

球墨铸铁钻探机保护件熔模铸造工艺优化

张晓光, 彭彬, 仓欣蕾, 李远志

(辽宁工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁锦州 121001)

摘要: 保护件主要用于石油钻探机, 起安全保护作用。以球墨铸铁保护件为研究对象, 通过Pro/E和ProCAST相结合对该铸件原熔模铸造浇注过程进行数值模拟, 找到产生缩孔、缩松等铸造缺陷的原因。改进浇注系统, 并研究了浇注温度、充型速度、型壳预热温度对铸件质量的影响, 通过分析获得最佳的工艺参数, 铸件的浇注温度、充型速度、型壳预热温度分别为1 300 °C、0.460 m/s、800 °C。对经过优化后的结果进行数值仿真, 发现铸件的缩孔率值大幅度降低, 并通过实际铸造生产验证。

关键词: 熔模铸造; 球墨铸铁; 保护件

球墨铸铁保护件作为石油钻探机的重要零件, 主要起安全保护的作用, 在熔模铸造的凝固过程中存在缩孔缺陷问题, 在铸件的充型过程中容易产生卷气和夹杂等缺陷^[1-5]。本文通过Pro/E软件进行球墨铸铁保护件的三维建模, 熔模铸造浇注过程的数值仿真采用ProCAST软件, 通过优化浇注系统和工艺参数, 解决铸件缺陷问题, 为球墨铸铁钻探机保护件的实际生产提供理论依据。

1 球墨铸铁钻探机保护铸件的结构

球墨铸铁保护件, 为石油钻探机上起安全保护作用的重要零件。该铸件结构较为简单, 壁厚均匀, 平均壁厚为20 mm, 整体是一个空心圆柱体, 在一端开了3个不对称的槽, 两端面之间有8个通孔, 圆柱面外轮廓有牙形槽。其外轮廓尺寸为148.49 mm×148.49 mm×71.1 mm。此铸件要求无表面和内部的铸造缺陷。QT600为该铸件的材质, 化学成分(质量分数, %)为3.0~3.5 C、2.4~2.8 Si、0.3~0.5 Mn、0.03~0.035 S, P<0.1, 0.045~0.050 Mg。抗拉强度≥600 MPa; 硬度: HB 190~270; 铸件的凝固温度范围: 1 129~1 194 °C; 密度: 7 300 kg/m³。

2 熔模铸造工艺设计

2.1 浇道选择

对球墨铸铁保护件的结构特点分析可知, 铸件整体呈直筒型, 铸件壁较厚。为了提高生产效率, 浇注系统采用一型4件组合。为保证铸件不产生缩松缩孔缺陷, 使其充型平稳, 具有良好的补缩, 应保证铸件按顺序凝固。浇注系统采用直浇道、横浇道、内浇道、出气道组合的设计^[6-8]。

2.2 充型速度的确定

本试验以卡尔金公式计算其充型速度:

$$v_{\text{充}} = \frac{0.22\sqrt{h}}{\delta \cdot \ln \frac{T}{380}} \quad (1)$$

式中: $v_{\text{充}}$ 为铸件型腔中金属液面允许的最小上升速度, cm/s; h 为铸件高度, cm; δ

作者简介:

张晓光(1977-), 男, 教授, 硕士, 硕士生导师, 主要研究方向为模具设计与制造。E-mail: lgdixjz2020@163.com

通讯作者:

彭彬, 男, 硕士生。电话: 18840134491, E-mail: 584571777@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)11-1501-05

基金项目:

辽宁省科学技术计划项目(省博士科研启动基金计划项目: 2021-BS-261)。

收稿日期:

2023-01-06 收到初稿,
2023-03-30 收到修订稿。

为铸件壁厚, cm; T 为合金浇注温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由式(1)计算得充型速度为0.457 7 m/s, 综合考虑取充型速度为0.458 m/s。

2.3 主要工艺参数

根据相关试验, 球墨铸铁QT600的液、固两相线的温度分别为1 194 $^{\circ}\text{C}$ 、1 129 $^{\circ}\text{C}$; 型壳有6层, 厚度约6 mm, 型壳材料耐火石英砂, 粘结剂为硅溶胶; 浇注过程全在空气中进行, 采用顶注式, 型壳预热温度为900 $^{\circ}\text{C}$; 在重力方向下铸件以负 X 方向进行浇注, 浇注温度1 300 $^{\circ}\text{C}$, 充型速度为0.458 m/s, 以自然冷却的方式进行冷却。

3 初始工艺数值模拟结果和分析

3.1 3D模型的建立与网格划分

通过Pro/E进行球墨铸铁保护件三维模型的建立, 如图1所示, 在此基础上, 建立该铸件浇注系统的三维模型以及完成网格划分, 铸件获得67 010个总节点数, 如图2所示。



图1 球墨铸铁保护件三维模型

Fig. 1 3D model of ductile iron protective parts

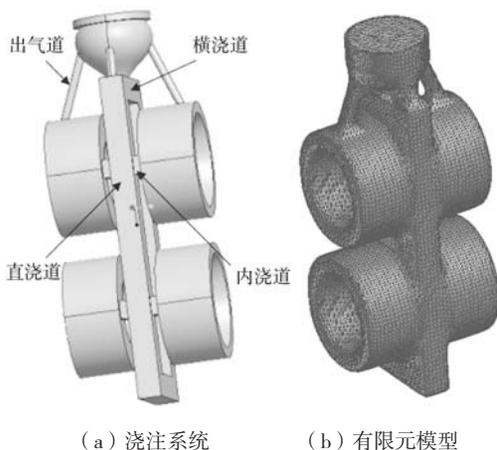


图2 初始方案的浇注系统和有限元模型

Fig. 2 Pouring system and finite element model of initial scheme

3.2 仿真模拟参数设置

在ProCAST软件中设置材料和边界条件等相关参

数, 完成设置后生成p.dat和d.dat两个文件^[9-10]。根据相关经验与典型值确定换热系数: 型壳与铸件之间换热系数为1 000 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 铸件与空气之间换热系数为1 000 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 型壳与空气之间换热系数为50 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。设置铸件重力方向为负 X 方向, 值为9.8 m/s^2 。

3.3 结果和分析

初始方案的充型过程如图3所示, 金属液平缓注入, 型腔内壁所受到的冲击较小, 直浇道被充满的时间为0.7 s, 第一组中的两个工件在2.5 s时完成充型, 第二组中的两工件在3.4 s时已充型过半, 7.2 s时充型完成。

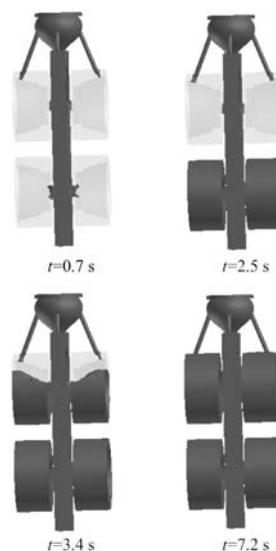


图3 初始方案不同时刻铸件的充型状态

Fig. 3 Mold filling of castings at different times in the initial scheme

初始方案的凝固情况(单位: %)如图4所示, 在铸件的凝固过程中, 按照先外后内、先下后上的凝固顺序, 可得到高质量的铸件。在944 s时, 铸件首先从外侧开始凝固, 然后从距内浇口最远的部位向内浇口部位推进, 凝固率为10%~20%, 根据灰色部分可以看出: 在1 774 s时, 铸件的主体即将完成凝固, 2 704 s整个铸件系统全部凝固。

保护件初始工艺缩孔分布图(单位: %)如图5所示。通过模拟结果分析, 发现在直浇道和内浇道及连接部分容易产生缩松缩孔, 缩孔率为13.260 3%。由于分布在铸件主体部分的缩孔很多, 铸件质量受到影响, 使铸件检验为不合格, 最终导致产品报废。这与实际生产时, 产品报废的主要原因相一致。由于工艺方案和工艺参数设定不合理, 导致凝固中的铸件因体积收缩, 而无法得到补缩, 从而产生缩孔缺陷。为了获得高质量的铸件, 改进铸件的初始浇注系统以及优

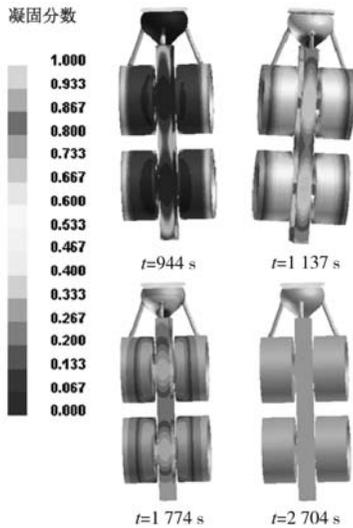


图4 初始方案不同时刻铸件的固相分数

Fig. 4 Solidification fraction of castings at different time in the initial scheme

化工艺参数，以便消除缩孔缺陷^[11]。

4 工艺优化与模拟

4.1 初始工艺方案缺陷分析和修改

根据对初始方案的数值仿真结果可以看出，直浇道和内浇道及连接部分的区域容易产生缩松缩孔缺陷，而对于铸件质量来说，直浇道缺陷的影响不太明显。在内浇道和铸件连接部分的缩松缩孔缺陷较严重，由图5可看出，内浇道部分会首先凝固，导致补缩通道阻塞，而与铸件连接部位早已凝固，从而在凝固过程中导致铸件体积收缩没能得到补充。

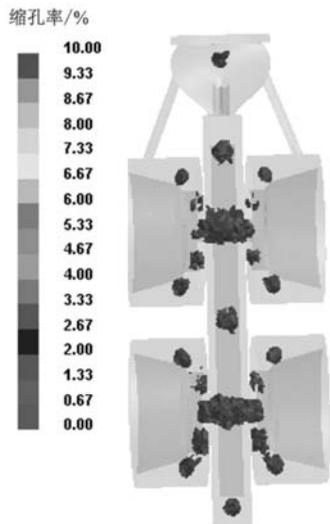
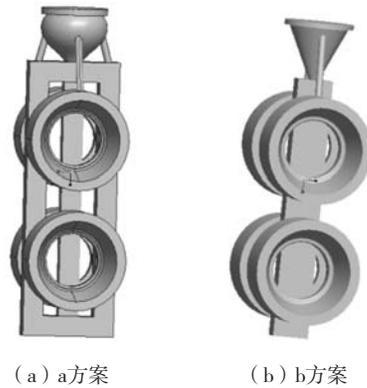


图5 初始工艺铸件的缩孔缩松分布图

Fig. 5 Distribution diagram of shrinkage and dispersed shrinkage of initial process castings

基于以上原因，在初始工艺浇注系统的基础上进行优化，得到两种不同方案，优化工艺方案如图6所示。图中a浇注系统方案为，在原浇注系统的基础上增加了置于矩形侧面内浇道。图中b浇注系统方案为，在原浇注系统的基础上增加置于管道部分的内浇道。对a、b两种方案进行数值模拟分析研究。



(a) a方案 (b) b方案

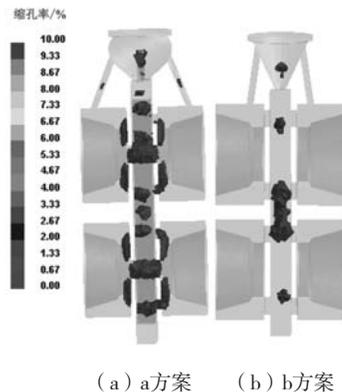
图6 优化工艺方案三维造型图

Fig. 6 3D modeling diagram of optimization process scheme

利用ProE软件对保护件进行三维造型，再导入ProCAST软件中的mesh CAST模块，进行网格划分，浇口杯和直浇道的网格划分长度为8 mm，铸件和内浇道的网格划分长度为5 mm，模拟软件自动生成有限元网格。为了与初始方案对比，其他设置与初始工艺方案一致。

4.2 结果和分析

不同工艺方案缩孔分布图（单位：%）如图7所示。根据色标值得到两种不同方案的缩孔率，a方案为6.902 5%，b方案为1.367 5%。b方案的缩孔率最小，与初始方案数值模拟缩孔率为13.260 3%相比，缩孔率数值已经大幅度减小。此外，b方案中的铸件本体无缩孔缺陷。因此，与a方案和初始方案相比，b方案的设置更为合理。



(a) a方案 (b) b方案

图7 不同工艺方案缩孔分布图

Fig. 7 Shrinkage pore distribution of different process schemes

5 铸造工艺参数优化

熔模精密铸造的铸件质量受到众多因素的影响, 本文对有关的三个铸造工艺参数进行研究^[12]。一般熔模铸造的浇注温度比合金液相线温度高50~100℃, 因此结合相关生产经验, 选择浇注温度为1 250℃, 1 280℃, 1 300℃。在球墨铸铁铸件的熔模精密铸造时, 型壳预热温度可在700~1 000℃的范围进行选择, 经综合考虑后, 选择800℃、900℃、1 000℃作为研究的型壳预热温度。充型速度的改变会对铸件的质量产生影响, 通过计算得出的充型速度, 并结合相关生产经验, 选择充型速度分别为: 0.450 m/s, 0.455 m/s, 0.460 m/s。

评判指标为铸件内缩孔率, 根据已知参数建立正交试验表, 并对所需要优化的工艺参数进行正交试验。在优化过程中, 铸件内缩孔率越小, 所得的工艺参数组越合理。正交试验的因素和水平, 如表1所示。

表1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and level table of orthogonal experiment

水平	因素		
	A浇注温度/℃	B充型速度/(m·s ⁻¹)	C型壳预热温度/℃
1	1 250	0.450	800
2	1 280	0.455	900
3	1 300	0.460	1 000

根据正交试验, 完成铸件9组方案的有限元建模和数值仿真, 获得相关的充型时间、缩孔率值, 并填入表内, 如表2所示。

表2 正交试验方案和结果

Table 2 Scheme and results of orthogonal experiment

试验号	因素A	因素B	因素C	充型时间/s	缩孔率/%
L1	1	1	1	4.881	1.451
L2	1	2	2	3.925	1.433
L3	1	3	3	3.869	1.442
L4	2	1	2	3.961	1.551
L5	2	2	3	3.918	1.452
L6	2	3	1	3.869	1.402
L7	3	1	3	3.820	1.589
L8	3	2	2	3.771	1.370
L9	3	3	1	3.858	1.321

根据表2中的9组试验方案可以明显看出, 缩孔率最小的为L9, 值为1.321%; 缩孔率最大的为L7, 值为1.589%。

正交试验法的试验指标为缩孔率越小铸件质量越好, 通过极差分析筛选出A3B3C1组合方案为最优工艺参数组, 获得的浇注温度、充型速度和型壳预热温度

分别为1 300℃、0.460 m/s、800℃, 充型时间为3.858 s, 缩孔率为1.321%。钻探机保护件最优方案的缩孔分布(单位: %)如图8所示。

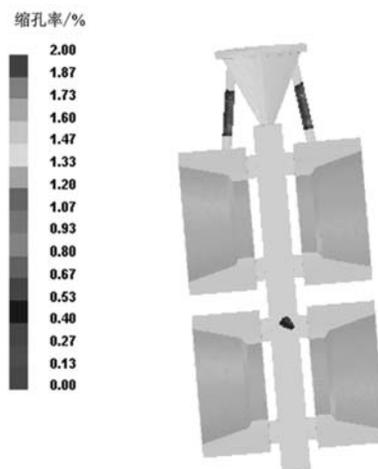


图8 最优工艺方案铸件的缩孔分布

Fig. 8 Distribution of shrinkage of casting in the optimal process scheme

根据上述的仿真分析结果, 对球墨铸铁钻探机保护件进行了实际熔模铸造的验证, 得到的铸造产品如图9所示, 发现通过优化使铸件的废品率降低, 铸件质量得到改善。

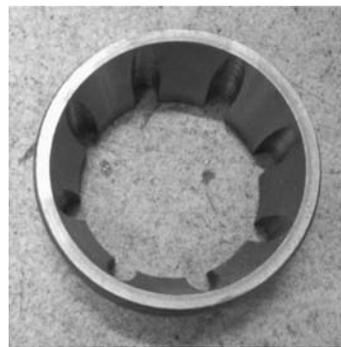


图9 保护件的实际铸件

Fig. 9 Actual castings of protective parts

6 结论

(1) 采用ProCAST软件能对球墨铸铁钻探机保护件的熔模铸造过程进行正确的数值仿真, 通过增加浇注系统的分流道和直流道的数量进行优化设计, 改善铸件缺陷, 为实际生产过程提供指导意见。

(2) 通过正交试验对影响球墨铸铁钻探机保护件质量的三个工艺参数进行分析, 依据缩孔率越小铸件质量越好的原则, 得到浇注温度为1 300℃、充型速度为0.460 m/s、型壳预热温度为800℃的组合方案为最优工艺参数组。

参考文献:

- [1] 李爱农, 潘宇飞, 何博, 等. 熔模铸造用型壳材料的优选 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (5): 106-110.
- [2] 张浩, 白瑀, 黄亮. 熔模铸造钛合金直齿面齿轮快速成形工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (2): 183-185.
- [3] 王海洋, 李远志, 张晓光. 升降臂的熔模铸造工艺设计及优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (8): 1027-1031.
- [4] 魏娟娟, 米国发, 周志杰, 等. 安装架石膏型熔模铸造数值模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (3): 83-87.
- [5] 向若飞. 熔模铸造废弃型砂耐火材料资源化利用研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.
- [6] 朱力微, 史兴利, 安庆贺. 铝合金航空箱体低压熔模铸造工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2017 (6): 55-59.
- [7] 傅骏, 赵怀昊, 魏继业, 等. 数值模拟技术在熔模铸造生产中的应用实践 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2764-2766.
- [8] 王清宇, 褚元召, 陶韬, 等. 百万燃气轮发电机铜支架铸造工艺改进 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2527-2529.
- [9] 陈方桃. 基于ProCAST的排气机匣熔模铸造数值模拟与优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 99-102.
- [10] 周传龙, 何强, 周宏根, 等. 基于ProCAST的柴油机活塞铸造工艺模拟及优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (5): 632-636.
- [11] 譙攀, 傅骏, 贾定磊, 等. 基于快速成型技术和熔模铸造的金属材质工艺品铸造实践 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17): 119-121.
- [12] 刘继广, 王殿飞, 方晓刚, 等. 高铁挂架熔模铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 968-975.

Optimization of Investment Casting Process for Ductile Iron Drilling Machine Protective Parts

ZHANG Xiao-guang, PENG Bin, CANG Xin-lei, LI Yuan-zhi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract:

The protective parts are mainly used in oil drilling machines and play a role in safety protection. Taking ductile iron protective parts as the research object, the casting process of the original investment casting was numerically simulated by combining Pro/E and ProCAST to find out the causes of casting defects such as shrinkage and dispersed shrinkage, improve the casting system, and study the effects of pouring temperature, filling speed and shell preheating temperature on casting quality. The optimal process parameters were obtained through analysis. The pouring temperature, filling speed and shell preheating temperature are 1 300 °C, 0.460 m/s and 800 °C, respectively. Numerical simulation was conducted on the optimized results, and it was found that the shrinkage rate of the casting was significantly reduced, which was verified through actual casting production

Key words:

investment casting; ductile iron; protective parts