

高等学校教材

无机材料岩相学

韩秀丽 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

无机材料岩相学/韩秀丽主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 11
高等学校教材
ISBN 7-5025-7917-6

I. 无… II. 韩… III. 无机材料-岩相分析-高等学
校-教材 IV. ①TB321②P586

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 138854 号

高等学校教材

无机材料岩相学

韩秀丽 主编

责任编辑: 杨 菁 张双进

文字编辑: 李 玥

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社
出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 10½ 字数 253 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7917-6

定 价: 19.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

无机材料岩相学是以硅酸盐工业原料及其产品显微结构为研究对象的一门学科。它是一门涉及结晶学及矿物学、晶体光学、岩石学、工艺岩石学及硅酸盐工艺学等多门课程的综合学科。本书是在参阅了兄弟院校许多相关教材及国内外有关书刊文献的基础上，按教学大纲的要求，结合教学实践编写的教学用书。总课时为 50~60 学时。

本教材由基础理论、无机材料岩相学研究方法和无机材料显微结构分析三部分组成，对结晶学、矿物岩石学等相关基础知识作了简要论述，详细系统介绍了晶体光学基本知识、光学显微镜鉴定矿物的基本原理和方法，以及耐火材料、水泥熟料、陶瓷等工艺产品的矿物组成和显微结构特征及其与生产工艺条件、产品性能的关系等内容。在文字方面，力求通俗易懂，便于学生及有关专业人员自学。

本教材针对无机非金属材料专业教学和工业生产需要，加强了应用光学显微镜分析、测试晶体光学性质的基本原理和方法，突出了与硅酸盐工业有关的矿物及岩石在肉眼和显微镜下鉴定等基本技能的训练。

本教材由河北理工大学韩秀丽教授主编，常全明副教授主审。第一、二、八章由韩秀丽、李昌存编写；第三、五章由常全明、戚龙水编写，第四、六章由王明格编写，第七章由王榕林编写，第九章及附录由戚龙水、陈稳编写。

本书在编写过程中得到了郭立稳教授、卜景龙教授等领导及同事的支持和关怀。北京科技大学李建平教授对本教材的初稿提出了宝贵意见。在此，向这些老师及做出大量辅助工作的同学致以衷心的感谢！

由于本教材内容涉及面广，时间仓促，水平有限，在材料选择、课时分量安排及与后续课程衔接上定有许多不当之处，衷心希望读者提出宝贵意见，以利修正。

编 者
2005 年 6 月

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一部分 基础理论

第一章 结晶学.....	2
第一节 晶体.....	2
第二节 晶体的对称和分类	10
第三节 晶体的理想形态	14
第四节 晶体定向和晶面符号	17
第二章 矿物岩石学	21
第一节 矿物概述	21
第二节 矿物的形态	22
第三节 矿物的物理性质	25
第四节 矿物的化学成分类型及性质	28
第五节 矿物的分类及命名	33
第六节 无机材料中常见矿物的特征	35
第七节 岩石	43
第三章 晶体光学基础	52
第一节 自然光和偏光	52
第二节 光的折射和折射率	52
第三节 光波在均质体和非均质体中的传播特点	53
第四节 光率体	54
第五节 光率体在晶体中的位置-光性方位	59

第二部分 无机材料岩相学研究方法

第四章 光学显微镜及样片的制备	61
第一节 偏光显微镜（岩相显微镜）	61
第二节 反光显微镜（矿相显微镜）	64
第三节 矿片制备	68
第五章 透明矿物的岩相显微镜鉴定	70
第一节 单偏光镜下晶体的光学性质	70
第二节 正交偏光镜间晶体的光学性质	75
第三节 锥光镜下晶体的光学性质	87
第四节 透明矿物薄片的系统鉴定.....	103
第五节 油浸法测定折射率值.....	105
第六节 矿物颗粒大小及含量测定.....	111

第六章 不透明矿物的矿相显微镜鉴定	115
第一节 反射力、反射率及双反射	115
第二节 反射色及反射多色性	116
第三节 内反射	117
第四节 非均质效应	117
第五节 光片的浸蚀鉴定	118
第六节 其他研究方法简介	120

第三部分 无机材料显微结构分析

第七章 耐火材料显微结构分析	122
第一节 显微结构及其研究内容	122
第二节 耐火材料显微结构的基本类型	123
第三节 硅质耐火材料显微结构分析	124
第四节 硅酸铝质耐火材料显微结构分析	128
第五节 镁质耐火材料显微结构分析	131
第八章 硅酸盐水泥熟料显微结构分析	136
第一节 概述	136
第二节 硅酸盐水泥熟料的矿物组成	139
第三节 硅酸盐水泥熟料的显微结构与其质量的关系	142
第九章 陶瓷显微结构分析	143
第一节 陶瓷坯体的显微结构特征	143
第二节 陶瓷性能与显微结构的关系	144
第三节 常见陶瓷显微结构特征	146

附录 工业矿物鉴定表

附录 I 均质矿物	148
附录 II 一轴晶矿物	150
附录 III 二轴晶矿物	153
参考文献	159

内 容 提 要

本书是以硅酸盐工业原料及其产品显微结构为研究对象的一门学科教材。全书共分为三大部分：基础理论、无机材料岩相学的研究方法和无机材料显微结构分析。分别对结晶学、矿物岩石学、晶体光学等相关基础知识作了简要叙述，详细系统介绍了晶体光学基本知识、光学显微镜鉴定矿物的基本原理和方法，以及耐火材料、水泥熟料、陶瓷等工艺产品的矿物组成和显微结构特征及其与生产工艺条件、产品性能的关系等内容。

本书针对无机非金属材料专业教学和工业生产需要，加强了应用光学显微镜分析、测试晶体光学性质的基本原理和方法，突出了与硅酸盐工业有关的矿物及岩石在肉眼和显微镜下鉴定等基本技能的训练。

绪 论

无机材料岩相学 (petrography of inorganic materials) 是高等院校无机非金属材料专业、硅酸盐工程专业和材料科学专业的一门技术基础课, 是研究硅酸盐工业原料及其产品的一门科学, 是将工业岩石学和硅酸盐工艺学紧密结合起来的新学科。其基本任务是在正确鉴定无机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艺学的理论, 探索耐火材料等无机材料生产工艺因素、材料的宏观性质及使用性能与显微结构之间的内在联系。

无机材料的矿物组成和显微结构是决定材料物理-化学性能及应用效果的本质因素, 研究无机材料制品的显微结构特征及其与生产工艺和使用性能之间的关系, 是无机材料岩相学研究的主要问题, 也是现代材料科学研究的中心内容。因此, 改进无机材料的显微结构, 使其具有各种作业条件下所要求的性能, 是无机材料生产工艺的重要任务之一。

光学显微镜研究方法是进行岩相学研究的基础技术手段之一。比如说, 一块耐火砖、陶瓷制品、水泥熟料等, 用肉眼无法辨认其成分、结构特点, 但把它加工成薄片或光薄片 (0.03mm), 在偏光显微镜或反光显微镜下观察, 就会发现制品是由许多细小的工艺矿物组成的, 其矿物成分、性质、材料的显微结构与无机材料制品的质量有着密切的关系。质量的优劣, 通过岩相学的研究就可以找到正确的答案, 为提高产品的质量、提出有效的工艺措施提供理论依据。

本教材的主要研究内容分为以下三个部分。

(1) 基础理论部分 包括几何结晶学基础、矿物岩石学基础、晶体光学基础, 对硅酸盐工业原料和硅酸盐工业制品中常见矿物、岩石的描述, 理论和实际相结合。

(2) 无机材料岩相学研究方法部分 重点介绍光学显微镜的构造、使用及调节; 偏/反光显微镜下晶体的光学性质的测定方法及原理; 矿物含量、颗粒大小的测定及其他岩相学研究方法简介。

(3) 无机材料显微结构分析部分 介绍无机材料显微结构分析的内容和方法; 常见无机材料如耐火材料、陶瓷、水泥熟料中物相组成及其特点; 无机材料制品的矿物组成、晶粒大小、含量、显微结构特征及其与原料、工艺条件、产品质量的关系。

通过本课程的学习, 使学生掌握结晶学、矿物岩石学、晶体光学的基本理论知识; 学会用偏/反光显微镜鉴定工艺矿物的原理和测定光学性质的方法; 根据产品的物相组成及显微结构特点, 并结合矿物原料、工艺过程, 分析岩相特点与产品质量的关系, 为提高产品质量提供理论依据。

第一部分 基础理论

无机材料的原料来自天然的矿物或岩石，原料的优劣对制品的质量影响很大，因此应对硅酸盐制品等无机材料的原料有一定的了解。掌握常见原料的矿物、岩石性质。

第一章 结 晶 学

结晶学是研究晶体的外部形态、内部构造以及晶体的发生、成长及其物理性质的科学。本章主要阐述矿物晶体的外部形态和内部构造的一般规律以及晶体的基本特性。

第一节 晶 体

一、晶体及非晶体的概念

1. 晶体的概念

地壳中发现的 3000 多种矿物中，绝大多数是晶体。人们对晶体的认识是有过程的。最早人们把无色透明并具有多面体外形的水晶称为晶体。因为它无色透明，以为是水形成的，故称为“水晶”，实际上水晶的成分为 SiO_2 ，是纯净的石英晶体。后来，在矿产资源不断开发的过程中，人们发现了许多有色的具有规则几何多面体外形的天然矿物，如磁铁矿的八面体、石盐的立方体及磷灰石的晶体等（图 1-1）。因此，晶体一词中否掉了无色透明，认为具有规则多面体外形的矿物即为晶体。

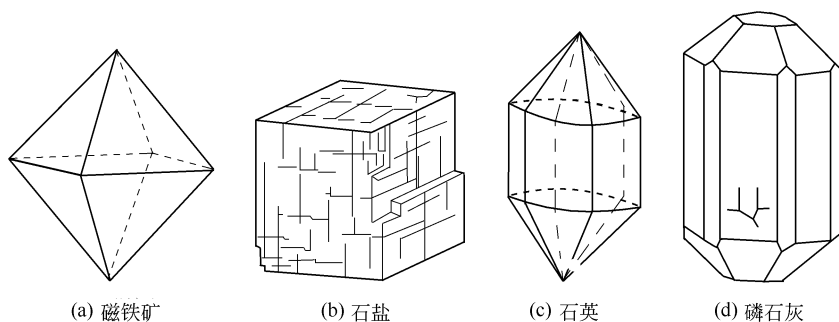


图 1-1 常见晶体的形态

自从人们利用 X 射线研究晶体成功以来，又加深了对晶体的认识。发现这些具规则多面体外形的晶体的内部质点均作有规律排列且呈周期性重复，而且在无完好晶形的物质中也发现这一特点，从而揭露了晶体的本质。晶体内部质点作有规律重复排列的构造，称为格子构造。因此晶体的完整而严谨的定义是：晶体（crystal）是内部质点作有规律重复排列的固体，或具有格子构造的固体称为晶体。

2. 非晶体的概念

内部质点不作规则排列的物质，即内部不具格子构造者，称为非晶体（non-crystal），

如玻璃、琥珀、沥青、松香等。

晶体与非晶质体，在一定的条件下可以相互转化。由于某些原因，促使晶体内部构造破坏，晶体可变成非晶质体，随之也引起矿物的物理性质和化学性质的变化，这种现象称为非晶质化。如黄铁矿风化后变为褐铁矿。

非晶质体是不稳定的，如人造玻璃或炉渣快速冷却而形成的玻璃，经过长时间后能慢慢转变为晶体，这种现象称为晶化现象。

二、空间格子

1. 空间格子的概念

从晶体的定义可知，晶体内部的格子构造是一切晶体所共有的基本特性，它是决定晶体各项性质的最基本因素之一。

虽然对于不同的晶体来说，其内部质点的种类一般都不相同，它们在空间排列的具体形式和间隔大小也不会完全一样。例如石盐 NaCl (图 1-2)，组成它的内部质点是 Cl^- 和 Na^+ ，实际测出，沿立方体棱方向的重复周期（即每相隔一个异号离子的同种离子之间的距离）为 $5.628\text{\AA}$ ❶，方铅矿 PbS ，其组成质点是 S^{2-} 和 Pb^{2+} ，质点排列形式与 NaCl 结构相同，但它沿立方体棱方向的重复周期是 $5.924\text{\AA}$ ，这点与 NaCl 结构有所不同；又如方解石 $\text{Ca}[\text{CO}_3]$ ，它的晶体结构，相当于把 NaCl 的结构沿立方体中的一条对角线方向压扁到棱交角为 $101^\circ55'$ 的程度，并以 Ca^{2+} 取代 Na^+ 的位置，以 CO_3^{2-} 取代 Cl^- 的位置而成。此时沿这样一个菱面体的棱方向， Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 交替重复排列，而重复周期则为 $6.41\text{\AA}$ 。至于其他的晶体，如正长石 $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ，普通角闪石 $(\text{Ca}, \text{Na})_{2\sim3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$ 等，它们所包含的质点种类更多，结构的具体形式也复杂得多，但是，任何一个晶体，不管它的结构有多么复杂，其质点总是保持在三度空间成周期性重复的规则排列。如果不具有这一特点，那么也就不称其为晶体了。

为了探讨晶体构造的规律性，人们利用了一些几何要素（如点、线、面），将晶体构造作某种程度的抽象表示。现以氯化铯 (CsCl) 的晶体结构 (图 1-3) 为例作简要说明。

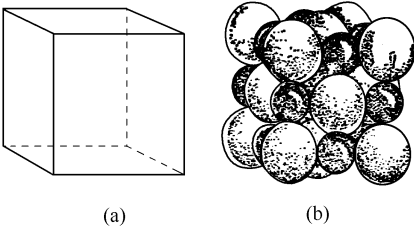


图 1-2 石盐 NaCl 的晶形 (a) 及质点排列 (b)

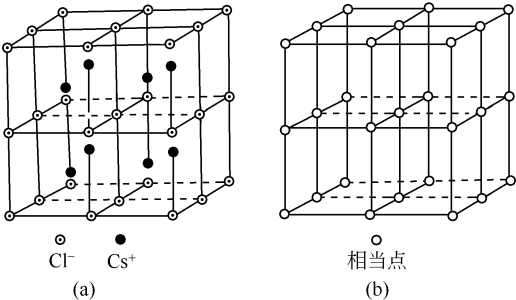


图 1-3 氯化铯的晶体结构 (a) 与空间格子 (b)

在图 1-3 中，双圈和黑圈分别表示 Cl^- 和 Cs^+ 离子的中心。不难看出，无论 Cl^- 离子或 Cs^+ 离子在晶体结构的任一方向上都是每隔一定的距离重复出现一次。为了进一步揭示这种重复规律，可以对它作某种抽象，先在结构中选出任一几何点，这个点取在 Cl^- 离子中心或 Cs^+ 离子中心，或者取它们之间的任意一点都可以，然后在结构中找出与此点相当的几何点

❶ $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$ 。

(相当点)。相当点条件是：如果原始的几何点是取在质点的中心，则相当点所占的质点的种类应是相同的，也就是占据同种质点的中心，其次是这些质点周围的环境以及方位应是相同的，也就是说，这些质点周围相同的方向上要有相同的质点。在氯化铯的晶体结构中，若原始点选在 Cl^- 离子的中心，则相当点的分布如图 1-3(b) 所示，显然，如果把原始点选在 Cs^+ 离子中心或其他任何地方，那么找出的相当点的分布也同样如图 1-3(b) 所示。由此可见，相当点的分布可以体现晶体结构中所有质点的重复规律，相当点在三维空间作格子状排列，故称为空间格子。由于质点在三维空间的排列是无限的，显然，相当点排列也是无限的，由相当点构成的空间格子必然也是无限的。

因此，空间格子的概念为：表示晶体结构规律性的几何图形，是相当点在三维空间无限排列而成。

必须说明，空间格子与晶体的格子构造，两者可以比拟，但不能直接等同。因为空间格子是借助几何要素所组成的几何图形，是抽象化的几何概念，只有纯粹的几何意义；而晶体的格子构造，则是由具体的物质所组成的实物，并反映了晶体的物理和化学等方面的性质。

2. 空间格子要素

(1) 结点 结点 (node) 是空间格子中的点，它们代表晶体结构中的相当点。在实际晶体中，结点的位置一定是由同种质点所占据，但实际晶体中的同种质点却并不一定只占据在同一套结点上。在空间格子中，就结点本身而言，它们并不代表任何质点，它们只有几何意义，为几何点。

(2) 行列 结点在直线上的排列即构成行列 (row) (图 1-4)。空间格子中任意两个结点联结起来就是一条行列的方向。行列中相邻结点间的距离称为该行列的结点间距 (如图 1-4 中的 a)。在同一行列中结点间距是相等的，在平行的行列上结点间距也是相等的；不同方向的行列，其结点间距一般是不等的。

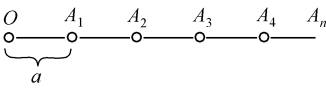


图 1-4 空间格子的行列

(3) 面网 结点在平面上的分布即构成面网 (net) (图 1-5)。空间格子中不在同一行列上的任意 3 个结点就可联结成一个面网。换句话说，也就是任意两个相交的行列就可决定一个面网。面网上单位面积内结点的密度称为面网密度 (reticular density)。相互平行的面网，面网密度必相同，且任意两相邻面网间的垂直距离-面网间距 (interplanar spacing) 也必定相等；互不平行的面网，面网密度及面网间距一般不同。面网密度大的面网，其面网间距也大；反之，密度小，间距也小。

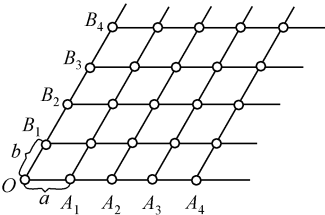
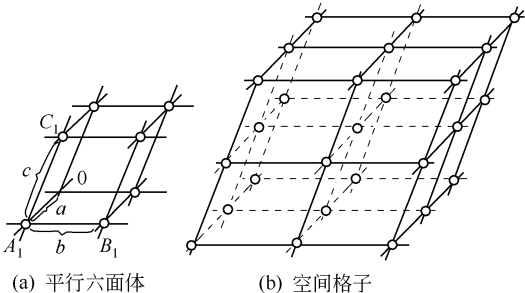


图 1-5 空间格子的面网



(a) 平行六面体

(b) 空间格子

图 1-6 空间格子

(4) 平行六面体 从三维空间来看，空间格子可以划出一个最小重复单位，那就是平行六面体 (parallel hexahedron) (图 1-6)。它由 6 个两两平行而且相等的面组成。

3. 空间格子类型

1855 年布拉维用数学方法推导出空间格子的类型有 14 种，并为后来的 X 射线分析所证实。

从图 1-6 所表示的一般形式的空间格子中，可以看出空间格子是由无数多的平行六面体平行无间隙地堆砌而成。由于平行六面体的划分方式可以多至无限，相应地，空间格子也有无限多的不同形式。为了使划分出的平行六面体具有充分的代表性，布拉维提出了统一选择平行六面体的三条原则：①所选择的平行六面体的对称性要符合整个空间格子的对称性；②在不违反对称性的条件下，平行六面体的棱与棱之间的直角关系力求最多；③在上两条的前提下，所选择的平行六面体要体积最小。按选择原则选取的平行六面体称为单位平行六面体。显然，它的大小和形状是受三根交棱的长短和交角的大小所决定的。以 a 、 b 、 c 和 α 、 β 、 γ 作为表征单位平行六面体大小和形状的数据，称为单位平行六面体参数。

根据对称性，单位平行六面体的形状共有 7 种（图 1-7），与晶体的 7 个晶系相对应，现将 7 个晶系的晶体常数特点列出如下。

等轴晶系： $a=b=c$ ； $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

四方晶系： $a=b\neq c$ ； $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

六方晶系及三方晶系： $a=b\neq c$ ； $\alpha=\beta=90^\circ$ ， $\gamma=120^\circ$ 。

三方晶系（采用菱面体坐标系，三轴定向）： $a=b=c$ ； $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$ ， 60° ， $120^\circ 28' 16''$ 。

斜方晶系： $a\neq b\neq c$ ； $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

单斜晶系： $a\neq b\neq c$ ； $\alpha=\gamma=90^\circ$ ， $\beta>90^\circ$ 。

三斜晶系： $a\neq b\neq c$ ； $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$ 。

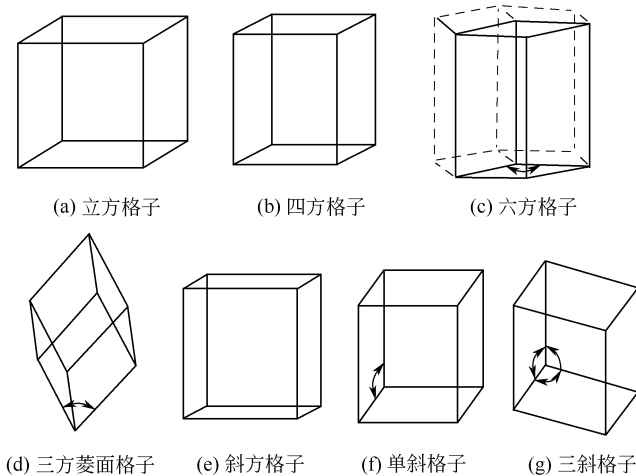


图 1-7 7 个晶系平行六面体的形状

平行六面体中结点的分布：在按选择原则选择出的平行六面体中，结点（相当点）的分布只能有 4 种可能的情况，与其对应，可分为 4 种格子类型（图 1-8）。

原始格子（ P ）：结点分布于平行六面体的 8 个角顶上。

底心格子（ C ）：结点分布于平行六面体的角顶及某一对面的中心。

体心格子（ I ）：结点分布于平行六面体的角顶和体中心。

面心格子（ F ）：结点分布于平行六面体的角顶和 3 对面的中心。

综合考虑平行六面体的形状及结点的分布情况，在晶体结构中只可能出现 14 种不同形

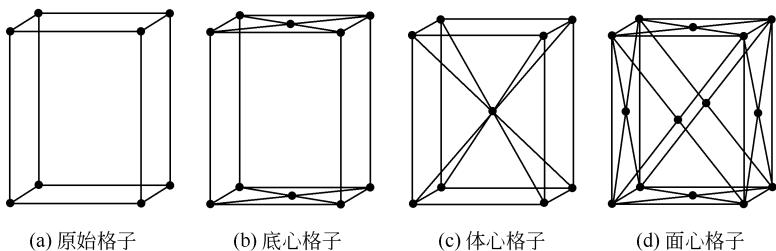


图 1-8 4 种格子类型

式的空间格子。这是由布拉维（A. Bravais）于 1848 年最先推导出来的，故称为 14 种布拉维格子。它们如表 1-1 中所列。

表 1-1 14 种布拉维格子

	原始格子 P	底心格子 C	体心格子 I	面心格子 F
三斜晶系		$C = P$	$I = P$	$F = P$
单斜晶系			$I = C$	$F = C$
斜方晶系				
四方晶系		$C = P$		$F = I$
三方晶系		与本晶系 对称不符	$I = P$	$F = P$
六方晶系		与本晶系 对称不符	$I = P$	$F = P$
等轴晶系		与本晶系 对称不符		

既然平行六面体有前述的 7 种形状和 4 种结点分布类型，为什么不是 $7 \times 4 = 28$ 种空间格子而只有 14 种呢？这是因为某些类型的格子彼此重复并可转换，还有一些不符合某晶系的对称特点而不能在该晶系中存在。

4. 晶胞（unit cell）的概念

在晶体的格子构造中，能够充分反映晶体构造特点的最小构造单位称为晶胞。晶体构造中的晶胞与空间格子中的单位平行六面体，两者是完全相当的，但又不等同。晶胞是由实在的具体质点组成的，而单位平行六面体是只有纯粹几何意义的抽象化的几何概念。

晶胞的大小、形状是用一组晶胞参数（或称常数）来确定的。其晶胞参数的含义与对应的单位平行六面体参数含义相当，其数值也完全相同。晶胞是晶体构造的基本单位，由一个晶胞就能重复出整个晶体的构造来。因此在描述某个矿物的晶体构造时，以描述它的一个晶胞代表整个晶体的构造。

三、晶体的基本性质

由于晶体是具有格子构造的固体，因此也就具备着晶体所共有的、由格子构造所决定的基本性质。现简述如下。

1. 自限性

自限性（selfconfinement）是指晶体在适当条件下可以自发地形成几何多面体外形的性质。由图 1-9 可以看出，晶体为平的晶面所包围，晶面相交成直的晶棱，晶棱会聚成尖的角度。

晶体的多面体形态是其格子构造在外形上的直接反映。晶面、晶棱与角顶分别与格子构造中的面网、行列及结点相对应，它们之间的关系如图 1-9 所示。

晶体多面体形态受格子构造制约，它服从于一定的结晶学规律。

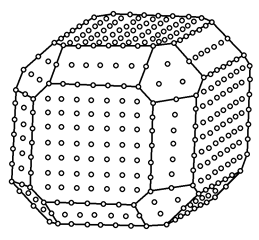


图 1-9 晶面、晶棱、角顶与面网、行列、节点的关系的示意

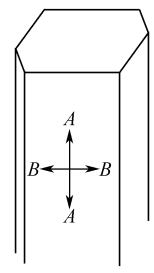


图 1-10 蓝晶石晶体硬度的异向性

2. 均一性

因为晶体是具有格子构造的固体，在同一晶体的各个不同部分，质点的分布是一样的，所以晶体的各个部分的物理性质与化学性质也是相同的，这就是晶体的均一性（homogeneity）。

但必须指出的是，非晶质体也具有其均一性。如玻璃的不同部分折射率、膨胀系数、热导率等都是相同的。但是如前所述，由于非晶质体的质点排列不具有远程规律，即不具有格子构造，所以其均一性是统计的、平均近似的均一，称为统计均一性；而晶体的均一性是取决于其格子构造的，称为结晶均一性。两者有本质的差别，不能混为一谈。液体气体也具有统计均一性。

3. 异向性（各向异性）

同一格子构造中，在不同方向上，质点排列一般是不一样的，因此，晶体的性质也随方

向的不同而有所差异，这就是晶体的异向性（anisotropy）。如矿物蓝晶石（又名二硬石）的硬度，随方向的不同而有显著的差别（图 1-10），平行晶体延长的方向（图 1-10 中的 AA ）可用小刀刻动，而垂直于晶体延长的方向（图 1-10 中的 BB ）则用小刀不能刻动。又如云母、方解石等矿物晶体，具有完好的解理，受力后可沿晶体的一定方向裂开成光滑的平面，而沿其他方向则不能裂开为光滑平面。在矿物晶体的力学、光学、热学、电学等性质中，都有明显的异向性的体现，这些将在矿物的物理性质一章中叙述。此外，晶体的多面体形态也是其异向性的一种表现，无异向性的外形应该是球形。

非晶质体一般是具等向性的，其性质不因方向而有所差别。

4. 对称性

晶体具异向性，但这并不排斥晶体在某些特定的方向上具有相同的性质。在晶体的外形上，也常有相等的晶面、晶棱和角顶重复出现。这种相同的性质在不同的方向或位置上有规律地重复，就是对称性（symmetry）。晶体的格子构造本身就是质点重复规律的体现。对称性是晶体极其重要的性质，是晶体分类的基础，以后将在专门的章节中加以讨论。

5. 最小内能性

在相同的热力学条件下，晶体与同种物质的非晶质体、液体、气体相比较，其内能最小，这就是晶体的最小内能性（minimum internal energy）。所谓内能，包括质点的动能与势能（位能）。动能与物体所处的热力学条件有关，温度越高，质点的热运动越强，动能也就越大，因此它不能直接用来比较物体间内能的大小。可用来比较内能大小的只有势能，势能取决于质点间的距离与排列。

晶体是具有格子构造的固体，其内部质点是有规律地排列的，这种规律的排列是质点间的引力与斥力达到平衡的结果。在这种情况下，无论是质点间的距离增大还是缩小，都将导致质点的相对势能的增加。非晶质体、液体、气体由于它们内部质点的排列是不规律的，质点间的距离不可能是平衡距离，因此它们的势能也较晶体为大。也就是说，在相同的热力学条件下，它们的内能都较晶体为大。实验证明，当物体由气态、液态、非晶质状态过渡到结晶状态时，都有热能的析出；相反，晶格的破坏也必然伴随着吸热效应。

晶体的加热曲线（图 1-11）和非晶体的加热曲线（图 1-12）对比如下。

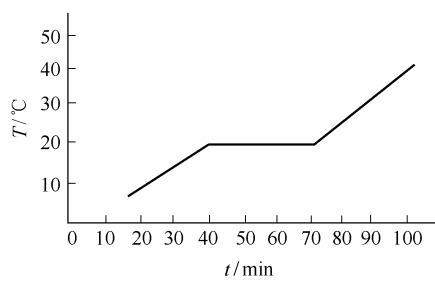


图 1-11 晶体的加热曲线

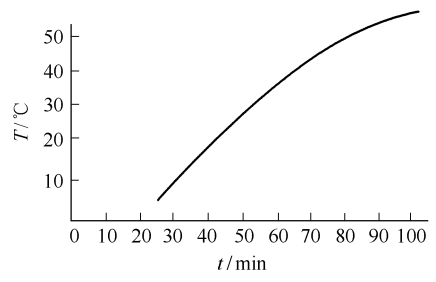


图 1-12 非晶体的加热曲线

当晶体加热时，起初温度是随着时间逐渐上升的。当达到某一温度时，晶体开始熔解，同时温度的上升停顿了，此时所加的热量用于破坏晶体的格子构造。直到晶体完全熔解，温度才开始继续上升。在温度停顿的时间内，晶体吸收了一定的热量而使自己转变为液体，这些热量称为熔解潜热。由于晶体的格子构造中各个部分的质点是按同一方式排列的，破坏晶体各个部分需要同样的温度。因此，晶体具有一定的熔点。

非晶质则与之不同，由于它们不具有格子构造，所以没有一定的熔点。例如，将玻璃加热时，它首先变软，逐渐变为黏稠的熔体。在这一过程中没有温度的停顿，其加热曲线为一光滑的曲线。

6. 稳定性

在相同的热力学条件下，晶体比具有相同化学成分的非晶体稳定，非晶体有自发转变为晶体的必然趋势，而晶体决不会自发地转变为非晶体。这就是晶体的稳定性(stability)。

晶体的稳定性是晶体具有最小内能性的必然结果。

四、布拉维法则

在晶体生长过程中，晶面是平行地向外推移的。因此，把晶面在单位时间内沿其法线方向向外推移的距离称为晶面生长速度。图 1-13 为一晶体格子构造的某个切面，AB、CD、BC 为三个晶面的迹线，相应面网的面网密度是 $AB > CD > BC$ ， $a_0 > b_0$ 。因为面网密度小的面，其面网间距也小，从而相邻面网间的引力就大，所以面网密度小的晶面将优先生长；反之，面网密度越大，相应的面网间距也越大，面网间的引力就越小，最不利于质点的堆积，故面网密度大的晶面则落后生长。因此可以得出结论：在一个晶体上，各晶面间相对的生长速度与它们本身面网密度的大小成反比。即面网密度越大的晶面，其生长速度越慢，反之则快。

研究晶面的生长速度，对于研究晶体的形态有很大的关系。因为晶体形态上的变化决定于不同晶面相对生长速度的大小。由图 1-14 可以看出，面网密度小的晶面由于其生长速度快，在晶体成长过程中，其面积将逐渐缩小，最终可被面网密度较大的相邻晶面所淹没。而面网密度大的晶面由于其生长速度慢，则在生长过程中逐渐扩大，最后便在晶体上保留下来。因此法国学者布拉维作了总结：晶体通常被面网密度大的晶面所包围。这就是布拉维法则。

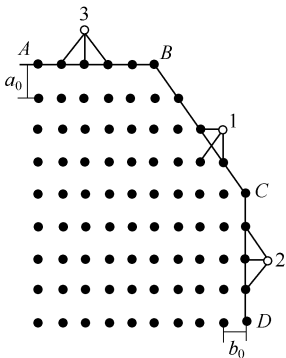


图 1-13 面网密度小的晶面优先生长的图解

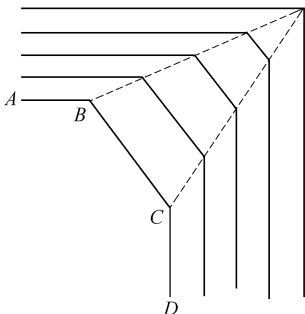


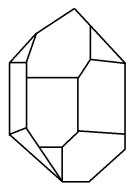
图 1-14 生长速度快的晶面在成长过程中被淹没的示意

五、影响晶体生长的因素

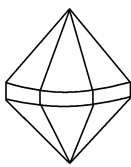
晶体生长时所处的外部环境，对晶体的生长形态影响很大。

(1) 温度 同种物质的晶体在不同温度下生长，所具形态是有差别的。高温下生长的石英晶体与低温下生长的石英晶体不同，如图 1-15 所示。此外，还有长石、方解石等晶形也随其形成温度而异。

(2) 杂质 溶液中的杂质常常严重地影响着晶体外形。杂质的种类和数量不同时，其影响程度也有差异。如明矾，在纯净的水溶液中结晶成八面体，而当溶液中含有大量硼砂杂质



(a) 低温石英



(b) 高温石英

图 1-15 温度的影响

时，则结晶成立方体。但并不是任何杂质都对晶体生长形态有影响。

(3) 结晶速度 结晶速度大时，结晶中心增多，晶体长得细小，常常长成针状、树枝状等。相反，结晶速度小则晶体长得粗大。

(4) 黏度 黏度很大时，质点扩散的速度很慢，晶面生长所需的物质供应不足，因而晶体生长很慢，甚至停止生长。但是晶体的棱和角，则

可以接受多方面的扩散物质，所以相对地生长得快一些。因此，使得晶体的棱角突出，中心凹陷，形成了所谓“骸晶”或树枝状“雏晶”。

影响晶体生长的因素还有很多，如晶体的结构类型及重力的作用等。

总之，晶体发生和成长的过程，既是质点由混乱到有规则的过程，也是质点按格子构造排列的过程。这一过程既遵循布拉维法则，又受外部环境的影响。所以晶体的形态，是由其内部构造和生成环境两方面所决定的。

第二节 晶体的对称和分类

一、对称的概念及晶体对称的特点

前面谈到了晶体具有格子构造，这一节将进一步讨论与格子构造规律密切相关的晶体的对称规律。

对称是个普遍现象，在自然界及日常生活中都是常见的。如蝴蝶和花冠、某些建筑物、工艺美术品、生活用具等都常呈对称的图形。

物体或图形的对称，有两个最基本的特点：一是物体上有相等的部分；二是这些相等部分有规律地重复出现。如蝴蝶的两个翅膀，通过垂直平分它的镜面的反映而彼此重合；6个相同的花瓣，通过垂直花冠并过其中心的一根直线的旋转，使之多次重复再现（图 1-16）。因此物件的相等部分作有规律的重复的性质称为对称。

晶体是具有对称性的，晶体外形的对称表现为相等的晶面、晶棱和晶顶有规律的重复出现。

晶体具有对称性的原因不同于其他物体，动植物的对称是长期演化的结果，对称有利于它们的生存和发育；建筑物、工艺品、用具的对称是人为的，是为了使其美观和适用；而晶体的对称是由于其内在的格子构造。因此晶体的对称具有以下特点。

① 所有晶体都是对称的。这是因为一切晶体都具有格子构造。而格子构造本身就是对称的。

② 晶体的对称受格子构造的严格控制。只有格子构造能够容许的那些对称才能在晶体上出现。这就是晶体对称的有限性。

③ 晶体的对称不仅表现在外部形态上，而且表现在性质上。因为晶体的性质同样要受其格子构造的控制。

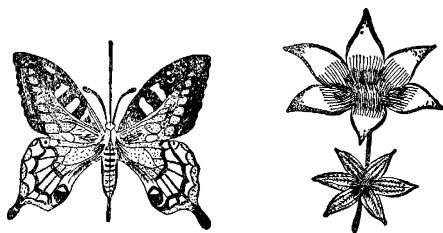


图 1-16 蝴蝶与花瓣的对称

正是由于以上的特点，故晶体的对称可以作为晶体分类的依据。

二、对称操作与对称要素

欲使对称图形中相等的部分重复，必须通过一定的操作，这种操作称为对称操作。例如，欲使蝴蝶的两个相等部分的重复，必须借一个镜面的“反映”；欲使花瓣重复，必须使花冠围绕一根直线“旋转”等。在进行对称操作时所应用的辅助几何要素（点、线、面）称为对称要素。晶体外形上可能存在的对称要素及相应的对称操作如下。

1. 对称面(P)

对称面是一个假想的平面，相应的对称操作为对于此平面的反映。它将图形平分分为互成镜像的两个相等部分。

在图 1-17 中，平面 P_1 和 P_2 ，都是对称面（垂直纸面），因为它们都可以把图形 $ABDE$ 分为互成镜像的两个相等部分。但 AD 却不是图形 $ABDE$ 的对称面，因为它虽然把图形 $ABDE$ 平分分为 $\triangle AED$ 和 $\triangle ABD$ 两个相等部分，但这两部分不是互为镜像关系， $\triangle AED$ 的镜像是 $\triangle AE_1D$ 。

晶体上对称面的出露位置：垂直并平分晶面，且垂直平分晶棱的平面；包含晶棱并平分晶面夹角的平面。

在一个晶体上，可能没有对称面，也可能有一个或若干个对称面，但最多不能多于 9 个。对称面的符号是 P 。描述一个晶体有几个对称面时，就把对称面的数目写在符号 P 的前面，如立方体有九个对称面（图 1-18），记作 $9P$ 。

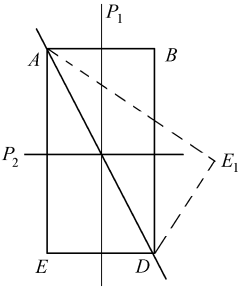


图 1-17 对称面示意

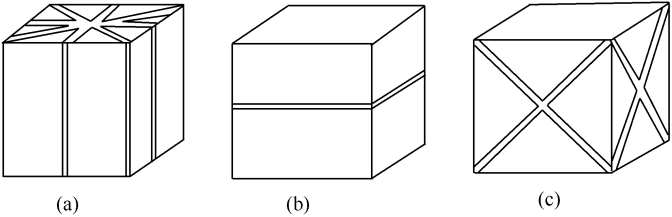


图 1-18 立方体的 9 个对称面

2. 对称轴 (L^n)

对称轴是通过晶体中心的一根假想直线；相应的对称操作是围绕此直线的旋转。当晶体围绕此直线旋转一定角度后，可使晶体上的相等部分重复。旋转 360° ，晶体上相等部分重复出现的次数，称为轴次 (n)，使相等部分重复出现所必须旋转的最小角度称为基转角

(α)。两者的关系为 $n = \frac{360^\circ}{\alpha}$ 。

对称轴以 L 表示，轴次 n 写在 L 的右上角。如 L^4 、 L^6 等。

晶体的对称轴只有 L^1 、 L^2 、 L^3 、 L^4 、 L^6 五种，而没有 5 次及 6 次以上的对称轴。这是晶体对称的有限性所决定的。在空间格子中，垂直对称轴必定有面网存在，其网孔的形状与对称轴的轴次是相对应的，从图 1-19 可以看出，由 L^2 (a)、 L^3 (b)、 L^4 (c)、 L^6 (e) 所决定的多边形网孔均能无间隙地布满整个平面，符合空间格子规律，而由五次 (d)、七次 (f)、八次 (g) 对称轴所决定的正五边形、正七边形、正八边形网孔不能无间隙地布满整个平面，不符合空间格子规律，所以在晶体中不可能存在五次及高于六次的对称轴，这就是晶体