

普通高等教育“十二五”规划教材



铸造工艺 设计及应用

主 编 王再友 王泽华
副主编 詹绍思 陈慧敏 张炎



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

铸造工艺设计及应用

主 编 王再友 王泽华
副主编 詹绍思 陈慧敏 张 炎
参 编 柳秉毅 纪秀林 谈淑咏
主 审 糜朝华



机械工业出版社

本书系统阐述了铸造工艺设计, 铸造工艺方案和工艺参数的确定, 零件结构的铸造工艺性, 砂芯及浇注系统和补缩系统设计, 铸造应力、变形和裂纹的形成机理及防止方法, 铸造工艺装备设计, 特种铸造工艺设计; 详细介绍了艺术铸造方法及工艺设计和铸造工艺设计数字化技术等。

本书注重理论联系实际, 注重实用性和先进性, 在系统阐述铸造工艺设计专业基础知识的同时, 介绍了铸造工艺计算机辅助设计和铸造快速成形等先进铸造工艺技术, 特别注意吸取国内外最新研究成果及新技术与新工艺应用。本书既可作为高等院校材料类和机械类相关专业本科生教材, 也可作为企业铸造工程技术人员培训教材, 并可供从事材料成形加工技术研究的科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造工艺设计及应用/王再友, 王泽华主编. —北京: 机械工业出版社, 2016. 1

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-52081-8

I. ①铸… II. ①王…②王… III. ①铸造—工艺设计—高等学校—教材
IV. ①TG24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 266679 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: 丁昕祯 责任编辑: 丁昕祯 章承林 任正一

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京玥实印刷有限公司印刷

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.5 印张·484 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-52081-8

定价: 39.80 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

服务咨询热线: 010-88379833 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649 机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

铸造是装备制造业的基础，也是国民经济的基础产业。2009年国务院颁布的《装备制造业调整和振兴规划》，把大型、关键铸锻件、基础配套件、基础工艺提升到与主机产品同等重要的战略高度。2013年我国颁布实施了《铸造行业准入条件》，以加快铸造产业结构调整 and 转型升级，这需要大量的铸造专业技术人才。加强教材建设，完善教学内容，建立健全人才的培养、吸引、使用的科学机制，是当今我国铸造产业发展亟待解决的重要课题。

近年来，随着科学技术的发展，铸造工艺设计在新技术应用方面也取得了长足进展。但是，现有教材的编写大都缺乏企业工程技术人员参与，内容陈旧，缺乏实用性和先进性，不能反映当今铸造工艺技术的发展及应用。根据铸造产业发展对专业技术人员的知识结构与能力的要求，结合我国铸造行业实际生产情况，校企携手设计教材内容，共同打造具有科学性、应用性、先进性和适用性的教材，是我国铸造专业技术人才工程教育的迫切需要。

本书编写由校企与行业协会合作完成，内容注重理论联系实际，注重实用性及前沿工艺技术应用。在系统阐述铸造工艺设计专业基础知识的同时，介绍了特种铸造和艺术铸造工艺设计，还介绍了绿色铸造和计算机辅助设计等数字化技术的应用，特别注意吸取国内外最新研究成果及新技术与新工艺的应用，可更好地满足广大铸造工程技术人员的需要。本书既可作为高等院校材料类和机械类相关专业本科生教材，也可作为企业铸造工程技术人员培训教材，并可供从事材料成形加工技术研究的科研人员参考。

本书由南京工程学院王再友、河海大学王泽华主编。参加编写的有中国艺术铸造协会秘书长詹绍思，河南科技大学陈慧敏，南京工程学院张炎、柳秉毅和谈淑咏，河海大学纪秀林。本书编写分工如下：第1章由谈淑咏编写，第2章、第4章由王再友编写，第3章由纪秀林编写，第5章由王泽华编写，第6章由柳秉毅编写，第7章由陈慧敏编写，第8章由詹绍思编写，第9章由张炎编写。

本书由江苏省铸造协会会长、航天晨光艺术制像分公司总经理糜朝华主审。王庆林高级工程师等从不同角度提出了宝贵的建议和修改意见。本书编写参考了有关教材和资料，并借鉴了一些企业铸件生产实例。在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 前言 | |
| 第 1 章 铸造工艺设计概论 | 1 |
| 1.1 铸造工艺设计概述 | 1 |
| 1.1.1 铸造工艺设计依据 | 1 |
| 1.1.2 铸造工艺设计内容 | 2 |
| 1.1.3 铸造工艺设计与经济指标和环境保护的关系 | 3 |
| 1.2 铸造方法的确定 | 4 |
| 1.2.1 铸造方法的分类 | 4 |
| 1.2.2 铸造方法的选择 | 6 |
| 1.3 砂型铸造工艺设计 | 7 |
| 1.3.1 砂型铸造生产工艺过程 | 7 |
| 1.3.2 砂型铸造工艺设计步骤 | 7 |
| 1.4 铸造技术发展及应用 | 8 |
| 1.4.1 造型与制芯技术 | 8 |
| 1.4.2 特种铸造与近净成形技术 | 9 |
| 1.4.3 合金熔炼与精炼技术 | 9 |
| 1.4.4 晶粒细化与凝固技术 | 10 |
| 1.4.5 计算机应用技术 | 11 |
| 1.4.6 无模铸造技术 | 11 |
| 小结 | 12 |
| 复习思考题 | 13 |
| 第 2 章 铸造工艺设计基础 | 14 |
| 2.1 零件结构的铸造工艺性 | 14 |
| 2.1.1 铸件质量对零件结构的要求 | 14 |
| 2.1.2 铸造工艺对零件结构的要求 | 19 |
| 2.2 砂型铸造工艺方案 | 22 |
| 2.2.1 造型与制芯方法的选择 | 22 |
| 2.2.2 浇注位置与分型面的确定 | 23 |
| 2.2.3 砂箱中铸件数目的确定及排列 | 28 |
| 2.3 铸造工艺参数 | 31 |
| 2.3.1 铸件尺寸公差 | 31 |
| 2.3.2 铸件重量公差 | 34 |
| 2.3.3 机械加工余量 | 34 |
| 2.3.4 铸造收缩率 | 36 |
| 2.3.5 起模斜度 | 37 |
| 2.3.6 最小铸出孔及槽 | 39 |
| 2.3.7 其他铸造工艺参数 | 40 |
| 2.4 砂芯设计 | 42 |
| 2.4.1 砂芯的分类 | 42 |
| 2.4.2 砂芯设计的原则 | 43 |
| 2.4.3 砂芯的固定和定位 | 45 |
| 2.4.4 芯头的尺寸和间隙 | 49 |
| 2.4.5 芯撑和芯骨 | 52 |
| 2.4.6 砂芯的排气 | 53 |
| 2.5 出气孔设计 | 55 |
| 2.5.1 出气孔的作用及设置原则 | 55 |
| 2.5.2 出气孔的结构形状和尺寸 | 55 |
| 2.6 铸造工艺图及工艺卡 | 58 |
| 2.6.1 铸造工艺符号及表示方法 | 58 |
| 2.6.2 铸造工艺图和铸件图 | 59 |
| 2.6.3 铸造工艺卡 | 61 |
| 小结 | 62 |
| 复习思考题 | 62 |
| 第 3 章 浇注系统设计 | 63 |
| 3.1 液态金属充型 | 63 |
| 3.1.1 液态金属的充型特点 | 63 |
| 3.1.2 液态金属的流动性及充型能力 | 64 |
| 3.2 液态金属在浇注系统中的流动 | 65 |
| 3.2.1 液态金属在浇口杯中的流动 | 65 |
| 3.2.2 液态金属在直浇道中的流动 | 66 |
| 3.2.3 液态金属在横浇道中的流动 | 66 |
| 3.2.4 液态金属在内浇道中的流动 | 67 |
| 3.3 浇注系统的基本类型 | 68 |
| 3.3.1 按浇注系统各组元截面比例分类 | 68 |
| 3.3.2 按内浇道在铸件上的位置分类 | 69 |
| 3.4 浇注系统阻流截面积计算 | 72 |
| 3.4.1 阻流面积计算 | 72 |
| 3.4.2 浇注时间的确定 | 73 |
| 3.4.3 金属液在型内的上升速度 | 74 |
| 3.4.4 流量系数的确定 | 75 |
| 3.4.5 金属液充型临界速度 | 76 |

| | | | |
|---------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 3.5 浇注系统结构设计 | 76 | 小结 | 134 |
| 3.5.1 浇注系统各组元截面面积计算 | 76 | 复习思考题 | 134 |
| 3.5.2 浇注系统各组元结构设计 | 77 | 第5章 铸造应力、变形和裂纹 | 135 |
| 3.5.3 阶梯式浇注系统设计 | 82 | 5.1 热裂 | 135 |
| 3.5.4 垂直分型浇注系统设计 | 83 | 5.1.1 热裂形成机理 | 136 |
| 3.6 常用铸造合金浇注系统设计 | 84 | 5.1.2 热裂的影响因素 | 138 |
| 3.6.1 灰铸铁件浇注系统 | 85 | 5.1.3 铸件热裂的防止方法 | 142 |
| 3.6.2 球墨铸铁件浇注系统 | 87 | 5.2 铸造应力 | 145 |
| 3.6.3 铸钢件浇注系统 | 88 | 5.2.1 铸件冷却过程中产生的 | |
| 3.6.4 轻合金铸件浇注系统 | 90 | 热应力 | 145 |
| 3.6.5 铜合金铸件浇注系统 | 92 | 5.2.2 铸件冷却过程中产生的 | |
| 3.7 过滤网在浇注系统中的应用 | 93 | 相变应力 | 149 |
| 3.7.1 玻璃纤维过滤网 | 93 | 5.2.3 铸件冷却过程中产生的机械 | |
| 3.7.2 多孔陶瓷过滤网 | 94 | 阻碍应力 | 151 |
| 小结 | 95 | 5.2.4 减少铸造应力的方法 | 151 |
| 复习思考题 | 96 | 5.2.5 消除铸造残余应力的方法 | 153 |
| 第4章 补缩系统设计 | 97 | 5.3 变形和冷裂 | 154 |
| 4.1 铸件凝固及缩孔和缩松缺陷 | 97 | 5.3.1 铸件的变形 | 154 |
| 4.1.1 铸件凝固方式及其影响因素 | 97 | 5.3.2 减少铸件变形的措施 | 156 |
| 4.1.2 合金凝固方式对铸件质量的 | | 5.3.3 铸件的冷裂与防止措施 | 157 |
| 影响 | 98 | 小结 | 159 |
| 4.1.3 铸件凝固与缩孔类缺陷 | 99 | 复习思考题 | 160 |
| 4.2 冒口的分类及设计内容 | 101 | 第6章 铸造工艺装备设计 | 161 |
| 4.2.1 冒口的分类 | 101 | 6.1 模样 | 161 |
| 4.2.2 冒口的设计内容 | 102 | 6.1.1 模样的分类及选材 | 161 |
| 4.3 铸钢件冒口设计 | 107 | 6.1.2 金属模样的结构设计与 | |
| 4.3.1 模数法 | 108 | 尺寸计算 | 163 |
| 4.3.2 三次方程法 | 114 | 6.2 模板 | 167 |
| 4.3.3 比例法 | 114 | 6.2.1 模板的分类 | 167 |
| 4.4 铸铁件冒口设计 | 116 | 6.2.2 模底板的结构与尺寸 | 168 |
| 4.4.1 铸铁件凝固与收缩的特点 | 116 | 6.2.3 模样在模底板上的布置与装配 | 172 |
| 4.4.2 铸铁件通用冒口 | 117 | 6.3 芯盒 | 178 |
| 4.4.3 铸铁件实用冒口 | 117 | 6.3.1 芯盒的分类 | 178 |
| 4.5 有色金属铸件冒口设计 | 123 | 6.3.2 普通金属芯盒的设计 | 180 |
| 4.5.1 铝合金铸件冒口 | 123 | 6.3.3 热芯盒的设计 | 185 |
| 4.5.2 铜合金铸件冒口 | 125 | 6.3.4 壳芯盒的设计 | 188 |
| 4.6 特种冒口 | 126 | 6.3.5 冷芯盒的设计 | 190 |
| 4.6.1 大气压力冒口 | 127 | 6.4 砂箱 | 191 |
| 4.6.2 保温冒口和发热冒口 | 128 | 6.4.1 砂箱的分类及选择 | 191 |
| 4.6.3 易割冒口 | 129 | 6.4.2 通用砂箱设计 | 192 |
| 4.7 冷铁设计 | 130 | 6.4.3 特殊砂箱的结构和尺寸 | 196 |
| 4.7.1 外冷铁 | 130 | 6.5 其他工艺装备 | 196 |
| 4.7.2 内冷铁 | 132 | 6.5.1 浇注系统模具 | 196 |

| | | | |
|------------------------|------------|---------------------------------------|------------|
| 6.5.2 压砂板和填砂框 | 197 | 8.1.1 我国艺术铸造发展史 | 264 |
| 6.5.3 烘芯板 | 198 | 8.1.2 我国艺术铸造现状 | 266 |
| 小结 | 198 | 8.1.3 艺术铸造发展趋势 | 267 |
| 复习思考题 | 198 | 8.2 艺术铸造工艺技术 | 267 |
| 第7章 特种铸造 | 200 | 8.2.1 艺术铸造产品的种类及合金 | 267 |
| 7.1 熔模铸造 | 200 | 8.2.2 艺术铸造工艺方法 | 270 |
| 7.1.1 概述 | 200 | 8.2.3 艺术铸件的后处理 | 275 |
| 7.1.2 浇冒口设计 | 201 | 8.3 艺术铸造工艺设计 | 276 |
| 7.1.3 压型设计 | 202 | 8.3.1 艺术铸造产品生产工艺流程 | 276 |
| 7.1.4 蜡模制造 | 207 | 8.3.2 艺术铸造工艺设计内容及程序 | 278 |
| 7.1.5 型壳制造 | 211 | 8.3.3 艺术铸造产品工艺设计实例 | 280 |
| 7.1.6 脱壳清理 | 214 | 小结 | 283 |
| 7.2 消失模铸造 | 215 | 复习思考题 | 283 |
| 7.2.1 概述 | 215 | 第9章 铸造工艺设计数字化技术 | 284 |
| 7.2.2 浇冒口设计 | 216 | 9.1 铸造工艺设计 CAD 技术 | 284 |
| 7.2.3 消失模的制造及其材料 | 217 | 9.1.1 铸造工艺设计 CAD 基本概念 | 284 |
| 7.2.4 消失模涂料及造型工艺 | 220 | 9.1.2 铸造工艺设计 CAD 技术开发 应用 | 285 |
| 7.3 金属型铸造 | 223 | 9.1.3 铸造工艺设计 CAD 发展趋势 | 288 |
| 7.3.1 概述 | 223 | 9.2 铸造 CAE 技术 | 288 |
| 7.3.2 金属型设计 | 224 | 9.2.1 铸造充型和凝固过程 CAE 技术 的基本原理 | 289 |
| 7.3.3 金属型铸造工艺 | 229 | 9.2.2 铸造 CAE 数值模拟分析的 方法过程 | 290 |
| 7.4 压力铸造 | 230 | 9.2.3 铸造 CAE 软件及应用 | 291 |
| 7.4.1 概述 | 230 | 9.2.4 铸造 CAE 技术发展趋势 | 293 |
| 7.4.2 压铸模设计 | 232 | 9.3 逆向工程与铸造模具设计 制造技术 | 294 |
| 7.4.3 压铸工艺 | 238 | 9.3.1 逆向工程的概念 | 294 |
| 7.5 低压铸造 | 241 | 9.3.2 逆向工程工艺流程 | 294 |
| 7.5.1 概述 | 241 | 9.3.3 逆向建模的关键技术 | 294 |
| 7.5.2 浇冒口系统设计 | 242 | 9.3.4 逆向工程在模具设计制造 中的应用 | 296 |
| 7.5.3 低压浇注工艺 | 244 | 9.4 铸造快速成形技术 | 297 |
| 7.6 离心铸造 | 248 | 9.4.1 快速成形的概念 | 297 |
| 7.6.1 概述 | 248 | 9.4.2 常用快速成形技术 | 298 |
| 7.6.2 离心铸造铸型 | 249 | 9.4.3 快速成形铸造模具制造 | 302 |
| 7.6.3 离心铸造工艺 | 251 | 9.4.4 数字化无模铸造技术 | 303 |
| 7.7 其他类型特种铸造 | 254 | 小结 | 304 |
| 7.7.1 差压铸造 | 254 | 复习思考题 | 304 |
| 7.7.2 连续铸造 | 256 | 参考文献 | 305 |
| 7.7.3 挤压铸造 | 258 | | |
| 小结 | 261 | | |
| 复习思考题 | 261 | | |
| 第8章 艺术铸造 | 264 | | |
| 8.1 概述 | 264 | | |

第1章 铸造工艺设计概论

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，是当今机械制造工业中毛坯和零件的主要成形方法。铸件在机械制造中占有很大的比例，如机床中铸件占60%~80%，汽车中铸件占25%，拖拉机中铸件占50%~60%。铸件品质直接影响机械产品质量。我国由机械制造大国向机械制造强国迈进，企业能否提供高品质铸件是关键。

铸造是一个十分复杂的过程，工序多，铸件质量受铸型、合金熔炼、充型和凝固等诸多因素的影响。先进技术和科学管理是铸造企业生产高品质、低成本铸件必不可少的两个条件。只有在铸件生产之前进行科学而合理的铸造工艺设计，提高工艺技术水平，才能保证铸件质量，达到优质高产、低成本的目的。

1.1 铸造工艺设计概述

铸造是熔炼金属，制造铸型，并将熔融金属浇入铸型，凝固后获得具有一定形状、尺寸和性能金属零件毛坯的成形方法，所铸出的产品称为铸件。铸造生产包括造型制芯、合金熔炼、浇注充型、冷却凝固、清理修整和质量检验等多道工序，涉及成分、组织、性能、形状及尺寸等铸件质量控制。

铸造工艺设计是根据零件的结构特点、技术要求、生产批量和生产条件等，确定铸造工艺方案和工艺参数，绘制铸造工艺图，编制生产工艺等技术文件的过程，又称铸造工艺规程设计。铸造工艺设计应在保证铸件质量的可靠性和稳定性基础上，尽可能达到优质、高效益、低成本、少污染的目的，主要体现在以下几个方面：

- 1) 采用先进的工艺技术获得高质量、低成本的铸件。
- 2) 有利于生产过程管理，根据工艺文件要求进行工序检查，便于寻找铸造缺陷的产生原因及防止措施。
- 3) 有利于生产准备，根据工艺设计进行生产前准备，如准备砂箱、芯骨、原材料等，有利于保证正常的生产秩序，方便生产计划调度。
- 4) 有利于生产组织管理，不断积累并总结生产经验，提高铸造生产工艺技术和管理水平。

1.1.1 铸造工艺设计依据

在铸造工艺设计前，设计者不仅要了解零件的结构特点及技术要求和生产任务，还要熟悉企业生产条件，这些都是铸造工艺设计的出发点，也是铸造工艺设计的基本依据。此外，要求设计者有一定的生产经验和设计经验，并对铸造先进技术有所了解，具有经济观点和发展观点，才能很好地完成设计任务。铸造工艺设计应着重从以下四个方面进行综合考虑：

1. 产品技术要求和生产任务

- (1) 零件结构的铸造工艺性 首先必须审查零件的结构是否符合铸造工艺要求，若认

为有必要修改零件结构时，必须与原设计单位或订货单位共同商量，在取得一致意见后进行修改，并以修改后的图样作为设计依据。在此环节，重点要从铸件质量和工艺操作两方面进行零件结构铸造工艺性分析，包括铸件壁厚、形状结构、复杂程度及铸件材料的铸造性能等。

(2) 零件的技术要求 通常主要有材质牌号、金相组织、力学性能、尺寸精度和表面粗糙度等表面质量和内在质量以及其他特殊性能要求，如是否经水压、气压试验，零件的服役条件等。

(3) 产品数量及生产期限 铸件生产可分为大批量生产、成批生产和单件生产三种类型。产品数量的多少是铸造工艺设计的重要依据。对于大批量生产尽可能采用专用设备和装备，成批生产一般使用通用设备和装备，单件产品生产应使用尽可能简单的工艺装备，以便缩短生产周期，并获得最大的经济效益。

生产期限包括生产准备周期（即工艺装备设计制造时间）和铸件生产周期。铸件生产周期主要取决于铸造方法、铸件的复杂程度和质量要求及生产条件等。一般来讲，相对于压力铸造和金属型铸造，砂型铸造生产准备周期较短；若铸件结构复杂、质量要求高，则生产准备周期和生产周期较长。

2. 企业生产条件

企业生产条件主要包括设备能力、原材料供应及工艺技术水平等。

1) 设备能力，包括起重机的起重量和最大起重高度、熔炉的形式及吨位和生产率、造型和制芯机种类、机械自动化程度、烘干炉和热处理炉的能力、地坑尺寸、厂房高度和大门尺寸等。

2) 车间原材料的应用情况和供应情况，包括来源和质量稳定性等。

3) 工人技术水平和生产经验，车间在合金熔炼和造型等方面的工艺技术及生产管理水平。

3. 经济性

成本是企业为生产产品和提供服务而发生的耗费。如果成本控制不力，可能导致企业亏损。设计者应了解各种原材料、炉料的质量及价格、能耗及工人的操作技术水平与工时费用、生产设备与工艺装备成本等费用，以便在保证铸件质量的同时能兼顾铸造方法的经济性，制订合理的工艺方案，尽可能降低铸件成本。

4. 节能环保

节约能源和保护环境是国内外极为关注的社会与经济发展问题。铸造工艺方案的确定必须综合考虑资源和环境的关系，应了解新技术、新工艺、新设备和新材料的发展及应用，采用节能降耗、资源综合利用率高、废弃物排放量少的工艺方法，选用低能耗、与环境友好的工艺方案，让环境保护从治理转为以防为主，力求做到清洁生产。

1.1.2 铸造工艺设计内容

铸造工艺设计内容的繁简程度，主要取决于铸件批量的大小、生产要求和生产条件，通常包括铸造工艺图、铸件（毛坯）图、铸型装配图（合箱图）、铸造工艺卡及操作工艺规程等。广义地讲，铸造工艺装备的设计也属于铸造工艺设计的内容，例如模样图、芯盒图、砂箱图、压铁图、专用量具图和样板图、组合下芯夹具图等。

对于大量生产的定型铸件、特殊重要的单件铸件生产, 铸造工艺设计内容较多, 工艺制订得较为详细。但对于单件、小批生产的一般性铸件产品, 设计内容可以简化。在最简单的情况下, 仅绘一张铸造工艺图即可。铸造工艺设计的一般内容和设计程序见表 1-1。

表 1-1 铸造工艺设计的一般内容和设计程序

| 项 目 | 内 容 | 用途及应用范围 | 设计程序 |
|-------|---|--|--|
| 铸造工艺图 | 在零件图上, 按 JB/T 2435—2013 规定的铸造工艺符号表示出浇注位置、分型面、加工余量、铸造收缩率(文字说明)、起模斜度、反变形量、分型负数、工艺补正量、浇注系统、冒口、内外冷铁、铸肋、砂芯形状和芯头结构等 | 用于制造模样、模板、芯盒等工艺装备, 是设计模具的依据, 也是生产准备和铸件验收的根据。适用于各种批量的生产 | (1) 零件技术条件和铸件结构工艺性分析 (2) 选择铸造及造型方法 (3) 确定浇注位置和分型面 (4) 选用工艺参数 (5) 设计浇注系统、冒口、冷铁和铸肋等 (6) 砂芯设计 (7) 工装、夹具设计 |
| 铸件图 | 反映铸件实际形状、尺寸和技术要求。用标准规定符号和文字标注。反映内容: 加工余量、工艺余量、不铸出的孔槽、铸件尺寸公差、加工基准、铸件金属牌号、热处理规范、铸件验收技术条件等 | 是铸件检验和验收、机械加工夹具设计的依据。适用于成批、大量生产或重要的铸件 | (8) 在完成铸造工艺图的基础上, 画出铸件图 |
| 铸型装配图 | 表示出浇注位置、分型面、砂芯数目、固定和下芯顺序、浇注系统、冒口和冷铁布置、砂箱结构和尺寸等 | 是生产准备、合箱、检验、工艺调整的依据。适用于成批、大量生产的重要件, 以及单件生产的重要件 | (9) 通常在完成砂箱设计后画出 |
| 铸造工艺卡 | 说明造型、造芯、浇注、开箱、清理等工艺操作过程及要求 | 用于生产管理和经济核算。依据批量大小, 填写必要内容 | (10) 综合整个设计内容 |

1.1.3 铸造工艺设计与经济指标和环境保护的关系

减少废弃物排放, 降低环境污染, 对废弃物无害化处理, 变废为宝, 是当今社会发展对铸造生产的必然要求。铸造工艺方案的确定必须综合考虑铸件成本、节约能源和环境保护问题, 从零件结构的铸造工艺性改进、造型和制芯工艺方法选择、铸造工艺方案确定、浇注系统和冒口设计、铸件清理工艺方法等方面出发, 采用合理、先进的铸造工艺和设备及新材料和新技术, 尽可能减少污染、保护环境、降低成本, 力求在保证铸件质量可靠性和稳定性的同时, 取得良好的社会效益和经济效益。例如, 铸钢件采用保温冒口, 不仅工艺出品率可以提高 10% ~ 20%, 还可减少能耗和炉料损耗以及熔炼等对环境造成的污染, 降低综合生产成本。

砂型铸造是铸件生产的主要方法, 占整个铸件产量的 80% ~ 90%。由造型材料带来的固体废弃物和粉尘对环境的污染严重, 解决旧砂的再生回用问题是减少环境污染的有效措施。尽量采用环境友好的无机粘结剂或少粘结剂的铸造工艺, 如真空负压干砂造型消失模铸造工艺, 不仅可改善铸造条件, 更重要的是可以大大减少固体废弃物排放, 解决废旧砂排放

对环境造成的污染。此外，铸造工艺设计要注意节约能源。例如，采用湿型铸造法比干型铸造法要节省燃料消耗，用自硬砂型取代普通干砂型，制芯采用冷芯盒法，都可以节约燃料或减少电力消耗。

为了保护环境和保证工人身体健康，铸造工艺设计要尽可能避免选用有毒害和高粉尘的工艺方法。一方面，采用无污染、低污染工艺或无毒、低毒工艺，实现无污染替代有污染，低污染替代高污染，无毒替代有毒，低毒替代高毒。例如，采用 N_2 、Ar气体精炼工艺替代六氯乙烷精炼熔炼铝合金，采用无毒气硬树脂砂、无毒精炼变质剂、水性涂装等；另一方面，实现生产过程密闭化、自动化，严格遵守操作规程，配备防护用品。

对铸造生产过程中存在的污染，应采用相应的对策，以确保安全和不污染环境。例如，三乙胺冷芯盒制芯工艺对三乙胺气体等应进行严格的控制，必须经过有效地吸收、净化处理并达到排放标准后，才可以排放投入大气。对于球化处理、浇注、落砂、清理打磨等造成的烟气和高粉尘空气，也应净化后排放。

为推进我国铸造行业健康有序、协调发展，加快铸造产业结构调整和企业转型升级，2013年国家工业和信息化部颁布了《铸造行业准入条件》，对铸造企业的建设条件和布局、工艺装备、企业规模（产能/产值）、产品质量、能耗环保和职业健康安全及劳动保护、人员素质、监督管理等提出了明确的要求，主要体现在以下两个方面：

(1) 节能减排 企业应根据 GB/T 15587—2008 建立能源管理系统，降低熔化过程中的能耗，减少污染物排放和废砂数量，提高工艺出品率、余热回收利用率和废水回收利用率。采用砂型铸造工艺的企业应配备旧砂处理设备，提高旧砂再生比例，各种旧砂的回用率应达到：水玻璃砂（再生） $\geq 60\%$ ，呋喃树脂自硬砂（再生） $\geq 90\%$ ，碱酚醛树脂自硬砂（再生） $\geq 70\%$ ，黏土砂 $\geq 95\%$ 。

(2) 环境保护 冲天炉、电弧炉等各种熔化炉及炉前处理工位均应配备有效的烟气排放与净化系统，感应电炉应配备有效的烟气排放装置，混砂、落砂、清理设备均应配备有效的通风除尘设施。炉料入炉前必须进行适当的净化处理，工艺废气（苯系物、酸雾、三乙胺等）重点产生工位配备适宜、有效的抽风净化设施，定期监测污染物的排放数值等，废气排放等必须达到国家及所在地污染物排放标准的要求。

1.2 铸造方法的确定

1.2.1 铸造方法的分类

铸造是一种既经济又便捷的金属成形工艺，适用范围广、成本较低，是制造装备业的基础。铸造方法很多，通常按铸型材料、铸型特性、充型和凝固条件进行分类。常用的铸造方法及其适用范围和工艺特点见表 1-2。

1. 按铸型材料、充型和凝固条件分类

根据铸型材料、充型和凝固条件的不同，铸造可分为砂型铸造和特种铸造。

(1) 砂型铸造 砂型铸造是以型砂为造型材料制备铸型并在重力下浇注的铸造方法，具有适应性广、成本低廉等优点，是应用最为广泛的铸造方法。砂型铸造按造型工艺方法不同，可分为手工造型和机器造型两大类。手工造型操作灵活，工艺装备简单，适应性强，适

表 1-2 常用铸造方法及其适用范围和工艺特点

| 铸造方法 | 铸件材质 | 铸件质量 | 表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$ | 铸件复杂程度 | 铸件尺寸公差等级 | 适用范围 | 工艺特点 |
|-------|-------------|----------|------------------------|------------|----------|---|--|
| 砂型铸造 | 各种合金 | 几十克~几百吨 | 12.5~50 | 复杂铸件 | CT8~CT14 | 最常用的铸造方法。手工造型适用于单件、小批量和难以使用造型机的形状复杂的大型铸件；机器造型适用于批量生产的中、小型铸件 | 手工造型：灵活、易行，但效率低，劳动强度大，尺寸精度和表面质量低 机器造型：尺寸精度和表面质量高，但投资大 |
| 熔模铸造 | 铸钢、有色合金 | 几克~几千克 | 1.6~12.5 | 任何复杂程度铸件 | CT4~CT9 | 各种批量的铸钢及高熔点合金的小型复杂精密铸件，特别适合于生产精密铸件 | 尺寸精度高、表面光洁，但工序繁多 |
| 消失模铸造 | 铝合金、铜合金、铁、钢 | 数十克~数吨 | 3.2~12.5 | 各种形状铸件 | CT6~CT9 | 各种类型铸件 | 无砂芯、铸件表面光洁，铸件结构设计灵活，生产清洁 |
| 陶瓷型铸造 | 铸钢及铸铁 | 几千克~几百千克 | 3.2~12.5 | 较复杂 | CT5~CT8 | 精密铸件 | 尺寸精度高、表面光洁，生产率低 |
| 金属型铸造 | 有色合金 | 几十克~20千克 | 6.3~12.5 | 中等复杂铸件 | CT6~CT9 | 大批量有色金属铸件 | 铸件精度、表面质量高，组织致密，力学性能好，生产率高 |
| 低压铸造 | 有色合金 | 几十克~几十千克 | 3.2~25 | 复杂铸件（可用砂芯） | CT6~CT9 | 最好是大批量的大、中型有色合金铸件，可生产薄壁铸件 | 铸件组织致密，工艺出品率高，可采用各种铸型，但生产率较低 |
| 压力铸造 | 铝、镁合金 | 几克~几十千克 | 1.6~12.5 | 复杂铸件（可用砂芯） | CT4~CT8 | 大量生产的各种有色合金中小型铸件、薄壁铸件 | 铸件尺寸精度高、表面光洁，生产率高，成本低，但设备成本高 |
| 离心铸造 | 铸铁 | 几十千克~几吨 | 1.6~12.5 | 一般为圆筒形铸件 | 取决于铸型材料 | 适合于生产大批量的旋转体铸件、各种直径的管件 | 铸件尺寸精度高、表面光洁，组织致密，生产率高 |

用于各种形状的铸件；机器造型生产效率高，铸件质量好，但设备和工艺装备费用高，生产准备时间较长，适用于中、小型铸件的成批或大量生产。

(2) 特种铸造 特种铸造是在铸型材料、充型和凝固等方面与砂型铸造有显著差别的铸造方法的统称，简单来说，除砂型铸造外的铸造方法可以统称为特种铸造。目前，特种铸造方法有 20 多种，常用的方法有熔模铸造、消失模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造、壳型铸造、陶瓷型铸造和挤压铸造等。

2. 按铸型特性分类

根据铸型特性的不同，铸造方法分为一次型铸造和永久型铸造。

(1) 一次型铸造 铸型只能浇注一次，此类方法有砂型铸造、熔模铸造、壳型铸造、石膏型铸造、磁型铸造、真空实型铸造等，铸型材料通常为非金属材料。

(2) 永久型铸造 铸型能反复使用，此类方法有金属型铸造、压力铸造、挤压铸造、离心铸造、真空吸铸、连续铸造等，铸型材料主要为金属材料，也有石墨型。

3. 按液态金属充型和凝固条件分类

根据充型和凝固条件的不同，铸造方法分为重力铸造和非重力铸造。

(1) 重力铸造 充型和凝固时仅受重力作用，没有其他附加外力作用，重力铸造也称自由浇注、重力浇注，此类方法有砂型铸造、金属型铸造、磁型铸造、熔模铸造等。

(2) 非重力铸造 充型和凝固时除受重力作用外，还受外加压力或离心力等其他外力的作用，此类方法有压力铸造、离心铸造、低压铸造、真空吸铸等。

1.2.2 铸造方法的选择

铸造工艺设计首要任务是选择合适的铸造方法。每种铸造方法各有其优缺点和适用范围，铸造方法的选择应从适用的合金种类和铸件结构及大小、铸件尺寸精度、表面粗糙度和内在质量等技术要求、生产批量和企业生产条件等方面出发，在技术、经济、生产条件以及资源利用和环境保护等方面进行综合考虑和分析比较，用最经济的铸造方法，在现有或可能的工艺装备条件下生产出符合质量要求的铸件。

在适用合金种类方面，铸造方法主要取决于铸型材料的耐热状况。砂型铸造所用硅砂耐火度达 1700°C ，比碳钢的浇注温度高出 100°C 左右，可用于铸钢、铸铁、有色金属等各种金属材料铸件。熔模铸造型壳由耐火度更高的刚玉粉、纯石英粉和硅砂制成，可用于生产熔点更高的合金钢铸件。金属型铸造、压力铸造和低压铸造一般使用金属铸型和金属型芯，即使表面刷上耐火涂料，耐火度也不高，一般只用于低熔点的有色金属铸件。

在适用铸件大小方面，铸造方法主要与铸型尺寸、金属熔炉、起重设备的能力等条件有关。砂型铸造和消失模铸造限制较小，可铸造小、中、大件。熔模铸造由于在操作过程中蜡型和型壳易变形，一般只宜于生产中、小型铸件。对于金属型铸造、压力铸造和低压铸造，由于制造大型金属铸型和金属型芯难度大、费用高和设备吨位的限制，一般用于生产中、小型铸件。

在适用铸件结构形状及复杂程度方面，凡是采用砂型铸造、熔模铸造和消失模铸造，铸件结构形状及复杂程度不受限制。离心铸造较适用于管、套等这一类特定形状的铸件。金属型铸造适合生产形状较为简单的铸件，不适宜生产形状复杂的薄壁铸件。压力铸造可生产出复杂形状的铸件，但压铸模费用高，只有铸件大量生产时压力铸造才是经济的。因为压铸件

生产率高,又能节省大量切削加工工时,综合计算零件成本还是经济的。

在铸件尺寸精度和表面粗糙度方面,铸造方法主要与铸型的精度和表面粗糙度有关。砂型铸造铸件的尺寸精度较差,表面粗糙度值较大。熔模铸造压型可加工得很精确、光洁,故蜡模也很精确,型壳无分型面,熔模铸造铸件尺寸精度很好,表面粗糙度值很小。由于压力铸造在高压、高速下成形,压铸模加工得较精确,压铸件尺寸精度也很好,表面粗糙度值很小。金属型铸造和低压铸造的金属铸型(型芯)不如压铸型精确、光洁,在重力或低压下成形,铸件的尺寸精度和表面粗糙度都优于砂型铸件。

在铸件生产批量方面,铸造方法还应和铸件产量相适应。砂型铸造、熔模铸造和消失模铸造可用于单件、小批量和大批量铸件生产,但低压铸造、压力铸造、离心铸造等铸造方法,因设备和模具的价格昂贵,只适合于批量生产。对于套、管和筒类等空回转体铸件的大量、成批生产,离心铸造可大大简化生产过程,不用浇冒口系统,工艺出品率高。此外,消失模铸造采用真空负压干砂造型工艺,可大大减少废弃物排放,粉尘、烟尘和噪声污染小,落砂容易,利用余热可进行高锰钢铸件的水韧处理和耐热铸钢件的固溶处理。因此,高锰钢铸件生产应优先采用消失模铸造,实现资源综合利用和保护环境的目的是。

1.3 砂型铸造工艺设计

1.3.1 砂型铸造生产工艺过程

砂型铸造造型材料价廉易得,铸型制造简便,铸造合金种类、铸件结构及大小和生产批量等几乎不受限制,既可以铸造外形和内腔十分复杂的铸件,如各种箱体、床身、机架等,还可生产几克到几百吨的铸件,对铸件的单件生产、成批生产和大量生产均能适应。砂型铸造生产工序多,涉及造型和制芯、合金熔炼、合箱和浇注、铸件清理和检验等若干工序。砂型铸造生产工艺过程如图1-1所示。

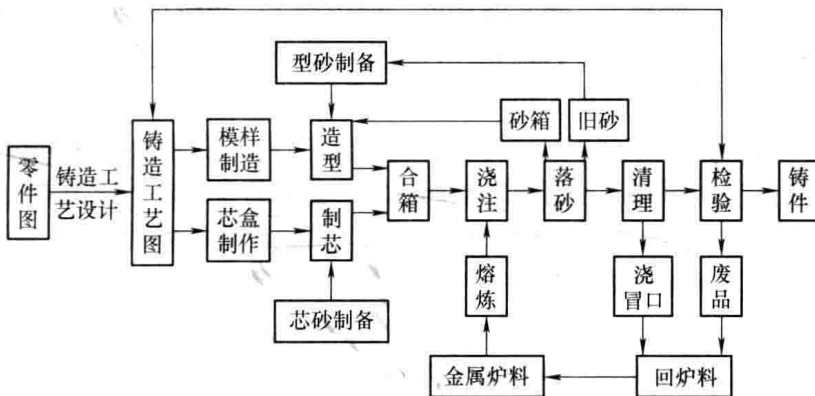


图 1-1 砂型铸造生产工艺过程

1.3.2 砂型铸造工艺设计步骤

砂型铸造工艺设计应根据零件结构的铸造工艺性分析,结合产量和技术要求及生产条件,选择造型和制芯方法及铸型类型,确定浇注位置和分型面,具体步骤如下:

- 1) 审查零件图样, 分析零件的技术要求、结构特点和铸造工艺性等。
- 2) 拟订工艺方案, 选择造型和制芯方法, 确定铸型类型、浇注位置、分型面以及防变形和防裂措施, 选择机械加工余量、起模斜度、铸造收缩率、不铸出孔和槽等工艺参数, 确定砂箱中铸件数量及排列。
- 3) 砂芯设计, 确定砂芯的类型、数量和芯头结构及下芯顺序等。
- 4) 浇注系统、冒口、冷铁、补贴、出气孔设计。
- 5) 绘制铸造工艺图及相关图样(铸件图、合箱图等)。
- 6) 工艺装备设计, 绘制模板图、芯盒图、专用量具和组合下芯夹具图等。
- 7) 编制操作工艺规程及铸造工艺卡等技术文件。

1.4 铸造技术发展及应用

近年来, 随着科学技术的进步, 铸造工装设备取得了很大进展, 在造型与制芯、合金熔炼与凝固控制等方面, 铸造生产技术获得了长足进展, 向绿色集约化铸造方向发展。目前, 近净成形可使铸件达到不加工或少量加工的目的; 计算机辅助设计和模拟分析在铸造生产中得到了广泛应用, 铸件开发周期和成本大幅度降低, 质量明显提高; 3D 快速成形技术进一步推动了铸造技术的发展, 选择性激光烧结技术已成功用于复杂精密铸件制造, 提高了铸件新产品的开发效率和结构设计的灵活性。

1.4.1 造型与制芯技术

造型和制芯是铸件形成过程中的关键工序之一, 对铸件质量、制造成本、生产效率、劳动强度和环境污染等各方面都有十分重要的影响。

(1) 黏土砂湿型造型工艺 气冲造型具有砂型紧实度高、均匀合理、能生产复杂铸件、噪声小、节能等优点。静压造型消除了震实造型机的噪声污染, 大大改善了作业环境; 最后采用压实板在型砂上进一步压实, 紧实效果好, 使铸型上、下硬度均匀, 铸件尺寸精度高。射压、气冲造型和静压造型等高度机械化、自动化、高密度湿型造型工艺具有成本低、污染小、效率高、质量好等优点, 是中、小型铸件生产的主要工艺方法。

(2) 真空密封造型(V法造型)工艺 V法造型的基本原理是在特制的砂箱内填入无粘结剂的干砂, 用塑料薄膜将砂箱密封后抽成真空, 借助铸型内外的压力差, 使型砂紧实成型。V法造型可用于生产面积大、壁薄、表面要求光洁、轮廓清晰的铸件。近年来, V法造型在铁道车辆铸件、叉车配重块、艺术铸件、大型标牌、钢琴弦架、浴缸等产品生产中获得了广泛应用。

(3) 树脂砂造型、制芯工艺 树脂砂强度高, 砂(型)芯尺寸精度高, 铸件表面质量好, 但会对环境造成污染, 开发低污染粘结剂、催化剂、固化剂及配套的环保处理设备, 是推广和发展树脂砂造型、制芯工艺的关键。

(4) 水玻璃砂造型、制芯工艺 水玻璃砂流动性好, 易于紧实, 能耗较低。水玻璃砂高温退让性好, 特别适用于裂纹倾向大的铸钢件, 但水玻璃砂溃散性差、旧砂再生困难。因此, 研究水玻璃改性, 开发新型水玻璃砂旧砂再生回用工艺及设备是重点。酯硬化水玻璃砂的应用, 提高了旧砂再生回用率, 并在中、大型铸钢件上得到了应用。

(5) 组芯造型工艺 组芯造型被称作“精确砂型铸造”，适合于生产近终型复杂铸件（如缸体、缸盖），对砂芯的尺寸精度要求较高。随着各种可以在常温下固化的化学粘结剂的开发应用，已经能够生产出尺寸十分精确的砂芯，冷芯盒砂芯组芯造型的方法已成功用于轿车发动机缸体等近终型铸件的生产。

(6) 铸造涂料 砂型（芯）与金属液直接接触的工作表面的质量对铸件质量具有十分重要的影响，在砂型（芯）工作表面上涂覆涂料是改善其质量的经济实用而又收效显著的方法。高性能的有机和无机系列涂料的开发应用，是提高铸件尺寸精度和表面质量的重要技术途径。

1.4.2 特种铸造与近净成形技术

随着现代制造装备业对铸件尺寸精度和外观质量的要求越来越高，特种铸造将向着近净成形方向发展。近年来，特种铸造作为一种实现少余量、无余量加工的精密成形技术，其应用及发展将主要体现在以下两个方面：

1) 开发新的工艺，发展复合铸造工艺技术。加强镁合金压铸、挤压铸造技术的研究和应用，以适应汽车轻量化技术发展的需求；加强钛合金熔模铸造工艺的研究，解决铸型材料问题；利用快速成形技术替代传统蜡模成形技术，缩短生产周期；研究差压铸造新技术及设备，推动低压铸造向差压铸造方向发展。

2) 铸件的近净成形技术（Near Net Shape Process）改变了铸造只能提供毛坯的传统观念，得到无机械加工余量的铸件。如挤压铸造技术特征是“平稳充型、压力下凝固、补缩和塑性变形”，铸件冶金质量高、尺寸精度高、工艺出品率高、节省机加工。近净成形技术是铸造业的未来方向，可降低物耗、能耗、工耗和改善铸件质量，更好地满足制造装备业发展的需要。

1.4.3 合金熔炼与精炼技术

合金熔炼的基本要求可概括为优质、高产、低耗、长寿和操作便利五个方面，其根本任务是金属液温度和成分等达到技术要求。在现代冶金生产中，金属液预处理和炉外精炼是高品质铸件生产普遍采用的熔炼工艺技术。

(1) 铸铁熔炼 冲天炉是传统的铸铁熔炼设备，生产效率高，成本低。但冲天炉熔炼废气排放多，易对周围大气环境造成污染，铁液成分波动大、难以精确控制，不适用于熔炼合金铸铁。冲天炉熔炼的技术发展方向是大型化、智能化和连续熔炼，实现冲天炉熔炼的计算机控制和检测，提高铁液成分的稳定性。

感应电炉熔炼废气排放少，对环境污染小，铁液温度和化学成分易于调整和控制。目前，铸铁熔炼感应电炉有工频感应电炉、中频感应电炉和变频感应电炉。工频感应熔炼炉因效率低、操作麻烦而应用越来越少。由于变频感应电炉节能降耗、生产率高，在铸铁生产中获得了越来越广泛的应用。

冲天炉-感应炉双联熔炼工艺是一种较为理想的铸铁熔炼方法。冲天炉向感应电炉提供铁液，感应电炉对铁液进行升温、调整化学成分，有利于改善铁液冶金质量，并降低成本。冲天炉-感应电炉双联熔炼还能调节铁液供求平衡，最大限度地发挥冲天炉的熔化能力，方便生产组织。

(2) 铸钢熔炼 铸钢熔炼一般采用电弧炉和中频感应炉。电弧炉一般采用氧化-还原法冶炼铸钢。中频感应电炉操作简单, 碳钢、低合金钢、各种高合金钢和镍基合金等基本上都可以用中频感应电炉熔炼。铸钢熔炼不论是采用电弧炉, 还是采用中频感应炉, 最后必须进行脱氧。一般终脱氧都是出钢时在钢包内进行, 广泛采用的终脱氧剂是铝, 也可用铝、钙复合脱氧, 以提高脱氧效果。

随着对铸钢件质量要求的日益提高, 越来越多的高端铸件生产采用炉外精炼, 包含真空脱碳、吹氧脱碳、喷粉脱硫、吹氩等炉外精炼。采用电渣熔铸以及氩气搅拌、氩氧脱碳法(简称 AOD 法)和真空吹氧脱碳法(简称 VOD 法)等精炼技术, 可减少合金加入量, 提高钢液的纯净度, 改善铸件强韧性, 降低铸件废品率。

(3) 铝合金熔炼 铝合金熔炼工艺过程控制不严, 铸件易产生针孔、氧化夹渣、缩松等缺陷。铝合金熔炼节能所采取的技术和方法包括炉体结构设计、永磁搅拌技术、高温空气燃烧技术、富氧燃烧技术、等温熔炼技术, 以及采用新型节能炉衬材料、余热回收和利用等。铝合金熔炼时, 传统的氯盐、六氯乙烷等氯化物精炼工艺因污染环境、对人体有害而逐渐淘汰, 目前主要采用氩气和氮气等惰性气体进行精炼。

1.4.4 晶粒细化与凝固技术

1. 孕育与变质处理

孕育处理是指在凝固过程中, 向液态金属中添加少量其他物质, 促进形核、抑制生长, 达到细化晶粒、改善组织的目的。习惯上, 向铸铁中加入添加剂称为孕育处理; 向铸钢和铝合金中加入添加剂则称变质处理。从本质上说, 孕育处理主要影响形核; 而变质处理则是改变晶体的生长机理(抑制长大), 从而影响晶体形貌。

目前, 铸铁用孕育剂品种繁多, 用含钡、铋和稀土元素的孕育剂可减缓孕育的衰退。孕育方法(即孕育剂的加入方法)主要有包内孕育、出铁槽孕育、瞬时孕育(浇口杯孕育、喂丝孕育、随流孕育法)和型内孕育等。瞬时孕育和型内孕育可防止孕育衰退, 孕育量小, 孕育效果好, 在铸铁生产中获得了越来越广泛的应用。

低成本、高效、无污染、多功能化的复合变质是变质处理的发展趋势。铸钢采用含稀土元素的合金化变质剂进行变质处理, 在细化晶粒的同时还可净化钢液。ZL109 合金用 Cu-P 和 Al-Ti-B 复合变质, 组织中的初晶硅和共晶硅得到很好的细化。Sr 盐可使铝硅合金的硅相由针杆状变为长度尺寸在 $100\mu\text{m}$ 以下的短杆状或弯曲的纤维状。

2. 动态结晶

除孕育与变质处理可细化晶粒、改善铸件组织外, 对熔融金属液进行超声波振动处理或电磁搅拌, 都可以达到细化晶粒的目的, 改善铸件质量。超声处理可细化 AS41 镁合金的凝固组织, 并使 Mg_2Si 相细化和球化, 晶粒尺寸仅为无超声处理时的 30% ~ 50%。目前, 晶粒细化技术向组合化的方向发展, 形成了孕育处理与电磁搅拌等组合工艺, 纯铝在施加直流脉冲磁场的基础上加入 0.05% 的 Al-5Ti-B 进行孕育处理, 晶粒尺寸比单独施加直流脉冲磁场更加细小, 晶粒尺寸分布比较均匀。

3. 定向凝固

定向凝固又称定向结晶, 是使金属或合金在熔体中定向生长晶体的一种工艺方法。定向凝固方法主要有发热剂法、功率降低法、快速凝固法和液态金属冷却法等。定向凝固主要用