DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.017

# 复杂泵体熔模铸造工艺数值模拟与优化控制

姜　淼,凌李石保
(嘉善鑫海精密铸件有限公司,浙江 嘉善 314101)

**摘　要**:根据不锈钢复杂泵体的结构特点设计浇注系统,选择了熔模铸造型壳与合金的热物性参数,对复杂泵体的蜡模注射成型过程与铸件凝固过程进行数值模拟分析和生产验证。结果表明,通过增加冷铁、优化冒口尺寸,选择最佳方案,缩短了产品试制周期,提高了产品合格率。

**关键词**:复杂泵体铸件;数值模拟;浇注系统;优化控制

**中图分类号**:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0492-04

# Numerical Simulation and Optimal Control of Complex Pump Investment Casting Process

JIANG Miao, LINGLI Shibao
(Jiashan Xinhai Precision Casting Co., Ltd., Jiashan 314101, China)

**Abstract**: According to the structural characteristics of the complex stainless steel pump, the gating system was designed, and the thermo-physical parameters of the investment casting shell and the alloy were selected. Numerical simulation and production verification of wax injection molding process and casting solidification process of complex pump were carried out. The results show that by increasing the chillers and optimizing the size of the risers, the best scheme is selected, which shortens the trial production period and improves the pass rate of the products.

**Key words**: complex pump casting; numerical simulation; gating system; optimal control

熔模铸造是一种近净形制造复杂结构零件的方法[1]。由于熔模铸造是一个极其复杂的高温动态过程,故其铸造工艺存在着制造过程繁琐、生产周期较长、废品率较高等缺点。计算机数值模拟仿真技术的迅速发展为熔模铸造带来了新的发展方向,该技术可以缩短熔模铸造的试验时间和生产周期,大大降低了生产成本,提高经济效益和市场竞争力[2-5]。熔模铸造的模具设计和注蜡成型面临着新的挑战,单纯靠人工经验已经不能满足新的要求,因此对精铸模料成型过程的数值模拟尤为必要。对于注射成型的充填模拟方面已进行了很多研究[3-7]。目前,利用商业铸造软件计算精密铸件的流场、温度场、凝固缺陷与应力场方面有很多研究成果[8-12]。然而,不同产品结构特征不尽相同,开发适应于特征铸件的相应的浇注系统,优化铸造工艺,控制铸件缺陷与尺寸精度的研究很有必要。高压泵体铸件是承压件,要求铸件具有足够的强度、组织致密、尺寸稳定,同时还要具有良好的导热散热性能,泵体的缩松缺陷要严格控制,防止出现泵体因为在高压下缩松缺陷导致渗漏事件。本文根据高压泵体铸件的结构特征,利用 ProCAST 软件模拟铸件的流场、温度场及凝固过程,优化浇注系统及工艺参数,以提高产品的铸件成品率,降低生产成本。

## 1　铸件形状与结构特点

铸件法兰是内腔结构,蜡模需要放置型芯成型。铸件下大圆形的阀体,有内腔结构需要安置可溶性型芯成型蜡模。整个铸件局部对称整体不对称,前端有一个突出的法兰盘,在铸件的四周有 4 个吊耳。轮廓尺寸为长 339 mm,宽 131mm,高 264 mm,突出的平台距离铸件中心 197 mm,铸件结构如图 1 所示。

## 2　蜡模流场与缺陷数值模拟

注蜡模具流道系统设计主要包括浇口位置及数量与流道的布置。浇口是起连接分流道与蜡模的作用,浇口的位置可以设置一处或多处,数量也可以是多个。浇口区域可以根据模拟的浇口匹配性参考,浇口的类型有很多种,包括半圆形,扇形,矩形等。浇口的形状与大小优化可以保证蜡料熔体充填时平稳且

**收稿日期**:2019-02-20

**作者简介**:姜　淼(1974-),女,辽宁抚顺人,工程师.主要从事不锈钢精密铸件技术开发方面的工作.
电话:13666723888,E-mail:miao.jiang@sinhai.com.cn
**通讯作者**:凌李石保(1984-),江西赣州人,博士,工程师.主要从事熔模铸造方面的研制工作.电话:18801903542,
E-mail: nealllm@163.com

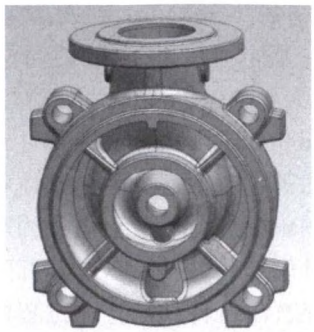


图 1 复杂泵体的三维模型
Fig.1 The 3D model of complex pump

粘度合适；控制浇口的凝固时间便于蜡模冷却后脱模。图 2 为不同浇口位置的充填模拟结果，可以看出，浇口位置在法兰部位时，整个充填时间缩短 20.66 s，只有原来浇口位置充填时间的一半，所用选用法兰上的浇口方案，有利于蜡模的充填成型。

由图 3 蜡模翘曲模拟结果看出，方案一的蜡模的最大变形量是 0.941 8 mm，方案二的蜡模的最大变形量是 1.555 mm。综合各情况考虑，方案一由于翘曲量小，充填时间短，开模方便，所以最终选用方案一。

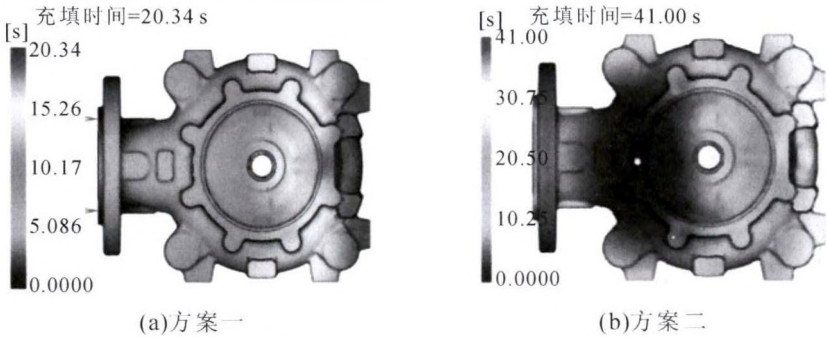
## 3 浇注系统设计

浇注系统的设计还要保证金属液在铸件的各部位较均衡的流动，使热量的传导平稳进行，避免某个部位过热，导致热裂、应力集中等变形缺陷。根据以上简要的分析，这次模拟方案设计了顶注加侧注的混合浇注系统如图 4 所示。为了保证模拟结果的准确性，铸件材料为 304 不锈钢，型壳材料为 Refractory-Mullite，型壳与大气之间的传热条件为空冷，铸件与型壳间界面换热系数设置为 1 000 W/(m²K)。初始条件根据不同工艺参数设定，设定完毕后进行数值模拟计算。

## 4 数值模拟分析与优化

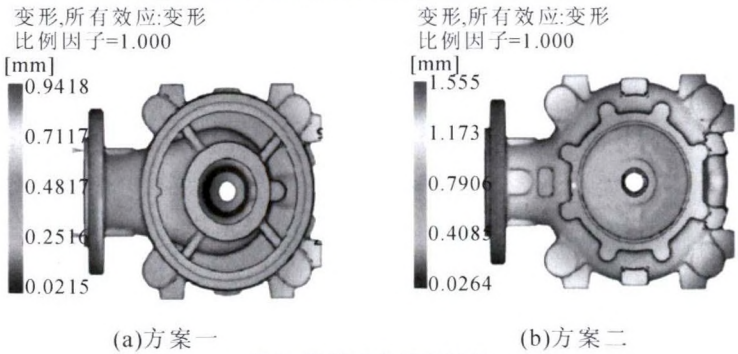
### 4.1 充型，凝固及缺陷分布模拟结果分析

图 5 为顶注加侧注式浇注系统铸件的流动，凝固及缺陷分布情况。图 5(a)所示为顶注式浇注系统下合金液不同时刻的数值模拟充型状态，可见整个充型过程较为平稳，金属液受重力作用向下流动。侧边法兰盘底部跟中间环形结构底部优先充型，整个充型顺序基本实现自下而上，最后充型部位位于顶部横浇道。从图 5(b)铸件不同部位凝固时间分布中可以看出，浇注系统和铸件的外边缘部分先开始凝固，凝固到中间部分时，外侧法兰盘基本凝固完成，顶部浇注系统最后凝固，基本实现了自下而上的顺序凝固。图 5(c)所示为该浇注系统数值模拟的缩松缩孔分布。从图中可以看出，缩松主要集中在顶部浇注系统部位，铸件上缩松缺陷分布在外侧法兰盘和中间环形结构。将 cut off 值设为 5，即孔隙率大于 5%的缩松缺陷会显示。统计得到顶部浇注系统内部缩松体积为 12.861 5 cm³，铸件内部缩松体积为 0.953 3 cm³。




(a)方案一　　(b)方案二

图 2 浇口位置及充填模拟结果
Fig.2 Gate location and filling simulation results




(a)方案一　　(b)方案二

图 3 蜡模翘曲模拟结果
Fig.3 Wax model warpage simulation results

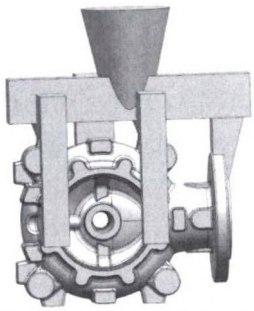


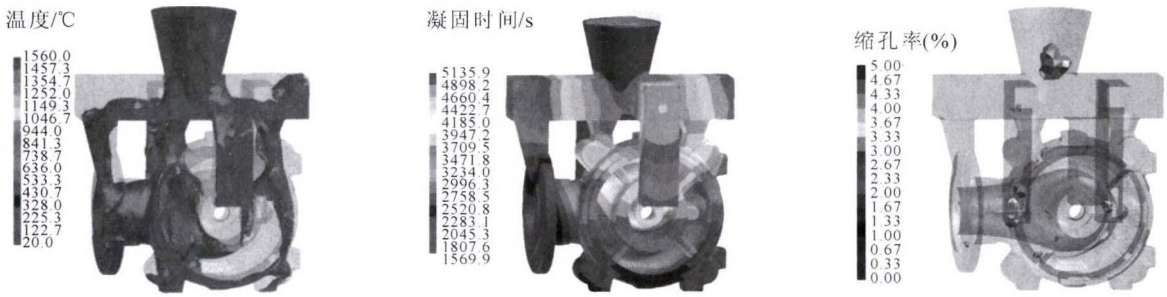
图 4 顶注加侧注的混合浇注系统示意图
Fig.4 Schematic diagram of mixed gating system with top and side pouring

### 4.2 优化后模拟结果分析

由于原始铸件存在着大量的缩孔缩松，现在的改进方案为在铸件底端增加两块冷铁。对其进行 ProCAST 数值模拟计算后，得到铸件的模拟结果如图 6 所示。通过扩大竖浇道和内浇道的尺寸达到优化的目的，优化前的两个竖浇道从左到右的宽度由 40.773 4 mm、40.773 4 mm 增大为 60.773 4 mm、55.773 4 mm；紧挨左侧竖浇道的内浇道上底边由 23.472 9 增大为 44.430 2 mm、下底边由 13.207 7 mm 增大为 29.318 0 mm，右边内浇道尺寸不变。金属熔体在流入浇注系统时大部分处于液体状态，只有少部分位于薄壁位置的金属液出现凝固现象。随后，金属熔体从铸件底部和中心轮盘位置开始凝固。加上冷铁后，明显看出铸件内部底端位置的缩孔缩松明显减少，统计得到顶部浇注系统内部缩松体积为 12.861 5 $cm^3$，铸件内部缩松体积减小为 0.418 5 $cm^3$。从而，该铸造工艺得到了优化。

### 4.3 铸件浇注试验验证

图 7 为熔模铸造生产的铸件。将优化后的浇注系统用于实际生产，实际生产过程中铸件未出现明显的缩松缺陷，铸件的收缩变形尺寸得到了优化控制，提高了铸件成品率。




(a)流场　(b)温度场　(c)缺陷分布

图 5 顶注加侧注浇注时铸件模拟结果
Fig.5 Simulation results with top and side pouring system

(a)流场　(b)温度场　(c)缺陷分布

图 6 优化后铸件模拟结果
Fig.6 Optimized casting simulation results

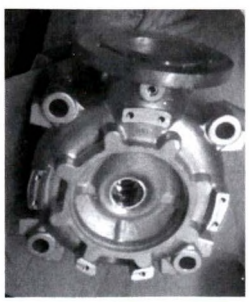


图 7 改进工艺后合格铸件
Fig.7 Qualified casting after improvement of process

## 5 结论

应用 ProCAST 软件对复杂泵体进行了浇注系统设计及数值模拟分析，得出以下结论。

(1)复杂泵体蜡模注射成型数值模拟及工艺优化，对复杂泵体浇口位置进行优化设计，浇口位置在外侧法兰上时，蜡模充填时间缩短 20.66 s，蜡模最大翘曲变形尺寸减小了 0.613 2 mm，且泵体整体收缩尺寸比较均匀。

(2)针对 304 不锈钢复杂泵体的结构特征，设

计了浇注系统，构建熔模铸造型壳与合金的热物性参数，运用 ProCAST 软件对复杂泵体的充型与凝固过程进行分析，预测其缩松缺陷的位置，分析产生机制，并对铸造工艺进行优化。

(3)运用软件对优化方案在铸造过程中的充型过程、凝固冷却过程、固相分数分布及缩孔缩松分布情况，再结合实际生产的试验结果，最终确定增加冷铁优化冒口尺寸为最佳方案。

**参考文献：**


[1] 陈晶阳，吴文津，李青，等. 采用低温度梯度 HRS 工艺制备的镍基单晶高温合金雀斑组织[J]. 中国有色金属学报，2018，28(19): 2494-2498.

[2] Liu B C, Kang J W, Xiong S M. A study on the numerical simulation of thermal stress during the solidification of shaped casting [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2001 (2): 157-164.

[3] Wang DH, He B, Li F, Sun BD. Experimental and numerical analysis on core deflection during wax injection[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28: 920-924.

[4] 古俊同，汪东红，肖旅，等. 蜡模粘弹性变形数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2016，36(5):505-508.

[5] 古俊同，汪东红，肖旅，等. 注蜡过程数值模拟蜡料性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金，2016，36(4):394-396.

[6] Wang DH, He B, Li F, Sun BD. Cavity pressure and dimensional accuracy analysis of wax patterns for investment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28: 637-642.

[7] Wang DH, He B, Li F, Sun BD. Numerical simulation of the wax injection process for investment casting [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013. 28: 220-224.

[8] 郑伦川，刘贯军. 基于 ProCAST 模拟的铸钢件熔模铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2016，37 (8): 1776-1778.

[9] 米国发，刘彦磊，赵恒涛. HT200 飞轮铸件凝固过程模拟及工艺优化[J]. 热加工工艺，2008，37(17): 51-57.

[10] 孙锦玉，汪东红，董安平，等. 基于 ProCAST 的复杂泵体熔模铸造工艺模拟[J]. 热加工工艺，2018，47(23): 77-85.

[11] 李贺，汪东红，陈凯，等. 长流程薄壁输送连接管精铸工艺的数值模拟与优化[J]. 热加工工艺，2017，46(19): 85-91.

[12] 王狂飞，许广涛，孔佑顺，等. 某壳体铸钢件浇注系统设计与优化[J]. 热加工工艺，2014，43(23):90-94.



**出售信息**

**山西华恩实业有限公司有一条“30 t/h 呋喃树脂砂铸造生产线”设备(保定维尔工程设计有限公司设计制造)，全新未用。因工艺改变，现低价出售，价格面议！**

**联系电话:18835932061 杨　13935914377 张**

**保定维尔工程设计有限公司 30 t/h 呋喃树脂生产线(2012 年 8 月)**

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 代号 | L1210 | OC-600-7 | RCDC-6 | PL350 | Y4735 | S5616IB | S5216B | S528 | S528II | S5216IVE | S528 | S524 | S5216VA |
| 名称 | 落砂机 | OC 输送机 | 电磁吊挂磁选机 | 1# 斗提机 | 振动给料机 | 砂块破碎机 | 沸腾冷却分离机 | 2# 斗提机 | 磁选机 | 再生机 | 3# 斗提机 | 振动筛 | 砂调 |
| 数量 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 备注 | 台面 2.4*3M | L=7.5M | | | | | | | | 两级再生 | | | |

| 序号 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 代号 | S528 | S524 | Y9110 | S225F | Z292 | | S25030F | Z296 | | GF1714 | | | |
| 名称 | 4# 斗提机 | 5# 斗提机 | 气力输送装置 | 混砂机 | 振实台 | 手动辊道 L=4M | 混砂机 | 振实台 | 机动辊道 | 翻转起模机 | 机动辊道转运车 | 密辊皮带转运车 | 密辊皮带机 |
| 数量 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 16 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 备注 | | | | | | | | | L=1.8M | | L=2M | L=2M | L=5.4M |

| 序号 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 代号 | | | | | | | | | | | | X227S5216QK | X227S5216DK |
| 名称 | 在线倾转流途 | 板链输送机 | 板链输送机 | 密辊皮带机 | 下芯小开车 | 密辊皮带机 | 合箱小天车 | 合箱机械手 | 机动辊道 | 浇注冷却转运车 | 无动力辊道 | 气控系统 | 电控系统 |
| 数量 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 18 | 1 | 1 |
| 备注 | | L=10.8M | L=5.4M | L=3.6M | | L=3.6M | | | L=2.5M | | L=3.6M | | |