

■ 普通高等教育机械工程及自动化专业规划教材

工程材料基础

邢建东 主编

工 程 材 料 基 础
工 程 材 料 基 础
工 程 材 料 基 础
工 程 材 料 基 础

SAFETY PINION.



普通高等教育机械工程及自动化专业规划教材

工 程 材 料 基 础

主 编 邢建东

副主编 高义民 范志康

参 编 梁工英 施卫 李梅娥 鲍崇高

主 审 杨根仓



机 械 工 业 出 版 社

本教材根据教学改革的需求,本着重基础、宽知识面的精神,以学生毕业后可能接触到的主要材料和日益引起人类重视的环保问题出发,介绍常用材料的基本知识和材料的环境行为。全书共分为三篇十六章:第一篇为“结构材料”,从材料应用的角度出发着重介绍金属材料、非金属材料的基本知识、基本性能及应用特点,该部分是本教材的基本内容;第二篇为“功能材料”,介绍目前常用功能材料的基本原理及特点;第三篇为“材料的环境行为”,介绍材料的环境负荷、环境性能以及环境材料的基本概念。三篇的内容既相互独立又具有一定的关联性,便于在组织教学过程中灵活选用。

本教材可作为机械工程及自动化、能源与动力工程、化学工程、工程力学、管理工程等专业的大学本科学生教材使用,参考学时数为 50~64 学时。也可供相应专业的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料基础/邢建东主编. —北京:机械工业出版社, 2004.1
普通高等教育机械工程及自动化专业规划教材
ISBN 7-111-12978-4

I. 工... II. 邢... 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(2003)第 078084 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王霄飞 加工编辑:董连仁 张祖凤

版式设计:冉晓华 责任校对:张媛

封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.75 印张·456 千字

定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育机械工程及自动化专业 规划教材编委会

顾 问 钟 掘 (院士)

主 任 于德弘

副 主 任 邢建东 迟毅林 王润孝

委 员 (排名不分先后)

陈国定 吴序堂 赵汝嘉 殷国富

段宝岩 陈晓南 陈花玲 梅雪松

官德娟 孙国雄 刘全坤

策划单位 机械工业出版社

西安交通大学

序

改革开放以来,我国高等教育的专业目录经过了3次大的调整。1987年的专业目录由原来的1400多种调整到740种,1993年又调整到504种,1998年教育部颁布的新专业目录再调整到目前的249种。专业目录的调整,改变了过去狭窄的“对口专业教育”观念,拓宽了专业知识范围,使我国高等教育在专业设置上与发达国家比较接近,也有利于培养具有较宽知识结构和扎实理论基础的复合型人才。

在这一系列的专业调整及教学改革过程中,“机械工程及自动化”大机械类专业教学计划有了根本性的变化,不仅根据机械工程学科的发展增加了一些课程,而且对原来设置的课程也作了较大调整。显然原来使用的专业教材已不能适应现代机械工程及自动化专业的教学要求,编写一套具有较宽知识面且能较全面反映当前机械制造领域发展的新理论、新方法与新技术的教材就显得非常迫切。

正是在这一背景下,西安交通大学机械工程学院与机械工业出版社共同策划、组织了我国西部地区部分高校“机械工程及自动化”专业系列教材的编写工作。参加编写的学校有西安交通大学、西北工业大学、西安电子科技大学、西安建筑科技大学、西安理工大学、昆明理工大学、四川大学等。目前确定的系列教材包括《机械工程测试技术》、《先进制造系统导论》、《工程材料基础》、《机械设计基础》、《机械设计方法及工程图学》、《数控技术》、《网络化计算机辅助设计与制造技术》、《先进设计方法》、《材料成形技术基础》、《机械制造技术基础》等。这些教材初步形成了机械工程及自动化专业主干课程的教材框架。其编写的定位点是适应于大机械类专业本科生学习。教材特别注重拓宽基础知识、加强工程背景和培养学生的工程实践能力。以期形成一个新的、适应于21世纪我国现代化建设和市场经济发展的大机械类专业教材体系。

系列教材的出版符合教学改革的精神,注重教材内容的创新性和

系列的整体性，注重教学和人才培养的规律，同时反映了西部地区部分高校教学改革的成果，具有明显特色。此系列教材将为我国机械工程及自动化专业建设和高等教育的教材建设作出积极的贡献。希望这套系列教材的出版能引起各校的关注与帮助，在实际使用中不断进行修订和完善，为我国高等教育机械类人才的培养不断作出贡献。

印8/2

前 言

随着我国高等教育与世界接轨,高等教育向着宽口径、高兼容性发展的趋势,要求学生在有限的学时内掌握更多、更丰富的知识,以适应工业高速发展的要求。尽管国内关于机械工程类材料的教材较多,但基本上只涉及到金属材料及非金属材料。“材料”的进步是人类发展的标志,也是一切“工程”得以实现的基本物质。因此,对于工科各专业的本科生,在掌握工程材料的基础知识并对目前飞速发展的各种材料有一个基本的了解和掌握是非常必要的。同时,随着 21 世纪的到来,人类对于环保问题日益关注,材料对环境的影响已日显突出,而到目前为止在现有的材料教材中很少涉及到材料环境行为的问题。显然,21 世纪培养出的工程类高级人才,在考虑材料的制备、生产直至选用的过程中,不能没有材料的环境意识。本教材正是从这一观点出发,希望在有限的学时内,在掌握材料基本知识的同时,使学生建立起材料环境行为的概念,并对工程领域使用日益增多的功能材料有一个基本的了解。

本教材是面向“机械工程及自动化”大专业,即含盖现有的“机械工程”和“能源与动力工程”各专业本科生的一门必修专业基础课教材,也可供“化学工程”、“工程力学”、“管理工程”等相关专业的大学本科学生使用。本教材共分为三个相对独立的部分:

第一部分为“结构材料”,着重介绍金属材料与非金属材料的基本理论、基本性能及应用特点。该部分是本教材的基本内容。

第二部分为“功能材料”,介绍目前常用功能材料的基本原理及特点。

第三部分为“材料的环境行为”,介绍材料的环境负荷、环境性能以及环境材料的基本概念。

全书建设总学时为 64 学时,各校也可根据本校学时数灵活选用,并安排部分内容的自学。

全书共分为 16 章,其中:第一、二、五、六章由西安交通大学高义民教授编写;第三、四、七章由西安交通大学梁工英教授编写;第八章由西安交通大学李梅娥博士编写;第九、十三章由西安理工大学范志康教授编写;第十、十一、十二章由西安理工大学施卫教授编写;第十四、十五、十六章由西安交通大学邢建东教授编写。此外,西安交通大学鲍崇高博士参与了第一篇部分章节的协编工作。全书由邢建东教授担任主编,高义民教授、范志康教授担任副主编,并共同

负责全书的统稿及修改工作。

本书的编写大纲,经由机械工业出版社教材编辑室与西安交通大学机械工程学院共同策划与组织的“西部地区部分高校机械类主干课系列教材”编审委员会审定。编者希望本教材的出版对我国“机械工程及自动化”专业的教学改革及教材建设做出积极的贡献。

本教材由西北工业大学杨根仓教授担任主审,对教材的章节编排、书稿内容及文字进行了认真的审阅,提出了许多宝贵的修改意见,这对于全面提高本教材的质量起到了重要的作用,编者对此表示衷心的感谢。

编者衷心地希望使用本教材的教师、工程技术人员及学生在使用和阅读本教材后,能提出宝贵的意见和建议,共同提高该教材的质量。

编者

2003年4月于西安交通大学

目 录

序 前言

第一篇 结 构 材 料

第一章 金属晶体结构与合金相结构	1
第一节 金属的晶体结构	1
第二节 实际金属的晶体结构	6
第三节 合金的相结构	7
第四节 二元合金相图	12
第五节 铁碳合金相图	21
第六节 合金性能与相图关系	34
习题与思考题	36
第二章 钢铁材料的热处理	38
第一节 钢在加热时的转变	38
第二节 钢在冷却时的转变	42
第三节 钢的普通热处理	51
第四节 钢的表面热处理	64
第五节 铸铁热处理	70
习题与思考题	75
第三章 黑色金属材料	76
第一节 碳钢	76
第二节 合金钢	80
第三节 铸铁	115
习题与思考题	123
第四章 非铁合金	125
第一节 铝及铝合金	125
第二节 铜及铜合金	136
第三节 高比强度合金	150
第四节 铸造轴承合金	154
习题与思考题	157
第五章 非金属材料	159

第一节 高分子材料	159
第二节 陶瓷材料	174
习题与思考题	179
第六章 复合材料	180
第一节 概述	180
第二节 复合材料的增强相及其作用机制	183
第三节 常用复合材料	187
习题与思考题	197
第七章 材料表面改性技术	198
第一节 热喷涂技术	198
第二节 高能束表面处理技术	204
第三节 气相沉积技术	212
习题与思考题	215
第八章 机械零件失效及选材原则	217
第一节 机械零件的失效分析	217
第二节 机械零件的选材方法	225
第三节 力学性能指标在选材中的意义	231
习题与思考题	237
参考文献	238
 第二篇 功能材料 	
第九章 超导材料和形状记忆合金	240
第一节 超导材料	240
第二节 形状记忆合金	242
习题与思考题	245
第十章 半导体材料	246
第一节 半导体材料的分类	246
第二节 半导体中的电子状态及特征	247
第三节 半导体材料的应用	252
习题与思考题	257
第十一章 光学材料	258
第一节 光纤材料	258
第二节 半导体发光材料	266
第三节 光电显示材料	273
习题与思考题	278
第十二章 功能薄膜及功能转换材料	279
第一节 导电薄膜材料	279

第二节 光电材料	284
第三节 磁光材料	289
第四节 压电材料	291
习题与思考题	297
第十三章 非晶态合金、磁性材料及纳米材料	298
第一节 非晶态合金	298
第二节 磁性材料	301
第三节 纳米材料	306
习题与思考题	308
参考文献	309

第三篇 材料的环境行为

第十四章 材料与环境的关系	310
第一节 对环境问题的认识	311
第二节 对现代生活方式的认识	316
第三节 地球的资源问题	319
第四节 材料的环境协调性评价	322
习题与思考题	327
第十五章 清洁生产	328
第一节 清洁生产的概念及评价方法	328
第二节 实施清洁生产的主要途径	331
第三节 ISO 14000 环境管理体系	336
第四节 企业实施清洁生产的事例	339
习题与思考题	343
第十六章 材料的环境协调性设计	344
第一节 金属材料的环境协调性设计	344
第二节 有机高分子材料的环境协调性设计	354
第三节 无机非金属材料的环境协调性设计	359
习题与思考题	363
参考文献	364

第一篇 结构材料

第一章 金属晶体结构与合金相结构

金属材料通常都是晶体。金属的晶体结构是指金属材料内部原子排列的规律，它决定着材料的显微组织特性和材料的宏观性能。合金是指两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素通过熔炼、烧结或其它方法所制成的具有金属特性的物质。在金属或合金中，具有化学成分相同、结构相同，并与其它部分有界面分开的均匀组成部分称之为相。合金的性能一般都由组成该合金的各相的成分、结构、形态、特性及各相的组合情况而定。

第一节 金属的晶体结构

一、晶体结构的基本概念

晶体中原子（或分子）在空间呈规则排列的方式称为晶体结构。晶体中的原子都是在它的平衡位置上不停地振动着。但为了便于讨论，通常假设它们是一些静止不动的小球，各种晶体结构就可以看成是这些小球按一定的几何方式紧密排列堆积而成的。图 1-1a 是简单立方晶体的原子排列示意图。

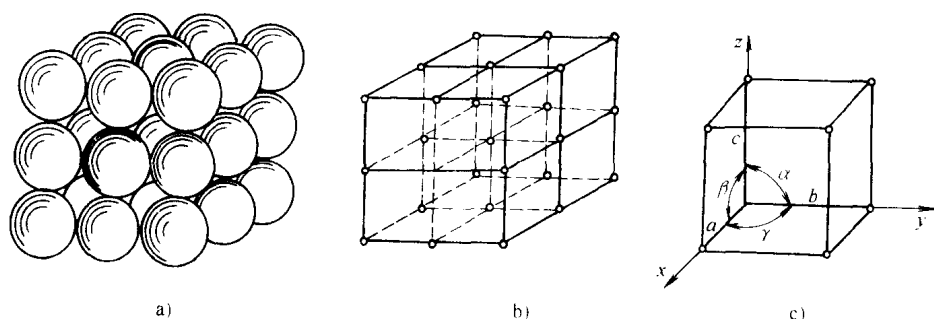


图 1-1 简单立方晶格、晶胞示意图

a) 晶体中原子排列示意图 b) 晶格 c) 晶胞

这种晶体结构的“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规律的细节。我们可以把原子看成是一个几何质点，把原子之间的相互联系与作用假想为几何直线，这样一来，晶体结构就可以直接用几何学来讨论了。这

种用于描述原子在晶体中排列规律的三维空间几何点阵称为晶格。图 1-1b 是简单立方晶格的示意图。晶格中能够代表晶格特征的最小几何单元，称之为晶胞。图 1-1c 是一个简单立方晶格的晶胞示意图。晶胞在空间的重复排列就构成整个晶格。因此，晶胞的特征可以反映出晶格和晶体的特征。晶胞的大小以其各边尺寸 a 、 b 、 c 表示，称为晶格常数，以 $\text{\AA}$ （埃）为单位来度量（ $1\text{\AA}=1\times 10^{-8}\text{cm}$ ）。晶胞各边之间的夹角分别以 α 、 β 及 γ 表示。在立方晶格的情况下，其晶格常数 $a=b=c$ ，而夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，因此在立方晶格中只取一个晶格常数便足以表征其尺寸。

各种晶体由于其晶格类型和晶格常数不同，则呈现出不同的物理、化学及力学性能。

二、典型的金属晶格

简单立方晶格只见于非金属晶体中，在金属中，约百分之九十以上的晶体属于以下三种典型晶格类型。

1. 体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞如图 1-2 所示，由八个原子构成一个立方体，在立方体的中心还有一个原子。其晶格常数 $a=b=c$ ，故常以一个常数 a 表示。每个体心立方晶胞中原子个数为两个，即 $\frac{1}{8}\times 8+1=2$ 个。属于这类晶格类型的金属有 α -Fe（ 910°C 以下的纯铁）、铬（Cr）、钼（Mo）、钨（W）、钒（V）等。

2. 面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞如图 1-3 所示，由八个原子构成一个立方体，并在立方体的六个面的中心各有一个原子。因晶胞也是一个立方体，故也只用一个晶格常数 a 表示。每个面心立方晶胞中有四个原子，即 $\frac{1}{8}\times 8+\frac{1}{2}\times 6=4$ 个。属于这种晶格类型的金属有 γ -Fe（ 912°C 、 1394°C 的纯铁）、铜（Cu）、铝（Al）、镍（Ni）等。

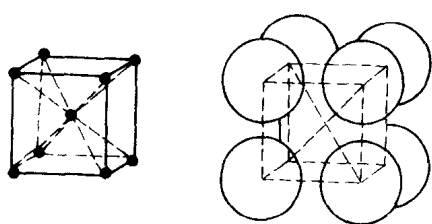


图 1-2 体心立方晶胞

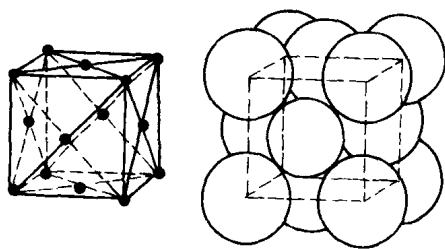


图 1-3 面心立方晶胞

3. 密排六方晶格 密排六方晶格的晶胞如图 1-4 所示，是一个六方柱体。柱体的上、下底面六个角及中心各有一个原子，柱体中心还有三个原子。密排六

方晶胞通常需要两个晶格常数才能表示，一个是六边形底面的边长 a ；另一个是六方柱体的高度 c 。分析表明，密排六方晶格的晶格常数 c 和 a 之比为 1.633 时，其晶格内的原子才是真正密集排列的。每个密排六方晶胞中有 6 个原子，即 $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个。属于这类晶格类型的金属有铍 (Be)、镁 (Mg)、锌 (Zn)、镉 (Cd) 等。

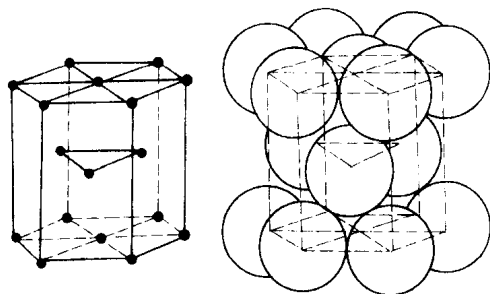


图 1-4 密排六方晶胞

上述三种晶格中，原子排列的致密程度不同。经计算表明：体心立方晶格中原子占总体积的 68%；

而面心立方晶格和密排六方晶格中，有 74% 的体积被原子所占据。这就是在对钢铁进行热处理时，由一种晶格转变为另一种晶格时产生比体积变化的重要原因之一。

三、金属晶体结构的一些重要参数

用于表征金属晶体结构特点的参数除前面提到的晶胞原子数外，还有原子半径、配位数、致密度等。

1. 原子半径 原子半径是指晶胞中原子致密度最大的方向上相邻两原子间的平衡距离的一半，或晶胞中相距最近的两个原子间距离的一半。由此可以很容易推算出体心立方晶格中，原子半径 $r = (\sqrt{3}/4)a$ ；面心立方晶格的原子半径 $r = (\sqrt{2}/4)a$ ；密排六方晶格中，在理想的密排情况下（即 $c/a = 1.633$ 时），晶胞中原子相距最近的是上下底面的对角线，其值 $d = a$ ，故原子半径 $r = (1/2)a$ 。

2. 配位数 指晶体结构中，与任一原子最临近、等距离的原子数目。配位数越大，晶体中原子排列便越紧密。根据三种典型晶体结构特点可知，体心立方晶格的配位数为 8，面心立方晶格和密排六方晶格的配位数均为 12。

3. 致密度 晶格的致密度是用来表示晶体中原子排列紧密程度的。致密度的定义是：每个晶胞中原子所占的总体积与晶胞的体积之比。经过计算可知：体心立方晶格的致密度为 0.68；面心立方晶格和密排六方晶格的致密度都是 0.74。晶格致密度也称为晶格堆积因数。

三种典型金属晶格的晶格参数见表 1-1。由表可以看出，无论从晶格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均是最紧密的，这一点对于金属的许多性能有很大影响。但是，致密度只是决定晶体某些性能的重要参数之一，而晶体中不同晶面和晶向上原子排列的方式也是决定晶体许多性能的另一个重要因素。

表 1-1 三种典型金属晶体的晶格常数

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	$(\sqrt{3}/4) a$	8	0.68
面心立方	4	$(\sqrt{2}/4) a$	12	0.74
密排六方	6	$(1/2) a$	12	0.74

四、晶面指数和晶向指数

晶体中通过一系列原子中心的平面称为晶面。通过两个以上原子中心的直线为原子列，各原子列的方向称为晶向。每一组平行的晶面和晶向都可用一组数字来标定其位向，这组数字分别称为晶面指数和晶向指数。

(一) 晶面指数的确定方法

1) 以晶胞的三个棱边为坐标轴 (x 轴、 y 轴、 z 轴)，坐标原点可以选在结点上，但不应选在待标定的晶面上。

2) 以晶胞的棱长 a 、 b 、 c 为相应坐标轴的度量单位，测量出待标定晶面对坐标轴的截距。例如：某晶面的截距分别为 ∞ 、2、1。

3) 取各截距的倒数，并按比例化为最小整数。上述截面的倒数是 $1/\infty$ 、 $1/2$ 、1，化为最小整数为 0、1、2。

4) 将这三个最小整数依次写在圆括号内，数之间不用标点隔开，即 (012)。(012) 就是这个待定晶面的晶面指数。

一般情况下，晶面指数是以 (hkl) 的普通形式表示。如果所求晶面在坐标轴上的截距为负值，则应在相应的指数上方加“-”号，如 $(\bar{h}kl)$ ， $(h\bar{k}l)$ 等。

在立方晶格中，具有重要意义的晶面及晶面指数是图 1-5 中所示的 (100)、(110) 及 (111) 三种晶面。

值得指出的是，晶面指数并非仅指某一晶格中的某一个晶面，而是泛指该晶格中所有那些与其平行的方位相同的晶面。在同一种晶格中，有些晶面虽然空间位向不同，但其原子排列情况相同，如立方晶格中的 (100)、(010)、(001)、 $(\bar{1}00)$ 、 $(0\bar{1}0)$ 及 $(00\bar{1})$ 等，这些晶面均属于一个晶面族，若无必要予以区别，则可把这些晶面统一用一种晶面指数 $\{100\}$ 来表示。也就是说，

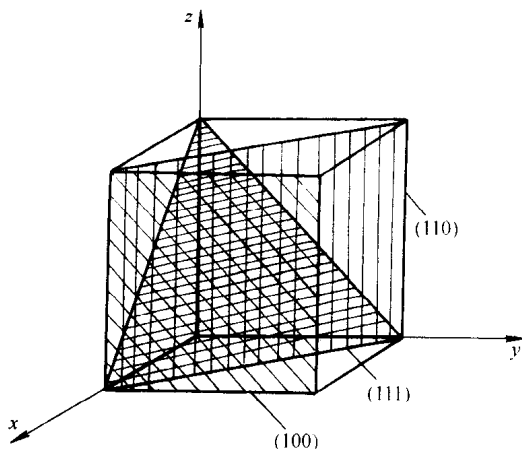


图 1-5 立方晶格中三种重要晶面及晶面指数

$\{hkl\}$ 不仅包括一系列互相平行的某组晶面，而且还包括若干组空间位向不同但其原子排列情况相同的晶面。

(二) 晶向指数的确定方法

1) 以晶胞的棱边作为坐标轴 (x 轴、 y 轴、 z 轴)，原点选在待定晶向的直线上。

2) 以棱长 a 、 b 、 c 分别为相应坐标轴的度量单位，求出待定晶向上某点 (任选) 的三维坐标值，如：-2、2、0。

3) 将坐标值按比例化为最小整数值，并依次写在方括号内，数间不用标点隔开，负号写在数的顶部。则上例为 $[\bar{1}10]$ 。 $[\bar{1}10]$ 就是这个待定晶向的晶向指数。实际上，它代表的是与之平行的所有晶向。

对于立方晶系常用晶向指数是 $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ ，如图 1-6 所示。

与晶面指数的表示法相似， $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 等具有相同原子排列的晶向均属于同一个晶向族，若无必要予以区分时，可笼统地用 $\langle 100 \rangle$ 符号表示。

比较图 1-5 和图 1-6 可以看出，在立方晶格中，凡指数相同的晶面与晶向彼此是互相垂直的。如 $[111] \perp (111)$ 、 $[110] \perp (110)$ 、 $[100] \perp (100)$ 。

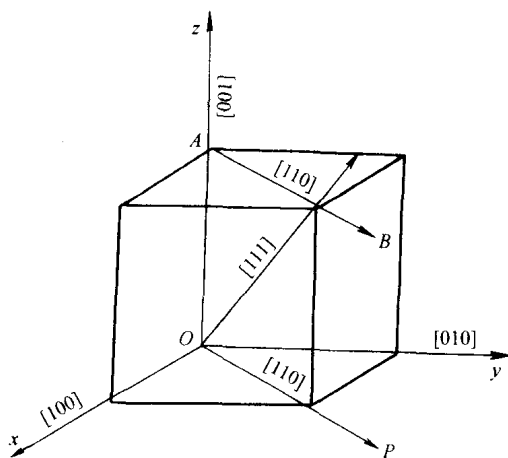


图 1-6 立方晶格中常用晶向与晶向指数

五、晶体的各向异性

在晶体中，由于各晶面和各晶向上的原子排列密度不同，因而在同一晶体的不同晶面和晶向上的各种性能不同，这种现象称为“各向异性”。

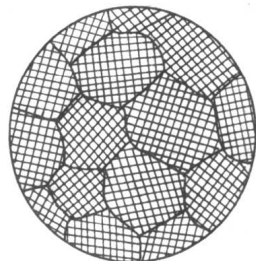
结晶方位完全一致的晶体称为“单晶体”。单晶体具有各向异性的特征，即在晶体的各个晶向上具有不同的物理、化学和力学性能。例如 α -Fe 的单晶体，由于它不同晶向上的原子密度不同，则原子结合力便不同，因而其弹性模量 E 也不同。在立方体对角线方向上， $E = 290000 \text{ MPa}$ ，而沿立方体的一边方向上 $E = 135000 \text{ MPa}$ 。

但是，工业上实际应用的金属材料，一般不具有各向异性的特征。例如对纯铁进行测定，无论从任何方向取样，其弹性模量均为 $E = 210000 \text{ Pa}$ 。这是因为上述晶体是理想的单晶体结构，而实际上工业用的金属晶体结构大多属于多晶体。

第二节 实际金属的晶体结构

一、多晶体结构

在工业生产中,单晶体的金属材料除专门制作外基本上是不存在的。实际的金属结构都包含着许多小晶体,每个小晶体内的晶格方位是一致的,而各小晶体之间彼此方位不同,如图 1-7 所示。由于每个小晶体都具有不规则的颗粒状外形,故称为“晶粒”;晶粒与晶粒之间的界面叫做“晶界”。由于晶界是两相邻晶粒不同晶格方位的过渡区,所以在晶界上原子排列总是不规则的,这种由多晶粒组成的晶体结构称为“多晶体”。



二、晶体缺陷

在金属晶体中存在各种晶格缺陷,这些缺陷使晶体中的某些原子偏离正常位置,造成晶格畸变。晶格缺陷图 1-7 多晶体结构示意图的形式有以下三类。

1. 点缺陷 点缺陷是指“晶格空位”、“置换原子”和“间隙原子”。晶格空位是在正常的晶格结点上出现空位(图 1-8a);置换原子是指结点上的原子被异类原子所置换。(图 1-8b);间隙原子是在晶格的间隙中存在多余原子(图 1-8c)。

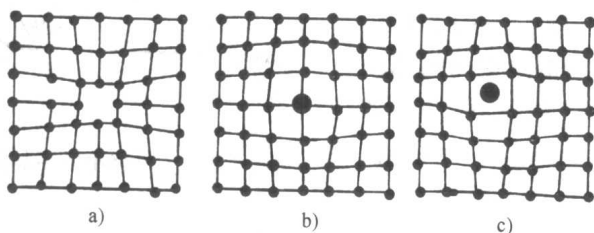


图 1-8 点缺陷示意图

a) 晶格空位 b) 置换原子 c) 间隙原子

点缺陷的形成,主要是由于原子在各自平衡位置上做不停的热运动的结果。当某个原子有足够大的能量克服周围原子对它的牵制时,便跳到晶界处或晶格间隙处,形成间隙原子。空位的数目随着温度的升高而增加,例如铝在室温时, 1cm^3 中有 8×10^{10} 个空位,当温度升高到 600°C 时,其空位可剧增至 3×10^{19} 个。

由于晶格点缺陷的出现,可促使周围原子发生靠拢或撑开的现象,如图 1-8 所示,从而造成晶格畸变。

2. 线缺陷 线缺陷是晶体中呈线状分布的缺陷,其具体形式是各种类型的位错。最简单直观的一种称为刃型位错,如图 1-9a 所示。其表现形式是晶体中某个晶面上下两部分的原子排列数目不等,就好像沿着某个晶面插入一个原子平