

国家级精品课程教材

现代工程训练系列教材

现代工程实训

XIANDAI GONGCHENG SHIXUN

周燕飞 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

现代工程训练系列教材

现代工程实训

周燕飞 主编

图书在版编目(CIP)数据

现代工程实训 / 周燕飞主编. — 北京: 国防工业出版社, 2010.8
ISBN 978-7-118-04584-5
I. ①现… II. ①周… III. ①工程—实训—教材 IV. ①TB-43
中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第144134号

2010年8月第1版第1次印刷 印张1—2000册 定价40.00元
开本285×1095 1/16 印张33.4 字数210千字

国防工业出版社

发行所: (010) 68435845 发行部: (010) 68411232 地址: 北京市海淀区中关村大街28号
电话: (010) 68411232 传真: (010) 68435845 邮编: 100044

内 容 简 介

本书共 19 章,包括工程材料、热加工成型、非金属材料及其成型、金属切削基本知识、车削加工、钳工、铣刨镗削加工、齿轮加工、磨削及精密加工、数控加工、特种加工、机械制造工艺过程、计算机辅助设计、计算机辅助制造、产品加发与项目管理、产品数据管理、工程创新等内容。

本书具有训练目标先进、训练内容综合、训练安排有层次、训练对象多样、训练方法现代化、以学生为本等特点。适用于普通高等院校一二年级的工程训练,以及高年级的生产实习、毕业实习。

图书在版编目(CIP)数据

现代工程实训 / 周燕飞主编. —北京: 国防工业出版社, 2010. 8

(现代工程训练系列教材)

ISBN 978 - 7 - 118 - 06968 - 6

I. ①现... II. ①周... III. ①工程技术 - 教材
IV. ①TB

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 152776 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 22¼ 字数 516 千字
2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—5000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前言

工程实训是高等工科院校培养和提高学生工程综合实践能力的重要环节。高等工程教育的根本目标是培养适应现代工程及其技术发展需要的未来工程师。随着经济全球化、科学技术综合化的迅速发展,现代工程的综合性和创新性特征日趋明显,对未来工程师的工程综合实践能力提出了越来越高的要求。一个合格的工程师必须具备综合运用工程科学与技术手段来分析和解决各种工程问题的实践能力,必须具备从事工程设计、开发、制造和管理等多领域工作的实践能力,必须具有良好的工程意识和较强的工程创新能力。因此,国内外工科院校对工程实训教学环节十分重视,面向工程实际,加强工程实训,是当代国际高等工程教育实践教学改革的共同趋势。

现代工程实训是根据高等工程教育发展的内在逻辑和高级工程技术专门人才的成长规律,在特定的工程实践环境中对学生进行机械、信息及其系统等高度综合的融工程设计、制造、管理、创新等环节为一体的“全程”工程技术训练。

随着社会、经济和科技的迅猛发展,特别是现代科学技术如现代设计与制造技术、信息技术、自动化技术、现代管理技术等与现代工程的相互交融、渗透,现代工程实训的内涵不断发生着深刻的变化。面对这一深刻的变化,现代工程实训教学改革必须转变教育思想,贯彻以学生为本、知识、能力、素质协调发展,学习、实践、创新相互促进的实践教学理念,凸显工程实训的工程性和教学特性,构建新的工程实训教学内容和课程体系、深化工程实训方法和手段的改革,以培养社会、经济和科技的迅猛发展所需的素质高、工程实践能力强、富有创新精神和创新能力的复合型高级工程技术专门人才。

基于上述时代背景和要求,我们组织编写了《现代工程训练系列教材》。本书是该系列教材的第一本,是面向理工科院校本科学生的工程训练基础教材。本书力求具有以下特点:

(1) 训练目标的先进性:以培养“基础宽、能力强、素质高”的具有综合工程素质和创造性的复合型高级工程技术专门人才为主要目标,在强调工程实践能力的同时,更加重视工程意识和工程创新能力的培养。

(2) 训练内容的综合性:横向上,工程实训不再仅仅是常规制造技术基础训练,同时纳入了先进制造技术训练、综合与创新实践训练以及综合素质训练的内容,并且将机械、信息及其系统各方面内容相结合;纵向上,工程训练已经远非传统意义上的纯机械制造与加工训练,而应该是工程设计、工程制造、工程管理和创新实践等现代科学思想与高新技术的认知与实践。

(3) 训练安排的层次性:以基础工程技术训练为起点,以现代工程技术训练为核心,以工程创新能力与创新精神训练为重点,进行分层次的渐进性训练。

(4) 训练对象的多样性:工程训练不能再拘泥于本科一二年级的工程训练,而是向高年级的生产实习、毕业实习开放,并且向指导研究生教学的方向转变,逐步打开本科生、硕士研究生和博士研究生的综合工程实践能力培养通道。

(5) 训练方法的现代性:将教师的启发、引导与学生的主动体验、积极探究有机结合起来,在训练基本工程实践能力的过程中培养学生的创新兴趣、创新精神与创新能力;不仅向学生传授知识,更重要的是向学生传授获取知识的方法,变“授之于鱼”为“授之于渔”。

(6) 以学生为本。本书尽量体现以学生为本、以学生为中心的教育思想,不为教而教,要有利于培养学生自学能力和扩展、发展知识能力,为学生今后持续创造性学习打好基础。

当然,本书尽管主观上想以新思想、新体系、新面孔出现在读者面前,但由于是一种新的探索以及其他可能尚未认识到的因素,难免有这样那样的缺点甚至错误,敬请广大读者不吝赐教,以便再版时修正和完善。

本书由周燕飞组织编写和统稿,其中,第2、4、5、6、7、8、9、12章由张莉、周燕飞负责编写;第1、3、11章由刘润负责编写;第10、15章由葛旺、王恒厂负责编写;第13章由高珏、耿习琴、周燕飞负责编写;第14、20章由王姝歆负责编写;第16、17、18、19章由常燕青、周燕飞负责编写。

本书的编审和出版得到了南京航空航天大学、国防工业出版社、南京航空航天大学工程训练中心全体员工的大力支持和配合,在此,一并表示衷心感谢。

编者

目 录

第1章 工程材料	1
1.1 金属材料概述	1
1.2 金属的晶体结构	5
1.3 金属的结晶	8
1.4 二元合金及其晶体结构	9
1.5 铁碳合金	12
1.6 钢的热处理	16
1.7 现代新型工程材料	20
思考题	22
参考文献	23
第2章 热加工成型	24
2.1 铸造成型	24
2.2 锻压成型	37
2.3 焊接成型	48
思考题	58
第3章 非金属材料及其成型	59
3.1 塑料及其成型加工	59
3.2 橡胶及其成型加工	64
3.3 陶瓷及其成型加工	67
3.4 复合材料及其成型加工	71
思考题	75
参考文献	76
第4章 金属切削基本知识	77
4.1 概述	77
4.2 切削加工的基本知识	79
4.3 金属切削机床	86
思考题	89
第5章 钳工	90
5.1 概述	90
5.2 钳工常用设备	90
5.3 划线	92
5.4 锯削	95

5.5	铨削	98
5.6	钻削	100
5.7	攻螺纹与套螺纹	104
5.8	装配	106
	思考题	110
第6章	车削加工	111
6.1	概述	111
6.2	卧式车床	112
6.3	车刀	114
6.4	工件安装及车床常用附件	116
6.5	车床操作要点	120
6.6	车削加工基本方法	122
6.7	其它车床简介	130
	思考题	132
第7章	铣削、刨削、镗削、拉削加工	133
7.1	铣削加工	133
7.2	刨削加工	146
7.3	镗削加工	153
7.4	拉削加工	155
	思考题	156
第8章	齿轮加工	158
8.1	概述	158
8.2	铣齿	158
8.3	滚齿	159
8.4	插齿	160
8.5	剃齿	162
8.6	珩齿	164
8.7	齿轮磨削	165
8.8	齿轮加工方案选择	167
	思考题	167
第9章	磨削、精密加工	169
9.1	概述	169
9.2	磨削加工	169
9.3	精密加工	176
	思考题	179
第10章	数控加工	180
10.1	数控机床概述	180
10.2	数控车削加工	185
10.3	数控铣削加工	198

第 11 章 特种加工	217
11.1 概述	217
11.2 电火花加工	219
11.3 快速成型技术	224
11.4 其它特种加工方法	228
思考题	232
参考文献	233
第 12 章 机械制造工艺过程	234
12.1 概述	234
12.2 工件的安装与基准	237
12.3 机械加工工艺规程的设计	241
12.4 典型表面加工方案的选择	247
12.5 典型零件工艺过程	251
思考题	257
第 13 章 计算机辅助设计	258
13.1 概论	258
13.2 CAD 产品设计的一般流程	261
13.3 简单零件几何造型	262
13.4 高级特征造型	265
13.5 装配	271
13.6 虚拟现实技术	275
第 14 章 计算机辅助工艺设计	276
14.1 概述	276
14.2 CAPP 的分类	278
14.3 CAPP 系统的基本功能	280
14.4 CAPP 技术的发展	283
参考文献	284
第 15 章 计算机辅助制造	285
15.1 概述	285
15.2 CAM 系统功能与基本操作	287
15.3 CAM 系统的应用	292
15.4 NC 程序的输出与 DNC	298
第 16 章 产品开发与项目管理	302
16.1 概述	302
16.2 成功的产品开发	302
16.3 产品开发过程	303
16.4 项目管理概念	303
16.5 产品开发项目管理实施要点	304
第 17 章 产品数据管理	307

17.1	概述	307
17.2	系统的功能与基本操作	307
17.3	产品生命周期管理	312
17.4	产品数据管理软件的应用	312
第 18 章	企业资源计划	315
18.1	概述	315
18.2	MRP II/ERP 系统原理基础	315
18.3	计划与控制管理	319
18.4	物料管理	326
18.5	成本管理	327
18.6	ERP 商业软件	328
第 19 章	工程创新	329
19.1	概述	329
19.2	创新原理	330
19.3	创新方法	335
19.4	机械创新设计	342
19.5	创新案例	345

第1章 工程材料

1.1 金属材料概述

材料是所有科技进步的核心,是现代文明的三大支柱之一,材料同样也是人类生产生活的物质基础。随着科学技术的不断进步,新材料不断涌现,其中用于制造构件、机器、工具和功能器件的各类材料统称为工程材料,它包括金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料四大系列材料。而金属材料是现代工业生产中应用最广泛、最重要的一种工程材料。

1.1.1 金属材料的发展

根据所使用的工具材料的发展,可以将人类的历史大致分为石器时代和金属时代,而金属时代又分为铜器时代和铁器时代,它标志着人类生产发展的三个飞跃阶段。20 世纪中期之后,随着高分子材料和先进复合材料的迅速发展,人类进入了高分子材料时代,但是这并不意味着金属材料的发展慢了,而是更加迅猛地进入了一个大发展的新时期,到目前为止,全世界金属材料的总产量包括钢、铸铁和有色金属材料已经高达数十亿吨以上。

早在 5000 年前,人类在烧制陶器的过程中发现了冶铜术,后来人们在铜中加入金属锡(即铜锡合金),使较软的铜制品变得非常坚硬;公元前 1200 年左右出现了炼铁技术,从此人类进入铁器时代。而我国青铜冶炼起始于公元前 2000 年(夏朝早期),在春秋战国时期就已经在农业生产中大量地使用铁器了。随后由铸铁发展到炼钢,而大规模炼钢技术是 18 世纪工业革命的重要内容。我国在明朝之前钢铁生产一直居世界前列,到了近代才逐渐落后于其它国家,以至于在解放前我国年钢铁生产最高也只有几十万吨;解放后我国金属冶炼业得到了巨大的发展,其中仅钢铁产量在 2005 年就达到 3.5 亿 t,一跃而为世界第一产钢大国。

如上所述,金属材料在 20 世纪中期之前一直占据绝对优势地位,之后才逐渐被其它材料(高分子材料、无机非金属材料 and 先进复合材料等)所取代,但是目前金属材料仍然占据主导地位,主要是因为金属材料有着完善的生产工艺和庞大的生产能力,同时还具有独特的物理性能,如高韧性和良好的导电性能等。

1.1.2 金属材料的分类

金属材料按照其发展历程可以分为传统材料和先进材料,传统材料是指那些生产和使用历史都比较长的材料,如钢铁、铜和铝等,由于使用量比较大,与国民经济关系密切,有时也称为基础材料;先进材料是指那些具有优异性能且正在发展中的材料,如快(急)冷技术带动出来的非晶态金属软磁薄带,比传统的冷轧硅钢片具有更高的高频导磁特性

和高铁损,以及由气相沉积技术促进的各种类型的金属薄膜等。

金属材料按照组成的特点可以分为黑色金属、有色金属和特殊金属材料。黑色金属包括生铁(含碳量 $>2\%$)、钢(含碳量 $0.04\% \sim 2\%$)和工业纯铁;有色金属包括重金属如铜、铅、锌、镍等,轻金属如铝、镁、钛等,贵金属如金、银、铂等,稀有金属如钨、钼、钽、铌、铀、钍、钇、铯、锶等;特殊金属材料包括非晶态金属、形状记忆合金、超塑金属、储氢合金、超导合金、减振合金和高强高模铝锂合金等。

金属材料按照使用性能可以分为金属结构材料和金属功能材料。结构材料是指以力学性能为主要性能的材料,如飞机框架、压力容器和海洋平台等;功能材料是指以物理或者化学性能为主要性能的材料,如高温测试用的热电偶金属丝、手机中磁铁采用的永磁材料、硬盘读写磁头用的金属多层膜巨磁阻材料等。

金属材料还有其它分类的方法,如按照学科问题可以分为相图与相变、结构与缺陷、表面和界面等;也可以按照材料的形式来分,如块体、薄膜、微粒、纤维等。

1.1.3 金属材料的力学性能

材料的力学性能是材料抵抗外力作用的能力,有时也称为机械性能,常用的力学性能指标有强度和塑性、硬度、冲击韧性、疲劳极限、断裂韧性等。

1.1.3.1 强度和塑性

强度是材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。根据外力作用方式的不同,强度可以分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。工程上最常用的是抗拉强度和屈服强度。测定材料强度最基本的方法是拉伸实验,拉伸实验是指用静压力对拉伸标准试样进行缓慢地轴向拉伸,直到拉断的一种实验方法。在实验中可以测量力的变化和试样的伸长,得到应力 σ 和应变 ε 的关系曲线,即应力—应变曲线,从而确定材料的强度和塑性。

在实验前按照 GB 6397—86 的规定,标准拉伸试样可以制成圆形和板形试样,由于圆形试样夹紧时易于对中,所以优先使用圆形试样。

从应力—应变图 1-1 中可以看出,低碳钢在拉伸实验过程中明显地表现出三个阶段,即弹性变形、塑性变形和断裂阶段。在变形曲线(Oe)中,试样的伸长量随着载荷的增加而增加,外力去除后试样能够回复原状,所以 Oe 段称为弹性变形阶段;在曲线的 Op 段,应力和应变呈正比关系,即符合胡克定律;当应力超过 σ_e 时,试样进入塑性变形阶段,曲线出现平台或者锯齿,应力不增加或者只有少量增加,而试样继续伸长(es 段),称为“屈服”现象。当应力超过 σ_s 时,整个试样发生均匀而显著的大量塑性变形(sb 段)。当应力增加到 σ_b 时,试样发生局部变形,产生“颈缩”,应力明显减小,试样迅速伸长,当应力 σ_k 达到时试样在颈缩处断裂。

1. 屈服强度

在应力—应变曲线上 s 点应力 σ_s 称为屈服

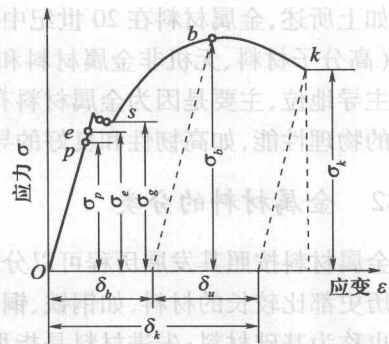


图 1-1 应力—应变曲线

极限或者屈服强度。即 $\sigma_s = F_s / S_0$, 其中 F_s 为材料屈服时的最小拉伸力(N); S_0 为试样截面积(mm^2)。

屈服强度是具有屈服现象的材料特有的强度指标,除了退火或者热轧的低碳钢、中碳钢等少数合金外,大多数合金没有屈服现象,所以工程上设定标准试样产生的塑性变形量为标距长度的0.2%时所对应的应力值定义为该种材料的条件屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。屈服强度表明材料抵抗微量塑性变形的能力,其值越大,抵抗塑性变形的能力越强。由于在一些工程结构或者机器上是不允许塑性变形的,因此屈服强度是工程设计和选材的重要依据。

2. 抗拉强度

在应力—应变曲线上 b 点应力 σ_b 称为抗拉强度。它是材料在断裂之前所承受的最大应力,又称为强度极限,它是材料抵抗断裂的能力,也是评定材料的重要强度指标。例如对于脆性材料没有屈服强度,则用抗拉强度作为设计依据。

3. 塑性

塑性是指材料在静载荷作用下,断裂前发生永久变形的能力。常用的指标有断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。断后伸长率 δ 是指拉断后标距的伸长量与原始标距的百分比。断面收缩率 ψ 是指颈缩处横截面积的最大缩减量与原始截面积的百分比。 ψ 越大则材料的塑性越好,不受试样尺寸的影响,所以用 ψ 表示塑性更接近材料的真实应变。

1.1.3.2 硬度

硬度是材料表面局部抵抗变形的能力。它是一个由材料的弹性、强度、塑性、韧度等一系列不同力学性能组成的综合性能指标,硬度越高,表示材料抵抗局部塑性变形的能力越强,一般情况下,材料的耐磨性能就越好。

硬度的测定方法很多,常用的两类是压入法和划痕法,其中静载荷压入法可以测定布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)、显微硬度(HM)等;动载荷压入法可以测定肖氏硬度(HS);划痕法可以测定莫氏硬度。不同测量方法得到的硬度不能直接比较,但是可以通过硬度换算表来对照比较,在机械制造生产中应用最广泛的方法是布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度试验法。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验法是将一定直径的钢球或者硬质合金球,以一定的静载荷压入到被测金属的表面,保持一段时间后卸除载荷,用显微镜测出压痕平均直径,用载荷除以压痕表面积求得布氏硬度值,如图1-2所示。

布氏硬度的计算公式为

$$\text{HBS}(\text{HBW}) = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

淬火钢球作压头时测得的硬度值用 HBS 表示,适用于测定硬度不高(小于 HB450)的材料,如退火钢、调质钢、有色金属的硬度;当材料的硬度值范围是 HB450 ~ HB650 时,用硬质合金作压头,以 HBW 表示。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验法是用夹角为 120° 的金刚石锥体或者直径为 1.588mm 的淬火钢球,以一定大小的压力压入试样表面,卸除压力,根据压痕深度确定硬度值。测定方法如下:先以初载荷 98N 压入材料,是为了消除试样表面不平对结果的影响,压入到如图1-3中位

置1,压入深度为 h_1 ;再加主载荷,压到位置2,最后去除主载荷(初载荷不去除),压痕弹回到位置3,深度为 h_2 。两次载荷作用后深度差为 $h = h_2 - h_1$,洛氏硬度用深度差 h 来表示。人们习惯认为材料越硬,压痕越浅,硬度越高,为了符合人们的习惯,用某一常数值减去 h 的差值作为硬度值。生产中常将洛氏硬度分成A、B、C三级,HRA测定硬质合金、表面淬火层、渗碳钢;HRB测定有色金属、退火钢、正火钢;HRC测定淬火钢、调质钢。对于HRA和HRC,此常数为0.2mm,对于HRB,此常数为0.26mm,此外规定0.002mm为一个洛氏硬度单位,所以计算公式如下:

$$\text{HRA} = \text{HRC} = \frac{0.2(\text{mm}) - h(\text{mm})}{0.002(\text{mm})} = 100 - \frac{h(\text{mm})}{0.002(\text{mm})}$$

$$\text{HRB} = \frac{0.26(\text{mm}) - h(\text{mm})}{0.002(\text{mm})} = 130 - \frac{h(\text{mm})}{0.002(\text{mm})}$$

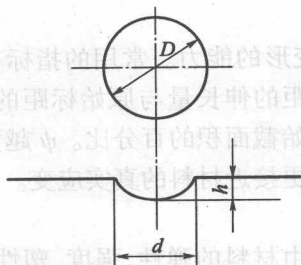


图 1-2 布氏硬度试验示意图

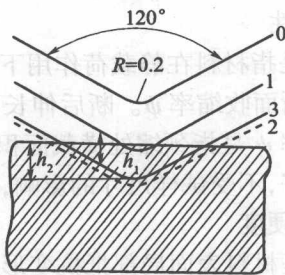


图 1-3 洛氏硬度试验示意图

3. 维氏硬度

维氏硬度的试验方法与布氏硬度基本相同,不同点是采用的压头是夹角为 136° 的金刚石四棱锥,试验力可以任选,如图1-4所示。将压头在压力作用下压入被测材料的表面,保持一段时间后卸除压力,测量两对角线的平均长度为 d ,计算出表面积,最后计算出平均压力值,以此作为维氏硬度,计算公式如下:

$$\text{HV} = \frac{F}{S} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

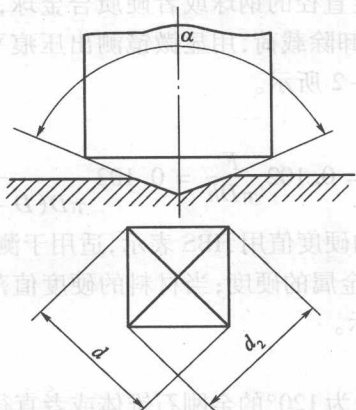


图 1-4 维氏硬度试验示意图

1.1.3.3 疲劳极限

材料在交变应力的作用下发生断裂的现象称为疲劳。在规定次数(钢铁材料为 10^7 次,有色金属为 10^8 次)交变载荷作用下,材料不会引起断裂的最大应力,称为疲劳极限,光滑试样弯曲疲劳强度用 σ_{-1} 表示。

许多机器的零件如轴、弹簧和齿轮等在工作时承受交变载荷,当交变载荷值远远低于屈服极限时,零件就发生了断裂。疲劳断裂的发生是突然性的,事先没有明显的塑性变形阶段,是低应力脆断。从图 1-5 可看出金属材料的应力越大,那么断裂前能够承受交变应力的次数 N 越少,当最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 小于 σ_{-1} 值时,曲线与横坐标平行,交变应力次数为无限大,不会发生断裂。一般钢铁材料 σ_{-1} 约是 σ_b 的 1/2,非金属材料的疲劳极限远远低于金属材料。产生疲劳断裂的原因是由于材料内部的杂质、加工过程中形成的刀痕和尺寸变化引起的应力集中等,生产中常采用表面强化工艺(如表面淬火、喷丸处理等)、改善结构形状和表面质量来提高材料的疲劳极限。

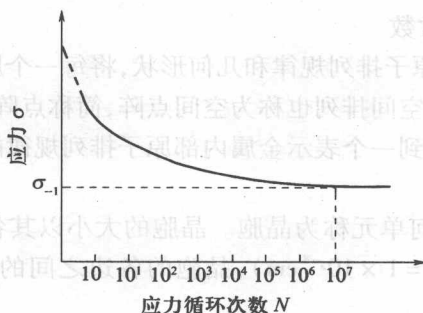


图 1-5 疲劳曲线

1.2 金属的晶体结构

材料的结构是指组成物质的单元(原子或者分子)的排列和空间分布方式,可以通过改变材料的内部组织结构来获得所需的性能,因此了解材料的内部结构是掌握材料性能的基础。

1.2.1 晶体的基本知识

1. 晶体和非晶体

晶体是原子在空间呈规则排列的固体物质,如图 1-6(a)所示。在金属晶体中,金属原子失去最外层电子变成正离子,每个正离子按照一定规则排列并在固定位置做热振动,自由电子在各正离子间自由运动,并为整个金属所共有,形成带负电的电子云。正离子和自由电子相互吸引,将所有的金属原子结合起来,使金属处于稳定的晶体状态,金属原子的这种结合方式称为金属键。

大多数金属、陶瓷以及一些聚合物在形成固体时,都可以形成晶体。晶体通常具有一定的熔点和各向异性等特点。

非晶体是指材料在形成固体时,内部的原子为无序排列的固体物质,如玻璃、大部分

塑料、沥青等。非晶体在整体上是无序的,原子间靠化学键结合在一起,没有固定的熔点,热导率和热膨胀性较小。

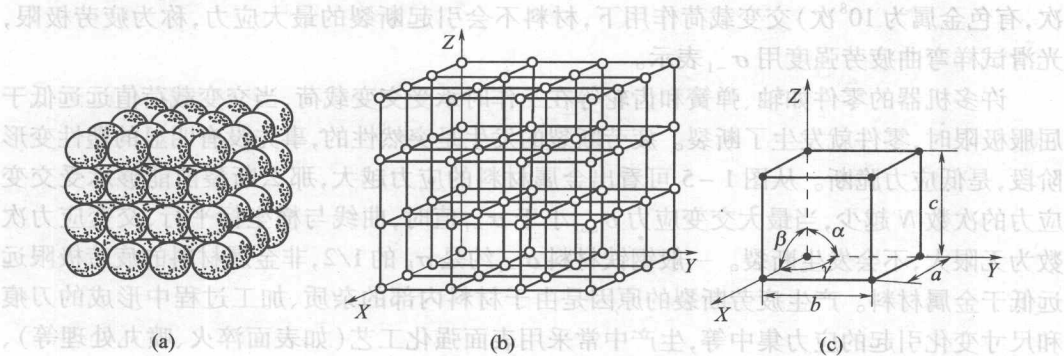


图 1-6 晶体结构示意图

2. 晶格、晶胞和晶格常数

为了便于分析晶体中原子排列规律和几何形状,将每一个原子假设成一个几何点,忽略其尺寸和质量,这种点的空间排列也称为空间点阵,简称点阵。用假想的一系列平行的直线将这些点连接起来,得到一个表示金属内部原子排列规律的抽象的空间格架,称为晶格,如图 1-6(b)所示。

构成晶格的最基本几何单元称为晶胞。晶胞的大小以其各边尺寸 a, b, c 表示,称为晶格常数,以埃为单位($1\text{\AA} = 1 \times 10^{-8}\text{cm}$),晶胞的各边之间的夹角用 α, β, γ 表示,如图 1-6(c)所示。

1.2.2 金属的实际晶体结构

在元素周期表中有 80 余种金属,工业上常用的金属元素大约有 40 种,大多数金属具有简单的高对称性的晶体结构,常见的有体心立方、面心立方和密排六方。

1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1-7 所示,由 8 个原子构成一个立方体,在立方体的中间还有一个原子,其晶格常数 $a = b = c$,棱边夹角 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$,晶胞角上的原子为相邻的 8 个晶胞所共有,每个晶胞只有 $1/8$,中心原子为晶胞独有,故晶胞实际原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$ 个,属于这类晶格的金属有 α -Fe、铬(Cr)、钼(Mo)、钒(V)、钨(W)等强金属性金属。

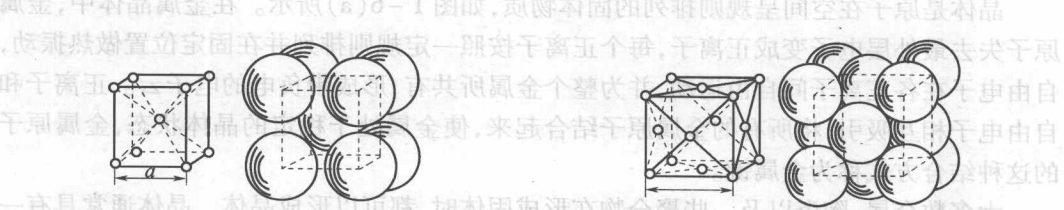


图 1-7 体心立方晶格

图 1-8 面心立方晶格

2) 面心立方晶格

面心立方晶格如图 1-8 所示,由 8 个原子构成一个立方体,在立方体的六个面的中心各占有一个原子,晶胞角上的原子为相邻 8 个晶胞所共有,每个晶胞实际上只占有 $\frac{1}{8}$ 个原子,面中心的原子为 2 个晶胞所共有,故晶胞中的实际原子数为 $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ (个)。属于这类晶格的金属有 γ -Fe、铝(Al)、铜(Cu)、银(Ag)、镍(Ni)、金(Au)等大部分有色金属。

3) 密排六方晶格

密排六方晶格如图 1-9 所示,是一个六方柱体,柱体上下底面 6 个角及中心各有一个原子,柱体中心还有 3 个原子。柱体角上的原子为相邻 6 个晶胞所共有,上下底面中心的原子为 2 个晶胞所共有,柱体中心的 3 个原子为该晶胞独有,故晶胞中实际原子数为 $12 \times \frac{1}{6} + 2 \times \frac{1}{2} + 3 = 6$ 。属于这类晶格的金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)等。

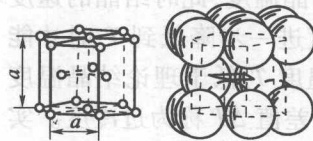


图 1-9 密排六方晶格

4) 多晶体结构

所有的金属都是从熔融液态在正常条件下冷却形成晶态结构的,然而由液态冷却形成的铸件在整体上很难是一个单晶体,单晶体是结晶位向完全一致的晶体。单晶体在不同的晶面和晶向的力学性能不同,称为各向异性。铸件经常是由结构相同但取向不同的晶体组成,大多数金属形成多晶体结构,如图 1-10 所示。外形不规则的小晶体是晶粒,晶粒之间的界面称为晶界。晶粒的典型尺寸在 $0.5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 。

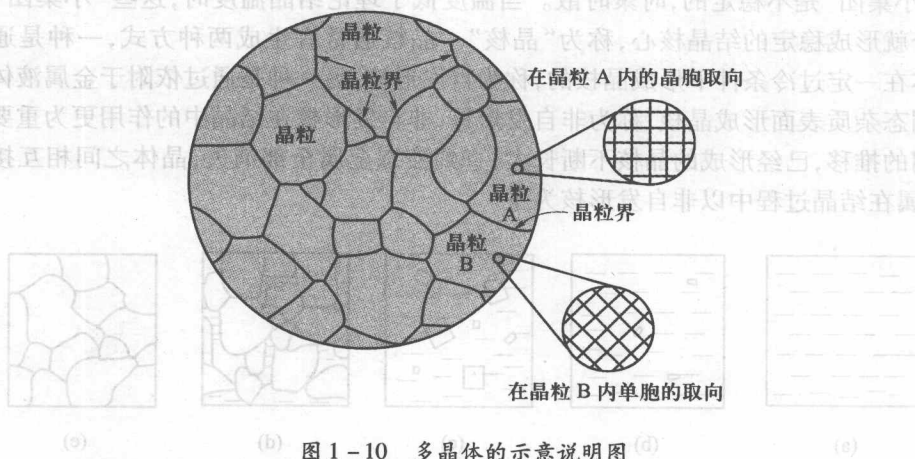


图 1-10 多晶体的示意说明图

(多晶粒是很多晶粒的组合,这些晶粒由晶界隔离,晶粒 A 中单胞的排列和晶粒 B 中是不同的)

1.3 金属的结晶

大多数金属材料都是经过熔炼法生产的,我们把材料由液态转变为固态的过程称为凝固,如果材料是晶体,则将此转变过程称为结晶。金属与合金在一定条件下转变产物是晶体,所以金属从液态转变为固态的过程称为金属的结晶。

1.3.1 纯金属的冷却曲线和热力学条件

各种金属都有一定结晶温度,如铁为 1538°C ,铝为 660°C 。这里指的是冷却速度很慢的平衡结晶温度,也称为理论结晶温度。在平衡结晶温度下,液体和晶体同时共存,处于平衡状态。

纯金属的冷却曲线如图 1-11 所示。图中 T_m 液体和晶体平衡共存,所以称为理论结晶温度,此时结晶的速度与熔化的速度相等,只有将温度进一步降低到 T_n 时才能进行进一步的结晶,实际结晶温度 T_n 低于理论结晶温度 T_m 的现象称为过冷现象,它们的差值 ΔT 称为过冷度。实践证明,金属的结晶总是在一定的过冷度条件下进行的,同一种金属,冷却速度越快,过冷度也越大,金属的实际结晶温度越低。

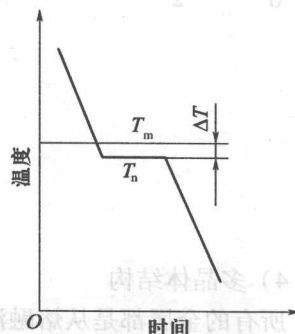


图 1-11 纯铁冷却曲线

1.3.2 金属的结晶过程

金属的结晶过程是由形成晶核和晶核长大两个阶段组成,发生在冷却曲线水平线段上所经历的时间内,过程如图 1-12 所示。实验证明,在液态金属中总是存在着许多类似于晶体中原子排列的“小集团”,在理论结晶温度以上,这些“小集团”是不稳定的,时聚时散。当温度低于理论结晶温度时,这些“小集团”中的一部分就形成稳定的结晶核心,称为“晶核”。晶核通常有生成两种方式,一种是通过金属液体在一定过冷条件下形成晶核的,称为自发形核;另一种是通过依附于金属液体中未熔的固态杂质表面形成晶核,称为非自发形核,非自发形核在结晶中的作用更为重要。随着时间的推移,已经形成的晶核不断长大,直到液态金属全部消失,晶体之间相互接触为止,金属在结晶过程中以非自发形核为主。

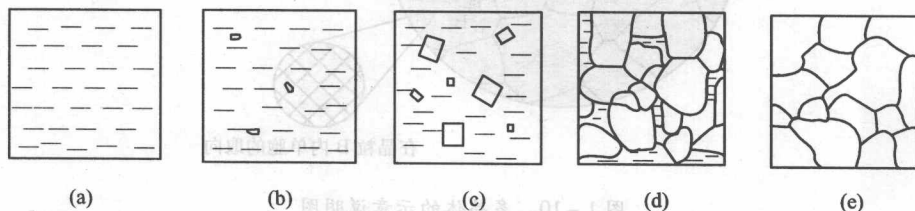


图 1-12 纯金属的结晶过程示意图