

鲁伟明 主编 刘洪波 主审

J I E J I N G X U E Y U
Y A N X I A N G X U E

结晶学 与 岩相学

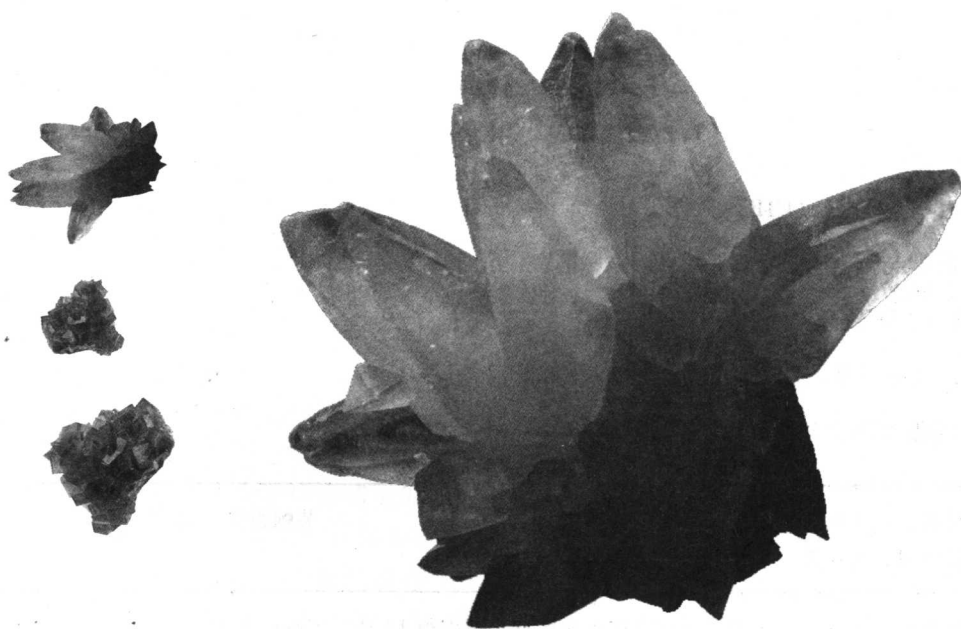


化学工业出版社

鲁伟明 主编 刘洪波 主审

JIE JING XUE YU
YAN XIANG XUE

结晶学 与 岩相学



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分为四大部分：基础理论部分（第1~3章），对结晶学、矿物岩石学、晶体光学等相关基础知识进行阐述；无机材料岩相学的研究方法部分（第4、5章），详细系统介绍了光学显微镜鉴定晶体矿物的基本原理和方法；无机材料岩相分析部分（第6~9章），分别介绍陶瓷、玻璃、水泥熟料、耐火材料等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；附录部分，以表格形式分别列出无机材料工业原料和制品中常见矿物的主要光学性质、鉴定特征，并扼要介绍它们在无机材料制品中的出处及其主要特征。

本书结构合理，系统性强，可用作大学无机非金属材料专业的教材，也可以满足无机材料研究、生产与使用等技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

结晶学与岩相学/鲁伟明主编. —北京：化学工业出版社，2007.9
ISBN 978-7-122-01065-0

I. 结… II. 鲁… III. ①晶体学②岩相 IV. P586

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 134925 号

责任编辑：丁尚林 王晓云
责任校对：凌亚男

装帧设计：韩 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 446 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

结晶学与岩相学是研究无机材料工业原料及其产品的一门科学。人类以天然矿物岩石作原料生产无机非金属材料已有几千年历史,随着社会发展和科技进步,无机非金属材料工业不断发展,产品不断更新。无机非金属材料以不同原料配比和工艺条件可以生产出不同性能和不同用途的产品,而不同的无机非金属材料产品则有其独特的岩相特征。因此,通过无机非金属材料工业原料和产品的岩相分析研究,可以探索出改进生产工艺、提高产品质量和研制新产品的途径。

结晶学与岩相学是无机非金属材料类专业必修的专业基础课程,内容涉及几何结晶学、矿物学、岩石学、晶体光学及无机材料工艺学等多门课程。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,按国家最新教学大纲的要求,结合作者多年教学的实践而编写的教材。理论课时为50~60学时。

本书是在学习并初步掌握本专业必要的基础知识和专业工艺知识的前提下,用光学显微镜研究无机材料的显微结构,阐明无机非金属材料所用的原料、工艺配方、生产工艺过程及条件对制品显微结构的影响,并进一步探讨它们与无机材料制品的质量、技术性能、在使用过程中变化以及互相之间关系等方面的问题。岩相分析在指导无机材料的生产制造、制成品使用、新材料及新工艺的研究和开发以及材料改性的研究等方面,均是重要而有效的方法。

全书共分为四大部分:基础理论部分(第1~3章),对结晶学、矿物岩石学、晶体光学等相关基础知识进行阐述;无机材料岩相学的研究方法部分(第4、5章),详细系统介绍了光学显微镜鉴定晶体矿物的基本原理和方法;无机材料岩相分析部分(第6~9章),分别介绍陶瓷、玻璃、水泥熟料、耐火材料等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;附录部分,以表格形式分别列出无机材料工业原料和制品中常见矿物的主要光学性质、鉴定特征,并扼要介绍它们在无机材料制品中的出处及其主要特征。

本书由长沙理工大学鲁伟明主编,刘洪波教授主审。第1章至第5章及附录由鲁伟明编写;第6、7章由成茵编写;第8章由夏清编写;第9章由叶昌编写。

本书在编写过程中,得到长沙理工大学材料科学与工程学院领导和同事的支持和帮助,为本书的编写和出版提供珍贵的显微照片和有价值的资料。编者在此一并向他们表示衷心的感谢。

书中如有不妥之处,请读者批评指正。

编者

2008年1月

目 录

第 1 章 几何结晶学	1
第 1 节 晶体的基本概念	1
一、晶体的定义	1
二、空间格子	2
三、晶体的基本性质	3
四、非晶质体	4
第 2 节 晶体的形成与生长规律	5
一、晶体的形成	5
二、晶体的生长	6
三、布拉维法则	7
第 3 节 晶体的宏观对称	8
一、对称的概念	8
二、晶体对称的特点	8
三、晶体的对称操作及对称要素	8
四、对称要素的组合	12
五、晶体的 32 种对称型及推导	13
六、晶体分类	14
第 4 节 晶体的理想形态	16
一、单形	16
二、聚形	21
第 5 节 晶体定向与结晶符号	22
一、晶体定向	22
二、结晶符号	23
第 6 节 晶体构造的几何规律	26
一、布拉维十四种空间格子	26
二、晶胞	28
三、晶体的微观对称要素	29
四、空间群	31
五、对称型及空间群的国际符号	32
六、等效点系的概念	35
思考题	36
第 2 章 矿物与岩石	38
第 1 节 矿物及其基本性质	38

一、矿物的概念	38
二、矿物的化学成分与化学性质	39
三、矿物的形态	43
四、矿物的物理性质	46
第2节 矿物的命名和分类	50
一、矿物的命名	50
二、矿物的分类	50
第3节 无机材料中常见的矿物	52
一、自然元素矿物	52
二、氧化物及氢氧化物矿物	53
三、卤化物矿物	55
四、硫化物矿物	55
五、硫酸盐及碳酸盐矿物	56
六、硅酸盐矿物	57
第4节 岩石及其基本性质	63
一、岩石的概念	63
二、岩浆岩	63
三、沉积岩	68
四、变质岩	71
思考题	74
 第3章 晶体光学基础	75
第1节 光及其在介质中传播	75
一、自然光与偏光	75
二、光的折射及折射率	76
第2节 光在晶体中的传播特点	78
一、光性均质体及光性非均质体	78
二、双折射	78
第3节 光率体	80
一、光率体	80
二、均质体光率体	80
三、一轴晶光率体	80
四、二轴晶光率体	82
第4节 光率体在晶体中的位置——光性方位	85
一、一轴晶光率体在晶体中的位置	85
二、二轴晶光率体在晶体中的位置	85
思考题	86
 第4章 偏光显微镜下的晶体光学性质	87
第1节 偏光显微镜	87
一、偏光显微镜的构造	87

二、偏光显微镜的品质评价	89
三、偏光显微镜的调节与校正	89
四、偏光显微镜的保养	92
五、薄片的制备	92
第2节 单偏光镜下的晶体光学性质	92
一、晶体形态	93
二、解理及解理夹角的测定	93
三、颜色与多色性	95
四、贝克线、糙面、突起及闪突起	95
第3节 正交偏光镜下的晶体光学性质	98
一、正交偏光镜下光的干涉原理	98
二、正交偏光镜下晶体的干涉色	100
三、补色法则及补色器	103
四、正交偏光镜下晶体光学性质的观察	105
第4节 锥光镜下的晶体光学性质	110
一、锥光镜的装置及特点	110
二、一轴晶干涉图	111
三、二轴晶干涉图	115
四、光率体色散及锥光镜下色散现象的观察	122
第5节 透明矿物的系统鉴定	123
一、透明矿物系统鉴定的内容	123
二、全面系统鉴定透明矿物薄片的程序	124
第6节 油浸法测折射率值	124
一、浸油的配制方法	124
二、浸油薄片的制备	125
三、测定浸油与矿物的折射率的大小	125
四、油浸法测定矿物折射率值的具体步骤	127
第7节 矿物颗粒大小及含量的测定	128
一、人工测定	128
二、自动测定	130
思考题	131
 第5章 反光显微镜下的晶体光学性质研究	 132
第1节 反光显微镜	132
一、反光显微镜的构造	132
二、反光显微镜的调节使用与保养	136
第2节 反射光下的晶体光学性质	137
一、矿物的结构	137
二、矿物的反射与反射率	138
三、矿物的反射色与反射多色性	140
四、矿物的内反射	140

五、矿物的均质性与非均质性·····	142
第3节 矿物的硬度·····	143
一、刻划硬度·····	143
二、抗磨硬度·····	143
三、抗压硬度·····	144
第4节 光片与光片的浸蚀·····	144
一、光片的磨制·····	144
二、光片浸蚀鉴定的概念·····	145
思考题·····	146
第6章 陶瓷岩相分析 ·····	147
第1节 陶瓷材料的种类与制备·····	147
一、陶瓷材料的品种及分类·····	147
二、陶瓷材料制备工艺·····	148
第2节 陶瓷材料的显微结构特征·····	151
一、晶相与晶粒·····	151
二、玻璃相·····	153
三、气相·····	154
四、表面与界面·····	155
五、晶界·····	156
第3节 几种陶瓷材料的岩相分析·····	157
一、陶瓷釉的岩相分析·····	157
二、电瓷的岩相分析·····	159
三、氧化铝瓷·····	161
四、滑石瓷·····	162
五、氮化硅瓷和碳化硅瓷·····	162
思考题·····	163
第7章 玻璃材料岩相分析 ·····	165
第1节 玻璃材料的形成及缺陷·····	165
一、玻璃制品的形成·····	165
二、微晶玻璃的形成·····	166
三、玻璃体内的缺陷·····	167
第2节 玻璃结石的种类及岩相分析·····	168
一、粉料结石·····	168
二、耐火材料结石·····	170
三、析晶结石·····	173
第3节 非晶态缺陷的岩相分析·····	175
一、玻璃气泡·····	175
二、玻璃态夹杂物·····	176
三、其他非晶态缺陷·····	178

第4节 微晶玻璃的岩相分析	179
一、微晶玻璃的制备	179
二、微晶玻璃的岩相分析	180
三、微晶玻璃的种类	182
思考题	186
第8章 水泥材料显微结构分析	187
第1节 概述	187
一、水泥的原料	187
二、水泥的生产	188
三、水泥熟料的组成	189
四、水泥的水化和强度	189
第2节 硅酸盐水泥熟料的显微结构特征	189
一、阿利特 (A 矿)	190
二、贝利特 (B 矿)	191
三、中间相	192
四、游离氧化钙和方镁石	193
第3节 硅酸盐水泥熟料显微结构的影响因素	194
一、原料及生料对熟料显微结构的影响	195
二、煅烧工艺对熟料显微结构的影响	200
三、熟料显微结构对强度的影响	202
第4节 硅酸盐水泥水化产物的显微结构特征	204
一、水泥水化、凝结和硬化	204
二、水泥的水化产物	205
第5节 铝酸盐水泥熟料的显微结构特征	208
一、高铝水泥熟料	208
二、硫铝酸盐水泥熟料	210
三、氟铝酸盐水泥熟料	211
第6节 水泥混合材的显微结构特征	212
一、高炉矿渣	212
二、钢渣	213
三、粉煤灰	215
思考题	217
第9章 耐火材料显微结构分析	218
第1节 概述	218
一、耐火材料的分类	218
二、显微结构与生产工艺及制品性能之间的关系	219
第2节 硅质耐火材料的显微结构特征	219
一、显微结构特征	220
二、使用过程中显微结构的演变	222

第3节 铝硅质耐火材料的显微结构特征	224
一、以莫来石为主晶相的耐火制品显微结构特征	224
二、以刚玉为主晶相的耐火制品显微结构特征	225
三、铝土矿系耐火制品显微结构特征	227
四、使用过程中显微结构的演变	228
第4节 锆铝硅质耐火材料的显微结构特征	230
一、熔铸 AZS 制品显微结构特征	231
二、烧结 AZS 制品显微结构特征	232
三、使用过程中的显微结构的演变	234
第5节 镁质耐火材料的显微结构特征	235
一、镁质耐火制品显微结构特征	235
二、镁铬质耐火制品显微结构特征	236
三、镁铝质耐火制品显微结构特征	238
四、使用过程中显微结构的演变	239
第6节 含碳钙镁质耐火材料的显微结构特征	241
一、白云石的烧结与熔融	241
二、含碳的钙镁质耐火制品显微结构特征	242
三、使用过程中显微结构的演变	243
思考题	244
附表	245
附表一 146 种单形	245
附表二 矿物性质一览表	247
附表三 主要玻璃结石矿物及性质	276
附表四 米舍尔—列维色谱表	278
参考文献	279

第 1 章 几何结晶学

自然界的物质，大部分是晶体，研究材料的特性将涉及晶体的固有性质和结晶学的一些基本规律。本章先阐明什么是晶体，然后根据晶体内部构造不同于其他物质的特点，进一步导出晶体构造的共同规律，及由晶体构造所决定的一切晶体所共有的基本性质。

第 1 节 晶体的基本概念

一、晶体的定义

1. 晶体的外表特征

在古代，人们认识晶体，是从观察外部形态开始的。最先将有规则几何外形的石英称为晶体。后来把天然具有几何多面体形态的固体，如石盐、磁铁矿、方解石都称为晶体（图 1-1）。从外表特征描述，晶体是天然具有规则几何外形的固体。晶体的外表平面称晶面，两晶面的相交直线称晶棱，晶棱汇聚的点称角顶。

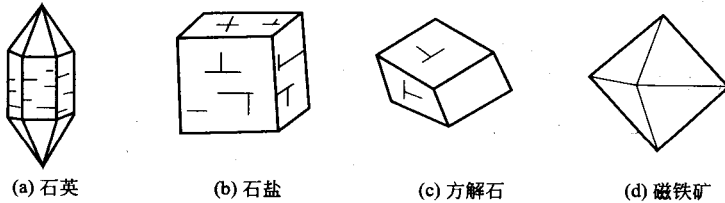


图 1-1 几种常见矿物晶体结构

然而，人们发现，盐湖中产出的石盐，有立方体晶型，也有任意形态的颗粒。它们两者之间，除形态外，所有的其他性质，如密度、硬度等，是完全相同的。人们还发现，若将任意形态的石盐颗粒，放入到高浓度的盐湖水中，让它有充分的空间生长，也同样能长成立方体形态。由此可见，晶体的多面体形态外表特征，应是其内部某种本质因素在外表上的反映。

2. 晶体的共性

规则的几何外形是晶体的外表特征，晶体为什么会具有规则的几何外形呢？这是由晶体内部质点的排列规律所决定的。也就是说，是由于晶体内部质点的排列方式的不同，决定了晶体外表特征的差异。

关于晶体的本质，也就是晶体内部构造的问题，直至 1912 年，才由德国科学家劳厄 (Max von Laue, 1879—1960) 用晶体作光栅，使 X 射线产生衍射，证明晶体内部质点是有序排列的，又由英国科学家布拉格父子 (William Henry Bragg, 1862—1942 和 William Lawrence Bragg, 1890—1971) 用各种各样的晶体做大量的衍射实验，揭示了一切晶体皆具有格子构造的秘密。

一切晶体, 不论其外形如何, 它的内部质点(原子、离子、离子团或分子)都是有规律排列的, 即晶体内部相同质点在三维空间均呈周期性重复, 这就是晶体的共性。

晶体的定义: 晶体是内部质点在三维空间呈周期性重复排列的固体, 或者说, 晶体是具有格子构造的固体。

二、空间格子

1. 空间格子的定义

既然一切晶体都有格子构造, 那么各种晶体的格子之间, 有无共同规律可循呢? 让我们从晶体的格子构造中, 做些抽象的归纳和推理, 也就是说, 抛开晶体的物质意义, 仅就其内部质点的排列方式分析, 来找出各种晶体格子都遵循的共同规律。

以石盐(NaCl)晶体格子为例, 来说明空间格子的导出。在石盐晶体结构中, 任意割取一个能代表整个结构规律的最小单位, 如图 1-2 所示。

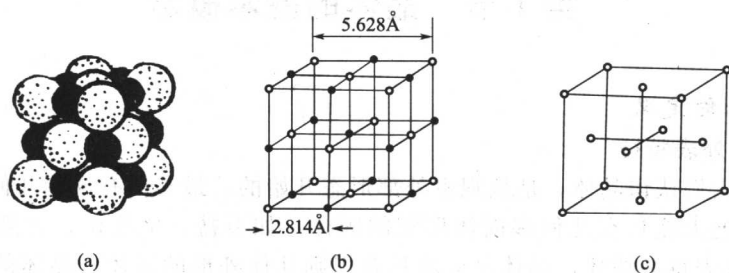


图 1-2 石盐(NaCl)的晶体结构(a, b)及其相当点的分布(c)

注: $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。

图 1-2(a)、图 1-2(b) 中大小两种球分别代表氯离子和钠离子, 它们在三维空间的不同方向上, 各自都按一定的间隔重复出现, 并排列成立方体形状, 在沿立方体三条棱边的方向上, Na^+ 与 Na^+ 之间及 Cl^- 与 Cl^- 之间各自都间隔 $5.628\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$), 沿两棱边交角的平分线方向各自都间隔 $3.978\text{\AA}$ 。任何外形的氯化钠晶体都有这种立方格子排列。

在氯化钠晶体中, 任选一个点, 然后在结构中找出与此点完全相同的全部几何点(这一类点称为相当点或等同点), 这就构成了图 1-2(c) 的形状。

等同点: 在晶体结构中的种类相同、分布位置或周围环境也相同的一类点, 它可与质点重合, 也可不在质点上。

等同点必须具备的两个条件:

- ① 位置或质点种类相同, 几何点若在质点中心, 等同点亦应在此;
- ② 质点周围环境相同, 即这些质点在相同方向的相同距离上有相同的质点。

在氯化钠晶体中, 所有的 Cl^- 是一类等同点, 所有的 Na^+ 又是另一类等同点。

等同点的分布, 可以体现晶体中所有质点的重复规律——在空间上呈格子状, 这种结构图形叫空间格子(图 1-3)。

空间格子: 等同点在三维空间作格子状排列所构成的图形。

空间格子不表示物体的物质意义, 仅表示物质内部质点排列的几何构图。我们设想空间格子在三维空间作无限排列, 不受晶体大小限制。

2. 空间格子的要素

(1) 结点 空间格子中的点, 代表晶体结构中的等同点。在实际晶体中, 结点的位置可为同种质点所占据。但就其本质而言, 它不代表任何质点, 它只具几何意义。

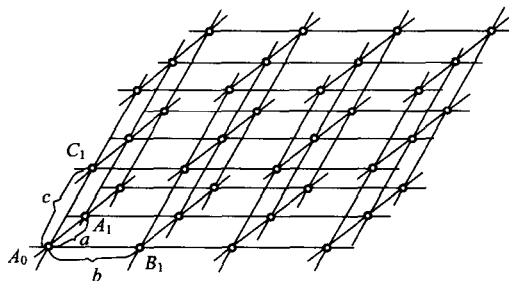


图 1-3 空间格子

(2) 行列 结点在直线上的排列称为行列 (图 1-4)。空间格子中任何两质点联结起来就是一条行列的方向。

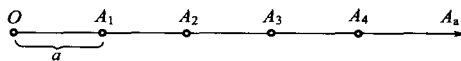


图 1-4 空间格子的行列

行列中相邻两结点之间的距离称为该行列的结点间距。在同一行列中结点间距相等，在平行行列中结点间距不变，不平行行列的结点间距一般不等。

(3) 面网 结点在平面上的分布即构成面网 (图 1-5)。空间格子中不在同一行列上的三个结点可构成一面网。任意两相交行列决定一个面网。

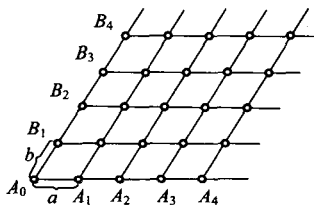


图 1-5 空间格子的面网

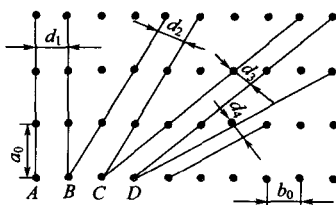


图 1-6 面网密度与面网间距关系

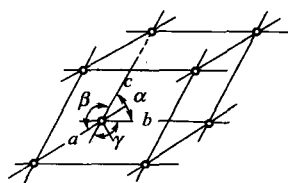


图 1-7 平行六面体

面网上单位面积内的结点数，称为面网密度。在一个空间格子中，任意两相邻平行面网之间的垂直距离称为面网间距。在一个空间格子中平行面网的面网密度与面网间距相等。而不平行的面网之间，面网间距和面网密度一般不等，面网间距较大者面网密度也较大 (图 1-6)。

(4) 平行六面体 空间格子的最小单位，又叫单位空间格子。平行六面体由六个两两平行的面网组成，结点分布于它的角顶上，平行六面体的三个棱长，恰好正是三组平行行列的结点间距 (图 1-7)。

空间格子可看作是无数个平行六面体在三维空间毫无间隙地重复堆叠而成。相应地，在实际晶体中，也能划出这样的单位，称为晶胞 (严格地说，称为原胞，能反映整个晶体结构特征的最小结构单位才称晶胞)。晶体可视为无数个晶胞在三维空间毫无间隙地重复堆叠。

三、晶体的基本性质

晶体是具有格子构造的固体，因此，所有晶体都具格子构造所决定的基本性质。

1. 自限性 (自范性)

指晶体在适当条件 (能自由生长) 下，可以自发形成规则几何多面体。晶体的多面体

形态, 是其格子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、行列及结点相适应。它们之间的关系如图 1-8 所示。晶体多面体形态受格子构造制约, 服从一定的对称规律。

2. 均一性

因为晶体是具有格子构造的固体, 晶体内部相同质点在三维空间均呈周期性重复。同一晶体的各个不同部分, 质点的分布是一样的, 所以晶体的各个不同部分的物理性质及化学性质是一样的。

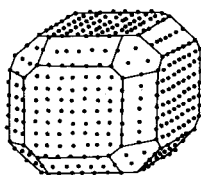


图 1-8 晶面、晶棱、角顶与面网、行列、结点的关系示意图

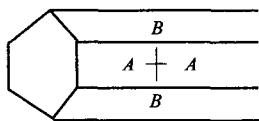


图 1-9 蓝晶石的硬度各向异性

3. 异向性 (各向异性)

同一格子构造中, 在不同的方向上质点的排列方式一般是不同的。晶体的性质因方向不同而有差异。这就是晶体的异向性。如蓝晶石在不同的方向上硬度有很大差异 (图 1-9)。AA 方向, 摩氏硬度 $H=4.5$, 小刀可刻动。BB 方向, $H=6.5$, 小刀不能刻动。

4. 对称性

晶体中相等的晶面、晶棱、角顶, 以及晶体的物理、化学性质在不同方向或位置上有规律地重复出现的性质称为对称性。晶体内部质点在三维空间周期性重复, 决定了晶体在空间上必然具有对称性。晶体的对称性特点将在本章第 2 节详细阐明。

5. 最小内能

晶体内部的质点有规律地排列, 是质点间引力与斥力达到平衡的结果, 这时的质点只能在某一位置作振荡而不能成为自由粒子, 其动能与势能都是很低的。物质的内能包括动能与势能, 在相同的热力学条件下, 晶体与同种化学成分的非晶体如液体、气体比较, 其内能最小。同种温度的非晶质体要变为晶体, 必须要放出结晶热, 才能实现其结构转变。

6. 最大稳定性

在相同的热力学条件下, 具有相同化学成分的晶体与非晶体比较, 晶体是最稳定的。这是因为晶体的内能最小, 内部质点在一定位置上振动保持格子的平衡, 晶体总是处于最稳定状态。要破坏晶格, 使晶体变成同温度的其他状态 (如熔融、升华等), 必须获得足够的能量, 所以, 与物质的其他状态相比, 晶体具有最大稳定性。

四、非晶质体

自然界中还有一些固体物质, 如玻璃、琥珀、松香等, 它们无规则的外形, 内部质点分布类似于液体, 不作规律排列, 称为非晶质或非晶质体。它们在任何条件下都不能自发地长成规则的几何多面体。从结构到物质成分, 其在各个部分之间, 具统计意义上的均匀性; 不同方向的性质, 在统计意义上也是一致的, 在内部性质上则是统计上均一的各向同性体。所以, 非晶质体是无定形的凝固态物体, 也可认为是过冷却的液体, 或硬化的液体。非晶质体加热时逐渐软化, 无固定熔点 (图 1-10)。

晶体与非晶体在一定条件下可以转化。某些玻璃使用多年后, 透明度降低, 这是玻璃

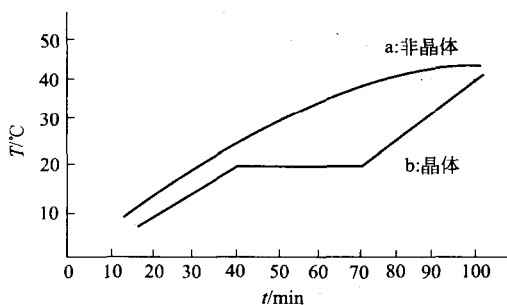


图 1-10 晶体与非晶体的加热曲线

向结晶态转化形成雏晶。这种转变过程称为晶化或脱玻化。相反，一些放射性晶体矿物，由于放射性元素蜕变放出核能，破坏晶格，产生非晶质化现象。

某些固态的非晶质体如石英玻璃，它们内部质点排列方式并非完全杂乱无章，而是在极小范围可能是遵循某种规律，但整体排列不具规律性。这种现象也称为质点排列具有近程规律性而不具远程规律性。

第2节 晶体的形成与生长规律

一、晶体的形成

晶体的形成和生长，实质上是在一定的条件下，组成物质的质点按照格子构造规律排列的过程。

1. 晶体形成的方式

晶体是在物相转变的情况下形成的。物相有三种，即气相、液相和固相。只有晶体才是真正的固体。由气相、液相转变成固相时形成晶体，固相之间也可以直接产生转变。

(1) 由液相转变为固相 这是自然界极为普遍的方式。有从熔体和溶液中结晶两种现象。

① 从熔体中结晶 当温度低于熔点时，晶体开始析出。如水在温度低于零摄氏度时结晶成冰；金属熔体冷却到熔点以下结晶成金属晶体。

② 从溶液中结晶 当溶液达到过饱和时，才能析出晶体。其方式有：

- A. 温度降低，晶体陆续析出；
- B. 水分蒸发，溶液浓度变大，盐类矿物结晶出来；
- C. 通过化学反应，生成难溶物质。

(2) 由气相转变为固相 从气相直接转变为固相的条件是要有足够低的蒸汽压。雪花就是由于水蒸气冷却直接结晶而成的晶体。

(3) 由固相重结晶为固相 环境条件的变化，可以引起晶体结构在固态情况下改变，使晶粒变大或生成新矿物。如：在 573°C 以上， SiO_2 可形成高温石英，温度降低到 573°C 以下时，则转变为晶体结构不同的低温石英。或原矿物晶粒逐渐变大，及由固态非晶质结晶等。

2. 晶核的形成

晶体生成的一般过程是先生成晶核，而后再逐渐长大。一般认为晶体从液相或气相中

的生长有三个阶段：①介质达到过饱和、过冷却阶段；②成核阶段；③生长阶段。

在某些介质体系中，过饱和、过冷却状态的出现，并不意味着整个体系的同时结晶。温度或浓度的局部变化，外部撞击，或一些杂质粒子的影响，都会导致体系中出现局部过饱和度、过冷却度较高的区域，使结晶粒子的大小达到临界值以上。这种形成结晶微粒子的作用称为成核作用。

二、晶体的生长

1. 层生长理论

科塞尔 (Kossel, 1927) 首先提出，后经斯特兰斯基 (Stranski) 加以发展。它论证在晶核的光滑表面上生长一层原子面时，质点在界面上进入晶格“座位”的最佳位置是具有三面凹入角的位置 (图 1-11 中 K)。在此位置上，质点与晶格结合成键放出的能量最大。因为新质点在晶格上就位时，最可能结合的位置是能量上最有利的位置，即结合成键数目最多，释放出能量最大的位置。

图 1-11 示出了质点在光滑表面上所可能有的生长位置。K 为曲折面，具有三面凹入角，是最有利的生长位置。其次是 S 阶梯面，具有二面凹入角的位置。最不利的生长位置是 A。由此可以得出如下的结论：晶体在理想情况下生长时，先长一条行列，然后长相邻的行列。在长满一层面网后，再开始长第二层面网。晶面 (最外的面网) 是平行向外推移而生长的。这就是晶体的层生长理论，用它可以解释如下的一些生长现象。

① 晶体常生长成为面平、棱直的多面体形态。

② 在晶体生长的过程中，环境可能有所变化，不同时刻生成的晶体，在物性 (如颜色) 和成分等方面可能有细微的变化，因而在晶体的断面上常常可以看到带状构造 (图 1-12)。它表明晶面是平行向外推移生长的。

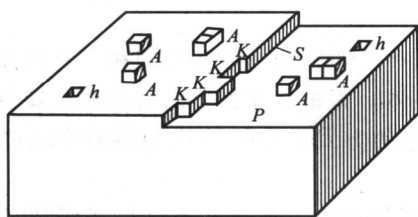


图 1-11 晶体生长过程中表面状态图解

P—平坦面；S—台阶；K—曲折面；

A—吸附分子；h—孔

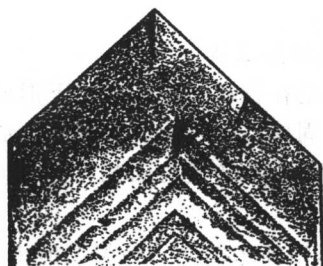


图 1-12 石英的带状构造

③ 由于晶面是向外平行推移生长的，所以同种矿物不同晶体上对应晶面间的夹角不变。

④ 晶体由小长大，许多晶面向外平行移动，其轨迹形成以晶体中心为顶点的锥状体称为生长锥 (或砂钟状构造)。这种现象在薄片常常能看到。

然而晶体生长的实际情况要比简单层生长理论复杂得多。往往一次沉淀在一个晶面上的物质层的厚度可达几万或几十万个分子层。同时亦不一定是一层一层地顺序堆积，而是一层尚未长完，又有一个新层开始生长。这样继续生长下去的结果，使晶体表面不平整，成为阶梯状，称为晶面阶梯。

2. 螺旋生长理论

弗兰克等人 (Frank, Cabresa, Buston) 研究了气相中晶体生长的情况，他们根据实

实际晶体结构缺陷中最常见的位错现象，提出了晶体的螺旋生长理论，即在晶体生长界面上螺旋位错露头点所出现的凹角，及其延伸所形成的二面凹角（图 1-13）可作为晶体生长的台阶源，促进光滑界面上的生长。这样便成功地解释了晶体在很低的过饱和度下能够生长的实际现象。

位错的出现，在晶体的界面上提供了一个永不消失的台阶源。晶体将围绕螺旋位错露头点旋转生长。螺旋式的台阶并不是随着原子面网一层层生长而消失，它代表着一种螺旋式的生长运动持续下去，随着晶体的不断长大，表现在晶面上出现能提供生长条件信息各种样式的螺旋纹。螺旋状生长与层状生长不同的是台阶并不是直线式地等速前进扫过晶面，而是围绕着螺旋位错的轴线螺旋状前进（图 1-14）。这就是说在晶体生长时不需要在光滑表面上先形成二维核，而在低过饱和度的条件下就能生长。

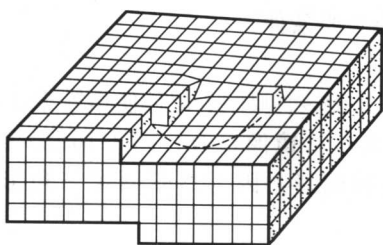


图 1-13 晶体的位错

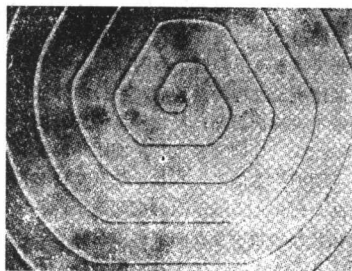


图 1-14 SiC 晶体表面的生长螺旋

三、布拉维法则

晶体是具有格子构造的固体。晶体外表的晶面、晶棱、角顶都是格子构造在外形上的反映。

晶面：是晶体外层面网。

晶棱：外层面网最边缘的行列。

角顶：外层面网边缘行列的末端结点。

在晶体的生长过程中，晶面的生长速度（单位时间内垂直晶面方向所增长的厚度）与其面网密度关系很大。面网密度大，生长速度慢；面网密度小，生长速度快。

图 1-15 是一空间格子的横切面，有三个不同密度的面网，自由粒子 1、2、3 被晶体吸引，试图进入晶格。从引力情况看，粒子 3 与面网相距最远，粒子 2 次之，粒子 1 最小，BC 面吸引自由粒子之力最强，生长最快，晶面相应变小，直至消失，而生长慢的晶

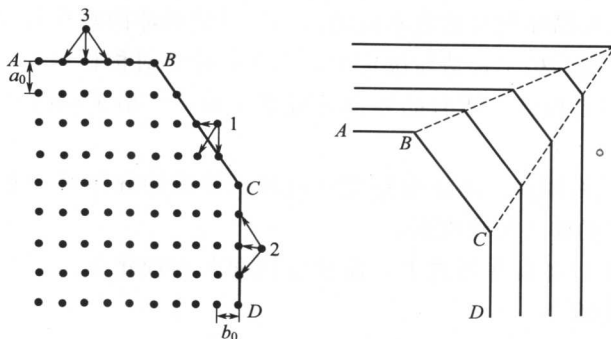


图 1-15 晶体的面网密度与晶体生长速度的关系图解