

高等学校教材

机械工程材料

(第2版)

何世禹 金晓鸥 主编



哈尔滨工业大学出版社

高等学校教材

机械工 程 材 料

(第 2 版)

何世禹 金晓鸥 主编

哈爾濱工業大學出版社

内 容 提 要

本书主要介绍机械工程上常用的金属材料及非金属材料的组织与性能特点,改变材料组织与性能的基本途径以及材料的选用等。全书共分五篇(17章),即金属材料基础、工业用钢、铸钢与铸铁、有色金属材料及非金属材料。

本书经审定为高等院校机械类冷加工专业本科生全国通用教材,也可供从事机械设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/何世禹,金晓鸥编著.—2版.哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2006.3

ISBN 7-5603-0798-1

I.工… II.①何…②金… III.工程材料-高等
学校-教材 IV.TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 008117 号

责任编辑 孙 杰

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.5 字数 401 千字

版 次 1995 年 5 月第 1 版 2006 年 3 月第 2 版

2006 年 3 月第 10 次印刷

印 数 45 001~49 000 册

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

再 版 前 言

本书系根据高等工科院校机械工程材料和物理化学教材编审组制定的对“机械工程材料”课教学基本要求,并按照机械工程材料及物理化学课程教学指导小组会议投标评审意见和要求编写的全国通用教材。全书共分五篇,包括金属材料基础、工业用钢、铸钢与铸铁、有色金属材料及非金属材料。

在“机械工程材料”课教学基本要求中,要求学生在设计机械产品时知道如何选择和使用材料及制定零件的加工工艺。因此,本书的体系以工程上所用材料的使用性能及工艺性能特征为主进行编写,以满足设计-选材-使用的要求。同时,本书详细阐述了各种材料化学成分、组织结构和性能关系的基本概念,便于学生对每种材料的了解与掌握。从内容安排上,本书以工业用钢为重点,结合典型、代表性零件,根据零件的工作条件及失效形式提出对材料使用性能及工艺性能要求,按着碳钢-低合金钢-高合金钢的层次来阐述它们的特征及选用。这样更能加深对各类钢材合金化及加工工艺特征的理解。本书无论在教材体系或内容的安排上均做了改革性的尝试,这种尝试能否取得有益效果要由实践来检验。

本书自第1版出版以来,经过国内许多院校师生的使用,他们认为该教材对培养机械类专业的本科生是适宜的,并提出了许多宝贵意见。随着新材料学科不断发展,作者又对本书进行了补充和调整,进一步适应培养学生的需要。

本书由哈尔滨工业大学何世禹和黑龙江大学金晓鸥主编。何世禹编写了第一、三篇共6章;金晓鸥编写了第二、四篇共8章;哈尔滨工业大学邢玉清编写了第五篇共3章,全书由洛阳工学院席聚奎教授主审。

本书在编写过程中得到哈尔滨工业大学张吉人教授的指导,对教材体系、章节安排、内容取舍等提出了宝贵意见。南京工学院戴枝荣、洛阳工学院吴磊等对本书也提出了中肯的意见。哈尔滨工业大学张玉兰及何慧为本教材提供了显微组织照片等资料,在此一并表示感谢。

本书系机械类冷加工专业大学本科的技术基础课教材,也可供从事机械类冷加工专业的工程技术人员参考。

由于编者水平有限,本书不足之处在所难免,衷心希望批评指正。

何世禹 金晓鸥
2005年12月于哈工大

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第一篇 金属材料基础

第1章 纯金属的晶体结构与组织	(4)
1.1 纯金属的晶体结构	(4)
1.2 纯金属的结晶与组织	(13)
第2章 二元合金的相结构与组织	(18)
2.1 合金的相结构	(18)
2.2 二元合金相图	(21)
2.3 二元合金相图的基本类型及 相图分析	(22)
2.4 铁碳合金相图	(30)
第3章 金属的塑性变形与再结晶	(37)
3.1 金属的变形过程	(37)
3.2 塑性变形对金属组织与性能 的影响	(40)
3.3 金属的回复与再结晶	(43)
3.4 金属的热加工	(45)
3.5 金属的断裂	(47)
第4章 评定金属材料在应力、介质作用下的 性能指标	(48)
4.1 金属材料在静载荷作用下的 性能指标	(48)
4.2 金属材料在其他载荷作用下的 性能指标	(52)
4.3 金属的缺口效应与断裂韧性	(55)
4.4 金属的磨损与接触疲劳	(57)
4.5 应力腐蚀与氢脆	(60)

第二篇 工业用钢

第5章 改善钢的组织与性能的基本途径 ...	(64)
5.1 冶金质量对钢性能的影响	(64)
5.2 碳钢的热处理	(70)
5.3 钢的合金化	(90)
第6章 构件用钢	(99)
6.1 构件工作条件及性能要求	(99)
6.2 低碳构件用钢的性能特点	(99)
6.3 构件用钢	(104)
第7章 机器零件用钢	(111)
7.1 概述	(111)
7.2 轴类零件用钢	(112)
7.3 齿轮用钢	(122)
7.4 弹簧用钢	(134)
7.5 滚动轴承用钢	(138)
7.6 易切削钢	(142)
7.7 典型零件选材及工艺分析	(144)
第8章 工具材料	(149)
8.1 刀具钢	(149)
8.2 高速钢	(155)
8.3 模具钢	(160)
8.4 量具钢	(166)
8.5 硬质合金	(168)
第9章 特殊钢	(170)
9.1 不锈钢	(170)
9.2 耐热钢及耐热合金	(178)
9.3 耐磨钢	(187)

第三篇 铸钢与铸铁

第 10 章 铸钢	(190)
10.1 铸造碳钢	(190)
10.2 铸造合金钢	(191)
第 11 章 铸铁	(196)
11.1 灰口铸铁	(196)
11.2 可锻铸铁	(200)
11.3 球墨铸铁	(202)
11.4 特殊性能铸铁	(206)

第四篇 有色金属材料

第 12 章 铝、钛及其合金	(210)
12.1 铝及其合金	(210)
12.2 钛及其合金	(217)
第 13 章 铜及轴承合金	(221)
13.1 铜及其合金	(221)
13.2 轴承合金	(227)
第 14 章 提高机械产品质量的基本途径 ...	(232)
14.1 机械产品的失效分析	(232)

14.2 提高机械产品质量的基本途径 ...	(234)
------------------------	-------

第五篇 非金属材料

第 15 章 高分子材料	(240)
15.1 高分子材料的基本知识	(240)
15.2 高分子的结构	(242)
15.3 高分子的性能	(245)
15.4 常用高分子材料	(250)
第 16 章 陶瓷材料	(255)
16.1 概述	(255)
16.2 陶瓷的组成与结构	(255)
16.3 陶瓷的性能	(259)
16.4 常用陶瓷材料及其应用	(261)
第 17 章 复合材料	(264)
17.1 概述	(264)
17.2 复合理论简介	(266)
17.3 复合材料的性能	(268)
17.4 复合材料的应用	(270)
附录 常用塑料、复合材料缩写代号	(273)
参考文献	(274)

绪 论

材料是人类从事生产和生活的物质基础。材料与人类进化有着密切的关系,它是衡量人类社会文明程度的标志之一。因此,历史学家按照人类使用材料的种类及性质差异,把历史时代分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等。今天人类已经进入了人工合成材料时代。

迄今为止,人类发现和制造的材料类别相当繁多。机械工程材料主要是指用于机械工程、电器工程、建筑工程、化工工程、航空和航天工程等领域中的材料。

目前,人类所使用的机械工程材料,按化学成分可分为以下四大类:金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料。

同人类历史发展一样,机械工程材料也有一个发展过程。其发展的推动力是人类不断地创造新型机械与装置,对材料提出了更高的要求,当已有的材料满足不了要求时,迫使人类不断地研制新材料。以交通运输工具而言,它经历了这样的发展过程:人力车→马车→汽车→火车→飞机→人造卫星→宇宙飞船。不难看出,不同的交通运输工具,其工作条件差异很大,当然对材料的性能要求也不一样。而且这些交通运输工具越来越先进,对材料的性能要求也越来越高,越来越严格,这必然推动材料的发展,使新材料的不断出现。新的材料出现又使新运输工具的制造成为可能。因此,材料与机器及装置的更新在不断地进行着。

在人类研究材料发展的历史长河中,发现材料的性能与它的组织结构有密切关系。因此要研究材料,就必须先了解材料的性能、组织与结构的基本概念。

工程材料的性能主要是指材料的使用性能及工艺性能。

材料的使用性能是指在服役条件下,能保证安全可靠工作所必备的性能,其中包括材料的机械性能(力学性能)、物理性能、化学性能等。对绝大多数工程材料来说,机械性能是最主要的使用性能。

材料的工艺性能是指材料的可加工性。其中包括锻造性能、铸造性能、焊接性能、热处理及切削加工性能等。

材料的组织是指借助于显微镜所能观察到的材料微观组成与形貌。因此,又称显微组织。

材料的结构是指构成材料的基本质点(原子、离子或分子等)的结合与排列的情况。它表明材料的构成方式。

研究表明,材料的性能与组织、结构间存在着因果关系。也就是说,材料的性能是由它的组织结构决定的。因此,要想改变材料的性能,必须改变它的组织或结构。工程上用来改变材料组织与结构的主要途径是通过改变它的化学成分及加工工艺来实现的。由此可以得出这样的结论:材料的化学成分、组织结构和加工工艺与材料的性能之间存在着一定的规律性。它成为材料科学的基本理论,是不断研制新材料、新工艺及新技术的依

据。

不言而喻,机械工程材料也是以此理论为基础的。但对于非材料专业的人员来说,其任务主要是从事各种机械产品的设计。要求设计者应根据零件的工作条件与性能要求,学会合理地选择和使用材料,科学地编制出机械零件的加工工艺。因此,机械工程材料教材编写的内容与重点显然与材料专业不同。它主要是在介绍有关材料的性能与组织结构等基本概念的基础上,重点掌握已有各类工程材料的使用性能及加工工艺特点,为合理地选材及编制零件的加工工艺奠定基础,这是培养高水平的设计者不可缺少的课程。

第一篇

金属材料基础

金属材料是指以金属键来表征其特性的材料,它包括纯金属及其合金。可分为两大类:黑色金属和有色金属。

黑色金属:指以铁为基本元素的合金,如钢和铸铁等。

有色金属:指钢铁以外的各种金属材料,如铝、镁、铜及其合金等。

由于金属材料具有良好的机械性能,因而无论在过去还是现在,它是机械工程材料中应用最广泛的基本材料。人类对它的认识比其他材料更全面、更深刻,已形成了系统的理论。

所谓金属材料基础,主要是指金属的组织与结构,金属材料在外力作用下的行为以及性能的基本概念,这是掌握金属材料各项性能的基本内容。

第 1 章 纯金属的晶体结构与组织

1.1 纯金属的晶体结构

在自然界中,人类已经发现的化学元素有 81 种属于纯金属。但工业上的纯金属从来就不是绝对纯的,由于提取方法不同,其纯度也有差异。通常所说的纯金属一般是指没有故意加入其他元素的工业纯金属,往往含有某些微量的杂质元素。

纯金属是人类在历史上应用最早的金属,首先是金,其次是铜。纯金属的强度远低于合金,因而随着机械工业的发展,作为机械工程材料很少应用,而主要是使用它的合金。纯金属主要是作为合金的基础金属及合金元素来使用。常用的纯金属有:Fe、Cu、Al、Mg、Ti、Cr、W、Mo、V、Mn、Zr、Nb、Co、Ni、Zn、Sn、Pb、Sb 等。

尽管纯金属在工程上使用量不多,但它是合金的基本材料,是进一步研究合金的重要理论基础,因此,首先要研究纯金属的晶体结构与组织。

一、纯金属的晶体结构

在研究自然界固态物质最本质点(原子、离子或分子等)的排列中发现,大多数的固态物质,其最本质点的排列都有一定的规律性,同时还具有规则的外形和一定的熔点等特征,如食盐、单晶硅等。人们把这类固态物质称为晶体。反之,为非晶体。

金属一般均属晶体。但应注意人们对某些金属采用特殊的工艺措施,也可使固态金属呈非晶态。在本教材中主要研究金属的晶体性质与结构。

金属的晶体结构是指构成金属晶体中的原子(离子)的结合与排列情况。

在基础化学中已知,金属晶体中的原子(离子)之间是靠金属键结合的。

金属晶体中原子(离子)排列的规律性,可由 X 射线结构分析方法测定。结果表明,原子(离子)排列均有其周期性。金属晶体中原子(离子)排列的周期性可用其基本几何单元体——“晶胞”来描述。

(一)晶胞

金属的晶体结构,一般是通过如下的假设与抽象来描述的。

已知,组成金属晶体中的原子(离子)都是在它自己固定的位置上永远做热振动的。要把这种状态的原子(离子)排列的规律性反映出来是有困难的。因而可先假设原子是处于静止不动状态中,并根据原子结构模型假设它们都是些刚性小球。这样便可把金属晶体中原子(离子)排列状况抽象为是由一个个刚性小球按照一定的几何规律堆积起来的,如图 1.1(a)所示。但用这种几何图形来描述晶体中原子(离子)排列的规律性并不太方便,因为在晶体内部的原子(离子)排列情况从图形中不易看得出来,为此,又进一步抽象,把晶体中原子(离子)所在的位置——原子振动中心,看做为一些结点,并用一些线条把这

些结点联接起来,构成空间几何格架,称为“晶格”,如图 1.1(b)所示。这样用晶格就可以把晶体中原子排列的规律性反映出来。但由于金属晶体中原子排列是有周期性的,没有必要研究全部晶格,只要能够从晶格中取出一个单元体,它具有整个晶体一切几何特征就可以。从而抽象出用“晶胞”这个名词来描述晶体中原子(离子)排列的周期性。

因此可定义晶胞是用来说明金属晶体中原子(离子)排列的最小的基本几何图形,它可以表征出整个晶体的一切几何特征,如图 1.1(c)所示。由此可见,金属晶体中原子(离子)排列的周期性可理解为由这种晶胞在三维空间中多次重复排列的结果。

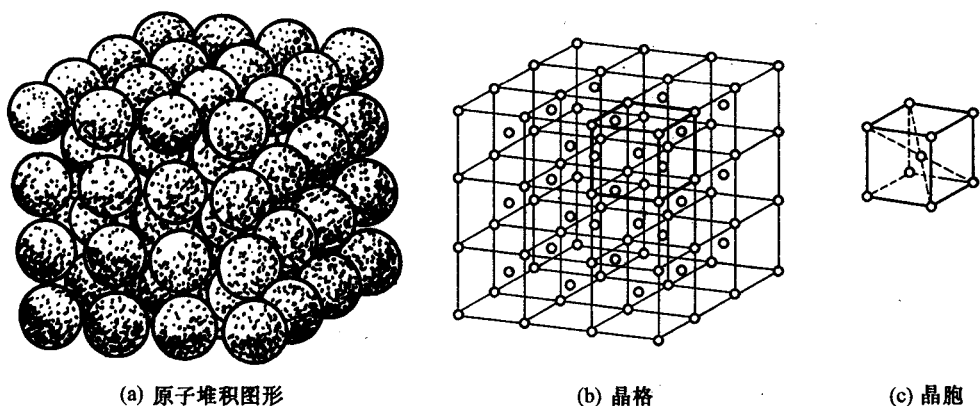


图 1.1 晶体结构示意图

(二)金属晶体的三种典型晶胞

虽然金属在固态都是晶体,但各种金属的晶体结构并不完全相同。工业上常用的金属中,除少数具有复杂晶体结构外,绝大多数金属都具有比较简单的晶体结构。其中最常见的金属晶体结构有三种类型:体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。图 1.2 分别表示出了三种金属结构的晶胞。

室温下的纯铁、铬、钨、钼、钒、铌等金属的晶体结构为体心立方。911 ~ 1 392℃的铁、

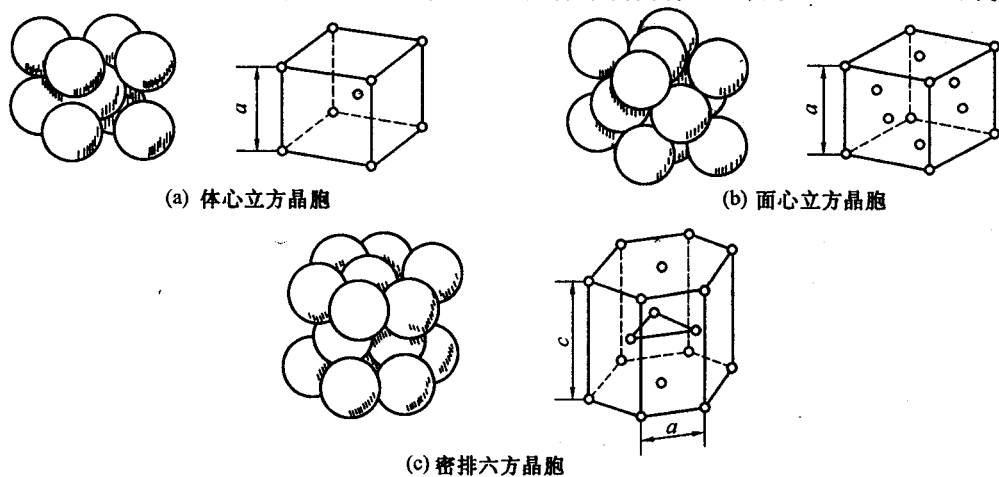


图 1.2 常见金属的晶胞

铜、铝、金、银、钴等为面心立方结构。镁、铍、锌等为密排六方结构。

由于金属的晶体结构类型不同,金属的性能也不同。具有相同晶胞类型的不同金属,其性能亦不同,这主要是由晶胞特征不同决定的。常常用如下的主要几何参数来表征晶胞的特征:晶胞的形状及大小,晶胞中实际的原子数,原子半径,晶胞中原子排列的紧密程度等。

1. 晶胞的形状及大小

为了描述立方晶胞的形状及大小,在晶胞的三个相互垂直的棱边上加一个原子坐标轴 X 、 Y 、 Z ,如图 1.3 所示。晶胞棱边长三个坐标轴上分别用 a 、 b 、 c 表示,并称之为晶格常数,其度量单位为纳米。三棱边间的夹角分别用 α 、 β 、 γ 表示。

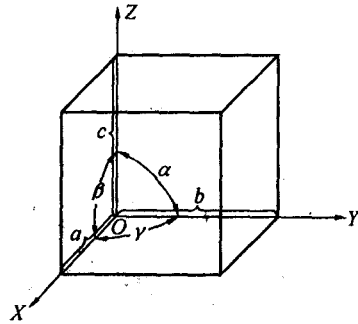


图 1.3 立方晶胞中原子坐标

体心立方和面心立方晶胞都是立方体,即 $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$,只是它们中的结点分布不同,除晶胞的八个角上都有一个结点外,前者在立方体的体积中心还有一个结点,而后者则是在立方体六个面的中心各有一个结点。由于体心立方和面心立方晶胞的晶格常数 $a = b = c$,故可只用 a 来表示,不同金属的晶格常数 a 是不同的。因此,立方体晶胞的形状与大小可用晶格常数 a 及夹角 α 表示。

密排六方晶胞的原子坐标如图 1.4 所示。晶格常数有四个,由 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ 来表示,即晶胞尺寸由六角底面的边长 a 和上下两底面的间距 c 来决定。 c 与 a 之比称为轴比,只有当轴比 $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} \approx 1.633$ 时,上下两底面的原子才与中心三个原子紧密接触,此时才是真正的密排六方结构。

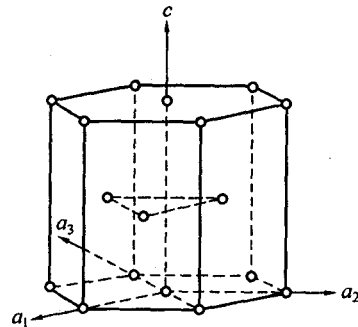


图 1.4 密排六方结构中原子坐标

2. 晶胞中实际的原子数

体心立方晶胞:由于晶体是由许多晶胞堆砌而成的,因此,体心立方晶胞每一个角上的原子是同属于与其相邻的八个晶胞的,每个晶胞实际上只占有它的 $1/8$,如图 1.5(a) 所示。而立方体中心结点上的原子却为晶胞所独有,所以每个晶胞中实际所含的原子数为: $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ (个)。

同理,面心立方晶胞: $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ (个),如图 1.5(b) 所示。密排六方晶胞: $\frac{1}{6} \times 12 + 3 + \frac{1}{2} \times 2 = 6$ (个),如图 1.5(c) 所示。

3. 原子半径

由于金属晶体中的原子可近似地看做具有一定大小的刚性小球,那么原子半径可以

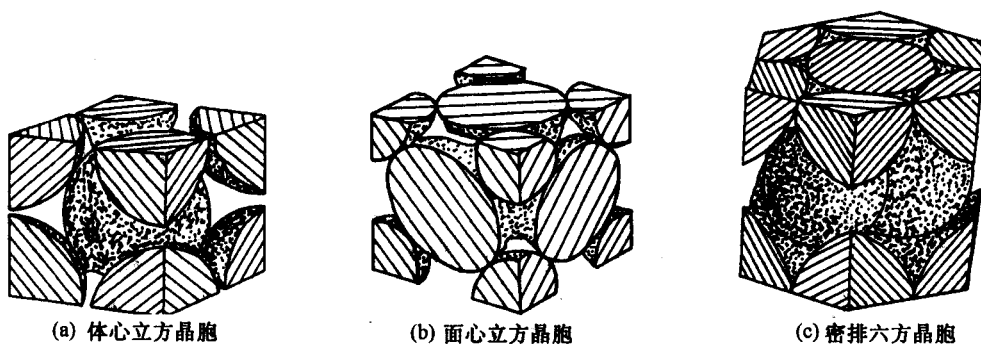


图 1.5 三种典型晶胞实际所含原子数计算示意图

定义为相互接触两个原子的中心距离的一半(即最近原子间距的一半),据此就不难根据晶格常数来推算原子半径,如图 1.6 所示。

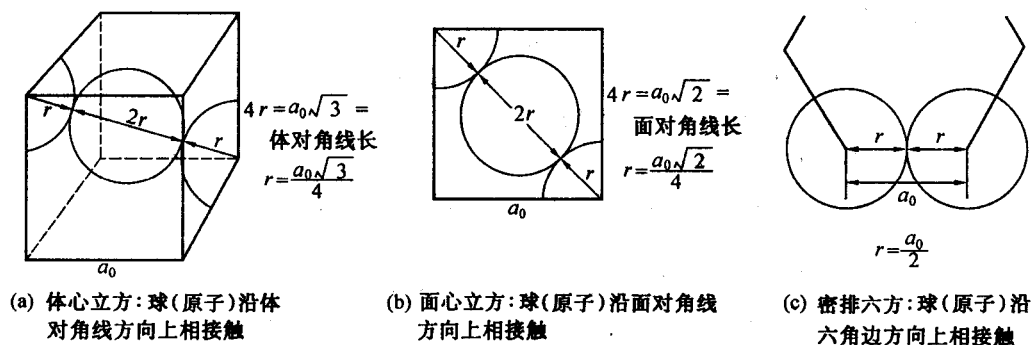


图 1.6 原子半径计算示意图

4. 晶胞中原子排列的紧密程度

通常用配位数、致密度来表征晶体中原子排列的紧密程度。

配位数是指晶体结构中 与任一原子等距离、最近邻的原子数目。显然晶体中配位数越大,晶体中的原子排列越紧密。三种典型金属晶体的配位数如图 1.7 所示。体心立方晶体结构的配位数为 8,面心立方晶体结构的配位数为 12,密排六方晶体结构的配位数为 12。可以看出,体心立方晶体结构原子排列不紧密,另两种晶体结构中原子排列比体心立方的要紧得多。

从晶格配位数看,它不过是各种晶格密度的相对表达法。对晶体原子排列紧密程度进行定量比较,常用致密度。晶格致密度是指晶胞中所含全部原子(将其视为球体)的体积总和与该晶胞体积之比,即

$$K = \frac{nV_{\text{小球}}}{V_{\text{晶胞}}}$$

式中 K ——致密度;
 n ——晶胞原子数;
 $V_{\text{小球}}$ ——原子体积;
 $V_{\text{晶胞}}$ ——晶胞体积。

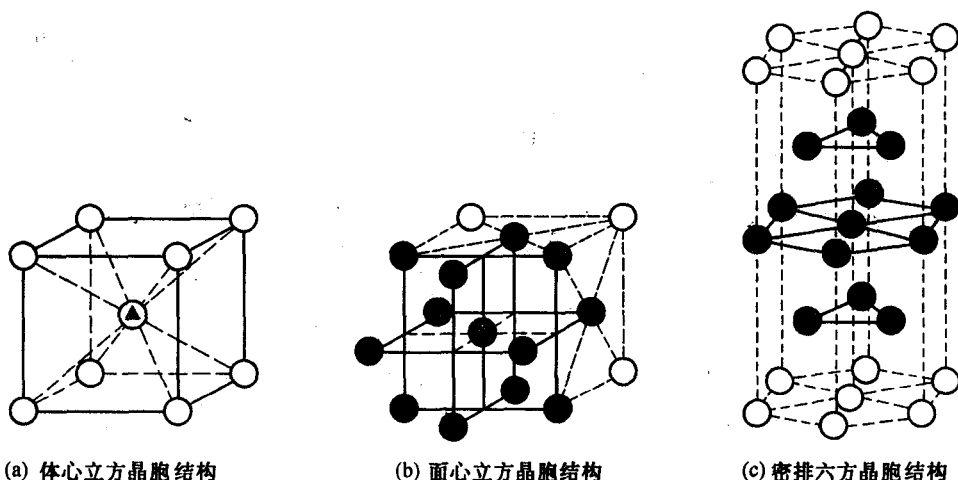


图 1.7 三种晶体结构配位数示意图

由此可计算出体心立方晶胞的致密度为 0.68, 面心立方和密排六方晶胞的致密度均为 0.74。此数值说明, 具有体心立方结构的金属晶体中, 有 68% 的体积被原子所占据, 其余 32% 的体积则为空隙体积。

晶体中的配位数和致密度越大, 说明晶体中的原子排列越紧密。

(三) 多晶型

绝大多数纯金属的晶体结构可以用上述三种晶胞中的一种来描述。但有些金属, 如铁、锰、钴、铬等, 在不同的温度或压力范围内具有两种或几种晶体结构。固态金属有两种或两种以上的晶体结构称多晶型。当条件变化时, 金属会由一种结构转变成另一种结构。称此转变为多晶型转变, 或者称同素异构转变。例如纯铁, 在 911℃ 以下具有体心立方结构, 在 911 ~ 1392℃ 具有面心立方结构, 当温度在 1392℃ 至熔点间又是体心立方结构。

金属的多晶型转变具有重要的意义, 它一方面会导致晶体体积的变化, 同时还会引起性能的改变。由于不同晶体结构的致密度不同, 当金属由一种结构转变为另一种结构时, 必然伴随着体积的突变, 这常用比容变化来表示, 比容是指单位质量晶体的体积。

由于面心立方和密排六方晶体结构的致密度比体心立方结构大, 因而由面心立方或密排六方结构向体心立方结构转变时, 晶体的体积会增加; 反之, 会减少。图 1.8 纯铁的晶型转变的膨胀曲线就说明了这一点。

(四) 晶向与晶面

当人们研究工程材料的各种性能与晶体结构的关系时, 发现不仅是不同晶体结构的金属性能有明显差异, 而且在同一种类型晶胞

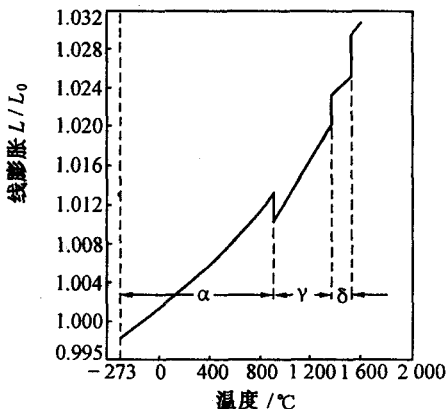


图 1.8 纯铁加热时的膨胀曲线

的不同方向上性能也不同。为了描述这种差异,提出了晶向与晶面的概念。

晶向是指晶格中各种原子列的位向,并用晶向指数来表示。晶向指数的确定方法是:

- (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,一般形式为 $[uvw]$ 。如图 1.9(a) 所示晶向 OA 的晶向指数为 $[111]$ 。

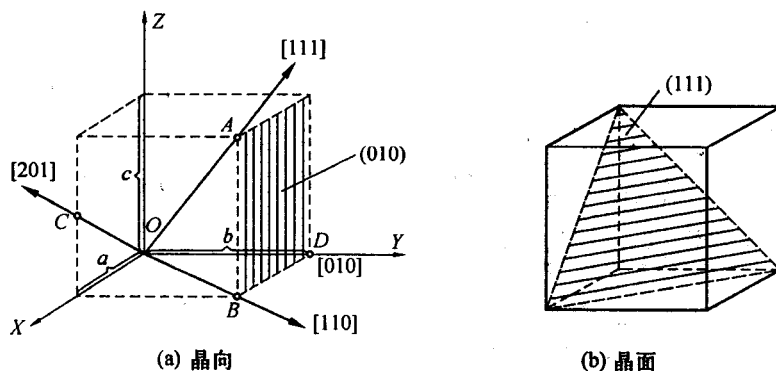


图 1.9 晶向指数和晶面指数求法示意图

晶面是指晶格中不同方位上的原子面。其方位可用晶面指数表示。晶面指数的确定方法如下。

- (1) 沿晶胞的三个坐标轴,由原点起取该晶面在各坐标轴上的截距(以晶格常数值 a 、 b 、 c 分别作为三个相应轴上的度量单位)。
- (2) 取截距的倒数。
- (3) 把它们化为三个最小的简单整数,并括在一个圆括弧中表示。一般形式为 (hkl) ,如图 1.9(b) 所示。

不难看出,不同指数的晶面和晶向上的原子排列密度是不同的。

当我们研究了晶体中原子排列的规律后,再看看晶体的性能特征。

实测表明,晶体的性能在不同方向上具有不同的数值,这种现象称为各向异性现象。它是区别晶体与非晶体的一个重要特征。

晶体的各向异性在单晶体中表现得最为突出。例如,体心立方晶格的 α -Fe 单晶体,其弹性模量 E 就是各向异性的:在 $[111]$ 方向, $E = 284\,000\text{ MPa}$;而在 $[100]$ 方向, $E = 132\,000\text{ MPa}$ 。

二、晶体缺陷

从上可知,用晶胞就能描述金属晶体中的原子排列规律。如有一块纯铁,它在室温下的原子排列规律就是由体心立方晶胞在三维(X 、 Y 、 Z)方向上多次重复堆砌的结晶。称这块纯铁为单晶体。不难理解,所谓单晶体是指晶体中原子排列的位向或方式均是相同的晶体。但是,这是一种理想化的情况。因为实际工程上所使用的材料并非单晶体,绝大多数是多晶体。它是由若干个小的单晶体组成的,多晶体中每个单晶体被称为晶粒。当然,每个晶粒中原子位向是不会相同的,如图 1.10 所示。研究结果还发现,即使在一个晶粒内,实际

金属的结构与理想的状态也有差异。因此,在实际金属中或多或少地存在着偏离理想结构的微观区域,把这种偏离晶体完整性的微观区域称为晶体缺陷。

按照晶体缺陷的几何尺寸大小,可将晶体缺陷分为三类:点缺陷、线缺陷、面缺陷。同样,可通过晶格的几何图形来描述这些缺陷的特征。

点缺陷的特点是在 X 、 Y 、 Z 三个方向上的尺寸都很小,主要是指空位、间隙原子等。空位是指未被原子占据的晶格结点,如图 1.11 所示。

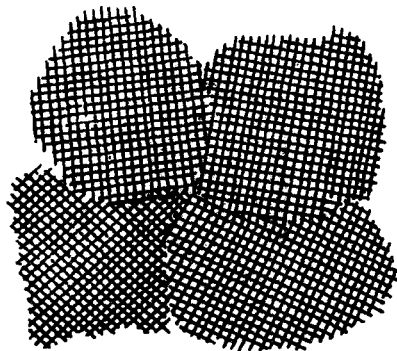


图 1.10 多晶体中不同位向晶胞示意图

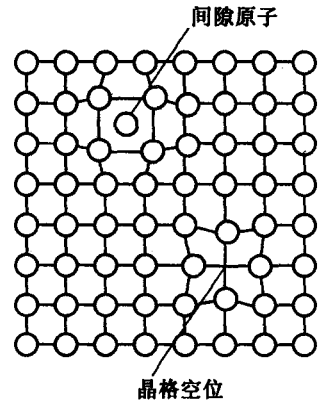
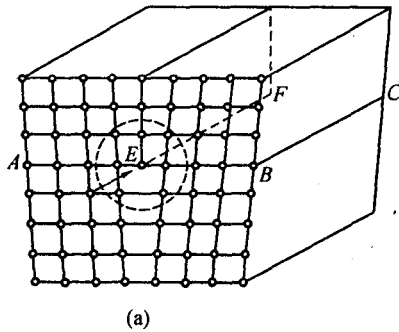


图 1.11 点缺陷示意图

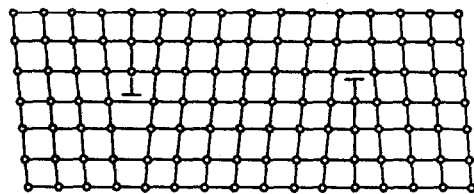
这种缺陷可能是晶体在结晶过程中由于堆积不完善所造成的,也可能由已形成的晶体在高温或外力作用下而引起的。温度的作用尤为明显。晶体中的原子并不是静止不动的,而是在其平衡位置中心做热振动,并受周围原子的约束,处于平衡状态。当温度升高后,原子振动的能量加大,当大到足以克服周围原子的约束,该原子就可能脱离原子振动中心,跑到金属表面或晶格的间隙中,则形成了空位。而跑到晶格间隙的原子称为间隙原子,当然间隙原子也可能是外来溶入的。

晶体中出现空位和间隙原子后,破坏了原子间的平衡,使它们要偏离平衡位置,造成了晶格局部的弹性变形,称此为晶格畸变。因此,空位和间隙原子的出现就破坏了原子排列的规律性。

晶体中的线缺陷就是位错。它是指晶体中的原子发生了有规律的错排现象。按着位错的形态可分为刃型位错和螺型位错。图 1.12 为刃型位错的示意图。



(a)



(b)

图 1.12 刃型位错示意图

刃型位错可以描述为晶体内多余半原子面的刃口,好像一片刀刃切入晶体,中止在内部。沿着半原子面的刃边 EF 线附近,晶格发生很大的畸变,这就是一条刃型位错,晶格畸变中心的连线 EF 就是刃型位错线。位错线并不是一个原子列,而是一个晶格畸变的“管道”。不难看出,在 ABC 晶面上方位错线附近的原子在一定的范围内,将受到垂直于位错线两侧的原子压力。相反,在 ABC 晶面下方位错线附近的原子在一定范围内则受到两侧的拉应力。因此,沿着位错其晶格能量总是增加的。为了研究方便,将刃型位错又分为正、负两种,当多出的半个原子面位于晶体的上方时,称正号刃型位错,用符号“ $\perp$ ”表示。反之,若多出的半个原子面是处在晶体下方时,则称为负号刃型位错,以符号“ — ”表示。显然这是相对性的。

晶体中位错可在由液态转变成固态过程中产生,而在固态经塑性变形时,位错更易产生。它在温度和外力作用下还能够不断地运动。因此,晶体中的位错数量在外界条件(温度、外力)作用下会发生变化。为了评定金属中位错数量的多少,常用位错密度来衡量,用符号“ ρ ”表示。

位错密度:指单位体积中所包含位错线的总长度。 ρ 的单位为 $\text{cm}/\text{cm}^3(1/\text{cm}^2)$ 。金属中的位错密度一般在 $10^8 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 范围内波动。

面缺陷包括晶界、亚晶界和孪晶界。

在多晶体材料中有许多晶粒,在任意一个晶粒内,所有原子都是按同一方位和方式排列的。但在相邻两晶粒中其原子排列方位则不同,因而在两个相邻的晶粒之间存在一个过渡区,称此为晶界。这个区域的原子排列与两个晶粒都不相同。如图 1.13 所示。

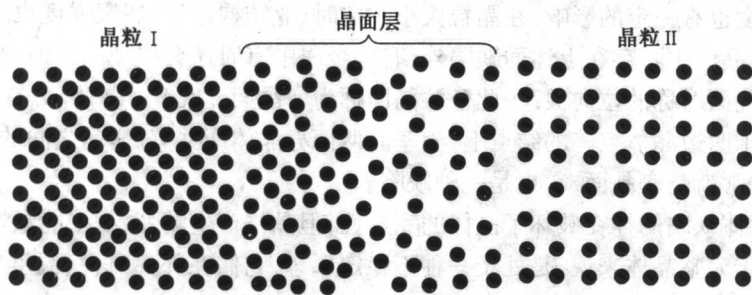


图 1.13 晶内和晶界上的原子分布模型

虽然不能看到晶界处的单个原子,但只要将金属经过腐蚀,就不难在显微镜下看到晶界。如图 1.14 所示。

虽然晶界可能是曲面,实际上晶界具有几个原子间距的厚度,可以认为它是二维的,是面缺陷中的一种。由于相邻晶粒的取向失配,使晶界上原子不能有效地堆积,因此,在晶界上的原子比晶粒内部的原子具有更高的能量。此外,晶界上的原子致密度也较低。晶界上原子排列的这些特点必然会对金属的性能发生重要影响。

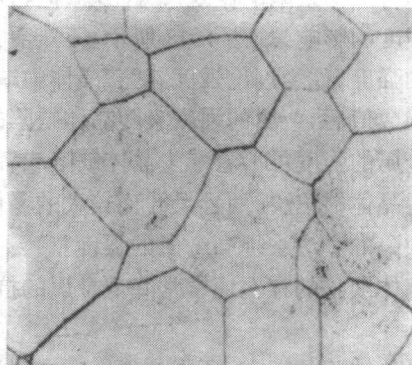


图 1.14 纯金属铅的晶界