

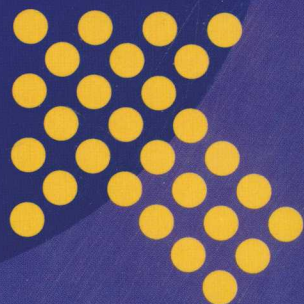
21世纪高等学校规划教材



GONGCHENG CAILIAO YU CHENGXING GONGYI

工程材料 与成型工艺

郭彩萍 主 编
李 蒙 孟 超 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

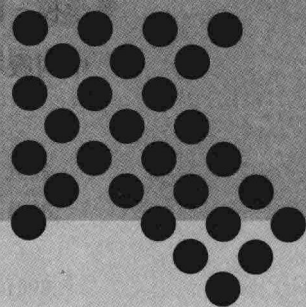
21世纪高等学校规划教材



GONGCHENG CAILIAO YU CHENGXING GONGYI

工程材料与 成型工艺

主 编 郭彩萍
副主编 李 蒙 孟 超
编 写 王保华 张冬梅 高清冉 姚亚平
主 审 李大庆



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。本书是根据教学要求,在总结高校教改经验、编者多年的教学实践经验及学生反馈意见的基础上编写而成的。同时,遵循教材内容与生产实际相结合、专业理论为专业技能服务的基本原则,注重对学生专业能力和解决生产实际问题能力的培养,使学生获得的知识能满足生产第一线的需要。本书主要内容包括:材料的结构与性能、金属材料组织和性能的控制、金属材料、非金属材料、金属材料的成形、非金属材料成形工艺、材料表面处理技术。

本书可作为高职高专机械类专业相关课程的教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料与成型工艺/郭彩萍主编. —北京:中国电力出版社, 2010

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9761 - 0

I. ①工… II. ①郭… III. ①工程材料—成型—工艺—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 214521 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 302 千字
定价 19.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“工程材料与成型工艺”是机械类、近机类各专业的一门重要的技术基础课。近年来，随着社会和经济的不断发展，对各类型人才的培养提出了更高层次的要求，培养生产、建设、管理、服务第一线的高等技术应用型专门人才是适应时代发展的重要举措。“应用型”人才的培养是现代职业教育最鲜明的特色。本书在编写过程中，充分把握实践和应用的特点，在保证基础知识和基本理论“必需”、“够用”的前提下，去掉了复杂难懂的公式和理论的推导、证明，应用简洁明了的语言给出基本的概念、理论和方法，同时采用了大量的图形、表格加以说明，使读者一目了然。

本书根据教学要求，在总结高校教改经验和编者多年的教学实践经验及学生反馈意见的基础上编写而成。同时在汲取同类教材宝贵经验的基础上，对该课程体系和结构进行了一定的改革，以适合课堂教学的需要；同时又考虑到知识体系结构和有兴趣的读者自学的需要，内容编排上力求符合人们认识事物的规律，使之有益于培养读者的创造性思维，提高他们的创新能力。

本书还注重教材内容与生产实际相结合、专业理论为专业技能服务的基本原则，注重对学生专业能力和解决生产实际问题能力的培养，使学生获得的知识能满足生产第一线的需要。

本书由焦作大学郭彩萍担任主编，李蒙、孟超担任副主编。参加本书编写的有焦作大学郭彩萍（绪论、第1、6章）、李蒙（第3章）、孟超（第2章第5节、第7章）、王保华（第2章第1~4节）、张冬梅（第4章）、济源职业技术学院高清冉（第5章第1、2节）、姚亚平（第5章第3节）。全书由郭彩萍统稿和定稿。

本书由江苏大学李大庆主审，主审老师提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。由于编者的水平有限，书中错漏之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

编者

2009年10月

目 录

前言	
第1章 材料的结构与性能	1
1.1 金属的晶体结构	1
1.2 晶体缺陷和合金的结构	6
1.3 金属材料的性能.....	13
第2章 金属材料组织和性能的控制	20
2.1 纯金属的结晶.....	20
2.2 合金的凝固.....	26
2.3 铁碳合金的相图.....	32
2.4 金属的塑性变形.....	39
2.5 钢的热处理.....	49
第3章 金属材料	72
3.1 杂质元素对钢性能的影响.....	72
3.2 工业用钢.....	73
3.3 铸铁.....	88
3.4 有色金属及其合金.....	96
3.5 钢铁材料的现场鉴别	103
3.6 新型金属材料	105
第4章 非金属材料	107
4.1 高分子材料	107
4.2 陶瓷材料	124
4.3 复合材料	133
第5章 金属材料的成形	139
5.1 铸造	139
5.2 锻造	149
5.3 焊接	152
第6章 非金属材料成形工艺	164
6.1 塑料成形	164
6.2 橡胶成形	168
6.3 陶瓷成形	168
6.4 复合材料成形	172
6.5 材料的快速成形技术	176
第7章 材料表面处理技术	182
7.1 材料表面处理基础	182

7.2	气相沉积	185
7.3	电镀	188
7.4	热喷涂	190
7.5	涂装	191
参考文献		193

第1章 材料的结构与性能

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体与非晶体

自然界中的一切物质都是由原子构成的。根据原子在其内部排列的方式不同,可以将固态物质分为晶体与非晶体两大类。晶体又分为单晶体和多晶体。所谓晶体就是指其内部的原子(质点)在空间有规则的排列,具有一定的熔点并具有各向异性的特征,如金刚石、石墨和所有的金属在固态下都是晶体。所谓非晶体就是指其内部的原子在空间无规则的排列,也有一定的熔点,如玻璃、松香、沥青在固态下都是非晶体。晶体中原子排列的情况如图1-1(a)所示。

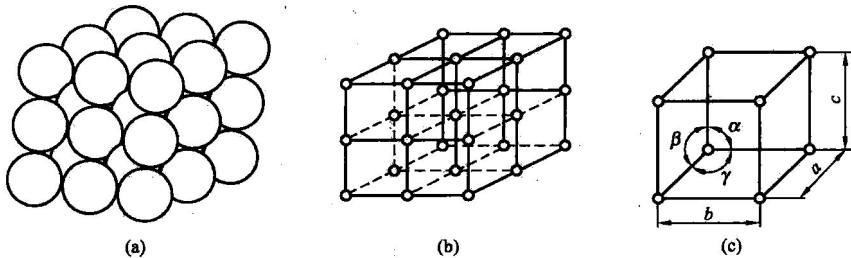


图1-1 晶格和晶胞

(a) 晶体中的原子排列; (b) 晶格; (c) 晶胞

自然界中除少数物质(如普通玻璃、松香、赛璐珞等)外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。天然晶体一般具有规则的几何外形,例如,食盐(NaCl)结晶成立方体形,明矾结晶成八面体形,然而金属制品却不具有规则的几何外形,可见晶体与非晶体的区别不在于外形,主要在于内部原子排列方式。

与非晶体相比,晶体通常具有如下特征。

(1) 晶体具有一定的几何形状,其内部质点(分子、原子或离子)在空间有规律地重复排列,如氯化钠、石英、磁铁矿等均为晶体。非晶体(无定形物质)则没有一定的结晶外形,质点排列没有规律,如玻璃、石蜡都是无定形物质。无定形物质往往是在温度突然下降到液体的凝固点以下成为过冷液体时,物质的质点来不及进行有规则的排列而形成的。

(2) 晶体有固定的熔点。晶体在一定温度时便开始熔化。继续加热时,在晶体没有完全熔化以前,温度保持恒定;待晶体完全熔化后,温度才开始上升。因此,晶体具有固定的熔点。这是晶体的又一特征。而非晶体(无定形物质)没有固定的熔点,如玻璃、石蜡等。加热非晶体时,升高到某一温度后开始软化,流动性增加,最后变成液体。非晶体从软化到完全熔化的过程中,温度是不断上升的,没有固定的熔点,只能说有一段软化的温度范围。

(3) 晶体具有各向异性。晶体中各个方向排列的质点间的距离和取向不同,因此晶体是各向异性的,即在不同方向上有不同的性质。例如,石墨容易沿层状结构的方向断裂,石墨

在与层平行方向上的电导率比与层垂直方向上的电导率要高 1 万以上，各向异性是晶体的重要特征。非晶体的无规则排列决定了它们是各向同性的。

由此可见，规则的几何外形、固定的熔点、各向异性、对称性等是晶体的几个宏观基本特征。金属晶体具有良好的导电、导热性和延展性。大多金属具有较高的熔沸点、较高的硬度。熔点最高的是金属钨 (3410°C)，熔点最低的是金属汞 (-38.87°C)。

1.1.2 金属概述

某一特定元素是否为金属取决于它的某些性能，而对于用哪几种性能作为判断标准却是不同的。从化学的角度看，若某种元素的氯化物溶于水后形成碱性溶液，则这种元素为金属；从物理的角度看，具有良好的导电性且导电性随温度升高而减小的元素称为金属；从冶金学和工程的角度看，如果某种元素能满足上述导电性能的要求，并且能进行某种程度的塑性变形，则视其为金属。应该指出，上述的定义并非十分严格。在化学元素周期表中，已发现的化学元素有 105 种，其中 80 余种是金属元素。在这些金属元素中，有些元素（如铋）并不具有良好的延展性，铍、镓的导电性还不如某些非金属元素（如石墨）好。显然，上述定义并未揭示出金属与非金属之间差别的本质。比较通用的定义是：凡具有正的电阻温度系数的元素即为金属。而所有的非金属电阻都随温度的升高而下降。

1. 金属原子的结构特点

金属原子的结构特点在于其最外层的电子数很少，只有 1~2 个，一般不超过 4 个。由于这些外层电子与原子核的结合力较弱，很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子，使得金属原子变为正离子，因此常将这些元素称为正电性元素。非金属原子的结构与此相反，其外层电子数较多，最多 7 个，最少 4 个，原子易于获得额外电子成为负离子，因此非金属元素又称为负电性元素。

在化学元素周期表中，还有一些所谓的过渡族金属元素，如钛、钒、铬、锰、铁、钴、镍等。它们的原子结构除具有上述特点之外，还有一个特点，就是在次外层尚未填满电子的情况下，最外层就先填充了电子。因此，过渡族金属的原子不仅容易丢失最外层电子，而且还容易丢失次外层的 1~2 个电子，这就导致了过渡族金属的化合价是可变的。当过渡族金属的原子互相结合时，不仅最外层电子参与结合，而且次外层电子也参与结合，使其原子间的结合力大幅增加，表现出熔点高、强度高等重要的重要的宏观特性。因此，过渡族金属在金属材料中占有极为重要的地位。

2. 金属键

金属处于气态时，各原子间距离较远，只是偶尔发生碰撞，彼此间并不存在结合键，当金属原子互相靠近到一定程度而成为液体金属或固体金属时，原子间就形成了结合键，使原子紧凑而规则地排列在一起。这种金属原子间的结合键称为金属键。

由金属键的本质可以解释固态金属的许多特性。例如，金属在很小的外电场作用下，自由电子即可沿着电场方向流动形成电流，所以金属具有良好的导电性；金属正离子的热振动与自由电子的运动都可以传递热能，所以金属具有良好的导热性；随温度的升高，金属正离子振动的振幅加大，阻碍自由电子流过，使电阻升高，以致金属具有正的电阻温度系数；自由电子易吸收可见光的能量，使金属具有不透明性，而吸收了能量从被激发态的电子回到基态时产生辐射，使金属具有光泽。

应该指出，以上只是利用经典的自由电子理论，粗略地解释了金属的一些特性。实际

上,金属中的自由电子并非完全自由。根据量子力学的观点,在金属中运动的自由电子可以看成是电子波(即德布罗意物质波),它们在金属内周期性电场作用下所具有的能量是不连续的,依能带而分布。

3. 金属原子的结合能

原子能够结合成为晶体的根本原因在于原子结合起来后可使体系的总能量降低,即在分散的原子结合成晶体的过程中,会有一定的能量(E)释放出来,这个能量称为结合能。

在固态金属中每个原子周围都有几个最紧邻的原子,只要了解它们之间的相互作用,便可大体了解整个金属中原子间的作用情况。

为方便起见,首先分析两个原子间的相互作用情况(即双原子作用模型)。晶体中的原子间存在相互吸引及相互排斥两种矛盾的作用,吸引作用的本质来源于异性电荷之间的库仑引力;而排斥作用则是由同性电荷间的库仑力及正离子周围电子气相互重叠引起的。两原子相互作用的综合结果取决于它们之间的距离。一般来说,两原子相距较远时,吸引作用占主导地位;而两原子相距较近时,排斥作用占主导地位。

1.1.3 金属晶体结构的基本知识

1. 空间点阵、晶格和晶胞

在实际晶体中,每个原子都在围绕着自身的平衡位置不停地振动,并且这种振动随着温度的升高而加剧。此外,晶体中还存在着局部破坏原子排列完整性的各种缺陷。为便于讨论,这里先把晶体看成是由不动的原子所组成,而且是不含各种缺陷的理想晶体。

为了便于研究金属的结构,假定金属原子是静止的,金属原子外形视为一个小球,晶体由这些小球按一定的规律在空间紧紧地排列而成。图1-1(a)所示晶体结构的“小球”模型虽然很直观,但仍然不便于表述晶体内部原子排列顺序规律的细节。可以把原子看成是一个几何质点,把原子之间的相互作用假想为几何直线,这样便可以直接用几何学来讨论晶体的结构。

为更清楚地表明原子在空间排列的规律性,常将构成晶体的实际质点(原子、离子、分子或原子集团)的体积忽略,抽象成为纯粹的几何点,称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,但各个阵点的环境必须相同。这种由周围环境相同的阵点在空间排列的点阵称为空间点阵。进一步用许多平行直线将空间点阵的各阵点连接起来,构成一个三维的空间格架,如图1-1(b)所示。这种用以描述晶体中原子排列规律的空间格架称为晶格。

由于晶体中原子排列具有周期性的特点,故可从晶格中选取一个能够完全反映晶格特征的最小几何单元来分析晶体中原子排列的规律性。这个最小的几何单元称为晶胞,如图1-1(c)所示。晶胞中各棱边的长度称为晶格常数,单位用 \AA 表示($1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$)。晶胞是晶格中的一个具有代表性的结构单元,所以研究金属晶体结构只需研究晶胞的特征。

通常是取一个最小的平行六面体作为晶胞,将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。

同一空间点阵可因阵点连接线选取方式不同而得到不同形状的晶胞。因此人为规定在选择晶胞时应满足下列条件。

- (1) 晶胞的几何形状应与宏观晶体具有同样的对称性。
- (2) 平行六面体内相等的棱和角的数目应最多。

(3) 当平行六面体的棱间呈直角时，直角的数目应最多。

(4) 在满足上述条件下，晶胞的体积应最小。

2. 晶格的类型

由于原子的排列方式不同，便组成不同的晶格类型，晶格的类型有很多种，常见的有以下三种。

(1) 体心立方晶格。体心立方晶格的晶胞如图 1-2 所示，它的晶胞形状是一个立方体，三个边长相等并且互相垂直。晶格边长 $a=b=c$ ，晶胞间的夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，原子分布在立方体的八个角上，由于晶体由许多晶胞堆积而成，因此，体心立方晶胞八个角上的原子同属于与其相邻的八个晶胞共有，每个晶胞实际上只占有 $1/8$ 个原子。在立方体的中心还有一个该晶胞独有的原子，所以原子数为 $1/8 \times 8 + 1 = 2$ (个)。

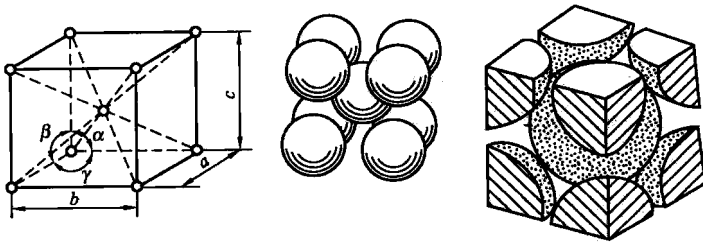


图 1-2 体心立方晶格示意图

体心立方晶格的致密度约为 0.68 (致密度是晶胞中原子所占的体积与晶胞体积之比)。室温时 α -Fe 的晶格常数为 2.866\AA ，原子半径为 1.23\AA ，约有二十多种金属具有体心立方晶格。纯铁在 910°C 以下就是体心立方晶格，称为 α 铁。具有这种晶格的金属有铁 (α -Fe)、钨 (W)、钼 (Mo)、钒 (V)、铬 (Cr) 等。这类金属一般都具有较好的强度和塑性。

(2) 面心立方晶格。面心立方晶格的晶胞如图 1-3 所示，和体心立方晶格一样，它的晶胞形状是一个立方体，三个边长相等并互相垂直，晶格边长 $a=b=c$ ，晶胞间夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，原子分布在立方体的八个角上，其晶胞八个角上的每个原子为八个相邻晶胞共有，在立方体六个面中心也各有一个原子，则只属于相邻两个晶胞共有。原子数为 $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$ (个)，面心立方晶格的致密度约为 0.74。 910°C 时的 δ -Fe 的晶格常数为 3.643\AA ，原子半径为 1.228\AA 。约有二十多种金属具有面心晶格。纯铁在 $910 \sim 1390^\circ\text{C}$ 之间，具有面心立方晶格，称为 γ 铁。具有这种晶格的金属有铝 (Al)、铜 (Cu)、镍 (Ni)、铁 (γ -Fe) 等，这类金属的塑性都较好。

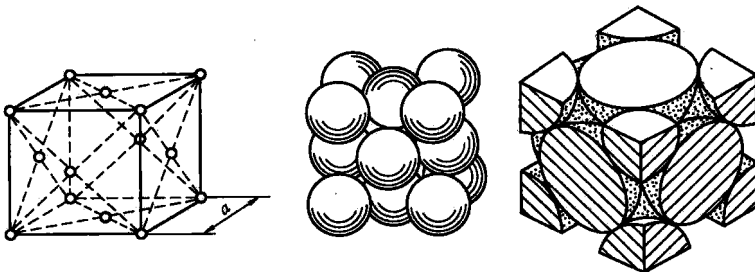


图 1-3 面心立方晶格示意图

(3) 密排六方晶格。密排六方晶格的晶胞如图 1-4 所示, 它的晶胞形状是一个正六角柱体, 在六角柱体的十二个角上各有一个原子, 每个原子为相邻的六个晶胞所共有, 上底和下底各有一个原子, 为相邻两个晶胞所共有, 在六柱体的中心还有三个原子, 为该晶胞所独有, 原子数为 $1/6 \times 12 + 1/2 \times 2 + 3 = 6$ (个), 密排六方晶格的致密度约为 0.74, 约有三十余种金属具有密排六方晶格。具有这种晶格类型的金属有铍 (Be)、钛 (α -Ti) 等。

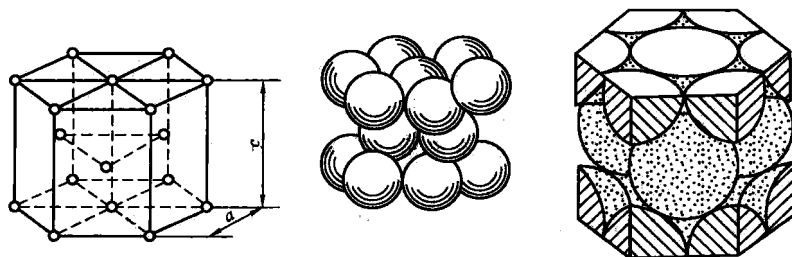


图 1-4 密排六方晶格示意图

3. 反映金属晶体排列紧密的参数

晶格的致密度: 晶胞中所包含的原子所占有的体积与该晶胞体积之比。

配位数: 晶格中任一原子周围所紧邻的最近且等距离的原子数。

不同晶格的配位数与致密度见表 1-1。

表 1-1 晶格的配位数与致密度

晶格类型	配位数	致密度	晶格类型	配位数	致密度
体心立方	8	0.68	密排六方	12	0.74
面心立方	12	0.74			

下面介绍晶格的致密度 c 的计算。

(1) 体心立方晶格的致密度 c 。棱边为 a , 晶胞含有 2 个半径为 r 的原子, 则致密度 c 为

$$c = \frac{2 \frac{4\pi}{3} r^3}{a^3} = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{r}{a}\right)^3$$

因为 $4r = a\sqrt{3}$, 所以

$$c = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)^3 = 0.68, \text{ 即 } 68\%$$

(2) 面心立方晶格的致密度 c 。单元晶格含有 4 个原子, 则紧密度 c 为

$$c = \frac{4 \frac{4\pi}{3} r^3}{a^3} = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{r}{a}\right)^3$$

因为 $4r = a\sqrt{2}$, 所以

$$c = \frac{\pi}{6} \sqrt{2} = 0.74, \text{ 即 } 74\%$$

(3) 密排六方晶格的致密度 c 。单元晶格中有 2 个原子, 即

$$c = \frac{2 \frac{4\pi}{3} r^3}{V}$$

$$S = 2r^2 \sqrt{3}, h = 4r \sqrt{\frac{2}{3}}, \text{ 所以}$$

$$c = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.74, \text{ 即 } 74\%$$

4. 晶面与晶向指数

晶面：晶体中各种方向上的原子面。

晶向：晶体中各种方向上的原子列。

在研究金属晶体结构的细节及其性能时，需要分析其各种晶面和晶向中原子分布的特点，因此有必要给各种晶面和晶向定出一定的符号，以表示出它们在晶体中的方位或方向，便于分析。晶面和晶向的这种符号分别称为晶面指数和晶向指数。

(1) 确定晶面指数的步骤。

1) 设晶格中某一原子为原点，通过该点作平行于晶胞的三棱边作 OX 、 OY 、 OZ 三坐标轴，以晶格常数 a 、 b 、 c 分别作为相应的三个坐标轴上的量度单位，求出所需确定的晶面在三坐标轴上的截距。

2) 将所得三截距之值变为倒数。

3) 再将这三个倒数按比例化为最小整数，并加上圆括号，即为晶面指数。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示。

立方晶格中三个重要晶面 (100) 、 (110) 、 (111)

(2) 晶向指数的确定方法。

1) 通过坐标原点引一直线，使其平行于所求的晶向。

2) 求出该直线上任意一点的三个坐标值。

3) 将三个坐标值按比例化为最小整数，一般用 $[uvw]$ 表示。

晶面与晶向的原子密度：晶面原子密度是指单位面积中的原子数。

晶向原子密度是指单位长度上的原子数。

例如，体心立方晶格的晶面与晶向指数见表 1-2。

表 1-2 体心立方晶格的晶面与晶向指数

晶面指数	晶面密度	晶向指数	晶向密度
(100)	$1/a^2$	[100]	$1/a$
(110)	$1.4/a^2$	[110]	$0.7/a$
(111)	$0.58/a^2$	[111]	$1.16/a$

单晶体应用：变压器中的硅钢片晶向指数为 $[100]$ ，利用了它的磁导率。

如果一个晶体内部的晶格方位完全一致，称为单晶体。工业中实际使用的金属材料，包含了许多小晶体，单个晶体内部晶格方位一致，但不同晶体间彼此方位不同，称为多晶体。单晶体各向异性，多晶体一般不显示各向异性。

1.2 晶体缺陷和合金的结构

1.2.1 纯金属的实际晶体结构

在金属体中，凡是晶格位向基本一致的区域，并有边界与邻区分开就称之为一个晶粒。在

显微镜下可以看到这些晶粒，其外形不规则状。它们是些不规则的外形多面体，如图 1-5 所示。相邻晶体的晶粒间晶格的位向有明显差别。晶粒之间原子排列不规则的区域称为晶界。实际上，晶界就是不同晶格位向的相临晶粒在原子排列上的过渡区。通常，晶粒尺寸很小，对于钢铁材料一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm。有色金属的晶粒尺寸一般都比钢大一些，有的可用眼睛直接看到。例如，镀锌钢板表面镀锌层的晶粒尺寸可达到几毫米到几十毫米。

每个晶粒内部晶格位向也并非完全一样，而是存在着许多晶格位向差小于 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的更小的晶块。这些小晶块内部是完全相同的。这些小晶块称为亚晶粒，也称嵌镶块，如图 1-5 所示。亚晶粒间的过渡区称为亚晶界，也称小角度晶界。亚晶界也是一种原子排列不太规则的区域。

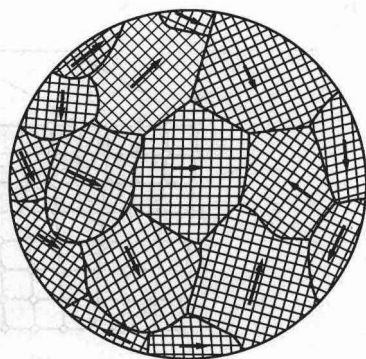


图 1-5 多晶体的晶粒与晶界示意图

1.2.2 晶体中的缺陷

这里说的缺陷不是指晶体的宏观缺陷，而是指晶体中局部原子排列不规则的区域。根据晶体缺陷的几何特点和原子对排列不规则性的影响范围，可分为三大类。

1. 点缺陷

点缺陷是指以一个点为中心，在它的周围造成原子排列的不规则，产生晶格的畸变和内应力的晶体缺陷。主要有间隙原子、置换原子、晶格空位三种，如图 1-6 所示。在晶格的间隙处出现多余的晶体缺陷称为间隙原子；在晶格的结点处出现缺少原子的晶体称为晶格空位；在晶格的结点处出现的原子直径不同的异类原子的晶体缺陷称为置换原子。间隙原子和大直径的置换原子会引起以一个点为中心的晶格局部“撑开”现象，称之为正畸变；而晶格空位和小直径的置换原子会引起以一个点为中心的晶格局部“靠拢”现象，称之为负畸变。

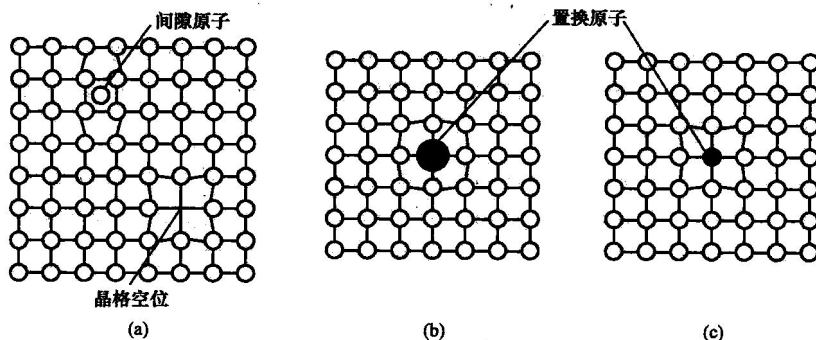


图 1-6 点缺陷

(a) 间隙原子和晶格空位；(b) 大原子置换原子；(c) 小原子置换原子

晶体中的点缺陷都是处在不断的变化和运动中，其位置随时在变。这是金属原子扩散的一种主要方式，也是金属在固态下“相变”和化学热处理工艺的基础。

2. 线缺陷

线缺陷主要是指各种形式的“位错”。所谓位错是指晶体中某一系列或若干列原子发生有规律的错排现象。它引起以晶格错线为中心轴的一个管状区域。

位错有很多种。最简单直观的一种称为刃型位错。它像一个刀刃的切入，如图 1-7 所示。

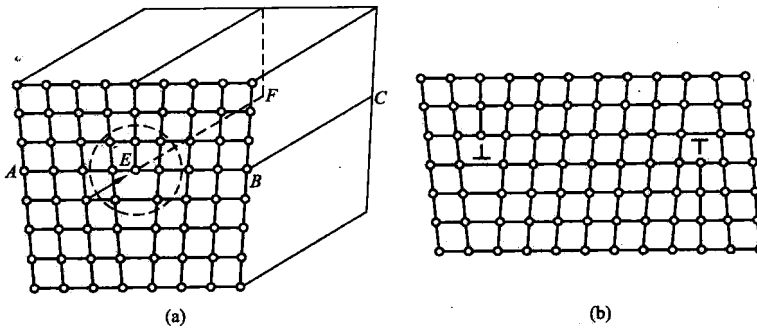


图 1-7 刃型位错示意图

晶格中的位错多少，可用位错密度来表示。位错密度是指单位体积内位错的错线长度，量纲为 cm^{-2} 。晶体中的位错首先是产生于晶体的结晶过程。

晶体材料内部的位错在相应的条件下，可以产生滑移、增殖、交割、缠结、攀移等行为。这对金属材料的强度、塑性等力学性能有着重要的影响。

3. 面缺陷

晶体的面缺陷，主要是指前述的晶界和亚晶界。面缺陷是由于受到其两侧的不同晶格位向的晶粒或亚晶粒的影响而使原子呈不规则排列。原子的位置处于两晶格的取向所能适应的折中位置上。面缺陷是有一定厚度的原子排列不规则的过渡带。其厚度主要取决于相邻的两晶粒或亚晶粒的晶格位向差的大小及晶格变化的纯度。对于金属，这个厚度通常在几个原子间距或几百个原子间距的范围内变化。面缺陷处的晶格畸变较大，界面处能量高，影响范围也较大。因此，晶界具有与晶粒内部不同的特性。

晶体的缺陷影响晶体的性质，可使晶体的某些优良性能降低，但是从缺陷可以改变晶体性质的角度看，在晶体中造成种种缺陷就可以使晶体的性质有着各种各样的变化，晶体的许多重要性能由缺陷产生。改变晶体缺陷的形式和数量，就可得到所需性能的晶体。

1.2.3 合金的晶体结构

在机械工程中，由于纯金属本身的力学性能很有限，满足不了实际的需要。所以，很少使用纯金属制作零部件。而是将它们熔炼成合金，从而改善它们的力学性能，满足使用需要。所以，在机械工程中大量使用的金属材料绝大多数都是合金材料。如钢、铸铁、黄铜、青铜、硬铝、锻铝等。由于合金不只是一种化学元素，因此合金的晶体结构要比纯金属复杂许多。而且其显微组织仅用晶粒、晶界来表示也远远不足，必须引出一些新概念。

1. 基本概念

(1) 合金。两种或两种以上的金属元素（或金属元素与非金属元素）熔合在一起形成具有金属特性的物质，称为合金。例如，铁元素与碳元素组成铁碳合金，铜元素与锌元素组成普通黄铜合金，铝、铜、镁组成硬铝合金等。

合金除具备纯金属的基本特征外，还兼有优良的机械性能与特殊的物理性能、化学性能，如高强度、强磁性、低膨胀性、耐腐蚀性等。同时，组成合金的各元素的比例可在很大范围内调节，使合金具有不同性能，以满足工程中提出的各种不同性能要求。

(2) 组元。组成合金最基本的、独立的物质称为组元，简称元。例如，铁碳合金中的纯铁和碳也是组元，黄铜合金中的铜和锌也是组元。它们都是由两个组元组成的合金，又称为二元合金。合金中的组元可以是化学元素（如铁、碳、铜、铝、锌等），也可以是化合物。

(3) 合金系。合金系是由两种或两种以上的组元，以不同的比例配制出一系列成分不同的合金，这一系列合金组成一组合金系统，称为合金系，简称系。

合金系可以由构成它的组元命名，如铁和碳组元构成的合金系称为铁碳合金；也可以用组元的数目来命名，如由两个组元组成的一个合金系称为二元合金，简称二元系。依此类推，由三个组元组成的合金称为三元合金，简称为三元系，如铝、铜、镁组成的合金称为三元合金。纯金属只有一个组元。更多组元组成的合金称为多元系。

(4) 相。合金中具有同一成分，晶体结构及性能相同的组成部分，称为相。例如，纯铁在 1538℃ 以上时均为液态，只存在一个液相简称单相。在 1538℃ 结晶时，不断从液相 L 中结晶出固相 δ -Fe，在整个结晶过程中既有液相 L 又有固相 δ -Fe，两相并存则为两个相，结晶终了时则只存在一个固相 δ -Fe，为一个单相。

相与相之间有明显的分界线，如温度转变线。相与组织结构概念不同，组织可以有一个相，也可以由多个相组成，称单相或多相组织。如室温条件下 45 钢的平衡组织是铁素体和渗碳体组成的。

(5) 显微组织。是指在显微镜下看到的相和晶粒的形态、大小和分布。

2. 合金的金相组织

由于合金各个相的晶体结构是不同的，所以在合金中，不同相所在的区域具有不同的晶体结构。绝大多数的合金在液相时各组元之间都能互相溶解形成单一的均匀液相。但是，在固相时各种组元之间相互作用不同，可以形成各种晶体结构和化学成分的相。通常分为固溶体和金属化合物两大类。

(1) 固溶体。合金结晶成固态时，含量少的组元（溶质）原子分布在含量多的组元（溶剂）晶格中形成一种与溶剂有相同晶格的相，称为固溶体。可见固溶体的重要标志是与溶剂有相同晶格。根据需要，固溶体有很多种分类方法。最常用的是按溶质固溶体原子在溶剂晶格中的分布位置来分类。有间隙固溶体和置换（代位）固溶体两大类，如图 1-8 和图 1-9 所示。

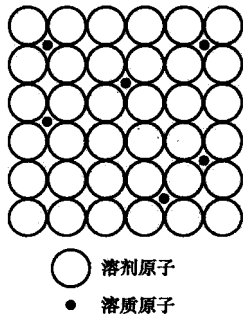


图 1-8 间隙固溶体

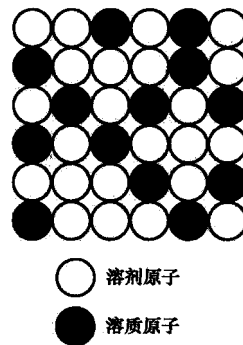


图 1-9 置换固溶体

1) 间隙固溶体。溶质原子分布于溶剂的晶格间隙中所形成的固溶体，称为间隙固溶体。由于晶格的间隙通常都是很小的，所以一般都是由原子半径较小的 ($<0.1\text{nm}$) 非金属元素

(如 C、N、B、O 等) 溶入过渡族金属中, 形成间隙固溶体。例如, 钢中的奥氏体就是 C 原子团溶到 γ -Fe 晶格的间隙中形成的固溶体。

间隙固溶体对溶质溶解都是有限的, 所以均为有限固溶体。间隙固溶体中, 溶质原子的排列是无秩序的, 所以也都是无序固溶体。

2) 置换固溶体。溶质原子代替溶剂原子占据着溶剂晶格结点位置而形成的固溶体, 称为置换固溶体。在有色金属合金和合金钢中都存在着置换固溶体。

根据固溶体中溶质原子的溶解情况, 置换固溶体可分为无限固溶体和有限固溶体。若两组元能以任意比例相互溶解, 即溶质原子能无限制地溶于溶剂中, 如铜镍合金中, 铜与镍可以任意比例相互溶解, 镍原子可以完全置换铜晶格中的铜原子, 或铜原子可以完全置换镍晶格中的镍原子, 这种固溶体称为无限固溶体。若溶质原子在溶剂中溶解受到限制, 即溶剂晶格只能部分溶解溶质原子, 如黄铜中的含锌量小于 39% 时, 所有的锌能溶于铜中, 形成单相的固溶体, 还会出现铜与锌的金属化合物。由此可见, 锌在铜中的溶解是具有一定限度的。这种有限溶解度的固溶体称为有限固溶体。大多数组元的溶解能力是有限的。元素间形成有限固溶体时, 溶质元素的溶解度与温度有关。一般来说, 温度越高, 溶解度越大; 反之降低。这对金属材料的热处理具有十分重要的意义。

置换固溶体中溶质原子的分布一般也是无序分布的, 通常也都是无序固溶体。但是, 在一定条件下也会出现有序分布。这种固溶体称为有序固溶体 (也称超结构)。例如, 铜—金合金系中, 当铜原子数与金原子数的比例为 1:1 或 3:1, 并缓慢冷却至室温时就会出现 CuAu 或 Cu_3Au 的有序固溶体。

有序固溶体, 虽然化学元素成比例, 但并不是化合物。当把它加热到一定温度时, 就会变成无序固溶体; 若是把它再缓慢地冷却到这个温度之下, 则又可变为有序的。这个无序到有序的转变过程称为固溶体的有序化。固溶体的有序化也会变化, 如硬度和脆性增加、塑性和电阻率下降等。

3) 固溶体的溶解度。溶质原子溶于固溶体中的量称为固溶体溶质的溶解度。不同固溶体的溶解度不相同。同一种固溶体随温度的升高溶解度也增加, 反之下降。

4) 影响固溶体的晶体结构和溶解度的主要因素。

① 原子直径。当溶质与溶剂的原子直径相差较小时易形成置换固溶体, 而且直径差越小, 其溶解度也会越大。这是因为, 原子直径差会引起晶格的畸变, 使晶格的畸变能增加。原子直径差越大, 畸变能增加越剧烈。随着畸变能的增加将使这种固溶体晶格结构的稳定性下降。自然这种固溶体本身的存在也就不稳定了, 这将会导致其他相的形成。但是, 若两种原子直径差越小, 畸变能增加也越小, 尽管固溶体浓度不断增加, 也不致因畸变能的原因而引起其晶格结构的改变。这就有可能形成无限固溶体。当溶质与溶剂的原子直径差很大时是不能形成置换固溶体的, 但是却可以形成间隙固溶体。间隙固溶体的溶解度较小。

② 负电性。所谓负电性是指某元素的原子从其他元素原子夺取电子而变成负离子的能力。在元素周期表中, 两种元素的位置距离越远, 则其负电性也越大。两元素负电性越大, 则化学亲和的能力也越大。它们之间就易于形成化合物, 而不利于形成固溶体, 即使形成固溶体其溶解度也很小。

③ 电子浓度。在合金中, 价电子数目与原子数目之比称为电子浓度。对于固溶体, 当溶质原子与溶剂原子的价电子数不相同, 随着溶质原子的进入, 将使固溶体晶格中的电子

浓度及电子云的分布有所改变。并且，溶入的溶质数量越多，电子浓度改变越大。直至达到某一个极限电子浓度时，此固溶体的晶格结构就不稳定了，将会出现新的相。可见，每种固溶体只能稳定地存在于一定的电子浓度范围之内。例如，对于溶剂是一价的，而溶质是高于二价的固溶体，若晶格结构是面心立方，其电子浓度的极限值为 1.36。若固溶体具有体心立方晶格，则电子浓度的极限值为 1.48。

④ 晶体结构。在多数情况下，晶格类型相同的元素之间溶解度较大。晶格类型不同的元素之间溶解度较小。无限固溶体只能产生于相同晶格结构的元素之间。

⑤ 温度。在一般情况下，固溶体随温度升高其溶解度也增加，这可能与固溶体晶格上原子的热振动有关。

5) 固溶体的性能。当溶质含量极少时，固溶体的性能与溶剂金属基本相同。随着溶质含量的升高，通常都会使固溶体的强度、硬度升高，塑性、韧性下降，电阻率、磁感矫顽力升高。通常把溶入溶质元素形成固溶体而使金属的强度、硬度升高的现象称为固溶强化。固溶强化是金属材料的一种重要的强化途径。如果适当控制溶质的浓度，可以在显著提高金属材料强度和硬度的同时，仍保持相当好的塑性和韧性。工业上使用的金属材料多数都是单相固溶体合金和以固溶体为基体的多相合金。

当然仅靠固溶强化来提高金属材料的强度和硬度还是很有限的。但是可以在固溶强化的基础上再适当配合其他强化手段，就会使金属材料达到所需的各种强韧度。其他强化方法还有细晶强化、第二相弥散强化、热处理相变强化、加工硬化等。

(2) 金属化合物。在合金中，当溶质组元的质量分数超过固溶体的溶解度将会产生新相。这个新相可能是以另一组元为溶剂的另一种固溶体，也可能产生一种晶格结构不同于任一组元的化合物。如钢中的 Fe_3C 、 FeS 、 MnS ，黄铜中的 β 相 (CuZn) 等。若化合物的结合键中有一定程度的金属键，则该化合物就具有一定的金属性质。这种具有金属性质的化合物称为金属化合物，如 Fe_3C 、 CuZn 。而 FeS 、 MnS 主要是离子键结合，没有金属性质，称为非金属化合物。在合金中，金属化合物若以细小的粒状均匀分布在固溶体相的基体上会使合金的强度、硬度进一步提高，这种现象称为第二相弥散强化。非金属化合物在合金中通常都会降低合金的性能，它们的存在越少越好。非金属化合物常称为非金属夹杂物，简称夹杂。

金属化合物一般都具有复杂的晶格结构，熔点高，硬而脆。在合金中金属化合物的多少、形态、大小、分布的方式等对合金的性能有不同的影响。弥散均匀分布可提高合金的强度、硬度和耐磨性，但会降低合金的塑性和韧性；若以网状或大块条状分布，则会严重降低合金的各种力学性能。通过热处理和锻造可以改变金属化合物在合金中的分布状况。

金属化合物按照其形成的条件可分为三大类。

1) 正常价化合物。这是一种符合化合物原子价规律、成分固定并有严格分子式的金属化合物。通常由在元素周期表上相距较远、电化学性质相差很大的两种元素化合而成。例如，强金属元素与非金属或类金属元素 (Sb 、 Bi 、 Sn 、 Ph 等) 形成的化合物 Mg_2Si 、 Mg_2Sn 、 Mg_2Pb 等。

正常价化合物化学成分固定，一般不会形成以化合物为基的固溶体。它常被用做铝合金、青铜等材料的强化相。

2) 电子化合物。这是一类不遵守原子价规律而服从电子浓度规律的化合物。当电子浓度为 $21/14$ 、 $21/13$ 、 $21/12$ 时，则分别形成体心立方的电子化合物 (β 相)、复杂体心立方的电子化合物 (γ 相)，密排立方体 (ϵ 相)，见表 1-3。