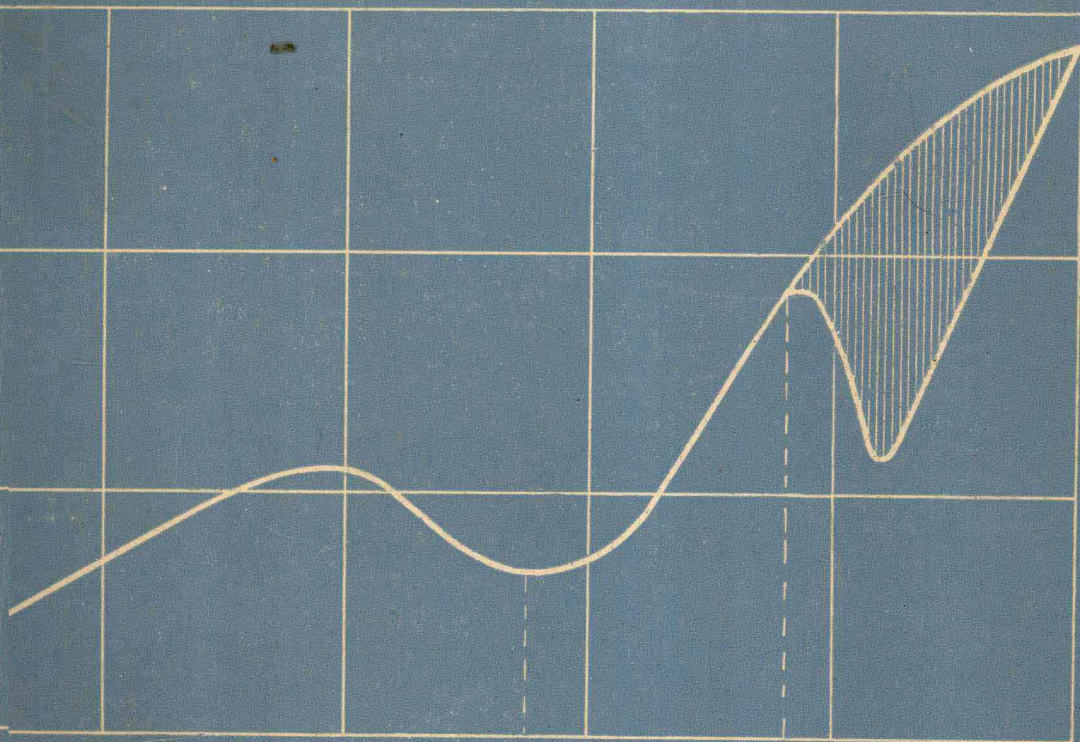


高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海工业大学史美堂主编



上海科学技术出版社

高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海工业大学 史美堂 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是一机部为高等院校机械制造冷加工各专业组织编写的试用教材。

本书从机制专业学生实际需要出发,扼要讲述金属学、金属材料以及热处理方面的基本内容。共包括:金属的结构与结晶;金属的塑性变形与再结晶;合金的结构与结晶;有色金属及其合金;铁碳合金;钢的热处理;合金钢;铸铁;机械零件选材及其工艺路线分析等九章。书末附录还简单介绍了金属硬度测定原理及有关换算,国外钢号编号方法等。本书在选材方面,对加强基础理论,理论联系实际,反映新近的科学技术成就等,均相当注重。

本书亦适合机械设计和生产部门的技术人员阅读参考。

高等学校试用教材

金属材料及热处理

上海工业大学 史美堂 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.5 字数 391,000

1980 年 7 月第 1 版 1981 年 2 月第 2 次印刷

印数 55,001—135,000

书号: 15119·2079 定价(科四): 1.55 元

编 者 的 话

根据《高等学校一机部对口专业座谈会纪要》的决定,我们编写了这本《金属材料及热处理》作为高等院校机械制造冷加工各专业的试用教材。

本书以培养机制专业学生具有合理选用金属材料,正确选定热处理工艺方法,妥善安排工艺路线的初步能力为主要目标。

本书扼要讲授:金属材料的性能与成分、组织、结构以及加工工艺之间的关系;钢铁材料的热处理基本原理和工艺及其在机械产品零件加工过程中的地位和作用;常用金属材料(碳钢、铸铁、合金钢、有色金属及合金、硬质合金等)的分类、编号、成分、组织结构、性能和用途;金属材料选用原则;热处理技术条件标注;机械设计对减少和防止热处理变形、开裂的考虑;典型零件选材及工艺分析等。书中对近年来金属材料及热处理新成就有适当的反映,如马氏体形态,调质钢的锻热淬火,中温气体碳氮共渗,气体软氮化,粉末冶金,铝基轴承合金等;对稀土镁球墨铸铁也予以足够的重视。

本书计量单位统一采用国际单位制(SI),并以国际代号表示,如强度(σ_b 、 σ_s 等)指标的单位一律用 MN/m^2 (百万牛顿/米²)表示,它同一般沿用的单位 kgf/mm^2 (公斤力/毫米²)的关系为: $1\text{MN}/\text{m}^2 \approx 0.1\text{kgf}/\text{mm}^2$ 。另外,本书采用冲击功 A_k 作为冲击韧性的指标,其国际单位为 J(焦耳)。 A_k (以 J 为单位)与冲击值 a_k (以 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ 为单位)的关系为 $A_k \approx 8a_k$ 。硬度值仍沿用 kgf/mm^2 作为单位,但通常不予标注。

本书由上海工业大学史美堂同志主编,洛阳农机学院席聚奎同志参加编写第一、二、八章,东北重型机械学院杨慧心同志参加编写第三、四章;由陕西机械学院热处理教研室金属材料及热处理教材审阅组主审。本书在编写过程中,曾得到许多有关同志的热忱帮助和支持,在此谨表示衷心感谢。

还应说明,本书在编写时,着重参考了 1974 年原上海人民出版社出版的教材《金属材料及热处理》(1978 年起转为上海科学技术出版社出版),注意吸取其优点。上海科学技术出版社决定在本书出版时,该书不再印行。

由于我们水平有限,经验不多,加之编写时间仓促,书中一定存在不少缺点和错误,恳切希望广大读者提出宝贵意见,以便改进。

1979 年 12 月

目 录

绪论	1
第一章 金属的结构与结晶	3
第一节 金属的晶体结构	3
一、晶体的概念	3
二、三种常见的金属晶格	4
三、三种典型晶格的致密度及其晶面和晶向的分析	5
四、晶体的各向异性	7
第二节 金属的实际结构和晶体缺陷	8
一、多晶体结构	8
二、晶格缺陷	9
第三节 金属的结晶与铸锭	10
一、结晶的概念	10
二、结晶时晶核的形成和成长过程	11
三、影响晶核的形成和成长速率的因素	13
四、金属铸锭的组织	14
第二章 金属的塑性变形与再结晶	17
第一节 金属的塑性变形	17
一、金属的变形和断裂	17
二、单晶体金属的塑性变形	18
三、多晶体金属的塑性变形	21
第二节 塑性变形对组织和性能的影响	23
一、晶粒沿变形方向拉长,性能趋于各向异性	23
二、晶粒破碎,位错密度增加,产生加工硬化	23
三、织构现象的产生	25
四、残余内应力	25
第三节 回复与再结晶	26
一、变形金属在加热时的组织和性能的变化	26
二、金属的再结晶温度	29
三、再结晶退火后的晶粒度	30
第四节 金属的热加工	31
一、热加工与冷加工的区别	31
二、热加工对金属组织和性能的影响	31
第三章 合金的结构与结晶	33
第一节 固态合金中的相结构	33

一、固溶体	34
二、金属间化合物	40
第二节 二元合金相图的建立	43
一、相图的意义及几个名词的涵义	43
二、二元合金相图的建立	44
第三节 匀晶相图	46
一、相图分析	46
二、合金的结晶过程	47
三、二元相图中的杠杆定律	47
四、固溶体合金中的偏析	48
第四节 二元共晶相图	49
一、相图分析	49
二、合金的结晶过程	49
第五节 二元包晶相图	53
第六节 形成稳定化合物的二元合金相图	54
第七节 具有共析反应的二元合金相图	55
第八节 合金的性能与相图之间的关系	56
一、当合金形成单相固溶体时	56
二、当合金形成两相混合物时	57
三、当合金形成化合物时	58
第四章 有色金属及其合金	60
第一节 铝及其合金	60
一、工业纯铝	60
二、铝合金概述	60
三、铸造铝合金	64
四、形变铝合金	71
第二节 铜及其合金	73
一、紫铜(工业纯铜)	73
二、铜的合金化	74
三、黄铜	75
四、青铜	82
第三节 轴承合金	89
一、锡基轴承合金	91
二、铅基轴承合金	92
三、铜基轴承合金——铅青铜	93
四、铝基轴承合金	93
第五章 铁碳合金	95
第一节 纯铁、铁碳合金的组织结构及其性能	95
第二节 铁碳合金相图分析	98
一、概述	98

二、钢和白口铁结晶过程分析	101
三、组织组成物计算	104
四、含碳量与铁碳合金机械性能的关系	105
五、Fe-Fe ₃ C 相图的应用	105
第三节 碳钢	107
一、钢中常存杂质的影响	107
二、碳钢的分类、编号和用途	108
第六章 钢的热处理	112
第一节 钢在加热时的转变	112
一、奥氏体的形成	112
二、奥氏体晶粒的长大及其影响因素	114
第二节 过冷奥氏体转变产物的组织形态与性能	115
一、珠光体类型组织形态与性能	115
二、马氏体类型组织形态与性能	116
三、贝氏体类型组织形态与性能	118
第三节 过冷奥氏体的冷却转变曲线图	121
一、过冷奥氏体等温转变曲线图	121
二、过冷奥氏体连续转变曲线图	126
第四节 钢的退火和正火	128
一、退火和正火的目的	128
二、退火和正火操作及其应用	129
第五节 钢的淬火	131
一、淬火的目的	131
二、淬火温度的选择	131
三、淬火冷却介质	132
四、常用的淬火方法	133
第六节 钢的淬透性	135
一、什么叫淬透性	135
二、淬透性对钢机械性能的影响	137
三、影响淬透性的因素	137
四、淬透性的测定及表示方法	137
五、淬透性与淬硬层深度的关系	139
六、在设计中如何考虑钢的淬透性	139
七、淬透性值的应用	139
第七节 钢的回火	141
一、回火的目的	141
二、淬火钢在回火时的转变	141
三、回火的种类及应用	144
第八节 钢的表面淬火	144
一、概述	144
二、感应加热表面淬火	145

三、火焰加热表面淬火·····	149
第九节 钢的化学热处理·····	149
一、概述·····	149
二、钢的渗碳·····	150
三、钢的氮化·····	153
四、钢的碳氮共渗·····	155
第七章 合金钢 ·····	157
第一节 概论·····	157
一、合金元素对钢中基本相的影响·····	157
二、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图的影响·····	158
三、合金元素对钢热处理的影响·····	160
四、合金钢的分类·····	162
第二节 合金结构钢·····	163
一、合金结构钢的分类及编号·····	163
二、普通低合金钢·····	163
三、易切钢·····	164
四、渗碳钢·····	166
五、调质钢·····	169
六、弹簧钢·····	174
七、滚动轴承钢·····	177
第三节 合金工具钢·····	180
一、工具钢的分类及编号·····	180
二、刀具钢·····	180
三、模具钢·····	190
四、量具钢·····	195
第四节 特殊性能钢·····	197
一、不锈钢·····	197
二、耐热钢·····	201
三、耐磨钢·····	208
第五节 粉末冶金与硬质合金简介·····	208
一、粉末冶金工艺简介·····	209
二、粉末冶金的应用·····	209
三、硬质合金简介·····	210
第八章 铸铁 ·····	212
第一节 概论·····	212
一、铸铁的成分、组织和性能特点·····	212
二、铸铁中的石墨化过程·····	212
三、铸铁的分类·····	213
第二节 灰口铸铁·····	214
一、灰口铸铁的成分、组织、性能和用途·····	214

二、灰口铸铁的变质处理——变质铸铁	217
三、灰口铸铁的热处理	217
第三节 可锻铸铁	218
第四节 球墨铸铁	219
一、球墨铸铁的成分、组织、性能和用途	220
二、球墨铸铁的热处理	222
第五节 特殊性能铸铁	224
一、耐磨铸铁	224
二、耐热铸铁	225
三、耐蚀铸铁	226

第九章 机械零件选材及其工艺路线分析

第一节 选材的一般原则	227
一、材料的机械性能	227
二、材料的工艺性能	228
三、材料的经济性	229
第二节 热处理技术条件的标注	229
一、整体热处理时的标注图例	230
二、局部热处理时的标注图例	230
第三节 冷加工方面减小变形、防止开裂的措施	232
一、改进淬火零件结构形状的设计	232
二、合理安排工艺路线	235
三、修改技术条件	235
四、按变形规律调整加工尺寸	236
五、预留加工余量	236
六、更换材料	238
七、提高表面光洁度	239
第四节 热处理与切削加工性的关系	239
第五节 典型零件选材及工艺分析	241
一、齿轮类	241
二、轴类	244

附录

I. 金属的硬度	251
II. 国外钢号编号方法简介	254
III. 国内外钢号对照举例	256

绪 论

目前机械工业正面临着朝高速、自动、精密方向迅速发展,在机械产品的设计和制造过程中,所遇到的金属材料及热处理方面问题日益增多,机械工业与金属材料及热处理学科之间的关系愈加密切。实践表明,合理选用金属材料,适当确定热处理工艺,妥善安排工艺路线对充分发挥金属材料本身的性能潜力,保证材料具有良好的加工工艺性能,获得理想的使用性能,提高产品零件的质量,节省金属材料,降低生产成本等方面起着重大的影响。实际工作中,往往由于选材不当或热处理不妥,使机械零件的使用性能达不到规定的技术要求,而导致在使用中发生早期损坏如产生变形、断裂或磨损等。因此,金属材料及热处理知识对于机械制造工作者来说是必需具备的。

金属材料在现代工农业生产中占有极其重要的地位。不仅在机械制造、交通运输、国防与科学技术等各个部门都需要使用大量金属材料,而且在人们日常生活的用品中也离不开金属材料。金属材料的品种繁多,工程上常用的金属材料计有钢铁、有色金属及合金、粉末冶金材料等。各种材料成分不同,性能各异,而且通过加工,特别是热处理以后,性能变化很大。金属材料的性能主要是指使用性能和加工工艺性能。金属材料在使用条件下所表现的性能称为使用性能,它包括材料的物理、化学和机械性能。金属材料在冷热加工的过程中所表现的性能称为加工工艺性能,它包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能等等。

材料不仅应当具有优良的使用性能,而且还应当具有良好的工艺性能。一般机械零件,在设计和选用材料时经常以机械性能指标作为主要依据。可是在不少情况下,加工工艺性能往往成为决定某种材料能否被选用的关键性因素。

金属材料的性能与其成分和组织以及加工工艺之间的关系是非常密切的。热处理实际上是通过改变组织或改变表面成分而使金属材料性能发生变化的一种加工工艺。金属材料及热处理这门学科的基本任务就在于建立材料成分、内部组织、热处理工艺与性能之间的关系,找出关于何种成分的材料,经过什么样的加工和处理后便具有什么样的组织和性能的规律,以便通过控制金属材料的成分、冷热加工工艺过程,来控制其组织,提高材料性能或创制具有某种性能的新材料。近年来,由于新的测试仪器的发明,使金属的研究进入了更为微观的范畴。为了对金属内部构造、缺陷等细微的组织进行研究,以期对许多现象有进一步的了解,许多最先进的技术,如电子显微镜、X射线衍射、放射性同位素、超声波、声发射等在金属研究中都得到了应用。

金属材料及热处理课程是机械制造类各专业的技术基础课,其主要目的是使学生获得有关金属学、热处理的基本理论及金属材料的一般知识,用以了解常用金属材料的成分、组织、性能、热处理工艺之间关系及其用途,以便在学习本门课程之后,使学生具有合理选用金属材料,正确选定热处理工艺方法,妥善安排工艺路线等方面的初步能力。

本课程的内容由金属学、热处理、金属材料三方面组成,其基本要求如下:

1. 在金属学方面 了解金属和合金的组织结构、结晶过程、塑性变形与再结晶以及二元合金相图的基本理论,为进一步学习热处理和金属材料打下基础。

2. 在热处理方面 了解钢铁材料的热处理基本原理和工艺,以及热处理工艺在零件加工过程中的地位和作用,以便能根据零件的技术条件正确选定热处理工艺方法,合理安排工艺路线。

3. 在金属材料方面 掌握常用的碳钢、铸铁、合金钢、铜合金、铝合金、轴承合金等金属材料(其中以钢铁材料为主)的成分、组织、性能和用途的基本知识,以便能合理选用金属材料。

学习本课程前,学生应学完化学、物理和材料力学、金属工艺学等课程,并应经过金属工艺方面的基本工艺训练,在金属材料及热处理方面有一定的感性知识。

为照顾到机械类各专业的需要,本书第四、六、七、九各章内容偏多,可适当选学。

第一章 金属的结构与结晶

第一节 金属的晶体结构

一切金属在固态下都是晶体,故研究金属首先就应从了解其晶体结构开始。为此我们需要先介绍一些有关晶体的一般概念。

一、晶体的概念

所谓“晶体”就是指其原子(更确切些应说是离子)具有规则排列的物体。如图 1-1(a)所示,为一最简单的晶体结构示例。在自然界中,除了一些少数的物质(如普通玻璃、松香及赛璐珞等)以外,包括金属在内的绝大多数的固体都是晶体。晶体之所以具有这种规则的原子排列,主要是由于各原子之间的相互吸引力与排斥力相平衡的结果。由于晶体内部原子排列的规律性,故有时甚至可以见到某些物质的外形也具有规则的轮廓,如水晶、食盐及黄铁矿等,但金属晶体一般则看不到有这种规则的外形。

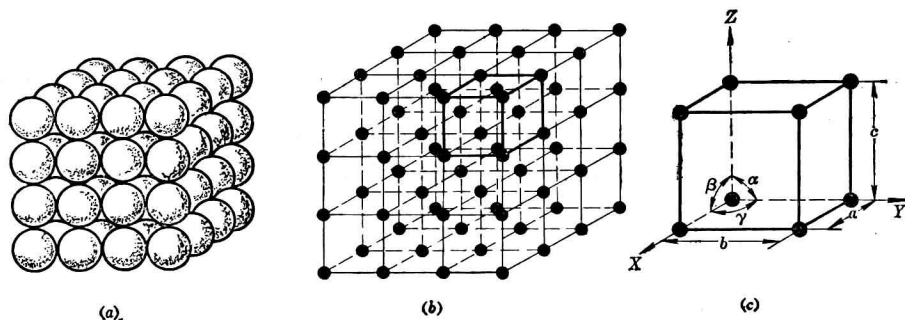


图 1-1 简单立方晶体(a)、晶格(b)及晶胞(c)的示意图

为了便于分析各种晶体中的原子排列规律或形式起见,我们常以通过各原子中心的一些假想联线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来,如图 1-1(b)所示,各联线的交点称为“结点”,在结点上的小圆圈(或用黑点)表示各原子中心的位置,我们把这种表示晶体中原子排列形式的空间格子叫做“晶格”(或点阵)。显然,由于晶体中原子重复排列的规律性,我们可从其晶格中确定一个最基本的几何单元表达其排列形式的特征,如图 1-1(c)所示。组成晶格的这种最基本的几何单元,我们把它叫做“晶胞”。晶胞的各边尺寸 a 、 b 、 c 叫“晶格常数”,其大小常以 $\text{\AA}$ (埃)为单位($1\text{\AA}=1\times 10^{-8}\text{cm}$);晶胞各边之间的相互夹角常分别以 α 、 β 及 γ 表示。如图 1-1(c)所示的晶胞,其晶格常数 $a=b=c$,而 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,这种晶胞叫做简单立方晶胞,具有简单立方晶胞的晶格叫做简单立方晶格。简单立方晶格只见于非金属晶体中,在金属中则看不到。

各种晶体物质,或其晶格形式不同,或其晶格常数不同,主要与其原子构造、原子间的结

合力(或称结合键)的性质有关;因晶格形式及晶格常数不同,于是不同晶体便表现出不同的物理、化学和机械性能。

二、三种常见的金属晶格

金属与非金属晶体的不同,主要归因于其原子构造及原子间结合键的差异。我们知道,一切金属元素,在其原子构造上的共同特点是其价电子数目少、与原子核间的结合力小,因而金属晶体中的原子结合形成所谓“金属键”,其特点是所有原子都失去其价电子变为正离子,在晶体中规则地排列起来(实际上每个正离子在各晶格结点上还作轻微的高频率振动,而不是固定不动),而所有游离的自由电子则穿梭于各离子之间作高速运动,形成所谓“电子云”,电子云与各离子间的公有引力使金属被坚强地结合起来,而离子与离子间及电子与电子间的斥力则与这种引力相平衡,使金属处于稳定的晶体状态。

正由于金属晶体中有这种电子云的大量自由电子存在,从而使金属能区别于非金属而具有良好的导电与导热性能;正由于金属晶体是借助于其电子云与各离子间公有引力的坚强结合,从而使金属能区别于非金属而不仅具有良好的塑性,而且还具有高强度等优良的机械性能(详见后述);同时,也正由于这种坚强的金属键存在,因而便使得金属晶体大都具有趋于紧密排列的倾向,以致原子排列组合形式的数目大为减少,而只具有少数几种高对称性的晶格形式的特点。而非金属晶体一般则大都具有比较复杂的晶格,对称性较低。

在金属元素中,约有百分之九十以上的金属晶体都属于如下三种密排的晶格形式:

(一)体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞(图 1-2)是由八个原子构成的立方体,并在其立方体的体积中心还有一个原子,因其晶格常数 $a=b=c$,故通常只用一个常数 a 即可表示。由图 1-2 可见,这种晶胞在其立方体对角线方向上的原子是彼此紧密相接触排列着的,故由该对角线长度 $\sqrt{3}a$ 上所分布的原子数目,共 2 个,便可计算出其原子半径的尺寸,为 $r=\frac{\sqrt{3}}{4}a_0$ 。在这种晶胞中,因每个顶点上的原子是同时属于周围八个晶胞所公有,故实际上每个体心立方晶胞中仅包含有: $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个原子。属于这种晶格的金属有铁($<910^{\circ}\text{C}$, $\alpha\text{-Fe}$),铬(Cr),钼(Mo),钨(W),钒(V)等。

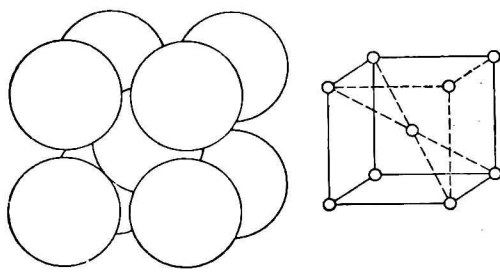


图 1-2 体心立方晶胞

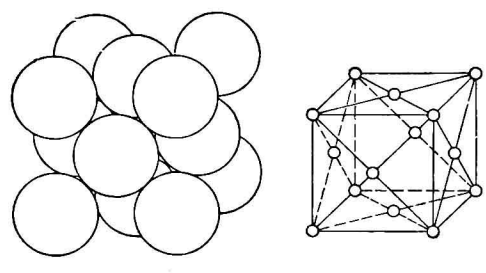


图 1-3 面心立方晶胞

(二)面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞(图 1-3)也是由八个原子构成的立方体,但在立方体的每一面的

中心还各有一个原子。显然,在这种晶胞中,是在每个面的对角线上各原子彼此相互接触,因而其原子半径的尺寸应为 $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。又因每一面心位置上的原子是同时属于两个晶胞所公有,故每个面心立方晶胞中包含有: $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个原子。属于这种晶格的金属有铝(Al),铜(Cu),镍(Ni),铅(Pb)等。

(三)密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞(图 1-4)与简单六方晶胞不同,它不仅在由 12 个原子所构成的简单六方体的上下两个六方面的中心还各有一个原子,而且在两个六方面的中间还有三个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $c/a \approx 1.633$ 。属于这种晶格的金属有铍(Be),镁(Mg),锌(Zn),镉(Cd)等。

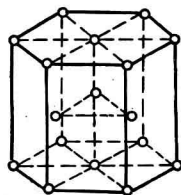
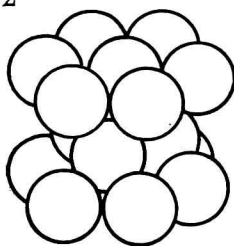


图 1-4 密排六方晶胞

除以上三种晶格以外,少数金属还具有其它类型的晶格,但一般很少遇到。

三、三种典型晶格的致密度及其晶面和晶向的分析

(一)晶格的致密度

如上所述,金属晶体的特点是其原子排列紧密,即致密度较高。所谓晶格的致密度是指其晶胞中所包含的原子所占有的体积与该晶胞体积之比。例如,在体心立方晶格中,每个晶胞含有 2 个原子,原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$,晶胞体积为 a^3 ,故体心立方晶格的致密度为: $2 \times \frac{4}{3} \pi r^3 / a^3 = 2 \times \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a \right)^3 / a^3 = 0.68$,即晶格中有 68% 的体积被原子所占据,其余为空隙。同理亦可求出面心立方及密排六方晶格的致密度均为 0.74。而简单立方晶格的致密度则仅为 0.52。

此外,在定性评定晶体中原子排列的紧密程度时,常还应用“配位数”这一概念。所谓配位数即指晶格中任一原子周围所紧邻的最近且等距离的原子数。显然,配位数越大,原子排列也就越紧密。据此定义,体心立方晶格的配位数应为 8,这从该晶胞体心位置上的那个原子很容易看出来;当然,这对体心立方中任一顶点上的原子也应毫无例外,因为,如上所述,立方体每个顶点上的原子都是同时属于它周围 8 个晶胞所公有,即它周围 8 个晶胞中每个体心的原子与它都是最近邻且等距的。以此类似的方法,尚可求出面心立方与密排六方晶格的配位数均为 12。现将三种典型金属晶格的各种数据总结于表 1-1。由表列数据可见,不论从晶体的致密度或配位数来看,面心立方和密排六方晶格的原子排列都同样是最紧密的。

表 1-1 三种典型金属晶格的数据

晶 格 类 型	晶胞中的原子数	原 子 半 径	配 位 数	致 密 度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4} a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4} a$	12	0.74
密排六方	6	$\frac{1}{2} a$	12	0.74

(二) 晶面及晶向指数

晶体中各种方位上的原子面叫晶面；各种方向上的原子列叫晶向。在研究金属晶体结构的细节及其性能时，往往需要分析它们的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。晶面的这种符号叫“晶面指数”，晶向的符号叫“晶向指数”。

确定晶面指数的方法包括如下三个步骤：

(1) 设晶格中某一原子为原点，通过该点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（见图 1-5）；

(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，并加上一圆括号，即为晶面指数。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示。

例如，图 1-5 中所示带影线的晶面，其晶面指数的确定步骤为：(1) 取它与 OX 、 OY 、 OZ 三坐标轴的截距为：1、2、 ∞ ；(2) 三截距的倒数是：1、 $\frac{1}{2}$ 、0；(3) 化为最小整数后的晶面指数为：(210)。

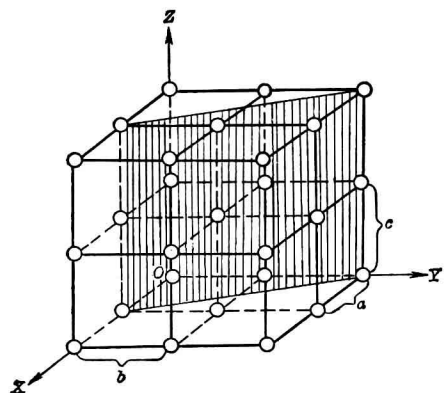


图 1-5 晶面指数的确定方法

在立方晶格中，具有最重要意义的是如图 1-6 中所示的三种晶面，即 (100)、(110) 与 (111) 三种晶面。这里应注意的是，所谓晶面指数，并非指一晶格中的某一个晶面，而是泛指该晶格中所有那些与其相平行的方位相同的晶面。另外，在一种晶格中，如果某些晶面，虽然它们的方位不同，但各晶面中的原子排列相同时，如 (100)、(010) 及 (001) 等，这时若无必要予以区别，则可把这些晶面统用 $\{100\}$ 一种晶面指数来表示，换句话说，即 (hkl) 这类符号系指某一确定方位的晶面指数，而 $\{hkl\}$ 则可指所有那些方位不同而原子排列相同的晶面指数。

晶向指数的确定方法是：

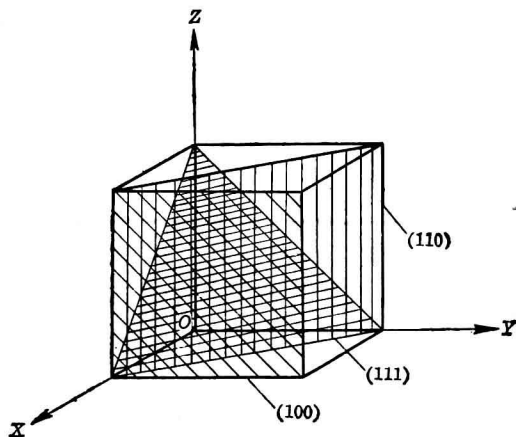


图 1-6 立方晶格中的三种重要晶面

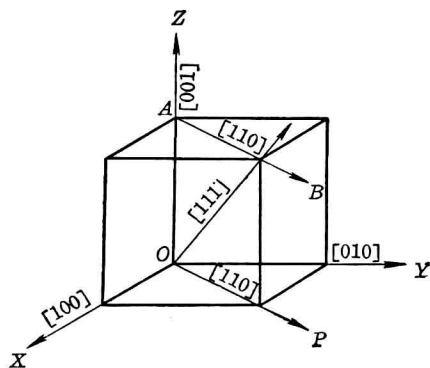


图 1-7 立方晶格中的三个重要晶向

- (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,加一方括号,即为所求的晶向指数,其一般形式为 $[uvw]$ 。

如欲求图 1-7 中 AB 的晶向指数,可通过与其平行的 OP 直线上的任意一点的坐标化简而求出为 $[110]$ 。图 1-7 中所示的 $[100]$ 、 $[110]$ 及 $[111]$ 晶向为在立方晶格中具有最重要意义的三种晶向。与晶面指数的表示方法相类似,如 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等具有相同原子排列的晶向,若无必要区分时,可笼统用 $\langle 100 \rangle$ 这种符号来表示。将图 1-7 与图 1-6 对比可以看出,在立方晶格中,凡指数相同的晶面与晶向彼此是相互垂直的。

(三) 晶面及晶向的原子密度

所谓某晶面的原子密度即指其单位面积中的原子数,而晶向原子密度则指其单位长度上的原子数。在各种晶格中,不同晶面和晶向上的原子密度都是不同的。例如,在体心立方晶格中的各主要晶面和晶向的原子密度见表 1-2。

表 1-2 体心立方晶格中各主要晶面和晶向的原子密度

晶面指数	晶面示意图	晶面密度 (原子数/面积)	晶向指数	晶向密度 (原子数/长度)
$\{100\}$		$\frac{1}{4} \times 4 = \frac{1}{a^2}$	$\langle 100 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{a} = \frac{1}{a}$
$\{110\}$		$\frac{\frac{1}{4} \times 4 + 1}{\sqrt{2} a^2} = \frac{1.4}{a^2}$	$\langle 110 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2}{\sqrt{2} a} = \frac{0.7}{a}$
$\{111\}$		$\frac{\frac{1}{6} \times 3}{\frac{\sqrt{3}}{2} a^2} = \frac{0.58}{a^2}$	$\langle 111 \rangle$	$\frac{\frac{1}{2} \times 2 + 1}{\sqrt{3} a} = \frac{1.16}{a}$

从表 1-2 中可见,在体心立方晶格中,具有最大原子密度的晶面是 $\{110\}$,具有最大原子密度的晶向是 $\langle 111 \rangle$ 。

四、晶体的各向异性

由于晶体中不同晶面和晶向上的原子密度不同,因而便会造成它在不同方向上的性能差异,晶体的这种“各向异性”的特点是它区别于非晶体的重要标志之一。例如,体心立方的 Fe 晶体,由于它在不同晶向上的原子密度不同,原子结合力不同,因而其弹性模量 E 便不同,在 $\langle 111 \rangle$ 方向 $E=290000 \text{ MN/m}^2$,在 $\langle 100 \rangle$ 方向 $E=135000 \text{ MN/m}^2$ 。许多晶体物质如石膏、云母、方解石等常沿一定的晶面易于破裂,具有一定的解理面,也都是这个道理。

晶体的各向异性不论在物理、化学或机械性能方面,即不论在弹性模量、破断抗力、屈服

强度,或电阻、导磁率、线胀系数,以及在酸中的溶解速度等许多方面都会表现出来,并在工业上得到了应用,指导生产,获得优异性能的产品。如制作变压器用的硅钢片,因它在不同晶向的磁化能力不同,我们可通过特殊的轧制工艺,使其易磁化的 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于轧制方向,从而得到优异的导磁率等。

但必须指出的是,在工业金属材料中,通常却见不到它们具有这种各向异性的特征。例如,上述铁的弹性模量,我们日常在材料试验时,不论从何种方位取样,所得数据均在 $E=210000\text{ MN/m}^2$ 左右,而从未发现过它在不同方向上的性能不同。这是因为以上所述的晶体原不过是一些晶体结构的理想情况,而与实际的金属晶体结构还相差很远,因此我们在下面还必须再进一步讨论实际的金属结构。

第二节 金属的实际结构和晶体缺陷

一、多晶体结构

如果一块晶体,其内部的晶格方位完全一致时,我们称这块晶体为“单晶体”,以上的讨论我们指的都是这种单晶体中的情况。但在工业金属材料中,除非专门制作,则都不是这样,而那怕是在一块很小的金属中也包含着许许多多的小晶体,每个小晶体的内部,晶格方位都是均匀一致,而各个小晶体之间,彼此的方位都不相同。如图1-8所示,由于其中每个小晶体的外形多为不规则的颗粒状,故通常都把它们叫做“晶粒”;晶粒与晶粒之间的界面叫“晶粒界”或简称“晶界”,显然,该处的原子排列,为了适应两晶粒间不同晶格方位的过渡,总是不规则的。这种实际由多晶粒组成的晶体结构我们把它叫做“多晶体”。如上所述,工业纯铁的弹性模量等性能,所以测不出它们象在单晶体中那样的各向异性,就是因为其中各晶粒的方位不同,结果只表现出它们的平均性能。

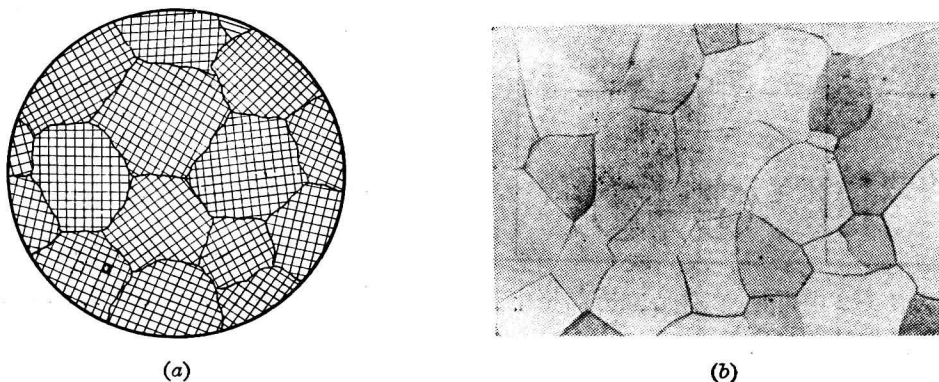


图1-8 金属多晶体结构的示意图(a)及其显微组织的照片(b)

晶粒的尺寸,在钢铁材料中,一般在 $10^{-1}\sim 10^{-3}\text{ mm}$ 左右,故必须在显微镜下才能看到。在显微镜下所观察到的金属中的各种晶粒的大小、形态和分布叫做“显微组织”,如图1-8(b)所示即为纯铁的显微组织。有色金属,如铜、铝、锡、铅、锌等的晶粒度一般都比钢铁中的大些,有时甚至不用显微镜就能直接看见,如镀锌钢板表面的锌晶粒,其尺寸通常达数毫米至十几毫米。

在每个晶粒的内部,实际上也不是那么理想,即每个晶粒内部的晶格方位在不同区域上