

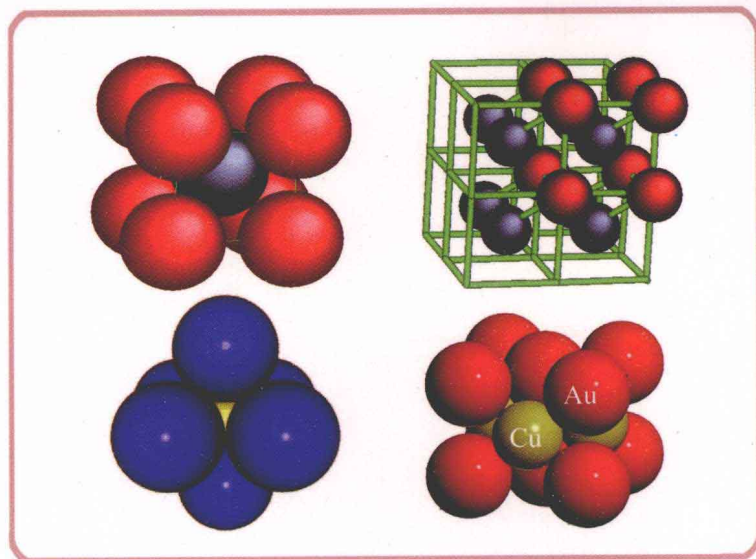


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

材料科学基础教程

王亚男 陈树江 张峻巍 李国华 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

材料科学基础教程

王亚男 陈树江 张峻巍 李国华 编著

北京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书从教学要求出发,着重对材料科学的基本概念和基础理论进行了阐述。全书分为8章,内容包括晶体结构、晶体结构缺陷、固体中的扩散、纯金属的凝固、二元合金相图、三元合金相图、材料的变形与再结晶、亚稳态材料。各章均配有适量的习题,方便读者学习。

本书可供材料科学与工程一级学科本科生基础课教学使用,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料科学基础教程/王亚男等编著. —北京:冶金工业出版社, 2011. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5647-4

I. ①材… II. ①王… III. ①材料科学—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第158567号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5647-4

北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011年8月第1版, 2011年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16印张; 385千字; 245页

33.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·金属材料	编委会 编	229.00
现代材料表面技术科学	戴达煌 等编	99.00
物理化学(第3版)(本科教材)	王淑兰 主编	35.00
理科物理实验教程(本科教材)	吴 平 主编	36.00
传热学(本科教材)	任世铮 编著	20.00
合金相与相变(第2版)(本科教材)	肖纪美 主编	37.00
金属学原理(本科教材)	余永宁 编	56.00
金属学原理习题解答(本科教材)	余永宁 编著	19.00
金属学与热处理(本科教材)	陈惠芬 主编	39.00
材料现代测试技术(本科教材)	廖晓玲 主编	45.00
位错理论及其应用(本科教材)	王亚男 等编	19.00
相图分析及应用(本科教材)	陈树江 等编	20.00
热工实验原理和技术(本科教材)	邢桂菊 等编	25.00
传输原理(本科教材)	朱光俊 主编	42.00
无机非金属材料研究方法(本科教材)	张 颖 主编	35.00
材料研究与测试方法(本科教材)	张国栋 主编	20.00
金相实验技术(第2版)(本科教材)	王 岚 等编	32.00
金属材料学(第2版)(本科教材)	吴承建 等编	52.00
特种冶炼与金属功能材料(本科教材)	崔雅茹 等编	20.00
耐火材料(第2版)(本科教材)	薛群虎 主编	35.00
机械工程材料(本科教材)	王廷和 主编	22.00
土木工程材料(本科教材)	廖国胜 主编	40.00
冶金物理化学(本科教材)	张家芸 主编	39.00
冶金工程实验技术(本科教材)	陈伟庆 主编	39.00
冶金过程数值模拟基础(本科教材)	陈建斌 编著	28.00
冶金原理(本科教材)	韩明荣 主编	40.00
冶金热工基础(本科教材)	朱光俊 主编	36.00
金属塑性成形原理(本科教材)	徐 春 主编	28.00
金属压力加工原理(本科教材)	魏立群 主编	26.00
金属材料及热处理(高职高专教材)	王悦祥 主编	35.00
工程材料基础(高职高专教材)	甄丽萍 主编	26.00
冶金原理(高职高专教材)	卢宇飞 主编	36.00
稀土永磁材料制备技术(高职高专教材)	石 富 编著	29.00
机械工程材料(高职高专教材)	于 均 主编	32.00
金属热处理生产技术(高职高专教材)	张文丽 主编	35.00
金属基纳米复合材料脉冲电沉积制备技术	徐瑞东 等著	36.00
一维无机纳米材料	晋传贵 等编	40.00
真空材料	张以忱 等编	29.00

前 言

本书为辽宁省精品课教材，是根据材料科学与工程一级学科的专业基础课教学实际需要，结合多年来的教学实践和体会精心编写而成的。本书从教学要求出发，着重对基本概念和基础理论的阐述，力求教材内容的科学性、先进性和实用性，注重培养学生运用科学原理去解决工程材料中实际问题的能力。

材料科学是研究材料的成分、组织结构、制备工艺与材料性能和应用之间相互关系的科学，它将金属、陶瓷、高分子等不同材料的微观特性和宏观规律建立在共同的理论基础上，对生产、使用和发展材料具有重要的指导意义。

本教材的特点表现为：

(1) 适应新世纪对人才培养的要求，将金属、陶瓷、高分子等不同材料的微观特性和宏观规律建立在共同的理论基础上，拓宽了知识面，注重为学生奠定“宽、新、实”的理论基础；

(2) 各级标题和主要概念都有中、英文对照，帮助读者了解基础和专业词汇，提高读者的英语阅读及应用的能力；

(3) 每章后面都有习题，帮助读者掌握基本概念和基本理论，提高读者的自学能力及分析和解决问题的能力；

(4) 教材适用面广，既可供材料科学与工程一级学科本科生基础课教学使用，也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

本书主要介绍了材料内部的微观结构，包括原子态到聚合态，从理想的完整结构到存在各种缺陷的不完整晶体结构，原子和分子在固体中的运动，以及材料在受力变形时组织结构的变化和恢复过程；在上述基础上，进一步介绍了材料组织结构的转变规律，包括单组元转变、二组元间的相互作用及转变和三元系的相互作用规律，通过这些内容来了解材料的形成规律和存在状态；此外

还介绍了有关亚稳态材料的内容及近年来在亚稳态研究中的一些新成果如纳米晶等，学生读后可以了解材料科学发展的一些新动态。

全书共分8章，第1、2章由陈树江、李国华编写，第3、4、5、6章由王亚男编写，第7、8章由张峻巍编写，习题由苗露、韩立影整理、编写。在编写过程中，参考和引用了一些文献和资料中的有关内容及图片，并得到周围同事的支持和帮助，谨此一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编者
2011年5月

目 录

1 晶体结构	1
1.1 晶体几何基础	1
1.1.1 晶体内部结构和空间点阵	1
1.1.2 晶体的宏观对称性	5
1.1.3 晶体的 32 种点群及分类	8
1.1.4 微观对称和空间群	9
1.1.5 晶体的空间点阵结构	11
1.1.6 点阵几何元素表示法	14
1.2 理想晶体结构	17
1.2.1 决定离子晶体结构的基本因素	17
1.2.2 典型的金属晶体结构	22
1.2.3 合金相结构	27
1.2.4 离子晶体结构	36
习题	55
2 晶体结构缺陷	56
2.1 点缺陷	56
2.1.1 点缺陷符号及缺陷反应方程式	57
2.1.2 热缺陷 (晶格位置缺陷)	59
2.1.3 组成缺陷	60
2.1.4 电荷缺陷	60
2.1.5 点缺陷平衡浓度计算	61
2.2 线缺陷	62
2.2.1 位错的基本类型及特征	62
2.2.2 柏氏矢量	64
2.2.3 位错的运动	68
2.3 面缺陷	75
2.3.1 表面	75
2.3.2 晶界	75
2.3.3 相界	77
习题	78

3 固体中的扩散	79
3.1 扩散定律及其应用	79
3.1.1 菲克第一定律	79
3.1.2 菲克第二定律	80
3.1.3 菲克第二定律的解及其应用	81
3.2 扩散微观理论与机制	85
3.2.1 原子跳动和扩散系数	85
3.2.2 扩散激活能	89
3.2.3 扩散机制	89
3.3 扩散的热力学分析	91
3.4 影响扩散的因素	93
3.5 反应扩散	94
习题	96
4 纯金属的凝固	97
4.1 结晶的过冷现象	97
4.2 结晶的热力学条件	98
4.3 液态金属的结构	98
4.4 纯金属的结晶过程	99
4.5 形核规律	99
4.5.1 均匀形核	100
4.5.2 非均匀形核	104
4.6 长大规律	106
4.6.1 固-液界面的微观结构	106
4.6.2 晶体长大机制	107
4.6.3 纯金属生长形态	108
4.7 凝固理论的应用	110
4.7.1 晶粒大小的控制	110
4.7.2 单晶体的制备	111
4.7.3 急冷凝固技术	111
习题	113
5 二元合金相图	114
5.1 相图的基础知识	114
5.1.1 相图的表示方法	114
5.1.2 相图的测定方法	115
5.1.3 相图的热力学基础	115
5.2 二元相图的基本类型	120

5.2.1	二元匀晶相图	120
5.2.2	二元共晶相图	122
5.2.3	二元包晶相图	127
5.2.4	其他类型的二元相图	130
5.2.5	复杂二元相图的分析方法	133
5.2.6	根据相图判断合金的性能	134
5.3	二元相图实例分析	136
5.3.1	SiO ₂ -Al ₂ O ₃ 系相图	136
5.3.2	铁碳合金相图	139
5.4	二元合金的凝固理论	153
5.4.1	固溶体合金的凝固理论	153
5.4.2	共晶合金的凝固理论	161
5.4.3	合金铸锭的组织与缺陷	165
	习题	170
6	三元合金相图	174
6.1	三元相图的成分表示法	174
6.1.1	等边成分三角形	174
6.1.2	等腰成分三角形	175
6.1.3	直角成分三角形	175
6.2	三元系平衡相的定量法则	176
6.2.1	直线法则和杠杆定律	176
6.2.2	重心法则	176
6.3	三元匀晶相图	176
6.3.1	相图分析	177
6.3.2	结晶过程分析	177
6.3.3	水平截面图(等温截面图)	177
6.3.4	垂直截面图(变温截面图)	179
6.3.5	投影图	180
6.4	固态互不溶解的三元共晶相图	181
6.4.1	相图分析	181
6.4.2	投影图	183
6.4.3	等温截面图	184
6.4.4	变温截面图	185
6.5	两个共晶型和一个匀晶型二元系构成的三元相图	186
6.5.1	相图分析	186
6.5.2	投影图	188
6.5.3	变温截面图	188
6.5.4	等温截面图	189

VI	
6.6	两个包晶型和一个匀晶型二元系构成的三元相图 190
6.7	固态有限互溶的三元共晶相图 192
6.7.1	相图分析 192
6.7.2	投影图 194
6.7.3	变温截面图 195
6.7.4	等温截面图 195
6.8	三元相图应用举例 197
6.9	三元相图小结 200
	习题 202
7	材料的变形与再结晶 205
7.1	弹性变形 205
7.1.1	弹性变形特征 205
7.1.2	弹性的不完整性 206
7.2	晶体的塑性变形 207
7.2.1	单晶体的塑性变形 207
7.2.2	多晶体的塑性变形 216
7.2.3	合金的塑性变形 218
7.2.4	塑性变形对材料组织与性能的影响 221
7.3	回复和再结晶 223
7.3.1	冷变形金属在加热时的组织和性能变化 223
7.3.2	回复 225
7.3.3	再结晶 226
7.3.4	晶粒长大 230
7.4	金属的热加工 230
7.4.1	冷热加工的划分 230
7.4.2	动态回复与动态再结晶 231
7.4.3	热加工对组织及性能的影响 232
7.4.4	蠕变 233
7.4.5	超塑性 233
	习题 234
8	亚稳态材料 236
8.1	纳米晶材料 236
8.1.1	纳米材料的结构 237
8.1.2	纳米晶体材料的性能 237
8.1.3	纳米晶材料的形成 238
8.2	准晶 239
8.2.1	准晶的结构 240

8.2.2 准晶的形成	240
8.2.3 准晶的性能	240
8.3 非晶态材料	241
8.3.1 非晶态的形成	241
8.3.2 非晶态的结构	243
8.3.3 非晶合金的性能	244
参考文献	245

1 晶体结构

(Crystal structure)

1.1 晶体几何基础 (Geometric basis of crystal)

这里所说的晶体是指理想晶体，即不考虑实际晶体中可能存在的各种缺陷。首先用几何学的方法研究晶体的外形几何特征及其内部结构，阐明晶体所遵循的几何规律，揭示晶体的外部形态与其内部结构之间的相互依赖关系。只有弄清楚了晶体的结构、形态的规律，才能从本质上去认识晶体的物理-化学性质。

1.1.1 晶体内部结构和空间点阵 (Inner structure and space lattice of crystal)

1.1.1.1 晶体内部结构的周期性 (Periodism of crystal structure)

人们最开始认识晶体是从观察外部形态开始的。把具有天然的而不是经人工加工的规律的几何外形固体称为晶体。如：石英、锆英石、尖晶石、食盐，如图 1.1 所示。但许多物质，虽然不具有明显的规则多面体外形，却具有晶体性质，也就是说，这种规则的多面体并不能反映晶体的实质，它只是晶体内部某种本质因素的规律性在外表上的一种反映。

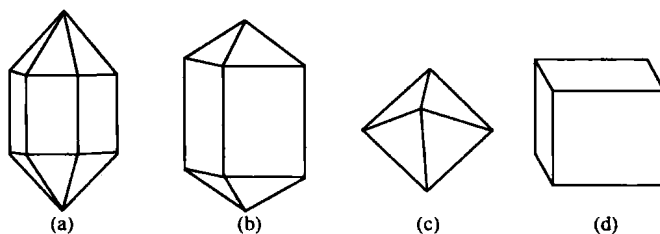


图 1.1 几种晶体的外形

(a) 石英; (b) 锆英石; (c) 尖晶石; (d) 食盐

直到 20 世纪初，1912 年德国物理学家劳厄第一次成功获得晶体的 X 射线衍射图案，才使研究深入到晶体的内部结构，才从本质上认识了晶体，证实了晶体内部质点（原子、离子、分子或原子团）在三维空间都是有规律地呈周期性重复排列。如图 1.2 食盐的晶体结构。图 1.2 (a) 中大球代表氯离子 (Cl^-)，小球代表钠离子 (Na^+)。沿着立方体棱边方向， Na^+ 和 Cl^- 各自以相等的间隔交替排列，每隔 0.5628nm ， Na^+ 或 Cl^- 就重复一次，若沿着立方体的面对角线方向，各自每隔 0.3978nm 重复一次，在其他方向上也有类似的周期性重复，如图 1.2 (b) 所示。这个重复周期的尺度与实际晶体尺寸相比是非常小的，以至对边长为 1mm 的食盐晶粒，这种重复竟达 10^6 数量级，因此可把它看成是无限多次重复。因此，在食盐晶体中，若把整个图形沿立方体棱边三个方向中任一方向移

动 0.5628nm 或其整数倍, 图形就和没有移动过一样, 即整个图形复原。晶体中的这个特点称为周期性重复性, 或称之为平移对称性。可以用平移向量通式来表达晶体内部质点这种周期性重复的性质, 即对整个图形作 $T = ma + nb + pc$ ($m, n, p = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 任意整数) 的平移, 图形可以复原, T 称为平移向量。 a 、 b 、 c 为晶体在三维方向的基本平移周期, 而它们的向量 a 、 b 、 c 称为基本向量。晶体中 T 有下列性质: (1) 从晶体结构中任何一个质点出发, 以向量 T 进行平移, 一定会重合在另一个等同的质点上; (2) 任何两个等同质点的连线一定也是一个 T 向量。不符合这两条原则的固体结构就不属于晶体。所以也可以定义晶体就是有 T 向量的固体材料。

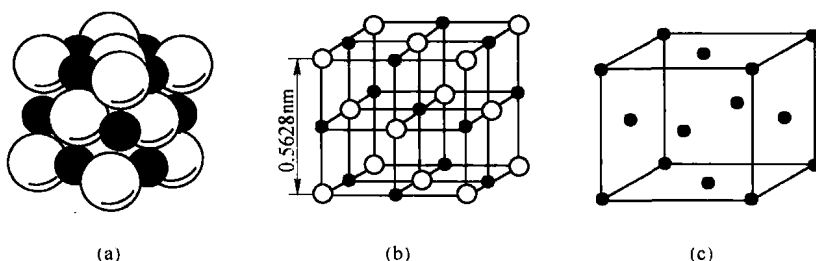


图 1.2 食盐晶体结构

(a) 晶胞; (b) 结构示意图; (c) 空间点阵

以上是以 NaCl 为例, 阐述了晶体中周期性重复性的特点。实际对任何一种晶体, 不管它的构造多复杂, 其质点在三维空间的排列都始终呈现周期性重复, 因此周期性重复性是一切晶体都具有的共性。而不同晶体结构的差异, 只在于它们的质点种类不同, 排列方式和间隔大小也相应发生了变化, 有些晶体如 MgO 和 NaCl , 尽管排列方式一样, 而质点种类不同, 重复周期不一样, 性质也有很大差异, 但就其晶体内部质点在三维空间呈周期性重复这一点, 却都是一样的。因此又可以定义晶体就是具有周期性构造的固体。

1.1.1.2 晶体结构与点阵 (Structure and space lattice)

为了研究各种千变万化的晶体结构中的一些共同规律, 人们根据晶体内部质点排列具有周期性的特点, 提出了点阵概念。

首先根据晶体结构的周期性来建立一维晶体和直线点阵的关系。图 1.3 (a) 所示为一个沿一定方向以一定距离呈无限周期性重复的一维结构图形。从图中可知, 一个周期性结构应具备两个要素: (1) 周期性重复的内容, 它相当于在一维晶体中由质点 (原子、离子、分子或原子团) 组成的一个基本单元, 称为结构单元或结构基元。在任何理想晶体中, 结构单元应包括这个晶体中所有不等价的原子, 但又不应该包括完全等同的原子。这里所说的等同, 不只是指属于同一种元素的原子, 还包括其周围的物理化学环境及几何环境也应该相同。即结构单元中所包含的质点间相互关系, 在整个晶体中都是一样的。如图 1.3 (a) 中每四个“基本”质点才算一个结构单元; (2) 重复周期的方向和大小, 相当于一维晶体中相邻结构单元间的距离, 称为周期。

为了研究各种千变万化的晶体结构中的一些共同规律，即晶体结构中的结构单元在整个结构中是否重复出现？向哪个方向重复？距离多大重复一次？即只考虑结构的周期性，这就不需要研究整个晶体结构中每个结构单元的具体情况，只要对整个晶体结构进行几何抽象，抽象的办法是从整个晶体结构的每一个由一个或一组质点构成的结构单元中都选出等同的质点作为代表（这个结构单元），并将它们一个个都化成既无质量又无尺度的几何点，如图 1.3 (b) 所示。这样便得到一个相应于一维晶体结构的无限点阵排列，称为直线点阵。抽象的几何点称为阵点，简称阵点。两相邻阵点间的距离 a 称为该直线点阵的基本周期，而 a 的向量 \mathbf{a} 称为该直线点阵的平移向量，也称基本向量。

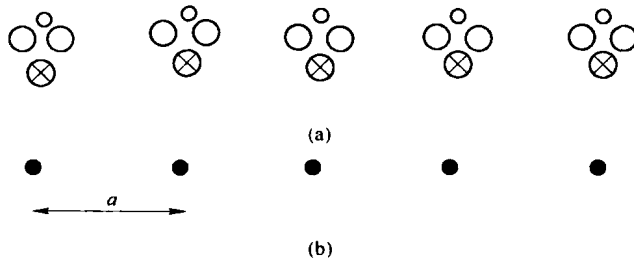


图 1.3 一维结构图与直线点阵

(a) 一维结构图形；(b) 直线点阵

同样，将一个二维或三维结构中的结构单元加以几何抽象，就会得到相当于二维晶体结构或三维晶体结构的点阵，它们分别称为平面点阵（见图 1.4）或空间点阵（见图 1.5）。平面点阵中有两个互不平行的基本向量 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 。如果用两组分别平行于 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的直线将平面点阵中所有阵点都连接起来，平面点阵就被分割成无数个以 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 为边、大小和形状都相同、互相并置的平行四边形，如图 1.4 (b) 所示。此时的平面点阵也称为平面格子，其阵点称为结点。同理，在空间点阵中有三个互不平行的基本向量 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 。如沿 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 三个方向用直线将所有阵点都连接起来，则空间点阵将被分割成无数个相互叠置的，以 \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 为三个棱边的，且完全相同的平行六面体，如图 1.5 (b) 所示。此时的空间点阵称为空间格子，其阵点也称为结点。

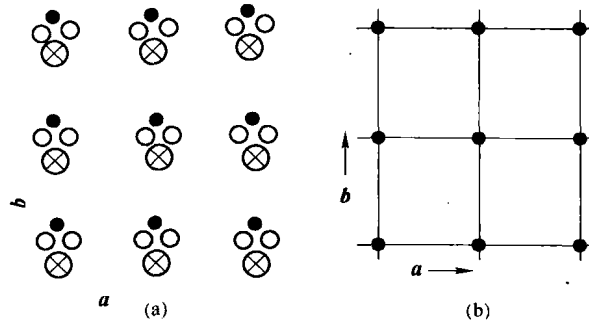


图 1.4 二维结构图与平面点阵

(a) 二维结构图形；(b) 平面点阵

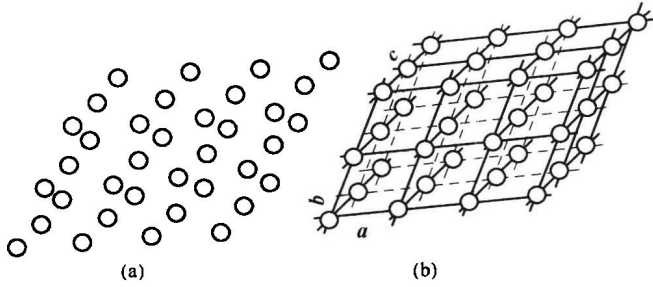


图 1.5 空间点阵与空间格子

(a) 空间点阵; (b) 空间格子

1.1.1.3 晶体的基本性质 (Basic properties of crystal)

(1) 各向异性 (Anisotropy)。晶体对光、电、磁、热以及抵抗机械和化学作用在各个方向上是不一样的 (等轴系晶体除外)。如: 石墨的电导率, 在不同方向差别很大, 垂直方向为层平行方向的 $1/10^4$ 。晶体的各向异性是区别于物质其他状态的最本质性质。

(2) 固定熔点 (Definite melting point)。晶体在熔化时必须吸收一定的熔融热才能转变为液态 (同样在凝固时放出同样大小的结晶热), 如图 1.6 (a) 所示, 随时间增加, 温度升高, T_0 时晶体开始熔解, 温度停止上升, 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, 温度才开始继续升高, T_0 称为晶体熔点。而非晶体不具有这一特点, 如图 1.6 (b) 所示。

(3) 稳定性 (Stability)。晶体能长期保持其固有状态而不转变成其他状态。这是由晶体具有最低内能决定的, 内能小, 晶体内的质点规律排列, 这时质点间的引力、斥力达到平衡, 结果内能最小, 质点在平衡位置振动, 没有外加能量, 晶体格子构造不破坏, 就不能自发转变为其他状态, 处于最稳定状态。

(4) 自限性 (Selfconfinement)。晶体具有自发地生长为一个封闭的几何多面体倾向, 即晶体与周围介质的界面经常是平面, 晶体的多面体形态是其格子构造在外形上的直接反映。

(5) 对称性 (Symmetry)。晶体的某些性质在一定方向及位置上出现对称性, 因为晶体的构造是质点在空间的周期性规律排列, 是反映在宏观上的必然结果。

(6) 均一性 (Uniformity)。一个晶体的各个部分性质都是一样的。因为晶体内质点是周期性重复排列的, 其任何一部分在结构上都是相同的, 因而由结构决定的一切性质都是相同的。

(7) 晶面角守恒定律 (Conservation law of crystal face angle)。晶体的晶面大小和形状会随外界的条件不同而变化, 但同一种晶体的相应晶面 (或晶棱) 间的夹角却不受外界条件的影响, 它们保持恒定不变的值。

上面晶体所具有的基本性质, 非晶体都不具有, 它是晶体与非晶体的本质区别, 其最

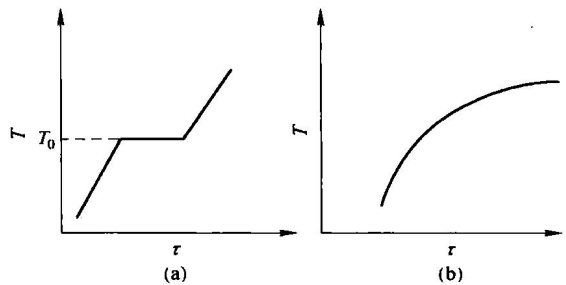


图 1.6 固体的加热曲线

(a) 晶体; (b) 非晶体

重要原因是内部结构的不同。

1.1.2 晶体的宏观对称性 (Macroscopic symmetry of crystal)

1.1.2.1 晶体外形的对称性 (Appearance symmetry of crystal)

对称图形广泛存在于自然界中，人们日常生活中经常碰到，从六角形的雪花到翩翩起舞的蝴蝶等都是自然对称的，人的双手也是对称的，伞是对称的（8块），还如前面讲到的石英、锆英石、尖晶石和食盐晶体的形态，上述物体间存在着某种共同的规律性，这种规律性表现在：第一，这些物体上存在着若干个彼此相同的部分或本身可以被划分若干个彼此相同的部分；第二，如果把这些相等部分对换一下，这些相等部分都是有规律重复出现的。这种性质是对称的，晶体外形上的对称是由其内部格子构造的对称所决定的，只是不同晶体之间对称性是有差别的，晶体的对称性与晶体的物理学性质有很大的关系，如压电效应只能发生在不具有对称中心的晶体中，而双折射则是中、低级晶族所固有的特点等等。

对称是晶体的一种基本性质，但晶体的对称受其内部结构的周期性和对称性制约，只有内部结构所容许的对称性才能在晶体外形上体现出来；且晶体的对称性不仅表现在几何形态上，也表现在物理性质上。

晶体的外形是一个有限的对称图形，其相等部分表现为相同的晶面、晶棱和角顶等。能使有限对称图形中相等部分出现规律性重复的对称操作只有旋转、反映、倒反和旋转倒反4种，这些对称操作常称为宏观对称操作。

如果对一个对称图形实施某种对称操作，使其在操作后能复原，总是要借助于某些辅助性、假想的几何要素（点、线、面）来进行的。如图1.7所示，A、B两图形相等，A、B通过照镜子来反映，使A、B重复的动作就如“照镜子”。

两个图形之所以能形成对称图形，是因为可以在两图形之间找到一个假想的平面（镜面R），通过这个平面的反映操作，能使该图形复原。又如图1.8所示，对这个图形实施对称操作，使其在操作后能复原，一定是围绕一根假想轴线的旋转操作，这根轴线垂直于纸面，而且通过图形中心（O）。

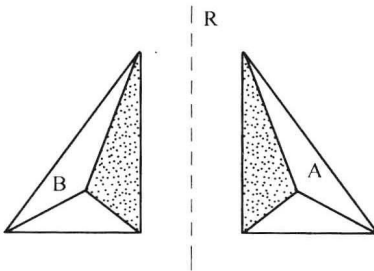


图 1.7 镜像对称图形

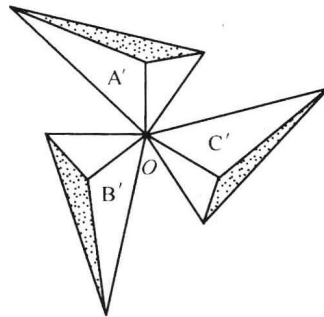


图 1.8 旋转对称图形

以上这些假想的几何要素为对称元素。因而各种对称操作都有相应的对称元素：旋转操作的对称元素称为旋转轴（或对称轴）；反映操作的对称元素称为对称面；倒反操作的对称元素称为对称中心；旋转倒反操作的对称元素称为倒转轴。它们都是宏观对称操作的

辅助几何元素，所以统称为宏观对称元素。

1.1.2.2 宏观对称要素和对称操作 (Macroscopic symmetric element and symmetric manipulation)

A 对称轴和旋转 (Symmetry axis and rotation)

对称轴和旋转以符号 L^n 表示。旋转操作的特点为晶体中每一点都绕某一根假想的轴线转动，在转动过程中，该点到轴线的距离始终不变，该轴线一定通过晶体的几何中心，并且位于其几何中心和角顶或棱的中点或面心的连线上。每旋转一定角度，晶体中各个相等部分就会重复一次。在旋转一周的过程中，晶体重复的次数 n ，称为旋转轴的轴次，显然 n 必为整数。使晶体复原所需要的最小旋转角 α 称为基转角，则有 $n = \frac{360^\circ}{\alpha}$ 。

对称轴是一根通过晶体几何中心的假想直线，晶体绕此轴旋转一定角度后，可使相等部分晶面、晶棱或角顶重复。对称操作：晶体绕轴旋转。符号 L^n ，国际符号 n ， L 代表对称轴， n 代表绕 L 旋转一周重复的次数。晶体中，对称轴只有 1, 2, 3, 4, 6 次，即 L^1 , L^2 , L^3 , L^4 , L^6 ，没有 L^5 和高于 6 次的，原因可用图 1.9 平面点阵的密排图形说明。具有 5 次和高于 6 次旋转轴的图形不能使晶格单元在空间密排，这不符合空间格子理论，因此内部结构不允许 5 次及高于 6 次的旋转轴在晶体的宏观上出现。

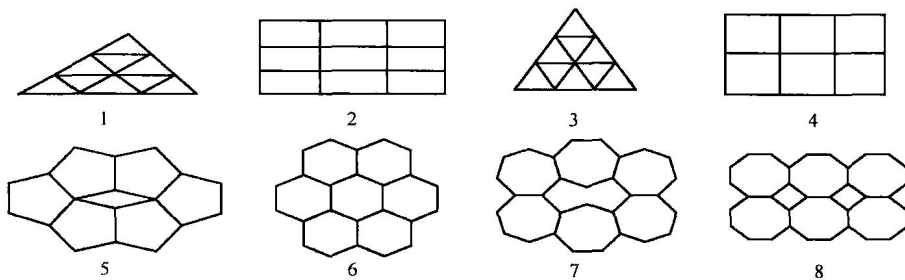


图 1.9 晶体结构中不能出现 5 次和高于 6 次的旋转轴

B 对称面与反映 (Symmetry plane and reflect)

对称面是一个假想平面，它能把晶体分成互为镜像反映关系的两个相等部分，符号 P ，国际符号 m 。

对称操作特点与镜面操作相同，在一根垂直于对称面的直线上，位于对称面两侧且距对称面等距离的两点必为性质完全相同的两点，所以在含有对称面的晶体中，对称面必定通过晶体的中心，并将晶体分成互呈物与像的两个镜像相等部分，因而对称面通常是晶棱或晶面的垂直平分面，或多面角的平分面。图 1.10 是立方体中的对称面。

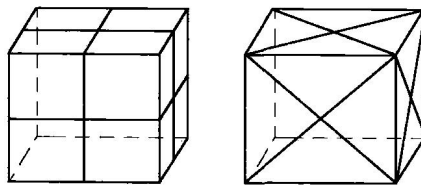


图 1.10 立方体中的 9 个对称面

C 对称中心和倒反 (Symmetry center and inversion)

对称中心是晶体中心的一点，通过此点的直线向相反两个方向延伸，当此直线与一对晶面、一对晶棱、一对角顶（相等部分）相交时，两交点与对称中心间的距离相等。以符