

金属材料学

(修订版)

北京工业学院 吴培英 主编

国防工业出版社

TG14

TG 14

W91

(2)

265991

金属材料学

(修订版)

北京工业学院 吴培英 主编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书是为机械系设计专业及冷加工专业编写的教学用书。
合这类专业教学大纲所提的要求。

内容由下列部分组成:

I. 基础理论

金属与合金的构造; 金属与合金的结晶 (相图); 金属的塑性变形、再结晶及晶体缺陷 (位错的概念); 合金的机械性能 (包括断裂韧性); 金属材料的强化机理 (概念); 钢的热处理。

II. 钢铁材料

钢材的熔炼与质量; 结构钢 (包括低合金高强度钢、超高强度钢、低温用钢); 工具钢; 特殊性能的钢及合金、铸铁。

III. 有色金属

铝合金; 铜合金; 钛合金等。

本书具有下列特点:

(1) 适当地加强了基础理论, 特别是对结晶及晶体缺陷的近代概念作了介绍。

(2) 加强了合金组织与性能的内在规律的探讨, 以加深学生对金属材料本质的理解。

(3) 注意到金属材料的机械性能在设计工作中的重要性, 加强了这方面的内容。

(4) 考虑到近代技术对金属材料要求广泛, 扩大了材料介绍的深度和广度, 并适当地介绍了某些国外牌号。

IV. 金属材料的现状和发展。

金 属 材 料 学

(修订版)

北京工业学院 吴培英 主编

责任编辑 张仁杰

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张 20 3/4 483千字

1987年6月第二版 1987年6月第二次印刷 印数: 15,201—23,200册

统一书号: 15034·2244 定价: 3.00元

序

金属材料学是机械类专业的技术基础课。它的任务是使学生了解和掌握各种金属材料的内部组织与性能之间的关系、金属材料的强化方法（特别是热处理强化），以及各类金属材料的选用原则及注意事项。目的是使机械设计人员具备合理地、经济地选择及使用金属材料的初步能力，为实现我国社会主义的四个现代化作出贡献。

在编写这本教材的过程中，我们主要注意了以下几个问题：①充分肯定了过去编写教材的经验，尽量保留了过去所编教材中的可取之处。②查阅了不少国外同类教材的内容，经过对比分析，吸取了其中的长处。③适当地加强了基础理论章节，尽量用近代的观点来解释金属材料中的问题。④除介绍最基本的金属材料外，还适当注意了新材料和新工艺的发展。

在上述思想的指导下，对本教材的具体内容主要作了如下安排：①对晶体缺陷（特别是位错）作了简要的介绍，并用位错概念对合金的强化机理及金属材料中的一些重要现象作了粗浅的解释。②增加了钢的熔炼及其质量一章。其中除简略地介绍了近代熔炼方法以适应讲解某些高级合金的需要外，还对影响钢材质量的冶金学因素作了扼要的探讨。③将结构钢分为结构钢与专用结构钢两章。在结构钢的介绍中，适当增加了低合金高强度钢、低温用钢及超高强度钢的探讨，并对某些钢的国外状况作了简单介绍。④为了适应某些尖端技术专业的需要，书中对析出硬化不锈钢及超耐热合金作了适当的补充。⑤在介绍合金组织特别是不平衡组织时，尽量采用光学显微组织照片与电镜照片对比的方法，使学生能获得较深的印象。⑥在附录中还列出世界各主要国家的钢号表示法及对照表、国际单位制的简介及换算表、硬度换算表以及常用数据及代号以便查阅。

本书自1981年出版以来，很多兄弟院校选为教材，提出了宝贵的意见。我们也以该书作为教本对不同专业学生进行了教学实践，检查和总结了使用效果，在此基础上进行了修订工作。在修订过程中，对所有各章均进行了审订、调整和补充，主要有以下几方面的改进：①全部采用我国法定计量单位、即国际单位（SI单位）。②对基础理论进行了必要的补充。③补充介绍了某些新型材料，并增加了“金属材料的现状与发展”一章。④加强了新工艺在提高各类材料性能的具体应用。

本教材的适用学时数较宽（50~80学时）。各兄弟院校使用本教材时，建议任课教师在讲授各种合金材料时，可结合学生的专业要求，选讲有关部分，因为本书中金属材料的各个章节，彼此具有一定程度的独立性。

由于我们的水平不高，经验不足，时间也比较紧，虽然作了一些改进的尝试，但考虑不周，安排不当，甚至错误之处在所难免，希望使用本书的同志提出宝贵意见，以便今后改进。

参加本书编写工作的同志有：石霖（第三、四、六、十六章）；吴培英（第二、五、七、八、九、十一章）；乐秀伟（第十二、十三章、第十五章的锌合金及轴承合金、附录）；王道胤（第一章、第十五章的钛合金）；曾慧敏（第十、十四章）。由吴培英同志主编、石霖同志主审。本书全部插图由伊秀珍同志绘制，全部照片由封文瑜同志拍摄。

编者 1986.4.27

目 录

第一章 金属与合金的晶体构造	1	五、第二相的强化	128
一、金属的概念	1	六、塑性、韧性同材料微观组织及结	
二、金属的晶体结构	3	构的关系	130
三、合金的晶体结构	11	七、各种强化机理在实际金属材料上的	
第二章 二元合金相图	19	应用举例	131
一、纯金属的结晶过程	19	第七章 钢材的冶金过程与冶金	
二、合金的结晶过程——相图	24	质量	134
三、Fe-Fe ₃ C相图及其分析	38	一、一般炼钢法	135
第三章 金属的塑性变形和再结晶	51	二、近代炼钢法	138
一、金属中的塑性变形现象	51	三、影响钢材质量的冶金因素	140
二、单晶体滑移时的临界切应力	52	四、钢的分类与编号	143
三、位错的形式及特点	54	五、铸钢	146
四、多晶体的塑性变形	59	第八章 结构钢	149
五、金属的加工硬化	59	一、合金元素在结构钢中的作用	149
六、冷加工金属在加热时的变化	61	二、低合金高强度钢	152
七、冷加工与热加工的区别	65	三、高强度钢与超高强度钢	156
第四章 金属的机械性能	68	四、化学热处理用钢	166
一、概论	68	五、选用钢材的一般原则	170
二、拉伸试验	68	第九章 专用结构钢	178
三、硬度试验	73	一、弹簧钢	178
四、冲击韧性	76	二、滚珠轴承钢	181
五、断裂韧性	78	三、易削钢	184
六、疲劳	81	四、冷冲压钢	186
第五章 钢的热处理	84	五、低温用钢	188
一、热处理的基本概念	84	第十章 工具钢	191
二、钢在加热时的转变	84	一、概论	191
三、钢在冷却时的转变	87	二、碳素工具钢	193
四、钢在回火时的转变及回火方法	106	三、合金工具钢	194
五、钢的表面热处理	110	四、高速钢	198
六、热处理工艺和其他加工工艺的		五、硬质合金	203
关系	120	第十一章 特殊性能的钢及合金	207
七、影响热处理质量的零件形状因素	121	一、不锈钢	207
第六章 金属材料强化的概念	123	二、耐热钢及耐热合金	217
一、概论	123	三、高锰钢	226
二、固溶强化	124	第十二章 铸铁	230
三、位错强化	126	一、概论	230
四、晶界强化	127	二、常用的铸铁	235

三、铸铁的热处理	244	三、功能材料	295
四、合金铸铁	247	四、金属材料的发展与基础科学的 研究	299
第十三章 铝及其合金	249	附录	301
一、纯铝	249	一、各种硬度测定方法一览表	301
二、铝合金	249	二、各类硬度值的对应关系	302
三、铝合金选用的几点原则	263	三、硬度试验规范	302
第十四章 铜及其合金	265	四、硬度对照表	303
一、铜锌合金(黄铜)	265	五、钢的热处理工艺的代号与技术 条件的表示方法	305
二、铜锡合金(锡青铜)	268	六、有色金属及合金产品状态及其 代号	305
三、铜铝合金(铝青铜)	269	七、晶粒度等级	305
四、铜铍合金(铍青铜)	269	八、常用钢种的临界温度	307
五、铜镍合金(白铜)	270	九、美、英、日、西德、苏各国钢号 表示法	309
六、消震铜合金及耐热铜合金	271	十、国际单位制简介	317
七、铜合金选用的几点原则	272	十一、国内外常用钢号对照表	321
第十五章 其他有色金属及合金	276	十二、kgf/mm ² 和MPa换算表	324
一、钛及其合金	276	十三、冲击韧性指标换算表	326
二、锌及其合金	281		
三、轴承合金	282		
第十六章 金属材料的现状和发展	286		
一、概况	286		
二、结构材料的状况及发展趋势	289		

第一章 金属与合金的晶体构造

一、金属的概念

在目前已知的化学元素中，大约有四分之三是金属元素（见附录中的化学元素周期表）。金属与非金属物质的主要区别是：金属具有良好的导电性和导热性，并且具有良好的塑性和金属光泽。

所有这些金属特性都是人们所熟知的。但是，若想了解金属为什么具有上述这些特性，就必须首先从其内部的结构——原子与原子间的结合方式上加以分析。

从普通物理及化学知识中我们知道，金属原子与非金属原子的主要不同是它们在价电子数目上的差别。金属原子的特点是它们的价电子数目较少（一般仅有1、2或3个），而且价电子与原子核之间的结合力很弱，极易与核脱离。这就表现出金属原子与非金属原子相结合时，前者易于失去价电子而成为正离子（cation）。这种特点也表现在金属原子彼此之间的结合方式上。当各个金属原子相互结合在一起而形成固体时，便会具有下述的特殊结合方式：

当各个金属原子相互结合在一起而形成固体时，各金属原子与其价电子脱离变成正离子，正离子按照一定的几何形式规则排列，并在其占据的位置上作高频率的振动（约 $10^{14}/s$ ）；而所有的价电子都呈自由电子的形式在各离子间自由地作高速穿梭运动，它们为整个金属所公有，形成所谓“电子气”（electron gas）。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（见图1-1）。金属原子的这种结合方式谓之金属键（metallic bond）。

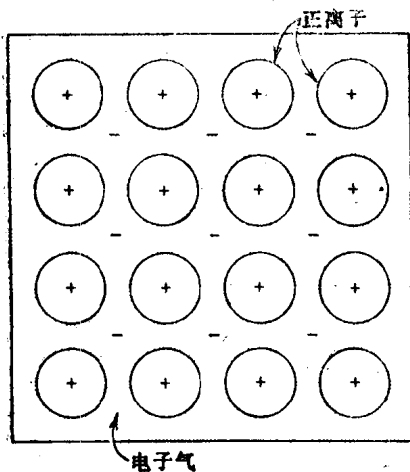


图1-1 金属的原子结合示意图

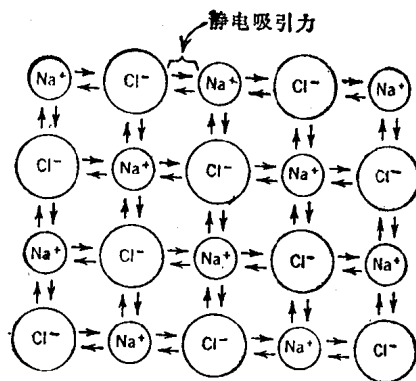


图1-2 氯化钠的离子键结合示意图

非金属固体原子之间的结合方式，最主要的有离子键（ionic bond）和共价键（covalent bond）。离子键是化学键中最简单的类型，本质上几乎完全是静电性的。它是正

电性元素（周期表上右边的金属元素）和负电性元素（周期表上左边的非金属元素）构成的。NaCl是最典型的实例。其中氯夺取了钠的一个价电子而形成氯离子（ Cl^- ），而钠失去电子后则成为钠离子（ Na^+ ），它们之间通过静电引力而结合在一起（图1-2）。对于一些陶瓷材料，离子键往往是原子间的主要结合方式。由于不存在自由电子，这些材料一般是不导电的。

许多具有三个或三个以上价电子的元素，其晶体结构一般是由近邻原子共享电子所产生的力结合起来的，谓之共价键。形成共价键时，其原子可以只与近邻原子分享一个电子，所以某种元素形成共价键的数目等于 $(8 - N)$ ，其中 N 是满壳层外部的电子数目。共价键的另一个基本特点是共享电子处于 S 态或 P 态。实际上由于杂化（原子的键合轨道的适当组合）的结果，其几个键合轨道变成等同的，这时所得到的分子键合轨道称为杂化轨道。碳具有四个外部电子，因此它可以与另外四个碳原子构成共价键。在碳的金刚石晶体中，每个碳原子由其他四个碳原子围绕着（图1-3），四个近邻原子对称地位于一个正四面体的角顶上。利用这种方法可以建立起金刚石晶体中碳原子的三维网络。一些高分子化合物材料（如工程塑料），共价键是主要的原子结合方式。

将上述结合键进行对比即可看出，存在自由电子是金属结合的重要特点，而金属的一些特性都是和自由电子的存在分不开的。

首先，由于金属中有电子气存在，故只要在金属物体的两端造成不大的电位差时，其自由电子便会向正极流动而形成电流。这便是金属具有良好的导电性（electrical conductivity）的原因。图1-4是金属加电压前后自由电子流动情况的示意图。同时，由于金属中离子振动的振幅会随温度的升高而增大，阻碍自由电子的流动，所以，金属均具有正的电阻温度系数，即随着温度的升高，电阻不断上升。

其次，金属的导热现象不仅通过其离子振动，而且还可通过其中的自由电子的运动来实现，所以金属具有较非金属为优的导热性（thermal conductivity）。但由于导热性并不象导电性那样单独地由自由电子来完成，因而金属与非金属之间导热性的差别就不象导电性那样明显。

此外，金属键不仅使金属具有较高的强度（strength），而且也是金属具有高塑性（plasticity）的重要前提。在后面第三章中我们将会知道，所谓晶体的塑性变形，

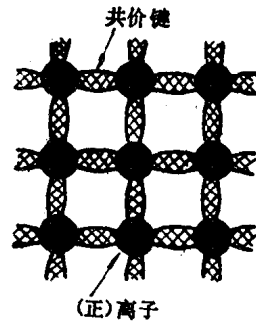


图1-3 金刚石的共价键结合示意图

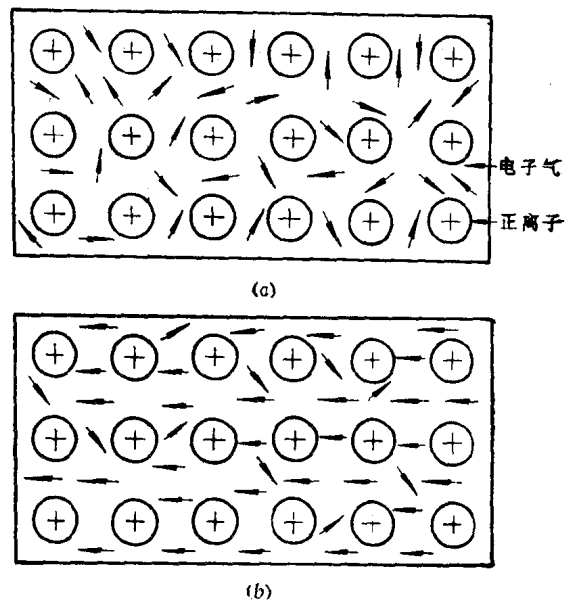


图1-4 金属导电示意图

a—加电压前；b—加电压后。

乃是在外力作用下,晶体中的一部分与另一部分发生相对位移的结果,由于金属键的特点,使得金属离子在位移前后其周围环境不发生变化,即正离子与自由电子间仍然保持原来那样的相对关系。因此,金属具有良好的塑性,能发生较大的塑性变形而不致破裂(fracture)。离子晶体(如NaCl)则不然,当晶体的两部分沿某一平面发生一个原子间距的相对位移后,平面两侧相邻的离子其周围环境就会有改变。在滑动平面的另一侧与Na离子相对应的已经不是 Cl^- 而是 Na^+ ,这就使正负离子间的引力关系变为同性离子间的斥力关系。不过若沿着另一些晶面则是可以滑动的(图1-5)。因此,离子晶体的塑性较差,较易开裂,尤其在低温下更为突出。

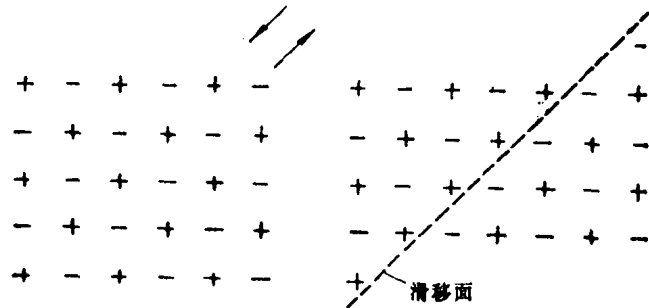


图1-5 简单离子晶体中的滑移面

最后,金属中的自由电子能吸收可见光的光量子的能量,故使金属具有不透明性。另一方面,当自由电子因吸收可见光的能量而被激发到更高的能量状态,在其返回到原来的低能态时,就会产生辐射(radiation),从而使金属具有不同颜色的光泽。

综上所述,金属的各主要特性都与它的金属键密切相关。不仅如此,当金属形成固态晶体时,其晶体结构的特点也是与金属键分不开的。

二、金属的晶体结构 (crystal structure of metals)

一切固态物质可以分为晶体与非晶体两大类。所谓晶体就是指其内部的原子或分子具有规则排列的固体。绝大部分的固态金属都是晶体。但近年来已开始研制出非晶质的金属,这类金属具有许多与一般金属不同的特异性质。

1. 晶粒与晶界 (grain and grain boundary)

如果取一小块纯铁(其他金属也一样),将其表面进行磨平与抛光,然后将表面用选定的蚀刻剂(etchant)稍加腐蚀,再在显微镜下放大观察,便会发现原来纯铁是由许多外表类似多边形的颗粒所组成。我们把这些颗粒称为“晶粒”,而把晶粒之间的界面称为“晶界”。图1-6a是纯铁的显微组织(microscopic constitution),从中可明显地看出它所包含的晶粒与晶界。晶粒尺寸(grain size)一般都很小,其平均直径约在 $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{mm}$ 范围内,一般均需借助于显微镜方能看清其轮廓。只有当晶粒尺寸很大(如铸造金属的晶粒)时,才能用肉眼直接观察。

晶粒尺寸的大小对于金属的机械性能具有重要的影响。如果晶粒尺寸小[通常称为“细晶粒”(fine grain)],则金属的屈服强度、塑性、特别是韧性,都得到改善;如果晶粒尺寸很大[通常称为“粗晶粒”(coarse grain)],则对金属的屈服强度、塑性、韧性都不利。图1-7为纯铁的晶粒尺寸对其屈服点的影响。可见,金属的晶粒尺寸是决定

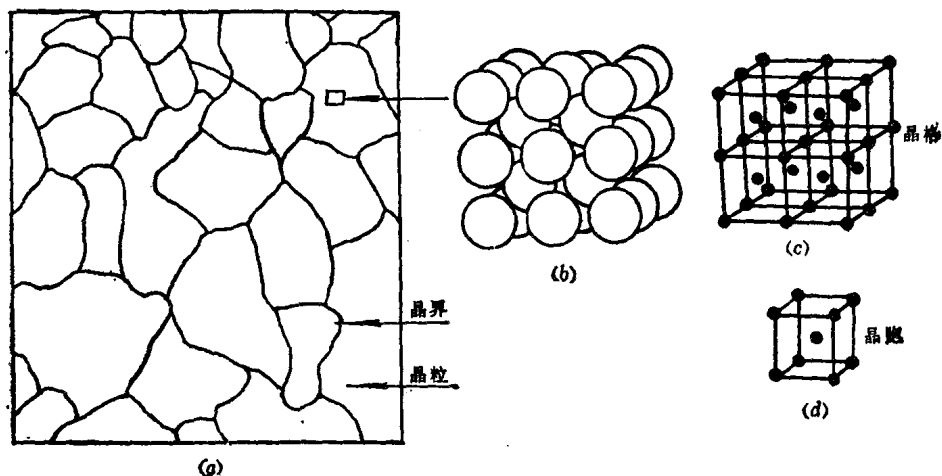


图1-6 纯铁的内部构造示意图

金属机械性能的重要因素之一，必须充分重视。关于影响晶粒大小的因素，以后将陆续进行讨论。

I. 金属的常见晶格 (crystal lattices)

纯金属在固态下是由晶粒组成的，那么，晶粒内部的构造又是怎样的呢？进一步剖析（通常用 x 射线衍射法 X-ray diffraction analysis）就会发现，每个晶粒都是由金属原子（更确切地讲是“金属离子”）按一定的形式规则地排列而成的，如图1-6 b 所示。为了清楚起见，我们只画出原子的中心点，并用线条将这些中心点连接起来，这样便会很清晰地看出原子排列的形式，如图1-6 c 所示。我们把这些人为地连接起来的线条所构成的几何空间格架称为晶格，而把构成晶格的最基本的单元（图1-6 d）称为晶胞 (unit cell)，晶胞的各边尺寸（如长、宽、高）谓之“晶格常数” (lattice constants or parameters)，其大小以埃 ($\text{\AA}$ ngström, $1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{cm}$) 来度量。

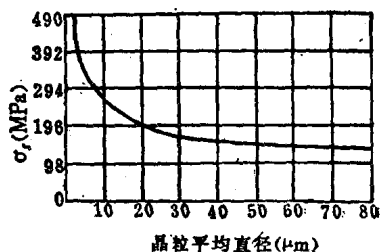


图1-7 纯铁的屈服极限与晶粒度的关系

由于金属键结合力强且无方向性，所以在金属晶体中，原子总具有趋于密排的倾向，常形成具有高度对称性的、为数不多的几种简单的几何形式。常见的晶格形式有如下三种：

(1) 体心立方晶胞 (unit cell of the body-centered cubic structure)

如 α -Fe（低于 910°C 的铁）、以及Cr、W、Mo、V等金属皆具有这种晶格形式。由图1-8可以看出，这种晶格的晶胞是一个长、宽、高相等的立方体。立方体的八个角上各有一个原子，而立方体的中心尚有一个原子。

(2) 面心立方晶胞 (unit cell of the face-centred cubic structure)

如Al、Cu、Ni及 γ -Fe（高于 910°C 而低于 1400°C 的铁）等金属均具有这种晶格形式。这类晶格的晶胞也是一个立方体。立方体的八个角各有一个原子，立方体的六个面的中心尚各有一个原子（如图1-9所示）。

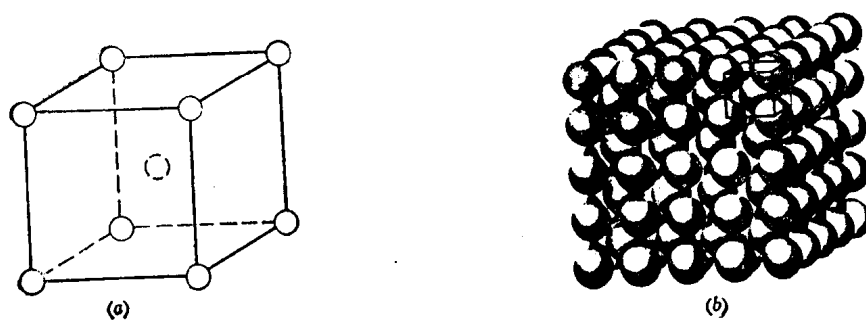


图1-8 体心立方晶格的模型与晶胞

a —晶胞； b —模型。

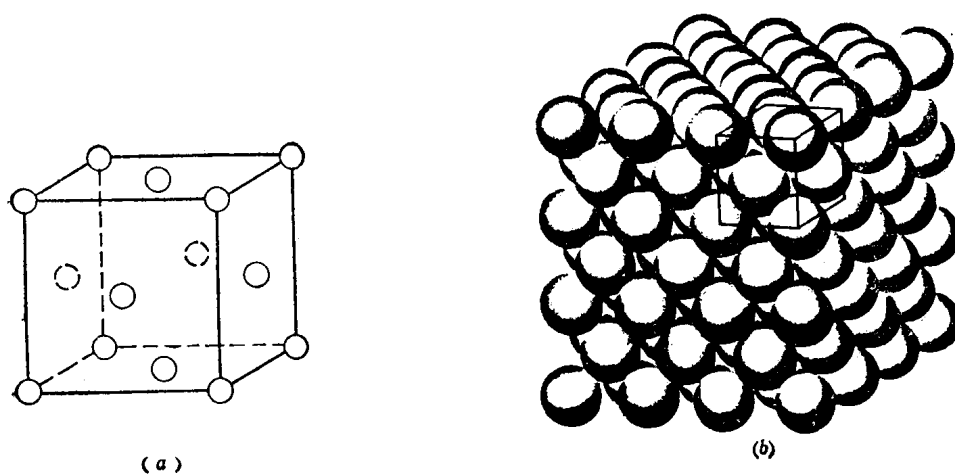


图1-9 面心立方晶格的模型与晶胞

a —晶胞； b —模型。

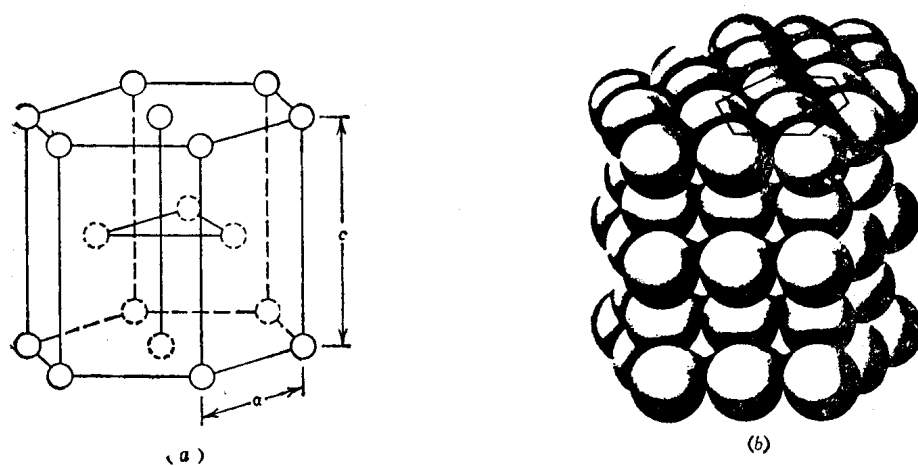


图1-10 密排六方晶格的模型与晶胞

a —晶胞； b —模型。

(3) 密排六方晶胞 (unit cell of the close-packed hexagonal structure)

Mg、Zn等金属的晶格均属这一类型。其晶胞是一个六方柱体，上下两个六方面的中心及角上各有一个原子，而在这两个六面体的中间还均匀分布着三个原子。图1-10为其示意图。其晶格常数 c 和 a 的比值 (c/a) 根据金属类型的不同，大致在1.58~1.89之间。

各种金属晶体结构的主要差别就在于其晶格形式及晶格常数是不同的。

以上三种晶格的一个共同特点是原子排列密度高。任一种晶格中原子排列密度的高低，可以根据“配位数” (coordination number) 来判断。所谓配位数就是指晶格中任一原子周围所紧邻的等近距离的原子数目。由图1-11 a 可以看出，体心立方晶格中任一原子（如取立方体中心的那个原子为中心更为醒目，该原子以▲符号标注）周围所邻近的等近距离的原子数是8。同样由图1-11 b 和1-11 c 可以看出，面心立方晶格和密排六方晶格的配位数都是12（以任一原子为中心时，在同平面上有六个相邻原子，在上、下两平面各有三个相邻原子）。配位数的数值愈大，则晶格中原子的密排度，即在晶胞的总体积中原子所占有的体积百分数便愈大。

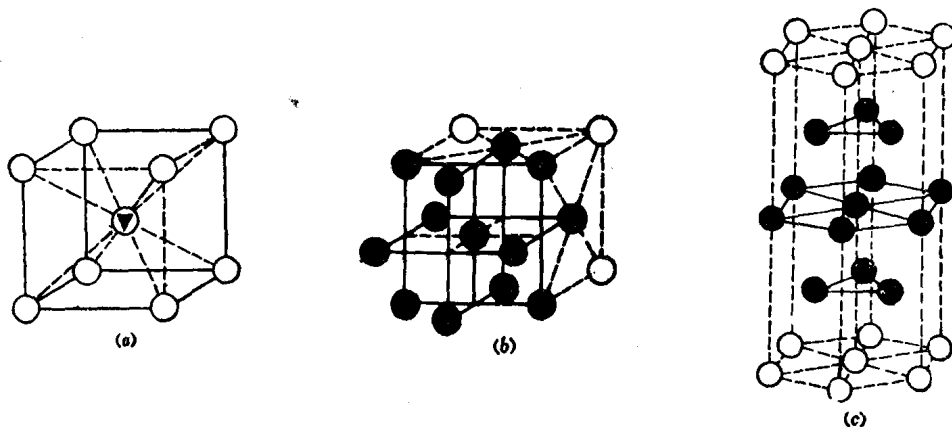


图1-11 三种晶格的配位数示意图

a—体心立方；b—面心立方；c—密排六方。

下面就以面心立方晶胞与体心立方晶胞为例，计算其密排度。

$$\text{密排度} = \frac{\text{原子占有的体积}}{\text{晶胞体积}}$$

对面心立方晶胞来说，由图1-12 a 看出，每一晶胞仅包含四个原子，即每一个面心原子均分属于两个晶胞，晶胞角顶上的每个原子则分属于8个晶胞，故每个晶胞实际上只包含4个原子。这4个原子共占体积为 $4 \times \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right)$ ，式中的 r 为原子的半径（以Å表之）。

图1-12 b 是面心立方晶胞中，由面的对角线与正方面的两个边形成的一个三角形。由图可知，通过三角关系，原子半径 r 与晶格常数 a 的关系为 $a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$ ，则晶胞体积

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

$$\text{密排度} = \frac{4 \times \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right)}{\left(\frac{4r}{\sqrt{2}} \right)^3} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{12} = 0.74 = 74\%$$

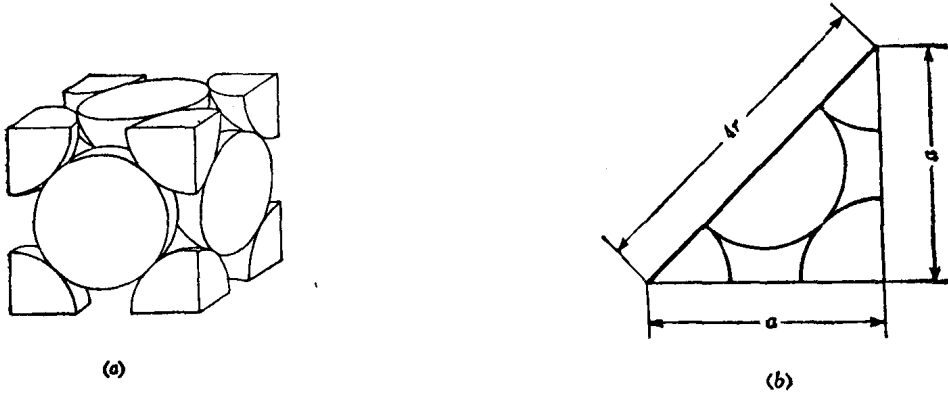


图1-12 面心立方晶胞密排度的计算

a—模型；b—三角关系。

对体心立方晶胞来说，由图1-13 a 看出，这种晶胞仅包含两个原子，即体心原子全部属于本晶胞，而顶角上的每个原子为八个晶胞所共有，故每个原子只有 1/8 属于本晶胞，即体心立方晶胞包含 2 个原子，共占的体积为 $2 \times \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right)$ 。

图1-13 b 所示的三角形是由立方体的对角线与底面的对角线和立方体的一个棱所构成的。通过简单的三角关系可知， r 与 a 的关系为： $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$ ，则晶胞体积 $a^3 = \left(\frac{4r}{\sqrt{3}} \right)^3$ ，于是

$$\text{密排度} = \frac{2 \times \left(\frac{4\pi r^3}{3} \right)}{\left(\frac{4r}{\sqrt{3}} \right)^3} = \frac{2\sqrt{3}\pi}{16} = 0.68 = 68\%$$

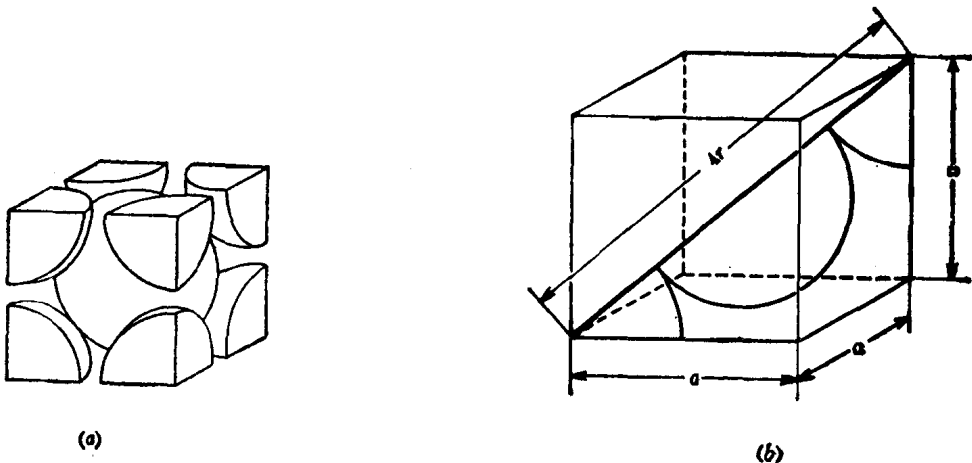


图1-13 体心立方晶胞密排度的计算

a—模型；b—三角关系。

由以上的简单计算可以看出,面心立方晶格的密排度(74%)较体心立方者(68%)为高。密排六方晶格的密排度(当 $c/a=1.66$ 时)与面心立方晶格相同,也是74%。

Ⅱ. 晶面与晶向 (crystal planes and crystal directions)

晶格中各种方位的原子层叫做晶面,所以也可以把晶体看成是由一层的层的晶面堆砌而成的。图1-14是几种不同位向的晶面的示意图。晶格中各种原子列的方向谓之晶向。由图1-15可以看出,晶向 a 与晶向 b 的原子排列状况是不同的。金属晶体的物理性能与机械性能同晶体的晶格形式以及晶面和晶向上的原子排列方式与排列密度有密切的关系。因此,细致地分析晶格中各种晶面和各种晶向的特点是十分重要的。表示各种位向的晶面的符号叫做“晶面指数”(Miller indices of the plane),而表示各种晶向的符号谓之“晶向指数”(indices of directions)。晶面与晶向的特点就可以通过“晶面指数”和“晶向指数”反映出来。

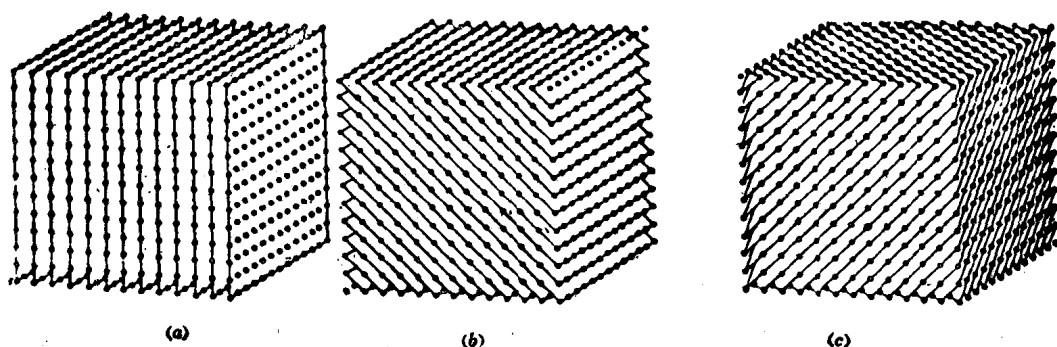


图1-14 晶面示意图

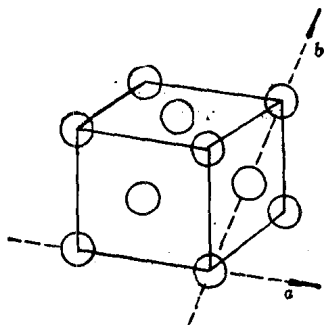


图1-15 晶向示意图

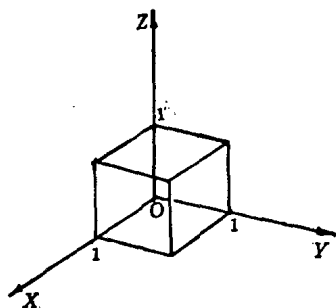


图1-16 立方晶格求晶面指数时坐标的选取

(1) 晶面指数的表示法和意义

通过晶面指数可以将晶体中不同位向的晶面区别开来,进而能将不同晶面上的原子分布状况反映出来。

晶面指数(以立方体为例)可以通过下列三个步骤来求出:

(i) 首先选定晶格中的某一结点(原子)为三维坐标的原点 O (注意原点不可设在所求的晶面上),以晶格的三个棱作为坐标轴 OX 、 OY 、 OZ ,以晶格常数 a 、 b 、 c 分别作为三个相应轴上的量度单位,求出所求晶面在各坐标轴上的截距(参考图1-16);

(ii) 取截距的倒数;

(iii) 将它们化为最小的整数，并括在一个圆括号内，这就是该晶面的晶面指数。

例如：图1-17 a、b、c 中所示的三类晶面，其晶面指数的求法是：

图 号	取 截 距	变 倒 数	化为最小整数
a	$1, \infty, \infty$	$1, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty}$	(100)
b	$1, 1, 1$	$1, 1, 1$	(111)
c	$1, 1, \infty$	$1, 1, \frac{1}{\infty}$	(110)

由上例可以看出，通过第二步便可以消掉晶面符号中的 ∞ ，而通过第三步则可以消除其中的分数值，最后可以得到一个完全由最小整数所组成的符号。

上例中所求出的 (100)、(111) 和 (110) 三类晶面都是立方晶格中具有重要意义 的晶面。由于 (100)、(010)、(001) 是代表着立方晶格中同一类型的晶面，如图1-17a 所示，故往往将其写成 {100} (晶面族) 的形式。

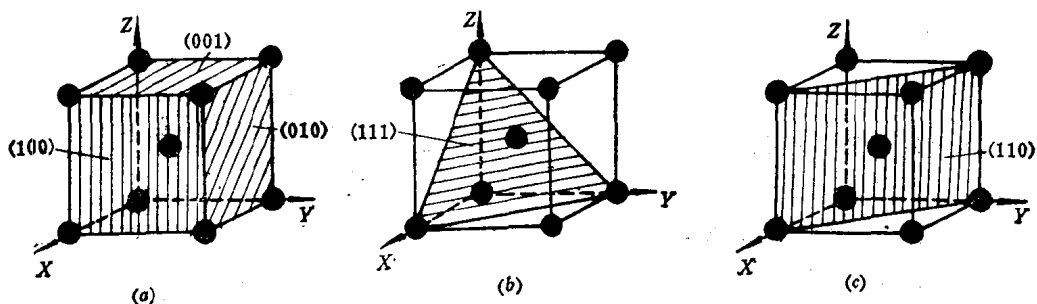


图1-17 立方晶格中三种典型晶面的位向及其晶面指数的求法

a—(100) 面； b—(111) 面； c—(110) 面。

同一晶体中，凡晶面指数 $\{hkl\}$ 不同的晶面，其原子分布状况及排列密度也是不同的。这里以面心立方晶格的三个主要晶面为例予以分析 (图1-18)。

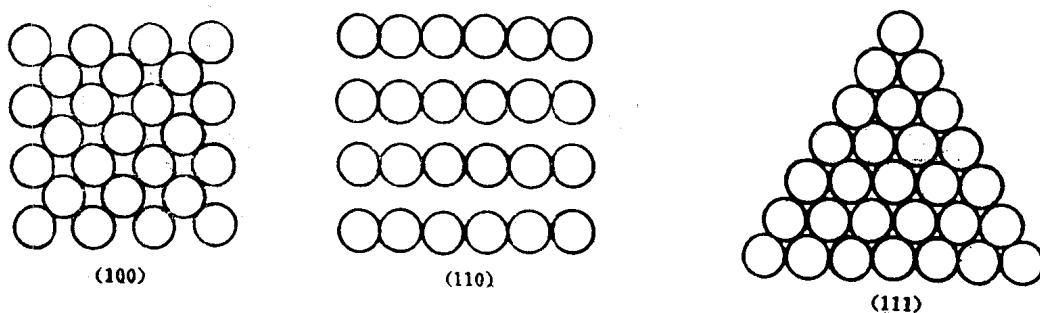


图1-18 面心立方晶格中的 (100)、(110)、(111) 三种晶面中原子排列密度示意图

从图中可以大致看出，在面心立方的 (111) 晶面上，每个原子周围有六个原子与其紧靠，在 (100) 晶面上每个原子周围仅有四个原子与其紧靠，而在 (110) 面上紧靠的原子数更少，仅有两个。因此，在面心立方晶格中以 (111) 晶面 (晶面族) 的原子

密度最大, (100) 次之, (110) 面最小。

在体心立方晶格中, 则以 (110) 面的原子排列密度最大, (100) 面次之, (111) 面最小。

晶面上原子排列密度的差别对晶体的许多性能有直接影响。例如, 具有面心立方晶格的晶体, 在受到外力而发生塑性变形 (plastic deformation) 时, 在其原子排列密度最大的晶面, 即在 {111} 族晶面之间, 最容易产生相对位移 (详见第三章)。

(2) 晶向指数的表示法和意义

晶向指数不仅表达出晶体中某一原子列的方向, 而且能反映出该方向上原子的排列状况和密度。

晶向指数的表示法是, 自坐标原点向任一方向上的最邻近的一个原子引一连线, 则这一连线就代表一定的结晶方向。而此结晶方向的指数, 则用该线上某一具有最小整数的原子坐标加以方括号表示之。

图 1-19 中沿立方晶格的 OX 轴的晶向指数为 $[100]$, 面对角线的晶向指数为 $[110]$, 体对角线的晶向指数为 $[111]$ 。

在立方晶体中, $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 三个晶向指数是等效的, 故往往以 $\langle 100 \rangle$ (晶向族) 符号表示之。同理 $\langle 110 \rangle$ 代表着 $[110]$ 、 $[101]$ 、 $[011]$ 诸等效结晶方向。

另外值得注意的是, 在立方晶格中, 某一晶面的晶面指数与该晶面法线的晶向指数数值完全相同。如图 1-20 中 (100) 面法线的晶向

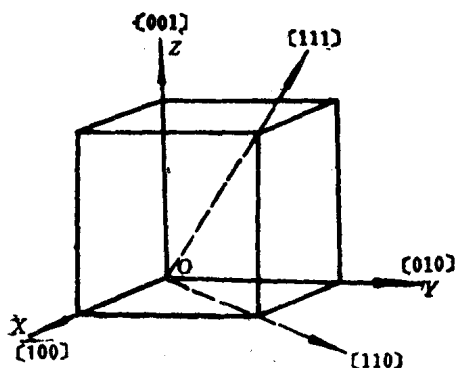
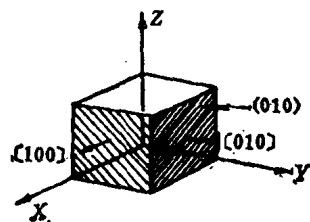


图1-19 立方晶格中三种重要晶向指数

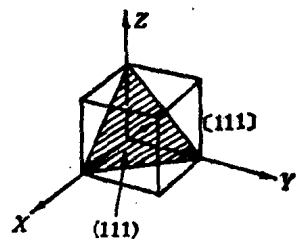
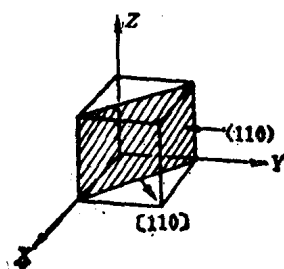


图1-20 立方晶格中晶面指数与该晶面法线的晶向指数

指数是 $[100]$, (110) 面法线的晶向指数是 $[110]$, 而 (111) 面法线的晶向指数则为 $[111]$ 。

在晶体中, 由于各晶向上的原子排列密度不同, 从而使晶体在不同方向上的性能出现差异, 这种现象叫做“各向异性” (anisotropy)。各向异性是区分晶体与非晶体的一

个重要特征。非晶体是“各向同性”(isotropy)的,即在各个方向上的性能都是相同的。

晶体的各向异性在物理、化学或机械性能方面都表现了出来。这方面的实例是很多的。如铁的晶体(体心立方晶格)放在磁场中时,沿 $[100]$ 晶向远比沿 $[111]$ 晶向容易磁化。又如铁单晶体的弹性模量 E ,在 $[111]$ 方向上是 284200MPa ,而在 $[100]$ 方向上仅等于 132300MPa (图1-21)。这种各向异性是单晶体的特点,所谓单晶体即一个宏观晶体内部的晶格方位都是一致的(图1-22a)。

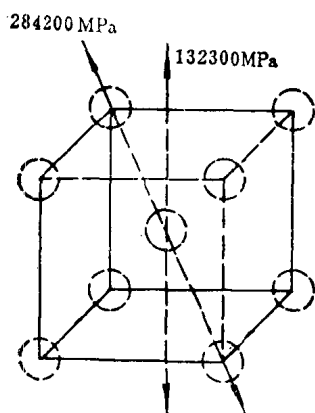


图1-21 铁的单晶体在不同方向上的弹性模量示意图

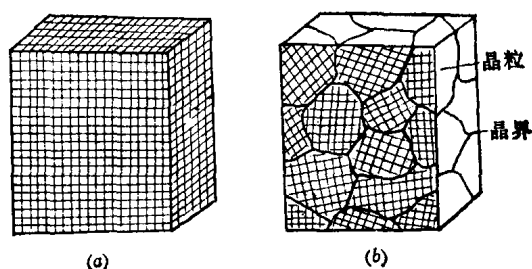


图1-22 单晶体与多晶体示意图

a—单晶体; b—多晶体。

实际晶体都是多晶体(图1-22b),即一个宏观晶体是由千千万万个位向不同的微观晶粒构成的。纵然每个晶粒都是各向异性的,当不同方向上不同位向的晶粒数大体近似时,金属的实际晶体就表现出各向同性。

这里应该指出,以上建立晶体的概念时,是把整个晶体看成为所有的原子都呈十分规律的排列,而实际情况并不是那样完整无缺,而是存在着各式各样的缺陷。归纳起来可分为三种:①点缺陷,即晶格中存在着“空位”和“间隙原子”。前者是晶格结点上缺少原子;而后者则是晶格的空隙中错排了原子。②线缺陷,在某些晶面的某些方向线的两侧原子发生了规律性的错排,一般将这一方向线称之为“位错线”。③面缺陷,主要指晶界及亚晶界。组成多晶体的每一个晶粒都存在晶界,每个晶粒内部晶格方位也并非完全一致,而是存在着若干尺寸很小、位向差也很小($<2^\circ$)的晶块,一般称为亚结构,其周围存在着亚晶界。所有这些晶体缺陷及其对机械性能的影响,将在第三章及第六章中予以介绍。

三、合金的晶体结构 (crystal structure of alloys)

纯金属虽然有一些优越的特性,但它们的机械性能较差,而且价格较高,因此在工业中应用较少,实际上大量使用的是合金。合金除具备纯金属的基本特性外,还可以拥有纯金属所不能达到的一系列机械特性与理化特性,如高强度、强磁性、耐蚀性等。随着科学技术的迅速发展,能满足更高要求的新型合金也在不断地研制出来。

将两种以上的元素(其中主要是金属元素)通过熔炼或粉末冶金等方法,所制得的