



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

工程材料与机械 制造基础

主编 苏子林



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

工程材料与机械制造基础

主 编	苏子林	
副主编	张铁军	郭宏亮
参 编	王保卫	李洪斌
	李长河	陈峥峰
	葛振亮	姜婷婷
主 审	王亮申	冯宝富



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书的编写按照教育部提倡的教学改革“宽口径、少学时”的新要求,以加强学生素质和能力的培养,提高学生的综合应用能力和适应性为目标,突出应用。

本书分为6章,主要内容包括工程材料与机械制造基础两个部分,工程材料部分可根据本专业工程材料课程的设置和先修情况在教学中选用。工程材料部分主要包括工程材料的性能、二元合金与铁碳合金相图、金属材料与非金属材料、热处理;机械制造基础部分主要包括铸造、塑性成形、焊接、切削加工和先进制造技术。每一章都设有教学目标、教学要求、引例、特别提示、知识链接、本章小结和习题等内容,以便于教学。

本书可作为高等工科院校机械工程、机械设计制造及其自动化、工业工程、材料成形及控制工程等专业教材,也可作为工科非机械类专业教材,还可作为企业中从事机械设计和机械制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与机械制造基础/苏子林主编. --北京:北京大学出版社, 2009. 10

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-15899-9

I. 工… II. 苏… III. ①工程材料—高等学校—教材②机械制造工艺—高等学校—教材
IV. TB3 TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 173690 号

书 名: 工程材料与机械制造基础

著作责任者: 苏子林 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-15899-9/TH·0165

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24 印张 558 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

工程材料与机械制造基础是机械工程类专业教学指导委员会推荐设置的一门综合性主干技术基础课程。本书的目标是加强学生素质和能力的培养,提高学生的综合应用能力和适应性,适应教学改革的“宽口径、少学时”的新要求。本书主要面向高等工科院校机械工程类专业,也可用于工科近机械类、非机械类专业。

本书主要包括工程材料与机械制造基础两个部分,工程材料部分可根据本专业工程材料课程的设置和先修情况在教学中选用。工程材料部分的主要内容包括工程材料的性能、二元合金与铁碳合金相图、金属材料与非金属材料、热处理;机械制造基础部分的主要内容包括铸造、塑性成形、焊接、切削加工和先进制造技术。每一章都设有教学目标、教学要求、引例、特别提示、知识链接、本章小结和习题等内容,以便于教学。

本书由鲁东大学苏子林担任主编,烟台大学张铁军和聊城大学郭宏亮担任副主编,由鲁东大学王亮申和冯宝富担任主审。编写分工如下:烟台大学张铁军、葛振亮、姜娉娉和鲁东大学的苏子林编写第1章工程材料,苏子林和张铁军编写第2章铸造,鲁东大学的王保卫和李洪斌编写第3章塑性成形和第4章焊接,聊城大学的郭宏亮和陈峥峰编写第5章切削加工,青岛理工大学的李长河编写第6章先进制造技术。

本书在编写和出版过程中,得到了许多专家和同仁的大力支持和帮助,也得到北京大学出版社的支持,在此谨向他们表示衷心的感谢!

由于编者的水平和经验有限,书中的不足之处在所难免,敬请广大读者和同行批评指正。

编 者

2009.7

目 录

第1章 工程材料 1

1.1 概述 2

1.1.1 工程材料的分类 2

1.1.2 材料的结合方式 4

1.1.3 金属的晶体结构 5

1.1.4 金属的结晶 13

1.2 工程材料的性能 16

1.2.1 静载时材料的力学性能 16

1.2.2 材料的动载力学性能 21

1.2.3 材料的高、低温力学性能 23

1.2.4 材料的断裂韧性 24

1.3 二元合金与铁碳合金相图 25

1.3.1 二元合金的结晶 25

1.3.2 二元合金相图 29

1.3.3 合金的性能与相图的关系 34

1.3.4 铁碳合金的结晶 36

1.4 金属材料 44

1.4.1 碳钢 44

1.4.2 铸钢 48

1.4.3 铸铁 49

1.4.4 铝及铝合金 57

1.4.5 铜及铜合金 61

1.5 热处理 65

1.5.1 钢在加热时的转变 66

1.5.2 钢在冷却时的转变 68

1.5.3 钢的普通热处理 72

1.5.4 钢的回火 78

1.5.5 形变热处理 80

1.5.6 钢的表面热处理 82

1.5.7 钢的化学热处理 83

1.5.8 钢的热处理新技术 86

1.5.9 热喷涂技术 87

1.5.10 气相沉积技术 88

1.5.11 激光表面改性 89

1.6 非金属材料 90

1.6.1 塑料 90

1.6.2 橡胶 92

1.6.3 陶瓷材料 94

习题 95

第2章 铸造 97

2.1 铸造理论基础 99

2.1.1 金属的凝固 99

2.1.2 金属与合金的铸造性能 101

2.1.3 铸造性能对铸件质量的影响 105

2.2 砂型铸造方法 110

2.2.1 手工造型 111

2.2.2 机器造型 112

2.2.3 造型生产线简介 114

2.3 特种铸造方法 115

2.3.1 熔模铸造 115

2.3.2 金属型铸造 117

2.3.3 压力铸造 118

2.3.4 低压铸造 119

2.3.5 离心铸造 120

2.3.6 挤压铸造 120

2.3.7 实型铸造 122

2.4 铸造工艺设计 122

2.4.1 浇注位置的选择 122

2.4.2 铸型分型面的选择 124

2.4.3 铸造工艺参数确定 125

2.4.4 铸造工艺简图绘制 125

2.5 铸件结构工艺性 127

2.5.1 铸造合金性能的影响 127

2.5.2 铸造工艺的影响 129

2.5.3 铸造方法的影响 130

2.6 铸造成形新发展 131

2.6.1 凝固理论推动的铸造 新发展	131	第4章 焊接	182
2.6.2 造型技术的新发展	133	4.1 焊接理论基础	184
2.6.3 计算机技术推动铸造的 新发展	134	4.1.1 熔焊冶金过程特点	184
本章小结	135	4.1.2 熔焊接头金属组织与 性能的变化	186
习题	136	4.1.3 金属的焊接性能	189
第3章 塑性成形	138	4.1.4 焊接应力与变形	195
3.1 塑性成形理论基础	141	4.2 焊接方法	200
3.1.1 塑性成形的实质	141	4.2.1 电弧焊	200
3.1.2 冷变形强化与再结晶	143	4.2.2 电渣焊	207
3.1.3 锻造比与锻造流线	144	4.2.3 压焊	208
3.1.4 塑性成形基本规律	145	4.2.4 钎焊	212
3.1.5 金属的锻造性能	146	4.2.5 其他常用焊接方法	214
3.2 金属的加热与锻件的冷却	148	4.3 焊接结构工艺设计	218
3.2.1 金属的加热	148	4.3.1 焊件的选材原则	218
3.2.2 锻件的冷却方式	149	4.3.2 焊接方法的选择	219
3.3 塑性成形方法	149	4.3.3 焊件的结构工艺性	220
3.3.1 锻造	149	4.4 焊接技术新发展	225
3.3.2 板料冲压	155	4.4.1 计算机控制技术在 焊接中的应用	225
3.3.3 其他塑性加工方法	161	4.4.2 先进无损检测技术	231
3.4 塑性成形工艺设计	166	本章小结	235
3.4.1 自由锻工艺规程的 制订	166	习题	236
3.4.2 自由锻工艺规程实例	168	综合实训	237
3.4.3 自由锻锻件的常见 缺陷	169	第5章 切削加工	239
3.4.4 模锻工艺规程的制订	170	5.1 切削加工理论基础	240
3.5 塑性加工方法的结构工艺性	173	5.1.1 切削运动、切削用量与 切削层参数	240
3.5.1 自由锻件的结构 工艺性	173	5.1.2 刀具几何角度及材料	242
3.5.2 模锻件的结构工艺性	174	5.1.3 金属切削过程	247
3.5.3 板料冲压件的结构 工艺性	174	5.1.4 切削力、切削热与 切削温度	249
3.6 常用塑性成形方法的选择	176	5.1.5 刀具磨损和刀具使用 寿命	253
3.7 塑性成形新发展	178	5.1.6 材料的切削加工性	256
本章小结	179	5.1.7 切削条件的合理选择	258
习题	180	5.2 金属切削刀具	260
综合实训	181	5.2.1 车刀	261
		5.2.2 铣刀	263

5.2.3 砂轮	265	6.2.4 超精密加工的关键 技术	349
5.2.4 孔加工刀具	269	6.2.5 超精密加工的工作 环境	350
5.2.5 复杂刀具	272	6.3 特种加工技术	350
5.3 金属切削机床	281	6.3.1 特种加工概述	350
5.3.1 金属切削机床的 基本知识	281	6.3.2 电火花加工	350
5.3.2 车床	284	6.3.3 电火花线切割加工	352
5.3.3 齿轮加工机床	289	6.3.4 电解加工	353
5.3.4 磨床	292	6.3.5 超声波加工	354
5.3.5 数控机床与加工中心	296	6.3.6 磨料喷射加工	355
5.3.6 其他各类机床	298	6.3.7 激光加工	356
5.4 机械加工工艺规程设计	299	6.3.8 电子束加工	357
5.4.1 概述	299	6.3.9 离子束加工	358
5.4.2 毛坯的选择与零件的 结构工艺性	302	6.4 快速成形技术	359
5.4.3 定位基准的选择	305	6.4.1 快速成形技术的原理	359
5.4.4 工艺路线的拟定	309	6.4.2 快速成形技术的典型 工艺方法	360
5.4.5 工序内容的确定	312	6.4.3 快速成形技术在模具 制造中的应用	361
5.4.6 工序尺寸计算	315	6.5 非金属材料的成形技术	363
5.4.7 工艺过程的生产率与 技术经济分析	319	6.5.1 塑料成形	363
5.4.8 典型零件的加工工艺	321	6.5.2 橡胶成形	364
5.4.9 成组技术与计算机辅助 工艺规程设计	326	6.5.3 陶瓷成形	365
本章小结	332	6.5.4 复合材料成形	365
习题	332	6.6 先进制造技术发展趋势	367
第6章 先进制造技术	335	6.6.1 先进制造技术定义	367
6.1 超高速加工技术	335	6.6.2 先进制造技术的特点	367
6.1.1 超高速切削加工技术	336	6.6.3 先进制造技术的范畴	367
6.1.2 超高速磨削加工技术	343	6.6.4 先进制造技术的发展 趋势	368
6.2 超精密加工技术	348	本章小结	371
6.2.1 超精密加工技术概述	348	习题	371
6.2.2 超精密加工的应用	348	参考文献	372
6.2.3 超精密加工的分类	349		

第1章 工程材料

教学目标

- (1) 理解并掌握工程材料的基础理论及基础知识。
- (2) 理解并掌握工程材料尤其是金属的结构，理解材料结构与性能之间的关系，尤其是强化工程材料性能的途径、基本原理与方法。
- (3) 掌握常用金属工程材料和复合材料的种类、结构特点、性能和应用，了解其应用范围。
- (4) 结合实例，初步具备合理选择材料、正确确定加工方法、妥善安排加工工艺路线的能力。
- (5) 了解新材料、新工艺、新方法等材料科学与工程前沿知识及未来材料发展的方向。

教学要求

能力目标	知 识 要 点	权重	自测分数
掌握材料结构的基础知识	材料的结合键、晶格的基本类型、实际金属的晶体结构及晶体缺陷、晶体缺陷对材料性能的影响、固溶体、金属化合物的类型及其对合金性能的影响	20%	
理解材料性能的测试分析的原理，使用性能的分类及其测试原理及方法	屈服强度、抗拉强度、延伸率、断面收缩率、冲击韧性、疲劳强度、断裂韧性、布氏硬度、洛氏硬度	15%	
掌握合金的结晶、细晶强化、同素异构转变、晶体的结构、固溶强化	合金的相结构、二元合金相图、铁碳合金的相结构与性能、铁碳合金相图	15%	
掌握合金的相结构、相图、铁碳合金相图	金属材料在加热和冷却时的转变、退火、正火、淬火、回火、钢的形变热处理和化学热处理	40%	
了解铸铁、碳钢、合金钢、有色金属及其合金、钢的热处理、高分子材料、陶瓷、复合材料、工程材料的新进展	常用金属材料的分类和编号、化学成分、相应热处理工艺及组织、性能特点和主要用途 工程塑料、工程陶瓷和复合材料的性能特点和应用	10%	



引例

铜车马, 如图 1.1 所示, 铜制, 高 104.2cm, 全长 328.4cm, 马高 92cm, 总重约 1200kg, 创作于秦朝, 出土于陕西临潼秦始皇陵西侧通往地宫的甬道中。这是 1980 年冬天在秦始皇陵西侧地下约 7 米处挖

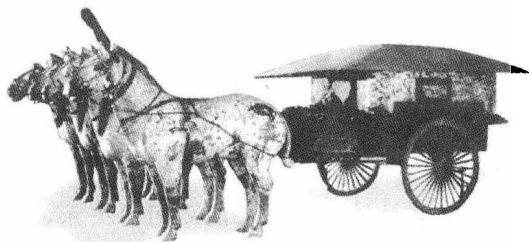


图 1.1 铜车马

掘出土的两辆大型铜车马之一。这两件作品都为单辕, 四马, 单御者编制, 尺寸约为实际车马的二分之一。一号车为伞盖, 驭手呈站立姿势, 其伞盖为圆形, 车厢为方形, 取天圆地方之意; 二号车为篷盖, 驭手作跪姿。它反映出秦代工艺制作的高超水平。同时, 它是目前发现年代最早、形体最大、保存最完整的铜铸车马, 对研究中国古代车马制度、雕刻艺术和冶炼技术等, 都具有极其重要的历史价值。

材料是用来制作有用器件的物质, 是人类生产和生活所必需的物质基础。从日常生活用的器具到高技术产品, 从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人, 都是用各种材料制作而成或由其加工的零件组装而成。纵观人类历史, 每一种新材料的出现并得以利用, 都会给社会生产与人类生活带来巨大的变化。历史学家按照人类所使用材料的种类将人类历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。材料的发展水平和利用程度已成为人类文明进步的标志之一。例如, 没有半导体材料的工业化生产, 就不可能有目前的计算机技术; 没有高温高强度的结构材料, 就不可能有今天的航空航天工业; 没有光导纤维, 也就没有现代的光纤通信。20 世纪 70 年代, 人们把材料与能源、信息并列, 称为现代文明的三大支柱, 而材料又是后两者的基础。

中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。早在公元前 6000 年~公元前 5000 年的新石器时代, 中华民族的先人就能用黏土烧制陶器, 到东汉时期又出现了瓷器, 并流传海外。4000 年前的夏朝时期, 我们的祖先已经能够炼铜, 到殷、商时期, 我国的青铜冶炼和铸造技术已达到很高水平。河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎质量达 87.5kg, 且饰纹优美。从湖北江陵楚墓中挖掘出的两把越王勾践的宝剑, 长 55.6cm, 至今锋利异常, 是我国青铜器的杰作。我国从春秋战国时期(公元前 770 年~公元前 221 年)便开始大量使用铁器, 明朝科学家宋应星在其所著的《天工开物》一书中就记载了古代的渗碳热处理等工艺。这说明早在欧洲工业革命之前, 我国在金属材料及热处理方面就已经有了较高的成就。中华人民共和国成立后, 我国先后建起了鞍山、攀枝花、宝钢等大型钢铁基地, 钢产量由 1949 年的 15.8 万吨上升到 2007 年的 7.52 亿吨, 已连续 13 年成为世界上钢产量第一大国。原子弹、氢弹的爆炸, 卫星、“神七”飞船的上天, 青藏铁路的建成通车, 南极科学考察等事件都说明了我国在材料的开发、研究及应用等方面有了飞跃性的发展, 达到了较高的水平。

1.1 概 述

1.1.1 工程材料的分类

工程材料是指在机械、船舶、化工、建筑、车辆、仪表、航空航天等工程领域中用于

制造工程构件和机械零件的材料。按照材料的组成、结合键的特点可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类。

1. 金属材料

金属材料是以金属键结合为主的材料，具有良好的导电性、导热性、延展性和金属光泽，是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两类，铁、锰、铬及其合金称为黑色金属，即钢铁材料。2007年其世界年产量已达12亿吨，在机械产品中的用量占全部用材的60%以上。黑色金属具有优良的机械性能，是最重要的工程金属材料。

黑色金属之外的所有金属及其合金称为有色金属。有色金属的种类很多，根据其特性的不同又可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属、易熔合金、稀土金属和碱土金属等。它们是重要的特殊用途材料。

2. 陶瓷材料

陶瓷材料属于无机非金属材料，是以共价键和离子键结合为主的材料，其性能特点是熔点高、硬度高、耐腐蚀、脆性大。陶瓷材料分为传统陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷三类。传统陶瓷又称普通陶瓷，是以天然材料(如黏土、石英、长石等)为原料的，主要成分为硅、铝氧化物的硅酸盐材料，主要用作建筑材料；特种陶瓷又称精细陶瓷，是以高熔点的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等人工合成材料为原料的烧结材料，常用作工程上的耐热、耐蚀、耐磨零件；金属陶瓷是金属与各种化合物粉末的烧结体，主要用于制作工具和模具。

3. 高分子材料

高分子材料为有机合成材料，亦称聚合物，是以分子键和共价键结合为主的材料。高分子材料由大量相对分子质量特别大的大分子化合物组成，每个大分子都包含有大量结构相同、相互连接的链节。有机物质主要以碳元素(通常还有氢)为其结构组成，在大多数情况下它构成大分子的主链。大分子内的原子之间由很强的共价键结合，而大分子与大分子之间的结合力为较弱的范德华力。由于大分子链很长，大分子之间的接触面比较大，特别当分子链交缠时，大分子之间的结合力是可以很大的，所以高分子材料的强度较高。在分子中存在氢原子时，氢键会加强分子间的相互作用力。

高分子材料具有塑性、耐蚀性、电绝缘性、减振性好及密度小等优良性能。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等，在机械、电气、纺织、汽车、飞机、轮船等制造工业和化学、交通运输、航空航天等工业中有广泛应用，也是在工程上发展最快的一类新型结构材料。和无机材料一样，高分子材料按其分子链排列有序与否，可分为结晶聚合物和无定形聚合物两类。结晶聚合物的强度较高，结晶度取决于分子链排列的有序程度。

4. 复合材料

复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料，通过这种组合可达到进一步提高材料性能的目的。复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料，如现代航空发动机燃烧室中耐热温度最高的材料就是通过粉末冶金法制备的氧化物粒子弥散强化的镍基合金复合材料。很多高

级游艇、赛艇及体育器械等都是由碳纤维复合材料制成的，它们具有密度低、弹性好、强度高优良性能。

复合材料就是两种或两种以上不同材料的组合材料，其性能优于它的组成材料。复合材料可以由各种不同种类的材料复合组成，所以它的结合键非常复杂。它在强度、刚度和耐蚀性方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越，是一类特殊的工程材料，具有广阔的发展前景。

特别提示

任何材料都是由原子组成的，原子的结合方式和排列决定了材料的性能。作为工程技术人员，要了解材料的性能并合理使用材料，必须首先掌握材料结构方面的知识。

1.1.2 材料的结合方式

工程材料通常是固态材料，是由各种原子通过原子、离子或分子的特定组合结合而成的。原子、离子或分子之间的结合力称为结合键。根据结合力的强弱，可以把结合键分为强键(离子键、共价键或金属键)和弱键(分子键)两类。

1) 金属键

元素周期表中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ族元素的原子在满壳层外有一个或几个价电子，原子很容易丢失其价电子而成为正离子。被丢失的价电子不为某个或某两个原子所专有或共有，而是为全体原子所共有。这些“公有化”的电子叫做自由电子，它们在正离子之间自由运动，形成所谓电子气。正离子在三维空间或电子气中呈高度对称的规则分布。正离子和电子气之间产生强烈的静电吸引力，使全部离子结合起来。这种结合力就叫做金属键。在金属晶体中，价电子弥漫在整个体积内，所有的金属离子皆处于相同的环境之中，全部离子(或原子)均可被看成具有一定体积的圆球，所以金属键无所谓饱和性和方向性。

金属由金属键结合，因此金属具有下列特性。

(1) 良好的导电性和导热性。金属中存在大量自由电子，当金属的两端存在电势差或外加电场时，电子可以定向地流动，使金属表现出优良的导电性。金属的导热性很好，一是由于自由电子的活动性很强，二是依靠金属离子振动的作用而导热。

(2) 正的电阻温度系数，即随温度升高电阻增大。绝大多数金属具有超导性，即在温度接近于绝对零度时电阻突然下降，趋近于零。加热时，离子(原子)的振动增强，空位增多，离子(原子)排列的规则性受干扰，电子的运动受阻，电阻增大。温度降低时，离子(原子)的振动减弱，则电阻减小。对于许多金属，在极低的温度($<20\text{K}$)下，由于自由电子之间结合成两个电子相反自旋的电子对，不易遭受散射，所以导电性趋于无穷大，产生超导现象。

(3) 金属中的自由电子能吸收并随后辐射出大部分投射到其表面的光能，所以金属不透明并呈现特有的金属光泽。

(4) 金属键没有方向性，原子间也没有选择性，所以在受外力作用而发生原子位置的相对移动时，结合键不会遭到破坏，使金属具有良好的塑性变形能力，金属材料的强韧性好。

2) 离子键

当元素周期表中相隔较远的正电性元素原子和负电性元素原子相接近时，正电性原子

失去外层电子变为正离子，负电性原子获得电子变为负离子。正、负离子通过静电引力互相吸引，当离子间的引力与斥力相等时就形成稳定的离子键。离子键的结合力大，因此通过离子键结合的材料强度高、硬度高、熔点高、脆性大。由于离子键难以移动输送电荷，因此，这些材料都是良好的绝缘体。并且离子的外层被牢固束缚，难以被光激发，所以通过离子键结合的材料一般不能吸收可见光，是无色透明的。比如，NaCl 离子键。

3) 共价键

元素周期表中ⅢA~ⅧA族同种元素的原子或电负性相差不大的异种元素原子相互接近时，不可能通过电子转移来获得稳定的外层电子结构，但可以通过公用电子对来达到这一目的。如金刚石中的一个碳原子与周围的四个碳原子各形成一个电子对，形成共价键。通过共价键结合的材料与通过离子键结合的材料一样，也具有强度高、熔点高、脆性大的特点，但其导电性依共价键的强弱而不同。例如弱共价键的锡是导体，中等共价键的硅是半导体，而强共价键的金刚石则是绝缘体。具有离子键和共价键的工程材料多为陶瓷或高分子聚合物材料。

4) 分子键

原子状态形成稳定电子壳体的惰性气体元素，在低温下可结合成固体。甲烷分子在固态也能相互结合成为晶体。在它们的结合过程中没有电子的得失、共有或公有化，价电子的分布几乎不变，原子或分子之间是靠范德华力结合起来。这种结合方式叫分子键。范德华力实际上就是分子偶极之间的作用力。当一个分子中，正、负电荷的中心瞬时不重合，而使分子一端带正电，另一端带负电，形成偶极。偶极分子之间会产生吸引力，使分子之间结合在一起。在含氢的物质，特别是含氢的聚合物中，一个氢原子可同时和两个与电子亲和能力大的、半径较小的原子(如F、O、N等)相结合，形成所谓氢键。氢键是一种较强的、有方向性的范德华键。其产生的原因是由氢原子与某一原子形成共价键时，共有电子向那个原子强烈偏移，使氢原子几乎变成一半径很小的带正电荷的原子核，因而它还可以与另一个原子相吸引。

由于范德华力很弱，因此由分子键结合的固体材料熔点低，硬度也很低，因无自由电子，因此这些材料有良好的绝缘性。

1.1.3 金属的晶体结构

1. 晶体与非晶体

在自然界中，所有的固态物质按照它的原子(离子或分子)的聚集状态，可分为晶体和非晶体两大类。在晶体中，原子(离子或分子)的排列是按照一定的几何规律做规则排列的，相反，原子(离子或分子)在空间呈无序排列的物体则称为非晶体，如松香、石蜡、玻璃等。金属材料及绝大多数的固态物质都是晶体，因而其内部的原子(离子或分子)是按照一定的规律作规则排列的。那么，金属为什么呈晶体结构呢？这与它的内部原子(离子)的结合键有关。金属材料是按照金属键方式结合的。在金属中，脱离原子的价电子无方向性地自由穿行在正离子所组成的骨架中，并相互吸引而结合，因而赋予金属特有的性能(晶体结构、导电、导热、金属光泽、可塑性等)。金属在某些特定条件下也可以形成非晶体，称为金属玻璃。晶体具有固定的熔点，原子排列有序，其各个方向上原子密度不同，因而具有各向异性。非晶体无固定的熔点，原子排列无序，具有各向同性。晶体与非晶体在一定条件下可以互相转化，如非晶态金属加热到一定温度可转变为晶态金属，称为晶化。

2. 晶格与晶胞

如果把组成晶体的原子(离子或分子)看做刚性球体,那么晶体就是由这些刚性球体按一定规律周期性地堆垛而成,如图 1.2(a)所示。不同晶体的堆垛规律不同。为研究方便,假设将刚性球体视为处于球心的点,称为结点。由结点所形成的空间点的阵列称为空间点阵。用假想的直线将这些结点连接起来所形成的三维空间格架称为晶格,如图 1.2(b)所示。晶格直观地表示了晶体中原子(离子或分子)的排列规律。

从微观上看,晶体是无限大的。为便于研究,常从晶格中选取一个能代表晶体原子排列规律的最小几何单元来进行分析,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1.2(c)所示。晶胞在三维空间中重复排列便可构成晶格和晶体。

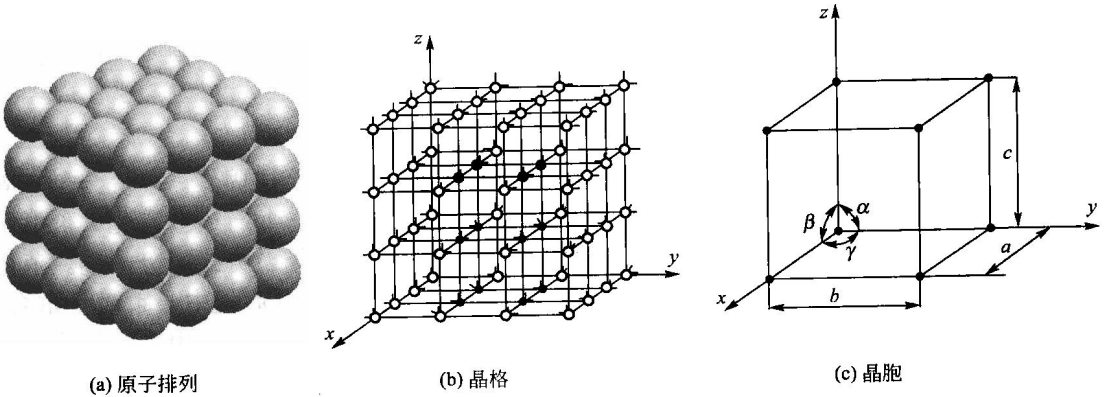


图 1.2 晶体的结构

晶胞各边的尺寸 a 、 b 、 c 称为晶格尺寸,又称晶格常数。晶胞的大小和形状通过晶格常数 a 、 b 、 c 和各棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来描述。根据这些参数。可将晶体分为 7 种晶系,其中立方晶系和六方晶系比较重要。

3. 晶面和晶向表示法

晶体中各方位上的原子面称为晶面,各方向上的原子列称为晶向。为便于研究,人们通常用符号来表示不同的晶面和晶向。表示晶面的符号称为晶面指数,表示晶向的符号称为晶向指数。下面简单介绍立方晶系的晶面指数和晶向指数的确定方法。

1) 晶面指数

如图 1.3 所示,晶面指数的确定步骤如下。

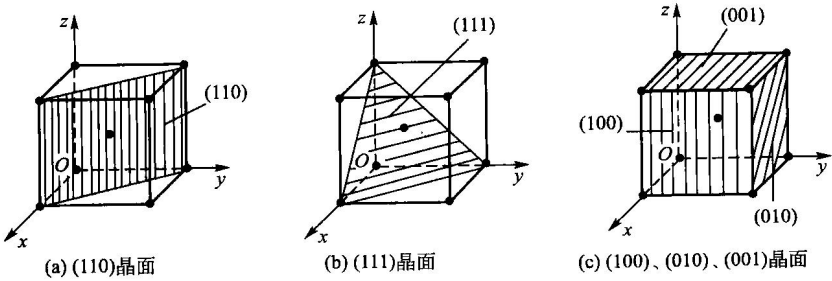


图 1.3 常见晶面指数的确定示意

(1) 以任一原子为原点(注意原点不要放在待确定晶面上), 以过原点的三条棱边为坐标轴, 以晶格常数为测量单位建立坐标系。

(2) 求出待定晶面在三个坐标轴上的截距。

(3) 取三个截距值的倒数并按比例化为最小整数, 加一圆括号, 即为所求晶面的指数, 其形式为 (hkl) 。如果是负指数, 则应将负号“ $-$ ”放在相应指数的上方。

例如, 求截距为 $1, \infty, \infty$ 晶面的指数时, 取三个截距值的倒数为 $1, 0, 0$, 加圆括号成为 (100) , 即为所求晶面的指数。再如, 要画出晶面 (221) , 则取三指数的倒数 $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1$, 即为该晶面在 x, y, z 三个坐标轴上的截距。 (hkl) 代表的是一组互相平行的晶面。原子排列完全相同, 只是空间位向不同的各组晶面称为晶面族, 用 $\{hkl\}$ 表示。立方晶系常见的晶面族为 $\{100\}$ [包括 $(100), (010), (001)$ 3个晶面]、 $\{111\}$ [包括 $(111), (\bar{1}\bar{1}\bar{1}), (11\bar{1}), (\bar{1}11)$ 4个晶面]。图 1.3 所示为 $(110), (100), (111), (001), (010)$ 几个晶面。

2) 晶向指数

如图 1.4 所示, 晶向指数的确定步骤如下。

(1) 建立坐标系(方法同上), 过原点作所求晶向的平行线。

(2) 求该平行线上任一点的三个坐标值并按比例化为最小整数, 加一方括号即为所求晶向指数, 其形式为 $[uvw]$ 。

例如, 过原点某晶向上一点的三坐标值为 $1, 1, 0$, 将这三个坐标值按比例化为最小整数并加方括号, 得 $[234]$, 即为所求晶向指数。又如, 要画出 $[110]$ 晶向, 需要找出 $(1, 1, 0)$ 坐标点, 连接原点与该坐标点的直线即为所求晶向。

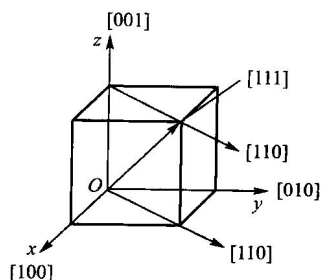


图 1.4 常见晶向指数的确定示意

4. 纯金属的晶体结构

由于金属键没有方向性和饱和性, 因而大多数金属晶体都具有排列紧密、对称性高的简单结构。在纯金属中, 最常见、最典型的晶体结构有体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。前两者属于立方晶系, 后者属于六方晶系。

(1) 体心立方晶格。

体心立方晶格的晶胞如图 1.5 所示, 为一个立方体。在立方体的 8 个顶角上各有一个与相邻晶胞共有的原子, 立方体中心还有一个原子。因此只用一个参数 a 表示即可。

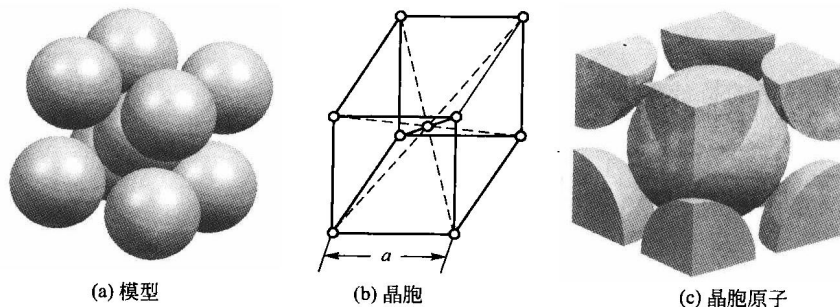


图 1.5 体心立方晶格的晶胞示意

体心立方晶格的特征如下。

晶格常数： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

晶胞原子个数：由于立方体顶角上的原子为 8 个晶胞所共有，立方体中心的原子为该晶胞所独有，因此晶胞原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ ，即 2 个。

原子半径：晶胞中相距最近的两个原子之间距离的一半，或晶胞中原子密度最大的方向上相邻两原子之间距离的一般称为原子半径(r)。体心立方晶胞中原子相距最近的方向是体对角线，所以原子半径与晶格常数之间的关系为 $r = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ 。

配位数：配位数为晶胞中与任一原子接触且距离相等的原子数目。配位数越大，原子排列紧密程度就越大。体心立方晶格的配位数为 8。

致密度：晶胞中所包含的原子所占有的体积与晶胞体积之比称为致密度(也称密排系数)。致密度越大，原子排列紧密程度越高。体心立方晶胞中原子所占有的体积为 $\frac{4}{3}\pi r^3 \times 2$ ，

晶胞体积为 a^3 ，所以致密度为 $\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \times 2}{a^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}a\right)^3 \times 2}{a^3} \approx 0.68$ 。

表明晶胞中有 68% 的体积被原子所占据，其余为空隙。

常见金属： α -Fe、Cr、W、Mo、V、Nb 等。

(2) 面心立方晶格。

面心立方晶格的晶胞如图 1.6 所示，也是一个立方体。除在立方体的 8 个顶角上各有一个与相邻晶胞共有的原子外，在 6 个面的中心也各有一个共有的原子。与体心立方晶格一样，晶格常数也是只用一个参数 a 表示。由于立方体顶角上的原子为 8 个晶胞所共有，面上的原子为两个晶胞所共有，因此面心立方晶格中每一个原子(以面的中心原子为例)在三维方向上各与 4 个原子接触且距离相等。

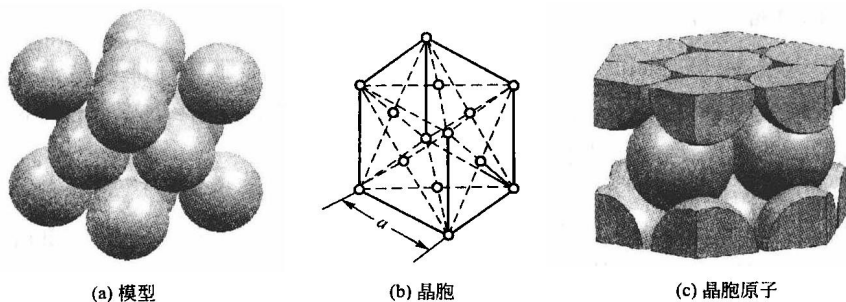


图 1.6 面心立方晶格的晶胞示意

面心立方晶格的特征如下。

晶格常数： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。

晶胞原子个数： $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个。

原子半径： $r = \frac{\sqrt{2}}{4}a$ 。

致密度： $K = 4 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{2}}{4}a\right)^3 / a^3 = 0.74$ 。

配位数：12。

常见金属： γ -Fe、Ni、Al、Cu、Pb、Au 等。

(3) 密排六方晶格。

密排六方晶格的晶胞如图 1.7 所示，12 个金属原子分布在正六棱柱体的角上，在上、下底面的中心各分布一个原子，两底面之间还均匀分布 3 个原子。

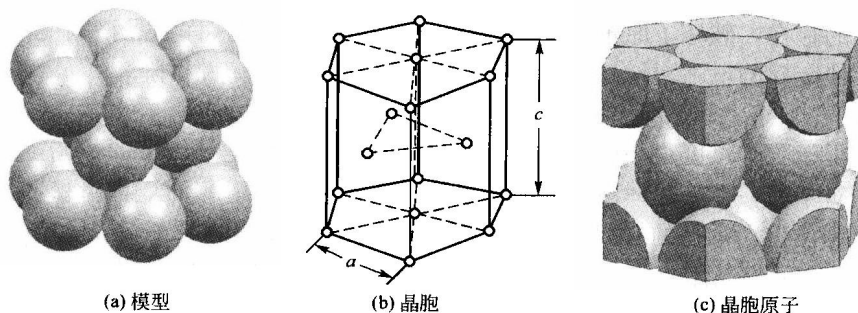


图 1.7 密排六方晶格的晶胞示意

密排六方晶格的特征如下。

晶格常数：用底面正六边形的边长 a 和两底面之间的距离 c 来表示，两相邻侧面之间的夹角为 120° ，侧面与底面之间的夹角为 90° 。

晶胞原子个数： $\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$ 个。

原子半径： $r = \frac{1}{2}a$ 。

配位数：12。

致密度：0.74。

属于这种晶格类型的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等。

5. 实际金属中的晶体缺陷

以上所讨论的金属的晶体结构是理想的结构，由于许多因素的作用，实际金属的结构远不是理想中完美的单晶体，结构中存在许多不同类型的缺陷。按照几何特征，晶体缺陷主要可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三类，每类缺陷都对晶体的性能产生重大影响。

1) 点缺陷

点缺陷是指在三维尺度上都很小的，不超过几个原子直径的缺陷。如空位、间隙原子、置换原子等，如图 1.8 所示。

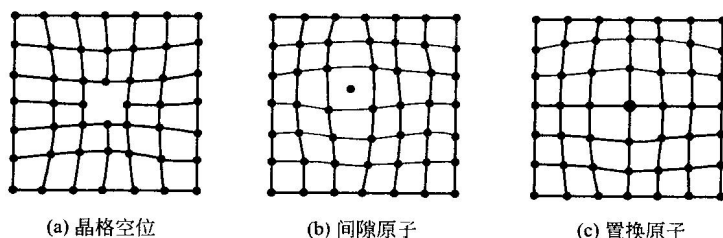


图 1.8 点缺陷示意

空位是指晶格中某些缺排原子的空结点，空位的产生是由某些能量高的原子通过热振动离开平衡位置引起的。塑性变形、高能粒子辐射、热处理等也能促进空位的形成。空位附近的原子会偏离正常结点位置，造成晶格畸变。空位的存在有利于金属内部原子的迁移(即扩散)。某些挤进晶格间隙中的原子称为间隙原子，间隙原子可以是基体金属原子，也可以是外来原子。如果外来原子取代了结点上原来原子的位置，这种原子称为置换原子。

点缺陷的存在，破坏了原子的平衡状态，使晶格发生扭曲(称为晶格畸变)，从而引起性能变化，使金属的电阻率增加，强度、硬度升高，塑性、韧性下降。

2) 线缺陷

线缺陷是指二维尺度很小而三维尺度很大的缺陷，也就是晶体中的位错。当晶格中一部分晶体相对于另一部分晶体沿某一晶面发生局部滑移时，滑移面上，滑移区与未滑移区的交界线称为位错。常见的有刃型位错和螺型位错两种。这里主要介绍刃型位错。

假设在一个完整晶体的上半部插入一多余的半原子面，它终止于晶体内部，好像切入的刀刃一样，这个多余的半原子面的刃边就是刃型位错，如图 1.9 所示。多余半原子面在滑移面上方的称为正刃型位错，用符号“ $\perp$ ”表示；多余半原子面在滑移面下方的称为负刃型位错，用符号“ $\neg$ ”表示。单位体积内所包含的位错线总长度称为位错密度，符号为 ρ ，

$$\rho=L/V$$

式中： L ——位错线总长度；

V ——体积，单位为 cm^3 或 cm^{-2} 。

退火金属中位错密度一般为 $10^{10}\text{m}^{-2}\sim 10^{12}\text{m}^{-2}$ 。

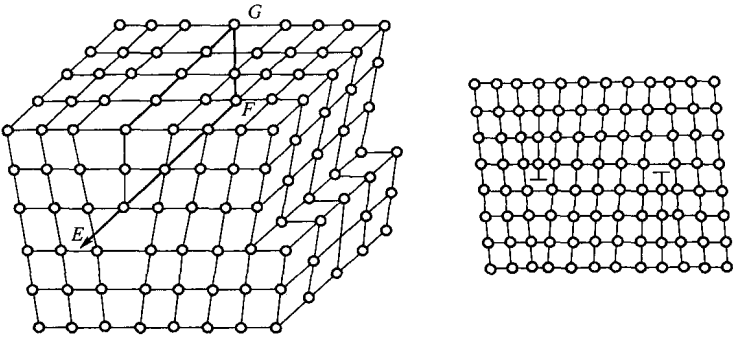


图 1.9 刃型位错示意

位错的存在极大地影响金属的机械性能。当金属为理想晶体或仅含有极少量位错时，金属的屈服强度很高；当含有一定量的位错时，强度降低；当进行形变加工时，位错密度增加，屈服强度将会增高，如图 1.10 所示。

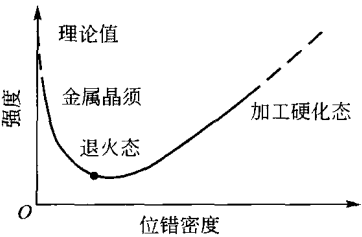


图 1.10 位错密度对金属强度的影响

3) 面缺陷

面缺陷是指二维尺度很大而第三维尺度很小的缺陷。金属晶体中的面缺陷主要有晶界和亚晶界两种。

(1) 晶界。

实际金属为多晶体，是由大量外形不规则的小晶体即晶粒组成的。每个晶粒基本上可视为单晶体，一般尺寸为 $10^{-5}\text{m}\sim 10^{-4}\text{m}$ ，但也有大至几个或十几个