

高等学校试用教材

金属学与热处理

(锻压专业用)

西安交通大学 张鸿庆 王永兰 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

金属学与热处理

(锻压专业用)

西安交通大学 张鸿庆 王永兰 编

172.63/51



机械工业出版社



B 571942

前 言

本书是根据 1984 年在南京召开的原高等学校工程材料及物理化学教材编审组会议通过《金属学与热处理》课程教学大纲（锻压专业用）编写的。

《金属学与热处理》是锻压专业的一门重要技术基础课。但是，长期以来，还没有一本密切结合锻压专业特点，能满足专业需要的《金属学与热处理》教材，因而给教学工作带来不少困难。本书就是根据锻压专业既从事材料冷热塑性变形工艺的研究，又从事设备设计制造的特点编写的。在编写时，我们力图从锻压专业教学要求出发，在保证基本理论和基本内容的前提下，对金属材料塑性变形、位错理论、金属材料的成分和组织与性能的关系、锻件与模具的热处理、冷热模具材料等内容在深度和广度上都有不同程度的加强。为了提高学生对材料强度的认识，编写了金属材料强度概论一章，着重分析了断裂韧性的物理本质及断口分析的基本方法以及材料成分、显微组织对主要力学性能指标的影响。本书各部分附有例题，每一章都列有较多的复习题，以帮助读者更好地理解 and 掌握重要的理论和方法。

本书由西安交通大学张鸿庆、王永兰合编。第一、二、三、四、九、十章由张鸿庆编写，第五、六、七、八章由王永兰编写。西北工业大学胡德林主审。西安交通大学饶启昌对本书的编写和审稿做了大量的工作，提出了许多宝贵的意见。书中照片由西安交通大学李芬兰提供。在编写过程中，还得到许多专家的热忱帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，经验不多，本书必然存在不少缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见。

编 者

1988.8.20

目 录

第一章 金属及合金的晶体结构	1	复习题	146
§ 1-1 纯金属的晶体结构	2	第六章 钢的热处理	147
§ 1-2 合金的晶体结构	11	§ 6-1 钢在加热时的转变	147
§ 1-3 金属晶体缺陷	17	§ 6-2 钢在冷却时发生的转变	153
复习题	23	§ 6-3 钢的退火和正火	170
第二章 金属的结晶与相图	25	§ 6-4 钢的淬火	174
§ 2-1 金属结晶的基本规律	25	§ 6-5 钢的回火	181
§ 2-2 二元合金相图与合金的结晶	30	§ 6-6 钢的形变热处理	188
§ 2-3 三元合金相图	46	复习题	189
复习题	57	第七章 钢的表面热处理	192
第三章 铁碳相图与碳钢	59	§ 7-1 感应加热表面淬火	192
§ 3-1 铁碳相图	60	§ 7-2 化学热处理	195
§ 3-2 碳对铁碳合金性能的影响	71	复习题	205
§ 3-3 钢的组织与缺陷	72	第八章 合金钢	207
§ 3-4 渗碳	76	§ 8-1 合金元素在钢中的作用	207
复习题	78	§ 8-2 合金结构钢	217
第四章 金属与合金的塑性变形和再结 晶	80	§ 8-3 合金工具钢	236
§ 4-1 单晶体的塑性变形	80	§ 8-4 特殊性能钢	253
§ 4-2 多晶体与合金的塑性变形	99	复习题	261
§ 4-3 金属塑性变形后的组织与性能	105	第九章 铸铁	263
§ 4-4 回复与再结晶	113	§ 9-1 铸铁的石墨化	263
§ 4-5 金属的热塑性变形	120	§ 9-2 灰口铸铁	267
复习题	124	§ 9-3 可锻铸铁	269
第五章 金属材料强度概论	125	§ 9-4 球墨铸铁	271
§ 5-1 金属材料的静强度	125	§ 9-5 特殊铸铁	273
§ 5-2 金属的断裂	130	复习题	273
§ 5-3 金属材料的动强度	137	第十章 有色金属材料	276
§ 5-4 金属磨损与接触疲劳	141	§ 10-1 铜及铜合金	276
§ 5-5 常用力学性能指标在工程中的意 义	142	§ 10-2 铜及铜合金	285
§ 5-6 材料强度、塑性、韧性配合问题的 讨论	145	§ 10-3 钛及钛合金	291
		§ 10-4 轴承合金	293
		复习题	296

第一章 金属及合金的晶体结构

金属与其它物质相比,有许多特性,如良好的导电、导热性能,高的强度、塑性和耐冲击性能等,但各种金属材料(包括金属与合金)在性能上又有很大差别。金属的特性及各种金属性能上的差别,是由他们内部微观结构所决定的。因此研究金属材料性能变化规律,必须首先研究金属及合金的内部结构。

金属的内部结构可以分为三个层次,即原子结构、晶体结构和显微组织,见图1-1。

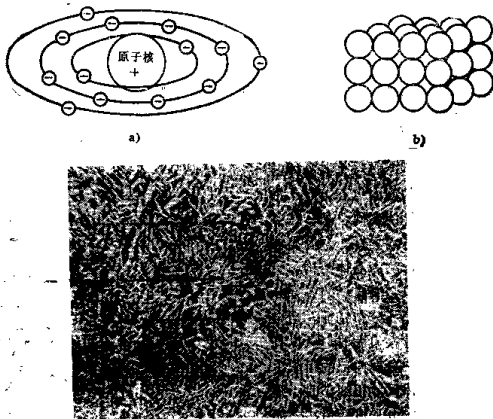


图1-1 金属结构的三个层次

a) 原子结构 b) 晶体结构 c) 显微组织

金属原子的结构特征是最外层电子数目较少(一般为1~3个,见图1-1a),与原子核的联系较松弛,因此容易失去电子而形成正离子。这些脱离原子核的电子并不受某个金属正离子的束缚,而是能够在各个正离子之间作穿梭运动,这种电子称为自由电子(图1-2)。这些自由电子为金属中全部正离子所公有,形成所谓电子气。金属固体就是依靠这些公有化了的自由电子与各正离子之间的引力结合而成的。金属原子的这种结合方式称为金属键。

金属的许多特性可以用金属键加以说明。例如,金属在外力作用下,各层原子间虽然发生相对滑动,但由于自由电子的不停运动(图1-3),即使进行较大的塑性变形,金属仍不发生断裂,因此金属具有良好的塑性。通过轧制、锻造、冲压等塑性变形,可以把金属加工成各种形状的制品。但是在以共价键或离子键结合的物质中,原子层之间在外力作用下发生

相对滑动时,会破坏共价键或离子键的结合,结果使这种材料在发生少量塑性变形时就破裂(图1-4)。

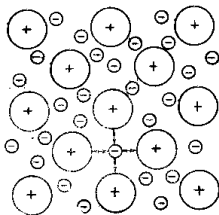


图1-2 金属键示意图

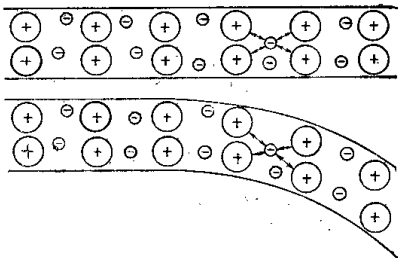


图1-3 金属变形时保持金属键联系示意图

应用X射线衍射、电子衍射等实验方法可以证实所有固态金属中,原子呈长程有序排列,即原子在三维空间作有规则的周期性重复排列(图1-1b),因此固态金属都是晶体。

固态金属既然是晶体,必然具有晶体的特性,如金属具有一定的凝固点和熔点;沿晶体不同方向所测得的性能不同。晶体在各方向性能上的差异称为各向异性。金属晶体中原子排列的具体方式,称为晶体结构。

金属的组织是指组成金属材料的各部分晶体的形状、数量、大小和分布特征。当金属组织中各部分晶体尺寸很粗大时,可以直接用肉眼或放大镜观察到金属内部的组织。当金属组织中各部分晶体尺寸很细小时,则需要借助于光学显微镜或电子显微镜,才能观察清楚金属内部的组织。

图1-1c为借助显微镜所观察到的Pb-Sb合金的显微组织照片。

金属的原子结构、晶体结构和显微组织都对金属材料的性能有很大的影响。本章将着重讨论金属及合金的晶体结构。这是我们学习本书其他内容的重要基础。

§ 1-1 纯金属的晶体结构

一、晶粒与晶界

从图1-5中可以看出,纯铁是由许多颗粒状铁的小晶体所组成的(其它金属组织也有类似形态),这些小晶体称为晶粒,每一晶粒内原子排列取向相同,相邻晶粒的原子排列取向不同,因此相邻晶粒之间有明显的界面,称为晶界。纯金属的组织通常都由许多形状不规则

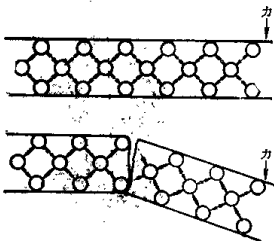


图1-4 共价键和离子键材料
在外力作用下破裂示意图

的颗粒状晶体所组成,这种金属晶体称为多晶体,图1-5即为纯铁试样磨面上晶粒与晶界的形态。由于多晶体内各部分晶体位向不同,所以从宏观上掩盖了多晶体材料的各异性,多晶体表现为各向同性。在特殊条件下,可使金属晶体中所有原子按同一取向排列,这种晶体称为单晶体。

二、晶胞

1. 空间点阵与晶胞 为了便于研究晶体结构,通常把晶体抽象为一组在空间作周期重复和对称排列的几何点(图1-6);其中每一个点代表晶体中原子(离子)的中心,这些点的空间排列称为空间点阵,点阵中的点称为阵点或结点。如果用平行直线将阵点连接成空间格架,就可以清楚地看到晶体的几何图形,这种空间格架称为晶格。

为了分析晶体中原子排列的规律和特点,可以在晶体中取出一个能完全代表整个晶体结构特征的最小基本单元,称为晶胞。图1-6中粗黑线画出的平行六面体就是这个点阵的晶胞。

2. 常见的金属晶体结构 图1-7示出了三种常见的金属晶体结构,即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构的晶胞模型,其中每一个刚性圆球代表一个金属原子。

体心立方晶胞为一立方体,立方体的每一角上有一个原子,此外立方体的中心还有一个原子。例如,铁在912°C以下为体心立方结构,称为 α -Fe,再如 β -Ti、 β -Zr、Nb、V、Ta、Cr、Mo、W等金属也都是体心立方结构。

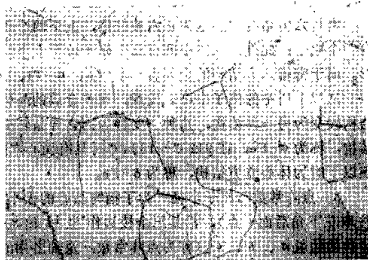


图1-5 纯铁的显微组织 400×

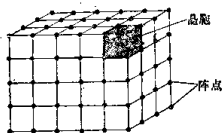


图1-6 空间点阵与晶胞示意图

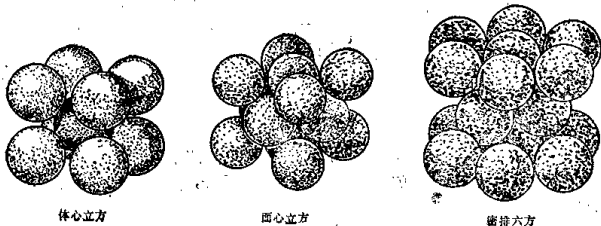


图1-7 三种常见的金属晶体结构

面心立方晶胞也是一个立方体，除了八个角上各有一个原子外，立方体侧面的中心各有一个原子。例如，铁在 $912^{\circ}\text{C} \sim 1394^{\circ}\text{C}$ 时为面心立方结构，称为 $\gamma\text{-Fe}$ ；此外 Ni 、 Cu 、 Al 、 Au 、 Ag 、 Pb 、 Pt 、 $\delta\text{-Mn}$ 、 $\beta\text{-Co}$ 等也是面心立方结构。

密排六方结构的晶胞为正六棱柱体，上下两个正六边形底面的每一个角上和面的中心各有一个原子；此外，柱体中间有三个原子位于上下底面原子间凹陷处，排成一个等边三角形。属于密排六方结构的金属有 Mg 、 Zn 、 $\alpha\text{-Ti}$ 、 $\alpha\text{-Zr}$ 、 $\alpha\text{-Co}$ 等。

从以上所举的例子中可以发现，有些金属的晶体结构类型随温度发生变化，即可由一种结构转变为另一种结构，这种转变称为同素异晶转变。例如，纯铁在 912°C 以下为体心立方结构，称为 $\alpha\text{-Fe}$ ；在 $912^{\circ}\text{C} \sim 1394^{\circ}\text{C}$ 时具有面心立方结构，称为 $\gamma\text{-Fe}$ ；在 1394°C 以上，熔点以下时为体心立方结构，称为 $\delta\text{-Fe}$ 。

3. 点阵常数与原子半径 为了描写晶胞的大小和形状，可以通过晶胞角上某一阵点(往往取左下角后面一点)，沿其三个棱边作坐标轴 xyz (称为晶轴)，则此晶胞就可由其三个棱边的边长 a 、 b 、 c (称为点阵常数)及轴之间的夹角 α 、 β 、 γ 这六个参数完全表达出来。

图1-8列出了三种较简单的晶胞，其中立方晶胞的点阵常数为立方体棱边的长度 a ，晶轴之间的夹角为 90° ；正交晶胞的点阵常数为三个不相等的棱边 a 、 b 、 c ，晶轴之间的夹角都是 90° ；六方晶胞的点阵常数为正六边形底面的边长 a 及六方柱体高 c ， x 、 y 轴之间的夹角为 120° ， x 轴和 z 轴之间夹角、 y 轴与 z 轴之间的夹角都是 90° 。

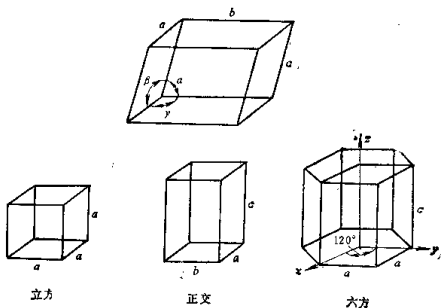


图1-8 点阵常数的确定

点阵常数的数量级为 10^{-10}m 。点阵常数的大小与晶体结构、原子半径有关，其计算方法是首先找出晶胞中沿某一直线方向相互接触排列的一组原子，然后根据几何关系算出点阵常数与原子半径的关系(图1-9)。

在体心立方晶胞中，原子沿立方体对角线接触排列，对角线的长度为 $\sqrt{3}a = 4r$ ， a 为立方体边长， r 为原子半径。所以体心立方的点阵常数为

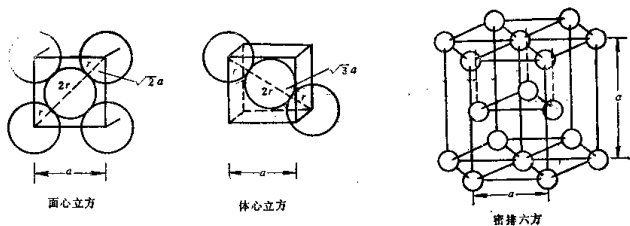


图1-9 点阵常数与原子半径的关系

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}} \quad (1-1)$$

在面心立方晶胞中, 原子沿立方体侧面对角线接触排列, 对角线的长度为 $\sqrt{2}a = 4r$, 所以面心立方的点阵常数为

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} \quad (1-2)$$

密排六方的点阵常数有 a 和 c 两个, a 为上下底面正六边形边长, c 为六方柱体高, 根据几何关系

$$a = 2r \quad (1-3)$$

$$c = 1.633a \quad (1-4)$$

〔例题1-1〕 铁的原子半径为 $1.24 \times 10^{-10} \text{m}$, 计算体心立方及面心立方铁的点阵常数。

〔解〕 体心立方铁

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}} = \frac{4(1.24)}{\sqrt{3}} \times 10^{-10} \text{m} = 2.86 \times 10^{-10} \text{m}$$

面心立方铁

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4(1.24)}{\sqrt{2}} \times 10^{-10} \text{m} = 3.51 \times 10^{-10} \text{m}$$

4. 配位数和致密度 配位数和致密度是定量地表示晶体中原子排列紧密程度的两个参数。晶体中与任一原子最近邻并且等距离的原子数称为配位数, 因此面心立方和密排六方结构的配位数都是12, 体心立方结构的配位数为8, 图1-10示出了三种晶格的配位数示意图, 可取带 $\blacktriangledown$ (或 $\triangle$) 的原子为中心, 观察与其最近邻的等距离原子。

致密度是指晶体中原子所占空间体积的百分数, 为了方便起见, 常以一个晶胞来计算。致密度等于晶胞中原子所占体积与晶胞体积之比, 即

$$\text{致密度} = \frac{(\text{晶胞原子数})(\text{每个原子的体积})}{\text{晶胞的体积}} \quad (1-5)$$

由于可以把晶体看成是由许多相同晶胞堆砌而成, 所以除了晶胞中心的原子完全属于该晶胞以外, 晶胞角上和面上的原子应同时为相邻晶胞所共有。

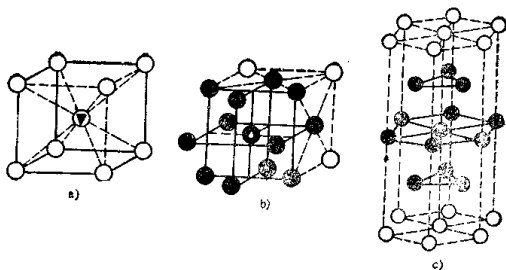


图1-10 三种晶格配位数示意图
a) 体心立方 b) 面心立方 c) 密排六方

体心立方晶胞的每个角上的原子为8个相邻晶胞所共有，因此体心立方晶胞的原子数为： $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 。

面心立方晶胞除了每个角上为 $\frac{1}{8}$ 个原子外，每个侧面中心的原子应同属于相邻2个晶胞所共有，因此面心立方晶胞的原子数为： $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 。

密排六方晶胞每个角上的原子为6个晶胞所共有，上下底面中心的原子为2个晶胞所共有，晶胞中心的三个原子完全属于该晶胞所有，因此，密排六方晶胞的原子数为： $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 。

〔例题1-2〕 计算面心立方晶胞的致密度。

〔解〕 面心立方晶胞有4个原子，每个原子的体积为 $\frac{4}{3}\pi r^3$ ，晶胞的体积为 a^3 ， $a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$ ，所以

$$\text{面心立方结构致密度} = \frac{(4) \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{\left(\frac{4r}{\sqrt{2}} \right)^3} = 0.74$$

对于金属来说，致密度等于0.74是原子排列最紧密的晶体结构。用同样的方法和几何关系，可算出体心立方结构的致密度为0.68；密排六方结构的致密度为0.74。从配位数和致密度来看，面心立方和密排六方都是金属晶体中原子排列最紧密的结构。

应该指出，晶体结构中原子间存在许多间隙，由于原子排列方式不同，不同晶体结构中间隙位置、数量和尺寸也不同。虽然面心立方结构的致密度比体心立方结构大，但由于面心立方结构的间隙数比体心立方结构的间隙数量少得多，因此面心立方晶体结构中的间隙尺寸比体心立方晶体结构的间隙尺寸大，可以容纳较大和较多的外来原子。

当具有同素异晶转变的金属由一种晶体结构转变为另一种晶体结构时，由于不同晶体结

构的致密度不同,金属将发生体积(或比容)的突变。例如,纯铁由室温加热时,体积随温度升高逐渐增大。当温度升到 912°C 时,纯铁将由 $\alpha\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$,体积突然减少;反之,纯铁由高温冷至 912°C 时,将由 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\alpha\text{-Fe}$,体积突然增加(图1-11)。

三、晶向指数和晶面指数

实验证明,金属晶体中某些原子方向(称为晶向)和原子平面(称为晶面)对晶体生长、变形、相变以及性能等各方面极为重要。晶向指数和晶面指数就是用简单的数字和符号,定量地表示晶体中某一晶向和晶面位置的标号。

1. 晶向指数 晶体中的某一晶向可用一矢量的方向表示,矢量的方向可以用矢量箭头的位置坐标和箭尾位置坐标加以确定。

确定晶向指数的方法如下:

(1) 以晶胞 a 、 b 、 c 三个棱边为坐标轴 x 、 y 、 z ,以点阵常数作为坐标轴的长度单位,在晶胞内作所求晶向的矢量;

(2) 将矢量箭头的坐标减去箭尾的坐标,求得两个坐标值的差数;

(3) 将此差数化为最小整数;

(4) 将此最小整数加上方括号 $[\]$,即为所求的晶向指数。如果指数为负值,则应将负号记于指数上方,如 $[\bar{1}01]$ 。

【例题1-3】 确定图1-12中 A 、 B 、 C 三个晶向的晶向指数。

【解】 根据晶向指数确定法的四个步骤

晶向 A

(1) 箭头坐标 $1, 0, 0$, 箭尾坐标 $0, 0, 0$;

(2) 箭头坐标减箭尾坐标, 即 $1, 0, 0 - 0, 0, 0 = 1, 0, 0$;

(3) 化为最小整数仍为 $1, 0, 0$;

(4) $[100]$ 即晶向 A 的晶向指数。

晶向 B

(1) 箭头坐标 $1, 1, 1$, 箭尾坐标 $0, 0, 0$;

(2) 箭头坐标减箭尾坐标, 即 $1, 1, 1 - 0, 0, 0 = 1, 1, 1$;

(3) 化为最小整数仍为 $1, 1, 1$;

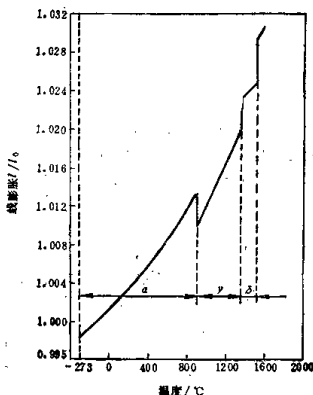


图1-11 纯铁加热时的膨胀曲线

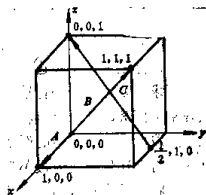


图1-12 例题1-3中的三个晶向

(4) $[111]$ 即晶向 B 的晶向指数。

晶向 C

(1) 箭头坐标 $0, 0, 1$, 箭尾坐标 $\frac{1}{2}, 1, 0$;

(2) 箭头坐标减箭尾坐标, 即 $0, 0, 1 - \frac{1}{2}, 1, 0 = -\frac{1}{2}, -1, 1$;

(3) 化为最小整数, 即 $2 \times \left(-\frac{1}{2}, -1, 1\right) \rightarrow -1, -2, 2$;

(4) $[\bar{1}22]$ 即为晶向 C 的晶向指数。

确定和运用晶向指数时, 应注意下列几点:

(1) 晶向指数的通式可写成 $[uvw]$;

(2) 同一晶向指数表示所有相互平行、方向一致的晶向; 符号相反、指数绝对值相同表示相互平行、方向相反的晶向, 例如 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 与 $[1\bar{1}2]$;

(3) 在立方结构晶体中, 因对称关系而等价的各组晶向可归纳为一个晶向族, 用尖括号 $\langle uvw \rangle$ 表示。例如, 立方结构中的 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 和 $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$ 六个晶向上的原子排列是完全相同的, 可用 $\langle 100 \rangle$ 代表这六个晶向; 同理, $\langle 110 \rangle$ 晶向族包括12个晶向(表1-1)。但如果晶体不是立方结构, 则晶向指数顺序不同不能归并为一个晶向族。

表1-1 $\langle 110 \rangle$ 晶向族

$\langle 110 \rangle$	$[110]$	$[\bar{1}\bar{1}0]$
	$[101]$	$[\bar{1}0\bar{1}]$
	$[011]$	$[0\bar{1}\bar{1}]$
	$[1\bar{1}0]$	$[\bar{1}10]$
	$[10\bar{1}]$	$[\bar{1}01]$
	$[01\bar{1}]$	$[\bar{0}\bar{1}1]$

2. 晶面指数 晶面指数表示晶体中某一种平面的位置。晶面指数的确定方法如下:

(1) 沿晶胞的三个棱边 a 、 b 、 c 作坐标轴 x 、 y 、 z , 以点阵常数为坐标轴的长度单位, 取所求晶面在三个坐标轴上的截距。如果所求晶面通过坐标原点, 则必须将原点移开一个点阵常数距离, 使原点落在所求晶面之外。

(2) 取所求晶面截距的倒数;

(3) 将上述倒数化为最小整数;

(4) 将此最小整数加上圆括号(), 即为所求晶面的晶面指数。当指数为负值时, 负号应写在指数上方。例如 $(1\bar{2}3)$ 。

〔例题1-4〕 确定图1-13中 A 、 B 、 C 三个晶面的晶面指数。

〔解〕 根据确定晶面指数的四个步骤

晶面 A

(1) 晶面 A 在原点外, 其截距是 $x = 1, y = 1, z = 1$;

(2) 取各截距的倒数, 即 $\frac{1}{x} = 1, \frac{1}{y} = 1, \frac{1}{z} = 1$;

(3) 化为最小整数, 仍为 1, 1, 1;

(4) (111) 即为晶面 A 的晶面指数。

晶面 B

(1) 晶面 B 与 x 、 z 轴平行, 其截距是 $x = \infty$, $y = \frac{1}{2}$, $z = \infty$;

(2) 取截距的倒数, 即 $\frac{1}{x} = 0$, $\frac{1}{y} = 2$, $\frac{1}{z} = 0$;

(3) 化为最小整数, 即 0, 2, 0 $\rightarrow$ 0, 1, 0;

(4) (010) 即为晶面 B 的晶面指数。

晶面 C

(1) 由于晶面经过原点, 所以必须把原点沿 y 方向移开一个点阵常数, 使晶面 C 位于原点之外 (例如左移一个点阵常数), 晶面 C 在各晶轴上的截距为 $x = \infty$, $y = -1$, $z = \infty$;

(2) 取截距的倒数, 即 $\frac{1}{x} = 0$, $\frac{1}{y} = -1$, $\frac{1}{z} = 0$;

(3) 化为最小整数, 则仍为 0, -1, 0;

(4) (0 $\bar{1}$ 0) 即为晶面 C 的晶面指数。

确定和运用晶面指数时, 应注意以下几点:

(1) 晶面指数通式为 (hkl) 。

(2) 所有相互平行的晶面其晶面指数相同或指数相同符号相反。例如 (1 $\bar{1}$ 2) 与 ($\bar{1}$ 12) 是相互平行的晶面。

(3) 原子排列完全相同但位向不同的一组晶面, 可归并为一个晶面族, 用大括号 $\{hkl\}$ 表示, 表 1-2 为立方晶体中 $\{110\}$ 晶面族所包含的晶面。

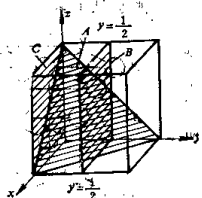


图 1-13 例题 1-4 中的三个晶面

表 1-2 $\{110\}$ 晶面族

{110}	(110)
	($\bar{1}$ 01)
	(011)
	(1 $\bar{1}$ 0)
	(101)
	(01 $\bar{1}$)

(4) 在立方晶体中, 具有相同指数的晶向和晶面必定是相互垂直的, 即 $[hkl] \perp (hkl)$ 。例如, $[100] \perp (100)$, $[110] \perp (110)$, $[111] \perp (111)$ 等。但是这一关系不适用于非立方晶体。

3. 六方晶胞的晶面和晶向指数 六方晶胞的晶面和晶向指数确定方法与立方晶胞基本相同, 但是由于立方晶胞的对称特点与立方晶胞不同, 因此, 对于六方晶胞还常采用 a_1 、 a_2 、 a_3 及 c 四个晶轴, 其中 a_1 、 a_2 、 a_3 之间的夹角均为 120° , 如图 1-14 所示。六方晶胞晶

面指数用 (hkl) 四个指数表示。例如, 图1-14中的 A 面与 a_1 、 a_2 、 a_3 三个晶轴都平行, A 面与 c 轴的截距为 1 个单位, 因此, 晶面 A 的指数可写成 (0001) ; 图中 B 面在 a_1 、 a_2 、 a_3

晶轴上的截距分别为 1, 1, $-\frac{1}{2}$, 在 c 轴上的截距为

1, 再取各截距的倒数并化为最小整数, 则 B 面的晶面指数为 $(11\bar{2}1)$; 图中晶向 C 的箭头坐标为 0, 0, 0, 1, 箭尾坐标为 1, 0, 0, 0, 箭头与箭尾坐标之差为 0, 0, 0, 1-1, 0, 0, 0, 0 = -1, 0, 0, 1, 因此晶向 C 的指数为 $[\bar{1}001]$; 同理, 图中晶向 D 的箭头坐标为 0, 1, 0, 0, 箭尾坐标为 1, 0, 0, 0, 箭头与箭尾坐标之差为 0, 1, 0, 0-1, 0, 0, 0, 0 = -1, 1, 0, 0, 晶向 D 的指数为 $[\bar{1}100]$ 。

4. 密排晶向和密排晶面 晶体中不同晶向及晶面上的原子排列紧密程度是不同的。晶体中原子排列最紧密的晶向称为密排晶向, 原子排列最紧密的晶面称为密排晶面。表 1-3 列出了三种晶体的密排晶向和密排晶面。

表1-3 三种晶体的密排晶向和密排晶面

晶体结构	密排晶向	密排晶面
体心立方	$\langle 111 \rangle$	无
面心立方	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$
密排六方	$\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{0001\}$

在体心立方结构中, 最密排的晶向是沿立方体对角线的方向 $\langle 111 \rangle$, 其中包括 $[111]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 、 $[\bar{1}11]$ 和 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 四个晶向。由于体心立方结构中原子的排列不是最紧密的, 因此体心立方结构中不存在最密排的晶面。

图 1-15 中的 A 、 B 、 C 面为密排六方结构中的密排面, 这些密排面相互平行, 因此密排六方结构中的密排面只有一个 $\{0001\}$ 面。密排六方结构中密排晶向有 $\langle 2\bar{1}10 \rangle$ 和 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 两个晶向族, 包括三个互不平行的晶向 (即正六边形三个对角线的方向), 这些密排晶向与密排晶面位于同一平面内。

面心立方结构中的密排晶面是 $\{111\}$ 晶面 (图 1-16), 包括 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 和 $(1\bar{1}\bar{1})$ 四个互不平行的密排晶面。前已指出, 面心立方晶体和密排六方晶体结构的配位数和致密度完全相同, 现在从密排晶面上的原子排列来看, 两者也完全相同。这两种结构所不同的是密排面的堆垛次序不同, 密排六方结构是按 $ABABAB \cdots$ 的次序堆垛而成 (图 1-15)。面按照图 1-16 $ABCACBAC \cdots$ 次序堆垛起来的结构就成为面心立方结构。正是由于这种看来微小的不同, 造成了面心立方结构和密排六方结构晶体性能上的重大差别。面心立方结构中的密排晶向为立方体

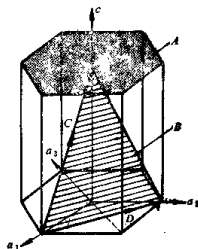


图1-14 六方晶胞晶面、晶向指数

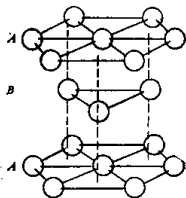


图1-15 密排六方结构中的密排晶面

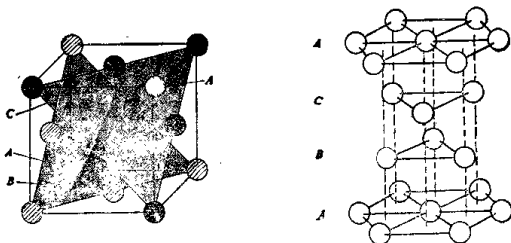


图1-16 面心立方结构中的密排晶面

侧面的对角线，其晶向指数为 $\langle 110 \rangle$ 晶向族，每一个密排晶面内有三个互不平行的密排晶向。

§ 1-2 合金的晶体结构

纯金属虽然有许多用途，但工程上使用的金属材料绝大多数是合金，合金与纯金属相比，具有纯金属所达不到的机械性能，有些合金还具有特殊的物理和化学性能。由两种或两种以上金属与非金属经熔炼、烧结或其它方法组合而成的物质称为合金，其组成元素则称为组元，例如碳钢是铁和碳组成的合金，其组元就是铁和碳。

一、相的概念

物质存在的状态或结构可依所处的条件而变化，例如水在常压下， $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内为液体（水）， 0°C 以下呈结晶状固体（冰），而在 100°C 以上为气体（水蒸汽）。有些物质在固态时的不同条件下有着不同的结构。例如，固态铁在不同温度下有面心立方和体心立方两种晶体结构。通常把物质存在的某种状态或结构称为某一相，上例中的水在不同温度下分别处于液相、固相和气相，固态铁处于 α 相或 γ 相。

在一个物质系统中，不同条件下可能由一个相所组成，也可能由几个不同的相所组成，前者称为单相体系，后者称为多相体系。例如，酒精水溶液是由酒精和水两种物质组成的单相体系，这部分液体的成分和性质相同，即使其中有所不同，也是以一种连续的方式变化，即他们的成分和性质从宏观范围来说是均匀的，没有突然的变化。又如盐和水组成的盐水溶液，如没有固态盐的沉淀，则为单相盐水溶液。但当盐水中有益沉淀时，则此物质系统是由盐水和固态盐所组成的两相体系，两相之间有明显的界面，界面处有物理性质或化学性质或两者兼有的突变。

液态合金通常都为单相液体。固态合金由一个固相组成时称为单相合金，由两个或两个以上固相组成时称为多相合金。单相合金一般由一种固溶体组成，多相合金通常由固溶体和金属化合物组成。

综合以上分析，可以把相的特征归纳如下：

1. 同一相的物质具有均匀的晶体结构或原子排列，

2. 同一相的物质具有均匀的成分和性质;
3. 相邻两相之间具有明显的界面。

二、固溶体

在固态合金中,以—种金属晶体为基础(溶剂),而另一种金属或非—金属(溶质)“溶入”到基体金属的晶体中形成—种均匀的固态溶液,称为固溶体。固溶体仍保持基体金属(溶剂)的晶体结构类型,而溶质原子则分布在溶剂金属点阵中。根据溶质原子在溶剂金属点阵中所处的位置,可以分为置换固溶体和间隙固溶体两种类型。

1. 置换固溶体 置换固溶体是指溶剂点阵上的原子被溶质原子所替换(置换)的固溶体。例如,含Zn量较少的Cu-Zn合金凝固后形成单相固溶体,如图1-17虚线方框外的结构所示,其中Cu是溶剂,Zn是溶质,Zn原子置换了面立方结构中的部分Cu原子,形成置换固溶体。但若Cu-Zn合金中Zn的质量百分数 w_{Zn} 超过39%时(Zn在Cu中的最大溶解度),合金凝固后除了形成以Cu为基体的置换固溶体外,多余的Zn原子将与合金中的一些Cu原子形成CuZn化合物,如图1-17中虚线方框内结构所示,CuZn化合物是一种具有金属性质的化合物,其晶体结构、成分和性能与Cu-Zn固溶体完全不同。这种成分的Cu-Zn合金在固态下有两个相共存,即 $w_{Zn}=39\%$ 的Cu-Zn固溶体和CuZn化合物。

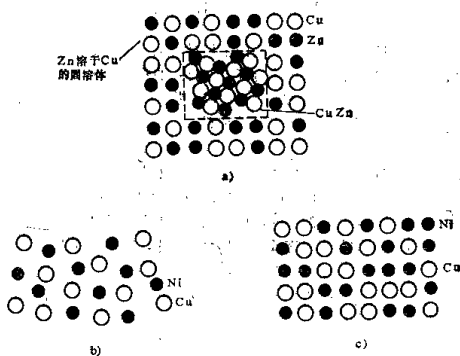


图 1-17

- a) $w_{Zn} > 39\%$ 的 Cu-Zn 合金中由固溶体和化合物 CuZn 两相组成
- b) 完全互溶的液相 Cu-Ni 合金单相液体
- c) 完全互溶的固态 Cu-Ni 合金单相固溶体

对大多数合金而言,液态时组元间可以任何比例互溶(图1-17b),而当形成置换固溶体时,组元间互溶的情况要视组元而定。有些合金置换固溶体的溶解度是有一定限度的,Cu-Zn合金就是一种;此外,如Si、W、Mo、Ti、Al、Cu都能溶于Fe形成置换固溶体,但他们的溶解度是有限的,这种具有有限溶解度的固溶体称为有限固溶体。

有些组元组成的合金,如Cu-Ni、Fe(α)-Cr、Fe(γ)-Ni、Bi-Sb等合金,不仅液态时

能无限互溶，而在凝固后各组元能以任何比例互溶（图 1-17c），这种具有无限溶解度的固溶体称为无限固溶体。

实验指出，能形成无限固溶体的合金，其组元必须满足以下条件：

（1）各组元原子半径相对差不超过 15%（以铁为溶剂的固溶体，须小于 8%），才可能形成无限固溶体。否则随着溶质增多，溶剂点阵畸变太大，溶质原子不能继续溶解，难以有无限溶解度。

（2）各组元必需有相同类型的晶体结构，才可能有无限溶解度。上述的 Cu 与 Ni 都是面心立方晶体结构， α -Fe 与 Cr 都是体心立方结构。如果各组元的晶体结构不同，形成的固溶体可能有两种晶体结构，结果在此合金系中将出现由一种固溶体转变为另一种固溶体的转折点，这两种固溶体的溶解度都将是有限的。例如 Cu 是面心立方结构，Zn 是密排六方结构。Cu-Zn 合金系中有两种固溶体，一种是 Zn 溶于 Cu 的固溶体，为面心立方结构；另一种是 Cu 溶于 Zn 的固溶体，为密排六方结构，所以 Cu-Zn 合金不可能形成无限固溶体。

（3）各组元必需具有相同的原子价，才可能形成无限固溶体。否则，价电子的差别将促使各组元互溶至某一溶解度后形成化合物。各组元原子价相差愈大，固溶体的溶解度愈小。

（4）各组元必需有相同或接近的负电性（化学亲和力）。如果他们的负电性相差较大，各组元将倾向于形成化合物，而不利形成固溶体。负电性相差愈大，固溶体的溶解度愈小。

但是必须注意，凡是能形成无限固溶体的合金，必须满足以上四个条件，而满足这四个条件的合金组元不一定都能形成无限固溶体。

2. 间隙固溶体 在溶剂晶体原子间隙位置中插入溶质原子而形成的固溶体称为间隙固溶体。间隙固溶体的溶质原子，一般是原子半径较小的非金属元素，如 C、N、H、B 等；而溶剂元素都是原子半径较大的过渡族金属元素。实验指出，只有当溶质与溶剂原子半径的比值 $r_B/r_A < 0.59$ 时，才可能形成间隙固溶体。

由于溶剂结构中的空隙位置有一定的限度，而且随着溶质原子的溶入，溶剂的点阵将发生畸变，溶入的溶质原子越多，所引起的点阵畸变越大，当畸变达到一定程度时，溶剂结构变得很不稳定，不能再溶入溶质原子。所以，一切间隙固溶体都是有限固溶体，而且其溶解度通常比置换固溶体小得多。例如，钢中的铁素体和奥氏体就是碳在 α -Fe 和 γ -Fe 中的间隙固溶体，碳在 α -Fe 中的最大溶解度为 0.02%， γ -Fe 中的最大溶解度为 2.11%。关于铁素体和奥氏体的结构和性能将在第三章中作详细讨论。

3. 固溶体的性能 固溶体不论是置换式或间隙式，均对合金的性能产生一定的影响。由于形成固溶体而引起合金强度、硬度升高的现象，称为固溶强化。影响固溶强化的主要因素有两个：第一个因素是溶剂原子和溶质原子大小的差别，两者差别愈大，固溶强化程度愈高，因为原子尺寸差别使固溶体产生点阵畸变，提高了合金抗塑性变形的能力。图 1-18 表示溶质原子在固溶体中产生点阵畸变示意图。置换固溶体中如果溶质原子大于溶剂原子，则溶质原子周围点阵膨胀，平均点阵常数增大；反之，则溶质原子周围点阵收缩，平均点阵常数减小。影响固溶强化的第二个因素是溶质原子的数量，溶质原子数量愈多，则固溶强化程度愈高。