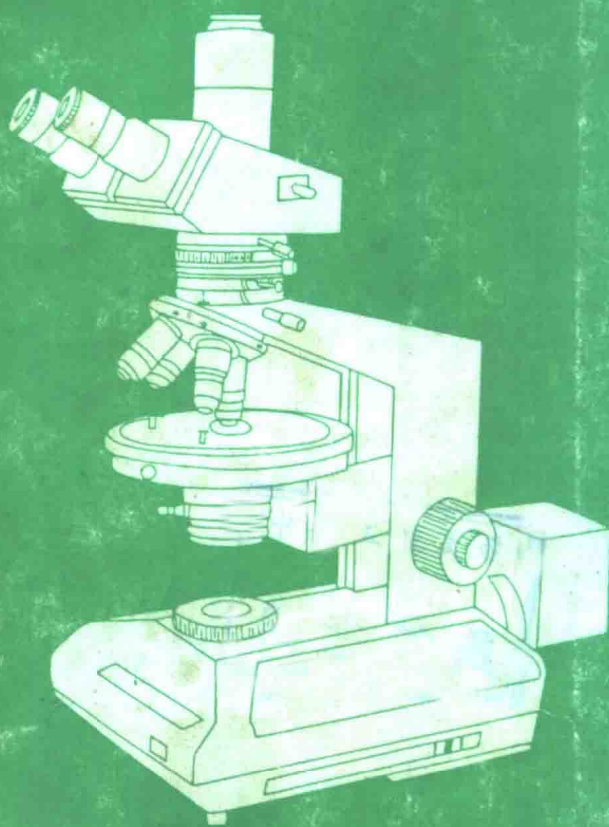


中国地质大学出版社



透明造岩矿物与宝石 晶体光学

曾广策主编



内 容 简 介

本书是为了适应现代教学和宝玉石业蓬勃发展的需要,根据晶体光学与光性矿物学教学基本要求和教学大纲编写而成的。

书中阐明了晶体光学基本原理和基本知识;介绍了晶体光学鉴定的常用仪器;系统阐述了用偏光显微镜对透明造岩矿物及宝石薄片进行晶体光学鉴定的基本原理、主要内容和详细操作方法,以及油浸法测定透明造岩矿物及宝石折射率的原理、方法和程序;简述了对宝石制品进行晶体光学鉴定的主要内容和基本方法。此外,书中还叙及矿片厚度、矿物粒度和矿物含量的测定方法,并附有100多道复习思考题。

该书不仅可作为综合性大学及地质院校地质类各专业及宝玉石学、硅酸盐材料、工业岩石等专业的教材,还可供岩矿、宝玉石鉴定人员以及从事地质、工业岩石、合成硅酸盐材料等相关专业的生产科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

透明造岩矿物与宝石晶体光学/曾广策主编. —武汉:中国地质大学出版社,1997.8
ISBN 7-5625-1228-0

- I. 透…
- II. 曾…
- III. 透明矿物-宝石-晶体-光学特征-鉴定方法
- IV. P585

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山·邮政编码 430074)
责任编辑 刘士东 责任校对 杨霖
印 刷 武汉测绘院印刷厂
经 销 新华书店

开本 787×1092 1/16 印张 10.5 字数 270千字
1997年8月第1版 1997年8月第1次印刷 印数 1—3500册
定价:11.50元

前 言

透明矿物晶体光学是研究可见光,尤其是可见偏光通过透明矿物晶体所产生的折射、双折射、偏振、干涉、吸收、色散、旋光等一系列光学现象的基础学科。研究透明矿物晶体光学的主要仪器有透射偏光显微镜、偏光仪、二色镜、折射仪等,因此,透明矿物晶体光学又是介绍用上述仪器测定透明矿物系统光学性质的基本原理和基本方法的应用学科。

透明矿物包括一般透明造岩矿物、玉石矿物和宝石矿物。绝大多数造岩矿物、玉石矿物和宝石矿物在薄片中都是透明的。透明矿物晶体光学鉴定是研究和鉴别一般岩石、玉石和宝石的最基础的鉴定技术。因此,晶体光学既是岩石学、矿物学、宝玉石学、矿物材料学的重要组成部分,也是地学其他专业及相关专业的基础课程。此外,工业岩石(工艺岩石、人造岩石),如陶瓷、铸石、耐火砖、炉渣、水泥、玻璃等其中的合成矿物大多数与天然透明矿物相同或类同,其研究和鉴别方法也与天然透明矿物相同,因此,晶体光学也广泛地应用于冶金、化工、轻工、建材等其他部门和行业。

本书是根据地质矿产部岩石学课程教学指导委员会岩浆岩课程教学指导组制定的《晶体光学及光性矿物学》教学基本要求和该校的该课程教学大纲,为适应现代地学教学和宝玉石行业蓬勃发展的需要而编写的。编写时参阅了前人的《晶体光学》和近年来出版的宝玉石学、宝玉石鉴定书籍,力图使本书“三基”(基本理论、基本知识、基本技能)更突出,概念更确切,实用性更强,应用面更广,更适合于现代教学改革。本书不仅可作为高等院校地学所有各专业及宝玉石学、建材、硅酸盐材料等专业的教材,还可供岩矿鉴定人员、宝玉石鉴定人员、地质生产科研人员、工业岩石产品的生产科研人员、合成硅酸盐材料的生产科研人员参考。

本书编写分工如下:第一章由叶德隆、曾广策编写;第二、九章由朱云海编写;第三、四、五、六、七、八章以及前言和其他所附内容由曾广策编写;全书由曾广策统一修改定稿。

本书的编写和出版得到了我校出版社及岩石教研室、教材科的大力支持。初稿完成后,邱家骧、路凤香教授审阅了全书,并提出了宝贵的修改意见。我校珠宝学院开利剑副教授对第八章进行了审阅。出版社耿小云总编、正编审为本书出版给予了大力支持。谨此,一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限,书中定有遗误或不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

1997年1月于中国地质大学

本书使用的缩写符号

a, b, c	结晶轴(相当于结晶学中的 X, Y, Z 轴)
N	折射率、均质体折射率
N_o, N_e	一轴晶对常光、异常光的折射率(也用作一轴晶光率体两个主轴的名称)
N_p, N_m, N_g	二轴晶最小、中等、最大主折射率(也用作二轴晶光率体三个主轴的名称)
$ N_e - N_o $	一轴晶最大双折射率
$N_g - N_p$	二轴晶最大双折射率
OA	光轴
OAP	光轴面
$2V$	光轴角
$2r$	红光光轴角
$2v$	紫光光轴角
Bxa	两光轴所夹锐角等分线
Bxo	两光轴所夹钝角等分线
PP	下偏光振动方向
AA	上偏光振动方向
$(+), (-)$	光率体正、负光性符号
R	光程差
d	薄片厚度
λ	光波波长

目 录

前 言

本书使用的缩写符号

第一章 晶体光学基础原理	(1)
§ 1-1 光学基础知识	(1)
一、光的波动性	(1)
二、可见光、单色光与白光、自然光与偏光	(1)
三、光的折射和折射率	(3)
四、光的全反射和全反射临界角	(5)
五、光性均质体和光性非均质体	(6)
六、双折射和双折射率	(7)
§ 1-2 光率体	(8)
一、高级晶族矿物和其他均质体的光率体	(9)
二、中级晶族(一轴晶)矿物的光率体	(9)
三、低级晶族(二轴晶)矿物的光率体	(14)
§ 1-3 光性方位	(21)
一、中级晶族矿物的光性方位	(21)
二、低级晶族矿物的光性方位	(21)
§ 1-4 色散	(23)
一、折射率色散	(23)
二、双折射率色散	(23)
三、光率体色散	(25)
第二章 透明造岩矿物及宝石晶体光学鉴定常用仪器	(27)
§ 2-1 偏光显微镜	(27)
一、偏光显微镜的构造	(27)
二、偏光显微镜的光路系统	(31)
三、偏光显微镜的调节与校正	(32)
四、偏光显微镜使用和保养守则	(36)
五、岩石薄片磨制简介	(36)
§ 2-2 偏光仪	(37)
§ 2-3 二色镜	(38)
第三章 透明造岩矿物及宝石在单偏光镜下的晶体光学性质	(39)
§ 3-1 单偏光镜的装置及其特点	(39)
§ 3-2 矿物的边缘和贝克线	(40)
一、边缘、贝克线及其成因	(40)
二、贝克线的移动规律和观察注意事项	(41)

三、洛多奇尼科夫色散效应·····	(41)
§ 3-3 矿物的形态·····	(43)
一、矿物的切面形态·····	(43)
二、矿物的单体形态和集合体形态·····	(45)
§ 3-4 糙面、突起和闪突起·····	(46)
一、糙面、糙面的成因及影响糙面的因素·····	(46)
二、突起及突起等级·····	(47)
三、闪突起及其能见度·····	(48)
§ 3-5 解理和解理夹角的测定·····	(50)
一、解理纹及其能见度·····	(50)
二、解理的等级及其特征·····	(52)
三、解理夹角的测定·····	(52)
§ 3-6 颜色、多色性和吸收性·····	(53)
一、矿物的颜色及其成因·····	(53)
二、非均质体矿物的多色性、吸收性·····	(54)
三、多色性、吸收性的表征·····	(55)
第四章 透明造岩矿物及宝石在正交偏光镜下的晶体光学性质 ·····	(58)
§ 4-1 正交偏光镜的装置及特点·····	(58)
§ 4-2 正交偏光镜下矿片的消光现象和消光位·····	(58)
§ 4-3 正交偏光镜下矿片的干涉现象·····	(60)
一、光波的相干性·····	(60)
二、正交偏光镜下通过矿片的光波产生干涉现象的条件·····	(60)
三、正交偏光镜下矿片的干涉现象·····	(60)
§ 4-4 干涉色及正常干涉色级序·····	(61)
一、单色光的干涉·····	(61)
二、白光的干涉及干涉色·····	(62)
三、正常干涉色的色序和级序·····	(62)
四、干涉色色谱表·····	(64)
五、异常干涉色及其观察要点·····	(65)
§ 4-5 补色法则和补色器·····	(66)
一、补色法则·····	(66)
二、几种常用的补色器·····	(67)
三、专用补色器·····	(68)
§ 4-6 非均质体斜交 OA 切面光率体椭圆半径方位和名称的测定·····	(69)
§ 4-7 矿物最高干涉色和最大双折射率的测定·····	(70)
§ 4-8 矿物多色性公式和吸收性公式的测定·····	(73)
§ 4-9 矿物的消光类型及消光角的测定·····	(75)
一、消光类型·····	(75)
二、消光角及消光角公式的测定·····	(77)
§ 4-10 矿物的延性及延性符号的测定·····	(78)

§ 4-11 矿物双晶的观察	(80)
§ 4-12 平行偏光镜下晶体光学性质	(81)
第五章 透明造岩矿物及宝石在锥偏光镜下的晶体光学性质	(84)
§ 5-1 锥偏光镜的装置特点	(84)
§ 5-2 一轴晶干涉图的特征、成因及其应用	(85)
一、垂直 OA 切面的干涉图	(85)
二、平行 OA 切面的干涉图	(89)
三、斜交 OA 切面的干涉图	(91)
§ 5-3 二轴晶干涉图的特征、成因及其应用	(93)
一、垂直 Bxa 切面的干涉图	(93)
二、垂直 OA 切面的干涉图	(97)
三、平行 OAP 切面的干涉图	(100)
四、垂直 Bxo 切面的干涉图	(101)
五、平行一个主轴切面的干涉图	(103)
六、斜交主轴切面的干涉图	(104)
§ 5-4 干涉图色散观察	(104)
一、斜方晶系矿物的干涉图色散	(105)
二、单斜晶系矿物的干涉图色散	(105)
三、三斜晶系矿物的干涉图色散	(108)
第六章 透明造岩矿物及宝石的晶体光学系统鉴定	(109)
§ 6-1 不同光路系统偏光显微镜下透明矿物晶体光学系统鉴定的内容	(109)
§ 6-2 定向切面的用途及其出现的概率	(110)
一、定向切面的种类及其用途	(110)
二、定向切面出现的概率	(111)
§ 6-3 矿物晶体光学系统鉴定的程序	(112)
一、均质体矿物的鉴定	(113)
二、非均质体矿物的鉴定程序	(113)
三、不透明矿物的鉴定	(114)
§ 6-4 矿物光学性质的描述内容和格式	(114)
第七章 透明造岩矿物及宝石的油浸法研究	(115)
§ 7-1 浸油	(115)
一、浸油的种类及对浸油的要求	(115)
二、成套浸油的配制	(116)
§ 7-2 折射仪	(117)
一、阿贝折射仪	(117)
二、吉里折射仪	(120)
§ 7-3 比较矿物和浸油折射率相对大小的常用方法	(122)
一、直照法	(122)
二、斜照法	(123)
三、环形屏蔽法及其应用	(125)

§ 7-4 碎屑油浸法测定矿物折射率的程序	(128)
§ 7-5 非均质体矿物主折射率的测定方法	(131)
一、统计法	(131)
二、定向切面法	(132)
三、旋转针台法	(132)
第八章 宝玉石晶体光学鉴定的其他方法	(137)
§ 8-1 宝玉石薄片晶体光学鉴定的重点	(137)
§ 8-2 宝玉石碎屑油浸片的偏光显微镜法晶体光学鉴定	(138)
§ 8-3 宝玉石制品的偏光显微镜法晶体光学鉴定	(139)
§ 8-4 宝玉石制品的偏光仪法晶体光学鉴定	(139)
§ 8-5 宝玉石制品的二色镜法晶体光学鉴定	(141)
§ 8-6 宝玉石制品的折射仪法晶体光学鉴定	(141)
第九章 显微镜下矿片厚度、矿物粒度与含量的测定	(146)
§ 9-1 矿片厚度的测定	(146)
§ 9-2 矿物粒度的测定	(147)
§ 9-3 矿物含量的测定	(149)
复习思考题	(153)
主要参考文献	(158)
干涉色色谱表	(159)

第一章 晶体光学基础原理

§ 1-1 光学基础知识

一、光的波动性

关于光的学说,有微粒说、波动说、电磁说、量子说。19世纪晚期,麦克斯韦和赫兹证明了光的电磁性,认为光是一种电磁波,即光波。

电磁波是电磁振动(变化的电磁场)在空间的传播过程。电磁振动方向与其传播方向互相垂直,即电磁波是一种横波,因而光波也是一种横波。光波是横波这一基本概念很重要,因为晶体光学中许多光学现象都要用光波是横波这一特征加以解释。晶体光学鉴定中使用的主要仪器是偏光显微镜,偏光显微镜中见到的光是平行镜筒中轴方向传播或垂直物台平面入射的,其振动方向是平行物台平面的。显微镜下观察到的光学性质,是振动方向平行物台平面的光波通过矿物时所显示的性质,即看到的是平行物台平面的矿物切面的光学性质。

光波既然是一种横波,它应具有波动性,能解释反射、折射、干涉、偏振、色散、衍射等光学现象。光波与机械横波(水波、地震横波等)不同,它不仅能在固体(如透明矿物、玻璃、树胶)中传播,也能在液体(浸油、水等)中传播,还能在空气和真空中传播。

晶体光学中还经常用到光学中的重要概念——光线。光线是光波传播的路径,代表波阵面在空间的传播方向,因此用光线来表示光波的传播方向。严格地讲,光波传播是一种正弦曲线运动,而且遇到障碍时要发生衍射,所以光线是光波传播的近似描述。

二、可见光、单色光与白光、自然光与偏光

1. 可见光

可见光即通常所说的光或光波,它是电磁波谱中的一个成员,是正常人眼能见到(感觉到)的一段电磁波,其频率为 $3.9 \times 10^{14} \text{ Hz} \sim 7.7 \times 10^{14} \text{ Hz}$,其真空或空气中的波长为 $770 \text{ nm} \sim 390 \text{ nm}$ (图 1-1-1)。可见光可以是单色光,也可以是白光;可以是自然光,也可以是偏光。

2. 单色光与白光

频率(f)是光波的重要特征值。某一频率的光波在不同介质中传播时,其频率是固定不变的,但在不同介质中的传播速度(v)不同,因此其相应的波长(λ)是随传播的介质不同而改变的。决定光的颜色的是光波的频率,而不是波长。如一光波,其 $f=4 \times 10^{14} \text{ Hz}$,为红色,按公式 $v=f \cdot \lambda$ 计算,其空气中的波长 $\lambda=750 \text{ nm}$;进入水中后,其频率不变,但由于传播速度变小,波长变短为 560 nm ,虽然波长变短,但水下人见到该光的颜色仍然为红色,而不是真空中或空气中 $\lambda=560 \text{ nm}$ 的光所表现的黄绿色。晶体光学中所述的光波波长是指真空或空气中的波长。

单色光 是频率为某一定值或在某一窄小范围的光,或波长为某一定值或在某一窄小范围的光。如钠光灯产生的黄光,其 $\lambda=589.3 \text{ nm}$ 。波长与 589.3 nm 接近的一段光波($\lambda=570 \text{ nm}$ 。

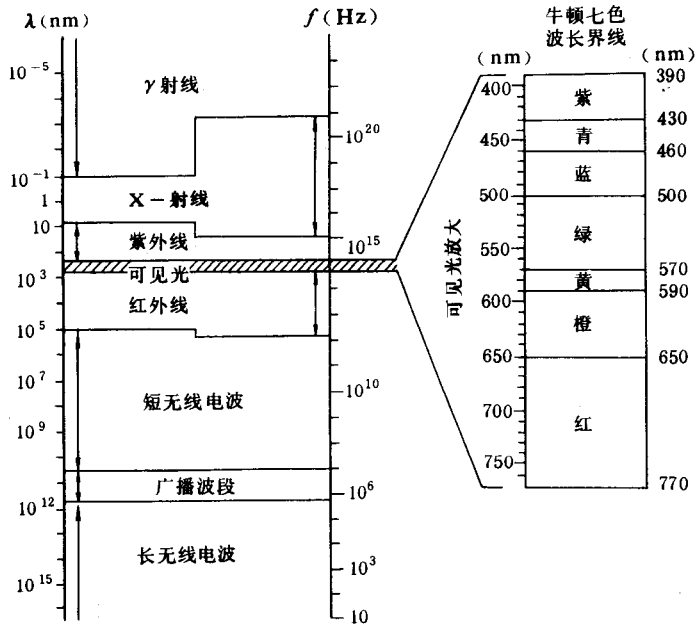


图 1-1-1 可见光在电磁波谱中的位置

(据李德惠,1993,略有修改)

~590nm)也呈黄色。按频率从小到大,或按波长从大到小可见光可分为红、橙、黄、绿、蓝、青、紫七种基本单色光,各单色光在真空中的波长范围如图 1-1-1 所示。单色光可以是自然光,也可以是偏光。

人眼对各单色光的灵敏度是不均等的,是呈正态分布的,人眼最敏感的光是波长为 550nm~560nm 的黄绿色光,较敏感的光是黄光、绿光、橙黄光、蓝绿光、橙光(图 1-1-2)。由于

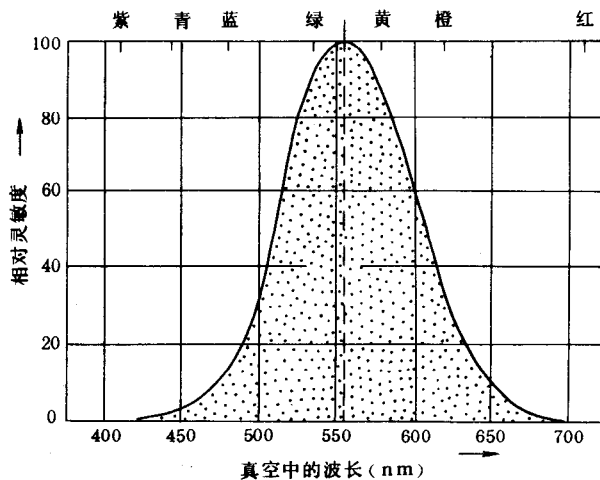


图 1-1-2 人眼对不同波长光波的相对灵敏度

(据 Wahlstrom,1979;转引自陈芸菁,1987,修改)

人眼较敏感的黄光可用钠光灯较容易获取,测定矿物折射率时,常以黄光作单色光源。晶体光学和光性矿物学中所列折射率即是矿物对黄光的折射率。

白光 是由七种基本单色光混合的光,如常见的日光、白炽灯光都为白光。白光的平均波长为 580nm,与黄光波长相近。因此,用白光光源测定的折射率可视作用黄光光源测定的折射率。白光可以是自然光,也可以是偏光。

3. 自然光与偏光

自然光 所有实际光源如太阳、燃烧的蜡烛、电灯等所发射出的光,一般都是自然光。自然光的基本特征是在垂直光波传播方向的平面内各个方向上都有等振幅的光振动(图 1-1-3A)。也就是说,光波在垂直其传播方向的平面内作任意方向的振动,振动面均匀对称,振幅相等。自然光可以是白光,也可以是单色光。

偏振光 自然光穿过某些介质,经过反射、折射、双折射、选择吸收等作用,可以改变其振动状态,变成在垂直光波传播方向的某一个固定方向上振动的光波,具有这种振动特征的光波称为平面偏振光,简称偏振光或偏光。偏光的振动方向与传播方向所构成的平面称为振动面(图 1-1-3B)。偏光可以是白光,也可以是单色光。

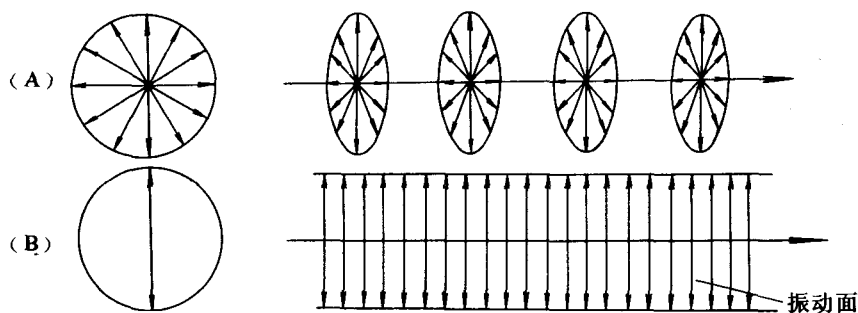


图 1-1-3 自然光(A)和偏光(B)振动特点示意图

(据李德惠,1993)

使自然光转变为偏光的作用称为偏光化作用(polarization)。晶体光学研究中主要应用偏光,使用的基本仪器是偏光显微镜。偏光显微镜中装置有使自然光转变为偏光的偏光镜。偏光镜,有根据介质的双折射作用制成的,如尼科尔棱镜,也有利用介质的选择吸收作用制成的,如偏光胶板或偏光片。自然光通过下偏光镜后就转变为振动方向固定的偏光。偏光显微镜中下偏光镜产生的偏光振动方向大多数固定为左右(或东西)方向,与目镜十字丝的横丝方向一致,并以符号“PP”表示。

三、光的折射和折射率

光波在同一种均匀介质中一般沿直线方向传播。当光波从一种介质传播到另一种介质时,在两种介质的分界面上会发生程度不同的反射和折射现象,改变了光波的传播方向。反射光波按反射定律反射回原介质;折射光波进入另一种介质并遵循折射定律。透明造岩矿物和宝石的晶体光学性质研究大多数涉及光波的折射作用,因此有必要简述折射光波所遵循的规律。

当光波从光疏介质进入光密介质时,折射光波传播方向向靠近界面法线偏折,即折射角小

于入射角。相反,当光波从光密介质进入光疏介质时,折射光波传播方向向远离界面法线偏折,即折射角大于入射角。入射角 i 的正弦与折射角 r 的正弦的比值,对于一定的介质是一个常数,以符号“ N ”表示这一常数,即 $\sin i/\sin r=N$,此即为折射定律。

用惠更斯波前传播原理可以证明折射定律。如图 1-1-4 所示,AB 代表光疏介质 1 和光密介质 2 的分界面(垂直图面),AB 的垂线 CD 称为界面法线。有一平行光束在介质 1 中传播并斜射向界面, R_1 和 R_2 是该光束中两条代表光线,到达界面后都折射进入介质 2。入射光线与法线的夹角 i 称入射角,折射光线与法线的夹角 r 称折射角。设 v_1 代表光波在介质 1 中的传播速度, v_2 代表光波在介质 2 中的传播速度。设在 t_1 瞬间,入射光束的波前到达 ON 面,按照惠更斯原理,波前 ON 面上的任一点都可以视为发射子波的独立的新光源。当光线 R_1 从 O 点折射入介质 2 时,光线 R_2 仍在介质 1 中传播。随后至 t_2 瞬间, R_2 到达界面上的 M 点,显然,距离 $MN=v_1(t_2-t_1)$,此时 R_1 在介质 2 中已传播了 OS 距离, $OS=v_2(t_2-t_1)$,即 R_1 从 O 点发出的子波已在介质 2 中形成一个以 OS 为半径的半圆波面。从 M 点向此半圆波面作一切线与波面相切于 S 点,MS 就是 t_2 瞬间折射光束的波前,OS 就是折射光束的传播方向。

从图 1-1-4 中不难看出:

$$\Delta ONM \text{ 中, } \angle NOM=i, \quad MN=OM\sin i \quad (1-1-1)$$

$$\Delta OSM \text{ 中, } \angle OMS=r, \quad OS=OM\sin r \quad (1-1-2)$$

将 $MN=v_1(t_2-t_1)$ 、 $OS=v_2(t_2-t_1)$ 代入上述二式,并用(1-1-2)式除(1-1-1)式可得:

$$\frac{v_1(t_2-t_1)}{v_2(t_2-t_1)} = \frac{\sin i}{\sin r} = N_{2,1}$$

$$\text{即} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r} = N_{2,1}$$

此式是折射定律的完整表达式。 $N_{2,1}$ 称为介质 2(折射介质)对介质 1(入射介质)的相对折射率。如果入射介质为真空(或空气), $N_{2,1}$ 即为折射介质的绝对折射率,简称折射率(refractive index)。光波在真空中的传播速度最大,达 $3 \times 10^8 \text{m/s}$,真空的折射率定为 1。光波在空气中的传播速度接近在真空中的传播速度,光波在真空中的传播速度与在空气中的传播速度之比为 1.000 29 : 1,二者几乎相等,因此把空气的折射率也近似地视为 1。光波在其他固态或液态介质中的传播速度总是小于在空气中的传播速度,这样其他介质相对空气而言都是光密介质,就是说其他介质的折射率总是大于 1 的。

从折射定律表达式可以看出,光波在介质中的传播速度与该介质的折射率成反比关系,即光波在某介质中的传播速度较快,该介质的折射率较小;相反,光波在某介质中传播速度较慢,该介质的折射率较大。设 N_1 、 N_2 分别为两种不同介质的折射率, v_1 、 v_2 为光波分别在这两种介质中的传播速度,则有 $N_2/N_1=v_1/v_2=\sin i_1/\sin i_2=N_{2,1}$ 。

每种介质的折射率大小取决于介质的性质和光波的波长。

介质的折射率大小由光波在其中的传播速度决定,而光波的传播速度则取决于介质的组成成分及其微观结构,即取决于介质的密度。例如,对于硅酸盐矿物晶体来说,由岛状结构的橄

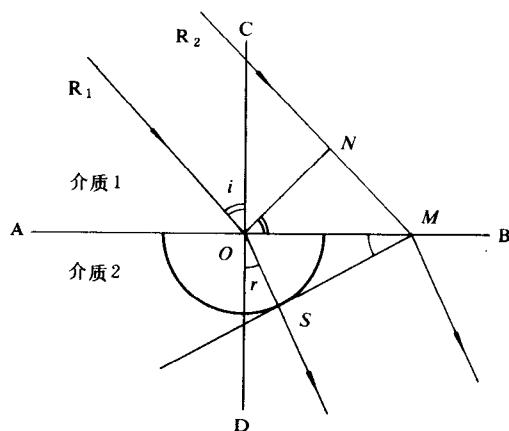


图 1-1-4 折射定律证明示意图
(据李德惠,1993,略有补充)

榄石→单链结构的辉石→双链结构的角闪石→层状结构的云母→架状结构的长石和石英，它们的折射率随晶体结构紧密程度逐渐降低而降低，且随着矿物化学组成中 Fe、Mg 减少和 Si、Al 增多而呈递减的趋势。因此，折射率是反映介质成分和内部结构特征的重要参数。在晶体光学常数中，折射率是透明造岩矿物和宝玉石矿物最基本的光学常数。

介质的折射率是随入射光波的波长不同而异的，折射率与入射光波的波长成反比关系，这种现象就是以后要讲的折射率色散。设白光以固定的入射角从入射介质进入折射介质，红光的波长较长，折射角较大，折射率较小，而紫光的波长较短，折射角较小，折射率较大(图 1-1-5)。因此，对同一种介质，红光的折射率总是小于紫光的折射率。一般所说的折射率，如无附加说明，都是指对黄光波长的折射率，也可以近似地看作为相当于白光平均波长的折射率。光性矿物学中所列折射率即此种折射率。

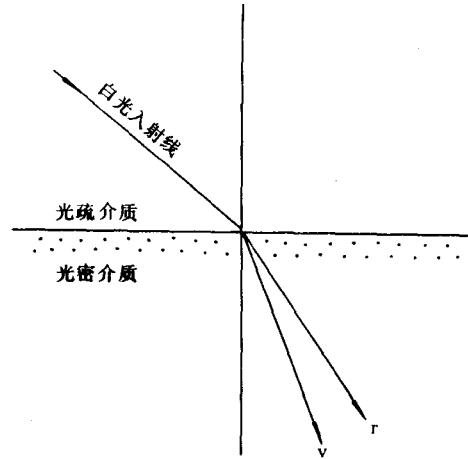


图 1-1-5 折射角与光波波长关系示意图
r. 红光折射线, v. 紫光折射线

四、光的全反射和全反射临界角

根据折射定律，光密介质的折射率总是大于光疏介质的折射率。当光波由光疏介质进入光密介质时，折射角总是小于入射角，折射线向靠近界面法线方向偏折，无论入射角多大，总是可以进入光密介质的。相反，当光波由光密介质进入光疏介质时，折射角总是大于入射角，折射线向远离界面法线的方向偏折；随着入射角逐渐增大，折射角也以更大的幅度逐渐增大，当折射角增至 90° 时，折射光波不再折入光疏介质，而是沿界面方向传播；再稍微增大入射角，入射光波将全部按反射定律反射回光密介质中，这种现象称为透明物质的全反射。使折射角 $r=90^\circ$ 的入射角称为全反射临界角。

图 1-1-6 表示由某一光密介质中的 O 点向不同方向发射出的 OA、OB、OC、OD、OE 等一系列光波，分别以不同角度向光疏介质传播到达界面 TU 时产生的折射和反射现象。OA 光波垂直界面，入射角 $i=0^\circ$ ，不发生折射，AA' 光波沿原方向直接进入光疏介质。从 OA→OB→OC→OD→OE 光波，随着入射角渐次增大，折射角也相应增大，折射光波的强度渐次减弱，反射光波的强度相应增强。至 OD 光波，入射角 $i_D=30^\circ$ ，此处折射角 $r=90^\circ$ ，没有光波折射进入光疏介质，全反射临界角为 30° ，当入射角 i 大于全反射临界角时，如图中的 OE 光波， $i=40^\circ$ ，其折射角 $r>90^\circ$ ，此处发生全反射，入射光全部反射回入射介质中，如图中 EE' 光波。全反射发生处可观察到反射光波的强

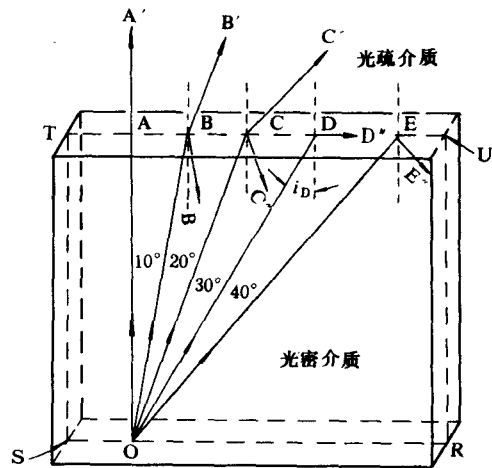


图 1-1-6 全反射与全反射临界角示意图
(据陈芸菁, 1987, 略有修改)

度随着折射光波的出现而突变性的增强。以 N_1 代表光密介质的折射率, N_2 代表光疏介质的折射率, 以 φ 代表全反射临界角, 根据折射定律可得下式:

$$\frac{\sin\varphi}{\sin 90^\circ} = \frac{N_2}{N_1}$$

因为 $\sin 90^\circ = 1$, 所以 $N_2 = N_1 \sin\varphi$ 。这样, 如果折射率较大的介质的 N_1 值已知, 则可根据全反射临界角计算出较小折射率介质的 N_2 值。测定透明物质折射率的阿贝折射仪就是根据这种全反射原理设计制造的(本书第七章中详细介绍)。

五、光性均质体和光性非均质体

自然界中的物质根据其光学性质特征, 可划分为光性均质体(optical isotropic substance)和光性非均质体(optical anisotropic substance)两大类, 光波在这两类物质中的传播特征各不相同。

(一)光性均质体

光性均质体, 又简称均质体, 包括一切非晶质的物质(如火山玻璃、树胶、浸油等等)和等轴晶系的矿物(如萤石、石榴子石、金刚石等等)。均质体都是各向同性的介质, 其光学性质在各个方向上是相同的, 光波在均质体中传播无论沿什么方向振动, 其传播速度和相应的折射率都是固定不变的, 因而在三维空间任何方向折射率都相同, 例如萤石只有一个固定的折射率 1.434, 金刚石也只有一个固定的折射率 2.434。光波进入均质体中, 不发生双折射, 也不改变入射光波的振动特点和振动方向。入射光若为各方向振动的自然光, 折射后仍为自然光; 入射光若为固定方向振动的偏光, 折射后仍为偏光, 而且其振动方向也不改变。

(二)光性非均质体

光性非均质体, 又简称非均质体, 包括除等轴晶系以外的其余六个晶系的所有矿物, 如石英、方解石、锆石、刚玉、绿柱石、橄榄石、角闪石、云母、长石等等。绝大多数透明造岩矿物和宝石矿物都是光性非均质体, 因此光性非均质体是晶体光学研究的重点。

光性非均质体都是各向异性的介质, 其光学性质随方向不同而异。光波在光性非均质体中传播具有以下几个特征。

(1)光波在非均质体中传播, 其传播速度一般都随光波振动方向不同而发生变化, 因而其相应的折射率也随振动方向不同而改变, 即非均质体具有许多个折射率。每一种具体的介质, 其各个方向的折射率有一个固定的变化范围, 例如石英的折射率范围是 1.544~1.553, 方解石的折射率范围是 1.486~1.658。

(2)光波进入非均质体时, 除特殊方向而外, 都要发生双折射(double refraction)和偏光化, 分解为两种偏光。这两种偏光的振动方向互相垂直, 传播速度各不相同, 相应的折射率也不相等, 传播速度较快的偏光其折射率较小, 传播速度较慢的偏光其折射率较大。这两种偏光的折射率的差值称为双折射率(birefringence), 简称双折率(一些较老的文献中也称重折率)。

(3)非均质体中都有一个或两个特殊方向, 当光波沿这种特殊方向传播时不发生双折射, 也不改变入射光波的振动特点和振动方向, 这种特殊方向称为光轴(optic axis), 以符号“OA”表示。中级晶族(六方晶系、四方晶系、三方晶系)的晶体中只有一个这种特殊方向, 且与结晶轴 c 轴方向一致, 故称为一轴晶(uniaxial crystal); 低级晶族(斜方晶系、单斜晶系、三斜晶系)的晶体中有两个这种特殊方向, 故称为二轴晶(biaxial crystal)。通常所说的矿物的轴性, 就是指该矿物属于一轴晶或是二轴晶。

自然界中的一切物质,其光学性质与结晶物质晶系的关系,如表 1-1-1 所列。

表 1-1-1 光性均质体与光性非均质体

	介质类型	晶系	实例
光性均质体	非晶质物质		火山玻璃、树胶、浸油
	高级晶族矿物	等轴晶系	萤石、石榴石、金刚石
光性非均质体	中级晶族矿物 (一轴晶)	六方晶系	磷灰石、绿柱石、霞石
		四方晶系	锆石、锡石、金红石
		三方晶系	水晶、方解石、刚玉
	低级晶族矿物 (二轴晶)	斜方晶系	橄榄石、黄玉、重晶石
		单斜晶系	普通辉石、黑云母、绿帘石
		三斜晶系	斜长石、硅灰石、蓝晶石

六、双折射和双折射率

造岩矿物和宝玉石多数都是光性非均质体,双折射是所有非均质体具有的共同特征,而非均质体的许多光学性质都与双折射有关。这里以冰洲石为例说明双折射现象。

当光波入射冰洲石时,发生双折射和偏光化,分解形成两种振动方向互相垂直且传播速度不等的偏光(图 1-1-7)。其中一种偏光无论入射光方向如何改变,其振动方向总是垂直于冰洲石的 c 轴,相应的折射率也始终保持不变,这种偏光称为常光(ordinary ray),以符号“ o ”表示,亦称 o 光,与常光相应的折射率以符号“ N_o ”表示。另一种偏光的振动方向平行于冰洲石 c 轴与光波传播方向所构成的平面(这一平面称为主截面),且同时与光波传播方向和 o 光振动方向垂直,其传播速度和相应的折射率随着入射光波方向的改变亦即随着振动方向的改变而变化,这种偏光称为非常光(extraordinary ray),以符号“ e ”表示,亦称 e 光。每种晶体常光的折射率 N_o 是固定不变的,冰洲石的 $N_o=1.658$;非常光的折射率则随着光波的振动方向改变而变化,其变化范围由 N_o 至另一个极端值之间,非常光波沿 c 轴方向振动时的折射率就是这一极端值(矿物折射率的最大值或最小值),以符号“ N_e ”表示。冰洲石的 $N_e=1.486$,是该矿

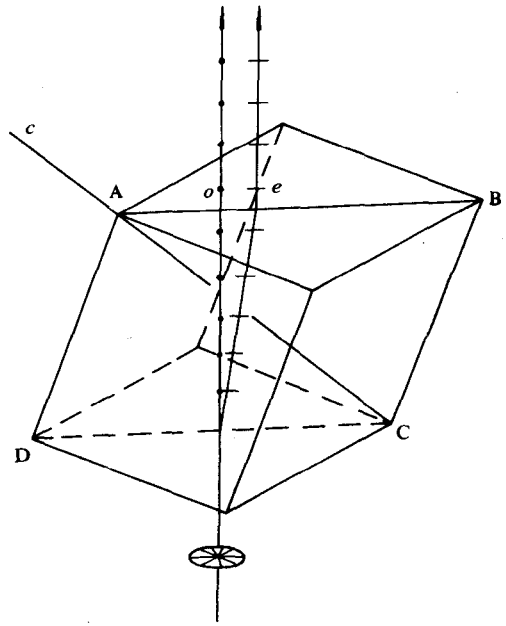


图 1-1-7 冰洲石的双折射特征

(据李德惠,1993,略有修改)

ABCD 面为主截面

物折射率的最小值。非常光波在主截面内其他方向振动其相应的折射率介于 N_o 和 N_e 之间, 并随光波振动方向的改变而变化, 以符号“ N_e' ”表示。对于冰洲石, $N_o > N_e' > N_e$ 。

双折射和偏光化后分解形成的这两种振动方向互相垂直且传播速度不等因而折射率也不相同的偏光的折射率的差值, 称为双折射率。当入射光垂直冰洲石的 c 轴传播, 双折射和偏光化分解形成的常光振动方向垂直 c 轴, 相应的折射率为 N_o , 非常光振动方向平行 c 轴, 相应的折射率为 N_e , 此时的双折射率为最大值 $N_o - N_e$, 称为最大双折射率。最大双折射率是矿物的鉴定常数。冰洲石的最大双折射率为 $N_o - N_e = 1.658 - 1.486 = 0.172$ 。

冰洲石是一轴晶矿物。所有一轴晶矿物, 光波入射其中发生双折射的情况与冰洲石类同, 不同点仅在于 N_o 和 N_e 的具体数值因矿物而异, 例如石英(水晶)的 $N_e = 1.553$, $N_o = 1.544$, N_e 是石英折射率的最大值, 最大双折射率为 $N_e - N_o = 1.553 - 1.544 = 0.009$ 。

二轴晶矿物双折射的情况比一轴晶更为复杂, 每一入射光双折射和偏光化后分解形成的两种振动方向互相垂直且传播速度不同的偏光都是非常光, 其传播速度和相应的折射率都随入射光方向的变化亦即随光波振动方向的变化而改变。每种二轴晶矿物也都有一个最大双折射率, 当光波垂直于两个光轴所构成的平面入射时, 双折射和偏光化形成的两种偏光, 相应的折射率一个最大, 另一个最小, 二者的差值就是最大双折射率。这种最大双折射率也是二轴晶矿物的鉴定常数, 例如透辉石的最大双折射率为 $0.029 \sim 0.031$ 。

§ 1-2 光率体

光波在非均质体中传播, 其传播速度和相应的折射率大小取决于光波的振动方向, 因为根据电磁波理论, 组成物质的原子或离子受到电磁波扰动极化成偶极子, 可见光波在物质中传播主要是通过偶极子的感应振动进行的。在晶体中, 使振动偶极子回复到平衡位置的回复力强度控制光波的传播速度, 即光波在晶体中的传播速度随振动偶极子回复力的增强而增大。偶极子的振动及其回复力横切光波传播方向, 即平行光波振动方向。因此光波在非均质体中的传播速度和相应的折射率随光波在晶体中的振动方向的改变而不同(李德惠, 1993)。

实验也证明, 透明造岩矿物和宝玉石矿物在偏光显微镜下所显示的许多光学性质, 都与光波在晶体中的振动方向和相应的折射率有密切关系。为了反映在晶体中传播的光波振动方向与相应的折射率之间的关系, 需要建立一个立体模型, 这种模型就是光率体。

光率体 又称为光性指示体(indicatrix), 是表示在晶体中传播的光波振动方向与晶体对该光波的折射率(简称相应的折射率)之间关系的立体几何图形。光率体的构成方法: 设想自晶体中心起, 沿光波在晶体中传播的各个振动方向, 按一定比例截取线段代表相应的折射率, 再把各线段的端点连续地连结起来, 就构成了光率体。光波在晶体中不同振动方向的折射率, 可以用晶体不同方向的切片在折射仪上直接测出, 或用油浸法间接测出。

光率体理论是晶体光学原理和方法的重要理论基础之一。在本书后面几章中将要介绍的透明造岩矿物和宝石矿物在单偏光镜、正交偏光镜和锥偏光镜下的许多重要光学性质, 都要用光率体理论加以说明。因此, 应透彻理解并能熟练地应用光率体理论。

光率体总的形态是球状体, 由于各类矿物的光学性质的差异, 因而构成的光率体的具体形态也有所不同。

一、高级晶族矿物和其他均质体的光率体

高级晶族矿物和一切非晶质体都是各向同性的光性均质体。光波在均质体中传播时,无论沿任何方向振动,其传播速度不变,因而折射率也固定不变。这样,在光波各个振动方向上按一定比例截取的代表折射率的线段也都是等长的,把这些等长的线段的端点连续地连接起来的立体空间图形必为一圆球体(图 1-2-1)。通过圆球体中心的任何方向的切面都是大小相等的圆切面,圆切面的半径也就是圆球体的半径,其长度代表均质体的折射率。所有的高级晶族(均质体)矿物的光率体都是圆球体,不同种属的均质体矿物彼此的光率体差异只是圆球体的大小不同而已,即圆球体半径所代表的折射率大小不同而已。例如萤石 $N=1.434$,其光率体是以 1.434 为半径的圆球体;镁铝榴石 $N=1.739$,其光率体是以 1.739 为半径的圆球体。

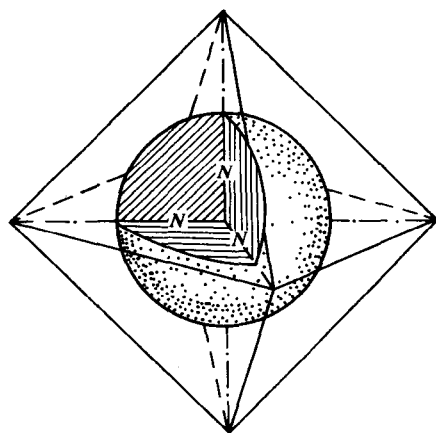


图 1-2-1 高级晶族(均质体)的光率体
(据李德惠,1993)

二、中级晶族(一轴晶)矿物的光率体

(一)一轴晶光率体形态

一轴晶光率体形态是旋转椭球体。一轴晶水平结晶轴的轴单位相等,这种晶体结构特点决定了在垂直 c 轴的水平方向上光学性质是均一的。实验证明:中级晶族矿物中,光波振动方向与 c 轴垂直即在水平方向振动,无论其振动方向如何改变,其折射率都是一个固定不变的常数,这就是常光的折射率 N_o ;光波振动方向与 c 轴平行,其相应的折射率与 N_o 相差最大,这就是非常光折射率的极端值 N_e ;光波的振动方向与 c 轴斜交,其相应的折射率介于 N_o 与 N_e 之间,以 N_e' 表示。 N_e' 随光波振动方向与 c 轴的夹角大小而变化,光波振动方向与 c 轴夹角较大,则 N_e' 比较接近 N_o ,相反,光波振动方向与 c 轴夹角较小,则 N_e' 比较接近 N_e 。由此不难看出,一轴晶的光率体是一个以 c 轴为旋转轴的旋转椭球体。下面以石英为例,具体说明这种旋转椭球体的构成。

石英属三方晶系。设光波 1 平行 c 轴(光轴)方向进入晶体(图 1-2-2A),不发生双折射。光波在垂直 c 轴的平面内振动,无论振动方向如何改变,测得其折射率都恒等于 1.544,此即常光的折射率,即 $N_o=1.544$ 。因此在石英垂直 c 轴的切面上自中心起取一定的线段长度代表 $N_o=1.544$,各方向的线段长度必相同,把这些线段的端点连接起来,就得到一个圆(图 1-2-2A),圆的半径名称标为 N_o ,意思是半径的方向代表 o 光的振动方向,半径的长度代表折射率 N_o 的大小。

设光波 2 垂直 c 轴(光轴)方向进入晶体,会发生双折射,分解形成两种偏光。一种偏光振动方向垂直 c 轴,测得其折射率仍为 1.544;另一种偏光振动方向平行 c 轴,测得其折射率为 1.553,此即非常光折射率的极端值(对于石英为最大值),即 $N_e=1.553$ 。因此在与光波 2 垂直的平面上,即在平行 c 轴的切面上,自中心起在垂直 c 轴方向截取代表 $N_o=1.544$ 长度的线段,沿 c 轴方向以相同比例截取代表 $N_e=1.553$ 的线段,以两线段为半径可以作一个椭圆。椭