-方硼石	1. 2. 3. } 溶	产于盐矿床中，与盐石膏、光卤石、钾盐伴生
			吸热 612℃ 684℃ 失水 800℃	1. 2. 3. } 难溶	产于干涸的盐湖与盐、石膏、钾盐伴生
				1. 2. } 溶	产于接触交代矿床与磁铁矿、黄铁矿等伴生
			吸热 150℃ 260℃ 310℃ 860℃ 放热 640℃	1. 2. 3. } 溶	产于盐湖干涸区与盐、钾盐、光卤石伴生
		1. 6.55	吸热 60℃ 170℃ 165℃ } 中大主	溶于水	产于盐湖干涸区与盐伴生

地信网论坛
bbs.2001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
硼(B)组矿物	矽硼钙石（硅硼钙石）Datolite	$CaB[SiO_4][OH]$ B_2O_3 20.61（分析） 21.8（理论） SiO_2 37.6	1.单斜系 2.粒状，短柱状放射状	黄、白、淡绿	δ2.993～3.0 H_M5～5.5
	水硼钙镁石	$MgCaB_6O_{11}\cdot 6H_2O$ B_2O_3 50.53(分析) 49.58 CaO 13.9, MgO 9.9	1.单斜系 2.纤维状，板状放射状 3.{010} 完全	白色	δ2.167 H_M2
Q铅(Pb)组矿物	白铅矿 Cerussite	$PbCO_3$ PbO 83.5 Pb 77.5	1.斜方系 2.致密块状钟乳状 3.不完全	白色、淡灰、淡黄，淡褐	δ6.4～6.6 H_M3～3.5
	方铅矿 Galena	PbS Pb 86.6	1.等轴系 2.立方体，粒状 3.立方体解理完全	银灰色铅灰色	δ7.4～7.6 H_M2～3
	铅矾 Anglesite（硫酸铅矿）	$PbSO_4$ Pb 68.21	1.斜方系 2.板状，柱状 3.{001} 良好	白色	δ63～8.0 H_M2.5～3
S铯(Cs)组矿物	铯榴石 Pollucite（锂云母常含Cs）	$(Cs,Na)[AlSi_2O_6]\cdot H_2O$ Cs_2O 42.8 一般30～32%	1.等轴系 2.立方体 3.无	白色	δ2.9～2.86 H_M6.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[6]	热 学 性 质[6]	可溶性[6]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
			吸热 590℃	1.分解，析出，冻胶	产于火成岩空隙及砂卡岩中，与沸石方解石伴生
			吸热 224～354℃ 669～696℃ 876～896℃ 放热 727℃ 751～790℃	酸中加热即溶 几乎不溶于水	产于盐湖下渊区与钾盐，光卤石伴生，常有粘土存在
0.032 (平均)	0.0004	1. 5.47	吸热 ①{360℃ 390℃ 470℃} 均大 ②{410℃中大 500℃中大}	2.溶 也溶于KOH	产于铅矿床的氧化带，与闪锌矿、菱锌矿、褐铁矿伴生
0.052 (平均)	0.0006	1. >81 3. 10^{-7}～$10^{-2}\Omega\cdot m$	1. 1115℃M.P	1. 2. 3. 溶	产于硫化矿床，与黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等伴生 用乙基黄药在pH=5～10.4时可选
0.039 (平均)	0.0005	1. 7.02	吸热 400℃ 490℃ 很大 850℃中	2.溶	产于硫化矿床的氧化带
0.11	0.0014			1.难溶，加热析出硅胶	产于花岗岩、伟晶岩，与云母、长石、石英共生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
砷(As)组矿物	雄黄 Arsenopyrite	FeAsS As 46.0 Fe 34.3	1.单斜系 2.粒状集合体 3.{110}{001}清楚	玫瑰黄色抛光面白色	δ6.0～6.2 H_M6.5 Hv 1035，1018，988，1094 kg mm²
	雌黄 Orpiment	As_2S_3 As 61	1.单斜系 2.柱状，肾状，葡萄状集合体 3.{010}完全，发育	柠檬黄色	δ3.4～3.5 H_M1～2
	雄黄 Realgar	AsS As 70.1	1.单斜系 2.致密集合体 3.{010}{120}清楚	桔红色暗红色	δ3.4～3.6 H_M1.5～2
锶(Sr)组矿物	菱锶矿 Strontianite（碳酸锶矿）	$SrCO_3$ Sr 70.2 CO_2 29.8 常含Ca	1.斜方系 2.针状，纤维状柱状，粒状 3.{110}良好	白、灰黄、黄褐、红	δ3.728 H_M3.5
	天青石 Celestine	$SrSO_4$ Sr 56.4 SO_3 43.6	1.斜方系 2.板状，柱状集合体 3.{010}完全	白色淡蓝、灰色淡黄，淡红	δ3.9～4.0 H_M3～3.5
钛(Ti)组矿物	钙钛矿 Perovskite	(Ca，Na，Fe，Ce)(TiNb)O_3 TiO_2 58.9 CaO 41.1	1.斜方系 2.立方体，八面体，粒状 3.缺	黑色褐色红褐黄色	δ4.03 H_M5.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁶				
0.03	0.0003	1. >81 3. 20～300×10⁻⁶ Ω·m		2.溶，慢泡析出S及As₂O₃ 3.溶	与黄铁矿、黝铜矿、方铅矿、斜方砷铁矿伴生
		1. 7.42	1. 328℃M.P	2.溶 溶于王水及KOH	与雄黄、辉锑矿、黄铁矿、毒砂伴生
			1. 310℃M.P	溶于王水	同 上
0.14	0.0017		吸热 465℃很小 860℃小 1250℃中大 放热 770℃很小 1000℃很小	1.溶，发泡	产于热液矿床，与天青石、重晶石、方解石硫化物伴生 也见于沉积岩中
		1. 6.94	吸热 ① 930℃中 ② 1200℃中	3.溶于浓H_2SO_4	产于含石膏的沉积层中，如白云岩、灰岩、石膏粘土岩
3.866	0.0486			3.分解	产于碱性岩，与霞石、长石伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
钛(Ti)组矿物	金红石 Rutile	α-TiO_2 经常含铁、铌、锰	1.正方系 2.柱状 3.缺	白色 淡黄 淡红	δ4.23 H_M6～6.5
	锐钛矿 Anatase	β-TiO_2	1.正方系 2.锥状，粒状 3.底面解理完全	白色 淡蓝 淡黄	δ3.9 H_M5.5～6.0
	板钛矿 Brookite	γ-TiO_2	1.斜方系 2.板状，柱状，粒状 3.缺	淡红 棕色 黄色 黑色	δ4.14±0.06 H_M5.5～6
	钛铁矿 Ilmentite	$FeTiO_3$ TiO_2 52.66 有时含Mg，可达6%	1.三方系 2.板状，致密状 3.缺	铁黑色	δ4.72 H_M5～6
碳(C)组矿物	金刚石 Diamond	C	1.等轴系 2.多面体结晶粒状 3.无	白、黄 淡黄 淡蓝 淡棕	δ3.52 H_M10
	石墨 Graphite	C	1.六方系 2.鳞片状 3.{0001}完全	黑色 铅黑色	δ2.15～2.25 H_M1～2
锑(Tb)组矿物	辉锑矿 Antimonite	Sb_2S_3 Sb 71.4 有时含Au，As，Ag	1.斜方系 2.柱状集合体 粒状集合体 3.{010}完全	铅灰色	δ4.5～4.6 H_M2～2.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性[6]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁶				
0.550（平均）	0.0069	1. 5.85 3. 29～910Ω·m	1. 1825℃M.P.	1. 2.} 不溶 3.	产于火成岩，变质岩及沉积岩中
0.844（平均）	0.0106			1. 2.} 不溶 3	同 上
0.365	0.0046		在700℃转为金红石	1. 2.} 不溶 3.	产于片麻岩，片岩与长石、石英、云母伴生
31779	399.35	1. >81 3. 29～910Ω·m		1.热溶 2.难溶	产于超基性及基性岩，及其他火成岩
		1. 4.58 3. 2.7 Ω·m		1. 2.} 不溶 3.	产于火山岩，金伯砾岩 紫外光下：橙、蓝，山楂红
		1. >81 3. 36～100×10⁻³Ω·m 28～9900×10⁻⁶Ω·m （电流横切解理）			产于含碳变质岩天然可浮性良好
4.96～6	0.0628～0.0754	1. 11.5		1.溶 2.溶	产于热液矿床，与其他硫化物矿物共生或伴生，（活化后）用丁基黄药pH8～9时可选

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铁(Fe)组矿物	磁铁矿 Magnetite	Fe_3O_4 FeO 31，Fe_2O_3 69 Fe 72.4 有时含Cr，Ti，Mg	1.等轴系 2.粒状集合体 八面体粒状 3.缺	铁黑色	δ4.9～5.2 H_M5.5～6 H_V 530～559 kg/mm²
	赤铁矿 Hematite	α-Fe_2O_3 Fe 70.0	1.三方系 2.粒状集合体 3.菱面体解理呈鳞片状	红色 血红	δ5.2 H_M5～6 H_V 739～822 kg/mm²
	褐铁矿 Limonite	$FeOOH \cdot nH_2O$ Fe 48～63	2.不定形集合体 土状，块状 钟乳状	红、棕、褐色	δ2.7～4.3 H_M4
	菱铁矿 Siderite	$FeCO_3$ Fe 48.21 常含Mn，Ca，Mg	1.三方系 2.粒状 3.菱面体解理发育	淡褐红 红 淡棕	δ3.0～3.8 H_M3.5～4.5
	针铁矿 Geothite	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$ Fe 62.9	1.斜方系 2.针状，纤维状 3.{010} 完全	黄、褐、棕色	δ4.4 H_V 525～624 772～824 kg/mm²
铜(Cu)组矿物	斑铜矿 Bornite	Cu_5FeS_4 Cu 63.3	1.正方系 2.粒状集合体 3.无	暗铜色	δ4.9～5.5 H_M3

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
100000 (平均)	1256.6	1. >33.7 <81	1. 1590℃M.P.	1.溶 2.缓溶	产于变质岩，基性岩及矽卡岩，与石英伴生，或辉石、长石伴生
7.69～ 576.9 镜铁矿 82.69～615	0.0966～ ～7.249 1.039～ 7.728	1. >81	1. 1350℃M.P.	1.溶 2.难溶	于沉积矿床中，与石英、粘土，方解石伴生、用亚油酸，油酸钠pH7～7.4时可选
				1.溶	铁矿床的地表氧化带，与赤铁矿、水针铁矿共生，或为二者集合体
115.88 (平均)	1.456	1. 6.74		1.易溶 2.溶 3.溶	产于沉积铁矿，也见于火成岩空洞中用油酸，pH10～11时可选
		1. 11.70		1.溶	产于铁矿床地表氧化带，与赤铁矿伴生
0.693 (平均)	0.0087	3. 1.6～ 6000 $\times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$		1. 2. 溶 3.不溶	产于铜的硫化矿床，与黄铜矿、辉铜矿、镍黄铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿伴生或共生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铜(Cu)组矿物	赤铜矿 Cuprite	Cu_2O Cu 88.8	1.等轴系 2.粒状块状 3.缺	铜黑色 黑色	δ5.8～6.15 H_M3.5～4
	黄铜矿 Chalcopyrite	$CuFeS_2$ Cu34.6	1.等轴系 2.粒状 3.无	黄铜黄色	δ4.1～4.3 H_M4.0
	辉铜矿 Chalcocite	Cu_2S Cu 79.8	1.斜方系 2.粒状集合体 3.缺	铅灰色	δ5.5～5.8 H_M2.5～3
	硅孔雀石 Chrysocolla	$CuSiO_3 \cdot nH_2O$ Cu 40.4	1.斜方系? 2.纤维状，土块状，皮壳状 3.缺	蓝绿色 天青色	δ2.0～2.4 H_M2～4
	孔雀石 Malachite	$Cu[CO_3][OH]_2$ Cu57.5	1.单斜系 2.针状纤维状集合体 3.{010}	蓝绿色	δ4.05 H_M6
	蓝铜矿 Azurite	$Cu_3[CO_3]_2[OH]_2$ Cu 55.3	1.单斜系 2.板状，柱状，胶状 3.{011} 完全	蓝灰色	δ3.8～4.0 H_M3.5～4
	硫砷铜矿 Enargite	Cu_3AsS_4 Cu 48.3	1.斜方系 2.柱状 3.{110} 完全	深红色	δ4.1～5.5 H_M3

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热学性质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
−0.010（平均）	0.0001	1. 16.20 3. 10～50Ω·m	1. 1236°CM.P	1. 2. 溶 3.	产于铜矿床的氧化带，与黑铜矿、黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿共生伴生
0.915（平均）	0.0115	1. >81 3. 150～9000×10⁻⁶Ω·m		2.溶	产于铜硫化矿床与其他硫化物伴生，用乙基黄药pH8～10时可选
0.061	0.0008	1. >81 3. 8～100×10⁻⁶Ω·m	1. 1130°CM.P	2.溶	产于铜硫化矿床与其他铜硫化物共生伴生（包括铁的硫化物）
5.64（平均）	0.0782			1. 2. 溶 3.	铜矿床的氧化带与其他铜矿物伴生
1.66	0.0208	3. 10^7～10^9Ω·m		1. 2. 溶 3.	同上 （硫化后）用异戊基黄药脂肪酸可选，pH 8.5～9.5
3.078	0.0386			1. 2. 溶	产于铜矿床氧化带与孔雀石共生
					产于硫化矿床与砷黝铜矿、辉砂、白铁矿、金银矿、黄铁矿共生伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铜(Cu)组矿物	铜蓝 Covellite	CuS Cu 66.5	1.六方系 2.粒状 3.底解理完全	靛青蓝	δ4.6～4.76 H_M1.5～2.0
	砷黝铜矿 Tennantite	$Cu_{12}As_4S_{13}$ Cu51.57 30～53（分析）	1.等轴系 2.粒状集合体 3.无	钢灰—铅灰色 铁黑色	δ4.4～5.4 H_M3～4.5
	黝铜矿 Tetrahedrite	$Cu_{12}Sb_4S_{13}$ Cu45.77 23～45（分析）	1.等轴系 2.粒状 3.无	钢灰—铅灰 铁黑色	δ4.4～5.4 H_M3～4.5
	自然铜 Copper	Cu	1.等轴系 2.六面体，多为粒状集合体 3.无	铜红色	δ8.5～9 H_M2.5～3.0
钍(Th)组矿物	钍石 Thorite	$Th(SiO_4)$ Th 71.7	1.正方系 2.柱状、粒状 3.无	白、棕褐	δ4.6 H_M5
稀土(TR)组矿物	独居石 Monazite	(Ce,La,Th)$[PO_4]$ Th2.02～24.1 $TR_2O_3$64.27（分析）	1.单斜系 2.板状 3.清楚	黄色 黄绿 棕黄	δ4.98～5.06 H_M5
	氟碳钙铈矿 Parsite	(Ce,La)$Ca[CO_3]_3F_2$ $(Ce\text{-}TR)_2O_3$ 55～61 $(Y\text{-}TR)_2O_3$0.0～7.86	1.三方系 2.板状，粒状 3.{0001}完全	黄色 黄褐色	δ4.36～4.38 H_M4.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性②	热 学 性 质③	可溶性④	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁵				
0.021（平均）	0.0003	3. 0.2～40×10⁻⁶ Ω·m		2.溶	产于硫化矿床与其他铜、铁硫化物共生
1.06	0.0133	弱导电		2.溶	同 上
0.862（平均）	0.0108	弱导电		2.溶	同 上
		1. >81	1. 1084℃,M.P.	2.溶 3.热溶	有内生及次生两种自然铜类型，与其他铜、铁硫化物矿物伴生
4.17	0.0524		3.吸热 180℃大 370℃小 410℃ 放热 570℃ 870℃	1.溶 2. 3. 缓溶	产于伟晶岩，花岗岩，细晶花岗岩 有强放射性
18.61 11.32	0.234 0.1422		3.吸热 350℃小 880℃小	1. 2. 微溶 3.	同上，也产于海滨砂中，有放射性
12.59	0.158		3.吸热 660℃大 放热 720℃小	1. 2. 热液 3.	产于碱性岩，花岗岩、伟晶岩及热液矿床，与长石、石英、霓石、易解石伴生

地信网论坛
bbs8s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
X稀土(TR)组矿物	氟碳铈矿 Bastnaesite	(Ce,La)[CO_3]F (Ce-TR)$_2O_3$ 73～36	1.六方系 2.板状 3.清楚	蜡黄	δ4.9～5.2 H_M4～4.5
	复稀金矿 Polycrase	(Y,Ca,Ce,U,Th) (Ti,Nb,Ta)$_2O_6$ (Y,Er)$_2O_3$ 25.64	1.斜方系 2.他形块状	黑、棕	δ4.7～5.4 H_M5.5～6.5
	黑稀金矿 Euxenite	(Y,Ca,Ce,U,Th) (Nb,Ta,Ti)$_2O_6$ (Y,Er)$_2O_3$ 24.94 27.32	1.斜方系 2.柱状，板状块状	黑色 棕色	δ4.6～5.0 H_M6.5
	磷钇矿 Xenotime	YPO_4 (Ce-TR)$_2O_3$ 0.9～2.1 (Y-TR)$_2O_3$ 57～69	1.正方系 2.柱状	黄，棕 黄，棕色	δ3.369 H_M4～5
	易解石 Eshinite	(Ca,Ce,Fe,Th) (Ti,Nb)$_2O_6$ (Ce-TR)$_2O_3$ 19.5 (Y-TR)$_2O_3$ 4.53	1.蜕晶质 2.他形、块状 3.缺	黑，棕，黄棕	δ5.0 H_M^V5.6～6
	钇易解石 Priorite	(Y,Er,Ca,U,Th) (Ti,Nb)$_2O_6$ (Ce-Th)$_2O_3$ 4.3 (Y-Th)$_2O_3$ 17～29	1.斜方系 2.他形、块状 3.缺	黑，棕，黄棕	δ4.51～5.02 H_M5～6.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电性[5]	热学性质[4]	可溶性[3]	其他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
11.34	0.1425		3.吸热 555°显著	1. 2.} 溶 3.	同上 有时有放射性
18.88	0.2372		3.吸热 175°C很小（宽） 550°C中小 放热 780°C小 920°C很小	1. 2.} 不溶 3.溶	同上
20.21	0.2539			1.部分溶 溶于H_3PO_4 及HF	同上
28.86	0.3629		3.吸热 120°C 625°C 945°C 970°C 995°C 放热 370°C 660°C	1.不溶 2.溶	产于花岗岩，花岗伟晶岩，与独居石、钛石伴生
16.01	0.2012				同黑稀金矿
			3.放热 400°C(宽) 中大 560°C 小 800°C中小		同黑稀金矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
W钨(W)组矿物	白钨矿 Scheelife	$CaWO_4$ W 63.9	1.正方系 2.板状，块状	黄，白，灰褐	δ4.5～5 H_M6.12
	黑钨矿 Wolframite	$(Fe,Mn)[WO_4]$ W 60.5	1.单斜系 2.短柱状 3.{010} 完全	铁黑色	δ6.7～7.5 H_M4～4.5
	钨锰矿 Huebnerite	$Mn[WO_4]$ W 60.7	1.单斜系 2.长柱状，板状 3.{010} 完全	铁黑色	δ7.1 H_M4～4.5
	钨铁矿 Ferberite	$Fe[WO_4]$ W 60.5	1.单斜系 2.短柱状，块状楔形 3.{010} 完全	铁黑色	δ7.08～7.69 H_M4～4.5
X锡(Sn)组	锡石 Cassiterite	SnO_2 Sn 78.7	1.正方系 2.短柱状、粒状双锥状 3.无	黄，淡黄，棕黄，棕红，灰白少见	δ6.8～7.1 H_M6～7
硒(Se)组矿物	硒铅矿 Clausthalite	Pb Se Se 27.6	1.等轴系 2.细粒状 3.清楚	蓝灰色 棕色 微蓝	δ8.0 H_M2～3 H_V 46～72 kg/mm²
	硒铜矿 Klackmannite	Cu_2Se Se 38.8	1.六方系 2.薄板状 3.清楚	蓝灰	δ6.7 H_M2～3 H_V 57～66 kg/mm²
	硒银矿 Naumannite	Ag_2Se Se 26.8	1.等轴系 2.粒状集合体 3.立方体解理	灰白	δ8.0 H_M2.5 H_V 31～37

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	MKS $\times 10^{-6}$				
0.049	0.0006		3.吸热 100℃宽，特小		产于接触变质矿床，伟晶岩、云英岩及热液矿床
5.947	0.0747	1. 12.51		1.分解 2.分解 3.热溶	产于云英岩，伟晶岩，花岗岩及热液矿床
5.557 (平均)	0.0698			1.分解	同 上
4.98 (平均)	0.0626		3.吸热 700℃（宽）很小 放热 100℃小 300℃（宽）很小		同 上
0.81	0.0102	1. 27.75 2. 23.4～24.0	1. 1630℃CM.P	1. 2. 3. 不溶	产于伟晶岩，花岗伟晶岩，云英岩，石英斑岩
				1. 2. 有反应	产于热液矿床，与方铅矿及其他硒矿物共生
					产于热液矿床，与黄铜矿、黄铁矿及其他硒化物共生
				2.有反应	同 上

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ) 和硬度②
锌(Zn)组矿物	红锌矿 Zincite	ZnO Zn 80.3	1.六方系 2.叶片状 3.{10$\bar{1}$0}完全	橙黄 暗红	δ5.4～5.7 H_M4
	硅锌矿 Willemite	$Zn(CO_3)$ Zn 58.6 可含Ca,Fe,Mg,Cu	1.三方系 2.菱面体、粒状纤维状	白，绿红褐	δ3.9～4.2 H_M5.5
	菱锌矿 Smithsonite	Zn_2SiO_4 Zn 52.1	1.六方系 2.肾状，块状 3.不发育	灰白 暗灰 绿白 蓝灰	δ4.1～2.5 H_M4.4～4.5
	闪锌矿 Sphalerite	ZnS Zn 67.1 43.6～67（分析）	1.等轴系 2.粒状集合体，四面体 3.{110} 完全	棕，褐黄，深棕	δ3.5～4.2 H_M3.5～4
	异极矿 Hemimorphite	$Zn_4(OH)_2Si_2O_7 \cdot H_2O$	1.斜方系 2.束状集合体粒状，钟乳状 3.{110} 完全	白、黄褐	δ3.4～3.5 H_M4.5～5
Y银(Ag)组矿物	淡红银矿 Proustite（硫砷银矿）	Ag_3AsS_3 Ag 65.4 64.5～65.37（分析）	1.六方系 2.针状 3.不清楚	浓红色	δ5.6 H_M2 H_V 50～156 kg/mm²
	脆银矿 Stephanite（斜方辉锑银矿）	Ag_5SbS_4 Ag 68.3 67.8～68.6（分析）	1.斜方系 2.柱状 3.无	灰白色	δ6.2 H_M2～2.5 H_V 42～107 kg/mm²
	辉银矿 Argentite	Ag_2S Ag 87.1 S 12.9	1.等轴系 2.立方体，八面体，粒状集合体 3.清楚	铁黑色 铅灰色	δ7.2～7.4 H_M2～2.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性②	热 学 性 质③	可溶性④	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-8}$				
0.342	0.0043	1. 33.7	1. 1670℃M.P.	1. 2. 溶 3.	产于锌矿床，与硅锌矿、方解石、锌铁尖晶石共生
7.671	0.0964	1. 5.55	1. 1510℃M.P.		同 上 紫外光下，鳞绿
0.082 (平均)	0.0010		3.吸热 460℃大 500℃大 590℃大	1. 2. 溶 3.	产于锌矿床的氧化带，为次生矿物
0.285 (平均)	0.0036	1. 5.29		1. 2. 溶 3.	产于硫化矿床，与方铅矿共生
0.058	0.0007				脉状产出，与铅、锌、铁的硫化物共生
				2.溶，析出S和As_2O_3	产于钨锌矿床中与铅、锌、铜、铁硫化物伴生
				2.分解	产于Ag-Co矿脉，与硫化物及金、银矿物伴生
		1.>81		2. 溶，后加入HCl有AgCl沉淀	产于热液矿脉及次生富集带，与铜，铅，锌的硫化物伴生

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
Y银(Ag)组矿物	角银矿 Cerargyrite	AgCl Ag 75.0	1.等轴系 2.板状 3.不清楚	无色 淡黄，淡蓝，淡褐	δ5.5～5.6 H_M1～1.5
	硫砷铜银矿 Pearceite	$(Ag,Cu)_{16}As_2S_{11}$ Ag 78.4	1.单斜系 2.细板状 3.不清楚	深红色	δ6.2 Hv 142～164 kg/mm²
	硫锑铜银矿 Polybasite	$(Ag,Cu)_{16}Sb_2S_{11}$ Ag 75.5	1.单斜系 2.细板状 3.不清楚	深红色	δ6.27～6.33 H_M2～3 Hv 131～139 kg/mm²
	深红银矿 Pyrargyrite	Ag_3SbS_3 Ag 59.8	1.六方系 2.柱状，板状 3.不清楚	深红色	δ5.8 H_M2 Hv 50～156 kg/mm²
	自然银 Silver	Ag	1.等轴系 2.羽毛状，枝状	银白色 常为黑色薄膜覆盖	δ10.1～11.1 H_M2.5
铀(U)组矿物	钾钒铀矿 Carnotite (钒钾铀矿)	$(K,Na,Ca,Cu,Pb)_2(UO_2)_2[VO_4]_2 \cdot 3H_2O$ U 52.7	1.单斜系 2.板状 3.{001} 完全	淡黄色	δ4.5 H_M软
	晶质铀矿 Uraninite	UO_2 U 88.1	1.等轴系 2.立方体，八面体，粒状 3.清楚	黑色	δ9～9.7 H_M4～6

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率χ		电 性[8]	热 学 性 质[9]	可溶性[8]	其 他
cgs ×10⁻⁶	MKS ×10⁻⁵				
			1. 455°CM.P.	2. 溶，后加入HCl有AgCl沉淀	产于银矿床的铁帽带，与自然银，辉银矿，异极矿，锰土伴生
					产于内生铜银硫化矿床，与方铅矿及其他硫化物伴生
					产于含银热液矿床与毒砂、闪锌矿、银黝铜矿等伴生
					产于Pb-Zn-Ag热液矿脉，与Ni-Co-Fe 砷化物伴生
		1. >81 3. 1.5×10⁻⁸Ω·m	1. 961°CM.P.	2.溶，后加HCl有AgCl 沉淀	产于含银矿床氧化带
					次生矿物，与钙钒铀矿、钒铀矿等共生有强放射性
			1. 2827°C,M.P.（合成）	2.溶溶于王水	产于伟晶岩，花岗岩接触交代矿床有强放射性

地信网论坛
bbs.3s001.com

金属(元素)组别	矿物	化学成分 化学式 主成分，%	晶系、结晶习性和解理①	颜色	密度(δ)和硬度②
铀(U)组矿物	钙铀云母 Autunite	$Ca(UO_2)_2[PO_4]_2 \cdot 10\sim12 H_2O$ U 50.1～48.2	1.假正方系 2.片状 3.{001} 完全	黄色 绿黄色	δ3.1 H_M2～2.5
	矽钙铀矿 Uranofite	$Ca(UO_2)_2SiO_4(OH_1)_2$ U 67.0	1.单斜系 2.柱状，纤维状 3.{100} 清楚	黄色 土黄色	δ3.8～3.9 H_M2～3
	沥青铀矿 Pitchblende	UO_2 U 88.1	1.等轴系 2.凝胶状，葡萄状 3.不清楚	黑色 深棕色	δ9.0～9.7 H_M3～6 Hv 514～803 kg/mm²
	铜铀云母 Torbernite	$Cu(UO_2)_2[PO_4]_2 \cdot 12H_2O$ U 47.1	1.正方系 2.板状，片状 3.{001} 完全	翠绿 绿	δ3.5 H_M2～2.5
	铀钍矿 Uranothorite	$U_3O_8 \cdot ThO_2$ U 69.59 Th 22.61	1.正方系 2.粒状 3.不清楚	黑色	δ9.3 H_M4.5～5.0

① 此栏中：1—晶系；2—结晶习性；3—解理；

② 此栏中：δ—矿物密度，g/cm³；H_M—莫氏硬度；Hv—维氏硬度；

③ 此栏中：1—介电常数(60Hz)；2—介电常数(高频)；3—电阻率Ω·m。

④ 此栏中：1—熔点M.P.；2—相变温度，℃；3—差热分析；

⑤ 此栏中：1—可溶于HCl；2—可溶于HNO_3；3—可溶于H_2SO_4。

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.1.29

比磁化率 χ		电 性[3]	热 学 性 质[4]	可溶性[5]	其 他
cgs $\times 10^{-6}$	*MKS* $\times 10^{-6}$				
				1. 2. 3. 溶	产于铀矿床的地表氧化带，为次生矿物，与铜铀云母及矽钙铀矿伴生，有放射性
					产于沉积矿床及氧化带，有放射性
				1. 2. 溶 溶于王水	产于Ni-Co-Ag-Bi矿物共生的热液矿床，有强放射性
				1. 2. 3. 溶	同钙铀云母
0.94	0.0118				同晶质铀矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2 工艺矿物学研究方法

鉴定和研究矿物的方法很多，除采用常规的测试方法，为选矿提供一般的基础资料外，还应运用先进手段加深对矿物微观世界及特性的认识，更充分地为利用矿物资源创造条件，并对工艺中存在的问题尽快地作出正确判断。因而，必须针对具体矿石和研究目的与要求，正确地选择快速而有效的方法进行分析测试。

3.2.1 矿物分离法

对矿物进行精确分析测试时，为保证结果的准确性，必须选取新鲜纯净的样品。为此，应用简便仪器设备，按矿物性质不同进行一系列加工处理，将各种矿物分别富集，清除杂质，最后获得纯度为98%以上的单矿物。

自然界矿物常以复杂的多矿物集合体形式产出，从中选取极为纯净的单矿物是一项细致的工作，整个分离过程包括三个阶段：标本检查、破碎筛分和分选。

3.2.1.1 重力分离法

这种方法是沿用重力选矿法中的跳汰、摇床、溜槽、重介质等选别手段进行粗选；然后再用精淘、重液分离等方法精选，从而得到不同密度（比重）的矿物。重力分离难易程度的指标，是以两种不同的矿物在介质中相对密度的比值 A 表示，按下式计算：

$$A=\frac{\delta_2-\Delta}{\delta_1-\Delta} \tag{3.2.1}$$

式中 δ_1、δ_2——轻、重矿物的密度，g/cm^3；

Δ——分选介质的密度，g/cm^3。

按矿物分离难易程度的分类列于表3.2.1。

重力分离的仪器设备较多，各种设备都有其特点和适用范围，只有针对矿石性质正确选用，才能发挥其特长，达到有效分

地信网论坛
bbs.3s001.com

离。主要分离设备的分类及其适用粒度范围列于表3.2.2。

表 3.2.1 重力分离难易指标

A	>2.5	2.5～1.75	1.75～1.5	1.5～1.25	<1.25
难易程度	极易	易	中等	难	很难

表 3.2.2 重力分离分类

方法	介质	介质的运动方式	适宜粒度 mm
跳汰	水、空气	间断上升或上下交变介质流	16～0.3
摇床	水、空气	连续倾斜水流或上升气流	2～0.04
重介质	重悬浮液	上升流、水平流或回转流	100～2
重液	重液	稳流	1～0.002

重液分离法是重要的手段，它不仅能分离密度相近的矿物，直接获得合格的单矿物，而且能对用仪器分离法所得纯度较差的矿物进一步分离提纯。当矿物粒度小于0.04毫米在重液中难以自然沉降时，可在电动离心机中借离心力的作用使细粒级重矿物在重液中分层；若矿物粒度极微细如粘土矿物，应直接在高速重液离心机中进行分离。当矿物密度差极小，但只要有0.004的密度差，就可采用重液变温法进行有效的分离。

几种常用的重液列于表3.2.3。

3.2.1.2 磁力分离法

磁力分离法可分为磁选和电磁选两种。对强磁性矿物常用马蹄形、方形或喇叭形的永久磁铁进行分离。电磁选则用多极磁铁或各种电磁分离仪将电磁性矿物与其他矿物分开。北京地质仪器厂生产的WCF_2—65型“多用磁性分析仪”操作简便，分离效果较好。该仪器可根据矿物性质调节分离仪的纵向、坡度及电流强度。常见矿物分离时所需的调整参数如表3.2.4所列。

我国研制成功的一种电磁液分离仪，是在不均匀磁场中以

地信网论坛
bbs.3s001.com
298

表 3.2.3 几种常用的重液及其特性

名称	成分	密度 g/cm³	稀释剂	其他性质
三溴甲烷	$CHBr_3$	2.89	乙醇、苯、二甲苯	微黄色，遇光变暗
四溴乙炔	$C_2H_2Br_4$	2.96	二甲苯、四氯化碳	黄色
杜列液	KI与HgI_2水溶液	3.19	水	黄色，能被硫化物、金属、有机物分解
二碘甲烷	CH_2I_2	3.32	苯、二甲苯、其他有机液	浅黄色，易变暗
克莱恩液	铊的硼钨酸盐的水溶液	3.36	水	浅金黄色，能被碳酸盐、铅、锌、铁分解
杜伯恩液	NaI与HgI_2水溶液	3.46	水	黄色，参看杜列液
苏-罗尔巴液	BaI_2与HgI_2水溶液	3.58	苯、乙醚	黄色，能被水、金属分解
克列里奇液	$CH_2(COOTl)_2$ HCOOTl	4.2	水	淡黄色，能被盐酸蒸汽分解，会变暗，剧毒
硝酸亚汞	$HgNO_3 \cdot H_2O$	4.3	水	熔点70℃，无色易流动，能分解碳酸盐矿物
蚁酸铊	$TlCO_2H$	5.0	水	熔点105℃，流动性大，无色，价格昂贵
硝酸铊亚汞	$TlHgN_2O_6$	5.3	水	熔点76℃，无色，流动性大，剧毒

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.4 多用磁性分析仪分离矿物调整参数

矿物名称	水平倾角 °	侧面倾角 °	电流，A
铬铁矿	20	10	0.30
褐铁矿	25	10	0.57～1.1
菱铁矿	25	10	0.35～1.3
赤铁矿	20	10	0.39
钛赤铁矿	24	10～12	0.2
钒　矾	25	10	0.57～2.5
钛铁矿	25	10	0.45～0.57
钛铁矿	20	10	0.23
锰华矿	20	10	0.3～0.5
软锰矿	25	10	0.8～0.9
软[illegible]矿	20	10	0.6～0.7
黑钨矿	20	10	0.44～0.49
钨铁矿	20	10	1.4
[illegible]石	20	10	1.2～1.4
金红石	20	10	1.6～2.8
锐钛矿	20		1.8～2.1
黄铅矿	20		2.45
黄铜矿	24	11	0.5～0.8
黄铜矿	17	10	0.6～0.9
黄铜矿	25	10	1.4
闪锌矿	20	10	0.76～1.1
闪锌矿	32	9	0.90
磷钇矿	20	10	0.4
磷钇矿	24	10	0.4～0.5
黑云母	20	10	0.45～0.6
金云母	20	10	0.55～1.54
含锂白云母	20	10	0.6～0.7
绿色白云母	20	10	1.8～2.0
含铁白云母	20	10	1～1.2
铬云母	20	10	0.77
普通角闪石	20	10	0.52
普通角闪石	24	9	0.4～0.6
钠角闪石	20	10	0.52～0.66
闪叶石	20	10	1.1～1.4
叶绿泥石	20	10	0.45～0.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.4

矿物名称	水平倾角 °	侧面倾角 °	电流，A
黑石	20	10	0.37～0.9
黑石	20～30	10	0.55～0.65
辉石	20	10	0.22～0.8
辉石	24	9	0.4～0.6
蛇纹石	20	10	0.22～1.4
橄榄石	20	10	0.6～0.8
橄榄石	24	9	1.5～2
钠闪石	20～30	10	0.65～0.8
富铁橄榄石	20	10	0.11～0.23
钠透辉石	20	10	0.36
透闪石	20	10	0.77～1.42
钛角闪石	20	10	0.6
钛普通辉石	20	10	0.7
硅钛铈钇矿	20	10	0.6～1.0
钇萤石	20	10	1.25～1.5
钾钇锰矿	20	10	0.4～0.45
方铈矿	20	10	1.5
黄河矿	25	10	1.7～1.8
锡石	25	10	2～2.1
铁钍石	25	10	1.1～2.1
钍石	20	10	1～1.5
包头矿	25	10	2～2.5
磷铈镧矿	25	10	2～2.1
铌钙矿	25	10	1.7～2.5
铌铁矿	20	10	0.4～0.55
铌铁矿	24	9	0.46～0.5
铌铁矿	26	11	0.46～0.5
铌铁矿	25	10	0.57～0.9
钽铌铁矿	20	8	0.5～0.56
钽铌铁矿	24	9	0.56～0.6
钽铌铁矿	14	2	0.2～0.3
铌钽铁矿	26	11	0.56～0.6
重钽铁矿	20	8	0.6～0.65
锰钽铁矿	26	11	0.6～0.65
钛铁金红石	20	10	0.44～1.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.4

矿物名称	水平倾角 °	侧面倾角 °	电流，A
钛铁金红石	25	10	0.9～1.3
烧绿石	20	10	1.5～3.9
硅铍钇矿	20	10	0.35～0.4
铌钇矿	20	10	0.64～0.68
褐钇钽矿	20	10	0.45～1.1
方铈矿	20	10	1.0
独居石	20	10	0.61～0.8
独居石	25	10	1.3～1.9
独居石	24	11	0.7～0.9
钇易解石	20	10	0.75～1.0
风化易解石	20	10	1～1.2
普通易解石	25	10	1.2～1.3
钛易解石	25	10	1～1.1
铌易解石	25	10	1～1.1
褐帘石	25	10	0.9～1.0
褐帘石	20	10	0.64
氟碳铈矿	20	10	0.8～1.0
氟碳铈矿	25	10	1.8～1.9
氟碳钙铈矿	25	10	1.3～1.5
黑稀金矿	20	10	0.4～0.45
黑稀金矿	26	11	0.7～0.8
硅钠钙矿	20	10	0.55～0.6
复稀金矿	20	10	0.75～0.9
氟铈镧矿	20	10	0.9～1.0
钇磷灰石	20	10	0.9～1.5
磷铝铈矿	20	10	2.5～3.0
黑色火山玻璃	20	10	2.08
蓝石棉	25	10	0.8～1
斜硅镁石	25	10	1.5～1.7
白云石	25	10	0.35～0.45
绿泥石	17	10	0.7～1.2
榍　石	20	10	0.9～1.6
棕绿色电气石	20	10	0.56～0.68
棕绿色电气石	14	2	0.5～0.6
黑色电气石	20	10	0.4～0.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.4

矿物名称	水平倾角 °	侧面倾角 °	电流，A
绿色电气石	20	10	1.1～1.7
石榴石	20	10	0.2～0.3
钙铬榴石	20	10	1～1.3
锰铝榴石	20	10	0.50
镁铝榴石	20	10	0.76
钙铁榴石	20	10	0.40
铬尖晶石	20	10	0.76
绿帘石	20	10	0.44～0.68
黑色萤石	25	10	0.6～0.9
紫色萤石	25	10	1.7～2.5
尖晶石	20	10	0.4～0.6
镁铝尖晶石	20	10	0.4～0.6
斜黝帘石	20	10	1～1.5
赤铁矿	20	10	0.23
镜铁矿	20	10	0.35～0.45
细晶石	20	10	1.5～2
钛钽铌矿	20	10	0.7～1
黑钽铀矿	11	4	2
沥青铀矿	20	10	1.4
水锆石	20	10	0.6～2.5
褐红-褐黄锆石	20	10	1.48～2.1
乳白黄色锆石	20	10	2.3～2.7
铀钍石	20	10	2.0
晶质铀矿	20	10	1.2～2
尼日利亚石	20	10	0.7～0.9
金绿宝石	20	10	1.0
绿柱石	20	10	1.3～1.5
日光榴石	20	10	0.25～0.4
蓝色硼镁石	20	10	1.5
含硼电气石	20	10	1.1～1.7
硼镁铁石	20	10	0.2～0.3
似晶石	20	10	>3
铬榴石	20	10	>3
锂辉石	20	10	>3
硼镁石	20	10	>2.5

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.4

矿物名称	水平倾角 °	侧面倾角 °	电流，A
钒铅矿	20	10	>3
黄铁矿	20	10	>2.7
锡石	20	10	>2.7

$FeCl_3$、$MnCl_2$等顺磁性液体作为分离介质，按矿物的密度和磁化率的差异而分离弱磁性矿物，亦可分离高密度的矿物如铂、金等。若将电磁铁两极间隙调整呈上宽下窄的楔形，则间隙内的场强出现下部强、愈向上则逐渐减弱的变化，而处于该磁场中的顺磁液的密度也相应地呈现与其同步的趋势。因此，可将矿物按密度逐级分离，尤其是对高密度的非磁性矿物分离具有显著效果，并可在一定范围内代替重液分离。

3.2.1.3 电选分离法

电选分离仪型式很多，有静电分离仪、电晕电选分离仪和复合电场电选分离仪。西北地质科学研究所研制的高压静电分离仪，是由产生静电的电源部分和分离部分组成的，设备简单易操作，对非导体矿物分离效果较好。

矿物导电率和介电常数常受其中杂质含量、水分、温度的影响。所以，采用电选分离矿物时，必须在恒温恒湿条件下进行，样品的颗粒大小要一致，表面要清洁、干燥。

3.2.1.4 介电分离法

我国常用的介电分离仪一般采用低频电场和高频电场两种。它主要由产生电磁波的电源、分离电极和盛放矿物样品以及介电液的玻璃容器等组成。分离电极应由铂铑丝、镀银磷铜丝等韧性强、导电性好、不易氧化的材料制成。

介电液应选用无色透明、无毒、不易燃、物理化学性质稳定、不易混浊的液体。常用介电液及其介电常数如表3.2.5所列。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.5 几种常用的介电液及其常数表

常用介电液	ε	介电液	ε
氯仿	5.2	醋醛	42.0
四氯化碳	2.24	苯	2.3
乙醇	26.8	煤油	2.1
丙酮	21.5	硝基苯	36.0
水	781	甲醇	33.7

置于介电液中的介电质矿物，在电场作用下，其作用力F的大小由矿物介电常数ε_1、介电液介电常数ε、电场强度E、场强梯度及矿物粒度所决定。由电动力学计算得：

$$F=\varepsilon r^3\frac{\varepsilon_1-\varepsilon}{\varepsilon_1-2\varepsilon}E\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \tag{3.2.2}$$

式中 $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}$——场强梯度；

r——矿物颗粒半径。

当$rE\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}$为定值时，则$F$是$\varepsilon$，$\varepsilon_1$的函数。如$\varepsilon>\varepsilon_1$，则$F>0$；

如$\varepsilon<\varepsilon_1$，则$F<0$，即在电场一定的情况下，如果矿物介电常数大于介电液的介电常数，则矿物被吸引，反之则被排斥。两种矿物的介电常数相差愈大，就越容易分离。

为使不同介电性的矿物分开，应选择和配制一定的介电液，一般可用表3.2.5中所列的介质试剂按体积、V配制出混合介电液，由下列公式求得：

$$\varepsilon_{混}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i V_i}{\sum_{i=1}^{n}V_i} \tag{3.2.3}$$

一般的矿物分离条件可参考表3.2.6所列的一些实例。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.6 矿物分离的参考条件

矿物组合	电压	介质		选上部分		留下部分	
	V	种类	ε	矿物	纯度 %	矿物	纯度 %
铌铁矿+电气石	1800	氯仿+乙醇	10.0	铌铁矿	99	电气石	99
铌铁矿+铬铁矿	1800	氯仿+乙醇	10.7	铌铁矿	99	铬铁矿	98
铌铁矿+黑钨矿	1800	氯仿+乙醇	11.6	铌铁矿	90	黑钨矿	90
独居石+磷钇矿	2500	氯仿+丙酮	8.2	独居石	97	磷钇矿	96
绿帘石+磷钇矿	1700	氯仿+乙醇	10.7	绿帘石	99	磷钇矿	98
钛铁矿+黑钨矿	1700	氯仿+乙醇	11.6	钛铁矿	98	黑钨矿	98
钛铁矿+铌铁矿	1800	氯仿+乙醇	11.6	钛铁矿	98	铌铁矿	95
钛铁矿+褐钇铌矿	1800	氯仿+乙醇	13.0	钛铁矿	96	褐钇铌矿	98
钛铁矿+磷钇矿	1800	氯仿+乙醇	10.8	钛铁矿	100	磷钇矿	100
钛铁矿+铬铁矿	1800	氯仿+乙醇	13.0	钛铁矿	99	铬铁矿	99
细晶石+锆石	1700	氯仿+乙醇	10.7	细晶石	96	锆　石	95
细晶石+锡石	1800	氯仿+乙醇	13.0	细晶石	97	锡　石	95
锡石+锆石	1600	氯仿+乙醇	13.0	锡　石	97	锆　石	98
钍石+锆石	1800	氯仿+丙酮	11.0	钍　石	97	锆　石	85
金红石+锆石	1500	四氯化碳+乙醇	7.0	金红石	98	锆　石	98
白钛石+锐钛矿 锆石+辰砂	1400	氯仿+丙酮	11.0	白钛石+锐钛矿	95	锆石+辰砂	98

地信网论坛
bbs.3s001.com

用高频介电分离仪分选矿物速度快，效率高，样品中容许有导电矿物存在；而在低频介电分离仪中则不能有导电矿物存在，因其会引起短路。本法的特点对于矿物密度差很小的重矿物分离起到重液法不易起到的作用。

3.2.2 矿物物理性质研究法

3.2.2.1 矿物的密度测定

矿物比重是指纯矿物的重量与4℃时同体积水的重量之比。由于4℃时水的密度为1克/厘米^3，因此，矿物比重数值与其密度数值恰好相等。矿物密度的测定方法有：比重瓶法、重液悬浮法、流体静力称量法、显微比重法和X-射线测定法等。

A 比重瓶法

是测定密度的经典方法。比重瓶容积一般5～50毫升，大者用于测定选矿产品较为方便适宜。微量比重瓶为2～5毫升不等，应根据样品数量选用。空比重瓶重量P和4℃时比重瓶中水的重量是两个常数，可以预先测得。用玻璃比重瓶时按（3.2.4）式计算，用石英比重瓶时按（3.2.5）式计算：

$$(P_4-P)=\frac{(P_t-P)Q_4}{[1+3\beta(t-t_4)]Q_t} \qquad (3.2.4)$$

$$(P_4-P)=\frac{(P_t-P)Q_4}{Q_t} \qquad (3.2.5)$$

式中 P_4——比重瓶装有4℃水时的重量；

P_t——比重瓶装有t℃水时的重量；

t——测定温度；

t_4——水的密度为最大时的温度，即等于4℃；

Q_t——t℃时水的密度；

Q_4——4℃时水的密度，等于1.0000；

β——玻璃的线膨胀系数，等于0.000025。

将一定粒级的纯矿物，称得其重量m置于瓶内，其数量占比重瓶的1/3。然后向瓶内加水至瓶的2/3，便可煮沸或抽气，最好

地信网论坛
bbs.3s001.com

能在真空条件下引水将瓶装满，称得比重瓶、矿物和水的重量P_{mb}，按下列公式计算即得矿物的密度D。

$$D^t_{/空气}=\frac{m}{P_4+m-P_{mb}} \tag{3.2.6}$$

$$D^t_{4/v}=\frac{m(Q_t-\lambda)}{P_4+m-P_{mb}}+\lambda \tag{3.2.7}$$

$$D^t_{4/v}=\frac{m(Q_t-\lambda)}{P_4+m-P_{mb}+(P_4-P)[3\beta(t-t_4)+Q_t-Q_4]}+\lambda \tag{3.2.8}$$

式中 λ——1cm³空气的重量，等于0.0012g。

公式（3.2.6）未作空气中称样及温度校正，为保证精度，计算所得密度应取二位小数。为获得不受测定温度影响的矿物密度，则按公式（3.2.7）、（3.2.8）计算，其结果可取三位小数。本法测定精度高，但样品需要量大，手续繁琐，计算复杂。

B 液体介质称量法

根据矿物在液体中重量损失的静水力学称重法是常用和较简单的方法。如果已知液体的密度D_L，分别称出矿物在空气中和在液体中的重量m和m_L，矿物密度按下式计算：

$$D=\frac{m}{m-m_L}\cdot D_L \tag{3.2.9}$$

$$D^t_{4/v}=\frac{m(Q_t-\lambda)}{m-m_L}\cdot D_L+\lambda \tag{3.2.10}$$

测定密度时，矿物可以是纯净碎块，或是同一粒级的粉末状颗粒。当用有机液体并用抽气方法测定时，矿物的适宜粒度为0.1毫米最好。所用的液体应选用浸湿力强的有机液体，如酒精、煤油、甲苯、二甲苯、四氯化碳等。液体密度愈大，矿物称重愈大或矿物密度愈小时，测定的误差愈小。矿物粒度愈粗，越易被液体所浸湿，因而测定值也更可靠。本法操作简便，精度与比重瓶法相近，适于测定比重大于4，与有机液体不起反应的矿物。

C 重液悬浮法

地信网论坛
bbs.3s001.com

本法是利用密度不同的重液与矿物相比较，间接测定矿物密度的一种方法。当矿物在重液中呈悬浮状态时，则二者的密度相等，然后称量该重液的密度，即得矿物的密度。为使投入的矿物处于悬浮状态，可在重液中加进另一种密度大或小的液体，或者采用升高或降低液体的温度的方法来改变密度。一般来说有机液体的密度极为明显地随其温度的改变而变化，当降温时液体冷却而密度增高。另一方面，对于某些液体或水溶液，随温度的增高，盐在水中的溶解度要增加，此时密度便比冷却时要大。常用重液的特性可参阅表3.2.3。

方法的精度，如果重液密度的精度为±0.0001时，则求得矿物的密度具有±0.002～0.003的精度。重液密度的测定通常以20℃的水在有刻度的量杯或量瓶中求得与水相比的密度，即$D^t_{20/空气}$，在空气中称重未加校正。为求得在4℃时水的密度，即$D^t_{4/空气}$需要水在t℃时的密度时，再乘以Q_t在t°C时水的密度，例如：$D^t_{4/空气}=D^t_{15/空气}\cdot Q_{15}$。

如果与4℃的水相比，同时考虑温度与空气中称重校正的密度，可按下式计算：

$$D^t_{4/v}=D^t_{4/空气}\left(1-\frac{\lambda}{Q_t}\right)+\lambda \qquad (3.2.11)$$

$$D^t_{4/v}=D^t_{4/空气}(Q_t-\lambda)+\lambda \qquad (3.2.12)$$

此法设备简单，测定迅速，但受重液本身密度的限制，对于密度大于4.3的矿物无法测定。此外，对于裂隙多的、易分裂成薄片的矿物以及能与其起化学反应的矿物均不适宜。对于矿物颗粒较粗的，在测定中容易达到平衡状态，但对较细的矿物颗粒（0.5毫米以下）易为液体内部运动所引动，不能很快达到平衡。

D 显微比重法

本法是测定微量矿物的方法，将矿物颗粒投入盛有液体介质的玻璃管内，利用带有测微尺的显微镜，测得矿物投入后液面上升的高度，根据玻璃管的内径，即可求出液体增加的体积，即矿物的体积。然后按密度公式计算出矿物的密度。此法精度较差，

地信网论坛
bbs.3s001.com

但设备简单，操作迅速，对少量样品甚至一个矿物颗粒也能进行测定。

E X-射线计算法

根据矿物单位晶胞体积V，其中的分子数Z和分子量M计算矿物密度的方法。计算公式为：

$$D=\frac{ZM}{NV} \tag{3.2.13}$$

式中 N——阿弗加德罗常数。

当晶胞参数以Å作单位时，$1/N=1.6602$；当晶胞参数以KX作单位时，$1/N=1.6502$。这对重矿物来说，差别表现在小数点后第二位数值。晶体的单位晶胞体积按下列公式计算：

$$V=a_0b_0c_0\sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta-\cos^2\gamma+2\cos\alpha\cdot\cos\beta\cdot\cos\gamma} \tag{3.2.14}$$

式中 $a_0b_0c_0$——基本晶胞棱的长短；

α，β，γ——轴角。

这是一般的公式，适用于三斜晶系矿物，对于其他晶系的矿物，就转变为下列特殊公式：

等轴晶系 $V=a_0^3$ (3.2.15)

四方晶系 $V=a_0^2c_0$ (3.2.16)

六方晶系 $V=\frac{\sqrt{3}}{2}a_0^2c_0$ (3.2.17)

三方晶系 $V=a_0^3\sqrt{1-3\cos^2\alpha+2\cos^3\alpha}$ (3.2.18)

斜方晶系 $V=a_0b_0c_0$ (3.2.19)

单斜晶系 $V=a_0b_0c_0\sin\beta$ (3.2.20)

此法适用于计算成分简单而固定的矿物密度，常作为理论计算值与实测值对比，相互验证。方法的精度：晶胞大小的计算一般满足±0.1%，得到的精度为±0.4%。

3.2.2.2 矿物的硬度测定

矿物的硬度是指矿物抵抗外力的机械作用的强度，以其外来

地信网论坛
bbs.3s001.com

作用力的大小来度量的物理量。在矿物鉴定中常用压入硬度，一般称显微硬度。表示矿物显微硬度值常用维氏硬度，它是在金刚石为正方形锥体，相对面间夹角$\alpha=136°$的显微硬度计上测量的，压入硬度值是以压痕中单位面积所承受的重量表示，单位为公斤/毫米^2。按下式计算矿物的硬度：

$$H_V=2\left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)\cdot\frac{P}{d^2}=1.8544\frac{P}{d^2} \qquad (3.2.21)$$

式中　H_V——维氏硬度；

P——施于金刚石角锥体上的荷重，kg；

d——压痕对角线的长度，mm。

莫氏硬度是一种相对硬度，逐级之间硬度增高的幅度是极不规则的。由于不同方法作用的物理过程不同，因而所测得的硬度值，彼此间是不相对应的，表3.2.7对比列出不同方法测定10种标准矿物硬度值。

表 3.2.7　用不同方法测定的10种标准矿物的硬度

矿　物	莫氏硬度 H_M	由测硬计测定的刻划硬度（以刚玉为1000）	维氏压入硬度 H_V，kg/mm^{2}①	罗氏相对研磨硬度（以石英为100）
滑　石	1	2.3	2	0.03
石　膏	2	9.5	35	1.04
方解石	3	22.5	172	3.75
萤　石	4	25.5	248	4.17
磷灰石	5	35.5	610	5.42
正长石	6	108	930	31.0
α-石英	7	300	1120	100
黄　晶	8	450	1250	146
刚　玉	9	1000	2100	833
金刚石	10	—	~10000	117000

① 以产生的凹痕之对角线长等于10μ的压陷量为标准。

显微硬度计的种类型号较多，一般作为显微镜的附件（参见表3.2.8）。近期国外生产的MPV3型自动显微硬度计，是由金刚石压锥器、负荷传感器和测微目镜组成的，可以自动加压，硬度

地信网论坛
bbs.3s001.com

值可通过电子数字显示。这种仪器消除了人为的误差因素，测得结果精度较高。

矿物硬度不是一个常数，是与测量条件、矿物成分、晶体构造以及矿物产出形式因素有关。

3.2.2.3 矿物的磁性测定

矿石的磁性分析主要包括矿物的磁化系数测定与磁性分析两部分。矿物的磁性常用比磁化系数来表征。

A 比较测定法

本法是利用已知磁化系数的标准试样与被测试样相比较的方法，一般用来测定弱磁性矿物的比磁化系数，通常采用焦磷酸锰作为标准样品，其比磁化系数$\chi_1=117\times10^{-6}$厘米^3/克，也可用其他稳定的化合物作标准试样。在预先已知的磁场强度条件下，测出标准试样所受的比磁力（F_{m_1}）和被测试样所受的比磁力（F_{m_2}），即可求得被测试样的比磁化系数（χ_2）：

$$\chi_2=\chi_1\frac{F_{m_2}}{F_{m_1}} \tag{3.2.22}$$

测量装置简单，将试样制成粉末状，放入直径约为1厘米的非磁性球形容器中。用非磁性材料制成的线，将装有试样的小球吊在天秤盘上使之平衡，然后在电磁铁内通入需要的电流，测出试样所受磁力的大小，代入上式算出试样的比磁化系数。

此法是对粉状物料测量的一种常用方法，由于其磁系能在两极整个空间内产生相同的磁力，是一种等磁力天平，因而容易精确测定。为提高测量精度，要求天平和电器仪表精度高些，场强也应适当提高，并反复测量3～4次取其平均值。

B 振动样品磁强计

利用样品在均匀磁场中振动，而使检测线圈中感生电压来精密测量矿物磁矩的一种方法。用这种仪器测量矿物的磁性参数包括磁导率、比磁化强度、比磁化系数、磁化曲线、磁滞回线、极限磁滞回线、饱和磁感应强度以及退磁曲线、剩余磁感应强度、矫顽力、内禀矫顽力等，其定标简单，稳定性良好，误差极小，

地信网论坛
bbs.3s001.com

并可用于低温技术测量，低至液氦温度下的磁矩，且可研究矿物的铁磁性、顺磁性、抗磁性和超导性等性能参数。

日本VSM-3型振动样品磁强计，测量范围为0.05～50emu，灵敏度1×10^{-4}emu，准确度为1%，温度77°K～900℃。吉林大学研制的微振动样品磁强计，其分辨率达到2×10^{-6}emu。

C 多用磁性分析仪

北京地质仪器厂生产的WCF$_2$—65型多用磁性分析仪，常用于分离矿物，同时也可以测定矿物的比磁化系数。这种仪器作比磁化系数测量受到一定的限制。如磁场强度不能从很低的场强测起，开始第一档0.1A时的场强是71619.6A/m左右，因此，不可能获得与外磁场强度呈函数关系的某些矿物的完整磁化曲线。此外，还受到测定范围的限制，对比磁化系数较大的矿物不能测定。

另外还有一种测定矿物磁性的古依法，也可称磁天平法。用它可直接测量粉状矿物的比磁化系数。

3.2.2.4 矿物的电性测定

矿物导电性能常以测量矿物电阻率的倒数表示其导电率，或以电阻率直接表示。对于矿物颗粒粗大的（>5毫米），可在直流条件下，采用指示仪表测量，如用细针探头的万用表和欧姆表可直接测量。精确测量可采用电桥。电位差计和数字欧姆表，电阻数值范围约从10^{-8}～10^{17}欧姆，甚至更宽些。此法的优点测量速度快，多点测量数据准确。但天然矿物粗晶很少，一般难于用此法测定。

A 直流四探针法

本法主要用于测量样品各点的电阻率，得到电阻率分布，测量误差一般<10%，其关系式为：

$$\rho \approx 2\pi s\frac{V_{2,3}}{I} \qquad (3.2.23)$$

式中 ρ——样品电阻率，Ω·m；

s——探针间距，cm；

I——由1，4探针流入样品的电流，mA。

地信网论坛
bbs.3s001.com

$V_{2,3}$——由2，3探针测得的电位差，mV。

主要测量仪器和测量线路图如图3.2.1所示。本线路的特征是

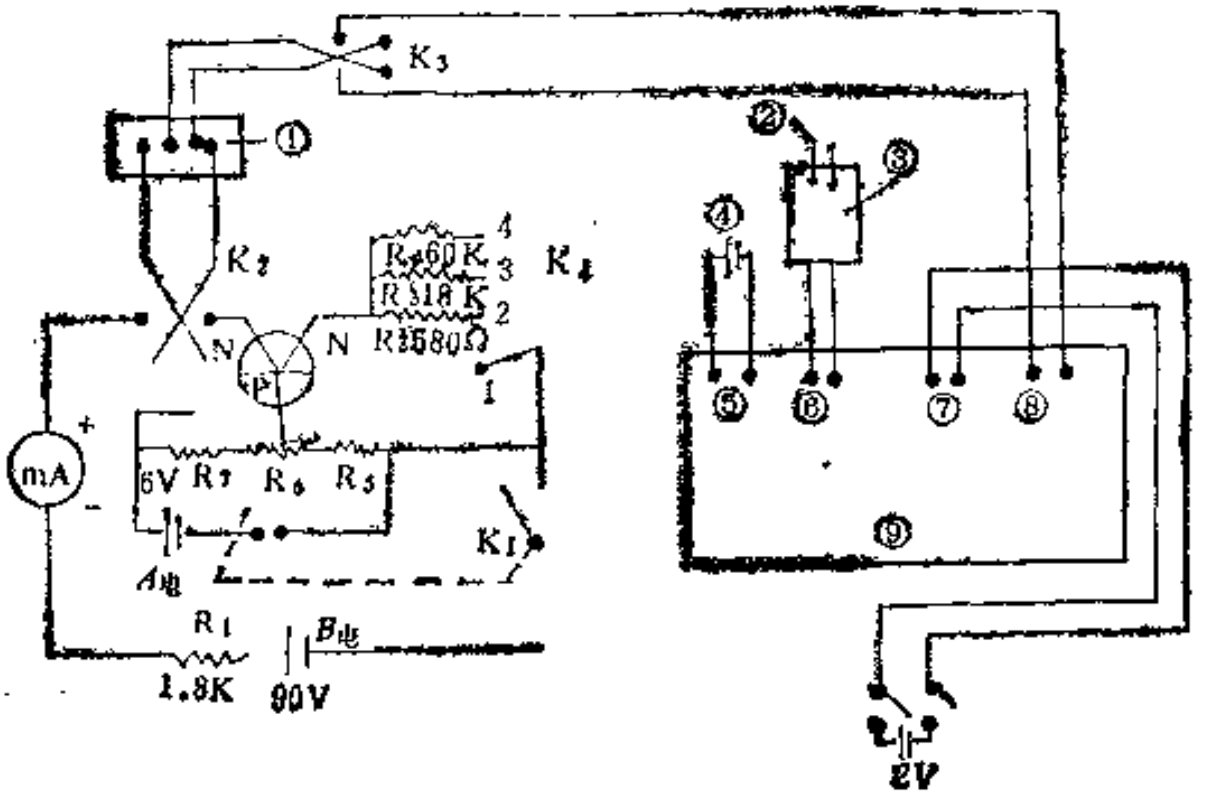


图 3.2.1 四探针法测量线路图

①—样品；②—光点检流计；③—分流箱；
④⑤—标准电池；⑥—检流计；⑦—电池；⑧—
未知；⑨—电位差计

其发射极线路中在集电极回路，输出阻抗极大。调节NPN管的基极偏流电阻和发射极电阻就可使其集电极电流变化。可通过调节：发射极电阻R_2、R_3、R_4(粗调)，基极电阻R_6（中调）和基极电阻R_7（细调），达到集电极固定在某一位置的目的。一旦上述粗、中、细调节停止时，集电极电流基本上不随探针1～4之间的样品电阻变化。K_1为两个连在一起的开关，K_2、K_3为换向开关。注意需放在同一个方向，K_4为调电流粗调开关。

测量样品时必须满足以下测试条件：

（1）样品必须纯净，压实为柱体，需用标样校正孔隙率的电阻值。

（2）测量样品的厚度必须大于三倍针距。探针头中任一探针距样品边缘的最近距离不得小于三倍针距。

地信网论坛
bbs.3s001.com

（3）测量区域的电阻率应是均匀的，为此，针距不宜过大，一般采用0.5毫米左右为宜，可用显微镜测距。

（4）四根探针应处于同一平面的同一条直线上，为此，样品表面应平整。

（5）四探针与试样应有良好接触，为此，探针应当细、尖，与样品的接触点是半球形，且接触半径远远小于针距，针头应有一定压力，一般2公斤较适宜。

（6）电流通过样品，不应引起样品的电导变化，即$E<1$伏/厘米。

（7）电流在测量时保持恒定。电阻率测量主要是通过2，3探针间的电位差进行，因此$V_{2,3}$要测量精确，所以规定使用电位差计或高输入阻抗的电子仪表。

此法由于设备简单，操作方便，精度高，故可测量不规则形状的晶体。对于颗粒细小的矿物必须预先提纯，并用压结机压实成圆柱体或方形的块体，便可进行电阻率的测量。

B 高压圆盘法

本装置是武汉安全技术研究所研制成功的一种测定粉尘比电阻的方法，可测常温和变温条件下矿粉的比电阻，并可作出矿粉温度与比电阻的关系曲线。装置分为供电和测试两部分，供电电源采用可调高压电子管桥式全波整流，最高电压60千伏，最大电流20毫安，测试仪表采用高压静电电压表，从零到30千伏一套，以及10^{-10}安/分度检流计一套。测定温度由热电偶毫伏计自动调节，最高温度可达320℃。样品盘置于烘箱内的绝缘架上，高压电通过吊盘传至圆盘。测定时圆盘电极的电压线和镍铬丝的感应电压线以及主电极的电流线由穿过烘箱的绝缘管分别引至静电电压表及检流计上，即获得读数。其计算公式：

$$\rho=\frac{V}{I}\cdot\frac{F}{H} \tag{3.2.24}$$

式中 ρ——矿粉比电阻，Ω·cm；

V——测定电压，kV；

地信网论坛
bbs.3s001.com

I——通过矿粉层的电流，μA；

F——主电极面积，cm^2；

H——矿粉厚度，cm。

测量的样品必须纯净，粒度应小于20微米，其数量要求5～10克，根据矿物的密度而定。此法测定矿物比电阻误差较大。其影响因素是样品的湿度、矿物纯度、矿物的击穿电压，特别是不同粒级的矿物颗粒间形成空隙度越小，比电阻越接近实际。如果把粒径由20微米改成5微米，可使其比电阻增高三个数量级。粉层过于疏松，空隙度变大，则比电阻加大。所以在测量之前，需要进行条件试验，以确定不同粒级不同矿物比电阻的测量修正系数。

C 冷热探针法

对于半导体矿物的导电类型测定方法主要有三种：冷热探针法、点接触整流法和叠加法，其中以冷热探针法最简便。

本法是根据矿物温差电效应进行测量的，因为半导体矿物内自由载流子的能量和运动速度是随温度的升高而增大的，由于温度不同热激发的效应也不同。因此，矿物晶体内冷热两点之间就造成了自由载流子的浓度差，这样在两点间就出现了电位差。如果外电路是闭合的，那么外电路就有电流通过，根据矿物内部导电结构不同，它们所带电性不同，则外电路的电流方向不同，就可判定样品的导电类型。

总之，根据对大量不透明矿物的导电率或电阻率的实测表明，矿物导电率并不是一个常数。而是有很大的变化范围。例如，某些磁铁矿的导电率比同一部位的磁铁矿高695倍；赤铁矿导电率的变化至少达7500倍。测定者发现同一矿物的不同标本所测数据一致的情况很少。此外，测量中对接触电阻要注意，如不消除则内部电阻将会偏高，影响结果的精度。

3.2.2.5 矿物的发光性研究法

矿物的发光性是指矿物在外来能量的激发下，发出可见光的性质。能够激发矿物发光的因素是多种多样的。加热、摩擦、阴极射线、紫外线、X-射线的照射，都能使某些矿物发出一定颜

地信网论坛
bbs.3s001.com

色的可见光。

我国研制生产的携带式紫外光灯已被广泛地应用，可随便带入矿井或坑道进行矿物鉴定，如用紫外光灯照射白钨矿时，则发出鲜明的浅蓝色荧光；硅锌矿发出鲜绿色磷光。

3.2.3 光学显微镜法

光学显微镜是有力的研究手段，它是利用直线偏光或矿物表面对光线的反射来研究矿物的光学特征，实现鉴定矿物的目的。

3.2.3.1 实体显微镜鉴定法

一般是在双目镜下对矿物各种物理性质的详细观察，如矿物的晶形、颜色、光泽、解理、裂开、断口、透明度、颗粒表面性质、包裹体以及连生体等，从而进行矿物鉴定和定量研究。此法适用于重砂矿物鉴定、选矿产品检查以及提纯矿物等。但由于其放大倍率较低，最大倍率120～140倍。因而对于颗粒微细的矿物鉴定受到一定的限制。

3.2.3.2 透射偏光显微镜鉴定法

此法是运用晶体光学原理和方法，将矿物岩石磨制成厚度为0.03毫米的薄片，在偏光显微镜下，观察可见光通过矿物晶体所发生的折射、反射、干涉等现象，测定其折射率、双折射率、消光角等系列光性常数，从而进行鉴定矿物。晶体光学法是一种成熟的方法，并有完整的光性数据可供查阅。因而此法在研究矿石中的透明矿物应用最多。

油浸法是在偏光显微镜下，用已知折光率的液体成熔体与未知折光率的透明矿物相比较，来测定矿物折光率的方法。透明矿物和液体材料的折光率均随光波波长及温度的改变而变化，而液体的变化比固体要大。因此，在油浸法中有“单变”和“双变”油浸法以及波长和温度为常数的“常规油浸法”。此法适用于选矿产品鉴定和研究，因为它可以对直接置于镜下的碎屑产品，用更换浸油的方法，迅速而准确地鉴定产品中的透明矿物。

3.2.3.3 反射偏光显微镜鉴定法

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.8 各偏显微镜的型号、规格及主要技术数据

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
偏光显微镜	XPT-7	放大倍数：20×～630× 十字分划目镜：5×10× 消色差物镜：4×10×25×40×63×（后两种为弹簧镜头） 旋转工作台直径：130mm游标刻度值：6′	适用于观察透明薄片。利用偏光特性，对晶体、矿物等双折射物质进行鉴定和分析	950	南京江南光学仪器厂	选购件： 1．透射光源 2．摄影装置
	PS	放大倍数：20×～1000× 目镜：（无应力）5×10× 物镜：（无应力）4×10×40×100× 载物台：度盘刻度0～360°游标读数值：6′		1400	上海光学仪器厂	
	XP1	放大倍数：25×～1000× 目镜：10× 物镜：2.5×4×10×25×40×63×100× 工作台旋转范围：360 游标读数分度值：6′ 检偏振镜旋转范围：180° 检偏振镜读数分度值：0.2° 微动调焦范围：≥2mm 微动刻度分划值：0.002mm	用于岩石的薄片检定，利用偏振光的特性，研究均匀介质的强弱和各种差异，配以适当的附件，也可进行明、暗视场，荧光，相衬的观察和显微摄影	3950	新天精密光学仪器公司	选购件： 1．摄影装置 2．63×25×2.5×物镜 3．移动尺0.01刻尺 4．网格平场目镜

地信网论坛
bbs.3s001.com
318

续表 3.2.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
偏光显微镜	XP1A	放大倍数：31.25～1250× 目镜：12.5× 物镜：4× 10× 40× 100× 工作台旋转范围：360° 游标读数分度值：6′ 微动调焦范围：全行程	用于岩石薄片检定，利用偏振光的特性，研究均匀介质的强弱和各种差异，配以适当附件，也可进行明、暗视场、荧光、相衬的观察，显微观察和显微摄影	5600	新天精密光学仪器公司	
矿相显微镜	XPK-6	放大倍数：20×～630× 十字分划目镜：5× 10× 平场消色差物镜：4× 10× 25× 40× 63× 起偏振镜和检偏振镜均为人造偏振片 旋转载物台直径：130mm 刻度360° 游标读数值6′	供地质、科研、高中等学校作分析鉴定不透明矿物和教学示范用	2600	南京江南光学仪器厂	
大型万能照相显微镜	PANPHOT-POL	放大倍数，21×～1050× 透光下用的： 消色差物镜 P3.5/0.10 P10/0.25 P50/0.85 P100/1.30（油浸） 目镜 P8× P6× P8×（成对的）	偏反两用，带照相装置，适合于科研及大型实验室用		西德徕资厂	附件：显微光度计

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
大型万能照相显微镜	PANPHOT-POL	反光下用的： 消色差物镜 P5.6/0.15 油浸物镜 P12.5/0.25 萤石物镜 PF1 45/0.85 萤石油浸物镜 PF1 oil 105/1.32 目镜 P10×				
万能科研偏光显微镜	ORTHOLUX-POL	放大倍数21×～1050× 透光下用的： 消色差物镜 P3.5/0.10 P10/0.25 P50/0.85 P100/1.30（油浸） 目镜 P8× P6× P8×（成对的） 反光用的： 消色差物镜 P5.6/0.15 油浸物镜 P12.5/0.25 萤石物镜 PFL45/0.85 萤石油浸物镜 PFL oil 105/1.32 目镜 P10×	适于反光及透光下工作，可用于岩石、矿石的研究		西德徕资厂	附件： 照相装置 显微光度计
大型偏光显微镜	DIALUX-POL	放大倍数，21×～800× 消色差物镜 P3.5/0.10 P10/0.25 P50/0.85 P100/1.32（油浸） 目镜 P8× P6×	带照明系统，适合于偏反两用		西德徕资	附件： 照相装置

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价/元	生产厂	备　注
反光显微镜光度计	MPV2	放大倍数，32×～1000× 物镜 5×/0.09 10×/0.20 20×/0.40 50×/0.85 50×/0.85（油浸）100×/0.90 萤石物镜 6.3/0.20 16/0.45 25/0.55 40/0.65 100/1.32（油浸） 目镜10×M，6.3×（成对的）	偏反两用，适合于大型实验室用可测定显微硬度，精密测量反射率		西德徕资厂	附件： 自动显微硬度计 自动计数反射率测定 荧光光度计，照相装置
偏光显微镜	ZETOPAN-POL	放大倍数18×～790× 偏光用的： 消色差物镜 4/0.08 10/0.25 40/0.65 63/0.75 平面目镜 5× 12.5× 反光用的： 消色差物镜 3.5/0.15 11/0.25 32/0.65	适合于岩矿实验室及科研单位，偏反两用		奥地利Reichert Wien	附件： 照相装置
偏光显微镜	EPILUX-POL	放大倍数，34×～1060× 消色差物镜 P5.6/0.15 P12.5/0.25 荧石物镜 PFL 45/0.85 PFL oil 60/0.95（油浸） PFL oil 105/1.32（油浸） 目镜 8× 6× 10×	偏反两用，适用于矿石，煤岩的研究		西德徕资厂	附件： 显微光度计

续表 3.2.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
照相显微镜	OPTON	放大倍数，20×～1250× 消色差物镜 6.3～16～40～100× 目镜 8×～12.5× 平面消色差物镜 2.5POL Z	偏反两用，岩石及矿石研究用，并有投影仪屏		西德蔡斯厂	附件：照相机
大型万能科研显微镜	NU	放大倍数，40×～1250× 平面消色差物镜 ×4/0.10 ×10/0.20 ×25/0.50 ×63/0.80 ×100/1.30 目镜 PK×12.5 PK×10	供岩矿研究人员用，偏反两用，可以测量硬度，可以应用荧光法		东德蔡司耶拿	附件：显微硬度计照相装置
偏光显微镜	POIMI A	放大倍数25×～2500× 平面消色差物镜 2.5/0.07 6.3/0.16 16/0.32 40/0.65 补偿目镜 PK10× PK16× 透光用的： 平面消色差物镜 10/0.25 100/1.25 反光用的： 平面消色差物镜 4× 10× 25× 65× 100× 目镜 PK25×	偏反两用，适合于岩石矿石研究		东德蔡司耶拿	附件：

地信网论坛 bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.4.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
偏光显微镜	M720000	放大倍数，12×～1000× 无应变物镜 3× 5× 10× 20× 40× 100×（油浸） 目镜 4× 7× 10×	偏反两用，可用于矿石及岩石鉴定研究，适合于一般的实验室用		英国徕茨仪器有限公司	
偏光显微镜	EPM57 EP57	放大倍数，15×～1300× 物镜 2.5× 4× 7× 10× 15× 25× 40× 60× 105×（油浸） 目镜 8× 10× 13× 6× 11×	一般的岩石偏光显微镜，适合于实验室及教学用		法国Nachet	
科研偏光显微镜	M7110Q M7021P	放大倍数，35×～950× 物镜 5× 20× 40× 95× 目镜 7× 10×	岩石鉴定用，适合于实验室用		英国Cooke	
偏光显微镜	МИН—8	放大倍数，20×～1200× 消色差物镜 OM27 OM14 M—101 OM3 OM21 目镜 AM-5 АИ-3 AM-33	一般的岩石薄片鉴定用		苏　联	
偏光显微镜	SPM—1	放大倍数，20×～600× 物镜 4× 10× 40× 60× 目镜 5× 8× 10×	适合一般实验室及教学用		日本岛津	

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.8

产品名称	型　号	规格和主要技术数据	主要用途和使用要求	参考价元	生产厂	备　注
矿相显微镜	МИН—9	放大倍数，26×～1250× 物镜 OM—38 OM—8 OM—44 OM—9 OM—10 OM—12M OM—13 目镜 AM—11M AM—10 AT—36 AM—27	一般实验室用的矿石显微镜		苏　联	
矿相显微镜	M7105	放大倍数， 消色差物镜 5× 10× 20× 40× 95× 目镜 7× 10×	适合于实验室、工厂鉴定矿石用		英国Cooke	
大型矿相显微镜	T46	放大倍数， 物镜 3× 4.5× 6× 8× 13× 19× 28× 50× 50×（无应变）70× 120× ALP 12× ALP28× 目镜 6× 8× 14×	一般矿石鉴定用		法国Nachet	
矿相显微镜	ORTHOPL-AN POL-BK	放大倍数，30×～1250× 消色差物镜 P5×/0.09 P10×/0.20 P20×/0.40 P50×/0.85 P100×/0.90 P20×/0.40（油浸）P32×/0.65（油浸）P50×/0.85（油浸）P125×/1.30(油浸) 目镜 P6.3× P8× 10× 6.3× GF10× GF10×	偏反两用适合于科研、教学的大型实验室用		西德徕资厂	附件： 自动硬度计 自动测微光度计 自动照相机 自动图象分析仪

地信网论坛
bbs.3s001.com

此法是用来观察、研究不透明矿物的一种光学仪器，称之为反光显微镜或矿相显微镜。新型显微镜不仅可以偏、反光两用，并附有很多供定量测定用的附件，除能对矿物进行定性、定量及显微形貌分析外，还可通过光薄片使透射、反射、明场和暗场等在同一视域中的同一部位显示，为对比分析和精细鉴定提供了条件。此外，还可在矿物光片表面上进行单色光自动计数的反射率测定，自动显微硬度测定，磁、电物理性能的测试等，为全面研究矿物特性提供信息。

反射偏光显微镜与偏光显微镜类似，其最大区别是具有垂直照明器，光源通过照明器内的反射器，使光线反射到矿石光片表面上，再从光片表面反射到目镜，就可对不透明矿物观察与鉴定。

根据光在矿物光面上反射时所产生的现象，观察和测定其反射力、反射色、内反射、偏光图以及化学试剂的浸蚀反应等来鉴定矿物。近来对不透明矿物的反射光研究，已开始向精密化及定量方向发展。如反射率的精密测量、反射率色散曲线的测制等。国内外生产的显微镜型号很多，现将常用的列于表3.2.8。

3.2.4 化学成分分析

化学分析是确定物质化学成分的方法。它可分为定性分析和定量分析，如果根据被分析物质成分数量，则可分为常量分析、半微量分析（10～100毫克）、微量分析（1～10毫克）和超微量分析（<1毫克）。定量分析中根据所用方法的性质，还可分为容量分析和重量分析。对某些元素为提高分析结果的精度和速度，已广泛应用仪器分析法。

3.2.4.1 简易分析法

A 粉末研磨法

用以鉴定矿物化学成分较迅速的方法。将矿物细粒和固体试剂粉末混在一起，使之在研磨作用下发生固相反应，从而生成有色化合物，以鉴定矿物中所含的化学元素。此法一般有两种程

地信网论坛
bbs.3s001.com

序：所鉴定的矿物不必进行处理，直接与固体试剂在瓷皿中研磨，即显示染色反应；另一种是需要预先加以分解处理，然后再研磨以获得染色反应，如矿物粉末与硫酸氢钾一起研磨，使被鉴定元素成为能起反应的硫酸盐。

此法设备简单，固体试剂便于携带，操作方便，反应灵敏，所需时间短。因而更适合于野外应用。

B 斑点试验法

测定矿物化学成分的微量分析方法，又称点滴分析。此法主要是将微量矿物粉末溶于溶剂，如水或酸中，使元素在溶液中呈离子状态，然后再滴加微量试剂于溶液中，根据反应的颜色来确定元素的种类。这种试验法可以在白瓷板上、表皿、表面玻璃或滤纸上进行。

由于操作简单快速，灵敏度较高，并能测定矿物中所含微量元素，因而野外、室内均可应用。

C 染色法

本法是鉴定矿物的一种简单而迅速的化学方法。通常先用酸浸蚀，使矿物表面活化，然后用选定的化学试剂与其反应，使矿物染成各种特征的颜色，从而达到鉴定的目的。此法对于外表特征或光性极其相似不易区分的矿物，如碳酸盐类矿物、粘土矿物、长石等特别有效、例如各种碳酸盐矿物在薄片或磨光面上用茜素红、联苯胺、试镁灵等试剂染色，根据各矿物呈现的颜色便可区分方解石、白云石、文石、菱镁矿及伴生的石膏和硬石膏等。

D 显微化学分析法

将矿物粉末或选矿产品中要鉴别的颗粒放在载物片上用溶剂溶解，然后用玻璃丝拨出一滴溶液于载玻片上的一端，再以一滴或一粒固体试剂与溶液作用，再在显微镜下观察沉淀物的晶形和颜色等特征，从而确定矿物中所含的元素。这种方法在矿相学中均有描述，又称之为“微化分析”。它与点滴分析有相同之处，所不同的是不仅观察化学沉淀物的颜色，并可研究它的形态，因而获得的资料更多，也提高了鉴定的可靠性。

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.4.2 化学分析法

A　容量分析法

将样品制成溶液，滴加已知浓度的标准溶液，直到反应终了为止，根据所用标准溶液的体积，计算出被测组分的含量。容量分析依性质可分为中和法、氧化法和沉淀法。

此法对成分复杂矿石或矿物中的绝大部分元素都能进行分析。但对某些元素的测定精度常受到一定的限制，如含量低或干扰元素较多时，应与其他分析相配合，才能获得可靠的分析数据。

络合滴定法测定钙、镁，手续简便，结果可靠，很快就基本上取代了容量法和重量法。当前，钙、镁、铁、铝、锌、镉、铋、钍等的络合滴定，已成为常规测定方法。

B　重量分析法

将被测定物质通过化学处理，得到成分固定的化合物或单质，称量后计算出被测组分的含量。此法与容量分析类似，能够测定几乎全部自然元素和成分复杂多变的各种组分。

当前，辅之以化学分析的仪器化，正在迅速发展。光度分析法原来主要用于稀有、分散元素以及其他低含量组分的测定。由于此法的仪器不太昂贵，方法较易掌握，灵敏度较好，所以发展极快。同时由于仪器性能的提高，现在不但是痕量分析中的主要手段，而且逐渐及于主要组分与元素，取代了相当部分的重量法和容量法。尤其在样品量较少的单矿物分析中，已成为许多分析流程中的主要手段。

利用化学法分离富集稀土、贵金属等痕量或超痕量元素，然后联用仪器方法测定，均能获得满意的结果。

C　化学物相分析

测定矿石中不同矿物或不同种类的矿物中某元素的含量，是研究矿石中物质组成、元素赋存状态的一种定量分析法。它可以确定试样中某些元素对于矿物成分或矿物类别的依附关系。当已知试样的矿物组成简单时，可根据化学全分析结果计算。但对矿物组成和成分复杂的就不易计算准确。

地信网论坛
bbs.3s001.com

化学物相分析是通过选择不同的溶剂，在相应的条件下，使不同矿物彼此分离，然后分别测定目的元素在各个矿物或各类矿物中的含量的一种方法。一般地说，就是选择性溶解法，即在一定的条件下，选择合适的溶剂，有目的的溶解矿石中某些组分，保留某些组分，并通过对所处理产品进行化学分析，从而确定各种元素存在的矿物形式。

化学物相分析所测得的数据，是矿石中某元素赋存于各类矿物的金属量。要根据此结果计算矿石中某矿物的重量含量，则应将金属量除以该矿物中某元素的实际含量或用矿物的某元素理论含量进行估算。

3.2.4.3 仪器分析法

仪器分析法优点很多，但大部分是间接的方法，要靠化学法或化学法产生的标准进行检查，所以仪器分析和化学分析之间，是互相补充的关系。

发射光谱分析，一般称为光谱分析，由于发射光谱一次摄谱可同时给出多元素的信息，在使用中已成为金属量测定、多元素半定量分析的有力手段，是普及面很广的技术方法。它是根据组成物质的原子受激发后直接发出的可见光谱，以确定其化学成分。按其目的和方法的不同可分为：光谱定性和半定量分析和光谱定量分析。

光谱分析的仪器很多，其中用光栅作色散系统的光栅分光计，分辨本领很高，几乎对所有的元素都能进行测定。近来又研制生产电感耦合等离子体光源、光电直读式谱仪、激光显微光谱等。由于光谱分析具有极高的灵敏度和准确度，已被广泛的应用。

3.2.5 矿物微束分析

3.2.5.1 电子探针分析法

X-射线显微分析仪，简称电子探针。它以聚焦电子束激发试样表面内直径为0.n～n微米的特征X-射线，然后根据对X-射线谱的分析可测出微区试样的元素定性定量组成，可测范围是从

地信网论坛
bbs.3s001.com

铍（Be^4）到铀（U^{92}）。这种仪器相对灵敏度较差，一般为0.01～0.05%。但因分析的是微区含量，若以绝对灵敏度计算，则只要有10^{-3}～10^{-14}克元素就能检测出，这样来看，其灵敏度又是相当高的。最常用的几种物理信息有：特征X-射线、二次电子、背散射电子、吸收电子等。通过观察测量这些信息来获得矿物微区的成分、含量及其分布、赋存状态、晶形、颗粒大小、矿物形貌和结构构造等。目前常用的方法有波谱分析法和能谱分析法，近代新型电子探针都有这两种方法。波谱分析法具有良好的光谱分辨本领及峰背比，分辨率高。但不足的是X-射线利用率较低，再者其分析速度较慢，作一次元素的全分析，约半小时左右。能谱分析法灵敏度高，同时可检测多种元素，分析速度快，一般2～3分钟内就能得出原子序数表中钠以上元素的定性和定点定量分析结果，并把全部有用数据储存或记录下来。其缺点是分辨能力远不如波谱法高，故一般对于精确定量和超轻元素的分析还需用波谱分析法。不论上述哪种方法都可在最终显像管上显示出来，也可通过X-Y记录仪和电传打字机记录下来。

电子探针图象的观察：在观察背散射电子图象与吸收电子图象时，元素是按照原子序数的大小呈现反差，原子序数小的元素在背散射电子图象内的成象较暗，而原子序数大的元素较亮。利用这种特点，可大致判断出样品内不同元素或矿物的分布状态。而吸收电子图象的暗区或亮区与背散射电子图象完全相反。

特征X-射线图象，能清晰地显示出某元素在微区的分布情况，常用下列三种方式进行测定：

（1）点分析：将电子束固定在所要分析的点上，然后改变晶体和探测器的相对位置，即可对点内的元素进行定性定量分析。

（2）线分析：将X-射线谱仪固定在所要测定的元素位置上，使电子束沿着指定的方向作线扫描运动，即可在荧光屏上，或记录仪上记录某元素在指定直线上的分布状态，即所谓浓度分布曲线。

（3）面扫描：将X-射线谱仪固定在所要测量某元素的微

地信网论坛
bbs.3s001.com

区，使电子束在试样表面上扫描，即可得到元素的面分布，显示白点密集的区域，就是该元素含量最高的区域，改变谱仪的位置就可得到不同元素的面分布。

电子探针的送样要求，一般要导电性好，如为非导体时应进行表面喷涂处理。磨制光片一般直径10～20毫米，应按电探样品座的规格而定，样品表面要抛光、平整。薄片样品应去掉盖玻片，用酒精洗去树胶，然后喷涂碳膜（或金膜）。重砂或选矿产品应在长10毫米、直径8～10毫米左右的铜管（或铝管）用电木粉或其导电的粘结剂镶成光片，所有制成光片的样品应在反光镜下用金刚石笔标出测试位置，以免寻找测试位置浪费时间。样品一定要有代表性，送样时要附上采样情况，矿物共生组合、成因产状以及已做的化学分析和其他测试资料，供研究时参考，并要提出要求解决的问题，以便选择合适的信息与手段。

各种微束分析方法的主要特点列于表3.2.9。

3.2.5.2 透射电子显微镜分析法

电子显微镜包括透射电子显微镜、扫描电子显微镜、发射电子显微镜及反射电子显微镜等。透射电子显微镜简称透射电镜，它是利用高能电子束与试样物质相互作用产生的透射电子束，进行高倍图象观察或用电子衍射花样进行矿物组成、晶体结构分析的仪器。由于其分辨本领高，且具备电子衍射等特点，至今仍是一种应用最广的电镜。

透射电镜的主要型号和性能列于表3.2.10。

透射电镜的送样要求，首先要求样品一定有代表性，粉末样（如粘土矿物）。光片、薄片均可送样。矿片面要平滑，要圈定测试位置，要提出需要解决的问题，如物相鉴定、赋存状态、构造缺陷、位错、组构、表面微细花纹等，并应提供该试样所做的其他测试结果，以供鉴定时参考。此外，还需要介绍该样品的地质情况，如采样位置、矿床成因、矿物共生组合、围岩蚀变、构造等。

在电镜中观察，直接得到的是在荧光屏上由亮暗反差显示的

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.9 各种微区

分析方法	形态观察分辨率	结构分析最小微区	成分分析最小微区（直径）
电子探针	吸收电流图象：1μm	柯塞尔图 数十μm	1μm
离子探针	用光学显微镜		>2μm
扫描电子显微镜（带X-射线能谱仪）	二次电子象：70Å	选区电子通道图：10μm	500～1000Å
分析电子显微镜（带X-射线能谱仪）	透射电子象：最高1～2Å	选区电子衍射：200Å	200Å
分析电子显微镜（带晶体分光谱仪）	透射电子象：数Å	选区电子衍射：数百Å	约1000Å
激光显微发射光谱仪	用光学显微镜		>20μm（3～50μm）
俄歇扫描电子显微镜（俄歇电子谱仪）	二次电子象：100Å		数μm
低能电子衍射仪		低能电子衍射1mm	
光电子谱仪		能	一般为数mm
能量分析电子显微镜	同一般电子显微镜	同一般电子显微镜	100Å
原子探针			一般为数mm，最小为10～100μm

地信网论坛
bbs.3s001.com

分析方法的主要特点

成分分析的主要特点				备注
检测元素范围（原子序数）	检测极限 ppm	是否破坏样品	测量精度，%	
≥4	100～500	否	1～5	测定试区较小，分析精度较好，不破坏样品
全 部	0.1～100	是	大部分不能定量	破坏样品，定量困难，但能作超轻元素分析和同位素测量，检测极限小
11～92	500～1000	否	较差，有些样品可以得到近似定量的结果	能同时作形状，成分及某些结构分析，成分分析精度不如电子探针
11～92	1000～10000	否	较 差	对薄膜和微粒样品可以进行最小微区的形态，成分和结构分析
11～92	>1000	否	能进行定量工作	由于带了分光谱仪，透射电镜的其他性能稍差
金属元素	1～10	是	定性分析为主，部分低于5%的元素可作定量	微区大、精度低、破坏样品，但检测极限较低，分析速度较快
>3 对超轻元素更有效		否	不易作定量分析	可以作表面10Å的分析，但多数仪器的微区仍较大，定量有困难
		否		可以作表面几个原子层的结构分析
>3 对超轻元素更有效		否	定量有一定困难	可以作表面几个原子层的成分分布，但微区较大
轻元素	较差	否	差	在成分分析方面检测范围小，分辨率差，精度差，但分析微区极小
11～92（能谱） 4～92（光谱）	1～100	否	有些样品可以得到近似定量的结果	探测极限小，分析深度小（约100Å），可在真空外测量

地信网论坛
bbs.3s001.com

分析方法	形态观察分辨率	结构分析最小微区	成分分析最小微区（直径）
原子探针			
局部光谱分析（火花源）			直径0.4mm 深5～8μm
火花源探针质谱计			25μm（最小2μm深0.2μm）
分子探针			数μm

图象，或者是有黑白反差的照片。对于电镜图象的分析，必须考虑到所研究试样的特点和制样过程，因为它与制样方法有密切关系。当然，运用矿物学知识并参考其他分析手段获得的结果，更有利于准确理解图象。应用透射电镜可确定微细矿物的颗粒或集合体的大小、形态和分布以及颗粒表面的"净度"等，这些形态学信息对矿物鉴定和选矿都是重要的参数。查明和鉴定已知矿物和分布于矿物中杂质元素的赋存状态、微细分散相和显微、次显微包体相以及它们与主晶的矿物基质的关系和分布特征，并查明矿物分解结构、单体或显微包体的形态，这些结晶化学信息可为选矿制定工艺流程提供依据。应用透射电镜还可查明矿物结构类型，混层矿物或多型变体的形貌；矿物固溶体的分解参数；低序度和高序度矿物的晶畴结构特性；晶格-位错的各种缺陷和相互关系；腐蚀坑的蚀象，断错密度和数量等，可以全面地研究矿物的结构-形态特征。透射电镜在工艺矿物学方面的应用实例：褐铁矿的化学成分一般用$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$表示，但实际成分很复杂，它是多种含水氧化铁矿物集合体的总称，属细分散多矿物集合体。其中包括针铁矿、水针铁矿、纤铁矿、水赤铁矿、蛋白石、粘土等，有时还吸附杂质元素Cu、Pb、Zn、Ni、Co、Mn、

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.9

成分分析的主要特点				备注
检测元素范围（原子序数）	检测极限 ppm	是否破坏样品	测量精度，%	
		是		适于表面分析，是场离子显微镜与质谱计的组合
金属元素	10～100	是	定量精度 ±15～20%	微区较大，现已逐步为激光显微光谱所替代
全 部	100～1000	是		轰击面积较大时，灵敏度为0.03ppm
				资料不详

Au、Ag等，这些矿物颗粒细小，用显微镜难以鉴定，而采用透射电镜较易区别。针铁矿属斜方晶系，晶体呈柱状、针状或束状集合体，纤铁矿呈细小毛发状或不规则弯曲的纤维状集合体。

表 3.2.10 透射电镜的主要型号、规格和性能

型号	放大倍数 倍	分辨本领 Å	加速电压 kV	电子束电流 μA
DXA_{4-10}	300～200000	点分辨 7	25、50、75、100	0～100
DXB_{2-12}	300～800000	晶格分辨 2.04	10、20、60、120	0～100
H^{-}_{600}	1000～600000	晶格分辨 1.44	25、50、75、100、200	0～100

型号	标本铜网直径 mm	生产厂	备注
DXA_{4-10}	3	上海新跃仪表厂	标本照明范围最小直径 <3μm
DXB_{2-12}	3	上海新跃仪表厂	
H^{-}_{600}	3	日本日立制作所	束斑大小 0.5、1、2、3 μm

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.5.3 扫描电子显微镜分析法

扫描电子显微镜，简称扫描电镜。近年在扫描电镜上装上许多专用附件，使其成为同时具有透射电镜、电子探针和电子衍射仪等功能的一种快速、直观、综合的分析仪器。它的特点主要有：分辨本领高，二次电子象分辨本领可达50～70埃，较透射电镜略低；放大倍数变化范围大，且连续可调；图象景深大，富有立体感；试样制备简单；可做综合分析；附有X-射线波谱仪和X-射线能谱仪后，在观察扫描形貌图象的同时，可对试样微区进行元素分析。此外，装上不同类型的试样台和检测器可直接观察处于不同环境（加热、冷却、拉伸等）中的物料显微结构形态及其变化。

扫描电镜的主要型号和性能列于表3.2.11。

表 3.2.11 扫描电镜的主要型号、规格和性能

型 号	分辨率 A	放大倍数 倍～万倍	加速电压 kV	生产厂	备 注
DX-3	100	20～10	5、10、15、20、25、30	中国科学院仪器厂	图象种类：二次电子、背散射电子、吸收电子、透射电子和电子通道图象
ASM-5X	60～100	20～14	1～30	日本	附件：X-射线波谱仪；EDAX型能谱仪，NOVA1200型电子计算机；SILENT700自动记录仪
X-650	60	20～20	1～40	日本日立	附件：X-射线波谱仪；X-射线彩色能谱仪；32K型计算机

扫描电镜的送样要求基本与电子探针相同，但不同的是研究岩石（如粘土岩）及金属的结构，矿物断口的性质、晶体表面的生长纹、双晶纹、解理纹等表面不一定平滑，用扫描电镜二次电子象观察能获得较好的效果。

在工艺矿物学研究中较突出的是用来解决矿石中低含量和微细矿物的元素存在形式以及矿物光性近似、成分复杂的矿物组

地信网论坛
bbs.3s001.com

合；研究类质同象系列矿物的确切成分区域，各种微细矿物间相互嵌布特征；研究矿物晶格缺陷与杂质成分的关系以及晶体结构分析等。

电子探针、透射电镜、扫描电镜三者的主要差别表现在利用信息、主要功能、仪器结构、工作条件等方面。电子探针的主要功能是利用特征X-射线进行微区成分精确定性和定量分析，辅助形貌观察，分析元素范围广。透射电镜的功能主要是利用透射电子进行高分辨率的微细矿物颗粒形貌观察和进行选区电子衍射花样结构分析的仪器。而扫描电镜的主要功能是进行高精度的微形貌观察，辅助点、线、面扫描快速多元素的定性和定量分析，详见表3.2.12。

表 3.2.12 电子探针、透射电镜、扫描电镜的主要差别

仪器名称	电子探针	透射电子显微镜	扫描电镜
主要利用信息	特征X-射线(辅助二次电子吸收电子背散射电子)	透射电子	二次电子(辅助特征X-射线吸收电子及背散射电子)
主要功能	微区成份精确定量及定性分析，辅助形貌观察	形貌观察及选区电子衍射花样结构分析	高分辨率形貌观察，辅助微区多元素快速定性定量分析
分辨率	100～1000Å	1.5～100Å	100Å（二次电子象）
仪器结构	不需要中间镜及投影镜，需要分光晶体，故分辨率低 元素分析范围广 Be^{4}—U^{92}定量精度高	有物镜、中间镜、投影镜三级（或五级）放大故分辨率高	不需要中间镜及投影镜故放大倍数低，亦不需要分光晶体。元素分析范围Na^{11}～U^{92}，精度差，但快速
工作条件	束流大10^{-7}～10^{-8}A，束流直径宽0.1～1μm工作间距要小	束流直径小，工作电压高，工作间距大	束流要小10^{-11}～10^{-12}A束流直径要小，0.05～0.1μm工作间距要大

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.6 矿物谱学分析

3.2.6.1 红外光谱分析法

红外吸收光谱，简称为红外光谱，是一种共振吸收现象，即当光量子照射某一物质时，引起分子中振动能级的跃迁而产生的一种吸收光谱。被吸收的特征频率取决于被照射物质的原子量、键力以及分子中原子分布的几何特点，即取决于物质的化学成分和内部结构。因此，每一种矿物，作为具有确定化学组成和结构特征的同相分子，都有自己的特征吸收谱，包括谱带位置、谱带数目、谱带宽度及谱带强度等。当化学组成和结构特征不同，其特征吸收谱图也就发生了变化。这样就可以根据谱图进行分析鉴定工作。

目前国内外生产的红外光谱仪型号繁多，但一般由红外光

表 3.2.13 矿物中常见基团频率

阴离子团	伸缩振动，cm^{-1}（特征频率区）	弯曲振动，cm^{-1}（指纹区）
xOH^-	3750～2000	1300～400
H_2O	3660～2800	1650～1590
H_3O^+		1800～1680
CO_3,HCO_3	1650～1300	890～700
$(BO_3)_n^{3-}$	1460～1200	800～600
$(BO_4)_n^{5-}$	1100～850	800～600
$(SiO_4)_n$	1250～900	<500
$(SiO_6)_n$	950～600	
SO_4^{2-}	1200～1100	700～600
PO_4^{3-}	1200～900	600～500
VO_4	915～730	
CrO_4	870～700	<500
WO_4、MoO_4	850～740	<500
$(MoO_6)_n$	1000～750	
AsO_4	850～730	<500
(NO_3)	1390～1500	700～900

地信网论坛
bbs.3s001.com

源、单色器、检测器、放大器和记录器等部分组成。常用的红外光谱仪如东德IR—72型棱镜红外光光度计和P—E399B型光栅 红外光光度计等。

红外光谱通常以波数（或波长）为横坐标，以透过百分率或吸收百分率为纵坐标作出红外光谱图，其基本特征为：特征频率（基团频率）和指纹区；吸收峰的数目、形状、强度等。常见矿物中不同含氧盐基团频率如表3.2.13。

根据一些矿物实测积累的资料，绝大部分硫化物的红外吸收

表 3.2.14 某些硫化物的主要吸收谱带

矿 物	伸缩振动,cm^{-1}	变形振动,cm^{-1}
闪锌矿（ZnS）	298	—
方铅矿（PbS）	155	—
辰砂（HgS）	345,283	120
磁黄铁矿（$Fe_{1-x}S$）	360,280	—
辉锑矿（Sb_2S_3）	335,272,240	180,130
雄黄（As_4S_4）	373,368,359	224,210,204
雌黄（As_2S_3）	348,322,304,248	185
辉钼矿（MoS_2）	382,260	180
黄铁矿（FeS_2）	422,349	294
白铁矿（FeS_2）	420,398,355	293,255,180
毒砂（FeAsS）	433,368	275,178

表 3.2.15 某些氧化物的主要吸收谱带

矿 物	特征吸收谱带,cm^{-1}	矿 物	特征吸收谱带,cm^{-1}
赤铁矿(Fe_2O_3)	650、545、474、370、310	铁尖晶石	1170、1090、880
钛铁矿($FeTiO_3$)	530、465	($FeAl_2O_4$)	545、470、410
尖晶石	1020、765、685	磁铁矿	638、570、440
($MgAl_2O_4$)	1080、583、510	($FeFe_2O_4$)	
锌尖晶石	670、557、505	铬铁矿	700、635
($ZnAl_2O_4$)		($FeCr_2O_4$)	600、435
		针铁矿	3095、1105、672
		(FeOOH)	590、470

地信网论坛
bbs.3s001.com

谱带位于0～430cm^{-1}的最低频区内（表3.2.14），而氧化物的吸收谱带则位于400～4000cm^{-1}区间（表3.2.15）。

工艺矿物学研究中应用红外光谱的实例很多，这里列举几种铜、铁硫化物的红外光谱分析结果，如图3.2.2。辉铜矿、斑铜矿、磁黄铁矿的谱线分辨较弱，表明结构中金属键程度很高。硫化物中原子间的价键振动吸收带位置不仅取决于原子的性质，而且与其质量及配位多面体的结合方式有关。433～422至400～395cm^{-1}的吸收峰属于原子间的最强的键，即S—As和S—S（黄铁矿型结构）。360～370cm^{-1}吸收带是Fe—S键的振动所产生的。250～270cm^{-1}吸收带是四次配位的Cu^{+}离子的特征谱线。

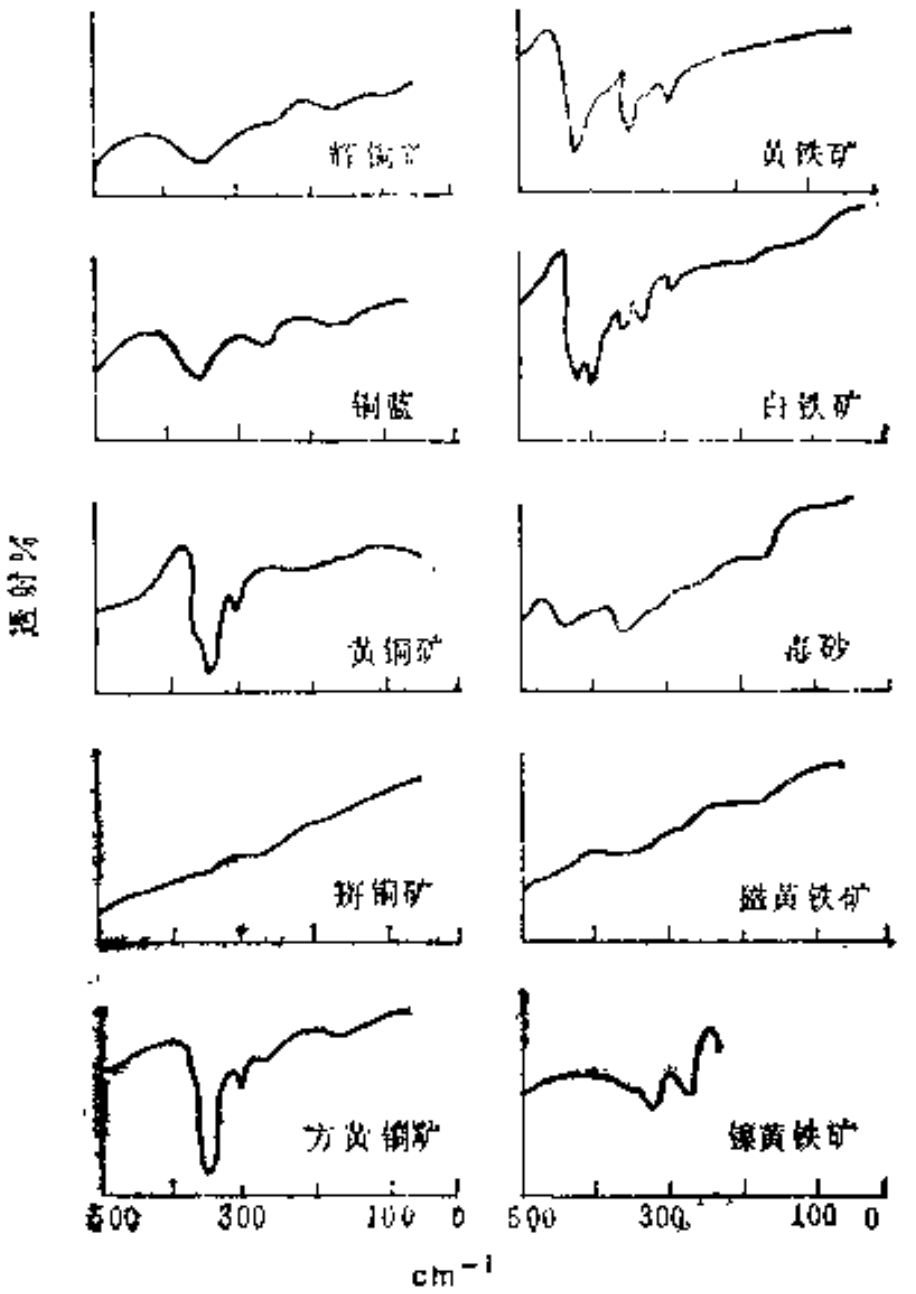


图 3.2.2 铜、铁硫化物的红外光谱图

地信网论坛
bbs.3s001.com

目前，红外光谱已成为研究矿物微观性质的重要手段之一，由定性发展到定量分析，对于研究矿物成分的变化，阳离子置换形成的类质同象系列，矿物内部结构，确定矿物的结晶水或化合水，矿物相变，某些物理参数的测定及非晶质矿物等方面都是较为有效的手段，对粘土矿物的研究具有特效。

3.2.6.2 电子顺磁共振分析法

电子顺磁共振谱学分析法是工艺矿物学研究的强有力的工具之一。电子顺磁共振或称电子自旋共振。常简称顺磁共振。其本质是顺磁离子或具有顺磁状态的电子-空穴心的未偶电子的自旋亚能级间的跃迁。这种跃迁受晶场、核磁矩及外磁场等因素的影响。因此，它可以获得其他方法难以得到的信息：电子密度分布、SP杂化情况、离子—共价键性、价态、配位以及局部对称性。

顺磁共振谱的灵敏度很高，能量分辨率达10^{-6}~10^{-7}每厘米。样品中顺磁离子的含量以0.n~0.00n%最适宜，含量过低，灵敏度不够；过高时，因顺磁离子间的相互作用使谱线变宽而无法分辨。顺磁共振所研究的对象，仅可研究顺磁物质，即有未偶电子的化合物。对矿物学而言就是含顺磁离子及电子-空穴心的矿物。在室温下观察电子自旋共振比较适合的，能给出谱图的离子有：Cr^{3+}、Fe^{3+}、Mn^{2+}、Ni^{2+}、Cu^{2+}、Eu^{2+}、Ga^{2+}等，而其他许多顺磁离子由于自旋—晶格弛豫时间太短，难以观察到其谱图，必须在低温或超低温条件下，如Fe^{2+}的谱图要在液氦温度(4K)下才能获得。另如Ti^{4+}、V^{5+}、Zr^{4+}、Nb^{5+}、Mo^{6+}、Hf^{4+}、Ta^{5+}、W^{6+}、Th^{4+}及U^{6+}等离子就不再是顺磁离子，因为它们的d、f层上的电子已成为价电子。所以，不含杂质的金红石、锆石、白钨矿是没有谱线的。

应用电子顺磁共振谱的研究实例较多，概括起来有以下几个方面：确定阳离子多面体中的离子键—共价键程度；确定元素间的类质同象代换；可区分类质同象代换和微细包裹体；可以确定顺磁离子周围配位场的对称性；研究矿物的标型特征；研究矿物

地信网论坛
bbs.3s001.com

的颜色；研究晶体中的有序—无序，了解其形成的热历史；可以研究有机质中自由基的含量及结构，可对微量元素进行定性、定量分析等。

送样要求可以是单晶，亦可以是粉末多晶，对所研究的样品不需任何处理。若为单晶时，可获得较完整的顺磁共振谱图，单晶的粒度在2～9毫米间为宜，棱角不一定完好；对于多晶混合物所得的信息较少，但仍能获得最重要的参数。本法不破坏样品。

3.2.6.3 核磁共振分析法

核磁共振是原子核在恒定的强磁场中对于一定波长电磁波的共振吸收现象。由于原子核是带电的粒子，它和电子一样也有自旋运动，自旋时产生磁矩，即称为核磁矩。各种原子核由子结构的不同而可能具有不同的磁矩。若将原子核置于恒定的磁场中，则核磁矩可有不同的排列，因而具有不同的能级。如果在垂直于恒定磁场方向上加一个强度小得多的交变磁场，则在适当的交变频率下，原子核将强烈吸收交变磁场的能量而使其磁矩从一个方位转移到另一个方位，即产生核共振。核磁共振谱属于射频波谱范围。最常见的高分辨率核磁共振仪，可用于测定化学位移和自旋偶合常数等物质分子结构的一些重要参数。

在矿物学方面的应用，可用来研究矿物中水的存在类型与行为、原子的结构位置、有序—无序性、化学键状态和探讨矿物的形成条件。如核磁共振研究表明海蓝宝石中水以水分子形式存在于其隧道结构中，它与隧道中Fe^{2+}结合形成水合离子，使海蓝宝石呈蓝色，其中水既使Fe^{2+}在隧道结构中更加稳定，也降低了$Fe^{2+}$$d$电子的轨道能级。

青金石的核磁共振研究表明其结构中存在两种水：羟基(OH)和吸附水，其水的存在也降低了d轨道的能级差，使青金石的颜色鲜艳。

此外，利用核磁共振法还可测定分子中氢原子之间的距离，可弥补电子衍射或X-射线衍射法不易测定氢原子位置的缺陷。

3.2.6.4 穆斯堡尔谱

地信网论坛
bbs.3s001.com

穆斯堡尔效应是一种无反冲能量损失的核γ-射线的共振吸收现象。同种元素的吸收核和辐射核引入固体中，如果两者所处的化学环境有微小差异，则两者之间存在能量差，共振条件受到破坏。但利用多卜勒效应，在实验室装置中使样品以不同的速度相对于放射源运动，这时记录到的γ-光子数就是穆斯堡尔谱。从穆斯堡尔谱图中，可测量三个最主要的参数：同质异能移（化学位移）、四极矩分裂和磁超精细结构。穆斯堡尔谱仪的基本结构，目前国内常用的是电磁推动式等加速度穆斯堡尔谱仪，其结构十分简单，主要由γ-辐射源、吸收体、探测器及高压电源和多道分析器组成。

用于穆斯堡尔分析的送样要求，一般重量为100毫克，穆斯堡尔核（如^{57}Fe、^{119}Sn等）含量高时，样品量可适当减少；样品可以是单晶，也可以是多相粉晶、细分散体、吸附薄膜、赭石类及粘土类矿物；样品粒度可以细到电镜级、X-射线非晶质体及玻璃体；所研究的元素可以是主成分，也可以是含量为万分之几的杂质。

穆斯堡尔谱在矿物学方面的应用，主要用来研究矿物中的铁和锡，如铁的存在形式、价态、占位及其对称性、自旋态、化学键性质、不同价态的铁（Fe^{2+}和Fe^{3+}）在不同结构位置上的分配、有序—无序程度，由此推断矿床的形成条件和确定矿物的工艺特性。

例如，镁—钠闪石石棉的化学式为$Na_2(Mg、Fe^{2+})Fe^{3+}Si_8O_{22}(OH)_2$，其晶体结构如图3.2.3，其穆斯堡尔谱如图3.2.4。表明其中的铁有两种价态Fe^{2+}和Fe^{3+}。参考X-射线结构分析和晶体化学知识，根据穆斯堡尔参数与配位态的关系，可将某一组谱线归属于某一晶位，就可以确定不同价态的铁在不同晶位上的分布状态。从化学位移可知：AA'、BB'两对双峰是Fe^{2+}形成的；而DD'双峰为Fe^{3+}形成的。又知：图3.2.3中有四种空隙，其大小顺次为A，M_4，M_3，M_2及M_1；同时，晶体化学表明：Fe^{3+}优先占据M_2晶位，Fe^{2+}富集在M_1及M_3晶位上，空隙较大

地信网论坛
bbs.3s001.com

的晶位由其他阳离子占据。因此，图3.2.4中DD'双峰是由M_2晶位上的Fe^{3+}形成的，AA'和BB'双峰是M_1和M_3晶位上Fe^{2+}形成的。因为，两者面积比$A_{AA'}:B_{BB'}\approx2:1$，即为$M_1$与$M_2$位置数之比；又知$Fe^{2+}$的四极矩分裂随配位八面体对称程度的增加而减少，因而估计M_3比M_1的对称程度高。可见，上述指派是正确的。

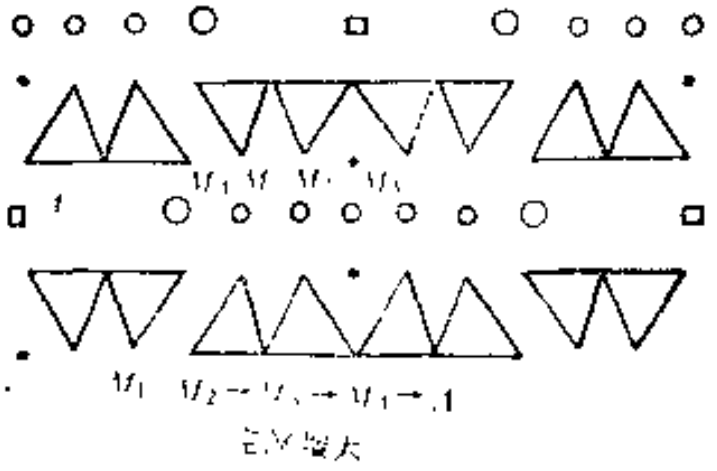


图 3.2.3 铁-钠闪石石棉的晶体结构简图

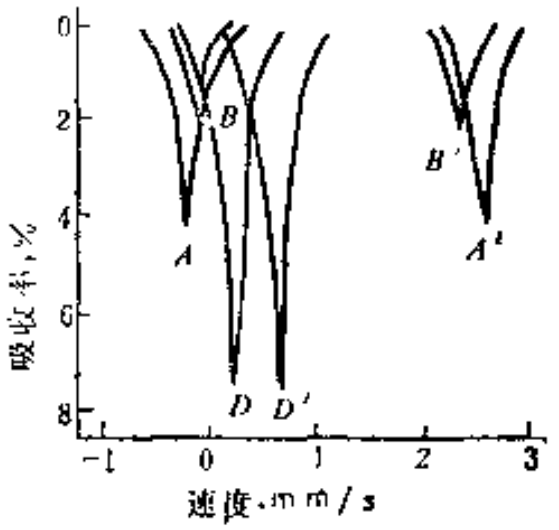


图 3.2.4 镁-钠闪石石棉的穆斯堡尔谱

矿物谱学的分类及其各种设备的基本原理和研究内容列于表3.2.16。

3.2.7 矿物结构分析

3.2.7.1 X-射线衍射分析法

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.16 矿物谱学分类表

矿物谱学分支名称	核γ共振（穆氏效应）	X-射线谱和X-射线电子能谱	紫外光谱	可见—近红外光谱	红外光谱	无线电波谱		
						电子顺磁共振波谱	核磁共振波谱	核四极矩共振波谱
相互作用类型	与原子核	与内层电子	与外层电子		与分子（基团）	在外磁场中与外层电子	在外磁场中与原子核	与原子核
能量,eV	$10^{5}\sim10^{4}$	$10^{5}\sim10^{3}$	$10\sim10^{-1}$		$10^{-1}\sim10^{-3}$	10^{-5}	10^{-7}	10^{-7}
波长,cm	$10^{-9}\sim10^{-8}$	10^{-8}		10^{-4}	$7.5^{-6}\sim3^{-2}$	$5^{-2}\sim1$	0.8～10	10^{4}
研究内容	1.鉴定Fe、Sn在矿物中的氧化状态，配位情况、化学键特点等； 2.确定杂质铁的存在形式； 3.确定Fe/Fe比值及它们在晶格中不等价位置上的分配，测定结构状态的有序—无序，研究矿物在不同条件下的物理相变过程	1.X-射线谱学是一广泛使用的，既快速而又准确的微粒微量分析技术方法； 2.X-射线电子能谱主要用于成分分析，价态判定，基团结构同成分异构体判定等		1.研究元素赋存状态； 2.测定矿物中铁族元素和稀土族元素的价态和配位数； 3.研究矿物的颜色和电子—空穴心； 4.研究类质同象； 5.研究晶体场理论在矿物学上的应用	1.矿物的定性鉴定； 2.研究矿物的类质同象； 3.研究矿物的结构； 4.关于水的存在形式、键合性能和方向探讨	1.研究矿物中的顺磁性杂质离子； 2.研究矿物中广泛存在的多种多样的电子/空穴心及矿物的发光机理； 3.测定价态、配位数和局部晶体场对称性； 4.研究有序—无序	1.研究矿物中水的存在类型和行为，质子的结构位置； 2.研究某些结构问题； 3.利用化学位移的测量来研究化学键状态和探讨矿物的成因	1.研究矿物的化学键性； 2.研究矿物某些结构问题。如不等价位置、有序度

地信网论坛
bbs.3s001.com

X-射线是一种波长短、能量高的横向电磁辐射，在遇到晶体时会发生衍射，其衍射条件服从于布拉格方程式。若晶体一定时，则 d 值就是一系列的定值，因而设法连续改变 λ 或 Q，就能使许多面网有满足布拉格衍射条件的机会，从而获得所需要的衍射数据。晶体对X-射线衍射的基本方法有三种：劳埃法、旋转晶体法和粉末法。前两种方法都是利用单晶，因而使用时受到一定条件的限制。而粉末法或称粉晶法是利用许多不同的微晶集合体，因而此法是最常用的方法。

粉末法分为照相法和衍射仪法。照相法又根据试样与底片的相对位置分为德拜一雪莱法、平板底片法和聚焦法。其中德拜—雪莱法应用最广。所以，一般所说的粉末法如未加另外说明，均指德拜法。

X-射线衍射分析法主要用于区别晶质、非晶质矿物，区别晶质矿物所属晶族和对称程度，查定矿石中矿物相及其半定量或定量分析，并可区别同质异象及类质同象。

X-射线粉晶的送样要求，首先是样品一定要有代表性，否则会得出错误结论。一般对称程度高的矿物样品可稍粗一些（即200目左右），对称程度低的样品，粒度要细些，一般样品粒度1～10微米合适。过粗会使衍射线变成点线，过细，衍射线变宽、高角区会不出现衍射线等现象。样品的重量一般0.2～0.5克左右，采用德拜相机可用低量，当用衍射仪法，则样品量要求多些，采用高量为宜。送样时，应附矿区的地质资料，简要说明矿物的化学全分析结果、矿物共生组合、成因及产状、有无蚀变及其他鉴定资料如红外光谱分析」差热分析，显微镜鉴定等以供参考。同时要提出要求解决的问题，是物相鉴定还是精确测定晶格常数、矿物相变等。送样时要注意的问题：非晶质矿物不能送样，因无衍射线条，但变生矿物例外，经加热处理变成结晶质矿物后即可送样；多相粘土样品混入的石英、方解石等，应预先处理提纯，避免对粘土矿物衍射线条的干扰，对重砂样品亦应挑纯，避免增加鉴定和解释图谱的困难；样品防止用铁锤加工，以免破坏晶

地信网论坛
bbs.3s001.com

格，对粘土矿物最好先用蒸馏水浸泡后分散分离，烘干温度不宜超过80℃，最好自然干燥，加工时避免择优取向等。

应用实例：金刚石、萤石、自然金等属高级晶族的矿物，X-射线粉晶衍射线条少而强；石墨、刚玉、方解石、红砷镍矿等属中级晶族矿物线条较多；而孔雀石、冰长石等为低级晶族矿物，其衍射线条更多而弱，这样就可以区别晶族和对称程度。

某金铜矿床中的含金方铅矿（含Au=46.65克/吨），进行X-射线粉晶物相分析，获得了自然金及方铅矿的独立衍射线条，表明金在方铅矿中呈独立的自然金存在，查明了金的赋存状态。

3.2.7.2 电子衍射分析法

在利用衍射研究晶体结构方面，证明电子和中子都是十分有用的粒子。如使一束粒子流在适当条件下指向晶体时，将会与X-射线一样遵循布拉格定律而被衍射。然而，电子、中子被晶体衍射的行为与X-射线是不完全相同的，这就是说，任何一种技术均能提供某种特殊信息。

产生快速电子流可在与电镜的仪器构造和操作原理几乎相同的仪器中实现。所产生电子流的波长由施加的电压决定。在相同电压下所得到的电子流波长比普通用于X-射线波长要短得多，但其穿透本领远低于X-射线。电子极易被空气吸收，因而必须将电子流、试样和照相底板都放在同一个真空器内，这个真空器可称为电子衍射仪，它是电子衍射的主要组成部分。

近代电子显微镜都附有供作电子衍射用的装置和附件，已很少有单独的电子衍射仪。由于电子流的穿透能力很低，要想得到穿透的衍射图，必须将试样品制备得极薄，其厚度不应超过数百埃。粉末试样可喷涂到有机底膜上制成，不能制备出很薄的块状试样可作反射电子衍射。

电子衍射图与德拜法X-射线衍射图类似，可用同样方法进行鉴定与分析。但电子衍射的原子散射因子与X-射线衍射的有较大的不同，所以各衍射线的相对强度与X-射线情况有较大的

地信网论坛
bbs.3s001.com

不同。因此，对多晶电子衍射花样进行分析时，主要利用JCPDS卡片中的d值数据，至于强度数据可作参考。所以，电子衍射花样的鉴定最好利用芬克索引。

由于电子衍射具有某些特征，除具有研究晶体结构的功能外，在研究矿物表面结构时，远较X-射线衍射优越。

3.2.7.3 中子衍射分析法

中子流可在链式反应堆中产生，在其壁上开一小口并用导管引出，便可得到一束很强的中子流。这种中子流的中子具有很大范围的动能分布，如用单晶分光，即可获得一种能量的中子所组成的“单色”中子束。

中子衍射与X-射线及电子衍射之间的主要区别，在于原子散射因数随原子序数Z的散射角2θ的变化不同。原子对于X-射线和电子的散射本领是随着Z的增加而增加，并随2θ的增加而减少。中子在所有的角度下，均以相同的强度而散射，与原子序数无固定的渐变关系。例如，Z值近乎相同的元素，其中子散射本领可能相差很大，而Z值相隔很大的元素却可能具有相同的散射中子的能力。尤其是一些轻元素较某些重元素更强烈地散射中子。因此，中子衍射可用于X-射线衍射或电子衍射所不能进行或比较难以进行的结构分析领域中。

中子衍射可用于测定一些同时含有原子序数相差很大的轻、重元素化合物的晶体结构。对非晶态结构的测定较其他方法也能得出更多的信息。由于中子散射对磁结构敏感，因而可进行X-射线衍射无法进行的磁结构测定。中子对矿物穿透能力很强，所以样品的厚度不受限制，可做大块物料的结构研究。

3.2.8 矿物表面分析

研究矿物表面层和吸附层元素的含量及其分布，或表层元素间的结合状态与结构，以及表面的几何形状、物性等，都称之为矿物表面分析。目前已有许多分析方法，其中有些方法在实际中得到广泛的应用。

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.8.1 离子探针分析法

离子探针是固体表面成分分析和微区分析有力工具之一。它与电子探针有类似之处，是用离子束代替电子束，用二次离子代替特征X-射线，用质量分析器代替X-射线分光谱仪。由于它采用离子轰击样品，检测所产生的二次离子，对于矿物表面极薄层的测定灵敏度高，而且二次离子的收集效率比特征X-射线高，因而分析效率高。离子探针的应用范围如下：

（1）表面分析：由于二次离子产生于最接近表面的原子层，因此，能提供矿物表面特征、各种元素含量及其分布，并可与内部元素分布比较等；

（2）深度分析：采用一次离子束轰击样品表面，由于溅射剥离，可使矿物表面产生一个平底坑而逐层去除，这样可得到元素的浓度与深度的函数关系。

（3）微量分析：能进行矿物中微量杂质成分分析，以及碳、氮、氧等间隙元素的测定。

（4）同位素分析：对于地质学、核物理以及生物学等，同位素分析具有特殊意义。

各种离子探针的特性列于表3.2.17。

3.2.8.2 光电子能谱分析法

近来迅速发展起来的表面分析方法有光电子能谱，俄歇电子能谱，低能电子衍射，电子轰击能谱，电势能谱，低能电子损耗能谱等，这些方法的共同特点都是用大约1千电子伏特或低于1千电子伏特的光量子或电子作为入射粒子，然后检测所产生的二次粒子。它们各有特点，相互补充。由于矿物材料研究强调综合分析，因此出现了光电子能谱（化学分析电子能谱）包括X-射线光电子能谱和紫外光电子能谱、俄歇电子能谱及低能电子衍射的多功能联机装置，为表面分析提供了新的综合仪器。

X-射线光电子能谱法一般是采用软X-射线作为光源，紫外光电子能谱法是用真空紫外或远紫外线作为光源，为进一步明确其特征，一般将这两者通称为光电子能谱。

表 3.2.17 各种离子探针的特性

类型	生产国家	名称（型号）	一次离子束			二次离子束		成象方式	X、Y分辨本领	深度分辨本领	样品室真空 Pa（torr）	离子流检测方式	备注
			种类	直径	有无质量分离	质量分析器类型	分辨本领						
二次离子质量分析器	西德	Benninghoven	稀有气体	~1μm	无	四极滤质器	200	否	1mm		1.33×10^{-8}~1.33×10^{-4} (10^{-10}~10^{-11})	电测	
	美国（GCA）	GCA	同上	300μm 1mm	无	双聚焦	1000	否	>300 μm		1.33×10^{-5} (10^{-7})	电测	
离子微探针质谱计	美国（ARL）	IMMA	活性气体和惰性气体	2~300μm	有	同上	600	扫描成象	2μm	50Å	1.33×10^{-5}~1.33×10^{-6} (10^{-7}~10^{-8})	电测	
	英国（AEI）	MS-702R	同上	同上	有	同上	3000（电）10000（照相）	同上	2μm	同上	1.33×10^{-7} (10^{-9})	电测、离子干板	
	日本（日立）	IMA-2	同上	同上	有	同上	300	同上	2μm	同上	6.5×10^{-5} (5×10^{-7})	电测	
直接成象质量分析器	法国（CAMECA）	IMS-300	同上	10~300μm	无	磁棱镜-反射镜-磁棱镜	300	直接成象	0.6~0.75 μm	同上	1.33×10^{-4} (10^{-6})	电测、直接观察图象和照相	
微探针型	中国	LT-1	同上	2~300μm	有	双聚焦	1000	扫描成象	2μm	同上	<1.33×10^{-6} (<10^{-8})	电测和小计算机处理	配有小计算机作数据收集
直接成象型	中国	ZLF-300	同上	10~300μm	无	磁棱镜-反射镜-磁棱镜	300 最大 1000	直接成象	1μm	同上	<1.33×10^{-6} (<10^{-8})	电测直接观察	

地信网论坛 bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

X-射线光电子能谱法很有成效地用于元素及其化合价态的分析中，一种研究固体表面内层电子能谱的工具。它是由各种元素的内层电子和价电子、导电电子被X-射线激发放出光电子而产生谱线的，但由于X-射线光束不能用同样的方法聚成象电子束那样小，所以目前其分辨力不超过1.0～1.5电子伏特。通过晶体单色器可以提高其分辨率。此法的优点是：适用于几乎所有的元素；能得到与化学组成、分子结构等化学结合状态（价态）有关的数据；无损分析；可作表面薄层的分析，能检测的表面层深度为几十埃。

紫外光电子能谱法虽然只能测定原子的价电子和导电电子，但由于其光源的能带非常窄，所以分辨力可达到10～15毫电子伏特。此法的优点是：谱线较简单；能直接测定表面的电子状态及吸附状态；对深度为几埃的表面层的测定灵敏度高，其缺点是狭义的分辨力不太高。

光电子能谱的基本原理是用单色光源或电子束去照射样品，使其原子或分子的电子激发，测量这些电子的能量分布，从中获得所需要的信息。因此，在工艺矿物学领域中它的应用日益广

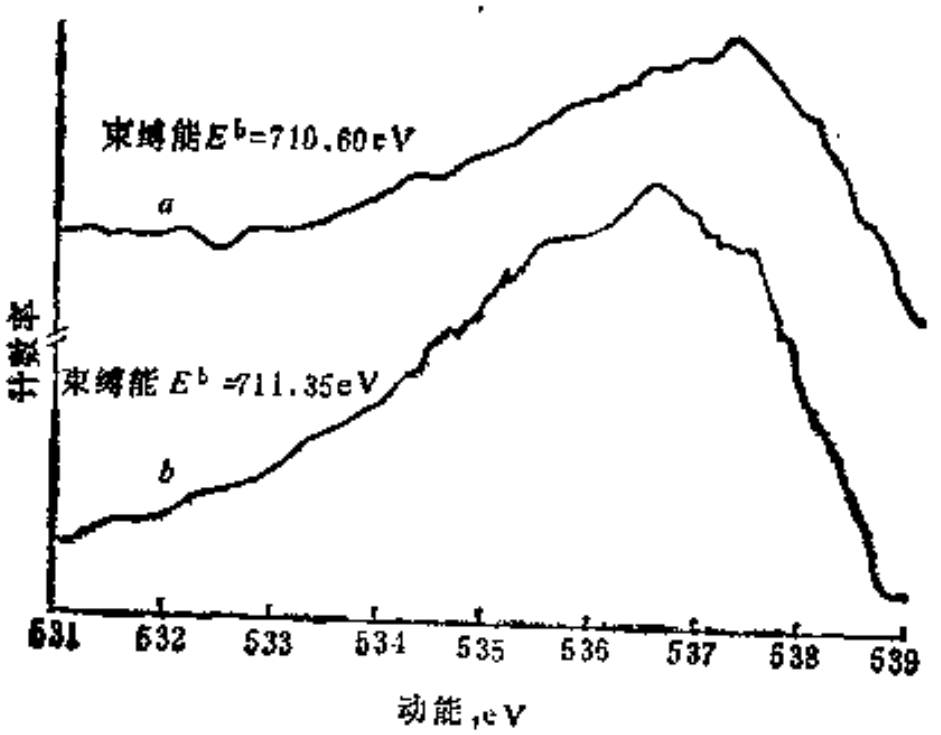


图 3.2.5 充气搅拌前后钛铁矿表面Fe的XPS谱

a—钛铁矿；b—经充气搅拌的钛铁矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

泛。例如，在研究某地钛铁矿的可浮性时，利用其复杂氧化物晶格中某些阳离子优先溶解这一特点来改变钛铁矿表面Fe^{2+}、Ti^{4+}的分布密度。由实验可知，充气搅拌会使钛铁矿表面Fe的溶解量比Ti的溶解量大得多，对此，用X-射线光电子能谱测试，其结

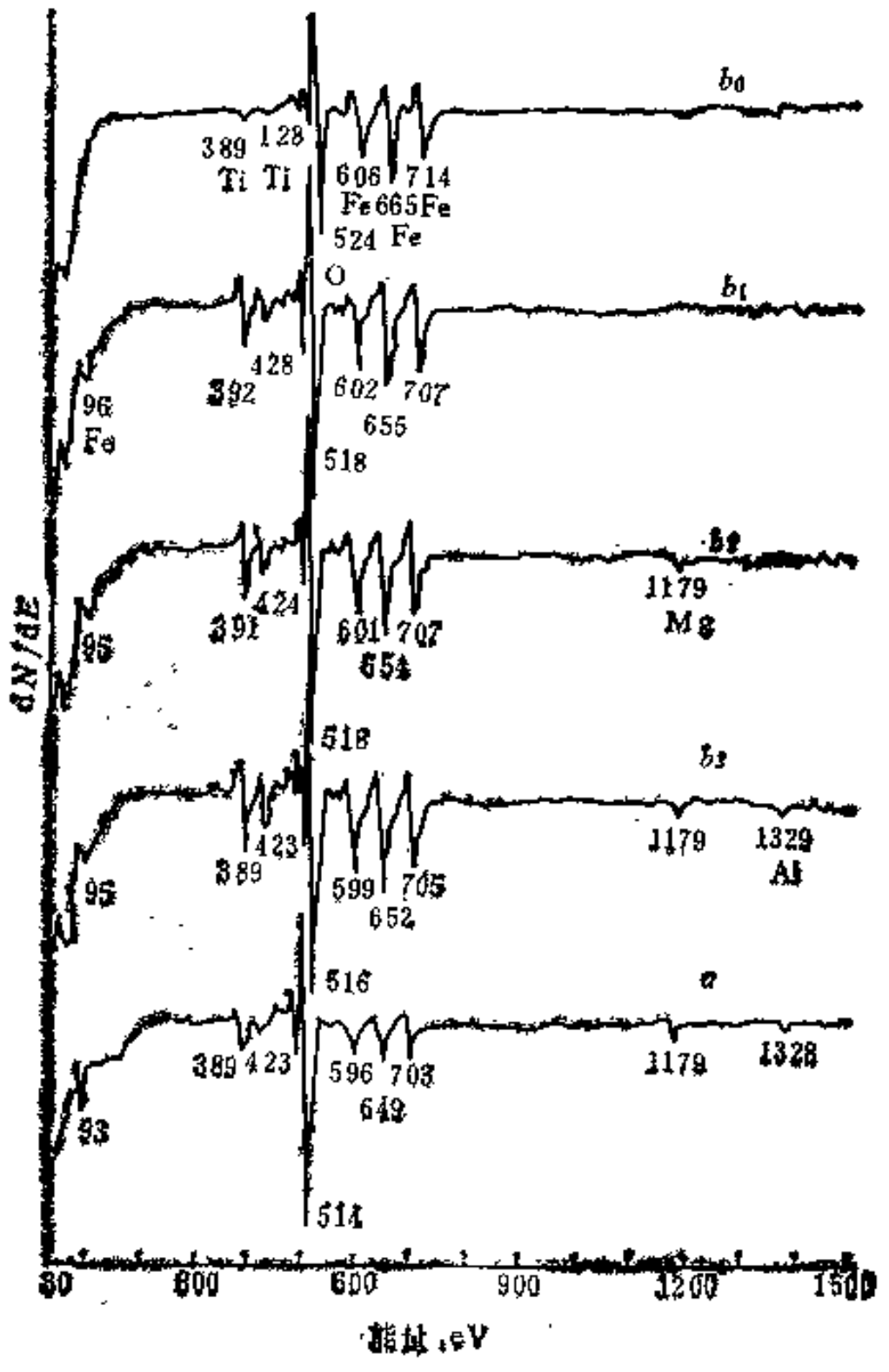
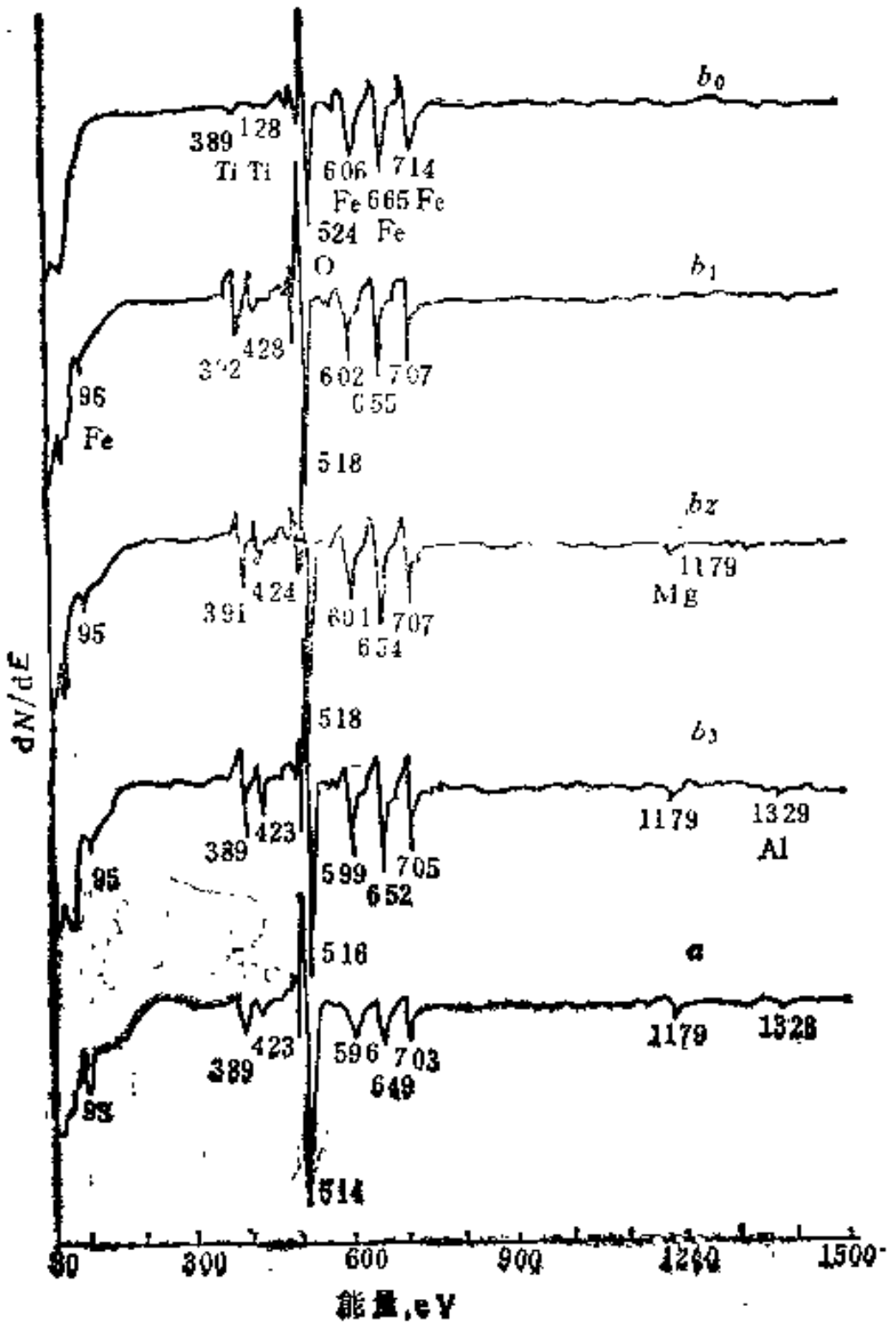


图 3.2.6 加热氧化前

a—钛铁矿表面；b_0—氧化钛铁矿表面；b_1、b_2、b_3—氧化钛铁矿经Ar^+离子枪灯丝加热电流25mA；

地信网论坛
bbs.3s001.com

果表明（图3.2.5），在pH值为5的硫酸溶液中充气搅拌15分钟，使钛铁矿表面Fe的$2p_{3/2}$轨道的光电子束缚能从710.60电子伏特增大到711.35电子伏特，明显地证明充气搅拌时，钛铁矿表面Fe的正价升高，即Fe^{2+}被氧化成Fe^{3+}。



后钛铁矿的俄歇谱

Ar^+溅射1、2、4min；溅射条件：Ar气源浓度6.5×10^{-3}Pa(5×10^{-5}torr)

Ar^+离子枪加速电压3kV

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.8.3 俄歇电子能谱分析法

俄歇电子能谱是利用俄歇效应中放出俄歇电子具有表征各元素组态的原理，进行元素分析的方法。样品经激发源发出的电子束作用后，产生俄歇电子，通过能量分析器，将不同动能的俄歇电子区分开，经检测记录得到俄歇电子讯号强度与电子动能关系的曲线就是俄歇电子能谱。

俄歇电子能谱特别适用于作表面分析。当电子束逐点扫描时，得到样品表面各部位的成分变化情况，称为扫描俄歇电子能谱；当配合以离子侵蚀（刻蚀）技术，即用氩离子枪轰击样品表面时，逐层剥离，同时进行俄歇分析，可以了解样品由表到里各层的成分变化情况，称为纵剖面测定。俄歇电子的能量很低，一般为几百电子伏特，因而其平均自由程很短，大于这个距离，俄歇电子就不断损失能量，甚至被吸收。因此，能测得的具有特征能量的俄歇电子，仅限于来自表面2、3层的原子，所以它是具有表面探针的作用。

本法适用于矿物表面成分的定性和半定量分析，分辨率高，可分析10埃极薄的表面层，检测灵敏度高，其能力可达单分子层的0.1～10%，可测定化学结合状态。其缺点是：谱线复杂，定量分析有困难，存在电子束时会引起干扰。

应用实例：在加热氧化对钛铁矿可浮性的影响研究中，由俄歇电子能谱分析结果(图3.2.6)得知：原生钛铁矿表面有O、Fe、Ti和少量的Mg、Al；经加热氧化后，其表面俄歇谱的Fe峰加强，Ti峰变得极不明显，Mg和Al峰消失；590～720电子伏特之间的Fe俄歇峰的能量位移均在10电子伏特以上，而Ti的能量位移不明显。Fe俄歇峰的能量位移大，是由于钛铁矿表面FeO被氧化成Fe_2O_3，使得Fe的价电子带状态发生较大的变化所引起的。而钛铁矿表面的TiO_2在加热氧化后以金红石的形式存在，Ti的价电子带状态变化较小，故Ti俄歇峰的能量位移较小。上述结果表明，氧化钛铁矿表面主要是Fe_2O_3，而TiO_2的分布密度很小。采用俄歇电子能谱法与Ar^+离子溅射刻蚀相配合，测定了氧化钛铁矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

的氧化层厚度（图3.2.6，$b_1b_2b_3$），随着溅射时间延长，Fe俄歇峰的相对强度减小，Ti的相对强度增大，这表明随着溅射深度增大，Ti的分布密度增大，Fe的分布密度减小，Fe、Ti的分布密度逐渐与原生钛铁矿表面Fe、Ti的分布密度接近。同时，随着溅射时间延长，氧化钛铁矿的Fe、O俄歇峰相对于原生钛铁矿的Fe、O俄歇峰的能量位移逐渐减小。当溅射4分钟时，氧化钛铁矿的俄歇谱中，出现Mg和Al的俄歇峰，且各峰的相对强度和俄歇电子能量与原生钛铁矿的基本一致，说明此时氧化层已被剥完。按溅射速率（0.25埃/秒）可知，氧化层的厚度约为60埃。通过俄歇电子能谱的分析，从微观上揭示了加热氧化钛铁矿在用苯乙烯膦酸为捕收剂浮选效果好的原因之一，就是增大其表面Fe^{3+}的分布密度的结果。

3.2.8.4 低能电子衍射分析法

低能电子衍射是研究固体表面微区结构的重要手段之一。低能电子衍射仪是在电子的后加速技术的成熟和超真空技术的普及才得以实现的。低能电子衍射后，再加速称为后加速，它只增强电子的能量，而不能改变电子衍射谱。为防止气体污染试样表面及吸收低能电子，仪器内的真空度要求高于1.33×10^{-7}帕（10^{-9}托），并配有离子溅射源，以便清除玷污的表面层。

应用低能电子衍射查清一些矿物表面最外部原子层的结构，后来又发现过去完全不清楚的吸附分子的二维规律性，即超点阵结构等。目前，根据衍射强度，结合俄歇电子能谱的数据，可以鉴定表面状态。因此，低能电子衍射是研究表面结构的一种非常有力的方法。

低能电子衍射的优点：可作表面二维结构分析；能确定晶体表面原子或吸附原子与分子的二维对称性和单位晶胞的大小；表面超点阵结构分析；能检测出贵金属、锗、硅等表面原子分布与基体三维结构间的差异；催化剂表面吸附气体原子分布的研究。其缺点：衍射斑点的排列与真正的原子排列不是1:1的关系；对于不完整的表面难于进行分析；电子照射会干扰吸附状态的原始

地信网论坛
bbs.3s001.com

情况等。

3.2.8.5 场离子显微镜研究法

场离子显微镜是研究某些材料表面特性较好的仪器。它的特点是：分辨率高，能直接观察到试样表面原子的排列情况；灵敏度高，一个原子大小的杂质的存在或缺陷亦能检测；在深度方向上能对一个原子层的厚度进行组成分析；仪器构造简单。最近它与飞行时间质谱仪（简称TOFMS）结合，制成了原子探针场离子显微镜（APFIM），使其不仅能研究固体表面结构，而且能进行组成分析，扩大了场离子显微镜的应用范围。

场离子显微镜是一种正在发展中的分析仪器，最近已有商品化仪器，但在实际上应用得缓慢的原因主要是被研究对象的试样必须是针状，而且一般应是一些高熔点的金属或合金，试样尖端的曲率半径必须在100埃左右，因而只能局限于金属材料，而在矿物学方面的实际应用尚属困难。

原子探针场离子显微镜首先用场离子显微镜观察电场蒸发的原子象，然后用飞机时间型质谱仪测定这些原子的质量，由于可以调整试样表面电场蒸发一个原子层厚度的速度，这就可能对微区深度方向上包含一个原子层的元素进行分析。这种方法，除具有场离子显微镜的特点外，还能进行微区表面单原子层或吸附原子的元素分析，而且能分析全部原子序数的元素。

3.2.9 矿物的热分析

矿物的热分析是根据矿物在加热过程中所发生的热效应或重量的变化等特征来研究和鉴定矿物的一种方法，目前应用较广的有以下几种：

（1）差热分析法。这是利用矿物试样在加热过程中，试样与中性体（Al_2O_3或MgO）的温差变化，这种变化可能有两种情况：无温差变化，即无热效应，则差热曲线为一直线，与横坐标平行，亦称基线，例如萤石、长石、刚玉等矿物；另一种情况，

地信网论坛
bbs.3s001.com

有热效应：吸热效应如脱水分解、结晶构造破坏、同质多象转变等，都可以形成吸热谷；放热效应如氧化作用、再结晶作用等，则形成放热峰。由此根据差热分析仪记录的峰谷位置、形状、数目多少、面积大小等特征来鉴定和研究矿物。

（2）热重分析法。这是测定矿物在加热过程中的重量的变化，来研究、鉴定矿物的一种方法。由于大多数矿物在加热时因脱水而失去一部分重量，故亦称热失重分析或脱水分析。由于常用热天平来测定矿物在不同温度下脱水时的重量变化，故又称热天平法。

（3）热重率分析法（微分热重分析）。这是利用矿物在加热过程中在单位时间内重量的变化，故亦称差热失重分析。

（4）热膨胀法。这是改变温度测量体积的热分析法。

此外，近代仪器又出现了下列几种方法：

（1）差示扫描热量分析法(Differential Scanning Calorimetry)，简称“D.S.C.”，即测量试样和参比物两者温差相等所需热量之差。

（2）逸出气体分析法（Evolved gas analysis)，简称“E.G.A.”。确定挥发性产物的性质及其含量的方法。

此外，还有差热与气相色谱、差热与高温X-射线衍射仪并用等热分析仪器。

3.2.9.1 差热分析法

差热分析是测定矿物加热时伴随物理-化学变化的同时产生的热效应的一种方法。从热效应的测定中可以了解矿物物理-化学变化与热变化的关系，从而达到对矿物进行定性、定量分析的目的。由于差热分析仪实现了温度控制、差热记录的自动化，测量温度范围可从室温至2000℃，一般的仪器均能达到1100℃以上。同时有些仪器中加设了气氛控制、压力控制装置，已成为综合化、自动化、迅速准确、重复性好的综合热分析仪。我国已能生产性能好、质量高的自动差热分析仪，如江苏江阴试制成功五种样品同时测定的自动差热分析仪，为快速分析，试验条件相同

地信网论坛
bbs.3s001.com

的对比分析创造了条件。

差热分析法被应用于研究和鉴定矿物主要是：矿物的物相及其半定量分析；鉴定粘土矿物的结晶程度；同质多象转变；确定变生矿物的转变温度；研究矿物内部结构类型；研究矿物粒度大小；研究矿物中是否有类质同象混入物；矿物加热到1000℃时，是否有分解、熔化、蒸发、升华、结晶构造破坏等现象，以及鉴定宝石、玉石矿物方面都得到广泛的应用。

差热分析的送样要求；样品要有代表性，有明显热效应的矿物；样品粒度0.1～0.25毫米；重量0.5～1克，如做热天平应为2～5克；附上地质资料、化学分析结果以及其他测试资料，以供鉴定时参考。

差热分析存在的问题是矿物定量工作尚需探索，因未建立国内自己的标准差热曲线图谱；要求送样量过多，国外已做到0.1毫克；仪器的灵敏度不高，对低含量矿物（1～5%）的鉴定困难；对差热曲线的解释工作尚有困难，特别是对相分析的混合样品必须与其他方法配合才能得到满意的结果。如何把差热分析与其它仪器并用，如与高温X-射线衍射仪并用等，将会扩大差热分析的应用范围。

应用实例：研究矿物中是否有类质同象混合物存在及其含量的多少。例如白云石Ca、$Mg[CO_3]_2$，化学成分较纯，$Mg[CO_3]$的分解作用温度较高(800℃左右)，形成较大的吸热谷，$Ca[CO_3]$的分解作用在950℃形成吸热谷，当白云石中有Fe^{2+}替代Mg^{2+}时，形成类质同象的含铁白云石$Ca(Mg, Fe)[CO_3]_2$，则$(Mg, Fe)[CO_3]$的分解作用温度，随含铁量的增加而降低(见图3.2.7)。同样，纯的文石$CaCO_3$加热到390～420℃有一小的吸热谷（同质多象转变，由文石转变成方解石），在950℃有一大的吸热谷（$CaCO_3$分解作用形成），当有Pb和Sr类质同象代替Ca时，则在950℃吸热谷之前有一小的吸热谷（表示有Pb），则在950℃吸热谷之后有一小吸热谷（表示Sr替代Ca）（图3.2.8），其含量多少与小吸热谷的面积成正比。

地信网论坛
bbs.3s001.com

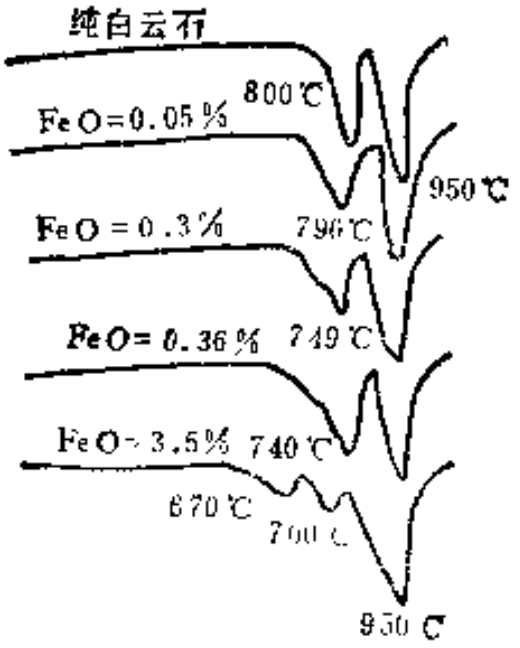


图 3.2.7 铁的含量对白云石差热曲线的影响

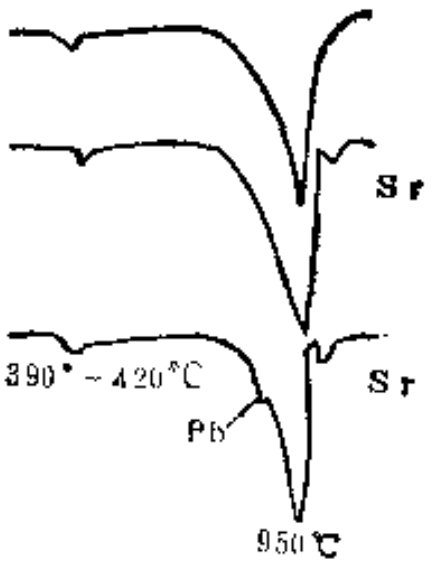


图 3.2.8 文石中类质同象对差热曲线的影响

3.2.9.2 热重分析法

许多矿物，尤其是粘土矿物、碳酸盐类矿物，在加热过程中排除水分，放出二氧化碳等气体，而使试样的重量减少。但有些矿物在加热过程中，由于氧化，却使试样的重量增加。热重分析法就是根据这些特点来鉴别矿物的一种方法。由于矿物在不同温度下脱水时重量百分数的变化，而获得失重曲线，故又称失重分析。

热重分析根据使用的称量设备大致分三种：热天平法，扭力天平法和石英弹簧秤法。因为矿物学研究方面常用热天平来测定，故又称热天平法。

以重量变化为纵坐标，温度或时间变化为横坐标作图，得到温度重量变化曲线，因为大多数矿物在加热过程中均失去重量，所以在热谱图上称这种重量—温度变化曲线为失重曲线。

热重分析在工艺矿物学方面的应用，主要是鉴定矿物和确定矿物中含水类型。例如，长石族矿物，在差热曲线上，几乎是一条平缓的直线，难以相互区分。而在失重曲线上（图3.2.9），则可明显看出它们的差异。因此，失重分析法与其它近代分析法相

地信网论坛
bbs.3s001.com

配合，有利于精确地对各种矿物加以鉴别。又例如：矿物自由水的脱水温度一般在110℃左右以前脱去，而结晶水要在200～500℃才脱去，结构水要500～900℃才脱去，故从失重曲线上可看出。

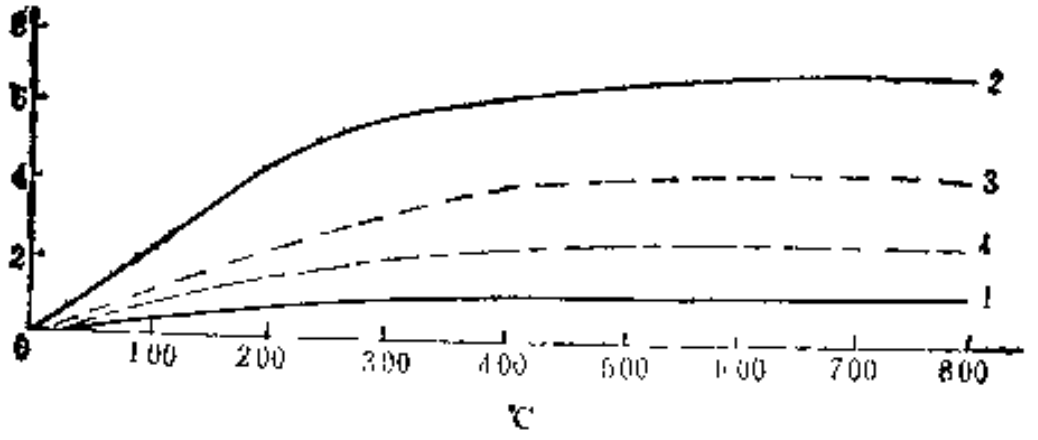


图 3.2.9 长石族矿物的失重曲线

1—正长石；2—正长石；3—钠长石；4—钙斜长石

研究热重分析结果时应注意的问题是：当矿物含有挥发性组分，如CO_2、H_2S、SO_2、SO_3等，在发生分解作用时，也会引起矿物的失重；试样中含有低价变价元素如Fe^{2+}、Mn^{2+}、U^{4+}等，因矿物加热氧化可增加矿物的重量；样品的粒度、结晶度以及类质同象等杂质的存在都会影响脱水温度和脱水曲线的形态。因此，解释失重曲线时必须考虑上述因素。

3.2.10 矿物含量测定

矿物定量方法很多，诸如计算法、分离矿物定量法、几何测定法、重砂矿物定量法、化学物相分析法及其他专属矿物定量法如染色法、红外光谱法、X-射线衍射法、扫描电镜法、热分析法、电渗析法以及利用矿物特殊物化性质测定矿物含量等。然而，利用传统的光学显微镜测定矿石组成矿物的含量仍是一种常用的方法。

3.2.10.1 矿物含量的计算法

根据化学分析结果计算矿物含量，如果已查明元素在矿石中仅存在于单一矿物时，可利用化验测得该元素的含量，再按被测矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

物的单矿物该元素的实际含量，便可计算出欲测矿物的含量。如果某组分以两种以上的矿物形式存在，则应根据与某种矿物有关的特征组分，在不是很复杂的情况下，也可计算出矿石中的矿物含量。

应用这种计算法无疑是简便的。但当矿石中矿物组成和元素赋存状态较为复杂时，应用此法很难获得准确的计算值。因而往往不能普遍应用，必须与其他定量方法联合或借助其他测试手段加以检测。

3.2.10.2 几何测定法

根据体视学原理，由二维矿石截面上的显微组织的分析和测算，来确定矿物组成的三维形貌及其定量关系，这就是利用显微镜和图象分析仪测定矿物含量的一种方法。

显微镜定量法有：点测法、线测法和面测法。因为是在光、薄片截面上进行测定的，而矿石中矿物颗粒却是以立体形式存在，所以必须把测定的二维数据转换成三维信息。这种换算在理论上是很复杂的，但实际上却很简单。由矿物定量的数学基础和定量的实践证实，矿石切片中所测矿物的点、线、面的百分率数值等于矿物的体积百分率，条件是该矿物在矿石中无规律的分布和严格遵守测定方法的规程。因此，欲测矿物的重量含量，$W\%$：

$$W = P_P \cdot \frac{D_x}{D_0} = L_L \cdot \frac{D_x}{D_0} = A_A \cdot \frac{D_x}{D_0} = V_V \cdot \frac{D_x}{D_0} \quad (3.2.25)$$

式中 P_P、L_L、A_A、V_V——点数，%、线段，%、面积，%、体积，%；

D_x——欲测矿物密度，g/cm^3；

D_0——矿石密度，g/cm^3。

图象分析仪是用计算机控制的自动测定系统来代替显微镜的手工操作，它能快速、较准确地提供矿物含量、粒度分布、颗粒形态、单位体积内颗粒表面积以及矿物解离度等参数。

图象分析仪的光学系统，可用透光、反光或偏光、暗视域，

地信网论坛
bbs.3s001.com

它是依据不同矿物的不同光学讯号，即波长和强度通过选择适合的光照来鉴别矿物，其分辨率取决于图象的光学显微镜或电子显微镜的分辨率。其鉴别能力常受到条件的限制和干扰因素的影响：如电子噪音干扰；电视屏上各点灵敏度发生变化；待测矿物光性上的改变，如组成改变、微细包体的存在，以及与共生矿物的光亮度差别很小；矿物截面的结晶方位不同和制备样品上的缺陷等。

3.2.11 矿物粒度测定

在选矿过程中，有用矿物和脉石嵌布粒度特性是确定选矿方法、制定工艺流程和磨矿指标的依据。

3.2.11.1 粒度概念与表示法

工艺矿物学所表达的矿物粒度是指同一矿物集合体颗粒的大小，当然也包括该种矿物单晶颗粒。它与选矿破磨后由多种矿物组成的矿石“粉碎粒度”是不同的。但它又区别于地质学上的矿物晶粒粒度，它是为地质服务的，是以了解矿石形成过程中各阶段的物理、化学及物理化学条件的变化，而探讨矿石成因为目的的。

A 矿物粒度单元与粒级的划分

矿物粒度的划分，可按同一种矿物颗粒及其集合体颗粒作为粒度划分的单元。根据选矿工艺要求，几种矿物不需分离而一起回收时，则该几种矿物相嵌的集合体颗粒为粒度单元。当被测矿物为含杂矿物时，如含有乳滴状黄铜矿的闪锌矿，若矿石中这种含杂矿物量少，不影响金属回收或精矿质量标准时，可将含杂矿物一起作为粒度划分单元。否则要作为两种或两种以上的单元分别检测统计。

粒级划分应按选别粒度范围与通用标准筛网尺寸相吻合的原则划分，即按筛比$\sqrt{2}$等比级数作为划分依据，且以基底为0.074毫米筛比为$\sqrt{2}$的泰勒标准为级序，以保持与选矿粒度级别的一致性，便于应用和分析对比。矿物粒度级别的划分列于表

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.18 矿物粒度的划分及命名

粒级名称	粒级范围 mm	标准筛目	粒径比为$\sqrt{2}$粒级的粒径，mm	平均粒径 mm	φ标度
极粗粒	>10			……	
粗粒	1～10	4	4.708	3.959	−2
		6	3.329	2.800	−1.5
		8	2.355	1.930	−1
		10	1.665	1.400	−0.5
		14	1.177	0.990	0
中粒	0.1～1	20	0.833	0.700	0.5
		28	0.589	0.496	1
		35	0.417	0.351	1.5
		48	0.295	0.248	2
		65	0.208	0.175	2.5
		100	0.147	0.124	3
		150	0.104	0.088	3.5
细粒	0.01～0.1	200	0.074	0.062	4
		270	0.052	0.044	4.5
		400	0.037	0.031	5
			0.026	0.022	5.5
			0.018	0.015	6
			0.013	0.011	6.5
微粒	0.003～0.01		0.009	0.007	7
			0.006	0.005	7.5
			0.004	0.003	8
			0.003		
极微粒	<0.003		<0.003		

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.18。

B 粒度与粒度分布表示法

粒度测定的任务是确定矿物颗粒大小及其分布特性。对于形状规则的颗粒可用线性尺寸来表征其粒度。例如，球体颗粒可用“直径”表示；立方体颗粒可用其“边长”表示；对于形状不规则的颗粒，最好用随机尺寸来表示。

粒度测定数据的处理除列表外，最好用粒度分布曲线或称粒度特性曲线表示，它是表征矿石中矿物粒度组成及其分布特征的最直观方式。粒度特性绘制在直角坐标上，按各个级别含量而绘出的称为部分粒度特性曲线；按各级别总含量即累积含量绘制的称为累积粒度特性曲线。根据矿物的粒度特性，可选用简单坐标法、半对数坐标法和对数坐标法。当级别数量不多，矿物粒度差别不大，用简单坐标法很方便。而粒度差别很大，粒度分布均匀，特别是细粒级占有比例较大时，为避免作图坐标拉得过长或细粒级密集不易看清时，一般选用半对数坐标法。泰勒标准以图解法表示时，可在($\lg x$, $\lg y$) 坐标上绘制，x轴表示粒度；y 轴表示各级别累积含量。对数累积粒度特性在 ($\lg x$, $\lg y$) 坐标上绘制，它可以确定矿物粒度在矿石中的分布规律性，也可用它说明粒度相差很大、含量很高的粒度特性。

C 粒度特性方程式

粒度特性方程式是用数学方法处理矿物粒度测定的资料，以简明的定量数值描述粒度分布规律的数学表达式。它不仅概括了大量繁琐的粒度测定数据，而且便于将粒度实测结果与其他物理量相联系，来探讨选矿方法和磨矿指标的合理性。应用粒度方程式可解决许多问题，如确定任一粒级中的颗粒数目、颗粒的表面积、比表面、粒度分布规律性和均匀性等。根据不同类型矿石中各种矿物的粒度测定结果表明，矿物粒度特性不是具备某一数学规律，而是用不同的数学方法处理可得到不同形式的粒度方程式。关于一些粒度方程式，特别是适合矿物嵌布粒度的有关方程式，均可参考选矿筛分粒度部分，此处不再赘述。

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.2.11.2 粒度测定方法

测定矿物粒度的方法主要是光学显微镜法和图象分析仪法。应用显微镜测定粒度时，与矿物定量一样可分别采用点测法、线测法和面测法，只要严格按各测量方法的操作规程进行测定，几种方法的测算结果应是等效的。

一般用随机截距线测法较为普遍。线测法的测线总长应超过比较粒级的500倍。测线距的选择，应以等距离均匀分布于具有代表性的截面上为原则。测线距越密，所得结果愈接近实际，但必须大于矿物的平均粒径。当矿物颗粒嵌布不均匀时，应增加矿片，并可加大测线距。对条带状构造的矿石采用随机截距线测法时，测线应以垂直条带方向为宜。对含量低、颗粒细的粒状矿物应采用面测法，测量颗粒的定向最大截距，测线两侧的颗粒按“测左不测右”的原则测量全部颗粒。此外，作为一种抽样方法来看，点测法是快速而准确的，但要配用固定的网格目镜及电动求积仪，故使用时不太方便。

上述三种测定方法，若以规则的立方体为基础的粒度测定原理来看，它们具有不同的物理量。因此，用不同的方法计算其体积含量的方法亦异。用点测法时，各粒级的点数或颗粒数（n）与总点数（Σn）之比，即为该粒级矿石截面上矿物粒度的体积百分率（$V\%$）：

$$V=\frac{n}{\Sigma n}\cdot 100\% \tag{3.2.26}$$

线测法时，矿物颗粒数与其粒级的平均粒径（d）有关，故：

$$V=\frac{nd}{\Sigma nd}\cdot 100\% \tag{3.2.27}$$

而面测法时为：$V=\frac{nd^2}{\Sigma nd^2}\cdot 100\%$ (3.2.28)

A 测量样品的代表性

准确测定粒度的关键是能取到具有代表性样品。往往由于取样方法不适当而引起的误差大于粒度测定的误差，甚至导致测定

地信网论坛
bbs.3s001.com

结果报废。因此，应根据矿石的嵌布特性与要求，选择相应的取样方法及样品的数量。

在矿体中取样，应根据试验目的和选矿试验样品、矿石结构构造、矿床自然类型和比例等因素而定，一般由地质勘探或矿山按要求系统地选取有代表性的手标本。对于矿石结构构造较简单，嵌布粒度较均匀者，可选取具有代表性的10～20块标本，其块度应大于50毫米。

在选矿试样中取样，应根据采样说明书，按矿石类型比例和矿石品位等，从破碎到50～80毫米块矿中以网格法选取代表性样品。如果矿石结构构造复杂，矿物嵌布粒度不均匀且粒度较细，应由选矿试验2～3毫米左右的平均试样中缩取2～3千克，再缩分磨制矿片，便可进行粒度测定。

上述取样方法和数量，仅限于矿石品位、矿物含量达到可测矿物粒度的下限，具有足够的代表性。若矿石中欲测矿物的含量很低，如金、银、铂等贵金属和稀散元素的微量载体矿物等，应选取大量的矿样进行分离处理后，再进行矿物粒度测定。

B 截面效应误差及校正

当矿物颗粒呈球粒状，在切割的矿片上出露的粒径比它的实际粒径要小些，即测量半径的平均值是实际半径的0.7854概率，这就是截面效应的问题。因此，对这种系统误差在理论上是需要进行校正的。然而，类似这种误差都是在假设的理想化模型条件下建立的，对于不规则形状颗粒的立体评价，还要具体分析与实验，例如对于片状、不规则状的矿物颗粒多采用随机截距线测法来测定，所测的截距较实际颗粒有时偏大或偏小，这种偶然误差一般是可以不进行校正的。

关于校正的方法和校正系数，提出了很多的数学变换法，而这些方法都涉及到假设或需要测量颗粒的形状参数。因此，有待深入的研究与探讨。目前，应以实测结果表示为准，如果进行校正应列出校正前后的结果，并列出校正公式。

为保证有效的测定和可信度，所测矿物颗粒应不少于500个

地信网论坛
bbs.3s001.com

颗粒，一般测定500～800个颗粒，可信度可达90%以上。

3.2.12 矿物解离测定

矿物解离的测定方法，除常用的光学显微镜方法外，还有比表面法、自动图象分析仪、X-射线摄影法、重液梯度分离法以及应用磨矿功指数、显微热电动势、显微辐射照相、中子活化法和近代微束分析法等方法研究矿物界面性质、结构和强度特性，以确定其解离效应。此外，在矿片上测定矿物解离参数的校正和连生体系数，选择性解离以及根据近代体视学对二元矿物连生体出现的机率进行电算模拟与数模分析，给出各种立体转换系数，以提高测定精度。

3.2.12.1 矿物解离及其表示法

矿物解离是指从矿石组成矿物中解离出来单矿物颗粒的过程，结果形成便于分选的目的矿物和脉石矿物的机械混合物。在破磨过程中，表征某种矿物解离为单体的程度称为矿物解离度，可用某种矿物单体颗粒的重量含量（f_A)占该矿物重量含量(A)的百分率来表示。

即：

$$F_A=\frac{f_A}{f_A+L_A}=\frac{f_A}{A} \tag{3.2.29}$$

式中 F_A——某矿物的解离度，%；

L_A——在各类型连生体颗粒中该矿物的重量含量，%。

使用显微镜测定解离度时，对试样中粗颗粒计数的统计规律性差，精度较低，故应预先把试样分成若干粒级，通常按筛分的级别产物进行测定。尽管使得解离度测定过程复杂化，但它有可能同时测定试样的矿物粒度分布和各粒级解离度的优点，因而将会增大测定结果的实用价值。

由各粒级矿物解离度求全试样的解离度时，若各级别矿物含量相同，则按粒级产率与粒级解离度的加权平均，可得全试样的某种矿物的解离度。若矿石中同一元素或组分赋存于两种或两种以上矿物时，则必须采用各级别的矿物含量来计算。即：

地信网论坛
bbs.3s001.com

$$F_A=\frac{\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\cdot W_i\cdot f_i}{\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\cdot W_i} \tag{3.2.30}$$

式中 γ_i——粒级产率，%；

W_i——粒级矿物重量含量，%；

f_i——粒级某矿物解离度，%。

如果矿石的矿物组成简单，只有一种矿物表征元素的含量，也可用粒级的化验品位进行计算。

矿石中各种有用矿物和脉石矿物解离度的总和，称为矿石单体分离度。矿物解离度一般是随粒度的减小而增加，然而颗粒的粒度不能减小到使其解离度达到100%，这不仅因为磨矿费用会增加，还因为会降低所采用的特定分离工艺的效率。实际上，所确定的矿物解离度应根据能保证达到精矿品位的要求和获得最佳回收率，使选矿工艺流程的经济效益最大。

3.2.12.2 测定方法

矿物解离测定方法很多，其中用光学显微镜测定是最常用的方法。在实体显微镜下直接测定选矿物料的矿物解离，简易快速，无切片效应，但它只适用于大于200目的粗粒和易于鉴别的矿物，多数矿石不能采用此法。在偏光显微镜下油浸法测定，是有其优点的，即方法简便快速，不需要磨片，测定时可使载物台微倾3°～5°，矿粒在浸油中微微滚动，易于辨明颗粒是单体还是连生体。但是最大的缺点就是不能分辨金属矿物间的连生关系，同时只能目估矿物含量不能准确定量，往往测得结果不透明矿物含量偏高。因此，对金属矿物来说，普遍适用的是在反光显微镜下砂光片的测定法，必要时辅以在偏光显微镜下对透明矿物的测定。

镜下测定时，在光、薄片中呈现的矿物单体颗粒，严格地说是指同一矿物构成而不连生它种矿物的集合体，也包括单晶颗粒。但在实际测量中应根据选矿工艺的要求，如精矿质量、磨矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

粒度下限，以及光学显微镜的分辨能力等，所以应规定允许夹杂其它矿物的粒度和含量。例如，单一矿物集合体中含有微粒包体(<0.1微米)、细微网格状、尘埃状的浸染体，这些都是连生体的一种类型。然而，在实际测量中究竟将这些“准单体”或称“视单体”归入单体颗粒还是另作一项单独测量，应根据选矿方法、产品质量以及对矿物工艺性质是否有影响而定。

连生体颗粒形态特征，应以连生比表示，即用目的矿物占连生体颗粒的百分含量或分数来表示，一般划分四个级别，即：>75%$\left(>\frac{3}{4}\right)$；75～50%$\left(\frac{3}{4}\sim\frac{2}{4}\right)$；50～25%$\left(\frac{2}{4}\sim\frac{1}{4}\right)$；<25%$\left(<\frac{1}{4}\right)$。根据矿石性质和工艺要求，还可划分更多的级别。

测量误差范围，按矿物解离度测量规定，当产品中矿物量>10%，测量矿物颗粒数应达200个；1～10%，测量矿物颗粒数应达100个；0.1～1%，测量矿物颗粒数应达50个；其计算结果可信度可达90%以上。<0.1%，测量矿物颗粒数较少，仅作半定量结果。对矿物含量低的产品可以预先分离富集，然后进行镜下测定，可以提高其测量精度。

3.2.12.3 解离测定的立体校正

显微镜下矿物定量方法不需做立体变换的理论，仅对矿物含量测定有效。而矿物粒度、形状和连生的二维测定数据与三维真实数据之间并不存在这种简单关系。因为，平面切割的矿片中被随机切割的连生体可呈现为单体。相反，单体颗粒永远不会切割为连生体，因而解离度偏高。所以，在测量时对连生体含量要分别用连生体系数进行校正。国内外研究者实验求得的连生体系数列于表3.2.19。

上述资料表明，各校正系数相差较大，选用困难，虽然球体模型从理论上可能进一步完善，但因其各种假设条件下不能适应变化复杂的各种实际矿物。因此，在“工艺矿物解离度显微镜测定技术规范”中规定，目前应以实测结果表示为主，如有校正的

地信网论坛
bbs.3s001.com

应同时列出校正前后的结果，并列出校正公式。

3.2.12.4 矿物解离度定量数学模型

基于磨矿细度与矿物含量、粒度、物理性质和磨矿过程矿物特性间的函数关系，而建立起来的矿物定量数模具有较大的实用价值。理想的解离模型有可能定量地回答各种具体矿石需要磨多细才能达到选别所要求的解离度的问题。目前已有的模型列于表3.2.20。

表 3.2.19 连生体校正系数

校正系数	测定方法	样 品	作 者
1.22～1.28	连生体平面相接的球体，面测法	方铅矿-石蜡人工共生体，不同混合比例	A.M.Gaudin(1939)引用B.G.Moncriff，B.G.Lakewood数值
目的矿物占≥3/4：1.43～2.22 占1/2：1.21～1.67 占<1/2：1.16～1.52	按连生体结合类型，点测法	彩色水泥人工共生体， 赤铁矿-石英， 黄铁矿-石英	屋希翔(1964)
3.0～3.05	二元球体模型，线测法	赤铁石英岩	M.P.Jones，J.L Shaw(1975)
1.58～1.61	二元球体模型，面测法	赤铁石英岩	P.S B.Stewart，M.P.Jones(1978)
1.10～1.15	Quantimet720图象分析仪，面测法，点测法	石英-黄铁矿 闪锌矿-黄铁矿	W.Petruk(1978)
1.03～1.643	各种连生状态，毗连型连生，二元球体模型	钨 矿	张志雄(1982)
1.08～1.22	密度（比重）不同的连生体，面测法	赤铁石英岩	佳明飞(1983)

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.2.20 矿物解离定量数学模型

作　者	解　离　度　公　式	备　注
A.M.Gaudin (1939)	$L=\left(\frac{K-1}{K}\right)^3$	K—矿物晶粒粒度与破碎粒粒度之比
竹内常彦(1951)	$L=\int_{x_2}^{x_1}(b-s)\mathrm{d}s=bs-\frac{1}{2}\cdot as^2$	X_1X_2—破碎粒粒级区间 a,b—常数(a为直线方程斜率，b为截距)
R.L.Wiegel对A.M.Gaudin的改进模型(1967)	$L_i=(1-\varepsilon)^3(t+1)^3+3\varepsilon(1-\varepsilon)^2(t+1)^2(t+2)+3\varepsilon^2(1-\varepsilon)(t+1)(t+2)^2+\varepsilon^3(t+2)^3$ $\beta<\alpha$时可简化为： $L_i=\frac{(K-1)^3}{K^3}+\frac{3(K-1)^2}{K^3}v_i+\frac{3(K-1)}{K^3}v_i^2+\frac{1}{K^3}v_i^3$	i—矿物A或B α—矿物晶粒粒度 β—破碎颗粒粒度 $K=\alpha/\beta$ t—K的最大整数值 ε—K的小数值($\varepsilon=\beta/\alpha-t$) v_i—矿石矿物的体积含量
И.К.Младецкий (1977)	$L_{有用矿物}=\left(1-e^{-\frac{\Delta d}{d}}\right)\sum_{d=0}^{d_{BK}}\left(1-\frac{d}{d_{BK}}\right)e^{-\frac{d}{d}}$ $L_{脉石}=\left(1-e^{-\frac{\Delta d}{d}}\right)\sum_{d=0}^{r_{BK}}\left(1-\frac{d}{r_{BK}}\right)e^{-\frac{d}{d}}$	d_{BK}—有用矿物平均粒度 r_{BK}—有用矿物晶粒间距离 $\overline{d}$—破碎颗粒平均粒度 d—破碎颗粒粒度

续表 3.2.20

作　者	解　离　度　公　式	备　注
B.И.Чернуха和 Э.И.Русская (1978)	$$L_{有用矿物}=\frac{\int_{x_1}^{x_2} r(x)\mathrm{d}x\int_0^{a_{max}} \frac{a^3}{k'k''} f_3(a)n(a)\mathrm{d}a}{\int_0^{a_{max}} \frac{a^3}{k'k''} n(a)\mathrm{d}a}$$ $$L_{脉石}=\frac{\int_{x_1}^{x_2} r(x)\mathrm{d}x\int_0^{a_{max}} \frac{1-\alpha_3}{\alpha_3}\frac{a^3}{k'k''} f_M(a)n(a)\mathrm{d}a}{\frac{1-\alpha^3}{\alpha_3}\int_0^{a_{max}} \frac{a^3}{k'k''} n(a)\mathrm{d}a}$$	a—有用矿物晶粒的平均短轴尺寸 x—破碎颗粒粒度 x_1x_2—破碎粒粒度区间 $n(a)$—矿石中粒度为a的晶粒含量 $r(x)$—粒度为x的颗粒重量函数 $\int_0^{x_{max}} r(x)\mathrm{d}x=1$ α_3—矿石中有用矿物含量 k',k''—矿物晶粒形状系数 $k'=\frac{a}{b}$，$k''=\frac{a}{c}$，b为晶粒平均中间尺寸，c为平均长轴尺寸 $f_3=1-\left(\frac{x}{a}\right)\left(1+k'+k''\right)+\left(\frac{x}{a}\right)^2\left(k'k''+k'+k''\right)-\left(\frac{x}{a}\right)^3 k'k''$ $f_M=\frac{\alpha_3}{1-\alpha_3}\left[\left(\frac{x}{a}\right)(1+k'+k'')+\left(\frac{x}{a}\right)^2(k\ k''+k'+k'')-\left(\frac{x}{a}\right)^3 k'k''\right]$

地信网论坛 bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

续表 3.2.20

作　者	解　离　度　公　式	备　注
R.P.King(1975)	$L=\int_0^{\infty}L(l)P(l)\mathrm{d}l$，其中$L(l)=1-\frac{1}{\mu}\int_0^{\infty}[1-F(x)]\mathrm{d}x$ 若$F(x)=1-e^{-\frac{x}{\mu}}$时，$L(l)=e^{-\frac{l}{\mu}}$	μ—矿石中矿物平均截线长度 $F(x)$—矿石中矿物截线长度分布函数 $P(l)$—破碎颗粒粒度l时重量分布函数
R.P.King(1979)	$L=\int_0^{D}L(D)P(D)\mathrm{d}D$，其中$L(D)=1-\frac{1}{\mu}$ $\int_0^{D_u}\{1-N(l/D)\}\ \{1-F(l)\}\ \mathrm{d}l$ 若$F(l)=1-\exp(-l/\mu)$和$N(l/D)=l^2/D^2$时， $L(D)=2\left(\frac{\mu}{D}\right)^2\left\{1-\exp\left(-\frac{D}{\mu}\right)\left(\frac{D}{\mu}+1\right)\right\}$	D—破碎颗粒筛析粒度 D_u—破碎颗粒总体中最大粒度 $F(l)$—矿石中矿物截线长度分布函数 μ—矿石中矿物平均截线长度 l—破碎颗粒的截线长度 $N(l/D)$—筛析粒度D时颗粒总体的截线长度分布函数 $P(D)$—筛析粒度D时的重量分布函数

地信网论坛
bbs.3s001.com

目前，已有的模型可概括为两类：即需要假设晶粒或颗粒为立方体、球体或长方体；另一类则不需要这些假设，这就是说King，R.P.模型相对地较为理想。实际上，矿物性质是极为复杂的，不同矿物的结构、机械强度、矿物结合接触面性质以及在磨矿过程中动力作用下不同矿物的粉碎性能及其变化等，都是影响建立解离模型的因素。因此，矿物解离定量数学模型尚未达到全面实用阶段，如若能实现与选矿工艺有机的联系起来，还需要进行大量的工作。

地信网论坛
bbs.3s001.com

3.3 工艺矿物学研究内容与程序

对选矿入选原料的工艺矿物学研究，能保证全面而迅速地了解矿石的加工技术特性，得到定性、定量分析和选矿工艺方面的原始数据，因而能选择正确的选矿试验方法，且能在短时期内以少量的实验工作量完成选矿工艺试验。其工艺矿物学研究内容与深度，是随选矿试验不同阶段所提出的要求而不同。根据不同的目的，研究内容可详可简，要求的精度也不相同。一般分为：地质评价可选性试验工艺矿物学研究、选厂设计工艺流程试验工艺矿物学研究和选厂新技术试验工艺矿物学研究三种。此外，尚有根据选矿工艺中的问题，作不同内容的单项、多项或全面的生产全流程工艺矿物学考查。

3.3.1 地质评价可选性试验工艺矿物学研究

在地质勘探阶段中进行的可选性试验，旨在解决工业上利用的可能性，要求探索不同类型或品级的矿石可选性差别，有害杂质除去的难易，以及伴生组分综合利用的可能性，指出边界品位的界限，初步选定选别方法、原则流程和可能达到的指标。为了取得完整而确切的资料，同时不使自己的工作带有盲目性，在工艺矿物学研究工作开始以前就应制定研究方案，其研究内容见表3.3.1。工艺矿物学研究包括若干步骤，有一个基本工作程序(见图3.3.1)。但，不同矿种，不同类型矿石以及不同品位的差别，又很难用一个程序解决不同的问题，根据不同的情况相应有不同的变化。此处仅列举几种有代表性的矿石，以供研究工作参考。

铁矿石

铁矿石不同于其他有色金属矿石，一般含铁30%左右或以上，矿石矿物组成一般比较简单。根据其矿物组成的不同，分磁铁矿矿石、赤铁矿矿石、褐铁矿矿石和菱铁矿矿石以及混合类型

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.1 可选性试验矿石工艺矿物学研究内容

序号	研究内容	目的
1	矿石化学组分考查 光谱分析 多元素分析 化学物相分析	决定选矿方法与选矿限度 快速了解矿石的化学组分全貌，阐明有无稀有、稀散金属 阐明主要组分，伴生有用、有害组分的准确含量 对主回收元素的不同化合物形式进行定量测定
2	有用、有害元素存在形式	决定选矿方法及选矿限度
3	矿石的矿物组成及其含量	同 上
4	矿石结构构造，有用矿物嵌布特征及其共生关系研究	确定选矿程序和磨矿限度
5	有用矿物粒度分析	同 上
6	影响选别的主要矿物的有关物理化学性质 硬度、密度（比重）、磁性、导电性、比表面等	决定选矿方法与选矿限度

矿石。不同类型矿石在磁性等物理性质上有显著的差异。

进行矿石性质研究时，首先查阅地质勘探报告，了解矿床成因类型和工业类型，以及矿石的变化与配矿问题，掌握围岩和夹石的情况，注意混入岩石对选别的影响，同时全面了解矿石成分、品位、结构构造和矿物嵌布特征等资料．在此基础上，进行可选性试验样品的工艺矿物学研究。在工艺矿物学研究中着重如下几项内容：

（1）矿石化学成分分析和矿石氧化度测定。首先对代表性矿样依次进行光谱分析、多元素化学分析（TFe、SFe、FeO、SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO、K_2O、Na_2O、S、P_2O_5），以及在矿物定性的基础上进行化学物相分析。对铁矿石的化学物相分

地信网论坛
bbs.3s001.com

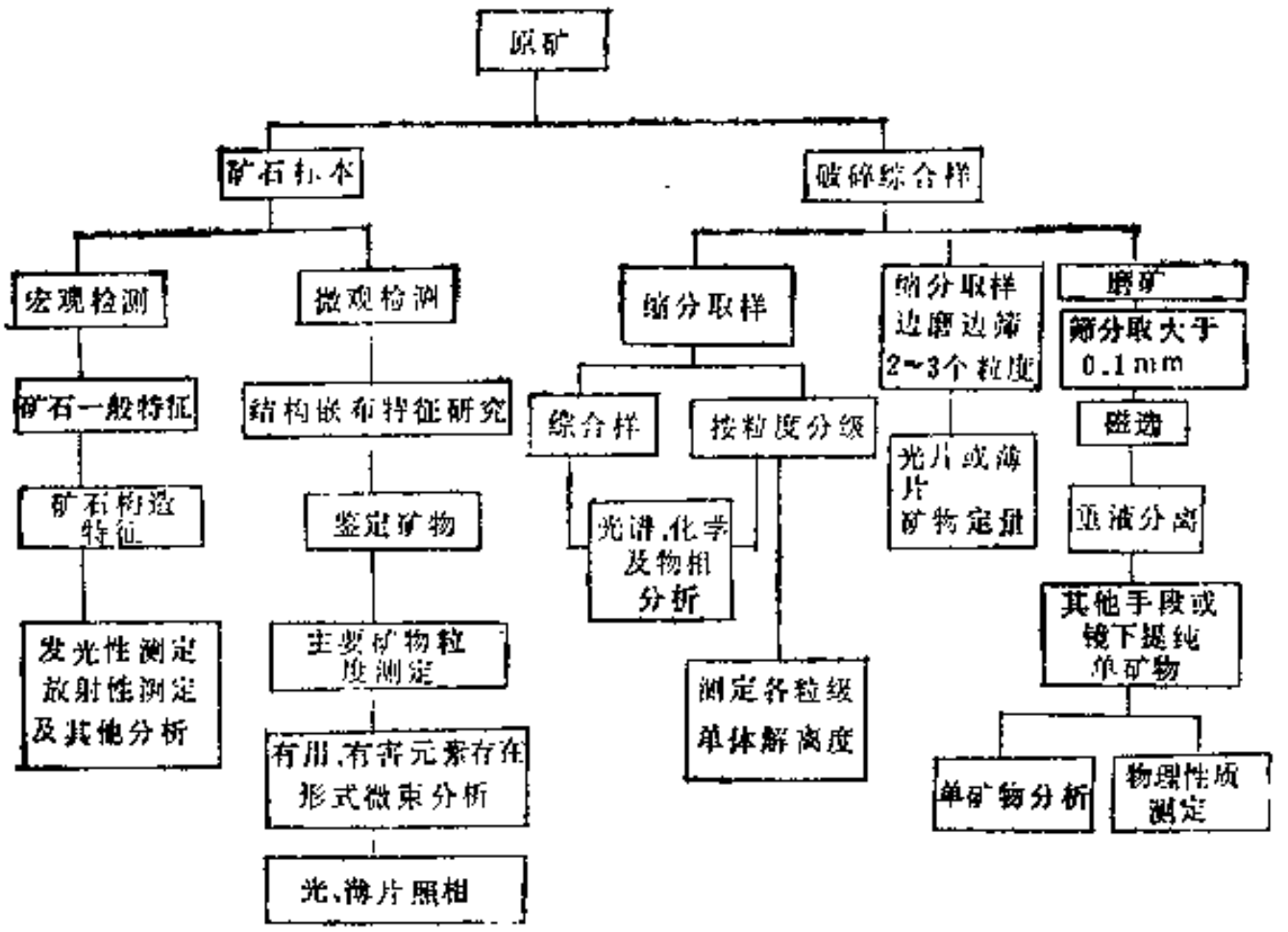


图 3.3.1 矿石工艺矿物学研究基本程序

析一般要求分析五个相：磁性铁，赤、褐铁矿，硫化铁，碳酸铁和硅酸铁。此外，矿石的氧化程度是选矿拟定方案时判断可选性的一项重要依据，在一般情况下，是用 TFe(全铁)/FeO 来表示氧化度（TFe/FeO<2.7 为原生磁铁矿，TFe/FeO=2.7～3.5 为混合矿，TFe/FeO>3.5为氧化矿）。但在脉石中存在有铁的硫化物、碳酸盐和硅酸盐时，此种计算方法则不适用，新“规范”已改为测定磁性铁，由于磁性铁占有率与弱磁选矿的回收率相接近，因此按磁性铁占有率大于85%、85～15%、小于15%来划分矿石类型。

（2）矿石结构构造研究。矿石结构构造和主要矿物嵌布特征与嵌镶关系决定了需要解离分选的矿物的解离特性和可选性的差异。如有用矿物颗粒与脉石之间的接触方式简单，其界线光滑平坦，在破碎时矿物就易于解离，且解离得完全。如连生边缘呈不规则的锯齿状结合或互相穿插，接触方式复杂则不易解离，往往需要增加磨矿细度。有的矿物呈显微状连晶则用破碎方法解离

地信网论坛
bbs.3s001.com

这些矿石常常是不可能的。从矿石构造看，带状构造、片状构造较为有利，粗磨就可分选出大部分脉石，而细粒浸染构造则必须将全部矿石磨得很细。从结构看，粒状、海绵晶铁状一般较易选别，压碎结构和格状固溶体分离结构也比较易解离，而交代溶蚀残余结构就很难彻底分离。

一般首先对矿石手标本进行宏观描述，然后磨制光片与薄片进行微观特征的研究。综合各类型磨制光、薄片各20～30块（必要时，根据矿石类型复杂程度也可相应增加光、薄片数量），对光片或薄片系统观察统计。矿石结构构造勿须分得太细，其结构构造分类见表3.3.2与表3.3.3。此外，为了表示矿染程度，视矿物颗粒包裹体分布密度，可采用简便的目测方法分级，（表3.3.4）。

（3）矿物粒度特性研究。选矿工艺所要求了解的矿物粒度参数是为了获得使有用矿物从脉石中解离出来的信息。

表 3.3.2 矿石构造常见分类

类别	特征
块状构造	矿石具有均一的结构。金属矿物呈粗大结晶集合体或细小结晶集合体或隐晶质集合体作为矿石基质部分，非金属矿物含量极少
浸染状构造	脉石矿物基质内金属矿物呈星散状分布
角砾状构造	一种或多种矿物集合体所成角砾被另一种或多种矿物集合体呈不规则状胶结，两者的成分，或其中一种是金属矿物，另一种是非金属矿物集合体，或两者全是金属矿物
条带状构造	矿物集合体在一个方向上伸长，以条带相间出现，二者间的界线可以是明显的也可是渐变的
脉状及网脉状构造	矿脉充填在岩石中和较早矿物集合体中穿插有较晚期矿物集合体的不规则的交错细脉形成网格状
多孔、疏松和蜂窝状构造	矿石在风化过程中一些矿物淋滤，而不易溶部分形成骨架，产生多孔和蜂窝状

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.3 矿石矿物结构常见分类

分 类	特 征
粒状结构	一种或多种矿物组成的矿石，金属矿物具自形、半自形或他形晶粒状
海绵晶铁结构	他形的金属矿物（如磁铁矿）胶结自形硅酸盐矿物而成
格状结构	沿矿物颗粒边缘或解理有另一种矿物集合体成规则格状分布
文象和次文象结构	一种矿物呈弯曲和蠕行状被包裹在另一种矿物中，两种矿物间具明锐界限
放射状结构	针状晶体成放射状排列
压碎结构	一种脆性矿物受压后产生裂缝，有许多尖角的碎块，塑性矿物在裂缝中成胶结物
乳浊状结构	金属矿物以细小乳滴状颗粒散布在基质矿物中
交代溶蚀和交代残余结构	一种矿物交代先形成的矿物和使先形成的矿物成零星不规则残留体，但尚能识辨其原来晶粒的轮廓

表 3.3.4 矿染程度简便目测分级

包裹体分布密度	磨片面积中包裹体，%
星散浸染	<1
稀疏浸染	1～5
中等浸染	5～25
稠密浸染	25～50
稠密直至块状	50～100

粒度测定一般在研究结构构造的几十块光薄片中测定统计。就代表性而言，最好取破碎综合样测定，但其破碎粒度应保证矿石中矿物最大粒度的上限不遭到破碎（一般大于原矿石中矿物粒度的上限的三倍）。也可在选矿试验的3～0毫米或6～0毫米综合

地信网论坛
bbs.3s001.com

样中测定。这种粒度分析称为碎磨3～0毫米或6～0毫米综合样的矿物粒度分析，所测粒度偏细，但矿样代表性强，对选矿工艺也有一定的参考价值。特别是对浸染粒度很细的矿石，其误差不太大。在综合样中测定粒度的同时，还可测铁矿物单体解离度，用以指导磨矿制度的确定。均匀粗粒结构，粗磨就可达到单体解离，粗细不均匀的则需要两段或多段磨矿。

在综合样中测粒度，样品的筛分是一个很重要的程序。首先脱泥（细泥称重，测铁品位），然后分成几个粒度均匀的粒级可提高显微镜测定的准确度。一般可取综合样1千克，缩分为100～200克，在400目或325目筛上冲洗试样干燥称重，+400目或325目用标准套筛筛分，－400目或－325目用水析分级，得到各粒级样后，按粒级分别制备成砂光片或砂薄片测定。

（4）矿物定量测定。在矿物定量方面，如矿石矿物组成简单，不存在硫化铁、碳酸铁或硅酸铁，而铁矿物又是单一铁矿物时，则进行可溶铁分析后就可换算成矿物量，但这种情况是不多见。通常是几种铁矿物和含铁矿物同时出现，往往需要制成砂光片或砂薄片在显微镜下定量测定。显微镜下定量法可与化学物相分析定量相结合，两者相互补充，又彼此检验。用矿物定量数据再根据多元素化学分析结果和单矿物的化学成分作出元素平衡计算，确定铁以各种矿物形式存在的分配率。

定量测定中的关键问题是样品的代表性与制片技术。定量样品应取自2～0毫米综合样0.5千克，经进一步磨碎，边筛分边磨使全部通过100目或150目，再从中缩分取出20克筛分为2～3个级别，一般可分－100+150目，－150目+200目，－200目三个级别。前两个级别各制备2～4块砂光片和2～3块砂薄片、后一个级别可制备1～2块砂光片和1～2块砂薄片。制片过程中应注意防止因矿物粗、细颗粒和比重大小的差异所发生的自然沉降，或磨抛技术不佳、掉渣、磨损、未抛出光面等而失去样品代表性的问题。

（5）矿物有关物理化学性质测定。对各种铁矿物以及影响

地信网论坛
bbs.3s001.com

选别的有害矿物的比重、磁性或可浮性进行测定。

铜、铅、锌矿石

原生矿石。自然界中有单一的铜矿石或铅、锌矿石，也常有铜、铅、锌共生矿石。其工艺矿物学的研究内容与程序大体上与铁矿石研究相似。但由于其品位比铁矿石低得多，其工作量相应增大。同时，铜、铅、锌矿石通常含有金、银、镉、铟、硒、碲及其他稀有元素；需查定这些稀贵元素的赋存状态和载体矿物，因此常需增补单矿物分离富集与元素赋存状态研究的内容。此外，在多金属矿和铜矿石的研究中，常碰到一些专门的与硫化矿物的外生蚀变有关的问题，有时需要对矿物进行表面性质的研究，以找出硫化矿浮选中某些难选因素。

下面只就用对铁矿石的研究内容与程序进行研究时应增补的项目作提示。

（1）化学分析与化学物相分析以及矿石氧化度测定方面，要考虑在光谱半定量的基础上拟定多元素或全分析的项目中应包括SiO_2、Al_2O_3、TFe（如该矿石矿物组成含有磁铁矿、赤铁矿和褐铁矿时须要增加Fe_2O_3、FeO项目）、CaO、MgO、Na_2O、K_2O、C、CO_2、SO_2和S（全硫）。在多金属矿石中要测Cu、Pb、Zn、Ag、As、Sn、Sb；在铜-钼矿石中要测Mo、Cu、Pb、Zn。对所有矿石都要进行金的试金分析。化学物相分析方面，铜矿石需测硫酸盐、自由氧化铜、原生硫化铜、次生硫化铜、结合铜五相。铅矿石需测铅矾、白铅矿、方铅矿、砷铅矿四相。锌矿石需测硫酸锌、氧化锌、硫化锌、异极矿和硅锌矿五相。

此外，对矿石氧化度的测定，对铜、铅、锌……等有色金属而言，其氧化率的表示方法一般是以该金属氧化矿物的金属量与总金属量之比。常根据氧化率的不同划分为三种不同的矿石类型。氧化率小于10%者为原生矿石，氧化率在10～30%者为混合矿石，氧化率在30%以上者为氧化矿石。

（2）矿石结构构造与矿物嵌布粒度研究所需磨制的光、薄

地信网论坛
bbs.3s001.com

片数，对工艺类型较简单的矿石，一般光片30～50片，薄片20～40片，而工艺类型较多，比较复杂的矿石则需光片60～100片，薄片40～60片。

（3）显微镜法测定矿物含量时，所需测定目的矿物的颗粒数是根据矿石品位而定，含量1～5%者，目的矿物的颗粒数应达100～150粒，含量0.5～1%者，50～100粒，含量小于0.5%者，应不少于50粒，对含量小于0.1%者，应分离富集后再进行矿物定量。

（4）通常要测定矿物的密度（比重）、比磁化系数、润湿性、矿物可溶性与热稳定性。此外，根据矿石实际情况还可考虑测定矿物的导电性、发光性，以便利用电选、光电选矿。

氧化矿石。在氧化带中要注意选取含硫化物残留体的标本，有利于研究次生矿物。方铅矿和闪锌矿在氧化带中转化为硫酸盐、碳酸盐、氧化物及硅酸盐等各种次生矿物。铅和锌的次生矿物主要是在薄片中研究，使用油浸法鉴定，必要时辅以X-射线结构分析、差热热重和红外分析，可以得到比较全面的结果。氧化带的次生矿物常被其它赭土或被膜之类混染，增加了矿物定性特别是定量上的困难，通常不得不增加各种分析数据。总的说，氧化程度很深难以辨认的矿物，要用选择溶解法来配合矿物鉴定。在矿物定量上通常采用化学物相分析方法，对化学物相分析区分不开计作一个相时，则通常利用显微镜或X-射线衍射分析、差热、热重分析测出各矿物相之间大致比例关系，再根据多元素分析结果，计算出各矿物的含量。此外，要注意用物理分离和选择溶解法获得的单矿物测定其中的稀贵金属含量。

钨、锡、钼矿石

在多数情况下，石英-辉钼矿石、石英-黑钨矿石以及石英-锡石矿石含金属矿物较贫，因此进行矿石物质成分研究和矿物定量时，应先经过富集，如先磁选，后重选（小摇床分选、淘洗或重液分离），把有用矿物富集于重粒级中，对重粒级再电磁分选。磁铁矿与磁黄铁矿在磁性级产品中；石榴石、黑钨矿、钨锰

地信网论坛
bbs.3s001.com

铁矿进入强电磁性级产品中；辉石、角闪石、石榴石、赤铁矿进入中电磁性级产品中；绿帘石、褐铁矿、铁的氢氧化物进入弱电磁性级产品；其他硫化物、锆石、磷灰石、金红石和锡石集中于非电磁性级，而锡石如表面被污染或裂隙被铁的氢氧化物充填，也可进入弱电磁性级。

要注意用光谱定量和化学分析查定金属矿物和非金属矿物中稀有和分散元素，如辉钼矿中的Re、Se、Te；黑钨矿中的Ta、Nb、Sc、In、Sn；白钨矿、萤石、石榴石、绿帘石中的 稀土；白云母、长石及辉石中的Li、Rb、Cs和Be。

石英脉型钨矿石，黑钨矿常形成相当大的单 体，其 矿 物定量、粒度和解离度分析，也可在实体显微镜下测定，对轻矿物定量还可采用选择溶解法或染色法测定。

如样品中有泥级矿粉存在，可通过冲洗脱除矿泥，对矿泥称重，分别作光谱、化学分析，并在显微镜下用油浸法研究组成矿物。

含金矿石

含金矿石按金矿床类型划分有砾岩金矿石、砂金矿石、石英脉金矿石、含少量金的有色金属矿石和复杂含金矿石（包 括 金-银、金-砷、金-锑、金-铀、金-硒、金-锰、含泥金矿石 与 含碳金矿石等）。这些含金矿石的特点是，金品位相当低。因此进行工艺矿物学研究，根据金的品位高低的不同，往往需要十千克甚至几十千克的试料进行工作。

其研究内容与程序见图3.3.2与3.3.3。

在脉金矿石中，考查金的产状与嵌布特性，一般是分为裂隙金、粒间金（亚种：砾间金）、包裹金。在金粒细小时，很难直接在显微下确定，可先在光学显微镜中倍（300～400倍）镜下细心观察网脉构造和包体等，标记出网脉或包体可能含金的区域，然后在电子探针或扫描电镜下，对这些区域以1000倍以上的倍数进行扫描，寻找金的存在，包括金的碲化物。并确定金与其它矿物之间的镶嵌关系。

地信网论坛
bbs.3s001.com

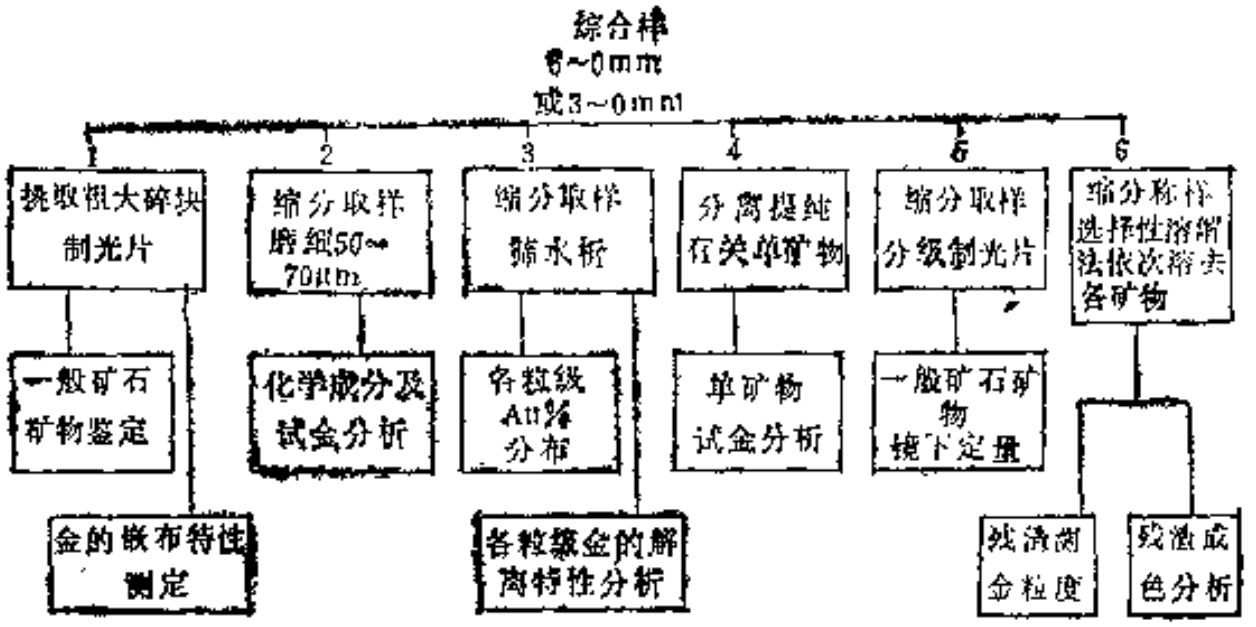


图 3.3.2 金矿石工艺矿物学研究内容

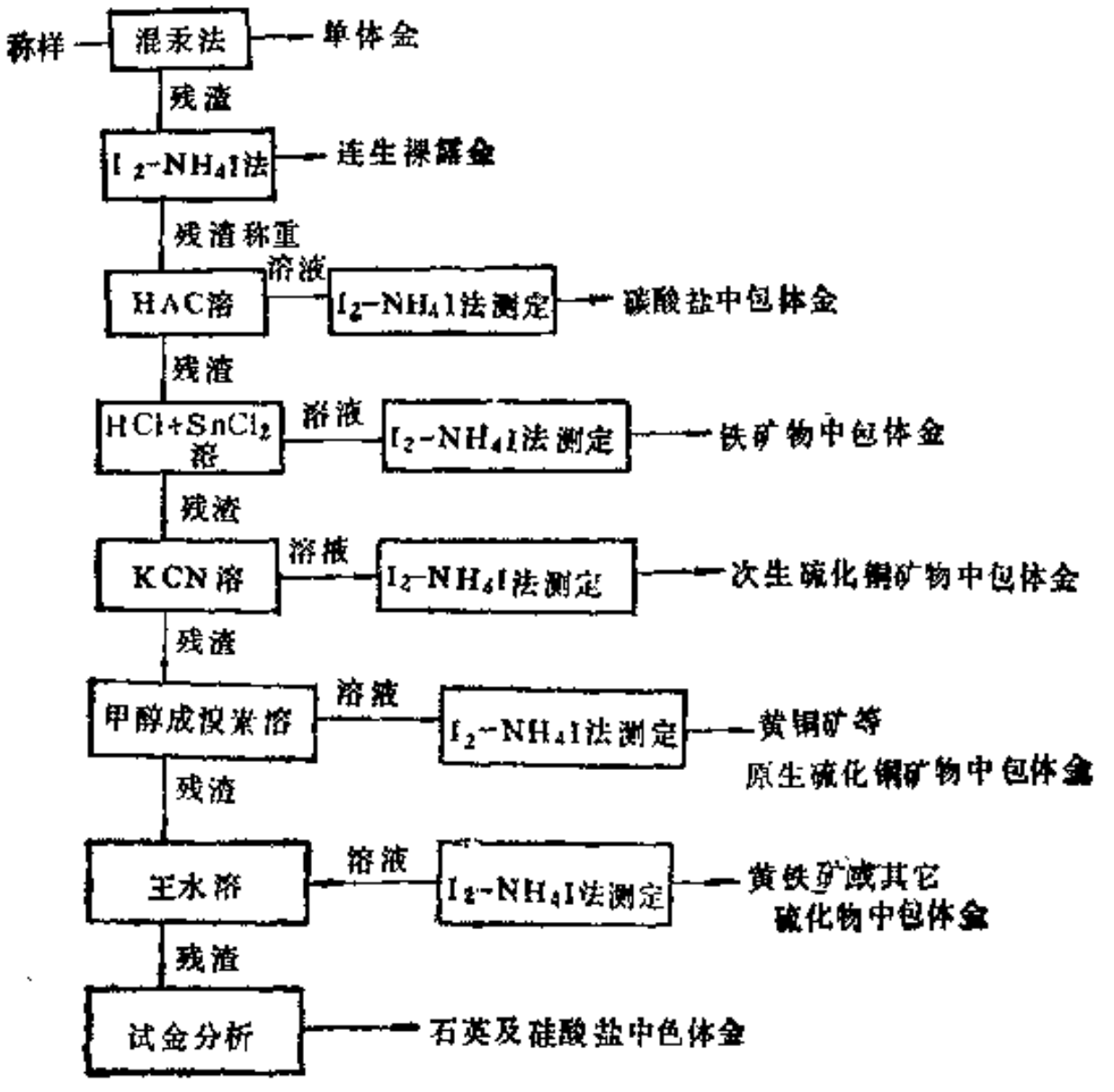


图 3.3.3 金的解离特性分析原则流程

地信网论坛
bbs.3s001.com

在多金属硫化矿石中，查金在各载体矿物的配分时，一般都须提纯各种单矿物送金、银分析。在用综合样进行了矿物定量的基础上，计算金在各种矿物间的配分率。但如果单矿物难于提纯，也可采用对提纯的富集物求近似值的办法，以解决单矿物提纯耗时费力的问题。

近似值的求法，仍需测定各单矿物富集物中各种杂质矿物的比例，用已知的比例和各矿物的未知金含量与综合样中已知金含量的关系式设一组联立方程式，用最小二乘回归方法求解。

金的成色分析（用千分数表示，如800/1000＝80%）可用电子探针测定一定数量的金粒上Au%与Ag%，获得金粒最高成色，最低成色。或采用提取人工重矿—化学分析方法测定金的平均成色（化学溶矿—残渣送原子吸收分析法或微量化学分析）。后一种方法在矿石中还含有显量的银矿物时，则应除掉银矿物后进行测定计算，否则会带来严重误差。

此外，含金的氧化矿石常使金粒表面产生天然薄膜，在提取处理工艺中有时金粒表面也会新生成薄膜，会恶化混汞或氰化提取，往往须要对金粒进行表面性质研究，可用各种分离提纯方法获取金的富集物，用俄歇探针对其进行表面成分测定，或用超声波振荡，对表面脱落部分进行电子衍射分析。

对复杂含金矿石，如用常规分析法找不到金，就应考虑次显微金与吸附金的问题，须用特殊方法处理查定。对次显微金可考虑分离富集载体矿物，进行超高压电镜选区衍射分析。对吸附金还可考虑将载体矿物焙烧，使胶体金外圈的氢氧根加热脱出，用带正电荷的明胶作解吸剂，进行胶体金解吸浮选，以证明金的吸附态。

3.3.2 选厂设计选矿工艺流程试验工艺矿物学研究

为选厂设计所进行的选矿工艺流程试验，在深度、广度、精度上都要满足设计的需要，往往需要在详细方案对比的基础上，提出最终推荐的选矿方法和工艺流程。对复杂矿石除了实验室试

地信网论坛
bbs.3s001.com

验外，尚须进行半工业试验或工业试验。为此，工艺矿物研究深度也随之提高。在可选性试验工艺矿物学研究基础上深入。其研究内容见表3.3.5。在整个研究程序上应分两个阶段来开展工作。第一个阶段是在选矿试验前，快速初步地对矿石矿物组分有个定性研究，以及时提供资料作制定方案流程的依据。第二个阶段是全力以赴去查找影响工艺指标的主要问题。边结合选矿试验考查过程产品，对精矿、中矿、尾矿都要进行显微镜观察，有用矿物单体解离率和有害杂质存在情况，考查是否需要再磨再选等流程结构问题；边深入进行对主回收矿物在工艺流程中的运动规律的

表 3.3.5 选矿工艺流程试验工艺矿物学研究内容

除可选性试验工艺矿物学研究内容之外，着重深入的方面

研究内容	目的
有用、有害元素赋存状态研究	考虑综合回收和除杂方式
铜、铅、锌矿石往往需要分析提纯单矿物查定金、银。并要注意Pb、Zn硫化物中的镉、铟、铊、硒和碲的分析，以及磷酸盐、碳酸盐中的钇和稀土的分析	考虑综合回收，提高经济效益
不同世代主回收矿物物化性质差异	影响回收率原因考查
矿物表面性质及微量元素对分选影响的研究	同上
磨矿细度试验产品考查	推荐磨矿产品的细度与段数
工艺试验产品及最终产品系统考查 筛水析各粒级矿物组成 主回收矿物粒度组成比 主回收矿物单体解离度	检查流程的效果 确定最佳选别粒级
不同类型原矿石半工业、工业试验产品对比考查 矿石工艺类型划分 各类型矿石地质空间分布规律研究	指导生产配矿

地信网论坛
bbs.3s001.com

工艺矿物学研究，必要时进行有关物理化学性质的测定。最后必须进行系统的最终产品考查，根据全部工艺矿物学研究资料来评价选矿方法及工艺流程的合理性，为选矿工艺方案选择及流程试验过程中障碍的查找提出基础资料，最后编写工艺矿物学研究报告。

3.3.3 选厂效率最佳化的选矿试验工艺矿物学研究

生产现场的选矿试验是为强化现场生产过程而进行的专题性试验研究。如提高精矿品位和回收率，或改进工艺流程、提高设备效率以及资源综合利用等试验研究。工艺矿物学研究目的性非常明确，针对性强。其原则研究内容和程序与3.3.2大致相同。参见表3.3.5。

3.3.4 选厂生产流程工艺矿物学考查

对选厂生产全流程定期进行工艺矿物学考察，旨在提高现厂指标，提高经济效益。对生产流程中各阶段产品进行研究，考察矿物在选矿过程中的性状，了解磨矿细度是否合适，产品品级是否最佳，尾矿金属损失是否合理，不合格产品含杂原因与除杂的有效地点和方法，以及综合利用程度高低等方面的问题，可检查工艺流程的效果，评价现有流程的合理性，以及就如何更合理地综合利用已开发的资源，预示和指明提高生产指标的途径、产品系列以及工艺流程改革的方向。因此，选厂应定期了解选矿工艺流程中各段的矿物行为，对工艺流程在质与量方面进行全面性的分析，根据掌握的生产全流程入选矿石工艺性质的系统工艺矿物学研究结果，调整配矿比，使矿山稳定生产，或进行现有生产流程的改造。

全流程考查应对所有出口物料进行取样研究，研究内容见表3.3.6。

选厂生产流程中工艺矿物学研究的样品，应代表日处理数百吨乃至几千吨矿石的选厂的物料流。为了保证所研究的样品具有

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.6 选厂生产流程工艺矿物学考查内容

研究对象	研 究 内 容	研究目的
分级溢流	元素的粒级分布，各粒级和全样的单体解离度	判别磨矿细度的合理性 探寻进一步提高指标的可能性
粗选精矿	确定有害杂质含量和种类	为精选提供依据
精选精矿	主回收矿物的单体解离度和粒级分布率杂质矿物的成分 杂质矿物混入的形式（单体抑连生体）杂质矿物的粒级分布	提高品位，降低杂质含量，改进质量
中 矿	查明主回收矿物存在形式及其含量，测定单体解离度，连生脉石种类与粒度分布	为回收方式提供依据
尾 矿	主回收矿物流失形式（单体抑连生体）及其含量； 主回收矿物粒度分布、单体解离度与连生形式； 必要时，进行主回收矿物物化性质测定	考查流失原因，为改善选别指标提供依据

代表性，需要较长的取样时间，在研究选厂的一个回路或一个车间时，应每个班取样，取样间隔时间为 1 小时，取样连续时间可1～2天。而若全面研究选厂的全部最终产品和中间产品，则取样连续时间不得少于一周，一般15天左右。矿浆样品应先过滤，然后用丙酮清洗滤饼，以防止矿浆絮凝，干燥后缩分成具有代表性的小样。

取样检测的目的、内容、方法均与前述小型试验相同。

3.3.5 实 例

3.3.5.1（实例 1） 解离参数测定与理论选别指标计算

对某地铁矿石小型浮选试验矿样进行了铁矿物解离参数测定与理论选别指标计算，情况如下：

地信网论坛
bbs.3s001.com

原矿石含全铁32.40%，$SiO_2$51.12%。其矿石的矿物组成见表3.3.7。

表 3.3.7 原矿石中主要矿物含量

矿物名称	磁铁矿	假象、半假象赤铁矿	赤铁矿	褐铁矿	黄铁矿	脉石矿物
含量，%	6.5	1.5	34.5	2.5	0.1	55.40
铁矿物相对含量，%	14.41	3.33	76.50	5.54	0.22	

根据选矿研究的需要，对磨矿细度分别为85%－200目、95%－200目、95%－270目、95%－325目的四个磨矿产品进行了铁矿物单体解离度的测定。将四个产品各分为三个粒级（+200目、－200目+400目、－400目）磨制光片在反光显微镜下测定。测定中，以中倍（45×）物镜下未见有与脉石连生的铁矿物颗粒均为单体，与脉石连生者，不论脉石的颗粒大小均为连生体。连生体又按其中铁矿物所占比例大小分＞3/4、3/4～1/2、1/2～1/3、＜1/3四类分别进行统计。结果列于表3.3.8。

表 3.3.8 不同磨矿细度产品铁矿物单体解离度及连生体结果

磨矿细度	单体，%	连生体		总计
		与石英连生的铁矿物，%	与绿泥石等连生的铁矿物，%	
85%－200目	74.88	20.14	4.98	100
95%－200目	83.76	11.86	2.38	100
95%－270目	89.54	7.76	2.70	100
95%－325目	91.33	6.36	2.31	100

表3.3.8表明，连生体以铁矿物与石英连生为主，次为与绿泥石等脉石连生。在磨矿细度为85%－200目时，其铁矿物的单体解离度为74.88%，而95%－325目时则为91.33%。这说明该铁

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿石中的铁矿物易于单体解离者不超过75%，难于单体解离者占15%左右，相当难解离者占10%左右。

连生体又可分为贫、富连生体。贫、富连生体占有率的多少将对选别指标有直接的影响。通常把有用矿物在连生体中的比值>1/2者称为富连生体，<1/2者称为贫连生体。其统计结果列于表3.3.9。

表 3.3.9 不同磨矿细度产品铁矿物单体及各种比例的连生体含量

磨矿细度	单体，%		各种比例的连生体含量，%				总计
			>3/4	3/4～1/2	1/2～1/3	<1/3	
85%－200目	个别	74.88	9.70	9.18	3.98	1.63	100
	累计		84.58	94.39	98.37	100	
95%－300目	个别	83.76	5.78	6.83	2.89	0.74	100
	累计		89.54	96.37	99.26	100	
95%－270目	个别	89.54	4.40	3.66	1.62	0.78	100
	累计		93.94	97.60	99.22	100	
95%－325目	个别	91.33	3.63	3.06	1.29	0.69	100
	累计		94.96	98.02	99.31	100	

从表3.3.9中可看出，没有解离的铁矿物以富连生体为主。累计含量可理解为回收全部单体铁矿物及不同比值连生体时，可达到的最高回收指标。若回收全部单体及$>\frac{1}{2}$的富连生体铁矿物，则回收率可达94.39%以上（磨矿细度为85%－200目时）。可见，对于该铁矿石来说，在较粗的磨矿条件下富集铁丢尾矿，粗精矿再磨或选出一部分合格精矿后，中矿再磨再选的阶段磨矿、阶段浮选流程理应更符合该矿石的性质。

在选别过程中，富连生体易与单体一起被选入精矿，但与此同时也将与其连生的各种脉石带入精矿，成为影响精矿质量的一个重要因素。其带入量的多少和与铁矿物连生的脉石量有关。为

地信网论坛
bbs.3s001.com

此，必需系统测定铁矿物单体、连生体及与铁矿物连生的脉石量，根据其含量可计算出不同磨矿细度下铁精矿的理论品位及杂质含量。

（1）按回收全部单体和连生体铁矿物，即铁回收率为100%时，不同磨矿细度下理论铁精矿中单体、连生体铁矿物及连生体脉石矿物的含量和理论铁精矿品位的计算结果列于表3.3.10。

表 3.3.10 回收全部单体和连生体铁矿物时的理论指标

磨矿细度	铁矿物		与铁矿物连生的脉石		总计	铁回收率 %	铁品位 %
	单体，%	连生体 %	石英，%	其他脉石 %			
85%－200目	69.97	21.67	7.03	1.33	100	100	63.23
95%－200目	79.75	14.62	4.34	1.29	100	100	65.11
95%－270目	86.24	9.73	3.10	0.93	100	100	66.22
95%－325目	88.34	8.19	2.58	0.89	100	100	66.61

（2）回收全部单体和＞1/2的连生体铁矿物时，不同磨矿细度下理论铁精矿中单体、连生体铁矿物及连生体脉石矿物的含量和理论铁精矿回收率、品位的计算结果列于表3.3.11。

表 3.3.11 回收全部单体和＞1/2连生体铁矿物时的理论指标

磨矿细度	铁矿物		与铁矿物连生的脉石		总计	铁回收率 %	铁品位 %
	单体，%	连生体 %	石英，%	其它脉石 %			
85%－200目	76.00	20.32	2.84	0.84	100	94.39	66.46
95%－200目	84.37	12.83	1.95	0.85	100	96.37	67.07
95%－270目	89.57	8.63	1.19	0.61	100	97.60	67.76
95%－325目	91.38	7.08	0.99	0.55	100	98.02	67.94

（3）回收全部单体和＞3/4的连生体铁矿物时，不同磨矿细度下理论铁精矿中单体、连生体铁矿物及连生体脉石矿物的含量和理论铁精矿回收率、品位的计算结果列于表3.3.12。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.12 回收全部单体和>3/4连生体矿物时理论指标

磨矿细度	铁矿物		与铁矿物连生的脉石		总计	铁回收率 %	铁品位 %
	单体，%	连生体 %	石英，%	其他脉石，%			
85%－200目	85.46	12.97	1.20	0.37	100	84.58	67.92
95%－200目	92.03	7.09	0.66	0.22	100	89.54	68.39
95%－270目	94.40	4.93	0.39	0.28	100	93.94	68.54
95%－325目	95.46	3.98	0.33	0.23	100	94.96	68.61

从上述计算结果看，连生体脉石夹杂量对铁精矿品位的影响并不严重。这说明，如果分离效果理想，铁精矿品位是可能比较高的。

3.3.5.2（实例2） 元素平衡计算及其应用

某地一大型含锌铜矿床，矿石工业类型主要有含铜黄铁矿型、含铜矽卡岩型和含铜斑岩型三种。选矿试验采样按三种工业类型的氧化矿（氧化率>30%）和混合矿（氧化率10~30%）分别采取，对每种工业类型的氧化矿石和混合矿石按1：2配成三个综合试样，试样分别编号为p-001(含铜黄铁矿型综合样)，s-001（含铜矽卡岩型综合样）和π-001（含铜斑岩型综合样)。

对上述三个综合样，在分别进行了多元素分析，铜、锌元素的化学物相分析，显微镜下矿物百分含量测定以及各类型矿石中的各矿物的铜、锌含量测定（电子探针分析）的基础上，进行铜、锌主回收元素的分布及其元素平衡计算列于表3.3.13、表3.3.14、表3.3.15、表3.3.16、表3.3.17和表3.3.18。

根据元素平衡计算表，结合各类型综合样中铜矿物的解离特性测定，就可估算出三种类型矿石浮选铜的理论指标。

3.3.5.3（实例3） 某地铅锌氧化矿物质组成研究阶段报告

某地铅锌矿是我国最大的铅锌矿床，伴生有硫、镉、铊、锶、钡、铁、银等有价金属，可供综合利用。矿体上部氧化强烈，局部次生富集发育。有一部分高铁灰岩型氧化矿待充分利

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.13 各类型矿石多元素分析

矿石类型	元素含量，%												
	Cu	Zn	S	Fe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	As	Mo	Pb	Bi	Co
p-001	1.49	0.41	31.30	32.95	22.12	2.92	0.14	0.07	0.049	<0.005	0.056	0.022	0.0017
s-001	0.64	0.52	9.70	24.75	37.92	4.10	6.61	0.31	0.031	0.0038	0.02	0.022	0.0037
x-001	0.68	0.095	6.35	9.10	60.54	11.68	0.14	0.33	0.013	0.013	0.023	0.0054	0.0034

矿石类型	元素含量，%								
	Au g/t	Ag g/t	Ga	In	Tl	Ge	Cd	Se	Te
p-001	0.32	20.5	0.0032	0.00084	0.0008	0.0004	0.012	0.0039	0.0036
s-001	0.14	12.6	0.0023	0.0006	0.0002	0.0006	0.0049	0.0011	0.0023
x-001	0.06	7.0	0.0018	0.0004	0.0002	0.0004	0.0012	0.0009	0.001

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.14 各类型矿石铜物相分析，%

矿石类型	水溶铜		自由氧化铜		结合氧化铜		次生硫化铜		原生硫化铜		总铜
	Cu	分配率	Cu	分配率	Cu	分配率	Cu	分配率	Cu	分配率	Cu
p-001	0.32	22.61	0.01	0.71	0.005	0.35	0.92	65.02	0.16	11.31	1.415
s-001	0.01	1.59	0.058	9.21	0.072	11.43	0.36	57.13	0.13	20.64	0.63
π-001	0.012	1.64	0.041	5.61	0.02	2.73	0.61	83.45	0.048	6.57	0.731
相应矿物	胆矾、铜绿矾		孔雀石、硅孔雀石、蓝铜矿		褐铁矿、脉石中铜		铜蓝、辉铜矿、蓝辉铜矿、自然铜、斑铜矿、砷黝铜矿		黄铜矿		

表 3.3.15 各类型矿石锌物相分析，%

矿石类型	水溶锌		氧化锌		硫化锌		其它锌		总锌
	Zn	分配率	Zn	分配率	Zn	分配率	Zn	分配率	Zn
p-001	0.11	26.19	0.09	21.43	0.19	45.24	0.03	7.14	0.42
s-001	0.02	3.77	0.23	43.40	0.13	24.53	0.15	28.30	0.53
π-001	0.01	8.13	0.042	34.15	0.033	26.83	0.038	30.89	0.123
相应矿物	胆矾等		含锌菱铁矿		闪锌矿、铁闪锌矿及硫化物中的锌		褐铁矿(含锌)铁锌尖晶石		

表 3.3.16 各类型矿石矿物含量

矿石类型	金属硫化物，%														小计
	黄铁矿	闪锌矿	黄铜矿	斑铜矿	辉铜矿	蓝辉铜矿	铜蓝	自然铜	黝铜矿	砷黝铜矿	硫砷铜矿	铜锌铁硫化物共晶体	辉钼矿	其他硫化物	
p-001	55.0	0.30	0.50	0.04	0.24	0.30	0.50	0.02	0.05	0.03	0.02	0.50	0.002	0.04	57.54
s-001	17.0	0.25	0.35	0.02	0.10	0.08	0.20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.20	0.005	0.025	18.31
π-001	11.0	0.04	0.14	0.01	0.20	0.20	0.30	0.005	0.01	0.01	0.02	0.10	0.015	0.015	12.07
备注	包括白铁矿胶状黄铁矿	包括铁闪锌矿					包括铁铜蓝							包括磁黄铁矿、毒砂、硫铋铅矿等等	

矿石类型	金属氧化物与脉石矿物，%														小计
	孔雀石	铜矾类矿物	锌矾类矿物	磁铁矿	褐铁矿	菱锌矿	石英	长石	石榴石	透辉石	粘土矿物	绢云母	铁钙矾类矿物	其它脉石矿物	
p-001	0.02	1.60	0.30	0.2	10.0	1.0	19.0	1.0	0.4	0.2	4.0	2.0	2.5	0.24	42.46
s-001	0.10	0.05	0.04	1.5	15.0	5.0	21.0	3.0	24.0	2.0	6.0	2.0	1.5	0.49	81.68
π-001	0.07	0.05	0.02	0.2	4.2	1.5	43.0	9.0	1.0	0.4	20.0	7.0	1.0	0.46	87.93
备注	包括蓝铜矿蓝孔雀石	胆矾、铜绿矾等	皓矾等	包括赤铁矿					以钙铁石榴石为主	包括透闪石绿帘石	以高岭石为主	包括黑云母白云母	包括铁矾	方解石、有机炭等	

注：矿物定量以光学显微镜为主要手段，结合X-射线衍射、电子探针定性，元素化学分析与物相分析定量结果，互相核对、验证、计算而得。

地信网论坛 bbs.3s001.com

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.17 各类型矿石中铜的分布与铜元素平衡计算

矿物种类	含铜量，%	黄铁矿型矿石，%			矽卡岩型矿石，%			斑岩型矿石，%		
		矿物量	金属量	分布率	矿物量	金属量	分布率	矿物量	金属量	分布率
胆　矾	25.5	1.00	0.255	17.02	0.03	0.008	1.24	0.03	0.008	1.16
铜绿矾	10.0	0.60	0.060	4.01	0.02	0.002	0.31	0.02	0.002	0.29
孔雀石	57.5	0.02	0.012	0.80	0.10	0.058	8.96	0.07	0.040	5.80
褐铁矿	0.45	10.00	0.045	3.01	15.0	0.068	10.51	4.20	0.019	2.76
自然铜	98.0	0.02	0.020	1.34	0.02	0.020	3.09	0.005	0.005	0.73
铜　蓝	66.5	0.50	0.333	22.24	0.20	0.133	20.56	0.30	0.200	29.02
蓝辉铜矿	74.9	0.30	0.225	15.03	0.08	0.060	9.27	0.20	0.150	21.77
辉铜矿	79.9	0.24	0.192	12.83	0.10	0.080	12.36	0.20	0.160	23.22
斑铜矿	63.3	0.04	0.025	1.67	0.02	0.013	2.01	0.01	0.006	0.87
黄铜矿	34.6	0.50	0.173	11.56	0.35	0.121	18.70	0.14	0.048	6.97
黝铜矿	41.3	0.05	0.021	1.40	0.02	0.008	1.24	0.01	0.004	0.58
硫砷铜矿	41.5	0.02	0.008	0.53	0.02	0.008	1.24	0.02	0.008	1.16
砷黝铜矿	51.6	0.03	0.015	1.00	0.02	0.010	1.55	0.01	0.005	0.73
铜、锌、铁硫化物混合体	17.0	0.50	0.085	5.68	0.20	0.034	5.25	0.10	0.017	2.47
其他硫化物	10.0	0.04	0.004	0.27	0.03	0.003	0.46	0.035	0.003	0.44
闪锌矿	2.0	0.30	0.006	0.40	0.25	0.005	0.77	0.04	0.001	0.15
黄铁矿	黄铁矿型 0.03 矽卡岩型 0.07	55.0	0.017	1.14	17.0	0.012	1.86	11.00	0.008	1.16
脉　石	黄铁矿型 0.003 矽卡岩型 0.006	30.84	0.001	0.07	66.54	0.004	0.62	83.61	0.005	0.72
合计（原矿）		100.00	1.497	100.00	100.00	0.647	100.00	100.00	0.689	100.00

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.18 各类型矿石中锌的分布与锌元素平衡计算

矿物种类	含锌量 %	黄铁矿型矿石，%			矽卡岩型矿石，%			斑岩型矿石，%		
		矿物量	金属量	分布率	矿物量	金属量	分布率	矿物量	金属量	分布率
闪锌矿（铁闪锌矿）		0.30	0.189	44.26	0.25	0.151	29.09	0.04	0.024	23.76
铜锌铁硫化物混合体	7.8	0.50	0.039	9.13	0.20	0.016	3.08	0.10	0.008	7.92
次生硫化铜矿物	0.6	1.08	0.006	1.41	0.40	0.002	0.39	0.71	0.004	3.96
胶状黄铁矿	0.6	1.0	0.006	1.41	0.50	0.003	0.58	0.40	0.002	1.98
皓矾	22.7	0.3	0.068	15.92	0.04	0.009	1.74	0.02	0.005	4.98
菱铁矿		1.0	0.028	6.56	5.0	0.225	43.35	1.5	0.039	38.62
褐铁矿（少量铁锌尖晶石）		10.0	0.091	21.31	15.0	0.113	21.77	4.2	0.019	18.81
黄铁矿与其它金属矿物与脉石矿物	忽略不计（微量）	85.82			78.61			93.03		
合 计		100.00	0.427	100.00	100.00	0.519	100.00	100.00	0.101	100.00

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.19 可选性试样XKY50配样表

矿体号	矿石名称	采样			分析结果，%						送样	
		点号	位置	重量 kg	Pb	铅氧化率	Zn	锌氧化率	Fe_2O_3	FeO	标本编号 JB	重量 kg
Ⅺ	铅锌赤铁矿褐铁矿灰岩角砾岩	XKY50-1	P28-1-C60	256	1.07	44.86	5.02	85.26	23.87	0.13	5001—04	100
	铅锌褐铁矿石	-2	29-C451	362	5.73	63.70	10.11	65.58	54.75	0.09	—7	20
	铅锌褐铁矿石	-3	31 C59	324	4.19	58.23	12.24	76.96	50.02	0.09	—10	20
	灰岩角砾岩褐铁矿铅锌矿石	-4	32 C105	276	1.47	52.38	29.85	90.79	26.20	0.09	—13	120
	灰岩角砾岩铅锌褐铁矿石	-5	33 C64	231	0.72	40.28	25.96	89.52	30.41	0.13	—15	100
	赤铁矿褐铁矿铅锌灰岩角砾岩	-6	33-C466	333	1.09	40.37	25.29	95.69	15.12	0.09	—17	160
Ⅺ	褐铁矿铅锌灰岩角砾岩	-7	34-C148	333	2.00	59.00	18.49	85.83	22.11	0.22	—22	150
	褐铁矿石	-8	35-C61旁	336	0.49	42.86	1.86	44.62	56.52	0.09	—24	30
	褐铁矿灰岩角砾岩铅锌矿石	-9	36-C409	335	6.39	88.26	28.94	93.12	17.63	0.11	—27	100
	褐铁矿铅锌灰岩角砾岩	-10	P37-ZK295	240	1.53	69.28	13.17	86.18	17.50	0.44	—29	110
	铅锌褐铁矿石	-11	P37南-C89	205	9.33	68.66	3.79	52.24	52.41	0.14	—31	10
	铅锌褐铁矿灰岩角砾岩	-12	P37南-C408	341	5.51	64.07	7.03	67.43	35.51	0.09	—33	80
	合计			3622	2.38	56.09	18.95	85.46	25.15	0.16	33	1000

地信网论坛
bbs.3s001.com

用。本报告是配合选矿小型试验，查清矿石物质组成，考查矿石性质与可选性之间关系。矿样采自地表探槽、浅硐、采场 等 8～10个采样点。矿样配比列于表3.3.19。

A 原矿化学成分

原矿多元素分析结果列于表3.3.20。铅、锌、铁的化学物相分析列于表3.3.21。

表 3.3.20 原矿多元素化学分析结果

元素	Pb	Zn	Cd	Tl	S	PaO	SrO	Fe
含量，%	2.29	20.05	0.27	0.01	1.30	3.28	1.74	17.50

元素	Mn	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Ag	Au
含量，%	0.46	3.70	0.24	10.30	0.68	15	<0.1

表 3.3.21 铅、锌、铁化学物相分析结果

矿物相	铅					锌		
	方铅矿	白铅矿	铅 矾	褐铁矿等	总 量	闪锌矿	菱锌矿 水锌矿	异极矿
含量，%	0.24	1.50	0.18	0.46	2.38	0.15	16.20	2.18
分布率，%	10.08	63.03	7.56	19.33	100	0.74	80.32	19.81

矿物相	锌		铁				
	其 它	总 量	磁性铁	褐铁矿等	碳酸铁	硫化铁	总 量
含量，%	1.64	20.17	0.059	16.74	0.96	0.40	18.159
分布率，%	8.13	100	0.23	92.19	5.29	2.20	100

B 矿物种类、含量及嵌布特征

a 矿物种类及其相对含量

地信网论坛
bbs.3s001.com

通过显微镜鉴定及X-射线衍射、电子探针、扫描电镜、差热、热重等综合手段检测，已发现有二十余种矿物。其中铅矿物有白铅矿、铅矾、方铅矿、铅硬锰矿、砷菱铅矾、铅铁矾等；锌矿物有菱锌矿、铁菱锌矿、水锌矿、异极矿、闪锌矿、黑锌锰矿等；可供综合回收的矿物还有褐铁矿、重晶石、天青石、菱锶矿等。主要脉石矿物有石英、方解石、高岭土以及少量的黄铁矿、石膏、软锰矿、赤铁矿、菱铁矿、辉铜矿、黄钾铁矾等。主要矿物相对含量列于表3.3.22。

表 3.3.22　主要矿物相对含量

矿物种类	铅矿物				锌矿物			
	方铅矿	白铅矿	铅矾	铅矿物总量	闪锌矿	菱锌矿 水锌矿	异极矿	锌矿物总量
含量，%	0.28	1.94	0.26	2.48	0.22	36.32	4.52	41.06
占有率，%	11.29	78.23	10.48	100	0.54	88.46	11.00	100

矿物种类	脉石及其它矿物							
	褐铁矿	石英	方解石	粘土	重晶石	菱锶矿等	其它	总量
含量，%	31.58	7.60	6.61	1.95	4.99	2.48	1.25	56.46
占有率，%	55.93	13.46	11.71	3.45	8.84	4.39	2.22	100

b　主要矿物的嵌布特征

方铅矿（PbS）呈不规则粒状或脉状产出。一般均被铅矾交代呈交代残余结构。铅矾又被白铅矿交代，因此三者经常紧密嵌生，与褐铁矿的嵌布关系也较密切。粒度0.1～0.01毫米，个别颗粒较粗。

铅矾（$PbSO_4$）呈不规则粒状，交代方铅矿呈被膜状。有时呈柱状、板柱状的集合体产于褐铁矿之孔洞或矿石裂隙中。

白铅矿（$PbCO_3$）　是氧化矿中最主要的铅矿物，常见交代

地信网论坛
bbs.3s001.com

铅矾并与之密切嵌生，多呈不规则粒状，有的呈柱状或晶簇状产于褐铁矿孔洞或矿石的裂隙中，还见有被菱锶矿交代呈残余结构。

铅硬锰矿（$mMnO \cdot MnO_2 \cdot nH_2O$） 是高铁灰岩型氧化矿中较为常见的矿物。呈鲕粒状、葡萄状、皮壳状、薄膜状产出，与菱锌矿、水锌矿、褐铁矿等密切嵌生，有时呈同心圆互层。经扫描电镜多颗粒定量分析：Mn36.85～38.17%，Pb/8.57～26.38%，Zn6.72～17.21%。

闪锌矿（ZnS）含量极少，一般呈细粒星点状分布于铁菱锌矿及褐铁矿中，多小于30微米，难以单独回收。

铁菱锌矿（Zn，Fe）CO_3和菱锌矿（$ZnCO_3$）这两种矿物是该矿石中最主要的锌矿物，铁菱锌矿约占55%，菱锌矿约占35%。铁菱锌矿呈黄褐色，一般为不规则粒状或粒状集合体，反光显微镜下微带黄褐色。菱锌矿颜色较浅，呈浅灰至蜡黄多种，反光显微镜下呈灰白色，两者以不规则粒状或脉状密切嵌生，其中铁菱锌矿与褐铁矿密切嵌生，呈环带状同心圆。褐铁矿有时在铁菱锌矿周围呈皮壳状。

对两种菱锌矿特别是铁菱锌矿中铁与锌的关系进行了扫描电镜分析，其结果列于表3.3.23。

表 3.3.23 铁菱锌矿和菱锌矿的主要成分含量

矿物名称	主要成分变化范围，%			主要成分平均含量，%		
	Zn	Pb	Fe	Zn	Pb	Fe
铁菱锌矿	29.00～38.56	2.04～3.92	10.56～19.59	32.08	2.85	16.17
菱锌矿	45.31～53.06	0	0～4.72	49.90	—	1.75

铁菱锌矿含铁较高，加之与褐铁矿紧密嵌生，在强磁选过程中易于磁性夹杂而带入褐铁矿精矿。

异极矿（$2ZnO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$） 含量较多，是仅次于菱锌矿的主要锌矿物。与菱锌矿和褐铁矿紧密嵌生，结晶较好的呈砂糖状

地信网论坛
bbs.3s001.com

集合体，也有的呈细脉状、网脉状充填在石英裂隙中。粒度0.3～0.01毫米。

黑锌锰矿（$ZnMn_2O_7 \cdot 3H_2O$） 呈不规则粒状嵌布于灰岩的裂隙中。与铅硬锰矿密切嵌生。粒度最大0.2毫米，最小0.003毫米，一般0.074～0.02毫米。

褐铁矿（$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$） 经扫描电镜分析，其中普遍含有一定量的铅、锌、硅等，Fe 53.91～58.91%，Zn 3.46～3.77%，Pb0.48～3.77%，Si1.35～3.56%。是该矿石中含量较多的一种矿物，对铅锌选别有重要的影响。主要为胶状褐铁矿，呈胶状、同心圆环状、不规则粒状及细脉浸染状。与铁菱锌矿、异极矿、白铅矿嵌布关系复杂。颗粒极不均匀，其中大于0.074毫米部分占60%以上，在较粗的磨矿细度下即可单体解离，小于0.037毫米部分占25.49%，这部分由于粒度细，且与氧化铅锌矿的嵌布关系相当复杂，磨矿过程中难以充分单体解离。

重晶石、天青石和菱锶矿 粒度一般较粗，呈不规则粒状、细脉状，部分与铅锌矿物嵌布密切。

石英 不规则粒或浑圆粒，有时大颗粒石英呈龟裂状，其裂隙中充填有异极矿和白铅矿等，细粒石英主要分布于褐铁矿及铁菱锌矿中。

碳酸盐类脉石 主要为方解石和少量白云石，呈块状灰岩产出，少部分呈不规则粒状、脉状。风化严重者呈粉晶状集合体。碳酸盐类脉石与铅锌矿物的嵌布关系不甚密切。

硅铝质粘土矿物 粒度较细，其嵌布特征与细粒石英相似。

C 主要矿物的粒度组成

采用2～0毫米综合样，筛分出大于1毫米的粗粒级部分磨制光片，在反光显微镜下线测法进行粒度分析。主要矿物粒度组成特征见表3.3.24。

从表3.3.24可看出，以菱锌矿为主的氧化锌矿物粒度最粗，其次是褐铁矿，再次是以白铅矿为主的氧化铅矿物。黄铁矿粒度最细，综合脉石矿物粒度较金属矿物为粗。粒度大于200目者，

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.24 主要矿物粒度分析

粒级 mm	氧化锌矿物，%		氧化铅矿物，%		褐铁矿，%		黄铁矿，%		综合脉石，%	
	含量	累计	含量	累计	含量	累计	含量	累计	含量	累计
>1	3.57		—		2.70		—		8.59	
1~0.5	19.41	22.98	2.95		13.49	16.19	—		34.83	43.42
0.5~0.3	18.37	41.35	4.69	7.64	10.26	26.45	—		21.18	64.60
0.3~0.1	23.53	64.88	17.20	24.84	25.91	52.36	—		19.87	84.47
0.1~0.074	8.88	73.76	16.93	41.77	8.73	61.09	2.48		5.85	90.32
0.074~0.037	12.72	86.48	30.89	72.66	13.42	74.51	1.59	4.07	5.57	95.89
0.037~0.01	11.20	97.68	22.69	95.35	17.70	92.21	59.16	63.23	3.43	99.32
<0.01	2.32	100	4.65	100	7.79	100	36.77	100	0.68	100

表 3.3.25 筛水析产品中铅锌铁含量及分布

粒级，mm		+0.9	0.9~0.5	0.5~0.3	0.3~0.1	0.1~0.074	0.074~0.043	0.043~0.037	0.037~0.020	0.02~0.01	<0.01	总计
产品号		JB—2~1	JB—2~2	JB—2~3	JB—2~4	JB—2~5	JB—2~6	JB—2~7	JB—2~8	JB—2~9	JB—2~10	原矿
产率，%		16.83	20.01	13.05	18.35	5.95	5.66	3.10	3.80	3.98	9.30	100
Pb	含量，%	2.03	1.90	2.41	2.41	2.59	2.80	2.59	3.22	2.11	2.33	2.29
	分布，%	14.88	16.57	13.71	19.27	6.72	6.91	3.50	5.34	3.66	9.44	100
Zn	含量，%	20.63	22.09	21.65	21.38	18.12	18.49	18.04	22.60	16.50	13.60	20.10
	分布，%	17.26	21.98	14.06	19.51	5.36	5.21	2.78	4.27	3.27	6.30	100
Fe	含量，%	20.25	17.36	16.39	17.24	15.03	14.60	15.31	15.50	16.80	17.90	17.30
	分布，%	19.69	20.07	12.37	18.28	5.17	4.78	2.74	3.41	3.97	9.62	100

地信网论坛
bbs.3s001.com

氧化锌矿物占73.76%，褐铁矿占61.09%，氧化铅矿物占41.77%，黄铁矿仅占2.48%，而综合脉石占90.32%。小于400目者，氧化锌矿物占13.52%，褐铁矿占25.19%，氧化铅矿物占27.34%，黄铁矿占95.93%，综合脉石仅占4.11%。

D　磨矿产品矿物解离特性

该高铁灰岩型氧化矿矿物种类多，嵌布关系复杂，嵌布粒度很不均匀，其中粗粒级部分占相当的比例。有必要对碎矿和磨矿产品中主要矿物解离特性进行考查。

a　2～0毫米综合样的解离特性

1．筛水析产品中铅锌含量及其分布。为了考查2～0毫米综

表 3.3.26　筛水析各级产品重液分离结果

粒级，mm		+0.9			0.9～0.5			0.5～0.3		
密度，g/cm³		>2.9	<2.9	总计	>2.9	<2.9	总计	>2.9	<2.9	总计
产率，%		90.0	10.0	100	87.76	12.14	100	86.27	13.73	100
Pb	含量，%	2.19	0.57	2.03	2.08	0.44	1.88	2.83	0.40	2.50
	分布，%	97.19	2.81	100	97.16	2.84	100	97.80	2.20	100
Zn	含量，%	22.40	4.66	2.63	24.50	3.45	21.94	23.85	3.20	21.02
	分布，%	97.74	2.26	100	98.09	1.91	100	97.91	2.09	100
粒级，mm		0.3～0.1			0.1～0.074			0.074～0.043		
密度，g/cm³		>2.9	<2.9	总计	>2.9	<2.9	总计	>2.9	<2.9	总计
产率，%		84.91	15.09	100	81.73	18.27	100	92.59	7.41	100
Pb	含量，%	3.01	0.28	2.60	3.24	0.36	2.71	2.74	0.46	2.57
	分布，%	98.37	1.63	100	97.58	2.42	100	96.67	1.33	100
Zn	含量，%	23.10	2.08	19.93	21.75	2.21	18.18	19.00	3.30	17.84
	分布，%	98.42	1.58	100	97.78	2.22	100	98.62	1.38	100

地信网论坛
bbs.3s001.com

合样中主要矿物的解离特性，首先将样品进行筛、水析分级，测定各粒级铅锌含量并计算其分布率，其结果列于表3.3.25。

从表3.3.25中可看出，铅在－0.1～＋0.02毫米各粒级中有所富集，锌在大于0.1毫米各级中有所富集。铅锌分布率高于相应粒级的产率，说明铅矿物在碎至小于0.1毫米以下方可获得较高的解离度。锌矿物粒度较粗，在－0.9～＋0.1毫米各粒级中已有部分解离成为单体，表明锌矿物较易于单体解离。从矿石泥化程度看，2～0毫米综合样中小于0.037毫米部分产率占17.08%，铅的分布率占18.44%，锌的分布率占13.84%，铁的分布率占16.90%。

2．筛水析产品解离特性。矿样中铅锌铁等有用矿物比重均大于3.5，脉石矿物的比重一般小于2.9，因此采用了重液分离法考查了2～0毫米综合样筛、水析各粒级产品中主要矿物的解离情况，以便确定粗磨条件下富集有用矿物和丢尾的可能性。重液为三溴甲烷（比重2.9），采用自然沉降法分离。其结果列于表3.3.26。

从表3.3.26中可看出，各粒级分离的重产品中，铅、锌、铁均有明显的富集，轻产品中均相应明显贫化。特别是小于0.3毫米各级中经重液分选，铅可降至0.32%以下，锌可降至2.23%以下。这说明铅锌及主要脉石矿物的粒度有相当比例是较粗的。矿石磨至－0.5毫米以下，即可达到富集铅锌铁和丢弃部分尾矿的目的。但由于原矿石中石英、方解石密度（比重）较小的脉石矿物含量只有17.41%（表3.3.22），所以，采用重选法只能丢弃产率15～18%的尾矿。由于细粒产率较大，采用重选法选别铅锌，其效果将不会很理想。

3．筛水析产品磁性考查。该矿样不仅含有较多的褐铁矿，还含有铁菱锌矿和褐铁矿污染的菱锌矿及含铁很低或不含铁的菱锌矿。用WCF_1—63型自动磁力分离仪，研究了矿石的磁性与磁选工艺的关系。在63662.4×10A/m场强条件下选出了褐铁矿精矿（K_1），在127324.8×10A/m场强条件下选出铁菱锌矿等精

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿（K_2）及含铅锌仍较高的尾矿（X）。其重液、磁性分离原则流程见图3.3.4，分离结果列于表3.3.27。

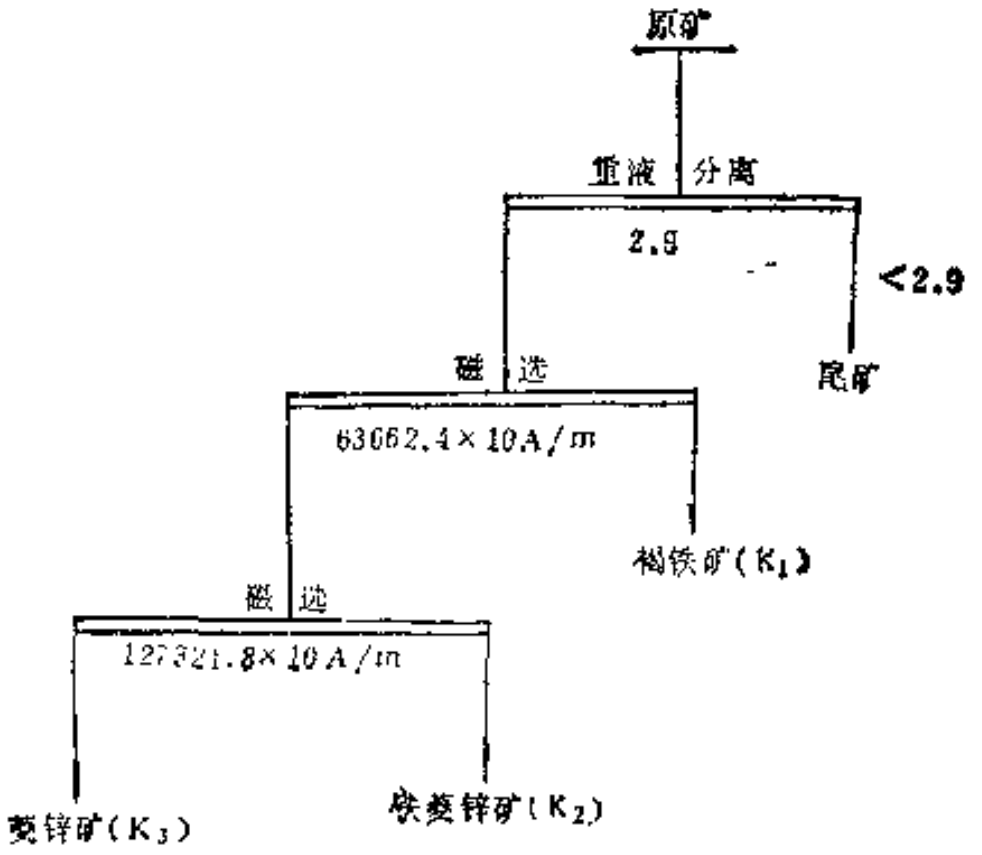


图 3.3.4 重液、磁选分离流程图

表 3.3.27 0.9～3.5粒级重液和磁选分离结果

矿石类型		高铁灰岩型氧化矿			
产品编号		K_1	K_2	K_3	X
产率，%		40.65	24.51	20.65	14.19
Pb	含量，%	1.78	1.73	3.75	0.44
	分布，%	36.46	21.37	39.02	3.15
Zn	含量，%	15.50	37.50	27.90	3.45
	分布，%	28.98	42.27	26.50	2.25
Fe	含量，%	35.10	8.75	1.50	1.35
	分布，%	84.35	12.68	1.84	1.13

地信网论坛
bbs.3s001.com

b 磨矿产品的解离特性

考查了80%－200目磨矿细度的产品。将该产品筛分为四个粒级，对各粒级分别进行了重液分离和磁性分离。各粒级的铅、锌、铁含量及其分布列于表3.3.28，各粒级重液分离结果列于表3.3.29，各粒级磁性分离结果列于表3.3.30。

表 3.3.28 高铁灰岩型80%－200目磨矿产品各粒级铅、锌、铁含量及其分布

粒级，mm		+0.074	0.074～0.043	0.043～0.037	－0.037	原 矿
产率，%		19.11	16.19	7.35	57.35	100
Pb	含量，%	1.61	2.19	2.71	2.45	2.27
	分布率，%	13.59	15.66	8.79	61.97	100
Zn	含量，%	19.69	19.28	21.36	18.30	18.95
	分布率，%	19.85	16.47	8.28	55.40	100
Fe	含量，%	19.24	19.92	16.73	18.30	18.63
	分布率，%	19.73	17.31	6.60	56.36	100

从表3.3.28可看出，当原矿磨至80%－200目时，－0.037毫米细粒级产率达57.35%，Pb、Zn、Fe的分布率均在55%以上，说明泥化严重，应重视其对选别过程的影响。

从表3.3.29可看出，铅、锌、铁在重液分离重产品中有所富集，轻产品中则明显贫化。但轻产品的产率均在20%以下，表明该矿样采用重选方法，其效果将不会很理想。

从表3.3.30可看出，在场强63662.4×10A/m条件下，可选出褐铁矿精矿（K_1），在127324.8×10A/m条件下，可选出铁菱锌矿为主的锌精矿和基本不含铁的尾矿。尾矿虽然基本不含铁，但Zn仍为19.45%以上，Pb含量1.69%以上。

c 重、磁分离产品主要矿物解离特性

对2～0毫米综合样筛水析中的0.9～0.5和0.1～0.074毫米两个有代表性的粒级的磁性分离产品和80%－200目磨矿筛分的各

地信网论坛 bbs.3s001.com

表 3.3.29 80%－200目磨矿产品各粒级重液分离结果

粒级，mm		+0.074			0.074～0.043			0.043～0.037			－0.037
密度，g/cm³		>3.3	<3.3	总 计	>3.3	<3.3	总 计	>3.3	<3.3	总 计	未分离
产率，%		80.56	19.44	100	88.71	11.29	100	87.04	12.96	100	100
Pb	含量，%	2.36	0.47	1.99	2.80	0.38	2.53	2.85	0.20	2.51	2.41
	分布，%	95.41	4.59	100	98.30	1.70	100	98.97	1.03	100	100
Zn	含量，%	23.85	4.35	20.06	22.80	3.67	20.64	23.00	1.81	20.25	19.70
	分布，%	95.78	4.22	100	97.99	2.01	100	98.84	1.16	100	100
Fe	含量，%	21.65	5.95	18.60	19.70	4.40	17.97	19.90	2.15	17.60	17.75
	分布，%	93.78	6.22	100	97.24	2.76	100	98.42	1.58	100	100

表 3.3.30 80%－200目磨矿产品各粒级磁选分离结果

粒级，mm		+0.074				0.074－0.043				0.043－0.037				－0.037
产品编号		K_1	K_2	X	总计	K_1	K_2	X	总计	K_1	K_2	X	总计	未分离
产率，%		41.38	22.99	35.63	100	35.96	21.93	42.11	100	53.13	15.63	31.24	100	100
Pb	含量，%	1.79	1.17	1.69	1.61	1.78	1.61	2.85	2.19	2.20	1.37	4.24	2.71	2.27
	分布率，%	45.95	16.69	37.36	100	29.18	16.10	54.72	100	43.17	7.91	48.92	100	100
Zn	含量，%	12.30	33.35	19.45	19.69	11.40	26.20	22.40	19.28	18.40	30.55	21.80	21.36	18.95
	分布率，%	25.85	38.95	35.20	100	21.26	29.80	48.94	100	45.75	22.35	31.39	100	100
Fe	含量，%	39.00	11.80	1.10	19.24	39.65	19.50	3.30	19.92	25.60	16.45	1.80	16.73	18.63
	分布率，%	83.87	14.10	2.03	100	71.56	21.46	6.96	100	81.28	15.35	3.36	100	100

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.31 碳性分离产品单体解离度分析结果

粒级，mm		0.9～0.5			0.1～0.074		
产品编号		K_1	K_2	X	K_1	K_2	X
褐铁矿	单体，%	52.10	16.13	0	86.60		0
	连体，%	47.90	83.87	100	13.40		100
菱锌矿	单体，%	31.96	53.81	75.14	50.00	76.75	83.14
	连体，%	68.04	46.19	24.86	50.00	23.25	16.86
白铅矿	单体，%	0	6.78	28.74	42.55	29.63	75.00
	连体，%	100	93.22	71.26	57.45	70.37	25.00
综合脉石	单体，%	42.96	53.81	79.24	36.69	81.90	91.85
	连体，%	57.04	46.19	20.76	63.31	18.10	8.15

表 3.3.32 80%－200目磨矿产品各粒级主要矿物单体解离度测定结果

粒级，mm		+0.074	0.074～0.043	0.043～0.037	−0.037	原 矿
褐铁矿	单体，%	74.85	79.36	86.26	90.72	85.52
	连体，%	25.15	20.64	13.74	9.28	14.48
菱锌矿等	单体，%	51.48	63.28	77.30	90.74	77.81
	连体，%	48.52	36.72	22.70	9.26	22.19
氧化铅矿物	单体，%	48.39	66.28	78.66	89.41	77.04
	连体，%	51.61	33.72	21.34	10.59	22.96
综合脉石	单体，%	80.37	91.65	93.07	95.50	91.81
	连体，%	19.63	8.35	6.93	4.50	8.19

表 3.3.33 0.9～0.5mm粒级褐铁矿精矿铁、锌、铅化学物相分析结果

相 别	铁物相			锌物相			铅物相		
	氧化铁	碳酸铁	总铁	氧化锌	与铁结合的锌	总锌	氧化铅	与铁结合的铅	总铅
含量，%	29.20	0.44	29.64	14.53	2.35	16.88	0.84	1.40	2.24
占有率，%	98.52	1.48	100	86.08	13.92	100	37.50	62.50	100

地信网论坛
bbs.3s001.com

级产品，分别进行了主要矿物的单体解离度测定和褐铁矿精矿的化学物相分析，其结果列于表3.3.31、表3.3.32和表3.3.33。

从表3.3.31中可看出，在0.1～0.074毫米细粒级中，各种矿物单体解离度均较高，基本达到分选的要求。

从表3.3.32中可看出，磨矿80%－200目时，主要矿物单体解离度已达77%以上。

从表3.3.33中可看出，褐铁矿精矿中，与褐铁矿结合的锌占13.92%，但是与褐铁矿结合的铅则高达62.50%。这说明磁选铁精矿中的锌主要以独立的锌矿物存在，而铅则不同，这部分铅难以分选成为单独的铅精矿。

E 小结

质量组成研究结果可小结如下：

（1）基本查清矿石矿物组成。铅主要组成为铅矾和铅矾，方铅矿含量较少；锌主要组成铁菱锌矿、菱锌矿、水锌矿、异极矿等；铁主要组成褐铁矿。影响选别的主要脉石为石英和碳酸盐。

（2）褐铁矿含量较多，与铅锌矿物密切嵌生，嵌布关系复杂，且褐铁矿含有一定量的铅锌。因此，褐铁矿将成为铅锌选别的主要影响因素。

（3）矿样中密度（比重）小的脉石矿物含量仅占17.14%，重液分离结果表明，矿石磨至－0.3毫米时，可丢弃含Pb0.32%，Zn2.23%的尾矿，但产率仅占15%左右（表3.3.25及表3.3.26），说明采用重选方法选别铅锌，其效果将不会理想。

（4）2～0毫米综合样中，小于0.037毫米部分产率占17.08%，铅的分布率为18.44%，锌13.84%，铁16.90%（表3.3.25），而80%－200目磨矿产品中，小于0.037毫米部分达57.35%，铅分布率达61.97%，Zn55.40%，Fe56.36%（表3.3.28），说明磨矿中将产生大量的次生矿泥，应重视其对选别过程的影响。

3.3.5.4（实例4）金的赋存状态研究

地信网论坛
bbs.3s001.com

湖南某地铁锰土含金1.97克/吨。通过各种手段检测，确定了矿样的矿物组成主要为针铁矿、粘土矿物、软锰矿、硬锰矿和石英，少量矿物有铅硬锰矿、水锰矿、铝土矿及碳酸盐；此外尚有自然金、自然铋、辉铋矿、方铅矿、硫酸铅、白钨矿、黄铁矿、赤铁矿和磁铁矿等。矿样呈土状，大部分颗粒极细，污染又严重，显微镜下只作了主要矿物相对含量。对金的赋存状态采用了多种手段进行了综合性的考察。

A 显微镜与探针的考查

从25千克90%－200目的缩分矿样中，分离富集出产率很低的无磁性重产品分析金，金的分布率只占10%。镜下检测出几颗单体自然金。用探针进行金、银定量分析，平均Au80.6%，Ag 19.5%。对重级部分的黄铁矿、方铅矿、辉铋矿以及大量的铁与锰等矿物，采用电子探针进行了上百个颗粒的大面积扫描，对有疑点的矿物反复检验，均未能发现金矿物颗粒或含金高于0.1%的富集部位，可知金粒远小于1微米，大部分超过了探针的可探极限。

B 化学方法考查

一般用混汞法测单体金，但本矿样中金可能为超显微金，混汞法不会有效果，因而采用了氯水法。氯水浸取仅半小时就浸出了66～88%的金。其残渣用亚硫酸氢溶解锰矿物后，再用氯水浸，残留的金全部浸出。对浸取液进行了主要元素分析，证明氯水法除金外，其他矿物几乎完全不被浸出（黄铁矿可溶解，但量很少，可忽略不计），因此可认为，前者为单体金与连生体金，后者为锰矿物中的包体金。结果列于表3.3.34。

表 3.3.34 化学物相分析法测定金解离特性

矿样	粒级 目	总金	单体＋连生体金	包体金	单体＋连生体占有率，%
选矿试验样	－200	1.90	1.30	0.67	66.0
锰土富金样	－200	7.8	6.70	0.9	88.2

地信网论坛
bbs.3s001.com

另将选矿试验综合样分别以24小时与72小时浸泡后筛、水析分级，各粒级含金量列于表3.3.35与表3.3.36，各粒级经700℃焙烧后用氯水浸取，浸取结果列于表3.3.37。

表 3.3.35 综合样经24小时浸泡后的粒级含Au量

粒级 目	重量 %	主要元素含量，%				
		Fe	Mn	SiO_2	Al_2O_3	Au，g/t
+10	8.4	41.58	6.58	8.61	5.27	2.4
+35	10.1	36.57	7.88	10.72	5.31	5.6
+100	8.4	30.36	9.86	9.16	7.88	3.3
+200	6.0	26.35	10.22	14.65	9.99	1.8
−200	67.1	15.62	8.65	32.02	15.76	1.2
合计	100.00	21.80	8.59	24.91	12.81	1.96

表 3.3.36 综合样经72小时浸泡又搅拌2小时的粒级含Au量

粒级 目	重量 %	主要元素含量，%				
		Fe	Mn	SiO_2	Al_2O_3	Au，g t
+10	4.77	47.70	4.60	11.68	3.32	3.1
+20	3.66	42.54	7.14	16.20	2.10	3.8
+40	5.06	41.48	7.46	15.53	1.99	3.7
+60	4.06	38.92	9.76	14.02	4.23	2.8
+100	3.65	35.20	10.14	14.94	5.64	3.2
+200	6.33	30.82	10.33	18.22	6.90	2.2
−200	72.47	15.87	9.43	28.36	16.02	1.7
合计	100.00	22.31	9.44	24.76	12.75	2.06

表 3.3.37 综合样经700°C焙烧后各粒级金浸出率

粒级，目	+10	−10+35	−35+100	−100+200	−200	总计
金浸出率，%	95.3	104.2	63.3	83.5	94.3	91.6

从表3.3.37可见，铁锰土中的金，经焙烧后浸出较易，这是由于结晶水逸出后，矿样孔隙率增大，浸取液易于达到金粒部位与之接触之故。

地信网论坛
bbs.3s001.com

C 金与主要矿物的关系考查

为考查金与某些主要矿物之关系，通过计算机用回归分析统计法，定量地研究金与主要元素的相关关系，从而推导出其与相应矿物的关系。

设随机变量y(Au—因变量) 在某种程度上随另一变量(Fe、Mn、Si、Al—自变量) 的值而变化，并设想有如下线性关系：

$$y=a+bx$$

根据x、y的若干组观测数据，用最小二乘法确定系数a、b的值，同时对a、b作统计检验，以便研究这些值的可靠程度。所采用的观测数据是组合成选矿试验用样的六个分样和它的不同粒级筛分产品的Au和Fe、Mn、Si、Al的化学分析值列于表3.3.38。

表 3.3.38 六个分样的主要元素分析结果

样号	Au,g/t	SiO_2,%	Al_2O_3, %	Mn, %	Fe, %
1	1.4	12.78	8.81	8.38	32.91
2	1.3	10.70	6.95	21.03	22.36
3	1.0	23.23	11.92	6.38	17.58
4	5.0	21.00	11.42	15.87	18.85
5	1.3	27.82	14.75	5.61	22.17
6	1.2	31.31	13.44	14.19	13.38

这些样品中，Fe、Mn、Si、Al的含量变化幅度较大，说明其相应矿物的含量有很大的不同，金的含量也有差别。样品的选取，排除了诸如密度(比重)、磁性等可能产生诱导相关的因素，而样品而涉及到了矿样的整个部分。因此认为，通过这些组样的数据来研究相关关系，是有一定的说服力的。

通过几种模型的运转，获得如下结果：

(1) Au与Al_2O_3： $L_n(Au)=1.63502-0.44807L_n(Al_2O_3)$

相关系数 $R=0.64995$

地信网论坛
bbs.3s001.com

剩余标准差 $S_1=0.39365$

（2）Au与Fe: $L_n(Au)=0.01672+0.02609(Fe)$

相关系数 $R=0.62426$

剩余标准差 $S_1=0.39365$

通过上述统计检验可看出，矿石中金的含量与铁和铝的含量有关；其中金与铁是正相关，而与铝是负相关。

但是在金与锰、与硅之间没有发现其相关性，它们之间的相关系数很小，数据离散很厉害。

由此，金与铁矿物有一定的连生关系。而与锰的相关系数虽很小，但由于主要含锰矿物不止一种，因而也不能排除与其中某一锰矿物连生关系较密切的可能性。金与石英，与粘土均无密切关系。从而也否定了本区金矿物主要被粘土矿物所吸附的说法。

D 透射电镜能谱分析与选区衍射研究

a 制样

取样20克磨至－200目，用1:1HCl微热下浸取24小时，将所得残渣反复洗涤，然后取适量残渣置于二次蒸馏水中，用超声波使其充分分散，自然沉降30分钟，将较大颗粒矿物和未溶的铁锰沉淀，而保留下小于1微米的金粒于溶液中，取出上层液体，小心烘干，用火棉胶制成薄片状电镜样，喷碳使其导电。

b 电镜观察

先后用JEM6A型和EM400型电镜观察，后者带EDAX711能谱仪，使用加速电压分别为80kV和120kV进行选区衍射。

由于样品中主要为粘土矿物，薄片状，平均原子序数又低，故透明度较好；而金的原子序数79，原子序数大，透射电子少，电镜下显得不透明，酸处理后的矿样中只有少量不透明的铁锰矿物干扰，因此对可疑金矿物的寻找就缩小了范围。

通过对标准同位素胶体金粒在电镜下的观察，一般倾向于成球形，以及根据已发表的资料，卡林浸染型胶粒金成椭球形，作为电镜观察追寻金的重要线索，结果在酸溶样品及矿样中均发现了近团球形透明度差的可疑颗粒。对这些颗粒立即用能谱检测，

地信网论坛
bbs.3s001.com

有的是铁、锰矿物，有的是铁锰矿物与硅、铝的复合颗粒，凡经能谱检测出金的颗粒，随即对其进行选区衍射。小于0.1微米的颗粒难于获得较清晰的衍射图，此外，粘土矿物极易摄谱，干扰和破坏金的衍射效果，反复实践，经大量颗粒的选区衍射所获图谱，选择了尽量远离其他矿物的金粒衍射图谱分析，金的单晶电子衍射点呈标准的正六方形排列，并都落在内外标金的多晶衍射环上。少数有时略偏离，尤其是{111}面的衍射点多比标金膜衍射环稍小，即相应的d值略大。推测这与自然金含一定量的银有关。随着银的含量增加，相应网面距也略增大。

通过上述各种手段综合研究，发现矿样中的次生显微金颗粒多成球形或椭球形，少部分呈不规则粒状。有的成单体产出，有的与其他矿物连生，但在粘土矿物颗粒边缘分布的不多见，在酸处理后产品中常成团聚状。所观察到自然金颗粒中，多数在0.5微米以下，最小者不到0.02微米。据统计，大于0.5微米者占5%，0.5～0.1微米者占30%，0.1～0.05微米者占50%，小于0.05微米者占15%。估计显微金约占20%，次显微金约占80%。

E 中子活化分析

通过系统选择的样品进行由反应堆中子轰击样品，使其所含金产生放射性同位素，然后分析其γ-射线强度以测定金元素含量。发现金在矿样中分布不均匀，酸处理样品含量达201克/吨。此外，样品中银的含量约为金的1/4，与前述显微金中金、银分析结果近似，因此推测本矿样中的自然金多为含银自然金。

根据以上各种资料分析，得到以下几点结论：

（1）铁锰土中金的含量近2克/吨，金主要为含银自然金。自然金颗粒以显微金者约占20%，次显微金占80%，用机械选矿法回收难于获得好指标。

（2）金与铁矿物关系较为密切，被致密状锰矿物包裹的金约占30%，金与其他矿物关系不大，因而提取金与处理铁、锰矿物有关。

（3）矿样疏松，易于金的浸取，但试料颗粒大部分微细，

地信网论坛
bbs.3s001.com

将会给浸取工艺带来困难。

3.3.5.5（实例5） 硅铁分离难选原因考查

某选厂处理某地富含铁、铌、稀土和氟的大型多金属共生矿床的氧化矿石时，其弱磁性铁矿物与霓石的分离一直是选矿难题。矿石工艺矿物学研究从矿物晶体化学特性入手；主要采用俄歇探针结合其他测试手段，查明了霓石的晶体化学特征，以及霓石和赤铁矿破碎后矿物表面性质与浮选的联系；考查了在磨矿过程中霓石受铁离子污染后表面性质的变化和某些有机络合剂对矿物表面的处理效果，找到了霓石与铁矿物难以浮选分离的主要原因。研究步骤为：

（1）提纯单矿物。从矿区主、东矿体采集有代表性的较富集的假象赤铁矿、原生赤铁矿、磁铁矿、细晶霓石和粗晶霓石的手标本，破碎至25毫米左右，经手选后再碎至－0.4毫米，采用摇床分选，筛分若干级，再用干式磁选机反复精选，获得纯度分别达95%以上的假象赤铁矿、原生赤铁矿、细晶霓石、粗晶霓石等单矿物。

（2）霓石穆斯堡尔谱仪分析。从晶体化学角度分析矿物的破碎规律和破裂面上的离子分布，而表面铁离子的含量与其在结晶构造中的价态和分布有关。为了确定铁的属性，对几种霓石测定其穆斯堡尔谱，其化学位移为0.39～0.40毫米/秒，四极分裂0.33毫米/秒，线宽0.31～0.43毫米/秒，这些参数表明霓石中Fe^{2+}含量甚微，铁以Fe^{+3}的形式存在，且Fe^{+3}在晶体构造中只占一套位置，即图3.3.5中M_1位置，而M_2位置则由Na^{+}离子充填（少量的Ca^{+2}离子可置换Na^{+}离子也充填在M_2位置），同时得知几种霓石中铁离子的价态和Fe^{+3}离子在晶体中的分布无明显差异。

影响矿物破碎的因素很多，一般认为在晶体构造中的键力最弱的部位破裂，破裂面上离子的出露，根据矿物晶格中阴、阳离子间的静电引力来计算键力，其静电引力主要决定于半径R和电价，由此分析霓石晶体构造中Na—O键应比Fe—O键弱的多，较易断裂，经浮选检验，用油酸钠作捕收剂浮选矿物时，纯净的霓

地信网论坛
bbs.3s001.com

石在广泛的pH值范围内不浮，表明霓石表面含铁量确实很少。

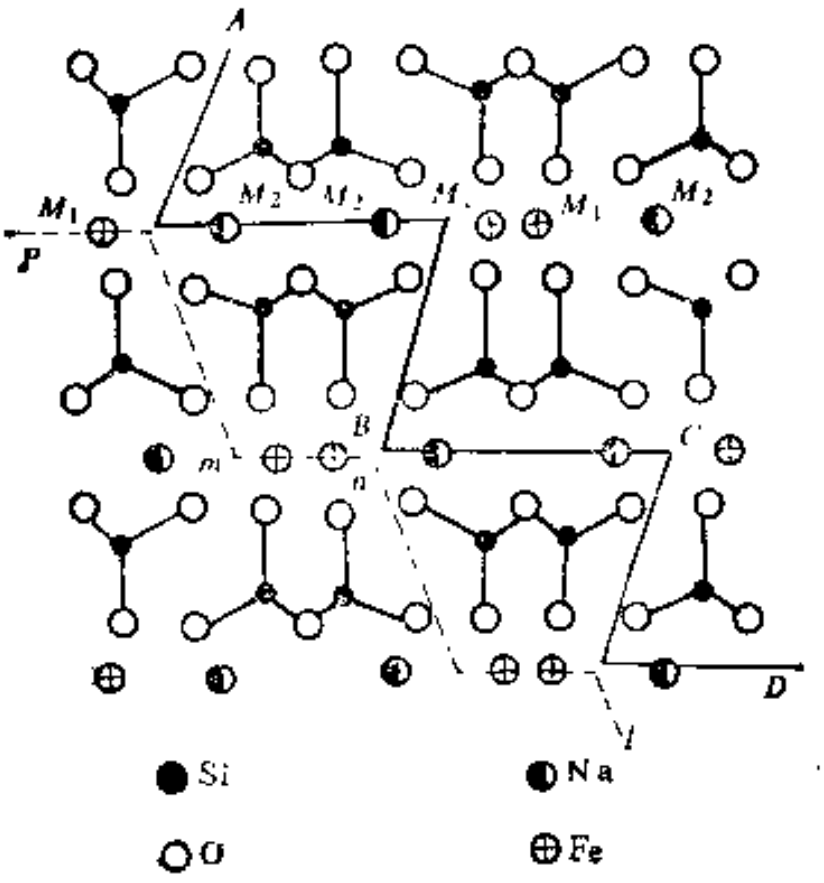


图 3.3.5 霓石的晶体构造在{001}面上的投影及离子分布

（3）霓石表面俄歇探针分析。将−0.074+0.038毫米粒级的霓石分撒在很薄的铝箔上，用压力器将矿物颗粒压在铝箔变形处，以固定样品并减少或消除绝缘体矿物表面充电现象。一次电子束对矿物表面入射角选择40°～60°，加速电压5～10kV，束流0.4～1.0×10^{-7}A，借助于二次电子象观察其表面形貌，确定分析点进行测试，由俄歇谱可知，在霓石的柱状晶体表面上分布有大量的氧，其次为钠；在端断面上除分布大量氧以外，还有较多的硅与铁。

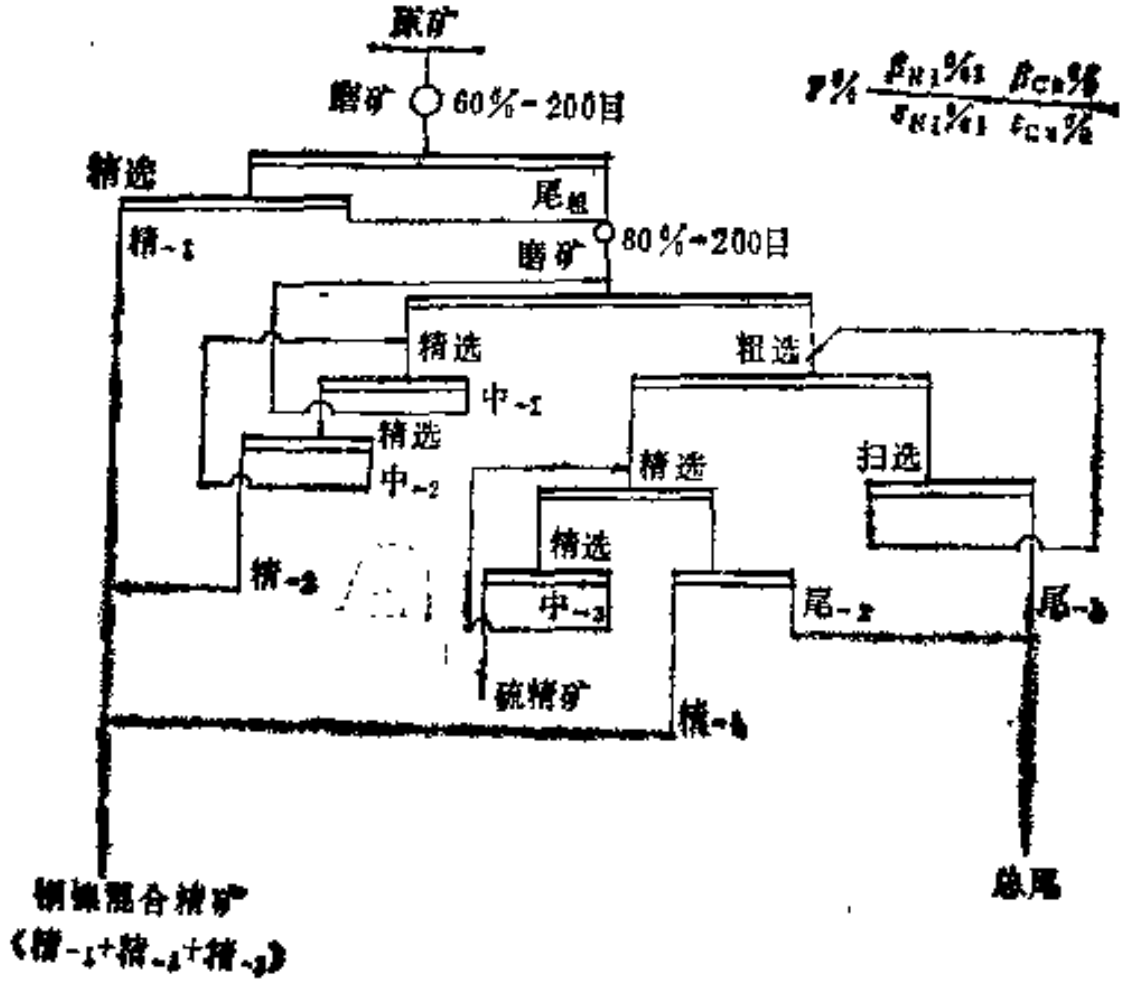
根据上述几方面分析结果综合判断，霓石受外力作用时，应沿图3.3.5中$A—B—C—D$方向破裂，主要应沿Na—O键断裂，则破裂面上应有较多的Na(Ca) 离子，而没有或极少的铁离子。

（4）硅、铁难以分离的原因查找。纯净的霓石在整个pH值范围内，用油酸钠作捕收剂均不浮，而将霓石采用铁球磨机湿磨

地信网论坛
bbs.3s001.com

10分钟，其表面性质和浮游性发生了很大变化。零电点(PZC)由2.0增至2.7，对淀粉的吸附量由0.003毫克/克增至0.057毫克/克，相当于原生赤铁矿和假象赤铁矿对淀粉的吸附量，用油酸钠浮选时，霓石回收率从0增至92%。再将其污染后的霓石与铁矿物人工混合，其分选又失去了选择性。对被铁污染的霓石再进行表面俄歇探针分析，发现霓石柱面上铁峰大幅度增高，相当于铁矿物谱图。这充分说明了影响分选效果的实质并非来自霓石自身的铁离子，而是外界铁对霓石表面污染所致。

（5）解决难选问题的途径。清除霓石表面次生铁离子或微细铁的沉积物的污染，是改变表面特性，提高霓石与铁矿物分离选择性的关键。用普通酸碱处理的试验，未达到理想效果；但采用酒石酸或EDTA有机络合浸蚀隐蔽剂却能使外来污染的铁离子及少量原生铁离子、钙离子从霓石表面浸蚀下来，转入液相，并以稳定的络合物形式将其隐蔽在液相之中，防止这些干扰离子



地信网论坛
bbs.3s001.com

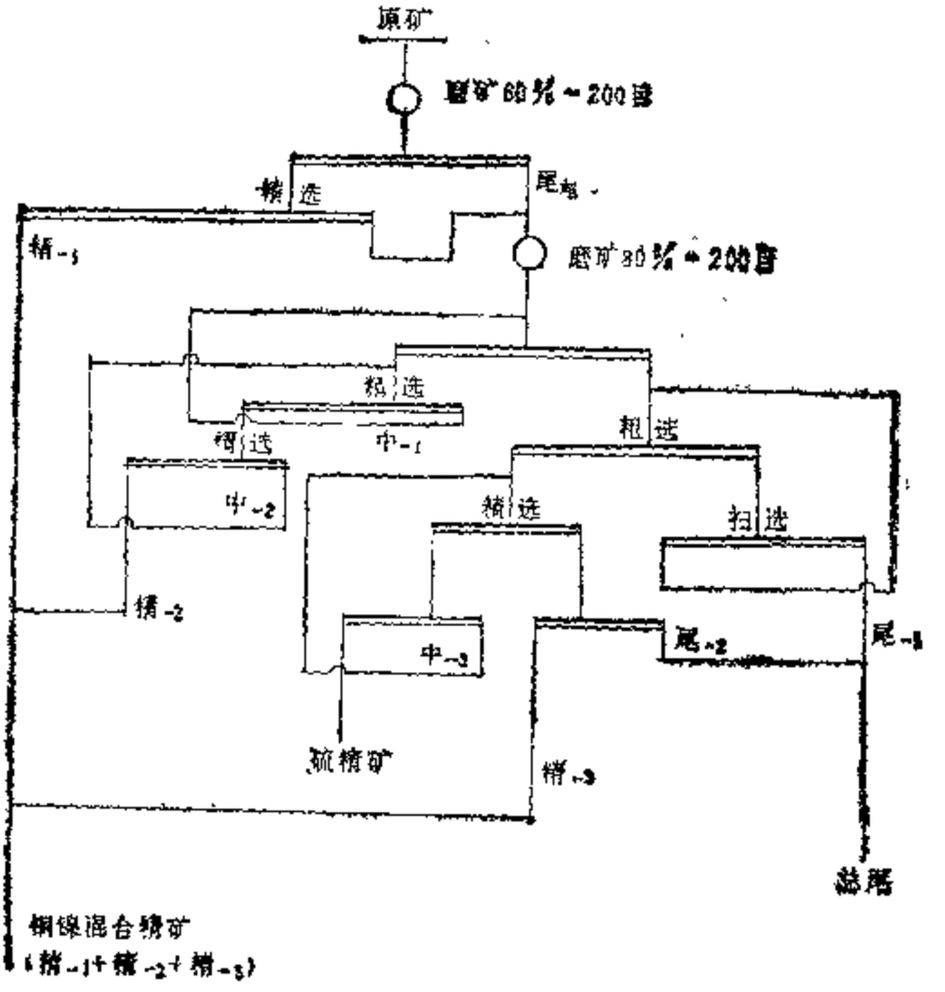


图 3.3.6 中性介质浮选小型闭路流程

$$精\text{-}1:\ 13.52\frac{9.59;\ 5.79}{73.83;\ 76.08};\quad 精\text{-}2:\ 6.10\frac{4.47;\ 1.40}{15.59;\ 8.30};$$

$$精\text{-}3:\ 0.98\frac{0.79;\ 0.80}{0.44;\ 0.76};\quad 精\text{-}总:\ 20.60\frac{7.65;\ 4.25}{89.86;\ 85.14};$$

$$尾\text{-}1:\ 69.22\frac{0.18;\ 0.162}{7.16;\ 10.90};\quad 尾\text{-}2:\ 3.78\frac{0.36;\ 0.42}{0.78;\ 1.53};$$

$$尾\text{-}总:\ 73.0\frac{0.19;\ 0.175}{7.94;\ 12.43};\quad 尾\text{-}总:\ 81.41\frac{6.42;\ 0.269}{19.55;\ 20.87};$$

$$精\text{-}总:\ 6.40\frac{0.62;\ 0.39}{2.26;\ 2.43};\quad 中\text{-}1:\ 10.48\frac{0.835;0.36}{4.88;\ 3.66};$$

$$中\text{-}1:\ 7.72\frac{1.77;\ 0.585}{7.78;\ 4.39};\quad 中\text{-}3:\ 3.26\frac{0.985;\ 0.80}{1.64;\ 2.65}$$

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.39　精-1、精-2、精-3筛析各粒级铜镍的含量、占有

产品名称	粒级 μm	产率 %	镍 含量 %	镍 占有率 %	铜 含量 %	铜 占有率 %	镍矿物 单体	镍矿物 连生体 镍矿物-磁黄铁矿	镍矿物-脉石	镍矿物-磁黄铁矿-脉石	镍矿物-磁铁矿-脉石	镍矿物-磁铁矿	镍矿物-铜矿物
精-1	综合	13.52	9.59	100	5.79	100							
	+150	2.56	3.46	0.92	6.16	3.02	33	7	21	9	11	7	12
	−150 +100	8.70	6.04	5.47	5.62	8.92	54	8	18	4	7	2	7
	−100 +74	15.86	9.08	15.00	5.00	14.47	62	12	13	2	5	4	2
	−74 +53	14.32	10.52	15.69	5.34	13.95	74	2	12	1	2	5	2
	−53 +37	12.53	10.72	13.99	5.40	12.35	81	5	7	1	2	2	2
	−37 +20	30.43	9.70	30.75	4.64	25.77	86	6	6			1	1
	−20	15.60	11.18	18.18	7.56	21.52	92	3	3			2	
精-2	综合	6.10	4.47		1.40	100							
	+100	1.13	4.08	1.05	1.96	1.71	19	5	32	19	10	11	4
	−100 +74	8.60	5.06	9.19	1.56	9.68	32	8	25	4	6	20	5
	−74 +53	12.67	4.56	13.12	1.34	13.18	38	11	28	3	4	13	3
	−53 +37	15.13	4.24	14.57	1.16	13.62	53	11	21	1	1	11	2
	−37 +20	46.92	3.18	33.89	0.79	28.72	71	8	14	0.5	0.5	4	2
	−20	16.15	7.68	28.18	2.64	33.09	90	3	6			1	
精-3	综合	0.98	0.79		0.89	100							
	+74	16.44	1.42	25.82	0.808	15.50	16	6	52	15	6	5	
	−74 +53	15.02	1.17	19.44	0.763	13.38	19	7	48	13	4	7	2
	−53 +37	12.88	1.20	17.11	0.825	12.41	35	5	51	4	1	4	
	−37 +20	20.06	0.675	14.98	0.625	14.64	56	2	23	7	2	10	
	−20	35.60	0.575	22.65	1.06	44.06	88	2	7	1		2	

注：矿石中镍矿物：主要为镍黄铁矿（含Ni 34.5%）；有极少量的铜镍铁矿

铜矿物：主要为黄铜矿（Cu 34.5%）与方黄铜矿（Cu 23.4%），

地信网论坛
bbs.3s001.com

率及镍矿物、铜矿物、磁黄铁矿、脉石矿物的单体解离度

铜矿物单体	铜矿物连生体						铜矿物单体	磁黄铁矿（包括黄铁矿）连生体									磁黄铁矿单体	脉石矿物连生体
	铜矿物-磁黄铁矿	铜矿物-脉石	铜矿物-磁铁矿-黄矿-脉石	镍矿物-磁黄铁矿	镍矿物-磁铁矿	镍矿物-铜矿物		磁黄铁矿-镍黄铁矿	磁铁矿-黄矿-铜黄矿-镍铁矿	磁黄铁矿-黄铜矿	磁黄铁矿-脉石	磁黄铁矿-黄矿-铜矿-脉石	磁黄铁矿-镍铁矿-黄矿-脉石	磁黄铁矿-磁铁矿	磁铁矿-黄矿-镍铁矿-磁铁矿	磁铁矿-黄矿-铜矿-磁铁矿		
8	15	46	18	5	3	5	30	1	4	12	16	21	6	7	1	2	10	90
19	16	38	12	7	2	6	42	3	2	15	17	10	4	5	1	1	14	86
37	12	34	7	3	3	4	55	4	2	15	11	3	2	6	1	1	21	79
55	10	23	4	4	1	3	65	1	2	2	18	0.5	1	9	0.5	1	30	70
70	5	17	2	2	2	2	86	1		1	4		1	7			48	52
84	2	9	2	1	1	1	91	1			4		1	3			76	24
92	1	6			1		95				3			2			88	12
5	10	54	22	4	2	3	35	4	2	7	31	7	2	10	2		22	78
7	11	66	10	3	1	2	53	1	1	2	27	1	1	12	2		36	64
23	8	54	7	4	2	2	74	4		1	10	1	1	8	1		54	46
44	8	37	5	2	3	1	80	2		2	9		1	6			63	37
75	5	15	2	1	1	1	86	1		1	6		1	5			81	19
87	3	9			1		92	1		1	4			2			92	8
9	6	51	3	8	23		未测										未测	
15	14	44	3	2	22													
36	10	30	2	1	20	1												
36	4	26	1	1	12													
83	2	9			6													

（Ni 23.20%，Cu 11.17%）和微量紫硫镍铁矿（Ni 28.7%）。

少量墨铜矿（Cu 15.90%）。

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.40 硫精矿筛析各粒级铜镍的

产品名称	粒级 μm	产率 %	镍 含量, %	镍 占有率, %	铜 含量, %	铜 占有率, %
硫精矿	综合	6.40	0.62		0.39	
	+100	1.68	1.50	4.82	0.538	2.38
	−100+74	13.29	0.835	21.24	0.416	14.63
	−74+53	22.26	0.51	21.72	0.345	20.29
	−53+37	16.73	0.39	12.48	0.330	14.60
	−37+20	43.64	0.40	33.41	0.338	39.03
	−20	2.40	1.38	6.33	1.43	9.07

表 3.3.41 尾矿$_{-1}$、尾矿$_{-2}$筛析各粒级铜、

产品名称	粒级 μm	产率 %	镍 含量, %	镍 占有率, %	铜 含量, %	铜 占有率, %
尾矿$_{-1}$	综合样	69.22	0.18		0.162	
	+100	2.1	0.268	3.35	0.212	2.91
	−100+74	13.69	0.172	14.04	0.174	15.40
	−74+53	20.67	0.139	17.20	0.128	17.15
	−53+37	14.17	0.127	10.75	0.136	12.49
	−37+20	17.11	0.156	15.05	0.136	15.06
	−20	32.26	0.201	38.71	0.177	36.97
尾矿$_{-2}$	综合样	3.78	0.36		0.42	
	+74	13.11	0.772	28.79	0.585	24.01
	−74+53	11.55	0.642	21.11	0.535	19.35
	−53+37	9.20	0.51	13.34	0.445	12.81
	−37+20	15.72	0.158	7.06	0.342	16.84
	−20	50.42	0.207	29.70	0.171	26.99

地信网论坛
bbs.3s001.com

含量、占有率及铜镍矿物的单体解离度

镍矿物单体	镍矿物						铜矿物						
	连生体						铜矿物单体	连生体					
	镍矿物-磁黄铁矿	镍矿物-脉石	镍矿物-磁铁矿-黄矿-脉石	镍矿物-磁铁矿-脉石	镍矿物-磁铁矿	镍矿物-磁铁矿-黄矿-磁铁矿		铜矿物-磁黄铁矿	铜矿物-脉石	铜矿物-磁铁矿	铜矿物-磁铁矿-脉石	铜矿物-磁黄铁矿-脉石	铜矿物-磁黄铁矿-磁铁矿
3	27	17	23	16	9	5		15	17	1	4	53	10
15	22	20	18	8	6	11	2	32	12	1	3	44	6
19	26	14	13	3	17	8	5	35	8	1	4	41	6
21	36	15	4	3	14	7	12	43	10	1	2	25	7
41	25	30	4	1	6	3	41	28	7		1	17	6
60	21	15	2		1	1	74	20	1			4	1

镍的含量占有率及铜镍矿物的单体介离度

镍矿物单体	镍矿物						铜矿物						
	单体	连生体					单体	连生体					
	镍矿物-磁黄铁矿	镍矿物-脉石	镍矿物-磁铁矿-黄矿-脉石	镍矿物-磁铁矿-脉石	镍矿物-磁铁矿	镍矿物-磁铁矿-黄矿-磁铁矿	铜矿物单体	铜矿物-磁黄铁矿	铜矿物-脉石	铜矿物-磁铁矿	铜矿物-磁铁矿-脉石	铜矿物-磁黄铁矿-脉石	铜矿物-磁黄铁矿-磁铁矿
6	3	74	2	7	4	—	—	—	75	2	3	15	
12	3	77	3	1	2	2	2	3	76	2	4	12	1
17	2	60	14	5	1	1	6	2	59	1	4	29	
32	3	47	10	6	1	1	15	2	60	1	6	16	
44	6	35	4	2	6	3	48	4	37	1	3	7	
75	2	20	1	1	1		68	2	23		1	6	
3	6	53	12	13	6	7	1	3	64	1	10	19	2
7	2	57	14	9	9	2	3	5	58	3	10	19	2
14	2	65	3	4	10	2	10	12	65	1	1	10	1
36	2	57	1	2	1	1	41	5	44	1	1	7	1
72	3	23	1		1		62	3	29	1		5	

地信网论坛
bbs.3s001.com

对霓石表面的重复污染，然后用阳离子捕收剂浮选，试验中随着络合剂、酒石酸浓度的增加，液相中的含铁量增加，霓石表面的含铁量下降，ξ-电位变负，对淀粉的吸附量下降，浮选回收率上升。将受铁污染的霓石经酒石酸处理后，再进行表面俄歇探针分析，俄歇能谱上铁峰已明显降低，与纯净霓石的谱图相似。采用有机络合浸蚀隐蔽剂处理的效果为寻找硅铁分离指明了方向。

3.3.5.6（实例6） 浮选小型试验产品考查

某铜镍矿床富矿石镍品位1.75%，铜1.02%，中性介质（自然pH值）浮选小型试验得：铜镍混合精矿（Ni 7.61%，Cu 4.22%，MgO 8.78%）；硫精矿（S>25%，Ni 0.57%）。总镍回收率90%以上。按分选工艺流程所得选矿产品有：铜镍混合精矿$_{-1}$、精矿$_{-2}$、精矿$_{-3}$和硫精矿，以及总尾$_{-1}$和总尾$_{-2}$（见图3.3.6）。为判别流程的合理性，是否有提高指标的潜力，对组成铜镍混合精矿的精矿$_{-1}$、精矿$_{-2}$和精矿$_{-3}$三个产品分别进行了筛、水析，测定了各粒级的化学组分与矿物组成，并进行了主回收矿物的单体解离度和连生体的连生特性考查，结果列于表3.3.39。

从表3.3.39可看出，铜镍混合精矿除铜、镍矿物以外，还含有较多的磁黄铁矿和脉石矿物。精$_{-1}$和精$_{-2}$是组成铜镍混合精矿的主要精矿产品，精$_{-1}$中单体磁黄铁矿和脉石矿物的含量比精$_{-1}$高，若要进一步提高精矿品位，必须抑制一部分已单体解离的脉石和磁黄铁矿。此外，大于0.053毫米粒级的单体解离度较差，多与脉石矿物连生，因此进一步提高精矿品位需要细磨。而精$_{-3}$是硫粗精矿精选的中矿（产率1%左右），其中铜镍含量比较低，主要为脉石矿物和磁黄铁矿。镍矿物与铜矿物的单体均在50～55%左右，其余均以连生体状态存在，主要与脉石和磁黄铁矿连生，欲提高精-3品位则需适当细磨。

对硫精矿筛、水析，进行各粒级矿物组成和矿物解离特性考查列于表3.3.40。

由表3.3.40可看出，硫精矿中以矿物态存在的镍主要是连生

地信网论坛
bbs.3s001.com

体。镍矿物和铜矿物的单体均较少。因此，欲进一步降低硫精矿中镍、铜的含量，应是比较困难的。

对组成总尾矿的尾$_{-1}$和尾$_{-2}$分别进行了筛、水析和各粒级的化学组分与矿物组成以及矿物解离特性测定，结果列于表3.3.41。

从表3.3.41可知，尾矿中的镍，一部分在脉石矿物中呈类质同象存在，一部分以连生体状态存在，而呈单体状态的镍较少。铜、镍矿物单体主要集中在小于37微米的粒级。此外，呈连生体的铜、镍矿物粒度也比较少，大部分小于20微米，由此可知，进一步提高磨矿细度，对铜、镍回收率提高的幅度不会太大。欲降低尾$_{-1}$和尾$_{-2}$中铜镍品位，主要应考虑回收小于37微米的单体铜、镍矿物。

3.3.5.7（实例7） 钼选厂低品位钼中矿的考查

某选厂低品位钼中矿系一次精选的尾矿和扫选粗精矿一次精选之精矿。这部分难选中矿，进入精矿影响精矿质量，进入尾矿影响钼的回收率。为了解该产品工艺性质，以便确定适合的处理工艺，进行了工艺矿物学考查。

A 化学组分与矿物组成分析

低品位钼中矿的多元素分析，钼、铜化学物相分析以及显微镜矿物定量分析结果列于表3.3.42～表3.3.44。又将中矿筛、水析，分级测定了各粒级的金属分布率，辉钼矿单体解离度、连生体类型和数量等结果列于表3.3.45。

表 3.3.42 中矿多元素分析

元 素	CaO	MgO	S	K_2O	Na_2O	C	WO_2	Mo	Cu	Fe
含量，%	2.46	1.45	11.85	4.11	0.72	0.40	0.0038	1.30	0.78	13.30
元 素	Pb	Zn	SiO_2	Al_2O_3	Sn	Bi	As	P	Be	
含量，%	0.05	0.16	47.88	7.94	0.0052	0.0085	0.00019	0.11	<0.0005	

地信网论坛
bbs.3s001.com

表 3.3.43 钼中矿钼、铜化学物相分析

Mo，%						Cu，%					
氧化物中Mo		硫化物中Mo		总Mo		氧化物中Cu		硫化物中Cu		总Cu	
品位	占有率	品位	占有率	品位	占有率	品位	占有率	品位	占有率	品位	占有率
0.01	0.77	1.29	99.23	1.30	100	0.003	0.40	0.74	99.60	0.743	100

表 3.3.44 中矿矿物相对百分含量

矿物名称	黄铁矿	磁铁矿	黄铜矿	辉钼矿	闪锌矿	硫铋铜铅矿	方铅矿	针硫铋铅矿
含量，%	19	3.0	2.30	2.15	少量	少量	少量	少量
矿物名称	石英	绢云母	正长石	绿泥石	萤石	方解石	其它	
含量，%	34.0	15.0	13.0	6.5	4.0	1.0	0.40	

表 3.3.45 中矿粒级矿物特性分析，%

粒级 μm	产率	Mo 品位	Mo 占有率	钼的氧化物	氧化率	辉钼矿 单体	辉钼矿与脉石、黄铁矿连生体		
							辉钼矿出露部分 >40	辉钼矿出露部分 <40	脉石中辉钼矿包体
+74	22.62	1.77	30.0	0.013	1.02	3.3	37.8	13.5	40.4
74～53	2.32	0.96	5.99	0.015	1.56	30.3	51.8	11.7	6.2
53～41	4.87	1.36	4.94	0.026	1.91	43.7	41.9	6.2	3.2
44～36	8.62	1.43	9.24	0.007	0.49	80.1	16.6	2.1	1.2
36～20	10.14	1.37	10.41	0.0053	0.42	96.0	4.0	0	0
20～10	20.23	1.23	18.69	0.0057	0.46	99.0	1.0	0	0
−10	25.15	1.10	20.72	0.0056	0.51	100.0	0	0	0
合计	100.00	1.33	100.00	0.012	0.775	63.33	18.66	5.25	12.76

由表3.3.42～表3.3.45看出，难选钼中矿中氧化钼很少，氧化率仅占0.775%，钼的氧化物主要是高铁钼华和钼华。其次，辉钼矿仅在小于44微米粒级解离较好，粗粒级单体解离度较低，与脉石连生或作为脉石中的包体较多。对这种含有大量铁、铜、碳的钼的中间产品，只能单独处理。经由次氯酸钠选择性氧化辉钼

地信网论坛
bbs.3s001.com

矿，在碱性溶液加压浸出—萃取法生产钼酸铵的小型试验，浸出率96～98%，所得钼酸铵含钼60%，钼的总回收率90%。对浸出渣镜检及X-射线衍射分析，除辉钼矿被浸出外，黄铜矿、黄铁矿的表面虽有微弱的浸蚀，但含量及其状态基本无变化。渣中尚含有0.022%的钼，经化学物相分析，氧化钼占58.62%，探针检测有新生成的钼酸钙产生，因此必须采用1%碱水充分洗涤，以降低渣中新生成的钼酸钙的含量。

参 考 文 献

[1] 王濮等著，系统矿物学，地质出版社，1982.

[2] 李寿元等著，结晶学，人民教育出版社，1965.

[3] 北京地质学院矿物教研室编，X-射线分析，中国工业出版社，1965.

[4] 胡·史特伦茨，矿物表，地质出版社，1959.

[5] 张志雄等编，矿石学，冶金工业出版社，1981.

[6] 中国地质科学院地质矿产研究所编著，金属矿物显微镜鉴定，地质出版社，1978.

[7] 中国地质科学院地质矿产研究所编著，透明矿物显微镜鉴定，地质出版社，1977.

[8] Carmichael, R.S., Handbook of Physical Properties of Rocks, Vol II, Vol I, C.R.C Press, Boca Raton F/a, 1982.

[9] Powell, H.E. and Ballard, L.N., Magnetic Susceptibility of 34 Manganse-Bearing Minerals, I.C. Bureau of Mines, United states Department of the Interior, 1968.

[10] Powell, H.E., Magnetic Susseptibility of 19 Nickel and Cobalt-Bearing, I.C. 8351, Bureau of Mines, United states Department of the Interior, 1967.

[11] Wills, B.A., Mineral Processing Technology, Pergaman Press, 1981.

[12] Powell, H.E., Magnetic Susceptibility of Copper—, Lead—, Zinc-bearing Minerals. Bereau of Mines. Information circular 8383, 1968.

[13] Powell, H.E., Magnetic susceptibility of group IVB, VB and VIB metal-bearing Minerals, Bureau of Mines, Information circular 8360, 1968.

[14] Jones, M.P., Applied Minerlogy, Graham and Trotman, 1987.

[15] Winchell, A.N., Elements of Optical Mineralogy, Fourth Edition, 1951.

[16] 程希翱，矿冶工程，7(1987)，№1，30.

[17] 南京大学地质系岩矿教研室编著，结晶学与矿物学，地质出版社，1978，第234—261页.

地信网论坛
bbs.3s001.com

[18] 陈正等，金属矿物颜色指数研究，地质出版社，1979，第1—23页。
[19] 清华大学分析化学教研室编，现代仪器分析（上册），清华大学出版社，1983。
[20] 张振儒等编著，近代岩矿测试新技术，中南工业大学出版社，1987。
[21] 加藤忠藏，理論分析化学，昭晃堂，东京，1974。
[22] 田边良美译，走查电子显微镜——基础上应用，共立社，东京，1976。
[23] 王宗明等编著，实用红外光谱学，石油化工出版社，1978。
[24] 南京化工学院等编，陶瓷材料研究方法，中国建筑工业出版社，1980，第177—328页。
[25] Болдырев, А. И., Инфлакрасные спектры шинералов, Изд. Недра, Москва, 1976.
[26] Kayashima, K., Shimadzu Review, 29(1972), №1—2, 5.
[27] Andersen, C. A., et al., Shimadzu Review, 29(1972), №1—2, 75.
[28] Челещев, Н. Ф., Изв. АН СССР, сер. геол., (1977), №11, 86.
[29] Гинзбург, А. И., Разв. и Охрана Недр., (1978), №10, 11.
[30] Petruk, W., CIMBull, 69(1976), 146.
[31] Bajon, P. H., et al., Preprints-XIV in Mineral proc. Congress, Session VIII, 1982, p. VIII-9.1.
[32] Underwood, E. E., Microscope, 22(1974), №1, 67.
[33] Jesse, A., Microscope, 19(1971) №1, 21.
[34] 程希翔，有色金属（选矿部分），1979，№3，21。
[35] Petruk, W., Inst. Min. met. Trns. section C, 87(1978) №4, 272.
[36] King, R. P., J. South Afr. IMM, 76(1975), №10, 170.
[37] Wiegel, R. L., Soc. Min. Eng. AIME, 258(1975), №3, 247.
[38] Чернуха, В. И. и др., Изв. Горн. ж., 1978, №8, 154.
[39] King, R. P., Int. J. Miner. Process, 1976, №3, 207.
[40] 程希翔，矿冶工程，3(1983)，№4，27。
[41] Младецкий, И. К., Изв. Вуз. Горн. ж., 1977, №8, 134.
[42] E. N. 卡梅伦著，矿相学，地质出版社，1974，第211—246页。
[43] Hutchison, C. S., Laboratory Handbook of Petrographic Techniques, 1974.
[44] С. Ф. 申柯连科主编，黑色金属矿选矿手册，冶金工业出版社，1978。
[45] П. Е. 奥斯塔平科著，铁矿石选矿，冶金工业出版社，1981。
[46] 黑色金属矿石选矿试验编写组，黑色金属矿石选矿试验，冶金工业出版社，1978。
[47] 张洪恩等编，红铁矿选矿，冶金工业出版社，1983。
[48] 钱鑫等著，铜的选矿，冶金工业出版社，1982。
[49] Hausen, D. M., Park, W. C., Process Mineralogy, Met. Soc. AIME, 1981.