

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

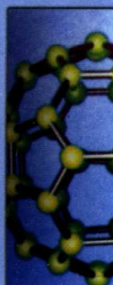


中国材料工程大典编委会

第**19**卷

材料铸造
成型工程 (下)

柳百成 黄天佑 主编



化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料 工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会



中国材料工程大典编委会

第19卷

材料铸造成形工程(下)

柳百成 黄天佑 主编

(京) 新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写, 全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果, 集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容, 涵盖了材料工程的各个领域, 将最新的实用数据 (特别是与国际接轨的标准数据)、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来, 并附应用实例, 充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材, 合理用材, 应用先进的材料成形加工技术, 提高产品质量和性能, 降低产品成本, 增强产品市场竞争力的需要, 而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新, 促进制造业的发展, 提高我国制造业的竞争能力, 具有重要的现实意义。

本书为第 19 卷, 材料铸造成形工程 (下)。主要内容包括: 特种铸造、铸造成形 CAD/CAE、铸造生产质量检测及控制等。

本书主要供具有大专以上学历水平, 从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料铸造成形工程各类技术问题时使用, 起备查、提示和启发的作用, 也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国材料工程大典. 第 19 卷, 材料铸造成形工程. 下/柳百成, 黄天佑主编. —北京: 化学工业出版社, 2005.8
ISBN 7-5025-7321-6

I. 中… II. ①柳…②黄… III. ①材料科学 ②铸造—工艺 IV. ①TB3 ②TG24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 094424 号

中国材料工程大典 第 19 卷 材料铸造成形工程 (下)

中国机械工程学会

中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

柳百成 黄天佑 主编

责任编辑: 周国庆 陈志良 李骏带

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码: 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京蓝海印刷有限公司印装

开本 880mm × 1230mm 1/16 印张 43 $\frac{3}{4}$ 字数 2037 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7321-6

定价: 135.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入 21 世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的 1/3 以上，约占全国工业生产的 4/5，为国家财政提供 1/3 以上的收入，占出口总额的 90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过 5 年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共 26 卷约 7000 万字的巨著，是 39 位两院院士和 1200 余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了 10 多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005 年 9 月 23 日

前言

《材料铸造成形工程》卷是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

铸造行业是制造业的主要组成部分,对国民经济的发展有重要作用。铸造是汽车、电力、钢铁、石化、造船、装备制造等支柱产业的基础制造技术,新一代铸造技术也是当代材料工程和先进制造技术的重要内容。中国已是世界铸件生产的第一大国,2004年铸件产量已超过2200万吨。进入21世纪,中国铸造业迎来了持续发展的大好局面,但同时也面临对铸件生产的技术水平、质量、能源消耗、环境污染等方面的严峻挑战。中国的铸造业只有向世界先进水平看齐,提高整体技术和管理水平,才能在世界市场激烈的竞争中保持和发扬优势,变“铸造大国”为“铸造强国”,这也是我国广大铸造工作者所面临的紧迫和艰巨的任务。《中国材料工程大典》中的《材料铸造成形工程》卷的编写和出版,正是适应了这种形势发展的需要。

《材料铸造成形工程》卷(上、下卷)是我国至今为止篇幅最大、涵盖内容最新最全的铸造专业技术工具书。内容包括概论、铸造合金及其熔炼、铸造成形工艺技术基础、砂型铸造、特种铸造、铸造成形CAD/CAE、铸造生产质量检测及控制等7篇共49章,字数共约400多万字。参加本卷编写的有全国著名铸造企业、研究所及大学等各方面的专家教授共40余名,最后由柳百成和黄天佑进行统稿。参加编写的主要单位有清华大学、沈阳铸造研究所、北京航空材料研究院、东风汽车公司铸造二厂、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、东北大学、西安工程科技学院、河北工业大学等,历时3年多完稿。

各篇的主编如下:

第1篇 概论	柳百成
第2篇 铸造合金及其熔炼	邢建东
第3篇 铸造成形工艺技术基础	郭景杰
第4篇 砂型铸造	黄天佑
第5篇 特种铸造	姜不居
第6篇 铸造成形CAD/CAE	熊守美
第7篇 铸造生产质量检测及控制	黄天佑

本书的编写强调以“全而精、新而准、实用便查”为特点,在整体设计上,既立足全局,又突出重点。从材料铸造成形工程的科学基础、成形工艺与设备、生产质量管理与检测、铸造新技术应用等方面,作全方位论述。在取材上,以“基础、通用、先进、实用”为原则。本书全面系统地反映了我国铸造技术的发展及取得的成就和经验,并介绍了国内外的先进铸造技术,具有“科学性、先进性和实用性”。本书主要供从事制造业和材料工程的科技人员在工作中查阅使用,也可以供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

衷心感谢有关单位和个人对本卷编写工作的指导与大力支持,是他们的积极参与和共同协作,才使编写工作得以顺利完成。由于编写时间紧迫和编者水平所限,书中的不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

柳百成 黄天佑

2005年10月12日

目 录

第5篇 特种铸造	1	4 定向凝固铸造工艺	80
第1章 概述	3	4.1 定向凝固柱晶铸造工艺	80
1 特种铸造方法	3	4.2 定向凝固单晶铸造工艺	83
2 特种铸造发展概况	3	4.3 定向凝固共晶铸造工艺	84
3 特种铸造方法基本特点	4	5 计算机技术的应用	84
第2章 熔模铸造	7	5.1 定向凝固过程的测试与控制	84
1 概述	7	5.2 定向凝固过程数值模拟	84
1.1 工艺过程	7	6 定向凝固铸造的发展前景	84
1.2 工艺特点	7	第4章 石膏型铸造	85
1.3 应用范围	8	1 概述	85
2 铸件工艺设计	11	1.1 工艺过程	85
2.1 铸件结构	11	1.2 工艺特点	85
2.2 基准面选择	17	1.3 应用范围	85
2.3 浇注系统设计	18	2 铸件工艺设计	87
2.4 冒口计算	20	2.1 浇注位置和分型面选择	87
3 压型设计与制造	23	2.2 铸件尺寸公差和表面粗糙度	87
3.1 压型分类	23	2.3 加工余量	87
3.2 机械加工压型	23	2.4 收缩率	87
3.3 易熔合金压型	29	2.5 铸造斜度	87
3.4 石膏压型	29	2.6 浇注系统及冒口设计	88
3.5 硅橡胶压型	29	2.7 冷铁的应用	88
4 易熔模制造	31	3 模样选择与制造	88
4.1 模料	31	3.1 熔模石膏型用模样及制造	88
4.2 制模设备	34	3.2 起模石膏型用母模选择	90
4.3 制模工艺	34	4 石膏型制造	90
4.4 水溶芯制作	34	4.1 石膏型用原材料	90
4.5 浇口棒的制作	34	4.2 石膏浆料	93
4.6 组合模组和清洗模组	34	4.3 灌浆	95
4.7 模料回收和再生	37	4.4 石膏型的蒸汽处理、干燥和脱蜡	95
5 型壳制造	37	4.5 焙烧	96
5.1 制壳用耐火材料	37	5 浇注	96
5.2 硅溶胶及其型壳	40	6 修整	98
5.3 硅酸乙酯及其型壳	46	7 石膏型铸件常见缺陷及防止方法	98
5.4 水玻璃及其型壳	49	第5章 陶瓷型铸造	100
5.5 型芯	51	1 概述	100
6 合金浇注	56	1.1 工艺过程	100
6.1 常用浇注方法	56	1.2 工艺特点	100
6.2 过滤净化技术	59	1.3 应用范围	101
7 清理及精整	61	2 铸件工艺设计	102
7.1 清理	61	2.1 铸造工艺方案的确定	102
7.2 铸件的修补	65	2.2 铸造工艺参数选择	102
7.3 铸件精整	68	2.3 母模	102
8 常见缺陷及其防止	72	2.4 浇注系统和冒口设计	102
第3章 定向凝固铸造	76	3 陶瓷型制造	103
1 概述	76	3.1 陶瓷浆料用原材料	103
2 定向凝固铸造原理	76	3.2 制型工艺	107
2.1 金属凝固热流	76	4 陶瓷型铸件常见缺陷及防止方法	109
2.2 定向凝固实现条件与结晶组织	77	第6章 消失模铸造	111
3 定向凝固铸造的主要方法和设备	78	1 概述	111
3.1 发热铸型法	78	1.1 消失模铸造的分类	111
3.2 功率降低 (PD) 法	78	1.2 工艺特点	111
3.3 高速凝固 (HRS) 法	79	1.3 应用范围	112
3.4 液态金属冷却 (LMC) 法	79	2 模样材料及其制造	112
		2.1 概述	112

2.2 模样材料	113	1 概述	180
2.3 预发泡	113	1.1 压力铸造成形原理与工艺流程	180
2.4 成形发泡	114	1.2 压铸特点	180
2.5 模样分片与黏结	117	1.3 应用范围	181
3 涂料	117	2 压铸件结构设计	181
3.1 涂料的作用与要求	117	2.1 压铸件设计的基本要求	181
3.2 涂料性能及检测	118	2.2 压铸件的结构要素	183
3.3 涂料的组成、制备与使用	118	2.3 压铸件尺寸精度	191
4 造型、填砂和紧实	119	3 压铸合金	194
4.1 砂箱与型砂	119	3.1 概述	194
4.2 填砂与振动紧实	120	3.2 各类压铸合金	195
4.3 真空系统	120	4 压铸机	200
4.4 旧砂的冷却与再生回用	121	4.1 压铸机的分类	200
5 浇注和冷却凝固	121	4.2 各类压铸机	200
5.1 金属液的充填	121	5 压铸型设计	202
5.2 模样的热解特性	121	5.1 压铸型设计的依据与要求	202
5.3 浇注系统和浇注工艺	121	5.2 压铸型的分类与结构组成	202
5.4 消失模铸造的凝固特性	123	5.3 压铸机的选择	202
6 消失模铸造缺陷与对策	123	5.4 分型面的确定	203
7 发泡模具设计与制造	124	5.5 浇注系统的设计	204
7.1 工艺参数的确定	124	5.6 成形零件的设计	212
7.2 发泡模具设计	125	5.7 抽芯机构的设计	217
7.3 发泡模具制造	127	5.8 推出机构的设计	222
8 清洁化生产	129	5.9 复位机构	224
8.1 废气状况	129	5.10 压铸型的冷却系统	225
8.2 废气处理方法	129	5.11 压铸型的技术要求	226
第7章 金属型铸造	130	6 压铸工艺	227
1 概述	130	6.1 压力	227
1.1 铸造原理	130	6.2 速度	228
1.2 工艺过程	130	6.3 温度	229
1.3 工艺特点	130	6.4 时间	230
1.4 应用范围	130	6.5 压铸涂料	230
2 铸件工艺设计	131	7 特种压铸工艺	232
2.1 基准面的选择	131	7.1 真空压铸	232
2.2 铸件在金属型中的位置	131	7.2 定向、抽气、加氧压铸	232
2.3 分型面的选择	132	7.3 精、速、密压铸	232
2.4 铸件工艺性设计	132	8 压铸生产	233
2.5 浇注系统	133	8.1 压铸型加热	233
2.6 冒口设计	139	8.2 合金液的输送及浇注工具	233
3 金属型设计	142	8.3 浇注	234
3.1 金属型结构形式	142	8.4 自动取件与喷涂	235
3.2 金属型结构设计	143	8.5 压铸件后处理	236
3.3 金属型操纵机构设计	150	8.6 压铸件主要缺陷特征、产生原因及控制	236
3.4 金属型加热和冷却	159	第9章 低压铸造	241
3.5 金属型用材料及其选用	161	1 概述	241
3.6 金属型的尺寸精度及表面粗糙度	163	1.1 铸造原理及工艺过程	241
3.7 金属型寿命	163	1.2 工艺特点	241
4 铸造工艺	166	1.3 应用范围	242
4.1 金属型的准备	166	2 铸型工艺	244
4.2 金属型的浇注工艺	168	2.1 铸型种类选择	244
4.3 金属型的试铸	169	2.2 浇冒口系统设计	244
4.4 典型铸件铸造工艺举例	170	3 低压铸造设备	247
5 金属型铸造机	172	3.1 保温炉及密封坩埚系统	247
5.1 类型	172	3.2 铸型开合机构	248
5.2 通用金属型铸造机	173	3.3 液面加压控制系统	248
5.3 铸造机的选定	176	3.4 计算机控制低压铸造设备	249
5.4 铸造生产流水线	176	4 低压铸造工艺	250
6 铸件常见缺陷及防止方法	178	4.1 升液管和保温坩埚的准备	250
第8章 压力铸造	180	4.2 铸型的准备	251

4.3 低压浇注	251	4.3 双层铸型	291
4.4 低压铸造实例	252	4.4 端盖及紧固	292
5 特种低压铸造工艺	254	4.5 铸型损坏分析	293
5.1 差压铸造	254	4.6 铸型材质选择	295
5.2 真空吸铸	257	5 离心铸造机	297
6 常见缺陷及其防止	262	5.1 离心铸造机构造	297
6.1 低压铸造常见缺陷及其防止	262	5.2 主要零件设计	299
6.2 结晶器真空吸铸常见缺陷及防止方法	262	5.3 离心铸造机附属装置	301
第 10 章 挤压铸造	265	5.4 专用离心铸造机	302
1 概述	265	6 离心铸造双金属铸件	303
1.1 工艺原理	265	6.1 离心铸造铸铁冶金复合轧辊	303
1.2 工艺特点	265	6.2 离心铸造空心铸铁复合轧辊	306
1.3 应用范围	266	6.3 离心铸造钢背铜合金轴瓦	307
2 挤压铸造设备	266	6.4 离心铸造钢背锡合金轴瓦	309
2.1 挤压铸造对设备性能的要求	266	6.5 离心铸造钢和铸铁复合缸套	310
2.2 挤压铸造机	266	7 离心铸件典型缺陷分析	310
3 铸型设计	268	7.1 锡青铜铸件缺陷分析	310
3.1 铸型设计基本要求	268	7.2 铸铁缸套缺陷分析	310
3.2 铸型设计工艺参数	268	7.3 铸铁管缺陷分析	311
3.3 铸件工艺分析	268	7.4 钢管缺陷分析	312
3.4 铸型分型面和挤压位置的选择	269	第 12 章 连续铸造	314
3.5 排气和溢流槽的设计	269	1 概述	314
3.6 模具材料	270	1.1 连续铸造的主要工艺方法	314
3.7 铸型加工和装配技术要求	270	1.2 连续铸造产品的特点及应用	315
4 铸造工艺	271	2 连续铸造铸铁管	315
4.1 铸型涂料	271	2.1 连续铸管的主要工艺及设备	315
4.2 铸型温度	272	2.2 主要工艺参数及其控制	326
4.3 浇注温度	272	2.3 铸铁管主要缺陷及防止方法	329
4.4 压力	272	3 水平连续铸造铸铁型材	332
4.5 加压开始时间	273	3.1 铸铁型材概述	332
4.6 加压和充型速度	273	3.2 主要工艺设备	335
4.7 保压时间	273	3.3 主要工艺参数及质量控制	335
4.8 典型铸件工艺	273	第 13 章 半固态金属铸造	339
5 常见缺陷及防止方法	275	1 概述	339
第 11 章 离心铸造	277	1.1 半固态金属铸造的诞生	339
1 概述	277	1.2 半固态金属铸造的基本工艺过程	339
1.1 工艺过程	277	1.3 半固态金属铸造的优势	339
1.2 特点	277	1.4 半固态金属铸造的应用	340
1.3 离心铸造分类	277	2 半固态金属浆料或坯料的制备工艺	341
1.4 应用范围	277	2.1 机械搅拌制备工艺	341
1.5 离心铸造发展	278	2.2 电磁搅拌制备工艺	342
2 离心铸造工艺原理	278	2.3 变形诱变激活制备工艺	343
2.1 离心力场	278	2.4 低过热度浇注制备工艺	344
2.2 合金液自由表面的形状	279	2.5 其他制备工艺	345
2.3 离心压力	280	3 半固态金属的触变铸造	346
2.4 合金液中非金属质点的移动	280	3.1 半固态金属坯料的重熔加热	346
2.5 合金凝固特点	281	3.2 半固态金属的触变压铸	347
2.6 离心力偏析	282	3.3 半固态金属的触变锻造	351
3 离心铸造工艺	282	3.4 半固态金属的触变射铸	351
3.1 铸型涂料	282	4 半固态金属的流变铸造	352
3.2 铸型温度	284	4.1 压射室制备浆料式流变铸造	352
3.3 铸型转速	285	4.2 单螺旋机械搅拌式流变铸造	353
3.4 浇注系统	287	4.3 双螺旋机械搅拌式流变铸造	354
3.5 合金定量	288	4.4 低过热度倾斜板浇注式流变铸造	355
3.6 离心浇注充型参数	289	4.5 低过热度浇注和弱机械搅拌式流变铸造	357
3.7 浇注温度和铸件出型温度	289	第 14 章 快速铸造	359
4 铸型设计	290	1 概况	359
4.1 离心铸件工艺设计	290	2 快速成形技术	359
4.2 普通筒式铸型	290	2.1 概述	359

2.2 快速成形的原理	359	5.3 气缸盖罩盖充型过程模拟	413
2.3 快速成形的特点	359	5.4 发动机罩盖充型过程模拟	414
2.4 快速成形的过程	360	5.5 阀盖体充型过程模拟	416
2.5 快速成形的典型工艺	360	第3章 铸件凝固过程数值模拟	417
2.6 快速成形样件的表面处理	362	1 凝固过程传热学基础	417
3 快速铸造	364	1.1 传热的基本方式	417
3.1 快速铸造的技术路线	364	1.2 导热微分方程	418
3.2 快速制造铸型	364	1.3 直角坐标系下一般方程的特殊形式	420
3.3 快速制造模样	367	1.4 导热过程的定解条件	421
3.4 快速制造模具	369	1.5 凝固过程结晶潜热的处理	421
第15章 V法造型	373	2 铸件凝固过程数值模拟方法	425
1 基本原理	373	2.1 数值模拟方法介绍	425
2 V法造型的特点	373	2.2 有限差分法的数学基础	425
3 工艺装备	374	2.3 凝固传热有限差分法求解	426
4 V法造型工艺	374	3 铸件凝固过程缩孔缩松预测	430
5 涂料	376	3.1 铸钢件缩孔缩松预测	430
6 型砂	376	3.2 球墨铸铁缩孔缩松预测	432
7 塑料薄膜	376	3.3 灰铁铸件缩孔缩松预测	434
参考文献	377	3.4 压力条件下的缩孔缩松预测	436
第6篇 铸造成形 CAD/CAE	381	4 铸件凝固过程数值模拟计算效率研究	437
第1章 铸造工艺 CAD	383	4.1 分区计算的基本思想	437
1 铸造 CAD 技术发展	383	4.2 分区计算的实现	438
2 铸造 CAD/CAE/CAM 技术	383	4.3 分区计算的计算效率	439
3 铸造工艺基本设计过程	384	5 铸件凝固过程数值模拟工程应用	440
4 三维铸造工艺 CAD 系统功能分析	385	5.1 大型缸体铸钢件的补浇工艺优化	440
5 基于三维几何造型的铸造工艺 CAD 系统	385	5.2 大型压机上梁铸件工艺优化	442
5.1 工艺设计三维造型的实现	385	5.3 轮毂球墨铸铁件模拟及其工艺优化	443
5.2 数据的操作与维护	386	5.4 驱动轮毂灰铸铁件模拟及其工艺优化	443
5.3 友好的用户界面	386	第4章 铸造过程的应力场数值模拟	445
5.4 系统开发工具	386	1 概述	445
5.5 参数化设计技术	386	2 有限元法基础	445
5.6 基于实体的特征造型技术	387	2.1 连续介质的离散	445
5.7 工程数据库技术	387	2.2 形函数	446
6 小结	388	2.3 等参单元的形函数	446
第2章 液态金属充型过程的数值模拟	389	2.4 高斯数值积分	447
1 液态金属充型过程的数学物理模型	389	2.5 整体集成与求解	447
1.1 液态金属流体性质的抽象	389	3 热弹性模型及其有限元算法	448
1.2 液态金属流动的基本方程	390	3.1 弹性力学基本方程	448
1.3 初始条件和边界条件	391	3.2 热弹性模型本构方程	449
1.4 紊流	391	3.3 热弹性模型的有限元算法	450
2 液态金属充型过程的数值求解方法	393	4 其他力学模型和算法简介	451
2.1 SIMPLE 算法	393	4.1 准固相区间流变学模型及其有限元算法	451
2.2 MAC 技术	394	4.2 基于控制体积的弹性模型	452
2.3 SOLA-VOF 方法	396	5 数值模拟中的几个主要问题	453
2.4 格子气模型	400	5.1 热-力耦合	453
2.5 液态金属充型过程数值模拟中的其他问题	401	5.2 铸件/铸型边界条件处理	454
3 液态金属充型过程数值模拟中的并行计算技术	405	5.3 有限元前处理	455
3.1 并行计算技术概述	405	5.4 基于准固相区热应力分析的热裂倾向预测	455
3.2 两种主要的并行编程环境——PVM 与 MPI	407	6 验证与工程应用	455
3.3 铸造充型数值模拟中的并行计算技术应用	408	6.1 应力测试方法	455
4 液态金属充型过程的简化模型及简化算法	410	6.2 应力框试件应力分析	456
4.1 变网格方法	410	6.3 铸件、铸型接触单元算例	457
4.2 近表面迭代方法	410	6.4 铸铁带轮残余应力分析	458
4.3 逐层充填简化方法	410	第5章 铸件的微观组织模拟	459
5 铸件充型过程数值模拟应用实例	412	1 引言	459
5.1 压室慢压射过程流动模拟	412	2 金属凝固热力学与动力学	459
5.2 倒挡伺服器活塞充型模拟计算	413	2.1 金属结晶的微观过程	459
		2.2 金属凝固热力学	459
		2.3 界面过冷动力学	460

2.4 形核	461	4 电阻温度计	519
2.5 生长	463	4.1 电阻温度计的分类	519
3 微观组织模拟的数学模型	464	4.2 纯金属电阻温度计	519
3.1 宏观传输方程	464	4.3 热敏电阻	522
3.2 金属凝固过程中的溶质再分配与扩散过程	465	5 辐射温度计	522
3.3 金属凝固过程的微观动力学模型	466	5.1 辐射温度计的测温原理	522
4 确定性模拟方法	470	5.2 辐射温度计的分类和基本结构	523
4.1 基本原理	470	5.3 光学高温计	524
4.2 共晶合金	471	5.4 全辐射温度计	525
4.3 枝晶合金	472	5.5 比色温度计	525
5 相场方法	472	5.6 热像仪	525
5.1 基本原理	472	5.7 辐射温度计的选型	526
5.2 相场方程	473	6 光纤温度计	527
5.3 枝晶生长的模拟	474	6.1 光纤温度计的分类及原理	527
6 随机性模拟方法	476	6.2 光纤温度计的应用	527
6.1 Monte Carlo 方法	476	第2章 金属液的热分析	529
6.2 Cellular Automata 方法	477	1 铸造热分析技术	529
7 球墨铸铁的微观组织模拟	482	1.1 铸造热分析的基本原理	530
7.1 液固相变时的微观组织模拟	482	1.2 铸造热分析系统的基本组成	532
7.2 固态相变时的微观组织模拟	483	2 用热分析法测定铁液成分	533
7.3 球墨铸铁力学性能预测	485	2.1 原理	534
7.4 某球墨铸铁件的微观组织模拟与验证	485	2.2 碳当量的检测	534
第6章 并行工程与网络化铸造	488	2.3 碳和硅含量的检测	535
1 并行工程环境下铸造 CAD/CAE 的集成	488	2.4 采用微分热分析法检测铁液成分	536
2 全新的服务提供者 ASP	489	3 热分析法在综合评估金属液质量方面的应用	536
2.1 ASP 的概念	489	3.1 在评估球墨铸铁铁液质量方面的应用	537
2.2 ASP 的发展概况	489	3.2 在评估灰铸铁铁液质量方面的应用	540
2.3 ASP 需要解决的问题	489	3.3 在评估铝合金液质量方面的应用	542
3 网络化铸造工艺 CAE 系统设计	490	3.4 热分析法与微机技术相结合综合评估金属液质量	544
3.1 文件管理模块及前处理模块	490	3.5 利用冷却曲线整体形状综合评估金属液质量	544
3.2 核心计算模块	491	第3章 定量金相分析	547
3.3 后处理模块	492	1 定量金相分析的体视学基础	547
3.4 网络安全和系统管理模块	492	1.1 体视学基本符号	547
4 基于 Web 的铸造工艺 CAE 系统网站	493	1.2 体视学基本公式	548
4.1 系统方案选择	493	2 显微组织特征参数的测量原理	549
4.2 网络化凝固模拟网站	493	2.1 基本测量方法	549
5 小结	496	2.2 定量金相试样的选取与制备	551
参考文献	497	2.3 显微组织特征参数的测量	552
第7篇 铸造生产质量检测及控制	501	3 图像分析仪	558
第1章 温度检测	503	3.1 自动图像分析仪的基本原理与结构	558
1 温度与温标	503	3.2 计算机图像处理基本原理	559
1.1 温度	503	3.3 基于 PC 机的图像分析仪	560
1.2 温标	503	3.4 自动图像分析的误差	561
2 膨胀类温度计	505	4 定量金相学的应用	561
2.1 玻璃液体温度计	505	4.1 金属与合金组织基本参数的定量分析测量	562
2.2 双金属温度计	507	4.2 研究材料组织与性能间的定量关系	563
2.3 压力式温度计	508	4.3 研究相变过程动力学	565
3 热电偶类温度计	510	第4章 型砂性能检测	566
3.1 工作原理	510	1 原材料	566
3.2 热电偶温度计的分类	510	1.1 取样方法	566
3.3 热电偶温度计的结构	510	1.2 原砂(耐火材料)	566
3.4 标准化热电偶	510	1.3 黏结剂	572
3.5 非标准化热电偶	512	1.4 附加物	584
3.6 热电偶绝缘材料	512	2 型(芯)砂	587
3.7 热电偶保护管	512	2.1 取样方法	587
3.8 铠装热电偶	514	2.2 试样制备	587
3.9 其他特殊热电偶	518	2.3 黏土砂	588
3.10 补偿导线	518		

2.4 水玻璃砂	595	7.2 微波检测技术	641
2.5 油砂	596	7.3 激光全息检测技术	642
2.6 树脂砂	597	7.4 球墨铸铁球化率的检测	643
第5章 铸件的无损检测	601	7.5 工业内窥镜检测	644
1 概述	601	8 检测技术与质量控制	645
1.1 无损检测技术的特点及其发展	601	8.1 质量工程学概论	646
1.2 无损检测技术的分类	601	8.2 质量保证	646
1.3 铸铁的缺陷及其分类	601	8.3 检测的可靠性	646
1.4 无损检测方法的选用	601	第6章 统计工艺控制 SPC 在铸造中的应用	648
2 超声检测	602	1 概述	648
2.1 概述	602	2 铸造生产过程数理统计基础	648
2.2 超声检测技术基础	602	2.1 铸造生产过程中质量特性分类	648
2.3 超声检测方法	604	2.2 抽样的基本概念	648
2.4 超声检测设备	605	2.3 常见质量特性分布	648
2.5 铸件缺陷的超声检测	606	3 七种工具	649
2.6 铸件缺陷当量的确定	607	3.1 分层法	649
2.7 铸件的超声检测标准	607	3.2 调查表法	649
2.8 铸件超声探伤规范	608	3.3 排列图	650
2.9 铸件超声检测的应用	608	3.4 因果分析图	650
2.10 自动化超声检测	610	3.5 散布图法	651
2.11 声成像超声检测	611	3.6 直方图	651
2.12 电磁超声检测	614	4 工序能力	652
2.13 超声检测新技术	615	4.1 工序能力的概念	652
3 射线检测	616	4.2 工序能力分析	653
3.1 概述	616	4.3 工序能力和不良品率	654
3.2 射线检测技术基础	616	4.4 6 σ 质量标准	654
3.3 X 射线检测方法	618	5 SPC 与控制图	654
3.4 铸件的射线检测	622	5.1 控制图原理	654
3.5 γ 射线检测方法	623	5.2 控制图的判断准则	658
3.6 高能射线检测方法	624	5.3 控制图的使用	659
3.7 射线实时检测技术	624	5.4 控制图举例	660
3.8 工业射线 CT 检测技术	625	5.5 统计管理的控制点的设置	661
3.9 射线的防护	626	6 PDCA 工作循环	662
4 磁粉检测	626	7 计算机辅助统计质量控制	664
4.1 概述	626	第7章 铸造专家系统	665
4.2 磁粉检测技术基础	626	1 概述	665
4.3 磁粉检测方法	627	2 铸造专家系统的发展	665
4.4 磁粉检测设备	630	3 铸造专家系统举例	667
4.5 铸件的磁粉检测	630	3.1 铸造方法与铸造合金的选择专家系统	667
5 渗透检测	631	3.2 铸造过程缺陷识别专家系统	668
5.1 概述	631	3.3 铸造过程型砂控制专家系统	670
5.2 渗透检测方法	631	4 铸造专家系统的开发策略	674
5.3 渗透检测技术规范	631	第8章 铸造企业 PDM	675
6 涡流检测	633	1 PDM 产生的背景	675
6.1 概述	633	2 PDM 的定义	675
6.2 涡流检测技术基础	633	2.1 PDM 的主要功能	675
6.3 涡流检测方法	636	2.2 PDM 的体系结构	676
6.4 涡流检测设备构成	637	3 PDM 与 CAD/CAM/CAPP/MRP II 的关系	676
6.5 涡流检测的应用	638	4 国内外 PDM 软件	677
6.6 电磁分选	638	5 实施	677
7 其他无损检测方法	639	6 PDM 在铸造中的应用	677
7.1 声发射检测技术	639	参考文献	679

中国材料工程大典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

第19卷 材料铸造成形工程(下)

第
5
篇

特种铸造

主 编 姜不居

编 写 姜不居 吕志刚 李嘉荣 张宏炜

殷克勤 闫双景 吴志超 刘国利

王玉玮 冯志军 佟铭铎 甘 雨

毛卫民 崔旭龙 解明国

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会

第1章 概述

1 特种铸造方法

随着科学技术和生产的发展,对铸造提出了更高的要求,要求生产更加精确、性能更好、成本更低的铸件。为适应这些要求,铸造工作者发明了许多新的铸造方法。在铸型材料、造型方法、金属液充型形式和随后的冷凝条件等方面与普通砂型铸造有着显著区别,这些铸造方法被称为特种铸造方法。对于某特种铸造方法可能具有一方面的特点或几个方面的特点。

常用的特种铸造方法有:熔模铸造、陶瓷型铸造、石膏型铸造、消失模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、差压铸造、挤压铸造、离心铸造、连续铸造、半固态铸造、真空吸铸、快速铸造、电渣熔铸、壳型铸造等等。本卷叙述的是先进的和目前生产中已应用广泛的14种方法。

2 特种铸造发展概况

(1) 熔模铸造发展

熔模铸造(Investment Casting)是一种古老而又年轻的铸造技术。说它古老是因其已有4 000年之久,发源于埃及、中国和印度,后传到非洲、欧洲和美洲。说它年轻是该法进入工业领域仅60年,20世纪30年代末,人们发现Austenite实验室为外科移植手术研制的钴基合金有优异的高温性能,可用于飞机涡轮增压器。但这类合金很难机械加工,熔模铸造就成为该类合金成形的最佳工艺方法,迅速地发展成了工业技术。进入航空航天和国防工业,并应用于其他工业部门。

半个多世纪以来,熔模铸造在不断吸收新工艺、新技术、新材料,使得该工艺可生产出无余量、复杂、较大铸件,最大铸件重达1 000 kg,轮廓尺寸达1.8 m,最小壁厚不到1 mm,即熔模铸造已能生产更精、更大、更复杂、更薄、更强的产品,使它现在仍然是一种近净形成形的先进工艺。

(2) 陶瓷型铸造发展

20世纪50年代初英国人诺尔·肖氏兄弟(Clifford & Noel Shaw)研究成功陶瓷型铸造(ceramic mold casting),并于1954年获得专利。该法又称肖氏法铸造(Shaw Process Casting),在生产中很快得到应用。在此基础上出现了几百个专利,派生出Unicast工艺、复合型肖氏工艺、Schott工艺、Ceramacast工艺等,被广泛用于生产各种复杂精密铸件、模具和铸造工装。

(3) 石膏型铸造发展

用石膏铸造(plaster mold casting)生产艺术品的历史已久远于世。19世纪末石膏被用于制作假牙。20世纪40年代初,经过压蒸处理的安提阿(Antioch)石膏型被用来铸造轮胎模具。后又发展出发泡石膏型、普通石膏型,主要用于生产形状不太复杂的铝、锌、铅等中小型铸件。20世纪60年代末,石膏型铸造被用来生产金银饰物和铜合金文物复制品等,并逐渐用于铸造机床、电器、仪表、汽车等零部件上。20世纪70年代随着大型、薄壁、复杂铝铸件的发展,石膏型精密铸造新工艺在美国、德国、法国、加拿大、日本等西方国家发展很快,尤其在航天航空等部门发展更快。现石膏型已可生产尺寸达1 000 mm,壁厚1.5 mm,公差 ± 0.125 mm/25 mm的铸件。

(4) 消失模铸造发展

消失模铸造(Expendable Pattern Casting,简称EPC)是美

国H.F.Shroyer于1956年试验成功,1958年获专利、1961年德国亚琛工业大学A.Wittmoser从美国引进专利,与Hartman等合作生产工业铸件,并在1963年GIFA展出。从而引起各国铸造工作者极大兴趣,开始用该法生产铸件。1967年一些国家的150多个企业组成国际消失模铸造协会。1968年GIFA展出磁丸消失模铸造。1980年前消失模铸造主要用于单件、小批量大中型铸件生产,泡沫塑料模用板材加工成形,型砂采用自硬砂或铁丸。1980年后消失模铸造发展到第二个时期,主要用于大批量小件生产中,泡沫塑料模采用发泡成形,造型用干砂振动法,典型的工厂有:美国Ford汽车公司1980年在加拿大Essex铸铝厂建的第一条干砂消失模生产线;美国GM汽车公司在Saturn建的年产5.5万吨的消失模生产线,1990年生产铝合金四缸气缸体、缸盖和球墨铸铁曲轴;德国宝马汽车公司建的一条年产20万只铝合金气缸盖EPC生产线,1999年2月成品率达90%;意大利FATA公司1991年为都灵CASTEK铸铁厂建的一条全自动EPC生产线,年产5 000 t球墨铸铁件,工人及管理人员仅22人。消失模铸造是一种近净形工艺,为铸件设计提供了充分的自由度,容易实现清洁生产,被称为“21世纪的铸造技术,”很有发展前景。

(5) 金属型铸造发展

金属型铸造(permanent mold casting)是一种古老的铸造方法,由我国发明。现发现的最早金属型是在战国时代,这些金属型被用来生产各种农具和工具。金属型铸造有很多优点,被广泛用于发动机、仪表、农机等行业中。

(6) 压力铸造发展

压力铸造(die casting)是一种重要的特种铸造方法,已有100多年历史。1838年格·勃鲁斯首先用压铸法生产铅字。1849年英国Sturges取得热压室压铸机专利。1920年英国开发了冷压室压铸机。1927年捷克斯洛伐克Josef Polak设计了立式冷压室压铸机。1958年真空压铸在美国获得专利。1966年美国General Motors公司提出精、速、密压铸法。1969年美国爱列克斯提出充氧压铸法。压力铸造属近净形先进成形工艺,随着铝合金、镁合金、金属复合材料的发展,半固态铸造技术的应用,压力铸造必将得到进一步的发展。

(7) 低压铸造发展

20世纪20年代初英国E.H. Lake申请了第1个低压铸造(low-pressure die casting)专利,最初主要用于巴氏合金。同时期法国制出用于铜、铝合金的低压铸造机,这种方法真正被推广应用是在“二战”后,被用来生产汽车汽缸体、电动机转子、炊事用具、高硅铝啤酒桶等。1955年德国出现铸铁和铸钢用低压铸造专利。1961年保加利亚索非亚铸造研究所在低压铸造基础上研制成差压铸造(counter pressure casting)。

20世纪60年代英国率先发展低压铸造汽车轮毂。1989年仅美国、日本、德国三国用此法就生产630万只轮毂。低压铸造是实现铸件精密化、薄壁化、轻量化和生产大型薄壁铝铸件的工艺方法之一,有着良好的发展前景

(8) 挤压铸造发展

挤压铸造(squeeze casting)于1937年在前苏联问世,几十年来已建立起完整的工艺体系和理论基础,如1964年前苏联B.M.Пляцкий发表的“液态金属模压”。挤压材质有铝、铜、锌、镁、钴的合金及钢、铁,铝合金占比例最大,钢、铁挤压铸造于20世纪50年代末已用于生产。

(9) 离心铸造发展

1809年英国 A. Erehart 申请了第一个离心铸造 (centrifugal casting) 专利。1849年英国 Andrew Shank 制造出第一台离心铸管机, 1857年德国 Henery Bessemer 提出用立式离心铸造生产轮圈, 1862年英国 Whileley 和 Bouwer 生产出这种离心机。1914年巴西人研制成水冷金属型离心铸管法。20世纪30年代后离心铸造法被用于生产气缸套、炮身、鼓轮等铸件。40年代出现了用此法生产双金属复合冶金轧辊的工艺。1950年瑞典开始用涂料金属型离心铸造法, 50年代美国使用了树脂砂型离心铸造法。

(10) 连续铸造发展

1857年德国人 Bessemer 获得了第一个连续铸造 (continuous casting) 的专利。1950年后连续铸锭等铸造方法在生产中获得发展。1949年前苏联 Мясоєдов 兄弟发明半连续铸管法。

(11) 真空吸铸发展

前苏联 Б.М. Ксенофонов 于 1949 年发明了真空吸铸 (vacuum die casting), 生产小型铜套毛坯。

(12) 快速铸造发展

20世纪70年代初到80年代初期, 美国和日本的技术人员在不同的地点各自独立提出了快速成形的概念, 即利用连续层的选区固化产生三维实体的思想。美国 UVP 公司的 Charles W. Hull 完成了一个能自动建造零件的完整系统

SLA-1, 并于1986年获得专利。到20世纪90年代后期, 随着现代设计和制造技术的迅速发展, 先后出现了十几种不同的快速成形技术。这些直接从计算机模型生产物体的快速成形技术是建立在机械工程、自动控制、材料科学、计算机技术等多学科的发展基础上的。快速成形技术与铸造技术结合产生了快速铸造。多用于单件、小批生产中。

3 特种铸造方法基本特点

与砂型铸造相比, 特种铸造有如下的优点。

1) 铸件尺寸精确、表面粗糙度值低, 更接近零件最后尺寸, 从而易于实现少切削或无切削加工。

2) 铸件内部质量好, 力学性能高, 铸件壁厚可以减薄。

3) 降低金属消耗和铸件废品率。

4) 简化铸造生产工序 (除熔模铸造外), 便于实现生产过程的机械化、自动化。

5) 改善劳动条件, 提高劳动生产率。

由于以上的优点, 使特种铸造方法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。但每种特种铸造方法也都存在着一些缺点, 其应用范围也有一定的局限性。表 5.1-1 中列出了各种主要特种铸造方法的工艺过程特点、适于生产的铸件和一些工艺参数。

表 5.1-1 特种铸造工艺过程特点及其使用范围

铸造方法	工艺特点	工艺过程复杂程度	适用于生产的铸件							工艺出品率/%	毛坯利用率/%	生产准备
			合金	重量	最小壁厚/mm	表面粗糙度/ μm	尺寸公差	形状特征	批量			
熔模铸造	1) 熔去模样形成型腔 2) 铸型工作表面由粉状耐火材料和高温粘结剂形成 3) 热型浇注	复杂	各种铸造合金	数克至数百千克	约 0.5, 最小孔径 0.5	一般 $R_a = 1.6 \sim 6.3$, 精整后最高可达 $R_a = 0.8$	CT4 ~ CT7 级	复杂铸件	小批至大批	30 ~ 60	90	复杂
陶瓷型铸造	铸型工作表面由粉状耐火材料和高温粘结剂形成	较复杂	主要是模具钢、碳素钢、合金钢	数百克到数吨	2	$R_a = 3.2 \sim 12.5$	CT6 ~ CT8 级	中等复杂铸件	单件小批	40 ~ 60	90	较复杂
石膏型铸造	铸型由粉状耐火材料和石膏粉料形成	复杂	以铝合金、锌合金、铜合金、银为主	数克至数百千克	约 0.5, 最小孔径 0.5	$R_a = 0.8 \sim 6.3$	CT4 ~ CT7 级	复杂铸件	小批至大批	30 ~ 60	90	复杂、较复杂
	铸型由粉状耐火材料和石膏粉料形成						CT6 ~ CT8 级					

续表 5.1-1

铸造方法	工 艺 特 点	工艺过程复杂程度	适用于生产的铸件							工艺出品率/%	毛坯利用率/%	生产准备
			合金	重量	最小壁厚/mm	表面粗糙度/ μm	尺寸公差	形状特征	批量			
消失模铸造		简单一般	铝合金 铜合金 铁、钢	数十克到数十吨	铝合金 2~3、铸铁 4~5、铸钢 5~6	$R_a = 6.3 \sim 12.50$	CT6 ~ CT9 级	各种形状铸件	大批	40~75	70~80	较复杂
									单件小批			
金属型铸造	利用金属制成铸型，在重力场中浇注金属液，形成铸件 1) 铸型有剧烈的冷却作用 2) 铸型无透气性 3) 铸型无退让性	简单一般	钢、铁 铝合金 镁合金 铜合金	数十克到几百千克	铝硅 2 铝镁 3 铸铁 2.5 钢 5	一般为 $R_a = 6.3 \sim 12.5$ 最高 $R_a = 3.2$	CT6 ~ CT9 级	中等复杂铸件	中批大批	40~70	70	较复杂
压力铸造	金属液在高压作用下，以高的线速度填充金属型，并在压力作用下凝固成形	简单	锌合金 锡合金 铝合金 镁合金 铜合金	数克到数十千克	最小壁厚 0.3, 最小孔径 0.7, 最小螺距 0.75	$R_a = 0.8 \sim 3.2$	CT4 ~ CT8 级	复杂铸件	大批	60~90	90	复杂
低压铸造	金属液在较低压力作用下，由下向上地填充各种铸型，并在压力作用下凝固成形	简单一般	钢、铁 铝合金 镁合金 铜合金	中、小件数到数千千克	同金属型	决定所用铸型种类	CT6 ~ CT9 级	中等复杂铸件	小批中批大批	80~90	70~90	中等复杂
挤压铸造	把金属液浇入开启的铸型中，把两半型相合，型内金属液受到铸型的挤压，填充于两半型形成的型腔之中，凝固成形	一般	铝合金、镁合金、锌合金、铜合金为主，其他变形合金和铸造合金	几十克到 160 kg	1	$R_a = 3.2 \sim 6.3$	CT5 级	外形简单的铸件	中批大批	80~95	70~90	复杂
离心铸造	金属液浇注到旋转的铸型中，并在旋转情况下凝固成形	一般	铸钢、铸铁、铝合金、铜合金	数克到数十吨	3	$R_a = 6.3 \sim 12.5$	—	特别适用于管形铸件，也可铸中等复杂的铸件	小批中批大批	75~95	70~100	复杂、中等复杂
连续铸造	金属液进入水冷金属型（结晶器）的一端，从铸型的另一端连续地取出铸件	简单	钢、铁 铝合金 铜合金		3~5	—	—	外形简单、截面相同的长铸件	大批	>90	>80	复杂

续表 5.1-1

铸造方法	工艺特点	工艺过程复杂程度	适用于生产的铸件							工艺出品率/%	毛坯利用率/%	生产准备
			合金	重量	最小壁厚/mm	表面粗糙度/ μm	尺寸公差	形状特征	批量			
真空铸造	在水冷金属型(结晶器)内建立真空,把金属液由下向上地吸入型内,并在真空下由外向中心凝固	简单	铜合金 铝合金 锌合金		结晶器的真空吸铸5、非结晶器的真空吸铸0.5、	—	—	圆管形、圆柱形,直径小于120 mm	小批	>90	>80	复杂、中等复杂

编写：姜不居（清华大学）