



汪相 编著

# 晶体光学

## Optical Crystallography

南京大学出版社





0734  
W215

汪相 编著

# 晶体光学

Optical  
Crystallography



南京大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

晶体光学 / 汪相编著. —南京:南京大学出版社,  
2003.5  
ISBN 7—305—04088—6

I. 晶... II. 汪... III. 晶体光学 IV. 0734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 028868 号

书 名 晶体光学  
编 著 者 汪 相  
出版发行 南京大学出版社  
社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093  
电 话 025—3596923 025—3592317 传真 025—3686347  
网 址 <http://press.nju.edu.cn>  
电子邮件 [nupress1@public1.ptt.js.cn](mailto:nupress1@public1.ptt.js.cn)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 南京京新印刷厂  
开 本 787×960 1/16 印张 8.25 字数 138 千  
版 次 2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷  
印 数 1—1000  
ISBN 7—305—04088—6/O·287  
定 价 16.00 元

---

\* 版权所有,侵权必究

\* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购  
图书销售部门联系调换

# 前 言

晶体光学是研究透射光下晶体的光学性质的一门科学。它不仅是岩石学研究必不可少的基础知识,而且已广泛应用于建材、化工、医药等领域中各种人工合成材料(如陶瓷、玻璃、铸石)的光性特征研究。

晶体光学有着近百年的发展历史,在众多物理学家、矿物学家和岩石学家的不懈探索之下,它在理论及其应用方面已趋于完整和成熟。然而,随着科学技术的进一步更新和提高,晶体光学中的部分内容及其表述形式仍有待于修正和补充。在南京大学地球科学系编著的《晶体光学》基础上,笔者广泛吸收国内外同类教材的长处,并结合多年来的教学实践经验,重新整理和编著了一本更加简明、规范的《晶体光学》,以适应现代教学和科研的严格要求。

在本书中,笔者修正了旧版教材中少数含义不明确的术语,重新限定了一些术语的适用范围;同时加强了重点、疑难内容的讲解,并尽可能通过图解的方式加以阐述。借助于计算机绘图软件,本书的插图显得更加精确和美观。书末以附录形式列出了晶体光学词汇的中英对照及其索引,将有助于读者参考和查阅。

在本书的编著过程中,笔者得到南京大学地球科学系岩石教研室周新民教授、赵连泽教授、于津海副教授等诸位教师的热忱关注和精心指导;初稿承北京大学地质学系魏春景教授和中国地质大学(武汉)地球科学学院李昌年教授审阅,提出了大量宝贵的修改意见;同时,南京大学出版社和教务处为本书的顺利出版给予了大力支持,谨此一并致以衷心的感谢。由于笔者水平有限,书中遗误和不妥之处在所难免,祈望读者和专家批评指正。

汪 相

# 目 录

## 前言

<b>第一章 基本概念</b> .....	( 1 )
§ 1.1 光的性质与传播 .....	( 1 )
§ 1.2 自然光和偏光 .....	( 3 )
§ 1.3 光的折射与全反射 .....	( 4 )
§ 1.4 折射率与折射率仪 .....	( 5 )
§ 1.5 光的双折射 .....	( 6 )
§ 1.6 一轴晶和二轴晶 .....	( 9 )
习题一 .....	(10)
<b>第二章 光率体</b> .....	(12)
§ 2.1 光率体 .....	(12)
§ 2.2 一轴晶光率体 .....	(12)
§ 2.3 二轴晶光率体 .....	(18)
§ 2.4 光率体的主要参数 .....	(24)
§ 2.5 光性方位 .....	(26)
习题二 .....	(28)
<b>第三章 偏光显微镜</b> .....	(30)
§ 3.1 偏光显微镜的构造 .....	(30)
§ 3.2 偏光显微镜的光学系统 .....	(33)
§ 3.3 偏光显微镜的调节 .....	(34)
§ 3.4 薄片的制作 .....	(37)
习题三 .....	(37)
<b>第四章 单偏光系统下晶体的光学性质</b> .....	(39)
§ 4.1 形态 .....	(39)
§ 4.2 解理 .....	(41)
§ 4.3 选择性吸收 .....	(45)
§ 4.4 界面 .....	(50)

## 目 录

---

习题四.....	( 57 )
<b>第五章 正交偏光系统下晶体的光学性质.....</b>	<b>( 59 )</b>
§ 5.1 消光 .....	( 59 )
§ 5.2 干涉原理 .....	( 61 )
§ 5.3 干涉色 .....	( 66 )
§ 5.4 干涉色级别的确定 .....	( 72 )
§ 5.5 补色原理与补色器 .....	( 74 )
§ 5.6 消光类型与消光角 .....	( 78 )
§ 5.7 延性 .....	( 82 )
§ 5.8 双晶 .....	( 84 )
习题五.....	( 86 )
<b>第六章 聚敛偏光系统下晶体的光学性质.....</b>	<b>( 88 )</b>
§ 6.1 聚敛偏光系统 .....	( 88 )
§ 6.2 一轴晶矿物的干涉图 .....	( 90 )
§ 6.3 二轴晶矿物的干涉图 .....	( 99 )
§ 6.4 光率体色散 .....	( 113 )
习题六.....	( 119 )
<b>参考文献.....</b>	<b>( 120 )</b>
<b>《晶体光学》词汇的中英对照及其索引.....</b>	<b>( 121 )</b>
<b>干涉色色谱表</b>	



# 第一章 基本概念

## § 1.1 光的性质与传播

现代物理学揭示,光是一种由光子组成的电磁波,故为横波,即它的振动方向垂直于传播方向,这两个垂直方向上的运动耦合为一种正弦曲线式的传播轨迹(图 1-1)。

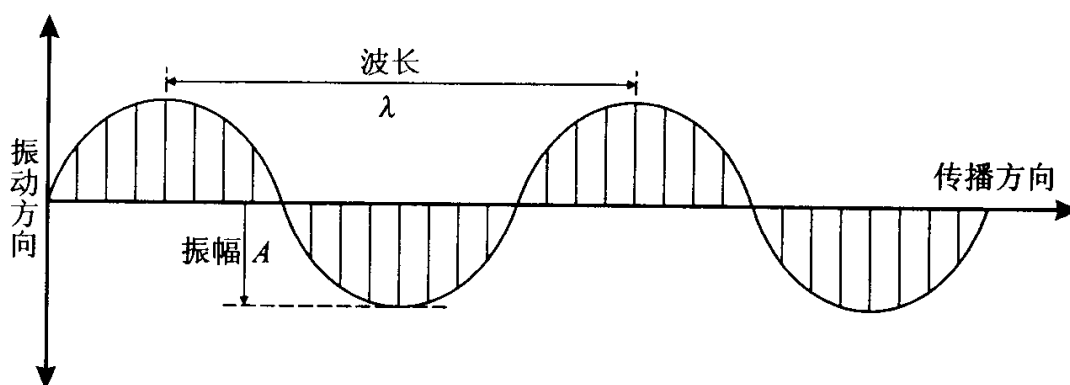


图 1-1 光波的正弦曲线运动方式

在图 1-1 中,我们可以了解一些关于光波的基本概念:

(1) 波长:同一束光波中,两个相邻的同位相点(如相邻的波峰)之间的距离称为波长(以  $\lambda$  表示)。同一束光波在不同的介质中传播时,其波长随介质的物理性质不同而改变。

(2) 频率:波源在一秒钟内振动的次数称为频率(以  $f$  表示)。波源不变,则频率不变,即同一束光波在不同的介质中传播时,其频率不受介质的物理性质影响。

(3) 周期:波源完成一次振动所需要的时间称为周期(以  $T$  表示),故  $f=1/T$ 。

(4) 波速:在一秒钟内,质点在传播方向上的位移距离称为波速(以  $V$  表示),故  $V=f\lambda$ ,或  $V=\lambda/T$ 。显然,同一束光波在不同的介质中传播时,由于波长的改变其波速也相应地发生变化。

(5) 振幅:质点在振动方向上距平衡位置的最大位移距离称为振幅(以

## 第一章 基本概念

A 表示)。它的大小由光强(以  $I$  表示)决定,两者的关系为:  $I = kA^2$ ,  $k$  为传播介质系数。

(6) 位相:质点离开平衡位置(为正弦曲线的中轴线)后所经历的时间称为位相。它可以通过周期的分数来表示,如  $T/n(n > 1)$ 。

(7) 位相差:如果有两束波长、振幅、传播方向相同的光波不同时到达平衡位置,那么两者相邻的同位相点(如相邻的波峰)之间的距离称为位相差。它可以通过波长的分数来表示,如  $\lambda/n(n > 1)$ 。

对于普通光学而言,“光”被定义为眼睛可以直接看见的一部分电磁波的辐射,因此这一部分电磁波称为可见光。在真空介质中,可见光具有一定的波长范围,大致为  $390 \text{ nm} \sim 770 \text{ nm}$ ,仅占整个电磁波谱的一小区段(图 1-2)。可见光谱中不同频率的光在我们的视网膜上的反应是不同的,表现为各种各样的颜色,因此把一定频率范围内呈现同种颜色的光称为单色光。通常所见的“白光”,是由各种单色光按一定比例组成的混合光。在真空介质中,频率不同的各种单色光具有不同的波长范围,依照波长由长变短的次序,分别为红、橙、黄、绿、蓝、青、紫七种颜色(图 1-2)。

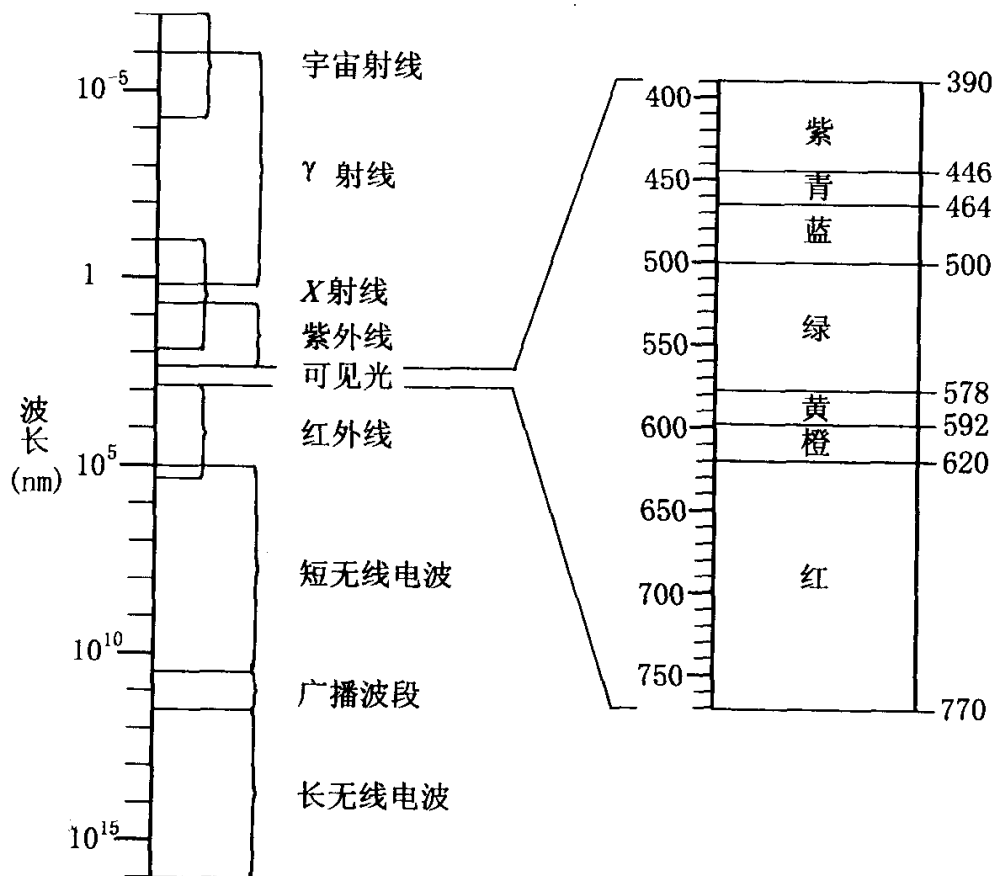


图 1-2 电磁波谱与可见光谱的波长范围



光的波长单位通常用纳米(nm)表示。纳米与其他长度单位的换算关系为:1 纳米(nm) $=10^{-3}$ 微米( $\mu\text{m}$ ) $=10^{-6}$ 毫米(mm)。在传统的教科书中,也有使用“毫微米”或“埃”这些单位的,它们的换算关系为:1 纳米(nm) $=1$ 毫微米( $\text{m}\mu$ ) $=10$ 埃( $\text{\AA}$ )。

## § 1.2 自然光和偏光

根据光波振动方向的差别,可以将光波分为自然光和偏光。一般来说,直接自光源发出的光,如太阳光、烛光、灯光等,都是自然光。自然光是由无数个振动方向各异的光波复合而成的,即在垂直自然光传播方向的平面内,各个方向上都有相等振幅的光波振动(图 1-3 (a))。

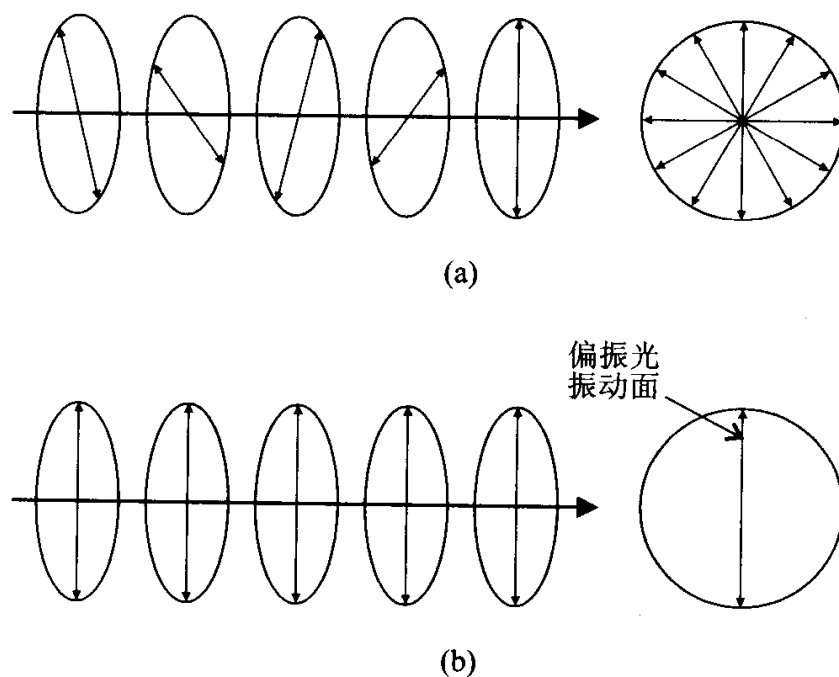


图 1-3 光波传播与振动的侧视图与正视图

(a) 自然光; (b) 偏光

在垂直传播方向的某一固定方向上振动的光波,称为平面偏振光,简称为偏光(图 1-3 (b))。偏光的振动方向与传播方向所构成的平面称为偏光振动面。自然光经过光学处理,如反射、折射、双折射或选择吸收作用可以转变为偏光,其转变过程称为光的偏振化。晶体光学研究中主要使用的仪器是偏光显微镜,其特点之一是在光源上方装置一个偏光镜。该偏光镜包含一个起选择性吸收作用的偏光片,它只允许光源中振动方向与偏振化方

向平行的光波透过,而完全吸收掉振动方向与偏振化方向垂直的光波。因此,偏光显微镜的光源(自然光)中各个振动方向的光波都只能以投影在偏振化方向上的矢量透过偏振片,当它们离开偏光镜后,所有的光波都转变为振动方向平行一致的偏光。

### § 1.3 光的折射与全反射

由于光是一种电磁波,当它从一种介质(如空气)传播进入另一种介质(如晶体)时,必然会受到后者所具有的电磁场的影响。作为影响的直接结果,就是同一频率的光波在不同的介质中传播时,它的波长将随着介质密度的变大而变小,故它的传播速度会相应地变小( $V = f\lambda$ )。因此,光线(指光的传播途径)从一种介质(称为入射介质)以任意角度进入另一种介质(称为折射介质)时,在这两种不同密度的介质的分界面上必将产生折射或全反射现象(图1-4)。

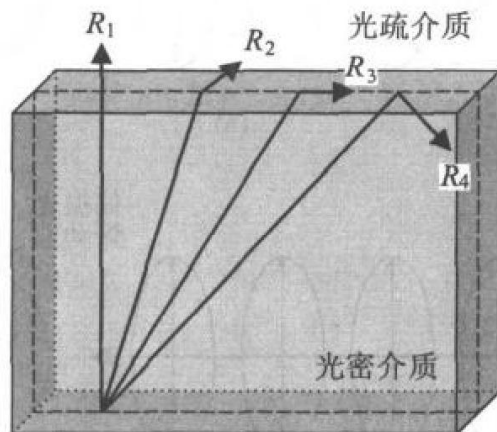


图 1-4 光线在两种介质的分界面处的折射  
( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ )与全反射( $R_4$ )现象

当入射介质与折射介质的密度确定,光线在这两种介质中的传播速度是固定的。此时,如发生折射现象,则任意入射角的正弦值与相应折射角的正弦值之比为常数,这就是斯涅耳定律(亦称为折射定律)。该定律可以根据惠更斯波前原理证明之:

在图 1-5 中,AB 代表入射介质与折射介质之间的分界面(垂直纸面),界面的垂线为法线。当一束平行的入射光( $I_1 \sim I_4$ )以入射角  $i$  倾斜射向界面时,它们以折射角  $r$  进入折射介质而成为一束平行的折射光( $R_1 \sim R_4$ )。设  $V_i$  代表光线在入射介质中的传播速度, $V_r$  代表光线在折射介质中

的传播速度。根据惠更斯发现的波前原理,在  $t_1$  瞬间,这一束平行的人射光( $I_1 \sim I_4$ )同时到达波前  $ab$  面;至  $t_2$  瞬间,这一束平行的折射光( $R_1 \sim R_4$ )同时到达波前  $cd$  面(波前  $ab$  面和  $cd$  面总是垂直光线传播方向),则:

$$\sin i = \frac{bd}{ad} = \frac{(t_2 - t_1) \times V_i}{ad}$$

$$\sin r = \frac{ac}{ad} = \frac{(t_2 - t_1) \times V_r}{ad}$$

上述两式相除,即得到斯涅耳定律:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_i}{V_r}$$

当入射介质与折射介质的密度不同时,  $V_i \neq V_r$ , 故  $i \neq r$ , 这意味着光线的折射;且两者的密度差别越大,折射光偏离原来入射光方向的程度越大。

当入射介质的密度大于折射介质的密度时,  $V_i < V_r$ , 故  $i < r$ 。随着入射角逐渐加大,折射角必将不断加大,并可达到  $90^\circ$ , 即相应的折射光线沿界面方向传播(图 1-4 中的  $R_3$ );如果入射角继续加大,光线将按照反射定律(入射角=反射角)在界面处返回原入射介质(图 1-4 中的  $R_4$ ),该现象称为全反射。

值得补充的是,当提及光波的传播方向时,指的是其位相的传播方向,它不随传播介质的改变而改变。简言之,在折射(或反射)前,光线与光波的传播方向是一致的;而在折射(或反射)后,两者的传播方向是不同的。

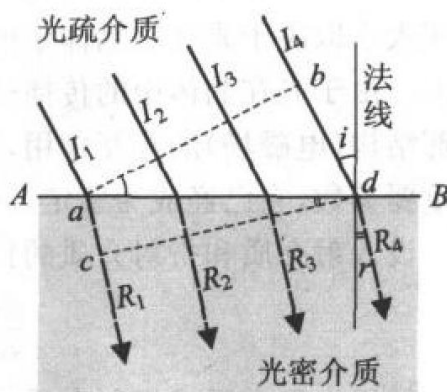


图 1-5 一束平行光由光疏介质进入光密介质的折射现象

## § 1.4 折射率与折射率仪

根据斯涅耳定律,在已知的人射介质与折射介质之间:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_i}{V_r} = N_{r-i}$$

$N_{r-i}$  为常数,被称为折射介质对入射介质的相对折射率。

如果入射介质被假定为空气(真空),那么折射介质的相对折射率被定义为折射介质的绝对折射率,简称折射率(以  $N$  表示):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c_0}{V_r} = N$$

其中光波在空气中的传播速度  $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。当矿物晶体作为折射介质

时,由于  $V_r < c_0$ ,故所有晶体的折射率都大于 1。同时,每个矿物晶体的折射率大小取决于光在该晶体中的传播速度,光的传播速度越小,它的折射率越大。由于光在晶体中的传播速度取决于光(电磁波)与晶体的化学组成和内部结构(电磁场)的相互作用,因此,折射率值是反映矿物成分和晶体结构的重要参数,它已经成为鉴定、区分各种矿物的主要依据之一。

设入射介质和折射介质的折射率分别为  $N_i$  和  $N_r$ ,则:

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{V_r}{V_i} = \frac{N_i}{N_r}$$

如果入射介质或折射介质中的某一个折射率是已知的,则可通过测量入射角和折射角的大小求得另一个介质的折射率。根据上述原理,人们发明了多种折射率仪来测量矿物晶体的折射率。在岩相学中,最常用的是阿贝折射率仪(图 1-6),其光学主件为高折射率的玻璃棱镜、读数望远镜,用于准确测定玻璃棱镜的全反射临界角,然后根据玻璃棱镜的已知折射率换算并显示出晶体介质的折射率。

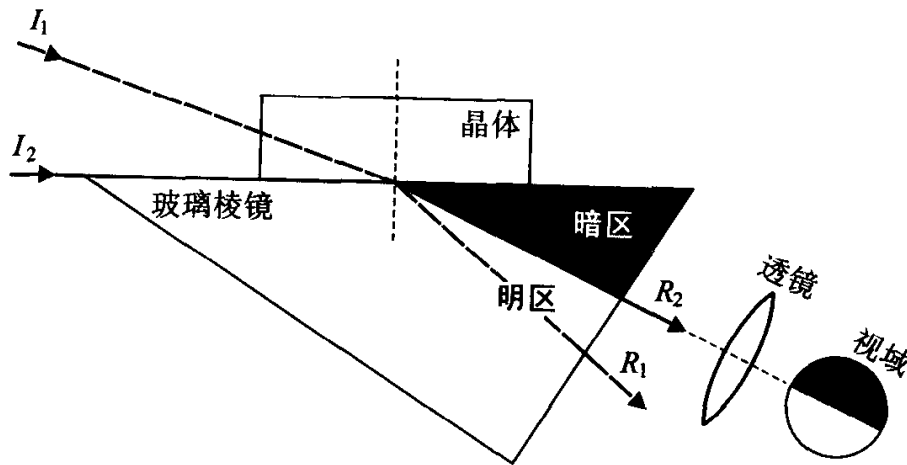


图 1-6 阿贝折射率仪的工作原理

## § 1.5 光的双折射

根据光学性质的不同,可以把固体物质分为(光性)均质体和(光性)非均质体两大类。高级晶族(即等轴晶系)矿物的光学性质各方向相同,称为均质矿物,如石榴子石、萤石等。中级晶族和低级晶族矿物的光学性质随方向而异,称为非均质矿物,如石英、方解石、长石、橄榄石等。

光在均质矿物中传播时,其传播速度不随光波的传播方向和振动方向的改变而改变,换言之,光在均质矿物中总是以一个固定的速度传播。因



此,均质矿物在三维空间任何方向上都具有相同的折射率。同时,在均质矿物中折射的光保持入射光的振动方向,即自然光射入均质矿物后,仍以自然光传播;而偏光射入均质矿物后,仍以原来振动方向的偏光传播(图1-7)。

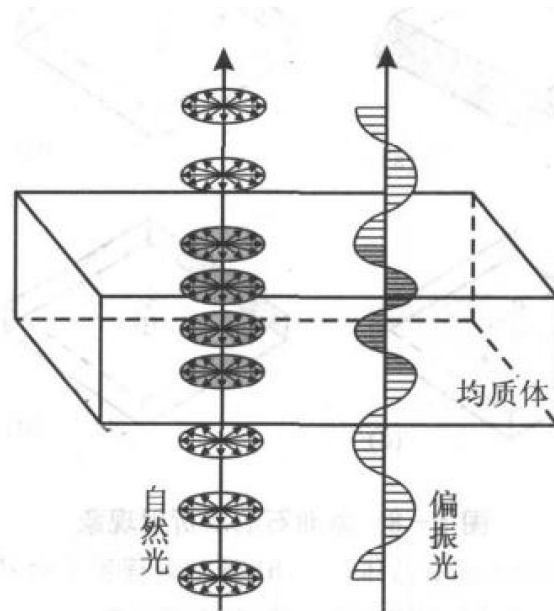


图 1-7 自然光与偏光在均质体中的传播与振动

在自然界,绝大多数矿物属于非均质体,而自然光或偏光射入非均质体后,一般都产生双折射现象。下面以冰洲石为例说明之。

无色透明的冰洲石是方解石的亚种,属三方晶系,具菱面体解理,其棱面体中轴的方向(即  $c$  轴方向)为唯一的三次对称轴( $L^3$ )的方向(图 1-8 (a))。在纸面上画一个点(相当于一个光源),把冰洲石按解理面方向平放在纸上,这时,纸面上的一个点透过冰洲石以后变成了两个点(图 1-8 (b))。其中,一个点(以  $o$  表示)与纸面上的画点重合,即它所对应的光线垂直透过冰洲石,另一个点(以  $e$  表示)偏离纸面上的点,即它所对应的光线斜向透过冰洲石(图 1-9)。

如果在纸面上围绕解理面法线转动冰洲石,可以看到  $o$  点始终不动,而  $e$  点围绕  $o$  点作圆周转动(图 1-8 (c))。如果以解理面的长对角线为转轴,旋转冰洲石,使得冰洲石的  $c$  轴慢慢竖立起来,可以看到  $e$  点逐渐向  $o$  点靠拢;当冰洲石的  $c$  轴完全垂直纸面时, $e$  点和  $o$  点重合成一点(图 1-8 (d))。

上述非均质矿物中的光学现象表现出二个基本特征:① 任意一束入射光进入非均质矿物后分解成两束折射角不同——即传播速度不等的折射光。根据两束光波的速度大小,它们分别称为慢光( $V_g$ )和快光( $V_p$ )( $V_g < V_p$ ),通常以折射率  $N_g$  和  $N_p$  表示( $N_g > N_p$ ),后两者之差值( $N_g - N_p$ )称为

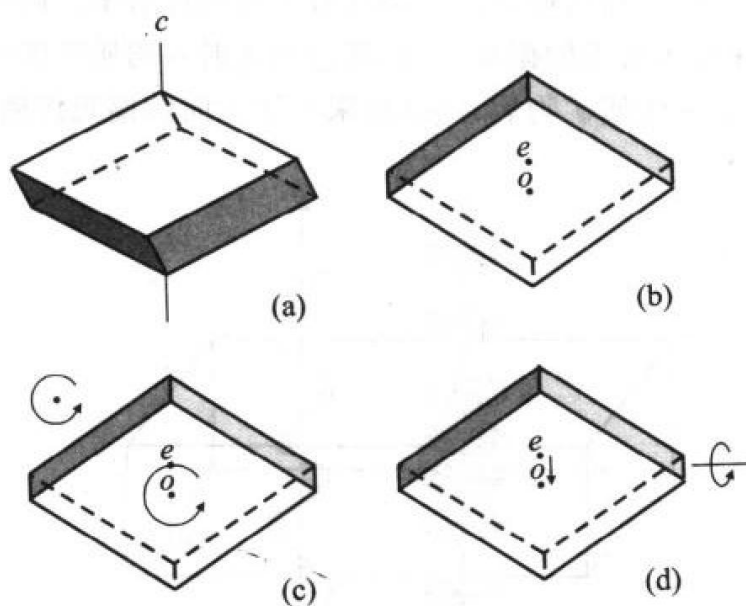


图 1-8 冰洲石的双折射现象

- (a)  $c$  轴直立的冰洲石晶体；
- (b) 透过解理面后的双折射现象；
- (c) 围绕解理面法线旋转晶体时的双折射现象；
- (d) 围绕解理面的长对角线旋转晶体时的双折射现象

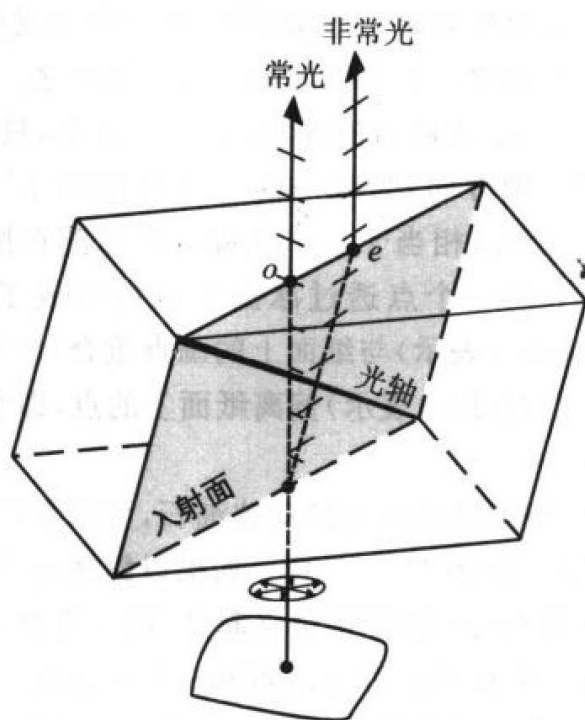


图 1-9 冰洲石双折射现象体视图

双折射率(以  $\Delta N$  表示)；② 因为这两束折射光在晶体中不产生干涉条纹

(详细解释参见第五章 5.2 节), 所以它们一定是振动方向互相垂直的偏光。因此, 无论入射光是自然光还是偏光, 射入非均质矿物后, 都将分解成两束传播速度不同、振动方向相互垂直的偏光, 这就是非均质矿物的双折射现象。

## § 1.6 一轴晶和二轴晶

光沿任何方向射入非均质矿物都要发生双折射吗? 实验证明, 在非均质矿物中, 存在着一种特定的方向, 当光沿着该方向入射时, 并不分解成两束速度不等、振动方向垂直的偏光(如图 1-8 (d) 所示), 而显示相同于光射入均质矿物的特征, 这种特定的方向称为光轴。对于中级晶族矿物, 高次对称轴( $L^n, n=6, 4, 3$ ) 的方向(即  $c$  轴方向) 就是光轴的方向(参见第二章 2.2 节)。由于中级晶族矿物只有一个高次对称轴, 所以它们也只有一个光轴, 故称中级晶族矿物为一轴晶矿物。在低级晶族矿物中, 总是存在两个不发生双折射的特定方向(参见第二章 2.4 节), 所以它们具有二个光轴, 因此, 称低级晶族矿物为二轴晶矿物。

在一轴晶矿物中发生的双折射现象, 必然呈现两个方面的基本规律:

(1) 传播速度: 一束偏光的传播速度不随着入射方向的改变而改变(图 1-8 和图 1-9 中的光线  $o$ ), 即它的折射率为常数, 这一束偏光称为常光(以  $N_o$  表示); 另一束偏光的传播速度则随着入射方向的改变而改变(图 1-8 和图 1-9 中的光线  $e$ ), 即它的折射率为变数, 这一束偏光称为非常光(以  $N_e$  表示)。

(2) 振动方向: 在晶体光学中, 我们把入射光与光轴构成的平面称为入射面。在一轴晶矿物中, 因为只有一个光轴, 故对于一个确定方向的入射光而言, 只有一个人射面。实验证明, 常光的振动方向总是垂直于入射面, 而非非常光的振动方向总是平行于入射面(图 1-10 (a))(参见第六章 6.3 节)。

二轴晶矿物的双折射情况比较复杂, 因为: ①双折射后的两束偏光都是非常光, 即它们的折射率都随入射光方向的改变而改变; ②由于二轴晶矿物中有两个光轴, 故对于一个确定方向的入射光而言, 就会产生两个人射面。根据菲涅尔定律, 两束偏光的振动方向分别平行于两个相交入射面的两个分角面(图 1-10 (b))(参见第六章 6.3 节)。

在非均质矿物中, 由于存在双折射现象, 且随着入射光的方向改变, 两束偏光的折射率和振动方向相应变化, 因此, 它们的光学现象比均质矿物复杂得多。但是, 通过折射率仪和入射面方向, 我们可以确定每两束偏光的折

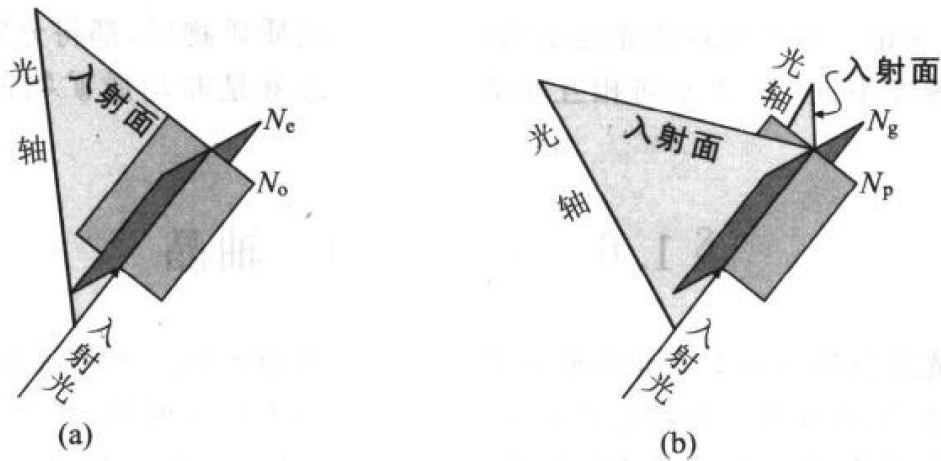


图 1-10 在非均质体中双折射的两束偏光的振动方向与入射面(浅阴影面)的关系  
(a) 在一轴晶矿物中; (b) 在二轴晶矿物中

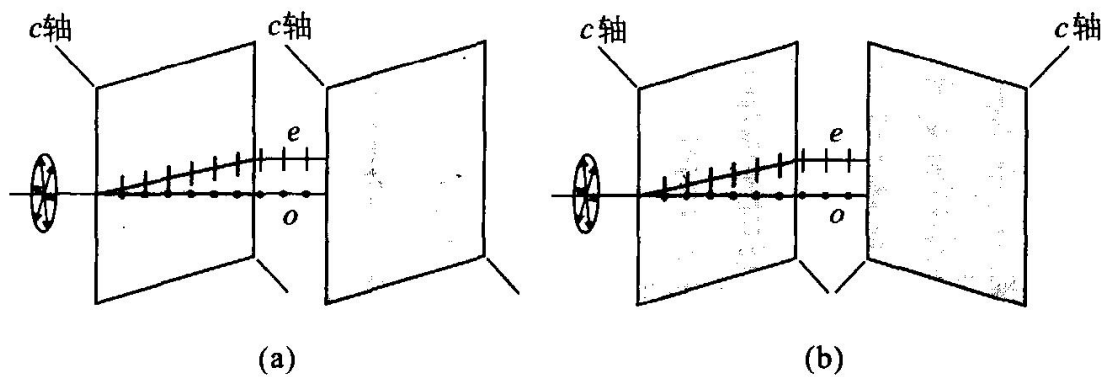
射率大小和振动方向,进而揭示出非均质矿物的各种光性特征。因此,在了解非均质矿物的光学共性的基础上,可以利用它们互不相同的光学个性作为鉴定和区分矿物的客观依据。

## 习 题 一

1. 试分别解释可见光及其光线和光波的概念。
2. 设某均质矿物的折射率为 1.50,试问在该矿物中光的传播速度为多少?
3. 为什么岛状、环状、链状结构的硅酸盐矿物的折射率,一般都大于层状、架状结构的硅酸盐矿物的折射率?
4. 石英、长石和沸石等架状结构的硅酸盐矿物,不仅其折射率较低,而且其双折射率也较低,试从晶体结构方面解释这种特征。
5. 对于层状结构的硅酸盐,它们的底面解理的法线方向一般都是快光的振动方向。据此可以说明,光的传播速度主要取决于振动方向的物理性质,试作图解释。
6. 在空气中,波长为 530 nm 的绿光射入晶体后,速度变慢,这是否意味着该光的波长变短? 如果变短,是否意味着光波的色调由绿向蓝青紫变化? 试回答并加以说明。
7. 如果把两块形状及大小相同的冰洲石按结晶学方位平行的方向并排放置(图 1-11 (a)),试作图完成两束偏光进入第二块晶体后的传播方向



和振动方向；若将两块晶体呈镜像对称方式放置(图 1-11 (b))，试再次作图完成两束偏光进入第二块晶体后的传播方向和振动方向。



**图 1-11 冰洲石中两束偏光的传播与振动**  
 (a) 两块冰洲石同向排列； (b) 两块冰洲石反向排列