

不锈钢支架熔模铸造工艺优化

张晓光, 仓欣蕾, 彭 彬

(辽宁工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁锦州 121001)

摘要: 通过ProCAST软件对除草机不锈钢支架进行熔模铸造的数值模拟, 预测铸件缩孔缺陷分布情况, 并对其浇注系统进行改善。利用正交试验对铸件的工艺参数进行研究, 通过分析获得工艺参数的最佳方案。对该结果进行数值仿真以及实际铸造, 发现铸件缺陷明显减少, 这为不锈钢支架的生产提供了参考。

关键词: 熔模铸造; ProCAST; 不锈钢支架; 正交试验

不锈钢支架主要应用在汽车、航空航天、农用机械等领域中, 为两个重要零件之间的连接件, 起传递转速和扭矩的作用, 因其复杂的外部轮廓, 在熔模铸造凝固过程中容易产生缩孔缺陷, 充型过程中会有卷气和夹杂等问题^[1-4]。本文通过ProCAST软件对不锈钢支架原熔模铸造的浇注过程进行数值模拟分析, 并依据仿真结果优化浇注系统和工艺参数, 解决缩孔缺陷, 提高铸件质量, 为不锈钢支架铸件的实际生产提供参考。

1 不锈钢支架铸件结构

不锈钢支架, 为除草机上传递转速和扭矩作用的重要连接件。该铸件平均壁厚4 mm, 结构复杂, 整体为圆形面、类似矩形面、U形壳体组成的不规则结构。其外轮廓尺寸为141 mm × 81.8 mm × 60.84 mm, 要求无内部和表观的铸造缺陷。铸件材料为304 L不锈钢, 其化学成分(质量分数, %): ≤ 0.03 C, ≤ 1.0 Si, ≤ 2.0 Mn, 18.0~20.0 Cr, 8.0~11.0 Ni, ≤ 0.03 S。液、固相线温度为1 461.9 °C, 1 411.2 °C; 密度7.93 kg/m³。通过Pro/E软件对除草机不锈钢支架进行三维建模, 如图1所示。

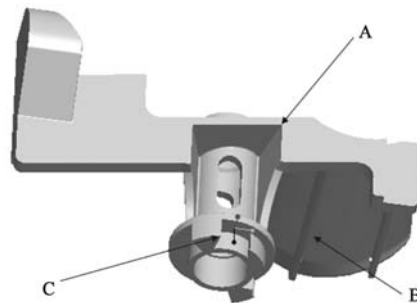


图1 支架的三维模型
Fig. 1 3D model of the bracket

同时根据浇注工艺的不同, 分析预测该铸件可能出现缩孔和缩松的位置为铸件的最大热节处, 分别位于铸件矩形连接处A、铸件U形壳体B、侧壁接触的一圈圆弧块C。

2 熔模铸造工艺设计

2.1 浇道选择

通过不锈钢支架的结构特点分析, 铸件整体呈不规则形状, 圆柱部分及U形壳体部分最薄, 属于复杂薄壁结构。为了提高生产效率和充型过程的平稳, 根据实际生产要求, 除草机不锈钢支架铸件采用直浇道、内浇道设计^[5], 一壳型2件。

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:

仓欣蕾, 女, 硕士生。电话: 15110750970, E-mail: 1216126086@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)02-0257-05

基金项目:

辽宁省科学技术计划项目(2021-BS-261)。

收稿日期:

2023-04-11 收到初稿,
2023-11-17 收到修订稿。

2.2 充型速度的确定

本试验通过卡尔金公式确定铸件的充型速度^[6]:

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

式中: $v_{\text{充}}$ 为金属液充型速度, cm/s; h 为铸件高度, cm; δ 为铸件壁厚, cm; T 为浇注温度, $^{\circ}\text{C}$ 。根据式(1)计算得 $v_{\text{充}}=239.053\ 4$ mm/s, 取充型速度为240 mm/s。

2.3 工艺参数

根据相关试验, 不锈钢304 L的液相线温度为1 461.9 $^{\circ}\text{C}$, 固相线温度为1 411.2 $^{\circ}\text{C}$; 型壳共6层, 材料为硅溶胶+耐火石英砂, 厚度约8 mm; 铸件在重力方向下负Z方向采用顶注式和自然冷却的方式, 浇注温度和型壳预热的温度分别为1 500 $^{\circ}\text{C}$ 、1 000 $^{\circ}\text{C}$, 充型速度为240 mm/s^[7]。

3 原工艺方案仿真分析

3.1 浇注系统的三维建模以及网格划分

通过Pro/E软件建立不锈钢支架浇注系统的三维模型, 如图2所示, 以及获得.igs的格式导入ProCAST软件, 并完成网格划分, 网格总节点数12 706, 总单元数104 753, 得到的不锈钢支架浇注系统的三维有限元模型如图3所示。

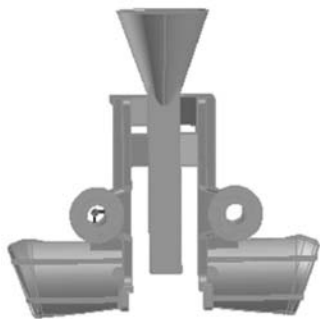


图2 不锈钢支架浇注系统

Fig. 2 Pouring system of stainless steel bracket

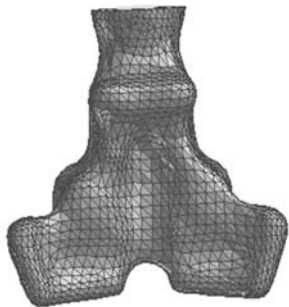


图3 浇注系统网格划分

Fig. 3 Meshing of pouring system

3.2 仿真有关参数的设置

在熔模铸造模拟仿真时, 需设置众多参数, 如铸件材料、初始条件、边界条件等, 准确设置相关模拟参数才能获得精度较高的结果^[8]。本文在ProCAST中设置如下参数: 铸件材料为304 L, 其浇注温度取1 500 $^{\circ}\text{C}$; 铸件与型壳、铸件与空气之间的换热系数均为1 000 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$), 型壳与空气之间的换热系数设为50 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$); 型壳厚度大约8 mm, 型壳外表面设为空冷, 浇注方式为顶注式, 使用速度计算器设置充型速度为240 mm/s, 重力加速度设置为9.8 m/s^2 。

3.3 仿真结果与分析

除草机不锈钢支架原工艺方案的充型状态如图4所示。根据图4可以看出, 金属液在型腔中平稳上升, 无冲击型腔现象。1 s时金属液充满直浇道, 并开始进入内浇口, 2.5 s时金属液充满内浇道, 3 s时整个充型到达一半左右, 4 s时充型完成。

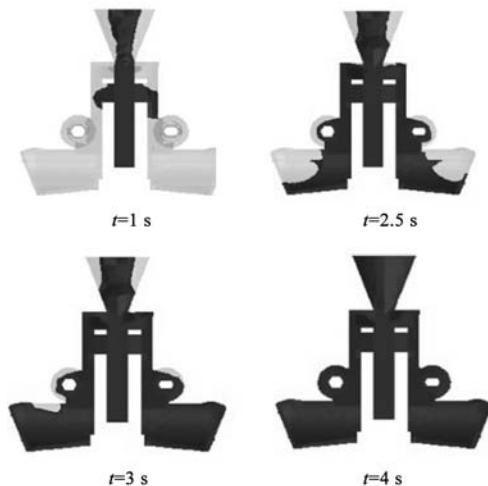


图4 不同时刻铸件充型情况

Fig. 4 Mold filling condition of castings at different times

铸件的凝固顺序直接影响到铸件质量的好坏, 原工艺方案除草机不锈钢支架的凝固过程如图5所示。

根据图5可以看出, 铸件在整个凝固过程中, 基本按照由外向内、由下向上的顺序进行凝固, 这有利于获得高质量的铸件。4 s时铸件外侧薄壁开始凝固, 凝固从远离浇口的位置向浇口处进行, 1 042 s时铸件主体已基本凝固完全。

除草机不锈钢支架原工艺方案的缩孔分布图如图6所示。经数值模拟预测出除草机不锈钢支架原工艺方案的缩孔率(铸件本体中预测的缩孔体积与铸件本体体积之比)为21.450%, 且部分缩孔缺陷分布在铸件主体, 导致铸件质量不合格, 从而报废, 这与实际情况相符合, 表明数值模拟效果较好。缩孔缺陷产生的

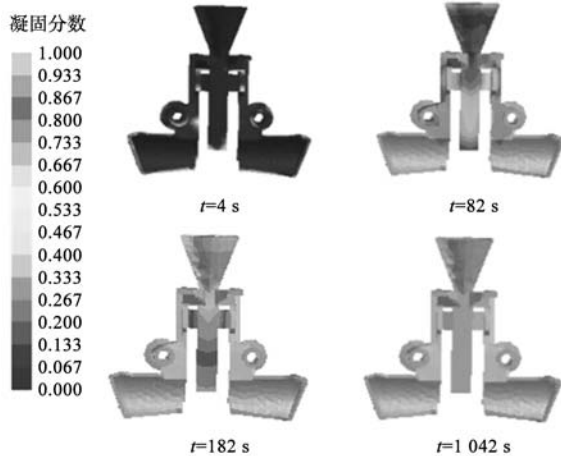


图5 不同时刻铸件凝固情况

Fig. 5 Solidification condition of castings at different times

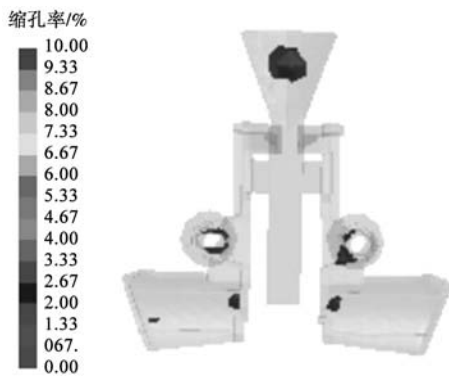


图6 铸件缩孔分布

Fig. 6 Distribution of shrinkage cavity in castings

原因, 主要为工艺方案、工艺参数等两方面的不合理设定, 致使铸件凝固过程中因体积收缩而无法得到补缩, 从而产生缩松缩孔缺陷^[9]。为了降低铸件缩孔率、解决缩孔缺陷等问题, 需要改进铸件的浇注系统和优化工艺参数。

4 铸造工艺的优化与模拟

4.1 浇注系统的改进与分析

根据原工艺方案的仿真模拟可以看出, 铸件缩孔缺陷主要分布在最大热节处, 分别位于矩形连接处、U形壳体、侧壁接触的一圈等部位, 产生这种现象的原因是内浇道部分先凝固, 导致补缩通道阻塞, 造成铸件因体积收缩而没能得到补缩。

基于以上原因, 在原工艺方案的基础上进行改进, 设计了以下两种工艺方案, 如图7所示, a方案在直浇道下方增加内浇道, b方案在直浇道下方同样增加内浇道, 且在浇口杯位置增加排气道。

创建三维模型, 通过mesh CAST模块完成网格划分。浇口杯、直浇道的网格尺寸控制为10 mm, 铸件U

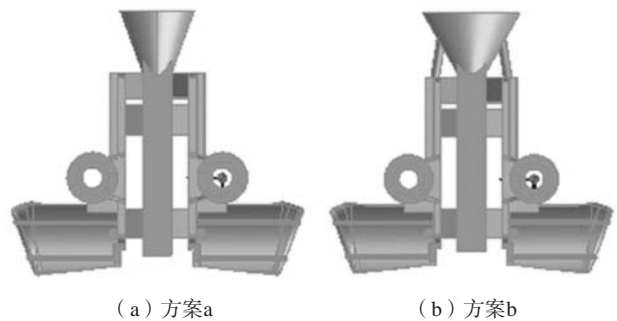


图7 优化工艺方案的三维模型

Fig. 7 3D model of the optimized process schemes

形壳体的网格尺寸控制为3 mm; a方案总节点数12 832, 总单元数108 029; b方案总节点数13 134, 总单元数109 929; 为了将两种方案进行对比分析, 在工艺参数、边界条件不变的情况下, 分别进行仿真模拟分析。优化工艺方案除草机不锈钢支架的缩孔缩松分布如图8所示。

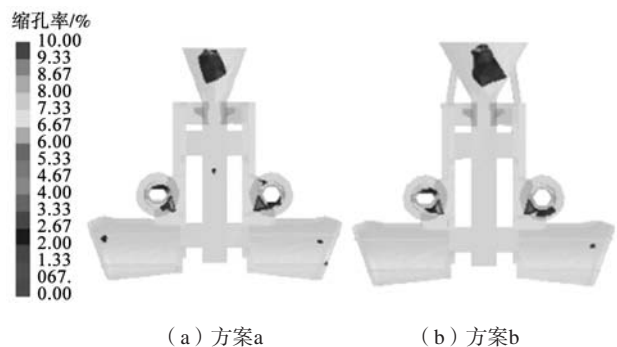


图8 优化工艺方案铸件缩孔分布

Fig. 8 Distribution of shrinkage cavity in castings of optimization process schemes

从图8可以得到两种方案的缩孔率值, a方案为8.461 5%, b方案为6.508 9%。与初始方案的缩孔率为21.450%相比, 优化方案的缩孔率明显减小。但是a、b两种方案的铸件主体上仍然存在缩松、缩孔缺陷, 需要选择一种方案进行工艺参数的优化。因b方案的缩孔率相比a方案更少, 且b方案的铸件主体存在的缩孔缺陷更少, 综合考虑采用b方案更为合理。

4.2 铸造工艺参数优化

影响熔模精密铸造铸件质量的因素众多, 本文分析三个有关铸件成形质量的工艺参数^[10]。结合相关生产经验, 浇注温度一般相比金属液相线温度高50~100 ℃, 取1 530 ℃, 1 600 ℃, 1 650 ℃; 不锈钢铸件在熔模精密铸造时, 型壳预热温度一般在800~1 015 ℃, 考虑不锈钢支架为复杂薄壁零件, 应稍微提高型壳预热温度来保证不锈钢支架铸件的成形质量, 取1 000 ℃,

1 050 ℃, 1 100 ℃。充型速度对铸件质量有较大的影响, 根据公式并结合有关生产经验, 选择充型速度分别为: 200 mm/s、230 mm/s、250 mm/s。

为了消除b方案铸件主体上的缩松缩孔缺陷, 根据需要每个因素选择三个水平见表1, 以缩孔率的大小为主要判断指标, 对铸件的三个工艺参数进行 $L_9(3^3)$ 的正交试验^[11]。

表1 正交试验因素
Table 1 Orthogonal experimental factors

水平	因素		
	浇注温度/℃	充型速度/(mm·s ⁻¹)	型壳预热温度/℃
	A	B	C
1	1 530	200	1 000
2	1 600	230	1 050
3	1 650	250	1 100

通过有限元建模与仿真, 完成9组方案的数值模拟计算, 将对应方案的充型时间和缩孔率填入表内, 如表2所示。

表2 正交试验方案
Table 2 Orthogonal experimental schemes

试验号	因素A	因素B	因素C	充型时间/s	缩孔率/%
L1	1	1	1	6.780	1.716
L2	1	2	2	5.459	2.752
L3	1	3	3	4.883	2.574
L4	2	1	2	5.864	1.345
L5	2	2	3	5.417	1.360
L6	2	3	1	4.929	1.367
L7	3	1	3	5.864	1.346
L8	3	2	2	5.365	1.343
L9	3	3	1	4.850	1.345

从表2可看出, L4、L7、L8、L9的缩孔率分别为1.345%、1.346%、1.343%、1.345%, 4个试验方案中的缩孔率均较小且非常接近, 经过数值模拟后发现, 上述方案中的缩孔预测结果均显示铸件本体无缩孔缺陷。结合生产经验与成本控制情况, 选择A3B2C2为工艺参数最优方案, 见表3。

表3 最优工艺参数
Table 3 Optimal process parameters

最优方案	浇注温度/℃	充型速度/(mm·s ⁻¹)	型壳预热温度/℃	充型时间/s	缩孔率/%
A3B2C2	1 650	230	1 050	5.365 2	1.343 2

除草机不锈钢支架最优方案的缩松缩孔分布如图9所示。

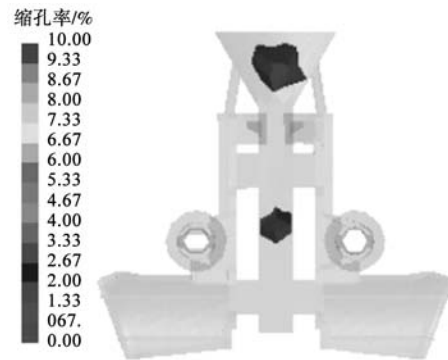


图9 最优方案铸件缩孔分布

Fig.9 Distribution of shrinkage cavity in castings with the optimal scheme

4.3 实际生产验证

对优化后的结果进行实际生产验证, 根据实际生产经验控制浇注温度、型壳预热的温度和充型速度, 得到铸件实物如图10。由图可知, 铸件的外观良好, 缺陷明显减少, 检测发现优化后的除草机不锈钢支架的成品率有了很大的提高。

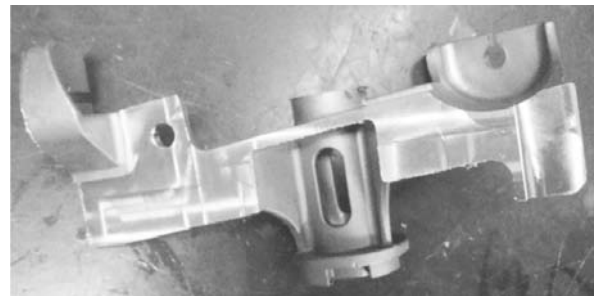


图10 铸件实物

Fig.10 Physical casting

5 结论

(1) 采用ProCAST软件对不锈钢支架熔模铸造过程进行数值模拟, 通过改进浇注系统, 增加内浇道和排气道的数量, 使得铸件缩孔率明显降低, 但不能完全消除铸件主体的内部缺陷。

(2) 采用正交试验法获得不锈钢支架铸件工艺参数的最佳方案, 浇注温度、型壳预热的温度分别为1 650 ℃、1 050 ℃, 充型速度为230 mm/s, 并对其进行数值模拟和实际产品铸造, 发现铸件主体内部存在缩孔缩松缺陷, 铸件质量得到改善, 为不锈钢支架铸件的实际生产提供参考。

参考文献:

- [1] 冯爽诚, 丁旭, 冉普, 等. 熔模铸造发动机支架的数值模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (12): 1320-1322.
- [2] 王清宇, 褚元召, 陶韬, 等. 百万燃气轮机发电机铜支架铸造工艺改进 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2527-2529.
- [3] 王丽萍, 孙长波, 高成薇, 等. 支架类铸件熔模铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (6): 528-530.
- [4] 徐贵强, 鞠富, 郝素斌, 等. 精铸支架浇不足缺陷解决方案 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (2): 180-182.
- [5] 张晓光, 韦洲, 李莹. 基于ProCAST的支架铸件熔模铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (21): 100-102.
- [6] 白瑀, 张浩, 黄亮. 基于ProCAST的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优化 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (11): 71-75.
- [7] 王海洋, 李远志, 张晓光. 升降臂的熔模铸造工业设计及优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (8): 1027-1031.
- [8] 杨新娣, 田智星, 路涵博, 等. 涡轮后机匣支板熔模铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (9): 1184-1188.
- [9] 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.
- [10] 丁华锋, 金先志, 陈涛, 等. 车用水箱弯管接头熔模铸件工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (2): 248-252.
- [11] 钟发勇, 张继祥, 董安平, 等. 基于数值模拟和田口实验的K4169高温合金精密铸造工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (3): 62-67.

Optimization of Investment Casting Process for Stainless Steel Bracket

ZHANG Xiao-guang, CANG Xin-lei, PENG Bin

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

Abstract:

The stainless steel bracket of weeding machine was numerically simulated by investment casting using ProCAST software. The shrinkage defect of the casting was predicted and the pouring system is improved. The process parameters of castings were studied by the orthogonal experiment, the optimum scheme of process parameters was obtained by analysis. Through numerical simulation and actual casting, it is found that the casting defects are obviously reduced, which provides a reference for the production of stainless steel bracket.

Key words:

investment casting; ProCAST; stainless steel bracket; orthogonal experiment
