

普通高等教育“十三五”规划教材



特种铸造

主 编 陈维平 李元元

副主编 罗守靖 黄卫东 樊自田



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

特 种 铸 造

主 编 陈维平 李元元

副主编 罗守靖 黄卫东 樊自田

参 编 (按姓氏笔画)

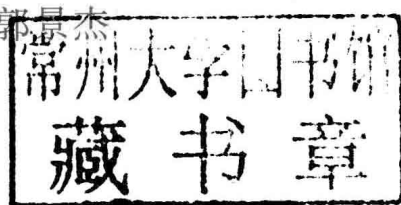
王 猛 叶久新 邢敏儒 李海树

杨湘杰 吴春苗 何 韶 黄 丹

蒋文明 赖锡鸿 谭建波

主 审

郭景杰



机械工业出版社

本书是高等学校材料成形及控制工程专业铸造方向的专业教材。本书按照“成熟、先进、实用”的原则选择介绍技术,较全面系统地介绍了各种特种铸造技术的基本原理、技术方法和工程应用,三者并重,并且突出了工程应用特色。其中重点介绍了金属型铸造、压力铸造、反重力铸造、熔模铸造、挤压铸造、消失模铸造、离心铸造、半固态铸造,简要介绍了陶瓷型铸造、石膏型铸造、连续铸造、铸渗技术、复合材料的金属浸渗技术、电磁铸造技术等特种铸造技术,同时还有艺术铸造欣赏的内容。本书在编排上采用模块式,各部分内容相对独立,使用者可以根据具体培养目标选择授课内容。

本书适用于材料成形及控制工程专业方向本科教学,也可供铸造、冶金及金属材料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

特种铸造/陈维平,李元元主编. —北京:机械工业出版社,2018.5
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-58960-0

I. ①特… II. ①陈… ②李… III. ①特种铸造-高等学校-教材
IV. ①TG249

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第009865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 章承林 丁昕祯

责任校对:杜雨霏 封面设计:张 静

责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·26.5印张·652千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58960-0

定价:63.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十三五”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在兰州召开的会议精神，组织全国具有代表性的高校和企业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课程的教学。

我国高等院校自 1952 年开始创办铸造专业，较早期的特种铸造教材有南京工学院（现东南大学）铸工教研组编写的《特种铸造》（1961）、宫克强主编的《特种铸造》（高等学校试用教材，1982）、王乐仪主编的《特种铸造工艺》[航空院校铸造专业教材（非指定），1984]、曾昭昭主编的《特种铸造》（1990）等。我国高校人才培养模式在 1998 年发生了重大转变，即由原来的按照专业（产业）培养模式，转变为重基础、宽口径的学科培养模式，国家高等教育专业目录也进行了调整，铸造专业并入材料成形及控制工程专业，专业课程大幅削减，很多高校取消了实践性很强的“特种铸造”专业课。然而，经过十多年的宽口径学科人才培养模式实践，人们又发现，原来学生的知识面过窄的状况虽然有所改善，但是又出现了所学专业知识浅而泛、不深入，不能很好地适应企业的专业生产实践需要等新问题。材料成形及控制工程专业的大学毕业生对企业已大量应用的特种铸造新技术缺乏了解，铸造专业技术人才奇缺的现象严重。尤其是我国铸造行业经过近三十年的快速发展，大量的特种铸造新技术已经在生产实际中获得广泛应用，而过去编写的《特种铸造》专业教材长期没有更新，需要进行大幅度的修订或重新编写，以汲取最新成果、适应工业发展的需要。

本次教材的编写，是铸造专业教材经历二十几年以后，又一次由全国性学术团体组织的规模较大的规划教材的集中编写。根据教材编委会对本次教材编写提出的指导性意见和要求，在全国铸造方向的代表性高校、研究院和企业中广泛征询意见、遴选专家，组成了《特种铸造》教材编写组。教材编写第一次工作会议于 2010 年 10 月 16 日（第 69 届世界铸造会议暨 2010 中国铸造活动周同期举行）在杭州市召开，讨论确定教材编写大纲（包括教材的定位、内容、特色）、编写风格、各章的编写人员和负责人等。第二次工作会议于 2010 年 11 月 21 日在华南理工大学召开，讨论确定特种铸造工艺案例的选取原则、案例编写规范、负责提供案例的单位等。第三次工作会议于 2011 年 7 月 16 日（第 13 届全国特种铸造及有色合金学术年会同期举行）在武汉市召开，编写组对全书进行第一次集中审稿、修改。第四次工作会议于 2011 年 11 月 14 日（第 11 届亚洲铸造会议暨 2011 中国铸造活动周同期举行）在广州市召开，编写组对全书进行第二次集中审稿、修改。

关于本书的编写定位和特色的几点说明。第一，关于编写定位。特种铸造是一门工程技术，既要掌握基本原理，又要了解工程应用。因此，本书较系统地介绍各种特种铸造技术的基本原理、技术方法和工程应用，三者并重。第二，关于内容的选取。本书以目前成熟、先进、实用的主流特种铸造技术作为主要内容，同时介绍前沿的特种铸造技术，以利于学生适应特种铸造技术开发工作。第三，突出工程应用特点。各章针对不同特种铸造工艺选取适合



的典型零件，完整地介绍了特种铸造工艺过程、工艺特点。同时，安排了“工艺适应性分析”一节，主要从成形性和经济性方面进行比较，以供学生走上工作岗位，有一个大致的工艺选择方向。第四，专门安排了一章介绍艺术铸造，这在以往的《特种铸造》教材中是很少见的，可以让工科专业的学生在比较枯燥的专业课学习中欣赏艺术，思考工程技术如何与艺术完美结合，提高学习兴趣。第五，在编排上采用模块式，各部分内容相对独立，使用者可以根据具体培养目标选择授课内容，适合不同类型高校的学生选用。

本书由华南理工大学陈维平、李元元任主编，哈尔滨工业大学罗守靖、西北工业大学黄卫东和华中科技大学樊自田任副主编。在陈维平、李元元的主持下，通过充分的调研与论证，由主编和副主编共同提出了本书的编写大纲（草案），并经过第一次编写工作会议讨论确定。编写分工：第1章由陈维平、李元元、河南理工大学黄丹编写，第2章由河北科技大学谭建波、广东肇庆动力技研有限公司何韶编写，第3章由华南理工大学吴春苗、李元元、中国第一汽车集团公司邢敏儒编写，第4章由黄卫东、西北工业大学王猛编写，第5章由湖南大学叶久新、东风精密铸造有限公司李海树编写，第6章由罗守靖编写，第7章由樊自田、华中科技大学蒋文明编写，第8章由黄丹、陈维平编写，第9章由南昌大学杨湘杰编写，第10章由黄丹、陈维平编写，第11章由广州美术学院赖锡鸿编写。全书由陈维平负责统稿，哈尔滨工业大学郭景杰担任主审。

在本书出版之际，我们衷心感谢对本书给予帮助和支持的所有同行和专家！这里要特别感谢广州有色金属研究院王顺成高工、广州钢铁企业集团技术中心李新国高工、中国兵器科学研究院宁波分院朱秀荣研究员、华南理工大学赵海东教授、广东肇庆动力技研有限公司李维明高工等，他们受邀参加了本书调研的有关会议和讨论。罗杰硕士参加了前期调研资料的整理工作，刘健博士协助了后期教材修改的汇总整理工作。

由于编者水平所限，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	
第 1 章 绪论	1
1.1 特种铸造方法	1
1.2 特种铸造的技术特点	2
1.3 特种铸造技术的应用与发展	3
1.4 本课程的性质与任务	6
思考题	6
参考文献	6
第 2 章 金属型铸造	7
2.1 金属型铸造原理	7
2.2 金属型铸件的成形特点	8
2.2.1 型腔内气体对铸件成形的影响	8
2.2.2 铸件凝固过程中热交换的特点	9
2.2.3 金属型阻碍收缩对铸件质量的影响	12
2.3 金属型铸造工艺参数	13
2.3.1 金属型铸造的工艺流程	13
2.3.2 金属型的预热	13
2.3.3 金属型的浇注	14
2.3.4 铸件的出型时间	14
2.3.5 金属型涂料	14
2.3.6 覆砂金属型铸造	15
2.4 金属型铸件的工艺方案	17
2.4.1 铸件结构的工艺性分析	17
2.4.2 铸件在金属型中的浇注位置	19
2.4.3 铸件分型面的选择	19
2.4.4 浇注系统的设计	20
2.4.5 冒口的设计	26
2.5 金属型设计与制作	27
2.5.1 金属型的结构型式	28
2.5.2 金属型主体设计	29
2.5.3 金属型型芯的设计	32
2.5.4 金属型排气系统的设计	37
2.5.5 顶出机构的设计	38
2.5.6 金属型的加热和冷却装置	40
2.5.7 金属型的定位、导向和锁紧装置	41
2.5.8 金属型材料的选择	41
2.6 金属型铸造缺陷与对策	43
2.6.1 缩孔与缩松	43
2.6.2 冷隔或浇不足	44
2.6.3 裂纹	44
2.6.4 气孔	45
2.6.5 夹渣	46
2.7 发动机缸盖金属型铸造应用实例	46
2.7.1 模具或铸型结构设计	46
2.7.2 铸造机及关键工艺参数的选择	47
2.7.3 铸造工艺流程	47
2.7.4 铸件热处理	48
思考题	50
参考文献	50
第 3 章 压力铸造	51
3.1 概述	51
3.1.1 压铸定义	51
3.1.2 压铸流程	51
3.1.3 压铸生产需具备的条件	52
3.1.4 压铸产品应用示例	53
3.1.5 压铸新技术	54
3.2 压铸机	60
3.2.1 压铸机的分类	60
3.2.2 压铸机的结构特点及应用	61
3.2.3 压铸机的总体结构	62
3.2.4 压铸机的选用	62
3.3 压铸合金	64
3.3.1 铝合金	64



3.3.2 锌合金	64	4.3.4 铸型涂料	113
3.3.3 镁合金	65	4.4 反重力铸造设备及自动化	115
3.4 压铸工艺	66	4.4.1 反重力铸造设备	115
3.4.1 压铸过程中压力与速度的变化	66	4.4.2 压力控制系统	118
3.4.2 压力	67	4.4.3 保温炉结构设计	120
3.4.3 速度	68	4.4.4 升液管结构设计	122
3.4.4 时间	69	4.4.5 电磁低压铸造	123
3.4.5 温度	71	4.5 反重力铸造的缺陷与对策	123
3.4.6 工艺案例	72	4.5.1 缩孔与缩松	123
3.5 压铸件结构设计	74	4.5.2 气孔	124
3.5.1 压铸件的结构要素	75	4.5.3 浇不足及铸件空壳	126
3.5.2 压铸件的尺寸要素	80	4.5.4 铸件披缝、鼓胀及跑火	126
3.5.3 简化模具结构的铸件设计	81	4.5.5 铸件变形及裂纹	127
3.5.4 功能组合设计	82	4.5.6 黏砂	127
3.5.5 压铸件尺寸精度和公差	83	4.6 反重力铸造应用实例	128
3.6 压铸件缺陷分析及对策	83	4.6.1 汽车轮毂铸件低压铸造实例	128
3.6.1 缺陷分类及影响因素	83	4.6.2 航空器舱体铸件调压铸造实例	130
3.6.2 缺陷检验方法	84	思考题	132
3.6.3 缺陷产生原因及防止方法	85	参考文献	132
3.7 压铸模	89	第5章 熔模铸造	133
3.7.1 压铸模基本结构	89	5.1 概论	133
3.7.2 压铸模设计要点	89	5.1.1 熔模铸造的定义	133
3.7.3 压铸模设计步骤	89	5.1.2 熔模铸造的发展历程	133
3.7.4 压铸模加工工艺流程	91	5.1.3 熔模铸造的工艺流程	133
3.7.5 压铸模设计与分解案例	92	5.1.4 熔模铸造应用实例	135
思考题	96	5.2 熔模的制备	137
参考文献	97	5.2.1 模料常用原材料	137
第4章 反重力铸造	98	5.2.2 常用模料的成分及性能	139
4.1 反重力铸造原理及分类	98	5.2.3 模料的配制与制模	142
4.1.1 真空吸铸	99	5.2.4 旧模料的处理及回收	144
4.1.2 低压铸造	101	5.3 型壳制备	146
4.1.3 差压铸造	102	5.3.1 对型壳的性能要求	146
4.1.4 调压铸造	104	5.3.2 型壳的原材料及其作用	146
4.2 反重力铸造工艺参数	106	5.3.3 制壳工艺	154
4.2.1 压力调控	106	5.3.4 熔模铸造型芯	162
4.2.2 浇注温度及铸型温度	109	5.4 熔模铸造工艺设计	172
4.3 反重力铸造工艺方案	110	5.4.1 熔模铸件结构工艺性分析	172
4.3.1 浇注位置及分型面	110	5.4.2 浇注补缩系统设计	173
4.3.2 浇注系统及冒口设计	111	5.4.3 压型设计	176
4.3.3 铸型排气设计	112	5.5 熔模铸造的浇注与清理	183



5.5.1 熔模铸造的浇注	183	思考题	239
5.5.2 熔模铸件的清理	186	参考文献	240
5.6 熔模铸造生产的机械化和 自动化	186	第7章 消失模铸造	241
5.6.1 熔模生产的机械化	186	7.1 消失模铸造概述	241
5.6.2 型壳生产的机械化	187	7.1.1 消失模铸造的分类及其技术 特点	241
5.6.3 焙烧、浇注生产线	191	7.1.2 消失模铸造的应用及经济性 分析	243
5.7 熔模铸造的缺陷及对策	191	7.1.3 消失模铸造的发展趋势	244
5.8 熔模铸造的工艺适应性分析	194	7.2 消失模铸造成形理论基础	246
5.8.1 以铸代锻技术的应用	195	7.2.1 消失模铸造充型时气体间隙 压力	246
5.8.2 以铸代铸(砂铸)技术的应用	195	7.2.2 消失模铸造的浇注温度	247
5.8.3 以铸代冲技术的应用	196	7.2.3 消失模铸造的合理浇注速度	247
5.8.4 以铸代焊技术的应用	196	7.2.4 消失模铸造中铸型坍塌缺陷的 形成机理	249
5.8.5 以铸代加工技术的应用	197	7.3 消失模铸造的充型特征及界面 作用	250
5.8.6 以铸代装配技术的应用	197	7.3.1 消失模铸造的充型过程及裂解 产物	250
思考题	198	7.3.2 热解产物对铸件质量的影响	252
参考文献	198	7.3.3 消失模铸造的充型及凝固特点	253
第6章 挤压铸造	199	7.3.4 消失模铸造的凝固及组织特点	254
6.1 挤压铸造的工艺方法分类、 特点及适应范围	199	7.3.5 消除消失模铸造组织不利因素的 措施	256
6.1.1 工艺方法分类	199	7.4 消失模铸造的关键技术	256
6.1.2 工艺特点	201	7.4.1 消失模铸造的白区技术	256
6.1.3 工艺适应范围	201	7.4.2 消失模铸造的涂料技术	258
6.2 挤压铸造基本理论简介	202	7.4.3 消失模铸造的黑区技术	259
6.2.1 挤压铸造流变学理论	202	7.4.4 振动紧实工艺基础	262
6.2.2 高压凝固理论	203	7.5 消失模铸造的工艺参数及其 铸件的缺陷防治措施	266
6.2.3 挤压铸造下的力学成形理论	206	7.5.1 消失模铸造的浇注系统特征及 工艺参数	266
6.3 挤压铸造模具、工艺及设备	209	7.5.2 消失模铸造的常见缺陷及防治 措施	267
6.3.1 挤压铸造模具设计	209	7.6 消失模铸造应用实例	273
6.3.2 挤压铸造设备	215	7.6.1 工艺设计过程	273
6.3.3 挤压铸造工艺参数	220	7.6.2 确定浇注位置	274
6.4 挤压铸造件组织性能与质量 控制	221	7.6.3 确定主要铸造工艺参数	274
6.4.1 挤压铸造件组织与性能	221		
6.4.2 挤压铸造的缺陷形成及对策	228		
6.5 挤压铸造生产实例	231		
6.5.1 汽车铝轮毂	231		
6.5.2 摩托车发动机镁合金外壳	234		
6.5.3 钢平法兰	237		



7.6.4 变速器箱体铸造过程数值模拟及 工艺优化	275
7.6.5 变速器箱体铸件浇注实践	276
7.7 铝、镁合金特种消失模铸造新 技术	277
7.7.1 铝、镁合金消失模铸造特点	277
7.7.2 压力消失模铸造技术	280
7.7.3 真空低压消失模铸造技术	280
7.7.4 振动消失模铸造技术	285
7.7.5 消失模壳型铸造技术	286
思考题	289
参考文献	289
第8章 离心铸造	291
8.1 概述	291
8.2 离心铸造原理	293
8.2.1 离心力场与离心压力	293
8.2.2 离心铸件内表面的形状	294
8.2.3 离心力场中异相质点的径向 移动	294
8.3 离心铸件的凝固及其组织	295
8.3.1 凝固特征	295
8.3.2 凝固组织	296
8.4 离心铸造工艺	298
8.4.1 铸型的转速	298
8.4.2 涂料工艺	301
8.4.3 浇注温度	304
8.4.4 金属液的定量	305
8.5 离心铸造机及生产自动化	306
8.5.1 水冷金属型离心机的特点	307
8.5.2 水冷金属型离心机的结构	307
8.6 离心铸造的工艺适应性分析	314
8.7 离心铸造应用实例	317
8.7.1 毛坯及模具结构的设计	317
8.7.2 离心铸造工艺及过程控制要点	318
8.7.3 涂料工艺及要求	318
8.7.4 铸造工艺流程及过程管理要点	319
8.7.5 缩松的产生与防止	319
思考题	320
参考文献	320
第9章 半固态铸造	322
9.1 半固态铸造的原理、分类、 特点及其特性	322
9.2 半固态铸造充型基本理论	326
9.2.1 非牛顿型流动基本理论	326
9.2.2 半固态金属浆料的流变行为	328
9.2.3 具有连续固相半固态浆料的 特性	331
9.2.4 固相体积分数为 0.5 左右的部分 重熔半固态金属	332
9.2.5 半固态铸造下塑性变形理论	332
9.3 半固态铸造用材料及其制备 方法	337
9.3.1 A356 和 A357 合金	337
9.3.2 A319 和 A355 合金	338
9.3.3 液相铸造比较困难的合金	338
9.3.4 半固态铸造用材料的制备方法	340
9.3.5 半固态金属坯料重熔（二次 加热）	347
9.4 半固态铸造工艺	349
9.4.1 半固态压铸	349
9.4.2 半固态压铸工艺参数	354
9.5 半固态成形件热处理工艺与 缺陷分析	357
9.5.1 热处理	357
9.5.2 缺陷分析	358
9.6 半固态铸造工艺实例	359
9.6.1 镁合金触变注射成形	359
9.6.2 半固态金属挤压铸造	362
思考题	363
参考文献	363
第10章 其他特种铸造技术介绍	366
10.1 陶瓷型铸造	366
10.1.1 陶瓷型铸造的工艺特点及应用 范围	366
10.1.2 陶瓷型的制造	366
10.2 石膏型铸造	368
10.2.1 石膏型铸造的工艺特点及应用 范围	368



10.2.2 石膏型的制造	369	11.2.1 制造过程及要求	392
10.2.3 石膏型铸造工艺	370	11.2.2 常用的铸造方法	392
10.3 连续铸造	370	11.3 艺术铸件材料选择及应用	398
10.3.1 连续铸造成形原理	370	11.3.1 艺术铸造合金材料	398
10.3.2 连续铸造工艺及应用	372	11.3.2 艺术铸造对合金材料性能的要求及选材原则	398
10.3.3 双流浇注连续铸造技术	372	11.3.3 几种应用最广的艺术铸造合金	399
10.4 铸渗技术	375	11.3.4 铜合金熔炼技术	401
10.4.1 铸渗基本原理	375	11.4 艺术铸造案例	402
10.4.2 铸渗工艺	376	11.4.1 案例一：石膏型铸造《日晷》	402
10.5 复合材料的金属浸渗技术	378	11.4.2 案例二：石膏砂型铸造《海景翔龙》	405
10.5.1 金属液在多孔介质中的浸渗	378	11.4.3 案例三：铸、锻、焊不锈钢雕塑《九天揽月》	406
10.5.2 压力浸渗技术	378	11.4.4 案例四：熔模铸造《论语笔筒》	407
10.6 电磁铸造技术	381	11.4.5 案例五：快速成形技术的应用	408
10.6.1 电磁铸造技术原理	381	思考题	411
10.6.2 电磁铸造工艺	382	参考文献	411
10.6.3 电磁铸造材料的组织与性能	384		
思考题	385		
参考文献	385		
第 11 章 艺术铸造	388		
11.1 艺术铸造欣赏	388		
11.2 艺术铸件铸造方法及应用	392		

第 1 章 绪 论

铸造通常是指用熔融的合金材料制作产品的方法，将液态合金注入预先制备好的铸型中使之冷却、凝固而获得毛坯或零件，这种制造过程称为铸造，其本质就是利用液态金属的流动性完成成形。铸造是人类掌握比较早的一种金属热加工工艺，已有约 6000 年的历史；铸造是比较经济的成形方法，对于形状复杂的零件更能显示出它的经济性；铸造也是现代机械制造工业的基础工艺之一。铸造的零件尺寸和质量的适应范围很宽，金属种类几乎不受限制；零件在具有一般力学性能的同时，还具有耐磨、耐蚀、吸振等综合性能，是其他金属成形方法（如锻、轧、焊、冲等）所做不到的。因此，在机器制造业中用铸造方法生产的毛坯零件，在数量和吨位上迄今仍是最多的。

铸造技术是制造业的重要组成部分，也是先进制造技术的重要内容。它对国民经济的发展及国防力量的增强均有重要作用，轻量化、精确化、高效化将成为成形制造技术的重要发展方向。铸造技术将向更轻、更薄、更精、更强、更韧及质量高、成本低、流程短的方向发展。

1.1 特种铸造方法

在各种铸造方法中，用得最普遍的是砂型铸造，这是因为砂型铸造时不仅铸件生产批量的大小，而且铸件的形状、尺寸、质量及合金种类等几乎不受限制。然而，随着科学技术的发展，对铸造提出了更高的要求，要求生产出更加精确、性能更好、成本更低的铸件。归纳起来，具体要求主要有如下三个方面：

- 1) 要求大量生产同类型、高质量而且稳定的铸件，进一步减小铸件的表面粗糙度值、提高尺寸精度以及内在质量和力学性能。
- 2) 进一步简化生产工艺过程，缩短生产周期，便于实现生产工艺过程机械化、自动化，提高劳动生产率，改善劳动条件。
- 3) 减少生产原材料的消耗，降低生产成本。

为了适应上述的要求，近几十年来，铸造工作者在继承、发展古代铸造技术和应用近代科学技术成就的基础上，发明了许多新的铸造方法，这些方法统称为特种铸造（Special Casting Process）方法。

特种铸造不是一个严格的定义，它是指与砂型铸造不同的其他铸造方法，如熔模铸造、陶瓷型铸造、金属型铸造、低压铸造、差压铸造、压力铸造、挤压铸造、离心铸造、连续铸造、真空铸造、消失模铸造、半固态铸造等。它们之中还可再分为若干种铸造方法。特种铸造方法已得到日益广泛的应用，其中一些方法属于近净成形的先进工艺，近年来发展的速度极快。



同时，随着科学技术的发展，新的特种铸造方法还在不断产生。如 20 世纪末出现的快速铸造，它是快速成形技术和铸造技术结合的产物。而快速成形技术则是计算机技术、CAD、CAE、高能束技术、微滴技术和材料科学等多领域高新技术的集成。快速铸造使铸件能够被快速生产出来，满足科研生产的需要。今后，新的特种铸造方法仍将随着技术的发展而不断涌现出来。

1.2 特种铸造的技术特点

特种铸造一般能至少实现以下一种性能：①提高铸件的尺寸精度和表面质量；②提高铸件的物理及力学性能；③提高金属的利用率（工艺出品率）；④减少原砂消耗量；⑤适宜高熔点、低流动性、易氧化合金铸造；⑥改善劳动条件，便于实现机械化和自动化。

砂型铸造与金属型铸造、低压铸造、熔模铸造等特种铸造方法的公差等级见表 1-1。

表 1-1 砂型铸造与金属型铸造、低压铸造、熔模铸造等特种铸造方法的公差等级（GB/T 6414—1999）

铸造方法	公差等级
手工砂型铸造	CT11 ~ CT13
机器砂型铸造	CT8 ~ CT10
金属型铸造	CT6 ~ CT9
低压铸造	CT6 ~ CT9
熔模铸造	CT5 ~ CT7

这些特种铸造方法与砂型铸造间的本质差别可归纳如下：

（1）铸型的材料和造型工艺与砂型铸造有本质的不同 如金属型铸造、压力铸造、连续铸造用的结晶器的材料都是不同于砂型的材料。而熔模铸造的型壳中虽然有颗粒状的耐火材料，但不是砂型所用的一般天然硅砂，而是经特殊处理和加工后的颗粒耐火材料，并且其制型方法和制型原理与砂型也截然不同。

铸型条件的不同，使铸件的成形条件也发生了质的变化，因而便派生出许多特种铸造方法所制铸件的多种特点。如熔模铸件、金属型铸件、压铸件，表现出比砂型铸件更高的尺寸精度和更小的表面粗糙度值。

（2）金属液充型和凝固冷却条件与砂型铸造有本质的不同 如熔模壳型的高温型壳浇注、压力铸造时金属液在铸型合型过程中的挤压充型等，这些特殊的金属液充型情况都对金属液的随后成形过程和铸件形状的特征产生显著影响。如离心铸造特别适于筒、套、管类铸件的成形；压力铸造和挤压铸造特别适于薄壁铸件的生产；连续铸造的铸件一般都是断面不变、长度很大，等等。

金属制铸型中金属液凝固速度比砂型中更快的特点，离心铸件在离心力场作用下的凝固特点，压力铸造、低压铸造、差压铸造时金属在压力作用下的凝固特点等，都可使铸件内部组织的致密度和相应的力学性能得到很大的提高。

以上两个方面的基本特点是从特种铸造整体来看的，至于某一具体方法，有的则只具有某一方面的特点，例如金属型铸造及陶瓷型铸造，它们只是制型材料或制型工艺的改变，而液体金属的充填及冷凝过程仍然是在重力作用下完成的。但是，有的方法则两个方面的特点

都具备，如压力铸造及采用金属型或熔模型壳的低压铸造或离心铸造。

综上所述，给了人们这样一个重要的启示，即从铸造工艺角度来看，铸件尺寸精度及表面粗糙度主要取决于铸型的质量。因此，为了提高铸件的外部质量，应从改进铸型材料或制型工艺入手；而为了提高铸件的内部质量，则主要依靠改善液体金属充填及随后冷凝的条件。当然，改善液体金属的充填条件，提高液体金属的充型能力，也利于改善铸件的表面粗糙度及尺寸精度。事实证明，许多新的铸造方法的出现，都是由此而产生的。

各种特种铸造方法的工艺过程特点和适用范围见表 1-2。

表 1-2 各种特种铸造方法的工艺过程特点和适用范围

铸造方法 比较项目	砂型铸造	熔模铸造	金属型铸造	低压铸造	压力铸造	离心铸造
适用合金的范围	不限制	以碳钢和合金钢为主	以有色金属为主	以有色金属为主	用于有色金属	多用于钢、铁、铜合金
适用铸件的大小及质量范围	不限制	一般<25kg	中小件,铸钢可达数吨	中小件最大可达数百千克	一般中小型铸件	中小件
适用铸件的最小壁厚范围/mm	灰铸件 3, 铸钢件 5, 有色金属 3	通常 0.7, 孔 $\phi 1.5 \sim \phi 2.0$	铝合金 2~3, 铸铁>4, 铸钢>5	通常壁厚 2~5, 最小壁厚 0.7	铜合金<2, 其他 0.5~1, 孔 $\phi 0.7$	最小内孔为 $\phi 7$
表面粗糙度 $Ra/\mu m$	粗糙	6.3~1.6	12.5~1.6	3.2~0.8	—	—
尺寸公差等级	CT11~CT13	CT4	CT6	CT6	CT4	—
金属利用率(%)	70	90	— 70	80	95	70~90
铸件内部质量	结晶粗	结晶粗	结晶细	结晶细	结晶细	结晶细
生产率 (适当机械化、自动化)	可达 240 箱/h	中等	中等	中等	高	高
应用举例	各类铸件	刀具、机械叶片、测量仪表、电器设备等	发动机、汽车、飞机、拖拉机、电器零件等	发动机、电器零件、叶轮、壳体、箱体等	汽车、电器仪表、照相器材、国防工业零件	各种套、环、筒、辊、叶轮等

1.3 特种铸造技术的应用与发展

在特种铸造方法中，历史最悠久的是金属型铸造和熔模铸造。早在 2000 多年前，我国劳动人民就已经掌握了这些技术，远比欧洲各国要早。1953 年在河北省兴隆县寿王坟出土了 87 件铁范（金属型），据研究推测是战国时代燕国的产物。其中有锄范、双镰范、镢范、斧范等。这些铁范构造比较复杂，制作很精巧，工艺也较合理。可见我国金属型铸造技术早已有了很好的成就。1968 年在河北满城发掘了西汉时期中山靖王刘胜（死于公元前 113 年）的墓葬，其中有些青铜器如错金铜博山炉，经有关部门鉴定为失蜡铸造法制成，上面铸有山水、人物及各种野兽动物的形象，极为精致；在明代宋应星著的《天工开物》中还介绍了用失蜡铸造法制作当时宫廷中使用的“北极朝钟”的生产过程，足见当时我国失蜡铸造的技术水平已相当成熟。

现代特种铸造技术在世界各国工业生产中得到实际的应用，是在近百年左右甚至是近三四十年才实现的。如熔模铸造是在第二次世界大战期间，当时由于航空喷气发动机的发展，

要求制造像涡轮叶片、叶轮、喷嘴等形状复杂、尺寸精确以及表面光洁的耐热合金零件，加上耐热合金难以加工，难以用其他方法制造，于是，借鉴牙科医生中流传下来的失蜡铸造法制造，并经过对其他材料和工艺的改进，才使现代熔模铸造方法在科学的基础上获得重要的发展。如今出现的定向凝固熔模铸造新技术，可以直接生产高温合金单晶体燃气轮机叶片，是精确铸造成形技术在航空航天工业中应用的杰出范例。

自从 J. J. Sturgiss 于 1849 年制成第一台简易手动活塞式热压室压铸机问世至今，压力铸造已有 130 多年的历史，开始只是用于生产低熔点的铅锡合金（铅字），真正用于工业生产是在 21 世纪初。近 30 年来，随着科学技术和工业生产的进步，压铸生产才获得极其迅速的发展。截至 2006 年，据不完全统计：全世界有 27 条铝缸体压铸生产线，用合型力为 25000kN 的压铸机生产 V4~V6 铝缸体（排量 1.3~2.0L），约 3min 就可生产一个。

金属型铸造虽较早用于生产，但广泛用于浇注铝、镁合金铸件，是在第一次世界大战以后。目前公认的铸造有色合金包括铝、镁、钛、锌和铜等的合金，占各类铸件总量的 20% 左右。由于减重降耗的要求，其应用具有明显的增长趋势，例如在汽车产业中，需要将铝合金铸件从现有的 10%（占铸件总质量）提高到 30% 左右，而在航空工业中，铝铸件更是占到铸件总量的 80% 以上。

消失模铸造技术具有高精度、短流程、洁净化等一系列的优点，因此许多国家预测消失模铸造将成为“明天的铸造新技术”，其工艺原理是先用成形机获得零件形状的泡沫塑料模型，接着涂抹耐火涂料及干燥，然后放在砂箱中填砂并直接浇注液体金属。消失模铸造技术是一种近无余量、精确成形的新工艺，无需取模、无分型面、无砂芯，因而铸件尺寸精度高、设计灵活。我国的消失模铸造技术自 2005 年后获得了较大进步和快速发展，目前已是世界产量第一的消失模铸件生产国。

半固态铸造是一种生产结构复杂、净终成形、高品质铸件的半固态加工技术。其固液混合熔体在压力下充型、凝固，从而使零件具有良好的表面和内部质量，以及细小的球状晶粒组织，大大改善了产品的力学性能。半固态铸造技术最早在 20 世纪 70 年代由美国麻省理工学院开发，并在 20 世纪 90 年代中期因汽车的轻量化得到了快速发展。

离心铸造的第一个专利，是在 1809 年由英国人 Erhardt 申请的，但直到 20 世纪初才在生产中逐步被采用，首先用于离心铸管。对其他特种铸造方法，如低压铸造、陶瓷型铸造、石膏型铸造、真空吸铸、挤压铸造等方法，虽然提出专利时间有早有晚，但真正发展起来并在生产中得到实际的应用，是从 20 世纪 50 年代到 60 年代这一段时期。

随着全球化及市场的激烈竞争，加快产品开发速度已成为竞争的重要手段之一。制造业要满足日益变化的用户需求，制造技术必须有较强的灵活性，能够以小批量甚至单件生产迎合市场。快速原型制造技术就是在这样的社会背景下产生的。近年来，快速原型制造已发展为快速模具制造及快速制造。利用快速原型制造原理，可以直接制造出砂型或砂芯，并立即生产出铸件。它能大大缩短产品的设计开发周期，解决单件或小批铸件的制造问题，受到了日益广泛的关注。

特种铸造技术之所以发展如此迅速，主要是自第二次世界大战以后，世界各国，特别是发达国家的工业生产发展很快，尤其是航空、航天、汽车及其他机械工业的发展，都对铸造生产提出了更高的要求，加之其他学科技术出现了一些新成就，也促进了铸造方法的发展。还应指出，现代熔模铸造的发展与化学工业提供质量优良的黏结剂和新模料是分不开的。



同时也应看到,每一种特种铸造方法都有其本身的特点,也存在着一些缺点,其应用场合有一定的局限性。例如:从铸件的结构特点(轮廓尺寸、壁厚及形状复杂程度等)来看,大多数特种铸造方法适宜生产质量不大的中、小型铸件。金属型铸造不宜用于生产形状复杂的薄壁铸件,而压力铸造则适宜;离心铸造原则上只适宜生产空心旋转体铸件(如管子、套筒等)。从铸件的合金种类来看,金属型铸造、压力铸造等,最适宜有色合金铸件;熔模铸造及陶瓷型铸造最适宜于生产各种钢铸件。从铸件的生产批量来看,除陶瓷型铸造外,由于特种铸造方法生产准备周期长,工艺装备成本高,或者是需要采用专用的机械设备,所以通常用于大批量生产。

到目前为止,铸造技术一直是机械工业金属加工行业中的关键基础技术,发挥着重要作用。为了适应当前对铸造质量、铸造精度、铸造成本、铸造自动化以及铸造环境等日益严格的要求,继续发挥铸造技术优于其他加工工艺方法的特长,未来的先进铸造技术仍将面临挑战与机遇并存的局面,其发展趋势可作如下预测:

1. 更好的铸件尺寸精度和表面粗糙度控制

现代制造的许多领域,对铸件尺寸精度和外观质量的要求越来越高,铸件的近净成形化(Near Net Shape Process)技术改变着铸造只能提供毛坯的传统观念,其目的在于降低物耗、能耗、工耗,并且改善产品的内外质量,争取市场的高效益。

铸件是液态成形的,实现近净成形具有独特的优越性,在结构方面铸件的内腔和外形用铸造方法一次成形,使其接近零件的最终形状,使加工和组装工序减至最少;在尺寸精度和表面质量方面,使铸件能接近产品的最终要求,做到无余量或小余量;另外,被保留的铸造原始表面利于保持铸件的耐蚀和耐疲劳等优越性能,从而提高产品寿命。努力提高铸件的尺寸精度和减小表面粗糙度值,推进近净成形技术的发展是铸造技术未来的方向。

2. 更强的铸造缺陷防止与控制

铸造缺陷是造成废品的主要原因,是对铸件质量的严重威胁,如液态金属的凝固收缩会形成缩孔、缩松;凝固期间元素在固相和液相中的再分配会造成偏析;冷却过程中热应力的集中会造成铸件裂纹和变形。应根据缺陷产生的原因和出现的程度不同,采取相应措施加以控制,使之消除或降至最低程度。此外,如夹杂物、气孔、冷隔等缺陷的产生,不仅与合金种类有关,而且还与具体成形工艺有关。总之,防止、消除和控制各类缺陷是一个不容忽视的关键问题。

3. 以“节能减排”为途径的环境友好型铸造技术

铸造是典型的高能耗行业之一,同时固体废弃物的排放量巨大。提高铸造生产环节的能源利用率和降低各种废弃物的排放,涉及铸件设计、熔炼及热处理设备效率、质量控制等多个环节,不仅能够起到保护环境的作用,同时对于铸造生产效率和成本控制也将起到重要的作用。

4. 信息技术的广泛应用

由计算机、网络技术、传感技术、人工智能等所构成的信息技术近年来在铸造生产中得到了更为广泛的应用,这正在改变着铸造生产的面貌。可以说,现代铸造技术的主要特征就是将传统的铸造工艺与信息技术融于一体。