

高等学校适用教材

# 机械工程材料应用基础

张代东 主编  
雷建民 柴跃生 周俊琪 副主编

机械工业出版社

本教材是为了适应高等学校专业教学改革的需要,结合高等学校机械制造类专业的特点而编写的。全书共分为九章,扼要讲述了机械工程材料的基本理论、力学性能及其应用。内容包括金属的结构与结晶、合金的结构与二元相图、铁碳合金、金属的塑性变形、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属和其他常用工程材料等。

本书可作为高等院校机械制造类专业使用教材,亦可供机械设计和生产部门工程技术人员阅读参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料应用基础/张代东主编. —北京:机械工业出版社, 2001. 6  
高等学校适用教材  
ISBN 7-111-09023-3

I. 机… II. 张… III. 机械制造材料-高等学校-教材 IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 037361 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: 邝 鸥 版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟  
封面设计: 姚 毅 责任印制: 郭景龙  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2001 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·15.5 印张·384 千字  
0 001—4 000 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、68326677-2527

# 前 言

本书是根据 1998 年和 2000 年两届全国高校材料工程专业教学指导委员会会议的精神,从高等学校机械类专业教学的基本要求出发,结合各兄弟院校教学改革研究的成功经验,在机械工业出版社的指导和支持下而编写的,是高等学校机械制造类专业教学改革试用教材之一,亦可作为工矿企业机械类技术人员的阅读参考资料。

本书根据高等学校专业调整与改革、培养跨世纪人才的需要和机械制造类专业特点,除要求学生熟悉金属材料外,还适当增加了一些其他工程材料知识,并注意吸收新材料、新工艺、新标准。

全书共包括四个部分,金属学基础、热处理原理和工艺、金属材料及其他常用工程材料等。其中第一、二、三、四章属于金属学基础,包括材料的结构、凝固、合金相图及塑性变形,旨在为读者建立材料的成分、组织结构、性能和加工应用之间的密切关系奠定理论基础。第五章属于钢的热处理,主要介绍钢的强化、改性和表面技术的应用。第六、七、八章包括工业用钢、铸铁、有色金属及其合金,主要介绍了各种常用金属材料的成分、结构、性能特点及应用,同时还介绍了金属材料几种典型的成形工艺方法及选择。第九章为其他常用工程材料,主要介绍高分子材料、陶瓷材料及复合材料的成分、结构、应用等方面的知识,目的在于强化基础、拓宽知识面。

本书根据大纲要求,讲授时数约 50 学时,实验时数 6~8 学时,课堂讨论 4 学时。

本书由太原重型机械学院张代东副教授担任主编。雷建民副教授、柴跃生副教授、周俊琪副教授担任副主编。郑建军、甘玉生、李秋书担任编委。参加编写的人员为:张代东(绪论、第一、五章),雷建民(第六、七章),柴跃生(第三、八章),周俊琪(第二、四、九章)。全书由山西大学工程学院关晓梅副教授主审。本书照片由太原重型机械学院金相实验室提供。在全书编写过程中得到了张敏刚、虞明香、马强等老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

因为是适应专业改革的新教材,在体系和内容上有较大改变,其中可能会有不少缺点和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2001 年 3 月

# 目 录

## 前言

绪论 .....	1	一、具有其他恒温转变的相图 .....	34
第一章 金属的晶体结构与结晶 .....	3	二、形成稳定中间相的相图 .....	35
第一节 金属的晶体结构 .....	3	第七节 相图与性能的关系 .....	36
一、晶体基础 .....	3	一、根据相图判断材料的力学性能和 物理性能 .....	36
二、典型的金属晶体结构 .....	3	二、根据相图判断合金的工艺性能 .....	36
三、典型晶格的致密度和配位数 .....	6	第三章 铁碳合金 .....	38
四、晶面、晶向和晶体的各向异性 .....	6	第一节 铁碳合金的组元分析 .....	38
第二节 实际金属的晶体结构 .....	9	一、纯铁 .....	38
一、多晶体结构和亚结构 .....	9	二、渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) .....	38
二、实际金属晶体缺陷 .....	9	第二节 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图分析 .....	39
第三节 纯金属的结晶与铸锭组织 .....	11	第三节 铁碳合金平衡结晶分析 .....	40
一、结晶基础 .....	11	一、工业纯铁 .....	40
二、结晶过程 .....	12	二、钢 .....	41
三、金属结晶后晶粒的大小 .....	13	三、白口铸铁 .....	44
四、金属铸锭组织 .....	14	第四节 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图的应用 .....	48
第二章 合金的相结构与二元合金 相图 .....	16	一、 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图在选材上的应用 .....	49
第一节 固态合金中的相结构 .....	16	二、 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图在制定热加工工艺方面的 应用 .....	49
一、固溶体 .....	16	第五节 碳钢及其牌号 .....	50
二、中间相 .....	19	一、常存杂质元素对碳钢性能的影响 .....	50
第二节 二元合金相图的建立 .....	23	二、碳钢的分类 .....	51
一、相图的意义及其名词的涵义 .....	23	三、碳钢的牌号、性能及用途 .....	52
二、相图的基本知识 .....	23	第四章 金属材料的塑性变形与再 结晶 .....	57
第三节 匀晶相图 .....	26	第一节 金属材料的塑性变形特性 .....	57
一、匀晶相图分析 .....	26	一、金属材料变形特性 .....	57
二、合金的平衡结晶过程 .....	26	二、单晶体金属的塑性变形 .....	57
三、二元相图的杠杆定律 .....	27	三、多晶体金属的塑性变形 .....	60
四、固溶体合金中的枝晶偏析 .....	28	四、合金体的塑性变形 .....	61
第四节 二元共晶相图 .....	28	第二节 塑性变形对组织和性能的影响 .....	62
一、相图分析 .....	28	一、纤维组织的产生 .....	62
二、共晶系合金的平衡结晶及组织 .....	29	二、晶粒破碎，位错密度增大，产生 加工硬化 .....	62
三、伪共晶和比重偏析 .....	32	三、织构现象的产生 .....	63
第五节 二元包晶相图 .....	33	四、残余内应力的产生 .....	64
一、相图分析 .....	33		
二、包晶反应 .....	33		
第六节 其他类型的二元系合金相图 .....	34		

第三节 回复与再结晶 .....	64	第十节 钢的化学热处理 .....	105
一、回复 .....	64	一、钢的渗碳 .....	106
二、再结晶 .....	65	二、钢的渗氮 .....	109
三、晶粒长大 .....	65	三、钢的中温碳氮共渗 .....	111
四、影响再结晶后晶粒大小的因素 .....	65	四、钢的低温气体氮碳共渗 .....	112
第四节 金属材料的热加工 .....	67	第六章 合金钢与粉末冶金 .....	113
一、热加工与冷加工的区别 .....	67	第一节 概论 .....	113
二、热加工对材料的组织和性能的影响 .....	68	第二节 钢中合金元素的作用 .....	113
第五章 钢的热处理 .....	69	一、合金元素对钢中基本相的影响 .....	113
第一节 概述 .....	69	二、合金元素在钢中的分布 .....	114
第二节 钢在加热时的转变 .....	70	三、合金元素对 Fe-Fe <sub>3</sub> C 相图的影响 .....	115
一、奥氏体的形成过程 .....	70	四、合金元素对热处理工艺的影响 .....	116
二、影响奥氏体形成速度的因素 .....	71	五、合金钢的分类 .....	119
三、奥氏体晶粒的长大及其影响因素 .....	72	第三节 合金结构钢 .....	119
第三节 过冷奥氏体的转变产物及性能 .....	73	一、合金结构钢的分类及编号 .....	119
一、珠光体类型组织转变 .....	73	二、低合金高强度结构钢 .....	120
二、贝氏体类型组织转变 .....	75	三、易切削钢 .....	121
三、马氏体类型组织转变 .....	77	四、渗碳钢 .....	123
第四节 过冷奥氏体转变曲线图 .....	81	五、渗氮钢 .....	127
一、过冷奥氏体等温转变曲线图 .....	81	六、调质钢 .....	128
二、过冷奥氏体连续冷却转变图 .....	83	七、弹簧钢 .....	134
第五节 钢的退火和正火 .....	85	八、滚动轴承钢 .....	136
一、退火、正火的定义、目的和分类 .....	85	第四节 合金工具钢 .....	139
二、退火和正火操作及其应用 .....	86	一、刃具钢 .....	140
第六节 钢的淬火 .....	90	二、模具钢 .....	147
一、淬火的定义和目的 .....	90	三、量具钢 .....	149
二、淬火温度的选择 .....	91	第五节 特殊性能钢 .....	152
三、淬火介质 .....	91	一、不锈钢 .....	152
四、常用的淬火方法 .....	93	二、耐热钢 .....	157
五、几种淬火新工艺的发展及应用 .....	94	三、耐磨钢 .....	160
六、淬火缺陷 .....	96	第六节 粉末冶金 .....	161
第七节 钢的淬透性 .....	96	一、粉末冶金 .....	161
一、淬透性的基本概念 .....	96	二、硬质合金 .....	164
二、淬透性的测定及表示方法 .....	97	第七章 铸铁 .....	167
三、淬透性的实际意义 .....	98	第一节 概述 .....	167
第八节 钢的回火 .....	100	一、铸铁的成分及性能特点 .....	167
一、回火的目的 .....	100	二、铸铁的石墨化及其影响因素 .....	167
二、淬火钢在回火时的转变 .....	100	三、铸铁的分类 .....	169
三、回火的种类 .....	102	第二节 灰铸铁 .....	170
第九节 钢的表面淬火 .....	103	一、普通灰铸铁的化学成分与组织 .....	170
一、感应加热表面淬火 .....	103	二、灰铸铁的变质处理——变质铸铁 .....	172
二、火焰加热表面淬火 .....	104		

三、灰铸铁的热处理 .....	172	第三节 轴承合金 .....	207
第三节 可锻铸铁 .....	173	一、轴承合金的性能要求 .....	207
一、可锻铸铁的成分 .....	173	二、常用的轴承合金 .....	208
二、可锻铸铁的退火与组织 .....	174	第四节 钛及钛合金 .....	211
第四节 球墨铸铁 .....	175	一、纯钛 .....	211
一、球墨铸铁的成分与制造工艺 .....	175	二、钛合金化 .....	211
二、球墨铸铁的性能 .....	176	三、工业用钛合金 .....	212
三、球墨铸铁的热处理 .....	177	四、钛合金的热处理 .....	214
第五节 特殊性能铸铁 .....	179	第九章 其他常用工程材料 .....	217
一、耐磨铸铁 .....	179	第一节 高分子材料 .....	217
二、耐热铸铁 .....	180	一、高分子材料的基本概念 .....	217
三、耐蚀铸铁 .....	181	二、高分子材料的结构及构象 .....	219
第八章 有色金属及其合金 .....	182	三、高分子材料的性能 .....	222
第一节 铝及铝合金 .....	182	四、常用高分子材料 .....	223
一、工业纯铝 .....	182	第二节 陶瓷材料 .....	227
二、铝合金的分类 .....	182	一、陶瓷的结构特点 .....	227
三、铝合金的强化 .....	184	二、陶瓷材料的性能特点 .....	229
四、铸造铝合金 .....	186	三、常用工程陶瓷 .....	231
五、变形铝合金 .....	192	第三节 复合材料 .....	235
第二节 铜及铜合金 .....	195	一、概述 .....	235
一、纯铜 .....	195	二、纤维增强复合材料 .....	237
二、黄铜 .....	195	三、层状复合材料 .....	241
三、青铜 .....	201	参考文献 .....	242

# 绪 论

机械工程材料是现代机械制造的基础材料，在工业、农业、国防、科学技术及人们日常生活中占有非常重要的地位。

工程材料根据其结构特点可分为金属材料、非金属材料（无机非金属材料、有机非金属材料）和复合材料等。其中金属材料是工业上应用最为广泛的材料，非金属材料与复合材料是当前发展最为迅速的材料。

金属材料之所以能获得广泛的应用，是由于其具有许多优良的性能。首先，金属材料具有优良的力学性能，包括高的强度、硬度，足够的塑性、韧性，可用来制造生产工具和各种机械设备。其次，金属材料具有特殊的物理、化学性能，包括导电性、导磁性、耐蚀性、耐热性等，可用来制造导线、传热器、磁铁、船体和化学容器等，在电力、电子、造船、化工等部门得以广泛的应用。第三，金属材料具有优良的加工工艺性能，包括铸造工艺性能、压力加工工艺性能、焊接工艺性能、热处理工艺性能和切削加工工艺性能等，容易采用各种工艺方法加工成形和进行性能调整，以满足不同场合工件的各种使用要求。

金属材料的各种性能取决于其内部的组织结构。而本学科的基本任务就是研究材料的成分、内部组织、热处理工艺等与性能之间的关系，并找出其中的内在规律，以便控制组织，提高材料的使用性能。

除金属材料外，近几年来其他工程材料像高分子材料、复合材料、陶瓷材料、功能材料等也得到了长足的发展，显示出巨大的开发潜力和广泛的应用前景。

高分子材料年增长率很快，其生产按体积计算已超过钢产量，它不仅代替一部分钢铁等金属材料，还研制和发展了具有良好导电和耐高温等特殊性能的有机合成材料。陶瓷材料除具有某些（高硬度、高耐磨性等）功能外，其脆性及抗震性已逐步改善，可望成为理想的高温工程材料。复合材料的显著特点是由两种或两种以上性质不同的材料组成一种多相材料，它不仅保留了组成材料的各自特点，而且具有单一材料达不到的特性，该类材料的最大特点是具有很强的可设计性。

高等学校使用教材是为课程教学服务的，所以必须与教学内容、教学思维方式乃至教学改革方案相联系，与专业人才的培养相结合。

本教材的内容体系是建立在材料科学基础之上，紧紧围绕材料的使用和加工这一主线构成和展开的。同时，基于培养目标和课程教学任务的要求，该书内容体系中所涉及到的材料科学基础，本着必需、够用的原则，突出了结构工程材料的选择、使用和加工等工程技术应用的内容。

本教材的特点之一 将各类工程材料作为一个整体，力图清晰地阐述材料成分、组织、结构与性能、行为之间的关系。

本教材的特点之二 材料的强韧化和改性及表面技术是挖掘材料潜力和发挥材料效能的重要技术措施，其应用的成功与否往往成为产品质量的关键，在技术上、经济上的意义是不言而喻的。所以，将这一部分内容作为材料科学技术的一个重要组成部分在教材中得到加强、

所包含的内容也不单是传统教学内容中的钢的热处理。

本教材的特点之三 在结构工程材料中，金属材料仍在发挥着重要的作用。但高分子材料、陶瓷材料和复合材料等的发展更显得迅速，应用也日益广泛，作用也更令人瞩目。因此在本教材中将其也作为一个重要组成部分作了介绍，力求详略适当、突出应用，既统筹考虑，又突出重点。

本教材的特点之四 在工业生产与应用研究中，热处理的新工艺、新技术不断涌现，根据大多数同志的要求和意见，适当增加了新工艺方面的内容。

本教材的特点之五 目前国内正在贯彻新标准，因此对材料、热处理工艺名词和部分内容以及一些标准做了补充和更新。

《机械工程材料应用基础》是机械制造类专业的一门技术基础课。其主要目的是通过学习，使学生获得有关金属学的基本理论知识，掌握热处理的原理和常用工艺方法，熟悉常用金属材料和其他工程材料的基础知识等；通过学习，使学生学会正确选用和合理使用常用工程材料，正确选用热处理工艺和妥善安排材料加工工艺路线等方面的初步知识与能力。

《机械工程材料应用基础》是以物理、化学、材料力学、金属工艺学等为基础的一门学科。在学习中应根据教学目标和要求注意：

(1) 熟悉各类常用结构工程材料 注意金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料的成分、结构、性能、应用特点及牌号的表示方法；了解各类结构工程材料的强化、改性及表面技术的知识。

(2) 掌握常用成形工艺方法 学习中一定要掌握常用成形工艺方法的工艺特点及应用范围；了解新技术、新工艺的发展动态及应用。

(3) 学会选择零件材料及成形工艺的原则和方法 通过基础的学习，要学会选择零件材料及成形工艺的原则、方法和步骤，了解失效的分析方法及其应用，力求强化综合训练，初步具备合理选择材料、成形工艺以及强化方法并正确安排加工工艺路线的综合能力。

(4) 应用为主 不论是理论基础知识的学习，还是成形技术的学习，都应将重点放在对材料的成分、组织结构、加工使用、性能行为之间关系及规律的认识上，为以后学习新材料、新内容奠定基础。

# 第一章 金属的晶体结构与结晶

金属的内部结构和组织状态是决定金属材料性能的一个重要因素。对于金属内部结构的研究通常把金属原子作为研究的基本单位,讨论金属原子间的相互结合以及原子排列规律等。金属在固态下通常都是晶体,要了解金属内部结构,首先要了解晶体的结构,其中包括晶体中原子之间的相互作用、结合方式、原子排列方式和分布规律、各种晶体的特点与差异等。

## 第一节 金属的晶体结构

### 一、晶体基础

晶体是指其原子呈规则排列的固态物体。在自然界中,包括金属在内的大多数固体物质都属于晶体。天然晶体往往会具有规则的几何外形,如钻石、宝石、水晶等,冰花、雪花、食盐等也容易看到规则的几何外形。但金属晶体及其制品,一般则看不到规则的几何外形。

少数物质,如玻璃、松香、木材、棉花等属于非晶体,其内部的原子则是散乱分布,至多有些局部存在的短程规则排列。

由于晶体中的原子呈一定规则周期性的重复排列,造成晶体在性能上区别于非晶体的一些重要特性:(1)晶体可具有规则几何外形;(2)晶体具有固定的熔点;(3)晶体具有各向异性。

虽然晶体与非晶体之间存在着本质的差别,但并不意味着两者之间必然存在着不可逾越的鸿沟。在一定的条件下,两者可进行相互转化。例如:玻璃经长时间高温加热后能形成晶态玻璃;用特殊设备,使液态金属以极快的速度冷却,可获得非晶态金属等。当然,这些转变的结果,使物体的性能也产生了极大的变化。

为了研究晶体中原子的排列规律,假定理想晶体中的原子都是固定不动的钢球,晶体即由这些钢球堆垛而成,形成原子堆垛的球体几何模型,如图 1-1a。这种模型的优点是立体感强,很直观,但钢球密密麻麻地堆垛一起,很难看清内部原子排列的规律和特点。为了便于分析各种晶体中的原子排列规律性,常以通过各原子中心的一些假想连线来描绘其三维空间中的几何排列形式,如图 1-1b。各联线的交点称作“结点”,表示各原子中心位置。这种用以描述晶体中原子排列的空间格架称为空间点阵或晶格。由于晶格中原子排列具有周期性的特点,为了简便起见,我们可从其晶格中选取一个最基本的几何单元来表达晶体规则排列的形式特征,如图 1-1c。组成晶格的这种最基本的几何单元称为晶胞。晶胞的大小和形状常以晶胞的棱边长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  (称作晶格常数)和棱边间相互夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  来表示。晶格常数以  $\text{\AA}^{\ominus}$  为计量单位。

### 二、典型的金属晶体结构

自然界中的各种晶体物质,或其晶格形式不同,或其晶格常数不同,主要与其原子构造、

$\ominus$   $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm} = 0.1\text{nm}$ , 下同。

原子间的结合力的性质有关。对于金属晶体来说，其原子结构的共同特点是价电子数少，一般为 1~2 个，最多不超过 4 个，与原子核间的结合力弱，很容易脱离原子核的束缚而变成自由电子。贡献出价电子的原子，变为正离子，自由电子穿梭于各离子之间作高速运动，形成电子云。金属的这种结合方式称作金属键。

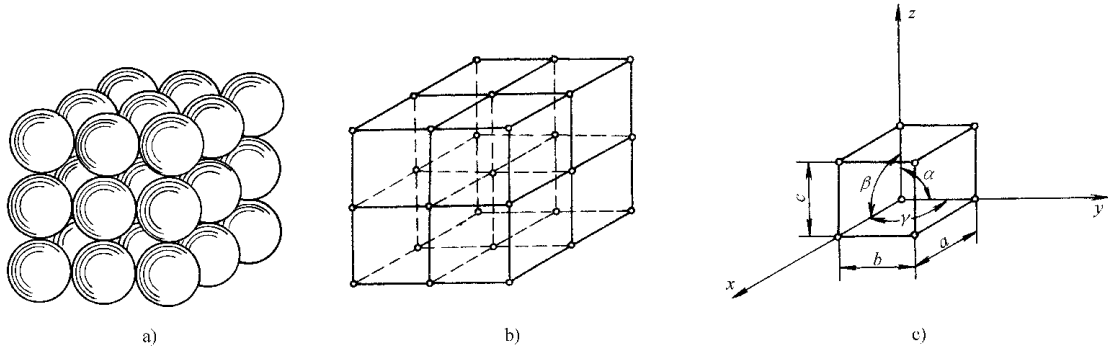


图 1-1 立方晶体球体几何模型、晶格和晶胞示意图

a) 晶体中金属原子的排列 b) 金属的晶格 c) 晶胞及晶格常数的表示方法

根据金属键的本质，可解释固态金属的金属特性：如在外电势作用下，自由电子作定向移动使金属具有良好的导电性；通过离子振动和自由电子运动实现热传导，使金属具有良好的导热性；同时，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，而使金属具有正的电阻温度系数；自由电子容易吸收可见光的能量，而被激发到高能位，当它跳回到原来的低能级时，把吸收的可见光能量辐射出来，使金属具有不透明性和金属光泽；金属键没有饱和性和方向性，当金属晶体一部分相对于另一部分发生相对位移时，金属正离子始终被包围在电子云中，因而使金属能够经受一定的塑性变形而不发生断裂，具有良好的塑性或延展性。

也正由于金属是金属键的结合，结合力强且无方向性，使金属晶体中原子总具有趋于密排的倾向，晶体以较紧密的排列方式形成具有高度对称性、晶格比较简单的晶体结构。在金属元素中约有百分之九十以上的晶体结构都属于如下三种典型的金属晶体结构形式：

### (一) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞模型如图 1-2 所示。其晶胞是一个立方体，晶胞的三个棱边长度  $a = b = c$ ，通常只用一个晶格常数  $a$  表示即可。三个晶轴之间夹角均为  $90^\circ$ 。在体心立方晶胞的每个角上和晶胞中心都排列有一个原子。体心立方晶胞中属于单个晶胞的原子数为  $(1/8) \times 8 + 1 = 2$  个（如图 1-2b）。

在体心立方晶胞中，原子沿立方体对角线紧密地接触排列，长度为  $\sqrt{3}a$ ，等于 4 个原子半径，所以体心立方晶格的原子半径  $r = \sqrt{3}a/4$ 。

具有体心立方晶格的金属有  $\alpha$ -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W、 $\beta$ -Ti 等。

### (二) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞模型如图 1-3 所示。其晶胞也是一个立方体，晶格常数用  $a$  表示。在面心立方晶格的每个角上和晶胞的六个表面的中心都排列有一个原子。面心立方晶胞中属于单个晶胞的原子数为  $(1/8) \times 8 + (1/2) \times 6 = 4$  个（如图 1-3b）。

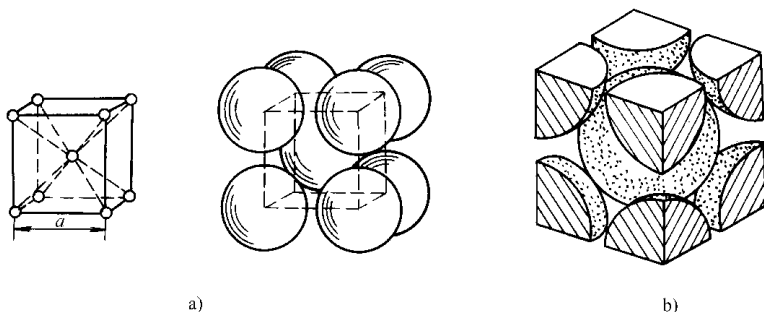


图 1-2 体心立方晶胞模型

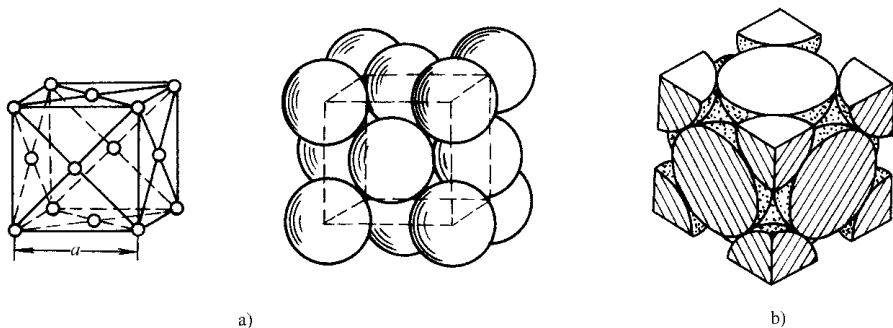


图 1-3 面心立方晶胞模型

在面心立方晶胞中，原子沿晶胞六个表面的对角线紧密地接触排列，长度为  $\sqrt{2}a$ ，等于 4 个原子半径，所以面心立方晶格的原子半径  $r = \sqrt{2}a/4$ 。

具有面心立方晶格的金属有  $\gamma$ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag、Au、Pb、Pt、 $\beta$ -Co 等。

### (三) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞模型如图 1-4 所示。在晶胞的 12 个角上各有一个原子，构成六方体，上、下底面的中心各有一个原子，晶胞内还有三个原子。晶格常数用柱体高度  $c$  和六边形的边长  $a$  两个晶格常数来表示， $c$  与  $a$  之比  $c/a$  称为轴比，典型的密排六方晶格中  $c/a = \sqrt{8/3} \approx 1.633$ 。密排六方晶胞中属于单个晶胞的原子数为  $(1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 + 3 = 6$  个（如图 1-4b）。

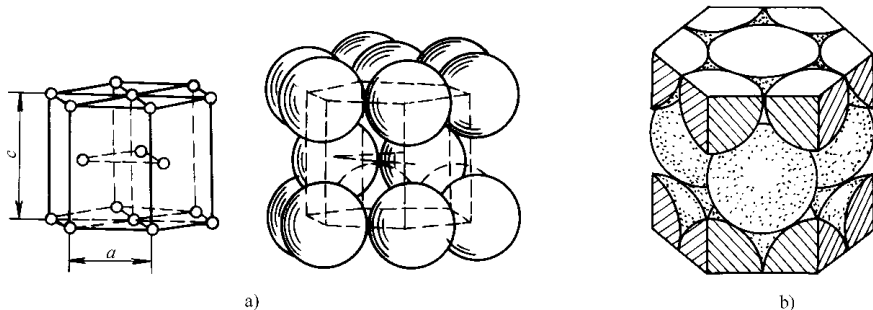


图 1-4 密排六方晶胞模型

对于典型的密排六方晶格金属，相互相邻的两个原子紧密地接触排列，长度为  $a$ ，等于两个原子半径，所以密排六方晶格的原子半径  $r = a/2$ 。

具有密排六方晶格的金属有 Mg、Zn、Be、Cd、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Co 等。

### 三、典型晶格的致密度和配位数

金属晶体的一个特点是趋于最紧密的排列，所以晶格中原子排列的紧密程度是反映晶体结构特征的一个重要因素。通常用两个参数来表征，一个是配位数，一个是致密度。

#### (一) 配位数

配位数是指晶体中任意一个原子周围最近邻且等距离的原子的数目。配位数越大，晶体中原子排列便越紧密。

#### (二) 致密度

球体几何模型中，把原子看作刚性圆球，原子与原子结合时之间必然存有空隙。晶体中原子排列的紧密程度可用原子所占体积与晶体体积的比值来表示，称为晶体的致密度，即：

$$\text{致密度} = \frac{\text{晶体中原子所占体积}}{\text{晶体体积}} = \frac{\text{单个晶胞中原子所占体积}}{\text{晶胞体积}}$$

晶体的致密度越大，晶体原子排列密度越高，原子结合越紧密。

表 1-1 是三种典型金属晶格的计算数据。由表列数据可见，不论从配位数还是致密度来看，面心立方晶格和密排六方晶格的原子排列都是最紧密的，在所有晶体结构中属最密排列方式。体心立方晶格次之属次密排列方式。

表 1-1 三种典型晶格的数据

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	$\frac{a}{2}$	12	0.74

### 四、晶面、晶向和晶体的各向异性

在晶体中，过各原子中心所构成的不同方位上的原子面称为晶面，过各原子中心所构成不同方向上的原子列称为晶向。为了便于研究和表述不同晶面和晶向的原子排列情况及其在空间的位向，需要用一定的符号来统一表示，用来表示晶面的符号称作晶面指数，用来表示晶向的符号称作晶向指数。

#### (一) 晶面指数

以方立体晶格为例，确定晶面指数的方法包括如下四个步骤：

1. 设坐标 在立方晶格中，沿晶胞的相互垂直的三条棱边设主参考坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。
2. 求截距 以晶胞的棱边长度即晶格常数为单位，确定待求晶面在各坐标轴上的截距值。
3. 取倒数 将所求三截距值取倒数，取倒数的目的是为了避开晶面指数出现  $\infty$ 。
4. 化整数 将所取三倒数按比例化为最小整数，用圆括号 ( ) 括起，便得到所求晶面的晶面指数。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示。

图 1-5 为立方晶体中三个最具有意义的晶面的晶面指数。其中晶面 A 在三个坐标轴上的截距分别为 1、 $\infty$ 、 $\infty$ ，取其倒数为 1、0、0，故其晶面指数为 (100)。晶面 B 在三个坐标轴上的截距分别为 1、1、 $\infty$ ，取其倒数为 1、1、0，故其晶面指数为 (110)。晶面 C 在三个坐标轴上的截距分别为 1、1、1，取其倒数为 1、1、1，则其晶面指数为 (111)。

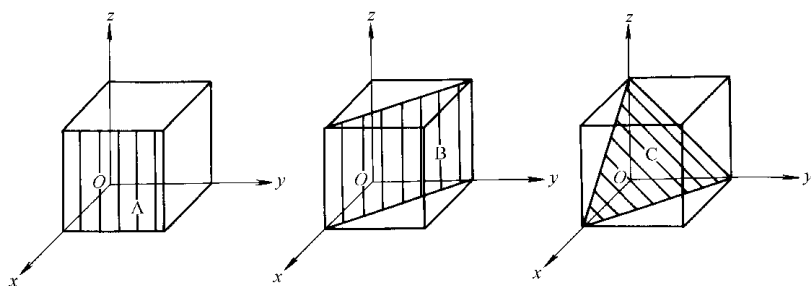


图 1-5 立方晶系的 (100) (110) (111) 晶面

从晶面指数的确定步骤可以看出，晶面指数 (hkl) 所表示的不仅仅是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位向相同的晶面，称为晶面组。

在同一种晶体晶格中，空间位向不同，但原子排列情况完全相同的晶面称作一个晶面族，其晶面指数用大括号 {hkl} 表示。例如：{100} 晶面族，包含 (100)、(010)、(001) 三组位向不同而原子排列相同的晶面；{110} 晶面族，包含 (110)、(101)、(011)、 $(\bar{1}10)$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(0\bar{1}1)$  六组位向不同而原子排列相同的晶面；{111} 晶面族，包含 (111)、 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 、 $(11\bar{1})$  四组位向不同而原子排列相同的晶面。

## (二) 晶向指数

以立方体晶格为例，确定晶向指数的方法包括如下三个步骤：

1. 设坐标 方法同晶面指数，但一般使所设坐标轴的原点  $O$  位于待定晶向的直线上。
2. 求坐标值 以晶格常数为单位，求待定晶向上某结点处的三坐标值（也可采用坐标平移，以原点引平行直线或求待定晶向上任两点坐标取两点差值等方法求待定晶向的坐标值）。
3. 化整数 将所求三个坐标值按比例化为最小整数，用方括号 [ ] 括起，即得出所求晶向的晶向指数。晶向指数的一般形式用  $[uvw]$  表示。

图 1-6 为立方晶体中三个最具有代表意义的晶向的晶向指数。其中晶向  $OA$  的  $A$  结点坐标为 (1, 0, 0)，其晶向指数为  $[100]$ 。 $OB$  晶向的  $B$  结点坐标为 (1, 1, 0)，其晶向指数为  $[110]$ 。 $OC$  晶向的  $C$  结点坐标为 (1, 1, 1)，其晶向指数为  $[111]$ 。

同理， $[uvw]$  表示位向且方向相同的一组相互平行的晶向称作晶向组；而原子排列相同但空间位向不同的所有晶向称作晶向族，用  $\langle uvw \rangle$  表示。例如： $\langle 100 \rangle$  晶向族，包含  $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$  和方向与之相反的  $[\bar{1}00]$ 、 $[0\bar{1}0]$ 、 $[00\bar{1}]$  六组具有相同原子排列但空间位向不同的晶向； $\langle 110 \rangle$  晶向族，包含  $[110]$ 、 $[101]$ 、 $[011]$ 、 $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}01]$ 、 $[0\bar{1}1]$  和方向与之相反的  $[\bar{1}\bar{1}0]$ 、 $[\bar{1}0\bar{1}]$ 、 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 、 $[1\bar{1}0]$ 、 $[10\bar{1}]$ 、 $[01\bar{1}]$  十二组具有相同原子排列但空间位向不同的晶向； $\langle 111 \rangle$  晶向族，包含  $[111]$ 、 $[\bar{1}11]$ 、 $[1\bar{1}1]$ 、 $[11\bar{1}]$  和方向与之相反的  $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 、 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 、 $[\bar{1}1\bar{1}]$ 、 $[\bar{1}\bar{1}1]$  八组具有相同原子排列但空间位向不同的晶向。

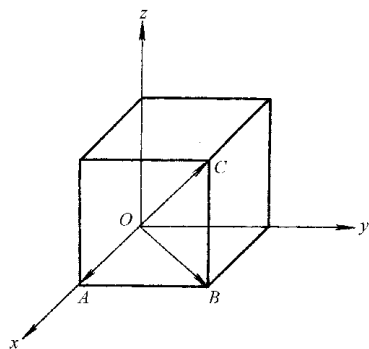


图 1-6 立方晶系中的  $[100]$   
 $[110]$   $[111]$  晶向

此外，在立方晶系中，当晶向位于或平行于晶面时必须满足以下关系：

$$hu + kv + lw = 0$$

当晶向与晶面相互垂直时，则其晶向指数和晶面指数必须完全相等，即：

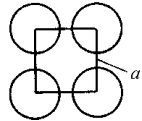
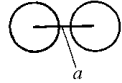
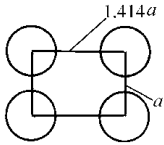

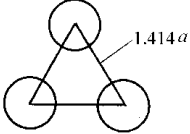
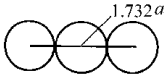
$$u = h \quad v = k \quad w = l。$$

### (三) 晶体的各向异性

晶体晶面和晶向上的原子排列情况常用晶面上的原子密度和晶向上的原子密度来表示。

晶面上的原子密度指其单位面积上所截原子个数，晶向上的原子密度指其单位长度上所截原子个数。表 1-2 列出了体心立方晶格各主要晶面和晶向上的原子密度。

表 1-2 体心立方晶格各主要晶面和晶向上的原子密度

晶面指数	晶面示意	晶面密度/ (原子数/面积)	晶向指数	晶向示意	晶向密度/ (原子数/长度)
{100}		$1/a$	<100>		$1/a$
{110}		$\sqrt{2}/a$	<110>		$\sqrt{2}/2a$
{111}		$\sqrt{3}/3a$	<111>		$2\sqrt{3}/3a$

由表可见，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 <111>。同理可求，面心立方晶格中具有最大原子密度的晶面是 {111}，具有最大原子密度的晶向是 <110>。

由于在晶体晶格中不同的晶面和晶向上原子排列的紧密程度不同，说明晶体沿不同晶面和晶向原子之间的结合力不同，从而使晶体沿不同方向显示出性能上的差异，这就是晶体的各向异性。

晶体的各向异性是其区别于非晶体的重要标志之一。例如具有体心立方晶格的铁按不同方向测其弹性模量，沿 <111> 方向  $E=290\ 000\text{MPa}$ ；沿 <100> 方向  $E=135\ 000\text{MPa}$ 。晶体的各向异性在其化学性能、物理性能和力学性能等方面都同样会表现出来。

但必须指出，工业所用金属材料中，通常见不到这种各向异性的特征。因为上面所讨论的金属晶体都是理想状态的晶体结构，而实际金属晶体结构与理想晶体结构相差很远。如对实际应用的体心立方铁测其弹性模量，不论从何种位向取样，其弹性模量  $E$  均在  $210\ 000\text{MPa}$  左右。为此，需要进一步讨论实际金属的晶体结构。

## 第二节 实际金属的晶体结构

### 一、多晶体结构和亚结构

在上节讨论中，是把金属晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列堆垛而成，其内部的晶格位向完全一致，完整无缺，这种晶体称为单晶体或理想单晶体。在工业生产中，除非经过特殊制作才能获得内部结构相对完整的单晶体。一般所用工业金属材料，即使是体积很小，其内部仍包含有许许多多的小晶体，每个小晶体的内部的晶格位向相对一致，而各个小晶体彼此间位向各不相同，如图 1-7 所示。把这种外形不规则的小晶体称作晶粒。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种实际上由多个晶粒组成的晶体称作多晶体。由于实际金属是多晶体结构，一般测不出其像在单晶体中那样的各向异性，测出的是各位向不同的晶粒的平均性能，结果使实际金属不表现各向异性，而显示出各向同性。这就是上述的体心立方铁的弹性模量不论从何种位向取样， $E$  都是 210 000MPa 的原因。

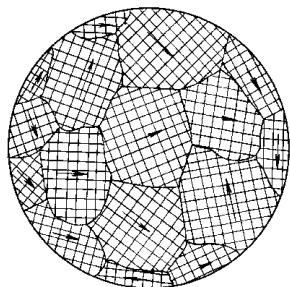


图 1-7 金属多晶体晶体结构示意图

晶粒的尺寸通常很小，如钢铁材料的晶粒一般在  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  mm 左右，只有在金相显微镜下才能观察到，把在金相显微镜下所观察到的金属中各种晶粒的大小、形态和分布的图形叫作显微组织或金相组织。如图 1-8 是在金相显微镜下所观察到的纯铁（铁素体）和高锰钢（单相奥氏体）的显微组织。

实践证明，在多晶体的每个晶粒内部，实际上也并不像理想单晶体那样晶格位向完全一致，而是存在着许多尺寸更小，位向差也很小（一般是  $10' \sim 20'$  左右，最大到  $1^\circ \sim 2^\circ$ ）的小晶块。它们相互嵌镶成一颗晶粒，这些在晶格位向上彼此有微小差别的晶内小区域称为亚结构或嵌镶块。因其尺寸更小，须在高倍显微镜或电子显微镜下才能观察到。

### 二、实际金属晶体缺陷

实际金属是多晶体结构，晶粒内存在着亚结构。同时，由于结晶条件等原因，会造成晶体内部某些局部区

a)

b)

图 1-8 纯铁的显微组织

a) 纯铁（铁素体）200× b) 高锰钢（单相奥氏体）300×

域原子排列的规则性受到干扰而破坏，不像理想晶体那样规则和完整。把这种偏离理想状态的区域称为晶体缺陷或晶格缺陷。这种局部存在的晶体缺陷对金属性能影响很大，按晶体缺陷的几何形态特征分为以下三类：

### (一) 点缺陷

空间三维尺寸都很小，都相当于原子尺寸的缺陷，包括空位、间隙原子和置换原子等。

在实际晶体结构中，晶格的某些结点若未被原子所占据则形成空位。空位是一种平衡含量极小的热平衡缺陷，随晶体温度升高，空位的含量也随之提高。

晶体中有些原子不占有正常的晶格结点位置，而处于晶格间隙中称为间隙原子。同类原子晶格不易形成间隙原子，异类间隙原子大多数是原子半径很小的原子，如钢中的氢、氮、碳、硼等。

晶体中若有异类原子，异类原子占据了原来晶格中的结点位置，替换了某些基体原子则形成置换原子。

由于点缺陷的存在，使其周围的原子离开了原来的平衡位置，造成晶格畸变。如图 1-9 所示。

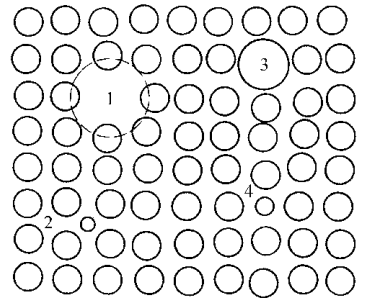
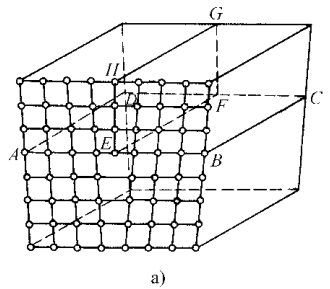
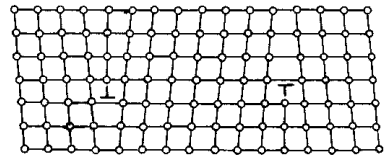


图 1-9 点缺陷示意图

1—空位 2—间隙原子 3、4—置换原子



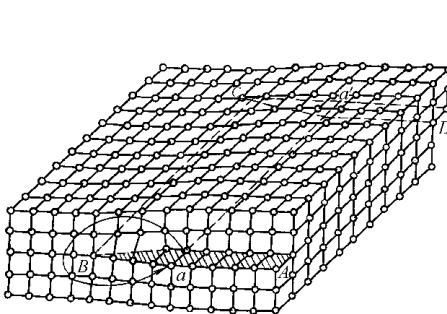
a)



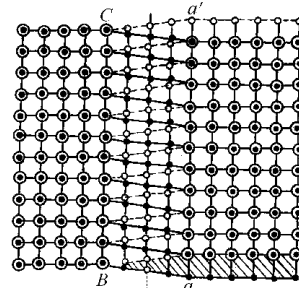
b)

图 1-10 刃型位错示意图

位错是晶体中某处有一列或若干列原子发生有规律的错排现象。可看作是晶体中一部分晶体相对于另一部分晶体产生局部滑移而造成的，滑移部分与未滑移部分的交界线即为位错线。晶体中位错的基本类型有刃型位错和螺型位错两种：刃型位错模型如图 1-10 所示，某一原子面在晶体内部中断，宛如用一把锋利的钢刀切入晶体沿切口插入一额外半原子面一样，刃口处的原子列即为刃型位错线；螺型位错模型如图 1-11 所示，相当于钢刀切入晶体后，被切的上下两部分沿刃口相对错动了



a)



• 上层原子 位错线

• 下层原子

b)

图 1-11 螺型位错示意图

子发生了错排和不对齐的现象，沿刃口的错排原子被扭曲成了螺旋形即为螺旋型位错线。无论是刃型位错还是螺旋型位错，沿位错线周围原子排列都偏离了平衡位置，产生晶格畸变。

金属晶体中往往存在有大量的位错线，通常用位错密度  $\rho$  来表示：

$$\rho = S/V$$

式中  $V$ ——晶体体积 ( $\text{cm}^3$ )；

$S$ ——体积  $V$  内位错线的总长度 ( $\text{cm}$ )。

$\rho$  的单位用  $\text{cm}/\text{cm}^3$  或  $\text{cm}^{-2}$  表示。一般经适当退火的金属中，位错密度  $\rho \approx 10^6 \sim 10^8 \text{cm}^{-2}$ 。

### (三) 面缺陷

空间三维一维尺寸很小，在原子尺寸范围内，另外二维尺寸相对很大的缺陷，包括晶界、亚晶界和相界等。

实际金属是多晶体，各晶粒间位向不同，晶界处原子排列的规律性受到破坏。晶界实际上是不同位向晶粒之间原子排列无规则的过渡层。亚晶界同样是小区域的原子排列无规则的过渡层。过渡层中晶格产生了畸变，如图 1-12 所示。相界是具有不同晶体结构的两相之间的分界面，相界上的原子偏离平衡位置产生畸变。

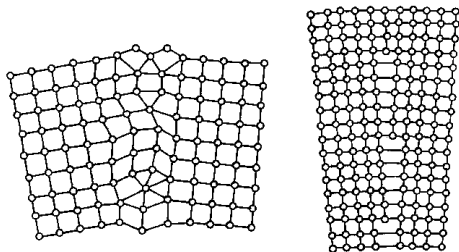


图 1-12 晶界、亚晶界的过渡区结构示意图

晶体缺陷处及其周围均有明显的晶格畸变产生，引起晶格能量的升高，使金属的物理、化学和力学性能发生显著变化。

## 第三节 纯金属的结晶与铸锭组织

### 一、结晶基础

一切物质从液态转变为固态的过程称为凝固。通过凝固能形成晶体结构则称为结晶。金属自液态经冷却转变为固态的过程，通常是原子由不规则排列的液态向规则排列的晶体状态转变的过程，故属于结晶过程。

纯金属都有一个固定的熔点或称平衡结晶温度。也就是说，纯金属的结晶过程总是在一个恒定温度下进行。金属的平衡结晶温度可用热分析等实验方法来测定。

将金属加热熔化成液体，如果在无限缓慢冷却条件下平衡结晶，所得到的结晶温度称为平衡结晶温度或理论结晶温度，常用  $T_0$  表示。但在实际结晶中，冷却都有一定的冷却速度，此时，液态金属将在理论结晶温度  $T_0$  以下某一温度  $T_n$  才开始结晶，如图 1-13 所示。金属的实际结晶温度  $T_n$  低于理论结晶温度  $T_0$  的这一现象称为过冷现象。理论结晶温度与实际结晶温度的差  $T_0 - T_n = \Delta T$  称为过冷度。金属液体的冷却速度越大，过冷度越大。

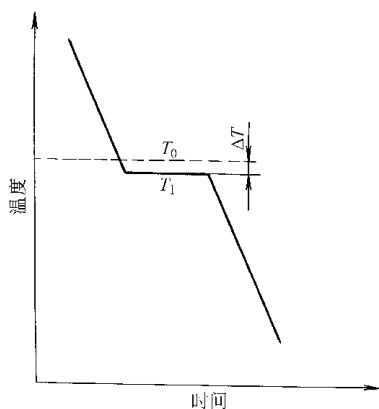


图 1-13 纯金属结晶时

的冷却曲线