



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

清华大学本科教材立项建设项目

# 制造工程与技术原理

(第3版)

冯之敬 主编

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

清华大学本科教材立项建设项目

# 制造工程与技术原理

(第3版)

冯之敬 主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

依照大类专业培养的教学改革理念和教学模式,本书结合前沿制造技术和科研成果,系统全面地论述现代制造工程中主要制造技术的基本原理和制造工程设计的基本原理,适用于机械大类培养的制造工程基础平台课程。主要内容有:工程材料及处理特性;金属成形制造(铸造、压力加工、粉末冶金、焊接);金属切削加工(切削原理、机床刀具、夹具、加工表面质量和精度);非金属制品的制造(塑料、橡胶、玻璃、陶瓷制品);专业制造技术选例(精密磨料加工、电加工、高能束加工、快速成形、表面工程、光学加工、电子芯片制造与电路组装);工艺规程设计(加工工艺规程、装配工艺规程)。各章内容相辅相成,有机联系,相互依存,不可或缺,共同构造了制造技术系统全面的学术概念。章末附有习题与思考题。本书章节层次概念清晰,贯彻力学新标准,追求语言准确、精炼、严谨、秀美、富含学术性,重视通识教育与专业教育合理平衡,以强化大学工科的专业基础教学为目标,特别注重阐明必要的基础理论。

本书为高等工科院校机械大类的制造专业基础理论课教材,也可用于制造工程设计的参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

制造工程与技术原理/冯之敬主编. —3版. —北京:清华大学出版社,2019  
ISBN 978-7-302-53188-3

I. ①制… II. ①冯… III. ①机械制造工艺—高等学校—教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 110358 号

责任编辑:冯 昕

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5 彩 插:1 字 数:572千字

版 次:2004年6月第1版 2019年9月第3版 印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:65.00元

产品编号:078510-01

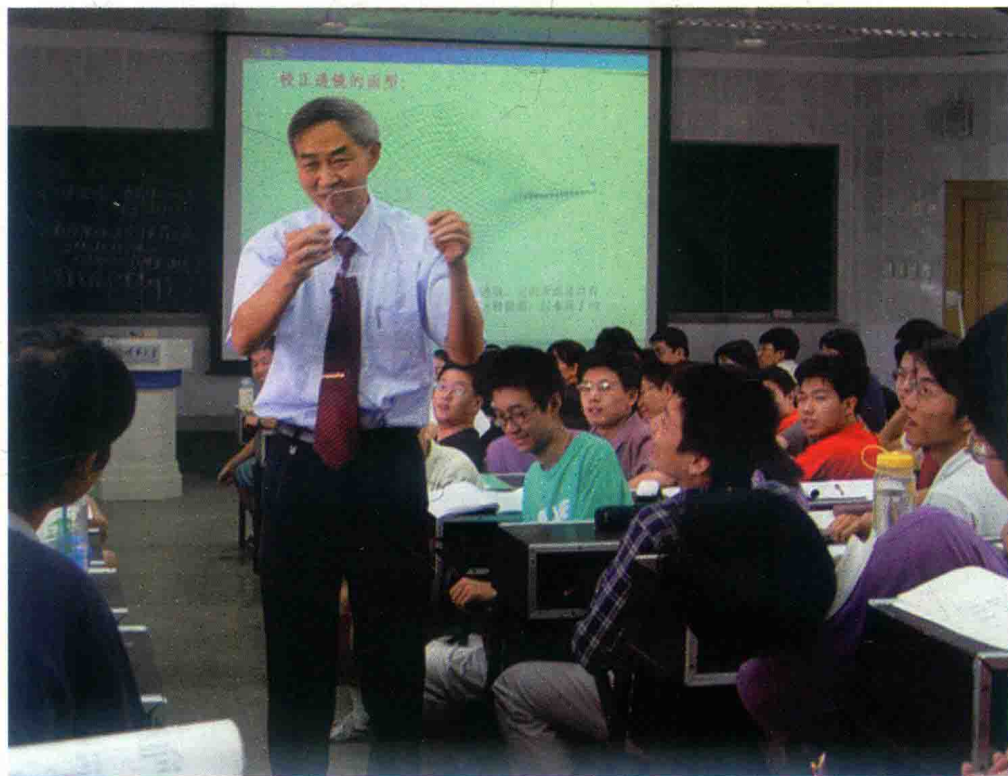
## 主编简介

冯之敬博士,清华大学机械工程系教授,生于1948年4月29日。

1982年大学本科毕业于合肥工业大学机械工程系获学士学位;1985年硕士研究生毕业于哈尔滨工业大学机械制造专业获硕士学位;1987年博士研究生毕业于哈尔滨工业大学机械制造专业获博士学位;1987—1990年在北京理工大学光学仪器专业做博士后;1990年到清华大学工作,1996年任职教授。

主要从事机械学基础理论和精密超精密加工技术领域的研究工作,科研成果1985年获航天工业部科技进步二等奖,1998年获教育部科技进步二等奖,2001年获教育部科技进步一等奖。发表科学研究论文60余篇,在机械工业出版社1994年出版的《机电一体化技术手册》中担任全书副主编和总论篇主编,该书1995年获国家新闻出版署全国优秀科技图书二等奖。指导的博士生论文中有1篇2006年度入选全国百篇优秀博士学位论文。

主编《机械制造工程原理》和《制造工程与技术原理》两本教材,分别于2012年和2005年获评北京市高等教育精品教材。1995年以来,主持清华大学本科生“制造工程基础”课程的教学工作,课程的教学改革1998年获清华大学优秀教学成果一等奖,2001年获北京市优秀教学成果二等奖,主持的“制造工程基础”课程2005年获评为北京市高等教育精品课程、国家级高等教育精品课程。2006年获得北京市高等学校教学名师奖。



制造是创造物质财富的一种非常重要的生产活动。制造是用物理或化学的方法改变原材料的几何形状、性质和外观,制成零件以及将零件装配成产品的操作过程,通过这样的制造过程将原材料转变成具有使用价值和更大经济价值的产品。制造企业中,除了生产组装起来的最终产品的企业外,还有一些企业专门为生产最终产品的企业生产原材料、零部件和配套件、工具、模具等,所以说,制造业包括一个很复杂的生产组织,分别生产不同层次、不同种类的最终产品和中间产品。

产品的制造通常是由一个包括很多关联工序的操作序列来实现的,每一步操作都使材料变得更接近于最终所希望的状态,完成操作过程必须将机器、工具、能源、操作者紧密结合起来。与手工操作的自由制作方式相比,现代制造工业是以严密的工程组织方式进行的,产品制造过程中每一步骤的工艺方法、工艺设备和工具、操作规范、工时定额、工业标准、成本核算以及中间物料的传送和操作信息的传递,各个步骤的流程等都经过精心设计和科学制订,按照严格的符合生产规律的工艺规程进行。

产品的制造工艺技术是企业生产某种产品的技术能力的核心,必须掌握先进的工业化的制造技术,企业产品才能具备市场竞争力。现代工业技术已经发展到很高的水平,并以很高的速度在继续进展。例如,飞机是最大的制造产品之一,使用铝合金、镁合金、钛合金等轻强金属和纤维增强的聚合物复合材料,以及在喷气发动机的涡轮和其他部件使用高强度的耐热合金等高性能新材料,通过精密加工零部件和严格的组装工艺而建造,是先进材料、先进工艺和先进生产组织方式的集中体现;同样,汽车也是应用很多种类的材料和各种先进的制造技术进行大批量生产的机械电子紧密结合的机电产品典范;又如,集成电路制作在高纯度的硅薄片上,在 $0.414\text{in}\times 0.649\text{in}$ 的面积上包含了百万个晶体管,它的制作处理序列是所有制造产品中最复杂的,包括几十道独立的工序,这些芯片通常在超净车间成千上万大批量地生产;再如,光学镜的制造,大口径光学天文望远镜的主镜已做到 $8\text{m}$ 口径,光刻机精密镜头的精度达到几纳米,通过哈勃空间望远镜已经观测到120亿光年的星系,先进的精密光学加工技术成为光学技术进步的重要技术支持。这些典型的例子说明:制造技术是工业发展和科学技术发展的基础。

早前的制造类课程体系结构,按专业细分为铸造、锻压、焊接、金属材料与热处理、金属切削原理、金属切削刀具、机床、机械制造工艺学等多门大课,分类细化,深度增加,在培养计划中占用学时比例大,体现的培养理念是专、深。随着现代科学技术的进步,为使学生将来

能够适应工业技术的高速发展,高校培养的学生不仅要建立坚实的专业基础和专业能力,还要注重学习大量涌现的新知识,扩宽知识面,注重综合能力的培养,提高毕业后对工作环境的适应性,因此教学计划中产生了新的专业知识、新的教学内容大量增加引起的学时分配冲突问题,教学改革思想上提出了通识教育与专业教育合理平衡的培养理念,以新的培养理念为指导思想,制造类课程体系结构逐渐综合成为工程材料、材料成形基础、机械制造基础等三门分立的技术基础课程。现今,教学改革呈现的新趋势是大类专业培养的教学理念,各个机械相关的专业都需要开设制造的课程,但无法接受这种三门大课的学时分配,解决方案是建设成一门综合性的机械大类制造技术平台课。同时,这三门大课的体系还存在一个严重问题,就是课程内容基本局限于针对金属材料,这样的课程建设理念已经远远落后于制造工业技术的发展现状。例如,工程塑料和纤维增强的聚合物复合材料已在汽车、高铁动车、飞机以及航天器上广为使用,可是这一类制品的制造技术不是我们制造课程的内容;又如,大规模集成电路制作被称为现代制造技术的巅峰,相应的集成电路生产设备光刻机的光学系统制造精度达到纳米级,可是电子制造和光学制造这样有代表性的制造技术在我们的制造课上不讲;再如,在液态锡的表面上大规模制造平板玻璃的浮法玻璃制造技术,已与我们的生活紧密联系的玻璃钢化技术,这些高超的工业生产技术也无法合理地纳入我们的制造课程体系中。由此表明,建设机械大类制造技术平台课,课程内容也需要改革。

本书自2000年起,在教学改革发展的前瞻性分析基础上,开始筹划编写,宗旨是结合前沿制造技术和科研成果,系统全面地论述现代制造工程中主要制造技术的基本原理和制造工程设计的基本原理,经过4年的努力,解决了一系列策略和技术上的困难,于2004年出版了第1版,而此时,恰逢清华大学全面推动机械学院平台课程体系(面向精仪系、机械系、热能系、汽车系、工业工程系、工程力学系)改革创新,其中的制造平台课明确要求开创成一门课,并能综合反映先进的制造技术,这本书的内容结构准确地契合了课程体系规划中“制造工程基础”平台课建设的理念和需要,成为“制造工程基础”机械大类平台课的教材,在教学改革中起到了重要的支持作用。本书于2005年获评为北京市高等教育精品教材。

教材的修订工作2006年批准为“十一五”国家级规划教材,于2009年出版了《制造工程与技术原理》第2版。

第2版从2009年出版至今也已经10年了,工业技术突飞猛进有了很多发展变化,书中内容涉及的许多标准发生变更,新标准出台,教材的课堂使用也积累了很多新的经验,改革修订已是势在必行,本书第3版修订入选了清华大学2017年本科教材立项建设计划。

第3版修订主要有下述特点:

1. 改变原来的篇章节编排方式,简化层次,精编成章节结构,从层次结构上符合大类培养平台课的理念。

2. 改变内容分类观念,原来是以加工方法类似性作为篇章分类的第一准则,现改变为按材料分类,因为加工工艺方法的根本依据是材料本身的加工性质,这样分章节,层次概念清晰。各章内容编排分划顺序为:工程材料及处理特性;金属成形制造和切削加工;非金属制品的制造;专业制造技术选例(表面工程、光学加工、电子芯片制造等);工艺规程设计。这些内容相辅相成,有机联系,相互依存,不可或缺,共同构成了制造技术系统全面的学术概念。

3. 贯彻力学新标准(书末附有力学性能指标符号国家标准更替对照表),刀具材料新标

准等。

4. 调整精炼,删略不必要的和过于专深的内容,增加重要的新内容(例如玻璃钢化工艺),增强通识性,注重理论基础,删简重复,合理安排语言层次和上下承接,字斟句酌,力求说明清楚。

书中各章附有习题与思考题,可以通过这些基本练习,加深对课程内容的理解,增强解决工程问题的能力。

在本书写作过程中,始终特别追求语言的准确、精炼、严谨,富含学术性,意使工程技术教材也能从字里行间展现秀美文字艺术的魅力。

本书为高等工科院校的制造专业技术基础理论课教材,也可用于制造工程设计的参考。

清华大学刘成颖、朱跃峰、张辉、冯之敬参加了本书第1版、第2版的编写工作,冯之敬为主编参与了各章的修改定稿,并负责全书第3版的修订。

作者在本书中融入了新的教学指导思想、新的学术见解和研究成果,也参考了大量的文献,在此谨向所列参考文献的作者致以诚挚的谢意,也向所有对本书提出过建议和帮助的同行和同事致谢。

诚恳希望对本书的不足之处提出意见、建议和指正。

冯之敬

2019年8月

# CONTENTS

# 目 录

1 工程材料及处理特性	1
1.1 工程材料的分类和性能	1
1.2 金属材料及其热处理	1
1.2.1 金属与合金的结构	1
1.2.2 铁碳合金相图	4
1.2.3 钢的热处理	9
1.2.4 铝合金的热处理	26
1.2.5 常用金属材料	27
1.3 非金属材料 and 复合材料	32
1.3.1 高分子材料	32
1.3.2 陶瓷	36
1.3.3 复合材料	38
1.3.4 其他材料	39
习题与思考题	40
2 金属成形制造	43
2.1 铸造	43
2.1.1 砂型铸造	43
2.1.2 特种铸造方法	56
2.1.3 铸造合金种类及铸造特点	63
2.2 压力加工	72
2.2.1 金属塑性变形的应力和应变	72
2.2.2 轧制	75
2.2.3 锻造	80
2.2.4 冲压	87
2.3 粉末冶金	94
2.3.1 粉末的制取	95
2.3.2 钢模压制和烧结技术	96
2.3.3 其他的压制成形和烧结技术	98

2.4	焊接	100
2.4.1	电弧焊	100
2.4.2	气焊和气割	113
2.4.3	其他焊接方法	115
2.4.4	焊接质量与检验	121
2.4.5	常用金属材料的焊接	126
	习题与思考题	131
3	金属切削加工	138
3.1	金属切削原理	138
3.1.1	切削运动和切削用量	138
3.1.2	刀具材料、几何形体与角度参数、切削层参数	141
3.1.3	金属切削的变形过程	156
3.1.4	切削力	163
3.1.5	切削热和切削温度	167
3.1.6	切削过程优化	168
3.2	机床、刀具与切削磨削工艺	177
3.2.1	车床和车刀	177
3.2.2	钻床和麻花钻	182
3.2.3	铣床和铣刀	187
3.2.4	拉床和拉刀	189
3.2.5	齿轮加工机床和齿轮加工刀具	192
3.2.6	磨床和砂轮	203
3.2.7	组合机床	206
3.2.8	数控机床和加工中心机床	206
3.3	工件的定位夹紧与夹具	209
3.3.1	夹具的基本概念	209
3.3.2	工件在夹具上的定位	211
3.3.3	工件在夹具中的夹紧	220
3.4	机械加工表面质量和精度	223
3.4.1	机械加工表面质量	223
3.4.2	机械加工精度	230
	习题与思考题	247
4	非金属制品的制造	254
4.1	塑料成形工艺及模具	254
4.1.1	塑料组分、分类及加工工艺性	254
4.1.2	注射成形工艺与模具	256
4.1.3	压缩和压注成形工艺	258
4.1.4	挤出成形、吹塑成形、泡沫塑料成形及玻璃钢缠绕成形	259

4.2	橡胶制品的加工和成形工艺 .....	261
4.3	玻璃制品成形工艺 .....	264
4.4	陶瓷制备 .....	268
	习题与思考题 .....	272
5	专业制造技术选例 .....	274
5.1	精密磨料加工 .....	274
5.2	电加工 .....	277
5.3	高能束加工 .....	280
5.4	快速成形 .....	283
5.5	表面工程技术 .....	284
5.5.1	表面预处理 .....	284
5.5.2	表面强化和改性 .....	285
5.5.3	表面涂覆和表面膜 .....	289
5.6	光学零件制造工艺 .....	294
5.6.1	光学玻璃镜的基本铣磨抛光工艺 .....	294
5.6.2	非球面镜的计算机控制抛光 .....	298
5.6.3	光学零件的模压、金刚石切削、镀膜 .....	301
5.6.4	彩虹全息图的模压生产技术 .....	303
5.7	电子芯片制造与电路板组装 .....	305
5.7.1	电子芯片制造工艺 .....	305
5.7.2	电子元器件组装 .....	314
	习题与思考题 .....	320
6	工艺规程设计 .....	321
6.1	机械加工工艺规程 .....	321
6.1.1	基本概念 .....	321
6.1.2	定位基准及选择 .....	325
6.1.3	工艺路线的制订 .....	328
6.1.4	加工余量、工序尺寸及公差的确定 .....	333
6.1.5	工艺尺寸链 .....	335
6.1.6	时间定额和提高生产率的工艺途径 .....	338
6.1.7	自动生产线和柔性制造系统 .....	340
6.2	装配工艺规程 .....	345
6.2.1	装配工艺规程的制订 .....	346
6.2.2	装配尺寸链 .....	349
	习题与思考题 .....	359
附录	力学性能指标符号国家标准更替对照表 .....	364
	参考文献 .....	365

# 工程材料及处理特性



## 1.1 工程材料的分类和性能

工程材料主要指广泛应用于工业领域的材料。工程材料种类很多,用途广泛,按其性能特点和用途可分为两大类:一类是结构材料,主要是利用材料的力学性能来满足工程结构上的需要;另一类称为功能材料,主要是利用材料具有光、电、磁、热等特殊的物理性能来满足特定的功能需要。

根据材料的化学组成分类,大多数的工程材料属于金属材料、高分子材料和无机非金属材料 3 种基本类型,以及由多种材料组成的复合材料。

金属材料包括纯金属和以金属元素为主的合金,工业上通常把金属材料分为钢铁、非铁金属及其合金(也称为有色金属及其合金)两大类。

高分子材料又称聚合物,是由分子质量很大的大分子组成,其主要原料是石油化工产品,按性能用途和使用状态可分为塑料、橡胶、合成纤维和胶黏剂等 4 大类型。

除金属以外的无机材料统称无机非金属材料,主要是硅酸盐、金属与非金属元素的化合物(氧化物、碳化物、氮化物),如水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料等,因其中陶瓷历史悠久,应用广泛,常称之为陶瓷材料。

复合材料是由基体材料(树脂、金属、陶瓷)和增强剂(颗粒、纤维、晶粒)复合而成的,复合材料保持所组成材料的各自优点,还有着单一材料不具备的优良性能,其力学性能和功能可以根据使用需要进行设计制造。

工程材料的性能包括使用性能和工艺性能。材料在不同条件下使用,如在载荷、温度、介质、电磁场等作用下将表现出不同的行为,即为材料的使用性能,包括力学性能、物理性能、化学性能等;工艺性能是指材料在加工过程中对所涉及的加工工艺所表现出来的适应性,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

## 1.2 金属材料及其热处理

### 1.2.1 金属与合金的结构

#### 1. 金属的晶体结构

金属材料属晶体材料,金属材料的性能取决于其晶体结构特征。

晶体是原子(或分子)在三维空间按一定的几何规律周期性重复排列的固体。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,并用假想的几何线条将各质点的中心连接起来,形成一个空间格架,这种抽象的用于描述原子在晶体中排列方式的几何空间格架称为晶格,又称晶体的空间点阵。晶格形式与晶体的性能有密切关系。

由于晶体中原子作周期性规则排列,因此可以在晶格中选择一个能够完全反映晶格特征的最小的几何单元来表示原子排列规律,称为晶胞。

大多数金属材料的晶格形式有3种:体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格,如图1-1所示。

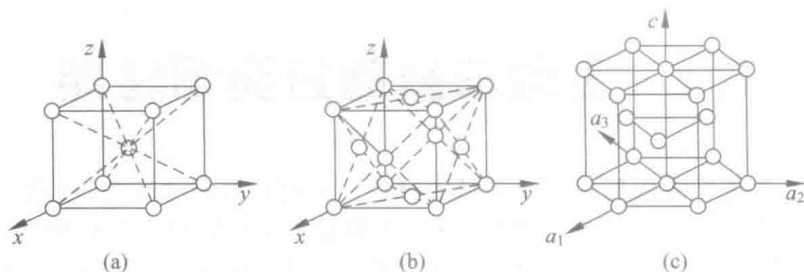


图 1-1 典型晶胞

(a) 体心立方晶胞; (b) 面心立方晶胞; (c) 密排六方晶胞

(1) 体心立方晶格。它的晶胞是一个立方体,如图1-1(a)所示,在立方体的8个顶角上和立方体中心各有1个原子。具有这种晶格的金属有铬、钨、钼、钒、铌和912℃以下的铁( $\alpha$ -Fe)等。

(2) 面心立方晶格。它的晶胞也是一个立方体,如图1-1(b)所示,在立方体的8个顶角上各有一个原子,6个面的中心各有1个原子。具有这种晶格的金属有铜、铝、镍、铅、金、银和912~1394℃的铁( $\gamma$ -Fe)等。

(3) 密排六方晶格。它的晶胞是一个六方柱体,如图1-1(c)所示,它在六方柱体的上下六角形面的12个顶点上各有1个原子,上下面的中心各有1个原子,以及在六方柱体上下面之间还有3个原子。具有这种晶格的金属有镁、锌、镉和铍等。

若内部的晶格周期性规则排列,位向完全一致,这样的晶体称为单晶体,在工业生产中,需要经过特殊制作才能获得单晶体,例如生产半导体管的锗和硅。一般所用工业金属材料,内部包含许许多多的小晶体,每个小晶体内的晶格位向相对一致,而各个小晶体彼此间位向各不相同,如图1-2所示,把这种外形不规则的小晶体称作晶粒,晶粒与晶粒之间的界面称为晶界,这种实际上由多个晶粒组成的晶体称为多晶体。

实际金属材料在晶界和晶粒内都存在着偏离理想结构的微观区域,称为晶体缺陷,如图1-3所示。晶体缺陷破坏了晶体的完整性,使晶格产生畸变,晶格能量增加,因而晶体缺陷相对于完整的晶体来说处于一种不稳定状态,它们在外界条件(温度、外力等)变化时会首先发生运动,从而引起金属某些性能的改变。

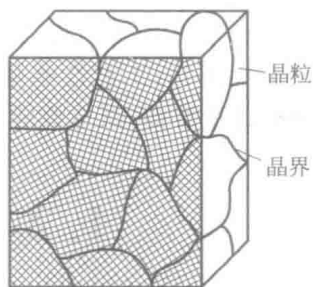


图 1-2 金属多晶体结构示意图

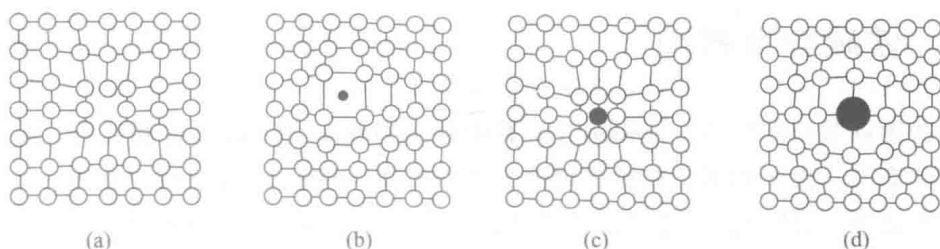


图 1-3 晶体缺陷

(a) 空位; (b) 间隙原子; (c), (d) 置换原子

## 2. 合金的结构

合金是以一种金属元素为基础,加入另一种或几种金属或非金属元素组成的,具有金属特性的物质。组成合金的基本单元称为组元,组元可以是金属元素和非金属元素,也可以是稳定的化合物。由两个组元组成的合金称为二元合金,三个组元组成的合金称为三元合金,三个以上组元组成的合金常称为多元合金。合金的名称常按最主要的组元的名称命名,如铜合金、铝合金等,也可按主要合金元素的名称命名,如铁-碳合金、铜-锌合金等。

合金的力学性能通常比纯金属好,故工程上都选用合金做结构材料。

由于合金是两种或更多的元素组成,因此元素之间的相互关系及存在形式的不同,使合金具有不同的结构。表达合金结构特征有两个重要概念:相与组织。

金属或合金中,凡成分相同、结构相同并与其他部分以界面相互隔开的独立均匀的组成部分称为相。不同的合金具有不同的相,同一合金在不同条件下可能具有不同的相,用相的特征来表示合金结构时称为合金的相结构,结构中各种相称为相组成物。

合金结构的微观形貌称为组织,合金的组织通常用显微镜才能观察清楚,故也称显微组织。将金属断面磨平、抛光,再用酸液(95%乙醇+5%硝酸)浸蚀,然后用水洗净吹干,就可在光学显微镜下观察金属的金相显微组织。

合金中存在各种组织组成物,但其最基本的组成单元是两种基本相:固溶体和金属化合物。

(1) 固溶体。是指溶质组元渗入溶剂晶格中而形成的单一的均匀固体。固溶体的特点是保持溶剂组元的晶体结构,但会引起溶剂组元晶格不同程度的畸变。固溶体按照溶质原子在溶剂晶格中的位置可以分为置换固溶体和间隙固溶体,如图 1-3 所示,置换固溶体是溶质原子取代了溶剂晶格中某些结点上的原子,而间隙固溶体是溶质原子嵌入溶剂晶格的间隙中。固溶体还可以按溶解度的大小分为有限和无限固溶体,按溶质原子在溶剂晶格中的分布特点分为无序和有序固溶体。固溶体中溶质原子的溶入会引起晶格畸变,使晶体处于高能状态,提高合金的强度和硬度,这就叫做固溶强化。固溶强化使强度和硬度有所提高,但塑性和韧性下降。

(2) 金属化合物。合金组元间相互作用,化合形成具有金属特征的化合物新相(例如 Fe、C 化合形成  $Fe_3C$ ),它的晶格类型和性能与两组元完全不同,一般都具有熔点高、硬度高、脆性大的特点。合金中以固溶体为主,具有适量的金属化合物呈弥散分布,可提高合金的强度、硬度及耐磨性能,所以常常用金属化合物来强化合金。

## 1.2.2 铁碳合金相图

合金相图就是用图解的方法表示合金系中合金的状态、组织、温度和成分之间的关系,因而也称状态图。由于相图是在极其缓慢的冷却条件下测定的,故又称平衡图。

在二元合金中,铁碳合金是现代机械制造行业中使用最广泛的金属材料,以铁和碳为基本组元组成,根据含碳量多少,可以分为工业纯铁、钢和铸铁,含碳量  $w_C < 0.02\%$  为工业纯铁,  $0.02\% < w_C < 2.11\%$  为钢,  $w_C > 2.11\%$  为铸铁。铁碳合金相图就是分析研究铁碳合金在平衡条件下合金的成分、温度、合金相之间关系的图解,它对于正确选择和使用材料,制订合理的铸造、锻造、焊接及热处理工艺具有指导作用。

### 1. 铁碳合金的基本组织和性能

铁碳合金在液态时可以无限互溶,在固态时碳能溶于铁的晶格中,形成间隙固溶体,当碳含量超过铁的溶解度时,多余的碳便与铁形成化合物  $Fe_3C$ ,还可以形成由固溶体与化合物  $Fe_3C$  组成的机械混合物。铁碳合金的基本相及组织有以下 5 种。

(1) 铁素体。碳溶入  $\alpha-Fe$  中形成的间隙固溶体称为铁素体,用符号 F 或  $\alpha$  表示。 $\alpha-Fe$  是在  $912^\circ C$  以下以体心立方晶格存在的工业纯铁,碳溶入  $\alpha-Fe$  后形成的铁素体仍保持体心立方晶格。由于  $\alpha-Fe$  的间隙很小,溶碳的能力较小,在  $727^\circ C$  时溶碳量最大,达到  $w_C = 0.0218\%$ ,室温下溶碳量仅为  $0.0008\%$ ,因此,室温下的铁素体与工业纯铁的性能相同。铁素体的显微组织呈明亮的多边形晶粒,晶界曲折,如图 1-4 所示。

(2) 奥氏体。碳溶入  $\gamma-Fe$  中形成的间隙固溶体称为奥氏体,用符号 A 或  $\gamma$  表示。奥氏体仍保持  $\gamma-Fe$  的面心立方晶格。由于间隙较大,溶碳的能力较大,在  $727^\circ C$  时,溶碳量  $w_C = 0.77\%$ ,  $1148^\circ C$  时溶碳量最大,  $w_C = 2.11\%$ 。奥氏体塑性、韧性好,强度、硬度较低,断后伸长率  $A = 40\% \sim 50\%$ ,抗拉强度  $R_m = 400 MPa$ ,硬度  $160 \sim 200 HBW$ ,因此,生产中常将工件加热到奥氏体状态进行锻造。奥氏体的显微组织与铁素体的显微组织相似,呈多边形晶粒,但晶界较铁素体平直,如图 1-4 所示。

(3) 渗碳体。铁与碳形成的具有复杂晶体结构的间隙化合物,用  $Fe_3C$  表示。 $Fe_3C$  的含碳量为  $6.69\%$ ,熔点很高,约  $1227^\circ C$ ,硬度可高达  $800 HBW$ ,塑性和韧性几乎为零,脆性大。 $Fe_3C$  是碳钢中的强化相,它的形态、大小、数量与分布对铁碳合金性能产生很大影响。

(4) 珠光体。铁素体和渗碳体组成的机械混合物,用符号 P 表示,含碳量为  $0.77\%$ ,力学性能介于铁素体和渗碳体之间,强度较高,硬度适中,具有一定塑性。珠光体中的铁素体与渗碳体呈片层交替分布状态,其显微组织如图 1-4 所示,白色基体为铁素体,黑色片层是渗碳体。

(5) 莱氏体。奥氏体和渗碳体组成的机械混合物称为高温莱氏体,用符号  $L_d$  或  $(A + Fe_3C)$  表示,由于其中的奥氏体属高温组织,因此高温莱氏体仅存于  $727^\circ C$  以上,高温莱氏体冷却到  $727^\circ C$  以下时,将转变为珠光体和渗碳体的机械混合物  $(P + Fe_3C)$ ,称为低温莱氏体,用符号  $L_d'$  表示。莱氏体的含碳量为  $4.3\%$ ,由于莱氏体中含有的渗碳体较多,故其性能与渗碳体相近,极为硬脆,其显微组织如图 1-4 所示,珠光体呈圆柱状分布在渗碳体的基体上。

## 2. 铁碳合金相图的特征点和特征线

图 1-4 为经简化后的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图。当铁碳合金中含碳量  $w_C > 6.69\%$  时, 由于合金的性能很脆, 无实用价值, 所以铁碳合金相图中主要研究含碳量从 0~6.69% 这一部分。

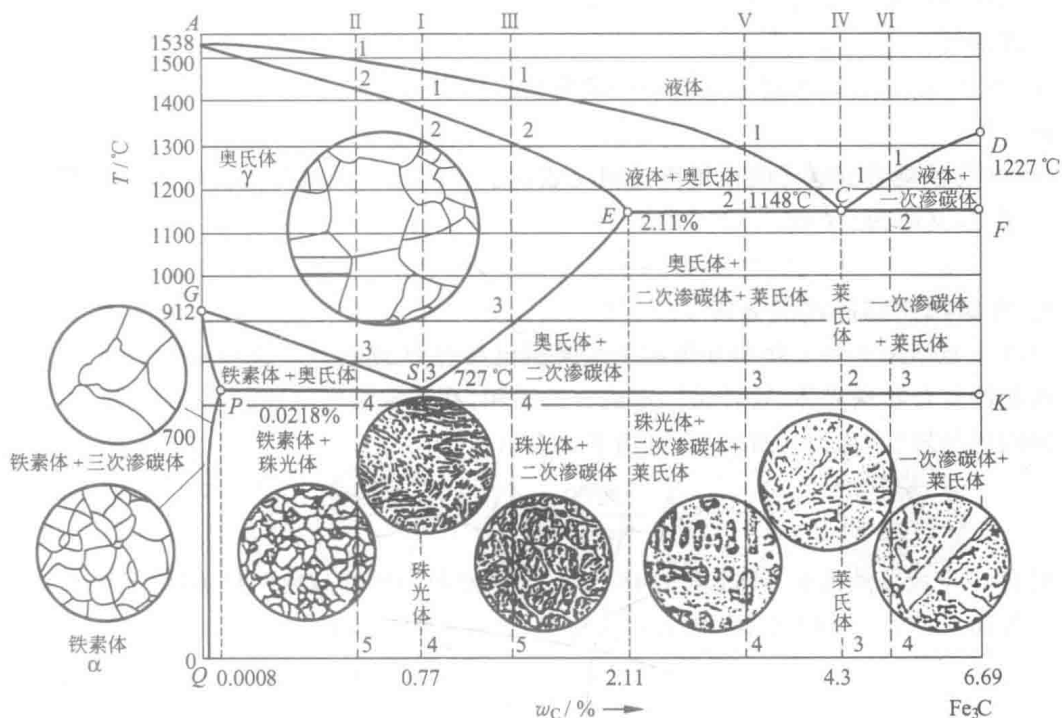


图 1-4 简化的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中有几个突出的特性点, 具体意义分别列入表 1-1 中。

表 1-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的特性点

特性点	温度/°C	$w_C/\%$	含义
A	1538	0	纯铁的熔点
D	1227	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的熔点
C	1148	4.3	共晶点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度
P	727	0.0218	碳在铁素体中的最大溶解度
G	912	0	纯铁的同素异晶转变点
Q	室温	0.0008	碳在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度
F	1148	6.69	渗碳体的成分点
K	727	6.69	渗碳体的成分点
S	727	0.77	共析点

在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中还有几条典型的特征线。

ACD 为液相线, 此线以上合金呈液态, 冷却至该线合金开始结晶。

AECF 为固相线, 此线以下合金均呈固态, 冷却至该线合金全部结晶完毕。

PSK 线为共析线,凡是  $w_C > 0.0218\%$  的铁碳合金缓冷到该线时( $727^\circ\text{C}$ )均要发生共析转变,共析转变的产物是珠光体(P)。PSK 线又称为  $A_1$  线。

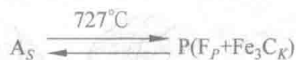
ES 线为碳在奥氏体的溶解度线,凡是  $w_C > 0.77\%$  的铁碳合金,由  $1148^\circ\text{C}$  (奥氏体含碳量为  $2.11\%$ ) 缓冷到  $727^\circ\text{C}$  (奥氏体含碳量为  $0.77\%$ ) 时,过剩的碳将以二次渗碳体( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ) 形式从奥氏体的晶界上呈网状析出。ES 线又称为  $A_{\text{cm}}$  线,是从奥氏体中开始析出  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  的临界温度曲线。

GP 线为  $w_C < 0.77\%$  的铁碳合金中碳在铁素体中的溶解度线,即是奥氏体中析出铁素体的终了线。

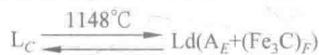
GS 线为铁碳合金缓冷时由奥氏体转变成铁素体的开始线或加热时铁素体转变成奥氏体的终了线,又称为  $A_3$  线。

### 3. 铁碳相图结晶过程分析

具有 S 点成分的奥氏体将在恒温下同时析出具有 P 点成分铁素体和具有 K 点成分渗碳体两相的复合物珠光体,这种由一定成分的固相,在一定温度下,同时析出成分、结构不同的两种固相的转变,称为共析转变,可用下式表示:



具有 C 点成分的液相,冷却至  $1148^\circ\text{C}$  时,会从液相同时结晶出两种不同固相, E 点成分的奥氏体和 F 点成分的渗碳体,称为共晶转变,这种组织称为共晶组织,也称莱氏体 Ld:



按 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图,把铁碳合金分成 3 大类 7 小类。

(1) 工业纯铁( $w_C < 0.02\%$  的铁碳合金)。指室温下的平衡组织为铁素体的铁碳合金,位于相图 P 点以左的区域。

(2) 钢( $0.02\% < w_C < 2.11\%$ )。指高温固态组织为单相奥氏体的铁碳合金,位于相图 P 点及 E 点成分之间。根据室温组织的不同又可分为 3 种:  $0.02\% < w_C < 0.77\%$  的铁碳合金为亚共析钢;  $w_C = 0.77\%$  的铁碳合金为共析钢;  $0.77\% < w_C < 2.11\%$  的铁碳合金为过共析钢。

(3) 白口铸铁( $2.11\% < w_C < 6.69\%$ )。指液态结晶时都有共晶反应且室温下的平衡组织中都有变态莱氏体的铁碳合金,位于 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图 E 点成分以右。根据室温组织的不同也可分为 3 种:  $2.11\% < w_C < 4.3\%$  的铁碳合金为亚共晶白口铸铁;  $w_C = 4.3\%$  的铁碳合金为共晶白口铸铁;  $4.3\% < w_C < 6.69\%$  的铁碳合金为过共晶白口铸铁。

下面分析几种典型的铁碳合金的结晶过程。

(1) 共析钢。图 1-4 中合金 I 为  $w_C = 0.77\%$  的共析钢。合金在点 1 以上为液相(L); 缓冷到 1 点时开始从液相结晶出奥氏体固相(A), 温度不断降低, 剩余液相不断减少, 奥氏体不断增多, 同时液相成分沿 AC 线变化, 奥氏体成分沿 AE 线变化; 当温度降至点 2 时, 液态全部结晶为奥氏体单相并保持到点 3(S); 当温度降至点 3( $727^\circ\text{C}$ ) 时, 奥氏体将发生共析转变, 形成珠光体(P), 直到冷却至室温。从铁素体中析出的微量  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  与渗碳体同相, 因量少故可忽略不计。共析钢结晶过程中金相组织的变化如图 1-5 所示, 共析钢的室温显微组

织为层片状的珠光体。

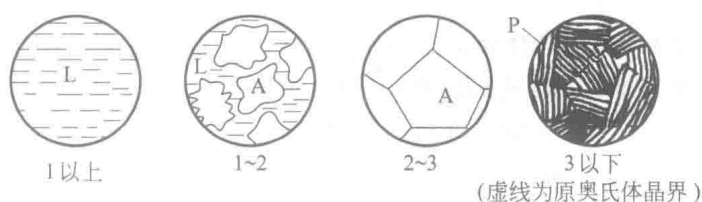


图 1-5 共析钢结晶过程示意图

(2) 亚共析钢。图 1-4 中合金 II 为  $w_C < 0.77\%$  的亚共析钢。合金 II 在点 3 以前的结晶与合金 I 在点 3 以前相似；缓冷至点 3 时，从奥氏体中开始析出铁素体，随着温度的不断降低，奥氏体不断减少，其成分沿  $GS$  线变化，铁素体不断增多，其成分沿  $GP$  线变化；当温度降至点 4 时，剩余奥氏体成分达到  $S$  点，奥氏体将发生共析转变，形成珠光体(P)；继续冷却到室温，组织基本变化不大。亚共析钢的室温组织为  $F+P$ ，亚共析钢结晶过程如图 1-6 所示。

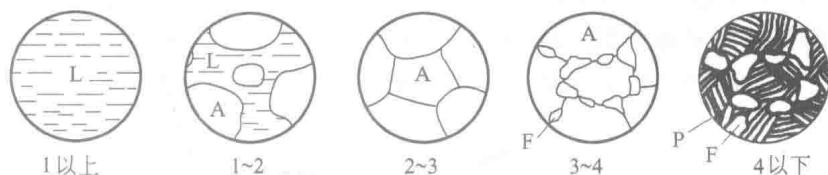


图 1-6 亚共析钢结晶过程示意图

(3) 过共析钢。图 1-4 中合金 III 为  $0.77\% < w_C < 2.11\%$  的过共析钢。该合金在点 3 以前的结晶与合金 I 在点 3 以前相似；当合金缓冷至 3 点时，由于奥氏体中碳达到饱和而开始从奥氏体的晶界上析出二次渗碳体( $Fe_3C_{II}$ )；当温度继续降低至  $727^\circ C$  时，奥氏体成分达到  $S$  点，奥氏体将发生共析转变形成珠光体。过共析钢结晶过程如图 1-7 所示，温度降至室温后的组织为  $P+Fe_3C_{II}$ 。



图 1-7 过共析钢结晶过程示意图

(4) 白口铸铁。根据合金的成分和结晶条件不同，铁碳合金结晶过程可以析出  $Fe_3C$ ，或者析出石墨  $C$ 。描述铁碳合金的结晶过程的综合相图包括  $Fe-Fe_3C$  相图(说明了  $Fe_3C$  的析出规律)和  $Fe-C$  相图(说明了石墨  $C$  的析出规律)两部分，图 1-4 的简化相图只是其中的  $Fe-Fe_3C$  相图。对于  $0.02\% < w_C < 2.11\%$  的钢， $Fe_3C$  为增强相，对钢的性能具有很重要的作用，但对于  $2.11\% < w_C < 6.69\%$  的铸铁来说，当碳主要以  $Fe_3C$  等化合物形式存在时，其断口显微金相组织呈银白色，称为白口铸铁，白口铸铁具有硬而脆的基本特性。其结晶过程可用上述同样的方法进行分析。