



高职高专规划教材

JIXIE

GONGCHENG CAILIAO

机械工程材料

主 编 张宝忠

副主编 晁拥军 陈云祥

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/张宝忠主编. —杭州:浙江大学出版社,2004.8

ISBN 7-308-03822-X

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(2004)第 079151 号

丛书策划 樊晓燕

封面设计 刘依群

责任编辑 宋纪浔

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 16

字 数 322 千

版 印 次 2004 年 8 月第 1 版 2005 年 5 月第 2 次

印 数 2001—5000

书 号 ISBN 7-308-03822-X/TH·066

定 价 22.00 元

内 容 提 要

本书是根据教育部《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求,针对从事机械类专业的工程技术应用性人才的实际要求,在总结高职高专机械类专业人才培养模式的教改经验基础上进行编写的。

本书的主要内容有:金属的晶体结构与力学性能、金属的结晶与铁碳相图、金属的塑性变形与再结晶、铁碳合金与铸铁、钢的热处理、合金钢、非铁合金与粉末冶金材料、非金属材料与复合材料、零件的失效与选材。各章后面均附有思考练习题。

本书可作为高职高专学校机械类专业的教材,也可作为各类成人教育和中等职业教育机械类专业的教材和相关工程技术人员的参考书。

高职高专机电类规划教材

参编学校(排名不分先后)

浙江机电职业技术学院

杭州职业技术学院

宁波高等专科学院

宁波职业技术学院

嘉兴职业技术学院

金华职业技术学院

温州职业技术学院

浙江工贸职业技术学院

台州职业技术学院

浙江水利水电高等专科学院

浙江轻纺职业技术学院

浙江工业职业技术学院

丽水职业技术学院

湖州职业技术学院

前 言

随着我国加入 WTO 的进程,我国正成为世界的“制造中心”,材料科学与制造技术不断进行深层次的结合,使制造业发生了日新月异的变化。为了深化高等职业教育改革,推动高职高专的发展,培养 21 世纪与我国现代化建设要求相适应的,在先进制造业中从事技术应用、设备运行和维护的应用型人才。根据教育部高教司《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求,以从事机械专业的工程技术应用性人才的实际要求出发,在总结高职高专机械类专业人才培养模式的教改经验基础上编写了本教材。

本书的编写具有以下特点:

(1) 以培养生产第一线的高等技术应用性人才为目标。减少繁琐的理论内容,注重知识的实际运用。

(2) 对于某种材料的知识掌握,按成分、处理方法、组织、性能、应用的因果关系来建立,有助于对知识的理解和掌握,并将重点放在材料的应用上。

(3) 合理安排了新材料、新工艺、新技术的课程内容。

(4) 强调理论联系实际,以应用为目的,重视对学生的实践训练;以掌握概念、强化应用为教学重点。

(5) 力求做到重点突出、通俗易懂和易于自学。

(6) 名词、术语、牌号均采用了新的国家标准,使用了法定计量单位。

本书由于具有很强的实践性,因此广大教师应注重采用先进的教学方法和手段,将基础知识与技术应用有机结合起来。采用实践训练、讨论等多种教学方法,以达到更好的教学效果。

参加本书编写的人员有宁波职业技术学院张宝忠(前言、绪论、第 3 章、第 5 章、第 7 章、第 8 章、附表 I, II, III, IV, V),温州职业技术学院晁拥军(第 1 章、第 2 章、第 4 章),浙江机电职业技术学院陈云祥(第 6 章、第 9 章)。全书由浙江大学宋炳华主审。

本教材在策划、编写过程中得到了有关专家、学者和兄弟院校同行的支持和指教,在此一并表示诚挚的感谢。在本书的编写中,曾参考并引用了有关文献资料、插图等,在此对上述作者也表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点、错误,恳请读者批评指正。

编者

2004 年 2 月

目 录

绪 论	1
第 1 章 金属的晶体结构与力学性能	3
1.1 纯金属的晶体结构	3
1.1.1 金属是晶体	4
1.1.2 晶体结构的基本概念	4
1.1.3 三种典型的金属晶体结构	6
1.2 纯金属的实际晶体结构	8
1.2.1 单晶体和多晶体	8
1.2.2 晶体缺陷	8
1.3 合金的晶体结构	10
1.3.1 合金的相结构	11
1.3.2 合金的组织	13
1.4 强度与塑性	13
1.4.1 拉伸试验及拉伸曲线	13
1.4.2 常用强度判据	15
1.4.3 塑性判据	16
1.5 硬度	17
1.6 韧性及疲劳强度	20
1.6.1 韧性	20
1.6.2 疲劳极限	22
1.6.3 断裂韧性	23
第 2 章 金属的结晶与铁碳相图	26
2.1 纯金属的结晶	26
2.1.1 纯金属的结晶	26
2.1.2 结晶时晶核的形成和长大过程	28
2.1.3 金属结晶后的晶粒大小	29
2.1.4 铸锭的组织	29

2.2 合金的性能与相图的关系	31
2.3 铁碳合金的组织	33
2.3.1 纯铁的同素异构转变	33
2.3.2 铁碳合金的基本相及其性能	34
2.4 铁碳合金相图	34
2.4.1 相区及其主要特性点和特性线的分析	35
2.4.2 典型合金的结晶过程及组织	36
2.4.3 含碳量与铁碳合金组织及性能的关系	41
2.4.4 铁碳相图的应用	43
第3章 金属的塑性变形与再结晶	46
3.1 金属的塑性变形	46
3.1.1 单晶体的塑性变形	46
3.1.2 多晶体的塑性变形	50
3.2 塑性变形对金属组织和性能的影响	51
3.2.1 产生加工硬化	51
3.2.2 形成纤维组织	52
3.2.3 形成变形织构	53
3.2.4 产生残余应力	53
3.3 冷塑性变形后的金属在加热时组织和性能的变化	54
3.3.1 回复	54
3.3.2 再结晶	54
3.3.3 再结晶后的晶粒大小	56
3.3.4 晶粒长大	57
3.4 金属的热加工	58
3.4.1 热加工的概念	58
3.4.2 金属热加工时组织和性能的变化	58
第4章 碳钢与铸铁	61
4.1 钢铁生产过程概述	61
4.1.1 生铁的冶炼	61
4.1.2 炼钢	63
4.1.3 钢中杂质对碳钢性能的影响	64
4.2 碳钢的分类	64
4.3 碳钢的牌号及用途	65
4.4 铸铁	70

4.4.1 概述	70
4.4.2 铸铁的石墨化	72
4.4.3 常用铸铁	74
4.4.4 其他铸铁	79
第5章 钢的热处理	82
5.1 钢在加热时的组织转变	83
5.1.1 奥氏体的形成及其影响因素	83
5.1.2 奥氏体晶粒长大及其影响因素	85
5.2 钢在冷却时的组织转变	86
5.2.1 共析钢过冷奥氏体等温转变	87
5.2.2 过冷奥氏体的连续冷却转变	94
5.3 钢的退火与正火	96
5.3.1 钢的退火	96
5.3.2 钢的正火	98
5.4 钢的淬火	99
5.4.1 淬火工艺	99
5.4.2 淬火方法	101
5.5 钢的回火	102
5.5.1 钢的回火转变与组织	102
5.5.2 回火的种类	103
5.5.3 回火脆性	104
5.6 钢的淬透性	105
5.6.1 淬透性的概念	105
5.6.2 淬透性的测定方法	105
5.6.3 淬透性的应用	107
5.7 钢的表面热处理	108
5.7.1 感应加热表面淬火	108
5.7.2 火焰加热表面淬火	109
5.8 钢的化学热处理	109
5.8.1 钢的渗碳	110
5.8.2 钢的氮化(渗氮)	112
5.8.3 钢的氰化(碳氮共渗)	114
5.9 钢的热处理新技术	115
5.9.1 可控气氛热处理	115

5.9.2 真空热处理	115
5.9.3 形变热处理	116
5.9.4 表面气相沉积	117
5.9.5 激光加热表面热处理	117
5.10 热处理质量分析	118
5.10.1 热处理工艺对质量的影响	118
5.10.2 热处理对结构设计的要求	118
5.11 热处理工序安排与应用实例	120
5.11.1 热处理技术要求	120
5.11.2 热处理工序顺序安排	121
5.11.3 热处理工艺应用举例	122
第6章 合金钢	128
6.1 钢的分类	128
6.1.1 按化学成分分类	128
6.1.2 按主要质量等级、主要性能及使用特性分类	129
6.2 杂质元素和合金元素在钢中的作用	131
6.2.1 主要常存元素在钢中的作用	131
6.2.2 合金元素在钢中的作用	132
6.3 结构钢	136
6.3.1 工程构件用钢	136
6.3.2 机器零件用钢	139
6.4 工具钢	151
6.4.1 刀具钢	151
6.4.2 模具钢	156
6.4.3 量具用钢	159
6.5 特殊性能钢	160
6.5.1 不锈钢	160
6.5.2 耐热钢	163
6.5.3 耐磨钢	166
第7章 非铁合金与粉末冶金材料	169
7.1 铝及铝合金	169
7.1.1 工业纯铝	169
7.1.2 铝合金	170
7.2 铜及铜合金	178

7.2.1 工业纯铜	178
7.2.2 铜合金	179
7.3 钛合金	185
7.3.1 工业纯钛	185
7.3.2 钛合金	185
7.4 轴承合金	186
7.4.1 轴承合金的性能要求	187
7.4.2 轴承合金的组织特征	187
7.4.3 常用轴承合金	187
7.5 粉末冶金材料	190
7.5.1 硬质合金	191
7.5.2 粉末冶金减摩材料	193
7.5.3 粉末冶金结构材料	194
7.5.4 粉末冶金摩擦材料	195
第8章 非金属材料与复合材料	197
8.1 高分子材料	197
8.1.1 高分子材料的性能	197
8.1.2 高分子材料概述	198
8.1.3 高分子材料的合成	199
8.1.4 高分子材料的结构	200
8.1.5 高分子材料的力学状态	201
8.1.6 常用高分子材料	202
8.2 陶瓷材料	208
8.2.1 陶瓷的分类与性能	208
8.2.2 常用工业陶瓷	209
8.3 复合材料	210
8.3.1 复合材料的分类	211
8.3.2 复合材料的性能特点	211
8.3.3 常用复合材料	213
第9章 机械工程材料的选择	217
9.1 零件的失效分析	217
9.1.1 零件失效的形式	217
9.1.2 零件失效的原因	219
9.1.3 失效分析的一般过程	220

9.1.4 失效分析与选材	221
9.2 机械工程材料的选用	222
9.2.1 选材的一般原则	222
9.2.2 选材的方法与步骤	225
9.3 典型零件的选材	227
9.3.1 轴类零件的选材	227
9.3.2 齿轮类零件的选材	230
9.3.3 箱体类零件的选材	234
附表	236
附表 I 非合金钢、低合金钢和合金钢合金元素规定含量界限值 (GB/T13304—1991)	236
附表 II 常用结构钢退火及正火工艺规范	237
附表 III 常用工具钢退火及正火工艺规范	238
附表 IV 常用钢种回火温度与硬度对照表	239
附表 V 低合金高强度结构钢新旧标准牌号对照表(参考件)	240
主要参考文献	241

绪 论

材料是人类生活和生产的物质基础,是人类在与自然界相处的进程中,为改善自身的生存条件,不断利用自然、改造自然所创造的共同财富。生产技术的进步和生活水平的提高与新材料的应用相关,每一种新材料的出现和应用都使社会生产和生活发生重大的变化。可以说材料的应用具有划时代的意义,因此人类历史才划分为石器时代、铜器时代、铁器时代,现代社会已跨入人工合成材料时代。

信息、材料、能源和生物工程被称为现代技术的四大支柱,材料科学更被很多国家确定为重点发展的学科之一。材料科学的发展已影响到人类生活的各个方面,材料科学在现代技术中的地位和作用越来越突出。

材料科学是人类在与自然界和谐相处的过程中,不断发现自然界赋予人类现成材料的应用价值,和为满足人类更高的生产、生活需求不断合成、制造具有更高应用价值材料的实践中发展起来的。大约两三百万年前人类即开始用石头作为生产工具。我们的祖先在六七千年前的原始社会末期就已掌握了制作陶器的技术,到东汉出现了瓷器,并逐渐传至阿拉伯地区、非洲和欧洲。瓷器作为中国文化的象征,对世界文明发展具有重大作用。我国青铜的冶炼在夏以前就开始了,到殷、西周时期已发展到较高的水平,普遍用于制造各种兵器、工具、食器。著名的司母戊鼎是迄今为止世界上最古老的大型青铜器,它反映了我国古代在青铜材料冶炼和应用方面达到了当时世界的顶峰,创造了灿烂的青铜文化。在我国的春秋战国时代铁器已大量应用,从西汉到明代的一千五六百年间,我国的钢铁生产技术远远超过了世界各国,留下了大量的珍贵文物和文献。进入 20 世纪以来,现代科学技术和生产技术飞跃发展,特别在 20 世纪 60 年代到 70 年代人工合成的高分子材料发展迅速,全世界的有机合成材料产量和钢产量的体积已经相等,并作为结构材料代替钢铁,同时,具有良好导电性能和耐高温的特殊性能高分子合成材料和具有特殊性能的陶瓷材料也得到了迅速发展,新型复合材料也层出不穷。近几年,纳米材料的研究与应用已影响到工程技术的方方面面,并不断改变人类生活的面貌。

毋庸置疑,中华民族在材料及其应用方面对人类文明和人类进步作出了巨大贡献。但也应清楚地认识到,18 世纪以后,长期的封建统治和闭关锁国,严重地束缚了我国生产力的发展,使我国的科学技术处于停滞落后状态。

材料的种类很多,其中用于机械制造的各种材料,称为机械工程材料。机械工程材料可分为金属材料、非金属材料(高分子材料、陶瓷材料)和复合材料。

金属材料是最重要的机械工程材料,它包括钢铁材料和非铁材料。钢铁材料也称为黑色金属,如铸铁、钢。非铁材料也称为有色金属,如铜及铜合金、铝及铝合金。钢铁材料应用最广,占整个结构材料、零件材料和工具材料的90%左右。

非金属材料主要是指高分子材料和陶瓷材料。非金属材料不但能代替部分金属材料,而且在很多情况下,具有其特有的性能,并不断得到越来越广泛的应用。近年来,非金属材料特别是高分子材料发展特别迅速。金属材料、非金属材料 and 复合材料相互补充、相互结合,已形成了材料科学的完整体系。

当今,机械工业正向着高速化、自动化和精密化方向发展,机械工程材料的使用量越来越大,在产品的设计与制造过程中,所遇到的有关材料和热处理问题也日益增多。例如,在选择材料时可供选择的材料种类很多,如何选择既能满足使用性能又具有良好的经济性和工艺性的材料,不仅在制造时需要考虑,在产品的设计阶段就应充分加以考虑。因此,具备与专业相关的材料知识,对于机械设计与制造领域的工程技术人员来说是相当重要的。合理地选材对充分发挥材料本身的性能潜力,获得理想的使用性能,节约材料,降低成本,保护环境都起着巨大作用。

本课程的主要内容有金属学基本理论、金属的力学性能、金属的塑性变形、钢的热处理、铁碳合金与铸铁、合金钢、非铁合金、非金属材料及工程材料的选用等部分。

本课程在讲授材料的知识时,重点强调材料的应用。对于某种材料的知识掌握,按成分、处理方法、组织、性能、应用的因果关系来思考,将有助于对知识的理解和掌握,并将重点放在材料的应用上。

本课程是实践性和实用性较强的课程,在教学中应注重理论联系实际,运用好理论讲授、实践教学、课堂讨论等多种教学形式。有些内容将随着后续课程、课程设计和毕业设计的开设,甚至在今后的工作实践过程中才能深化掌握和理解。

金属的晶体结构与力学性能

从物理学得知,所有的固态金属都有一些共同的物理特性,这与金属内部原子规则排列和原子中外围电子的分布及运动有关。但是,不同的金属材料具有不同的力学性能;即使是成分相同的材料,当经过不同的热加工或冷变形加工后性能也会有很大差异。金属材料在工程上所表现出来的机械性能,是由金属内部的组织和结构所决定的。

1.1 纯金属的晶体结构

我们平时所看到的金属材料,表面上似乎没有什么区别,但如果采用金相分析方法,在金相显微镜下就可以发现,各种金属的内部组织是有很大差别的。用这种方法所观察到的组织称为金属材料的显微组织,显微组织是决定金属材料机械性能的重要内在因素。

铸铁是工业生产中常见的一种金属材料,在显微镜下可以看到不同种类的铸铁具有不同形式的石墨,图 1-1 是灰铸铁和球墨铸铁中石墨分布情况的显微组织示意图。

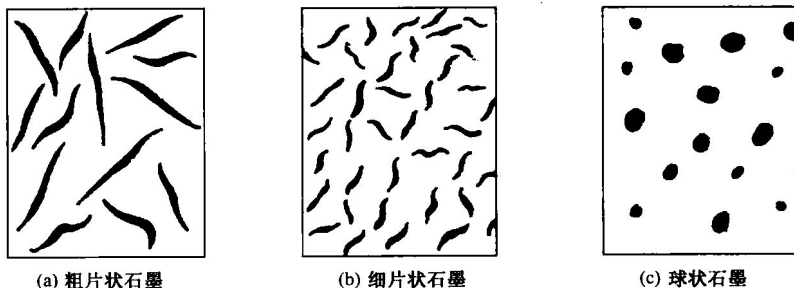


图 1-1 灰铸铁(a)(b)和球墨铸铁(c)中石墨分布示意图

我们可以做一个模拟的实验：拿三张同样质量的纸，分别剪出上述各图所示的石墨形状的孔（因为石墨在铸铁中相当于孔洞）。再将纸上方固定，下面挂以砝码并逐步增加，结果就会看到：剪有粗片状孔洞的纸容易被拉断，球状孔洞的不易被拉断，而细片状孔洞的居中。这个模拟的实验说明，金属材料的性能与其内部的组织形态有着十分密切的联系。当然这只是直观的比喻，但是在工程实际中，恰恰就是利用这样的基本原理来提高铸铁强度的。球墨铸铁、孕育铸铁就是在一般灰铸铁的基础上发展起来的高强度铸铁，不同铸铁的机械性能如表1-1所示。

表 1-1 不同铸铁的机械性能

铸铁类别	σ_b /MPa	δ /%	HB	石墨形状
普通铸铁	120~200	0.5	117~148	粗片状
孕育铸铁	300~400	1~6	197~269	细片状
球墨铸铁	400~500	5~15	190~270	球状

我们利用 X 射线进行结构分析得知：金属的原子在空间是按一定次序排列起来的，不同的金属有不同的排列方式，这种排列方式称为金属的晶体结构。金属的晶体结构是决定金属性能的极为重要的内在因素。

在纯铁中分别加入 1% 的镍、锰或硅，由于它们的原子溶入了铁的晶体内，使其晶体结构发生不同程度的变化，性能也有所变化。所以在研究金属材料的组织与性能关系时，不但要研究显微组织，而且还要研究更加微观的晶体结构，这样才能更深刻地揭示金属材料性能变化的规律。

1.1.1 金属是晶体

固态物质根据其原子排列特征，可分为晶体和非晶体两类。自然界中，除了少数物质，如普通玻璃、沥青、石蜡等外，绝大多数固态的无机物都是晶体。晶体的特点是：组成晶体的基本质点（原子、离子或分子）在三维空间排列是有一定规律的。因此晶体一般有规则的外形，具有一定的熔点，具有各向异性。一般情况下固态金属都是晶体。

1.1.2 晶体结构的基本概念

实际晶体中的各类质点（包括离子、电子等）虽然都是在不停地运动着，但是，在讨论晶体结构时，通常把构成晶体的原子看成是一个个固定的小球，这些原子小球按一定的几何形式在空间紧密堆积，如图 1-2(a) 所示。

为了便于描述晶体内部原子排列的规律，将每个原子视为一个几何质点，并用一些

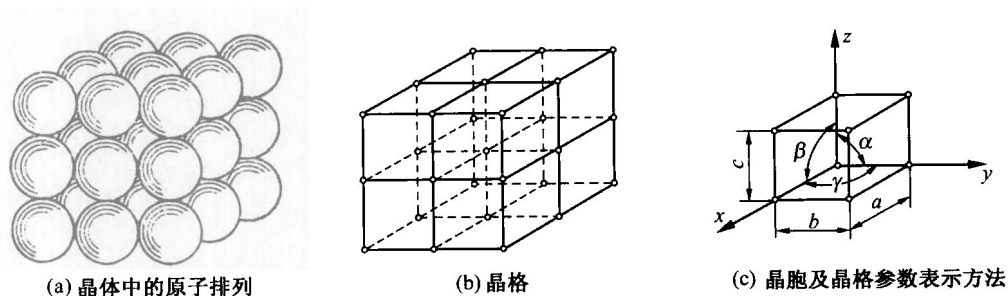


图 1-2 简单立方晶格示意图

假想的几何线条将各质点连接起来,便形成一个空间几何框架。这种抽象的用于描述原子在晶体中排列方式的空间几何框架称为晶格,如图 1-2(b)所示。由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格内取一个能代表晶格特征的,由最少数目的原子排列成的最小结构单元来表示晶格,称为晶胞,如图 1-2(c)所示。晶格可以看成是由晶胞不断重复堆砌而成的。通过对晶胞的研究可找出该种晶体中原子在空间的排列规律。

为研究晶体结构的需要,在晶体学中还规定用晶格参数来表示晶胞的几何形状及尺寸。晶格参数包括晶胞的棱边长度 a, b, c 和棱边夹角 α, β, γ ,如图 1-2(c)所示,晶胞的棱边长度又称为晶格常数,其度量单位为 $\text{\AA}$ 。当三个晶格常数 $a = b = c$,三个轴间夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 时,这种晶胞组成的晶格称为简单立方晶格。

在晶格中由一系列原子组成的平面称为晶面,而晶面则又是由一行行的原子列组成,晶格中各原子列的位向称为晶向。为了便于对各种晶面和晶向进行研究,了解其在形变、相变以及断裂等过程中所起的不同作用,按照一定规则将晶格的任意一个晶面或晶向都确定出特定的符号,表示出它们的方位或方向。这种数字符号分别称作晶面指数和晶向指数(这部分内容本书不作详述)。

图 1-3 所示的晶面是立方晶格中具有重要意义的三种晶面。图 1-4 所示的是立方晶格中具有重要意义的三个晶向。

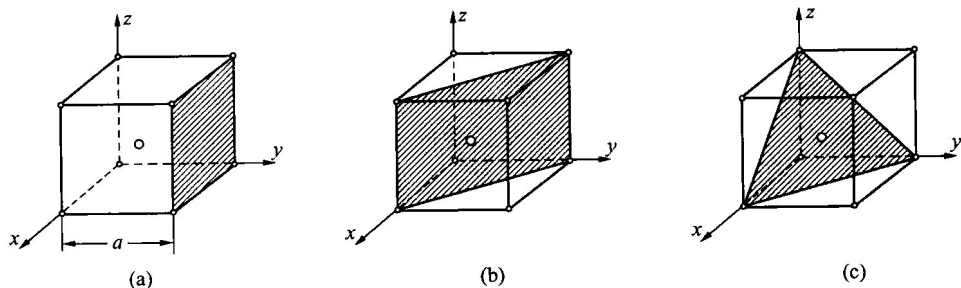
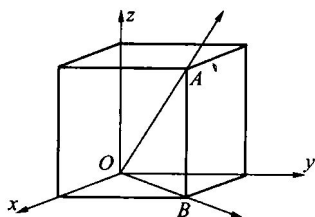


图 1-3 立方晶格中三种重要晶面

图 1-4 立方晶格中三个重要晶向 Ox , OA , OB

1.1.3 三种典型的金属晶体结构

根据晶体晶胞中原子小球堆砌规律的不同,可以将晶格基本类型划分为 14 种。在金属材料中,常见晶格类型有体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格 3 种。

体心立方晶格的晶胞是一个立方体,在立方体的 8 个角上和晶胞中心各有一个原子,如图 1-5 所示。体心立方晶胞每个角上的原子均为相邻八个晶胞所共有,而中心原子为该晶胞所独有,所以体心立方晶胞中的原子数为 $1+8\times 1/8=2$ 个。属于这种晶格类型的金属有 Cr, W, Mo, V 等。

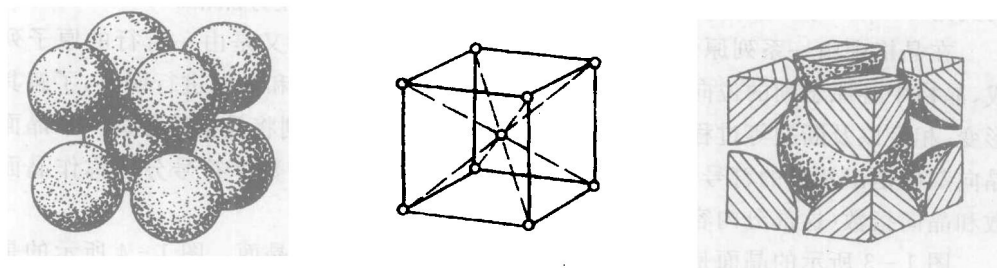


图 1-5 体心立方晶胞示意图

原子在晶胞中排列的紧密程度对晶体性质有较大影响,晶胞中原子所占有的体积与晶胞体积的比值称为晶格的致密度。晶格的致密度越大,则原子排列越紧密。在体心立方晶格中每个晶胞含有 2 个原子,这 2 个原子占有的体积为 $2\times 4\pi r^3/3$, r 为原子半径(最近原子间距的一半);体心立方晶格原子半径与晶格常数 a 的关系为 $r = a\sqrt{3}/4$;晶胞体积为 a^3 。因此体心立方晶格的致密度为

$$\frac{\text{晶胞中原子占有的体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{2 \times 4\pi r^3/3}{a^3} = 0.68$$

这表明在体心立方晶格中有 68% 的体积被原子所占有,其余为空隙。

面心立方晶格和密排六方晶格的晶胞示意图分别如图 1-6 和图 1-7 所示。3 种典型的晶体结构晶格特征如表 1-2 所示。属于面心立方晶格类型的金属有 γ -Fe, Cu, Ni, Ag 等;属于密排六方晶格类型的金属有 Mg, Zn, Cd, α -Ti 等。

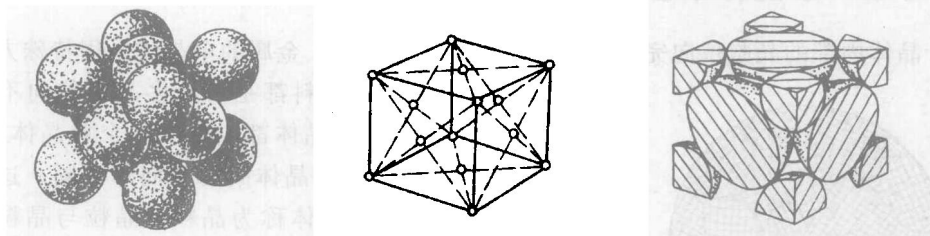


图 1-6 面心立方晶胞示意图

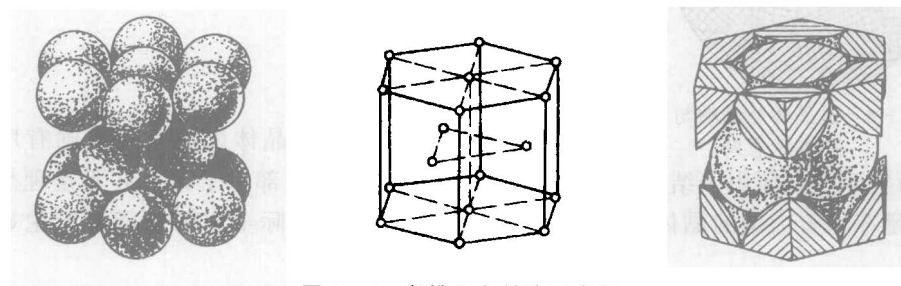


图 1-7 密排六方晶胞示意图

表 1-2 晶体类型及特性参数

结构类型	晶格常数	晶胞中原子数目	最近原子间距 d_0	致密度
面心立方	a	$1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$	$a\sqrt{2}/2$	0.74
体心立方	a	$1/8 \times 8 + 1 = 2$	$a\sqrt{3}/2$	0.68
密排六方	a, c	$1/6 \times 12 + 3 + 1/2 \times 2 = 6$	a	0.74

注: 只有理想密排六方结构的轴比 $c/a = 1.633$, 致密度 = 0.74。

由于晶体中不同晶面和晶向上原子密度不同,原子间结合力也就不同,因此晶体在不同晶面和晶向上表现出不同的性能,这就是晶体具有各向异性的原因。但在实际金属材料中,一般却见不到它们具有这种各向异性的特征。例如在不同晶向测得的 α -Fe单晶的弹性模量是不同的,在(OA)方向 $E=286000\text{MPa}$,在(Ox)方向 $E=132000\text{MPa}$,而实际应用的 α -Fe(工业纯铁)取样测试,从任何位向所测得的结果均为 $E=210000\text{MPa}$ 左右。这是因为实际金属是由若干不同位向的多晶体组成,实际金属的晶体结构与理想晶体结构有很大的差异。