

# 烧结球团矿 微观结构

Microstructure of  
Sinter and Pellet

陈耀铭 陈锐 编著



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

# 烧结球团矿微观结构

陈耀铭 陈 锐 编著



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

## 内容提要

本书全面论述了烧结球团矿微观结构的基本理论;系统地介绍了矿相鉴定技术与方法;总结了人造矿物光学特性;归纳了烧结球团矿微观结构特点及矿物的结晶规律;指明了烧结球团矿中的优劣现象及改善微观结构的先进方法和技术,内容全面深入,取材新颖。本书可作为钢铁冶金、矿物加工有关专业工程技术人员的参考书,也可作为高等学校高年级学生及研究生的教材。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

烧结球团矿微观结构/陈耀铭,陈锐编著. —长沙:中南大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5487-0419-5

I. 烧... II. ①陈... ②陈... III. 烧结矿:球团矿-超微结构 IV. ①TF046.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第206826号

---

## 烧结球团矿微观结构

陈耀铭 陈锐 编著

---

责任编辑 刘颖维

责任印制 文桂武

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙超峰印刷有限公司

---

开 本 720×1000 B5  印张 16  字数 274千字

版 次 2011年12月第1版  2011年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5487-0419-5

定 价 58.00元

---

图书出现印装问题,请与经销商调换

# 序

陈耀铭同志长期从事烧结球团矿矿相鉴定工作，经过多年在实践工作中的积累编写了《烧结球团矿微观结构》，该书的出版值得庆贺！

矿相鉴定是一门高深的学问，矿物千万种，微观结构复杂纷繁，牵涉的知识面广，是一门容纳了多学科的交叉学科。研究和发展这一学科，对于进一步深入研究烧结球团矿，优化高炉炉料，促进钢铁工业的发展十分有利。

《烧结球团矿微观结构》自成一体，选题新颖，构思精细，深入浅出地阐述了矿相鉴定的基本理论与方法，为如何做好这项工作进行了奠基辅路，并对怎样改善烧结球团矿微观结构指明了方向，同时也介绍了很多宝贵经验，提供了很多珍贵的矿物图片，也提出了很多新思想、新观点、新方法，创造性地发展了矿相鉴定理论，是一本值得一读的好书。

姜 涛

中南大学

2011年5月15日

# 前 言

许多学生和在同厂的同志希望我写一本关于烧结球团矿矿相鉴定方面的书。为了不负重托，将多年矿相鉴定实践和收集的资料，特意编成了《烧结球团矿微观结构》一书献给大家。

《烧结球团矿微观结构》是应用光性矿物学、晶体光学、烧结球团学、物理化学的基本原理，在光学显微镜下观察分析烧结球团矿微观结构与其质量及工艺之间相互关系的一门交叉学科。该学科目前在冶金工业中得到广泛地应用和重视，这对于促进我国钢铁工业的发展，尤其是对我国烧结球团矿理论的丰富和完善，具有十分重要的意义。

本书在解剖烧结球团矿微观结构的同时，总结了烧结矿微观结构中的三要素，归纳了小块烧结矿同心环带结构特征，揭示了氧化球团矿中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  结晶规律，分析了矿相与工艺的关系，阐述了改进微观结构的先进方法与技术，列举了许多矿相鉴定实例，具有独特的理论和创新思维。

全书共分8章。第1、2、3、4、5、6章由陈耀铭编写，第7、8章由陈锐编写，全书由罗贤昌教授审稿。在编写过程中得到了教研室教师和同学们的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，缺点、错误在所难免，恳请读者指正！

编 者

2011年5月

## 目 录

第1章 绪论 .....	(1)
1.1 研究烧结球团矿微观结构的目与内容 .....	(1)
1.1.1 研究微观结构的目与内容 .....	(1)
1.1.2 研究微观结构的内容 .....	(2)
1.2 研究微观结构的基础知识 .....	(2)
1.2.1 晶体光学基础知识 .....	(2)
1.2.2 偏光显微镜及其观察内容 .....	(14)
1.2.3 反光显微镜及其观察内容 .....	(31)
思考题 .....	(36)
第2章 制片与矿物鉴定 .....	(37)
2.1 制片过程 .....	(37)
2.2 烧结球团矿矿相鉴定的方法及步骤 .....	(39)
2.3 微观测试精密仪器的应用 .....	(40)
2.3.1 扫描电镜的应用 .....	(40)
2.3.2 电子探针的应用 .....	(43)
2.3.3 X射线衍射分析 .....	(44)
2.3.4 差热分析仪的应用 .....	(44)
思考题 .....	(45)
第3章 常见矿物的光学性质 .....	(46)
3.1 不透明或半透明矿物的光学性质 .....	(46)
3.2 透明矿物的光学性质 .....	(55)
3.3 人造矿矿物光学性质的特点 .....	(63)
3.4 矿物熔点与矿物结晶规律 .....	(65)
3.5 矿相与工艺的关系 .....	(66)
思考题 .....	(68)
第4章 烧结矿微观结构 .....	(69)
4.1 烧结矿的矿物组成 .....	(69)
4.1.1 矿物组成 .....	(69)
4.1.2 影响烧结矿矿物组成的因素 .....	(70)
4.2 烧结矿微观结构 .....	(70)
4.2.1 烧结矿微观结构中的三要素 .....	(70)
4.2.2 烧结矿同心环带微观结构 .....	(74)
4.3 显微结构与烧结矿质量 .....	(77)
4.3.1 铁酸钙与烧结矿质量 .....	(78)
4.3.2 固相结晶与烧结矿质量 .....	(81)
4.3.3 硅酸钙的膨胀与烧结矿质量 .....	(83)

4.3.4	矿物组成与烧结矿质量 .....	(83)
4.4	烧结矿理想的微观结构 .....	(86)
4.4.1	理想烧结矿微观结构的形成 .....	(86)
4.4.2	理想的烧结矿微观结构 .....	(88)
4.5	改善烧结矿微观结构的先进方法与技术 .....	(88)
4.5.1	添加蛇纹石 .....	(89)
4.5.2	添加橄榄石 .....	(89)
4.5.3	高速搅拌及分割制粒技术 .....	(90)
4.5.4	双球(双碱度)烧结技术 .....	(91)
4.5.5	添加硼泥 .....	(91)
4.6	烧结矿微观结构实例 .....	(92)
4.6.1	熔剂性烧结矿微观结构 .....	(92)
4.6.2	高碱度烧结矿微观结构 .....	(95)
	思考题 .....	(109)
<b>第5章</b>	<b>球团矿微观结构 .....</b>	<b>(111)</b>
5.1	球团矿与高炉炼铁 .....	(111)
5.2	球团矿的矿物组成 .....	(115)
5.3	球团矿的微观结构 .....	(115)
5.3.1	球团矿中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 结晶规律 .....	(115)
5.3.2	球团制备中各阶段的球团微观结构 .....	(119)
5.4	改善球团矿微观结构的先进方法与技术 .....	(121)
5.4.1	优化配矿 .....	(121)
5.4.2	添加白云石或者石灰石 .....	(123)
5.4.3	添加蛇纹石 .....	(123)
5.4.4	添加有机黏结剂 .....	(123)
5.4.5	物料进行高压辊磨 .....	(123)
5.5	典型球团矿微观结构实例 .....	(124)
5.5.1	自熔性球团矿微观结构 .....	(124)
5.5.2	硫酸渣球团矿显微结构 .....	(131)
5.5.3	锰矿球团显微结构 .....	(134)
5.5.4	红土镍矿球团显微结构 .....	(138)
5.5.5	澳大利亚氧化球团矿显微结构 .....	(138)
5.5.6	巴西氧化球团矿显微结构 .....	(141)
5.5.7	日本氧化球团矿显微结构 .....	(142)
	思考题 .....	(143)
<b>第6章</b>	<b>其他人造矿显微结构 .....</b>	<b>(144)</b>
6.1	高炉渣显微结构 .....	(144)
6.1.1	碱性高炉渣 .....	(144)
6.1.2	酸性高炉渣 .....	(144)
6.1.3	高硫高炉渣 .....	(145)
6.1.4	高铝高炉渣 .....	(145)

6.1.5	高钛高炉渣	(145)
6.1.6	锰铁高炉渣	(146)
6.2	钢渣显微结构	(146)
6.2.1	碱性转炉渣	(146)
6.2.2	碱性平炉渣	(146)
6.2.3	碱性电炉渣	(146)
6.3	陶瓷显微结构	(147)
6.3.1	传统陶瓷	(147)
6.3.2	近代陶瓷	(148)
6.4	水泥显微结构	(149)
6.5	铸石显微结构	(149)
6.6	耐火材料显微结构	(150)
6.6.1	硅砖	(151)
6.6.2	白云石砖	(151)
6.6.3	高铝砖	(153)
6.6.4	黏土砖	(153)
	思考题	(154)
<b>第7章</b>	<b>计算机在矿相鉴定中的应用</b>	<b>(155)</b>
7.1	烧结球团矿矿相数据库的建立	(155)
7.1.1	显微图像演示	(156)
7.1.2	专题研究	(156)
7.1.3	矿相知识网络化	(157)
7.2	显微照相与矿物计量分析	(157)
7.2.1	计算机对显微图像的处理	(157)
7.2.2	应用电子计算机进行计量分析	(158)
7.3	制片自动化	(158)
7.3.1	光片制作自动化	(158)
7.3.2	薄片制作自动化	(159)
	思考题	(159)
<b>第8章</b>	<b>化学腐蚀法和结晶法的应用</b>	<b>(160)</b>
8.1	化学腐蚀法在矿相鉴定中的应用	(160)
8.2	化学结晶法在矿相鉴定中的应用	(161)
8.2.1	铁(Fe)的化学结晶法	(161)
8.2.2	钙(Ca)的化学结晶法	(162)
8.2.3	镁(Mg)的化学结晶法	(163)
8.2.4	铝(Al)的化学结晶法	(164)
8.2.5	硅(Si)的化学鉴定法	(165)
8.2.6	锰(Mn)的化学鉴定法	(165)
8.2.7	硫(S)的化学鉴定法	(165)
8.2.8	磷(P)的化学结晶法	(167)
8.2.9	钾(K)的化学结晶法	(168)



8.2.10	硼(B)的化学鉴定法	(168)
8.2.11	砷(As)的化学结晶法	(169)
8.2.12	氟(F)的化学鉴定法	(170)
8.2.13	锌(Zn)的化学结晶法	(171)
8.2.14	钛(Ti)的化学鉴定法	(171)
8.2.15	钒(V)的化学鉴定法	(172)
8.2.16	铋(Bi)的化学结晶法	(173)
8.2.17	镍(Ni)的化学鉴定法	(173)
8.2.18	钴(Co)的化学鉴定法	(174)
8.2.19	铍(Be)的化学鉴定法	(175)
8.2.20	铅(Pb)的化学鉴定法	(176)
8.2.21	钼(Mo)的化学鉴定法	(177)
8.2.22	锡(Sn)的化学鉴定法	(179)
8.2.23	锑(Sb)的化学鉴定法	(180)
8.2.24	铜(Cu)的化学鉴定法	(181)
8.2.25	碲(Te)的化学鉴定法	(182)
8.2.26	硒(Se)的化学鉴定法	(183)
8.2.27	钨(W)的化学鉴定法	(185)
8.2.28	锶(Sr)的化学鉴定法	(186)
8.2.29	金(Au)的化学鉴定法	(187)
8.2.30	银(Ag)的化学鉴定法	(188)
8.2.31	铁闪锌矿的化学鉴定法	(190)
8.2.32	硬锰矿的鉴定法	(190)
8.2.33	黄钾铁矾的化学鉴定法	(192)
8.2.34	方钴矿的化学鉴定法	(192)
8.2.35	车轮矿的化学鉴定法	(193)
8.2.36	毒砂的化学鉴定法	(195)
8.2.37	辉碲铋矿的化学鉴定	(196)
8.2.38	辉银矿的化学鉴定法	(196)
8.2.39	钛铀矿的化学鉴定法	(197)
8.2.40	泡铋矿的化学鉴定法	(197)
8.2.41	黄金与黄铜的鉴别	(198)
8.2.42	黄铁矿与白铁矿的鉴别	(198)
	思考题	(199)
	参考文献	(200)
	附录1: 常用矿物鉴定用表	(205)
	附录2: 矿物图片	(215)

# 第1章 绪论

## 1.1 研究烧结球团矿微观结构的目的与内容

### 1.1.1 研究微观结构的目的

在烧结球团矿制备过程中,会发生一系列的物化反应,各种矿物要经历发育、长大、结晶,重新排列组合,形成各种固相、液相,同时也将产生各种有形的不良产物,复杂纷繁的微观结构决定了矿物的质量。为了正确评价烧结球团矿质量,找出存在的问题,不断改善其微观结构,因此来研究烧结球团矿的微观结构,以达到满足高炉冶炼的要求。

借助于光学显微镜、扫描电镜、矿物结构分析仪、计算机等现代微观测试工具,对烧结球团矿中的矿物进行定性定量分析,对各种微观结构进行观察、比较、分析、总结,以致不断提高烧结球团矿质量。这对促进钢铁工业的发展,不断地丰富烧结球团理论具有重要的作用。

众所周知,我国是一个生产钢铁的大国,年产钢铁5亿~6亿t,居世界第一。全国有近百家烧结、球团厂,年产烧结矿6亿~7亿t,年产球团矿1亿t左右。对这些烧结、球团矿质量进行鉴定是非常必要的。检测烧结、球团矿质量的途径很多,如化学成分测定、机械强度的测定等,都可以反映成品某一方面的特性,但却不能完全反映成品的质量。例如,某烧结矿的转鼓指数较高,但质量不一定好,因为在烧结矿中,如果含有大量的铁橄榄石,其强度高,转鼓指数好,但在高炉冶炼时,铁橄榄石难以还原,焦比高、产量低。所以,单一的指标只能反映事物的个性,要想全面地反映产品质量,最直接有效的方法是进行矿相鉴定。国外烧结球团厂也是采用这种科学的方法来鉴定矿物质量的好坏。

优质的高炉炉料应是高强度、低粉化、易还原产品。大量研究表明,熔剂性球团矿具有这些特性,值得大力发展。世界上许多发达国家都实现了炉料精品战略,北美、瑞典、德国、日本等国家采用100%的熔剂性球团矿入炉,降低焦比27kg/t,提高产量8%。普遍反映熔剂性球团矿还原性好,只需67min就能达到80%的还原度,而酸性球团则需114min。微观结构研究阐明了熔剂性球团矿固结机理和特征,为生产熔剂性球团提供了理论依据。

综上所述,有效地控制成品的微观结构,是生产优质烧结球团矿的关键,也是高炉炼铁的需要。基因、纳米技术的出现,标志着科学技术大踏步地向微观领域进军。烧结球团微观结构是研究矿物微观世界的一门学科,国内许多专家十分关注,相信在21世纪里,烧结球团矿矿相研究必定会出现新的飞跃。

### 1.1.2 研究微观结构的内容

显微结构是指在光学显微镜下矿物所呈现的一切光学现象,其研究内容如下:

#### (1) 矿物组成

- ①组成烧结球团矿内部结构的矿物
- ②矿物的化合及分解
- ③矿物自身的强度和性质
- ④固结机理
- ⑤温度、气氛对矿物形成的影响

#### (2) 微观结构

- ①矿物结晶形态及分布状况
- ②液相形成及其黏结状况
- ③各种有形的破坏现象及其危害
- ④固相结晶发育状况
- ⑤各种添加物对微观结构的影响
- ⑥生产工艺对微观结构的影响
- ⑦改善微观结构的先进方法与技术

#### (3) 矿物的定性定量

- ①人造矿矿物的认定
- ②人造矿矿物光学性质的变化
- ③电镜扫描分析
- ④微化分析
- ⑤矿物组成和整体结构综合分析

## 1.2 研究微观结构的基础知识

### 1.2.1 晶体光学基础知识

#### 1.2.1.1 自然光和偏光

光是一种电磁波,电磁波是电磁振动在空间的传播过程。根据振动特点不同,可将光分为自然光和偏振光。自然光是一切普通光源所发出的光波,如太阳

光、电灯光等。它们是光源中大量分子或原子辐射的电磁波的混合波。由于光源中各个分子或原子的运动状态各不相同，发光情况也就不同，可以说是瞬息万变，异常复杂。因此，混合波中的光振动不可能只沿一个方向，而是在垂直于光波传播方向的平面内，一切方向上都有光振动。故自然光的特征是：在垂直于光波传播方向的平面内，各方向上都有等幅的光振动。

自然光经过反射、折射、双折射、选择吸收等作用后，可以转变为只在一个固定方向上振动的光波，这种光称为平面偏光，简称偏振光或偏光。偏光振动方向与传播方向所构成的平面称为振动面。

晶体光学研究中主要应用偏光，其主要工具是偏光显微镜，其中装有特制的偏光镜。偏光镜是利用选择吸收作用或双折射作用使自然光偏振化的原理制成的。自然光通过偏光镜后，光波只有一个振动方向，即变为偏光。

### 1.2.1.2 光率体

光率体是表示光波在晶体中传播时，光波振动方向与相应折射率值之间关系的一种光学指示体。其作法是设想自晶体中心起，沿光波的各个振动方向，按比例截取相应的折射率值，再把各个线段的端点联系起来，便构成了光率体。

晶体中不同振动方向的折射率值，可以利用不同方向的晶体切面，在晶体折射仪上测出。光率体是从晶体的光学现象抽象得出的立体概念，它反映了晶体光学性质中最本质的特点，形状简单，应用方便。用偏光显微镜鉴定造岩矿物，都以光率体在每种矿物中的方位为依据。

由于各类晶体的光学性质不同，所构成的光率体形状也不相同，分述如下：

#### (1) 均质体的光率体

光波在均质体中传播时，向任何方向振动，其传播速度不变，折射率都相等。因此，均质体的光率体是一个圆球体(图1-1)。均质体光率体任何方向的切面都是一个圆切面，圆切面的半径代表均质体的折射率值。

#### (2) 一轴晶光率体

中级晶族矿物晶体的水平结晶轴单位相等，其水平方向上的光学性质相同。这类矿物有最大和最小两个主折射率值，分别以符号  $N_e$  和  $N_o$  表示。其他折射率值递变于  $N_e$  和  $N_o$  之间，一般以符号  $N'_e$  表示。光波振动方向平行  $Z$  轴时，相应的折射率值为  $N_e$ ；光波振动方向垂直  $Z$  轴时，相应的折射率值为  $N_o$ ；光波振动方向斜交  $Z$  轴时，相应的折射率值为  $N'_e$ 。 $N'_e$  值的大小递变于  $N_e$  与  $N_o$  之间，振动方向接近于  $Z$  轴时， $N'_e$  接近  $N_e$ ；振动方向接近于垂直  $Z$  轴时， $N'_e$  接近  $N_o$ 。显然，一轴晶光率体

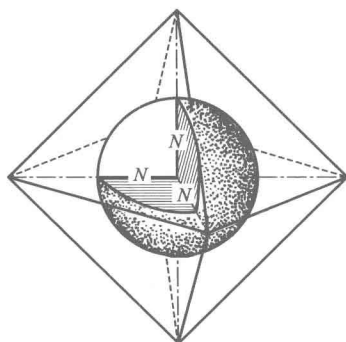


图1-1 均质体的光率体

是一个以  $Z$  轴为旋转轴的旋转椭球体，而且有正负之分。下面以石英和方解石为例，分别加以说明。

当光波沿石英  $Z$  轴方向射入晶体时[图 1-2(a)]，不发生双折射，在折射仪上测得光波垂直  $Z$  轴振动时的折射率均为 1.544，即  $N_o = 1.544$ 。以此数值为半径构成一个垂直入射光波(即垂直  $Z$  轴)的圆切面。当光波垂直石英  $Z$  轴射入晶体时[图 1-2(b)]。发生双折射分解形成两种偏光。其一振动方向垂直  $Z$  轴(为常光)，测得其折射率为 1.544，即  $N_o = 1.544$ 。另一种偏光振动方向平行  $Z$  轴，测得其折射率  $N_e = 1.553$ 。在  $Z$  轴方向上，从中心向两边以一定比例截取  $N_e$  值，在垂直  $Z$  轴的方向上以一定比例截取  $N_o$  值，以此两个线段为长、短半径，构成一个垂直入射光波，包含  $Z$  轴的椭圆切面。将此二切面联系起来，便构成一长形旋转椭球[图 1-2(c)]。此即石英的光率体，其旋转轴为光轴。

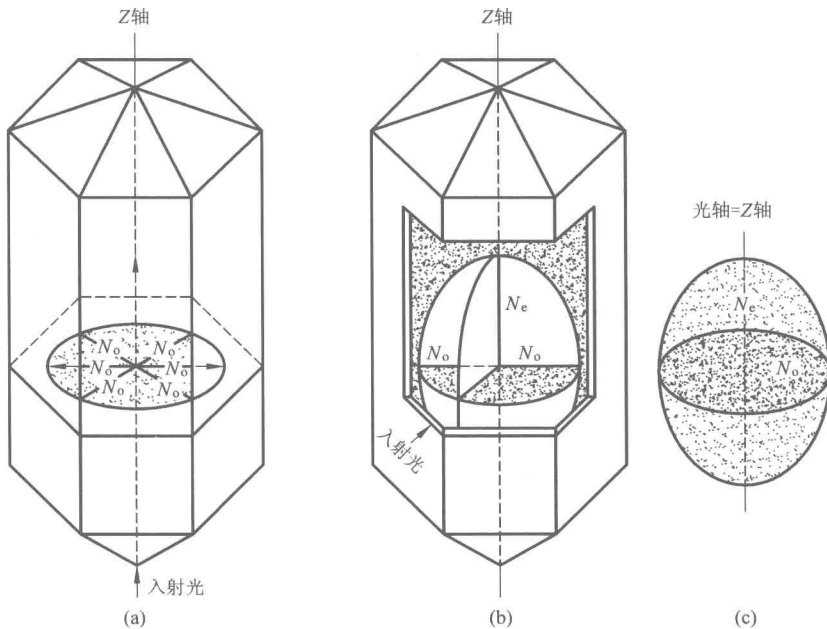


图 1-2 一轴晶光率体的构成

这种光率体的特点是其旋转轴(光轴)为长轴[图 1-2(c)及图 1-3(a)]，光波平行光轴振动时的折射率总是比垂直光轴振动时的折射率大，即  $N_e > N_o$ 。凡具这种特点的光率体称为一轴晶正光性光率体。相应的矿物称一轴晶正光性矿物。

当光波平行方解石  $Z$  轴射入晶体时，不发生双折射，测得其各个方向的折射

率均为 1.658, 即  $N_o = 1.658$ 。光波垂直  $Z$  轴射入晶体时, 发生双折射, 分解形成两种偏光。其一振动方向垂直  $Z$  轴(常光), 测得其相应折射率  $N_o = 1.658$ ; 另一偏光振动方向平行  $Z$  轴(非常光), 测得其相应的折射率  $N_e = 1.486$ 。按上述作法, 可以得出一个以  $Z$  轴为旋转轴的扁形旋转椭球体[图 1-3(b)]。它与石英的光率体的区别在于其旋转轴(光轴)为短轴。光波平行光轴振动时的折射率总是比垂直光轴振动时的折射率小, 即  $N_e < N_o$ 。凡具这种特点的光率体称为一轴晶负光性光率体, 相应的矿物称一轴晶负光性矿物。

无论是正光性或负光性的一轴晶矿物, 其光率体都是旋转椭球体; 其直立轴(旋转轴)永远是  $N_e$  轴, 水平轴永远是  $N_o$  (图 1-3)。  $N_e$  与  $N_o$  代表一轴晶矿物折射率的最大与最小值, 称为主折射率。折射率的最大值一般以  $N_g$  表示, 最小值以  $N_p$  表示。一轴晶矿物的光性正负取决于  $N_e$  与  $N_o$  的相对大小。当  $N_e > N_o$ , 即  $N_e = N_g$  时, 其光性为正[图 1-3(a)]; 当  $N_e < N_o$ , 即  $N_e = N_p$  时, 其光性为负[图 1-3(b)]。  $N_e$  与  $N_o$  的差值为一轴晶矿物的最大双折射率。

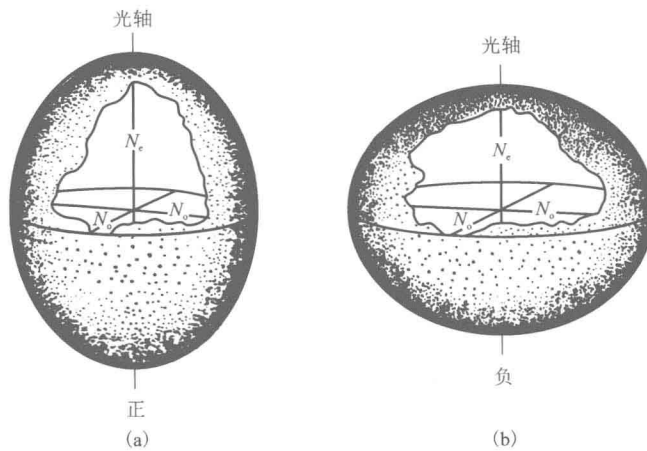


图 1-3 一轴晶光率体

在偏光显微镜下鉴定矿物时, 我们所看到的是矿物晶体各方向的光率体切面。一轴晶光率体主要的切面有下列三种。

垂直光轴(或结晶轴  $Z$  轴)的切面[图 1-4(a)及图 1-5]: 为圆切面, 其半径等于  $N_o$ 。光波垂直这种切面入射(即平行光轴入射)时, 不发生双折射, 也不改变入射光波的振动方向, 其折射率等于  $N_o$ , 双折射率等于零。一轴晶光率体只有一个这样的圆切面。

平行光轴的切面[图 1-4(b)及图 1-5]: 为椭圆切面, 其长、短半径分别为  $N_o$  与  $N_e$  (正光性的长半径为  $N_e$ , 短半径为  $N_o$ ; 负光性的长半径为  $N_o$ )。光波垂直

这种切面入射(即垂直光轴入射),发生双折射分解成两种偏光,其振动方向必分别平行椭圆切面的长、短半径,相应的折射率值分别等于椭圆切面的长、短半径  $N_e$  与  $N_o$ ,二者之差是一轴晶矿物的最大双折射率。

斜交光轴的切面[图 1-4(c)和图 1-5]:仍为椭圆切面,其长、短半径分别等于  $N_o$  与  $N'_e$ 。光波垂直这种切面入射时(即沿斜交光轴入射),发生双折射分解形成两种偏光,其振动方向必定分别平行椭圆切面的长、短半径,相应的折射率必分别等于椭圆切面长、短半径  $N_o$  与  $N'_e$ 。双折率值等于椭圆切面长、短半径  $N_o$  与  $N'_e$  之差,其大小递变于零与最大双折射率之间。一轴晶任何斜交光轴的椭圆切面的长、短半径中,始终有一个是  $N_o$ 。当光性为正时,短半径是  $N_o$ ;光性为负时,长半径是  $N_o$ 。

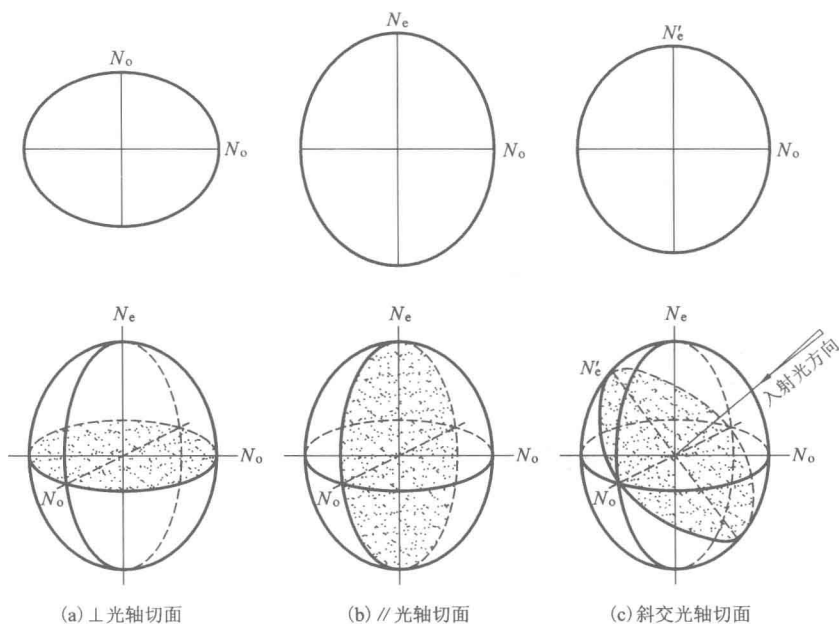


图 1-4 一轴晶正光性光率体的主要切面

应用光率体,可以确定光波在晶体中的传播方向(波法线)、振动方向及相应折射率之间的关系。光波沿光轴射入晶体,垂直入射光波的光率体切面是一个圆切面;表示不发生双折射,也不改变入射光波的振动方向,其双折射率等于零。光波沿其他任何方向射入晶体,垂直入射光波的光率体切面均为椭圆切面,其长、短半径方向分别代表入射光波发生双折射后分解形成的两种偏光的振动方向,半径的长短分别代表两种偏光相应的折射率值,长、短半径之差代表双折射

率。在一轴晶中，垂直光轴切面的双折射率为零，平行光轴切面的双折射率最大，其他方向切面的双折射率递变于二者之间(图 1-4 及图 1-5)。

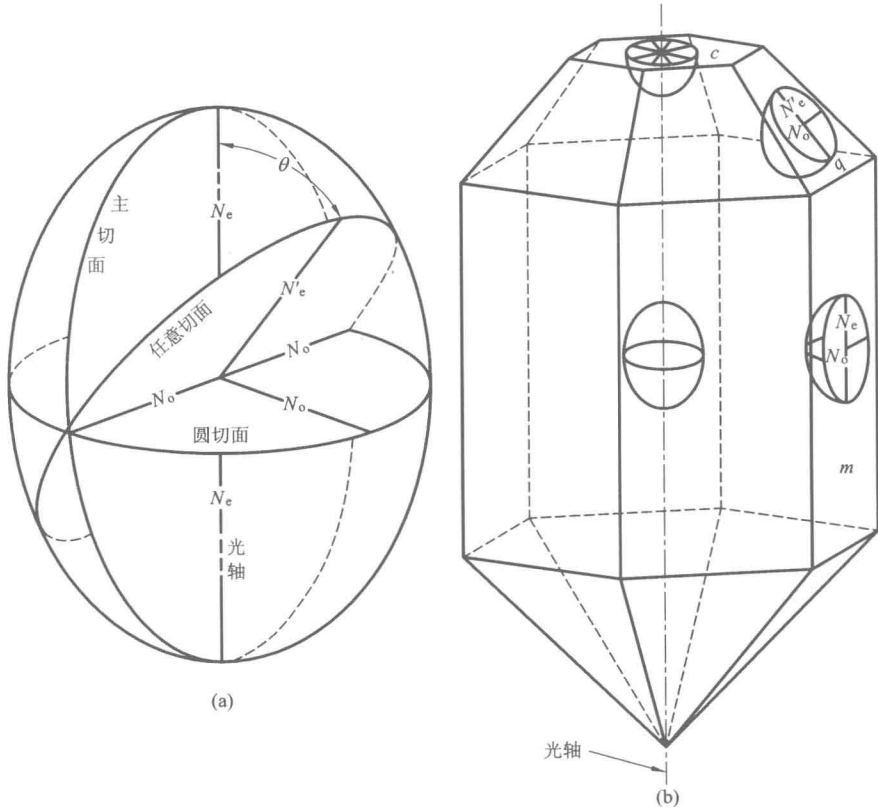


图 1-5 一轴晶正光性光率体三个切面的立体图

### (3) 二轴晶光率体

低级晶族(斜方、单斜、三斜晶系)矿物属二轴晶。这类矿物晶体的三个结晶轴单位不等，即  $a \neq b \neq c$ ，表明晶体三度空间方向的不均一性。实验证明，这类矿物都有大、中、小三个主折射率值，分别与互相垂直的三个振动方向相当，以符号  $N_g$ 、 $N_m$ 、 $N_p$  分别代表三轴晶的大、中、小三个方向折射率值。与其他振动方向相当的折射率值递变于  $N_g$ 、 $N_m$ 、 $N_p$  之间，分别以  $N'_g$  和  $N'_p$  代表，即  $N_g > N'_g > N_m > N'_p > N_p$ 。显然，二轴晶光率体是一个三轴不等的椭球体(三轴椭球体)[图 1-6 (d)]。下面以斜方晶系矿物镁橄榄石为例来说明二轴晶光率体的构成。

当光波沿镁橄榄石 Z 轴方向射入晶体时，发生双折射分解形成两种偏光，其一振动方向平行 X 轴，测得其折射率值等于 1.715，另一偏光振动方向平行 Y 轴，



测得其折射率值等于 1.651 [图 1-6(a)]。在  $X$  轴方向上, 由中心向两边按比例截取折射率值 1.715, 在  $Y$  轴方向上截取折射率值 1.651, 以此二线段为长、短半径可构成一个垂直入射光波 (即垂直  $Z$  轴) 的椭圆切面 [图 1-6(a)]。

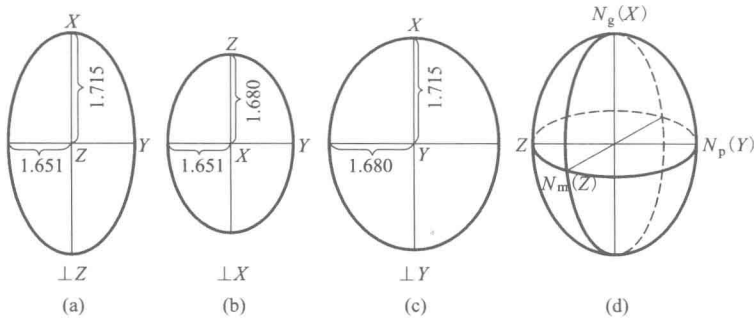


图 1-6 二轴晶光率体的做法

当光波沿镁橄榄石  $X$  轴方向射入晶体时, 发生双折射形成两种偏光, 其一振动方向平行  $Y$  轴, 折射率等于 1.651; 另一偏光振动方向平行  $Z$  轴, 折射率等于 1.680。同样构成一个垂直入射光波 (垂直  $X$  轴) 的椭圆切面 [图 1-6(b)]。

当光波沿镁橄榄石  $Y$  轴方向射入晶体时, 亦发生双折射分解形成两种偏光, 其一振动方向平行  $X$  轴, 折射率等于 1.715; 另一偏光振动方向平行  $Z$  轴, 折射率等于 1.680。同样构成一个垂直入射光波 (垂直  $Y$  轴) 的椭圆切面 [图 1-6(c)]。

把这三个椭圆切面, 按照它们在空间的位置联系起来, 便构成了镁橄榄石的光率体。它是一个三轴不等的椭球体 [图 1-6(d)], 称为三轴椭球体。

从镁橄榄石的三个主要方向切面可以看出, 它具有大 (1.715)、中 (1.680)、小 (1.651) 三个主折射率, 它们分别平行  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个结晶轴振动。实验证明, 其他二轴晶矿物也都有大、中、小三个主折射率分别与互相垂直的三个振动方向相当, 只是其主折射率值的大小及与它们相当的互相垂直的振动方向在晶体中的位置与镁橄榄石不相同。

三轴椭球体中三个互相垂直的轴, 代表二轴晶矿物的三个主要光学方向, 称光学主轴, 简称主轴, 即  $N_g$  轴、 $N_m$  轴和  $N_p$  轴。包括二主轴的切面, 称主轴面。二轴晶光率体有三个互相垂直的主轴面, 即  $N_g N_p$  面、 $N_g N_m$  面与  $N_m N_p$  面。因为二轴晶光率体是一个三轴椭球体, 通过  $N_m$  轴在光率体的一边可作一系列切面, 它们的半径之一始终为  $N_m$ , 另一个半径的长短递变于  $N_g$  与  $N_p$  之间。因系连续变化, 在它们之间总可找到一个半径为  $N_m$  的圆切面 [图 1-7(a)]。同样, 在光率体的另一边总可截出另一个圆切面。光波垂直这两个圆切面入射时, 不发生双折射, 故