

一种双相不锈钢闭式叶轮熔模铸造的工艺优化

史书考¹, 李松山¹, 向青春¹, 曹美佳¹, 杨建², 王沿滨², 邱克强¹

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 盘锦天工精密铸造有限公司, 辽宁盘锦 124216)

摘要: 采用熔模铸造方法可以生产出近净形复杂结构整铸式叶轮铸件, 满足叶轮的力学性能设计要求。利用ProCAST数值模拟软件对一种双相不锈钢闭式叶轮的熔模铸造工艺方案进行了优化, 通过改进浇冒口系统及金属液的浇注方式, 成功地消除了该闭式叶轮铸件轮毂部位及口环部位处的缩孔缺陷。实际生产验证表明, 按照优化后的铸造工艺方案, 可以获得质量优良的闭式叶轮铸件产品, 其成品率和生产效率更高, 为同类闭式叶轮铸件的熔模铸造工艺设计及生产提供了参考。

关键词: 熔模铸造; 闭式叶轮; 工艺优化; 数值模拟

带有叶片的叶轮是涡轮机械(例如离心泵)中的旋转零件, 通过叶轮叶片对流体的作用, 将外部机械能转化为流体的动能和压力能, 实现涡轮机械的功率输出^[1-2]。其叶片的流线型轮廓线很难靠机械加工成形, 但可以通过铸造方法, 尤其是熔模铸造方法直接制造出来, 而且能够避免机械加工带来的应力集中, 从而提高叶轮的力学性能^[3]。在中小型叶轮的生产过程中, 缩孔和气孔是影响熔模铸造生产最大的质量问题。

本文介绍了一种双相不锈钢闭式叶轮的熔模铸造工艺优化过程, 通过ProCAST数值模拟软件^[4-6]分析铸件的凝固过程, 预测其缩孔、缩松等缺陷的位置, 进而调整浇冒口系统等工艺设计^[7-8], 改善浇注方案, 为同类叶轮精铸件的生产提供工艺及技术参考。

1 闭式叶轮的铸件结构

叶轮按照叶片形式分为三种: 开式叶轮、闭式叶轮和半开式叶轮; 按照工作方式分为单吸叶轮和双吸叶轮; 按结构分为流道式(单流道、双流道)、叶片式、螺旋离心式和旋流式。本研究中叶轮类型为单吸六流道闭式叶轮, 如图1所示, 其单件重量为122 kg, 材质为美标的A890 3A双相不锈钢。图1(a)所示为铸件的三维模型

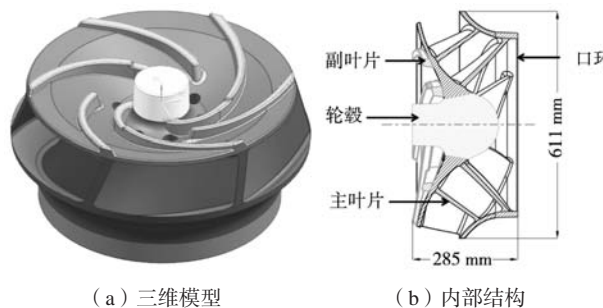


图1 闭式叶轮铸件图

Fig. 1 Diagram of the closed impeller casting

作者简介:

史书考(1999-), 男, 硕士生, 主要从事铸造新材料与新工艺方面的研究工作。E-mail: 1303419196@qq.com

通信作者:

向青春, 男, 教授。E-mail: xiangqchun@yeah.net

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

03-0370-06

基金项目:

沈阳工业大学首批课程思政示范课程培育项目(100601171)。

收稿日期:

2024-01-22 收到初稿,

2024-03-16 收到修订稿。

型,图1(b)所示为铸件的内部结构。该叶轮的轮廓尺寸为611 mm×611 mm×285 mm,最大壁厚为175 mm,最小壁厚为8.5 mm。其他结构的基本尺寸如表1所示。

表1 闭式叶轮铸件的基本尺寸
Tab. 1 Basic dimensions of the closed impeller casting /mm

轮毂直径	口环直径	流道宽度	叶轮直径	叶片厚度范围
110	495	110	611	8.5~10

2 初始铸造工艺方案及数值模拟分析

2.1 初始铸造工艺方案的设计

首先分析该闭式叶轮铸件的结构,其轮毂和口环均为壁厚或结构厚大的部位,判断在这些部位铸件容易出现缩孔缩松等铸造缺陷。根据铸钢类产品顺序凝固的工艺设计原则^[9-10],本次初始铸造工艺方案的浇注位置选择为铸件的口环朝上放置,主内浇口设计在轮毂的球面位置,冒口使用杯型模头,浇注类型为顶部注入,并且在口环位置设计三个带补贴的侧边内浇口,其主要作用是:①对口环部分的热节进行补缩;②起到排气和排渣的作用;③脱蜡时,起到排蜡的作用。该叶轮的初始铸造工艺方案如图2所示。

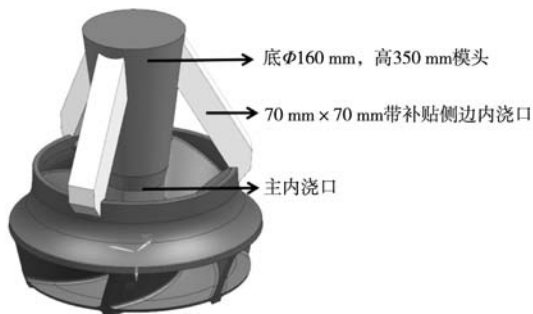


图2 初始铸造工艺方案
Fig. 2 Initial casting process scheme

2.2 数值模拟参数设置

通过UG软件导出初始铸造工艺方案三维图的x_t文件,进入ProCAST软件中MESHCAST模块^[11],打开该x_t文件,然后进行铸件和模壳的网格划分,其中铸件的单位网格步长设置为10 mm,模壳的单位网格步长设置为20 mm,一共生成的二维网格数为75 192,三维网格数为706 712,划分网格后的数值模拟模型如图3所示。设置浇注温度为1 620 ℃,浇注开始时模壳温度为650 ℃,浇注速度为7 kg/s,金属液与模壳的换热系数为500 W/(m²·K),冒口顶部金属液与空气的换热系数为100 W/(m²·K),模壳与空气的换热系数为45 W/(m²·K)。

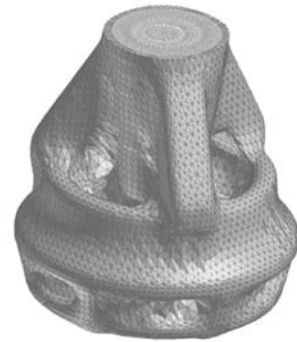


图3 初始铸造工艺方案的网格划分图
Fig. 3 Meshing diagram of the initial casting process scheme

2.3 初始方案数值模拟分析

图4所示为初始铸造工艺方案的数值模拟结果,图4(a)显示了缩孔缺陷的位置,所选取缩孔缩松判断的临界值为2.3% (参考该材质的收缩率),可见在铸件的轮毂和口环部位均有缩孔缺陷。从图4(b)分析得出,三个侧边内浇口的补缩距离有限,无法对口环部位的热节进行全部补缩,导致口环部位存在缩孔缺陷。图4(c)显示了轮毂部位缺陷的形成过程,由于冒口根部与空气换热面积大,相当于降低了冒口根部的模数,导致冒口根部比底部的轮毂要先凝固。从图4(d)的温度场可以看出,没有侧边内浇口的一侧,冒口根部更容易先行凝固,从而使铸件的轮毂部位出现缩孔缺陷。

3 浇冒口系统优化及数值模拟

3.1 浇冒口系统优化

根据初始铸造工艺方案的数值模拟分析,对其进行工艺优化。一是增加侧边内浇口的数量,由初始的3个侧边内浇口增加到6个,使每一个口环与叶片连接部位的热节均由上方的侧边内浇口进行补缩,同时也能减缓冒口根部提前凝固。二是增大冒口根部的模数,选择底部直径为φ170 mm的冒口。为了方便工人蜡型组树,将冒口的顶部设计成六棱形状。浇冒口系统优化后的工艺方案如图5所示。

3.2 优化工艺方案的数值模拟

如图6所示为优化浇冒口系统后工艺方案的数值模拟结果,图6(a)为优化后工艺方案的缩孔缺陷位置,可见在轮毂位置依然有少量的缩孔缺陷,而在其余位置已没有缺陷。图6(b)显示了增加侧边内浇口后口环部位的凝固状况,可见口环部位的热节部分已全部被侧边内浇口补缩完毕。从图6(c)和图6(d)分析轮毂位置缺陷的形成原因,可以看到冒口的补缩

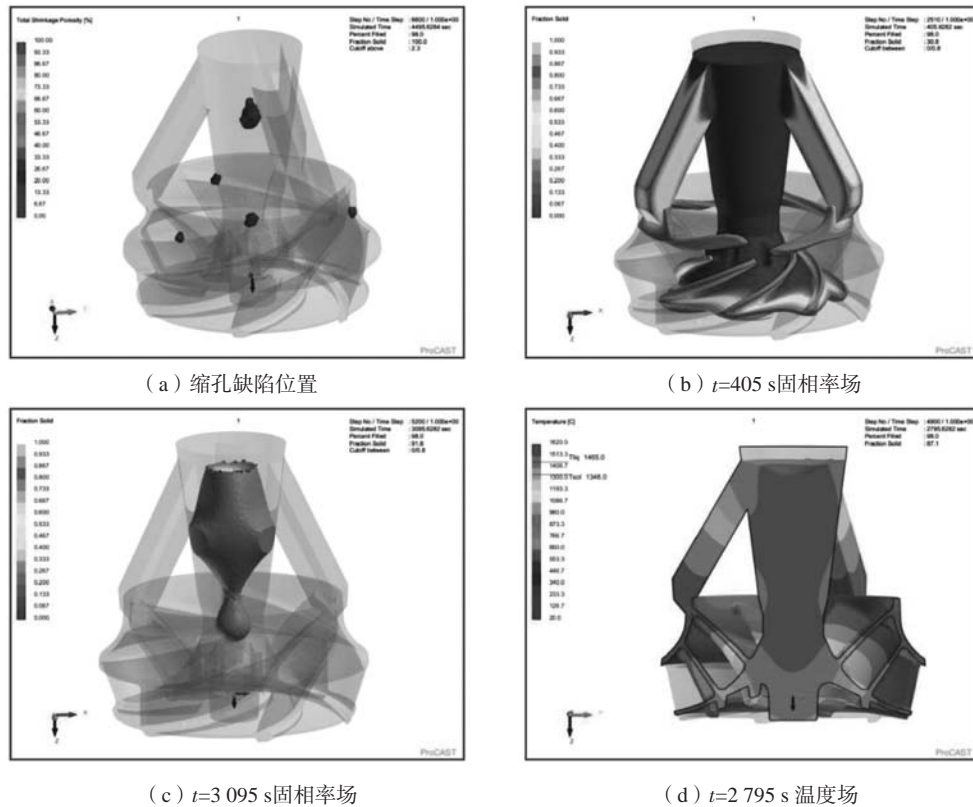


图4 初始铸造工艺方案的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of the initial casting process scheme

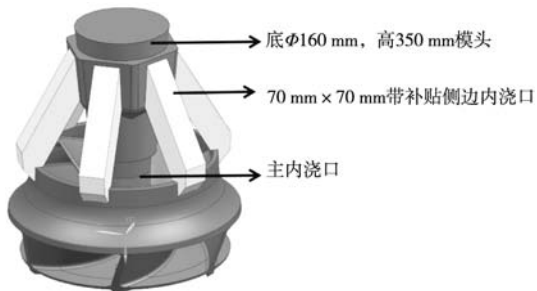


图5 浇冒口系统优化后的工艺方案

Fig. 5 The casting process scheme with the optimized gating and feeding systems

状态以“V”型进行补缩，这种补缩类型很容易产生质量隐患，同时也说明了铸件下方的散热不好，导致金属液凝固速度慢。

4 浇注工艺的优化及生产验证

4.1 初始浇注工艺的数值模拟分析

图7所示为初始浇注工艺的数值模拟结果，金属液从浇口杯的中间引入，见图7(a)。从图7(b)-(d)的温度场可以看出，金属液一直在冲击轮毂底部，使轮毂底部的温度一直处于一个高温状态，导致

轮毂底部的凝固速度慢，从而在铸件最后凝固的轮毂部位中仍然出现了少量缩孔缺陷，见图6(a)。

4.2 优化后浇注工艺的数值模拟分析

为了防止铸件的轮毂底部形成蓄热区，优化了该工艺的浇注方案，采用侧边浇注的方式，如图8所示。从图8(a)-(d)可以看出，金属液沿着浇口杯的侧壁引入，解决了轮毂底部温度过高的问题，而且从侧边引入金属液也起到了缓流的作用，保证了型壳的强度。图8(e)显示出主内浇口部位的凝固趋势，图8(f)为优化浇注工艺方案后铸件的缺陷分布图，可以看出经过调整浇注方案成功地消除了轮毂部位的缩孔缺陷。

4.3 生产验证

根据最终优化后的铸造工艺方案，我们进行了该双相不锈钢闭式叶轮铸件的实际生产，生产过程如图9所示。图9(a)到图9(d)分别为组树、制壳、浇注和清理打磨，图9(e)所示为生产出来的叶轮铸件。最后经过机加工验证，该闭式叶轮铸件的口环和轮毂部位均无缺陷，达到了客户的质量要求。

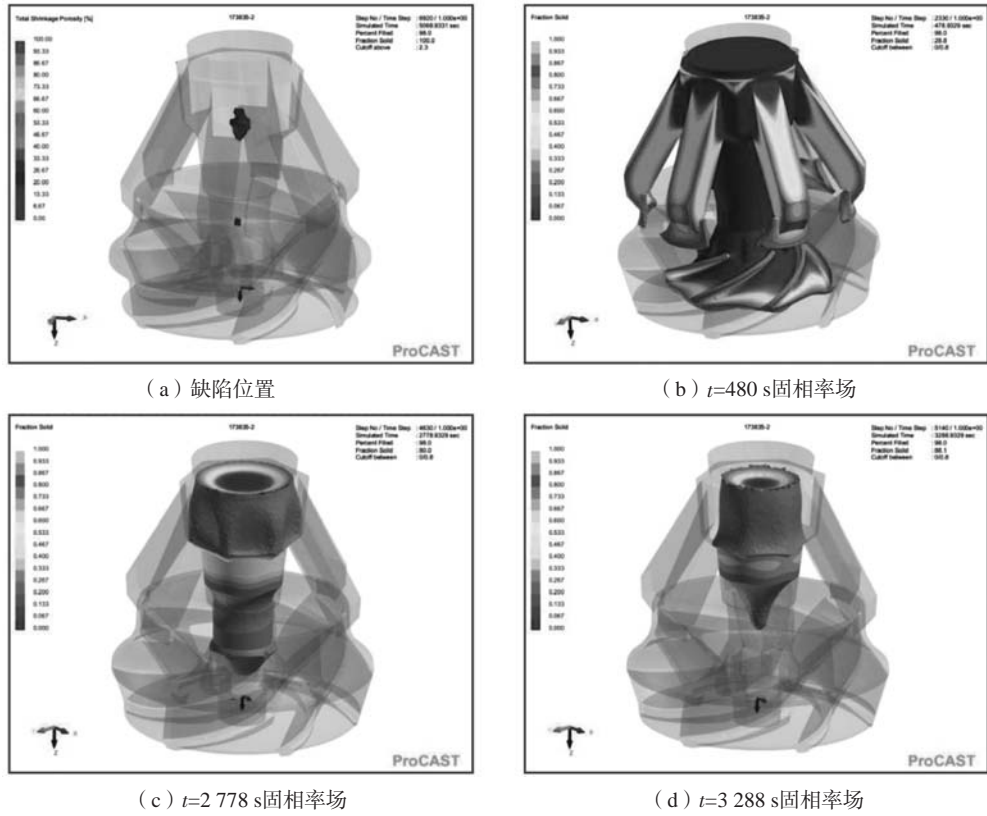


图6 优化铸造工艺方案的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of the optimized casting process scheme

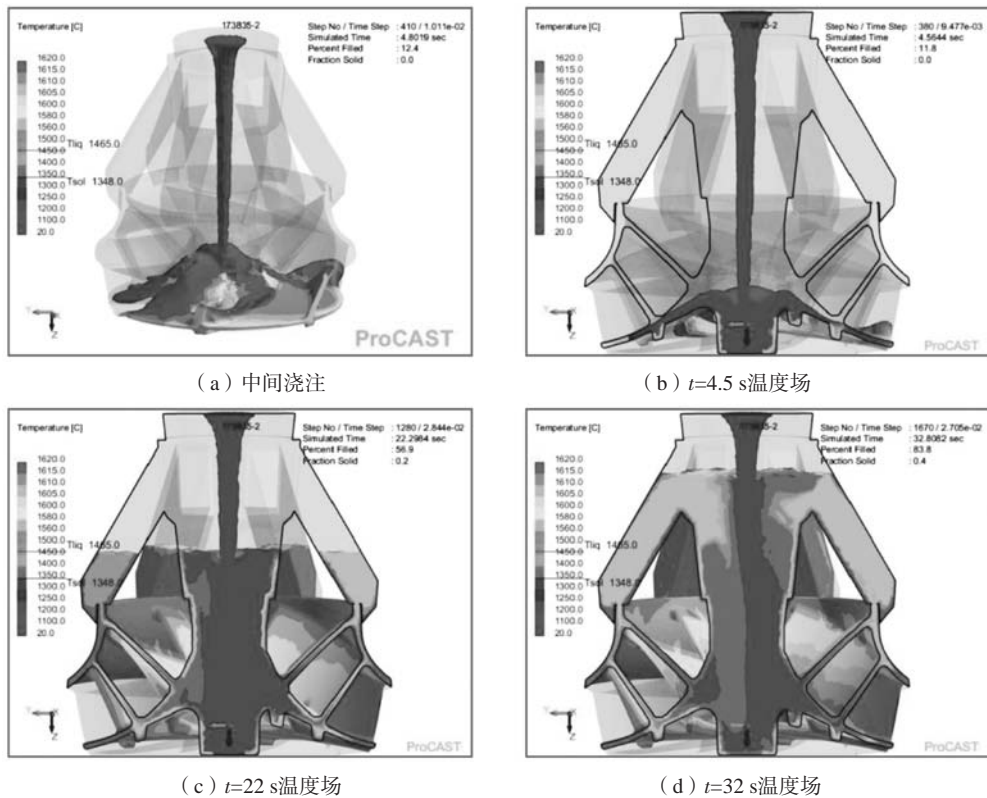


图7 初始浇注工艺方案的数值模拟结果

Fig. 7 Simulation results of the original pouring scheme

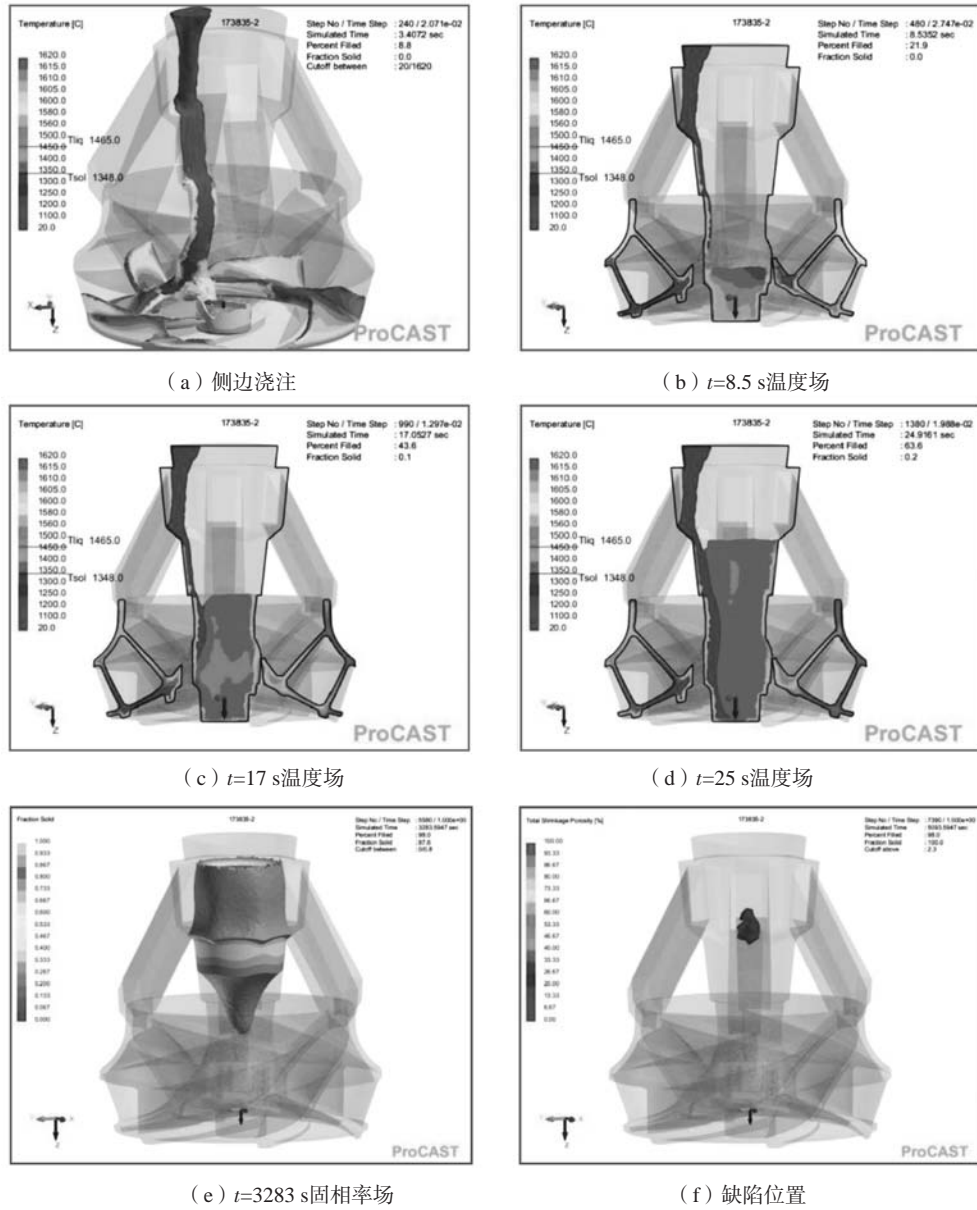


图8 优化浇注工艺方案的数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of the optimized pouring process scheme



(a) 组树 (b) 制壳 (c) 浇注 (d) 切割打磨 (e) 铸件成品

图9 闭式叶轮铸件的生产过程

Fig. 9 Production process of the closed impeller casting

5 结论

(1) 利用ProCAST数值模拟软件优化了一种双相不锈钢闭式叶轮熔模铸造工艺设计, 通过增加侧边内浇口的数量以及增大冒口的模数, 成功消除了铸件在口环部位的缩孔缺陷, 并有效减小了轮毂部位的缩孔缺陷。

(2) 通过优化浇注工艺方案, 将由浇口杯中中间浇注改为侧边浇注的方式, 解决了该闭式叶轮铸件轮毂

底部蓄热的情况, 有效降低了铸件轮毂部位产生缩孔缩松缺陷的风险。

(3) 将闭式叶轮的口环朝上放置, 通过合理设计侧边内浇口和主浇冒口, 并通过侧边浇注的方式, 根据实际生产验证了该优化后的熔模铸造工艺方案的可行性, 提高了铸件的成品率, 为类似闭式叶轮铸件的熔模铸造工艺设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 郝领斌. 叶轮类零件工艺决策及虚拟制造 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [2] 王小华, 靳鑫. 高速泵叶轮力学强度影响因素的正交试验研究 [J]. 化工技术与开发, 2023, 52 (12): 67-69.
- [3] 刘彦昌, 李忠辉, 耿春旭. 涡轮叶片熔模铸造工艺研究 [J]. 机械工程师, 2008 (8): 159-160.
- [4] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2022, 71 (7): 803-813.
- [5] 周君华, 孙长波, 尚伟, 等. ProCAST软件在熔模铸造工艺优化中的应用 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21 (5): 109-112.
- [6] 于靖, 许庆彦, 柳百成. 铸钢件熔模精密铸造凝固过程数值模拟 [J]. 铸造, 2006, 55 (5): 473-476.
- [7] 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.
- [8] 张晓光, 王云鹏, 王晓鹏, 等. 合金钢支架熔模铸造的工艺优化 [J]. 铸造, 2023, 72 (9): 1175-1180.
- [9] 阳海清. 大型不锈钢阀门精铸工艺的探讨 [J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28 (1): 45-46.
- [10] 程云龙, 马孝斌. 大型法兰铸件的熔模铸造工艺 [J]. 铸造设备与工艺, 2014 (6): 22-24.
- [11] 周剑, 严青松, 芦刚, 等. 不锈钢阀体熔模精铸件浇冒系统的数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (3): 341-344.

Optimization of Investment Casting Process for a Duplex Stainless Steel Closed Impeller

SHI Shu-kao¹, LI Song-shan¹, XIANG Qing-chun¹, CAO Mei-jia¹, YANG Jian², WANG Yan-bin²,
QIU Ke-qiang¹

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. Panjin Tiangong Precision Casting Co., Ltd., Panjin 124216, Liaoning, China)

Abstract:

The near-net shaped integrated-cast impeller castings with complex structures can be produced by investment casting process, to meet the requirements of their mechanical properties designed. The investment casting process scheme of a duplex stainless steel closed impeller has been optimized with the numerical simulation software ProCAST. By improving the gating and feeding systems and the pouring method of the liquid metal, the shrinkage cavity defects at the hub and the caliber ring of the closed impeller have been successfully eliminated. The actual production verification shows that according to the optimized casting process scheme, high-quality closed impeller castings can be produced, with higher yield percentage and production efficiency. This can provide a reference for the investment casting process design and practical production of similar closed impeller castings.

Key words:

investment casting; closed impeller; process optimization; numerical simulation