

高等学校教学用书

耐火材料岩相分析

冶金工业出版社

耐火材料岩相分析

冶金工业出版社

高等学校教学用书

耐火材料岩相分析

西安冶金建筑学院 杨兴华 主编

*

冶金工业出版社 出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 13 字数 307 千字

1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷

印数00,001~3,000册

统一书号: 15062·3549 定价 1.35 元

序 言

耐火材料岩相分析是耐火材料专业一门重要的技术基础课。本课程的基本理论、基本方法以及为培养分析能力所引用的研究实例,对学习耐火材料工学和进行硅酸盐物理化学的实验研究都具有重要的意义。根据本课程教学大纲,考虑到耐火材料生产、科研和专业教学的实际情况,本书包括耐火材料光学显微学研究法、电子光学研究法及耐火材料岩相分析等三篇内容。光学显微学研究法是岩相分析的基本手段,其全部技术实践系建立在波动光学的理论基础之上,因此物理光学是其重要的基础课。电子光学研究法是岩相分析的重要辅助手段,本书介绍的部分方法有助于岩相工作者对电子光学仪器某些技术性能的了解和进行测试方法的选择。岩相分析是本书所涉及的基本方法和理论在研究工作中的具体运用,它除了以第一、二部分所提供的技术手段直接为其服务之外,在许多方面还需应用硅酸盐物理化学、耐火材料工学以及有关学科的理论对显微结构的形成和变化加以阐述。

耐火材料岩相分析是实践性较强的学科,因此培养和提高实际分析能力必须与生产和科学实验的实践紧密地结合起来。

本书由西安冶金建筑学院杨兴华同志任主编。绪论、第三、五、六、十、十二章及第十三章的第二、三、五节由杨兴华同志执笔;第一、二、四章及第十三章的第四节由河北矿冶学院朱兰胜同志执笔;第七、八、九、十一章由鞍山钢铁学院沈端书同志执笔;第十三章第一节由沈端书、杨兴华同志共同执笔。最后,由北京冶金机电学院孙荣亮同志协助审校。

本书的编写仅仅是一个初步的尝试。特别是有关显微结构定性、定量分析方面的内容,由于编写时间仓促,对适于教学参考的技术资料未能进行充分地研究,加之编者水平所限,故错误与不妥之处一定很多,殷切期望广大读者不吝指教。

编 者

1978年12月

目 录

绪论	1
----	---

第一篇 耐火材料光学显微学研究法

第一章 晶体及其宏观对称性	3
第一节 晶体的概念	3
第二节 晶体的基本性质	4
第三节 晶体的对称及分类	5
第四节 晶体的单形和聚形	8
第五节 晶面符号	11
第二章 晶体光学基本原理	15
第一节 自然光和偏光	15
第二节 光性均质体和非均质体	16
第三节 全反射、晶体折射仪及其应用	18
第四节 光率体	19
第三章 偏光显微镜及薄片的制备	26
第一节 偏光显微镜的光路系统	27
第二节 偏光显微镜的构造	28
第三节 显微镜光源	35
第四节 偏光显微镜的主要附件	36
第五节 偏光显微镜的检验和校正	37
第六节 薄片的制备	38
第四章 透明矿物在偏光显微镜下的研究	42
第一节 单偏光系统下的观察和测量	42
第二节 正交偏光系统下的观察和测量	47
第三节 聚敛偏光系统下的观察和测量	58
第四节 薄片透明矿物的系统鉴定	69
第五节 油浸法	71
第五章 反光显微镜及其在耐火材料研究中的应用	74
第一节 垂直照明器	75
第二节 反射偏光显微镜的检验和校正	78
第三节 光片及光薄片的制备	79
第四节 反光显微镜下的观察和测量	82

第二篇 电子光学研究法简介

第六章 X射线分析法	88
第一节 X射线的性质和产生	88
第二节 X射线谱	89
第三节 滤波片	91

第四节	X射线在晶体中的衍射	92
第五节	X射线物相分析	93
第六节	X射线粉末法在物相分析中的应用	97
第七章	透射式电子显微镜	100
第一节	电子显微镜的光源和透镜	100
第二节	电子显微镜的构造	102
第三节	样品的制备	103
第八章	扫描电子显微镜	105
第一节	扫描电子显微镜的工作原理	105
第二节	扫描电子显微镜的工作方式	107
第三节	扫描电子显微镜样品的制备	109
第九章	电子探针X射线显微分析	109
第一节	电子探针工作原理	109
第二节	仪器构造	110
第三节	样品的制备	112
第四节	使用后耐火材料电子探针分析示例	113

第三篇 耐火材料岩相分析

第十章	矿物原料地质学概述	114
第一节	矿物与工艺矿物	114
第二节	矿物的成分类型及性质	114
第三节	岩石及地壳的化学组成	116
第四节	矿石、矿体和矿床	120
第十一章	原料及制品中常见矿物鉴定	121
第一节	矿物宏观鉴定特征综述	121
第二节	矿物原料及耐火制品中常见矿物鉴定特征	125
第十二章	显微结构分析基础知识	152
第一节	显微结构及其研究内容	152
第二节	耐火材料显微结构的基本类型	154
第三节	体视学的初步概念	155
第四节	显微结构参数及其测定	158
第五节	自动图象分析仪	165
第十三章	耐火材料岩相分析	166
第一节	镁质耐火材料岩相分析	166
第二节	镁铬质耐火材料岩相分析	173
第三节	白云石耐火材料岩相分析	178
第四节	粘土及高铝质耐火材料岩相分析	189
第五节	硅质耐火材料岩相分析	196

绪 论

耐火材料是各种高温窑炉以及其他热工设备的衬砌材料，它经常处在高温条件下经受着气体、渣尘的机械冲刷和化学侵蚀。因此，要求耐火材料必须具备抵抗这些物理和化学作用的性能。

检验耐火材料各种理化性能和作业性能的技术指标是判别耐火材料质量和预计其可能使用条件的重要依据，而阐明这些指标与耐火材料物相组成及显微结构之间的相互关系，对于改进材料质量、发展新的耐火材料品种以及进行耐火材料理论研究工作尤其具有重要的意义。

耐火材料岩相分析是从生产和科学实验的实践中逐步总结和发展起来的一门新的技术学科，其基本任务是在正确鉴定耐火材料及其蚀变产物物相组成的基础上，通过显微结构的定性、定量分析，并应用硅酸盐物理化学和耐火材料工学的理论，探索耐火材料生产工艺因素、材料的宏观性质及使用性能与显微结构之间的内在联系。

耐火材料的物相分析和显微结构分析是岩相分析工作的重点和核心。物相分析是显微结构分析的前提和基础，显微结构分析是联系耐火材料生产和理论研究的一条纽带。很久以来，人们就注意到材料的力学性质及其他高温物理化学性质与显微结构之间有着密切的联系，比如说与相的形貌、相的边界状态和相的空间分布特性之间的联系。如镁质耐火材料中的方镁石晶体，虽然其熔点高达 2800°C ，但是如果没有良好的显微结构予以保证，它仍然不能发挥出这种高温稳定相所应表现出来的各种性能。从这个意义上讲，耐火材料的使用寿命在很大程度上取决于它的显微结构。因此，改进耐火材料的显微结构，使其具有各种作业条件所要求的性能，是耐火材料生产工艺的重要任务之一。

耐火材料显微结构分析的理论和实践，在它发展的最初阶段，在很大程度上限于对结构形态的定性描述和对结构类型的资料的综合；借以通过结构类型的对比和归纳，探讨和评价材料的生产过程、产品质量以及使用过程中所出现的某些问题。但是，仅从形态特征的定性分析出发难于获得有关显微结构参数随工艺因素而变化的数量概念。特别是在进行有关多相体系晶体生长动力学或附加组分对材料高温物理化学行为的影响等课题研究时，显微结构的定量分析就成为一项非常重要的基础工作。

在现代科学技术条件下，物相与结构分析的技术方法已经逐渐形成一个包括光学显微学和电子光学显微学两个光谱范畴的专门科学领域。光学显微学研究法用于材料科学研究历时较久，无论在它的理论体系和技术实践上均比较成熟和完备。但囿于可见光波波长的限制，使得光学显微镜的分辨本领限制在2000埃左右。电子光学微观分析技术以其特有的性能问世以后，引起了材料科学微观分析的深刻变化。短波长电子束的应用，使得人类的视域进入材料结构的微观方面，大大提高了人们认识自然和改造自然的能力。目前，百万倍级电子显微镜的分辨率已经达到3埃的高水平，使得晶体空间格子构造的推论在直观上得到了证实。他如X射线衍射、电子衍射、中子衍射等晶体结构分析仪以及六十年代迅速发展起来的电子探针、激光探针、离子探针、表层探针等微区分析仪相继用于材料科学研

究的实践之后，使得微观结构分析的定量化、快速化和精密化大大地向前跨进了一步。

这些方法对于耐火材料的研究都是十分重要的，因此在某些时候为了解决某一课题必须应用多种技术手段。但是，应该在确保研究工作对成果精度要求的前提下，对各种技术方法加以合理的选择。下表给出的简单资料可供参考，表中圆圈的数量表示该方法对相应研究目的的有效性。

分析技术方法	研究内容		
	物相鉴定	元素分布	显微结构
X射线衍射	○○○		
电子衍射	○○		
电子探针X射线显微分析	○	○○○	○
电子显微镜	○		○○
反射显微镜	○		○○○
偏光显微镜	○○○		○○○
红外线显微镜	○○○		○○○

从中可以看出，偏光显微镜法作为物相鉴定和显微结构分析的一种手段，在技术上则比较全面。它可以在不破坏样品原有结构的条件下，对耐火材料或其蚀变产物进行较为全面的研究，容易获得有关相的形成阶段、形貌特征和变化规律等方面的直观概念，因此仍然可以作为近代研究方法的基础。特别是基于二维的实体显微学广泛用于陶瓷、耐火材料等硅酸盐制品的研究之后，以反射晶体光学为理论基础的反光显微镜研究法，在透明矿物领域中也展现出极其广阔的前景。近年来，在反光显微镜、电子探针和扫描电子显微镜相结合的结构相关性研究方面所进行的成功尝试，也为两个光谱范畴技术方法的综合运用提供了一个生动的示例。

第一篇 耐火材料光学显微学研究法

第一章 晶体及其宏观对称性

根据X射线及其他电子光学测试手段的分析结果已经充分证实，晶体是具有格子构造的固体物质。由于格子构造的严格规律性，决定了晶体的宏观对称性和对称形式的有限性。除了几何对称性之外，晶体的其他性质，如热学、电学、力学和光学性质等也都为晶体格子构造的规律所制约。因此，对称（广义的）现象及其规律是晶体所固有的基本属性之一。

晶体的几何对称性与物理性质的对称性都是格子构造在不同方面的外在反映，因此，晶体几何对称性与光学对称性之间也必然存在着一定的联系。研究不同对称形式的晶体所特有的光学性质及其变化规律，是鉴定结晶相物质的重要依据。

第一节 晶体的概念

晶体的本质在于组成晶体的内部质点（原子、离子、络阴离子、分子）作有规律的排列。图1-1为食盐NaCl的内部构造。可以看出，无论是氯离子还是钠离子，在空间的任何

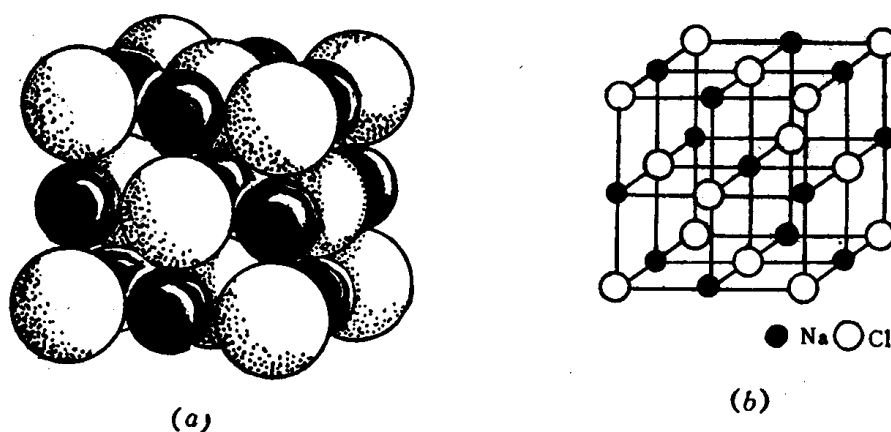


图 1-1 NaCl的格子构造

(a) 食盐晶体的原子配列，(b) 食盐晶体的空间格子

方向上都是每隔一定距离重复出现一次。也就是说，组成晶体的化学质点是有规律排列的。这种规律性表现在构造的同一方向上等距离的地方重复出现性质相同和周围环境也完全一样的质点——相当点。

如果我们用几何点来表示晶体的构造，将得到既简明又能反映晶体普遍规律的立体几何图形，这种图形称为空间格子。图 1-2 是空间格子的一般形式。

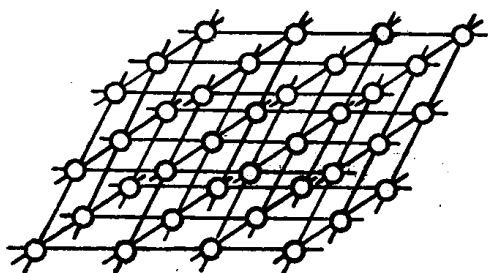


图 1-2 空间格子的一般形式

可以用不同符号的几何点表示构成晶体的不同质点，如图 1-1 b 所示。单位结晶格子称为晶胞。晶胞很小，人们无法用肉眼看见。晶胞中离子之间的距离用埃 Å 作度量单位 ($1 \text{ \AA} = 10^{-8}$ 厘米)。在 1 毫米^3 的氯化钠晶体中，所含晶胞可达 6×10^{12} 个之多。

空间格子由下列要素组成：

1. 结点 构成空间格子的几何点，它代表实际晶体构造的相应点的几何位置。
2. 行列 沿一直线上结点排列的总和 (图 1-3)。空间格子中，任意两结点相连即成行列。同一行列上两相邻结点的距离称为该行列的结点间距 (如图 1-3 中的 a)。在同一方向的行列中，结点间距永远相等；但在不同方向的行列中，结点间距一般不等。

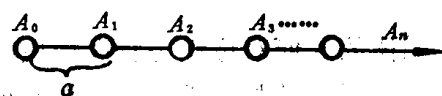


图 1-3 行列

3. 面网 由结点在平面上排列而成 (图 1-4)。面网中单位面积内的结点数目称为面网密度。平行的面网，其面网密度相等。相邻的平行面网之间的垂直距离称为面网间距。

4. 平行六面体 由三对平行且相等的面网组成 (图 1-5)。它是空间格子的基本构造单位。整个空间格子可以看作是由平行六面体在三度空间平行而又毫无间隙地堆砌而成。

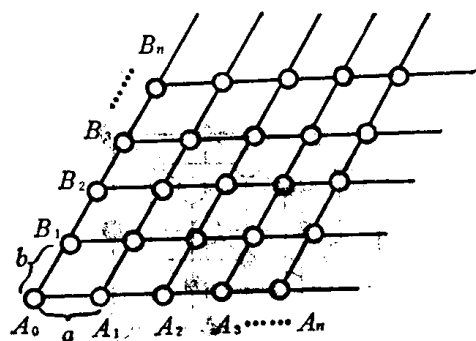


图 1-4 面网

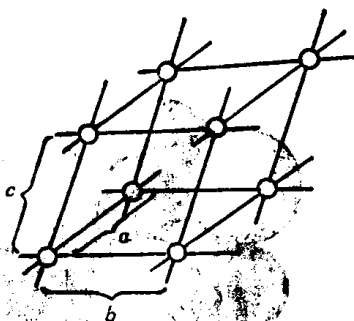


图 1-5 平行六面体

由此可知，空间格子是结点在三度空间作平行六面体状无限排列而成的，表示晶体内部构造规律性的几何图形。

在所有晶体内部均可找到这样的空间格子，只不过不同的晶体，其空间格子的具体形式不同罢了。总之，规律的格子构造是一切晶体的共有特征，也是晶体最本质的特征。从这个意义上讲，晶体就是具有格子构造的固体。那些内部质点不作规律排列的物质，即不具有格子构造的固体则称为非晶质体。如玻璃，松香等。

第二节 晶体的基本性质

格子构造是结晶物质区别于其他物质的最本质的特征。由格子构造的一般规律所决定

的晶体性质称为晶体的基本性质，其主要表现有如下几方面：

1. 自限性 各种晶体所表现出来的不同几何外形，是由其各自的内部构造规律所决定的。也就是说，晶体的几何多面体外形是晶体格子构造的外在反映。从晶体构造的观点出发，晶面就是内部格子构造中最外层的一个面网，而且往往是密度较大的面网；晶棱则是格子构造中最外部的一条行列；而角顶是晶棱两端的结点。有些晶体在生长过程中由于某种原因而不具有多面体形态，但若把它置于合适的环境中，仍可自发地生成规则的外形。晶体自发地生成规则外形的性质称为自限性。

2. 均一性和异向性 同一晶体的不同部分其性质相同，称为均一性；而同一晶体的不同方向，其性质往往不同，这叫异向性。晶体的均一性和异向性是晶体格子构造反映在晶体性质上的两个方面。因为，同一晶体的不同部分，其成分和构造都是相同的，因而各处性质是均一的；但是，同一格子构造的不同方向，其质点排列一般又是不相同的，因而晶体的性质也随方向不同而变化。

3. 对称性 晶体的外形和性质的相等部分作有规律的重复出现，这种现象称为晶体的对称性。对称性显然也是由于晶体内部构造中质点作周期性排列产生的。

4. 一定的熔点 晶体在一定压力下具有固定的熔化温度。如冰在 0°C 时熔化成水；方镁石 MgO 在 2800°C 时变成液态；石英在 1713°C 时熔融成液态 SiO_2 。而非晶体（如玻璃）则没有固定的熔化温度。其原因在于同一晶体的各个部分，质点的排列是相同的，故破坏任何部分所需的温度是一样的，因而有固定的熔点；而非晶质体质点排列疏密不一，故熔化各部分所需的温度亦不同，从而没有固定的熔点。

第三节 晶体的对称及分类

一、晶体的对称

晶体外形的规律性，集中地表现为晶体的对称。

对称，是自然界普遍存在的一种现象。晶体的对称是指晶体的相等部分，如晶面、晶棱、对应晶面之间夹角、角顶、晶体的内部构造等，通过一定的操作手续能够自相重复的现象。晶体对称具有如下两个特点：

1. 表里一致 晶体的对称，不仅表现在外形上，而且也表现在晶体的全部性质（如光学、热学、力学和电学性质等）和内部构造上。

2. 有限性 晶体的对称受格子构造的严格控制，只有符合格子构造规律的那些对称，才能在晶体外形上表现出来。因而有一定的数量限制。

晶体的对称是晶体分类的依据，也是进一步研究晶体性质和内部构造的基础。

二、晶体的宏观对称要素

研究晶体对称时，为了验证晶体的各个相等部分是否按一定的规律重复出现或重合，需要借助于一些假想的辅助几何图形。如左右对称要靠某一平面的反映；多面体的重复出现要借助于围绕某一直线的旋转等等。这些假想平面、直线或点就称为晶体的对称要素。也叫晶体的宏观对称要素。晶体的宏观对称要素主要有以下几种：

1. 对称面 P 对称面是一个假想平面，它能将晶体分为互成镜像关系的两相等部分。如图1-6a中的 PP' 和 P_1P_1' 平面即为对称面。因为它们能把图形 $ABCD$ 平分为两个相等部分，并且这两个相等部分互成镜像关系。而图1-6b中的 AC 则不是对称面，虽然

它也能把图形分为两个相等部分，但这两部分却不能以 AC 平面互成镜象关系。

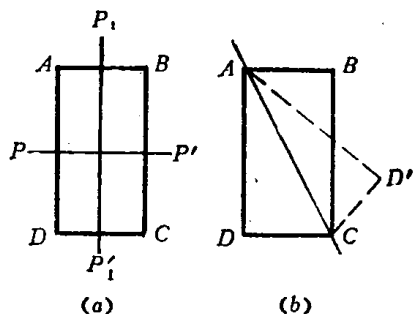


图 1-6 对称面存在的条件

(a) PP' , P_1P_1' 为对称面; (b) AC 不是对称面

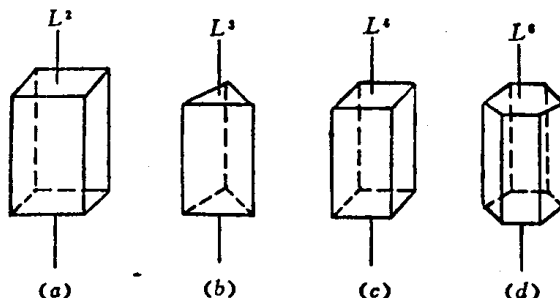


图 1-7 晶体的各种对称轴

不同晶体中存在对称面的数目往往不同，但最多只能有九个，如立方体晶体；少的则一个也没有。一个晶体中的对称面数目，可用系数与符号 P 来表示。例如， $3P$ 即表示这个晶体具有三个对称面。

2. 对称轴 L^n 或 g_n 对称轴是通过晶体中心的一根假想直线，晶体绕此直线旋转一定角度后，其相等部分自相重复。如图1-7所示各直线。

晶体旋转一周，相等部分自相重复出现的次数称为轴次，以 n 表示。如图1-7c所示的四方柱体，在绕通过晶体中心的竖轴旋转 360° ，可使相等部分自相重复四次，该轴就称为四次对称轴，记作 L^4 ；图1-7d的晶体可重复六次，故称为六次对称轴，记作 L^6 ；余者类推。

在所有晶体中，只有 L^1 、 L^2 、 L^3 、 L^4 和 L^6 五种对称轴存在，而没有五次或高于六次的对称轴。 L^1 为任何几何体所共有，故无实际意义。

轴次大于2的对称轴，即 L^3 、 L^4 、 L^6 均称为高次轴。

不同晶体的对称轴的种类和数目可多可少。有的晶体同时具有几种对称轴，而且每一种对称轴还同时有数根。如立方体晶体就有三根 L^4 、四根 L^3 和六根 L^2 。有的晶体则可能只有一种对称轴，甚至一种也没有。

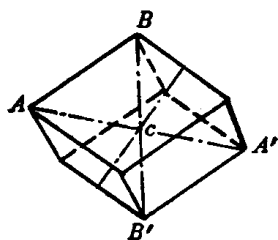


图 1-8 菱面体的对称中心

各种对称轴的数目，同样以数字写在相应对称轴符号的前面。如三根四次轴、四根三次轴、六根二次轴，分别写作 $3L^4$ 、 $4L^3$ 、 $6L^2$ 等。

3. 对称中心 c 对称中心是晶体内的一个假定点，过此点所作任何方向直线的等距两端，均可找到晶体上形体相同的对应点。如图1-8中的 c 即为菱面体晶形的对称中心。因为通过该点的任一直线 AA' (或 BB')，其等距两端所遇到的点均为同形等大的三个晶面相交的角顶。

对称中心在晶体中可有可无，若有、最多只能有一个。

具有对称中心的晶体，其晶面总是成对的，即每一晶面都有另一相等晶面与之反向平行。

4. 旋转反伸轴 L^n_i 旋转反伸轴是一根通过晶体中心的假想直线，晶体绕此直线旋

转一定角度后，再经过中心反伸，所成形象与晶体未转前完全相同。图1-9a为四方四面体，当其绕直线 L 反时针旋转 90° 后，其形象如图1-9b，然后再通过中心点 i 反伸，则 A 点反伸至 A' ， B 点反伸至 B' ；同理， C 反伸至 C' ， D 反伸至 D' 。图形 $C'D'A'B'$ （图1-9c）恰巧与未旋转前的图1-9a的形象完全重合， L_i 即为旋转反伸轴。由于晶体绕该轴旋转一周出现四次重合，故该轴称为四次旋转反伸轴，记作 L_i^4 。图1-10为具有 L_i^6 的晶体。

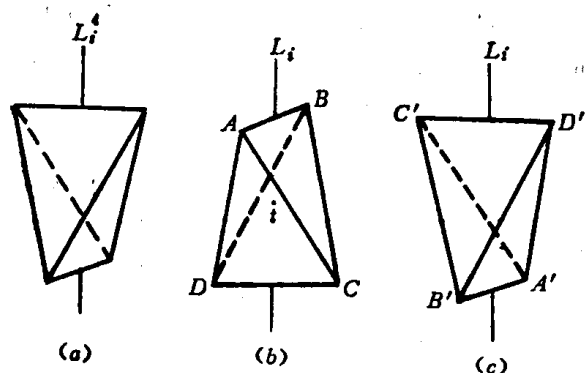


图 1-9 具有四次旋转反伸轴的四方四面体

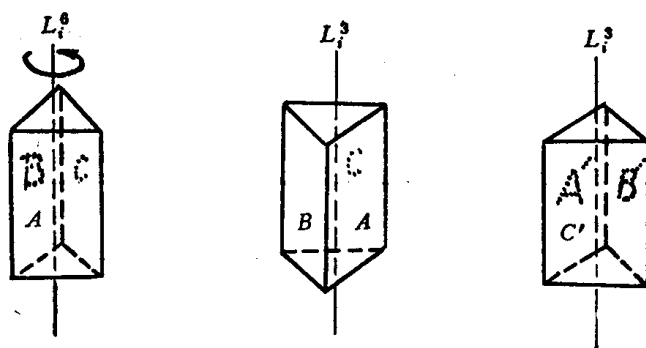


图 1-10 具有六次旋转反伸轴的晶体

在晶体上具有实际意义的旋转反伸轴仅有 L_i^4 和 L_i^6 两种，均属高次轴。

三、对称型、晶族和晶系的划分

综上所述，晶体上具有实际意义的宏观对称要素有： P 、 L^2 、 L^3 、 L^4 、 L^6 、 C 、 L_i^4 和 L_i^6 等八种。这些对称要素在晶体中既可以单独存在，也可以同时存在。一个晶体中各对称要素的总和，称为该晶体的对称型。如菱镁矿晶体中，有一个 L^3 ，三个 L^2 ，三个 P 和一个 C ，其对称型记为 L^33L^23PC 。

结晶体的32种对称型分类表

表 1-1

晶 族	晶 系	对 称 型						
低级晶族	三斜晶系	1	2					
	单斜晶系			3	4	5		
	斜方晶系			6	7	8		
中级晶族	三方晶系	9	10	11	12	13		
	四方晶系	14	15	16	17	18	19	20
	六方晶系	21	22	23	24	25	26	27
高级晶族	等轴晶系	28	29	30	31	32		
		$4L^33L^2$	$4L^33L^23PC$	$4L^33L^26P$	$3L^44L^36L^2$	$3L^44L^36L^29PC$		

晶体中对称要素的种类是有限的，各对称要素的组合又服从于对称定理，所以，晶体对称型的数目也是有限的。理论和实践均证明，晶体宏观对称要素的组合共有三十二种。换句话说，晶体的对称型只有32种（表1-1）。

由于对称是晶体的基本性质，它既具有普遍性（凡是晶体均有对称性），又具有特殊性（不同晶体其对称程度不同），因而它是晶体分类的依据。

根据对称，首先把属于同一对称型的所有晶体归纳为一个晶类，也就是说，全部晶体可按对称型归结为32个晶类；然后根据高次对称轴的有无及多少，将晶体划分成三个晶族；最后再根据各晶族中不同的对称特点，将其分为七个晶系（表1-2）。

晶系的划分

表 1-2

晶 族	高 次 轴	晶 系	对 称 特 点
低 级	无	三 斜 单 斜 斜 方	无 L 、 P 、 C 或只有 C 只有 L^2 或 P L^2 或 P 多于一个
中 级	有 一 根	三 方 四 方 六 方	只有一根 L^3 只有一根 L^4 (或 C_4) 只有一根 L^6 (或 C_6)
高 级	多 于 一 根	等 轴	一定有 $4L^3$

第四节 晶体的单形和聚形

属于同一种对称型的晶体，还可有不同的外表形态。如图1-11中的立方体、八面体和菱形十二面体，其对称型皆为 $3L^4 4L^3 6L^2 9PC$ 。可见，仅根据晶体对称型还不足以说明一个晶体的形状，因此应当进一步研究晶体的外形。

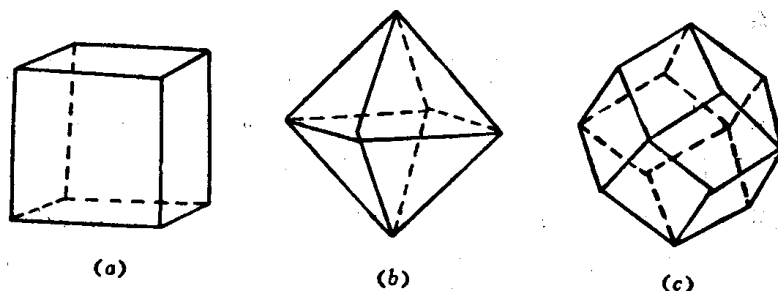


图 1-11 对称型相同、外形不同的晶体

(a) 立方体；(b) 八面体；(c) 菱形十二面体

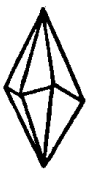
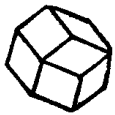
晶体的几何形态决定于其内部构造，研究晶形一方面有助于鉴别晶体；另一方面还有助于了解晶体的生成条件，进而阐明晶体的成因。

各晶系中的常见主要单形

表 1-3

晶 族	单形名称	单 形 形 状	晶面数目	单 形 特 点
低 级 晶 族	单 面		1	由一个晶面组成
	平行双面		2	两个晶面互相平行
	双 面		2	两个晶面相交
	斜 方 柱		4	四个晶面相交之棱互相平行，横断面为菱形
	斜方单锥		4	由四个不等边三角形晶面组成，四个晶面相交于一点，横断面呈菱形。
	斜方双锥		8	由八个不等边三角形晶面组成，上、下部各四个晶面相交横断面为菱形。
中 级 晶 族	三 方 柱		3	三个晶面相交之棱互相平行，横断面呈正三角形。
	六 方 柱		6	六个晶面相交之棱互相平行，横断面呈正六边形。
	三方单锥		3	由三个等腰三角形晶面组成，三个晶面相交横断面呈正三角形。
	六方双锥		12	由十二个等腰三角形晶面组成，上、下部各六个晶面相交横断面呈正六边形。

续表 1-3

晶 族	单形名称	单 形 形 状	晶面数目	单 形 特 点
中 晶 族	菱 面 体		6	由六个菱形晶面组成，晶面呈上下对称交错排列。
	复三方偏三角面体		12	可看作由菱面体一个晶面分成两个晶面而成，面呈上下对称交错排列。
	四 方 柱		4	四个晶面相交之棱互相平行，横断面为正方形。
	四方双锥		8	由八个等腰三角形晶面组成，上下部各四个晶面相交横断面为正方形。
	四 方 四 面 体		4	由四个等腰三角形组成，上部晶面与下部晶面呈对称交错排列，横断面为正四边形。
高 晶 族	四 面 体		4	由四个等边三角形组成，上部晶面与下部晶面呈对称交错排列，横切面为正四边形。
	立 方 体		6	由六个正方形晶面组成，晶面两两平行，相邻晶面互相垂直。
	八 面 体		8	由八个等边三角形组成，上、下晶面对称。
	菱形十二面 体		12	由十二个菱形晶面组成。
	五角十二面 体		12	由十二个五边形晶面组成，每一五边形晶面上有四个边等长而且较短，另一边则较长。

晶体的形态是由晶面的数目、形状、大小和相对位置决定的。晶体的同种晶面，如果各向发育相等，则形成晶面形状相同、大小相等的所谓理想形态。根据组成晶体的晶面形状和大小，是否相同，可以分为单形和聚形。

一、单形

整个晶体是由一种形状相同、大小相等的晶面构成的晶形，叫做单形，如图1-11中的各晶形。同一单形的各晶面，与对称要素的关系是完全一致的。如图中的八面体各晶面均与 L^4 呈等角相交，利用对称操作可使这些晶面重合。换句话说，单形也就是与同一对称要素保持相同关系的一组同种晶面的总称。属于同一单形的晶面，除同形等大外，其物理和化学性质也是一致的。

由于单形各晶面与对称要素密切相关，因此，根据对称型便可推导出单形来。对32种对称型推导的结果，共得出单形47种。这些单形在自然界的出现是很不均衡的，有的极为常见，有的只偶尔可见。现将最常见的单形及主要特点列于表1-3。

二、聚形

由两个或两个以上的单形组合而成的晶形称为聚形。单形的相聚不是任意的，只有属于同一对称型的单形才能聚合在一起，形成聚形。

由于构成聚形的单形数目可多可少，且单形相聚的形式又多种多样，因此，虽然单形只有47种，但聚形在理论上则可多至无穷。研究聚形时，最重要的工作在于分析聚形是由哪些单形聚合而成的。图1-12是几种耐火原料矿物常见的聚形晶体。

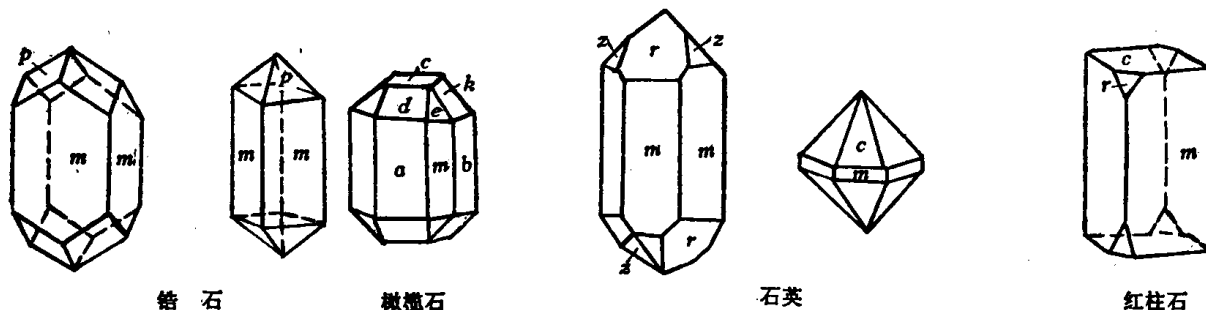


图 1-12 几种矿物常见聚形晶体

锆石： m —四方柱； p —四方双锥。橄榄石： k 、 d 、 m —斜方柱； a 、 b 、 c —平行双面； e —斜方双锥。石英： r 、 z —菱面体； m —六方柱； c —六方双锥。

红柱石： m 、 r —斜方柱； c —平行双面

第五节 晶 面 符 号

研究一个晶体，仅知道它的对称型与单形，有时仍不能确定它的形状。如图1-13的两个聚形晶体，其对称型同为 L^44L^25PC ，且都是由四方柱和四方双锥相聚而成的，但由于它们的晶面相对位置不同，其具体形状也完全两样。另外，对晶体许多重要光学现象的观察和光学常数的测定，经常也要在确定晶面空间位置关系的前提下才能进行。因此，详细研究晶体，还有进一步确定晶面在空间位置的必要。

为了表达晶面的空间位置，在结晶学中也象数学上确定点、线或面的位置一样，采用一个坐标系统，即在晶体

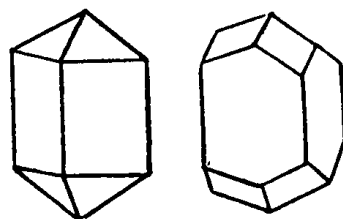


图 1-13 由相同单形组成的两种不同聚形

上选用坐标轴（晶轴），并将它们安置在一定的方位上，然后根据晶面在各坐标轴上的截距长度，用一定的符号——晶面符号表示出来。

一、晶轴的选定

根据晶体的形态特点选定晶轴（即坐标轴）是确定晶面间相对位置和相互关系的重要步骤。晶轴是相交于晶体中心的一组假想直线，在等轴、四方、斜方、单斜和三斜晶系的

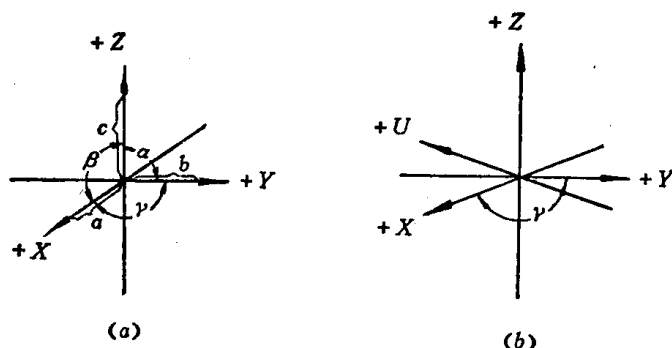


图 1-14 晶轴的方位

晶体中选用三根晶轴。其中前后轴叫X轴，左右轴为Y轴，上下轴称Z轴。各晶轴均有正负端之分，由轴的交点向前、向右、向上为正端；向后、向左、向下为负端，如图1-14 a所示。在三方和六方晶系的晶体中则选用四根晶轴，即X、Y、U、Z轴（图 1-14 b）。其中Z轴、Y轴的方位和正负端与上述相同，不同的是X轴正端偏向观察

者左方 30° ，U轴负端偏向观察者右方 30° ，且X、Y、U三根轴均位于同一水平面上，其中任何二晶轴正端的交角都是 120° ，它们与Z轴保持垂直关系。

各晶轴之间的夹角叫轴角。一般以 α 代表Y轴与Z轴的交角； β 代表X轴与Z轴的交角； γ 代表X轴与Y轴的交角（图1-14）。

各晶系晶体的晶轴选定法则，见表1-5。

二、轴单位的确定

晶轴选定后，必须确定晶面在晶轴上的截距长度才能最后确定晶面的空间位置。在晶轴上量度距离的单位长度称为轴单位，一般以 a 、 b 、 c 分别代表X、Y、Z轴上的轴单位。按理轴单位必须与各相应晶轴方向的行列结点间距相等，但因结点间距极小，不便表示。故通常是在晶体上选择一个与各晶轴相交的晶面作为单位面，以单位面在各晶轴上交截的长度作为相应晶轴的轴单位。

由于各晶系的基本格子构造以及各晶轴方向上的结点间距不同，从而轴单位也不相同。各晶系晶体的轴单位特点见表1-4。

轴单位 a 、 b 、 c 及轴角 α 、 β 、 γ 合称为晶体常数。如果知道了一个晶体的轴角，并测得轴单位的绝对长度，便可定出该晶体的晶胞形状和大小。

三、晶面符号

晶轴和轴单位一经确定，便可定出各个晶面的符号。所谓晶面符号就是一种以数字形式表达各晶面空间相对位置的符号。晶面符号有多种表示方法，现只介绍目前较普遍采用的米氏符号。这种晶面符号的求法是：顺序取晶面在X、Y、Z轴的截距系数的倒数比，然后化简，去掉比号，加一小括号即是。其一般式以 (hkl) 或 $(hkil)$ 表示，其中 h 、 k 、 (i) 、 l 分别称为X、Y、 (u) 、Z轴上的晶面指数。

现以图1-15所示晶体为例，求晶面HKL的晶面符号。其步骤如下：

1. 先求出晶面在各晶轴上的截距系数的倒数比（晶面指数比）。即