目　　次

绪　论
第一章　矿相显微镜和光片的制备 …… (1)
　第一节　矿相显微镜 …… (1)
　第二节　光片的制备 …… (10)
第二章　矿物的反射率 …… (12)
　第一节　反射率的测定方法 …… (15)
　第二节　影响矿物反射率测定值的因素 …… (18)
第三章　矿物的反射色 …… (20)
第四章　矿物的双反射和反射多色性 …… (30)
第五章　矿物的均质性与非均质性 …… (34)
　第一节　光的基本概念 …… (34)
　第二节　矿物的均质性与非均质性 …… (37)
　第三节　均质性与非均质性、偏光色、非均质视旋转角和旋向的观测方法 …… (40)
　第四节　矿物均质性与非均质性视测分级和影响观察的因素 …… (42)
第六章　矿物的偏光图 …… (44)
　第一节　偏光图的形成原理 …… (44)
　第二节　观测方法及步骤 …… (51)
第七章　矿物的内反射 …… (53)
　第一节　内反射的基本概念 …… (53)
　第二节　内反射的观察方法和注意事项 …… (54)
第八章　矿物的硬度 …… (57)
　第一节　刻划硬度的测定 …… (57)
　第二节　抗磨硬度的测定 …… (58)
　第三节　压入硬度的测定 …… (59)
第九章　矿物的浸蚀鉴定 …… (66)
　第一节　概　述 …… (66)
　第二节　试剂和工具 …… (67)
　第三节　操作方法和注意事项 …… (68)
第十章　矿物的综合性系统鉴定和简易鉴定 …… (70)
　第一节　矿物的综合性系统鉴定 …… (70)
　第二节　常见矿物简易鉴定 …… (71)
　第三节　金属矿物鉴定表的编制原则和使用方法 …… (74)
第十一章　矿石的构造、结构和矿物晶粒内部结构 …… (122)

第一节　矿石的构造 …… (123)
第二节　矿石的结构 …… (131)
第三节　矿物结晶颗粒的内部结构 …… (138)
第十二章　矿化期、矿化阶段和矿物的生成顺序 …… (144)
第一节　矿化期 …… (144)
第二节　矿化阶段 …… (145)
第三节　矿物的生成顺序和世代 …… (146)
第四节　矿物生成顺序图表的编制 …… (148)
附录一　矿相学课程作业指导书 …… (151)
附录二　矿物索引表 …… (154)
主要参考文献 …… (156)

第一章　矿相显微镜和光片的制备

第一节　矿相显微镜

矿相显微镜亦称反射偏光显微镜或矿石显微镜，它是矿相学研究工作的基本工具。近几十年，在矿相显微镜的研制上做了多方面的改进，其光学性能已有了很大的提高。从而使矿相学工作者能精确地观测到更多的光学性质。同时为了定量测试不透明矿物的物理、光学性质而设计的几种光学仪器和显微镜附件亦已被广泛应用，因此为矿相学的研究创造了有利条件。

矿相显微镜实际上是由一台偏光显微镜加一套“垂直照明系统”组成（图1-1）。旧式矿相显微镜的“垂直照明器”多半固定在显微镜筒的下端，而新型的则能任意装卸。装上垂直照明器后可作反射光观察用，卸下“垂直照明器”，装上物镜更换器和透光观测用物镜，则可作透射光下观察之用。

一、矿相显微镜的结构及附件

矿相显微镜的镜体与一般偏光显微镜（岩石显微镜）基本相同。下面将矿相显微镜的主要部件作一简要介绍。

（一）垂直照明器

垂直照明器附以光源即构成完备的垂直照明系统。该系统和部件如下图（图1-1）。

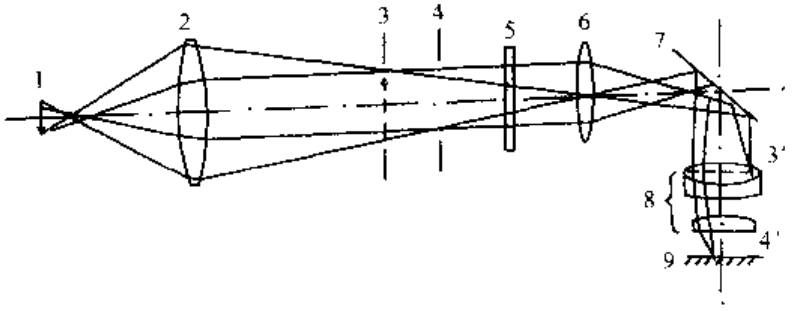


图1-1　矿相显微镜垂直照明器部件及系统光路示意图

垂直照明器部件：1—光源；2—聚光透镜；3—孔径光栏；4—视野光栏；5—起偏镜；6—视野透镜（校正透镜）；7—反射器；8—物镜的透镜系统；3'—孔径光栏的像；4'—视野光栏的像；9—光片

1. 孔径光栏

孔径光栏也称孔径光圈，是位于光源透镜之后可任意开缩的虹膜式光圈，它用于控制入射光束直径大小、影像反差强弱及物镜的有效孔径。当将其缩小时，入射光束直径相应变小，故视域亮度也随之减弱，但可形成较为垂直的入射光，且由此使有害的杂乱光线减

少，从而增高影像反差使之清晰，然而物镜有效孔径减小，使分辨率会因此而降低。所以孔径光栏应调节适宜，其调节法详见后文。

2. 起偏镜

起偏镜也称前偏光镜，多用偏振片制成，其作用是使入射光成直线（平面）偏光。应能自由旋转至少90°为宜，并能锁紧更佳。观测矿石光片时，应使其振动方向为东西向（水平振动），因为这样经反射器向下反射的光强比其成南北向位置时为大。而新型显微镜的前偏光镜大多固定成东西向。

3. 视野光栏

视野光栏也称视域（野、场）光圈，它一般也是由活动叶片构成的虹膜式光圈，其功能是用以控制视野（域）大小，挡去有害杂乱反射光射入视野，而便于提高所观测矿物影像的清晰程度，以利对其精细研究。一般观察时，可将此光圈调至与视野边缘重合即可，不宜再大，以免更多的杂乱光线投进视域中。

位于视野光栏后方，通常装置一个由二、三片透镜组合而成的视野透镜（又称校正透镜或消色差透镜），它可前后移动，但也有固定不变的，其作用是将视野光栏焦距准确，从而使视野中的影像清晰。

4. 反射器

反射器是垂直照明器中最主要的部件，其作用是将水平入射光垂直向下反射。反射器最常用的有玻璃片和棱镜两类，另有一种是新型的史密斯反射器。下面将三种反射器加以介绍：

（1）玻璃片反射器　该反射器是在垂直照明器内装置一个以45°倾斜的玻璃片而成（图1－2a）。玻璃片的反射面通常镀有一层高折射率物质（如硫化锌或氧化铋等）透明薄膜，以便增高其反射能力。同时为了增强光线透过它而向上的透射能力，又在玻璃片的上表面镀有低折射率物质（如氟化镁）的增透膜。由图1－2a可看出，入射光线射至反射玻璃片上，一部分光线透过玻璃片而损失，另一部分光线被反射向下通过物镜至矿物光面上，当由矿物光面向上反射再次遇到玻璃片时，部分光线被反射转向光源而损失，另一部分透过玻璃片至目镜。照明光线由光源入射后经玻璃片两次反射，到达目镜的最大光强为入射光强的21%～22%（设光片的反射率为100%）。由此可知玻璃片反射器的主要缺点

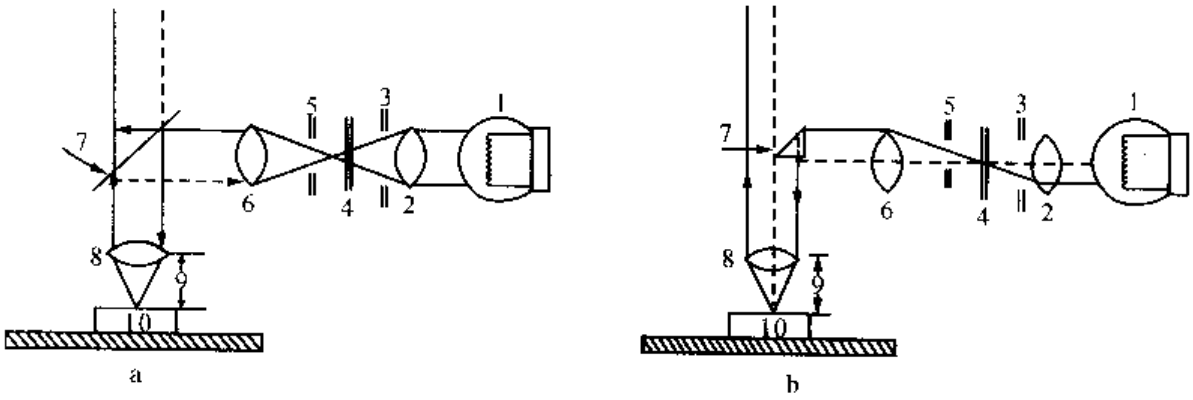


图1－2　玻璃片反射器（a）和棱镜反射器（b）及其反光原理示意图

1—灯泡；2—聚光透镜；3—孔径光栏；4—起偏镜；5—视野光栏；6—视野透镜；7—反射器；8—物镜；9—自由工作距离；10—光片

是反射能力弱，即入射光损耗大、视野中亮度低。但玻璃片反射器的优点是：光线可以通过物镜的全孔径，故分辨能力较高，视野中亮度均匀，所以观测偏光图时必须用它，而且由于它能获得较为垂直的光线，故反射率测定时也要用这种反射器。此外，显微摄影时用它可拍出亮度均匀的照片。

（2）棱镜反射器　全反射棱镜反射器是以直角三棱镜代替玻璃片（图 1－2b）。入射光线被棱镜全部反射向下，但由于棱镜的大小不超过镜筒内径的一半，必须留出一半空间作为反射光线向上的通路，所以射向目镜的光强最大不超过 50%，故视野亮度比用玻璃片反射器时高得多。棱镜反射器有两种，旧型的显微镜多用普通直角三棱镜，其主要缺点是当入射光为直线偏光时，因光束不完全平行（斜射光），则被棱镜反射后会使部分反射光成椭圆偏光，从而影响对光学性质的精确观测。

新型的矿相显微镜都采用三次全反射补偿棱镜（图 1－3）。三次全反射棱镜玻璃的折射率必须是 $N=\sqrt{3}=1.73$，这样全反射一次所造成的周相差为 60°，经三次全反射后总的周相差应当为 180°，仍是直线偏光。

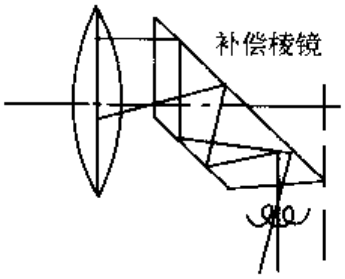


图 1－3　三次全反射补偿棱镜

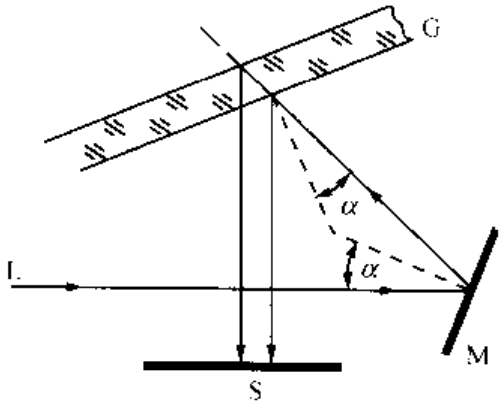


图 1－4　史密斯反射器

总之，棱镜反射器光线损耗比玻璃片少，因而视野较明亮。同时，有害的杂乱反射光也少。由于入射光是略倾斜地照射在矿物光片上，所以视野中反差比较鲜明、影像显得清晰。但由于它射向目镜的光线不够均匀，故视野中略有半明半暗的现象（若用中、低倍物镜时，此缺陷则不明显）。又因棱镜挡住物镜一半孔径，仅能看到半个偏光图，故不适合观测偏光图用。

（3）史密斯反射器　史密斯（Smith）反射器为二次反射结构，即由反光镜和反射玻璃片两部分组成。其构造如图 1－4，入射光经反射镜 M 反射到镀膜的玻璃片 G 上，被 G 再反射垂直向下射入物镜至光片 S 上。由光源射至反射镜 M 的光线的入射角 α 为 22.5°，而反射镜至玻璃片上的入射角也是 22.5°。反射镜由玻璃片镀铝制成，反射玻璃片的折射率为 1.52，在其下表面镀 $N=2.45$ 的氧化铋（Bi_2O_3）膜，以增强反射率，其上表面则镀 $N=1.38$ 的氟化镁（MgF_2）膜以减少内反射而增强透射。

该反射器除具有玻璃片反射器的优点外，它由于垂直入射面和平行入射面的偏光的透射和反射光强差别小，所以可大大减少玻璃片的反射和透射旋转。

（二）照明设备

1. 光源

矿相显微镜一般常用钨丝白炽灯和卤钨灯作为光源。部分研究用显微镜还配有汞灯、钠灯、钢灯或氙灯。

2. 滤光器

用上述光源除必备蓝色玻璃滤光器外，为了一些特殊的用途（如测定矿物的反射率和非均质视旋转角 A_r 等），则需要单色光源。单色光源主要有单色仪和干涉滤光器两种。除单色仪外，大多采用简易方便的干涉滤光器。由于一般玻璃滤光片的单色性很差，光谱组成复杂，现在已基本上被淘汰；而干涉滤光器的透射光波段范围较窄（半宽度较窄），单色性高，故被广泛采用。

干涉滤光器是两片平行，两个内表面镀有半透明银膜或铝膜的光学玻璃片，中间夹一层厚度约为规定的透射波长之半的透明的电介质而成。入射光线在两个内表面之间多次反射，经干涉后形成单色光透出玻璃。其性能决定于三个常数：①透射光峰值位置；②峰值的透射率及透射带的透射率；③透射带半宽度 HW，即峰值高度一半处的透射宽度，半宽度可控制在 10 nm 左右，它可经过计算，设计各种波长和不同半宽度的滤光器。干涉滤光器的单色性良好、孔径大、进光充足。

由于国际矿物协会所属的矿相学委员会（COM）规定，每一矿物至少需测定 470 nm、546 nm、589 nm、650 nm 等四种波长的反射率，所以这四个波长的滤光器是必备的。

（三）接物镜

接物镜通称物镜，它是由多片形状不一的透镜组成的一个光学放大系统。每个物镜都具有两种最基本的特征，即放大能力和分辨能力。物镜按放大倍数可分为低倍（放大数倍，即十倍以下）镜、中倍镜（放大十至二十倍左右）、高倍镜（放大二十倍以上）。

1. 物镜的分辨率

分辨能力是指分辨细微结构的能力，也就是使观察对象细微结构特点表现出来的能力。它常以分辨率 l 来表示，分辨率是指物镜能分开两个点（或两条平行线）之间的最短距离。例如用某物镜观察时，能够把距离为 0.4 μm 的两个点分开，而不能将 0.3 μm 间距的两点分开，故 0.4 μm 就是此物镜的分辨率（分辨限度）。

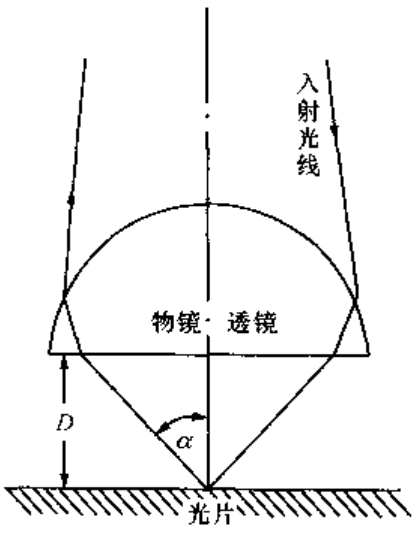


图 1-5　接物镜的孔角（孔径角）

物镜的分辨率除与物镜的各种像差有关外，更主要的是决定于物镜的“数值孔径 NA”。而 $NA = N\sin\alpha$，α 为物镜前透镜与光片上焦点间之光锥角，即孔角的一半（图 1-5）。

$$l = 0.61\frac{\lambda}{N\sin\alpha}$$

式中：N 为物镜和光片间观察介质的折射率；λ 为观察时所用光波的波长。

从上面公式可知，物镜的数值孔径 NA 越大，分辨率越小，即分辨细微结构能力越强；入射光波的波长越短，分辨率 l 也越小。因此欲增强物镜分辨能力（使 l 变小时）主要需使数值孔径 NA 增大。实际上高倍物镜的最大孔角为 144°，即 $\angle\alpha$ 为 72°，因此在空气介质条件下，最大数值孔径 $NA = 1 \times \sin 72° = 0.95$。在以油浸（香柏油 $N = 1.515$）为介质时，$NA = 1.515 \times \sin 67° = 1.40$。所以数值孔径最大不超过 1.40。在物镜上一般都刻有数值孔径的数值（0.05～1.4）。欲观察极细微的现象时，可选择高数值孔径的油浸物镜。必须指出的是，反光用物镜还存在透镜界面的耀光，这种耀光也影响分辨率，故物镜的分辨率不能只以数值孔径为唯一标准。

还应当指出的是必须把分辨能力与放大倍数分开，二者并不完全成比例关系，也就是说，并非物体放得越大细微结构就愈清晰。因为如果不增大分辨能力，只增大放大倍数，其结果会使影像模糊不清，所以是无用的“空放大”。由此可知，显微镜的性能主要决定于分辨能力或分辨率，而不是以单纯的放大能力为准。

物镜上一般都刻有放大倍数和数值孔径。放大倍数有的用符号“×”表示，如 10× 即 10 倍。通常都省去“×”号仅刻上数字；也有不刻放大倍数而刻焦距 f 或 mm，如 f 5.2表示焦距为 5.2 mm。数值孔径通常用“NA”表示，而在物镜外壳上一般直接刻写数字，如“10/0.20”表示放大 10 倍，数值孔径 0.20。

2. 透镜的像差及其校正

单透镜放大成的像，一般是畸形的或带色边的。这种现象是由于透镜有各种像差引起的。任何一个或一组透镜在成像时，由于透镜本身光学条件的缺陷而使物像发生种种异常，这些引起异常的作用统称之为像差。

像差包括有球面像差、纵向色差、横向色差、彗星像差、像散、像场弯曲和畸变等。而以前两种像差表现较为突出。

（1）球面像差　球面像差简称球差。由图 1－6 可看出自无限远处射来的平行光束通过凸透镜后，不是聚焦于一点（即透镜的焦点），而是聚焦在多个点上。图中所示，一对光线聚成三个焦点，愈近光轴的光线折射愈小，因此焦点就离透镜远一些；而愈近透镜边缘的光线折射愈强烈，所以焦点距透镜就愈近。由于产生这种现象的原因在于透镜表面是球面，故称球面像差。因这种像差的影响，当升降镜筒使中心部分成像清楚时，则边缘部分不清晰，若使边缘清晰时，则中心部分就模糊。其校正方法是用折射率不同的光学玻璃经过计算后，制成正（凸）、负（凹）透镜组合在一起，使两种透镜所形成的球差相反而抵消，以此来改正透镜的球差。但一般改正并不彻底，都还残存一些球差。

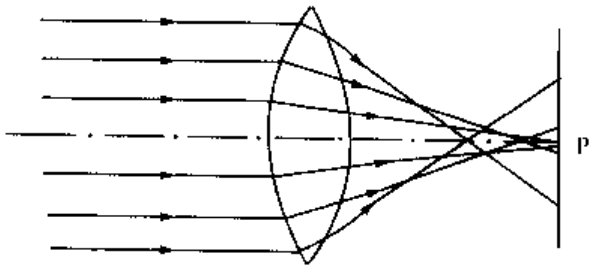


图 1－6　球面像差

P—屏幕

（2）色像差　色像差也称色差，由于玻璃对不同波长色光有不同的折射率，因此白光通过透镜后不能聚焦于一点，即产生了色差。色差有纵向与横向两种，前者影响较大，纵向色差的产生如图 1－7 所示。由点状物体射来的白光穿过透镜后，蓝光折射最强，聚焦于 a，绿光聚焦于 b，红光聚焦于 c，因此物体影像必然不清晰。

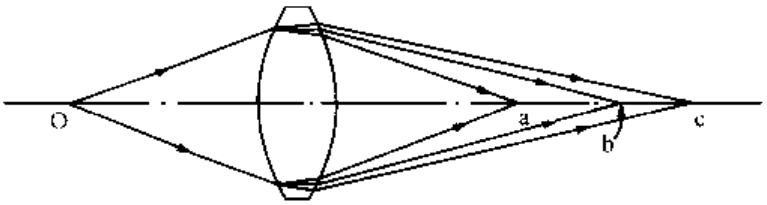


图 1-7　纵向色差

a—蓝光焦点；b—绿光焦点；c—红光焦点

纵向色差会使物体影像产生虹状的彩色边缘，因此必须改正。一般与球差同时改正，即用折射率和平均色散系数不同的玻璃经过计算后，制成正、负透镜组成，就可以同时改正大部分球差和纵向色差。这种组合制成的物镜叫消色差物镜和复消色差物镜。

3. 物镜的种类和识别

物镜除按数值孔径和放大倍数分类外，由于用途不同其类型繁多。现仅将矿相显微镜的物镜就其性能与用途简单介绍如下：

（1）按所用的观察介质不同分为干燥（空气、干）物镜与浸没（油、水浸）物镜。干燥物镜观察介质为空气；浸没物镜最常用的是油浸物镜，介质为不易腐蚀镜头的香柏油（$N=1.515$）、其标志是在物镜金属框前端有一色圈（常为黑色）并刻有“Oil”、“Oel”、“imm”或“ПМИ”等字样。油浸物镜因数值孔径 *NA* 较干燥物镜大，故分辨能力强，且易于观测矿物的双反射、非均质性和内反射等光学性质。

（2）根据像差校正程度，可将物镜分为消色差物镜、复消色差物镜、半复消色差物镜和平像物镜。消色差物镜是使可见光中的红光与蓝光聚焦于一点，而黄绿光则焦于另一点（靠近红蓝光的焦点）。所以基本上校正了上述色光的色差与球差，但对其红蓝光以外的各种色光间色差未予校正，消色差物镜一般不刻有符号。

复消色差物镜基本上能把可见光谱中的各种色光聚焦于一点，同时也校正了球差和其他像差，这种物镜性能好，适用于各种倍数的观察及摄影。但它的构造复杂，是用特殊的光学玻璃或萤石配合光学玻璃制造的。其物镜外壳上刻有“APO”或“Apochromatic”等字样。半复消色差物镜，它的构造与消色差物镜相同，仅其中的冕牌玻璃部分或全部用光学萤石代替。它的色差校正在消色差与复消色差之间。物镜框上刻有“FI”、“Neofluar”或“Fluorite”等字样。

上述的物镜都有像场弯曲，并且倍数越高越严重，以复消色差物镜最为严重。新型显微镜大多数用平像物镜。平像物镜特点是它们所成的影像基本上是平的，像场弯曲很小，不会产生视野中心与边缘不能同时准焦的现象，因此利于观察和显微摄影。其识别标志是在它的金属框上刻有“Planachromate（平像消色差）”、“Planapochromate（平像复消色差）”、“Plan（平像）”、“Pl（广视野平像）”、“Npl（正常视野平像）”和“Epiplan（反射光专用平像）”等字样。

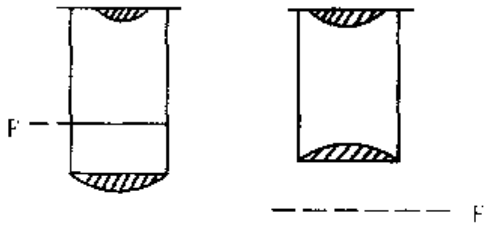
最后必须提及的是，矿相显微镜不能使用有应变的物镜，它特别不适于在正交偏光下观测矿物。无应变物镜标有“POL”或“P”等字样；“（P）”表示基本无应变。还须指出的是，偏反两用显微镜中备有两套物镜（反射光及透射光专用），各有标记，不可混用，尤其高倍物镜更是如此。

（四）接目镜

物镜将微小物体放大，但由于物体太细小，这个实像仍不够大，因此需要在实像与眼睛之间再加一个放大镜将实像进一步放大，把它变成一个放大虚像才便于观察。这个放大镜就是接目镜，也称目镜。按其构造及用途不同可分为下列几种。

1. 惠更斯目镜

由两个平凸透镜组成(图 1－8a)，凸面均朝下，上端眼透镜比下端的场透镜小。目镜之焦点在两透镜之间(焦平面上装有一金属框可置目镜微尺或十字丝)，故称为负目镜。惠更斯目镜的优点是可以完全消除本身的横向色差。其放大倍数均较小，最大不超过 10×。这种目镜由于对球差和纵向色差不能很好校正，且观察时人眼要紧帖目镜很不方便等缺陷，所以已渐被平像目镜所取代。



a. 惠更斯目镜　　b. 兰姆斯顿目镜

图 1－8　按目镜的两种普通型式

2. 兰姆斯顿目镜

也由两片平凸透镜组成，凸面相对（图 1－8b）。目镜的焦点在场透镜之下，故又称正目镜。在它的焦面上安装测微尺等很适宜，因测微尺与物像同样都是通过两个透镜放大的，故基本上没有像差。但这种目镜不能全部消除横向色差，改良的是将眼透镜用两片透镜黏合而成，以消去残存色差，故称开尔纳目镜即无畸变目镜。开尔纳目镜在外壳上刻有“O”、“Orth”、“Opt”等。由于近年来设计出平像补偿目镜，故上述目镜除较旧型显微镜可能附有外，新型显微镜已不采用。

3. 补偿目镜

它是专门与复消色差物镜配合使用的目镜，因为复消色差物镜形成的蓝像比红像大，而补偿目镜设计红像比蓝像大，故抵消了复消色差物镜的横向色差。补偿目镜也可以与萤石物镜及高倍消色差物镜配合使用。然而一般的低、中倍消色差物镜配补偿目镜会使物像产生色边。此外，这种目镜最大的缺点是像场弯曲严重。

补偿目镜倍数由 5×至 30×。其外壳上常刻有“C”、“K”、及“Compens”等字样。

目前新型偏光显微镜或矿相显微镜只使用平像目镜，上述几种目镜均被淘汰。

4. 平像目镜

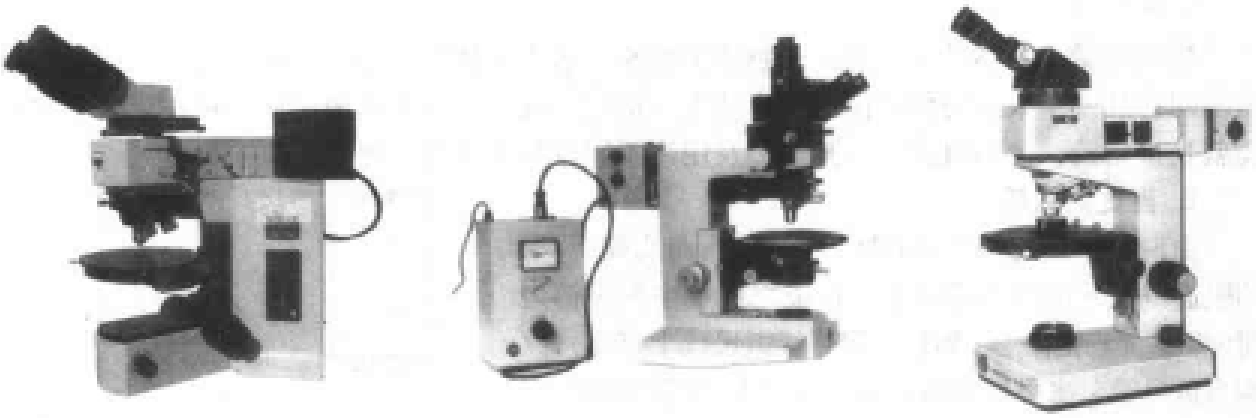
它也是一种补偿目镜，但已消除了像场弯曲。这种目镜仅校正了本身的像场弯曲，但不能校正物镜的像场弯曲。只有与平像物镜配合使用才能获得完全平坦的像场。平像目镜放大倍数由 8×至 25×；外壳上常刻有“Plan”、“Planosc-opic”、“Periplan”、“Kpl”、“GW”或“GF”等字样。

二、几种常见矿相显微镜简介

矿相显微镜是矿相学研究时最基本、最重要的仪器。因此必须学会熟练的使用，并对其每一附件的名称和性能均应完全掌握。现将两种常见、常用的矿相显微镜简介如下(图 1－9)。

1. OLYMPUS BX51M（BX60M）反光显微镜

为日本产最新型矿相显微镜。垂直照明器与镜体相连接，备有前、上偏光镜，上偏光



OLYMPUS BX51M(BX60M)反光显微镜　　莱茨ORTHOLUX Ⅱ POL-BK型显微镜　　莱茨LABORLUX 12POL型显微镜

图 1-9　矿相显微镜

镜可转一周，刻度标明 180，上偏光镜振动方向可转变 180°。变压器装在镜架内，旋钮在右手，很方便。另外，当调节光线的强度时，镜架上有 12 挡指示灯。镜架呈 Y 形，使显微镜稳定性好。该显微镜优点是视域大，无畸变，物像清晰，正交偏光下光强，适于观察内反射和偏光色、均质和非均质性，还可测 A_i 角，精度达 0.1°。

2. ORTHOLUX Ⅱ POL - BK 型显微镜

该显微镜也为偏反两用镜，是莱茨厂的产品。也备有上、下、前偏光镜，上偏光镜可旋转 360°，刻度值精确至 0.1°。垂直照明器与镜体连接；有玻璃片和棱镜反射器各一，可选用。照明灯为一可装卸在镜体上的灯室，内有 12 V、50 W ~ 100 W 的溴钨灯。该显微镜性能良好，可作某些光学常数的测量。

3. LABORLUX 12 POL 型显微镜

它也是偏、反两用显微镜，是莱茨厂的一种改型新产品。垂直照明器中基本部件齐全，并与镜体和照明灯相连接；照明灯为一可装卸在镜体上的灯室，内有 6 V、20 W 的溴钨灯。变压器置于镜体内，便于调节照明亮度。此种类型显微镜性能良好，适于实验工作和学生使用。

三、矿相显微镜的调节、使用和维护

1. 矿相显微镜的调节

不论显微镜的性能如何，在使用前必须加以调节，使其各部件处于正确的位置，才能进行有效的观测。矿相显微镜结构较为复杂，在安装使用时，很多部分需要仔细地检查和调节。通常需要调节的部分简述如下：

（1）调节光源　目前新型显微镜的灯多是安装在镜体上，如安装在垂直照明器的前端或灯室中，调整方法是转动灯室或灯头的螺旋，使光源点与进光管在同一水平线上，直至视野中亮度均匀、亮度最大为止。

（2）反射器的调节　缩小视野光圈后转动反射器的横轴，其小圆亮点应严格平行目镜十字丝的竖丝移动，然后使小亮点位于视域正中心，并被十字丝所平分，即表示反射器的位置及倾角（45°）已调正。需要指出的是一些新型的显微镜中，反射器固定在横轴上

（处于正确位置），不能自行调整。

（3）调节孔径光栏和视野光栏　实践证明，由于耀光的影响，不适当地开大孔径光栏，并不能有效地提高反光物镜的分辨能力。孔径光栏的适宜大小（取下目镜或推入勃氏镜即可在物镜后界面上看到孔径光栏的像），应随物镜的放大倍数而异。用低倍物镜时，孔径瞳孔可开至与孔边基本重合；用中、高倍镜时应适当缩小（1/3 至 1/2）。

视野光栏的调节是首先缩小光圈并调至十字丝中心，若光圈界线模糊不清或带有红、蓝等颜色，转动视野透镜至视野界线清晰和无色边为止。重新开大光栏至视域周边，不可再大。

（4）偏光镜振动方向的检验与校正　检验偏光镜振动方向通常是置石墨或辉钼矿非底切面的光片于物台上，推出上偏光镜，转动物台，使矿物晶体的延长方向（高反射率方向）处于最亮位置时，其延长方向即为前偏光镜振动方向。如果此时矿物的延长方向恰平行十字丝呈东西向，则证明前偏光镜也为东西向。若非如此，需先使矿物延长方向平行十字丝东西向后，再转动前偏光镜至矿物最亮时，此时前偏光镜即处于东西向。

检查两个偏光镜是否严格正交的方法是，先用上述方法确定前偏光位置，再推入上偏光镜，若上述矿物呈最暗（消光），并在物台旋转一周时，出现四次消光、两次之间距严格为 90°，同时在各 45°方位的偏光色也应完全一致；或者用一均质矿物如黄铁矿在高倍无应变物镜下作锥光观察，若偏光图为一完美的“黑十字”，即可证明二偏光已经正交。上述两种检查方法中，若前者四次消光间距不等、后者图像稍显双曲线状，则都表明两偏光未完全正交。须仔细地调节上偏光镜，以达到前述要求，并记录前、上偏光镜所处刻度位置，便于备查。

关于物镜中心等校正与偏光显微镜相同，不再赘述。

2. 矿相显微镜使用的一般程序

（1）安装垂直照明器　有的垂直照明器已固定在镜筒上，只需调整照明。可装卸的垂直照明器需安装在镜筒既定的位置上。

（2）安装物镜和目镜　因显微镜的型号不同，故物镜的装法也各异。如有的显微镜，要顺着接头沟槽横插，也有的显微镜的物镜是拧上弹簧夹安装的；现在多是以物镜螺纹拧在镜筒的物镜接头器上或旋转盘上的。

（3）开启照明灯　按动照明器开关即可，注意调节到合适的亮度。

（4）安装光片于载物台上　以适量的胶泥先用压平器将光片压平在载物片上，然后置于显微镜的载物台上，再调动镜筒或升降物台使之准焦。

3. 显微镜的维护

（1）任何部、附件的螺旋不应乱搬硬拧，应仔细找出原因（如方向拧错、卡住或已旋到极限等）后妥善处理。

（2）显微镜的部件（如物镜与目镜等）不能混用，不论同型号或不同型号的显微镜都不能混用。

（3）显微镜保存温度要适宜，一般应在 -4℃ ~ +20℃之间，不要过冷或过热，以免脱胶和润滑油变质失效。特别注意避免曝晒或取暖设备烘烤。

（4）偏光镜（尤其是以冰洲石作的偏光镜）须轻推轻拉；镜头装卸也要轻上轻下，以免因振动应变，脱胶损坏。

（5）灰尘对显微镜的影响很大，其光学系统需保持严格清洁，但物镜绝不可拆卸。所有透镜及偏光镜都不可用手指或一般纸及织物擦拭，只能用擦镜纸或脱脂棉轻轻擦拭物

镜、目镜透镜的外表面。

（6）低压白炽灯泡的插头一定要插在变压器上，绝不可直接插在电源上，以防烧毁灯泡。灯泡及变压器不可连续通电时间过长，在空隙时间应随手关闭。另外，若变压器发出嗡嗡声，须立即将变压器插销从电源上拔下检查。

实验作业

（1）每人固定使用某一台显微镜。阅读“反光显微镜使用规程”。

（2）重点掌握垂直照明器的结构和工作原理，熟悉物镜、目镜的种类及使用前偏光镜和上偏光镜的方法，了解、熟悉孔径光栏和视野光栏的用途及使用方法。

（3）以方铅矿（白色）为标准，用蓝玻璃片调节灯光的颜色，使其成为纯白色。注意调整光源的角度、位置并排除障碍，使光强达到应有的亮度。

（4）参观了解其他类型的反光显微镜。

第二节　光片的制备

在对矿石进行矿相学的研究中磨制矿石光片是个重要问题，矿石光片的磨制质量对于鉴定矿物及观察矿石组构等均有很大的影响，常常由于磨制质量不佳，不能得出正确的结论。因此对矿石光片的磨制质量至少须达到以下几点要求：①矿石光片表面应该力求平滑如镜，无小坑、细裂隙和较粗的擦痕；②同一种矿物在矿石光片的中央部位和边缘部分，其磨光程度都应同样精细；③在矿石光片中硬矿物与软矿物的相对突起应不明显。

矿石光片的一般制备过程是：选择（准备）矿石、切割、粗磨、细磨、磨光（抛光）、编号和安装等几道工序。现分别简述如下：

（1）选择（准备）矿石　按研究目的要求对矿石进行肉眼选择切片部位，并用色笔圈定，但对其中疏松的矿石标本要用松香和树胶等胶固，对散粒的矿粉或矿砂等需用火漆、电木粉和环氧树脂等胶固，压铸后即可直接磨制。

（2）切割　新型切片机是采用金刚石砂轮切割，可自动及手动进给，操作方便。一般研究矿石用的光片切成长、宽各 2 cm ~ 3 cm，厚 0.5 cm ~ 1 cm 即可；对具有特殊意义或有代表性的矿石组构标本，可切成较大的矿石块以备磨制大光面（磨光块），其规格及形状要根据要求和矿石的自然形状而定。

（3）粗磨及细磨　将切锯下来的粗坯用水洗净后，在磨光机上加以粗磨，磨料用 150 号金刚砂（直径 100 μm）。将光片磨平定形后用水冲洗干净。光片在细磨前，对矿石试样不很坚固者，需用树胶或环氧树脂再加胶固。细磨一般是用水调和更细的金刚砂（10 μm ~ 20 μm、2 μm ~ 5 μm、1 μm ~ 2 μm），依次在专用的铁盘或玻璃板上进行。最后磨至金属矿物可显闪光现象为止。

（4）磨光（抛光）　抛光是在磨抛机上进行，它是光片磨制工作中的最后工序。磨盘为包有呢料、丝绒、帆布或尼龙布的水平旋转圆盘，磨盘也有用木制者（用菩提树、梨树、苹果树或软木等制成）。所用磨料，一般是先用与水调和的氧化铁粉或氧化铬粉（粒度 1 μm 左右）作磨料，其后再用氧化镁或用氧化铬粉加适量的铬酸氨水溶液抛光。最后若用 0.05 μm ~ 0.25 μm 的氧化铝或金刚砂抛光粉（膏）进一步抛光，可制成平滑如

镜的光片。20 世纪 80 年代国内外所研制的万能磨抛机和自动抛光机，试样能在可更换的磨抛盘上，作不重复轨迹运动的自动抛光。它配有抛光夹、具旋转机构和时间控制装置，速度及负荷等大小可调，并可自动加滴抛光液，用其抛磨可获得高质量的光片。应指出的是，对矿石光片不宜高速抛光，因高速抛磨将使光片表面生成一层非晶质薄膜，它很影响对光片中矿物光学、物理性质的测试，特别影响对其均质性与非均质性的观测。所以磨抛机的转速，应控制在每分钟不超过 200 转为宜。

（5）编号　光片磨好后应立即编号，以免错混。编号时，一般先在光片的侧面涂以白漆，然后用绘图墨水写号。为避免字迹模糊脱落，可用透明亮漆覆盖。

（6）光片的安装　在用显微镜观察研究前，首先须将光片的光面固定为水平位置。固定的方法可用软泥（油灰、石蜡、铸型泥等）或用橡皮泥，粘着光片底部与载物玻璃片上，再用压平器压平即可观察。对于质松或欲长期保存的光片，可放在金属框中用火漆或石膏浇铸起来。也可压铸于塑料中。但光片的光面与铸物的底面必须严格保持水平，以便做镜下观察。

最后应该指出的是，光片的磨光面长期暴露在空气中，易受氧化、沾污灰尘，所以在每次观察之前，必须在呢绒擦板上用抛光粉（膏）擦拭干净。

实验作业

（1）参观磨片室，听取磨片室工人师傅系统讲解制片全过程（包括截锯、粗磨、精磨和抛光）。

（2）参观和了解各种切片机、磨片机和磨光机的型号与性能。

（3）参加磨制光片的劳动。

第二章　矿物的反射率

矿物光面对垂直入射光线的反射能力，称为矿物的反射力，即矿物光面在反光显微镜下的明亮程度。表示反射力大小的数值叫做反射率，以下列公式表示：

$$R = \frac{I_r}{I_i} \times 100\% \qquad (2\ 1)$$

式中：R 为矿物的反射率；I_i 为入射光强度；I_r 为反射光强度。

由于反射率是矿物本身的属性，因此它是不透明矿物最重要的光学特征和主要鉴定依据。

矿物的反射率 R 取决于矿物的折射率 N 与吸收系数 K。一般透明矿物的吸收性极低，即吸收系数属 10^{-4} 级，故可忽略不计，所以透明矿物的反射率可用费涅耳（A-Fresnel）公式表示：

$$R = \frac{(N - N_s)^2}{(N + N_s)^2} \qquad (2\ 2)$$

式中：N 为矿物的折射率；N_s 为浸没介质的折射率。

若观察矿物是以空气为介质，则 $N_s = 1$；如果以香柏油为介质，其 $N_s = 1.515$。

吸收性（不透明）矿物，其反射率不仅与矿物的 N 有关，而与 K 的关系尤为重要。故其矿物的反射率 R 要用下列公式表示：

$$R = \frac{(N - N_s)^2 + K^2}{(N + N_s)^2 + K^2} \qquad (2-3)$$

当以空气为介质时，则 $N_s = 1$，公式变为：

$$R = \frac{(N - 1)^2 + K^2}{(N + 1)^2 + K^2} \qquad (2\ 4)$$

矿物反射率 R 和矿物光学常数 N、K 的关系如图 2－1，从图 2　1 中可看出，吸收性强的不透明矿物，其反射率主要取决于矿物的吸收系数 K。若矿物的 K 值大于 2 时，其反射率 R 值均大于 38%，而 R 与 N 值的关系不明显。图中可见 K 大于 2 的各 K 值曲线，从 $N = 1 \sim 5$ 一段逐渐近水平状，故 N 值对反射率 R 值影响很小；从 K 小于 2 递减向下的各 K 值曲线弯曲度逐渐增大，$N = 1$ 的两侧逐渐成明显的斜线，从而 N 值对 R 的影响亦随之增大，直至 K 值近于 0 时，则 R 值完全取决于 N。

从图 2－2 中也明显的反映出光垂直入射时，矿物 R 与 K 和 N 的关系及其规律性。如当已知矿物的 N、K 值后，可从图中立即求出 R 值，例如 $N = 4$、$K = 2$ 的矿物，则 $R = 45\%$。在反映 R 与 K 的关系方面，可看出：当 $K \geq 1$ 时，R 一定大于 16%；$K \geq 2$ 时，$R > 38\%$；$K \geq 3$ 时，$R > 52\%$ 等。在反映 R 与 N 的关系方面，当 $N \geq 2$ 时，$R > 10\%$；$N \geq 3$ 时，$R > 24\%$；$N \geq 4$ 时，$R > 35\%$；$N \geq 5$ 时，$R > 44\%$；$N \geq 6$ 时，$R > 50\%$ 等等。

上述是以均质矿物为例，由于均质矿物的 N 和 K 不因方向而异，所以其反射率 R 只

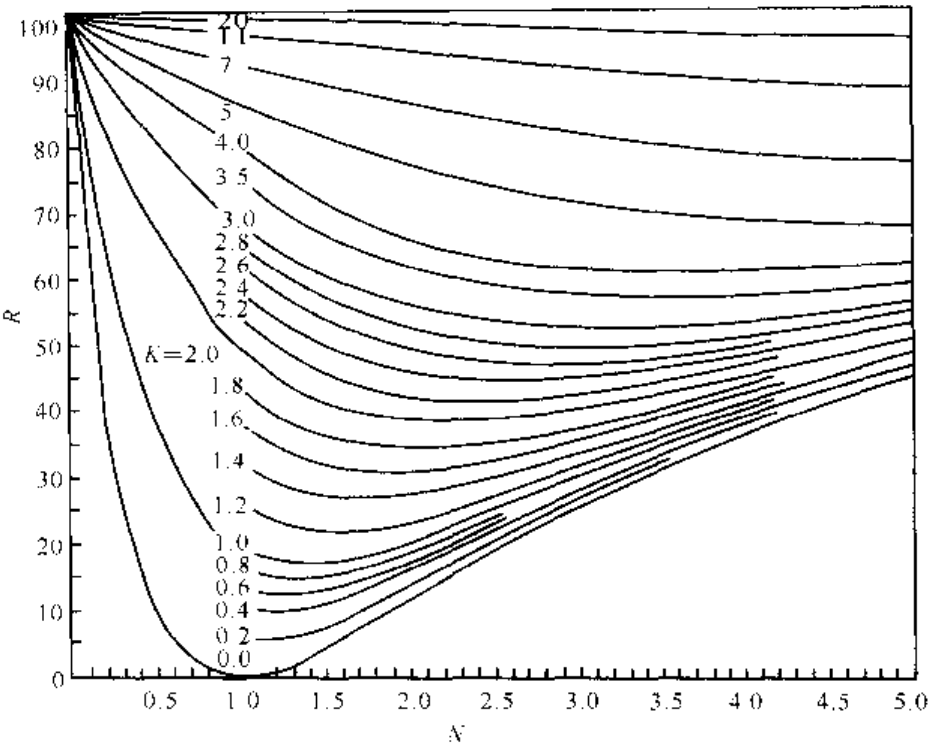


图 2-1　吸收性物质在垂直照射光下的反射率 R 与折射率 N 和吸收系数 K 的关系

有一个值；而非均质矿物因随晶体的方向不同，其 N 与 K 均有所差异，所以 R 也随晶体方向而变化，故中级晶矿物应有两个主反射率 R_o 和 R_e。低级晶矿物应有三个主反射率 R_g、R_m 和 R_p。

以上论述的是决定矿物反射率的主要内在因素（N 和 K），下面略讨论一下影响矿物反射率的外在条件：

由于大多数矿物的 N 和 K 随光波波长的变化而变化，所以在不同波长入射光下测定或计算出来的反射率也不一样。矿物对各种光波的反射率也具有某些特征意义，对不透明矿物鉴定工作很有帮助。用光电显微光度计测定矿物的反射率值时，通常用国际矿相学委员会规定的几种波长的单色光，即蓝（470 nm）、绿（546 nm）、黄（589 nm）和红（650 nm）光测定。其测得的反射率值，必须注明是在哪种波长入射光下进行的。

另一影响反射率数值的因素是观察介质条件。由公式（2　2）（2-3）可以看出观察介质的折射率改变，而导致矿物反射率改变。油的折射率较空气的折射率大，所以在油中观察矿物反射率较空气中为小。如在空气中闪锌矿的反射率为 17.5%（绿光），而在香柏油中为 5.5%。从公式中不难看出，矿物在油浸介质中反射率普遍降低。但反射率大的矿物因 K 是决定 R 值的主要因素，所以反射率降低较少；而反射率小的矿物则与其相反，降低较多。

综上所述，得知反射率 R 是其折射率 N、吸收系数 K 和浸没介质折射率 N_s 等的函数。N 与 N_s 的物理意义为人们所熟悉，而决定 K 值的“吸收性”之机制需在此略加阐述。

矿物由元素或化合物组成，其结合方式可为离子键、共价键、金属键和分子键（温德华键）等，每种矿物可由一种化学键组成，也可以由两种甚至三种化学键构成。由离

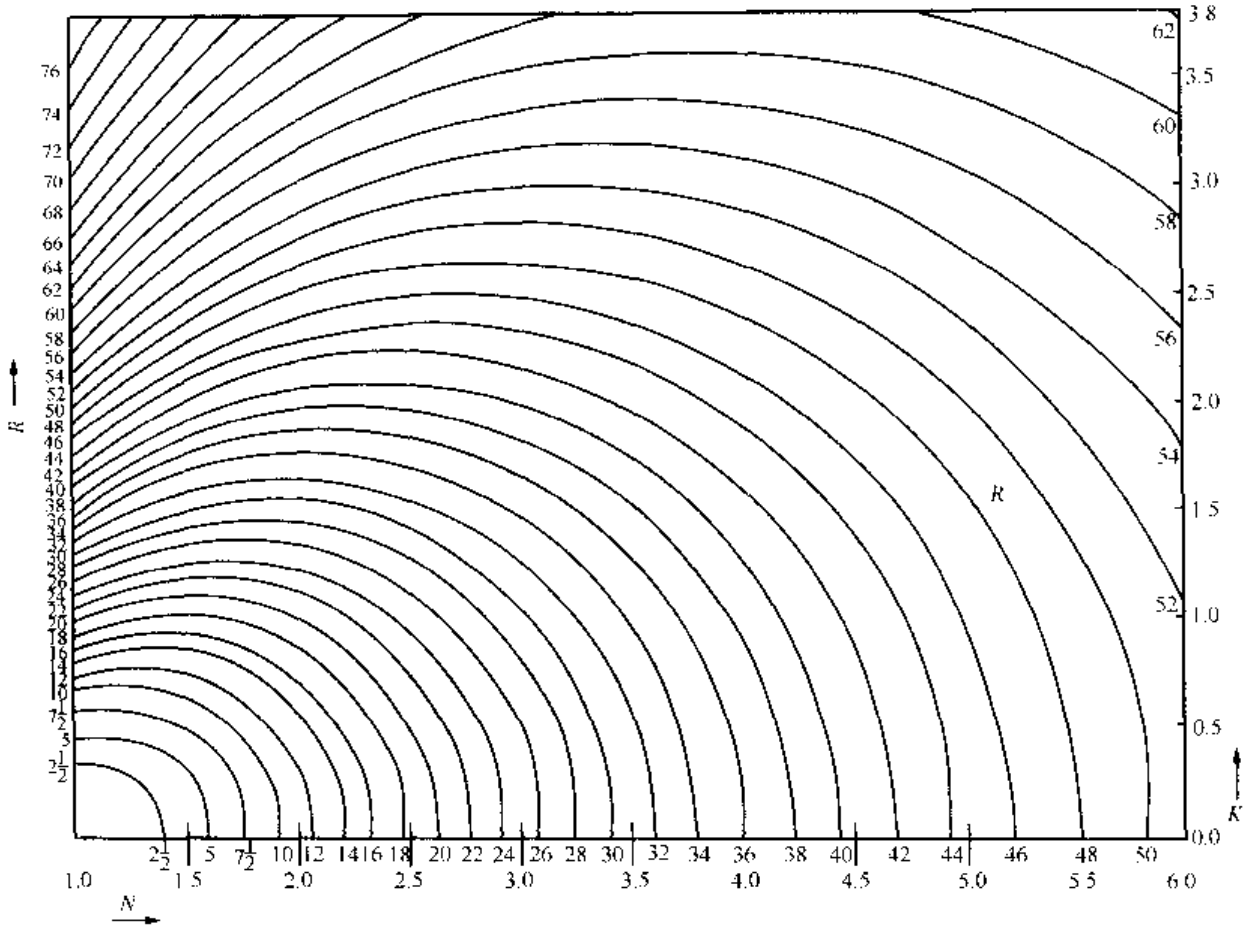


图 2－2　光垂直入射时，反射率 R（空气中）和矿物光学常数 N、K 的关系图

（据 R. Galopin 等，1972）

纵坐标为吸收系数 K；横坐标为折射率 N；曲线为反射率 R

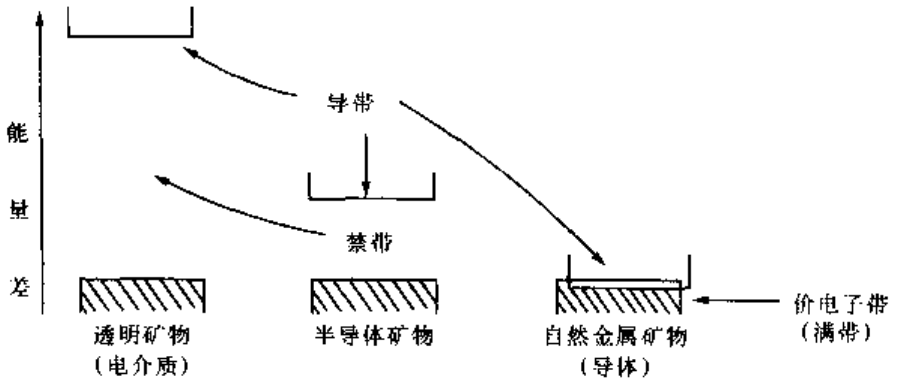


图 2－3　自然金属矿物、半导体矿物和透明矿物能带结构示意图

子键和共价键构成的透明矿物的电子都是束缚电子，它束缚在各自原子核周围而不能在晶体内移动。而含金属键的一些不透明矿物具有自由电子，它们在晶体内可以自由移动。当可见光（光量子）射到金属矿物表面后，由于其中自由电子能级的能量差多与可见光（光量子）的能量相当，故这些电子可从基态位上被激发，吸收了光量子的能量。当电子

再跃迁回到基态时，其大部分能量呈光量子再发射出来形成反射光。这就是吸收性越强其反射光也越强的机理所在。

根据固体物理学能带理论，可将矿物对可见光的“吸收”作如下理解：透明矿物（电介质）的禁带宽度一般大于可见光能量值（图2-3左），故难于使外层电子激发，即对光能几乎不吸收。所以入射光可透过，因而反射率必然很低。属半导体矿物的黄铁矿、方铅矿、辰砂和雄黄等，其禁带宽度可以小于等于或稍大于可见光的能量，外层电子吸收光能后，而被激发从满带（价电子带）跃迁至导带，当返回时释放出所吸收的能量而成反射光。由于矿物不同其禁带的宽度可有差异（图2-3中），所以半导体矿物的反射率可以从中高至中低，而不被吸收的那部分光得以透过。自然银、自然金、自然铜等导体矿物，其能带是重叠的（图2-3右），外层电子可在整个晶体中自由运动，可吸收各种能量的可见光，经激发后再跃迁回基态时，则产生强的反射光。所以自然金属矿物的反射率都很高，一般在60%以上，如黄光下自然银可高达95%。

第一节　反射率的测定方法

反射率是不透明矿物最重要的光学性质，是鉴定矿物的主要光学常数。其测定方法一般有光电学方法（光电光度法）和光学方法（视测光度法和简易比较法）。

一、光电学方法

光电学方法（光电法或光电光度法）是利用光电效应的原理，即利用光电元件所产生的光电流与其受照光强成正比的原理来测定矿物反射率。其方法是在同一条件下，分别测取“标准”与欲测矿物的光电流强度，从而根据已知反射率的“标准”计算出欲测矿物的反射率。测反射率的光电装置，按所采用光电元件种类可分为光电池、光电管和光电倍增管显微光度计。前两种由于其灵敏度及准确性差而被淘汰；光电倍增管显微光度计其灵敏度高，能测直径小至0.5 μm面积的光强。所以被国际矿相学委员会规定为测定反射率的标准仪器。

光电倍增管显微光度计（法）因光的接收元件为光电倍增管而得名。由于它被光照后，其光电流强度（发射的光电子数）与照度（入射光强）成正比的线性关系较好，能感受很弱的光，故对细小矿物能精确地测其反射率。光电倍增管由阳极、阴极和多个二次发射靶屏极组成（图2-4）。当光照射到光电阴极便会发射光电子，由于第一靶屏D_1与阴极间的电压差所产生的静电场作用，使光电子被吸到D_1上，并在那里打出更多的二次

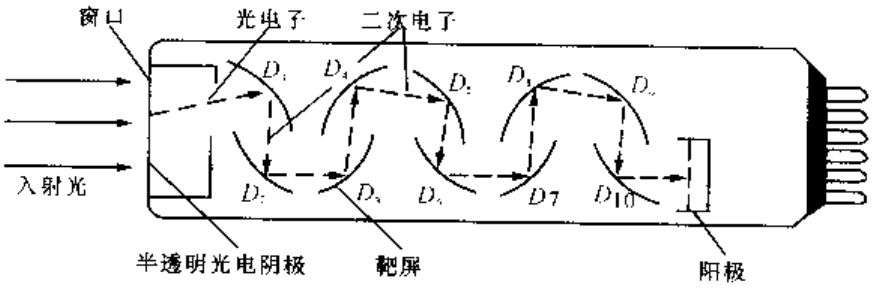


图2-4　光电倍增管结构示意图

电子落到第二靶屏 D_2 上，又成倍地产生了新的第二次电子。这样经过多个（10 个～15 个）靶屏极多次的第二次电子发射，当达到阳极时，其光电子将比原来多出几百万倍，从而提高了灵敏度。阳极输出的电流可用灵敏检流计测定。光电倍增管外加电压一般为 700 V～3000 V。

光电倍增管及其光度计目前已有很多光学工厂生产。常见的有奥普同厂生产的 MPM 型和莱茨厂生产的 MPV 系列，后者分 1、2 和 3 型。MPV 光度计基本组成部分包括：ORTHOPLAN 型显微镜；带有稳压器和干涉滤光器的光源；光电倍增管及它所用的稳压高压电源；测定光电流的仪表、数字显示器和微处理机等。MPV－1 型光度计测定反射率时光线进行情况见图 2－5。光线由照明系统 17 入射，经反射器 19 向下经物镜 3 至光片 2，从光片反射向上再经物镜、玻片反射器至目镜 6，透过目镜至半透明反射玻片 7 上，部分透射向上至倍增管 15；另一部分反射向右进入观察目镜中，在此观察被测矿物的影像。在

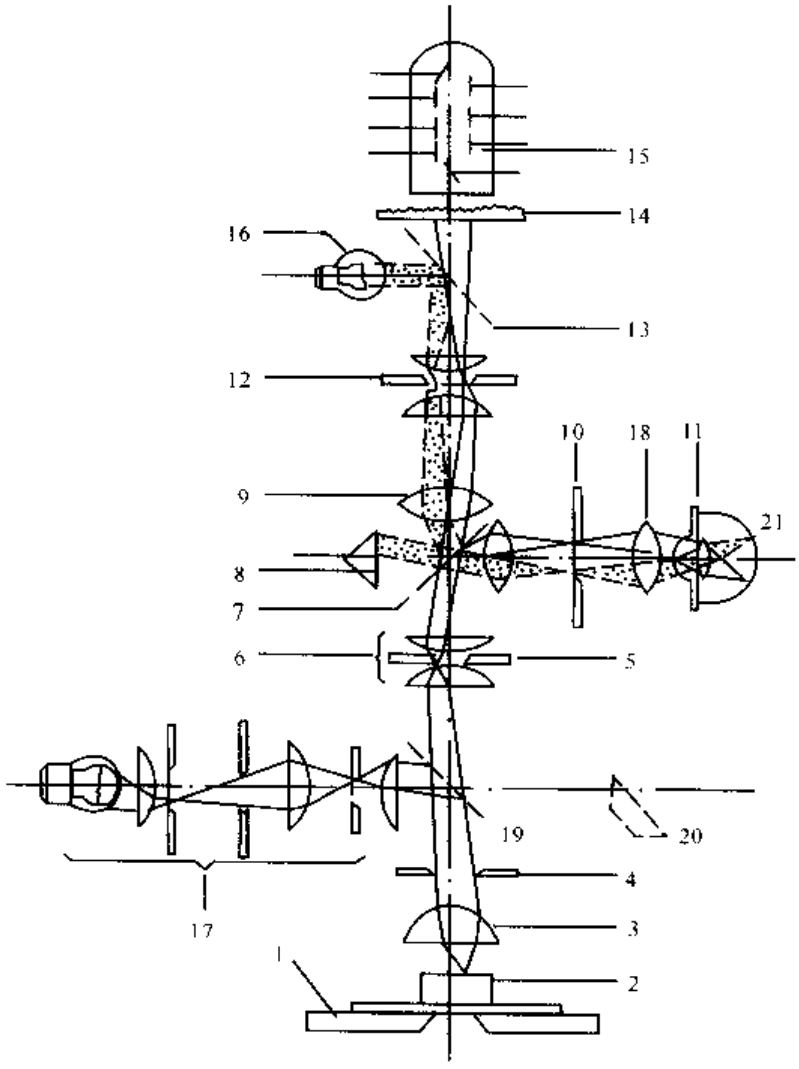


图 2－5　MPV－1 型光电倍增管光度计在反射光中测定原理示意图

1—物台；2—光片；3—物镜；4—孔径光栏（像）；5—目镜光栏；6—目镜；7—半透明反射器；8—反射棱镜；9—透镜；10—观察目镜光栏；11—目镜的出射光瞳；12—测量光栏；13—半透明反射器；14—毛玻璃；15—光电倍增管；16—测量光栏照明灯泡；17—反光显微镜照明系统；18—观察目镜；19—反射玻片；20—补偿棱镜；21—人眼

12 处有一测量光栏，用它来限定被测面积，此光栏被小辅助灯 16 照明后，其影像经 7 和反射棱镜 8 反射后，也进入观察目镜重叠在被测矿物影像上，以便选择测定部位。此外，视野光栏 5 也重叠在被测矿物的影像上，它比光栏 12 大一些。这样用双重光栏遮挡可使射入被测范围内的有害杂光减至最少。测定时从电流计上读出电流读数，然后计算出所测的光学常数（反射率）。

反射率“标准”

不论用哪种方法测定矿物的反射率，都需与反射率已知的标准物质进行对比。这种简称“标准”的物质其选择颇为重要，因为它对测定反射率的精确性起着决定作用。作为“标准”的物质，须具备的条件是：化学成分固定、化学性质稳定不易腐蚀，反射率色散曲线近于水平，均质性，无内反射，硬度高不易划伤并能磨光成平整的镜面。

所用标准按上述要求条件及实际工作需要可分两个等级。一级“标准”的反射率是通过“光强直接测定法”标定，或根据对其所测定的 N、K 值计算法而得出；二级标准可利用一级标准用“光电光度法”标定。国际矿相学委员会（COM）规定三种人造物质作为“标准”（一级标准）：黑色中性玻璃，空气中平均反射率为 4.5% ±；碳化硅（SiC）单晶体切面的磨光片，空气中平均反射率为 20% ±；碳化钨（W，Ti）C 的底面磨光片，空气中平均反射率为 45% ±。各种“标准”对不同波长光的反射率精确测定值由所供工厂给出，并经责任工程师书写在每个“标准”所附的卡片上。

二、光学方法

此法是借助装在显微镜上的视测光度仪来测定矿物的反射率，或在显微镜下同一视域中来比较两种矿物（“标准”与欲测矿物）的反光强度（反射率）。前者称视测光度法，后者为简易比较法（视测比较法）。视测光度法主要有裂隙显微光度仪法和视觉显微光度仪法等。由于均以观测者的视觉为准，故难免带有主观因素，所以精度较差，达不到精度要求，现已被淘汰。在日常的一般鉴定工作中，有时只需知道欲测矿物反射率的大致范围，即可查表定出矿物时，可采用简易比较法。由于它除显微镜外不需专门仪器及附件，操作简便而易于掌握。

反射率简易比较法

其具体方法是将欲测矿物和标准矿物光片用软泥紧密镶在载玻璃上，再用压平器压于同一水平面上，置于镜下以目力比较其反射率。即在同一视域中比较两矿物的明亮程度（代表反射率）；若标准矿物与欲测矿物不能出现在同一视域中进行比较时，可反复迅速推移载片来比较它们的亮度。当待测矿物与几种标准矿物比较后，即可定出欲测矿物反射率的范围（高于或低于某些矿物，应属于哪一反射率级）。本书鉴定表是以下列四种标准反射率矿物（表 2－1）将反射率分为五级：

表 2－1　四种二级标准矿物反射率值

所用光波	黄铁矿	方铅矿	黝铜矿	闪锌矿
白　光	54.5%	43.2%	30.7%	17.5%
黄　光	54%	43%	29.8%	17%

R > 黄铁矿 R	Ⅰ级
黄铁矿 R > R > 方铅矿 R	Ⅱ级
方铅矿 R > R > 黝铜矿 R	Ⅲ级
黝铜矿 R > R > 闪锌矿 R	Ⅳ级
R < 闪锌矿 R	Ⅴ级

第二节　影响矿物反射率测定值的因素

影响矿物反射率测定值的因素一般有以下几点：

（1）矿物光片磨光质量的影响：这是最重要而且是常见的影响因素，所以要求光片光滑如镜而无擦痕、无氧化薄膜，否则将不能正确反映反射率的实际大小。

（2）入射光的波长和浸没介质的影响：在不同波长的入射光和不同浸没介质中测定的反射率不同，因此在比较和测定反射率时必须在同等条件下进行。

（3）切面方向的影响：非均质矿物切面方向不同，测出的单向反射率值也有差异；所以测定单向反射率时，应选择双反射最强的颗粒（切面）来进行。

（4）仪器和附件及测量方法不同的影响：如光电值和视测光度仪目测值多数不一致，采用仪器的型号及附件不同测出的数据也有差异；使用不同类型的反射器、不同倍数的物镜其测定结果可能也不一样。

（5）不同标准物质（矿物）的影响：用碳化硅、碳化钨、黑玻璃和用铂、黄铁矿、方铅矿及闪锌矿作标准，所测得的矿物反射率值常会有差异；当然即使采用同一标准物质，由于上述的磨光或平整程度的差别，也会影响测量结果。

表 2－2　常见矿物反射率（空气中）

矿物名称	白光	单色光（波长/nm）			
		470	546	589	650
自然银	95.0	88	93	94	95
银金矿	83.0	76	90	92	93
自然金	74.0	36	77	88	94
自然铜	81	48	56	77	87
自然铂	70.0	66	70	71	72
自然铋	67.9	54～62	60～67	62～70	64～72
方钴矿	55.8	57	56	55	54
毒　砂	51.7～55.7	51～55	52～54	53～54	53
黄铁矿	54.5	46	53	54	54
白铁矿	48.9～55.5	45～52	49～56	50～55	48～53
针镍矿	54～60	43～44	50～54	52～58	54～60
镍黄铁矿	52	40	47	49	52
黄铜矿	44～46.1	34	47	48	49

续表

矿物名称	白光	单色光（波长/nm）			
		470	546	589	650
辉铋矿	42.0～48.7	38～49	37～49	37～48	36～47
方铅矿	43.2	47	44	43	43
方黄铜矿	40.0～42.0	29～34	35～39	38～41	41～43
磁黄铁矿	38.0～45.2	31～36	35～40	37～42	40～43
辉锑矿	30.2～40.0	31～53	31～48	30～45	30～42
软锰矿	30.0～41.5	30.5～39.9	29.0～40.0	28.1～39.3	27.5～38.1
辉铜矿	32.2	37～38	32～33	31～32	29～30
黝铜矿	30.7	31	32	30	30
辉钼矿	15.2～37.0	21～45	20～39	19～39	39～39
赤铁矿	25.0～30.0	28～32	26～30	23～29	23～26
黄（黝）锡矿	28.0	26～27	28	27～28	27
雌黄	20.3～25.0	27～31	23～28	22～27	21～26
雄黄	18.5	22.5～24.8	21.4～21.8	20.3～20.6	19.5～19.8
斑铜矿	21.9	17	21	25	29
磁铁矿	21.1	21	21	21	21
闪锌矿	17.5	18	17	17	17
钛铁矿	17.8	17～20	16～19	17～20	18～20
黑钨矿	16.8～18.5	16～17	15～16	15～16	15～16
针铁矿	16.1～18.5	17～20	16～18	15～17	14～16
铬铁矿	12.1	14	14	13	13
石　墨	6.0～17.0	6～25	7～26	7～27	7～28
锡　石	11.2～12.8	11～13	11～12	11～12	11～12
石　英	4.6				
方解石	4～6				

注：单色光反射率值根据 COM 公布的金属矿物定量资料卡。

（6）内反射的影响；低反射率的矿物由于内反射的影响常使反射率测定值变大，因此应尽量选择裂隙、解理及包裹体不发育的颗粒，即内反射较不显著的颗粒来进行测定。

实验作业

（1）在镜下观察标准矿物黄铁矿、方铅矿、黝铜矿和闪锌矿的反射率，比较它们亮度的差别。

（2）用简易比较法观测下列矿物的反射率，并确定其反射率等级：

辉铜矿、磁铁矿、黑钨矿、磁黄铁矿、黄铜矿、毒砂、自然铜、铬铁矿、赤铁矿、石英。

（3）用光电法测定磁铁矿的反射率。

第三章　矿物的反射色

一、反射色的基本概念

矿物的反射色是指矿物磨光面在白光垂直照射下垂直反射所呈现的颜色，它是矿物的表色。所谓矿物的颜色一般有体色与表色之分。体色是矿物在透射光中所呈现的颜色，为透明、半透明矿物所具有（将在内反射章节中叙述），而表色是矿物表面反射光所显示的颜色。若某些矿物光面对白色入射光中各波长的光近似等量反射时，则这些矿物的反射色呈白色至灰色，仅表现亮度（反射率）或深浅的差别，矿物赋色主要由反射较强的波段所决定，如果某矿物对黄波波段反射较强，其反射色就相应地突出黄色。所以形成反射色的机理，是由于矿物光面对白色垂直入射光选择反射所致。

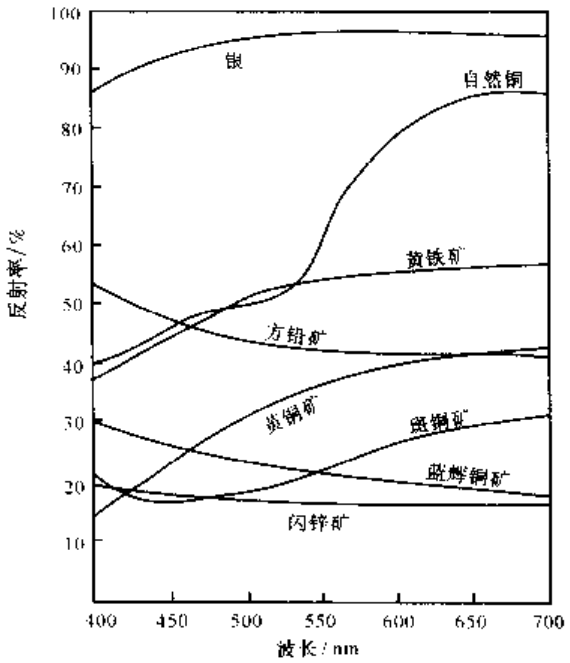


图 3－1　矿物反射率色散曲线

矿物的反射率随入射光的波长不同而变化的现象称之为反射率色散。从矿物反射率色散曲线（图 3－1）图中可看出：黄铁矿的反射率色散曲线表现为在黄、橙波段有所升高，所以显淡黄色，自然铜的曲线在黄、橙、红波段急剧上升，而对红光的反射率尤高，故反射色为铜红色，方铅矿之所以为白色，是因为它对各波长的反射率差别很小，曲线较平缓，只在蓝紫波段略为升高，所以白色中微带蓝色色调。从图中不难看出，其他矿物的反射色均决定于各自的反射率色散曲线，在此不一一赘述。

由上述可知，用连续光谱按一定波长间距，分段测取矿物的反射率而绘制成的反射率色散曲线，具有重要的实际意义。因为它能形象地反映出反射色的特点，即使有几种矿物的反射色很相似，但它们的色调和浓淡仍有所不同，这种微小的差异从反射率色散曲线的细微变化中可以看出，但用文字是难以描述的。反射色为矿物最突出的特征，因而反射率色散曲线在矿物鉴定工作中就有特殊的重要意义。

二、反射色定性描述及色变效应

反射色虽易辨认，但颜色种类繁多。根据实验，正常视觉的人，能将单纯的光谱色分辨成 150 种以上的色调，而对每种色调的浓度可辨别约为 10 个等级，对其亮度的辨别等

级可达百位计。三个要素值相乘积，即人眼应辨别的颜色种类，可达几十万种之多，然而实际测试表明，正常的人眼仅能够辨别一万种左右的颜色。如此众多的颜色用有限的辞汇来描述相当困难。虽然矿物的反射色分为两大类，即无色类（包括微带色调的白－灰色矿物）及有色类❶（具明显的赋色）。但不论是对有色矿物还是微带色调的矿物，即使同一颜色也往往因人而异，作出不同的描述。譬如以磁黄铁矿的反射色为例，曾被描述为淡褐黄色、淡棕黄色、淡玫瑰黄色或古铜黄色等，也有人描述为乳黄色、粉黄色或淡黄色微带玫瑰色等。因此矿物反射色的分类及描述难于统一。

影响反射色观察的因素除光源的色调和矿物的磨光质量外，还有就是周围矿物的影响，即视觉的色变效应。矿物反射色是指矿物单独存在时的颜色。而同一种矿物分别与不同的矿物连生时，往往会使观察者产生视觉色变。例如辉铜矿本为无色矿物（灰白微带蓝色调）类，但与方铅矿连生时，就呈明显的蓝色，若与铜蓝连生时，则显白色。再如磁铁矿反射色应为灰色，但和赤铁矿连生时，呈明显的棕色调，但与钛铁矿连生时，则显浅粉红色。虽然色变效应影响对矿物反射色的准确判断，但对某些矿物的鉴定却有所裨益。常见矿物的反射色和相对色变（效应）见表3－1。

表3－1　常见矿物的反射色和相对色变

矿　物		反　射　色	相对色变（附连生矿物）
自然金		金黄色；亮黄色	黄色（自然银）；更黄（银金矿）；亮黄（黄铜矿）
银金矿		亮淡黄色	淡黄色（自然金）；亮浅黄色（方铅矿）
针镍矿		淡黄色；纯黄色；乳黄色	亮淡黄色（黄铜矿）；稍黄（黄铁矿）
黄铁矿		浅黄色；黄白色	较黄（白铁矿）；淡黄微绿（黄铜矿）
白铁矿		黄白色；淡黄微绿	白色（黄铁矿）；微绿黄（毒砂）
黄铜矿	有	铜黄色	暗黄微绿（自然金）；较亮黄（方黄铜矿）；较黄（黄铁矿）；淡黄色（磁黄铁矿）
镍黄铁矿		淡黄色；白色微黄	浅黄色（磁黄铁矿）；白色微黄（硫钴矿）
自然铜	色	亮粉红色；铜红色	亮粉红色（辉铜矿）；粉红色（自然银）
红砷镍矿		亮粉红色微黄；粉红带褐	浅粉红色（磁黄铁矿）；粉红带黄（红锑镍矿）
磁黄铁矿	类	乳黄色；淡玫瑰棕色	较暗，带棕（镍黄铁矿）；粉红（方黄铜矿）；较暗，无红色调（红砷镍矿）
斑铜矿		粉红带褐；玫瑰棕色	较暗（硫砷铜矿）；色较深（锗石）
铜　蓝		大蓝色；蓝色微紫	微带紫（辉铜矿）
蓝辉铜矿		浅蓝色；灰蓝色	较暗蓝（辉铜矿）；鲜蓝（斑铜矿）
深红银矿		浅蓝灰白色；蓝灰色	稍亮（淡红银矿）；蓝灰色（方铅矿）
淡红银矿		蓝灰色	稍暗（深红银矿）；蓝灰色（方铅矿）
自然银		亮白色	亮乳白色（自然锑、自然铋）；淡黄（锑银矿）
方铅矿		白色	淡粉色（辉铋矿、硫锑铅矿）；暗蓝灰色（自然金）
辉锑矿		白色；浅灰白色	微乳白（方铅矿）；暗乳白（辉铋矿）
毒　砂	无	白色；微粉	白色（黄铁矿）；微黄（方铅矿）；灰白微紫（自然锑）
黝铜矿		灰白色微淡褐	褐灰微绿（方铅矿）；蓝灰色（黄铜矿）
辉铜矿	色	灰白色微蓝	浅蓝（方铅矿）；蓝灰色（黄铜矿）
辉钼矿		白色	相似微黄（方铅矿）；较亮无褐色（石墨）
赤铁矿	类	灰白色微蓝	蓝灰色（黄铁矿）；白色微蓝（磁铁矿、钛铁矿）；微褐（辉铜矿）
磁铁矿		浅灰色微棕	棕灰色（赤铁矿）；浅粉红色（钛铁矿）；棕色（磁赤铁矿）
闪锌矿		灰色	深灰色（方铅矿）；稍暗灰（磁铁矿）

❶ 可进一步分为三个亚类，即黄色亚类、玫瑰色亚类及蓝色亚类。

三、反射色的颜色指数

金属矿物的反射色是矿物的主要属性，是在矿相显微镜下鉴定不透明矿物的重要依据。然而至今多数人还对金属矿物的反射色用文字来作定性的描述。定性的文字描述由于缺乏客观标准，所以人们难以从不同人对反射色的描述中获得统一的概念。近年来，矿相工作者已逐渐利用色度学的原理和方法，来定量测定矿物的反射色，即用几个简单的数字——颜色指数，客观定量地表达各种矿物反射色的特征。

1. 色度学的基本概念

色度学中，颜色可用色调（颜色主波长）、饱和度（纯度或浓度）及亮度（反射率）三要素来表示。

视觉的色彩效应是由于可见光具有不同波长而产生。可见光中的各种色光以大致相等的强度混合时即成白光。色光可归纳为三种主要色光，即蓝光、绿光及红光。而以不同方式和强度混合这三种色光，就能获得几乎所有的色光。所以光学上将蓝、绿、红称为三原色。以三原色中任意两原色可混合成青、黄和紫等补色。它们之间的关系见表 3－2 和图 3－2。

表 3－2　原色和补色的加减关系

加光法	红＋绿＝黄 绿＋蓝＝青 蓝＋红＝紫 红＋绿＋蓝＝白	减光法	白－红＝绿＋蓝＝青 白－绿＝红＋蓝＝紫 白－蓝＝红＋绿＝黄 白－（红＋蓝＋绿）＝黑

注：红绿蓝为色光中的三原色。七种基本色的其他四色为三原色以不同方式混合而成。

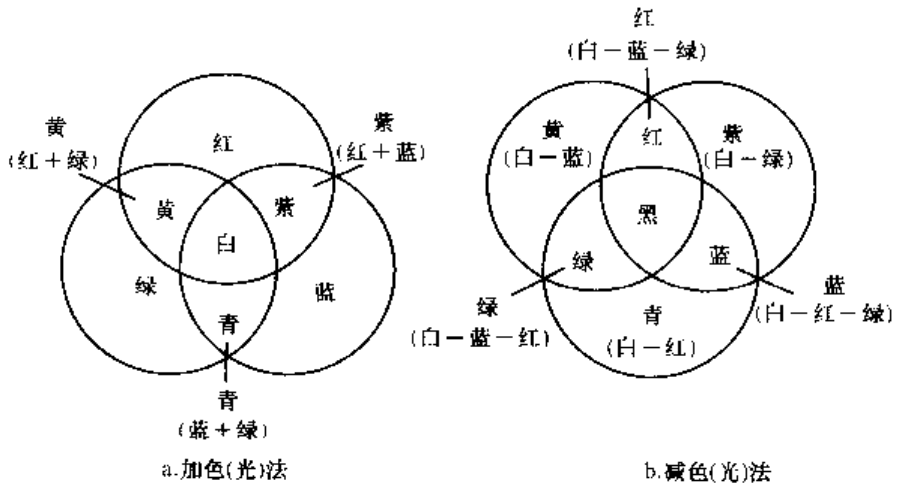


图 3－2　三原色关系图

色调或色彩系指颜色的种类，可用反射光的主波长（λ_d）来表示，它与反射率色散曲线主峰的波长值相当。饱和度（P_e）也可称纯度或浓度，是指同一色调的纯粹浓淡程度，可用纯光谱色（主波长色调）和白光的比例来表示，纯光谱色最大作为100/100＝1，随颜色变淡其 P_e 值逐渐变小，直至纯白色（光）时饱和度为零，不透明矿物反射色饱和

度都很小，因此在矿相显微镜下呈现的颜色均较浅淡。亮度即颜色的明亮程度可用矿物的反射率（绿光）$R_{绿}$表示。

色调（λ_d）与饱和度（P_c）合称色度或色品。

2. 三刺激值与色度图

三刺激值是表示正常人目中三种锥体对红、绿和蓝三原色的刺激程度（值）。据此国际照度委员会利用三色色度计制定了标准的三色曲线，也称三刺激值曲线（图 3－3）❶，图中以波长为横坐标，亮度的相对量为纵坐标。$\bar{X}$、$\bar{Y}$、$\bar{Z}$ 分别表示不同波长刺激值的相对数量。例如波长为 500 nm 色光的三原色刺激值为：

$$X = 0.0049$$

$$Y = 0.3230$$

$$Z = 0.2720$$

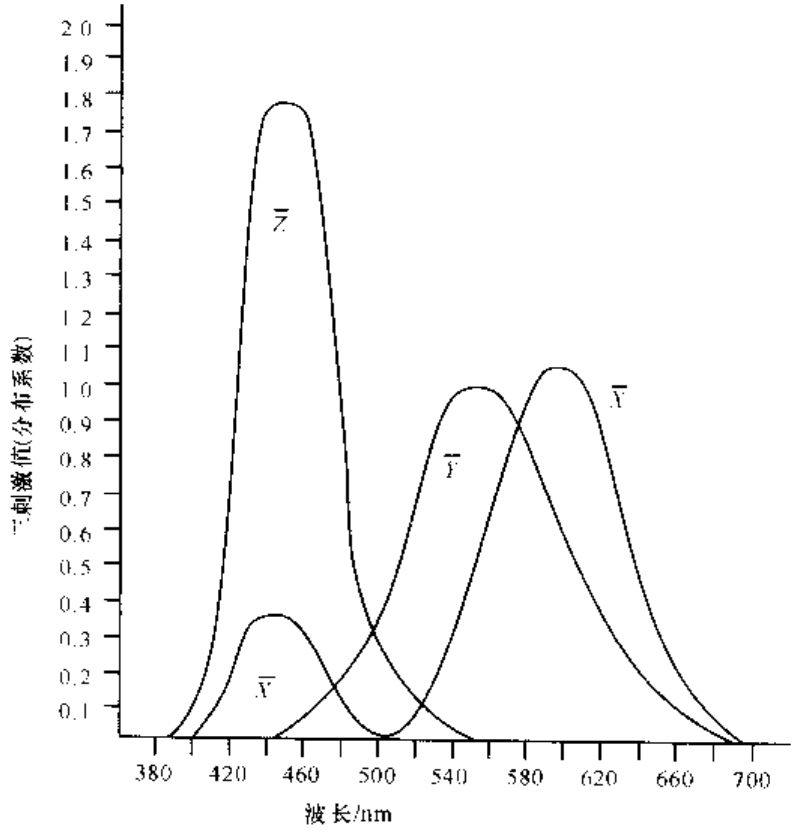


图 3－3　等能光谱的三色曲线

由于表示上述三个数值，则须采用三度空间的立体图。为了解决作图的困难，可分别采用其相对百分数计算。即令：

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \qquad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \qquad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

由上式可知 $x + y + z = 1$，如 x、y 为已知，z 当为一定值。仍用上例说明：

$$\because X + Y + Z = 0.5999$$

❶ 三色曲线下的面积相等，表明在等能光源（纯白光）中三原色的能量是相等的。

$$\therefore\ x = 0.0082$$

$$y = 0.5384$$

$$z = 0.4534$$

上列 x、y、z 三数值通称相对三色系数或色度坐标。因 z 为一定值，则可用 x 为横坐标，y 为纵坐标作出平面色度图（色品图），见图 3－4。

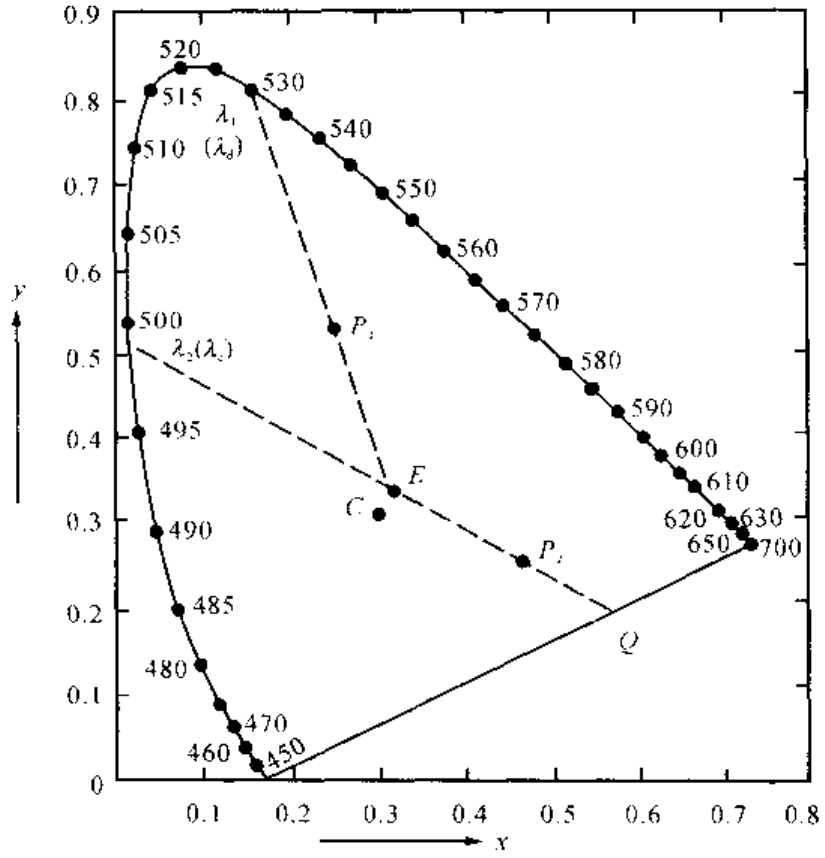


图 3－4　色度图

将所有的光谱色（400 nm ~ 700 nm）均依上述方式分别找出相应的相对三色系数，并将其各自的 x、y 值投入图中，就可绘出各光谱色在色度图中的马蹄形轨迹。

从图中可看出，所有光谱色都位于上述光谱色轨迹（光谱色曲线）之上，由于光谱色的饱和度最大，所以任何颜色都必位于马蹄形范围以内。在图 E（S_E）[1] 点表示等能白色光，即它的三色系数 x、y、z 均为 0.3333。

既然在轨迹上的光谱色代表最大的饱和度（为 1），那么任何颜色的色度坐标愈近轨迹，其色愈浓、愈纯或愈近于饱和；而愈近 E 点，则颜色愈淡，即饱和度或纯度愈低，直至色光完全变成白光（饱和度等于零）为止。

设某一颜色的 x、y 落于 P_1 点，可自 E 点连直线 EP_1 直至交光谱色轨迹 530 nm 光 λ_1

[1] E（S_E）代表等能光（源），为理论上真正的白光（无色光）。若以直角坐标图表示，设横坐标为 400 ~ 700 nm 可见光波长范围，纵坐标为不同波长的相对能量，则等能光的能量分布曲线当为一水平线。色度图中 C（S_C）代表平均日昼光，近于白光，色温为 6700 K。

处，530 nm 即这一颜色的主波长（λ_1 处）。其饱和度 P_e 则相当于 $EP_1/E\lambda_1$，即二者长度之比。

另如某一紫光落于 P_2 点，而与 E 点的连线交于红、紫端的直线连线之上 Q 点处。但在此点无法得出主波长，只能将 EP_2 线反向延长交于轨迹曲线段 λ_2 点，此点为 P_2 点的补色主波长 λ_d，以负数（-499 nm）表示。而 P_2 点色光的饱和度可表示如下：

$$P_{e2} = \frac{EP_2}{EQ}$$

综上所述，基于颜色的三基本要素，反射色的颜色指数是用三色系数中的 x、y，亮度（代表视觉反射率）R_{vis}（$=Y$），主波长 λ_d 及饱和度 P_e 来表示。常见矿物的反射色颜色指数见表 3-3。

表 3-3　常见矿物的反射色颜色指数

矿物	颜色指数（S_E）					矿物		颜色指数（S_E）				
	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e			R_{vis}	x	y	λ_d	P_e
自然银	95.0	0.337	0.334	575	0.023	黄铜矿		46.2	0.369	0.389	575	0.248
自然金	75.3	0.400	0.398	578	0.399	磁黄铁矿	R'_g	40.3	0.351	0.350	579	0.102
自然铜	64.9	0.392	0.358	588	0.251		R'_p	34.2	0.335	0.349	582	0.114
斑铜矿	21.9	0.371	0.349	589	0.161	毒砂	R'_g	52.9	0.340	0.341	577	0.044
黄铁矿	53.9	0.352	0.359	574	0.132	（横切面）	R'_p	51.8	0.332	0.333	491	0.005
镍黄铁矿	46.8	0.361	0.362	578	0.170	白铁矿	R'_g	56.3	0.341	0.352	568	0.078
黄锡矿	27.5	0.343	0.348	574	0.073		R'_p	49.3	0.343	0.346	574	0.066
方铅矿	43.2	0.325	0.324	473	0.037	辉锑矿	R'_g	46.6	0.317	0.324	484	0.062
黝铜矿	31.4	0.332	0.336	516	0.005		R'_p	30.6	0.330	0.333	491	0.012
砷黝铜矿	29.0	0.329	0.333	490	0.014	辉钼矿	R'_g	37.2	0.319	0.316	473	0.067
银黝铜矿	30.9	0.332	0.334	499	0.006		R'_p	18.9	0.325	0.324	476	0.038
辉铜矿	32.8	0.317	0.322	482	0.064	铜　蓝	R'_g	23.0	0.301	0.306	480	0.134
磁铁矿	20.4	0.333	0.334	557	0.001		R'_p	5.9	0.227	0.247	480	0.436
闪锌矿	16.7	0.324	0.325	478	0.038	赤铁矿	R'_g	29.7	0.320	0.328	486	0.050
							R'_p	26.6	0.320	0.325	484	0.052

从表中可看出，在镜下难以区别的矿物，如几种黝铜矿的颜色指数是有差别的，特别是主波长 λ_d 较为明显，同时也不难看出，几种黄色矿物和玫瑰色矿物中，其颜色指数皆有较大的差异。从而有助于鉴定矿物。

关于矿物反射色的分类（级），前节仅将其分为有色及无色两大类，而对微带色调的矿物，则归入无色一类中。

若按矿物反射色的深浅与饱和度 P_e 的关系，可依如下标准分类定级：

（1）$P_e < 0.00\ n$：不论主波长为哪一种波长，反射色一律为白色（无色），其极微弱的色调不足以被人目感觉出来。

（2）$0.01 < P_e < 0.05$：一般为微带色调的矿物。

（3）$0.05 < P_e < 0.10$：一般为淡色或浅色矿物。

（4）$P_e > 0.10$：一般为明显的有色矿物。

3. 反射色颜色指数的测量方法

下面以由陈正等提出的用等能光源（S_E）、等间距波长坐标法的测量反射色颜色指数方法为例，将实测步骤介绍如下：

（1）精确地测出矿物的反射率色散曲线：即在以波长为横坐标、反射率为纵坐标的直角坐标网格图中，将各点所测的值投入并连成反射率色散曲线；或用 MPV－3 显微光度计打印机上直接印绘的反射率色散曲线。

（2）在反射率色散曲线上，从400 nm～700 nm 波长之间，按间隔 10 nm 量出 31 个波段的反射率值 R_λ，再分别乘以相对应的三刺激函数 X_λ、Y_λ、Z_λ，而得各波长的 $X_\lambda \cdot R_\lambda$、$Y_\lambda \cdot R_\lambda$、$Z_\lambda \cdot R_\lambda$（表3－4）。

表 3－4　S_E 等能光源等值纵坐标法计算记录表

波长/nm	$P_{E\lambda} \cdot X_\lambda \cdot R_\lambda$	$P_{E\lambda} \cdot Y_\lambda \cdot R_\lambda$	$P_{E\lambda} \cdot Z_\lambda \cdot R_\lambda$
400	$0.0143 \cdot R_{400}$	$0.0004 \cdot R_{400}$	$0.0679 \cdot R_{400}$
410	$0.0435 \cdot R_{410}$	$0.0012 \cdot R_{410}$	$0.2074 \cdot R_{410}$
420	$0.1344 \cdot R_{420}$	$0.0040 \cdot R_{420}$	$0.6456 \cdot R_{420}$
430	$0.2839 \cdot R_{430}$	$0.0116 \cdot R_{430}$	$1.3856 \cdot R_{430}$
440	$0.3483 \cdot R_{440}$	$0.0230 \cdot R_{440}$	$1.7471 \cdot R_{440}$
450	$0.3362 \cdot R_{450}$	$0.0380 \cdot R_{450}$	$1.7721 \cdot R_{450}$
460	$0.2908 \cdot R_{460}$	$0.0600 \cdot R_{460}$	$1.6692 \cdot R_{460}$
470	$0.1954 \cdot R_{470}$	$0.0910 \cdot R_{470}$	$1.2876 \cdot R_{470}$
480	$0.0956 \cdot R_{480}$	$0.1390 \cdot R_{480}$	$0.8130 \cdot R_{480}$
490	$0.0320 \cdot R_{490}$	$0.2080 \cdot R_{490}$	$0.4652 \cdot R_{490}$
500	$0.0049 \cdot R_{500}$	$0.3230 \cdot R_{500}$	$0.2720 \cdot R_{500}$
510	$0.0093 \cdot R_{510}$	$0.5030 \cdot R_{510}$	$0.1582 \cdot R_{510}$
520	$0.0633 \cdot R_{520}$	$0.7100 \cdot R_{520}$	$0.0782 \cdot R_{520}$
530	$0.1655 \cdot R_{530}$	$0.8620 \cdot R_{530}$	$0.0422 \cdot R_{530}$
540	$0.2904 \cdot R_{540}$	$0.9540 \cdot R_{540}$	$0.0203 \cdot R_{540}$
550	$0.4334 \cdot R_{550}$	$0.9950 \cdot R_{550}$	$0.0087 \cdot R_{550}$
560	$0.5945 \cdot R_{560}$	$0.9950 \cdot R_{560}$	$0.0039 \cdot R_{560}$
570	$0.7621 \cdot R_{570}$	$0.9520 \cdot R_{570}$	$0.021 \cdot R_{570}$
580	$0.9163 \cdot R_{580}$	$0.8700 \cdot R_{580}$	$0.0017 \cdot R_{580}$
590	$1.0263 \cdot R_{590}$	$0.7570 \cdot R_{590}$	$0.0011 \cdot R_{590}$
600	$1.0622 \cdot R_{600}$	$0.6310 \cdot R_{600}$	$0.0008 \cdot R_{600}$
610	$1.0026 \cdot R_{610}$	$0.5030 \cdot R_{610}$	$0.0003 \cdot R_{610}$
620	$0.8544 \cdot R_{620}$	$0.3810 \cdot R_{620}$	$0.0002 \cdot R_{620}$
630	$0.6424 \cdot R_{630}$	$0.2650 \cdot R_{630}$	0.0000
640	$0.4479 \cdot R_{640}$	$0.1750 \cdot R_{640}$	0.0000

续表

波长/nm	$P_{EA}\cdot X_\lambda\cdot R_\lambda$	$P_{EA}\cdot Y_\lambda\cdot R_\lambda$	$P_{EA}\cdot Z_\lambda\cdot R_\lambda$
650	$0.2835\cdot R_{650}$	$0.1070\cdot R_{650}$	0.0000
660	$0.1649\cdot R_{660}$	$0.0610\cdot R_{660}$	0.0000
670	$0.0874\cdot R_{670}$	$0.0320\cdot R_{670}$	0.0000
680	$0.0468\cdot R_{680}$	$0.0170\cdot R_{680}$	0.0000
690	$0.0227\cdot R_{690}$	$0.0082\cdot R_{690}$	0.0000
700	$0.0114\cdot R_{700}$	$0.0041\cdot R_{700}$	0.0000
三者之和	$\Sigma(P_{EA}\cdot X_\lambda\cdot R_\lambda)=$	$\Sigma(P_{EA}\cdot Y_\lambda\cdot R_\lambda)=$	$\Sigma(P_{EA}\cdot Z_\lambda\cdot R_\lambda)=$
总乘因素	1/10.68	1/10.68	1/10.68
三刺激值	$X=$	$Y=$	$Z=$

颜色指数　视觉反射率：$(R_{vis})=Y=$

色度坐标值：$x=X/(X+Y+Z)=$

$y=Y/(X+Y+Z)=$

颜色主波长：$\lambda_d=$

颜色饱和度：$P_e=$

注：反射率按整数计。

（3）将三色分别相加，而得出$\sum X_\lambda\cdot R_\lambda$、$\sum Y_\lambda\cdot R_\lambda$、$\sum Z_\lambda\cdot R_\lambda$，再分别乘以因数1/10.68，即求出该矿物的反射色的X、Y、Z。Y值也代表视觉反射率R_{vis}。

（4）将$X+Y+Z$作分母，分别除X、Y，就求出色度坐标x、y。

（5）将x、y投入色度图，就可定出P点位置。

（6）P点已定，即能从图中求出λ_d和P_e。

按上述步骤，即可得出欲测矿物的颜色指数R_{vis}、x、y、λ_d和P_e。

此外，必须提及的是国际上发表的颜色指数，通常用以CIE（国际照度学会）公布的两种标准光源A和C所测算的数据。其测量方法相似（参阅参考文献[7]），按照C光源用等值纵坐标法计算见表3-5。

表3-5　按照C光源（P_{CA}）用等值纵坐标法计算记录表

波长/nm	$P_{CA}\cdot X\cdot R_\lambda$	$P_{CA}\cdot Y\cdot R_\lambda$	$P_{CA}\cdot Z\cdot R_\lambda$
400	$0.0841\cdot R_{400}$	$0.0021\cdot R_{400}$	$0.3992\cdot R_{400}$
410	$0.3180\cdot R_{410}$	$0.0087\cdot R_{410}$	$1.5159\cdot R_{410}$
420	$1.2623\cdot R_{420}$	$0.0378\cdot R_{420}$	$6.0646\cdot R_{420}$
430	$2.9913\cdot R_{430}$	$0.1225\cdot R_{430}$	$14.6019\cdot R_{430}$
440	$3.9741\cdot R_{440}$	$0.2613\cdot R_{440}$	$19.9357\cdot R_{440}$
450	$3.9191\cdot R_{450}$	$0.4432\cdot R_{450}$	$20.6551\cdot R_{450}$
460	$3.3668\cdot R_{460}$	$0.6920\cdot R_{460}$	$19.3235\cdot R_{460}$
470	$2.2878\cdot R_{470}$	$1.0605\cdot R_{470}$	$15.0550\cdot R_{470}$

续表

波长/nm	$P_{CA}\cdot\bar{x}\cdot R_\lambda$	$P_{CA}\cdot\bar{y}\cdot R_\lambda$	$P_{CA}\cdot\bar{z}\cdot R_\lambda$
480	$1.1038\cdot R_{480}$	$1.6129\cdot R_{480}$	$9.4420\cdot R_{480}$
490	$0.3639\cdot R_{490}$	$2.3591\cdot R_{490}$	$5.2789\cdot R_{490}$
500	$0.0511\cdot R_{500}$	$3.4077\cdot R_{500}$	$2.8717\cdot R_{500}$
510	$0.0898\cdot R_{510}$	$4.8412\cdot R_{510}$	$1.5181\cdot R_{510}$
520	$0.5752\cdot R_{520}$	$6.4491\cdot R_{520}$	$0.7140\cdot R_{520}$
530	$1.5206\cdot R_{530}$	$7.9357\cdot R_{530}$	$0.3871\cdot R_{530}$
540	$2.7858\cdot R_{540}$	$9.1470\cdot R_{540}$	$0.1956\cdot R_{540}$
550	$4.2833\cdot R_{550}$	$9.8343\cdot R_{550}$	$0.0860\cdot R_{550}$
560	$5.8782\cdot R_{560}$	$9.8387\cdot R_{560}$	$0.0381\cdot R_{560}$
570	$7.3230\cdot R_{570}$	$9.1476\cdot R_{570}$	$0.0202\cdot R_{570}$
580	$8.4141\cdot R_{580}$	$7.9897\cdot R_{580}$	$0.0147\cdot R_{580}$
590	$8.9878\cdot R_{590}$	$6.6283\cdot R_{590}$	$0.0101\cdot R_{590}$
600	$8.9536\cdot R_{600}$	$5.3157\cdot R_{600}$	$0.0067\cdot R_{600}$
610	$8.3294\cdot R_{610}$	$4.1788\cdot R_{610}$	$0.0027\cdot R_{610}$
620	$7.0604\cdot R_{620}$	$3.1485\cdot R_{620}$	$0.0012\cdot R_{620}$
630	$5.3212\cdot R_{630}$	$2.1948\cdot R_{630}$	0.0000
640	$3.6882\cdot R_{640}$	$1.4411\cdot R_{640}$	0.0000
650	$2.3531\cdot R_{650}$	$0.8876\cdot R_{650}$	0.0000
660	$1.3589\cdot R_{660}$	$0.5028\cdot R_{660}$	0.0000
670	$0.7113\cdot R_{670}$	$0.2606\cdot R_{670}$	0.0000
680	$0.3657\cdot R_{680}$	$0.1329\cdot R_{680}$	0.0000
690	$0.1721\cdot R_{690}$	$0.0621\cdot R_{690}$	0.0000
700	$0.0806\cdot R_{700}$	$0.0290\cdot R_{700}$	0.0000
三刺激值（总计）	$X=$	$Y=$	$Z=$

颜色指数　视觉反射率：$R_{vis}=Y=$

色度坐标值：$x=X/(X+Y+Z)=$

$y=Y/(X+Y+Z)=$

颜色主波长：$\lambda_d=$

颜色饱和度：$P_e=$

注：反射率按小数计。

应指出的是用上述作图法得出的 λ_d 和 P_e，对于大多数矿物，因其反射色的浓度很低，故而色度点 P 与白点 E（或 C）的距离很近，所以在定点和连线时易产生较大的误差。此即用作图法求 λ_d 和 P_e 的缺点所在。但用“斜率”检索法，可避免作图法的这一缺陷，而以计算、查表的方法简便准确地求解出 λ_d。

下面对用“斜率”求（查）λ_d 和 P_eX 的方法（斜率检索法）略加介绍：

以得出矿物的色度坐标（x、y）与白点 E 的色度坐标（$x_0=0.3333$，$y_0=0.3333$）两

点连线即“斜率”。矿物色度坐标与白点连线的斜率（S_r）计算公式为：

$$S_r = \frac{x - x_0}{y - y_0} = \frac{x - 0.3333}{y - 0.3333}$$

算出“斜率”后，可根据斜率查“检索表”（张志雄，1983），并用内插法求出精度达 0.1 nm 的主波长值 λ_d。

关于纯度（P_e）也可用相应的计算法获得：

$$P_e = \frac{x - x_0}{x_d - x_0} \text{ 或 } P_e = \frac{y - y_0}{y_d - y_0}$$

$$P_e = \frac{x - 0.3333}{x_d - 0.3333} \text{ 或 } P_e = \frac{y - 0.3333}{y_d - 0.3333}$$

式中：x、y 为欲测矿物的色度坐标值；x_d、y_d 为主波长 λ_d 的色度坐标值（可从色度图中量出）。

另一表解矿物颜色指数的新方法（刘建明，1993）是：先求出斜率 K［$K = (y_0 - y) / (x_0 - x)$］，再根据 K 值在检索表中查出 λ_d 和另一个参数 $|x_0 - x_d|$，再以公式 $P_e = |x_0 - x| / |x_0 - x_d|$ 算出 P_e。不难看出，这种表解法是完全摆脱了作图法的弊端。同时这一新方法中，不仅备有标准光源 A 和 C 以及等能光源求解 λ_d 和 P_e 的检索表，而且编制了一套自动求解的计算机程序。

实验作业

（1）观察描述下列矿物的反射色，并对相似反射色的矿物进行比较。

黄色——黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿

玫瑰色——斑铜矿、红砷镍矿、自然铜

蓝色——铜蓝、蓝辉铜矿、深红银矿

无色（白——灰色）毒砂、方铅矿、闪锌矿、石英。

（2）观察磁铁矿与赤铁矿连生时的视觉色变效应。

（3）参观 MPV－3 型显微光度计并测定矿物反射率色散曲线，根据测出的矿物反射率色散曲线，求出该矿物反射色的颜色指数。

第四章　矿物的双反射和反射多色性

在入射光为平面偏光的条件下（单偏光下），当旋转载物台一周时，非均质性矿物都可能有明亮程度或颜色的变化。这种明亮程度（反射率）随矿物方向不同而变化的性质称双反射，而与之相应的反射色变化称为反射多色性。由于二者均是在单偏光下所显示的光学性质，所以观察时要推出上偏光镜（分析镜），只保留前偏光镜（起偏镜）于光路中。

一、双反射的基本概念

非均质矿物的反射率是随矿物结晶方向的改变而变化。中级晶矿物有两个主反射率 R_o 和 R_e，低级晶矿物则有三个主反射率 R_g、R_m 和 R_p。

非均质矿物最大反射率与最小反射率之差称为矿物的绝对双反射率，也称双反射的绝对值，通常用 ΔR 表示。

中级晶矿物：$\Delta R = R_o - R_e$（或 $R_e - R_o$）

例：辉铜矿：$R_o = 37\%$，平行延长；$R_e = 15\%$，垂直延长；故 $\Delta R = 37\% - 15\% = 22\%$。

低级晶矿物：$\Delta R = R_g - R_p$

例：辉锑矿 $R_g = 45\%$，平行 c 轴；$R_p = 31\%$，平行 b 轴；故 $\Delta R = 45\% - 31\% = 14\%$。

最大双反射（率）只有在平行包含 X、Z 轴的主切面内才能测得，然而矿物光片大多是任意切面的，所以任意切面的双反射率 $\Delta R_s = R_2 - R_1$（$R_2 > R_1$），ΔR_s 可称之为切面绝对双反射（率）。

非均质矿物双反射现象是否明显，主要是凭视觉来判断。虽然双反射现象与其绝对值 ΔR 有关，但更重要的是取决于另一关系数值，即相对双反射率 $\Delta R'$ 的大小。$\Delta R'$ 是以 ΔR 除以大小二反射率之和的一半（即平均反射率）的百分数计算而得出。其表达式为：

$$\Delta R' = \frac{\Delta R}{1/2(R_o + R_e)} \times 100\%\text{（一轴晶主切面）}$$

$$\Delta R' = \frac{\Delta R}{1/2(R_g + R_p)} \times 100\%\text{（低级晶主切面）}$$

$$\Delta R'_s = \frac{\Delta R_s}{1/2(R_1 + R_2)} \times 100\%\text{（非均质矿物任意切面）}$$

由上式可看出，平均反射率越小的矿物，其 $\Delta R'$ 或 $\Delta R_s'$ 值越大。虽然 $\Delta R'$ 与 ΔR 有某些关系，但 ΔR 对双反射现象明显程度的影响远不及 $\Delta R'$ 重要。例如：方解石的 $R_o = 5.9\%$，$R_e = 3.9\%$，则

$$\Delta R = 5.9\% - 3.9\% = 2\%$$

$$\Delta R' = \frac{2}{1/2(5.9 + 3.9)} \times 100\% = 40.8\%$$

红砷镍矿的 $R_o = 56\%$，$R_e = 50\%$

$$\Delta R = 56\% - 50\% = 6\%$$

$$\Delta R' = \frac{6}{1/2(56 + 50)} \times 100\% = 11.3\%$$

由上述两种矿物的 $\Delta R'$ 值可知，方解石的 ΔR 虽小，但 $\Delta R'$ 值大，所以双反射现象比红砷镍矿明显得多。

二、反射多色性的基本概念

在反射色一章中已叙述，即不透明矿物对不同光波有不同的吸收性，就是选择吸收性，由于选择吸收而造成选择反射，矿物的反射色就因此形成。非均质不透明矿物各主反射率对不同光波也有不同的选择性反射，因此各主反射率方向也可以具不同的反射色。矿物的这种反射色因方向不同而改变的性质就是矿物的反射多色性。例如铜蓝当其延长方向与偏光振动面平行时为深蓝色，垂直时为浅蓝色。总之，具有反射多色性的矿物，当旋转载物台时，可见两主方向的反射色交替变化。

从双反射与反射多色性形成的原理上来讲，二者具有相同的机理，即它们同为各组光波对矿物不同方向所表现的不同反射。双反射表示矿物主反射率间具有相似的色散曲线，所不同的是反射率有差别，反射多色性则表示矿物主反射率间不仅反射率有差别，同时色散曲线形态也不一样。图 4－1 为铁铜蓝的二主反射率（R_o 和 R_e）的反射率色散曲线。从二曲线形态上的特点，可看出二主反射率具有明显不同的反射色。

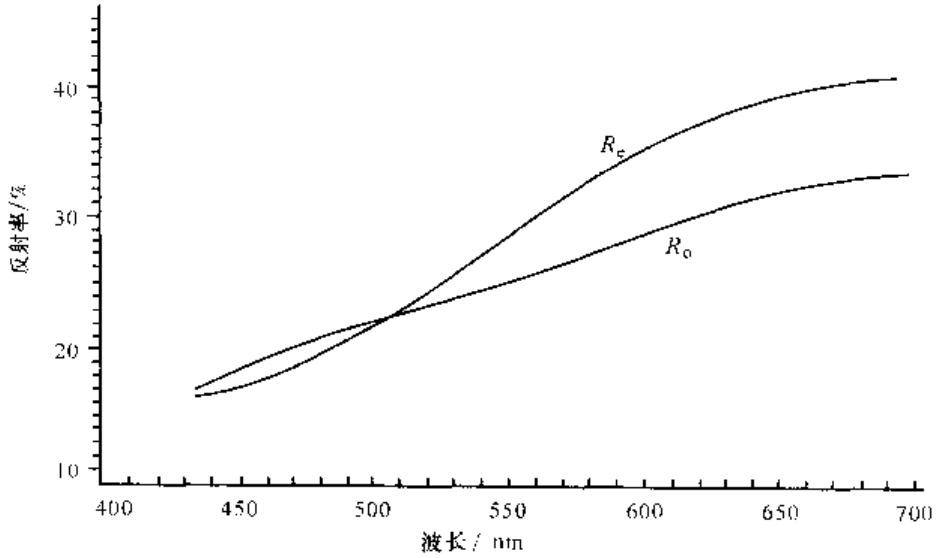


图 4－1　铁铜蓝的色散曲线

从图 4－1 还可看出，双反射也随着波长的改变而改变。双反射的数值以一定波长的 R_o 与 R_e 的差值表示，如铁铜蓝的双反射在 640 nm 波长光波下 $\Delta R = 37.0 - 29.7 = 7.3$，在 560 nm 波长光波下为 $29.4 - 25.2 = 4.2$，但在 515 nm 波长光波处两者同为 22.55。即是矿物在这个特定光波中由非均质性变成了均质性。在 $\lambda < 515$ nm 时为负光符（$R_o > R_e$），而 $\lambda > 515$ nm 时为正光符（$R_e > R_o$）。

反射多色性的明显程度也可用相对双色散率 $\Delta F'$ 表示；但由于很少在实际中应用，故不赘述。

三、双反射和反射多色性的观察方法与视测分级

1. 双反射和反射多色性的观察方法

双反射与反射多色性是在单偏光下观察的一种现象，而只有一些强非均质性矿物才能被看到，所以仅对那些具明显双反射或反射多色性的矿物才有意义。

因为观察是在单偏光下进行，所以观察时先推入起偏镜（前偏光镜）去掉分析镜（上偏光镜）。转动物台，视矿物有无亮度和颜色的变化。双反射微弱的矿物在单个晶粒上看不出双反射现象，但在多晶粒集合体组成的光片中易于见到。这是由于连生在一起的许多晶粒方位不同，对比下，因不同晶粒间反射率的差别，而易于显示之故。对双反射和反射多色性微弱的矿物，还可在浸油中观察，因为矿物在浸油介质中其反射率有不同程度的降低，所以使相对双反射数值增大，因此在浸油中比空气中双反射现象显著。

由于反射多色性和双反射现象产生的机制相同，所以这两种观象可同时存在。观察反射多色性和双反射现象的方法与操作程序是一致的，但对反射色鲜明的矿物，其反射多色性现象较易观察，而双反射现象则常被掩盖；对无色矿物来讲，易被看到的是双反射现象。

2. 双反射和反射多色性的视测分级

在不透明矿物的描述和鉴定工作中，双反射与反射多色性也是矿物的重要光学性质之一，因此有必要进行分级。分级的同时，还应表示出最大和最小反射率两个方向上的反射色及与矿物结晶要素的关系。

例如　石墨　$R_o=17$　灰色微带棕色　平行延长

$R_e=6$　深灰色微带蓝色　垂直延长

视测分级若按传统的划分法，一般分为特强、显著、清楚、微弱及无五个级别，也有将前一、二两级合并为“强”、清楚与微弱合并为“弱”，即改为“强”、“弱”和“无”三个等级。不论分为五级还是三级，也都是依视觉上的明显程度作出的定性分类。由于视觉的主观因素及显微镜光学性能的差异，使其划分“标准”因人及仪器条件不同而难于掌握。所以根据目前实验室的一般设备情况，将双反射或反射多色性分为如下两级：

显（清晰）：凡在空气为介质条件下，对单颗粒矿物或集合体的双反射或反射多色性现象，用一般矿相显微镜均能显现者，皆属此级（表4-1）。

表4-1　显双反射和反射多色性的常见矿物

矿　物	双反射和反射多色性	矿　物	双反射和反射多色性
＊＊＊＊铜蓝	R_o深蓝色，R_e蓝白色	＊＊＊＊黑铜矿	R_o淡棕灰色，R_e灰色微蓝
＊＊＊＊石墨	R_o灰色微棕，R_e深灰微蓝	＊＊＊红砷镍矿	R_o淡玫瑰黄色，R_e淡玫瑰棕色
＊＊＊＊辉钼矿	R_o白色，R_e灰白色微蓝	＊＊＊红锑镍矿	R_o亮橙色、R_e淡紫红色
＊＊＊辉锑矿	//a灰白色，//b浅灰色，//c白色	＊＊辉铋矿	//a白色，//b灰白色，//c黄白色
＊＊白铁矿	黄白色，淡绿黄色	＊淡红银矿	R_o灰色，R_e淡蓝
＊＊硼镁铁矿	//延长淡棕，⊥延长淡灰，蓝至淡褐	＊毒砂	白色，白色微橙黄
＊＊＊软锰矿	//c白色，⊥c灰色微蓝	＊＊＊雌黄	//a白色，//b淡灰色，//c灰白色
＊＊磁黄铁矿	R_o淡棕红色，R_e乳黄色	＊＊＊菱铁矿	R_o淡灰（亮），R_e深灰（暗）
＊＊＊黑柱石	//a淡灰微玫瑰红色 //b淡灰微玫瑰色 //c灰色微蓝	＊＊＊方解石	R_o灰（较亮），R_e深灰（暗）
		＊＊戴氏赤铜矿	R_o黄粉色，R_e玫瑰褐色

注：对显双反射和反射多色性矿物按四级视测分类时，标以＊＊＊＊者表示特强，＊＊＊为显著，＊＊为清楚，＊为微弱。

不显：为上述条件下不显者均属本级。既包括均质矿物也包括那些看不出有双反射或反射多色性的非均质矿物有：黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、黝铜矿、黝锡矿、黑钨矿、辉银矿、石英、磁铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、雄黄、铬铁矿、闪锌矿、方铅矿。

鉴于矿相显微镜等教学实验设备不断更新，为适应高质量（性能）矿相显微镜对矿物双反射和反射多色性的视测分级，可将显双反射和反射多色性的矿物，进一步分为如下四级（空气中）：

特强　在单晶中，亮度和颜色变化极其明显，往往一瞥即见，如石墨、辉钼矿和铜蓝等。

显著　在单晶中亮度或颜色变化较显著，如辉锑矿、红锑镍矿等。

清楚　在单晶中亮度和颜色变化较清楚可见，如方黄铜矿、磁黄铁矿和白铁矿等。

微弱　在单晶中其亮度和颜色的变化不明显，仅在晶粒集合体中可以看出，如毒砂和赤铁矿等

四、影响双反射和反射多色性观察的因素

影响双反射和反射多色性观察的因素一般有以下几点：

（1）相对双反射率的影响　相对双反射率 $\Delta R' > 10\%$ 时才易凭视力观察到，$\Delta R' < 10\%$ 的非均质矿物虽然理论上有双反射，但难于为视力所及，或不显双反射，或极微弱。

（2）切片方位的影响　具有双反射和反射多色性的矿物，当切片方位为垂直或接近垂直光轴或圆偏光轴时，可显示均质效应，因此不显双反射和反射多色性。

（3）观察介质的影响　矿物在不同介质中观察，其双反射和反射多色性现象有所不同。在空气中观察双反射和反射多色性不显的矿物，在浸油中可表现清楚。例如锡石在两种不同介质条件下双反射的情况见表 4－2。

表 4－2　锡石在不同介质中的双反射率

观察条件	R_g	R_p	双反射率		双反射和反射多色性
			绝对值（ΔR）	相对值（$\Delta R'$）	
在空气中	12.4	11.3	1.1	9.0	不显（微弱）
在香柏油中	2.6	2.0	0.6	27.0	显（清楚）

实验作业

（1）在单偏光下观察下列矿物的双反射现象。

在空气中观察：辉钼矿、辉锑矿、红砷镍矿、石墨、方解石、菱铁矿；

在油浸中观察：毒砂、赤铁矿。

（2）在单偏光下观察下列矿物的反射多色性：铜蓝、石墨、硼镁铁矿。

第五章　矿物的均质性与非均质性

第一节　光的基本概念

一、光的性质

光可被认为是一种具有一定能量和动量的光子所组成。其传播方式可视为在垂直于光的进行方向上作周期性振动的横波。由于波动概念的确立就相应出现了如波长、振动频率、振动周期、光速、振幅、位相、折射、反射、干涉和偏化现象等术语。本书仅将与吸收性晶体有关的基本光学概念加以简介。光波运动的情况和振幅及位相的关系如图 5－1 所示，用质点的圆周运动来说明光波的形成情况，质点的运动用与光路垂直的圆周直径的相当部位的投影表示。圆周的半径为光波的振幅（它的平方与光强成正比）。光波中一给定质点的位置，可用圆周参考质点的位置表示。图 5－1 中光波上的 A 点为原始位置的起点，B 点相当圆周上 1 到 2 的运动，其运动的角度为 30°，即该质点在光波上的位相为 30°，所以 C 点的位相为 90°，D 点的位相为 180°，E 点为 270°。F 点也即回至原始位置 A 点，故位相为 0°。由于参考圆的一周即投影 A 至 F 点为波长 λ，因此光波的位相也可用波长表示，如图 5－1 中，C 点位相是 $\lambda/4$。若两光波沿着平行的光路进行，位相可以不同，如相差 30°、45°、90°、180°等。图 5－2 表示两光波的位相差为 90°的情况。

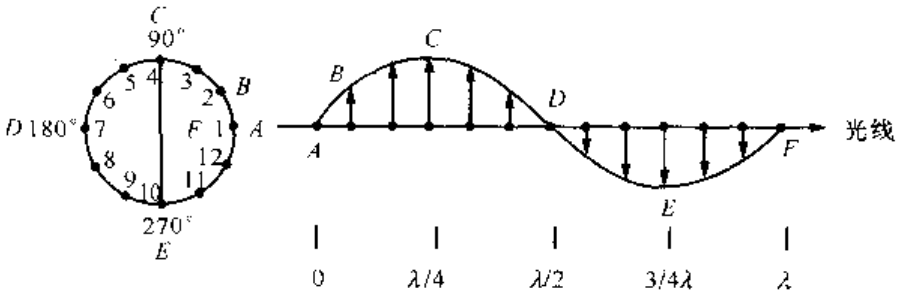


图 5－1　表示光波的形式和垂直于光路的振动情况及位相关系

（据卡梅伦，1961）

根据光的电磁理论，认为可见光是电磁波中的一部分，在整个电磁波中仅占极其狭小的一段，是物质原子、离子或分子的价电子发生振动而形成的。图 5－3、5－4 表示可见光在电磁波谱中所占的位置及可见光波中波长与颜色的关系。

二、光的偏振

前面已初步讨论了普通光的性质。光是一种横波，其振动方向垂直于传播方向。普通

的自然光是由无数个光波所组成，每个光波都有它自己的振动面，即在传播光路中，包含在所有平面上振动的光波。由于对矿物的观测大多在偏光中进行，所以必须了解光的偏振情况。偏光有三种主要形式，即平面偏光（直线偏光）、椭圆偏光和圆偏光。

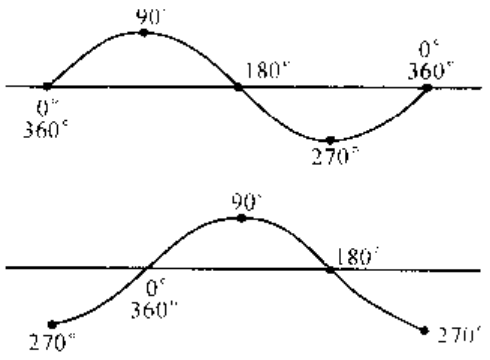


图5－2　表示两光波沿着平行光路进行，但位相差90°（据卡梅伦，1961）

1. 平面偏光

平面偏光（直线偏光）是严格局限于包含光路的一个平面内振动的偏光，这个面称之为振动面，因为对着光线传播方向看去其振动的轨迹成一直线，所以也叫做直线偏光。

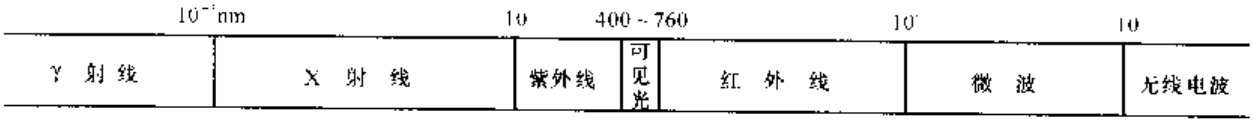


图5－3　可见光在电磁波谱中的位置

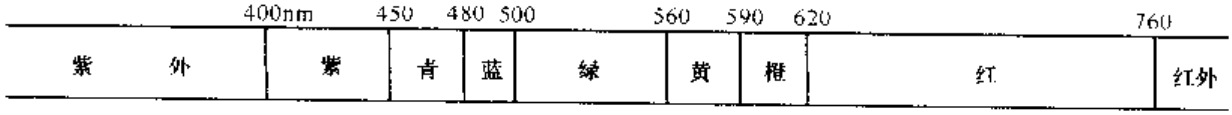


图5－4　可见光波中波长与颜色的关系

平面偏光可由几种方法产生。它可由吸收作用和双折射作用产生，也可由反射作用等产生。

在反光显微镜下观察矿物时，是以平面偏光投射至矿物磨光面的。如果所观测之矿物为一均质矿物，当以平面偏光垂直入射矿物光面，则反射后仍为一平面偏光且不发生振动方向的改变。若观测矿物为非均质透明矿物，入射条件与上述相同，而且矿物截面主反射率方向处于非0°或90°及其整数倍的位置时，从矿物光面反射的光除振动面有所旋转外，仍为一平面偏光。

2. 椭圆偏光和圆偏光

如果两同频率的平面偏光沿同一光路互相垂直振动，所产生的合成光波可能有二种情况。

第一种情况：两同频率互相垂直的直线振动，如相差为0°或180°及其整数倍时，也即合成为一平面偏光（图5－5）。此为一特殊情况。

若两光波的振幅相等时，则合成的直线（z）振动将与其分波（x 与 y）振动成45°。如果两光波的振幅不等，如图5－5所示，则合成的直线振动方向将偏向振幅较大的（x）一侧。

第二种情况：若两同频率互相垂直的直线振动，其相差不等于0°、180°或180°的整

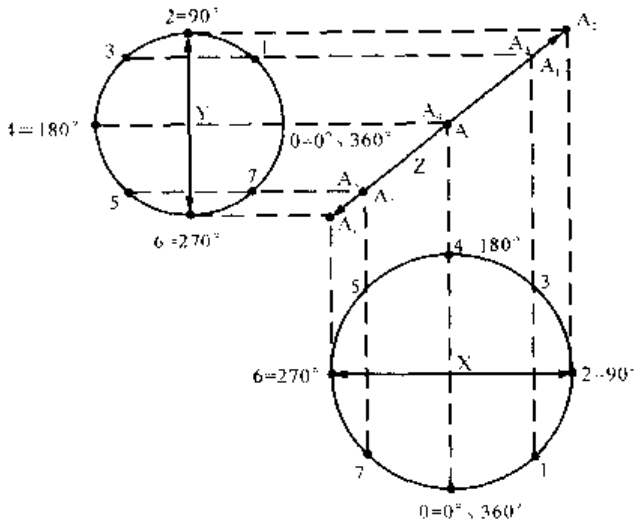


图 5－5　两个互相垂直，相差为 0°同频率不等振幅的直线振动 x 和 y，合成直线振动 z
（据卡梅伦 1961）

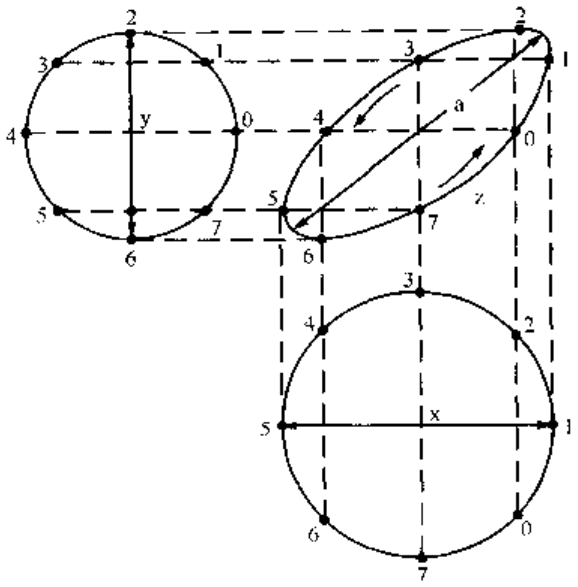


图 5－6　两个互相垂直、同频率、不等振幅。相差为 45°的直线振动 x 和 y 合成为一左旋椭圆振动 z
（据卡梅伦，1961）

数倍时，即合成各种不同椭圆度的椭圆偏光。如图 5－6 所示两个互相垂直、同频率不等振幅、相差为 +45°的直线振动合成的左旋椭圆振动，即光线质点沿光路运动的轨迹则是一个椭圆。椭圆长轴 a 的方位角是分波振幅及光波之间相差的函数。在两分波振幅不等的情况下，椭圆长轴 a 偏向于振幅较大的一侧（图 5－6）。若相差为 －45°的情况下其合成为一右旋椭圆振动。以平面偏光入射时，由矿物光面反射后可能形成椭圆振动（椭圆偏光）的条件有下述几种：

一为以平面偏光垂直入射于非均质不透明矿物光面的反射；二为平面偏光斜射于非均质不透明矿物光面的反射；三为在某种情况下，平面偏光斜射于强吸收性均质矿物光面的反射后，也形成椭圆振动。

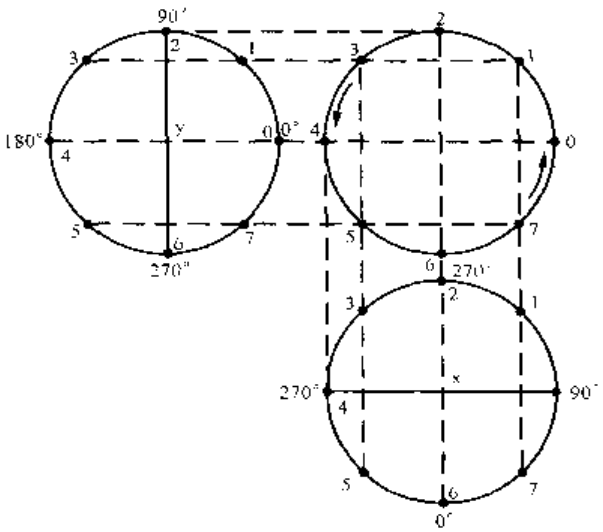


图 5－7　两个互相垂直、同频率、等振幅、相差为 ±90°的直线振动 x 和 y 的叠加，合成为一左旋圆周振动
（据卡梅伦 1961）

第三种情况：当两光波的振幅相等、同频率、其相差为 90°或 90°的奇数倍时，两个互相垂直的直线振动的叠加，则合成为一圆振动，如图 5－7 所示。此种圆振动的产生是第二种情况中在特定条件（振幅相等、相差为 ±90°）下，出现的一种特殊情况。如果只有相差为 ±90°，而振幅不等两互相垂直的直线振动，合成时仍为一椭圆振动，而不会出现圆振动。

圆振动（圆偏光）在矿物光面对

入射平面偏光反射中，出现的机会是不多的。如平面偏光垂直入射于斜方晶系不透明矿物垂直于圆偏光轴的切面，其反射光为圆偏光。

综上所述不难理解，实际上圆偏光和直线偏光是椭圆偏光的极限状况。

在以平面偏光入射的条件下，从矿物光面反射上来的是直线偏光、椭圆偏光还是圆偏光，通过转动分析镜的方法即可加以鉴别。若为直线偏光，当转动分析镜，其振动面与反射光波的振动面垂直时，光线将完全消失，即出现“全消光”。如果为椭圆偏光，则转动分析镜至任何位置，也不能出现真正完全消光的现象，而只有明暗之分，如分析镜的振动面垂直于振动椭圆的长轴（即//短轴）时，所见光线的强度最小（相对最暗），当分析镜的振动面垂直于振动椭圆的短轴（即//长轴）时，所见光强最大（相对最亮）。若为圆偏光，当转动分析镜至任何位置时，其明暗程度不变。

第二节　矿物的均质性与非均质性

本章是讨论垂直入射光照射条件下，矿物在正交偏光中所呈现的光学现象。这些现象主要包括均质性与非均质性、非均质旋转角和非均质视旋转角、偏光色及旋向（旋性）等。

所谓垂直入射光，是指在实际观察中使用垂直和近于垂直的光线。若获得近于垂直的入射光，只能采用聚敛程度较小的中、低倍物镜，最好是低倍物镜，并加之缩小孔径光圈即可。

“正交偏光”可分两种情况，一种是严格的正交偏光，另一种是不完全的正交偏光。而严格的正交偏光可以用黄铁矿等均质矿物，在高倍物镜下用锥光法检查。若所显示的偏光图为一完美的黑十字，则证明两偏光镜已完全正交；若黑十字中心稍显分开呈双曲线状，即证明两偏光镜处于不完全正交状态。如能用双石英试板检查正交情况更为精确（正交时双石英试板两瓣的暗度相等）。

一、矿物均质性与非均质性的基本概念

1. 均质性

等轴晶系的晶质矿物和非晶质矿物均无方向性，对垂直入射的平面偏光仍按原来振动方向反射，因其偏振方向（东西振动）不变，故反射光线不能透过振动方向与之垂直（南北向）的上偏光镜，所以矿物在视域中呈黑暗（消光）状态。当旋转物台时其黑暗程度也不改变，如闪锌矿。而对一些吸收性强，反射率高的不透明矿物，由于物镜或多或少地受聚敛作用的影响，使反射光成椭圆偏光，以致均质矿物在严格正交偏光下也不完全黑暗，而具一定的亮度；但转动物台时，其明暗程度并不改变，如自然银。上述的这类现象统称均质效应，矿物的这种性质称之为均质性；若某种矿物各方向的颗粒都显均质性，则该矿物即属均质性矿物。应指出的是，非均质性矿物的均质切面，在正交偏光下也显均质效应，但不能与均质性矿物并论。

2. 非均质性

为非等轴晶系的晶质矿物之主要属性，由于这些矿物晶体结构和光学上的异向性，除位于“消光”方位外，它能改变入射偏光的性质，使反射偏光的振动方向不同于原入射偏光的振动方向；吸收性矿物还能改变入射直线偏光的性质为椭圆偏光，从而使一部分光

线能透过上偏光镜。当转动物台而使矿物方位改变时，这部分透过上偏光镜的光线，也随着改变而发生亮度（明暗）和颜色的变化。这种在正交偏光下呈现的光学现象称为非均质效应（非均质性），具此光学性质的矿物为非均质性矿物。

非均质不透明矿物的非均质效应，是由矿物对平面偏光所具有的三种性能所造成的。它们是，一为对反射平面偏光振动面的旋转性能，二为对反射平面偏光产生周相差而造成椭圆偏光的性能，三为上述两种现象形成的色散。下面将简介三种性能的生成机理。

二、非均质矿物反射平面偏光振动面旋转的性能

兹以一轴晶透明矿物的主切面为例，说明非均质矿物反射平面偏光振动面旋转的机制及非均质旋转角的形成。如图 5－8 所示，图中为一轴晶透明矿物主切面，入射光一般被分解成两组互相垂直振动的反射平面偏光，二者之间的周相差为零。图 5－8 中 PP 代表起偏镜（前偏光）的振动方向，圆代表显微镜视域，CC 代表一轴晶矿物 c 轴的方位，AA 表示矿物水平轴的方位，两者皆为矿物主反射率的方向。从图中可看出，矿物的 c 轴与起偏镜 PP 的振动方向成 45°，假定入射光的振幅为 OI，入射光投射到矿物光片上后，将分解成振幅相等的两组互相垂直的平面分振动，分别平行于 CC（OI_2）和 AA（OI_1）方向。由于这两组平面偏光反射率的差异，因而反射时其 OR_1 必不等于 OR_2，所以两组反射光按平行四边形法则合成后的振动，为一振动方向靠近反射率较高晶体方向的直线振动，即以 OP' 代表其振动方向和振幅。由图中可知 OP' 与 OI 不重合，表示反射后使振动方向发生了旋转。这种合成反射平面偏光的振动方向不同于入射光的振动方向，而存在一夹角 $A_{\varphi\beta}$ 的关系，称为非均质矿物反射平面偏光振动面旋转的性能，简称非均质旋转。$A_{\varphi\beta}$ 角为非均质旋转角。

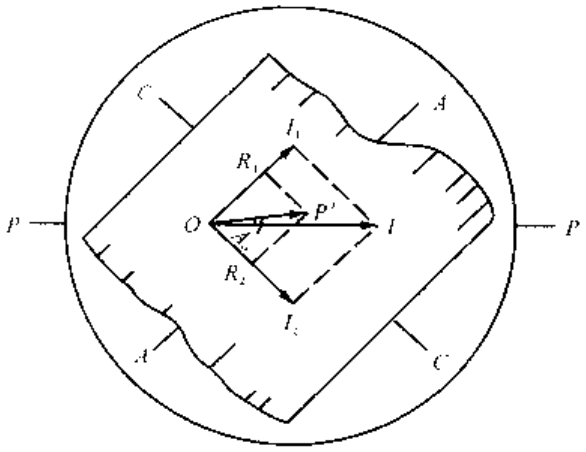


图 5－8　一轴晶透明矿物光面在反射中引起偏光振动面的旋转

从图 5－8 中也可推知，由于 OP' 与 OI 不一致，因此部分光线（振幅为 $OP'\sin A_{\varphi\beta}$）可通过正交偏光状态的上偏光镜，所以矿物会呈现一定亮度。若当矿物的一个截面主反射率方向（平行或垂直 c 轴）与 PP 平行时，则 OI、OP' 与截面主反射率方向三者重合，非均质旋转角 $A_{\varphi\beta}=0$，故矿物的反射光线不能通过上偏光镜，而呈现黑暗（消光）。若截面主反射率方向与起偏镜 PP 逐渐形成夹角时，则 $A_{\varphi\beta}$ 也从零逐渐增大。所以平行矿物 c 轴的切面在 $45°\pm\frac{1}{2}A_{\varphi\beta}$ 时 $A_{\varphi\beta}$ 角最大，但由于 $45°\pm\frac{1}{2}A_{\varphi\beta}$ 位置不易确定，故以 45°位时的 $A_{\varphi\beta}$ 值为标准值（近似最大值）。如将物台旋转一周，可看到四次消光与四次明亮交替出现，四次最明亮方位位于相邻消光方位间 45°位置。

三、非均质不透明矿物使反射平面偏光产生周相差而造成椭圆偏光的性能

不透明非均质矿物除使反射平面偏光产生旋转外，还能使反射平面偏光产生非为零和π的周相差，从而导致合成的反射光波变成椭圆偏光。

非均质不透明矿物置于45°位置时，从图5－9也可看出，非均质反射椭圆长轴的方位不同于入射平面偏光的方向，即长轴的方位发生了旋转。图5－9是非均质不透明矿物在反射中形成椭圆偏光的一般图式，它的基本形式与图5－8相似，只是图中加上了椭圆偏光部分。椭圆长轴a与起偏镜方向之间的夹角称为非均质视旋转角A_r，A_r角也随周相差而变化，A_r也可用转动上偏光镜的方法测出（详见后节）。

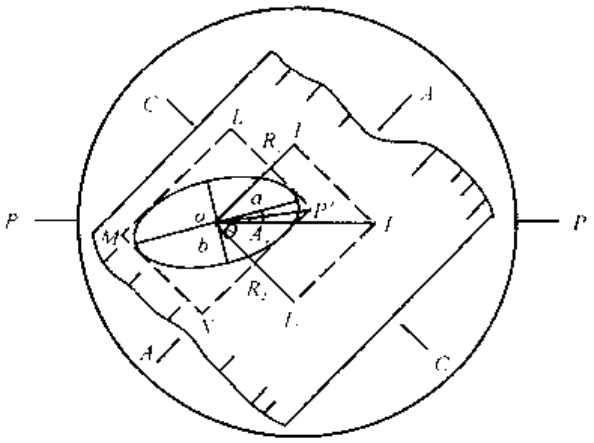


图5－9　非均质不透明矿物在反射中形成椭圆偏光的一般情况

$A_{r\beta}$（即图中θ）为非均质旋转角，A_r为非均质视旋转角，a为椭圆长轴，b为椭圆短轴；$LMNP'$为外切矩形

矿物处于45°位置时，非均质视旋转角A_r与非均质旋转角$A_{r\beta}$的关系式如下：

当周相差很小时，$\cos\Delta \approx 1$，故$A_r \approx A_{r\beta}$；当$\Delta = 0$时，$\cos\Delta = 1$，所以$A_r = A_{r\beta}$。一般当$\Delta < 10°$，$\cos\Delta = \cos 10° = 0.9851 \approx 1$，故仍可认为$A_r = A_{r\beta}$，因为误差不会超过现在测定精度$\pm 0.1°$。

多数非均质不透明矿物的周相差均较小（$\Delta < 10°$），所以它们的A_r与$A_{r\beta}$近于相等。A_r的标准值（45°位时所测）是矿物的一个较重要的鉴定特征。

四、非均质矿物的偏光色

非均质不透明矿物在严格正交偏光下处于45°位置时不仅最明亮，而且在白光中常显现出颜色，这种颜色称为偏光色。

非均质矿物定向切面在45°位置时，其偏光色一般是固定的，所以对某些矿物可作为鉴定特征。如铜蓝为火橙色等。

偏光色的形成主要是由于下述的非均质旋转色散和非均质椭圆色散而致。

（1）非均质旋转色散为透明非均质矿物生成偏光色的基本原因。矿物二主反射率随光波而变化，即对不同波长的光波，反射率也随着改变，因此合成偏光的振幅与非均质旋转角也随波长而有所不同，故透过上偏光镜的振幅和光强也有差别。如图5－10所示。PP为起偏镜的振动方向，AA为分析镜振动方向，OI为入射光的振幅，矿物系在45°位置。若矿物有反射率的色散，则合成的平面偏光也有色散，如以OR'代表红光的合成反射平面偏光的振幅及方向，OG'代表绿光、OB'代表蓝光。每一种光波在分析镜AA线上的投影，即为该光波能透过分析镜的分振幅，即为Oc、Ob、Oa三部分。它们根据“相加”的原理合成一种混合色，即为偏光色。

（2）非均质椭圆色散，系指非均质不透明矿物二主向的反射率不仅振幅不同，而且周相差也随光波波长而改变，因此使合成的非均质椭圆偏光也发生色散，即各色光的非均

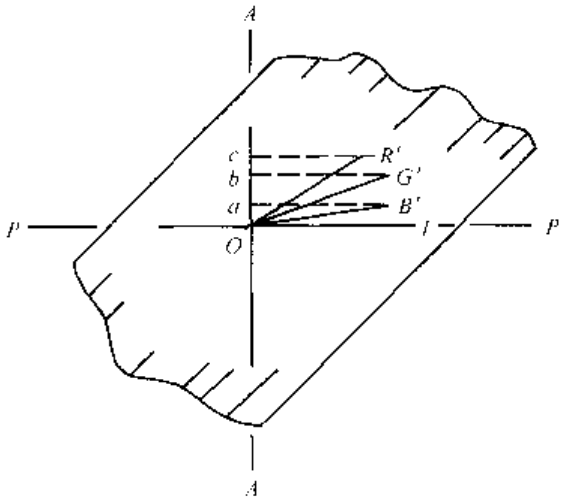


图 5－10　非均质矿物偏光振动面的旋转色散

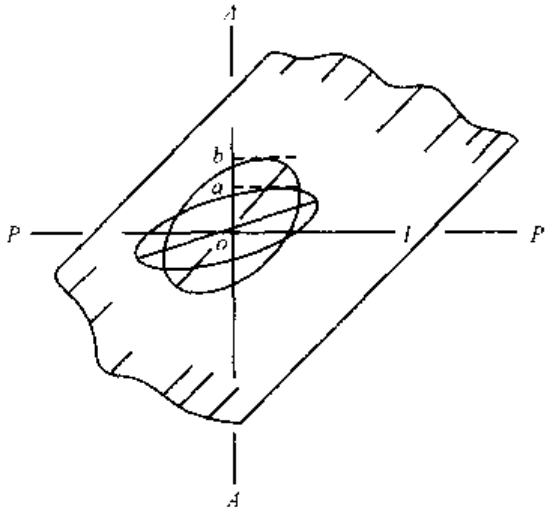


图 5－11　非均质不透明矿物的椭圆色散

质椭圆不同。这种色散也是构成非均质不透明矿物偏光色的基本原因。如图 5－11 所示，图中有两个不同色光合成的椭圆振动，为同一矿物在不同波长光波中造成不同的非均质反射椭圆，假设其中一个代表红光的椭圆振动，另一个代表绿光的椭圆振动，二椭圆各有一部分光强透过分析镜。Oa 代表绿光椭圆透过分析镜的振幅，Ob 代表红光的振幅，根据“相加”的原理合成一种混合色，即构成偏光色。

此外还有一种消（暗）光色，它是由消（暗）光位色散所引起，这种色散使非均质矿物在白光中得不到严密的消光，而在消光位常呈现某种颜色。

第三节　均质性与非均质性、偏光色、非均质视旋转角和旋向的观测方法

在矿相显微镜下对矿物进行一般鉴定时，主要需对矿物的均质性与非均质性及偏光色作定性观测。首先是将矿物划分为均质的与非均质的两大类，若为非均质矿物，再进一步按非均质效应的强弱予以视测分级和对偏光色及旋向（旋性）作定性的观测。根据仪器的完备程度及对鉴定数据的要求，可对非均质矿物的非均质视旋转角 A_r 进行测量。

一、矿物的均质性与非均质性和偏光色的观察方法

在对矿物的均质性与非均质性及偏光色进行观察之前，须校正分析镜与起偏镜的位置，使之正交，同时要记录下分析镜在正交时的位置（刻度）。简易校正方法前已述及，现将几种观察方法介绍如下。

1. 正交偏光观察法

一般指在低、中倍镜下的观察，因为低倍物镜聚敛程度低，入射光近于直射，同时由于视域较大，可选择同一矿物多颗粒连晶或集合体的视域，这样易于判断其均质性与非均质性。若是均质性，当旋转物台一周时不发生明暗的变化，即为全消光或为不变的暗灰色。如为非均质矿物，在此严格的正交偏光下，转动物台一周时应出现四次“消光”和四次明亮（45°位置）现象；具有偏光色的矿物，可见颜色递变现象，注意要记下 45°位

时的偏光色。

2. 不完全正交偏光观察法

在对矿物均质性与非均质性的观测中，对一些非均质性较弱的矿物，常利用不完全正交偏光（偏离角 1°～3°）进行观察。这样可使较多的光量透过分析镜，而便于判断是均质性还是弱非均质性的矿物。但转动物台时，非均质矿物的消光位必然不恰在 90°位置上。若偏离角 $\theta_d > A_r$ 时，则只出现两明两暗的现象。必须指出的是，虽然在不完全正交偏光下易于观察到颜色的变化，但它不是标准的偏光色。

3. 正交或不完全正交偏光下油浸观察法

若用上述两种方法不能作判断者，可在油浸中进行观察验证。特别是对反射率较低的非均质矿物非均质效应的观察尤为有效。观察介质 N 值的增大将使双反射现象更加明显，故非均质效应也必然相应增强。

二、非均质视旋转角 A_r 的测量方法

因为非均质不透明矿物 A_r 值与入射光波波长有关。所以需用不同波长的单色光入射，一般用 470 nm、546 nm、589 nm 及 650 nm 的单色光分别测量矿物的 A_r。单色光可在强光（如 12 V100 W 的卤灯）照射下采用上述各波长的干涉滤光器作为光源。现将测定 A_r 的方法介绍如下。

正交偏光暗位法：此方法是依据非均质矿物在垂直入射正交偏光下，处于 45°位时，因非均质反射椭圆偏光显示的亮度可旋转分析镜而消去的现象。具体步骤是：在正交偏光下选择欲测矿物中非均质性最强的颗粒（代表主切面），将其置于视域中心，旋转物台至该颗粒的消光位，记下度数。再转动物台 45°，使该矿物处于 45°位置，此时矿物颗粒最明亮，然后顺时针或反时针转动分析镜，使矿物呈最暗或消光（如在分析镜下插入一双石英试板，可见试板两瓣明暗相等）。此时分析镜的转角（偏离角），即为该矿物对该入射光波波长的 A_r。

除上述方法外，还有偏光偏离角明暗次数法及单色光偏光图定位法。后者将在下一章中介绍。

三、非均质矿物旋转方向（旋向）符号的测定

非均质矿物反射平面偏光或反射椭圆偏光长轴的旋转方向称旋向。倘向矿物解理、晶轴、延长或双晶结合面等某结晶要素方向旋转，则对该结晶要素而言，其旋向为正（+），反之为负（-）。如图 5-8 与图 5-9 中，非均质反射旋转 OP' 和反射椭圆长轴 a 与解理和矿物 a 轴的关系，以 $RS\{0001\}$解理、d 轴（+）表示。测定旋向（旋性）正负的方法如下。

正交偏光暗位法：兹以非平行底切面的辉钼矿为例，先将其解理转至平行于起偏镜的位置，推入上偏光镜（分析镜）使之与起偏镜（东西向）正交。再反时针旋转物台 45°，此时解理处于东北－西南方向，然后也反时针旋转分析镜使矿物消光或变暗，表明解理方向为高反射率 R_1。我们据此可定辉钼矿底面解理的旋向为正，或用［$RS\{0001\}$解理（+）］表示，这也表明 c 轴的旋向为负或［RSc 轴（-）］。而铜蓝的例子恰与辉铜矿相反，即解理的旋向为负，c 轴的旋向为正。

第四节　矿物均质性与非均质性视测分级和影响观察的因素

一、矿物均质性与非均质性的视测分级

虽然非均质性和偏光色，在现阶段都可以定量测定，然而在实际鉴定工作中，为了迅速简易，通常仅对其作定性估计，以资作为判别矿物的一种依据。为了在教学及实际工作中更易于分辨，只将矿物的均质性、非均质性分如下三级：

（1）强非均质性　在正交偏光下，旋转物台明暗变化显著，偏光色从显著（如辉铅矿、铜蓝等）至明显（如磁黄铁矿等），这一类级的非均质矿物包括一般习惯上分级的“特强”和“显著”两级。

（2）弱非均质性　正交偏光下，旋转物台明暗变化可见至仅隐约可见，有的显示弱的偏光色，在多方向性矿物颗粒的集合体中才能清楚地看出其非均质效应。这一类级包括习惯上的“清楚”和“微弱”两级非均质矿物，如钛铁矿、车轮矿等。

（3）均质性　正交偏光下，即使用强入射光，旋转物台也不出现明暗变化，即物台旋转一周呈全暗或全微亮，如方铅矿、闪锌矿。

常见矿物均质性与非均质性分级见表5-1。

表5-1　常见矿物均质性与非均质性分级

非均质性矿物				均质性矿物	
强非均质性		弱非均质性			
铜蓝＊＊＊＊	磁黄铁矿＊＊＊	钛铁矿＊＊	褐锰矿＊	黄铁矿	方铅矿
辉铅矿＊＊＊＊	辉铋矿＊＊＊	金红石＊＊	车轮矿＊	自然金	自然铜
辉锑矿＊＊＊＊	红锑镍矿＊＊＊	辉锑铋矿＊＊	黑钨矿＊	自然银	自然铂
白铁矿＊＊＊＊	红砷镍矿＊＊＊	黝锡矿＊＊	白钨矿＊	镍黄铁矿	磁铁矿
脆硫锑铅矿＊＊＊	深红银矿＊＊＊	针铁矿＊＊	锡　石＊＊	斑铜矿	黝铜矿
硼镁铁矿＊＊＊	淡红银矿＊＊＊	辉锑铅矿＊＊	辉铜矿＊	方钴矿	闪锌矿
石　墨＊＊＊＊	软锰矿＊＊＊	叶碲金矿＊＊	黄铜矿＊	硫锰矿	铬铁矿
方黄铜矿＊＊＊	水锰矿＊＊＊	雄黄＊＊		蓝辉铜矿	辉银矿
针镍矿＊＊＊	赤铁矿＊＊＊				
黑锰矿＊＊＊	辰砂＊＊＊				
雌黄＊＊＊＊	毒砂＊＊＊				

注：非均质性按四级分类时，标以＊＊＊＊者表示特强；＊＊＊为显著；＊＊为清楚；＊为微弱。

二、影响均质、非均质性观察的因素

（1）光片质量的影响　光面上往往有擦痕和凹坑，由它们造成的漫反射，会使均质矿物在转动物台时也显明暗变化，但这种变化在一个光片或视域中为同一方向，具一致性，而非均质矿物的非均质效应是发生于各颗粒中，且随矿物晶粒的方位不同而异。

（2）光片安装的影响　若光片安装不平，转动物台180°时，也会出现明暗变化，但转动光片一周，与上述现象类似，即整个光面呈同一方向性的变化，而不是矿物晶粒显现非均质效应，故不呈“四明四暗”现象。

（3）切面方向的影响　非均质矿物也有显均质效应的“均质切面”，所以应对同一种矿物观察许多颗粒后再作判断。

（4）强内反射的影响　具强内反射的矿物，在正交偏光下由于强烈的内反射效应，会干扰对均质与非均质效应的观察。

（5）光源强度的影响　若入射光线较弱（由于光源弱或聚光、反射器等调整不当）时，会对一些弱非均质性矿物误认为均质性矿物。

（6）矿相显微镜本身的影响　若显微镜的光学性能不佳以及物镜有应变等，都会大大影响对均质与非均质性的观察。

实验作业

1. 用正交偏光法或不完全正交偏光法观察下列已知均质、非均质性矿物

（1）均质性矿物　方铅矿、闪锌矿、黄铁矿。

（2）强非均质性矿物　铜蓝，偏光色为火橙－棕红－橙黄；辉钼矿，偏光色为淡紫色－蓝灰色。

（3）弱非均质性矿物　黑钨矿，偏光色为黄－灰色。

2. 鉴定下列矿物的均质性、非均质性及偏光色

辉锑矿、黝铜矿、毒砂、磁黄铁矿、铬铁矿、硼镁铁矿、钛铁矿、磁铁矿、辉铋矿、赤铁矿。

3. 用正交偏光暗位法测量石墨和辉钼矿的A_1角。

第六章　矿物的偏光图

金属矿物在反射光下的偏光图，是属聚敛偏光下矿物的光学性质，也即平面偏光斜射于矿物光面时，经反射后所产生的光学现象。所以与前述章节中介绍的垂直入射正交偏光下的光学现象是不同的。本章只简略介绍偏光图形成的基本原理、光学现象及其观察方法。

第一节　偏光图的形成原理

一、反射旋转的基本概念

入射光线通过高倍物镜时，被聚敛成圆锥形光束，除中心部分光线为垂直入射外，其他部位为各种角度的斜射光。从物理光学定义中可知，入射光与反射光所组成的面称为入射面，入射面与光面垂直的线称为入射法线，入射光与法线所夹之角称为入射角，反射光与法线之间的夹角叫反射角，入射角应等于反射角。

垂直入射于均质物体表面（均质矿物光面）上的平面偏光，反射时不发生振动方向的变化。但以平面偏光倾斜入射时，其反射光将产生两种现象：一为反射光振动面的旋转，简称“反射旋转”，即反射光的振动面将与入射光的振动面在方向上不一致，二为反射光因产生非为0和π的周相差而发生椭圆偏化，形成反射椭圆偏光。

透过高倍物镜的平面偏光，其入射光线被聚敛成一圆锥形光束于矿物光面上时，可有三种不同的入射面：一为入射面与入射偏光振动面平行，二为入射面与偏光振动面垂直，三为入射面与偏光振动面斜交（可有各种方位角）。一、二两种反射光不发生偏光振动面的旋转，第三种反射光将发生偏光振动面的旋转，同时，吸收性较强的金属矿物光面的反射光，将由于产生非为0和π的周相差而形成椭圆偏光。“反射旋转”的机制如图6－1所示。*PP*代表前偏光的振动方向，*AA*代表上偏光的振动方向，*XX*和*XX′*为入射面（代表第三种情况），*I*为入（透）射偏光。入射偏光分解为平行入射面$I_{//}$和垂直入射面$I_{\perp}$二部分。此二部分经反射后成$E_{//}$与$E_{\perp}$，其振幅为$OE_{//}$和$OE_{\perp}$，而与$OI_{//}$及$OI_{\perp}$的比例不一致，$OE_{\perp}$皆大于$OE_{//}$。因此合成的反射光*OE*的方位不同于入射光*OI*，即形成了偏光振动面的旋转

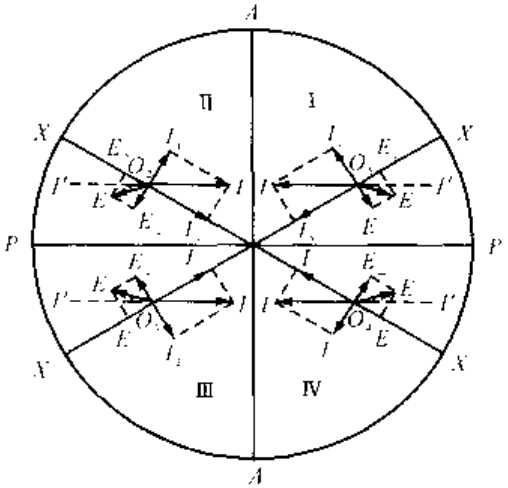


图6－1　平面偏光斜射于均质物体（矿物）在视域各象限中对入射平面偏光的反射情况

（据邱性国，1982）

Ⅰ、Ⅲ象限作顺时针方向旋转，Ⅱ、Ⅳ象限作逆时针方向旋转。∠*I′OE*为反射旋转角R_{θ}

（反射旋转）。反射合成振幅 OE 和反射旋转角 R_φ 的大小，与入射角成正比关系，即前二者均随入射角增大而增大，所以自视域中心向边缘逐渐增大，而且 OE 及 R_φ 也与入射面的方位角有关，即由十字线向45°位，其“反射旋转”逐渐增强（R_φ 变大）。因为 $OE_\perp$ 总比 $OE_\parallel$ 大，所以其反射旋转在四个象限中呈对称分布（图6－1）。必须指出的是，OE 和 R_φ 也当与矿物本身的属性密切相关。

如果反射物体为吸收性不透明矿物，由于 $E_\parallel$ 与 $E_\perp$ 二者之间有非为0和 π 的周相差，所合成的反射光必为椭圆振动（椭圆偏光）。其椭圆的性质与入射偏光的波长、入射方位角、入射角及矿物的属性有关。椭圆长轴的反射视旋转方向，在视域四个象限中与反射旋转情况雷同，即反射椭圆长轴与入射平面振动之间的夹角和反射视旋转角 R_r 呈对称分布。

二、均质矿物偏光图

在正交偏光下用高倍物镜（>40倍）观察均质不透明矿物时，由于物镜的聚敛作用，使入射平面偏光除中心一束光为垂直矿物光面外，视域内几乎全为斜射光。所以在正交偏光下，可见与一轴晶底切面之干涉图相似的图像（图6－2），即主要部分为一“黑十字”形消光带，四象限为明亮部分。此图像则称之为“偏光图”，它系由“反射旋转”作用而成。由图6－2可看出前偏光镜为东西向（PP）。在 PP 线上入射光振动面与入射面平行，在 AA 线上的振动面与入射面垂直，因面反射光振动方向不发生旋转。如图中“黑十字”位上双箭形线所示，当到达上偏光镜 AA 时，这部分光线完全被截住而不能通过上偏光镜，故形成“黑十字”。“黑十字”以外四象限范围的入射光，其任意一点上的入射面均与偏光振动面斜交，当其反射时，反射偏光的振动面就发生不同程度地旋转。图中四象限中短实线表示各点反射偏光振动面方位，由于入射光线离视域中心愈远斜度愈大，即入射角愈大，愈远离视域中心和十字线，其反射旋转角也愈大。因此，透过上偏光镜的光线也就愈多，所以其明亮程度也相应愈大。“黑十字”的图像在将上偏光镜从正交位置稍转一角度后，即分解呈双曲线形（图6－3）。双曲线的位置恰是矿物光面上的某些点，经反射旋转的振动面与转动后的上偏光振动面相垂直。因此当旋转上偏光至 $A'A'$ 时二、四象限内出现双曲线，若顺时针方向旋转上偏光镜时，即在一、三象限出现。当入射光为白光时，转动上偏光镜后可见到两类不同色型的图像。第一类以蓝辉铜矿为例，它的图像中双曲线凹面与凸面出现红和蓝的色边（图6－4）。凸面出现蓝色，说明红光反射旋转角较蓝光为大，因在此红光的振动方向恰于上偏光镜垂直而消失，而蓝光的旋转角小，与上偏光镜未达到垂直，所以可透过上偏光镜呈蓝色边。凹面较凸面离视域中心远，其入射角均相应增大，所以在此蓝光已达到与上偏光镜垂直的程度，故消失，但红光的旋转，已超过与上偏光镜垂直的程度，可有部分光量透过分析镜，故凹面显红色。上述现象，是由于反射旋转量因不同波长而造成的，故称之为反射旋转色散 DR_r。如蓝辉铜矿的色散以 DR_r = 红 > 蓝（$r > v$）（图6－4）表示。相反的色边则表示 DR_r = 蓝 > 红（$v > r$），如黄铁矿就是（图6－5B）。

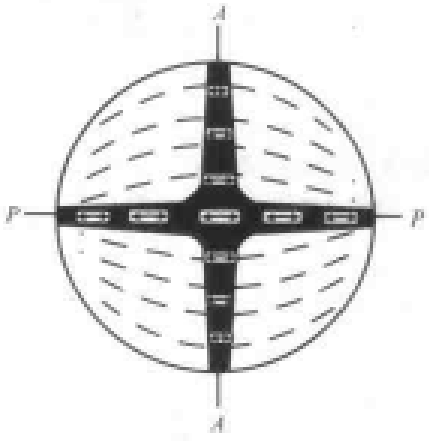


图6－2　均质矿物黑十字偏光图的形成

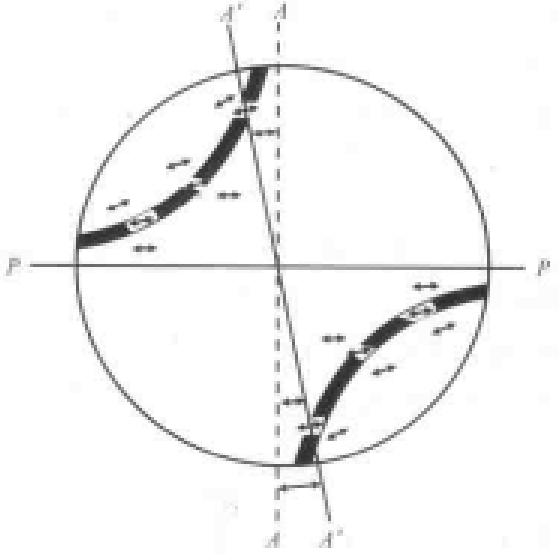


图6－3　转动上偏光镜从 *AA* 至 *AA'* 位置时均质矿物“黑十字”偏光图变成双曲线形

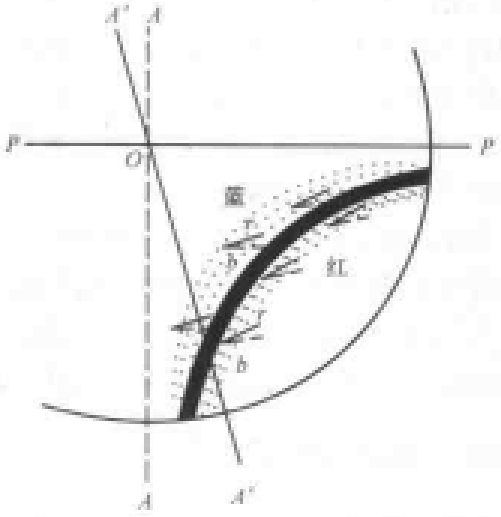


图6－4　当转动上偏光镜时，双曲线消光带色边与红、蓝光振动方向的关系

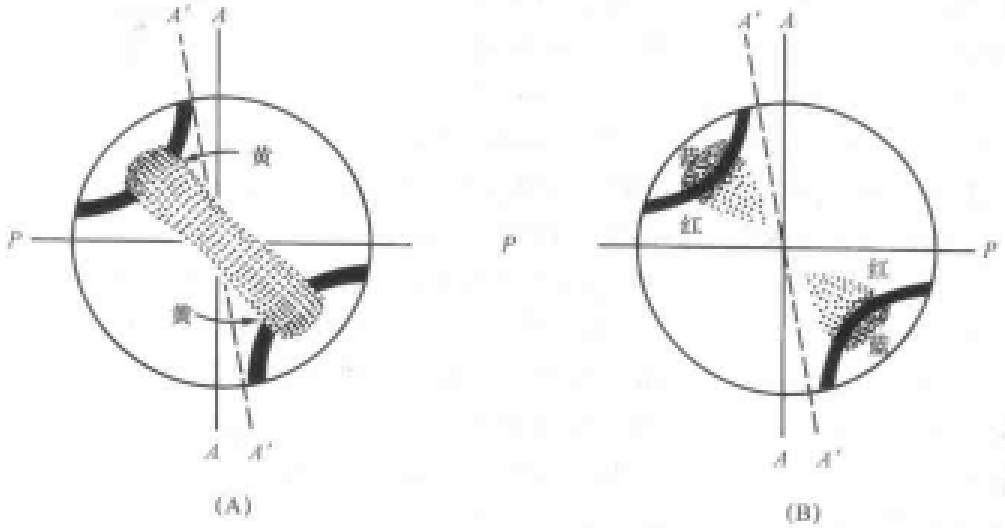


图6－5　转动上偏光镜后自然金（A）与黄铁矿（B）的偏光图

第二类色型图像的特点是双曲线边界模糊不清，而且双曲线中段与视域中心连成一片或具相同的色调，如自然金为橙黄色。这类图像是由于强吸收性矿物反射时形成大椭圆度（强）的椭圆偏光所致，因此也形不成真正的“消光带”。如金、银、铜等自然金属矿物的图像皆属此类（图6－5A）。这种色散称之为反射椭圆色散，以符号 *DE* 表示。

不论是反射旋转色散 *DR*，还是椭圆色散 *DE*，它们不仅与光波、入射偏光的入射角，方位角有关，更主要与矿物本身的属性（*N* 与 *K* 等）密切相关，所以也是矿物光性特征之一，有助于矿物的鉴定。

有关常见均质矿物偏光图情况见表6－1。

表 6－1　常见均质矿物偏光图

矿　物	正交偏光下偏光图的情况（“黑十字”的特征）	上偏光镜自正交位置旋转后双曲线“消光带”的特征	反射旋转色散 DR_1	椭圆度 θ	椭圆色散 DE
自然金*	棕灰色，四象限黄色	两端棕灰-深灰色，中段及中心为橙黄色	因椭圆偏化而不清楚	大	橙黄色－黄色，强
自然银*	深灰色，四象限微弱的浅蓝色	两端深灰色，中段及视域中心为黄白色	因椭圆偏化而不清楚	大	黄白－淡黄，弱
自然铜*	棕灰色，四象限为橙黄色	两端暗棕色，中段与视域中心为淡棕红色	因椭圆偏化而不清楚	大	淡棕红色，强
斑铜矿*	黑，四象限浅棕黄	黑，模糊；淡褐）蓝灰	$r>v$，极弱	无	不显
镍黄铁矿*	黑灰，四象限无色	黑褐，模糊；不显色边	无	小	不显
黄铁矿*	黑灰，四象限淡蓝	灰黑，淡蓝）淡棕黄	$v>r$，中等	小	不显
方铅矿*	黑灰，四象限微蓝	灰黑，蓝）淡褐黄	$v>r$，中等	小	不显
黝铜矿*	黑，四象限无色	灰黑，淡玫瑰）微灰蓝	$r>v$，弱	不显	不显
硫锰矿*	黑，四象限无色	黑，微橙灰）淡灰蓝	$r>v$，弱	不显	不显
辉银矿*	黑灰，四象限蓝白	黑灰，红）蓝微绿	$r>v$，中等	小	不显
蓝辉铜矿*	黑，四象限微蓝	黑，橙红）深蓝	$r>v$，强	不显	不显
磁铁矿*	黑，四象限无色	黑，微灰橙）微蓝	$r>v$，弱	不显	不显
闪锌矿*	褐黑，四象限微黄	褐黑，微橙）灰蓝	$r>v$，弱	无	无
铬铁矿*	黑，四象限无色	黑，微橙）蓝	$r>v$，中等	无	无

* 表示编者所测。凹边）凸边。

三、非均质矿物偏光图

非均质矿物的偏光图，在矿物处于消光时（即一个截面主反射率平行或垂直入射偏光振动面时），其图像与均质矿物相同，即为一“黑十字”，转动上偏光镜也分解成双曲线。因矿物在消光位时不发生非均质旋转效应（前章已述），所以只有反射旋转起作用。但当转动物台使矿物从消光位向45°位旋转时，“黑十字”将分解成双曲线形消光带，当矿物处于45°时，其双曲线分离度最大（图6－6）。而旋转物台一周出现四次“黑十字”、四次“双曲线”，因为非均质矿物除处于“消光位”外，都有非均质旋转效应叠加于反射旋转作用之中，因此在正交偏光下转动物台也形成双曲线。其机理如图6－6所示：矿物处于45°位置，I 代表入射光振动方位，R_1 代表矿物四象限反

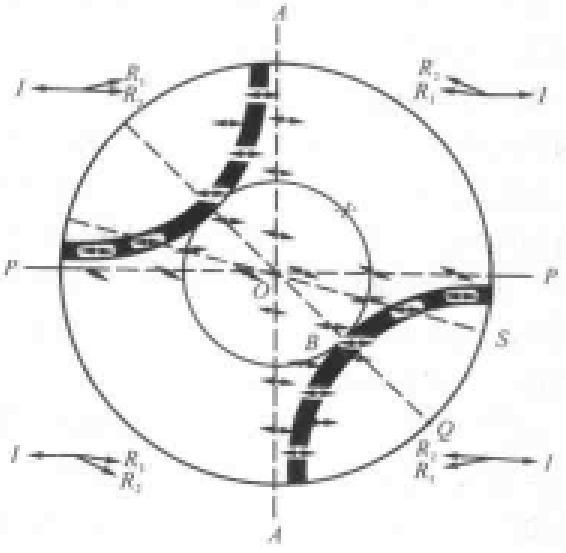


图6－6　非均质矿物45°位置时的双曲线偏光图

射旋转的方位，十字线上之双箭线代表矿物非均质反射旋转，二者之合振动以 R_2 表示，在Ⅱ、Ⅳ象限双曲线位置因两个旋转相抵而恰与起偏镜 PP 平行，因此不能通过与之正交的上偏光镜，故呈双曲线形消光带，在Ⅰ、Ⅲ象限内因二者为同向旋转而增加，则增强了其旋转量，故一部分光线可通过上偏光镜，所以呈明亮区。

从图6－6中还可以看出：小圆 X 上的点就是矿物在45°位时“消光带”之顶点，OS 为东西直径（PP）与45°对角线之间的另一条对角线，现对 OS 与 X 圆的交点上的旋转情况作一分析，在该点上反射旋转角比 B 点小，因此，在 OS 线上，反射旋转等于非均质旋转的点皆位于 X 圆之外；所以，更为靠近东西直径的其他半径上的补偿点（相抵点），将逐渐向外远离 X 圆，在整个象限中，这些点汇聚起来就形成了双曲线型消光带。

虽然非均质矿物在45°位时，其偏光图是由非均质旋转和反射旋转叠加而成；但视域中心及“十字线”位置，在反射聚敛偏光下不产生反射旋转效应，而只有非均质旋转起作用。故矿物在此位置（45°位）时，将上偏光镜转到使“双曲线”变为“黑十字”之角度即为非均质旋转角（A_{rp}）或非均质视旋转角（A_r）。此外，非均质矿物在45°位时，其两双曲线之间的距离也代表非均质旋转角的大小，而以视域直径的百分数表示之。

若用单色光照明，观察非均质矿物在45°位置的偏光图时，仅看到不同“黑度”的双曲线形消光带。然而在白光中观察时，许多矿物将出现色边。色边产生于以下三种情况：①矿物处于消光位时，转动分析镜所形成之双曲线消光带；②在正交偏光下旋转物台而形成之双曲线消光带；③两项操作兼之进行。但就其成因及颜色效应则取决于两种色散，即反射旋转色散 DR_r（已于均质矿物偏光图中叙述过）与由矿物非均质性引起的非均质视旋转角色散（或非均质旋转色散）DA_r。在观察非均质视旋转角色散时因夹有反射旋转色散效应，而不能将这两种色散完全分开，故只能称其为综合（联合）色散 D（$A_r + R_r$），所以仅可作为定性地分析，以助其鉴定矿物。

由于非均质矿物偏光图的色散现象的复杂关系，尚不能作出全面的解释，所以下面作一定性且带有部分经验性的说明。

依上述两种色散相互叠加的关系，可出现四种情况。第一种，即最简单的情况，以铜蓝的偏光图像为例。在正交偏光下将铜蓝平行或斜交 c 轴的切面转动物台使之处于消光位后，即出现一“十字”形图像。然后转动上偏光镜，消光带分解成双曲线形，于西北和东南象限内。在每一消光带的凹侧呈现强烈的红色，凸侧和附近区域呈清晰的蓝绿色（图6－7a第一部分）。将分析镜转回正交位置后，转动物台45°，使之西北和东南两对象限内再次出现双曲线形，在双曲线带两侧也呈现明显的色边，然而凹侧为蓝色，凸侧至近视域中心为鲜明的橙红色（图6－7a第二部分）。

解释：图的第一部分，表示矿物处于消光位时，转动上偏光镜由“十字”形图像分解为双曲线形图像后，消光带两侧的光学关系，因仅由反射旋转色散造成，所以和均质矿物色散边形成原理相同。即沿红色边蓝光消失，故蓝光振动方向必然垂直于上偏光镜振动面（AA）；同理，沿蓝色边红光消失，所以红光的振动方向必然垂直于上偏光镜振动面。图的第二部分，当上偏光镜转回正交位置后转动物台45°，在此位置上矿物引起的非均质性旋转为顺时针方向。红边 RO 表示在该点经反射旋转后红光的振动方向，假如由矿物非均质性引起的反向旋转恰等于反射旋转，则红光的振动方向呈东西向而消失，但凸边所见

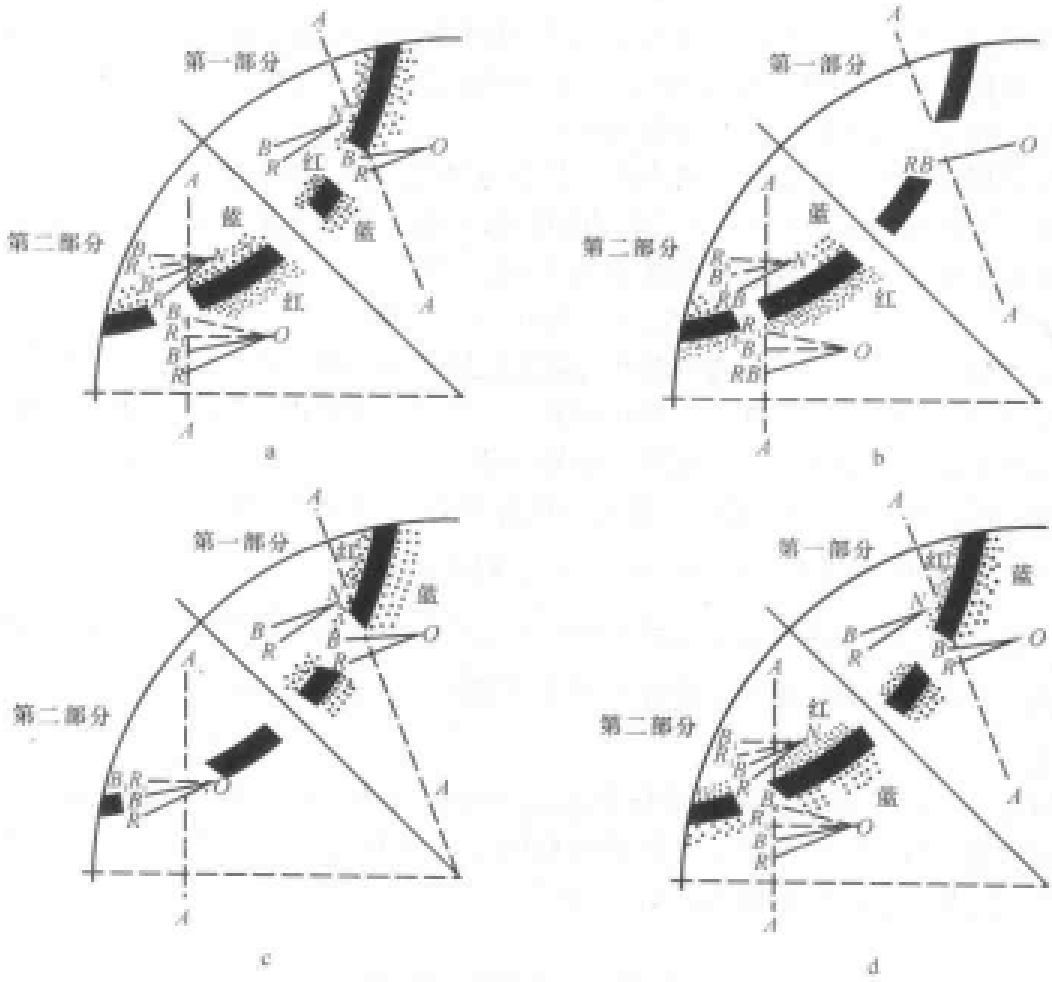


图 6－7　表示红和蓝光振动方位的旋转及其与非均质矿物偏光图的色边关系

各图的第一部分是矿物处于消光位，上偏光镜（*AA* 为振动面）反时针偏转。各图的第二部分是上偏光镜 *AA* 与前偏光镜 *PP* 正交，矿物处于Ⅱ、Ⅳ象限 45°位置，在此位置矿物非均质旋转为顺时针方向。*OR*、*NR* 和 *OB*、*NB* 分别为 *O* 点和 *M* 点红光与蓝光经反射旋转后的振动方向；OR_1、NR_1 和 OB_1、NB_1 分别表示红光和蓝光，叠加与之反方向的非均质旋转后的振动方向。红边用细点表示，蓝边用粗点表示

为红光，故说明非均质旋转对红光效应较强，大于反射旋转的效应而不能相抵，即两种旋转相叠后，红光的振动方向 OR_1 必在东西向之右边，而在该点上蓝光消失。这表明由反射作用引起的蓝光旋转被矿物非均质性旋转补偿，因此振动方向由 *OB* 转到 OB_1（东西向）。在凹边一侧，因反射旋转角向外逐渐增大，其增大程度恰与红光的非均质性旋转相等，但因旋转方向相反而补偿，所以凹侧为蓝色边。综上所述及图 6－7a 所示，表明矿物的非均质视旋转角色散 DA_r 为红大于蓝（$r > v$）。对于铜蓝 OR_r 及 OA_r 均为红 > 蓝（$r > v$）。若上述两种操作（两部分）中，色边的分布与上述情况都恰好相反，则 DR_r 和 DA_r 均为蓝 > 红（$v > r$）。

第二种可能出现的情况，如图 6－7b 所示。转动上偏光镜，第一部分消光带不出现色边，DR_r = 零。图中第二部分凹面蓝色，凸边红，则 $DA_r = r > v$；若色边相反，则 $DA_r = v > r$。第三种情况如图 6－7c，第一部分可看出 $DR_r = r > v$；第二部分消光带无色边，其红、蓝光的反射旋转叠加非均质旋转的关系应为：

$$\angle ROR_1B_1 = \angle ROB + \angle BOR_1B_1$$

由于在此点（O 点）上红、蓝光的振动方向都垂直于上偏光镜，故消光带为黑色而不具色边。从图中可知在第一部分 DR_r 为 $r > v$ 的前提下，等二部分 DA_r 也必 $r > v$。若在第一部分色边相反，则 DR_r 与 DA_r 也皆为 $v > r$。

第四种情况如图 6 7d 所示。图中第一部分与前图相同，DR_r 为 $r > v$。但当分析镜转回正交位置，并使矿物处于 45°位时，色边的分布与第一部分相同（凹边红凸边蓝）。仅当下式关系成立时，才能出现这种形式分布的色边，即

$$\angle BOB_1 > \angle ROR_1 - \angle BOR$$

但在这种情况下，并不一定能判明红与蓝光视旋转角的相对色散强度，因为蓝光的视旋转角可以小于、等于或大于红光。只有当第一、二部分中色边的强度有明显差别时，才能推测其相对色散。假如第二部分比第一部分的色边弱，则 $DA_r = r > v$，若第一、二部分中色边强度相等，则 $DA_r = O$；倘第二部分的色边较第一部分强，则 $DA_r = v > r$。在图 6 7d 中色边的位置若全部相反，即 $DR_r = v > r$ 时，则 $DA_r = v \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} r$。

如果不能从偏光图双曲线色边来判断测定非均质视旋转角色散时，则必须分别用红与蓝的单色光，对矿物的非均质视旋转角 A_r 进行定量测定后即可得 DA_r 的符号（$r \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} v$）。其方法见下节。

综上所述，对非均质矿物偏光图所观察之主要内容为：反射旋转色散 DR_r 及强度；非均质视旋转角色散 DA_r 及强度，非均质视旋转角 A_r（对红、白、蓝等色光）和双曲线的分离度等。常见非均质矿物偏光图见表 6－2。

表 6－2　常见非均质矿物偏光图

矿物	晶系	上偏光镜自正交位置旋转后双曲线“消光带”特征及 DR_r	视旋转角 A_r			色散度	双曲线分离度 %	正交偏光下、矿物 45°位置时的图像及 DA_r
			蓝	白	红			
铜蓝 *	六方	黑，模糊；橙红）蓝绿。$r > v$，中	17° ±		31° ±	14° ±	红 100 蓝 90 ±	双曲线不清楚、蓝））橙红。$r > v$，极强
辉钼矿 *	六方	黑灰，模糊；橙灰）蓝灰。$r > v$，极弱？	13°	13°	12.5°		95 ±	双曲线不清楚，视域呈淡灰蓝色
辉锑矿 *	斜方	灰黑，边界模糊；暗棕红）蓝灰。$r > v$，中	6.0° –	5.0° +	4.5° ±	1.5°	60 +	双曲线灰黑、淡玫瑰））蓝。$v > r$，中等
红砷镍矿 *	六方	灰色，模糊；暗棕）蓝灰。$r > v$，弱	3.5°	3.0°	2.5°	1.0°	50 ±	双曲线灰色，浅玫瑰红））蓝绿。$v > r$，强
硼镁铁矿	斜方	黑，淡棕）深蓝。$r > v$，中	3.0°	4.5°	6.5°	3.5°	70 –	双曲线黑灰色，深蓝））淡棕。$r > v$，中等
黑钨矿 *	单斜	黑，淡橙灰）淡蓝灰。$r > v$，弱	1.5°	2.0°	2.5°	1.0° –	20	双曲线黑色，不显色边。$r > v$，弱
磁黄铁矿 *	六方	灰，模糊；不显色边	2.0°	2.3°	2.5°	0.5°	20	双曲线黑灰色，浅灰蓝））灰橙。$v > r$，弱

续表

矿物	晶系	上偏光镜自正交位置旋转后双曲线“消光带”特征及 DR_i	视旋转角 ϕ_i			色散度	双曲线分离度/%	正交偏光下，矿物45°位置时的图像及 DA_r
			蓝	白	红			
毒砂*	单斜	黑灰，模糊；蓝）淡棕红，$v>r$，弱	1.5°	1.0°	0.5°	1.0°–	20	双曲线灰黑色，浅玫瑰）蓝绿，$v>r$，中等
辉锑矿*	斜方	褐灰，模糊；淡蓝）淡褐，$v>r$，弱	3.0°	3.5°	3.5°	0.5°–	30	双曲线灰黑色，天蓝））淡褐，$r>v$，弱
软锰矿*	斜方	黑，模糊；灰蓝）淡橙，$v>r$，弱	3.0°	3.5°	4.0°	4.0°	20	双曲线黑灰色，淡褐））灰蓝，$r>r$，中等
黄铜矿*	四方	黑灰，模糊；天蓝）淡褐，$v>r$，弱					<5	呈轻微变形（扭曲）的“黑十字”
黝锡矿*	四方	黑，蓝）淡棕，$v>r$，弱	1.5°	1.0°	0.5°	1.0°	<20	双曲线灰色，淡棕））深蓝，$v>r$，中等
碲金矿	单斜	灰，蓝）玫瑰红，$v>r$，弱	3.0°	3.0°	3.0°	0°		双曲线黑色，无色边
针碲金矿	单斜	灰，蓝）玫瑰红，$v>r$，弱	4.0°	4.5°	5.0°	1.0°		双曲线黑色，蓝绿））玫瑰红，$r>r$，中等
斜方砷镍矿	斜方	黑灰，无色边	1.3°	1.3°	1.4°		<20	双曲线黑色，无色边
斜方砷铁矿	斜方	黑灰，无色	2.2°		1.0°	1.2°		双曲线黑色，红））蓝，$v>r$，中等
斜方砷钴矿	斜方	深灰，淡蓝）粉红，$v>r$，弱	0.5°~1°	0.7°~2.8°	1.2°~3.1°	0.5°~2.1°	30~40	双曲线灰色，橙））蓝，$r>r$，弱
三方碲金矿	三方	灰，无色边	1.5°	1.5°	2.0°	0.5°		双曲线灰色，蓝））玫瑰红，$r>r$，中等
门铁矿	斜方	灰黑，淡色边，蓝）红，$r>r$，弱	2.5°	1.0°	0.5°	2.0°	>2	双曲线灰黑色，蓝绿））在视域中心为绿褐色，$v>r$，强
钛铁矿*	六方	黑，蓝）红，$v>r$，中	3.0°	2.5°	2.0°	1.0°	>20	双曲线灰黑色，紫粉））绿蓝，$v>r$，中等
赤铁矿*	六方	黑，橙红）蓝，$r>v$，中	2.5°	2.0°	2.0°	0.5°	<20	双曲线黑色，浅红））灰蓝，$v>r$，弱

注：“））”表示综合色散凹凸两边的颜色。

第二节　观测方法及步骤

在反射光下观测矿物偏光图，必须选择一台光学系统优良、部件（加膜无应变高倍物镜、镀膜玻璃片反射器、可左右转动读数精致0.1°的上偏光镜、勃氏镜、孔径及视野光圈等）齐全、安装精确的矿相显微镜。而且对显微镜之各部件必须进行检查校正，同时要将光源调至在视域中最亮程度，但勿使灯丝影像因聚光而呈现于视域中，以免影响对图像的观测。还需要用适当的蓝色滤光片将入射光调至白色，因在白光下才能正确地分析色散色型。

在观测偏光图之前，选一块磨光质量较好而无应变的均质矿物如黄铁矿置于载物台上，使上偏光镜与起偏镜严格正交，加勃氏镜或移去目镜（从敞开着的镜筒直接观察）

后可见一完美的“黑十字”。转动载物台若“黑十字”不变形也不破坏，则证明两偏光镜完全正交和物镜无应变现象。同时必须将物镜中心校正好，以免转动物台时由于不同矿物颗粒移换而造成对图像不正确的分析。

置欲测的矿物光片于视域中，移去目镜或加勃氏镜，转动物台仍为一不变的“黑十字”形图像时，说明矿物为均质性或非均质矿物底切面。

转动上偏光镜使“黑十字”分解成双曲线，并观测反射旋转色散 DR_r 及椭圆色散 DE，并记下它们的色型及强度。

如果矿物为非均质性矿物，则必须选非均质性最强的颗粒进行观测，因为只有这样颗粒才能代表或接近平行 c 轴或光轴面的切面。颗粒选定后，在正交偏光下转动物台使之呈“黑十字”图像，然后转动上偏光镜，观测 DR_r，或 DE。

恢复上偏光镜至正交位置，转动物台至45°位置，若矿物为极弱的非均质矿物，如黄铜矿，则只见“黑十字”扭曲变形，而一般非均质性矿物则分解成双曲线形。先用目镜微尺测双曲线分开的距离（以视域直径的百分比计算）；若无目镜微尺或勃氏镜，可移去目镜从敞开着的镜筒直接观察目估之，将其双曲线的分开距离记下，即双曲线的最大分离度，也是间接代表矿物在白光下的非均质视旋转角 A_r。而直接测 A_r 的方法是：转动上偏光镜使双曲线恢复成完美的“黑十字”时，上偏光的转角即为 A_r（白光）。如果欲测矿物对红光或蓝光的 A_r，需加一定波长的红光或蓝色干涉滤光器，转动上偏光镜使双曲线恢复在红光或蓝光下的“黑十字”时，上偏光镜之转角即为红或蓝光的 A_r。从而也即得出 DA_r（$v \gtrless r$）。

在白光下观测时，若双曲线具色边，则记下凹面的颜色及强度，即综合色散，并从中分析 DA_r 的性质。

实验作业

（1）在聚敛相交偏光下（用40～50×物镜）观察下列均质矿物的偏光图，并确定它们的反射旋转色散 DR_r、反射椭圆色散 DE：闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、自然铜、自然银、自然金。

（2）在聚敛相交偏光下，观测下列非均质矿物的偏光图，并确定它们的 DR_r 及 DA_r：铜蓝、白铁矿、辉锑矿。

（3）用偏光图“双曲线消光带”变“黑十字”法测量下列非均质矿物的 A_r：辉钼矿、石墨、辉锑矿。

第七章　矿物的内反射

第一节　内反射的基本概念

一、内反射的机理

内反射是指光线投射到透明或半透明矿物表面后，有部分光线经折射透入矿物内部，遇到矿物内部的解理、裂缝、空洞、孔隙、粒间界面和包体等时，发生内反射和折射，从而使一些光线折射出来的现象。内反射中所带有的颜色，则称为内反射色。内反射色与矿物的体色（透射光的颜色）是一致的。

二、矿物的内反射与反射色及反射率的关系

前已述及，矿物的反射色，主要是由于矿物磨光面对白色垂直入射光选择反射所致，它呈现的颜色为矿物的表色；而内反射色则是除反射光以外，透入矿物内部的那部分光线的颜色，也就是说它反映了矿物透射光的颜色，即体色。因此，二者之间应互为补色。例如辰砂的内反射色为鲜红色，而反射色则为灰白色带蓝色调；深红银矿内反射色呈深红色，其反射色则为淡蓝灰色。必须指出的是那些低反射率的透明矿物，它们反射色与内反射色的互补现象不明显。其原因是由于反射率过低（反射光少），矿物的选择反射现象也相对不明显。与此相反的那些高反射率的不透明矿物，由于吸收性强而透射的光线近于零，故无内反射现象可言，只见有较强的反射光（或反射色），所以无条件显示颜色的互补关系。因此，唯有一些半透明矿物的内反射色与反射色的互补关系，在显微镜下才容易观察得出。还应指出的是：内反射可分“有”和“无”两类，“无”是指用任何方法在空气中不显内反射现象者，“有”表示用某种方法可看到矿物的内反射现象者，它既包括具鲜明内反射色的矿物（如有内反射色的雄黄、蓝铜矿等），也包括“无色”内反射者（如具乳白色内反射的石英、方解石等）。

不难理解，内反射现象出现于透明矿物和半透明矿物中，这些矿物的反射率一般都较低，而反射率高的不透明矿物则不能产生内反射。根据实验统计表明，内反射与反射率及其反射色的关系大致有以下几种情况：

（1）反射率 $R>14\%$ 的矿物，因吸收性一般较弱（K 值大多小于 0.03），故大部分光线可透过，所以几乎都具有强烈的内反射，内反射色多为无色透明或乳白色（如石英），也有的因内反射光线的干涉作用产生虹状彩色（不是内反射色）。总之，这类矿物由于反射率很低，所以一般均具有强烈的内反射现象，其内反射色与矿物的颜色一致，而反射色均为深灰色、常带微弱的色调。

（2）反射率 $R=14\%\sim40\%$ 之间的矿物（大多 K 值在 0.03～0.73 之间），而其中反

射率在30%～40%之间的仅有少数矿物有内反射，如深红银矿等，但反射率在30%以下者多数矿物具内反射。有内反射者，其内反射色与矿物的颜色一致，皆为体色，而与反射色互为补色，如辰砂。

（3）反射率 $R>40\%$ 的矿物（K 值一般均大于0.73），由于对入射光线较强烈地吸收，因此光线几乎完全不能透入内部，所以不能产生内反射，其反射色与矿物颜色一致。因为二者都表现为反射光的颜色即表色，黄铁矿为一例。

应当指出的是，内反射的有无或强弱取决于矿物的透明度，就一般而言是与反射率大致成反比关系，但不严格。因为矿物的透明程度与其吸收系数 K 的关系更为密切，所以用 K 值的大小可恰当地解释少数反射率低（但 K 值较高）而不显内反射的矿物（如石墨等）。

第二节　内反射的观察方法和注意事项

一、内反射的观察方法

1. 斜照法

它是一种简便而常用的方法。其步骤是，先将欲观察的矿物在垂直照射光下准焦（用低倍物镜），然后再将光源改从侧面斜射于矿物磨光面上（图7-1），此时表面反射光与入射光成相同的角度向另一侧反射掉，故不能进入显微镜系统，所以在视域中看不到矿物的反射光。但经折射进入透明、半透明矿物内部的光线，当遇到矿物内部解理、裂隙、空洞或粒间界面时，部分光线经内部反射、折射后透出矿物，再进入显微镜系统达到目镜，从而可以观察到矿物的内反射现象。用此法观察矿物的内反射，一是需要较强的白色光源照射，二是要不断变换照射角度及方向，以便选择最适宜的方向和角度（也可同时转动物台变换矿物的方向），使其获得最大的光量，从而才能看到比较确切的内反射现象，三是接物镜必须有适当的工作距离，所以只能用低、中倍物镜观察。还应指出的是，内反射现象会使视觉有透明感、立体感、呈现透明的颜色并具不均匀的特点，或呈斑点状出现，转动物台时无规律性的变化等。然而这种方法对细小矿物内反射的观察颇受限制，而且灵敏性较差，所以只能用于观察那些内反射现象很明显的矿物。

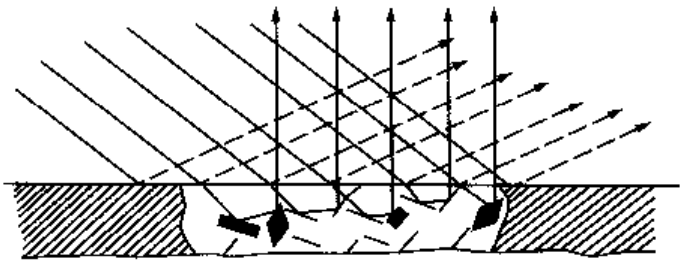


图7-1　斜照光下内反射的成因
（据邱柱国，1982）

2. 正交偏光法

这种方法观察矿物内反射可用各种倍数的接物镜，而以采用高倍物镜为宜，因高倍物镜对光线的聚敛作用强，可以获得各方向入射角较大的斜射光，从而增大了矿物显现内反射的机会。当这些斜射光线射入矿物内部，经折射旋转和内反射旋转作用，使入射的直线偏光发生旋转，同时也常产生椭圆偏光，故使部分内反射光可透过上偏光镜，因此在正交偏光下可观察到矿物的内反射现象。当观察均质的透明和半透明矿物时，因其表面反射光

基本上是将入射直线偏光原向反射，故被上偏光镜消除，从而可突出地显示矿物的内反射现象。对非均质的透明和半透明矿物的内反射进行观察时，必须将矿物转到消光位，以排除偏光色的干扰后才利于观察内反射。

3. 斜照光下或正交偏光下观察矿物粉末法

如果上述方法看不到矿物（$R>40\%$）的内反射现象，则不能认为该矿物确无内反射。可用钢针或金刚石笔将矿物刻划下来的粉末，在斜照光下或正交偏光下观察，其灵敏度较上述方法为高。因粉末即该矿物的微粒，它比光面中的矿物容易透光，因具有更多的反射界面，所以对那些透明度较差的矿物，如赤铁矿、针铁矿等，用此法可清楚地看到它们的内反射（粉色）。若所观察的矿物为无内反射的不透明矿物，如磁铁矿、磁黄铁矿，其粉末为黑色，或呈耀眼的金属矿物的反射色。

4. 正交偏光下油浸观察法

由于矿物在浸油中反射率大为降低，故使透入矿物内部的光强增大，因此更有利于内反射的显现，所以对内反射现象微弱的矿物颇见其效，具有很高的灵敏性。一些用前几种方法看不出内反射的矿物，在浸油中则能看出较清楚的内反射现象。若用这种方法仍看不到矿物的内反射，还可在浸油中观察其粉末，此为最后一试。若再看不出内反射时，即可确认该矿物为无内反射之属，但此法一般不用。在本书鉴定表中只将内反射分为两类：

（1）有——表示一般在介质为空气（干镜头）的条件下，用斜照光或正交偏光法显内反射者；如以粉末法才显者，须加以标明为粉末颜色。常见有内反射的矿物见表7－1。

表7－1　常见有内反射的矿物及其内反射色

白—黄色			
白钨矿（白—淡黄）	锡石（白—黄褐）	菱铁矿（白－黄褐）	自然硫（白－黄）
雌黄（黄—橘黄）	*针铁矿（淡黄－棕黄）	闪锌矿（淡黄—棕黄）	*金红石（黄—棕）
橙—红—棕红色			
雄黄（橘红）	红锌矿（橙—红）	黑钨矿（红棕）	辰砂（鲜红）
*铬铁矿（黄棕）	深红银矿（朱红）	淡红银矿（鲜红）	赤铜矿（血红）
*赤铁矿（砖红）	*水锰矿（暗红棕）	*纤铁矿（棕红）	*褐锰矿（暗棕）
绿—蓝色			
孔雀石（翠绿）	*硫锰矿（暗绿）	*方锰矿（暗绿）	蓝铜矿（蓝）

注：*粉末色。

（2）无——表示在上述条件下用上述方法不显内反射现象者所属之，常见矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、白铁矿、磁铁矿、辉铋矿、辉锑矿、辉铅矿、黝铜矿、辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、硬锰矿、软锰矿、毒砂、方铅矿、石墨。

二、注意事项

（1）内反射的特点是具有透明感、立体感和不均匀性。光片的擦痕、糙面、刻槽或不透明矿物的粉末，在斜照下，都会不同程度地产生漫射现象，切不可将此种强烈耀眼的表面反射光（闪光）误认为是内反射。

（2）在矿物光片裂隙或空洞中往往充填有磨料（如红色的 Fe_2O_3，绿色的 Cr_2O_3），用斜照光或正交偏光法观察矿物的内反射时，它们也会形成内反射并具较鲜明的颜色，切勿把它们误认为是矿物的内反射。

（3）非均质现象和偏光色影响在正交偏光下对内反射的判断，所以在观察非均质矿物内反射时，须将矿物转到消光位后进行。同时应注意当转动物台时内反射现象作无规律性的变化，而非均质现象及偏光色变化是有规律的。相反，当内反射很强烈时（如雌黄），也会将非均质性和偏光色掩盖掉。

实验作业

（1）用斜照法或正交偏光法观察下列矿物的内反射现象，并描述内反射的颜色：孔雀石、蓝铜矿、雌黄、辰砂、深红银矿、石英、雄黄。

（2）用斜照光或正交偏光观察下列矿物的粉末色：硫锰矿、黑钨矿、赤铁矿、针铁矿。

（3）在正交偏光下用油浸法观察铬铁矿的粉末色。

第八章　矿物的硬度

矿物抵抗某种外来的机械作用，特别是抵抗刻划、压入及研磨等作用的能力，称为矿物的硬度。

刻划硬度、压入硬度及抗（研）磨硬度是三种形式不同的抵抗外加机械作用的阻力（量度）标准。由于三种硬度的机制有所差异及测试方法的不同，其度量单位也各不相同。故不可能得到同一的物理量。另外，即使用相同的方法，如以压入法为例，若测试条件不同，得出的硬度值也不一致。矿物的硬度虽然是一个变量，但对每种矿物，其变化范围有一定限度，因此，不同的矿物具有不同的特征性。所以硬度值仍可作为鉴定矿物的重要依据。

硬度的大小主要取决于矿物的化学成分和晶体结构等因素。

矿物晶体中，化学元素呈原子或离子在空间作有规律的排列，原子或离子间的结合力称为键力，键力愈强，抵抗压入或撕裂的阻力就愈大，因此具有较高的硬度。而原子或离子结合的键力又取决于原子或离子半径、电价及化学键的类型等。一般情况下，就化学键的类型而论，以共价键结合的矿物硬度较高，离子键的矿物硬度中等，金属键的硬度较低，分子键（范德华键）者硬度最低。当键型相同时，矿物硬度依离子半径的大小及电价的高低而异：半径大者结合力小，硬度较低，反之结合力大，则硬度较高；就电价而言，电价高者结合力大，硬度就高，反之硬度则低。再者配位数、原子或离子的堆积密度对矿物硬度也至关重要，即配位数增高、堆积密度愈大者，其硬度愈高，密度愈小者，则硬度愈低。

此外，由于矿物的化学键和晶体结构上的异向性，造成晶体不同方向上硬度的差异，即使是在等轴晶系的矿物中也如此，而非均质矿物的差异就更为明显。

第一节　刻划硬度的测定

用金属针刻划矿物磨光面、晶面或解理面，视矿物能否被金属针刻划以确定矿物的硬度，此法虽只能定性测定，但该方法所用工具简单，方便易行，省时快速。所以仍具一定的使用价值。

一、测定方法

在低倍或中倍镜（其工作距离较大，易于刻划）下，对欲测矿物准焦，用右手食指、中指和拇指握住金属针，小指和无名指轻轻支撑在显微镜载物台上。使针与光面保持大约30°~40°的角度，针尖抵住欲测矿物，轻力握针，徐徐向右手外侧方向拉，同时眼睛注视显微镜下针尖在矿物表面刻划的现象，一旦获得刻动与否的试验结果，便立即停止刻划，尽量减少光面的损坏程度。

选针应有先后，一般先用铜针（用铜丝磨出较锋利的尖端，其摩氏硬度值大致为3）刻划，然后用钢针（可用较粗缝衣针，其摩氏硬度值大约为5.5）刻试。根据刻划结果，矿物硬度分级如下：

（1）低硬度：能被铜针刻动，相当于摩氏硬度3级以下。

（2）中硬度：铜针刻不动，钢针能刻动，相当于摩氏硬度3至5.5级。

（3）高硬度：钢针刻不动，在摩氏硬度5.5级以上。

二、测试注意事项

（1）测试前先将光片擦净，以免其上的污垢或氧化膜影响观察结果。

（2）刻划时，尽量勿将矿物磨光面上的其他重要现象刻划掉。

（3）注意观察刻划现象，针尖刻动的现象是针尖运行轨迹位置留下一条沟槽、刻痕或粉末；如果刻不动，刻划的右手在移动时会感到光滑省力，在刻划的轨迹上或者没有留痕迹，或者留下一条亮白色（钢针的）或铜红色（铜针的）划痕。两种现象切勿混淆。

（4）当钢针或铜针能刻动欲测矿物时，沟槽两测堆积为粉末状者，表示该矿物具脆性，堆积物为翻卷而降起时，表明其具可塑性。这些特征也是鉴定矿物的有益信息。

此外，某些矿物硬度有明显的异向性，测定时应予以重视。

刻划硬度在目前仍很重要，因为许多分组式矿物鉴定表（包括本书），均以刻划硬度的高、中、低三级作为编表的依据之一。

第二节　抗磨硬度的测定

在磨制光片时，由于矿石中连生的各种矿物抗磨程度的差异，被磨损程度的不同，从而呈现凸凹不平的现象。低硬度的矿物易磨损而相对凹下，较高硬度的矿物磨损程度小而相对突起，在两种硬度不同的矿物的连接处即形成斜面，并向软矿物一方倾斜（图8－1）。当垂直入射光射至此斜面上时，必向软矿物一侧发生斜反射，此部分向上斜射的光线与软矿物平面的垂直反射光重叠时，即形成一条“亮线（亮带）”。借这种“亮线”来观测矿物的抗磨硬度，故又称“亮线”法。

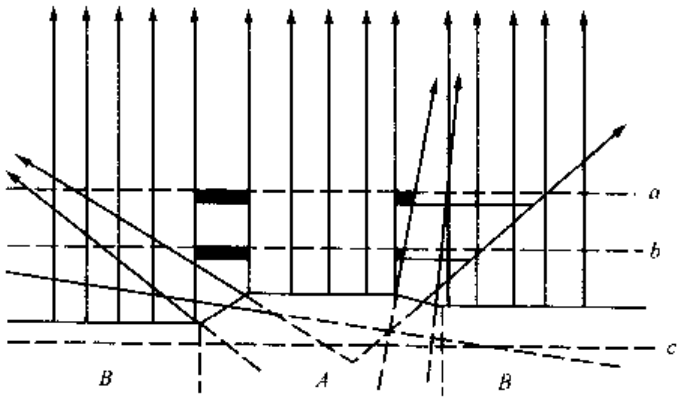


图8－1　垂直照射下光线在不同硬度矿物接触斜面上的反射情况

一、观测方法

首先在镜下找到欲比较其硬度的两种矿物接触线，置于视域中心，焦准在图8－1的b焦平面上。提升镜筒，使焦平面由b线上升至a线位置，使亮线逐渐向低硬度矿物（B）一侧移动；若下降镜筒，使焦平面降至c线位置时，其亮线向较高硬度矿物（A）一侧移动。据此即可判断欲测矿物抗磨硬度的相对高低。

二、测定注意事项

（1）如果相比较的两矿物抗磨硬度接近时，亮线就不会很清楚，这时可缩小孔径光圈，使亮线更清楚些，认真反复观察才能得出确切结论。

（2）若两相邻矿物抗磨硬度相差甚大，接触带形成一陡坎，反而看不到亮线，此时通过接触面的反射光近于水平反射，因此在视域中看到的只是一条暗带。

（3）观测时为使缓斜面的亮带更明显些，可减弱光源亮度（降低光源电压或缩小孔径光圈）来提高效果。

第三节　压入硬度的测定

根据压锥（或压痕）的形状显微压入硬度可分三种：用硬质合金制成的球体测出的硬度称布氏硬度；用金刚石制成的正方形锥体测出的硬度称维克硬度；用金刚石制成的菱形锥体测出的硬度称诺普硬度。矿物学的研究中，通常是测试矿物的维克硬度。测定时，加一定负荷（砝码），将锥体压入矿物表面，形成一永久性压痕。由于压痕侧面积（或深度）与负荷成正比例关系，在负荷固定的情况下，压痕侧面积与矿物硬度成反比例关系。即压痕侧面积越大时，矿物硬度越低，反之，矿物硬度越高。若保持压痕大小基本不变，则可通过改变负荷来测定。矿物的压入硬度与负荷和压痕侧面积二者之间的关系式如下：

$$H = \frac{P}{S} \tag{8-1}$$

式中：H 为压入硬度（kg/mm^2）；P 为负荷重量（kg）；S 为压痕侧面积（mm^2）。

目前国内外用于显微压入硬度测定的压锥，主要是用维克（Vicker）压锥（图 8－2a），或者用诺普（knoop）压锥（图 8－2b）。前者测得的硬度用 H_V 或 VHN 表示，后者用 H_K 或 KHN 表示。

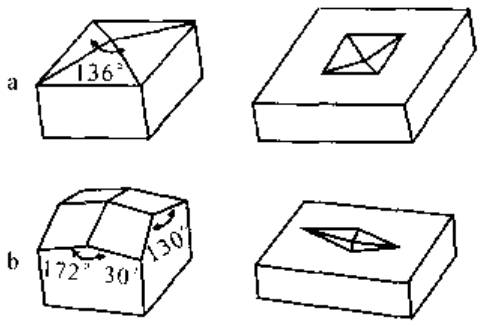


图 8－2　维克与诺普压锥及其压痕形状

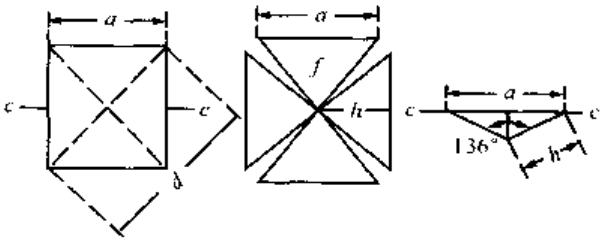


图 8－3　维克压头及其压痕面积展开示意图

维克压锥相对斜面间夹角为 136°（图 8－2a），压痕投影呈正方形（图 8－2a），实际压入面积应以锥体的总侧面积 $S = 4f$ 计算。f 为每个三角形压面的面积，a 为正方形压痕的边长，即每个三角形压面的底边长，h 为三角形压面的高，d 为压痕投影对角线长（图 8－3）。这样公式（8－1）可以演化为：

$$H_V = \frac{P}{S} = \frac{P}{4f} = \frac{P}{4 \times \frac{1}{2}ah} = \frac{P}{2ah} = \frac{P}{2a \cdot \frac{a}{2\sin\frac{136°}{2}}} = \frac{2P\sin 68°}{2a^2}$$

$$= \frac{2P\sin 68°}{d^2} = 1.8544\frac{P}{d^2}(\mathrm{kg/mm^2}) \qquad (8-2)$$

单位为：千克/平方毫米（$\mathrm{kg/mm^2}$），即 P 以千克（kg）、d 用毫米（mm）计算。

诺普压锥体相对两面夹角分别为 130°和 172°30′，压痕投影为长菱形（图 8－2），其硬度计算公式为：

$$H_K = 14.2288\frac{P}{d^2}(\mathrm{kg/mm^2}) \qquad (8-3)$$

所用符号意义与（8－2）式相应，仅 d 为长对角线长度。

两种压锥相比较，诺普压锥的压痕对角线较长，压痕深度较浅，因此对于测定硬度异向性和厚度较小的矿物有利；维克压锥的压痕为正方形，用其测定晶体不同方向的硬度时，较易获得平均值，数据也较稳定。

一、显微硬度仪的构造

显微硬度仪按安装方式可分两类：一类是压锥与物镜分离式，如苏式 ПМТ－3 型及我国上海产 71 型显微硬度仪；另一类是压锥与物镜一体，如联邦德国产附在 ORTHOPLAN 型及 ORTHOLUⅡPOL－BK 型矿相显微镜上的自动显微硬度计。

1. 国产 71 型显微硬度仪

由测微反光显微镜、载物台和负载装置等部件组成。测微反光显微镜在左半部，由测微目镜、物镜等组成，用于选择矿物，确定欲测部位和测量压痕对角线长度。载物台安装在可升降的立轴上，可以作上下、左右和前后移动，以便准焦欲测部位和调节压痕位置等。负载装置位于右半部，拨动手轮，可变换使用不同重量的砝码（P）。压锥为金刚石正方形锥体（维克压锥），被固定在保护套内。

2. 联邦德国自动显微硬度计

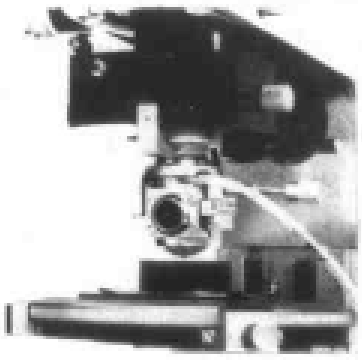
主要部件为自动负荷选择器、压锥、压头、微尺目镜和砝码等（图 8－4）。

自动显微硬度计装在 ORTHOLUXⅡPOL－BK 型显微镜上者如图 8－4a。其自动负荷选择器如图 8－4b、c，当选定所需负荷及加压时间后，调节其上各种旋钮，可自动控制加压速度和时间，并以指示灯给出信号。压锥有维克和诺普两种，可自由选择，压头可与镜筒相连（图 8－4d），便于观察和测试。通过转动微尺目镜的旋钮测量压痕对角线长度（d）。砝码有 5 g、10 g、25 g、50 g、100 g、200 g、400 g 七种，使用前须经标定天平校正，各种砝码不能组合使用。

二、测量方法

1. 国产 71 型显微硬度仪的测定方法

将欲测矿物置于物台上，向左推使物台位于显微镜下方，转动物台手柄，使光片准焦，然后调节左右和前后旋钮，使欲测部位居中。轻推物台向右，使欲测部位恰好位于压锥下方。旋动压锥升降旋钮，徐徐下降，当红灯明亮时即开始加压，一定时间后（选定



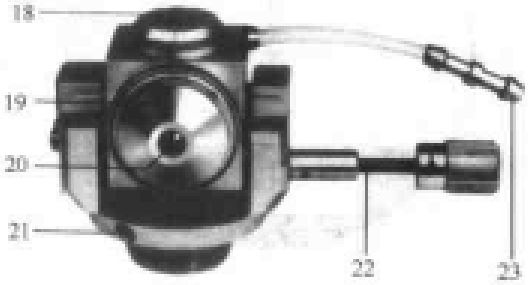
a. 附在 ORTHOLUX Ⅱ POL-BK 型矿相显微镜上的自动显微硬度计



b. 自动负荷选择器



c. 自动负荷选择器主侧面图



d. 压头

图 8－4　硬度计示意图

1—测试负荷的支柱；2—气泡水准；3—负荷期间指示灯；4—按钮帽；5—起动按钮；6—调节栓；7—断路按钮；8—负荷数调整按钮；9—泵工作期间调节钮；10—主（转换）开关；11—主报警灯；12—调平螺旋；13—测尺照明器插口；14—测压管接口；15—主电缆；16—插座；17—压头压力管的接口；18—观测物镜；19—盖帽（保护罩）；20—金刚石压锥；21—中心校正螺丝；22—弹性轴；23—压力管接口

的时间，15 s 为宜），绿灯明亮，则加压结束（红绿灯交替时间可由旋钮控制）。提升压锥卸荷，将物台重新推至左端，在反光显微镜下测量压痕对角线长度。

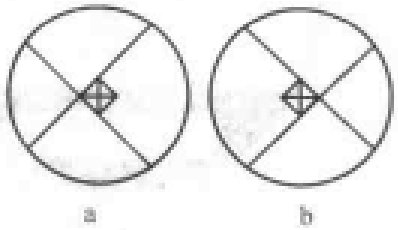


图 8－5　压痕对角线长度测量示意图

测量时，首先调节显微镜视域中心与压痕中心重合，可扭动物台前后和左右旋钮，使其重合。然后利用鼓轮移动测微目镜中的十字丝（图 8－5 十字丝从 a 移至 b）量出压痕对角线格数，将格数乘以格值（格值由说明书中查出），换算成毫米，然后将给定的 P 和 d 值代入公式（8－2），即可求出 H_V。

2. 联邦德国自动显微硬度计的测定方法

操作程序是先将微尺目镜装入镜筒中，再把物镜、压头和金刚石压锥一起旋入镜筒下端镜头接口中，调节压头中心使之与物镜视野中心一致。准焦欲测矿物后，即可选择负荷及加压时间，再转动弹性轴，使金刚石锥按箭头方向转入光路。开始加压时红色控制针指示泵马达正在运转；指示灯明亮，同时泵自动关闭。在规定的加压时间完成后，指示灯熄

灭，控制针复原。然后按箭头方向转回弹性轴，使观察物镜转入光路。

测量对角线长度时，调节微尺目镜上的校正螺丝，使目镜十字丝中心对准压痕中心。然后转动物台活动旋钮，使压痕对角线一端对准标尺零点（图8－6a），竖尺读数为075～100之间，再将另一端下移至075处（图8－6b），从横尺上读出另一读数为12.5，将两数相加（75＋12.5＝87.5格）即为压痕对角线长度。欲求另一对角线长度时，将微尺目镜向右转动90°后，重复前法测量。将两对角线长度相加平均，得出 d。根据 d 和所加负荷 P 代入公式（8－2），即可求出 H_V。若采用诺普压锥时，测量方法与上相同，测出长对角线长度（图8－7），代入公式（8－3），即可得出 H_K。

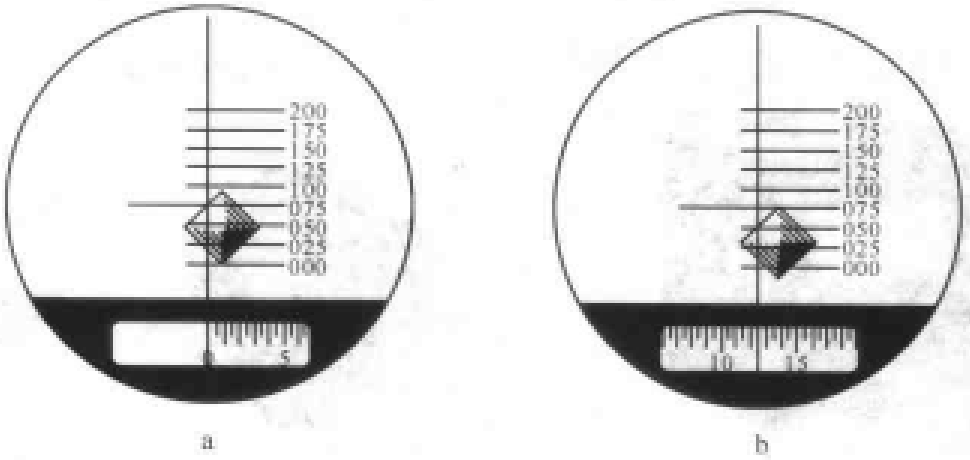


图8－6　维克压痕对角线长度的测量

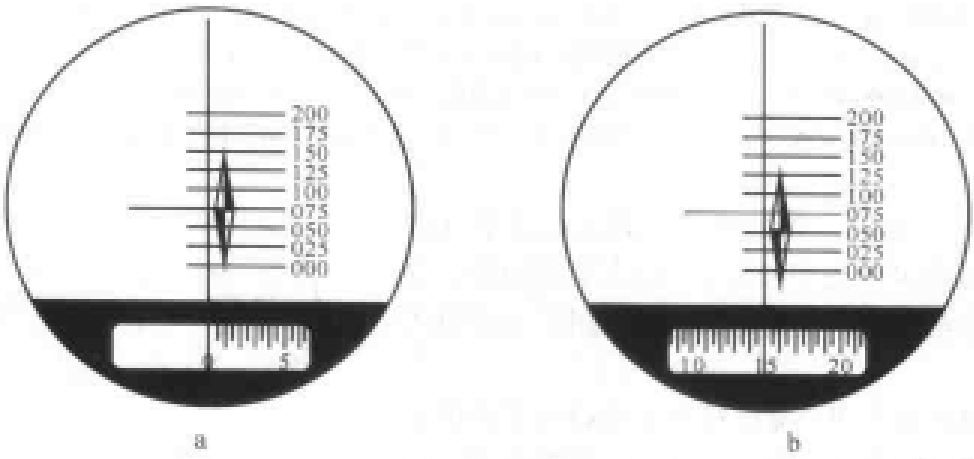


图8－7　诺普压痕长对角线长度的测量

三、测量注意事项

1. 校正硬度值

在使用71型显微硬度仪测量矿物之前，可用仪器所附的标准块（多选用石盐晶体的解理面作标准）进行标定。作法是用5 g负荷，用维克压锥连测4次－6次，若计算其硬度值均在20 kg/mm^2～23 kg/mm^{2}范围内，则被认为仪器已校正好。此时的压锥与矿物光

面的距离为标准距离。如果所测结果不在 20 kg/mm^2 ~ 23 kg/mm^2 之内，则应调节压锥的高低位置后重测，直至符合要求为止。

2. 压痕与矿物颗粒大小

所测矿物的颗粒不能太小，压痕对角线长度不应大于被测矿物粒径的 1/4，两次测试的压痕间距要超过压痕对角线长度的三倍以上。压痕深度要小于被测颗粒厚度的 1/10。同一种矿物要测 10 个以上压痕。

3. 负荷选择

根据硬度理论公式，矿物的硬度与测定时的负荷大小无关，然而在实际测试中却往往出现误差。绝大多数矿物随测试负荷减小而出现硬度值偏大的趋势（图 8 - 8）。其原因主要是由于矿物磨光面在抛光过程中产生一非晶质较高硬度薄膜，负荷较小时这一薄膜对矿物硬度的歪曲越明显。再者压痕产生后由于弹性复原，造成压痕对角线收缩，对于可塑性大的矿物和压痕对角线过小时，将会造成较大误差。因此对于脆性矿物可适当减小负荷，对可塑性矿物则一般采用大负荷，按国际矿相学委员会建议，一般采用 100 g 负荷。在测

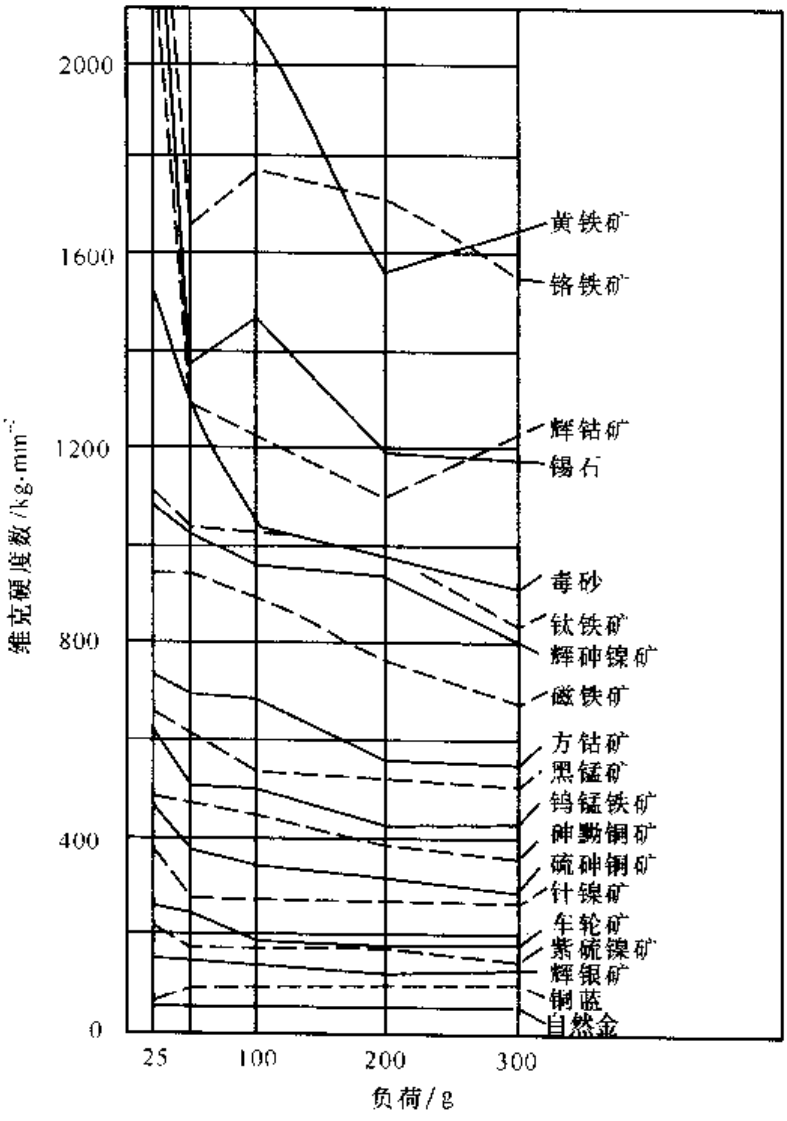


图 8　8　几种常见矿物的维克硬度值与负荷的关系

试硬度时，要注明所采用的负荷重量，以利于对硬度值的选择和对比。

4. 加压时间

硬度计算公式中虽然没有时间因素，但在实测中，压锥与矿物接触的时间长短，也会造成压痕大小变化。加压时间越长，压痕也逐渐增大。这是由于矿物的可塑性引起的，因此，为了求得标准硬度值，按国际矿相学委员会规定，加压时间为 15 s。

5. 压痕对角线测量精度要求

实测矿物硬度值主要取决于压痕对角线长度。而压痕对角线长度除必须提高测量精度外，还有压痕规整程度、光源波长、物镜分辨率、焦深范围等外在因素均影响压痕对角线长度测量的精度。为了克服上述因素造成的误差，尽量使压痕足够大，一般不宜小于 20 μm，才能保证硬度值误差在 5% 以内。

6. 震动误差

显微硬度仪的灵敏度很高，微小的震动甚至变压器的震动都会影响压痕大小的变化。所以安装仪器必须严格防震，仪器应置于防震桌或水泥台之上，并在仪器座下垫以橡皮垫或海绵垫，以防止震动误差。

7. 压痕的形状观察

因矿物的弹性复原、塑性变形、脆性破裂等原因，可使压痕呈现各种形状，即使是等轴晶系矿物，压痕形状也会随不同方位而异。一般可分完整的、轻微破裂的、破裂的、内凹的、外凸的五类。记下这些压痕形状有助于鉴定矿物和对比研究。

四、摩氏硬度与压入硬度的关系

压入硬度值主要表示矿物抵抗塑胜变形的能力，至于弹性、脆性等则居于次要地位。刻划硬度亦表示抵抗塑性变形的能力，但抵抗破裂、剥离及刻划的方向性等因素的影响比对压入法重要。因此两者仅在一定程度上可以类比。

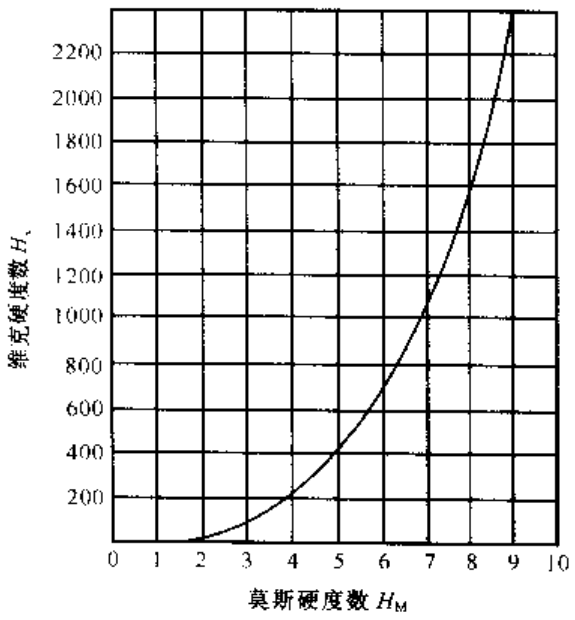


图 8－9　维克硬度值(H_V)与莫斯硬度数(H_M)关系图

（据普多芙金娜）

（据金属矿物显微镜鉴定，1978）

所以摩氏硬度与压入硬度数值并非完全呈线性关系变化，只是同消长关系。

普多芙金娜（И. А. Пудовкина）综合了各家数值，取其平均数，作出了维克硬度值与摩氏（氏）硬度数的换算图（图 8－9）。

维克硬度（H_V）与摩氏硬度（H_M）之间的线性关系式为：

$$H_M = 0.675\sqrt[3]{H_V}$$

$$H_V = 3.25H_M^3$$

根据上述公式可以大致换算出两者的相当数值。

常见矿物抗磨硬度的相对顺序和刻划硬度及压入硬度的相应关系见表8－1。

表 8－1　常见矿物抗磨硬度的相对顺序表（从上至下、自左向右、以递增为序）

矿物	刻划硬度	维克硬度/（$kg \cdot mm^{-2}$）	矿物	刻划硬度	维克硬度/（$kg \cdot mm^{-2}$）
石墨		$7 \sim 12_{5-15}$	自然铜		48～143
辉钼矿		24～32（六方），18～23（斜方）	黝锡矿		142～248
辉银矿		20～61	硫锰矿		138～261
雌　黄		22～52	针镍矿	中	192～376
雄　黄		47～60	闪锌矿		128～276
辉锑矿		$42 \sim 129$，$72 \sim 138_{50}$，$65 \sim 153_{10-20}$	镍黄铁矿		$202 \sim 231$，$195 \sim 303_{50}$
铜　蓝	低	$59 \sim 129$，$92 \sim 110_{50}$	磁黄铁矿		230～390
辉铜矿		$58 \sim 96$，$62 \sim 99_{15-20}$	红砷镍矿		308～533
蓝辉铜矿		$56 \sim 83$，$30 \sim 94_{15-20}$	方铅矿系列		268～974
方铅矿		$56 \sim 116$，$64 \sim 110_{10-25}$	针铁矿		525～1010
辉铋矿		$67 \sim 216$，$68 \sim 190_{50}$	磁铁矿		440～1100
自然金		$32 \sim 59$，$42 \sim 88_{10-25}$	铬铁矿		689～957
自然银		$46 \sim 118$，$40 \sim 57_{10-20}$	钛铁矿	高	402～1088
斑铜矿		$68 \sim 105$，$97 \sim 124_{20-25}$	毒　砂		715～1354
黄铜矿		174～219	赤铁矿		739～1114
方黄铜矿	中	150～264	白铁矿		762～1561
黝铜矿		251～425	黄铁矿		913～2056
砷黝铜矿			锡　石		811～1592

注：维克硬度值的右下角数字为所用砝码重量，未标下角数字者一般系使用 100 g 砝码所测。

实验作业

（1）用刻划法测定矿物硬度

熟悉下列标准矿物的刻划硬度

方铅矿：低硬度，即用铜针能刻动。

闪锌矿：中硬度，即用铜针不能刻动，钢针能刻动。

黄铁矿：高硬度，即用钢针也不能刻动。

测定下列矿物硬度并分级

毒砂、黄铜矿、辉锑矿、铬铁矿、辉铋矿、磁黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、辉铜矿。

（2）用亮线法比较下列矿物硬度的相对大小

磁黄铁矿－黄铜矿；斑铜矿－黄铜矿；方铅矿－闪锌矿。

（3）用压入显微硬度仪测定下列矿物的维克硬度值（H_v）

闪锌矿、方铅矿、黄铁矿。

第九章　矿物的浸蚀鉴定

浸蚀试验（浸蚀反应）在19世纪80年代被人们用于鉴定矿物后，直到20世纪30年代以来，其主导地位才逐渐被光学性质所代替。特别是随着定量测试矿物光学、物理性质的仪器近于日臻完善，从而更有利于金属矿物的鉴定。尽管如此，浸蚀试验仍不失为鉴定工作中的重要辅助方法之一。尤其对某些物理性质很相似、难以区别的矿物，可用浸蚀试验帮助将其迅速的区分开。浸蚀试验包括浸蚀鉴定和结构浸蚀。前者是利用化学试剂试验矿物反应与否及反应现象来鉴定矿物；后者是借助化学浸蚀来显示矿石结构和矿物晶粒内部结构的方法，此部分将在矿石结构研究的章节中一并叙述。本章仅对浸蚀鉴定加以简介。

第一节　概　　述

一、基本概念

浸蚀鉴定是利用一定浓度的化学试剂浸蚀矿物的光面，经一定时间后（约1 min），在显微镜下观察有无溶解、发泡、沉淀、变色等现象发生及其程度如何。由于矿物对试剂的浸蚀反应各不相同，因此可以用于鉴别矿物。

二、浸蚀过程

矿物光片在磨制过程中产生一层该矿物的非晶质薄膜（厚度为零点几个纳米），这层薄膜不仅掩盖在矿物光面上，而且充填了矿物的裂隙以及晶粒之间的空隙。以致使矿物的集合体连成一片，看不出晶粒内部结构及晶粒与晶粒之间的界线。

浸蚀鉴定所用的试剂大部分为强酸、强碱或强氧化剂，具有强烈的腐蚀能力及化学反应能力。当试剂与矿物接触时，首先与试剂起作用的就是非晶质薄膜，进一步才是矿物的表面。

三、浸蚀后产生的反应

各种浸蚀试剂对非晶质薄膜与矿物表面所起的作用是多种多样的，主要有下面几种：

1. 发泡（起泡）

试剂作用于矿物光面之后，若反应产物中有气体产生，便呈气泡从试液中逸出，此现象称为发泡（起泡）。而迅速剧烈起泡者称沸腾，如辉铜矿加1:1 HNO_3 后的反应。缓慢者称缓慢发泡，如针镍矿加1:1 HNO_3 后的反应。发泡时间长短、快慢将随矿物与试剂种类及浓度不同而异。一般引起发泡的试剂为硝酸、盐酸、王水和过氧化氢等。所产生的气泡（气体）常为 CO_2、H_2S、O_2 等气体。例如：用硝酸、盐酸浸蚀方解石时则放出 CO_2；以1:1 HCl 浸蚀硫锰矿时可产生 H_2S；用 H_2O_2 浸蚀氧化锰矿物时即产生 O_2。

2. 变色

当试剂将非晶质薄膜溶解再作用于矿物表面后，由于矿物受到浸蚀或产生轻度沉淀

时，往往使矿物表面形成明显的变色现象。变色大致可分为如下三种情况：

（1）染黑　由于试剂浸蚀作用强烈，使矿物表面变得粗糙不平，从而不能向上垂直反光而呈黑或黑灰色。

（2）染色　系矿物与试剂作用后形成的带色薄膜所致。如辉铜矿被 1:1HNO_3 或 20% $FeCl_3$ 浸蚀后染蓝；以 20% KCN 作用于斑铜矿则被染褐。

（3）染彩（晕色）　被试剂作用后的矿物表面形成红、黄、蓝，绿等彩晕叫作染彩，它是由所形成的一层无色透明沉淀薄膜经光干涉作用而致。如 1:1HNO_3 作用于毒砂后形成的彩晕。

3. 沉淀

当浸蚀作用特别强烈时，大多产生沉淀物而形成较厚的皮膜。这种沉淀物比“变色”沉淀皮膜厚而显著，以致不能向上垂直反光，只能在显微镜系统外从侧面观察其沉淀物的颜色。如辉锑矿经 40% KOH 浸蚀后产生黄色沉淀，赤铜矿加 1:1HCl 后形成白色沉淀。

4. 显结构

包括显现颗粒界限、内部环带结构、解理、裂理及双晶等。由于各种浸蚀试剂的作用，使非晶质薄膜溶解消失，进而显现矿物的颗粒界限及内部结构。例如：辉铜矿经 1:1HNO_3浸蚀后显现颗粒界限及解理，毒砂加 1:1HNO_3 后显现双晶和晶粒内部环带结构。

5. 薰污

试剂液滴周围常形成一圈暗色薰染或彩色的晕圈，系由试剂蒸气与非晶质薄膜有轻微反应之结果。一般有薰污反应现象的矿物，在试剂液滴部也有反应。例如，辉银矿遇 1:1HNO_3褐色薰污显著。

上述现象产生的原因解释如下：

当浸蚀作用只将非晶质薄膜溶解时，矿物表面的性质及颜色变化不大，表面可变为无光泽。但另一方面由于非晶质薄膜的消失，使矿物内部结构特征如解理、裂理、双晶、环带结构等可以显现出来，或晶粒之间界线更为清楚。当试剂的浸蚀作用较强烈时，除了非晶质薄膜被溶解外，矿物本身也被浸蚀，结果使矿物表面变成粗糙不平，入射光经反射后变成散射光，光面就变成了灰色或黑色。

但在一般情况下试剂与矿物反应所遗留下的皮膜并不厚，只形成极薄的皮膜粘附在被浸蚀部分的矿物光面上。薄膜往往带有颜色，这种带色的薄膜使矿物表面变黄、褐、蓝等各种颜色（染色）。有时薄膜也可以是无色透明的晶体，当入射光进入此无色透明晶体内部再度反射出来时，就形成各种干涉色（晕色、染彩）。

光片经过浸蚀作用后，出现发泡、变色、沉淀、显结构、薰污等任何一种现象时，均为正反应，以（+）号表示之。若作用后无反应，光面保持原有光滑，则均为负反应，以（-）号表示之。

第二节　试剂和工具

用于浸蚀试验的试剂通常均有规定，它们都应符合一基本条件，既反应快又剧烈，反应结果在矿物不同方向上一致，试剂本身又能起溶媒作用，为了操作方便，试验必须在室温状况下进行，样品和试剂都不需要加热，试剂须纯净稳定，容易保管。

一般常用的六种标准试剂为：

硝酸（1:1 HNO_3），即 1 份浓 HNO_3、1 份蒸馏水

盐酸（1:1 HCl）

氰化钾（KCN 的 20% 水溶液）

氯化铁（$FeCl_3$ 的 20% 水溶液）

氢氧化钾（KOH 的 40% 水溶液）

氯化汞（$HgCl_2$ 的 5% 水溶液）

此外，附加下列两种辅助的常备试剂，专试氧化锰矿物和一些与上述六种试剂都不起反应的矿物。

双氧水（H_2O_2 的 30% 水溶液），接触氧化锰矿物后都发泡。

王水（3 份 HCl + 1 份 HNO_3），与上述六种试剂全无反应的矿物试之。

还可以采用硝酸银的饱和溶液鉴别黄铜矿与自然金，在 1 min 内金不起变化，黄铜矿则变成黑色。采用高铁氰化钾 $K_3Fe(CN_6)$ 25% 的溶液鉴别黝铜矿与砷黝铜矿。许多适用于结构浸蚀的试剂，也具有一定的鉴别意义，例如 $KMnO_4 + H_2SO_4$ 用于闪锌矿，浓 HNO_3 用于辉铜矿，浓 HCl 用于磁铁矿等。

试剂最好用小滴瓶保存。这种小滴瓶的瓶塞与瓶盖经过精细磨制，接触很紧密，不致使气体外泄。上述试剂中几种酸都应当用这种滴瓶装置。但氯化汞与氢氧化钾溶液易发生结晶，如用小滴瓶就会在短时间内将瓶口粘住，因此应该采用橡皮塞的瓶子。每一瓶子外面都要贴上涂蜡标签，既免紊乱又防被试剂的气体浸蚀毁坏。整套试剂最好装在上漆的木匣内，每瓶在匣中的位置要固定，便于取用。

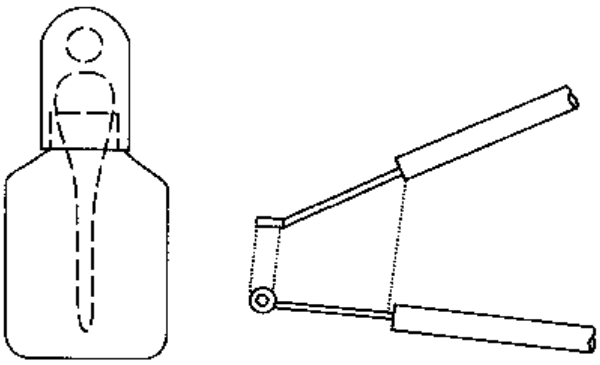


图 9-1　浸蚀鉴定所用的小滴瓶及白金丝圈

试剂长期应用后浓度将发生变化，以致影响试验结果，因此，应当定期将试剂重新制备。

浸蚀试验中另一重要用具为滴放试剂用的白金丝。白金丝直径最好为 0.3 mm，长约 3 cm，另取玻璃棒一段，将白金丝的一端熔入其中，另一端则弯成一小圈，小圈平面略与白金丝成 30°倾斜（图 9-1）。白金丝每次用后必须用蒸馏水洗净，以免下次沾污试剂，也有人用蜡纸尖楔滴放试剂，但用白金丝显然较为优越。

另外，还须准备些小块吸水纸（长条形，宽约 0.5 cm）、冲洗白金丝与光片用的蒸馏水滴瓶或烧杯、擦拭光片用的擦板、抛光用的磨料等，每次浸蚀后须将光片抛光复原。

第三节　操作方法和注意事项

一、操作方法

（1）将测试矿物的光片先在擦板上擦拭，除去其上的灰尘、油污及表面在空气中生

成的氧化膜，使光片有一光滑的新鲜面。

（2）置光片于载物台上，用机械台夹住。换上中、低倍物镜，并移置测试矿物于视野中心。

（3）把要用的试剂（试用的顺序应为：$HgCl_2$、$FeCl_3$、KCN、KOH、HCl、HNO_3）用小滴瓶中的滴棒滴在清洗过的白金丝上。

（4）将蘸有试剂的白金丝移至接近光片之亮点中，在视野中见到白金丝后再将试剂准确的滴在测试矿物上，并立即开始观察其变化。

（5）浸蚀作用的时间以一分钟为限（有无发泡现象在此时间内观察），有的矿物变化迅速，有的变化缓慢。

（6）一分钟后，用吸纸将试液吸干，观察其矿物表面有无变化。然后用一滴清水冲洗原处并再以吸纸吸干，进一步检查变化的情况，最后决定其“正”或“负”反应。

（7）再用吸管吸水冲洗浸蚀面，在擦板上擦净，然后做第二种试剂的试验。依次做完六种试剂的浸蚀，记录结果。

二、注意事项

（1）矿物光片不干净，有油污或氧化膜，都会减弱反应，因此在试验前须擦拭干净。

（2）金属矿物中常有方解石包体或细脉，与酸作用剧烈发泡，不要误认为被试矿物的发泡反应；同时由于方解石的存在影响试剂对矿物的反应，此外试剂常流入光片的裂隙，或与光面以下的矿物反应而起泡，应与被试矿物的反应分开。

（3）三氯化铁溶液本身为淡绿色，切勿误认为是正反应。另外用滤纸未能完全吸干试剂时，其残余试液在光片上呈不规则彩晕，也易误认是晕色。

（4）试剂若滴在两种以上矿物交界处，由于电位差的作用使反应随毗邻矿物的不同而增强或减弱。

（5）矿物中含有类质同象混入物或非均质矿物的截面不同，其反应结果会不完全相同。

（6）氧化带矿石易受浸蚀，如采自氧化带的黄铜矿能被1:1硝酸浸蚀，而原生带者不受浸蚀。

（7）试剂作用时间须控制在一分钟内，否则有些矿物经长时间的试剂作用仍可起反应。总之，正确的掌握了浸蚀反应所产生的现象就能迅速判别其正负反应。

实验作业

1. 观察浸蚀鉴定的几种主要反应：

（1）辉铜矿加1:1HNO_3，强烈的起泡和染蓝，并显颗粒界限及解理。

（2）方铅矿加1:1HNO_3，变黑（染黑），有时有发泡现象及蒸汽作用产生薰污。

（3）毒砂加1:1HNO_3，产生晕色（染彩），有时发泡。

（4）辉锑矿加40% KOH，产生黄色沉淀。

（5）孔雀石加20% $FeCl_3$，慢慢发泡及染黄。

（6）方解石加1:1HCl，猛烈起泡。

2. 以六种标准试剂系统浸蚀辉铜矿、方铅矿、斑铜矿、雌黄，观察其反应（“+”，“-”）。

第十章　矿物的综合性系统鉴定和简易鉴定

第一节　矿物的综合性系统鉴定

一、显微镜下矿物的综合性系统鉴定

矿相学的主要目的之一是在矿相显微镜下鉴定金属矿物。自然界中的金属矿物近千种，许多矿物的某些性质很相似，无突出的鉴定特征，不易立即确定矿物的名称。为了迅速而准确地鉴定出矿石中的每种金属矿物，必须借助于金属矿物系统鉴定表。

在矿相学领域中，现阶段主要以光学性质、物理性质、化学性质及形态特征为主要鉴定内容，这四个方面能够从不同的侧面反映矿物的本质。只有全面地综合研究上述特征进行系统鉴定，才能正确地确定矿物的名称。

目前，鉴定表的编排方法主要有表格分组式、顺序排列式，此外，还有穿孔卡片式、坐标图表式等。虽然，各种鉴定表中的测试内容有所相似，但是，每种鉴定表在编排内容及方式上都有所侧重，每个时期的鉴定表在鉴定特征的重点选择上也有所不同。

不言而喻，矿物的镜下特征只能作为综合鉴定的初步依据，对某些矿物，特别是罕见的矿物，还需要取得矿物的化学成分数据及 X 光结构分析资料并结合矿物的组构特点及其产状加以综合研究。

现阶段人们通常使用的鉴定表主要有两种：

表格分组式鉴定表：只要保证两、三项主要性质（如反射率及硬度等）观测的准确，就可以使查表不出错误，可将矿物圈定在一个较小的范围里。此表用以对比较为方便，既不排斥定量数据的引用，也不受仪器条件的限制。其缺点之一是某些矿物在相邻的表中需重复出现，之二是其定量数据的使用不如顺序排列式方便、简明和系统。

顺序排列式鉴定表：充分利用定量测量的常数，如反射率和硬度值等，可以避免矿物在鉴定表中重复出现。其缺点是受仪器及条件的限制，若无较精密的仪器，使用此表较为困难。

本教材采用表格分组式鉴定表，使用金属矿物系统鉴定表的方法，即在鉴定前，首先搜集矿石的野外产状资料并对矿石进行详细的肉眼鉴定，然后再开始镜下鉴定。利用矿相学的方法，从物理性质鉴定到化学性质鉴定，从单偏光到正交偏光，进行准确的观察。

需精确时，要用 MPV－3 型的显微光度计和显微硬度计来测取反射率、显微硬度等数据。最后，将矿物各方面的特征资料汇集起来。对比鉴定矿物时所根据的鉴定特征越广泛、数据越精确，其鉴定结果越可靠。在此基础上用欲测矿物的鉴定特征查对金属矿物鉴定表，而后确定矿物名称。

二、电子计算机在矿物鉴定中的应用

1. 应用电子计算机自动鉴定金属矿物

应用电子计算机自动鉴定金属矿物是现代先进的方法之一。该方法的基础是将特定的未知矿物与标准矿物的不连续特征谱加以对比。主要是通过能从仪器上精确测出来的具有很高鉴定信息量的定量特征（如可见光谱范围内的反射率色散、显微压入硬度和颜色指数等），矿物的一般光性特征、物理特征和浸蚀反应（如内反射、均质非均质性、磁性和在 HNO_3、HCl、$FeCl_3$、$HgCl_2$、KOH、KCN 等试剂中有无反应等）、矿物的主要化学成分等待定矿物的特征谱叠加到标准矿物鉴定特征谱通道上进行对比来实现。只要待定矿物特征谱落入标准矿物特征谱通道中，就可以认为被鉴定矿物就是标准矿物。

由于电子计算机自动鉴定矿物快速准确，因而在教学、科学研究和生产中可被应用。

2. 应用电子计算机进行矿物检索

应用电子计算机进行矿物检索，是当代矿物学研究领域中的先进方法，其基本方法是用计算机语言将各鉴定表的所有内容编入软件中，再将鉴定表中的矿物按矿物的汉字笔画或按英文字母顺序编写程序，同时输入磁盘中。进行矿物检索时，只要按照计算机所编程序将主菜单显示就可以检索。

应用电子计算机进行矿物检索，具有许多优越性：①具有显示功能：通过计算机屏幕可以直接显示检索矿物的各项特征；②根据需要和内容的更新（如新矿物等），可以随时插入进去；③修改：如果程序中部分内容需改动，可随时修改；④删除：如果检索程序中有陈旧或不恰当的内容可以删除；⑤打印：检索到的矿物或需要的内容可直接打印出来使用。可见应用电子计算机进行矿物检索，将给科学研究工作带来极大的方便和准确性。

第二节　常见矿物简易鉴定

鉴定矿物过程中，如果掌握常见矿物的简易鉴定特征，会给实际工作带来很多方便。我们没有必要遇到一个矿物就系统鉴定一个矿物，只有对不常见的矿物和具有特殊意义的常见矿物才需要系统、综合鉴定。可见，熟练地掌握常见矿物的主要鉴定特征，对于迅速地鉴定矿石光片中的某些矿物是大有益处的。各种矿物在反光显微镜下显示出其独特的性质，在综合考虑各项性质的基础上，以各个矿物的特殊性作为鉴定特征，识别和区别各种矿物，可以达到快速、准确鉴定矿物之目的。

矿物简易鉴定方法，即根据常见矿物各自较为突出的特性，快速、准确地定出矿物名称。对某些特征有相似之处的常见矿物，还要对比区分，有比较地认识它们的异同点，熟练掌握其特征，方能鉴别。

为了帮助学生熟练掌握常见矿物的主要鉴定特征，我们收集了 35 种常见矿物的主要特征，整理后列表 10－1，供简易快速鉴定时参考。

表 10-1　常见矿物简易鉴定特征表

矿物名称及化学组成	主要鉴定特征
黄铁矿 FeS_2	浅黄色，高反射率，高硬度，均质性，常呈自形晶或棱角状碎粒集合体，不易磨光常具麻点。胶黄铁矿呈胶状构造
白铁矿 FeS_2	黄白色，以高反射率、高硬度，显双反射和强非均质性（偏光色：黄绿-灰紫-蓝灰）为主要特征
镍黄铁矿 $(Fe, Ni)_9S_8$	黄白色，反射率稍低于黄铁矿，中硬度，均质性，常产于与基性或超基性岩有关的铜镍硫化物矿床中，与磁黄铁矿、黄铜矿共生；常沿磁黄铁矿颗粒边缘形成结状结构
磁黄铁矿 $Fe_{1-x}S$	乳黄色微带玫瑰棕色，反射率小于方铅矿，中硬度，强非均质性（偏光色：黄灰-绿灰-蓝灰）和强磁性。常呈他形粒状及其集合体出现
毒砂 FeAsS	亮白色微带黄色调，高反射率，高硬度，强非均质性（消光色散显著），晶形断面常为菱形或菱柱形
黄铜矿 $CuFeS_2$	铜黄色，反射率与方铅矿近似（$R=43\%\sim46\%$），弱非均质性，中硬度，易磨光，常与其他铜矿物及方铅矿、闪锌矿共生
黝铜矿 $Cu_3SbS_{3.25}$	灰白色微带淡褐色，中等反射率（$R\approx30\%$），中硬度，均质性；常与其他铜矿物共生
辉铜矿 Cu_2S	灰白色微带浅蓝色，弱非均质性（显均质性），低硬度，加硝酸发泡、染蓝、显结构，常与其他铜矿物共生
砷黝铜矿 $Cu_3AsS_{3.25}$	灰白色微带淡蓝绿色，中等反射率（$R\approx30\%$），中硬度，均质性；常与其他铜矿物共生
蓝辉铜矿 $4Cu_2S\cdot CuS$	浅灰蓝色，均质性，低硬度，加硝酸发泡、显结构；常与铜蓝、辉铜矿等铜矿物共生
铜蓝 CuS	反射色为浅蓝-深蓝色，双反射显著（淡蓝-蓝色），具特强的非均质性和特殊的偏光色（火橙-红棕色）
斑铜矿 Cu_5FeS_4	淡玫瑰棕色，中低硬度，均质性（有时显微弱的非均质性）；与其他铜矿物共生；在空气中易变为蓝紫色
自然铜 Cu	亮铜红色，高反射率，低硬度，具擦痕，均质性
红砷镍矿 NiAs	浅玫瑰红色，高反射率，高硬度，强非均质性（偏光色：黄绿-绿-淡紫色）
磁铁矿 Fe_3O_4	浅灰色微带浅褐色，反射率略大于闪锌矿，均质性，高硬度，具强磁性。常呈等轴状自形晶
针铁矿 $\alpha-FeO(OH)$	灰色，反射率近于闪锌矿，高硬度，非均质性，内反射褐红色－褐黄色－黄色，以具放射状结构、胶状构造为特征
赤铁矿 Fe_2O_3	灰白色带淡蓝色，反射率略高于磁铁矿，具较强的非均质性（偏光色：蓝灰－灰黄色），粉末呈红色，晶形为板状、叶片状、鳞片状，常与磁铁矿连生
钛铁矿 $FeTiO_3$	灰色带褐色、高硬度，弱非均质性，反射率略小于磁铁矿，常在磁铁矿或赤铁矿中构成不混溶连晶（多呈叶片状或格状）

实验作业

熟悉掌握下列常见矿物的镜下特征：

毒砂、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铜矿、斑铜矿、黑钨矿、辉铝矿、磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿、铬铁矿、辰砂、雌黄、雄黄、孔雀石、蓝铜矿、方解石、石英。

第三节　金属矿物鉴定表的编制原则和使用方法

一、鉴定表的编制原则

本书采用表格分组式鉴定表。首先，根据矿物反射率的大小，以四个标准矿物将矿物的反射率从高到低分为五级：R > 黄铁矿 R、黄铁矿 R > R > 方铅矿 R、方铅矿 R > R > 黝铜矿 R、黝铜矿 R > R > 闪锌矿 R、R < 闪锌矿 R。然后，根据矿物的刻划硬度分为高、中、低三级，把鉴定表分为十五个表。

（1）鉴定表的编制以矿物的物理性质为基础，并结合化学性质及产出状态等其他特征。

（2）在物理性质中，将反射率放在首位，硬度放在第二位，从而，反射率和硬度的定量数据在鉴定表中得到了应有的反映。

（3）矿物的排列顺序以白光反射率测定值为准，按递降顺序排列，无白光数值的则用绿光、黄光数值或估计数值代替。对具有两个数值的矿物，以其高反射率值为准进行排列，其低反射率值在以后的表中还将重复出现。

（4）矿物的成分和组构特点是成矿作用、成矿环境和成矿过程的客观证据，因此，在鉴定表中加强了对矿物产出状态的描述。

（5）根据目前的教学设备条件，鉴定表中的各项性质分级不宜过细。为了便于教学，鉴定表中的矿物数量亦不宜过多，本表仅选定 135 种主要的金属矿物。

二、鉴定表的使用方法

鉴定表的前一部分（左侧）详细描述了矿物的镜下特征，后一部分（右侧）描述了包括肉眼能鉴定的矿物学特征、地质产状、矿物组合及光片的磨光性等。鉴定时，根据矿物的镜下特征，结合表中右侧的已知条件，彼此参考，互相启发，以已知推断出未知，进行系统鉴定。

鉴定表中共分九栏，各栏主要内容如下：

第一栏　矿物名称、化学组成及晶系

为了便于对比，本表将类质同象的矿物放在一起进行描述。矿物名称的右上方标有"*"者为最常见矿物，标有"者为普通矿物，不标"者为少见矿物。

第二栏　反射率

鉴于近代已广泛应用光电倍增管显微光度计测反射率值，故在本栏中将其为主要数据。由于一般观测是在白光下进行的，所以，每种矿物首先列出的是白光反射率测定值。同时，根据国际矿相委员会（COM）规定的标准单色波长，分别列出矿物 470 nm（蓝光）、546 nm（绿色）、589 nm（黄光）、650 nm（红光）四种单色光的反射率测定值

(根据 COM 公布的矿物定量数据)，个别矿物采用了估计值。

第三栏 1. 刻划硬度；2. 压入硬度；3. 抗磨硬度

本栏中所列出的三种数据：1. 刻划硬度，所用的数值为摩氏硬度数值，一部分为实测值，一部分由压入硬度换算而成的计算值；2. 压入硬度为维克压入硬度，各家数值基本完全列入，其数值右下方所附注负荷数，例如：150_{20}，20 即为负荷（克），所测得的维克压入硬度即为 150 kg/mm^2，未注负荷数者，其负荷均为 100 g；3. 抗磨硬度即相对抗磨硬度，列出了与其比较的矿物。

第四栏 1. 反射色；2. 颜色指数

1. 反射色，首先描述反射色的色调，然后描述反射色的视觉色变效应。该矿物与其他矿物连生时的视觉色变效应表示法，如方铅矿为："灰白微蓝（黄铁矿）"，说明方铅矿与黄铁矿连生时呈灰白色微带蓝色色调。

2. 颜色指数，为在等能光源（SE）条件测算的数值，以 R_{vis} 表示视觉反射率，以 x、y 表示色度坐标，以 λ_d 表示颜色主波长，以 P_e 表示颜色饱和度（颜色指数选自陈正、陈殿芬等著的"金属矿物颜色指数研究"一书中的数据）。

第五栏 1. 双反射与反射多色性；2. 内反射

1. 双反射与反射多色性，视测分级划为两级："显"和"不显"，显者在括号内注明反射多色性的颜色变化，显是指在空气中可见者。

2. 内反射，表示为"有"和"无"两级，有内反射者，指在空气中以斜照法或正交偏光法观察到的内反射现象；标有"者为粉末色，括号内注明了内反射色的颜色。

第六栏 均质性和非均质性

划分为强非均质性、弱非均质性和均质性三级，括号内注明偏光色；部分矿物下面附有非均质视旋转角，即在光波 589 nm 的 A_r 值。

第七栏 浸蚀反应

采用常用的六种试剂(HNO_3、HCl、KCN、$FeCl_3$、$HgCl_2$、KOH)，正(+)反应和现象在表中进行了描述，负(-)反应现象省略。个别情况下，根据不同的矿物增加了试剂。

第八栏 磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状

磨光性系指矿物光片的磨光程度，组构特点系指矿石的构造、结构和矿物晶粒的内部结构。此外，还描述了矿物的产状。

第九栏 主要鉴定特征及与类似矿物的区别

指明该矿物特有的 1 个～2 个特征，并强调与其他类似矿物相区别的主要依据。

说明：

鉴定表中反射率的数值是根据 COM 卡片所公布的数据，个别矿物选用了 W. 乌顿布格、E. A. J. 伯克及中国科学院矿床所六室所测的数据，少数透明矿物采用了根据反射率计算的数值。矿物颜色指数大部分选陈正、陈殿芬等著的"金属矿物颜色指数研究"一书中的数据。维克硬度数值主要采用 W. 乌顿布格和陈正收编的资料，少数部分采用原成都地质学院测的数据；抗磨硬度主要引用 W. 乌顿布格的资料。此外，还引用了原武汉地质学院及南京大学地质系的有关资料。

第一鉴定表　R > 黄铁矿 R 的低硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
自然银* silver Ag 等轴晶系	白:95 470:88 546:93 589:94 650:95	1. 2.5 ~ 3 2. 43 ~ 59 $40 \sim 57_{(10-20)}$ 3. ≥淡红银矿 > 方铅矿 < 黝铜矿、 锑银矿	1. 亮白色微带乳黄色；空气中迅速变色，成为较深的奶油色、粉红色和彩色淡黄色（锑银矿）； 亮白微黄（自然铜） 2. R_{vis}: 88.7 x: 0.340 y: 0.341 λ_d: 577 P_e: 0.042	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3 (+) 发泡，染黑； HCl(±) 薰污； KCN (+) 微染灰棕； $FeCl_3$ (+) 晕色染黑； $HgCl_2$ (+) 晕色染棕； 碘酒(+) 白色薄膜	易磨光，多擦痕。呈树枝状、骸晶状、分散叶片状和毛发状等集合体形态出现。导电性强，为可塑性矿物。与辉银矿、方铅矿、深红银矿、银金矿、硫铜银矿、黄铜矿、磁黄铁矿、红砷镍矿等伴生。常见于中低温热液矿床和硫化物矿床的次生富集带中，也见于火山沉积、受变质矿床中	以高反射率、均质性、低硬度为特征。以反射色与自然金、金银矿区别，以均质性与自然铋区别
银金矿* electrum AuAg 等轴晶系	白:83 470:76 546:90 589:92 650:93	1. 2.5 ~ 3 2. 34 ~ 44 3. > 方铅矿 = 自然金 < 闪锌矿、 黄铜矿	1. 乳黄色或淡黄色 较浅的黄色（自然金）； 亮黄色较淡（黄铜矿） 2. R_{vis}: 81.6 x: 0.349 y: 0.349 λ_d: 578 P_e: 0.093	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3 (±) 薰污，微泡； KCN(±) 染黑； $FeCl_3$ (±) 晕色、染棕； $HgCl_2$ (+) 晕色、染黑	易磨光，具磨痕。呈不规则粒状及细脉状产出，常包裹于硫化物、碲化物、石英、方解石等矿物中。伴生矿物有自然金、自然银、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然铋等。主要产于高、中、低温热液脉状矿床及沉积（砂）矿床中；也常见于火山沉积和变质矿床中	高反射率、低硬度为其特征。以反射色、浸蚀反应与自然银、自然铂、自然金和自然铜区别
自然铜* copper Cu 等轴晶系	白:81.2 470:48 546:56 589:79 650:87	1. 2.5 ~ 3 2. 48 ~ 143 3. > 辉铜矿、 黄铜矿 < 赤铜矿	1. 铜红色；空气中易变成淡褐色 粉红色（自然银）； 亮粉红色（辉铜矿） 2. R_{vis}: 65 x: 0.390 y: 0.358 λ_d: 588 P_e: 0.247	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3 (+) 发泡，(±) 染褐，表面粗糙； HCl(±) 染棕色； KCN(+) 慢染棕； $FeCl_3$ (+) 迅速变黑； $HgCl_2$ (+) 晕色染黑； KOH(+) 晕色染棕	易磨光，常见擦痕。呈粗粒或细粒状他形晶集合体，具肾状、结核状构造。自然铜表生时，呈树枝状或矛状外形，浸蚀后可见聚片双晶和环带结构。富于延展，具可塑性和强导电性。在赤铜矿、硫砷铜矿、斑铜矿、辉铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿中呈微细包体。含方黄铜矿和赤铜矿的定向连晶。交代辉铜矿，可氧化成赤铜矿或被赤铜矿交代。常产于热液矿床、风化矿床和沉积矿床中	以特殊反射色与自然银、自然金区别；以均质性、高反射率和低硬度与红砷镍矿区别

自然锑 antimony Sb 六方晶系	白:72 ~ 77 470:74 ~ 77 546:74 ~ 78 589:73 ~ 77 650:70 ~ 75	1. 3 ~ 3.5 2. 45 ~ 101 $51 \sim 135_{20 \sim 50}$ 3. > 辉锑矿 < 锑银矿、 自然砷	1. 亮白色或亮白微黄色 稍亮(自然砷); 较亮(方铅矿); 较暗(自然银) 2. R_g R'_p R_{vis}: 75 71.6 x: 0.332 0.330 y: 0.335 0.334 λ_d: 501 495 P_e: 0.005 0.011	1. 不显 2. 无	弱非均质性(棕黄-灰蓝色) A_r: 1° ± 0.1°	HNO_3(+)晕色或染棕变黑; KCN(±)染棕; $FeCl_3$(+)晕色染黑; $HgCl_2$(+)染棕	易磨光。常呈他形细粒集合体,解理常见,聚片双晶可见。交代辉锑矿,也可被辉锑矿包围或在锑银矿上形成外壳。常与自然砷、方铅矿、辉锑矿、黄铁矿、毒砂、钴及镍的砷化物、铜和银的硫化物等矿物伴生。主要产在低温热液矿床中	以反射率、非均质性为特征。凭反射色和浸蚀反应与自然铋区别;以硬度较低区别于锑银矿
自然金* gold Au 等轴晶系	白:74 470:36 546:77 589:88 650:94	1. 2.5 ~ 3 2. 32 ~ 59 $42 \sim 88_{10 \sim 25}$ 3. > 方铅矿 = 黄铜矿 < 黝铜矿、 闪锌矿	1. 金黄色或亮黄色 较黄(银金矿); 亮黄色(黄铜矿); 黄色(自然银) 2. R_{vis}: 75.3 x: 0.400 y: 0.398 λ_d: 578 P_e: 0.399	1. 不显 2. 无	均质性	KCN(+)染黑	易磨光,常具擦痕。常呈各种粒度的他形颗粒,具脉状、骸晶状等结构。无解理;双晶及内部环带结构常见。可塑性强,富延展性。常在毒砂、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿、方解石、稀化物和石英中呈细小或超显微包体。次生金呈细脉状、薄皮状及不规则粒状充填于辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝及褐铁矿中。产于热液、风化、沉积和受变质矿床中	以特殊的反射色、高反射率和低硬度与黄铁矿、黄铜矿区别;尤以浸蚀反应可与自然铜区别
自然铋 bismuth Bi 六方晶系	白:67.9 470:54 ~ 62 546:60 ~ 67 589:62 ~ 70 650:64 ~ 72	1. 2 ~ 2.5 2. 9 ~ 13_{15} 3. < 辉铋矿	1. 亮白色微带粉红色或 玫瑰色、淡玫瑰色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 66.8 59 x: 0.347 0.345 y: 0.343 0.339 λ_d: 582 588 P_e: 0.069 0.052	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r: 2.12° ±0.1°	HNO_3(+)慢泡,染棕; HCl(+)染棕,有时显结构; $FeCl_3$(+)染黑,显结构; $HgCl_2$(+)染褐	磨光性好。常为他形集合体或呈骸晶、树枝状。聚片和格状双晶常见,为塑性矿物。可与方铅矿、辉铋矿、黄铜矿、磁黄铁矿、自然金构成文象连晶或蠕虫状连晶。常与黄铁矿、闪锌矿、铜-铋硫化物、铋-稀化物、辉钼矿、白钨矿、黑钨矿和毒砂伴生。常产于高温热液矿床中	以低硬度,高反射率及聚片双晶为特征,凭其浸蚀反应,反射色可与自然锑区别;以高反射率、非均质性和低硬度可与自然砷区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
针碲金矿 sylvanite $AuAgTe_4$ 单斜晶系	470:50～60 546:53～63 589:53～63 650:53～62	1. 1.5～2 2. 102～221 3. ≥辉银矿、碲银矿≥叶碲金矿<深红银矿	1. 乳白色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 59.7 49.9 x: 0.245 0.346 y: 0.178 0.348 λ_d: 453 576 P_e: 0.494 0.082	1. 显（乳白—白微棕） 2. 无	强非均质性（淡蓝灰—深棕）		呈柱状、板状、骸晶状和树枝状，与碲银矿、叶碲金矿构成连晶，可在辉银矿、闪锌矿、方铅矿、辉铜矿、黄铁矿中呈包体。可包含自然金，共生（伴）矿物还有碲金矿、辉铋矿、辉锑矿等。产于低温热液矿床中，也见于中-高温热液矿脉中，但主要产于次火山热液矿床之中	以反射色、非均质性与自然金、银金矿区别
碲金矿 calaverite $AuTe_2$ （可含 Ag、Cu、Sb） 单斜晶系	白:62 470:55～63 546:60～68 589:62～68 650:63～68	1. 2.5～3 2. 198～209 3. >深红银矿略<方铅矿	1. 白色带黄色调较亮（黄铁矿）；略显粉色（碲铅矿） 2. R'_g R'_p R_{vis}: 56.8 53.7 x: 0.343 0.344 y: 0.345 0.345 λ_d: 576 577 P_e: 0.062 0.068	1. 不显 2. 无	弱非均质性（灰红-绿-浅灰） A_r: 1.4° ±0.1°	HNO_3(+)慢泡、染褐至黑； $FeCl_3$(+)染淡褐	磨光性好。一般呈自形针状，有时发育成放射状集合体，穿入其他碲化物或呈不规则板条状、片状。有时颗粒极细。无解理，偶见复合双晶。交代碲金银矿、碲铅矿、自然金、黄铜矿、黄铁矿。可在黄铜矿和磁黄铁矿中呈包体。主要产于与火山作用有关的金、银、铜矿脉中	以反射色、非均质性与银金矿区别
碲铋矿 tellurobismuthile Bi_2Te_3 六方晶系	白:61.5 470:63～64 546:62～66 589:63～67 650:64～68	1. 1.5～2 2. 32～93_{20} 3. >辉碲铋矿<辉铋矿	1. 白色微带浅粉红色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 65.1 60.7 x: 0.338 0.336 y: 0.337 0.334 λ_d: 580 592 P_e: 0.023 0.009	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r: 1.14° ±0.1°	HNO_3(+)起泡，染黑褐色（快）	磨光性差。可在黄铜矿中呈自形包体出现。解理完全，页片状双晶可见。与辉碲铋矿成不混溶连晶。伴生矿物主要有其他铋的碲化物、碲铅矿、碲金矿、亮碲金矿、碲金银矿、自然铋、辉铋矿，其次有硫化物、毒砂、黝铜矿等。主要产于高中温热液矿床中	以反射色和常与辉碲铋矿共生为其特征，可与类似矿物相区别

方金锑矿 aurostibite $AuSb_2$ 等轴晶系	470:59.2 546:61 589:61.9 650:63	1. 1~3 2. 248~262_{15} 3. ≥自然金	1. 白色,在空气中易变为粉红色 2. R_{vis}: 61.4 x: 0.338 y: 0.337 λ_d: 581 P_e: 0.025	1. 不显 2. 无	均质性		他形晶粒状,常为自然金与辉锑矿反应的产物,可分解成辉锑矿与自然金蠕虫状连晶。共(伴)生矿物还有黄铁矿、碲金矿、黄铜矿等,常产于中温含金石英脉中	以反射色、空气中易氧化为粉红色、均质性与自然金、辉锑矿相区别
珲春矿 hunchunite Au_2Pb 等轴晶系	480:58.4 546:59.5 589:60 656:60	2. 149_5 128_5 138_5 141_5	1. 灰白色(易氧化为褐色或灰黑色) 2. R_{vis}: 59.5 x: 0.3448 y: 0.3477 λ_d: 575.5 P_e: 0.078	1. 不显 2. 无	均质性		易磨光。呈不规则他形粒状,常与自然金、阿幼铋矿呈文象交生,外围为方铅矿。与其共生的矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂、辉铋矿、磁铁矿、赤铁矿、锡石、石英等。产于火山热液金矿床之中	该矿物以易氧化为褐色或灰黑色与方铅矿相区别
叶碲铋矿 wehrlite BiTe 六方晶系	白:57 470: 62.5~59.5 546:64~61 589: 65.5~62.3 650: 66.6~63.5	1. 1.5~2 2. 57.1~69.7 3. ≤辉碲铋矿	1. 白色微带浅蓝色调 2. R'_g R'_p R_{vis}: 64.8 61.7 x: 0.339 0.339 y: 0.337 0.337 λ_d: 583 584 P_e: 0.030 0.028	1. 不显 2. 无	弱非均质性(淡棕-淡蓝灰色) A_r:0.96° ±0.1°	HNO_3(+)染黑; HCl(+)灰褐; $FeCl_3$(+)淡褐	磨光性较差。呈不规则的颗粒状,有时充填在其他矿物颗粒的间隙中,具一组完全解理,与磁黄铁矿、自然金和黄铜矿形成连晶。常产于中-低温热液型金矿床中	以反射色与碲铋矿相区别
金铜矿 auricupride $AuCu_3$ 等轴晶系	470:49.1 546:62.9 589:71.5 680:84	1. 3 3. > 自然金	1. 浅粉紫色 2. R_{vis}: 64.2 x: 0.386 y: 0.361 λ_d: 586 P_e: 0.240	1. 不显 2. 无	均质性		在自然金中平行(100)呈片状或粒状不混溶连晶或被金包裹。伴生矿物有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、辉银矿、石英等。产于热液矿床之中	以其特殊的反射色与自然金、银金矿相区别
碲铋银矿 (沃仑斯基矿) volynskite $AgBi_{1.6}Te_2$ 斜方晶系	470: 55.8~53.3 546: 54.4~52.6 589: 55.1~52.8 680: 55.5~52.8	1. 1.5~2 2. 98~103 3. <方铅矿 >碲铋矿、碲银矿	1. 白色带淡紫色调	1. 显 2. 无	弱非均质性(无颜色变化)		呈粒状包体,与碲银矿、碲铅矿包于碲铋矿之中,可见三角形凹陷。与碲铋矿物成复杂连晶。伴生矿物还有黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、碲金银矿、叶碲金矿、自然金、黄铁矿等。产于热液矿床中	以反射色,非均质性与方铅矿、辉银矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
自然砷 arsenic As 六方晶系	白：48～51 470：53～56 546：52～56 589：51～55 650：51～55	1. 3～3.5 2. 57～167 3. ≥自然铋 ＞自然银 ≥锑银矿	1. 白色 浅灰色（自然锑）； 微灰（方钴矿）； 白带乳黄色（方铅矿） 2. R_y R_α R_{vis}：49 48 x：0.332 0.333 y：0.332 0.333 λ_d：478 492 P_e：0.006 0.002	1. 不显 2. 无	弱非均质性（棕色-浅灰色）	HNO_3（+）慢泡，晕色染棕黑； $FeCl_3$（+）变黑； $HgCl_2$（+）染棕	易磨光。呈他形粒状集合体，或呈羽毛状、束状。具胶状和放射状结构，细聚片双晶普遍，解理常见。可含自然银、自然锑或锑银矿的包体。内部环带结构发育。产于热液矿脉中，尤其是Ag－Co－Ni重晶石建造和贵金属方解石建造中	胶状环带构造及在空气中迅速变色为其特征，以反射率与自然锑区别

第二鉴定表　R＞黄铁矿 R 的中硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
自然铂 platinum Pt 等轴晶系	白：70 470：66 546：70 589：71 650：72	1. 4～4.5 2. 125～127 114～274_{50} 3. ＞闪锌矿 ＜磁黄铁矿	1. 亮白色微带蓝色或黄色 微蓝（自然钯）； 亮得多（砷铂矿） 2. R_{vis}：69.5 x：0.344 y：0.343 λ_d：579 P_e：0.063	1. 不显 2. 无	均质性	王水（+）显结构	易磨光，具擦痕。常形成不规则他形粒状，偶为自形晶。内部环带结构普遍，浸蚀后可见双晶。可在铬铁矿中形成包体或含砷铂矿和赤铁矿包体，亦可交代砷铂矿和铬铁矿。主要产于岩浆型含铂的铜镍硫化物矿床及铬铁矿矿床中。也见于砂矿中	高反射率和亮白色为其特征。以浸蚀反应与砷铂矿区别；以反射率与辉砷镍矿区别；与锇铱矿区别在于后者为非均质性

锑银矿 dyscrasite Ag_3Sb 斜方晶系	白:62 ~ 64.5 470:59 ~ 62 546:60 ~ 63 589:60 ~ 63 650:59 ~ 63	1. 3.5 ~ 4 2. 152 ~ 178 3. ≥方铅矿 略 > 自然银 略 < 黄铜矿	1. 亮白色或亮白微黄奶油白色(方铅矿);微灰(自然银) 2. R_m R_{vis}: 70.3 x: 0.340 y: 0.343 λ_d: 573 P_e: 0.047	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r:0.9°	HNO_3(+)晕色,染棕; $FeCl_3$(+)沉淀; $HgCl_2$(+)褐黄色沉淀	极易磨光,具擦痕。呈柱状、矩形自形晶或呈他形晶集合体出现。解理偶见,双晶少见。常呈细包体分布在方铅矿之中,不混溶分离结构常见。交代脆银矿、深红银矿、红砷镍矿、砷镍矿,主要产于热液矿脉中,也形成于次生富集带中	以反射率较低,硬度较高,弱非均质性与自然银区别;并以解理少见区别于自然锑
自然钯 palladium Pd 等轴晶系	白:64 470:62 546:68 589:69 650:73	1. 4 ~ 4.5 3. ≪自然铂	1. 白色带乳黄色微黄(自然铂)	1. 不显 2. 无	均质性	王水(+)迅速变褐	易磨光。呈他形粒状或细小八面体自形晶出现。可被自然铂包裹或与自然铂构成环带。可由锑钯矿蚀变而成。主要产于超基性铬铁矿型铂矿床和铜镍硫化物矿床及其氧化带或砂矿中	中硬度、高反射率为其特征。以微黄的反射色与自然铂区别
针镍矿 millerite β—NiS (可含 Co) 六方晶系	白:54 ~ 60 470:43 ~ 44 546:50 ~ 54 589:52 ~ 58 650:54 ~ 60	1. 3 ~ 3.5 2. 192 ~ 376 3. > 黄铜矿 < 闪锌矿、镍黄铁矿	1. 纯黄色或淡黄色较亮、较浅(黄铜矿);稍黄(黄铁矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 55.7 50.5 x: 0.373 0.358 y: 0.380 0.362 λ_d: 576 577 P_e: 0.259 0.160	1. 不显或显-微弱 2. 无	弱非均质性(黄-紫) A_r: 1.79° ±0.1°	HNO_3(±)慢泡染棕; $HgCl_2$(±)染棕	易磨光。常由针状晶体组成放射状、束状或他形粒状集合体。双晶普遍,解理常见。呈定向页片包裹于硫钴矿中或与其构成连晶;在紫硫镍矿和磁黄铁矿之间呈反应边;可被磁黄铁矿、镍黄铁矿包裹;可蚀变为方硫铁镍矿和紫硫镍矿。常产于热液矿床和铜镍硫化物矿床中	以针状晶体常见及强非均质性区别于黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿及辉镍矿
红锑镍矿 breithauptite NiSb 六方晶系	白:45.3 ~ 54.6 470:47 ~ 37.8 546: 47.6 ~ 36.5 589: 51.7 ~ 41.5 650: 58.4 ~ 50.7	1. 5 2. 412 ~ $584_{50\cdot100}$ 3. ≤红砷镍矿 < 斜方砷镍矿 ≪辉钴矿、毒砂	1. 亮粉红色或亮玫瑰紫色略暗带紫(红砷镍矿) 2. R_o R_e R_{vis}: 49.8 39.8 x: 0.345 0.352 y: 0.325 0.326 λ_d: 502 497 P_e: 0.064 0.158	1. 显(淡玫瑰紫色-淡棕色) 2. 无	强非均质性(蓝绿—微红紫) A_r: 2.15° ±0.2°	HNO_3(+)晕色; $FeCl_3$(+)晕色; $HgCl_2$(+)薰污	磨光性良好。常为他形粒状,也可发育为自形晶。解理未见,无双晶。环带结构普遍。被红砷镍矿、自然银、斜方砷钴矿交代;也交代斜方砷钴矿。呈铬铁矿、镍黄铁矿、方铅矿的包体,与磁黄铁矿构成连晶。常产于钴、镍、银建造的热液矿脉中,也偶见于铅锌矿床中	以反射色特殊,双反射显著,多色性显著,非均质性特强为其特征,可与红砷镍矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
斜方砷钴矿 safflorite $(Co,Ni,Fe)As_2$ 斜方晶系 （富 Co 者为单斜晶系）	白：53 470：54～57 546：54～55 589：54 650：52～53	1. 4.5～5 2. 430～$988_{100-200}$ 3. ＞方钴矿类 ≥红砷镍矿 <斜方砷铁矿 ≪毒砂	1. 亮白色带淡蓝色微灰（自然锑）；淡蓝（自然铋）；白带灰（自然银） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：54.3　52 x：0.335　0.326 y：0.336　0.327 λ_d：574　481 P_e：0.011　0.032	1. 不显 2. 无	强非均质性（橙黄－绿灰蓝） A_r：2.1°	HNO_3（+）染深色；$FeCl_3$（+）染棕色，显粒状结构	易磨光。常与红砷镍矿、铁硫砷钴矿、方钴矿等形成环层的同心状构造，呈放射状球颗结构。解理未见，双晶普遍且典型，具星状、楔状、菱形复合星状三连晶的自形晶，内部环带普遍。交代方钴矿系列的矿物、斜方砷镍矿及红砷镍矿。主要产于中温的 Co－Ni　Ag－Bi－U 热液矿床中，偶见于高温热液矿床中	以硬度低、星状晶形和反射色色调为特征，可与毒砂、斜方砷镍矿、斜方砷铁矿区别
自然砷	见 80 页							
红砷镍矿* niccolite NiAs （可含少量 Fe、Co、S） 六方晶系	白：50.5～45 470：44.9～37.4 546：52.6～47.2 589：56～53.3 650：60.1～59.1	1. 5～5.5 2. 306～425 3. ≥自然银、磁黄铁矿 ≤砷镍矿 ≪黄铁矿	1. 粉红色或亮玫瑰色淡粉黄色（红锑镍矿）；明显粉红色（方钴矿） 2.　R_o　R_e R_{vis}：52.2　47 x：0.354　0.361 y：0.345　0.348 λ_d：585　587 P_e：0.098　0.126	1. 显 R_o：粉红色带黄色；R_e：粉红色带褐色 2. 无	强非均质性（淡黄绿紫褐色） A_r：1°±0.1°	HNO_3（+）发泡变黑、显解理；$HgCl_2$（+）染彩褐	磨光性好。常为他形晶集合体，自形晶少见。常与斜方砷钴矿、斜方砷镍矿一起形成或同心圆状集合体或呈近乎平行的集合体。也呈聚片双晶和十字形双晶出现。伴生矿物主要有：磁黄铁矿、黄铜矿、砷镍矿、红锑镍矿、斜方砷钴矿、方钴矿、闪锌矿、黄铁矿等。常产于中温热液矿床及贵金属－方解石建造中，也产于铜镍硫化物矿床中	反射色及其他光性较特征，不易与其他矿物相混

第三鉴定表　R > 黄铁矿 R 的高硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
斜方砷镍矿 rammelsbergite $(Ni,Co,Fe)As_2$ 斜方晶系	白:58～60 470:56～61 546:57－61 589:57－61 650:57～59	1. 5.5 2. 459～830 3. = 方钴矿类 < 斜方砷铁矿 ≪毒砂	1. 亮白色 纯白色（砷镍矿）； 淡黄色（斜方砷钴矿）； 白色（毒砂） 2.　R_g　R_m　R_p R_{vis}:60.1　55.6　52.7 x:0.329　0.330　0.333 y:0.330　0.329　0.332 λ_d:483　470　568 P_e:0.019　0.0148　0.005	1. 不显（显-微弱） 2. 无	弱非均质性（淡粉红－浅蓝绿） A_r:1.18° ±0.1°	HNO_3（+）发泡变黑； $FeCl_3$（+）染棕，显结构； $HgCl_2$（±）染棕	磨光性好。呈片状自形晶或细粒他形集合体。由纤维状或叶片状晶体组成的放射状结构很普遍。解理偶见，双晶常见。浸蚀后显环带。与红砷镍矿、方钴矿系列矿物构成连晶，呈反应边出现在红砷镍矿和镍方钴矿之间。多产于中温热液矿床中	以双晶常见、遇 HNO_3 发泡变黑的特点，可与斜方砷钴矿、斜方砷铁矿区别
方钴矿* skutterudite (Co,Ni,Fe) As_{3-x} 可分： *a*. 方钴矿 *b*. 镍方钴矿 *c*. 铁方钴矿 等轴晶系	白:55.8 470:57 546:56 589:55 650:54	1. 5.5～6 2. $268～974_{200～50}$ 3. 硬度随成分而异 $c > a > b$ ≪毒砂	1. 乳白色微带淡蓝色或淡黄色 微黄（斜方砷镍矿）； 灰带蓝（红砷镍矿）； 白带黄（方铅矿） 2. R_{vis}:　55.6 x:　0.329 y:　0.331 λ_d:　484 P_e:　0.019	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3（±）慢泡变褐； $FeCl_3$（±）含 Ni 时，染棕显结构； $HgCl_2$（±）含 Ni 时，染褐； H_2O_2（+）异色、染褐	磨光性良好。常呈自形晶，晶粒较粗，晶形似黄铁矿，常呈细密状环带结构。可具清晰解理，但少见。未见双晶。性脆，强导电体。可与红砷镍矿或自然铋构成连晶。交代黄铁矿，亦可被斜方砷镍矿、斜方砷钴矿、斜方砷铁矿、红砷镍矿、自然铋、辉银矿、其他银矿物、硫钴矿、黄锡矿、黄铜矿、自然砷交代。斜方砷铁矿、自然砷、自然铋可呈脉状穿插于方钴矿中。主要产于矽卡岩型和热液矿床中，偶见于变质矿床中	晶形似黄铁矿、均质性、高反射率、高硬度、乳白色，常与 Co、Ni 矿物伴生等为其特点。可以反射色和浸蚀反应与黄铁矿区别；以均质性、乳白色反射色与砷镍矿区别
毒砂** arsenopyrite $(Co,Fe)AsS$ （Co 含量可达 9%，并可含少量 Au 或 Sb）单斜晶系	白：51.7～55.7 470:51～55 546:52～54 589:53～54 650:53	1. 5.5～6 2. $715～1354_{100～20}$ 3. ≫方钴矿类 < 辉钴矿、黄铁矿	1. 亮白色微带奶油色或淡红色调 白色（黄铁矿）； 亮白带淡黄色（方铅矿）； 较白（辉钴矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}:　52.9　51.8 x:　0.340　0.332 y:　0.341　0.333 λ_d:　577　491 P_e:　0.005　0.122	1. 显（微弱） 2. 无	强非均质性（淡蓝绿－淡玫瑰色）消光位色散显著 A_r:0.57°	HNO_3（+）慢泡异色	磨光较好。常呈特征性的菱形、长柱形自形晶，骸晶和半自形粒状集合体。内部环带常见，聚片双晶可见。含有铁硫砷钴矿的固溶体分离物。伴生矿物有：黄铁矿、斜方砷铁矿、黝铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、斜方砷钴矿、辉钴矿、辉锑矿等。主要产于矽卡岩型和高温热液矿床中；也产于中、低温热液矿床中	以切面常见菱形或菱柱形，消光位色散显著为其特征。对 HNO_3 浸蚀反应与斜方砷镍矿、斜方砷钴矿等矿物区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
白铁矿** marcasite FeS_2 斜方晶系	白：48.9 ~ 55.5 470：45 ~ 52 546：49 ~ 56 589：50 ~ 55 650：48 ~ 53	1. 5 ~ 6.5 2. 762 ~ 1561 3. ＞磁黄铁矿 ≤黄铁矿	1. 淡黄白色微带粉红色或淡绿 黄色 较白（黄铁矿）； 微绿黄（毒砂） 2. R'_g R'_p R_{vis}：56.3 49.3 x：0.341 0.343 y：0.352 0.346 λ_d：568 574 P_e：0.078 0.066	1. 显（黄白-淡黄-绿色） 2. 无	强非均质性（绿-黄-淡紫-蓝灰） A_r：1.63° ±0.1°	HNO_3（+）缓慢发泡、染褐、晕色	磨光性差。常呈菱形、菱柱形、板状等自形或半自形切面。可见胶状构造及放射状集合体，与黄铁矿成交互层或在胶状黄铁矿上形成皮壳。聚片双晶和环带结构普遍。可由磁黄铁矿（在磁黄铁矿中呈鸟眼状）、黄锡矿蚀变而成。还可与闪锌矿、银黝铜矿、方铅矿、自然银、毒砂、黄铜矿、铜蓝、辉锑矿、脆硫锑铅矿和锡石等伴生。主要形成于地表或近地表的矿床中，多为次生矿物；也见于低温热液矿床中	以其反射色，强非均质性及偏光色显著和切面形态，区别于黄铁矿
斜方砷铁矿 loellingite $(Fe, Ni, Co)As_2$ 斜方晶系	白：53 ~ 54.7 470：54 ~ 56 546：53 ~ 55 589：52 ~ 55 650：55 ~ 56	1. 5 ~ 5.5 2. 368 ~ $1048_{100-200}$ 3. ≥黄铜矿 ＞磁黄铁矿 ＜磁铁矿 ≪毒砂、黄铁矿	1. 亮白色，常带淡黄色或淡粉黄色或淡粉黄色 黄色较浅（毒砂）； 纯白（红砷镍矿）； 亮淡黄（磁铁矿） 2. R'_g R'_p R_{vis}：54.7 57.1 x：0.339 0.323 y：0.340 0.327 λ_d：576 483 P_e：0.039 0.039	1. 不显（显-微弱） 2. 无	强非均质性（蔷薇-绿-蓝） A_r：1.98° ± 0.1°	HNO_3（+）晕色、棕彩 $FeCl_3$（+）染棕、显结构	易磨光。常呈自形晶、放射状集合体或细粒块状集合体。解理未见，双晶普遍。为塑性矿物。与红砷镍矿、斜方砷钴矿、毒砂构成连晶。含锑银矿、自然砷、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿的包体。呈包体分布在毒砂、方钴矿、砷镍矿中。主要产于高、中温热液矿床和矽卡岩型矿床中	以无消光位色散，遇 $FeCl_3$ 的反应为特征，可与毒砂区别
红锑镍矿	见81页							
黄铁矿** pyrite FeS_2 （可含 Co，Ni，Au 和 Cu 等） 等轴晶系	白：54.5 470：46 546：53 589：54 650：54	1. 6 ~ 6.5 2. 913 ~ $2056_{100-200}$ 3. ＞毒砂 ＜砷铂矿、锡石	1. 淡黄色、黄白色 较黄（白铁矿）； 淡黄（方铅矿） 2. R_{vis}：53.9 x：0.352 y：0.359 λ_d：574 P_e：0.132	1. 不显 2. 无	均质性（有时显异常的非均质性）	NHO_3（+）慢泡，有时黛污	磨光极费时，磨光不够时常见麻点。常呈立方体、五角十二面体和八面体的自形晶。各种粒度均有，亦可呈各种粒度之棱角状碎粒的集合体。可交代生物，形成各种具生物假象的结构、构造。浸蚀后可见内部环带和双晶。黄铁矿中可含可见金和超显微状不可见金的包体。黄铁矿为普遍存在矿物，在各种矿床中几乎都可出现，与之伴生的矿	以浅黄色、高硬度、均质性、常呈自形晶及棱角状碎粒为特征，易与其他矿物相区别

							物也极多。铜镍硫化物矿床中的黄铁矿含 Co 较高。可产于内生、沉积和变质矿床中。胶黄铁矿呈各种胶状构造，常出现于低温热液矿床和沉积矿床中	
斜方砷钴矿					见 82 页			
辉钴矿 （辉砷钴矿） cobaltite (Co, Fe)AsS （可含 Ni） 斜方晶系 （有序结构，常温下） 等轴晶系 （无序结构，800℃以上）	白：52.7 470：48 546：50 589：52 650：54	1. 5.5 2. 570～850 3. ≫方钴矿 ＞毒砂 ＜黄铁矿	1. 白色带淡粉色或淡紫褐色调 淡粉红色（毒砂）； 较白、无黄色色调（黄铁矿） 2. R_{vis}：50.9 x：0.345 y：0.339 λ_d：587 P_e：0.052	1. 不显 2. 无	弱非均质性（蓝灰－褐色）	NHO_3(+)晕色，发泡	难磨光。常呈自形晶，也呈他形集合体出现。粒度较粗的晶体中解理清楚。聚片双晶常见，具环带。常含钴斜方砷铁矿、自然金、自然银、红砷镍矿、黄铜矿的包体。交代钴斜方砷铁矿、斜方砷钴矿、沥青铀矿。被磁黄铁矿、钴毒砂、黄铜矿、毒砂、黄铁矿、方钴矿、闪锌矿、方铅矿、砷黝铜矿、红砷镍矿、自然银交代。其核部可被斑铜矿和自然银交代。常产于高温热液矿床中，中温矿床如 Co　Ni — Ag — Bi — U 或 Pb　Zn — Hg - Se 建造中也可见。也产于某些铜矿床中	以反射色和磨光性与黄铁矿区别；以硬度较高与方钴矿区别
红砷镍矿					见 82 页			
辉砷镍矿 gersdorffite (Ni, Co, Fe)·AsS 等轴晶系	白：47.5 470：49 546：47 589：47 650：47	1. 5～5.5 2. 520～907 3. ＞硫钴矿 ＝方钴矿 ≤斜方砷铁矿 ≪黄铁矿	1. 白色带淡黄色或微粉红色 2. R_{vis}：47.8 x：0.332 y：0.330 λ_d：445 P_e：0.011	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)慢泡、染色、显结构； $HgCl_2$(+)染色； 饱和 $KMnO_4$(+)染褐； 溴蒸气(+)显结构	易磨光。常呈自形晶，具内部环带结构。可见聚片双晶，解理清楚，有三角形陷穴。与红砷镍矿、黄铁矿、方钴矿、斜方砷镍矿、自然银、自然铋、辉钴矿、晶质铀矿、针镍矿等伴生。常出现于中温热液矿床、铜镍硫化物矿床中，矽卡岩矿床中也可见	以具解理及常见的三角形陷穴与方钴矿区别；以硬度高与辉镍矿区别

第四鉴定表　黄铁矿 $R>R$ > 方铅矿 R 的低硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
辉铋矿* bismuthinite Bi_2S_3 斜方晶系	白：42～48.7 470：38～49 546：37～49 589：37～48 650：36～47	1. 2～2.5 2. 68～190_{50} 3. ≥方铅矿 ＞自然铋 ＜黄铜矿	1. 白色 暗灰色带蓝色（自然铋）； 较白（方铅矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：50.3　41.9 x：0.333　0.330 y：0.335　0.331 λ_d：497　482 P_e：0.010　0.013	1. 显 //a：白色微蓝；//b：灰白色；//c：黄白色 2. 无	强非均质性（灰-黄褐灰紫） A_r：4.8° ±0.1°	HNO_3（+）慢泡染黑，显结构； HCl(±)薰污； $HgCl_2$（+）染浅棕	易磨光。常呈纤维状、针状、长柱状及其集合体，很少为粒状，产于晶洞中呈自形晶簇。解理常见，可见纺锤状聚片双晶。相对密度6.5。伴生矿物主要有：辉钼矿、锡石、黑钨矿、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿、自然金、自然铋、辉碲铋矿等。常产于高温热液矿脉中，与钨、锡、钼矿物伴生。也产于中、低温热液硫化物矿脉中	以双反射、浸蚀反应为特征，尤以对KOH的浸蚀反应（－）可区别于辉锑矿
辉铅铋矿 galenobismutite $PbS\cdot Bi_2S_3$ 斜方晶系	白：47 470：54.1～51.5 546：51～48.6 589：48.7～46.5 650：47.2～45.5	1. 2. 5 2. 142～150 3. ≪黄铜矿	1. 白色或乳白色 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：50　47.8 x：0.332　0.323 y：0.326　0.326 λ_d：483　482 P_e：0.046　0.04	1. 显（白色微黄-灰白微蓝） 2. 无	强非均质性（灰-黄-棕） A_r：0.32° ±0.1°		磨光性差。常呈纤维状和羽毛放射状集合体出现，亦有呈板状、细粒状及其集合体者。可见解理。双晶常见。相对密度大，与辉铋矿构成连晶，包于闪锌矿、黄铁矿中；可交代黄铁矿和磁黄铁矿。伴生矿物主要有黄铜矿、深红银矿、黑钨矿、毒砂等。常产于高温气水-热液矿床中	以强非均质性和双反射与斜方辉铅铋矿区别；以其双反射显著、相对密度大，含铅等与辉铋矿区别
黄铜矿** chalcopyrite $CuFeS_2$ 四方晶系	白：44～46.1 470：34 546：47 589：48 650：49	1. 3.5～4 2. 174～219 3. ＞方铅矿 ＜闪锌矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿	1. 铜黄色 浓亮黄色（方黄铜矿）； 较黄（方铅矿）； 亮黄色（闪锌矿）； 较暗黄绿色（自然金） 2. R_{vis}：48.1 x：0.367 y：0.380 λ_d：574 P_e：0.242	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r：0.32° ±0.1°	HNO_3(±)薰污	易磨光。常为他形粒状集合体。双晶常见，偶见解理和内部环带结构，为弱塑性矿物。黄铜矿的固溶体分离物可呈小乳滴状分布在闪锌矿、黝锡矿、黝铜矿、辉铜矿、硫砷铜矿中。可与方黄铜矿、墨铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿、闪锌矿和黝铜矿等矿物形成连晶。常与各种硫化物、含硫盐矿物等伴生。除风化矿床外，几乎各类矿床中均可产出	铜黄色，弱非均质性和常呈固溶体分离结构为其特征。以反射色、弱非均质性区别于方黄铜矿；以反射色显黄绿色及反射率较低与自然金区别

金铜矿								
				见 79 页				
方铅矿 * * galena PbS 可含少量 Ag、Bi、Sb、Se、Te 等 等轴晶系	白:43.2 470:47 546:44 589:43 650:43	1. 1.5 ~ 2 2. 56 ~ 116 64 ~ $110_{10\sim25}$ 3. ≫辉银矿 > 淡红银矿 = 辉铜矿 < 斑铜矿、 黄铜矿	1. 纯白色 白色(闪锌矿); 蓝灰(自然金); 灰白色微蓝(黄铁矿) 2. R_{vis}: 43.2 x: 0.325 y: 0.324 λ_d: 473 P_e: 0.037	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)染黑; HCl(±)染棕、晕色; $FeCl_3$(+)晕色	易磨光,具擦痕。常呈自形或他形晶集合体,立方体解理完全,具黑三角形孔,浸蚀后可见内部的环带结构。极可塑性,受应力后发生揉皱现象。交代与其共生的大部分矿物,系常见的金属矿物,与绝大多数的金属矿物都可伴生。主要产于矽卡岩型、热液型、沉积型和沉积变质型矿床中	以具明显的黑三角形孔、低硬度、白色和均质性为特征,可与类似矿物区别
辉锑矿 * stibnite Sb_2S_3 斜方晶系	白:30.2 ~ 40 470:31 ~ 53 546:31 ~ 48 589:30 ~ 45 650:30 ~ 42	1. 2 ~ 2.5 2. 72 ~ 138_{50} 42 ~ 129 3. > 雌黄 < 方铅矿	1. 白色至浅灰白色 微暗(方铅矿); 亮得多(车轮矿) 2. R'_g R'_p R_{vis} :46.6 30.6 x: 0.317 0.330 y: 0.324 0.333 λ_d: 484 491 P_e: 0.062 0.012	1. 显 //a:暗灰白色; //b:灰带褐; //c:纯白色 2. 无	强非均质性(蓝-黄粉-褐) A_r: 6.2° ±0.1°	HNO_3(+)晕色迅速染黑; HCl(±)染棕; KCN(±)染棕; KOH(+)染棕、黄橙色沉淀	磨光性良好。呈长柱状、长条状、针状和粒状、块状或放射状集合体。聚片双晶和受压变形现象普遍,可见花岗变晶结构。常见擦痕,属弱塑性矿物。可见解理和内部环带结构。伴生矿物主要有:辉铁锑矿、块硫锑铅矿、深红银矿、红锑矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、黝铜矿、铅-锑含硫盐、白钨矿、块硫锑铜矿、自然金、雄黄、雌黄等。主要产于低温热液矿床中	以双反射、易揉皱变形、常见压力双晶、遇 KOH 产生橙黄色沉淀为特征,可与其他矿物区别
叶硒金矿 nagyagite $Au(Pb,Sb,Fe)_3$ $(S,Te)_{11}$ 斜方或四方晶系	470:43 ~ 46 546:40 ~ 42 589:39 ~ 41 650:38 ~ 39	1. 1.5 2. 39 ~ 110 3. ≤针硒金矿	1. 白色 微带浅紫色(方铅矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 40.4 38.5 x: 0.320 0.326 y: 0.324 0.329 λ_d: 482 484 P_e: 0.053 0.029	1. 显(微弱) 2. 无	强非均质性(浅蓝灰-暗棕色)		常呈弯曲的板状晶体,可含自然金、硒金矿、斜方硒金矿、黝铜矿和方铅矿的包体,共(伴)生矿物还有黄铁矿、斑铜矿和其他硒化物。主要产于低温热液矿床中	以反射色、反射率与自然金、硒金矿区别

第五鉴定表　黄铁矿 $R>R>$ 方铅矿 R 的中硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
针镍矿	见 81 页							
红锑镍矿	见 81 页							
镍黄铁矿* pentlandite $(Ni,Fe)_9S_8$ 可含 Co 等 轴晶系	白:52 470:40 546:47 589:49 650:52	1. 3.5～4 2. 201～231 $195\sim303_{50}$ 3. ＞黄铜矿 ≤磁黄铁矿	1. 淡黄色或乳黄色较亮（磁黄铁矿）； 白色、微黄（硫钴矿） 2. R_{vm}: 46.8 x: 0.361 y: 0.362 λ_d: 578 P_e: 0.170	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3（+）染棕色	易磨光，常呈粗粒至细粒的自形晶或他形晶集合体。解理发育；双晶、环带未见。常呈火焰状、羽毛状、星状分布在磁黄铁矿中，或分离于磁黄铁矿的周围成结状结构。也呈不混溶物分布在黄铜矿和方黄铜矿中。可含磁黄铁矿、黄铜矿和四方硫铁矿的不混溶体。可蚀变为方硫铁镍矿、紫硫镍矿、针镍矿。主要产于与基性、超基性岩有关的铜镍硫化物矿床中	以反射色、均质性、具解理为特征，可与磁黄铁矿、黄铜矿区别
自然砷	见 80 页							
红砷镍矿*	见 82 页							
硫镍钴矿 siegenite $(Ni,Co)_3S_4$ Se 含量可达 11%； 可含少量 Cu、Fe 等轴晶系	白:47.3～49.8 470:45 546:47 589:49 650:51	1. 4.5～5.5 2. 381～418 3. ＝硫钴矿 ＜方硫钴矿	1. 乳白色微带粉红色明显的浅粉红色（黄铁矿、黄铜矿）	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3（+）薰污，染棕； $HgCl_2$（+）薰污	磨光性良好。主要呈他形粒状集合体出现，也可呈自形晶及半自形晶粒，也有呈莓状、细菌状者。偶见解理、双晶，未见环带。与钴镍黄铁矿构成连晶。伴生矿物主要有：黄铁矿、方硫铁镍矿、黄铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、砷黝铜矿、斜方砷钴矿、砷镍矿、白铁矿、红砷镍矿、闪锌矿、菱锰矿、菱铁矿等。主要产在岩浆型铜镍硫化物矿床、热液矿床和沉积矿床中	以均质性和反射色较淡与红砷镍矿区别；以其反射色、磨光性和略低的反射率与黄铁矿区别

硫银铋矿 matildite 等轴晶系 $\xrightarrow{215℃}$ 斜方晶系	470:43 ~ 49 546:43 ~ 48 589:42 ~ 47 650:41 ~ 47	1. 3.5 2. 68 ~ 91 3. ≫方铅矿	1. 白色	1. 不显 2. 无	弱非均质性		常呈聚片状他形晶集合体。与方铅矿构成类韦氏交纹状不混溶结构，也可在方铅矿、闪锌矿中形成包体。其他伴生矿物还有自然银、辉银矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、白铁矿等	以反射色，非均质性与方铅矿、辉银矿相区别
锑硫镍矿 ullmannite NiSbS 等轴晶系	白:47.5 470:47 546:46 589:46 650:47	1. 5 ~ 5.5 2. 460 ~ 560 3. ＞硫钴矿 ≥辉砷镍矿 ≪黄铁矿	1. 白色微带淡黄色 2. R_{vis}: 46.1 x: 0.326 y: 0.327 λ_d: 480 P_e: 0.030	1. 不显 2. 无	均质性（有时显异常非均质性）	HNO_3(+)暗色；$FeCl_3$(+)染淡棕；溴蒸气(-)	磨光性较好。常呈自形晶，解理常见，偶见黑三角孔和内部环带结构。与黄铜矿、红锑镍矿、自然金、菱铁矿、鲕绿泥石等伴生。产于热液和沉积矿床中	以高硬度和偶见黑三角孔与方铅矿区别；以遇溴蒸气不起作用区别于辉砷镍矿
黄铜矿**	见86页							
砷镍钴矿 langisite (Co,Ni)As 六方晶系	470:44.9 ~ 46 546：46.1 ~ 46.8 589：47.1 ~ 47.7 650:49.4 ~ 53	1. 5 ~ 6.5 2. 780 ~ 857	1. 淡粉红黄色	1. 不显 2. 无	弱非均质性（淡蓝灰色-浅褐色）		常呈不规则颗粒和页片状出现于斜方砷钴矿中。与含钴镍黄铁矿、硫镍钴矿、自然铋、辉铋矿、斜方砷钴矿、砷镍矿、黄铁矿、白铁矿、方硫铁镍矿、闪锌矿、黄铜矿等伴生。常产于沉积岩与火山岩接触带附近的含碳酸盐热液矿脉中	以其形态、淡粉红黄色反射色及反射率略低为特征，可与斜方砷钴矿区别；以硬度较高、可与硫钴矿、硫镍钴矿区别
硫钴矿 linnaeite Co_3S_4 等轴晶系	白:46 470:45.7 546:46.8 589:47.7 650:50.7	1. 4.5 ~ 5.5 2. 351 ~ 566 3. 460 ~ 485_{200} ≫黄铜矿 ＞闪锌矿 ＝方钴矿 ≪毒砂、黄铁矿	1. 白色微带粉黄色 2. R_{vis}: 47.5 x: 0.348 y: 0.338 λ_d: 593 P_e: 0.059	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)暗色；$HgCl_2$(+)棕色显结构	磨光性良好。常呈八面体、自形晶粒和他形晶粒集合体。常见解理，未见双晶、环带。在磁黄铁矿中构成叶片状的固溶体分离结构。伴生矿物主要有：方钴矿、辉铜矿、黄铜矿、黄铁矿、自然铋等。常产于岩浆型铜镍硫化物矿床、热液矿床及沉积矿床中	以磨光性良好、反射色和浸蚀反应与辉钴矿、辉镍矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
磁黄铁矿** （陨硫铁） pyrrhotite （troilite） $Fe_{1-x}S$ $x=0.05\sim0.14$ 单斜晶系 六方晶系 $x\approx0$ 时为 陨硫铁	白；38～45.2 470；31～36 546；35～40 589；37～42 650；40～43	1. 4 2. 230～390 3. ≥黄铜矿 ≤镍黄铁矿 ≪毒砂、黄铁矿	1. 乳黄色微带粉褐色 红褐色（镍黄铁矿）； 浅粉红色（方黄铜矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：40.3　34.2 x：0.351　0.335 y：0.350　0.349 λ_d：579　582 P_e：0.102　0.114	1. 显 2. 无	磁黄铁矿：强非均质性（黄灰－绿灰－蓝灰） A_r：1.51° ±0.1° 陨硫铁：（土黄棕褐） A_r：2.55° ±0.1°	HNO_3（+）慢染棕； HCl（±）液体变黄、黯污； KOH（+）棕色	磨光性好。常呈他形粒状集合体。双晶普遍，楔formed结构，环带结构可见。具强磁性和可塑性。常见火焰状、纺锤状、粒状的固溶体分离物镍黄铁矿沿磁黄铁矿的裂隙、解理、晶粒间隙生长或析出于磁黄铁矿外缘形成“结状结构”，磁黄铁矿也可含黄铜矿的固溶体分离物及毒砂、红砷镍矿的包体。可蚀变成黄铁矿、白铁矿、赤铁矿和磁铁矿；亦可分解成细粒状黄铁矿和白铁矿，局部构成“鸟眼状结构”。主要产于岩浆型铜镍硫化物矿床、矽卡岩型矿床和热液矿床中，也见于沉积、变质矿床中	以具磁性、强非均质性、明显的反射色及浸蚀反应为特征，可与黄铜矿和方黄铜矿、镍黄铁矿区别
硫铜锑矿 chalcostibite $Cu2_S\cdot Sb_2S_3$ 或 $CuSbS_2$ 斜方晶系	白；37.1～43 470；39～47 546；38～44 589；36～40 650；34～38	1. 3～4 2. 212～249_{50} 3. ＞自然银 ≤黄铜矿	1. 白色微带粉灰色 浅灰色（自然银）； 浅粉红色（闪锌矿） 2.　R_g　R_m　R_p R_{vis}：42.3　37.3　35.9 x：0.323　0.324　0.326 y：0.336　0.332　0.334 λ_d：495　490　493 P_e：0.034　0.034　0.026	1. 不显 2. 无	弱非均质性（玫瑰－蓝灰－绿灰） A_r：5.04° ±0.1°	KCN（+）染棕	易磨光。呈他形粒状出现，很少呈自形的板状晶体。解理常见，偶见黑三角孔。可见双晶，未见环带。可交代黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿，可被方铅矿、辉铜矿、磁黄铁矿、墨铜矿等交代，亦可在黝铜矿中形成包体。主要产于中、低温热液矿床中	凭反射色、具解理和浸蚀反应与相似矿物区别

方黄铜矿* cubanite $CuFe_2S_3$ 斜方晶系 等轴晶系	白;40~42 470;29~34 546;35~39 589;38~41 650;41~43	1. 3.5 2. 150~264 181~224 3. ≥黄铜矿 <闪锌矿 ≪磁黄铁矿	1. 乳白色带淡褐色，乳黄色带淡粉红色 显黄色(磁黄铁矿)； 浅黄带粉(黄铜矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 40 35.5 x: 0.355 0.367 y: 0.361 0.367 λ_d: 575 578 P_e: 0.147 0.203	1. 不显 2. 无	强非均质性(黄棕-灰蓝) 有时显均质效应 A_r:0.82° ±0.1°	HNO_3(+)变褐，煮污	易磨光，常具擦痕。呈不规则粒状、多边形状或镶边状、板状、叶片状或柱状晶体。与黄铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿构成不混溶连晶。解理常见，具细密聚片双晶，系可塑性矿物，具磁性。主要伴生矿物有墨铜矿、闪锌矿、方铅矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、辉铜矿、黄铁矿、白铁矿、毒砂、黄锡矿、锡石、辉钼矿、黝铜矿等。常产于矽卡岩矿床及铜镍硫化物矿床中	以反射色和强非均质性为特征，可与黄铜矿区别
硫铜钴矿 carrollite $Cu(Co,Ni)_2S_4$ 等轴晶系	白;42 470;43 546;44 589;45 650;46	1. 4.5~5.5 2. 351~566 3. ≈硫钴矿类	1. 乳白色 淡粉红色(黄铜矿) 2. R_{vis}: 43.3 x: 0.340 y: 0.338 λ_d: 582 P_e: 0.034	1. 不显 2. 无	均质性		易磨光。常呈自形、半自形、他形粒状出现，可见解理、双晶和环带。被辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、黄铁矿、磁黄铁矿交代。呈包体出现于黄铜矿中，可含闪锌矿、黄铜矿及其他铜矿物包体。常与黄铁矿等伴生。主要产于岩浆型铜镍硫化物矿床、热液矿床和沉积矿床中	以含铜丰富，常与铜的硫化物伴生，反射色似硫钴矿为特征，可与类似矿物区别
紫硫镍矿* violarite $(Ni,Fe)_3S_4$ 可含少量 Co、Cu 等轴晶系	白;39 470;44 546;45 589;47 650;51	1. 3.5 2. 241~373 3. >黄铜矿 ≥镍黄铁矿 ≤磁黄铁矿	1. 淡紫色或红褐色 明显紫红色(镍黄铁矿)； 浅褐色(磁黄铁矿)； 淡紫色(黄铜矿) 2. R_{vis}: 45.2 x: 0.346 y: 0.343 λ_c: 582 P_e: 0.067	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)发泡、染紫褐色； $HgCl_2$(+)染淡褐色	磨光性好，常为他形晶集合体，八面体自形晶少见。常发育有完好的立方体和八面体解理。双晶、环带未见。常与方硫铁镍矿一起出现，呈镍黄铁矿和针镍矿的蚀变产物。伴生矿物主要有磁黄铁矿、辉砷镍矿、黄铜矿、红砷镍矿、钛铁矿等。常产于铜镍硫化物矿床和热液矿床中	以紫色为特征。凭中硬度、解理发育可与方硫铁镍矿区别。凭反射率、反射色可与镍黄铁矿区别

第六鉴定表　黄铁矿 $R>R>$ 方铅矿 R 的高硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
斜方砷镍矿					见 83 页			
方钴矿*					见 83 页			
毒砂**					见 83 页			
白铁矿**					见 84 页			
斜方砷铁矿					见 84 页			
红锑镍矿					见 81 页			
黄铁矿**					见 84 页			
硫镍钴矿					见 88 页			
锑硫镍矿					见 89 页			
辉砷镍矿					见 85 页			
砷镍钴矿					见 89 页			
硫钴矿					见 89 页			

第七鉴定表　方铅矿 $R>R>$ 黝铜矿 R 的低硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
辉锑矿*					见 86 页			
黄铜矿**					见 86 页			
块硫锑铅矿 （硫锑铅矿） boulangerite $5PbS\cdot 2Sb_2S_3$ 单斜晶系	白：37～44.1 470：39～43 546：37～42 589：37～41 650：35～38	1. 2.5～3 2. 50～173 3. ≤方铅矿 ＜车轮矿	1. 白色微带蓝绿色 绿灰（方铅矿）； 稍亮（辉锑矿） 2. R'_e　R'_p R_{vis}：43.2　35.9 x：0.323　0.325 y：0.327　0.329 λ_d：484　485 P_e：0.041　0.031	1. 显（灰白－蓝绿－绿灰） 2. 无	强非均质性（淡褐－蓝灰） A_r：2.52° ±0.1°	HNO_3(±)发泡、变黑 KCN(±)； $FeCl_3$(±)； $HgCl_2$(±)； KOH(±)	易磨光。常呈粒状、纤维状、针状或板状晶体及其集合体。解理、双晶、环带未见。系可塑性矿物。可与辉锑矿和脆硫锑铅矿构成连晶。伴生矿物主要有方铅矿、黝铜矿、车轮矿、黄铜矿、深红银矿、黄铁矿、黄锡矿、闪锌矿、辉锑矿、毒砂、磁黄铁矿、白铁矿、自然金等。常产于中、低温热液矿床中。多见于锡石硫化物矿床中	以无解理、双反射弱及浸蚀反应等与脆硫锑铅矿及类似矿物相区别

脆硫锑银矿 owyheeite $5PbS \cdot Ag_2S \cdot 3Sb_2S_3$ 斜方晶系	470:44 ~ 41.5 546: 42.6 ~ 39.8 589: 41.5 ~ 38.9 650: 39.4 ~ 37.3	1. 2 2. 98 ~ 129 3. > 深红银矿 < 方铅矿	1. 灰白微带橄榄绿色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 42 39.4 x: 0.326 0.326 y: 0.330 0.329 λ_d: 485 483 P_e: 0.027 0.028	1. 显 2. 无	强非均质性（草黄-灰白-蓝灰）		呈针状，纺锤状晶体和不规则粒状集合体。三角形凹穴，平行延长的双晶可见。与深红银矿形成假文象连晶，伴生矿物还有方铅矿，闪锌矿、黄铜矿、银金矿、脆银矿、黝铜矿等。产于热液矿床之中	以特征反射色，强非均质性与方铅矿区别，以无内反射与深红银矿区别
柱硫锑铅银矿 freieslebenite $4PbS \cdot 2Ag_2S \cdot 2Sb_2S_3$ 含少量 Cu、Fe 单斜晶系	470: 39.9 ~ 36.6 546: 39.7 ~ 36.3 589: 39.2 ~ 36.1 650: 38.3 ~ 34.8	1. 2 ~ 2.5 2. 85 ~ 140_{20} 3. ≪方铅矿	1. 灰白色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 39.3 36.1 x: 0.330 0.332 y: 0.331 0.336 λ_d: 482 490 P_e: 0.014 0.012	1. 不显或微弱 2. 无	弱非均质性		常呈自形粒状或柱状晶集合体。可见聚片双晶。在方铅矿中形成细小的不混溶体。其他共（伴）生矿物有闪锌矿、辉银矿、硫锑铅银矿、银黝铜矿、黄铁矿、铅复硫盐和银-锑复硫盐等	以反射色、非均质性与辉银矿、方铅矿区别
叶硫金矿					见 87 页			
硫铜锑矿					见 90 页			
方铅矿**					见 87 页			
软锰矿* pyrolusite MnO_2 四方晶系	白:30 ~ 41.5 470: 30.5 ~ 39.9 546:29 ~ 40 589: 28.1 ~ 39.3 650: 27.5 ~ 38.1	1. 2 ~ 6 2. 76 ~ 1500 3. 取决于结晶方位、粒度和结合的类型	1. 白色微带浅黄色色调淡黄（赤铁矿）；白色（水锰矿） 2. R_o R_e R_{vis}: 39.3 33.3 x: 0.325 0.325 y: 0.329 0.327 λ_d: 485 481 P_e: 0.031 0.034	1. 显（黄白色-灰白色） 2. 无	强非均质性（橙黄-蓝绿） 隐晶质变种显均质性 A_r: 4.9° ±0.2°	H_2O_2 (+) 发泡；$H_2O_2 + H_2SO_4$ (+) 发泡，染黑	不易磨光。呈自形柱状、针状晶体及其束状集合体。常呈块状、土状、粉末状构造。粗粒晶体常具清楚解理，可出现简单双晶和聚片双晶。主要与锰、铁的氧化物、氢氧化物伴生。常产于风化矿床和沉积矿床中	凭反射色微黄、反射率较高及晶形特点与其他锰矿物区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
脆硫锑铅矿* （毛矿） jamesonite $4PbS \cdot FeS \cdot Sb_2S_3$ 单斜晶系	白：36～40 470：38～45 546：36～44 589：36～43 650：34～41	1. 2～3 2. 67～126 3. ＜方铅矿	1. 白色微带蓝绿色 微绿（方铅矿）； 白色（闪锌矿） 2.　R_p　R_p R_{vis}：43.8　38.2 x：0.324　0.326 y：0.330　0.330 λ_d：487　485 P_c：0.033　0.028	1. 显（黄白-白色带灰绿） 2. 无	强非均质性（灰-浆　深蓝） A_r：2.6° ±0.1°	HNO_3（+）慢泡，棕色； HCl（±）薰污； KOH（+）晕色； 王水（+）发泡，变褐至黑色	磨光性良好。呈针状、柱状晶体，常呈放射状集合体。⊥延长方向解理通常易见，//延长方向聚片双晶极常见，H特征。细晶一般不具双晶。性脆。主要伴生矿物有方铅矿、深红银矿、块硫锑铅矿、黄铁矿、银黝铜矿、毒砂、黄铜矿、磁黄铁矿、白铁矿、锡石、黄锡矿、硫锑铅矿、辉锑锡铅矿、辉锑矿、自然银、自然金等。常产于中、低温热液矿床中	以具解理、双晶、明显的双反射、强非均质性及浸蚀反应为特征，可与硫锑铅矿区别
辉锑矿*							见87页	
辉铁锑矿 berthierite $FeS \cdot Sb_2S_3$ 或 $FeSb_2S_4$ 斜方晶系	白：30～40 470：38～44 546：37～42 589：37～41 650：36～40	1. 2～3 2. 102～213 134～206_{50} 3. ≥辉锑矿 ≤闪锌矿	1. 灰白色带粉红褐色 2.　R_g　R_m　R_p R_{vis}：41.9　39.4　30.7 x：0.327　0.327　0.333 y：0.332　0.326　0.326 λ_d：489　475　554 P_c：0.0212　0.030　0.030	1. 显（灰白-粉褐） 2. 无	强非均质性（蓝黄-褐） A_r：4.59° ±0.1°	HNO_3（+）晕色； KOH（±）晕色	易磨光。常呈放射状、柱状、针状及纤维状晶体，或块状集合体。偶见解理，未见双晶、环带。与辉锑矿构成定向连晶，还与黄铜矿、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、硫锑铁矿、闪锌矿、方铅矿、红锑镍矿、红砷镍矿、镍-钴-铁的砷化物、自然银、深红银矿等伴生。主要产于低温热液锑矿床中	以反射色、浸蚀反应与辉锑矿、辉铋矿等类似矿物区别
史蒂银矿 （六方硒银矿） stutzite $Ag_{5-x}Te_3$ 六方晶系	白：39 470：41～42 546：40～41 589：39～41 650：38～41	1. 2～2.5 2. 75～90 3. ＜粒硒银矿	1. 浅灰色	1. 显（浅灰色-乳白色） 2. 无	强非均质性（淡褐-强烈蓝色） A_r：0.63°		磨光性良好。呈粒状及其集合体。未见双晶。伴生矿物主要有粒硒银矿、硒银矿、硒金银矿、针硒金银矿、自然硒、硒汞矿、硒铅矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、砷黝铜矿、自然银、方钴矿、斜方砷钴矿。常见于五元素矿床和火山热液矿床中	以其双反射、强非均质性及不具双晶为特征，可与硒银矿相区别

碲银矿 hessite Ag_2Te 单斜$\xrightarrow{155℃}$等轴晶系	白:38.5 470:40 546:39~41 589:39~42 650:39~43	1. 2~3 2. 24~41 28~44$_{10-15}$ 3. >辉锑矿 ≤碲铅矿 ≪方铅矿	1. 灰白色带褐色调 淡褐(方铅矿); 褐色(辉银矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 40.1 38.9 x: 0.341 0.333 y: 0.339 0.332 λ_d: 582 569 P_e: 0.039 0.003	1. 不显 2. 无	强非均质性 A_r:0.81° ±0.1°	HNO_3(+)染棕黑; HCl(±)染黑; KCN(±)染黑; $FeCl_3$(+)染色; $HgCl_2$(+)染棕、染色	不易磨光,常具擦痕。呈圆粒状、他形粒状集合体,偶见骨晶状。未见解理。在155℃以上,可见转变双晶。主要伴生矿物为自然金、针碲金银矿、碲金银矿、自然银、碲铅矿、砷镍矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、砷黝铜矿、毒砂、自然锑、锑镍矿以及其他金和银的碲化物等。主要产于次火山岩的金矿脉和银矿脉中	以强非均质性和反射色为特征,可与辉银矿区别,以低硬度,不易磨光及浸蚀反应与其他类似矿物区别
车轮矿 bournonite $2PbS\cdot Cu_2S\cdot Sb_2S_3$ 斜方晶系	白:36~38.2 470:36~37 546:34~36 589:33~35 650:32~34	1. 2.5~3 2. 132~213 3. >硫锑铅矿、 >方铅矿 <闪锌矿	1. 灰白色带蓝绿色调 较暗(硫锑铅矿); 淡蓝色(黝铜矿); 暗绿带蓝(方铅矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 36.1 33.8 x: 0.326 0.325 y: 0.330 0.328 λ_d: 486 482 P_e: 0.027 0.032	1. 不显 2. 无	弱非均质性(淡蓝灰-绿灰-棕黄-暗褐) A_r:0.46° ±0.1°	HNO_3(+)染棕; 王水(+)迅速变黑	磨光性良好。常呈多边形颗粒的集合体,也呈柱状、碟状,边缘不整齐。交织状双晶普遍,未见解理,偶见环带。常见压力变形结构、重结晶结构。多呈包体分布于黝铜矿、斑铜矿和方铅矿中。与方铅矿构成文象状连晶。在方铅矿和块硫锑铅矿之间,以及在黄铜矿和硫铜锑矿之间形成反应边,还与辉锑矿、自然金、自然银等伴生。常产于中、低温热液矿床中	以反射色、交织状双晶及浸蚀反应为特征,可与辉锑铜矿及类似矿物相区别
硒银矿 naumannite $\beta-Ag_2Se$ ⟸ $\alpha-Ag_2Se$ 斜方晶系$\xrightarrow{133℃}$等轴晶系	450: 39.5~33.1 550: 37.3~36.3 600:34~36.5 650: 33.2~34.9	1. 2.5 2. 31~37 27~56$_{10-15}$ 3. <硒铅矿	1. 乳白色微带棕色 微蓝绿(硒铅矿); 较亮(灰硒汞矿) 2. R_{vis}: 36.3 x: 0.320 y: 0.327 λ_d: 486 P_e: 0.050	1. 不显 2. 无	强非均质性		易磨光。呈他形粒状集合体,可与硒铅矿构成蠕虫状连晶。其他共(伴)生矿物还有黄铁矿、自然金、银黝铜矿、黄铜矿、硒化物等。常产于热液矿床中	以低硬度和与硒矿物,共生为特征,以不显内反射与硫砷铜银矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
硒铜银矿 eucairite AuCuSe 斜方晶系	470：35～34 546：37～36 589：36～37 650：34～35	1. 2 2. 54～94 3. ≥硒铜矿	1. 淡黄色	1. 显 2. 无	强非均质性（蓝白-微橄榄棕）		易磨光。呈粒状或粒状等集合体。可与硒铜矿构成蠕虫状连晶。在辉铜矿中呈包体。可改变成六方硒铜矿。伴生矿物还有硒汞矿、赤铁矿等。产于热液矿床之中	以反射色、非均质性与方铅矿、辉铜矿区别
辉钼矿** molybdenite MoS_2 六方晶系 （2H） 三方晶系 （3R）	户：15.2～37 470：21～45 546：20～39 589：19～39 650：19～39	1. 1～1.5 2. 24～21_{50} （2H） 18～23_{50} （3R） 3. ＜石墨	1. 灰白色 2. R'_g R'_p R_{vis}：45.3 21.8 x：0.317 0.312 y：0.316 0.315 λ_d：476 480 P_e：0.073 0.089	1. 显（灰白色-灰带淡蓝色） 2. 无	强非均质性（45°位置时：白色微带淡粉黄色） A_r：12.5°±0.1°		不易磨光。常为弯曲鳞片状、叶片状的晶体，有时呈玫瑰花状集合体，易变形，常具波状消光。常见解理。伴生矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、毒砂、辉铋矿、锡石、黑钨矿、白钨矿、自然铋、自然金、闪锌矿、方黄铜矿、磁黄铁矿等。主要产于高中温热液矿床及矽卡岩矿床中	以双反射、非均质性特强，硬度特低；常呈弯曲片状，对试剂特别稳定为特征，可与类似矿物区别
辉锑银矿 miargyrite $Ag_2S \cdot Sb_2S_3$ 或 $AgSbS_2$ 单斜晶系	户：31.8～36 470：38.7～31 546：37.8～30.3 589：35.1～27.9 650：32.1～26	1. 2 2. 88～123 3. ≥深红银矿 ＜脆银矿、方铅矿	1. 灰白色带蓝色调较暗，带绿（方铅矿）；较亮，淡蓝（银黝铜矿） 2. R'_g R'_p R_{vis}：35.7 28.5 x：0.322 0.321 y：0.327 0.327 λ_d：484 484 P_e：0.043 0.047	1. 显（灰白-蓝灰） 2. 有，深红色	强非均质性（浅灰-蓝灰-淡棕） A_r：3.09°±0.1°	HNO_3（±）染棕； HCl（±）薰污； KCN（+）染灰； $HgCl_2$（+）染棕； KOH（+）晕色	易磨光。常呈粒状集合体。双晶可见，均为聚片双晶。可含闪锌矿的包体，呈黝铜矿和方铅矿中的包体。通常与深红银矿或其他银锑矿物构成连晶。交代毒砂、闪锌矿、银黝铜矿、黝铜矿、深红银矿、可被自然银、硫锑铜银矿、深红银矿交代。主要伴生矿物有黄铜矿、车轮矿、辉银矿、脆银矿、斜方砷铁矿、斜方砷镍矿。常产于低温热液银矿床中	以灰白带蓝的反射色和具有深红色的内反射为特征，可与脆银矿、硫铜银矿区别

圆柱锡矿 cylindrite $6PbS \cdot 6SnS_2 \cdot Sb_2S_3$ 或 $Pb_3Sn_4Sb_2S_{14}$ 斜方晶系	白;36 470;33 ~ 40 546;31 ~ 38 589;30 ~ 37 650;29 ~ 35	1. 2 ~ 3 2. 31 ~ 131 3. ≥辉锑锡铅矿 < 黄铜矿、闪锌矿、黄锡矿	1. 灰白色 略暗(方铅矿); 绿灰色(磁黄铁矿) 2. R'_g R'_p R_{vis}: 37.8 34.3 x: 0.330 0.329 y: 0.335 0.334 λ_d: 498 492 P_c: 0.011 0.014	1. 显(奶油白色-淡蓝灰色) 2. 无	弱非均质性(暗蓝色-黄白色) A_r: 1.46° ±0.1°	HNO_3(+)黑污、染彩; HCl(+)黑污、染彩; $FeCl_3$(±)染褐; KOH(±)染灰至彩	不易磨光。横切面具圆筒状外形,呈放射状和内部环带结构。同心环带间可出现辉锑锡铅矿的间层,核心部分由圆柱锡矿、闪锌矿、石英、锡石的细粒集合体组成。圆筒状单晶可长2cm ~ 3 cm,厚1 cm。极脆性。可含黄锡矿、闪锌矿、锡石、黄铁矿的包体。可在黄铜矿和纤锌矿小球体的核心呈滴状或半自形粒状包体产出。可蚀变为方铅矿、硫锑铅矿和锡石的文象状连晶。常产于含锡的热液矿床中	其晶形横切面特殊,不易与其他矿物混淆
硫铋铜矿 wittichenite $3Cu_2S \cdot Bi_2S_3$ 斜方晶系	白;34 470;32 ~ 34 546;33 ~ 36 589;34 ~ 36 650;33 ~ 35	1. 2 ~ 3 2. 161 ~ 206 167 ~ 216_{50} 3. ≫自然铋 > 硫铜铋矿 < 斑铜矿	1. 乳白色或白色带淡黄褐色调 2. R_g R_m R_p R_{vis}: 35.9 33.6 32.4 x: 0.336 0.336 0.339 y: 0.338 0.335 0.337 λ_d: 568 571 566 P_c: 0.002 0.016 0.012	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r: 1.21°	HNO_3(+)慢泡,有时显晕色; KCN(+)晕色; $FeCl_3$(±)染淡棕; $HgCl_2$(±)染淡棕	易磨光。常为粗粒他形集合体,也呈自形、半自形的针状、板状、刀片状晶体。未见解理、双晶、环带。呈斑铜矿或黄铜矿的包体或分布于其接触处,成为黄铜矿与自然铋的反应边。主要伴生矿物有自然铋、辉铋矿、硫铜铋矿、针硫铋铅矿、蓝辉铜矿、硫砷铜矿、块硫锑铜矿、自然银、自然金、黄铁矿、闪锌矿、铜蓝等。主要产于富含铜、铋的银-钴-镍的矿脉中	以无解理、双反射不明显为特征,可与硫铜铋矿区别
辉锑铅矿 zinkenite $PbS \cdot Sb_2S_3$ 或 $6PbS \cdot 7Sb_2S_3$ 六方晶系	白;32.3 470;38.05 ~ 44.1 546;36.9 ~ 42.4 589;36 ~ 41.3 650;34.3 ~ 39.3	1. 3 2. 123 ~ 207	1. 灰白色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 42.7 37.6 x: 0.324 0.325 y: 0.328 0.329 λ_d: 484 484 P_c: 0.037 0.032	1. 不显 2. 无	弱非均质性 A_r: 1.63° ±0.1°	HNO_3(+)发泡,变黑; HCl(+)染棕; $HgCl_2$(+)染色; KOH(+)晕色; 王水(+)染褐至黑	易磨光。呈细针状、毛发状、放射纤维状集合体,常构成被膜和裂隙充填物。解理可见。呈小乳滴包体或针状集合体于闪锌矿中。可交代锡石、黄铁矿和黄锡矿。主要伴生矿物有毒砂、方铅矿、脆硫锑铅矿、辉锑矿、其他铅-锑复硫盐及自然金。常产于热液矿床中	以弱非均质性与脆硫锑铜矿、块硫锑铅矿区别;以浸蚀反应与辉锑矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
辉铜矿** chalcocite Cu_2S （一般含 Ag） 103.5℃以下为斜方晶系；103.5～420℃为六方晶系变体；420℃以上为等轴晶系变体	白：32.2 470：37～38 546：33 589：32 650：30	1. 2.5～3 2. 58～96 $62\sim99_{15-25}$ 3. ≥辉银矿 =蓝辉铜矿 <斑铜矿	1. 灰白色微带蓝色色调 淡蓝色（方铅矿）； 灰色带蓝（黄铁矿）； 白色（铜蓝）； 明显淡蓝色（黝铜矿） 2. R_m R_{vis}：31.8 x：0.320 y：0.323 λ_d：481 P_c：0.054	1. 不显 2. 无	弱非均质性（假均质效应系隐晶质或在极大压力下制备光片所致） A_r：0.43°	HNO_3（+）发泡，染蓝，显结构； HCl（+）蒸污； KCN（+）迅速染黑显结构； $FeCl_3$（±）染蓝，显结构； $HgCl_2$（+）显结构	易磨光。在103.5℃以上形成的辉铜矿，粒度较粗；急速结晶时，粒度较细。可与蓝辉铜矿构成连晶、聚片双晶可见。浸蚀后显两向解理。淋积形成的辉铜矿一般呈细粒状或隐晶质，而构成所谓“烟灰状辉铜矿”。辉铜矿经常与斑铜矿共生；还常与黄铜矿、铜蓝、闪锌矿等各种硫化物、硒化物、碲化物伴生。产于中、低温热液矿床、淋积矿床、沉积矿床及变质矿床中	以低硬度，常与斑铜矿共生，遇 HNO_3 发泡、染蓝、显解理为特征，可与黝铜矿及其他铜矿物区别
深红银矿* pyrargyrite $3Ag_2S\cdot Sb_2S_3$ 六方晶系	白：29～31 470：34～35 546：29～30 589：27～28 650：25～27	1. 2～2.5 2. $105\sim127_{15}$ 3. ≥辉银矿 >硫锑铜银矿 <脆银矿	1. 浅蓝灰色 蓝灰色（方铅矿）； 淡蓝色（辉锑银矿）； 2. R'_g R'_p R_{vis}：30.4 27.8 x：0.309 0.308 y：0.315 0.311 λ_d：481 479 P_c：0.098 0.107	1. 显 2. 有（深红色）	强非均质性（灰黄白蓝灰色） A_r：1.4° ±0.1°	HNO_3（+）染棕； KCN（+）染灰； $FeCl_3$（±）染黑； $HgCl_2$（+）染棕	易磨光。呈长柱状、板状自形晶或不规则他形粒状集合体。常具聚片双晶；浸蚀后可见环带状内部结构。主要伴生矿物有辉银矿、自然铋、毒砂、黄铁矿、黝铜矿、黄铜矿、方铅矿、硫锑铜银矿、车轮矿、硫锑铅矿、辉银矿、淡红银矿、银黝铜矿以及镍、钴、铁的砷化物等伴生。常产于中、低温热液矿床及火山矿床、淋积矿床（硫化物矿床的次生富集带）中	以反射率稍高、红色内反射较为特征，可与淡红银矿区别

硫锑铜银矿-硫砷铜银矿 polybasitepearceite $(Ag,Cu)_{16}(Sb>As)_2S_{11}$均可含少量 Se；为无限类质同象固溶体系列单斜晶系（假六方晶系）	硫锑铜银矿 白：30.5 470：33～34 546：31～33 589：30～31 650：29 硫砷铜银矿 470：32～34 546：29～32 589：29～31 650：29～30	硫锑铜银矿 2.131～139 硫砷铜银矿 1. 2～3 2. 148～155 3. ＞辉银矿 ≈深红银矿 ≪砷黝铜矿	1. 灰白色微带淡绿色调 灰绿（方铅矿）； 相似（辉银矿）； 淡褐（脆银矿） 2. 硫锑铜银矿： R'_g R'_p R_{vis}：30.6 28.5 x：0.327 0.325 y：0.330 0.324 λ_d：484 474 P_e：0.024 0.038 硫砷铜银矿： R'_g R'_p R_{vis}：34.9 27.9 x：0.325 0.324 y：0.328 0.324 λ_d：483 477 P_e：0.032 0.043	1. 不显 2. 有（深红色－红色）	弱非均质性 A_r：1.2° ±0.2°	HNO_3(±)黑污； HCl(+)黑污； KCN(+)染黑快； $FeCl_3$(±)晕色； KOH(±)晕色； $HgCl_2$(±)染褐至黑	不易磨光。常呈自形假六方板状和小板状，玫瑰花状或他形粒状集合体。也呈方铅矿、黝铜矿、闪锌矿、黄铁矿的不规则包体。偶见解理、双晶。主要伴生矿物为黄铜矿、脆银矿、深红银矿、锑银矿、硫铜银矿、晶质铀矿、斑铜矿、辉铜矿、自然银、自然金、辉银矿、斜方砷钴矿、斜方砷镍矿等。常产于热液矿床和沉积矿床中	以红色内反射、切面形态呈板状为特征，可与辉银矿区别；以弱非均质性、硬度较低为特征，可与砷黝铜矿区别
脆银矿 stephanite $5Ag_2S \cdot Sb_2S_3$ 斜方晶系	白：30 470：31～33 546：28～30 589：28～30 650：28～29	1. 2～2.5 2. 45～107 3. ≫辉银矿 ＞硫锑铜银矿	1. 灰白色带淡紫色调 暗粉紫（方铅矿） 2. R'_g R'_p R_{vis}：30.9 27.6 x：0.322 0.322 y：0.326 0.321 λ_d：482 476 P_e：0.044 0.052	1. 显（灰白－淡粉白） 2. 无	强非均质性（深紫－灰绿色） A_r：1.8° ±0.1°	KCN(+)染灰黑； KOH(+)染彩黑； $HgCl_2$(+)染褐	易磨光。呈柱状自形晶，他形集合体。与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、自然银、深红银矿、方铅矿、Ni－Co－Fe 的砷化物、硫锑铜矿、辉银矿、黝铜矿、银金矿、毒砂等伴生。性脆。聚片双晶常见，解理少见，环带未见。多产于浅成及较深成的中温 Ag－Pb 热液矿脉中	以无内反射与深红银矿区别；以反射色与辉银矿区别
螺状硫银矿*—辉银矿 acanthite－argentite Ag_2S（可含少量 Cu） 单斜晶系：螺状硫银矿生成于177℃以下等轴晶系：辉银矿生成于177℃以上	白：32 470：33.1～34.3 546：30.4～31.2 589：29.4～30.1 650：28.4～28.9	1. 2～2.5 2. 20～26 3. 为硬度最低之金属矿物之一	1. 灰白色带绿色 绿灰（方铅矿）； 明显绿色（自然银） 2. R_{vis}：34.1 x：0.326 y：0.331 λ_d：487 P_e：0.029	1. 不显 2. 无	螺状硫银矿：非均质性； 辉银矿：均质性	HNO_3(±)黑污； HCl(+)染棕彩，晕圈洗不去； KCN(+)染棕黑； $FeCl_3$(+)染灰黑； $HgCl_2$(+)染彩	螺状硫银矿呈柱状、针状、立方体、他形粒状或隐晶质、等轴辉银矿呈自形立方体、八面体、四角三八面体或他形粒状集合体或呈细脉状。螺状硫银矿的聚片双晶常见。均为可塑性。因硬度低，磨光后常见擦痕。呈方铅矿的不混溶体和呈黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿的包体出现。还与铜蓝、辉铜矿、蓝辉铜	以低硬度、反射色和对盐酸的反应为特征，可与辉铜银矿、硫铜银矿、和硫锑铜银矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
							矿、辉铋矿、方铅矿、黄铜矿、深红银矿、淡红银矿、银金矿、自然金、自然银等伴生。主要产于中-低温热液矿床、沉积矿床和次生富集带中	
淡红银矿* proustite $3Ag_2S \cdot As_2S_3$ 六方晶系	白：25～27.7 470：29～33 546：24～28 589：23～26 650：22～25	1. 2～2.5 2. 106～127_{15} 3. =深红银矿	1. 浅蓝灰色 2.　R'_g　R'_p R_{ms}：27.4　24.1 x：0.313　0.312 y：0.314　0.311 λ_d：478　476 P_e：0.088　0.094	1. 显（浅蓝灰色-黄白色） 2. 有（鲜红色至砖红色）	强非均质性（黄-蓝灰，常被内反射干扰） A_r：1.63° ±0.1°	HNO_3（+）黯污； KCN（+）染褐，显结构； $FeCl_3$（+）染黑至灰； $HgCl_2$（+）染棕； KOH（±）染灰或黑	易磨光。呈不规则粒状、自形针状。解理、双晶、环带偶见。交代自然铋、银黝铜矿、深红银矿等。与方铅矿和深红银矿常分别构成文象状连晶。可含自然银的包体。本矿物可原生，亦可次生。多出现在锑矿床或铅锌矿床中。常产于低温热液矿床中，也见于外生矿床中	以反射率低、双反射明显及有鲜明的内反射色为特征，可与深红银矿区别

第八鉴定表　方铅矿 $R>R>$ 黝铜矿 R 的中硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
红锑镍矿	见81页							
黄铜矿**	见86页							
磁黄铁矿**	见90页							
硫银铋矿	见89页							
硫铜锑矿	见90页							
方黄铜矿*	见91页							

紫硫镍矿*					见91页			
少银黄铁矿 argentopyrite $AgFe_3S_5$ 斜方晶系	470：34.4～27.65 546：36.8～30.1 589：37.8～31.3 650：38.9～33.2	1. 3～4 2. 250～252 3. >磁黄铁矿 <黄铁矿	1. 灰白至淡黄色	1. 显 2. 无	强非均质性(深蓝、蓝灰、灰白、淡红色)		呈柱状晶体、假六方晶体、也可成页片状双晶。与火硫锑银矿构成连晶。可分解成黄铁矿、辉银矿和磁黄铁矿，其共生矿物还有中银黄铁矿、脆银矿、深红银矿、黄铜矿、方铅矿等。产于热液矿床之中	以其晶形、硬度与磁黄铁矿相区别
软锰矿*					见93页			
黝铜矿* tetrahedrite $Cu_3SbS_{3.25}$ 等轴晶系	白：30.7 470：30.3 546：30.3 589：29.8 650：28.2	1. 3.5～4.5 2. 251～425 3. ≥方铅矿 =黄铜矿 <闪锌矿	1. 灰白色微带浅褐色 蓝灰(黄铜矿)； 褐灰、微绿(方铅矿) 2. R_{vis}：28.8 x：0.330 y：0.333 λ_d：489 P_e：0.012	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)棕色； KCN(±)染淡棕	易磨光。呈他形粒状集合体，解理未见。脆性。可含由不混溶作用形成的闪锌矿、黄铜矿或磁黄铁矿的微细包体，亦可与黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿构成文象状连晶。与各种硫化物、含硫盐伴生。常产于中、低温热液、沉积、变质矿床中	凭其反射色和化学分析可与砷黝铜矿区别
银黝铜矿* freibergite 化学式与黝铜矿相似，Ag可高达20% 等轴晶系	白：29.8 470：30.4 546：30.9 589：30.5 650：28.5	1. 3～4.5 2. 250～310_{50} 3. ≪闪锌矿 >银的含硫盐	1. 灰白色微带橄榄褐色 淡褐色(淡红银矿)； 淡灰褐色(方铅矿) 2. R_{vis}：30 x：0.348 y：0.346 λ_d：579 P_e：0.082	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(+)染棕(慢)； $FeCl_3$(+)染彩； $HgCl_2$(+)沉淀	易磨光。常呈他形粒状集合体。解理罕见。脆性，常与淡红银矿、辉银矿、方铅矿、辉锑铜矿、自然银、黄铜矿、自然金、钴镍铁的砷化物、黄锡矿、硫锑铅银矿、自然砷、脆硫锑铅矿、辉锑矿、雄黄等伴生。常产于中温热液矿床及火山沉积-受变质硫化物矿床中	凭其反射色、化学分析和遇 $HgCl_2$ 沉淀与黝铜矿族的其他矿物区别
砷黝铜矿* tennatite $Cu_3AsS_{3.25}$ 等轴晶系	白：28.9 470：31.5 546：30 589：29.8 650：28.8	1. 3.5～4.5 2. 251～425 3. ≫方铅矿 =黄铜矿 <闪锌矿	1. 灰白色微带橄榄绿色或浅蓝绿色 淡绿色(方铅矿)； 蓝灰色(黄铜矿) 2. R_{vis}：29.5 x：0.326 y：0.331 λ_d：488 P_e：0.026	1. 不显 2. 无	均质性	HNO_3(±)薰污； KCN(±)染淡棕	易磨光。常呈他形粒状集合体。脆性。常与方铅矿、硫铜银矿、深红银矿构成文象状连晶。交代黄铁矿，硫砷铜矿，亦可被方铅矿、硫铜银矿、黄铜矿等交代。主要产于中-低温热液矿床中，也产于沉积、变质等矿床中	以反射色、浸蚀反应及化学分析结果与黝铜矿区别

第九鉴定表　方铅矿 $R>R>$ 黝铜矿 R 的高硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
硫钴矿					见91页			
软锰矿					见93页			
硬锰矿* psilomelane $(Ba,H_2O)_2Mn_5O_{10}$ 单斜、斜方、四方晶系或非晶质及隐晶质	白:27 470：35.3 ~ 28.2 546：32.2 ~ 26.2 589：30 ~ 24.9 650：27.8 ~ 23.8	1. 4 ~ 6 2. 503 ~ 627 （硬度随铁氢氧化物混入物数量的增加而增高）	1. 灰白色带蓝色调亮得多（水锰矿）；无黄色调（软锰矿） 2.　R'_y　R'_a R_{vis}：24.4　19 x：0.317　0.319 y：0.320　0.321 λ_d：480　479 P_e：0.0689　0.06	1. 显晶者：显隐晶或胶体：不显 2. 无	显晶者：强非均质性（白 - 灰白色）；隐晶、胶体者：均质性	HNO_3(±)黑污、染褐至灰； HCl(±)染褐至黑； $FeCl_3$(±)染浅褐； H_2O_2(+)发泡	易磨光。一般为非晶质（胶体）或隐晶质，呈葡萄状、肾状、钟乳状、同心环带状等胶状构造。显晶质者常呈细粒状或细针状集合体，为上述形态的变胶状构造。可含软锰矿、褐铁矿等。伴生矿物主要为其他铁、锰的氧化物、氢氧化物等。主要产于风化矿床和沉积锰矿床中	以反射率低，反射色具蓝色调及胶状、变胶状构造为特征，可与软锰矿区别
钡硬锰矿 （碱硬锰矿或锰钡矿） hollandite $Ba\leqslant_2R_8O_{16}$ R 主要为：Mn^{4+}，Mn^{2+}，Fe，Co；Ba 可达 20% 四方晶系或单斜晶系 （为硬锰矿的四变种之一）	白：25.5 ~ 32.5 470：28 ~ 35 546：26 ~ 33 589：25 ~ 31 650：24 ~ 30	1. 6 2. 540 ~ 1048 3. ≥褐锰矿（大多数）； ＜褐锰矿（少数）	1. 灰白色微带淡黄色调	1. 显 2. 无	强非均质性（浅黄-淡粉红-淡蓝紫） A_r：3.31° ±0.2°	$SnCl_2$(+)显结构； H_2O_2(+)发泡； $H_2O_2+H_2SO_4$(+)显结构	不易磨光。呈柱状、板状或针状晶体组成的放射状集合体。解理常见，可见聚片双晶和格状双晶，含褐锰矿、黑锰矿的包体；亦呈包体分布在褐锰矿、黑镁铁锰矿、方铁锰矿中，可被褐锰矿、方铁锰矿、赤铁矿、硬锰矿沿解理交代。为沉积锰矿的接触变质产物，或高温热液的产物	以反射色、双反射及没有内反射为特征，可与赤铁矿、黑锰矿、水锰矿、褐锰矿等区别

第十鉴定表　黝铜矿 $R>R$ > 闪锌矿 R 的低硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
辉钼矿**	见96页							
圆柱锡矿	见97页							
辉铜矿**	见98页							
螺状硫银矿* —辉银矿	见99页							
深红银矿*	见98页							
硫锑铜银矿- 硫砷铜银矿	见99页							
黄银矿　火硫锑银矿 xanthoconite—pyrostilpnite Ag_3AsS_3—Ag_3SbS_3 单斜晶系	470:29～32 546:25～27 589:23～25 650:23～24	1.2～3 3. =深红银矿、淡红银矿	1. 浅蓝灰色（较深红银矿和淡红银矿浅）	1. 显 2. 有（浅黄褐色）	强非均质性		在少银黄铁矿中呈粒状晶集合体，也可形成叶片状和针状晶体构成放射状球粒，常与深红银矿、辉锑银矿、淡红银矿连晶。矿物生成多晚于红银矿类，呈细小晶体出现	以其色调和具有黄褐色的内反射色区别于红银矿类
脆银矿	见99页							
硫铜银矿 stromeyerite CuAgS 斜方 $\frac{94℃}{}$ 等轴晶系	门：25.5～28.7 470:28～38 546:27～31 589:26～30 650:26～29	1.2～2.5 2.38～44 3. <方铅矿、辉铜矿	1. 灰白色带紫红色调淡紫灰色（辉铜矿）；相似（辉铜银矿） 2.　R'_g　R'_p R_{min}：29.4　25.6 x：0.314　0.323 y：0.312　0.322 λ_d：474　474 P_e：0.086　0.047	1. 不显（显-微弱） 2. 无	强非均质性（蓝-紫红） A_r:2.1*	HNO_3（+）晕色至黑，显结构； HCl（±）蒸污，染黑； KCN（+）迅速变黑显结构； $FeCl_3$（+）晕色	易磨光，常呈粒状集合体，少见针状自形晶。未见解理、双晶和环带。呈竹叶状与辉铜矿构成不混溶连晶；与黝铜矿族、自然银、黄铜矿、斑铜矿和方铅矿构成连晶。主要产于低温热液矿床、次生富集带及沉积矿床（含铜砂岩中）	以与自然银共生，具叶片状结构及颗粒小等为特征，可与类似矿物区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
辰砂* cinnabar HgS 三方晶系	白：28 470：26～31 546：24～29 589：23～28 650：23～27	1. 2～2.5 2. 51～98_{10}～25 3. ≥黑辰砂 ≪赤铜矿	1. 灰白色微带蓝色调 淡蓝（方铅矿）； 稍亮（黑辰砂） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：27　23.7 x：0.325　0.323 y：0.326　0.322 λ_d：480　475 P_e：0.035　0.048	1. 不显 2. 有（朱红色）	弱非均质性 A_r：2.53°±0.1°	王水（+）发泡，暗色，但不均匀	磨光性良好。常呈他形及半自形粒状及其集合体。可发育菱面体自形晶和菱面体的贯穿双晶。可见六方柱解理，未见环带。主要伴生矿物为硫砷铜矿、块硫锑铜矿、雌黄、闪锌矿、方铅矿、辉锑矿、重晶石、方解石、黑辰砂、雄黄等。常为低温热液最后生成矿物，亦可为火山喷气产物；亦可为沉积后生作用产物	以朱红色内反射、低硬度及对六种标准试剂无反应为特征，可与赤铜矿、淡红银矿、深红银矿等区别
硒金银矿 fischesserite Ag_3AuSe_3 等轴晶系	480：22.3 540：29.7 580：31 640：33.8	1. 2 2. 32. 7_{50}	1. 粉红色	1. 不显 2. 无	均质性		呈他形晶粒状。与自然金、硒银矿、硒铅矿和均质硒铜矿等共生。常产于铀矿床的碳酸盐脉中	以反射色、反射率与金银矿区别；以均质性、反射色特征与硒银矿区别
淡红银矿*				见100页				
雌黄** orpiment As_2S_3 单斜晶系	白：20.3～25 470：27～31 546：23～28 589：22～27 650：21～26	1. 1.5 2. 22～52 3. ≥雄黄	1. 浅灰色或灰白色 稍亮（雄黄）； 较亮（闪锌矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：24.5　20.6 x：0.317　0.315 y：0.316　0.315 λ_d：475　476 P_e：0.073　0.080	1. 显（灰白-白-灰白带微红） 2. 有（浅黄色或稻草黄色）	非均质性强-弱（被内反射所掩盖）	KCN（+）显结构； KOH（+）染棕黑； $HgCl_2$（+）黄色沉淀	不易磨光。常呈板状、片状、柱状或针状晶体或他形粒状块体出现。常见解理，未见双晶、环带。可见其呈皮壳状构造或束状集晶覆盖在雄黄表面，系雄黄蚀变而成。常与雄黄、辉锑矿、毒砂、黄铁矿、闪锌矿、自然砷等伴生。常产于低温矿床、温泉矿床、沉积后生矿床中	以鲜明的黄色内反射和显著的双反射为特征，可与雄黄区别

硫银锗矿－黑硫银锡矿 (argyrodite - canfeldite) $4Ag_2S \cdot Ge_2S_2$ $4Ag_2S \cdot SnS_2$ 等轴晶系(高温) 斜方晶系(低温) 类质同象固溶体系列	硫银锗矿： 470；25.2 546；24.3 589；24.2 650；24.6 黑硫银锡矿： 470；26.5 546；24.7 589；24.2 650；24.3	1. 2. 5 2. 154～172 3. ＞深红银矿＜方铅矿、黝铜矿	1. 灰白色带粉棕色 2. 硫银锗矿 R_{vis}：24.4 x：0.330 y：0.328 λ_d：455 P_e：0.016 黑硫银锡矿 R_{vis}：25.49 x：0.417 y：0.412 λ_d：579 P_e：0.489	1. 不显 2. 无	弱非均质性(斜方) 均质性(等轴)		易磨光，常为粒状集合体，偶见自形晶，聚片双晶常见，可含黄铁矿、方铅矿或深红银矿包体，或沿方铅矿解理产出，还可与闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿、黄锡矿、辉银矿、锡石等矿物共生或构成连晶，产于热液矿床之中	以反射色与黝铜矿、黝锡矿区别；以无内反射与深红银矿区别
斑铜矿** bornite Cu_5FeS_4 可含少量 Au、Ag、Co、Se 四方 $\xrightleftharpoons{228℃}$ 等轴晶系	白；21.9 470；17 546；21 589；25 650；29	1. 3 2. 97～124_{20-25} 3. ＞方铅矿、辉铜矿≤黄铜矿	1. 淡玫瑰红色 较深(硫砷铜矿)； 较橙、较暗(块硫锑铜矿) 2. R_{vis}：22.8 x：0.374 y：0.359 xd：584 P_e：0.201	1. 不显 2. 无	均质性(有时可显微弱的非均质性)	HNO_3(+)发泡，变黄褐； KCN(+)染褐； $FeCl_3$(+)染橙	易磨光，常为他形粒状集合体。解理可见，常显双晶。在空气中易形成紫蓝色的锖色膜。常与黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿构成格状和叶片状的固溶体分离结构。可交代黄铜矿、黝铜矿、方铅矿、赤铁矿；可被铜矿物和辉银矿等交代。主要见于沉积矿床、变质矿床和中、高温热液矿床中	以鲜明的反射色可与辉铜矿区别
蓝辉铜矿* digenite neodigenite $4Cu_2S \cdot CuS$ 等轴晶系	白；22 470；27 546；22 589；19 650；17	1. 2－3 2. 58～83 30～94_{15-20} 3. ＝辉铜矿、方铅矿	1. 灰蓝色或浅蓝色 随 CuS 含量的增多而更蓝 灰蓝色(方铅矿)； 鲜蓝色(斑铜矿) 2. R_{vis}：22.8 x：0.308 y：0.316 λ_d：483 P_e：0.102	1. 不显 2. 无	均质性(有时可呈弱的非均质性)	HNO_3(+)发泡、变蓝、显结构； KCN(+)变黑、显粗糙面	磨光性好，呈细粒状集合体，八面体解理常见。具塑性。在蓝辉铜矿中可出现由固溶体分离而产生的辉铜矿或铜蓝的叶片。蓝辉铜矿经常与各种铜的硫化物紧密伴生。在硫化物矿床的次生富集带中，细粒的蓝辉铜矿常沿边缘或裂隙交代其他铜的硫化物。主要产于中、低温热液、淋积、沉积等矿床中	以浅蓝色的反射色、均质性及低硬度为特征，可与辉铜矿、铜蓝等铜矿物相区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
铜蓝* covellite CuS 六方晶系	白： 8～23 470：13～30 546：7～24 589：4～21 650：6～23	1. 1.5～2 2. 92～110$_{50}$ 3. ≫辉银矿 ≤方铅矿 <黄铜矿	1. 深蓝色-白色微蓝 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：23　5.93 x：0.301　0.227 y：0.306　0.247 λ_d：480　480 P_e：0.134　0.436	1. 显（深蓝色微带紫色-蓝白色） 2. 无	强非均质性（火橙-蔷薇-橙黄） A_r： 14.6° ± 0.4°	HNO_3（+）黑污； KCN（+）染蓝紫或黑，显结构	易磨光。常呈自形的板状、薄板状或他形、半自形粒状及其集合体。底面解理完全清晰。双晶和环带未见，可由很多铜矿物变成，与各种铜的硫化物伴生。主要产于沉积矿床、铜矿床的氧化带和次生富集带及低温热液矿床中	以火橙色的偏光色、反射色和反射多射性为特征，可与蓝辉铜矿区别
雄黄** realgar AsS 单斜晶系	白：18.5 470：22.5～24.8 546：21.4～21.8 589：20.3～20.6 650：19.5～19.8	1. 1.5～2 2. 47～60 51～57$_{15}$ 3. <雌黄 ≪辉锑矿	1. 灰色微带紫色 稍暗（雌黄）； 较亮（闪锌矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：28.9　19 x：0.319　0.313 y：0.318　0.309 λ_d：475　473 P_e：0.064　0.094	1. 不显 2. 有（黄红色或橙色）	弱-强非均质性（易被强烈的内反射所掩盖）	HNO_3（+）发泡； KCN（±）薰污； KOH（+）迅速变黑； 王水（+）发泡，变褐	不易磨光。呈板状、棱柱状及他形粒状集合体，或呈孔隙充填物出现在其他金属矿物之间，或呈皮膜状、土状、块状、粉末状。解理少见，双晶未见。几乎总与雌黄共生。主要伴生矿物有辉锑矿、毒砂、黄铁矿、闪锌矿、自然砷、砷的含硫盐、砷黝铜矿、淡红银矿等。主要产于低温热液矿床、温泉矿床和喷气矿床中	以鲜明的橙红色内反射、低硬度及与雌黄紧密伴生为特征，可与类似矿物区别
硫镉矿 greenockite CdS 可含少量 In（与纤锌矿形成完全类质同像固溶体系列） 六方晶系	白：18.5 470：21 546：20 589：18 650：17	1. 2.5～3 2. 52～91$_{20}$ 3. >闪锌矿	1. 灰色 相似（闪锌矿） 2. R_{vis}：19.4 x：0.333 y：0.341 λ_d：555 P_e：0.027	1. 不显 2. 有（褐色、黄色、浅黄色、橙红色）	弱非均质性	HNO_3（+）染淡褐	易磨光。呈皮膜状覆盖于闪锌矿、纤锌矿等锌矿物之上或充填其间，还可呈粉末状。未见解理、双晶，环带。产于硫化物矿床的淋滤亚带和次生硫化物富集带，也产于火山岩的气孔和裂隙中，系低温热液作用形成	以内反射、形态、产状等与闪锌矿区别

纤锌矿 wurtzite ZnS 可含 Fe、Cd、Mn (硫镉矿与纤锌矿形成完全类质同象固溶体系列) 六方晶系	白;17 470;19 546;16.5 589;16 650;16	1. 3 ~ 4 2. 146 ~ 264 3. ≈闪锌矿	1. 灰色微带淡蓝色很相似(闪锌矿)	1. 不显 2. 有(褐色、浅黄、黄色)	弱非均质性	HNO_3(+)染淡褐	易磨光。呈纤维状晶体之集合体。常构成放射状结构及同心环带状的胶状构造,解理清楚。一般系 ZnS 胶体经再结晶作用而成,常产于低温浅成热液矿床中	以纤维状、放射状结构和胶状构造与闪锌矿相区别
墨铜矿 vallerite $Cu_2Fe_4S_7$ 六方或斜方晶系	白;16 ~ 9 470;11 ~ 15 546;10 ~ 21 589;10 ~ 23 650;10 ~ 26	1. 1 2. 30 3. < 黄铜矿	1. 古铜色、青铜色、褐色 2. R'_g R'_p R_{vis}: 19.3 12 x: 0.383 0.334 y: 0.377 0.335 λ_d: 580 573 P_e: 0.279 0.008	1. 显(浅灰褐色-蓝) 2. 无	强非均质性(白色-青铜色)	HNO_3(±)染色; $FeCl_3$(±)染黑; $HgCl_2$(±)染褐黑; $KMnO_4 + KOH$(+)染黑	磨光性极差。呈针状、线状、纤维状、蠕虫状、叶片状、板状、泡状、星状在黄铜矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿及铬铁矿中呈包体,或在其接触处出现。还与石墨、黄铁矿、蛇纹石等伴生,可见解理。常产于矽卡岩矿床,以及与超基性岩和基性岩有关的铜镍、铂、铬铁矿床中	以古铜色的反射色、特低硬度和特强的双反射和强非均质性为特征,可与类似矿物区别

第十一鉴定表　黝铜矿 $R > R >$ 闪锌矿 R 的中硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性(偏光色)	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
黝铜矿*	见 101 页							
银黝铜矿*	见 101 页							
砷黝铜矿*	见 101 页							
少银黄铁矿	见 101 页							

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
块硫砷铜矿 luzonite （与块硫锑铜矿形成完全类质同象固溶体系列） $Cu_3(As\cdot Sb)S_4$ 四方晶系	广： 25.1～28.7 470:24～25 546:25～27 589:26～29 650:28～30	1. 3. 5 2. 205～397 3. ≥斑铜矿 ≥黝铜矿 ≤硫砷铜矿、闪锌矿	1. 淡橙色微带粉色 淡粉红色（块硫锑铜矿） 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：28.4　25.7 x：0.348　0.345 y：0.340　0.335 λ_d：589　595 P_e：0.064　0.041	1. 显（橙褐－灰紫色） 2. 无	强非均质性（暗棕灰绿） A_r：2.2° ±0.1°	HNO_3（+）棕色，黑污； KCN（+）染深灰色	易磨光。呈不规则状、浑圆状或等轴状及细粒状集合体。解理未见，双晶普遍。交代黄铜矿、黝铜矿、辉铜矿、闪锌矿；也被辉铋矿、硫砷铜矿交代。常与硫砷铜矿构成环带状结构，与黝锡矿、黄铜矿构成连晶。主要产于中、低温热液矿床及火山热液矿床中	以具双晶、双反射和浸蚀反应为特征，可与硫砷铜矿区别
硫砷铜矿 enargite $Cu_3(As,Sb)S_4$ Sb 可高达 6% 斜方晶系	白：25～28.1 470:26 546:24～25 589:24～26 650:25～27	1. 3. 5 2. 133～383 3. ＞方铅矿 ≥砷黝铜矿 ＜闪锌矿	1. 灰白色带粉红色或淡粉褐色 2.　R'_g　R'_p R_{vis}：25.4　28.5 x：0.331　0.346 y：0.329　0.351 λ_d：448　574 P_e：0.012　0.092	1. 不显 2. 无	强非均质性（淡蓝－淡绿－淡红－橙） A_r：2.6° ±0.1°	KCN（+）染黑、染绿褐、显结构； $FeCl_3$（±）显结构； $HgCl_2$（±）染色	易磨光。呈柱状、他形粒状、浑圆颗粒状或呈集合体。常见解理。由于压力作用，偶见压力双晶。受浸蚀常显环带、性脆。可与块硫砷铜矿互相转变。伴生矿物有块硫砷铜矿、黄铜矿、黄铁矿、硫铜锑矿、脆硫锑铅矿、自然金、雄黄和黄锡矿等。主要产于中、低温铜矿床，多金属矿床和矽卡岩型铅锌矿床中	以强非均质性和反射色为特征，可与斑铜矿区别；以无双晶区别于块硫砷铜矿和块硫锑铜矿
黝锡矿* （黄锡矿） stannite $Cu_2S\cdot FeS\cdot SnS_2$ 或 Cu_2FeSnS_4 四方晶系	白：28 470:26～27 546:28 589:27～28 650:27	1. 3～4 2. 142～248 3. ＞黄铜矿 ≈黝铜矿 ＜闪锌矿	1. 灰黄色微带褐色、橄榄绿色 略暗，灰褐（黝铜矿）； 较亮、黄褐（闪锌矿） 2.　R'_e　R_ω R_{vis}：27.3　25.9 x：0.341　0.341 y：0.346　0.347 λ_d：572　572 P_e：0.063　0.063	1. 不显 2. 无	强非均质性（淡暗绿－浅玫瑰）	HNO_3（+）棕色、黑污、染黑、显结构； $H_2SO_4+H_2O_2$（±）沉淀； $KOH+H_2O_2$（+）显结构	磨光性较好。常呈细粒他形集合体或呈细小晶粒、晶片、乳浊体包裹于其他矿物中。解理偶见，可见环带结构。复合双晶普遍，常与闪锌矿、黄铜矿构成乳滴状固溶体分离结构。可构成锡石与磁黄铁矿、锡石与黄铜矿、锡石与闪锌矿之间的反应边。主要产于矽卡岩型或热液型的锡石硫化物矿床中	以特殊的反射色，易与黝铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿和斑铜矿区别

赤铜矿 cuprite Cu_2O (可含少量 V) 等轴晶系	白:27.1 470:31 546:27 589:25 650:23	1.3~4 2.179~218 $195\sim218_{50}$ 3. >黄铜矿 <针铁矿	1. 浅灰色微带浅蓝色调 2. R_{vis}: 26.3 x: 0.310 y: 0.318 λ_d: 483 P_e: 0.092	1. 不显 2. 有(深红色)	均质性(显异常非均质效应)	HNO_3(+)有铜膜出现; HCl(+)白色沉淀; KCN(+)染黑显结构; $FeCl_3$(+)晕色	易磨光。呈他形粒状的土状、细脉状、不规则状集合体,偶呈八面体自形晶体。解理少见,双晶未见。极可塑性。与自然铜、针铁矿、褐铁矿、黑铜矿、孔雀石、自然银等伴生。常产于铜矿床的氧化带中	以具蓝色色调的反射色,深红色的内反射和浸蚀反应为特征,可与类似矿物区别
硬锰矿*	见 102 页							
黑铜矿 tenorite CuO 单斜晶系	白: 20~26.9 470:21~27 546:20~28 589:20~27 650:20~27	1.3.5 2.203~254 3. >辉铜矿 <赤铜矿	1. 灰白-灰色 浅褐(赤铜矿); 较亮、灰带黄(针铁矿) 2. R_g R_m R_p R_{vis}:17.8 15.6 14.2 x:0.325 0.336 0.325 y:0.323 0.323 0.322 λ_d:469 469 467 P_e:0.039 0.097 0.042	1. 显 2. 无	强非均质性(蓝-淡黄灰) A_r: 6.7° ±0.3°	HNO_3(+)黯污、染褐; HCl(±)染棕,显结构; $FeCl_3$(±)染色	较易磨光。呈针状、柱状、鳞片状及束状集合体或胶状、土状集合体。常见双晶,未见解理。交代赤铜矿。主要伴生矿物有褐铁矿、自然铜、辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、针铁矿等。常产于含铜硫化物矿床的氧化带中	以显双反射、不显内反射以及与铜的氧化带矿物共生的特征,可与水锰矿区别;凭无内反射也可与赤铜矿、针铁矿区别
硫锰矿 alabandite α-MnS 等轴晶系	白:23.4 470:24 546:23 589:22 650:22	1.3.5 2.138~261 $129\sim256_{50}$ 3. <闪锌矿	1. 浅灰色 较亮(闪锌矿) 2. R_{vis}: 22.5 x: 0.323 y: 0.322 λ_d: 475 P_e: 0.045	1. 不显 2. 有(绿褐色)	均质性	HNO_3(+)发泡,染棕显结构,放出H_2S气体; HCl(+)发泡,放出H_2S气体,染黑	磨光性良好。常呈他形粒状的脉状或块状集合体,偶呈自形晶。聚片双晶常见,可具内部环带结构。常与黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄锡矿、脆硫锑铅矿、硫砷铜矿、菱锰矿及其他硫化物、碳酸盐伴生。主要产于低温热液矿脉、矽卡岩矿床、沉积矿床或变质矿床中	与闪锌矿相似,二者可以反射率、内反射的特点区别。以遇HNO_3放出H_2S气体为其突出特点
斑铜矿**	见 105 页							

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
磁铁矿** magnetite Fe_3O_4 等轴晶系	白：21.1 470：21 546：21 589：21 650：21	1. 5.5～6.5 2. 440～1100 3. ≥闪锌矿 <钛铁矿 ≪赤铁矿	1. 灰色微带褐色 较暗，明显的棕褐色（赤铁矿）； 较亮（闪锌矿） 2. R_{vis}：20.7 x：0.335 y：0.333 λ_d：496 P_e：0.004	1. 不显 2. 无	均质性	HCl(+)蒸污，染褐	不易磨光。常呈自形晶（八面体）；半自形晶或他形晶及其集合体。穆磁铁矿呈板片状赤铁矿的假象。环带结构可见，内部裂纹常见。常见钛铁矿、钛铁晶石、尖晶石的固溶体分离呈格状或叶片状沿｛111｝和｛100｝分布。强磁性。产于岩浆、伟晶、热液、沉积变质等矿床中，产出地质条件广泛，与各种氧化物、硫化物及其类似化合物、硅酸盐矿物伴生	以反射色带褐色、均质性、高硬度、强磁性及无内反射为特征，可与闪锌矿、铬铁矿、钛铁矿等区别
水锰矿 manganite $Mn^{2+}Mn^{4+}O_2(OH)_2$ 单斜晶系	白： 14～20 470：15～21 546：14～21 589：14～20 650：13～19	1. 3～4.5 2. 367～803 3. <黑钨矿、褐锰矿 ≪软锰矿	1. 灰色带褐色调 2. R_g　R_m　R_p R_{vis}：21.5　16.2　13.5 x：0.320　0.326　0.328 y：0.327　0.329　0.333 λ_d：485　483　490 P_e：0.049　0.029　0.020	1. 显-不显（淡褐-灰色，微带橄榄绿色） 2. 有*（红褐-血红色）	强非均质性（淡黄-淡蓝灰色） A_r：5.47° ±0.2°	H_2O_2(+)发泡	磨光性好。呈柱状、片状、他形粒状。有时具放射状结构，常呈块状、豆状和鲕状构造。解理清楚可见，双晶普遍。伴生矿物有硬锰矿、软锰矿、褐锰矿、锌黑锰矿、黑锰矿和针铁矿。常见于沉积矿床中，也见于热液矿床中	以反射率稍高、强非均质性与针铁矿区别；以反射率较低、有内反射与软锰矿区别；以具有解理、硬度较低及可显的双反射和强非均质性与褐锰矿区别

黑钨矿* 钨锰矿 钨铁矿 wolframite huebnerite ferberite $(Fe,Mn)WO_4$ 单斜晶系（含 Fe 端员称为钨铁矿，含 Mn 端员称为钨锰矿，一般以分子 80% 为界线）	白： 16.2～18.5 470：16～17 546：15～16 589：15～16 650：15～16	1. 5～5. 5 2. 258～657 3. ＞白钨矿 ≪黄铁矿	1. 灰色 相似（闪锌矿）； 褐灰色（黄铜矿）； 较亮（锡石） 2. 黑钨矿 R'_y R'_o R_{vis}：17.2 15.3 x：0.328 0.328 y：0.328 0.328 λ_d：479 477 P_e：0.025 0.024 钨铁矿 R'_g R'_p R_{vis}：18.5 16.7 x：0.333 0.332 y：0.333 0.333 λ_d：489 481 P_e：0.003 0.004	1. 黑钨矿：显 不显； 钨铁矿：不显； 钨锰矿：显 2. 有（褐-红色）； 钨铁矿：无	弱非均质性（黄-灰） 钨锰矿：强非均质性 A_r：2.7° 或 2.5° ±0.1°		易磨光。呈粗大晶体及放射同心圆状集合体，常以板状自形晶或半自形晶、不规则粒状出现。可出现生长环带。解理清楚，可见简单双晶，相对密度 7.2～7.5。常见硫化物如黄铜矿等沿解理或边缘交代。常与锡石、辉钼矿、辉铋矿、白钨矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、铌铁矿、绿柱石等伴生。主要产于热液矿床中。黑钨矿多产于高、中温热液矿床，钨铁矿、钨锰矿多产于中、低温热液矿床中	以其内反射的有无、强弱、颜色和非均质性的强弱区别三种钨矿物；以非均质性和结晶习性与磁铁矿、闪锌矿等区别
闪锌矿** sphalerite ZnS 可含 Fe、Mn、Cd、In、Ge、Tl 等，Fe 含量最高可达 26% 等轴晶系	白：17.5 470：18 546：17 589：17 650：17	1. 3. 5 2. 128～276 3. ＞黄铜矿 ≥硫砷铜矿 ＜磁黄铁矿	1. 灰色微带褐色调 深灰（方铅矿）； 稍暗（磁铁矿）； 相似（纤锌矿） 2. R_{vis}：17.2 x：0.338 y：0.338 λ_d：578 P_e：0.030	1. 不显 2. 有（红褐色-褐黄色）	均质性	HNO_3（+）染棕，显结构； 王水（+）发泡、染褐色	易磨光。常呈他形颗粒集合体，粗细不一，自形晶罕见。聚片双晶和环带状结构普遍（浸蚀后显出）。常与纤维锌矿构成连晶。可交代白铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂；可被自然银、辉银矿、黝铜矿、辉铜矿、方铅矿等交代。黄铜矿、方黄铜矿、黝锡矿、磁黄铁矿在闪锌矿中常呈固溶体分离的乳滴状结构，产于内生、沉积、变质等各类矿床中	以其均质性、中硬度、鲜明的内反射及常含黄铜矿乳浊体，常与方铅矿共生为其特征，可与类似矿物区别
纤锌矿	见 107 页							

第十二鉴定表　黝铜矿 $R>R$ > 闪锌矿 R 的高硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
钡硬锰矿	见 102 页							
赤铁矿** hematite Fe_2O_3 （可含 Ti、Mn、Mg、Al 等） 三方晶系	白：25.0～30 470：28～32 546：26～30 589：23～29 650：23～26	1. 5.5～6 2. 739～1114$_{100-20}$ 3. ≥针铁矿 >钛铁矿 <锡石 ≤黄铁矿	1. 灰白色微带蓝色 白色（磁铁矿）； 灰带蓝色（黄铁矿） 2. R'_g　R'_p R_{vis}：29.7　26.2 x：0.320　0.320 y：0.328　0.325 λ_d：486　484 P_e：0.050　0.052	1. 不显（微弱） 2. 有*（深红色）	强非均质性（蓝灰－灰黄） A_r：2.19° ±0.1°	浓 HF（+）显结构	不易磨光。常呈板状、叶片状、针状及纤维状晶体。鲕状、肾状及隐晶质构造系外生作用所形成。聚片双晶常见。常交代磁铁矿，成为假象赤铁矿。受压力后，可弯曲揉皱。未见环带。常与各种铁、锰氧化物、石英、硅酸盐矿物伴生。为常见矿物，产于内生、外生和变质矿床中	以反射率、具深红色内反射、强非均质性为特征，可与针铁矿区别；凭较高的反射率与纤铁矿区别
磁赤铁矿 maghemite $\gamma-Fe_2O_3$ 等轴晶系	白：25.0 470：23.7 546：22.2 589：21.1 650：19.5	1. 5～5.5 2. 357～ 988$_{50-100}$ 3. ≥磁铁矿 ≤赤铁矿	1. 淡蓝灰色 灰色（针铁矿）； 灰带蓝色（赤铁矿）； 明显淡蓝（磁铁矿） 2. R_{vis}：20.2 x：0.318 y：0.317 λ_d：476 P_e：0.069	1. 不显 2. 有*（褐红色，少见）	均质性		较易磨光。通常在磁铁矿颗粒中呈不规则状分布，呈细密网格状、云雾状或海绵状，偶尔沿其结晶方向或裂隙分布，二者界线常不清楚。磁赤铁矿通常由磁铁矿氧化而成，也可以由褐铁矿或赤铁矿在成岩、后生作用中形成。具强磁性。常与针铁矿、纤铁矿、菱铁矿等伴生。主要产于风化矿床和沉积矿床中	主要以蓝灰色、均质性、具磁性以及常与赤铁矿、磁铁矿紧密共生为特征，可与类似矿物区别
纤铁矿 lepidocrocite $\gamma-FeO(OH)$ 斜方晶系	白：15.8～25.0 470：13～21 546：12～18 589：11～17 650：11～17	1. 5 2. 147～782 3. <针铁矿	1. 灰色 较亮（针铁矿）； 微绿（赤铁矿）	1. 显 2. 有（褐红色）	强非均质性（浅灰－暗灰） A_r：6.32° ±0.1°	$SnCl_2$（+）显结构	常呈纤维状、片状、薄板的绒球状、放射状集合体。具葡萄状、肾状等胶状构造。解理常见。主要与磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、针铁矿等伴生。常由风化作用形成，也可由低温热液作用形成	以红色内反射与针铁矿区别。以纤维状、放射状结构、变胶状构造、较低硬度及产状为特征，可与金红石区别

金红石 rutile TiO_2 （可含少量 Nb、Ta、V、Fe、Cr） 四方晶系	白;23.5 470;21 ~ 25 546;20 ~ 23 589;19 ~ 23 650;19 ~ 22	1. 6 ~ 6.5 2. 933 ~ 1280 3. > 钛铁矿 < 锡石 ≥ 赤铁矿	1. 灰色，有时带蓝色较亮（钛铁矿）；蓝带粉红（针铁矿） 2. R_a R'_g R_{vis}: 20.7 23.5 x: 0.323 0.325 y: 0.323 0.326 λ_d: 477 478 P_e: 0.044 0.036	1. 强 2. 有（黄色、棕黄色）	强非均质性（偏光色常被内反射掩盖） A_r:2.28° ±0.2°		磨光较好。常呈针状或柱状的自形晶。解理可见，聚片双晶常见。亦可见压碎结构。磨光费时，常见陷穴或麻点。与钛赤铁矿、钛磁铁矿、钽铁矿等构成连晶。还与磁铁矿、黄铁矿、磁铁矿、钒磁铁矿、铌铁矿等伴生。产于岩浆、伟晶岩、高温热液、变质等矿床中，亦在岩浆岩和变质岩中呈副矿物出现	以晶形、内反射、常见双晶、高硬度及共生关系等为特征，可与闪锌矿区别
磁铁矿**							见 110 页	
钛铁矿* ilmenite $FeO \cdot TiO_2$ （常含少量 Fe^{3+}、Mn^{2+}、Mg） 三方晶系	白: 17.8 ~ 21.1 470;17 ~ 20 546;16 ~ 19 589;17 ~ 20 650;18 ~ 20	1. 5 ~ 6 2. 501 ~ 752 3. ≤ 赤铁矿 > 磁铁矿	1. 灰白色带浅棕色红褐色（赤铁矿）；较暗（磁铁矿） 2. R_a R'_g R_{vis}: 19.3 14.7 x: 0.344 0.339 y: 0.334 0.331 λ_d: 605 498 P_e: 0.034 0.025	1. 不显 2. 无	弱非均质性（淡黄-绿蓝-紫） A_r:2.39° ±0.1°		易磨光。呈粒状、板状、片状、格状及其集合体。发育完好的聚片双晶，且可见两组双晶。常与赤铁矿、磁铁矿构成不混溶连晶，还与金红石、铬铁矿、钛铁晶石、尖晶石、硫化物等伴生。主要产于基性岩、超基性岩、碱性岩及其有关矿床中，砂矿中亦常见	以非均质性、聚片双晶及反射色为特征，可与磁铁矿区别
褐锰矿 braunite （Mn^{4+}、Si）$Mn_7^{2+}O_8$ 四方晶系	白: 17.8 ~ 19.8 470;20 ~ 21 546;19 ~ 20 589;18 ~ 19 650;18 ~ 19	1. 5 ~ 6.6 2. 280 ~ 1187 3. ≥ 磁铁矿 ≤ 方铁锰矿	1. 灰色微带淡褐色 2. R'_y R'_a R_{vis}: 20.1 19.1 x: 0.324 0.322 y: 0.324 0.323 λ_d: 478 478 P_e: 0.041 0.047	1. 不显 2. 有（暗棕，罕见）	弱非均质性（棕灰-蓝） A_r:0.65° ±0.1°	H_2O_2(+) 发泡，较慢	易磨光。常呈致密的或微细的粒状块体或变斑状构造集合体。解理未见，双晶少见，可具环带。主要伴生矿物为黑镁铁锰矿、钡硬锰矿、方铁锰矿、赤铁矿、软锰矿、黑锰矿、硬锰矿、磁铁矿、水锰矿、锰的硅酸盐和碳酸盐等。主要产于变质沉积锰矿床中；也见于低水-热液矿床中	以弱非均质性、较低的反射率为其特征，可与软锰矿区别。凭非均质性弱与黑锰矿和水锰矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
黑锰矿 hausmannite $(Mn,Fe)Mn_2O_4$ 四方晶系	白：16.0～19 470：17～21 546：16～20 589：16～20 650：15～20	1. 5～5.5 2. 466～724 3. ＞水锰矿 ＜黑镁铁锰矿	1. 灰色微带褐色或蓝色 2.　R_o　R'_e R_{vis}：19.7　17.2 x：0.322　0.328 y：0.325　0.330 λ_d：482　482 P_c：0.045　0.02	1. 显（灰微带淡蓝-褐灰） 2. 有（血红色）	强非均质性（黄灰-黄棕-蓝灰）	HCl(±)染棕色	较易磨光。常呈嵌镶粗粒状集合体，也呈细粒晶体组成的细脉交代方铁锰矿。双晶普遍而特征，双晶片常宽窄不一，可相互交切，解理偶见。与软锰矿、硬锰矿、隐钾锰矿、褐锰矿、红锌矿、黑镁铁锰矿等伴生。主要产于低温锰矿脉中；也见于接触交代矿床、沉积矿床中	以内反射色、强非均质性及特征的双晶与钨铁矿、褐锰矿区别
黑钨矿* 钨锰矿 钨铁矿	见111页							
针铁矿* goethite $\alpha-FeO\cdot OH$ 斜方晶系	白：16.1～18.5 470：17～20 546：16～18 589：15～17 650：14～16	1. 5～5.5 2. 525～1010 3. ≥纤铁矿 ＜磁铁矿、钛铁矿	1. 灰色微带淡蓝色 明显淡蓝色（闪锌矿）；暗得多（赤铁矿） 2.　R'_y　R'_α R_{vis}：16.1　14.6 x：0.314　0.316 y：0.314　0.316 λ_d：477　477 P_e：0.085　0.075	1. 不显（显-微弱） 2. 有*（褐黄-红褐）	弱非均质性（蓝灰-黄棕-绿灰） Δ_r：1.34°±0.1°		较易磨光。呈针状、纤维状晶体，具放射状、球颗状结构，常呈葡萄状、肾状、钟乳状等胶状构造。常与褐铁矿、赤铁矿、水赤铁矿构成累带状。可见凝缩裂纹。交代黄铁矿、钨锰矿、磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿等，可构成黄铁矿和菱铁矿的交代假象。主要产于风化矿床中，常与次生铁、锰矿物伴生	以针状、放射状结构，葡萄状、肾状等胶状构造以及鲜明的褐黄-红褐色内反射为特征。凭内反射色可与纤铁矿区别
铌铁矿 钽铁矿 columbite－tantalite $(Fa,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ 斜方晶系	白：16.5 470：17～18 546：17 589：17 650：16～17	1. 5.5～6 2. 240～1021$_{HD=4D}$ 3. ＜金红石	1. 灰色微带褐色	1. 不显 2. 有（锰钽铁矿黄棕色，铁钽铁矿深红色）	弱非均质性 Δ_r：1.06°±0.2°		易磨光。常呈自形柱状、板状及其集合体。亦呈束状或粒状集合体。解理清楚，双晶少见，环带偶见。性脆。常与锡石、方铅矿、赤铁矿、钛铁矿、金红石、晶质铀矿、黑钨矿等伴生。常产于伟晶岩矿床和与碱性岩、酸性岩有关的矿床中	以板状晶体及束状为特征，尤以不显双反射和弱非均质性（平行消光）可与黑钨矿区别

第十三鉴定表　$R<$闪锌矿 R 的低硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
铜蓝*	见 106 页							
硫镉矿	见 106 页							
石墨* graphite C 六方晶系 (2H) 三方晶系 (3R)	白：6.0～17.0 470：6～22 546：7～23 589：7～24 650：7～25	1. 1 2. 7～12_{5-15} 3. ≤辉钼矿	1. 浅褐灰色 o：灰色带褐，较亮较浅（闪锌矿）； e：深灰或深蓝灰色，较亮（石英） 2.　R'_g　R'_p R_{in}：21.5　7.0 x：0.346　0.335 y：0.343　0.336 λ_d：582　572 P_c：0.065　0.015	1. 显（灰色带棕-蓝灰色） 2. 无	强非均质性（单黄－紫灰） A_r：20°±0.2°	均无反应	不易磨光。呈细小的板状、叶片状、鳞片状及平行状、放射状集合体，解理清楚，未见双晶、环带。系强导电性、极软性。与硫化物、石英、长石、云母等伴生。主要见于变质矿床中，岩浆、伟晶和气成矿床中亦可见，偶见沉积矿床和沉积岩中	以极强的非均质性、双反射、低反射率及与所有的试剂不起反应为其特征，可与辉钼矿区别
黑铜矿	见 107 页							
白铅矿* cerussite $PbCO_3$ （有时含 Ag、Zn、Ca、Sr） 斜方晶系	白：11.5～8.5 估计值： R_p：8.2 R_m：12.3 R_g：12.3	1. 3 2. 107～114 3. ≥方铅矿≈方解石	1. 灰色 相似（铅矾）； 暗灰（方铅矿）	1. 显（灰色－深灰色） 2. 有（白色－灰黄、浅黄绿色）	强非质均性 A_r：5.41°	HNO_3(+)发泡、染灰； HCl(+)发泡白色沉淀 $FeCl_3$(+)显结构； KOH(+)显结构； $HgCl_2$(+)显结构	易磨光。常呈粒状集合体，很少呈板状和假六方双锥状自形晶。常沿方铅矿之解理、裂隙和边沿进行次生交代。常交代铅矾并与其紧密连生，亦常在其外围出现。性脆，相对密度 6.5。产于含铅锌矿床的氧化带，由风化作用形成	以交代方铅矿、铅矾、浸蚀反应不同与其他碳酸盐区别；以强非均质性与铅矾区别
铅矾 anglesite $PbSO_4$ 斜方晶系	黄：9.0	1. 2.5～3 2. 94.5～110.2 3. ≈白铅矿	1. 灰色至深灰色 暗灰色（方铅矿）	1. 不显 2. 有（白色－浅黄白色）	显均质性（有时显极弱的非均质性）	HNO_3(+)显结构	易磨光。常呈他形粒状集合体，少见自形板状或粗粒状集合体。可见其呈细脉状、格片状、不规则状等沿方铅矿的解理、裂隙及颗粒边缘进行次生交代。可具方铅矿的假象。与白铅矿紧密伴生。常产于铅锌矿床氧化带中	以显均质性、低反射率及浸蚀反应为特征，可与白铅矿区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性(偏光色)	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
方解石** 白云石 calcite dolomite $CaCO_3$ $(Ca,Mg)CO_3$ 三方晶系	估计值:4～6	1. 3 2. 76～140 3. ≪石英	1. 深灰色 稍亮(石英)	1. 显 2. 有(乳白色—棕黄色)	强非均质性(浅灰—暗灰) A_r: 方解石 5.8° 白云石 6.7°	HNO_3(+)发泡; HCl(+)发泡 (方解石发泡比白云石猛烈)	易磨光。方解石具菱面体或菱面体与六方柱聚形的自形晶、半自形晶或呈他形晶。常在金属矿石中呈他形粒状集合体胶结或穿插其他金属矿物。其格状双晶及聚片双晶常见。 白云石自形程度一般较高,具可塑性。二者均系遍在矿物,任何地质条件下均可产出	以遇酸猛烈发泡为特征,可区别方解石和白云石

第十四鉴定表　R<闪锌矿 R 的中硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性(偏光色)	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
水锰矿	见 110 页							
黑钨矿* 钨锰矿 钨铁矿	见 111 页							
闪锌矿**	见 111 页							
纤锌矿	见 107 页							
晶质铀矿 uraninite UO_{2+x} 等轴晶系	白:16.8 470:16 546:16 589:16 650:16	1. 5～6 2. 625～929 3. ＞磁铁矿; ≤黄铁矿; ≫闪锌矿	1. 灰色微带淡棕色 稍暗(磁铁矿); 稍亮(沥青铀矿) 2. R_{vio}: 16.7 x: 0.324 y: 0.326 λ_d: 481 P_e: 0.038	1. 不显 2. 有*(微暗褐色)	均质性	HNO_3(±)染棕; $FeCl_3$(±)染淡棕	易磨光。呈立方体、八面体自形晶。解理可见。双晶常见。脆性。具强放射性。交代黄铁矿;亦被黄铁矿、沥青铀矿、闪锌矿、自然金交代。蚀变成钛铀矿。主要伴生矿物有白铁矿、硫镍钴矿、方硫铁镍矿、闪锌矿、沥青铀矿、自然金、钛铀矿、方铅矿、磁铁矿、方钍石、黄铜矿、辉钼矿等。常产于花岗伟晶岩类矿床和接触交代矿床中,也产于沉积矿床中	以晶形、均质性、高硬度、强放射性为特征。以自形晶与沥青铀矿区别

沥青铀矿 （非晶质铀矿） pitchblende UO_2 和 UO_3 的不同比例混合物，可含少量 Th、Ra、Pb 和 TR 非晶质	白：15.0 470：17.1 546：16.2 589：15.9 650：15.8	1. 3～6 2. 314～803	1. 灰色微带淡褐色 2. R_{in}：16.1 x：0.326 y：0.326 λ_d：476 P_e：0.031	1. 不显 2. 有（深棕或黄棕色）	均质性	HNO_3(+)染棕黑，有时发泡； $FeCl_3$(±)染棕灰	不易磨光。常呈葡萄状、肾状、豆状、环带、角砾状或脉状产出，胶体结构。同心状或圆形横切面常具放射状的不规则凝缩裂隙。不显解理、双晶、环带。具强放射性。系脆性矿物。伴生矿物主要为方钴矿系列、自然铋、红砷镍矿、方铅矿、黄铁矿、辉铜矿、淡红银矿、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、Fe—Co—Ni 之砷化物、各种硫化物、自然银、辉银矿、自然金等。主要产于矽卡岩及热液矿床中；也产于沉积矿床和淋积矿床中	以具各式各样胶状构造和圆形横切面具放射状凝缩裂纹及胶状结构为特征，可与晶质铀矿区别
红锌矿 zincite ZnO （含 Mn 和 Fe） 六方晶系	白：11.5 470：12 546：11 589：11 650：11	1. 3～4.5 2. 149～219	1. 灰色带粉褐色 较亮（方解石）； 较暗（锌铁尖晶石）	1. 不显 2. 有（橙—红）	弱非均质性（固强烈的内反射而不显） A_r：0.32°	HNO_3(+)染黑，显结构； HCl(+)变暗，显结构； KCN(±)染褐，显结构； $FeCl_3$(+)染褐； $HgCl_2$(±)染浅褐	易磨光。呈他形或多角形粒状、圆粒状或片状及其集合体。解理可见，常有裂纹。系可塑性矿物。可与黑锰矿和方锰矿构成定向连晶。常与锌铁尖晶石、硅锌矿伴生。主要产于矽卡岩矿床中	以鲜艳的红色、橙黄色内反射及常与锌铁尖晶石等矿物共生为特征，可与类似矿物区别
硼镁铁矿 ludwigite $(Mg,Fe^{+2})_2$ (Fe^{+3},Al) BO_3 斜方晶系	白：11.0 470：9.2～12.1 546：8.4～11.8 589：7.8～11.6 650：6.8～11.2	1. 5～6 2. 537～1486 3. ＞纤铁矿≈磁铁矿	1. 灰色稍带棕色 暗灰色（磁铁矿） 2. R'_g R'_p R_{in}：11.7 8.2 x：0.328 0.312 y：0.330 0.321 λ_d：483 484 P_e：0.0206 0.084	1. 显（灰棕色-灰蓝色） 2. 有（无）（富镁者显红棕色；富铁者无内反射）	强非均质性（淡棕－蓝灰） A_r：4.94°±0.1°	KOH(+)染淡棕； HNO_3(+)薰污； HCl(+)薰污	呈长柱状及其平行和放射状集合体。与磁铁矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、硼镁石及镁质矽卡岩和镁质变质岩的其他矿物伴生。产于镁质矽卡岩或镁质变质岩中	以其强非均质性、形态及反射多色性为特征。以形态和浸蚀反应与黑柱石区别

续表

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
白钨矿* scheelite $CaWO_4$ 可含 Cu 和 Mo 四方晶系	白:10.0 470:10～11 546:10 589:10 650:10	1. 4.5～5 2. 285～464 3. ＜黑钨矿≪锡石	1. 灰色 稍亮（石英）； 暗灰带紫（黄铜矿） 2.　R'_c　R_w R_m:　10.2　9.8 x:　0.330　0.330 y:　0.329　0.330 λ_d:　474　474 P_e:　0.016　0.014	1. 不显 2. 有（白色－淡黄色）	弱非均质性		磨光性较好。单晶为四方双锥，切面呈菱形或菱柱形自形晶或他形粒状及其集合体。常交代黑钨矿或充填于黑钨矿的裂隙中。可含辉钼矿、毒砂、黑钨矿、黄铜矿、黄铁矿的包体。也可呈包体分布在黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、石英、方解石中。还与锡石、磁铁矿、闪锌矿、自然金、各种矽卡岩矿物伴生。脆性至弱可塑性，短波照射发荧光（蓝白色）。产于矽卡岩矿床及热液矿床中	以其低反射率、白色内反射及荧光性为特征，可与其他钨矿物区别；长石、石英硬度高、反射率低；方解石反射率低、弱非均质性及浸蚀反应等，均可与本矿物区别
菱铁矿* siderite $FeCO_3$ 可含 Mg、Mn、Ca 等类质同象混入物 三方晶系	白:9.5～6.0	1. 3.5～4.5 2. 212～344 3. ＜菱锰矿＞方解石	1. 灰色、深灰色 较亮（方解石）； 相似（菱锰矿）； 较暗（赤铁矿）	1. 显（较亮—较暗） 2. 有（红褐—浅褐色）	弱非均质性（浅灰—暗灰色）	HNO_3(+)溶解、变粗糙、显结构； HCl(+)溶解、变粗糙、显解理； $FeCl_3$(+)显结构； KOH(+)显结构	易磨光。常呈自形晶（晶面为菱形）、半自形晶或他形粒状集合体。具块状、层状、结核状等构造。可见菱面体解理，偶见双晶。常与赤铁矿、黄铁矿、鲕绿泥石等伴生。风化后成褐铁矿、针铁矿等次生矿物。主要产于沉积矿床中，中、低温热液矿床中也可产出	以反射率较低，具红褐－浅褐色的内反射及浸蚀反应等为特征，可与方解石、白云石区别
蓝铜矿* azurite $2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ 单斜晶系	白:9～7	1. 3.5～4 2. 161～253 3. ＞方解石＜白云石	1. 灰色微带褐红色 相似（孔雀石）； 很暗（辉铜矿）； 稍亮（石英）	1. 不显（微弱－不显） 2. 有（天蓝色－深蓝色）	强非均质性（为强烈的内反射掩盖）	HNO_3(+)发泡，显结构； HCl(+)发泡，显结构； $FeCl_3$(±)显结构；	易磨光。呈放射状、纤维状、不规则粒状及其集合体，亦有呈隐晶及胶体者。具胶状、土状、粉末状构造。解理少见。为极可塑性矿物。常与孔雀石、赤铜矿、赤铁矿、褐铁矿、黑铜矿以及铁锰的氢氧化物伴生。产于铜矿床的氧化带中	以其特征鲜明的天蓝色内反射和产状可与其他矿物区别

孔雀石** malachite $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ 单斜晶系	白;9~6	1. 3.5~4 2. 110~156 3. ≥方解石 白云石	1. 灰色微带褐红色 暗灰(辉铜矿)	1. 显 2. 有(翠绿色-暗绿色)	强非均质性(因强烈的内反射不显) A_r:6.2*	HNO_3(+)发泡,显结构; HCl(+)发泡; KCN(+)显结构; $FeCl_3$(+)发泡,黄色沉淀; KOH(±)黄色沉淀	易磨光。呈针状、纤维状、放射状的集合体,亦有呈细粒者。常见葡萄状、肾状、结核状、土状、粉末状、胶状构造。解理可见,具可塑性。次生交代赤铜矿、辉铜矿及他它铜矿物。与蓝铜矿、铜蓝、斑铜矿、蓝辉铜矿、赤铁矿、褐铁矿等伴生。产于铜矿床的氧化带中	以放射状、翠绿色内反射及与铜矿物伴生为特征,以此可与其他矿物区别
菱锌矿 smithsonite $ZnCO_3$ 三方晶系	估计值: 589: R_o:9.0 R_e:5.8	1. 4~5 2. 501~655_{50} 3. >菱锰矿、菱铁矿	1. 深灰色 较亮(方解石)	1. 显 2. 有(白色-淡黄色)	强非均质性 A_r:6.21*		常呈他形粒状或多边形粒状及其集合体,具葡萄状,肾状等胶状构造。主要产于铅矿床的氧化带中	反射率及硬度稍高于方解石和白云石;硬度高于白铅矿,反射率略低于白铅矿
菱锰矿 rhodochrosite $MnCO_3$ 可含 Fe、Ca 等类质同象混入物 三方晶系	589: R_o:8.5 R_e:5.4	1. 3.5~4 2. 232~245_{100}	1. 深灰色 相似(菱铁矿)	1. 显(亮暗) 2. 有(淡红色-粉红褐色-淡黄色)	强非均质性(浅灰-暗灰色) A_r:5.29*		磨光性良好。呈菱形自形晶、半自形晶和他形粒状集合体。具块状、层状、透镜状、结核状、脉状构造。常氧化成黑色偏锰酸矿、硬锰矿、软锰矿。常与其他碳酸盐矿物伴生。产于沉积锰矿床中,也见于中、低温热矿床中	以有内反射色、反射率较高,可与方解石、白云石区别;以内反射常具粉红色,氧化物为黑色氧化锰为特征,可与菱铁矿区别
方解石** 白云石	见 116 页							
萤石* fluorite CaF_2 等轴晶系	估计值:3	1. 4	1. 深灰色	1. 不显 2. 有(白色)	均质性		易磨光。呈等轴粒状及其集合体、解理可见,系极塑性矿物。常与方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、辉银矿、黑钨矿、磁铁矿、方解石、石英等伴生。主要产于热液矿床中	以反射率最低,具八面体解理为特征,可与类似矿物区别

第十五鉴定表　R < 闪锌矿 R 的高硬度矿物组

矿物名称 化学组成 晶　系	反射率 %	1. 刻划硬度 2. 压入硬度 3. 抗磨硬度	1. 反射色 2. 颜色指数	1. 双反射与反射多色性 2. 内反射	均质性与非均质性（偏光色）	浸蚀反应	磨光性、形态特征、矿物组合、组构特点及产状	主要鉴定特征及与类似矿物的区别
纤铁矿	见 112 页							
钛铁矿*	见 113 页							
黑钨矿* 钨锰矿 钨铁矿	见 111 页							
针铁矿*	见 114 页							
铌铁矿 钽铁矿	见 114 页							
晶质铀矿	见 116 页							
沥青铀矿	见 117 页							
锡石* cassiterite SnO_2 可含少量 Fe、Nb、Ta、W 等 四方晶系	白：11.2 ~ 12.8 470：11 ~ 13 546：11 ~ 12 589：11 ~ 12 650：11 ~ 12	1. 6.5 ~ 7 2. 811 ~ 1532 3. > 所有伴生的金属矿物 > 石英	1. 灰色带褐色 灰褐（黄锡矿）； 褐灰（钛铁矿） 2. R'_g R_w R_{vis}：11.9 10.7 x：0.331 0.332 y：0.331 0.332 λ_d：479 478 P_e：0.011 0.007	1. 不显 2. 有（淡黄-白色）	弱非均质性 A_r：1.46° ±0.1°	HCl + 锌粉（+）出现金属锡薄膜	不易磨光，多麻点。常呈四方双锥与四方柱的聚形自形晶，亦见半自形或他形颗粒。常具环带。双晶常见。解理偶见。多裂纹。常与黄铁矿、毒砂、辉钼矿、黑钨矿、辉铋矿和黝锡矿等伴生。主要产于矽卡岩、高温热液矿床和砂矿床中	以常呈自形晶、不易磨光、多麻点、高硬度及内反射为特征，可与其他矿物相区别
铬铁矿 chromite $(Fe,Mg)(Cr,Al,Fe)_2O_4$ 等轴晶系	白：12.1 470：14 546：14 589：13 650：13 随成分而异，高反射率常含 Fe、Cr；低反射率富含 Mg、Al	1. 5.5 ~ 7 2. 689 ~ 975 3. > 磁铁矿	1. 灰色微带褐色 暗得多（磁铁矿） 2. R_{vis}：12.6 x：0.329 y：0.330 λ_d：482 P_e：0.017	1. 不显 2. 无或有*（棕色）	均质性	热 $KClO_3 + H_2SO_4$（+）显结构	易磨光。常呈八面体自形晶和半自形晶或浑圆粒状及其集合体。碎裂结构普遍。浸染状、块状、条带状、豆状构造常见。未见解理和双晶，环带较普遍。具弱磁性和弱可塑性。常与磁铁矿、钛铁晶石、铂族矿物、镍黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿等伴生。主要见于与超基性、基性岩有关的岩浆矿床中	以反射率稍低和有棕色内反射为特征，可与磁铁矿区别；以均质性与钛铁矿等矿物区别
硼镁铁矿	见 117 页							

白钨矿*			见118页				
石榴子石** garnet $R_3^{2+}R_2^{3+}(SiO_4)_3$ R^{2+}：Ca、Mg、Fe、Mn……； R^{3+}：Al、Fe、Cr……。 可含少量 Ti、Zr、P、Y 等 等轴晶系	黄光：9.7 ± 反射率随 Fe、Mn 含量的增高而增高，随 Ca、Al 含量的增高而降低	1. 6～7.5 2. 689～1224	1. 暗灰色 较亮（方解石、石英、长石等）	1. 不显 2. 有（红褐色、褐色、黄色、淡绿色、米白色等）	均质性		能磨光，但费时。常为四角三八面体、菱形十二面体切面或半自形晶切面，也呈他形粒状集合体。环带结构常见，压碎现象普遍。无解理。性脆。粗晶中可包含其他矿物自形嵌晶，如钛铁矿、硫化物等。含铁的石榴子石常有绿泥石沿其边缘和裂隙进行交代。主要产于变质矿床、矽卡岩矿床及岩浆矿床中	以自形程度高、高硬度、低反射率、具环带、均质性及内反射鲜明为特征，可与其他矿物区别
黑柱石 ilvaite $CaFe^{2+}Fe^{3+}[SiO_4]_2(OH)$ 斜方晶系 单斜晶系	白：9.5 470：9.2～7.8 546：9.2～7.4 589：9.2～6.8 850：8.9～5.8	1. 5.5～6 2. 703～1055 3. ＞闪锌矿＝赤铁矿＜黄铁矿	1. 灰色带粉红色或带暗紫蓝色 2. R_{in}：R'_g 9.7，R'_p 7.5 x：0.330，0.308 y：0.334，0.320 λ_d：496，485 P_e：0.01，0.095	1. 显（特强）（灰色带红-蓝灰-紫色） 2. 有（棕褐）	强非均质性（红褐-棕-蓝灰） A_t：8.22°±0.3°	稀 HCl（+）显结构	磨光性好。呈粗大柱状自形晶、半自形晶或集合体。解理清楚可见。双晶少见。受力后，裂纹发育。常与钛铁矿、磁铁矿、钛铁晶石、镍黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铁矿、石墨等伴生。常产于岩浆岩与灰岩的接触交代带及基性和超基性岩中，在铜镍硫化物矿床中也有发现	以具明显内反射、浸蚀反应、伴生矿物和产状可与硼镁铁矿区别
石英 quartz SiO_2 三方晶系	白：4.59	1. 7 2. 763～1140 3. ≥碳酸盐	1. 深灰色 微暗（方解石的 o 向）；微亮或相似（方解石的 e 向）	1. 不显 2. 有（无色-乳白色-米黄色）	显均质性效应	HF（+）可浸蚀	磨光性良好。常呈菱柱状自形晶；细晶者中常见横断面为六边形。未见解理。弱可塑性。系遍在矿物，常见于各种矿床中，与很多金属矿物伴生，为极常见的透明矿物之一	以其晶形、高硬度、低反射率及内反射为特征，可与其他矿物区别

注：表中出现的 R_g、R_p 或 R_y、R_α、均代表二轴晶两个主反射率，R_o、R_e 或 R_ε、R_ω、均代表一轴晶两个主反射率。表中个别一轴晶矿物的两个主反射率也写成"R_g、R_p"，引用原文如此。

第十一章　矿石的构造、结构和矿物晶粒内部结构

矿石是矿体的主要组成部分，任何一种矿石都是由一种或几种矿物所组成。由于矿石的形成条件和形成作用的不同，以及矿物本身在结晶过程中各种因素的差异，致使矿石呈各种各样形态。为便于研究和描述矿石的形态特征，通常用“矿石构造”、“矿石结构”和“矿物晶粒内部结构”等术语来概述。也有人则以“矿石组构”一词来概括其矿石的形态特点。

矿石构造（ore structure）：系指矿石中矿物集合体的形状、大小及其空间上的相互关系。即矿物集合体的形态特征。

矿石结构（ore texture）：是指矿石中矿物晶粒的形状、大小及其空间上的相互关系。即一种或多种矿物晶粒之间或单个晶粒与矿物集合体之间的形态特征。

矿物晶粒内部结构：指的是单个矿物结晶颗粒内部所显现的结构形态特征，如双晶、环带、解理、裂理、裂纹和加大边等。

一、研究矿石构造与结构的意义

1. 为矿床成因理论研究提供依据

因为矿床主要是由矿石所组成，而矿床的形成是受许多地质作用和形成条件所控制，在不同的地质作用或不同的物理化学条件下，所形成的矿床类型往往有很大差别，矿石的构造和结构也随之而异。因此，它能够客观地并较突出地反映矿床成因特征。所以，研究矿石的构造与结构，将有助于对矿床形成条件、成矿作用、成矿方式和演化过程的分析，从而为研究矿床的成因提供依据。

如在气水-热液矿床中，若矿石多具晶洞和晶簇状、梳状、角砾状等构造，则可推断此矿床的形成方式是以充填作用为主。如果矿石普遍存在交代残余和细脉浸染状等构造，可认为其成矿方式是以交代作用为主。

2. 为找矿勘探提供实际资料

如河北高板河铅锌矿床，其矿石构造主要是层纹状、草莓状和胶状构造，矿体存在于一定的层位中，可确定该矿床应属沉积矿床。故在区域范围内，无论是找矿还是勘探，均须在具有相似或相同的岩相、古地理环境、地层层位中进行。因此，这与过去认为该矿床属热液矿床的找矿方向大不一样。

如果在中酸性斑岩中发现铜、钼矿石呈细脉浸染状构造，很可能是斑岩型铜钼矿床，找矿和勘探的重点则应放在斑岩体的顶部和边部接触带两侧。

3. 为矿石工艺提供必要的资料

在对矿石进行工艺加工时，必须搞清两个问题：一是矿石中有哪些有用矿物，二是矿石中有用矿物的赋存、嵌布状态和含量。这两方面的基本资料，都要在对矿石进行观察，

分析研究后才能获得。诸如矿石矿物和脉石矿物的种类、含量、赋存状态和粒度及嵌镶关系等。这些资料对于选择最优的矿石工艺加工方案是必不可少的。因此，矿石构造和结构的研究，对于合理和充分地利用矿产资源，有着很重要的指导意义。

二、矿石构造和结构的研究方法

研究矿石的构造和结构，必须结合矿床地质的综合研究和实验室试样观测这两个必不可少的环节来进行。主要程序和内容大致如下：

在野外，通过对矿点、探槽、探井、矿坑、露天采石（矿）场、废石堆、地下坑道（顶、两壁及掌子面）及钻孔岩心等的详细观察，查明矿体和围岩及地质构造等的关系。初步了解矿石的物质成分、矿石构造和结构特点、矿化期及矿化阶段等，并做必要的大比例尺（一般为1:5～1:100）的素描图及照相。同时采集标本样品（包括化验及分析的样品），并把采集标本样品的位置标示于素描图上。

室内研究工作是很重要的一环。首先，以肉眼或放大镜对矿石标本的物质成分、矿石构造与结构、矿化阶段及矿物生成顺序等进行全面而仔细的观察。同时选择需要磨制光片（也应同时磨制对应的薄片）的标本，以便进一步研究。

然后，在矿相显微镜下对矿石磨光块、光片及薄片进行深入系统的观测研究，确定矿石的矿物成分、矿石构造和结构、晶粒内部结构、矿物颗粒大小、矿物含量（主要是指有用矿物）及矿物生成顺序等。并对于重要的现象，要绘制显微素描图或摄制显微照片，作为例证资料附于文字报告中。

通过大量的野外和室内的观测研究，写出综合性的文字报告，并对矿床的成因、矿石工艺等问题提出论据和建议。

第一节　矿石的构造

一、矿石构造的分类

组成矿石构造的单位是矿物的集合体。各种不同类型的构造在于矿物集合体的形态、大小和相互关系上的差异。由于矿石构造主要是在地质成矿作用中形成，故地质成矿作用应作为矿石构造分类的基础，据此可按成矿作用将矿石构造分为五个成因组（大类），见表11－1所列。

二、矿石构造的主要成因类型及其特征

（一）岩浆矿石构造

根据不同的岩浆成矿作用及不同部位所形成的矿床，又可分为侵入岩浆作用和火山岩浆作用的矿石构造。侵入岩浆作用的矿石构造，包括岩浆结晶分异作用、贯入作用及熔离作用所形成的矿石构造。火山岩浆成矿作用的矿石构造，主要包括爆发和喷溢等火山作用所形成的矿石构造。

1. 侵入岩浆矿石构造

组成这类矿石的金属矿物主要有铬铁矿、磁铁矿、钛铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄

表 11-1　主要矿石构造成因分类

成因分类	岩浆矿石构造		气-水热液矿石构造		风化矿石构造	沉积矿石构造			变质矿石构造
	侵入岩浆矿石构造	火山岩浆矿石构造	充填矿石构造	交代矿石构造		机械沉积矿石构造	胶体及生物化学沉积矿石构造	火山沉积矿石构造	
矿石构造类型	块状构造 浸染状构造 斑点状构造 斑杂状构造 球（瘤）状及豆状构造 条带状构造 脉状构造 滴状构造 角砾状构造	角砾状构造 气孔状构造 杏仁状构造 流纹状构造 绳状构造 珍珠状构造 块状构造 浸染状构造	脉状、交错脉状、网脉状构造 角砾状及环状构造 晶洞状及晶簇状构造 梳状构造 胶状及变胶状构造 块状构造 浸染状、斑点状及斑杂状构造 条带状构造	脉状、细脉状及网脉状构造 条带状及透镜状构造 浸染状、斑点状和斑杂状构造 交代残留（余）及假象构造 块状构造	多孔状构造 蜂窝状构造 粉末（土）状及散粒状构造 角砾状构造 胶状和变胶状构造（肾状、葡萄状、钟乳状、结核状、同心圆状及皮壳状等） 脉状（脉状、细脉状、交错脉状及网脉状）构造 晶洞状构造 块状构造	松散状构造 星散状构造 条带状构造 层状构造 砾状构造 透镜状构造	层状及层纹状构造 条带状构造 鲕状构造 豆状构造 肾状构造 结核状构造 生物状构造 草莓状构造 透镜状构造 块状构造	角砾状构造 层状及层纹状构造 条带状及透镜状构造 胶状（豆状、鲕状）构造 块状构造	条带状构造 皱纹状构造 片状和片麻状构造 变余（残余）构造 脉状及肠状构造 角砾状构造 块状构造 浸染状构造

注：具标型意义的构造用黑点表示。

铜矿、铂及铂族元素矿物等，脉石矿物主要是组成岩浆岩的造岩矿物（如橄榄石，辉石，基性斜长石等）及其蚀变矿物（如蛇纹石和绿泥石等）。矿石构造是在岩浆结晶分异作用、熔离作用和贯入作用过程中形成的。矿石与母岩系在同一地质作用下形成，故二者常呈渐变过渡关系。根据矿物共生组合、矿体与母岩同生等特点，可与其他成矿作用形成的相同形态矿石构造相区别。

（1）块状造构、稠密浸染状和浸染状构造　这些矿石构造是金属矿物在岩浆结晶分异作用和熔离及贯入作用中聚集而成。

块状构造　指矿石中金属矿物含量在80%以上，组成无空洞的致密状集合体。矿物颗粒大小较均匀，如河北大庙钒钛磁铁矿矿床中存在一定数量的块状构造矿石。

但是，对于铜镍硫化物矿石，金属矿物含量达80%以上者很少见，故通常以金属矿物在50%左右而且彼此相连时，则可定为块状构造。其脉石矿物主要为橄榄石和辉石，有时还有基性斜长石等。

稠密浸染状及稀疏浸染状构造　矿石中金属矿物集合体的粒径一般小于2 mm（图版Ⅰ）。前者系指金属矿物含量在40%～80%之间，且无定向排列者，而后者即通常所指的浸染状构造，其中金属矿物含量在30%以下，金属矿物的分布也无方向性。

在矿体中，块状构造与稠密浸染状及稀疏浸染状构造往往呈量变的过渡关系。

（2）斑点状和斑杂状构造　当金属矿物的集合体呈近乎等轴状，粒径一般在5 mm～10 mm左右，呈星散状分布于矿石中，其含量大致在50%以下者，称为斑点状构造。通常金属矿物集合体的斑点要比浸染状构造中的金属矿物集合体大得多。

若金属矿物斑点大小不一，相差悬殊，呈不规则地分布于脉石矿物的基质中，有的部位金属矿物集中成致密状，有的则成星散状，其分布特点是杂乱无章，既无规律又不均匀，这种构造可称斑杂状构造。它是斑点状构造、浸染状构造和块状构造之间的一种过渡类型。在钛磁铁矿和铬铁矿矿石中常可见到这种构造；铜镍硫化物矿石中，也有所见。

（3）球（瘤）状构造和豆状构造　这是铬铁矿矿石所特有的构造类型。铬铁矿矿物集合体组成致密的球（瘤）状（直径多为 1 cm ~ 3 cm）或豆状（直径 0.5 cm ~ 1 cm），分布在橄榄岩（基质）中，铬铁矿球（瘤）体有时呈椭圆形。铬铁矿球体表面平滑，与其周围橄榄岩之间的界线清晰，并且没有溶蚀现象（图版 2）。球体中的铬铁矿常呈自形晶。目前多数认为这是含矿岩浆在熔融状态下，先分离出团状矿浆（即熔离作用），然后分别结晶形成的。但也有人认为是在岩浆分异作用中，矿石矿物首先晶出而成。

（4）条带状构造　金属矿物集合体和脉石矿物集合体成条带相间出现。常见的铬铁矿矿石条带状构造是由自形的铬铁矿和橄榄石集合体构成黑绿相间的“互层状”。金属矿物条带经常相互平行，但宽窄不一，常为数毫米至十几毫米（图版 3），有时几乎全由铬铁矿组成，有时铬铁矿则呈星散状出现，形成浸染条带状构造（图版 4）。后者常和浸染状矿石成过渡关系。在铜镍硫化物矿石和钛磁铁矿矿石中，有时也可见到条带状构造。

（5）滴状构造　含矿熔浆的熔离作用，使分离出的金属硫化物熔体呈下降的滴状，悬浮在先结晶的硅酸盐矿物集合体（辉长岩-橄榄岩）中。当熔浆固结后，即形成滴状构造。

（6）角砾状构造　由两组不同时期形成的矿物集合体所构成，先形成的一组为角砾，后形成的一组为胶结物。它多出现于含矿岩浆岩体的边缘部分，或晚期熔离矿床的贯入矿体中。多系含矿熔浆沿构造裂隙侵入过程中，含矿熔浆胶结围岩角砾而成的。

2. 火山岩浆矿石构造

本类构造是指含矿熔浆在火山爆发和喷溢成矿过程中形成的矿石构造。

（1）角砾状构造　角砾成分较复杂，它既可以是围岩的碎块，也可以是与胶结物（熔浆或矿浆）为同源岩浆早期凝结的岩屑。角砾由大至小，可分为火山砾状、角砾状和次角砾状等。

（2）气孔状、气管状和杏仁状构造　由于含矿火山岩浆在喷溢时外压力骤降，内压大于外压，引起气体逸散而形成气孔状和气管状等构造。若气孔或气管被石英、方解石、沸石及其他碳酸盐等矿物所充填时，即成杏仁状构造。

此外，由于含矿岩浆喷出地表后，黏滞性的流动作用可形成流纹状和绳状等构造。若喷出地表的含矿熔浆经迅速冷却，则可形成珍珠状构造。

至于块状和浸染状等构造，在火山岩浆作用中也为常见。

（二）气水热液矿石构造

含矿气水热液的来源主要有三种，即与岩浆分异作用有关的含矿气水热液；或地表水下渗至地下深处受热后，在环流过程中汲取围岩的有用组分，形成的含矿地下渗流热液；或由变质作用（包括混合岩化作用）所形成的变质热液。当单一的或混合的气水热液沿着围岩构造裂隙或破碎带流动时，由于温度和压力降低，挥发组分的散失或溶液性质的变化等，使有用组分沉淀成矿床，溶液中的成矿组分还可交代置换先生成的矿物或围岩而形成矿床。前者的成矿方式称充填成矿作用，后者称交代成矿作用，二者在成矿过程中关系

密切，往往是以一种成矿方式为主，伴以另一种成矿方式。因此，从形成方式这一基点出发，即使气水热液的来源、性质和成分各有不同，但其成矿作用的机理是相同的。由于含矿气水热液的组分及其所处的地质环境和物理、化学条件的差异和多样性，从气水热液中产生的矿石构造形态就十分繁多并且非常复杂。

从气水热液中产生的矿石成分，就金属矿物而言，主要是金属硫化物、含硫盐、砷化物、氧化物及含氧盐类，而自然金属及硒碲化物较少见。常见的金属矿物有：

硫化物及硫盐：黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、辉钼矿、辉铋矿、辉银矿、辉锑矿、辰砂、雌黄和雄黄等；

氧化物及含氧盐：磁铁矿、赤铁矿、软锰矿、锡石、黑钨矿、白钨矿以及稀土的复杂氧化物及含氧盐等；

自然金属：金、银、铜和铋等；

碲化物：碲金银矿、碲银矿、碲金矿等。

这类矿床的金属矿物种类很多，其围岩也可以是多种多样，但脉石矿物的种类却比较简单，矿石中几乎没有造岩硅酸盐矿物，除矽卡岩矿物外，常见的非金属矿物主要有石英、萤石、方解石、重晶石和绿泥石等。

根据成矿方式的不同，大致可分为充填矿石构造和交代矿石构造两个亚类。

1. 充填矿石构造

本类构造是那些成矿方式以充填为主所成的矿石构造。它们多发育在化学性质不活泼的围岩中或地壳浅部较宽阔的裂隙中。

常见的矿石构造主要有：

（1）脉状、交错脉状及网脉状构造　含矿气水热液沿围岩或早期形成的矿体裂隙充填，构成各种脉状构造。脉状构造（图版5）通常出现于构造裂隙较简单的地段。交错脉状及网脉状构造常形成于构造裂隙交叉发育地段。若由两组细脉交错穿插，则呈交错脉状构造（图版6）；而由很多细脉交织成不规则网状时，就构成网脉状构造（图版7）。

（2）角砾状和环状构造　围岩或早期形成的矿石碎块，被后期的矿物集合体所胶结而形成角砾状构造（图版8、9）。它与岩浆矿床中角砾状构造的区别在于胶结物与角砾的成分不同，岩浆成因者，其角砾与胶结物均为岩浆成分。此外，角砾间常伴随出现岩浆矿石角砾状构造极少见的晶洞或晶簇状构造。

环状构造是一种特殊的角砾状构造。系由后期矿物集合体呈同心环状，围绕早期破碎的角砾，由里向外呈多层环状分布所构成（图版10）。

（3）晶洞及晶簇状构造　含矿热液沿围岩或矿石的较大裂隙、空洞或角砾间的空隙充填，但空间未充满，矿物由洞壁向中间生长出较完好的晶形者，称晶洞构造（图版11）；如果晶体由洞壁向中间丛生者，即为晶簇状构造（图版12）。当含矿热液沿较宽的裂隙充填，多组晶体垂直裂隙两壁，分别向中间作对称而有规律生长，其形似梳子，则称梳状构造（图版13）。

晶簇状构造及梳状构造中的矿物生成顺序是：靠裂隙壁一侧者生成得早，越向中间，生成越晚。

（4）胶状及变胶状构造　由非晶质矿物集合体构成复杂曲面的平行条带或同心圆状，即为胶状构造。各条带间的界限为渐变过渡，并常在条带上具有凝胶收缩的裂纹。胶状构

造是浅成热液充填沉淀的一个重要标志，系含矿热液骤然快速冷却所造成的强烈过饱和所致（图版 14）。

若胶状构造中矿物的胶体经再结晶，形成垂直于弯曲表面的针状、柱状、纤维状晶体等，则为变胶状构造。

（5）块状构造　矿石构造特点与岩浆成因块状构造基本相同，仅矿石矿物和脉石矿物有差异，并常在局部出现。

（6）浸染状、斑点状及斑杂状构造　矿石构造形态特点与岩浆成因者相同。分为充填成因和交代成因两种类型，其区别在于基质。充填成因的基质多为与之伴生的脉石矿物，金属矿物与脉石矿物为同生关系；而交代成因的基质则常是围岩或早期矿石，即金属矿物为后生的，并具有明显的交代现象。至于岩浆成因的浸染状构造，其金属矿物与基质（脉石矿物）为同源同生关系，矿石与母岩为渐变过渡关系，即其成因和成矿方式与前二者不同。

（7）条带状构造　矿物集合体呈同一方向平行的条带出现，条带宽度不大，但较稳定。系由金属矿物或与脉石矿物的集合体充填一组平行的裂隙，依次沉淀而成（图版 15）。

2. 交代矿石构造

本类构造系指成矿方式以交代作用为主所形成的矿石构造。它们多发育在化学性质较活泼的围岩或早期矿体中。在含矿气水溶液温度较高、化学性质较活泼或者温度下降缓慢的条件下，有利于交代矿石构造的形成。

（1）脉状、细脉状和网脉状构造　是含矿气水热液沿裂隙交代围岩或早期形成的矿石所构成的矿石构造，其形态特点与充填成因者很相似，但脉的形状较复杂，脉与围岩的界线多呈犬牙交错状且较模糊（图版 16、17）。一般脉宽在 1 mm 左右者称细脉状。

（2）条带状构造和透镜状构造　条带状构造是由含矿气水热液沿围岩的微细层理、化学成分有差异的互层带及一些近乎平行的小裂隙交代而成。金属矿物集合体与围岩相间构成条带，这些条带的连续性较好，但其宽度不很稳定，界线较模糊。

当含矿条带的宽度变化很大，呈现中间厚度大，两端逐渐减小甚至尖灭时，称为透镜状构造（指凸透镜状，下同）。

（3）浸染状、斑点状和斑杂状构造　其含意和形态特点与充填方式形成的此类构造相类似，但其基质常是围岩，形态也较复杂，界线不平整且模糊不清（图版 18、19、20、21）。

（4）交代残余（留）构造　若含矿热液沿围岩裂隙交代，其中残留有围岩或早期形成的矿石块体，称为交代残余（留）构造。当含矿溶液交代生物，便可形成生物假象构造。

（5）块状构造　其含意和形态特点与充填成因者相似，是在成矿物质丰富的条件下，经强烈交代而成。这种构造在交代成因的矿体中普遍存在（图版 22）。

总之，充填成因的矿石构造在形态上，与交代矿石构造有很多相似之处，但也有明显的差别，主要是：①充填矿石构造主要受构造裂隙控制，而交代者，虽也受构造裂隙控制，但多发育在化学性质活泼或孔隙度较大的岩石中，受岩性的控制更为明显；②充填矿石与围岩界线清楚，而且较平直，无交代现象或仅有极轻微的交代现象，角砾的棱角清

楚；而交代成因的矿石与围岩界线往往模糊不清，边界曲折，复杂多变，常呈犬牙交错状，交代现象很明显，角砾或残留体的棱角常被交代成浑圆状；③充填矿石构造中，金属矿物和脉石矿物多为同生的，而交代矿石构造中的金属矿物常晚于围岩生成，因此，也常晚于主要来自围岩的脉石矿物。

（三）风化矿石构造

本类矿石构造类型，主要是原生矿石和岩石在地表条件下，经受机械破碎、剧烈氧化、溶解、淋滤和次生富集等作用而形成的各种矿石构造。组成风化矿石构造的金属矿物，常见的有褐铁矿、软锰矿、硬锰矿及铜、铅、锌等的碳酸盐矿物（如孔雀石、菱锌矿等），非金属矿物主要是二氧化硅和碳酸盐等矿物。典型的矿石构造有：

1. 多孔状和蜂窝状构造

原生矿石中呈散分布的较小颗粒的金属矿物，当它受到风化作用后，易溶的矿物被淋失掉，留下许多小孔洞，即构成多孔状构造（图版23）。假如淋滤作用继续进行，甚至连一部分较难溶的矿物也被溶解迁移，只剩下硅酸盐或硅质骨架时，便形成蜂窝状构造（图版24、25）。因在骨架中常有粉末状的褐铁矿等，故蜂窝状构造常呈黄褐色或褐红色。

2. 胶状及变胶状构造

在化学风化作用中形成的某些金属化合物的胶体溶液，当它沿围岩或原生矿体的裂隙下渗过程中，因某些因素的改变而促使这些胶体不断地凝聚沉淀，形成具有同心圆状或者多层互相平行弯曲外形的非晶质致密状集合体。其形态有肾状、葡萄状、钟乳状、结核状、同心圆状及皮壳状等。当它们重结晶后仍保留有胶体形态特征时，便形成变胶状构造（图版26、27）。

（1）肾状构造及葡萄状构造　胶体溶液在足够大的空间沉淀时，由于其表面张力的影响，使胶凝体形成不规则半球形或半椭球形表面，称肾状构造（图版28）；如果成较规则的圆球形集合体，球径小于1cm者，则称葡萄状构造（图版29）。锰矿床或铅锌矿床的氧化带的下部常可见到这类构造。

（2）结核状构造　含矿胶体溶液围绕岩石碎屑或其他质点形成浑圆形的结核，多数呈球状体，少数呈椭球形。

构成结核的矿物成分，常见的有菱锰矿、菱铁矿、锰菱铁矿、白铁矿、黄铁矿、硬锰矿、软锰矿及褐铁矿等。

（3）钟乳状构造　含矿胶体溶液沿较大的空洞顶壁裂隙缓慢下滴，逐渐形成钟乳石状构造。我国湖南上五都、辽宁瓦房子、广西木圭等锰矿床均可见到这种构造（图版30）。

（4）同心圆状、皮壳状及条带状构造　当含矿胶体溶液围绕某一岩石或矿石碎块，逐圈沉淀成颜色或成分上略有变化者即为同心圆状构造（图版31）。若含矿胶体溶液逐层沉淀而形成较宽阔的曲面或不规则的壳层时，即为皮壳状构造。如广西泗顶厂的水锌矿在褐铁矿之上形成的皮壳状构造（图版32），又如某些硫化物矿床的氧化带形成的孔雀石皮壳状构造（图版33）。当含矿胶体溶液凝聚沉淀，形成彼此大致平行的条带时，即构成条带状构造。这三种矿石构造时常相伴出现。

3. 粉末（土）状及散粒状构造

原生矿石或含矿围岩，经风化作用后，次生矿物形成松散的粉末（土）状者，称粉

末（土）状构造。例如有些含铜的硫化物矿床的氧化次生富集带中，常可见到粉末状辉铜矿集合体。此外，铁、锰、镍矿床或含矿岩石经风化后，亦常有粉末状的褐铁矿、软锰矿、绿色含镍高岭土（硅酸镍）等。

如果原生矿石受到风化淋滤作用较轻时，则可呈疏松、胶结不坚固的散粒状构造。如甘肃白银厂黄铁矿型铜矿床氧化淋滤带中的黄铁矿呈散粒状。

4. 角砾状构造

系原生矿石经风化破碎后，被粘土等表生矿物胶结起来，或破碎的岩块被次生的金属矿物（如硬锰矿、软锰矿、褐铁矿等）集合体胶结而成（图版 34）。倘若破碎的角砾，在原地未经胶结物胶结，呈松散堆积，则称碎块状构造。

5. 脉状和网脉状构造

由地表化学风化作用形成的含矿溶液，沿裂隙下渗，在氧化带的下部（多在淋滤亚带）、潜水面之下，原生矿体上部进行交代而成。其构造形态特点与气水热液矿石中同类型的矿石构造相类似，唯其矿物共生组合不同，例如次生硫化物（辉铜矿等）、氢氧化物（褐铁矿等）或含氧盐（硫酸盐、碳酸盐等）等组成的矿脉穿切原生矿石而构成脉状或网脉状构造。

6. 晶洞状构造

化学风化作用形成的含矿溶液沿矿石或围岩较大的空洞充填沉淀而成。

（四）沉积矿石构造

沉积矿石构造与沉积岩成因密切相关，主要是由沉积作用——机械沉积、胶体化学和生物化学沉积以及火山沉积等作用形成的，故它同沉积岩的构造相似。组成的矿物主要是铁、锰、铝的氧化物、碳酸盐、磷酸盐和铜、铅、锌、铁等的硫化物、自然金、稀散元素及放射性元素矿物等。根据形成作用把沉积矿石构造划分为以下几类：

1. 机械沉积矿石构造

本类构造主要是由那些化学性质稳定、不易风化、不易溶解、相对密度大、硬度或韧性均较大的矿物所组成。其主要矿物有磁铁矿、钛铁矿、自然金、自然铂、锡石、金红石和独居石等。

（1）松散状构造　有用矿物的颗粒或碎屑分散于未固结的砂层中。

（2）星散状构造　主要见于已固结的矿石中，金属矿物呈星散状均匀地分布于沉积岩中。

（3）条带状构造及透镜状构造　矿石构造特点与其他成因的同类构造相似，但其野外产状及矿物成分等却有很大差别。

（4）层状构造　有用矿物与砂质或泥质等物质组分相间呈平行层状产出，各单层厚度及延长都较稳定。

（5）砾状构造　由围岩或早期矿石砾石，被金属矿物或围岩碎屑等所胶结而构成。

2. 胶体及生物化学沉积矿石构造

本类型包括地表中形成的成矿物质胶体溶液，被地表水搬运至湖泊、浅海盆地中，以凝胶的方式沉淀而形成的矿石构造，也包括由生物化学作用富集而成的矿石构造。

（1）层状及层纹状构造　系由不同颜色、成分和结构的矿物集合体，分别平行于层理方向成层分布，有时可出现斜层理或交错层理，单层有厚有薄，层间有时有围岩或其他

成分的夹层，矿石有明显的层理，单层厚度在0.5 mm以上者，称层状构造（图版35）。若单层厚度在0.5 mm以下者，则为层纹状构造（图版36、37、38）。

（2）条带状构造　矿石构造特征与前述同类构造相同，条带延长较大，但各条带间的厚度不甚一致，连续性和延长性均较层状者为差，时而尖灭，时而复现，有的过渡为浸染状或透镜状构造。沉积磷矿石等可具这种构造（图版39）。

（3）鲕状构造　以岩屑或晶屑、砂粒、化石碎片或凝胶体质点等为核心，金属矿物质胶凝体围绕它形成同心环状小圆粒，直径为1 mm～2 mm，状如鱼子故称鲕状构造。若粒径在2 mm～5 mm者，则称豆状构造。河北宣龙海相沉积铁矿床即有这类构造（图版40、41）。常呈鲕状的矿物有菱铁矿、赤铁矿、铝土矿、鲕绿泥石、褐铁矿等，少数情况下有黄铁矿、锰菱铁矿、锰方解石、磁铁矿、硬锰矿和软锰矿等。鲕粒间胶结物主要也是上述成分。一般认为鲕粒是由胶体溶液，在动荡的浅水中形成，但也有人认为是生物成因。

（4）肾状构造　以砂粒、鲕粒或化石碎屑为基底，含矿胶体溶液仍以凝胶的方式，以凸曲面朝上的半圆形同心圆状向上逐渐叠生形成肾体，很像倒扣的碗罗（叠层石状）。顶面多呈不规则圆形、椭圆形，直径常为1 cm～2 cm，“肾体”间的胶结物通常是与肾体成分相同，此外，还可有鲕粒、化石及化学沉积的围岩成分。其形成环境与鲕状构造者相似，但水体相对稳定些；近年来多被认为属藻类生物成因。河北宣龙海相沉积铁矿床、辽宁瓦房子锰矿床中可见到典型的肾状构造（图版42）。

（5）结核状构造　多数形成于较鲕粒、肾体更深的海或湖盆地中，含矿胶体溶液围绕碎屑凝聚成大小不等的球形、椭球形及不规则状的独立结核体。构成结核体壳层的胶体成分有黄铁矿、白铁矿、菱铁矿、硬锰矿及软锰矿等（图版43、44）。

近代发现大洋底部正进行着胶体溶液沉积，其中最有意义的是锰（并含铁、铜、钴、镍等多种金属）结核。

（6）草莓状构造　通常是指由黄铁矿组成的草莓状集合体而言，因其形如草莓而得名。其成因多认为是生物化学作用形成的，但也有人认为胶体和无机化学作用也可造成。总之，它是沉积作用形成的典型矿石构造。即使经受后期的改造作用（如浅变质或热液叠加作用），仍能被保存下来；草莓状构造在我国云南、四川、湖南等地的层状铜矿床和河北高板河多金属硫化物矿床、德国拉姆尔斯堡矿床中均有发现（图版45、46）。

此外，胶体及生物化学沉积作用，除形成上述矿石构造和其他各种生物状构造（如叠层藻状等，图版47）外，还有胶状（图版48）、块状、透镜状等构造。

3. 火山沉积矿石构造

这类矿石构造是由与火山作用有关的成矿物质经沉积而成，成矿物质系来自火山喷气、火山热液以及火山碎屑。它们既可呈碎屑状，也可呈胶体溶液、真溶液等经再沉积而成。所以矿石构造既有碎屑沉积特点，又有化学沉积特点。

（1）角砾状构造　金属矿物集合体既可以呈角砾状出现，也可成胶结物，矿石多由与火山有关的物质，经搬运、沉积而成。角砾呈棱角状，大小相差悬殊，且常与碎屑混杂。

（2）层状、层纹状、条带状、透镜状、胶状及块状等矿石构造　其形态特点与其他沉积成因的同类型矿石构造相似，但矿石的物质成分和产出条件有所差异。

（五）变质矿石构造

本类矿石构造的成因与变质作用（区域、动力及热力变质作用）密切相关，其特点是因受压力和温度作用改造而成，故通常与区域动力及接触变质岩中的岩石构造特点相似。它多见于变质矿床中。组成矿物主要为金属氧化物和硫化物等。常见的重要类型如下。

（1）条带状构造　金属矿物集合体与脉石矿物集合体呈定向的相间排列，构成条带状构造。条带宽度略有变化，延长不大，条带内矿物颗粒多呈定向排列，常有弯曲现象，某些矿物可具有残余的变胶状或变晶结构，这些矿物在定向压力或热力下同时形成。在辽宁鞍山和甘肃镜铁山等变质铁矿床的矿体中多见这种矿石构造（图版49、50、51、52）。

（2）皱纹状构造　原生条带状或层状及层纹状构造的矿石，在变质作用过程中发生褶皱而形成皱纹状构造（图版53）。

（3）片状构造和片麻状构造　片状、板状和柱状、针状矿物呈定向排列形成片理，而构成片状构造。它是在区域变质作用过程中，受温度及定向压力作用而成。如山东烟台磁铁矿矿石中，石英和磁铁矿呈片状构造，此外，江苏海州变质磷矿矿石也常形成片状构造（图版54）。矿石矿物集合体成定向排列在矿石中，与脉石矿物呈相间断续分布称片麻状构造（图版55）。在北京太古宇密云群中的变质铁矿石中常见。

（4）变余构造　即变质矿石中仍残留有变质前的构造特征者称为变余构造。研究此构造，对查明矿石的成因，具有极重要的意义。这类构造还可根据保留下来的变质前构造特征，冠以“变余”，而进一步分类，如变余层理构造、变余鲕状构造、变余胶状构造及变余流纹状构造等（图版56、57）。

此外，变质矿石中，常见的矿石构造还有块状、浸染状、角砾状、眼球状及脉状、肠状构造（图版58）。

第二节　矿石的结构

一、矿石结构的分类

矿石结构研究的对象是矿物结晶颗粒。由矿物结晶颗粒所构成的矿石结构，是受其组成矿物晶体化学性质和形成过程中物理化学条件所控制。所以，即使同种矿物，在不同的物理化学条件下，可形成截然不同的矿石结构。因此，对矿石结构的分类，应以形成的物理化学条件、形成作用等成因作为分类的主要依据，以利于矿石结构的成因研究。

矿石结构类型划分如表11－2。

二、矿石结构的主要成因类型及其特征

1. 结晶结构

结晶结构系指从岩浆熔融体和气水溶液中结晶形成的矿石结构。

在矿物结晶过程中影响矿物结晶结构形态的因素很多，主要有以下几方面：

影响矿物颗粒大小的主要因素——结晶能力（单位时间内，产生结晶中心数量多少的能力）。当熔体和溶液处于微过冷却和过饱和时，产生结晶中心数量较少，有足够的自

表 11－2　主要矿石结构成因分类表

成因分类	结晶结构	交代结构	固溶体分离结构	胶体和结晶物质再结晶结构	沉积结构	受压力形成的结构（压力结构）
主要形态类型	全自形晶粒状结构 半自形晶粒状结构 他形晶粒状结构 海绵陨铁（陨石状）结构 斑状结构 包含结构 共结边结构 隐晶结构	自形晶状结构 半自形晶状结构 他形晶状结构 似斑状结构 浸蚀结构及星状结构 骸晶结构 似文象结构 交代残余结构 交错（交叉）结构 交代格状及网状结构 交代乳滴（乳浊）状结构 假象结构 反应边结构	乳滴（乳浊）状结构 叶片（板）状结构 格状结构 结状结构 文象结构 他形晶结构 共边结构	花岗变晶结构 斑状变晶结构 包含状变晶结构 放射状结构 放射球颗状结构 自形变晶结构 半自形变晶结构 他形变晶结构	碎屑结构 胶结结构 生物结构 鲕粒结构	花岗压碎结构 斑状压碎结构 揉皱结构 再结晶结构 鳞片变晶结构 定向变晶结构

注：常见并具有一定代表性的结构用黑点表示。

由空间生长，易形成较大的晶体，若强烈过冷却和过饱和时，则常形成细小的晶体；而在极强烈过冷却和过饱和时，将形成隐晶质或胶体物质。

影响晶形完好程度主要因素——结晶速度（晶体生长的直线速度，厘米每秒）。结晶速度小，易形成完好的晶体，反之，形成的晶体不完好，若各向结晶速度有差异，则晶形发育也受影响。

矿物结晶生长力（结晶力），也是影响晶形完好程度的重要因素。结晶生长力较强的矿物，能在缺少足够的自由空间条件下，发挥其挤占空间的能力，可生长出较完好的外形，如黄铁矿、毒砂等，而结晶生长力较弱的矿物，则不易形成较完好的晶形，如黄铜矿、磁黄铁矿等，通常呈他形晶状。

温度、压力及组分的浓度等，对结晶有着重要的影响，其中温度的因素最重要。在温度逐渐降至矿物熔点以下或溶解度逐渐减小至过饱和状态以下时，矿物按一定次序晶出，当温度缓慢下降时，矿物结晶速度也慢，晶出矿物的颗粒较粗大，晶形也较完好；当温度骤然下降时，矿物即迅速沉淀、形成隐晶质或胶体物质。另外，高温时某些组分，尤其是挥发分，多呈气态存在于系统中，当温度降低时，则呈液态溶于熔体或溶液中，使其中的阴离子浓度增高，有利于与金属阳离子发生化学反应，从而促使某些矿物晶出。

压力的影响也不可忽视，当压力高时，通常结晶速度较缓慢，外压减低时，挥发分易从液相中逸出，使其化学平衡遭到破坏，可促使某些矿物迅速沉淀。

成矿组分在熔体或溶液中浓度相对大小，决定结晶的相对先后、晶粒的相对大小和自形程度。

常见结晶结构的主要类型有：

（1）全自形晶粒状结构：由一种或多种矿物组成的矿石，其中一种金属矿物多呈较完好的晶形，其含量应在 80% 以上者（图版 59），称全自形晶粒状结构。倘若矿石矿物晶形虽完好，但数量很少且零星产出，只能视为呈某种形态的自形晶状。形成自形晶粒状的矿物，多为结晶生长力较强的矿物，如铬铁矿、磁铁矿等。

（2）半自形晶粒状结构：矿石由一种或多种矿物所组成，其中一种矿物的含量在

50%以上，其晶粒形成部分完整的晶面者称半自形晶粒状结构（图版60）。

（3）他形晶粒状结构：矿石中矿石矿物多呈不规则粒状，不具任何完好的晶面者（图版61）为他形晶粒状结构。形成这种结构的矿物多为结晶力弱，或是在极度过冷却或过饱和的情况下，由于同时结晶的矿物晶粒互相争夺空间所致。另一种情况是由于结晶晚于其他矿物，故其形状受所剩余粒间空隙限制而形成他形（填隙）结构（图版62、63）。

（4）海绵陨铁（陨石状）结构：这是一种从熔体中产生的特殊他形晶粒状结构，也是晚期岩浆矿床重要的结构类型。通常是他形的金属矿物集合体，充填在自形的硅酸盐造岩矿物晶隙之间而成。它是岩浆结晶分异过程中，金属矿物晚于硅酸盐矿物晶出的一种典型结构。金属矿物多为氧化物，如钛磁铁矿等，被胶结的硅酸盐矿物常为辉石、斜长石及橄榄石等（图版64）。铜镍硫化物矿石也常见有这种结构，是含矿岩浆经熔离作用分出的金属硫化物晚于硅酸盐矿物晶出，充填于辉石、橄榄石、斜长石等硅酸盐矿物晶粒之间而成（图版65）。

（5）斑状结构：粒度较粗大，晶形较完好的斑晶，分布在较细小颗粒矿物组成的基质中，称斑状结构。其中斑晶结晶较早，细粒基质形成较晚。

（6）包含结构：在一种粗大晶体的矿物中，包含有同种或另一种细小晶体的矿物，称包含结构。结晶作用的早期，液相在温度较快速下降且强烈过饱和时，出现许多结晶中心，形成细粒自形晶状矿物，后来由于温度下降缓慢，在形成较粗大晶体的过程中，包揽了先形成的细小矿物而构成包含结构（图版66）。

结晶结构总的特点是矿物呈各种外形完好程度和粒度不等的晶质粒状结构，而溶蚀交代现象不明显且不普遍。

区别从熔体抑或由气水溶液中结晶出的相同结构类型，在于形成的矿物种类及其标型特征、矿物共生组合及其形成温度、以及脉石矿物等的差别。

2. 交代结构

交代结构是早晶出的矿物，被较晚生成的矿物交代溶蚀而成。交代作用发生在广泛的地质作用中，而交代结构主要发育在各种成因的气水溶液交代矿石中，在表生矿石（如风化矿石等）中也多见，岩浆矿石中不发育。交代作用是在溶解固态介质的同时，即进行沉淀新生矿物以取代早形成矿物的作用。交代作用遵循等体积定律，在交代前后，矿石或岩石的体积保持不变，原岩或原矿石甚至生物的组构有时亦能保留下来。交代结构中，也可见自形、半自形、他形以及生物状等结构，它们是以交代矿物所呈现的形态而命名。交代晶体（代晶）中常包有被交代矿物的残余。

常见交代结构的主要类型有：

（1）浸（溶）蚀结构：后生成的矿物沿早生成的矿物之边缘、解理、裂隙等部位进行较轻度的交代而成。晶边常出现凹陷、边缘不平坦，多呈港湾状和星状等（图版67、68、69、70、71）。其特点是交代矿物常呈尖楔状侵入被交代矿物中，或交代矿物呈星状出现在被交代矿物中。

（2）骸晶结构：早晶出的具有较完整晶形轮廓的矿物（如结晶力强的黄铁矿、毒砂、砷钴矿和辉砷钴矿等），被后生成的矿物从晶体内部向边部进行溶蚀交代，无论交代程度如何，只要保存被交代晶形残骸外形者，均称骸晶结构（图版72、73、74）。但须注意与骸晶状交代晶体（代晶）相区别，因其交代关系恰与前者相反。代晶也呈“骸晶”状，

系指被交代矿物残余体包于交代矿物之晶廓中，而交代矿物晶面（边缘）较平整，不显被交代的现象，但前者边部多数具有被交代的残缺现象。

（3）似文象结构：当浸蚀结构或骸晶结构进一步被溶蚀交代时，被交代的矿物形成多个蠕虫状颗粒，被包裹在交代矿物内，形似古代象形文字，称似文象结构或交代文象结构（图版75）。为了与固溶体分离形成的文象结构加以区别，故冠以“似”字。

（4）交代残余结构：被交代矿物在交代矿物中，残余下一些岛屿状或不规则状残余体，这种结构称交代残余结构（图版76）。各残余体之间有的结晶方位多具一致性，可大致恢复被交代矿物原颗粒轮廓。被交代矿物在量上一般少于交代矿物。

（5）交错结构：在被交代的矿物边缘或者其解理、裂隙中，有另一种（交代）矿物的细脉交错穿插，称交叉或交错结构。这些细脉宽窄不一，脉壁不规则且不平行，脉的长度一般不大，脉和脉之间可见有分叉和汇合的现象（图版77）。

（6）交代网状结构和格状结构：交代网状结构实际上是交错结构的进一步演化，如果呈不规则的交织网状者，则称交代网状结构（图版78）。一种矿物沿早生成的矿物颗粒之解理、裂开或边缘等裂隙交代时，形成两组以上定向规则排列的细脉，即为交代格状结构（图版79）。

（7）假象结构：若交代溶蚀作用进行得彻底时，早生成的矿物或生物有机体结构被后来的矿物全部交代，并呈现早生成矿物的晶形或有机体结构等轮廓者，称假象结构。一般是在交代矿物名称之前，冠以“假象”二字，如假象赤铁矿，即赤铁矿完全交代了磁铁矿晶粒并保留其外形。但这种命名尚有不够严密之处，应在“假象”二字之前加上被交代者的名称，在其后才是交代矿物的名称，如磁铁矿假象赤铁矿，植物细胞假象辉铜矿等（图版80、81）。

此外，当交代反应仅在矿物晶体周边进行时，便成反应边结构（图版82）。

3. 固溶体分离结构

自然界有不少金属矿物是固溶体。固溶体是在较高的温度和压力条件下，由离子（或原子）半径、离子电荷、离子类型、晶格类型以及键型等相同或相近的两种或两种以上的元素或化合物，共同组成均匀的同相晶体。其中含量较高者可视若固态的溶剂；而另一些含量较少者可视为溶质，它均匀地溶解在固体溶剂的晶格中。固溶体矿物在熔体或溶液结晶时，甚至物质重结晶时都可形成。在较高温度时形成的固溶体，随着温度、压力的下降会变得不稳定。当温度逐渐降低时，均一的固溶体中的不同的溶质组分就会发生分离（出溶），而成为两种或两种以上的矿物相，这种现象叫作固溶体分离作用或出溶作用。固溶体分离时的温度叫“共析点”，分离形成的结构称固溶体分离（出溶）结构。分离后，含量多的一种称主矿物或主晶，含量少的叫做客矿物或客晶。不同组分的固溶体分离温度亦异，因此，固溶体矿物共析点可作为地质温度计。该温度可视为分离出两种矿物的温度下限，此时，主客矿物属同时形成。不难理解，在固溶体分离结构的形成中，温度的因素起着主要作用，因只有在温度缓慢下降的条件下，才能形成各种形态的固溶体分离结构，如果温度急剧下降，会使固溶体发生“淬火”而硬化，即不能出现固溶体分离的情况。压力对固溶体的分离作用虽不如温度影响之大，但压力增大，会使共析点降低。另外，共析点与固溶体溶质的浓度也有关系，即浓度愈低，其共析点也愈低。因此，必须注意的是，固溶体客晶在主晶中的含量多寡，会导致其“共析点”温度的差异。

固溶体分离的过程可分为如下三个阶段：

（1）温度在实际结晶温度以上时，为均匀的熔体或溶液。

（2）温度在实际结晶温度至共析点之间，则结晶成均匀的固溶体。

（3）温度逐渐下降到共析点以下时，固溶体发生分离，形成两种或两种以上的矿物相。

固溶体分离的状况是随物理化学条件的变化而异，如温度、压力或溶质浓度的高低和温度缓慢下降的程度等，可形成各种不同形态的结构类型。现大致以温度下降缓慢程度由较快至极缓慢递变为序，将固溶体分离结构的主要类型列述如下：

（1）乳滴状结构：也叫乳浊状结构，即客矿物在主矿物中呈细小至极细小的乳滴状颗粒，乳滴由圆形、椭圆形至伸长的纺锤形。客矿物乳滴的分布可呈无序或有序排列。当固溶体矿物结晶后，温度缓慢地下降，达到共析点以下时，开始形成排列无规则的细粒矿物，若此时温度急剧下降，细粒客矿物来不及聚集而停留在原来分离出的位置或附近，则形成无序排列的乳滴状结构（图版 83、84）。

在细粒客矿物分离时，温度持续缓慢地下降，使部分乳滴可聚集在主矿物的软弱带（解理、裂理等）中，从而形成有方向性排列的乳滴状结构。如果温度一直保持慢慢地下降，使分离出的矿物有较充分的时间聚集，则形成叶片状、板状结构，以至结状结构。

即使在同一矿床的不同矿段中，温度下降速度也可能是不同的，故一个矿床甚至一个矿段的矿石，都可能出现几种固溶体分离结构。

（2）叶片状（板状）结构：沿主矿物的解理、裂理或双晶接合面等方向，分离出的客矿物呈叶片状或板状晶体作定向排列（图版 85、86）。

（3）格状结构：从固溶体中分离出的片状或板状客晶，沿主矿物颗粒两组或两组以上的解理或裂开呈规则的格状分布（图版 87、88、89）。

（4）结状结构：客矿物的集合体呈不规则弯曲细脉状，环绕主矿物的结晶颗粒边缘形成结状（网状）。这是由于固溶体矿物生成时温度相当高，当其下降极为缓慢时，固溶体分离得较彻底，分离出的客矿物有充分时间集中，并被完全排出在主矿物结晶颗粒之外所形成的（图版 90、91）。

（5）文象结构：固溶体中分离出独立晶体的客矿物，沿主矿物晶粒内的裂隙分布，形如古象形文字或蠕虫状，称文象结构（图版 92）。它以主矿物与客矿物接触边界平滑、无交代溶蚀现象及其独特的成因与交代作用所形成的边界不平整的似文象结构相区别。

此外，当温度下降得极其缓慢时，固溶体得到充分的分离，最后还可以形成他形至自形晶粒状结构。在某些固溶体矿物中也可见到“聚片状”等结构。

固溶体分离作用形成的结构常与交代作用产生的结构有许多相似的形态，其区别标志如下：

（1）凡是组成固溶体分离的矿物，从晶体化学上看，必须是能够形成固溶体者（见表 11－3）。

（2）由固溶体分离形成的矿物，其接触界线平滑，乳滴状或叶片状客矿物一般为单晶颗粒；而交代作用形成者，多呈不规则的锯齿状等浸蚀边界。

（3）固溶体分离形成的格状结构，在交叉处其宽度不加大，而且常呈收缩甚至尖灭的现象（图版 87、88、89）；但交代形成者，恰与之相反，即在交叉处膨大（图版 78）。

固溶体分离结构在岩浆和各种气水热液形成的矿石中较为常见，在变质作用形成的矿石中也有所见。由自然金属、氧化物、硫化物及硫盐类等矿物形成较常见的固溶体矿物见表 11－3。

表 11-3　固溶体矿物表

矿物类	矿　　物	化学分子式	分离温度/℃
自然金属类	金-银	Au - Ag	
	金-铜	Au - Cu	
	银-铜	Ag - Cu	
	砷-锑	As - Sb	
	铜-砷	Cu - As	
	金-铋	Au - Bi	
	铋-碲	Bi - Te	
	银-锑	Ag - Sb	
	铁-镍	Fe - Ni	
氧化物类	锡石-钽铁矿*	SnO_2 - $(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$	
	铬铁矿-赤铁矿	$FeCr_2O_4$ - Fe_2O_3	
	铬铁矿-钛铁矿	$FeCr_2O_4$ - $FeTiO_3$	
	刚玉-赤铁矿	Al_2O_3 - Fe_2O_3	
	赤铁矿-金红石*	Fe_2O_3 - TiO_2	
	赤铁矿-钛铁矿*	Fe_2O_3 - $FeTiO_3$	
	赤铁矿-钛铁矿-金红石	Fe_2O_3 - $FeTiO_3$ - TiO_2	
	钛铁矿-红钛锰矿	$FeTiO_3$ - $MnTiO_3$	
	磁锰矿-黑锰矿	$MnFe_2O_4$ - Mn_3O_4	
	磁铁矿-赤铁矿	Fe_3O_4 - Fe_2O_3	
	磁铁矿-钛铁矿*	Fe_3O_4 - $FeTiO_3$	
	磁铁矿-红钛锰矿	Fe_3O_4 - $MnTiO_3$	
	磁铁矿-金红石*	Fe_3O_4 - TiO_2	
	磁铁矿-尖晶石	Fe_3O_4 - $MgAl_2O_4$	
	方锰矿-红锌矿	MnO - ZnO	
	钽铁矿-铌铁矿*	$(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$　$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$	
	钽铁矿-金红石	$(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$ - TiO_2	
	钽铁矿-钛铁矿	$(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$ - $FeTiO_3$	
硫化物及含硫盐矿物类	斑铜矿-辉铜矿*	Cu_5FeS_4 - Cu_2S	175 ~ 225
	斑铜矿-黄铜矿*	Cu_5FeS_4 - $CuFeS_2$	225 ~ 475
	斑铜矿-黝铜矿	Cu_5FeS_4 - Cu_3SbS_3	275
	辉铜矿-铜蓝	Cu_2S - CuS	75
	辉铜矿-硫铜银矿	Cu_2S - $Cu_2S \cdot Ag_2S$	300
	黄铜矿-方黄铜矿	$CuFeS_2$ - $CuFe_2S_3$	450
	黄铜矿-磁黄铁矿*	$CuFeS_2$ - FeS	600($CuFeS_2$),300(FeS)
	黄铜矿-黝铜矿	$CuFeS_2$ - Cu_3SbS_3	500(?)
	方铅矿-辉银矿	PbS - Ag_2S	
	方铅矿-硫银铋矿*	PbS - $AgBiS_2$	210 ~ 350
	磁黄铁矿-辉铜铁矿	FeS - $CuFe_4S_6$	350 ~ 500
	黄铜矿-辉铜铁矿	$CuFeS_2$ - $CuFe_4S_6$	225 ~ 450
	磁黄铁矿-镍黄铁矿	FeS - $(Fe,Ni)_9S_8$	425 ~ 450
	闪锌矿-黄铜矿*	ZnS - $CuFeS_2$	350 ~ 400(ZnS),500($CuFeS_2$)
	黄锡矿-黄铜矿	Cu_2FeSnS_4 - $CuFeS_2$	500
	银-锑银矿	Ag - Ag_3Sb	275 ~ 350

注：据 A·B·爱德华兹资料；主矿物在前，* 号者表示可互为主矿物；分离温度栏中括号内为主要矿物。

和泥状结构。如某些化学性质较稳定的矿石矿物可构成不同粒度的碎屑结构(图版97)。

(2) 胶结结构：指金属矿物呈胶结物状态出现，被胶结者多为脉石矿物的晶粒或其碎屑。如沉积铜及铅锌等矿石中，可见由辉铜矿、自然铜、方铅矿、闪锌矿胶结石英等碎屑所构成的胶结结构（图版98、99、100）。

(3) 生物结构：系指生物个体本身所形成的结构。如木质细胞结构、有孔虫结构及细菌结构等。关于莓粒结构有人认为是生物化学作用形成的结构，或由铁细菌与H_2S反应形成黄铁矿的莓粒结构；也有人认为是无机成因的。莓粒的粒径多为4 μm～20 μm，有的则更大些，其内由立方体或五角十二面体黄铁矿小晶粒（1 μm左右）组成。它们在层状硫化物矿石中较为发育，因此，多被认为是沉积矿石的“标型性”组构。在一些层状铜矿床中，也可见有黄铜矿和辉铜矿的莓群，一般认为是交代黄铁矿莓粒而成。莓粒结构的成因尚有争议，在此不加赘述。

6. 压力结构

矿石中已结晶形成的矿物，受动力作用和其他作用后，产生机械形变而形成压力结构。变形的程度决定于压力的大小以及矿物的特性，而动力作用的强度和持续的时间长短，也是很重要的因素。

脆性的矿物受力后，易产生破碎、断裂等现象，当破碎的晶屑位移不大，能拼复成原晶形者，则为压碎结构。易形成压碎结构的矿物如黄铁矿、毒砂、铬铁矿、锡石等。而具可塑性和延展性的矿物，受力后则易发生塑性变形，晶格曲扭，其主要表现为矿物的波状消光、滑动现象、形成压力双晶、矿物颗粒发生弯曲、揉皱和被拉长等现象，从而产生揉皱结构。易形成揉皱结构的矿物如方铅矿、辉锑矿、辉钼矿、磁黄铁矿等。

此外，压碎结构也可以在矿化过程中受到局部构造活动产生。

压力结构有以下几种主要类型：

(1) 花岗状压碎结构：当脆性的矿物受到压力后，晶粒产生裂缝或小位移及带有许多尖角的碎块，碎块大小大致相等，而塑性矿物则在裂缝中成胶结物（图版101）。

压碎结构与角砾状构造极易混淆，其区别是：前者碎块为同一种矿物的晶屑，碎块没有发生空间方位的大改变，大多数的碎屑还能各自拼成一完整的矿物晶体形状，而后者，组成角砾状构造的碎块，常由好几种矿物集合体构成。

(2) 斑状压碎结构：被压碎的矿物晶屑大小相差悬殊，在细小的晶屑碎块中夹有粗大的晶屑碎块。构成类似斑状结构者，称斑状压碎结构（图版102）。

(3) 揉皱结构：矿物受力后，产生塑性变形，弯曲成微型褶曲，称揉皱结构(图版103、104、105)。这种结构在单偏光下常不易被发现，须用正交偏光或结构浸蚀法等观察之。

(4) 鳞片变晶结构：矿物在较高温度条件下，由于定向压力和重结晶作用形成鳞片状变晶。如石墨的鳞片变晶结构（图版106）。

第三节 矿物结晶颗粒的内部结构

矿物结晶颗粒内部的双晶（简单双晶、聚片双晶、复聚片双晶）、解理、裂理、加大边和环带等皆属矿物结晶颗粒的内部结构。

研究矿物结晶颗粒内部结构，可以了解该矿物以及矿石的形成过程，并可为矿石工艺

提供有关资料。其主要意义如下：

（1）确定矿物生成的世代：由于不同世代形成的同种矿物晶粒内部结构可能有所差异，因此，可用其作为划分矿物生成世代的依据。

（2）推断成矿时的物理化学环境：例如晶粒内部的环带结构，说明矿物结晶时溶液的性质及物理化学性质在不断变化，环带较宽的一侧常是迎着矿液流动方向，矿质供应充分，则生长环较宽。又如具环带结构的磁铁矿晶粒，大多是在温度较高的气水溶液中形成。

（3）某些晶粒内部结构，可作为鉴定某些矿物的特征：如方铅矿和碲铅矿的黑三角孔，是由三组完全解理所构成，可作为鉴定特征。

（4）对矿物晶粒内部包裹体等的研究，可为矿石工艺提供重要的资料：例如有的自然金常呈包裹体镶嵌在黄铁矿环带内，多数自然银呈包裹体产于方铅矿中，搞清它们的赋存状态和大小，有利于元素的综合利用。

一、晶粒内部结构研究方法

由于矿物集合体中颗粒排列得非常紧密，或因在磨制光片时，晶粒间的界限常被非晶质薄膜所覆盖、填塞，故所见的矿物往往是相连成一片，时常掩盖了矿石内部，包括晶粒内部结构。因此，在反射光下常很难直接观察到，所以，通常采用下列方法显示矿物晶粒内部结构，以利观察。

1. 偏光法

对于非均质性的金属矿物，可在矿相显微镜下，以垂直入射正交或不完全正交偏光法，观察矿物晶粒内部结构。如辉锑矿、毒砂、铜蓝、磁黄铁矿、红砷镍矿等非均质性矿物，用此法观察，可得到较好的效果。但该法通常只能显示矿物结晶颗粒轮廓界限及其内部的双晶、晶带等，而不能显示裂理、解理等。

2. 结构浸蚀法

对于那些均质性的或弱非均质性的金属矿物，可利用结构化学浸蚀法来显示其内部结构。结构浸蚀法和浸蚀鉴定的操作与原理相似，即在光片上用一定浓度的化学试剂加以浸蚀，其浸蚀的时间、化学试剂的种类和浓度，以能最快和最清晰地显示其内部结构为宜。至于浸蚀的面积，可根据需要而定，通常比浸蚀鉴定的面积要大。浸蚀的时间，一般为几秒至几十秒钟不等，甚至可达几十分钟。由于光面上的矿物晶粒因其各自方向和截面不同，与试剂反应的速度和程度也不相同，故各晶粒经浸蚀后显示出明暗和深浅程度不同的浸蚀面。因而矿物晶粒界线和裂理、解理、环带、双晶等内部结构，在矿相显微镜下均可被观察到。其常用的方法如下：

（1）液体试剂浸蚀法（液法）　用滴管吸取试剂滴在光面上进行局部浸蚀，经一定时间后，用滤纸吸干，置于显微镜下观察。若有沉淀物产生时，可用清水冲洗，揩干后再进行观察。

（2）气体试剂浸蚀法（气法）　把矿石光片的磨光面置于盛有化学试剂的玻璃瓶（皿）口上方，但不接触瓶（皿）口，利用试剂的蒸汽来浸蚀矿石磨光面，经一定时间后，再置于显微镜下观察。此法的优点在于不易损坏磨光面，观察后在擦板上擦拭之，光面即可复原。

（3）电解浸蚀法（电解法）　通常用四节串联的一号干电池作电源，正极与钢针相

连接，负极与铂丝相连接，然后将铂丝触及光片上滴有试剂的溶液表面，使钢针触及矿物，构成电流回路。经一定时间后，取下两个电极，用滤纸吸干后，再置于显微镜下观察。该法的实质是加速和加强试剂对光片的浸蚀作用。

结构浸蚀所需的浓度及时间，以能迅速而又清楚地显示结构为宜。即时间由短而逐渐加长，试剂的浓度由稀至浓的次序进行浸蚀。如发现作用时间不足，应仍在原处再进行浸蚀，直至能清晰地观察到晶粒内部结构为止，即尽量少损坏光面而又能观察清楚为宜。表11－4为一些常见矿物结构浸蚀的经验数据，可供借鉴。

观察浸蚀结构应由低倍到中倍物镜的次序进行，以免遗漏现象。

表11－4　显示晶粒内部结构的矿物和方法

矿物名称	显　示　方　法	显现的内部结构
方铅矿	①1:1HCl 通电数秒；②1:1HNO_3 浸蚀 20 s～30 s；③60%～70% HBr 浸蚀 8 s～11 s；④饱和 NaCl 液＋几滴 $FeCl_3$，浸蚀 10 s～30 s	解理，颗粒界线、包体，偶见环带
闪锌矿	①不完全磨光法（显聚片双晶）； ②气法：王水蒸气，10 s～20 s； ③$KMnO_4$＋1:5H_2SO_4，10 s～30 s，试剂现配	沿{111}和{211}出现的双晶（及聚片双晶），偶见环带结构、晶粒界线
黄铜矿	①25% NH_4OH＋数滴 30% H_2O_2，20 s～30 s； ②气法：王水蒸气，10 s～30 s； ③$KMnO_4$＋40% KOH，10 s～40 s； ④浓 HNO_3＋$KClO_4$ 晶体	晶粒界线，双晶，偶见环带
磁铁矿	①浓 HCl，1 min～2 min； ②浓 HBr； ③不完全磨光法	双晶，环带
铬铁矿	①2g$KClO_4$＋40 mL H_2SO_4＋10 mL 水，光片投入试剂中煮 30 min～2 h； ②不完全磨光法	裂理、环带
辉铜矿	①1:1HNO_3，1 min～1.5 min； ②20% KCN，10 s～20 s	晶粒界线、解理，偶见双晶
黝铜矿	①浓 $KMnO_4$＋KOH＋30% H_2O_2，10 s～60 s，试剂现配； ②HCl＋50% Cr_2O_3，30 s	晶粒界线，偶见环带状结构
黄铁矿	①电法：30% NH_4OH，直流电 70 V～100 V，10 s～20 s； ②浓 HNO_3＋CaF_2 粉； ③$KMnO_4$＋1:5H_2SO_4，20 s～30 s； ④$KMnO_4$＋KOH，10 s～20 s	环带、胶状残余
锡　石	①不完全磨光法； ②1:5HCl＋小块锌片，使锡石产生一层金属锌膜，再以 HNO_3 溶解之	双晶、环带
斑铜矿	①气法：王水蒸气，5 s～10 s； ②1:1HNO_3，1 min～2 min； ③20% KCN，1 min～2 min	方形解理
自然金	①王水； ②HCl＋Cr_2O_3（50%）混合剂； ③王水＋Cr_2O_3（50%）混合剂	聚片双晶、环带
自然银	①浓 HI；②HCl＋Cr_2O_3（50%）混合剂的蒸汽，10 s～15 s	双晶、环带
自然铂	①王水； ②HCl＋Cr_2O_3（50%）混合剂，10 min～25 min	双晶

续表

矿物名称	显　示　方　法	显现的内部结构
硫砷铜矿	①20% KOH； ②正交偏光法	双晶、解理
水锰矿	浓 HF，30 s 至几分钟	环带、解理
深红银矿 淡红银矿	①浓 HI； ②正交偏光法	双晶、环带
赤铁矿	①电法：1∶1 HCl 直流电 6V； ②浓 HF，1 min ~ 2 min	双晶、解理
车轮矿	HBr，2 s ~ 5 s	双晶
辉锑矿	①正交偏光法； ②浓 KOH，1 s ~ 3 s	双晶、复聚片双晶、解理、环带
磁黄铁矿	①正交偏光法； ②HI，1 s ~ 5 s	双晶、晶粒界线
红砷镍矿	①正交偏光法； ②$KMnO_4 + H_2SO_4$，试剂现配	环带、双晶
毒　砂	①正交偏光法；②1∶1 HNO_3，15 s ~ 60 s； ③$KMnO_4$ + 20% KOH（新配），10 s ~ 20 s	双晶、聚片双晶、晶粒界线、解理、环带
铜　蓝	①正交偏光法； ②单偏光法（由双反射及反射多色性显示）	弯曲双晶、解理、晶粒界线
辉钼矿	正交偏光法	弯曲聚片双晶、解理
石　墨	正交偏光法	弯曲聚片双晶、解理

3. 不完全磨光法

对于有些既不能用正交偏光法观察，又不易被一般试剂浸蚀的矿物（如黑钨矿、铬铁矿和辰砂等）可用此法。具体做法是用细金刚砂稍加磨光（不抛出光面）后，观察其晶粒内部结构。

二、矿物晶粒内部结构的主要类型

1. 环带结构

环带结构是在晶粒内部，由一系列平行晶面的环状条纹带所构成（图版 107、108、109、110、111），环带可宽、可窄，环带间隔可疏可密。各环带间以反射色、反射率、硬度、化学组分和包裹体等的差异而显示其差别。环带虽多为在晶体生长过程中形成，但就其生成机制仍有所不同。其主要成因有以下几种：

（1）吸附作用形成的环带，是在晶体生长面上断续地吸附外来的细微杂质，交互变化而构成环带。例如在磁铁矿、铬铁矿、黄铁矿、方铅矿、毒砂和自然铜等矿物中的环带结构，可有此种成因。

（2）生长不连续性形成的条带，一般是由形成温度、溶液成分和浓度的变化而造成。如在温度较低、晶体生成速度较快时，溶液中含有大量晶芽，并不断有新的溶液渗入，其小晶芽被捕虏包裹在迅速生长的大晶体中，便可出现有包裹体和无包裹体以及成分有差异的环带。如在辉锑矿、黄铁矿、方铅矿及深红银矿等矿物中可见此种环带结构。

（3）连续固溶体的分晶作用也可形成环带结构。环带的成分自内向外，可由高温的端员逐渐变为低温的端员。构成这种成因环带结构的矿物有：金银矿、方钴矿、斜方砷钴

矿－斜方砷镍矿、锡石、黑硫银锡矿、黝铜矿等。

此外，交代作用也可形成环带结构，如假象赤铁矿交代磁铁矿、白钨矿交代黑钨矿等所形成的交代环带。这种环带与前三种成因的环带结构的区别，在于交代环带有时是断续的，宽窄不一，界线不平整等。

环带结构具有重要的成因意义，如接触交代成因的磁铁矿晶粒中，多发育环带结构，而区别于其他成因的磁铁矿。

常见环带结构的金属矿物：铬铁矿、辉锑矿、辉砷镍矿、硫铁镍矿、磁铁矿、毒砂、方钴矿、锑硫镍矿、镍黄铁矿、金银矿、钛铁矿、黑硫银锡矿、方铅矿、锡石、黑钨矿、黝锡矿、黄铁矿、锑镍矿、砷钴矿、金红石、针镍矿、斜方砷钴矿、斜方砷镍矿、黝铜矿。

2. 双晶结构

按双晶构成形式，可分为简单双晶、聚片双晶和羽状（复聚片）复合双晶等。简单双晶是由两个不同方位的单体所组成；聚片双晶是由按同一双晶律结合并多次重复，彼此平行的多个片状单晶所组成（图版112、113、114、115）。复聚片双晶是由不同双晶律的两组聚片双晶相互交错组成（图版），还常交错成规则的格子状（图版116）。

按双晶结构的成因，可分为生长双晶和压力双晶等。

（1）生长双晶：晶体在生长过程中，晶芽按双晶规律的位置生长，或晶体生长到相互密接时，由于晶粒间的压力，使晶粒中的分子层间发生有规律的推移而形成双晶，但它并未受到外来压力的影响。这类双晶多以简单的接触双晶出现，也可呈贯穿双晶，双晶纹平直，双晶带宽度不等，双晶在矿石中一般无固定方向，且不普遍。生长双晶在金属矿物中并不多见，在闪锌矿、毒砂、辉铜矿、黄铜矿、黄锡矿和自然金中有时可见。此外，生长双晶偶尔也可出现聚片双晶。常见生长双晶结构的矿物有：毒砂、菱铁矿、脆硫锑铅矿、方铅矿、自然金、砷硫锑铅矿、车轮矿、钛铁矿、辉铜矿、赤铁矿、闪锌矿、黄铜矿、白铁矿、锡石、黑锰矿、深红银矿、自然铜、斜方硫锑铅矿、自然银、黝锡矿、斜方砷钴矿、黑铜矿、自然铂、斜方砷镍矿。

（2）压力双晶：晶体形成以后，受外来压力影响而造成的双晶，常为密集聚片双晶或复聚片双晶且多呈纺锤状和叶片状，往往在很小的范围内，其形状就有变化，并且经常发生弯曲、断裂、波状消光和滑动等现象，亦可同时伴有重结晶作用。在矿石中，双晶纹一般沿一定方向分布，而矿物本身也沿此方向延长展布。这种双晶主要是由变质作用造成的，也可受其他动力作用而形成，如湖南锡矿山辉锑矿的复聚片双晶（图版115）。常见压力双晶结构的矿物有：辉锑矿、铜蓝、方铅矿、磁黄铁矿、赤铁矿、红砷镍矿、闪锌矿、钛铁矿、锡石、黄铜矿、石墨、黑锰矿、金红石、深红银矿。

3. 解理与裂理

矿物晶体受外力作用后，严格沿一定的结晶方向分裂成光滑平整平面的性质，即为解理。解理面有一组或几组，常与某个晶面相交成解理线，呈极细的平行线纹。不透明矿物的解理在光片表面因有非晶质薄膜覆盖，更不易显现，除少数不透明矿物的解理可在显微镜下直接观察到之外，一般要经结构浸蚀后才能观察清楚。若有几组完全解理时，常在其互相交切处脱落成黑三角孔，这种黑三角孔对于方铅矿、硒铅矿和碲铅矿等矿物，具有一定的鉴定意义（图版117）。常见具有解理的矿物详见表11－5。

表 11-5 常见具有解理的矿物

矿物及晶系		解理	特征
碲铅矿	等轴晶系	{100}	大部分显著，有黑三角孔
方铅矿	等轴晶系	{100}	很显著，细粒者较少见或缺失，有黑三角孔
硒铅矿	等轴晶系	{100}	普遍较显著
菱铁矿	三方晶系	$\{10\bar{1}1\}$	通常较显著
辉砷镍矿	等轴晶系	{100}	很显著
硫钴矿	等轴晶系	{100}	不定，有时很显著
磁黄铁矿	六方晶系	{0001}，$\{10\bar{1}1\}$	较少见，两组解理同样显著
针镍矿	六方晶系	$\{10\bar{1}1\}$	显著
镍黄铁矿	等轴晶系	{111}	显著，解理纹长，多不平直，常呈裂纹状
黑钨矿	单斜晶系	{010}，{100}	良好
黄锡矿	四方晶系	{110}，{001}	很少见
闪锌矿	等轴晶系	{110}	粗粒及变形者显著，细粒者不显著
自然锑	六方晶系	{0001}	通常清楚可见
辉锑矿	斜方晶系	{010}	显著，磨光太久不易看见
雌黄	单斜晶系	{010}	普遍可见
硫砷铜矿	斜方晶系	{110}	很显著
辉铜矿	斜方晶系	{001}	风化标本清楚可见，通常不显著
铜蓝	六方晶系	{0001}	清楚可见
白铁矿	斜方晶系	{110}	风化标本清楚可见
辉铋矿	斜方晶系	{010}	很清楚
石墨	六方晶系	{0001}	显著
辉钼矿	六方晶系	{0001}	清楚可见
孔雀石	单斜晶系	{001}	很显著

（据拉姆多尔资料修改）

裂理又叫裂片，系矿物在外力作用下，沿某些面网方向分裂成大致平整的裂面。这种性质并非矿物晶体固有的特性，是在不同条件下形成的同种矿物中，有的可见，有的则无。如磁黄铁矿的 {0001} 裂开，磁铁矿常显示 {100}、{111}、{110} 裂开（图版 79、86）。如果晶体内部具有不规则破裂面，在横切面上呈现不规则的凹纹，即为裂纹。系在应力作用或物理化学条件改变的影响下形成。

有些矿物经固溶体分离作用或交代作用、变质作用、构造动力作用及风化作用，可促使解理和裂开等形成或显示得更清楚。如磁铁矿的裂开 {111} 或 {100}，常由固溶体分离物钛铁矿的分布而显示出来（图版 86、87）。

实验作业

（1）观察各主要成因类型的矿石构造和结构的典型标本、光块、光片及照片。

（2）观察分析各种矿物晶粒内部结构类型的光片和照片。

（3）从分析具体实际材料中，总结研究矿石构造和结构特征的重要意义。

（4）绘制若干有代表性的矿石构造、结构与矿物晶粒内部结构素描图（手标本及光片）。

第十二章　矿化期、矿化阶段和矿物的生成顺序

对矿化期、矿化阶段、矿物生成顺序及矿物世代的研究，可客观地了解矿床、矿石与矿物的形成条件和形成过程及其在空间上和时间上的演变规律。因此，它在矿床学研究上是个不可缺少的重要环节，同时对找矿勘探工作也具有很大的实际意义。

第一节　矿　化　期

一、矿化期的概念

矿化期或称成矿期，即指发生矿化作用的一个较长的地质成矿时期。根据成矿作用的差异，可将矿化期划分为岩浆矿化期、伟晶矿化期、气水-热液矿化期、风化矿化期、沉积矿化期及变质矿化期等。各矿化期以极不相同的地质条件和物理化学环境相区别，并且每个矿化期或各矿化期彼此之间的时间间隔也相当长。一个矿床的形成，可能经历一个或多个矿化期。

二、矿化期的确定

确定矿化期的主要标志是根据与其各矿化期的成矿作用密切相关的矿床形成地质环境、物理化学条件、产状特征、典型矿物组合（包括标型特征）和矿石构造等特点来判断和划分。

例如湖北大冶县铜绿山铁铜矿床，矿体均产于燕山期花岗闪长岩与三叠纪大理岩接触带及其附近的围岩中。原生矿石中的金属矿物主要有磁铁矿、黄铜矿和斑铜矿等，并与石榴子石、透辉石等矽卡岩矿物相伴生，为气水-热液矿化期形成的大型矿床。

近地表矿体普遍经受强烈的氧化作用，氧化带及次生富集带发育，一般深达六十多米，最深为二百多米。其上部为褐铁矿、孔雀石及蓝铜矿，下部为赤铁矿、自然铜、黑铜矿，辉铜矿等，氧化矿石中的铜品位已达工业要求，可被利用。

由此可知铜绿山铁铜矿床的形成至少经历了两个矿化期，即气水-热液矿化期（矽卡岩—热液期）和风化矿化期。

又如，绪论中所列举的福建马坑铁矿，主矿体赋存于一定层位，呈层状及似层状，并保持有原始沉积成矿作用的矿石组构特征，经后期岩浆侵入的影响，矿体因受热变质作用而使赤铁矿变为磁铁矿，胶状构造的矿石经重结晶作用呈变晶状，继至由于气水-热液作用的叠加，发生了强烈的矽卡岩化，并有少量的磁铁矿形成。从而可知该铁矿床经历了沉积（或火山沉积）、热变质和气水-热液等三个矿化期。

第二节　矿化阶段

一、矿化阶段的概念

矿化阶段又叫成矿阶段，是在一个矿化期内较短的矿化作用过程，即在同一矿化期中，由相同或相似的地质条件和物理化学环境中形成的一组共生矿物的矿化过程。因此，它在时间的间隔上，较矿化期为短。在一个矿化期内，可以有一个或几个矿化阶段。

在同一矿化期内，不同的矿化阶段，表现在所处的物理化学条件有所差异，而在时间上具有一定的间隔，各矿化阶段中所形成的矿物共生组合可以相似或有较大的差异，甚至完全不同，在空间上多表现为穿切关系，也可以是叠加伴生。

二、确定矿化阶段的标志

确定的主要标志是矿体构造、矿石构造及矿物共生组合等三方面。

1. 矿体构造方面的标志

（1）脉状穿插关系：由于一些热液矿床中的构造活动往往伴随着间隔矿化作用，形成多次叠加的脉状矿体穿切现象，后一个矿化阶段矿物共生组合构成的脉体，可穿切叠加于前一矿化阶段矿物共生组合所形成的矿体。这种现象在矿化露头、采矿场、坑道壁上常可见到。如图 12－1 中所示：石英脉 6（含萤石及闪锌矿等少量硫化物）为最先生成，系第一矿化阶段的产物，含方铅矿等的萤石脉 1 穿切石英脉 6，为第二矿化阶段形成的，含闪锌矿及方铅矿的萤石脉 2，纵向切穿第二矿化阶段形成的萤石脉 1，属于第三矿化阶段产物。

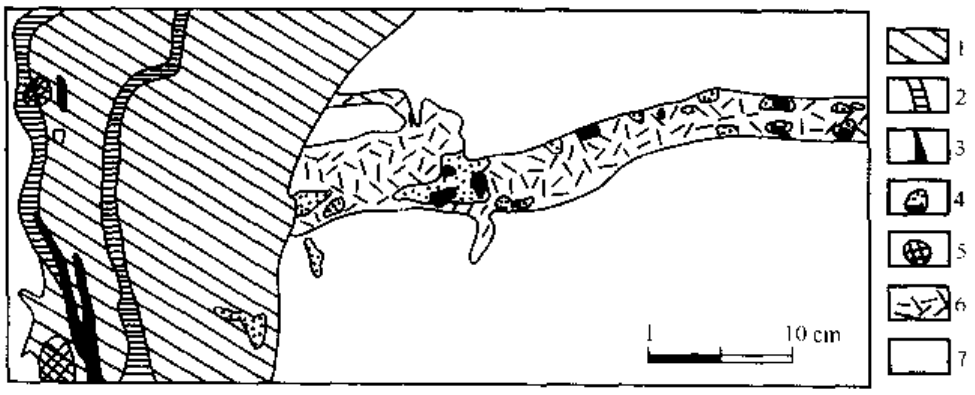


图 12－1　湖南桃林铅锌矿床坑道素描图

1, 2, 4—不同矿化阶段的萤石；3—闪锌矿；5—方铅矿；6—石英；7—围岩

（2）矿体内部分带构造：由于构造裂隙多阶段性的张开，并伴随发生多次成矿作用，因而往往形成从矿体的边部至中央依次由不同矿物共生组合构成的矿石带。各带除矿物共生组合有所差异外，其矿石构造和结构也可各有其特点。据此可从边缘向中央依次划分成数个矿化阶段。

2. 矿石构造方面的标志

（1）脉状构造：其形成机理与脉状矿体穿切相同或相似。其成因是构造多次活动而

造成围岩或早期形成的矿石产生裂隙，含矿热液也同步地多次沿其裂隙发生充填或交代矿化，因此形成各种脉状穿插构造。如脉状、细脉状、交错脉状和网脉状等矿石构造。按脉体间的穿插关系，即可划分成不同的矿化阶段（图版5、6、7）。

（2）角砾状和环状构造：构造活动使矿化围岩或已形成的矿石破碎成角砾，被后一矿化阶段生成的矿物或矿物共生组合所胶结（图版8、9），若围绕这些角砾依次向外沉淀，即形成环状构造（图版10），皆可依次划分为两个以上的矿化阶段。

（3）残留构造：晚期矿化阶段形成的矿物组合交代早期矿化阶段的产物，并残留有早期矿化阶段矿石成分或组构（包括假象构造）者，均可作为划分不同矿化阶段的依据。

3. 矿物共生组合方面的标志

根据矿物共生组合的显著差别并结合测温及微量元素等资料，可划分成不同的矿化阶段。如气水-热液矿床中矽卡岩型金属矿床，可按石榴子石-透辉石-硅灰石共生组合；辉钼矿-锡石-白钨矿共生组合，磁黄铁矿-黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿等共生组合，划分成多个矿化阶段。

最后须指出的是，矿化阶段的划分，应结合野外矿床地质特点及综合性的资料，并对矿石标本、光片等进行详细地观察和分析，以及对矿物标型特征及其内部结构、形成温度和微量元素等的研究之后，才能作出结论。

第三节　矿物的生成顺序和世代

一、矿物的生成顺序

（1）矿物生成顺序是指在同一矿化阶段中，各种矿物结晶的先后次序。

不同矿化阶段生成的矿物，它们之间生成的先后关系，不能归为矿物的生成顺序，故首先应仔细研究，确定矿化阶段之后，再观察、判断同一矿化阶段内矿物的生成顺序。

（2）确定矿物生成顺序的标志是指在同一矿化阶段中，矿物结晶先后顺序，大致可归纳为先后生成、同时生成、超复生成等三种关系。在研究矿物生成顺序时，除少数能以肉眼观察到外，大都须结合在显微镜下观察矿石光片的组构，经综合分析后才能确定。确定矿物生成顺序的标志如下：

（一）先后生成的标志

1. 交代溶蚀结构

交代溶蚀作用所形成的各种矿石结构，是确定矿物先后生成的可靠证据，即被交代的矿物先生成，交代者后生成。后生成的矿物往往呈尖楔状或细脉状，指向或穿插早生成的矿物。主要判断标志如下：

（1）浸蚀结构（包括星状结构）和交错结构　被交代呈港湾状或被交错细脉穿插的或被星状交代的矿物，必形成在前，造成上述形状并取而代之者，则生成于后（图版67、68、69、70）。

（2）交代残余结构和似文象结构　被交代的矿物在交代矿物中，呈无明显棱角的孤岛状或“文象”状者，也可确定矿物生成的先后次序（图版75、76），被交代矿物先于交代者。

（3）骸晶结构　具原晶形之残骸者，生成在先，交代者生成于后（图版 72、73、74）。但特别注意勿与交代不完全的代晶（交代成因的自形、半自形晶结构）相混，因代晶有时也呈似骸晶状者，然而它们是后生成的。

（4）交代格状、网状结构　构成格状或网状者为后生成，呈大片出露的主体—被交代矿物生成在先（图版 77、78、79）。

（5）假象结构　先生成的矿物晶粒，完全被后生成的矿物所交代，但仍保留先生成矿物的晶形。其先后关系往往可从假象颗粒中残留极少量的被交代矿物的残留体或相邻的同种被交代矿物晶粒中的交代残余结构加以判断（图版 80）。

2. 他形填隙结构

海绵陨铁及其他填隙结构中，被填隙的矿物生成在先，填隙者生成于后（图版 62、63、64、65）。

3. 充填成因的矿石构造

充填作用形成的各种构造，如晶洞状、梳状、环状和条带状构造等，通常可用来确定矿物生成顺序。在梳状、晶洞状及条带状构造里，靠近脉（洞）壁者生成在先；逐渐远离者（即愈近中间者），依次生成于后。而环状构造者，则以最靠近角砾的内环矿物为先生成，愈向外环，则其生成时序愈晚（图版 10）。

（二）同时生成的标志

1. 固溶体分离结构

构成固溶体分离结构的主、客矿物，都被视为同时生成的（图版 83、85、90）。

2. 共生边结构

两种矿物的接触界线，无明显的凸出或凹入，而是呈光滑、平直或舒缓波状，并无交代溶蚀现象者，为共生边结构。这种结构表明是同时生成的（图版 117）。

3. 再结晶结构

胶体或晶质物质再结晶形成的结构，如放射状结构与花岗变晶等结构中的矿物，均系同时生成（图版 93、94、95）。

（三）矿物超覆生成的标志

两种以上的矿物，在其结晶过程中，只要有一段时间重叠，则称为超覆生成。超覆生成大致有四种情况：①一种矿物结晶尚未结束时，另一种矿物便开始结晶，并晚于先结晶矿物结束；②两种矿物同时开始结晶，但不同时结束；③两种矿物不同时开始结晶，但同时结束，④后结晶的矿物早于先结晶矿物结束。

确定矿物超覆生成的标志是两种以上的矿物根据既有先后生成的标志，又有同时生成的标志来判断，详见本节前两部分。

二、矿物的世代

1. 矿物世代的概念

同种矿物多次生成的先后次序称矿物的世代。同种矿物多次晶出，每结晶沉淀出一次，就是该种矿物的一个世代。这样，按着先后生成的次序可将该种矿物划分为第一世代、第二世代、第三世代、……。

矿物世代形成的原因很多，主要是由于形成某种矿物的化学反应重复多次，反复结晶沉淀的结果。例如，含矿热液中，通常富含很多的挥发分，尤以 H_2S 和 CO_2 为最常见，其溶解度随溶液的温度下降而增高。当它们与溶液中的金属离子化合后，在适宜的物理化学条件下，便结晶沉淀，形成金属硫化物和碳酸盐，直到溶液中的 S^{2-} 和 CO_3^{2-} 离子浓度，因在结晶时消耗而下降到一定数值时，结晶沉淀即中止。但当含矿溶液的温度继续下降，使其 H_2S 和 CO_2 的溶解度增高，并达到一定浓度时，又与溶液中该种金属离子化合，而沉淀出另一世代的金属硫化物和碳酸盐。这种作用反复地进行，便可形成矿物的多个世代。不同世代的矿物，由于结晶时含矿溶液的成分及物理化学条件的差异，导致不同世代矿物中的类质同象混入物和包裹体的种类与含量、矿物的颜色、晶形、习性、光学性质以及内部结构等往往也有所不同。利用这些差异便可区别之。

2. 确定矿物世代的标志

通常根据矿石中同种矿物明显的差异来识别矿物的世代，其主要标志如下：

（1）晶形特征和结晶程度的差别：同种矿物在不同的物理化学条件下形成，会出现晶形特征和结晶程度的差别，据此可作为划分矿物世代的依据。例如五角十二面体和六面体的黄铁矿；胶状黄铁矿或细粒晶质黄铁矿和粗粒黄铁矿（图版 118、119）；大面积分布的黄铜矿和闪锌矿中固溶体分离的乳滴状黄铜矿可分属于不同的世代（图版 120）。

（2）物理性质及化学组分的差异：如矿物的颜色、反射率、硬度、结晶要素、包体、微量元素及形成温度等方面有较大差异者。例如湖南桃林铅锌矿床中，深褐色和草黄色两种闪锌矿，色异，微量元素也各不相同，前者含铁高；而后者含某些稀散元素较高，故应为两世代产物。

（3）矿物晶粒内部结构的不同：矿石中同种矿物，若其内部结构特征存在明显差别者，则可作划分不同世代的标志。如山东金岭镇铁矿床，据磁铁矿晶粒内部环带结构的有与无，可划为两个世代。

第四节　矿物生成顺序图表的编制

在对矿床进行了野外和室内的详细研究后，就可用图表法来简要地表达矿化期、矿化阶段、各矿化阶段内矿物的共生组合、矿物的相对含量、生成顺序和世代等内容。从中可看出该矿床形成全部过程和矿化作用的规律性，它是矿床成因研究必备的资料。矿物生成顺序图表中要表示的主要内容是：

（1）矿床的矿化期、矿化阶段、矿物生成顺序和矿物世代；

（2）矿石中的矿物成分及其相对含量、各种矿物晶出的先后及晶出相对时间的长短；

（3）矿石的组构、矿化阶段形成的温度范围及与矿化作用有关的地质构造活动、各阶段主要的围岩蚀变及矿石类型等。均可酌情以极简明扼要的文字表示于此图表的下方。

编制矿物生成顺序图表的方法及实例如下：

以江南某矽卡岩-斑岩型铜（钼）矿床为例。该矿床属大型铜（钼）矿床，它位于扬子-钱塘准褶皱带西部的东西向紧密褶皱带中，燕山期花岗闪长斑岩呈椭圆形岩株侵入到二叠系灰岩和白云质灰岩内，在接触带形成矽卡岩型铜（钼）矿床，而在斑岩体内则产生斑岩型矿化，后期的爆破作用形成的爆破角砾岩和贯入角砾岩中，含有金属硫化物矿

化，局部构成工业矿体。围岩蚀变除矽卡岩化外，还有钾长石化、石英-绢云母化及绿泥石化等。该矿床近地表的部分，遭受风化作用后发生次生变化。矿床的矿化过程简述如下：

1. 气水-热液矿化期

（1）早矽卡岩—硅酸盐阶段　与花岗闪长斑岩有关的早期含矿气水热液，沿接触带交代斑岩及大理岩，形成强烈的矽卡岩化（主要在大理岩一侧）。矽卡岩矿物主要有硅灰石、透辉石及石榴子石等，并具有轻微的磁铁矿化。在花岗闪长斑岩岩体内，发生较强的钾长石化。各矽卡岩矿物之间的生成顺序多为同时或超复生成。

（2）晚矽卡岩—磁铁矿阶段　在早期矽卡岩和大理岩中，被晚期矽卡岩矿物穿切交代或叠加，形成透闪石、阳起石和绿帘石等矿物。同时可见磁铁矿交代石榴子石、透辉石等矽卡岩矿物，形成浸蚀、交代残余等结构，磁铁矿在矽卡岩中多呈浸染状和块状构造。在矽卡岩中有辉钼矿及黄铁矿矿化现象，矿石构造主要为细脉浸染状。在花岗闪长斑岩中，钾长石化、石英-绢云母化等蚀变发育，也有少量辉钼矿及黄铁矿等矿化现象，它们多呈浸染状。

（3）石英-硫化物阶段（Ⅰ）　其后，由于与含矿气水热液活动相关的强烈爆破作用，使接触带及两侧的围岩发生强烈破碎，形成爆破角砾岩，并伴随产生石英-绢云母化和绿泥石化等蚀变。本矿化阶段形成的金属硫化物有：辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿及黄铁矿等，其生成顺序由早至晚依次为辉钼矿—黄铁矿—黄铜矿—斑铜矿。矿石中可见到辉钼矿被后三种矿物交代溶蚀现象，而黄铁矿常被黄铜矿和斑铜矿交代成骸晶结构，斑铜矿交代黄铜矿成交代环边（反应边）结构等。矿石以角砾状（矽卡岩、斑岩及早期矿石呈角砾，被石英、方解石、黄铁矿及铜、钼等矿物集合体所胶结）、细脉浸染状构造为主。

（4）石英—硫化物阶段（Ⅱ）　在爆破角砾岩形成后，含矿气水热液又一次沿构造裂隙通道活动，将早阶段的矿石及围岩角砾与碎块带到较高的部位，形成热液贯入含矿角砾岩。本阶段生成的金属硫化物有黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿及少量辉钼矿等。它们与石英、碳酸盐、石膏及绿泥石等脉石矿物呈胶结物形式出现。矿石构造以角砾状、脉状和细脉浸染状为主，矿石结构常见的有浸蚀、骸晶、网状及交代残余等，矿物生成顺序与前一矿化阶段相似（表 12-1）。

2. 风化期

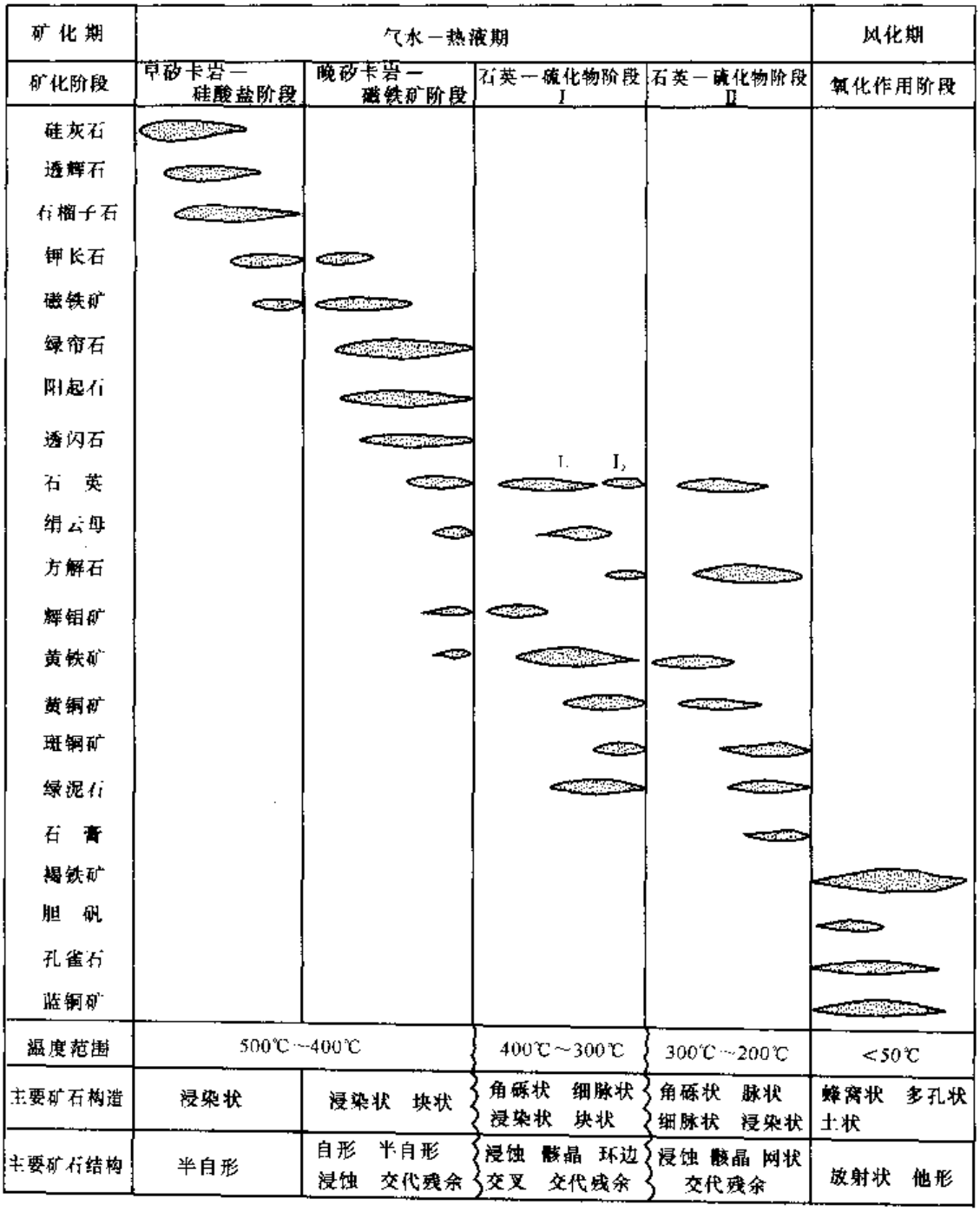
本期以氧化作用为主，多见于矿体出露在地表部位、老硐及断裂带中，氧化带深度可达数米至十米左右。主要次生矿物有褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿及胆矾等。在氧化带之下，有烟灰状辉铜矿。矿石构造以蜂窝状、多孔状及土状（粉末状）为常见，而矿石结构则多为放射状及他形晶粒状，少数呈自形晶粒状结构（蓝铜矿）。

根据上述地质资料，经综合分析，可编制出如下的矿物生成顺序图表（表 12-1）。

图表中透镜体形象特征所表示的主要内容是：①透镜体的长度表示矿物结晶沉淀时间的相对长短；②其面积代表该矿物在矿石中的相对百分含量，其厚度最大处，示该矿物晶出的高峰；③在同一矿化阶段内，各个透镜体的前端（左端）的相对位置，表明各矿物间晶出的先后顺序；其末端（右端），表示各矿物结晶结束的次序；④同种矿物在同一个矿化阶段内或不同矿化阶段内，以数个透镜体表示该种矿物断续性地多次结晶沉淀的世代关系。

有的学者采用线条或长方形图块或半透镜体等形式来表示，其含意与上述方法表达的内容相似，但不如透镜体图示法更形象些。

表 12－1　某铜（钼）矿床矿物生成顺序图表



注：　表示构造活动；I_1，I_2表示矿物的世代；I表示矿化的阶段。

实验作业

（1）观察划分矿化阶段的主要标志。

（2）观察确定矿物生成顺序及世代的主要标志。

（3）熟悉和学会阅读矿物生成顺序图表的表示方法和内容。

附录一：矿相学课程作业指导书

为了使学生更好地掌握和巩固课程内容，在系统学习矿相学之后，应进行矿相学课程作业以便系统总结和提高。矿相学作业是运用和巩固学生已学过的矿相学基本知识和操作方法，利用生产过程中收集的实际资料并结合科研进行矿床学室内研究，并借此实践来检查学生学习效果。在加强学生独立工作能力同时亦给生产和科研提供一定的有关矿相学的资料。现将矿相学课程作业报告书内容提纲介绍如下：

（一）绪言

（二）矿物的描述

（三）矿石的构造和结构

（四）矿化阶段和矿物生成顺序

（五）结束语

各节分别说明如下：

（一）绪言

首先说明所采用矿石的产地，矿床成因类型和矿床特征。然后，列举出光片中所含的矿物。叙述时，将其分为金属矿物和非金属矿物，说明哪些是主要的、次要的和微量的，最后以表格形式列出上述矿物。

绪言举例说明如下：

所研究的矿石产于湖南某地铅锌矿，为矽卡岩型铅锌矿床。

在显微镜下见到的金属矿物有：方铅矿、黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿。非金属矿物有石英。其中方铅矿、黄铁矿含量最多，石英次之，闪锌矿较少，黄铜矿微量，见表1。

表1　矿石矿物含量表

	矿物名称	化学分子式	百分含量/%
金属矿物	方铅矿	PbS	40
	黄铁矿	FeS_2	32
	闪锌矿	ZnS	7
	黄铜矿	$CuFeS_2$	1
非金属矿物	石　英	SiO_2	20

（二）矿物的描述

描述次序按照含量多少排列，每种矿物应描述以下项目：

（1）矿物名称（化学分子式）；

（2）主要鉴定特征（矿物的反射率、硬度、反射色、双反射及反射多色性、内反射、均质非均质性与偏光色以及矿物的化学性质和其他特征等）；

（3）矿物的百分含量及平均颗粒直径；

（4）矿物分布的形态特征（如不规则状、细脉状或孤立包体等）以及与相邻矿物的关系。

举例说明：

黄铜矿（$CuFeS_2$）

镜下呈黄色，反射率大于方铅矿小于黄铁矿，弱非均质性，硬度中等，表面较光滑。黄铜矿在矿石中的含量为1%，平均颗粒直径为0.01 mm。

黄铜矿呈不规则状和细小乳滴状两种形态出现，不规则状者多分布在闪锌矿边缘部分，有溶蚀闪锌矿现象，细小乳滴状者包在闪锌矿之中。

（三）矿石的构造和结构

首先总述全部构造和结构的名称，说明主要的和次要的类型，然后分别叙述之。

1. 矿石构造

对每一种构造应说明以下内容：

①构造名称；②形态特点和组成矿物；③成因简述；④对主要类型的构造应有绘图和说明。

2. 矿石结构

对每种结构应说明以下内容：

①结构名称；②形态特点和组成矿物，各矿物之间的关系，确定其生成的先后；③对主要类型的结构应有绘图和说明。

例如：

骸晶结构

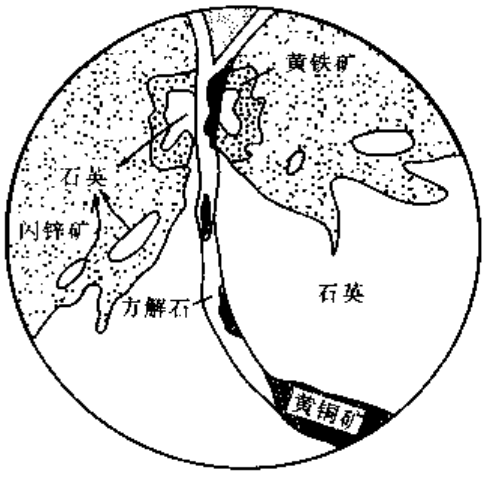


图1

黄铁矿呈自形晶状位于闪锌矿中，可见到黄铁矿被闪锌矿交代成骸晶的现象，说明黄铁矿先生成。

（四）矿化阶段和矿物生成顺序

这一节是在前面的基础上，综合所有观察到的现象进行综合分析，划出矿化期和矿化阶段，确定出每个矿化阶段中矿物的生成顺序和世代。简要叙述矿石的形成过程，最后绘制矿物生成顺序图表。

举例说明：

由于见到黄铜矿与方解石小脉穿过了黄铁矿、闪锌矿和石英的集合体（图1），因此，可以确定有两个矿化阶段。第一矿化阶段生成了黄铁矿、闪锌矿和石英，其中黄铁矿生成最早，它被石英溶蚀呈骸晶结构，因又见到闪锌矿溶蚀石英的现象，故闪锌矿的生成晚于石英，同时在闪锌矿中有固溶体分离作用形成的乳滴状黄铜矿，应与闪锌矿同时形成。在第一矿化阶段中，矿物的生成顺序为：

注：文中各举例之间不存在相应的联系（延续性）。

黄铁矿、石英、闪锌矿（黄铜矿）。第二矿化阶段生成了黄铜矿和方解石，它们沿裂隙呈脉状穿过了所有的第一矿化阶段中生成的矿物。

综合上述结果，作出矿物生成顺序图表如下，其绘制方法参考表 12-1。

（五）结束语

根据矿石中矿物的共生组合、矿物的光学、物理、化学性质以及矿石的构造结构特点，作出有关矿床成因方面的结论，并对矿石进行工业评价。

要求说明以下各项：

（1）矿床成因类型划分方面的相应结论；

（2）矿石中有用矿物的可采品位；

（3）有何可以综合利用的元素；

（4）有哪些是选矿冶炼上的有害杂质；

（5）简述有用矿物的工业用途及在国民经济中的意义。

格式说明

矿相学课程作业须装订成册，封面可自行设计，而基本格式如图 2。作业中的文字须简练，书写清晰，图件要求正确美观；颜色逼真，显微素描图直径一律为 7 cm，并注明图名、图例和放大倍数以及单偏光或正交偏光，如图 3 所示。

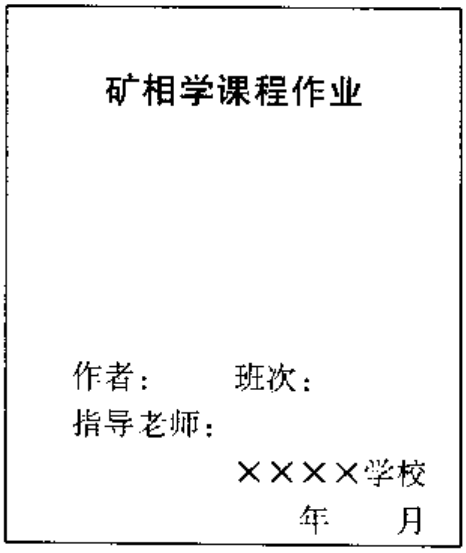


图 2　矿相课程作业封面

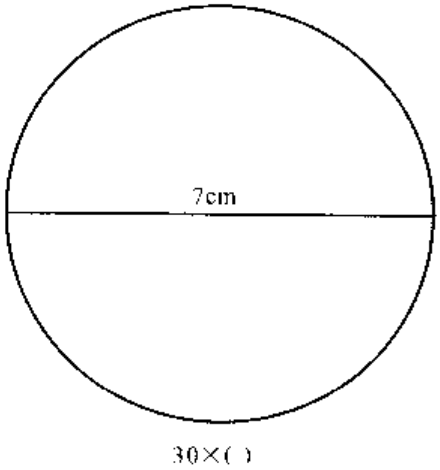


图 3　方铅矿溶蚀交代黄铁矿显微素描图

附录二：矿物索引表

四　画

方解石	calcite	十三表
方铅矿	galena	四表
方黄铜矿	cubanite	五表
方钴矿	skutterudite	二表
方金锑矿	aurostibite	一表
水锰矿	manganite	十一表
火硫锑银矿	pyrostilpnite	十表
少银黄铁矿	argentopyrite	八表
孔雀石	malachite	十四表
车轮矿	bournonite	七表

五　画

白铅矿	cerussite	十二表
白铁矿	marcasite	三表
白钨矿	scheelite	十四表
白云石	dolomite	十三表
石榴子石	garnet	十五表
石英	quartz	十五表
石墨	graphite	十三表
闪锌矿	sphalerlite	十一表
叶碲铋矿	wehrlite	一表
叶碲金矿	nagyagite	四表
史碲银矿	stuetzite	七表
（六方碲银矿）		

六　画

自然钯	palladium	二表
自然铂	platinum	二表
自然银	silver	一表
自然金	gold	一表
自然铜	copper	一表
自然铋	bismuth	一表
自然砷	arsenic	一表
自然锑	antimony	一表
红锌矿	zincite	十四表
红砷镍矿	niccolite	二表
红锑镍矿	breithauptite	二表
纤锌矿	wurtzite	十表
纤铁矿	lepidocrocite	十二表

七　画

辰砂	cinnabar	十表
针铁矿	goethite	十二表
针镍矿	millerite	二表
针碲金矿	sylvanite	一表
块硫砷铜矿	luzonite	十一表
块硫锑铅矿	boulangerite	七表
赤铁矿	hematite	十二表
赤铜矿	cuprite	十一表
沥青铀矿	pitchblende	十四表

八　画

金红石	rutile	十二表
金铜矿	auricupride	一表
软锰矿	pyrolusite	七表

九　画

钛铁矿	ilmenite	十二表
毒砂	arsenopyrite	三表
钡硬锰矿	hollandite	九表
陨硫铁	troilite	五表
钨铁矿	terberite	十一表
钨锰矿	huebnerite	十一表
柱硫锑铅银矿	freieslebenite	七表

十　画

铌铁矿	columbite	十二表
钽铁矿	tantalite	十二表
脆硫锑铅矿	jamesonite	七表
脆银矿	staphanite	七表
脆硫锑银矿	owyheeite	七表
砷镍钴矿	langisite	五表
砷黝铜矿	tannatite	八表
圆柱锡矿	cylindrite	七表
铅矾	anglesite	十三表
珲春矿	hunchunite	一表

十一画

铜蓝	covellite	十表
银金矿	electrum	一表
银黝铜矿	freibergite	八表
铬铁矿	chromite	十五表
黄铁矿	pyrite	二表
黄铜矿	chalcopyrite	四表
黄银矿	xanthocone	十表
菱铁矿	siderite	十四表
菱锰矿	rhodochrosite	十四表
菱锌矿	smithsonite	十四表
斜方砷镍矿	rammelsbergite	二表
斜方砷铁矿	loellingite	三表
斜方砷钴矿	safflorite	二表
淡红银矿	proustite	七表
深红银矿	pyrargyrite	七表
萤石	fluorite	十四表
硒银矿	naumannite	七表
硒金银矿	fischesserite	十表
硒铜银矿	eucairite	七表

十二画

锑银矿	dyscrasite	二表
锑硫镍矿	ullmannite	五表
硫镉矿	greenockite	十表
硫钴矿	linnaeite	五表
硫锰矿	alabandite	十一表
硫砷铜矿	enargite	十一表
硫镍钴矿	siegenite	五表
硫铜钴矿	carrollite	五表
硫铜锑矿	chalcostibite	五表
硫铋铜矿	wittichenite	七表
硫铜银矿	stromeyerite	十表
硫锑铜银矿	polybasite	七表
硫砷铜银矿	pearceite	七表
硫银锗矿	argyrodite	十表
硫银铋矿	violarite	五表
紫硫镍矿	violarite	五表
辉铜矿	chalcocite	七表
辉钼矿	molybdenite	七表
辉锑矿	stibnite	四表
辉锑铅矿	zinkenite	七表
辉锑银矿	miargyrite	七表
辉铅铋矿	galenobismutite	四表
辉铋矿	bismuthinite	四表
辉钴矿（辉砷钴矿）	cobaltite	三表
辉砷镍矿	gersdorffite	三表
辉铁锑矿	berthierite	七表
黑柱石	ilvaite	十五表
黑铜矿	tenorite	十一表
黑钨矿	wolframite	十一表
黑锰矿	hausmannite	十二表
黑硫银锡矿	canfieldite	十表
雄黄	realgar	十表
晶质铀矿	uraninite	十四表
斑铜矿	bornite	十表
硬锰矿	psilomelane	九表

十三画

硼镁铁矿	ludwigite	十四表
蓝铜矿	azurite	十四表
蓝辉铜矿	digenite	十表
锡石	cassiterite	十五表

十四画

碲金矿	calaverite	一表
碲铋矿	tellurobismuthite	一表
碲银矿	hessite	七表
碲铋银矿（沃仑斯基矿）	volynskite	一表
磁铁矿	magnetite	十一表
磁赤铁矿	maghemite	十二表
磁黄铁矿	pyrrhotite	五表
雌黄	orpiment	十表
褐锰矿	braunite	十二表

十五画

镍黄铁矿	pentlandite	五表
墨铜矿	valleriite	十表

十七画

黝铜矿	tetrahedrite	八表
黝锡矿	stannite	十一表
螺状硫银矿-辉银矿	acanthite argentite	七表

主要参考文献

陈正：不透明矿物显微镜鉴定，北京：地质出版社，1959

北京地质学院：矿相学，北京：中国工业出版社，1961

王曙：不透明矿物晶体光学，北京：地质出版社，1985

中国地质科学院地质矿产所：金属矿物显微镜鉴定，北京：地质出版社，1978

王曙：偏光显微镜和显微摄影，北京：地质出版社，1978

陈正、陈殿芬、李纯杰：金属矿物反射色的颜色指数，地质学报第3期，1979

陈正、陈殿芬、邹星：金属矿物颜色指数研究，北京：地质出版社，1979

袁见齐、朱上庆、翟裕生：矿床学，北京：地质出版社，1985

邱柱国：矿相学，北京：地质出版社，1982

张志雄等：矿石学，北京：冶金工业出版社，1981

尚浚：非均质性旋转在不透明矿物鉴定中的应用，长春地质学院学报第2期，1979

A. B. Edwards（1947）：金属矿物结构及其应用，王文魁译，龙门联合书局出版，1953

陈正、岳树勤、陈殿芬：矿石学，北京：地质出版社，1985

尚浚、林金泉：银矿物鉴定及其赋存状态研究，世界地质第2期，1989

尚浚、林金泉：金矿物及其赋存状态，长春地质学院学报第3期，1990

C. A. 瓦赫罗麦耶夫：矿相学导论，中译本，北京：中国工业出版社，1954

A. T. 别捷赫琴等：矿石的构造和结构，中译本，北京：中国工业出版社，1958

W. Uytenbogaardt and E. A. J. Burke：金属矿物显微镜鉴定表，中译本，北京：地质出版社，1975

E. N. Cameron and L. H. Green：金属矿物在反射光线下的偏光旋光性及其在鉴定矿物上的用途，王文魁译，矿产专辑第6辑，北京：地质出版社，1957

R. W. Hutchinson：Polarization figures ang rotation properties as applied to the identification of some Cobalt Nickel Sulfarsenides and related minerals，Econ. Geol，Vol. 48，P492～500，1953

E. N. Cameron：Ore Microscopy，1961

H. V. Eales：Polarization figures as an aid to identification on of Polished isotropic minerals，Amer. Miner. Vol. 50，P942～952，1965

H. Piller：Color measurement in ore microscopy. Mineral Deposita，J. 175～192，1966

R. Galopin and N. F. M. Heory：Microscopic Study of Opaque Minerals，1972

P. Picot et Z. johan：Atlas des Mineraux Metalliques，1977

Ernest E. Wahlstrom：Optical Crystallography，5th Edition，1979

James R. Craig，David J. vaughan：Ore Microscopy and Ore Petrography，1981

P. Ramdohr：The Ore Minerals and Their Intergrowths，1980

J. Zussman：Physical Methods in Determinative Mineralogy，1977

H. Piller：Microscope photometry，1977

N. F. M. Henry：IMA/COM Quantitative Data File. First ISSue

Evans. A. M：《An Introduction to Ore Geology》. Geoscience Texts Vol. 2. Blackwell Scientifie Publication，1980

A. J. Criddle and C. I stanley：The Quantitative Data File for Ore Minerals，1986