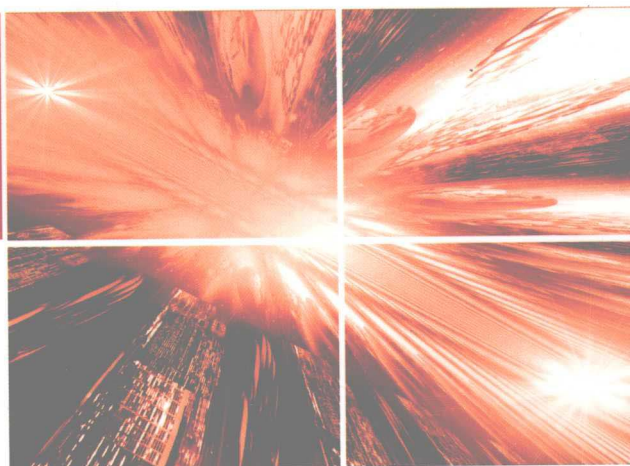


普通高等教育“十二五”规划教材



铸件成形原理

祖方遒 主 编

袁晓光 梁维中 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

铸件成形原理

主 编 祖方遒
副主编 袁晓光 梁维中
参 编 刘洪喜 席 赟 张国赏 黄中月
主 审 孙国雄 陈其善



机械工业出版社

本书为高等学校材料成形及控制工程专业铸造方向的专业基础课教材,主要介绍金属凝固过程的基本概念、基本理论、组织形成规律及控制原理,以及与铸件成形相关的诸种缺陷的形成机制与控制原则,具体内容包括液态金属的结构与性质、凝固温度场、晶体形核与生长、单相合金凝固、多相合金凝固、铸件凝固组织的控制、特殊条件下的凝固技术、液态金属与气相和渣相的相互作用、凝固过程中的成分偏析、气孔和夹杂的形成与控制、凝固收缩过程中的缺陷形成与控制、固态冷却过程中的缺陷形成与控制。本书在内容取舍、表达方式、篇章布局等方面均进行了新的尝试,尤其在凝固基础知识方面做了较大幅度的更新,力求在相关重要内容上与国内外当今的认知和发展水平同步,以体现高等教育教材应有的时代特征。

本书适用于材料成形及控制工程专业铸造方向本科教学,也可供在铸造、冶金及金属材料等领域从事技术和研发的专业人员以及相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铸件成形原理/祖方道主编. —北京:机械工业出版社, 2013.1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-40306-7

I. ①铸… II. ①祖… III. ①铸件—成形过程—高等学校—教材
IV. ①TG25

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第263592号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:冯春生 责任编辑:冯春生 韩冰 版式设计:闫玥红

责任校对:张媛 封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.5印张·530千字

标准书号:ISBN 978-7-111-40306-7

定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”规划教材 编审委员会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

方洪渊 哈尔滨工业大学
朱世根 东华大学
邢建东 西安交通大学
李永堂 太原科技大学
聂绍珉 燕山大学

王智平 兰州理工大学
许并社 太原理工大学
李大勇 哈尔滨理工大学
周 荣 昆明理工大学
葛继平 大连交通大学

委员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学
王卫卫 哈尔滨工业大学 (威海)
邓子玉 沈阳理工大学
刘金合 西北工业大学
毕大森 天津理工大学
闫久春 哈尔滨工业大学
张建勋 西安交通大学
李 桓 天津大学
李亚江 山东大学
周文龙 大连理工大学
侯英玮 大连交通大学
赵 军 燕山大学
黄 放 贵州大学
薛克敏 合肥工业大学

文九巴 河南科技大学
计伟志 上海工程技术大学
刘永长 天津大学
华 林 武汉理工大学
许映秋 东南大学
何国球 同济大学
李 尧 江汉大学
李 强 福州大学
邹家生 江苏科技大学
武晓雷 中国科学院
姜启川 吉林大学
梁 伟 太原理工大学
蒋百灵 西安理工大学
戴 虹 西南交通大学

秘书长 袁晓光 沈阳工业大学
秘书 冯春生 机械工业出版社

铸造方向教材编委会

主任委员 李荣德 沈阳工业大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王智平 兰州理工大学

朱世根 东华大学

李大勇 哈尔滨理工大学

李元元 华南理工大学

陈维平 华南理工大学

周 荣 昆明理工大学

孟祥才 佳木斯大学

黄 放 贵州大学

傅高升 福州大学

翟启杰 上海大学

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁雨田 兰州理工大学

刘敬福 辽宁工程技术大学

孙清洲 山东建筑大学

米国发 河南理工大学

许春香 太原理工大学

宋延沛 河南科技大学

李秋书 太原科技大学

李培耀 上海工程技术大学

苏 勇 合肥工业大学

陈美玲 大连交通大学

荣守范 佳木斯大学

祖方遒 合肥工业大学

赵占西 河海大学

赵玉华 沈阳航空航天大学

徐 瑞 燕山大学

袁晓光 沈阳工业大学

梁维中 黑龙江科技大学

曾大新 湖北汽车工业学院

樊自田 华中科技大学

潘 冶 东南大学

秘 书 长 李润霞 沈阳工业大学

秘 书 冯春生 机械工业出版社

前 言

本书是根据中国机械工业教育协会材料成形及控制学科教学委员会于2009年8月在兰州召开的会议精神组织编写的铸造方向系列规划教材之一，主要用于高等学校材料成形及控制工程专业铸造方向专业基础理论课程的教学。

我国高等院校自1952年开始创办铸造专业（1998年按国家专业目录调整并入材料成形及控制工程专业），作为教学中论述铸件成形基础理论的这门专业主干课程，其教材发展经历了一个漫长的历程。早先的教材内容基本上是基于前苏联俄文版的有关书籍，如雷日可夫的《铸造生产理论基础》（1954）、魏尼克的《铸件凝固理论》（1960）、普里斯贝尔的《铸造过程理论》（1967）等。除各校的自编讲义外，最具代表性的是作为全国统编教材出版的《铸造合金原理》（舒光冀等，1961），以及此后多校合编的《铸造工艺学（工艺基础部分）》（1975、1977）和《铸造工艺基础》（1979）等教材。

1977年恢复高考后，我国高等教育百废待兴，鉴于缺乏适合于当时科技发展水平的铸造基础理论方面正规教材的情况，根据1978年4月原第一机械工业部在天津召开的高等学校对口专业座谈会精神，1978年6月在长沙召开的铸造专业教材会议上讨论并制订了《铸造形成理论基础》教材的编写大纲，会议委托李庆春教授担纲主编并组织该教材的编写工作，该教材编成后还未及正式出版即在全国多所高校用于77和78级铸造专业的教学，1982年由机械工业出版社以铸造专业全国统编教材正式出版。8年后在该教材的基础上，由安阁英、陈其善和曾松岩三位教授重新编写，教材改名为《铸件形成理论》并于1990年出版。这部教材基于原苏联《铸件形成理论基础》（Баладин，1979）以及20世纪50年代和60年代初其他书籍内容，也融入了《Principles of Solidification》（B. Chalmers，1964）和《Solidification Processing》（M. C. Flemings，1974）等著作的部分新内容，专业内具有里程碑意义。在此后几十年内该教材一直广泛用于铸造专业/方向的基础理论课的教学。虽然之后出版过若干类似教材，包括近年铸锻焊通用教材《材料成形（基本）原理》等，内容体系上对上述教材均少有突破。

欣然接受本书编写任务之后，在确定内容体系时，编者面临使命感及诸多疑虑间的两难抉择。一方面，过去几十年中，国内外凝固理论及技术原理方面不仅出现了一些新的认知和发展，即使对一些经典凝固内容，认识上也更趋于系统、深入和完善，或对物理过程描述和内容表达上也更具新意。而且，凝固技术、铸造产业水平和内涵也有了迅速发展和外延。若守着几十年前传统内容体系不变，“剪刀+糗糊”地做些调整或重写，延续教材“版本新而内容体系陈旧”的局面，则教材本身缺乏时代特征，更不利于人才的培养。而另一方面，若做到对传统内容体系有明显突破，编者并非没有顾忌。首先，经典内容的保留与更新，新内容重要性及权威性的研判与筛选，教材整体体系的构建等，需要编写人在原有知识构成基础上广泛收集资料和新的素材，并认真消化、梳理和凝练，这些对编者均构成任务上的挑



战。而且,为此所消耗的大量时间与精力,同用之于写专著或做科研等相比,当今的认定准则却让编写人员不无得不偿失之感。再者,上述传统教材的内容及其体系深入人心,尤其对于授课教师更是如此,而且,教材新的内容体系要求教师在教学准备上多花时间,接受它必然会有阻力。两难抉择之际,我们请教、求证于国内一些资深专家,包括曾参加过传统教材的主要编写者以及企业高工,令人欣慰的是,他们的一致意见与编者的使命感高度地吻合——内容体系的更新势在必行。得不偿失的心态也好,习惯于传统内容的外界阻力也罢,方向既定则我们义无反顾地准备接受任务上的挑战。

基于上述考虑,这里对本教材的编写纲领和特点作几点说明。第一,关于内容的筛选,本书不刻板地拘泥于过去属本科还是研究生阶段的内容。道理很浅显,集成电路问世之初,在电子领域即使博士、教授也觉得深奥,而今本科教材中则必然涉及,因为时代在发展。因此,本书新增内容的取舍,取决于其重要性及当今的共识程度;而其表达深度和方式则以本科生的知识结构所决定的理解和接受能力为根据。第二,除了新增内容之外,对一些经典内容的介绍,基于内涵上新的发展或表达上的严谨性、系统性、易懂性的需要,在内容陈述、公式引出、示例说明等方面也进行了一定程度的更新,替换并新增了较多的示意图及实例图,其中一些图例是以往国内教科书中未见的。对于新增内容以及经典内容的更新与重新表达,本教材主要参考了《Fundamentals of solidification》(W. Kurz 等,第4版,1998)、《Science and engineering of casting solidification》(D. M. Stefanescu, 2002)等专著,也广泛参考了国内外学术期刊上近年相关的重要论文。第三,关于撰写风格,本教材对一些内容着意采取开放式写法,即在介绍现代共识性知识的同时,也让学生知晓其相关理论并非完全成熟的现实及目前的发展现状。其考虑主要基于,科学理论或技术原理的发展都具有其时代性与阶段性,若对所有的知识内容在表达上都言之凿凿,给读者以完美无缺之感,则不利于学生开放性思维习惯的形成,更不利于学生创新意识的培养。第四,本书将关于凝固基本原理的第1~7章内容作为上篇;关于铸件在凝固及后续冷却过程缺陷形成的第8~12章内容作为下篇。考虑到铸造方向当前无“冶金原理”方面的课程,而此方面基本知识对于凝固缺陷形成与控制是不可或缺的,故本书专门新增一章内容(第8章),简要介绍液态金属与气体、熔渣和铸型材料之间的冶金作用过程和原理。第五,由于上述几方面原因,本书就相关主要内容在各章后面对应给出了较为详细且有针对性的参考文献。这些文献将有助于一些读者对相关内容作进一步的深入了解和探究,相信对本科大学生的自主学习有用,对研究生及专业科技人员也具有参考价值。

本书由合肥工业大学祖方道教授任主编,沈阳工业大学袁晓光和黑龙江科技大学梁维中两位教授任副主编,东南大学孙国雄、合肥工业大学陈其善两位教授任主审。在祖方道的主持下,通过充分调研与论证,确定了本书的编写纲领和内容大纲。编写分工为:第1、3、4、5章由祖方道编写,第2、7章由袁晓光编写,第6、11章由梁维中编写,第8、12章由昆明理工大学刘洪喜教授编写,第9章由合肥工业大学席赞高工编写,第10章由河南科技大学张国赏副教授编写,第6章的6.6节由合肥工业大学黄中月博士编写,绪论由袁晓光、梁维中和祖方道共同完成。祖方道对各章书稿在三轮内部评阅中给出了详细的内容调整和修改意见,初稿形成后于2011年7月提交主审。根据2011年11月广州教材审稿会上两位主审中肯的审稿意见,编写人分别对书稿进行了认真修改。修改稿经内审并部分修改后再次提交主审,其后参考二审意见再行修订后于2012年5月最终定稿。

成稿之际，衷心感谢对本书给予帮助与支持的所有同行和专家！在辛苦付出之后虽觉释然，也深感难以满意。由于编者水平所限，加之内容更新与表达上力图做些尝试，教材中不妥和错误之处在所难免，恳请读者和相关专家不吝批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
上篇 金属凝固基本原理	
第1章 液态金属的结构与性质	10
1.1 引言	10
1.2 液态金属的结构	11
1.2.1 液体与固体、气体的结构比较及衍射特征	11
1.2.2 由物质熔化过程认识液体结构	13
1.2.3 液态金属结构的理论模型	16
1.2.4 实际金属的液态结构	18
1.2.5 对液态结构的再认识及研究新进展	19
1.3 液态金属的性质	22
1.3.1 液态金属的粘度	22
1.3.2 液态金属的表面张力	25
1.4 液态金属的充型能力	31
1.4.1 液态金属充型能力的基本概念	31
1.4.2 液态金属的停止流动机理与充型能力	32
1.4.3 影响充型能力的因素	34
思考与练习	39
第2章 凝固温度场	42
2.1 传热基本原理	42
2.1.1 基本概念	42
2.1.2 热量的传递形式	43
2.1.3 导热基本定律	44
2.2 铸件的传热特点	46
2.3 铸件凝固温度场的研究方法	48
2.3.1 铸件凝固温度场的数学解析法	49
2.3.2 铸件凝固温度场的数值算法	53
2.3.3 铸件凝固温度场的测量法	57
2.4 铸件的凝固时间	60
2.4.1 铸件凝固过程的平方根定律	60
2.4.2 铸件凝固时间计算中的折算厚度法	62
2.5 影响铸件温度场的因素	64
2.6 铸件凝固方式及与铸件质量的关系	68
2.6.1 铸件凝固区域结构	68
2.6.2 铸件凝固方式及影响因素	70
2.6.3 铸件凝固方式与内部质量的关系	71
思考与练习	73
第3章 晶体形核与生长	75
3.1 引言	75
3.2 液-固相变驱动力及过冷度	78
3.2.1 液-固相变驱动力	78
3.2.2 凝固过冷度	79
3.3 凝固形核	83
3.3.1 均质形核	83
3.3.2 非均质形核与均质形核的比较	84
3.3.3 非均质形核的形核条件	90
3.4 晶体生长	90
3.4.1 固-液界面的微观结构	90
3.4.2 晶体生长方式	93
思考与练习	98

第4章 单相合金凝固	99
4.1 凝固过程中的溶质再分配	99
4.1.1 溶质平衡分配系数	99
4.1.2 平衡凝固条件下的溶质再分配	101
4.1.3 固相无扩散而液相充分混合均匀的溶质再分配	102
4.1.4 固相中无扩散而液相中只有有限扩散的溶质再分配	103
4.1.5 液相中部分混合(有对流作用)的溶质再分配	107
4.2 合金凝固界面前沿的成分过冷	109
4.2.1 成分过冷的形成及其条件	109
4.2.2 成分过冷形成的判据	111
4.2.3 成分过冷的程度	112
4.3 成分过冷对合金单相固溶体结晶形态的影响	112
4.3.1 热过冷对纯物质液-固界面形态的影响	112
4.3.2 成分过冷对合金固溶体晶体形貌的影响规律	114
4.3.3 窄成分过冷作用下胞状组织的形成及其形貌	115
4.3.4 较宽成分过冷作用下的枝晶生长	117
4.3.5 等轴晶的形成与内生生长	119
4.4 界面稳定性动力学分析	122
4.5 枝晶间距	124
4.5.1 胞状晶及柱状树枝晶的一次间距	125
4.5.2 柱状树枝晶及等轴树枝晶的二次间距	128
思考与练习	130
第5章 多相合金凝固	134
5.1 共晶组织的分类及特点	134
5.2 规则共晶的凝固	136
5.2.1 层片状共晶组织的形核过程	136
5.2.2 层片状共晶组织的扩散耦合生长	137
5.2.3 层片状共晶组织生长的界面过冷度	139
5.2.4 确定共晶片层间距的最小过冷度准则	140
5.2.5 棒状共晶生长	143
5.3 共晶与枝晶相的竞争生长	144
5.3.1 共晶生长界面的失稳	144
5.3.2 偏离平衡相图的共晶共生区	146
5.3.3 离异生长及离异共晶	150
5.4 非小平面-小平面非规则共晶的一般特征及形成机制	151
5.5 灰口铸铁的非规则共晶结晶	154
5.5.1 奥氏体-石墨(γ -G)共晶的多种方式	154
5.5.2 灰铸铁的共晶(片状石墨+奥氏体)结晶	155
5.5.3 球墨铸铁的共晶(球状石墨+奥氏体)结晶	157
5.6 Al-Si合金的非规则共晶结晶	160
5.6.1 未变质Al-Si合金的共晶生长	160
5.6.2 变质元素对共晶硅生长方式的作用——IIT机制	162
5.6.3 变质处理对Al-Si共晶形核的作用——限制形核机制	164
5.6.4 变质处理与Al-Si合金共晶结晶动力学	166
5.6.5 Al-Si合金熔体的表面张力与变质效果	168
5.7 包晶凝固	169
5.7.1 包晶凝固过程	169
5.7.2 包晶转变中的相竞争	171
思考与练习	174
第6章 铸件凝固组织的控制	178
6.1 铸件宏观组织特征	178
6.2 表面激冷晶区的形成机理	179
6.3 柱状晶区的形成机理	180
6.4 内部等轴晶区的形成机理	180
6.4.1 成分过冷理论	181
6.4.2 激冷等轴晶型壁脱落与游离理论	181
6.4.3 枝晶熔断及结晶雨理论	183
6.5 铸件宏观凝固组织控制	184
6.6 凝固组织与熔体热历史的相	



关性	192	8.3.2 自由氧对金属的氧化	240
6.6.1 熔体热历史与凝固相关性	193	8.4 气体的影响和控制	240
6.6.2 凝固行为及组织与熔体状态相 关性的认识	194	8.4.1 气体对金属质量的影响	240
思考与练习	197	8.4.2 气体的控制措施	241
第7章 特殊条件下的凝固	199	8.5 熔渣的作用与形成	241
7.1 快速凝固	199	8.5.1 熔渣的作用与铸造熔渣的分类	241
7.1.1 快速凝固原理	199	8.5.2 熔炼过程中的熔渣来源与构成	242
7.1.2 快速凝固工艺	201	8.6 熔渣的结构及碱度	243
7.1.3 快速凝固材料的特点	204	8.6.1 熔渣结构的分子理论	243
7.2 块体非晶合金	205	8.6.2 熔渣结构的离子理论	244
7.2.1 块体非晶合金形成的理论基础	206	8.6.3 离子与分子共存理论	247
7.2.2 多组元块体的非晶合金设计	209	8.6.4 熔渣的碱度	247
7.2.3 非晶合金复合材料	210	8.7 渣相的物理性质	248
7.2.4 块体非晶合金的性能及应用	212	8.8 活性熔渣对金属的氧化	250
7.3 定向凝固	214	8.9 液态金属的脱氧、脱碳、脱 硫和脱磷	252
7.3.1 定向凝固原理	214	8.9.1 液态金属的脱氧	253
7.3.2 定向凝固工艺	214	8.9.2 液态金属的脱碳	256
7.3.3 定向凝固的应用	216	8.9.3 液态金属的脱硫	257
7.4 超常条件下的凝固	220	8.9.4 液态金属的脱磷	259
7.4.1 微重力凝固	220	思考与练习	260
7.4.2 超重力凝固	222	第9章 凝固过程中的成分偏析	262
7.4.3 超高压凝固	222	9.1 引言	262
思考与练习	224	9.2 显微偏析	263
下篇 铸件成形过程缺陷形成与控制		9.2.1 晶内偏析(枝晶偏析)	263
第8章 液态金属与气相和渣相的相 互作用	227	9.2.2 晶界偏析	266
8.1 铸件成形过程中气体的来源与 产生	227	9.3 宏观偏析	266
8.1.1 气体的来源	227	9.3.1 正常偏析	267
8.1.2 铸型内的气体	228	9.3.2 逆偏析	268
8.2 气体在金属中的溶解	231	9.3.3 带状偏析	269
8.2.1 气体在金属中的存在形式	231	9.3.4 V型及逆V型偏析	270
8.2.2 气体在金属中的溶解度	232	9.3.5 密度偏析	272
8.2.3 双原子气体在液态金属和合金 中的溶解	233	思考与练习	272
8.2.4 化合态气体在金属和合金中的 溶解	238	第10章 气孔和夹杂的形成与控制	273
8.3 氧化性气体对金属的氧化	239	10.1 引言	273
8.3.1 金属氧化还原方向的判据	239	10.2 铸件中的气孔	274
		10.2.1 气孔的分类及特征	274
		10.2.2 气体在金属中的析出	275
		10.2.3 析出型气孔	279
		10.2.4 侵入型气孔	280
		10.2.5 反应型气孔	282

10.3 铸件中的夹杂	285	11.4.2 影响灰铸铁和球墨铸铁缩孔与 缩松的因素	304
10.3.1 概述	285	11.4.3 防止缩孔与缩松的措施	305
10.3.2 夹杂物的形成原因	286	11.5 热裂纹的形成与控制	309
10.3.3 夹杂物的长大、分布及形状	287	11.5.1 热裂纹的分类及形成机理	309
10.3.4 夹杂物的防止措施	288	11.5.2 热裂纹的影响因素及防止 措施	311
思考与练习	289	思考与练习	314
第11章 凝固收缩过程中的缺陷形 成与控制	291	第12章 固态冷却过程中的缺陷形成 与控制	316
11.1 金属的收缩	291	12.1 铸造应力	316
11.1.1 收缩的基本概念	291	12.1.1 应力的分类和危害	316
11.1.2 铸铁的收缩	292	12.1.2 铸件热应力的形成	319
11.1.3 铸钢的收缩	295	12.1.3 影响铸造应力的因素	320
11.1.4 铸件的收缩	296	12.1.4 减小铸造应力的途径	321
11.2 缩孔与缩松的分类及特征	297	12.1.5 降低铸造应力的方法	322
11.2.1 缩孔	297	12.2 铸件变形	324
11.2.2 缩松	298	12.2.1 铸件变形种类	324
11.3 缩孔与缩松的形成机理	299	12.2.2 铸件变形的影响因素	326
11.3.1 缩孔的形成机理	299	12.2.3 防止铸件变形的途径	327
11.3.2 缩松的形成机理	300	12.3 铸件裂纹	328
11.3.3 铸铁件的缩孔及缩松形成特 点	302	12.3.1 热裂纹	328
11.4 影响缩孔与缩松的因素及防 止措施	303	12.3.2 冷裂纹	329
11.4.1 影响缩孔与缩松的因素	303	思考与练习	330

绪 论

1. 材料与材料成形

材料是划分人类文明进程的重要标志，史学家们据此将人类发展历史分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。当今，由于科学技术的飞速发展以及社会进步所带来的各个层面和各个领域对材料的新的更高需求，使得材料的品种和数量不断增多、质量不断提高。在金属材料方面，加大了对各类黑色、有色金属及其合金的研究，并扩大了其应用范围，如钢铁材料、铝合金、锌合金、铜合金、镁合金、钛合金等。在非金属材料方面，高分子材料、合成纤维等的性能日趋提高，它们在结构材料中的应用范围逐渐扩大并日益显示出发展潜力；陶瓷、功能陶瓷、人造金刚石以及各种复合材料、表面涂层等新材料的效能进一步得以发挥。从材料的使用功能来看，以往多以结构材料为主，而今发展出超强、超韧、超硬、耐磨、耐蚀、耐高温等各类特性材料，以满足更严酷的服役条件，取得更长的使用寿命；激光晶体、超导材料、光导纤维、电/磁流变液材料、电/磁致伸缩材料、形状记忆合金等新材料的发现和应用，使得功能材料异军突起，屡建奇功；半导体材料自问世以来，发展成现今日新月异的集成电路，引发了电子、信息及通信等领域的产业革命狂潮；各种换能、储能等新能源材料的出现已引起各国的普遍重视。从材料的微观结构来看，人们在不断地探索和制备多晶、单晶、微晶、纳米晶、准晶、非晶等材料，获得相异的特殊性能，满足不同的需求。

材料是现代文明各个领域不可缺少的物质基础，而材料的应用价值体现在形成具有一定形状、尺寸及结构并具备所需使用性能的零件、部件及构件，并以特定方式组合、装配而构成各种装置、设备、仪器、设施、器件或用具，从而服务于各行各业。材料制备成零件、部件及构件等产品的工艺过程称为“材料成形”，材料成形一般包括铸件成形、塑性成形、连接成形、粉末冶金及切削加工等。目前高等学校的材料成形及控制工程专业囊括了以往所称的铸造、锻压、焊接、粉末冶金等多个传统专业，也涵盖了高分子材料、复合材料等材料的成形方法。随着科学技术的不断发展以及新材料、新工艺的不断涌现，材料成形的内涵和外延仍在不断地发展与拓宽，材料成形向着精密、柔性、复合、高效、清洁、优质及智能方向不断发展。

材料成形与各行各业密不可分，可以毫不夸张地说，没有材料成形就没有现代工业、现代农业、交通运输、城市建设、能源与矿产等国民经济的基础设施和精良装备；没有材料成形就没有现代通信、自动控制、航海、航空航天等高新技术领域的存在；没有材料成形，人民生活需求及国防建设就没有保障。

本课程主要以金属材料为对象，讨论铸件成形基本原理方面的内容。

2. 铸件成形在材料成形中的地位与特点

铸件成形是材料成形方法的一种，也称为铸造。铸件成形是将液态金属浇入到具有一定



形状的型腔中，液态金属在重力场或其他外力场的作用下充满型腔，冷却并凝固形成具有型腔形状的物体。铸件成形的方法很多，通常从砂型铸造到各种形式的特种铸造，但其基本特点是相同的，首先都要熔炼出符合化学成分要求的液态金属，然后将液态金属充填铸型，待冷却、凝固后成为铸件。在金属材料的成形过程中，除了通过粉末成形和电铸法等获得特殊金属制品外，几乎所有金属制品及其原材料都要经历至少一次的冶炼和凝固过程。铸件的性能、铸锭经过塑性成形制备的各种型材的性能、铸件经焊接制成的构件性能，以及金属铸锭经切削成形获得的制品性能，都要受到铸件或铸锭最原始的凝固组织的影响。因此，铸件成形在材料成形过程中具有不可取代的地位，研究铸件成形原理对获得高质量的金属制品具有十分重要的意义。

在各种材料成形方法中，铸造方法具有以下独到的优点：

1) 适用范围广。铸造法几乎不受铸件大小、厚薄和形状复杂程度的限制，铸件的壁厚可达到 0.3 ~ 1000mm，长度可从几毫米到十几米，质量可从几克到数百吨。铸造最适合生产形状复杂的结构件，特别是内腔复杂的零件，如复杂的箱体、阀体、叶轮、发动机气缸体、螺旋桨等。

2) 铸造可采用的材料广泛，几乎凡是能熔化成液态的合金材料均可用于铸造，如铸钢、铸铁，各种铝合金、铜合金、镁合金、钛合金及锌合金等。对于塑性较差的脆性合金材料（如普通铸铁等），铸造是唯一可行的成形方法。

3) 铸件具有一定的尺寸精度，一般情况下，铸件比普通锻件、焊接件的成形尺寸精确。

4) 成本低廉、综合经济性能好、能源与材料消耗及成本均低于其他金属成形方法。

3. 中国古代的铸造技术

铸造是一种古老的技术，在人类发展的历史长河中，铸造有着许多辉煌记载和重要贡献。

中国的铸造历史源远流长，五千多年的铸造技术发展史都印证在青铜器和铁器上。根据对出土文物的考证，前三千年以青铜器为主，后两千年以铸铁为主。1978 年湖北随县曾乙侯墓出土的青铜器编钟，是在距今 2400 多年前的战国初期制造的，如图 0-1 所示。该编钟有 64 件共分 8 组，总质量为 2500kg，其中最大的编钟质量为 203.6kg，高 153.4cm，最小的编钟质量为 2.4kg，高 20.2cm。曾乙侯编钟音色优美淳朴，音域宽广，音律准确，可演奏中外名曲，其纹饰繁美，玲珑剔透，充分体现了该时期铜合金熔炼和铸造技术的最高水平。

由于我国青铜铸造技术的快速发展，在商代已经获得了 1200℃ 以上的炉温，极大地促进了铸铁技术的发展。到了战国中期，由生铁铸造的工具已经取代了青铜，成为主要的生产工具。由于对生铁工具的大量需求，促使金属型铸造在战国时期就开始使用了，同时也促成了球墨铸铁在西汉晚期的出现。隋唐以后，铸造技术向大型及特大型铸件发展。河北沧县的五代时期铁狮长 5.3m、高约 5.4m、宽 3m、质量约 40t，如图 0-2 所示，是由数百块约 30cm 见方的铁块采用分节叠铸的方法拼铸而成的，其铸造技术充分显示了我国高超的铸铁工艺。湖北当阳的北宋铁塔由十三层叠成，质量约 8300kg，铁塔上铸有 2279 尊栩栩如生的佛像，其铸造工艺精湛，造型挺秀典雅，如图 0-3 所示。

失蜡法铸造在我国具有悠久的历史，许多精美的青铜艺术品都采用失蜡法铸造。北京故

宫内象征着江山万代永固及万寿无疆的铜狮、铜龟及铜麒麟等都是明清时期的代表作，如图 0-4 所示。现代的熔模精密铸造就从失蜡法发展而来。

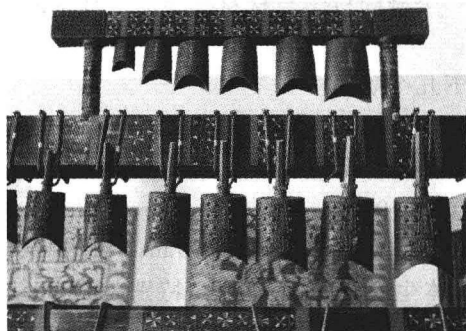


图 0-1 曾乙侯编钟（青铜铸造）



图 0-2 五代铁狮

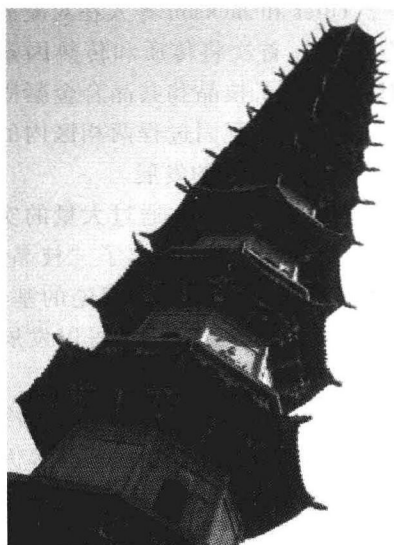


图 0-3 北宋铁塔

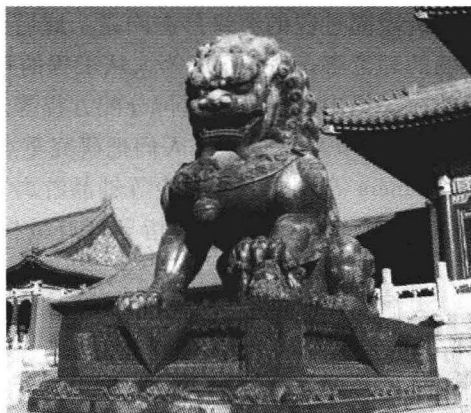


图 0-4 明代铸造的太和门铜狮

可以说，我国的铸造历史悠久，工艺水平精湛，对世界铸造技术的发展做出了举世公认的贡献。

4. 现代凝固理论及铸造技术的发展

随着现代科学技术的发展和不断提高的社会需求，铸造技术及其产业的水平和内涵有了迅速发展和外延。在国民经济诸多领域的基础设施和精良装备中，在国家大型工程、国防科技、航海、航空航天等高技术领域中，铸件成形技术及产品都发挥着不可替代的重要作用。日益增长的社会需求对铸件的性能要求越来越高，应用范围需求越来越广，合金类别要求越来越多，质量要求越来越轻，结构要求越来越复杂，环境保护及节约资源要求也越来越苛刻，这些都极大地促进了现代凝固理论及铸造技术的发展。

(1) 凝固理论及凝固技术的发展 凝固理论是金属铸造技术最重要的基础，其发展奠定了铸件成形的基本原理。凝固科学并非铸件成形所独有的基础理论，它与凝聚态物理、数

学、热力学、材料学、化学等基础科学及众多工程科学与技术体系相互交叉,并通过凝固基础理论的研究发展,同时又不断地从冶金、晶体生长、空间科学、化工、机械、电子、信息、计算科学等领域汲取营养,迄今已初步构筑成一个凝固科学与材料凝固加工技术的应用与研究体系,人们甚至将凝固科学称为大科学。

现代凝固理论和技术的迅速发展大体经历了以下几个阶段。

19 世纪后叶起是经典凝固理论的萌芽期。1878 年 Gibbs 发表的著名论文《论复相物质的平衡》为研究晶体生长的开端。

20 世纪初期和中叶是经典凝固理论的诞生时期。自 1926 年起,在 Volmer 和 Weber 等模型的基础上,形核理论得以发展和不断完善。20 世纪 20 年代 Kossel 和 Stranski 提出了完整晶体生长的微观理论;40 年代 Frank 发展了缺陷晶体生长的微观理论;特别是自 50 年代 Jackson 提出液固界面结构模型及判据之后,晶体生长理论不断得以完善。

20 世纪 50 年代自半导体的问世及 60 年代激光晶体的发展之后,围绕着传热、传质、液固成分分布和界面稳定性研究,在 Chalmers 的指导下,Tiller 和 Jackson 等人在对凝固界面附近溶质分布求解的基础上提出了著名的“成分过冷”理论,首次将传质和传热因素结合起来分析凝固过程的组织形态问题。此后,Jackson 和 Hunt 提出了枝晶和共晶合金凝固过程扩散场的理论解。Flemings 等人从工程的角度出发,进一步考虑了凝固过程两相区内的液相流动效应,提出了局部溶质再分配方程等理论模型,推动了凝固理论的发展。

20 世纪 60 年代以来,人们把研究重点放在经典凝固理论的应用上。通过大量的实验研究,Chalmers 等人提出“激冷等轴晶游离”理论,Jackson 及 Southi 等人提出了“枝晶熔断”及“结晶雨”理论,以此为指导可有效控制结晶过程和凝固组织。在这些理论的基础上,机械、超声及电磁等动力学方法,孕育处理、变质处理、半固态铸造等技术得以发展与完善,使人们在控制材料凝固组织形貌和细化晶粒方面更加得心应手。

20 世纪 60~80 年代,“扰动分析”(Perturbation Analyses)理论克服了“成分过冷”理论的不足,对界面稳定性认识有了进一步深化。在此其间及之后,Kurz 和 Trivedi 等人的理论及实验研究工作推动了枝晶形态及枝晶间距认识的发展,也为共晶凝固理论和基本规律的发展做出了新的贡献。

最近几十年来,凝固技术和理论研究进入新的发展历史时期。由于对高性能先进材料的需求和技术的进步,高精确控制定向、双梯度/高梯度定向、光悬浮定向等凝固新技术不断发展,对在极端条件下的凝固过程(快速凝固、极低速凝固)和特殊条件下的凝固过程(微重力凝固,超重力凝固,超高压凝固,电、磁、超声等物理场下的凝固)的研究不断深入,此外,对纤维增强及颗粒增强金属基复合材料的凝固等方面也进行了大量的研究。在这些凝固条件下,某些经典凝固理论和规律已不再适用,而原先忽略了的因素变成了主要影响因素。必须指出,在各种极端和特殊条件下的凝固技术及其新现象,对凝固理论及规律的认识又提出了许多新的任务,尚有待人们继续探索。

(2) 铸件成形技术及相关工艺的发展

1) 金属液质量控制技术与工艺的发展。熔炼是保证铸件成分及内部质量的关键,更是保证铸件性能的重要环节。随着冶金物理化学在铸件成形和合金熔炼过程中的应用与发展,涌现出一批新的熔炼与熔体质量控制技术,包括稀土复合孕育技术、VOD(真空吹氧精炼)、AOD(氩氧精炼)、VAOD(真空氩氧精炼)等除气及除杂质精炼技术、电渣熔铸、

炉前快速检测技术、液态金属过滤技术等,极大地提高了合金熔体的质量。此外,熔炼过程中的环保、节能技术也得到了发展,大大降低了铸造生产对环境的污染和碳的排放。例如:大型、高效、除尘、微机测控、外热送风无炉衬水冷连续作业冲天炉的使用,70t电弧炉的使用和各种高效电炉控制系统的开发等,既提高了熔炼效率,又减少了排放,降低了能耗,使得铸造生产向清洁化、低能耗化方向更进一步发展。

2) 造型材料及其技术的发展。随着对环保和铸件质量要求的不断提高,铸造用辅助材料已由单纯保证铸件成形向提高铸件尺寸精度、减少表面和内部缺陷、满足复杂结构、少污染与排放方向发展。随着铸造用有机粘结剂的不断开发,使得树脂粘结剂的种类和品质不断提高,相应的各种硬化方法的出现,使得树脂粘结剂逐渐替代传统的粘土、水玻璃等低效粘结剂,并得到广泛应用。传统的粘土粘结剂通过建立新的与高密度粘土型砂相适应的原辅材料体系,进一步提高了粘土砂型铸造的尺寸精度和表面质量;而对水玻璃粘结剂的改性研究,使水玻璃砂型的溃散性、抗湿性和硬化强度等均得到显著改善。通过建立与近无余量精确成形技术相适应的新的涂料系列,并开发出有机和无机系列非占位涂料及自硬转移涂料等,进一步提高了铸件的精确成形性,保证了高尺寸精度铸件生产的需要。随着旧砂再生性研究工作的不断深入和新技术的开发,使旧砂得到了最大可能的回用,降低了生产成本,减少了污染,节约了资源。

3) 铸件成形新技术及新型合金材料的发展。随着铸造装备和工艺方法的发展,传统的砂型铸造、压铸及熔模铸造等技术水平得到了大幅度提升,适用范围进一步扩大。低压、差压、调压、半固态加工、挤压铸造、电磁铸造、真空铸造、消失模铸造等新技术、新工艺、新装备得到不断完善和应用,一方面提高了铸件内部质量,大幅度提高了铸件的力学性能和致密性;另一方面,这些装备和工艺使一些结构复杂、薄壁及大型零件可以采用特种铸造方法进行生产,并使易氧化、难熔炼的镁合金、钛合金等材料可以稳定地进行工业化生产,成为装备轻量化的有效途径之一,既实现了近终成形,又避免了大量造型材料的排放,极大地促进了先进装备的发展。

随着镁合金、钛合金、锆合金、高温合金、块体金属玻璃以及各类声、能、光、电、磁、形状记忆等特殊功能材料的多种新型合金材料的快速发展,加之新型铸造成形技术的涌现,使得人们获得轻质、超韧、超强、耐高温、耐腐蚀以及具有各种特殊物理、化学等高性能的构件和装备成为可能,也推动了铸件成形产业的内涵和外延的迅速扩展。

4) 铸件成形数字化与智能化。计算机作为有效的信息处理和控制手段,在铸造中的应用取得了迅速发展。计算机数值模拟技术已从单一的对铸件凝固过程的数值模拟,发展到铸造工艺的计算机辅助设计、铸造缺陷和铸件组织形成过程的预测,以及与检测手段相结合的可视化铸造等。各种模拟研究工作的开展和大量高精度计算机软件的商品化,不但揭示了一些重要的凝固过程的物理本质,促进了凝固理论的发展,也进一步推动了计算机模拟技术在铸造生产中的应用,实现了铸造生产过程的可预测和可控性,在优化铸造工艺方案、控制铸件质量等方面正发挥着巨大的作用。此外,计算机在铸造装备控制、生产管理、专家系统建设等方面的应用大幅度提高了装备的自动化水平和生产管理效率,在保证铸件质量、科学化管理、降低生产成本和稳定化生产等方面发挥了重要作用。铸件成形的数字化与智能化,仍然是今后几十年的重要任务。

(3) 铸件成形在国民经济及高技术领域的作用 铸造作为一个最基础行业,其产品为