



获2004年上海市优秀教材奖

普通高等学校“国家十一五”规划教材

大学工科教学、实践通用教材

机械制造

主编 鞠鲁粤 主审 陈茂贞

(第5版)

基础

JIXIE ZHIZAO JICHU

上海交通大学出版社

TH16/71=3

2005

获 2004 年上海市优秀教材二等奖

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
大学工科教学、实践通用

机械制造基础

第 5 版

主编 鞠鲁粤
主审 陈茂贞

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书是工科学生课堂教学和实践教学的教学参考书,也可作为工程技术人员参考用书。

全书共分 18 章。前 7 章主要介绍工程材料及热处理,铸造成形,锻压成形,焊接成形,非金属材料成形和快速成形(RP)方法及测量方法。后 11 章主要介绍金属切削基本知识,钳工,车削加工,铣、刨、镗、拉削加工,齿轮加工,磨削、精密加工,数控加工,特种加工,计算机辅助设计与制造(CAD/CAM),机械制造工艺过程,先进机械制造技术(AMT)发展等。为配合学习,每一章都附有习题,便于读者进行复习和总结,巩固已学知识。为适应机械制造技术的飞速发展,许多章节都介绍了现代加工方法的新成果和新发展,便于读者了解先进制造技术的发展趋势。

本书阐述了机械制造各种成形过程和加工过程的工艺原理、工艺方法、自身规律、相互联系及技术进展,注重理论教学与实践相结合。曾获得 2000 年上海市优秀教材三等奖和 2004 年上海市优秀教材二等奖。2006 年纳入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/鞠鲁粤主编. —5 版. —上海:上海
交通大学出版社,2009
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN978-7-313-02025-3

I. 机... II. 鞠... III. 机械制造—高等学
校—教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 110824 号

机械制造基础

(第 5 版)

鞠鲁粤 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海锦佳装璜印刷发展公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.5 字数:480 千字

1998 年 5 月第 1 版 2009 年 1 月第 5 版 2009 年 1 月第 16 次印刷

印数:67 751~75 800

ISBN978-7-313-02025-3/TH·065 定价:26.00 元

版权所有 侵权必究

再版前言

机械制造基础(金属工艺学)是高等工科院校近机类和非机类专业一门重要的技术基础课程。本教材自1998年5月第1版问世后,受到兄弟院校同仁的厚爱,已有数十所高校采用本书作为授课教材,近百所高校将本书作为教学参考书。本书也被指定为上海市自学考试教材。本教材第1版获得上海市优秀教材三等奖,第2版荣获上海市优秀教材二等奖,2006年被教育部纳入国家“十一五”规划教材。

进入21世纪,在强调高等院校创新教育的同时,实践教育已提到了极为重要的位置。本书的改编,就是建立在创新和实践两大立意上的。

本书的编写从三个角度考虑:其一,通过工程材料及其性能控制、材料成形、机械加工三个方面,分别叙述传统的机械制造过程及方法;其二,尽可能全面地介绍机械制造中的一些新工艺、新技术、新方法及其发展趋势,以扩大学生的视野,适应用人单位对学生知识结构和知识面的要求,使高校培养的学生能面向21世纪,适应时代对工程技术人员的要求;其三,为了使读者进一步了解课程内容,作者精心编制了本书多媒体配套课件。课件分上下两册,共16张光碟,内容全部覆盖文字教材,采用大量的Flash动画和教学视频,最大限度提高课堂教学效果和工程实践教学效果。这些多媒体课件,已在许多“985”、“211”高校使用,获得较好的评价。欢迎读者使用。

本书内容较新,实践性较强,不但可以满足工科学生的课程学习需求,同时也被许多高校工程训练中心作为机械制造实践训练教材使用。

本书的编者长期从事近机类、非机类和机械类工科学生的课程教学和金工实习工作,已累计有数万人次的机械制造基础教学和金工实习工作经历。本书的编写,是编者长期教学工作经验的总结,对非机类、近机类和其他专业的学生掌握机械制造学科会有一定的帮助。

参加本书编写的人员有:(按章节顺序)鞠鲁粤(第1,2,4,8,9,10,17,18章)、姚勤(第3,5,12章)、陈方泉(第6章)、李宏(第7章)、张萍(第10,15,16章)、朱民(第11,13章)、陆建刚(第7,14章)。

刘占斌、钟高建、鞠俊亭、杨飞云、应陈勇、林成辉、严建华、刘鑫、王志清、李伟、朱冒冒、冯祖军、姜振春、郭建华、郑亮、万军、张劲峰、刘鑫、王洪全、张金荣、朱慧英、黄慰卿、陆新惠、姚明珍、王琴珍、朱辉石、张汉芳、陆小生、冯磊等参加了本书的编写工作。

全书由上海大学鞠鲁粤教授主编。陈茂贞教授为本书第一版主审。

本书在编写过程中,参考了有关教材、手册、资料,并得到众多同志的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,书中错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2009年1月

目 录

第1章 工程材料	1
1.1 概述	1
1.2 金属材料简介	2
1.3 晶体的结构	5
1.4 金属的结晶	7
1.5 二元合金晶体结构	9
1.6 铁碳合金	10
1.7 钢的热处理	14
1.8 塑料	20
1.9 现代结构材料	22
1.10 功能材料	26
1.11 纳米材料	27
习题	30
第2章 铸造成形	32
2.1 概述	32
2.2 铸件成形理论基础	33
2.3 造型方法	37
2.4 铸造工艺分析	43
2.5 特种铸造	50
2.6 常用铸造方法的比较	58
2.7 铸造新工艺新技术简介	59
2.8 铸造技术的发展趋势	64
习题	65
第3章 锻压成形	67
3.1 金属的塑性变形及锻造性能	67
3.2 锻造	70
3.3 板料冲压	76
3.4 粉末冶金	80
3.5 锻压新工艺简介	81
习题	87
第4章 焊接成形	90
4.1 概述	90

4.2 熔化焊接	94
4.3 压力焊和钎焊	100
4.4 焊接接头	103
4.5 常用金属材料的焊接	105
4.6 焊接结构设计简介	107
4.7 胶接	109
4.8 焊接新技术简介	110
习题	114
第5章 非金属材料的成形	115
5.1 塑料的成形与加工	115
5.2 橡胶的成形加工	119
5.3 陶瓷的成形加工	122
5.4 复合材料的成形	125
习题	128
第6章 快速成形	129
6.1 概述	129
6.2 快速成形技术的基本过程	131
6.3 几种常用 RP 技术的工艺原理	133
6.4 RP 技术的应用领域	136
习题	138
第7章 测量	139
7.1 测量基础知识	139
7.2 常用计量器具介绍	141
7.3 现代测试仪器简介	145
习题	148
第8章 金属切削基本知识	149
8.1 概述	149
8.2 切削加工基本知识	151
8.3 金属切削机床	162
习题	165
第9章 钳工	168
9.1 概述	168
9.2 划线	170
9.3 锯削和锉削	171

9.4 钻削	171
9.5 装配	175
习题	178
第 10 章 车削加工	179
10.1 概述	179
10.2 卧式车床	181
10.3 车削加工基本方法	184
10.4 其他车床简介	187
习题	188
第 11 章 铣、刨、镗、拉削加工	190
11.1 铣削加工	190
11.2 铣床	191
11.3 铣削加工基本方法	192
11.4 刨削加工	195
11.5 镗削加工	196
11.6 拉削加工	198
习题	199
第 12 章 齿轮加工	201
12.1 概述	201
12.2 齿形的基本加工	202
12.3 齿形的精加工	207
习题	209
第 13 章 磨削、精密加工	210
13.1 概述	210
13.2 磨削加工	210
13.3 精整和光整加工	216
习题	217
第 14 章 数控加工	218
14.1 概述	218
14.2 数控加工程序	221
14.3 数控机床编程实例	228
14.4 数控技术的发展趋势	234
习题	235

第 15 章 特种加工	236
15.1 概述.....	236
15.2 电火花加工.....	236
15.3 超声加工.....	247
15.4 电解成形加工.....	250
15.5 电铸成形加工.....	252
习题.....	253
第 16 章 CAD/CAM 技术	254
16.1 概述.....	254
16.2 CAD/CAM 系统的基本组成	258
16.3 计算机辅助设计系统的三维造型技术.....	261
16.4 CAM 概述	263
16.5 CAD/CAM 软件概况	265
习题.....	267
第 17 章 机械制造工艺过程	269
17.1 概述.....	269
17.2 毛坯的选择.....	270
17.3 加工余量和定位基准.....	277
17.4 各种表面加工方案的选择.....	278
17.5 典型零件工艺过程.....	279
17.6 各种加工方法经济性综合比较.....	281
习题.....	285
第 18 章 现代机械制造技术的发展	287
18.1 概述.....	287
18.2 现代机械制造技术及发展.....	288
18.3 现代制造技术的发展.....	297
习题.....	301
参考文献.....	303

第 1 章 工程材料

1.1 概述

材料是现代文明的三大支柱之一,也是发展国民经济和机械工业的重要物质基础。材料作为生产活动的基本投入之一,对生产力的发展有深远的影响。历史上曾把当时使用的材料,当作历史发展的里程碑,如“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”等。我国是世界上最早发现和使用金属的国家之一。周朝是青铜器的极盛时期,到春秋战国时代,已普遍应用铁器。直到 19 世纪中叶,大规模炼钢工业兴起,钢铁才成为最主要的工程材料。

科学技术的进步,推动了材料工业的发展,使新材料不断涌现。石油化学工业的发展,促进了合成材料的兴起和应用;20 世纪 80 年代特种陶瓷材料又有很大进展,工程材料随之扩展为包括金属材料、有机高分子材料(聚合物)和无机非金属材料三大系列的全材料范围。

1.1.1 金属材料的发展

人类早在 6 000 年以前就发明了金属冶炼,公元前 4 000 年古埃及人便掌握了炼铜技术。我国青铜冶炼约始于公元前 2 000 年(夏代早期)。古埃及在 5 000 年以前,就用含镍 7.5% 的陨石铁做成铁球。我国春秋战国时期已经大量使用铁器。铸铁的发展经历了 5 000 年的漫长岁月,只是到了发明蒸汽机以后,由于在铁轨、铸铁管制造中的大量应用,才走上工业生产的道路。15 世纪到 18 世纪,从高炉炼钢到电弧炉炼钢,逐步奠定了近代钢铁工业的基础。

19 世纪后半叶,欧洲社会生产力和科学技术的进步,推动了钢铁工业的大步发展,扩大了钢铁生产规模,提高了产品质量。从 20 世纪 50 年代到 2007 年,全世界的钢产量由 2.1 亿吨增加到 13.435 亿吨。而我国 2007 年钢产量达到 4.892 亿吨,超过 20 世纪 50 年代全球钢产量,跃居全球钢产量首位。

在钢铁材料发展的同时,非铁金属也得到发展。人类自 1866 年发明电解铝生产工艺以来,铝已成为用量仅次于钢铁的金属。1910 年纯钛的制取,满足了航空工业发展的需求。

1.1.2 非金属材料及复合材料的发展

非金属材料如陶瓷、橡胶等的发展历史也十分悠久。进入到 20 世纪后,更是取得了重大的进展。人工合成高分子材料从 20 世纪 20 年代至今,发展之快、产量之大、应用之广可与钢铁材料相比。20 世纪 60 年代到 70 年代,有机合成材料每年以 14% 的速度增长,而金属材料年增长率仅为 4%。1970 年世界高分子材料年产量为 4 000 万吨,其中 3 000 万吨为塑料,橡胶为 5 000 万吨(已超过天然橡胶的产量),合成纤维 400 万吨。20 世纪 90 年代,塑料产量已逾亿吨,按体积计,已超过钢铁产量。2005 年我国塑料产量为 2 198.55 万吨。

陶瓷材料近几十年的发展也十分引人注目。陶瓷材料在冶金、建筑、化工和尖端技术领域已成为耐高温、耐腐蚀和各种功能材料的主要用材。

随着航空、航天、电子、通信、机械、化工、能源等工业的发展,对材料的性能提出了越来越高的要求。传统的单一材料已不能满足使用要求,复合材料的研究和应用引起了人们的重视。玻璃纤维树脂复合材料、碳纤维树脂复合材料等已在航空航天工业和交通运输、石油化工等工业中广泛应用。

1.1.3 新材料的发展趋势

随着社会的发展和科学技术的进步,新材料的研究、制备和加工应用层出不穷。每一种重要的新材料的发现和运用,都把人类支配自然的能力提高到一个新的水平。工程材料目前正朝高比强度(单位密度的强度)、高比模量(单位密度的模量)、耐高温、耐腐蚀的方向发展。图 1-1 为材料比强度随时间的进展,表明今日先进材料的比强度比早期材料增长 50 倍。

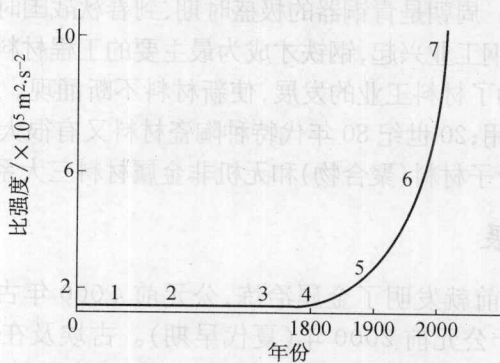


图 1-1 材料比强度的进展

1—木材、石料；2—青铜；3—铸铁；4—钢；
5—铝合金；6—复合材料钢；7—芳纶纤维铝、碳纤维

新材料主要在以下几方面获得发展：

- (1) 先进复合材料 由基体材料(高分子材料、金属或陶瓷)和增强材料(纤维、晶须、颗粒)复合而成的具有优异性能的新型材料。
- (2) 光电子信息材料 包括量子材料、生物光电子材料、非线性光电子材料等。
- (3) 低维材料 指超微粒子(零维)、纤维(一维)和薄膜(二维)材料,这是近年来发展最快的材料领域。
- (4) 新型金属材料 如镍基高温合金、非晶态合金、微晶合金、Al-Li 合金金属间化合物等。

1.2 金属材料简介

1.2.1 金属材料的种类

传统金属材料是能源、通信、交通运输、建筑、家用电器等行业中最基本的构成物质,也是保证经济持续增长的支柱之一。金属材料是工程材料中广泛应用的一大类。金属材料可分为钢铁金属和非铁金属两类。

常用的钢铁金属材料分为钢和铸铁两大类。碳钢按钢的质量可分为普通钢、优质钢、高级优质钢、特级优质钢等;按钢的碳含量可分为低碳钢($w_c \leq 0.25\%$)、中碳钢($w_c = 0.25\% \sim 0.6\%$)、高碳钢($w_c > 0.6\%$)、合金钢(低合金钢、中合金钢、高合金钢)等;按用途可分为结构钢(工程结构钢、机器零件用钢等)、工具钢(制造刀具、模具、量具等)、特殊性能钢(如不锈钢、耐热钢、耐磨钢、磁钢等)。

铸铁可分为白口铸铁(铁碳合金中的碳以 Fe_3C 形式出现)、灰口铸铁(碳以片状石墨出现)、可锻铸铁(碳以团絮状石墨形式出现)、球墨铸铁(碳以球状石墨形式出现)、蠕墨铸铁(碳以蠕虫状石墨形式出现)以及特殊性能铸铁(如耐磨铸铁代号 KmTB、冷硬铸铁代号 LT、耐热铸铁代号 RT、耐蚀铸铁代号 ST)等。常用的钢铁金属分类如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的钢铁金属材料

名称	分类 标准号	编 号 方 法		用 途
		举 例	说 明	
碳 钢	碳素结构钢 GB/T700-1988	Q235-AF	屈服点为 235 MPa、质量为 A 级的沸腾钢	一般以型材供应的工程结构件,制造不太重要的机械零件及焊接件
	优质碳素结构钢 GB/T699-1999	45	表示平均 $w_c = 0.45\%$ 的优质碳素结构钢	用于制造曲轴、传动轴、齿轮、连杆等重要零件
	碳素工具钢 GB/T1298-1986	T8 T8A	表示平均 $w_c = 0.8\%$ 的碳素工具钢, A 表示高级优质	制造需较高硬度、耐磨性、又能承受一定冲击的工具,如手锤、冲头等
	一般工程 铸造碳钢 GB/T5613-1995	ZG200-400	表示屈服强度为 200 MPa、抗拉强度为 400 MPa 的碳素铸钢	适用于铸造成形的钢质零件(ZG200-400 为低碳铸钢, ZG310-570 为中碳铸钢, ZG340-640 为高碳铸钢)
合 金 钢	合金结构钢 GB/T699-1999	40Cr	表示平均 $w_c = 0.4\%$, 主加元素为 Cr	40Cr 为调质钢,用于承受弯曲、扭转、拉压、冲击等复杂应力的重要件,如传动轴、曲轴、连杆螺栓等
	高合金 刀具钢 GB/T9943-1988	W18Cr4V	$w_c = 0.70\% \sim 1.65\%$, $w_w = 17.5\% \sim 18.5\%$, $w_{Cr} = 3.8\% \sim 4.4\%$, $w_v = 1.00\% \sim 1.40\%$	用于淬透性好、红硬性高,截面尺寸不大的刀具
铸 铁	灰口铸铁 GB/T9439-1988	HT200	表示试样直径为 30 mm,平均抗拉强度 200 MPa 的灰口铸铁	承受较大载荷和较重要的零件,如气缸、齿轮、底座、飞轮、床身等
	可锻铸铁 GB/T9440-1988	KTZ450-06	平均抗拉强度不大于 450 MPa,伸长率大于 6% 的珠光体可锻铸铁	制造负荷较高的耐磨损零件,如曲轴、连杆、齿轮、凸轮轴等薄壁小铸件
	球墨铸铁 GB/T1348-1988	QT450-10	表示抗拉强度大于 450 MPa,伸长率大于 10% 的球墨铸铁	承受冲击振动的零件如曲轴、蜗杆等
	蠕墨铸铁 GB/T5612-1985	RuT340	表示平均抗拉强度大于 340 MPa 的蠕墨铸铁	制造大截面复杂铸件,主要用来代替高强度灰口铸铁、合金铸铁

(续表)

名称	分类 标准号	编 号 方 法		用 途
		举 例	说 明	
特殊性能铸铁	耐磨铸铁 GB/T8263-1999	KmTBMn5 W3	中锰球墨铸铁,具有一定的强度和韧性,耐磨料磨损	可制造承受干摩擦及为磨料磨损条件下工作的零件,在矿山、冶金、电力、建材和机械制造等行业有广泛的应用
	耐热铸铁 GB/T9437-1988	RQTSi4Mo	在铸铁中加入 Si、Al、Cr 等元素,使铸铁在高温下表面形成一层致密的氧化膜,保护内层不被继续氧化	可制造在高温工况下工作的零件
	耐蚀铸铁 GB/T8491-1987	STSi11Cu2 CrR	合金元素的作用是提高铸铁基体组织的电位,使铸铁表面形成一层致密的保护膜	可制造在腐蚀工况下工作的零件,广泛用于化工等行业

除了钢铁金属以外的其他金属材料统称为非铁金属,习惯上称为有色金属,如铜、铝及其合金、轴承合金、硬质合金等。

1.2.2 金属材料的性能

金属材料的性能分为使用性能和工艺性能,如表 1-2 所示。

表 1-2 金属材料的性能

性 能 名 称		性 能 内 容
使用性能	物理性能	包括密度、熔点、导电性、导热性、磁性等
	化学性能	金属材料抵抗各种介质的侵蚀能力,如抗腐蚀性能等
	强 度	指在外力作用下材料抵抗变形和破坏的能力,分为抗拉强度 σ_b 、抗压强度 σ_{bc} 、抗弯强度 σ_{bb} 、抗剪强度 σ_c ,单位均为 MPa
	硬 度	衡量材料软硬程度的指标,较常用的硬度测定方法有布氏硬度(HBW)、洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)等
	塑 性	指在外力作用下材料产生永久变形而不发生破坏的能力。常用指标是伸长率 $\delta(\%)$ 和断面收缩率 $\psi(\%)$, δ 和 ψ 愈大,材料塑性愈好
	弹性模量	也称刚度,表示材料抵抗弹性变形的能力
	冲击韧度	指材料抵抗冲击力的能力。常把各种材料受到冲击破坏时,消耗能量的数值作为冲击韧度的指标,用 $a_K(J/cm^2)$ 表示。冲击韧度值主要取决于塑性、硬度,尤其是温度对冲击韧度值的影响具有更重要的意义
工艺性能	疲劳强度	指材料在多次交变载荷作用下而不致引起断裂的最大应力
	工 艺 性 能	包括热处理工艺性能、铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能等

1.3 晶体的结构

1.3.1 晶体与非晶体

固体可分为两类:晶体和非晶体。晶体中原子按一定规则排列。金属及其合金及大多数矿物等都是晶体。最普通的非晶体是玻璃,它的原子排列较不规则。非晶体的结构比晶体结构更难确定。

1. 晶体的空间点阵和晶系

如果把所有具有相同环境的原子或原子群作为一个质点,则晶体结构可以抽象为这些质点在空间上的、周期性规则排列的空间点阵,如图 1-2(b)所示。

在空间点阵中取一单位体积(通常为六面体)作为点阵的最小组成单元,称为晶胞,如图 1-2(c)所示。晶胞的大小和形状以晶胞的棱边长 a 、 b 、 c 和棱边之间的夹角 α 、 β 、 γ 来表示。

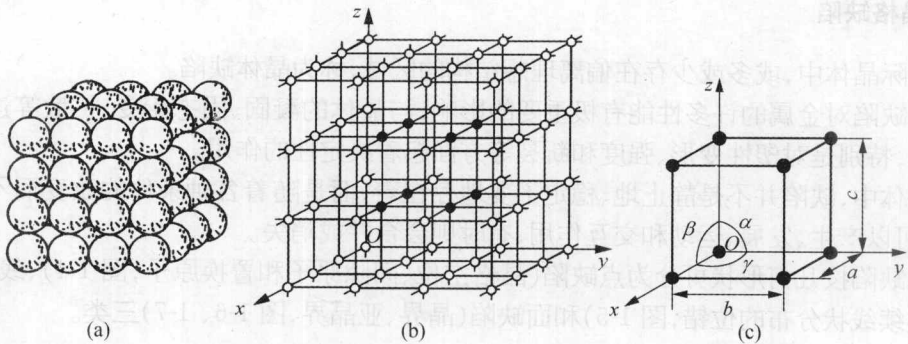


图 1-2 晶体中原子排列示意图
(a) 原子排列模型; (b) 结晶格子; (c) 晶胞

2. 金属的晶体结构

金属材料包括纯金属和合金,在一般情况下都是晶体。最常见的金属晶体结构有三种,即体心立方,见图 1-3(a);面心立方,见图 1-3(b);密排六方,见图 1-3(c)。

1.3.2 实际金属结构

1. 多晶体结构

实际的金属结构都包含着许多小晶体,每个小晶体内的晶格方位是一致的,而小晶体之间彼此方位不同。由于每个小晶体都具有不规则的颗粒外形,故称为“晶粒”;晶粒与晶粒之间的界面叫做“晶界”。由于晶界是两相邻晶粒不同晶格方位的过渡区,所以在晶界上原子排列总是不规则的。这种由多晶粒组成的晶体结构称为“多晶体”。

钢铁材料的晶粒尺寸一般为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm 左右,所以必须在显微镜下才能观察到,因

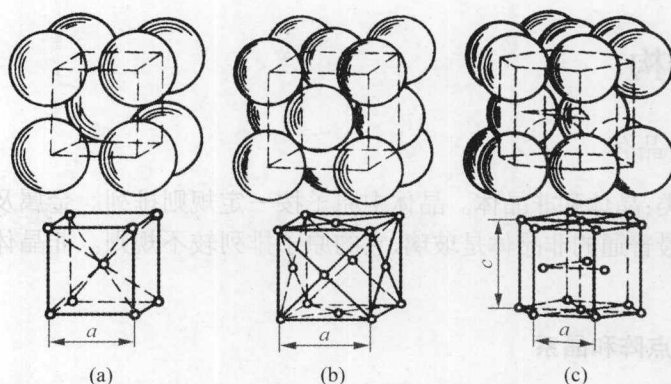


图 1-3 金属的晶胞

(a) 体心立方; (b) 面心立方; (c) 密排六方

此也叫“显微组织”。非铁金属的晶粒一般都比较粗大,有时肉眼就可以看见。

2. 晶格缺陷

在实际晶体中,或多或少存在偏离理想结构的区域,称为晶体缺陷。

晶体缺陷对金属的许多性能有极重要的影响,与晶体的凝固、固态相变、扩散等过程都有重大关系,特别是对塑性变形、强度和断裂等方面起着决定性的作用。

在晶体中,缺陷并不是静止地、稳定不变地存在着,而是随着各种条件的改变而不断地变动,它们可以产生、发展、运动和交互作用,有时则会合并或消失。

晶体缺陷按几何形状可分为点缺陷(晶格空位、间隙原子和置换原子,图 1-4)、线缺陷(晶体中呈连续线状分布的位错,图 1-5)和面缺陷(晶界、亚晶界,图 1-6、1-7)三类。

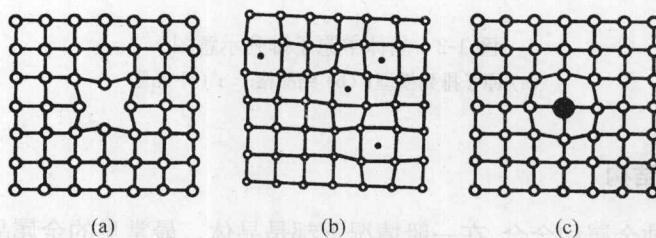


图 1-4 点缺陷示意图

(a) 晶格空位; (b) 间隙原子; (c) 置换原子

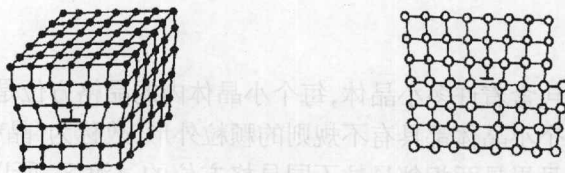


图 1-5 刃型位错示意图

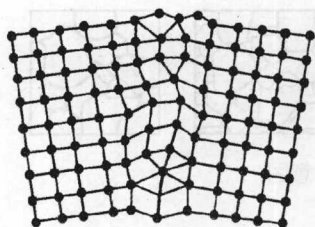


图 1-6 晶界示意图

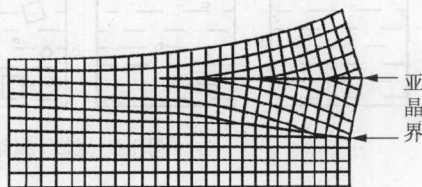


图 1-7 亚晶界示意图

所有这些缺陷,都将导致周围的晶格发生明显的畸变,从而对金属的力学性能、化学性能产生显著的影响。

1.4 金属的结晶

1.4.1 结晶的概念

金属溶液在凝固后一般都以晶质状态存在,即内部原子由不规则排列转变到规则排列。形成晶体的过程,称为结晶过程。结晶形成的组织,直接影响金属内部的组织与性能。

金属在结晶过程中,其结晶温度可以用热分析法测定。将液态金属放在炉中缓慢冷却,在冷却过程中测得温度随时间变化的数据,则得到如图 1-8 所示的冷却曲线 a 。由于结晶时放出潜热,补偿了冷却散失的热量,所以冷却曲线出现水平台阶,即结晶在恒温下进行。在无限缓慢冷却条件下的平衡结晶温度 T_m 称为理论结晶温度。

图 1-8 中曲线 b 表示实际的结晶过程。在实际结晶时,冷却速度不可能无限缓慢,因此实际结晶温度 T_n 总是低于理论结晶温度 T_m ,理论结晶温度与实际结晶温度之差称为过冷度。即 $T_m - T_n = \Delta T$ 。金属结晶的过冷度与冷却速度有关,冷却速度愈快,过冷度就愈大。

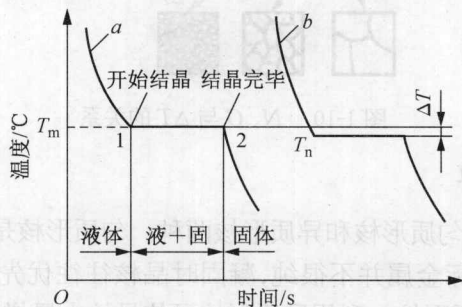


图 1-8 纯金属结晶时的冷却曲线

1.4.2 金属结晶过程

金属的结晶过程是不断形成晶核和晶核不断长大的过程,即由晶核的产生和长大两个基本过程组成的,如图 1-9 所示。

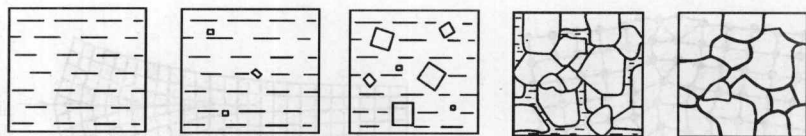


图 1-9 纯金属结晶过程示意图

1.4.3 铸态晶粒的大小

金属结晶后的晶粒愈细小,晶界的面积就愈大。晶界面积愈大,晶体缺陷就愈多,则对金属的力学性能影响愈大。一般情况下,细晶粒组织的强度、硬度、塑性和韧性都比粗晶粒组织好。获得细晶粒的方法通常是增加过冷度、变质处理和附加振动等。

1. 过冷度对晶粒大小的影响

晶粒大小是形核率 N (成核数目 / $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$) 和长大速率 G (cm/s) 的函数。形核速率愈大,长大速率愈小,则晶粒愈细。图 1-10 表明随着过冷度的增加,晶核的形核率增加,同时晶核的长大速度也增加。但是,形核率 N 大大高于长大速率 G ,因此增加过冷度即加快冷却速度,能获得细晶粒组织。

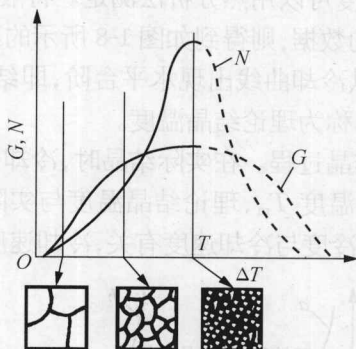


图 1-10 N 、 G 与 ΔT 的关系

2. 变质处理细化晶粒

晶核形成方式可分成匀质形核和异质形核两种。匀质形核是由溶液自发形成新晶核的过程,亦称自发形核。而实际金属并不很纯,凝固时晶核往往优先依附在未熔质点的表面而形成,这种形核方式称为异质形核。利用异质形核可使晶核大量增加,从而使晶粒细化。

变质处理就是利用异质形核的原理,于浇注前在金属液中加入某些高熔点的物质作为结晶核心,以获得细晶粒组织,也称孕育处理。加入的物质称为变质剂,也称孕育剂。

3. 附加振动细化晶粒

生产中还常以机械振动、超声波振动、电磁振动等方法,使熔融金属在铸型中产生运动,从而使晶体在长大过程中不断被破碎,最终获得细晶粒组织。

用细化晶粒强化金属的方法称为细晶强化,它也是强化金属材料的基本途径之一。

1.4.4 金属的同素异构

某些金属在不同温度和压力下呈不同的晶体结构,同一种固态的纯金属(或其他单相物质),在加热或冷却时发生由一种稳定状态转变成另一种晶体结构不同的稳定状态的转变,称为同素异构转变。此时除体积变化和热效应外还会发生其他性质改变。例如 Fe、Co、Sn、Mn 等元素都具有同素异构特性。

铁在结晶后继续冷却至室温的过程中,将发生两次晶格转变,其转变过程如图 1-11 所示。铁在 1 394 °C 以上时具有体心立方晶格,称为 δ -Fe; 冷却至 1 394~912 °C 之间,转变为面心立方晶格称为 γ -Fe; 继续冷却至 912 °C 以下,又转变为体心立方晶格,称为 α -Fe。

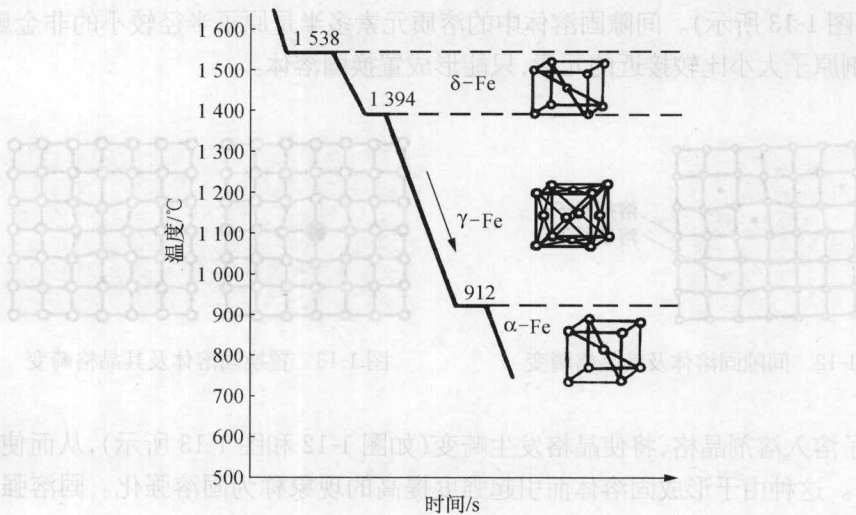


图 1-11 纯铁的同素异构转变

金属的同素异构转变与液态金属的结晶过程类似。转变时遵循结晶的一般规律,如具有一定的转变温度,转变过程包括形核、长大两个阶段等。因此,同素异构转变也可以看做是一种结晶,有时也称为重结晶。通过同素异构转变可以使晶粒得到细化。

1.5 二元合金晶体结构

由两种或两种以上的金属元素或金属元素和非金属元素组成的具有金属特性的物质称为合金。组成合金的元素叫做组元,组元一般指化学元素,但稳定化合物也可以看成是一个组元。由两种组元组成的合金称为二元合金。

液体中,绝大多数合金的组元能相互溶解,成为均匀的液体。合金的结晶与纯金属一样,也是通过形核及长大来完成的。不同的是,由于合金组元间的相互作用,使生成的结晶产物往往不只含一种组元的晶粒。在物质中,凡是成分相同、结构相同,并与其他部分以界面分开的均匀组成部分,称为相。合金结晶后可以是一种相,也可以是由若干种相所组成。