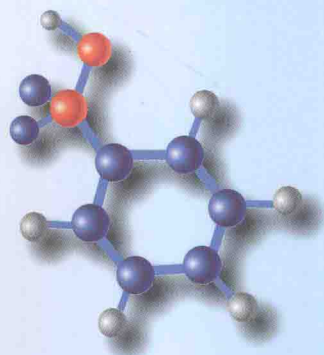




21世纪全国高等院校材料类**创新型**应用人才培养规划教材



MATERIALS

# 铸造金属凝固原理

主 编 陈宗民 于文强

- 以凝固理论和铸造生产的发展为基点
- 糅合现代凝固理论和技术的最新成果
- 注重基础理论和工程实践的有机结合

Materials



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

# 铸造金属凝固原理

主 编 陈宗民 于文强



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书主要内容包括液态金属的结构和性质、凝固过程的热力学和动力学原理、凝固过程的传热与传质、常规铸造条件下的凝固组织及其控制原理、特殊条件下的凝固技术、凝固过程中产生的铸造缺陷等。为了帮助学生更好地理解 and 掌握基础内容，每章后面都附有适量的习题。

本书注重基础理论和工程实践的结合，在讲解中兼顾凝固过程的理论分析、研究手段和工程控制。这样的编排既有利于提高读者对凝固过程的理论认识，又可促进学以致用；同时，有利于培养学生发现问题、正确分析问题和有效解决问题的能力。在内容上尽可能地糅合了现代凝固理论和技术的最新成果，体现了凝固理论和技术的历史传承和发展趋势。

本书可作为工科院校本科、研究生材料成型类专业的教材和参考书，也可作为金属材料、铸造工程方面工程技术人员的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

铸造金属凝固原理/陈宗民，于文强主编. —北京：北京大学出版社，2014.1

(21世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-23469-3

I. ①铸… II. ①陈…②于… III. ①熔融金属—凝固理论—高等学校—教材 IV. ①TG111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 273482 号

**书 名：铸造金属凝固原理**

著作责任者：陈宗民 于文强 主编

策 划 编 辑：童君鑫

责 任 编 辑：黄红珍

标 准 书 号：ISBN 978-7-301-23469-3/TG·0047

出 版 发 行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn> 新浪官方微博：@北京大学出版社

电 子 信 箱：[pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者：北京富生印刷厂

经 销 者：新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 494 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价：43.00 元

---

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024 电子信箱：[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 21 世纪全国高等院校材料类创新型应用人才培养规划教材

## 编审指导与建设委员会

### 成员名单（按拼音排序）

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 白培康（中北大学）    | 陈华辉（中国矿业大学）    |
| 崔占全（燕山大学）    | 杜彦良（石家庄铁道大学）   |
| 杜振民（北京科技大学）  | 耿桂宏（北方民族大学）    |
| 关绍康（郑州大学）    | 胡志强（大连工业大学）    |
| 李楠（武汉科技大学）   | 梁金生（河北工业大学）    |
| 林志东（武汉工程大学）  | 刘爱民（大连理工大学）    |
| 刘开平（长安大学）    | 芦笙（江苏科技大学）     |
| 裴坚（北京大学）     | 时海芳（辽宁工程技术大学）  |
| 孙凤莲（哈尔滨理工大学） | 孙玉福（郑州大学）      |
| 万发荣（北京科技大学）  | 王春青（哈尔滨工业大学）   |
| 王峰（北京化工大学）   | 王金淑（北京工业大学）    |
| 王昆林（清华大学）    | 卫英慧（太原理工大学）    |
| 伍玉娇（贵州大学）    | 夏华（重庆理工大学）     |
| 徐鸿（华北电力大学）   | 余心宏（西北工业大学）    |
| 张朝晖（北京理工大学）  | 张海涛（安徽工程大学）    |
| 张敏刚（太原科技大学）  | 张锐（郑州航空工业管理学院） |
| 张晓燕（贵州大学）    | 赵惠忠（武汉科技大学）    |
| 赵莉萍（内蒙古科技大学） | 赵玉涛（江苏大学）      |

# 前 言

本书是按照高等院校材料成型及控制工程专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求，结合目前铸造行业发展对人才知识结构的要求编写而成的。编者曾在生产技术一线工作多年，并具有丰富的铸造教育培训经验。

随着我国经济与技术的飞速发展和产业结构的调整，铸造业也发生了很大的变化。市场对铸件的需求量呈繁荣昌盛趋势，对铸件质量、生产周期的要求也越来越苛刻。虽然近年来，通过技术改造，一批企业有了较大的进步和改观，形成一批具有先进水平的铸造骨干生产厂，但总体来说，我国铸造产业仍面临着经济效益差，铸件质量低，能源、材料消耗高，劳动条件恶劣，环境污染等严重问题，满足不了日益激烈的市场竞争。为了消除这些差距，满足我国经济建设的需要，也为了铸造行业自身的存在与发展，我国的铸造行业应以提高铸件质量和经济效益为中心，面向国内和国际两个市场；加强管理，打好基础，提高铸造业人才和企业素质；调整研究人员和工程技术人员知识结构，在研究和工程中面向高精尖产品，合理配置资源，继续以适用先进的生产工艺和技术装备改造铸造行业，实现清洁化生产，保证可持续发展。凝固过程对铸件质量具有最重要的影响，提高铸件质量最首要的任务是精确控制铸件的凝固过程，得到所需要的组织和性能。编写本书的目的是给读者提供最基本的凝固理论和技术的基本知识，使读者能够在这些知识的基础上解决铸造生产中产生的若干与凝固相关的技术问题。

本书以目前凝固理论和技术的发展趋势及铸造生产的发展特点为基点，以应用和指导为目的，在理论讲解方面以必需、够用为度，在技术特点方面，尽量以实际生产为例，并提供尽可能宽的知识面和尽可能新的发展信息。书中的技术名词、定义符号均采用国际标准化组织和最新国家或行业标准。

在编写本书时，吸收了许多正规出版物、公开发表的内部技术信息、产品信息的内容以及网络信息，这些内容对充实、完善本书至关重要。由于篇幅所限，故不在此一一列举，编者谨向有关单位和个人致以诚挚的谢意。

本书由山东理工大学陈宗民、于文强主编，由山东理工大学材料成型及控制工程系铸造方向课程组全体同仁审阅并提供各种技术材料，在此表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校工科材料类、材料成型类专业的教材和参考书，也可作为材料和材料成型类的科研及工程技术人员的学习参考书。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者、专家和同仁不吝赐教。

编 者  
2013年9月

# 目 录

<b>第 1 章 导论</b> .....	1	3.3.2 铸型性质方面的因素 .....	38
1.1 铸造技术简介 .....	2	3.3.3 浇注条件方面的因素 .....	40
1.1.1 铸造的概念和特点 .....	2	3.3.4 铸件结构方面的因素 .....	41
1.1.2 铸造技术的发展概况 .....	3	习题 .....	42
1.2 铸件凝固理论和技术 .....	7	<b>第 4 章 凝固过程的热力学和动力学</b> .....	43
1.2.1 凝固理论的发展概况 .....	7	4.1 凝固的热力学基础 .....	44
1.2.2 凝固过程的基本问题 .....	9	4.1.1 热力学的基本术语和概念 .....	45
1.2.3 凝固过程的研究方法 .....	10	4.1.2 常用的热力学函数 .....	45
<b>第 2 章 液态金属的结构和性质</b> .....	12	4.1.3 状态函数间的关系 .....	46
2.1 固体金属的加热、熔化 .....	13	4.1.4 自发过程的判断 .....	47
2.2 液态金属的结构 .....	14	4.2 液态金属(合金)凝固热力学 .....	47
2.2.1 液态金属的热物理性质 .....	14	4.2.1 液态金属(合金)凝固热力学条件 .....	47
2.2.2 X 射线结构分析 .....	15	4.2.2 液态金属(合金)凝固过程及该过程中能量的增加 .....	49
2.2.3 液态金属的结构特征 .....	16	4.3 均质形核 .....	50
2.3 液态金属的某些物理性质及其对凝固成型的影响 .....	17	4.3.1 形核热力学 .....	50
2.3.1 液态金属的粘滞性(黏度) .....	17	4.3.2 均质形核速率 .....	51
2.3.2 表面张力和界面张力 .....	19	4.3.3 均质形核理论的局限性 .....	52
习题 .....	23	4.4 异质形核 .....	52
<b>第 3 章 液态金属的充型能力</b> .....	24	4.4.1 形核热力学 .....	52
3.1 液态金属充型能力的基本概念 .....	25	4.4.2 异质形核速率 .....	53
3.2 液态金属的停止流动机理和充型能力计算 .....	28	4.5 固-液界面的结构 .....	54
3.2.1 液态金属的停止流动机理 .....	28	4.6 晶体长大(固-液界面的推进)方式和速率 .....	58
3.2.2 液态金属充型能力的计算 .....	29	4.6.1 固-液界面的长大方式 .....	58
3.3 影响充型能力的因素及提高充型能力的措施 .....	31	4.6.2 粗糙界面连续长大(Continuous Growth)速率 .....	59
3.3.1 金属性质方面的因素 .....	32	4.6.3 光滑界面二维晶核台阶长大速率晶核台阶长大方式 .....	61
		4.6.4 螺型位错长大速率 .....	63



习题 .....	64	6.4 凝固过程中的液体流动 .....	104
<b>第5章 凝固过程中的传热</b> .....	65	6.4.1 凝固过程中液相区的液体流动 .....	104
5.1 铸件与铸型的热交换特点 .....	66	6.4.2 液态金属在枝晶间的流动 .....	107
5.1.1 铸件-中间层-铸型系统传热分析 .....	66	习题 .....	108
5.1.2 铸件在非金属型中的冷却 .....	68	<b>第7章 单相合金的凝固</b> .....	109
5.1.3 铸件在金属型中的冷却 .....	69	7.1 纯金属凝固过程 .....	110
5.1.4 非金属铸件在金属型中的冷却 .....	70	7.1.1 平面方式长大 .....	110
5.2 凝固过程的温度场 .....	70	7.1.2 树枝晶方式生长 .....	111
5.2.1 数学解析法 .....	71	7.2 成分过冷 .....	111
5.2.2 数值计算法 .....	74	7.2.1 合金的溶质富集引起界面液体凝固温度的变化 .....	111
5.2.3 测温法 .....	78	7.2.2 成分过冷的形成条件 .....	112
5.2.4 影响铸件温度场的因素 .....	80	7.2.3 成分过冷的过冷度值 .....	113
5.3 铸件凝固方式 .....	82	7.2.4 成分过冷和热过冷的比较 .....	115
5.3.1 凝固动态曲线 .....	82	7.3 成分过冷对单相合金凝固过程的影响 .....	116
5.3.2 凝固区域及其结构 .....	83	7.3.1 无成分过冷的平面生长 .....	116
5.3.3 铸件的凝固方式及其影响因素 .....	84	7.3.2 窄成分过冷区的胞状生长 .....	117
5.3.4 铸件的凝固方式与铸件质量的关系 .....	86	7.3.3 较宽成分过冷区的柱状树枝晶生长 .....	119
5.4 铸件凝固时间和速度的计算 .....	88	7.3.4 宽成分过冷区的自由树枝晶生长 .....	120
5.4.1 理论计算法 .....	88	7.3.5 树枝晶的生长方向和枝晶间距 .....	121
5.4.2 经验计算法——平方根定律 .....	89	7.3.6 晶体形貌间的关系 .....	123
习题 .....	90	习题 .....	124
<b>第6章 凝固过程中的传质</b> .....	92	<b>第8章 多相合金的凝固</b> .....	125
6.1 凝固过程中的溶质平衡 .....	93	8.1 共晶合金的凝固 .....	126
6.2 传质过程的控制方程 .....	94	8.1.1 共晶合金的分类及共晶组织的特点 .....	126
6.3 凝固界面上的溶质再分配 .....	95	8.1.2 共晶合金的结晶方式 .....	127
6.3.1 溶质再分配与平衡分配系数 .....	95	8.1.3 规则共晶凝固 .....	130
6.3.2 平衡凝固时溶质的再分配 .....	97	8.1.4 非规则共晶凝固 .....	138
6.3.3 近平衡凝固时溶质的再分配 .....	98		
6.3.4 非平衡凝固时溶质的再分配 .....	104		

8.2 偏晶合金的凝固 .....	145	10.4.1 OCC 连续定向凝固 技术的原理与特点 .....	187
8.2.1 偏晶合金大体积的 凝固 .....	145	10.4.2 OCC 连铸工艺方法 .....	188
8.2.2 偏晶合金的定向凝固 .....	145	10.4.3 OCC 连铸的凝固过程与 质量控制 .....	190
8.3 包晶合金的凝固 .....	147	习题 .....	192
8.3.1 包晶合金的平衡凝固 .....	147	<b>第 11 章 快速凝固技术</b> .....	193
8.3.2 近平衡凝固条件下 包晶合金的凝固 .....	148	11.1 快速凝固基本原理 .....	195
8.3.3 利用包晶转变细化 晶粒 .....	150	11.2 激冷凝固技术 .....	196
习题 .....	151	11.2.1 模冷技术 .....	196
<b>第 9 章 铸件凝固组织的形成和 控制</b> .....	152	11.2.2 雾化技术 .....	197
9.1 铸件宏观凝固组织的特征及 形成机理 .....	154	11.2.3 表面融化与沉积技术 .....	199
9.1.1 铸件宏观凝固组织的 特征 .....	154	11.3 大过冷凝固技术 .....	201
9.1.2 铸件宏观凝固组织的 形成机理 .....	155	11.3.1 小体积大过冷凝固法 .....	201
9.2 铸件宏观凝固组织的控制 .....	160	11.3.2 大体积大过冷凝固法 .....	201
9.2.1 铸件凝固组织对铸件 性能的影响 .....	160	11.4 快速凝固传热特点 .....	202
9.2.2 铸件宏观组织中等轴晶的 控制途径和措施 .....	162	11.4.1 薄层熔体在固体衬底上的 导热传热 .....	202
9.2.3 共晶合金铸件凝固组织的 控制 .....	170	11.4.2 金属液滴在流体介质中的 对流传热 .....	203
习题 .....	171	11.5 快速凝固合金的组织 and 性能特征 .....	204
<b>第 10 章 定向凝固技术</b> .....	172	11.5.1 快速凝固晶态合金的 组织和性能 .....	204
10.1 定向凝固工艺 .....	174	11.5.2 快速凝固非晶态合金的 组织和性能 .....	206
10.1.1 定向凝固工艺参数 .....	174	习题 .....	206
10.1.2 定向凝固的方法 .....	176	<b>第 12 章 其他超常规条件下的 凝固技术</b> .....	208
10.2 单晶生长 .....	177	12.1 微重力凝固技术 .....	209
10.2.1 单晶生长的特点 .....	178	12.1.1 微重力场下金属流动的 特点 .....	209
10.2.2 单晶生长的方法 .....	179	12.1.2 微重力场对金属凝固 组织的影响 .....	213
10.3 柱状晶的生长 .....	183	12.1.3 微重力试验环境的 获得 .....	215
10.3.1 柱状晶生长的条件和 特点 .....	184	12.2 超重力凝固技术 .....	215
10.3.2 柱状晶的力学性能 .....	185	12.2.1 超重力场的获得及 产生原理 .....	215
10.4 连续定向凝固技术 .....	187		





12.2.2 超重力下熔体的重新 层流化及对流强度的 增加 .....	216	习题 .....	263
12.3 声悬浮凝固技术 .....	218	<b>第 15 章 铸件凝固过程中产生的 偏析</b> .....	264
12.4 高压凝固技术 .....	219	15.1 概述 .....	265
习题 .....	221	15.2 微观偏析 .....	266
<b>第 13 章 金属基复合材料的凝固</b> .....	222	15.2.1 枝晶偏析(晶内偏析) .....	266
13.1 概述 .....	223	15.2.2 胞状偏析 .....	270
13.2 金属基人工复合材料的凝固 .....	224	15.2.3 晶界偏析 .....	271
13.2.1 金属基纤维强化 复合材料 .....	224	15.3 宏观偏析 .....	271
13.2.2 金属基颗粒强化 复合材料 .....	226	15.3.1 正常偏析 .....	271
13.3 自生复合材料的凝固 .....	229	15.3.2 逆偏析 .....	274
13.3.1 共晶自生复合材料 .....	229	15.3.3 V 型偏析和逆 V 型 偏析 .....	276
13.3.2 非共晶成分的自生 复合材料 .....	233	15.3.4 带状偏析 .....	277
习题 .....	235	15.3.5 密度偏析 .....	279
<b>第 14 章 铸件的收缩及缩孔和 缩松</b> .....	236	习题 .....	280
14.1 铸造合金的收缩 .....	237	<b>第 16 章 铸件中产生的气孔与非金属 夹杂物</b> .....	281
14.1.1 收缩的基本概念 .....	237	16.1 气孔的种类 .....	282
14.1.2 铸钢的收缩 .....	240	16.2 气孔的形成机理 .....	283
14.1.3 铸铁的收缩 .....	242	16.2.1 析出性气孔的形成 机理 .....	283
14.1.4 铸件的收缩 .....	245	16.2.2 反应性气孔的形成 机理 .....	286
14.2 铸件中的缩孔和缩松 .....	246	16.2.3 侵入性气孔的形成 机理 .....	287
14.2.1 缩孔 .....	246	16.3 气孔的防止 .....	288
14.2.2 缩松 .....	250	16.3.1 防止或减少析出性气孔的 措施 .....	288
14.2.3 灰铸铁和球墨铸铁件的 缩孔和缩松 .....	253	16.3.2 防止皮下气孔的措施 .....	288
14.3 防止铸件产生缩孔和缩松的 途径 .....	256	16.3.3 防止侵入性气孔的 措施 .....	289
14.3.1 合适的凝固原则——顺序 凝固和同时凝固 .....	256	16.4 夹杂物 .....	289
14.3.2 浇注系统的引入位置及 浇注工艺 .....	259	16.4.1 液态金属中非金属 夹杂物的来源与类型 .....	289
14.3.3 冒口、补贴和冷铁的 应用 .....	260	16.4.2 非金属夹杂物对铸件 质量的影响 .....	290
14.3.4 加压补缩 .....	262	16.4.3 初生夹杂物的形成与 防止措施 .....	291

16.4.4 二次氧化夹杂物的 形成与防止措施 .....	292	17.4.3 浇注条件方面 .....	311
16.4.5 次生夹杂物 .....	293	17.4.4 铸件结构方面 .....	312
习题 .....	295	习题 .....	312
<b>第 17 章 铸件凝固后期产生的 热裂纹 .....</b>	<b>297</b>	<b>第 18 章 铸件凝固后产生的 应力、变形和冷裂纹 .....</b>	<b>313</b>
17.1 概述 .....	298	18.1 概述 .....	314
17.2 热裂形成的温度范围及 形成机理 .....	299	18.2 铸件在冷却过程中产生的 热应力 .....	315
17.2.1 热裂形成的温度范围 ..	299	18.2.1 热应力的产生过程 .....	315
17.2.2 热裂形成机理 .....	301	18.2.2 影响残余热应力的 因素 .....	316
17.3 影响热裂形成的因素 .....	304	18.3 铸件在冷却过程中产生的 相变应力 .....	319
17.3.1 铸造合金性质的影响 ..	305	18.4 铸件在冷却过程中产生的 机械阻碍应力 .....	320
17.3.2 铸型性质的影响 .....	307	18.5 减小或消除铸造应力的途径 ..	321
17.3.3 浇注条件的影响 .....	308	18.6 铸件的变形 .....	323
17.3.4 铸件结构的影响 .....	309	18.7 铸件的冷裂 .....	324
17.4 防止铸件产生热裂形成的 途径 .....	310	18.8 防止铸件产生变形和冷裂的 途径 .....	325
17.4.1 合金成分、熔炼工艺的 精炼方面 .....	310	习题 .....	327
17.4.2 造型工艺方面 .....	311		

# 第 1 章 导 论



## 本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
金属铸造的基本概念和发展	(1) 掌握铸造的基本原理及特点 (2) 了解铸造技术的发展历史	(1) 铸造的主要工艺过程 (2) 铸造生产的特点
凝固过程在铸造生产中的作用及其发展历史、研究方法	(1) 掌握凝固对铸造生产过程及铸件质量的影响 (2) 了解凝固过程的研究方法 (3) 了解凝固技术和理论的发展	(1) 凝固过程与铸件质量 (2) 几种具有代表性的凝固理论和技术 (3) 3 种主要的研究方法



### 中国古代的钢铁冶炼技术

古代的炼铁方法是块炼铁，即在较低的冶炼温度下，将铁矿石固态还原获得海绵铁，再经锻打成的铁块。冶炼块炼铁，一般采用地炉、平地筑炉和竖炉3种。我国块炼铁始于春秋时代，在掌握块炼铁技术的不久，就炼出了含碳2%以上的液态生铁，并用以铸成工具。战国初期，我国已掌握了脱碳、热处理技术方法，发明了韧性铸铁。战国后期，又发明了可重复使用的“铁范”（用铁制成的铸造金属器物的空腹器）。西汉时期，出现坩埚炼铁法。同时，炼铁竖炉规模进一步扩大。1975年，在郑州附近古荥镇发现和发掘出汉代冶铁遗址，场址面积达12万平方米，发掘出两座并列的高炉炉基，高炉容积约50立方米。西汉时期还发明了“炒钢法”，即利用生铁“炒”成熟铁或钢的新工艺，产品称为炒钢。同时，还兴起“百炼钢”技术。东汉（公元25—220年）光武帝时，发明了水力鼓风炉，即“水排”。我国古代水排的发明，大约比欧洲早1100多年。汉代以后，发明了灌钢方法。《北齐书·慕容怀文传》称为“宿钢”，后世称为灌钢，又称为团钢。这是中国古代炼钢技术的又一重大成就。据《中华百科要览》记载：中国是最早用煤炼铁的国家，汉代时已经试用，宋、元时期已普及。到明代（公元1368—1644年）已能用焦炭冶炼生铁。在公元14—15世纪，铁的产量曾超过2000万斤。西方最先开始工业革命的英国，约晚两个世纪，才达到这个水平。

总的来看，中国古代钢铁发展的特点与其他各国不同。世界上长期采用固态还原的块炼铁和固体渗碳钢，而中国铸铁和生铁炼钢一直是主要方法。由于铸铁和生铁炼钢法的发明与发展，中国的冶金技术在明代中叶以前一直居世界先进水平。

众所周知，铸造是机械制造中最重要的成形方法。铸件的质量和性能很大程度上取决于其凝固组织特征，而凝固组织主要受合金成分、冷却速率和冷却方向等控制。在这一过程中涉及析出相组成、形态、分布以及偏析、裂纹、缩孔、疏松以及夹杂物的数量等，其对铸件性能具有重要的影响，控制凝固过程已成为提高铸件性能和研制新型铸造工艺，开发新型铸造材料的最关键的手段之一。

铸件凝固过程是热力学原理和动力学条件决定的相变过程，涉及凝聚态物理学、界面与表面科学、传热传质学、流体力学、流变学、弹性力学、化学及数值计算等。所以，铸造金属凝固理论是一门多学科交叉的综合性学科。

## 1.1 铸造技术简介

### 1.1.1 铸造的概念和特点

铸造是利用金属在液态时容易成形的原理来生产金属制品的一种加工工艺。首先，把金属或合金的原材料熔化成具有一定的化学成分和一定温度的液体，然后在重力或外力作用下将它浇注到铸型型腔中，经凝固冷却后便形成所需要的铸件。大多数铸件只是零件的毛坯，它要经过切削加工才能成为机器零件。但是，随着少余量与无余量铸造技术的发

展,有的铸件可以不需切削加工即能满足零件精度和粗糙度的要求。

铸造是多工部、多工序的生产过程,主要工部有熔化、砂处理(砂型铸造)、造型与制芯、浇注、清砂与清理等。此外,还包括热处理和表面处理等辅助工部。每个工部包括若干工序。任一工部和任一工序都将直接地或间接地影响着铸件的最终质量。它的影响因素是多方面的。其中包括金属炉料的品质,熔化过程所产生的冶金反应,造型材料的性质及铸型性能,铸型与液态金属之间的相互作用,浇注方案及其工艺参数(浇注温度和浇注速度等),以及由温度场所决定的凝固速度、凝固方向和凝固方式等。铸件绝大多数宏观缺陷,例如缩孔、缩松、气孔、夹渣和夹杂以及裂纹等,均与这些方面的因素有关。要克服铸件的缺陷,必须掌握多方面的理论知识和实践经验。

铸件的性能除了受到缺陷的影响以外,还受到液态金属一次凝固组织的直接影响。因此,铸造工作者必须对液态金属的结晶(凝固)过程十分通晓。

铸造与其他的加工工艺方法比较,其基本特点在于液态金属的抗剪应力很小,易于成形。因此铸造具有以下优点。

### 1. 适应范围很大

首先,可供铸造用的金属(合金)十分广泛。除了常用的铸铁、铸钢和铝、镁、铜、锌等合金以外,还有以钛、镍、钴等为基的合金。甚至不能接受塑性加工和切削加工的非金属,如陶瓷类的材料也能用铸造的方法液态成型。其次,铸造可用于制造形状最复杂的整体零件(无论是外形还是内腔,其复杂程度原则上不受限制)。最后,铸件的重量和尺寸可以在很大范围内变化。目前,其可铸的最小壁厚为0.2mm,最大壁厚为1m;最小长度为数毫米,最大长度为十几米;可铸造的铸件质量为数克至数百吨。

### 2. 可生产复合铸件

由于铸件是在液态下成型的,所以用铸造的方法生产复合铸件是一种最经济的方法,使铸件由不同的材质构成(例如衬套)。此外,通过一次结晶过程的控制,可使铸件的各个部位获得不同的结晶组织及性能。

### 3. 成本低廉

在一般机器中,铸件质量为40%~80%,但其成本只占25%~30%。铸件成本低廉的原因:一是铸件的形状及尺寸与零件十分接近,因此材料的消耗和切削加工的费用很小(只有锻件的1/3~1/2);二是可以大量利用报废的零件和废料进行重新熔铸;三是容易组织机械化的大量生产,从而降低产品的单件成本。

## 1.1.2 铸造技术的发展概况

人类文明大致经历石器时代、铜器时代和铁器时代3个历史阶段。石器时代长达约300多万年的漫长历史。使用金属的历史才有几千年,但它使人类文明产生了根本性的飞跃(质的变化),而铸造技术的发明是与金属的使用分不开的。

我国是世界文明古国之一,铸造技术的发展源远流长。据历史考证,我国铸造技术开始于夏朝初期,即堰师二里头文化早期,迄今已有5000多年。到了晚商和西周,青铜的铸造得到蓬勃发展,从而形成了灿烂的青铜文化,出现了以司母戊、四羊尊、大方鼎、莲鹤方壶(图1.1)等为代表的青铜珍品。到了春秋战国时期,音乐界出现了百家争鸣的繁荣



局面，编钟成为当时的主要乐器。1976年湖北随县出土的曾侯乙墓青铜器重达10余吨，其中有64件编钟和楚惠王赠送曾侯乙的傅钟(图1.2)。全套编钟每件都铸有错金铭文，分别在正鼓与侧鼓部位标出不同的音名与音律，只要准确敲击标音部位就能发出与铭文相符的两音。钟架上层为音色清脆的钮钟，中层为音色嘹亮的甬钟，下层为音色浑厚的甬钟。每钟均可旋宫转调，全组音域辽阔，可以演奏现代多声部的乐曲，音色十分迷人。



图 1.1 莲鹤方壶图(春秋时期)  
(尺寸 22 厘米×10 厘米×8 厘米)

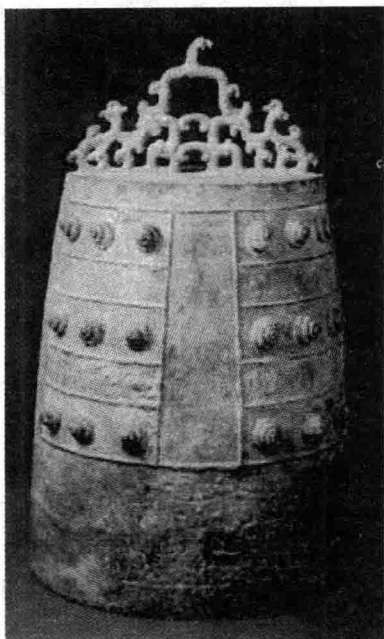


图 1.2 青铜蟠钮傅钟

春秋战国齐国官书《周礼·考工记》中，有世界上最早的合金配料规律——“六齐”的记载。根据青铜中含锡量的高低而可将“六齐”分为上齐(少锡)和下齐(多锡)两段。当含锡量提高到15%~20%时，抗拉强度可达极大值；而含锡量提高到30%左右时，硬度最高。钟鼎类铸件要求有足够强度而又需避免变形和脆硬，因此“六分其金而锡居一”乃为钟鼎之齐(合金)。斧钺、戈戟、刀剑则要求既有一定强度又需一定硬度，故应逐步增高其含锡量。根据近代研究，含锡量约30%(铜-锡半)为化合物，其硬度很高(400HB)而强度适当(300MPa)，谓之鉴(青铜镜)燧(利用阳光取火的凹镜)之齐，表面抛光之后十分光亮平整。这种对硬度和强度要求不同的铸件，用含锡量高低分成6档，证明我国在2000多年以前对成分与性能之间的关系已经有着深刻的了解。

我国从公元前6世纪开始使用铁器，并完成了由低温固态还原法(块炼法)向高温液态冶铁的过渡。到战国中期，在农具和兵器等方面，铸铁逐渐代替了青铜。为了满足生产力发展而对生铁工具的大量需要，便发明了金属型(古称铁范)铸造法。1953年在河北省兴隆县出土的铁范共87件，就是战国时期用来铸造铁锄、铁镰、铁斧等工具、农具和车具的。兴隆铁范是我国乃至世界最早发明和使用的金属型。金属型与泥型相比，具有快速冷却的特点而容易获得亚稳态白口铸铁的组织，铸件经过石墨化退火或脱碳退火就可以制成黑心可锻铸铁件或白心可锻铸铁件。1957年和1975年分别在长沙出土的战国铁铲和在洛



阳出土的空首铁铺钬，经金相分析鉴定，其石墨呈团絮状，前者是典型的黑心可锻铸铁，后者是白心可锻铸铁，它们便是利用当时的金属型铸造并经热处理退火后制造出来的。尤其令人惊奇的是在河南巩县发现的西汉铁镢具有球状石墨的组织。现代球墨铸铁是对铁水进行球化处理直接获得铸态球状石墨的。这项技术于1947年由英国莫洛研制成功。它大大提高了铸铁的力学性能和生产成本。但中国的铸造匠师早在公元前1世纪就已经创造了类似现代球铁的铸件。由此可见，中国不仅是最先发明和使用金属型铸造的国家，而且也是最先发明和掌握铸铁强韧化技术的国家。

我国古人有“型范正，工冶巧，然后可铸”的说法。要获得优质铸件，除了有适当的合金成分和精湛的熔炼技术外，还需要有设计合理和良好的铸型，两方面缺一不可。因此，“型范正，工冶巧”这正道破了铸造生产的关键。在悠久的铸造生产历史中，古代的铸冶匠师在铸型工艺方面，有着丰富的经验和独特的创造。

泥型(古称陶范)在古代铸造中占有重要的地位。泥型可分为一次型和半永久型两类。泥型铸造至今仍有强大的生命力，为薄壁铸件(例如铁锅)生产所普遍使用。其中，薄壳泥型叠型串铸工艺，起源于西汉铸钱手工业，这项技术流传下来，可用来铸造缝纫机零件、汽车活塞环、小齿轮等小件。如果将我国传统的薄壳泥型结合现代树脂砂壳型进行研究提高，很可能发展成为具有我国特点的先进工艺。

现代航空和航天发动机重要的涡轮部件——导向叶片，全世界都要用熔模铸造的方法制造。现代熔模铸造(包括各种专利)起源于我国古代的失蜡铸造法。举世闻名的晚商四羊铜尊(图1.3)，是商代奴隶主用的盛酒器。它造型奇特，花纹十分复杂，尊身四隅有四只羊头，各长一对卷曲的羊角，尊的扇边镂空。这一作品经专家分析鉴定，是采用失蜡法铸造而成的。因此，我国失蜡法的发明可推到殷商时期，而文献记载始于唐代(《唐会要》)。公元340年左右(日本仁德天皇时期)失蜡法和铜镜一起传入日本及四邻国家。经过不断完善，最后发展成为现代的熔模铸造工艺。

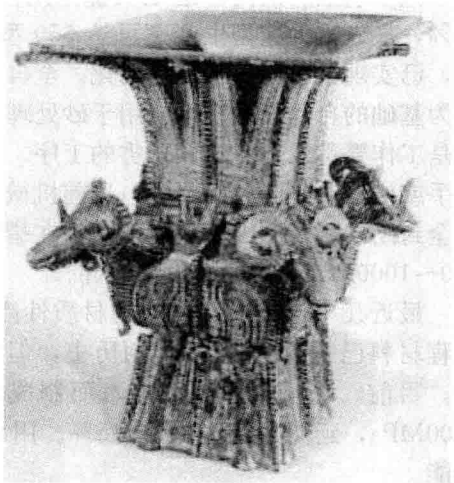


图 1.3 晚商四羊铜尊

据英国李约瑟博士在《中国科学技术史》书中所述，中国古代传入欧洲的重大科技成果共22项，其中属于铸造方面的就占有5项。在1974年前后，我国出土文物曾在欧洲一些国家展出，其优美的艺术构思和精湛的铸造技巧使各国铸造专家叹为观止。

我国铸造技术有着悠久的历史，并在人类文明进步的过程中做出了不可磨灭的贡献。发掘、整理、研究和提高我国的传统铸造技术，使其古为今用，无疑具有重要的现实意义。

铸造技术经过几千年来的演变和发展才达到现代铸造技术的水平。尤其值得注意的是，最近几十年来由于一些边缘科学和工业领域中有许多突破性的发展，整个铸造行业发生了许多深刻的变化。其中，以金属凝固理论和凝固技术的发展和计算机的应用尤为突出。



传统的观点认为合金凝固过程中的过冷现象仅与冷却速率有关。1953年,查尔默斯等人提出成分过冷理论,接着杰克逊提出界面结构原理,并以 $\alpha$ 因子作为划分凝固界面形态的相似准则。从此,使理论研究从宏观转入微观原子尺度的研究,加深了人们对结晶过程的认识,揭示了结晶过冷现象的本质及其对结晶组织与铸件性能之间的关系,丰富了人们控制铸件结晶的手段。这几十年以来,由于凝固理论向更高层次的发展,而推动了定向凝固和复合材料的生产应用。

计算机在铸造中的应用之一是作为一种有效的信息处理手段用来模拟铸件的凝固过程。所谓计算机数值模拟,是指对表征凝固过程的数学模型用计算机进行解析。它可以形象地显示铸件任一截面在凝固过程中的温度分布,这是计算机辅助设计和优化工艺的前提。目前,已经可以用自动设计系统来预测铸件的缩孔、气孔、夹杂物以及应力分布的情况,并将经过优化的工艺方案自动录成工艺卡。

计算机的另一重要应用是作为生产过程的一种控制手段。对于铸造这样工序繁多、劳动条件恶劣、影响因素复杂的行业,一些国家的铸造厂商纷纷认识到在生产中应用计算机控制将会给他们创造利润和保证质量。目前,新一代造型生产线基本上已采用微机控制的自动化系统。例如,德国KW公司的真空压实造型线,荷兰Rademker铸造厂和法国Peug Cor汽车厂的燃气冲击造型生产线,丹麦Disa公司垂直分型无箱射压造型线及我国第二汽车制造厂的高压造型线都采用微机控制系统。采用微机控制之后,生产率可提高60%,最先进的造型生产率可达550型/h。以微机为基础的微电子技术在压铸机上的应用,已实现了压铸过程的自动化。全自动压铸机,在日本已占压铸机总数的80%。以计算机为基础的自动化系统也应用于砂处理和熔化、浇注及质量检测等方面。此外,铸件的清理是工作繁重及环境比较恶劣的工序。因此,在铸件清理工序中采用以计算机为基础的机械手或机器人是十分必要的。目前机械手能够清理的铸件质量已达800kg,整个清理过程在全封闭的隔音室内完成。此外,在蜡模涂挂涂料的工作中,采用机械手可以做出尺寸为800~1000mm的大型熔模精铸件。

最近几十年来,在铸件的材质性能方面也取得了长足的发展。球墨铸铁作为高强度工程材料已有60多年的使用历史,但它的性能获得大幅度的提高还是近20多年才实现的。目前,采用等温淬火技术而制成的贝氏体或奥贝体球铁,其抗拉强度已达900~1300MPa,延伸率已达5%~15%。用它代替锻钢制造汽车齿轮,既能降低成本又能提高性能。

铸铁中的蠕虫状石墨曾经长期地被认为是球化处理不良的产物。从20世纪60年代开始才发现蠕墨铸铁的应用价值。目前,它已作为新型的一种工程铸铁而被广泛使用。其特点是具有与灰铸铁相媲美的铸造性能与切削加工性能,它和灰铸铁一样具有良好的吸震性与抗缺口敏感性,不同之处是其力学性能优于灰铸铁。它与球铁比较,虽然力学性能不如球铁高,但成本低于球铁,而且耐磨性和导热性比球铁好,所以很适用于制造内燃机的缸头和缸套之类的零件。

铝镁锂系合金是目前引人注目的一种轻合金。它的优点是密度特别小(约 $2.5\text{g/cm}^3$ ),因此比强度和比弹性模量特别高。此外,还有良好的耐腐蚀性能,很适用于制造海陆空的载体。钛合金也是一种发展较快的轻质结构材料,除了比强度和比弹性模量高之外,还有相当高的耐热、耐腐蚀性能。目前,在世界钛产量中有10%~15%用于航天和航空工业,在日本则有80%~90%的钛用于化工机械制造业。值得注意的是,正在研制中的钛基



金属间化合物将有可能成为涡轮元件的优异材料。

在这几十年中,复合材料作为新型的一种工程材料有了很大进展。自从20世纪50年代末和60年代初展现纤维增强复合材料以来,至今复合材料的类型已有几十种之多。用铸造方法生产复合材料已经成为铸造技术发展的重要分支。比强度和比弹性模量是衡量结构材料承载能力和机器特性的重要指标之一,尤其是对高速运动的动态结构更是这样。碳纤维铝复合材料的比强度和比模量为钢的3倍。长纤维增强(铝)基复合材料还具有优良的高温强度、吸振能力、抗疲劳能力以及防止零件突然性破坏的能力。但因成本昂贵,故只用于宇航等少数工业领域。目前,发展最快的是短纤维型或粒子型铸造复合材料。这些复合材料是汽车、电机等工业中最经济而有效的耐磨和耐腐蚀材料,用来制造轴承、活塞、汽缸、集电器等零件。复合材料具有单一材料所不能及的许多重要的性能,无疑是材料发展的一个重要方向。据日本技术调查株式会社的预测,21世纪将要确立复合材料优先发展相应应用的地位。

工艺和设备方面的发展,主要围绕着铸件的优质、精化、高产以及生产过程的无害或少害进行。目前,砂型铸造虽然仍以黏土砂型为主,但化学硬化砂的使用范围正在不断扩大。树脂砂造型材料及其工艺方法有了不少的创新,使铸件的质量和尺寸幅度有了新的提高,生产环境有了新的改善。此外,20世纪50年代使用广泛的震击式或震压式造型机,因其噪声大、生产率低、紧砂质量和尺寸精度差,目前已由气动微震压、高压、射压以及真空造型和气流冲击造型等新一代造型设备逐渐代替。

随着产业结构以及世界经营环境的发展和变化,压力铸造在整个铸造行业中将占有日益重要的位置。目前,在发展大型压铸机的同时十分重视发展5~20T的热室小型压铸机,用来生产薄壁、高精度的小型—微型压铸件。例如,DM100型压铸机注射质量只有100~200g,生产率为1000型/h,一型多腔。其铸件可直接用来组装灯具、相机、音响设备、计算机和各种仪表。锌压铸合金和镁压铸合金的使用也在不断发展和扩大。我国已经建立了教学、科研和生产的完整体系,并拥有一支具有相当水平的铸造科技队伍。铸件年产量已跃居世界第一,每年可以为机床、汽车、农机、动力、冶金、化工、纺织机械、飞机、船舶以及重型机械等工业部门提供数量充足的铸件,而且有越来越多的铸件进入国际市场,标志着我国悠久的铸造生产在现代工业化进程中已经占有举足轻重的地位。

## 1.2 铸件凝固理论和技术

### 1.2.1 凝固理论的发展概况

如前所述,我国在古代已具有很高的冶铸技术水平,如对化学成分和凝固过程的控制已达到很精确的水平。尽管如此,在古代对液态金属的凝固控制只是停留在经验的基础上。近代凝固理论的发展大约经历了以下几个阶段。20世纪60年代前诞生了经典的凝固理论,该理论认为凝固首先是成核,接着是核心长大直至成为固态。在多伦多大学B. Chalmers的指导下,许多著名的凝固学家脱颖而出。他们在对凝固界面附近溶质分析求解的基础上,总结出“成分过冷”理论,并提出了可操作性的成分过冷判据:首次将传热和传质耦合起来,研究其对晶体生长方式和形态的影响。Flemings等从工程的角度出