



汪相 编著

晶体光学

Optical Crystallography

南京大学出版社



内 容 简 介

本书是高等院校地质学科中矿物、岩石、矿床及地球化学等专业的必修课程教材，同时也是其他各种天然和人工材料光学特征研究的重要参考书。

本书是在大量参阅国内外同类教材基础上，并结合南京大学地球科学系长期以来的教学成果编写而成的。全书简明扼要，共10多万字，分作6章。第一章与第二章阐述晶体光学的基本原理，第三章介绍偏光显微镜的结构及其操作，第四章至第六章分别介绍单偏光系统、正交偏光系统及聚敛偏光系统下晶体的光学性质。本书中109幅精美的插图和每章后附有的习题，俾使学生加深理解和记忆各种晶体光学的抽象概念。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，有助于参考和阅读。



责任编辑 王玉华
责任校对 姚晓娟
装帧设计 杨小民

ISBN 7-305-04088-6



9 787305 040887 >

ISBN 7-305-04088-6/○·287

定价:16.00元

07
W

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
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

第一章 基本概念	(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)
第二章 光率体	(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)
第三章 偏光显微镜	(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)
第四章 单偏光系统下晶体的光学性质	(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)
第五章 正交偏光系统下晶体的光学性质.....	(59)
§ 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)
第六章 聚敛偏光系统下晶体的光学性质.....	(88)
§ 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)
参考文献.....	(120)
《晶体光学》词汇的中英对照及其索引.....	(121)
干涉色色谱表	

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)。

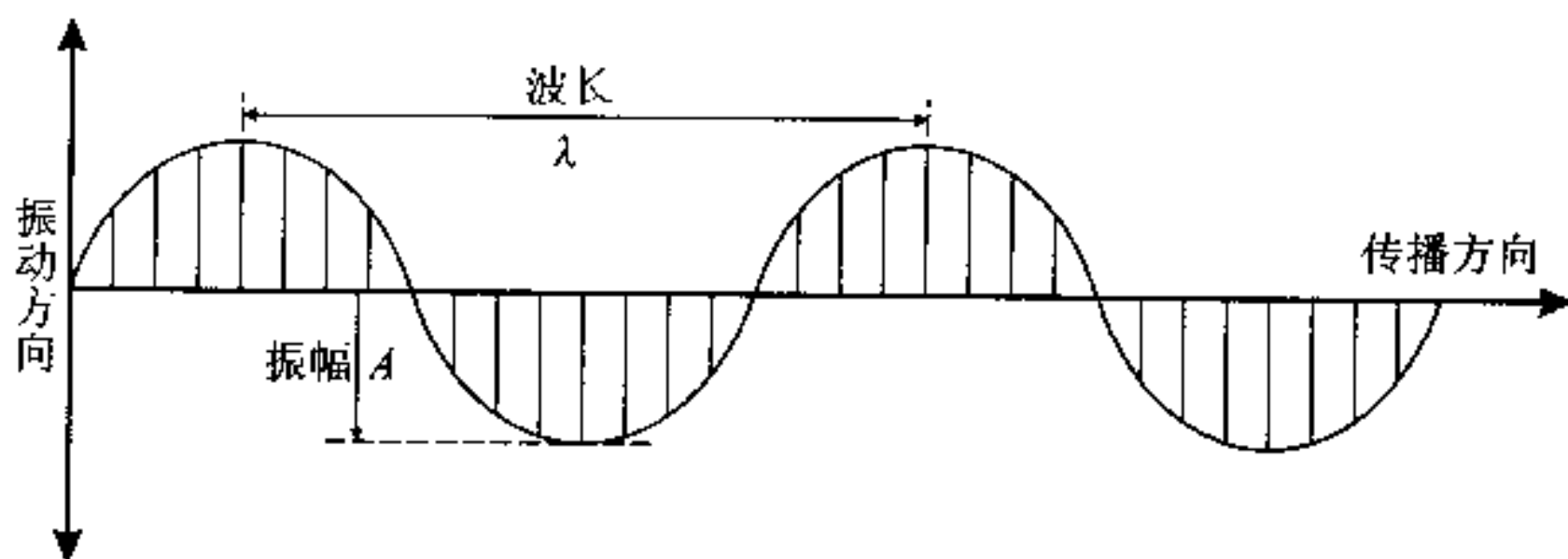


图 1-1 光波的正弦曲线运动方式

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 λ 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

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)。

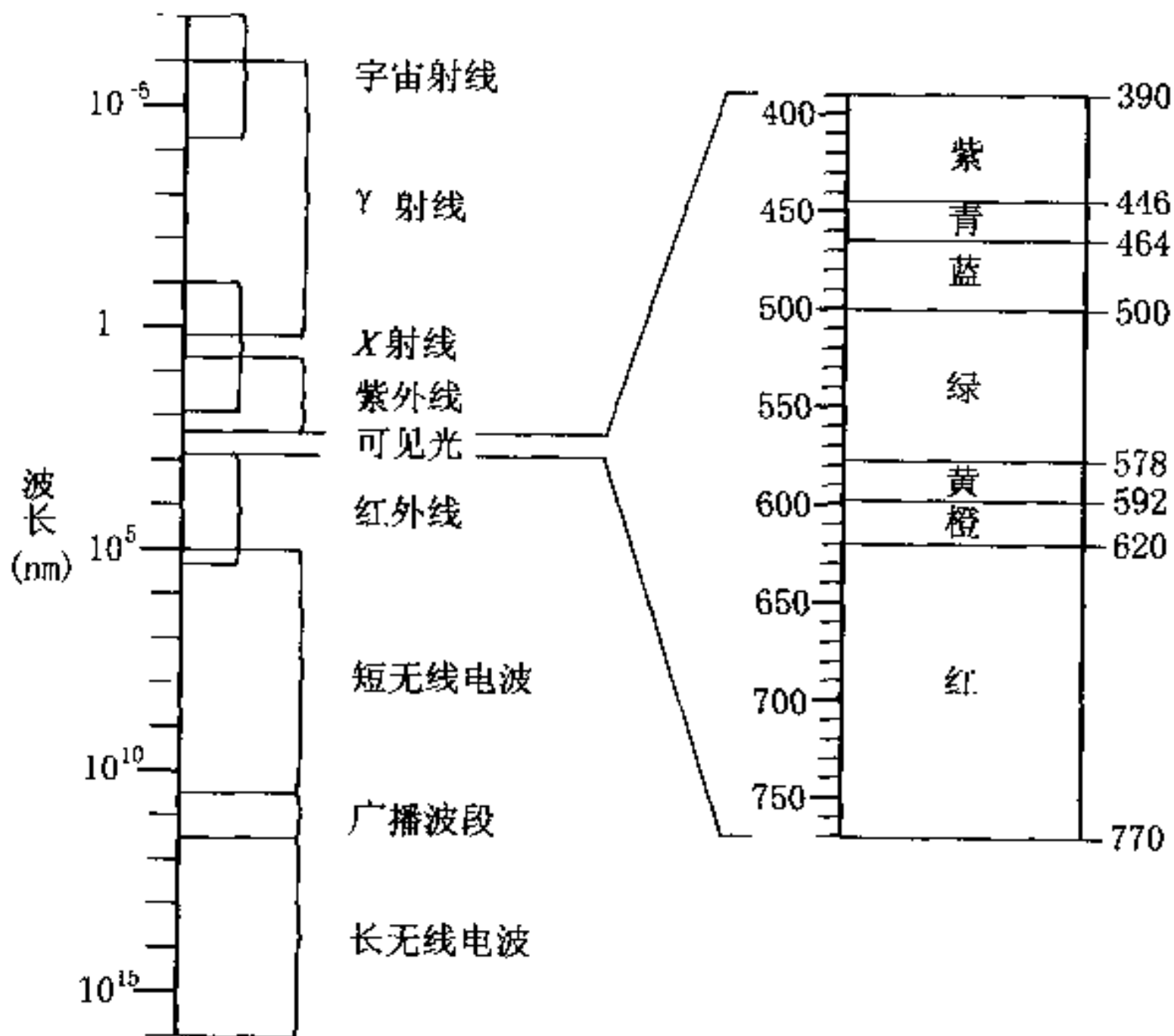


图 1-2 电磁波谱与可见光谱的波长范围

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(μm) $=10^{-6}$ 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(\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))。

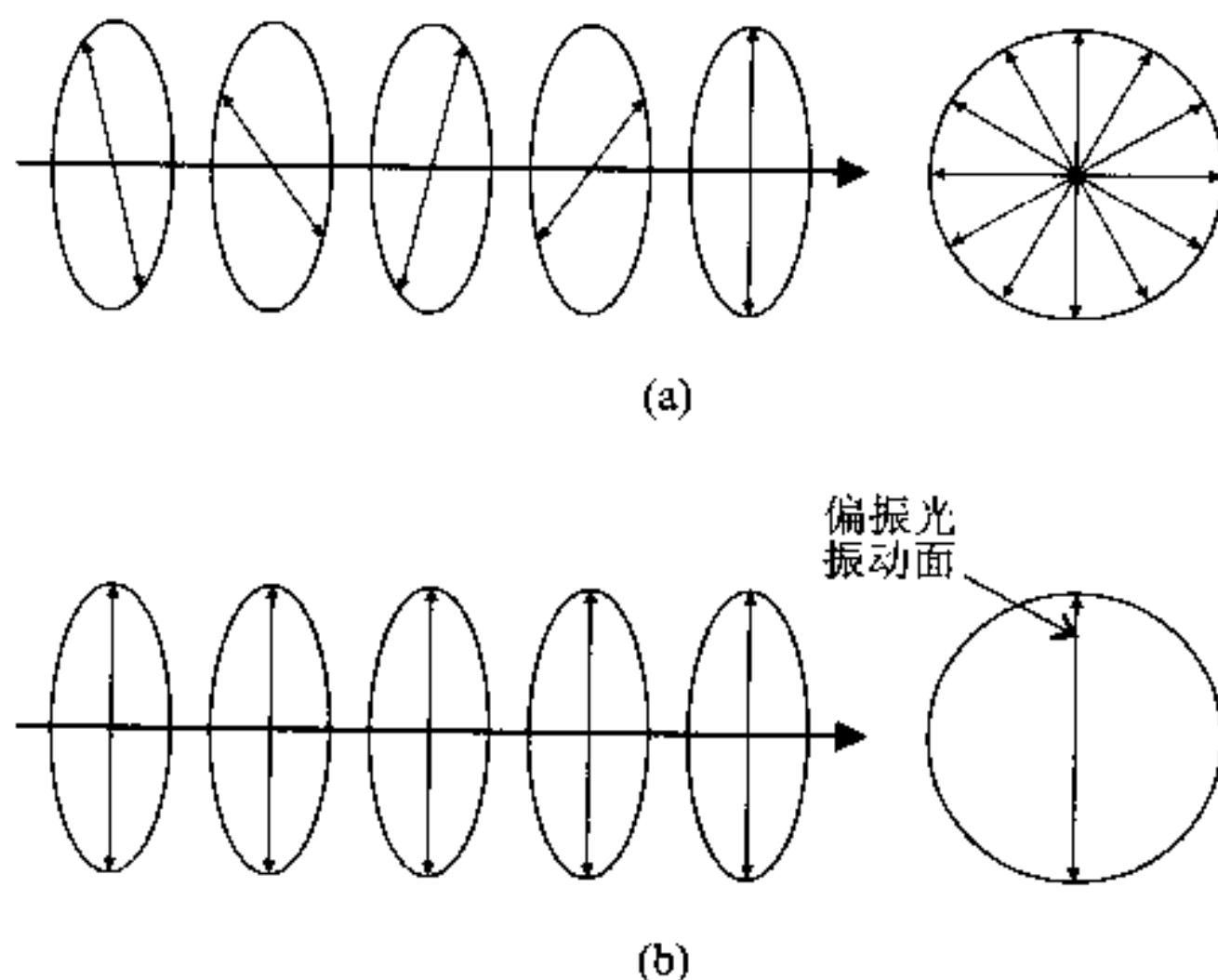


图 1-3 光波传播与振动的侧视图与正视图

(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)。

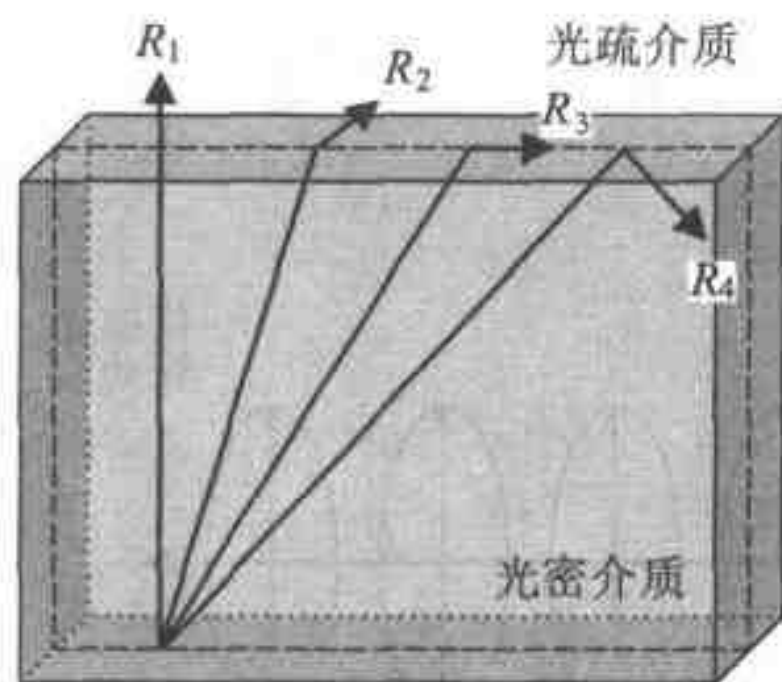


图 1-4 光线在两种介质的分界面处的折射
(R_1 、 R_2 、 R_3)与全反射(R_4)现象

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。当一束平行的人射光($I_1 \sim I_4$)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° , 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。

§ 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,被称为折射介质对人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

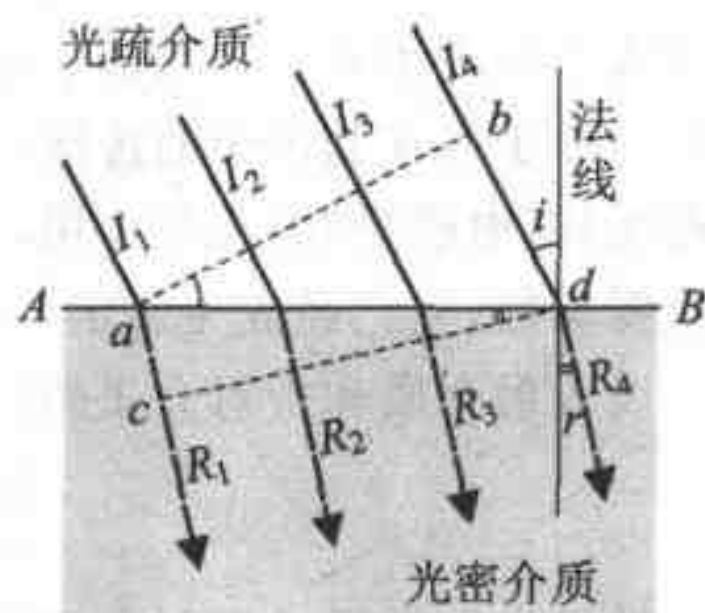


图 1-5 一束平行光由光疏介质进入光密介质的折射现象

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。

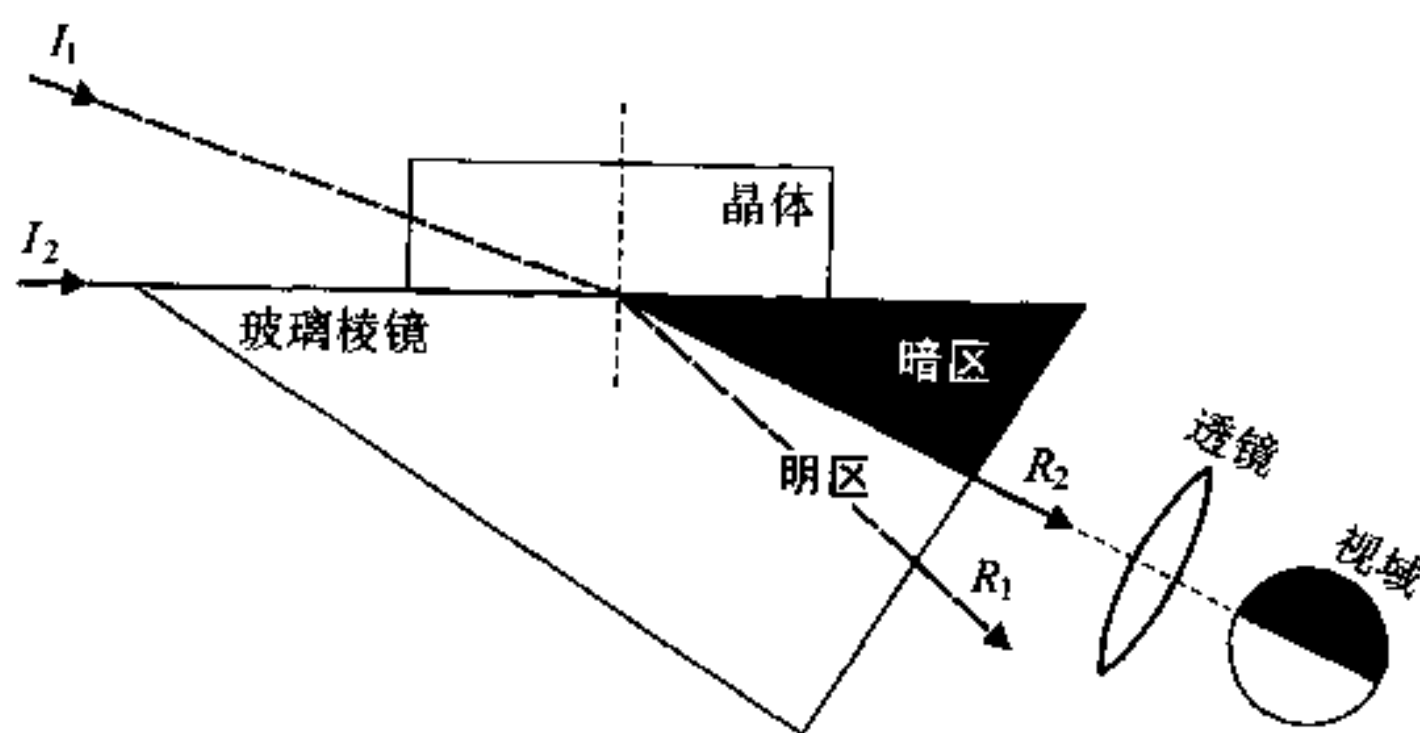


图 1-6 阿贝折射率仪的工作原理

§ 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)。

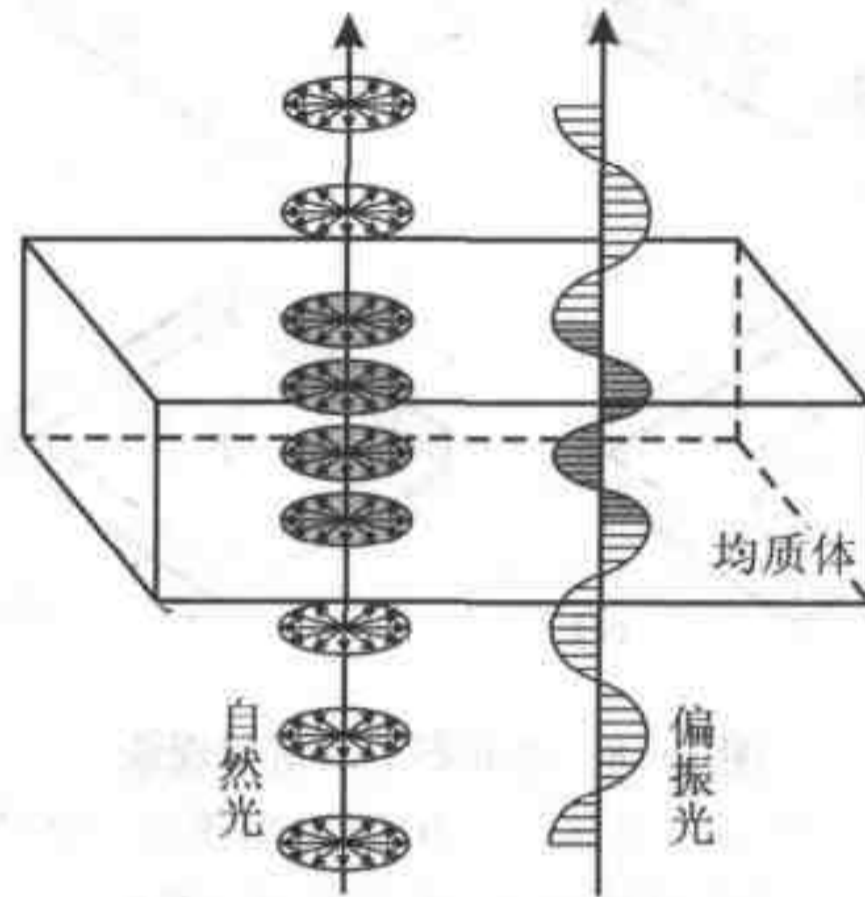


图 1-7 自然光与偏光在均质体中的传播与振动

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

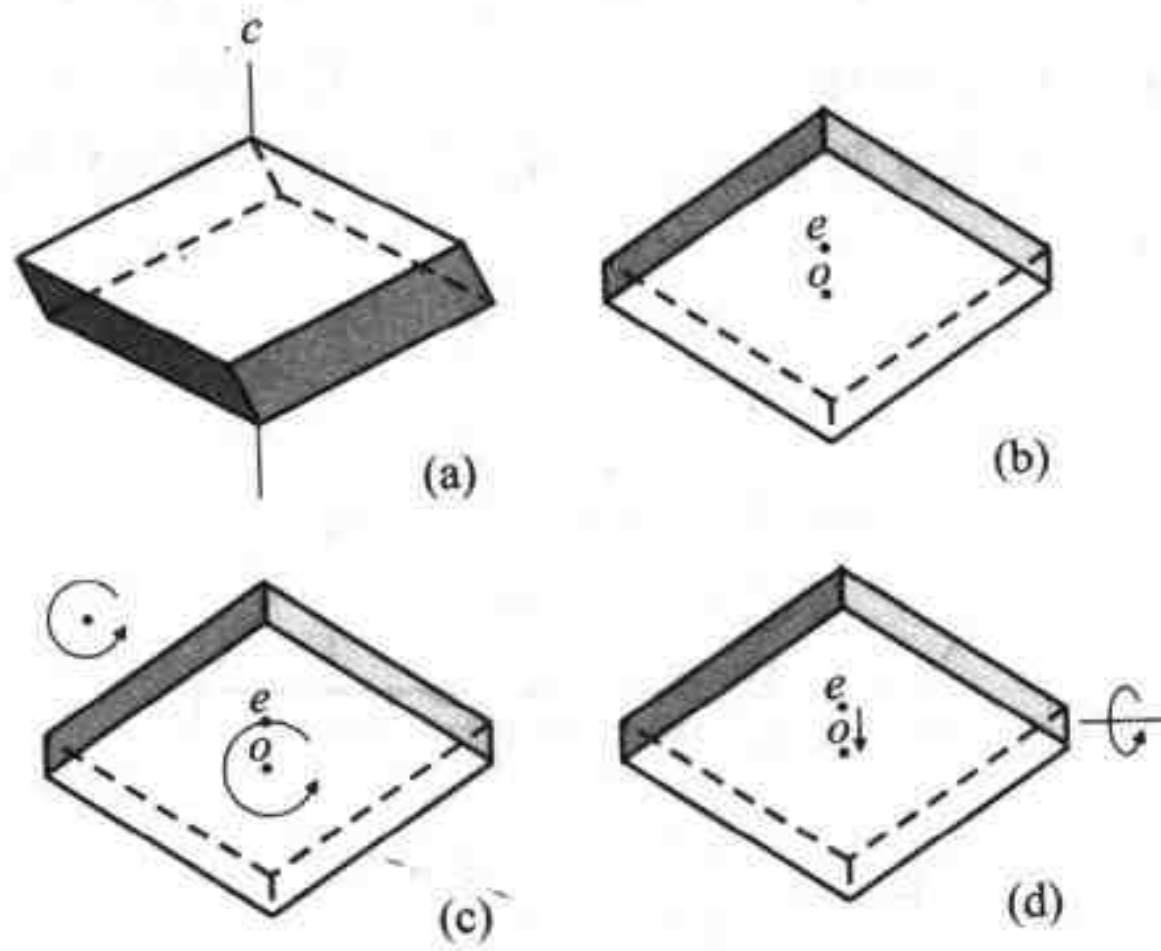


图 1-8 冰洲石的双折射现象

- (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

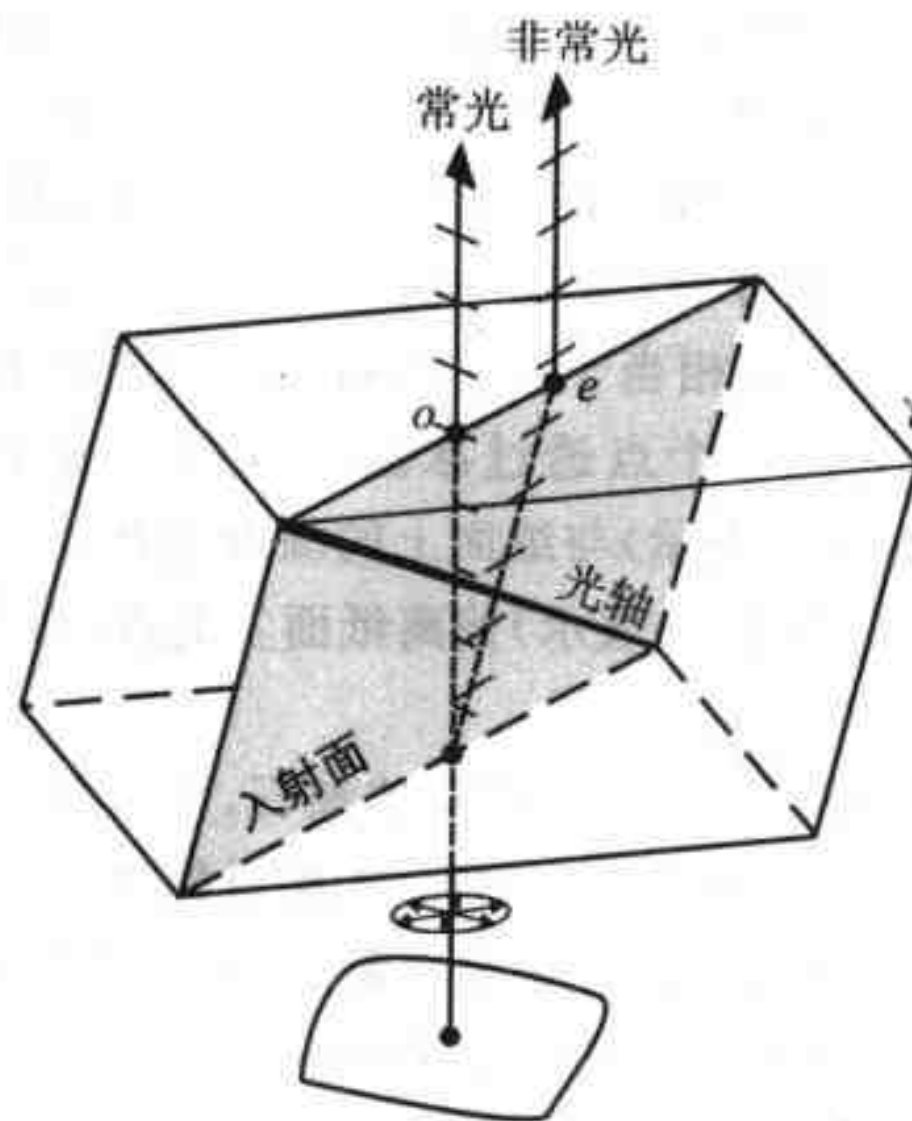


图 1-9 冰洲石双折射现象体视图

双折射率(以 ΔN 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,只有一个入射面。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,就会产生两个入射面。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

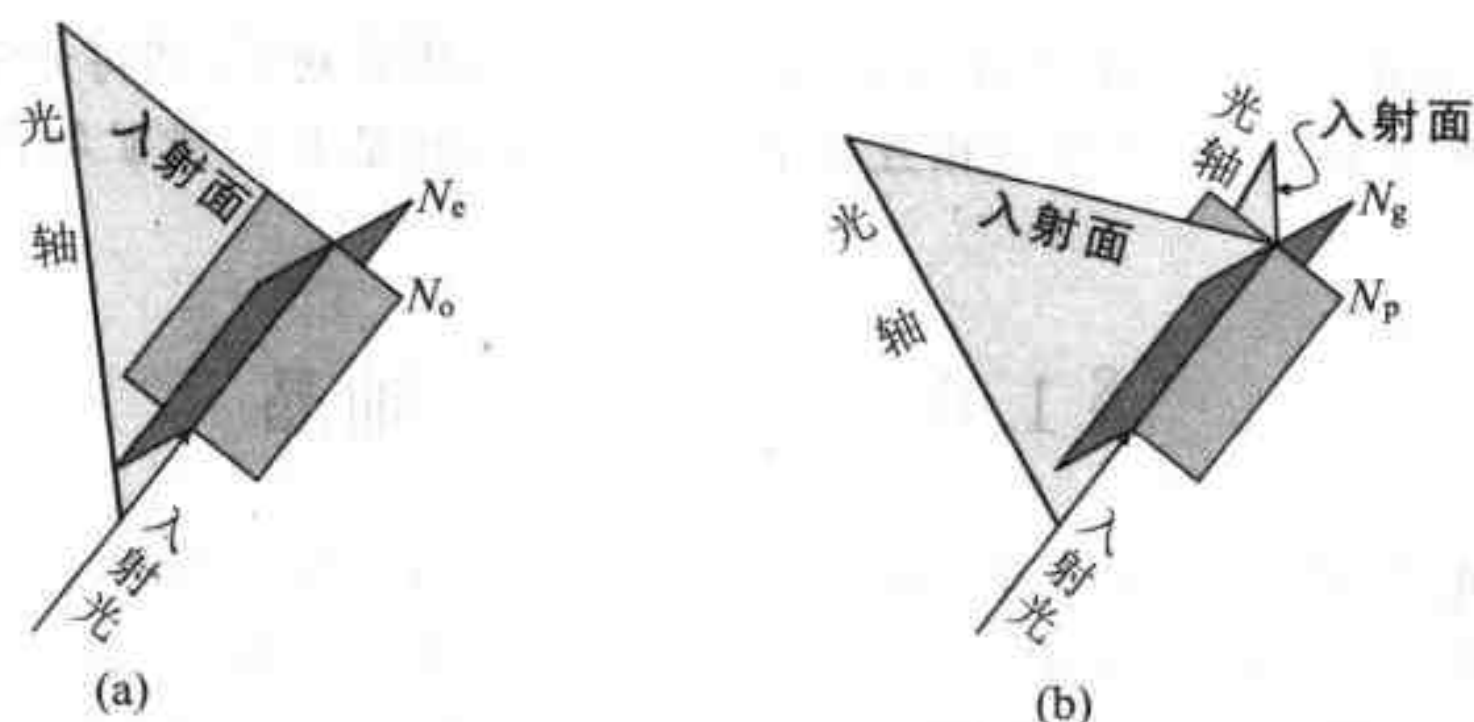


图 1-10 在非均质体中双折射的两束偏光的振动方向与入射面(浅阴影面)的关系

(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。

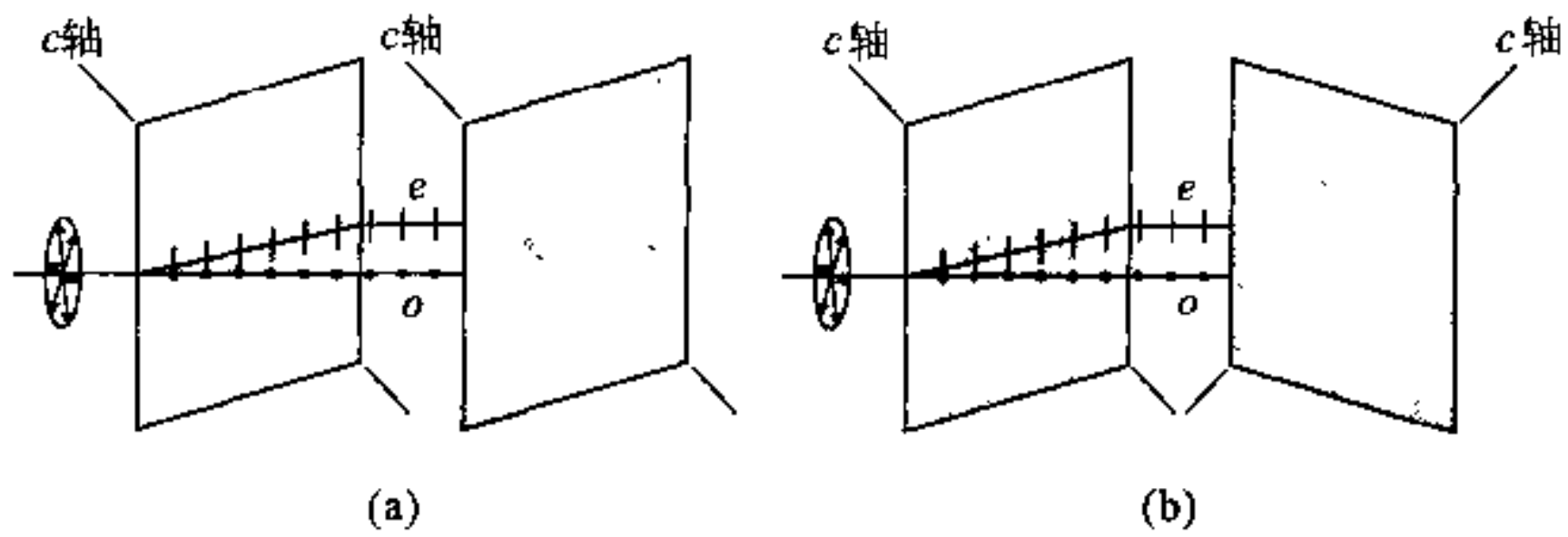


图 1-11 冰洲石中两束偏光的传播与振动
 (a) 两块冰洲石同向排列； (b) 两块冰洲石反向排列

第二章 光率体

§ 2.1 光率体

根据非均质矿物中的双折射现象可以确定,光波的折射率(即对应的传播速度)取决于光波振动方向上的物理性质,即在同一个非均质矿物中两束传播方向相同(光轴方向除外)、振动方向不同的光波必然具有不同的折射率,而两束振动方向相同、传播方向不同的光波必然具有相同的折射率。为了直观地表示这种光波的振动方向与折射率之间的对应关系,需要建立一个立体模型,称之为光率体。

对于一束任意方向的人射光,当它进入非均质矿物后所产生的两束偏光可以用两根起始于晶体中心的线条表示出来:① 线条的方向代表两束偏光的振动方向。显然,这两根线条的方向垂直于入射光的传播方向,同时它们又相互垂直,且根据入射面的方位,可以被具体地确定下来(参见第一章 1.6 节)。② 线条的长度代表两束偏光的折射率。利用折射率仪,可以测出两束偏光的折射率,然后按一定的比例截取两根长度不等的线条。如果不断地改变入射光的方向,就可以得到无数两根一组、不同方向、不同长短、起始于晶体中心的线条,将每根线条的末端连接起来,就构成一个规则球状的立体形态——光率体。

因此,光率体是一种从晶体光学现象中抽象出来的光性指示体,它可以形象地显示任意振动方向上的光波的折射率大小,进而表现出晶体的各种光学现象,故它属于晶体光学性质的基本内核。由于种类不同的矿物往往具有形态不同的光率体,因此,利用偏光显微镜鉴定矿物,实质上就是要确定该矿物的光率体形态及其在矿物中的方位。

§ 2.2 一轴晶光率体

2.2.1 基本形态

中级晶族(六方晶系、四方晶系、三方晶系)矿物的 $a_0 = b_0 \neq c_0$,故 a 、 b

轴方向具有几乎相同的物理性质,而 c 轴方向为高次对称轴($L^n, n=6, 4, 3$) 的方向。因为中级晶族矿物的高次对称轴方向为光轴的方向,而中级晶族矿物的高次对称轴只有一个,因此称中级晶族矿物为一轴晶矿物。当任意方向的光射入一轴晶矿物后,将发生双折射而产生两束偏光。其中,一束偏光的传播速度是不变的,称为常光,它的振动方向总是垂直于入射面;另一束偏光的传播速度则随着入射方向的改变而改变,称为非常光,它的振动方向总是平行于入射面(参见第一章 1.6 节)。基于上述中级晶族矿物的光性特征,一轴晶矿物的光率体必然为一个旋转椭球体。

2.2.2 光率体的构成

现以三方晶系的石英为例(图 2-1),介绍一轴晶光率体的构成。

(1) 当入射光平行 c 轴(即光轴)进入晶体时(即入射光 1, 图 2-1), 不发生双折射, 故无论入射光的振动方向如何, 它们的折射率都是相同的, 用折射率仪测得它们的折射率均为 1.544。根据此数值, 可以自晶体中心在垂直 c 轴的方向上截取无数根相同长度的线条, 来表示入射光平行 c 轴射入晶体以后, 光波的振动方向和折射率。由于它们的振动方向垂直于入射光(即 c 轴)和光轴(即 c 轴)(相应的人射面变为 c 轴方向的线条), 所以这些折射率为 1.544 的偏光都是常光, 以 N_o 表示。因此, 当无数根垂直 c 轴、长度为 N_o 的线条的末端被连接起来后, 就构成一个以 N_o 为半径的圆环(图 2-2 (a))。

(2) 当入射光偏离 c 轴并向 b 轴方向移动而进入晶体时(即入射光 2, 图 2-1), 发生双折射, 产生两束偏光: 其一为常光, 它的振动方向垂直入射面(即 bc 面), 所以必然平行 a 轴, 故正好为上述圆环中的一条半径。用折射率仪测得它的折射率确实为 1.544, 故以 N_o 表示。另一为非常光, 它的振动方向与入射面(即 bc 面)方向一致, 同时垂直入射光。用折射率仪测得它的折射率为 1.546, 大于 N_o , 故在它的振动方向上自晶体中心起截取一根

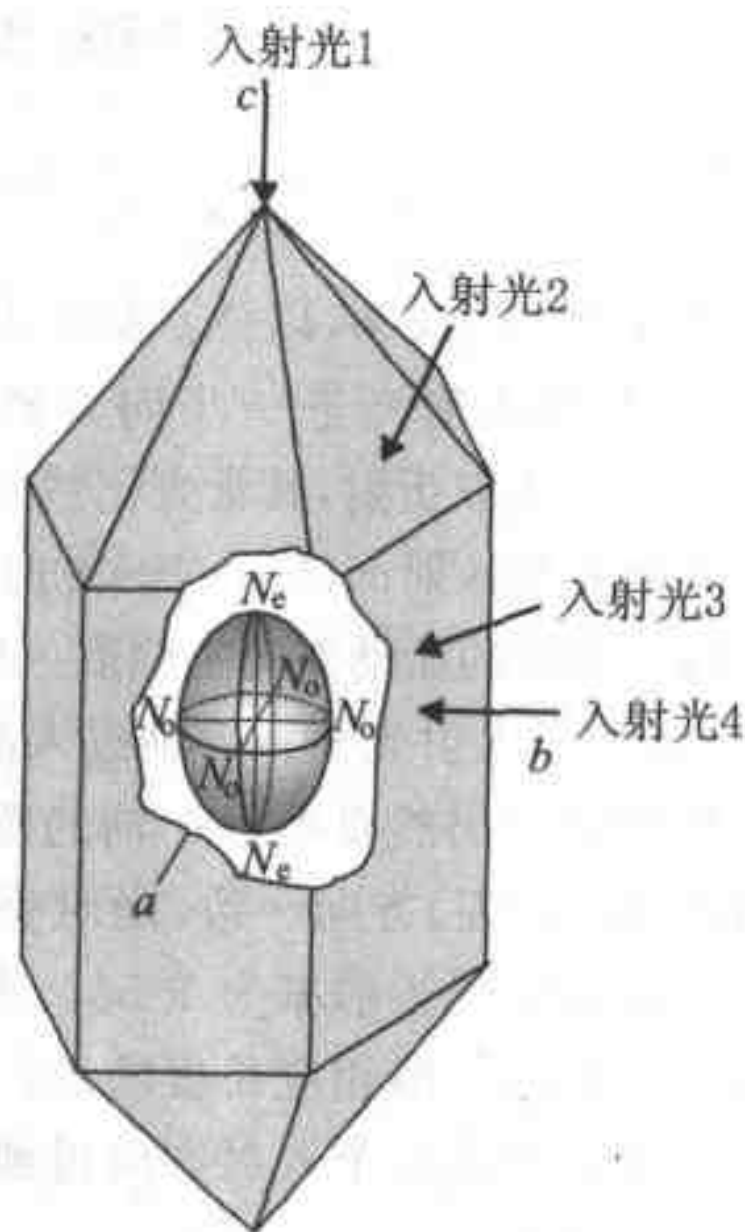


图 2-1 石英晶体及其光率体

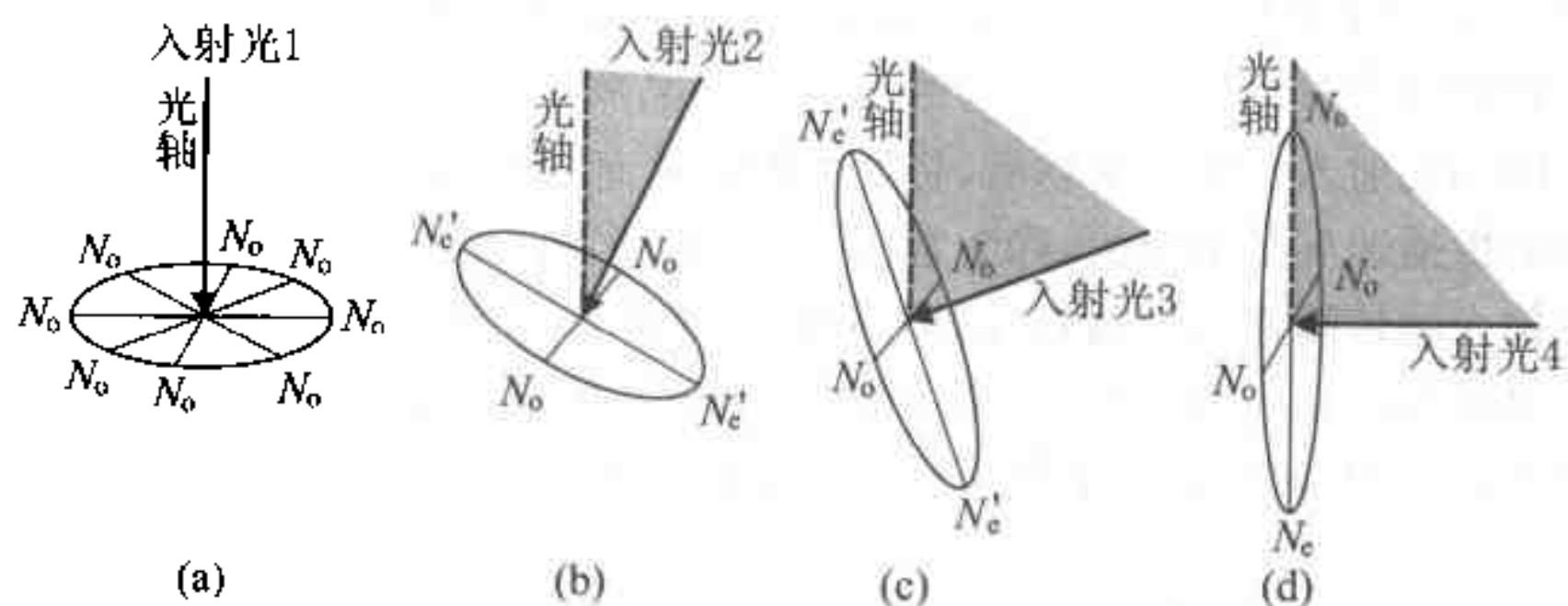


图 2-2 不同方向的入射光(1~4)进入石英晶体后的双折射及表示它们振动方向和折射率的线段(阴影区为入射面)
 (a)平行 c 轴的入射光; (b)和(c)斜交 c 轴的入射光;
 (d)平行 b 轴的入射光

略大于 N_o 的线条,以 N'_c 表示(图 2-2 (b))。

(3)当入射光进一步向 b 轴方向靠近而进入晶体时(即入射光 3,图 2-1),发生双折射,其常光仍然以平行 a 轴的圆环半径 N_o 表示,非常光的振动方向亦与入射面(即 bc 面)方向一致,但它的折射率进一步变大,测得为 1.551,故在它的振动方向上截取一根更长的线条,亦以 N'_c 表示(图 2-2 (c))。

(4)当入射光平行 b 轴进入晶体时(即入射光 4,图 2-1),由双折射而产生的常光仍然以平行 a 轴的圆环半径 N_o 表示,非常光的振动方向与入射面(即 bc 面)方向一致,同时垂直入射光,因此它必然平行 c 轴。用折射率仪测得它的折射率为 1.553,为石英晶体中的最大折射率,故在 c 轴方向按比例截取一根相应长度的线条,以 N_c 表示(图 2-2 (d))。

根据上述四个入射方向得到的两束偏光的折射率与振动方向的变化规律,可以确定:

(1)在某一入射面内不断增大入射光与 c 轴的夹角,则两束偏光中的常光的折射率(即 N_o)和振动方向(即垂直入射面)始终不变,而非常光的振动方向由接近垂直 c 轴至平行 c 轴,同时它的折射率按椭圆曲线由 N'_c (接近 N_o)变化至 N_c 。把这一组表示非常光振动方向和折射率大小的线条的末端连接起来,就构成两个以 N_c 为长半径以 N_o 为短半径的 $1/4$ 椭圆环(图2-3(a))。

(2)在同一入射面内,使入射光继续由垂直 c 轴向平行 c 轴方向移动时,得到的非常光线条的末端连接起来,则构成另两个以 N_c 为长半径以

24 4.4

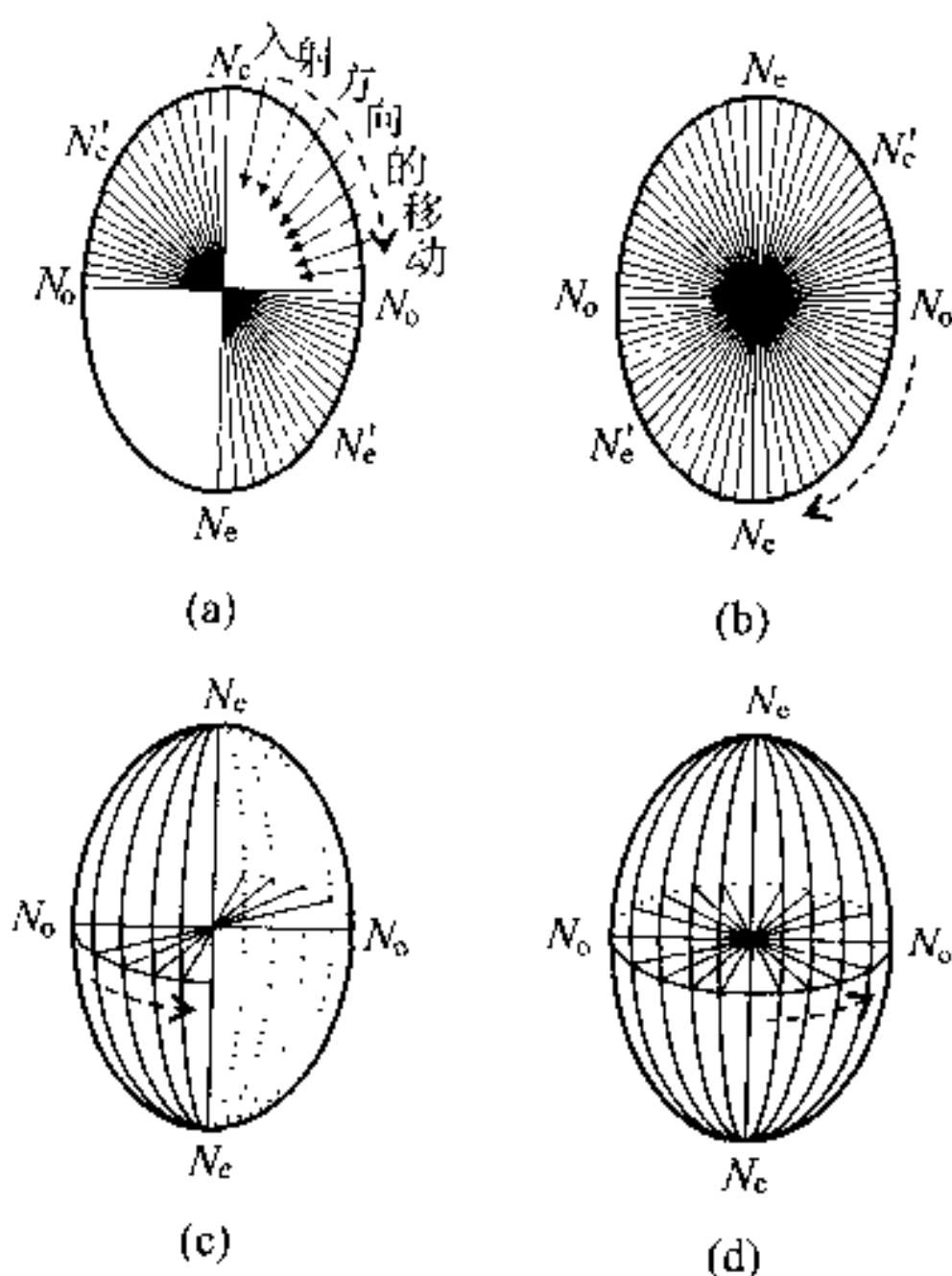


图 2-3 石英光率体的构成

(a) 入射光由平行 c 轴向垂直 c 轴移动时, 表示非常光的振动方向与折射率的各个线段; (b) 在同一入射面内, 所有表示非常光的振动方向与折射率的各个线段的末端连接形成一个椭圆环; (c) 围绕 c 轴重复上面两个过程, 则形成一系列平行 c 轴的椭圆环; (d) 无数个椭圆环连接构成一个旋转椭球体

N_o 为短半径的 $1/4$ 椭圆环。它们与前两个 $1/4$ 椭圆环连接起来就构成一个完整的椭圆环(图 2-3(b))。

(3) 如果围绕 c 轴, 不断地重复上述过程, 我们就可以得到无数个完全相同的椭圆环(图 2-3(c)); 把无数个椭圆环连接起来, 就构成一个以 c 轴为旋转轴的旋转椭球体(图 2-3(d)), 这就是石英的光率体。

2.2.3 光性符号

由于石英晶体的 $N_e > N_o$, 所以它的光率体是一个旋转轴(c 轴)为长轴的旋转椭球体, 该光率体的光性符号为正, 称为一轴晶正光性光率体(图 2-4(a))。在一轴晶正光性光率体中, 振动方向平行 c 轴的光波的传播速度最慢(其传播方向一定是垂直 c 轴), 而振动方向垂直 c 轴的光波的传播速

度最快(其传播方向不一定是平行 c 轴)。

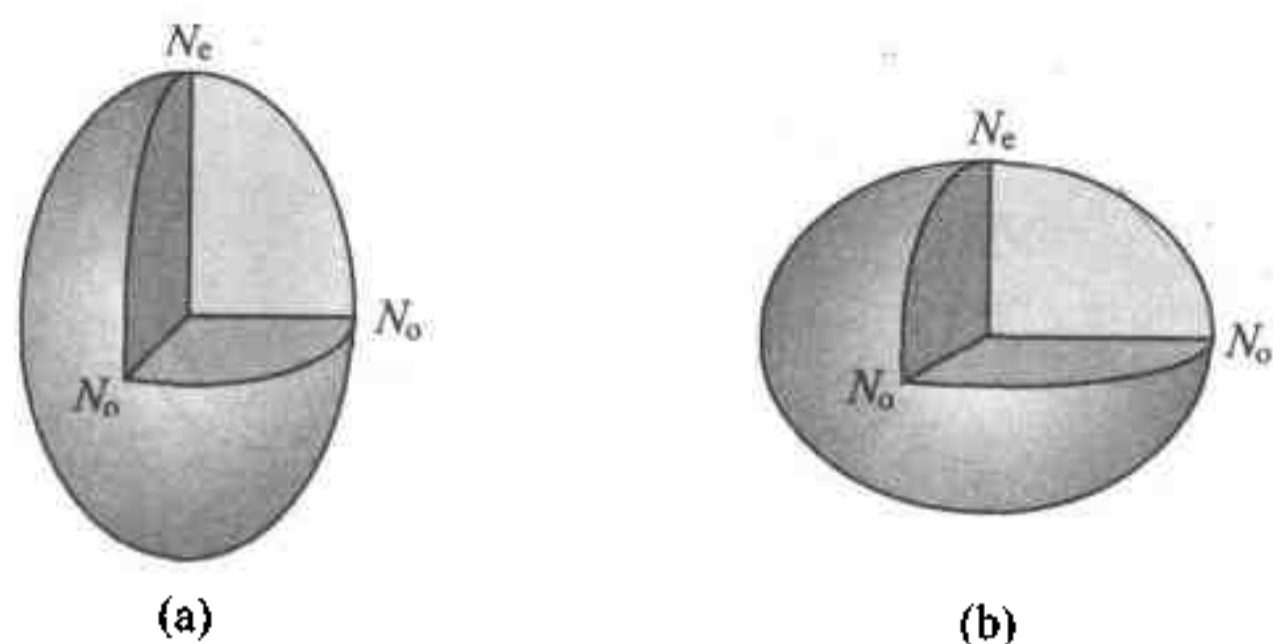


图 2-4 一轴晶光率体

(a)一轴晶正光性光率体；(b)一轴晶负光性光率体

如同石英光率体的构成过程,三方晶系的方解石的光率体也可以通过不断改变入射光的角度,在入射面上得到一个椭圆环,再由围绕 c 轴的无数个椭圆环构成一个以 c 轴为旋转轴的旋转椭球体。然而,方解石的常光的折射率 N_o 为 1.658,而非常光的折射率 N_e 为 1.486, $N_o > N_e$ 。在此情况下,所构成的光率体是一个旋转轴(c 轴)为短轴的旋转椭球体,该光率体的光性符号为负,称为一轴晶负光性光率体(图 2-4 (b))。与一轴晶正光性光率体相反,在一轴晶负光性光率体中,振动方向平行 c 轴的光波的传播速度最快,而振动方向垂直 c 轴的光波的传播速度最慢。

2.2.4 切面类型

通过与上述相同的过程,可以构成所有中级晶族矿物的光率体,它们的形态都是旋转椭球体。然而,由于不同矿物的化学成分和晶体结构各不相同,因此它们的 N_e 和 N_o 有不同的数值,即不同的矿物之间,它们的光率体的相对形态是不同的。

当矿物的光率体形态确定以后,我们可以容易地判断任意方向的人射光进入矿物后产生的两束偏光的折射率和振动方向,而无需借助于折射率仪和入射面。具体的做法如下:

设有一束任意方向的光波射入晶体,则垂直该入射方向并经过光率体中心作一平面,该平面与光率体相交得到一个椭圆切面,该椭圆切面上的长、短半径分别代表上述任意入射方向上的双折射而产生的两束偏光,其长、短半径的长度代表两束偏光的折射率大小,面长、短半径的方位代表两

束偏光的振动方向(图 2-5 (a))。同时,在该椭圆切面上,还可以确定双折射率的大小,它等于长、短半径的长度之差。

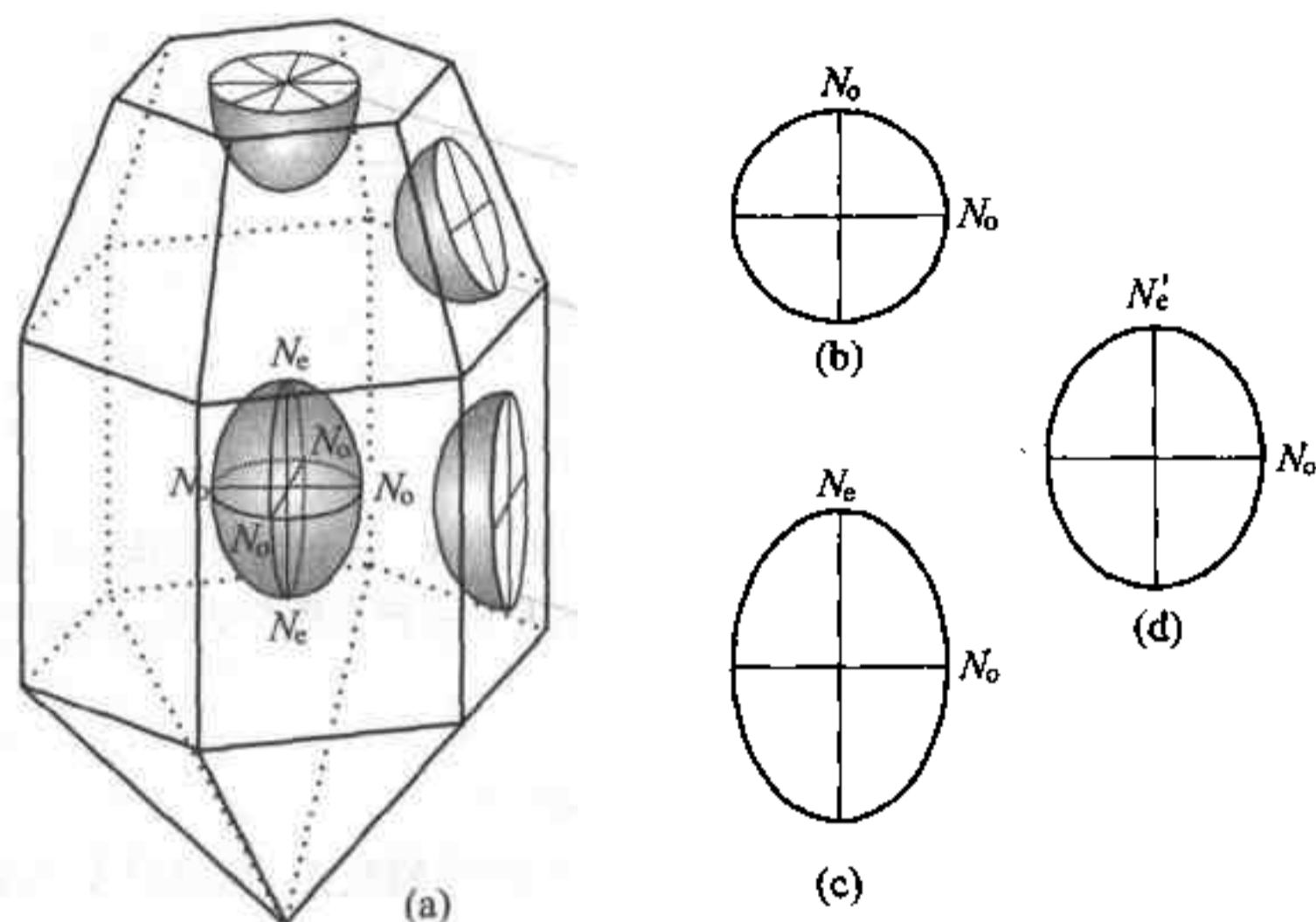


图 2-5 一轴晶光率体中的主要切面

(a)一轴晶光率体及不同方位的切面; (b)垂直光轴的圆切面(N_oN_o 面);
(c)平行光轴的椭圆切面(N_eN_o 面); (d)斜交光轴的椭圆切面(N'_eN_o 面)

在一轴晶光率体中,根据任意方向的人射光可以得到无数个不同长、短半径的椭圆切面,但这些切面可以被归纳为三种类型:

(1)垂直光轴的圆切面(图 2-5 (b)):人射光平行中级晶族矿物的 c 轴(即光轴)射入时,得到一个长、短半径相等的椭圆切面——圆切面(N_oN_o 面),故双折射率等于 0(为一轴晶矿物的最小双折射率)。不论光波在晶体中的振动方向如何,它的折射率始终不变,等于圆半径 N_o ,故此方向入射的光波不可能发生双折射现象。

(2)平行光轴的椭圆切面(图 2-5 (c)):人射光垂直 c 轴传播时,得到的是一个平行 c 轴的椭圆切面(N_eN_o 面),其长、短半径分别为 N_e 和 N_o 。(正光性)或 N_o 和 N_e (负光性), $\Delta N = |N_e - N_o|$ 。由于 N_o 和 N_e 为旋转椭球体中的两个极值,因此,该切面上的双折射率为一轴晶矿物的最大双折射率(以 ΔN_{\max} 表示)。每种矿物的最大双折射率是固定的,故它是一个重要的光性鉴定参数。

(3)斜交光轴的椭圆切面(图 2-5 (d)):人射光斜交 c 轴射入时,得到

一个椭圆切面($N_e'N_o$ 面),其长、短半径分别为 N_e' 和 N_o (正光性)或 N_o 和 N_e' (负光性), $\Delta N = |N_e' - N_o|$ 。由于 N_e' 介于 N_o 和 N_e 之间,因此,该切面上的双折射率必然小于该光率体的最大双折射率。至于该切面上 N_e' 的数值,可以根据入射光的角度(α)直接推导获得(图 2-6)。

由于 N_e 和 N_o 是已知的,即以两者为长短半径的椭圆方程为:

$$\frac{x^2}{N_o^2} + \frac{y^2}{N_e^2} = 1$$

同时,根据入射角 α 可以得到 ON_e' 的直线方程:

$$\tan \alpha \times x + y = 0$$

合并上述两个方程,即得到椭圆曲线与直线的交点,从而计算出该交点到原点的距离,即任意切面上半径 N_e' 的长度:

$$N_e' = N_o \times N_e \sqrt{\frac{1}{N_e^2 \cos^2 \alpha + N_o^2 \sin^2 \alpha}}$$

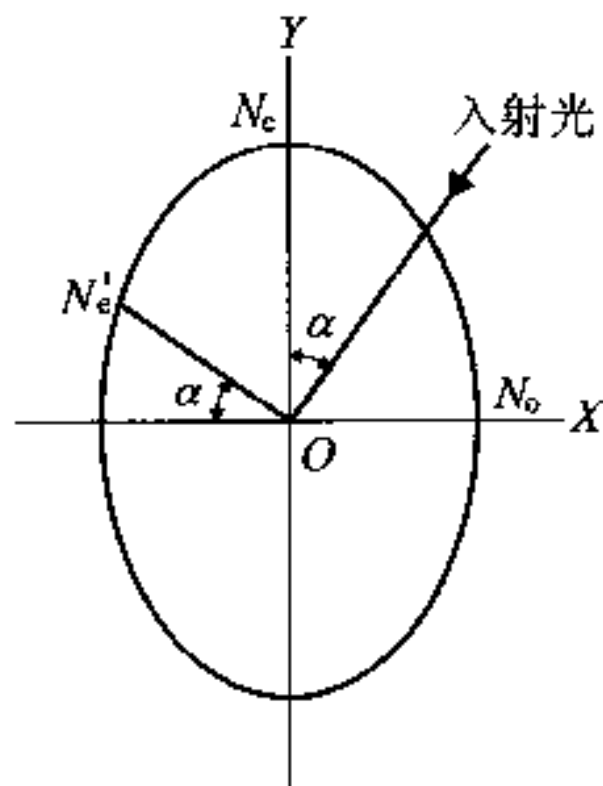


图 2-6 一轴晶光率体中任意方向入射光所产生的非常光的折射率(N_e')

§ 2.3 二轴晶光率体

2.3.1 基本形态

由于中级晶族矿物的 a 轴与 b 轴的物理性质近于相等,而它们与 c 轴方向的物理性质有所差别,这种物理性质的不均匀性体现在光率体上,就是平行 c 轴方向的折射率 N_e 不等于垂直 c 轴(或平行 a 轴和 b 轴)方向的折射率 N_o 。然而,对于低级晶族(斜方晶系、单斜晶系和三斜晶系)矿物,由于它们的 $a_o \neq b_o \neq c_o$,因此它们的物理性质在三个结晶轴方向上都有差别。在光学性质上,这种差别表现为低级晶族矿物有三个不同大小的折射率。如镁橄榄石(属斜方晶系矿物)在 a 、 b 、 c 轴三个方向上的折射率分别为 1.675、1.637 和 1.655。根据它们的大小次序,分别用 N_g 、 N_m 、 N_p 表示最大的、中等的和最小的折射率($N_g > N_m > N_p$),称为主折射率。

这三个主折射率的方向相互垂直,构成了低级晶族矿物光率体的三个

光学主轴(亦称为光学对称轴),故其光率体为一个三轴椭球体(图 2-7 (a))。在三轴椭球体中,由两个光学主轴所构成的面,称为主轴面。由于它们分别是三轴椭球体中的对称面,因此又称为光学对称面。主轴面共有三个,分别是 $N_g N_m$ 面、 $N_g N_p$ 面和 $N_m N_p$ 面,彼此相互垂直(在一轴晶光率体中,包含主折射率 N_e 和 N_o 的光学对称面有无数个)。

2.3.2 光率体的构成

在三轴椭球体中,必然会出现两个光轴,它们都位于 $N_g N_p$ 面内。现说明如下:

(1)由于 N_m 的大小介于 N_g 与 N_p 之间,因此在 $N_g N_p$ 构成的椭圆环上,自 N_p 向 N_g 移动必可找到一点 A ,它到椭球体中心 O 的距离正好等于 N_m , $AO=N_m$ (图 2-7 (b))。

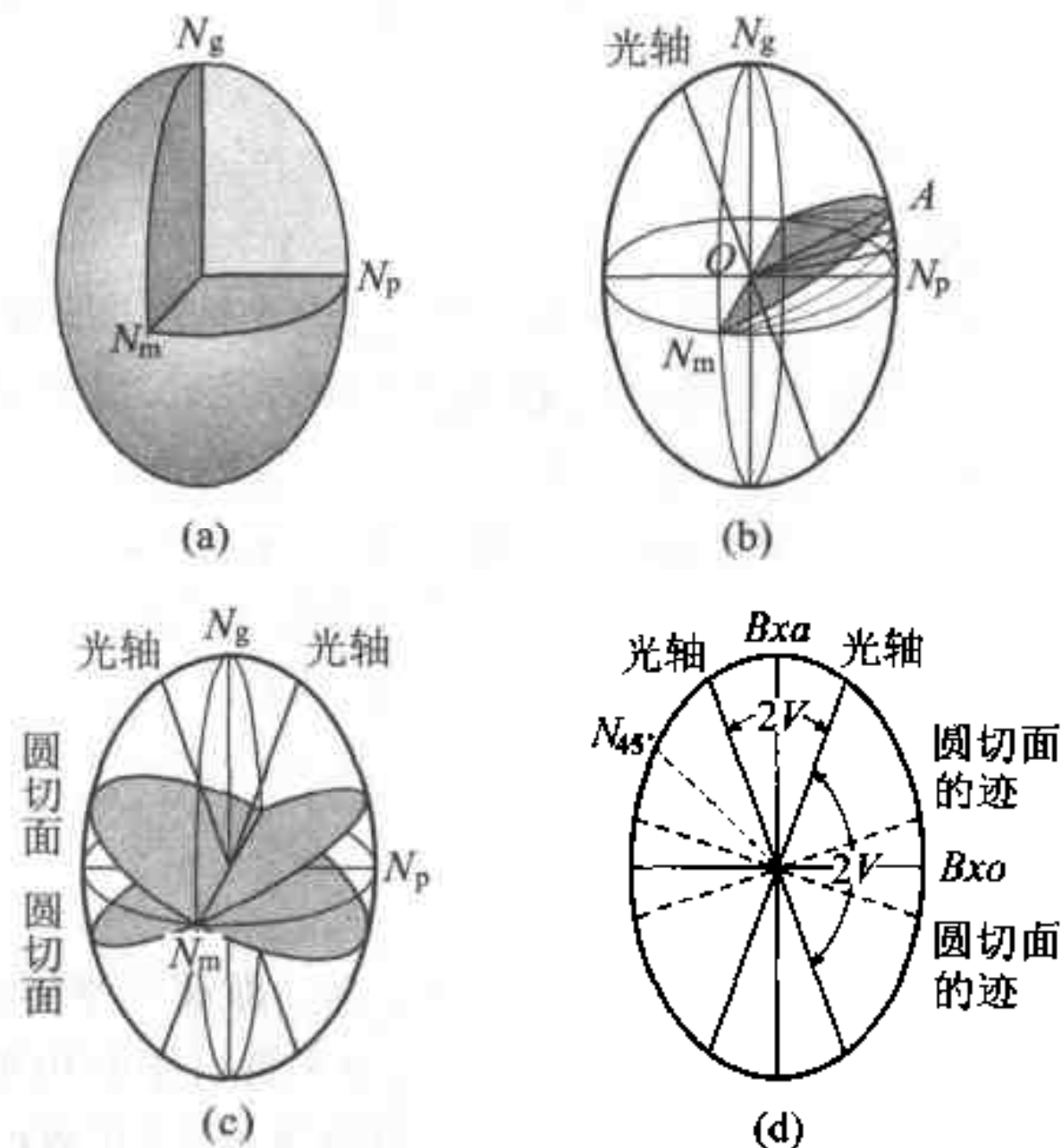


图 2-7 二轴晶光率体的构成

(a)二轴晶光率体立体图;(b)某圆切面及其光轴位置的确定;
(c)二轴晶光率体解析图;(d)在光轴面上的光轴角 $2V$ 、锐角等分线 Bxa 、钝角等分线 Bxo 和 45° 位置的折射率 N_{45}

(2) AO 与光学主轴 N_m 构成一个平面, 该平面与三轴椭球体相交得到一个 AON_m 切面。在三轴椭球体的任意椭圆切面上, 如果包含一个主轴, 那么该主轴必然为椭圆切面上的一个半径, 因此, 主轴 N_m 为 AON_m 切面上的一个半径。由于 AO 与 N_m 垂直, 所以 AO 为 AON_m 切面上的另一个半径。显然, 由于 $AO=N_m$, AON_m 切面必为圆切面(图 2-7(b))。

(3) 当光垂直这个圆切面入射时, 不发生双折射。因此, 这个圆切面的垂线方向为一个光轴(图 2-7(b))。

(4) 由于三轴椭球体两侧对称, 因此可以在 $N_g N_p$ 椭圆环的另一侧找到另一个圆切面及其光轴。该圆切面和光轴的位置完全与上一个圆切面和光轴的位置呈对称分布(图 2-7(c))。

(5) 由于光轴垂直 N_m (N_m 在圆切面内), 而 N_m 垂直 $N_g N_p$ 面(三个光学主轴彼此垂直), 所以, 光轴必然在 $N_g N_p$ 面内, 且对称地位于 N_g 或 N_p 两侧(图 2-7(d))。

因此, 低级晶族矿物的光率体中, 必然有两个光轴, 所以称为二轴晶矿物。

2.3.3 光轴角与光性符号

在二轴晶光率体中, 包含两个光轴的面, 称为光轴面, 即 $N_g N_p$ 面; 在光轴面内, 两个光轴之间的夹角称为光轴角, 以 $2V$ 表示。显然, 光轴角 ($2V$) 有二个不同的数值, 一个为锐角 ($<90^\circ$), 另一个为钝角 ($>90^\circ$), 其等分线分别以 Bxa (锐角等分线) 和 Bxo (钝角等分线) 表示(图 2-7(d))。

在晶体光学中, 二轴晶光率体的光性符号被定义为:

$Bxa=N_g, Bxo=N_p$, 为正光性(图 2-8(a)和(b));

$Bxa=N_p, Bxo=N_g$, 为负光性(图 2-8(c)和(d))。

2.3.4 光性符号的判别

二轴晶光率体的 Bxa 等于 N_g , 还是等于 N_p (即该光率体为正光性, 还是负光性), 完全取决于该二轴晶光率体的三个主折射率的相对大小。

(1) 在光轴面上, 根据 N_g 和 N_p 的大小可以求得 45° 位置的折射率大小 (以 N_{45° 表示)(图 2-7(d)):

$$N_{45^\circ} = N_g \times N_p \sqrt{\frac{1}{N_g^2 \cos^2 45^\circ + N_p^2 \sin^2 45^\circ}} = N_g \times N_p \sqrt{\frac{2}{N_g^2 + N_p^2}}$$

当 $N_m < N_{45^\circ}$ 时, 圆切面位于 N_p 与 N_{45° 之间, 则光轴位于 N_g 与 N_{45° 之间, $Bxa=N_g$, 为正光性; 当 $N_m > N_{45^\circ}$ 时, 圆切面位于 N_g 与 N_{45° 之间, 则光

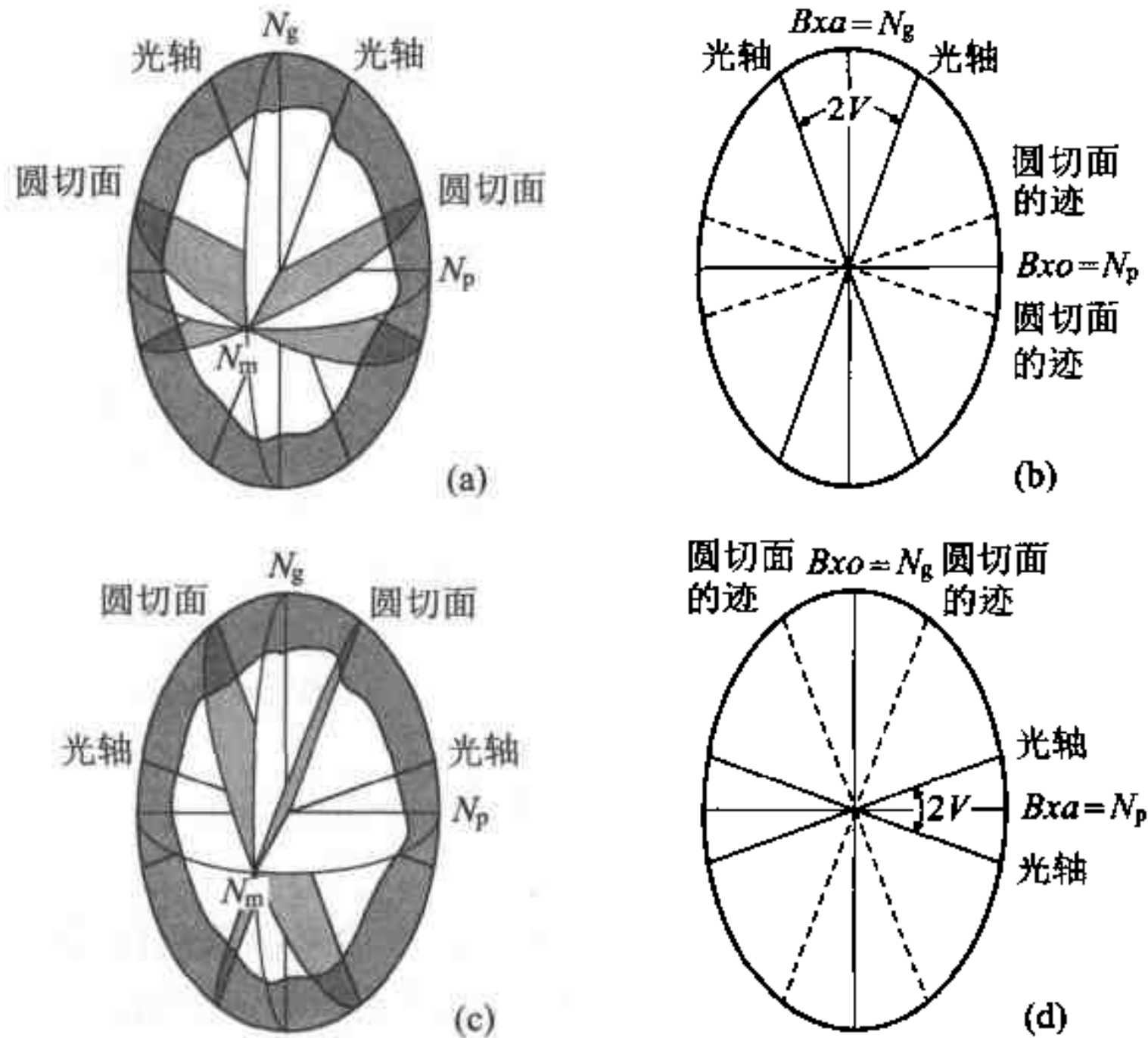


图 2-8 二轴晶光率体

- (a) 正光性光率体； (b) 正光性光轴面；
 (c) 负光性光率体； (d) 负光性光轴面

轴位于 N_p 与 N_{45° 之间, $Bxa = N_p$, 为负光性。该判别方法精确而直观, 但不便快速操作。

(2) 此外, 根据 N_g 一侧的半光轴角 (V) 的大小, 也可以作为判别光性符号的依据。

如图 2-9 可得:

$$\frac{x^2}{N_p^2} + \frac{y^2}{N_g^2} = 1$$

将 $x = N_m \cos V$, $y = N_m \sin V$ 代入上式, 可得

$$\frac{N_m^2 \cos^2 V}{N_p^2} + \frac{N_m^2 \sin^2 V}{N_g^2} = 1$$

因 $\sin^2 V + \cos^2 V = 1$, 故上式可改写为:

$$\frac{N_m^2 \cos^2 V}{N_p^2} + \frac{N_m^2 \sin^2 V}{N_g^2} = \sin^2 V + \cos^2 V$$

该方程式两边各除以 $\cos^2 V$, 并演算如下:

$$\frac{N_m^2}{N_p^2} + \frac{N_m^2}{N_g^2} \tan^2 V = \tan^2 V + 1$$

$$\tan^2 V \left(1 - \frac{N_m^2}{N_g^2}\right) = \frac{N_m^2}{N_p^2} - 1$$

$$\tan^2 V = \frac{N_g^2 (N_m^2 - N_p^2)}{N_p^2 (N_g^2 - N_m^2)}$$

$$\tan V = \frac{N_g}{N_p} \sqrt{\frac{(N_m + N_p)(N_m - N_p)}{(N_g + N_m)(N_g - N_m)}}$$

当该等式右项小于 1 时, 则 $V < 45^\circ$, $Bxa = N_g$, 为正光性; 当该等式右项大于 1 时, 则 $V > 45^\circ$, $Bxa = N_p$, 为负光性。

该公式不仅给出了光轴角 ($2V$) 的计算

方法, 而且反映了 Bxa 和 Bxo 的位置是由三个主折射率的相对大小决定的。

(3) 由于矿物的三个主折射率都大于 1, 且一般来说彼此比较接近 (其差别仅反映在小数点后的第二位或第三位上, 如上列的镁橄榄石), 故可近似地认为:

$$\frac{N_g}{N_p} \approx 1, \quad \frac{N_m + N_p}{N_g + N_m} \approx 1$$

所以, 上述半光轴角 (V) 的计算公式可以近似地改写为:

$$\tan V = \sqrt{\frac{N_m - N_p}{N_g - N_m}}$$

当 $N_g - N_m > N_m - N_p$ 时, 则 $\tan V < 1, V < 45^\circ, Bxa = N_g$, 为正光性; 当 $N_g - N_m < N_m - N_p$ 时, 则 $\tan V > 1, V > 45^\circ, Bxa = N_p$, 为负光性。事实上, $N_g - N_m > N_m - N_p$, 则意味着 N_m 相对接近 N_p , 即光率体中圆切面靠近 N_p , 光轴靠近 N_g 。因此, 在一般情况下 Bxa 为 N_g , 晶体为正光性。反之, $N_g - N_m < N_m - N_p$, 则意味着 N_m 相对接近 N_g , 即光率体中圆切面靠近 N_g , 光轴靠近 N_p , Bxa 为 N_p , 晶体为负光性。当 $N_g - N_m = N_m - N_p$ 时, $2V \cong 90^\circ$, 无 Bxa 和 Bxo 之分, 故光性符号非正非负, 如富镁橄榄石、霓辉石就是如此。由于这种判别方法的简便性, 故在晶体光学中, 往往利用 $(N_g - N_m)$ 和 $(N_m - N_p)$ 的相对大小来近似地判别二轴晶矿物的光性符号及计算光轴角的大小。

在矿物光性描述中, 光轴角 ($2V$) 一般都以锐角数值表示, 并在 $2V$ 前标

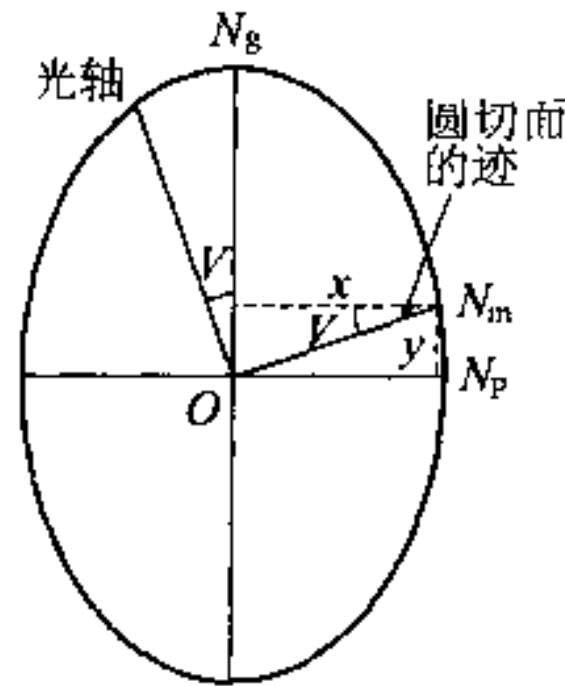


图 2-9 二轴晶光率体中光轴角的绝对大小与主折射率的相对大小之间的关系

写 (+) 或 (-), 表示光性正负。如普通辉石的 (+) $2V=58^\circ$, 说明它是正光性 ($Bxa=N_g$), 包含 N_g 的光轴角为 58° 。少数矿物的光轴角可以有较大的变化范围, 甚至由正光性(或负光性)变化为负光性(或正光性), 如钠长石光率体的 (+) $2V=77^\circ\sim 135^\circ$, 后一数据 (+) $2V=135^\circ$ 相当于 (-) $2V=180^\circ-135^\circ=45^\circ$ 。

2.3.5 切面类型

与一轴晶光率体一样, 利用二轴晶光率体也可以确定, 任意入射方向的光进入晶体后产生双折射的两束偏光的振动方向和折射率大小。在二轴晶光率体中(图 2-10 (a)), 同样可以随入射方向的改变, 经过光率体中心作无数个不同的椭圆切面, 它们可以被归纳为四种类型:

(1) 垂直光轴的切面(图 2-10 (b)): 光平行光轴入射时, 得到的是一个含无数 N_m 半径的特殊椭圆切面——圆切面 ($N_m N_m$ 面), 在二轴晶光率体中共有两个圆切面。垂直这两个圆切面传播的光的折射率为 N_m , $\Delta N=0$, 不发生双折射现象。

(2) 包含两个主轴的切面(图 2-10 (c)): 光分别平行 N_m 、 N_p 、 N_g 入射时, 得到含有两个主轴的椭圆切面 $N_g N_p$ 面、 $N_g N_m$ 面、 $N_m N_p$ 面, 共有三个主轴面。其中, $N_g N_p$ 面为光轴面, 两束偏光的折射率分别为最大值 (N_g) 和最小值 (N_p), 故该切面具有最大双折射率 ($\Delta N_{\max}=N_g-N_p$)。

(3) 只包含一个主轴的切面(图 2-10 (d)): 光仅垂直一个主轴入射时, 得到的椭圆切面上一个半径为主轴 (N_g 、 N_m 或 N_p), 另一个半径为 N_g' ($N_g > N_g' > N_m$) 或 N_p' ($N_m > N_p' > N_p$)。这类切面共有四个, 分别为 $N_g N_g'$ 面、 $N_g' N_m$ 面、 $N_m N_p'$ 面、 $N_g' N_p$ 面。在二轴晶光率体中, 除了圆切面, 任何切面上两束偏光的折射率总是一大 ($\geq N_m$) 一小 ($\leq N_m$) 的(参见第六章 6.3 节), 故不可能出现 $N_g N_g'$ 面或 $N_p' N_p$ 面。

(4) 不包含主轴的切面(图 2-10 (e)): 入射光以任意方向射入二轴晶矿物时, 得到的椭圆切面为 $N_g' N_p'$ 面, 其长半径 N_g' 和短半径 N_p' 的大小关系为: $N_g > N_g' > N_m > N_p' > N_p$; 其长、短半径的方向遵守菲涅尔定律, 即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(参见第六章 6.3 节)。

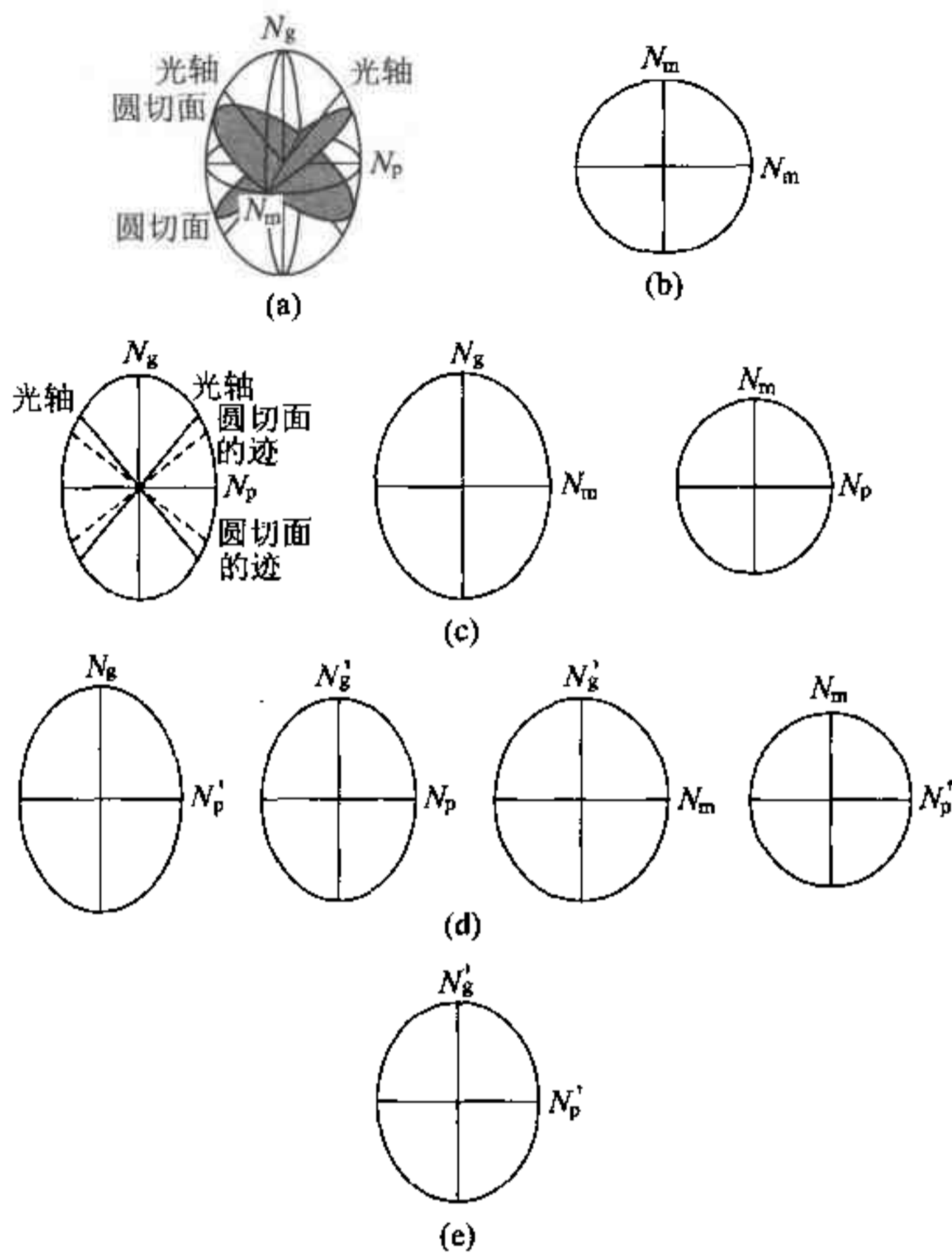


图 2-10 二轴晶光率体中的不同切面
 (a)二轴晶光率体； (b)圆切面； (c)主轴面；
 (d)含一个主轴的面； (e)任意切面

§ 2.4 光率体的主要参数

综上所述,无论是一轴晶矿物,还是二轴晶矿物,光沿着各种方向射入晶体时,在其光率体中都有一个相应的椭圆切面,其长短半径的位置代表两束偏光的振动方向,其长短半径的长度代表两束偏光的折射率。从双折射

率角度看,垂直光轴的切面上双折射率为0,平行光轴(对于一轴晶光率体)或平行光轴面(对于二轴晶光率体)的切面上双折射率为最大值,这两种方位的切面在鉴定矿物时最有意义(将在以下章节中介绍)。其他方位切面的双折射率介于上述两者之间。

对于二轴晶矿物来说,光轴角($2V$)是它的标志性参数(图2-11(a))。当 $2V$ 趋于 0° 时,两个光轴重合,同时两个圆切面也重合,二轴晶矿物变成一轴晶矿物(图2-11(b)),如滑石、黑云母、白云母、绿泥石等,它们的光轴角可以接近 0° 。反之,许多一轴晶矿物,如石英、方解石、刚玉、磷灰石、符山石、绿柱石等,在外应力或结晶应力影响下,可以呈现较小的光轴角,即由一轴晶矿物变成二轴晶矿物。因此,可以把一轴晶矿物看成是二轴晶矿物的特例(其 $2V=0^\circ$)。

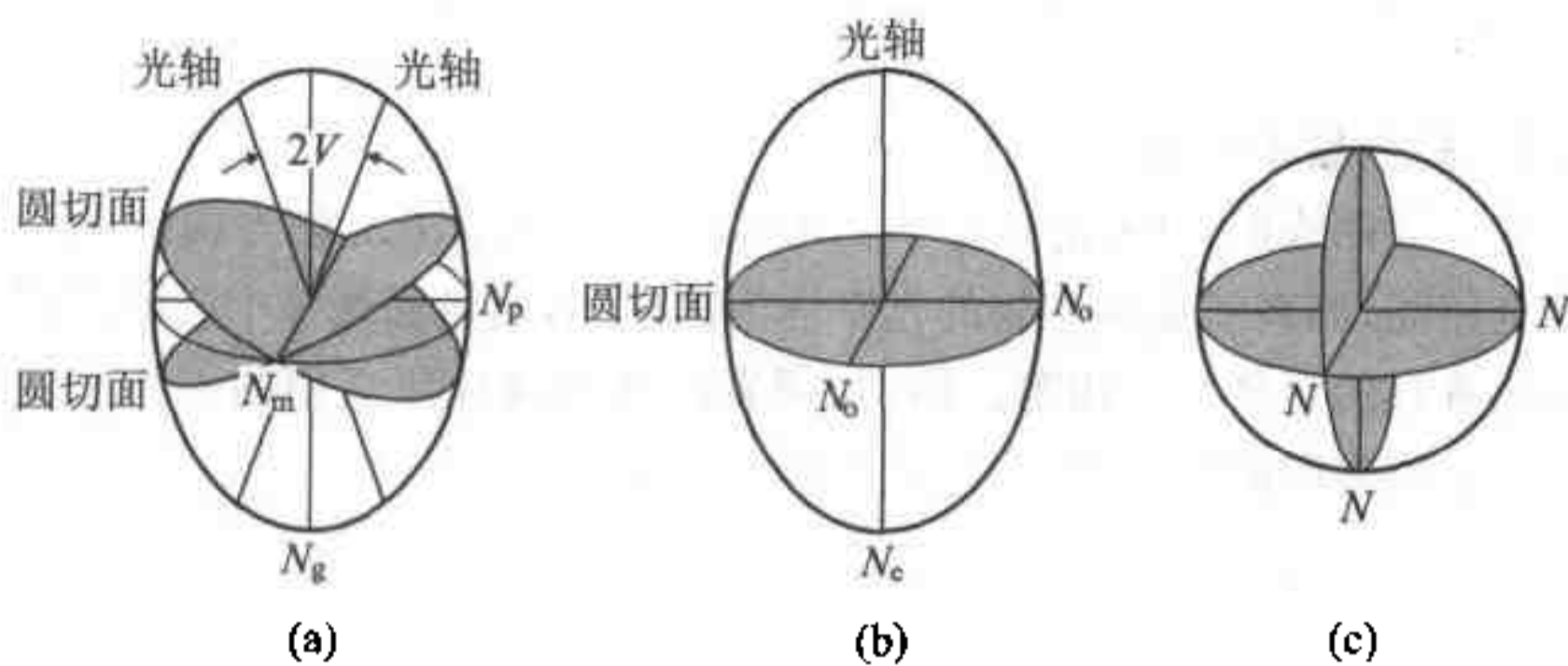


图2-11 三种光率体之间的转变关系

(a)二轴晶光率体; (b)一轴晶光率体; (c)均质体光率体

对于一轴晶矿物来说,最大双折射率($\Delta N_{\max} = |N_e - N_o|$)是它的标志性参数(图2-11(b))。当 ΔN_{\max} 趋于0时,三维方向的折射率完全相等,旋转椭球体变成圆形球体,即变成均质矿物光率体(图2-11(c))。但更多的是,不少均质矿物,如石榴子石、尖晶石、萤石等,在外应力或结晶应力影响下,可以出现较小的双折射率,即由均质矿物变成非均质矿物。因此,可以把均质矿物看成是一轴晶矿物的特例(其 $\Delta N_{\max}=0$)。

因此,从光率体的角度看,所有矿物的光学性质都是连续变化的,其中光轴角($2V$)和最大双折射率(ΔN_{\max})是最重要光性参数,因此,它们已成为鉴定矿物的主要依据。

§ 2.5 光性方位

光率体的建立使我们可以直观地判断,任意方向入射光进入晶体后所产生的两束偏光的振动方向与折射率之间的相互关系。虽然光率体是从晶体光学现象中抽象出来的立体形态,即它并不存在于晶体中的某个部位,也没有绝对的几何尺寸,仅仅是相对入射光的位置和方向而抽象地存在。但是,对于具体的矿物,这种抽象的光率体的几何方位是以完全固定的方式存在于晶体之中的,即光率体的主轴与晶体的结晶轴之间有着一定的空间关系(方向、夹角),我们把这种关系称为光性方位。实际上,从光率体的构成过程可以看到,光率体在晶体中的方位严格地受到晶体对称性的支配,因此,不同晶系矿物有着不同的光性方位。

2.5.1 高级晶族矿物

在高级晶族矿物中, $a_0 = b_0 = c_0$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, a, b, c 轴方向的物理性质完全相同,而高级晶族矿物的光率体为圆球体,通过圆球体中心的任何三个互相垂直的直径完全相等。因此,两者的各向同性使它们的光性方位不受任何空间方向的制约(图 2-12 (a))。

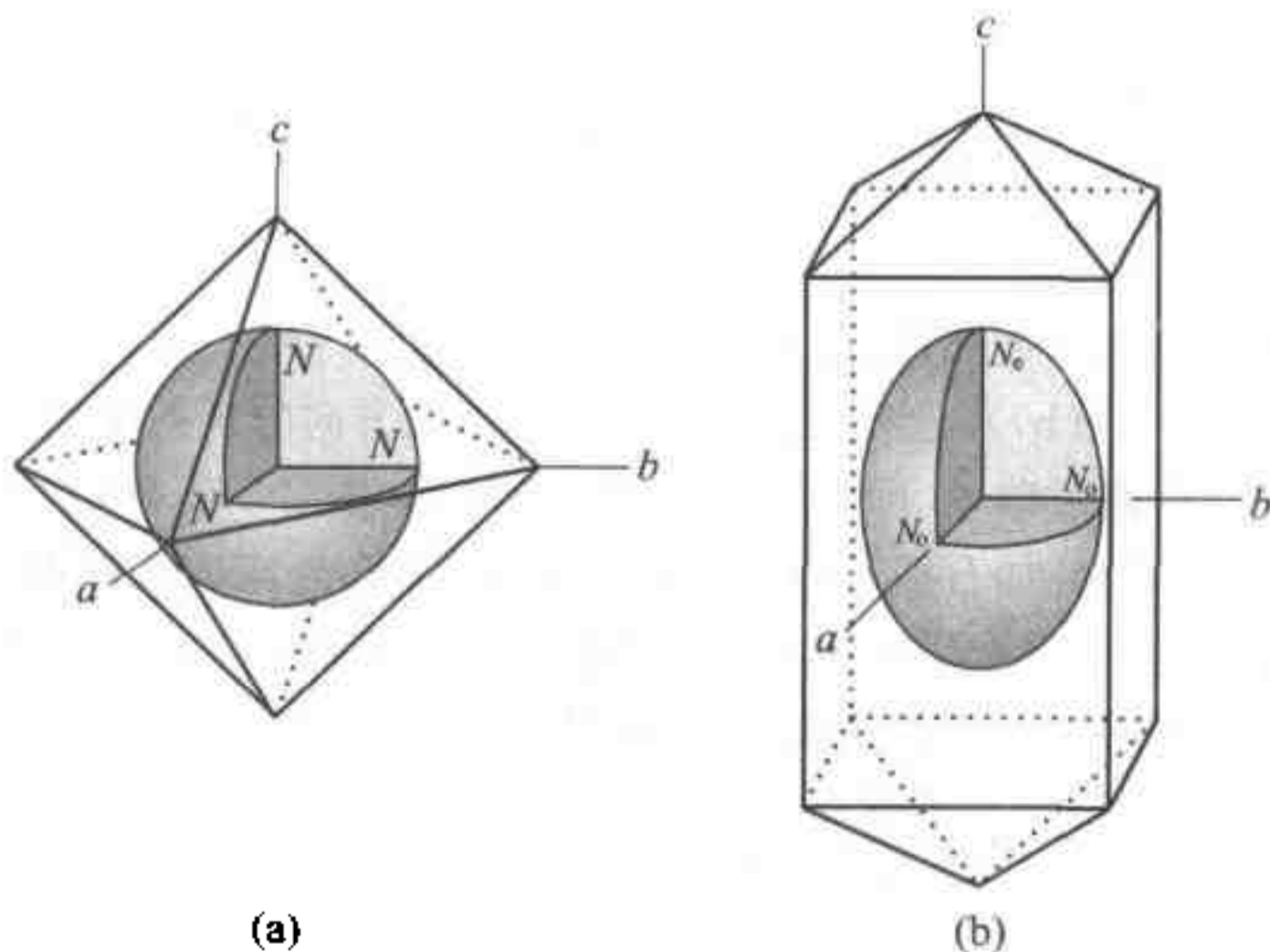


图 2-12 高级晶族和中级晶族矿物的光性方位

(a)等轴晶系矿物; (b)四方晶系矿物

2.5.2 中级晶族矿物

在中级晶族矿物中, $a_0 = b_0 \neq c_0, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。 a, b 轴方向具有几乎相同的物理性质, 而 c 轴方向具有与 a, b 轴方向不同的物理性质。这导致了中级晶族矿物的光率体为一个以 c 轴为旋转轴的旋转椭球体, 即 c 轴平行光率体的旋转轴, 而 a, b 轴平行光率体的圆切面, 故中级晶族矿物的光性方位为: c 轴 $\parallel N_c, a$ 轴和 b 轴 $\parallel N_o$, 光率体呈直立状态(以其旋转轴相对 ab 平而而言)存在于中级晶族矿物之中(图 2-12 (b))。

2.5.3 低级晶族矿物

在低级晶族矿物中, $a_0 \neq b_0 \neq c_0, a, b, c$ 轴方向具有不同的物理性质, 这导致了低级晶族矿物的光率体为一个三轴椭球体, 即有三个主折射率 N_g, N_m, N_p , 彼此互相垂直, 相当于三个二次旋转轴。

1. 斜方晶系

斜方晶系矿物的轴角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, 三个结晶轴 a, b, c 轴互相垂直, 它们正好是三个二次对称轴的位置。因此, 三个结晶轴与光率体的三个主折射率方向对应, 即斜方晶系矿物的光性方位为: 二轴晶光率体的三个主轴分别与 a, b, c 轴平行(图 2-13 (a))。

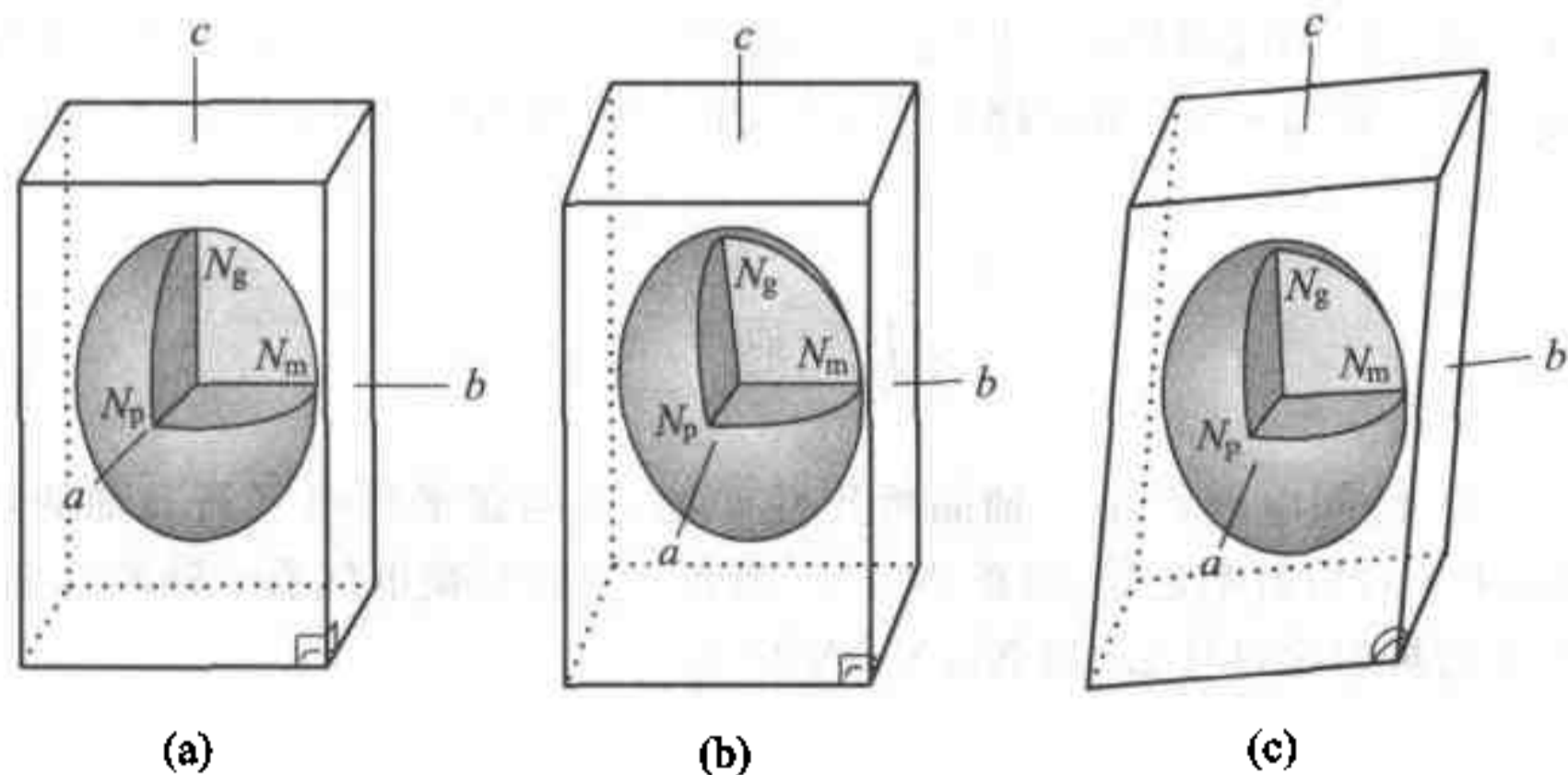


图 2-13 低级晶族矿物的光性方位

(a)斜方晶系矿物; (b)单斜晶系矿物; (c)三斜晶系矿物

然而, 究竟哪个主轴与哪个结晶轴平行, 随矿物而异, 并取决于晶体定向时结晶轴的选定。具体地说, 斜方晶系矿物的光性方位有六种可能的情况:

(1) $a \parallel N_g$: ① $b \parallel N_m, c \parallel N_p$, 如红柱石; ② $b \parallel N_p, c \parallel N_m$, 如橄榄石。

(2) $b // N_g$: ① $a // N_m, c // N_p$, 如文石; ② $a // N_p, c // N_m$, 如硅镁石。

(3) $c // N_g$: ① $a // N_m, b // N_p$, 如十字石; ② $a // N_p, b // N_m$, 如黄玉。

2. 单斜晶系

单斜晶系矿物的轴角 $\alpha = \gamma = 90^\circ < \beta$, 即 b 轴同时垂直 a 轴和 c 轴。在单斜晶系的最高对称型中, b 轴是唯一的二次对称轴, 这样, b 轴将与光率体的一个主轴平行, 另两个主轴分别与 a, c 轴斜交(图 2-13 (b))。究竟哪个主轴与 b 轴平行, 随不同的矿物而变化, 但不外乎三种可能的光性方位:

(1) $b // N_g, a, c$ 轴与 N_m, N_p 斜交, 如正长石。

(2) $b // N_m, a, c$ 轴与 N_g, N_p 斜交, 如透闪石。

(3) $b // N_p, a, c$ 轴与 N_g, N_m 斜交, 如独居石。

在单斜晶系的结晶学方位中, 正 a 轴与正 c 轴、负 a 轴与负 c 轴之间的夹角为 $+\beta$, $+\beta$ 大于 90° ; 正 a 轴与负 c 轴、负 a 轴与正 c 轴之间的夹角为 $-\beta$, $-\beta$ 小于 90° ($+\beta$ 和 $-\beta$ 构成补角关系)。如果某个光学主轴与某个结晶轴 (a 轴或 c 轴) 的夹角小于 45° , 当它位于 $+\beta$ 内时, 该光学主轴与结晶轴的夹角用正值表示; 当它位于 $-\beta$ 内时, 该光学主轴与结晶轴的夹角用负值表示。例如, 在单斜晶系的普通辉石中, $c \wedge N_g = +44^\circ$, 而 $a \wedge N_p = -20^\circ$ 。

3. 三斜晶系

三斜晶系矿物的轴角 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$, 即三个结晶轴彼此互不垂直, 也没有二次对称轴或对称面。因此, 三斜晶系矿物的光性方位为: 二轴晶光率体的三个主轴与三个结晶轴都斜交, 斜交的方位和角度随不同的矿物而异(图 2-13 (c))。

习 题 二

1. 已知电气石是一轴晶负光性矿物, 试问在平行电气石 c 轴的切面上, 快光的折射率是什么(指 N_e, N_e' 或 N_o)? 在斜交电气石 c 轴的切面上, 快光的折射率是什么(指 N_e, N_e' 或 N_o)?

2. 石英是一轴晶正光性矿物, 已知其 $\Delta N_{\max} = 0.009$, 试问: 具最大双折射率的切面是什么切面(指 $N_e N_o, N_e' N_o$ 或 $N_o N_o$)? 在该切面上测得其慢光的折射率为 1.553, 则快光的折射率应为多少? 在什么切面上测得的折射率只有一个(指 $N_e N_o, N_e' N_o$ 或 $N_o N_o$)?

3. 在二轴晶光率体中, 有五种包含 N_m 主轴的不同切面, 试分别说明 N_m 主轴在这些切面上代表快光还是慢光的振动方向。

4. 已知某矿物的光性方位: $b // N_p = 1.693, a // N_m = 1.700, c // N_g =$

1.705, 试问该矿物属哪个晶系? 其垂直 Bxa 、垂直 Bxo 和垂直 N_m 的三种切面的结晶学方位(以 (hkl) 表示)?

5. 已知在磷灰石(属六方晶系矿物)中, 一束振动方向平行 c 轴的光的折射率为 1.624, 另一束振动方向垂直 c 轴的光的折射率为 1.629, 试问该矿物的光性符号、最大双折射率以及垂直光轴的切面上的双折射率?

6. 已知黄晶(属斜方晶系矿物)的 (010) 面上两个主折射率分别是 1.607 和 1.617, (001) 面上两个主折射率分别是 1.607 和 1.610, 试问该矿物的光性符号、光性方位和光轴面的结晶学方位(以 (hkl) 表示)?

7. 已知透辉石(属单斜晶系矿物)的 (010) 面上两个折射率分别是 1.664 和 1.694, 在垂直 (010) 面上并与 c 轴相交 50° 的切面(该切面的法线位于 $+\beta$ 内并与 c 轴相交 40° , $+\beta=105^\circ 50'$)上, 两个主折射率分别是 1.664 和 1.671, 试问该矿物的光性符号、光性方位(定量)和光轴面的结晶学方位(以 (hkl) 表示)?

8. 已知正长石(属单斜晶系矿物)的 (010) 面上两个主折射率为 N_p 和 N_m , 它们分别等于 1.519 和 1.523, 正长石的 $\Delta N_{\max}=0.006$, 光轴面位于 $+\beta$ 内($+\beta=116^\circ$)并与 a 轴相交 5° , 试问该矿物的光性符号和光性方位(定量)?

9. 已知普通角闪石(属单斜晶系矿物)的三个主折射率分别为: $N_g=1.633$, $N_m=1.628$, $N_p=1.614$, b 轴垂直于光轴面, N_g 在 $+\beta$ 内($+\beta=106^\circ$)并与 c 轴呈 25° 夹角, 试确定该矿物光性符号, 并绘出光性方位图以及 (001) 、 (010) 、 (100) 三种切面上光率体椭圆半径与 $\{110\}$ 解理缝关系图。

第三章 偏光显微镜

偏光显微镜是研究晶体切片光学性质的重要仪器,它与普通生物显微镜的重要区别在于它装有两个偏光镜。其中,一个位于载物台之下,称为下偏光镜(或称起偏镜),另一个位于物镜之上,称为上偏光镜(或称分析镜)。透过二者出来的光波都是平面偏光,但其振动方向互相垂直。利用这种装置,使我们可以测定普通生物显微镜所不能观测到的晶体的许多光学特性。

§ 3.1 偏光显微镜的构造

偏光显微镜的型号较多,如目前教学中使用的我国江南光学仪器厂产的XPB型和日本Nikon公司产的Alphaphot-2 Pol型偏光显微镜、科研中使用的德国Leitz公司产的Orthoplan型和日本Olympus公司产的BH-SP型偏光显微镜等,无论是前者还是后者,它们的构造和作用是完全相似的。下面以江南光学仪器厂产的XPB型偏光显微镜为主(图3-1),以日本Nikon公司产的Alphaphot-2 Pol型偏光显微镜为辅(图3-2),介绍偏光显微镜的构造及其功能。

(1) 镜座:它支持偏光显微镜的全部重量,其外形为具立柱的马蹄形,通过横轴与镜臂相连(图3-1)。在高级偏光显微镜上,通常为矩形底座,其后方装有卤素光源灯,中部圆孔上装有孔径光阑,侧面装有电源开关(图3-2)。

(2) 镜臂:呈弓形体,其下端与镜座相连,上端与镜筒相接。与镜筒连接处,装有粗动螺旋和微动螺旋,以升降镜筒。为了方便观测,镜臂可以向后倾斜,但不宜过度,以防偏光显微镜翻倒(图3-1)。在高级偏光显微镜上,镜臂与镜座是连为一体的,其两侧的粗动螺旋和微动螺旋用于调节载物台的高度(图3-2)。

(3) 反光镜:为一个具平、凹两面的小圆镜,可以任意转动,以把光源的光线反射到偏光显微镜的光学系统中去。一般情况下,使用平面反光镜,获取平行的透射光;但在光源较弱或锥光系统下,应使用凹面反光镜(图3-1)。在高级偏光显微镜上,由于它本身装有光源,故不需要通过反光镜来获得光线(图3-2)。

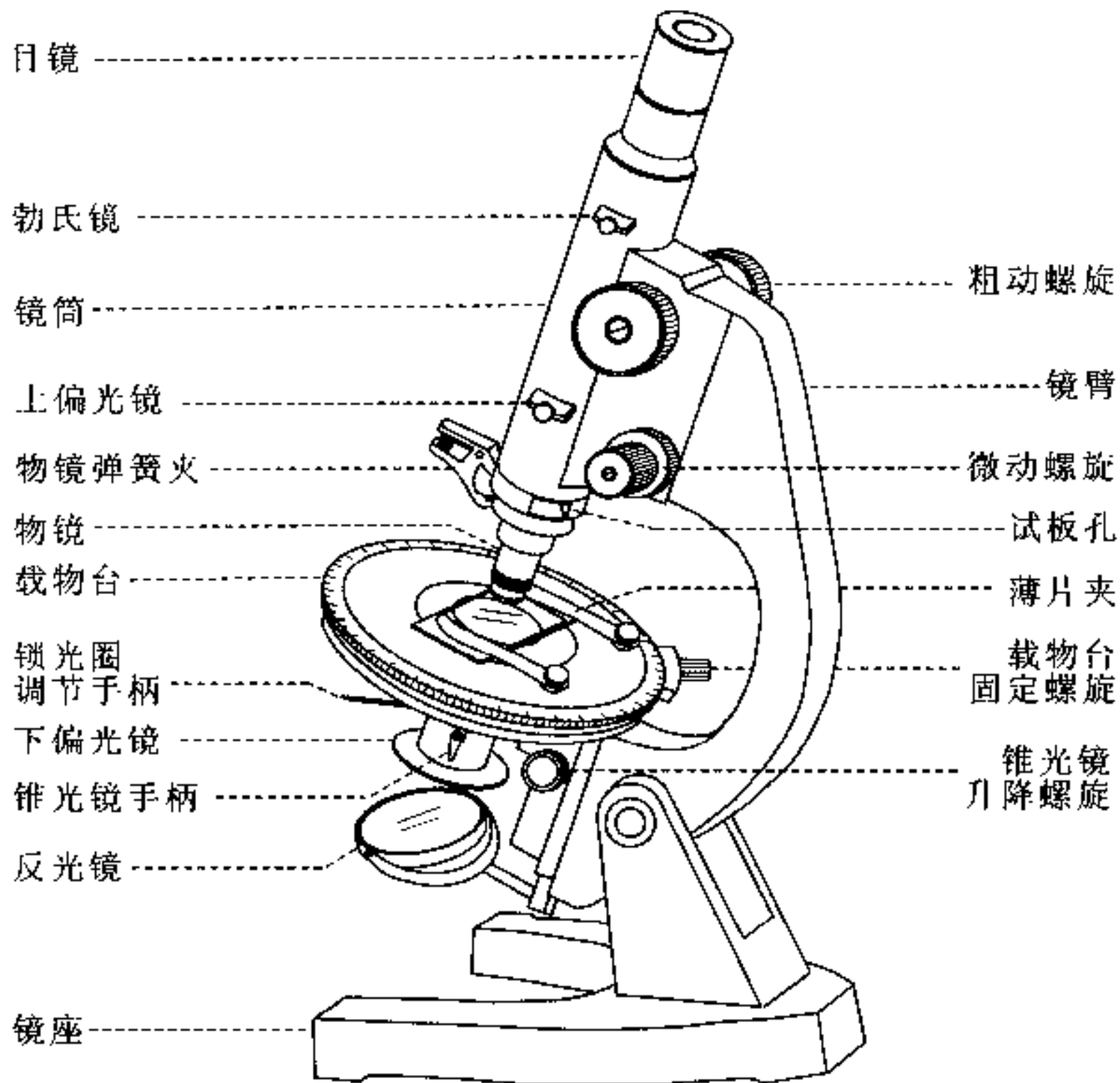


图 3-1 江南光学仪器厂制造的 XPB 型偏光显微镜

(4) 下偏光镜(起偏镜):由偏光片制成,位于反光镜之上。从普通光源发出的自然光,经反光镜射入下偏光镜,发生偏振化作用,自然光全部转化为振动方向固定一致的偏光。下偏光镜可以转动,通常将下偏光镜的振动方向(即通过它之后偏光的振动方向)调节在南北向,并以符号“PP”表示。

(5) 锁光圈(光阑):位于下偏光镜之上,通过转动手柄,可以自由开合锁光圈,以控制光线的透过量。

(6) 锥光镜:位于锁光圈与载物台之间,由一组透镜组成。从下偏光镜透出的偏光,经过锥光镜而聚敛成锥形偏光束。装有锥光镜升降螺旋,以调节锥光镜的高度。不用时可以通过一个连接手柄,把锥光镜推出光学系统。

(7) 载物台:为一个可以水平转动的圆形平台,其边缘有 360° 的刻度,与固定的游标尺配合,可以直接读出载物台的旋转角度。载物台中央有一个圆孔,为光线的通道。圆孔旁还有一对薄片夹,用以夹持薄片。载物台外缘有固定螺丝,用以固定载物台。在高级偏光显微镜上,载物台一般呈水平

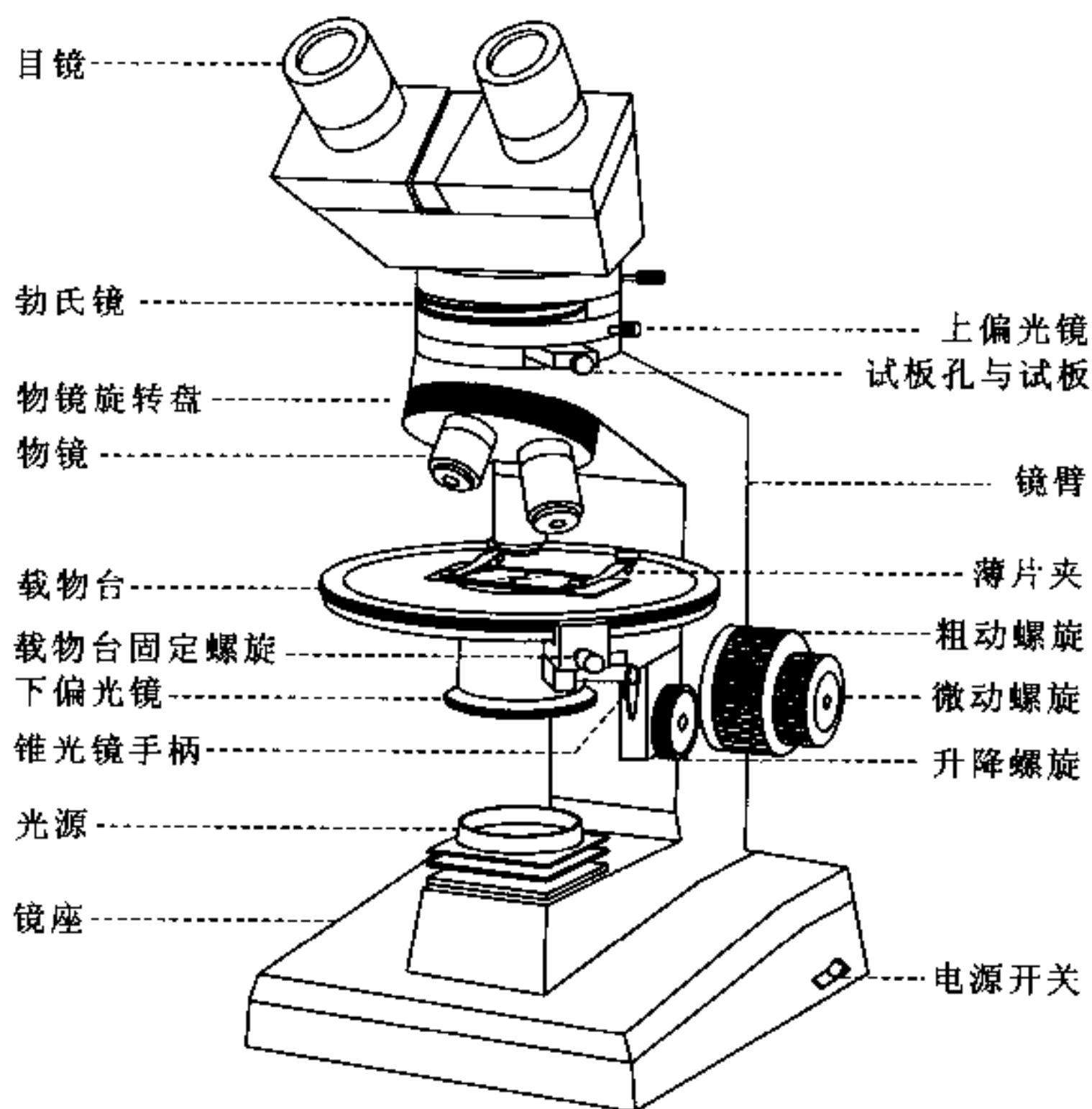


图 3-2 日本 Nikon 公司制造的 Alphaphot-2 Pol 型偏光显微镜

状态,但可通过安装在镜臂上的粗动螺旋、微动螺旋进行升降,以调节载物台与物镜之间的距离(图 3-2)。

(8)镜筒:为一个长直的圆筒,连接在镜臂上。转动镜臂上的粗动螺旋和微动螺旋,可以使镜筒上升或下降。镜筒上端连接目镜,下端连接物镜,中间有试板孔、上偏光镜和勃氏镜。

(9)物镜(接物镜):为偏光显微镜上最重要的光学部件之一,由安装在金属圆筒中的若干组透镜构成。一般偏光显微镜配备四个不同放大倍数(以 $n\times$ 表示)的物镜,即 $4\times$ (称为低倍物镜)、 $10\times$ 和 $25\times$ (中倍物镜)、 $45\times$ (高倍物镜)。在每个物镜上,刻有放大倍数、数值孔径(N. A.),前者与图像清晰度成反比,后者与图像清晰度成正比。物镜与薄片之间的距离称为物镜的工作距离,它与物镜的放大倍数成反比。在 XPB 型偏光显微镜上,物镜借助于弹簧夹固定在镜筒的下端(图 3-1),而在高级偏光显微镜上,镜筒的下端为物镜旋转盘,其上随意装置 4~5 个不同放大倍数的物镜,

只需转动该圆盘即可更换物镜(图 3-2)。

(10)上偏光镜(分析镜):镶嵌在一个金属框中,置于物镜与勃氏镜之间,可以推入或拉出光学系统。其功能与下偏光镜相同,即任何振动方向的光,经过上偏光镜后,都转化为振动方向固定一致的偏光。上偏光镜的振动方向(即通过它之后偏光的振动方向)总是固定在与下偏光镜的振动方向垂直的位置上,通常为东西向,以符号“AA”表示。

(11)勃氏镜:位于目镜与上偏光镜之间,是一个小的凸透镜。在聚敛偏光系统下,勃氏镜和高倍物镜联合使用,以观察较大范围的矿物干涉图。在非聚敛偏光系统下,把勃氏镜推离镜筒中心,以保持清晰的光学系统。

(12)目镜(接目镜):由一组安装在金属圆筒中的透镜构成,插入到镜筒的顶端(如 XPB 型偏光显微镜)。一般有 $5\times$ 和 $10\times$ 两种放大倍数的目镜。偏光显微镜的总放大倍数为目镜放大倍数与物镜放大倍数的乘积。例如,使用 $25\times$ 的物镜和 $10\times$ 的目镜时,其总放大倍数应为 $25\times 10=250$ 倍。在高级偏光显微镜上,安装有两个目镜,其间距及焦距可按观察者的使用情况进行调节(图 3-2)。目镜中通常装有十字丝和分度尺。

上述部件分别组成偏光显微镜的两个操作系统:

(1)机械系统:包括镜座、镜臂、镜筒、载物台、锁光圈等,需坚固、精密而又灵便,以保证偏光显微镜的光学性能。

(2)光学系统:包括光源、反光镜、下偏光镜、锥光镜、物镜、上偏光镜、勃氏镜、目镜等,是偏光显微镜的关键所在,其性能与质量直接决定观察图像的大小、像差、色差和清晰度。

除上述主要部件以外,偏光显微镜还配有石膏试板、云母试板、石英楔、物镜中心校正螺丝等附件,置于镜头盒中,其用途将在下面有关章节中介绍。

§ 3.2 偏光显微镜的光学系统

偏光显微镜与一般显微镜的不同之处在于它的光学系统中配有两个偏光镜和一个锥光镜,这三件装置的不同组合构成了不同的光学系统。

(1)单偏光系统:只使用下偏光镜,即射入晶体切片中的是单一方向(一般固定在南北方向)振动的平面偏光。在该系统下,主要观察矿物的形态、解理、颜色、突起、糙面、贝克线等现象。

(2)正交偏光系统:在单偏光系统中,把上偏光镜推入镜筒,上、下偏光镜的振动方向互相垂直(一般分别固定在东西和南北方向),与目镜十字丝

一致。在该系统下,主要观察矿物的消光、干涉色、延性、双晶等现象。

(3)聚敛偏光系统:在正交偏光系统中,推入锥光镜,并加上高倍物镜和勃氏镜。在该系统下,主要观察矿物的干涉图,以测定矿物的轴性和光性符号。

§ 3.3 偏光显微镜的调节

作为精密光学仪器,偏光显微镜在使用过程中会偏离正常的工作状态,因此需要经常调节才能达到观察和测试的要求。除了对光、准焦等调节,偏光显微镜最重要的调节就是物镜的中心校正和上、下偏光镜的正交校正。

3.3.1 物镜的中心校正

在偏光显微镜的光学系统中,载物台、物镜和目镜的中心应当严格处在光学系统的中轴线上(图3-3)。此时旋转载物台,视域中心(以目镜十字丝的交点为标志)的物像仅在原地旋转,其余部位的物像则围绕视域中心作圆周运动(图3-4(c))。然而,在偏光显微镜使用过程中,为了放大或缩小所观察的视域,经常需要更换物镜,导致了物镜偏离上述中轴线。此时,视域内的部分物像将随着载物台的旋转而转出视域(图3-4(a)),从而妨碍全方位地观察和测定矿物的光学性质。

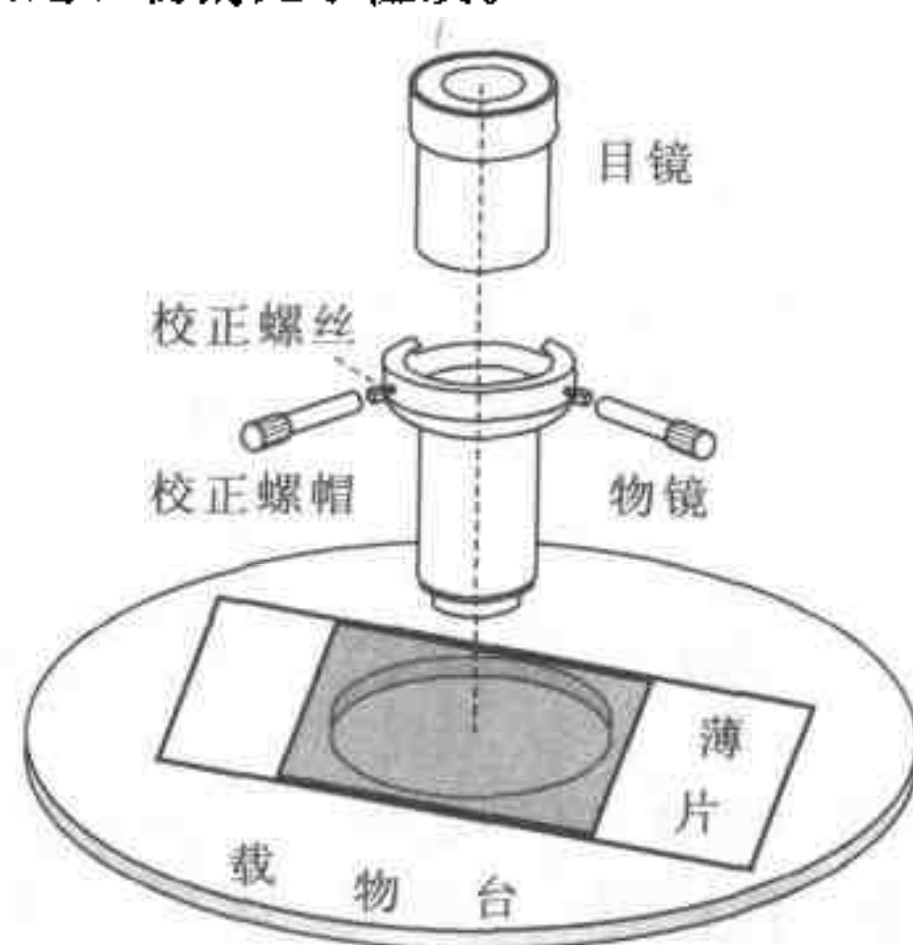


图3-3 位于中轴线上的载物台、物镜与目镜

由于安插在镜筒顶端的目镜是不能作水平方向移动的,安装在镜臂上的载物台也只能原地旋转,所以,只有调节物镜才可以使得偏光显微镜的光学系统严格地处于中轴线上。实际上,物镜的金属底座(把物镜固定在镜筒

上的部件)上安装有两个校正螺丝(图 3-3),用以调节物镜与镜筒(或物镜旋转盘)在水平方向上的相对位置。

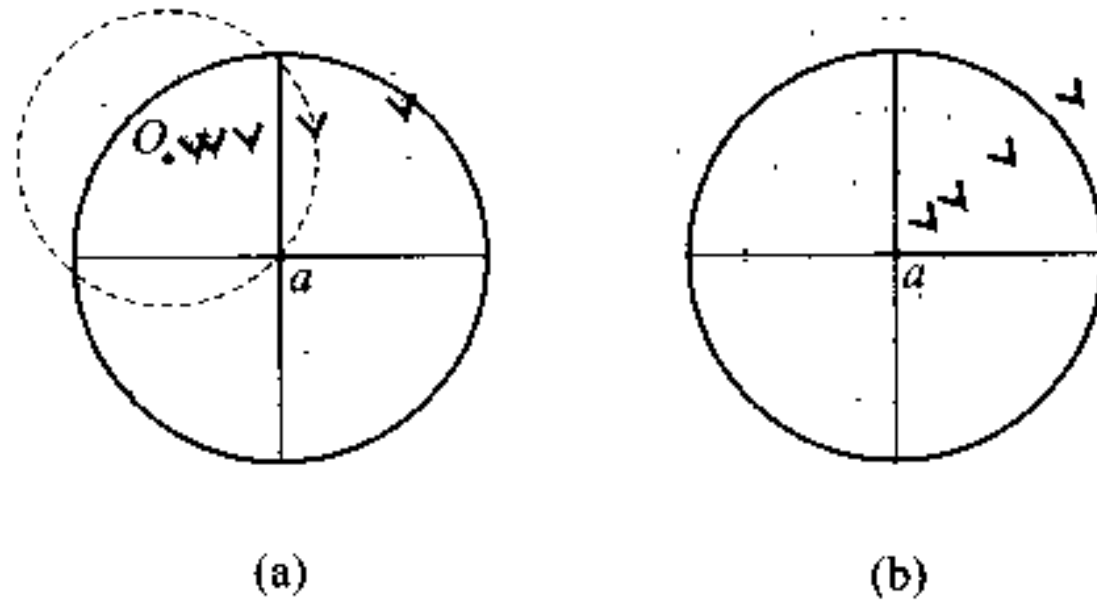


图 3-4 物镜的中心校正

- (a) 物镜偏离中轴线时,旋转载物台视域内质点的移动情况;
 (b) 物镜位于中轴线时,旋转载物台视域内质点的移动情况

在物镜中心校正前,应检查物镜是否安装到位,否则不仅无法校正,而且容易损坏校正螺丝。物镜中心校正的步骤如下:

(1) 在薄片选定一个任意标志点 a , 移动薄片使它位于视域中心(即十字丝交点)(图 3-4(a))。

(2) 将薄片固定,旋转载物台,观察标志点 a 的运动轨迹。若标志点 a 离开视域中心(图 3-4(a)),则说明物镜偏离中轴线。此时,继续不断地转动载物台,以确定作圆周运动的标志点 a 所围绕的圆心 O 点,该 O 点实为物镜偏离中轴线时视域内所见的载物台中心。

(3) 分别扭动两个校正螺丝,使圆心 O 点移至视域中心。

(4) 重复上述步骤 1、2 和 3,直至标志点 a 位于视域中心作原地旋转,则说明物镜完全处于中轴线上,中心校正完毕(图 3-4(b))。

3.3.2 上、下偏光镜的正交校正

在偏光显微镜的光学系统中,上、下偏光镜的振动方向互相垂直,分别平行东西、南北方向(取地理学的上北下南、左西右东之意),与目镜十字丝的方向一致。在使用偏光显微镜时,必须检验和校正上、下偏光镜的振动方向,其步骤如下:

(1) 校正下偏光镜的振动方向:在单偏光系统下,在薄片中寻找一个具极完全解理的黑云母切面(即 $(hk0)$ 面),置于视域中心,转动载物台,黑云

母的颜色发生深浅交替变化(图 3-5)。当黑云母的颜色变得最深时,解理缝的方向就是下偏光镜的振动方向(参见第四章 4.3 节)。如果颜色最深时的黑云母解理缝的方向与目镜十字丝的纵丝方向(南北方向)平行(图 3-5 (c)),则下偏光镜的振动方向正好在南北方向,故无需校正。如果不平行,则旋转载物台,使黑云母解理缝的方向与目镜十字丝的纵丝方向平行,然后旋转下偏光镜,至黑云母的颜色变得最深时为止,此时下偏光镜的振动方向位于南北方向。

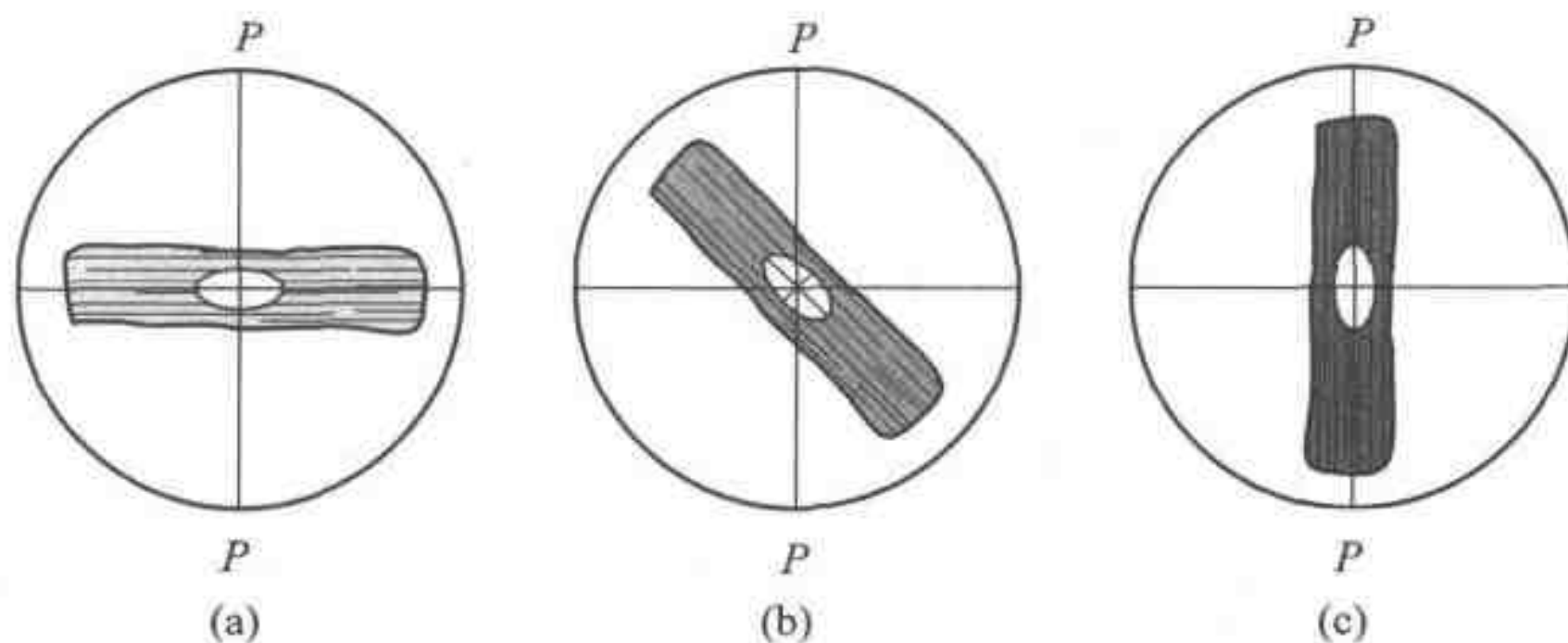


图 3-5 在单偏光系统下黑云母的 $(hk0)$ 切面上颜色的深浅变化
 (a)解理缝垂直下偏光镜振动方向时,黑云母的颜色最浅;
 (b)解理缝斜交下偏光镜振动方向时,黑云母的颜色变深;
 (c)解理缝平行下偏光镜振动方向时,黑云母的颜色最深

(2) 校正上偏光镜的振动方向:当移去薄片、推入上偏光镜后,如果视域完全黑暗,说明上、下偏光镜的振动方向垂直(图 3-6),故无需校正;如

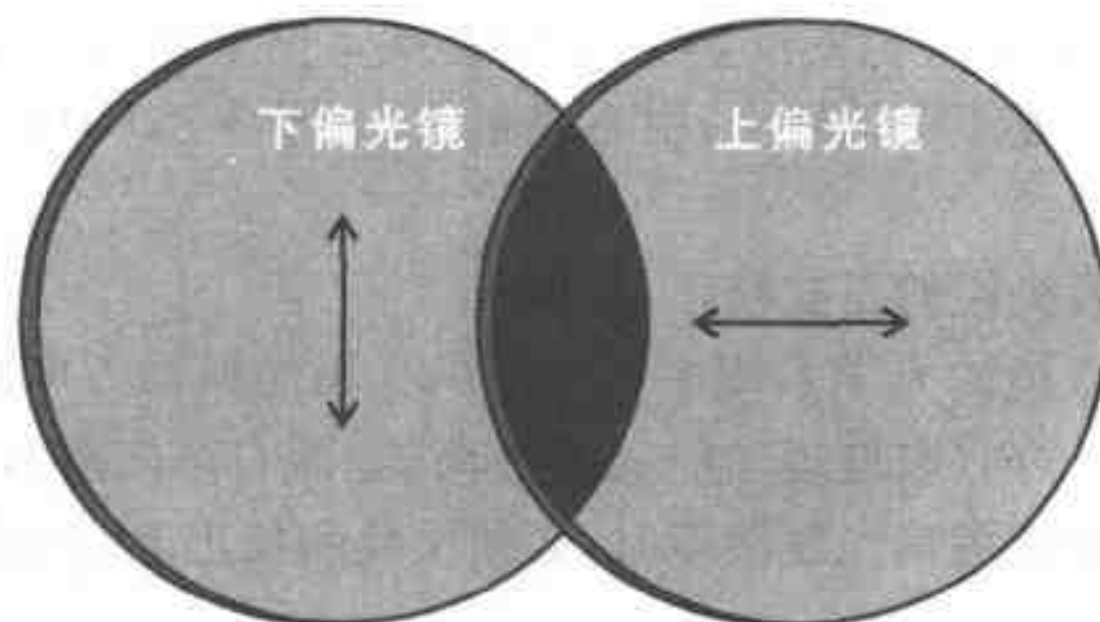


图 3-6 上、下偏光镜垂直时,透射的自然光被完全吸收

果视域不完全黑暗,则连续转动上偏光镜的偏振片,至视域完全黑暗为止,此时上、下偏光镜的振动方向必然正交,即上偏光镜的振动方向平行目镜十字丝的横丝方向(东西方向)。有些型号的偏光显微镜(如江南光学仪器厂的XPB型偏光显微镜)的上偏光镜偏振片振动方向是固定在东西方向上的,如发生偏离情况则需请专业人员对其进行校正。

§ 3.4 薄片的制作

在偏光显微镜下观察的不是岩石或矿物的手标本,而是它们的切片。首先,用切片机从手标本上切下一小片,其面积略小于盖玻片的面积;然后,把切片的一面磨平,用折射率等于 1.54 的树胶把这一平整面粘在载玻片中部(普通载玻片的面积为 $25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,厚约 1 mm);接着,磨薄、磨平切片的另一面,至 0.03 mm 厚为止,再用同样的树胶把盖玻片(普通盖玻片的面积为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,厚约 0.17 mm)粘在该面上。一块三层结构的岩石薄片制作完成(图 3-7)。

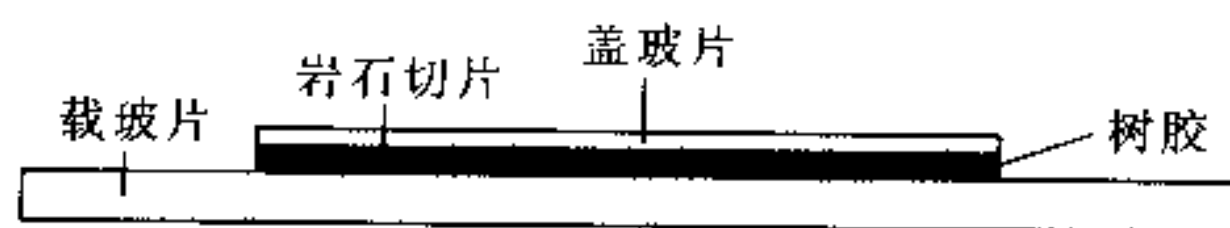


图 3-7 岩石薄片剖面示意图

为了一些特殊的需要(如矿物染色、电子探针分析),可以不加盖玻片,并对表面抛光,这样的薄片称为光薄片。

把薄片放到载物台上时,必须将盖玻片朝上,载玻片与载物台接触,并用薄片夹将其固定在载物台上。如果反向安装的话,一则可能因为不平稳而造成薄片破裂,二则因为载玻片的厚度较大而影响物镜的准焦,甚至在使用高倍物镜时损坏薄片及镜头,故必须正确安装。

习 题 三

1. 自然光经过下偏光镜后,光线强度是否要减弱?为什么?
2. 传统的偏光显微镜中的偏光镜是由两块完全相同、彼此倒置的楔形体冰洲石(称为尼克尔棱镜)组合构成(两者之间有一定的空隙)。试作图表

示该类偏光镜的工作原理：一束任意振动方向的光波（即自然光源），通过偏光镜的双折射和全反射作用，转变为一束固定振动方向的偏光（即下偏光）。

3. 在物镜中心校正时，旋转载物台发现圆心点 O （即载物台中心点）在视域之外很远的位置，且根本无法将其移进视域，其原因何在？

4. 自然光投射到两块偏振片上，这两块偏振片的振动方向取向使得自然光不能透过。如果把第三块偏振片放在这两块偏振片之间，是否仍然没有光透过最后面的偏振片？试按三种不同的放法解释之。

5. 在去掉下偏光镜的情况下，能否通过旋转载物台上的具有解理缝的黑云母切面，来检验上偏光镜振动方向？试说明理由。

第四章 单偏光系统下晶体的光学性质

单偏光系统是指仅利用下偏光镜的偏光显微镜工作状态。在此系统下,光源通过平面反光镜和下偏光镜以后,成为一束平行传播的、振动方向为南北向的偏光,射入薄片,从而使我们可以观察、测定矿物的一些特殊光学性质,如矿物的吸收性、多色性、闪突起等。此外,在观察矿物的普通光学特征(如形态、解理、颜色等)时,虽然不需要利用偏光的特性,但在单偏光系统下不影响这些现象的观察效果,所以通常仍在单偏光系统下对这些现象进行观察。

§ 4.1 形 态

天然矿物的形态是千变万化的,常见的有针状、叶片状、柱状、板状和粒状(图 4-1)。对于具体的矿物来说,因为一定的结晶习性而形成相对特定的形态。实际上,所谓矿物的结晶习性是由它的晶体结构和生成条件所决定的。此外,在偏光显微镜下,矿物形态还与切面方向有关。

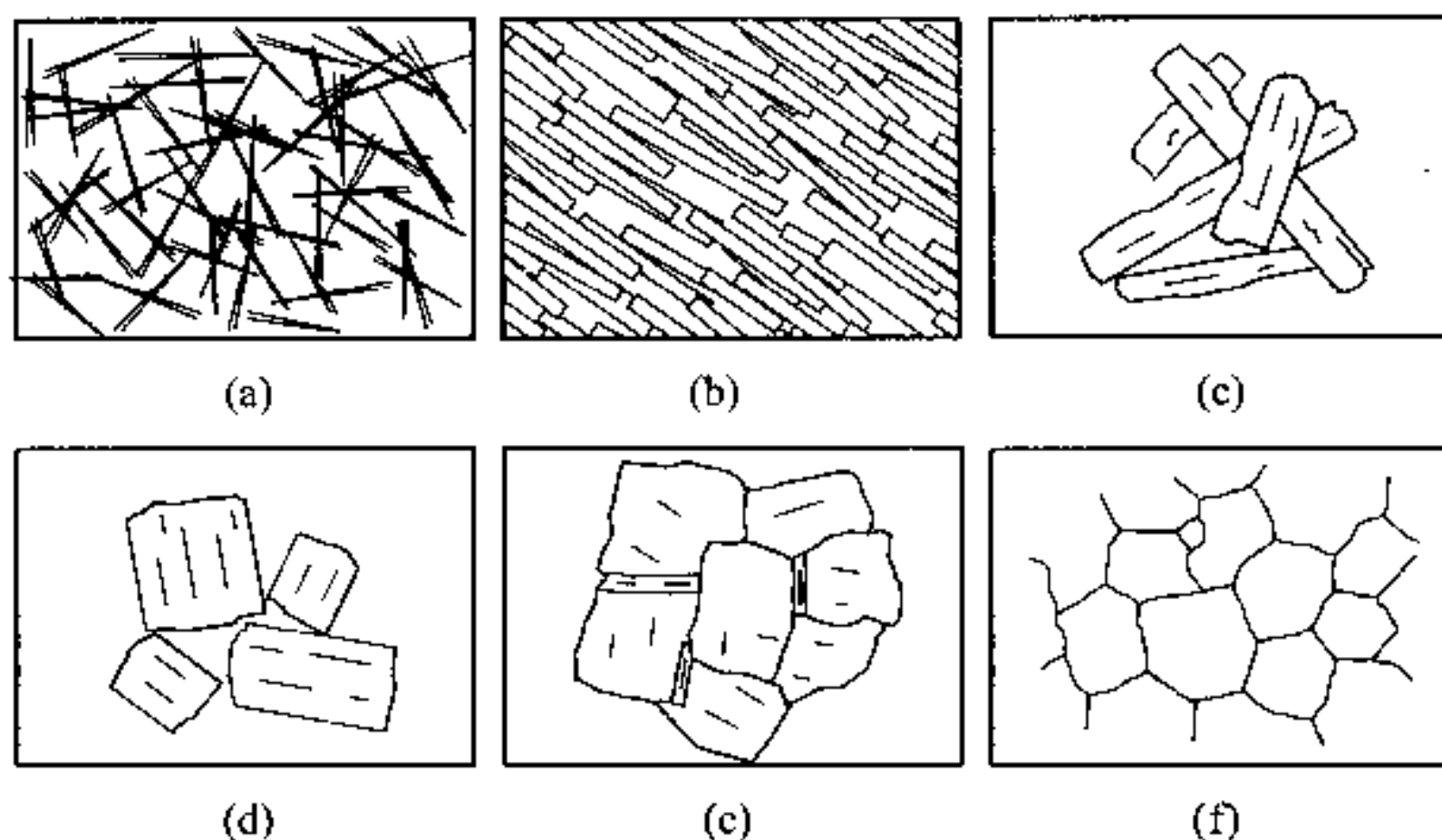


图 4-1 常见的晶体形态

(a)针状; (b)叶片状; (c)长柱状; (d)短柱状; (e)板状; (f)粒状

4.1.1 晶体结构

具有不同晶体结构的矿物往往呈现不同的形态,如以硅酸盐矿物为例:

(1) 岛状结构:它们往往呈粒状,如石榴子石;少数呈柱状,如橄榄石。

(2) 环状和链状结构:它们往往呈柱状、针状等一维方向延长的形态,横切面呈多边形,如绿柱石、电气石等环状结构矿物和辉石、角闪石等链状结构矿物。

(3) 层状结构:它们基本上呈叶片状、鳞片状,如云母、绿泥石等矿物。

(4) 架状结构:它们的形态变化较大,可以是粒状的,如白榴石;也可以是柱状的,如方柱石;甚至是板状的,如长石。但是,它们不同的形态与各自独特的内部结构仍然有关。

因此,根据薄片观察到的矿物形态,可以粗略地推测它们的晶体结构类型,从而达到鉴定矿物种属的目的。

4.1.2 生成条件

相同内部结构的晶体,在不同的生成条件下,其形态可以呈现较大的差异。如辉石、角闪石、磷灰石等柱状矿物,它们在恒温条件下结晶为短柱状,而在骤冷条件下结晶为针状。因此,晶体形态也可以有效地提供它们的成因信息。

从矿物鉴定的角度看,由于某些矿物在特定的结晶环境中形成相对特殊的形态,因此依据晶体形态,也可以达到鉴定矿物的目的。

4.1.3 切面方位

在薄片见到的矿物形态,并不是矿物的立体形态,而是切片方向上的矿物切面的形态。显然,薄片中的矿物形态还取决于切面的方向,即同一晶体不同方向上的切面可以具有不同的形态。如在一个四方柱体的晶体上,可以切出正方形、三角形、六边形、长方形等不同的形态(图4-2)。

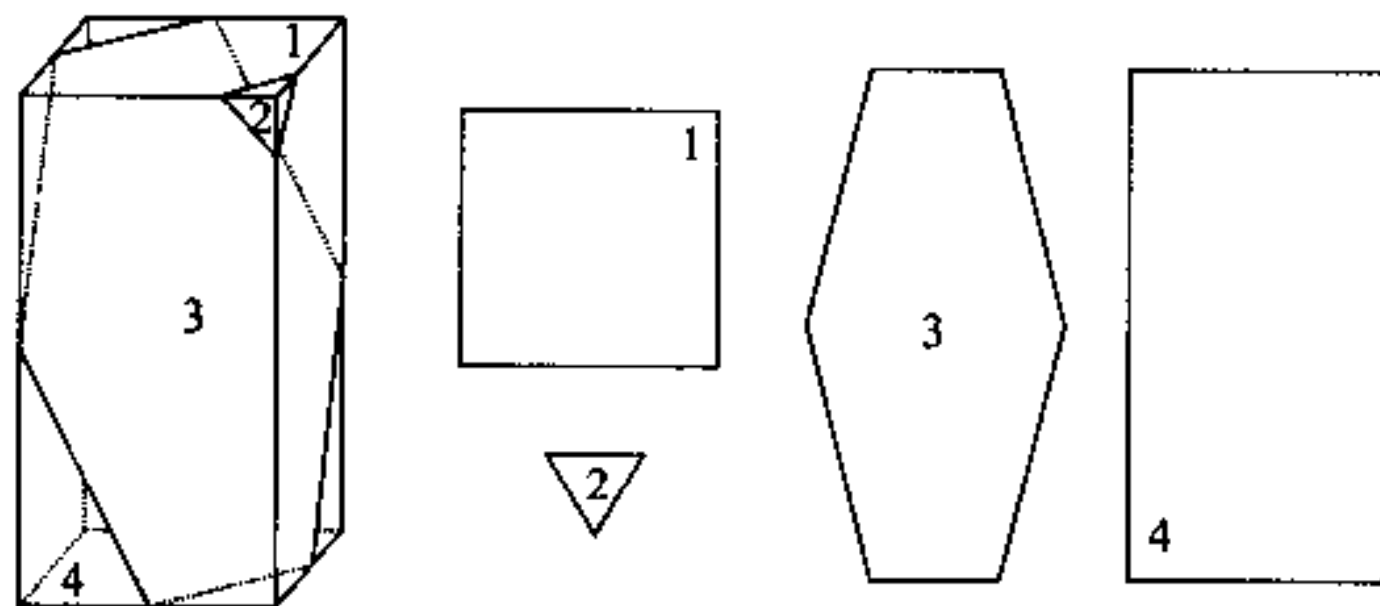


图4-2 矿物形态与切片方向的关系

因此,在实际鉴定中,需要寻找各种不同的切面形态,然后通过统计分析,组合出晶体的立体形态。如在薄片,磷灰石常具六边形和长条形切面,由此可以判断磷灰石为六方柱状晶体。

§ 4.2 解理

许多矿物都具有解理,但不同的矿物在解理的方向、完善程度及解理角方面可以是各不相同的。特别是解理的方向往往与晶面、结晶轴有一定的空间关系,故它的出现对于判别晶体的晶系、光性方位等是十分重要的。所以,解理是鉴定矿物的一个重要依据。

4.2.1 解理的完善程度

在薄片,矿物的解理表现为一组平行的暗色细缝,称为解理缝。在磨薄、磨平切片的过程中,由于机械力的影响,矿物沿解理面裂开(图 4-3 (a)),使得树脂充填其中(图 4-3 (b))。由于绝大部分情况下,矿物的折射率(N)大于树脂的折射率(n),垂直薄片的透射光在两者的界面处会发生全反射现象(图 4-5 (a)),致使解理面的上方由于光线转向面形成一条平行解理面的细长暗带,即解理缝。在薄片,晶体的各种裂缝(如原生的裂理缝、机械的碎裂缝等)也表现为一条细长暗带,但它们与解理缝的区别在于,裂缝往往是不规则弯曲的,有时也可以较平直,但缝与缝之间的距离往往不等。

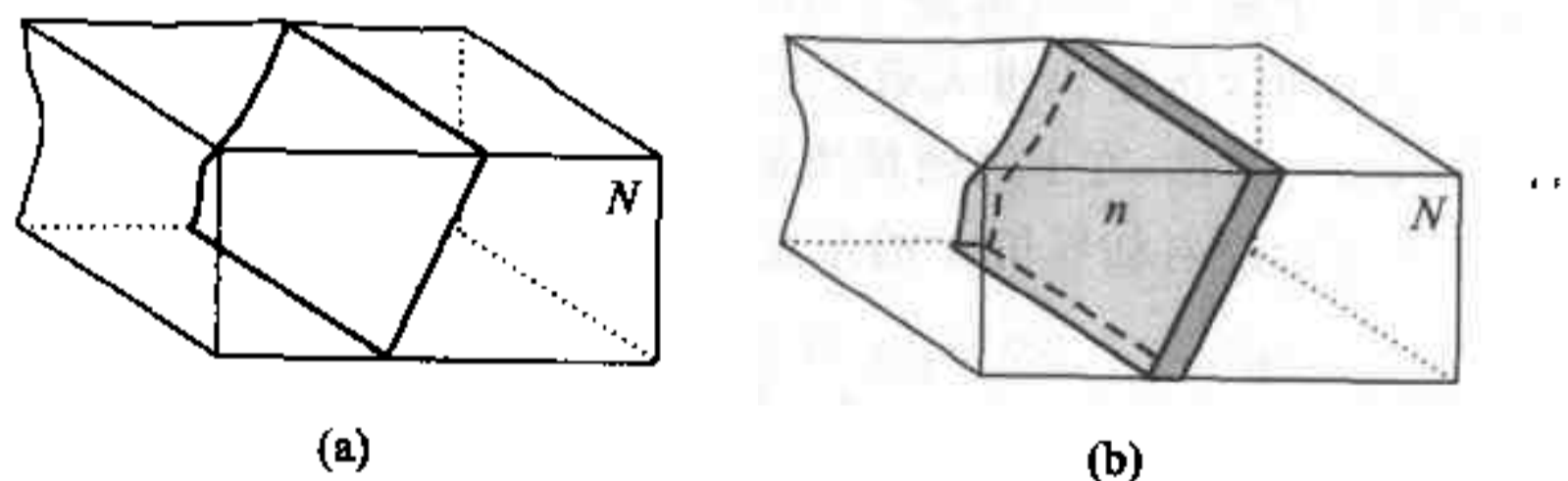


图 4-3 解理缝的形成

(a)矿物中的解理方向; (b)裂开的解理与充填的树脂

根据解理缝的特征,可以把薄片,见到的矿物解理按完善程度分为三个级别:

(1) 极完全解理:解理缝密集,其延续长度往往贯穿整个晶体,如云母

类矿物的解理缝(图 4-4 (a))。

(2) 完全解理:解理缝的间距较大,其延续长度不能贯穿整个晶体,如辉石、角闪石类矿物的解理缝(图 4-4 (b))。

(3) 不完全解理:解理缝稀少,且断断续续,如橄榄石类矿物的解理缝(图 4-4 (c))。

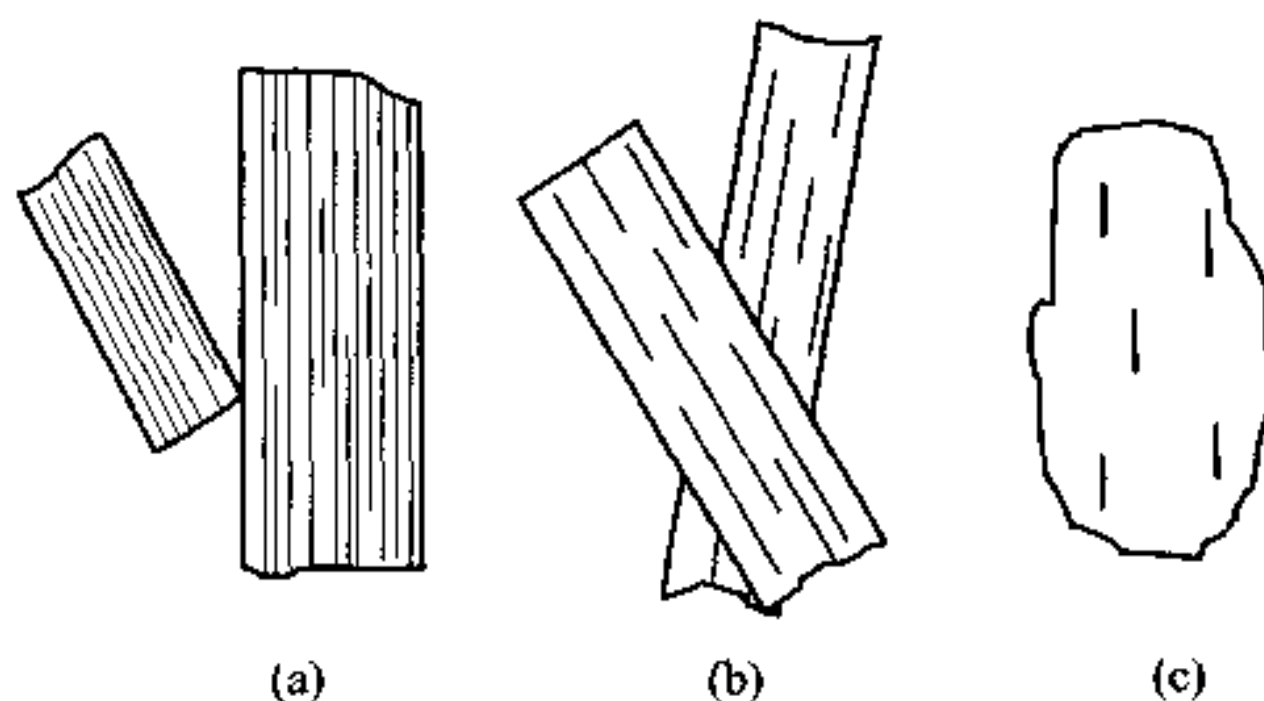


图 4-4 解理的完善程度

(a)极完全解理; (b)完全解理; (c)不完全解理

4.2.2 解理缝的清晰程度和可见性

矿物中解理的存在及其完善程度取决于晶体结构,而薄片解理缝的清晰程度则取决于切片的方向。设切片法线与解理面的交角为 α ,矿物折射率 $N >$ 树脂折射率 n ,则当 α 较小时,在解理面上光线发生全反射,解理面上方出现一个暗色带,故解理缝清晰(图 4-5 (a));当 α 较大时,在解理面上光线经过两次折射而进入解理面上方,不出现暗色带,故解理缝模糊(图 4-5 (c))。显然,在上述两种情况之间存在一个解理缝可见临界角 α_0 ,它的大小等于全反射临界角 i_0 的余角(图 4-5 (b)):

$$\alpha_0 = 90^\circ - i_0 = 90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{n}{N}\right) \quad (N > n = 1.54)$$

当 $\alpha \leq \alpha_0$,解理缝清晰;当 $\alpha > \alpha_0$,解理缝就模糊。因此,同一矿物中,不同方向的切片上解理缝并不是同等清晰的。由此可以判断,在矿物中具有非常清晰解理缝的切面往往近于垂直解理面,从而可以测定某些特殊结晶学方位上的光学参数。如在云母类矿物中,具有非常清晰的解理缝的切面往往是近于平行 c 轴的切面,该切面上具有接近 ΔN_{\max} 的双折射率。

从上述公式中也可以看出, α_0 的大小取决于矿物折射率 N 值的大小。矿物的 N 值越大,它的 α_0 越大,这意味着该矿物的解理缝的可见性越大。

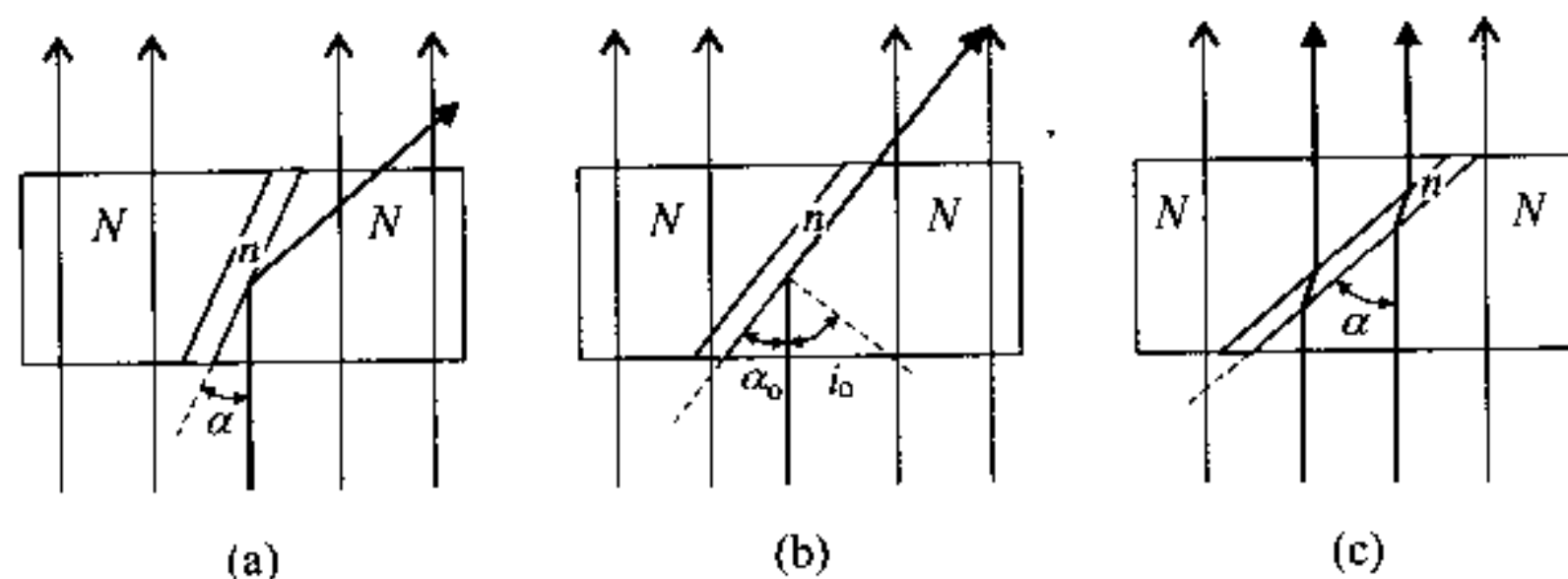


图 4-5 解理缝的清晰程度

(a)清晰; (b)临界状态; (c)模糊

因此,在具有解理的矿物之间,往往折射率较大的矿物的解理缝相对常见。例如,辉石具有完全解理而斜长石具有极完全解理,但在薄片中可以见到辉石解理缝的机会比见到斜长石解理缝的机会要大得多。

4.2.3 解理角

在矿物中,可以出现一个方向或多个方向的解理。但在一个切面上,很少见到两个以上不同方向的解理。镜下观察时,常把同一方向的解理缝称为一组。如在普通角闪石和普通辉石的平行 c 轴的切面上,只可以见到一组解理缝;而在垂直 c 轴的切面上,可以见到两组解理缝(图4-6)。这两组解理缝在结晶学上同属 $\{110\}$ 单形,故称为 $\{110\}$ 解理。

在同一切面上有两组解理,则两组解理之间的夹角称为解理角。不同的矿物有不同大小的解理角,如普通角闪石的 $\{110\}$ 解理角为 124° 和 56° (图4-6(a)),而普通辉石的 $\{110\}$ 解理角为 87° 和 93° (图4-6(b))。因此,在切片中通过测定解理角的大小可以帮助我们鉴定矿物。

测定解理角的步骤如下:

(1) 在薄片选择一个合适的矿物颗粒,具有两组细而清晰的解理缝,升降镜筒解理缝不左右移动。这说明该颗粒切面同时垂直两组解理面,切面上两组解理缝的夹角是这两组解理面的真正夹角(图4-7)。

(2) 把选好的切面置于视域中心(图4-8(a)),然后旋转载物台,使一组解理缝平行于目镜十字丝的纵丝,记下载物台的刻度(如 x° ,图4-8(b));继续旋转载物台,使另一组解理缝平行于目镜十字丝的纵丝,再次记下载物台的刻度(如 y° ,图4-8(c))。

(3) 两次刻度的差值($(y-x)^\circ$)为解理角的大小,用两组解理面的晶面

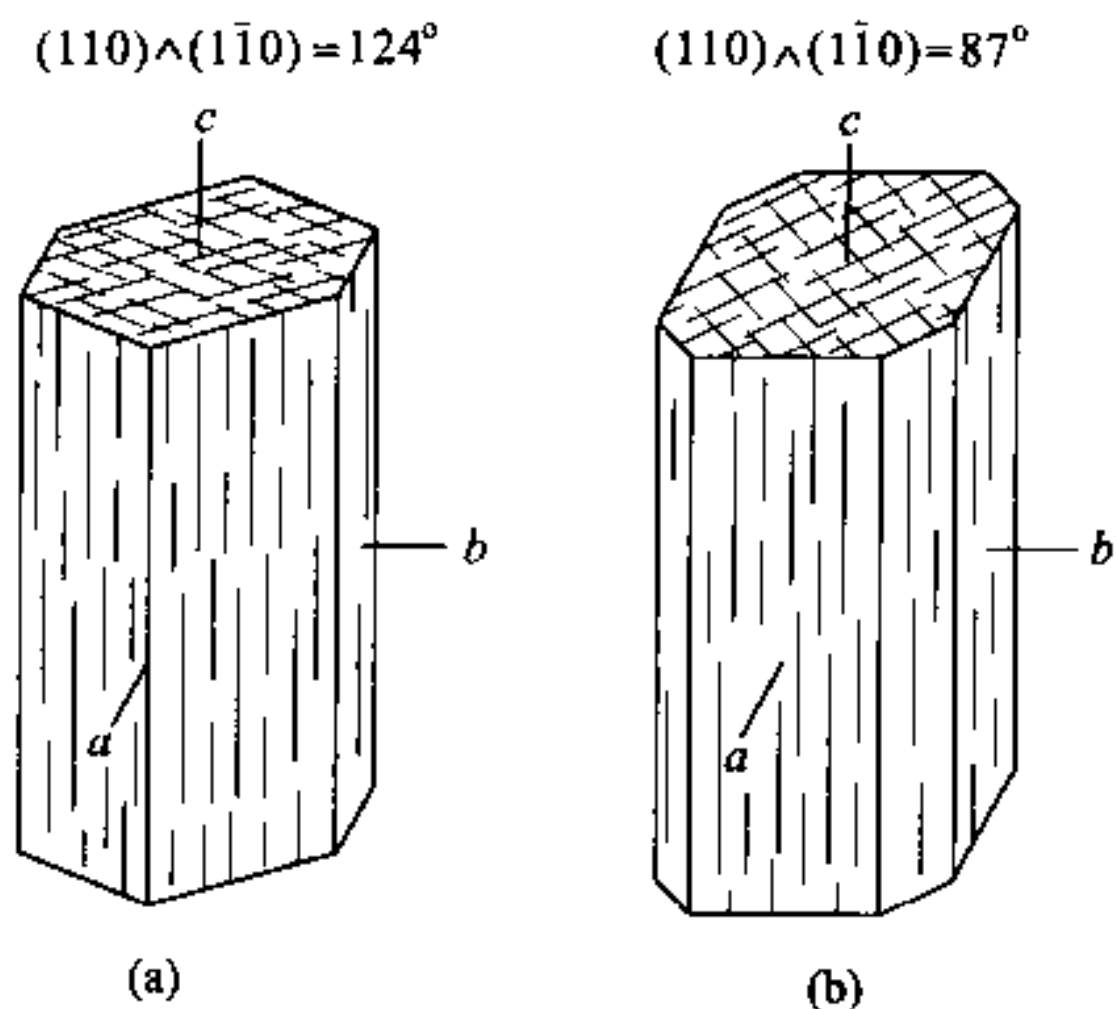


图 4-6 单斜晶系矿物的{110}解理

(a)普通角闪石； (b)普通辉石

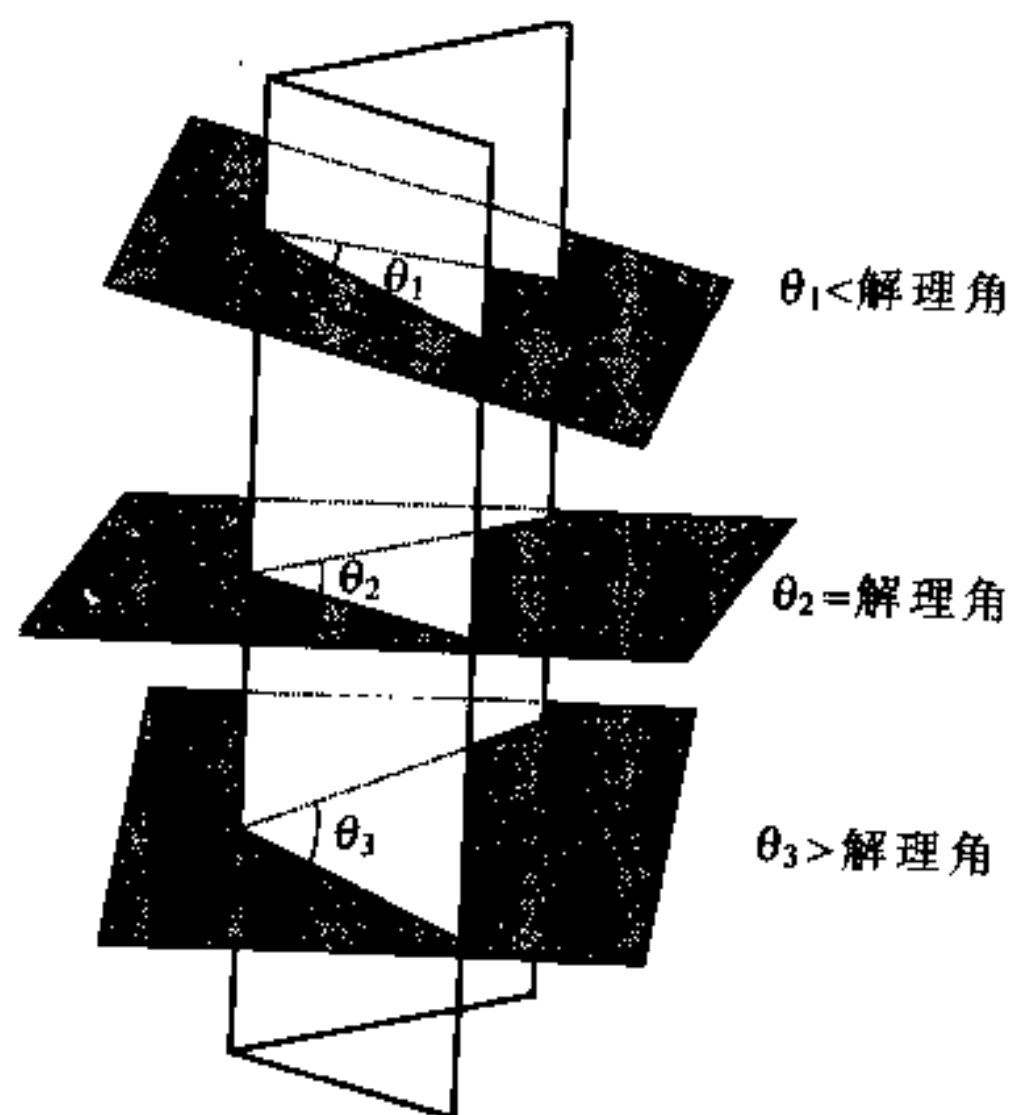


图 4-7 切片方位与解理角(θ_2)、视解理角(θ_1 和 θ_3)的关系

解理角

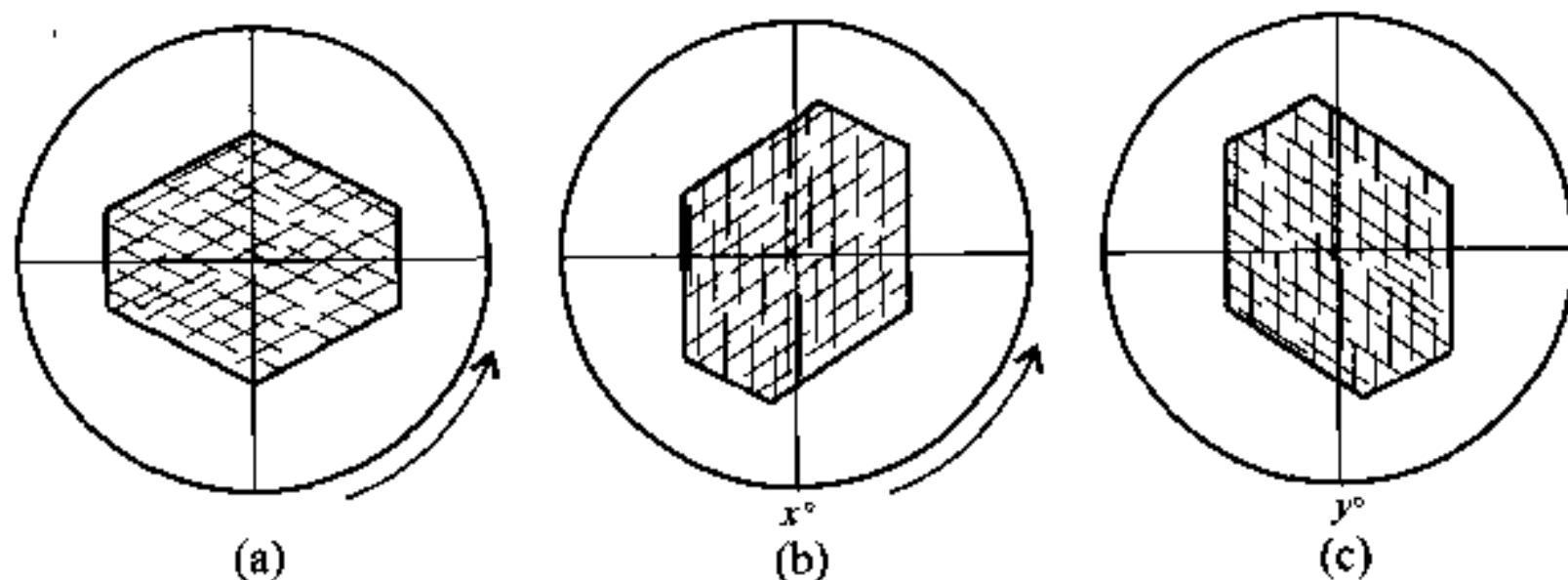


图 4-8 解理角的测定

(a) 两组解理缝的切面； (b) 一组解理平行于纵丝时的载物台刻度；
(c) 另一组解理平行于纵丝时的载物台刻度

符号 (hkl) 的夹角表示, 如普通角闪石垂直 c 轴切面上的解理角被记录为:
 (110) 解理 \wedge $(1\bar{1}0)$ 解理 $= 124^\circ$ 。

§ 4.3 选择性吸收

当作为电磁波的一束白光透过薄片中的晶体时, 其能量总是要被吸收掉一部分。不同矿物往往以不同的强度吸收白光中不同频率的光波, 由此产生了晶体的颜色、多色性、吸收性等光学现象。

4.3.1 颜色

白光是由红、橙、黄、绿、蓝、青、紫七种不同频率的单色光按一定比例混合组成。根据混合—互补原理(图 4-9), 对顶象限的两种颜色为互补色, 两者等浓度混合就互相抵消而呈白色; 反之, 白光中某单色光被减弱时, 白光就转化为其对顶象限单色光的颜色。如滤去白光中的红光, 白光就变为绿光。此外, 如果相隔的单色光等浓度混合, 就呈现两者之间所夹的单色光的颜色; 反之, 白光中两种相隔的单色光被减弱时, 白光就转化为两者之间所夹的单色



图 4-9 构成白光的单色光之间的混合—互补原理

光的对顶象限单色光的颜色。如滤去白光中的黄光和绿光,白光就变为紫光。

如果矿物对白光中的各单色光同等程度地吸收,则白光光源透过矿物后仍为白光,只是强度有所减弱,此时矿物不具颜色,称为无色。如果矿物对白光中的各单色光不同等程度地吸收,即有选择性地吸收一定频率的光波,则根据混合-互补原理,将呈现出矿物的颜色。

这种选择性吸收单色光的起因十分复杂,它与矿物的化学成分、晶体结构、杂质包裹体等有关。在薄片,矿物的颜色(即选择性吸收单色光)主要与它的化学成分有关。许多变价元素(如过渡金属元素)或镧系元素离子的内层由于晶体场分裂而形成不同的能级,这些不同能级之间的能量差可以接近某频率单色光的能量。因此,当白光经过这些元素的晶体场时,白光中部分单色光被吸收而引起电子层之间的电子跃迁,从而使透射光呈现被吸收光颜色的互补色。当矿物中含有这些元素的离子时,就会呈现一定的颜色,故这些离子被称为色素离子。主要的色素离子有 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、U 和稀土元素等变价离子,如:

Fe^{2+} :使矿物呈绿色,如阳起石、钙铁辉石、富铁钠闪石、黑云母、蓝宝石等;

Fe^{3+} :使矿物呈褐色或红色,如玄武闪石、黑云母等;

Mn^{2+} :使矿物呈浅玫瑰色,如菱锰矿、蔷薇辉石等;

Mn^{3+} :使矿物呈浅红色或蓝紫色,如锂云母、电气石、红帘石等;

Ti^{3+} :使矿物呈深褐色,如黑云母等;或呈紫色,如蓝线石、含钛普通辉石等;

Cr^{3+} :使矿物呈亮绿色,如含铬普通辉石、珍珠云母、翡翠等;或呈浅紫色或蓝紫色,如铬铁斜绿泥石等;

Cu^{2+} :使矿物呈蓝色或蓝绿色,如电气石、硅孔雀石等;

Ni^{2+} :使矿物呈黄绿色,如绿泥石。

除色素离子外,其他成分也影响矿物的颜色,如同样是含 Fe^{2+} ,但海蓝宝石呈湖绿色,金绿宝石呈黄绿色,普通角闪石呈蓝绿色。至于普通辉石含 Fe^{2+} 而近于无色,是因为它不含 OH 组分,后者的出现加强铁的呈色作用。

薄片,中见到的晶体颜色与手标本上的基本相同,但是在肉眼下见到的手标本颜色未必在偏光显微镜下也可以见到,如在手标本上橄榄石呈橄榄绿色,在切片中橄榄石却无色透明;又如绿帘石,在手标本上颜色较深,呈深绿色,但在切片中却很浅,为浅黄绿色。这是因为切片很薄,白光透过晶体仅发生很轻微的选择性吸收,故颜色没有充分显示出来。显然,对同一矿物

来说,切片愈厚颜色愈深。

4.3.2 多色性

均质矿物各个方向的光学性质都一致,对光的选择性吸收亦相同,因此任何方向都具有相同的颜色。但非均质矿物的光学性质具有不均匀性,对光的选择性吸收会随着晶体方向的不同而不同,故在单偏光系统下旋转载物台,许多非均质矿物的颜色会发生变化,这种现象称为多色性。如在紫苏辉石平行光轴面的切面上,当其 N_g 与下偏光的振动方向平行时,紫苏辉石呈淡绿色;而当 N_p 与下偏光的振动方向平行时,紫苏辉石呈淡红色。换言之,慢光(N_g)与快光(N_p)通过紫苏辉石时,两者被选择性吸收的单色光种类是不同的,犹如两者通过晶体时的速度不等一样。

这种多色性现象仅在偏光显微镜的单偏光系统下可以见到,其原因在于:

(1) 当下偏光以南北振动方向进入非均质矿物切面时,因发生双折射而产生慢光 N_g 和快光 N_p ,它们的振幅矢量 A_{N_g} 和 A_{N_p} 可以由下偏光的振幅矢量 A_p 按平行四边形法则分解而得(图 4-10 (a))。此时,两束偏光同时通过晶体,视域中所见到的颜色是两者在晶体中各自呈现的颜色的混合色。

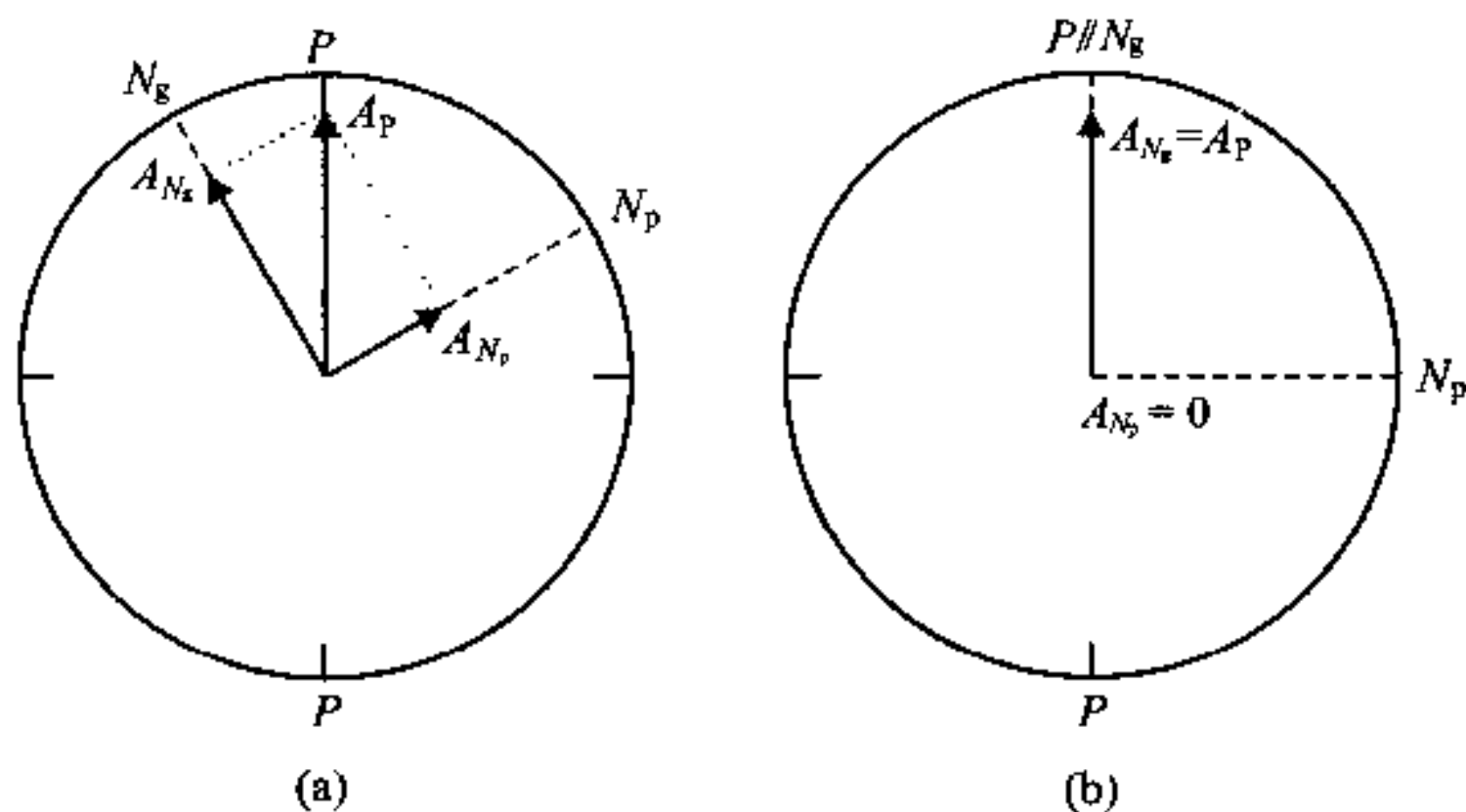


图 4-10 非均质体切面上两束偏光的振幅与位置的关系

(a)任意角度的切面位置; (b)0°或90°的切面位置

(2) 旋转载物台,使切面上的 N_g 平行下偏光的振动方向,此时慢光的振幅为最大值($A_{N_g}=A_p$),而快光的振幅为零($A_{N_p}=0$)(图 4-10 (b))。这

意味着只有慢光通过晶体,那么视域中见到的仅仅是慢光在晶体中选择性吸收而呈现的颜色。

(3) 旋转载物台 90° ,使切面上的 N_p 平行下偏光的振动方向,则看到快光单独通过晶体时选择性吸收所呈现的颜色。

显然,在普通显微镜下是不可能见到晶体的多色性现象的,因为无数振动方向的自然光射入切片后,几乎都要发生双折射,看到的总是两束偏光的选择性吸收的混合效应。

在一轴晶矿物中,可以有两种不同的端员颜色,分别出现在 N_e 和 N_o 方向上。现以电气石晶体为例,来说明单偏光系统下见到的多色性现象:

(1) 将平行 c 轴的电气石切面置于视域中心,旋转载物台使 N_e 方向(即 c 轴方向)平行于下偏光镜振动方向,电气石呈蓝灰色(图 4-11 (a))。

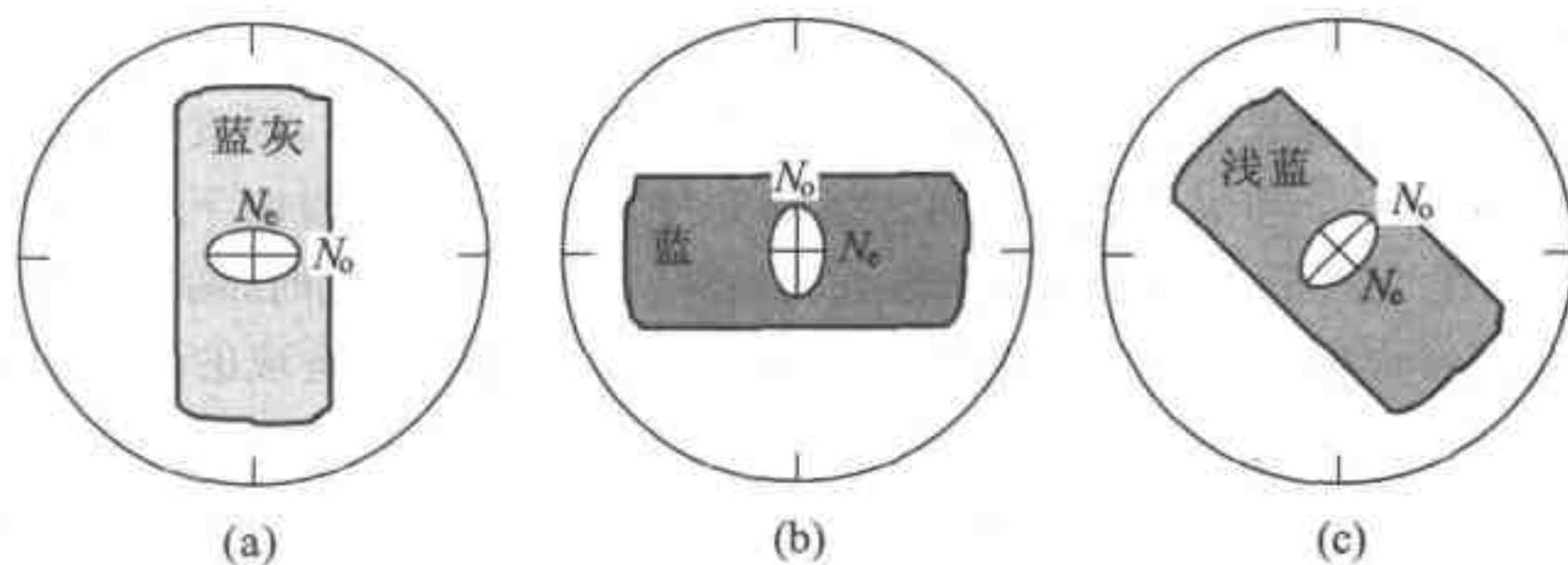


图 4-11 电气石平行 c 轴切面的多色性现象

(a) N_e 方向的颜色; (b) N_o 方向的颜色; (c) N_e 和 N_o 方向的混合颜色

(2) 将载物台旋转 90° ,使 N_o 方向平行于下偏光镜振动方向,电气石呈蓝色(图 4-11 (b))。

(3) 当 N_e 、 N_o 方向与下偏光镜振动方向斜交,电气石呈蓝与蓝灰之间的混合色——浅蓝色(相当于 N_e' 方向的颜色)(图 4-11 (c)),且浅蓝色中蓝与蓝灰的色调之比随着载物台的旋转而连续变化。

因此,蓝灰色与蓝色是电气石的两种端员颜色,分别代表 N_e 与 N_o 方向的颜色,可以用多色性公式表示如下: $N_e =$ 蓝灰色, $N_o =$ 蓝色。

在二轴晶矿物中,可以有三种不同的端员颜色,分别出现在 N_g 、 N_m 、 N_p 方向上。如普通角闪石晶体的 N_g 、 N_m 、 N_p 方向上有下列不同的颜色:

(1) 在平行光轴面的切面(即 $N_g N_p$ 面)上,当 N_g 方向平行于下偏光镜振动方向时,普通角闪石呈深棕色(图 4-12 (a));旋转载物台 90° ,使 N_p 方向平行于下偏光镜振动方向,普通角闪石呈浅黄色(图 4-12 (b))。

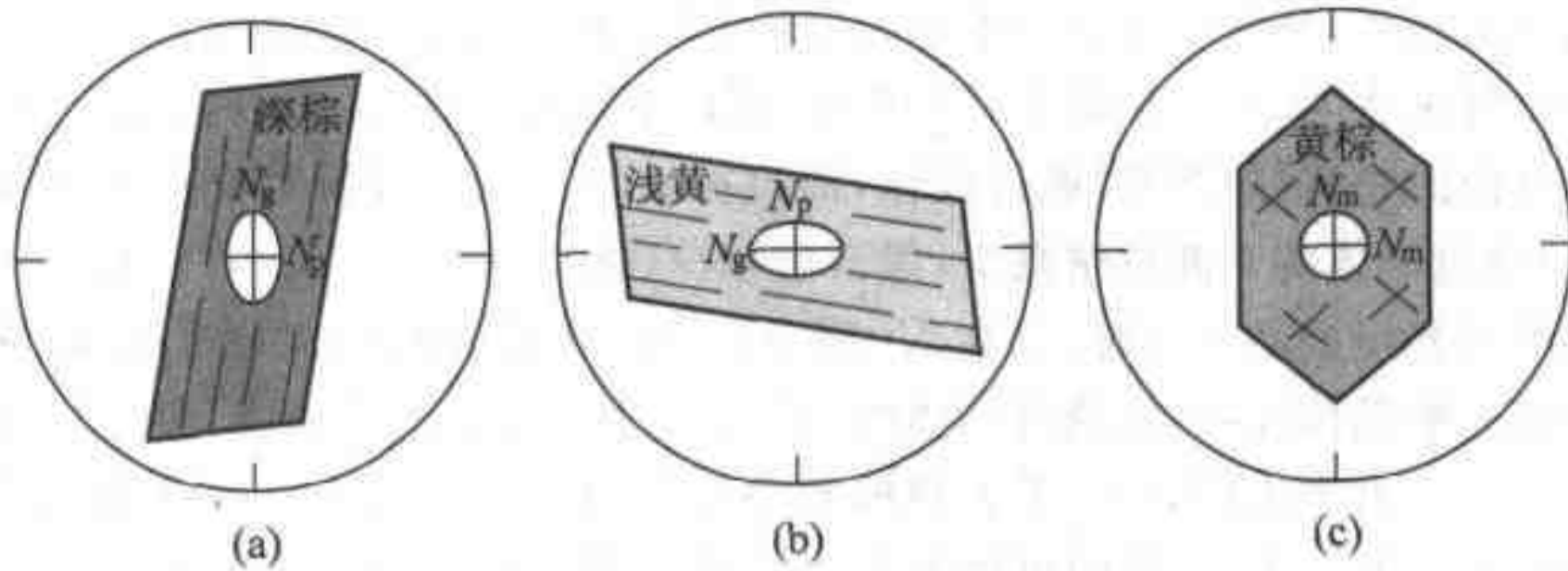


图 4-12 普通角闪石的多色性现象

(a) 平行光轴面切面上 N_g 方向的颜色；(b) 平行光轴面切面上 N_p 方向的颜色；
(c) 垂直光轴切面上 N_m 方向的颜色

(2) 在垂直光轴的切面(即 $N_m N_m$ 圆切面)上,不论怎样转动载物台,普通角闪石都呈黄棕色(图 4-12.(c))。

因此,深棕色、黄棕色、浅黄色是普通角闪石的三种端员颜色,分别代表 N_g 、 N_m 、 N_p 方向的颜色,用多色性公式表示如下: N_g = 深棕色, N_m = 黄棕色, N_p = 浅黄色。

从上述例子中可以看出,所谓矿物的多色性就是在不同的光率体主轴方向上晶体对白光的选择性吸收具有明显的差异。因此,必须在包含主轴的切面上才能观察到多色性现象,如对于一轴晶矿物需在平行光轴的切面(即 $N_e N_e$ 面)上,而对于二轴晶矿物则需在平行光轴面和垂直光轴的两个切面(即 $N_g N_p$ 面和 $N_m N_m$ 面)上。否则,在其他切面上也可以观察到晶体的多色性,但往往不太显著。如在一轴晶光率体的 $N_e' N_e$ 切面上的多色性远不如在 $N_e N_e$ 切面上的多色性,因为 N_e' 方向上的颜色一般是介于 N_e 和 N_e 方向上的两种颜色之间的过渡颜色。

由于矿物的化学组成(主要指色素离子的种类与含量)受制于它的形成环境,所以同种矿物可以有不同的多色性,如电气石的多色性除了上述蓝色—蓝灰色以外,也可以是棕褐色—浅黄色。少数矿物的多色性可达五、六种之多,如某些碱性角闪石、碱性辉石、红帘石等。同样原因,在不同矿物之间它们的多色性明显程度可以是不同的,如电气石、碱性角闪石、碱性辉石等多色性很明显,面绿泥石、紫苏辉石、阳起石等多色性不明显。

4.3.3 吸收性

由于非均质矿物的光学性质呈现为各向异性,因此对透射光的吸收总

量也随方向的变化而变化。主要表现在部分具有颜色的矿物上,其切面随载物台的旋转,颜色的浓度发生深浅变化,这种现象称为矿物的吸收性。如在黑云母垂直(001)的切面上,当其 N_g 平行下偏光镜振动方向时,只有 N_g 振动方向的光波(即慢光)通过晶体,而该振动方向的光波最容易被晶体吸收,故透过晶体的光波总量减少,黑云母呈深(褐)色(图 3-5(c));当其 N_p 平行下偏光镜振动方向时,只有 N_p 振动方向的光波(即快光)通过晶体,它最不容易被晶体吸收,故透过晶体的光波总量较多,黑云母呈浅(黄)色(图 3-5(a))。由于该切面上,黑云母的解理缝方向几乎平行 N_g (或非常接近 N_g 的 N_g' 、 N_m),因此我们可以利用黑云母的吸收性特征来检验下偏光镜的振动方向(参见第三章 3.3.2 节)。

与观察多色性现象相似,必须在包含主轴的切面上才能观察到真正的、明显的吸收性现象。在一轴晶矿物中,需在平行光轴的切面上观察,其观察结果可以用吸收性公式表示:① $N_e > N_o$ 表示 N_e 方向的吸收程度大于 N_o 方向,如金红石、磷钇矿等矿物;② $N_o > N_e$ 表示 N_o 方向的吸收程度大于 N_e 方向,如电气石、绿柱石等矿物。

同样,在二轴晶矿物中,则需在平行光轴面和垂直光轴的两个切面上观察,其观察结果同样用吸收性公式表示:① $N_g > N_m > N_p$ 表示三个主轴方向上的吸收程度随折射率降低而减弱,故称为正吸收,如普通角闪石、十字石等矿物;② $N_g < N_m < N_p$ 表示三个主轴方向上的吸收程度随折射率降低而增强,故称为负吸收,如钠铁闪石、霓石等矿物。

显然,对于无色矿物是无所谓多色性和吸收性的。而对于具有颜色的矿物,我们可以在相应的切面上同时观察矿物的多色性和吸收性,前者用不同的颜色来表示(即多色性公式),后者用颜色的深、浅表示(即吸收性公式)。寻找观察吸收性和多色性切面的方法将在下面章节中介绍。

§ 4.4 界 面

折射率是鉴定矿物的重要光学常数之一。在岩石切片中,矿物折射率的相对高低可以通过一系列矿物界面之间的光学现象来判别,这些现象包括轮廓、糙面、突起、贝克线及贝克线色散等。

4.4.1 轮廓

在单偏光系统下,两个不同折射率介质的接触处往往会出现一条暗色条带。对于矿物颗粒而言,该条带总是沿着颗粒边缘分布而呈封闭状,这就

构成了矿物的轮廓。

轮廓形成的原因是因为两种介质的折射率不同,在它们的倾斜接触面上垂直薄片的透射光要发生折射或全反射,导致光线偏离原来的传播方向,故在接触面上方形成一条无光线或少光线的暗色条带(图4-13)。

但是,我们看到有些矿物(如辉石、角闪石等)的轮廓粗而黑,而有些矿物(如石英、长石等)的轮廓细而淡(图4-14)。为什么有这种差异呢?根据斯涅耳定律:

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

折射介质与入射介质的折射率(分别为 N_r 和 N_i)相差越大,则折射角与入射角(分别为 r 和 i)相差越大,即折射光偏离薄片法线的角度越大,使两种介质的接触面上方光线减少的范围越大而显得条带越宽,同时使接触面上方光线减少的程度越大而显得条带越黑,故它的轮廓很显著;反之,两种介质的折射率接近或相等,轮廓就不显著(图4-14)。因此,观察轮廓的

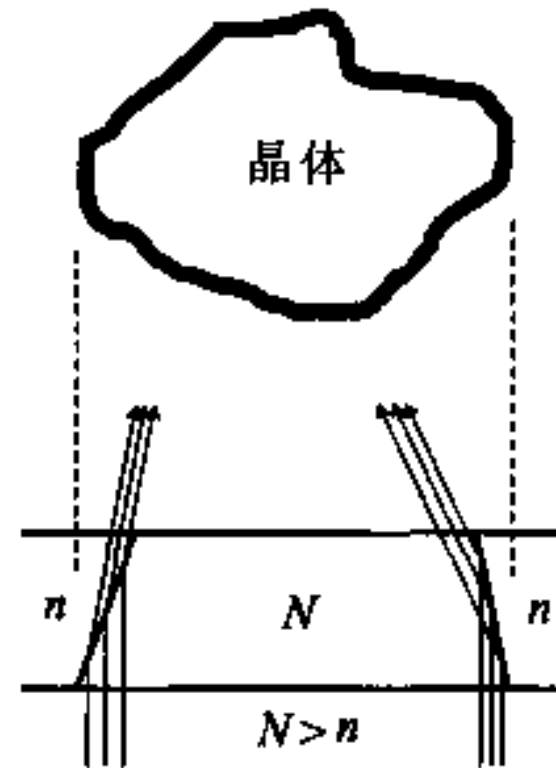


图4-13 轮廓及其成因

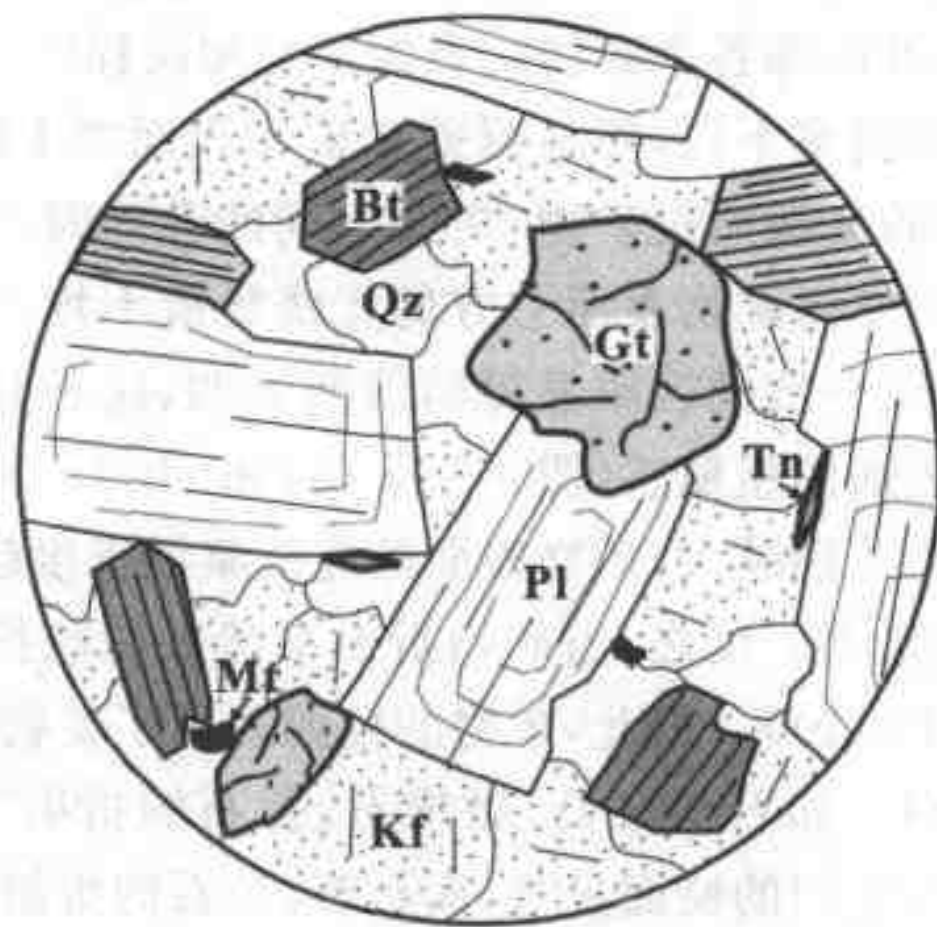


图4-14 矿物的轮廓、糙面和突起的镜下素描图

Gt—石榴子石; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Kf—钾长石;
Qz—石英; Tn—榍石; Mt—磁铁矿

显著程度,有助于判别矿物间折射率的相对大小。

在晶体光学中,以折射率固定的树胶($n=1.54$)为参照介质,将矿物轮廓的显著程度分为四个等级:

- (1) 很显著:矿物的折射率 $N > 1.74$,如石榴子石、楣石、铅石等。
- (2) 显著:矿物的折射率 $N = 1.74 \sim 1.60$,如橄榄石、辉石、角闪石等。
- (3) 不显著:矿物的折射率 $N = 1.60 \sim 1.50$,如长石、石英等。
- (4) 较显著:矿物的折射率 $N < 1.50$,如沸石、萤石等。

因此,通过矿物轮廓显著程度的判别,我们可以推测它们的折射率的相对大小。但是,在观察中必须注意以下两点:其一,界面与切片的角度。有时,矿物与树胶的折射率相差很大,但部分边界上的轮廓并不清楚,表现为一条淡而细的暗线,这是由于该处两个介质的界面与切片接近垂直所造成的。其二,矿物颜色的深浅。矿物的颜色也会影响矿物轮廓的显著程度,深色矿物的轮廓一般比浅色、无色矿物的要显著一些。

4.4.2 糙面

在单偏光系统下观察矿物的表面时,可以看到有些矿物表面似乎较为光滑,而另有些矿物表面呈麻点状,好像表面比较粗糙。这种晶体表面的光滑-粗糙的视觉感称为糙面。

形成糙面的原因并非在于矿物实际表面的平整性。事实上,在同等条件下磨制的薄片,其内部各个矿物的表面都是相同程度凹凸不平的。但是,由于不同矿物的折射率不同,即与覆盖在矿物表面之上的树胶的折射率的差值是不等的,导致光线通过矿物-树胶之间的介面时,发生折射的角度不同。这种折射效应使得矿物表面上方的光线集散不均,光线集中的区域显得明亮而高凸,光线分散的区域显得暗淡而低凹,这种高凸、低凹的随机分布就造成了矿物表面的粗糙感(图4-15(a)和(b))。并且,矿物折射率与树胶折射率之间的差别越大,矿物表面的光线集散程度越强,即明暗的反差越大,粗糙感就越显著。反之,当矿物折射率接近树胶折射率时,粗糙感就趋于消失(图4-15(c))。因此,矿物的糙面表现了矿物折射率与树胶折射率之间的相对差别。如石榴子石、橄榄石、萤石的折射率与树胶折射率之差,都在0.1以上,它们的糙面显著,而石英、长石的折射率与树胶折射率之差,都在0.03以下,它们的糙面就不显著(图4-14)。因此,矿物的糙面与轮廓的显著程度是一致的,即轮廓越显著的矿物必然糙面越显著。

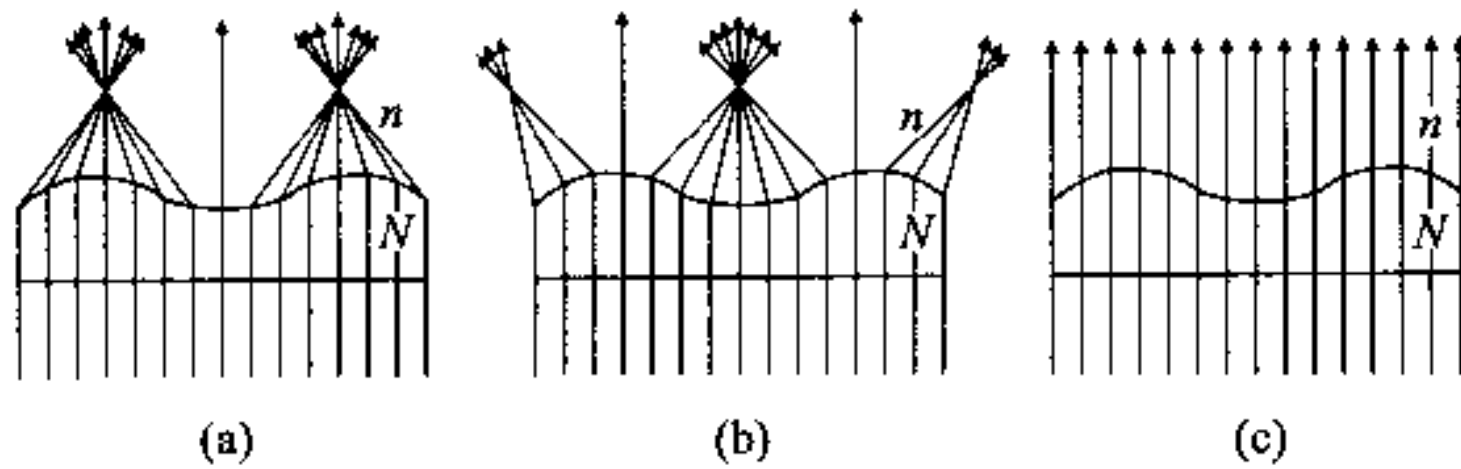


图 4-15 糙面及其成因

(a) $N > n$; (b) $N < n$; (c) $N = n$

4.4.3 突起

在单偏光系统下,矿物的糙面与轮廓会引起一种综合的视觉感(图 4-14),即有些矿物的表面显得高凸,如石榴子石;另有些矿物的表面显得低平,如长石、石英。这种高凸-低平的视觉感称为突起。

实际上,同一切片中各个矿物的表面都是近于处在同一平面上的,只是有些矿物的折射率与树胶的折射率相差较大,故显著的轮廓和糙面使得矿物表面具有较大的起伏感、厚度感,因此它的表面显得高凸。相反,另有些矿物的折射率与树胶的折射率相差较小,故不显著的轮廓和糙面使得矿物表面显得低平。因此,矿物的突起的高低反映了矿物与树胶的折射率之差。

在晶体光学中,将矿物的突起分为六个等级:

- (1) 极高正突起:矿物的折射率 $N > 1.78$,如楣石、锆石等矿物。
- (2) 高正突起:矿物的折射率 $N = 1.78 \sim 1.66$,如辉石、石榴子石等。
- (3) 中正突起:矿物的折射率 $N = 1.66 \sim 1.60$,如透闪石、磷灰石等。
- (4) 低正突起:矿物的折射率 $N = 1.60 \sim 1.54$,如石英、白云母、中长石等。
- (5) 低负突起:矿物的折射率 $N = 1.54 \sim 1.48$,如钠长石、钾长石等。
- (6) 高负突起:矿物的折射率 $N < 1.48$,如蛋白石、萤石等。

其中,以树胶的折射率($n = 1.54$)为标准,将折射率大于树胶的矿物的突起称为正突起;反之,则称为负突起。

显然,矿物突起的高低与它们的轮廓和糙面的显著程度是完全相关的。因此,这三种现象应统一地观察和分析,以正确估计矿物折射率的大致范围。

由于非均质矿物切面上有两个不同的折射率,如在方解石平行 c 轴的切面上, $N_o = 1.658$, $N_e = 1.486$ 。当 N_o 与下偏光镜振动方向一致时,晶体

接近高正突起,轮廓和解理缝粗黑,糙面显著;当 N_e 与下偏光镜振动方向一致时,晶体呈现为低负突起,轮廓和解理缝不明显,糙面不显著。如果连续地旋转载物台,晶体的突起由高变低、由正变负,然后又由低变高、由负变正,发生快速地交替变化,故称为闪突起。在矿物切面上能否观察到闪突起现象取决于两个因素:① 该矿物必须具有较大的 ΔN_{\max} ,且其中一个折射率比较接近树胶的折射率,如方解石族矿物、白云母、滑石等;② 该切面必须具有接近 ΔN_{\max} 的双折射率,如近于平行光轴的切面(对于一轴晶矿物)或近于平行光轴面的切面(对于二轴晶矿物)。此外,载物台转动越快,闪突起现象就越明显。

4.4.4 贝克线

当相邻介质(矿物与矿物或矿物与树胶)折射率不等时,其接触边界处必然会出现轮廓,即一条封闭的暗带;同时,在其一侧必然会出现一条细窄的亮线(图 4-16)。该亮线由德国学者贝克于 1893 年首次发现,故命名为贝克线。

贝克线具有一个特殊的现象:提升镜筒或下降载物台时,贝克线向折射率大的介质方向移动(图 4-16 (a));下降镜筒或提升载物台时,贝克线向折射率小的介质方向移动(图 4-16 (b))。

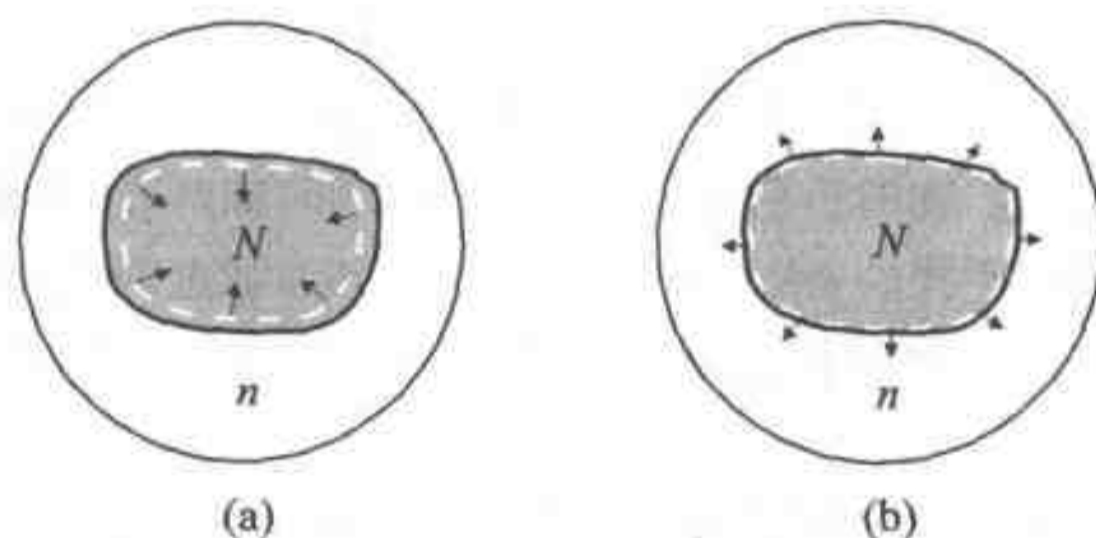


图 4-16 在树胶中矿物轮廓(黑实线)与贝克线(白虚线)的相对位置($N > n$)

(a)提升镜筒时,贝克线向矿物移动; (b)下降镜筒时,贝克线向树胶移动

产生上述现象的原因在于,无论相邻介质($N \neq n$)的接触面与切面的夹角 α 如何变化,透射光到达接触面后总是向折射率大的介质折射或全反射,致使接触面上方光线减少,形成轮廓;同时,折射率高的介质上方光线增多,形成贝克线(图 4-17)。当提升镜筒或下降载物台时,物镜的焦平面由 f_1 上升到 f_2 ,作为亮线的贝克线(即垂直的透射光与折射光的交汇处)向高折

射率介质方向移动；当下降镜筒或提升载物台时，物镜的焦平面由 f_2 下降到 f_1 ，贝克线向低折射率介质方向移动。

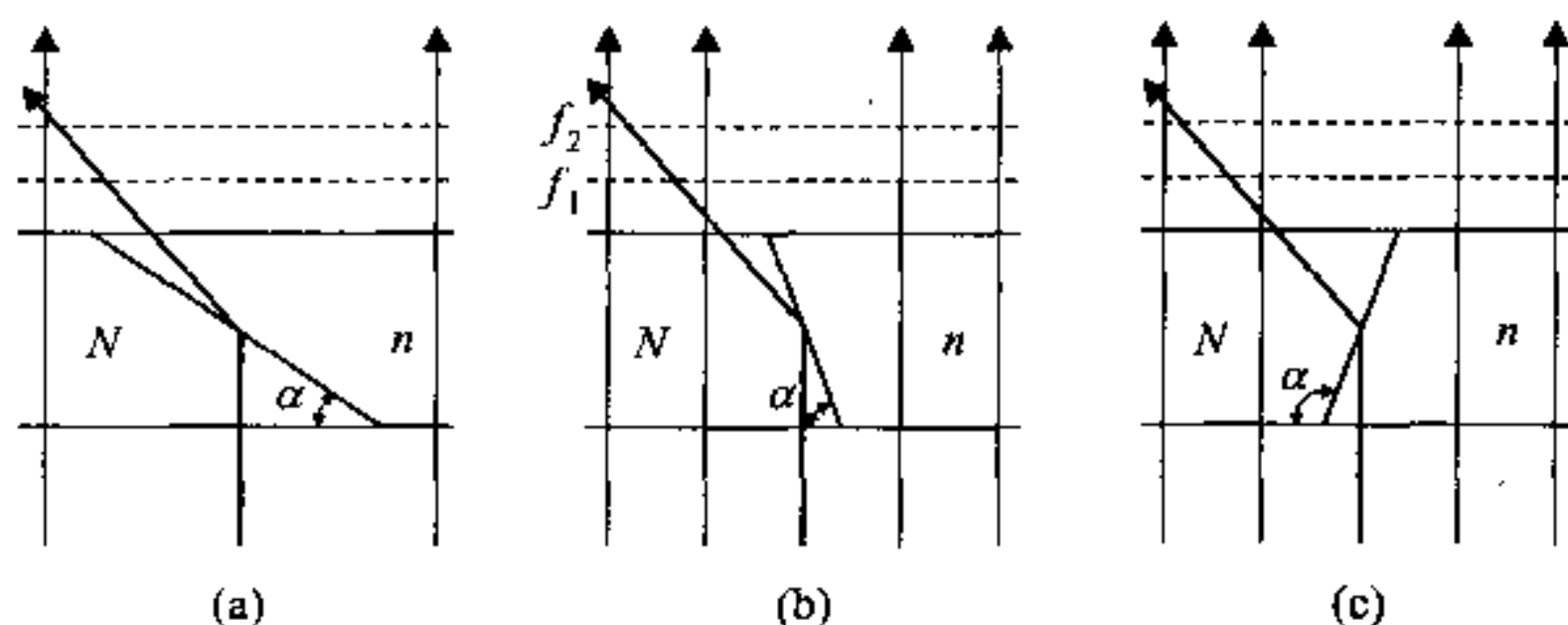


图 4-17 贝克线的成因及其移动规律 ($N > n$)

- (a)透射光由光密介质向光疏介质折射； (b)透射光在光密介质内部全反射；
(c)透射光由光疏介质向光密介质折射

因此在升降镜筒时，根据贝克线的移动方向，可以判别相邻介质的折射率相对大小。当矿物的相邻介质是树胶时，就可以利用贝克线的移动方向判别矿物突起的正负。然而，在两种折射率相差悬殊的介质之间 ($N \gg n$)，在两者的接触面上会发生内反射现象，从而在折射率小的介质一侧也出现一条亮线，称为假贝克线。升降镜筒时，假贝克线的移动方向正好与贝克线的相反。因此，在观察高折射率矿物的贝克线时，要注意假贝克线的出现与否。

为了在单偏光系统下看清贝克线及其移动方向，必须注意以下两点：①适当地缩小锁光圈，排除视域中非垂直入射的散光，并使视域背景变暗，突出贝克线的明亮程度；②升降镜筒要缓慢，边升降，边观察。

4.4.5 贝克线色散

当两相邻介质折射率相差不大时，其邻接处的贝克线分解为二个色带：橙色带和蓝色带，这种现象称为贝克线色散(图 4-18)。一般来说，橙色带离折射率小的介质近一点，蓝色带离折射率大的介质近一点，因此，利用贝克线色散，可以直接判断折射率相近的相邻介质折射率的相对高低。

白光中各单色光的频率是不同的，因此它们在有一定密度的介质中的传播速度(或折射率)是有所差异的。在一般情况下，传播速度随频率的降低而增加，故红光的传播速度最快，其折射率最小；而紫光的传播速度最慢，其折射率最大。这种单色光折射率发生分化的现象称为折射率色散，在棱

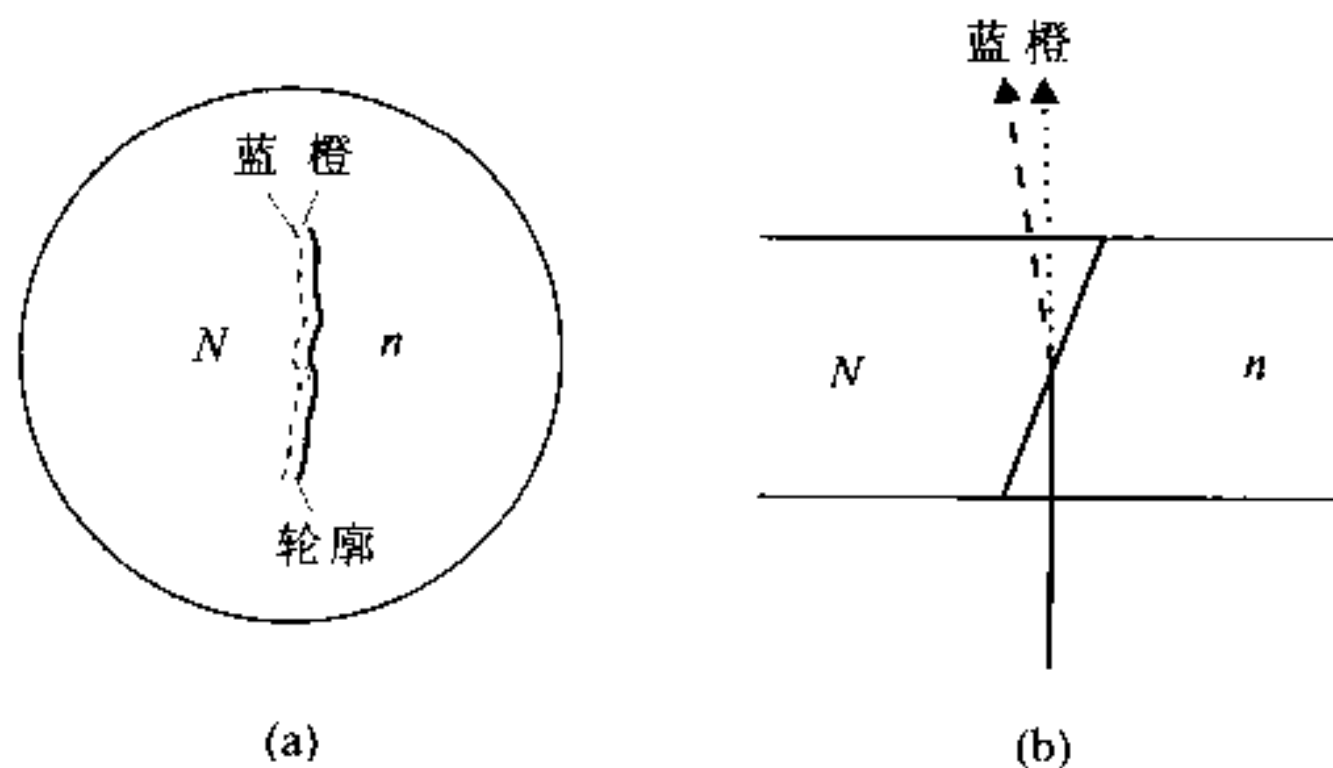


图 4-18 贝克线色散及其成因 ($N > n$)

(a) 顶视图; (b) 侧视图

镜中表现为光谱分光作用(图 4-19)。白光在晶体中传播时,其红光、橙光、黄光的折射率较小,故红光、橙光、黄光混合成的橙光具有较大的折射角(当入射介质为光疏介质时);其蓝光、青光、紫光的折射率较大,故蓝光、青光、紫光混合成的蓝光具有较小的折射角(当入射介质为光疏介质时)。因此,当两种不同介质之间的接触面有一定的倾角时,透射光从一种介质进入另一种介质时就要发生折射或全反射,导致光谱分光作用而形成两条不同的色带。无论两种介质的折射率相对大小如何,蓝色带总是靠近折射率较大的介质一侧,而橙色带总是靠近折射率较小的介质一侧。据此,可以判断

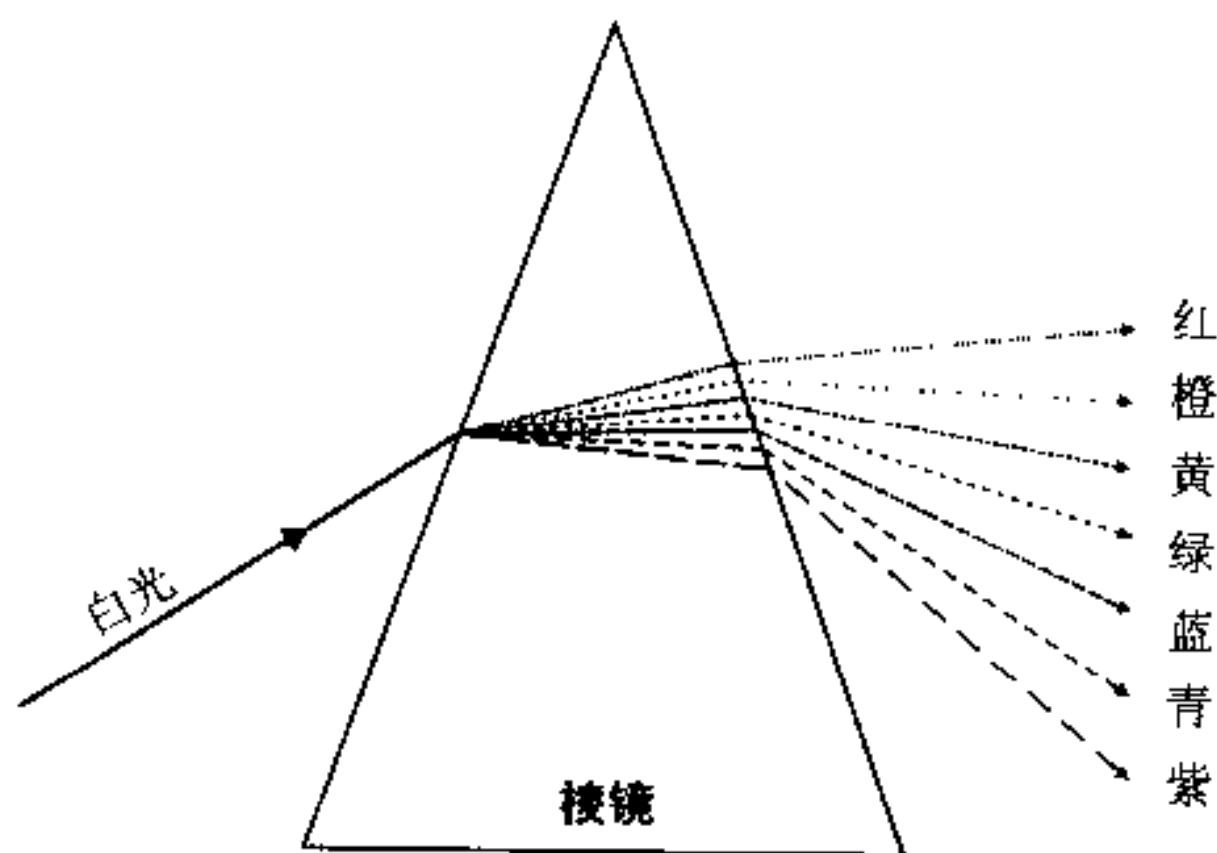


图 4-19 白光透过棱镜时的光谱分光作用

未知矿物的折射率相对大小。

实际上,折射率色散所导致的橙色带和蓝色带可以出现在任意两个相邻介质之间。但是,能够在偏光显微镜下被清晰地观察到的前提是,相邻介质的折射率必须相差不大。此时,折射角与入射角相差不大,两条不同色带近于平行透射光的方向而又分开地射入我们的眼睛,从而被清晰地观察到(图4-18(b))。否则,当相邻介质的折射率相差很大时,两条不同色带将大幅度地偏离透射光的方向折射或全反射,我们的眼睛只能感觉到两种不同色带重合的效应——白色的贝克线。因此,贝克线色散可以进一步提示,在两种介质之间出现橙色带和蓝色带时,它们的折射率是非常接近的。

贝克线色散是一种很微弱的光学现象,因此,必须在更严格的条件下才能观察到:

(1) 把观察对象置于视域中心,使用平面反光镜,适当地缩小锁光圈,尽量采用平行的透射光线。

(2) 一般宜用中倍物镜观察,轻微地调节物镜的焦平面,使得橙色带与蓝色带被清晰地分开。

(3) 深色矿物的颜色会掩盖色散效应,故仅无色或浅色矿物之间可以观察到贝克线色散。

习 题 四

1. 辉石($N_m=1.71$)和斜长石($N_m=1.56$)都具有一组完全解理,但在岩石薄片辉石的解理缝很常见,而斜长石的解理缝就比较少见,其原因何在?

2. 试定量并作图比较普通角闪石(其解理角: $(110) \wedge (1\bar{1}0)=124^\circ$)和普通辉石(其解理角: $(110) \wedge (1\bar{1}0)=87^\circ$)的平行(010)切面上的 $\{110\}$ 解理缝的清晰程度(已知普通角闪石 $N_m=1.67$,普通辉石 $N_m=1.71$,树胶 $n=1.54$)。

3. 在辉长岩薄片见二颗相邻的普通辉石和拉长石(普通辉石 $N_m=1.71$,拉长石 $N_m=1.56$),它们分别表现出一组清晰的解理,并且两个矿物的解理缝都同等程度的宽。如果可以使得这二个矿物颗粒的解理面与切面法线的夹角同步增大,它们的解理缝的清晰程度将分别如何变化(列出对应的夹角范围)?

4. 虽然萤石($N=1.43$)具极完全解理,但在偏光显微镜下它的解理缝应该是不清晰的,为什么?然而,在特殊情况下,它的解理缝还是可以被观

察到,为什么?试分别作图加以说明。

5. 已知电气石的多色性: $N_o =$ 深褐色, $N_e =$ 浅黄色,试写出电气石的三个代表性切面上的多色性公式。

6. 在安山岩薄片中共见四个不同切面方位的普通角闪石,分别呈现如下多色性:① 深褐色—褐色;② 深褐色—淡黄色;③ 褐色—淡褐色;④ 褐色—褐色。试问:① 平行光轴面的切面,应具上述第几种多色性?② 垂直光轴的切面,应具上述第几种多色性?

7. 在薄片中共见到两类黑云母切面,一类为平行底面解理的切面,呈深褐色,转动载物台,其多色性与吸收性有十分微弱的变化;另一类为垂直底面解理的切面,转动载物台,呈现显著的多色性与吸收性:浅黄色—深褐色。已知黑云母的光性方位: $b // N_m, c \wedge N_p = 3^\circ, (-)2V = 5^\circ, +\beta = 100^\circ$ 。试问:① 如何判别并确定上述第一类切面上的两个折射率(指 $N_g, N_g', N_m, N_p', N_p$)?② 为什么该类切面上的多色性与吸收性如此微弱?③ 如何判别并确定上述第二类切面上的两个折射率(指 $N_g, N_g', N_m, N_p', N_p$) (有三种可能切面,试分别列出)?④ 为什么该类切面上的多色性与吸收性非常强烈?

8. 在一辉长岩薄片中共见拉长石的 $N_m = 1.56$,普通辉石的 $N_m = 1.71$,树胶的 $n = 1.54$ 。在平行光透射下,当两种矿物与树胶邻接的平整界面(矿物在界面之下,树胶在界面之上)与薄片的法线呈 20° 相交时,试定量并作图说明这两种矿物轮廓的显著程度。

9. 已知“低温型”斜长石中(斜长石的号数 An_{0-100} 与折射率成正比), An_{22} 以上的斜长石的 $N_p > 1.54$, An_8 以下的斜长石的 $N_g < 1.54$ 。转动载物台,如果发现薄片中共见某个斜长石颗粒的突起时正时负,试问该斜长石的号数 An_r 是多少?

10. 在碱性长石与斜长石邻接的界面上,见到碱性长石一侧出现淡的橙黄色的贝克线色散;在斜长石与石英邻接的界面上,见到石英一侧出现淡蓝色的贝克线色散,试比较上述三种矿物折射率的相对大小。

第五章 正交偏光系统下晶体的光学性质

正交偏光系统是在单偏光系统的基础上,把上偏光镜推入镜筒的偏光显微镜工作状态。在此系统下,上、下偏光镜振动方向相互垂直,并与目镜十字丝一致。一般以 PP 表示下偏光镜的振动方向(南北方向),以 AA 表示上偏光镜的振动方向(东西方向)(图 5-1)。将矿物切片放在上、下偏光镜之间的载物台上,视域中将呈现一系列光学现象,如消光、干涉色、延性、双晶等。本章以干涉色的形成为理论基础,分别介绍与此相关的各种正交偏光系统下晶体的光学现象及其原理。

§ 5.1 消 光

在正交偏光系统下,如果在载物台上不放任何矿物切片时,那么自然光通过下偏光镜后,转化为 PP 方向振动的偏光,直接到达上偏光镜。由于上偏光镜的振动方向是 AA ,只允许 AA 方向振动的偏光通过,而 AA 与 PP 垂直(图 5-1 (a)),故全部 PP 方向振动的偏光都不能通过上偏光镜。此时,视域呈黑暗。

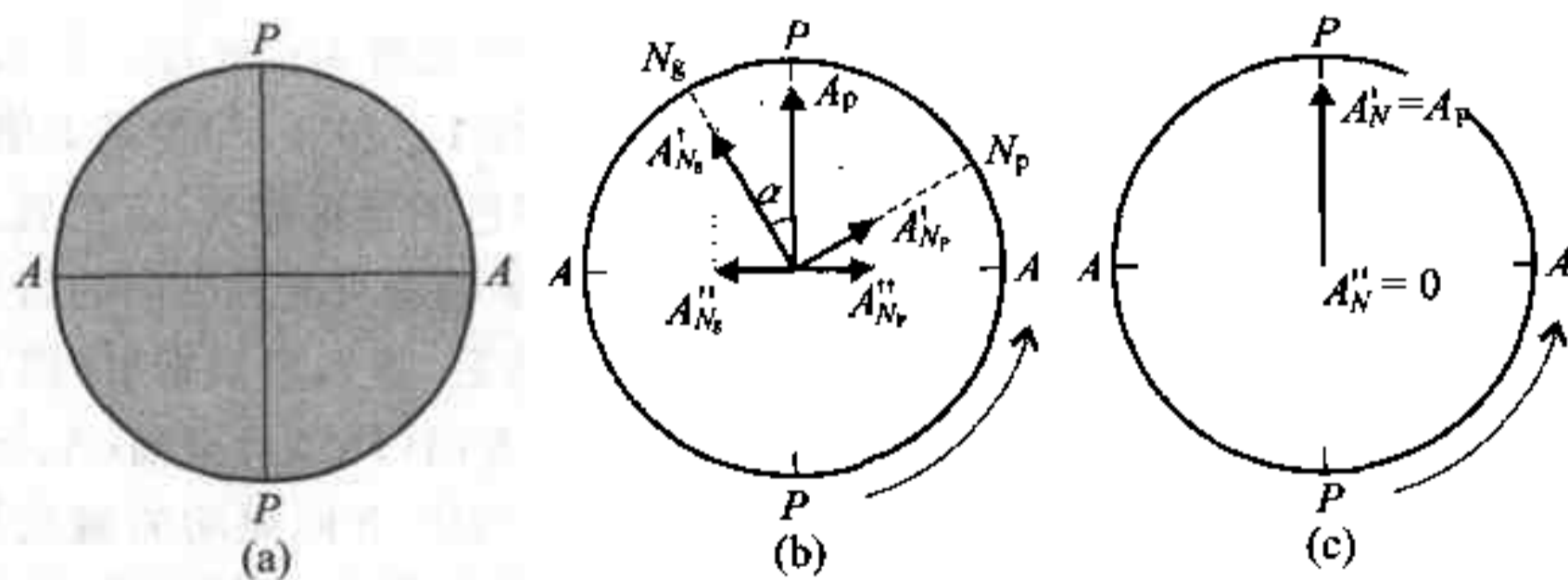


图 5-1 正交偏光系统下的消光及其原因

- (a)正交偏光系统; (b)非均质体任意切面上两束偏光的振幅矢量分解;
(c)均质体或非均质体垂直光轴切面上一束偏光的振幅矢量分解

如果在载物台上放置一个岩石切片,则可以看到不同的非均质矿物所呈现的各种色调的颜色,这些颜色称为干涉色;旋转载物台,干涉色色调不变,但干涉色亮度下降,直至黑暗。这种由明亮至黑暗的现象称为消光。旋转载物台 360° ,则干涉色发生四次明暗交替变化。

根据光学原理,光波的亮度(光强)取决于它的振幅($I=kA^2$,参见第一章 1.1 节)。在正交偏光系统下,非均质矿物任意切面上两束偏光的振幅大小(A_{Ng}' 和 A_{Np}')及其在上偏光镜振动方向上的矢量(A_{Ng}'' 和 A_{Np}'')是随着载物台的旋转而变化的(图 5-1 (b))。

(1) 当 $\alpha=0^\circ$ 时,两束偏光的振幅为: $A_{Ng}'=A_p$ (A_p 为透射偏光的振幅), $A_{Np}'=0$;它们在上偏光镜振动方向上的振幅矢量为: $A_{Ng}''=0$, $A_{Np}''=0$,故没有任何光线通过上偏光镜,视域黑暗,即晶体处于消光状态。

(2) 逆时针旋转载物台,随着 α 不断增大, A_{Ng}' 不断减小而 A_{Np}' 不断加大,但它们在上偏光镜振动方向上的振幅矢量 A_{Ng}'' 和 A_{Np}'' 却是同步增大,故通过上偏光镜的光强连续增加,晶体的干涉色变得越来越明亮,直至 45° 位置 A_{Ng}'' 和 A_{Np}'' 达到最大值。

(3) 继续逆时针旋转载物台, α 由 45° 增大到 90° ,则 A_{Ng}' 继续减小而 A_{Np}' 继续加大,但它们在上偏光镜振动方向上的振幅矢量(A_{Ng}'' 和 A_{Np}'')却开始同步变小,故通过上偏光镜的光强减弱,晶体的干涉色变得越来越暗,直至 90° 位置晶体又处于消光状态。

(4) 旋转载物台 360° ,晶体切面的干涉色发生四次明暗交替变化。

事实上,在 0° 或 90° 位置,只有一束平行下偏光镜振动方向的偏光通过晶体(另一束的振幅为 0),而该束偏光的振动方向与上偏光镜振动方向完全垂直,不能通过上偏光镜,视域黑暗,故称 0° 或 90° 位置为消光位。在 45° 位置,两束偏光在上偏光镜振动方向上的振幅矢量(A_{Ng}'' 和 A_{Np}'')为最大值,干涉色亮度最大,故我们把晶体切面处于最亮干涉色的位置称为 45° 位置。

如果在载物台上放置一个均质矿物或非均质矿物垂直光轴方向的切片(图 5-1 (c)),在 PP 方向振动的下偏光进入晶体后,不发生双折射(因其光率体切面为圆切面),即透射光保持原来的振动方向(PP)及振幅($A_N'=A_p$)通过晶体,并继续向上传播到上偏光镜。由于 PP 方向振动的偏光与上偏光镜振动方向 AA 垂直(即 $A_N''=0$),故全部不能通过,视域黑暗,处于消光状态。此时旋转载物台 360° ,矿物切片始终呈现黑暗,这种现象称为全消光。

§ 5.2 干涉原理

在正交偏光系统下,当非均质矿物切面由消光位向 45° 位置转动时,它的干涉色趋于明亮。然而,根据平行四边形法则,无论矿物切面处于什么位置,两束偏光在上偏光镜振动方向的振幅 A_{N_g} 和 A_{N_p} 总是大小相等、方向相反的。作为矢量,两者互相抵消,视域应该是黑暗的,那么为什么还有明亮的干涉色呢?

事实上,由于两束偏光通过晶体的速度是不相等的,故这两束偏光在到达上偏光镜时,它们在上偏光镜振动方向上的振幅矢量并不总是抵消的;相反,这两束偏光在该方向可以相互叠加、干涉而产生干涉色,下面将介绍干涉色形成的原理。

5.2.1 光程差

利用波长为 λ_0 的单色光作为偏光显微镜的光源,它经过下偏光镜后转化为振动方向和振幅为 OP 的偏光,然后射入 45° 位置的晶体切片(图 5-2)。由于双折射作用,下偏光 OP 分解为一束慢光(用折射率 N_g 表示)和--束快光(用折射率为 N_p 表示),它们的振幅分别为 ON_g 和 ON_p 。因为慢光和快光来自相同的光源,故它们的频率 f 是相等的,根据 $V=f\lambda$,慢光在晶体中传播时的波长 λ_g 小于快光的波长 λ_p 。因此可以假设,慢光通过晶体需 $1\frac{1}{2}\lambda_g$,而快光只需 $1\lambda_p$ 。由于慢光和快光的频率相等,两者的周期亦相等,故快光传播了 $1\lambda_p$ 到达晶体的上部表面时,慢光 N_g 也传播了 $1\lambda_g$,但仍在晶体内部;而当慢光接着再传播 $\frac{1}{2}\lambda_g$ 到达晶体的上部表面时,快光已在空气中传播了 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 的距离。此后,上述两束偏光以相同的(空气中)速度向上偏光镜传播,但两者之间始终保持了 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 的距离,这段距离称为光程差(用 R 表示)。

设光在空气中传播速度为 c_0 ,晶体切片的厚度为 d ,快光和慢光通过晶体切片所需的时间分别为 t_p 和 t_g ,则光程差:

$$R=c_0 \times (t_g - t_p)$$

设快光和慢光在晶体中传播速度分别为 V_p 和 V_g ,则:

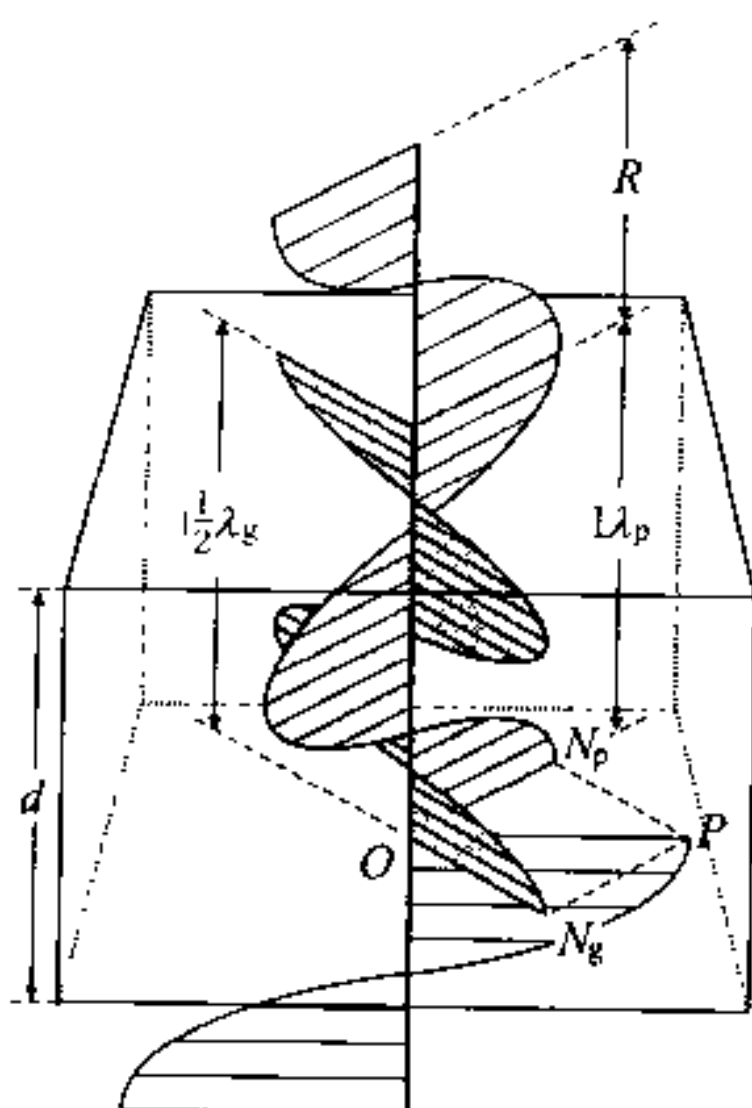


图 5-2 两束偏光透过非均质矿物切面时的传播过程

$$t_g = \frac{d}{V_g}, \quad t_p = \frac{d}{V_p}$$

将 t_g 和 t_p 代入前式, 则:

$$R = c_o \times \left(\frac{d}{V_g} - \frac{d}{V_p} \right) = d \times \left(\frac{c_o}{V_g} - \frac{c_o}{V_p} \right)$$

根据折射率的定义:

$$\frac{c_o}{V_g} = N_g, \quad \frac{c_o}{V_p} = N_p$$

所以,

$$R = d \times (N_g - N_p)$$

由此可见, 决定光程差大小的因素有两个, 一是该切面的双折射率, 另一个是切片厚度。前者决定了两束偏光的速度差, 速度差越大, 两者拉开的距离(即光程差)越大; 后者决定了慢光和快光以不同速度在晶体中传播的过程, 过程越长, 两者拉开的距离越大。

5.2.2 干涉作用

光程差的存在说明两束偏光并不是同时到达上偏光镜, 即在离开晶体后两束偏光之间必然保持着一个恒定的位相差。如果两束偏光的位相差为单

色光波长 λ_0 的整数倍,则两者抵消,视域中黑暗;否则,两束偏光将部分地叠加在一起,并通过上偏光镜,使视域中呈现明亮的干涉色。下面举例说明之。

设慢光通过晶体切片需传播 $2\lambda_g$,而快光通过晶体切片有两种情况:

(1) 快光只需传播 $1\lambda_p$ 即可通过,即光程差为 $1\lambda_0$ (图5-3(a))。由于透射偏光连续不断地进入晶体,发生双折射的两束偏光总是以固定的振动方向和固定的光程差通过晶体。因此,与快光同时在晶体中开始传播但滞后到达晶体上部表面的慢光,可以和后期进入晶体但与其同时到达晶体上部表面的快光,一起以相同的速度到达上偏光镜,然后以上偏光镜振动方向上的振幅分量通过上偏光镜。为了便于表达的原因,我们将两束偏光到达上偏光镜后发生的振幅分解、抵消或叠加的现象移到它们刚离开晶体上部表面的瞬间。从图5-3(a)中可以看出,当光程差为 $1\lambda_0$ 时,同时离开晶体的两束偏光在上偏光镜振动方向上的振幅矢量正好大小相等、方向相反,因此互相抵消;两者在垂直上偏光镜振动方向上的振幅矢量正好大小相等、方向相同,因此互相叠加,但由于该方向与上偏光镜振动方向垂直,因此叠加后的偏光不能通过上偏光镜。综合上述两个方向上的效应,没有任何光线通过上偏光镜,视域黑暗。

(2) 快光传播 $1\frac{1}{2}\lambda_p$ 到达晶体上部表面(图5-3(b))。相对前一种情况,慢光离开晶体时的位相不变,而快光增加了 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 位相才到达晶体上部表面,因此光程差为 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 。此时,同时离开晶体的两束偏光在垂直上偏光镜振动方向上的振幅矢量正好大小相等、方向相反,因此互相抵消;而两者在上偏光镜振动方向上的振幅矢量正好大小相等、方向相同,因此互相叠加,由于该方向与上偏光镜振动方向平行,因此叠加的两束偏光可以通过上偏光镜,视域明亮。

上述实例说明,光程差为 $1\lambda_0$ 时,两束偏光在上偏光镜振动方向上相互抵消,视域黑暗;而光程差为 $\frac{1}{2}\lambda_0$ 时,两束偏光在上偏光镜振动方向上相互叠加,视域明亮。因此,光程差的大小决定了视域黑暗或明亮,两者的关系可以进一步扩展为:① 当光程差等于半波长的偶数倍——波长的整数倍时,即 $R=2n\frac{\lambda_0}{2}=n\lambda_0$,光被抵消;② 当光程差等于半波长的奇数倍时,即 $R=(2n+1)\frac{\lambda_0}{2}$,光被加强。

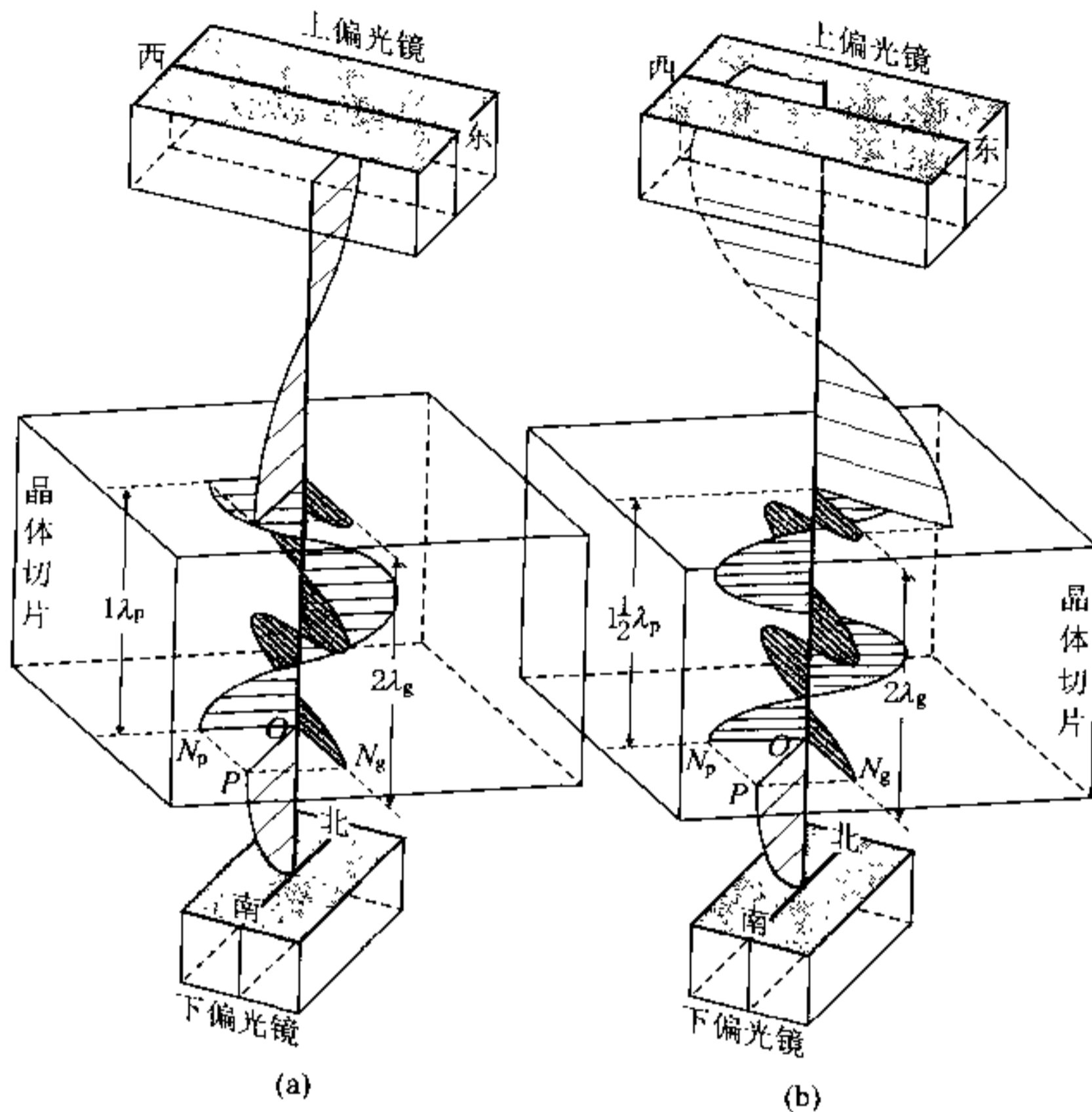


图 5-3 两束偏光透过非均质矿物切面后的干涉作用

$$(a) R = 1\lambda_0; \quad (b) R = \frac{1}{2}\lambda_0$$

事实上,对于 45° 位置的矿物切片,两束偏光形成时的位相差是恒定的,它们离开晶体时的位相差也是恒定的,但根据快光和慢光在晶体中的传播速度之差异性不同,两束偏光离开晶体时的位相差可以有四种代表性的情况(图 5-4):

(1) 快光和慢光离开晶体时的位相与形成时的相同(图 5-4 (a)),即在晶体中快光传播了 x 个 λ_p ,慢光传播了 y 个 λ_g ($x < y, y - x = n$),两者的光程差 $R = (y - x)\lambda_0 = n\lambda_0$,故光被抵消。事实上,两束偏光叠加的方向正好与上偏光镜垂直,故视域黑暗。

(2) 快光和慢光离开晶体时的位相比形成时的位相都多传播了 $\frac{1}{2}$ 个波

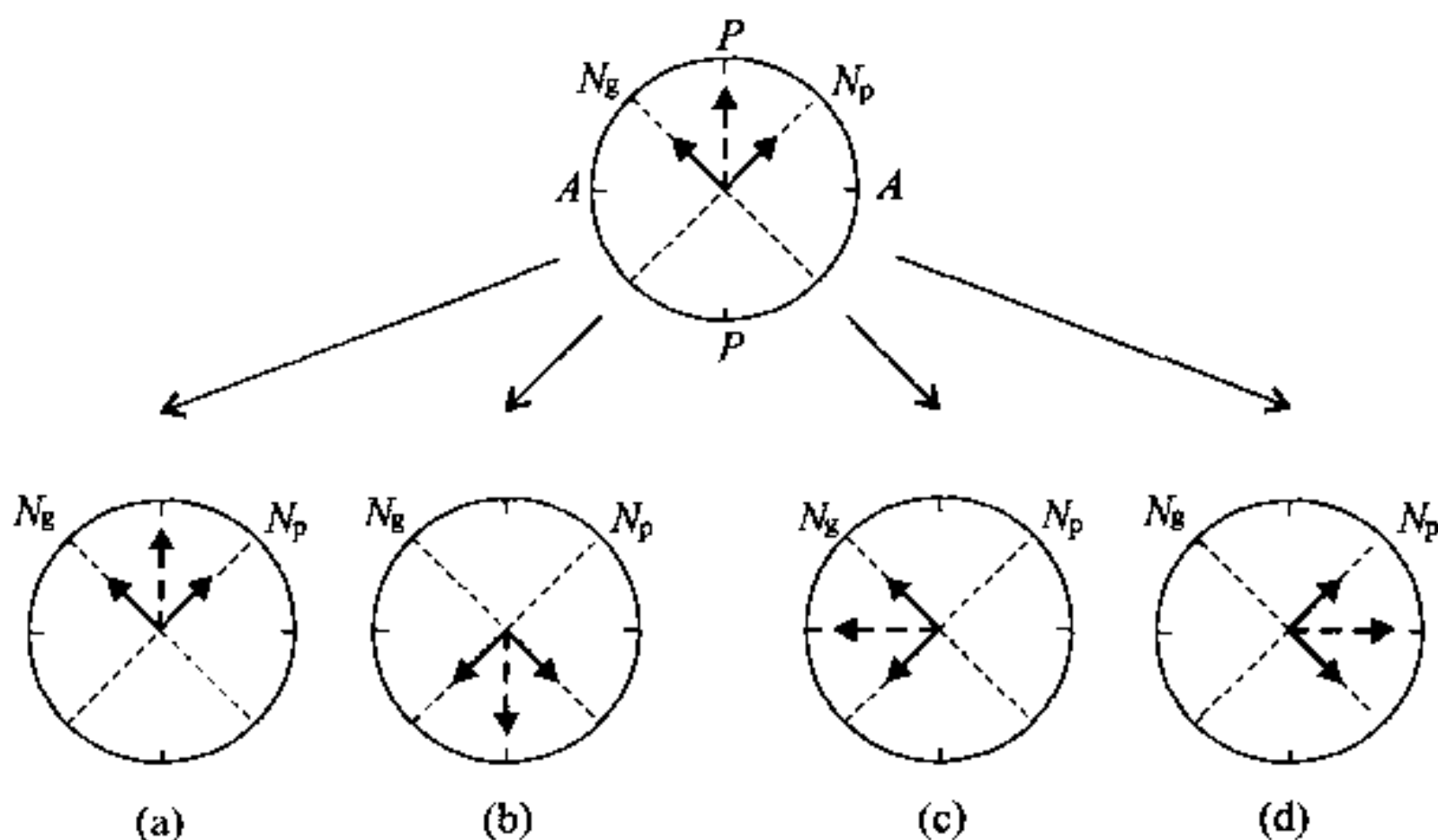


图 5-4 两束同时到达晶体上部切面的偏光的位相及叠加

(a)和(b): $R=2n\frac{\lambda_0}{2}$, 两束偏光在下偏光镜振动方向叠加;

(c)和(d): $R=(2n+1)\frac{\lambda_0}{2}$, 两束偏光在上偏光镜振动方向叠加

长(图 5-4 (b)),即在晶体中快光传播了 $(x+\frac{1}{2})$ 个 λ_p ,慢光传播了 $(y+\frac{1}{2})$ 个 λ_g ,两者的光程差 $R=[(y+\frac{1}{2})-(x+\frac{1}{2})]\lambda_0=[y-x]\lambda_0=n\lambda_0$,故光亦被抵消。此时,两束偏光叠加的方向也正好与上偏光镜垂直,故视域黑暗。

(3) 慢光离开晶体时的位相与形成时的相同,而快光离开晶体时的位相比形成时的位相多传播了 $\frac{1}{2}$ 个 λ_p (图 5-4 (c)),即在晶体中快光传播了 $(x+\frac{1}{2})$ 个 λ_p ,慢光传播了 y 个 λ_g ,两者的光程差 $R=[y-(x+\frac{1}{2})]\lambda_0=[y-x-\frac{1}{2}]\lambda_0=[2n-1]\frac{\lambda_0}{2}$,故光被加强。实际上,两束偏光叠加的方向正好与上偏光镜平行,故视域明亮。

(4) 快光离开晶体时的位相与形成时的相同,而慢光离开晶体时的位相比形成时的位相多传播了 $\frac{1}{2}$ 个 λ_g (图 5-4 (d)),即在晶体中快光传播了 x 个 λ_p ,慢光传播了 $(y+\frac{1}{2})$ 个 λ_g ,两者的光程差 $R=[(y+\frac{1}{2})-x]\lambda_0=[y$

$-x + \frac{1}{2}] \lambda_0 = [2n+1] \frac{\lambda_0}{2}$, 故光被加强。此时, 两束偏光叠加的方向也正好与上偏光镜平行, 故视域明亮。

总之, 光程差为半波长的偶数倍还是奇数倍决定了两束偏光能否通过上偏光镜。至于光程差介于上述两种情况的, 它们的结果可以看作介于明亮与黑暗之间, 即有一定强度的光通过上偏光镜。

5.2.3 干涉条件

任意两束光波在空间的某一点相遇时, 并非必然发生加强或抵消的干涉现象。根据光学原理, 必须具备三个条件它们才能发生干涉作用:

(1) 位相差恒定。在正交偏光系统下, 两束偏光离开晶体或到达上偏光镜时各自的位相是不随时间而改变的, 即两者之间的位相差是恒定的。这样, 两者之间以不变的方式和不变的振幅分量发生干涉作用, 导致视域中的干涉现象不随时间而改变。

(2) 频率相同。在正交偏光系统下, 非均质矿物中的两束偏光是由同一光源的下偏光分解而来的, 故它们的频率是一致的。只有频率相同, 才能保持两束偏光的位相差恒定。

(3) 偏光振动面相同。正是为了满足这一条件, 在单偏光系统的基础上装置上偏光镜, 使得两束偏光通过上偏光镜后被限制在同一个平面内振动, 从而发生干涉作用。在单偏光系统下, 两束偏光不发生相互干涉的原因正是因为它们的振动方向总是相互垂直的, 尽管它们满足了前面两个条件。

在正交偏光系统下, 通过上偏光镜后的两束偏光完全满足以上三个条件, 故将发生干涉作用, 从而形成干涉色。

§ 5.3 干涉色

5.3.1 干涉色的形成

基于干涉原理, 晶体光学中特制了一个偏光显微镜的重要附件——石英楔, 以观察光程差与干涉色的关系。石英楔是一个镶入金属框中的楔形石英单晶体, 楔形体的底面平行光轴, 其长边和短边分别为 N_e 和 N_o 方向, 楔形体的另一面为坡度 0.5° 左右的斜面(图 5-5)。当下偏光垂直楔形体的底面射入石英晶体时, 无论入射位置在石英楔的哪个部位, 其产生的双折射率始终为 0.009 ($\Delta N = N_e - N_o = 0.009$), 故两束偏光的光程差为 $R = d \cdot$

$(N_e - N_o) = 0.009 d$ (d 的大小取决于入射位置)。由于石英楔的厚度 d 是连续增大的, 因此, 随着下偏光入射位置沿石英楔长边由薄端向厚端连续移动 (或石英楔相对下偏光镜连续移动), 两束偏光的光程差也必然连续增大。

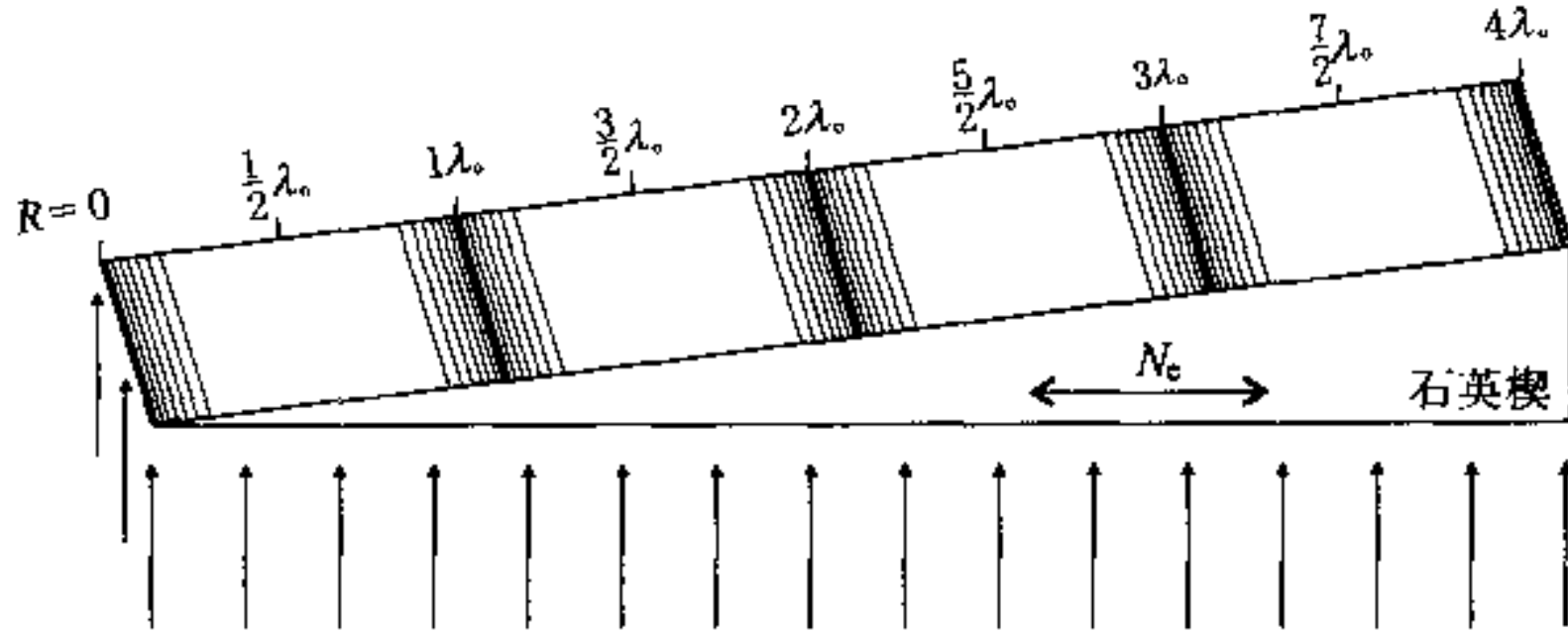


图 5-5 正交偏光系统下单色光通过石英楔时的干涉现象

现用单色光照射, 在正交偏光系统下, 沿偏光显微镜的试板孔 (试板孔的延伸方向与上、下偏光镜成 45° 角斜交, 见图 3-1) 徐徐插入石英楔。随着石英楔厚度的逐渐增大, 光程差也逐渐增大, 由 $0 \rightarrow \frac{1}{2} \lambda_0 \rightarrow \lambda_0 \rightarrow 1 \frac{1}{2} \lambda_0 \rightarrow 2 \lambda_0 \rightarrow 2 \frac{1}{2} \lambda_0 \rightarrow 3 \lambda_0 \rightarrow 3 \frac{1}{2} \lambda_0 \rightarrow 4 \lambda_0 \rightarrow \dots$; 同时, 在视域内相继呈现明暗相间的条带 (图 5-5)。暗带的位置表示该处通过石英楔的两束偏光的光程差等于单色光半波长的偶数倍 ($R = n \lambda_0$), 光被抵消; 亮带的位置表示光程差等于单色光半波长的奇数倍 ($R = (2n + 1) \frac{\lambda_0}{2}$), 光被加强; 亮度介于上述两者之间的位置, 表示光程差既不等于单色光半波长的偶数倍, 也不等于单色光半波长的奇数倍 ($R = \frac{1}{4} \lambda_0, \frac{1}{8} \lambda_0$ 等)。

如果用白光中的七种单色光分别作为光源重复上面的实验, 则在正交偏光系统下分别观察到七种单色光的明暗条带的干涉现象 (图 5-6)。但是, 由于七种单色光的波长不等, 其中红光的波长最大、紫光的波长最小, 因此光程差达到半波长的偶数倍 (光被抵消) 所要求的厚度随单色光波长的增加而增加 ($R_{\text{单色光}} = d \cdot (N_e - N_o) = 0.009 d = n \lambda_{\text{单色光}}, d = n \lambda_{\text{单色光}} / 0.009$), 对应于暗带出现的水平距离也相应增加, 故在同一个石英楔上红光的明暗条带的间隔最大, 而紫光的明暗条带的间隔最小, 介于上述两者之间的依次为橙光、黄光、绿光、蓝光、青光不同距离的明暗条带的间隔 (图 5-6)。

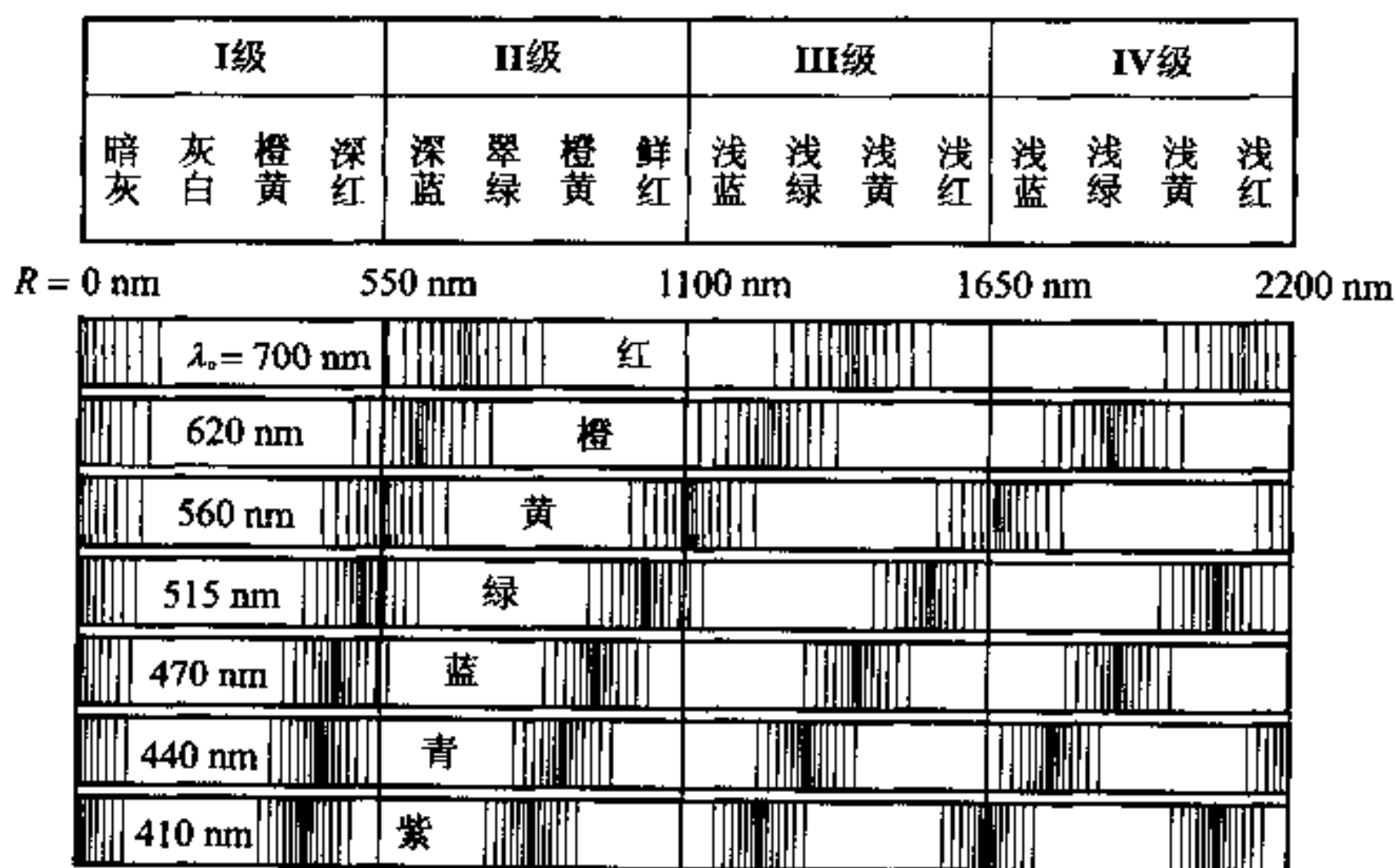


图 5-6 正交偏光系统下七种单色光通过石英楔时的干涉现象

当用单一的白光作光源,也就是同时用七种单色光作光源时,徐徐移动石英楔,将在正交偏光系统下观察到上述七种单色光干涉条带的混合现象:

(1) 不再出现明暗的干涉条带。除光程差 $R=0$ 以外,任何一个光程差值都不可能同时是七种单色光半波长的偶数倍,即七种单色光不可能同时被抵消,故任何一种单色光的暗带总是被其他单色光的亮带所掩盖。

(2) 随着光程差的增大,石英楔的每一处都有一种特定的颜色,它是相同光程差值、不同明暗程度的七种单色光的混合色。根据混合-互补原理(图 4-9),这些混合的颜色可以为灰白、橙黄、翠绿、鲜红等,它们被称为干涉色(见插页干涉色色谱表)。

显然,晶体的干涉色是完全不同于单偏光系统下晶体的颜色;后者是由色素离子的选择性吸收造成的,属于晶体固有的物理现象,故一般来说不随观察方式(肉眼或镜下)和样品大小的变化而变化;而前者是由白光通过晶体时产生的干涉作用引起的,在同一晶体的不同切面上(具有不等的 ΔN)或在不同厚度的同一切面上(具有不等的 d),它的干涉色不同,且这种干涉色只有在正交偏光显微镜下才可以被观察到。

5.3.2 干涉色级序

随着光程差 R 由小到大的连续变化,干涉色也相应地发生变化,这就

是干涉色级序(图 5-6)。它具有如下特点:

(1) 干涉色是连续变化的,由暗灰→灰白→橙黄→深红→深蓝→浅绿→橙黄→鲜红→浅蓝→翠绿→浅黄→浅红→浅蓝→浅绿→浅黄→浅红…亮白,变化顺序固定不变。

(2) 在光程差 $R=0\sim 2200\text{ nm}$ 之间(绝大部分矿物切面的光程差在此范围内),干涉色被均等地分成四级(通常以罗马字表示): I 级干涉色的光程差范围为 $0\sim 550\text{ nm}$,包括暗灰、灰白、橙黄、深红四种干涉色; II、III、IV 级干涉色的光程差范围分别为 $550\text{ nm}\sim 1\ 100\text{ nm}$ 、 $1\ 100\text{ nm}\sim 1\ 650\text{ nm}$ 、 $1\ 650\text{ nm}\sim 2\ 200\text{ nm}$,每级皆是蓝、绿、黄、红四种干涉色,但随着级别增大,干涉色的色调越来越淡,如 IV 级干涉色都呈浅色调。

(3) 在每一级干涉色中,最先出现的干涉色称为底部干涉色,如 II 级蓝;最后出现的干涉色称为顶部干涉色,如 II 级红;中间出现的干涉色称为中部干涉色,如 II 级绿、II 级黄;各种干涉色的光程差范围均在 140 nm 左右(据此,可以把光程差数值与干涉色级序近似地联系起来,如 $R=1\ 700\text{ nm}$ 的干涉色为 IV 级蓝)。但是,无论在每一级之间还是在每一级之内,相邻干涉色的色调都是过渡的,没有截然界线。

(4) 根据每级干涉色的光程差为 550 nm ,则 IV 级以上仍可划分为: V 级、VI 级、VII 级…,级序越高,其干涉色的色调越浅,且渐变为浅绿、粉红两种色调(蓝、黄逐渐消失),其原因可能是:① 随着光程差增大,七种单色光的明暗条带的组合趋于无序化,它们之间的混合-互补的随机性增大,导致白光色调增加,故干涉色变浅;② 在七种单色光中,绿光和红光具有最大的波长范围(图 1-2),故在七种单色光的混合中,这两者被互补抵消的几率较小;同时,绿光和红光正好是牛顿色盘中对角象限的两种互补色(图 4-9),故当两者的亮带错开时,它们就会相间出现。

(5) 当光程差非常大时,绿光和红光也变得非常淡而难于分辨,此时出现珍珠般的白色,称为高级白干涉色。从另一个角度看,当光程差非常大时,它几乎同时接近单色光半波长的偶数倍和奇数倍,故单色光处于明暗之间的中间状态;而七种相同状态的单色光的混合-互补就形成了高级白干涉色。

5.3.3 干涉色色谱表

干涉色色谱表是光程差公式 $R=d\cdot\Delta N$ 的图示形式,它可以表示光程差、双折射率及切片厚度三者之间关系,其中光程差的大小同时用不同级序的干涉色表示(图 5-7 和插页干涉色色谱表)。

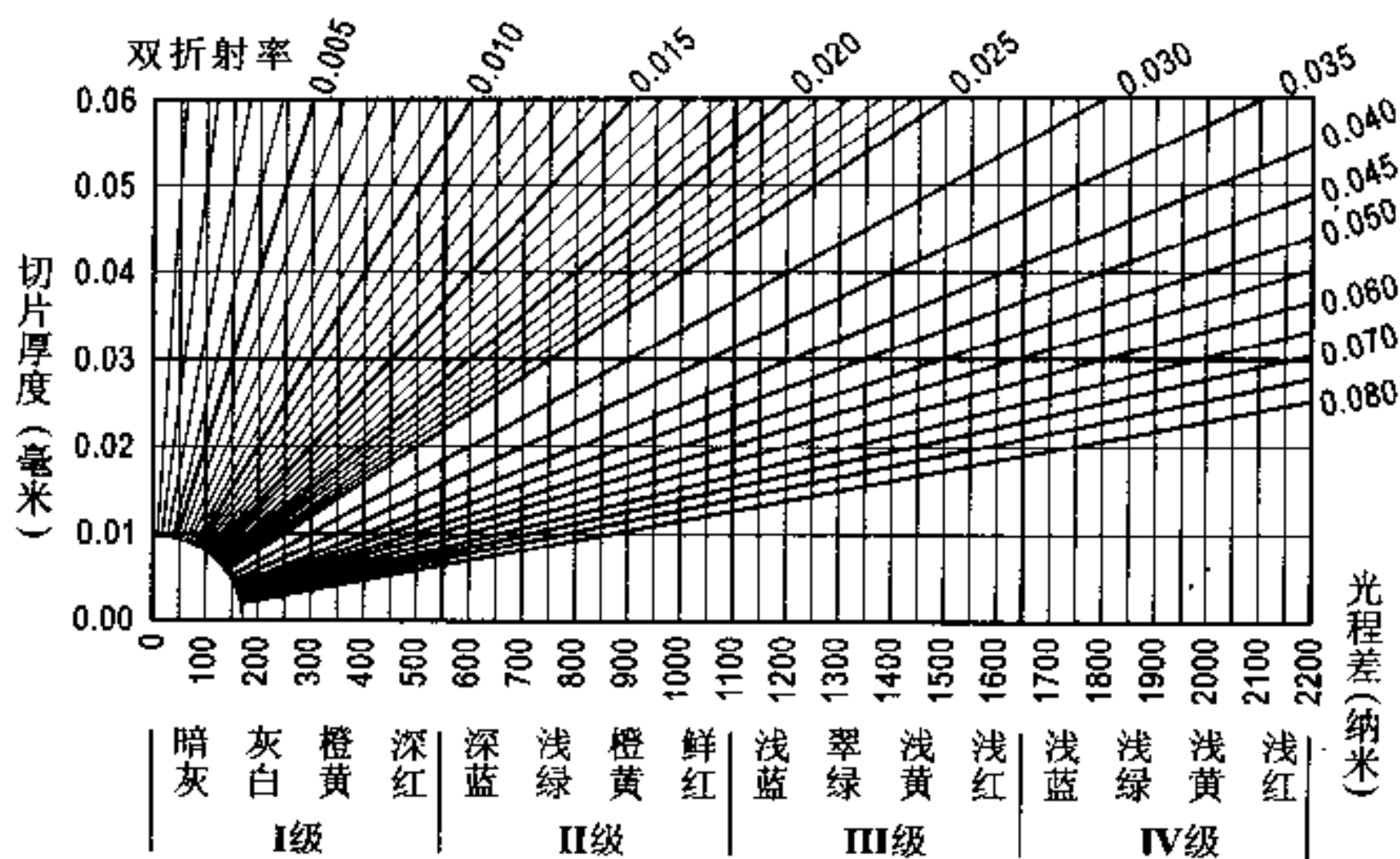


图 5-7 干涉色色谱表

干涉色色谱表的横坐标为光程差 R (以纳米为单位), 纵坐标为切片厚度 d (以毫米为单位), 斜线为切面的双折射率 ΔN (无量纲)。已知光程差 (或干涉色级序)、双折射率、切片厚度三项中的两项数值, 则查干涉色色谱表可近似地得到第三项数值。在实际工作中, 干涉色色谱表主要用于两个方面:

(1) 已知矿物的最高干涉色, 查此表可得该矿物的最大双折射率。例如, 在很多个石英颗粒中, 找到它的最高干涉色为 I 级黄白, 则可在表中确定通过黄白干涉色纵线与 0.03 mm (切片的标准厚度) 横线的交点, 连接该交点与左下角坐标原点构成一条斜线, 其上端指示了双折射率为 0.009, 由此得到石英的 $\Delta N_{\max} = 0.009$ 。

(2) 已知矿物的最大双折射率, 查此表可判断切片的厚度。例如, 已知石英的 $\Delta N_{\max} = 0.009$, 则在标准厚度下 (0.03 mm), 它的最高干涉色为 I 级黄白。在磨制薄片过程中, 如看到部分石英颗粒的干涉色达到 I 级橙黄 (或更高的干涉色), 表明切片厚度超过标准值, 应继续减薄切片, 直到所有颗粒的干涉色 \leq I 级黄白为止。

5.3.4 异常干涉色

在正交偏光系统下, 有些矿物的干涉色不同于干涉色色谱表中呈现的颜色, 称为异常干涉色。例如, 绿泥石的 I 级“柏林蓝”色, 黝帘石的 I 级“锈

褐”色等。

产生异常干涉色的主要原因有两个：

(1) 双折射率色散。在讲述贝克线色散时(参见第四章 4.4 节),我们提到折射率色散,即同一个矿物中不同单色光的折射率可以是不等的。与此同理,在同一个矿物切面上,不同单色光的双折射率也可以是不等的,称为双折射率色散。这样,白光中七种单色光通过同一厚度、同一方向的切面时,产生大小不同的光程差(如 $R_{\text{红光}} < \dots < R_{\text{紫光}}$, 图 5-8 (a)), 由此混合-互补形成的干涉色必然不同于正常的干涉色。换言之,对于具有双折射率色散的矿物,其异常干涉色是由七种不等光程差的单色光叠加而形成的,而正常干涉色是由七种相等光程差的单色光叠加而形成的。例如,黄长石的光双折射率为 0, 故它的双折射率色散导致出现 1 级“青蓝”的异常干涉色。

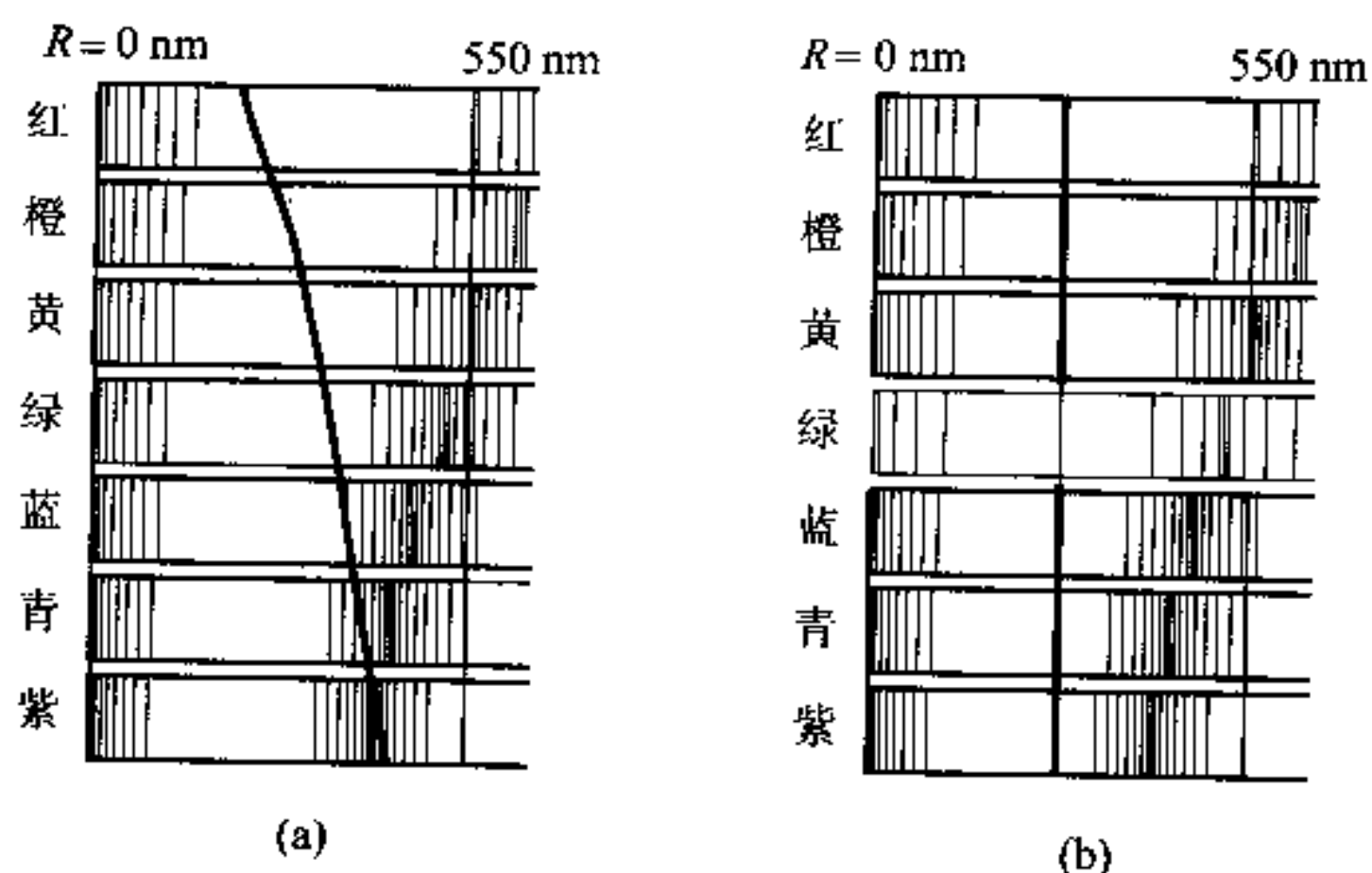


图 5-8 异常干涉色的成因

- (a) 双折射率色散导致不相等的七种单色光光程差
(粗黑线的位置对应于单色光通过矿物时的光程差大小);
(b) 绿光被吸收而较弱地呈现在干涉色中
(线段的粗黑度对应于单色光通过矿物后的光强大小)

(2) 矿物的颜色。颜色是由于白光通过晶体时某种单色光被强烈吸收而造成的,故对于颜色较深的矿物,七种单色光并不是等量地到达上偏光镜。因此,由较强的六种(或六种以下)单色光混合-互补形成的干涉色必然偏离正常的干涉色(图 5-8 (b))。例如,黑云母的最高干涉色可达三级顶部,但并不象正常的干涉色那么鲜艳,而是带有褐色色调。

§ 5.4 干涉色级别的确定

根据干涉原理,晶体的干涉色取决于光程差 R ;又由 $R=d \cdot (N_g - N_p)$
 $=0.03 \times 10^6 \times (N_g - N_p)$ nm 知道,在标准厚度的岩石薄片,决定光程差
 的因素是矿物切面的双折射率;而由光率体的概念知道,不同方位切面上的
 双折射率是不同的。

在一轴晶矿物中,各种方位的切面及其双折射率的变化规律可以归纳
 为:由 $N_o N_o$ (圆切面) $\rightarrow N_e' N_o$ (任意切面) $\rightarrow N_e N_o$ (平行光轴的切面),双折
 射率由0增加到最大值;同样,在二轴晶矿物中,各种方位的切面及其双折
 射率的变化规律也可以归纳为:由 $N_m N_m$ (圆切面) $\rightarrow N_g' N_p'$ (任意切面) \rightarrow
 $N_g N_p$ (平行光轴面的切面),双折射率也由0增加到最大值。因此,对于非
 均质矿物而言,它们都有一个最大双折射率(ΔN_{max}),故它们在岩石薄片
 中都有一个最大光程差(R_{max}),在正交偏光系统下呈现一个最高干涉色。如
 在石英颗粒中,它的 $\Delta N_{max}=0.009$,故它的最高干涉色为Ⅰ级黄白;在橄
 榄石颗粒中,它的 $\Delta N_{max}=0.038$,故它的最高干涉色为Ⅲ级绿。

在标准厚度的岩石薄片,矿物干涉色级别的确定具有十分重要的鉴
 定意义:

(1) 如果某矿物切面上的干涉色级别高于已知矿物的最高干涉色,则
 该切面不属于已知矿物。例如,Ⅱ级蓝的颗粒不可能是石英,因为石英的
 最高干涉色为Ⅰ级黄白。

(2) 如果已知矿物切面上的干涉色正好是该矿物的最高干涉色,则该
 切面一定平行光轴(一轴晶矿物)或平行光轴面(二轴晶矿物),从而可以在
 单偏光系统下有效地鉴定该矿物的多色性和吸收性等光性特征。

但是,除了Ⅰ级干涉色特有的暗灰、灰白以外,对于Ⅰ级~Ⅳ级都出现
 的黄、红干涉色和Ⅱ级~Ⅳ级都出现的蓝、绿干涉色,我们如何准确地判
 别其干涉色属于哪个级别? 现介绍两种最常用的判别方法。

5.4.1 边缘色带法

观察颗粒边缘的红带数目(n),再加上1,就是该颗粒干涉色的级别(n
 $+1$ 级)。例如,在正交偏光系统下,视域中见一颗粒的干涉色为绿色,其
 一侧可以看到两条红带,则该绿色干涉色为Ⅲ级绿(图5-9(a))。

边缘色带法的原理是:矿物颗粒边缘常呈斜坡,它所起的作用相当于一个
 石英楔,即随厚度增加干涉色级别相应增加(图5-9(b))。但是,颗粒斜

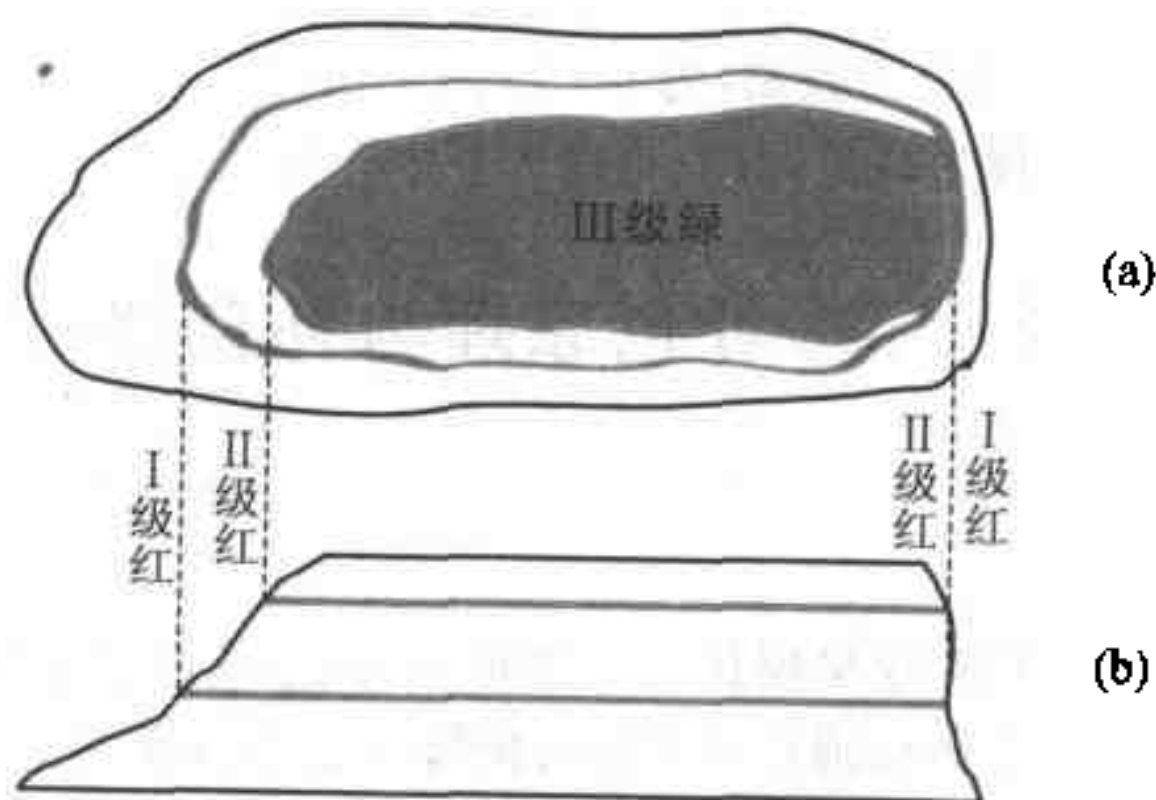


图 5-9 边缘色带及其成因

(a)顶视图; (b)侧视图

坡相对陡而不规则,不如石英楔那样显示连续而匀称的干涉色系列,故无法顺序排出所有的干涉色级别增加的过程。然而,我们可以在斜坡的干涉色变化中,比较容易地找到最醒目的红色条带。由于红色是每一级的顶部干涉色,因此红带以上的干涉色必然比红带高一个级序,故在矿物边缘出现 n 个红带时,矿物中心干涉色的级别必然是 $n+1$ 。如果边缘未出现红带,则 $n=0$,所见的干涉色属于 I 级。

用边缘色带法来确定干涉色级别是非常简便而有效的,但在实际操作中需注意以下情况:① 如果颗粒边缘很短或不连续时(如图 5-9 中颗粒的右侧),应放弃在该处作判别工作,而尽量在其他边缘部位寻找红带分明的斜坡(如图 5-9 中颗粒的左侧)进行鉴定;② 有时在颗粒边缘应该出现 I 级红带的部位,出现了深蓝的色带,它代表了较窄的 I 级红带被较深的 II 级蓝带所掩盖,故应把深蓝色带算作一个红带数目;③ 如果矿物颗粒边缘的斜坡被另一个颗粒叠盖,这时边缘所呈现的干涉色带为两者各自干涉色带的叠加,故应该转动载物台,使其中的一个颗粒消光,此时观察到的才是另一个颗粒的边缘干涉色带,从而可以确定该矿物的干涉色级别。

5.4.2 石英楔法

在正交偏光系统下,将视域中心的矿物切面转至 45° 位置(干涉色最明亮);然后在试板孔中,徐徐插入石英楔,观察矿物干涉色的变化:① 如果干涉色呈升高趋势(蓝→绿→黄→红→蓝…),则旋转载物台 90° ,重新插入石英楔;② 如果干涉色连续降低(红→黄→绿→蓝→红…),则不断插入石英

楔,直至出现黑带。在第二个过程中,注意观察通过的红带数目(n),再加上1,就是该颗粒干涉色的级别(为 $n+1$)。

石英楔法的原理为补色原理,将在下节中介绍。

§ 5.5 补色原理与补色器

5.5.1 补色原理

岩石薄片矿物颗粒呈现什么干涉色,取决于它的光率体椭圆切面上双折射率大小。至于该椭圆长短半径方向哪个是 N_g ,哪个是 N_p ,必须根据下述的补色原理,用补色器加以测定。只有确定了颗粒切面上 N_g 和 N_p 方向,才能进一步测定矿物的其他光性常数。例如,当找到最高干涉色的切面,并确定其 N_g 和 N_p 方向,才可以在单偏光系统下确定该矿物的多色性和吸收性公式。

设有两个不同的非均质矿物切片,其光率体椭圆切面的长短半径分别为 N_{g1} 、 N_{p1} 和 N_{g2} 、 N_{p2} 。当两束偏光经过这两个切片时,产生的光程差分别为 R_1 和 R_2 (图5-10(a)和(b))。现将这两个矿物切片重叠放在载物台上,转至 45° 位置,光通过这两个矿物切片后,将产生总光程差 R_t ,它的大小取决于这两个矿物切片的重叠方式:

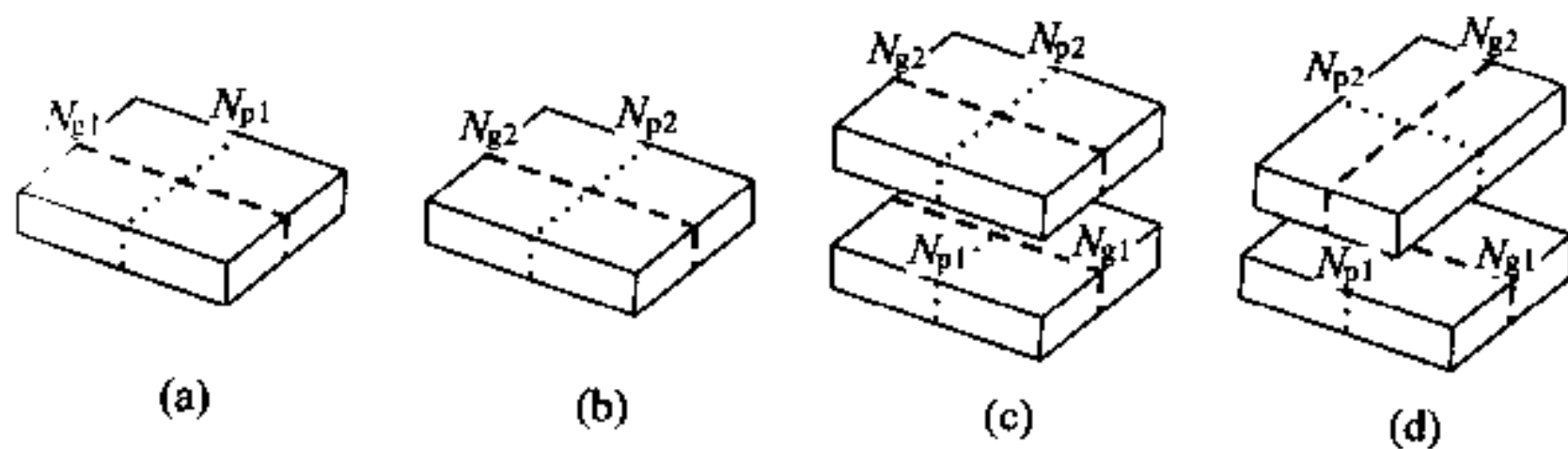


图5-10 两种不同的光程差叠加

(a)具有 R_1 光程差的晶体; (b)具有 R_2 光程差的晶体;

(c)同名轴重合, $R_t = R_1 + R_2$; (d)异名轴重合, $R_t = |R_1 - R_2|$

(1) 当两个椭圆切面的同名半径平行一致时,即 $N_{g1} // N_{g2}$ 、 $N_{p1} // N_{p2}$,则通过第一个矿物切片时的快光(N_{p1}),进入第二个矿物切片时仍然为快光(N_{p2})(图5-10(c))。因此,两束偏光都通过这两个矿物切片后,产生的总光程差 $R_t = R_1 + R_2$,其中 $R_t > R_1$ 、 $R_t > R_2$ 。由于光程差的大小可以由干

涉色级别直观地反映出来,故总光程差 R_t 反映的干涉色必然比两个矿物切片各自的干涉色都要高。这个规律被概括为:同名轴重合,干涉色升高。

(2) 当两个椭圆切面的异名半径平行一致时,即 $N_{g1} // N_{p2}$ 、 $N_{p1} // N_{g2}$, 则通过第一个矿物切片时的快光(N_{p1}),进入第二个矿物切片时变为慢光(N_{g2})(图 5-10(d))。此时,两束偏光通过第一个矿物切片后产生的光程差 R_1 ,将在两束偏光通过第二个矿物切片时被部分地或全部地抵消,产生的总光程差 $R_t = R_1 - R_2$ (当 $R_2 < R_1$ 时)或 $R_t = R_2 - R_1$ (当 $R_2 > R_1$ 时)。显然,在前一种情况下,总光程差 R_t 反映的干涉色必然低于第一个矿物切片的干涉色;而在后一种情况下,总光程差 R_t 反映的干涉色必然低于第二个矿物切片的干涉色。这个规律被概括为:异名轴重合,干涉色降低。

上述光程差的增加或减少而引起的干涉色升高或降低的规律,称为补色原理。正是基于该原理,我们可以用石英楔来测定矿物切片上的干涉色级别,其过程就是异名轴重合的前提下,插入石英楔,不断增加光程差 R_2 ,使得总光程差 R_t 由 R_1 降低至 0,表现为叠加的干涉色由被测矿物的干涉色下降至(I级)黑暗的过程。

5.5.2 补色器

在两个矿物切片中,如果第二个矿物切片的 N_{g2} 和 N_{p2} 方向是已知的,则可以根据补色原理,确定出第一个矿物切片的 N_{g1} 和 N_{p1} 方向。当加上第二个矿物切片后,干涉色升高,则同名轴重合, N_{g1} 方向平行 N_{g2} 方向, N_{p1} 方向平行 N_{p2} 方向(图 5-11(a));当加上第二个矿物切片后,干涉色降低,则异名轴重合, N_{g1} 方向平行 N_{p2} 方向, N_{p1} 方向平行 N_{g2} 方向(图 5-11(b))。在此,第二个矿物切片被称为补色器。

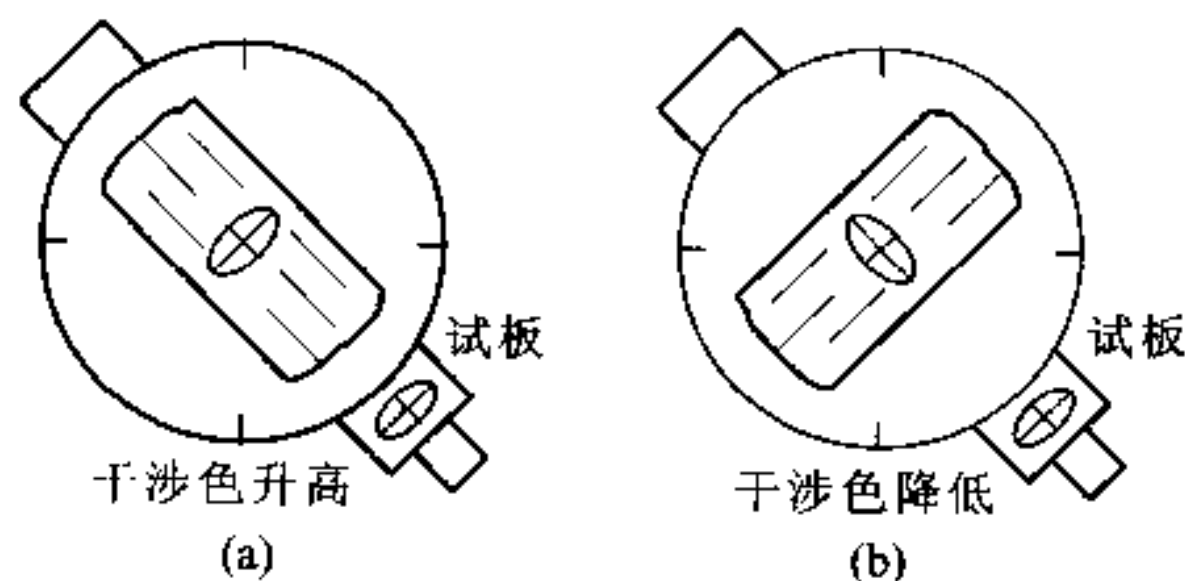


图 5-11 用试板测定矿物切片 N_g 和 N_p 方向
(a)同名轴重合; (b)异名轴重合

偏光显微镜所附带的补色器,除了已知 N_g 和 N_p 方向,还必须知道其矿物切片的光程差及其干涉色(称为补色),才能判别总的干涉色是升高还是降低。根据光程差的不同,补色器有多种类型,现着重介绍下列两种最常用的试板。

1. 石膏试板

在长条状的金属板中镶嵌进一个石膏晶体的切片,其 N_p (快光)方向平行金属板长边, N_g (慢光)方向平行金属板短边(图 5-12 (a))。通过控制切片的厚度使得它的光程差为 550 nm,正好是黄绿光的一个波长,故石膏试板也被称为 1λ 试板(1λ 被标写在试板的一端)。在正交偏光系统下,石膏试板呈现 I 级紫红干涉色。因此,在试板孔中插入石膏试板后,矿物切面的干涉色以升、降一个级别为特征。

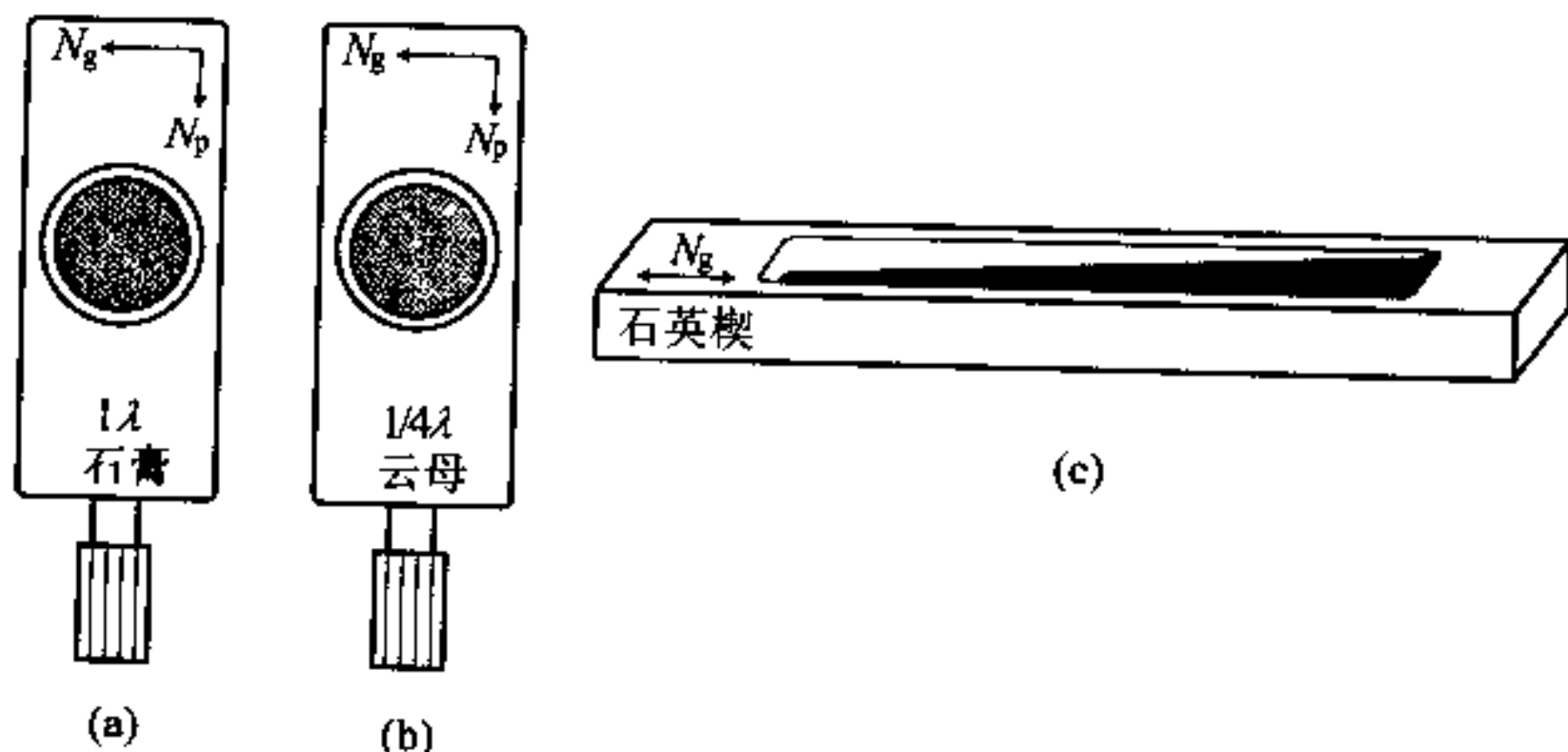


图 5-12 常用的试板类型

(a)石膏试板; (b)云母试板; (c)石英楔

现举例说明如下:

在正交偏光系统下,某矿物切片呈现 I 级暗灰干涉色($R_1 = 100 \text{ nm}$),插入石膏试板($R_2 = 550 \text{ nm}$)后,矿物加试板的干涉色为 II 级蓝($R_t = 100 \text{ nm} + 550 \text{ nm} = 650 \text{ nm}$)。由于 II 级蓝既高于 I 级暗灰($R_t > R_1$),又高于 I 级紫红($R_t > R_2$),干涉色升高,说明同名轴重合。

旋转载物台 90° ,矿物切片的干涉色仍为 I 级暗灰,插入石膏试板后,干涉色为 I 级黄($R_t = 450 \text{ nm}$)。由于 I 级黄低于 I 级紫红($R_t < R_2$),干涉色降低,说明异名轴重合。尽管由 I 级暗灰至 I 级黄,干涉色升高,但不符合“干涉色以升、降一个级别”的规律,因此应该从石膏试板的光程差看,总的干涉色是降低的。

由此可以知道,当矿物切片干涉色为I级时,插入石膏试板后干涉色的升降变化,以石膏试板I级紫红为判别标准:比I级紫红高(为II级),为干涉色升高,同名轴重合;比I级紫红低(为I级),为干涉色降低,异名轴重合。

2. 云母试板

在长条状的金属板中镶嵌进一个云母晶体的切片,其 N_p 和 N_g 方向分别平行金属板的长边和短边(图5-12(b))。它的光程差为140 nm,正好是黄绿光的四分之一波长,故云母试板也被称为 $\frac{1}{4}\lambda$ 试板($\frac{1}{4}\lambda$ 被标写在试板的一端)。在正交偏光系统下,云母试板呈现I级灰干涉色。因此,在试板孔中插入云母试板后,矿物切面的干涉色变成干涉色色谱表中与其相邻的色种:如向右邻色种变化,为干涉色升高;反之,如向左邻色种变化,为干涉色降低。

现举例说明如下:

在正交偏光系统下,某矿物切片呈现II级黄干涉色($R_1 = 900 \text{ nm}$),插入云母试板($R_2 = 140 \text{ nm}$)后,如果干涉色为II级红($R_t = R_1 + R_2 = 900 + 140 = 1040 \text{ nm}$),则干涉色升高,说明同名轴重合;如果视域中的干涉色为II级绿($R_t = R_1 - R_2 = 900 - 140 = 760 \text{ nm}$),则干涉色降低,说明异名轴重合。

在使用上述两种试板作为补色器时,应注意以下三点:

第一,当矿物切片呈现II级绿以上的干涉色时,不宜使用石膏试板作为补色器。例如,矿物切片呈II级黄,加入石膏试板后,干涉色升高则变为III级黄,降低则变为I级黄,这两种干涉色很难辨别,故不易判断干涉色的级序升降。实际上,石膏试板仅仅适用于干涉色低于II级黄的矿物切片。而云母试板弥补了石膏试板的不足,适用于干涉色较高的矿物切片。

第二,对于高级白干涉色的矿物切片,使用这两种补色器都无鉴定效果,因为高级白在增加、减少 1λ 或 $\frac{1}{4}\lambda$ 光程差后,仍然呈高级白,干涉色的变化不易察觉。然而,利用这一特性,可以确定矿物切片上呈现的是高级白干涉色,而非I级白干涉色,因为I级白干涉色加上云母试板或石膏试板的补色后其总干涉色会明显地发生变化(I级暗灰、I级黄或II级绿),故利用云母试板或石膏试板也可以区分高级白和I级白干涉色。

第三,用试板检查矿物切片上慢光与快光的振动方向前,必须把矿物切片从消光位旋转到 45° 位置(干涉色最明亮),使得慢光(或快光)的振动方向与试板的长边平行。

在上述章节中被介绍的石英楔也是一种补色器,但是它的 N_g (即 N_o) 方向平行金属板长边(图 5-12(c)),并且它的光程差随楔形体厚度的增加由 0 连续升高到 2 200 nm,在正交偏光系统下产生一至四级干涉色。因此,在试板孔中插入石英楔后,如果矿物切面与石英楔同名轴重合,则总的干涉色逐渐升高;反之,则总的干涉色逐渐降低,直至矿物切面的光程差被石英楔的光程差完全抵消,视域黑暗。

§ 5.6 消光类型与消光角

5.6.1 消光类型

如前所述,非均质矿物切片消光时,光率体椭圆切面的长、短半径(N_g 和 N_p)与上、下偏光镜振动方向(即目镜十字丝)平行。此时,解理缝、双晶缝或晶体外形(如长条形晶形的延长方向等)与目镜十字丝构成一定的几何关系,称为消光类型。消光类型可以有三种不同的状况:

(1) 平行消光(图 5-13 (a)):矿物切片消光时,其解理缝、双晶缝或晶体延长方向与目镜纵丝或横丝平行。主要见于一轴晶矿物和二轴晶斜方晶系矿物中,因为它们的光率体主轴与结晶轴平行一致。在二轴晶单斜晶系矿物的特定切面上也可以出现平行消光,如普通辉石的(100)切面消光时,其晶体的延长方向或{110}解理缝与目镜纵丝或横丝平行(图 5-14)。

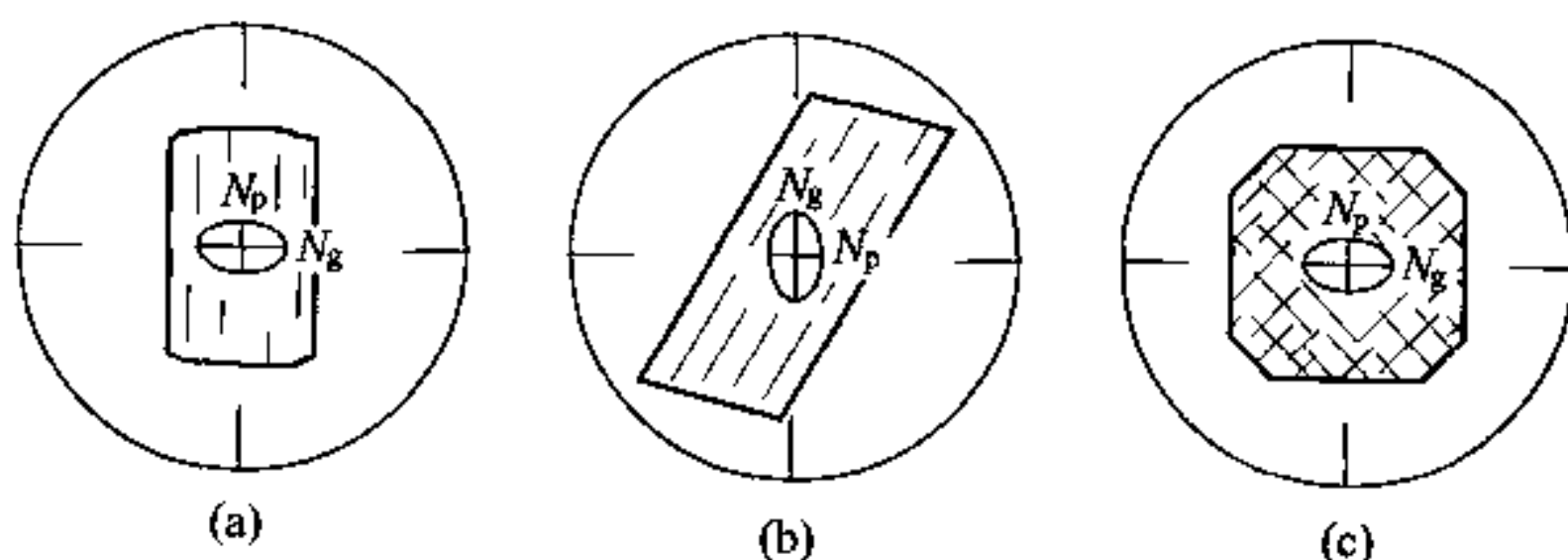


图 5-13 三种不同的消光类型

(a) 平行消光; (b) 斜消光; (c) 对称消光

(2) 斜消光(图 5-13 (b)):矿物切片消光时,其解理缝、双晶缝或晶体延长方向与目镜十字丝斜交。主要见于二轴晶单斜晶系和三斜晶系矿物中。对于一轴晶矿物和二轴晶斜方晶系矿物,当切面与三个结晶轴均斜交

时,也呈现斜消光。

(3) 对称消光(图 5-13 (c)):矿物切片消光时,目镜十字丝平分两组解理缝的夹角。主要见于一轴晶矿物中,但在二轴晶斜方晶系和单斜晶系矿物中,当切面垂直某一结晶轴,而该结晶轴与两组解理的交线方向一致,这两组解理又与另两个结晶轴斜交时,在这种切面上也表现对称消光,如在普通辉石垂直 c 轴的切面消光时,就出现对称消光(图 5-14)。

5.6.2 消光角

当矿物切片表现为斜消光时,光率体主轴与解理缝、双晶缝或晶体延长方向之间的夹角,称为消光角。一般以结晶轴或晶面符号与光率体主轴之间的夹角来表示消光角,它是晶体光性方位的组成部分。例如,在普通辉石的(010)切面上, $\{110\}$ 解理缝与 N_g 的夹角为 44° ,因为 $\{110\}$ 解理缝与 c 轴平行,所以 $N_g \wedge c = 44^\circ$ (在 $+\beta$ 内);同时,根据轴角 $+\beta = 114^\circ$,可得 $N_p \wedge a = 20^\circ$ (在 $-\beta$ 内)(图 5-14)。

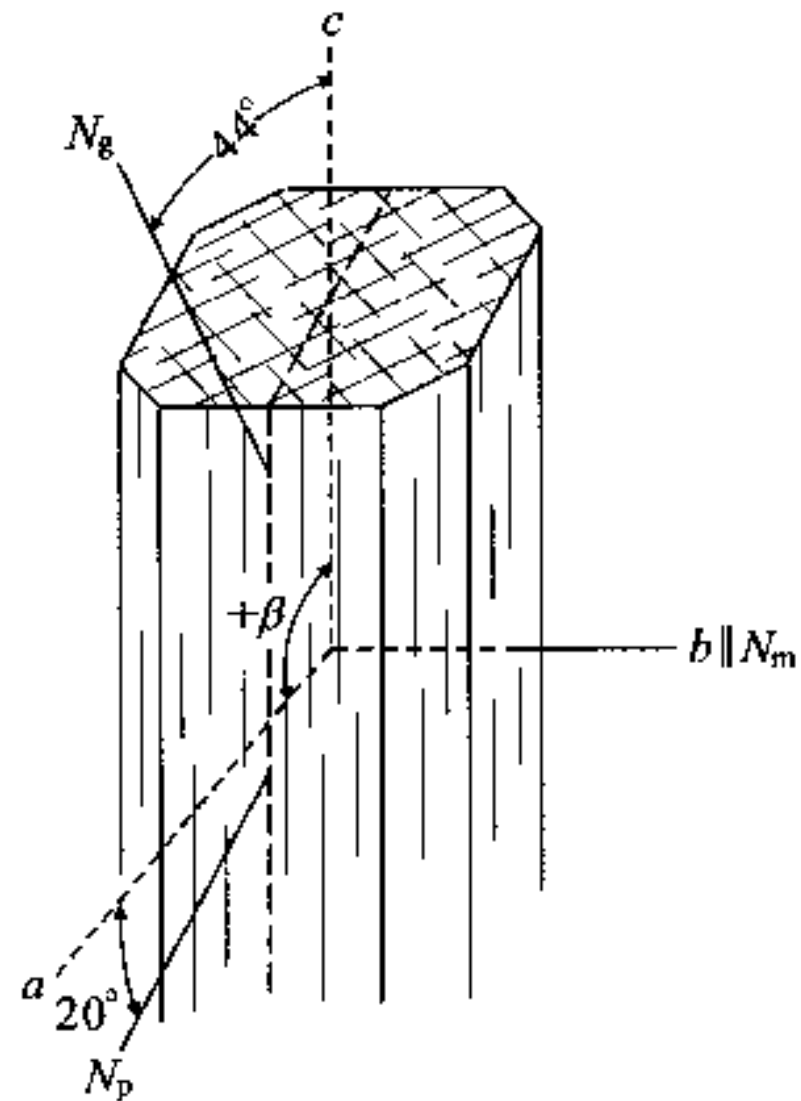


图 5-14 普通辉石中结晶轴与光率体主轴的关系

例如,在普通辉石的(010)切面上, $\{110\}$ 解理缝与 N_g 的夹角为 44° ,因为 $\{110\}$ 解理缝与 c 轴平行,所以 $N_g \wedge c = 44^\circ$ (在 $+\beta$ 内);同时,根据轴角 $+\beta = 114^\circ$,可得 $N_p \wedge a = 20^\circ$ (在 $-\beta$ 内)(图 5-14)。

在二轴晶单斜晶系和三斜晶系矿物中,不同的矿物具有不同的消光角,因此,准确地测定消光角对于矿物鉴定是非常重要的。消光角的测定包括两个方面的内容:

1. 切面方位的选择

在单斜晶系和三斜晶系矿物中,具有斜消光的切面有无数个,但惟有同时包含一个光率体主轴和一个结晶轴的切面,其消光角才是真正的消光角,其余切面上的消光角都是视消光角(如 N_g' 与 c 轴之间的夹角或 N_g 与不代表 c 轴方向的解理缝之间的夹角)。那么如何选择可以测定真正的消光角的切面呢?下面以单斜晶系的普通角闪石和三斜晶系的斜长石为例,说明切面方位的选择方法。

单斜晶系矿物的光性方位是结晶轴 b 轴与光率体的一个主轴平行一致, a 轴和 c 轴与另两个主轴斜交(见第二章)。在普通角闪石的[100]晶带中(图 5-15), $\{001\}$ 面上呈对称消光;其他 $\{0kl\}$ 面上可出现两组斜交的解理缝,但不是对称消光,仅 $\{010\}$ 面呈斜消光。在[001]晶带中, $\{100\}$ 面上呈

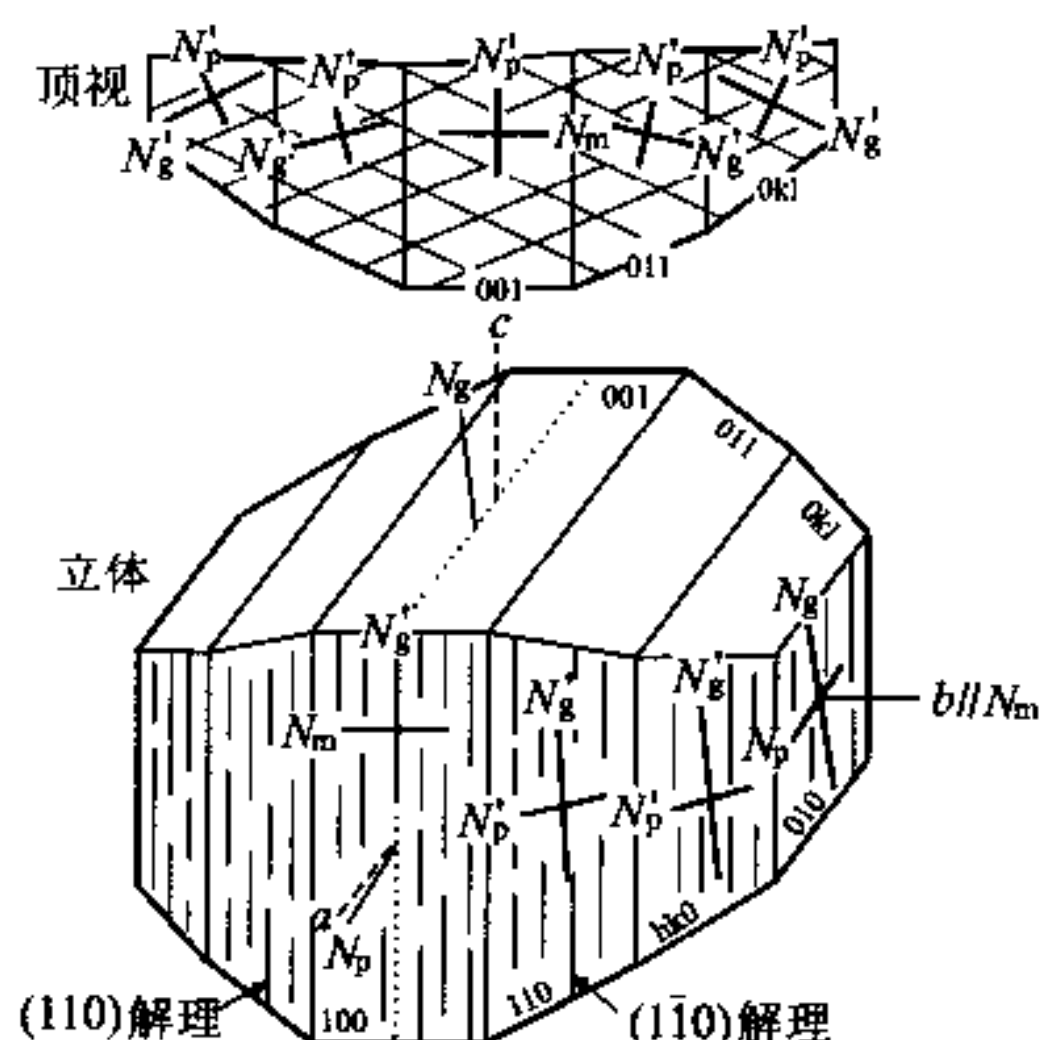


图 5-15 普通角闪石的结晶轴与光率体主轴的关系

平行消光；其他 $\{hk0\}$ 面上皆呈斜消光，且随着 h 值减小和 k 值增大，视消光角越来越大；至 $\{010\}$ 面，出现该晶带上最大的消光角。由于 $\{010\}$ 面平行 a 、 c 轴和两个光率体主轴(N_g 和 N_p)，故在 $\{010\}$ 面上可以测到真正的消光角。在正交偏光系统下，该切面的标志是它具有普通角闪石的最高干涉色。

三斜晶系矿物的光性方位是三个结晶轴与三个光率体主轴皆斜交(见第二章)。因此，不论哪个晶带上的切面，绝大部分切面都呈现斜消光类型。为了鉴定某些类质同象矿物中端员组分的百分含量，我们常测定一些特殊切面上的消光角或视消光角。如在斜长石的垂直 (010) 的各种切面上， $N_p' \wedge (010)$ 的最大消光角与斜长石的牌号($An\%$)之间有着密切的对应关系，而垂直 (010) 切面的标志就是它具有呈对称消光的聚片双晶(参见第五章 5.8 节)。

2. 具体的测量方法

在偏光显微镜下，测量消光角包括以下几个步骤：

(1) 在单偏光系统下，把所选矿物切片移到视域中心，旋转载物台，使解理缝、双晶缝或晶体延长方向与目镜纵丝重合(或平行)，记录载物台上的读数(如 x ，图 5-16 (a))。

(2) 在正交偏光系统下，顺时针旋转载物台，使矿物消光。此时，处于消光位的矿物切面上的某个光学主轴(N_g 或 N_p)必平行目镜纵丝，再次记录载物台上的读数(如 y ，图 5-16 (b))，则两次读数之差($y-x$)为消光角的大小。

(3) 逆时针旋转载物台 45° , 使得矿物从暗黑的消光位变为最明亮干涉色的 45° 位置, 此时原来平行目镜纵丝的光学主轴平行于试板孔的插入方向。插入试板, 检查该方向的轴名是 N_g , 还是 N_p (图 5-16 (c)), 从而写出消光角的完整的表达式, 如普通辉石 $N_g \wedge c = 44^\circ$ (在 $+\beta$ 内)。由于普通辉石的 $+\beta = 114^\circ$, 因此 $N_g \wedge a = 70^\circ$ (在 $+\beta$ 内) 也成立, 但习惯上取小于 45° 的消光角 (见图 5-14)。

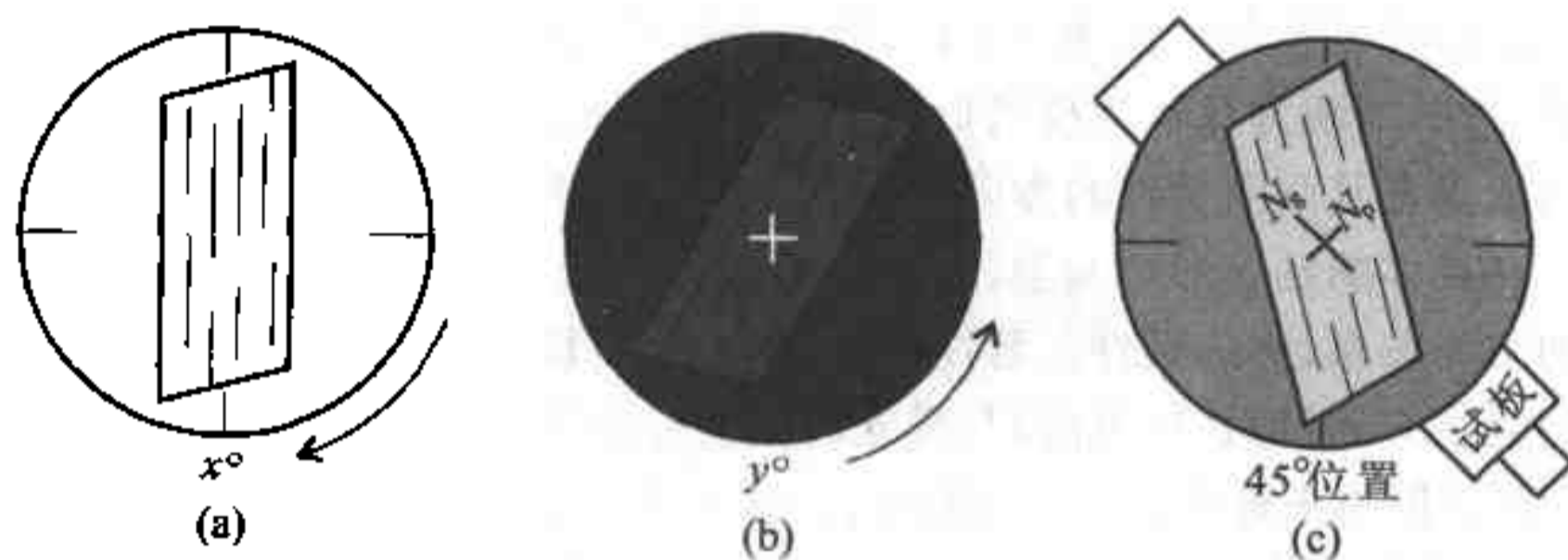


图 5-16 消光角的测量

(a) 解理缝平行目镜纵丝时的载物台读数; (b) 消光位的载物台读数;
(c) 45° 位置时插入试板以确定轴名

对于单斜晶系和三斜晶系矿物而言, 消光角有正、负之分。在单斜晶系矿物中 (如单斜角闪石、单斜辉石等), 在 a 、 c 轴所夹的钝角范围中 ($+\beta$) 测得的消光角为正, 在锐角范围中 ($-\beta$) 测得的为负 (图 5-17 (a))。如在普

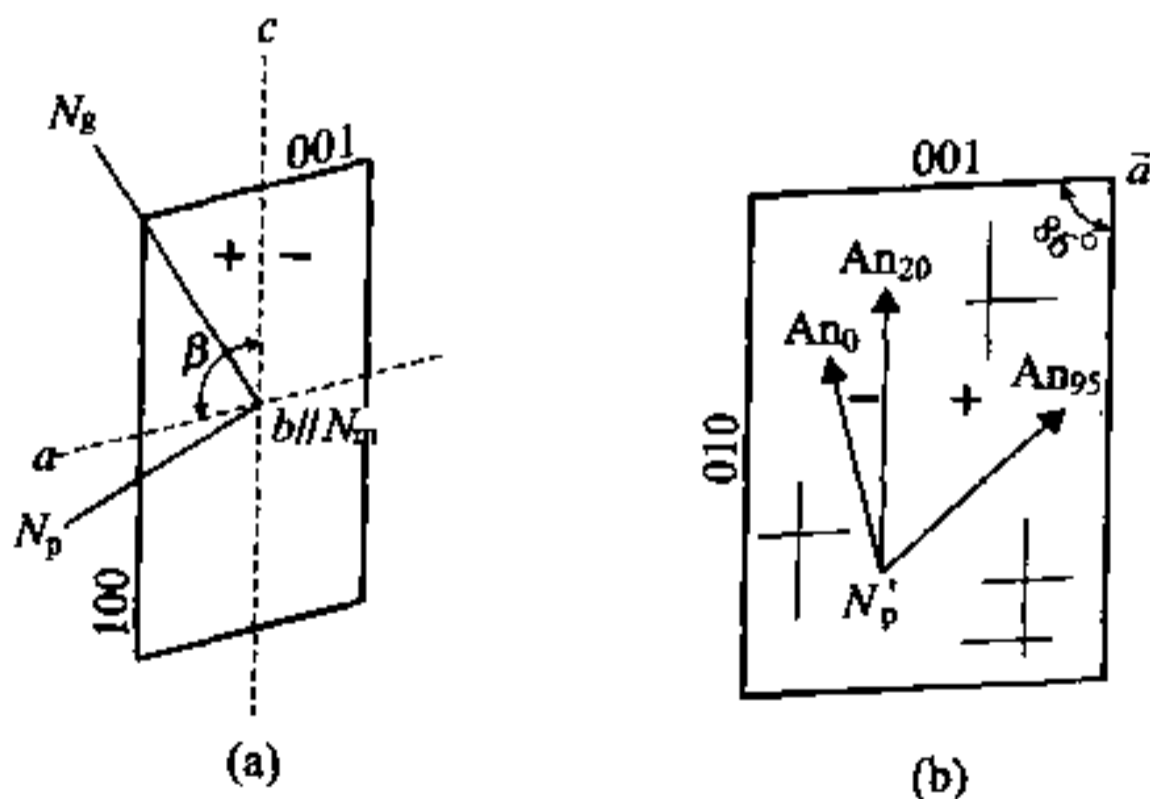


图 5-17 消光角正负的判别

(a) 单斜晶系矿物; (b) 斜长石 (三斜晶系矿物)

通辉石中, $c \wedge N_g = +44^\circ$, 而 $a \wedge N_p = -20^\circ$ (图 5-14)。三斜晶系矿物的消光角正负的判别比较复杂。如在垂直斜长石 a 轴切面上, 由于同时见到 $\{010\}$ 和 $\{001\}$ 两组解理缝, 消光角正负可按如下方法确定: N_p' 位于两组解理相交的锐角范围内, 为正消光角; 位于钝角范围内, 为负消光角。

§ 5.7 延 性

晶体可以有单向延伸的习性, 表现为针状或柱状形态; 也可以有两向延伸的习性, 表现为片状或板状形态。当岩石中的晶体被沿着其单向延伸的方向或垂直其两向延伸的方向切成薄片时, 这些晶体的切面往往是延长形的。在晶体的延长形切面上, 它的长轴方向与快光(或慢光)的振动方向之间的空间关系, 称为延性。延性符号(亦称为延长符号)有正、负之分: ① 切面的延长方向(即长轴方向)与慢光的振动方向平行或两者之间的夹角小于 45° , 该切面为正延性; ② 切面的延长方向(即长轴方向)与快光的振动方向平行或两者之间的夹角小于 45° , 该切面为负延性。

在斜消光的切面上, 消光角(如 $N_g \wedge a = +25^\circ$)和延长方向(如晶体沿 a 轴单向延伸)的确定意味着延性符号的确定。对于具平行消光的切面, 只要利用试板测出延长方向的轴名, 延性符号就确定了。在矿物光性描述中, 延性是一个常用的鉴定指标。例如, 在单偏光系统下红柱石切面与紫苏辉石切面都显淡红~浅绿的多色性, 而且突起、解理和干涉色等也有一定的相似性, 但它们的延性符号却完全不同, 红柱石的切面往往是负延性的, 而紫苏辉石的切面一般是正延性的。

对于一轴晶矿物, 延性符号与光性符号密切相关。根据晶体的延伸特征, 可以分为两种不同情况:

(1) 在一轴晶柱状或针状矿物中, 由于 a 轴与 b 轴的结晶习性相同, 延长形切面的长轴方向必然平行 c 轴, 故平行 N_c 。当切面是正延性时, N_c 为慢光的振动方向, 故晶体为正光性; 反之, 当切面是负延性时, N_c 为快光的振动方向, 晶体为负光性(图 5-18(a))。

(2) 在一轴晶板状或片状矿物中, 延长形切面的长轴方向垂直 c 轴, 故平行 N_o 。当切面是正延性时, N_o 为慢光的振动方向, 故晶体为负光性(图 5-18(b)); 反之, 当切面是负延性时, N_o 为快光的振动方向, 晶体为正光性。

对于二轴晶矿物, 切面的延性符号与晶体的光性符号之间没有必然的相关性(因为光性符号由三个主折射率的相对大小决定), 且同一个晶体上

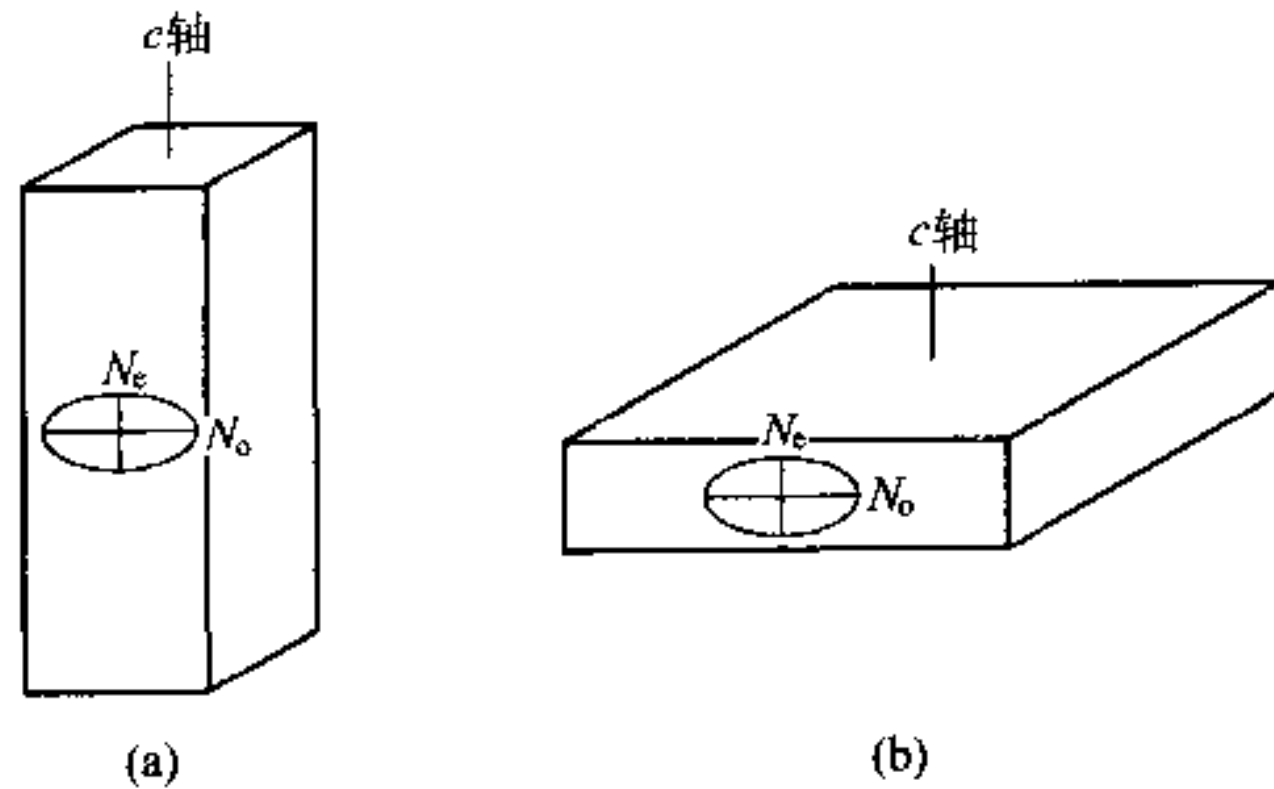


图 5-18 一轴晶矿物延性符号与光性符号的关系

(a)柱状晶体；(b)板状晶体

所有切面并不一定都有相同的延性符号(图 5-19 (b))。但是,不同切面上的延性符号却具有光率体主轴方位的指示意义:

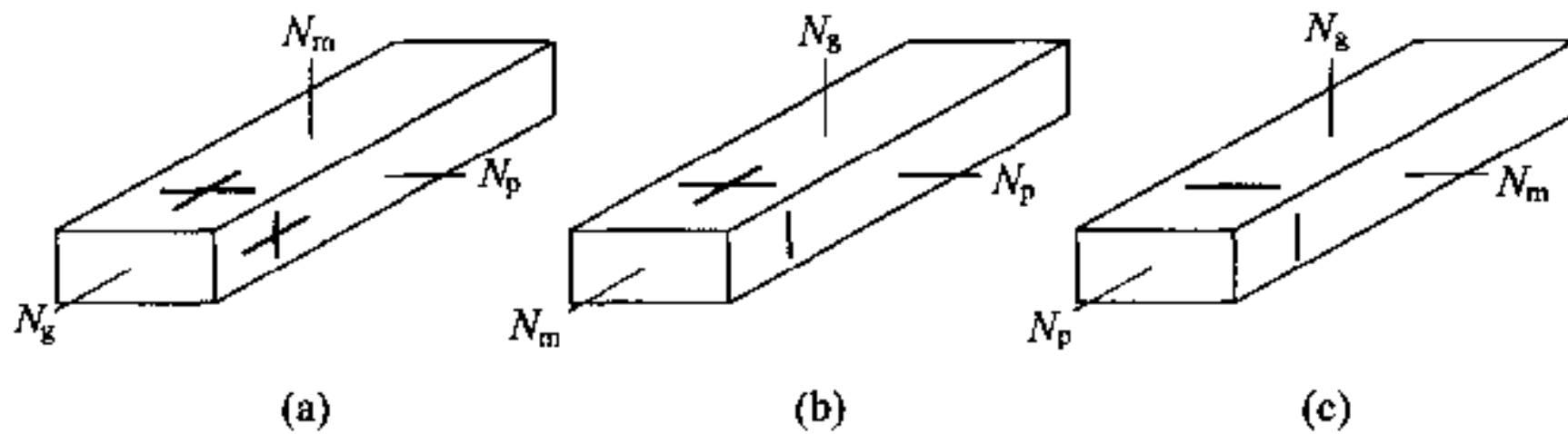


图 5 19 单向延伸的二轴晶矿物上各种切面的延性符号

(a)全部正延性；(b)部分正延性、部分负延性；(c)全部负延性

(1) 当所有切面都是正延性时, N_g 平行晶体的单向延伸方向(图 5-19 (a)),或 N_p 垂直晶体的两向延伸方向。

(2) 当不同切面的延性符号有正有负时, N_m 平行晶体的单向延伸方向(图 5-19 (b)),或 N_m 垂直晶体的两向延伸方向。此时,切面的正、负延性往往可以指示切面的结晶学方位,故对寻找具体方位的晶面具有借鉴作用。

(3) 当所有切面都是负延性时, N_p 平行晶体的单向延伸方向(图 5-19 (c)),或 N_g 垂直晶体的两向延伸方向。

§ 5.8 双 晶

矿物的双晶是指同一种晶体的两个或两个以上的单体连生在一起,其连接面称为双晶结合面,通常较平直。但是,双晶的两个单体的内部结构是不连续的,在手标本上表现为双晶的两个单体以双晶结合面成镜像反映,或一个单体以双晶轴旋转一定的角度可以与另一个单体重合,这种关系同样也反映在两个单体的光率体之间。在正交偏光系统下,两个单体总是呈现不同的消光位,分别为一明一暗,两者之间的平直界线(即双晶结合面与切面的交线)称为双晶缝。在接触双晶中,当双晶缝平行目镜纵丝(或横丝)时,左、右两个单体具有同样的干涉色,故两者似乎为同一个单晶体(图 5-20 (c));分别按顺时针方向(图 5-20 (a)和 (b))和逆时针方向(图 5-20 (d)和 (e))旋转载物台,左、右两个单体呈现对称的干涉色亮度变化规律,即左、右两个单体的消光角相等(图 5-20 (b)和 (d)),这种消光类型也称为对称消光。

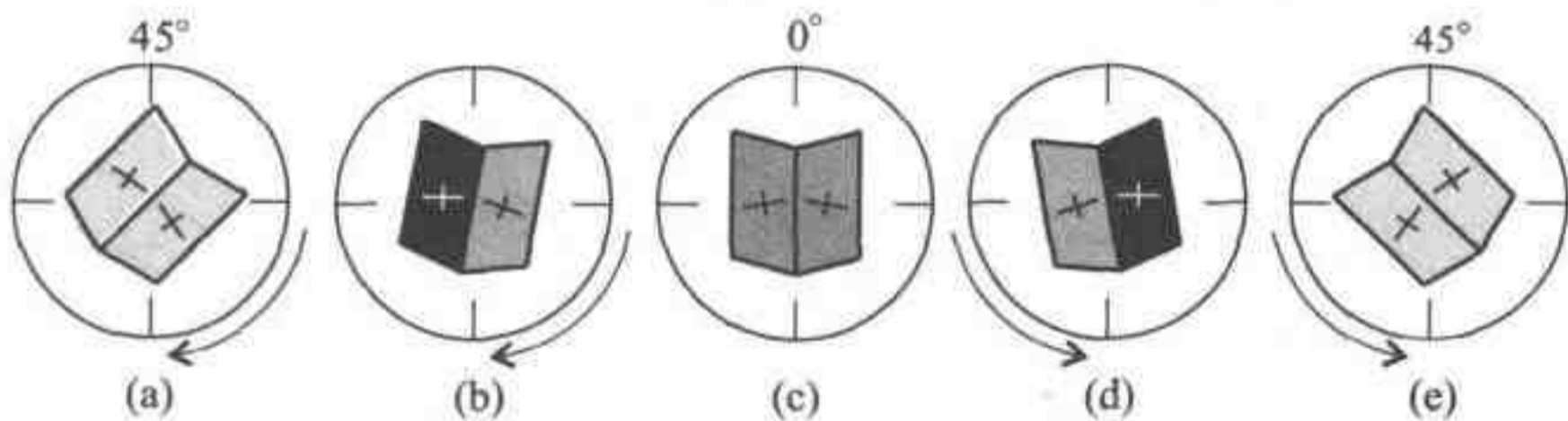


图 5-20 旋转载物台时,接触双晶左、右两个单体的同种干涉色的亮度变化
(a)同等亮度(45°位置); (b)左单体消光; (c)同等亮度(0°位置);
(d)右单体消光; (e)同等亮度(45°位置)

许多矿物都有双晶,其中斜长石双晶广泛发育,且具有多种双晶类型,在矿物鉴定和岩石学成因研究上最有意义。下面介绍两种常见的斜长石双晶:

(1) 钠长石律双晶:由两种方位的斜长石单体相间、聚片而成(图 5-21 (a)),其双晶结合面均为(010),双晶轴为(010)面的法线。在垂直(010)面的切面上,1、2 两组单体呈对称消光(图 5-21 (b)),其消光角 $N_p' \wedge (010)$ 与斜长石牌号($An\%$)之间有着严密的对应关系,故具有重要的鉴定价值。

(2) 卡钠复合律双晶:由三种或四种不同方位的斜长石单体聚片而成(图 5-22 (a)),其双晶结合面均为(010),但双晶轴有三个方向:① 1 和 2、3 和 4 单体间的双晶轴垂直(010)面,属钠长石律双晶;② 2 和 3、1 和 4 单

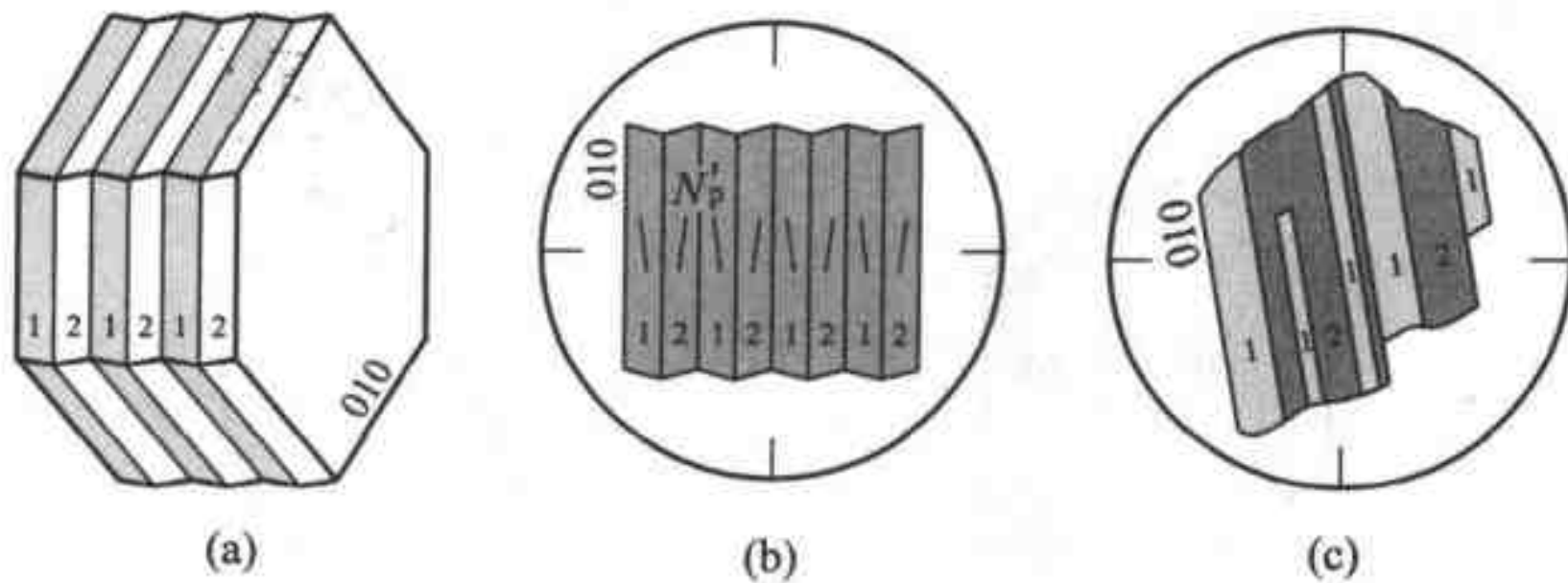


图 5-21 斜长石的钠长石律双晶

(a) 手标本； (b) 单偏光系统下垂直(010)面的双晶；
(c) 正交偏光系统下垂直(010)面的双晶

体间的双晶轴在(010)面上,并与 c 轴平行,属卡斯巴律双晶;③ 2 和 4、1 和 3 单体间的双晶轴也在(010)面上,但垂直于 c 轴,属钠长石-卡斯巴律双晶。上述四种单体由于光率体方位互不平行,所以都不同时消光(图 5-22 (b)),但在垂直(010)面的切面上,1、2 两组单体呈对称消光,可测得一个 $N_p' \wedge (010)$ 面的消光角;3、4 两组单体亦呈对称消光,可测得另一个 $N_p' \wedge (010)$ 面的消光角。这两个消光角总是不相等的,其共轭关系更精确地与斜长石牌号($An\%$)相对应,故具有非常实用的鉴定价值。

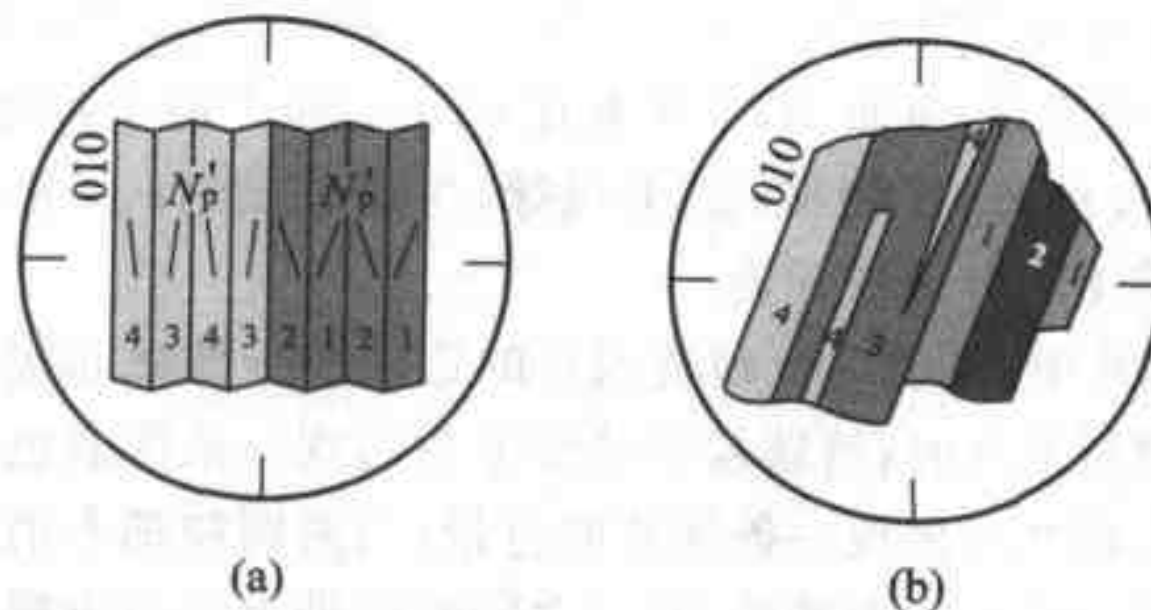


图 5-22 斜长石的卡钠复合律双晶

(a) 单偏光系统下垂直(010)面的双晶；
(b) 正交偏光系统下垂直(010)面的双晶

此外,单斜辉石和单斜角闪石常发育以(100)为双晶面和双晶结合面的接触双晶(图 5-23 (a))或聚片双晶(图 5-23 (b))。在其(010)切面上,这

种双晶的(100)结合面平行晶体延长方向和解理缝方向,故可以作为寻找(010)切面的特征之一。

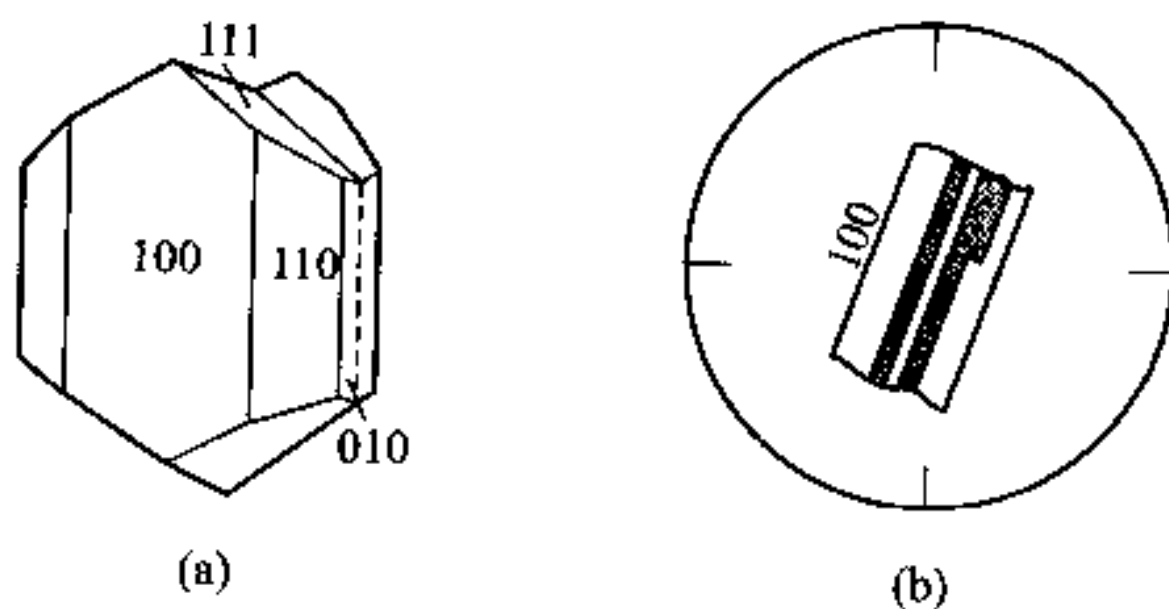


图 5-23 单斜辉石和单斜角闪石中(100)双晶

(a)接触双晶的手标本;

(b)正交偏光系统下垂直(100)面的聚片双晶

习 题 五

1. 在正交偏光系统下,放置一块非均质矿物切片,旋转载物台,将出现干涉色或消光。如果拿掉下偏光镜,让自然光直接射入该矿物切片,试问:旋转载物台,能否同样地观察到干涉色或消光?为什么?

2. 已知普通辉石的 $\Delta N_{\max} = 0.024$, $(+)$ $2V = 55^\circ$, 试问:在普通辉石垂直 N_m 、近于垂直光轴、垂直 Bxa 和垂直 Bxo 切面上的干涉色分别相当于下列第几种干涉色:① I级黑;② II级绿;③ II级黄红;④ II级红;⑤ I级紫红;⑥ I级灰白;⑦ II级深蓝。

3. 在某薄片,见透辉石和透闪石的边缘部分彼此邻接、叠加。转动载物台,当透辉石消光时,两颗粒邻接带上只出现一条深蓝色干涉色带;当透闪石消光时,仍然只出现一条深蓝的色带;当两颗粒都不消光时,透辉石呈红干涉色,透闪石呈绿干涉色,它们之间邻接带上不再出现蓝带,仅呈现一条宽阔的黄带。试问:① 透辉石和透闪石干涉色级别分别是几级? ② 透辉石和透闪石两颗粒的快光和慢光的振动方向在多少角度范围内相交? ③ 试作图解释或定量推导出出现黄带的机理。

4. 在角闪辉长岩薄片,见一普通角闪石颗粒,在单偏光系统下呈褐色色调的多色性,在正交偏光系统下,也呈褐色,它的边缘不显红色色带,而呈灰色色带。试问:① 上述正交偏光系统下的褐色干涉色是怎样形成的?

属第几级序? ② 将该普通角闪石切面上快光和慢光的振动方向, 转至 45° 位置, 自 II-IV 象限方向插入云母试板(试板的长边为快光的振动方向), 该颗粒干涉色没有显著变化, 而边缘的灰色色带向颗粒中心移动了一点, 则该颗粒的 II-IV 象限方向代表快光, 还是慢光的振动方向?

5. 在正交偏光系统下, 将石膏试板插入试板孔中, 而将云母试板放在转动的载物台上。试问: ① 当两个试板的长边互相平行或互相垂直时, 视域中分别出现什么干涉色? 干涉色是升高还是降低? ② 当石膏试板长边与云母试板长边成 45° 相交时, 视域中出现什么干涉色? 这表明云母试板处于何种位置?

6. 如何区分高级白和 I 级白干涉色?

7. 已知普通角闪石的光性方位是 $b // N_m, c \wedge N_g = 20^\circ$ 。试问: ① 平行(010)切面、平行(100)切面、垂直 c 轴切面、平行(110)切面上的消光类型是什么? ② 在[001]晶带上呈现最大消光角的切面方位平行于哪一个晶面? ③ 应寻找哪种切面测量普通角闪石的消光角?

8. 某斜方晶系矿物呈沿 c 轴延长的柱状体, 其平行(100)切面为负延性, 平行(010)切面为正延性, 而且这两个切面上的干涉色完全相同。试问: ① 该矿物的光性方位? ② 其光轴角($2V$)的大小($2V = 0^\circ \sim 30^\circ$ 为小、 $30^\circ \sim 60^\circ$ 为中、 $60^\circ \sim 90^\circ$ 为大)?

第六章 聚敛偏光系统下晶体的光学性质

§ 6.1 聚敛偏光系统

在正交偏光系统的基础上,加入锥光镜、换上高倍物镜、推进勃氏镜就构成了聚敛偏光系统。

加上锥光镜使得原来平行的透射光束变成锥形的透射光束,然后升高锥光镜使得锥形透射光束的顶点正好位于薄片的底面,此时透射光呈倒锥形进入矿物切片(图 6-1(b))。锥形光束与平行光束的差别在于,后者基本上是以同一方向垂直射入矿物切片(图 6-1(a)),故每条光线通过晶体的路程是相等的,相应的光率体切面也是相同的(即双折射率相等),即每条透射光在晶体中产生的光程差相等,因此在正交偏光系统下整个矿物切面的干涉色是相同的;而在锥形光束中,除中央一条光线垂直射入矿物切片以外,其余光线都是倾斜射入矿物切片,且愈向外倾斜角愈大(图 6-1(b)),故每条光线通过晶体的路程和相应的光率体切面是各不相等的,即每条透

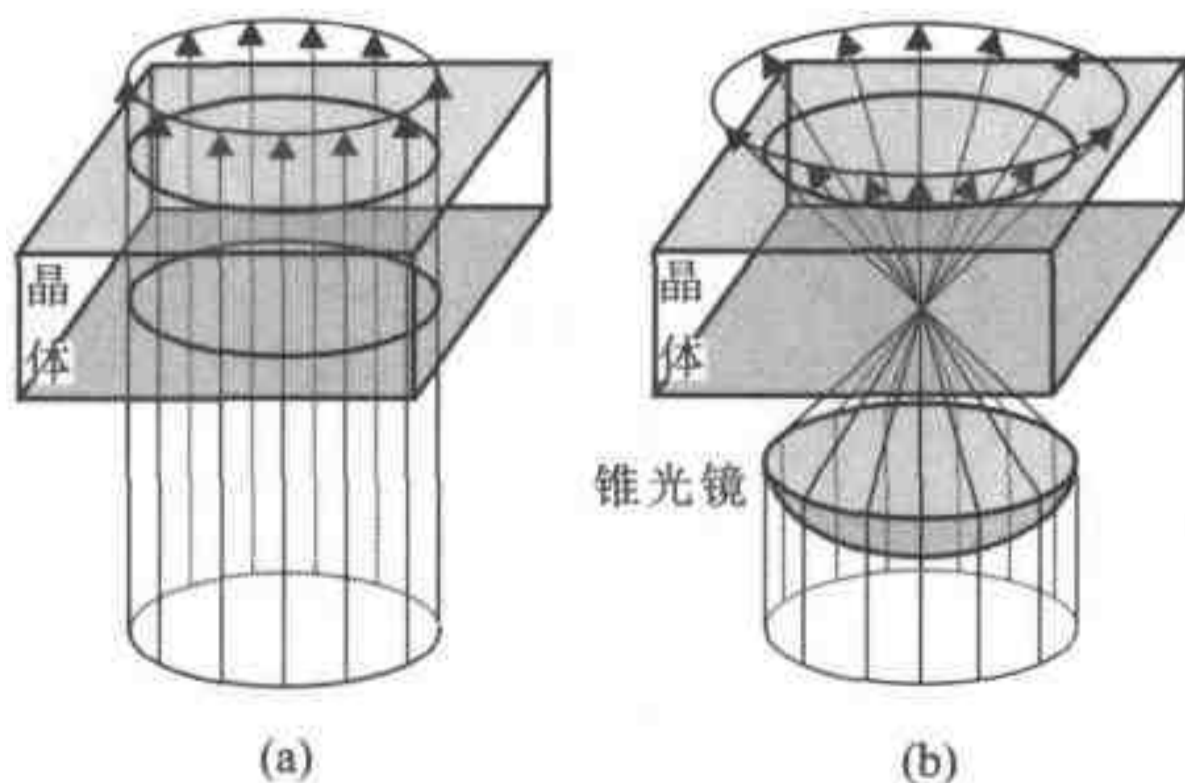


图 6-1 两种不同形态的透射光

(a)平行光束; (b)锥形光束

射光在晶体中产生的光程差各不相同,因此在聚敛偏光系统下整个矿物切面的干涉色是不相同、不均匀的,构成特殊的干涉色图像,称为干涉图。

换上高倍物镜的目的并不是为了放大观察到的干涉图,而是为了观察到更大范围的干涉图。物镜具有一个重要的技术指标——光孔角,它是指准焦状态的物镜最边缘的光线所构成的角度,以 2θ 表示(图 6-2(b))。一般而言,透镜曲率与透镜焦距成反比,而透镜焦距与光孔角成反比,故具有较大透镜曲率的高倍物镜能够接纳倾斜角度较大的透射光(即较大的光孔角),从而观察到更完整的干涉图。事实上,高倍物镜能接纳与薄片法线成 60° 夹角以内的倾斜透射光(图 6-2(c)),而低倍物镜只能接纳与薄片法线成 5° 夹角以内的透射光(图 6-2(a))。

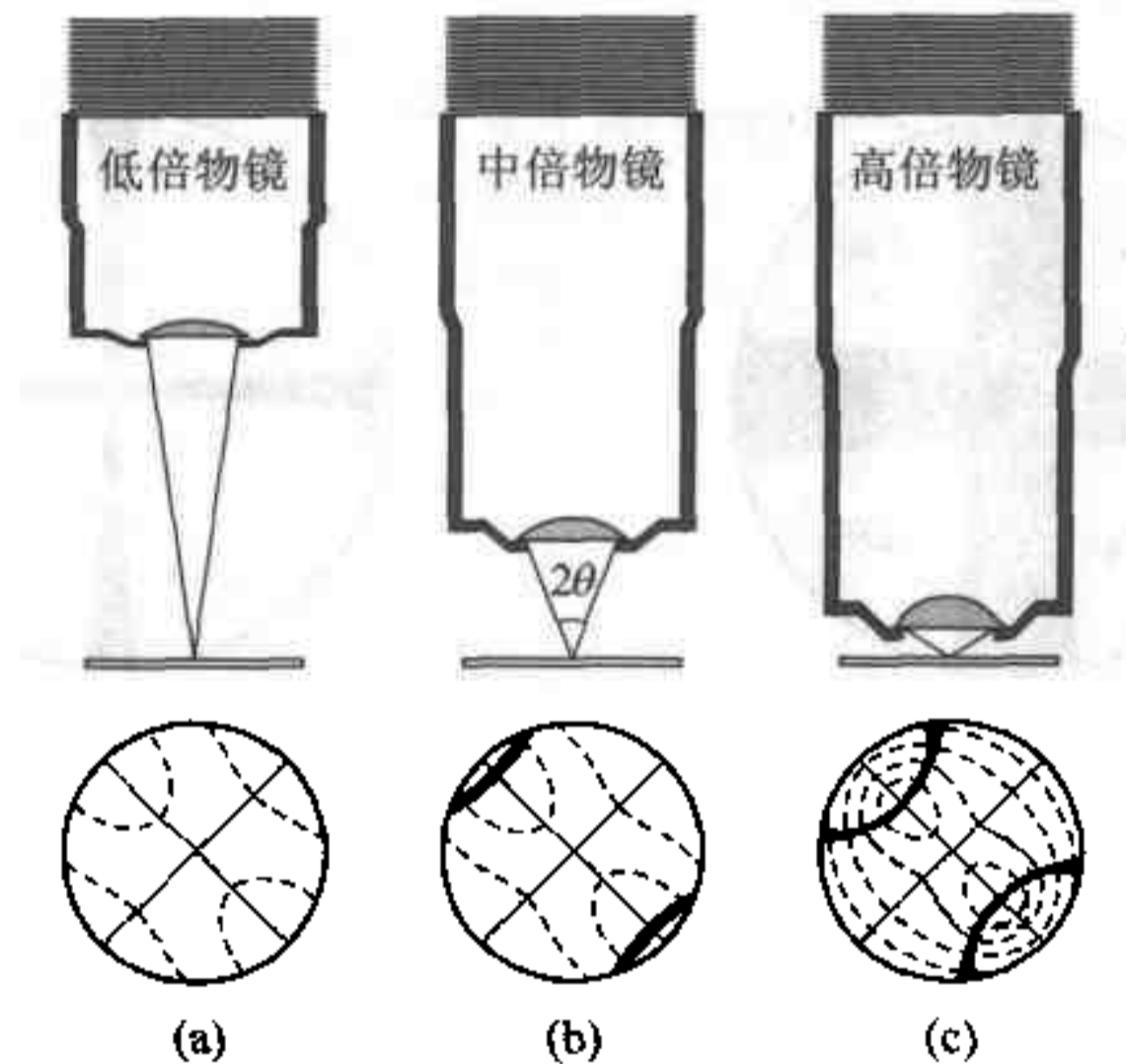


图 6-2 不同放大倍数物镜的光孔角(2θ)及其观察范围

(a)低倍物镜; (b)中倍物镜; (c)高倍物镜

观察干涉图时,必须把勃氏镜推进镜筒,使其参与到光学系统中。勃氏镜与目镜联合组成一个望远镜式的放大系统,故能看到一个放大的干涉图。虽然图形被放大,但图像较为模糊,故有时可去掉目镜和勃氏镜,用眼睛直接观察(透过上偏光镜的)物镜焦平面上的干涉图,其图形虽小,但较清楚。

利用干涉图可以观察和测定晶体的轴性、光性、光轴角和色散等光学性质,它们都是矿物鉴定中的重要光性参数。

§ 6.2 一轴晶矿物的干涉图

一轴晶光率体上有三种代表性的切面,即垂直光轴的切面、平行光轴的切面和斜交光轴的切面,故在聚敛偏光系统下可以分别观察到三种不同的干涉图:光轴干涉图、瞬变干涉图和偏心干涉图。

6.2.1 光轴干涉图

1. 形态特征

一轴晶矿物垂直光轴切片上所呈现的干涉图,称为光轴干涉图。它具有如下几个方面的形态特征(图 6-3):

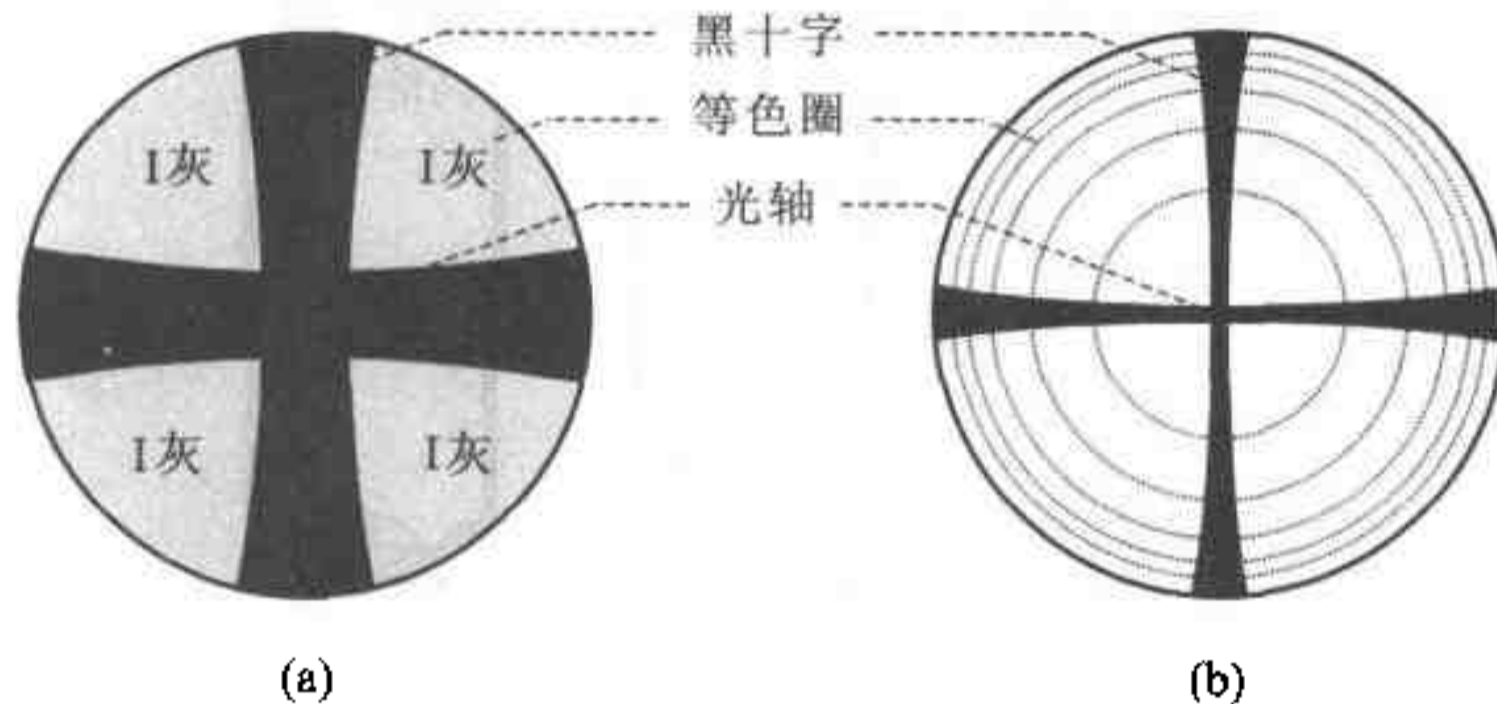


图 6-3 一轴晶矿物的光轴干涉图

(a)双折射率或切片厚度较小的切面; (b)双折射率或切片厚度较大的切面

(1) 在目镜十字丝(即上、下偏光镜的振动方向)附近呈现一个黑十字,其中心部分较细,边缘部分较粗。黑十字的中心为光轴的出露点。

(2) 围绕着黑十字中心呈现同心状干涉色圈,同一圈内的干涉色级别相同,故称为等色圈;不同等色圈的干涉色级序由中心向外逐渐升高,且等色圈愈外愈密。

(3) 旋转载物台 360° ,黑十字与等色圈均不发生变化。但是,在不同双折射率的晶体之间或同一晶体不同厚度的切片之间,其光轴干涉图是有差别的,表现为:双折射率或切片厚度越大,黑十字越细而等色圈越密。

2. 形成原理

形成光轴干涉图的原因是:射入矿物切片的锥形偏光,除中央一条偏光垂直切片入射外,其余各束偏光均沿不同方向倾斜入射,其与光轴的夹角越

向外越大。根据光率体的概念,垂直每条入射光都可作出相应的光率体椭圆切面,其长短半径之差随入射光方向的变化而变化。

(1) 透射光由平行光轴到斜交光轴进入晶体时(图 6-4 (a)),所呈现的光率体切面由圆切面($N_o N_o$)变为椭圆切面($N_e' N_o$),其双折射率由零变得越来越大;同时,夹角越大的透射光通过晶体的路程(d)越大,故在晶体中每条偏光产生的光程差随着入射夹角的增大而成几何级数增大。

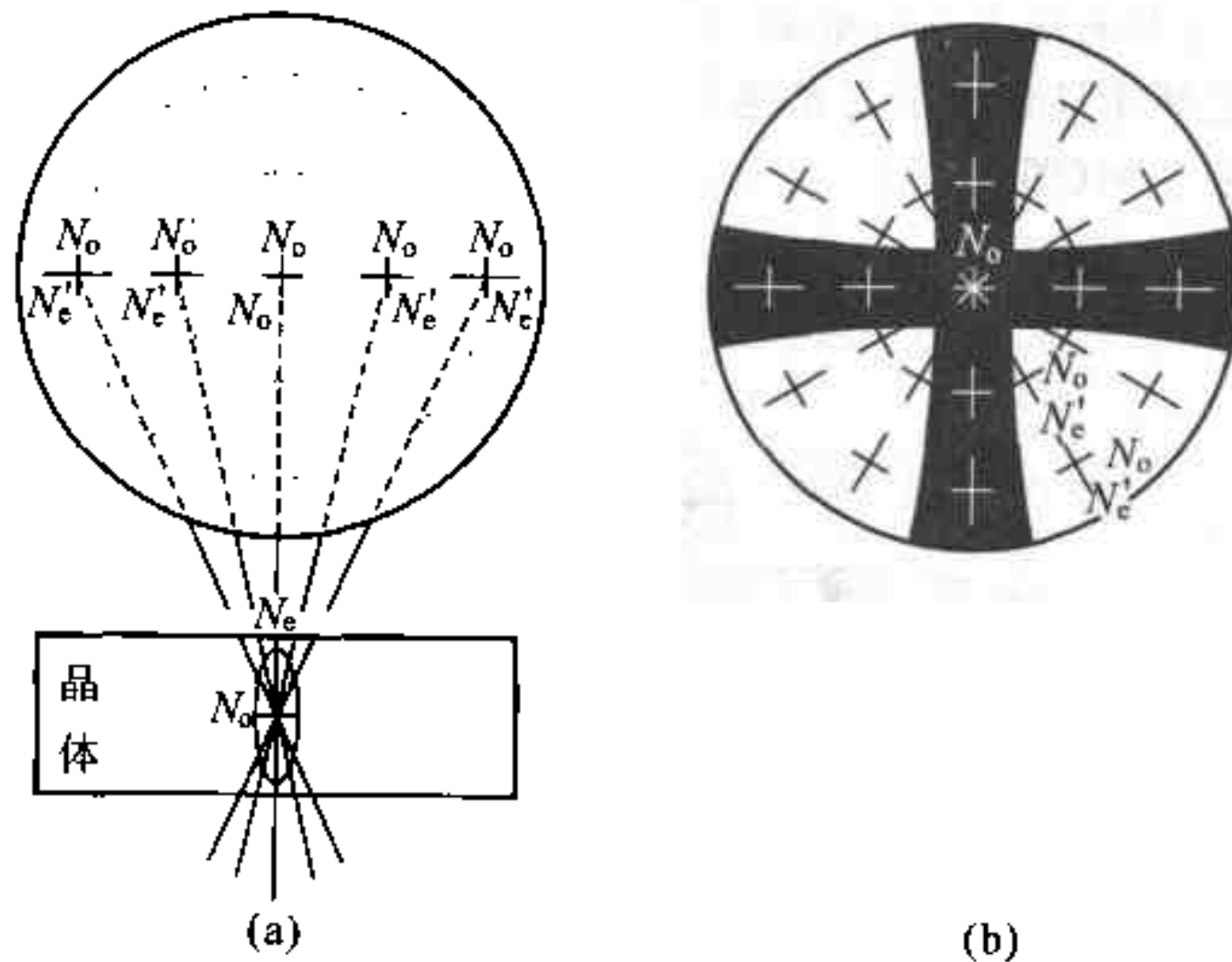


图 6-4 一轴晶矿物的光轴干涉图成因

(a) 锥形光束的双折射现象分解图; (b) 波向正投影图

(2) 由于透射光是以光轴为中线的锥形偏光,而一轴晶光率体是一个围绕光轴旋转的椭球体,因此只要透射光与光轴的夹角相同,产生的椭圆切面是相同的,即从干涉图平面看同样的椭圆切面成同心圆状分布,且越向外椭圆切面的双折射率越大。同时,根据入射面的概念,常光的振动方向(以 N_o 表示)总是与入射面垂直,故为同心圆的切线方向;非常光的振动方向(以 N_e' 表示)总是与入射面平行,故为同心圆的半径方向。这样,就得到一个锥形透射光下,矿物切片上各个传播方向的两束偏光的振动方向以及折射率大小的分布图,称为波向正投影图(图 6-4 (b))。

根据上述分析可以确定,在聚敛偏光系统下一轴晶矿物中垂直光轴切面的干涉图必然为:

(1) 在目镜十字丝及其近侧,椭圆切面的长、短半径平行或近于平行

上、下偏光镜的振动方向,故这些部位呈消光,构成黑十字消光影。由于 N_e 方向呈放射状,所以黑十字消光影内窄外宽。

(2) 其余部位的椭圆切面的长、短半径都与上、下偏光镜振动方向斜交,故不消光,而显示干涉色。由于相同光程差(切面的双折射率与通过晶体的路程均相同)的偏光出露点呈同心圆状分布,且越向外的同心圆,其光程差越大(为同步增加的 ΔN 与 d 乘积),故相同级别的干涉色构成同心圆状的等色圈,且越向外等色圈的干涉色级别越高,等色圈的密度越大。显然,晶体固有的最大双折射率(ΔN_{\max})越大或切片的厚度越大,自中心至边缘的等色圈干涉色级别之差越大,即等色圈越多且显得越密;同时,黑十字显得越来越细(图 6-5)。

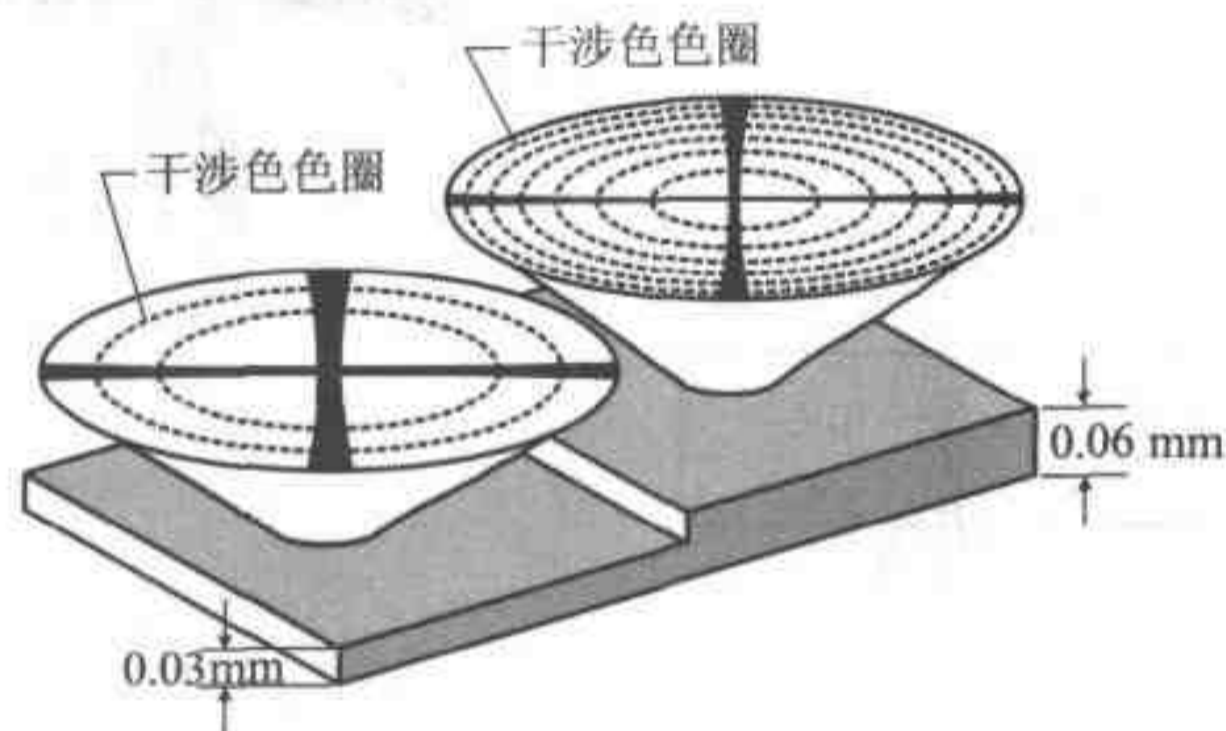


图 6-5 一轴晶矿物的光轴干涉图与切片厚度的关系

3. 光性符号测定

在一轴晶矿物的光轴干涉图中,黑十字消光影把视域分隔成四个象限,右上角为第 I 象限,然后逆时针方向依次为第 II、III、IV 象限(图 6-6)。其中, I、III 象限的 N_e 方向(即等色圈的半径方向)与试板孔的延伸方向垂直(即与试板的 N_p 平行),而 N_o 方向(即等色圈的切线方向)与试板孔的延伸方向平行(即与试板的 N_p 平行); II、IV 象限的 N_e 、 N_o 方向正好相反,即晶体 N_e 平行试板的 N_p 、晶体的 N_o 平行试板的 N_e (图 6-6)。根据一轴晶光率体光性符号的判别公式, $N_e > N_o$, 为正光性; $N_o > N_e$, 为负光性。只要在试板孔插入试板,根据对角象限(I-III 象限或 II-IV 象限)的干涉色升降情况,即可判断出所观察的一轴晶矿物的光性符号。

现举例说明,如何在一轴晶矿物的光轴干涉图上进行光性符号的判断。某光轴干涉图的四个象限都呈 I 级灰白(图 6-7 (a)),沿 II-IV 象限方向插

入石膏试板后,黑十字呈 I 级紫红(为石膏试板的干涉色),而四个象限的干涉色则变化为:

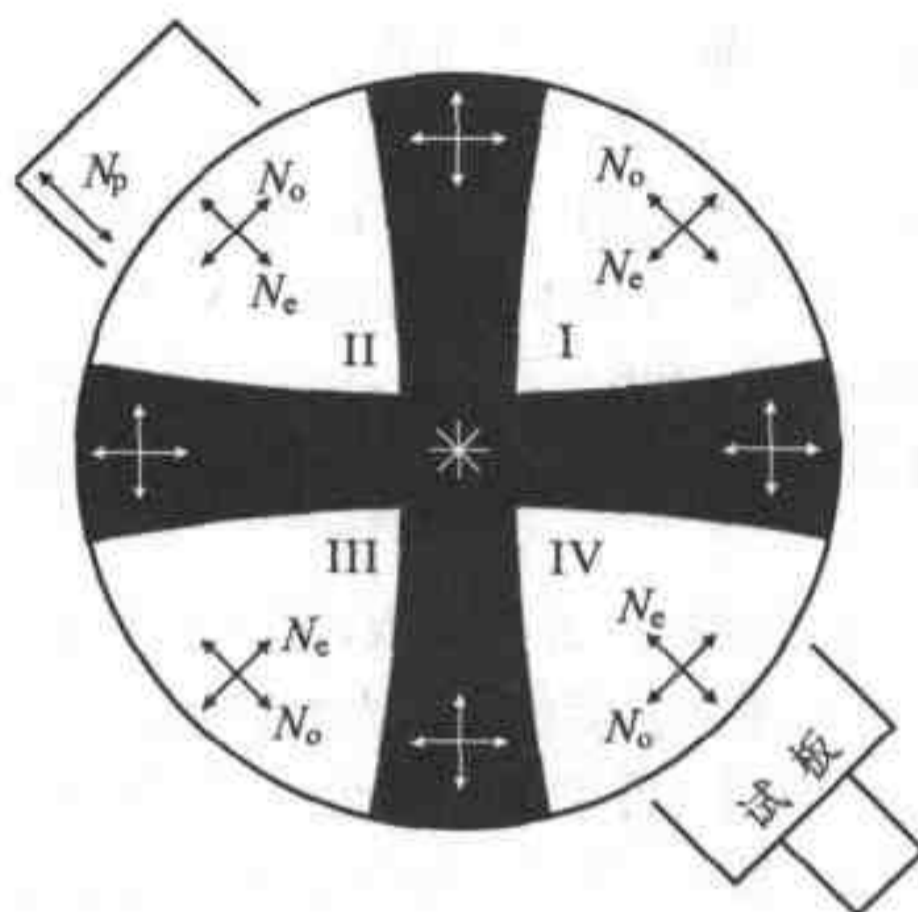


图 6-6 一轴晶矿物的光轴干涉图中四个象限的划分及其 N_e 、 N_o 方向

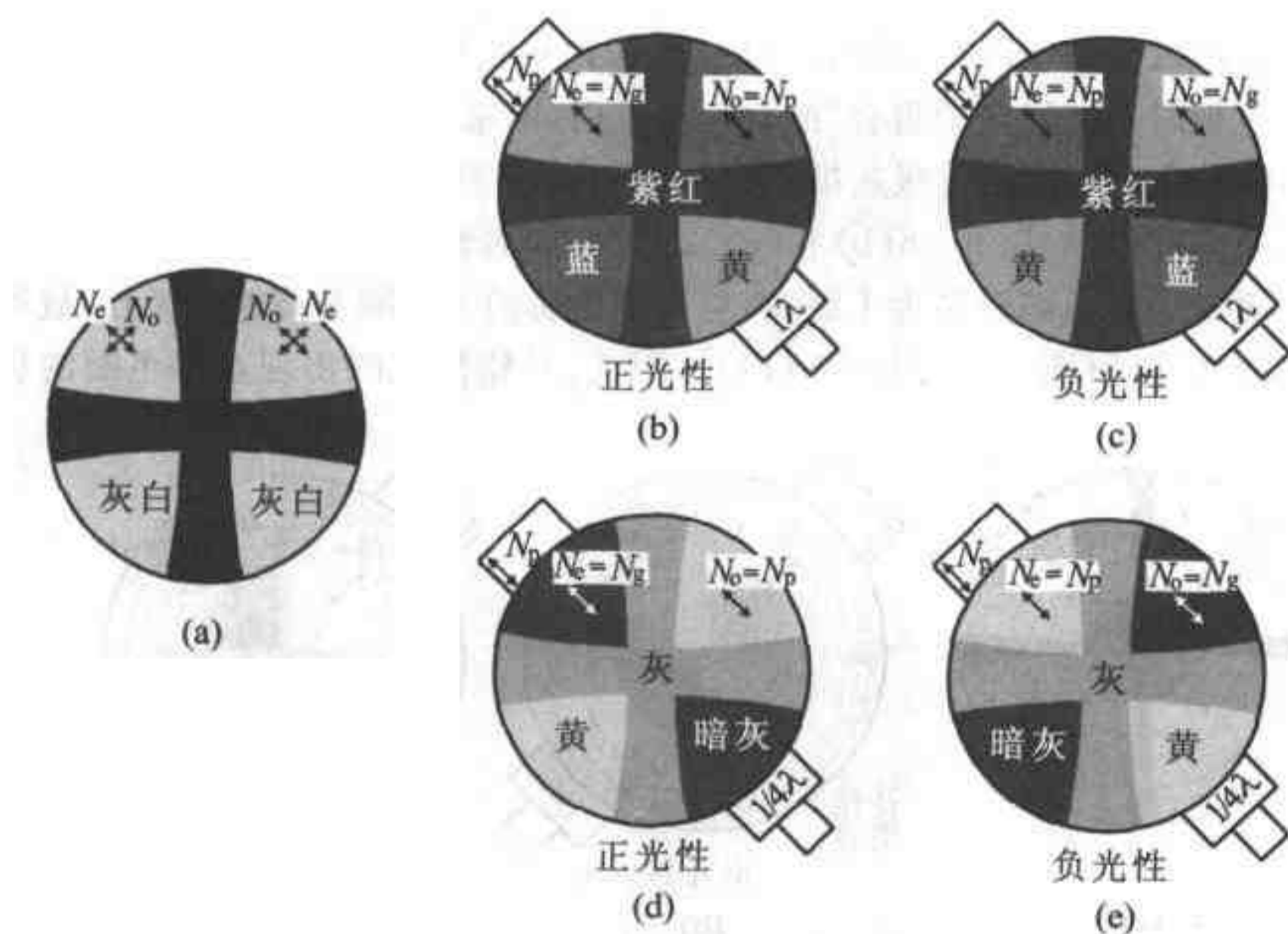


图 6-7 在一轴晶矿物的光轴干涉图上测定光性符号

(a)某晶体的光轴干涉图; (b)插入石膏试板后的正光性光轴干涉图;
 (c)插入石膏试板后的负光性光轴干涉图; (d)插入云母试板后的正光性
 光轴干涉图; (e)插入云母试板后的负光性光轴干涉图

(1) II、IV象限为I级黄(图6-7(b)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 N_e 方向的 N_g 重合,故 $N_e=N_g$,属正光性;而I、III象限为II级蓝(图6-7(b)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 N_o 方向的 N_p 重合,故 $N_o=N_p$,同样得到属正光性的结论。

(2) II、IV象限为II级蓝(图6-7(c)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 N_e 方向的 N_p 重合,故 $N_e=N_p$,属负光性;而I、III象限为I级黄(图6-7(c)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 N_o 方向的 N_g 重合,故 $N_o=N_g$,同样得到属负光性的结论。

如果沿II-IV象限方向插入云母试板,黑十字呈I级灰(为云母试板的干涉色),而对角象限干涉色的变化及其光性符号的判别与上述使用石膏试板时的情况基本相同,即I、III象限干涉色升高(图6-7(d)),为正光性;II、IV象限干涉色升高(图6-7(e)),为负光性;反之,则结论正好相反。

不同补色器具有不同的使用范围(参见第五章5.5节),故对于等色圈较少或只有I级灰的干涉图,使用石膏试板来判别光性符号更为有效;而对于等色圈较多的干涉图,使用云母试板来判别光性符号较为方便。当使用云母试板时,在“异名轴重合”的对角象限内,原来I级灰的等色圈(图6-8(a))将被云母试板的I级灰抵消,呈现黑点(或黑团),称为补偿黑点,同时等色圈向外移动(图6-8(b)和(c));而在“同名轴重合”的对角象限内,原来I级灰的等色圈升高为I级黄,原来I级黄的等色圈升高为I级红,故等色圈向内移动(图6-8(b)和(c))。因此,补偿黑点的出现及等色圈的移

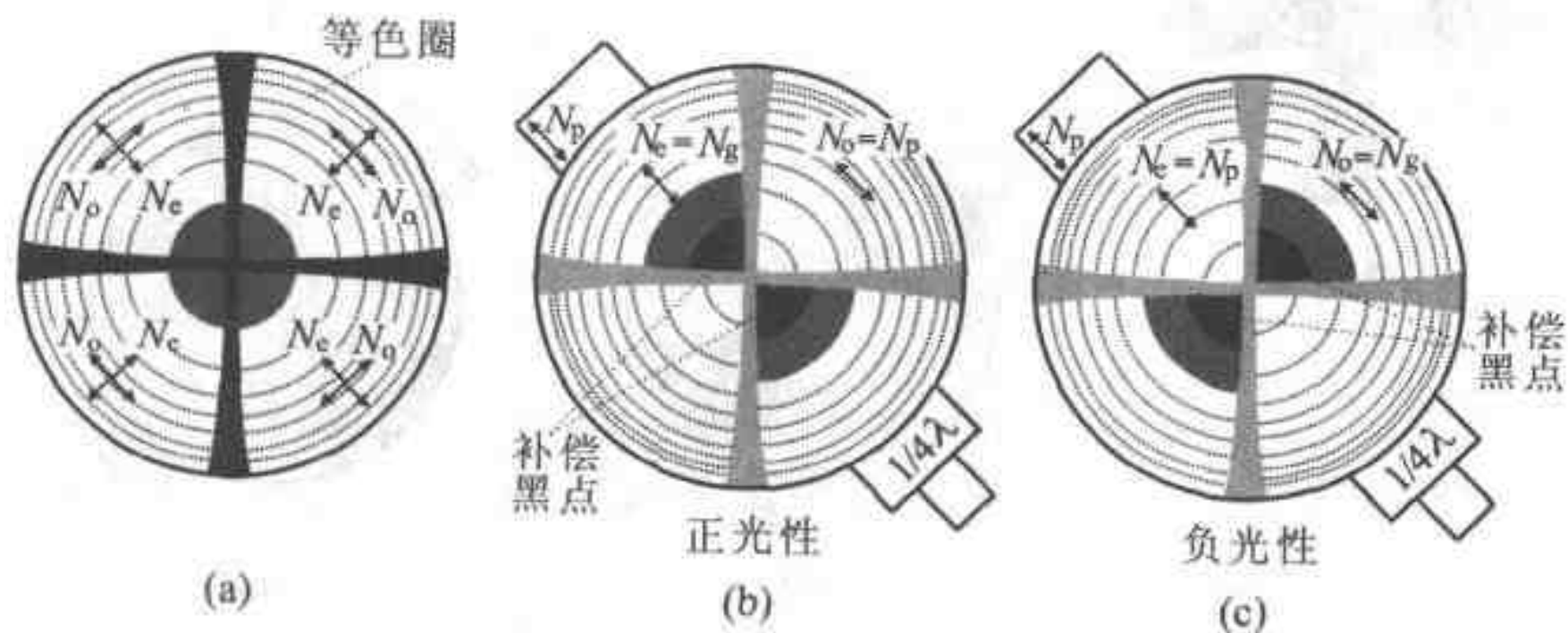


图6-8 一轴晶矿物的光轴干涉图上的补偿黑点及其光性符号判别
 (a)某晶体的光轴干涉图; (b)插入云母试板后的正光性光轴干涉图;
 (c)插入云母试板后的负光性光轴干涉图

动方向可以帮助我们准确判断哪两个象限的干涉色是降低的,从而确定光性符号。

光轴干涉图是测定光性符号最有效的干涉图,为此必须首先找到垂直光轴的切面。由于该切面上的 $\Delta N=0$,在正交偏光系统下呈全消光,故应在低倍物镜下仔细寻找干涉色黑暗或灰黑的、粒径较大的颗粒。然后,在聚敛偏光系统下观察它的干涉图。一旦呈现黑十字消光影和同心圆状的等色圈,就可以断定该矿物既不属于均质矿物(无干涉图),也不属于二轴晶(二轴晶矿物的光轴干涉图具有完全不同的图像,参见第六章 6.3 节),而属于一轴晶。然后,利用补色器,确定它的光性符号。

一轴晶矿物的光轴干涉图除了具有上述鉴定意义以外,它还具有检验偏光显微镜工作状况的用处:① 当黑十字的纵臂和横臂是清晰而互相垂直,说明上、下偏光镜是完全正交;否则,必须校正;② 当黑十字的纵臂和横臂与目镜十字丝完全重合时,说明上、下偏光镜振动方向分别是正东西和正南北向;否则,必须校正。

6.2.2 偏心光轴干涉图和偏心干涉图

在斜交一轴晶光轴的矿物切片上,可以观察到两种不同的干涉图:

(1) 当切片法线与光轴的斜交角度不大,视域内还能见到光轴出露点(黑十字中心),但与目镜十字丝中心不重合,故黑十字呈不完整的形态出现,等色圈亦略变为同心卵圆形,该图像称为偏心光轴干涉图(图 6-9 (a))。

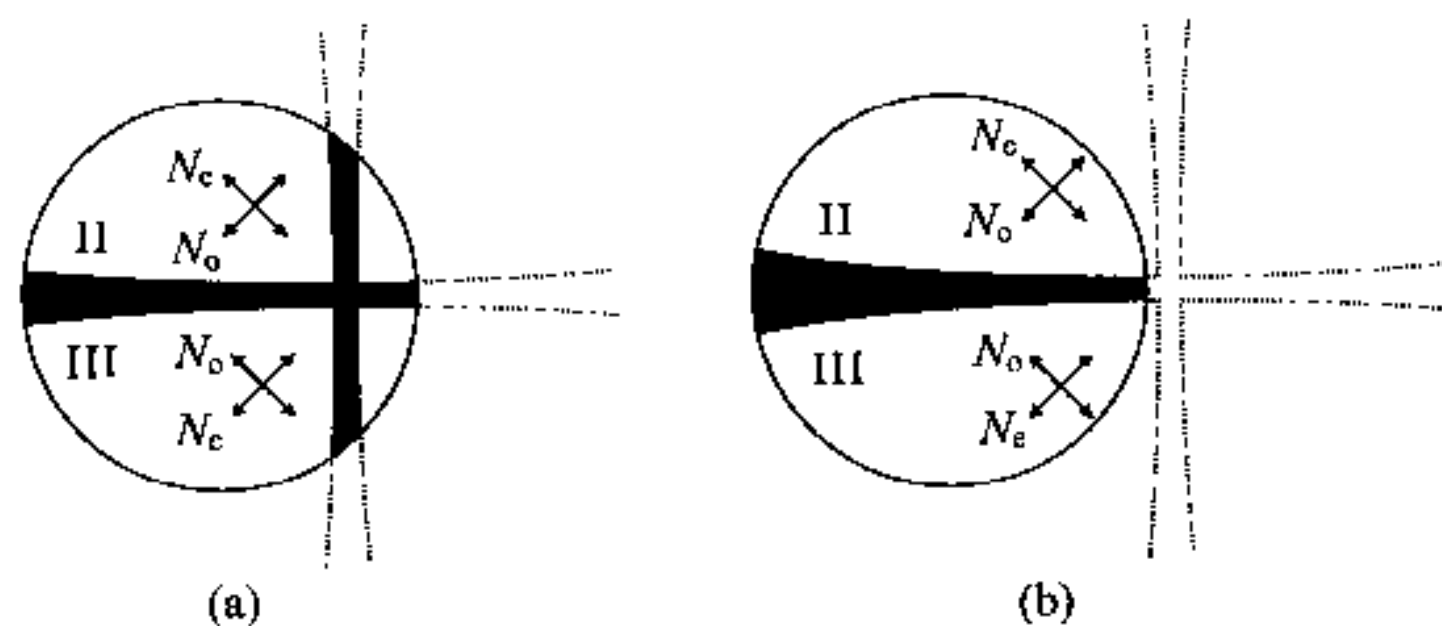


图 6-9 一轴晶矿物的斜交光轴切片上的干涉图

(a) 偏心光轴干涉图; (b) 偏心干涉图

(2) 当切片法线与光轴的斜交角度较大,视域内不再看到光轴出露点(黑十字中心),而仅见一条黑臂(纵臂或横臂的一部分),等色圈变为一组弧

线,该图像称为偏心干涉图(图 6-9 (b))。

转动载物台时,偏心光轴干涉图中的黑十字中心绕视域中心作圆周运动,黑十字的纵臂和横臂分别作左右和上下移动;而偏心干涉图中的黑臂也作近于平移运动,但有扫动现象,即粗的一端比细的一端移动得更快一些。如果沿着顺时针方向旋转载物台,将依次观察到…Ⅳ→Ⅲ→Ⅱ→Ⅰ→Ⅳ…象限,它们分别被自下而上运动的横向黑臂(图 6-10 (a))、自左而右运动的纵向黑臂(图 6-10 (b))、自上而下运动的横向黑臂(图 6-10 (c))和自右而左运动的纵向黑臂(图 6-10 (d))分隔开来。

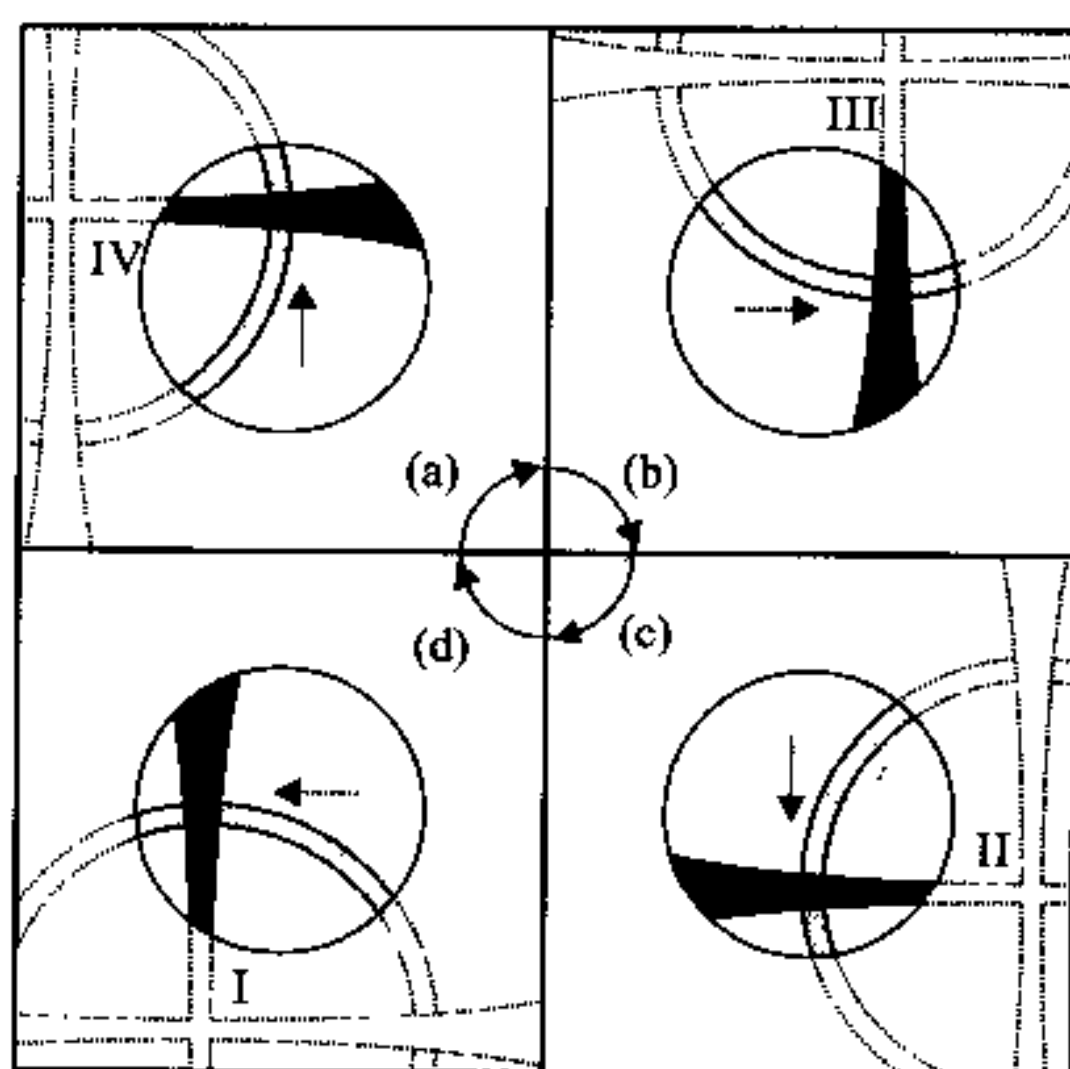


图 6-10 顺时针旋转载物台时一轴晶矿物偏心干涉图的变化

- (a) 右侧的横向黑臂上移; (b) 下侧的纵向黑臂右移;
 (c) 左侧的横向黑臂下移; (d) 上侧的纵向黑臂左移。

利用一轴晶矿物的偏心光轴干涉图和偏心干涉图也可以判断矿物的轴性和光性符号。由于这两种干涉图为一轴晶矿物所特有,故具有轴性指示意义;对于光性符号的判别,则必须首先确定视域中的干涉图(局部)属于哪个象限,然后才可插入试板进行鉴定。象限号码(I、II、III、IV)的确定主要根据下述三种现象:

(1) 黑臂的粗细方向:黑臂细的部分指向黑十字的中心(即光轴出露点)(图 6-11)。

(2) 等色圈的凹凸方向:等色圈的凹向指向黑十字的中心(即光轴出露

点)(图 6-11)。

(3) 旋转载物台时黑臂的移动方向: 不论顺时针或逆时针方向旋转载物台, 当横向黑臂向上移动后出现的视域必为第Ⅲ或第Ⅳ象限; 反之, 当横向黑臂向下移动后出现的视域必为第Ⅰ或第Ⅱ象限。同理, 当纵向黑臂向左移动后出现的视域必为第Ⅰ或第Ⅳ象限。通过这些现象的组合观察, 就能确定视域中的象限号码。例如, 顺时针转动载物台 90° , 根据先后退出视域的纵臂与进入视域的横臂, 即可确定视域中的干涉图属于第Ⅰ象限(图 6-11)。

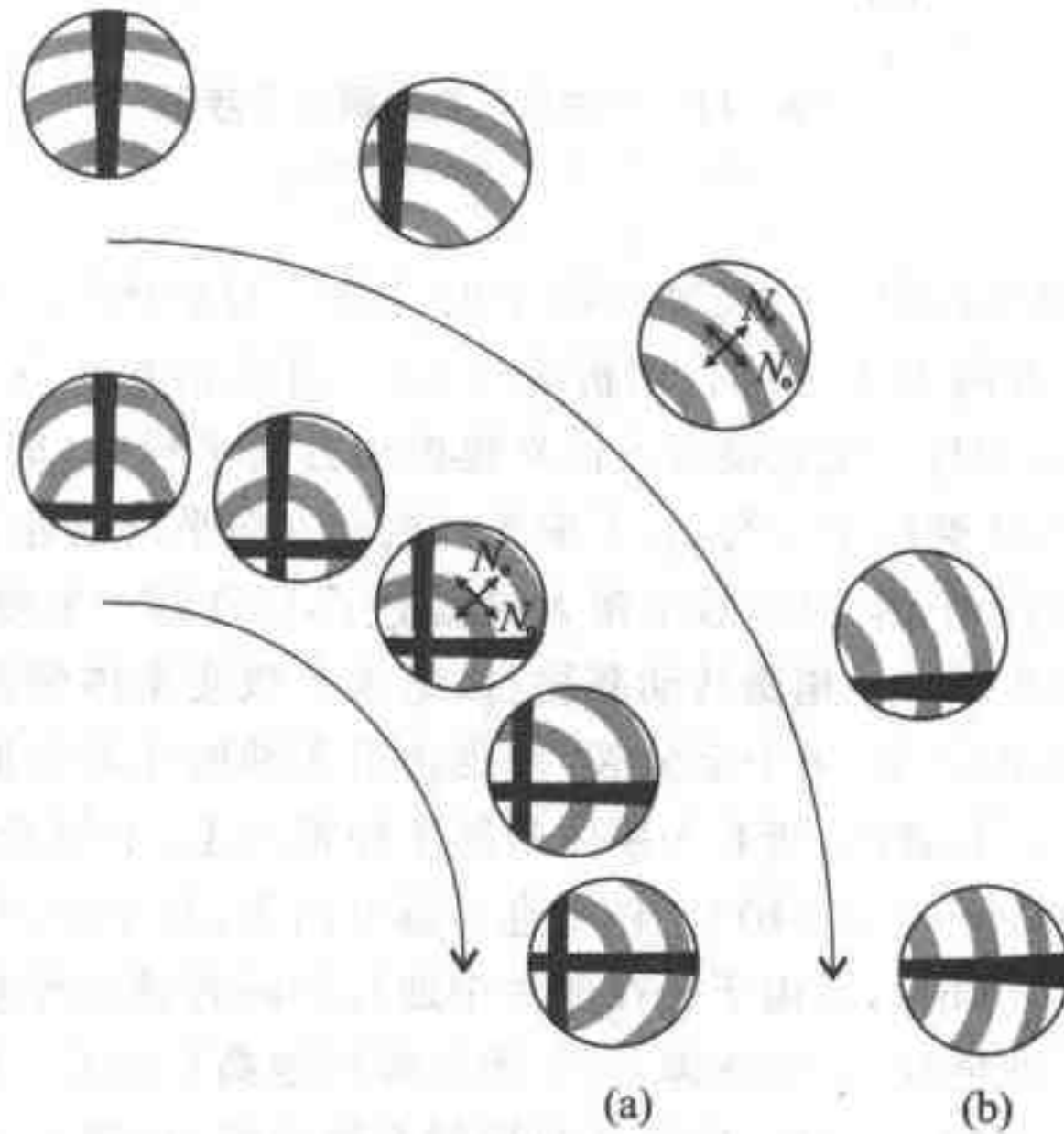


图 6-11 旋转载物台一轴晶矿物偏心光轴干涉图和偏心干涉图的变化

(a) 偏心光轴干涉图; (b) 偏心干涉图

6.2.3 瞬变干涉图

在一轴晶矿物平行光轴的切片上, 当光轴与上偏光镜或下偏光镜振动方向平行时(即 0° 位置), 视域中呈现一个粗大的黑十字, 几乎占满整个视域, 仅在四个象限的边缘有一定亮度的干涉色(图 6-12 (a))。稍微转动载物台, 该黑十字即刻分裂, 并迅速退出视域, 整个视域呈现明亮的干涉色(图 6-12 (b))。因此, 该类干涉图称为瞬变干涉图或闪图(亦称为光法线干涉图)。

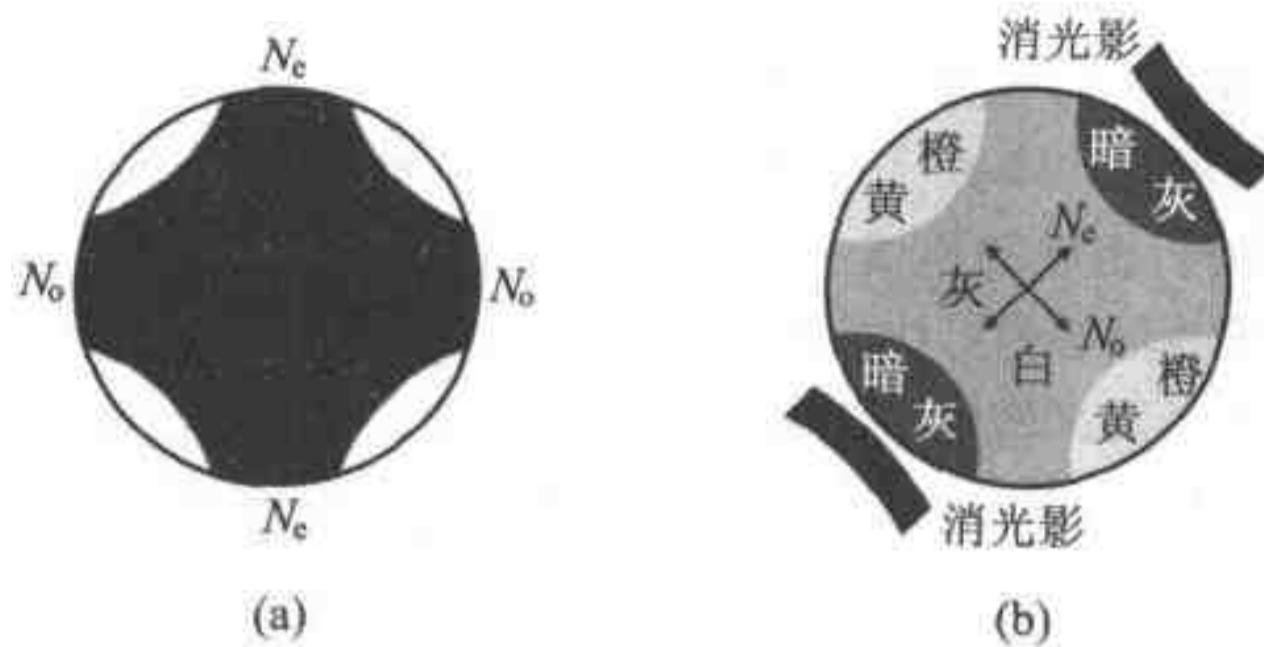


图 6-12 一轴晶矿物的瞬变干涉图

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

上述现象可以由平行光轴切面上的波向正投影图(图 6-13)加以解释:平行光轴方向为 N_e 方向,用折线表示;垂直光轴方向为 N_o 方向,用点线表示。当光轴与上偏光镜或下偏光镜振动方向平行时(即 0° 位置),视域内大部分光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向平行或近于平行,因此整个视域几乎都处于消光位,故呈粗大的黑十字,仅在四个象限边缘有暗灰干涉色(图 6-12 (a))。稍微转动载物台,绝大多数光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向斜交,黑十字分裂,并迅速沿光轴所在方向退出视域;当光轴方向转到 45° 位置时,所有光率体椭圆半径都与上、下偏光镜振动方向斜交,视域最亮(图 6-12 (b))。在垂直光轴方向上,自中心向外的双折射率相等(图 6-13 (b)),但由于光在薄片通过的路程越向外越长,故光程差(及相应的干涉色)越向外就越大(干涉色级别越高)(图 6-12 (b));然而,在平行光轴方向上,自中心向外的双折射率越来越小(图 6-13 (b)),虽然光在薄片通过的路程越向外越长,但在大多数情况下不足以抵消双折射率的减小,故光程差(及相应的干涉色)越向外就越小(干涉色级别越低),消光影也就由此方向退出(图 6-12 (b))。

利用一轴晶矿物的瞬变干涉图也可以鉴定光性符号,具体的操作步骤为:① 确定粗大的黑十字分裂、退出的方向,即光轴或 N_e 方向;② 将该方向转到 45° 位置,插入试板,根据补色原理,判断 $N_e = N_g$, 还是 $N_e = N_p$, 从而确定光性正负。然而,一轴晶矿物的瞬变干涉图与二轴晶矿物的 Bxo 干涉图、瞬变干涉图很难区分,所以一般不用。

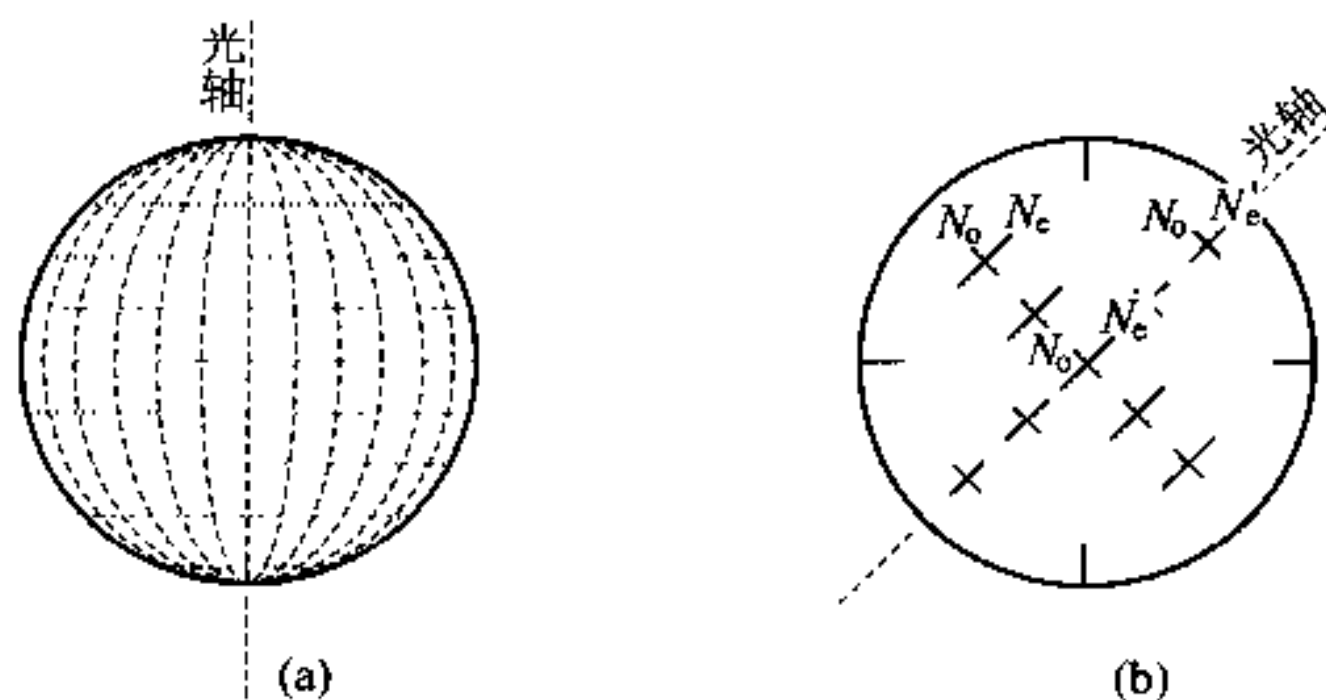


图 6-13 一轴晶矿物中平行光轴切面上的波向正投影图
(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

§ 6.3 二轴晶矿物的干涉图

二轴晶光率体有四种类型的切面,但最具代表性的是三个主轴面和一个圆切面,即垂直 Bxa 、垂直 Bxo 、垂直 N_m 和垂直光轴的切面。在聚敛偏光系统下,这些切面分别呈现不同的干涉图,可以用来测定轴性符号、光性符号以及光轴角、色散等光性特征。

6.3.1 Bxa 干涉图

1. 形态特征

垂直二轴晶矿物锐角等分线 (Bxa) 切片上所呈现的干涉图,称为 Bxa 干涉图。它具有如下形态特征(图 6-14):

(1) 当光轴面与目镜纵丝或横丝平行时(即 0° 位置),目镜十字丝附近呈现一个黑十字,但两条黑臂的粗细不等,沿光轴面方向的黑臂较细,在两个光轴出露点处则更细;垂直光轴面方向(即 N_m 方向),黑臂较宽,且越向外越宽。黑十字的中心为 Bxa 出露点(图 6-14 (a))。

(2) 中心部位的等色圈呈哑铃状,两个“哑铃”的中心为光轴出露点;外部的等色圈逐渐变为椭圆形,且越向外等色圈的密度越大。在双折射率较大的晶体中或在厚度较大的切片上,等色圈变密而黑十字变细(图 6-14 (a))。

(3) 旋转载物台时,等色圈形状不变,但方位随之转动;而黑十字从中心分裂,变成两个弯曲的黑带。当光轴面与目镜十字丝的夹角为 45° 时,两个弯曲的黑带相距最远(图 6-14(b))。该弯曲黑带称为消光弧,其两端较

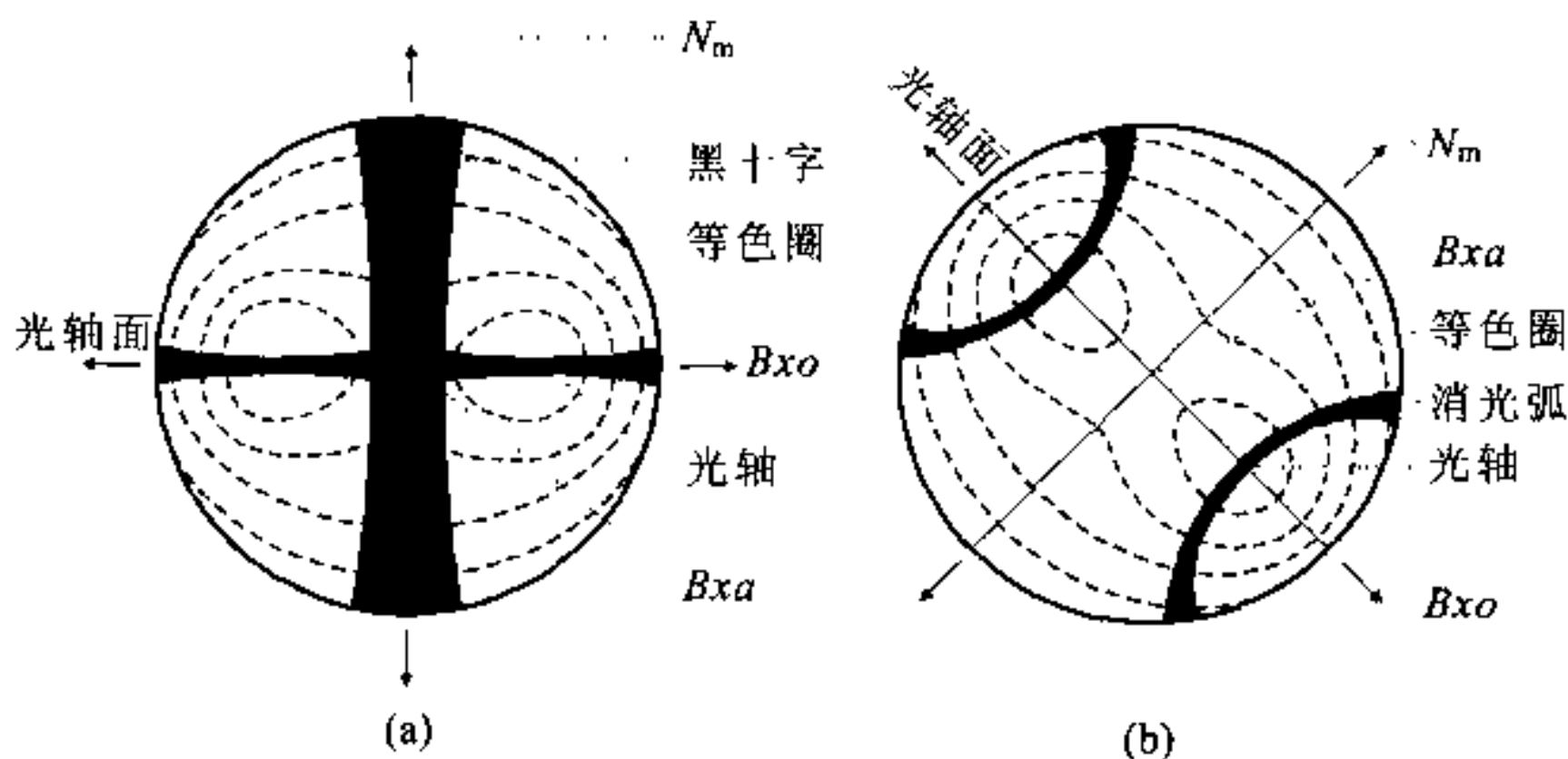


图 6-14 二轴晶矿物的 Bxa 干涉图

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

宽,中间较细,弧顶位置最细,为光轴出露点。两个消光弧顶点之间的距离反映了该矿物的光轴角($2V$)的大小。

2. 形成原理

为了分析 Bxa 干涉图的成因,必须建立垂直 Bxa 切面上的波向正投影图。对于二轴晶矿物,如何确定任意方向的透射光进入晶体后产生的两束偏光的振动方向? 根据菲涅尔定律,光沿任意方向射入二轴晶矿物,产生的两束偏光的振动方向平行两个人射面(即光轴方向与入射方向构成的平面)的分角面(图 6-15 (a))。因此,在二轴晶的波向正投影图上,只要作出任意方向透射光的出露点与两个光轴出露点的连线,其连线交点处的夹角平分线即为该方向入射而产生的两束偏光的振动方向(图 6-15 (b))。

菲涅尔定律可以被证明如下。

设 NO 为任意方向的入射光,垂直 NO 的椭圆切面与光率体的两个圆切面分别相交于 D 、 E 两点和 F 、 G 两点(图 6-16 (a)),则:

因为 D 、 E 两点同时出现在椭圆切面与一个圆切面上,所以 DE 线段为椭圆切面与一个圆切面的交线;同理, FG 线段为椭圆切面与另一个圆切面的交线;

因为椭圆切面与圆切面都经过球心 O 点,所以 DE 和 FG 两条交线也经过球心 O 点,故 DE 和 FG 为圆切面的直径;

因为在椭圆切面上,相等的线段总是对称出现(图 6-16 (b)),所以它们的平分线必然是椭圆切面的长、短轴,其长轴必大于 DE 或 FG (即圆直径 N_m)为 N_g' ,其短轴必小于 DE 或 FG (即圆直径 N_m)为 N_p' 。

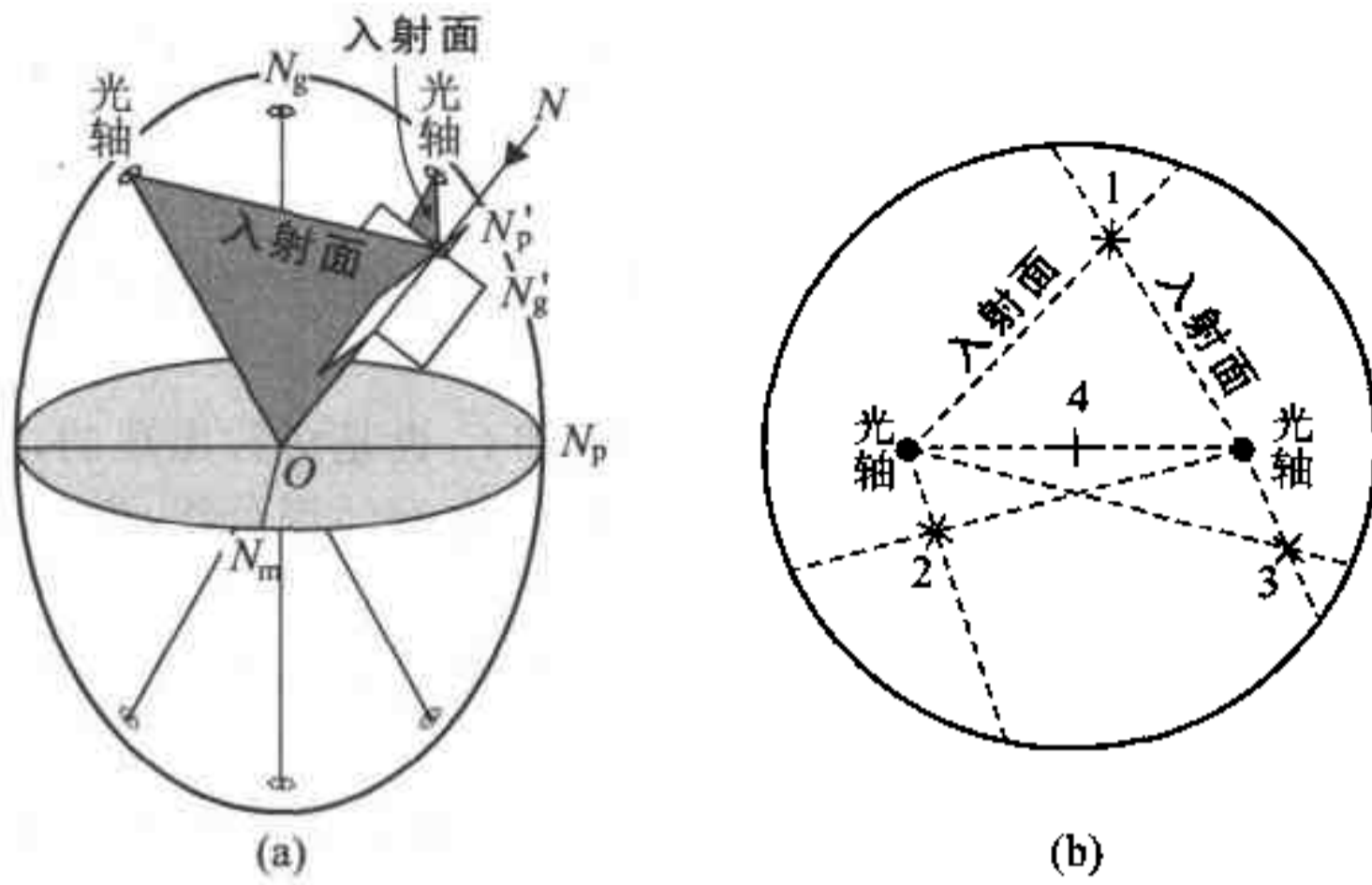


图 6-15 菲涅尔定律及其应用

- (a) 在光率体中两束偏光的振动方向；
- (b) 在波向正投影图上两束偏光的振动方向

因此，可以得到第一个结论：任意切面上两束偏光的折射率总是一大 ($>N_m$)—小 ($<N_m$)。

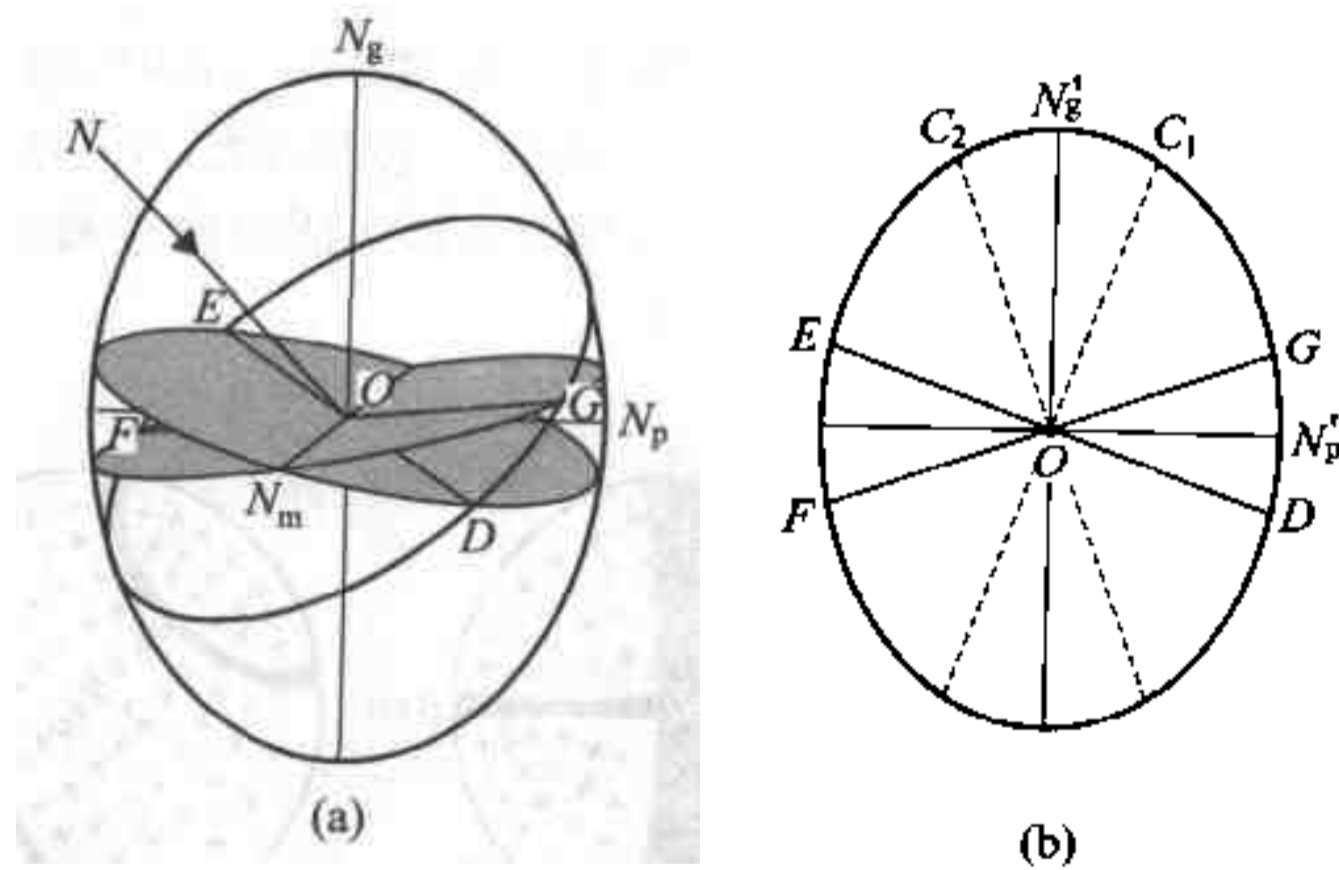


图 6-16 菲涅尔定律的证明

- (a) 在光率体中任意切面与两个圆切面的相交关系；
- (b) 在任意切面上两束偏光的振动方向

在任意椭圆切面 $N_g'N_p'$ 上，分别作过 O 点的 DE 和 FG 的垂线 C_1 和

C_2 (图 6-16 (b)), 则:

因为 DE 在圆切面上, 所以 DE 垂直一根光轴; 又因为 DE 在椭圆切面上, 所以 DE 垂直入射光; 因此, DE 垂直入射面 1 (即入射光 NO 与一根光轴所构成的平面);

因为 DE 垂直 C_1 , 所以 C_1 为入射面 1 与椭圆切面的交线; 同理, C_2 为另一个人射面 2 与椭圆切面的交线;

因为 DE 和 FG 是对称出现的, 所以 C_1 和 C_2 也是对称出现的, 故椭圆切面的长轴 (N_g') 和短轴 (N_p') 必然为 C_1 和 C_2 之间的等分线, 即为两个人射面的分角面在椭圆切面的交线。

因此, 可以得到第二个结论: 任意切面上两束偏光的振动方向分别平行两个人射面的分角面。

值得指出的是, 菲涅尔定律也完全适用于一轴晶光率体 (相当于 $2V=0^\circ$ 的二轴晶光率体), 即通过上述同样的方法可以得到两个对应的结论: ① 一束偏光的折射率为定值 (为常光), 另一束偏光的折射率总是大于该定值 (正光性) 或总是小于该定值 (负光性), 且随入射方向的改变而改变 (为非常光); ② 折射率不变的那束偏光的振动方向总是垂直于入射面, 而折射率变化的那束偏光的振动方向总是平行入射面 (参见图 1-10)。

根据菲涅尔定律, 可以容易地作出聚敛偏光系统下垂直 Bxa 切面上的波向正投影图 (图 6-17 (a))。该图直接地表明了 Bxa 干涉图的成因:

(1) 当光轴面和 N_m 分别与上、下偏光镜振动方向一致时 (即 0° 位置), 呈现黑十字, 且由于 N_m 主轴两侧消光位的分布范围较大, N_m 方向上的黑臂较宽; 而光轴面方向上消光黑臂较细, 其中光轴出露点附近最细, 因那里消光位的分布范围最小 (图 6-17 (b))。

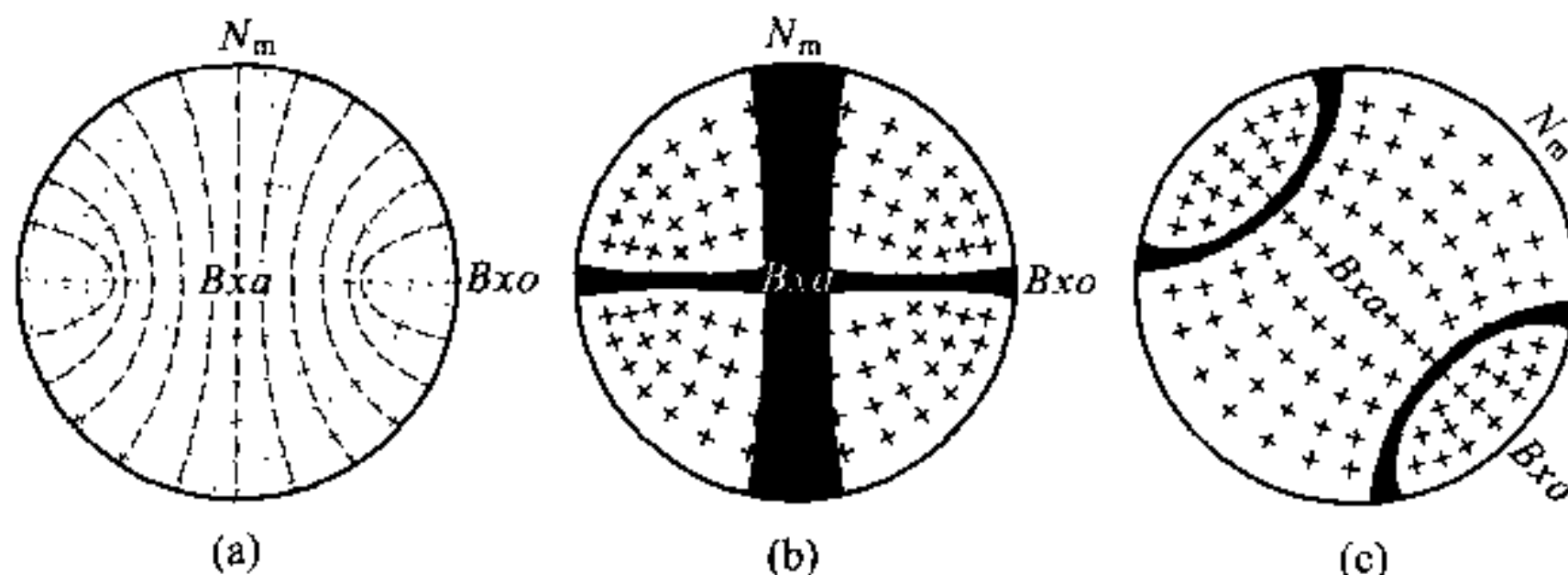


图 6-17 垂直 Bxa 切面上的波向正投影图

(a) 波向正投影图; (b) 0° 位置的黑十字; (c) 45° 位置的消光弧

(2) 旋转载物台,中心部分光率体椭圆半径首先与上、下偏光镜振动方向斜交而变亮,所以黑十字从中心部分首先分裂;当光轴面和 N_m 与上、下偏光镜振动方向成 45° 夹角时(即 45° 位置),消光弧位置的光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向平行,由此构成一对弯曲的消光影,即消光弧(图 6-17 (c))。

(3) 除黑十字或消光弧以外的其他部分,光率体椭圆半径与上、下偏光镜振动方向斜交,故呈现明亮干涉色(图 6-17 (b)和 (c))。由于二轴晶矿物有两个光轴,在它们的出露点上入射锥光的 $\Delta N=0, R=0$,故以两个光轴出露点为中心,向四周光程差逐渐加大,形成越来越高的干涉色等色圈。但是,由光轴方向向 Bxo 方向变化的透射光,其双折射率及在切片中所经历的路程同时加大,光程差成几何级数增加;而由光轴方向向 Bxa 方向变化的透射光,虽然其双折射率越来越大,但它们在切片中所经历的路程却在逐渐变小,因此光程差增加很慢(图 6-18 (a)),从而导致了等色圈向 Bxo 方向密集,向 Bxa 方向稀疏,呈现为哑铃状(图 6-14)。

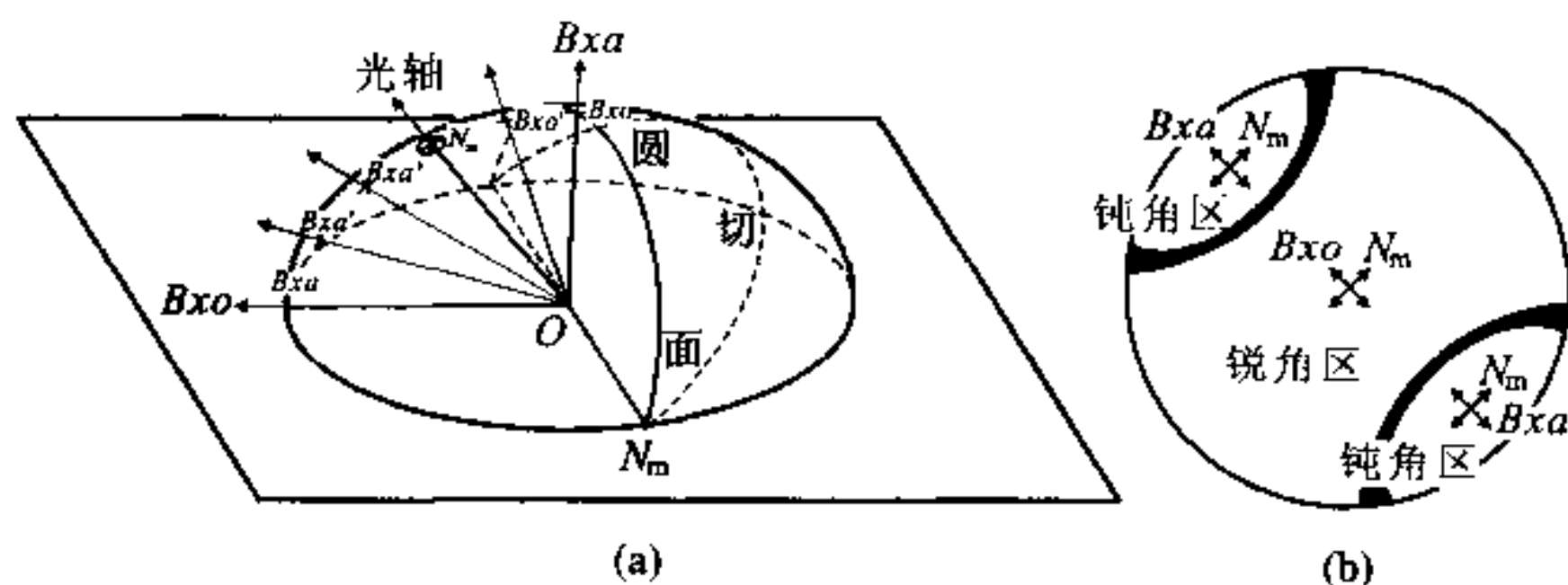


图 6-18 垂直 Bxa 切面中光轴面上的椭圆半径分布

(a) 体视图; (b) 45° 位置的投影图

3. 光性符号测定

在 45° 位置的 Bxa 干涉图中,两个消光弧的顶点为光轴出露点,两个光轴出露点之间的中点为 Bxa 出露点,故把两个消光弧之间的区域称为 Bxa 区域或锐角区;而消光弧凹向为 Bxo 方向,故把消光弧内的区域称为 Bxo 区域或钝角区(图 6-18 (b))。在锐角区,平行光轴面方向为 Bxo (或 Bxo' , Bxo' 介于 Bxo 与 N_m 之间)的振动方向,垂直光轴面方向为 N_m 的振动方向;在钝角区,平行光轴面方向为 Bxa (或 Bxa' , Bxa' 介于 Bxa 与 N_m 之间)的振动方向,垂直光轴面方向仍然为 N_m 的振动方向(图 6-18 (a))。根据二轴晶光率体光性符号的判别公式, Bxa (或 Bxa') = N_g 或 Bxo (或

$Bxo' = N_p$, 为正光性; Bxa (或 Bxa') = N_p 或 Bxo (或 Bxo') = N_g , 为负光性, 只要在试板孔插入试板, 根据锐角区或钝角区的干涉色升降情况, 即可判断出所观察的二轴晶矿物的光性符号。

现举例说明, 在 45° 位置的 Bxa 干涉图上如何判断光性符号。

(1) 某 Bxa 干涉图上, 由于晶体的最大双折射率 (ΔN_{\max}) 较小, 其锐角区和钝角区都呈 I 级灰干涉色 (图 6-19 (a))。沿光轴面方向 (即 II-IV 象限方向) 插入石膏试板后, 消光弧呈 I 级紫红 (为石膏试板的干涉色), 而锐角区和钝角区的干涉色呈现相反的升降变化。当锐角区干涉色由 I 级灰变成 II 级蓝 (图 6-19 (b)), 说明“干涉色升高, 同名轴重合”, 即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_p 重合, 故 $Bxo = N_p$, 属正光性; 而钝角区干涉色由 I 级灰变成 I 级黄 (图 6-19 (b)), 说明“干涉色降低, 异名轴重合”, 即

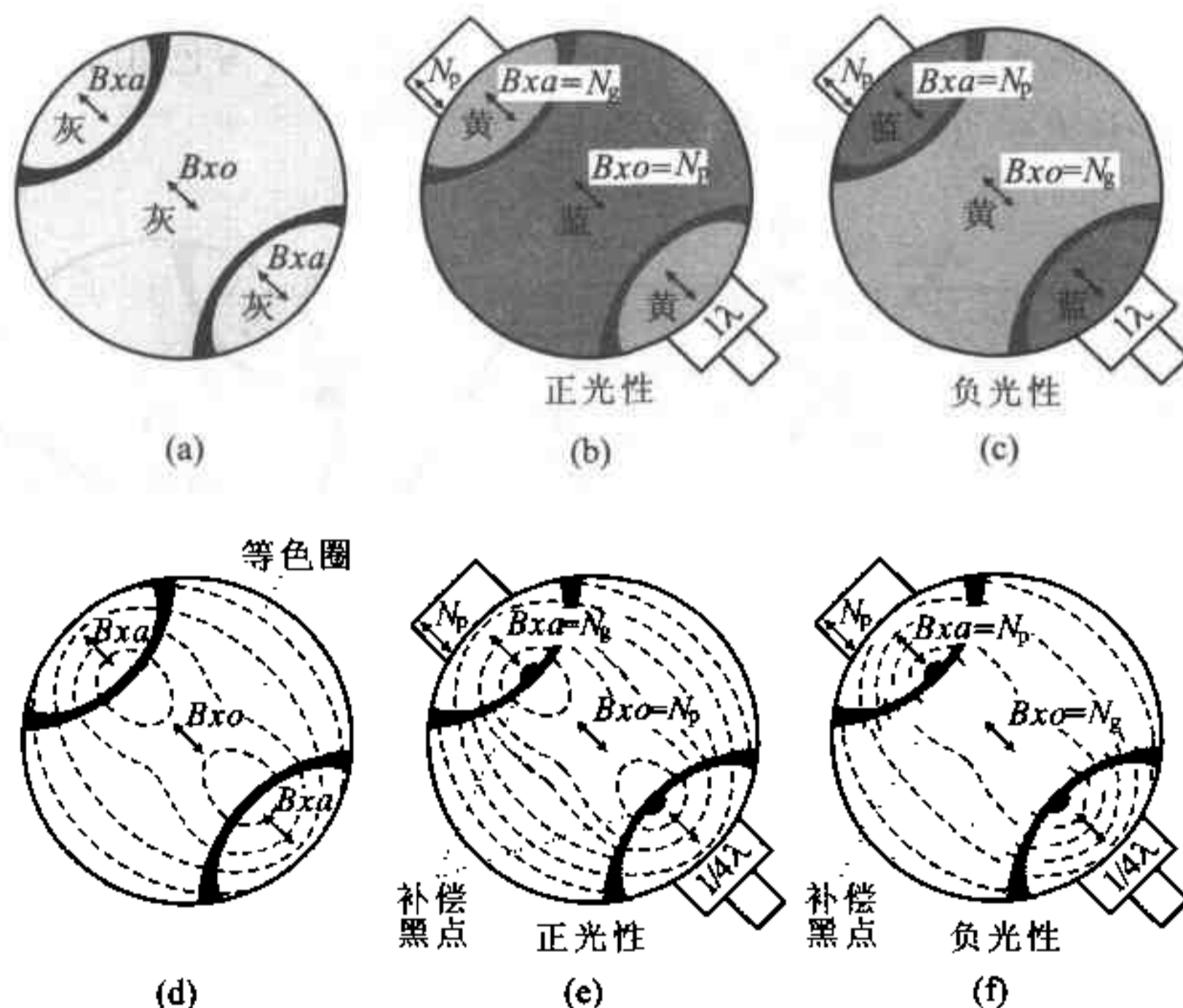


图 6-19 在二轴晶矿物的 Bxa 干涉图上测定光性符号

(a) 某最大双折射率较小的晶体的 Bxa 干涉图; (b) 插入石膏试板后的正光性 Bxa 干涉图; (c) 插入石膏试板后的负光性 Bxa 干涉图; (d) 某最大双折射率较大的晶体的 Bxa 干涉图; (e) 插入云母试板后的正光性 Bxa 干涉图; (f) 插入云母试板后的负光性 Bxa 干涉图

试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_g 重合,故 $Bxa=N_g$,同样得到属正光性的结论。当锐角区干涉色由I级灰变成I级黄(图 6-19 (c)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_g 重合,故 $Bxo=N_g$,属负光性;而钝角区干涉色由I级灰变成II级蓝(图 6-19 (c)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_p 重合,故 $Bxa=N_p$,同样得到属负光性的结论。由此可知,只要观察锐角区或钝角区内插入试板后干涉色的升降变化,就能确定光性符号。

(2) 某 Bxa 干涉图上,由于晶体的最大双折射率(ΔN_{max})较大,其锐角区和钝角区都呈现等色圈(图 6-19 (d))。沿光轴面方向(即 II-IV 象限方向)插入云母试板后,消光弧呈 I 级灰(为云母试板的干涉色),而锐角区和钝角区的等色圈呈现相反方向的移动变化,表示干涉色的升降变化。当锐角区的等色圈由 N_m 出露点(光轴面法线的两端) $\rightarrow Bxa$ 出露点(视域中心) \rightarrow 光轴出露点移动(消光弧顶点)(图 6-19 (e)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_p 重合,故 $Bxo=N_p$,属正光性;而钝角区的等色圈由光轴出露点 $\rightarrow Bxo$ 出露点(光轴面轨迹的两端)移动,并在原来 I 级灰处呈现补偿黑点(黑团)(图 6-19 (e)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_g 重合,故 $Bxa=N_g$,同样得到属正光性的结论。当锐角区的等色圈由光轴出露点 $\rightarrow Bxa$ 出露点 $\rightarrow N_m$ 出露点移动,并在原来 I 级灰处呈现补偿黑点(黑团)(图 6-19 (f)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_g 重合,故 $Bxo=N_g$,属负光性;而钝角区的等色圈由 Bxo 出露点 \rightarrow 光轴出露点移动(图 6-19 (f)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_p 重合,故 $Bxa=N_p$,同样得到属负光性的结论。如前所述,对锐角区和钝角区等色圈较少或只有 I 级灰的 Bxa 干涉图,通常使用石膏试板较为方便;而等色圈较多的 Bxa 干涉图,使用云母试板来判别光性符号较为方便。

Bxa 干涉图是测定二轴晶矿物光性符号最有效的干涉图,为此必须首先找到垂直 Bxa 的切面。在二轴晶光率体中, N_m 总是与 Bxo 方向的折射率(用 N_{Bxo} 表示)比较接近,而与 Bxa 方向的折射率(用 N_{Bxa} 表示)差别较大,故垂直 Bxa 切面上的双折射率为:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\perp Bxa} &= |N_m - N_{Bxo}| < |N_{Bxa} - N_m| \\ &= |N_{Bxa} - N_{Bxo} - N_m + N_{Bxo}| \\ &= |N_{Bxa} - N_{Bxo}| - |N_m - N_{Bxo}| \\ \Delta N_{\perp Bxa} &< |N_{Bxa} - N_{Bxo}| / 2 = \Delta N_{max} / 2 \end{aligned}$$

即该切面上的双折射率($\Delta N_{\perp Bxa}$)低于该晶体的最大双折射率(ΔN_{max})的一半,因此在未充分考虑光轴角大小的情况下,垂直 Bxa 切面的干涉色应该中等偏低(相对该晶体最高干涉色而言)。例如,某矿物的最高干涉色为 II 级红,则 I 级黄为其中等偏低干涉色,具这类干涉色的颗粒切面中,可能呈现 Bxa 干涉图。

Bxa 干涉图除了用于鉴定光性符号以外,它还可以用于估测光轴角 ($2V$) 的大小。在使用 10 倍目镜和 45 倍物镜条件下,观察 45° 位置的 Bxa 干涉图,如果两个消光弧顶点(即光轴出露点)在视域的边界上,则 $2V = 50^\circ$;如果两个消光弧顶点在视域内部,则根据两点之间的距离,按比例估测 $2V$ 的大小。显然,在同样的放大倍数条件下,对于 $2V > 50^\circ$ 的 Bxa 干涉图,光轴出露点就不在视域内。转动载物台,黑十字分裂成两个消光弧并退出视域。这类干涉图与 Bxo 干涉图不易区别(参见本章下述),故失去鉴定光性符号的意义。

6.3.2 光轴干涉图

1. 形态特征

在二轴晶矿物的垂直光轴切片上所呈现的光轴干涉图,可以简单地由 Bxa 干涉图推导而成。在 Bxa 干涉图上,设想把视域中心移到光轴出露点,并把视域范围缩小一半(图 6-20 (a)),这样就构成二轴晶矿物的光轴干涉图。

(1) 当光轴面平行上偏光镜或下偏光镜振动方向时(即 0° 位置),消光黑臂平行目镜横丝或纵丝,最细部分为光轴出露点(如为完全垂直光轴的切

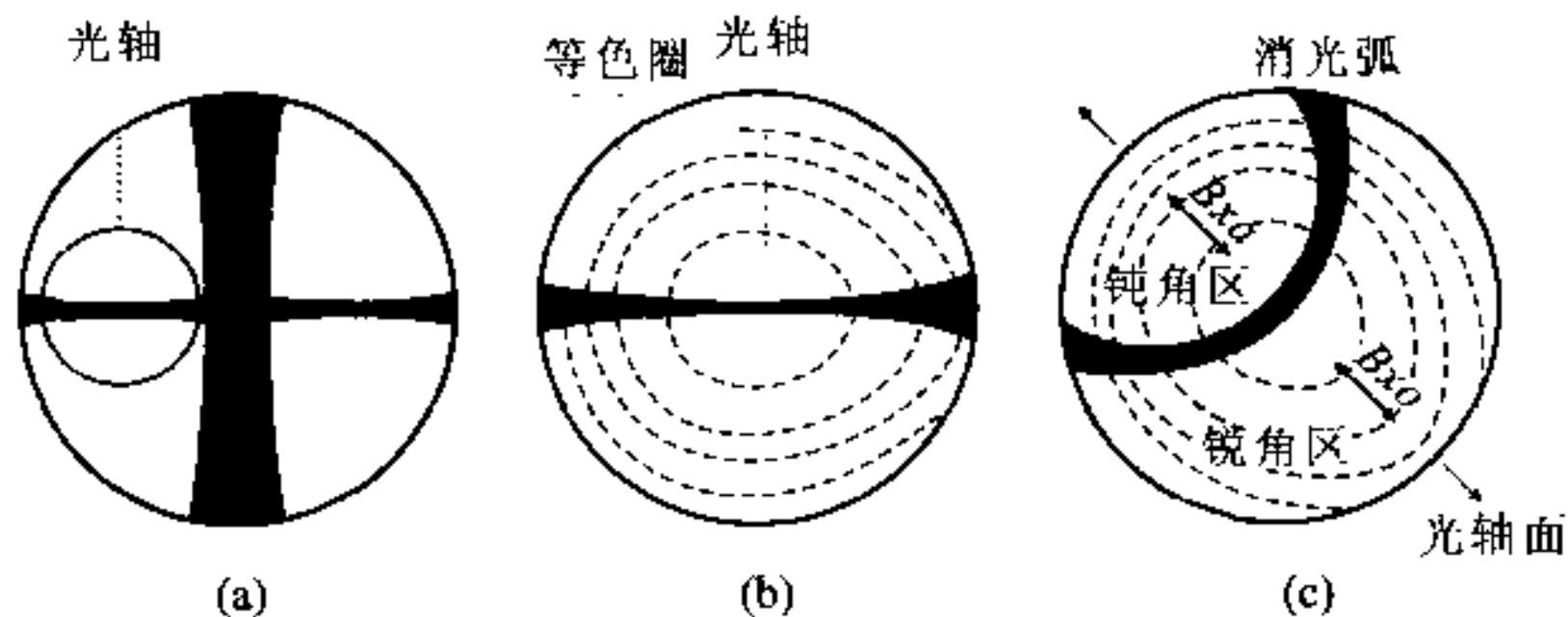


图 6-20 二轴晶矿物的光轴干涉图

(a) 在 Bxa 干涉图上的光轴干涉图范围; (b) 0° 位置的光轴干涉图;
(c) 45° 位置的光轴干涉图

片,则光轴出露点与十字丝中心重合);等色圈呈卵圆形,即靠 Bxa 出露点和 Bxo 出露点两侧的等色圈密度往往不相等(图 6-20 (b))。

(2) 当光轴面处于 45° 位置时,等色圈的方位变化但形态不变,消光黑臂弯曲成消光弧,光轴面平分消光弧;消光弧的凸侧为锐角区,该区的的光轴面方向代表 Bxo 的振动方向;消光弧的凹侧为钝角区,该区的的光轴面方向代表 Bxa 的振动方向(图 6-20 (c));因此,根据消光弧的凹凸方位就可以测定光性符号。

2. 光性符号测定

利用二轴晶矿物的光轴干涉图来测定矿物的光性符号的原理和方法,与 Bxa 干涉图中的相似。现举两个实例来说明:

(1) 某光轴干涉图上,由于晶体的最大双折射率(ΔN_{max})较小,其锐角区和钝角区都呈I级灰干涉色(图 6-21 (a))。沿光轴面方向(即II-IV象限方向)

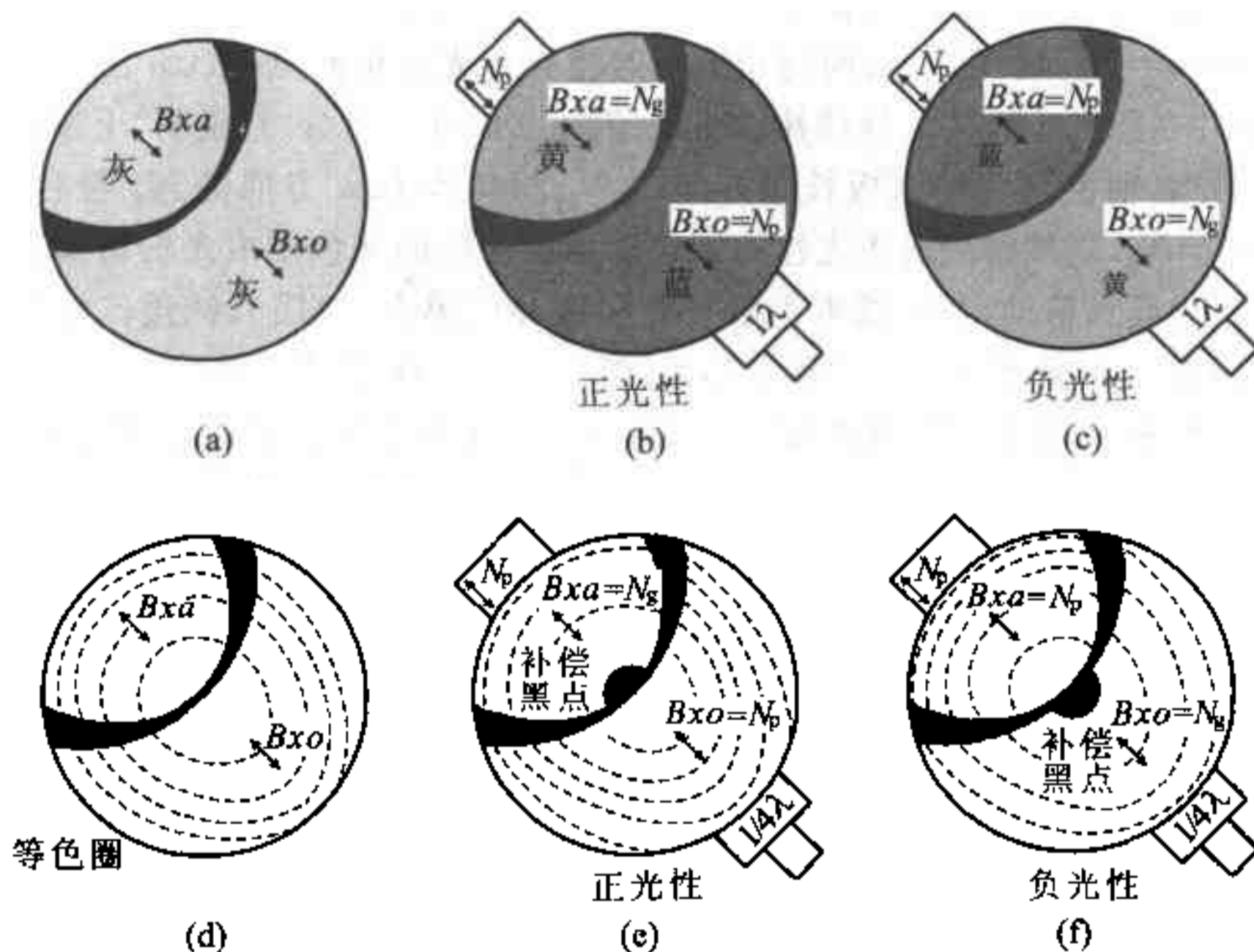


图 6-21 在二轴晶矿物的光轴干涉图上测定光性符号

(a) 某最大双折射率较小的晶体的光轴干涉图; (b) 插入石膏试板后的正光性光轴干涉图; (c) 插入石膏试板后的负光性光轴干涉图; (d) 某最大双折射率较大的晶体的光轴干涉图; (e) 插入云母试板后的正光性光轴干涉图; (f) 插入云母试板后的负光性光轴干涉图

插入石膏试板后,消光弧呈I级紫红(为石膏试板的干涉色),而锐角区和钝角区的干涉色呈现相反的升降变化。当锐角区干涉色由I级灰变成II级蓝(图6-21(b)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_p 重合,故 $Bxo=N_p$,属正光性;而钝角区干涉色由I级灰变成I级黄(图6-21(b)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_g 重合,故 $Bxa=N_g$,同样得到属正光性的结论。当锐角区干涉色降低,钝角区干涉色升高,则属负光性(图6-21(b))。

(2) 某光轴干涉图上,由于晶体的最大双折射率(ΔN_{max})较大,其锐角区和钝角区都呈现等色圈(图6-21(d))。沿光轴面方向(即II-IV象限方向)插入云母试板后,消光弧呈I级灰(为云母试板的干涉色),而锐角区和钝角区的等色圈呈现相反方向的移动变化,表示干涉色的升降变化。当锐角区的等色圈由 Bxa 出露点 \rightarrow 光轴出露点移动(图6-21(e)),说明“干涉色升高,同名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxo 方向的 N_p 重合,故 $Bxo=N_p$,属正光性;而钝角区的等色圈由光轴出露点 $\rightarrow Bxo$ 出露点移动,并在原来I级灰处呈现补偿黑点(黑团)(图6-21(e)),说明“干涉色降低,异名轴重合”,即试板长边方向的 N_p 与晶体 Bxa 方向的 N_g 重合,故 $Bxa=N_g$,同样得到属正光性的结论。当锐角区的等色圈由光轴出露点 $\rightarrow Bxa$ 出露点移动,并在原来I级灰处呈现补偿黑点(黑团),钝角区的等色圈由 Bxo 出露点 \rightarrow 光轴出露点移动(图6-21(f)),则属负光性。

呈现二轴晶矿物的光轴干涉图的切片,在正交偏光系统下为全消光。因此,欲利用光轴干涉图鉴定二轴晶矿物的光性符号,必须先要在正交偏光系统下,用低倍物镜仔细寻找全消光、粒径较大的矿物颗粒。有时难于找到完全垂直光轴的切片,但只要光轴出露点(即消光弧的顶点)仍在视域内,同样可以测定光性符号。由于寻找这类切片比寻找垂直 Bxa 的切片容易得多,因此,测定二轴晶矿物的光性符号主要依靠光轴干涉图。

3. 光轴角测定

在二轴晶矿物的光轴干涉图上,还可以估测光轴角的大小,因为光轴角的大小与消光弧的弯曲程度成一定的比例关系。当 $2V=0^\circ$ 时(即一轴晶光率体), 45° 位置上光轴干涉图的两个消光弧的弧顶重合而成为一轴晶矿物的黑十字消

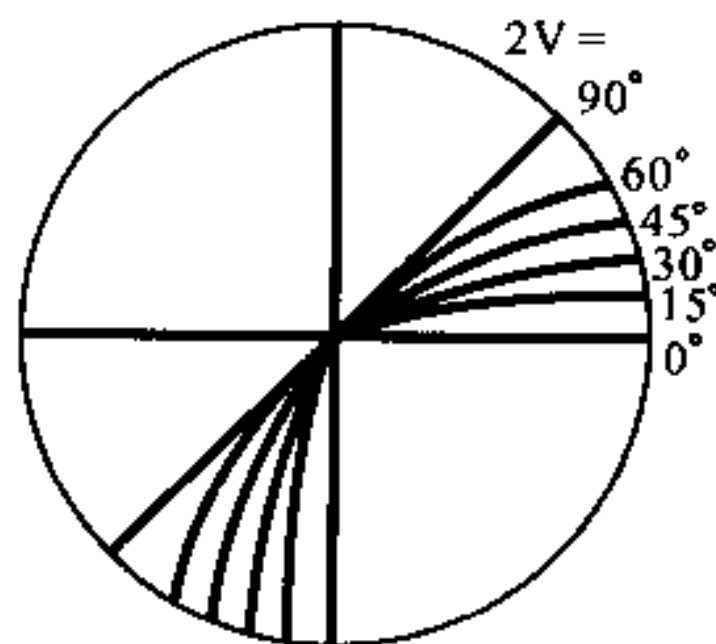


图6-22 二轴晶矿物的光轴干涉图上光轴角大小与消光弧弯曲度的关系

光影；当 $2V=90^\circ$ 时，消光弧没有明显的弯曲，近于直臂；旋转载物台，黑臂跟着转动，转动方向与载物台旋转方向相反，不发生弯曲。当 $0^\circ < 2V < 90^\circ$ 时，消光弧在 45° 位置时弯曲，消光弧弯曲的顶点（即光轴出露点）至末端的连线与目镜十字丝的交角（ $< 45^\circ$ ）的二倍，近似地相当于光轴角的大小（图 6-22）。使用这种方法目估光轴角的大小时，一般只能把光轴角粗略地定为大（ $2V > 60^\circ$ ）、中（ $2V = 30^\circ \sim 60^\circ$ ）、小（ $2V < 30^\circ$ ）三个等级。

6.3.3 Bxo 干涉图

垂直钝角等分线（ Bxo ）切片上的干涉图称为 Bxo 干涉图，其形态特征如下：

（1）当光轴面与目镜横丝或纵丝重合时（即 0° 位置），视域内呈现一个粗大黑臂与细小黑臂组成的黑十字，粗大黑臂代表 N_m 方向，细小黑臂代表光轴面位置，黑十字中心为 Bxo 出露点。光轴出露点分布在视域外的光轴面方向上（图 6-23（a））。

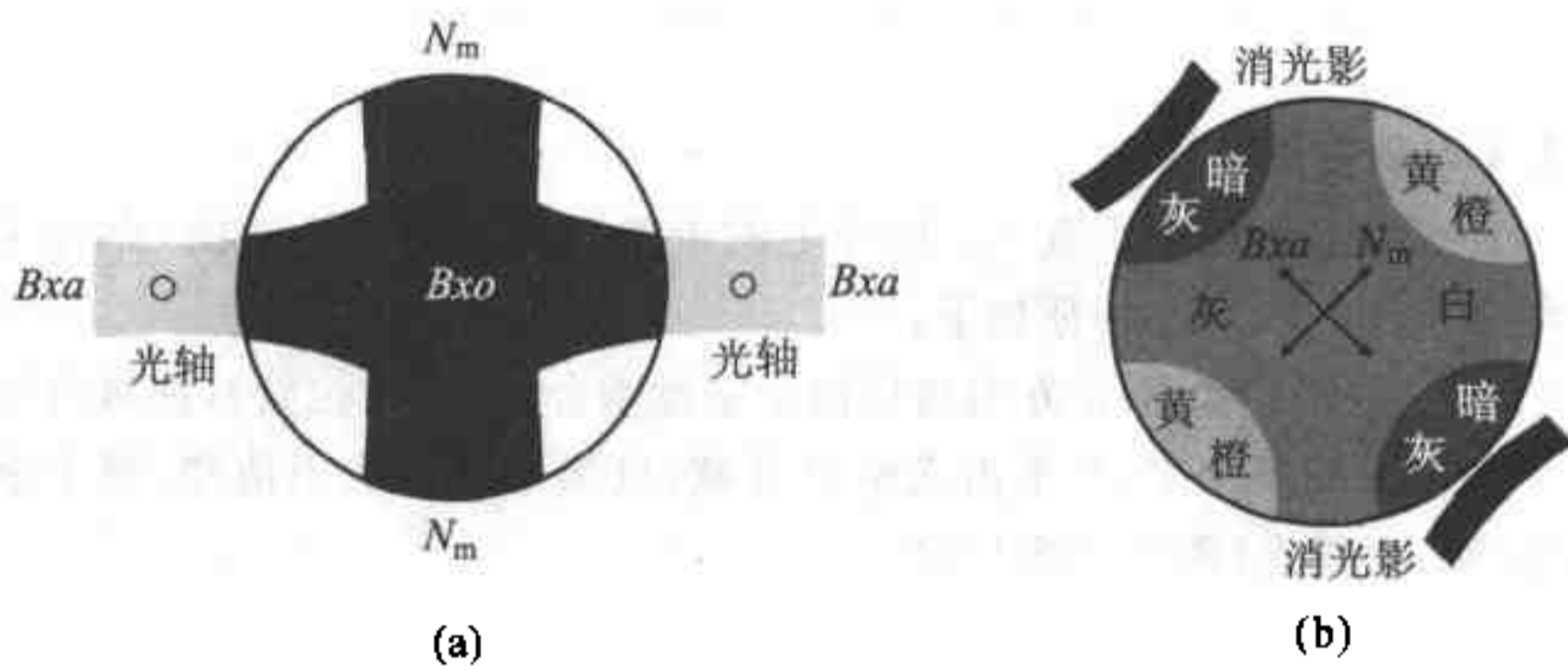


图 6-23 二轴晶矿物的 Bxo 干涉图

（a） 0° 位置；（b） 45° 位置

（2）被黑十字分割的四个象限内，呈现较低的干涉色，一般为 I 级灰到 I 级黄。当矿物双折射率较大时，可呈现较疏的哑铃状等色圈，两个“哑铃”的连线方向平行光轴面。

（3）转动载物台，黑十字很快分裂，并沿光轴面所在象限方向迅速退出视域（图 6-23（b））。

上述现象可以由垂直 Bxo 切面上的波向正投影图（图 6-24）加以解释：① 在 0° 位置，视域中心大部分入射锥光的椭圆半径方向与上、下偏光镜振动方向平行，故呈现粗大的黑十字消光影；② 当光轴面稍一偏离上、下偏

光镜振动方向,这些位置就不再是消光位,从而呈现明亮的干涉色。消光影退出方向指示了光轴面所在的方位,代表 Bxa 的振动方向;③ 在 45° 位置,在视域外面的光轴面方向上,有两个光轴出露点,故消光影由这个方向退出,干涉色也向这个方向降低;而沿 N_m 方向,干涉色由 Bxo 出露点(视域中心)向 N_m 出露点(视域边部)急剧增加。

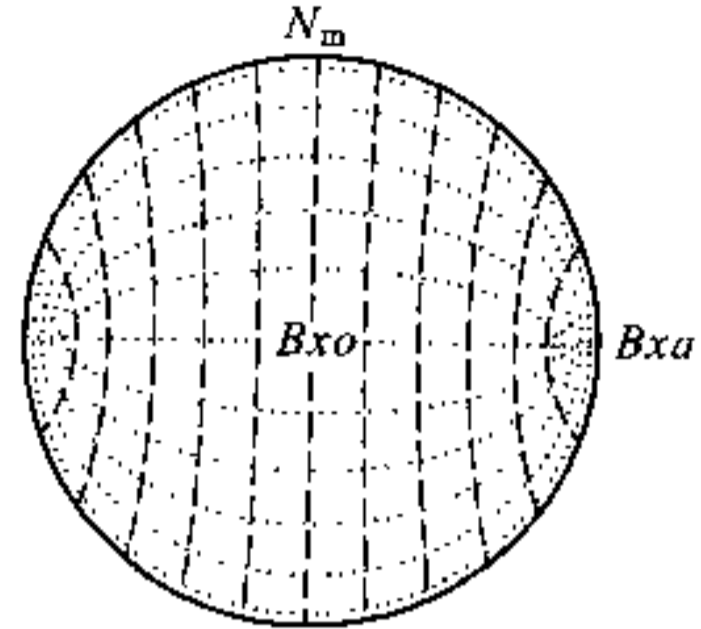


图 6-24 二轴晶矿物中垂直 Bxo 切面上的波向正投影图

通过上述分析,可以确定在视域中心的两束偏光为 Bxa 和 N_m ,前者的振动方向平行光轴面,后者的振动方向垂直光轴面。因此,在 45° 位置,插入试板,根据该区干涉色的升降变化,也可以判断光性符号。

然而,由于 Bxo 干涉图在形态上与 $2V$ 较大的 Bxa 干涉图、一轴晶矿物和二轴晶矿物的瞬变干涉图很相似,在矿物轴性不明的非定向切片上往往很难区分它们,因此这类干涉图很少用以鉴定光性符号。

6.3.4 瞬变干涉图

在二轴晶矿物中垂直 N_m 切片上的干涉图称为瞬变干涉图(亦称为光法线干涉图),其形态特征如下:

(1) 当 Bxa 和 Bxo 方向与目镜十字丝重合时(即 0° 位置),视域内呈现一个很粗大的黑十字,几乎占满整个视域,且黑十字轮廓不清楚,黑十字中心为 N_m 出露点(图 6-25 (a))。

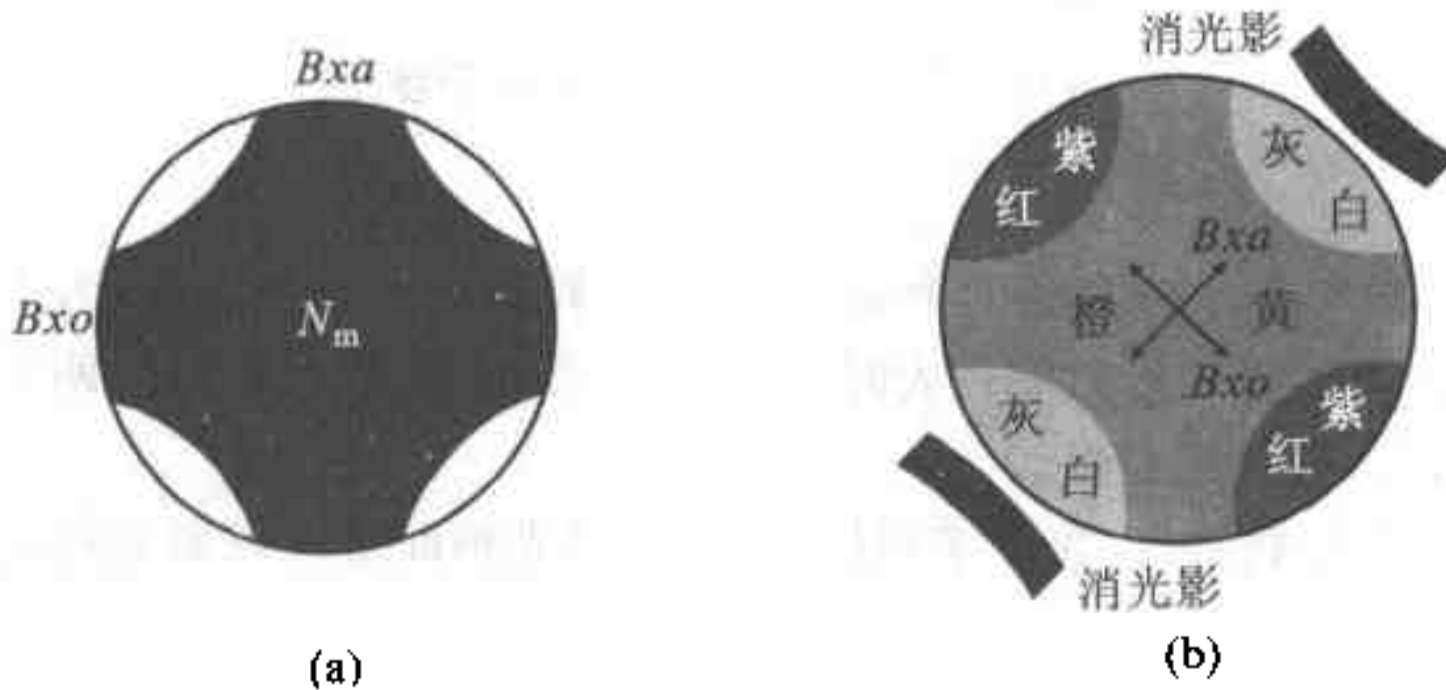


图 6-25 二轴晶矿物的瞬变干涉图

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

(2) 稍一转动载物台, 黑十字立即分裂, 并迅速退出视域(图 6-25 (b)), 因此亦被称为瞬变干涉图或闪图。

上述现象可以由垂直 N_m 切面上的波向正投影图(图 6-26)加以解释: ① 在 0° 位置时, 视域中 Bxa 和 Bxo 方向几乎都与上、下偏光镜振动方向一致, 故呈现粗大的黑十字消光影, 仅在四个象限的边缘略有斜交, 故呈暗灰干涉色; ② 稍一转动载物台, 视域中心部位的两束偏光的振动方向与上、下偏光镜振动方向斜交, 从而出现明亮的干涉色; ③ 干涉色自 N_m 出露点(视域中心)向 Bxo 出露点(即 Bxo 方向的两端)升高, 向 Bxa 出露点(即 Bxa 方向的两端)降低, 因为

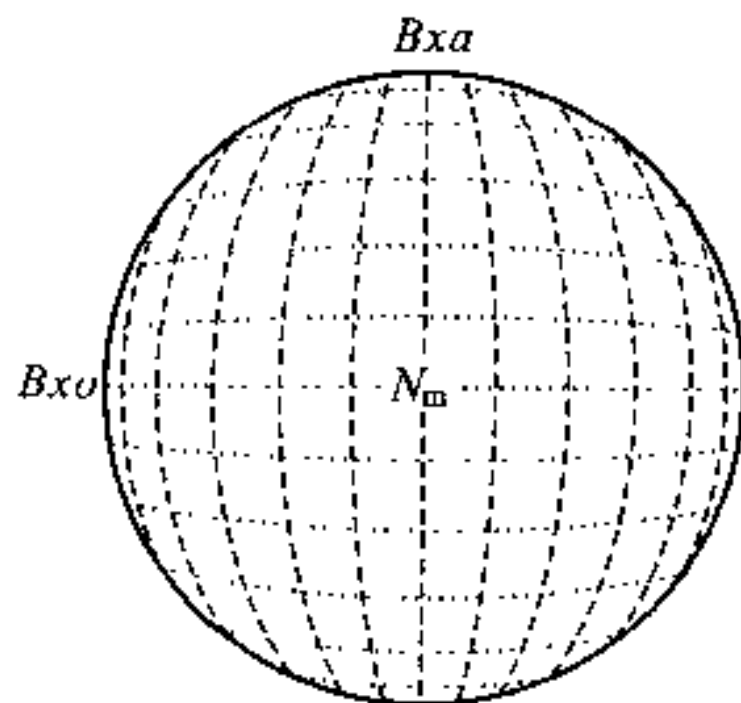


图 6-26 在二轴晶矿物中垂直 N_m 切面上的波向正投影图

无论光性正负, 垂直 Bxa 切面上的双折射率总是小于垂直 Bxo 切面上的双折射率($\Delta N_{\perp Bxa} < \Delta N_{\perp Bxo}$)。所以, 锥光中各光束的双折射率自 N_m 出露点(视域中心)向 Bxa 出露点的方向比向 Bxo 出露点的方向减少得快。虽然自视域中心向 Bxa 出露点和向 Bxo 出露点的各束锥光在切片中通过的路程在增加, 但在向 Bxa 出露点的方向变化时, 路程的增加不足以抵消双折射率的减低, 于是在该方向上边缘部分干涉色比中央部分低; 而在向 Bxo 出露点的方向变化时, 路程的增加比双折射率的降低更显著, 故在该方向上边缘部分干涉色比中央部分高。

在光轴角($2V$)很小的瞬变干涉图上, 稍一转动载物台, 黑十字一分为二, 分别沿一对角象限退出去。因为两个光轴很靠近 Bxa 方向, 所以黑十字分裂、退出的方向就是 Bxa 方向。此时, 可插入试板, 观察视域内干涉色的升降变化, 确定 Bxa 方向是 N_g , 还是 N_p , 从而鉴定光性符号。在光轴角($2V$)较大的瞬变干涉图上, 稍一转动载物台, 黑十字同时向四个象限方向退出去, 这样就无法确定 Bxa 和 Bxo 方向, 也就不能测定光性符号。

由以上特点可以看出, 用瞬变干涉图鉴定轴性和光性符号都是比较困难的, 它与 Bxo 干涉图、 $2V$ 较大的 Bxa 干涉图以及一轴晶矿物的瞬变干涉图很难区分, 因此很少使用。

6.3.5 偏心光轴干涉图和偏心干涉图

任意方位切片上呈现的干涉图称为偏心干涉图。如果在该干涉图上出

现光轴出露点,则称为偏心光轴干涉图。它们往往表现为上述四种干涉图的局部图像,因此转动载物台时出现比较复杂的变化。一般说来,只有近于垂直光轴的切面所呈现的偏心光轴干涉图和偏心干涉图可用于鉴定光性符号,其他类型的偏心干涉图没有鉴定意义。

用近于垂直光轴的偏心光轴干涉图和偏心干涉图来鉴定光性符号的步骤为:① 旋转载物台使消光弧弯曲,根据其凹凸方向确定锐角区和钝角区以及光轴面的位置,这样就确定了 Bxa 和 Bxo 相对 N_m 的方向;② 插入试板,观察干涉色的升降变化,确定 Bxa 方向(或 Bxo 方向)是 N_g 还是 N_p ,从而确定光性符号。现举两个实例来说明。

(1) 偏心光轴干涉图(图 6-27 (a)):光轴出露点位于视域内,但偏离视域中心。在 0° 位置,消光黑臂与目镜纵丝或横丝重合,因此该切面上显示的是偏心光轴干涉图,其等色圈的对称面方向代表光轴面位置。在 45° 位置,消光弧弯曲,根据其凹凸方向可判断锐角区和钝角区,然后用试板鉴定光性符号。消光弧的弯曲程度越大说明光轴角越大。

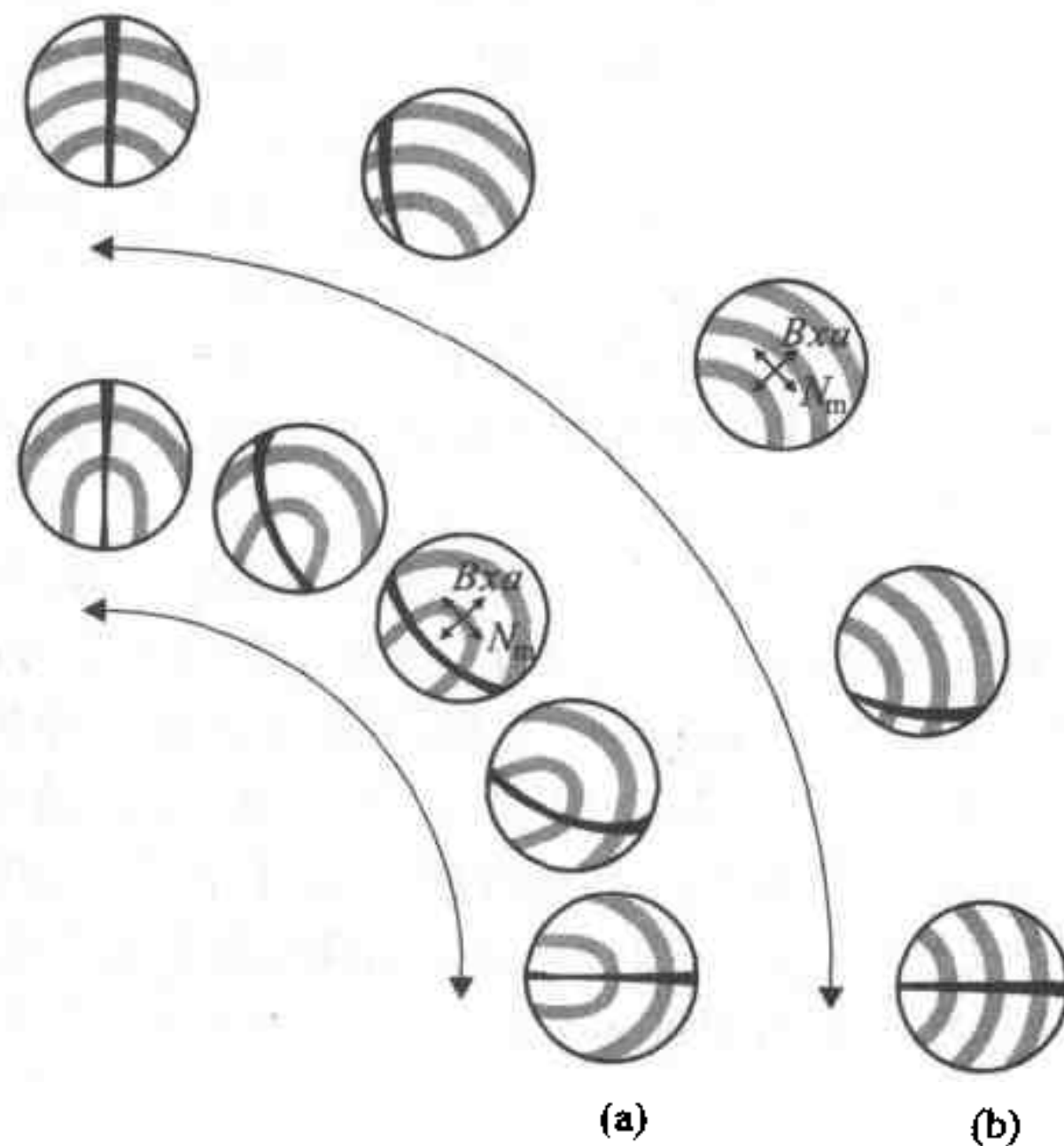


图 6-27 旋转载物台 90° 时,二轴晶矿物的偏心光轴干涉图和偏心干涉图的变化

(a) 偏心光轴干涉图; (b) 偏心干涉图

(2) 偏心干涉图(图 6-27 (b)):光轴出露点不在视域内,因此不能估计光轴角大小。旋转载物台时,消光弧略有弯曲,可勉强地区分锐角区和钝角区,从而也可以进行光性符号的判别。由于视域中看到的只是消光弧的一部分,而且消光弧较粗,界限不明显,有时连凹凸方向也不易确定,因而常发生鉴定错误。为此,可以把它作为一轴晶矿物的偏心干涉图处理,用于鉴定光性符号。具体的操作如下:寻找干涉色较低的矿物切面置于视域中心;旋转载物台,消光影近于平行目镜十字丝作上下、左右移动,但有扫动现象;如同对于一轴晶矿物的偏心干涉图,按黑臂移动规律确定视域中图像的象限号码;插入试板,检查该象限半径方向 N_e (或切线方向 N_o) 是 N_g , 还是 N_p , 从而确定该矿物的光性符号。

§ 6.4 光率体色散

白光是由七种频率和波长不同的单色光波组成的混合光波,这七种单色光在某些介质中的传播速度相差较大,即在同一种介质中它们的折射率可以大小不等。介质对不同单色光的折射率差别,称为折射率色散;而对于非均质矿物,除了折射率色散,它对不同单色光的双折射率也可以有不同的数值,称为双折率色散。因此,当白光通过晶体时,各种单色光所构成的光率体大小、形状(取决于主折射率的绝对值)及其光性方位(取决于主折射率的相对值)不尽相同,这种现象总称为光率体色散。

在等轴晶系矿物中,各种单色光构成的光率体都是同心圆球体,其形状、光性方位均无差别,仅光率体半径不同。

在一轴晶矿物中,各种单色光构成的光率体都是以晶体 c 轴(即光轴)为旋转轴的旋转椭球体,它们的光性方位是一致的,仅主折射率 N_e 和 N_o 大小各不相同,使光率体的大小和形状发生变化,如铜铀云母的紫光、绿光和红光的光率体分别为:

单色光	N_e	N_o	光性符号
紫光	1.647	1.651	负
绿光	1.634	1.634	正、负不分
红光	1.622	1.618	正

一轴晶矿物的光率体色散可以体现为双折射率色散,从而导致正交偏光系统下的异常干涉色,如上述的铜铀云母,以及鱼眼石、黄长石等。

在二轴晶矿物中,各种单色光构成的光率体均为三轴椭球体,但各种单

色光的主折射率大小发生变异,所以各种单色光的光率体大小、形状及光性方位相应地发生变化,从而导致光轴的位置、光轴面的位置、光轴角的大小等光性要素发生变化。这些变化引起了一系列显著而又复杂的色散现象,从而被归纳为以下几种色散类型。

6.4.1 斜方(晶系)色散

在斜方晶系强烈色散的矿物中具有典型的表现,故称为斜方色散。在斜方晶系矿物的光性方位中,各种单色光光率体的主轴均与三个结晶轴一致,但主轴(N_g 、 N_m 和 N_p)的大小各不相同,由此引起各种单色光光率体的光轴方位的变异,反映为光轴角的大小各不相同,故称为光轴角色散(图 6-28)。

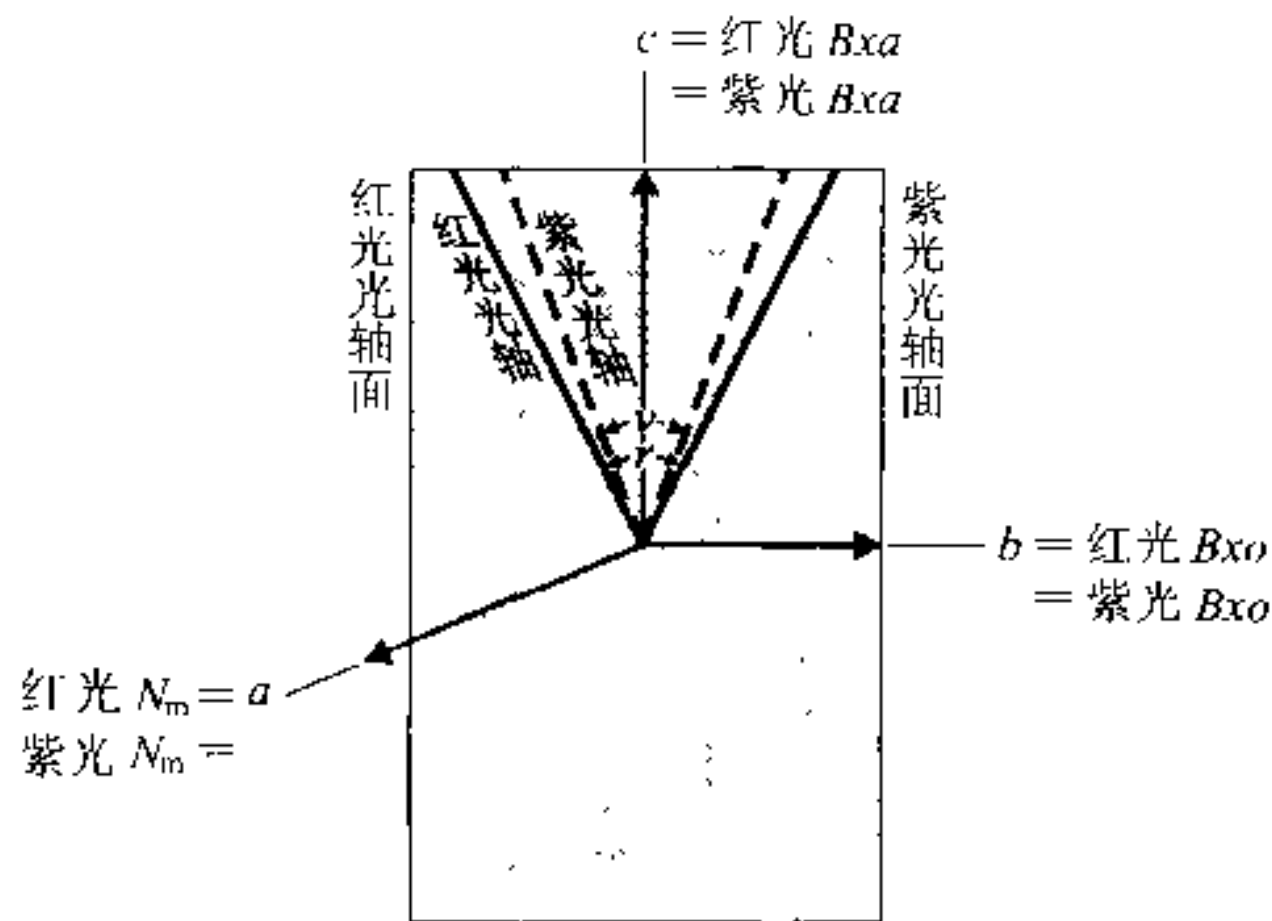
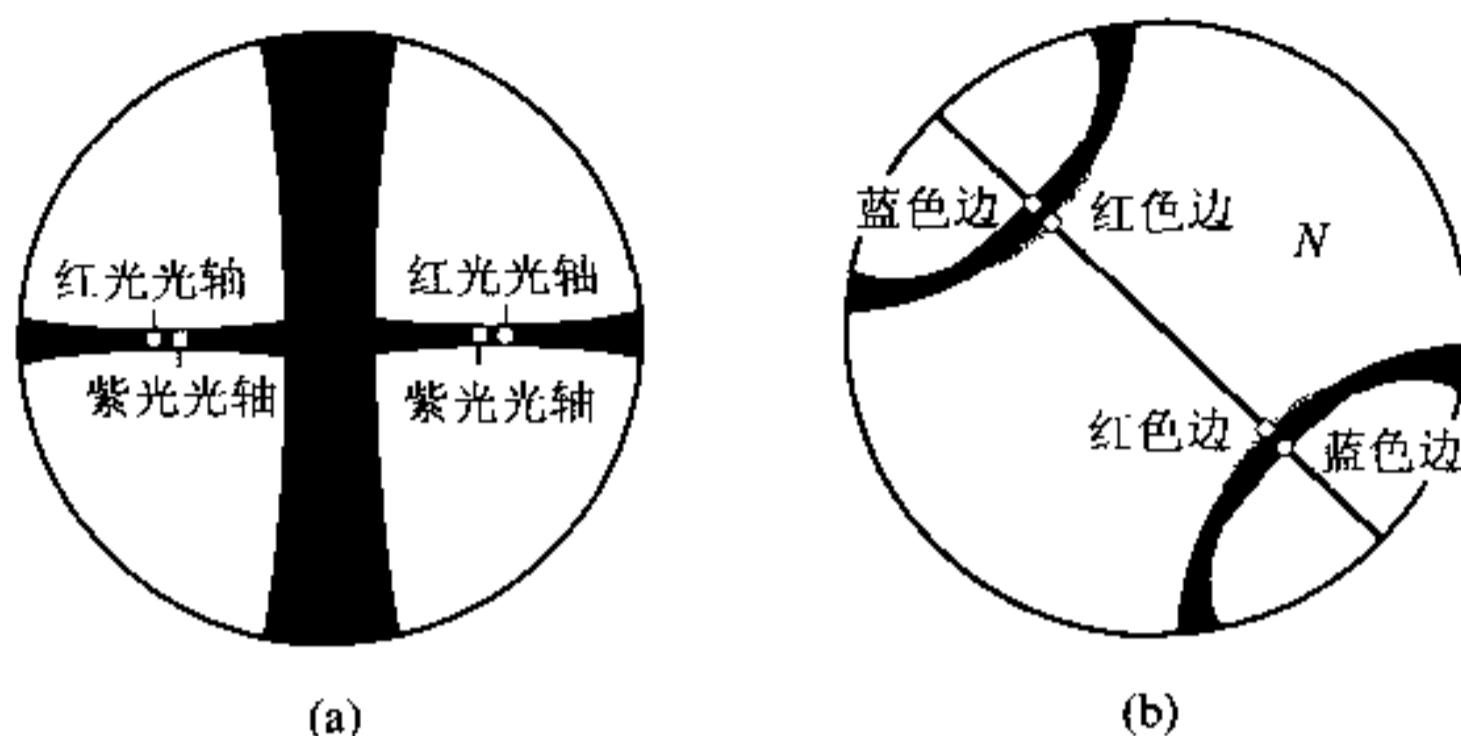


图 6-28 斜方晶系矿物的光轴角色散

在 Bxa 干涉图上,光轴角色散表现为:① 在 0° 位置,各种单色光光率体的光轴面都平行于目镜十字丝的横丝或纵丝,故无论它们的光轴位置如何,该方向上所有的透射光(平行光轴和斜交光轴)都处于消光位,故仍然为黑十字消光影的一条黑臂,即看不到任何色散现象(图 6-29 (a));② 但在 45° 位置,由于各种单色光的光轴角大小不等,如红光光轴角(以 r 表示)大于紫光光轴角(以 v 表示),导致两个消光弧的凸侧对称地出现红色边,它代表了紫光光率体的光轴出露点,紫光在此点附近的双折射率接近为零,故以此为顶点的消光弧为紫光的消光影,而红、橙光相对加强,产生一条红色边;两个消光弧的内侧对称地呈现蓝色边,代表红光消光弧(弧顶为红光光轴出露点),在此紫、蓝光相对加强,产生一条蓝色边(图 6-29 (b))。

图 6-29 在 Bxa 干涉图上的光轴角色散(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

由于红光和紫光代表着可见光谱的两端,它们的大小反映了同一晶体的光轴角的最大色散值,故一般光轴角色散以色散公式表示:① $r > v$ 表示红光光轴角大于紫光光轴角,如铁橄榄石、紫苏辉石、砂线石、红柱石、黄晶等;② $r < v$ 表示红光光轴角小于紫光光轴角,如镁橄榄石、顽火辉石、硬石膏、重晶石、金绿宝石等。

由于杂质元素的影响,有些矿物在不同的薄片中可以呈现不同的色散公式,如蓝线石、葡萄石等。这种特殊的现象同样具有光性鉴定意义,例如在橄榄石中具有 $r > v$ 色散公式的为负光性,而具有 $r < v$ 色散公式的为正光性。少数矿物不仅对不同单色光发生光轴角变异,而且发生光轴面方位的变异。例如,斜方晶系的板钛矿,它的红光光轴面为(001)(光轴角为 58°),而绿光光轴面为(010)(光轴角为 33°)。

6.4.2 单斜(晶系)色散

单斜晶系矿物中的色散称为单斜色散。除了发生上述光轴角色散以外,单斜晶系矿物中还可能发生光率体主轴方位的变化。根据单斜晶系矿物的光性方位,结晶轴 b 轴可以分别与光率体的 N_m 、 Bxa 、 Bxo 平行,从而导致下列三种不同类型的色散。

1. 倾斜色散

各种单色光光率体的 N_m 与 b 轴平行一致,而它们的 Bxa 和 Bxo 与 a 轴和 c 轴斜交的角度各不相同,由此引起各种单色光的光轴而在同一平面内发生倾斜位移,故称为倾斜色散(图 6-30)。

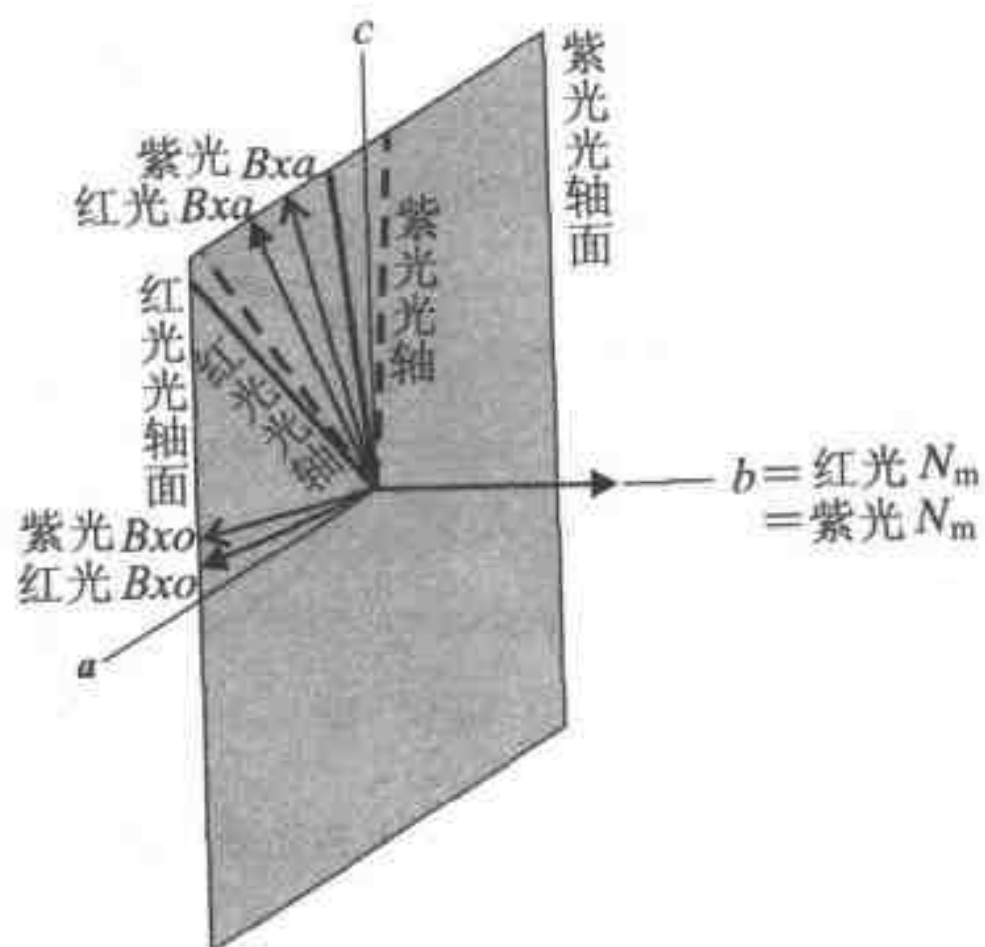


图 6-30 单斜晶系矿物的倾斜色散

在 Bxa 干涉图上, 倾斜色散表现为: ① 在 0° 位置, 各种单色光光率体的光轴面都平行于目镜十字丝的横丝或纵丝, 故无论它们的光轴位置如何, 该方向上所有的透射光(平行光轴和斜交光轴)都处于消光位, 故仍然为黑

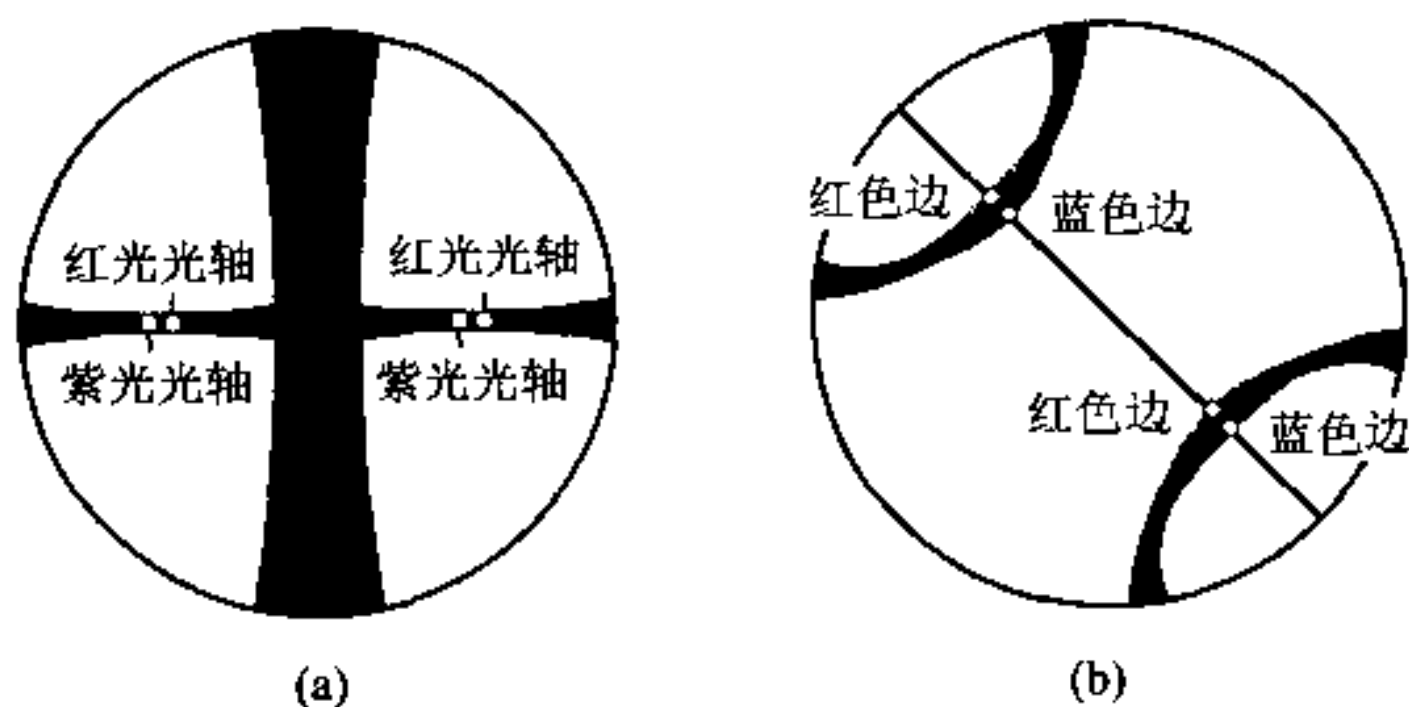


图 6-31 在 Bxa 干涉图上的倾斜色散

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

十字消光影的一条黑臂, 即看不到任何色散现象(图 6-31 (a)); ② 在 45° 位置, 由于各种单色光的 Bxa 在同一光轴面内依次错开, 如红光光轴右向倾斜, 而紫光光轴左向倾斜, 导致在一个消光弧的凸侧和在另一个消光弧的凹侧出现红色边, 代表紫光的消光弧(弧顶为紫光光轴出露点); 而在一个消

光弧的凹侧和在另一个消光弧的凸侧出现蓝色边,代表红光的消光弧(弧顶为红光光轴出露点)(图 6-31 (b))。

2. 交叉色散

各种单色光光率体的 Bxa 与 b 轴平行一致,而它们的 N_m 和 Bxo 与 a 轴和 c 轴斜交的角度各不相同,由此引起各种单色光的光轴而交叉于 b 轴,故称为交叉色散(图 6-32)。

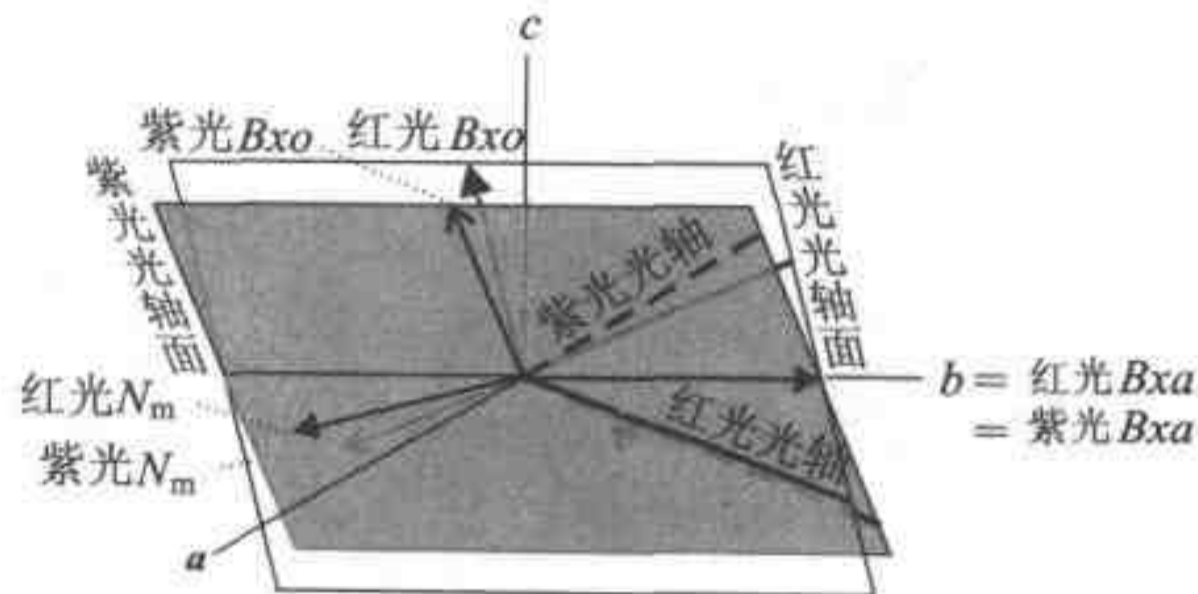


图 6-32 单斜晶系矿物的交叉色散

在 Bxa 干涉图上,交叉色散表现为:① 在 0° 位置,各种单色光光率体的光轴面交叉于 Bxa 方向,故它们不再与目镜十字丝的横丝平行,蓝色边的位置代表红光的光轴面(其最细的部位为红光光轴出露点),而红色边的位置代表紫光的光轴面(其最细的部位为紫光光轴出露点),两者交叉分布(图 6-33 (a));② 在 45° 位置,由于红光光轴面与紫光光轴面交叉分布,因此表示红光消光弧的蓝色边和紫光消光弧的红色边以 Bxa 出露点(即视域中心)为中心各自呈对称分布(图 6-33 (b))。

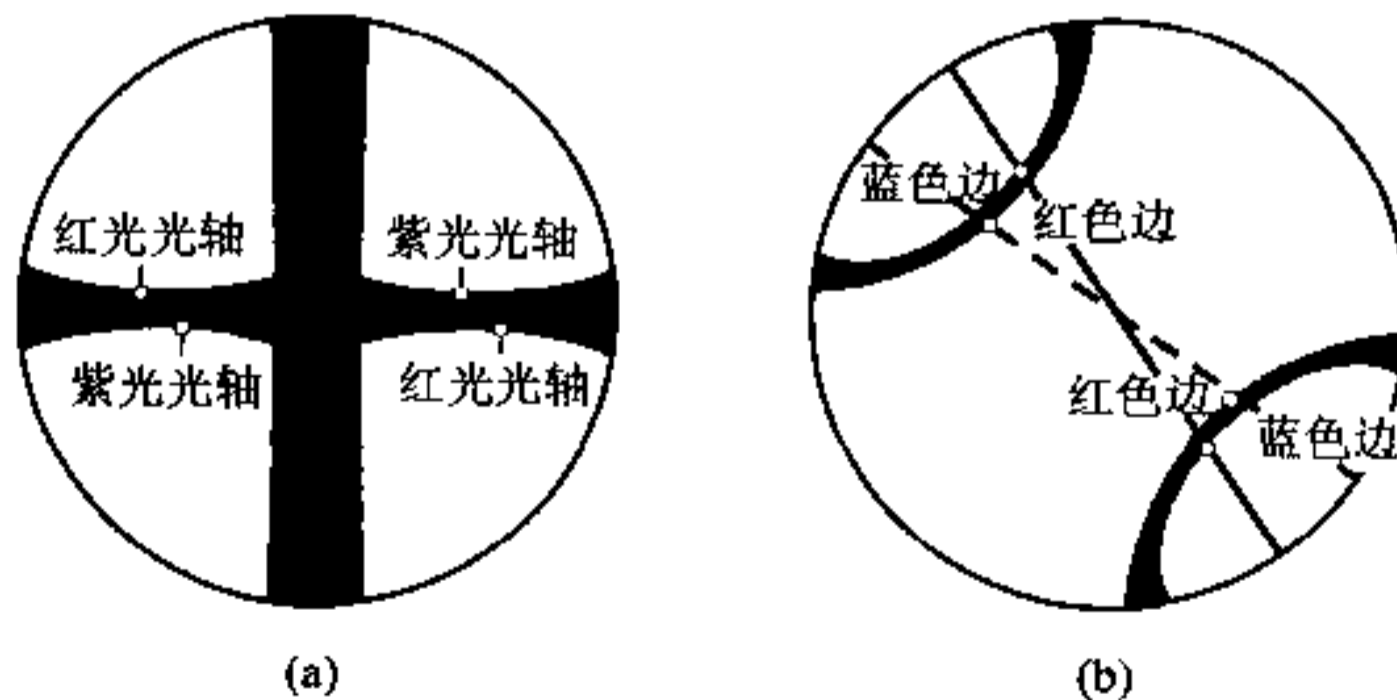


图 6-33 在 Bxa 干涉图上的交叉色散

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

3. 水平色散

各种单色光光率体的 Bxo 与 b 轴平行一致, 而它们的 N_m 和 Bxa 与 a 轴和 c 轴斜交的角度各不相同, 由此引起各种单色光的光轴面在 $+\beta$ 角内平行延伸, 故称为水平色散(图 6-34)。

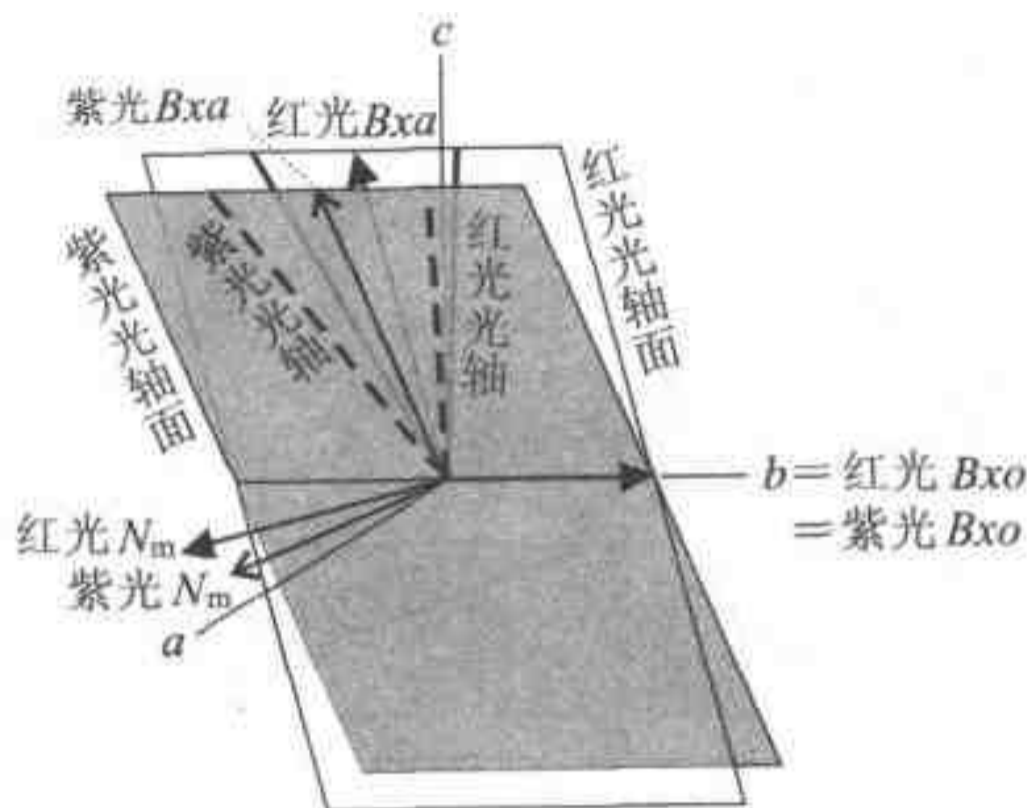


图 6-34 单斜晶系矿物的水平色散

在 Bxa 干涉图上, 水平色散表现为: ① 在 0° 位置, 各种单色光光率体的光轴面平行于目镜十字丝的横丝, 但不重合, 蓝色边的位置代表红光的光轴面, 而红色边的位置代表紫光的光轴面, 两者平行地分布在 Bxa 出露点的两侧(图 6-35 (a)); ② 在 45° 位置, 由于红光光轴面与紫光光轴面在垂直 Bxa 切面上呈两条平行线出现, 导致代表红光消光弧的蓝色边和代表紫

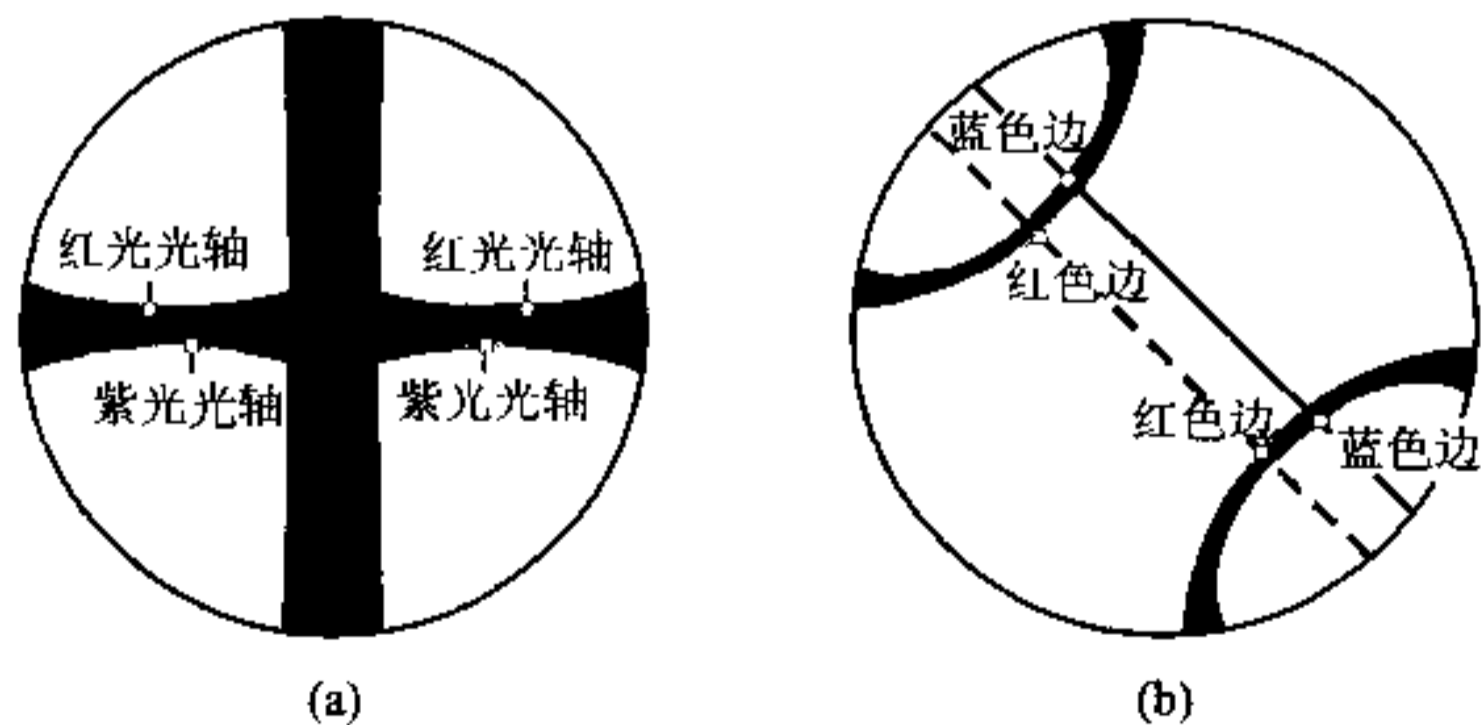


图 6-35 在 Bxa 干涉图上的水平色散

(a) 0° 位置; (b) 45° 位置

光消光弧的红色边在垂直 N_m 方向上平行分布(图 6-35 (b))。

6.4.3 三斜(晶系)色散

三斜晶系矿物的三个结晶轴与光率体的三个主轴都是斜交的,故其色散现象较为复杂。在 Bxa 干涉图上,黑带两侧的红色边和蓝色边呈不对称分布,故形成不对称色散。

在 Bxa 干涉图上,不仅可以观察和确定上述各种色散类型和色散公式,而且可以判别色散强度,即红色边和蓝色边的显著程度。通常把色散强度分为强、中、弱三个级别,如榴石色散很强(富钛矿物皆有较强色散),黑云母色散中等,而长石色散微弱。对于斜方晶系矿物,在其光轴干涉图上也可以确定色散公式和色散强度。

习 题 六

1. 在偏光显微镜下,如何区别均质矿物和垂直光轴切面的非均质矿物?

2. 在电英岩薄片,发现有各种切面的电气石颗粒(其 N_o = 暗绿色, N_e = 淡黄色, $\Delta N_{max} = 0.026$)。试问:① 在哪几种类型的干涉图上,可以鉴定电气石的光性符号? ② 如何在单偏光系统和正交偏光系统下寻找呈现这些干涉图的电气石切面? ③ 能否仅在正交偏光系统下,用试板直接测定呈现瞬变干涉图的电气石颗粒的光性符号? 为什么? ④ 对于具显著多色性的二轴晶矿物,是否也可以在正交偏光系统下确定其光性符号? 为什么?

3. 假定某矿物的 $\Delta N_{max} = 0.040$, $(+)$ $2V = 80^\circ$, 则要分别观察下列四种干涉图:① 光轴干涉图;② 瞬变干涉图;③ Bxa 干涉图;④ Bxo 干涉图,应该如何在正交偏光系统下找到上述四个切面?

4. 对二轴晶矿物,可否在正交偏光系统下寻找一个干涉色尽可能低的切面,然后在聚敛偏光系统下,用鉴定一轴晶矿物偏心光轴干涉图的原理和方法,去鉴定该矿物的光性符号? 如可以,试阐述其原因。

参 考 文 献

1. 陈芸菁. 晶体光学原理. 北京:地质出版社,1987.
2. 季寿元,王德滋. 晶体光学. 北京:人民教育出版社,1961.
3. 李德惠. 晶体光学. 北京:地质出版社,1993.
4. 曾广策. 透明造岩矿物与宝石晶体光学. 武汉:中国地质大学出版社,1997.
5. Bloss F D. An introduction to the methods of optical crystallography. New York; Holt, Rinehart and Winston, 1961. 294 pp.
6. Ehlers E G. Optical Mineralogy. Vol. 1: Theory and Techniques. Blackwell Scientific Publications, 1987. 158 pp.
7. Hartshorne N H. and Stuart A. Practical optical crystallography, 2nd edition, New York: American Elsevier, 1969. 326 pp.
8. Kerr P F. Optical Mineralogy. 4th edition, New York; McGraw—Hill, 1977. 492 pp.
9. Philips W R. and Griffin D T. Optical mineralogy, the nonopaque minerals. San Francisco; W H Freeman, 1981. 677 pp.
10. Shelley D. Optical mineralogy, 2nd edition, New York; Elsevier, 1985. 321 pp.
11. Wahlstrom E E. Optical mineralogy, 5th edition, New York; John Wiley & Sons, 1979. 488 pp.
12. Winchell A N. Elements of optical mineralogy. Part I: Principles and methods. New York; John Wiley & Sons, 1937. 263 pp.

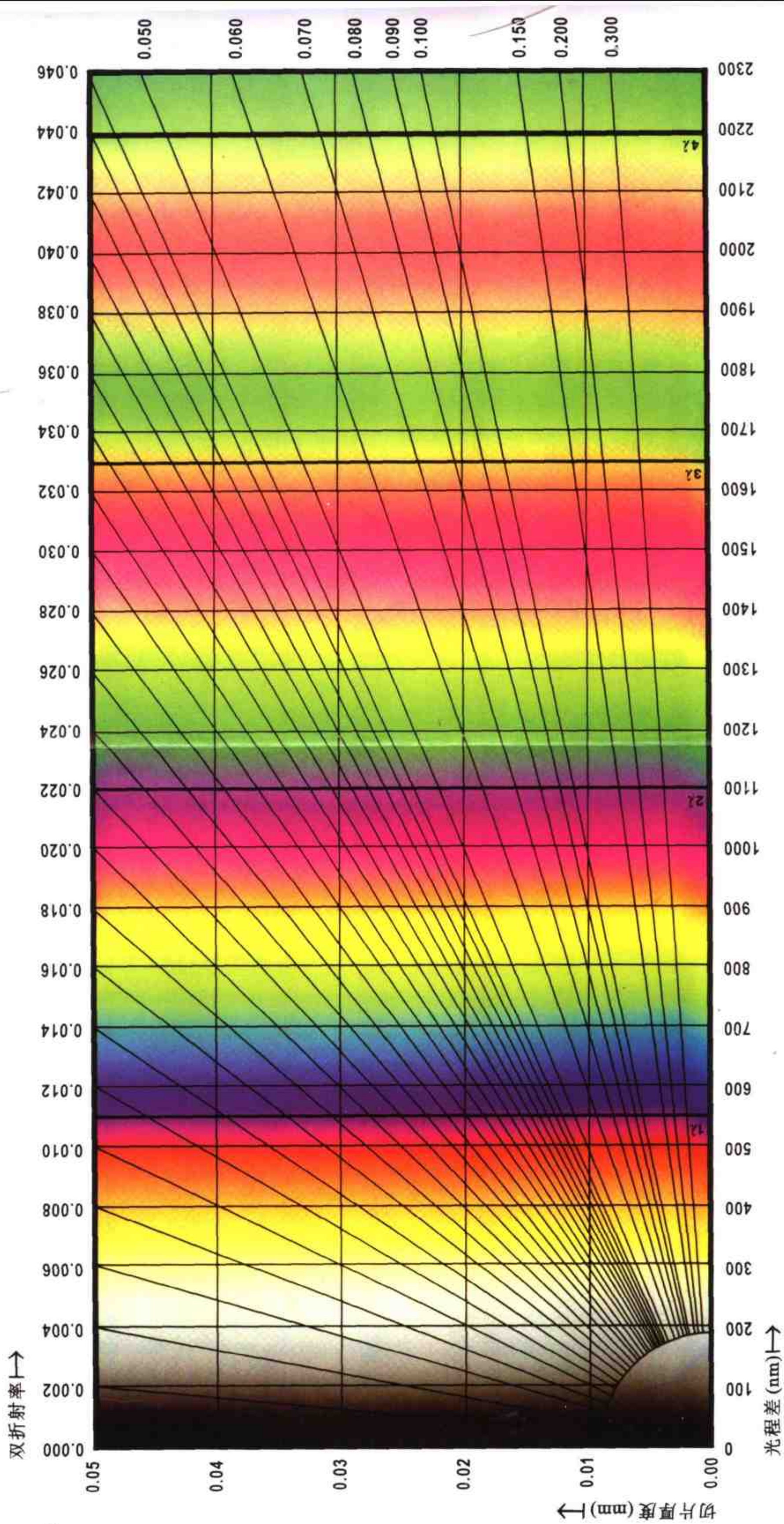
《晶体光学》词汇的中英对照及其索引

- 阿贝折射率仪 Abbe refractometer, 6
薄片 thin section, 37
贝克线 Becke line, 54
贝克线色散 double Becke line, 55
波前 wave front, 5
波向正投影图 Skiodrome, 91, 98, 102, 109, 111
勃氏镜 Bertrand lens, 33, 89
补色 compensatory color, 75
补色器 compensator, 75
糙面 rough surface, 52
常光 ordinary ray, 9
粗动螺旋 coarse vertical stage adjustment, 30
传播方向 direction of propagation, 1
单偏光系统 monoscope, 33, 39
单色光 monochromatic light, 2, 45
单斜色散 monoclinic dispersion, 115
等色圈 isochrome, isochromatic curve, 90, 99
对称消光 symmetrical extinction, 79
钝角等分线 obtuse bisectrix, 20
钝角等分线 ($B_{\alpha 0}$) 干涉图 obtuse bisectrix figure, 109
多色性 pleochroism, 47
多色性公式 pleochroism formula, 48
二轴晶 biaxial crystal, biaxial material, biaxial substance, 9, 18
二轴晶负光性晶体 negative biaxial crystal, 20
二轴晶干涉图 biaxial interference figure, 99
二轴晶光率体 biaxial indicatrix, 18
二轴晶正光性晶体 positive biaxial crystal, 20
反光镜 reflecting mirror, 30
反射光 reflecting light, 4
反射角 angle of reflection, 5
放大倍数 magnification, 32
非常光 extraordinary ray, 9
非均质矿物 anisotropic mineral, 6
菲涅尔定律 Fresnel rule, 100, 9
负延性 negative elongation, 82
干涉 interference, 61
干涉图 interference figure, 89
干涉色 interference colors, 66
干涉色级序 interference color order, 68
干涉色色谱表 interference color chart, Michel Levy chart, 69, 124
光波 light wave, 1
光程差 path difference, retardation, 61
光的波长 wavelength of light, 1
光的频率 frequency of light, 1
光的速度 velocity of light, 1
光法线干涉图 optic normal figure, 97, 110
光率体 optical indicatrix, 12
光率体色散 indicatrix dispersion, 113
光谱 light spectrum, 2
光线 light ray, 4
光性方位 optical orientation, 26
光性非均质体 optical anisotropic sub-

- stance, 6
光性符号 optic sign, 15, 20
光性均质体 optical isotropic substance, 6
光轴 optic axis, 9
光轴出露点 melatope, 90, 99
光轴干涉图 optic axis figure, 90, 106
光轴角 optic angle, 20, 108
光轴角色散 dispersion of the optic axis, 114
光轴面 optic plane, 20
假贝克林 false Becke line, 55
交叉色散 crossed dispersion, 117
解理 cleavage, 41
解理角 cleavage angle, 43
解理完善程度 cleavage quality, 41
结晶轴 crystal axis, 25
晶体 crystal, 5
镜臂 microscope stand, 30
镜筒 observation tube, 32
镜座 microscope base, 30
聚敛偏光系统 conoscope, 34, 88
均质矿物 isotropic mineral, 6
可见光 visible light, 2
快光 fast ray, 7
轮廓 edge, 50
慢光 slow ray, 7
目镜 ocular, eyepiece, 33
偏光 polarized light, 3
偏光器 polaroid, 3
偏光显微镜 polarizing microscope, 30
偏心光轴干涉图 inclined optic axis figure, off-center optic axis figure, 95, 111
偏振 polarization, 3
偏振面 polarized plane, 3
平面偏光 plane polarized light, 3
平行消光 parallel extinction, straight extinction, 78
倾斜色散 inclined dispersion, 115
全消光 complete extinction, 60
入射角 angle of incidence, 5
入射面 incident plane, 9
锐角等分线 acute bisectrix, 20
锐角等分线 (Bxa)干涉图 acute bisectrix figure, 99
三斜色散 triclinic dispersion, 119
色散 dispersion, 56, 71, 113
上偏光镜 upper polarizer, analyzer, crossed polarizer, 33
试板 plate, 76
试板孔 accessory slot, 32
石膏试板 gypsum plate, first-order red plate, 76
石英楔 quartz wedge, 66, 78
树脂 resin, 37
数值孔径 numerical aperture, 32
双晶 twin, 84
双折射 birefringence, double refraction, 6
双折射率 birefractive index, 8
双折射率色散 birefringence dispersion, 71
水平色散 horizontal dispersion, 118
瞬变干涉图 (闪图) flash figure, 97, 110
斯涅耳定律 Snell's law, 4
锁光圈 diaphragm, 31

- 透射光 transmission light, 30
 突起 relief, 53
 微动螺旋 fine vertical stage adjustment, 30
 物镜 objective, objective lens, 32
 吸收性 absorption, 49
 吸收性公式 absorption formula, 50
 下偏光镜 lower polarizer, polarizer, 31
 消光 extinction, 59
 消光角 extinction angle, 79
 消光类型 type of extinction, 78
 消光位 extinction position, 60
 消光影 isogyre, 92, 98, 103
 斜方色散 rhombic dispersion, 114
 斜消光 inclined extinction, 78
 选择性吸收 differential absorption, 45
 颜色 color, 45
 延长方向 elongation direction, 82
 延性 elongation, 82
 延性符号 sign of elongation, 82
 一轴晶 uniaxial crystal, uniaxial material, uniaxial substance, 9, 12
 一轴晶负光性晶体 uniaxial negative crystal, 16
 一轴晶干涉图 uniaxial interference figure, 90
 一轴晶光率体 uniaxial indicatrix, 12
 一轴晶正光性晶体 uniaxial positive crystal, 15
 异常干涉色 anomalous interference color, 70
 圆切面 circular section, 17, 23
 云母试板 mica plate, 77
 载物台 rotating stage, 31
 折射 refraction, 4
 折射光 refraction light, 4
 折射角 angle of refraction, 4
 折射率 index of refraction, refractive index, 5
 折射率色散 refractive index dispersion, 55
 折射率仪 refractometer, 5
 振动 vibration, 1
 振动方向 vibration direction, 1
 振动面 vibration plane, 3
 正交偏光系统 orthoscope, 33, 59
 正延性 positive elongation, 82
 中心校正 centering of objectives, 34
 主轴面 principal plane, 19
 主折射率 principal refractive index, 18
 锥光镜 condenser, condensing lens, 31

干涉色谱表



[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 晶体光学

作者 =

页数 = 1 2 3

S S号 = 0

出版日期 =

V s s号 = 9 4 6 0 7 2 8 9

封面
书名
版权
前言
目录

录
前言
第一章基本概念
§ 1 . 1 光的性质与传播
§ 1 . 2 自然光和偏光
§ 1 . 3 光的折射与全反射
§ 1 . 4 折射率与折射率仪
§ 1 . 5 光的双折射
§ 1 . 6 一轴晶和二轴晶
习题一
第二章光率体
§ 2 . 1 光率体
§ 2 . 2 一轴晶光率体
§ 2 . 3 二轴晶光率体
§ 2 . 4 光率体的主要参数
§ 2 . 5 光性方位
习题二
第三章偏光显微镜
§ 3 . 1 偏光显微镜的构造
§ 3 . 2 偏光显微镜的光学系统
§ 3 . 3 偏光显微镜的调节
§ 3 . 4 薄片的制作
习题三
第四章单偏光系统下晶体的光学性质
§ 4 . 1 形态

- § 4 . 2 解理
- § 4 . 3 选择性吸收
- § 4 . 4 界面

习题四

第五章正交偏光系统下晶体的光学性质

- § 5 . 1 消光
- § 5 . 2 干涉原理
- § 5 . 3 干涉色
- § 5 . 4 干涉色级别的确定
- § 5 . 5 补色原理与补色器
- § 5 . 6 消光类型与消光角
- § 5 . 7 延性
- § 5 . 8 双晶

习题五

第六章聚敛偏光系统下晶体的光学性质

- § 6 . 1 聚敛偏光系统
- § 6 . 2 一轴晶矿物的干涉图
- § 6 . 3 二轴晶矿物的干涉图
- § 6 . 4 光率体色散

习题六

参考文献

《晶体光学》词汇的中英对照及其索引