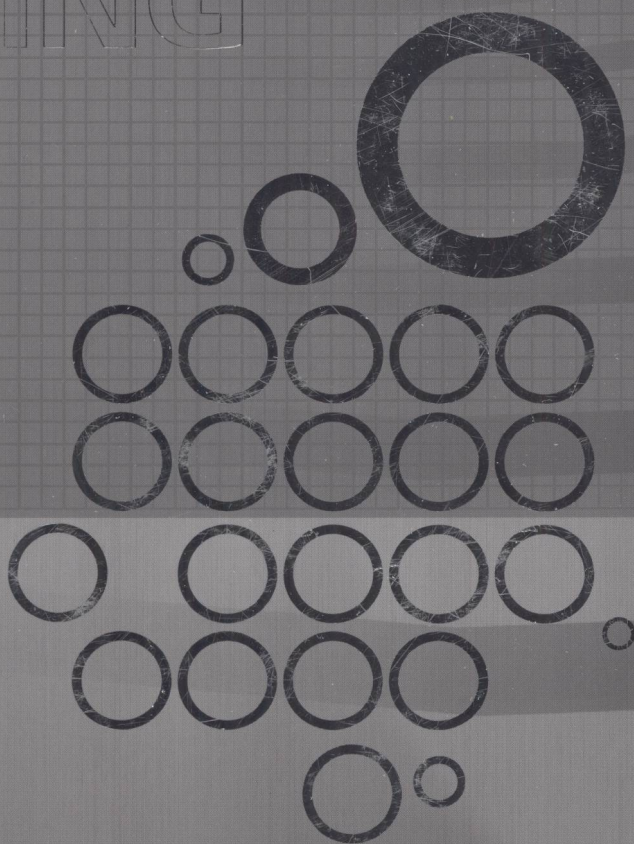


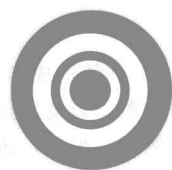
铸造成形手册 下

柳百成 黄天佑 主编

ZHUZAO
CHENGXING
SHOUCE



化学工业出版社



铸造成形手册

[下]

柳百成 黄天佑 主编

华南农业大学
图书馆藏书



化学工业出版社

· 北 京 ·

《铸造成形手册》铸造专业技术工具书。本书从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。对当前应用比较成熟的砂型铸造，突出实用性，以满足生产实际的需要；另外，还详细介绍了当前先进的特种铸造技术、铸造成形 CAD/CAM 技术等。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。

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。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造成形手册. 下/柳百成, 黄天佑主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05322-0

I. 铸… II. ①柳…②黄… III. 铸造-成型-技术手册
IV. TG24-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057696 号

责任编辑: 周国庆 王清颖
责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京蓝海印刷有限公司

装 订: 三河市前程装订厂

880mm×1230mm 1/16 印张 43 $\frac{1}{4}$ 字数 2037 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 140.00 元

版权所有 违者必究

前言

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。本书的编写和出版，正是适应了这种形势发展的需要。

本书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。参加这部著作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。各篇主编如下。

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

本书的编写过程强调以“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书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

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周 廉 左铁镛

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干 勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

丁 辛	丁传贤	干 勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓 炬	左铁钊
左铁镛	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯 涤	冯 稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕 炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华 林	刘 明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫 洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙 坚	孙加林	杜善义	杨 合	杨 武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李 强	李 晋	李 楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴 行	吴 昆	吴 诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱 勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈 真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张 力	张 扬	张 华	张 杰	张 金	张 峥
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈 琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈远远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翕	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周 廉	周伟斌	周国庆
郑有焯	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晚霞	祖荣祥
姚 燕	贺守华	耿 林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨湛	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄 勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔 健	康喜范	梁 齐	梁 军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董 瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄢国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡中义	漆 玄	谭 抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕 瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

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 清整	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 铸件结构设计	181
3.1 涂料的作用与要求	117	2.1 铸件设计的基本要求	181
3.2 涂料性能及检测	118	2.2 铸件的结构要素	183
3.3 涂料的组成、制备与使用	118	2.3 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 铸件后处理	236
3.3 金属型操纵机构设计	150	8.6 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 浇注温度和铸件成型温度	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 热弹塑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 热弹塑性模型本构方程	449
1.4 紊流	391	3.3 热弹塑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

第 5 篇

特 种 铸 造

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 Austenal 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 В.М.Плещкий 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合金轧辊的工艺。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 Мясоедов 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, 美国和日本的工程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。

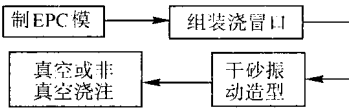
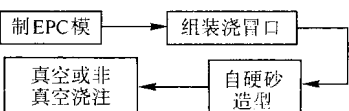
3 特种铸造方法基本特点

- 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形成的先进工艺。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	制熔模 制壳 脱膜 浇注 焙烧型壳 1) 熔去模样形成型腔 2) 铸型工作表面由粉状耐火材料 and 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 中批 大批	30 ~ 60	90	复杂
陶瓷型铸造	模样和砂箱放在模板上 灌陶瓷浆 取模 喷烧陶瓷型工作表面 焙烧陶瓷型 浇注 铸型工作表面由粉状耐火材料 and 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	制熔膜 灌石膏浆 干燥 脱模 石膏型焙烧 浇注 铸型由粉状耐火材料 and 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 中批 大批	30 ~ 60	90	复杂、较复杂
	模样和砂箱放在模底板上 灌石膏浆 取模 石膏型焙烧 浇注 铸型由粉状耐火材料 and 石膏粉状形成						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	数十克到数十千克	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，数十千克到数百千克	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）