

# 电磁泵铸造 技术及应用

DIANCIBENG ZHUZAO JISHU JI YINGYONG

刘 云 著  
侯击波 党惊知 主审

## 本书特色：

- \* 业内首创第一本指导性图书；
- \* 笔者20余年的辛勤劳动成果的结晶；
- \* 汇集近年来电磁泵发展的最新前沿知识。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

责任编辑：王京涛    jtwang@ndip.cn  
责任校对：钱辉玲  
封面设计：王晓军    xjwang@ndip.cn

电磁泵铸造技术及应用



► 上架建议：工程应用 ◀

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-06304-2

9 787118 063042 >

定价：29.00 元

# 电磁泵铸造技术及应用

刘 云 著

侯击波 党惊知 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书介绍电磁泵铸造技术,共分7章:铸造技术发展;直流电磁泵;直流电磁泵关键部件设计及实验;直流电磁泵在定量浇注中的应用;直流双联电磁泵关键技术;直流电磁泵在低压铸造中的应用;直流电磁泵中耐火材料。

本书可作为铸造领域科研人员和工程技术人员的参考资料,也可作为材料加工工程专业研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁泵铸造技术及应用/刘云著. —北京:国防工业出版社,2009.6

ISBN 978-7-118-06304-2

I. 电... II. 刘... III. 电磁泵—铸造 IV. TH35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 059942 号

※

国防工业出版社 出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷  
新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12 字数 300 千字  
2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着工业化的高速发展,铸造工业正走向专业化规模生产,绿色铸造技术将成为 21 世纪的发展趋向。传统铸造业正逐渐向高质量、低消耗、无污染、高效率的现代铸造业转变。随着对铝合金铸件质量要求的不断提高,用传统的低压铸造设备和工艺浇注的铸件质量已越来越满足不了用户的需求,并且传统的低压铸造生产存在生产效率低下、生产过程不稳定、自动化程度低、容易受外界因素影响等缺点。而以电磁泵铸造技术为核心,辅之以铝液的熔炼净化、平稳输送、检测与控制等多项技术组成的一个工艺系统,克服了传统低压铸造工艺的缺陷,使铸件的质量大大提高,被认为是铝铸件生产最有发展前途的低压铸造工艺方法。

另外,在生产铝合金铸件方面,为提高铸件成品率,常采用加大切削用量的方法来减小铸造缺陷,这样不仅降低了材料的利用率,而且增加了毛坯重量。电磁泵定量浇注技术的发展将从根本上解决铸件质量低下的现状。

为此开发适用于铝铸件低压铸造工艺要求以及定量浇注电磁泵铸造设备势在必行。

山西省铸造新工艺工程技术研究中心长期从事电磁泵铸造技术理论和应用研究,特别是研制的产品现已应用于国内企事业单位铝铸件低压铸造和定量浇注的生产,从而极大地提高铝铸件的产品质量和生产效率。该产品在国内属于首创,并取得多项发明专利。

全书共分 7 章,包括铸造技术发展、直流电磁泵、直流电磁泵关键部件设计及实验、直流电磁泵在定量浇注中的应用、直流双联电磁泵关键技术、直流电磁泵在低压铸造的应用以及直流电磁泵中耐火材料。

本书在撰写过程中得到中北大学杨晶教授、侯击波副教授、党惊知教授、白培康教授、徐宏教授、李传大讲师、韩涛讲师、任霁萍等老师和张江峰、戴雷、霍会娟等研究生的支持和帮助,在此深表感谢。

本书由侯击波副教授、党惊知教授主审,并提出许多宝贵意见,特致感谢。

本书面向铸造领域的科研和工程技术人员,也可作为材料加工工程专业研究生及本科生的教材。

限于学术水平,书中不妥之处难免,敬请批评指正。

作者  
2008 年 12 月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 铸造技术发展             | 1  |
| 1.1 铝合金铸造技术研究进展        | 1  |
| 1.1.1 压力铸造             | 3  |
| 1.1.2 低压铸造             | 3  |
| 1.1.3 差压铸造             | 5  |
| 1.1.4 真空吸铸             | 6  |
| 1.1.5 悬压铸造             | 7  |
| 1.2 电磁泵铸造              | 7  |
| 1.3 电磁泵在铸造中的应用         | 12 |
| 参考文献                   | 14 |
| 第2章 直流电磁泵              | 16 |
| 2.1 直流电磁泵简介            | 16 |
| 2.2 直流电磁泵的电枢反应和消除方法    | 17 |
| 2.3 直流电磁泵的端部损失及减少损失的方法 | 22 |
| 2.4 磁场分布的边缘效应          | 28 |
| 2.5 直流电磁泵的等值电路         | 29 |
| 2.6 直流电磁泵的参数选择和设计步骤    | 31 |
| 2.7 直流电磁泵的计算步骤         | 33 |
| 2.8 重量选择的准则            | 35 |
| 参考文献                   | 36 |
| 第3章 直流电磁泵关键部件设计及实验     | 38 |
| 3.1 直流电磁泵的基本工作原理       | 38 |
| 3.2 直流电磁泵的效率及其影响因素     | 39 |
| 3.3 直流电磁铁磁隙磁感应强度计算方法   | 39 |
| 3.3.1 分体式开口电磁铁结构       | 40 |
| 3.3.2 实验方法             | 40 |
| 3.3.3 实验结果             | 41 |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 3.3.4      | 结果分析与数据处理             | 45        |
| 3.3.5      | 计算气隙中磁感应强度的数学模型建立     | 46        |
| 3.4        | 直流电磁泵用磁铁聚磁效应          | 50        |
| 3.4.1      | 原理分析                  | 50        |
| 3.4.2      | 实验方法                  | 51        |
| 3.4.3      | 实验结果与分析               | 52        |
| 3.5        | 聚磁头磁感应强度的数学模型建立       | 55        |
| 3.5.1      | 数学模型的建立               | 55        |
| 3.5.2      | 数学模型的验证               | 56        |
| 3.6        | 直流电磁泵电极材料与结构设计        | 57        |
| 3.6.1      | 直流电磁泵用电极简介            | 57        |
| 3.6.2      | 直流电磁泵用电极性能要求          | 57        |
| 3.6.3      | 直流电磁泵用电极结构及分类         | 58        |
| 3.7        | 直流电磁泵电极实验             | 58        |
| 3.7.1      | 一体式电极实验               | 59        |
| 3.7.2      | 自体式电极实验               | 60        |
| 3.7.3      | 组合式电极实验               | 61        |
| 3.7.4      | 实验结果分析                | 63        |
| 3.8        | 直流电磁泵泵体流槽结构设计         | 64        |
| 3.8.1      | 模拟实验装置                | 64        |
| 3.8.2      | 实验方法及实验器材             | 64        |
| 3.8.3      | 实验结果与分析               | 64        |
|            | 参考文献                  | 70        |
| <b>第4章</b> | <b>直流电磁泵在定量浇注中的应用</b> | <b>72</b> |
| 4.1        | 电磁泵定量浇注系统组成           | 73        |
| 4.2        | 定量电磁泵加热部分设计           | 74        |
| 4.2.1      | 电热元件材料具有的性能           | 74        |
| 4.2.2      | 常用电热元件材料及其性能          | 75        |
| 4.2.3      | 电热元件的表面负荷率            | 77        |
| 4.2.4      | 电热元件的计算方法             | 78        |
| 4.2.5      | 定量电磁泵输液管加热炉丝计算实例      | 81        |
| 4.3        | 定量电磁泵电磁铁设计            | 86        |
| 4.3.1      | 定量电磁泵励磁电源设计           | 86        |
| 4.3.2      | 定量电磁泵磁场强度测定           | 86        |
| 4.4        | 定量电磁泵用保温炉             | 87        |
| 4.4.1      | 定量电磁泵保温炉的特性           | 87        |



|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.4.2      | 定量电磁泵保温炉体积与内腔高度的关系 .....    | 88         |
| 4.5        | 定量电磁泵工艺参数测定 .....           | 89         |
| 4.5.1      | 泵高与电流关系的测定及数学模型的建立 .....    | 89         |
| 4.5.2      | 流量与电流关系的测定及数学模型建立 .....     | 91         |
| 4.5.3      | 电磁泵流量的理论计算 .....            | 92         |
| 4.6        | 电磁泵定量浇注控制技术 .....           | 97         |
| 4.6.1      | 电磁泵定量浇注控制系统组成 .....         | 97         |
| 4.6.2      | 电磁泵定量浇注控制工作原理 .....         | 97         |
| 4.6.3      | 电磁泵定量浇注控制程序数学模型的建立 .....    | 98         |
| 4.6.4      | 电磁泵定量浇注控制程序设计 .....         | 98         |
| 4.7        | 电磁泵定量浇注系统浇注铝合金铸件 .....      | 101        |
| 4.7.1      | 浇注背盘铝合金铸件 .....             | 102        |
| 4.7.2      | 浇注蜗壳铝合金铸件 .....             | 102        |
| 4.7.3      | 浇注负重轮铝合金铸件 .....            | 103        |
| 4.7.4      | 实验结果分析 .....                | 104        |
|            | 参考文献 .....                  | 104        |
| <b>第5章</b> | <b>直流双联电磁泵关键技术 .....</b>    | <b>106</b> |
| 5.1        | 直流双联电磁泵的提出 .....            | 106        |
| 5.2        | 直流双联电磁铁结构及实验 .....          | 107        |
| 5.2.1      | 双联电磁铁极性分布对气隙中磁感应强度的影响 ..... | 107        |
| 5.2.2      | 数据分析 .....                  | 108        |
| 5.3        | 模拟双联电磁泵实验 .....             | 110        |
| 5.3.1      | 单电磁泵与双联电磁泵泵高的对比 .....       | 110        |
| 5.3.2      | 双联电磁泵流量实验 .....             | 111        |
| 5.4        | 双联电磁泵初步结构 .....             | 114        |
|            | 参考文献 .....                  | 115        |
| <b>第6章</b> | <b>直流电磁泵在低压铸造中的应用 .....</b> | <b>116</b> |
| 6.1        | 双联电磁泵低压铸造系统的组成 .....        | 116        |
| 6.2        | 双联电磁泵电磁铁结构设计 .....          | 116        |
| 6.3        | 双联电磁泵电磁铁磁场强度测定 .....        | 117        |
| 6.4        | 双联电磁泵工艺参数测定 .....           | 118        |
| 6.5        | 双联电磁泵泵高及效率 .....            | 121        |
| 6.6        | 大型复杂箱体铝铸件电磁泵低压铸造工艺 .....    | 122        |
| 6.6.1      | 大型复杂箱体铝铸件特点及铸造工艺分析 .....    | 122        |
| 6.6.2      | 熔化工艺的确定 .....               | 122        |



|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 6.6.3      | 变质细化处理 .....                    | 122        |
| 6.6.4      | 除气精炼工艺的确定 .....                 | 123        |
| 6.6.5      | 均衡凝固的铸型工艺设计 .....               | 123        |
| 6.6.6      | 箱体铸件的造型制芯 .....                 | 123        |
| 6.6.7      | 电磁泵低压铸造箱体铝铸件浇注工艺的制订 .....       | 124        |
| 6.7        | 用计算机 CASTsoft 软件模拟充型及凝固过程 ..... | 126        |
| 6.7.1      | 三维实体铸件图 .....                   | 126        |
| 6.7.2      | 前处理 .....                       | 127        |
| 6.7.3      | 模拟计算 .....                      | 127        |
| 6.7.4      | 均衡凝固工艺设计 .....                  | 129        |
| 6.7.5      | 浇注系统设计 .....                    | 129        |
| 6.7.6      | 冷铁布置 .....                      | 131        |
| 6.7.7      | 芯子布置 .....                      | 133        |
| 6.8        | 箱体铝铸件力学性能检测 .....               | 134        |
|            | 参考文献 .....                      | 134        |
| <b>第7章</b> | <b>直流电磁泵中耐火材料 .....</b>         | <b>135</b> |
| 7.1        | 铝合金直流电磁泵对耐火材料的要求 .....          | 135        |
| 7.2        | 黏土结合碳化硅制品的生产方法 .....            | 136        |
| 7.3        | 黏土结合碳化硅制品的结构特征 .....            | 138        |
| 7.4        | 铝工业用耐火材料的一般损坏机理 .....           | 139        |
| 7.4.1      | 铝熔体与耐火材料的反应 .....               | 139        |
| 7.4.2      | 铝熔液渗透的影响 .....                  | 139        |
| 7.5        | 提高耐火材料制品抗侵蚀性能的方法 .....          | 140        |
| 7.5.1      | 釉浆涂层对耐火材料抗侵蚀性的影响 .....          | 141        |
| 7.5.2      | 黏土结合碳化硅用釉的配方 .....              | 142        |
| 7.5.3      | 釉制备工艺过程 .....                   | 144        |
| 7.5.4      | 性能测试 .....                      | 144        |
| 7.6        | 黏土结合碳化硅抗铝液侵蚀性检测 .....           | 145        |
| 7.6.1      | 施釉前后气孔的改变 .....                 | 145        |
| 7.6.2      | 黏土结合碳化硅侵蚀结果与分析 .....            | 146        |
|            | 参考文献 .....                      | 151        |
| <b>附录</b>  | <b>直流电磁泵控制程序 .....</b>          | <b>152</b> |

# 第1章 铸造技术发展

铸造是将熔炼好的金属液体浇注入铸型内,经冷却凝固获得所需形状和性能的零件的制作过程,是常用的制造方法。其优点是:制造成本低,工艺灵活性大,可以获得复杂形状和大型的铸件,在机械制造中占有很大的比重,如机床占 60% ~ 80%,汽车占 25%,拖拉机占 50% ~ 60%。我国是世界上较早掌握铸造技术的国家,如今已是世界铸造生产大国,铸件年产量达 1000 多万吨,仅次于美国。

随着工业技术的发展,铸造技术的发展也很迅速,特别是 19 世纪末和 20 世纪上半叶,出现了很多新的铸造方法,如低压铸造、陶瓷铸造、连续铸造等,在 20 世纪下半叶得到完善和实际应用。由于现今对铸造质量、铸造精度、铸造成本和铸造自动化等要求的提高,铸造技术向着精密化、大型化、高质量、自动化和清洁化的方向发展,例如,我国这几年在精密铸造技术、连续铸造技术、特种铸造技术、铸造自动化和铸造成型模拟技术等方面发展迅速。

众所周知,铝是地球上储量最多的金属元素,占地壳质量的 8.13%,超过铁的储量(铁占地壳质量的 5%)。按现在的开采速度,地球上铁的储量仅可供开采 300 年。可以预料,今后的世界将是以铝合金为龙头的新材料时代。但是铝元素非常活泼,铝液在空气中铸造很容易造成大量氧化夹杂物,并大量吸收环境中气体,造成铸件夹杂和气孔缺陷。因而铝铸件的生产是一个多阶段和多因素的过程,涉及原材料的选择、成分控制、熔炼工艺、精炼变质处理、铸造工艺、机加及热处理等。只有采用一整套先进技术和工艺,并加以严格控制和管理,才能真正解决铸件生产的质量问题,可靠地生产出高质量的铸件。

国外学者提出获得高质量铸件要遵循的 10 个准则中第一个准则就是温度、成分、残余气体和夹杂量均合格的熔体。一般含氢量控制在小于 0.1ml/100g,含夹杂量控制在小于  $0.001\text{mm}^2/\text{cm}^2$ ,就可得到较高性能的铸件。但是铝液转移过程中易因流动不平稳而吸气氧化,造成铸件质量严重下降。英国 Cosworth 公司认为造成高品质铝合金铸件疲劳性能下降的主要原因是微小氧化夹杂物,因而提出了低湍流充型技术,该技术主要是保证铝液在充型过程中尽量避免紊流,确保铝液从炉中进入铸型及充型过程中处于低湍流流动状态,并配合合适的铸造工艺,就可得到高性能的复杂铝铸件。

近年来,在高品质铝合金铸造方面采用了电磁泵充型铸造方法、差压铸造方法、悬压铸造方法等,并在这些方面已取得了一些进展,随着汽车工业及其相关产业发展,围绕提高铝合金铸件性能的新型铸造方法越来越多、应用越来越广,铝合金将会应用到更广泛的领域。

## 1.1 铝合金铸造技术研究进展

铸造作为历史最悠久的传统工业,其工艺方法很多,常见的铸造方法及特点见表 1-1 所列。

表 1-1 常见铸造方法及特点

| 铸造方法  | 铸件材质    | 铸件质量      | 表面粗糙度 | 铸件复杂程度 | 生产成本 | 适用范围                                         | 工艺特点                                               |
|-------|---------|-----------|-------|--------|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 砂型铸造  | 各种材质    | 从几十克到几吨   | 高     | 中等     | 低    | 采用手工造型时用于生产单件、小批量复杂的大型铸件,机器造型时适用于批量生产的中、小型铸件 | 手工造型时工艺灵活,但效率低,劳动强度大,尺寸精度低,表面粗糙度高;机器造型尺寸精度高和表面粗糙度低 |
| 金属型铸造 | 有色合金    | 几十克到 20kg | 低     | 复杂     | 高    | 主要是批量生产非铁合金铸件                                | 铸件尺寸精度高、表面粗糙度低,组织致密,力学性能好,生产率高                     |
| 熔模铸造  | 铸钢及有色合金 | 几克到几千克    | 很低    | 复杂     | 中等   | 适用于生产铸钢及高熔点合金的小型复杂精密铸件,特别适合铸造艺术品、精密机械零件      | 尺寸精度高,表面粗糙度低;但工序繁多,劳动强度大                           |
| 陶瓷型铸造 | 铸钢及铸铁   | 几千克到几百千克  | 低     | 较复杂    | 高    | 小批量生产模具和一些精密铸件                               | 尺寸精度高,表面粗糙度低;但生产率低                                 |
| 石膏型铸造 | 铝、镁、锌合金 | 几十克到几十千克  | 低     | 较复杂    | 高    | 单件、小批量生产                                     | 尺寸精度高,表面粗糙度低,生产率较高                                 |
| 低压铸造  | 有色合金    | 几十克到几十千克  | 较低    | 复杂     | 高    | 大批量生产大、中型有色合金薄壁铸件                            | 铸件组织致密,工艺出品率高,设备较简单,可采用各种铸型;但生产效率低                 |
| 差压铸造  | 铝、镁合金   | 几克到几十千克   | 较低    | 复杂     | 高    | 小批量生产高性能和形状复杂的有色合金铸件                         | 压力可控,铸件成型好,组织致密,力学性能好;但生产效率低                       |
| 压力铸造  | 铝、镁合金   | 几克到几十千克   | 较低    | 复杂     | 高    | 大批量生产各种有色合金中小型铸件,特别是薄壁铸件、耐压铸件                | 铸件尺寸精度高,表面粗糙度低,组织致密,生产率高                           |
| 离心铸造  | 灰铁、球铁   | 几十千克到几吨   | 中等    | 简单     | 较低   | 批量生产各种直径的旋转体管型铸件                             | 铸件尺寸精度高,表面粗糙度低,组织致密,生产率高                           |
| 连续铸造  | 钢、铸铁    | 很大        | 较高    | 中等     | 低    | 大量生产固定截面的钢锭、钢管等                              | 组织致密,力学性能好,生产率高                                    |
| 消失模铸造 | 各种金属    | 几克到几吨     | 较低    | 较复杂    | 较低   | 不同批量的较复杂合金铸件                                 | 铸件尺寸精度较高,铸件设计自由度大,工艺简单                             |

适用于铝合金生产的方法较多,下面主要介绍目前研究及应用较多的用于生产高品质铝铸件的先进方法。

### 1.1.1 压力铸造

压力铸造(简称压铸)的实质是在高压作用下,使液态或半液态金属以较高的速度充填压铸型型腔,并在压力下成型和凝固而获得铸件的方法。高压和高速充填压铸型是压铸的两大特点。它常用的压射比压为几千千帕至几万千帕,甚至高达  $2 \times 10^5 \text{ kPa}$ 。充填速度一般为  $10\text{m/s} \sim 50\text{m/s}$ ,有时甚至可达  $100\text{m/s}$ 。充填时间很短,一般为  $0.01\text{s} \sim 0.2\text{s}$ 。

与其他铸造方法相比,压铸有以下三方面优点:

(1)产品质量好:铸件尺寸精度高,一般为 6 级 ~7 级,甚至可达 4 级;表面粗糙度低;铸件强度和硬度较高,强度一般比砂型铸造提高 25% ~30%,但伸长率降低约 70%;尺寸稳定、互换性好;可压铸薄壁复杂的铸件。

(2)生产效率高:机器生产率高,平均每 8 小时可压铸 600 次 ~700 次,小型热室压铸机平均每 8 小时可压铸 3000 次 ~7000 次;压铸型寿命长,一副压铸型,寿命可达几十万次,甚至上百万次;易实现机械化和自动化。

(3)经济效果优良:由于压铸件尺寸精确,表面粗糙度低等优点,一般不再进行机械加工而直接使用,所以既提高了金属利用率,又减少了大量的加工设备和工时;铸件价格便宜;可以采用组合压铸以其他金属或非金属材料,既节省装配工时又节省金属。

压铸虽然有许多优点,但也有以下缺点:

(1)压铸时由于液态金属充填压铸型型腔速度高,流态不稳定,故采用一般压铸法,铸件易产生气孔,不能进行热处理。

(2)对内凹复杂的铸件,压铸较为困难。

(3)不宜小批量生产,其主要原因是压铸型制造成本高,压铸机生产效率高,小批量生产不经济。

压铸是最先进的金属成型方法之一,是实现少切屑甚至无切屑的有效途径,应用很广,发展很快。目前压铸合金不再局限于有色金属的锌、铝、镁和铜,而且也逐渐扩大用来压铸铸铁和铸钢件。压铸件不仅应用于汽车工业和仪表工业,而且已逐步扩大到其他各工业部门,如农业机械、机床工业、电子工业、国防工业、计算机、医疗器械、钟表、照相机和日用五金等几十个行业。在压铸技术方面又出现了真空压铸、加氧压铸、精速密压铸以及可溶型芯的应用等新工艺。

压铸件由于使用金属型,冷却速度快、晶粒细小,铸件的力学性能非常好;但由于其不能生产内腔复杂的铸件,所以受到很大的制约,尤其是随着汽车工业的发展,如汽车发动机缸体、缸盖等内部有大量气道、水道、油道等复杂内腔的大型铸件,其实用性不大。

### 1.1.2 低压铸造

低压铸造是液态金属在压力作用下充填型腔,以形成铸件的一种方法。由于所用的压力较低,所以叫做低压铸造。其工艺过程如图 1-1 所示,在密封的坩埚中,通入干燥的压缩空气,液态金属在气体压力的作用下沿升液管上升通过浇口平稳地进入型腔,并保持坩埚内气体压力,使铸件在压力下完全凝固,然后去除保压压力,使升液管中未凝固的金

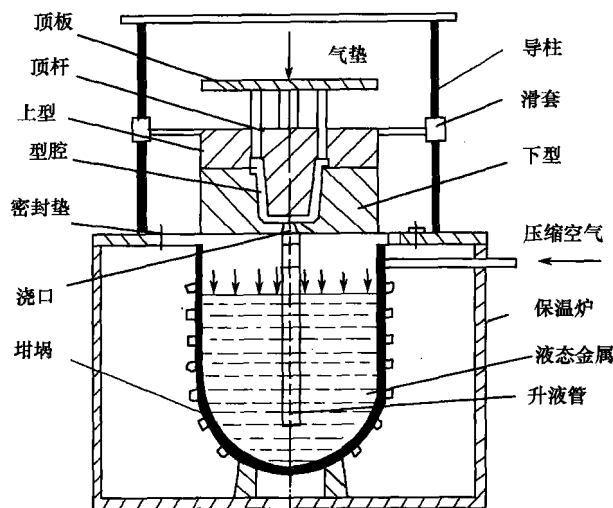


图 1-1 低压铸造的工艺示意图

属液流回坩埚,开箱取出铸件。

低压铸造主要有以下几个方面优点:

- (1) 液态金属充型比较平稳;
- (2) 铸件成型性好,有利于形成轮廓清晰、表面粗糙度低的铸件,对于大型薄壁铸件的成型更为有利;
- (3) 铸件组织致密,力学性能好;
- (4) 提高了液态金属的工艺收得率,一般情况下不需要冒口,使金属液的收得率大大提高,收得率一般可达 90%。

此外,劳动条件好、设备简单、易实现机械化和自动化,也是低压铸造的突出优点。

低压铸造所用的铸型有金属型和非金属型两类。金属型铸型多用于大批量生产有色金属铸件,非金属铸型多用于单件小批量生产黑色金属铸件,如砂型、石墨型、陶瓷型和熔模型壳等都可用于低压铸造,而生产中采用较多的还是砂型。铸件远离浇口的部位先凝固,浇口处最后凝固,使铸件在凝固过程中通过浇口得到补缩,实现顺序凝固。

用电磁泵设备充型的低压铸造技术是国外近年来发展起来的一种先进技术,它克服了传统铸造技术的缺陷,使铸件的质量大大提高。此工艺首先是由英国的 Cosworth 公司提出来的,其技术包括:以电磁泵升液系统为工艺技术的核心,辅之于铝液的熔炼净化、平稳输送、锆砂铸型和砂芯及回收、检测与控制等多项技术组成的工艺系统。用这种工艺生产铝铸件可以有效地克服铸件的氧化夹杂及其他缺陷,铝铸件在尺寸精度、组织致密性、力学性能、表面质量和金属利用率等方面都非常优良,被认为是 21 世纪高质量铝铸件生产最有发展前途的铸造工艺方法。该工艺早期主要用于生产具有极高性能要求且尺寸精确的赛车发动机、航空发动机铝铸件,随着技术的进步,也逐渐应用于汽车发动机等铸件生产。1984 年 Cosworth R&M 有限公司建立了第二铸造厂,主要生产一级方程式赛车的发动机缸体、缸盖;1988 年美国福特公司购买 CP 专利,并于 1992 年建成年产 100 万只缸体的生产线;1991 年南非某公司建立了 CP 法铸造厂;1994 年美国通用汽车公司欧洲分公司生产德国的 Opel 汽车的四缸多冲程缸盖也采用了 CP 法。1997 年 Cosworth R&M 有

限公司建立一个年产 100 万缸体和缸盖的新型 CP 法铸造厂,使汽油机铝合金铸件的生产处于世界领先水平。美国福特汽车公司某铸造厂目前全部采用电磁泵低压铸造系统,并实行自动化控制,年产 300 多万件缸盖,成品率稳定在 90% 以上;其他采用 CP 法工艺生产的比较著名的汽车有 Mercedes(日本)、Opel(德国)、Benz(德国)、Jaguar XK8(通用)等。近 20 年的生产实际表明,CP 法在汽油发动机的缸体、缸盖、进排气管等零部件的铸造生产上处于世界领先地位。

### 1.1.3 差压铸造

差压铸造又称为反压铸造、压差铸造。它是在低压铸造的基础上,铸型外罩一个密封罩,铸造过程中同时向坩埚和密封罩内通入压缩空气,通过工艺控制坩埚内的压力,使坩埚内的金属液在压力差的作用下经升液管充填铸型,并使铸件在压力下结晶。它是低压铸造与压力下结晶两种铸造方法的结合。

形成金属液充型时的压力差  $\Delta p$  有两种方式:一种是增压法,即在坩埚和密封罩中加相同的压力  $p_a^1 = p_b^1$ ,然后增加坩埚内的压力,使  $p_a^2 > p_b^1$ ,形成压力差  $\Delta p = p_a^2 - p_b^1$  使金属液充型;另一种是减压法,即在坩埚和密封罩中加相同的压力  $p_a^1 = p_b^1$ ,减小密封罩内的压力,使  $p_b^2 < p_a^1$ ,形成压力差  $\Delta p = p_a^1 - p_b^2$  使金属液充型。

#### 1. 增压法

压力为  $p^0$  的干燥压缩空气经阀 e、a 和 b 分别同时进入互通的坩埚和密封罩,如图 1-2(a)所示,当达到所需的工作压力值  $p^1$  时,坩埚和密封罩内的压力平衡,即  $p_a^1 = p_b^1$ ,坩埚内金属液处于静止状态;关闭连通阀 d,使坩埚与密封罩相互隔绝;然后关闭阀 a,使压缩空气继续经阀 b 进入坩埚,坩埚内压力由  $p_a^1$  增至  $p_a^2$ ,如图 1-2(b)所示,坩埚与密封罩之间产生一压力差  $\Delta p = p_a^2 - p_b^1$ ,使坩埚内金属液通过升液管经浇道进入铸型中;充型结束后,根据铸造工艺保压一段时间,使铸件在压力下凝固;凝固完毕后,打开互通阀 d,上、下压力筒同时放气,升液管中未凝固的金属液靠自重流回坩埚。因而差压铸造具有比低压铸造更理想的结晶、凝固条件。

#### 2. 减压法

压力为  $p^0$  的干燥压缩空气经阀 e、a 和 b 分别同时进入互通的坩埚和密封罩,使坩埚与密封罩中同时达到工作压力  $p_a^1 = p_b^1$  的工序与增压法相同;然后关闭阀 a、b 和 d,按照铸造工艺曲线要求速度打开阀 c,使密封罩中的压力逐渐减为  $p_b^2$ ,如图 1-2(c)所示,坩埚与密封罩之间产生压力差  $\Delta p = p_a^1 - p_b^2$ ,坩埚内有金属液通过升液管进行充型;充型结束后关闭阀 c。减压充型可避免密封罩内铸型由于金属液充填升温产生蒸汽和气体膨胀带来的附加影响。

差压铸造方法中金属液是在一定压力下充型,具有一系列有利于获得优质铸件的优点:

- (1) 获得最佳的充型速度;
- (2) 获得最优质的充型金属液,避免外来夹杂物进入型腔;
- (3) 获得组织致密的铸件;
- (4) 铸件尺寸精度与表面质量改善,不易使铸件表面机械粘砂。

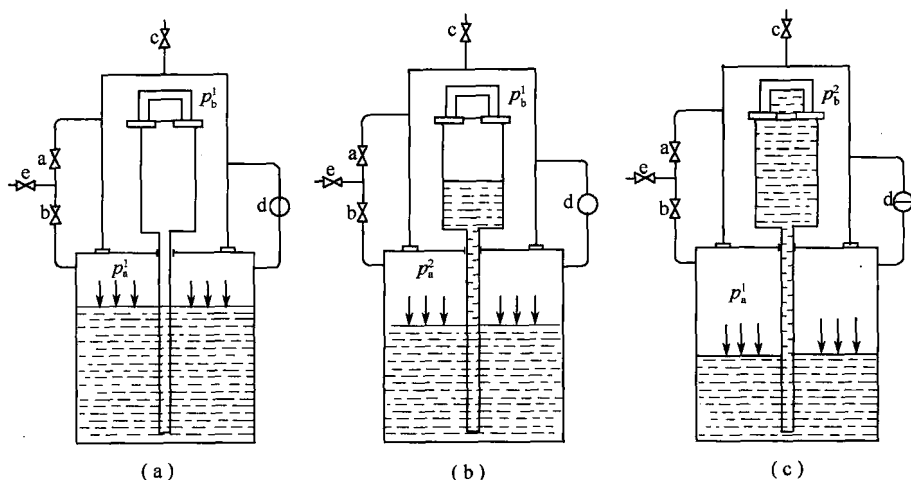


图 1-2 差压铸造基本原理及工艺过程

差压铸造既适用于砂型,也适用于金属型。用此方法铸造出了直径 540mm、高度 890mm、壁厚 8mm~10mm 的大型复杂薄壁整体舱铸件。可铸造的有铝合金、锌合金、镁合金、铜合金,以及铸钢。生产的铸件有电机壳、阀门、叶轮、汽缸、轮毂、坦克导轮、船体等。在压力铸造机上生产受投影面积或壁厚限制的铸件均可用差压铸造方法生产。

但是由于差压铸造方法必须要有密封罩,因此对其应用有较大的限制,适应性较差;另外由于产生压力需要压缩空气,对活泼金属的氧化问题难以解决,同时对压缩空气的干燥要求非常高,铸件的均一性相对较差。

#### 1.1.4 真空吸铸

真空吸铸的基本原理与低压铸造及差压铸造类似,只是使金属液充型的驱动力由压缩空气变为大气。其结构与差压铸造设备类似,区别为坩埚与大气相连,密封罩与真空泵相连。铸造时真空泵从密封罩中抽出空气,使密封罩中的气压低于大气压力,金属液在大气压的作用下经升液管进入型腔充型;保持真空直到铸件凝固,然后卸压。

真空吸铸的优点是:

- (1) 克服了低压铸造和差压铸造过程中由于铸型透气性差所产生的备压造成的铸件充型不完全,特别适用于薄壁铸件的生产。
- (2) 由于在真空下充型,所以大大降低了型腔内氧的分压,从而减少金属液在充型过程中的二次污染。
- (3) 由于在真空下充型,所以降低了金属液中的气体含量,从而减少了气孔、针眼的含量。

真空吸铸也存在以下缺点:

- (1) 在真空下充型及凝固,对于壁厚不均铸件在凝固过程中由于表面已凝结成壳,真空力作用不到升液管口,易发生倒流,使铸件充不满。
- (2) 由于自然环境中大气压力为 1atm ( $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ),最大充型压力及保压压力小于 1atm,不适合于高度大的及保压压力大的铸件生产。
- (3) 大型铸件真空室体积大,对真空的要求高,难于实现。



### 1.1.5 悬压铸造

悬压铸造的充型过程类似于真空吸铸方法,凝固保压过程由压缩空气完成,与低压铸造相同。它将低压铸造的优点与真空吸铸的优点结合起来,因此特别适合于高品质复杂铝铸件的生产。目前,我国西北工业大学正在从事此方面的工作,处于探索阶段。

## 1.2 电磁泵铸造

随着科学技术的进步以及市场的要求,以最低成本最大地提高铸件的成品率及性能已成为目前铸造产品生产迫切的发展方向,特别是对于铝、镁等化学活性较强的有色金属更为重要。铝合金在液态时化学活性大,易与周围的空气、湿气、碳氢化合物、氧气及其他金属发生剧烈的化学反应,造成金属液中存在大量的氢和氧化夹杂物,从而导致铸件凝固后产生气孔和夹杂,是铸件质量下降的主要原因。但同时铝合金还具有一个较为有利的特性,即其在空气中时表面形成了一层致密的氧化膜,如果该氧化膜不被破坏,可有效地阻止环境对铝合金液的污染。化学反应的强烈程度与金属液的表面积和比表面积有密切的关系,表面积和比表面积越大,则化学反应越强烈。表面积的大小与金属液的流动状态有关;比表面积与金属液的流动速度有关,当流动速度越快,金属液从层流状态转变为紊流,大大地增加比表面积,使化学反应物剧烈增加。同时,英国学者提出,造成高品质铝铸件疲劳寿命下降的主要原因是由于其内存在的大量微小氧化夹杂物,在紊流状态时,表面的氧化膜不断地被卷入金属液中,造成微小氧化夹杂物含量大量增加。在铸件充型过程中,充型速度相同时,金属液由下向上充型时流动状态要比由上向下浇入时的流动平稳得多,因而低压铸造方法更适用于生产高品质铝铸件。由于形状特点,即使采用低压铸造,绝大部分的铸件也不可能保证其横截面积在整个高度完全一致,并且大部分相差较大。如果用同样速度充型,势必在小截面时产生严重的紊流,因而根据铸件的截面形状变化,进行变速度充型使在每个截面上都保持低湍流,可大大提高铝合金铸件的质量。

传统的低压铸造是通过气压补压的方式实现的。该方法的应用已使铝铸件质量有了一定改善与提高,与传统的重力铸造相比,铸件质量上了一个新水平,但该方法存在以下缺点:

(1)合金从熔化到浇注过程中,不可避免地产生湍流,造成严重的氧化和吸气,使铸件极易形成缩松、显微气孔和氧化夹杂。

(2)由于温度变化和充型过程中液面变化以及空气的弹性作用,使得压力控制很难做到预定的准确性。

(3)由于炉内空气压力变化的“惰性”,气压调节不能做到快速反应。

(4)由于在压缩空气的作用下充型保压,金属液中氧和其他气体分压增加,造成铝液中含氧量增加。

(5)金属液补充带来浇注环境和温度的变化,生产状态的不稳定,从而导致铸件质量不稳定。

另外,为了降低压缩空气中的水分含量,常对压缩空气采用低温除湿的方法,虽然水分降低,但机械中的润滑油蒸汽进入到压缩空气中,同样会对金属液进行污染。

电磁泵系统将电磁力直接作用于液态金属,驱动其定向移动,带来以下优点:

(1)金属液传输平稳,不引起湍流而造成氧化、吸气,同时金属液经过磁场所用,可以细化晶粒,对改善铸件的组织、性能有积极的作用。

(2)液面波动对加压控制不产生影响,加压规范控制可以非常精确,且快速响应。

(3)炉体不需密封,金属液的气体压力保持稳定,从而减少了气体溶入,形成气泡的倾向性大大减小。

(4)生产过程和生产状态稳定,铸件质量的一致性良好。

(5)炉内金属液可很方便地进行温度检测与控制,除气处理、更换过滤片、添加合金元素或排渣等,不需要中止生产过程。

电磁泵技术最早在 1927 年由爱因斯坦和斯拉达提出来的,准确地说应该叫做电磁驱动泵,以电磁泵命名常与现在的电磁柱塞泵混淆。后来随着原子能动力工业的发展,特别是中子反应堆的发展促进了电磁泵的研究和应用,目前在国内外,电磁泵广泛用于原子能动力液金属回路的各种辅助系统及热工材料实验装置中,对于一些实验性反应堆以及空间动力反应堆,电磁泵也用于液态金属的主要回路中,如英国的唐纳原子能反应堆和法国的热泊沙弟屋(Rapsodio)原子能反应堆。随后逐渐向民用方向发展,如化工工业中的某些部门采用电磁泵输送汞可消除汞的泄漏和对环境的污染,我国某化工厂已将汞泵应用于一化工流程,从而改善了工人的劳动条件和健康状况;一些易氧化的液态金属,如钾、钠由于采用电磁泵进行输送可以大大提高安全性。在电子工业,电磁泵也发挥着重要的作用,随着现代电器产品的大量生产,元器件的钎焊速度成为瓶颈,以电磁泵技术为核心的波峰焊技术的应用使电器产品的工业化大规模生产成为现实。在冶金、铸造工业中,国外早在 1947 年就曾尝试应用电磁泵实现熔融铝的自动定时浇注,但由于当时的工艺技术和材料问题没有解决,所以迟迟没有进展。近年来随着新型、高效铸造机构,如压铸机和高速自动造型线在冶金和铸造生产中的广泛应用,使熔融金属的输送、计量、浇注的自动化、高速化成为亟待解决的问题,浇注作业又是冶金、铸造工业一道操作繁重的工序,不仅劳动强度大,而且作业环境(如高温、废气、安全事故等)对工人健康影响较大,这些都为电磁泵的应用开辟了新前景,如只产生推力的电磁泵式自动浇注装置,即双面或单面电磁流槽在国外已应用。1962 年美国 and 苏联首次将其应用于低压铸造,苏联的很多导弹罩壳都是采用电磁泵低压铸造技术生产的,图 1-3 为乌克兰生产的电磁泵低压铸造系统。如今从国外引进的大型压铸机系统都已配备了电磁泵浇注系统;20 世纪 70 年代末在英国形成了著名的 Cosworth 工艺,最早应用于 F1 方程式赛车的发动机生产,随后广泛应用于民用汽车发动机的生产。随着冶金、铸造工业自动化程度的提高,电磁原理的应用也越来越广泛,如电炉炼钢中的电磁搅拌、空心浇注、钢带淬火都有不同程度的应用。

国际铸造界公认的 Cosworth 工艺,即采用电磁泵充型,重力补缩的方法。Cosworth 工艺主要用来生产无缺陷、重量轻的铸件,能满足更为复杂的汽缸盖等铸件生产的需要。其工艺流程如图 1-4 所示。

Cosworth 工艺是由英国 Campbell 教授发明的,采用冷芯盒锆砂芯造型。它利用电磁泵实现在可控压力下使铝合金液由下而上地充填铸型。由于锆砂的热膨胀率很小而且恒定,因而有利于获得尺寸精确度高的铸件。但是,由于锆砂导热性极好,比石英砂高出 2 倍多,因而用它所造的砂型难以浇注出壁厚小于 4mm 的铝铸件。另外,砂芯采用机械组