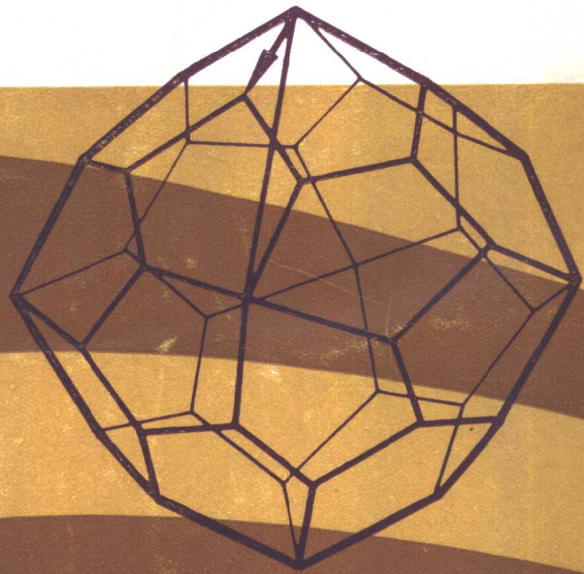


# 硅酸盐岩相学

GUI SUAN YAN  
YAN XIANG XUE

冯铭芬编著



同济大学出版社

# 硅 酸 盐 岩 相 学

冯铭芬 编著

同济大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了偏光、反光显微镜技术, X射线衍射分析, 热分析和电子光学分析等主要物相分析方法以及几何结晶学、晶体光学等基础理论。既着重基本原理, 又注意分析技术、具体应用实例。全书涉及范围较广, 论述深入浅出, 便于自学。

本书除作为高等学校无机非金属材料、硅酸盐工程和材料科学等材料类专业教科书外, 也可供水泥、混凝土制品厂等材料生产单位和科研、设计方面的科技人员以及有关专科学校师生的参考。

责任编辑 陆菊英

封面设计 王肖生

## 硅 酸 盐 岩 相 学

冯铭芬 编 著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 339 千字

1986 年 8 月第 1 版 1986 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—7000 科技新书目 117-231

统一书号 15335-020 定 价 2.40 元

# 前 言

根据1982年10月高等学校无机非金属材料类专业教材编审委员会洛阳会议上所修订的教学计划的精神,《硅酸盐岩相学》列为必修的技术基础课程之一。其主要内容有:偏光、反光显微镜技术、X射线衍射分析、热分析和电子显微技术等主要物相分析方法,以及几何结晶学、晶体光学等基础理论。本课程以水泥、混凝土等硅酸盐材料或其产品为基本研究对象,因此通常又有《硅酸盐物相分析》或《物相分析》等不同的名称。

为了适应科学技术发展对材料性能提出的要求,必须对原料、半成品、成品从宏观到微观的各个层次进行检测,分析影响材料特性的各种因素,探索成份、结构、性能与生产工艺之间的关系,才能为原材料选择、工艺改进以及提高产品质量,提供必要的前提。同时,掌握这些研究方法和测试工具,也是材料改性,研制指定要求的新材料,从事科学研究工作不可缺少的条件。

全书共分六章,以几何结晶学为第一章,上述五种物相分析方法则各列一章。在研究方法的介绍中,侧重于基本原理和应用技术、适用范围。要求在学习时能够理论联系实际,注意实验技能的培养,从而能具有采用必要手段对无机材料进行物相分析的能力。本教材还附有230种空间群、硅酸盐矿物性质以及粉末X射线衍射数据等有关资料,以便查阅。

本教材在历次修改过程中,曾吸取了兄弟院校来同济大学进修的教师们所提出的宝贵意见,对编写工作帮助很大。同时,在最后定稿过程中,得到同济大学苗迪青教授、中国科学院硅酸盐研究所郭祝崑副研究员的具体指教,在此顺表谢意。由于水平和时间所限,难免有错误不当之处,敬请指正。

编 者

1985年元月

# 目 录

## 前言

## 第一章 几何结晶学

§ 1 晶体的基本概念	1
§ 2 晶体的宏观对称	7
§ 3 晶体的定向和晶面符号	25
§ 4 晶体的形态	32
§ 5 晶体构造的几何规律	44

## 第二章 偏光显微镜岩相分析

§ 1 晶体光学的基础理论	56
§ 2 单偏光镜下晶体的光学性质	70
§ 3 正交偏光镜下晶体的光学性质	76
§ 4 锥光镜下晶体的光学性质	91
§ 5 折射率的测定——油浸法	107
§ 6 透明矿物薄片的系统鉴定	112

## 第三章 反光显微镜岩相分析

§ 1 反光显微镜	115
§ 2 光片的制备	116
§ 3 光片的浸蚀	118
§ 4 反射光下晶体的主要光学性质	121
§ 5 显微镜下材料的定量分析	124
§ 6 反射光下硅酸盐水泥熟料的结构特征	128

## 第四章 热分析

§ 1 差热分析	133
§ 2 失重分析	139
§ 3 综合热分析	140
§ 4 差热分析的应用	141

## 第五章 X射线物相分析

§ 1 X射线的性质和产生	147
§ 2 X射线谱	148

§ 3	X射线在晶体中的衍射	153
§ 4	多晶体X射线法——粉末法	156
§ 5	X射线物相分析的方法原理	161
§ 6	X射线分析方法的应用	165

## 第六章 电子光学分析

§ 1	透射电子显微镜	169
§ 2	扫描电子显微镜	177
§ 3	电子探针微区X射线分析仪	183
附表一	230种空间群	189
附表二	硅酸盐矿物性质一览表	192
附表三	水泥矿物粉末的X射线数据	202
附表四	干涉色色谱表	插页
参考书目		208

# 第一章 几何结晶学

## § 1 晶体的基本概念

在本章中首先将阐明什么是晶体，亦即晶体的概念。然后根据晶体内部构造上区别于其它物体的共同特点，进一步导出晶体的共同规律，即空间格子规律。根据后者，还可得出一切晶体所共有的基本性质。此外，还将阐明非晶质体的概念。

### 一、晶体的定义

人们认识晶体，是从外部形态的观察开始的。自然界的地质产物中，例如图1—1所示的石英、石盐、方解石等，它们都具有独特的多面体形态。于是人们就将这种天然具有的而不是人为磨削的规则几何外形的固体，称之为晶体。然而，对晶体的这种认识，并没有抓住它最本质的特点。因为作为晶体，规则的几何外形并不是它的必要条件。例如盐湖中产出的石盐(NaCl)，有立方体形态的晶体，也有任意形态的颗粒，它们两者之间，除在形态上有差异外，所有其他的一切性质，例如比重、硬度等都是完全相同的。而且，通过实践证明，如果将任意形态的石盐颗粒，放入NaCl的过饱和溶液中，让它有充分的空间去生长，最终也同樣能长成立方体的形态。由此可见，多面体形态并不能体现晶体的实质，它只是晶体内部某种本质因素所具有的规律性在外表上的一种反映。

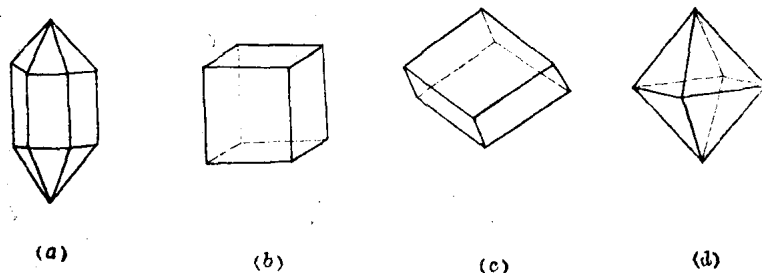


图 1—1  
(a) 石英  $\text{SiO}_2$ ; (b) 石盐  $\text{NaCl}$ ; (c) 方解石  $\text{CaCO}_3$ ; (d) 磁铁矿  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

有关晶体本质的问题，直到本世纪初(1912年)应用X射线对晶体构造进行研究后，才真正弄清楚。原来，在一切晶体中，组成它们的物质之质点(原子、离子、离子团或分子)在空间都是按格子构造的规律来分布的，例如在石盐晶体中就可明显地看出这种规律性。

图1—2(a)为石盐晶体的结构图，图1—2(b)是在其结构中割取的一个能代表整个结构规律的最小单位(晶胞)。在图中，大球代表氯离子( $\text{Cl}^-$ )，小球代表钠离子( $\text{Na}^+$ )。可以看出，这些离子在空间的不同方向上，各自都是按着一定的间隔重复出现的。例如沿着立方体的三条棱边方向、 $\text{Na}^+$ 离子与 $\text{Cl}^-$ 离子各自都是每隔5,628埃(1埃 =  $10^{-10}$ 米)的距离重复

一次。而沿着二条棱边交角的角平分线方向，则各自都是每隔 3.978 埃重复一次。在其他方向上，情况也都类似，只不过各自重复的间隔大小不同罢了。如果用不同的符号，例如用点与圈分别代表  $\text{Na}^+$  离子与  $\text{Cl}^-$  离子的中心点，并用直线将它们连接起来，那么，显然可以得出一个格子状的图形来。图 1—2(c) 就是这个图形中的最小单位（结晶格子）。实践证明，不论外部形态是否规则，所有的石盐，它们结构中的质点都是作这样的立方格子排列的，石盐之所以能够成为立方体的规则外形，正是受这种格子构造规律性所制约的必然结果。

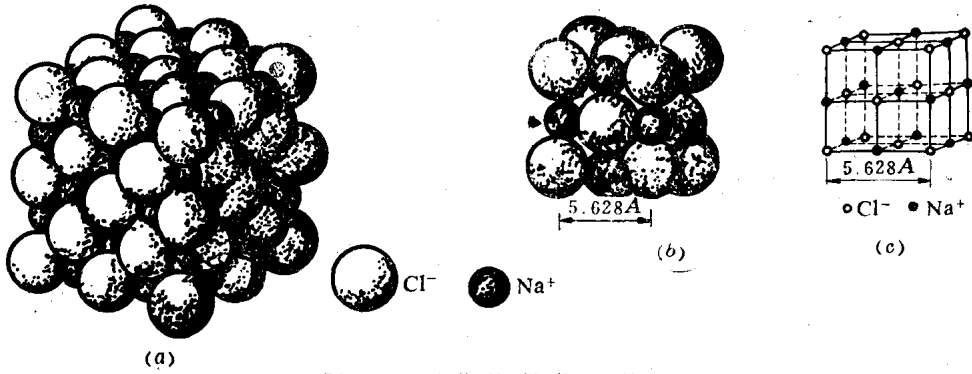


图 1—2 石盐的晶体结构

对于其他任何一种晶体而言，情况都是完全类同的：不论外形是否规则，它们的内部质点在三维空间都有规则地成周期性重复排列而构成格子状构造，这是无例外地为一切晶体所共有的性质。所不同的仅仅是，不同的晶体，它们的质点种类不同，排列的方式和间隔大小相应地也就不同罢了。例如  $\text{MgO}$ ，组成它的内部质点是  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{O}^{2-}$ ，如果把图 1—2 中的大球看成是  $\text{O}^{2-}$ ，小球看成是  $\text{Mg}^{2+}$ ，那么图 1—2 所示的结构也就成了  $\text{MgO}$  的晶体结构，亦即  $\text{MgO}$  内部质点的排列形式与  $\text{NaCl}$  结构相同。但它沿立方体棱方向的重复周期是 4.203 埃，就与  $\text{NaCl}$  结构不同了。再如方解石  $\text{CaCO}_3$ ，它的晶体结构相当于把  $\text{NaCl}$  的结构沿立方体中的一条对角线方向压扁到棱交角为  $101^\circ 55'$  的程度，并以  $\text{Ca}^{2+}$  取代  $\text{Na}^+$  的位置，以  $[\text{CO}_3]^{2-}$  取代  $\text{Cl}^-$  的位置而成（图 1—3）。

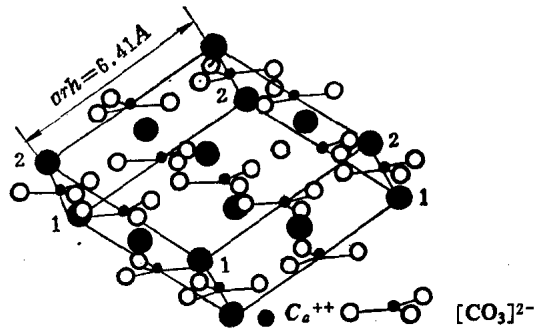


图 1—3  $\text{CaCO}_3$  晶体

此时，沿这样一个菱面体的棱方向， $\text{Ca}^{2+}$  和  $[\text{CO}_3]^{2-}$  交替重复排列，而重复周期则为 6.41 埃。至于其它的晶体，如正长石  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ 、高岭石  $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$  等等，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，其质点总是保持着在三维空间成周期性重复的规则排列。晶体的这一特点，反映了晶体与呈其它状态物体之间的根本区别。所以，晶体的现代定义应当是：晶体是内部质点在三维空间呈周期性重复排列的固体。或者概括地说：晶体是具有格子构造的固体。但需要指出的是，由于晶胞的大小跟实际晶体相比，是一个很小很小的数值，例如，在 1 立方毫米的石盐晶体中，就包含有大约  $10^{18} - 10^{19}$  个晶胞，因此，可以把晶体的格子构造近似地看成是向三维空间作无限延伸的，这样，跟下面即将谈到的空间

2



格子的无限图形就相应地取得一致了。

## 二、晶体的空间格子构造规律

既然一切晶体都有着格子构造，那么，各种晶体格子之间有没有共同规律可循呢？下面仍以食盐（NaCl）的结构为例加以说明。

在食盐的晶体结构中任意选择一个几何点，例如选在  $\text{Cl}^-$  的中心或  $\text{Na}^+$  的中心，然后在结构中找出与此相等的几何点（等同点）。等同点的条件是，如果原始的几何点是取在质点的中心，则等同点所占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，也就是说这些质点相同的方向上要有相同的质点。在 NaCl 的晶体结构中，若原始点选在  $\text{Cl}^-$  中心，每一个  $\text{Cl}^-$  中心点的前后、左右、上下都是  $\text{Na}^+$ ，如果把原始点选在  $\text{Na}^+$  中心，每个  $\text{Na}^+$  中心点的前后、左右、上下都是  $\text{Cl}^-$ 。因此，在食盐晶体结构中，所有  $\text{Na}^+$  中心点属于一类等同点，所有  $\text{Cl}^-$  中心点属于另一类等同点（其实等同点所在位置，并不限于这些质点的中心，就是结构中其它任何位置上的点，也都同样能引出一类等同点的）。如果对各类等同点在空间的分布规律进行考察，便可以得出，每类等同点都是构成如图 1—4 所示的图形。也就是说，当  $\text{Na}^+$  与  $\text{Cl}^-$  化合组成食盐晶体时，不论是  $\text{Na}^+$  还是  $\text{Cl}^-$ ，它们各自都是按照这个图形所限定的规律来进行排列的。

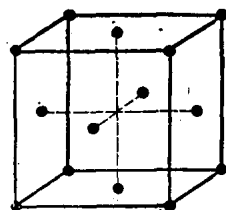


图 1—4 食盐晶体结构的单位空间格子

由此可见，等同点的分布可以体现晶体构造中所有质点的重复规律。等同点在三维空间作格子状排列，称为空间格子。为了研究晶体内部构造中质点的重复规律而不受晶体大小的限制，设想等同点在三维空间是作无限排列的，因而空间格子为无限图形。

空间格子的一般形式如图 1—5 所示。

空间格子有如下几种要素：

1. 结点——空间格子中的点，它们代表晶体结构中的等同点。在实际晶体中，在结点的位置上可为同种质点所占据。但就结点本身而言，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（图 1—6）。空间格子中任意两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—6 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

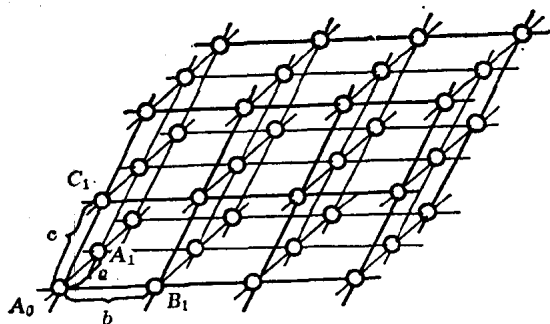


图 1—5 空间格子

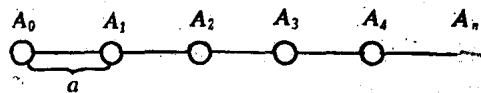


图 1—6 空间格子的行列

的行列，其结点间距一般是不等的，某些方向的行列上结点分布较密，而另一些则较稀（参看图1—5）。

3. 面网——结点在平面上的分布即构成面网（图1—7）。空间格子中不在同一行列上的任意三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。任意两个相邻面网间的垂直距离称为面网间距。相互平行的面网，其面网密度和面网间距必定相等；不相平行的面网，其面网密度及面网间距一般都不相等。而且面网密度大的，其面网间距也大，反之，面网密度小的，面网间距也小。

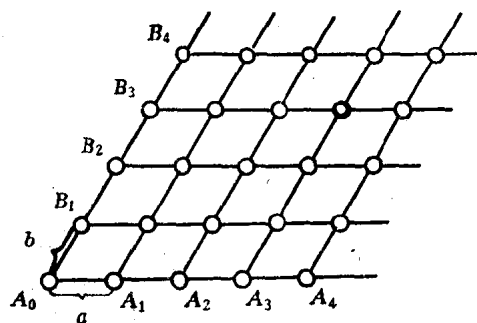


图 1—7 空间格子的面网

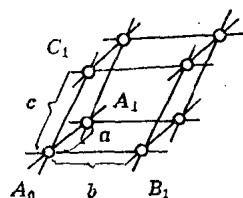


图 1—8 平行六面体

4. 平行六面体（单位空间格子）——结点在三维空间上的分布就构成空间格子（图1—5）。显然，由三条不同面的行列就可决定一个空间格子。此时，空间格子本身将被三组相交行列划分成一系列平行迭置的平行六面体，结点就分布在它们的角顶上。每一个平行六面体的三个棱长，恰好就是三条相应行列上的结点间距，这样的平行六面体是空间格子的最小单位（图1—8），所以也称为单位空间格子。在实际晶体结构中所划分出的这样的相应的单位，称为晶胞。整个空间格子可以看作是平行六面体在三维空间平行而又毫无间隙地堆迭而成。相应的整个晶体结构可视为晶胞在三维空间平行地、毫无间隙地重复累叠。

### 三、晶体的基本性质

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

#### 1. 自限性

晶体在适当的条件下可以自发地形成几何多面体。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、行列及结点相适应。

#### 2. 均一性及异向性

由于周期重复规律，晶体中的任何一部分，在结构上都是相同的，因而由结构所决定的一切性质也都是是一样的。就是说，不论从晶体上哪个部位割取的部份，它们的各种性质都是一样的，这就是晶体的均一性。

然而同一晶体，在不同的方向上，由于质点的排列一般是不相同的，因而晶体的性质也

不相同，也就是说，晶体的性质随方向而异，这就叫晶体的异向性。如果把水晶磨成圆球，加热后就会变成椭球体，这表明晶体的热膨胀性是随方向而异的。试验蓝晶石的硬度同样可以发现，晶体的硬度也随方向而异，如图1—9，沿晶体的延长方向（图中AA所示方向），小刀可刻动，而在其垂直的方向（图中BB所示方向），小刀则刻不动。又如云母、方解石等矿物晶体，具有完好的解理，受力后可沿晶体一定的方向，裂开成光滑的平面。

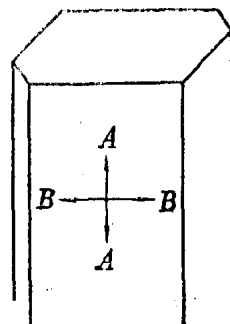


图1—9 蓝晶石晶体硬度的异向性

### 3. 对称性

晶体具有异向性，但并不排斥在某些特定的方向上具有相同的性质。由于晶体的构造是质点在空间作周期性的无限重复而成的，那么，在晶体构造的几个方向上，就可能出现相同的行列和面网，因而在晶体的外形上往往有相等的晶面、晶棱及角顶重复出现，这就是晶体的对称性。对称性是晶体极重要的性质，在下一节中将专门加以讨论。

### 4. 最小内能及最大稳定性

晶体是具有格子构造的固体，其内部质点是作有规律的排列的，这种规律的排列是质点间的引力与斥力达到平衡结果，所以晶体内能最小。当晶体结晶时，放出大量热能，这就使得晶体内部储藏的能量比它处在液态或气态时要小，图1—10是晶体的加热曲线，起初温度是随着时间逐渐上升的，当达到某一温度，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。由于晶体的格子构造中各个部份的质点是按同一方式排列的，破坏晶体各个部份需要同样的温度，因此，晶体具有一定的熔点。

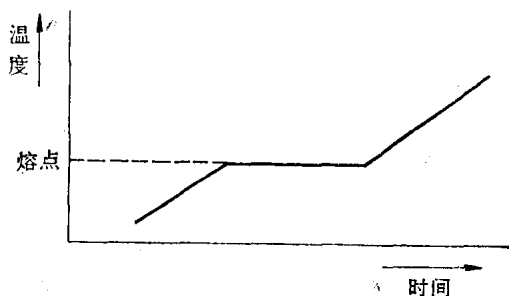


图1—10 晶体的加热曲线

晶体的内能是如此地小，以致只能使质点（离子、原子或分子）在格子构造的一定位置上产生振动，而且振动的平均位置是不变的，也就是说结晶的质点并不离开这个固定的位置，这样，晶体的格子构造就不致破坏，因而晶体是处在一种最稳定的状态，晶体具有最大稳定性。

## 四、非晶质体

非晶质体与晶体是有本质区别的。虽然非晶质体也呈固态存在，但其内部质点在三维空间不成周期性重复排列而是作杂乱无章分布。因此，非晶质体不可能遵循为晶体所共同具有的空间格子规律，它也不可能具有为晶体所共有的那些基本性质。表现在外形上，它在任何条件下都不可能自发地成长为规则的几何多面体；在内部结构上，其各个部分之间，仅仅在统计意义上是均一的，而在不同方向上的性质则是同一的。所以，非晶质体在外部性质上是

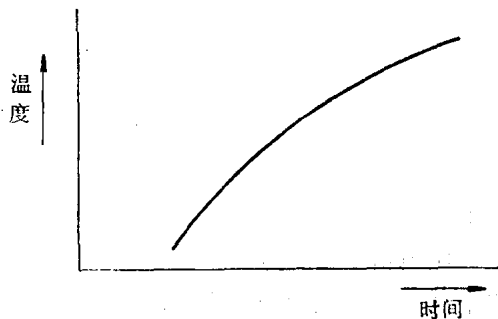


图1—11 非晶质体的加热曲线

一种无定形的凝固态物体，在内部性质上则是统计上均一的各向同性体。其实，从这些方面的特性来看，非晶质体倒是更类似于液体，所以，非晶质体也可以被认为是过冷却的液体，或者说是硬化了的液体。当加热非晶质体时（图1—11）它将逐渐软化，最后变成熔体，而没有固定的熔点。

## 五、晶体的投影

因为用二维的图形来表示晶体中的点、线、面在空间的位置比较方便，所以必须研究晶体投影的方法。这里仅介绍应用最广泛的极射赤平投影。

如图1—12，取任一点为投影中心，以一定的半径作一个球，称为投影球。通过球心作一平面 $Q$ ，称为投影面（亦称赤道平面）；投影面与投影球相交的圆称为基圆（相当于球的赤道，亦称大圆）；垂直于投影面的直径 $NS$ 称为投影轴；投影轴的两个端点 $N$ 和 $S$ ，即投影球的北极和南极，分别称为上目测点和下目测点。由于目测点在南北极，投影落在赤道平面上，故称为极射赤平投影。投影分为以下两个步骤。

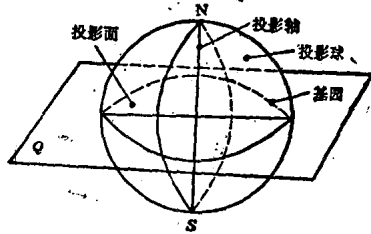


图 1—12 晶体投影的基本要素

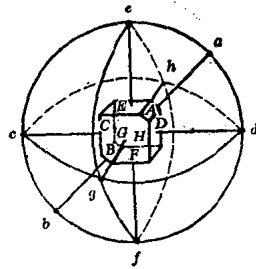


图 1—13 晶面的球面投影

### 1. 作晶体的球面投影

如图1—13，想象地将晶体置于投影球中，使晶体中心与投影球中心重合。自投影球中心点引每一晶面的法线，并延伸使之与球面相交，其交点称为相应晶面的极点，这些极点便是晶面的球面投影点。例如图1—13中的极点 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $h$ 分别为晶面 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 的球面投影点。显然，球面上极点的分布，相应地显示出晶面在晶体上的空间分布规律。

晶体的球面投影图，由于投影点位于球面上，是一个立体图形，实际应用时仍不方便，因而还需要进一步转换成平面上的投影。

### 2. 作极射赤平投影

为了把球面上的投影进一步转为赤道平面上的投影，我们以南极 $S$ 为目测点，由 $S$ 向球面上的极点作连线，连线与赤道平面的交点即为极点的极射赤平投影点。图1—14表示了由图1—13的球面投影到极射赤平投影的转换。图1—15给出了它们的极射赤平投影图。

应当指出的一点是，如果晶面的极点位于下半球，若仍以 $S$ 为目测点时，则晶面的极射赤平投影点必位于基圆之外，如图1—14晶面 $B$ 之投影点为 $b''$ ，甚不方便。因此，在这种情况下，则以 $N$ 为目测点。为了在赤平投影图上区别上下半球的极点，上半球极点的投影用 $\circ$ 表示，而下半球极点的投影以 $\times$ 表示（见图1—14、图1—15）。

从图1—13，1—15可以看出，晶体上水平晶面的投影点位于基圆的中心（如晶面 $E$ 、 $F$ ），

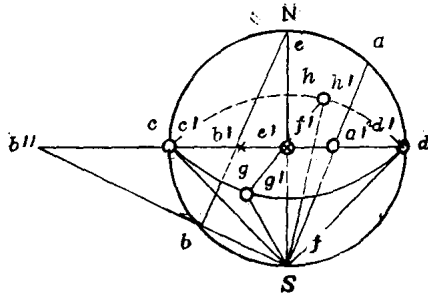


图 1-14 球面投影与极射赤平投影的关系

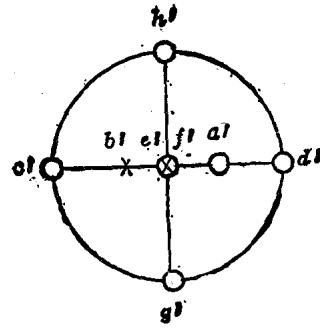


图 1-15 极射赤平投影

直立晶面的投影点位于基圆上（如晶面 C、D、G、H），倾斜晶面的投影点位于基圆内（如晶面 A、B），倾斜度愈近水平，其投影点距基圆中心愈近。

## § 2 晶体的宏观对称

在具有几何多面体外形的晶体——结晶多面体上，最突出的一个性质就是它的对称性。晶体外形上的对称是由它的内部格子构造的对称所决定的。所以一切晶体都是对称的，不过，不同晶体之间的对称性往往又是有差别的，这表现在它们所具有的对称要素可以有所不同，并因而构成不同的对称型。因此，有必要，同时也有可能，根据晶体对称特点的差异来对晶体进行分类，即划分成晶族和晶系。

本节将依次阐述以上有关内容，但只限于讨论晶体外形上的对称，即晶体的宏观对称。

### 一、对称的概念

对称的现象，无论是自然界或是在人类社会活动的各个领域中，都是一种极为常见的现象。例如蝴蝶、花朵、动物的形体以及某些人为的建筑物或用具、器皿，都常呈对称的图形。

虽然对称的图形必须由两个以上的相等部份组成，但是只具有相等的部份还不一定是对称的图形。如图 1-16 是由两个全等的三角形组成，但并不是对称图形。因此，对称的图形还必须符合另一个条件，那就是这些相等的部份，通过一定的操作（如反映、旋转、反伸）可以发生重复。如图 1-17 蝴蝶的两个相等的部分可以通过垂直平分它的镜面的反映，彼此重合。这就好象是在蝴蝶的左右两边之间假想有一面镜子，通过它的反映，左边在镜中的影子（即镜象）恰好与右边蝴蝶的实体重合，而右边的影子则恰好与左边蝴蝶实体重合。亦即两者发生重复。这就是一种对称。

图 1-18 所示的花朵，则具有另一种形式的对称。它的六片花冠就可以看作六个相等部分，如以花柄为轴，依次旋转  $60^\circ$ ， $120^\circ$ ， $180^\circ$ ， $240^\circ$ ， $300^\circ$ ， $360^\circ$  等角度各个相等部分之间就能有规律地发生重复。

所以，对称是指：物体相等部分有规律的重复。

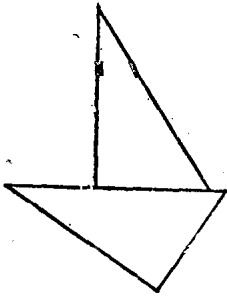


图 1—16 不对称的图形



图 1—17 蝴蝶的对称

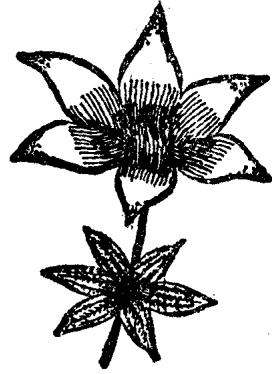


图 1—18 对称的花冠

## 二、晶体的对称性

晶体上相等的晶面、晶棱及角顶皆作规律的排列，因此晶体具有对称性。但晶体的对称，不同于动植物及其它物体的对称。动植物的对称是由于生存斗争长期演化的结果；建筑物和工艺美术品的对称，是为了美观，是人为的；而晶体的对称则是内部构造的反映，是由规律的格子构造所决定的，因此晶体的对称有如下特点：

1. 由于晶体内部都具有格子构造，而格子构造本身就是质点在三维空间周期重复的体现，因此，从这种意义上来说，所有的晶体都是对称的。
2. 晶体的对称既然是内部格子构造的反映，就必然受格子构造的严格控制，只有符合格子构造的对称才能在晶体外形上表现出来，这就是晶体对称的有限性。
3. 晶体的对称取决于其内在的本质——格子构造。因此，晶体的对称不仅体现在外形上，同时也体现在物理性质（如光学、力学、热学、电学性质等）上；也就是说晶体的对称不仅包含着几何意义，还包含着物理意义。

正是由于以上的特点，所以晶体的对称可以做为晶体分类的基础。

## 三、对称操作及对称要素

研究晶体的对称，必须首先确定晶体相等部分排列的规律性。为此，可对晶体进行一定的操作（如反映、旋转等），以观察相等部分（晶面、晶棱或角顶）是否按一定的规律重复出现或相重合。使相等部分重复出现或相重合所进行的操作，称为对称操作。有时只要进行一种操作（单纯的旋转或反映）就能使晶体上相等部分重复出现或相重合，这是一种简单的对称操作；有时则需要连续进行两种不同的操作（如旋转加反伸），这是一种复杂的对称操作。

在进行对称操作的时候，需要借助于一些假想的辅助几何要素（平面、直线或点）。如对于一个平面（假想过晶体中心的平面）反映，或绕一根直线（假想过晶体中心的直线）旋转等。进行对称操作时所引用的几何要素，称为对称要素。

每一种对称操作，就有一种相应的对称要素，二者的关系如表 1—1 所列。

不同的晶体，其对称程度不同，具体地表现为对称要素的种类及其数目不同。晶体外形对称中可能存在的对称要素及其相应的对称操作如下：

晶体的对称操作及相应的对称要素 表 1-1

	对 称 操 作	假想的辅助几何要素	对 称 要 素
简单的	反 映 旋 转 反 伸	平 面 直 线 点	对 称 面 对 称 轴 对 称 中 心
复杂的	旋转及反伸 旋转及反映	直线, 过直线上一点 直线, 垂直于直线的平面	旋转反伸轴 旋转反映轴

1. 对称面 ( $P$ )——相应的对称操作是对平面的反映。

对称面是个假想平面, 它能把晶体分成互为镜象反映关系的两个相等部分。

图 1-19(a) 中,  $P_1$  和  $P_2$  平面 (与纸面垂直) 是对称面, 因为它能把图形  $ABED$  平分两个互为镜象反映关系的相等部分, 但图 1-19(b) 中的  $AD$  平面不是对称面, 因为它虽能把图形  $ABED$  平分两个相等的部份 ( $\triangle AED \cong \triangle DBA$ ), 但这两者并不是互为镜象反映关系, 与  $\triangle AED$  成镜象反映关系的并不是  $DBA$  而是  $\triangle AE_1D$ 。检验这种关系最简单的办法是, 看两相等部份上对应点的连线是否与对称面垂直等距, 如果垂直等距, 就是反映关系。

晶体上如有对称面存在时, 必定通过晶体的几何中心, 并且垂直平分某些晶面、晶棱或包含某些晶棱 (图 1-20)。

对称面以  $P$  表示, 在晶体中可以没有对称面, 也可以有若干个, 最多可达 9 个。在描述中一般把对称面的数目写在符号  $P$  的前面, 如立方体有 9 个对称面记作  $9P$  (图 1-20), 除坐标面位置的三个对称面外, 在与坐标面交插的位置上还有 6 个对称面 (上下、前后、左右各两个)。

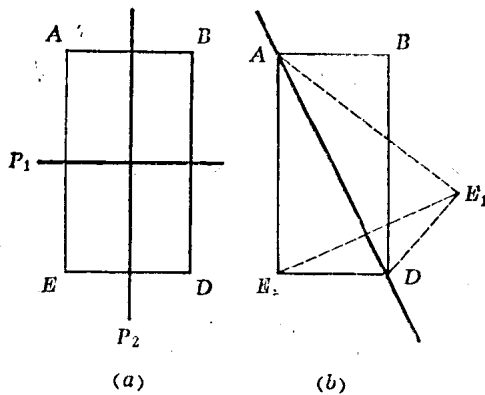


图 1-19

(a)  $P_1$  和  $P_2$  为对称面; (b)  $AD$  为非对称面

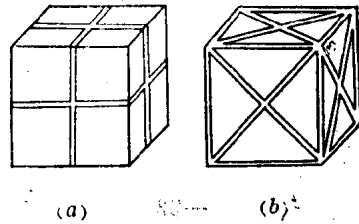


图 1-20 立方体的 9 个对称面

(a) 坐标面位置的 3 个对称面, 它们分别垂直平分晶面和晶棱;

(b) 与坐标面交插位置上的 6 个对称面, 它们分别包含一对棱

2. 对称轴 ( $L^n$ )——相应的对称操作是围绕直线的旋转。

对称轴是一根过晶体中心的假想直线, 晶体绕此直线旋转一定角度后, 可使相等部分 (晶面、晶棱或角顶) 重复。旋转一周重复的次数称为轴次 ( $n$ ), 重复时所旋转的最小角度称为基转角 ( $\alpha$ ), 两者之间的关系为:  $n = 360^\circ / \alpha$ 。

对称轴以  $L$  表示, 轴次  $n$  写在它的右上角, 写作  $L^n$ 。

晶体外形上可能出现的对称轴如表 1-2 所列。

对 称 轴 的 种 类 表 1—2

名 称	符 号	基转角 ( $\alpha$ )	轴 次 ( $n$ )	作图符号
一次对称轴	$L^1$	$360^\circ$	1	
二次对称轴	$L^2$	$180^\circ$	2	●
三次对称轴	$L^3$	$120^\circ$	3	▲
四次对称轴	$L^4$	$90^\circ$	4	■
六次对称轴	$L^6$	$60^\circ$	6	●

一次对称轴  $L^1$  无实际意义，因为任何晶体围绕任意直线旋转  $360^\circ$  都可以恢复原状。在研究晶体的对称时， $L^2$ 、 $L^3$ 、 $L^4$ 、 $L^6$  则很重要。轴次高于 2 的对称轴称为高次轴。

图 1—21 表示晶体的各种对称轴。从图中不难看出，在  $L^n$  的周围，晶体相等的部份（晶面、晶棱或角顶）必需有  $n$  个。

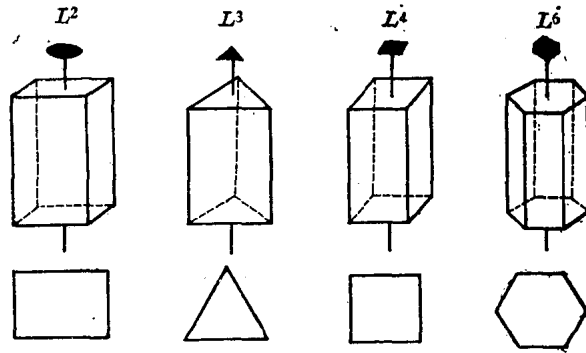


图 1—21 晶体的各种对称轴

对称轴只能是晶体上两个相对面中心的连线，两个相对棱中点的连线，两个相对角顶的连线，一个角顶与它相对面的中心以及一个棱与它相对面的中心的连线。

晶体中不可能出现五次对称轴 ( $L^5$ ) 及高于六次轴的对称轴 ( $L^7$ 、 $L^8$ ...)。这是由于它们不符合空间格子的规律。在空间格子中，垂直对称轴一定有面网存在，此时，只有按  $L^1$ 、 $L^2$ 、 $L^3$ 、 $L^4$ 、 $L^6$  五种对称轴的对称要求排布的结点所构成的面网的网孔，才能不留间隙地排满整个平面（图 1—22 中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $f$ ），除此之外的任意轴次，其所对应的面网的网孔，都不能无间隙地排满整个平面（图 1—22 中的  $e$ 、 $g$ 、 $h$ ）；而且这样的网孔，在平行的行列上结点间距也不相等（图 1—22 中的  $i$ 、 $j$ 、 $k$ ）。显然后一情况是不符合空间格子理论的。所以在晶体中不可能存在五次及高于六次的对称轴。

### 3. 对称中心 (C)——相应的对称操作是对于一个点的反伸（倒反）。

对称中心是晶体内一个假想的点，过此点作任意直线则在此直线上距对称中心等距离的两端上必定可以出现晶体上的相等部份（面、棱或角）。

对称中心的作用相似于一个照相机的镜头，由对称中心联系起来的两个相等部份，分别相当于物体和象，两者互为上下、左右、前后均颠倒相反的关系；但在此，相当于物体与象的两个部份，其大小相等，且各对应点至对称中心的距离也都相等（图 1—23）。

由以上关系可知，具有对称中心的晶体，每一个晶面必有另一相等晶面与它平行反向。



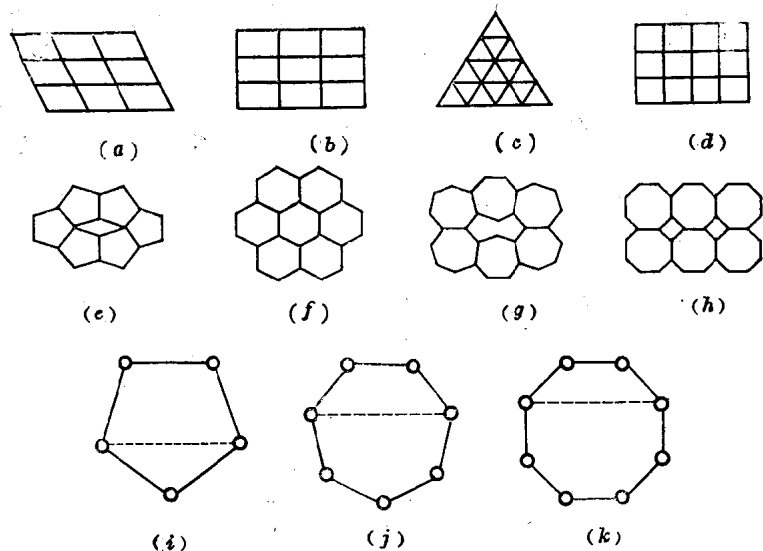


图 1-22

(a)、(b)、(c)、(d)、(f) 符合格子构造规律的网孔；  
 (e)、(g)、(h) 不符合格子构造规律的网孔；  
 (i)、(j)、(k) 平行的行列上结点距离不等

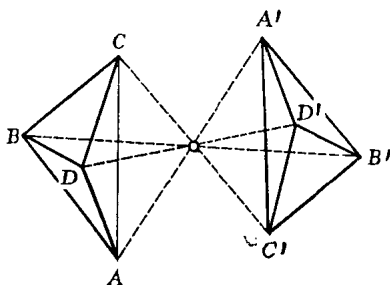


图 1-23 由对称中心联系起来的物与象互成倒反关系

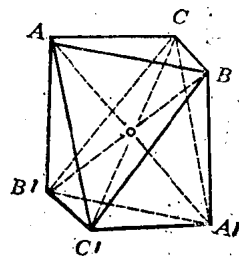


图 1-24 由对称中心联系起来的呈反向平行的相等晶面

如图 1-24 中的  $ABC$  与  $A'B'C'$ 、 $AB'C'$  与  $A'BC$ 、 $ABC'$  与  $A'B'C$  以及  $ACB'$  与  $A'C'B$  均为两两相等而反向平行二晶面。据此，把晶体任一晶面平放以后，看上面是否有形状相同、大小相等而又与它平行反向的晶面存在，就可以很容易地确定晶体有无对称中心。

对称中心以字母  $C$  来表示。晶体的对称中心，就是晶体的几何中心，数目只可能有一个，但晶体的几何中心不一定是对称中心，因此晶体也可没有对称中心。

4. 旋转反伸轴 ( $L_n^i$ ) 又称倒转轴——相应的对称操作是围绕一根直线的旋转和对此直线上的一个点反伸（倒反）的复合操作。

旋转反伸轴是一根假想的直线。当晶体围绕此直线旋转一定角度后（注意：此时相等部份尚未重复！），再继之对此直线上的一定点的反伸（倒反），才能使晶体相等部分重复。

如图 1-25 所示，欲使四方四面体  $ABCD$  中晶面  $ABC$  与  $CDB$

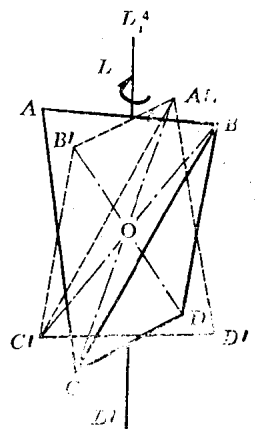


图 1-25 四次旋转反伸轴