

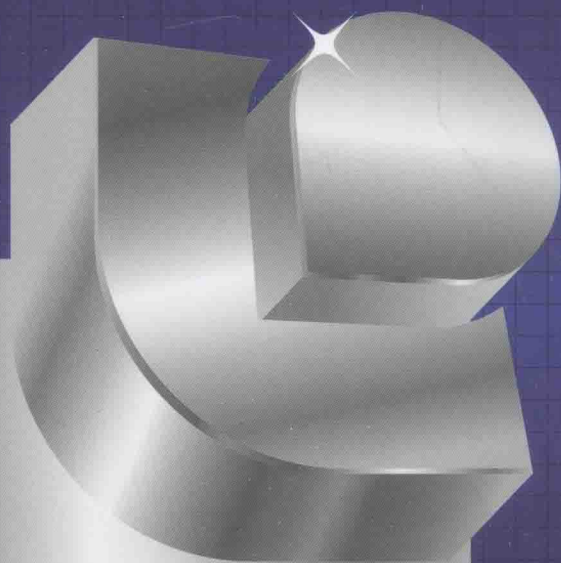


特种铸造

生产实用手册

TEZHONG ZHUZAO SHENGCHAN SHIYONG SHOUC

邓宏运 沈 猛 李艳明 章 舟 编著



化学工业出版社

特种铸造 生产实用手册

邓宏运 沈 猛 李艳明 章 舟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

特种铸造涉及的工艺门类较多,本书紧跟当前铸造行业的发展和生产应用实际,全面介绍了各类型特种铸造的生产技术经验和数据,包括熔模精密铸造、壳型铸造、金属型铸造、铁型覆砂铸造、陶瓷型铸造、离心铸造技术及设备、挤压铸造及半固态成型技术、反重力铸造技术、连续铸造技术及装备、增材制造技术及3D打印在新型工业发展中的应用等内容。

本书可供铸造领域技术人员、管理人员阅读,也可供铸造相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种铸造生产实用手册/邓宏运等编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-122-22532-0

I. ①特… II. ①邓… III. ①特种铸造-生产工艺-手册 IV. ①TG249-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第293326号

责任编辑:刘丽宏
责任校对:蒋宇

文字编辑:陈喆
装帧设计:刘丽华

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)

印装:北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张31 $\frac{3}{4}$ 字数831千字 2015年4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: 159.00 元

版权所有 违者必究

编 委 会

主 任：章 舟 邓宏运

副主任：王春景 李增民 王守仁

编 委：（按姓氏拼音排序）：

曹国钧	邓宏运	杜振栓	段同锋	靖 林	孔令清
李建国	李建平	李立新	李晓霞	李银铭	李增民
厉三于	刘永辉	刘志安	孟昌辉	潘东杰	时胜利
汤 娟	田忠民	童 军	王承伟	王春景	王定祥
王守仁	王树成	王彦堂	魏定青	吴殿杰	谢克明
许 扬	徐春杰	徐庆柏	颜文非	阴世河	应根鹏
尤志伟	翟永真	章 舟	张广贺	张锡南	张忠明
朱剑甫	朱以松				

铸造生产中应用最普遍的方法是砂型铸造,它具有适应性广、生产设备比较简单等优点。但砂型铸造在生产一些特殊零件和有特殊技术要求的铸件时,技术经济指标较低。所以,除砂型铸造以外,通过改变铸型材料、浇注方法、液态合金充填铸型的形式或铸件凝固条件等因素,形成了多种有别于砂型铸造的其他特殊铸造方法。铸造工作者把有别于砂型铸造工艺的其他铸造方法,统称为特种铸造。常见的特种铸造方法有熔模精密铸造、石膏型精密铸造、陶瓷型精密铸造、消失模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、差压铸造、真空吸铸、挤压铸造、离心铸造、连续铸造、半连续铸造、壳型铸造、石墨型铸造、电渣熔铸等。

为适应我国铸造生产的需要,结合我国铸造企业的技术现状,为众多企业从事铸件生产的广大工程技术人员、管理人员以及现场的实际操作者,撰写一本以介绍特种铸造生产基础知识和生产应用为指导的工具书,是十分必要的。鉴于此,我们编写了本书。

本书内容注重实用,包括熔模精密铸造、壳型铸造、金属型铸造、铁型覆砂铸造、陶瓷型铸造、离心铸造技术及设备、挤压铸造及半固态成型技术、反重力铸造技术、连续铸造技术及装备、增材制造技术及3D打印在新型工业发展中的应用等内容。系统论述了以上各类特种铸造方法的基本原理、工艺特点、专用材料、生产设备及工艺等,汇集了国内外在特种铸造生产技术方面的成熟经验和应用实例,尤其详细介绍了当前特种铸造领域正在广泛推广的节能型铸造技术和设备以及3D打印技术,希望对读者从事铸造生产实践提供有益的指导。

为了使本书内容既贴近生产实际,又具有一定的深度和广度,本书编写时综合了铸造生产企业一线实际,特邀高校教授、行业资深技术专家组成编写部和组审部,以求精益求精。手册第6~10章由西安理工大学徐春杰编写;高致密零缺陷铸铁空心型材连续铸造及其在石油机械上的应用由西安理工大学许扬编写;立式加压有芯连铸自动生产线由何理等编写;铁型覆砂铸造由浙江省机电设计研究院有限公司潘东杰、王立群编写;天水华荣铸造机械有限公司李建平总经理对离心铸造内容提供了修改建议;陕西华安铸铁型材有限公司的刘永辉总经理对铸铁型材连铸生产及质量控制内容提供了修改建议。全书由邓宏运、王春景统稿。

在手册编写过程中得到了西安理工大学、长安大学、西安科技大学、西安工业大学、河北科技大学、合肥工业大学、济南大学、铸造工程师杂志社、西安泉特科技有限公司、西安华清科教产业(集团)有限公司、陕西陕钢物业资产管理有限公司、陕西华安铸铁型材有限公司、河北殴耐机械模具有限公司、山东开泰集团有限公司、中国重汽(香港)有限公司部件制造部、无锡锦通科技有限公司、无锡锡通铸造材料有限公司、无锡方达利机械模具制造有限公司、宁波强盛机械模具有限公司、天水华荣铸造机械有限公司、郑州翔宇铸造材料有

限公司、郑州君成铸造材料有限公司、十堰龙岗铸造有限公司、洛阳凯林铸材有限公司、洛阳宝珠砂铸材有限公司等有关单位的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。感谢所有参与手册编写的人员的辛勤劳动和努力！天津的肖占德高工、洛阳宝珠砂铸材有限公司总经理周建平高工、洛阳凯林铸材有限公司刘满对高工等，许多专家为手册编写提供了翔实的技术资料及帮助，铸造工程师杂志社执行总监李晓霞编辑、中冶陕压重工设备有限公司靖林工程师对全书的文字及图表进行了技术处理。同时感谢给本书提供技术工艺、设备、仪表仪器、分析检测、原材料有关资料介绍、信息的诸位友人！

由于时间仓促和编者水平所限，书中不足之处，恳请读者批评指正。

编者

1.1 熔模精密铸造概述	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 熔模精铸的生产工艺流程	1
1.1.3 熔模精铸的生产方式	1
1.1.4 熔模精密铸造常用的金属材料及性能	2
1.1.5 用水玻璃作黏结剂、石英砂粉作耐火材料的熔模型壳可铸造铸件	4
1.1.6 熔模精密铸造的经济性	4
1.1.7 筹建熔模精铸车间(或工厂)应考虑的问题	5
1.1.8 熔模精铸存在的问题	5
1.1.9 用消失模白模代替蜡模 R 法	5
1.2 铸件工艺设计	9
1.2.1 熔模铸件工艺设计内容	9
1.2.2 对熔模精铸件的结构要求	9
1.2.3 工艺筋、工艺孔、铸造工艺图、工艺参数	11
1.2.4 铸件图绘制	12
1.2.5 选择和确定分型面	12
1.2.6 确定基准面	13
1.2.7 铸造圆角、铸造斜度、机械加工余量、铸造收缩率	14
1.2.8 估算精铸件质量	15
1.2.9 对浇注系统的基本要求、浇注系统的类型和特点	15
1.2.10 浇口杯的作用和形式	16
1.2.11 铸件的热节、热节圆直径	16
1.2.12 当量热节法计算内浇口截面尺寸	17
1.2.13 凝固区宽度与铸件质量的关系	18
1.2.14 浇注完毕后,金属液的收缩对铸件质量的影响	18
1.2.15 冒口在熔模精铸工艺中的作用	18
1.2.16 补贴、内冷铁	19
1.2.17 熔模铸造过滤技术	20
1.2.18 不锈钢熔模铸件工艺设计的注意事项	20
1.2.19 套筒类熔模铸件工艺设计的注意事项	20
1.3 压型设计与制造	21

1.3.1	压型的结构要求	21
1.3.2	压型型腔尺寸的总收缩率	22
1.3.3	压型型腔尺寸	22
1.3.4	压型尺寸精度和表面粗糙度、压型类型	23
1.3.5	制作和维护钢质压型	24
1.3.6	低熔点合金压型的常用配制方法及制作、维护	24
1.3.7	制作塑料压型	26
1.3.8	制作石膏压型的石膏有什么特性、如何制作使用	28
1.3.9	设计自动压蜡机压型原理	30
1.4	型芯制作	30
1.4.1	形成铸件复杂内腔的方法	30
1.4.2	制作钢质型芯	31
1.4.3	制作可溶性型芯	31
1.4.4	制作陶瓷型芯	33
1.4.5	制作水玻璃型芯	33
1.4.6	防止蜡模的开档变形	34
1.4.7	叶片铸件, 上下曲面都不加工, 蜡模如何制作	34
1.5	熔模制造	35
1.5.1	对模料原材料的基本要求	35
1.5.2	石蜡-硬脂酸模料的主要性能以及硬脂酸的代用材料	36
1.5.3	石蜡-硬脂酸模料熔化时采用隔水加热法而不能用电炉直接加热	36
1.5.4	目前国内外生产和使用的中温模料	36
1.5.5	低分子聚乙烯模料性能	37
1.5.6	根据气候特点调整石蜡-硬脂酸模料的成分	38
1.5.7	制备模料	39
1.5.8	性能比石蜡-低分子聚乙烯模料好又能自配的模料	39
1.5.9	配制模料工作人员的责任	41
1.5.10	压制熔模时怎样使用分型剂	41
1.5.11	压型工作温度、制模场地温度、模料温度对熔模质量的影响	41
1.5.12	超过一定温度时熔模表面鼓泡, 环形结构的断面全部脱开	42
1.5.13	压注压力大小对熔模质量的影响、压型注蜡口与压型之间的关系	42
1.5.14	熔模冷却水中用添加物	42
1.5.15	石膏压型不宜采用自由浇注法来获得熔模	42
1.5.16	压蜡机的分类及制模生产线的工作原理	43
1.5.17	压蜡机故障及排除、操作规程及维护保养	44
1.5.18	熔模的表面质量要求、熔模产生裂纹的原因	45
1.5.19	熔模产生变形、翘曲、冷隔或浇不足的原因及解决办法	45
1.5.20	熔模的修整、存放、保管以及浇口棒模的制作方法	45
1.5.21	熔模组焊、装配复杂熔模、蜡基模料性能的测试	46
1.6	脱(蜡)模和模料回收	47
1.6.1	常用脱蜡的方法	47

1.6.2	热水脱蜡的工艺	47
1.6.3	模料的“皂化反应”以及皂化物含量的测定方法	48
1.6.4	模料的回收处理方法	49
1.6.5	低温模料在使用过程中变色,进行酸法处理不能消除暗红色	50
1.6.6	模壳在脱蜡时开裂	50
1.6.7	用盐酸处理旧模料	51
1.6.8	消除黑褐色或红褐色的模料颜色,皂化物消除处理	51
1.6.9	石蜡-硬脂酸模料用酸法回收时注意要点	52
1.6.10	模料电解法回用处理	52
1.7	型壳制造	54
1.7.1	型壳的性能要求、常用原材料及其作用	54
1.7.2	石英材料对制壳的工艺要求	54
1.7.3	铝矾土的主要规格和性能	55
1.7.4	制壳用黏结剂	55
1.7.5	水玻璃的工艺性能指标	56
1.7.6	配制涂料时选择水玻璃的工艺参数	56
1.7.7	提高水玻璃模数	57
1.7.8	水玻璃存放不善会变质	58
1.7.9	水玻璃的模数测定	58
1.7.10	水玻璃涂料的质量	60
1.7.11	涂料的黏度测定以及它对型壳质量的影响	61
1.7.12	温度对水玻璃涂料性能的影响	61
1.7.13	脱脂剂、消泡剂、渗透剂的加入量	62
1.7.14	加固层涂料的作用与配制方法	63
1.7.15	涂料的“熟化期”与涂料的保管	64
1.7.16	涂料的涂挂方法和注意事项	64
1.7.17	水玻璃型壳硬化前的自然干燥	64
1.7.18	配制氯化铵硬化剂	65
1.7.19	涂料、型壳中 Na_2O 的含量测定	65
1.7.20	硬化时间对型壳质量的影响和型壳硬化效果的检测	66
1.7.21	配制硅酸乙酯涂料	66
1.7.22	用硅酸乙酯涂料制造型壳	73
1.7.23	防止型壳分层	74
1.7.24	防止型壳变形、型壳鼓胀	75
1.7.25	型壳表面长“白毛”	76
1.8	型壳焙烧	76
1.8.1	水玻璃黏结剂型壳要进行焙烧	76
1.8.2	型壳焙烧时应注意的问题	77
1.8.3	型壳的焙烧质量、水玻璃型壳的质量控制	79
1.8.4	硅溶胶型壳的质量	85
1.9	熔炼	90

1.9.1	适用于熔模铸造的金属材料	90
1.9.2	熔模精铸金属熔炼设备、电弧炉快速炼钢工艺特点和操作要点	91
1.9.3	电弧炉炼钢节约用电的途径	93
1.9.4	感应电炉的熔化特点与坩埚捣制、修补	93
1.9.5	感应电炉熔化操作常见问题	94
1.9.6	炉料配料计算	98
1.10	浇注	100
1.10.1	浇注前检测	100
1.10.2	浇注温度、操作工艺、型壳温度	101
1.11	清理	102
1.11.1	脱壳	102
1.11.2	铸件浇注系统的切割	103
1.11.3	精铸件的表面清理	104
1.11.4	碱煮	104
1.12	热处理	105
1.12.1	熔模精铸件要进行热处理	105
1.12.2	精铸件热处理的类型及规范	105
1.12.3	选择铸件的热处理方法	106
1.12.4	确定铸件热处理加热速度	107
1.13	检测与控制	107
1.13.1	检测	107
1.13.2	控制	108
1.14	熔模精铸件缺陷与防止	111
1.14.1	铸件尺寸偏差	111
1.14.2	铸件表面粗糙	116
1.14.3	表面缺陷类	119
1.14.4	孔洞类	125
1.14.5	裂纹冷隔类	128
1.14.6	残缺类	130
1.14.7	夹杂类	138

2

第2章 壳型铸造

140

2.1	壳型铸造概述	140
2.1.1	壳型铸造的工艺过程	140
2.1.2	壳型铸造的工艺特点	140
2.1.3	壳型铸造的优缺点及应用范围	142
2.1.4	壳型铸造的应用实例	142
2.2	壳型铸件的工艺设计	143

2.2.1	铸件分型面的选择	143
2.2.2	铸件的收缩率	143
2.2.3	铸件表面粗糙度和尺寸精度	144
2.2.4	铸造斜度与加工余量	144
2.2.5	铸件浇注系统的设计	145
2.3	壳型铸造造型(芯)材料	148
2.3.1	壳型铸造原砂及基本性能	148
2.3.2	树脂砂的配制	151
2.3.3	壳型、壳芯用酚醛树脂性能的检测	152
2.4	模板与芯盒制作	157
2.4.1	模板与芯盒材料的选择	157
2.4.2	模型缩尺	157
2.4.3	模板与芯盒加工精度	158
2.4.4	拔模斜度	158
2.4.5	模板与芯盒热处理	159
2.4.6	芯盒结构设计	161
2.4.7	模板结构	169
2.5	壳型(芯)铸造工艺	175
2.5.1	分型剂	175
2.5.2	制壳(芯)工艺	175
2.5.3	工艺因素对制造型壳(芯)质量的影响及其控制	177
2.5.4	壳型、壳芯废品分析	179
2.5.5	壳型的合型装配	180
2.5.6	铸件的浇注和清理	181
2.5.7	壳型铸件缺陷及防止	182
2.6	热芯盒法制芯	185
2.6.1	热芯盒法的工艺过程	186
2.6.2	制芯材料	186
2.6.3	热芯盒法制芯工艺	191
2.7	覆膜砂叠型铸造工艺及应用实例	192
2.7.1	覆膜砂铸造主要特点	192
2.7.2	覆膜砂原辅材料	192
2.7.3	覆膜砂的生产工艺及设备	194
2.7.4	覆膜砂检测	195
2.7.5	覆膜砂生产线异常处理	195
2.7.6	覆膜砂铸造工艺流程	195
2.7.7	覆膜砂使用过程中常见缺陷、原因及解决措施	195

3.1 金属型铸造概述	197
3.1.1 金属型铸造与砂型铸造的比较	197
3.1.2 金属型铸件形成过程的特点	198
3.2 金属型铸造工艺	202
3.2.1 金属型铸造工艺流程	202
3.2.2 金属型铸造工艺	202
3.3 各种合金金属型铸造的特点	210
3.3.1 铸铁	210
3.3.2 铸钢	211
3.3.3 铜合金	211
3.3.4 轻合金	211
3.4 金属型铸件的工艺设计	212
3.4.1 铸件结构的工艺性分析	212
3.4.2 铸件在金属型中的浇注位置	213
3.4.3 铸件分型面的选择	214
3.4.4 浇注系统的设计	215
3.4.5 冒口的设计	217
3.4.6 金属型铸件的工艺参数	218
3.5 金属型的设计	218
3.5.1 金属型的结构形式	219
3.5.2 金属型主体设计	219
3.5.3 型芯的设计	221
3.5.4 金属型的排气	224
3.5.5 顶出铸件机构的设计	225
3.5.6 金属型的定位、导向及锁紧机构	227
3.5.7 金属型材料的选择	227
3.6 金属型铸件缺陷及防止	229
3.6.1 气孔	229
3.6.2 针孔	231
3.6.3 缩孔和缩松	232
3.6.4 渣孔	235
3.6.5 裂纹	238
3.6.6 冷隔及浇不足	240
3.6.7 白口	243

3.7 金属型铸造机械化及实例	244
3.7.1 手动金属型铸造机	244
3.7.2 气动及液压金属型铸造机	245
3.8 金属型铸造生产线及实例	247
3.8.1 铸铁磨球金属型浇铸及生产线	248
3.8.2 汽车、摩托车铝铸件金属型铸造及生产线	252
3.9 金属型铸造生产典型铸件	262
3.9.1 摩托车铝合金整体车轮的金属型铸造	262
3.9.2 大型铝活塞的金属型铸造	264
3.9.3 铝活塞铸造工艺的改进	267
3.9.4 金属型铸造水嘴手柄的缺陷分析	269
3.9.5 双液双金属复合铸造颚板新工艺	270
3.9.6 金属型铸造典型工艺	274

4

第4章 金属型覆砂铸造

281

4.1 金属型覆砂铸造概述	281
4.1.1 铁型覆砂铸造生产原理	281
4.1.2 铁型覆砂铸造的热交换特点	282
4.1.3 铁型覆砂铸件的冷却速度	283
4.1.4 工艺流程	283
4.1.5 铁型覆砂铸造的应用	283
4.1.6 铁型覆砂铸造生产线	285
4.2 热固自硬热芯盒用树脂砂	285
4.2.1 糠醇改性脲醛树脂砂	285
4.2.2 糠醇改性酚醛树脂砂	291
4.2.3 其他树脂砂	292
4.3 铁型覆砂铸造生产铸件实例	293
4.3.1 轮毂类铸件	293
4.3.2 六缸球墨铸铁曲轴	296
4.3.3 铁型覆砂铸造工艺在灰铁薄壁件砂带机机床上的应用	299
4.3.4 铁型覆砂铸造技术在缸套毛坯生产上的应用	300
4.3.5 曳引轮铁模覆砂铸造及生产过程控制	302
4.4 铁型覆砂和铸件缺陷及防止	304
4.4.1 铁型覆砂(铁模覆砂、覆砂金属型)	304
4.4.2 铁模覆砂铸件缺陷及防止	305

5.1 陶瓷型铸造概述	306
5.1.1 陶瓷型铸造工艺过程	306
5.1.2 陶瓷型铸造原理	306
5.1.3 铸造特点	307
5.1.4 应用范围	308
5.2 陶瓷型铸件的工艺设计	308
5.2.1 母模材料选择	308
5.2.2 母模表面质量	309
5.2.3 母模尺寸精度	310
5.2.4 铸造斜度	310
5.2.5 铸件收缩率	310
5.2.6 分型面确定	310
5.2.7 浇注系统和冒口设计	311
5.2.8 加工余量	312
5.2.9 基准面选定	313
5.3 铸造工艺	314
5.3.1 铸型用原辅材料	314
5.3.2 制型工艺	319
5.4 常见的陶瓷型缺陷及其防止方法	325
5.4.1 型裂	325
5.4.2 气孔	326
5.4.3 铸件尺寸超差	326
5.4.4 铸件表面粗糙	327
5.4.5 铸型常见缺陷及防止方法	328

6.1 离心铸造概述	329
6.1.1 离心铸造基本原理	329
6.1.2 离心铸造分类	329
6.1.3 离心铸造特点	331
6.1.4 离心铸造原理	331
6.1.5 离心铸造应用	333
6.2 离心铸造工艺	334

6.2.1	铸型转速	334
6.2.2	浇铸系统	336
6.2.3	浇注定量	336
6.2.4	浇铸装置	337
6.2.5	熔渣的利用	339
6.2.6	金属液的过滤	339
6.2.7	涂料的使用	339
6.2.8	浇注温度	340
6.2.9	铸件脱型	340
6.2.10	离心镶铸	340
6.2.11	离心渗铸	340
6.2.12	离心铸造特殊工艺措施	341
6.3	离心铸造装备	341
6.3.1	卧式悬臂离心铸造机	341
6.3.2	滚筒式离心铸造机	341
6.3.3	立式离心铸造机	341
6.4	离心铸型	344
6.4.1	离心铸型设计	344
6.4.2	离心铸型结构特点	346
6.5	离心铸铁管生产工艺	350
6.5.1	铸铁管种类及主要用途	350
6.5.2	水冷金属型离心铸管	350
6.5.3	树脂砂离心铸管	353
6.5.4	金属型涂料离心铸管(热模法)	353
6.5.5	离心铸铁轧辊	355
6.5.6	离心铸造汽缸套	357
6.5.7	离心铸造钢管	358
6.5.8	离心铸造钢背轴套	358

7

第7章 挤压铸造与半固态成型

361

7.1	挤压铸造	361
7.1.1	挤压铸造工艺过程	361
7.1.2	挤压铸造工艺特点	363
7.1.3	挤压铸造应用范围	363
7.1.4	挤压铸造机	364
7.1.5	挤压铸造及铸型设计	366

7.2 半固态成型	373
7.2.1 工艺原理	374
7.2.2 半固态合金浆料的制备	375
7.2.3 成型方法	376
7.2.4 技术优势	377

8

第8章 反重力铸造

379

8.1 反重力铸造概述	379
8.1.1 反重力铸造分类	379
8.1.2 反重力铸造特点	380
8.1.3 反重力铸造工艺	381
8.2 反重力铸造工艺	382
8.2.1 低压铸造	382
8.2.2 差压铸造	392
8.2.3 真空吸铸	398

9

第9章 连续铸造

412

9.1 连续铸造技术原理及工艺特点	412
9.1.1 连续铸造技术原理	412
9.1.2 连续铸造的特点	412
9.1.3 连续铸造分类与用途	413
9.2 连续铸管	414
9.2.1 连续铸铁管的工艺原理	414
9.2.2 连续铸铁管工艺流程	414
9.2.3 连续铸铁管应用范围	414
9.2.4 连续铸铁管设备	416
9.2.5 连续铸管机	418
9.2.6 结晶器	427
9.2.7 浇注系统	442
9.2.8 连续铸管工艺	443
9.2.9 连续铸铁管主要缺陷及防止方法	453
9.3 铸铁型材水平连续铸造	456
9.3.1 铸铁水平连铸工艺过程	456
9.3.2 铸铁型材的组织性能特点	458

9.3.3 铸铁型材的应用	465
9.3.4 水平连续铸造铸铁型材的生产	465
9.3.5 铸铁型材质量检验及常见缺陷分析	469
9.4 高致密零缺陷铸铁空心型材的连续铸造	472
9.5 连续铸造钢坯	475

10

第 10 章 增材制造技术——3D 打印 478

10.1 增材制造技术	478
10.1.1 3D 打印概述	478
10.1.2 增材制造技术的分类	479
10.1.3 增材制造的关键技术	480
10.1.4 增材制造技术的优势	480
10.2 增材制造的技术应用	480
10.2.1 消费品和电子领域	480
10.2.2 航空领域	480
10.2.3 在航空航天应用的实例	482
10.2.4 高性能激光修复	486
10.3 增材制造技术为铸造业带来的机遇	488

参考文献 491