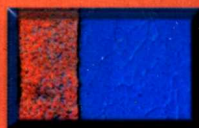
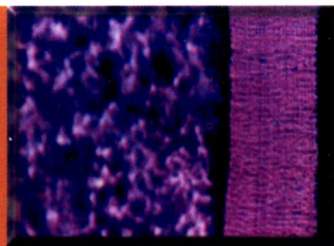


文九巴 主编

机械工程材料



机 械 工 程 材 料

主 编 文九巴
副主编 贡自均 李安铭
编写人 文九巴 贡自均
李安铭 王利国
田保红



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高等院校机械类冷加工各专业工程材料课程的基本要求编写的试用教材。

本书从机械类各专业学生实际需要出发,介绍了常用机械工程材料及其应用,主要包括:金属的晶体结构和结晶;金属的塑性变形与再结晶;合金的结晶与二元相图;铁碳合金;钢的热处理;合金钢;铸铁;有色金属及其合金;机械零件选材及工艺路线分析;非金属机械工程材料(包括高分子材料、工程塑料、橡胶材料、工程陶瓷材料、复合材料)等。书末附录介绍了常用力学性能指标及硬度试验方法,金属硬度及其与强度的换算以及国内外常用钢材牌号。本书在选材方面注重联系实际,反映材料科学的新近成果,书中的相关内容也采用了新的国家标准。

本书可作为高等院校机械类或近机类冷加工各专业使用的教材,也可供专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/文九巴主编. —北京:机械工业出版社, 2002. 7

ISBN 7-111-10232-0

I. 机... II. 文... III. 机械制造材料 IV. TH14

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第033926号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张秀恩 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:陈沛 责任印制:付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003年1月第1版·第2次印刷

1000mm×1400mm B5·10.125印张·391千字

5 001—8 000册

定价:23.00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

前 言

《机械工程材料》是机械类冷加工各专业的一门重要技术基础课。近年来,由于学科调整、专业改造、教学计划变更等,使得该课程的教学情况发生了变化,而且随着材料科学的发展,许多新的研究成果也需不断充实到该课程的教材中,为此我们重新编写了《机械工程材料》以适应新形势下的教学要求。

本书从机械工程材料的应用角度出发,以培养机械制造冷加工各专业的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,了解非金属材料及其在机械工程方面的应用为主要目标。

本书内容包括:金属学、热处理、金属材料、失效分析与选材以及非金属工程材料等。主要讲述:金属材料的结构、成分、组织与性能、加工工艺之间的关系;钢铁材料热处理的基本原理和工艺及其在机械构件上的应用;常用金属材料(碳钢、合金钢、铸铁、非铁(有色)金属及合金、硬质合金等)的分类、编号、成分、组织结构、性能及用途;金属材料的选用原则;机械设计对金属材料及热处理的技术要求;机械零件的失效分析;非金属材料(高分子材料、工程陶瓷、复合材料等)的基本性质及其工程应用等。

本书内容分为两部分(金属材料、非金属材料),适用学时数约50~70学时,各校在使用时可根据专业要求和具体情况进行删减或补充。

本书从机械工业实际出发,内容安排力图更好满足教学要求,以金属材料为主,兼顾非金属工程材料,并补充了有关新材料的内容。书中涉及的材料牌号、成分和性能,以及中外牌号对照采用了新的国家标准。计量单位统一采用国际单位制(SI),并以国际代号表示。

参加本书编写的有洛阳工学院文九巴(绪论、第四章、第六章)、洛阳工学院负自均(第五章、第九章)、焦作工学院李安铭(第一章、第七章、第八章)、郑州大学王利国(第二章、第三章、附录)、洛阳工学院田保红(第十章、第十一章、第十二章)。洛阳工学院王长生为本书提供了部分金相照片。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。

本书由杨蕴林教授主审,杨教授认真审阅了全书内容并提出了许多具体意见和建议,在此致谢。

由于我们水平有限,加之时间仓促,书中一定存在不少缺点和错误,恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2002年4月

目 录

前言

绪论 1

第一章 金属的晶体结构与结

晶 4

第一节 金属的晶体结构 4

一、金属的特性与金属键 4

二、晶体结构的基本概念 5

三、金属中常见的三种晶体结构 ... 5

四、三种典型晶格的致密度及晶
面晶向分析 6

五、晶体的各向异性 9

第二节 实际金属中的晶体缺陷 9

一、多晶体及其伪各向性 9

二、晶体缺陷 10

第三节 金属的结晶与铸锭 12

一、概述 12

二、晶核的形成与长大 14

三、结晶后晶粒大小及控制 15

四、金属铸锭的组织 17

第二章 金属的塑性变形与再

结晶 20

第一节 金属的塑性变形 20

一、金属变形的三个阶段 20

二、单晶体的塑性变形 21

三、多晶体的塑性变形 24

第二节 塑性变形对金属组织和
性能的影响 26

一、塑性变形对显微组织的影
响 26

二、塑性变形对金属性能的影
响 28

三、残余应力 29

第三节 回复与再结晶 30

一、回复 30

二、再结晶 30

三、晶粒长大 32

四、影响再结晶退火后晶粒度的
因素 33

第四节 金属的热加工 35

一、金属的热加工与冷加工 35

二、热加工对金属组织和性能的
影响 35

三、超塑性 37

第三章 合金的相结构与结晶 40

第一节 固态合金的相结构 40

一、固溶体 41

二、金属间化合物 43

第二节 二元合金相图的建立 46

一、二元合金相图的表示方法 46

二、二元合金相图的建立 47

三、杠杆定律 48

第三节 二元匀晶相图 49

一、二元匀晶相图的分析 49

二、合金的平衡结晶过程 49

三、晶内偏析（枝晶偏析） 51

第四节 二元共晶相图 51

一、二元共晶相图的分析 52

二、典型合金的平衡结晶过程
及室温平衡组织 52

三、相组成物与组织组成物 55

第五节 二元包晶相图 57

一、二元包晶相图的分析 57

二、典型合金的平衡结晶过程 58

三、包晶偏析 59

第六节 其他常用的二元合金相
图类型 60

一、二元共析相图	60	(等温转变 C 曲线)	93
二、具有稳定金属间化合物的 二元相图	60	三、过冷奥氏体转变产物的组织 形态及其性能	94
第七节 二元合金相图与合金性 能间的关系	61	四、影响 C 曲线位置和形状的 因素	99
一、合金的使用性能与相图的 关系	61	五、C 曲线的意义和应用	101
二、合金的工艺性能与相图的 关系	62	六、过冷奥氏体连续冷却转变 曲线简介	102
第四章 铁碳合金	65	第三节 钢的退火与正火	103
第一节 铁碳合金基本组元、组织 及其性能	65	一、退火	103
一、铁碳合金基本组元	65	二、正火	105
二、铁碳合金中的基本相及其 性能	66	三、退火、正火的选用原则	105
第二节 Fe-Fe ₃ C 相图分析	67	第四节 钢的淬火与回火	105
一、相图中的点、线、区	67	一、钢的淬火	105
二、典型合金的平衡结晶过程 及室温平衡组织	69	二、淬火的回火	109
三、杠杆定律的应用	77	第五节 钢的淬透性	113
四、铁碳合金的碳含量与平衡组 织、力学性能之间的关系	77	一、钢的淬透性与淬硬性	113
五、Fe-Fe ₃ C 相图的应用	79	二、淬透性对钢的力学性能的 影响	114
第三节 碳钢	81	三、影响淬透性的因素	115
一、钢中常存杂质元素的影响	81	四、淬透性的测定及表示方法	115
二、碳钢的分类、编号及应用	82	五、淬透性的应用	116
第五章 钢的热处理	88	第六节 钢的表面淬火	117
第一节 钢在加热时的转变	89	一、表面淬火的定义及方法	117
一、共析钢加热时奥氏体的形 成	89	二、感应加热表面淬火	117
二、亚、过共析钢的奥氏体化 过程	90	三、火焰加热表面淬火	120
三、影响奥氏体化的因素	90	第七节 钢的化学热处理	120
四、奥氏体的晶粒度及其长大	91	一、化学热处理的定义	120
第二节 奥氏体在冷却时的转变	92	二、钢的渗碳	120
一、奥氏体在不同冷却方式下 的转变	93	三、钢的渗氮	126
二、过冷奥氏体等温转变曲线图 (等温转变 C 曲线)	93	四、钢的碳氮共渗	127
		第六章 合金钢	131
		第一节 概论	131
		一、合金元素在钢中的主要作 用	131
		二、合金元素对 Fe-Fe ₃ C 相图 的影响	133
		三、合金元素对热处理的影响	134

四、合金钢的分类与编号	135	一、耐磨铸铁	188
第二节 合金结构钢	137	二、耐热铸铁	188
一、低合金结构钢	137	三、耐蚀铸铁	190
二、易切削钢	139	第八章 非铁(有色)金属及其合金	191
三、渗碳钢	140	第一节 铝及其合金	191
四、调质钢	143	一、概述	191
五、弹簧钢	148	二、铝合金的强化	192
六、滚动轴承钢	150	三、铸造铝合金及其热处理	195
第三节 合金工具钢	152	四、变形铝合金及其热处理	197
一、刃具钢	153	第二节 铜及其合金	200
二、模具钢	160	一、概述	200
三、量具钢	164	二、黄铜	203
第四节 特殊性能钢及合金	165	三、青铜	204
一、不锈钢	165	第三节 钛及其合金	206
二、耐热钢	167	一、钛及其合金的性能特点	206
三、耐磨钢	171	二、钛合金的分类	207
四、硬质合金	172	三、常用钛合金	207
第七章 铸铁	176	第四节 轴承合金	208
第一节 概述	176	一、概述	208
一、铸铁的特点	176	二、锡基轴承合金	209
二、Fe-C 双重相图及铸铁中石墨的形成	177	三、铝基轴承合金	210
三、铸铁的分类	178	四、铜基轴承合金	211
第二节 灰铸铁	179	第五节 新型及特种用途材料	212
一、灰铸铁的组织、性能和用途	179	一、非晶态合金	212
二、灰铸铁的孕育处理	182	二、纳米材料	213
三、灰铸铁的热处理	182	三、梯度材料	214
第三节 可锻铸铁	183	四、记忆合金	214
一、可锻铸铁的组织、性能和用途	183	五、储氢材料	215
二、可锻铸铁的生产	184	第九章 机械零件选材及工艺路线分析	218
第四节 球墨铸铁	185	第一节 选材的一般原则	218
一、球墨铸铁的生产	185	一、材料的力学性能	218
二、球墨铸铁的牌号、组织和性能	185	二、材料的工艺性能	219
三、球墨铸铁的热处理	187	三、材料的经济性	220
第五节 其他铸铁简介	188	第二节 热处理技术条件的标注	220
		一、整体热处理时的标注图例	221
		二、局部热处理时的标注图例	221

第三节 冷加工方面减小变形、防止开裂的措施	222	第十一章 工程陶瓷材料	276
一、改进淬火零件结构形状的设计	222	第一节 陶瓷材料概述	276
二、合理安排工艺路线	226	一、陶瓷的定义和分类	276
三、修改技术条件	227	二、陶瓷制品生产工艺	276
四、按变形规律调整加工尺寸	227	三、陶瓷的结构	277
五、预留加工余量	227	四、陶瓷的性能	279
六、更换材料	230	第二节 常用工程陶瓷	281
七、提高表面质量	231	一、普通瓷	281
第四节 热处理与切削加工性的关系	231	二、氧化铝陶瓷	282
第五节 典型零件选材及工艺分析	233	三、氮化硅陶瓷	283
一、齿轮类	233	四、Sialon 陶瓷	284
二、轴类	236	五、碳化硅陶瓷	284
第十章 高分子材料	244	六、氮化硼陶瓷	285
第一节 高分子材料概述	244	七、碳化硼陶瓷	286
一、高分子化合物与高分子材料	244	第十二章 复合材料	287
二、高分子化合物的组成	245	第一节 复合材料概述	287
三、高分子化合物的聚合类型	247	一、复合材料的概念	287
四、高分子化合物的分类和命名	248	二、复合材料的特性	287
五、高分子化合物的结构	249	三、复合材料的分类和命名	289
六、高分子材料的性能	255	四、复合材料的界面与强度	289
七、高分子材料的老化与防止	259	第二节 纤维增强聚合物基复合材料	290
第二节 工程塑料	259	一、玻璃纤维/聚合物复合材料	290
一、工程塑料概述	259	二、碳纤维/聚合物复合材料	292
二、热塑性工程塑料及应用	262	三、硼纤维/聚合物复合材料	294
三、热固性工程塑料及应用	267	四、纤维增强聚合物复合材料成型工艺	294
四、工程塑料的选材原则和方法	270	第三节 其它复合材料简介	295
第三节 橡胶材料	270	一、层合复合材料	295
一、橡胶材料概述	270	二、夹层结构复合材料	296
二、常用橡胶材料及应用	272	三、颗粒增强复合材料	296
		四、纳米复合材料	297
		附录	299
		参考文献	313

绪 论

人类社会的发展在很大程度上取决于生产力的发展，生产力水平的高低往往以劳动工具为代表，而劳动工具的进步又离不开材料的发展。人类使用材料的历史已有几万年之久。从远古的石器时代到公元前的青铜器时代和铁器时代，金属的使用标志着人类社会开始逐渐进入文明社会。到 18 世纪，随着钢铁材料的广泛应用，极大地促进了世界范围内的工业革命，因而产生了若干经济发达的强国。所以材料对社会文明的进步发挥着重大的作用。

在近代科学技术的推动下，材料科学发展迅速，材料的种类日益增多，不同效能的新材料不断涌现，原有材料的性能不断改善与提高，以满足各种使用要求，故材料科学是科学技术的发展基础、工业生产的支柱。

工程材料是指各种工程上使用的材料。工程材料按其属性可分为两大类，即金属材料和非金属材料。金属材料一般又分为钢铁（黑色金属）材料和非铁金属（有色金属）及其合金材料两类；非金属材料通常又分为无机非金属材料 and 有机高分子材料两类。随着材料科学的发展，单一金属或非金属材料无法实现的性能又可通过复合材料得以实现。

从应用的角度，人们习惯将材料分为两大类，一类是以力学性能为主要使用性能并兼具一定物理、化学性能的“结构材料”；另一类叫做“功能材料”，主要是指具有特异物理化学性质的材料，如超导材料、激光材料、储氢材料、生物材料、阻尼材料、半导体材料、形状记忆材料等。机械工程领域使用的主要是结构材料。

在机械工程领域，如机床、农业机械、交通设备、电工设备、化工和纺织机械等，所使用的钢铁材料占 90% 左右，非铁（有色）金属约占 5%。近些年来，随着许多新型非金属材料的不开发和应用，金属材料的统治地位已受到挑战，开始出现了金属材料、陶瓷材料和有机高分子材料“三足鼎立”的新局面。

目前，陶瓷材料已远远超出其作为建筑材料（以粘土、石英、长石等为主要成分）使用的范围。近 20 年中，以研究工程陶瓷（以 Al_2O_3 、 SiC 、 Si_3N_4 等为主要成分）用于工程结构件如陶瓷轴承、陶瓷发动机等为目标，在世界范围内兴起了陶瓷热。现在，陶瓷功能材料、陶瓷轴承已投入工业应用，陶瓷材料正显现出良好的发展前景。

高分子材料（包括工程塑料、橡胶、合成纤维等）也正以前所未有的速度发展。随着各种合成或制备技术不断出现和完善，高分子材料的产量和性能均不断

提高。有关专家预测,汽车的车身不久将大部分采用工程塑料,每 kg 工程塑料可代替 4~5kg 钢铁,而且可整体成型,因而成本和油耗将进一步降低。由于高分子材料由人工合成,且原料充足,可以设计、制造出无穷的新产品,应用前景十分广阔。

陶瓷材料和高分子材料的发展速度虽然很快,但它们还不可能全面地取代传统的金属材料,金属材料目前在工业中,特别是在机械工业中,仍然占有主导地位。

我国是金属材料生产和使用的大国。以钢铁为例,1996 年我国钢产量为 10124 万吨,2000 年已达 13000 万吨,但是我国的特殊钢生产仍然供不应求,每年要花大量的外汇进口合金钢材。特别是我国明确提出要加速发展汽车工业,到 2010 年汽车工业将与钢铁、石油、化工和建筑业一样形成国民经济的支柱产业,其年产量将由目前的 200 万辆达到 600 多万辆。仅就汽车工业的发展而言,对钢材的需求量(约占全国钢材年产量 20%左右)也会不断上升。

钢铁材料因其具有优良的力学性能、工艺性能和低的成本,使其在 21 世纪中仍将占有重要地位,高分子材料、陶瓷材料及复合材料等虽会少量地代替金属材料,但钢铁材料的应用不可能大幅度衰减。

本课程是机械类、近机械类冷加工各专业的一门必修的技术基础课。

本课程的任务是从机械工程材料的应用角度出发介绍机械工程材料的基本理论,介绍材料的化学成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系,介绍常用机械工程材料及应用等基本知识。

本课程的目的是使学生通过学习,在掌握机械工程材料的基本理论及基本知识的基础上,具备根据机械零件的使用条件和性能要求,对机械零件进行合理地选材及制订零件加工工艺路线的初步能力。

本课程的内容分为金属材料和非金属材料两大部分。金属材料部分由金属学、热处理、金属材料等三方面内容组成,非金属材料部分包括高分子材料、陶瓷材料和复合材料等。

本课程基本要求如下:

(1) 金属学方面 了解金属和合金的晶体结构、结晶过程、塑性变形与再结晶以及二元相图的基本知识,为掌握工程材料内部组织结构及其变化规律、理解不同金属材料之间的性能差异打下基础,也为学习热处理和金属材料作好知识准备。

(2) 热处理方面 了解钢铁材料热处理的基本原理和工艺,以及热处理工艺在机械零件加工过程中的作用,以便能根据零件的技术要求正确选定热处理工艺方法,合理安排工艺路线。

(3) 金属材料方面 掌握常用的碳钢、合金钢、铸铁、非铁(有色)金属及合金(铜合金、铝合金、轴承合金、钛合金)的成分、组织、性能和用途的基本知

识，以便能合理地选用金属材料。了解新型功能材料的发展状况。

(4) 非金属材料方面 了解高分子材料、陶瓷材料、复合材料的基本组成、性能及应用等方面的基础知识。

学习本课程前，学生应先学完材料力学，参加过金工实习，以便对机械工程材料的工艺过程及应用具有一定的感性知识。

第一章 金属的晶体结构与结晶

第一节 金属的晶体结构

金属材料的性能与其内部的原子排列（晶体结构）密切相关，金属在冷、热加工过程中的许多变化也与晶体结构有关，因此，必须首先了解金属的晶体结构。

一、金属的特性与金属键

（一）金属的特性

金属在固态下一般具有下列特性。

- （1）良好的导电导热性；
- （2）不透明、具有金属光泽；
- （3）具有较高的强度和良好的塑性；
- （4）有正的电阻温度系数，即随温度升高电阻增大。许多金属在极低的温度下（ $<20\text{K}$ ），电阻率趋于零而呈现超导现象。

金属的这些特性，都是由金属键的性质决定的。

（二）金属键

金属原子的价电子数目较少，所以原子很容易失去其价电子而成为正离子，价电子则为全部原子公有而成为自由电子，它们在正离子之间自由运动，形成电子气，正离子则沉浸在电子气中。正离子与电子气之间强烈的库仑力使金属原子结合在一起，这种结合力就叫做金属键。

当金属的两端存在电势差或外加电场时，电子可以定向地、加速地运动，使金属表现出优良的导电性。金属的导热性是离子的热振动和自由电子热运动两者的联合贡献所致，比单纯的离子热振动所产生的导热效果好。

金属中的自由电子能吸收并辐射出大部分投射到金属表面上的光能，所以金属不透明并呈现特有的金属光泽。

金属键使金属原子紧密堆排结合在一起，从而使金属具有较高的强度。金属键没有方向性，对原子没有选择性，所以在外力作用下发生原子相对移动时，金属键不会被破坏，金属表现出良好的塑性。

金属加热时，正离子的振动增强，原子排列的规则性受到干扰，电子运动受阻，电阻增大，因而金属具有正的电阻温度系数。温度接近绝对零度时，自由电子之间结合成两个电子相反自旋的电子对，不容易遭受散射，所以电阻率趋于零。

二、晶体结构的基本概念

固态物质按原子（离子或分子）的聚集状态分为两大类，即晶体和非晶体（又叫玻璃态或无定形结构）。晶体材料如钢铁、非铁（有色）金属、金刚石、硅酸盐等；非晶体材料如玻璃、橡胶、塑料等。晶体与非晶体的本质区别是：晶体内部的原子（离子或分子）是规则排列的；而非晶体内部的原子（离子或分子）是无规则排列的（不排除局部的短程规则排列）。

由于晶体与非晶体内部原子排列规律不同，其性能也不相同。晶体具有固定的熔点而非晶体没有，非晶液体态与固态之间的转变是一个逐渐过渡的过程。此外，晶体在不同方向上常表现出不同的物理、化学或力学性能，即具有各向异性的特征，而非晶体则是各向同性的。

在晶体中，原子按一定的规律在空间有规则地堆垛在一起，如图 1-1a 所示。为了便于分析晶体中原子排列的规律，通常以通过各原子中心的假想直线把它们在三维空间里的几何排列形式描绘出来，形成如图 1-1b 所示的三维空间格架，这种表示晶体中原子排列形式的空间格架叫做晶格，晶格的结点代表原子中心的位置。由于晶体中原子排列的规律性，我们可以从晶格中取出一个能完全代表晶格结构特征的最基本的几何单元，这种基本单元叫晶胞，如图 1-1c。晶胞的各棱边长 a 、 b 、 c 叫做晶格常数，其单位为 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 或 nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)；晶胞各棱边之间的夹角分别以 α 、 β 、 γ 表示，称为棱间夹角。

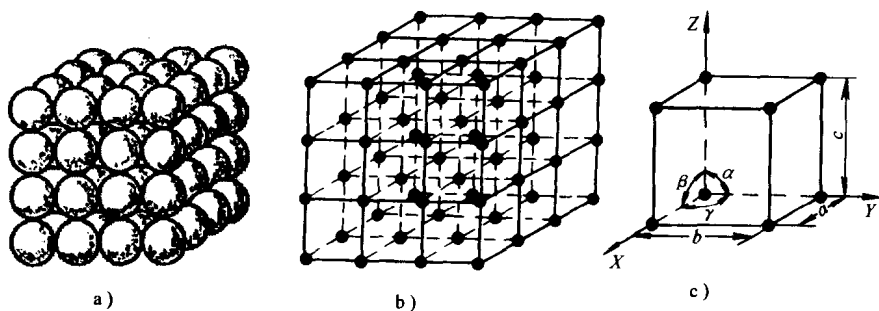


图 1-1 晶体、晶格和晶胞的示意图

a) 简单立方晶体 b) 晶格 c) 晶胞

三、金属中常见的三种晶体结构

晶体的晶体结构通常分为 7 个晶系，14 种晶格。绝大多数金属的晶体结构为体心立方、面心立方和密排六方三种紧密而简单的结构，其中体心立方、面心立方属于立方晶系，密排六方属于六方晶系。

(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，且在其体心位置

还有一个原子。晶胞中每个顶点上的原子同时属于周围 8 个晶胞所共有，故每个体心立方晶胞中的原子数为 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个。晶格常数 $a = b = c$ ，故通常只用一个常数 a 表示。体心立方晶胞沿体对角线方向上的原子是彼此紧密排列的，由此可计算出原子半径 $r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$ 。

属于这种结构的金属有 Na、K、Cr、W、Mo、V、 α -Fe 等。

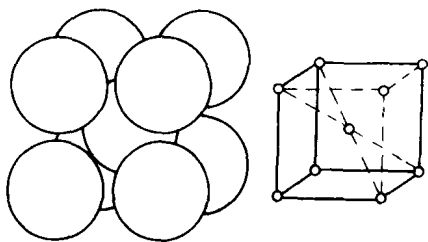


图 1-2 体心立方晶胞

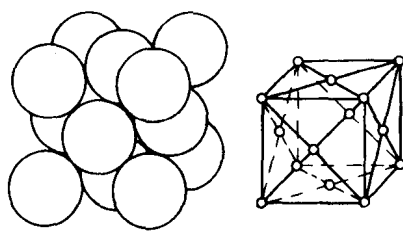


图 1-3 面心立方晶胞

(二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞 (图 1-3) 也是由 8 个原子构成的立方体，在立方体的每个面心位置还各有一个原子。故每个晶胞中的原子数是 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个。此种

晶胞每个面上沿对角线方向的原子紧密排列，故原子半径 $r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ 。

属于这种结构的金属有 Au、Ag、Al、Cu、Ni、 γ -Fe 等。

(三) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞 (图 1-4) 是由 12 个原子构成的六方棱柱体，上下两个六方底面的中心各有一个原子，上下底面之间还有三个原子。密排六方晶格的晶格常数比值 $\frac{c}{a} \approx 1.633$ 。每个密排六方

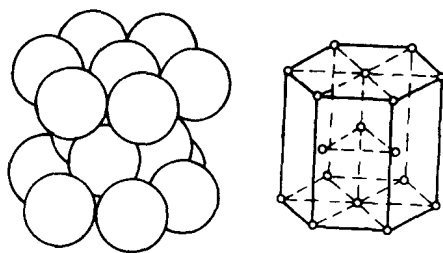


图 1-4 密排六方晶胞

晶胞中包含 $\frac{1}{6} \times 6 \times 2 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个原子。

属于这种结构的金属有 Mg、Zn、Be、Cd、 α -Ti 等。

四、三种典型晶格的致密度及晶面晶向分析

(一) 晶格致密度

晶体中原子排列的紧密程度与晶体结构类型有关，通常用致密度和配位数来

表示。致密度是指晶胞中所包含的原子所占有的体积与该晶胞体积之比，配位数是指晶格中与任一原子最邻近且等距离的原子数。晶格的致密度高，配位数也大。表 1-1 列出了三种典型晶格的常用数据。可以看出，三种常见金属晶体结构中原子排列最致密的是面心立方和密排六方，其次是体心立方，面心立方和密排六方致密度、配位数相同，说明原子排列致密程度相同，但原子排列方式不同。

不同类型晶格的晶体中，原子排列紧密程度不同，所以具有不同的比容（单位质量物质所占的体积）。金属的晶格类型发生转变时，会带来体积的膨胀或收缩，如果这种体积变化受到约束，金属内部将产生内应力，引起工件的变形或开裂。

表 1-1 三种典型金属晶格的常用数据

晶格类型	晶胞中原子数	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）晶面及晶面的原子密度

晶体学中，通过晶体中原子中心的平面叫做晶面。晶体中原子排列的规律性也反映在晶面上。为了分析各种晶面上原子分布的特点，需要给各种晶面规定一个符号，这就是晶面指数。

确定晶面指数的步骤是：

（1）建立坐标系，选定晶胞某一个顶点作为空间坐标系的原点 O （原点不能在待定的晶面上），晶胞三条棱边分别为坐标轴 Ox 、 Oy 、 Oz ，以晶格常数 a 、 b 、 c 分别作为相应三个坐标轴的长度单位；

（2）求出待定晶面在三个坐标轴上的截距；

（3）取三个截距的倒数；

（4）将三个截距的倒数按比例化为最小整数，并加一圆括号，即为所求的晶面指数 (hkl) 。

按照上面的步骤，图 1-5 中所示的晶面在三个坐标轴上的截距分别为 1、2、 ∞ ，截距的倒数为 1、 $\frac{1}{2}$ 、0；晶面指数为 (210) 。

由于坐标原点选择的任意性， (hkl) 面实际上并非仅表示某一晶面而是表示一组原子排列相同的平行晶面。若晶面的截距是负数，则应在相应的指数上加“—”号，例如 $(\bar{1}11)$ 晶面。图 1-6 表示了立方晶格中三种重要的晶面。

晶体中原子排列方式相同但位向不同的晶面，称为一族晶面，用 $\{hkl\}$ 表示。例如，立方晶系中 $\{110\}$ 包括 (110) 、 (011) 、 (101) 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(0\bar{1}1)$ 、 $(\bar{1}01)$ 六个晶面。

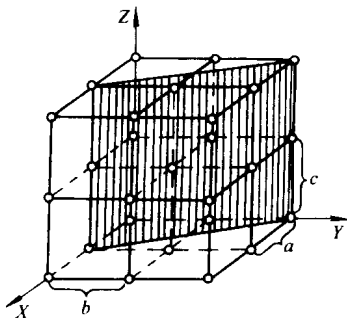


图 1-5 晶面指数的确定方法

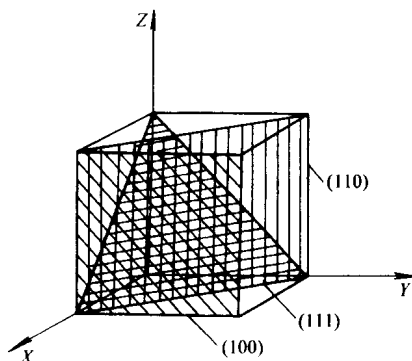


图 1-6 立方晶格中的三种重要的晶面

晶体中不同晶面上原子排列的紧密程度可以用晶面的原子密度表示，它是指某晶面单位面积中的原子个数。立方晶系中主要晶面的原子密度见表 1-2，可以看出，在体心立方晶格中，原子密度最大的晶面是 $\{110\}$ ；面心立方晶格中，原子密度最大的晶面是 $\{111\}$ 。

表 1-2 立方晶系中主要晶面的原子密度

晶格类型	晶面指数		
	$\{100\}$	$\{110\}$	$\{111\}$
体心立方	$1/a^2$	$1.4/a^2$	$0.58/a^2$
面心立方	$2/a^2$	$1.4/a^2$	$2.3/a^2$

(三) 晶向及晶向的原子密度

晶体中的原子列称为晶向，晶向用晶向指数表示。确定晶向指数的步骤是：

(1) 建立坐标系，取晶胞中某一顶点作为坐标原点 O ，晶胞三条棱边分别为坐标轴 Ox, Oy, Oz ，以晶格常数 a, b, c 分别作为相应三个坐标轴的长度单位；

(2) 过坐标原点作一条平行于待定晶向的直线；

(3) 求出该直线上任意一点的坐标值；

(4) 将三个坐标值按比例化为最小整数，并加一方括号，即为所求的晶向指数 $[uvw]$ 。

同样，一个晶向指数并非仅表示某一个晶向而是代表一组相互平行且方向相同的晶向。图 1-7 给出了立方晶格中几个重要的晶向。如

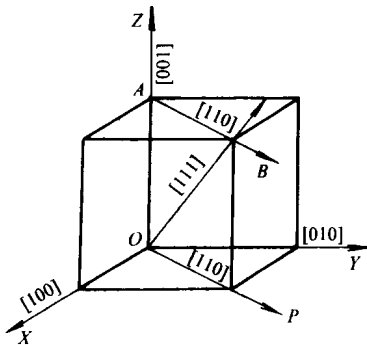


图 1-7 立方晶格中几个重要晶向

果指数为负数，则在其上加“-”号，如 $[\bar{1}11]$ 。在晶体中，凡原子排列完全相同的晶向，统称为一族晶向，用 $\langle uvw \rangle$ 表示。例如，立方晶系中 $\langle 110 \rangle$ 包括 $[110]$ 、 $[011]$ 、 $[101]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}01]$ 、 $[0\bar{1}1]$ 六个晶向。

晶向的原子密度指某晶向单位长度上的原子数。立方晶系中主要晶向的原子密度见表1-3，可以看出，体心立方晶格中，原子密度最大的晶向是 $\langle 111 \rangle$ ；面心立方晶格中，原子密度最大的晶向是 $\langle 110 \rangle$ 。

表 1-3 立方晶系中主要晶向的原子密度

晶格类型	晶向指数		
	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
体心立方	$1/a$	$0.7/a$	$1.16/a$
面心立方	$1/a$	$1.4/a$	$0.58/a$

五、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，原子间的结合力就不同，因而晶体在不同方向上的性能各异，此即晶体的各向异性。晶体的这种特性在力学性能、物理性能、化学性能上都能表现出来，是区别于非晶体的重要标志之一。例如，体心立方的铁晶体，在 $\langle 111 \rangle$ 方向，弹性模量 $E=290\text{GPa}$ ，在 $\langle 100 \rangle$ 方向 $E=135\text{GPa}$ 。再如石膏、云母、方解石等晶体常沿一定的晶面最易被拉断或劈裂，即具有一定的解理面，也都是这个道理。铁的单晶体在磁场中沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的磁化，比沿 $\langle 111 \rangle$ 方向容易。所以，制造变压器铁心的硅钢片的 $\langle 100 \rangle$ 晶向应平行于导磁方向，以降低变压器的铁损。目前工业生产上已通过特殊的轧制工艺生产出了 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于轧制方向的硅钢片，从而获得优良的导磁率。

第二节 实际金属中的晶体缺陷

一、多晶体及其伪等向性

当晶体内部的原子都按同一规律同一位向排列，即晶格位向完全一致时，此晶体称为单晶体。实际使用的金属材料单晶体极少，基本上都是由许多位向不同的单晶体所组成的多晶体，其截面示意图可用图1-8表示，即实际金属材料是由许多外形不规则的颗粒状小晶体组成，其中每个小晶体称为一个晶粒。在每个晶粒内部，晶格位向是均匀一致的，相邻晶粒的位向存在一定的差异。晶粒之间的界面称为晶界，它是不同位向晶粒之间的过渡区，故晶界的原子排列是不规则的。

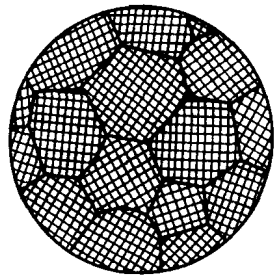


图 1-8 多晶体示意图