



高等学校机械设计制造  
及自动化专业“十三五”规划教材

# 材料成型工艺基础

( 第三版 )

主编 刘建华

*Machinery*  
*Machinery*  
*Machinery*



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校机械设计制造及其自动化专业“十二五”规划教材

# 材料成型工艺基础

(第三版)

主 编 刘建华

主 审 杨思一

附录(5P)目錄索引

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第054110号

责任编辑 姜 强

封面设计 姜 强

印刷工业出版社 北京 2010年10月第1版第1次印刷

ISBN 978-7-302-22810-0 定价 28.00元

www.cip.com.cn 姜 强 姜 强

2010

1103

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

“材料成型工艺基础”是高等工科院校机械类本科各专业的技术基础课程。本书主要阐述了工程中常用材料的分类、成分、组织、性能特点,以及各种材料成型的原理、方法、工艺特点及其应用。全书共10章,主要内容包括金属材料及热处理,铸造、压力加工、焊接成型技术,粉末冶金、高分子材料、工业陶瓷、复合材料及其成型,并简要介绍了快速成型技术及成型材料与方法选择。每章均附有一定数量的思考题与习题。

本书可作为高等工科院校机械类及近机械类专业的教材,还可作为职工大学、成人大学、广播电视大学相关专业基础课程教材和工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料成型工艺基础/刘建华主编. —3版. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.2

高等学校机械设计制造及自动化专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4012-9

I. ① 材… II. ① 刘… III. ① 工程材料—成型—工艺—高等学校—教材 IV. ① TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 024410 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张 玮 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016年2月第3版 2016年2月第5次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 16

字 数 371千字

印 数 13 001~16 000册

定 价 29.00元

ISBN 978-7-5606-4012-9/TB

**XDUP 4304003-5**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

## “十三五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

### 自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦力 王建中 巨永锋 孙强 陈在平 李正明  
吴斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高嵩  
秦付军 席爱民 穆向阳

### 电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明  
段晨东 郝润科 谭博学

### 机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞  
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚  
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策划：毛红兵 马武装 马晓娟

## 前 言

本书自2012年再版以来,根据使用教师及学生的反馈意见,并结合目前材料成型工艺的发展趋势及前沿,在第二版基础上进行了修订。

(1)增加了目前使用较多的镁合金材料性能、成型工艺及应用;

(2)增加了塑料新型成型技术——微发泡注塑成型技术和纳米注塑成型技术,使读者了解新技术的发展动态;

(3)增加了三维打印技术的最新应用及发展,使读者了解目前热点快速成型技术;

(4)删减了部分使用频率较低的思考题,并修改了印刷错误。

参加本书编写修订的有长安大学宋绪丁(第1、10章)、刘建华(第2、6、7章)、李珂(第3、5章)和朱蕾(第4、8、9章)。

在编写本书的过程中,编者吸取了广大教学工作者及读者的意见和建议,并得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,在此表示感谢!

编者

2015年11月于西安

## 第二版前言

本书自2007年出版以来,经过六年的实际教学使用,获得较高评价。为了满足教学和实践需要,本书结合多年教学实践经验及广大读者意见,在第一版的基础上进行了部分章节内容的调整,并对原版中的印刷错误进行了修改。

(1) 删减了课程体系中与其他课程重复的内容,保证内容精湛,重点突出;删除了金属材料机械性能的内容并简化了热处理部分的论述;删除了塑料加工与表面处理技术及橡胶制品及其成型工艺。

(2) 调节了焊接成型技术章节的内容,使其层次分明,更具有逻辑性。

(3) 增加了钛合金材料及快速成型技术新工艺的发展及应用简介,利于读者了解材料的最新发展前沿。

参加本书编写修订的有长安大学宋绪丁(第1章,第9章,第10章),刘建华(第2章,第5章,第6章),赵伟(第3章,第4章,第7章,第8章)。

在编写本书的过程中,编者得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,在此表示感谢!

编者

2012年11月于西安

# 第一版前言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。人类的生活和生产实践对材料不断提出新的要求,新材料的出现又推动了人类生活和生产的进一步发展。近年来,随着现代科学技术、工业生产的迅猛发展和我国制造业大国地位的确立,对材料及其成型工艺提出了新的更高要求。新材料和新的成型工艺已成为我国最重要和最有发展潜力的工业支柱产业之一,日益受到人们的重视。

本书是根据国家教育部《关于组织实施〈面向 21 世纪高等工程教学内容的课程体系改革计划〉的通知》精神和高等学校机械类专业的“工程材料及其机械制造基础”课程改革和实践的要求,并结合多年教学实践经验编写而成的。在编写过程中,突出了以下特点:

(1) 以“材料—成型原理和方法—成型工艺—零件的结构工艺性”为主线,使内容的层次分明、系统性强。

(2) 精简了传统的金属材料及其成型技术(铸造、压力加工、焊接)的内容,增加了粉末冶金材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料等材料的成型技术内容。

(3) 本书体现了“面向 21 世纪,注重能力培养”的教学特点,增强了材料成型方法和成型工艺的基础知识,增加了典型零件的成型工艺分析和成型材料、成型方法选择,以培养学生分析和解决实际问题的能力。

(4) 充实了新材料、新技术、新工艺等方面的内容,如先进成型方法,并在一定程度上反映了材料科学与工程科学的最新成就,以适应当前科技发展的需要。

(5) 本书的适用面广,既适用于机械类各专业,如机械设计制造及自动化、车辆工程等专业,也适用于近机械类专业,如自动化、工业工程、电气工程及其自动化等专业。在授课过程中,可根据专业的特点有选择地讲授。

参加本书编写的有长安大学的宋绪丁(第 1 章)、刘建华(第 2 章、第 3 章、第 5 章、第 7 章)、吴文(第 4 章、第 6 章、第 8 章)及西安建筑科技大学的杨军(第 9 章、第 10 章)。全书由刘建华主编,西安交通大学博士生导师金志浩教授审阅。审阅后金教授提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

在编写过程中,得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,在此表示感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免会有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2007 年 4 月于西安

# 目 录

<b>第 1 章 金属材料与热处理</b> .....	1
1.1 金属的晶体结构与结晶 .....	1
1.1.1 金属的晶体结构 .....	1
1.1.2 纯金属的结晶 .....	4
1.1.3 金属的同素异晶转变 .....	6
1.2 合金与铁碳合金 .....	7
1.2.1 合金的基本概念和结构 .....	7
1.2.2 铁碳合金的基本组织 .....	8
1.2.3 铁碳合金相图 .....	9
1.3 金属材料热处理 .....	15
1.3.1 钢在加热时的组织转变 .....	16
1.3.2 钢在冷却时的组织转变 .....	17
1.3.3 钢的热处理工艺 .....	18
1.3.4 钢的表面热处理 .....	21
1.4 常用的金属材料 .....	21
1.4.1 钢 .....	21
1.4.2 有色金属及其合金 .....	25
思考题与习题 .....	28
<b>第 2 章 铸造成型技术</b> .....	29
2.1 合金的铸造性能 .....	29
2.1.1 合金的充型能力 .....	30
2.1.2 合金的收缩 .....	32
2.1.3 合金的吸气性 .....	38
2.2 常用的铸造合金及铸造方法 .....	39
2.2.1 常用的铸造合金 .....	39
2.2.2 常见的铸造缺陷 .....	47
2.2.3 铸造方法 .....	48
2.3 砂型铸造工艺设计 .....	57
2.3.1 砂型铸造的基本过程 .....	58
2.3.2 铸造工艺图的绘制 .....	58
2.3.3 铸造工艺设计实例 .....	66
2.4 铸造结构工艺性 .....	68
2.4.1 铸造性能对结构的要求 .....	68
2.4.2 铸造工艺对结构的要求 .....	73
思考题与习题 .....	76



<b>第 3 章 压力加工成型技术</b> .....	79
3.1 压力加工成型方法 .....	79
3.1.1 型材生产方法 .....	79
3.1.2 机械零件的毛坯及产品生产 .....	81
3.2 金属材料的塑性成型基础 .....	82
3.2.1 金属塑性变形的实质 .....	82
3.2.2 塑性变形对金属组织和性能的影响 .....	84
3.3 锻造 .....	87
3.3.1 金属材料的锻造性能 .....	87
3.3.2 自由锻造 .....	90
3.3.3 模型锻造和胎模锻造 .....	97
3.4 冲压 .....	104
3.4.1 冲压的特点及应用 .....	104
3.4.2 板料的冲压成型性能 .....	105
3.4.3 冲压基本工序 .....	107
3.4.4 冲压件的结构设计 .....	117
思考题与习题 .....	121
<b>第 4 章 焊接成型技术</b> .....	124
4.1 焊接方法 .....	125
4.1.1 焊条电弧焊 .....	125
4.1.2 其他焊接方法 .....	130
4.2 焊接原理与焊接接头 .....	139
4.2.1 焊接基本原理 .....	139
4.2.2 焊接接头的组织与性能 .....	142
4.2.3 热影响区 .....	143
4.2.4 焊接应力与变形 .....	143
4.3 常用金属材料的焊接 .....	148
4.3.1 金属材料的焊接性 .....	148
4.3.2 常用金属材料的焊接 .....	149
4.4 焊接结构工艺设计 .....	152
4.4.1 焊接结构材料及焊接方法的选择 .....	152
4.4.2 焊接接头的工艺设计 .....	153
思考题与习题 .....	159
<b>第 5 章 粉末冶金及其成型</b> .....	161
5.1 粉末冶金基础 .....	161
5.1.1 金属粉末的性能 .....	161
5.1.2 金属粉末的制备方法 .....	163
5.1.3 金属粉末的预处理 .....	163
5.1.4 粉末冶金材料的应用及发展 .....	164
5.2 粉末冶金工艺过程 .....	165
5.2.1 粉末混合 .....	165

5.2.2	金属粉末压制成型	166
5.2.3	烧结	169
5.2.4	后处理	171
5.2.5	硬质合金粉末冶金成型	172
5.3	粉末注射成型技术	172
5.3.1	粉末注射成型技术的特点	172
5.3.2	粉末注射成型件的工艺性	173
5.4	粉末冶金制品的结构工艺性	174
5.4.1	粉末冶金制品的结构工艺性	174
5.4.2	粉末冶金成型件的缺陷分析	177
	思考题与习题	180
<b>第 6 章 高分子材料及其成型</b>		<b>181</b>
6.1	工程塑料	181
6.1.1	高分子化合物	181
6.1.2	工程塑料的组成	186
6.1.3	塑料的分类和性能	187
6.1.4	常用的工程塑料	189
6.2	工程塑料成型工艺	192
6.2.1	塑料成型的工艺性能	192
6.2.2	注射成型及其工艺条件	195
6.2.3	挤出成型及其工艺条件	198
6.2.4	压制成型及其工艺条件	199
6.2.5	真空成型及其工艺条件	201
6.2.6	其他成型方法	202
6.3	塑料制品的结构工艺性	204
6.3.1	塑料制品壁厚的设计	204
6.3.2	塑料制品圆角的设计	205
6.3.3	加强筋的设计	205
6.3.4	拔模斜度的设计	207
6.3.5	塑料制品上金属嵌件的设计	207
	思考题与习题	209
<b>第 7 章 工业陶瓷及其成型</b>		<b>210</b>
7.1	工业陶瓷	210
7.1.1	陶瓷材料的性能	210
7.1.2	常用的工业陶瓷	211
7.2	工业陶瓷的生产过程	213
7.2.1	坯料制备	213
7.2.2	成型	213
7.2.3	坯体干燥	216
7.2.4	烧结	216
7.2.5	后续加工	218

思考题与习题 .....	218
<b>第 8 章 复合材料及其成型 .....</b>	<b>219</b>
8.1 复合材料 .....	219
8.1.1 复合材料的定义 .....	219
8.1.2 复合材料的分类 .....	219
8.2 复合材料成型工艺 .....	220
8.2.1 聚合物基复合材料的成型工艺 .....	220
8.2.2 金属基复合材料的成型工艺 .....	224
8.2.3 陶瓷基复合材料的成型工艺 .....	226
思考题与习题 .....	227
<b>第 9 章 快速成型技术简介 .....</b>	<b>228</b>
9.1 快速成型技术 .....	228
9.1.1 快速成型技术的原理 .....	228
9.1.2 快速成型技术的分类及特点 .....	229
9.2 快速成型工艺 .....	229
9.2.1 光固化成型工艺(SLA) .....	229
9.2.2 叠层制造成型工艺(LOM) .....	230
9.2.3 选择性激光烧结成型工艺(SLS) .....	230
9.2.4 熔融堆积成型工艺(FDM) .....	231
9.2.5 三维打印技术(3DP) .....	232
9.2.6 快速成型工艺的比较 .....	232
9.3 快速成型技术的应用 .....	233
思考题与习题 .....	235
<b>第 10 章 成型材料与方法选择 .....</b>	<b>236</b>
10.1 选择材料成型方法的原则 .....	236
10.1.1 常用的毛坯材料 .....	236
10.1.2 材料成型方法的选择原则 .....	238
10.2 常用机械零件的毛坯成型方法选择 .....	239
10.2.1 轴杆类零件 .....	241
10.2.2 盘套类零件 .....	241
10.2.3 机架、箱座类零件 .....	242
10.2.4 毛坯成型方法选择举例 .....	242
思考题与习题 .....	243
<b>参考文献 .....</b>	<b>244</b>

# 第1章 金属材料与热处理

工业生产中所用的纯金属和合金材料统称为金属材料。通常我们把金属材料分为黑色金属和有色金属两大类：铁、锰、铬或以它们为主形成的合金称为黑色金属，如合金钢、铸铁和碳素钢等；除黑色金属以外的金属和合金称为有色金属，如铜合金、铝合金、钛合金和镁合金等。

金属材料是现代机械制造工业中应用最广泛的材料之一。它不仅资源丰富，具有优良的物理、化学和力学性能，而且还具有较简单的成型方法和良好的成型工艺性能。因此，金属材料在各种机械设备中所占的比例达90%以上。

金属材料的性能主要与其成分、组织和表面结构特性有关。热处理就是通过改变金属材料的组织以及改变表面成分和组织来改变其性能的一种热加工工艺。

## 1.1 金属的晶体结构与结晶

金属材料的化学成分不同，其性能也不同。但化学成分相同的金属材料，通过不同的方法改变材料内部的组织结构，可使其性能发生很大的变化。这种变化，从本质上来说，除化学成分外，金属的内部结构和组织状态也是决定金属材料机械性能的重要因素。因此，了解金属的内部微观结构及其对金属性能的影响，对于选用和加工金属材料具有非常重要的意义。

### 1.1.1 金属的晶体结构

#### 1. 晶体和非晶体

自然界中一切物质都是由原子组成的，根据固态物质内部原子的聚集状态，固体分为晶体和非晶体两大类。

原子无规律地堆积在一起的物质称为非晶体，如沥青、玻璃、松香等。原子按一定几何形状作有规律的、重复排列的物质称为晶体，如冰、结晶盐、金刚石、石墨及固态金属与合金。晶体和非晶体的原子排列不同，进而显示出不同的特性。晶体具有固定的熔点，性能具有各向异性；而非晶体没有固定的熔点，性能具有各向同性。

#### 2. 金属的晶体结构

金属晶体是由许多金属原子(或离子)在空间按一定的几何形式规则紧密排列而成的，如图1-1(a)所示。为了便于研究各种晶体内部原子排列的规律及几何形状，把每一个原子假想为一个几何结点，并用直线从其中心连接起来形成空间的格子，称为结晶格子，简

称晶格，如图 1-1(b)所示。晶格的结点为原子震动的平衡中心位置。晶格中各种方位的原子面称为晶面。晶体是由层层晶面堆砌而成的，晶格中由原子组成的任一直线，都能代表晶体空间的一个方向，称为晶向。晶格的最小几何单元称为晶胞，如图 1-1(c)所示。晶胞中各棱边尺寸  $a$ 、 $b$ 、 $c$  称为晶格常数，单位为  $\text{\AA}$  (埃， $1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ )。晶胞各棱边之间的夹角分别以  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示。当晶格常数  $a=b=c$ ，棱边夹角  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$  时，这种晶胞称为简单立方。

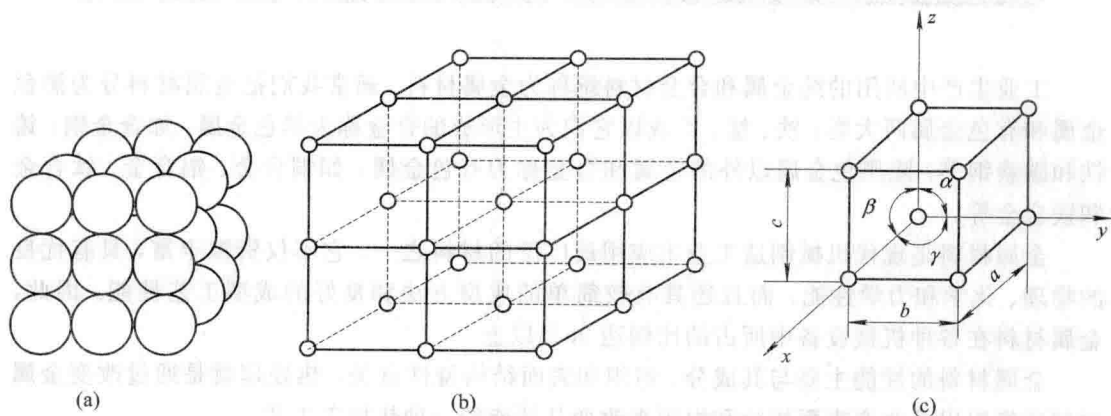


图 1-1 晶格结构示意图

(a) 晶体模型；(b) 晶格；(c) 晶胞

晶胞可以描述晶格的排列规律，组成晶胞的结构就是该金属的晶格结构，不同的晶格结构具有不同的性能，而相同的晶胞类型若有不同的晶格常数，也会使金属具有不同的性能。

### 3. 常见金属的晶体结构

在金属原子中，约有 90% 以上的金属晶体都属于以下三种密排的晶格结构。

#### 1) 体心立方晶格

如图 1-2 所示，体心立方晶格是一个正立方体。原子位于立方体的中心和八个顶点上，顶点上的每个原子为相邻的八个晶胞所共有。其晶格常数  $a=b=c$ ，晶胞棱边夹角  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。属于这种晶格类型的金属有铬(Cr)、钨(W)、钼(Mo)、钒(V)及  $\alpha$ -铁(Fe) 等。晶胞中原子排列的紧密程度可用致密度来表示。致密度是指晶胞中原子所占的体积与该晶胞体积之比。体心立方晶格中的晶胞的致密度为 0.68，表明体心立方晶格中有 68% 的体积被原子占据，其余 32% 的体积为空隙。

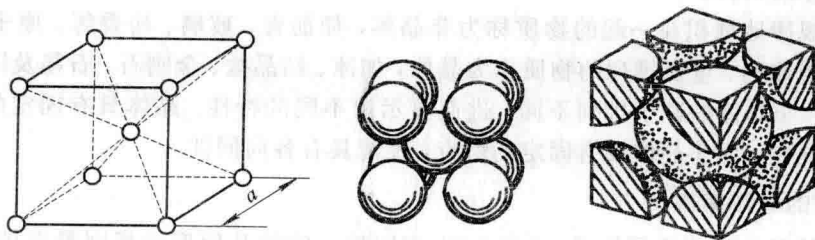


图 1-2 体心立方晶格示意图

### 2) 面心立方晶格

如图 1-3 所示, 面心立方晶格也是一个正立方体, 原子位于立方体六个面的中心和八个顶点, 顶点上的每个原子为相邻八个晶胞所共有, 面心的每个原子与其相邻晶胞所共有。其晶格常数  $a=b=c$ ,  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。属于这种晶格类型的金属有铝(Al)、铜(Cu)、镍(Ni)、银(Ag)、 $\gamma$ -铁(Fe)等。其致密度为 0.74。

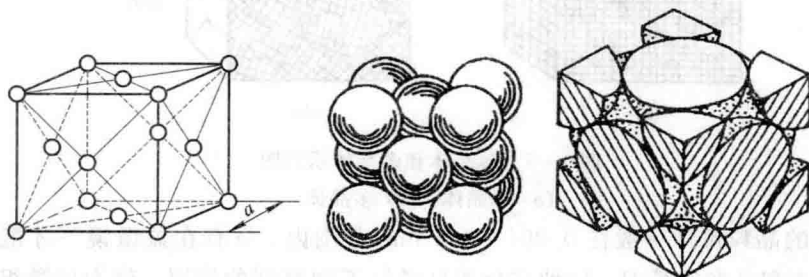


图 1-3 面心立方晶格示意图

### 3) 密排六方晶格

如图 1-4 所示, 密排六方晶格是一个正六方柱体, 原子位于 2 个底面的中心处和 12 个顶点上, 柱体内部还包含着 3 个原子。其  $a=b \neq c$ ,  $\alpha=\beta=90^\circ$ ,  $\gamma=120^\circ$ 。顶点的每个原子同时为相邻的 6 个晶胞所共有, 上下底面中心的原子同时属于相邻的 2 个晶胞, 而体中心的 3 个原子为该晶胞所独有。其致密度为 0.74。属于这类晶格的金属有镁(Mg)、锌(Zn)、铍(Be)、镉(Cd)等。

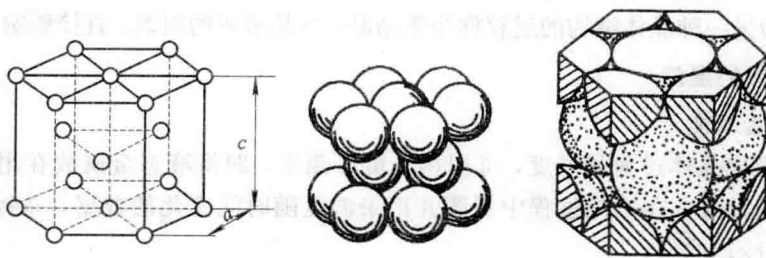


图 1-4 密排六方晶格示意图

## 4. 实际金属的晶体结构

上述讨论的晶体中, 原子排列规律相同, 晶格位向完全一致, 这种晶体称为单晶体, 见图 1-5(a)。生产中只有采用特殊的方法才能制成单晶体。单晶体材料只在特定情况下使用, 如制造半导体硅元件所用的材料就是单晶硅。实际使用的金属材料都是由许多小晶体组成的。由于每个小晶体外形不规则, 且呈颗粒状, 因而称为“晶粒”。每个晶粒内的晶格位向是一致的, 但各个晶粒之间彼此位向都不同(相差  $30^\circ \sim 40^\circ$ ), 晶粒与晶粒之间的界面称为“晶界”, 如图 1-5(b)所示。晶界是两个相邻晶粒不同晶格位向的过渡区, 其上的原子总是不规则排列的。由许多晶粒组成的晶体称为多晶体, 金属材料一般都是多晶体, 虽然每个晶粒具有各向异性, 但从不同方向测试出金属的性能, 是很多位向不同晶粒的平均性能, 故可以认为金属(多晶体)是各向同性的。

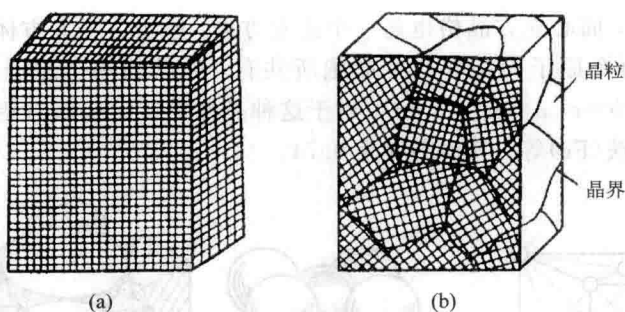


图 1-5 单晶体和多晶体示意图

(a) 单晶体; (b) 多晶体

钢铁材料的晶粒尺寸一般在  $0.001 \sim 0.1 \text{ mm}$  范围内。只有在显微镜下才能观察到晶粒的形态、大小和分布等情况。这种在金相显微镜下观察到的情况,称为显微组织或金相组织。有色金属的晶粒尺寸一般都比钢铁的晶粒大,有时用肉眼可以看到。

实验证明,在每个晶粒内,其晶格位向并不像理想晶体那样完全一致,而是存在着许多尺寸很小、位向差很小(一般小于  $2^\circ$ )的小晶块。这些小晶块称为亚晶粒,两个相邻亚晶粒的交界处称为亚晶界,其原子排列不规则,也产生晶格畸变。因此,晶界和亚晶界的存在会使金属的强度提高,同时还使塑性、韧性改善,这称为细晶强化。

### 1.1.2 纯金属的结晶

金属由液态转变为原子呈规则排列的固态晶体的过程称为结晶,而金属在固态下由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程称为重结晶。结晶形成的组织,直接影响金属的性能。

#### 1. 金属结晶的温度

##### 1) 理论结晶温度

金属结晶形成晶体过程的温度,可用热分析法测定,即将液态金属放在坩埚中以极其缓慢的速度进行冷却,在冷却过程中观测并记录温度随时间变化的数据,并将其绘制成如图 1-6 所示的冷却曲线。

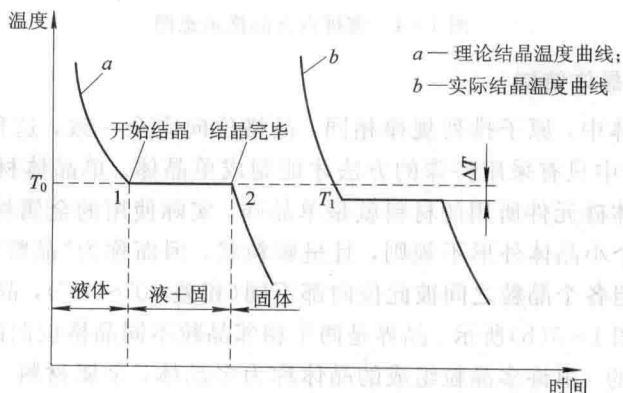


图 1-6 金属结晶的冷却曲线示意图



从图 1-6 中的曲线  $a$  可知,当液态金属冷却温度达到  $T_0$  时,出现水平段 1—2,其对应的温度就是金属的理论结晶温度  $T_0$ ,冷却曲线上的水平段表示温度保持不变。纯金属的结晶是在恒温下进行的,这是因为金属在 1 点开始结晶时放出结晶潜热,补偿了向外界散失的热量,2 点结晶终止后,冷却曲线又连续下降。

## 2) 实际结晶温度

实际生产中,金属不可能极其缓慢地由液体冷却到固体,冷却速度是相当快的,金属总是要在理论结晶温度  $T_0$  以下的某一温度  $T_1$  才能开始结晶。如图 1-6 中的曲线  $b$  所示, $T_1$  称为实际结晶温度, $T_0$  和  $T_1$  之差称为过冷度  $\Delta T$ ,其大小和冷却速度、金属性质及纯度有关,冷却速度越快,过冷度越大,实际金属的结晶温度也越低。

## 2. 金属结晶的规律

液态金属冷却到  $T_0$  以下时,首先在液体中某些局部微小的体积内出现原子规则排列的细微小集团,这些细微小集团是不稳定的,时聚时散,有些稳定下来成为结晶的核心,称为晶核。当温度下降到  $T_0$  时,晶核不断吸收周围液体中的金属原子逐渐长大,液态金属不断减少,新的晶核逐渐增多且长大,直到全部液体转变为固态晶体为止,一个晶核长大成为一个晶粒,最后形成的是由许多外形不规则的晶粒所组成的晶体,如图 1-7 所示。

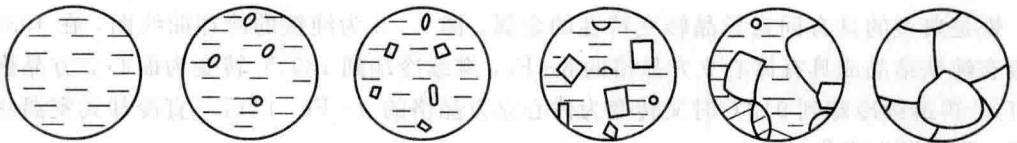


图 1-7 纯金属结晶过程示意图

### 1) 金属晶核形成的方式

(1) 自发形核:对于很纯净的液体金属,加快其冷却速度,使其在具有足够大的过冷度下,不断产生许多类似晶体中原子排列的小集团,形成结晶核心,即为自发形核。

(2) 非自发形核:实际金属中往往存在异类固相质点,并且在冷却时金属总会与铸型内壁接触,因此这些已有的固体颗粒或表面被优先依附,从而形成晶核,这种方式称为非自发形核。

### 2) 金属晶核的长大方式

晶核形成后,液相原子不断迁移到晶核表面而促使晶核长大形成晶粒。但晶核长大程度取决于液态金属的过冷度,当过冷度很小时,晶核在长大过程中保持规则外形,直至长成晶粒并相互接触时,规则外形才被破坏;反之,则以树枝晶形态生长。这是因为随着过冷度的增大,具有规则外形的晶核长大时需要将较多的结晶潜热散发掉,而其棱角部位因具有最优先的散热条件,因而便得到优先生长,如树枝一样先长出枝干,再长出分枝,最后把晶间填满。

### 3. 金属晶粒的细化方法

金属结晶后是由许多晶粒组成的多晶体,而晶粒大小是金属组织的重要标志之一。金属内部晶粒越细小,则晶界越多,晶界面也越多,晶界就越曲折,则晶格畸变越大,从而使



金属强度、硬度提高,并使变形均匀分布在许多晶粒上,塑性、韧性也好。

金属结晶后,晶粒大小与单位时间、单位体积内的形核数量即形核率  $N$  (形核数量/ $s \cdot mm^3$ ) 和长大速度  $G$  (mm/s) 有关,若晶核的形成速率很大而成长速率很小时,可得到很细小的晶粒。生产中常采用增加过冷度  $\Delta T$ 、变质处理和附加震动等细化晶粒的方法。

### 1.1.3 金属的同素异晶转变

金属经过结晶后都具有一定的晶格结构,且多数不再发生晶格变化。但 Fe、Co、Ti、Mn 等少数金属在固态下会随温度的变化而具有不同类型的晶体结构。

金属在固态下由一种晶格类型转变为另一种晶格类型的变化称为金属的同素异晶(构)转变。由金属的同素异晶转变所得到的不同类型的晶体称为同素异晶体。金属的同素异晶转变也是原子重新排列的过程,称为重结晶或二次结晶。固态下的重结晶和液态下的结晶相似,也遵循晶体结晶的一般规律:转变在恒温下进行,也是形核与长大的过程,也必须在一定的过冷度下转变才能完成。同素异晶转变与液态金属的结晶存在着明显的区别,主要表现在:同素异晶转变时晶界处能量较高,新的晶核往往在原晶界上形成;固态下原子扩散比较困难,固态转变需要较大的过冷度;固态转变会产生体积变化,在金属中引起较大的内应力。

铁是典型的具有同素异晶转变特性的金属。图 1-8 为纯铁的冷却曲线图,在 1538°C 时液态纯铁结晶成具有体心立方晶格的  $\delta$ -Fe,继续冷却到 1394°C 转变为面心立方晶格的  $\gamma$ -Fe,再继续冷却到 912°C 时又转变为体心立方晶格的  $\alpha$ -Fe,以后一直冷却到室温晶格类型,不再发生变化。

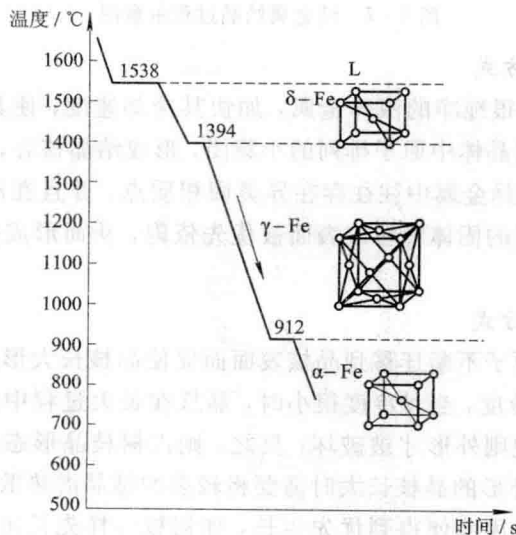


图 1-8 纯铁的冷却曲线图

纯铁的同素异晶转变同样存在于铁基的钢铁材料中,这是钢铁材料能通过各种热处理方法改善其组织和性能的基础,使钢铁材料的性能多种多样。