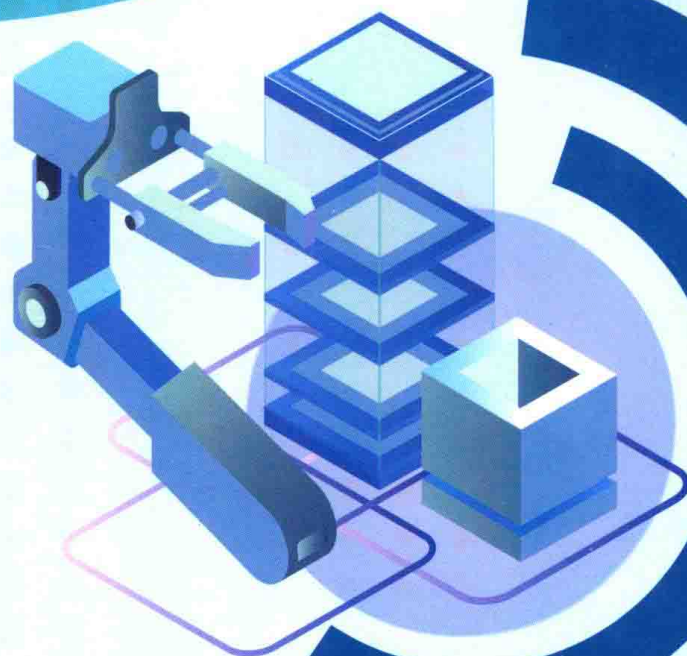


普通高等教育材料及工程类专业精品系列教材
国家级一流专业(材料科学与工程)建设成果系列教材

机械工程材料基础

主 编 胡 勇 郑建军 闫敏艳



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育材料及工程类专业精品系列教材
国家级一流专业（材料科学与工程）建设成果系列教材

机械工程材料基础

主 编	胡 勇	郑建军	闫敏艳
副主编	刘宝胜	宫长伟	马 强
	张晓华	张少华	
主 审	张代东		

内 容 简 介

本书包括4个部分：金属学基础、热处理原理与工艺、金属材料和其他常用工程材料。其中，第1~4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5章属于热处理原理与工艺，主要介绍钢的强化、改性和表面技术的应用；第6~8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型工艺方法及选择；第9章为其他常用工程材料，主要介绍了高分子材料、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。

本书可作为高等院校非材料专业的机械类和近机类专业教材，亦可供机械设计和生产部门工程技术人员阅读参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (C I P) 数据

机械工程材料基础 / 胡勇, 郑建军, 闫敏艳主编

. --北京: 北京理工大学出版社, 2023. 5 (2023. 7 重印)

ISBN 978-7-5763-2394-8

I. ①机… II. ①胡… ②郑… ③闫… III. ①机械制
造材料-高等学校-教材 IV. ①TH14

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 090844 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京广达印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.75

字 数 / 417 千字

版 次 / 2023 年 5 月第 1 版 2023 年 7 月第 2 次印刷

定 价 / 49.80 元

责任编辑 / 多海鹏

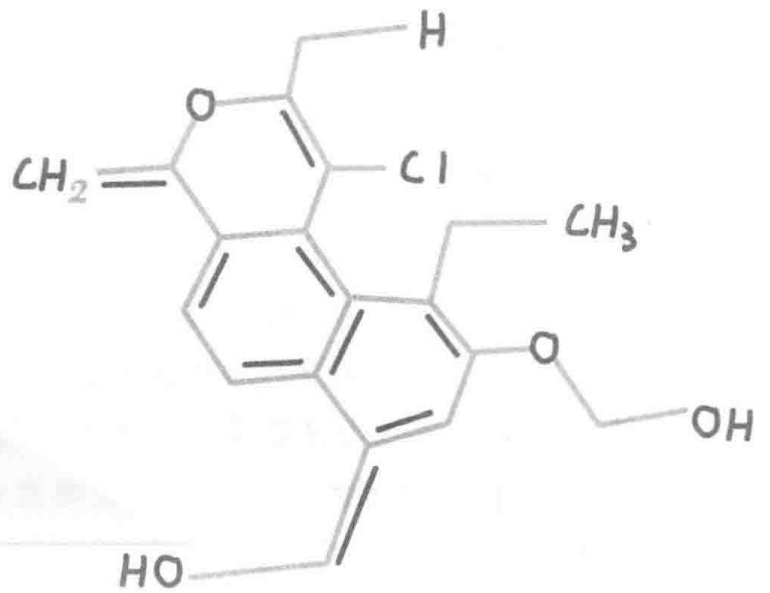
文案编辑 / 闫小惠

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言



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、科学技术及人民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、有机非金属）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，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，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、化工等行业得到了广泛的应用。最后，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型和进行性能调整，以满足不同场合工件的使用要求。

金属材料的各种性能取决于其内部的组织结构，而本教材的基本任务就是阐述金属材料的成分、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，提高金属材料的使用性能。

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，展示了巨大的开发潜力和广阔的应用前景。

高分子材料产量年增长率很高，其产量按体积计算已超过钢产量。高分子材料不仅具有良好的力学性能（可代替一部分钢铁等金属材料），还具有良好的导电、耐高温等特殊性能。陶瓷材料除具有高硬度、高耐磨性等特殊性能外，其脆性及抗振性已逐步改善，有望成为理想的高温工程材料。复合材料的显著

特点是具有很强的可设计性，它由两种或两种以上性质不同的材料组成一种多相材料，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。

本教材全面贯彻落实党的二十大精神。党的二十大报告明确提出，“加快建设教育强国、科技强国、人才强国，坚持为党育人、为国育才，全面提高人才自主培养质量，着力造就拔尖创新人才”，“深化教育领域综合改革，加强教材建设和管理”。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，本教材内容体系中所涉及的材料科学基础知识，本着必需、够用的原则，突出了结构工程材料的选择、使用和加工等技术应用的内容。本教材具有以下特点。

(1) 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、加工工艺、性能与服役性能之间的关系。

(2) 材料的强韧化、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、经济上的意义不言而喻。所以，本教材将这一部分内容作为材料科学技术的一个重要组成部分，所包含的内容也不单是传统教学内容中的钢的热处理。

(3) 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显得更为迅速，应用也日益广泛，作用也更令人瞩目。因此，本教材将其作为一个重要组成部分做了介绍，力求详略得当、突出应用，既统筹考虑，又突出重点。

(4) 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，根据实际应用的需要，适当增加了新工艺方面的内容。

(5) 目前国内正在贯彻新的标准，因此本教材对材料、热处理工艺名词和部分内容及一些标准做了补充和更新。

“机械工程材料基础”是机械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。

“机械工程材料基础”是以物理、化学、材料力学、金属工艺学等为基础的一门课程。在学习中应根据教学目标和要求注意以下内容。

(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) 掌握常用成型工艺方法。学习中一定要掌握常用成型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型工艺的原则和方法。通过基础的学习，要学会选择零件材料及成型工艺的原则、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、成型工艺及强化方法，并正确安排加工工艺路线的综合能力。

(4) 应用为主。不论是理论知识学习，还是成型技术的学习，都应将重点放在对材料成分、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。

本书的编写人员均来自太原科技大学材料科学与工程专业。第1章、第7章由胡勇编写，第2章、附录由闫敏艳编写，第3章由郑建军编写，第4章由官长伟编写，第5章由马强编写，第6章由刘宝胜编写，第8章由张少华编写，第9章由张晓华编写。全书由胡勇、郑建军、闫敏艳担任主编，由太原科技大学张代东教授担任主审。

由于编者水平所限，本书难免存在疏漏之处，恳请各位读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

第 1 章 金属的晶体结构与结晶	001
1.1 金属的晶体结构	001
1.1.1 晶体与非晶体	001
1.1.2 晶格与晶胞	002
1.1.3 典型的金属晶体结构	002
1.1.4 典型晶格的配位数和致密度	004
1.1.5 晶面指数和晶向指数	005
1.1.6 晶体的各向异性	006
1.2 实际金属的晶体结构	007
1.2.1 多晶体结构和亚结构	007
1.2.2 实际金属晶体缺陷	008
1.3 金属的结晶与铸锭组织	011
1.3.1 结晶基础	011
1.3.2 结晶过程	012
1.3.3 晶粒大小及控制方法	013
1.3.4 金属铸锭组织	014
习题	016
第 2 章 合金的相结构与二元合金相图	017
2.1 合金的相结构	017
2.1.1 固溶体	018
2.1.2 中间相	022
2.2 相图的基本知识	025
2.2.1 相图的表示方法	025
2.2.2 相图的建立	026
2.2.3 相律与杠杆定律	027



2.3 匀晶相图	029
2.3.1 相图分析	029
2.3.2 固溶体合金的平衡凝固	030
2.3.3 固溶体合金的非平衡凝固	030
2.4 二元共晶相图	031
2.4.1 相图分析	031
2.4.2 共晶系合金的平衡凝固	032
2.4.3 共晶系合金的非平衡凝固	035
2.5 二元包晶相图	036
2.5.1 相图分析	036
2.5.2 包晶系合金的平衡凝固	036
2.5.3 包晶系合金的非平衡凝固	038
2.6 其他类型的二元合金相图	038
2.6.1 其他具有恒温转变特征的相图	038
2.6.2 组元间形成化合物的相图	040
2.7 二元合金相图的分析 and 应用	041
2.7.1 二元合金相图的几何规律	041
2.7.2 二元合金相图的分析	042
2.7.3 二元合金相图的应用	043
习题	044
第3章 铁碳合金相图	046
3.1 铁碳合金的基本相	047
3.1.1 铁素体	047
3.1.2 奥氏体	047
3.1.3 渗碳体	048
3.2 铁碳合金相图分析	048
3.2.1 特性点	048
3.2.2 特性线	048
3.2.3 三条重要的转变水平线	050
3.2.4 特性区	051
3.3 铁碳合金平衡结晶分析	051
3.3.1 铁碳合金的分类	051
3.3.2 典型合金的冷却过程分析	052
3.4 铁碳合金相图的应用	060
3.4.1 Fe-Fe ₃ C 相图在选材上的应用	060
3.4.2 Fe-Fe ₃ C 相图在制订热加工工艺方面的应用	061
3.4.3 Fe-Fe ₃ C 相图的局限性	062
习题	063

第4章 金属材料的塑性变形与再结晶	064
4.1 金属材料的塑性变形特征	064
4.1.1 金属材料变形特性	064
4.1.2 单晶体金属的塑性变形	065
4.1.3 多晶体金属的塑性变形	068
4.1.4 合金的塑性变形	069
4.2 塑性变形对组织和性能的影响	070
4.2.1 显微组织的变化	070
4.2.2 塑性变形对金属性能的影响	071
4.2.3 残余应力	072
4.3 回复与再结晶	073
4.3.1 回复	073
4.3.2 再结晶	074
4.3.3 晶粒长大	074
4.3.4 影响再结晶后晶粒大小的因素	075
4.4 金属材料的热加工	076
4.4.1 热加工与冷加工的区别	077
4.4.2 热加工对材料的组织和性能的影响	077
习题	079
第5章 钢的热处理	080
5.1 概述	080
5.2 钢在加热时的转变	082
5.2.1 奥氏体的形成过程	082
5.2.2 影响奥氏体形成速度的因素	083
5.2.3 奥氏体晶粒的长大及其影响因素	084
5.3 过冷奥氏体的转变产物及性能	085
5.3.1 珠光体类型组织转变	085
5.3.2 贝氏体类型组织转变	087
5.3.3 马氏体类型组织转变	089
5.4 过冷奥氏体转变曲线图	093
5.4.1 过冷奥氏体等温转变曲线图	093
5.4.2 过冷奥氏体连续冷却转变曲线图	096
5.5 钢的退火和正火	097
5.5.1 退火和正火的定义、目的和分类	097
5.5.2 退火和正火操作及其应用	098
5.6 钢的淬火	103
5.6.1 淬火的定义和目的	103



5.6.2	淬火温度的选择	104
5.6.3	淬火介质	104
5.6.4	常用的淬火方法	106
5.6.5	钢的淬透性	108
5.6.6	几种淬火新工艺的发展及应用	111
5.6.7	淬火缺陷	113
5.7	钢的回火	114
5.7.1	回火的目的	114
5.7.2	淬火钢在回火时的转变	114
5.7.3	回火的种类	116
5.8	钢的表面淬火	117
5.8.1	感应加热表面淬火	117
5.8.2	火焰加热表面淬火	119
5.9	钢的化学热处理	119
5.9.1	钢的渗碳	121
5.9.2	钢的渗氮	124
	习题	126
第6章 工业用钢		128
6.1	概述	128
6.2	碳钢及其牌号	129
6.2.1	常见元素对碳钢性能的影响	129
6.2.2	碳钢的分类	131
6.2.3	碳钢的牌号、性能和用途	131
6.3	钢中合金元素的作用	137
6.3.1	合金元素在钢中的分布	137
6.3.2	合金元素在钢中的作用	138
6.3.3	合金元素对Fe-Fe ₃ C相图的影响	139
6.3.4	合金元素对热处理工艺的影响	140
6.4	合金结构钢	144
6.4.1	低合金高强度结构钢	144
6.4.2	渗碳钢	146
6.4.3	渗氮钢	149
6.4.4	调质钢	151
6.4.5	弹簧钢	156
6.4.6	轴承钢	159
6.5	合金工具钢	162
6.5.1	刃具钢	163
6.5.2	模具钢	169

6.5.3 量具钢	175
6.6 特殊性能钢	176
6.6.1 不锈钢	176
6.6.2 耐热钢	183
6.6.3 耐磨钢	186
6.6.4 易切削钢	187
习题	189
第7章 铸铁	190
7.1 概述	190
7.1.1 铸铁的化学成分及性能特点	190
7.1.2 铸铁的石墨化及其影响因素	191
7.1.3 铸铁的分类	193
7.2 灰铸铁	194
7.2.1 灰铸铁的化学成分与组织	194
7.2.2 灰铸铁的变质处理	195
7.2.3 灰铸铁的热处理	196
7.3 可锻铸铁	197
7.3.1 可锻铸铁的化学成分	198
7.3.2 可锻铸铁的退火与组织	198
7.4 球墨铸铁	200
7.4.1 球墨铸铁的化学成分和制造工艺	200
7.4.2 球墨铸铁的性能	200
7.4.3 球墨铸铁的热处理	201
7.5 特殊性能铸铁	203
7.5.1 耐磨铸铁	203
7.5.2 耐热铸铁	204
7.5.3 耐蚀铸铁	205
习题	206
第8章 有色金属及其合金	207
8.1 铝及铝合金	207
8.1.1 工业纯铝	207
8.1.2 铝合金的分类	208
8.1.3 铝合金的强化原理	209
8.1.4 铸造铝合金及其应用	211
8.1.5 变形铝合金及其应用	219
8.2 铜及铜合金	222
8.2.1 工业纯铜	222



8.2.2 铜合金的分类	223
8.3 轴承合金	231
8.3.1 轴承合金的性能要求	231
8.3.2 常用的轴承合金	231
8.4 钛及钛合金	233
8.4.1 工业纯钛	233
8.4.2 钛合金化	234
8.4.3 工业用钛合金及分类	234
8.4.4 钛合金的热处理	236
习题	237
第9章 其他常用工程材料	238
9.1 高分子材料	238
9.1.1 高分子化合物的基本概念	238
9.1.2 高分子化合物的结构	240
9.1.3 高分子化合物的力学状态	241
9.1.4 高分子材料的老化及其改性	242
9.1.5 常用高分子材料	243
9.2 陶瓷材料	246
9.2.1 陶瓷材料的基本概念	246
9.2.2 陶瓷材料的结构	248
9.2.3 陶瓷材料的性能	250
9.2.4 陶瓷材料的脆性及增韧	250
9.2.5 常用的工程陶瓷	251
9.3 复合材料	255
9.3.1 复合材料的组成和分类	256
9.3.2 复合材料的增强机制和性能	258
9.3.3 常用复合材料	260
习题	264
附录A 力学性能名称和符号新旧对照表	265
附录B 金属材料常用的浸蚀剂	266
附录C 各种硬度（维氏、布氏、洛氏）换算表	267
参考文献	271

第 1 章

金属的晶体结构与结晶

【学习目标】

本章的学习目标是熟悉金属的典型晶体结构，掌握晶面指数和晶向指数的确定方法，了解三类常见的实际金属晶体缺陷，理解金属的结晶过程和晶粒大小的影响因素，掌握金属铸锭宏观组织中的三晶区及其形成原因。

【学习重点】

本章的学习重点是晶面指数和晶向指数的确定方法。

【学习导航】

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。金属内部结构的研究通常把金属原子作为基本单位，讨论金属原子间的相互结合及原子排列规律等。金属在固态下通常是晶体，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。

1.1 金属的晶体结构

1.1.1 晶体与非晶体

晶体是指分子、原子或离子在三维空间做有规律的周期性重复排列所形成的固态物质。在自然界中，包括金属在内的大多数固态物质都属于晶体。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。但实际金属及其制品，一般则看不到规则的几何外形。

非晶体在整体上是无序的，但原子间也靠化学键结合在一起，所以在尺度很小的范围内

还存在一定的规律，可将非晶体的这种结构称为短程有序。少数物质，如玻璃、松香、木材、棉花等属于非晶体。

晶体中的原子呈一定规则周期性的重复排列，造成晶体具有不同于非晶体的一些重要特性：晶体可具有规则的几何外形；晶体具有固定的熔点；晶体具有各向异性。

虽然晶体与非晶体之间存在本质的差别，但并不意味着两者之间必然存在不可逾越的鸿沟。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，这些转变使物体的性能也产生了极大的变化。

1.1.2 晶格与晶胞

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刚球，晶体即由这些刚球堆垛而成，形成原子堆垛的球体几何模型，如图 1-1 (a) 所示。这种模型的优点是立体感强，很直观，但刚球密密麻麻地堆垛在一起，很难看清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，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 1-1 (b) 所示。各连线的交点称作结点，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构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，可以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点，如图 1-1 (c) 所示。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）和棱边夹角 α 、 β 、 γ 来表示。晶格常数以 Å 为计量单位。

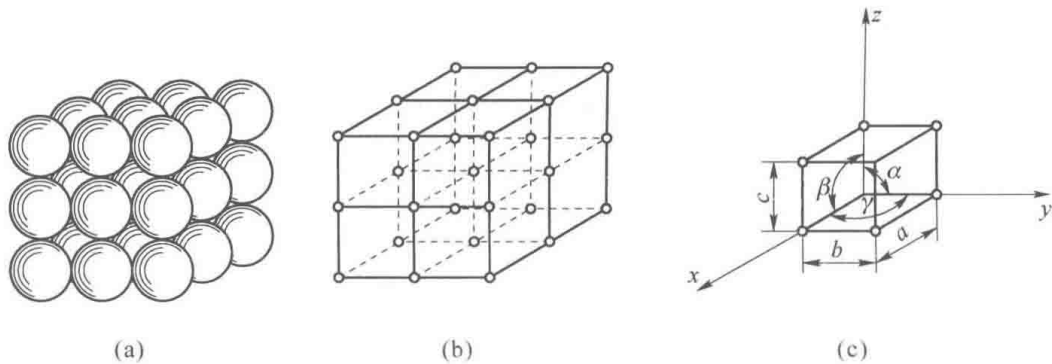


图 1-1 立方晶体
(a) 球体几何模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

1.1.3 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、原子间的结合力等性质有关。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做高速运动，形成电子云。金属的这种结合方式称作金属键。



根据金属键的本质,可解释固态金属的金属特性:在外电势作用下,自由电子做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,使金属具有正电阻温度系数;自由电子容易吸收可见光的能量,而被激发到高能级,当它跳回原来的低能级时,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。

金属键的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,故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。金属元素中约有90%的晶体结构都属于如下三种典型的结构形式。

1. 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,晶胞的三条棱边长度 $a=b=c$,通常只用一个晶格常数 a 表示即可。三条棱边之间夹角均为 90° 。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,所以单个晶胞中的原子数为 $(1/8)\times 8+1=2$ 个。

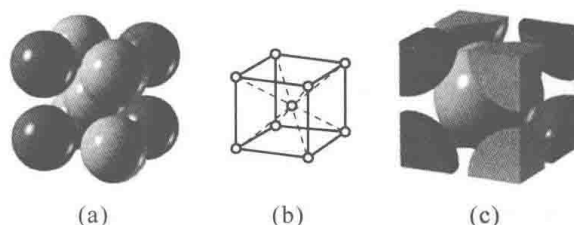


图1-2 体心立方晶格的晶胞模型

(a) 刚球模型; (b) 质点模型; (c) 晶胞原子数

在体心立方晶胞中,原子沿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 α -Fe、Cr、V、Nb、Mo、W、 β -Ti等。

2. 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,所以单个晶胞中的原子数为 $(1/8)\times 8+(1/2)\times 6=4$ 个。

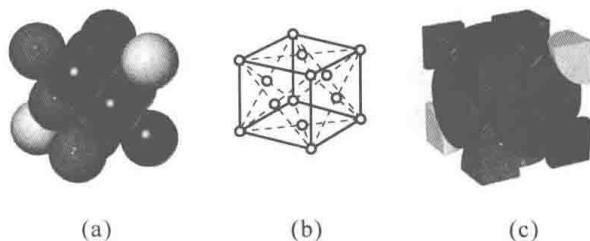


图1-3 面心立方晶格的晶胞模型

(a) 刚球模型; (b) 质点模型; (c) 晶胞原子数

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 γ -Fe、Cu、Ni、Al、Ag、Au、Pb、Pt、 β -Co 等。

3. 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 $c/a = \sqrt{8/3} \approx 1.633$ 。密排六方晶格中属于单个晶胞的原子数为 $(1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 + 3 = 6$ 个。

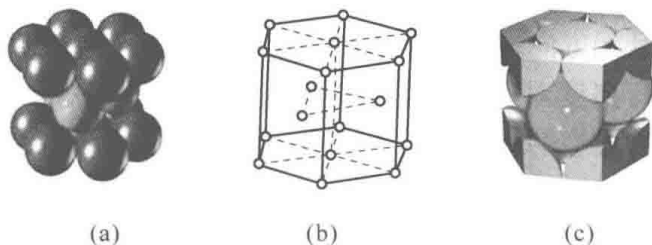


图 1-4 密排六方晶格的晶胞模型

(a) 刚球模型；(b) 质点模型；(c) 晶胞原子数

对于典型的密排六方晶格金属，六边形上相邻的两个原子紧密地接触排列，长度为 a ，等于 2 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、 α -Ti、 α -Co 等。

1.1.4 典型晶格的配位数和致密度

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，另一个是致密度。

1. 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，晶体中的原子排列越紧密。

2. 致密度

球体几何模型中，把原子看作刚球，原子与原子之间必然存有空隙。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

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

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数据。由表中数据可见，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，属于最密排排列方式。体心立方晶格次之，属次密排排列方式。

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

1.1.5 晶面指数和晶向指数

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物面指数，用来表示晶向的符号称作物向指数。

1. 晶面指数

以立方晶格为例，确定晶面指数的步骤如下。

(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，取倒数的目的是避免晶面指数出现 ∞ 。

(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 为立方晶格中三个最具代表意义的晶面。其中晶面 A 在三个坐标轴上的截距分别为 1 、 ∞ 、 ∞ ，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 、 ∞ ，取其倒数为 1 、 1 、 0 ，则其晶面指数为 (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) 。

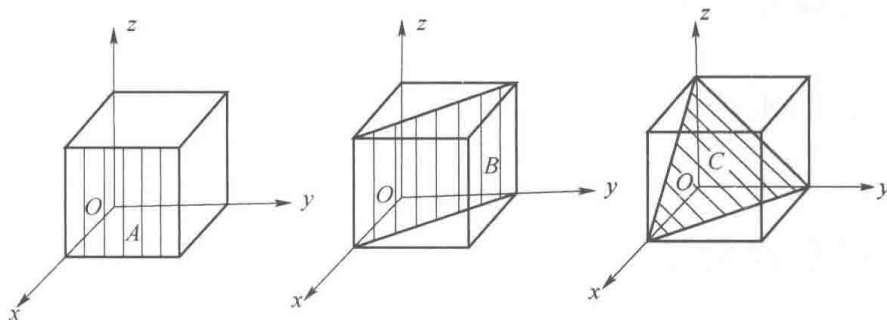


图 1-5 立方晶格中的 (100) (110) (111) 晶面

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，而是泛指该晶格中那些与其平行的位向相同的所有晶面，称为晶面组。

在同一个晶体晶格中，空间位向不同，但原子排列情况完全相同的晶面均属于一个晶面族，其晶面指数用 $\{hkl\}$ 表示（若有负数，则用数字上方的横线表示负号）。例如： $\{100\}$ 晶面族，包括 (100) 、 (010) 、 (001) 3 组空间位向不同而原子排列相同的晶面； $\{110\}$ 晶面族，包含 (110) 、 (101) 、 (011) 、 $(\bar{1}10)$ 、 $(\bar{1}01)$ 、 $(0\bar{1}1)$ 6 组空间位向不同而原子排列相同的晶面； $\{111\}$ 晶面族，包含 (111) 、 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 、 $(\bar{1}1\bar{1})$ 、 $(1\bar{1}\bar{1})$ 4 组空间位向不同而原子排列相同的晶面。

2. 晶向指数

以立方晶格为例，确定晶向指数的步骤如下。

(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