

## 第二篇

# 矿石构成分析与 鉴定新技术



# 第一章 矿物的物理性质 和化学性质分析

## 第一节 矿物的物理性质

矿物的物理性质取决于矿物本身的化学成分和内部结构。所以不同的矿物都具有特定的物理性质。人们可以借助矿物物理性质的差异来识别矿物、利用矿物和寻找矿物资源。例如,人们利用金刚石的荧光性对其进行手选,利用石英的压电性在电子工业中作振荡器件,利用沸石的吸附性除去废水中的放射性元素、重金属离子等。随着科学技术的发展,矿物将作为一种材料资源不断被开发利用,促进国民经济和高科技的发展。所以,研究矿物的物理性质有着极为重要的现实意义。

矿物的物理性质,包括矿物的光学性质、力学性质、矿物的其他物理性质等。

### 一、矿物的光学性质

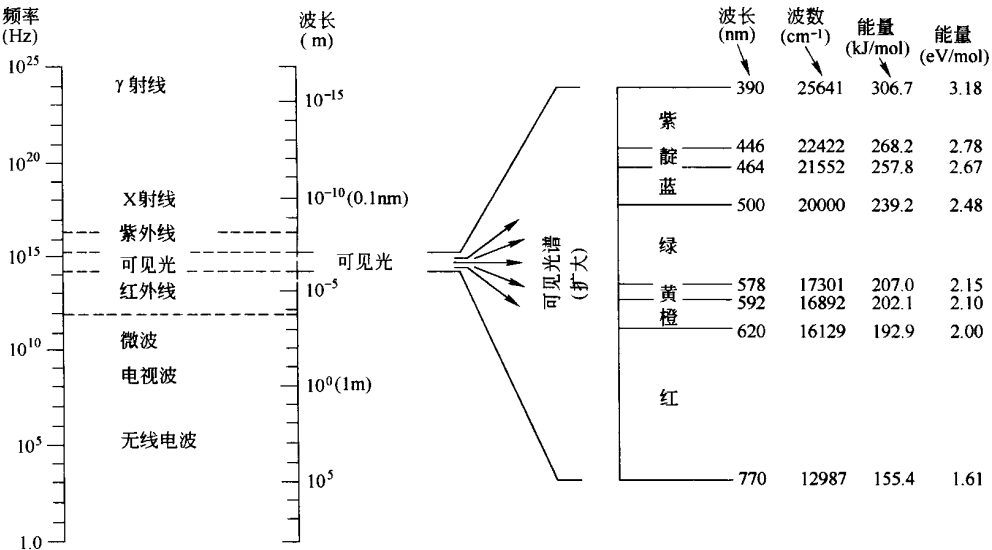
矿物的光学性质主要是指矿物对光线的吸收、反射和折射时所表现的各种性质,以及由矿物引起的光线干涉和散射等现象。用肉眼能观察到的矿物光学性质有矿物的颜色、条痕、光泽和透明度等。这些性质相互之间有着密切的内在联系。

#### (一) 颜色

颜色是矿物的重要光学性质之一。不少矿物具有鲜艳的颜色,如孔雀石

的绿色、蓝铜矿的蓝色、斑铜矿的古铜色等 ,对这些矿物来说 ,其颜色的差异是最明显、最直观的物理性质 ,对鉴定矿物具有重要的实际意义。

矿物的颜色 ,主要是由于矿物对可见光选择性吸收的结果。可见光波长约在 390 ~ 770nm 之间 ,其间波长由长至短依次显示红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等色。它们的混合色就是白色。不同颜色的光波 ,一般用波长表示 ,可以纳米( nm )为单位 ,也可用波数(  $\text{cm}^{-1}$  )为单位来表示。如果以能量表示时 ,则用电子伏特( eV )表示( 图 2 - 1 - 1 )。



注:  $10000\text{\AA}=1000\text{nm}=28.59\text{kcal/mol}=119.621\text{kJ/mol}=1.24\text{eV/mol}$

图 2 - 1 - 1 电磁波谱

其中把可见区域扩展了以便表明颜色、波长、波数和能量间的关系

当矿物受白光照射时 ,便对光产生吸收、透射和反射等各种光学现象。如果矿物对光全部吸收时 ,矿物呈黑色 ;如果对白光中所有波长的色光均匀吸收 ,则矿物呈灰色 ;基本上都不吸收则为无色或白色。如果矿物只选择吸收某些波长的色光 ,而透过或反射出另一些色光 ,则矿物就呈现颜色。矿物吸收光的颜色和被观察到的颜色之间为互补关系( 图 2 - 1 - 2 )。例如 ,照射到矿物上的白光中的绿光被矿物吸收 ,矿物即呈现绿色的补色一红色。

决定矿物颜色的重要因素有以下几方面。

## 1. 过渡金属阳离子内部电子跃迁

当矿物组成中含有过渡型离子时,因为该离子都具有未填满的  $d$  或  $f$  电子轨道。对孤立离子来说,同一  $d$  亚层 5 个轨道的能级是相同的。但在晶体场中,由于每个阳离子周围阴离子电荷的作用,使原来属于同一能级的  $d$  或  $f$  轨道发生分裂,使离子外层电子轨道重新排列,这时新形成轨道的能量差正在可见光范围内,为维持新的轨道状态就得吸收一定波长的可见

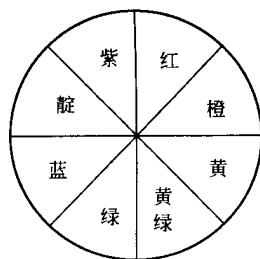


图 2-1-2 互补色

光,矿物即呈现出颜色。例如以类质同象方式进入刚玉中的  $\text{Cr}^{3+}$ ,其 3 个  $d$  电子位于能量较低的  $d$  轨道上,当吸收了以绿光为主的光波能量,这些电子即跃迁到能量较高的  $d$  轨道上去。由于绿光被吸收,晶体即呈现绿色的补色—红色(含铬刚玉叫红宝石)。

过渡型元素(主要是 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni),及 Cu、TR 和 U 等离子,都是使矿物呈色的主要离子,故称色素离子。表 2-1-1 为常见的色素离子及有关矿物的颜色。

表 2-1-1 常见色素离子及有关矿物的颜色

离 子	颜 色	矿物举例	离 子	颜 色	矿物举例
$\text{Cu}^{2+}$	蓝	蓝 铜 矿	$\text{Fe}^{2+}$	暗 绿	绿 泥 石
	绿	孔 雀 石	$\text{Mn}^{4+}$	黑	软 锰 矿
$\text{Ni}^{2+}$	绿	镍 华	$\text{Mn}^{2+}, \text{Mn}^{3+}$	玫 瑰	菱 锰 矿 红 柱 石
$\text{Co}^{2+}$	玫 瑰	钴 华	$\text{Cr}^{3+}$	红	刚 玉
$\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	蓝	钴 土	绿	钙 铬 石 榴 石	
	黑	磁 铁 矿	$\text{V}^{5+}$	黄 红	钒 铅 矿
$\text{Fe}^{3+}$	褐	褐 铁 矿	$\text{V}^{2+}$	绿	钒 云 母
	红	赤 铁 矿	$\text{Ti}^{4+}$	褐 红 褐	榍 石

由表可以看出,同种离子在不同矿物中可呈不同颜色。这是因为轨道分裂产生的分裂能不仅取决于过渡型金属离子的种类,而且与周围阴离子的种类以及由这些阴离子组成的配位多面体的形状有关。

惰性气体型离子所构成的矿物,通常无色。这是因为惰性气体型离子的

$p$  轨道同其最邻近的空轨道间的能量差值远比可见光的能量为大,其电子在可见光能量的作用下,不能被激发,不发生跃迁,从而可见光不能被吸收,因此矿物无色。

## 2. 离子间的电子转移

在矿物晶体结构中,构成共同分子轨道的离子之间(金属离子与金属离子之间、金属离子与配位阴离子之间、非金属离子与非金属离子之间),在一定能量光波作用下,电子可以从一个离子轨道跃迁到另一个离子轨道上去,这种发生在不同离子之间的电子跃迁称为电子转移(或电荷转移)。伴随着电子转移有很强的吸收,这就决定了某些矿物的颜色。如蓝闪石存在着金属离子  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  之间的电子转移而呈蓝色。石墨的晶体结构中碳原子组成六方网层,层内  $\pi$  电子可以或多或少地自由转移,造成强的光吸收而呈黑色。

## 3. 能带间电子跃迁 – 带隙跃迁

对自然金属和硫化物一类矿物的呈色,一般用带隙跃迁来说明。根据能带理论,晶体中的电子按能量高低分别位于各能带中。为电子占满的能带称为满带,未占满的叫导带,导带的能量较高。各能带间有一能量间隙,称为禁带。电子可以由满带向导带跃迁,但必须吸收超过中间的禁带宽度所代表的能量才能发生。而在自然元素和硫化物晶体中,这一禁带宽度很窄,有时甚至为零(如自然铜等金属为零;方铅矿、黄铁矿等有金属光泽的矿物小于  $1.7\text{eV}$ ,即小于红色光波的能量;辰砂、雄黄等有金刚光泽的矿物在  $2.0 \sim 2.5\text{eV}$  间,即橙色光至绿色光之间)。因此,它们能够吸收可见光而产生颜色。对于禁带宽度小于  $1.7\text{eV}$  甚至为零者,各种波长的可见光波均被大量吸收,使其透明度很低。跃迁后位于激发态的电子又极易回到基态,同时以可见光的形式放出大部分能量,以至使这类矿物经常具有很强的反射能力及特有的金属光泽和金属颜色。

## 4. 色心

由于种种物理 – 化学因素,在晶体局部范围内,形成晶格缺陷。晶体中能选择吸收可见光的点缺陷称色心。它能引起相应的电子跃迁而使晶体呈色。色心的类型很多,最常见的型式是 F 心和 V 心。F 心是由一个阴离子空位和一个受此空位电场束缚的电子所组成,故又称电子心。萤石就是由于存

在 F 心呈紫色。V 心是晶体结构中由于阳离子缺位而引起的。从静电作用考虑,缺少一个阳离子,等于附近增加一个负电荷,则附近一个阴离子必须成为空穴才能保持静电平衡。因此,V 心是由一个阳离子空位捕获一个空穴所组成,故又称空穴心。

在同一个晶体中,如果同时存在不同的色心,且数量亦不相同,将会引起不同的颜色,故某种晶体可有多种颜色,如萤石。

应该指出,由于矿物的成分、结构、键型是复杂的,引起颜色变化的因素也是复杂的。一种矿物的颜色往往是各种呈色机理所产生的总效应,如蓝宝石(含少量 Fe 和 Ti 的刚玉)的颜色是由  $d-d$  电子跃迁和离子间电子转移综合作用引起,即由  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{3+}$  的  $d-d$  电子跃迁和  $\text{Fe}^{2+} + \text{Ti}^{4+} / \text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{3+}$  的电子转移( $\text{Fe}^{2+}$  的一个电子转移给  $\text{Ti}^{4+}$ ,使形成  $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{3+}$  的组合)产生对红光强烈吸收,使刚玉染成深蓝或蓝绿色。

以上的呈色原因,都与矿物对可见光的吸收有关。但是,像某些少数矿物所呈现的彩色、乳光等,则与矿物对可见光的内散射或内反射有关。如贵蛋白石是具有彩色的透明蛋白石,它是一种水胶凝体矿物。由于其各部分的含水量不均匀,引起折射率的不同,于是当可见光入射时即发生内散射,各散射光相互干涉的结果,使白光中某些波长的色光强度减弱,另一些波长的色光强度增强,从而引起呈色。又如月长石,它实际上是由厚度极小的钠长石和钾长石的互层所组成的两相混合物,这两相具有不同的折射率,因而在一系列相互平行的界面上,将对入射光多次产生内反射,各反射光相互干涉的结果,同样也可引起颜色。

在矿物学中传统地将矿物的颜色分为自色、他色和假色三类。

白色指矿物自身所固有的颜色。如黄铜矿的铜黄色,孔雀石的翠绿色,贵蛋白石的彩电等。自色的产生,与矿物本身的化学成分和内部构造直接有关。如果是色素离子引起呈色那么,这些离子必须是矿物本身固有的组分(包括类质同象混入物),而不是外来的机械混入物。对于一种矿物来说,自色总是比较固定的,在鉴定矿物上具有重要的意义。

他色指矿物因含外来带色杂质的机械混入所染成的颜色。如纯净的石英为无色透明,但由于不同杂质的混入,可使石英染成紫色(紫水晶)、玫瑰色

(蔷薇石英)、烟灰色(烟水晶)、黑色(墨晶)等。引起他色的原因主要是色素离子作为一种机械混入物存在矿物中,而不是矿物本身所固有的组分,显然他色的具体颜色将随混入物组分的不同而异。因此,矿物的他色不固定,一般不能作为鉴定矿物的依据,而对少数矿物可作为辅助依据加以考虑。

假色指由于某些物理原因所引起的颜色。而且这种物理过程的发生,不是直接由矿物本身所固有的成分或结构所决定的。例如,黄铜矿表面因氧化薄膜所引起的锍色(蓝紫混杂的斑驳色彩)。又如白云母、方解石等具完全解理的透明矿物,由于一系列解理裂缝、薄层包裹体表面对入射光层层反射所造成的干涉结果,可呈现如彩虹般不同色带组成的晕色。这种锍色、晕色都属于假色。假色只对特定的某些矿物具有鉴定意义。

矿物的颜色种类繁多,对颜色的描述应力求确切、简明、通俗、使人易于理解。通常人们惯用三种命名法。一种为标准色谱红、橙、黄、绿、蓝、紫以及白、灰、黑色来描述矿物的颜色或根据实际情况加上形容词,如浅绿色墨绿色等;一种为类比法,即与常见实物的颜色相类比。如描述具有非金属光泽矿物的颜色时用桔红色、橙黄色、孔雀绿。描述具有金属光泽的矿物颜色时,常与金属的颜色类比,如锡白色、铅灰色、铜红色、金黄色等;一种为二名法,因有很多矿物往往呈现两种颜色的混合色,可用两种色谱的颜色来命名,其中主要颜色写在后面,次要色调写在前面,如黄绿色,则以绿色为主。

此外,在颜色描述过程中,还应注意区分新鲜面与风化面的颜色,应着重观察和描述新鲜面上的颜色,区分金属色与非金属色,从而正确类比。

## (二) 条痕

矿物的条痕是指矿物粉末的颜色。一般是将矿物在白色无釉瓷板上刻划后,观察其留在瓷板上的粉末颜色。矿物的条痕可以消除假色,减弱他色,因而比矿物颜色更稳定。所以,在鉴定各种彩色或金属色的矿物时,条痕色是重要的鉴定特征之一。如赤铁矿的颜色可呈铁黑色,也可呈钢灰色,但其条痕总是樱红色,由此利用其条痕可准确鉴定。然而,浅色矿物(如方解石、石膏)等,它们的条痕色均为白色或近于白色,难以作为鉴定矿物的依据,因而它的条痕色则无鉴定意义。

有些矿物由于类质同象混入物的影响,使条痕色发生变化。如闪锌矿



( $\text{Zn, Fe}$ )S, 当铁含量高时, 条痕呈褐黑色; 含铁低时, 条痕则呈淡黄色或黄白色, 由此可见, 某些矿物随着成分的变化, 条痕也稍有变化。因此, 根据条痕色的细微变化, 可大致了解矿物成分的变化。

在实际观察矿物的条痕色时, 要注意寻找矿物的新鲜面及需要鉴定的矿物颗粒在瓷板上刻划, 以获得良好的效果。

### (三) 光泽

矿物的光泽是指矿物表面对光的反射能力。光泽的强弱用反射率  $R$  来表示。反射率是指光垂直入射矿物光面时的强度 ( $I_0$ ) 与反射光强度 ( $I_1$ ) 的比值, 即  $R = I_1/I_0$ 。通常用百分率表示。反射率越大, 光泽就愈强。按照反射率的大小, 光泽分为四级:

(1) 金属光泽,  $R > 25\%$ 。呈金属般的光亮。矿物具金属色。条痕黑色、灰黑、绿黑或金属色。不透明。如自然金、黄铁矿、方铅矿等。

(2) 半金属光泽,  $R = 25\% \sim 19\%$ 。呈弱金属般的光亮。不透明。条痕深彩色(棕色、褐色)。如铬铁矿、黑钨矿。

(3) 金刚光泽,  $R = 19\% \sim 10\%$ 。如同金刚石般的光亮。条痕为浅色(浅黄、桔黄、桔红)或无色。透明至半透明。如金刚石、辰砂、雌黄等。

(4) 玻璃光泽,  $R = 10\% \sim 4\%$ 。如同玻璃般的光亮。条痕无色或白色。透明。如石英、长石、方解石等。

上述四级光泽, 是就矿物的平坦晶面或解理面上对光的反射情况而言的, 但当矿物表面不平坦或呈集合体时, 由于光产生多次的折射和散射, 形成一些特殊的光泽, 它们可与一些实物的光泽类比。

(1) 油脂光泽和树脂光泽。前者是指表面像涂了油脂似的光泽; 后者则是指像树脂表面那样的光泽。油脂光泽适用于对颜色较浅矿物的描述, 例如石英、霞石; 树脂光泽则适用对颜色较深矿物的描述, 特别是呈黄棕色的矿物, 如琥珀、浅色闪锌矿。这两种光泽都出现在一些透明矿物的断口面上, 是由于反射面不很光滑, 部分光发生漫反射所造成的。

(2) 珍珠光泽。矿物呈现如同珍珠表面或蚌壳内壁那种柔和而多彩的光泽。如石膏、云母解理面上的光泽。珍珠光泽都出现在片状解理很发育的浅色透明矿物解理面上, 是由于光的反射、干涉造成的。

(3) 丝绢光泽。透明矿物呈纤维状集合体时,表面所反射的那种光泽。例如石棉、纤维石膏的光泽。

(4) 蜡状光泽。像蜡烛表面的光泽。例如致密块状叶蜡石的光泽。这种光泽多出现在透明矿物的隐晶质或非晶质致密块体上,它比油脂光泽更暗一些。

(5) 土状光泽。矿物表面光泽暗淡如土,例如高岭石的光泽。土状光泽都出现在呈粉末状或土状集合体表面上。

#### (四) 透明度

矿物的透明度是指矿物可以透过可见光的程度。透明度的大小可以用透射系数  $Q$  表示。若进入矿物的光线强度为  $I_0$ ,当透过 1cm 厚的矿物时,其透射光的强度为  $I$ ,则  $I/I_0$  的比值称为透射系数。透射系数大,矿物透明;反之矿物半透明或不透明。

矿物的透明度决定于矿物的化学成分与内部构造。例如具有金属键的矿物(如自然金、自然铜等),由于含有较多的自由电子,对光波的吸收较多,禁带值小于可见光的能量,因而透过的光就少,透明度很低;反之,一些离子键或共价键的矿物(如冰洲石、金刚石等),由于不存在自由电子,禁带值大于可见光的能量,因而透过大量的光,透明度较高。

矿物的透明与不透明不是绝对的,例如自然金本是不透明矿物,但金箔亦能透过一部分的光。因此,在研究矿物透明度时,应以同一的厚度为准。根据矿物在岩石薄片(其标准厚度为 0.03mm)中透光的程度,可将矿物的透明度分为:

(1) 透明。矿物为 0.03mm 厚的薄片时能透光,如石英、长石、角闪石等。

(2) 半透明。矿物为 0.03mm 厚的薄片时透光能力弱,如辰砂、锡石等。

(3) 不透明。矿物为 0.03mm 厚的薄片时不能透光,如方铅矿、黄铁矿,磁铁矿等。

在肉眼鉴定矿物时,透明度难以精确度量,常与矿物条痕色配合起来判断矿物的透明度:对于不透明矿物,其条痕色常为黑色或金属色;半透明矿物条痕则呈各种彩色,透明矿物条痕常呈无色或白色。

此外,同一矿物的透明度还受矿物中的包裹体、气泡、杂质、裂隙及矿物

的集合方式的影响。

## 二、矿物的力学性质

矿物的力学性质是指矿物在外力作用下,所表现出的各种性质。其中最重要的是解理、硬度和密度,其次还有延展性、脆性、弹性和挠性等。

### (一)解理、裂开、断口

#### 1. 解理

矿物受外力(敲打、挤压)作用后,沿着一定的结晶方向发生破裂,并能裂出光滑平面的性质称为解理。破裂的光滑平面称为解理面。如果矿物受外力作用,在任意方向破裂并呈各种凹凸不平的断面,则称其为断口。

解理的产生与晶体的内部构造有着密切关系。它主要决定于结晶构造中质点的排列及质点间连接力的性质。解理往往沿着面网间化学键力最弱的方向产生。表现在以下诸方面:

解理面一般平行于面网密度最大的面网。因为从几何角度看,面网密度大,面网间距也大,导致面网间的引力小,故解理容易沿此方向产生。例如金刚石的解理平行 $\{111\}$ (图 2-1-3)。

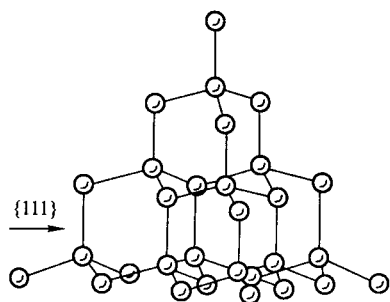


图 2-1-3 金刚石沿 $\{111\}$ 解理

解理面一般平行于由异号离子组成的电性中和的面网。因为在其网内静电引力强,而相邻面网间静电引力弱。例如在石盐晶体结构中, $\{100\}$ 是由 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 组成,且数量相等而达到电性中和。故石盐沿 $\{100\}$ 产生解理。

当相邻面网为同号离子的面网时,其间易产生解理。因同号离子间的斥力,使其相邻面网间联系力弱。如萤石沿 $\{111\}$ 方向有由 $\text{F}^-$ 组成的两个相邻面网,其解理平行 $\{111\}$ 面产生。

解理面平行于化学键力最强的方向。如在石墨的层状结构中,层内 C—C 的离子间距为 0.142nm,具共价键和 $\pi$ 键,而层间距离为 0.340nm,具分子键。使层内键力比层间的键力强,故解理沿 $\{0001\}$ 层的方向产生(图 2-1-4)。

实际矿物解理的产生,有的仅由以上某一因素起主导作用,而有的则几种因素共同起作用,所以,在说明某种矿物解理产生的原因时,应该把上述各种因素进行综合分析,方能得到合理的解释。

根据解理产生的难易和完善程度,将矿物的解理分为五级:

(1) 极完全解理。矿物在外力作用下极易破裂成薄片。解理面光滑、平整。很难发生断口。如云母(图 2-1-5)、石墨、辉钼矿等。

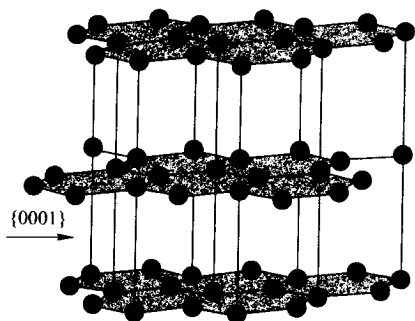


图 2-1-4 石墨沿{0001}解理

(2) 完全解理。矿物在外力作用下,很容易沿解理方向破裂成小块(不成薄片),解理面光滑且较大。较难发生断口。如方铅矿、萤石、方解石(图 2-1-6)等。

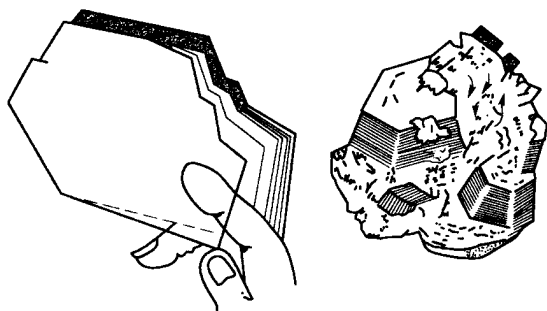


图 2-1-5 云母的极完全解理

(3) 中等解理。矿物在外力作用下,可以沿解理方向裂成平面。但解理面不太平滑。断口较易出现。因此在其破裂面上既可以看到解理面又可看到断口。如辉石、角闪石等。

(4) 不完全解理。矿物在外力作用下,不易裂出解理面。出现的解理面小而不平整,多形成断口,仔细观察才能见到解理面。如磷灰石等。

(5) 极不完全解理。矿物受外力作用后,极难出现解理,多形成断口,一般称为无解理,如石英、石榴石等。

由此可见,矿物的解理与断口出现的难易程度是互为消长的,也就是说

在容易出现解理的方向则不易出现断口。一个晶体上如被解理面包围愈多,则断口出现的机会愈少。

解理既体现出晶体的异向性,又体现出晶体的对称性。采用单形符号来表示解理,它既可以表示解理的方向,又可以表示解理的组数(相同方向的解理谓之一组)。例如方铅矿、萤石和闪锌矿都属等轴晶系,它们分别具有平行立方体 $\{100\}$ 、八面体 $\{111\}$ 和菱形十二面体 $\{110\}$ 的解理,根据单形晶面数可知其解理组数分别为三组、四组和六组。

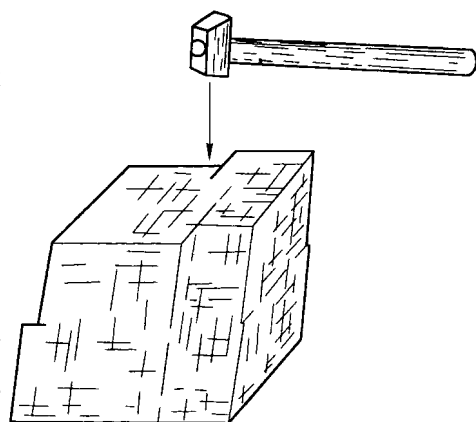


图 2-1-6 方解石的完全解理

在有些矿物晶体构造中,质点连接力弱的方向不只一个,这时就会出现几种单形的解理,这种情况在低级晶族的矿物中比较常见。例如重晶石属斜方晶系,有平行 $\{001\}$ 一组完全解理,平行 $\{210\}$ 二组中等解理。

只有晶质矿物才能产生解理。对于每种矿物,解理的特点(发育程度、组数、夹角)是固定不变的。同种矿物具相同的解理,不同的矿物,具有不同的解理,故解理是矿物的重要鉴定特征。

在实际观察和鉴定解理特征时,应注意在矿物单体上观察,因为矿物的解理是在单体中产生的,应选一个晶体较大、解理清晰的单体对着光线转动标本进行观察,如出现反光一致一系列平行或呈阶梯状的光滑平面,则可判断为解理。另外还应该注意解理面与晶面的区别(表 2-1-2)。

表 2-1-2 解理面与晶面的区别

晶 面	解 理 面
1. 为晶体外面的一层平面,被击破后即消失;	1. 为晶体内部结构上联结力弱的方向,受力打击后可连续出现互相平行的平面;
2. 晶面上一般比较暗淡;	2. 解理面上一般比较光亮;
3. 晶面一般不太平整,仔细观察时常有凹凸不平的痕迹或各种晶面花纹	3. 解理面比较平整,但可以出现规则的阶梯状解理面或解理纹

## 2. 裂开

从现象上看,裂开也是矿物晶体在外力作用下,沿着一定结晶方向破裂的性质。裂开的面称裂开面。从外表上看,它同解理很相似。但两者的成因不同。

裂开产生的原因一般认为可能是沿着双晶接合面特别是聚片双晶的接合面产生。也可能是因为沿某一种面网存在有他种成分的细微包裹体,或者是固溶体溶离物,这些物质作为该方向面网间的夹层,有规律地分布着,使矿物产生裂开(例如磁铁矿沿 $\{111\}$ 方向的裂开)。可见裂开是由一些非固有的原因所引起的定向破裂。因此,裂开和解理在本质上是不同的。其区别方法主要是:裂开面很少是特别光滑的。常只沿一个方向发生,而解理则沿该结晶方向,在矿物的各个部分都能发现;裂开只发生在同一矿物种的某些矿物个体中,而在另一些个体中可以不存在。而具有解理的矿物,在其所有个体中皆存在解理。

裂开也可作为一种鉴定特征,对某些矿物种来说具有重要鉴定意义,如磁铁矿(含Ti夹层时,产生的 $\{111\}$ 八面体裂开),刚玉(聚片双晶的刚玉个体有菱面体裂开)。裂开有时还可帮助分析矿物成因及形成历史。

## 3. 断口

断口与解理不同,它在晶体或非晶体矿物上均可发生。容易产生断口的矿物,由于其断口常具有一定的形态,因此可用来作为鉴定矿物的一种辅助特征。根据断口的形状,常见的有下列几种:

(1)贝壳状。断口呈椭圆形的光滑曲面,面上常出现不规则的同心条纹,与贝壳相似。石英和多数玻璃质矿物具有这种断口。

(2)锯齿状。断口呈尖锐的锯齿状。延展性很强的矿物具有此种断口。如自然铜等。

(3)纤维状及多片状。断口面呈纤维状或细片状。如纤维石膏、蛇纹石等。

(4)参差状。断口面参差不齐,粗糙不平,大多数矿物具有这种断口。如磷灰石等。

(5)土状。断面呈细粉末状,为上状矿物如高岭石、铝矾土等矿物所特有

的断口。

## (二) 硬度

矿物的硬度是指矿物抵抗外来刻划、压入或研磨等机械作用的能力。它是鉴定矿物的重要特征之一。矿物硬度以  $H$  表示。

测定矿物硬度的方法有：

(1) 刻划法。这种方法在矿物学中一直沿用的是摩氏硬度计。摩氏硬度计由 10 种矿物组成，按其软硬程度排列成 10 级，如表 2-1-3 所示。

表 2-1-3 摩氏硬度计

矿 物	硬度等级	矿 物	硬度等级
滑石 $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$	1	正长石 $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	6
石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2	石英 $\text{SiO}_2$	7
方解石 $\text{CaCO}_3$	3	黄玉 $\text{Al}_2[\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2]$	8
萤石 $\text{CaF}_2$	4	刚玉 $\text{Al}_2\text{O}_3$	9
磷灰石 $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	5	金刚石 $\text{C}$	10

以上 10 种标准矿物等级之间只表示硬度的相对大小，各级之间硬度的差异不是均等的，不成倍数和比例的关系。

利用摩氏硬度计测定矿物硬度的方法很简单。将欲测矿物和硬度计中某一矿物相互刻划，如某一矿物能划动磷灰石（即其硬度大于磷灰石）但又能被正长石所刻划（即其硬度小于正长石），则该矿物的硬度为 5 到 6 之间，可写成 5~6。

实际工作中还可以用更简便的方法来代替硬度计，如指甲的硬度为 2.5，小刀的硬度为 5~5.5。因而可把矿物的硬度粗略地划分为：小于指甲（< 2.5）、指甲与小刀之间（2.5~5.5）及大于小刀（> 5.5）三级。

(2) 压入法。压入法是用合金或金刚石制成一定的压头，加以一定的负荷（重量），压在矿物光面上，以负荷与压痕表面积（或深度）的关系，求得矿物的硬度。一般压痕表面积与负荷成正比关系。对于不同矿物，硬度越大，能抵抗压入的应力就越大，产生压痕的表面积就小，即硬度与抗应力成正比，而与压痕的表面积成反比关系。因此，由负荷与压痕表面积计算矿物的硬度，就可以得出以负荷/面积（ $\text{kg}/\text{mm}^2$ ）为单位的硬度值。

压入法因使用不同的压头和测试技术而有多种方法。一般采用显微硬度仪测定出矿物的显微硬度。目前应用最广的是维克(Vicker)法,其硬度以  $H_v$  或  $VHN$  表示。维克法压头是用金刚石正方形锥体,锥体两对角面的交角( $\alpha$ )为  $136^\circ$ ,压痕呈正方形锥形(图 2-1-7)。计算维克显微硬度时,设负荷为  $P$  (kg),压痕对角线长度为  $d$  (mm)则可按下式计算:

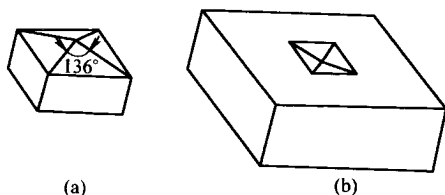


图 2-1-7 维氏压头(a)  
及其压痕形态(b)

$$H_v = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{d^2}$$

维克法测定矿物硬度较刻划法精确,在应用时可换算成摩氏硬度(图 2-1-8)。摩氏硬度( $H_M$ )与维克硬度( $H_v$ )间也可粗略地按下式转换:

$$H_v = 3.25 H_M^3$$

矿物的硬度主要决定于晶体结构的牢固程度,它与化学键的类型密切相关。一般情况,具典型共价键的矿物硬度最大,如金刚石。具离子键的矿物硬度中等,具金属键的矿物硬度较小,具分子键的矿物硬度最小。在自然界中具有离子晶格的矿物十分普遍。由于离子键的强度随离子性质不同而有差异,一般情况为:矿物的硬度随离子半径的减小而增大。例如方解石和菱镁矿中  $Ca^{2+}$  的半径是  $0.108nm$ ,  $Mg^{2+}$  是  $0.066nm$ ,所以方解石( $CaCO_3$ )的硬度是 3,而菱镁矿( $MgCO_3$ )则是 4.5;当其离子半径相同时,离子电价越高,键力越强,矿物硬度越大;晶体结构中原子(或离子)堆积紧密时,硬度大,否则硬度小。例如方解石与文石是  $CaCO_3$  的同质多象变体,但方解石(密度 2.72)比文石(密度 2.94)结构“松弛”,故方解石硬度是 3,文石硬度是 4;硬度随配位数的增大而增大,矿物中无论含  $H_2O$  分子或  $(OH)^-$ ,都将使硬度降低。例如石膏( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )的硬度是 1.5~2,硬石膏( $CaSO_4$ )的硬度则是 3~3.5。

由于矿物晶体结构的对称性和异向性,导致了矿物的硬度也有对称性和异向性。若将在矿物晶面各方向上的硬度值测出之后,取中央一点为中心,按比例绘出“硬度曲线”就可了解硬度的异向性及对称性。例如在萤石( $CaF_2$ )的立方体晶面 $\{100\}$ 和八面体晶面 $\{111\}$ 上,分别测出硬度曲线的形状



(图 2-1-9)。在立方体晶面上呈四开叶形 ,表现了晶体四次对称关系 ,两对角线方向硬度最小。在八面体晶面上呈三开叶形 ,表现了三次对称的关系。



图 2-1-8 维氏显微硬度与摩斯硬度等级转换

个别低级晶族的矿物硬度差异比较明显 ,如三斜晶系的蓝晶石 ,在( 100 )面上沿延长方向的硬度为 4.5 ,而垂直方向硬度为 6.5。

在肉眼鉴定时,测试矿物的硬度必须在矿物单体的新鲜面上进行,尽量避免因风化、裂隙、脆性以及矿物集合方式的影响所造成的虚假硬度。

硬度是矿物物理性质中比较固定的性质,具有重要的鉴定特征,同时也是影响矿石工艺加工生产效率和选矿成本的重要因素之一。

### (三) 相对密度和密度

矿物的相对密度是指矿物(纯净的单矿物)在空气中的重量与 4℃ 时同体积水的重量之比。其数值与密度的数值相同,但相对密度无单位;而密度的度量单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

矿物的密度变化范围很大,可以从小于 1(如石蜡)到 23(铂族矿物)。据统计,大多数矿物的密度在 2~3.5 之间。卤化物和含氧盐类矿物普遍较轻,而氧化物、硫化物及自然金属矿物通常具有较大的密度。

矿物的密度主要取决于它的化学组成和晶体结构:当矿物晶体结构类型相同时,矿物的密度随所含元素的原子量的增加而增大,随原子或离子半径的增大而减小;在原子量和原子(或离子)半径相同或相近时,晶体结构越紧密的矿物其密度也越大。

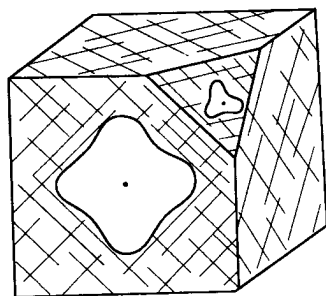


图 2-1-9 萤石的  
硬度曲线

矿物密度可分为三级:

- (1) 轻级。密度在 2.5 以下,如石盐、石膏等。
- (2) 中级。密度在 2.5~4 之间,如石英、方解石等。
- (3) 重级。密度在 4 以上,如重晶石、锡石、方铅矿等。

测定矿物密度的方法很多,常用的有比重瓶法、重液法、扭力天平法等。

#### 1. 比重瓶法

比重瓶法是根据固体矿物在水中的失重等于同体积水重的原理而测定的。比重瓶是容积为  $25 \sim 50\text{cm}^3$  的带有刻度的瓶子。

测定步骤:

- (1) 称比重瓶的质量  $P_1$ ;
- (2) 将待测矿物小块放入比重瓶中,一般占瓶容积的  $1/3$ ,称瓶和矿物的

总质量  $P_2$  ;

(3) 为排除矿物中的空气 , 先将蒸馏水注入比重瓶 , 使其达容积的一半左右 , 再用抽气机抽出瓶内附在矿物表面的气泡( 亦可用加热至  $80 \sim 100^{\circ}\text{C}$  排除 ) , 并不断摇晃比重瓶 , 直至瓶中无气泡为止 ;

(4) 用滴管将蒸馏水注满瓶中 , 称瓶、水和矿物的质量  $P_3$  ;

(5) 从瓶中倒出矿物和水 , 再将蒸馏水注入瓶中 , 达到与 4 相同水位 , 称瓶和水的总质量  $P_4$  ;

(6) 按下式计算矿物的密度  $D$ 。

$$D = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)}$$

用比重瓶测定密度时要求用纯净的蒸馏水。由于水能部分地溶解矿物中某些盐类 , 故最好采用非极性液体( 如煤油 ) , 但这时计算其密度应将上述公式乘以液体的密度。

比重瓶法可以测定矿物晶体、碎块或粉末的密度 , 但操作繁琐 , 用的不多。

## 2. 重液法

根据矿物的比重与液体比重相同时 , 矿物即可在液体中呈悬浮状态的原理 , 用液体的密度定出矿物的密度。使用这种方法时 , 要求有成套的各种不同密度的重液 , 以备测定之用。

此法迅速简便、准确 , 但受重液密度的限制 , 不能测定密度超过 4.2 的矿物。

重液法不仅可以测定矿物的密度 , 而且可以用来分离不同密度的矿物。选矿中的重介质选矿 , 即是利用这一原理精选矿物。

## 3. 扭力天平法

扭力天平法是利用阿基米德原理测定矿物密度。但由于水的表面张力大 , 不易沾湿矿样而引起误差 , 所以测定中一般不用水 , 而用四氯化碳、酒精、甲苯等液体 , 通常多采用四氯化碳。

用扭力天平对矿物称量后 , 再用下列公式求出矿物密度。

$$D_{\text{矿}} = \frac{P_2 - P_1}{(P_2 - P_1) - (P_3 - P_4)} \times D_{\text{液}}$$

当  $P_1 = 0$  时 则：

$$D_{\text{矿}} = \frac{P_2}{P_2 - (P_3 - P_4)} \times D_{\text{液}}$$

式中  $P_1$ ——空称盘在空气中的质量；

$P_2$ ——称盘装上矿样后在空气中的质量；

$P_3$ ——装有矿样的称盘在液体中的质量；

$P_4$ ——空称盘在液体中的质量；

$D_{\text{液}}$ ——所用液体在  $t^{\circ}\text{C}$  时的密度。

扭力天平的内部结构主要由平卷弹簧和片弹簧两种弹性元件组合而成，密封于天平外壳内。其结构如图 2-1-10 所示。

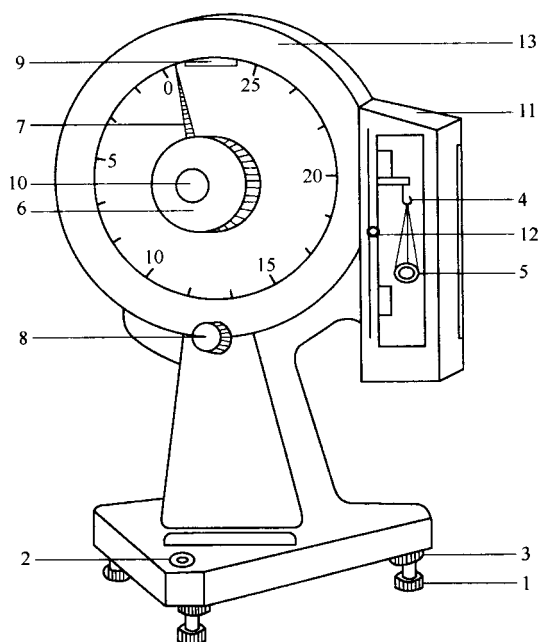


图 2-1-10 扭力天平结构示意图

1—垫脚 2—水准器 3—调平脚 4—秤钩 5—秤盘 6—读数

旋钮 7—读数指针 8—制动旋钮 9—平衡指针 10—保护壳；

11—计量盒 12—拉手 13—天平外壳

测定步骤如下：

(1) 称量矿物在空气中的质量  $P_2$ 。将矿物样品置于秤盘，挂在秤钩上，

开启天平,逆时针转动读数旋钮,直至平衡指针与镜子内刻度板上的中线重合,之后关闭天平,按读数指针所指的刻度读数并记录。

(2) 称量装有矿样的秤盘在液体中的质量( $P_3$ )。烧杯中盛入四氯化碳后置于计量盒内,将装有矿样的秤盘小心地放入四氯化碳液体中,并在秤钩上挂一重物(如铜丝或小金属片等),以抵消秤盘在液体中所受的浮力。开启天平,如同称量 $P_2$ 的方法一样称重,然后关闭天平,读数并记录。

(3) 称量空秤盘在液体中的质量( $P_4$ )。将装有矿样的秤盘从四氯化碳中取出后,把矿样倒在过滤纸上(小心地回收全部矿样,备今后测试时使用),再将空秤盘置于四氯化碳内,如同上述方法称重后,关闭天平,读数并记录。

(4) 测液体的密度( $D_{液}$ )。

记录测试时的室温,查出相应温度时四氯化碳的密度( $D_{液}$ )。

也可用比重计测出四氯化碳的密度:用玻璃量筒盛入四氯化碳,然后放入比重计,根据四氯化碳的弯月面与比重计刻度的交线,便可在比重计上读出四氯化碳的密度( $D_{液}$ )。

(5) 按上式计算出矿物的密度。一些有机液体在不同温度中的密度,如表 2-1-4 所示。

表 2-1-4 一些有机液体在不同温度中的密度

四氯化碳		乙 醇		甲 苯	
温 度 $t/^{\circ}\text{C}$	密 度	温 度 $t/^{\circ}\text{C}$	密 度	温 度 $t/^{\circ}\text{C}$	密 度
3	1.630	7	0.837	5	0.875
13	1.610	16	0.830	8	0.870
18	1.599	18	0.829	12	0.867
23	1.589	19	0.827	18	0.861
28	1.579	21	0.821	21	0.857
33	1.569	26	0.817	32	0.847
38	1.559	32	0.810	38	0.841
42	1.549	36	0.806	42	0.837

(四) 脆性与延展性、弹性与挠性

1. 脆性与延展性

矿物受外力作用时,容易破碎的性质称为脆性。脆性矿物用刀刻划时易产生粉末。大多数矿物都具有脆性。如方铅矿、黑钨矿等。

矿物受到外力的拉伸时,能发生塑性形变而趋向形成细丝的性质,称为矿物的延性;在受到外力的碾压或锤击时,能发生塑性形变而趋向于形成薄片的性质,则称为矿物的展性。延性和展性几乎总是同时并存的,一般通称为延展性。温度升高,延展性增强;混入杂质则会使延展性降低。延展性是金属键矿物的一种特性。如自然金、自然银、自然铜等矿物具有良好的延展性。

当用小刀刻划具有延展性的矿物时,矿物表面被刻之处留下光亮的沟痕,而不出现粉末和碎粒,借此可区别于脆性。

## 2. 弹性与挠性

矿物的弹性是指某些片状或纤维状的矿物,受外力作用时,能发生弯曲而不断裂,当外力解除后又能恢复到原来状态的性质。例如云母、石棉等矿物均具有弹性。

矿物的挠性则是指某些片状或纤维状矿物受外力作用时,虽能发生弯曲,但当外力解除后,却不再能恢复到原来状态的性质。例如绿泥石就具有挠性。

矿物的弹性和挠性,都决定于晶格内部的构造特点。例如绿泥石、滑石等矿物晶体,都为层状构造,在其相邻的构造单元层之间,只以微弱的分子键力相联系,当受力时,层间即可发生相对位移,使整个薄片弯曲,而基本上并不产生内应力,因此,当外力解除后,内部就没有力量促使晶格恢复到原来的状态,从而表现为挠性。

具有弹性的矿物,例如云母属于层状构造,但在其相邻的构造单元层之间,还存在有低价、大半径的阳离子  $K^+$ ,而使层与层之间的键力有一定程度的加强。当受力时,层间虽然仍可发生相对位移,使整个薄片弯曲,但位移破坏了  $K^+$  与阴离子之间的平衡位置,因而产生了内应力;当外力解除后,这种内应力就要促使质点恢复到平衡位置,而表现出弹性。

矿物的弹性和挠性,是区别云母、绿泥石等一些矿物的重要鉴定特征之一。

### 三、矿物的其他物理性质

#### (一) 磁性

矿物的磁性是指矿物能被永久磁铁或电磁铁吸引,或矿物本身能吸引铁质物件的性质。自然界具有磁性的矿物极为普遍,但磁性显著的矿物则不多。根据矿物在外磁场作用下所表现的性质,可将矿物的磁性分为三类。

##### 1. 磁性矿物

能被永久磁铁吸引的矿物。只有少数矿物才具有这种特性,因而在矿物鉴定上有意义。用肉眼鉴定矿物时,以永久磁铁为工具,将矿物磁性分为:

(1) 强磁性。较大颗粒矿物能被永久磁铁吸引,且本身还可以吸引铁钉、铁屑等物。当罗盘靠近时,能使磁针改变方向发生转动为强磁性矿物也称为铁磁性矿物。如磁铁矿。

(2) 弱磁性。即较大的矿物颗粒不能被永久磁铁吸引,而粉末能被吸引,但不能跃至磁铁上。如铬铁矿。

(3) 无磁性。矿物粉末也不能被永久磁铁吸引。如黄铁矿。

##### 2. 电磁性矿物

具较弱磁性,无论是颗粒或粉末均不能被永久磁铁吸引。但可被电磁铁吸引。这类矿物还可进一步分为强电磁性矿物和弱电磁性矿物。如角闪石、辉石、电气石等。矿物的这一性质对磁力选矿、重砂分离极为重要。

##### 3. 逆磁性矿物

逆磁性矿物,具抗磁性被磁铁所排斥的矿物。如自然铋、黄铁矿等。

磁性的强弱可用比磁化系数来表示。比磁化系数为  $1\text{cm}^3$  的矿物在磁场强度为  $10\text{Oe}$  的外磁场中所产生的磁力。比磁化系数越大,表示矿物越容易被磁化。在选矿中,利用矿物比磁化系数的差异进行磁选。矿物按比磁化系数的大小,可分为四类:

(1) 强磁性矿物。比磁化系数大于  $3000 \times 10^{-6}\text{cm}^3/\text{g}$ ,在弱磁场( $900 \sim 12000\text{Oe}$ )就容易与其他矿物分选。如磁铁矿、磁黄铁矿等。

(2) 中磁性矿物。比磁化系数在  $600 \times 10^{-6}\text{cm}^3/\text{g}$  到  $3000 \times 10^{-6}\text{cm}^3/\text{g}$  之间。要选出这类矿物,磁场强度要在  $2000 \sim 8000\text{Oe}$ 。如钛铁矿、铬铁矿等。

(3) 弱磁性矿物。比磁化系数在  $15 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$  到  $600 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$  之间。要选出这类矿物,磁场强度要在 10000Oe 以上。如赤铁矿、褐铁矿、黑钨矿、辉铜矿等。

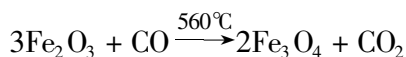
(4) 非磁性矿物。比磁化系数小于  $15 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ ,如石英、方解石、长石等。

矿物的磁性主要是由组成元素的电子构型和磁性结构所决定的。即当矿物成分中含有 Fe、Co、Ni、V 等元素时,这些元素的原子或离子构型中 3d 电子层未填满,为不成对电子的出现提供了条件。这些未成对的电子自旋所引起的磁矩是形成磁性的主要原因。这种未成对的电子越多,物质的磁性就越强,反之则弱。

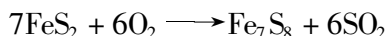
当矿物成分中含有以上元素时,随着所含元素 3d 电子进入晶体场中后自旋状态的不同,可以有不同的磁性显示。例如  $\text{Fe}^{2+}$  在八面体场中,当其电子的自旋状态有四个自旋平行的未成对电子时,就会使矿物显铁磁性或顺磁性。如磁黄铁矿、黑云母等;当电子的自旋状态都是自旋成对的电子对时,就会使矿物显逆磁性。如黄铁矿、毒砂等。

晶体中的磁性常具异向性,这与其内部结构类型有关。如磁铁矿晶体,在不同方向上的磁性强弱不同。

在选矿中可用焙烧还原磁化法,使一些磁性弱的矿物增加其磁性。如一些低品位的铁矿石,就可以用这种方法回收。它的主要原理是赤铁矿、褐铁矿经焙烧加热至  $800^\circ\text{C}$  以上,再通以煤气在  $560^\circ\text{C}$  以上,使  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  还原为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,反应式如下:



对于黄铁矿或白铁矿可先在空气中焙烧,当温度在  $60^\circ\text{C}$  左右时,他们将被烧裂,随后硫逐渐消失,到  $400^\circ\text{C}$  便形成强磁性的  $\text{Fe}_7\text{S}_8$ , 然后进行磁选。其反应如下:



以上说明矿物的磁性不仅是鉴定矿物的特征,而且在探矿、选矿工艺和单矿物分离上都具有实际意义。



## (二) 发光性

发光性是指矿物受外来能量激发,能发出可见光的性质。

根据发光激发源的不同,可将发光分为:光致发光,如由可见光、红外光和紫外光等激发;阴极射线发光,如由电子束激发;辐射发光,如由X射线、 $\gamma$ 射线等激发;热致发光,由热能激发。此外,还有电致发光、摩擦发光、化学发光等。

根据发光持续时间的长短又分为荧光和磷光两种类型。如果发光体一旦停止受激,发光现象立即消失,称为荧光;如果激发停止后,仍持续发光则称为磷光。能发荧光或磷光的物体分别称为荧光体或磷光体。

矿物的发光主要与矿物中的晶体缺陷和杂质元素有关,而多数组分纯净的矿物是不发光的。例如有些矿物中因含钒而呈现淡蓝色发光现象,因含钐等元素而呈现褐红色发光现象。含稀土元素的萤石和方解石常产生荧光;在钙的碳酸盐中有镧族元素代替钙时,常发生磷光。矿物发光的机理可用能带理论解释。

组分纯净的矿物,由于晶体的价带和导带间能量间隔较大,大于可见光的能量,因而电子受激跃迁所需的跃迁能必然较大,同时跃迁电子从导带回到价带时所释放出的能量也大于可见光的能量,因而,不发射可见光。但当晶体中存在能引起发光的杂质——激活剂时,特别当与组分不等价的激活剂进入晶格时,将导致晶体在价带和导带之间产生新的局部能级,如同在禁带中架起一个能级阶梯,使跃迁电子得以逐级回跳,在回跳过程中,电子将因受激时额外所得的能量以可见光的形式释放出来,晶体便产生发光现象。

若矿物中含有的激活剂,使晶体在禁带中靠近价带顶部附近形成一个附加能级[图2-1-1(a)],当晶体受高能辐射时,价带或局部能级的部分电子受激进入导带,而留下若干空着的能态,称为空穴。此时,较高能级上的电子受电场作用而填补这些空穴,使它们又留下新的空穴,造成空穴的不断转移,与此同时,进入导带的电子有足够的能量在晶格中移动(即自由电子),因此,跃迁1,2使晶体离子化,产生了自由电子与空穴心对。但受激电子在导带中是不稳定的,它们很快又跳回价带或局部能级,并与其空穴复合时(跃迁4),释放出相当于可见光的能量,产生很短的发光现象,即荧光。

若有些矿物中的激活剂,使晶体在禁带中靠近导带附近形成一个附加能级[图 2-1-11(b)]。当晶体受激时,价带电子除跃入导带外(跃迁 1),还有可能跃入局部能级中(跃迁 2),被晶体缺陷所滞留,而被滞留的电子通过热和光的激发,可以从陷阱中释放出来,再跃进导带(跃迁 3),当辐射停止后,由于陷阱类型和一些杂质的影响,位于导带的电子还持续不断地回到价带,并与其空穴复合(跃迁 4),伴随着这种复合不断发射出一定波长的可见光,即磷光。

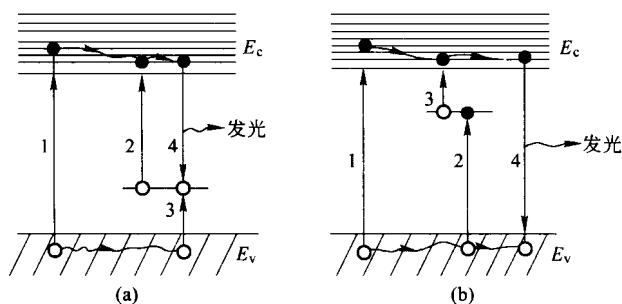


图 2-1-11 矿物发光机理示意图

(a) 荧光发光过程 (b) 磷光发光过程

$E_v$  为价带;  $E_c$  为导带; 短横线为附加能级; 空心圆表示空穴; 实心圆表示电子;

箭头表示电子跃迁或转移; 波状线表示空穴或电子在晶格中自由移动

矿物的发光性对于有些矿物,如金刚石、白钨矿等矿物的鉴定,找矿和选矿等工作均具有重大的实际意义。在地质工作中,常用轻便的紫外光灯来探测具有荧光性的矿物,如白钨矿当其被紫外光照射时,发出荧光,很容易与石英相区别。

### (三) 导电性与荷电性

#### 1. 导电性

矿物对电流的传导能力称为导电性。矿物的导电能力差别很大,有些矿物几乎完全不导电,如石棉、云母等,是绝缘体;有些极易导电,如自然金属矿物和某些金属硫化物,是电的良导体;某些矿物当温度增高时导电性增强,温度降低时呈绝缘体性质,这种导电性介于导体与绝缘体之间的叫半导体,如闪锌矿等。

矿物的导电性在很大程度上依赖于化学键的类型。具有金属键的矿物,

因在其结构中有自由电子存在,所以导电性强;离子键或共价键矿物导电性弱或不导电。矿物的导电性根据电阻系数( $\Omega \cdot \text{cm}$ )大小,将矿物分成下列三种:

(1)良导体矿物。电阻系数为  $10^2 \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。如黄铁矿、磁黄铁矿、石墨等。一般情况,金属矿物是电的良导体。

(2)半导体矿物。电阻系数为  $10^3 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  包括较少的富含铁和锰的硅酸盐及铁、锰等元素的氧化物(某些非导体当温度升高时,便变成半导体)。

(3)非导体矿物。在室温下电阻系数为  $10^{11} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ (或更大)的矿物。如石英、长石云母、方解石、石膏、尖晶石、石墨等。

导电性对于某些矿物来说,具有重要的实际意义。如金属及石墨是电的良导体,可作为电极原料;云母和石棉是电的非良导体,可作为绝缘材料;而半导体广泛地被应用在无线电工业中。此外在金属矿床的找矿中应用电法找矿,在选矿和重砂矿物的分离上,也根据矿物导电系数不同,采用静电分离来分离矿物。

## 2. 荷电性

矿物在外部能量作用下,能激起矿物晶体表面荷电的性质,称为矿物的荷电性。具有荷电性的矿物,其导电性极弱或不具导电性。荷电性可分为:

(1)压电性。某些矿物晶体,在机械作用的压力或张力影响下,因变形而导致的荷电性质称压电性。在压缩时产生正电荷的部位,在拉伸时就产生负电荷。在机械地一压一张的相互不断作用下,就可以产生一个交变电场,这种效应称为压电效应。反过来具有压电性的矿物晶体,把它放在一个交变电场中,它就会产生一伸一缩地机械振动,这种效应称为电致伸缩。当交变电场的频率和压电性矿物本身机械振动的频率一致时,就会发生特别强烈的共振现象。

矿物的压电性只发生在无对称中心,具有极性轴(即其两端不能借助于对称要素的作用而相重复的轴线)的各晶类矿物中(如  $\alpha$ -石英)。矿物的压电性广泛地应用于现代科学技术中。如无线电工业用其作各种换能器,超声波发生器等。石英由于其振动频率稳定、质地坚硬和化学性质稳定,成为最优良的天然压电材料(图 2-1-12)。

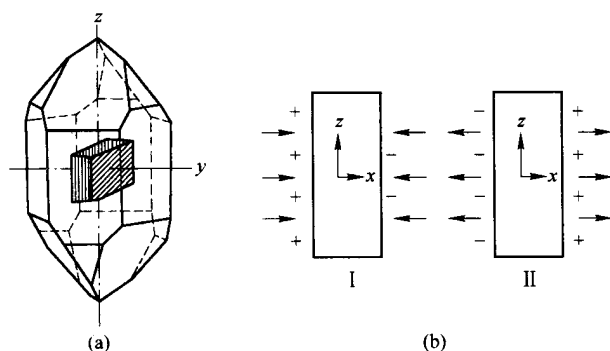


图 2-1-12 压电石英晶体切片方向(a)  
和石英晶体的压电效应(b)  
I - 受压缩时 ; II - 受拉伸时

(2) 热电性。矿物的热电性是指某些矿物晶体 ,当受热或冷却时 ,在晶体的某些结晶方向产生荷电的性质。如电气石晶体加热到一定温度时 ,其  $z$  轴 ( $L^3$ ) 的一端带正电 ,另一端带负电 ,若将其冷却 ,则两端电荷变号(图 2-1-13)。

矿物晶体的热电性主要存在于无对称中心、具有极性轴(性质均不相同的惟一方向)的矿物晶体中。如电气石、方硼石、异极矿等。

矿物晶体的热电性已在红外探测中得到应用。

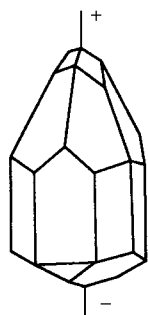


图 2-1-13 电气石的热电性

## 第二节 矿物的化学成分

矿物的化学成分是组成矿物的物质基础 ,是决定矿物各项性质的最基本因素之一。同时对于许多有用矿物来说 ,人们就是利用其中的某些化学成分。例如从黄铜矿  $\text{CuFeS}_2$  中提炼铜 ,从辰砂  $\text{HgS}$  中提炼汞等等。因此 ,研究

矿物时,全面了解矿物的化学成分是很重要的。下面就矿物的化学成分类型、引起矿物成分变化的原因——类质同象、胶体吸附作用以及矿物中水的存在、矿物化学式的书写等,分别介绍如下。

## 一、矿物的化学成分类型

自然界的矿物,就其化学组成来说,可以分为单质和化合物两大类。

### 1. 单质

由同种元素的原子自相结合组成的矿物,称为单质矿物,即自然元素矿物,如自然金 Au、自然铜 Cu、金刚石 C 等。

### 2. 化合物

由两种或两种以上不同元素的离子或络阴离子等组成的矿物,称为化合物矿物,化合物按其组成特点又分为:

(1) 简单化合物。由一种阳离子和一种阴离子化合而成,如方铅矿  $\text{PbS}$ 、食盐  $\text{NaCl}$ 、磁铁矿  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等。

(2) 络合物。由一种阳离子和一种络阴离子(酸根)组成的化合物。这种类型的矿物最多。各种含氧盐一般都是络合物,如方解石  $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ 、重晶石  $\text{Ba}[\text{SO}_4]$ 、钠长石  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$  等。

(3) 复化合物。由两种或两种以上的阳离子与阴离子或络阴离子组成的化合物。如黄铜矿  $\text{CuFeS}_2$ 、白云石  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]$ 、绿柱石  $\text{BeAl}[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$  等。

## 二、胶体矿物

### 1. 胶体矿物的概念

胶体是一种物质的微粒(粒径  $100 \sim 10000\text{nm}$ )分散于另一种物质之中所形成的均匀的细分散系。前种物质称为分散相(或分散质),后种物质称为分散媒(或分散介质)。无论是固体、液体或气体,既可作分散相,也可作分散媒。在胶体分散体系中,当分散媒远多于分散相时,称为胶溶体,而当分散相远多于分散媒时,称为胶凝体。

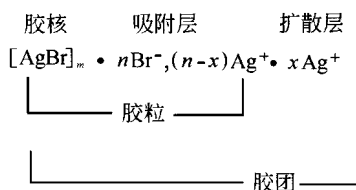
地面上的水常含有大于  $100\text{nm}$  的微粒,因此不是真溶液而是胶体溶液(即水胶溶体)。固态的胶体矿物基本上只有水胶凝体和结晶胶溶体两类。

水胶凝体是由水胶溶体凝结而成,其分散媒是水,分散相是固态的微粒,如蛋白石( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )、褐铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )和许多黏土矿物;结晶胶溶体的分散媒为固态晶质,分散相为气体、液体或固体,如乳石英(含气体分散相)、红色方解石(含 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 分散相)等。可见,结晶胶体实际就是含有作为机械混入物包裹体的晶体。因此,在矿物学中通常所说的胶体矿物,实际上就是指水胶凝体矿物。

胶体矿物中微粒的排列和分布是不规则和不均匀的,外形上不能自发地形成规则的几何多面体。一般多呈钟乳状、葡萄状、皮壳状等形态;在光学性质上具非晶质体特点,故通常将胶体矿物看做非晶质矿物。但它的微粒本身可以是结晶的,因粒径太细,是一种超显微的晶质(如新土矿物)。

## 2. 胶体的吸附作用

胶体质点的比表积极大,因而具有很大的表面能。为了降低表面能,吸附其他物质就是其中一种途径;同时,多数胶体的分散相质点都是晶质的,因此,它们的表面电性不饱和,称这个微粒为胶核。胶核优先吸附存在于介质中的与自己组成相同(或相似)的离子,在胶核外面形成一个吸附层,构成带一定电荷的胶粒,为了平衡吸附层的电荷,带电的胶粒还要吸附介质中的其他异性离子,这种离子在介质中有一定的自由移动能力,因而形成一个扩散层。例如 $\text{AgBr}$ 胶团的结构示意如下:

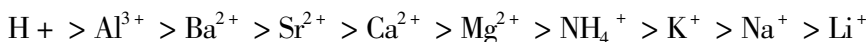


胶核和吸附层合起来称为胶粒。胶核、吸附层和扩散层总合起来称为胶团或胶体粒子。许多硅酸盐矿物中的胶体粒子中,由于 $\text{Si}^{4+}$ 被 $\text{Al}^{3+}$ 代替以及 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 被 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 代替,也可使胶核产生负电荷,从而吸附其他阳离子构成胶粒。根据胶粒所带正负电荷的不同,可将胶体分为正胶体和负胶体。地壳中常见的正胶体有:Zr、Ti、Th、Ce、Cd、Cr、Al、 $\text{Fe}^{3+}$ 的氢氧化物;负胶体有As、Sb、Cu、Pb的硫化物,以及高岭石等粒土质点和腐殖质等;有时氢氧化铁

也带有负电荷。在自然界中负胶体比正胶体分布广泛。

胶体的选择吸附,是指胶粒在不同溶液中仅能吸附某些与胶粒电荷相反的离子,而对其他物质吸附很少或完全不吸附。负胶体吸附介质中的阳离子,如  $\text{MnO}_2$  负胶体可以吸附  $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{CO}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Li}^+$  等 40 余种阳离子;正胶体吸附介质中的阴离子,如  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  正胶体能吸附 V、P、As、Cr 等元素的络阴离子。胶体的选择性吸附常常对某些有用元素的富集具有重要意义。如上述的  $\text{MnO}_2$  吸附  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{CO}^{2+}$  等,当它们富集到一定程度时,便有了工业价值。

胶体对离子吸附的选择性,还表现在对一些离子吸附的难易程度不同,进而表现为被吸附离子之间的交换。最常见的是新土矿物的离子交换现象。一般情况下,阳离子电价愈高,置换能力愈强,一旦被黏土吸附,就难被置换。在电价相等时,置换能力随离子半径增大而增强,因为离子半径愈大,水化能力减小,使水化半径减小,与胶核中的  $\text{O}^{2-}$  的结合键能增加。金属阳离子置换能力按下列顺序递减(其中  $\text{H}^+$  是例外的):



此顺序称为霍夫曼斯特顺序。由于胶体矿物所具有的强烈吸附性,因此成为胶体矿物化学成分复杂化的主要原因。但是,胶体矿物化学成分的变化还是有规律可循的。

### 3. 胶体矿物的形成

自然界中,胶体矿物除少数形成于热液作用及火山作用外,绝大部分形成于表生作用中。表生作用中胶体矿物的形成,大体经历了两个阶段。

#### (1) 形成胶体溶液

出露地表的矿物或矿物集合体,在物理风化作用中,由于机械破碎或磨蚀而形成胶粒大小的质点,当它们分散于水中即成为胶体溶液(水胶溶体)。或因化学风化作用,使原生矿物分解成离子或分子状态,然后进一步饱和聚集而成。胶体溶液是形成胶体矿物的物质基础。

#### (2) 胶体溶液的凝聚

胶体溶液在迁移过程中或汇聚于水盆地后,或因与带有相反电荷的质点发生电性中和而沉淀,或因水分蒸发而凝聚,从而形成各种胶体矿物。

滨海地带形成的赤铁矿、硬锰矿、胶磷矿、燧石等,岩石风化壳中的铝土矿、褐铁矿、孔雀石、硅孔雀石,以及氧化带潜水面以下形成的辉铜矿都是胶体作用的产物,有时还形成大规模的矿床。

已经形成的胶体矿物,随着时间的推移或热力学因素的改变,进一步发生脱水作用,颗粒逐渐增大而成为隐晶质。最终可转变为显晶质矿物。由胶体晶化而形成的晶质矿物特称为变胶体矿物,如蛋白  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  变为石髓、石英  $\text{SiO}_2$  等。这种转化过程,称之为胶体的老化或陈化。

### 三、矿物中的水

在很多矿物中,水是很重要的化学组成之一,并且它对许多矿物的性质有很重要的影响。但是,水在矿物中的存在形式并不相同。按水在矿物中存在形式和它在晶体结构中的作用,可将水分为吸附水、结晶水、结构水三种基本类型。此外,还有两种过渡类型,即沸石水和层间水。

#### 1. 吸附水

吸附水以中性水分子( $\text{H}_2\text{O}$ )存在,不参与组成矿物的晶体结构,而是被机械地吸附于矿物颗粒表面或缝隙中。吸附水不属于矿物的化学成分,不写入化学式。它们在矿物中的含量不定,随温度、湿度而变。常压下,当温度达到  $100 \sim 110^\circ\text{C}$  时,吸附水就全部从矿物中溢出而不破坏晶格。

含在水胶凝体中的胶体水,作为分散媒被微弱的联结力附着在胶体的分散相的表面,这是吸附水的一种特殊类型。胶体水是胶体矿物本身固有的特征,应当作为一种组分列入矿物的化学成分,但其含量变化很大,如蛋白石  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ( $n$  表示  $\text{H}_2\text{O}$  分子含量不固定)。

#### 2. 结晶水

结晶水以中胜水分子( $\text{H}_2\text{O}$ )存在于矿物中,参与组成矿物的晶格,有固定的配位位置,是矿物化学组成的一部分。结晶水分子的数量与矿物中其他组分的含量成简单的比例关系。

结晶水往往存在于具有大半径络阴离子的含氧盐矿物中。如石膏  $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、胆矾  $\text{Cu}[\text{SO}_4] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  等。某些矿物中的结晶水以一定的配位形式围绕着阳离子(有时也围绕阴离子)形成所谓的结晶水化物。如六水硫镍



矿  $\text{Ni}[\text{SO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  中,因  $\text{Ni}^{2+}$  的离子半径(7.7nm)很小,而  $[\text{SO}_4]^{2-}$  的半径(29.5nm)较大,二者相差很大(21.8nm),不能形成稳定的晶格。于是,在不改变  $\text{Ni}^{2+}$  离子电价的前提下,借助 6 个水分子来包围  $\text{Ni}^{2+}$ ,形成水化阳离子  $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  以增大半径,再与  $[\text{SO}_4]^{2-}$  形成稳定的晶格。结晶水,由于受到晶格的束缚,结合较牢固。因此,要使它从晶格中释放出来,就需要有较高的温度,但一般不超过  $600^\circ\text{C}$ ,通常为  $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 。

一些含结晶水的矿物,由于其中结晶水与晶格联系的牢固程度不同。因此,在加热过程中,从晶格中析出结晶水的温度也不相同。如有的矿物当加热到某一温度时,晶格中的结晶水一次全部都释放出来,例如芒硝( $\text{Na}_2[\text{SO}_4] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 在  $33^\circ\text{C}$  以上时,其中 10 个结晶水全部溢出,此时芒硝便变成无水芒硝( $\text{Na}_2[\text{SO}_4]$ ) 而有的则不然,失水过程可表现出分期性,例如石膏( $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 从  $80^\circ\text{C}$  开始脱水,到  $120^\circ\text{C}$  时,脱去原结晶水的  $3/4$ ,这时它便成了半水石膏( $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ),当温度继续升高到  $150^\circ\text{C}$  时,半水石膏中的水全部脱去之后,它便蜕变成成为硬石膏( $\text{Ca}[\text{SO}_4]$ )。

由上述两例可见,随着结晶水的脱失,原矿物的晶体结构都要发生破坏或被改造,而重建新的晶格成为另一种矿物。

### 3. 结构水

结构水也称化合水。是以  $(\text{OH})^-$  或  $(\text{H}_3\text{O})^+$  离子的形式参加矿物晶格的水,其中尤以  $(\text{OH})^-$  最为常见。如滑石( $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2$ )、高岭石( $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2$ )、水云母( $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] (\text{OH})_2$ ) 等中的水,就属于这种类型。

结构水在晶格中占有固定的位置,在组成上具有确定的含量比。由于与其他离子的联结相当牢固,因此,需要较高的温度(大约在  $600 \sim 1000^\circ\text{C}$  之间)才能溢出,如高岭石的失水温度为  $580^\circ\text{C}$ ,滑石则为  $950^\circ\text{C}$ 。由于结构水是占有晶格位置的,所以失水后,晶格完全被破坏。

### 4. 沸石水

沸石水是存在于沸石族矿物中的中性水分子。沸石的结构水有大小不等的空洞及孔道,水就占据在这些空洞和孔道中,位置不十分固定。水的含

量随温度和湿度而变化。由于沸石结构中,其空洞和孔道的数量及位置都是一定的,所以含水量有一个确定的上限值。此数值与矿物其他组分的含量成简单的比例关系。

沸石族矿物,当加热至  $80 \sim 400^{\circ}\text{C}$  范围内,水即大量溢出,失水后原矿物的晶格不发生变化,只是它的某些物理性质——透明度、折射率和比重等随失水量的增加而降低。失水后的沸石仍能重新吸水,恢复原有的物理性质。可见沸石水具有一定的吸附水的性质,但是含水量的这种变化是有一定范围限制的,当超过这一范围时,晶格将有所变化,脱水后就不再能够吸水复原。

### 5. 层间水

层间水是存在于某些层状结构硅酸盐的结构层之间的中性水分子。它参与矿物晶格的构成,但数量可在相当大的范围内变动。这是因为某些层状硅酸盐矿物如蒙脱石等,其结构层本身,电价并未达到平衡,在结构层的表面还有过剩的负电荷,这部分过剩的负电荷还要吸附其他金属阳离子,而后者又再吸附水分子,从而在相邻的结构层之间形成水分子层,即层间水。水的含量多少与吸附阳离子的种类有关。如在蒙脱石中,当吸附阳离子为  $\text{Na}^{+}$  时,在结构层之间常形成一个水分子层,若为  $\text{Ca}^{2+}$  时,则经常形成两个水分子厚的水层。此外,它的含量还随外界温度、湿度的变化而变化,常压下当加热至  $110^{\circ}\text{C}$  时,水大量溢出,结构层间距相应缩小,晶胞轴长  $C_0$  值减小,矿物的比重和折射率都增高,在潮湿的环境中又可重新吸水。可见,层间水也具有一定的吸附水性质。

矿物中含有各种不同形式的水,同一种矿物中,也可以存在几种不同形式的水。研究水在矿物中存在形式的最好方法是差热分析法。同时,也可用红外吸收光谱、X 射线衍射等配合进行。

## 四、矿物的化学式

将矿物的化学成分用元素符号按一定原则表示出来,就构成了矿物的化学式。它是以单矿物的化学全分析所得各组分的相对百分含量为基础计算出来的。其表示方法有两种,即实验式和结构式(晶体化学式)。

### 1. 实验式

只表示矿物化学成分中各组分数量比的化学式 称为实验式。如  $\text{CuFeS}_2$  (黄铜矿)和  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  (绿柱石)等。对于含氧盐矿物,也可以用氧化物的组合形式来表示,如绿柱石就可以写成  $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ 。

实验式的计算方法:先用单矿物化学全分析所得的各组分质量分数除以各相应组分的原子量(或分子量),将所得的各商数化为简单整数比,最后用这些整数标定各相应组分的相对含量,即得实验式(表 2-1-5 和表 2-1-6)。

表 2-1-5 黄铜矿实验式的计算过程

成 分	含量百分比 (化学全分析结果)	原 子 数		原子数比例 (近似值)	化学式
		换算(以原子量除)	结 果		
Cu	34.40	34.40/63.5	0.541	1	$\text{CuFeS}_2$
Fe	30.47	30.47/56.0	0.544	1	
S	35.87	35.87/32.0	1.120	2	
合 计	100.74				

表 2-1-6 绿柱石实验式的计算过程

成 分	含量百分比 (化学全分析结果)	分 子 数		原子数比例 (近似值)	化学式
		换算(以分子量除)	结 果		
BeO	14.01	14.01/25.0	0.5602	3	$3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ 或归并成 $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	19.26	19.26/102.2	0.1883	1	
$\text{SiO}_2$	66.37	66.37/60.3	1.1007	6	
合 计	99.64				

用实验式表示矿物的化学成分,计算简单书写方便,便于记忆。但是,实验式不能反映出矿物中各组分之间的相互结合关系,尤其对成分复杂的矿物,还可能引起误解,如上述绿柱石中,就不存在独立的  $\text{BeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的分子。为了克服实验式的弊端,目前在矿物学中普遍采用的是结构式。

## 2. 结构式(或称晶体化学式)

结构式是一种既能表明矿物中各组分的种类及其数量比,又能表明各组分在晶体结构中的相互关系的化学式。结构式是以单矿物的化学全分析和 X 射线结构分析等实验资料作基础,并以晶体化学基本原理为依据计算出来

的(具体计算过程略去)。

结构式的书写方法如下：

(1) 对于由单质元素构成的矿物,用元素符号表示,如自然金——Au,金刚石——C。若有类质同象代替,则按数量多少排列,用圆括号括起来,并用逗号分开,如银金矿——(Au,Ag)。

(2) 对于金属互化物,按金属性递减的顺序从左至右排列,如砷铂矿——PtAs。

(3) 对于离子化合物,书写的基本原则是阳离子在前,阴离子在后。具体的书写方法和意义如下：

1) 阳离子写在化学式的最前面。当存在两种以上的阳离子时,要按碱性由强到弱的顺序排列,如白云石  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ;当阳离子为同一元素而具不同价态时,则按电价由低至高排列,如磁铁矿  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ (即  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$ )。

2) 阴离子或络阴离子写在阳离子的后面,络阴离子要用方括号[]将它括起来,如方解石  $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ ,造辉石  $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]_2$ 。

3) 若有附加阴离子时,通常将它写在主要阴离子或络阴离子的后面,如磷灰石  $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F},\text{Cl})$ 。

4) 互为类质同象代替的离子,用圆括号()括起来,它们中间用逗号“,”分开,含量多的元素写在前面,少者在后。如铁闪锌矿  $(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$ 。

矿物中水的书写方式：

(1) 结构水,写在化学式的最后,如高岭石  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$ 。

(2) 结晶水,用圆括号括起来,写在与之相联系的阳离子后面,如  $\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_4[\text{SO}_4]_2$ 。

(3) 沸石水,写在化学式的最后,用圆点分开,其含量以其上限为准,如钠沸石  $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

(4) 层间水,用圆括号括起来,写在可交换的阳离子后面,如钠蒙脱石  $\text{Na}_{0.33}(\text{H}_2\text{O})_4\{\text{Al}_{1.67}\text{Mg}_{0.33}[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2\}_2$ 。

(5) 吸附水,在化学式中不予表示。胶体水应表示出来。因为含量不定,故以  $n\text{H}_2\text{O}$  或  $aq$  表示,写在化学式最后,也用圆点分开,如蛋白石  $\text{SiO}_2\cdot$

$n\text{H}_2\text{O}$  或  $\text{SiO}_2 \cdot \alpha q$ 。

3. 结构式计算

结构式计算最常用的是以氧原子数为基准的氧原子算法。现举例说明具体计算步骤(表 2-1-7)。

表 2-1-7 某地透辉石的晶体化学式计算表

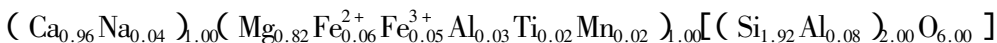
组 分	质量百分比	分 子 数	原 子 数		阳离子的 原子系数
			氧 原 子	阳 离 子	
SiO <sub>2</sub>	52.5	0.8696	1.7392	0.8696	1.920
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.0090	0.0180	0.0090	0.019
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.54	0.0249	0.0747	0.0498	0.110
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.81	0.0114	0.034	0.0228	0.050
FeO	1.95	0.0271	0.0271	0.0271	0.059
MnO	0.64	0.0090	0.0090	0.019	
MgO	14.97	0.3713	0.3713	0.3713	0.819
CaO	24.38	0.4348	0.4348	0.4348	0.960
Na <sub>2</sub> O	0.56	0.0090	0.0090	0.0180	0.039
H <sub>2</sub> O	0.11				
总 和	100.18	2.7173			

注：单斜辉石的晶体化学式为  $[\text{XM Si}_2\text{O}_6]$ 。

按氧原子数为 6 求得的公约数为  $2.717316 = 0.4529$ 。

- (1) 将各组分质量分数除以该组分的分子量求出各组分的分子数。
- (2) 用每个组分的分子数乘上述该组分中的氧原子系数,求出每个组分的氧原子数。
- (3) 用每个组分的分子数乘上该组分的阳离子系数,求出每个组分的阳离子原子数。
- (4) 统计氧原子数总和。
- (5) 用氧原子数总和除以理论通式中的氧原子数,求出公约数。
- (6) 用各组分阳离子原子数除以公约数,其商数即为各组分的阳离子原子系数。
- (7) 参照通式并分析类质同象代替关系即可写出该单斜辉石的晶体化学

式为：



上式中写在同一圆括号内的各元素呈类质同象代替关系,各元素的原子数写在元素符号的右下角,元素符号间不再加逗号,写于圆括号之后下角的数字为圆括号内各元素原子数之和。这是化学式计算时的习惯表示方法。

## 五、地壳的化学成分及元素的地球化学特征

### (一) 地壳的化学成分

矿物是地壳中所进行的地质作用的产物,它是地壳中各种化学元素分散、聚集、迁移、运动的结果。地壳的化学成分是矿物成分的基础,矿物成分是地壳化学成分的一种体现。

元素周期表中的元素在地壳中的含量是极不均匀,差异很大。元素在地壳中的平均含量称为“克拉克值”,用质量百分比表示。在地壳总重量中,氧的克拉克值最高,为47%,几乎占地壳总重量的1/2。硅的克拉克值为29.5%,约占地壳总重量的1/4。元素氧、硅与元素铝、铁、钙、镁、钾及钠等一起构成氧化物和含氧盐矿物。由于元素在地壳上分布的不均匀性,所以它们的分布状态不同。有些元素趋于集中,形成独立的矿物,甚至聚集成矿床,被称为聚集元素。而另一些元素则趋向于分散、称为分散元素。例如锑、金、银等元素克拉克值极低,但它们却可以形成独立的矿物,并可以富集为矿床,而铷、铯、镓、钪等元素的克拉克值远远高于它们,但却趋于分散,不易聚集成矿,甚至很少能形成独立的矿物,而常常仅作为微量的混入物赋存于主要由其他元素组成的矿物中。

### (二) 元素的地球化学分类及其在矿物成分中的组合

元素在矿物中的结合主要取决于两种因素(1)元素本身的性质,即元素的原子结构(主要是电子层的结构)及其特性(2)受到矿物结晶时的物化环境中的影响,即矿物中元素的结合受到地质环境、物理化学条件的控制。

元素的地球化学分类是元素在元素周期表的分类的基础上,进一步按元素的地球化学行为和元素在矿物中组合的特征进行分类。

#### 1. 惰性气体族

氦、氖、氩、氪、氙和氡, 这些元素具有稳定的 8 电子外层( 氦的外层电子数为 2 )。这说明它们的化学惰性, 一般仅作为气体单质存在于大气中。

## 2. 氢

在还原状态下, 它成为原子状态的气体; 在氧化状态下, 它形成  $[\text{OH}]^-$  离子, 成为某些含氧盐和氢氧化物的组成部分。有时它组成中性的  $\text{H}_2\text{O}$  分子参与晶格。

## 3. 主要造岩元素族

锂、钠、钾、铷、铯、铍、镁、钙、锶、钡、铝和硅元素属于这一族。这些元素可以形成具有稳定的 8 电子(  $s^2 p^6$  ) 外层( 部分为 2 电子外层 ) 的惰性气体型离子。它们有着较大的半径, 较弱的极化能力。这些元素的原子与阳离子半径有较大的差异, 它们有着强烈的形成离子的趋势, 从而易以离子键与阴离子相结合。这些元素常与氧结合形成氧化物或含氧盐( 特别是硅酸盐 ) 组成大部分的造岩元素。它们属于“亲石元素”, 也称为“造岩元素”或“亲氧元素”。

硅与氧结合形成石英, 并且与钠、钾、钙、镁、铝一起结合形成硅酸盐( 如长石、云母、辉石、角闪石、橄榄石、霞石、绿帘石、绿泥石、柱石、蛇纹石以及其他 )。元素 Ca 还可以与氧、碳一起形成碳酸盐( 如方解石等等 ) 构成了主要的造岩矿物, 这些矿物占地壳总质量的 95%。这些元素还形成卤化物矿物( 如石盐、钾盐、萤石等 )。

铷、铯、锶和钡的克拉克值较低, 常呈分散状态, 在矿物中成类质同象混入物存在。如含铷、铯的长石, 云母以及铯的独立矿物铯榴石等见于伟晶岩; 锶常为斜长石的类质同象混入物; 而钡除见于长石中外, 它的独立矿物石(  $\text{BaSO}_4$  ) 则常见于沉积岩和热液矿床中。

锂和铍具有小的离子半径, 多见于伟晶作用所形成的矿物中。锂为锂辉石、锂云母、锂磷酸盐等矿物的主要组成成分; 铍则大部分含于绿柱石、金绿宝石、似晶石、日光榴石、香花石等矿石中。

## 4. 矿化剂族

硼、碳、氧、氟、磷、硫和氯是这族矿物。它们主要是形成简单的阴离子或络阴离子, 因而对各种盐类矿物的形成起着重要的作用。它们的另一特点是

这些阴离子大部分可与阳离子形成比较易溶的和易挥发的化合物,因此对岩浆期后形成的金属矿床中所特有的许多金属的搬运和富集起着巨大的作用。

硼、氟、氯、硫和碳(以  $\text{CO}_2$  的方式)与水相伴成气体大量出现于火山喷气中,并相应地形成与火山喷气有关的矿物,如自然硫、某些硫化物、 $\text{NaCl}$  等多种氯化物、氟化物以及碳酸盐矿物等。在有相当深度的条件下,它们往往可与围绕侵入体的岩石发生强烈的变质作用,形成接触变质矿物;在深度很大的岩浆体中,又促进了伟晶岩矿物的形成。在外力作用过程中形成各种含氧盐及盐类矿物。

硼除见于伟晶岩矿物(如电气石)外,常成含水硼酸盐(主要是钠和钙的含水硼酸盐)出现于含硼盐层中,它的出现常与火山活动有关。

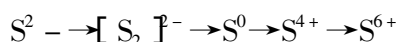
碳除了形成金刚石和石墨外,还主要与造岩元素和部分的铁、锰等元素形成碳酸盐,广泛存在于外力作用以及部分热液作用的产物中。

氮和氧是大气的组成部分。氮还可以成为硝酸盐矿物的组成成分。

在自然界中,有些元素易与氧结合,为亲氧元素,而有些却易与硫结合,具有亲疏性。这主要是由这些元素本身的特点和氧、硫的性质决定的。相比之下,氧具有较大的电负性,易与接受电子而形成阴离子,同时氧的半径较小,对阳离子有大的亲和力,氧易与阳离子结合并以离子键相连接。而元素硫,电负性较小,半径较大,更易作为配位键的给予体,与那些不易失去电子的元素形成共价结合。

在岩石圈内,愈接近地表氧的含量愈高。在地下深处多以低价铁的硅酸盐或硫化物为主,而在地表处由于氧化作用强烈,大多形成新的氧化物、氢氧化物、硫酸盐及其他富氧的化合物。

疏离子由于电负性小(相对于氧来说),半径较大,故倾向于与亲硫的重金属元素相结合,形成带有明显共价键或金属键特征的化学键。疏离子随氧化程度的加强产生如下的变化:



$\text{S}^{2-}$  在较强的还原条件下是相对稳定的,可形成方铅矿( $\text{PbS}$ )、磁黄铁矿( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ )、辰砂( $\text{HgS}$ )等简单硫化物。

$[\text{S}_2]^{2-}$  是黄铁矿和白铁矿的组成成分,两个负电荷属于两个疏离子,说



明疏离子被氧化了,也说明黄铁矿是在比磁黄铁矿氧化较强的条件下形成。

$S^0$  是中性的,是硫离子的进一步氧化产物,在高温时以气体的形式出现、低温时则结晶成自然硫。

$S^{4+}$  和  $S^{6+}$  是在显著氧化条件下产生的, $S^{4+}$  可  $SO_2$  的气体,可见于火山作用的喷气之中。而由  $S^{6+}$  形成的硫酸盐,则主要是表生作用的产物。

氟和氯是岩浆中易挥发组分,可见于火山作用的喷气中。它们也可以参加到硅酸盐矿物(如黄玉、云母)或磷酸盐矿物(如磷灰石)之中,以附加阴离子的形式存在。

磷主要是以磷酸盐矿物的形式存在。

### 5. 铁族元素

钪、钛、钒、铬、锰、铁、钴和镍为铁族元素。这些元素在周期表中的位置及性质介于造岩元素和造矿元素之间的过渡地位,称为过渡元素。它们形成的离子外层具有 8~18 个电子,属于惰性气体离子和铜型离子之间的过渡类型。

钴和镍主要呈硫化物及其类似化合物的形式出现,显示出了明显的亲疏性。铁、锰既可以形成氧化物又可形成硫化物。如铁的氧化物(如磁铁矿、赤铁矿)和硫化物(如黄铁矿)在自然界分布都十分广泛。锰多以氧化物的形式出现,但当富硫时,也可以生成硫锰矿。铁、锰既亲氧又亲硫,显示出双重特性。

钪、钛、钒、铬倾向于同氧结合,其中钪主要呈分散状态出现于硅酸盐矿物中。

### 6. 稀有金属元素族

钪、稀土、锆、铪、铌和钽为本族元素。这些元素可以出现于某些稀有元素矿物中。可以形成复杂氧化物或含氧盐。可以以矿物的主要成分还可以以类质同象代替的形式存在。

### 7. 放射性元素

钍、镭、锕、钍、镤和铀是这族元素。它们可以以硅酸盐和氧化物矿物形式存在,同时也可以呈类质同象的形式存在。在氧化条件下常形成各种含氧盐。

### 8. 钨钼族

钨、钼、铌和钽。钨和钼在成因上与酸性岩浆有关,多为高温热液作用的产物。钨主要形成氧化物[如黑钨矿( $\text{MnFe})\text{WO}_4$ ]和钨酸盐(如白钨矿 $\text{CaWO}_4$ )。钼则主要成为硫化物(如辉钼矿 $\text{MoS}_2$ )。钽常以类质同象代替的形式出现于辉钼矿中。

### 9. 铂族元素

钌、铑、钯、铱、锇和铂属于这族元素。在自然界中它们常以自然金属形式存在,有时也可以呈硫化物、砷化物形式存在。

### 10. 金属矿床成矿元素族

铜、银、金、锌、镉、汞、镓、铟、铊、锡和铅属于这族元素。这族元素常形成金属矿床,故称为造矿元素。这些元素的离子的最外层具有 18 个电子,称为“铜型离子”。由于这些元素倾向于与硫结合,形成各种硫化物,因此又称为亲硫元素。金多以单质的形式出现,少数情况下形成砷化物等。锡在自然界多以氧化物的形式出现(锡石 $\text{SnO}_2$ ),只有在还原条件下才形成两价锡的硫化物。

### 11. 半金属和重矿化剂族

砷、锑、铋、硒、碲和钋属于这族元素。半金属砷、锑、铋可与硫结合成为络阴离子,再与铜、银、铅等阳离子结合成为硫盐矿物。另外,也可以作为简单硫化物出现。在还原条件下可以形成单质的自然金属。

硒可以在硫化物中代替硫,以类质同象形式出现,碲可与铋、铅、汞、金、银、铜等结合成为独立矿物。

### 12. 重卤素族

溴、碘和砷是这族元素。溴、碘可呈分散状态成为含氯矿物的类质同象混入物。一部分也可以稀有的溴化物和碘化物的形式见于若干金属矿床的氧化带、在沙漠气候的强氧化条件下,可以形成铜、钙、铅的可溶性碘酸盐。

## 第二章 外生成矿矿石分析

### 第一节 外生成矿作用及其矿厂概述

#### 一、外生成矿作用及其矿床分类

外生成矿作用是外力地质作用的一种特殊表现形式。外力地质作用是指由地球外部能量,主要是太阳辐射能、地表重力能和日月引力能而引起的地质作用。外力地质作用按照它的整个进程,可划分为风化作用、剥蚀作用、搬运作用、沉积作用和沉积物成岩作用。

(1) 风化作用。露出地表的岩石或者矿床,在温度变化、水、大气和生物等因素的作用下,遭到破坏,发生形态和成分上的变化,形成碎屑、泥砂和一些新矿物,此即称为风化作用。

(2) 剥蚀作用。风、地面流水、地下水、湖泊、冰川和海洋等外营力,可对地表的风化残留物和岩石进行破坏,并把破坏产物搬走,这种作用称为剥蚀作用。

(3) 搬运作用。各种外营力(风、水和冰川)把风化、剥蚀产物从它们原来的地方搬到另外的地方的作用。

(4) 沉积作用。风化剥蚀产物在搬运过程中,当搬运力减弱或物理化学条件改变时,便会沉积下来,这称为沉积作用。

(5) 沉积物成岩作用。由于沉积作用堆积下来的物质原来都是松散的,后来在漫长的地质年代中,经过压紧和胶结等作用逐渐成为坚硬的沉积岩,

这种使疏松的沉积物团结成为沉积岩的作用 称为沉积物成岩作用。

外生成矿作用是指在外力地质作用下 ,使有用组分或有用元素富集成矿的过程。从以上不同过程的外力地质作用的特点可看出 ,真正能使物质发生分异作用的主要是风化作用和沉积作用 ,因此与之相对应的外生成矿作用也可分成两大类 :即风化成矿作用和沉积成矿作用。风化成矿作用是指在风化作用过程中 ,使有用组分或矿物富集而形成矿床的作用 ;同样 ,所谓沉积成矿作用是指在沉积作用过程中使有用组分或矿物富集而成为矿床的作用。在划分外生矿床时 ,首先应当考虑到最主要的是成矿作用 ,同时应当考虑到成矿区域的地质、气候和地形条件以及矿床的矿物和化学成分等。所以上述两大类成矿作用形成两大类矿床。即 :

(1) 风化矿床。它包括残坡积矿床、残余矿床、淋积矿床、硫化物矿床的表生富集带。

(2) 沉积矿床。它包括机械沉积矿床、化学沉积矿床、生物化学沉积矿床。

## 二、外生矿床的一般特点

外生矿床是在外力地质作用下通过使外生和内生形成的岩石和矿床受到破坏和改造 ,而有用组分或矿物得以富集所形成的矿床。由于外生矿床成矿条件跟内生矿床有很大差异 ,因此 ,其矿床的特点也不相同 ,外生矿床一般表现以下几个特点。

(1) 在元素和矿物组成上 ,外生矿床出现的元素是内生条件下不易富集的元素 ,如 K、Na、Mg、Ca、Al、Mn、Fe、Si 元素等。在矿物组成上也有三类矿物 :一是出现一些新矿物 ,所有各类氧化物、氢氧化物、含氧盐、含水硅酸盐及卤化物等 ,如赤铁矿、褐铁矿、软锰矿、硬锰矿、铝土矿、高岭石、埃洛石、蒙脱石、坡缕石、海泡石、伊利石、菱铁矿、菱锰矿、石膏、岩盐等 ,在岩浆岩中大量存在的矿物如橄榄石、辉石、角闪石、黑云母、长石等矿物较为罕见 ;二是由生物作用形成的可燃性有机岩 ,如石油、天然气、煤等 ;三是残留不易风化的原生矿物。如自然金、铂、金刚石、锡石、黑钨矿、锆英石、钛铁矿、石英、重晶石等。

(2) 在矿石的结构构造上, 风化矿床表现为土状、松散状、皮壳状、蜂窝状、气孔状。结核状构造, 角砾状、砂状、泥质结构, 隐晶质结构和胶体结构; 沉积矿床表现为层状、块状、鲕状、胶状构造及碎屑、泥质、胶体、生物、结晶结构。

(3) 在矿体形态上, 风化矿床大多数分布在地表或近地表, 呈面状、线状或与基岩呈接触状分布, 适合在地表开采。沉积矿床一般为层状, 多数产于沉积岩层中, 具有稳定层位和产状。外生矿床形成的矿产一般分布较广, 储量大(尤其是沉积矿床), 便于开采。

### 三、工业意义

外生矿形成的矿种丰富, 金属矿产、非金属矿产及燃料矿产的种类齐全, 产量大, 是人类生活和国民经济建设不可缺少的资源。其主要如下:

(1) 基本上百分之百的燃料矿产是来自于外生矿床, 如煤、石油、天然气等。

(2) 绝大部分的无机非金属矿产来自于外生矿床。产量最大的建筑材料产品, 如水泥、玻璃、陶瓷、砖石所使用的原料——黏土、石灰石、砂砾石、纯碱和石膏等属于外生矿床, 耐火材料要用的铝土矿也属于外生矿床。

(3) 不同种类的金属矿产也主要产源于外生矿床, 有生产黑色金属的铁、锰、锌、钴、钒等矿产, 有色金属及贵重金属的铝、铜、锌、钼、金、银等矿产以及稀有金属、稀土金属矿产等在外生矿床中占有很大比重。

近些年在大洋底发现大量锰结核, 其中除锰以外, 还有铜、镍、钴等元素可达到工业品位要求, 此外还有铁、铅、锌、铀、镭等 20 余种元素。据估算, 世界大洋底部的锰结核的总产量约有  $4 \times 10^{11} \text{t}$ , 镍  $1.64 \times 10^{10} \text{t}$ , 铜  $8.8 \times 10^9$ 。如按目前的消耗水平, 则锰可用  $2.4 \times 10^4 \text{a}$ , 铜可用 600a, 镍可用  $1.5 \times 10^4 \text{a}$ , 钴可用  $1.3 \times 10^5 \text{a}$  以上, 大大超过了同类矿产的陆地蕴藏量和可用年限。

最后还得指出, 大陆 70% 为巨厚的沉积层, 海洋几乎 100% 为沉积物所覆盖, 所以外生矿床的作用是不可忽视的。

## 第二节 风化成矿作用及其矿石

### 一、风化成矿作用及其矿床

#### 1. 概述

地表或近地表的原岩或原矿床在常温和常压下受水、大气( $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ )及各种酸类、生物和温度变化等的作用而发生变化,结果发生物理风化作用、化学风化作用和生物风化作用,最后形成风化矿床。

**物理风化作用** 这是一种以崩解方式、机械地把原岩或矿床破碎成细块和微粒的作用,一般不改变原岩(矿床)的化学成分。

主要影响因素有温度、水的结冰作用、盐类溶液的结晶作用、植物根系的楔插作用及人类对它们的破坏作用。

物理风化作用主要发生在温度变化剧烈的干燥沙漠地区、永久积雪山区及严寒的极地。形成的矿产有磁铁矿、钛铁矿、金、铂、金刚石、刚玉、水晶、蓝晶石及锡石等。

**化学风化作用** 原岩或原矿床由于水、空气和生物与之发生化学反应,使其发生化学分解,这就是化学风化作用。化学风化作用结果使一部分物质成为可溶盐类,在条件许可下淋滤迁移到它处形成矿床,称为淋积矿床;一部分物质则形成难溶的稳定新矿物,这样形成的矿床称为残余矿床。

主要的影响因素有水、空气和生物,而最主要的又是水。因为水有很大的溶解力,使易溶的矿物溶解,同时水中含有 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、有机酸、无机酸和各种盐类,它们加速了矿物的溶解,不仅仅是溶解,而且还发生化学反应,使旧物质溶解,新物质沉淀。另外水还有很大的迁移能力,把易溶物质带到有利地区沉淀。

化学风化作用主要发生在潮湿地区、降雨量超过蒸发量的地区,即热带、亚热带地区对化学风化作用的进行有利。形成的主要矿产有铁、锰、铝、钴、

镍、高岭土及稀土元素。

**生物风化作用** 生物风化作用属于化学风化作用的一种。生物有机体分布很广,在岩石圈上部、大气圈的下部、水圈的全部几乎到处有生物有机体存在。其作用首先它的生理活动和对有机体的分解,能生成大量的  $\text{CO}_2$ 。微生物的生理活动和有机体的分解,生成的大量  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和有机酸等,反过来又加速了化学风化作用。比如细菌、藻类以及地衣一起覆盖在岩石的表面上,自身分泌出来的有机酸分解岩石,从中吸取了可溶物质转变为有机化合物,以构成它们的躯体(蛋白质等)。当它们死后,有机质分解,一系列的元素转变为矿物质如  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等,经分解产生相互作用,结果形成了黏土矿物(如蒙脱石等)。在自然界有许多黏土并非是长石水解产物,而是生物形成的。硝化细菌使氨氧化为硝酸,硫化细菌使硫和硫化物氧化为硫酸。硝酸、硫酸使岩石遭到破坏,进一步风化。铁细菌使铁的低氧盐氧化为氧化物,自然界铁的生物氧化数量远远超过化学氧化数量,所以许多风化作用的铁矿床,包括锰矿床,大部分都是生物成因的。

生物风化作用主要发生在对生物繁殖有利的热带及亚热带地区。形成的主要矿产有铁、锰和黏土。

总之,大气、阳光(太阳能)、水和生物相互作用的结果,使原有的岩石和矿床遭到风化破坏,在有利的条件下形成风化矿床。

## 2. 风化矿床

风化矿床是指地表或接近地表的岩石或矿床由于风化作用破碎分解,其中的成矿物质基本上没有经过搬运,或只有近距离的搬运,它们在原地或原地附近堆积下来形成有用矿物的堆积体。

根据成因,风化矿床分为以下四类。

### A 残坡积矿床

含矿的岩石或矿床在出露地表处,由于风化作用,一些化学性质稳定的重矿物残留在原岩或原矿床的上部残积层中相对富集起来,这就形成了残积矿床。当那些残积的有用碎屑物质由于剥蚀作用和重力作用的影响沿山坡移动,并在山坡聚集起来便形成坡积矿床。因此残积矿床和坡积矿床常常呈逐渐过渡的关系(图 2-2-1)。两者统称为残坡积矿床。

本类矿床的基本特点:残坡积矿床一般在原矿床上部的残积层或坡积层中,由于搬运不远,组成砂矿的碎屑物质分选不完全,磨圆度差,除少数贵金属和稀有分散金属具有一定工业意义外,一般规模都比较小;这类矿床规模虽小,但品位高,离地表近,易采易选;残坡积砂矿床一般与冲积砂矿床或原生矿床一起开采;本类矿床的主要矿产有金、锡、铂、铁、锰、独居石、铌钽矿和水晶等。

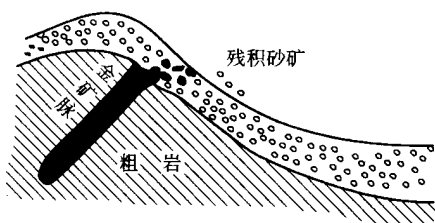


图 2-2-1 残积坡积砂矿

### B 残余矿床

当原生岩石或矿床主要受化学作用而分解时,一些物质被流水带走或向下渗透,其中难溶物质多以胶体形式沉淀,或者沉淀出来形成新矿物停留在原地或附近,如果某种有用物质能聚集达到工业要求时,则形成残余矿床。

化学风化作用分解的产物差不多都在原生岩石的表面形成一个薄壳,也称为风化壳矿床。

本类矿床的基本特点:残余矿床一般呈面型分布,如果受线型构造或岩体接触带控制,则成线型分布;矿床厚度常为几米至十几米,少数情况可达 11~22m,随着深度增加风化作用亦逐渐减弱直至停止;矿体产状平缓,呈似层状,分布面积较大,底部界限不平直,有的矿床规模大;矿床在剖面上往往具有明显的分带现象,并与母岩成过渡关系;本类矿床的主要矿产有铁、锰、铝、镍、稀土元素及高岭土,除锰矿的规模较小外,其他五类矿产均为大型矿床,具有重要的工业价值。

### C 淋积矿床

先形成的岩石或矿床经化学风化作用后,成矿物质可呈胶体或真溶液状态随地表水下渗到风化壳下部,因介质条件的改变发生沉淀作用或交代作用而形成的矿床称为淋积矿床。淋积矿床的成矿溶液流动方向是自上而下的,溶液的温度一般较低,故有人称这类矿床为冷液沉积矿床。

本类矿床的特点:淋积矿床的矿体形状多为不规则的层状、囊状、脉状和透镜状,矿石构造多为土状、胶状、钟乳状、结核状、网脉状、浸染状和块状构造。矿石结构为交代结构。矿物成分大多数为氢氧化物(褐铁矿、硬锰矿),



其次为各种碳酸盐、硫酸盐、硼酸盐、磷酸盐类矿物：如菱镁矿、菱铁矿、菱铍矿、孔雀石、蓝铜矿、石膏、重晶石、硼钾镁石、硼镁石、钠硼解石和磷灰石等，在较少的情况下也有硫化物（辉铜矿、斑铜矿、辉银矿和铜蓝等）和自然元素矿物（自然铜和自然银等）。淋积矿床的主要矿产有铁、锰、铜、钒、铀、磷灰岩、硼酸盐和石膏等。

#### D 硫化物矿床的表生富集带

所有矿床，不论金属矿床，还是非金属矿床的近地表部分，在风化作用下都要发生变化，尤其是金属硫化物矿床，其表生变化比较强烈。a 金属硫化物矿床的表生分带

金属硫化物矿床暴露地表之后，长期受富含氧、二氧化碳的地下水及生物有机质强烈作用，在物质成分和构造、结构上发生十分急剧变化，从地表到地下由于所受的化学风化作用不同，而产生分带现象。发育完好的金属硫化物矿床的垂直表生分带（图 2-2-2）如下：

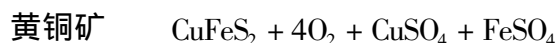
（1）氧化带，大致相当于地下水渗透带；

（2）次生硫化物富集带，大致相当于停滞水带。

#### b 金属硫化物矿床的氧化带

此带位于矿床近地表部分，自地下水水面以上至地表露头。一般厚几米至几十米，少数氧化带可达九百多米。

在氧化带中，硫化物矿床中的硫化物所引起的化学分解作用是非常剧烈的，当它们氧化时，需要经过硫酸盐化时期，即硫化物中的硫先氧化为硫酸，使矿物转变为硫酸盐，例如：



尽管各种金属硫化物都转变为金属硫酸盐，但各种金属的硫酸盐在水中的溶解度却不相同，如表 2-2-1 所示。

表 2-2-1 金属硫酸盐在水中的溶解度

硫酸盐	硫酸盐的溶解度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	硫酸盐溶解度的温度/ $^{\circ}\text{C}$
$\text{ZnSO}_4$	531.2	18
$\text{MnSO}_4$	393	25

硫酸盐	硫酸盐的溶解度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	硫酸盐溶解度的温度/ $^{\circ}\text{C}$
$\text{FeSO}_4$	157	0
$\text{CuSO}_4$	172	20
$\text{PbSO}_4$	0.041	18
$\text{AeSO}_4$	7.7	17

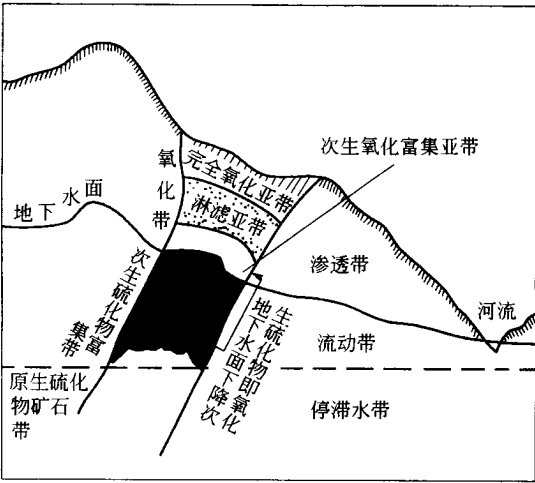
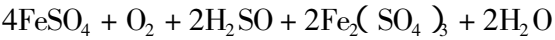
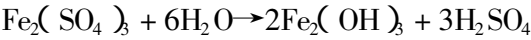


图 2-2-2 金属硫化物矿床的表生分带示意图

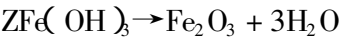
由于各种金属硫酸盐的溶解度不一样 , $\text{PbSO}_4$ ( 铅矾 )难溶于水 ,残留于原地 ,留在矿床上部 ,其他金属硫酸盐溶于水被地表下渗水和地下水搬运走。其中  $\text{FeSO}_4$  不稳定 ,继续氧化成为高价铁的硫酸盐 :



高价铁的硫酸盐在中性或弱酸性溶液中也不稳定 ,常发生水解形成氢氧化铁 :



氢氧化铁胶体又脱水沉淀下来 :



形成纤铁矿、针铁矿和含水赤铁矿等 ,它们与二氧化硅等组成‘铁帽’(硫化物矿体表部的富铁残余体)残留在氧化带。

氧化带根据硫化物的氧化程度 ,又可分为完全氧化亚带、淋滤亚带和次生氧化富集亚带 ,后两个亚带若经强烈风化作用 ,往往转化为完全氧化亚带

(图 2-2-2)。

### c 金属硫化物矿床的次生富集带

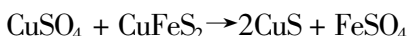
金属硫化物矿床的次生富集带位于地下水面以下,停滞水面以上,在流动带中。从氧化带中淋滤下来的某些金属硫酸盐交代原生硫化物形成次生硫化物,结果使某些金属的含量(品位)增加几倍到十几倍,这种作用称为次生富集作用,发生这种作用的地带称为次生硫化物富集带。本带一般厚几米至几十米,最厚者到 400m。

金属硫酸盐交代原生硫化物是有一定顺序的,修曼总结了如下经验序列:  $\text{Hg} - \text{Ag} - \text{Cu} - \text{Bi} - \text{Cd} - \text{Pb} - \text{Zn} - \text{Ni} - \text{Co} - \text{Fe} - \text{Mn}$ 。按元素亲疏性减小的次序排列,位于前面元素的硫酸盐可以交代位于后面元素的硫化物,如硫酸铜溶液可以与铅、锌、铁等原生硫化物进行交代作用而形成次生硫化铜,但硫酸锌却不与铜的硫化物进行交代作用。因此,位于修曼序列前面的元素容易形成次生硫化物富集带,如铜、银次生硫化物富集带就比较发育,也具有较大的工业意义。

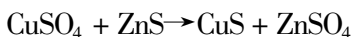
由氧化带淋滤下来的硫酸铜溶液与位于修曼序列中铜以后的各种金属原生硫化物发生置换反应,就沉积出铜的次生硫化物辉铜矿、铜蓝等。这种化学反应如下:



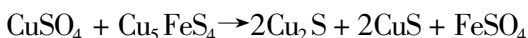
黄铜矿 辉铜矿



黄铜矿 铜蓝



闪锌矿



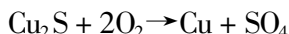
斑铜矿

由于辉铜矿含 Cu79.83%,铜蓝含 Cu64.44%,比原生黄铜矿(含 Cu34.57%)斑铜矿(含 Cu63.3%)含铜量高得多。次生硫化物和原生硫化物内铜的含量合起来就大大提高了矿石品位,一般比原生矿石提高 2~3 倍,使氧化带的下面大量金属铜富集起来,形成很有工业价值的次生富集带。

当地壳缓慢上升,侵蚀面和地下水面逐渐降低,而铜的次生富集带则随之上升,进入到氧化带(区),这时铜的次生硫化物,特别是辉铜矿受到氧化后则生成更为富含铜的新矿物——赤铜矿(含 Cu88.2%)和自然铜(含 Cu100%)等。其反应式如下:



赤铜矿



自然铜

所以当见到矿石中辉铜矿和赤铜矿、自然铜伴生时,即可认定次生硫化物富集带遭到了氧化作用。这一带含铜特别富,所以称为次生氧化富集带。

## 二、主要矿石

风化矿床中的主要金属矿产有铁、锰、铝、铜、镍、钛、钴、金、银、铂、锡、铀、钒、稀土元素等;主要非金属矿产有金刚石、高岭土、黏土、磷灰岩、刚玉、蓝晶石、重晶石、水晶等。现将最重要的几种矿石类型介绍如下:

(1) 软锰矿、硬锰矿矿石。产于锰矿床或含锰岩石的氧化带中。矿石的主要矿物为软锰矿和硬锰矿,其次有方锰铁矿、褐锰矿、水硬铝石、重晶石和黑锰矿等。矿石构造为疏松状、土状、网格状、蜂窝状和肾状构造等。含 Mn 富的达 40%,锰矿石质量高,有的锰帽厚几十米,矿床规模为大型,为锰矿产的重要矿石类型之一。

(2) 离子吸附型稀土元素矿石。产于花岗岩、正长岩、火山岩等含有一定数量稀土元素的原岩风化壳中。这些稀土元素在原岩中为独立矿物(如氟碳钙钇矿、铈钇矿、钽钇矿、独居石、磷钇矿、硅铈钇矿、褐钇铈矿等)。当它们遭受风化作用时,分解产物以离子状态进入溶液中,除一部分被地表水带走外,绝大部分则被多水高岭石、高岭石、水云母等黏土矿物吸附,使稀土元素离子在风化壳中富集成矿。矿石呈土块状,稀土元素含量为 0.088%,最高达 0.43%。选矿方法简单,用盐水淋洗含矿黏土,就可将 90% 以上的稀土元素转入氯化钠溶液中而得到纯度达 94% 以上的混合稀土氧化物。矿床规模为大型,解决了我国稀土元素的资源,具有很大的工业意义。

(3) 黏土矿石。根据黏土矿物的种属和相对含量,可把黏土分为高岭土、膨润土、耐火黏土和坡缕石类黏土。高岭土是花岗岩、伟晶岩和长英岩等酸性侵入岩风化后形成的产物。矿物组成主要是高岭石、埃洛石( $>90\%$ ),其次还有多水高岭石及水云母,常混入黄铁矿、菱铁矿、碎屑石英、长石等。膨润土是流纹岩、火山凝灰岩、粗面岩和安山岩等中酸性火山喷出岩风化后形成的产物,这种黏土以蒙脱石矿物(或称微晶高岭石)为主( $85\% \sim 90\%$ ),此外尚含有极少量的石英、长石、方解石及多水高岭石,因为这种黏土中含有Ca、Mg、K、Na,说明它是没有充分氧化的产物,所以有的地质学家认为膨润土继续风化可以成为高岭土。耐火黏土是指耐火度 $>1580^{\circ}\text{C}$ 的黏土,耐火黏土的耐火度随氧化铝含量的增加而增高,其主要矿物是一水硬铝石、三水硬铝石、高岭石、伊利石、石英等。坡缕石黏土又称凹凸棒石,是一种较为少见的镁质黏土矿物、形状呈针状、棒状。黏土矿物呈松散状、土状、斑杂状、微层状构造,下部有时可见母岩的残留构造,泥质或粉砂结构,它是生产陶瓷、水泥、砖石、耐火材料的主要原料,也是造纸、橡胶等工业填料,其用途相当广泛。矿石经洗选后可获得纯净的黏土。矿床规模常为大、中型。

## 第三节 沉积成矿作用及其矿石

### 一、沉积成矿作用及其矿床

地表的岩石或矿床在风化作用下被破碎和分解后的产物、火山喷发物以及其他宇宙物质被一定介质搬运、沉积形成有用矿物的堆积体为沉积矿床。形成这类矿床的地质作用称为沉积成矿作用。

无论沉积物以何种方式进行搬运,它们沉积并非同时,而是依一定顺序先后沉积的,这种按一定规律顺序沉积物质的作用称为沉积分异作用。沉积分异作用可分为机械沉积分异作用、化学沉积分异作用和生物化学沉积分异作用。

## 1. 机械沉积分异作用及其矿床

### A 机械沉积分异作用

当砂、砾石、重金属矿物等碎屑物质被水或风等夹带迁移,由于水流或气流的速度逐渐降低,于是搬运物质的能力也随着减小,这时被搬运的物质将按一定的规律(体积大小,大小等)依次沉积,这种作用称为机械沉积分异作用。

沉积物的机械分异取决于其比重、体积大小、形状和耐磨性。当流速减小时,水中的重矿物总是比同样大小体积的轻矿物先沉淀下来(图 2-2-3)。碎屑或岩屑在水中沉降的快慢也与体积大小及形状有关。同一种矿物或岩屑,总是粗粒的先沉积下来。球形的矿物一般比板状或片状矿物更容易沉淀。由于上述因素,在自然界见到比重大的小矿物同颗粒大的比重较轻的矿物在一起,如含金砾岩矿床中,直径  $0.01 \sim 0.07\text{mm}$  的金颗粒同直径约  $2.5\text{cm}$  的石英卵石伴生。流水速度对物质搬运的距离也有影响,即流水搬运物质的能力与其速度的平方成正比例,即水流速度增一倍,水的搬运能力增加四倍。机械沉积分异作用越彻底,分选程度就越高,对成矿越有利。

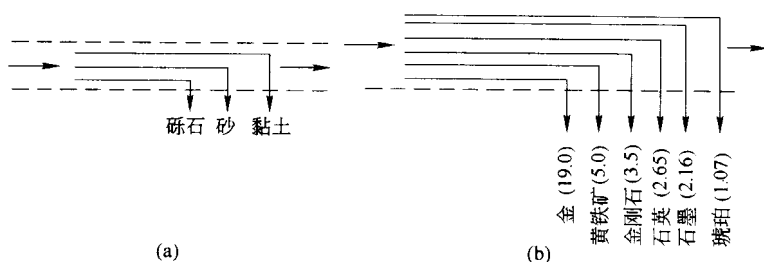


图 2-2-3 机械分异简图

(a) 按碎屑大小的机械分异简图 (b) 按比重大小的机械分异简图(当碎屑大小相等时)

### B 机械沉积矿床(砂矿床)

由机械沉积分异作用形成的矿床称为机械沉积矿床。其中有用物质为岩屑者(如砾石、砂、黏土等)称为岩屑矿床;有用物质为稳定矿物者称为砂矿床。单纯完全的岩屑或单一的重矿物是不大可能的,而更经常的是岩屑和重矿物混合产出,并表现出一定的配合关系。如金、铂等比重大的矿物与砾石堆积在一起,而钛铁矿、金红石则常与砂粒相伴生。

沉积砂矿床种类很多,根据产状和成因不同,可以分为以下类型:

(1) 洪积砂矿床。洪积砂矿床是间歇性急流所形成的。由于短时期和周期性暴雨发生急流洪水,携带大量疏松堆积物沉积在山麓、山沟盆地和喀斯特的盲谷、溶沟、溶洞、漏斗中。这种砂矿的分选作用差,而有用矿物的分布也不均匀,它们在疏松沉积物之间集中呈透镜体和薄层状。这类矿床规模小,所形成的主要矿产有金、锡、钨和水晶等。

(2) 冲积砂矿床。岩石和矿床的风化碎屑物在被河流搬运过程中,由于流速减慢,搬运能力的降低,在非湍流的适当地段按粒度和比重分别沉积,造成有用矿物的集中,形成了冲积砂矿床。冲积砂矿床按它在河谷中的分布情况和地貌类型,可分为河床砂矿床、河谷砂矿床、阶地砂矿床三个类型。由于冲积砂矿床是河流长期不间断分选的结果,而且分布面积一般较大,长度可达几公里或几十公里,宽约几米、几十米以至数百米,所以工业意义较大。其主要矿产有金、铂、锡石、钨锰铁矿、钙钨矿、磁铁矿、铬铁矿、钛铁矿、锆英石、独居石、金红石、金刚石、铌铁矿、磷钇矿、各类宝石以及石英砂等。

(3) 湖泊砂矿床。它是指搬运到湖泊中的碎屑物质通过机械沉积分异作用形成的矿床。当河流注入湖泊时,携带着大量碎屑物质汇集到湖泊中来,由于流速顿减,粗的和重的碎屑积在湖泊河口处,细粒物质则向湖心移动再沉积,泥质悬浮物可长期悬浮于湖水中,最后带到湖心沉积。由于分选好,所以可形成质量优良的耐火黏土和高岭石矿床,此外,还有铝土矿、砾石和砂等矿产。

(4) 海滨砂矿床。这是一种分布很广的矿床,它是由于波浪和岸流作用使有用矿物聚集的结果。岸流把物质带到沿岸,轻的物质比重的物质移动得快些和远些,发生了沉积机械分异作用。波浪把物质抛到海滩,回流和底流带走轻的和细的物质,于是产生极好的分选性,使大的重的物质聚集在海滩上形成了海滨砂矿。主要矿产有钛铁矿、金红石、锆英石、独居石、锡石、石英砂,还有磁铁矿、金、金刚石、铬铁矿、磷钇矿、铌铁矿和琥珀等等。

## 2. 化学沉积分异作用及其矿床

### A 化学沉积分界作用

许多风化产物呈真溶液或胶体溶液形式被地表水搬运。不同元素或物质在水中迁移的能力是不同的,当物理化学条件(如温度、压力、pH值等)变

化时,有的很快从水中沉淀下来,有的则较晚才沉淀,有的则长时间保留在水中,只有在特殊条件下才沉淀下来,这一过程称为化学沉积分异作用,因此而形成的矿床称为化学沉积矿床。

一般来讲,铁、锰、铝的氧化物和二氧化硅是呈胶体溶液形式进行搬运的,它们的沉积主要决定于 pH 值。石膏、岩盐、钾盐和镁盐是呈真溶液形式进行搬运的,它们的沉淀则主要是蒸发作用的结果,其沉淀顺序取决于它们的溶解度。根据大量事实的综合,各种元素或物质在水盆地的化学分异的先后顺序大体是由氧化物(氧化铁、氧化锰)开始,然后是铁的硅酸盐(海绿石、鲕绿泥石),碳酸盐类(如菱铁矿等),最后沉积硫酸盐和卤化物(石膏、石盐、钾盐等)等(图 2-2-4)。要注意的是,这只是一个综合性的理想情况。

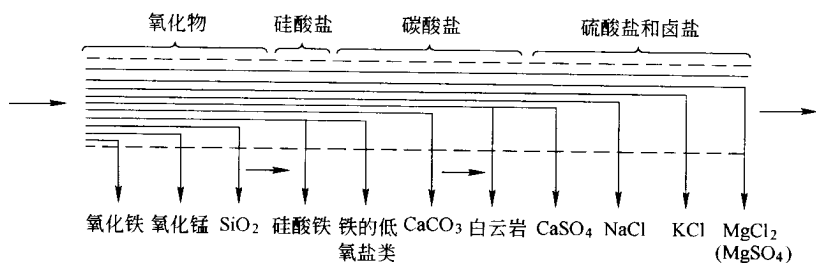


图 2-2-4 化学沉积分异简图

## B 化学沉积矿床

**胶体沉积矿床** 化学分异作用形成的各类金属矿产中,最重要的是胶体溶液沉积形成的铁矿、锰矿、铝矿和层状金属硫化物矿产。自然界最易形成胶体的元素有 Si、Al、Fe、Mn、P 等。胶体质点带有电荷,因而胶体能被长途搬运而不聚沉。当胶体溶液进入到海盆地或湖盆地中,由于受到大量电解质(盐类离子)的影响,便发生凝聚作用,造成胶体沉积矿床。

**本类矿床的基本特点** 矿床常产于一定地质时代的沉积岩系和火山沉积岩系内,层位稳定,产状与沉积岩岩层一致。矿体呈层状或透镜状,沿海湾边缘或湖盆边缘展布。铝土矿在最靠近岸边的地方沉积下来,铁在陆棚的上部沉积下来,而锰在距海岸更远一些,在陆棚的下部才沉积。矿石成分主要为金属氧化物、氢氧化物、碳酸盐和硅酸盐等。矿石常常具有鲕状、豆状和肾状构造,显示胶体结构特征。本类矿床规模大、分布普遍,具有很大的经济意



义。常见胶体沉积矿床有沉积铁矿、沉积锰矿、沉积铝矿等。

蒸发沉积矿床蒸发沉积矿床,也叫盐类矿床,其物质成分都是易溶于水的无机盐类,主要是钾、钠、镁的氯化物、钾、镁、钙的硫酸盐,钠碳酸盐,钠和钾的硝酸盐,还有少量溴化物、碘化物、硼酸盐等。已知的盐类矿物达一百余种主要有石盐、钾石盐、石膏、芒硝、水碱。硼砂等。盐类矿床的形成,是由于以真溶液形式存在的盐类物质经过蒸发浓缩产生过饱和而发生沉淀,形成蒸发沉积矿床。由于盐类矿物的溶解度不同,引起了它们沉积顺序也不相同,首先是溶解度小的石灰石和白云岩,其次是石膏和芒硝,再其次是大量石盐,最后为钾、镁的硫酸盐、氯化物和它们的复盐。

### 3. 生物化学沉积分异作用及其矿床

#### A 生物化学沉积分异作用

由于生物化学作用促使有机的或无机的成矿物质在各种水盆地中有规律的聚集和沉积,从而使不同物质组分分异开来,这一过程称为生物化学沉积分异作用,由此形成的矿床称为生物化学沉积矿床。

生物参与沉积矿床的成矿作用可以是直接的,也可以是间接的。直接参与的成矿作用是指成矿物质来自生物有机体的本身,如磷灰岩、硅藻土、硫、白垩、生物灰岩、煤、石油等矿产的形成。有关文献,也把煤、石油、天然气这种由生物体直接参与成矿所形成的矿床称为生物沉积矿床。间接参与的成矿作用是指在生物活动的产物—— $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 、酶、有机酸、腐殖质等的影响下,促使成矿物质的聚集作用,这种作用在自然界非常广泛而且错综复杂。

#### B 生物化学沉积矿床

生物化学沉积矿床,这类矿床种类比较齐全,据近年来了解发现有许多沉积矿产都与生物化学沉积作用有关。除了有非金属矿产如石灰岩、白云岩、磷灰岩、硅藻土、硫、白垩等和燃料矿产如煤、石油、天然气等都是生物作用的产物外,还有许多金属矿产如某些铁、锰、铀、铜、铅、锌、钴、镍、钼、钙同都与生物的活动影响有关。

本类矿床的基本特点,矿床主要产于陆棚浅海盆地的边缘地带,炎热气候条件提供了生物生长繁殖的环境。所以它们多赋存于海相地层中,有一定

的成矿时代和合矿层位。含矿岩系为富含有机质的页岩、砂岩、碳酸盐类岩石。矿层内常含有化石和有机质。常出现几个矿层。矿体形状主要为层状、透镜状、扁豆状,沿走向可以延长很远,但沿倾向延长比较小。矿床规模大、分布广,具有很大的经济意义。

## 二、主要矿石

沉积矿产资源十分丰富。能源矿产全部来源于沉积矿床。盐类矿产绝大部分是沉积成因。黑色金属原料(铁、锰等)、化肥原料(磷、钾等)、建筑材料等大部分来自沉积矿床。金和放射性矿产、有色金属(铜、铅、锌等)、稀有和分散金属等由沉积矿床所提供的储量占有很大的比重。现介绍最主要的几种金属和非金属矿石类型。

沉积铁矿石产于砂岩、石英岩、砂页岩或灰岩中。矿石主要矿物为赤铁矿、针铁矿、菱铁矿、鲕绿泥石和石英。还有少量氧化锰和黄铁矿。矿石多具鲕状、肾状、豆状构造和胶状结构。鲕状铁矿的鲕粒中心一般为石英。鲕粒外壳由赤铁矿与菱铁矿互层或赤铁矿与石英互层呈同心环带构造。鲕粒大小一般为 0.83 ~ 1.17mm,石英粒为 0.31 ~ 0.3mm,赤铁矿鲕粒之间大部分为菱铁矿胶结。矿石含 Fe 为 20% ~ 50%,一般平均在 40% 以上,含 Mn 12%,含 V 达 1%,含 P 0.2% ~ 0.5%,含硫百分之几至万分之几,含 SiO<sub>2</sub> 15% ~ 20%,比较高。可综合利用钒。此类型的矿床为大型,铁矿产量占世界铁矿产量的 30%,所以工业意义很大。河北宣龙式铁矿和我国南方宁乡武铁矿均属此类型。

沉积锰矿石产于砂页岩、黑色页岩、黏土岩和碳酸盐岩石中。矿物成分为软锰矿、硬锰矿、水锰矿、菱锰矿、黏土、石英和海绿石等。矿石为鲕状、块状、结核状、土状、多孔状、肾状等构造和胶状或粒状结构。含 Mn 一般 37% ~ 45%。矿石类型有氧化锰矿石和碳酸盐锰矿石两种。氧化锰矿石由软锰矿、硬锰矿、水锰矿组成,质量较佳,碳酸盐锰矿石以菱锰矿和锰方解石为主,含锰较低。碳酸盐锰矿石受到氧化后可变为氧化锰矿石。后者含硫、磷等杂质较低。这是锰矿床中工业价值最大的一种类型,矿床数量多、分布广泛,规模巨大,有的矿石储量可达到 10<sup>9</sup>t,矿石质量也较好。湖南湘潭锰矿、广西下

雷锰矿和辽宁瓦房子锰矿均属此种类型。

沉积铝矿石产于石灰岩地层底部。矿石中矿物成分简单,通常古生代铝土矿由一水型铝土矿(一水硬铝石和一水软铝石)组成,中生代铝土矿则由三水铝石组成,并含有铁矿物(如针铁矿、含水针铁矿及鳞绿泥石类等)及高岭石等。矿石以鲕状、豆状及致密块状构造为主,其次为条带状构造。含  $\text{Al}_2\text{O}_3$  48% ~ 70%。矿床规模为巨大型,是铝矿产的重要来源。山东淄博铝土矿矿床属于此类型。

沉积铜矿石又常称为含铜砂(页)岩,它的最大特点是含铜岩系的颜色杂,故称为“杂色岩系”。主要由紫色层(暗红、褐红、褐、紫色等)或浅色层(灰、青灰、绿色等)组成。因红色占主要地位,故又称为“红层”。含铜岩石是红层中的浅色砂岩、粉砂岩、页岩、砾岩以及碳酸盐岩等,含矿层也可以是含沥青质的黑色页岩。矿石矿物有黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿以及自然铜等,次生矿物有孔雀石、蓝铜矿等,常伴生有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等。矿石为浸染状和细脉状构造,呈粒状或胶状结构。一般含  $\text{Cu}$  2% ~ 3.6%,少数富矿含  $\text{Cu}$  达 26.08%,含  $\text{Zn}$  一般大于 0.3%,最高可达 5%,铅的品位则介于铜和锌之间,有的矿石含  $\text{Ag}$  97 ~ 182g/t。矿床规模多为大型,铜的储量占世界铜矿总储量的 33%,具有重要的经济价值。

砂锡矿石产于第三系和第四系红土、砂、砾石层中。主要有用矿物是锡石,其次有铌钽铁矿、钛铁矿、独居石、黑钨矿、白钨矿、金,还有锗英石和金红石等。矿石品位变化大,含  $\text{Sn}$  0.1 ~ 10kg/m<sup>3</sup>。伴生有益组分为钨、铌、钽和金,可综合利用。为大型矿床,目前世界 70% 的锡产于这种类型,所以砂锡矿的工业意义十分巨大。我国湖南、广西等省均有砂锡矿分布。

砂金矿石产于砂砾层或红土中。金呈自然金赋存于砂砾岩底部,砾石成分多为石英,与自然金伴生,重砂矿物还有磁铁矿、锡石、钛铁矿等。金往往呈极小的鳞片状或细颗粒,有时也可以找到粗大的颗粒,如内蒙某砂金矿最大颗粒重 203.8g,世界上发现的巨大金块最重者达 99.6kg(澳大利亚)。砂金较脉金品位高,含  $\text{Au}$  一般达 30g/t。矿床规模从小型到大型都有。目前此类矿石中的金产量占世界金总产量的 25% ~ 35%,我国砂金的产量约占全国金产量的 15%,是金的重要来源。

石灰石、白云石矿石。石灰石和白云石都是沉积岩中的岩层,呈层状、厚层状、储量大,层位稳定,易于开采。石灰石矿石主要矿物组成是方解石、少量白云石、菱镁矿以及石髓、蛋白石、新土、黄铁矿等。根据石灰石沉积成因的不同,可将石灰石称为生物灰岩、化学灰岩、碎屑灰岩。石灰石是很重要的水泥原料之一,也是石灰及其他建筑材料的原料,冶金工业常用石灰石来做助熔剂。

白云岩矿石是钙镁碳酸盐(其中  $\text{CaCO}_3$  占 54.2%,  $\text{MgCO}_3$  占 45.8%),其矿物组成以白云石矿物为主,还有方解石及其他矿物。白云石矿石主要用来作冶炼黑色金属材料的耐火材料,也可用来作助熔剂材料等。

硅藻土或硅藻石矿石。硅藻土矿石主要产于第三系地层中,硅藻石矿石比较致密,硬度较大,大多产于白垩系地层。矿体呈层状,与泥灰岩、白垩、砂和黏土互层。矿层厚度可达几百米,成分较纯。硅藻土矿石组分中以硅藻土为主,主要由不同形态及不同种属的硅藻组成,化学成分是  $\text{SiO}_2$ ,其次是黏土矿物——水云母、高岭石、矿物碎屑有石英、长石、黑云母及有机质,矿石呈柔软粉末状或疏松状。硅藻土在建材工业有广泛的应用,用来做保温、隔音。绝缘材料、水泥的混合材料等。在食品及净水工业,用来作吸附剂等。

## 第三章 气化 – 热液成矿矿石分析

### 第一节 气化 – 热液成矿概述

#### 一、概述

由气化 – 热液成矿作用形成的矿产不仅种类多 ,而且数量大。如钼、汞、锑等有色金属矿产几乎全部来自这类矿床 ,铜、铅、锌、钨、锡等则主要由这类矿床提供 ,铍、镉、铟、镓、锗、镧、铈、钽等稀有和分散元素是这类矿床的重要副产品 ,相当的铁、钴、镍和许多非金属矿产 ,如硫、石棉、重晶石、萤石、明矾石、冰洲石、水晶、砷、硼等 ,以及金和银等贵金属都与气化 – 热液成矿作用密切相关。因此 ,这类矿石在国民经济建设中具有十分重要的意义。

#### (一) 气化 – 热液及其成矿作用的概念

气化热液是在地下一定深度内自然形成的具有一定温度和压力的气态和液态的混合溶液。气化热液的成分以水为主 ,可含有各种元素及溶解在其中的气体 ,但主要呈液体状态。其温度一般为几十至几百摄氏度 ,压力随深度和地质环境的不同而变化 ,可从几十万帕至几千万帕 ,甚至达到数亿帕。形成气化热液的深度不等 ,通常为几至几十千米。

气化热液在许多类型的成矿过程中都具有参与作用。在内生成矿作用中 ,包括岩浆成矿作用和伟晶岩成矿作用 ,气化热液是它们演化过程某一阶段的产物 ,并且对成矿或多或少地起过积极的作用。对于热液矿床 ,气化热液不仅是主要含矿介质 ,而且是成矿的重要营力。它们对于矿质的萃取、携

带、搬运和沉淀起着极其重要的作用。热液在火山成因的矿床,甚至在某些沉积矿床的成岩-后生变化过程中也都有其踪迹,并对成矿及矿石的后生变化发生影响。在不同类型的变质成矿作用过程中,热液对矿质的运移和沉淀富集仍起着作用。

气化热液在活动过程中,既可以使母岩或围岩中的成矿物质发生富集,也可以使已进入到溶液中的矿质又分散到围岩中去。气化热液成矿作用是指前一现象,即指热液自身携带的成矿物质、或者在运移过程中从围岩中汲取的成矿物质,被热液带到一定的地质环境中(如断裂、裂隙、褶皱虚脱部位、岩体接触带、地层不整合面等),由于物理化学条件的改变,通过充填和交代等方式,将矿质沉淀下来,形成矿石的作用。

## (二) 气化-热液的来源

气化热液的来源是一个长期以来有争论的问题。随着科学技术和研究手段的发展,积累的实际资料越来越多,对现代地热体系、矿物流体包裹体、同位素地质学 and 高温高压水热体系实验等方面的研究表明,气化热液具有多种来源。

### 1. 岩浆热液

岩浆在演化过程中能分泌出热液的事实早已为人们所知。岩浆热液是与岩浆处于平衡或从岩浆中分出的气水溶液。岩浆中水的含量可根据岩浆快速喷溢和冷凝的熔岩中的含量粗略地计算出来,如流纹质珍珠岩和黑曜岩中水的含量为 0.2% ~ 4.0%,有时可达 8% ~ 10%。一般是酸性岩浆含水为 2% ~ 10%,基性岩浆为 1% ~ 6%。

水在岩浆熔体中的溶解度取决于温度、压力和熔体的成分,它随温度的增高而减小,随水蒸气压力的增高而增大。在成分方面,氧化硅熔体具有最小的溶解度,钠长石和碱金属硫酸盐熔体具有最大的溶解度。温度和压力的降低是水从岩浆中分出的主要原因,如温度从 1200℃ 冷却到 1000℃,则每 1t 硅酸盐物质可析出大约 6kg 的水。水从岩浆中分出可在结晶的整个温度范围内持续很长时间。水从岩浆中分出的同时,溶解有各种可溶性物质,使热液具有原始浓度。

### 2. 地下水热液

在一定的水文地质条件下,大陆地区的地下水可以下渗到几百米至几千米的深处,有时甚至可达万米以下。地下水可因地热梯度、岩浆烘烤、放射性元素蜕变、与其他热液混合等途径获得热量。如根据地热增温率计算,深度每增加 1m 温度升高  $0.015 \sim 0.06^{\circ}\text{C}$ ,那么,5km 深处的温度可达  $75 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。在火山活动地区,如云南的腾冲,地热梯度剧烈的增加,地热增温率异常上升,以致在几百米深处水温即可达数百摄氏度。

地下水向下渗透与环流时,一方面得到热量而变成热液,另一方面与其流经的岩石之间互相作用,不断溶解和汲取岩石中的某些元素,改变着自身的性质和成分,成为具有成矿能力的热液。尤其是地下水流经含盐类矿物较多的地层时,可溶解盐类物质而成为地下热卤水。这种热卤水从围岩或先形成的矿石中萃取成矿物质的能力更强。

### 3. 海水热液

在海洋地区,海水可沿裂隙、断裂及构造变动带下渗到地壳的深部,因受地下热能的影响,形成热液环流,并可从流经的围岩或矿床中萃取成矿物质。这种含矿热液可通过断裂、火山口或爆破带,再流入海中,与海水作用形成火山 - 沉积矿床。在洋底扩张中心、火山岛弧、海洋岛屿及大陆边缘地带,海水热液对于成矿作用有着重要的意义。由海水热液形成的热液矿床,主要是一些与海底岩浆作用有关的块状硫化物矿床,比较典型的例子是日本产在绿色凝灰岩建造中的铅、锌、铜矿床,即所谓的“黑矿”。

### 4. 变质热液

变质作用过程中岩石释放出的水称为变质水,变质水聚集升温后便成为变质热液。变质热液是受原始地质体(受变质岩石)的成因及变质作用的强度和类型控制的。随着变质程度的加深,岩石中含水量逐渐降低,排出的水便构成变质热液的主体。如沉积岩中含有  $20\% \sim 30\%$  的水,轻度变质形成绿片岩相时,只剩下  $6\%$  的水,中度变质形成角闪岩相时仅剩下  $1\% \sim 2\%$  的水,而强烈变质形成麻粒岩相时,保留在岩石中的水仅仅是  $0.5\%$ 。A. 萨乌科夫做过计算,密度为  $2.5 \times \text{kg}/\text{m}^3$  的泥质沉积岩,变质时若失去  $4\%$  的水,则  $1\text{km}^3$  的岩石中将会释放出约 1 亿 t 水。可见,变质过程中产生液相是毫无疑问的。变质热液的矿质可来自受变质的岩石,也可从所流经的围岩中萃取。

需要指出 ,热液矿床的形成有时是几种热液共同作用的结果。此时 ,可通过同位素组成等手段 ,确定哪种热液是形成矿床的主导因素。

(三) 气化热液的成分

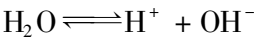
气化热液的成分十分复杂 ,而对其研究又常常缺乏直接的资料。研究气化热液的成分 ,一般是通过矿石、蚀变围岩、矿物中的气液包裹体、火山喷发物、火山活动区的热泉及沉积物、深钻和深矿井中获得的深层地下水等的成分资料 ,来综合分析推断气化热液的成分(表 2-3-1)。在表 2-3-1 中 ,水、硫、氧和二氧化碳的性状 ,尤其是硫和氧的性状对成矿作用的影响是显著的 ,故对这几种组分略加讨论。

表 2-3-1  气化热液中的主要组分

类 别		组 分
最主要的组分		H <sub>2</sub> O
基本组分		K、Na、Ca、Mg、Sr、Ba、Al、Si、Cl <sup>-</sup> 、F <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-1</sup> 、S <sup>2-</sup> 、CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>
金属成矿元素	亲铜元素 (最主要)	Cu、Pb、Zn、An、Ag、Sn、Sb、Bi、Hg
	亲铁元素 (过渡性元素)	Fe、CO、Ni、Mn
	稀有、稀土、放射性等元素	W、Mo、Be、TR、U、In、Re、Th、Cd、Ti
溶解的气体		H <sub>2</sub> S、CO <sub>2</sub> 、HCl
其他微量元素		Li、Rb、Cs、Br、I、Se、Te

1. 水

水是热液中的主体成分 ,它不仅是携带和搬运成矿物质的介质 ,而且在成矿作用中起着积极的作用。水是极弱的电解质 ,可以部分电离成 H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup> ,即



水的这一性质对成矿作用很重要 ,因为矿物在热液中所进行的化学作用 ,主要是在水溶液中进行的。它可以使很多物质发生溶解 ,并可以使溶解物质发生水解作用 ,促使某些矿物(如褐铁矿、锡石、金红石等)的沉淀。此

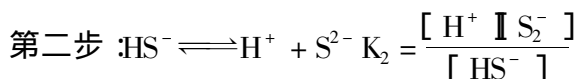
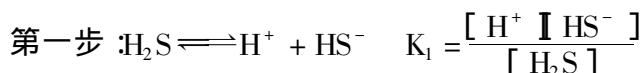


外,  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  的浓度不仅影响着热液的 pH 值, 而且  $\text{H}^+$  在水中对电子具有较大的亲和力,  $\text{H}^+$  浓度越高, 氧化能力就越强。这些因素对成矿物质的搬运和沉淀均有重要影响。

## 2. 硫

硫随着氧化程度的不同可形成不同电价的离子:  $\text{S}^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow [\text{S}_2]^{2-} \rightarrow \text{S}^0 \rightarrow \text{S}^{4+} \rightarrow \text{S}^{6+}$ 。硫在热液中的浓度与  $\text{H}_2\text{S}$  在水中的溶解度有关。 $\text{H}_2\text{S}$  在常压下, 当温度高于  $400^\circ\text{C}$  时发生热解离, 形成中性  $\text{S}_2$  分子, 不参加化学反应。在高温热液阶段(约  $400^\circ\text{C}$ )  $\text{H}_2\text{S}$  以未离解的中性分子存在, 仍不参与化学反应。由此可说明为什么在气化热液的高温阶段很少形成硫化物, 即使形成也是低硫硫化物, 如  $\text{FeS}$ (磁黄铁矿)和  $\text{FeAsS}$ (毒砂)等。当温度低于  $400^\circ\text{C}$  时,  $\text{H}_2\text{S}$  开始溶于水, 并随着温度的下降, 溶解度逐渐增大。这对形成大量的硫化物具有重要意义, 因为  $\text{H}_2\text{S}$  的离解程度与它在水溶液中的溶解度成正比。这也说明了为什么在气水热液矿床中, 硫化物大量沉淀的时候总是相当于由中温至低温热液阶段。

$\text{H}_2\text{S}$  解离成离子大致分为两步:



$[\text{S}^{2-}] = K_1 K_2 [\text{H}_2\text{S}] [\text{H}^+]^{-2}$ , 故溶液中出现何种疏离子与  $\text{H}_2\text{S}$  的溶解度以及溶液的氢离子浓度有关。一般情况下,  $\text{S}^{2-}$  只在强碱性条件下稳定, 在还原位较高、氧化位较低的条件下, 它与  $[\text{S}_2]^{2-}$  可分别形成  $\text{PbS}$ 、 $\text{ZnS}$ 、 $\text{CuFeS}_2$ 、 $\text{Cu}_2\text{S}$ 、 $\text{NiS}_2$ 、 $\text{FeS}$  和  $\text{CoS}_2$  等矿物。 $\text{HS}^-$  主要稳定于高温碱性和还原的热热水溶液中, 随着温度的降低, 其稳定的 pH 值范围加大。 $\text{S}^0$ (自然硫)在热液成矿作用中很少见到, 但在火山活动地区较常见。 $\text{SO}_4^{2-}$  在低温、酸性和氧化环境下稳定。 $\text{S}_{4+}$  形成  $\text{SO}_2$  气体, 在火山硫质喷气孔中常发现, 在热液中能形成亚硫酸, 进一步氧化便成为硫酸, 显然它是在晚阶段, 近地表自由氧比较丰富的条件下产生的。因此, 重晶石、天青石、石膏、硬石膏等硫酸盐矿物主要见于近地表的低温热液矿床中。总之, 以硫化物形式迁移的成矿元素较多。如  $\text{Au}$ 、

Ag、As、Bi、Cu、Ge、Hg、Mo、Ni、Ph、Pt、Sb 等。

### 3. 氧

氧和硫在热液成矿过程中具有对抗性,因为不少元素既能形成氧化物,又能形成硫化物。在氧浓度高的情况下形成氧化物沉淀,在富含硫化氢的溶液中,氧浓度较低则主要呈硫化物沉淀。氧在水中的溶解度很小,但游离氧或  $O^{2-}$  具有很高的化学活动性,在水溶液中能发生重要的化学作用。地壳中,游离氧的浓度一般随深度的增加而减少,所以气化热液在深部含氧较少,有利于硫化物的形成。当热液上升到近地表时,游离氧的浓度大大增加,有利于高价氧化物和硫酸盐矿物的形成。

热液中氧、硫浓度比例不同会导致一些金属化合物的沉淀,而另一些金属则呈易溶的化合物保留在热液中。如热液中硫阴离子浓度高时,铜和锌可形成硫化物沉淀,能形成大型矿床。当这种状况受到氧的作用、硫阴离子氧化成  $SO_4^{2-}$  时,则产生铜和锌的硫酸盐,成为易溶化合物,不可能形成矿床。

### 4. 二氧化碳

二氧化碳可溶于水,在溶液中  $CO_2$  具有下列化学平衡:



在溶液中,  $CO_3^{2-}$  的含量与  $CO_2$  的溶解量成正比,并与溶液的酸碱度有关。当溶液的 pH 值减小时,上列反应向左进行,  $CO_3^{2-}$  的浓度减小,当 pH 值增大时则  $CO_3^{2-}$  的浓度增加。

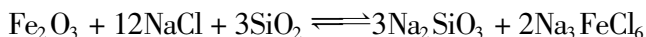
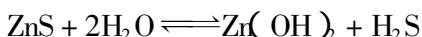
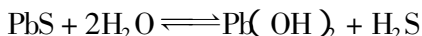
$CO_2$  的溶解度与温度成反比。在高温条件下,  $CO_2$  在溶液中成中性分子,对金属元素的迁移和化学反应的影响较小。当温度降低时,  $CO_2$  的作用增强。因此,在热液矿床的中温和低温阶段,常有大量的碳酸盐矿物出现,并广泛发育碳酸盐化围岩蚀变。

#### (四) 气化热液中成矿物质的沉淀

热液中成矿物质发生沉淀的因素是多方面的,主要包括温度、压力及溶液酸碱度的变化、氧化-还原反应及不同性质溶液的混合等。

(1) 温度。热液温度下降会引起成矿元素溶解度的降低,从而导致这些元素发生沉淀。温度下降还可引起溶液中硫化氢溶解度的增加,使  $S^{2-}$  的浓度增加,这对硫化物的沉淀是有利的。此外,温度的变化有利于某些化学反

应的进行,并使形成的矿物稳定存在,如方铅矿、闪锌矿和赤铁矿存在下列反应:



当温度降低时,上述反应向左进行,有利于方铅矿、闪锌矿和赤铁矿的形成和稳定。

(2) 压力。压力变化对溶液性质的影响十分显著。压力降低会影响热液中溶质的溶解度。压力下降可引起热液的‘沸腾’现象,能增加热液的浓度。热液中的挥发组分随压力的下降而不断逸出,  $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  等的减少能使剩余溶液的碱性增高,而搬运金属元素的能力则降低。压力下降还能促使一些含挥发分的化合物发生分解,结果导致矿质的沉淀。以菱铁矿为例,在温度不太高的情况下,压力迅速下降使重碳酸盐发生分解,形成菱铁矿。



研究表明,某些稀土矿物从热液中沉淀,可能是由于压力降低,致使络合物分解和  $\text{CO}_2$  逸散而造成的。

(3) 酸碱度。许多络合物或易溶化合物只能在一定的 pH 值范围内才稳定,当 pH 值改变时,就会引起这些化合物的分解和沉淀。表 2-3-2 列举了部分络阴离子和金属离子沉淀的 pH 值。

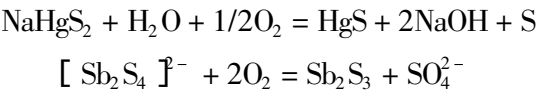
表 2-3-2 矿物从热液中沉淀的 pH 值

(依据 A·JI·巴夫洛夫,1976)

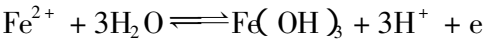
元 素	迁移形式	沉淀物形式	矿物沉淀 pH 值
Sn	$\text{SnS}_3^{2-}$ 、 $\text{SnS}_4^{4-}$	硫化物、氧化物	10.5 ~ 10
Ni	$\text{Ni}(\text{HS})_2$ 、 $\text{Ni}(\text{HS})_3^-$	硫化物	9.9
Co	$\text{Co}(\text{HS})_2$ 、 $\text{Co}(\text{HS})^+$	硫化物	9.8 ~ 8.5
Mo	$\text{MoS}_4^{2-}$	硫化物	10.0 ~ 7.7
U	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$	氧化物	9.5
Bi	$\text{BiS}_2^-$	硫化物	9.2
Cu <sup>+</sup>	$\text{CuS}_2^{2-}$ 、 $\text{Cu}(\text{HS})_2$	含铁硫化物(黄铜矿)	8.5 ~ 9.1

元 素	迁移形式	沉淀物形式	矿物沉淀 pH 值
Zn	$\text{ZnS}_2^-$ 、 $\text{Zn}(\text{HS})_2^-$	硫化物	8.8
Pb	$\text{PbS}_2^-$ 、 $\text{Pb}(\text{HS})_2^-$	硫化物	8.2
Cd	$\text{Cd}(\text{HS})_2^-$	硫化物	7.7
$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Cu}_2^{2-}$ 、 $\text{Cu}(\text{HS})_2^-$	不含铁( CuS 型 )	7.3
Au	$\text{AuS}^-$	自然元素	5.5 ~ 5
Hg	$\text{HgS}_2^-$ 、 $\text{Hg}(\text{HS})_2^-$	硫化物	6.5
Sn	$\text{SnS}_3^{2-}$ 、 $\text{SnS}_4^{4-}$	硫化物	5.8
Ag	$\text{AgS}^-$ 、 $\text{AgHS}$	硫化物	5.2
$\text{Cu}^+$	$\text{CuS}^-$ 、 $\text{Cu}(\text{HS})_2^-$	硫化物	5.2
Hg	$\text{HgS}_2$ 、 $\text{Hg}(\text{HS})_2^-$	自然元素	4.3
Sb	$\text{SbS}_2^-$ 、 $\text{HSb}_2\text{S}_4^-$	硫化物	4.5
As	$\text{AsS}_2$ 、 $\text{AsS}_3^{3-}$ 、 $\text{HAS}_2$	硫化物	4.0
Ba	$\text{BaS}$ 、 $\text{Ba}^{(2+)}$	硫化物	低 pH 高 Eh

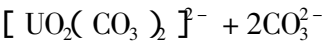
(4) 氧化 - 还原反应。有些矿物的分解与沉淀对环境的氧化与还原较敏感。如辰砂和辉锑矿可由氧化作用而发生沉淀：



此外,当硫氧化为  $\text{SO}_4^{2-}$  时,可形成重晶石和石膏等硫酸盐矿物。 $\text{Fe}^{2+}$  氧化为  $\text{Fe}^{3+}$  时可水解形成褐铁矿和赤铁矿：



由于还原作用而发生沉淀如非晶质铀矿(  $\text{UO}_2$  )的形成：



还原作用可使硫酸盐还原为  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{HS}^-$  等还原硫,从而促使成矿元素的沉淀。因此,还原作用在许多硫化物矿床中,对矿石的形成起着很大的作用。

(5) 不同性质溶液的混合。不同性质的溶液混合后,会打破热液体系的平衡,促使某些化学反应的进行,从而引起矿物的沉淀。

(五) 气化热液的成矿方式

气化热液成矿主要有两种方式,一种是充填作用,另一种是交代作用。

### 1. 充填作用及矿石特征

含矿热液在运移和停积定位过程中,如没有遇到化学性质活泼的围岩,则热液与围岩之间不发生明显的化学反应和物质的相互交换,热液中成矿物质的沉淀主要是由于温度、压力等物理条件的改变,直接沉淀在围岩的裂隙或孔洞中,这种成矿作用叫做充填作用。以充填作用为主要方式形成的矿床称为充填矿床。

充填矿床中,矿体的形态取决于原有空隙的形状,一般都为规模不一的脉状,与围岩的界线十分清楚。矿体中矿物的成分相对简单,矿物在空间分布上受沉淀顺序的控制,通常从裂隙的两壁向中心生长,形成对称带状构造[图 2-3-1(a)]。如热液从裂隙的一侧供应,则常形成单侧带状构造[图 2-3-1(b)]。在两种带状构造中,矿物最发育的晶面指向热液供应的方向。充填作用形成的矿石一般为自形晶-半自形晶粒状结构,典型的构造除条带状外,还有梳状、晶簇状、角砾状及同心圆状等。

### 2. 交代作用及矿石特征

交代作用的概念在讨论伟晶岩成矿作用时已阐述清楚。在此主要介绍交代作用的类型以及影响交代作用的因素。

交代作用必须在有孔隙溶液参与时才能进行。孔隙溶液渗透岩石,并能带走被交代组分和带来交代组分。根据溶液搬运交代组分和被交代组分的方式,可将交代作用分为扩散交代作用和渗滤交代作用两个主要类型。

扩散交代作用是指组分的移动是通过停滞的粒间溶液,以分子或离子扩散的方式缓慢地进行。即组分的带入或带出不是依靠溶液的流动,而是由于组分的浓度差造成的,使扩散作用从高浓度向低浓度方向进行。浓度差是扩散交代作用的必要条件。

渗滤交代作用是指组分的移动是靠溶液的流动来实现的。换言之,在交代作用过程中,组分的带入或带出是借助于流经岩石裂隙中的溶液进行的,而溶液流动的原因主要是压力差。因此,压力差是渗滤交代作用的必要条件。

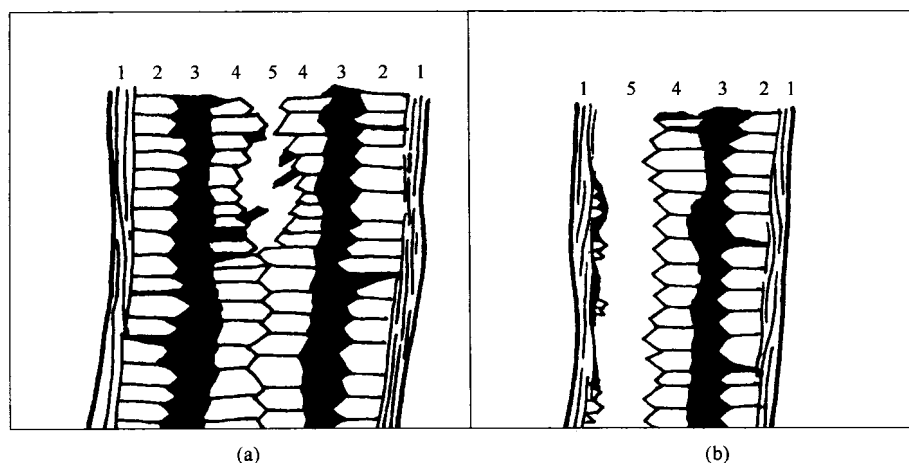


图 2-3-1 充填作用形成的对称带状构造(a)及单侧带状构造(b)

1-脉壁 2-石英晶体 3-闪锌矿 4-紫水晶 5-晶洞

影响交代作用的因素较多,主要是组分的活动性、浓度、温度、压力以及围岩的性质和构造等。一般而言,组分的活动性越强,交代作用越易进行。浓度增加,则活动性会相应降低。温度升高有利于交代作用的进行,压力加大则有利于渗滤交代作用的进行。围岩的物理性质和化学性质对交代作用的影响甚大,如石灰岩的化学性质活泼,易受交代作用而成矿。而石英岩化学性质较稳定,不易发生交代作用成矿。

交代作用形成的矿石比充填作用形成的矿石复杂得多。矿石成分相对多样,矿物种类较多。矿石中常含有未被交代的围岩残余、原岩的结构构造以及假象矿物。交代作用形成的矿物晶体因生长时不受空间限制,可向各个方向自由生长,故可形成完整的晶体,如交代成因的黄铁矿和石榴石等常具完好的晶形。在热液成矿过程中,交代作用与充填作用往往同时出现或先后发生,这时要注意区别以哪种成矿方式为主。

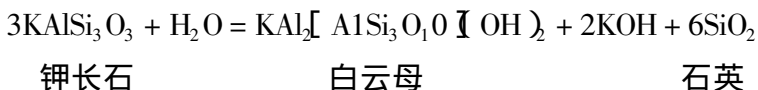
#### (六) 气化热液引起的围岩蚀变

围岩蚀变是指气化热液使围岩发生各种交代作用和变化。广义地说,围岩蚀变也是一种变质作用。因为遭受蚀变的岩石(蚀变围岩)在化学成分、矿物成分、结构构造和物理性质诸方面都已不同程度地发生了变化。发生在矿体附近、与成矿关系密切的围岩蚀变称为近矿围岩蚀变。这类蚀变常围绕矿

体呈带状分布,范围相对较小。离矿体较远、与成矿关系不密切的围岩蚀变称为远矿围岩蚀变。这类蚀变常远离矿体呈面状分布,范围一般较大。围岩蚀变是气化热液成矿作用的重要特征,下面对一些主要蚀变类型做出简介。

(1) 矽卡岩化。气化热液在高温状态下,在中等深度交代中酸性侵入岩和碳酸盐岩而形成矽卡岩的蚀变,称为矽卡岩化。矽卡岩化主要发生在中酸性侵入体与碳酸盐岩石的接触带及其附近,在交代蚀变的过程中,几乎从碳酸盐类岩石中带出了全部  $\text{CO}_2$  和部分  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ,同时带入大量的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;对于中酸性侵入岩,则有大量  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的带入和  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  的带出。与矽卡岩化有关的矿产主要是  $\text{W}$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}$  和  $\text{Pb}$ — $\text{Zn}$  等。

(2) 云英岩化。云英岩化是指高温气化热液交代花岗岩类岩石,形成以白云母和石英为主的岩 – 云英岩的蚀变作用。其交代反应如下:



云英岩中除白云母和石英外,还可出现及云母、黄玉、电气石、萤石、绿柱石、黑钨矿、白钨矿、锡石、好铝矿等矿物。与云英岩化有关的矿产主要是  $\text{W}$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Mo}$ 、 $\text{Bi}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 、 $\text{Be}$ 、 $\text{Li}$  及一些宝石矿物。

(3) 钾长石化。有关钾长石化的概念在论述伟晶岩成矿作用时已提及,在此不再赘述。钾长石化可形成钾长岩、钠长石钾长岩、石英钾长岩、黑云母钾长岩及霞石钠长石钾长岩等蚀变岩。与钾长石化有关的矿产较多,如与蚀变花岗岩有关的  $\text{Li}$ 、 $\text{Be}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$  等矿床,石英脉型和矽卡岩型  $\text{W}$ 、 $\text{Sn}$  矿床,斑岩型  $\text{Cu}$ 、 $\text{Mo}$  矿床,以及某些  $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{U}$ 、 $\text{TR}$  等矿产。

(4) 钠长石化。钠长石化不仅发生的温度范围较大,从高温到低温热液阶段均可发生,而且对原岩的选择性不明显,不同性质的岩石都可发生钠长石化,其中中基性岩浆岩最易发生钠长石化。在与矿化有关的花岗岩中,钠长石化常发生在钾长石化之后,而钠长石化之后往往又发育有云英岩化。与钠长石化有关的矿产主要是  $\text{Be}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 、 $\text{TR}$ 、 $\text{W}$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{P}$  和黄铁矿等。

(5) 青盘岩化。青盘岩化也称变安山岩化,是指安山岩、玄武岩、英安岩和部分流纹岩在中低温热液作用下,尤其是在热液中  $\text{CO}_2$ 、S 和  $\text{H}_2\text{O}$  等作用下产生的一种蚀变现象。形成的青盘岩呈暗绿至褐绿色,主要蚀变矿物是绿泥石、碳酸盐矿物、黄铁矿、绿帘石和钠长石。与青盘岩化有关的矿产有斑岩铜矿和铝矿、黄铁矿、铜等多金属矿,以及金银贵金属矿。

(6) 绢云母化。属于中低温热液蚀变,分布十分广泛,如各种岩浆岩、泥灰岩、钙质页岩等岩石都易发生绢云母化,表现为铝硅酸盐等矿物被细小的绢云母交代。与其有关的矿产较多,如斑岩型铜钼矿床和黄铁矿型铜矿床等中温热液硫化物矿床。有时也出现在与次生石英岩有关的金、萤石、红柱石和刚玉等矿床中。

(7) 绿泥石化。它是一种十分普遍的中低温热液蚀变,可发生在多种岩石中,尤其是一些安山岩、闪长岩、玄武岩和辉长岩等中基性岩浆岩中。与成矿作用有关的绿泥石化常与电气石化、绢云母化、硅化和碳酸盐化等蚀变有关。与绿泥石化有关的矿产为锡石-硫化物矿床、黄铁矿型铜矿床,以及铅、锌、金、银等多金属矿床。

(8) 硅化。硅化是一种最普遍的热液蚀变,从高温到低温都能发生硅化。由于热液中的  $\text{SiO}_2$  发生沉淀,或热液将原岩中的其他组分淋滤掉而残留下稳定的  $\text{SiO}_2$ ,从而使被蚀变岩石的石英或蛋白石含量增加。与硅化有关的矿产有 Cu、Mo、Pb、Zn、Au、Ag、Hg、Sb、黄铁矿、明矾石、重晶石等。

(9) 碳酸盐化。碳酸盐化常发生在热液作用的晚期,可发生在中基性岩浆岩、碳酸盐沉积岩及碱性-超基性岩中。主要蚀变矿物是方解石、白云石、菱铁矿和菱镁矿。与其有关的矿产是 Cu、Pb、Zn、Hg、Nb、Ta、Zr、TR、菱铁矿和菱镁矿等。

(10) 蛇纹石化。蛇纹石化常发生在超基性岩和白云岩等含镁高的岩石中,表现为蛇纹石交代橄榄石和白云石等矿物,使蚀变岩呈显不同程度的嫩绿色。与超基性岩蛇纹石化有关的矿产有 Ni、Co、Pt、Pd 和石棉等;与白云岩蛇纹石化有关的态度产主要是 Fe、Cu 以及石棉、滑石和菱镁矿矿床。

除以上十种围岩蚀变化,还可出现明矾石化、高岭土化、重晶石化、沸石化、绿帘石化、黄铁矿化等多种蚀变类型,不一一赘述。



## 第二节 接触交代成矿作用及其矿石

### 一、概述

接触交代成矿作用是指在中酸性 - 中基性侵入岩类与碳酸盐类岩石等钙镁质岩石的接触带上或其附近 ,由于含矿气化热液进行交代作用而形成矿产的作用 ,由此形成的矿床称为接触交代矿床。

接触交代作用能形成一套在矿物组合和结构构造等方面具有独特性的岩石 ,称为“矽卡岩”(Skarn)。因此 ,接触交代矿床也被称为矽卡岩矿床。

该类矿床的矿体主要分布在岩体接触带靠围岩的一侧 ,少数矿体可分布在接触带附近的岩体或地层中(图 2-3-2)。矿石的矿物成分复杂 ,它受碳酸盐岩石的种类及热液的成分控制。一般当含矿热液交代石灰岩时形成的矽卡岩叫钙矽卡岩 ,而交代白云岩时形成的矽卡岩叫镁矽卡岩。两类矽卡岩及其相应的矿石各有一套典型的矿物组合(表 2-3-3)。

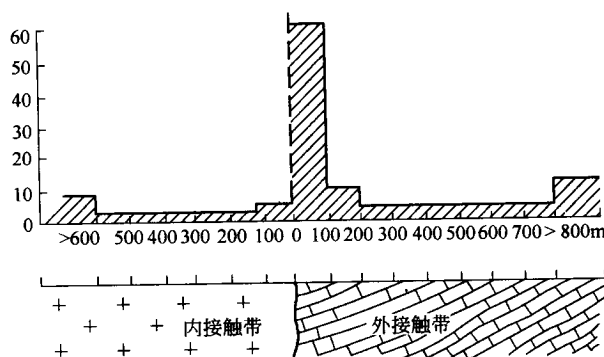


图 2-3-2 接触交代矿床矿体产出位置

表 2-3-3 钙、镁矽卡岩(矿石)的矿物组合

矿物类型	钙矽卡岩(矿石)	镁矽卡岩(矿石)
硅酸盐	辉石(主要是透辉石-钙铁辉石)、石榴石(主要是钙铝-钙铁石榴石)、硅灰石、方柱石	镁橄榄石、透辉石-次透辉石,在深成条件下有顽火辉石及紫苏辉石,在中深条件下有钙镁橄榄石
含水硅酸盐	角闪石、符山石、绿帘石、黑柱石、绿泥石、阳起石	硅镁石、金云母、透闪石、蛇纹石、韭角闪石
硼酸盐		硼镁铁矿、硼镁石、氟硼镁石
化物	磁铁矿、赤铁矿、锡石、石英	磁铁矿、赤铁矿、尖晶石、水镁石、锡石、石英
硫化物	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、毒砂	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿
其 他	方解石、萤石、重晶石、白钨矿	方解石、菱镁矿、菱镁铁矿

矿石的结构以粗粒结构为特征,这与成矿温度较高以及挥发性组分的参与有关。矿石构造以浸染状、块状、条带状以及晶洞构造为主。

## 二、接触交代成矿作用方式

接触交代成矿作用的实质是交代作用。在成矿过程中,渗滤交代和扩散交代两种方式均存在。

接触渗滤交代作用是由含矿气化热液沿着被交代岩石的裂隙系统渗滤而引起的。在有裂隙横切接触面部位,因上升的含矿热液沿交切接触带的裂隙渗滤,将下部的活性组分带到上部,并与之发生交代作用,常形成“火苗”状矽卡岩体(图 2-3-3 下部)。

接触扩散交代作用通常发生在接触带两种物理化学性质不同的交接部位。含矿热液沿岩浆岩和碳酸盐岩的接触面流动。外接触带石灰岩的粒间溶液为  $\text{CaO}$  所饱和,内接触带岩浆岩中的粒间溶液则为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  所饱和。上升溶液的出现可破坏上述平衡,使  $\text{CaO}$  向岩浆岩中扩散,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  向石灰岩中扩散,从而在接触带内形成了矽卡岩或矿石(图 13-3 上部)。由于物质交换具有双向性,故这种交代作用又称为双交代作用。

在实际成矿过程中,接触渗滤交代作用和接触扩散交代作用常相互伴随。当不存在较大的裂隙时,上升溶液在岩石中的渗透速度十分缓慢,这时以扩散交代作用为主;当深度不大、岩石裂隙较多时,热液运移速度较快,渗滤作用占主导地位。

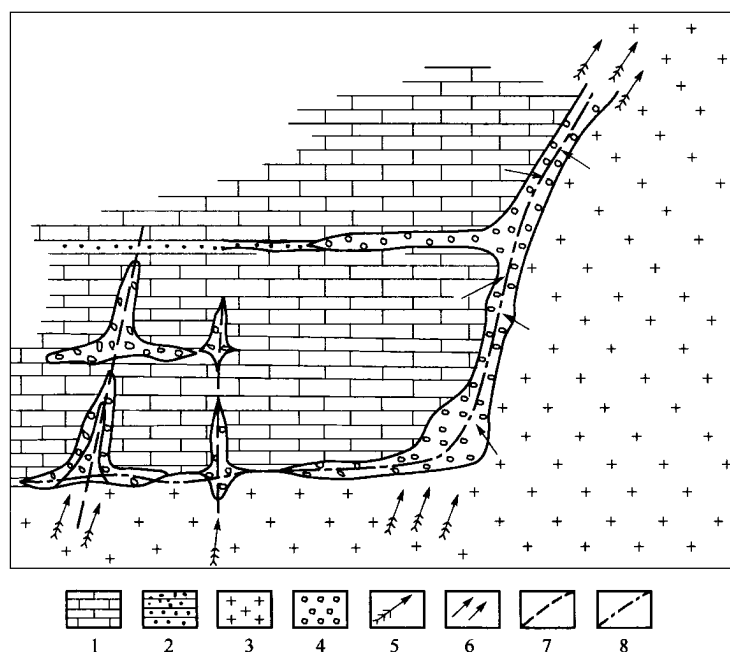


图 2-3-3 接触渗滤交代作用(下部)和接触扩散交代作用(上部)  
形成矽卡岩(矿石)示意图

1 - 石灰岩 2 - 砂岩 3 - 花岗岩 4 - 矽卡岩(矿石) 5 - 溶液流动方向 6 - 发生反应的惰性组分扩散方向 7 - 裂隙 8 - 岩体与地层的接触面

### 三、接触交代矿床的成矿过程

接触交代矿床的形成过程具有明显的多期性和多阶段性。矿床是在很长的时间和很大的温度范围内,通过多次含矿气化热液的活动形成的。由于不同的矿化期和矿化阶段所处的物理化学条件有很大的差异,所以形成的矿物组合也有明显的差别。一般说来,接触交代矿床可分为两个成矿期和 5 个成矿阶段(表 2-3-4)。也有人(M. T. Einaudi 等, 1981)将接触交代矿床的形成过程分为以下 3 个阶段(1)岩浆就位期间的等化学接触变质作用。在此

阶段,岩浆初始定位,驱动同生水和地下水,形成变质晕圈和局部的反应矽卡岩。(2)岩浆结晶期间的侵入体初步冷凝、交代矽卡岩形成、矿液演化和初期的矿石沉淀作用。此阶段岩浆结晶形成热液,交代作用强烈,在碳酸盐中形成外矽卡岩,在岩浆岩中形成内矽卡岩。(3)与岩浆热液系统相关联的退化蚀变和与该系统最终冷凝有关的矿石沉淀作用。此阶段热液系统冷却,较低温度的大气降水逐渐流入,导致岩浆岩的绢云母化和矽卡岩的退化蚀变,以及沿主要构造线和碳酸盐岩层理发生硫化物-硅质-碳酸盐的交代作用。

表 2-3-4 接触交代矿床的成矿期和成矿阶段

成矿期	成矿阶段	主要矿物组合	说 明
矽卡岩期	早期矽卡岩阶段 (干矽卡岩阶段)	硅灰石、透辉石、钙铁辉石、钙铝榴石、钙铁榴石、方柱石	以岛状和链状的无水硅酸盐矿物为主,在高温超临界条件下形成。一般不出现硫化物
	晚期矽卡岩阶段 (湿矿卡岩阶段)	阳起石、透闪石、角闪石、绿帘石、磁铁矿	以带状或复杂链状构造的含水硅酸盐矿物为主,在接近超临界状态下形成。溶液中的铁以磁铁矿的形式出现,故也称磁铁矿阶段
	氧化物阶段	正长石、酸性斜长石、金云母、白云母、石英、萤石、绿帘石、白钨矿、锡石、赤铁矿	以磁铁矿较少,而其他氧化物较多为特征。具有由矽卡岩期向石英-硫化物期过渡的性质
石英-硫化物期	早期硫化物阶段 (铁铜硫化物阶段)	绿泥石、绿帘石、绢云母、方解石、萤石、石英、黄铜矿、黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、辉铋矿	脉石矿物主要是交代早期硅酸盐矿物而成,金属硫化物主要形成于中温热液条件下
	晚期硫化物阶段 (铅锌硫化物阶段)	绿泥石、绢云母、方解石、石英、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿	以碳酸盐矿物增多和铅锌硫化物为特征,矿物主要形成于中-低温环境

## 四、主要矿石

由接触交代成矿作用形成的矿石不仅种类多,而且品位高,储量大。因此,接触交代矿床具有重要的工业价值。如中国的接触交代型铜矿床在全国

铜矿总储量中居第三位,在富矿总储量中居第二位,而在开采总量中跃居首位。

已知由接触交代成矿作用形成的矿产有 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Sn、Mo、Co、As、Be、B、石棉、压电石英和金云母等。矿石中常含有可供综合利用的元素,如铜矿石中常伴生有 Au、Ag、Mn、Se 等元素。有的铜矿床一年回收的金相当于一个中型金矿山的年产量。铁矿石中的综合利用元素有 Co、Mo、Cu 等,有时还伴生有 Ni、Bi、Se 和 Te 等组分。

### 1. 铁矿石

铁矿石主要与中至浅成的闪长岩 – 辉长岩类有关,少数与花岗岩和二长岩等岩浆岩有关。矿石中金属矿物主要是磁铁矿、赤铁矿和假象赤铁矿,其次为黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿。非金属矿物主要为透辉石、钙铁辉石和钙铁榴石,次为方柱石、阳起石和绿帘石等。矿石构造以致密块状为主,部分呈浸染状或条带状构造。矿石品位较高,铁含量通常为 40% ~ 50%,并常可综合利用 Co 和 Cu 等元素。

湖北大冶铁矿床是中国著名的接触交代铁矿床。矿石以致密块状的富矿石为主,主要金属矿物为磁铁矿,并有黄铜矿和黄铁矿呈条纹状分布于块状矿石中。在块状构造的富矿体与围岩过渡带,常有高铜贫铁的浸染状矿石。

### 2. 铜矿石

铜矿石主要与钙碱性花岗闪长岩 – 石英二长岩、石英闪长岩等岩浆岩有关,少数矿床与花岗岩有关。当围岩为石灰岩时,形成钙矽卡岩型铜矿石,围岩为白云岩时,则形成镁矽卡岩型铜矿石。两类矿石的矿物成分有区别,前者矽卡岩矿物为钙铁 – 钙铝榴石、透辉石和绿帘石等,后者为镁橄榄石、硅镁石、透辉石、金云母、透闪石和蛇纹石等。最重要的有用矿物是黄铜矿,次为斑铜矿。铜品位可达 2% ~ 8%。有时铜与其他有用元素伴生,如与辉钼矿伴生成铜 – 钼矿石,与磁铁矿伴生为铜 – 铁矿石,与方铅矿和闪锌矿等伴生为铜 – 铅、锌多金属矿石。矿石中还常出现磁黄铁矿和黄铁矿等金属矿物,并常可综合回收 Co 和 Au。

安徽铜官山铜矿是这类矿床的实例。

### 3. 钨矿石

钨矿石主要与花岗岩、花岗闪长岩及石英二长岩有关。围岩一般为石灰岩。矿石中主要有用矿物为白钨矿,其粒度较小,多在 5mm 以下。矿石品位一般为  $\text{WO}_3$  0.4% ~ 0.7%。矿石中的金属矿物除白钨矿外,有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、辉铋矿、毒砂和锡石等。矽卡岩矿物以含铁少为特点,主要为钙铝榴石、透辉石、角闪石、金云母,次为符山石、萤石、正长石、绿帘石、方解石和石英等。其中萤石和符山石具有标型意义,一般是钨品位与萤石含量成正比,而与符山石含量成反比。

湖南柿竹园和瑶岗仙产这类矿石。

### 4. 钼矿石

钼矿石主要与花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩及斜长花岗岩等岩浆岩有关,围岩为石灰岩。有用矿物主要是辉钼矿,其他金属矿物有黄铜矿、白钨矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、方铅矿和闪锌矿等。矽卡岩矿物以钙铝榴石和透辉石为主。辉钼矿常呈小颗粒浸染于矽卡岩中,有时与硫化物一起分布在矽卡岩内的石英脉中,呈细脉浸染状。钼的品位一般为 0.1% ~ 0.3%。有时辉钼矿和黄铜矿、白钨矿伴生,形成铜-钼或钨-钼矿石。

辽宁杨家杖子钼矿床产这类矿石。

### 5. 锡矿石

锡矿石这类矿石产在花岗岩体与石灰岩的接触带上及其附近。矿石的矿物成分较复杂,锡石是最主要的有用矿物。金属矿物除锡石外,有白钨矿、磁黄铁矿、黄铁矿、辉铋矿、毒砂、方铅矿和闪锌矿等,非金属矿物有透辉石、石榴石、符山石、阳起石、萤石、石英和绿泥石等。锡石粒度细,呈浸染状或与硫化物组成网脉。锡品位一般为 0.3% ~ 2.8%。综合利用元素有 Cu、Fe、Mo、Zn、Ag、Ge、Ga、In、As、S 和萤石等。

云南个旧锡矿产这类矿石。

### 6. 铅锌矿石

铅锌矿石主要与花岗闪长岩、花岗岩和石英二长岩有关。矿石常产在离接触带一定距离的围岩中,其成分较复杂,有用矿物以方铅矿和闪锌矿为主,其他金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、锡石、白钨矿、辉钼矿、辉铋矿、磁

铁矿和赤铁矿等。非金属矿物有辉石、石榴石、角闪石、绿帘石、绿泥石、绢云母、石英和方解石等。矿石铅品位通常为  $7\% \sim 20\%$  , 锌品位为  $5\% \sim 15\%$  。综合利用元素有 Cu、Au、Ag、In、Ca 和 Cd 等。通常说的“矽卡岩型多金属矿床”产的就是这类矿石。

湖南水口山铅锌矿产这类矿石。

### 第三节 热液成矿作用及其矿石

地壳中的含矿热水溶液在一定的物理化学条件下,以充填作用或交代作用的方式,将矿质沉淀在各种有利的构造和岩石中,从而形成矿石的作用称为热液成矿作用。由热液成矿作用形成的矿床称为热液矿床。

热液矿床可分为若干类型。由于研究目的不同,分类方案的侧重点也不一致。但是,分类的依据不外乎是温度、压力、热液来源、成矿环境和方式等,如地质上可根据成矿温度和热液来源,将热液矿床分为 15 个不同的类型,如表 2-3-5 所示。从矿石学的角度出发,对热液的来源尚不重要,而温度对矿石的矿物组合和结构构造等方面有密切关系,即成矿温度对矿石的工艺性质影响很大。因此,本教材以成矿温度为主要分类依据,并考虑到成矿环境,将热液矿床分为以下四类:

表 2-3-5 热液矿床分类表

成矿温度 热液来源	高温( $6 \sim 300^{\circ}\text{C}$ )	中温( $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$ )	低温( $200 \sim 50^{\circ}\text{C}$ )
岩 浆	高温岩浆热液矿床	中温岩浆热液矿床	低温岩浆热液矿床
变 质	高温变质热液矿床	中温变质热液矿床	低温变质热液矿床
地下水	高温地下水热液矿床	中温地下水热液矿床	低温地下水热液矿床
海 水	高温海水热液矿床	中温海水热液矿床	低温海水热液矿床
混合型	高温混合热液矿床	中温混合热液矿床	低温混合热液矿床

(1) 高温热液矿床。主要矿物在  $600 \sim 300^{\circ}\text{C}$  范围内晶出。

(2) 中温热液矿床。主要矿物在  $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$  范围内晶出。

(3) 低温热液矿床。主要矿物在  $200 \sim 50^{\circ}\text{C}$  范围内晶出。

(4) 火山气液矿床。主要矿物在  $600 \sim 50^{\circ}\text{C}$  范围内晶出。

## 一、高温热液成矿作用及其矿石

### 1. 概述

高温热液矿床的形成温度一般在  $600 \sim 300^{\circ}\text{C}$  之间, 压力约为  $2 \times 10^7 \sim 10^8 \text{ Pa}$ , 成矿深度多在  $1 \sim 4.5 \text{ km}$  之间。但也有压力低于  $2 \times 10^7 \text{ Pa}$  和深度小于  $1 \text{ km}$  的浅成高温热液矿床。

这类矿床通常与深成相花岗岩类岩石有成因联系, 尤其是与花岗岩和花岗闪长岩关系密切。矿体直接产于岩体内部, 或产在岩体附近的围岩中, 一般距岩体的距离不超过  $1.5 \text{ km}$ 。成矿围岩通常为非钙质岩石, 如硅质沉积岩和变质岩等, 有时也产于喷出岩中。

由于高温热液矿床的成矿深度和压力较大, 因此, 围岩中的张性裂隙不发育, 一般都是压扭性裂隙。活动性很强的高温热液可进入压扭性裂隙, 以充填方式为主成矿。

### 2. 矿床基本特征

高温热液矿床具有下列特点:

(1) 矿物成分以氧化物和含氧盐为主, 次为硫化物。典型的高温金属矿物有磁铁矿、锡石、黑钨矿、白钨矿、磁黄铁矿、赤铁矿、辉钼矿、辉铋矿、铁闪锌矿和毒砂等。非金属矿物有石英、长石、锂云母、角闪石和石榴石等。此外, 含有电气石、黄玉、金云母、白云母、绿柱石和方柱石等含矿化剂的矿物。以上矿物组合反映了高温热液成矿的特点。

(2) 围岩蚀变特别发育, 这和成矿温度高以及矿液中富含挥发组分有关。典型的高温热液蚀变如云英岩化、黄玉化、电气石化、钠长石化、阳起石化和钾长石化等。由高温热液蚀变形成的岩石常含有白云母、锂云母、黑云母、黄玉、电气石和萤石等矿化剂矿物。

(3) 高温热液的成矿方式以充填作用为主。矿体形态多呈脉状, 也可见到扁豆状、囊状及沿层交代的似层状矿体。矿体大小不一, 以中等规模多见。



矿石结构以中 - 粗粒为主,常见固溶体分离结构。矿石构造有块状、浸染状及条带状等。

### 3. 主要矿石

最主要的高温热液矿石是钨矿石、锡矿石、钼矿石、金矿石和铍矿石等。此外,还有 Bi、Fe、Li、Nb、Ta、TR、As、水晶、石墨和宝石等矿产。

(1) 钨矿石,为黑钨矿 - 石英脉型矿石,主要产在花岗岩体的顶部及附近非钙质的围岩中。矿体呈脉状成群分布。矿脉中石英占 90% 以上。金属矿物除黑钨矿外,还有锡石、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等。非金属矿物除石英外,有少量的白云母、钾长石、绿柱石、电气石、黄玉、萤石和绢云母等。黑钨矿中常含有 Nb、Ta 和 Sc 等稀有元素可供综合利用。矿石一般为粗粒自形晶结构和斑杂状构造,属于易选矿石。江西西华山钨矿是该类矿床世界最著名的实例。

(2) 锡矿石,为锡石 - 石英脉型矿石,与钨矿石有很多相似之处,两者常密切共生。成矿母岩以黑云母花岗岩为主。矿石中主要金属矿物是锡石和黑钨矿,其次为辉钼矿、辉铋矿、毒砂、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等。非金属矿物以石英为主,次为萤石、白云母、黄玉和碳酸盐等。矿石一般为中 - 粗粒结构,斑杂状、斑点状或浸染状构造,易于分选。

(3) 钼矿石,为辉钼矿 - 石英脉型矿石。这类矿石与酸性花岗岩类有成因联系。矿体呈脉状产出,少数为透镜状。矿石的矿物组成通常较简单,除辉钼矿外,伴生有黑钨矿、辉铋矿、锡石和少量硫化物。非金属矿物以石英为主,并有白云母、绢云母、电气石和萤石等。辉钼矿除分布在石英脉中外,还常浸染在石英脉壁附近的围岩中,呈细小鳞片状或团块状集合体出现。

(4) 金矿石,为含金石英脉或含金蚀变岩型矿石。主要分布在前震旦纪古老变质岩系中,成脉状产出。金属矿物有自然金、黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、辉钼矿、白钨矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等。非金属矿物为石英、方解石、绿泥石、电气石、钠长石、磷灰石和石榴石等。

(5) 铍矿石,含铍矿物主要是绿柱石,嵌布在石英脉或花岗岩中。绿柱石 - 石英脉型矿石中一般含有黑钨矿,有时含有锂云母,其产出特征与钨矿脉类似。花岗岩中的绿柱石呈浸染状或脉状产出。这类矿石中的绿柱石晶体

较大、色泽好、无裂纹时可作为宝石利用。

## 二、中温热液成矿作用及其矿石

### 1. 概述

中温热液矿床的形成温度一般为  $300 \sim 200^{\circ}\text{C}$  ,压力为  $1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7 \text{ Pa}$  ,成矿深度约为  $2 \sim 0.5 \text{ km}$ 。

这类矿床在空间上常与中小型、中深成侵入体有关 ,矿体产于侵入体的内外接触带中 ,尤其是外接触带的沉积岩、变质岩或火山岩中。部分中温热液矿床与岩浆岩无明显的成因联系和空间关系 ,它们产在大断裂带或热流值异常的地区。

### 2. 矿床基本特征

中温热液矿床具有下列特点 :

(1)可出现的矿物种类繁多 ,矿石矿物有自然金、自然银、赤铁矿、黄铁矿、毒砂、黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、红砷镍矿、辉钴矿、沥青铀矿、黝锡矿、辉钼矿、辉铋矿、自然铋、硼镁石、石棉、萤石和水晶等。脉石矿物有石英、方解石、白云石、绿泥石和绢云母等。

(2)围岩蚀变类型多 ,这与成矿母岩及围岩的种类多有关。常见的中温热液蚀变有绿泥石化、绢云母化、黄铁矿化、硅化、黄铁长英岩化、碳酸盐化、蛇纹石化及滑石菱镁矿化等。

(3)成矿方式既有充填作用 ,也有交代作用。所以 ,矿体形态多样 ,如脉状、网脉状、鞍状、似层状、扁豆状、囊状和柱状等。矿石一般为中粒结构 ,具块状、浸染状、条带状、梳状、晶簇状和角砾状等构造。

### 3. 主要矿石

主要的中温热液矿石有金矿石、铅锌矿石、锡石 - 硫化物矿石、菱镁矿矿石、石棉矿石。滑石矿石、水晶矿石、黄铁矿矿石和五元素矿石(  $\text{Ni} - \text{Co} - \text{Ag} - \text{Bi} - \text{U}$  )等。此外 ,还有以中温热液为主形成的铁、铜、砷、硫、萤石、重晶石等矿产。下面介绍几种中温热液矿石。

(1)金矿石。矿石的形成一般与燕山期花岗岩类有关 ,常产在花岗岩类侵入体顶盖的变质岩中 ,少数矿石分布在花岗岩体内部。矿石中的金属矿物

有自然金、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、白铁矿和辉银矿等,非金属矿物有石英、白云母、方解石、绿泥石、绢云母等。除主元素金外,伴生有益组分有 Cu、Pb、Zn、Se、In、Te、La 和 Tl 等,可供综合利用。这种自然金 - 多金属矿石是金的重要来源,在中国是最重要的金矿类型,如山东、吉林和辽宁等地的金矿床主要属于该类型。

(2) 铅锌矿石。中温热液铅锌矿石可产在沉积岩、变质岩和火山岩等多种岩石中。成矿方式以交代作用为主。矿石中常见的金属矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿和黝铜矿等,有时可见辉银矿、辉银铅矿、菱锌矿、铅矾、白铅矿、蓝铜矿和菱铁矿等。非金属矿物有石英、萤石、方解石和重晶石等。矿石以中 - 细粒结构和浸染状构造为主,也常见角砾状和块状构造的矿石。有用组分除 Pb 和 Zn 外,还可综合利用 Ag、Ca、Ce、Cd、V、Cu 和 In 等元素。

(3) 锡石 - 硫化物矿石。这类矿石与中酸性花岗岩、花岗闪长岩有成因联系。矿石常产在侵入体以外一定距离的砂岩、页岩和石灰岩等围岩中。锡石与铁的硫化物、铁铝硅酸盐及铁的氧化物等富铁矿物共生,金属矿物有锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿等,非金属矿物有石英、电气石、绿泥石、方解石和重晶石等。矿石以细粒结构和浸染状构造、块状构造、胶状构造为主。利用对象除 Sn 外,还有 Pb、Zn、Cu 和 Ag 等。

(4) 菱镁矿矿石。这类矿石主要产在白云岩、白云质灰岩和白云质大理岩等镁质碳酸盐岩石中。矿石中除菱镁矿外,常见矿物有方解石、白云石、滑石、蛇纹石和蛋白石,有时出现黄铁矿、黄铜矿、针铁矿、石墨和绿泥石等。矿石一般为中 - 粗粒结构,菱镁矿晶体多为几毫米至几厘米,呈灰色或向红色。矿石构造以块状和条带状为主。菱镁矿不仅可以提取金属镁,而且是制造轻质和重质氧化镁的主要原料,在冶金、建材、化工、橡胶、造纸、陶瓷、医药和制糖等工业上具有重要用途。中国是世界上菱镁矿资源最丰富的国家之一。

### 三、低温热液成矿作用及其矿石

#### 1. 概述

低温热液矿床的形成温度一般在  $200 \sim 50^{\circ}\text{C}$  之间,压力一般在  $10^7 \text{ Pa}$  以下,形成深度多数为几百米至几米。

这类矿床与岩浆岩的关系不密切,矿床产出的地区常常不见深成岩浆岩出露。矿体受各种断裂和裂隙系统控制,可赋存在各种各样的围岩中。

形成这类矿床的热液来源是多样的,成矿物质来源也较复杂。对碳、氢、氧、硫等稳定同位素的地球化学研究揭示,携带成矿物质的热液主要来自环流的地下水热液。

## 2. 矿床基本特征

低温热液矿床具有下列特点:

(1) 矿物成分为低温矿物组合,矿物种类多。金属矿物有辰砂、辉锑矿、雄黄、雌黄、黄铜矿、黝铜矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、辉银矿、自然金、自然银、自然铜等。非金属矿物有石英、玉髓、蛋白石、方解石、白云石、高岭石、沸石、冰长石、天青石、重晶石、明矾石、冰洲石、萤石和石膏等。

(2) 围岩蚀变主要是微粒至隐晶质的硅化(如玉髓化、蛋白石化)、黏土化、明矾石化、泡沸石化、重晶石化、石膏化和冰长石化等,属于低温热液蚀变。

(3) 低温热液成矿方式以充填为主,矿体形态复杂,主要呈各种脉状、透镜状、囊状和似层状。矿石以细粒结构为主,构造多为角砾状、块状、胶状、晶簇状或晶洞状。矿床规模以中小型为主。

## 3. 主要矿石

全部的汞矿石和大部分的锑矿石、明矾石、冰洲石来自低温热液矿床。重要矿产还有 As(雄黄和雌黄)、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、重晶石、萤石和硅质宝石等。

(1) 汞矿石。汞矿石大多数产于石灰岩和白云岩等碳酸盐岩中,少量产于砂岩或页岩中。含汞矿物为辰砂,伴生有雄黄、雌黄、辉锑矿、赤铁矿和黄铁矿等。非金属矿物主要是方解石、白云石、石英、重晶石和萤石等。矿石构造以浸染状和角砾状多见,并有块状和晶洞状构造,晶洞中的辰砂常具完美的晶体。矿体常呈脉状或层状,其中脉状矿体品位更高,汞含量通常可达10%以上。这类矿石除利用汞外,常可综合利用 Sb 和 As。

(2) 锑矿石。矿体多呈层状或脉状。层状矿体一般产于石灰岩和白云岩中,脉状矿体的围岩是各种各样的。矿石主要由辉锑矿和石英组成,其次有

萤石、重晶石、方解石、黄铁矿、毒砂、闪锌矿和菱铁矿等矿物。矿石以自形晶结构和浸染状构造为主,并常见块状、角砾状和晶簇构造。结晶完美的辉锑矿晶簇具有较高的观赏价值。

(3) 砷矿石。砷矿石主要产于砂岩、页岩或石灰岩中。矿体常呈脉状、网脉状或扁豆状充填于围岩裂隙中。矿石矿物主要是雄黄和雌黄,伴生矿物有针状低温毒砂、胶状黄铁矿、白铁矿、辉锑矿、石英、玉髓和方解石等。矿石除含 As 外,常可综合利用 Se、Au、Sb 和 Hg 等元素。

## 四、火山气液成矿作用及其矿石

### 1. 概述

在火山活动的晚期或间隙期,火山喷气和热液作用十分强烈。这些喷气和热液通常含有大量的重金属化合物。在一定的地质和地球化学条件下,含重金属的气液与围岩或海水。或气液之间发生复杂的相互作用,促使有用组分发生聚集和沉淀、形成矿石的作用称为火山气液成矿作用。形成的矿床称为火山气液矿床。这类矿床不仅包括火山喷气矿床和火山热液矿床,还包括与浅成、超浅成的次火山活动有密切联系的热液矿床。

火山气液成矿作用的温度大约在  $600 \sim 50^{\circ}\text{C}$  之间。就成矿温度而言,与前述的高温、中温和低温热液矿床的总温度区间是吻合的。但这类矿床的成矿环境特殊,成矿都与火山或次火山活动有关,矿化发生在地表、海底或地下浅处,矿体产于各种火山岩和次火山岩中,成矿作用主要发生在火山活动晚期或两个旋回的间隙期。含矿介质有喷气、热液或火山口附近被烤热的海水、湖水、地下水和地表水。因此,将此类矿床作为一个独立的类型。

火山气液成矿作用主要包括以下三种作用。

(1) 火山喷气作用。当火山喷发时,常伴随有大量的气体和重金属化合物,当它们与围岩发生相互作用、或通过简单的升华作用、或因不同的气体之间发生反应,从而在火山口或喷气孔及其附近,形成有用矿物堆积的作用称为火山喷气作用,由这种作用形成的矿床称为火山喷气矿床。

(2) 火山热液作用。火山喷出的大量含矿气体,由于温度和压力的变化,凝聚成含矿热液,它们与火山岩或其他围岩发生作用而沉淀出有用组分;有

时以充填作用的方式直接在火山岩的气孔或裂隙中成矿 ;或与海水、地下水等相互作用而沉淀出有用物质。这种作用称为火山热液作用 ,由此形成的矿床称为火山热液矿床。

(3)次火山气液作用。在火山活动晚期或间歇期 ,常伴随有浅成 – 超浅成相的次火山岩侵入活动 ,它们大多产在火山附近的各种断裂裂隙中 ,与相应的火山岩密切共生。由次火山气液通过交代或充填而形成矿石的作用 ,称为次火山气液作用 ,形成的矿床称为次火山热液矿床。

## 2. 矿床基本特征

火山气液矿床具有下列特点 :

(1)由于火山气液成矿作用温度范围大 ,成矿介质复杂 ,围岩多样 ,所以矿石成分也复杂 ,矿物种类繁多。主要有以下六类 :

1)自然元素类。自然硫、自然铜、自然金和自然银等。

2)贵金属类。金银矿、碲化金、硒化金、碲金银矿、碲银矿、硒银矿和辉银矿等。

3)硫酸盐及其他含氧盐类。重晶石、明矾石、石膏、硬石膏、黑钨矿、白钨矿、磷灰石、菱铁矿、方解石和冰洲石等。

4)铁、铜、铅、锌、钼、铋、汞、锑和砷的硫化物、氧化物、氯化物和氟化物等。

5)硅酸盐类。透辉石、石榴石、金云母、阳起石、绿帘石、钠长石、钾长石、绿泥石、黑云母、云母、冰长石、叶蜡石、沸石和高岭石等。

6)石英和萤石等其他矿物。

(2)围岩蚀变发育 ,不仅分布广泛 ,而且种类繁多。最主要的如青磐岩化、绢云母化、绿泥石化、硅化、明矾石化、次生石英岩化、冰长石化、碳酸盐化、钾化、高岭土化等。与次火山热液成矿作用有关的蚀变还有阳起石化、方柱石化、金云母化、绿帘石化和石榴石化等。

(3)交代作用和充填作用两种成矿方式都有。矿体形态和矿石结构构造均复杂 ,常见矿体形状有似层状、层状、透镜状、脉状、环状、筒状和囊状等 ,矿石结构有粒状(从微粒至粗粒均有)和各种交代结构等 ;构造有浸染状、细脉浸染状、脉状、网脉状、块状和角砾状等。

### 3. 主要矿石

火山气液矿床分布广泛,从陆相到海相均有。这类矿床不仅矿产种类多,而且矿石质量也较好。主要矿产如 Cu、Fe、Au、Ag、Mo、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Te 以及硫、萤石、重晶石、冰洲石、明矾石、沸石、石膏和硬石膏等非金属矿产。现介绍几种矿石。

(1) 斑岩铜(钼)矿石。斑岩铜(钼)矿床也称细脉浸染型铜(钼)矿床。矿化与花岗闪长斑岩、二长斑岩、石英二长斑岩等中酸性斑岩类有成因联系,矿体常产于斑岩体顶部的突起部位和附近围岩中。有用矿物是黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿及少量原生辉铜矿,其他金属矿物主要是黄铁矿及次生的辉铜矿、铜蓝、孔雀石和蓝铜矿,并有少量镜铁矿、褐铁矿和磁铁矿。非金属矿物有石英、绢云母、白云母、绿泥石、绿帘石、方解石、角闪石、方柱石、钾长石、黑云母、硬石膏和高岭石等。矿石构造以细脉状、网脉状和稀疏浸染状为特征。矿石品位较低,但规模通常很大。中国斑岩铜矿铜品位为 0.5% 左右,常伴生 Mo、Au 和 Ag 等有益组分,斑岩钼矿品位为 0.49% 左右,常伴生有 Cu、Au、Re 和 Ga 等有益组分。这类矿石是钢钴的主要来源,其中铜占世界总储量的 1/2,而钼占世界总储量的 2/3。

(2) 玢岩铁矿石。矿床与辉长闪长岩和辉石闪长玢岩等浅成 – 超浅成侵入岩有成因联系。铁矿石产在岩体的顶部、边缘及其与安山岩等岩石的接触带上,少量矿石产在安山岩及其围岩中。矿石中铁矿物以磁铁矿和假象赤铁矿为主,次为镜铁矿、针铁矿、含钒磁铁矿、穆磁铁矿和赤铁矿。其他金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、白铁矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿和辉铜矿等。非金属矿物有石英、铁白云石、方解石,以及少量的透辉石、钙铁榴石、硬石膏、水云母、磷灰石和高岭石等。常见矿石结构构造有粒状结构、海绵陨铁结构和交代结构,以及块状、斑杂状、角砾状、浸染状和细脉浸染状构造。矿石含铁一般为 30% ~ 40%,最高可达 65%。其中 S 和 P 的含量较高,Ca 和 Mg 含量也较高。综合利用组分有 V、Ga、S、P 和 Ti 等。

(3) 含铜黄铁矿矿石。成矿作用与基性 – 酸性的各种火山岩有关,矿石主要产于中酸性 k 山岩中的凝灰岩内。主要原生金属矿物为黄铁矿和黄铜矿,并有少量的闪锌矿、方铅矿和磁铁矿等。次生硫化物有烟灰状辉铜矿、铜

蓝和斑铜矿等。非金属矿物有石英、绿泥石、绢云母、方解石和白云石等。矿石常具粒状结构、压碎结构、交代结构及块状、浸染状、网脉状、角砾状等构造。矿石含  $\text{CuO}$  0.8% ~ 2% ,富矿可达 10% ;含 S50% 左右。可供综合利用的组分有 Zn、Pb、An、Ag 和 Se 等。该类矿石的铜储量居世界铜总储量的第 3 位 ,其中的黄铁矿则是提取硫的重要原料。

(4)金银矿石。矿化与地质时代较晚的火山活动有成因联系 ,矿石主要产于第三纪的安山岩、流纹岩、英安岩、粗面岩等喷出岩及凝灰岩中。有用矿物种类较多 ,包括自然金、碲金矿、碲金银矿、碲银矿、硒银矿、辉银矿、深红银矿和自然银等。其他金属矿物有铜、铅、锌的硫化物及黑钨矿、辉钼矿、白钨矿和辰砂等。脉石矿物有石英、萤石、菱铁矿、方解石、重晶石、泡沸石和冰长石等。矿石以浸染状构造为主、次为胶状构造。矿石品位很高 ,金为 10 ~ 500g/t ,平均 75 ~ 130g/t ,银品位为 1800g/t。这类矿床规模巨大 ,是金银的重要来源。

(5)铅锌多金属矿石(黑矿)。成矿作用与酸性熔岩的火山期后喷气和热液活动有关 ,矿石产于绿色凝灰岩区。矿石的矿物成分较复杂 ,金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、银金矿、自然银和赤铁矿等 ,非金属矿物有石英、石膏、硬石膏、重晶石、绢云母、绿泥石、沸石等。矿石特点是富铅锌 ,铜较少 ,银比金重要。矿石构造以块状、浸染状、纹层状和角砾状为主。该类矿床属于海相火山热液矿床。



## 第四章 变质成矿矿石分析

### 第一节 变质成矿概述

#### 一、概述

##### (一)变质作用、变质成矿作用和变质矿床分类

##### 1. 变质作用的概念

当由内力地质作用形成了岩浆岩或内生矿产、由外力地质作用形成了沉积岩或外生矿产之后,这些地质体并不是一成不变的,它们还会继续受到破坏和改造,有时还会受到高温、高压以及热水溶液的影响,使岩石和矿石原来的性质发生改变。原来已存在的各种岩石或矿石由于受到后来的高温、高压及热水溶液的影响,它们的矿物成分、化学成分、物理性质以及结构构造等发生了变化,而且这些变化基本是在固态下进行的,引起这种变化的作用称为变质作用。

变质作用本质上属内生作用的范畴。与岩浆作用所不同的是其作用基本上是在固态下进行的,但随着变质作用增强,原来矿物或岩石中所含的结晶水、粒间水和层间水受温度和压力的影响形成变质的气水溶液,以及在深变质作用条件下,由于岩石的部分熔融还可形成一些硅酸盐流相体,从而发生广泛的交代作用及混合岩化作用,在这过程中也可使一部分有用元素发生迁移和富集形成矿床。

变质作用使原岩矿物或原矿矿物发生变化,是由下列方式和过程引起

的：

(1)脱水作用。原来的岩石或矿石中经常含有多量的水分,当变质时,由于温度和压力的影响,就会使它们变成少含水或不含水的矿物,如褐铁矿和铁的氢氧化物变为赤铁矿或磁铁矿。

(2)重结晶作用。在高温高压作用下,原来隐晶质矿物便会逐渐结晶,如蛋白石和石髓变为石英。

(3)还原作用。原来高价离子,在高温缺氧条件下就会还原为低价的离子,致使矿物发生变化。如赤铁矿变为磁铁矿。

(4)重组合作用。原先沉积的物质,在变质过程中,可产生一系列新矿物。如黏土物质,在高温中压条件下可形成红柱石;在高压中温条件下形成蓝晶石;在高温高压条件下形成硅线石和刚玉。

(5)交代作用。在区域变质过程中,往往可产生变质热液,尤其当变质作用强烈时,由于混合岩化作用,可以产生混合岩化热液,它们与原岩常产生广泛的交代作用,促使原岩中的多种组分进行重新组合,并通过溶液进行迁移和富集,从而发生矿化和蚀变。

如果把变质作用与它形成的地质背景及变质程度联系起来,那么变质作用可划分为:接触变质作用、区域变质作用、混合岩化作用和动力变质作用。

## 2. 变质成矿作用的类型

使原岩或原矿床受改造而发生转化成为矿床或被改造的矿床,或使有用组分进一步富集成矿的变质作用称为变质成矿作用。

如果将变质矿床与被变质作用改造前的原岩或原矿相对照,那么变质成矿作用可分为三种情况:

(1)可使工业意义相对较小的岩石或矿床转变成工业意义较大的矿床。如当泥质页岩受到接触变质时,可形成红柱岩矿物而成为红柱石角岩;受区域变质时可形成红柱石、蓝晶石和矽线石矿物而成为红柱石片岩、蓝晶石片岩和矽线石片岩。当它们达到工业要求时则可作为耐火材料的原料。又如石灰岩经过变质作用后可转变成大理岩,它可直接加工成为建筑石材或化工产品的填料。

(2)可使原矿床变为另一种有工业意义的矿床。如原有的煤层经接触变

质后可转变成石墨,原来的层状铝土矿受到变质作用可以转为成刚玉矿床。

(3)原矿床在不同程度的变质作用下,可促使其品位增高,矿石质量得到提高。如原来沉积生成的赤铁矿—蛋白石可变成磁铁矿—赤铁矿—石英,在变质热液的作用下,可使一些有害成分如P、S等被带走,可使成矿物质进一步富集,品位得到提高,变质作用还使矿石矿物磁铁矿进一步结晶长大,因此易于加工和分选。

不同地质背景的变质作用,对矿产的形成会造成很大影响。一般来说,接触变质作用、区域变质作用及混合岩化作用,都有可能形成矿床。因此,如果按变质作用的成因类型、变质程度的深浅来考虑,可将变质成矿作用划分为:接触变质成矿作用,区域变质成矿作用和混合岩化成矿作用。

### 3. 变质矿床分类

经变质成矿作用形成的矿床称做变质矿床。对变质矿床的分类目前还没有一个公认的方案,绝大多数地质工作者比较公认的有两种方案:

(1)根据变质成矿作用前后矿石的工业意义和工艺加工特性分为:

①受变质矿床。它是由于变质作用使原有矿石或岩石受到某种程度变化,但未改变其有用矿物的物理化学性质和工艺特性的矿床,如受变质的铁、磷等矿床。

②变质矿床。强烈的改变了原来的矿石或岩石的组分,使其物理化学性质和工艺特性发生了根本的改变,产生了新的有用矿物的堆积体,如石墨、蓝晶石和石棉等矿床。

(2)根据变质成矿作用的类型把变质矿床划分为三种成因类型:

①接触变质矿床。由接触变质成矿作用对原岩或原矿改造后所形成的矿床。

②区域变质矿床。由区域变质成矿作用对原岩或原矿改造后所形成的矿床。

③混合岩化矿床。经过混合岩化热液交代作用后形成的矿床。

为叙述方便,本书按第二种划分方案介绍。

### (二)变质矿床的基本特点

变质矿床的基本特点有以下几方面:

(1) 矿物特点。作为在特定变质环境下形成的变质矿石,首先在矿物组成上它保留了岩浆岩和沉积岩的一些共性矿物,如正长石、微斜长石、斜长石、石英、黑云母、普通辉石、紫苏辉石及普通角闪石、方解石、白云石等及副矿物磁铁矿、榍石、磷灰石。其次它还在变质过程中产生了一些新矿物,如红柱石、矽线石、蓝晶石、石榴子石、硅灰石、阳起石、透辉石、蛇纹石、滑石、绿泥石等。

变质矿石中的有用矿物主要有以下几类:自然元素类有石墨、自然金;氧化物类有磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿、金红石、刚玉、褐锰矿、黑锰矿等;含氧盐类有磷灰石、菱铁矿、菱镁矿等;

硅酸盐类有红柱石、矽线石、蓝晶石、硅灰石、石榴石、滑石、石棉(纤维蛇纹石)、叶蜡石、蛭石和蔷薇辉石等。

(2) 矿石构造与结构。矿石一般呈片状、片麻状、眼球状、条带状、块状、浸染状、皱纹状及角砾状等构造。矿物很少有隐晶质,主要是显晶质。矿石结构有斑状变晶结构和针状、鳞片状、粒状变晶结构,也有非变晶的粒状结构、压碎结构和交代结构。

(3) 矿体的形状和产状。由地质体原始形状、产状和变质作用深度两个方面来决定。变质作用前的岩石和矿石是多种原因的,如果变质作用较轻,则变质矿床多继承了原来的形状和产状。在变质作用很强的情况下,则原来的产状遭到不同的破坏,尤其是那些由变质作用而产生的新矿床则受变质作用性质所控制,如接触变质形成的石墨矿床,即分布在侵入体接触带。变质矿床的形状主要有凸镜状、似层状、串珠状、囊状等,而脉状则少见。矿体的产状变化较大,不同矿床有不同程度的褶曲和断裂,倾角变化也大。

矿床规模大小不一,变化较大,矿体长度由几十米、几百米到几千米,个别可达几十千米。

### (三) 变质矿床的工业意义

变质矿床通常分布于变质岩区,据统计变质岩在地壳上的分布,在大陆的硅铝层中占50%以上,组成所有大陆的基底。在整个地壳发展的历史之中,不但在寒武纪以前所形成的岩石大多已成为变质岩,就是在寒武纪以后的地槽活动区,往往也是由变质岩系所组成。由此可见,变质岩不仅分布广,

而且时间延续也很长。由于自然界中,成矿作用和成岩作用有着不可分割的联系,因此变质矿床不仅矿产种类多,而且分布广,其中有的矿产储量大、品位高,在国民经济中,占有很重要的地位。

前寒武纪的变质矿床,在全球各大陆均有分布,其铁储量占世界铁矿总储量的  $2/3$  以上,我国前震旦纪的变质铁矿储量约占我国铁矿总储量的  $50\%$  左右,近年来还在这些矿区中发现了成因上与变质作用有关的富矿体,品位可达  $60\% \sim 70\%$ ,是富铁矿石的重要来源。

南非(阿扎尼亚)的维特瓦特兰德含金铀砾岩矿床,是世界上最大的金铀矿区。据统计,它的金产量占资本主义国家的  $75\%$ ,铀储量占世界储量的  $45\%$ 。类似的矿床在加拿大、加纳和巴西等国均有发现。

菱镁矿、石墨、大理岩、硅灰石、石英等矿产主要产于变质矿床中,我国辽宁大石桥的菱镁矿不仅质量好,而且规模居世界首位。

变质矿床中的锰、铜、铅、锌、钴、稀有、分散元素和放射性金属以及硼、磷、滑石、石棉、金云母、刚玉、石榴石、蓝晶石、红柱石、硅线石等都有一定的工业价值。

## 第二节 接触变质成矿作用及其矿石

### 1. 接触变质成矿作用

在岩浆岩岩体周围,由于温度的升高,而使围岩发生重组和重结晶作用,称为接触变质作用。由于接触变质作用而形成的矿床称为接触变质矿床。接触变质矿床系围岩在岩浆侵入的热力影响下,成矿物质重结晶或重组而形成的矿床。这类矿床因赋存在岩浆岩的侵入接触带附近而称为接触变质矿床。

这类矿床的形成主要是由岩浆侵入的热力作用的结果,因而也称为热力变质矿床。例如,煤受热力变质为石墨,石灰岩受热力变质重结晶为大理岩;高铝页岩受热力变质重组为红柱石等高铝矿物。

由于接触变质矿床主要是由侵入的岩浆热力作用影响下的重组合和重结晶作用形成,因此,在变质成矿过程中几乎没有或者很少有外来物质的加入和原有物质的带出。所以,接触变质作用不包括接触交代作用在内。但是由于接触变质矿床一般都是与富含挥发组分的酸性或中酸性侵入岩有关,因而不可避免地带来了大量高温气化热液。并且在接触变质过程中,围岩中含有少量水分因受热而形成高温气化热液。这些气化热液主要对热能起传导作用。

接触变质矿床一般环绕侵入体呈带状分布,距离侵入体几十到几百米,随距离侵入体的远近使热力作用的影响不同。离侵入体愈远则接受热量愈少,因而热力变质作用也愈弱。因此在围岩中围绕侵入体产生所谓接触变质晕,一般表现为三带,即距侵入体由近而远为:显著重结晶带;过渡带;原岩带。这三带变质程度不同,因而有不同矿物组分或结构和构造上的特征。如广西珊瑚锡矿区和湖北大冶铁矿区,靠近侵入体附近为结晶粗大的大理岩,稍远则为结晶细小的大理岩,更远则为未变质的石灰岩。

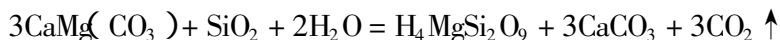
## 2. 主要矿石

接触变质成矿作用所形成的矿产主要是非金属矿,如大理岩、石墨、硅灰石、石棉、红柱石、矽线石等高铝矿物等。在很少的情况下也有铁质沉积岩受接触变质作用而形成磁铁矿矿床。

**接触变质型石墨矿石** 产于二叠系海陆交互相的含煤砂、页岩层与燕山期花岗岩的接触带位置。在接触带中煤层的接触变质晕明显,离花岗岩体由远而近,原煤层的变化为:无烟煤—石墨化无烟煤—石墨矿。石墨矿物的结构变化特点是:距花岗岩小于 500m 以内的石墨是鳞片状晶质石墨,越近岩体鳞片越大,距 500 ~ 800m 范围内为细鳞片状到隐晶质石墨,800 ~ 1200m 范围全为隐晶质石墨,大于 1200m 为石墨化无烟煤。矿床规模为大型,湖南鲁塘乐平煤系中的石墨矿床属此类型。

**石棉矿石** 产于富硅的白云岩或白云质灰岩中,矿床附近常见有较晚期的酸性侵入岩,或者出现有基性岩床、岩脉,接触带附近围岩有广泛蛇纹石化、沿岩层层面或构造裂隙更为明显,并蚀变为蛇纹岩。于蛇纹岩中发育有各种类型的石棉矿,构成石棉脉带。矿石中主要是石棉(纤蛇纹石)、蛇纹石,

常见有方解石,有时还残留有透辉石、镁橄榄石。纤蛇纹石呈横纤维(纤维与脉壁垂直),纤维长度一般几毫米,几厘米者亦可出现。矿石中石棉洁白或淡金黄色,含铁量低、质量较好,但含棉量一般较低,矿床规模不大。矿石的形成和岩浆热液有关,一般认为石棉纤维的形成温度低于  $500^{\circ}\text{C}$ ,石棉矿化的控制因素为(1)含硅的白云岩,提供矿床所需的镁和硅(2)侵入岩(酸性或基性)的活动,提供热源与热水溶液,促使岩石中和硅之间发生化学反应:



含硅白云岩

纤蛇纹石(石棉)

形成石棉。河北省涞源石棉矿床属于此类型。另一种较常见的石棉矿是超基性岩中的纤蛇纹石石棉矿床,这类矿床以四川省石棉县的石棉矿床为典型代表。

### 第三节 区域变质成矿作用及其矿石

#### 一、区域变质成矿作用

在广大地区内,由于区域性构造运动的影响,在热力、动力、变质气化热液的作用下,使原岩或原矿床(石)发生重结晶、变形、交代等改造作用,称为区域变质作用。由于区域变质作用而产生成矿物质的迁移富集,由此形成的矿床称为区域变质矿床。

区域变质矿床主要是受热力和动力的影响而形成的有用矿物堆积体,因而亦称为热力-动力变质矿床。这类矿床受区域性构造运动的影响,分布范围广大,因而称之为区域变质矿床。

在区域变质成矿作用过程中,原岩(原矿)在温度、压力及  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  等挥发组分的作用下,通常表现为下列变化:原来沉积铁矿中的氢氧化铁经脱水和重结晶作用变为磁铁矿或赤铁矿;矿石中蛋白石结晶为石英;使原来致密隐晶质的铁质碧玉变为条带状磁铁(或赤铁)石英岩。矿物粒度增大,特别是

磁铁矿的出现,很有利于工业加工利用,有时,原矿受变质之后,铁矿石中的磷和硫等有害杂质也会降低,进一步提高了矿石质量。

沉积锰矿在区域变质过程中,锰的氢氧化物如硬锰矿、水锰矿等经脱水和重结晶变为褐锰矿( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ )和黑锰矿( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ )等,提高了矿石工业价值。但当变质作用很强烈时,锰的氧化物或碳酸盐则与 $\text{SiO}_2$ 等组合成为蔷薇辉石( $\text{MnSiO}_3$ )、锰铝石榴石及红帘石等富锰的硅酸盐和铝硅酸盐,使矿石改变了原有的经济价值,可以作为宝石来开采。

含铜、铅、锌等的层状硫化物矿床,经过区域变质作用后,也可以产生很大的变化。例如,原先的金属硫化物经过变质后彼此可以重组合,并可形成广泛的类质同象和固溶体的分解结构,重结晶的现象也很显著,使矿物颗粒变得粗大,胶体构造完全消失,脆性矿物发生破碎,变质过程中在变质气化热液的作用下,可使一部分矿物溶解并重新沉淀,形成一些穿切矿层和围岩的矿脉;变质作用还可使一部分矿物还原,如黄铁矿转变为磁黄铁矿,在高温影响下闪锌矿可变为结晶的红锌矿等。

变质含金铀砾岩矿床有重大工业意义,它产于前寒武系的变质砾岩层内,金呈细小颗粒散布于胶结物中,部分金产于黄铁矿细脉中。原岩是一套河流及三角洲相的沉积物,在厚度最大、分选最好的砾岩层底部,金的品位最高。随远离盆地边缘,矿石品位下降,最后变为不含矿的砾岩及石英岩,说明古地理对当时砂金矿的富集起主要控制作用。但是变质过程中的改造也是明显的,变质热液对金起到迁移富集作用。如金的鳞片状晶体。

沉积磷矿床,特别是品位较低的磷酸盐-碳酸盐矿床,经过区域变质作用重结晶,可使非晶质磷酸盐变为磷灰石晶体,使很难分选的白云石-磷块岩变为易于选矿的磷灰石-透辉石-石英-碳酸盐组合的岩石,从而提高了它们的工业价值。

原来的一些岩石,或者某种矿石,经受变质作用后使之形成了矿石或者成为具有另一种工艺技术特性的矿石。如石墨、金刚石、石棉、刚玉、矽线石、蓝晶石和石榴石等。广义地说,板岩、大理岩等也属这类矿床。

## 二、主要矿石

区域变质成矿作用绝大部分是在沉积岩或沉积矿床的基础上进行的。



因而区域变质矿床分布广,矿种多、规模大,在国民经济中具有较大的意义。主要的矿产有铁、锰、铜、金、铀、磷、菱镁矿、石墨、滑石、石棉、大理岩和石英岩等。现将最重要的几种金属及非金属矿石类型介绍于后:

**区域变质型铁矿石** 产于前震旦系片岩、片麻岩、石英岩、大理岩、千枚岩等变质岩系中。矿石的主要矿物是磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿及石英、角闪石等。次要矿物有针铁矿、褐铁矿、菱铁矿、绿泥石、绢云母和辉石等。矿石以条带状、皱纹状构造为主,部分为块状构造。矿石呈粒状变晶结构。多为贫铁矿石,平均含  $\text{Fe}25\% \sim 40\%$ ,一般为  $30\% \sim 35\%$ ,富矿石含  $\text{Fe}50\% \sim 70\%$ ,含  $\text{SiO}_2$  在  $40\% \sim 50\%$ ,富矿石含  $\text{SiO}_2$  小于  $10\%$ ,S、P 的含量一般很低,为万分之几。这类铁矿床在世界上分布很广泛,为世界上最重要的铁矿类型。辽宁鞍山铁矿及海南石碌铁矿均属此类型。

**区域变质型含铜铁矿石** 产于钠质熔岩、层凝灰岩、凝灰角砾岩等变质火山岩系中。矿石中主要金属矿物为磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿和黄铜矿。次要矿物为钛铁矿、斑铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿。非金属矿物主要有钠长石、白云石、黑云母、绿泥石和石英等,次要的有石榴石、角闪石、磷灰石和电气石等。矿石呈条带状、条纹状、皱纹状、浸染状和块状构造。矿石结构为粒状结构、粒状变晶结构、固溶体分解结构等。粒度大小不等,磁铁矿一般  $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ ,大者达  $5\text{mm}$ ,赤铁矿一般  $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ ,菱铁矿粒度为  $0.3 \sim 0.7\text{mm}$ ,黄铜矿的粒度在  $0.03\text{mm}$  左右,贫矿石含  $\text{Fe}28\%$  左右,富矿石含  $\text{Fe}50\% \sim 60\%$ ,含  $\text{Cu}0.02\% \sim 0.2\%$ 。伴生组分有钛和钒,含  $\text{TiO}_2$  高可达  $1.4\%$ ,含  $\text{V}_2\text{O}_5$  高可达  $0.63\%$ ,可以综合利用。由于含  $\text{SiO}_2$  为  $6\% \sim 35\%$ ,故铁矿石为高硅低磷的酸性矿石,以富矿石为主。矿床规模为大型,有一定工业意义。

**区域变质型含金铀砾岩矿石** 产于前寒武系变质岩系古老底砾层中。砾层中砾石以石英岩卵石为主,形态为椭圆形板状,大小不一,平均直径  $3.5\text{mm}$  左右。胶结物为细粒,其中石英占  $70\% \sim 80\%$ ,已硅化成灰色玻璃状石英岩,其余为绢云母、绿泥石、金红石、电气石、锆英石、方解石等。硫化物呈浸染状分布于充填物及胶结物中,以黄铁矿为主。其次还有镍黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿和毒砂等。自然金呈微粒状,直径大多在  $0.01 \sim 0.06\text{mm}$  之间,呈浸染状分布于胶结物中,常被磁黄铁矿或石英包裹,金含

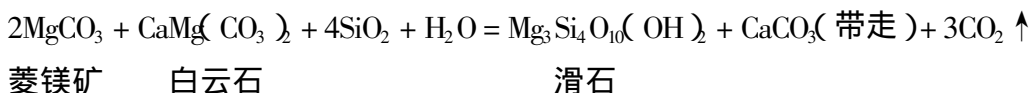
量可达  $10 \sim 17\text{g/t}$ 。铀主要呈晶质铀矿、沥青铀矿、碳铀钍矿等,其次有含铀独居石和锆英石。矿石中平均含  $\text{U}_3\text{O}_8$   $0.03\%$ 。还含  $\text{Ag}$   $5 \sim 10\text{g/t}$  不等,可以综合利用。本类矿石金产量占世界资本主义国家金总产量的  $75\%$ ,铀储量占世界铀储量的  $45\%$ ,工业意义巨大。

**区域变质型石墨矿石** 产于前寒武系大理岩、斜长片麻岩和石墨片麻岩中。矿石中主要矿物是石墨、黑云母、透闪石、石英和斜长石,其次有白云母、微斜长石和少量斜黧帘石、石榴石、磷灰石、榍石等。矿石构造为片麻状构造,石墨鳞片大致均匀分布和定向排列,有的按不同矿物显示平行细条纹,反映原始的微层理。矿石结构是鳞片状变晶结构、粒状变晶结构。在各种石墨矿石中,石墨含量一般在  $5\% \sim 10\%$  左右。矿床规模大,品位较稳定,石墨质量好,易于选矿,是沉积变质成因矿床,这是石墨矿床的最重要类型。山东南墅石墨矿床属于此类型,该矿床经历了区域变质作用,后又经历了混合岩化作用的热液改造。

**区域变质型菱镁矿矿石** 产于前寒武系条带状菱镁矿、白云质千枚岩中。矿石的主要矿物组成是菱镁矿,其次为白云石、铁菱镁矿、滑石、透闪石、直闪石、方柱石、石英、碳质物及少量黄铁矿。矿石构造可分为块状、条带状、放射状,还经常可见到变余层理构造。矿石结构为粒状变晶结构,因受多次变质作用影响,矿石普遍发生重结晶、菱镁矿结晶颗粒大小不等,最大的颗粒直径可达  $150\text{mm}$ ,一般为  $3 \sim 10\text{mm}$ 。矿石有益成分为  $\text{MgO}$ ,有害组分为  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 。其中  $\text{MgO}$  含量为  $35\% \sim 47\%$ , $\text{CaO}$  的含量一般为  $0.2\% \sim 4\%$ , $\text{SiO}_2$  含量在  $0.2\% \sim 8\%$  之间,其化学组分的平均含量分别为: $\text{MgO}$   $47.78\%$ , $\text{CaO}$   $0.76\%$ , $\text{SiO}_2$   $1.47\%$ 。矿床的规模为特大型,该矿床在工业上主要是在耐火材料、建筑制品等方面有广泛利用。辽宁海城一大石桥菱镁矿矿床属于此类型。

**区域变质型滑石矿矿石** 产于早前寒武系白云石大理岩和菱镁矿中。矿石多是极纯的滑石、少量白云石、菱镁矿、透闪石、阳起石,其次有石英、斜绿泥石。矿石构造为块状和片状构造,结构为鳞片状变晶结构、交代结构、交代残余结构。该矿床一般发育在菱镁矿层与白云石大理岩夹层之间,它是由海相沉积形成镁碳酸盐地层受到区域变质作用的同时,还遭受强应力作用,

并伴有含大量  $\text{SiO}_2$  热液的活动,从而使岩石中菱镁矿与白云岩遭受交代形成滑石矿床,滑石矿物的形成可用以下化学反应式来表示:



这类矿床的矿石质量较好,规模较大,是滑石矿床的主要类型。辽宁海城滑石矿床属于此类型。

## 第四节 混合岩化成矿作用及其矿石

### 1. 混合岩化成矿作用

混合岩化作用是在区域变质作用的基础上进一步发展演化的结果,是由深部上升的流体或由岩石部分熔融所产的“混浆”,与不同类型的原岩经过一系列相互作用和混合(二者包括渗透、注入、交代、结晶和重溶),这种转化作用称为混合岩化作用(在这种作用过程中形成的不同组合和形态的岩石,统称为混合岩)。在混合岩化过程中,由于广泛而强烈的交代作用,使一部分成矿物质发生迁移和富集,从而形成混合岩化矿床。

从混合岩化作用的发展过程来看,它们的成矿作用可分为两个主要阶段,即主期交代重结晶阶段和中晚期热液交代阶段:

(1) 主期交代重结晶阶段。主要表现为新生的长英质熔浆对原岩组分进行交代反应,并以碱质交代为主(钾化和钠化),同时挥发组分也起重要作用。

在交代作用中,首先表现为变质岩中已有硅酸盐矿物的重结晶,在含矿建造中可导致有用矿物的粒度加大和局部富集,使其具有工业价值。例如形成云母、刚玉、石榴石、石墨和磷灰石等非金属矿产,还可以形成一些稀有和稀土元素矿床(锆英石、独居石、金红石等)。在有些地区,由于长英质熔浆的伟晶岩作用,可形成含白云母、绿柱石、铌钽铁矿、独居石及磷灰石等伟晶岩型矿床。

在混合岩化早期的进一步交代作用过程中,原岩中矿物大量地分解,通

过各种交代反应形成一系列新矿物。硅酸盐矿物往往形成含 $(\text{OH}^-)$ 较多的硅酸盐,如阳起石和透闪石等。同时由于碱质交代形成大量的碱性长石。随着这一过程的进行,原来长英质的熔浆逐渐演变为热液,其中含有经交代作用以后从原岩中带出的各种组分,它们呈氧化物或络合物存在于热液中,进入了中晚期的热液交代阶段。

(2)中晚期热液交代阶段。在中晚期的交代阶段,混合岩化热液既可引起围岩的蚀变,同时也可能成矿。有些情况下,由于早期的铁镁质硅酸盐被交代,使中晚期热液中含有较大量的 Fe、Mg、Ca 等组分,因而产生 Fe、Mg 质交代作用。条带状磁铁石英岩建造中的富铁矿体,有一部分属于这种成因。此外,可能更主要的铁质来源,是这种热液溶解合矿建造中贫铁矿石的结果。变质的钙镁碳酸盐,在这一阶段的热液交代过程中,白云石可分解为菱镁矿、方镁石和水镁石,或与热液中的  $\text{SiO}_2$  等组分交代反应而形成滑石。富硼的含矿建造,经早期交代作用之后,分散于造岩矿物和电气石中的硼,可与部分铁镁一起溶解进入热液。中晚期交代过程中,如硼大量集中,可以交代镁质大理岩而形成各种硼酸盐(硼镁铁矿、硼镁石等)。此外,在这一阶段中同样还可能形成磷、铀、金、铜、锡和某些稀有稀土等矿床。

## 2. 主要矿石

混合岩化热液交代型铜锌矿石 产于黑云母斜长片麻岩、黑云母变粒岩、角闪质岩石系列中,岩层受到强烈的混合岩化作用,形成混合片麻岩和混合花岗岩。矿石中的矿石矿物有黄铜矿和闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿,有时可见毒砂和辉铜矿。脉石矿物有石英和斜长石。矿石以致密块状构造为主,还有条带状构造、斑杂状构造和角砾状构造,矿石结构有变晶结构和交代结构,矿石中的围岩蚀变类型有硅化、透闪石化、金云母化、堇青石化和绿泥石化。矿石中铜品位为 1% ~ 2%,高者可达 10%,锌品位为 1.5% ~ 2.5%。有用组分除 Cu、Zn 外,还有 Au、Ag、Cd、Se、Co、In 和 Ga 等。辽宁红透山铜锌矿床属于此类型。

混合岩化热液交代型硼矿石 产于前震旦系的电气石变粒岩、含钠变粒岩及其他变粒岩等以富硼为特征的变质岩系中。按矿石中主要矿物成分不同划分为三种类型:

(1) 硼镁石矿石。矿石矿物以纤维硼镁石为主或以纤维硼镁石和透硼镁石为主,两者都含有少量硼镁铁矿、磁铁矿。脉石矿物主要有镁橄榄石、硅镁石、金云母、蛇纹石,其次有透闪石、菱镁矿、白云石、滑石以及少量的硫化物。矿石为片状、条带状、脉状和角砾状构造。此类矿石品位较高,质量较好,矿床规模较大,是镁矿产的重要类型。

(2) 硼镁铁矿或硼镁铁矿-稀土元素矿石。矿石矿物以硼镁铁矿为主,次之磁铁矿、纤维硼镁石、透硼镁石,脉石矿物与硼镁石矿石相似。有的矿石还含有独居石、铈硼硅石等稀土元素矿物。此类矿石可综合利用铁、硼和稀土元素。

(3) 硼镁石-硼镁铁矿矿石和硼镁铁矿矿石的特点相似。矿石中硼镁石的含量较硼镁铁矿为高,以提取硼镁矿为主。

变质硼矿石的矿床规模自大型到小型都有。上述第一种第三种两个类型在工业上能开采、利用,有较大的工业意义,第二种类型因选矿冶炼技术未得到完全解决,目前暂时不能开采利用。此类矿床在我国东北有分布。

## 第五章 岩浆成矿矿石分析

岩浆是自然形成于地下深处的一种黏度较大的熔融体,其成分以硅酸盐为主,并含有重金属和挥发组分等物质。极少数的岩浆为碳酸盐熔融体。

地下深处的岩浆在动力作用下,在向地壳上部运移和定位的过程中,发生各种分异现象,而使某些组分富集成矿的作用,称为岩浆成矿作用。按照岩浆分异的性质和作用的特点,可将岩浆成矿作用分为结晶分异作用、熔离作用及爆发作用三种基本类型。

### 第一节 结晶分异作用及其矿石

#### 1. 结晶分异作用

岩浆在冷凝过程中,不同的组分会按照一定的顺序先后结晶出来。结晶顺序一般是按照矿物的晶格能、键性和生成热降低的方向进行的。结晶分异作用就是指矿物按顺序进行结晶,并在重力和动力影响下发生分异和聚集的过程。

结晶分异作用成矿有两种情况。一种是有用矿物较早地从熔浆中结晶出来。与此同时结晶或稍晚结晶的矿物是橄榄石、辉石、基性斜长石等硅酸盐矿物。这些已结晶的矿物在重力作用以及岩浆内部对流作用的影响下,密度大的往下沉,密度小的往上浮。从而,在岩浆下部或底部形成有用矿物和暗色硅酸盐矿物的富集带。如有用矿物的含量达到了工业要求,即成为矿石

(图 2-5-1)。岩浆发生结晶分异时,分异程度除了取决于矿物的密度外,还与晶出矿物的颗粒大小有关。尤其是各种矿物的密度差异不大时,颗粒大小就起决定性作用,通常大颗粒比小颗粒易沉降。此外,岩浆结晶过程中,若地壳构造活动强烈,侵入体规模较小,岩浆冷凝较快,则先结晶的有用矿物在岩浆流动过程中,形成不规则的条带状分离体,停积在岩浆流速减缓和流动受阻的地段富集成矿。这种岩浆在流动过程中产生矿物成分的分异和聚集的作用,称为流动分异作用。

上述岩浆结晶分异作用强调了有用矿物先结晶这一特点,形成的矿床称为早期岩浆矿床。这类矿床的矿体与母岩没有明显的界线。常呈逐渐过渡关系。矿石的矿物组分与母岩基本一致,仅是不同的矿物在含量上有区别。矿石常具自形晶一半自形晶结构,或有用矿物被硅酸盐矿物包围,形成包含结构。矿石构造常为浸染状。矿体形态多呈瘤状、巢状、透镜状或似层状。因有用矿物受重力或动力作用影响,故易在岩体的底部或边部成矿,而岩体顶部不易成矿。

结晶分异作用的第二种情况是有用矿物较晚地从岩浆中结晶出来。当岩浆中含有较多的挥发组分时,成矿元素可与挥发组分结合成易溶的化合物,大大降低了自身的结晶温度,这样便可一直残留在岩浆熔体中,直到主要硅酸盐矿物结晶后才晶出,通常充填在早期结晶的硅酸盐矿物颗粒之间。有时,富含成矿物质的残留熔浆或矿浆在外力作用下,或受由残余挥发分造成的内应力的影响,它们可贯入到已冷凝的侵入体的裂隙中,甚至离开侵入体;贯入到附近的地层中[图 2-5-1(d)]。形成贯入矿体的地质作用也称压滤作用。

以上的岩浆结晶分异作用强调了有用矿物后结晶的特点,形成的矿床称为晚期岩浆矿床。这类矿床的矿体与围岩间一般界线明显,有时围岩发生蚀变现象,如钠黝帘石化、绿泥石化、黑云母化、金云母化和碳酸盐化等。矿石中金属矿物充填在硅酸盐矿物颗粒之间,或胶结硅酸盐矿物,呈海绵陨铁结构。矿体常呈条带状或似层状(图 2-5-2),贯入矿体则常为脉状或透镜状。矿石构造以稠密浸染状或块状为主。

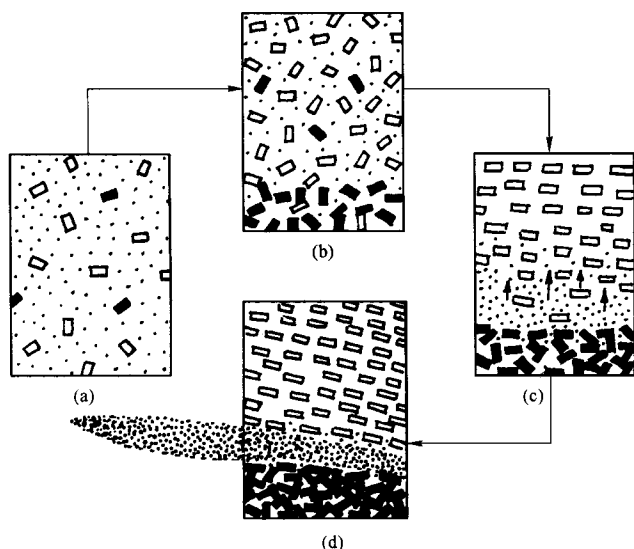


图 2-5-1 结晶分异作用示意图

(a) 岩浆开始结晶 (b) 早结晶的铁镁质矿物和金属矿物(黑色)向下沉, 随后结晶的硅酸盐矿物(白色)位于上部 (c) 不同密度的矿物按重力关系占据各自的位置, 含矿残浆向下集中 (d) 底部形成矿体, 含矿残浆(点状图案)受动力作用形成贯入矿体

## 2. 主要矿石及矿床实例

由岩浆结晶分异作用形成的矿石主要有超基性岩中的铬铁矿矿石和铂族金属矿石、以及基性岩中的钒钛磁铁矿矿石。此外, 岩浆岩常被用作建筑石料或装饰石材。

(1) 铬铁矿矿石。铬铁矿矿石中, 只有铬铁矿一种有用矿物, 其理论分子式为  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ 。其实, 铬铁矿中的  $\text{Cr}^{3+}$  常被  $\text{Al}^{3+}$  置换, 偶尔也被  $\text{Fe}^{3+}$  置换, 部分  $\text{Fe}^{2+}$  会被  $\text{Mg}^{2+}$  置换。所以, 铬铁矿的分子式和分子量常不固定, 一般有下列变种:

铬镁铁矿  $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ , 含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  为 50% ~ 65%

硬铬尖晶石  $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$  含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  35% ~ 55%

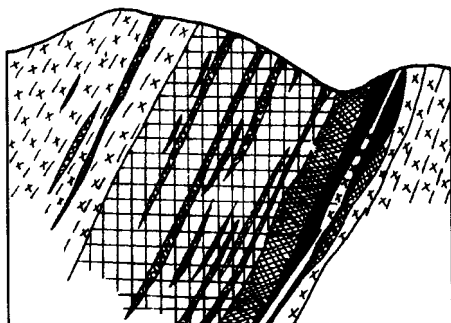


图 2-5-2 攀枝花似层状钒钛磁铁矿矿体



铝铬铁矿  $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Cr}_2\text{O}_4$  含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  35% ~ 50%

铬铁矿  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  47% ~ 60%

世界上铬铁矿资源的分布极不平均,主要集中在阿扎尼亚和津巴布韦,两国铬铁矿矿石储量占世界总储量的 90% 左右。

阿扎尼亚的布什维尔德铬铁矿矿床是世界上最著名的早期岩浆矿床。铬铁矿主要赋存在苏长岩、古铜辉石岩以及斜长岩中。矿体呈层状和似层状,储量巨大,达 20 亿 t 左右。矿石品位较稳定,一般为 42% ~ 45%。矿石中还含有  $\text{TiO}_2$ 、Pt、Ni 及磁铁矿等。

津巴布韦的罗德西亚铬铁矿矿石储量达 6 亿 t。矿石主要产在斜方辉橄岩中,呈致密块状, $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量高达 50% 以上。矿石特征与布什维尔德铬矿石十分相似。

中国西藏罗布莎铬铁矿矿床属于晚期岩浆矿床。矿石中金属矿物以铬尖晶石为主,并有少量磁铁矿,微量的针镍矿和斑铜矿。脉石矿物以橄榄石和蛇纹石为主,其次是辉石、铬石榴石、铬绿泥石和云母等。矿石中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量为 47.68% ~ 59.51%,并伴生有钨、钼等铂族元素。

(2) 铂族元素矿石。铂俗称白金,铂族元素指钌、铑、钨、铼、钯和铂六种元素。主要矿石是以铂为主的铂金矿,以及少量的钨铼矿。也有极少量铂族元素的硫、硒、碲、砷、锑和铋等化合物,常赋存于铜矿和镍矿等矿石中。铂族元素矿石中的有用矿物粒度极细,品位通常也较低,呈微细粒稀疏浸染状构造。

云南弥渡金宝山铂钯矿床是中国最大的独立铂族元素矿。矿体产在黑云角闪单辉橄榄岩中,矿石成分复杂,发现有自然元素及金属互化物、砷化物、硒化物、硫化物。锑化物、硫化物、氧化物、硅酸盐、碳酸盐、磷酸盐等类型的 50 多种矿物。六种铂族元素均出现于矿石中,分别赋存在近 20 种矿物中。Pt 平均含量为 0.27 ~ 0.41g/t,主要以砷化物和与锡的金属互化物形式出现,次为铂的硫化物和砷化物,自然铂较少见。Pd 的含量高于 Pt,平均为 0.36 ~ 0.73g/t,主要以锡化物、碲化物及与锡的金属互化物形式存在。Os、Ir、Ru 和 Rh 的含量很低,累计平均含量不到 0.1g/t,但氧化矿石中 Ir 的含量可达 3g/t 以上。这四种铂族元素主要以硫化物和硫砷化物的形式赋存于矿

石中。铂族矿物粒度微细,90%的颗粒小于 $4\mu\text{m}$ 。这些微细粒的铂族矿物主要嵌布在金属硫化物(黄铜矿、紫硫镍铁矿等)、氧化物(磁铁矿为主)和脉石矿物(蛇纹石为主)中。

(3)钒钛磁铁矿矿石。钒钛磁铁矿一般为晚期岩浆矿床。矿石中主要有用矿物是磁铁矿,其次是钛铁矿。磁铁矿和钛铁矿两者呈格架状、叶片状紧密连生,钛铁矿是由与磁铁矿呈固溶体结构的钛铁晶石经氧化而成的。钒一般没有独立矿物,以类质同象混入物的形式分布于磁铁矿中。

四川攀枝花钒钛磁铁矿是这类矿床的典型实例。矿石产于辉长岩中,以浸染状、条带状、块状和斑杂状构造为主。钛铁晶石和氧化成的钛铁矿呈叶片状分布在磁铁矿中,组成格状结构。部分矿石具海绵陨铁结构。矿石中主要金属氧化物为磁铁矿、钛铁矿、钛铁晶石和镁铝尖晶石,次为赤铁矿、钙钛矿和锐钛矿等。硫化物有磁黄铁矿、镍黄铁矿、硫钴矿和辉钴矿等。

## 第二节 熔离作用及其矿石

### 1. 熔离作用

熔离作用是指在较高温度下呈均匀状态的熔融体,当温度和压力下降时分离成两种或多种不混溶的熔融体的作用。

岩浆经过熔离后,因硫化物熔浆的结晶温度比硅酸盐矿物的结晶温度低,故硫化物晚于硅酸盐结晶,呈填充状态胶结先结晶的硅酸盐矿物,形成典型的海绵陨铁结构(图2-5-3)。晚形成的金属硫化物还可交代早形成的橄榄石和辉石等硅酸盐矿物。硫化物中普遍存在各种固溶体分离结构,如乳浊状、叶片状和格状结构等。当出现紫硫镍铁矿等低温矿物时,显示熔浆的结晶温度很低,有时甚至可延续到热液作用阶段。

影响硫化物熔浆在岩浆中熔离的主要因素是岩浆中硫和亲硫元素的浓度以及岩浆的总成分,尤其是其中铁、镁和硅的含量。一般是岩浆中硫和亲硫元素的浓度越高,越有利于熔离作用的发生。硅酸盐熔浆中铁的存在能使

硫化物的溶解度大为提高。所以,当正在结晶的岩浆同化围岩中的少量铁时,增加了铁的绝对含量,从而增加了硫化物的溶解度,此时只能析出少量硫化物熔浆,不能形成大规模的矿石。如果铁与正在结晶的橄榄石结合,就可减少熔浆中铁的含量,硫化物熔浆即可大量分离,形成具有工业意义的矿石。可见,岩浆同化围岩破坏了化学平衡,这也是促使硅酸盐熔浆和硫化物熔浆发生熔离的原因之一。

据研究,在一定的条件下,氧化物与硅酸盐熔浆也具有不混溶性,尤其是有挥发组分存在时,更有利于熔离作用的发生。一些含磷灰石的磁铁矿矿石以及瘤状铬铁矿矿石可能就是由熔离作用形成的。

## 2. 主要矿石及矿床实例

由熔离作用形成的最有工业价值的矿石是铜镍硫化物矿石,其中常含有铂族元素。在成因上,这类矿石常与基性岩(辉长岩、苏长岩和橄榄辉长岩)和超基性岩(橄榄辉石岩和辉石橄榄岩)有联系。矿石中主要金属矿物是磁黄铁矿、黄铜矿和镍黄铁矿,并有砷铂矿、把铂矿和铂的硫化物等。

甘肃金川铜镍硫化物矿床是岩浆熔离作用成矿的实例。成矿母岩为纯橄榄岩—二辉橄榄岩—斜长橄榄岩型岩石。矿石中金属硫化物以磁黄铁矿、黄铁矿、镍黄铁矿、紫硫镍铁矿和黄铜矿为主,次为方黄铜矿、四方硫铁矿、墨铜矿、白铁矿及针镍矿等。伴生有益组分包括铂族元素、钴、硒、碲、金和银,铬、锗、铟、铊和镉等组分都将逐渐被综合利用。矿石以浸染状构造为主,小量为块状构造。较富的矿石普遍具海绵陨铁结构。

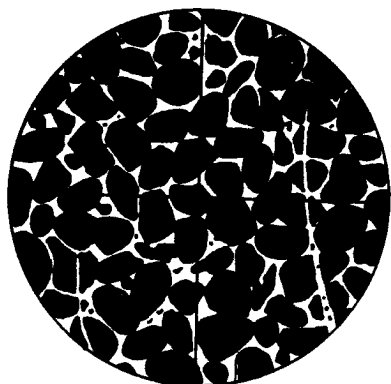


图 2-5-3 海绵陨铁结构  
铜镍硫化物(白色)填充于橄榄石粒间

### 第三节 爆发作用及其矿石

#### 1. 爆发作用

岩浆爆发作用是指那些经过结晶分异作用或熔离作用的岩浆,运移到地下浅处时,由于外压力的下降而产生爆破力,在爆发过程中形成岩石或矿石的作用。

爆发作用可分为地下隐爆和地表喷爆两种情况。当岩浆上升到地下浅处,由于构造和地球化学环境的改变,尤其是压力骤然降低,导致岩浆的内应力释放,在地下发生爆炸,此即地下隐爆。地下隐爆形成的矿石或岩石常具角砾构造,系先形成的岩石或矿石在爆炸过程中发生破碎,再被后结晶的物质胶结。如岩浆冲破地面,即为地表喷爆,也就是通常所说的火山。根据火山活动的营力,从强到弱可分为爆发、喷发和喷溢三种情况。这种划分是相对的,没有明确的界限。总的说来,火山释放的能量是巨大的,如休眠了 123 年的美国西部圣海伦火山,于 1980 年 5 月 18 日上午再度爆发,2903m 高的山峰被削低了近 200m,喷出的碎屑物质和熔浆约有  $10 \text{ 亿 m}^3$ ,释放的能量约相当于日本广岛原子弹爆炸能量的 500 倍。这是爆发型火山的一个典型例子。喷溢型火山比较平静,缺乏腾空而起的固体碎屑物或熔岩团,熔浆只是从火山口溢流而出。

天然金刚石的形成是爆发作用的典型例子。金刚石是由金伯利岩浆在很高的温度和压力下,在地下 200 ~ 300km 深处结晶形成的。当金伯利岩岩浆在地下深处进行正常的结晶分异作用时,可晶出橄榄石及少量铝镁铬铁矿、镁铝榴石和金刚石。当岩浆沿深断裂向上运移,并和含碳围岩发生同化混染时,便可促进金刚石晶体的成长。当岩浆上升到地下浅处时,由于温度进一步下降,橄榄石大量品出,挥发分大量增加,岩浆的内压力逐渐加大,岩浆的蒸馏作用开始进行。此时,岩浆处于爆发的前期。若内压力继续增加,上覆围岩盖层已不能抵挡岩浆的冲力,便发生火山爆发。这时岩浆随挥发分

把已结晶的金刚石、橄榄石等矿物和围岩捕虏体一起,带入已形成的构造薄弱地段,形成矿石。地下深处含有金刚石的熔浆必须在较短的时间内迅速到达地表浅处,否则,熔浆上升过程中金刚石会被熔融或分解掉。

## 2. 主要矿石及矿床实例

由岩浆爆发作用形成的矿石主要是金刚石矿石,它实际上是一种含金刚石的橄榄岩,因这种产金刚石的橄榄岩一般都含有云母,为角砾构造,故命名为角砾云母橄榄岩。这种岩石首先在南非一个叫金伯利的地方被发现,所以,又被称为金伯利岩。含矿金伯利岩中,金刚石呈斑晶出现,粒度较小,一般为数毫米至粉末状,最大可达 6 ~ 8cm。迄今发现的最大的金刚石重 3106ct,有成人的拳头般大小,取名“库里南”(Cullinan)。矿石中金刚石的含量很低,一般每吨矿石中仅含几克拉金刚石,而且分布不均匀,金刚石含量常随深度的增大而贫化。

金刚石的含量可通过矿石中的一些标型矿物来指示,一般与富铬镁铝榴石含量成正比,而与含钛副矿物的含量成反比。中国的一些矿床中,当矿石中金云母含量少、斑晶多时往往金刚石含量较高。

历史上最有名的金刚石生产国是南非,其中最大的矿山叫普雷米尔(Premier),矿山位于首府比勒陀尼亚东北约 20km 处。它是一个很大的椭圆形金伯利岩岩筒,口径达 914m × 457m。该矿山发现于 1902 年,一个世纪来,普雷米尔矿山生产了大量的金刚石。据 1976 ~ 1979 年的产量统计,该矿山年产金刚石 200 万 ct 左右,合 400kg。前面提到的世界头号大钻“库里南”就是 1905 年在这里被发现的。

澳大利亚是生产金刚石的后起之秀,近年来,已跃居为世界最大的金刚石生产国,其产量占世界总产量的 37%。1983 年起,澳大利亚开始大规模开采金刚石。生产地阿盖尔(Argyle)截止 1990 年总产量已达 17910 万 ct。当前,澳大利亚金刚石年产量已超过 3000 万 ct,几乎全部产自阿盖尔。除阿盖尔外,鲍河(BowRiver)的砂矿也已被开采,年产量 100 多万 ct。此外,澳大利亚还有 47 个金刚石矿床或矿点尚未开发。

## 第六章 伟晶岩成矿矿石分析

### 第一节 概 述

伟晶岩这个名称中的“伟晶”两字是粗大晶体的意思,伟晶岩就是指粗大晶体组成的岩石。伟晶岩不仅矿物颗粒结晶粗大,而且岩体常具带状构造,呈不规则的脉状、透镜状、囊状或串珠状产出(图 2-6-1)。当伟晶岩中的有用组分(元素或矿物)富集到工业要求时,即成为伟晶岩矿石。

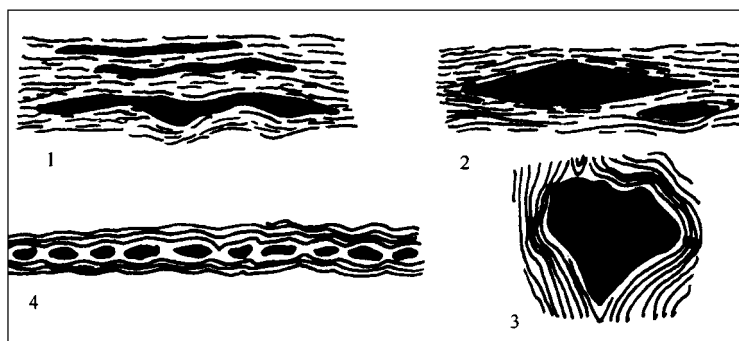


图 2-6-1 伟晶岩体形态示意图

1-脉状 2-透镜状 3-囊状 4-串珠状

伟晶岩是岩浆演化的一种较特殊的产物,广义地说,它们也是岩浆岩。在岩浆活动的晚期,当有大量挥发组分存在时,在侵入体冷凝的最后阶段便有可能形成伟晶岩及相应的矿产。伟晶岩体可位于侵入体的顶部或附近的围岩中,其主要成分与母岩(侵入体)一致,仅是在结构构造和形态、产状上与母岩体有显著的区别。各种不同成分的岩浆在一定的条件下都可以形成伟

晶岩。此外,变质过程中,在混合岩化的晚期阶段也可形成伟晶岩。

伟晶岩很少单独产出,通常是沿大的构造带成群、成带出现,并形成规模较大的伟晶岩区,它们都与区域构造有密切联系。

地壳中的大多数伟晶岩不含矿或不能形成工业矿体,仅有少数伟晶岩能形成矿床。它们是某些稀有元素和稀土元素矿产的重要来源。有些伟晶岩矿床中的 U、Th 和 W、Sn 等也较重要。长石、石英和云母等则是伟晶岩矿床的主要矿产。此外,许多宝石类矿物,如绿柱石、黄玉、电气石、水晶、锂辉石等也产在伟晶岩中。

## 第二节 伟晶岩成岩(成矿)假说

对伟晶岩的形成及其成矿作用,其认识还不完全一致,存在残余岩浆说和重结晶交代说等观点。

(1)残余岩浆说。认为伟晶岩是在相对封闭的物理化学条件下,其中富集有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和大量挥发组分、稀有金属、稀土元素和放射性元素等组分的残余岩浆冷凝结晶而成的。

以上假说以费尔斯曼、尼格里和伏格特等人为代表,他们根据尼格里以难挥发硅酸盐组分和易挥发组分(水)组成的二元系图解,认为在高温高压条件下,挥发组分能无限溶解在岩浆中,在岩浆结晶的末期便能形成富含挥发分的残余岩浆,并结晶成伟晶岩。

(2)重结晶交代说。重结晶交代说以 A. 查瓦里茨基和 B. 尼基京等人为代表,他们注意到水在花岗岩浆中的有限溶解性,因而否认有特殊的富含挥发组分的残余伟晶岩岩浆的存在。认为任何一种岩浆在冷凝过程中都会残留残余的气体溶液,这是一种超临界状态的流体,富含成矿物质、挥发组分和硅酸盐组分。所以,这种气体溶液对母岩成分而言是饱和的。在封闭条件下,溶液作用于早期形成的矿物,使它们发生重结晶,形成伟晶岩所特有的粗粒结构,这和把晶种置于饱和溶液中使其长大是同一道理。这种溶液还是成

矿物质的搬运者,当气体溶液引起母岩(或类似成分的围岩)再结晶后,随着分馏作用的进行,一些成分被扩散到围岩中,引起溶液成分的逐渐改变,从而打破了溶液与母岩之间的平衡,先形成的矿物不再稳定,将被新生矿物交代。随着交代作用的发生,封闭的物理化学条件逐渐转化为开放体系,将形成云母、稀有金属和稀土元素矿物、磷灰石、石榴石、磁铁矿、钛铁矿、榍石、绿泥石等一系列新矿物。

### 第三节 交代作用

交代作用也称置换作用,是指溶液与岩石在接触过程中,发生了一些组分的带入和另一些组分带出的地球化学作用。交代作用过程中,岩石或矿石与渗滤在孔隙中的溶液发生化学反应,原矿物的溶解和新生矿物的沉淀作用同时进行。在整个反映过程中,岩石基本上保持固体状态,交代前后的岩石总体积基本不变。交代作用形成的矿石或岩石中,常保存着原有矿物或岩石的残留体和结构构造,并常出现矿物假象,它们是交代作用的明显标志。

交代作用是伟晶岩矿床的主要成矿方式,交代作用发育的伟晶岩一般矿化较好。按交代作用后形成的矿物种类,可将伟晶岩的交代作用分为若干类型,其中主要的有白云母化、石英化、钾长石化、钠长石化和锂云母化等。

(1)白云母化。它主要表现为白云母交代钾长石,与石英密切共生,形成白云母-石英交代体。白云母化是伟晶岩中很普遍的一种交代现象,与此同时还可生成少量绿柱石、铌铁矿等稀有金属矿物,但一般规模不大,仅白云母具有工业价值。

(2)石英化。石英化是指高温和部分中温热液中的 $\text{SiO}_2$ 交代原岩,形成粗粒的石英晶体集合体。石英化是硅化的一种类型,在伟晶岩中较常见,可形成水晶矿,但与稀有金属矿化关系不密切,有时可生成少量的绿柱石和锂辉石。

(3)钾长石化。钾长石化也称钾化,包括微斜长石化、天河石化、透长石



化、正长石化和冰长石化。由于这些矿物成分几乎完全相同,较难区别,故统称为钾长石化。一般微斜长石化、天河石化和正长石化是在气化高温条件下发生的,而冰长石化主要发生在中、低温热液阶段,在伟晶岩中不易发生。钾长石化与锂、铍、铌、钽等矿化关系密切。

(4) 钠长石化。它主要发育在分异作用较好的伟晶岩中,表现为钠长石交代早期生成的钾长石,有时也交代锂辉石、石英等先形成的矿物。钠长石化与稀有金属矿化作用的关系十分密切,许多稀有金属矿物经常伴随钠长石化而产生,如绿柱石、锂辉石、铌钽铁矿、锰钽矿、细晶石、锆石和独居石等。

(5) 锂云母化。一般仅见于分异良好、交代作用强烈的伟晶岩中。锂云母化常伴生细晶石矿化和铯榴石矿化。此外,当锂云母本身量大时就具有工业价值。

从成矿意义而言,含有稀有金属和宝石矿物的伟晶岩最重要。这类伟晶岩一般属于花岗伟晶岩,其中可产锂辉石、锂云母、绿柱石、铌钽铁矿、细晶石(含钽)、锰钽矿、铯榴石、电气石、水晶等稀有金属矿物和宝石矿物。这类伟晶岩交代作用十分强烈,块状长石和大量块状石英被后期的溶液交代,钠长石广泛发育,微斜长石、条纹长石只剩下一些残留体。早期形成的锂辉石也常遭到分解,而晚期交代作用形成的锂辉石大量存在,同时还伴生有透理长石和磷铝石等。伴随着钠长石化和锂云母化作用,常有细晶石、锰钽矿、铌钽铁矿及格榴石等形成。晚期交代生成的绿柱石大部分呈绿色、玫瑰红色、蓝色或无色透明晶体,是祖母绿等宝石的重要来源。有时可形成玫瑰红色、绿色和蓝色等颜色的电气石,有的电气石同一晶体的两端颜色不同,它们可加工成各种碧玺饰物。

## 第四节 伟晶岩矿床矿石的特点

由于伟晶岩矿床的形成环境和成矿作用与其他矿床有明显区别,所以形成的矿石也具有自身的特点。

1.化学成分

化学成分复杂是伟晶岩矿石的一个特点。据统计 ,伟晶岩矿石中至少集中有 40 种以上的化学元素 ,它们主要是氧和亲氧元素 Si、Al、Na、K、Ca 等 ,稀有、稀土、分散和放射性元素 Li、Be、Nb、Ta、Cs、Rb、Zr、Hf、La、Ce、U、Th 等 ,金属元素 Sn、W、Mo、Fe、Mn 等 ,以及挥发组分 F、Cl、B、P 等。

稀有、稀土私放射性元素在伟晶岩中能高度富集 ,如 Li 在伟晶岩中含量可高达 2%左右 ,比地壳中 Li 的平均含量高出近千倍 ,而 Be 在伟晶岩矿石中的含量可高出地壳平均值上万倍。

2.矿物成分

伟晶岩矿石的化学成分决定了其矿物成分的多样化。据研究 ,伟晶岩矿石中出现的矿物有 300 多种 ,主要矿物种类如表 2－6－1 所示。

表 2－6－1 伟晶岩矿石的主要矿物成分。

矿 物 类 别		矿 物 名 称
硅酸盐类	主要的	石英(包括水晶) 长石 白云母 黑云母
	次要的	霞石 辉石 石榴石
稀有元素矿物	含锂矿物	锂云母 锂辉石 透锂长石 磷锂石 锂电气石
	含铍矿物	绿柱石 硅铍石 硅铍钽矿
	含铌、钽矿物	钽铁矿 褐钨铌矿 烧绿石 细晶石 铌铁矿
	含锆矿物	锆石 曲晶石
	含铈矿物	铈榴石 铈绿柱石
放射性矿物		方钍石 钍石 晶质铀矿
稀土元素矿物		独居石 磷钇矿 褐帘石
其他金属矿物		锡石 黑钨矿 辉钼矿 磁铁矿 钛铁矿
合挥发分矿物		萤石 电气石 磷灰石 黄玉

3.矿石结构

最主要的矿石结构有以下四种：

(1)巨晶结构。它也叫伟晶结构 ,这是伟晶岩矿石所特有的结构。常由长石、石英、云母等矿物的巨大晶体组成。晶体大小一般为 10cm ~ 2m ,有时甚至更大。如迄今已发现过 mkg 的黄玉、40t 的石英晶体、50t 的绿柱石、100t 的微斜长石 ,14m 长的锂辉石和 5m<sup>2</sup> 的白云母片等。

(2) 粗粒结构。主要由石英和长石组成,有时有白云母和绿柱石等矿物。颗粒大小一般为  $1 \sim 10\text{cm}$ 。

(3) 细粒结构。主要由石英、斜长石和微斜长石组成,以半自形或他形晶为主。有时有少量白云母等矿物,多数矿物颗粒小于  $1\text{cm}$ 。在伟晶岩体的边缘部分常出现细粒结构。

(4) 文象结构。主要由长石和石英共结生成。

## 第五节 伟晶岩(矿床)的分类

对伟晶岩及其矿床的分类方案较多,归纳起来有五种方案影响较大。

### A 按成分和交代作用强度分类

按伟晶岩的成分和交代作用的强度,可将伟晶岩分为简单伟晶岩和复杂伟晶岩两大类。简单伟晶岩主要由长石、石英和云母组成,其成分与母岩的主要造岩矿物类似,交代作用不显著。复杂伟晶岩除了长石、石英和云母等重要造岩矿物外,还含有一系列的含挥发分的矿物和稀有元素矿物等,交代作用异常显著。形成矿石的伟晶岩属于复杂伟晶岩。

### B 按母岩和成岩作用分类

按形成伟晶岩的母岩及成岩作用,可将伟晶岩划分为岩浆伟晶岩和变质伟晶岩两大类。岩浆伟晶岩又可进一步分为花岗伟晶岩(矿床)、碱性伟晶岩(矿床)和基性-超基性伟晶岩(矿床)3个亚类。其中花岗伟晶岩(矿床)分布最广,伟晶岩矿床的绝大多数都是属于这一类。变质伟晶岩是混合岩化晚期阶段伟晶岩化作用的产物。

### C 按矿物共生组合和结构特征分类

K. A. 符拉索夫根据花岗伟晶岩矿床中矿物的共生关系和结构特征,将伟晶岩矿床分为5个类型(表2-6-2)。从工业价值而言,第一类型伟晶岩无实际价值,第二类和第三类型为云母和陶瓷原料(长石)的主要来源,第四类和第五类型则为多种稀有金属的重要来源。

表 2-6-2 伟晶岩(矿床)的分类

类 型	K. A. 符拉索夫	A. N. 金兹堡	邹天人等
第一类型	文象和等粒型伟晶	斜长石型	黑云母 - 更长石 - 微斜长石型
第二类型	块状型伟晶岩	斜长石 - 微斜长石型	二云母 - 微斜长石型
第三类型	完全分异型伟晶岩	微斜长石型	二云母 - 微斜长石 - 钠长石型
第四类型	稀有金属交代型伟晶岩	具锂辉石的微斜长石型	白云母 - 微斜长石型
第五类型	钠长石 - 锂辉石伟晶岩	钠长石化、云英岩化型	白云母 - 微斜长石 - 钠长石型
第六类型	—	钠长石化、云英岩化锂辉	白云母 - 微斜长石 - 钠长石 - 锂辉石型
第七类型	—	石型	白云母 - 钠长石 - 锂辉石型
第八类型	—	复杂的锂 - 铯 - 钽型	白云母 - 钠长石型
第九类型	—	钠长石化、锂云母型	白云母 - 钠长石型
		—	

#### D 按特征性造岩矿物和稀有元素矿物分类

A. N 金兹堡根据特征性造岩矿物和稀有元素矿物的形成、演化和发展规律,将伟晶岩形成过程分为 8 个类型(表 2-6-2)。

#### E 按云母及其共生矿物分类

邹天人等根据云母及其共生矿物,将中国的伟晶岩分为黑云母类(第一类型)、二云母类(第二、三类型)、白云母类(第四至八类型)及锂云母类(第九类型)等 4 个大类 9 个类型。各类型中均发生不同程度的稀有元素等矿化作用(表 2-6-2)。

## 第六节 伟晶岩中的主要矿石

伟晶岩中最重要的矿产是稀有金属(Li、Be、Cs、Nb、Ta 等)、陶瓷原料、压电及绝缘等非金属原料(长石、石英、云母等),以及宝石矿物(绿柱石、电气石、水晶、黄玉、锆石等)。

(1) 稀有金属矿石。这类矿石主要产在花岗伟晶岩中,有时少数矿体的围岩为闪长岩、辉长岩及各种片岩。交代作用强烈,尤其是钠长石化和锂云母化十分发育。矿石的矿物成分复杂,除微斜长石、石英和云母化,还有钠长石、锂云母、含铷锂云母、锂辉石、磷灰石、电气石、绿柱石、铌铁矿、钽铁矿、锡石、磷锂石、透锂长石、铯榴石、硅铍石、硅铁钼矿、沥青铀矿、磁铁矿、钛铁矿、黄玉、锆石及一些硫化物。从这类矿石中可提取 Li、Be、Cs、Rb、Nb、Ta 等元素。目前,世界绝大部分铯和锂、大部分 Be 和部分钽来源于伟晶岩型稀有金属矿石。

(2) 绿柱石矿石。主要矿物为石英、微斜长石、钠长石、斜长石和白云母,其次为电气石、磷灰石和石榴石。稀有金属矿物有绿柱石、金绿宝石、硅铍石、锆石、独居石和铌钽铁矿等。矿石的主要利用对象是绿柱石和白云母。色泽和透明度好、裂纹较少的绿柱石可用作宝石原料,被加工成祖母绿、海蓝宝石等戒面或挂坠等饰物。非宝石级的绿柱石主要用来提取铍。绿柱石矿石中还含有铌和钽,含量较高时可供综合利用。

(3) 白云母矿石。产白云母的伟晶岩绝大多数产于前寒武系的深变质岩中,如片麻岩、花岗片麻岩、结晶片岩和大理岩等。矿石的矿物成分比较简单,主要为白云母、长石和石英。次要矿物为电气石、磷灰石和石榴石,偶见绿柱石、铌钽铁矿、晶质铀矿和曲晶石等。交代作用强烈,主要是白云母化,表现为白云母强烈交代钾微斜长石、斜长石和黑云母等矿物,形成板状白云母集合体。石英是指示白云母质量的标型矿物,若白云母及大块的长石晶体与暗色或烟色石英共生,则云母质量好,晶片大,通常可达 60~100cm;如白云母仅与石英共生,并出现钠长石化,则白云母往往呈绿色、褐色、淡红色和灰色,晶片通常不大,但杂质较少,透明度较好。这类矿石是天然白云母的惟一来源,有时可综合利用长石、绿柱石和晶质铀矿等矿产。

(4) 水晶矿石。水晶矿石常产在花岗岩体顶部接触带附近的伟晶岩中。水晶一般赋存在伟晶岩中心的晶洞里,与之伴生的矿物主要是长石、石英和黑云母,次为黄玉、绿柱石、电气石、萤石和钛铁矿等。水晶常带色,以墨晶或烟晶为主,也有部分无色晶体。晶体大小不一,一般为几至几十厘米,但偶见的大晶体可重达几十吨。除水晶外,综合利用的矿物还有光学萤石、黄玉、绿

柱石和电气石等。

(5)长石矿石。产长石的伟晶岩矿床分布在花岗岩、片麻岩和结晶片岩中。矿石主要由钾微斜长石、正长石、条纹长石和石英组成,并有云母及少量锂辉石、绿柱石和铌-钽矿物。具分带构造的长石伟晶岩矿床,长石常形成巨大的晶体,质量好,可单独采出;不具分带构造的矿床,开采时只能将长石和石英混合采出,质量较差。

长石在地壳中虽然广泛存在,但大多数情况下,难于与其他共生矿物分离。因此,具有工业意义的长石矿床主要是结晶粗大、易于分离的伟晶岩内的长石。

(6)稀土元素矿石。稀土元素伟晶岩矿床一般分布在太古代岩层中,常与周围的花岗岩、混合岩及结晶片岩组成的杂岩有关。矿石的矿物成分以微斜长石、石英和白云母为主,次要矿物为黑云母、石榴石、钛铁矿、磁铁矿、独居石等。稀土矿物种类较多,主要的有褐帘石、硅铍钇矿、独居石、铌钇矿、黑稀金矿、杂钇铌矿和钛铌铀矿等,并有曲晶石、磷钇矿、晶质铀矿和铀钍矿等矿物。但这类矿石不是稀土元素的主要来源。

伟晶岩矿石除上述六类外,还有铀伟晶岩、钨锡钼伟晶岩、刚玉伟晶岩、磷灰石伟晶岩、锆伟晶岩、石墨伟晶岩等矿石,但一般价值较小。

# 第七章 矿石颗粒几何特征分析与测试

## 第一节 颗粒的大小

颗粒的几何特征主要包括颗粒的大小、外形、表面积等,其中颗粒的大小最为重要。表征颗粒尺寸的主要参数是颗粒物料的粒度及其分布特性。它在很大程度上决定着颗粒加工工艺性质和效率的高低,是选择和评价设备以及进行过程控制的基本依据。对物料的应用而言,粒度是重要的性质指标之一。

### 一、粒径和粒度

表征颗粒的大小常用粒径和粒度两个术语,其用法和含义有所不同。粒径是以单颗粒为对象,表示颗粒的大小,而粒度则是以粒群为对象,表示所有颗粒大小的总体概念。

#### (一)单颗粒的粒径

形状规则的颗粒可以用某种特征线段来表示其大小,如球形颗粒,其粒径就是球的直径。正立方体颗粒的棱长就代表其大小。其他规则形状的颗粒也可用一个或一个以上的参数来度量,但矿物颗粒的形状不一,大小不等,其粒径的确定要困难得多。为此,采用“演算直径”来表示不规则粒子的大小。

所谓“演算直径”就是通过测定某些与颗粒大小有关的性质,推导出与

线性量纲有关的参数。如测得不规则颗粒的体积 ,计算出与颗粒同体积球的直径 ,该直径就是“ 演算直径 ” 称为颗粒的体积直径( 也简称体积径 )。又如 ,使不规则颗粒在  $Re < 0.2$  的条件下自由下沉 ,按斯托克斯公式计算出的直径 ,也是“ 演算直径 ” 称为斯托克斯直径 ,等等。可见 ,对同一粒子 ,以不同途径得到的尺寸是不同的 ,这和测量方法有关 ,应用时要特别注意。

常用的“ 演算直径 ”有轴径、球当量径、圆当量径和统计径四类 ,详见表 2-7-1 ~ 表 2-7-4。

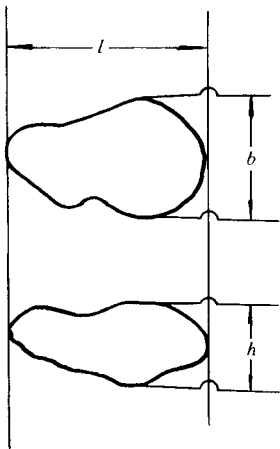


图 2-7-1 颗粒的特征线段

(1) 轴径 :用指定的特征线段表示。如图 2-7-1 所示 , $l$  为长径 ,即颗粒平面投影图中最大的距离。 $b$  是短径 ,是颗粒在垂直于长径方向的最大距离。 $h$  是厚度 ,即在另一投影面上垂直于长径的最大距离。根据以上三种特征线段 ,单颗粒轴径的表示方法可归纳于表 2-7-1。

表 2-7-1 颗粒的轴径

名 称	符 号	计算式	物理意义或定义
二轴平均径	$d_b$	$(l + b)/2$	平面图形长径和短径的算术平均值
三轴平均径	$d_c$	$(l + b + h)/3$	立体图形三维尺寸的算术平均值
三轴调和平均径	$d_s$	$3(\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h})$	同外接长方体有相同比表面积的球直径或立方体的一边长



名 称	符 号	计 算 式	物理意义或定义
二轴几何平均径	$d_y$	$\sqrt{lb}$	平面图形长短径的几何平均值
三轴几何平均径	$d_z$	$\sqrt[3]{lbh}$	同外接长方体有相同体积的立方体的一边长

(2) 球当量径 :用和颗粒具有相同参量的球体直径来表示。这些参量包括体积、面积、比表面积、运动阻力、沉降速度等 ,详见表 2-7-2。

表 2-7-2 颗粒的球当量径

名 称	符 号	计 算 式	物理意义或定义
体积直径	$d_v$	$\sqrt[3]{3V/\pi}$	与颗粒具有相同体积的圆球直径
面积直径	$d_s$	$\sqrt{S/\pi}$	与颗粒具有相同表面积的圆球直径
体积面积直径 (比表面径)	$d_{sv}$	$d \frac{2}{S} / d_v^3$	与颗粒具有相同外表面积和体积比的圆球直径
阻力直径	$d_d$	阻力 $F_R = \psi v^2 d_d^2 \rho$ 当 $Re < 0.5$ 时	在粘度相同的流体中 ,以同一速度并与颗粒具有相同运动阻力的球径( 当 $Re$ 很小时 , $d_d \approx d_s$ )
自由降落直径	$d_f$	自由降落末速度 $v_0 = \sqrt{\frac{\pi d_f^3 (\rho_s - \rho_l) g}{6 \psi \rho_l}}$	与颗粒同密度球性 ,在密度和粘度相同的流体中 ,与颗粒具有相同沉降速度球体的直径( 该球称为标准粒子 )
斯托克斯直径	$d_{st}$	$\sqrt{18 \eta / g (\rho_s - \rho_l)}$	层流区( $Re < 0.5$ )颗粒的自由降落直径

表中  $V$ ——颗粒或球体体积 ; $S$ ——颗粒或球体表面积 ; $F_R$ ——运动阻力 ; $\psi$ ——阻力系数 ; $v$ ——颗粒或球体在流体中的运动速度 ; $\rho_l$ ——液体的密度 ; $v_0$ ——颗粒或球体在介质中的沉降末速 ; $\rho_s$ ——颗粒密度 ; $v$ ——颗粒沉降速度 ; $\eta$ ——介质粘度 ; $g$ ——重力加速度。

(3) 圆当量径 :用和颗粒具有相同参量( 面积、周长 )的圆的直径表示 ,见表 2-7-3。

表 2-7-3 颗粒的圆当量径

名 称	符号	计算式	物理意义或定义
投影面积直径	$d_a$	$\sqrt{4A/\pi}$	与颗粒在稳定位置投影面积相等的圆直径
随机定向投影面积直径	$d_p$	$\sqrt{4A_1/\pi}$	与任意位置颗粒投影面积相等的圆的直径
周长直径	$d_\pi$	$L/\pi$	与颗粒投影外形周长相等的圆的直径

表中  $A$ 、 $A_1$ 、 $L$  分别为颗粒投影的面积和外形周长。

(4)统计径 :是平行于一定方向(用显微镜)测得的线度,见表 2-7-4。

表 2-7-4 颗粒的统计径

名 称	符 号	物理意义或定义
筛分直径	$d_A$	颗粒可通过的最小方筛孔的宽度
Feret 直径	$d_F$	与颗粒投影外形相切的一对平行线之间的距离
Martin 直径	$d_M$	沿一定方向把颗粒投影面积二等分线的长度
展开直径	$d_r$	通过颗粒重心的平均弦长
剪切直径	$d_{sm}$	用图象剪切圆镜测得的颗粒宽度
最大弦直径	$d_{ch}$	由颗粒轮廓所限定的一直线最大长度

(二)颗粒体的平均粒度

在矿物加工过程中,接触的不是单个颗粒,而是包含不同粒径的颗粒体,即粒群。对其大小的描述,常用平均粒度的概念。粒群的平均粒度可用统计数学的方法求得。即将粒群划分为若干窄级别,任意粒级的粒度为  $d$ ,设该粒级的颗粒个数为  $n$  或占总粒群质量比为  $W$ ,再用加权平均法计算得到总粒群的平均粒度。各种平均粒度的求法见表 2-7-5 和图 2-7-2。

峰值直径 :是指颗粒在最高频率处相对应的粒径,即图 2-7-2 中的  $D_{mod}$ 。

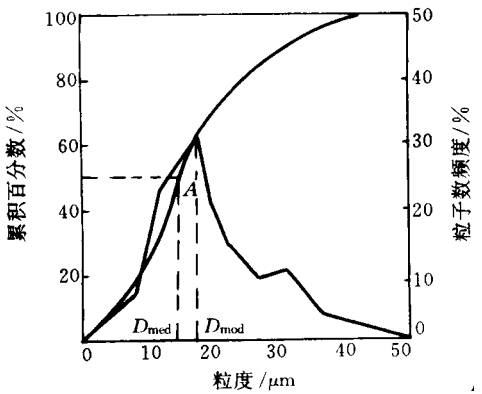


图 2-7-2 峰值平均直径和中位平均直径

中位直径或中值直径 :是对应粒度分布函数曲线 50% 处颗粒的直径。在图 2-7-2 中 ,过累积百分数 50% 处作平行横坐标直线 ,与分布函数曲线相交于 A 处 ,过 A 点作横坐标的垂线 ,垂足的对应值即为中位直径  $D_{med}$ 。

表 2-7-5 粒群的平均粒度

名 称	符 号	计算公式		公式编号
		个数基准	质量基准	
算术平均直径	$D_a$	$\sum nd / \sum n$	$\sum \frac{W}{d^2} / \sum \frac{W}{d^3}$	(2-7-1)
几何平均直径	$D_g$	$(d_1^n \cdot d_2^n \dots d_n^n)^{\frac{1}{n}}$	$(d_1^W \cdot d_2^W \dots d_n^W)^{\frac{1}{W}}$	(2-7-2)
调和平均直径	$D_h$	$\sum n / \sum \frac{n}{d}$	$\sum \frac{W}{d^3} / \sum \frac{W}{d^4}$	(2-7-3)
峰值直径	$D_{mod}$	分布曲线最高频度点		
中值直径(中位直径)	$D_{med}$	累积分布曲线的中央值(50%处)		
长度平均直径	$D_{Lm}$	$\sum nd^2 / \sum nd$	$\sum \frac{W}{d} / \sum \frac{W}{d^2}$	(2-7-4)
面积平均直径	$D_{sm}$	$\sum nd^3 / \sum nd^2$	$\sum W / \sum \frac{w}{d}$	(2-7-5)
体积平均直径 (质量平均直径)	$D_{vm}$	$\sum nd^4 / \sum nd^3$	$\sum Wd / \sum W$	(2-7-6)
平均面积直径	$D_s$	$(\sum nd^2 / \sum n)^{\frac{1}{2}}$	$(\sum \frac{W}{d} / \sum \frac{W}{d^3})^{\frac{1}{2}}$	(2-7-7)

名 称	符 号	计算公式		公式编号
		个数基准	质量基准	
平均体积直径 (重量平均直径)	$D_v$	$(\sum nd^3 / \sum n)^{\frac{1}{3}}$	$(\sum W / \sum \frac{W}{d^3})^{\frac{1}{3}}$	(2-7-8)

用图示法可直观表示上述各平均粒度的关系。图 2-7-3 是用电子显微镜法测量铬黄粉的结果。

### (三) 计算平均粒度方法的选择

虽然计算粒群平均粒度方法很多,但对特定粒群,用不同方法所得到的平均粒度值不同,有的相差甚远。图 2-7-3 清楚地证实了这一点。因为和任何平均值一样,它仅代表统计值的某方面,而不可能全面表征各数量间的关系。因此,实际应用时,应根据具体的对象来合理地选择某一种计算方法,否则就会出现错误。

【例 1】研究磨矿问题时,通常不是直接考虑颗粒的尺寸,而是和能耗联系起来。

根据 P. R. Rittinger 磨矿功耗学说,有

$$E = K \left( \frac{1}{D_p} - \frac{1}{D_0} \right) \sum W \quad (2-7-9)$$

式中  $E$ ——粉碎单位质量物料( $\sum W$ )所需的能量;

$D_0$ 、 $D_p$ ——粉碎前后物料粒子的平均粒度;

$W$ ——各粒级的质量产率;

$K$ ——比例系数。

若以  $d$  代表单个粒级粒子的平均粒度,则该粒级单位质量物料的能耗为  $K(\frac{1}{D_p} - \frac{1}{D_0})W$ ,而总能耗就为各粒级能耗的累积量  $\sum K(\frac{1}{D_p} - \frac{1}{D_0})W$ ,即

$$K \left( \frac{1}{D_p} - \frac{1}{D_0} \right) \sum W = \sum K \left( \frac{1}{D_p} - \frac{1}{D_0} \right) W \quad (2-7-10)$$

化简后得

$$D_p = \sum W / \sum \frac{W}{D_p} \quad (2-7-11)$$

$$D = \sum W / \sum \frac{W}{D_0} \quad (2-7-12)$$

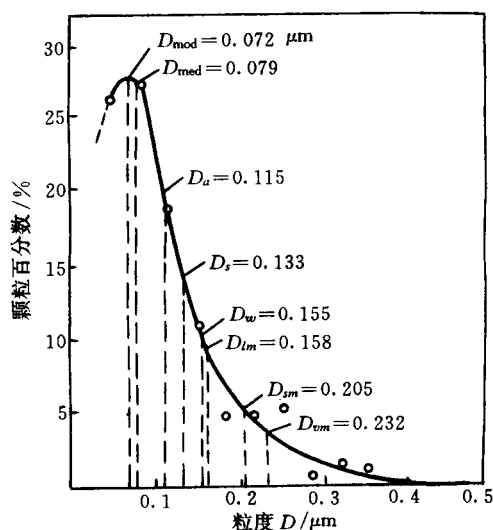


图 2-7-3 铬黄粉粒度分布曲线

(并示出各种平均直径值)

此即调和平均粒度,也即按Rittinger学说研究磨矿问题时,应选用调和平均直径。假如用基克功耗学说研究粉碎能耗,则应选用几何平均直径来计算能耗。

【例 2】研究跳汰理论时,根据 Newton - Rittinger 沉降规律,确定跳汰过程中粒子在水中沉降动能和平均粒度的关系。

物料颗粒沉降动能等于各粒级粒子沉降动能的累积量,即

$$E_0 = \sum n \times \frac{mv_0}{2} = \frac{\pi \rho K^2}{12} \sum nd^4 \quad (2-7-13)$$

单位体积(或质量)的比动能为:

$$E_1 = \frac{\pi \rho K^2}{12} \times \frac{\sum nd^4}{\sum nd^3} \quad (2-7-14)$$

式中  $E_0$ ——物料粒子沉降动能;

$n$ ——一个粒级中颗粒数;

$d$ ——一个粒级中颗粒平均粒度;

$D$ ——物料颗粒平均粒度;

$\rho$ ——颗粒密度;

$K$ ——比例系数。

显然  $\frac{\sum nd^4}{\sum nd^3}$  即为粒群的体积平均粒度  $D_{vm}$ 。因此,研究跳汰理论时,粒群的平均粒度应选用体积(质量)平均直径。

此外,在研究水煤浆的级配时,也应用体积平均直径。因为水煤浆是代油燃料,若干吨浆的热值相当于 1 吨油的热值,水煤浆的燃烧效果与其质量百分浓度、粒度组成有直接关系,平均直径是一个重要的质量指标。然而,在研究添加剂和煤粒的作用机理时,则应用面积平均直径。与此相类似,研究矿物表面改性、微细粒团聚等现象时,也应用面积平均直径。

总之,上述例子说明,平均粒度计算方法的选择应根据所研究对象的性质。只有在确定性质的基础上,计算的结果才有实际意义,切不可随意选用。

## 二、粒度分布

### (一) 粒度变量和总体数量

粒群的平均粒度是表征颗粒体系的重要几何参数,但它所能提供的粒度特性信息则非常有限。因为两个平均粒度相同的粒群,完全可能有极不一样的粒度组成,何况现代科学技术往往要求掌握精确的粒度特性,才能正确评价技术效果和分析生产过程。描述粒度特性最好的方法是查明粒群的粒度分析,它反映了粒群中各种颗粒大小及对应的数量关系。所以,完整地表示颗粒群粒度分布要有两个量,即颗粒的特征尺寸(颗粒的线性尺寸、面积、体积)和它的总数量(颗粒的个数、面积、体积和质量),分别称为粒度变量  $K$  (size variable) 和总体数量  $q$  (popularion quantity)。

在实践中,人们测量和应用的粒度分布包括粒度变量和总体数量的不同组合。为辨别各种类型的粒度分布或相互转换,可确定以下一般符号: $f_q(D_k) \Delta D_k = D_k$  和  $D_k + \Delta D_k$  之间用粒度变量和总体数量表示的粒级产率; $F_q(D) = \int_{D_{\min}}^D f_q(D_k) \Delta D_k = D_k$  和  $D_k + \Delta D_k$  之间以粒度变量和总体数量表示的累积产率。在上述关系中,脚标  $q$  和  $k$  的取值和用法如下: $q$  为 0、1、2、3,分别用于表示颗粒的颗粒数目、长度、面积、体积的总体数量;而  $k$  为 1、2、3,分别表示线性尺寸、面积、体积的粒度变量。例如:

$f_0(D) \Delta D$  表示粒度在  $D$  和  $D + \Delta D$  之间按颗粒数计算的粒级产率;

$f_3(D) \Delta D$  表示粒度在  $D$  和  $D + \Delta D$  之间按颗粒体积计算的粒级产率；

$f_0(D_3) \Delta D_3$  表示体积在  $V$  和  $V + \Delta V$  之间按颗粒数计算的粒级产率；

$f_2(D_2) \Delta D_2$  表示面积在  $A$  和  $A + \Delta A$  之间按颗粒面积计算的粒级产率；

$F_0(D) = \int_{D_{\min}}^D f_0(D_1) \Delta D_1$  表示粒度小于  $D$  的按颗粒数计算的累积产率；

$F_2(D_2) = \int_{D_{\min}}^D f_2(D_2) \Delta D_2$  表示面积小于  $A$  的按面积计算的累积产率。

在粒度测量中,由于原理不同,常用仪器输出的数据有两大类别的组合,如图 2-7-4 所示。

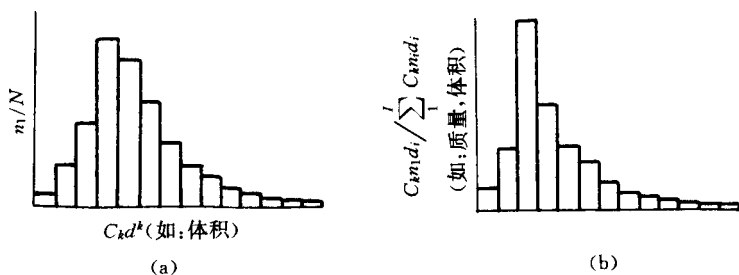


图 2-7-4 粒度分析数据

第一类的粒度变量是颗粒的质量、体积、面积或粒径,而总体数量是颗粒的个数或相对颗粒数(也称为相对频率)。作图时,横坐标是  $D$  的幂函数( $D$  代表球形颗粒的直径),而纵坐标是相对频率,即  $f_0(D_k) \Delta D_k$ 。

输出此类数据的仪器有:显微镜( $f_0(D) \Delta D \sim D$ )、图象分析仪( $f_0(D_2) \Delta D_2 \sim C_2 D^2$ )和库尔特计数器( $f_0(D_3) \Delta D_3 \sim C_3 D^3$ ),其中  $C_2$ 、 $C_3$  为比例常数。

第二类的粒度变量为  $D$ ,总体数量为相对质量、相对体积、面积或频率。如筛分、沉积仪、微粒仪等( $f_3(D) \Delta D \sim D$ )。

## (二) 粒度分布的表示法

表征物料粒度分布常用的方法有列表法、作图法、矩值法和函数法。

## 1. 列表法

将粒度分析得到的原始数据( 粒度区间、各粒级质量、面积、颗粒数等 )及由此计算的数据列成表格即可。这是最普通的方法 ,其优点是通过列表能表示出各粒级的分布情况 ,找出主导粒级、各级别和全体物料的平均粒度和指定粒度的累计含量等。表中各项数据也是其他表达法的基础资料。

表 2-7-6 是用列表法表示粒度分布的一个实例。其中 1000 个颗粒按几何级数划分成 12 个粒级。粒度范围的选择很重要 ,而且几何级数远比算术级数优越。在采用几何级数的情况下 ,每个粒级的算术平均粒度和相邻粒级粒度的比值为常数( 本例是  $1:\sqrt{2}$  ) ,而按算术级数划分时 ,则前两个平均值之比和最后两个平均值之比将会差别很大。所以 ,除粒级划分较密外 ,一般都采用几何级数分级。

列表法虽有上述优点 ,但数据量大时 ,列表很麻烦 ,而且表中数据不连续 ,要马上读出表中未列出的数据是不可能的 ,相比之下 ,作图法更为方便、实用。

表 2-7-6 粒度分析数据综合表

粒度范围 $D_i \sim D_{i+1}$	间隔 $dD$	平均粒度 $D$	颗粒数 $dN$	相对频率 $f(D)\%$	正累积频率 $F(D)\%$	负累积频率 $F(D)\%$
1.4~2.0	0.6	1.7	1	0.1	0.1	100.0
2.0~2.8	0.8	2.4	4	0.4	0.5	99.9
2.8~4.0	1.2	3.4	22	2.2	2.7	99.5
4.0~5.6	1.6	4.8	69	6.9	9.6	97.3
5.6~8.0	2.4	6.8	134	13.4	23.0	90.4
8.0~11.2	3.2	9.6	249	24.9	47.9	77.0
11.2~16.0	4.8	13.6	259	25.9	73.8	52.1
16.0~22.4	6.4	19.2	160	16.0	89.8	26.2
22.4~32.0	9.6	27.2	73	7.3	97.1	10.2
32.0~44.8	12.8	38.4	21	2.1	99.2	2.9



粒度范围 $D_i \sim D_{i+1}$	间隔 $dD$	平均粒度 $D$	颗粒数 $dN$	相对频率 $f(D)\%$	正累积频率 $F(D)\%$	负累积频率 $F(D)\%$
44.8 ~ 64.0	19.2	54.4	6	0.6	99.8	0.8
64.0 ~ 89.6	25.6	76.8	2	0.2	100.0	0.2
合 计			$N = 1000$	100	$D_a = \frac{\sum D f(D)}{\sum f(D)} = 13.59$	

## 2. 作图法

常用的图示法有绘制矩形图、密度函数图(频率分布图)、分布函数图(累积分布图)。

### (1) 矩形图

图 2-7-5 是按表 2-7-6 数据绘制的粒度分布矩形图,即在直角坐标中,以粒度范围在横坐标上作矩形底边,以各级频率(颗粒数,百分含量或每单位长度频率等)平行于纵坐标作矩形高。这是最简单的粒度分布统计图,其优点是能一目了然地看出各级粒度的变化及主导级别等情况,缺点是非连续分布,缺少各粒级范围内的信息,因而不能完整反映粒群的粒度特性。密度函数图在很大程度上可克服其不足。

### (2) 密度函数图

当所提供物料粒度级别足够多、粒级间隔足够小时,在矩形图中,连结每个矩形顶边中点(横坐标上对应每粒级的平均粒度)可得一光滑曲线,即为该粒群的密度函数曲线。密度函数及分布函数的概念,均来自概率分布,可通过数学方法确定粒群在某给定粒度颗粒的频率,各级相对百分含量等。

密度分布函数  $f(D)$  表示粒群的粒度分布。从物理意义上讲,  $f(D)d(D)$  等于总体中粒度由  $D$  到  $D+dD$  微分粒度区间颗粒所占的数量——产率等。从几何意义上看,该量可用图中由  $D$  到  $D+dD$  之间的阴影面积来表示(见图 2-7-6)。为求出粒度  $D'$  颗粒的产率,可把总体中由最小粒度  $D_{\min}$  到指定粒度之间各粒级产率加起来。这种求和是通过积分密度函数而得。

$$F(D') = \int_{D_{\min}}^{D'} f(D) dD \quad (2-7-15)$$

从密度函数曲线能方便地读出频率密度最大值及其对应的粒度即峰直

径  $D_{\text{mod}}$ 。

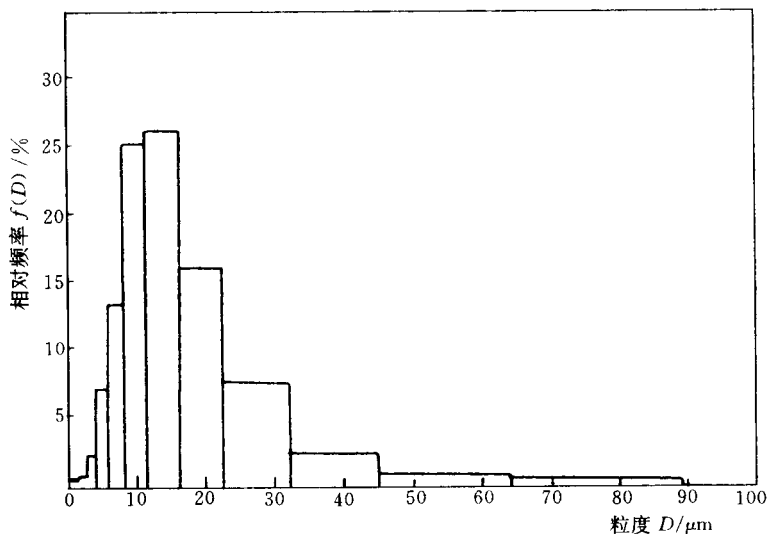


图 2-7-5 粒度分布矩形图

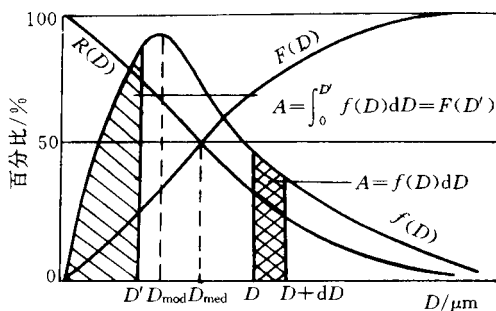


图 2-7-6 粒群的密度函数图和分布函数图

### (3) 分布函数图

式(2-7-15)中  $F(D')$  称为粒群粒度分布函数,反映该函数的图线称为该粒群的粒度分布函数图,也称为累积分布曲线。图中横坐标和密度函数曲线的一致,纵坐标是大于或小于某指定粒度  $D'$  的累积频率(或产率)的百分数。前者称作正累积分布曲线  $R(D)$ ,后者称作负累积分布曲线  $F(D)$ ,见图 2-7-6。

$$R(D) = 100 - F(D) = \int_D^{D_{\max}} f(D) dD = 100 - \int_{D_{\min}}^D f(D) dD \quad (2-7-16)$$

曲线斜率就是密度分布函数,即

$$F'(D) = \frac{dF(D)}{dD} = f(D) \quad (2-7-17)$$

粒群中任一粒级( $D_i \sim d_{i+1}$ )的产率(或频率)也可从分布函数中求得,即

$$F(D_i \sim D_{i+1}) = F(D_{i+1}) - F(D_i) \quad (2-7-18)$$

过纵坐标 50% 处,平行于横坐标的水平线和曲线交点所对应横坐标上的粒度称为中位径  $D_{med}$ 。

作图时坐标类型的选择也很重要。由于计算方便,人们普遍采用算术坐标,但当粒度分布范围很宽时,必须用很大的图纸,否则细粒级部分被压缩,影响精确度。此时采用对数或半对数坐标可避免这一缺点。尤其按几何级数划分粒级时,最好用对数坐标,当粒群的粒度分布符合高登—舒兹曼或盖茨—高登—舒兹曼以及罗辛—拉姆勒分布时,用全对数坐标更方便。

### 3. 矩值法

矩值法就是以数理统计原理来计算粒群(即样本)粒度分布的特征值,如平均粒度、方差等。在现有的文献中以矩值法来表示粒度分布特性并不多见,但随着计算机技术的应用,它将会进一步扩大使用范围。

设观测数  $D_1, D_2, \dots, D_m$  为取自某整体(粒群)的一个容量(级别数)为  $n$  的随机样本,则定义第  $k$  阶样本的原点矩为:

$$a_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2-7-19)$$

$k = 1$  时,就得到样本的平均数为:

$$a_1 = \bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (2-7-20)$$

第  $k$  阶样本的中心矩则定义为:

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (2-7-21)$$

显然,  $k = 1$  时,有

$$m_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}) = 0 \quad (2-7-22)$$

中心矩和原点矩的关系为:

$$m_2 = a_2 - a_1^2 \quad (2-7-23)$$

$$m_3 = a_3 - 3a_1a_2 + 2a_1^3 \quad (2-7-24)$$

$$m_4 = a_4 - 4a_1a_3 + 6a_1^2a_2 - 3a_1^4 \quad (2-7-25)$$

给出上述样本矩的定义后,对于凡是可以矩表示的总体数字特征,都可以写出其相应的样本数字特征,如:

$$\text{样本方差 } \sigma^2 = m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \quad (2-7-26)$$

方差大小表征粒度分布的离散程度。

$$\text{样本标准差 } \sigma = \sqrt{m_2} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-7-27)$$

$$\text{样本偏畸系数 } C_s = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^3}{\left[ \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \right]^{3/2}} \quad (2-7-28)$$

该值表示粒度分布偏离对称分布的程度。

$$\text{样本峰凸系数 } C_E = \frac{m_4}{m_2^2} = \frac{n \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^4}{\left[ \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \right]^2} \quad (2-7-29)$$

这是衡量分布曲线形状峰度或陡峭度的指标。

当样本容量很大时,样本数字特征的计算十分繁杂,此时可将测值适当分组,用每组的中值,即粒级的平均粒度,代替该组的所有测值进行计算,则  $R$  阶原点矩定义为:

$$a_k = \frac{\sum_{i=1}^n f_j D_j^k}{\left[ \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2 \right]} \quad (2-7-30)$$

式中  $n$  为组数(级别数);  $D_j$  为第  $j$  组的中值,组的频率数(产率)为  $f_j$ ,则有:

$$a_1 = \bar{D} = \frac{\sum_{j=1}^n f_j D_j}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (j=1, 2, \dots) \quad (2-7-31)$$

$a_1$  即为该粒群的平均粒度。同理可得到:

$$a_2 = \frac{\sum_{j=1}^n f_j D_j^2}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2-7-32)$$

$$a_3 = \frac{\sum_{j=1}^n f_j D_j^3}{\sum_{j=1}^n f_j}$$

..... (2-7-33)

同理,还可计算出样本各阶中心矩。

#### 4. 函数法

函数法就是用数学方法将物料粒度分析数据归纳、整理并建立能反映物料粒度分布规律的数学模型——粒度特性方程。这样便于进行统计分析、数学计算和应用电子计算机进行更复杂的运算。粒度分布方程不仅能表示粒度分布情况,而且通过解析法可求出各种平均直径、比表面积、单位质量颗粒数等。进行实际粒度分析时,也可减少测量工作量。

到目前为止,粒度特性方程均为经验式。自 20 世纪 20 年代以来,人们已提出数十种粒度方程,矿物加工中常用的有以下三种。

(1) 盖茨(Gates)—高登(Gaudin)—舒兹曼(Schutzmann)粒度特性方程,简称 GGS 方程,即

$$F(D) = 100 \left( \frac{D}{D_{\max}} \right)^m \quad (2-7-34)$$

式中  $F(D)$ ——筛下物(负累积产率),%;

$D_{\max}$ ——物料中最大粒度;

$D$ ——粒度;

$m$ ——分布模数,与物料性质、设备性能有关。

将(2-7-34)式两边取对数得:

$$\lg \frac{F(D)}{100} = m \lg D - m \lg D_{\max} \quad (2-7-35)$$

此式在对数坐标上是一条直线,其斜率就是模数  $m$ ,表征粒群粒度分布的均匀程度。而过纵坐标 1 处,平行横坐标直线和粒度分布线交点对应横坐标上的值即为  $D_{\max}$ ,见图 2-7-7。

颚式破碎机、辊式破碎机及棒磨机细粒级产物的粒度分布符合该方程。球磨机的产物则近似符合。

## (2) 罗辛(Rosin)—拉姆勒(Rammler)方程

该方程是在 20 世纪 30 年代,由罗辛、拉姆勒、斯波林(Sperling)以及后来的本尼特(Bennett)根据各自重复的磨矿因素试验,以统计方法而建立的另一粒度特性方程,简称为 RRSB 方程,即

$$R(D) = 100 \exp \left[ - \left( \frac{D}{D_e} \right)^n \right] \quad (2-7-36)$$

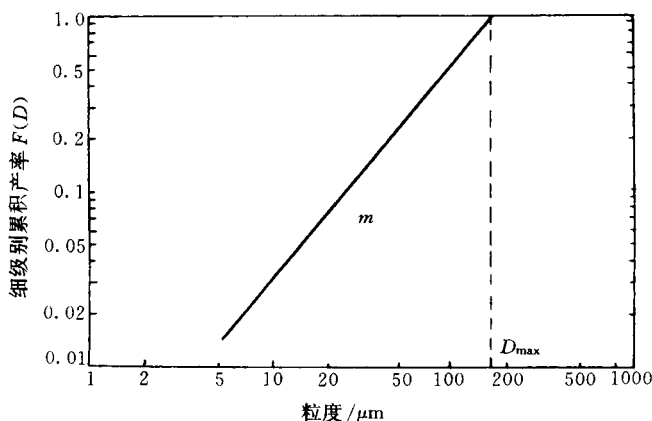


图 2-7-7 典型的 GGS 质量粒度分布图解

$$\text{或} \quad F(D) = 100 - 100 \exp \left[ - \left( \frac{D}{D_e} \right)^n \right] \quad (2-7-37)$$

式中  $R(D)$ ——正累积产率, %;

$F(D)$ ——负累积产率, %;

$D$ ——粒度;

$D_e$ ——临界粒度, 即  $R(D) = 36.8\%$  或  $F(D) = 63.2\%$  时, 对应的粒度;

$n$ ——方程模数, 也称均匀系数, 表示粒度范围的宽窄。 $n$  大表示粒度分布范围窄,  $n$  小则相反。

若对式(2-7-37)两边除以 100, 并对其倒数取二重对数得:

$$\lg \lg \frac{100}{R(D)} = n \lg D - n \lg D_e + \lg \lg e$$

$$= n \lg D + K \quad (2-7-38)$$

以  $\lg \lg \frac{100}{R(D)}$  为纵坐标, 以  $\lg D$  为横坐标, 则得斜率为  $n$  的一条直线, 其截距为  $K$ 。由  $R(D) = 36.8\%$  处可得  $D_e$ 。

实际应用时有专门的图纸, 即 Rosin—Rammler 纸 (简称 R—R 纸, 见图 2-7-8), 使用很方便。

当  $D$  和  $D_e$  的比值小于 1 时, RRSB 方程和 GGS 方程一致。而且实践证明, 在较粗的粒度范围时, 方程有惊人的重现性, 特别是 R—R 纸的应用, 使 RRSB 方程在实践中很受欢迎。

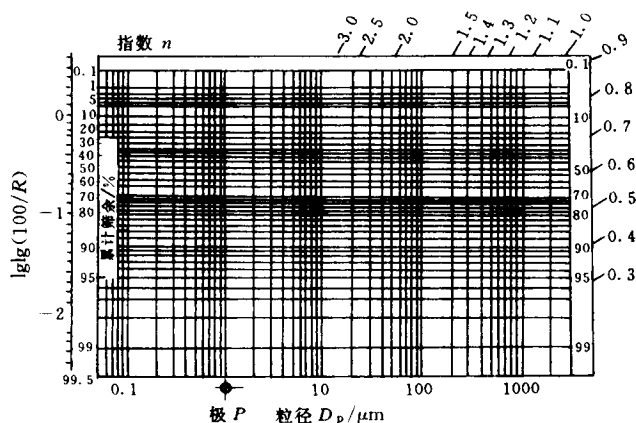


图 2-7-8 RRSB 分布图

多数破碎、磨碎产物的粒度分布都服从 RRSB 规律, 尤其是煤炭、石灰石等脆性物料经各种破碎、磨碎设备处理后的产物。

### (3) 对数正态分布

许多细磨产物, 尤其是粉体的粒度组成, 通常都服从对数正态分布, 其数学表达式为:

密度函数式

$$f(\ln D) = \frac{dn}{d(\ln D)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \exp \left[ -\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] \quad (2-7-39)$$

分布函数式

$$F(\ln D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \int_{D_{\min}}^D \exp \left[ -\frac{(\ln D - \ln D_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g} \right] d(\ln D) \quad (2-7-40)$$

式中  $D_g$ ——几何平均直径  $\ln D_g = \frac{\sum nD}{\sum n}$  ;

$\sigma_g$ ——几何标准偏差 ,可按式计算 :

$$\lg \sigma = \sqrt{\sum n(\ln D - \ln D_g)^2 / \sum n} \quad (2-7-41)$$

如果粒群的粒度组成符合对数正态分布 ,在对数正态概率纸上作图 ,其测值必定分布在一条直线附近 , $\sigma_g$  即为直线的斜率。

如前所述 ,粒群的平均粒度在累积分布曲线图上对应于 50% 处 ,如图 2-7-9 所示。它等于几何平均直径。而几何标准偏差为 :

$$\begin{aligned} \lg \sigma_g &= \lg D_{84.13} - \lg D_{50} \\ &= \lg D_{50} - \lg D_{15.87} \end{aligned} \quad (2-7-42)$$

通常某指定变量颗粒个数符合某种分布规律时 ,其质量分布就不符合该规律 ,反之亦然。但对数正态分布不同 ,如果颗粒个数服从对数正态分布 ,其他如颗粒面积、质量分布也是如此 ,而且有相同的标准偏差 ,因此很容易将一种分布转换成另一种分布。

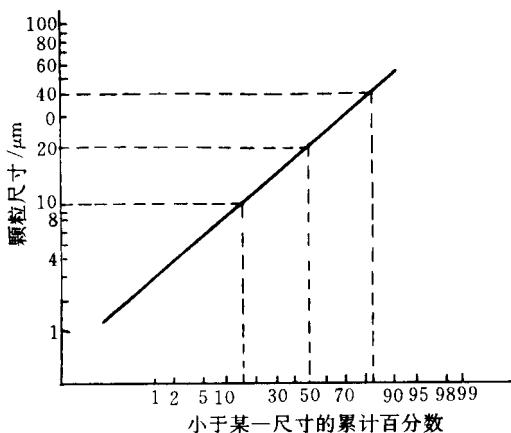


图 2-7-9 在对数—概率纸上点绘的对数正态分布

凡符合对数正态分布的粒群 ,由解析法可得各种平均粒径 ,见表 2-7-

7。



表 2-7-7 对数正态分布各种平均直径的计算公式

名 称	符号	个数基准	计算公式	公式编号
算术平均直径	$D_a$	$\sum nd / \sum n$	$D_{50} \exp[0.5(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-43)
长度平均直径	$D_{ln}$	$\sum(\ln d) / \sum(\ln nd)$	$D_{50} \exp[1.5(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-44)
面积平均直径	$D_{sm}$	$\sum(nd^3) / \sum(nd^2)$	$D_{50} \exp[2.5(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-45)
质量平均直径	$D_{wm}$	$\sum(nd^4) / \sum(nd^3)$	$D_{50} \exp[3.5(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-46)
平均面积直径	$D_s$	$\sqrt{\sum(nd^2) / \sum n}$	$D_{50} \exp[(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-47)
平均体积直径	$D_v$	$\sqrt{\sum(nd^3) / \sum n}$	$D_{50} \exp[(1.5 \ln \sigma_g)^2]$	(2-7-48)
调和平均直径	$D_d$	$\sum n / \sum(n/d)$	$D_{50} \exp[-0.5(\ln \sigma_g)^2]$	(2-7-49)

第二节 颗粒的形状

颗粒的轮廓边界或表面上各点的图像 称作颗粒的形状。

矿物颗粒的形状对其行为 ,如它在介质中的运动速度、界面化学性质、流动特性、滤饼的空隙率、比阻大小等都有重要的影响 ,与其加工产物的用途和价值有直接的关系。矿物加工中各作业的性质、效率在很大程度上也取决于矿物颗粒的形状。因此 ,颗粒的形状是继颗粒大小之后又一重要的几何特征。

颗粒形状的分析有定性和定量两方面。

## 一、颗粒形状的定性分析

通常用一些定性的术语描述颗粒的形状。常见的术语见表 2-7-8。

表 2-7-8 颗粒形状的定义

名 称	定 义	形 状
球形	圆球形体	
滚圆形	表面比较光滑近似椭圆形	
多角形	具有清晰边缘或粗糙的多面形体	
不规则体	无任何对称的形体	
粒状体	具有大致相同的是纲的不规则体	
片状体	板片状形体	
枝状体	形状似树枝体	
纤维状	规则或不规则的线状体	
多孔状	表面或体内有发达的孔隙	

颗粒形状的定性分析非常粗糙,不够确切。它难于确切描述颗粒的形状,更便于进行数学处理。因此,定量分析颗粒形状一直是人们悉心研究、

期待解决的课题。

## 二、颗粒形状的定量分析

颗粒形状的定量分析已有许多方法,本书仅介绍一些比较常用的方法。

### (一)形状系数

形状系数的概念来自这样的见解,即对规则形状的颗粒而言,其表面积、体积分别和线性尺寸成平方或三次方的关系。比例关系被定义为形状系数。

设颗粒的直径为  $d$ 、体积为  $V$ 、面积为  $S$ ,按上述定义得:

$$\text{表面形状系数:} \quad \varphi = S/d^2 \quad (2-7-50)$$

$$\text{体积形状系数:} \quad \varphi = V/d^3 \quad (2-7-51)$$

$$\text{比表面形状系数:} \quad \varphi_{sv} = \varphi_s / \varphi_v \quad (2-7-52)$$

因单位体积颗粒的比表面积  $S_v = S/V = \varphi_s d^2 / \varphi_v d^3$ , 所以有:

$$\varphi_{sv} = S_v d \quad (2-7-53)$$

对于不规则颗粒,其形状系数随粒度计算方法而变,例如用投影面积直径  $d_a$  表示时,上述三种形状系数分别为:

$$\varphi_{s,a} = S/d_a^2$$

$$\varphi_{v,a} = V/d_a^3$$

$$\varphi_{sv,a} = \varphi_{s,a} / \varphi_{v,a}$$

式中符号含义同前,而下标  $a$  表示测得的直径是投影面积直径。

如果研究对象是粒群,求其相应的系数时,分别要用平均值,即

$$\varphi_s = S/d^2 \quad (2-7-54)$$

$$\varphi_v = V/d^3 \quad (2-7-55)$$

可见,颗粒的形状系数就是所测得颗粒的“大小”和颗粒的面积或体积或比表面积间的关系值。

一些典型的形状系数见表 2-7-9。

表 2-7-9 颗粒的形状系数

规则颗粒			
形状类型	$\varphi_s$	$\varphi_v$	$\varphi_{sv}$
球形 ( $l = b = h = d$ )	$\pi$	$\pi/6$	6
圆锥体 ( $l = b = h = d$ )	$0.8/\pi$	$\pi/12$	9.7
立方体 ( $l = b = h = d$ )	6	1	6
圆板 ( $l = b, h = d$ )	$3\pi/2$	$\pi/4$	6
方柱体 ( $l = b = h$ )	6	1	6

不规则颗粒			
形状类型与实例	$\varphi_{s,a}$	$\varphi_{v,a}$	$\varphi_{sv,a}$
浑圆形 经水冲蚀的砂子、熔凝烟灰、雾化金属	2.7 ~ 3.4	0.32 ~ 0.41	8.34 ~ 8.29
粉磨的角状矿粒 煤、石灰石、砂子	2.5 ~ 3.2	0.2 ~ 0.28	12.5 ~ 11.43
片状矿粒 石墨粉、滑石、石膏	2.0 ~ 2.8	0.12 ~ 0.16	16.67 ~ 17.5
薄板片 云母、石墨、铝片	1.6 ~ 1.7	0.01 ~ 0.03	160 ~ 56.67

注： $l$ 、 $b$ 、 $h$ 、 $d$  分别代表颗粒长、宽、厚三轴径和直径。

一般来说,矿物颗粒的形状与其粒度大小有直接的关系。图 2-7-10 是一些常见矿物的比表面形状系数和粒度大小的变化规律。由图可见,随粒度的减小,颗粒的形状近似不变,而且各种矿物细颗粒的形状越发接近。

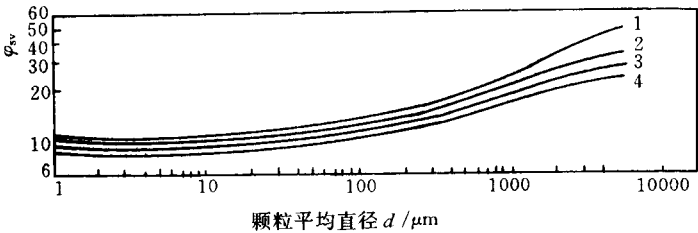


图 2-7-10 某些常见矿物面积形状系数与  
体积形状系数的比值  $\varphi_s/\varphi_v$

1-石英 2-黄铁矿 3-闪锌矿 4-方铅矿和方解石

Heywood 给出求形状系数的另一种方法。他认为:当测得颗粒三个相互

垂直方向的尺寸时 ,则有 :

$$\text{长度比} \quad n = l/b \quad (2-7-56)$$

$$\text{扁平比} \quad m = b/t \quad (2-7-57)$$

式中  $t$  是厚度 ,是两个平行面间的距离 ,这个平行面和颗粒两个对立面相切 ,其中之一应具有最大的稳定度。  $b$  是宽度 ,是另一对平行面间的最短距离 ,这对平行面与上述平行面垂直相交 ,并与颗粒两个相对的边相切。  $l$  是长度 ,是第三对平行面间的距离 ,它与上述两对平行面垂直相交 ,并与颗粒的两个相对边相切。

假设颗粒被矩形所包围 ,则颗粒的投影面积应为 :

$$A = \frac{\pi}{4} d_a^2 = a_a bl \quad (2-7-58)$$

式中  $a_a$  是面积比。

颗粒的体积则应为投影面积和平均厚度的乘积 ,即

$$V = \varphi_{v.a} d_a^3 = a_a bl P_r t \quad (2-7-59)$$

式中  $P_r$  称作拟棱体比(见图 2-7-11)。

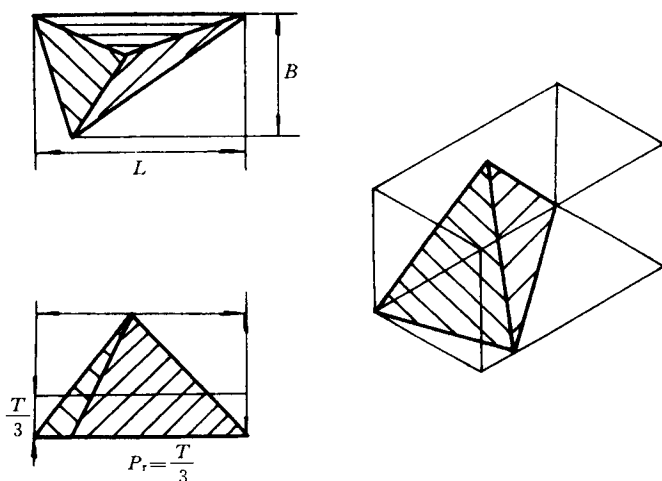


图 2-7-11 Heywood 的尺寸

联立式(2-7-58)和(2-7-59) ,并将式(2-7-56)和(2-7-57)代入 ,则得 :

$$\varphi_{v.a} = \frac{\pi \sqrt{\pi}}{8} \cdot \frac{P_r}{m \sqrt{a_a^n}} \quad (2-7-60)$$

令颗粒各向距离相等,即  $l = b = t$ , 则  $n = m = 1$ , 体积系数特征值为

$$a_e = \frac{\pi \sqrt{\pi} P_r}{8 \sqrt{a_a}} \quad (2-7-61)$$

因此,  $a_e$  可作颗粒形状系数的定义式。

当颗粒各向尺寸不等时, 则有:

$$\varphi_{v.a} = \frac{a_e}{m \sqrt{n}} \quad (2-7-62)$$

这一结论证实颗粒形状是由其几何形状和相对比例两种特征相结合而确定的。

Heywood 将颗粒分为四大类:四面体、拟柱体、次多角体和圆形体,并给出相应的  $a_a$  和  $P_r$  值(见表 2-7-10)。利用式(2-7-59)和直接观察来决定颗粒形状类型以及  $m$ 、 $n$  值,即可求得  $\varphi_{v.a}$ 。

表 2-7-10 各种形状颗粒的  $a_a$  和  $P_r$  值

颗粒形状类型	$a_a$	$P_r$
多角体 $\begin{cases} \text{四面体} \\ \text{拟柱体} \end{cases}$	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.53
	0.5 ~ 0.9	0.53 ~ 0.9
次多角体	0.65 ~ 0.85	0.55 ~ 0.8
圆形体	0.72 ~ 0.83	0.62 ~ 0.75

测定  $\varphi_{s.a}$  值很困难, Heywood 根据大量试验结果导出下面的关系式:

$$\varphi_{s.a} = 1.57 + C \left( \frac{a_{ea}}{m} \right)^{4/3} \frac{n+1}{n} \quad (2-7-63)$$

式中  $C$  是由几何形状所决定的常数, 表 2-7-11 给出了各种几何形状和不规则颗粒的  $a_{ea}$  和  $C$  值。

表 2-7-11 各种几何形状和不规则颗粒的  $a_{ca}$  和  $C$  值

形 状 类 型		$a_{ca}$	$C$
几何形状	四面体	0.328	4.36
	长方体	0.696	2.55
	球体	0.524	1.86
大致形状	多角形 $\begin{cases} \text{四面体} \\ \text{拟柱体} \end{cases}$	0.38	3.3
		0.47	3.0
	次多角形	0.51	2.6
	圆形	0.54	2.1

## (二) 形状指数

形状指数和形状系数不同,它和具体的物理现象无关,只用数学表达式来描述颗粒的外形。常见的形状指数有球形度、伸长度、粗糙度等。

### 1. 球形度

广为应用的球形度  $\psi_s$  的定义式为:

$$\psi_s = \frac{\text{与颗粒等体积的圆球表面积}}{\text{颗粒的实际表面积}} = \frac{S_{\text{球}}}{S_{\text{粒}}} \quad (2-7-64)$$

上式是最早定义的球形度,文献中可以见到的球形度的定义式还有:

$$\psi_{\varphi_s} = \frac{1}{4\pi\rho_{av}} \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\rho_{av} - \rho(\theta, \varphi)]^2 \sin\theta d\theta d\varphi \right\} \quad (2-7-65)$$

式中  $\rho_{av} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \rho(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$  是等效球的平均半径值,此处的等效球和颗粒有同一中心点; $\rho$  是球坐标中空间某点到中心点的距离; $\theta$ 、 $\varphi$  分别为经度、纬度。

### 2. 伸长度 $Z$

$$Z = d_{F\pi/2} / d_{Fmin} \quad (2-7-66)$$

式中  $d_{Fmin}$  是最小的 Feret 直径值; $d_{F\pi/2}$  是垂直于  $d_{Fmin}$  的直径值。

### 3. 粗糙度

粗糙度最早的定义是颗粒的实际表面积与把颗粒外观看成光滑时的表面积之比,即

$$\text{粗糙度 } P = \frac{\text{颗粒的实际表面积}}{\text{外观看成光滑时的颗粒表面积}} > 1$$

实际应用时又可作如下处理：

$$\text{粗糙度 } P = \frac{\text{用吸附法测得的比表面积}}{\text{用渗透法测得的比表面积}}$$

文献上关于粗糙度的数学表达式还有：

$$P^2 = \overline{R^2(\theta)} - R(\theta)^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R^2(\theta) d\theta - \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) d\theta \right]^2 \quad (2-7-67)$$

式中  $R$  为矢径,  $\theta$  为极角。上式第一项是颗粒投影平均半径的平方;第二项是与颗粒投影等周长的圆的半径的平方。

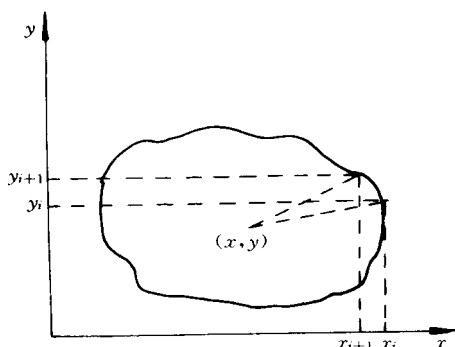


图 2-7-12 Fourier 分析法

### (三) 傅立叶(Fourier)分析法

先进的图像处理技术,为颗粒形态研究提供了现代、科学和方便的方法。傅立叶分析法就是其中的一种。美国、加拿大、德国等一些学者,自 20 世纪 70 年代开始,着重对它进行研究,结果表明,各阶 Fourier 系数可作为形状指数来看待。如前述球形度、粗糙度等形状指数都可从 Fourier 系数求出。

Fourier 分析法有  $(R, \theta)$  法和  $(\varphi, l)$  法,分别用于无凸形和凹形颗粒分析。

$(R, \theta)$  法即极坐标法。其分析的简单步骤是:先在颗粒轮廓上取点,测量出每个点的  $(x, y)$  坐标,求出重心作为原点,然后把直角坐标转换成  $(R, \theta)$  极坐标,再将  $R(\theta)$  函数按 Fourier 级数展开如下:

$$R(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\theta - a_n)$$



$$= A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (2-7-68)$$

式中  $A_0$ 、 $A_n$ 、 $a_n$ 、 $b_n$  是 Fourier 系数 ;  $a_n$  是相角 ;  $n$  是展开项数 ;  $A_0$ 、 $A_n$ 、 $a_n$ 、 $b_n$ 、 $a_n$  按下列各式计算 :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) \sin n\theta d\theta$$

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2$$

$$\tan a_n = b_n / a_n$$

这样便可得到一系列的系数  $A_n$  和  $a_n$  用来再现颗粒形状 , 前述的形状指数、球形度、伸长度和粗糙度都可以从 Fourier 系数计算出来。

在二维情况下 , 球形度就是圆形度 , 即

$$\phi_s = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \quad (2-7-69)$$

伸长度在这里是过重心的长宽比  $CAR$  值。过重心的最大尺寸等于  $R(0) + R(\pi)$  , 由 (2-7-68) 式可得 :

$$R(0) = A_0 + a_1 \cos 0 + a_2 \cos 2 \times 0 + a_3 \cos 3 \times 0 + \dots \quad (2-7-70)$$

$$R(\pi) = A_0 + a_1 \cos \pi + a_2 \cos 2\pi + a_3 \cos 3\pi + \dots \quad (2-7-71)$$

$$\therefore R(0) + R(\pi) = 2A_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \quad (2-7-72)$$

过重心的最短尺寸为  $R(\frac{\pi}{2}) + R(\frac{3\pi}{2})$  , 即与最大尺寸成  $90^\circ$ 。由 (2-7-68) 式可得 :

$$R(\frac{\pi}{2}) + R(\frac{3\pi}{2}) = 2A_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_{2n} \quad (2-7-73)$$

因此 , 伸长度为 :

$$Z = CAR = \frac{2A_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n}}{2A_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_{2n}} \quad (2-7-74)$$

同样,把(2-7-68)式代入(2-7-67)式开方可得粗糙度为:

$$P = \left[ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \right]^{1/2} \quad (2-7-75)$$

除此之外,还可得到颗粒形状的其他参数,例如颗粒的投影面积为:

$$S = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} R^2(\theta) d\theta = \pi \left[ A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \right] \quad (2-7-76)$$

颗粒投影面平均直径为:

$$\bar{d} = A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R(\theta) d\theta \quad (2-7-77)$$

与颗粒投影面积相等的圆的半径为:

$$R_0 = \left[ A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 \right]^{1/2} \quad (2-7-78)$$

颗粒的不规则度为:

$$IRR = (R_0/A_0)^2 \quad (2-7-79)$$

颗粒外形半径分布平均值的  $n$  阶矩为  $\mu_n$ , 即

$$\mu_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [R(\theta) - A_0]^n d\theta \quad (2-7-80)$$

从而可得出一阶矩  $\mu_1$ , 二阶矩  $\mu_2$  等等。其中  $\mu_1 = 0$ ,  $\frac{\mu_2}{R_0^2}$  为半径分布方差,  $\frac{\mu_3}{R_0^3}$

为半径分布的偏畸度等等。

$R(\theta)$  是单值函数,而在凹形处的  $R(\theta)$  是多值函数,因此,  $R(\theta)$  法不适用凹形颗粒。对凹形颗粒来说,应使用  $(\varphi/l)$  法,即切线法来计算。

毫无疑问,Fourier 分析法使颗粒形貌定量分析前进了一大步,但它是在颗粒二维断面基础上进行的数值化处理。它仅适用于表征粗糙度不大的颗粒,而对粗糙或高凹的颗粒就不适用了。由 Kaye 等人提出,并经 Clark 等人发展的分数维分析法,既能表征颗粒的宏观形状,又能适用于非常粗糙和高凹形的颗粒,其缺点是比较冗长。无疑这些成果使颗粒形貌的研究获得了长足的发展。

## 三、形状系数的应用

### (一) 不同测量方法测值的比较和转换

用不同测量方法所得的结果( 粒度及其分布 )不同 ,因为不同方法所指的特征值不同 ,而数值上的差别又取决于形状 ,见表 2-7-12。

表 2-7-12 显微镜、筛分和沉积分析直径的比较

矿 粒	$d_a/d_A$	$d_a/d_{st}$	$d_{st}/d_A$	形状
小钢粒	1.05	1.00	1.05	球形
石灰石	1.56	1.74	0.90	块状
石 膏	1.56	1.94	0.80	块状
滑 石	1.76	1.74	1.01	块状
云 母	1.68	11.6	0.14	片状

注 : $d_a$  为投影面积直径 ; $d_{st}$  为斯托克斯直径 ; $d_A$  为筛分直径。

从表 2-7-12 可见 ,对于球形或接近球形的颗粒 ,各种方法的实测结果是一致或相当的。这是因为斯托克斯定律是按球形直径计算的 ,同时由于球体的投影是一个与其取向无关的完整的圆 ,其筛分直径也必定等于这个圆的直径 ,所以球体三种不同测量方法所得结果应该一样( 或相近 )。但对块状颗粒情况就不同了。块状粒子在显微镜载物台上取向于最稳定的平面( 即基础面最大的平面 ) ,故其投影面的直径比其他两种直径都大。据观察 ,筛分粒度与颗粒的宽度有密切关系 ,其尺寸通常小于按投影面积确定的尺寸。同样 ,由于不规则颗粒的比表面积较大 ,并随流体阻力增大沉降末速变小 ,因此 ,不规则颗粒的斯托克斯直径比其他两种直径小。这一点在片状颗粒分析时尤为突出 ,因为其下降速度非常慢 ,因而按斯托克斯定律得到的直径非常小。

上述讨论表明 ,如果被测物料为球形颗粒 ,其粒度及粒度分布可用各种方法测量 ,所得结果一致 ,因球形颗粒的“ 粒度 ”是惟一的。而对不规则颗粒 ,用不同的测量方法将得到不同的结果。实际上 ,同一物料用不同仪器测量得到的粒度分布曲线形状是相同的。而且用某仪器测得的粒度与用另一种仪器测得的粒度大小成一定比例 ,该比例系数就是形状系数 ,即

$$\varphi_{12} = d_1/d_2 \quad (2-7-81)$$

式中  $\varphi_{12}$  为形状系数 , $d_1$ 、 $d_2$  分别为用两种仪器测得的粒度。因此 ,若颗粒

形状不随其尺寸变化而变化,那么,通过形状系数可转换不同仪器的测值。

图 2-7-13 是对两种不同形状颗粒用两种不同仪器得到的分析结果。Microtrac 法是利用驹琅和费光衍射原理,得到的是投影面积直径;Sedigraph 法是沉积分析的一种,得到的是斯托克斯直径。当颗粒为圆形时,两种结果完全一致,如图 2-7-13(a)所示。颗粒为不规则形状时,情况就不同了,如图 2-7-13(b)所示。

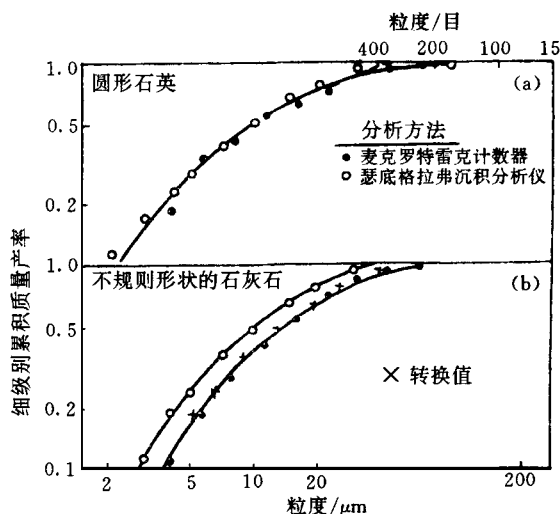


图 2-7-13 麦克罗特雷克(Microtrac)和瑟底格拉弗(Sedigraph)5000D 测定结果

若已知 Sedigraph 法测得粒度分布和形状系数  $\varphi_{M.S}$  为 1.35,则利用  $\varphi_{M.S}$  值很容易就转换成 Microtrac 的粒度分布,即

$$d_M = d_s \varphi_{M.S} \quad (2-7-82)$$

又如某粒群用 Coulter 仪得到其平均粒度为  $32\mu\text{m}$ ,用重力沉积法得到的平均粒度为  $29.2\mu\text{m}$ ,则以  $32/29.2$  乘沉积法粒度分布的各粒度值,便可得到 Coulter 的粒度分布。

显然,上述分析及实例又定义了一种颗粒的形状系数,同时也指出了确定形状系数的另一种方法。

## (二) 综合全级的粒度分布资料

矿物加工过程中的颗粒,常常有很宽的粒度范围,特别是在选矿工艺中,

粒度范围可达  $10^3$  倍或更大。因此,一般都需用两种或两种以上的分析方法,分别对粗细粒级进行测量。如前所述,不同方法的粒度变量不同,为得到多粒级物料的粒度分析资料,就可用形状系数进行处理。

如图 2-7-14 所示,黄铜矿精矿粉的粒度小于 100 目,于是 100~400 目粗粒级可用筛分法分析,小于 400 目的矿粉用沉积分析法测量,结果便得到两种不同方法的粒度特性曲线,如图 2-7-14(a)所示。其中筛分曲线的纵坐标即产率是占全粒级的,而沉积分析的产率是占本级的。前者粒度为筛分直径  $d_A$ ,后者则为斯托克斯直径  $d_{st}$ 。为获得全粒度级分布资料,首先应将粒度标准统一。具体方法如下:

第一步:先把沉积分析的数据——产率换算成占全级的产率并画出相应的曲线,如图 2-7-14(b)所示,从而得到两条大致平行且相互间有一定间距的曲线。

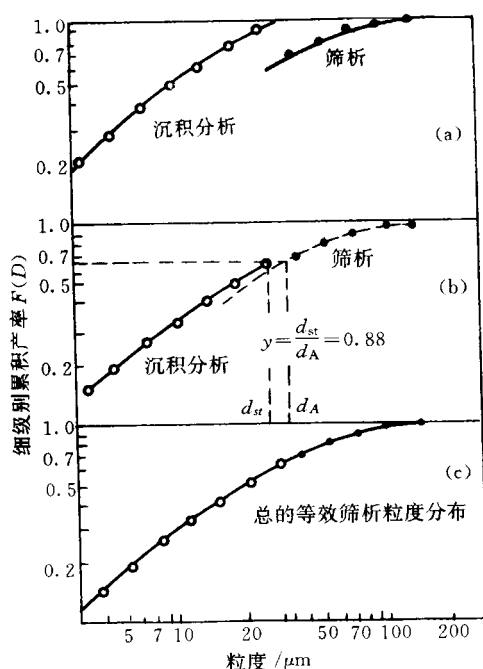


图 2-7-14 用不同测定方法测定同一产品的不同粒级所得粒度分布资料的综合比较

第二步:把沉积分析的分布曲线转换成等效筛分分析曲线。如果已知黄

铜矿粉的形状系数  $\varphi_{A, st}$  ,则等效筛分粒度可由下式求得 :

$$d_A = d_{st} / \varphi_{A, st} \quad (2-7-83)$$

如果  $\varphi_{A, st}$  未知 ,则在图 2-7-14(b)上 ,过  $F(d) = 68\%$  处(由分析知 ,矿粉中小于 400 目物料占总量的 68%) ,画一平行横坐标的直线 ,分别和两条曲线相交 ,对应的  $d_{st}$  和  $d_A$  从横坐标读出 ,于是得 :

$$\varphi_{A, st} = 30/34 = 0.88$$

利用  $\varphi_{A, st}$  便可将(b)图中沉积分析曲线上每一点转换成相应的  $d_A$  值。经以上两次换算 ,便可得到全粒级的粒度分布曲线 ,见图 2-7-14(c)。

## 第三节 颗粒表面

### 一、颗粒表面的形貌

固体和液体不同 ,液体只要处于静止 ,其表面就一定是光滑和均匀的 ,固体的表面却极不规则。和块状固体相比 ,颗粒表面的结构、构造复杂化的程度更突出。据介绍 ,不管经多么小心磨光的固体表面 ,实际还是凹凸不平的。两片磨得很平的金属表面 ,用力压在一起 ,实际能接触的表面仅有其表观接触面的千分之一。精心加工的表面尚且如此 ,自然形成或经破碎、研磨、风化、氧化等机械或自然力作用的表面形态更可想而知了。图 2-7-15 是放大 160 倍的解离方铅矿表面形貌的照片。

大部分矿物属晶体结构。晶体的表面也不是理想晶体的表面 ,都存在有台阶、裂隙、沟槽、位错、缺陷等多种形态。所以 ,Kossel 早就建议以 TLK 模型来表征固体表面的几何特征 ,见图 2-7-16。后来电子显微镜及衍射法测量固体表面的结果都充分证实了这一点。金属晶格、共价晶格或离子晶格矿物表面以及用其他方法获得的表面均是如此。

组成晶体的全部质点都定位在结构中的正确位置上的晶体为完善或理想晶体。或者说 ,组成晶体的质点 ,按照一定的点阵结构 ,在三维方向构成一

个完整的、周期性的原子序列,这样形成的晶体即完善的晶体。事实上这种晶体是不存在的。实际晶体的部分质点都不可避免会放错位置,即存在不同程度的缺陷。

偏离理想状态的不完善晶体,在结构和组成上存在某些缺陷。它在理论和实际应用上都有重要的价值,因为颗粒的许多性质包括化学反应性都和缺陷有关,甚至只有借助缺陷,才能产生或进行运动。例如,晶体缺陷决定着矿物颗粒的化学活性,还影响颗粒的光学、电学、声学、力学、热学等多方面的性质。



图 2-7-15 方铅矿表面的形貌

矿物在生成和经历地质矿床变化过程以及“后天”的采掘、破碎、风化、氧化等人工或自然的加工处理后,不可避免会产生晶体缺陷,位错、嵌镶、扭曲、裂缝加剧,同时还会伴随有非晶化等,这些都极大地影响矿粒的性质和行。

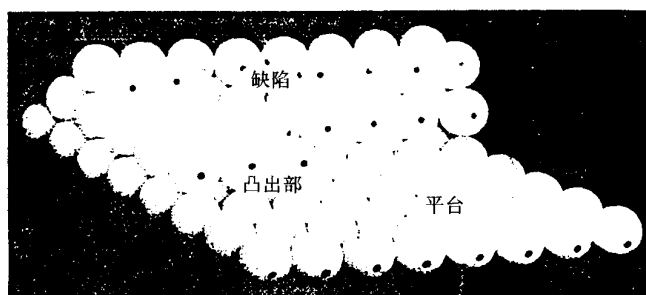
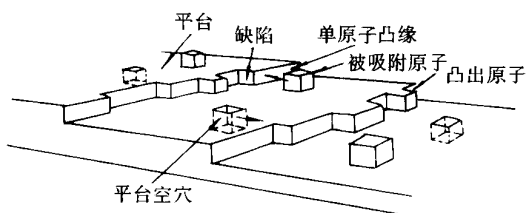


图 2-7-16 固体表面的 TLK 模型

为方便起见,在固体化学中,常把缺陷、位错、镶嵌、扭曲等统称为晶体的缺陷。

根据缺陷存在的方向或尺寸,可将缺陷分为点、线、面、体四种类型

### (一)点缺陷或零维缺陷

这些缺陷包括晶体点阵结构位置上可能存在的空位、取代的外来杂质原子,也包括固体化合物  $AB$  中的部分原子错位,即  $A$  原子占据了  $B$  原子的位置或  $B$  原子占据了  $A$  原子的位置,以及在点阵结构中间隙位置存在间隙离子或原子等情况,如图 2-7-17 所示。

### (二)线缺陷或一维缺陷

此种缺陷的特点是晶体中沿某一条线附近的原子排列偏离理想晶体点阵结构。例如位错就是一种线缺陷。当晶体中有一个晶面在生长过程中中断时,在相隔一层的两个晶面间造成短缺一部分晶面的情况,或者像在两个相邻晶面之间插入一个不完整的晶面一样,使晶体中的一部分质点受到挤压,另一部分受到拉伸,这种缺陷叫刃位错,如图 2-7-18 所示。另一种位错是,虽然晶面的生长并未中断,但它是斜面地绕着一根轴线盘旋生长起来,每盘旋一圈,就上升一个晶面间距,这种缺陷叫螺形位错,如图 2-7-19 所示。在位错处还可能聚集着一些杂原子,这也是线缺陷的一种。

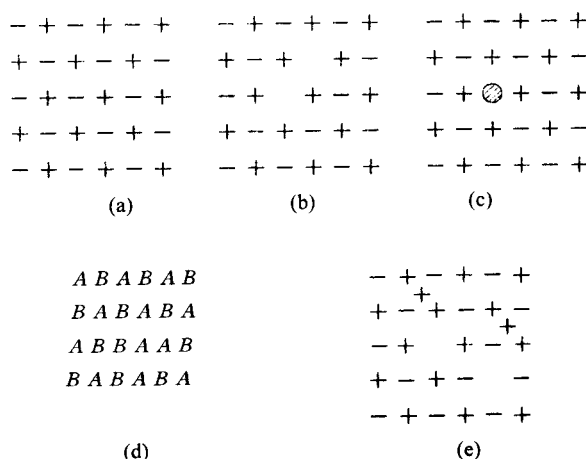


图 2-7-17 晶格的点缺陷

(a)理想晶格 (b)空位 (c)杂原子取代

(d)化合物部分原子错位 (e)间隙离子(或原子)



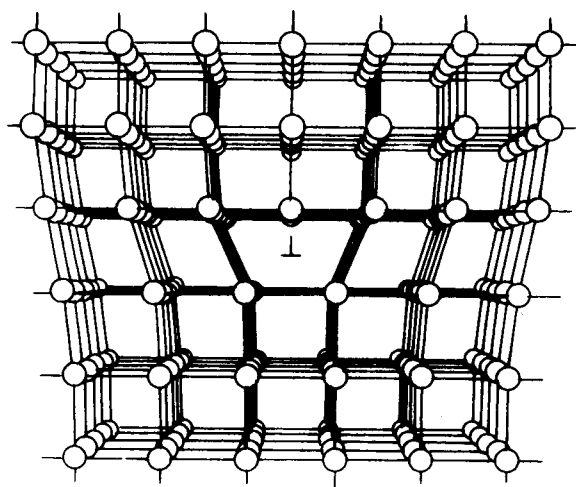


图 2-7-18 具有刃位错的点阵图：⊥表示位错线

### (三) 面缺陷或二维缺陷

此类缺陷存在于多晶体中,多晶体由许多单晶颗粒组成。多晶体中不同取向的晶粒之间的界面称为晶粒界面,是由许多晶核形成晶粒聚集体时造成的。晶粒间界面附近的原子排列比较紊乱,构成了面缺陷。在界面上没有足够的原子去组成完善的点阵序列和形成完全的价键,造成悬空键,所以在晶粒间界而交错处以及上述的位错处是活性中心所在地。

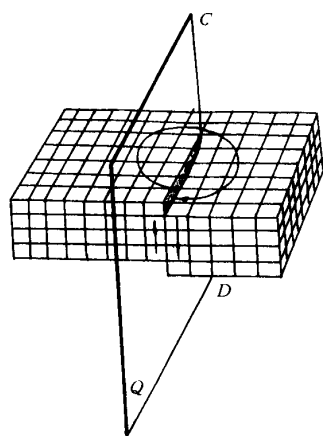


图 2-7-19 具有螺形位错的点阵图：

$Q$  是滑移面,垂直的两个箭头  
表示位错移动的方向

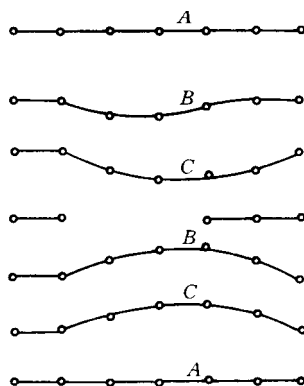


图 2-7-20 堆垛层错缺陷

在紧密排列的质点面一层层堆放时,堆垛的顺序发生如图 2-7-20 所示的情况,即  $ABCABC$  的层堆放变成  $ABCBCA$  的层堆放,这种缺少一个质点层形成的堆垛层错也是一种面缺陷。

#### (四)体缺陷或三维缺陷

这是在三维方向上尺寸比较大的一类缺陷。例如固体包藏杂质、沉淀和空洞等。这些缺陷和基质晶体已不属同一物相,所以也称异相缺陷。

大量事实表明,矿物颗粒表面缺陷对其表面性质和颗粒的行为有直接的影响。例如半导体缺陷浓度(缺陷数目)仅为  $10^{-6}$  数量级时,就足以使其表面吸附特性改变 50%。表面缺陷可使原来亲水的表面变得更亲水,反之则更疏水。晶体矿物在研磨后,产生非晶化层,如磨光的石英晶体表面被无定形  $\text{SiO}_2$  所覆盖,其厚度可达数十纳米,此时即使加热到  $200^\circ\text{C}$ ,表面也依然有相当数量的羟基存在(大约  $1\text{nm}^2$  有 4~5 个),从而大大提高颗粒表面的化学反应性。

关于缺陷对矿物表面和浮选药剂作用的影响实例,在浮选论著中有更多的介绍,此处就不加赘述了。其他实例将在后续的有关内容中加以介绍。

## 二、颗粒的比表面积与理论计算

### (一)颗粒的比表面积

单位体积(或单位质量)物体的表面积,称为该物体的比表面积或比表面。

加以  $V$  代表颗粒的总体积(或以  $W$  代表颗粒的总质量),以  $S$  代表其总表面积,以  $S_v$ (或  $S_w$ )代表比表面积,则有:

$$S_v = S/V \text{ (m}^2/\text{m}^3 \text{ 或 m}^2/\text{mL)} \quad (2-7-84)$$

$$\text{或} \quad S_w = S/W \text{ (m}^2/\text{kg 或 m}^2/\text{g)} \quad (2-7-85)$$

颗粒是细化的固体,粒度越细的粒群,其表面积越大,如直径  $1\text{cm}$  的颗粒破碎成  $1\mu\text{m}$  的颗粒群时,面积约增大  $10^4$  倍。

有巨大表面和表面自由能是颗粒体尤其是粉体的极重要的特征,是颗粒细化后诸多物理和物理化学性质发生变化的根源。

颗粒的表面积包括内表面积和外表面积两部分。外表面积是指颗粒轮

廓所包络的表面积,它由颗粒的尺寸、外部形貌等因素所决定。内表面积是指颗粒内部孔隙、裂纹等的表面积。上述两部分表面积并无明确的界限,例如颗粒尺寸较大时,其内部孔隙的表面积属内表面,但经充分粉碎后颗粒内部封闭的空洞被打开,内表面则变成外表面。

矿粒物料的表面积可通过许多仪器进行测量,也可以利用实际粒度分析资料进行理论计算。此处仅介绍比表面积的理论计算方法。

## (二)比表面积的理论计算

### 1. 单颗粒和粒群的计算

如前所述,单颗粒的比表面积可按(2-7-53)式计算,即

$$S_v = \varphi_{sv} d^{-1} \text{ 或 } S_w = \varphi_{sv} d^{-1} \rho_s^{-1} \quad (2-7-86)$$

式中  $\rho_s$  为颗粒的密度。

对具有粒度分布资料的粒群,也可用上式求出总的表面积  $S$  及比表面积  $S_v$  (或  $S_w$ )。

已知粒度分布频率函数  $F'(D)$ , 则  $F'(D)dD$  代表颗粒直径介于  $D$  和  $D+dD$  之间颗粒体积的百分数,而直径为  $D$  到  $D+dD$  窄粒级颗粒在总表面中所占数量为:

$$dS = \varphi_s D^2 dN \quad (2-7-87)$$

式中  $\varphi_s$  为面积形状系数; $dN$  为粒度在  $D$  到  $D+dD$  区间颗粒数,按下式计算:

$$dN = \frac{VF'(D)dD}{\varphi_v D^3} \quad (2-7-88)$$

式中  $\varphi_v$  为体积形状系数。合并(2-7-87)和(2-7-88)式并积分,得到总的表面积为:

$$S = \varphi_{sv} V \int_0^{\infty} \frac{F'(D)}{D} dD \quad (2-7-89)$$

于是,单位体积比表面积为:

$$S_v = \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{F'(D)}{D} dD \quad (2-7-90)$$

单位质量比表面积为:

$$S_w = \varphi_{sv} \rho_l^{-1} \int_0^{\infty} \frac{F'(D)}{D} dD \quad (2-7-91)$$

## 2. 按粒度特性方程计算

(1) 对盖茨—高登—舒兹曼方程即(2-7-34)式进行处理

为方便起见,把(2-7-34)式变成  $F(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^m$ , 则粒度分布频率函

数为:

$$F'(D) = \frac{dF(D)}{dD} = \frac{m}{D_{\max}^m} D^{m-1} \quad (2-7-92)$$

代入(2-7-90)式可得:

$$\begin{aligned} S_v &= \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{F'(D)}{D} dD = \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{\frac{m}{D_{\max}^m} D^{m-1}}{D} dD \\ &= \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{m}{D_{\max}^m} D^{m-2} dD \\ &= \frac{\varphi_{sv} m}{D_{\max}^m} \int_0^{\infty} D^{m-2} dD = \frac{m \varphi_{sv}}{D_{\max}^m} \frac{1}{m-1} [D^{m-1}]_0^{\infty} \end{aligned}$$

在实际处理时,积分上限取为  $D_{\max}$ , 则由上式可得到最后的计算公式:

$$S_v = \frac{m}{m-1} \varphi_{sv} \frac{1}{D_{\max}} \quad (2-7-93)$$

(2) 对罗辛—拉姆勒方程即(2-7-37)式也进行处理,即

$$F(D) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m\right]$$

则粒度分布频率函数为:

$$F'(D) = \frac{dF(D)}{dD} = -e^{D/D_e \cdot m} \frac{d\left[-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m\right]}{dD} = \frac{m}{D_e^m} e^{-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m} D^{m-1}$$

代入(2-7-90)式可得:

$$\begin{aligned} S_v &= \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{F'(D)}{D} dD = \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{m}{D_e^m} e^{-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m} \frac{D^{m-1}}{D} dD \\ &= \varphi_{sv} \int_0^{\infty} \frac{m}{D_e^m} D^{m-2} e^{-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m} dD \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \varphi_{sv} \frac{m}{D_e^m} \int_0^{\infty} D^{m-2} e^{-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m} dD \\
&= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} m \frac{D^{m-2}}{D_e^{m-1}} e^{-\left(\frac{D}{D_e}\right)^m} dD \quad (2-7-94)
\end{aligned}$$

为了进一步积分,作变量置换,设  $t = (D/D_e)^m$ , 则  $dD = D_e^m \frac{1}{m D_e^{m-1}} dt$ ; 而积分上下限为: 当  $D = 0$  时,  $t = 0$ ; 当  $D \rightarrow \infty$  时,  $t \rightarrow \infty$ , 则(2-7-94)式变为:

$$\begin{aligned}
S_v &= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} m \frac{D^{m-2}}{D_e^{m-1}} e^{-t} D_e^m \frac{1}{m D_e^{m-1}} dt \\
&= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} e^{-t} \frac{D^{m-2}}{D_e^{m-1}} \frac{D_e^m}{D_e^{m-1}} dt \\
&= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} e^{-t} \frac{D_e}{D} dt \\
&= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} t^{-\frac{1}{m}} e^{-t} dt \quad (2-7-95)
\end{aligned}$$

根据伽马函数的定义,即  $\Gamma(1+a) = \int_0^{\infty} t^a e^{-t} dt$ , 当  $a = -\frac{1}{m}$  时, 则  $\Gamma(1+a) = \Gamma(1 - \frac{1}{m}) = \int_0^{\infty} t^{-\frac{1}{m}} e^{-t} dt$ , 因此(2-7-95)式变为:

$$\begin{aligned}
S_v &= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \int_0^{\infty} t^{-\frac{1}{m}} e^{-t} dt = \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \Gamma(1 - \frac{1}{m}) \\
&= \varphi_{sv} \frac{1}{D_e} \left( -\frac{1}{m} \right) \quad (2-7-96)
\end{aligned}$$

若粒度特性方程采用对数正态分布方程即(2-7-40)式时,也可进行同样的数学处理,最后可求得:

$$S_v = \varphi_{sv} D_g^{-1} \exp\left[\frac{1}{2}(\ln \sigma_g)^2\right] \quad (2-7-97)$$

由于上述粒度特性方程属经验方程,任何一种物料的粒度组成都只是近似服从某种分布,因此在使用时,人们更愿意按粒度分析资料直接计算或进行实际测量,这样误差还小些。

## 第八章 矿石的偏光 显微镜分析与鉴定

到目前为止,所发现的天然矿物有 3300 多种,另外还有数量众多的人造矿物,这些矿物均有其自身的化学组成、晶体结构、一定的形态和物理性质,是组成岩石、矿石及工艺产品的基础。为了充分利用和研究这些物质,我们必须对矿物有很好的认识 and 了解。鉴定和研究矿物的方法很多,从简单的肉眼鉴定到现代化的仪器分析。然而,这其中的显微镜鉴定方法仍然是最基本的技术手段。

### 第一节 晶体光学基本知识

在可见光中,矿物可分为透明、半透明和不透明三大类,非金属矿物绝大部分为透明矿物。在鉴定和研究透明矿物的工作中,应用最广泛的方法就是晶体光学法,也就是偏光显微镜研究方法。它是将样品磨成 0.03mm 厚的薄片,在偏光显微镜下,观察矿物的各种光学性质,从而达到鉴定矿物、研究样品的结构构造及工艺加工特征的目的。

#### 一、自然光与偏振光

光具有微粒和波动的双重性,本书中所描述的光学性质都是与光的波动性有关。光是一种电磁波,电磁波是横波,所以光也是横波。它的传播方向

和振动方向相互垂直,在均匀介质中是直线传播的。根据光波的振动特点不同,光又可分自然光和偏光。

**自然光**:在垂直光波传播方向的平面内作任意方向的振动,并且各个振动方向的振幅是相等的,如图 2-8-1a。也就是说,它的振动方向一方面与光波的传播方向垂直,另一方面它又迅速地无规律地变换着自己的方向。直接从光源发出的光一般都是自然光,如太阳光、灯光等。

**偏光**:只在垂直传播方向的某一固定方向上振动的光波,称平面偏振光,简称偏振光或偏光,如图 2-8-1b。偏光振动方向与传播方向所构成的平面称振动面。

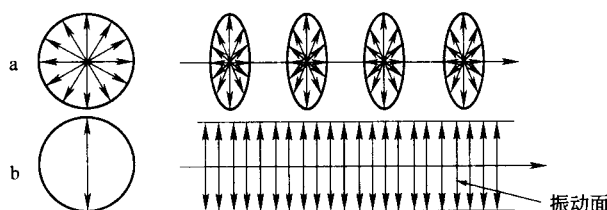


图 2-8-1 自然光和偏振光振动特点示意图

a - 自然光 b - 偏振光

自然光经过反射、折射、双折射及选择性吸收作用可以转变为偏光。使自然光转变为偏光的作用称为偏光化作用。晶体光学研究中主要是应用偏光。研究的主要工具是偏光显微镜,其中有使自然光变为偏光的偏光镜。偏光镜通常是利用双折射作用(尼科尔棱镜等)或选择性吸收作用(偏光片)产生偏光的原理制成的,自然光通过偏光镜(起偏镜)后即转变成振动方向固定的偏光。

## 二、光在均质体与非均质体中的传播

物质根据其光学性质,可分为均质体和非均质体两大类。等轴晶系矿物和非晶质物质的光学性质各方向相同,称为光性均质体,简称均质体。中级晶族和低级晶族的矿物其光学性质随方向而异,称为光性非均质体,简称非均质体。绝大多数矿物属于非均质体,是我们的研究重点。由于矿物在光的照射下有透明与不透明之分,对透明矿物主要是观察光在矿物中传播的特点,这方面的研究比较成熟。

光波在透明矿物中的传播特点如下：

特定频率的光波在均质体中传播时，其传播速度不因光波在晶体中的振动方向不同而发生变化，其折射率值只有 1 个。光波射入均质体中仅发生单折射现象，基本不改变入射光波的振动特点和振动方向。也就是说，自然光射入均质体后，基本上仍为自然光，偏光射入均质体后仍为偏光，而且其振动方向基本不改变。

特定频率的光波在非均质体中传播时，其传播速度随光波在晶体中的振动方向不同而发生改变。因此，非均质体的折射率值亦随光波在晶体中的振动方向不同而发生变化，即非均质体的折射率值有许多个。光波射入非均质体，除特殊方向外，都要发生双折射，分解形成振动方向不同、传播速度不同、折射率值不等的 2 个偏光。2 个偏光的折射率值之差称为双折射率。当入射光波为自然光时，非均质体能改变入射光波的振动特点。当入射光波为偏光时，也可改变入射光波的振动方向。

光波沿非均质体的特殊方向入射时（如沿中级晶族晶体的  $z$  轴方向），不发生双折射，基本不改变入射光波的振动特点和振动方向。非均质体中这个特殊方向称为光轴。中级晶族晶体只有 1 个光轴方向，称为一轴晶；低级晶族晶体中有 2 个光轴方向，称为二轴晶。

透明矿物薄片在偏光显微镜下所显示的一些光学性质，大都与光波在晶体中的振动方向及相应折射率值有密切关系。为了反映光波在晶体中传播时，光波振动方向与相应折射率值之间的关系，我们使用物理学中的光率体概念。

### 三、光率体

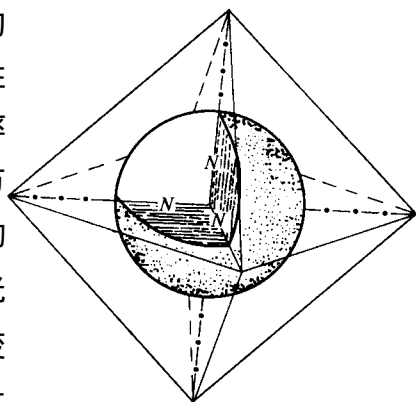
光率体是表示光波在晶体中传播时，折射率值随光波振动方向变化的一种立体几何图形。也可以说它是光波振动方向与相应折射率值之间关系的一种光性指示体。各类晶体的光学性质不同，所构成的光率体形状也不相同，现分述如下：

均质体的光率体：光波在均质体中传播时，向任何方向振动，其传播速度不变，折射率值相等。因此，均质体的光率体是一个圆球体，如图 2-8-2。



均质体光率体任何方向的切面都是圆切面,圆切面的半径代表均质体的折射率值( $N$ )。

一轴晶光率体:中级晶族矿物晶体的水平结晶轴单位相等,其水平方向上的光学性质相同,这类矿物有最大和最小2个主折射率值,分别以符号 $N_e$ 和 $N_o$ 表示。光波振动方向平行 $z$ 轴时,相应折射率值为 $N_e$ ,光波振动方向垂直 $z$ 轴时,相应的折射率值为 $N_o$ 。光波振动方向斜交 $z$ 轴时,相应折射率大小递变于 $N_e$ 与 $N_o$ 之间,以符号 $N'$ 表示。显然,一



轴晶光率体是一个以 $z$ 晶轴为旋转轴的旋转椭球体。旋转轴即为该矿物之光轴。在不同矿物中 $N_e$ 与 $N_o$ 值的大小是不同的,若 $N_e > N_o$ ,则光率体为一个长轴旋转椭球体,如图2-8-3a,这类光率体称为一轴晶正光性光率体,相应的矿物称一轴晶正光性矿物。若 $N_e < N_o$ ,则光率体为一个扁形旋转椭球体,如图2-8-3b,这类光率体称为一轴晶负光性光率体,相应的矿物称一轴晶负光性矿物。在这两类矿物中 $N_e$ 值是随入射光与 $z$ 轴夹角不同而改变,常以 $N'$ 表示,但 $N_o$ 值却始终不变,因此 $N_e$ 被称为非常光, $N_o$ 称为常光。

由上可知,一轴晶光率体是旋转椭球体,无论光性正、负,其旋转轴都是 $N_e$ 轴,其水平轴为 $N_o$ 轴。 $N_e$ 与 $N_o$ 代表一轴晶矿物折射率的最大与最小值,称主折射率。主折射率 $N_e$ 与 $N_o$ 的相对大小决定一轴晶矿物的光性正负。 $N_e$ 与 $N_o$ 的差值为一轴晶矿物的最大双折射率。

在偏光显微镜下鉴定透明矿物时,所遇到的都是矿物晶体不同方向的切面(即不同方向的光率体切面)。一轴晶光率体主要切面有下列3种:即垂直光轴切面,如图2-8-4a,其切面为圆切面,半径等于 $N_o$ ,光波垂直这种切面入射时,不发生双折射,也不改变入射光波的振动方向,相应的折射率等于 $N_o$ ,双折射率等于零。一轴晶光率体只有1个这样的圆切面。第2种主要切面为平行光轴的切面,如图2-8-4b,为椭圆切面,其长短半径分别为 $N_e$ 与

$N_o$ 。光波垂直这种切面入射时,发生双折射分解形成 2 个偏光,其振动方向必定分别平行椭圆切面的长短半径。相应的折射率分别等于椭圆切面的长短半径  $N_e$  与  $N_o$ 。双折射率为椭圆切面长短半径之差,是一轴晶矿物的最大双折射率。这种切面是一轴晶光率体的主切面,它包含光轴,有无数个。第 3 种切面为斜交光轴的切面:如图 2-8-4c,为椭圆切面,其长短半径分别为  $N_o$  与  $N'_e$ ,光波垂直这种切面入射时,发生双折射分解成 2 个偏光。其振动方向分别平行椭圆切面的长短半径,相应折射率等于椭圆长短半径  $N_o$  与  $N'_e$ 。双折射率等于  $N_o$  与  $N'_e$  之差,其大小递变于零与最大双折射率之间。在一轴晶光率体任何斜交光轴椭圆切面长短半径中,始终有一个是  $N_o$ 。

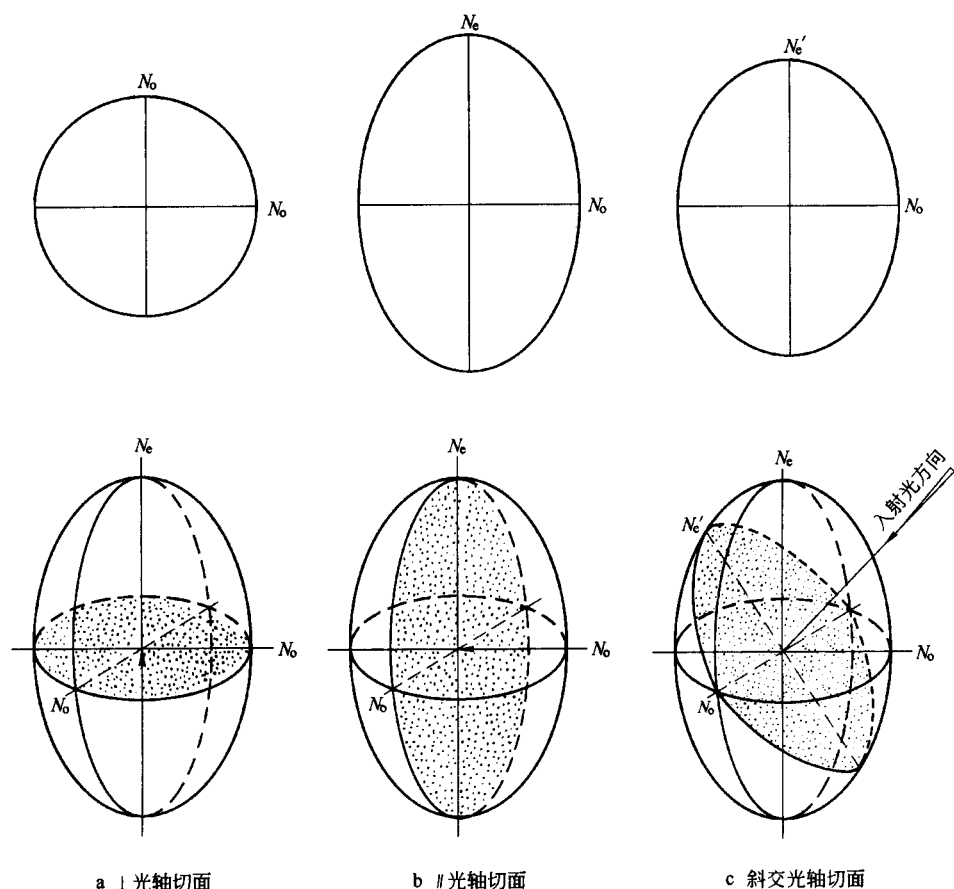


图 2-8-4 一轴晶正光性光率体的主要切面

二轴晶光率体:低级晶族矿物晶体属二轴晶矿物。这类矿物晶体的

3 个结晶轴单位不相等 ( $a \neq b \neq c$ ), 表明它们三度空间方向的不均一性。这类矿物都具有大、中、小 3 个主折射率值。它们分别与互相垂直的 3 个振动方向相当, 常以符号  $N_g$ 、 $N_m$ 、 $N_p$  代表大、中、小 3 个主折射率值。当光波沿其他方向振动时, 相应的折射率值递变于  $N_g$ 、 $N_m$ 、 $N_p$  之间, 一般以符号  $N'_g$  和  $N'_p$  表示。显然, 二轴晶光率体是 1 个三轴不等的椭球体, 如图 2-8-5。二轴晶光率体中, 3 个互相垂直的轴代表二轴晶矿物的 3 个主要光学方向, 称光学主轴, 简称主轴, 即  $N_g$  轴、 $N_m$  轴、 $N_p$  轴。包含 2 个主轴的切面, 称主轴面 (主切面)。二轴晶光率体有 3 个互相垂直的主轴面, 即  $N_g N_p$  面、 $N_g N_m$  面与  $N_m N_p$  面。因为二轴晶光率体是一个不等三轴椭球体, 通过  $N_m$  轴在光率体一侧, 可连续作系列椭圆切面 (图 2-8-5a)。这些切面的半径之一为  $N_m$  轴, 另一半半径递变于  $N_g$  与  $N_p$  之间, 在它们之间可找到 1 个半径等于  $N_m$  的圆切面。在光率体另一侧, 同样可截出另一圆切面 (2-8-5b)。光波垂直这两个圆切面入射时, 不发生双折射, 因而这两个方向是光轴方向, 以符号“ $OA$ ”表示 (图 2-8-5b 及图 2-8-6)。通过光率体中心, 只能截出 2 个圆切面, 即只有 2 个光轴, 故称二轴晶。

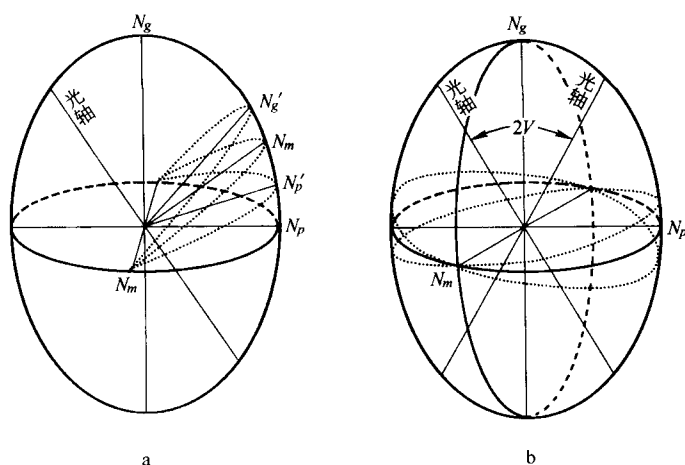


图 2-8-5 二轴晶光率体的圆切面及光轴

包括 2 个光轴的面称光轴面, 以符号“ $AP$ ”表示。通过光率体中心而垂直光轴面的方向称光学法线。2 个光轴之间所夹的锐角称光轴角, 以符号“ $2V$ ”表示。2 个光轴之间锐角的平分线, 以符号“ $B_{xa}$ ”表示 2 个光轴之间钝

角的平分线称钝角等分线,以符号“ $B_{xo}$ ”表示。根据  $N_g$ 、 $N_m$  的相对大小确定二轴晶矿物的光性符号。 $N_g - N_m > N_m - N_p$  时,为正光性。这时  $N_m$  值比较接近  $N_p$ ,以  $N_m$  为半径的圆切面也比较接近  $N_p$  轴(图 2-8-6),垂直圆切面的 2 个光轴则靠近  $N_g$  轴。2 个光轴的锐角等分线( $B_{xa}$ )必定是  $N_g$  轴。相反,当  $N_g - N_m < N_m - N_p$  时为负光性。两光轴之间的锐角等分线( $B_{xa}$ )为  $N_p$  轴。由此可知,当  $B_{xa} = N_g$  时,为正光性;当  $B_{xa} = N_p$  时,为负光性(图 2-8-6)。

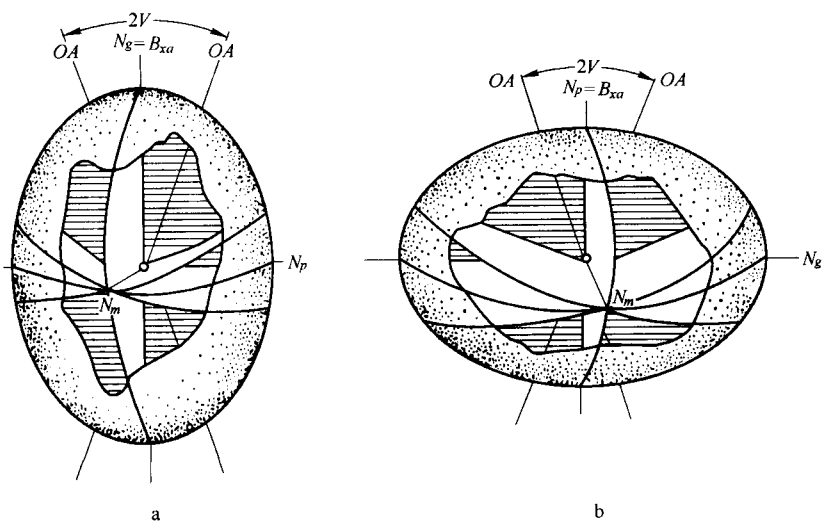


图 2-8-6 二轴晶正、负光率体

二轴晶光率体的主要切面,如图 2-8-7。垂直光轴的切面(图 2-8-7a):为圆切面,半径等于  $N_m$ 。光波垂直这种切面入射时,不发生双折射,不改变入射光波的振动方向。其折射率等于  $N_m$ ,双折射率等于零。平行光轴面的切面(图 2-8-7b):为椭圆切面,长短半径分别等于  $N_g$  与  $N_p$ 。光波垂直这种切面入射时,发生双折射,分解形成 2 个偏光,其振动方向分别平行  $N_g$  与  $N_p$  轴,折射率分别等于  $N_g$  与  $N_p$ 。双折射率等于  $N_g - N_p$ ,是二轴晶矿物的最大双折射率。垂直  $B_{xa}$  的切面(图 2-8-7c、d)为椭圆切面。正光性晶体相当于主轴面  $N_m N_p$  面;负光性晶体相当于主轴面  $N_g N_m$  面,光波垂直这种切面入射时,发生双折射,分解成 2 个偏光,其振动方向分别平行  $N_m$  轴与  $N_p$  轴或  $N_g$  轴与  $N_m$  轴,折射率分别等于  $N_m$  与  $N_p$  或  $N_g$  与  $N_m$ ,双折射率等于

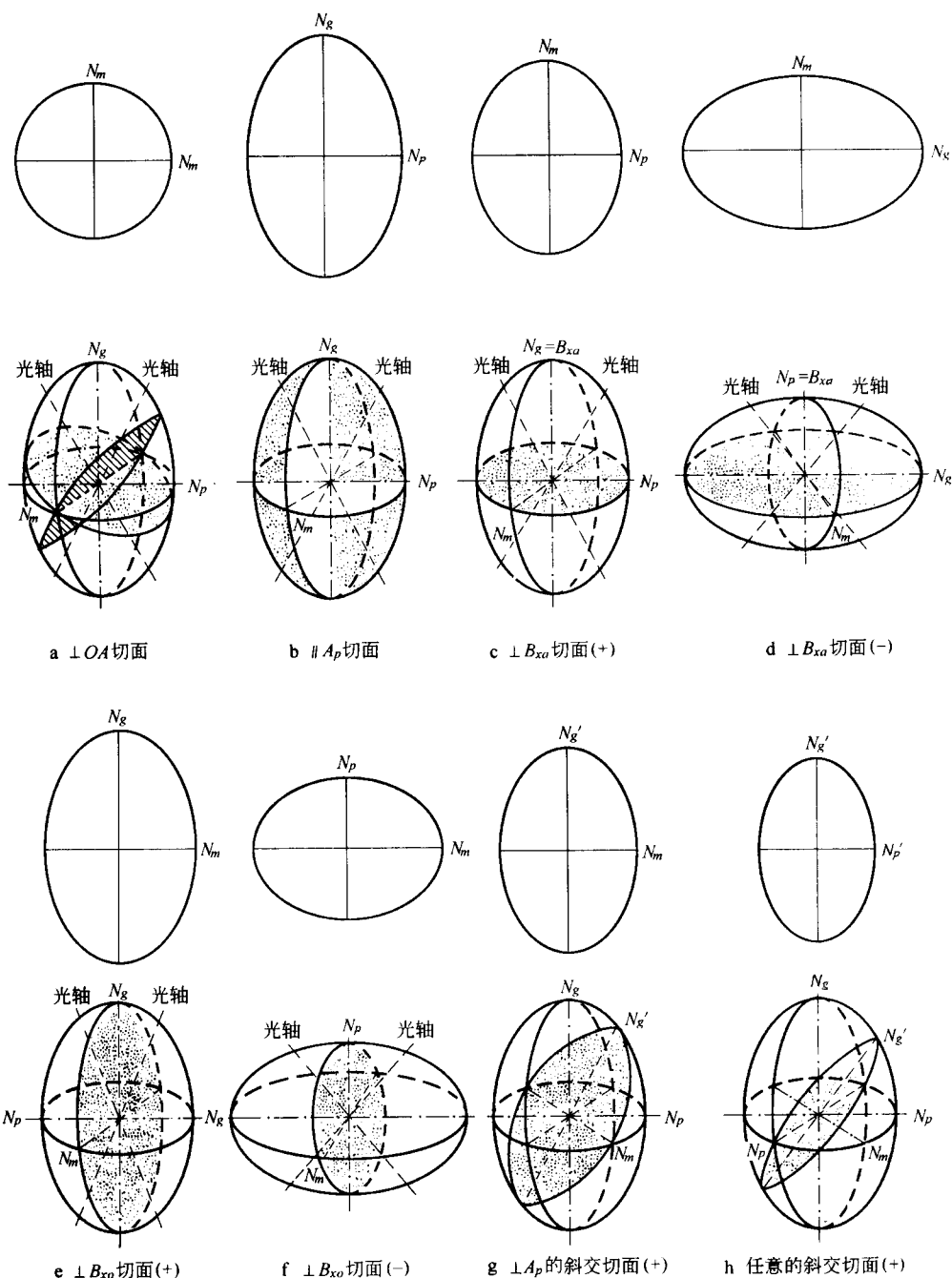


图 2-8-7 二轴晶光率体的主要切面

$N_m - N_p$  或  $N_g - N_m$  其大小介于零与最大值之间。垂直  $B_{xo}$  的切面(图 2-8-7e、f): 为椭圆切面。正光性晶体相当于主轴面  $N_g N_m$  面; 负光性晶体相当

于主轴面  $N_m N_p$  面。光波垂直这种切面入射时,发生双折射,分解成 2 个偏光。其振动方向分别平行  $N_m$  与  $N_g$  轴或  $N_m$  与  $N_p$  轴,折射率分别等于  $N_g$  与  $N_m$  或  $N_m$  与  $N_p$ 。双折射率等于  $N_g - N_p$  或  $N_m - N_p$ ,其大小介于零与最大值之间。但无论光性是正或是负,垂直  $B_{xa}$  切面的双折射率总是小于垂直  $B_{xo}$  切面的双折射率。上述平行光轴面、垂直  $B_{xa}$  及垂直  $B_{xo}$  的切面都相当于二轴晶光率体的主轴面,即属于垂直主轴的切面。斜交切面(图 2-8-7g、h):即不垂直主轴,也不垂直光轴的切面属于斜交切面。这种切面有无数个,它们都是椭圆切面(非主轴面)。斜交切面大体上可分为 2 种类型(1)垂直主轴面(即垂直  $N_g N_p$  面、 $N_g N_m$  面、 $N_m N_p$  面)的斜交切面,称半任意切面(图 2-8-7g)。这种切面的椭圆长短半径中,总有一个半径是主轴( $N_g$  或  $N_m$  或  $N_p$ ),另一半半径是  $N'_g$  或  $N'_p$ 。垂直光轴的圆切面也属这类切面的特例。(2)任意斜交切面(图 2-8-7h)。椭圆的长短半径分别为  $N'_g$  和  $N'_p$ 。光波垂直这类斜交切面入射(陈光轴和主轴以外的任意方向)时,发生双折射,分解形成 2 个偏光。其振动方向分别平行椭圆长短半径方向,折射率值分别等于长短半径。双折射率等于长短半径之差,其大小变化介于零与最大值之间。

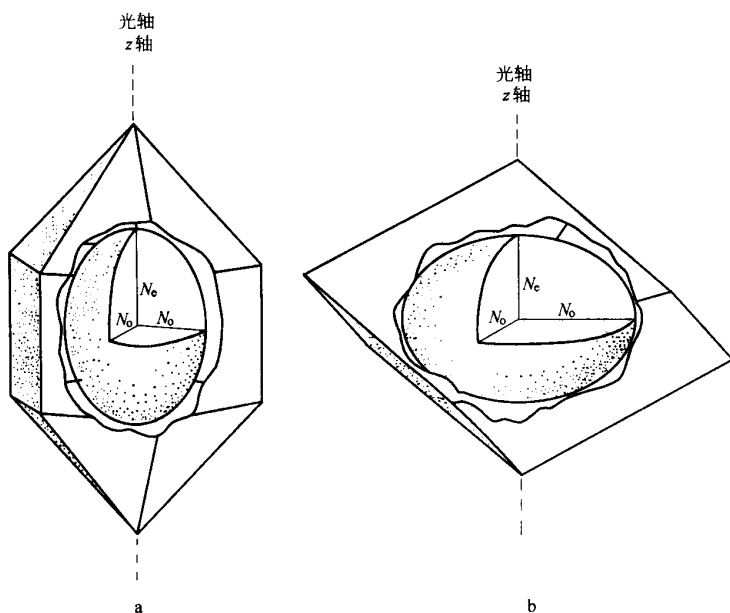


图 2-8-8 中级晶族晶体的光性方位

## 四、光性方位

光率体的主轴与晶体结晶轴之间的关系称光性方位。光性方位因晶体所属的晶系不同而异。中级晶族晶体的光性方位：一轴晶光率体是一个旋转椭球体，其旋转轴（光轴）与晶体的高次对称轴一致（图 2-8-8）。低级晶族晶体的光性方位：二轴晶光率体是三轴椭球体，具有 3 个相互垂直的二次对称轴（主轴）3 个对称面（主轴面）和 1 个对称中心。其对称要素相当于斜方晶系的对称要素（ $3L^23PC$ ）。因此斜方晶系的光性方位是：光率体的 3 个主轴与晶体的 3 个结晶轴一致。究竟哪一个主轴与哪一个结晶轴一致，因矿物不同而不同（图 2-8-9a）。单斜晶系晶体的对称要素是  $L^2PC$ 。 $y$  晶轴为二次对称轴， $y$  轴与光率体 3 个主轴之一重合，其余 2 个主轴与结晶轴斜交。究竟哪一个主轴与  $y$  轴一致，其余二主轴与结晶轴斜交角度有多大，视矿物种类不同（图 2-8-9b）。三斜晶系的对称程度最低，只有 1 个对称中心与光率体的对称中心相当。因而三斜晶系晶体的光性方位是光率体的 3 个主轴与晶体的 3 个晶轴均斜交，其斜交角度因矿物不同而不同（图 2-8-9c）。

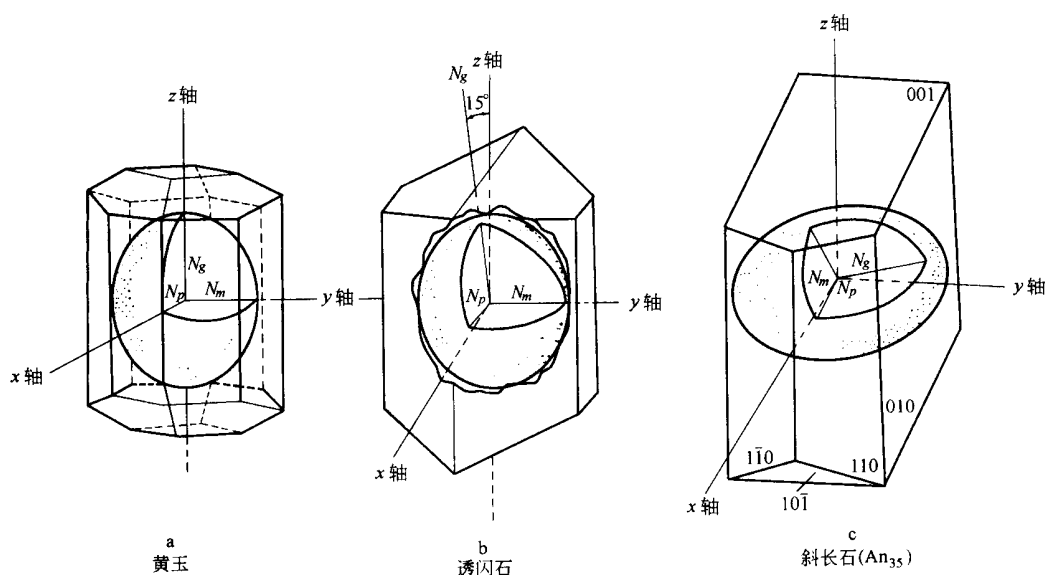


图 2-8-9 低级晶族晶体的光性方位

## 第二节 偏光显微镜概述

偏光显微镜是研究晶体薄片光学性质的重要仪器。它比一般显微镜复杂,最主要的区别是装有 2 个偏光镜。其中一个偏光镜在载物台之下,称下偏光镜(起偏镜),自然光通过下偏光镜后就变成偏光;另一个在物镜之上的镜筒中,称上偏光镜(分析镜)。二者透过偏光的振动面通常是互相垂直的。

### 一、偏光显微镜的构造

偏光显微镜型号很多,但基本构造大体相似。江南光学仪器厂生产的 XPB 和 XPT 系列的偏光显微镜应用普遍,故以 XPT-06 型偏光显微镜(图 2-8-10)为例说明它的构造。

**镜座** 支撑显微镜的全部重量,其外形为具直立柱的马蹄形。

**镜臂** 呈弯背形,其下端与镜座相连,上部装有镜筒。为了使用方便可以向后倾斜,但不宜倾斜过大,以防显微镜翻倒。

**反光镜** 是一个具平凹两面的小圆镜,可以任意转动,以便对准光源,把光反射到显微镜的光学系统中去。使用时应尽量取得所需亮度,一般在弱光源或锥光鉴定时使用凹面。

**下偏光镜** 位于反光镜之上,由偏光片制成。从反光镜反射来的自然光,通过下偏光镜之后,即成为振动面固定的偏光。下偏光镜一般可以转动,以便调节振动方向,通常以“PP”代表下偏光镜的振动方向。

**锁光圈(光阑)** 在下偏光镜之上,可以自由开合,用以控制光的透过量。缩小光圈可使光度减弱。

**聚光镜** 在锁光圈之上,由一组透镜组成。它可以把下偏光镜透出的平行光束聚敛成锥形偏光。不用时可以推向侧面或下降。

**载物台** 为可以水平转动的圆形平台,边缘有刻度( $360^{\circ}$ ),并附有游标尺,可直接读出转动角度。物台中央有圆孔,是光线的通道。圆孔旁有一对



弹簧夹,用以夹持薄片。物台外缘有固定螺丝,用以固定物台。

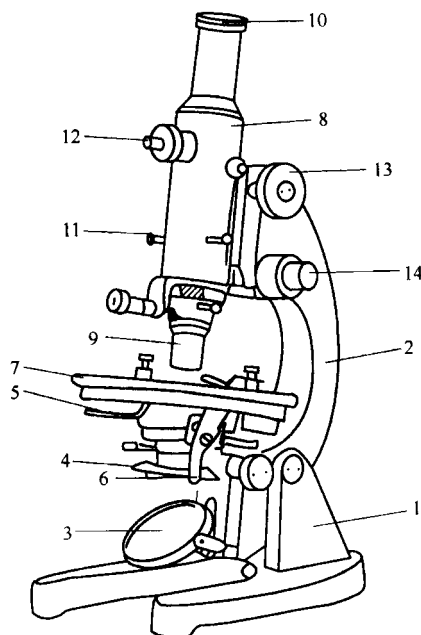


图 2-8-10 XPT-06 型偏光显微镜

1-镜座 2-镜臂 3-反光镜 4-下偏光镜 5-锁光圈拨把;

6-聚光镜拨把 7-载物台 8-镜筒 9-物镜;

10-目镜 11-上偏光镜 12-勃氏镜 13-粗动螺旋 14-微动螺旋

**镜筒** 为长的圆筒,联结在镜臂上。转动镜筒上的粗动调焦螺旋及微动调焦螺旋,可使镜筒上升和下降,用以调节焦距。有的显微镜中,微动调焦螺旋有刻度,可以读出微动调焦螺旋升降距离,通常是每小格等于 0.01mm 或 0.02mm。镜筒上端插目镜,下端装物镜,中间有勃氏镜、上偏光镜及试板孔,有的还有锁光圈。由目镜上端至装物镜处称机械筒长。物镜后焦平面与目镜前焦平面间的距离称光学筒长。显微镜所附说明书中有光学筒长的数据。

**物镜** 是决定显微镜成像性能的重要因素,其价值相当于整个显微镜的  $1/5 \sim 1/2$ ,是由 1~5 组复式透镜组成。其下端的透镜称前透镜,上端的透镜称后透镜。一般情况,前透镜愈小,镜头愈长,其放大倍率愈大。

每台显微镜至少有 3 个放大倍率不同的物镜。每个物镜均刻有放大倍率、数值孔径( $N.A.$ ),有的还刻有光学筒长、薄片盖玻璃厚度及前焦距等。

一般显微镜附有低倍( $3.2\times$ )、中倍( $10\times$ )及高倍( $45\times$ )物镜及油浸镜头( $100\times$ )。使用时按需要选用不同放大倍率的物镜,将其夹于镜筒下端的弹簧夹上。

物镜的光孔角(镜口角或开角)是指通过物镜前透镜最边缘光线与前焦点间所构成的角度(如图2-8-11中的 $2\theta$ )。物镜的数值孔径等于 $\sin\alpha$ (当物镜与物体之间为空气时)或等于 $n\sin\alpha$ (当物镜与物体之间为折射率等于 $n$ 的浸油时)。数值孔径缩写为 $N.A$ 或 $A$ 。从设计上看,通常是放大倍率愈高,其数值孔径愈大。放大倍率相同的物镜,其数值孔径愈大性能愈好。

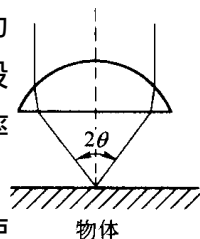


图2-8-11 物镜的光孔角

目镜 它的作用是把物镜放大的物像进一步放大,而使眼睛便于观察。一般显微镜都有 $5\times$ 、 $10\times$  2种目镜,并附有测微尺和测微网。显微镜的总放大倍率等于目镜放大倍率与物镜放大倍率的乘积。

上偏光镜 结构与下偏光镜相同。但其振动面常与下偏光镜振动面垂直。通常以符号“AA”表示上偏光镜的振动方向。上偏光镜可以自由推入或拉出,有的上偏光镜还可以转动。

勃氏镜 位于目镜与上偏光镜之间,是一个小的凸透镜,可以推入或拉出。在观察细小矿物干涉图时,缩小光圈可挡去周围矿物透出光的干扰,使干涉图更清楚。

除以上一些主要部件之外,还有一些附件,有测定切片上光率体椭圆半径名称和光程差的补色器、石膏试板、云母试板和石英楔;有测定颗粒大小、百分含量的物台测微尺、机械台、电动求积仪等。

## 二、偏光显微镜的调节与校正

### (一) 装卸镜头

装目镜 将选好的目镜插入镜筒,并使其十字丝位于东西、南北方向。

装卸物镜 因显微镜的类型不同,物镜的装卸有以下几种类型:弹簧夹型的是将物镜上的小钉夹在弹簧夹的凹陷处,即可卡住物镜。江南XPT-06型偏光显微镜即属此类型。另外还有转盘型、螺丝扣型、插板型等。

## (二) 调节照明(对光)

装上物镜和目镜后,轻轻推出上偏光镜和勃氏镜,打开锁光圈,推出聚光镜。目视镜筒内,转动反光镜直至视域最明亮为止。注意对光时不要把反光镜直接对准阳光,因光线太强易使眼睛疲劳。

## (三) 调节焦距

调节焦距的目的是为了使物像清晰可见,其步骤如下:

首先将观察的矿物薄片置于物台中心,并用薄片夹子将薄片夹紧。

然后从侧面看镜头,转动粗动螺旋,将镜头下降到最低位置。若使用高倍物镜,则需下降到几乎与薄片接触的位置,但需注意不要碰到薄片以免损坏镜头。

最后从目镜中观察,同时转动粗动螺旋,使镜筒缓慢上升,直至视域内有物像后,再转动微动螺旋使之清楚。

准焦后物镜与薄片之间的距离称工作距离,常用  $F.W.O$  表示。工作距离与放大倍率有关,放大倍率愈低,工作距离愈长,反之愈短。

## (四) 校正中心

在显微镜的光学系统中,载物台的旋转轴、物镜中轴、镜筒中轴和目镜中轴应严格在一条直线上。这时旋转物台,视域中心的物像不动,其余物像绕视域中心作圆周运动,不会将物像转出视域以外。如果它们不在一条直线上,旋转物台时,视域中心的物像绕另一中心旋转,并把某些物像转出视域之外(图 2-8-12)。这不仅妨碍观察,甚至有时影响某些数据的测定。因此必须进行中心校正。显微镜中,一般目镜中轴、镜筒中轴和物台旋转轴都是固定的,只有物镜中轴可以调节,所以中心校正实际是调节物镜中心使其与上述中轴吻合。校正物镜中心一般是借助于安装在物镜上的两个校正螺丝来进行的,其校正步骤如下:

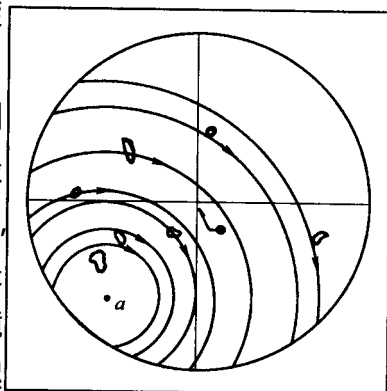


图 2-8-12 旋轴物台物像绕另一中心旋转

(1) 检查物镜是否安装在正确位置上,准焦后在薄片上选一特征点  $a$ ,移动薄片将  $a$  点移

至视域中心,即十字丝交点,如图 2-8-13a 所示。

(2) 固定薄片,旋转物台  $360^\circ$ 。若中心不正,则特征点  $a$  必定绕另一中心作圆周运动,如图 2-8-13b,其圆心  $O$  点即为物台旋转轴中心。

(3) 再旋转物台  $180^\circ$ ,使特征点  $a$  由十字丝中心移至最远处  $a'$  处,如图 2-8-13c 所示。

(4) 扭动物镜上的校正螺丝,使  $a$  点由  $a'$  处向十字丝中心移动一半距离,即  $O$  处,如图 2-8-13d 所示。

(5) 移动薄片,将  $a$  点移至十字丝交点,如图 2-8-13e,旋转物台,若特征点  $a$  不动(图 2-8-13f)则中心已校正,若  $a$  点仍离开十字丝中心,则未完全校正好,还须按上述方法重复校正,直至校好为止。

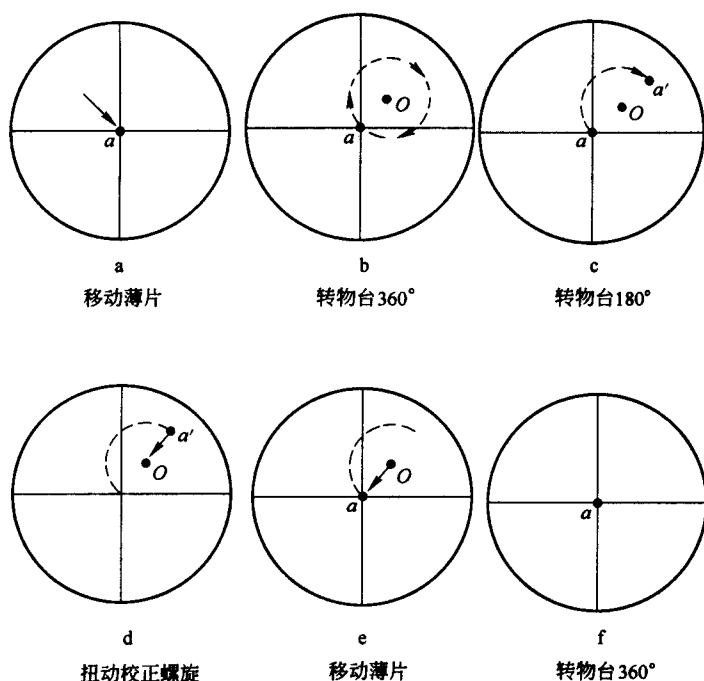


图 2-8-13 校正中心步骤示意图

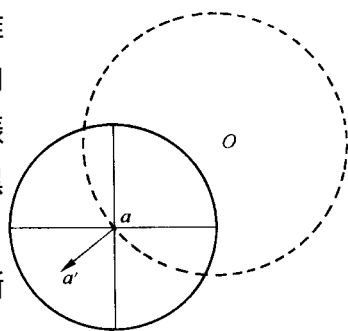
(6) 若偏心很大,旋转物台特征点  $a$  由十字丝交点移至视域之外,如图 2-8-14 所示。这时应根据特征点  $a$  移动情况,估计偏心圆中心点  $O$  在视域外的位置及偏心圆的半径长短。然后将  $a$  点转回十字丝交点。扭动物镜上的校正螺丝,使  $a$  点由十字丝交点,向偏心圆圆心  $O$  点相反方向移动大约等于偏心圆半径的距离。再移动薄片使  $a$  点回到十字丝交点上,转动

载物台可能  $a$  点在视域内旋转,这时可按上述偏心圆小的方法继续校正。若偏心仍然很大,则按偏心大的方法再校正一次。如果经过 3 次校正后,仍然偏心很大,则应检查原因或报告教师。

### (五) 偏光镜的校正

在偏光显微镜的光学系统中,上、下偏光镜的振动方向应当互相垂直,而且在东西、南北方向上。它们还分别与目镜十字丝平行。因此目镜十字丝的方向就代表上、下偏光镜的振动方向。所以偏光镜的校正包括 3 个内容。

(1) 上、下偏光镜的振动方向调至正交:推入上偏光镜,视域黑暗,证明上、下偏光镜振动方向正交。如果视域不完全黑暗,证明上、下偏光镜振动方向不垂直。这时需转动下偏光镜,直至视域黑暗为止。



(2) 确定下偏光镜的振动方向,应用具有清晰解理的黑云母薄片来确定。将薄片置于载物台上,推出上偏光镜,准焦后旋转物台,使黑云母颜色变得最深为止,这时黑云母解理缝的方向,就代表下偏光镜的振动方向,如图 2-8-15。

图 2-8-14 中心偏离较大时,校正中心的示意图

(3) 调整目镜十字丝与上、下偏光镜振动方向一致:仍然用黑云母薄片来校正,其方法如下:

首先推出上偏光镜将目镜十字丝放在东西、南北方向上。转动物台使云母解理缝平行十字丝之一。

然后推入上偏光镜,如果黑云母变黑暗(消光),说明目镜十字丝与上、下偏光镜振动方向一致;如果黑云母不全黑,则转动物台使黑云母变黑暗(消光)。推出上偏光镜,转动目镜使其十字丝之一与黑云母解理缝平行。这时十字丝与上、下偏光镜的振动方向一致。

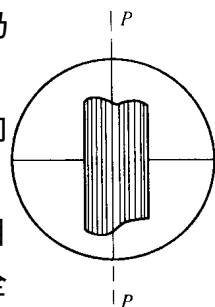


图 2-8-15 下偏光镜振动方向的确定

## 三、偏光显微镜的保养

偏光显微镜是精密的光学仪器,又是教学和科研工作

的重要工具。所以使用显微镜时 ,要特别细心 ,注意保护并自觉遵守以下规则 :

(1)从箱内取出或搬动显微镜时 ,必须用一只手握住镜臂 ,另一只手托住镜座。注意轻拿轻放防止震动。

(2)使用前应进行检查 ,但不能随便拆卸显微镜零件。

(3)使用显微镜各个部件时 ,动作要轻缓 ,装卸镜头时一定要拿稳 ,以防坠落损坏。显微镜的各种附件 ,一律放在盒子里 ,不准放在桌上或书上 ,以免不慎跌落造成损失。

(4)镜头必须保持清洁。有灰尘时必须用专门的擦镜头的软纸擦 ,以免损坏镜头。

(5)下降镜筒时 ,应从侧面看镜头 ,切勿使镜头与薄片相撞 ,而损坏镜头。特别是使用高倍物镜时 ,因其工作距离特别小 ,尤其要注意。

(6)尚未学习使用和不知如何使用的部分和部件 ,切勿随便乱动。如需使用 ,应报告教师。

(7)不得让显微镜晒到太阳 ,以防偏光镜或试板脱胶。显微镜还须防潮 ,不用时放入箱内并放上干燥剂。

(8)显微镜用完后应将上偏光镜、勃氏镜推入镜筒内 ,以免灰尘落入。在镜筒上盖上镜盖。若无镜盖时则目镜不要取下 ,以免灰尘直接落入镜筒内。

(9)使用完后必须登记 ,罩上罩子。若无罩子则放入箱内。

### 第三节 透明矿物在单偏光镜下的光学性质

只用一个偏光镜就是单偏光镜。在单偏光镜下可观察到矿物晶体的形态、解理、颜色和多色性 ,研究矿物的突起、糙面和贝克线等。

#### 一、矿物晶体的形态

每种矿物都有一定的结晶习性 ,从而构成一定的形态。如石榴石常呈菱

形十二面体、云母呈假六方片状、角闪石呈柱状等。这种特定的形态可以帮助我们鉴定矿物。同时矿物的形态和结晶程度往往与形成条件有关,所以研究矿物的形态也能帮助我们了解矿物的成因。

薄片中所见到的矿物形态,并不是矿物晶体的立体形态,而只是矿物某一切面的形态。同一晶体不同方向的切面,其形状和大小可以截然不同。如图 2-8-16 是一个立方体的晶体,由于切面方向不同,切面的形状可以是正方形、三角形、六边形、长方形以及其他形状。所以镜下研究矿物的形态,不能只根据个别切面的外形下结论,必须全面观察,仔细分析比较,最好结合手标本一起观察,才能作出准确的结论。

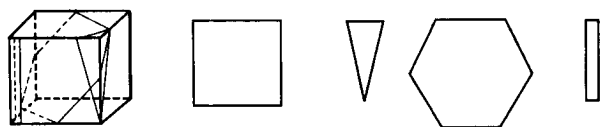


图 2-8-16 矿物晶体形态与切面方向的关系

一般在镜下根据晶面的发育程度,可确定晶体的结晶程度。大致可分为 3 类:

(1) 自形晶 晶形完整,晶体由发育完整的晶面包围。薄片中的自形晶呈规律的多边形,晶体与薄片的交线全为直线(图 2-8-17a)自形晶代表结晶早或结晶能力强的矿物晶体,如角闪石。

(2) 半自形晶:晶形较完整。晶体由部分发育完整的晶面和发育不完整的晶面包围,在薄片呈不规则的多边形。晶体与薄片的交线部分为直线,部分为不规则曲线(图 2-8-17b),半自形晶的结晶时间往往比自形晶晚,如黑云母。

(3) 他形晶 晶形不完整,晶体全由发育不完整的晶面组成。在薄片呈不规则圆粒状。晶体与薄片的交线全为不规则的曲线(图 2-8-17c)如石英晶体。他形晶的结晶时间较晚,受空间限制不可能发育成完整晶形。

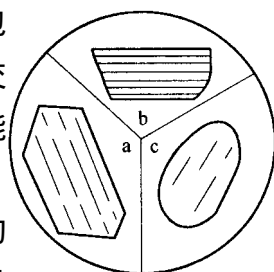


图 2-8-17 结晶程度和解理

## 二、解理及其夹角的测定

解理在矿物部分已介绍过。许多矿物都具有解理,但不同矿物解理的方向、完善程度、组数及解理夹角不同,所以解理是鉴定矿物的重要依据。

在磨制薄片时,由于机械力的作用沿解理面的方向形成细缝。在粘矿片的过程中,细缝又被树胶充填。由于矿物的折射率与树胶的折射率不同,光通过时发生折射作用,而使这些细缝显示出来,所以矿物的解理在薄片中的表现为一些平行的细缝,称为解理缝。根据解理的完善程度不同,解理缝的表现情况也不同,一般可分为 3 级:

(1) 极完全解理 解理缝细密而直长,贯穿整个矿物晶粒,如黑云母(图 2-8-17b)。

(2) 完全解理 解理缝较稀、粗,且不完全连贯,如角闪石(图 2-8-17a)。

(3) 不完全解理 解理缝断断续续,有时只能看出解理的大致方向,如橄榄石的解理。

解理缝的清晰程度,除了与解理的完善程度有关外,还受矿物与树胶的折射率的相对大小控制,两者相差愈大,解理缝愈清楚;反之解理缝就不清楚。所以有些矿物虽有解理,但由于折射率与树胶相近而在薄片看不到解理或解理缝不明显,如长石类矿物就是如此。

解理缝的宽度除了与解理的性质有关外,还与切面方向有关。当切片垂直解理面时,解理缝最窄,并代表解理的真实宽度,此时提升镜筒,解理缝不向两边移动,如图 2-8-18。当切片方向与解理面斜交时,则解理缝必然大于真实宽度,如图 2-8-18。这时提升镜筒,解理缝要向两边移动。当切片方向与解理面的夹角( $\alpha$ )逐渐增大,则解理缝逐渐变宽,而且越来越模糊。当  $\alpha$  角增大到一定程度解理缝就看不见了,这个夹角称为解理缝的可见临界角。另外切片方向与解理面平行时也看不到解理缝。所以有解理的矿物,在薄片不一定都能看到解理缝,主要受切面方向的控制。



解理夹角的测定:有些矿物具有 2 组解理,如角闪石和辉石。具 2 组解理的矿物,其解理夹角是一定的,所以测定其夹角也可帮助我们鉴定矿物。解理夹角在矿物晶体中是一定的,但在切片中由于切片方向不同,其解理角大小有一定差别。只有同时垂直于 2 组解理面的切面才能反映出 2 组解理的真正夹角。所以测定解理夹角时,必须选择垂直于 2 组解理面的切面,这种切面的特点是 2 组解理缝清楚,提升镜筒时,解理缝不向两边移动。

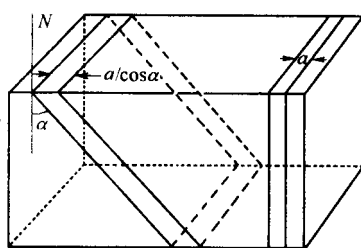


图 2-8-18 解理缝宽度与切片方向的关系

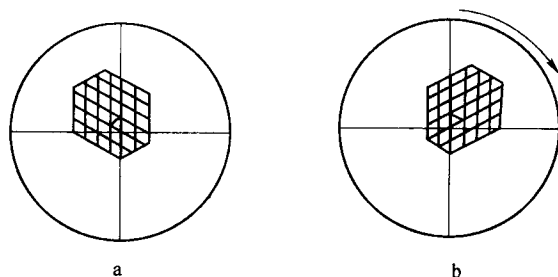


图 2-8-19 解理夹角的测定

测定解理夹角的步骤如下:

- (1) 按上述原则选择垂直于 2 组解理面的切面。
- (2) 转动载物台,使一组解理缝平行十字丝竖丝如图 2-8-19a 所示,记下载物台读数  $a_0$ 。
- (3) 旋转物台,使另一组解理缝平行目镜竖丝,如图 2-8-19b 记下物台读数  $b$ ,两次读数之差即为解理夹角。

### 三、颜色和多色性、吸收性

矿物的颜色是由光波透过矿片时经过选择性吸收后而产生的。若矿物对白光中各色光吸收程度相等,即均匀吸收,则矿物为无色透明。若是对白光中各色光是选择性吸收,则光通过矿片后,除去吸收的色光,其余色光互相混合,就构成该矿物的颜色。

颜色的深浅(又称颜色的浓度),是由矿物对各色光波吸收能力大小决定

的,吸收能力大颜色就深,反之就浅。吸收能力除与矿物本身性质有关外,还与薄片的厚度有关。

均质体矿物只有 1 种颜色,而且颜色深浅无变化。非均质体矿物的颜色和颜色深浅是随方向而变化的。因非均质体的光学性质随方向而变化,对光波的选择性吸收和吸收能力,也随方向而变化。因此在单偏光镜下旋转物台时,许多具有颜色的非均质体矿物的颜色和颜色深浅要发生变化而构成了所谓多色性和吸收性。

多色性是指矿片的颜色随振动方向不同而发生变化的现象。

吸收性是指矿片的颜色深浅发生变化的现象。

非均质体矿物的选择性吸收与矿物本身的光学性质有密切关系,一般可用光率体主轴来表示。

例如:一轴晶矿物有 2 个主要颜色,与主轴  $N_e$  和  $N_o$  相当,称二色性矿物。如:一轴晶电气石的多色性为: $N_o$  = 深蓝色, $N_e$  = 浅紫色,并将此称为多色性公式。又因  $N_o$  方向的颜色比  $N_e$  方向的颜色深,表示  $N_o$  方向吸收能力较强,即  $N_o > N_e$ ,称吸收性公式。

二轴晶矿物有 3 个主要颜色,分别与光率体的 3 个主轴  $N_g$ 、 $N_m$ 、 $N_p$  相当,称三色性矿物。如二轴晶角闪石的多色性为  $N_g$  = 深绿色、 $N_m$  = 绿色、 $N_p$  = 浅黄绿色。吸收性公式: $N_g > N_m > N_p$ ,称正吸收,如果与此相反  $N_p > N_m > N_g$  则称反吸收。

在观察矿物的多色性及吸收性时要多选一些颗粒,尤其是应选一些定向切面,如垂直光轴的、平行  $N_o$ 、 $N_e$  的切面或是平行  $N_g$ 、 $N_p$  的切面。

#### 四、薄片矿物的边缘、贝克线、糙面及突起

薄片中的矿物,由于与树胶的折射率有差别,在单偏光镜下,当光通过两者的交界处时要发生折射、反射作用,从而产生一些光学现象,表现为边缘、贝克线、糙面及突起。

(1) 矿物的边缘与贝克线 在 2 种折射率不同的物质接触处,可以看到比较黑暗的边缘,称矿物的边缘。在边缘的附近还可看到一条比较明亮的细

线,升降镜筒时,亮线发生移动,这条较亮的细线称为贝克线或光带。

边缘和贝克线产生的原因主要是由于相邻两物质折射率值不等,光通过接触界面时,发生折射、反射引起的(图 2-8-20)。在图 2-8-20 中, $N > n$ 、 $F_1 F_1$ 、 $F_2 F_2$ 、 $F_3 F_3$  为焦点平面及升降顺序,该图共介绍 4 种接触关系,其结果均是光线在接触处均向折射率高的一方折射,这样就使接触界线一边光线相对减少,而形成矿物的边缘,边缘的粗细、黑暗程度与两物质折射率差值大小有关,差值愈大边缘愈粗愈黑。而在接触界线的另一边,光线相对增多而形成贝克线。如果慢慢提升镜筒,即由  $F_1 F_1$  上升至  $F_2 F_2$ ,可见到贝克线向折射率大的一方移动,否则相反。贝克线的灵敏度很高,两物质折射率相差在 0.001 时,贝克线仍清楚。因此贝克线常用来测定相邻两物质折射率的相对大小。

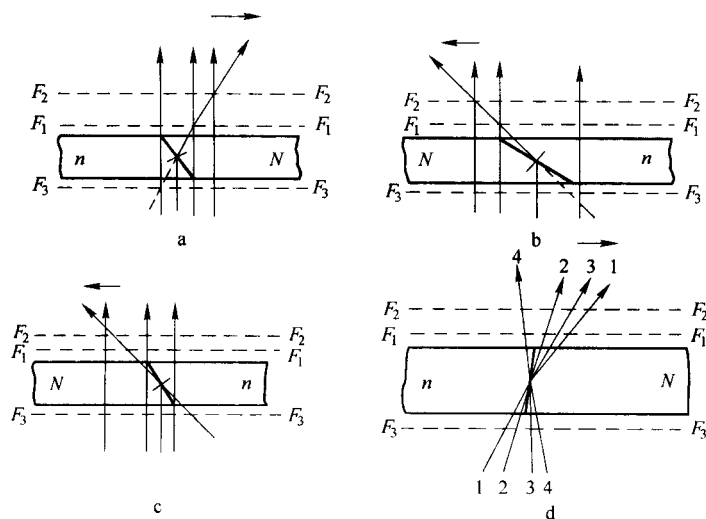


图 2-8-20 贝克线的成因及贝克线的移动规律

(2) 矿物的糙面 在单偏光镜下观察矿物表面时,可以看到某些矿物表面比较光滑,某些矿物表面显得较为粗糙而呈麻点状,好像粗糙皮革一样,这种现象称为糙面。其产生的主要原因是矿物薄片表面具有一些显微状的凹凸不平,覆盖在矿片上的树脂折射率又与矿片的折射率不同。光线通过两者之间的界面,将发生折射,甚至全反射作用,致使矿片表面的光线集散不一,而显得明暗程度不同,给人以粗糙的感觉。一般是两者折射率差值愈大,矿片表面的磨光程度愈差,其糙面愈明显。

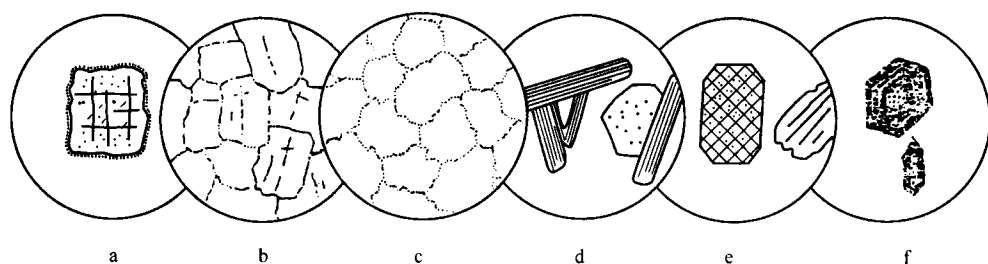


图 2-8-21 突起等级示意图

a- 负高突起 b- 负低突起 c- 正低突起 d- 正中突起;  
e- 正高突起 f- 正极高突起

(3) 矿物的突起 在薄片 中,各种不同的矿物表面好像高低不相同,某些矿物显得表面高一些,某些矿物则显得低平一些,这种现象称为突起(图 2-8-21)。矿物的突起现象仅仅是人们视力的一种感觉,在同一薄片 中,各个矿物表面实际上是在同一平面上。所以会产生高低的感觉,主要是由于矿物折射率与树胶的折射率不同所引起的。两者折射率值相差愈大,矿物的边缘愈粗,糙面愈明显,因而使矿物显得突起很高,否则相反。所以矿物的突起高低,实际上是矿物边缘与糙面的综合反映。树胶的折射率等于 1.54,折射率大于树胶的矿物属正突起,折射率小于树胶的矿物属负突起。区别矿物突起的正负必须借助于贝克线。当矿物与树胶接触时,提升镜筒,贝克线向矿物内移动时属于正突起;贝克线向树胶移动属于负突起。

根据矿片边缘、糙面的明显程度及突起高低,突起等级可以划分为 6 个等级,见表 2-8-1。

表 2-8-1 突起等级

突起等级	折射率	糙面及边缘等特征	实 例
负高突起	$< 1.48$	糙面及边缘显著,提升镜筒,贝克线向树胶移动	萤石
负低突起	$1.48 \sim 1.54$	表面光滑,边缘不明显,提升镜筒,贝克线向树胶移动	正长石
正低突起	$1.54 \sim 1.60$	表面光滑,边缘不清楚,提升镜筒,贝克线向矿物移动	石英,中长石

突起等级	折射率	糙面及边缘等特征	实 例
正中突起	1.60 ~ 1.66	表面略显粗糙 ,边缘清楚	透闪石 ,磷灰石
正高突起	1.66 ~ 1.78	糙面显著 ,边缘明显而且较粗	辉石 ,十字石
正极高突起	> 1.78	糙面显著 ,边缘很宽	楣石 ,石榴石

由此可以看出 ,矿物的边缘、糙面明显程度以及由此而表现出的突起高低 ,都是反映矿物折射率与树胶折射率的差值大小。差值愈大 ,矿物的边界与糙面愈明显 ,则突起愈高。

## 第九章 反光显微镜下的 矿石分析与测试

对于不透明和透明度低的矿物,不宜制成薄片在透射光下进行鉴定,而需要制成光片在反光显微镜下鉴定。反光显微镜也称矿相显微镜,主要用于金属矿物的研究。

### 第一节 光片与反光显微镜

#### 一、光片

光片是从矿石标本上切割下来、有 1 个面被磨光供镜下观测的矿样,常切成  $30\text{mm} \times 25\text{mm} \times 10\text{mm}$  的矩形块。若光片除了用于镜下观测外,还要用于电镜等其他手段的研究,则要限制光片的尺寸,因电镜样品室往往较小。制备光片可分为切割、研磨和抛光 3 个过程。

切割是用切片机将光片从标本上分离下来,修去多余的部分,使其初步成形。若标本疏松易碎,则切割前要先用胶处理,称为煮胶。有时为了满足鉴定的需要,还必须按规定的方向切割,这种有方位要求的光片称为定向光片。

研磨又可分为粗磨、细磨和精磨 3 个阶段,即按所用磨料由粗到细,依次在磨片机上研磨,最后用极细的磨料在玻璃板上手工磨动,直至光片表面光

滑如镜。

抛光通常先在帆布或木盘上加抛光剂抛磨,然后在毛呢磨盘上加氧化镁等抛光剂精抛。

以上每一道工序都应达到相应的质量要求,否则,前面的工序未达到要求就进入后一工序,急于求成会导致事倍功半,甚至被迫返工。

对于粒状砂矿,如人工重砂或选矿产品,需要制成光片时可先用胶将砂粒粘结成团块,再按上述工序制片,这种光片称为砂光片。

为了同一光片既能用透射光观测透明矿物又能用反射光观测不透明矿物,可将样品加工成光、薄两用片,简称光薄片。它是将样品切成薄片后,用胶粘在载玻片上,表面磨平抛光但不加盖玻片,以便在透、反射光下均能观测。

## 二、反光显微镜

与鉴定透明矿物的偏光显微镜相比,反光显微镜只是增加了光源和垂直照明器,其他部件基本是相同的(图 2-9-1、图 2-9-2)。现仅对光源和垂直照明器作一介绍。

### (一)光源

光源是反光显微镜不可缺少的组成部分,是为了得到一定亮度和质量的光线而设置的。反光显微镜采用白炽灯或卤钨灯作光源,电压为 6~12V,功率 30W 左右,最大可达 100W。光源可直接安装在显微镜的进光管上,如江南光学仪器厂生产的 XPK-6 型反光显微镜;光源也可制成独立的灯架,与显微镜配套使用,如苏州光学仪器厂生产的 XPA-1 型透、反两用显微镜。

光源关系到机域的明亮程度,故直接影响矿物各种光学性质的观测以及显微照相的效果。因此,鉴定矿物前,必须调节好光源。调节光源一是要选择适当的电压,使亮度适中;二是要调节好灯泡的空间位置,使光线均匀。对于安装在显微镜上的连体式光源,可通过调节螺丝使灯头在三维空间移动,直至光源点与进光管在同一水平线上,此时视域最亮且光线均匀。对于不与镜体相连的活动光源,可直接移动灯架的位置和方向,并沿立柱升降灯的高度,以及调节灯的入射角度,使光线平行射入进光管,调至视域最亮且光线均

匀。光源发出的光一般都带有黄色,必须在灯泡前加蓝色滤光片,使入射光接近白色。此外,为了消除灯丝或灯泡壁对光线的影响,灯泡前还需加一毛玻璃片。

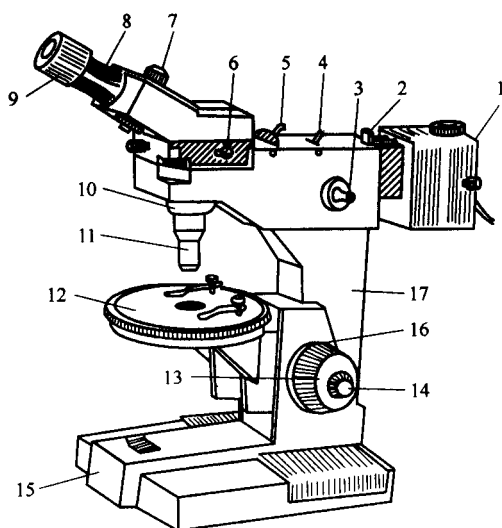


图 2-9-1 XPK-6 型矿相显微镜构造图

- 1-灯源; 2-毛玻璃; 3-滤色片; 4-孔径光圈; 5-一起偏  
镜手柄; 6-检偏镜手柄; 7-勃氏镜手轮; 8-目镜筒; 9-  
目镜; 10-物镜座; 11-物镜; 12-物台; 13-粗动手轮;  
14-微动手轮; 15-镜座; 16-调节手轮; 17-镜臂

## (二)垂直照明器

垂直照明器是反光显微镜上处理和调节光线的主要部件,可分为入射光管和反射器 2 个部分。

入射光管是光源和反射器之间的导光系统,使光源发出的光得到调整并照射到反射器上。从光源至反射器,依次设有下列部件(见图 2-9-2);

光源聚光镜(图 2-9-2 中的“2”、“3”):位于入射光管前端,靠近光源。其作用是使光源发出的光线聚焦于视野光圈上。

孔径光圈:也称口径学圈,为一可任意开闭的虹膜式光圈。其作用是控制入射光束的直径、影像反差强弱及物镜的有效孔径。孔径光圈缩小时,入射光线直径变小,视域亮度随之减弱,分辨力降低。但缩小孔径光圈可形成较为垂直的入射光,使有害的杂乱光线减少,并减弱镜筒内的耀光,降低色差。



和球差的影响,增强影像反差,使之更为清晰。可见,孔径光圈必须调节到合适的位置,用低倍物镜时通常可开至与孔边基本重合;用中倍或高倍物镜时应适当缩小孔径光圈。

准直透镜(图 2-9-2 中的“4”)能调整光线的方向,将来自孔径光圈中每一点的光线变成一束平行的光柱。

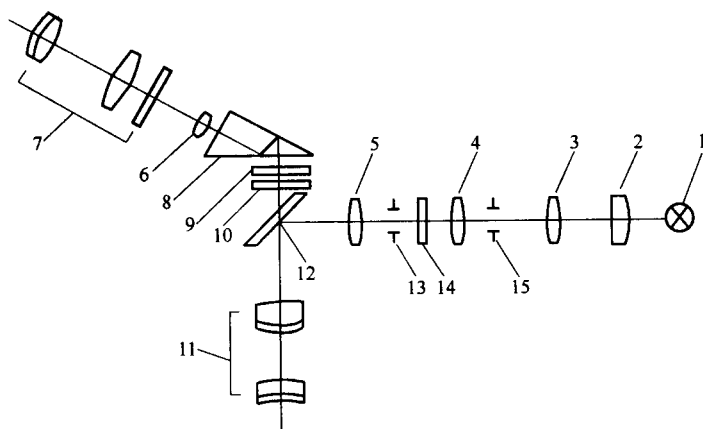


图 2-9-2 XPK-6 型矿相显微镜光路图

1-灯源；2,3,4,5-聚光镜；6-勃氏镜；7-目镜；8-棱镜；9-检偏镜；

10-补偿器；11-物镜；12-玻璃片式反射器；13-视场光圈；14-起偏镜；15-孔径光圈

前偏光镜:也称起偏镜,能使入射的自然光变为平面偏光,通常可以自由旋转  $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。观测矿物时,应使其振动方向为左右方向(水平振动),因为此时反射器反射向下的光强比其呈前后方向(直立振动)时大。

视野光圈:也称视域光圈或视场光圈,能控制视域的大小。适当缩小视野光圈可挡去有害的杂乱反射光,降低耀光的影响,使视野内明暗对比度增加,物像清晰度提高。鉴定矿物时,通常将视野光圈调至与视域的自然状态同大,如再放大,不仅不能增大视域,而且能放进更多的杂乱光线。

校正透镜(图 2-9-2 中的“5”)也称消色透镜,位于视野光圈后方。能将视野光圈之像准确校正于光片表面上,使视域中的物像清晰。校正透镜常可前后移动,它还具有消除色差和球差的功能。

反射器是垂直照明器中最重要的部件,能将来自进光管的水平入射光垂直向下反射,透过物镜达到光片表面。常用的反射器有玻片式和棱镜式两种。

玻片反射器是将一玻璃片镶嵌在东西向的水平轴上,使玻片表面与镜筒光轴呈  $45^\circ$  交角。为了增强玻片的反射能力,在其下面镶有高折射率的物质。<sup>1</sup>同时,为了增强光线透过玻片向上射向目镜的能力,又在其上侧镀了低折射率物质。当入射光线射到玻片反射器上时,一部分光线透过玻片而损失,另一部分光线被反射向下,通过物镜射至矿物光片上。当光线自矿物光片向上反射再次到达玻片时,又有一部分光线被反射回光源而损失,余下的部分透过玻片至目镜(图 2-9-3a)。玻片反射器的

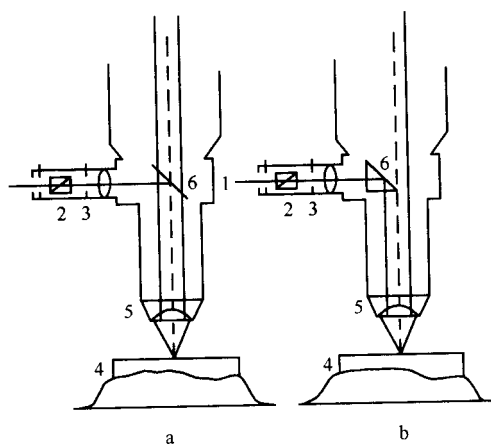


图 2-9-3 反射器示意图

a-玻片式 b-棱镜式

1-光源 2-前偏光镜 3-视野光圈;

4-光片 5-物镜 6-反射器

的优点是光线可以通过物镜的全孔径,视域亮度均匀,分辨力较强,可以进行全孔径偏光图的观察。缩小孔径光圈可使光线近于垂直入射和反射,在矿物光学性质测定时可得到较正确的结果。但是,玻片反射器光线损失大,即使假设矿物光片的反射率可达 100%,到达目镜的最大光强也只有入射光强的 21%。此外,光线多次透过玻片,因二次反射产生耀光,会影响物像的清晰度。

棱镜式反射器有直角棱镜和三次全反射棱镜 2 种。直角棱镜如图 2-9-3b 所示,截面为直角等腰三角形,被安装在显微镜镜筒一半的位置。入射光线进入棱镜后,可被棱镜的斜面全部反射向下,经物镜到达光片表面,再由光面反射向上,经物镜进入镜筒。此时有一半光线被棱镜反射回光源,另一半光线可直接到达目镜。因此,若光强经矿物光面和透镜表面的反射没有损失,则到达目镜的最大光强为入射光强的 50%,即有效光线比玻片式反射器强一倍以上。可是,棱镜反射器遮去了光路的一半,不仅降低了物镜的分辨能力,而且观察偏光图时也只能看到半个图形。此外,当入射光的振动面不严格与反射器对称面平行或垂直时,反射光将发生明显的椭圆偏振化和椭圆长轴的旋转,从而影响某些光学性质的测定。用高倍物镜时这种影响更大。

为了消除这一缺点,可改用3次全反射棱镜,它是将普通棱镜的直角截去,形成一个与斜面平行的平面(图2-9-4)。入射光经3次全反射后,产生 $180^\circ$  ( $3 \times 60^\circ$ )的周相差,使透出棱镜的光仍为直线偏光。

### (三)反光显微镜的调节使用与保养

反光显微镜的调节使用主要包括中心校正、偏光系统校正和垂直照明系统校正3方面。

中心校正方法与透射偏光显微镜一致。

偏光系统校正一方面是要将前偏光镜的振动方向调至东西(左右)方向,另一方面是检查两偏光镜的正交情况。前偏光镜的振动方向可用辉钼矿或石墨来检查,将其中1个矿物的延长方向调

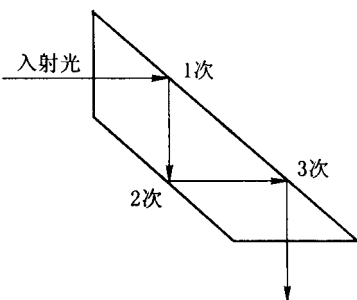


图2-9-4 3次全反射棱镜

至东西向,调节前偏光镜直至视域中的矿物最亮,此时前偏光镜的位置即是东西方向。若旋转物台将矿物延长方向调至南北向,则视域最暗。检查两偏光镜的正交情况可用钢蓝、辉锑矿、辉钼矿或石墨等矿物。将上述矿物之一置于物台上,调节上偏光镜,使旋转物台时矿物解理平行十字丝最暗,与十字丝成 $45^\circ$ 角最亮。即旋转物台一周,出现“四明四暗”的现象,此时两偏光镜已严格正交。若两偏光镜不正交,会出现明暗相间不等的“歪四明四暗”,离正交位置较远时可出现“两明两暗”现象。

垂直照明系统的校正主要是调节反射器、视野光圈和孔径光圈。调节反射器时,缩小视野光圈使视域成一小亮点,转动反射器使亮点正处于十字丝中心,此时反射器处于正确位置。调节视野光圈也需缩小该光圈使视域成一亮点,移动准直透镜,使亮点边缘清楚,然后放大视野光圈至与视域边框同大。调节孔径光圈需取下目镜或推入勃氏镜,推出上偏光镜,若缩小孔径光圈后在物镜最后1个界面上所成之像不在正中心,则需调节孔径光圈校正螺丝,将其调至中心。

反光显微镜的保养与透射偏光显微镜一致。

## 三、光片的安装

鉴定矿物前,必须先擦净光片的表面,再用胶泥将光片粘在载玻片上,然

后用压平器将光片压平。

光片通常在粗毛呢上擦净。毛呢固定在一块小木板上,制成擦板。擦光片时,手持光片从一个方向在擦板上擦去光片表面的尘污。不要像磨刀式的来回擦动或磨墨式的转圈擦动,以免擦不干净或损坏光面。

用胶泥粘接光片和载玻片时,应将胶泥搓成小球,置于载玻片中央,再将光片的底面轻轻压在胶泥球上。注意胶泥要适量,太少了不仅粘不稳光片,而且压平时载玻片易碎;太多了则易被压到光片的四周,污染光片和显微镜等。

光片基本装好后,将其放到压平器上压平,以保证光片表面与载玻片严格平行。注意压光片动作要轻缓,待压平器接触到光片表面时,稍用力下压即可。冲击性下压或用力太猛均有可能破坏光片或载玻片。

在操作顺序上,也可先装片,后擦净,再压平,但不可先压平后擦净。因为那样会改变已固定的光片方位,影响光学性质的正确测定。

## 第二节 矿的反射率与双反射

### 一、反射率与双反射的概念

反射率是表示矿物磨光面反光能力的参数,用符号  $R$  表示,它是反光显微镜下垂直入射光经矿物光面反射后的反射光强度( $I_r$ )与原入射光强度( $I_i$ )的比率,用百分数表示,即:

$$R = I_r / I_i \times 100\%$$

反射率与矿物的折射率( $N$ )及吸收系数( $K$ )之间存在下列关系:

$$R = \frac{(N - n)^2 + K^2}{(N + n)^2 + K^2}$$

式中  $n$  为传播光波之介质的折射率,介质通常为空气或浸油。以空气为介质时,其折射率  $n = 1$ ,上式成为:

$$R=\frac{(N-1)^2+K^2}{(N+1)^2+K^2}$$

对于透明矿物 ,其吸收系数  $K=0$  ,故公式简化为 :

$$R=\frac{(N-n)^2}{(N+n)^2}$$

对于不透明矿物 , $R$ 、 $N$  和  $K$  三者之间存在下列关系 :当  $K<0.5$  时 , $R$  主要取决于  $N$  ; $K=0.5\sim2.0$  时 , $R$  同时取决于  $N$  和  $K$  ;当  $K>2.0$  时 , $R$  主要取决于  $K$  ,此时  $R$  都大于 38%。

反射率是矿物本身固有的属性 ,不同的矿物具有不同的反射率值( 表 2-9-1 ) ,如白光下自然银的反射率为 95% ,而萤石的反射率仅为 3% ,两者相差 30 多倍。可见 ,反射率是鉴定矿物( 尤其是透明度低的矿物 )的重要特征。

表 2-9-1 几种矿物的反射率

矿物名称	蓝 光	绿 光	黄 光	红 光	白 光
	( 470um )	( 546um )	( 589um )	( 650um )	
自然银	92.2	94.3	95.1	94.8	95
黄铁矿	45.6	52.0	53.4	54.3	53
方铅矿	46.3	42.7	42.2	41.7	43
黝铜矿	31.6	32.2	31.8	30.2	30
闪锌矿	17.7	16.6	16.4	16.1	17
萤 石	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

属于高级晶族的等轴晶系矿物只有 1 个反射率值 ,其他晶系的矿物反射率随晶体方向而变化 ,当旋转物台时 ,表现为矿物亮度的改变 ,这种反射率随方向而变化的现象称为矿物的双反射。属于中级晶族的四方晶系、三方晶系和六方晶系的矿物有 2 个主反射率  $R_o$  和  $R_e$  ,而属于低级晶族的三斜晶系、单斜晶系和斜方晶系的矿物有 3 个主反射率  $R_g$ 、 $R_m$  和  $R_p$ 。

## 二、反射率与双反射的测定

测定矿物反射率的方法较多,归纳起来,可分为光学法和光电法两大类,前者以视测对比法用得最广,后者以光电倍增管法最为有效。

### (一)视测对比法

视测对比法是在显微镜下用肉眼观察未知矿物的亮度,并与已知反射率的矿物进行比较的方法。通常用黄铁矿、方铅矿、黝铜矿和闪锌矿 4 种矿物作标准,将欲测矿物与标准矿物安装在同一载玻片上,使两者尽量靠近,以便在同一视域中看到互为倒像的 2 个矿物,比较其亮度,便可知道欲测矿物的反射率是比标准矿物高还是低。显然,这是一种定性至半定量的方法,欲测矿物与标准矿物反射率相差较大时,很容易判断两者反射率的高低。当欲测矿物无法与标准矿物在同一视域出现时,可借助“视觉暂留”来进行比较,即先看一种矿物,以眼睛视觉保存其亮度的印象,与第 2 种出现在视域中的矿物亮度对比。

利用 4 种标准矿物,可将各种欲测矿物的反射率分为以下 5 级:

- A 反射率高于黄铁矿的矿物 ( $R > 53\%$ )
- B 反射率介于黄铁矿和方铅矿之间的矿物 ( $53\% > R > 43\%$ )
- C 反射率介于方铅矿和黝铜矿之间的矿物 ( $43\% > R > 30\%$ )
- D 反射率介于黝铜矿和闪锌矿之间的矿物 ( $30\% > R > 17\%$ )
- E 反射率低于闪锌矿的矿物 ( $R < 17\%$ )

这种方法除显微镜外不需专门的仪器设备,简便易行,快速有效,故在实际工作中被广泛采用。

矿物的双反射仍在单偏光镜下观察。对于同种矿物的集合体,要仔细观察不同颗粒的亮度变化,判断是否有亮度差异;对于单个颗粒,则要旋转物台,看其亮度是否有变化。观察结果可分为 3 级:明显、可见和无。

### (二)光电倍增管法

光电倍增管法利用光电效应测定矿物的反射率。物质在光的作用下发射电子的现象即光电效应,此时物质释放出的电子称为光电子,它在电场中形成的电流称为光电流。光电倍增管由阳极、阴极和多个“二次发射靶屏极”

组成。光线照射阴极发出光电子,多次落入“二次发射靶屏”上,产生二次电子,使光电流放大几百万倍。在阳极,输出电流被灵敏检流计测定。光电效应的基本定律表明,在单位时间和单位面积内,受光照射物质释放出的电子数与入射光的强度成正比。因此,只要分别测取标样与欲测矿物的光电流强度,就可根据标样的反射率计算出欲测矿物的反射率。当前使用的光电倍增管测微光度计带有微处理机,可直接读数和打印结果。

使用光电倍增管测微光度计测定矿物的反射率时,只要标样正确、光片质量好、安装水平、控制温差、避免震动以及精确准焦等,就能达到很高的灵敏度。所以,该方法被国际矿相学委员会规定为定量测定矿物反射率的标准。

### 三、影响反射率和双反射的因素

以下因素会影响反射率和双反射的正确测定,必须注意。

(1)光源 光源强度及入射光波长对反射率影响很大。光源越强,反射率就越高;波长改变,反射率也随之改变(表 2-9-1)。可见,测定反射率时,对标样和欲测矿物要保持相同的测试条件。

(2)光片 光片表面磨光质量要高,做到无擦痕、麻点或氧化膜等,否则会降低矿物的反射率。此外,光片必须严格压平,若光片表面与入射光不垂直,则会影响反射光的方向,降低矿物的反射率。

(3)其他因素 浸没介质、放大倍数、焦距、内反射及温差等因素均能影响反射率的高低。

## 第三节 矿物的反射色与反射多色性

### 一、反射色与反射多色性的概念

矿物光片在单偏光镜下呈现的颜色称为矿物的反射色。反射色随矿物

方位而变化的现象称为反射多色性。反射色与肉眼观察矿物标本时的颜色有所不同,它是由矿物磨光面对镜下光线直射时的选择性反射作用造成的“表色”。当矿物光面对白色入射光中各波长的光近似等量反射时,这些矿物的反射色就呈现白色至灰色;当矿物对某一波长的光反射较强时,反射色就呈该波长的颜色。如方铅矿对白色入射光近似等量反射,故方铅矿的反射色为白色;而黄铜矿对黄色波段的光反射强烈,故反射色呈黄色。

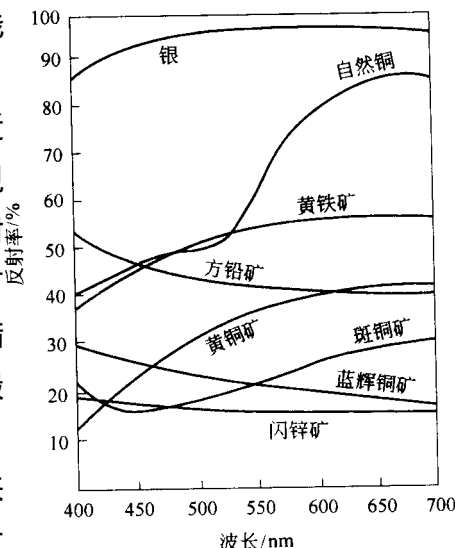


图 2-9-5 矿物反射率色散曲线

矿物的反射色可用反射率色散曲线来解释。反射率色散是指矿物反射率随入射光波长不同而异的现象。以波长为横坐标,反射率值为纵坐标,即可作出反射率色散曲线图(图 2-9-5)。从图 2-9-5 可知,自然铜的反射率色散曲线在黄、橙和红波段急剧上升,故反射色呈这 3 种颜色的综合色,黄铁矿的色散曲线则在黄和橙波段明显上升,故呈淡黄色。

## 二、反射色与反射多色性的测定

反射色和反射多色性的测定,有镜下肉眼观察和仪器测量 2 种测定方法,相应定性描述和定量记录 2 种表示方法。

定性描述是将肉眼观察到的颜色用文字描述的办法记录下来,如方铅矿的反射色描述为“白色”,黄铁矿为“淡黄色”等。对于反射多色性,可分为“明显、可见和无”3 级,其中前 2 个级别应尽可能描述颜色的变化情况,如毒砂的反射多色定性可描述为:可见(微蓝-淡桔色)。由于颜色的过渡类型多,而且描述起来常是因人而异,所以仅靠视觉来区别以及用词汇来表达是很困难的。

为了克服以上困难,可应用色度学的原理和方法,用数字来定量表示矿物的反射色。在色度学中,用色调、纯度和亮度 3 个要素来表示颜色。色调



也称色相 ,是指颜色的种类 ,可用反射光的主波长(  $\lambda_d$  )表示 ,它与反射率色散曲线主峰的波长值相当。纯度也称饱和度 ,用符号  $P_e$  表示 ,指颜色的纯粹程度 ,可用色光与白光的比例来定量 ,纯光谱色最大为 1( 100% ) ,随颜色变淡纯度值逐渐变小 ,直至纯白色时纯度为零。亮度也称明度 ,是指颜色的明亮程度 ,用绿光下矿物的反射率(  $R_{vis}$  )表示。

矿物的反射色可用色调(  $\lambda_d$  ) 纯度(  $P_e$  ) 亮度(  $R_{vis}$  )以及色度坐标(  $x, y$  ) 来表示 ,它们统称为颜色指数 ,表 12 - 2 列出了一些矿物的颜色指数 ,其中  $R_{vis}$  需要测定 ,  $\lambda_d$  和  $P_e$  可在国际照度委员会规定的 XYZ 系统标准色度图上求得。色度坐标  $x$  和  $y$  由下式计算 :

$$x = X / ( X + Y + Z )$$
$$y = Y / ( X + Y + Z )$$

式中  $X$  代表红色 ,  $Y$  为绿色 ,  $Z$  为蓝色 ,即所谓的三原色。可见光谱中任何色光都可由这 3 种色光按一定的比例混合而成 ,若三原色的光按等量混合即为白光。

表 2 - 9 - 2 一些矿物的反射色颜色指数

矿物名称	$R_{vis}$	$x$	$y$	$\lambda_d$	$P_e$
自然金	75.3	0.400	0.398	578	0.399
自然铜	64.9	0.392	0.358	588	0.251
黄铁矿	53.9	0.352	0.359	574	0.132
方铅矿	43.2	0.325	0.324	473	0.037
黝铜矿	31.4	0.332	0.336	516	0.005
磁铁矿	20.4	0.333	0.334	557	0.001
闪锌矿	16.7	0.324	0.325	478	0.038

三、影响反射色和反射多色性的因素

( 1 )光源 光源的强度与色调能影响矿物的反射色。当光源较弱时 ,反射色会偏黄。为了滤去光源中多余的黄光 ,显微镜上配备有蓝色滤色片。调节光源时 ,以方铅矿的白色作为标准。

( 2 )光片 与测定反射率时对光片的要求类似 ,光片的磨光质量要高 ,安

装必须正确。当光片表面存在氧化膜时,会出现各种彩色,故光片必须保持新鲜和清洁的表面。

(3)周围矿物的影响 矿物的反射色是指一种矿物单独出现时的反射光颜色。当2种或多种不同颜色的矿物出现在一起时,就会干扰人的视觉,称为视觉色变效应。如黄铁矿在镜下单独出现时呈淡黄色,若和白色的方铅矿在一起时,黄色就更明显;若黄铁矿与铜黄色的黄铜矿或金黄色的自然金共生时,黄色特征就变得不明显,甚至被误认为是白色。可见,观测不同矿物集合体的反射色时要注意视觉色变效应。

## 第四节 矿物的内反射

### 一、内反射的概念

当光线照射到具有一定透明度的矿物光片表面时,除反射光外,有一部分光线能折射透入矿物内部,若遇到矿物内部的某些界面(如解理、裂隙、空洞、晶粒、包裹体等),光线可以被反射出来或散射开,这种现象称为矿物的内反射。如果反射出来的光线没有色散现象,则仍为白光,如发生色散,则可显示颜色,称为内反射色。内反射也即光线在矿物内部发生的反射,所呈现的内反射色是矿物的体色,而前述的反射色是矿物的表色。体色和表色互为补色,互补明显程度与矿物的透明度密切相关。

透明矿物可使大量的光线透过,反射光极弱。因此,反射色多为灰色—灰黑色,所带色调很弱,即颜色的纯度很小。由于透射光量大,内反射现象很明显,若色散显著,还可呈现强烈的内反射色,如孔雀石呈现鲜艳的翠绿色、蓝铜矿呈现特征的蓝色等。透明矿物反射色与内反射色的互补现象一般不明显,肉眼观察矿物的颜色与内反射色相同或相近。

半透明矿物的透射光和反射光都较强,所以内反射色和反射色都比较强烈,两者的互补关系较明显。肉眼观察矿物的颜色与内反射色或反射色都不

一致,它是内反射色和反射色的综合色。如赤铁矿肉眼观察一般为褐红色,反射色为灰白色微带蓝色色调,内反射色则为深红色,三者都不一样。

不透明矿物不允许光线透过,故不发生内反射现象。如黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等金属矿物均无内反射。

由于矿物的透明度与反射率有密切联系,所以内反射现象与反射率之间的关系也十分明显。一般说来,矿物的反射率越高,内反射现象就越不明显。

## 二、内反射的测定

测定内反射常用斜照法和正交偏光法 2 种。测定结果可分为“明显、可见和无”3 个级别。对于有内反射的矿物,还应进一步观察和描述内反射色,用括号表示之。如辰砂的内反射现象可记录为:明显(朱红色)。

### (一)斜照法

将光源从侧面斜照在光片表面上,使反射光线对称倾斜反射而不进入物镜(图 2-9-6)。当光线斜射到透明或半透明矿物表面时,除被斜反射掉一部分外,其余光线透入矿物内部,遇到倾斜度合适的界面,又从矿物内部反射出来进入物镜,使显微镜视域呈现一定的亮度,并具有透明的视感,即内反射现象。如带有某种颜色则表示矿物有内反射色。

用斜照法观测矿物的内反射现象灵敏度较低,只能观测到内反射很显著的矿物的内反射现象。因此,不要以为斜照时镜下呈黑色的矿物就肯定无内反射。为了提高观测效果,可用斜照光观察矿物的粉末,因为粉末的透光性比块状矿物好。矿物粉末可用钢针或金刚石笔在镜下刻划光片表面而获取。

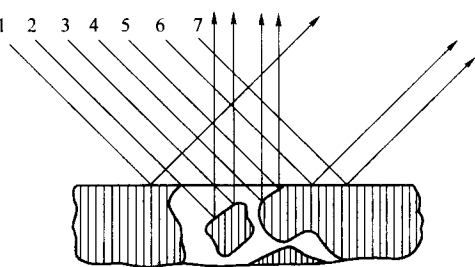


图 2-9-6 斜照法示意图

### (二)正交偏光法

该方法是在正交偏光下观察矿物的内反射现象。入射平面直线偏光被矿物表面反射时,反射光基本上是直线偏光,从而不能通过上偏光镜,视域呈黑暗状态。但是,射入矿物内部的直线偏光发生反射时的情况就不一样了,

因它们被矿物内部的界面反射出来的光波常呈椭圆偏光或发生反射旋转,即一部分内反射光能透过上偏光镜,使视域呈现一定的亮度,这就是正交偏光下的内反射现象。

在正交镜下观察矿物的粉末效果更好。对于内反射现象很微弱的矿物,还可用浸油作介质,观察矿物的粉末,这是观测内反射最有效的方法,因为矿物在浸油中反射率会大大降低,透入矿物粉末内部的光量大为增加,使内反射现象更易显现。

### 三、影响内反射测定的因素

(1)光源 由于内反射光相对较弱,故需要用强光源作入射光。光源要用白光,以便观测到正确的内反射色。

(2)入射角 斜照法观察矿物的内反射时,入射角以  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$  为宜。观察时,应变换入射光的入射角和方向,以寻求有利的反射角,增加进入物镜的光量,加强镜下的透明视感。

(3)磨料 要避免将堆积在矿物光片裂隙和凹坑中的磨料颜色误认为是矿物的内反射色。

(4)干涉现象 白光倾斜射入石英和方解石等无色透明矿物后,可能会像射入三棱镜似的发生色散,产生干涉现象,使矿物内部显示“彩色”,不要将这种内反射强烈但无内反射色的现象误认为彩色内反射色。

(5)物镜倍数 斜照法只能用低倍物镜或中倍物镜,因高倍物镜工作距离太短,不允许光线按适宜角度照射到光片表面。相反,正交偏光法最好是用高倍物镜,因为透过高倍物镜的光线聚敛作用强,成为各种方向和入射角的斜照光,使矿物显现内反射的机会增大。

(6)非均质性和偏光色 均质矿物任何方向都可用正交偏光法观察内反射,但非均质矿物在正交镜下显非均质性和偏光色,故应在消光位才能正确观察内反射。要区别内反射色和偏光色,只需旋转物台,当改变矿物方位时,内反射色基本不发生变化,而偏光色会发生明显的变化。

## 第十章 采矿原料与产物中组成矿物的定量分析与测试

原料与产物中组成矿物的定量是工艺矿物学研究的一项基础工作,对选矿工艺流程的开发和选择以及选矿生产流程的评价均具有重要意义。

进行工艺矿物学研究的矿物原料与产物,绝大多数是由若干种矿物所组成的。通常对矿物原料进行的化学分析,只能了解其中化学元素的组成情况,而无法掌握其中的矿物组成情况。然而,在矿物原料中同一种元素往往会以不同的矿物形式产出,并且元素的产出形式也因原料而异。例如,在铁矿石中铁的赋存形式最常见的就有磁铁矿、赤铁矿和褐铁矿3种;在铜矿石中铜的产出形式则更为复杂,铜既可以呈硫化矿物的形式产出,也可以呈氧化矿物的形式产出,硫化铜矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等,氧化铜矿物主要有赤铜矿、孔雀石等;在钨矿石中钨的产出形式又有黑钨矿和白钨矿之分。这些含有同种元素的不同矿物,彼此的性质相差悬殊,选矿方法和选矿工艺流程也截然不同。例如,磁铁矿和赤铁矿是两种最常见的含铁矿物,但二者性质相差悬殊,磁铁矿为强磁性矿物,通常可采用弱磁选法进行回收;而赤铁矿则为弱磁性矿物,须采用强磁选法或浮选法回收。显然,矿物原料的矿物组成研究对矿物加工工艺的选择与开发具有重要意义。

矿物组成研究对于选矿生产流程的评价同样具有重要意义。通过对选矿生产流程中各产物组成矿物的定量,可以从矿物学角度详细分析各选矿作业的效率,有助于分析目的矿物和有害矿物在流程中的走向及其行为规律,对于分析选矿流程结构及工艺条件的合理性、指导选矿流程的优化等具有重要意义。

原料与产物中矿物定量测定的方法很多。从当前各种方法的应用情况来看,矿物定量的基本方法主要包括(1)分离矿物定量法(2)显微镜下定量法(3)特征元素化学分析定量法(4)仪器分析定量法。本章主要介绍这些定量方法的原理及应用。除此之外,对于一些特殊的矿物原料,国内外工艺矿物学工作者还研究了一些其他定量方法,这里仅做简要介绍。

## 一、分离矿物定量法

分离矿物定量法是利用待测矿物与原料中其他矿物性质的差异,将待测矿物从原料中分离出来而进行定量的一种方法。该法主要适用于某些易于分选且嵌布粒度较粗大的矿物定量,对于嵌布粒度细小且难以分离的矿物则不适用,因为对于微细嵌布的矿物,通常无法保证在很高的分离纯度下使其全部从矿物原料中分离出来。该法定量结果准确可靠,但操作过程繁琐、费时、费力,使其应用受到了一定的限制。

分离矿物定量法可分为试样准备、矿物分离和结果整理计算3个步骤,矿物分离是定量成败的关键。试样准备是从待测矿物原料中缩分出具有代表性的分离样品,并根据待测矿物在原料中的嵌布特征和拟定的分离方法的要求,将样品破碎至一定的粒度。矿物分离是根据待测矿物与样品中其他矿物物理、化学性质的差异,采用适当的分离方法和分离手段,将一种或几种待测矿物以纯矿物的形式从样品中分离提取出来。最后,通过对分离过程的原料及各种产品进行计量,计算出待测矿物在样品中的含量。

进行矿物分离的方法和设备很多,在分离矿物定量时多采用一些简单、易行的分离方法和分离手段,如重力分离、磁力分离和选择性溶解等。

### (一)重力分离法

重力分离法是利用不同矿物之间密度的差异进行矿物分离的一种方法,不同密度矿物重力分离的难易程度可大致由下式判断:

$$E = (\rho_2 - \rho)(\rho_1 - \rho) \quad (2-10-1)$$

式中  $\rho_1$ ——轻矿物的密度  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho_2$ ——重矿物的密度  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho$ ——分离介质的密度  $\text{g/cm}^3$ 。

$E$  大于 5 时,属极易重力分离的矿物原料,除极细的细泥(小于  $5 \sim 10\mu\text{m}$ )以外,各种粒度的物料都可以采用重力分离法处理;

$E$  大于 2.5/小于 5 时,属易处理原料,有效分离的粒度下限为  $38\mu\text{m}$  左右;

$E$  大于 1.75 小于 2.5 时,属较易处理原料,其有效分离的粒度下限为  $75\mu\text{m}$  左右;

$E$  大于 1.5 小于 1.75 时,属较难处理原料,其有效分离的粒度下限为 0.5mm 左右;

$E$  大于 1.25 小于 1.5 时,属难处理原料,重力分离法只能处理粒度为数毫米的物料,且分离效率较低;

$E$  小于 1.25 时,属极难处理原料,不宜采用重力分离法。

因此,在选择分离方法时应根据原料的性质而定。适宜于重力分离法处理的原料,在选择分离设备和分离手段时,多采用处理量小、操作简单易行的设备和装置,主要包括 振摆溜槽、机动淘洗盘、微型摇床、重液分离和电磁重液分离等。

### 1. 振摆溜槽

振摆溜槽主要由分选槽、传动装置、坡角调节装置和供水系统组成(图 2-10-1)。矿样置

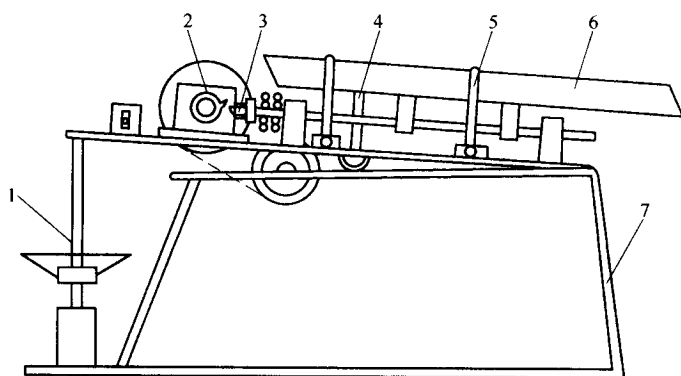


图 2-10-1 振摆溜槽结构示意图

1-调坡装置 2-凸轮 3-顶杆 4-偏心装置 5-给水管;

6-分选槽 7-机架

于分选槽并将设备启动后,振摆溜槽在前后方向做不对称往复变速振动

的同时,还伴有左右方向的往复匀速摆动。这种振摆运动和水流冲击的结果,使分选槽中的物料始终保持松散,并使密度不同的矿物颗粒按密度进行分层、分带,从而实现不同密度的矿物彼此分离。

分选槽的振动频率为 360 次/min,振幅 5mm,摆动频率为 28 次/min,摆幅 70mm。进行矿物分离时,首先开启振摆溜槽和给水开关,并将水的流量调至 400mL/min 左右,然后将样品注入分选槽上端,控制每次给矿量约 50g 左右;待矿物充分松散分层后,缓慢转动调坡手轮,调节分选槽的倾角,使矿物按密度分带,大密度矿物颗粒向槽头运动,小密度矿物颗粒则随水流由槽尾排出。振摆溜槽每次最大处理量为 100g 左右,最佳分离粒度为 0.15 ~ 0.074mm。

## 2. 机动淘洗盘

机动淘洗盘由淘洗盘、传动装置、调坡装置和供水装置组成(图 2-10-2)。设备启动后,将矿样以固液比 1:9 的浓度注入淘洗盘。淘洗盘呈水平状态做前后变速摆动和 3r/min 的转动,摆动角 15°,摆动频率为 120 次/min。随着淘洗盘的摆动和转动,矿浆集中于淘洗盘的中心部位并分层,密度较大的矿物颗粒沉积于盘的底部。待矿物充分松散分层后,打开补加水阀门并调节好水量,然后调节调坡手柄使淘洗盘倾斜一定角度。在淘洗盘的摆动、转动和补加水的作用下,矿浆开始分带并向出矿端移动,密度较大的矿物颗粒集中于矿带的后部,密度较小的矿物颗粒则迅速流向出矿端并集中于矿带的前部。待分带界限清晰后,打开冲洗水管,将轻矿物冲出盘外。淘洗盘处理的粒度范围为 0.15 ~ 0.02mm,每次处理量约为 1kg 左右。

## 3. 重液分离

重液分离是利用浮沉原理,采用密度较大液体作为分离介质,使密度大于分离介质的矿物颗粒下沉,密度小于分离介质的矿物颗粒上浮,从而达到分离矿物的目的。

重液的种类很多,包括有机重液、无机盐溶液和熔盐 3 类。用于少量样品分离的重液多采用卤代烷类有机重液,主要包括以下几种:



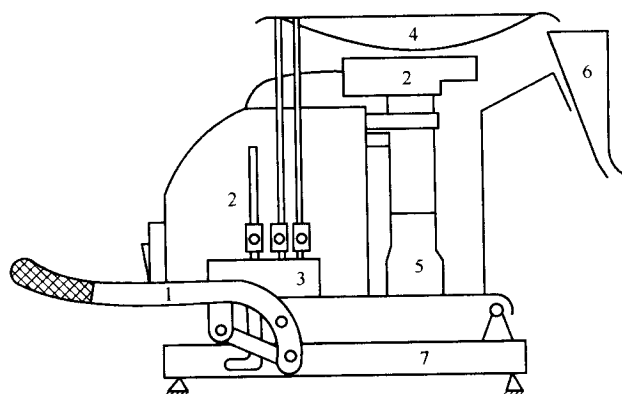


图 2-10-2 机动淘洗盘结构示意图

1 - 调坡手柄 2 - 传动系统 3 - 给水管 ;

4 - 淘洗盘 5 - 主轴 6 - 排矿漏斗 7 - 机座

(1) 三溴甲烷( $\text{CHBr}_3$ ) 为无色易流动的液体,在常温常压下,密度  $2.887\text{g}/\text{cm}^3$ ,黏度  $0.0018\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、沸点  $149^\circ\text{C}$ 、凝固点  $8^\circ\text{C}$ 。本品易挥发,在阳光下易分解,必须保存在暗色器皿中。加入  $3\% \sim 4\%$  的酒精可促使三溴甲烷稳定,同时其密度则降低为  $2.6 \sim 2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(2) 四溴乙烷( $\text{C}_2\text{H}_2\text{Br}_4$ ) 无色易流动液体,在常温常压下,密度  $2.953\text{g}/\text{cm}^3$ 、黏度  $0.0096\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、沸点  $243.5^\circ\text{C}$ 、凝固点  $0.1^\circ\text{C}$ 。其化学性质稳定,挥发性较小,但黏度较大。

(3) 二碘甲烷( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) 无色至亮黄色,在常温常压下,密度  $3.308\text{g}/\text{cm}^3$ 、黏度  $0.0096\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、沸点  $182^\circ\text{C}$ 、凝固点  $6.1^\circ\text{C}$ 。在阳光下极不稳定,有硫化物存在时也易分解,分解后因碘的析出而使颜色变暗,变暗后二碘甲烷的密度下降。为防止二碘甲烷分解,可加入几片金属铜。二碘甲烷有毒,使用时应注意安全。

以上 3 种卤代烷均难溶于水而易溶于易挥发的有机溶剂如酒精、苯、甲苯、四氯化碳等,为获得不同密度的重液可用这些有机溶剂稀释。为从稀释后的重液中浓缩回收卤代烷则可采用蒸馏的办法。

(4) 蚁酸铊和丙二酸铊复盐水溶液 又称克列里奇液,淡黄色,  $25^\circ\text{C}$  时饱和溶液的密度为  $4.3\text{g}/\text{cm}^3$ ,黏度  $0.031\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,化学惰性。可与任意比例的水混合而配置成不同密度的重液,用蒸馏的方法即可使其浓缩再生。克列里奇液

的密度大,但价格高,对皮肤的腐蚀性极强。

蚁酸铊和丙二酸铊复盐溶液的配制方法为:将 11g 丙二酸溶于少量水中,再将 500g 碳酸铊溶于此溶液中;另取 500g 碳酸铊溶于 115g89% 的蚁酸中,然后将这两种溶液相混,过滤、蒸发,直至密度为  $4.3\text{g}/\text{cm}^3$  的矿物(如:铁铝石榴石)在其中浮起为止。

重液分离的操作方法与试样的粒度、重量以及重液的类型有关。通常,对于试样量少(50g 以下)、粒度较细( $0.5 \sim 0.074\text{mm}$ )时,多在分液漏斗中进行。图 2-10-3 为常用的双开关分液漏斗示意图,其操作步骤如下:

(1) 将分液漏斗竖直固定在支架上,将分液漏斗的上开关打开、下开关关闭,并将配置好的重液倒入漏斗中,然后将矿样缓慢倒入漏斗中,用玻璃棒搅拌均匀,静置几分钟,使轻矿物上浮、重矿物下沉。

(2) 关闭上开关,打开下开关,将重矿物和轻矿物分别排放到带滤纸的过滤漏斗中。

(3) 将过滤漏斗中收集的重矿物和轻矿物分别进行洗涤、过滤、烘干、称重。

#### 4. 磁流体分离

磁流体分选是以顺磁性液体或铁磁性胶体悬浮液为分选介质,在上强下弱的不均匀外加磁场中,顺磁性液体由于磁化率高,受到磁场的作用力强,使其视在密度远高于自然密度,且随着外加磁场的变化,其视在密度也不断变化。这种分离方法的特点是:

(1) 通过调节外加磁场的强度,可连续调节顺磁性液体的视在密度,可以很方便地实现对一系列不同密度矿物的浮沉分离。(2) 通过采用高磁化率的顺磁性液

体和强磁场,可以获得很高的磁流体视在密度,目前磁流体的最高分选密度可达到  $19.5\text{g}/\text{cm}^3$ ,从而可以完成对高密度矿物间的浮沉分离(如:自然金和自然铂)。磁流体分离和常规重液分离有相似之处,二者均为对固体颗粒的浮沉分离过程。但前者除了有重力场作用外,还有磁场作用,而后者只有重力场作用。

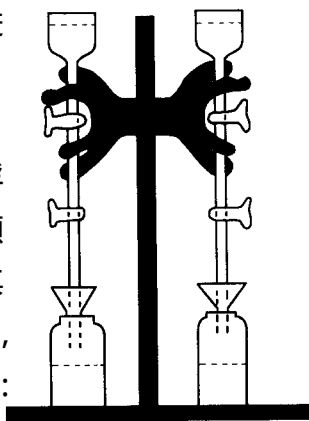


图 2-10-3 双开关分液漏斗示意图

常用的顺磁性液体主要为锰、镍、钴、铁以及稀土金属盐类的饱和溶液,如:硝酸锰、氯化锰、三氯化铁、稀土氯化物等。此外,为了提高磁流体的磁化率,国内外学者对铁磁性胶体悬浮液作为磁流体进行了大量的研究。目前,通常是在  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  共存的溶液中添加碱而制备成磁铁矿的胶体微粒,然后用表面活性剂进行表面处理,使其稳定地分散于水中或有机溶剂中,形成铁磁性胶体悬浮液。国内也有报道,采用氧化-水解法,在  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NaOH}$  的混合溶液中通入适量的空气,制备出磁铁矿胶粒,然后进一步进行表面处理制备出铁磁性流体。

磁流体分离的原理可用图 2-10-4 简要说明。在磁流体分离中,矿粒沿垂直方向所受的作用力包括(1)矿粒自身垂直向下的重力,与矿粒本身的密度和大小有关(2)矿粒在不均匀磁场中受到的垂直向下的磁力,与矿粒的体积磁化率和磁场梯度有关(3)垂直向上的液体浮力,与磁流体自身的密度和矿粒的体积有关(4)垂直向上的磁浮力,磁浮力是由于外加磁场的作用使磁流体的视在密度增加所引起的附加浮力,与磁流体的体积磁化率和磁场梯度有关。上述 4 个力的合力决定了矿粒的下沉或上浮。一般说来,磁流体分选只能用来分离非磁性矿物,有时也可用于分离磁化率较低的弱磁性矿物,但无法分离强磁性矿物。因此,用于磁流体分离的矿物颗粒,在磁流体中受到的垂直向下的力主要是自身的重力。显然,通过调节外加磁场的强度,改变磁浮力,即可实现对不同密度矿物的分离。

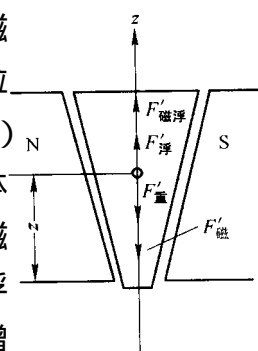


图 2-10-4 矿粒

在磁流体分离中垂  
直方向的受力分析

用于矿物分离的磁流体分离仪的结构如图 2-10-5 所示。它主要由电磁铁、分离槽、振动给料装置、直流稳流器等部分组成。采用楔形磁极或双曲线形磁极,在磁极间隙形成一不均匀磁场,分离槽置于该不均匀磁场中。试样由上部的电振给料装置均匀地给入分离区,重产物下沉到槽底,轻产物漂浮在磁流体的上层。将轻、重产物分别收集后,进行洗涤、过滤、烘干、称重,计算不同产物的含量。小型磁流体分离仪处理的试样粒度范围为  $0.5 \sim 0.038\text{mm}$ ,试样在分离前应预先脱除细泥和其中的强磁性矿物。

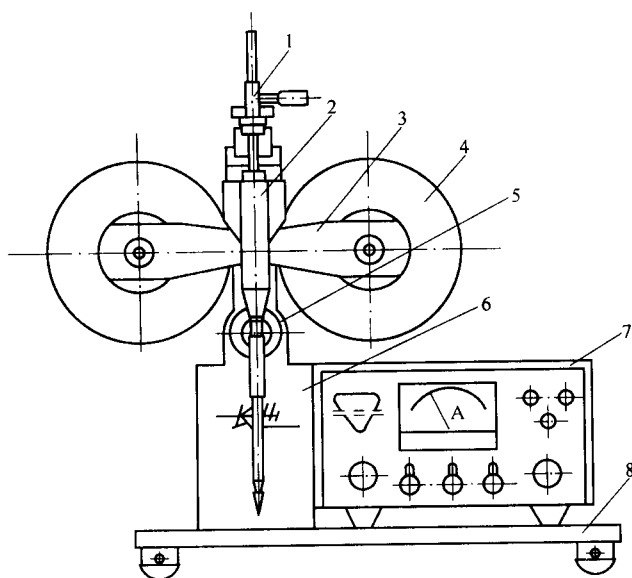


图 2-10-5 磁流体分离仪的结构示意图

1-振动给料装置 2-分离槽 3-磁极 4-线圈；  
5-蜗轮箱 6-蜗轮箱座 7-直流稳流器 8-底座

## (二) 磁力分离法

磁力分离是利用原料中不同矿物间磁性的差异进行矿物分离的。适于磁力分离的矿物主要是强磁性矿物(亚铁磁性物质)和部分弱磁性矿物(顺磁性物质)。强磁性矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿、磁黄铁矿和锌铁尖晶石等。弱磁性矿物主要有赤铁矿、镜铁矿、褐铁矿、菱铁矿、水锰矿、硬锰矿、软锰矿等铁锰矿物,以及钛铁矿、铬铁矿、黑钨矿等含钛、铬、钨的矿物。应用磁力分离的前提是,欲分离矿物的磁性与原料中其他矿物的磁性有明显差异。

磁力分离的方法和设备很多,按磁场强度的大小可分为弱磁选分离和强磁选分离 2 种,按分离介质条件又可分为干法和湿法。

### 1. 弱磁选分离

用于矿物分离的弱磁选法主要采用永久磁块和磁选管 2 种手段。

#### A 永久磁块分离法

永久磁块分离法是采用磁场较低的永久磁块来分离粒度较粗的强磁性矿物,如磁铁矿、磁黄铁矿、钛磁铁矿等。弱磁性永久磁块的磁场强度约为

6.28 ~ 10.05A/m,其操作方法也可分为干法和湿法 2 种。

干法操作适用于粒度较粗的原料(大于 0.2mm)。其操作方法为:用塑料薄膜或绸布将磁块包裹,然后在摊平的样品表面来回移动,将磁性颗粒吸附于磁块上,磁块吸满后,将磁块移至收样盘,将包裹的塑料薄膜或绸布取下,将磁性颗粒抖落于收样盘中。如此反复操作,即可将磁性颗粒分离出来。

### B 磁选管分离法

湿法操作适用于粒度较细的原料(小于 0.1mm)的分离。其操作方法为:将待测样品置于 200mL 的烧杯中,加水调成浓度 10% 左右的矿浆摇匀,然后将磁块紧贴烧杯底部,磁性颗粒受到磁块的吸引而沉积于烧杯底部,非磁性颗粒则悬浮于水中,将上部悬浮液缓慢倒出或用虹吸法吸出,则磁性颗粒仍留在烧杯中。如此反复操作即可将磁性颗粒从原料中分离出来,最后进行过滤、烘干、称重。

磁选管常用于细粒强磁性矿物的分离,其结构见图 2-10-6。在“C”字形铁心上绕有线圈,通以直流电,电流强度可以用变阻器调节,最高磁场强度可达到 20.11 ~ 30.16A/m。玻璃管用支架支撑于磁极中间,并与水平方向成 45°角。通过适当的传动装置,用电动机带动支架上的圆环(套在玻璃管的外面)使玻璃管做往复的上下移动和转动。

进行分离时,取适量有代表性的细磨试样,装入小烧杯中进行调浆,使其充分分散。然后将水引入玻璃管内,并调节玻璃管的上下端胶皮管的夹子,使玻璃管内水的流量保持稳定,水面高于磁极 30mm 左右。接通直流电源,并调节到预先规定的电流值,开始给矿。先将烧杯中的矿泥部分徐徐由玻璃管的上端冲入玻璃管内,待矿泥部分给完后再给入沉于杯底的矿砂。磁性颗粒在磁力作用下,被吸引在磁极间的管内壁上,而非磁性矿粒则随冲洗水从玻璃管下端排出。矿样给完后,继续保持玻璃管开动一段时间,使磁性物受到更好的冲洗,当将非磁性颗粒冲洗干净后(管内水变清为止),停止给水,放

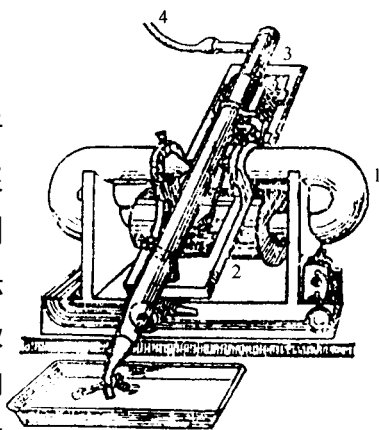


图 2-10-6 磁选管外形图

- 1—铁心 2—线圈;  
3—玻璃管 4—给水管

出管内的水,然后更换接矿器,切断直流电源,将管内的磁性物冲洗出来,即完成了分离过程。将产品分别过滤、烘干、称重,即可计算出磁性矿物的含量。

## 2. 强磁选分离

强磁选分离主要用于弱磁性矿物的分离定量,其操作方法也可分为干法和湿法 2 种。干法分离多采用自动磁力分析仪,其磁场强度可在  $12.57 \sim 251.33 \text{ A/m}$  范围内连续可调,要求样品的粒度一般为  $0.074 \sim 1.0 \text{ mm}$ 。湿法分离多采用实验室小型湿式强磁分选仪,其磁场强度的调节范围为  $18.85 \sim 289.03 \text{ A/m}$ ,可用于  $0.1 \sim 0.074 \text{ mm}$  以下原料的分离。在进行强磁分离前,须将原料中的强磁性矿物预先分离出来,以免干扰强磁分离的效果。

### A 自动磁力分析仪

自动磁力分析仪的结构如图 2-10-7 所示,主要由铁心、磁极头、线圈和电振分选槽等组成。电振分选槽的上端有给料杯及电振给矿器,下端有接料漏斗和接料杯。磁力分析仪用心轴支放在悬臂式的支架上,转动手轮可以改变分选槽的纵向坡度。悬臂支架被心轴固定在机座上,转动心轴上的手轮,可以改变电振分选槽的横向坡度。

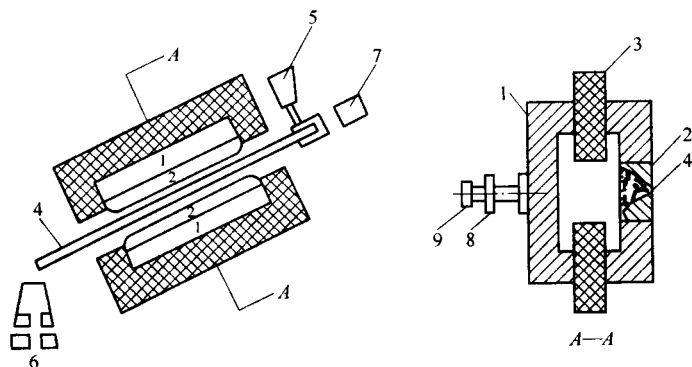


图 2-10-7 自动磁力分析仪结构示意图

- 1-铁心 2-磁极头 3-线圈 4-电振分选槽 5-给料杯 6-接料杯;  
7-电振给矿器 8-支架 9-转动手轮

自动磁力分析仪操作步骤如下:

(1) 接通励磁直流电源和电振给矿器的低压交流电源,分选槽便处在不均匀磁场中,给矿器作纵向振动。分选槽中的矿粒所受磁场的磁力靠里边

弱、靠外边强,磁性颗粒受磁力作用流向外侧的强磁场区,非磁性颗粒由于重力作用流向分选槽的里侧。这样从分选槽流出的矿粒即分为 2 种不同磁性的颗粒。

(2) 用副样调整励磁电流强度、电振给矿器的电流强度、电振分选槽的纵向坡度和横向坡度,使分选槽上的矿粒分带明显。

(3) 调整好后切断电源,刷净分选槽和磁极头。然后再接通励磁电流和电振分选槽电源,将正式样品装入给矿杯中,进行分离操作。

(4) 分离完毕后,切断电源,卸下振动分选槽,将粘附在槽上的少量物料分别刷入相应的接矿杯中。

(5) 最后将磁性产物和非磁性产物分别称重,计算出它们的重量百分含量。

### B 湿式强磁分离仪

用于矿物分离的实验室型湿式强磁分离仪的结构如图 2-10-8,主要由铁心、励磁线圈、分选箱和给矿、冲矿、接矿装置等几部分组成。

分选箱由 5 块纯铁制成的齿板和 2 块铝质挡板组成,齿尖角  $100^\circ$ 。紧靠磁极头的 2 块齿板为单面,其余为双面齿板。所有齿板均由带沟槽的铝质挡板固定,两齿板的齿尖距 1.5mm,齿谷距 6.25mm。为适应不同类型样品的分选需要,备有不同结构的分选箱。

在分选箱的上部有一搅拌桶,搅拌桶底部设有电磁铁控制的给矿阀,阀门下端安装一长 35mm,宽 2mm 的铜扁嘴,扁嘴由平衡电动机带动做往复运动。矿浆从搅拌桶经给矿阀和扁嘴均匀地进入分选箱内。

精矿和中矿冲洗水,分别由 19mm 和 25mm 电磁阀控制,经给矿阀与扁嘴间的三通管,由扁嘴进入分选箱。

分选箱中的排矿经漏斗进入接矿箱。漏斗由可逆电动机和偏心连杆机构带动做摆动运动。当操作台给定时间接通电动机电源后,漏斗开始摆动,当摆至某一接矿箱上部时,偏心轮上触点断开微动开关,电源切断,摆动漏斗在此位置自动停止,排矿完毕后,再启动并停止在另一接矿箱上,依次循环,实现产品的分别接取。

整个操作过程包括给矿、分选、清洗、排矿以及转换排矿漏斗位置等,均

可由数字计时器按预先给定的程序自动控制。最后将磁性产品、非磁性产品分别烘干、称重,计算其含量。

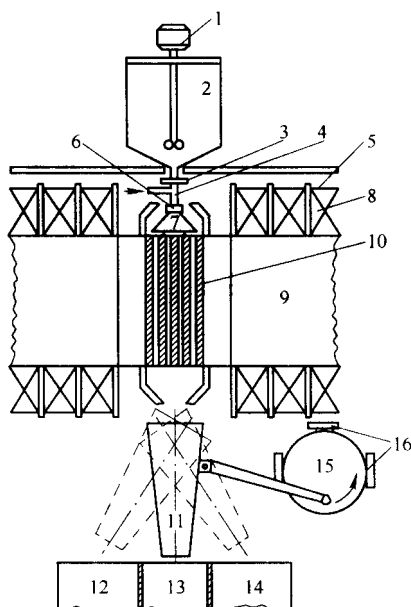


图 2-10-8 湿式强磁分选仪结构示意图

1-搅拌器 2-搅拌桶 3-给矿阀 4-三通阀 5-冷却水套;

6-扁嘴运动拉杆 7-铜扁嘴 8-激磁线圈 9-铁心;

10-分选箱 11-承矿漏斗 12、13、14-精、中、

尾矿接矿箱 15-偏心轮 16-微动开关

### (三) 介电分离法

介电分离是利用矿物介电常数的差异进行分离的。介电分离是在具有一定介电常数的介电液中进行的,介电分离仪的电磁振荡电极插入介电液中,在电极周围将形成一交变的非均匀电场,电场强度自电极向外逐渐降低。将适量样品放入介电液中,启动介电分离仪,则介电常数大于介电液的矿物颗粒被吸附于电极,介电常数小于介电液的矿物颗粒则被电极排斥,从而使介电常数不同的矿物彼此分离。

用于矿物分离的设备多使用中频介电分离仪,当 2 种矿物的介电常数相差 1.5~2.0 时,即可使二者有效分离。对于那些用重力和磁力都难以分离的矿物(如赤铁矿和钛铁矿,二者密度和磁性相近,而介电常数差异明显,赤



铁矿为 25.0 ,钛铁矿为 33.7 ~ 81.0 ) ,采用介电分离有一定的优越性。

根据要分离的矿物不同 ,应选择不同的介电液。介电分离通常使用的介电液是四氯化碳和甲醇的混合液体 ,也有用煤油、乙醇、硝基苯等作介电液体的 ,或者选择其中 2 种配置成适当的介电液。常用介电液及其介电常数如下 :

甘油	56.2	硫酸二甲酯	55.0
硝基苯	36.0	甲醇	35.0
醋酸	6.4	三氯甲烷	5.2
四氯化碳	22.4	三溴甲烷	4.5
煤油	2.0	甲醛	84.0

根据所需要的介电液体的介电常数不同 ,将各种液体按不同比例配置。若待分离矿物的介电常数比较大 ,则加入的介电常数比较大的液体的数量要多 ,反之则加入量要少一些。

矿物介电常数的大小是判定矿物导电性质的主要依据 ,通常将介电常数大于 12 的矿物称为导体矿物 ,小于 12 则为非导体矿物。介电常数的大小与测定的电源频率有关 ,根据 R. M. 福斯( R. M. Fouss )的结论 ,物料在低频时测定出的介电常数大 ,在高频时测定出的介电常数小 ,与测量的电场强度的大小无关。现在各种资料中所介绍的介电常数 ,都是在 50 或 60Hz 的交流电源条件下测出的。

测定矿物介电常数的方法很多 ,有干法和湿法之分 ,根据要测定矿物的具体情况不同选择适当的方法。湿法测定介电常数的装置包括针极、介电液体、容器、电源等。其原理是利用电极在一系列不同介电常数的介电液体中对被测矿物颗粒的吸引或排斥 ,来测定矿物颗粒的介电常数。在一较小的容器中 ,其上部 的胶木盖上安装两根很细的钢针 ,容器中充满介电溶液 ,两根针极的间距仅有 1mm 左右 ;在两根针极上通入普通的单相交流电( 50 或 60Hz )。待测矿物颗粒放入液体中 ,此时高于液体介电常数的颗粒被电极吸引 ,低于液体介电常数的颗粒被电极排斥。介电液体的介电常数是根据需要事先配置好的 ,然后不断地进行调节 ,从而能较准确地测定矿物的介电常数。

例如 ,测定石英的介电常数。在容器中加入 5mL 四氯化碳、0.5mL 甲醇 ,

使之成为一种介电常数为 5.1 的混合介电液体,此时加入几粒石英颗粒,通入电源后进行观察。如石英颗粒被电极吸引,则证明介电液体的介电常数仍较小,此时再加入 0.1mL 甲醇,使介电液体的介电常数提高至 5.63。如果此时观察到石英颗粒被电极排斥,则石英的介电常数必然介于两者之间,从而得出石英的介电常数为  $(5.1 + 5.63)/2 = 5.36$ 。

#### (四) 高压静电分离法

利用矿物电性质的差异进行矿物分离的另一种常用的方法为高压静电分离法。图 2-10-9 为实验室型鼓式高压电选机的结构示意图,主要由高压直流电源和主机两大部分组成。将常用的单相交流电升压后半波或全波整流形成高压直流电源,供给主机。现在国内实验室使用的电选机的电压一般为 20~40kV,输出为负电。主机由转鼓、电极、毛刷、给矿斗、接矿斗以及分矿板等几部分组成。

电极的结构形式有:单根电晕丝、多根电晕丝的电晕电场,静电场(偏转电极)与电晕电场相结合的复合电极,还有尖削形的复合电极等。电晕电极的作用是在高压直流电下释放负电荷,产生电晕电场。偏转电极的作用是使电晕电极释放的负电荷在静电场的作用下向转鼓表面的矿粒上辐射。处于电晕电场中的矿物颗粒,无论导体和非导体均能获得负电荷,但吸附于导体颗粒表面的电荷能在颗粒表面自由移动,而吸附于非导体颗粒表面的电荷则不能自由移动。若将转鼓接地而成为接地极后(常为正极),导体颗粒表面所吸附的电荷在极短的时间内( $1/40 \sim 1/1000\text{s}$ )即可经过接地极传走,表面不再留有电荷;非导体则不然,由于其导电性很差或不导电,表面吸附的电荷不能传走或要比导体至少长 100~1000 倍的时间才能传走一部分,表面会留有大量负电荷。因此,在电晕电场中非导体由于表面留有电荷,与转鼓(接地正极)相吸引,采用毛刷将其从转鼓上刷下;导体颗粒则在重力和转鼓离心力的作用下,脱离转鼓表面(图 2-10-9),与非导体颗粒彼此分离。电选法处理的原料必须充分干燥,潮湿原料对矿物的导电性影响很大。电选机的转鼓内通常带有加热装置,保持转鼓表面的温度在 60~80℃ 左右。原料的粒度一般为 0.04~0.5mm,且一般要预先筛分为窄粒级,粒度过细和粒级太宽均不利于分离。

电选是在高压下进行的,操作时一定要注意安全。高压直流电源的输出端必须严密连接,防止漏电;输出至主机电极时更要防止漏电至机架等;机架与地线连接要紧密,机架与地线连接的电阻要在  $4 \sim 6\Omega$  以下;并要经常检查,防止松动,避免产生危险。

### (五) 选择性溶解法

选择性溶解法是利用矿物化学性质的差异,特别是矿物在不同溶剂中的溶解性的差异,使不同矿物彼此分离。通常是待测样品置于某种溶剂(酸、碱等试剂)中,使其中的某种矿物溶解或使其中某些矿物溶解,而将某一种矿物留在残渣中,达到矿物定量的目的。选择性溶解的方法和手段很多,应用事例也很多,难以一一列举,具体方法的选择取决于原料的矿物组成特点。通常碳酸盐矿物和大多数金属氧化物易溶于普通无机酸(盐酸、硫酸等);硫化矿物通常可以用硝酸溶解,而石英及硅酸盐矿物则可用氢氟酸分解或采用碱熔法分解。

选择性溶解法因处理的原料不同,其具体处理方法和处理过程差异很大。但从分离程序来看,一般包括如下几个步骤:

- (1) 用精密天平称取适量样品;
- (2) 将样品倒入一定容积烧杯或坩埚中;
- (3) 将预先选择并配置好的溶剂按液固比 4:1 加入烧杯或坩埚中;
- (4) 加热搅拌使易溶矿物充分分解;
- (5) 溶解反应完全后,用清水洗涤、过滤、烘干,最后将残留物称重。

可见,在上述分离过程中,溶剂的选择是关键。理想情况下应选择仅对某一种矿物发生作用的试剂,而与其他矿物基本不发生作用。但事实上,矿物原料的组成千差万别,在采用选择性溶解分离时,实际样品很难满足这种理想条件,通常要与其他分离方法配合使用。

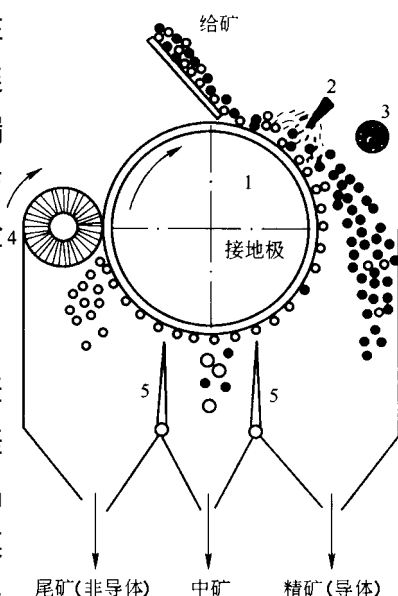


图 2-10-9 电选机

结构示意图

1-转鼓 2-电晕电极 3-偏转电极  
(静电极) 4-毛刷 5-分矿板

## 二、显微镜下矿物定量

显微镜下矿物定量,是从待测矿物原料中选取少量有代表性的样品,加工制备成光片或薄片,在显微镜下通过测定不同矿物在光片或薄片上所占比例,达到矿物定量的目的。显微镜下矿物定量通常采用普通光学显微镜,其结构简单、操作方便、测定方法易于掌握,是目前国内外普遍使用的一种矿物定量方法。该设备的缺点是,限于放大倍数和分辨率,对微粒微量矿物的定量尚很困难。

### (一)显微镜定量法的原理

显微镜下矿物定量是在光片或薄片上进行的,在光片或薄片上的矿物颗粒只显示出二维尺寸的大小,而不能直接观测到立体三维尺寸。因此,须将显微镜下测定的二维数据转化为三维数据。

显微镜下矿物定量的测定方法有点测法、线测法和面测法 3 种,分别利用待测矿物表面所占点数、线段长度或表面积来测定其含量。1848 年 A. Delesse 在假设矿物在岩石中呈无规律分布的条件下,证明了在岩石切面上矿物的面积百分含量等于矿物的体积百分含量。对于那些矿物呈定向排列或规律分布的岩石,如:片岩、片麻岩、沉积岩等,为了测定其中某种矿物的体积百分含量,可能需要在垂直岩石延伸方向的切片上进行测定。1898 年 A. Rosiwal 证明了在不规则分布的情况下,岩石切面上某矿物的线段截距的百分含量等于体积百分含量。Thompson(1930)和 Glagolav(1934)证明了采用点测法测定的点数百分含量等于体积百分含量。因此,点数百分含量、线段百分含量、面积百分含量与体积百分含量之间存在以下关系:

$$P_p = L_l = A_a = V_v \quad (2-10-2)$$

式中  $P_p$ ——点数百分含量;

$L_l$ ——线段百分含量;

$A_a$ ——面积百分含量;

$V_v$ ——体积百分含量。

1963 年 E. R. Weibel 又用数学分析的方法证明了这一基本原理。用点测法、线测法或面测法测定出矿物的体积百分含量后,即可按下式计算矿物的

重量百分含量：

$$W = P_p(\rho_1/\rho) = L_l(\rho_1/\rho) = A_a(\rho_1/\rho) = V_v(\rho_1/\rho) \quad (2-10-3)$$

式中  $W$ ——矿物的重量百分含量, % ;

$\rho_1$ ——待测矿物的密度  $\text{g}/\text{cm}^3$  ;

$\rho$ ——原料的密度  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## (二) 显微镜下目估定量

显微镜下目估定量是一种较为粗略的定量方法, 该方法不需要进行细致的测量统计工作, 仅通过对显微镜下不同视域的观察, 借助参考图, 大致确定待测矿物的含量。其测定精度较差, 但测定速度快, 结果有一定的参考价值。

显微镜下目估定量可使用实体显微镜对粉状样品直接测定, 也可以利用反光或透光显微镜对光片或薄片进行测定, 目估定量通常要设计一套标准图作为比较标准。图 2-10-10 就是一套矿物百分含量标准图, 可用于和显微镜下所观察的视域中待测矿物的分布情况进行比较。标准图的做法是: 首先在硬白纸上画 12 个直径为 20cm 的圆, 然后在彩色纸上分别以 1、3、5、10、15、...、90cm 的平方根为半径画 12 个小圆, 并将这些小圆分别剪碎成不规则等粒小碎片, 最后分别将这 12 份小碎片均匀地粘贴在硬白纸上的 12 个大圆中。这样做成的 12 个圆即表示矿物百分含量分别为: 1%、3%、5%、10%、15%、...、90%。

## (三) 面测法

面测法是根据光片或薄片各矿物所占面积百分含量, 等于矿物在原料中所占体积百分含量的基本原理来测定矿物的含量。采用带方格网的目镜进行测量, 此时在显微镜下所观察到的矿物颗粒上就叠置了一个方格网(图 2-10-11), 以该方格网为尺度来测量不同矿物所占的面积大小。

测量时, 通常是按照一定的间距左右移动载物台, 将整个矿片表面全部测完, 按视域分类统计不同矿物的面积(所占网格数), 并将测量结果记录在记录表中(表 2-10-1), 最后将各视域测量结果进行累计, 计算出待测矿物在该矿片中的体积含量。

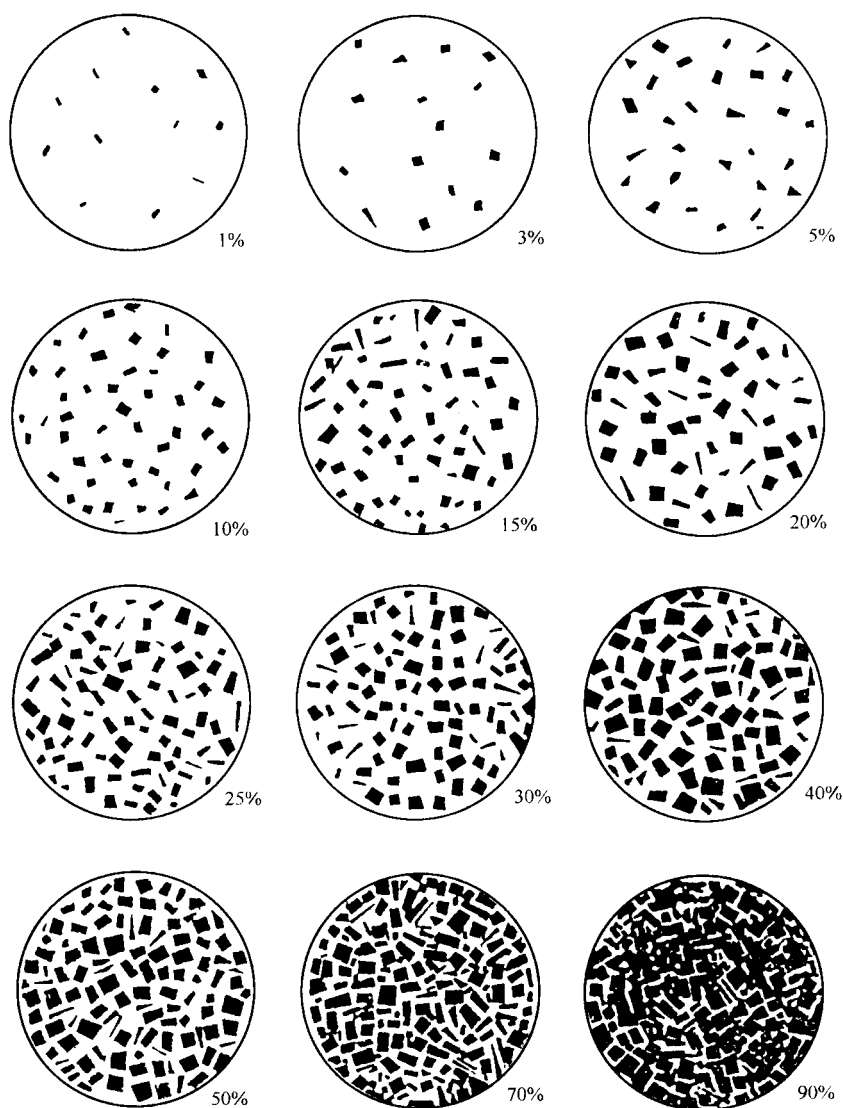


图 2-10-10 矿物百分含量标准图

以图 2-10-11 为例,如果矿片中含有 3 种矿物 No.1、No.2、No.3,所占网格数的累计值分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ ,则它们在原料中的重量百分含量可按下列式计算:

$$W_i = 100 N_i \rho_i / (N_1 \rho_1 + N_2 \rho_2 + N_3 \rho_3) \quad (2-10-4)$$

式中  $W_i$ ——第  $i$  种矿物在原料中的重量百分含量, %;

$N_i$ ——第  $i$  种矿物在切片中所占网格数;

$\rho_i$ ——第  $i$  种矿物的密度  $g/cm^3$ 。

因此 ,当原料的矿物组成较简单时 ,可分别统计不同矿物的网格数 ,并可按式( 2 - 10 - 4 )计算出若干种矿物的百分含量。当原料的矿物组成非常复杂 ,难以对各种矿物分别统计时 ,或仅需测定某一种矿物的含量时 ,则仅统计某种待测矿物的网格数和测到的所有矿物颗粒所占总网格数即可。在这种情况下 ,该待测矿物在原料中的重量百分含量可按下式计算 :

$$W = 100n\rho_d / N\rho_y \qquad (2 - 10 - 5)$$

式中  $n, N$ ——分别为待测矿物所占网格数和测定的总网格数 ;

$\rho_d, \rho_y$ ——分别为待测矿物的密度和原料的密度。

表 2 - 10 - 1 面测法测量结果记录表

视 域	各矿物所占网格数				
	矿物 NO.1	矿物 No.2	矿物 No.3	No.j	合计(按视域)
1	$N_{11}$	$N_{12}$	$N_{13}$	$N_{1j}$	$N_1$
2	$N_{21}$	$N_{22}$	$N_{23}$	$N_{2j}$	$N_2$
3	$N_{31}$	$N_{32}$	$N_{33}$	$N_{3j}$	$N_3$
$i$	$N_{i1}$	$N_{i2}$	$N_{i3}$	$N_{ij}$	$N_i$
合计(按矿物)	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_j$	$N_j$ (总格数)
体积含量/%	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_j$	100
重量含量/%	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_j$	100

为保证测量结果的精度 ,测量的视域数目不能太少。通常 ,每块矿片测定的视域数不少于 20 个 ,对于矿物呈不均匀分布的矿物原料 ,测定的视域数目还要更多。对于矿物呈极不均匀分布的原料 ,通常还需要对多个矿片进行测定。此外 ,在物镜的选择方面要注意根据原料中矿物的嵌布粒度选择适当的放大倍数 ,粗粒者常用低倍镜 ,细粒者要选用中倍镜。

(四) 线测法

线测法也是显微镜下矿物定量的常用方法 ,其原理是矿片表面不同矿物

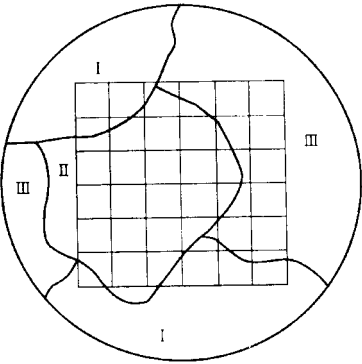


图 2 - 10 - 11 面测法原理示意图

沿一定方向直线上线段截距长度百分含量与其在原料中的重量百分含量相等。线测法的测量方法与面测法相似,所不同的是面测法是通过矿物表面所占网格数来测定其面积大小,而线测法则是通过目镜上的直线测微尺来测定不同矿物所占线段截距长度的大小。测量时采用带直线测微尺的目镜,测微尺长度一般为1cm,等分为100个小格(图2-10-12)。将待测矿片(光片或薄片)置于载物台上并用机械台夹紧,调好焦距后,在矿片表面的矿物颗粒上就会叠置上一个直线测微尺(图2-10-12)。测量时,按一定方向和间距,通过机械台左右移动矿片,以测微尺为单位统计测微尺在不同矿物表面的线段截距长度,某矿物表面所占的线段长度越长,说明该矿物的含量越高。

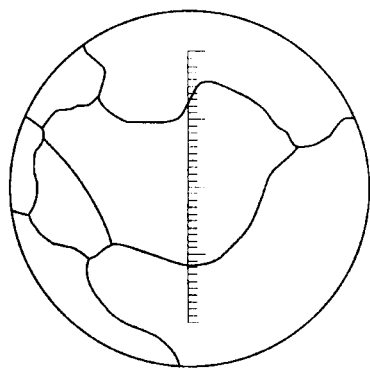


图 2-10-12 线测法测定原理示意图

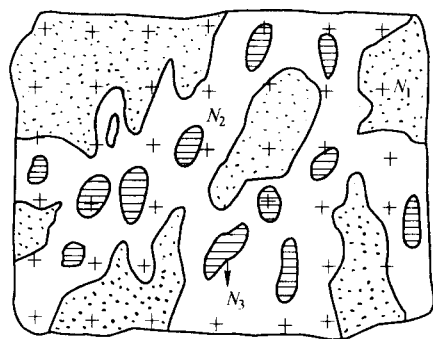


图 2-10-13 点测法测定原理示意图

线测法数据的统计和计算方法与面测法相同,只是将网格数更换成线段长度即可。线测法更适用于细粒矿物原料的测定,对于细粒嵌布的原料,若采用面测法会因颗粒细小占不满一格而难以统计,且会造成测量精度的降低,而线测法则可避免这一问题。

### (五) 点测法

点测法的原理是矿片上各种矿物表面所占点数之比与各矿物在原料中的体积之比相等。其测定方法和面测法、线测法也很相似,所不同的是测量时利用带测微网的目镜,以测微网格的交点在矿片上矿物表面分布的多少来测量矿物的含量(图2-10-13)。

测量时,首先在目镜筒中装入测微网,将视域中不同矿物表面分布的交点数分别统计下来。显然,矿片上出露面积大的矿物占有的交点数就多(见



图 2-10-13)。点测法适用于矿物嵌布粒度均匀的矿物原料,对于粗细不均匀嵌布的原料,会因细小颗粒的漏测而造成测量精度的降低。

### 三、化学多元素分析矿物定量

#### (一) 化学分析矿物定量原理

化学分析法定量是近年来获得迅速发展且日臻完善的一种矿物定量方法。该方法是利用矿物原料化学成分与其组成矿物化学成分的相关性,通过一定的数学运算来进行矿物定量的。它不像其他方法那样受组成矿物的含量和嵌布粒度的影响,而仅取决于原料和组成矿物的化学成分,定量精确度高,对于其他方法难以解决的微粒微量矿物的定量,该方法的优越性尤其显著。为了测定原料中所有矿物含量,必须具备以下基础资料:

- (1) 原料的化学全分析结果;
- (2) 确定所有组成矿物的种类;
- (3) 各组成矿物的化学成分分析结果。

根据以上分析资料,即可通过列联立方程等方法,求出组成矿物的含量。因为原料的化学分析提供了某元素在原料中总的含量,而某元素在原料中的含量则是由该元素在各矿物中的含量和各种矿物在原料中的含量所确定的。因此,利用化学分析法进行矿物定量,实际上是对化学分析过程的逆运算。

对于由  $n$  种矿物  $m$  种元素组成的矿物原料,根据元素平衡可建立如下线性方程组:

$$a_{11}\omega_1 + a_{12}\omega_2 + a_{13}\omega_3 + \dots + a_{1j}\omega_j + \dots + a_{1n}\omega_n = a_1$$

$$a_{21}\omega_1 + a_{22}\omega_2 + a_{23}\omega_3 + \dots + a_{2j}\omega_j + \dots + a_{2n}\omega_n = a_2$$

$$a_{i1}\omega_1 + a_{i2}\omega_2 + a_{i3}\omega_3 + \dots + a_{ij}\omega_j + \dots + a_{in}\omega_n = a_i$$

$$a_{m1}\omega_1 + a_{m2}\omega_2 + a_{m3}\omega_3 + \dots + a_{mj}\omega_j + \dots + a_{mn}\omega_n = a_m$$

式中  $a_{ij}$ ——第  $i$  种元素在第  $j$  种矿物中的百分含量, %;

$\omega_j$ ——第  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 种矿物在原料中的百分含量, %;

$a_i$ ——第  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 种元素在原料中的百分含量, %。

上述方程组可归纳为以下数学表达式：

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \omega_j = a_i \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \dots, m_a \quad (2-10-6)$$

原料中的矿物种类(  $n$  ),可采用光学显微镜、 $X$  射线衍射等方法确定 ;各矿物中某元素的含量  $a_{ij}$  可通过单矿物化学分析、电子探针波谱微区成分分析等方法测得。将已知数据代入方程组中 ,即可求出原料中各矿物的含量  $\omega_j$ 。

在化学分析矿物定量实际测量过程中 ,为保证定量结果的准确性 ,需要注意以下几点：

(1) 矿物中某元素的含量(  $a_{ij}$  )应采用该矿物原料中矿物化学成分的实际检测值 ,而不能简单地采用该矿物的理论化学成分含量。因为在自然界的矿物原料中存在着广泛的类质同象和胶体吸附现象 ,使实际矿物的化学成分与其理论成分之间存在着或大或小的偏差。例如闪锌矿(  $ZnS$  )的理论成分含  $Zn 67.10\%$  ,但自然界中的闪锌矿几乎都含有多少不等的  $Fe$ 、 $Cd$ 、 $In$  等元素 ,吉林某大型铅锌银矿床中的闪锌矿 ,其  $Zn$  含量仅为  $61.37\%$ 。因此 ,对于该闪锌矿来讲 ,若采用其理论成分进行计算必然会产生很大的误差。

(2) 方程组中的系数和常数(  $a_{ij}$  和  $a_i$  )应选择那些含量稳定、测定简单可靠的元素分析值。这些元素多属于矿物的主元素 ,类质同象和胶体吸附状态的微量元素不宜选择。

(3) 当利用联立线性方程组难以对原料中的所有矿物同时进行定量计算时 ,可利用元素的物相分析对矿物进行分组定量。如果原料中的某个元素仅赋存于一种矿物中 ,则可将该元素作为该种矿物的特征元素 ,分析出该元素在原料中和矿物中的含量后 ,即可直接计算出该种矿物的含量。

化学分析定量法根据原料性质的不同 ,其分析和计算方法也有一定差异 ,这里将几种典型的矿物原料的定量方法介绍如下。

## (二) 硫化矿物的计算

与其他矿物相比 ,硫化物的特点是 :主元素的组成简单、含量稳定且与矿物的相关性强。因此 ,矿物原料中硫化物的定量计算较为简单。

例如 :已知某硫化矿石的化学成分为 : $Cu 0.997\%$ 、 $Zn 39.164\%$ 、 $Fe 23.$

652%、S33.508% ,主要硫化矿物为 :闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿。求矿石中硫化矿物的含量。

### (1) 各矿物的元素含量

闪锌矿 :Zn 56.7%、Fe 10.0%、S 33.3% ,黄铜矿 :Cu 34.6%、Fe 30.4%、S 34.9% ;

黄铁矿 :Fe 46.5%、S 53.5% ,磁黄铁矿 :Fe 63.5%、S 36.5%。

### (2) 列方程组

设黄铜矿的含量为  $\omega_{cp}$  ,闪锌矿的含量为  $\omega_{sph}$  ,黄铁矿的含量为  $\omega_{py}$  ,磁黄铁矿的含量为  $\omega_{pyr}$ 。据以上条件可列出联立方程组如下 :

$$\begin{cases} 34.6\omega_{cp} = 0.997 \\ 56.7\omega_{sph} = 39.164 \\ 30.4\omega_{cp} + 10\omega_{sph} + 46.5\omega_{py} + 63.5\omega_{pyr} = 23.652 \\ 34.9\omega_{cp} + 33.3\omega_{sph} + 53.5\omega_{py} + 36.5\omega_{pyr} = 33.508 \end{cases}$$

### (3) 解方程组

求解方程组可得 : $\omega_{cp} = 2.88\%$  ; $\omega_{sph} = 69\%$  ; $\omega_{py} = 1.32\%$  ; $\omega_{pyr} = 24\%$ 。

## (三) 碳酸盐及含水矿物的计算

### 1. 碳酸盐矿物的计算

碳酸盐矿物在加热分解时可释放出  $\text{CO}_2$  ,而且不同矿物的分解温度不同。因此 ,可利用示差热天平进行定量测定。例如 :某矿石中含有方解石和白云石 2 种碳酸盐矿物 ,试利用示差热天平确定二者的含量。

已知白云石中  $\text{MgCO}_3$  的分解温度为  $800^\circ\text{C}$  , $960^\circ\text{C}$  是白云石中  $\text{CaCO}_3$  的分解温度或独立  $\text{CaCO}_3$ ( 方解石 )的分解温度。首先 ,测定出该矿石在  $800^\circ\text{C}$  时分解产生的  $\text{CO}_2$  的量为 18.5% ,在  $960^\circ\text{C}$  时分解产生的  $\text{CO}_2$  量为 21.9%。

则矿石中方解石的含量为  $(21.9\% - 8.5\%) \times (\text{CaCO}_3 \text{ 分子量} / \text{CO}_2 \text{ 分子量}) = 7.73\%$  ;

白云石的含量为 : $18.5\% \times \{ \text{CaCO}_3 \text{ 分子量} / \text{CO}_2 \text{ 分子量} \} + (\text{MgCO}_3 \text{ 分子量} / \text{CO}_2 \text{ 分子量}) \} = 77.13\%$ 。

### 2. 滑石、绿泥石和蛇纹石的计算

对于这些含水矿物的测定 ,同样可采用示差热天平法 ,因为这些矿物在一定温度下可以分解出一定量的水。滑石、绿泥石、蛇纹石的分解温度见表 2-10-2。

表 2-10-2 滑石、绿泥石、蛇纹石的分解温度

矿物名称	分 子 式	分解温度/℃	产生气相
滑 石	$3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	960	$\text{H}_2\text{O}$
绿泥石	$5\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	650	$\text{H}_2\text{O}$
蛇纹石	$6\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	760	$\text{H}_2\text{O}$

如果测定出矿石在不同温度下分解产生的结构水量 ,即可计算出不同矿物的含量。例如 ,某含有滑石、绿泥石、蛇纹石的矿石在不同温度下测定的结构水量为 :650℃ 1.5% ;760℃ 3.1% ;960℃ 0.8%。则可计算出 3 种矿物的含量为 :滑石 16.8% ,绿泥石 11.54% ,蛇纹石 23.77%。

3. 孔雀石和蓝铜矿的计算

某铜矿床的氧化矿石中 ,氧化带铜矿物有孔雀石、蓝铜矿、硅孔雀石、赤铜矿和金属铜等。经测定在 400℃时分解产生  $\text{H}_2\text{O}$  量为 1.2% ,在 1100℃分解产生  $\text{CO}_2$  量为 4.1%。求孔雀石和蓝铜矿量。

400℃和 1100℃是两者的分解温度。孔雀石的化学式为  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  ,有 1 个  $\text{CO}_2$  和 1 个  $\text{H}_2\text{O}$ 。蓝铜矿的化学式为  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  ,有 2 个  $\text{CO}_2$  和 1 个  $\text{H}_2\text{O}$ 。

设矿石中孔雀石和蓝铜矿含量的分子数比为  $1:\phi_m$ 。

则矿石中孔雀石和蓝铜矿析出的  $\text{H}_2\text{O}$  量和  $\text{CO}_2$  量比为 :

$$\frac{\text{H}_2\text{O 量}}{\text{CO}_2 \text{ 量}} = \frac{(1 + \phi_m) \times \text{H}_2\text{O 分子量}}{(1 + 2\phi_m) \times \text{CO}_2 \text{ 分子量}}$$
$$= \frac{(1 + \phi_m) \times 18}{(1 + 2\phi_m) \times 44} = \frac{1.2}{4.1}$$

解  $\phi_m = 0.64$ 。注意 ,这是分子数比 ,不是重量比。

则矿石中孔雀石量 = 孔雀石产生  $\text{H}_2\text{O}$  量  $\times \frac{\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2 \text{ 分子量}}{\text{H}_2\text{O 分子量}}$

= 矿石 400℃时产生的  $\text{H}_2\text{O}$  量  $\times \frac{1}{1 + \phi_m} \times \frac{123.55 + 97.55}{18}$

$$= 1.2\% \times \frac{1}{1.64} \times \frac{221.1}{18} = 8.99\%$$

$$\begin{aligned} \text{蓝铜矿量} &= \text{孔雀石量} \times \frac{\text{蓝铜矿分子量}}{\text{孔雀石分子量}} \times \phi_m \\ &= 8.99\% \times \frac{334.65}{221.1} \times 0.64 = 8.7\% \end{aligned}$$

从上述计算可知,孔雀石和蓝铜矿含量接近 18%,而分解产生的水却仅 1.2%。不难看出,如差热分析试样重量为 0.1g,则 1.2% H<sub>2</sub>O 的体积仅占 1.49mL。因此在气体体积测定上稍有出入,就可造成很大误差。所以应用此法确定孔雀石和蓝铜矿含量必须慎重,或增加试样重量至 1g,或先用标样确定仪器精度。

#### (四) 不含水硅酸盐矿物的计算

硅酸盐矿物根据它们的阴离子构造可分为岛状、单链状、双链状、层状和架状等 5 类。双链状和层状构造矿物大都含有结构水。因此在测定了它们的结构水后,可直接计算它们的矿物量。至于岛状、单链状和架状构造矿物,大都不含水和结构水,在成分简单的情况下也可计算。

某地矿石的矿物组成经显微镜研究后,确定有硅灰石 CaO·SiO<sub>2</sub>、方解石 CaO·CO<sub>2</sub>、透辉石 CaO·MgO·2SiO<sub>2</sub>、钙铝石榴石 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3SiO<sub>2</sub>、石英 SiO<sub>2</sub>、磁铁矿 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和少量硫化物等。

经化验得知其成分为:CaO 42.66、MgO 1.45、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.23、SiO<sub>2</sub> 29.28、CO<sub>2</sub>

17.15、Fe 4.89、S 0.53,总量 98.52。化验的 Fe 量除构成氧化铁和硫化铁独立矿物外,也可进入硅灰石、透辉石和钙铝石榴石。从理论上讲铁不可能以类质同象混入物进入硅灰石,所以硅灰石中即使含铁,也是含量甚微,故在此计算阶段可忽略不计。铁可呈类质同象混入物进入透辉石和钙铝石榴石。在镜下观察时,透辉石色不绿且折射率未见提高。钙铝石榴石色不红,折射率也仅稍大于 1.736。总之两者含铁均甚微。因而对两者的含铁量在此均都略而不计。

#### (1) 求矿石中方解石量及其占有的 CaO 量

方解石中 CaO 和 CO<sub>2</sub> 量的分子数比为 1:1。

$$\text{则矿石中的方解石量} = \text{CO}_2 \text{ 化验值} \times \frac{\text{CaCO}_3 \text{ 分子量}}{\text{CO}_2 \text{ 分子量}}$$

$$= 17.15\% \times \frac{100}{44} = 38.97\%$$

$$\text{矿石中方解石占有的 CaO 量} = \text{CO}_2 \text{ 化验值} \times \frac{\text{CaO 分子量}}{\text{CO}_2 \text{ 分子量}}$$

$$= 17.15\% \times \frac{56}{44} = 21.83\%$$

(2) 求矿石中透辉石量及其占有的 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 量

透辉石中 CaO、MgO 和 SiO<sub>2</sub> 的分子数比为 1:1:2。

$$\text{则矿石中透辉石量} = \text{MgO 化验值} \times \frac{\text{透辉石分子量}}{\text{MgO 分子量}}$$

$$= 1.45\% \times \frac{56 + 56 + 40 + 2 \times 60}{40} = 7.83\%$$

$$\text{矿石中透辉石占有的 CaO 量} = \text{MgO 化验值} \times \frac{\text{CaO 分子量}}{\text{MgO 分子量}}$$

$$= 1.45\% \times \frac{56}{40} = 2.03\%$$

$$\text{矿石中透辉石占有的 SiO}_2 \text{ 量} = \text{MgO 化验值} \times \frac{2 \times \text{SiO}_2 \text{ 分子量}}{\text{MgO 分子量}}$$

$$= 1.45\% \times \frac{2 \times 60}{40} = 4.35\%$$

(3) 求矿石中钙铝石榴石量及其占有的 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 量

钙铝石榴石中 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 量的分子数比为 3:1:3。

$$\text{则矿石中钙铝石榴石量} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 化验值} \times \frac{\text{钙铝石榴石分子量}}{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 分子量}}$$

$$= 1.23\% \times \frac{3 \times 56 + 102 + 3 \times 60}{102} = 5.43\%$$

$$\text{矿石中钙铝石榴石占有的 CaO 量} = \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 化验值} \times \frac{3 \times \text{CaO 分子量}}{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 分子量}}$$

$$= 1.23\% \times \frac{3 \times 56}{102} = 2.03\%$$

$$\begin{aligned}\text{矿石中钙铝石榴石占有的 SiO}_2 \text{ 量} &= \text{Al}_3\text{O}_3 \text{ 化验值} \times \frac{3 \times \text{SiO}_2 \text{ 分子量}}{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 分子量}} \\ &= 1.23\% \times \frac{3 \times 60}{102} = 2.17\%\end{aligned}$$

(4) 求矿石中硅灰石量及其占有的 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 量

$$\begin{aligned}\text{矿石中硅灰石占有的 CaO 量} &= \text{CaO 总量} - \text{方解石占有的 CaO 量} \\ &\quad - \text{钙铝石榴石占有的 CaO 量} \\ &= 42.66\% - 21.83\% - 2.03\% - 2.03\% \\ &= 16.77\%\end{aligned}$$

硅灰石中 CaO 和 SiO<sub>2</sub> 量的分子数比为 1 :1。

$$\begin{aligned}\text{则矿石中的硅灰石量} &= \text{矿石中硅灰石占有的 CaO 量} \times \frac{\text{CaSiO}_3 \text{ 分子量}}{\text{CaO 分子量}} \\ &= 16.77\% \times \frac{56 + 60}{56} = 34.74\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{矿石中硅灰石占有的 SiO}_2 \text{ 量} &= \text{矿石中硅灰石占有的 CaO 量} \times \\ &\quad \frac{\text{SiO}_2 \text{ 分子量}}{\text{CaO 分子量}}\end{aligned}$$

$$= 16.77\% \times \frac{60}{56} = 17.97\%$$

(5) 求矿石中游离的 SiO<sub>2</sub> 即石英量

矿石中的石英量 = SiO<sub>2</sub> 总量 - 试样中硅灰石、透辉石和钙铝石榴石占有的 SiO<sub>2</sub> 量

$$= 29.28\% - 17.97\% - 4.35\% - 2.17\% = 4.79\%$$

(6) 求矿石中的磁铁矿量

由于矿石中硫含量很低,且只能以黄铁矿和磁黄铁矿的形式存在。为简化计可暂略而不计。将矿石铁量全部计入磁铁矿。

$$\begin{aligned}\text{磁铁矿量} &= \text{矿石中 Fe 化验值} \times \frac{\text{磁铁矿分子量}}{3 \times \text{Fe 原子量}} \\ &= 4.89\% \times \frac{3 \times 55.85 + 4 \times 16}{3 \times 55.85} = 6.75\%\end{aligned}$$

最后可得矿石中矿物总量：

$$\begin{aligned}
 & \text{方解石量} + \text{透辉石量} + \text{钙铝石榴石量} + \text{硅灰石量} + \text{石英量} + \text{磁铁矿量} \\
 &= 38.97\% + 7.83\% + 5.43\% + 34.74\% + 4.79\% + 6.75\% \\
 &= 98.51\%
 \end{aligned}$$

#### 四、自动图像分析法矿物定量

仪器分析矿物定量也是近几年定量工艺矿物学(quantitative process mineralogy)研究非常活跃的领域之一。自 20 世纪 70 年代以来自动图像分析仪(IPS :Image Processing Sys - tem)在工艺矿物学中的应用,为矿物定量开辟了一个新途径。自动图像分析法实现了矿物识别、矿物测量和统计计算的自动化,大大地提高了矿物定量的精度和效率。

根据矿物识别的原理和方法不同,图像分析可划分为以下两大类:

(1)利用光学显微镜生成矿物图像,根据矿物在显微镜下的光学性质的差异(反射率、折射率、颜色等)来识别矿物。这种方法的缺陷在于对光学性质相近的矿物难以准确识别,特别是对于非均质矿物由于其光学性质不稳定,会造成矿物识别的困难和测量误差的增大,甚至会造成图像分析无法实现。这类设备有早期的 Quantimet 图像分析仪和国内江南光学仪器厂、北京大恒图像处理公司所产的图像分析设备。

(2)采用电子探针或扫描电镜生成矿物图像(背散射电子图像或元素特征 X 射线图像等)根据矿物化学成分的差异来识别矿物。这种分析方法对矿物的识别准确,测量可实现自动化,测量结果精度高。按照系统的组成和图像的生成方式,又可分为 3 种:1)带有电子探针微分析仪和计算机的图像分析仪, M. P. Jones(1982)研制的 X 射线图像分析仪即属此类。2)由澳大利亚 CSIRO 开发的扫描电镜矿物定量图像分析系统(QEM \* SEM)。

3)普通图像分析仪与扫描电镜配合使用,这种分析方法已在加拿大得到了应用。

可以看出,图像分析的方法和设备是多种多样的,这里仅将 Quantimet 图像分析仪的原理及测量方法做一简要介绍。

图 2-10-14 是 Quantimet 图像分析仪的结构示意图,它主要由输入、中央处理器和输出三大部分组成。测量时将制备好的矿片(光片或薄片)置于



样品台上,通过成像系统显微镜将待测矿物放大。扫描器的光导摄像管安装在显微镜的目镜上,对显微镜的视域进行系统扫描,扫描时根据不同矿物像的亮度不同转换成不同电平的脉冲信号。每类电平脉冲的宽度取决于每个矿物颗粒表面的图像点数,矿物颗粒的表面积越大,其表面分布的图像点数越多,则该电平脉冲的宽度就越大(一个光导摄像管平面上约有 60000 个图像点)。光导摄像管取得的电讯号分别同时输送到荧光屏(显示器)和选平部件探头上,进入荧光屏的扫描视频信号放大 30 倍后转换成样品物像呈现于荧光屏上。探头则利用自身的可调节电阻(阈值)来圈定图像中待测矿物的边界,其方法是根据测量的矿物不同选择一个电压(阈值),用该电压值与扫描视频信号相比较,其交点就是该待测矿物的边界,而其他矿物的图像则被滤掉。显然,阈值的高低不同,所检测到的边界矿物的种类也不相同。测定时就可以利用对阈值的控制,分别测量矿片上的各种矿物。计算机按预先编制的程序,对探头输送来的矩形脉冲进行积分即可得出待测矿物的面积值。

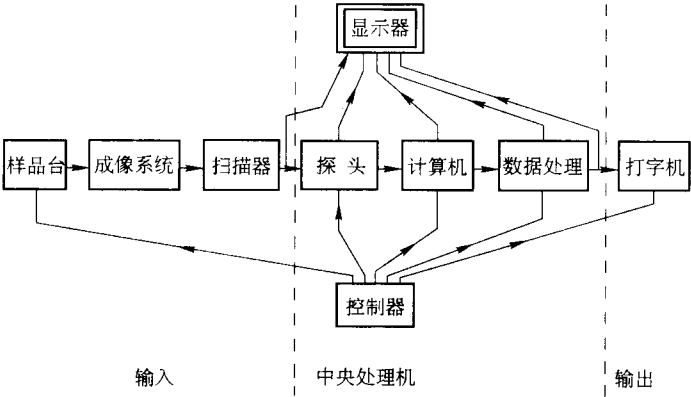


图 2-10-14 Quantimet 图像分析仪结构示意图

### 五、X 射线衍射矿物定量

现代 X 射线衍射仪由于计数探测器测量衍射强度的精确度不断提高、计算机数据处理功能的不断完善,使 X 射线衍射分析不仅能进行矿物原料的定性分析,而且使对矿物原料的定量分析成为可能,定量分析方法也在不断完善。

X 射线衍射定量分析是在定性物相分析的基础上进行的。其原理是混

合原料中某种物相(矿物)的含量  $Q$  与其特征衍射峰的强度  $I$  成正比。进行定量测定时,一般是首先利用待测物相的纯样(纯矿物)配置成一系列含量不同的定量样品(标样),测定它们的衍射强度,作出  $Q-I$  工作曲线,然后在相同条件下测定待测样品中该物相的衍射强度,利用工作曲线求出待测样品中该物相的含量。

$X$  射线衍射定量分析方法很多,这里仅简要介绍几种常用的分析方法。

### (一) 纯样标准法

纯样标准法的测定原理是:首先测定出纯矿物特征衍射峰的衍射强度  $I$ ,再将纯样配置成一系列含量不同( $Q_a$ )的标样并分别测定出该矿物的衍射强度  $I_a$ ,作出  $I_a/I - Q_a$  工作曲线(图 2-10-15)然后,在相同试验条件下测定待测原料中该矿物的特征衍射峰强度值  $I_a$  后,即可在工作曲线上求出该矿物含量  $Q_a$ 。

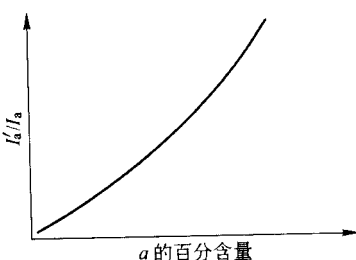


图 2-10-15 纯样标准法工作曲线

### (二) 二相系标样对比法

对于二相系中 2 种矿物相(A 和 B)相对含量

的测定,则可通过标样对比法进行测定。首先利用标样按各种比例配置出一系列标准样品,分别作出衍射曲线,根据这些衍射曲线作出 2 种物相的衍射强度之比( $I_A/I_B$ )与含量之比( $Q_A/Q_B$ )的工作曲线(图 2-10-16a),工作曲线也可以不止一条,可以根据几对特征衍射峰作出几条工作曲线(图 2-10-16b)然后将待测原料在同样条件下作出衍射曲线,并测量出相应的  $I_A/I_B$ ,在工作曲线上即可很方便地求出  $Q_A/Q_B$ 。

### (三) 内标法

内标法测定矿物含量时,首先用待测矿物 A 和内标样 S 配置一系列不同含量比例( $Q_A/Q_S$ )的定量样品,然后用衍射仪法测定出二者特征衍射峰的相对强度  $I_A/I_S$ ,作出  $I_A/I_S - Q_A/Q_S$  工作曲线(图 2-10-17)。进行待测样品的测量时,同样首先在样品中加入一定含量的内标样  $Q_S$ ,然后采用衍射仪

进行分析,测定出待测矿物的特征衍射峰强度  $I_A$  与内标样特征衍射峰强度  $I_S$  的比值  $I_A/I_S$  在工作曲线上查出  $Q_A/Q_S$  后即可计算出待测矿物的含量  $Q_A$ 。

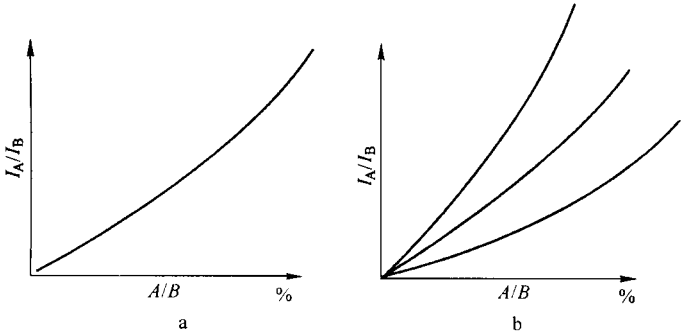


图 2-10-16 二相系标样对比法工作曲线

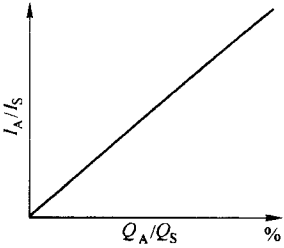


图 2-10-17 内标法工作曲线

需要指出, X 射线衍射法定量结果的精度和检测灵敏度尚较差,通常只能提供半定量分析结果,适用于定量精度要求不高时采用。当原料的矿物组成较简单时其定量结果的精度较高,而矿物组成较复杂的情况下该方法的定量结果误差较大。X 射线衍射分析还与矿物的结晶程度、矿物相的质量吸收系数等因素有关,无法分析隐晶质矿物。而且检测灵敏度较差,通常仅能检测含量在 2% ~ 3% 以上的矿物相,无法进行微量矿物的定量。

# 第十一章 矿物的单体解离新技术新工艺

矿石分选目的,是为了有效地富集并回收它其中的有用矿物。为此,首先必须经由破碎、磨矿使所含矿物(特别是有用矿物和脉石矿物)相互解离。块体矿石碎、磨成粉末状颗粒产品后,其中的颗粒,有的仅含有1种(或在分选作业中可同时回收的几种)矿物;有的则是有用矿物与脉石矿物共存。前者称之为已从矿石中解离出的单体(颗粒),后者叫做矿物的连生体(颗粒)。产物中某种矿物的单体含量( $q_m$ )与该矿物总含量( $q_n + q_1$ )比值的百分数,称之为所求矿物的单体解离度。

$$L_0 = \frac{q_m}{q_m + q_1} \times 100\% \quad (2-11-1)$$

式中  $L_0$ ——矿石碎、磨产品中某种矿物的单体解离度;

$q_m$ ——矿石碎、磨产品中某种矿物的单体含量;

$q_1$ ——矿石碎、磨产品中某种矿物在其自身连生体中的含量。

矿物,特别是矿石中有用矿物的单体解离,是选厂粉碎作业的一项基本目标。是确定最佳磨矿细度的重要依据。用于该项作业的能耗占到选厂全部作业的50%~85%。物料在可选粒度范围内的解离,直接影响到选分效果。因此,对矿物的单体解离及时做出正确的预测和查定,始终是矿物工程界最重要的任务之一。近半个多世纪的矿物解离研究,主要集中于两方面,一是解离度测定,它包括测量手段、测量方法和测量数据的整理、解释与转换;二是矿物解离的理论研究。对矿物解离的过程、机理和影响因素进行分析,同时采用数学方法,建立解离过程的数学模型,从而对一定粉碎细度下可

能达到的解离效果作出预测。

高登(Gaudin, 1939)是系统研究矿物解离的开创者。他依据矿石粉末产品组成颗粒的分选性质及其矿物组成特征,将颗粒划分成单体(free particles)与连生体(locked particles)。矿物中单体数量的多少,则用设定的“单体解高度”(degree of liberation)评定。鉴于显微镜下观测到的单体解离度,存有统计误差和单体值在光(薄)片上的“放大”,他主张应视样品情况,相应在镜下查数到400~6400个颗粒,并且还要将“连生因子”(locking factor)引入观测结果,以消除由于样品制作而带来的“截面切割效应”。同时确认矿物的解离主要是经由2种方式完成,一为粉碎解离(liberation by size reduction),一为脱离解离(liberation by detachment)。对于颗粒中的连生体,他基于连生体中不同矿物的结合形式,以及由此而导致的分选特点,将连生体分为毗邻型、细脉型、壳层型和包裹型等4类。在预测碎、磨产品中的矿物单体解离时,他认为矿物解离程度主要受制于矿物结晶粒度和产品粉碎粒度,同时还与其含量有关。为此,他设计了一种简易的双组分几何模型,用以预测由于粉碎解离而导致的矿物单体含量。威格尔和李(Wiegel & Li, 1967)在保留高登模型基本模式的基础上,允许矿物颗粒作随机排列,导出了组分解离度随系统组分相对含量及矿物与产品两者间粒度比值不同而变化的数学模型。此后赛(Hsin, 1994)又将粉末颗粒的粒度分布与矿物的脱离解离引入,从而使模型功能得到了新的提高。由上所述不难看出,高登的研究几乎涉及到了“矿物解离”的所有方面。论证的多数基本观点,至今仍然在被广泛引用。

高登之后有关矿物解离的数学模型,都是以粉碎解离和矿物晶体随机排列为前提。

矿石物料在破碎、磨矿时,如果不发生脱离解离,可以设想矿物晶体间的界面总面积就会与破碎粒度无关。斯坦纳(Steiner, 1975)基于这一认识创立了“相界面面积守恒定理”(简称IAC)。IAC模型表达出的是,不论粉碎细度如何,多组分系统的产物中永远会有连生体存在。梅洛依(Meloy, 1984~1989)在IAC理论的基础上,讨论了颗粒的粒度分布、颗粒密度和矿物嵌布结构对解理的影响,得到了一些有关连生颗粒组成与分布的推论。为了使解离模型尽可能真实地反映矿石物料和碎磨作业的影响,钦(King, 1979)建立了利用

矿物平面截弦长度和粉碎颗粒横向截距推求解离度的数学方程式。此后(1982,1994)对模型中的2个函数,根据新的试验成果又作了进一步的补充和完善。钦模型有别于其他模型之处,是除了要求矿物随机破裂和矿石组成矿物脆性相同外,不再需要别的任何脱离实际的假设。所以钦模型在矿物工程界受到了比较广泛的注意。

解离模型研究除前面介绍到的以外,威格尔之后的数十年间,影响较大的还有贝宰昂(Badziong,1965)的模型、姆拉杰茨基(Мдадецкий,1977)的模型、切尔努哈(Чернуха,1978)的模型、德维(Davy,1984)的模型、贝尔比里(Barbery,1986)的模型以及普雷蒂(Preti,1989)的模型等。但由于影响矿物解离的因素多而不确定,所以直到目前还没有一个模型能为世人所公认。正如钦(King,1989)所言,了解矿物解离现象是矿物工程界最困难和最有意义的任务之一。然而有一点却是可以期望的,即如果能使国内日渐普及的“工艺粒度”在概念和定义上具有更加完备的理论与实验基础,测试技术的操作性更强,结果误差更小,那么对于矿物解离的研究,将会有很好的推动作用。

矿物单体解离度的层定,由于采用的测试技术不同可分为:矿物分离测量法和矿物显微图像测量法。

矿物分离测量法,是利用产物中矿物间性质(密度、磁性、可浮性等)上的差别,将产物按其组分含量的不同分为一系列组分含量级别。具有比重差异的矿物组分,常用的分析手段是重液和重介质沉浮分离,有时也采用上升水流管或磁流体静力分离技术;若产物中矿物组分磁性差异明显,则采用磁力分离技术;而对于某些特定产物,也可采用浮游或浸出技术进行分析。

分离测量法通常比较简单、易行,但由于对颗粒的矿物解离只能提供一个模糊、近似的结论,因而使用的普遍性较差。

矿物显微图像测量法,是目前矿物单体解离度测定普遍采用的方法。它是将产物制作成可供放大后观测的样品,通过对其放大图像相关参数的测量,了解矿物的解离状况。按照所用测试仪器的不同,显微图像测量法又分为实体显微镜测定法、反光显微镜测定法和图像分析仪测定法。这其中实体显微镜测定法操作简单、测量精度高,只是因对矿物分辨能力差致使应用范围有限。图像分析仪测量法,极大地提高了对矿物平面图像参数的测量速度

和精度,同时还能实现对多种一维与二维参数值的测量。不足之处是设备成本高,操作难度较大,存在截面切割效应。这3种测量方法中它的矿物分辨能力最差(反射条件下)。反光显微镜测定法则足当今最具实用价值的解离度测量方法。

## 第一节 矿物的解离与连生

### 一、矿物的解离方式与连生体类型

#### (一)解离方式

矿物的单体和连生体,是矿石碎、磨产物组成颗粒的2种基本形态。随着磨矿细度的提高,产物中的单体量和连生体量将互为消涨地上升与下降。矿石组成矿物在外力作用下演变为单体的过程,称之为矿物解离。高登(Gaudin, 1939)定义的粉碎解离,是指粒度较粗的连生体颗粒,被碎、磨成粒度小于其组成矿物晶体(工艺)粒度的细粒时,由于颗粒体积减小使该组成矿物部分地解离成单体。此时由于不同矿物间的结合力未遭破坏,故而导致颗粒粒度下降的破裂面常穿切界面而过。脱离解离,是外力作用下的连生体各组成矿物沿共用边界相互分离。脱离解离由于只需耗费不多的能量即可实现矿物解离,所以是矿物工程期望的理想解离方式。然而,实际碎、磨过程中的矿物解离往往是两种方式并存,并以粉碎解离为主。因为只有相邻不同矿物的物理性质相差悬殊,且界面结合强度远小于界面两边矿物自身强度时,矿物才有可能在外力作用下优先从界面分离。而这类矿石自然界并不多见。高登设计了一个简易的理想几何模型,用以说明由于颗粒体积减小而导致的粉碎解离。他设想由P、G2种等量矿物组成的矿石试块,是一边长为10cm的正方体。该正方体含有1000个相互平行叠置的等大小正方矿物晶体。这些代表P、G矿物的小正方体颗粒边长为10mm。在正方体矿石试块中,2种矿物相互分隔且等距地排列组合成一个整体。矿石试块受到外力作用时,将

按正方形网格方式破裂成若干相同大小的正方体颗粒。正方网格破裂面与正方形矿物晶面平行但不重合(重合则为脱离解离)。图 2-11-1 是该模型的局部平面图。图中细线是矿物晶体的界面分界线,粗线代表破裂面。由图中可以看出,当矿石粉碎成边长 10mm 的正方体颗粒时,所有产品颗粒均为连生体而无单体出现。只有当粉碎颗粒成为 5mm 见方的小颗粒时,产品中才有部分单体出现。由于矿石中 P、G 2 种矿物状态相同,所以此时两者的单体解离度都等于 12.5%。由此不难想像,当矿石试块粉碎颗粒体积进一步缩小时,必定有更多的矿物会自连生体中解离出来成为单体。

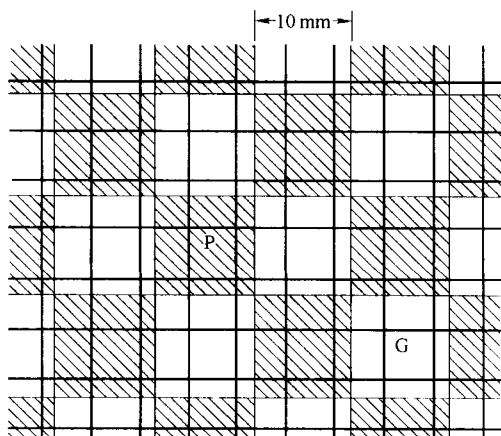


图 2-11-1 粉碎解离几何模型

## (二) 连生体类型

连生体是粉碎颗粒中远比单体复杂的一种矿物存在状态。对它的研究一般包括有:连生体的矿物组成(两相、三相或多相);各组成矿物的含量比;各类连生体的粒度范围及粒级含量;各组成矿物的相对粒度大小;连生体中组成矿物的共生形式等。这其中的矿物共生形式,由于不易量化和对分选作业的广泛影响而成为研究的重要内容。

高登(Gaudin, 1939)基于连生体的分选性质和组成矿物解离难易,将含有 2 种矿物的连生体分为 I、II、III、IV 等 4 种不同的类型(图 2-11-2)。由于 4 种类型在组成矿物共生形式上各自具有的形貌特征,通常将其分别称之为:毗邻型、细脉型、壳层型和包裹型。



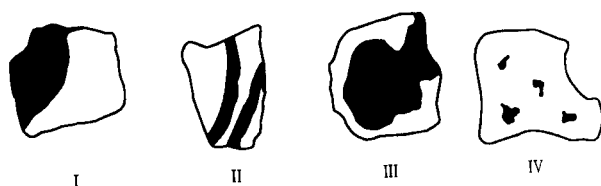


图 2-11-2 高登分类的连生体类型

( I - 毗邻型 ; II - 细脉型 ; III - 壳层型 ; IV - 包裹型 )

(1) 毗邻型 是四类连生体中最常见的。它的组成矿物连生边界平直, 舒缓, 边界线呈线性弯曲状。一般只有当矿物结晶粒度远远超出粉碎颗粒粒度时, 才会有它的产生。当然如果组成矿物自形程度愈高, 且彼此间含量愈接近, 那么对它的产生就愈是有利。这类连生体只要再稍加粉碎, 就会有矿物单体解离出来。由于各组成矿物存在状态、体积含量相近, 所以连生体的分选性质介于它们之间。而各组成矿物的体积含量基本与它们各自占有的表面积相当。

(2) 细脉型 也是较常见的一种连生类型, 但不及毗邻型普遍。此类连生体中, 一种矿物(常为有用矿物)呈脉状贯穿于含量较高的另种矿物(多为脉石矿物)中。只有当粉碎颗粒粒度明显小于脉状矿物的脉宽时, 该脉状矿物才有可能自连生体中解离出来。连生体的分选性质则与那种高含量的矿物相近。

(3) 壳层型 连生颗粒矿物中, 含量较低的矿物以厚薄不一的似壳层状, 环绕在主体矿物外周边。多数情况下, 中间的主体矿物只能局部地为外壳层所覆盖。完全理想的封闭包围虽也时有所见, 但较之前者甚为稀少。一般情况下, 组成矿物软硬差别大的矿石, 易于在碎、磨作业时产生这类连生体。比如覆盖于黄铁矿外周边的辉铜矿(或斑铜矿、方铅矿等)。

这类连生体受到进一步粉碎时, 它的二次磨矿产物常含有边缘相矿物的细粒单体、粗粒连生体以及中间主体矿物的粗粒单体等。

在矿物工程中, 它属于难处理的那种碎、磨产品。

(4) 包裹型 一种矿物(多为有用矿物)以微包体形式嵌镶于另种(载体)矿物中, 包体粒径一般  $5\mu\text{m}$  以下, 含量常不及总量的  $1/20$ 。它是尾矿中金属流失的重要原因。常见的例子有: 硅酸盐矿物中的黄铜矿(或黝铜矿)铁闪

锌矿中的黄铜矿、磁黄铁矿中的镍黄铁矿等。

阿姆斯蒂茨(G. C. Amstutz, 1972)遵循和高登基本相似的原则,将连生体划分成具体化程度较高的三类九式(图 2-11-3)。

1a 等粒毗邻连生 是连生体中矿物结合关系最简单的一类。颗粒中不同的两种矿物不仅体积大小相当,且共用边界单一而少有变化,属于二次磨矿时组成矿物易于解离的连生体。如黑钨矿-石英、黄铜矿-闪锌矿。

1b 斑点状或港湾状连生 连生矿物共用界面起伏弯曲似港湾状,或当一种矿物呈岛状置于另一种矿物中成斑点状。属磨矿产物中常见连生体。只要再稍加粉碎即会有新的单体产生。如黄铜矿-磁黄铁矿、方铅矿-闪锌矿、粗粒银金矿-石英。

1c 文象状或蠕虫状连生体 常见。通常不可能完全解离。构成这类连生体的矿物有:黄铜矿-黄锡矿、石英-长石等。

1d 浸染状或乳滴状连生体 常见。完全解离困难或不可能。如闪锌矿中的黄铜矿。方铅矿中的黝铜矿。

2a 皮膜状、反应边状或环状连生体 由于交代、表面氧化、浸染等原因,形成的一种连生体类型。在这种连生体中,一种矿物环绕另一种矿物表面呈薄膜状态存在。如辉铜矿或铜蓝围绕黄铁矿、闪锌矿或方铅矿。完全解离很困难。

2b 同心圆(环)状、球粒状、复皮壳状连生体像白铅矿与褐铁矿,赤铁矿与石英,氧化锰与铁矿的结核。解离非常困难。

3a 脉状、缝状、夹心状连生体 像辉钼矿-黄铁矿连生体。完全解离比较容易。

3b 层状、片状、聚片状连生体 像磁黄铁矿-镍黄铁矿连生体。这类连

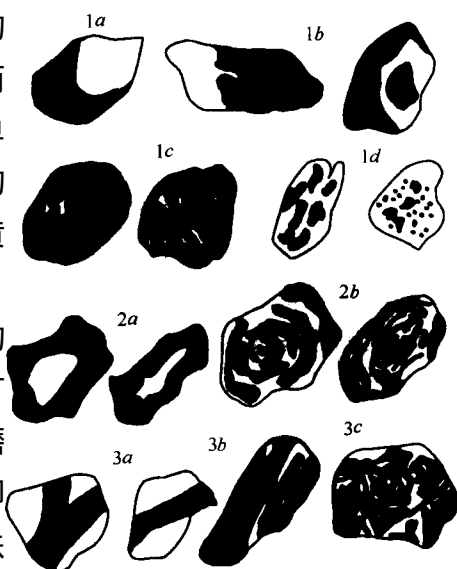


图 2-11-3 阿姆斯蒂茨分类的连生体类型

生体的解离性是变化的。

3c 网状、金状、格子状连生体 较少见。像赤铁矿、钛铁矿 – 磁铁矿 , 黄铜矿中的斑铜矿或方黄铜矿。解离困难或不可能。

## 二、矿物解离的影响因素

矿物解离 , 是矿石粉碎时组成矿物几何存在方式的改变 , 不仅直观且易于量化。然而单体的产生和解离高难易 , 却与多种因素有关。马尔维克 ( Malvik , 1976 ) 在“ 矿物解离性质研究 ” 一文中列出的影响因素有 :

- |                       |        |        |  |
|-----------------------|--------|--------|--|
| ( 1 ) 矿物结晶粒度          | } 矿石结构 | } 矿石性质 |  |
| ( 2 ) 矿物颗粒形状          |        |        |  |
| ( 3 ) 矿物颗粒间的界面特征      |        |        |  |
| ( 4 ) 矿物颗粒界面结合强度      |        |        |  |
| ( 5 ) 矿物颗粒强度          |        |        |  |
| ( 6 ) 共生矿物            |        |        |  |
| ( 7 ) 矿物含量            |        |        |  |
| ( 8 ) 矿石组成矿物相对可磨性     |        |        |  |
| ( 9 ) 次要因素 : 1 ) 磨矿细度 | } 工艺条件 |        |  |
| 2 ) 磨矿方法              |        |        |  |
| 3 ) 分选方法              |        |        |  |

### ( 一 ) 矿物的结晶粒度、含量与磨矿细度

由于粉碎解离是矿物解离的主要方式 , 而它的完成主要是借助于粉碎颗粒体积的减小。所以矿物结晶粒度愈大 , 磨矿细度愈小 , 愈是有利于矿物解离。矿物含量的影响主要是反映了矿物工艺粒度的作用。因为矿物在矿石中的含量愈高 , 同种矿物集合体出现的机会愈多 , 由此形成的集合体工艺粒度必然是既多又大。所谓单体 , 指的是仅含一种矿物的粉碎颗粒。所以工艺粒度大的矿物易于解离。实际就矿物体积对解离的作用而言 , 工艺粒度比之结晶粒度更为重要。

结晶粒度、含量与磨矿细度对解离的影响 , 高登基于他设计的解离模型 , 对粒度等大的 P、G 2 种矿物组成的矿石粉碎结果进行了量化考察 , 结果如表

2-11-1 和图 2-11-4 所示。

表 2-11-1 由  $\phi_v$  和  $\phi_d$  所决定的矿物平均单体解离度  $\bar{L}_0$

$\phi_d$	$\bar{L}_{(P)}/\%$	$\bar{L}_{(G)}/\%$						
		$\phi_v = 1$	$\phi_v = 2$	$\phi_v = 2$	$\phi_v = 10$	$\phi_v = 25$	$\phi_v = 100$	$\phi_v = 1000$
0.10	0	0	0	0	0	0	0	77.0
0.25	0	0	0	0	0	0	56.0	95.5
0.50	0	0	0	0	0	44.0	86.0	98.6
1.0	0	0	0	0	50.0	80.0	95.0	99.5
2.0	12.5	12.5	31.3	53.1	80.0	92.0	97.9	99.8
4.0	42.2	42.2	63.3	78.6	91.2	96.5	99.1	100.0
8.0	66.9	66.9	81.3	89.9	95.9	98.5	99.6	100.0
16.0	82.4	82.4	90.6	95.3	97.9	99.4	99.9	100.0
32.0	90.9	90.9	95.4	97.6	99.1	99.9	100.0	100.0
64.0	95.5	95.5	97.6	99.0	99.8	100.0	100.0	100.0

注： $\phi_v$ —P、G 种矿物的体积含量比 ( $G > P$ )； $\phi_d$ —矿物结晶粒度  $D_{cr}$  与粉碎颗粒粒度  $D_b$  (磨矿细度) 之比 ( $D_{cr} > D_b$ )。

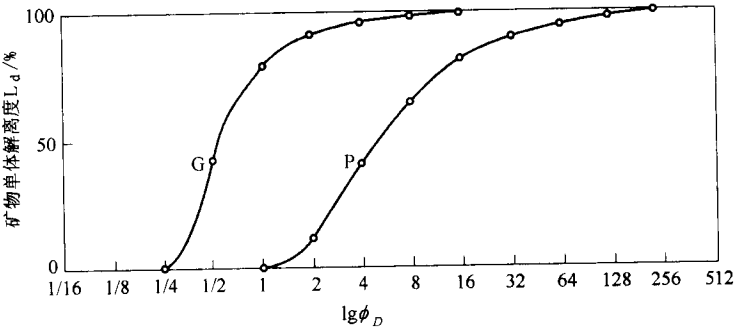


图 2-11-4  $\phi_v = 25$  时不同  $\phi_v$  值  
对应的 P、G 矿物单体解离度

由表 2-11-1 和图 2-11-4 可以看出：

- (1) 如果磨矿细度不能小于矿物结晶粒度 ,那么含量较低的矿物相( P)就不会有单体产生；
- (2) 只有当磨矿细度明显小于矿物结晶粒度时 ,含量较低的矿物相( P)才会有一定量的单体出现；
- (3) 如果磨矿细度大于结晶粒度 ,那么只有当  $\phi_v$  值很高时 ,含量较多的矿物相( G)才会有相当数量且基本稳定的单体产生；

(4)任何情况下,含量高的矿物(G)比之含量低的矿物(P)总会有更多的单体。

## (二)矿物相对可磨性、矿物界面结合强度、及矿物颗粒强度

为了分析可磨性、强度等因素对矿物解离的影响,马尔维克(Malvik, 1982)对性质不同的2组矿物进行了试验研究。一组是强度较低的易磨矿物:闪锌矿、黄铜矿、方铅矿;一组是强度较高的难磨矿物:黄铁矿、赤铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿。试验结果表明,就磨矿产物的粒级解高度而言,易解离、强度小、低硬度矿物,在磨矿细度较粗的条件下,即可迅速实现相当完全的解离。此时如果再次细磨,那么随着产物磨矿细度下降,只会是使矿物在粗粒级的解离度持续减小。因为产物被进一步细磨时,粗粒级的易磨矿物单体,将早于它的连生体较快地进入细粒级。难磨矿物的情况则与它不同,它一般在磨矿的初始阶段,不可能使难磨矿物有明显解离,所以在产物磨矿细度因再次磨矿而下降时,随着连生体中矿物的解离,粗粒级中这类矿物的单体解离度将随之上升。图2-11-5用2条走势相反的粒级解离度曲线,反映出了矿物相对可磨性对矿物解离的影响。

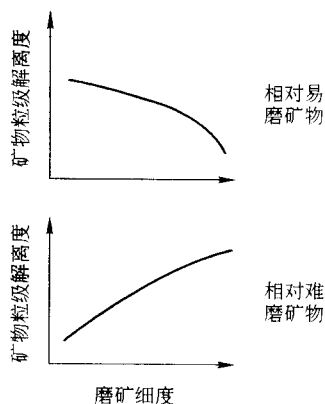


图 2-11-5 相对可磨性对矿物解离的影响

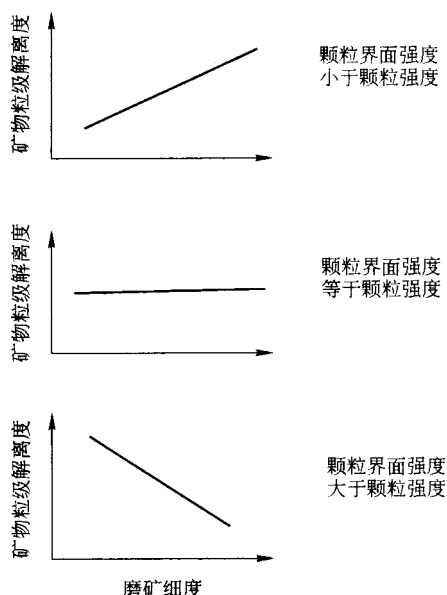


图 2-11-6 矿物强度对解离的影响

图 2-11-6 是马尔维克用以描绘矿物颗粒结合强度对解离作用的曲线。当颗粒界面结合强度大于颗粒自身强度时,对产物再次细磨,首先被粉碎的将是已解离的单体。而连生体由于矿物界面结合强度较高得以较多的被保留。故而较粗粒级的矿物解离,将随产物磨矿细度的下降而下降。如果矿石组成矿物的颗粒界面结合强度小于颗粒自身强度,磨矿产物较粗粒级的矿物解离度,则要随产物磨矿细度的下降而上升。因为此时破碎颗粒受外力作用时,颗粒将优先从矿物界面分离,故而有着和前面不同的结果发生。当两种矿物性质不同而强度相等时,产物各粗粒级的矿物解离度,自然是与产物磨矿细度无关的常数。

### (三) 不同矿物颗粒间的界面特征

矿石中矿物存有 2 种性质不同的界面。一是同种矿物各单体间的界面,一是不同矿物间的界面。后一类界面又可分为单体与单体间、单体与集合体间以及集合体与集合体间等 3 种不同形式的界面。矿物解离研究所指界面,通常是就后一类界面而言,因为矿石破碎时产生的矿物单体,均来自于后一类界面包围中的矿物颗粒(单体或集合体)。

天然产出矿石中的矿物颗粒界面,形态复杂多变,表面粗糙不平,既不平滑也不具有特征长度。对这一影响矿物解离的几何因素,由于难以量化,故而在以往的研究中,或者略而不计(自高登以来的所有解离模型研究中,均设定矿粒形体为某种简单的几何体,或可用微分几何处理的光滑颗粒),或者用文字作概念化的定性描绘。王雅蓉(1996)基于分形几何学原理,采用图像分析仪对天然矿物形体的相关尺寸进行了测量,结果发现矿物界面具有统计意义上的自相似性,属于分数维构造。界面的复杂程度可用其分数维维数(分维数)值标定。而其他性质相同,但界面情况各异的不同矿物,受外力粉碎时,它们的各自解离度明显地与其界面维数“负相关”。她对 6 种二元系矿物所做的试验结果如表 2-11-2 所示。

表 2-11-2 人工二元矿物系的界面特征值与单体解离度

二元系的矿物相	镜铁矿	赤铁矿	辉锑矿	黑钨矿	方铅矿	黄铁矿
界面维数	2.1170	2.1147	2.0663	2.0640	2.0548	2.0534
界面面积密度	38.11	37.22	33.66	32.98	30.59	30.20
全样单体解离度/%	44.11	46.43	76.64	78.92	86.28	87.98

表中数字表明：

(1) 矿物间的界面具有有限层次的分形结构,其界面维数可以有效地反映界面的不规则程度。维数值愈大,界面愈是趋于复杂。

(2) 矿物的单体解离度与界面维数值间具线性相关。实际应用中矿物单体解离度  $\bar{L}_0$  与界面维数值  $D_s$  可用方程  $\bar{L}_0 = (1456.5254 - 667.0937 D_s) \%$  联系在一起。

### 三、T.P.梅洛依连生定律

矿石碎磨时的矿物解离,既表现为矿物单体的产生与增加,同时也是产物中连生体含量不断下降的过程。在外力作用下,原有连生体会持续地破裂成新的单体和连生体。梅洛依(Meloy, 1985)在“*Theoretic study of locked particle comminution*”一文中,对由此而发生的连生体变化,以连生定律的形式进行了系统的总结和说明。在论证所提出的连生—解离模型时,他有4点假设。

(1) 大颗粒连生体破裂后的新生小连生体,无论是形状、粒度还是位置,均与它在原有连生体中的位置无关。

(2) 矿石碎磨产物的最大粒度应小于组成矿物的工艺粒度。这样,使得产物中的颗粒就只能有脉石单体、有用矿物单体、毗邻型连生体和极少量包裹型连生体等4种类型。

(3) 分析研究碎磨颗粒的相关性质时,可以将其视为球形,且颗粒破碎前后几何形状相似。

(4) 碎磨产物组成颗粒的粒度分布,应遵循高登—舒曼分布方程。即  $\gamma(D^\theta) = (D/D_{\max})^m$ ,  $D_{\max}$  为产物中最大颗粒粒度,  $\gamma(D^\theta)$  为产物中粒度小  $D$  的累积产率,  $m$  系分布模数。

定律1:界面积守恒

多种矿物组成的坚硬、脆性矿石物料受力粉碎时,无论物料细磨到何种程度,不同矿物间的原始界面面积基本维持不变。

定律成立的前提,是矿物单体都源于粉碎解离。事实上,只要各类矿物间的粘附强度不是明显低于矿物强度,那么,物料受力粉碎时,沿矿物界面发

生脱离解离的可能性几乎为零。所以物料磨矿细度不管怎样提高,由于颗粒破裂都是横切界面发生,因而它的原始界面面积将保持恒定。

### 定律 2 连生体表面积恒定

由于已设定磨矿产物的连生体原则上只有毗邻型 1 种,包裹型等其他 3 类连生体基本缺失或少见,而颗粒破碎前后的几何形状又彼此相近,所以就某一磨矿物而言,尽管它的磨矿细度会在磨矿过程中不断变化,然而其中连生体的表面积将基本保持恒定。

定律 1 表叙的界面积恒定,实际上即是产物中连生体的界面积恒定。球形颗粒的几何性质又决定了,连生体的表面积及其所含各矿物相间的界面积,均都只和颗粒直径的平方成正比,既然连生体的界面积总和在磨矿过程中不变,当然产物中所有连生体的表面积之和也应该是恒定的。产物磨矿细度提高增加的颗粒表面积,原则上都已归属于新生的矿物单体。

### 定律 3 连生体的体积总量与粒度成正比。

连生体在以毗邻型为主的前提下,定律 2 已确认某一产物中的连生体表面积之和恒定。而基本的物理常识表明,颗粒的体积或质量通常与其特征尺寸(球体的特征尺寸是直径,正方体的特征尺寸是边长)的立方成正比。所以由此可以推论出,产物中连生体的体积(或质量)总量必定是与颗粒平均粒度成正比。

前面 3 条定律结论的合理性,通过对正方形连生体破裂的分析,很容易就可以得到它的几何证明。图 2-11-7 左边棱长 3 个长度单位的正方体是一颗有待粉碎的连生体,所含有用矿物和脉石矿物各占一半。受力后,设定被破裂成 27 个同样大小、规格的小正方形颗粒,小颗粒棱长 1 个长度单位。表 2-11-3 列出了破碎前后产物中连生体各几何要素的统计结果。

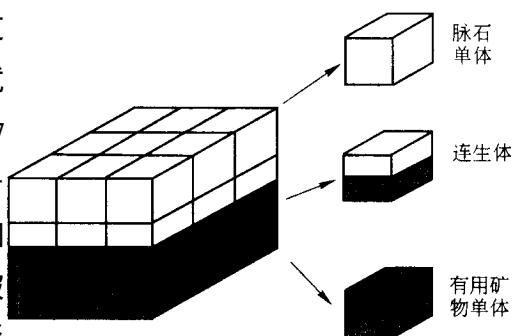


图 2-11-7 正方形连生体按正方形破裂示意图



表 2-11-3 正方形连生体破碎前后的几何要素计算结果

颗粒几何要素 产物类别	个数		特征尺寸	矿物相界面积	连生体表面积之和	连生体体积之和
	单体	连生体	(长度单位)	长度单位平方	长度单位平方	长度单位立方
破裂前	0	1	3	$1 \times 3^2 = 9$	$1 \times 6 \times 3^2 = 54$	$1 \times 3^3 = 27$
破裂后	18	9	1	$9 \times 1^2 = 9$	$9 \times 6 \times 1^2 = 54$	$9 \times 1^3 = 9$

由表中数据可以看出,在梅洛依的假设条件下,产物不论如何破碎,其中连生体的矿物相界面积和表面积均都保持不变(分别为 9 和 54 个长度单位平方)。而连生体的体积则直接正比于颗粒特征尺寸( $27/9 = 3/1$ )。

#### 定律 4 连生体的粒度分布

粉碎物料的粒度分布曲线,如按假设要求符合高登-舒曼方程,那么曲线应具有斜率  $m$ 。此时,物料中所含连生体的粒度分布,也将同样遵循高登-舒曼方程。但曲线斜率较陡,应为  $(m+1)$ 。

#### 定律 5 筛上连生体产率

粒级  $D$  筛上连生体的产率,可由定律 4 导出,它同样是与  $D^{m+1}$  成正比。

定律 2、3、4、5 的数学推导如下。

已知高登-舒曼方程:

$$\chi(D^\theta) = \left( \frac{D}{D_{\max}} \right)^m$$

式中  $\chi(D^\theta)$ ——粉碎物料所有粒度小于  $D$  的筛下累积产率;

$D_{\max}$ ——物料中的最大颗粒粒度。

当物料的总体积为  $V_0$  时,则  $D$  粒级的筛下产物累积体积

$$V(D^\theta) = V_0 \left( \frac{D}{D_{\max}} \right)^m$$

由此可以看出,物料中粒度于  $D$  和  $(D + \Delta D)$  之间颗粒数

$$\Delta N(D) = \frac{\Delta V(D)}{aD^3} = \frac{V(D) - V(D + \Delta D)}{aD^3}$$

当  $\Delta D \rightarrow 0$  时,物料中粒度为  $D$  的颗粒数

$$dN(D) = \frac{V_0 m D^{m-1}}{a D^3 D_{\max}^m} dD$$

式中  $\Delta V(D)$ ——颗粒直径由  $D$  至  $(D + \Delta D)$  区间中的物料体积;

$aD^3$ ——直径为  $D$  的颗粒体积。 $a$  是颗粒的体积形状系数,球形颗粒的  $a = \frac{\pi}{6}$ 。

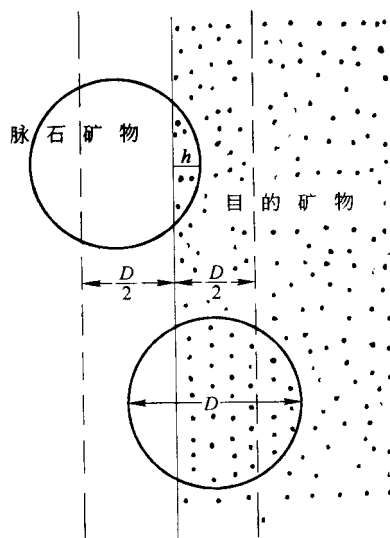


图 2-11-8 当矿物相界面展开成一个连续平面时,粒径为  $D$  的球形颗粒成为连生体的概率计算示意图

图 2-11-8 是粒径为  $D$  的球形颗粒,在由 2 种矿物组成的矿石中,经由破碎可能成为连生体的概率计算原理图。图中有用矿物与脉石矿物之间的分界线,代表了矿石组成矿物相界面的侧向投影。由图可以看出,直径为  $D$  的球形颗粒,只有当它的体积中心与矿物界平面间的距离小于  $D/2$  时,才有可能成为连生体。因此,当产物中矿物相界的总面积为  $A_{(V)}$   $V_0$  时,产物中粒度为  $D$  的连生体体积与产物总体积之比

$$\phi_{(V_D)} = \frac{DA_{(V)}V_0}{V_0} = DA_{(V)}$$

式中  $A_{(V)}$ ——产物单位体积中的矿物相界面积;

$DA_{(V)}V_0$ ——矿物相界面两侧各  $D/2$  范围内的矿石体积。

粒度为  $D$  的连生体个数即可由下式求出:

$$N_f(D) = dN(D) \times \phi_{(V_D)}$$

根据这一方程,很容易就可以推导出连生定律 2、3、4、5 的相应结论。

产物中所有连生体的总表面积：

$$\begin{aligned} A_{0(1)} &= \int_0^{D_{\max}} \frac{V_0 m D^{m-1}}{a D^3 \times \frac{m}{D_{\max}}} dD \times DA_{(V)} \times b D^2 \\ &= \frac{b}{a} \times V_0 \times A_{(V)} \times \frac{1}{D_{\max}^m} \int_0^{D_{\max}} m D^{m-1} dD = \frac{b}{a} \times V_0 \times A_{(V)} \end{aligned}$$

式中  $bD^2$  为直径等于  $D$  的颗粒表面积,  $b$  是颗粒的面积形状系数, 球形颗粒的  $b = \pi$ 。

由于决定连生体总表面积  $A_{(1)}$  大小的  $b$ 、 $a$ 、 $V_0$ 、 $A_{(V)}$  均是与产物碎磨作业过程及结果无关的常数, 因而定律 2 得以成立。

产物中所有连生体的总体积：

$$\begin{aligned} V_{(1)} &= \int_0^{D_{\max}} \frac{V_0 m D^{m-1}}{a D^3 \times D_{\max}} dD \times DA_{(V)} \times a D^3 \\ &= V_0 \times A_{(V)} \times \frac{1}{D_{\max}} \int_0^{D_{\max}} m D^m dD = \frac{m}{m+1} \times V_0 \times A_{(V)} \times D_{\max} \end{aligned}$$

在决定  $V_{(1)}$  的各项因子中, 只有  $D_{\max}$  是变数。即产物中连生体的体积总量直接正比于颗粒粒度。

粒级  $D$  所有筛下产物中的连生体累积产率, 为  $N(D)$  乘以  $aD^3$  后, 在区间  $0 \rightarrow D$  中的积分。

$$\begin{aligned} \gamma_{(D^0)} &= V_0 \times A_{(V)} \times \frac{1}{D_{\max}^m} \int_0^D m D^m dD = \frac{m}{m+1} \times \frac{V_0 \times A_{(V)}}{D_{\max}^m} \times D^{m+1} \\ &= \left[ \frac{m}{m+1} \times V_0 \times A_{(V)} \times D_{\max}^m \right] \left( \frac{D}{D_{\max}} \right)^{m+1} \end{aligned}$$

即由连生体的筛下累积产率与粒度所决定的分布曲线, 具有  $(m+1)$  的斜率。

粒级  $D$  筛上产物中的连生体产率：

筛比为  $\sqrt{2}$  时,  $D$  粒级的筛上产物量, 应等于  $\sqrt{2}D$  的筛下产物量减去  $D$  的筛下产物量。也就是说, 相应 2 个粒级筛下累积产率之差, 即为粒级  $D$  筛上产物中的连生体产率。而定律 4 已表明, 筛下累积产率具有斜率  $(m+1)$  相

邻 2 个均为  $(m+1)$  斜率的产率之差,也必然是与  $D^{m+1}$  成正比。

定律 6 粒级连生度曲线与粒级颗粒大小无关。

某粒级产物中,有用矿物含量不同的各类连生体,其产率与所含有用矿物量之比所决定的连生度曲线,与粒级颗粒大小无关。

定律 6 的合理性由图 2-11-8 即可看出。因为产物中由矿石块粉碎而成的各种大小颗粒,虽然都有可能成为连生体,然而颗粒处于矿物相界上,呈现为连生体的概率,和它其中所含的有用矿物量,显然都是颗粒直径的函数。粒径大的颗粒,不仅连生体的产率高,而且所成连生体中的有用矿物量也必然多。所以由两者之比所确立的连生度曲线,自然也就与颗粒大小无关。

定律 7 同一产物中的连生体,因各自的有用矿物含量不同而密度大小各异。由定律 4 和定律 6 可知,存在于同一密度带内的连生体,其体积(质量)-粒度分布曲线的斜率,同样等于  $(m+1)$ 。它表明在对产物连生体进行分析研究时,可以利用对这少部分连生体的考查,获取产物中全部连生体的相关性质。此一规律,对降低连生体的试验研究工作量,极为有利。

定律 8 粒级中的连生体体积含量,与其粒度成正比。

这可由图 2-11-8 及  $\phi(V_D)$  和  $N_1(D)$  的计算式看出,即粒径愈大的颗粒,呈现为连生体的概率愈高。所以,在产物的不同粒级中,粒度愈小的粒级,连生体所占颗粒百分数将愈低。

## 第二节 矿物解离数学模型

破碎磨矿时,矿石中矿物的单体解离,除了从对产物的实际观测中获得外,根据磨矿细度和矿物的粒度分布,或者矿石的结构构造等特征,利用前人建立的某种解离模型,也能作出相应判断。

解离模型的基本功能,是在矿石破碎磨矿前,对不同磨矿细度下的矿物解离作出预测,从而对矿物分选起到降低能耗、节约生产用料、减少泥化、提高有用矿物回收指标的作用。同时,通过对预测结果与实际资料的对比,还

可加深对矿物解离现象的本质认识。

## 一、高登模型及赛(Hsieh, 1994)对模型的改进

高登建立模型时,假定矿石破碎前的有用矿物,是呈等大的正方形矿粒彼此相互平行、均匀地嵌布在脉石矿物基体中(图 2-11-1)。矿粒的粒度(正方体边长)为  $D_{cr}$ ,颗粒数  $N_{cr}$ 。矿石破碎时,碎裂面平行于正方形矿粒表面。破碎颗粒同样也是大小相同的正方体,颗粒粒度  $D_b$ ,  $D_{cr} > D_b$ 。破碎产物中的有用矿物单体来自于矿粒的中间部位,它是边长为  $(D_{cr} - D_b)$  的正方体。由此,有用矿物的单体解离  $L(D_b)$  可表述为:

$$L(D_b) = \frac{N_{cr}(D_{cr} - D_b)^3}{N_{cr}D_{cr}^3} = \left(1 - \frac{D_b}{D_{cr}}\right)^3 \quad (2-11-2)$$

$$\text{令} \quad D_{cr}/D_b = \phi_D$$

则式(2-11-2)可改写为:

$$L(D_b) = \begin{cases} (\phi_D - 1)^3 / \phi_D^3 & (\phi_D > 1) \\ 0 & (\phi_D \leq 1) \end{cases} \quad (2-11-3)$$

式(2-11-3)即为高登的矿物解离数学模型。式中分子代表有用矿物单体的颗粒量,分母代表矿石中的有用矿物总量。高登用此模型预测由随机破裂导致的粉碎解离,并引申出下面 4 点结论。

(1) 只有当粉碎颗粒小于矿粒颗粒时(即  $\phi_D > 1$ ),有用矿物才有可能发生单体解离;

(2) 当矿粒粒度一定时,磨矿细度愈细,解离度愈高;

(3) 一定的磨矿细度下( $D_b$  固定),解离度随着有用矿物粒度的上升而提高;

(4) 当  $\phi_D = 10$  时,  $L(D_b) = 72.9\%$ 。这意味着,只有磨矿细度远小于矿粒粒度,才能使有用矿物产生明显的单体解离。

高登模型考虑到了矿石的结构和破碎磨矿的作用,触及到了矿物解离的主要影响因素,因而成为后来学者思考解离问题的出发点,其建模思想在此后别的解离模型中都有所体现。然而,高登模型的缺陷也是显而易见的,他

把矿石的结构和受外力时的破裂过于简化。实际上矿物颗粒和粉碎颗粒很少是呈标准的正方形,它们的粒度也并非是个单值,而是一种分布,此外模型还完全忽视了脱离解离的存在。故而高登模型未能在生产和试验分析中得到应用。

针对模型的不足,赛(C. S. Hsin)按照标准筛的筛序,将有用矿物颗粒的粒度划分成  $k$  个粒级。用  $\gamma_{vi}$  代表第  $i$  个粒级有用矿物颗粒的体积分数,  $D_i$  表示  $i$  粒级的粒度几何平均值,且规定  $D_i > D_{i+1}$  (即粒级划分成递降系列)。对于碎磨产物,  $D_j$  代表粉碎颗粒第  $j$  级的粒度几何平均值。当  $j = i$  时,  $D_j = D_i$ , 此时碎磨产物中第  $j$  级的有用矿物粒级解离度  $L_{(D_j)}$  可表述为:

$$L_{(D_j)} = \frac{\sum_{i=1}^j \mu_L \phi^3 \gamma_{vi} + \sum_{i=1}^j (1 - \mu_L) (\phi_i - 1)^3 \gamma_{vi}}{\sum_{i=1}^k \phi^3 \gamma_{vi}} \quad (2-11-4)$$

式中  $\phi_i$ ——有用矿物粒度  $D_i$  与破碎颗粒粒度  $D_k$  之比,即  $\phi_i = D_i/D_k$  ( $\phi_i > 1$ );

$\mu_L$ ——脱离解离系数( $\mu_L = 0 \sim 1$ )。  $\mu_L = 0$  表示没有脱离解离发生,  $\mu_L = 1$  意味着单体全部来自于脱离解离。

式(2-11-4)中的分母,表示碎磨物料  $D_j$  粒级中所含有用矿物总量,它包括有矿石中各种大小不同的有用矿物颗粒。分子的左边项,表示  $D_j$  粒级中由脱离解离产生的有用矿物单体量;分子的右边项,是  $D_j$  粒级中由粉碎解离产生的有用矿物单体量。这 2 项单体均来自于矿石中粒度大于或等于  $D_j$  的颗粒。分子 2 项的累加上限定为  $j$  (而不是  $k$ ),是因为只有当  $\phi_i$  大于或等于 1,即  $D_i$  大于或等于  $D_j$  时,有用矿物单体才会在碎磨产物的  $D_j$  粒级中出现。

式(2-11-4)给出的是粒级解离度。碎磨产物整体的平均解离度,可通过粒级产率对粒级解离度  $L_{(D_j)}$  的加权得出。

$$I_0 = \sum_{j=1}^k L_{(D_j)} \gamma_j \quad (2-11-5)$$

式中  $I_0$ ——碎磨产物的平均解离度;

$\gamma_j$ ——粒级  $j$  的产率。

改进后的高登模型 ,显然具有了较高的实用性。式( 2 - 11 - 4 )中 有用矿物的粒度分布 ,可在显微镜下测量统计出来 ,脱离解离系数可根据矿石组成矿物性质选定( 表 2 - 11 - 4 ) ,或在显微镜下根据对碎磨产物的观测统计计算 ,粒级产率则利用对碎磨产物的筛分得到。C . S . 赛用自己 和别人的实验资料对模型进行了验证( 图 2 - 11 - 9 ) ,结果表明 ,在 100 ~ 400 $\mu m$  的粒度范围内 ,模型预测与实测粒级解高度吻合得较好 ,从而证明了模型的可靠性。但由于  $\mu L$  的选取或测试尚存有较多的不确定性 ,故而它的应用仍然受到限制。

表 2 - 11 - 4 有关矿石中的  $\mu L$  推荐值( C . S . 赛 )

样号	有用矿物/脉石矿物	摩氏硬度	硬度差	$\mu L$ 值区间	强度顺序 <sup>①</sup>
1	磁铁矿 滑石	6.00 1.00	5.00	0.70 ~ 0.75	$\sigma_{in} < \sigma_G < \sigma_P$
2	丝光沸石 斜长石	3.50 6.00	2.50	0.55 ~ 0.65	$\sigma_{in} < \sigma_P < \sigma_G$
3	黄铁矿 石英	6.25 7.00	0.75	0 ~ 0.33	$\sigma_P < \sigma_G < \sigma_{in}$
4	闪锌矿 黄铁矿	3.75 6.25	2.50	0.02 ~ 0.20	$\sigma_P < \sigma_G < \sigma_{in}$
5	方铅矿 黄铁矿	2.50 6.25	3.75	0.50 ~ 0.80	$\sigma_P < \sigma_{in} < \sigma_G$
6	黄铜矿 黄铁矿	2.75 6.25	3.50	0.70	$\sigma_{in} < \sigma_P < \sigma_G$
7	水镁石 白云石	2.00 3.75	1.75	0.40 ~ 0.70	$\sigma_{in} \approx \sigma_P < \sigma_G$
8	镁橄榄石 白云石	6.50 3.75	2.75	0.65 ~ 0.85	$\sigma_{in} < \sigma_G < \sigma_P$

①平均抗拉强度 , $in$  :界面 , $P$  :有用矿物 , $G$  :脉石矿物。

二、威格尔模型

威格尔和李( 1967 年 )建立随机模型的假设前提有 :

- ( 1 ) 2 种矿物的晶体颗粒 ,都是正方形的六面体 ,且结晶粒度均为  $D_{cr}$  ( 图 2 - 11 - 10 ) ;
- ( 2 ) 矿物颗粒在矿石中以彼此平行的方式排列聚集 ;
- ( 3 ) 两种颗粒在矿石中随机分布 ;
- ( 4 ) 在破碎磨矿中 ,随着产品粒度的减小 ,矿石被分割成粒度为  $D_b$  的等粒状正方颗粒( 图 2 - 11 - 11 和图 2 - 11 - 12 )。

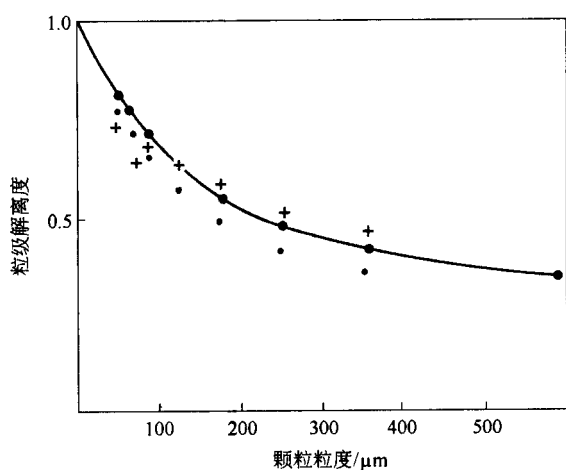


图 2-11-9 粒级解离度的模型预测  
结果和实测值比较  
+ - 铁的实测值 ; ● - 铁的模型预测结果 ;  
· - 石英的模型预测结果

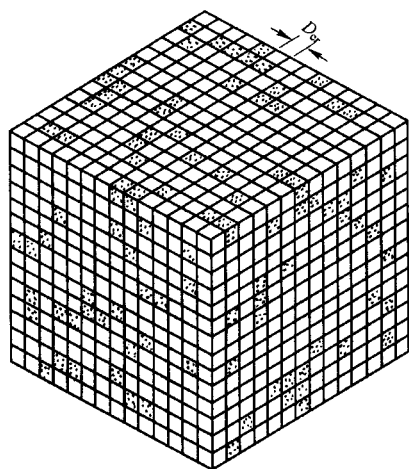


图 2-11-10 二元矿物聚  
集体的几何模型

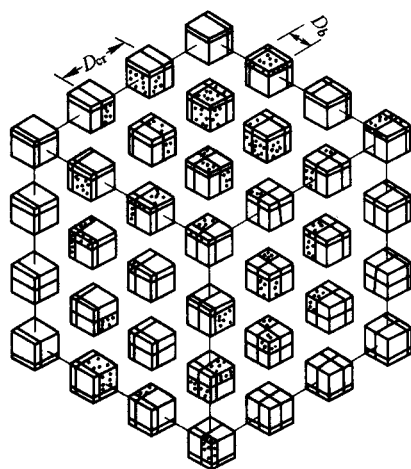


图 2-11-11 二元矿物聚集体  
破碎成粒度接近于  
矿物晶粒粒度的颗粒

(一) 粒度比大于 1 时的单体和连生体概率

粒度同为  $D_{cr}$  的 2 种矿物组成的矿石 , 当受外力作用破碎成粒度为  $D_b$  的



小立方颗粒时,产品有粒度比  $\phi_D = \frac{D_{cr}}{D_b}$ 。那么每个矿物结晶颗粒可分割成  $\phi_D^3$  此个小立方颗粒。在这些颗粒中平均有  $(\phi_D - 1)^3$  个颗粒,破碎前是完全处于某种单一矿物之中。其余的颗粒原来则应是围绕该矿物边界排列。前者即为矿物单体;后一类颗粒中,单体、连生体均有可能存在。

为理解问题的方便,我们可以分析一下当  $D_{cr} = 2$  时,2种矿物在  $n$  个相邻晶体颗粒中的各种可能排列方式。由于已经假设2种矿物晶粒是随机排列,故每种配置或排列的概率可由二项式定律求得。如果定义  $\phi_V$  为2种矿物的体积比。则某种排列出现的概率可表达成一个  $\phi_V$  的函数。

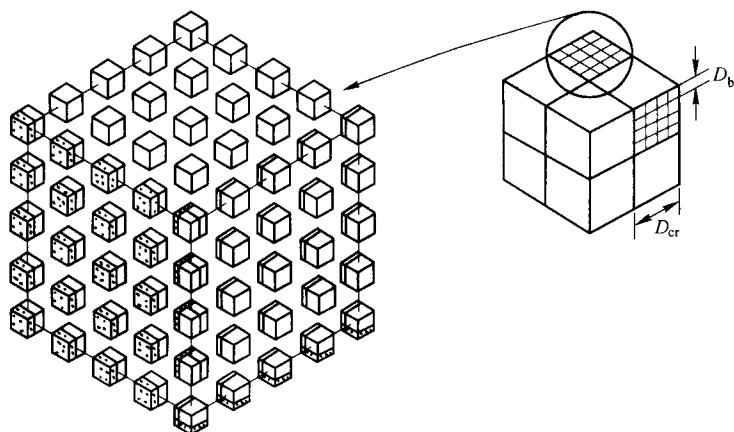


图 2-11-12 二元矿物聚集体破碎成粒度比

矿物晶粒粒度小得多的颗粒

由于每种排列方式都有自己相应的单体和连生体数。将这些数和排列方式的概率结合起来,然后将同类颗粒(单体或连生体)加起来,即可得:

$$F_{g(m)} = \frac{(\phi_D - 1)^3}{\phi_D^3} \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right) + \frac{3(\phi_D - 1)^2}{\phi_D^3} \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^2 + \frac{3(\phi_D - 1)}{\phi_D^3} \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^4 + \frac{1}{\phi_V^3} \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^8 \quad (2-11-6)$$

$$F_{K(m)} = \frac{(\phi_D - 1)^3}{\phi_D^3} \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right) + \frac{3(\phi_D - 1)^2}{\phi_D^3} \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^2 + \frac{3(\phi_D - 1)}{\phi_D^3} \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^4 + \frac{1}{\phi_D^3} \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^6 \quad (2-11-7)$$

式中  $F_{K(m)}$ ——有用矿物单体出现的概率；

$F_{g(m)}$ ——脉石矿物单体出现的概率。

方程式等式右边各项分别为 1 个、2 个、4 个、8 个单晶颗粒组成的矿物单体概率。

含有两种矿物的连生体的出现概率  $F_{(1)}$ ：

$$F_{(1)} = 1 - (F_{g(m)} + F_{K(m)}) = \frac{3(\phi_D - 1)^2}{\phi_n^3} \left[ \frac{(\phi_V + 1)^2 - (\phi_V^2 + 1)}{(\phi_V + 1)^2} \right] + \frac{3(\phi_D - 1)}{\phi_D^3} \left[ \frac{(\phi_V + 1)^4 - (\phi_V^4 + 1)}{(\phi_V + 1)^4} \right] + \frac{1}{\phi_D^3} \left[ \frac{(\phi_V + 1)^8 - (\phi_V^8 + 1)}{(\phi_V + 1)^8} \right] \quad (2-11-8)$$

上述各方程式中  $\phi_V$  可以任意变化。当  $\phi_V$  增大时，脉石矿物单体出现的概率随之增高，此时有用矿物单体出现的概率则随之下降。

## (二) 粒度比小于 1 时的单体和连生体概率

当磨矿产品粒度  $D_b$  大于晶体粒度  $D_{cr}$  ( $\phi_D \phi < 1$ ) 时，一个单体的矿物颗粒必定是由同一矿物的若干个晶粒所组成。现设由  $N_{cr}$  个晶粒组成的单体的概率为  $f(m)$ ，并将它与单晶单体的二项式概率结合起来，则可分别得到下列方程式：

$$F_{g(m)} = (1 - f(m))^2 \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 1)^3} + 3f(m)(1 - f(m)) \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)(N_{cr} + 1)^2} + 3(1 - f(m))f^2(m) \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)^2(N_{cr} + 1)} + f^3(m) \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)^3} \quad (2-11-9)$$

$$F_{K(m)} = (1 - f(m))^2 \left( \frac{\phi_V}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 1)^3} + 3f(m)(1 - f(m)) \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)(N_{cr} + 1)^2} + 3f^2(m)(1 - f(m)) \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)^2(N_{cr} + 1)} + f^3(m) \left( \frac{1}{\phi_V + 1} \right)^{(N_{cr} + 2)^3} \quad (2-11-10)$$

$$F_{(1)} = 1 - (F_{g(m)} + F_{K(m)}) \quad (2-11-11)$$

式中  $N_{cr}$ —— $\frac{1}{\phi_D}$  中的最高整数值；

$f_{(m)}$ ——是  $\frac{1}{\phi_D}$  中余下的分数部分, 即  $\frac{1}{\phi_D} = N_{cr} + f_{(m)}$ 。

方程式 (2-11-9) 和式 (2-11-10) 中的各项假设分别表示:

头一项表示单体颗粒的三维方向均由  $(N_{cr} + 1)$  个单晶粒填充时的概率; 一个单体颗粒三维中有 2 个方向是由  $(N_{cr} + 1)$  个单晶粒填充, 一个方向由  $(N_{cr} + 2)$  个单晶粒填充, 它所出现的概率即为方程式的第 2 项; 方程式第 3 项是指一个方向由  $(N_{cr} + 1)$  个单晶粒填充, 另两个方向均由  $(N_{cr} + 2)$  个单晶粒填充时的单体概率; 最后一项是表示 3 个方向均由  $(N_{cr} + 2)$  个单晶粒填充时的单体出现概率。

可以证明, 当  $\frac{1}{\phi_D}$  小于 1 ( $\phi_D > 1$ ) 时, 由于  $N_{cr} = 0$ ,  $f_{(m)} = \frac{1}{\phi_D}$ , 方程式 (2-11-9) 和式 (2-11-10) 将分别演变成方程式 (2-11-6) 和式 (2-11-7)。故可以认为方程式 (2-11-9) 到式 (2-11-11) 是适合于任何  $\phi_D$ 、 $\phi_V$  值的通式。

随着产物中  $\phi_D$ 、 $\phi_V$  的不同, 与之对应的矿物单体解离度值表示在图 2-11-13 中。图中的 9 条曲线, 分别代表某一体积比  $\phi_V$  值下 (1/100...100) 随粒度比  $\phi_D$  的不同而变化的有用矿物单体解离度。

### (三) 破碎过程中的矿物解离模型

1 个二元矿物体系的矿石在破碎磨矿过程中, 随着产品粒度的下降, 有 3 种类型的颗粒受到破碎。即 2 种矿物的单体和两者共存的连生体。单体矿物的继续破碎, 仍然是矿物单体。连生体的破碎则要产生细粒级的 2 种矿物单体和它们的连生体。尽管新生连生体和原有连生体在矿物的组成状况上不会相同, 但产品粒度的减小导致颗粒类型的变动趋向是不可逆的。

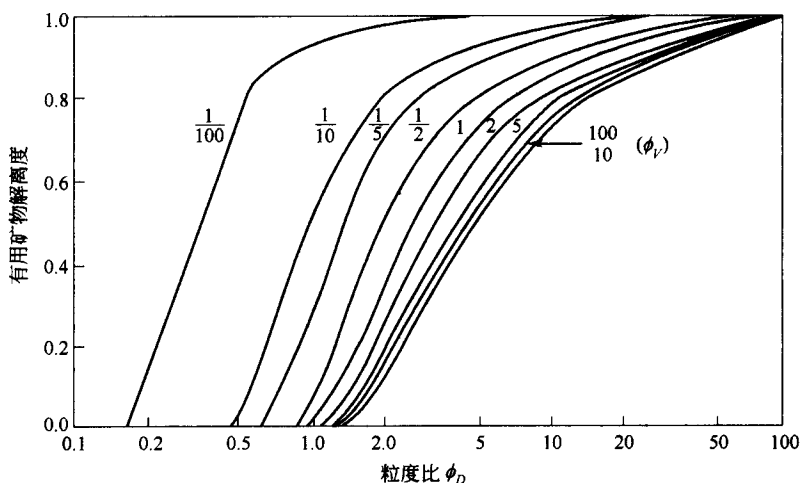


图 2-11-13 矿物单体解离度与  $\phi_D$ 、 $\phi_V$  的  
对应关系曲线

粒度为  $D_{(i)}$  的连生体, 破碎成粒度为  $D_{(i+1)}$  的颗粒时(其中既有单体也有连生体)新连生体的比例可用方向数  $\theta$  来表征。

$$F_{g(m)i} = F_{g(m)i-1} + \theta_{g(i,i-1)} F_{(l)(i-1)}$$

$$F_{R(m)i} = F_{R(m)i-1} + \theta_{R(i,i-1)} F_{(l)(i-1)}$$

$$F_{(l)i} = \theta_{(l)(i,i-1)} F_{(l)(i-1)}$$

$$\theta_{g(i,i-1)} = \frac{F_{g(m)i} - F_{g(m)i-1}}{F_{(l)(i-1)}} \quad (2-11-12)$$

$$\theta_{R(i,i-1)} = \frac{F_{R(m)i} - F_{R(m)i-1}}{F_{(l)(i-1)}} \quad (2-11-13)$$

$$\theta_{(l)(i,i-1)} = 1 - \theta_{g(i,i-1)} - \theta_{R(i,i-1)} \quad (2-11-14)$$

由上述各式可以看出, 方向系数值的大小取决于原矿中 有用矿物的体积百分比  $V_p$ , 矿石中矿物结晶粒度  $D_{cr}$  和磨矿产品粒度  $D_b$ 。

因此, 如果能准确查明矿石中矿物的嵌布特征, 以及在破碎磨矿时矿石破碎颗粒大小, 据此即可对矿物的单体解离状况做出判断。

#### (四) 应用举例

例一 由石英和磁铁矿组成的 4 种铁矿石, 它们的含铁品位分别为 5%、25%、40% 和 60%。矿物结晶粒度均为  $1000\mu\text{m}$ 。在不发生选择性破碎

的情况下被粉碎(即各粒级磁铁矿含量都和原矿相同)。计算磨矿产品各粒级的矿物单体解离度。

解：

(1) 计算原矿中石英和磁铁矿的体积百分比；

(2) 分别计算产品各粒级中石英和磁铁矿的体积百分比。由于各粒级的粒度比  $\phi_D = \frac{D_{cr}}{D_b}$  不同,计算时,要首先求取各粒级的  $N_{cr}$  和  $\theta$ ；

(3) 用 100% 减去单体石英和单体磁铁矿的体积百分比,可得各粒级的连生体体积百分比；

(4) 加上比重因素,可将各项体积百分比换算成重量百分比。

计算结果如表 2-11-5 所示(g 代表石英, p 代表磁铁矿)。

表 2-11-5 矿物单体和矿物品位的相关性

颗粒粒度与 晶粒粒度比	矿石的铁含量/%							
	5		25		40		60	
	$F_{g(m)}$	$F_{p(m)}$	$F_{g(m)}$	$F_{p(m)}$	$F_{g(m)}$	$F_{p(m)}$	$F_{g(m)}$	$F_{p(m)}$
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0051	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.3191	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003
1	0.7128	0.0000	0.1167	0.0000	0.0128	0.0010	0.0000	0.0932
0.5	0.8701	0.0058	0.4574	0.0513	0.2428	0.1304	0.0584	0.4262
0.25	0.9213	0.0182	0.6190	0.1231	0.4028	0.2560	0.1367	0.5911
0.125	0.9420	0.0283	0.6942	0.1737	0.4899	0.3332	0.1911	0.6693
0.0625	0.9507	0.0345	0.7300	0.2031	0.5347	0.3754	0.2224	0.7067
0.0313	0.9548	0.0379	0.7474	0.2188	0.5573	0.3974	0.2392	0.7253
0.0156	0.9567	0.0396	0.7560	0.2270	0.5687	0.4086	0.2479	0.7343

例二 分析例一中各粒级的连生体状况。

(1) 计算每个粒级中连生体的体积分数：

$$F_{(l)} = 1 - F_{g(m)} - F_{p(m)}$$

(2) 连生体中 有用矿物的体积百分比  $V_{p(l)}$ ：

$$V_{R(l)} = (V_P - F_{R(m)}) \frac{1}{F_{(l)}}$$

式中  $V_P$ ——原矿中有用矿物的体积百分比 据此计算的结果列于表 2 - 11 - 6。

表 2 - 11 - 6 各地级连生体颗粒中磁铁矿的体积百分比值

矿石中铁的重量百分数	5		25		40		60	
矿石中磁铁矿的重量百分数	6.94		34.7		55.6		83.3	
矿石中磁铁矿的体积百分数	4.14		23.54		41.99		74.33	
颗粒粒度与晶粒粒度之比	$F_{(l)}$	$V_{R(l)}$	$F_{(l)}$	$V_{R(l)}$	$F_{(l)}$	$V_{R(l)}$	$F_{(l)}$	$V_{R(l)}$
8	1.0000	0.0414	1.0000	0.2354	1.0000	0.4199	1.0000	0.7433
4	0.9949	0.0416	1.0000	0.2354	1.0000	0.4199	1.0000	0.7433
2	0.6809	0.0608	0.9993	0.2357	1.0000	0.4199	0.9997	0.7432
1	0.2872	0.1442	0.8833	0.2665	0.9862	0.4248	0.9068	0.7170
0.5	0.1241	0.2869	0.4913	0.3747	0.6269	0.4619	0.5154	0.6153
0.25	0.0599	0.3873	0.2579	0.4354	0.3413	0.4805	0.2723	0.5593
0.125	0.0297	0.4411	0.1321	0.4671	0.1769	0.4901	0.1397	0.5300
0.0625	0.0148	0.4662	0.0669	0.4828	0.0899	0.4950	0.0707	0.5151
0.0313	0.0073	0.4795	0.0338	0.4911	0.0453	0.4975	0.0356	0.5076
0.0156	0.0037	0.4865	0.0170	0.4941	0.0228	0.4981	0.0178	0.5038

(3) 利用下方程式计算连生体中铁的重量百分数

$$\text{铁的重量百分数} = \frac{V_{R(l)} \rho_P \times 0.724}{V_{R(l)} \rho_P + (1 - V_{R(l)}) \rho_g}$$

式中  $\rho_P$ ——有用矿物的比重；  
 $\rho_g$ ——脉石矿物的比重。

各粒级连生体中铁的重量百分数计算结果列于表 2 - 11 - 7。

表 2－11－7 连生颗粒中铁含量

颗粒粒度与晶粒粒度之比	矿石中铁含量/%			
	5	25	40	60
8	5.00	25.00	40.00	60.00
4	5.02	25.00	40.00	60.00
2	7.24	25.02	40.00	60.00
1	16.23	27.77	40.36	58.60
0.5	29.52	36.62	42.99	52.86
0.25	37.61	41.13	44.28	49.44
0.125	43.37	44.93	47.57	
0.0625	43.65	44.49	45.26	46.60
0.0313	44.63	45.04	45.43	46.09
0.0156	45.11	45.32	45.51	45.85

三、钦模型

钦( King ,1975 ,1979 )模型中 ,矿石组成矿物的含量与粒度 ,以及破碎颗粒的大小 ,仍然是制约矿物解离的关键因素。由于模型运算需要的原始数据 ,来自于光( 薄 )片的镜下测量结果 ,加之对概率统计相关理论的成功运用 ,所以在推导模型时 ,他只作了与实际偏离不大的 2 点假设。

( 1 )矿石在碎磨作业中破裂时 ,完全是随机的。无论是矿物的界面 ,还是其中的某种矿物均不具有优先破裂的倾向。

( 2 )光( 薄 )片镜下测量到的各类线段分数应等于其相应的体积分数 ,即  $L_L = V_V$ 。

矿石碎磨产物筛分粒度为  $D$  的粒级中 ,有用矿物  $P$  的单体解离度

$$L_P( D ) = 1 - \int_0^{l_{\max}} \{1 - T( l/D )\} \{1 - T_P( l )\} dl$$

( 2－11－15 )

式中  $l_p$ ——矿物 P 的平均截距长度；  
 $l_{\max}$ ——粉碎颗粒筛析  $D$  粒级中的最大横向截距；  
 $T(l/D)$ ——粒级  $D$  中破碎颗粒的线性截距分布函数；  
 $T_p(l)$ ——矿物 P 的线性截距长度分布函数。

钦的解离模型表明,只要在光(薄)片上测量出足够多矿物和颗粒的线性截距长度,将  $T(l/D)$  和  $T_p(l)$  2 个分布函数确定下来,即可顺利地求解到矿物的粒级解离度。

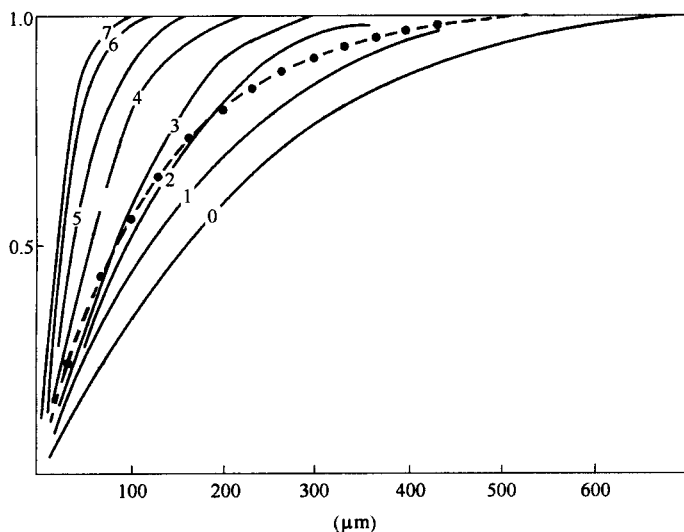


图 2-11-14 黄铁石英岩中黄铁矿的  $T_p(l)$

及矿石碎磨产物 8 个粒级颗粒的  $T(l/D)$

- — 矿石中的黄铁矿  $0-( -833 + 415 )_{\mu m}$  粒级的颗粒；
- 1—  $( -415 + 295 )_{\mu m}$  粒级的颗粒 2—  $( -295 + 208 )_{\mu m}$  粒级的颗粒；
- 3—  $( -208 + 147 )_{\mu m}$  粒级的颗粒 4—  $( -147 + 104 )_{\mu m}$  粒级的颗粒；
- 5—  $( -104 + 74 )_{\mu m}$  粒级的颗粒 6—  $( -74 + 61 )_{\mu m}$  粒级的颗粒；
- 7—  $( -61 + 43 )_{\mu m}$  粒级的颗粒

图 2-11-14 是南非维瓦特斯兰( Witwatersrand )黄铁石英岩中黄铁矿的截距分布函数曲线,以及破碎后 8 个粒级各自的颗粒线性截距分布函数曲线。由图中曲线可以看出,利用分布函数  $T_p(l)$  (或  $T(l/D)$ ),即可求得光(薄)片上矿物 P (或粒级  $D$  中粉碎颗粒),于某一截距值区间中的概率。据此计算出的粒级解离度列于表 2-11-8 中。为便于比较,表中同时还列



出了赛模型和威格尔模型的解离度预测值 ,以及钦对该样品中黄铁矿解离度的实测值。比较实测和模型预计值 ,除( - 833 + 415 ) $\mu\text{m}$  粒级和( - 74 + 61 ) $\mu\text{m}$  粒级外 ,其余的彼此均都相近。对于( - 833 + 415 ) $\mu\text{m}$  粒级的结果 ,可以认为是模型自身的不足引起的。因为当  $\phi_d \leq 1$  时( 参看式( 2 - 11 - 3 ) ) , $L_{(D_b)}$  应等于零。在矿物的线性截距中 ,并不存在大于 833 $\mu\text{m}$  的黄铁矿颗粒 ,而且在此粒级中的黄铁矿体积分数仅为 3.10% ,故真正的粒级解离度实应以 0.20% 为准。至于( - 74 + 61 ) $\mu\text{m}$  粒级中模型预计值与实测值的不符 ,可能是由于实测时的操作不良所致。因为 63.00% 的解离值 ,不仅低于( - 61 + 43 ) $\mu\text{m}$  粒级的 73.00% ,甚至比( - 147 + 104 ) $\mu\text{m}$  粒级的 64.00% 还低 ,显然与粒级解离度的走势相矛盾。所以钦模型和赛模型的预计值 ,应较为符合实际。

分布函数  $T(l/D)$ 、 $T_p(l)$  除根据实测资料获取外 ,还有不少理论实验研究结出的关系方程式。钦建议采用的是安德伍德( Underwood ,1970 )依据球形粒子推导出的关系式 :

$$T_p(l) = 1 - \exp(-l/\bar{l}_p) \tag{2-11-16}$$

$$T(l/D) = l^2/D^2 \tag{2-11-17}$$

表 2 - 11 - 8 模型预测与钦实测到的黄铁矿粒级解离度

筛级/ $\mu\text{m}$		- 833 + 415	- 415 + 295	- 295 + 208	- 208 + 147	- 147 + 104	- 104 + 74	- 74 + 61	- 61 + 43
$\bar{D}_g/\mu\text{m}$		588	350	248	175	124	88	67	51
$V_{\text{K(P)}}/\%$		3.10	6.70	10.20	12.00	11.00	10.00	7.00	5.40
$L_p(D)$ (%)	实测值( 钦 )	0.20	45.00	50.10	56.50	64.00	67.50	63.00	73.00
	钦模型	32.30	41.00	47.00	53.00	63.00	70.20	77.80	81.50
	赛模型 <sup>①</sup>	33.00	36.00	41.10	48.20	56.60	65.10	71.30	76.90
	威格尔模型 <sup>②</sup>	0.00	3.00	5.00	8.00	10.50	20.20	26.00	32.10

筛级/ $\mu\text{m}$		- 833	- 415	- 295	- 208	- 147	- 104	- 74	- 61
		+ 415	+ 295	+ 208	+ 147	+ 104	+ 74	+ 61	+ 43
$\phi_D$	$\phi_1$	1	1.680	2.371	3.360	4.742	6.682	8.776	11.529
	$\phi_2$		1	1.411	2.000	2.823	3.977	5.224	6.863
	$\phi_3$			1	1.417	2.000	2.818	3.702	4.863
	$\phi_4$				1	1.411	1.989	2.612	3.431
	$\phi_5$					1	1.409	1.851	2.431
	$\phi_6$						1	1.313	1.726
	$\phi_7$							1	1.314
	$\phi_8$								1

注：1.  $\bar{D}_g$  为破碎颗粒粒度的几何平均值；2.  $V_{(P)}$  为黄铁矿的体积分数；

①模型中的脱离系数  $\mu L = 0.33$  ②模型中  $\phi_v = 9$  即矿石中脉石矿物的体积是黄铁矿体积的 9 倍。

将式 (2-11-16) 和式 (2-11-17) 代入式 (2-11-15), 并设定  $l_{\max} = D$ , 那么有用矿物的粒级解离度可化解为：

$$L_P(D) = 2i_P/D^2 [\bar{l}_P(i_P + D) \exp(-D/\bar{l}_P)] \quad (2-11-18)$$

此外芬内生 (Finlayson, 1980) 和芬奇 (Finch, 1984) 还各自提出了自己的  $T(l/D)$  方程式：

$$T(l/D) = 1 - \left(1 - \frac{l}{\sqrt{2}l_{\max}}\right) \exp\left(-\frac{\phi_k^2 l}{\sqrt{2}l_{\max}}\right) \quad (2-11-19)$$

式中  $\phi_k$ ——产物筛分所用套筛的筛比。采用泰勒筛制时  $\phi_k = \sqrt{2}$ 。

$$T(l/D) = 1 - \exp(-\mu l/D) \quad (2-11-20)$$

式中  $\mu$ ——经验常数, 其取值区间为  $\mu = 2 \pm 0.4$ 。

将式 (2-11-16) 和式 (2-11-20) 代入式 (2-11-15), 同样使  $l_{\max} = D$ , 则

$$L_P(D) = 1 - D/(2\bar{l}_P + D) [1 - \exp\{-(2\bar{l}_P + D)/i_P\}] \quad (2-11-21)$$

式 (2-11-18) 或者式 (2-11-21) 表明, 只要在光 (薄) 片中测量到有用矿物的平均截距长度  $\bar{l}_P$ , 即可对它的粒级 ( $D$ ) 解离度做出预测。

### 第三节 矿物单体解离度测定

#### 一、测定方法

流程产物的观测方法,原则上讲都属于数粒法范畴,因为经过加工后的产物都是被破碎了的矿石。不过由于产物类型不同,在具体的观测方式上又分为下面2种。

(1) 实体显微镜测定法 它是将产物经过脱泥、筛分后,在实体显微镜下查数各种类型颗粒的数量。这种测定法的优点是简单、快速,不用对产物做过多的事前加工处理。矿石颗粒在实体显微镜下立体感很强。一个颗粒的四面或五面都能被观测到。因此测试结果准确可靠、误差小。但是,为要实现这些长处,产物的矿石类型必须具有矿物组成极其简单、矿物的外观特征明确易于区分的特点。像区域沉积变质磁铁矿就具备这些条件。矿石中最主要的石英和磁铁矿,按照黑、白颜色的不同就能准确无误地判断。所以类似这种类型矿石的产物,都是用实体显微镜测定法来观测。

(2) 反光显微镜测定法 选矿工艺加工的矿石,多数情况下都是由2~3种,个别的甚至由十来种矿物所组成。这些矿物经过破碎加工后,仅凭外观有限的少数特征,显然是很难准确辨认的。这些矿石的流程产物,主要就是用反光显微镜测定法进行考查。在镜下,一方面根据光性差别判断矿物类别,同时查数各种类型颗粒的多少。

流程产物的反光显微镜测定法,按照矿石特点,又分为直接观测法和预先富集后观测法2种。

1) 直接观测法:产物中目的矿物含量较高,一般是千分之几以上时,即可用直接观测法。如果目的矿物属于常见而易于鉴定的矿物,像方铅矿、黄铜矿、辉钼矿,即使含量是万分之几,也可用直接观测法。

2) 预先富集法:目的矿物含量极低且又不易鉴别时,就要用预先富集法

对产物进行观测。像钨(黑钨矿、白钨矿)、锡(锡石)、稀有(铌、钼矿物)和稀土矿物、贵金属(金、铂)等都属于这类矿物。

## 二、测定程序

### (一) 样品制备

首先将流程产物脱泥、烘干,并筛分成选矿筛析通常采用的几个级别。称取各个级别矿样重量,计算各级别产率。然后从各筛级中均匀撮取 2~5g 样,送化验室分析各有关元素的含量。

实体显微镜测定法使用的矿样,经过上述处理后,一般即可供观测之用。

反光显微镜测定法观测用的矿样,还需要在上面处理的基础上,做进一步处理。做法是:将各筛级的样品均匀撮取一部分(一般不少于 5~10g),用粘结剂团矿,作成  $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$  左右的小矿块。然后磨制成可供镜下观测的光片或薄片。

如果是预先富集法,样品在脱泥、烘干、筛分之后,还要经过对目的矿物的富集这一步骤。常用的分离富集手段是重液和电、磁分离。因为观测用样品需要量一般仅几克或几十克,因此,只要操作认真仔细,分离富集效果还是很好的。每个筛级的样品,通过分离富集,被处理成相应的“精矿”和“尾矿”。然后送化验室,分析样品每个级别的“原矿”和“尾矿”的有用元素含量。至于每个级别的“精矿”则用同样的办法团矿后,磨制成光片或薄片,供镜下观测用。

### (二) 测定

样品制备齐后,就可着手在镜下统计、观测。当然实施统计之前,观测者首先必须在镜下对所要观测的矿物做出正确判断。矿物种类判断错误,后续的全部统计工作就失去了价值。因此,镜下矿物的识别,观测者一定要认真地做好。

获取单体解离度的镜下统计方式较多。其中比较实用且统计精度较高的还要数“过尺法”和“数粒法”。过尺法是在视域中安置一把目镜测微尺,拧动载物台上的机械台,使所有的矿物颗粒逐个的通过目镜尺,量测所有单体的颗粒总长和各类连生体中目的矿物的总长。用单体颗粒总长比上该矿物

的总长(单体总长加上连生体中该矿物总长),即可得到目的矿物的单体解离度。采用数粒法时,正式观测前,要预先将连生体划分为 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{16}$ 等几种类型(比例数代表目的矿物在一粒连生体颗粒中占有的体积相对值),然后一个视域接着一个视域,连续而不重复地查数目的矿物的单体数和各类连生体的颗粒数,并按表 2-11-9 的格式逐项记录。

表 2-11-9 单体解离度的数粒法测定

筛 级	目的矿物 单体数	连生体颗粒数					浸染体 颗粒数	脉石单 体 数	观测颗 粒总数
		$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$			
+ 100 目	$N_{n(p)}$	$N_{K(3/4)}$	$N_L(1/2)$	$N_{K(1/4)}$	$N_{K(1/8)}$	$N_{K(1/16)}$	$N_{co}$	$N_{n(g)}$	$N_0$
+ 200 目									

表格中的浸染体,是指颗粒中目的矿物体积小于 $\frac{1}{16}$ 的那些连生体。这类连生体对单体解离度的计算影响不大,但当分析流程产物中存在的问题时作用很大。因此,观测时需要将它们区分并单独记录下来。脉石是指产物中所有无用矿物而言。当这些无用矿物密度相差不大时,即可统归为脉石。如果密度相差甚大而且含量相近时,则应将脉石分为几类,然后分别统计并记录。

### (三) 粒级单体解离度计算

实体显微镜测定法和反光显微镜测定法中的直接观测法,按上面的表格将观测结果记录下来后,用下列公式计算样品各粒级的单体解离度(例如 + 100 目这个级别):

观测颗粒总数:

$$N_0 = N_{n(p)} + N_{K(3/4)} + N_{K(1/2)} + N_{K(1/4)} + N_{K(1/8)} + N_{K(1/16)} + N_{co} + N_{n(g)} \quad (2-11-22)$$

单体解离度:

$$L_{(+100)} = \frac{N_{n(P)}}{N_{n(P)} + \frac{3}{4}N_{(3/4)} + \frac{1}{2}N_{(1/2)} + \frac{1}{4}N_{(1/4)} + \frac{1}{8}N_{(1/8)} + \frac{1}{16}N_{(1/16)}} \quad (2-11-23)$$

反光显微镜测定法中的预先富集法,由于经过了分离富集,由观测记录结果,只能得到该粒级“精矿”的单体解离度  $L_{(c)}$ ,整个粒级目的矿物的单体解离度由下式计算得出:

$$L_{(s)} = \left( 1 - \frac{\gamma_{(s)}\delta_{(s)}}{\delta_{(s)}} \right) L_{(c)} \quad (2-11-24)$$

式中  $L_{(s)}$ ——粒级目的矿物单体解离度;

$\gamma_{(s)}$ ——该粒级“尾矿”的产率;

$\delta_{(s)}$ ——该粒级“尾矿”品位;

$\delta_{(s)}$ ——该粒级未分离富集前“原矿”的品位;

$L_{(c)}$ ——该粒级“精矿”的单体解离度。

上述计算公式的前提,是认定在分离的“尾矿”中,目的矿物全部都是呈连生体状态。

#### (四) 流程产物中目的矿物单体占有率计算

流程产物经过观测、计算、整理,筛析各粒级中国的矿物含量及其单体解离度就完全清楚了。但从选矿生产的实际要求来看,不仅要了解矿物在某个粒级中的单体解离度,更需要知道全样中矿物的解离状况。因此,要在上面已有结果的基础上,进一步计算产物中矿物的单体占有率,即某个产物里矿物的单体解离度。这项整理运算工作,可按表 2-11-10 格式逐项进行。

脉石含量、脉石分布率、脉石单体占有率和目的元素(矿物)的相应各项意义和计算方法大体一致。可参看上述有关说明。

表 2-11-10 单体解离度计算

筛级	产率	分析品位	矿物量		显微镜分析			目的元素含量	目的元素分布率	目的矿物单体占有率	脉石含量	脉石分布率	脉石单体占有率
			目的矿物含量	脉石矿物含量	统计品位	目的矿物单体解离度	脉石矿物单体解离度						
1	2	3	4	5	6	7	8	$9 = 2 \times 3$	$10 = \frac{9}{\sum 9}$	$11 = 10 \times 7$	$12 = 2 \times 5$	$13 = \frac{12}{\sum 12}$	$14 = 13 \times 8$

注：筛级——根据产物粒度和实际选矿厂生产状况，选取适宜的套筛；

产率——筛析后各级产物量与全样量之比；

分析品位——产物中元素的化验分析值。

目的矿物含量——产物中要求富集的矿物含量与全样重量之比。

$$\text{目的矿物含量} = \frac{\text{目的矿物颗粒总数} \times \text{目的矿物密度}}{\sum \text{各类矿物的颗粒总数} \times \text{相应矿物密度}}$$

脉石矿物含量——产物中要求舍弃的矿物含量与全样重量之比。计算方法和目的矿物含量相同。

统计品位——根据显微镜观测整理的有用矿物含量结果，换算得到的目的元素含量。

目的矿物单体解离度——根据显微镜观测得到的结果，整理计算出的每个粒级中目的矿物的单体解离度。

脉石矿物单体解离度——根据显微镜观测结果，计算出的每个粒级中脉石矿物的单体解离度。

目的元素含量——全样中目的元素，分配在某粒级中的数量。各粒级元素含量之和，即为全样中元素的品位值。

目的元素分布率——全样中元素在各粒级中的分配比例。

目的矿物单体占有率——目的矿物单体量在各粒级的分配值。各粒级占有率之和，即为全样中目的矿物的单体解离度。

### 三、测定误差及其误差来源

和任何一项观测工作一样，镜下测定的单体解离度也存在着误差。一般说来，误差大小主要与下面几个因素有关。

(1) 取样代表性 首先是镜下观测用样品对流程产物的代表性；其次是制作团矿光片时，矿样在团矿块中分布的均匀性。头一项代表性，只要取样时严格按照样品缩分方法取样，基本就能得到保证。矿样各矿物在团矿块中的均匀分布，主要靠 2 个办法保证。一是制作团矿时，矿样与粘结剂要充分

搅拌 ;其次是团矿的粘结剂加入量要适宜。千万不能过多。否则在团矿块凝聚过程中 ,矿物就会因比重不同而分层 ,造成矿物分布的不均匀性。

(2)连生体类型的划分 连生体中目的矿物含量大小 ,在整个矿样中显然是连续分布的 ,但在统计时 ,只是简单地归并成几类。例如 ,我们计入“  $\frac{1}{2}$  ”这类连生体中的颗粒 ,目的矿物在每一粒中的含量决不都会是一半。而可能是 0.6 0.55 0.5 0.45 等。由此而造成的误差显然与统计连生体类型的划分有关。可以看出 ,连生体类型划分的愈细 ,统计结果与实际状况差距也就愈小。

(3)平面测定和实际立体状况之间的差别 此项误差当用实体显微镜观测时基本不存在。而在反光显微镜下观测团矿光片时 ,由于出露面积总是小于颗粒的实际表面。因此 ,不可避免地会产生连生体以单体形式出现的假象。从而造成单体数偏高的错觉。

(4)查数颗粒的多少 当然 ,颗粒数观测的愈多 ,愈精确。但实际统计时 ,也不可能无限制地增加颗粒数。理论和实践证明 ,在每一粒级中 ,只要查数到 100 ~ 300 粒目的矿物 ,即可保证 90% 以上的统计精度。



## 第十二章 矿石颗粒测量 新技术新工艺

颗粒测量在表示细粒的特性方面很重要。在选矿、金属粉末生产、催化剂、食品、造纸、油漆、颜料和精细化工等工业中,颗粒测量是过程控制和描述产品特性方面应用最广的技术之一。除工业应用之外,颗粒测量在医学、生物学和环境科学等研究领域亦很通用。颗粒特性测量包括对粒度、比表面积、孔径和图像特征的测定,其中粒度和比表面积是颗粒测量中最基本的测试参数。

### 第一节 测量方法的分类

颗粒特性的测量方法很多,从不同的角度来划分有以下方法:

#### (一) 理论计算和标定测量

理论计算测量就是用理论公式进行颗粒特性测定,如沉降法是按 Stokes 理论公式计算粒度。而标定测量就是用已知粒度的球形颗粒预先进行标定,然后再用于测量,如光学颗粒计数器和库尔特(Coulter)颗粒计数器。早期的标准颗粒曾用花粉,现在常用聚苯乙烯,也可用玻璃珠、二氧化钛和氧化铝等。

#### (二) 在线测量和非在线(离线)测量

目前大多数的测量仪器为非在线测量,也就是取出有代表性的样品进行

测量。但最近几年,在线测量发展较快,例如利用超声衰减法对工艺过程中的颗粒进行测量。再如库尔特在线监测器等。在线测量的特点是实时、真实和快速,现场监测方便。

### (三) 逐个测量和非逐个测量

逐个测量就是测量通过传感区的每一个颗粒,借助于某种效应(干涉、衍射、散射)测量颗粒的粒度并计数,以获得个数粒度分布,如各种成像法和计数器法等。

筛分和沉降则是非逐个测量的典型例子。

### (四) 分级测量和非分级测量

分级测量是将样品分成若干个不同粒度级别,求出每个粒度级别物料的质量就能求出样品的质量粒度分布,例如筛分、淘析等即属分级测量。而离心沉降法、光散射法等则属非分级测量的范畴。

## 第二节 测量方法的选择

在选择不同的颗粒测量技术时,应当考虑多方面的因素。因为市场上可买到各种各样的仪器,究竟采用哪种测定方法,选择何种仪器,常常难以决定。因此,在选择测量方法时应考虑以下几个因素:

### (一) 分析目的

颗粒测量仪器的选择取决于分析(测定)的目的。如筛分分析因简便、经济被广泛应用于选矿厂控制磨矿作业的操作,使磨矿细度既达到单体解离又不产生过磨现象。然而,对作涂料用的细磨产物(如二氧化钛专门供油漆和颜料工业)的粒度分析,需测定投影面积平均直径,这种情况须选择测定投影面积的光学仪器。因此选择任何一种用于描述系统特性的测量方法时,必须考虑仪器的应用,否则,甚至最准确、最精密的分析资料,对于研究目的来说也可能是不恰当的。

在一般情况下,首先要了解分析的目的及需要的资料(数据)类型。光散

射仪器可提供粒度分布、平均粒度和颗粒表面积的数据,表面积测定仪只能给出颗粒平均直径而不能给出粒度分布。因为市场上能买到可提供不同类型数据的各种仪器,所以在选择分析仪器前,了解分析目的及实际需要的资料(数据)是很重要的。

不同的仪器适用于不同的悬浮介质,有的适用于气体,有的适用于液体。如根据气体的渗透性和气体的吸附性测定颗粒特性的仪器就不能用于液体悬浮介质。某些仪器也不适用某种类型的悬浮介质,例如,麦克罗克(Microtrac)分析仪不适于分析悬浮在酒精中的颗粒。

### (二) 粒度范围

被检测物料的粒度范围常常限定了所能采用的仪器类型。例如根据重力沉积原理进行测量的仪器,对 $< 1\mu\text{m}$ 的颗粒不适合,因为 $< 1\mu\text{m}$ 的颗粒需要的沉降时间太长,对 $> 100\mu\text{m}$ 的颗粒也不适应,因为大颗粒沉降太快。所以重力沉积仅在 $1 \sim 100\mu\text{m}$ 之间是有效的。同样,光学显微镜可以精确地测定 $0.5\mu\text{m}$ 的颗粒,更小颗粒的测定应当用电子显微镜,所以,在确定颗粒分析的技术要求时,测定的粒度范围是一个重要参数。

### (三) 精度要求

颗粒测定的精度与时间和成本有关,因此选择一定用途的仪器时须仔细考察技术要求和仪器的性能,确定是常规测试还是非常规测试。常规测试往往要求快速简便,并尽可能自动化。

通常,任何一种仪器仅仅能测定整个试样中的一小部分样品,因而要求样品应有代表性。在颗粒测量中,这是非常重要的因素之一,虽然不是严格地与仪器有关,但对导出有意义的数据来说这是必不可少的。因此,即使对某个给定的颗粒系统,由于该系统空间分布的不均匀性,取自总物料量的一批样品的平均粒度与实际物料的平均粒度之间仍会有一定的偏差。所以选用分析时间短、精度为10%并能分析大量样品的仪器,可能比选用精度为0.5%、分析时间很长的仪器会更好一些。

### (四) 样品数量

选择适宜的仪器时必须考虑适宜的样品数量。如某干式筛分试验仪,用100g粉末试样比较恰当,测得的粒度分布数据误差在5%~10%之内,如果

只用 10g 试样,测得数据的误差可能高达 50%。因此,一旦确定了分析所要求的资料类型,那么,为了得到这种资料,必须考虑适宜的样品数量。

### (五)样品性质

在大多数情况下,一种仪器可处理各种样品,但也存在样品的性质影响选择颗粒分析仪器的的问题。如 LadalX 射线沉积仪只适用于能够吸收 X 射线的固体,因为所测定的颗粒浓度随时间和深度的变化是 X 射线吸收量的函数。又比如湿法筛分能够用来分析不溶于水的颗粒。

### (六)分析时间间隔

在颗粒分析中,不能过分强调时间因素的重要性。在大多数工业应用中,一次分析所花的时间在选择仪器时就已经决定了。有些仪器能够提供高精度的测量数据,但需要的时间长;有些仪器可在短时间内提供同样的测定资料,但精度降低了。

筛分在选矿中的应用很广泛,不仅筛子便宜,分析方法也简便快捷。带有复杂的辅助设施的显微镜能得到高度准确的分析资料,但太费时间。因此,要分析大量样品时,每一次分析的时间间隔就决定了粒度测定方法的选择。

### (七)投资费和分析费

选择仪器时同样要考虑投资费和分析费。某些仪器如图像分析仪、光学显微镜、扫描电子显微镜和麦克罗克分析仪等要求有受过训练的人员进行操作,估算费用时应当包括人员培训的费用。在最佳条件下操作时,分析一个样品的时间可能只要 5min,但要掌握操作技术,一个大学程度的人至少要经过半年的培训,才能非常熟练地得到有意义的资料。

有些分析方法如能更快速地提供对生产过程进行反馈控制的资料,即便分析费用增加仍是可行的。被测物料的粒度越小,颗粒越细,其测定的费用将越高。分析样品的量越多,每个样品的分析费就越低。

通过上述分析可知,选择颗粒测量方法时,要综合考虑以下情况,如准确度和精确度、设备的成本、分析时间的长短、此种测定技术使用的频繁程度、操作者需接受的训练以及样品的物理状态和物料颗粒的化学反应能力等,还要考虑所测定物料最适用的粒度范围。对各种方法要有针对性地进行比较

和选择 ,以满足从事颗粒性质测量人员和应用颗粒数据人员两者的需要。

### 第三节 采样与处理

在生产过程中经常要对原料、中间产品、最终产品和生产管理过程中所需的辅助材料进行数量和质量检查 ,这时不可能将全部材料拿来检验 ,只能从总体中抽取一小部分以估算它的特性。被抽取的这小部分物料称为试样 ,抽取试样的过程叫采样。试样与总体相比 ,在数量上是很小的 ,然而在物理化学性质上试样应能完全代表总体。换句话说 ,采出的试样要有代表性 ,不然的话 ,尽管制样、化验、分析很精确 ,最终结果也可能是错误的。

要得到一个完全有代表性的试样就必须随机地采取多份子样组成总样。子样的最小质量和份数必须符合规定 ,采样方法必须正确 ,由这些子样组成的总样才能有充分的代表性。

总样质量和子样份数的关系是 :

$$G = nq \quad (2-12-1)$$

式中  $G$ ——总样质量  $\text{kg}$  ;

$n$ ——子样份数 ;

$q$ ——子样质量  $\text{kg}$ 。

将有代表性的试样缩分成可分析或被测试样的过程可分为下列几步 :

工艺流程中或交货的物料	$10^4 \text{ kg}$
粗样	$\text{kg}$
实验室试样	$\text{g}$
分析试样	$\text{mg}$

缩分步骤中的任何偏差都可能对最后分析结果产生不利的影响。

## 一、取样规则

由于各种条件的限制,取样的时候会遇到各种各样的情况,但可以规定一些原则并尽可能地遵守:

(1)应尽量在物料移动时取样。

(2)应尽量在较短的时间间隔内多次取整个料流的试样,而不要在整个时间内取部分料流的试样。

若不按上述规则进行取样,则易产生误差。

## 二、大量物料中取样

从大量物料中进行取样的方法有许多,如从连续的物料流中取样;从一批物料中取样;在许多袋物料中取样;还有从大堆上或从卡车上取样等。

### (一)从移动的物料中取样

从移动的物料流中取样时,必须注意防止粗细颗粒的分离现象。最好在胶带输送机卸料端取样。在胶带上的物料可能出现两种分离形式,如给料机或机头仓出口位于胶带中央位置时,细粒将集中于胶带的中部,而粗粒滚到胶带机外缘;如果胶带在行进时有颤动现象,粗粒还会跑到料面上。每次接样时应短时间内把整个料流都收集下来,必须注意接样器进出料流的方法。图 2-12-1 给出了正确的取样方法。

按图 2-12-1(a)的方法取样时,除非接样器在料流中的停留时间比放入料流和移出料流的时间长,否则就会取到过多的粗颗粒。这是因为粗颗粒通常容易聚集于表面,当取样器进出料流时间多于在料流中停留时间时,接到的粗粒就增多。按图 2-12-1(b)的方法就可避免这种错误。图 2-12-1(c)的方法是接样器作横向移动,这样可以避免将整个料流都收集下来时试样的数量过大。

取样器的宽度、深度、长度分别为:宽度和最大颗粒直径之比越大越好,

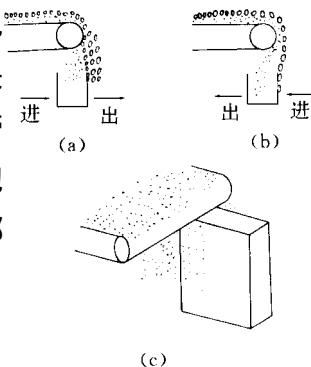


图 2-12-1 从移动料流中取样的方法  
(a)错误的方法(b)正确的方法(c)对大流量物料的取样步骤

其最低值应为 20:1 ;深度应大到能保证粉末不致溢出 ;长度应大到足以保证能在料流的整个宽度方向上采样。

## (二) 从输送带( 胶带 )上或溜子中取样

在胶带上取样的最佳位置是胶带端头落料处。如果在该处取样有困难 , 只好在胶带上取样 , 这时必须将胶带上一小段长度内全部物料收集下来 , 因为胶带边上和中间的物料颗粒大小不同 , 表面层和底部物料颗粒大小也不一样。如果胶带暂停 , 可用两块平行板插入料层把这一段物料全部刮下扫干净。若胶带在运行中 , 则可借助机械力用上述方法取样。图 2-12-2 是在胶带上自动取样的一种装置。这种装置在投入使用时 , 须检查一下能否将胶带上的物料全部刮净而不留下一层薄料层。

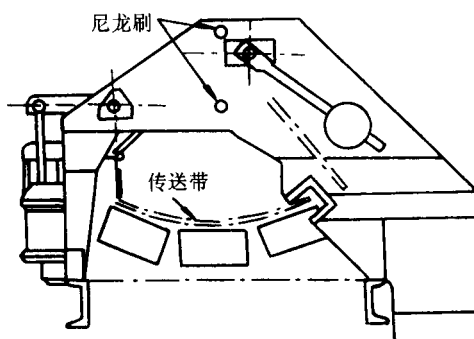


图 2-12-2 胶带机自动取样器

## (三) 斗式输送机的取样

必须随机抽取一部分斗子 , 将斗子内的物料全部取出 , 掺合并缩减。

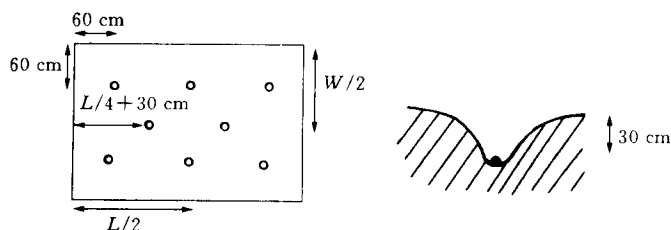


图 2-12-3 车厢中的取样点

## (四) 袋中取样

在袋中取样时 , 为了得到有代表性的试样 , 应该选用数袋物料。可以有次序地进行选择 , 如选第 10、第 20、第 30 袋等 , 或者用随机数字表选择数袋

物料,然后掺合、缩分。

### (五) 在车厢和容器内取样

当万不得已必须在车厢和容器内取样时,首先应布置取样点,可用如图 2-12-3 所示的 8 点取样法,用图 2-12-4 中的勺式取样器取样。

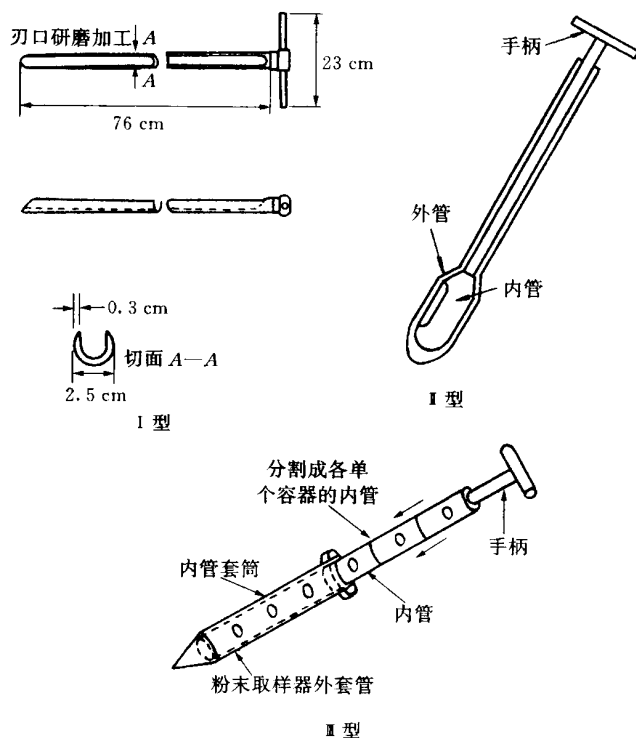


图 2-12-4 勺式取样器

### (六) 料堆上取样

最好不要在料堆上取样,因为形成料堆时粗细颗粒分离现象很明显。但有时因为取样时间有误(形成料堆以前物料是运动的),不得不在静止的料堆中取样,这时可采用图 2-12-5 介绍的气动取样器在各点取样然后组合成试样,但这种方法的效率较低、准确性较差。

## 三、悬浮液取样

用于悬浮液取样的方法很多,见图 2-12-6。(a)表示取样装置有一狭槽口连续地围绕平行于浆流的轴而旋转。(b)表示用一槽口管直立地装在水



力旋流器溢流室中,该溢流室在涡流室的后边。(c)表示将试样浆流送至有良好搅拌的取样桶中,并在控制的流量下取代表性试样。

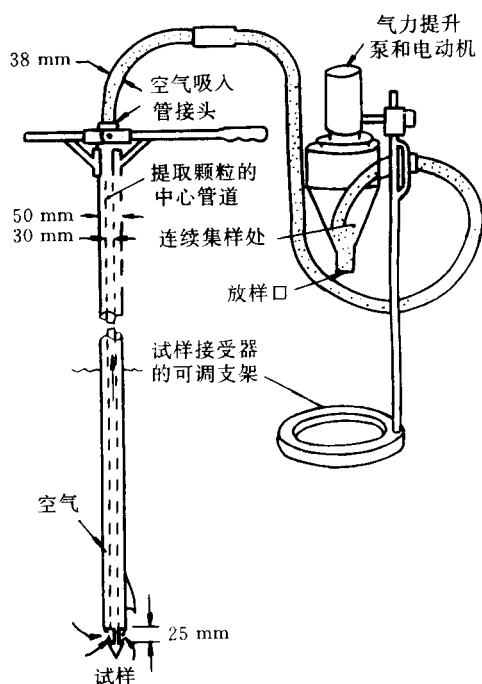


图 2-12-5 气动取样器

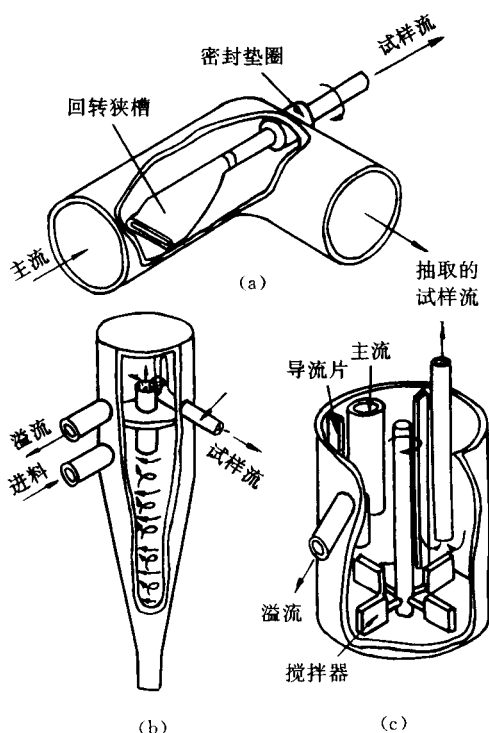


图 2-12-6 悬浮液取样装置

## 四、试样的制备

分析试样的制备过程就是试样的掺合缩分过程。缩分的目的是从一堆掺合好的试样中取出能代表总样性质的少量样品。通常的缩分步骤是：①使物料形成移动的料流；②每次的增量必须是短时间内料流的全部，每次增量的间隔时间必须相等；③将样品组合为试验室试样。

### (一) 取样缩分方法

#### 1. 抓取取样

抓取取样法就是从预先混匀的物料中多次随意地抓取少量物料，此法最简单，误差往往较大。

#### 2. 锥形四分法(见图 2-12-7)

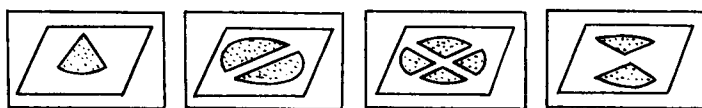


图 2-12-7 锥形四分法

将需要缩分的试样堆成锥形尖堆,然后压平其顶部,利用其径向对称性,用十字形切割器将其分成四等分,然后用平铲将其中相对的两部分除去,将剩下的两部分再混匀,重复上述步骤直至得到合格样品为止。样品的偏差可能来自形成锥堆时存在着物料粒度的“偏析”现象以及锥堆的不对称。这种方法简单,不需要专门的缩分设备,但要求操作娴熟。

### 3. 盘式缩分器(见图 2-12-8)

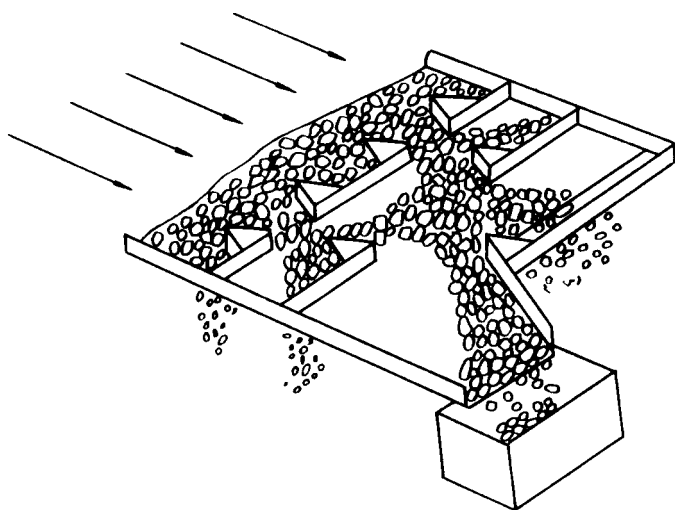


图 2-12-8 盘式缩分器

图 2-12-8 是一倾斜的平板,上面用一些三角形挡板分隔成几部分,每部分均开有出料口。物料从上部送入,在流动中被挡板分隔成几部分,一部分从出料口流出废弃,另一部分继续下行被另一排三角形挡板分隔再排走一部分,如此反复,在平板底部即可得到缩分好的试样。该法要求最初送入的物料颗粒分布要均匀。

### 4. 叉溜式缩分器

叉溜式缩分器是一个由一系列交错排列的斜槽组成的 V 形容器,物料通过时被随机地分成粒度相近的两部分(见图 2-12-9)。重复规定的操作

步骤,可得到原试样的  $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ ……的分量,直至试样被缩分到所需要的数量为止。

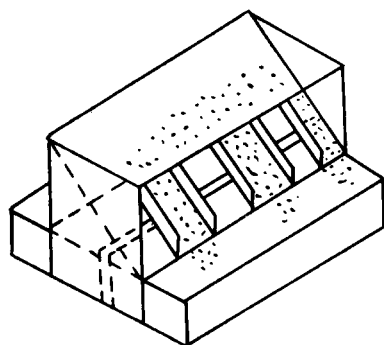


图 2-12-9 叉溜式缩分器

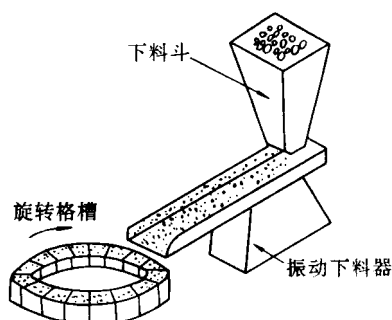


图 2-12-10 旋转格槽缩分器

### 5. 旋转格槽缩分器

物料从给矿漏斗下端排出,在振动给矿器上形成运动状态的物料流,再将物料分配到装在旋转台上的一系列小盒中即可,见图 2-12-10。该法符合试样缩分的黄金规则,取样结果准确,且很少受操作技巧的影响。

上面介绍的几种常用取样技术都是有效的,经验表明,其准确性和精确性按如下顺序递增:抓取取样、锥形四分法、盘式缩分器、叉溜式缩分器、旋转格槽缩分器。

### (二) 分析试样的制备

前面讲到的缩分方法一般适用于将大量的试样缩分为试验室试样。因为颗粒测量技术的研究范围是粉状颗粒,所以分析试样的量是很少的。要获得精确测定用的试样,还需要进一步缩分,同时必须注意使缩分后的分析试样有足够的代表性,使颗粒大小分布基本保持不变。分析试样的数量取决于采用的测定方法,如筛分一般应有  $25 \sim 50\text{g}$ ,累积沉降法或淘析法约要  $0.5\text{g}$ ,增量沉积法则需  $8 \sim 12\text{g}$  等。

值得考虑的缩分设备是旋转格槽式缩分器,当粉状物料保持自由流动状态时,该设备的准确度较高。

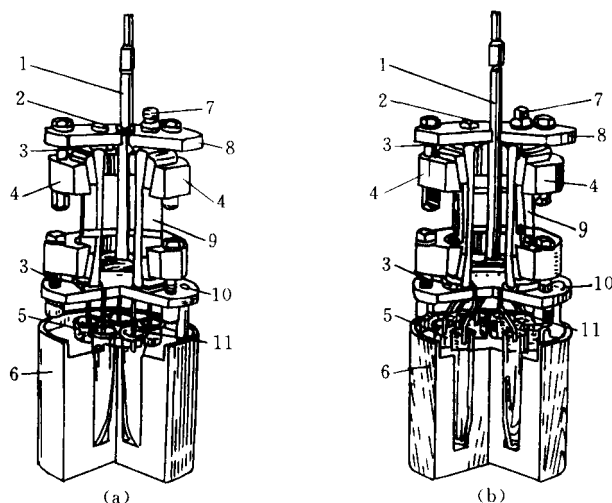


图 2-12-11 悬浮液缩分器

(a)取 2 至 10mL (b)取 10 至 100mL

1- 搅拌器 2- 充液孔 3- 聚四氟乙烯密封圈 4- QVF 塑料法兰 5- 10mL 离心管(5 只);

6- 基座 7- 空气入口 8- 上盖 9- QVF 管剖面 10- 底板 11- 不锈钢毛细管

悬浮液的缩分方法有两种:①当颗粒很细时,用注射器抽取充分搅拌过的悬浮液。②当颗粒较粗时,建议采用图 2-12-11 所示的悬浮液缩分器,它有一个玻璃圆筒,上下两端用不锈钢板密封,沿底板周长上有 5~10 个等距离的孔,使悬浮液通过不锈钢毛细管引入离心管。上部钢板上有一中间孔用来安装搅拌器,还有一个可密封的进料孔以及用来调节进入空气压力高低的气孔。将一定量的悬浮液放入玻璃圆筒,搅拌后鼓入压力不大的空气,使悬浮液分别进入各个离心试管,随机取出某个离心试管中的试样即可进行分析测定。悬浮液内的颗粒越细,使用该法得到的试样代表性越好。

## 五、被测物料的分散处理

无论何种测量方法,分析结果的准确性在很大程度上都依赖于测量前对被测物料的分散处理,以便使粒子以离散状态分散在介质中。粒度越细的物料,分散处理的必要性越显著,其中的道理是不言而喻的。为加深印象可参见图 2-12-12,该图所示为直径 5~30 $\mu\text{m}$  玻璃球,在各种条件下显微镜的测量结果。结果表明,细玻璃球在湿气中极易团聚,如果测量前不进行预处

理, 所得结果必然偏粗, 而且粗粒级部分的误差更大。

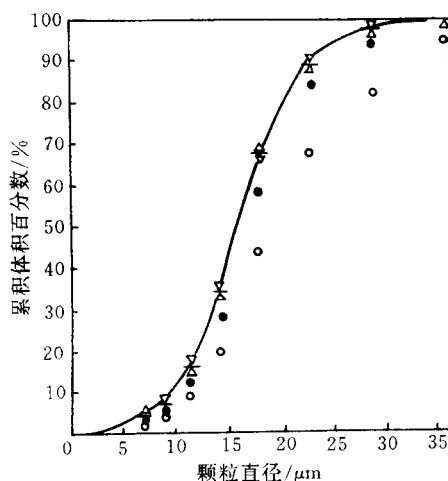


图 2-12-12 颗粒团聚对显微镜测量结果的影响

—很好分散后的样品 ;●熔炼后马上取用的样品 ;

○样品在少量湿气中存放 2 年 ;△条件同 3 ,

但经 30min 强烈机械振动后的样品 ;▽样品

未经长期存放 ,但经 30min 强烈机械振动

颗粒团聚是个自发过程,其机理可参阅本书第 6、7 章有关内容。此处仅介绍颗粒测量前分散颗粒的一些常用方法,主要包括以下四方面:

### (一) 选择分析介质

所谓分析介质是指粒度测量时采用的介质,它们可以是气体,也可以是液体,但前者极少用,而且效果也不好。所以广为应用的介质是液体,尤其是水及各种溶液。

根据表面化学的润湿原理,为使颗粒分散于介质中,首先应采用能使颗粒表面很好润湿的液体,以便在颗粒表面形成较厚的溶剂化膜,促进颗粒彼此分离。因此,极性的表面颗粒应以极性液体为介质。例如石英、硅酸盐等矿粒以水为介质就很理想。反之,非极性表面的矿粒,如高变质程度煤、石墨等则应用非极性液体,或添加分散剂对矿粒表面进行改性,变疏水性表面为亲水性表面。

此外,还要求介质和颗粒不发生溶解、粘结,不引起颗粒膨胀或产生其他化学反应等副作用。

常用介质主要是水 ,其次是水 + 甘油、酒精 + 甘油、环己烷、苯、二甲苯、植物油、蔗糖浆等 ,见表 2 - 12 - 1。甘油、植物油和蔗糖浆在沉降分析中作增稠剂 ,以调节介质粘度 ,确保颗粒在介质中有适当的沉降速度。添加增稠剂时应注意粘度分布均匀 ,因此要充分搅拌 ,同时还应保证因搅拌而产生的气泡的逸出 ,否则也会影响测量精度。使用有机介质时 ,脱除介质及样品中所含的少量水十分重要 ,否则会引起颗粒团聚 ,难于分散。介质中的水可通过真空干燥除去 ,样品中水的脱除可用烘干法。

(二) 添加分散剂

为使颗粒分散 ,原则上应选用和颗粒表面有强亲合力的介质 ,但由于水具有经济、使用方便等优点 ,所以在保证符合粒度测量原理的前提下( 如沉降分析时 ,最大颗粒应在层流条件下沉降 ,即  $Re < 0.2$  ) ,都应用水介质。但是 ,许多颗粒都有不同程度的疏水性 ,因此必须添加分散剂提高颗粒表面的亲水性。即使必须用非水介质时 ,分散剂也是必不可少的。分散剂技术是促进颗粒分散、稳定悬浮的普遍而有效的措施。

分散剂的种类有很多 ,表 2 - 12 - 1 给出粒度测量中常用的分散剂 ,其添加量一般为样品质量的 0.005 % ~ 0.05 %。

表 2 - 12 - 1 粒度测量中常用的介质和分散剂

颗 粒	介 质	分 散 剂
高岭土	水	六聚偏磷酸钠或水玻璃
石英	水	同上
粘土	水	草酸钠
土和土壤	酞酸丁酯 + 酒精	-
硅酸盐	水	聚磷酸钠
白铅矿	水	六聚偏磷酸钠
赤铁矿	水	Lissapol N. X( 酚聚氯乙烯醚 )
钛铁矿	水	-
磁铁矿	水/乙醇/甲醇/硝基苯	-
钨矿	水	聚磷酸钠
磷矿	水	六聚偏磷酸钠

颗 粒	介 质	分 散 剂
石灰石	水	同上 ,或聚磷酸钠 + 柠檬酸钠
石灰石	25% 甘油水溶液	-
重晶石	水	六聚偏磷酸钠或多聚磷酸钠
绿柱石	水	六聚偏磷酸钠或水玻璃
碳酸钙	水	聚磷酸钠或二甲苯
	二甲苯	-
硅藻土	水	-
硅线石	水 + 乙醇 ( 1 : 1 )	-
	水	聚磷酸钠
硅石	水	六聚偏磷酸钠 ,草酸或聚磷酸钠
	水 + 酒精	-
滑石粉	水	六聚偏磷酸钠
硫化物	乙二醇	-
黄铜矿	水	水玻璃
黄铁矿	水	水玻璃
焦炭 无烟煤 烟煤	水	{ 萘磺酸钠甲醛缩合物 或磺化腐植酸钠或木质素磺酸盐 或芳基聚氧乙烯醚
	水	
	水	
	乙醇或环己醇或环乙醇 + 甲醇 ( 1 : 1 )	-
褐煤	环己醇 + 10% 甲醇或 异丙醇或酞酸二乙酯	-
页岩	酒精	氯化钙
灰渣	水	聚磷酸钠、焦磷酸钠
碳化硅	水	六聚偏磷酸钠、萘磺酸盐甲醛缩合物
石墨	水	同上或丹宁酸

分散剂的种类虽多 ,但可划分为阴离子型和非离子型两大类。前者属低分子量电解质或大分子及准高分子聚电解质 ,主要通过静电引力或特性吸附作用使颗粒和分散剂离子相结合 ,提高颗粒间静电斥力和形成水化膜 ,促进粒子分散。后者的特点是分子量较大 ,主要借助氢键或其他作用力吸附大分

子,增强颗粒间的空间隔离位阻效应。

上述分散剂也可看成无机盐和表面活性剂两大类。这种分类法应用更方便。多数矿物是无机化合物,有较好的亲水性,用无机电解质既经济,效果也较满意。反之,对疏水性较强的矿物,则应选用表面活性剂或两类联合使用。

值得注意的是,多数表面活性剂都有不同程度的起泡性能,尤其是聚醚类。粒度测量时系统内不允许有气泡存在,因为气泡和细粒矿物容易形成气絮团,并飘浮在液面,造成测量结果失真。此时可加入少量消泡剂,如硅油、卵磷脂等,萘磺酸类对聚醚也有良好的消泡作用。

每种矿物或分散剂虽都有最佳的 pH 值条件,但多数在弱碱性或中性 pH 值范围时就可以了。

### (三) 悬浮液的浓度

被测悬浮液的浓度也是影响颗粒分散的一个重要因素。浓度高时不利于颗粒分散,同时对沉降分析而言,过高的浓度会使体系偏离 Stokes 定律。因此,除个别方法如显微镜、电子显微镜外,实际配置悬浮液的浓度都很低,如光透法的质量百分比浓度为  $0.02\% \sim 0.1\%$ ,沉降法为  $0.1\% \sim 3\%$ ,对某些特殊颗粒,上述浓度还偏高。片状颗粒在很低浓度下还有粒间的相互作用。如钠基膨润土在  $0.01\% \sim 0.05\%$  浓度时测得的沉降速率比在  $0.05\% \sim 0.1\%$  时几乎高 4 倍,使按 Stokes 公式计算的当量半径增大 2 倍。显然对片状的钠基膨润土颗粒,只有在非常低的浓度下,才有自由沉降可言,因而其合适的测量浓度应低于  $0.01\%$ 。

应根据具体的测量方法确定合适的浓度。如显微镜法只要将有足够代表性的粉末置于干净的载物片上,滴上几滴分散介质,放上玻璃盖片或用玻璃棒进行揉研,使样品分散即可。

### (四) 其他方法

细粒物料不仅容易团聚,而且团粒还有不同程度的强度。为使其分离成单个颗粒,除以上分散介质和分散剂的作用外,还必须施加一定的外力以克服粒间吸引势能。这些方法有:①手工或机械摇动;②机械搅拌;③将悬浮液加热或煮沸 30min;④抽真空脱气 30 min;⑤超声波处理等。其中,手工或机



械搅拌最简单,而超声波处理效率更高,见图 2-12-13。因此,一些先进的测量装置本身就带有超声波分散槽,如美国 CIL AS1064 型、920 型的激光粒度分析仪。

一般认为超声波分散的机理主要是空化作用。当超声波强度超过与液体介质种类有关的一定阈值时,液体中不断有空腔产生及闭合。空腔内部为蒸气或真空。按照 Eyring 的液体结构理论,液体内有許多天然的空穴,空腔的产生是这些空穴合并的结果。空腔闭合时,压力可高达几百个大气压。空腔的产生和闭合,以及伴随着的对介质、溶质和分散相颗粒的机械作用、物理作用及物理化学作用统称为空化作用。正是这种急剧产生的应力对团粒产生分离作用。此外,超声波处理产生的热效应也有助于分散。

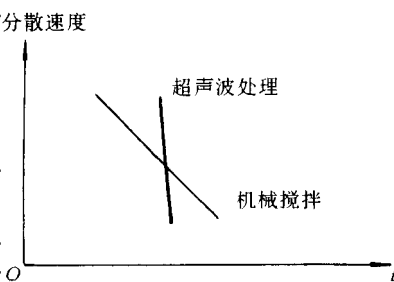


图 2-12-13 分散速度与时间的关系

以上是粒度测量中,使颗粒在介质中分散的主要方法和简单的作用机理。在实际工作中为获得理想的结果,常常把某几种方法联合使用。经各种预处理后如何判断样品是否分散仍是个重要问题。

检查分散效果最常用的方法是:把已配置好的悬浮液,滴一滴在显微镜的载物片上,盖上另一片玻璃以减慢挥发速度,然后放在显微镜下进行观察。若颗粒互不粘连,以单个粒子形式存在,便可判定分散效果是好的。

以石英颗粒为例,分析微细石英颗粒时,所用的分散步骤如下:

- ①配制质量浓度为 0.1% 的六聚偏磷酸钠水溶液时,用 NaOH 溶液调节 pH 值到 8 左右即可。
- ②将固体样品放入有适当体积的溶液内,用力搅拌以破坏可能形成的任何絮团,如果必要应重新检验调整 pH 值。
- ③把悬浮液放在超声波分散槽内约 2 min,定时搅拌以防止沉积物料的凝结堆积。
- ④放几滴悬浮液在一显微镜载片上,检查是否有絮团存在。
- ⑤如果颗粒完全分散,将悬浮液移至测定粒度大小的装置上进行粒度分析。