

CF8 不锈钢泵体熔模铸造工艺优化

李松山¹, 史书考¹, 向青春¹, 曹美佳¹, 赵佳怡¹, 王程玉¹, 杨建², 王沿滨²

(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: 用于化工泵设备中的CF8不锈钢泵体铸件一般在酸性的环境下工作, 铸件内部质量和表面粗糙度要求较高, 结构复杂, 成形难度较大, 一般通过熔模铸造生产。针对试产中该铸件产生的缩孔缩松缺陷, 采用ProCAST软件进行了数值模拟分析, 找到了初始工艺方案下产生缺陷的原因, 并通过对浇注和补缩系统进行合理的改进, 优化了铸造工艺设计。数值模拟和工艺实施结果证明了优化方案的可行性, 获得了满足客户质量要求的泵体铸件。

关键词: CF8; 熔模铸造; 数值模拟; 泵体; 铸造工艺优化

不锈钢泵体是化工泵的重要组成部分之一, 化工泵的作用是通过泵体内部的叶轮旋转产生强大的离心力, 从而将液体吸入并压送出去, 使其流动, 这就要求不锈钢泵体有足够的强度和刚性, 以及良好的导热性和散热性, 同时要严格控制泵体铸件的缩孔缩松缺陷, 以承受液体的高压, 防止出现严重泄漏事故^[1-5]。精密铸造CF8不锈钢泵体铸件目前存在的主要问题集中在黑点缺陷、缩孔和缩松缺陷、铸造应力问题、充型不完整和气孔缺陷、夹渣缺陷、补缩及流动性差等方面以及熔模精密铸造过程中的质量控制问题等方面。由于熔模铸造工艺流程较长, 且多为人工操作, 所以不锈钢泵体的缩孔缩松问题可能由多种因素引起。例如, 不锈钢泵体结构复杂和成形性差, 局部壁厚不均匀, 导致在热节处容易出现缩孔缩松缺陷。此外, 熔模铸造工艺很难放置冷铁, 通常不能采用冷铁措施来消除热节处的缩孔缩松缺陷。目前, 大多通过采取数值模拟来进行工艺优化的方法, 以控制温度场及凝固顺序, 从而消除铸件内缩孔缩松缺陷的产生^[6-8]。

本研究在分析CF8不锈钢泵体铸件结构特点的基础上, 利用工厂已有经验设计出初始的熔模铸造工艺方案, 然后通过ProCAST数值模拟软件分析铸件的充型和凝固动态过程, 进而优化其铸造工艺方案, 从而消除铸件内部的缩孔缩松缺陷, 以提高铸件成品率, 并降低铸件生产成本。

1 不锈钢泵体铸件的结构工艺性和铸造难点

该不锈钢泵体的材质为CF8, 其化学成分如表1所示。作为一种常用的泵体材料, 它具有很多优点, 主要包括高强度、抗磨损、耐腐蚀和不易生锈, 能够在潮湿、多雨等恶劣环境中长时间使用而不受损等特点。这使得CF8不锈钢泵体在化工、医药等行业得到广泛应用, 为生产运作提供了可靠的保障^[9]。

该泵体铸件的三维结构如图1所示。铸件重24.75 kg。铸件外部轮廓复杂, 内部

作者简介:

李松山(1999-), 男, 硕士生, 主要从事熔模铸造工艺方面的研究工作。

E-mail: 2951526134@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)05-0682-07

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:

2024-04-07 收到初稿,
2024-05-23 收到修订稿。

表1 CF8材质的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of CF8 material

w_B/%

| C | Si | Mn | S | Cr | Ni | Mo | Fe |
|------|-----|-----|-------|------|-----|-----|----|
| 0.06 | 0.7 | 1.1 | 0.009 | 17.5 | 8.2 | 0.2 | 其他 |

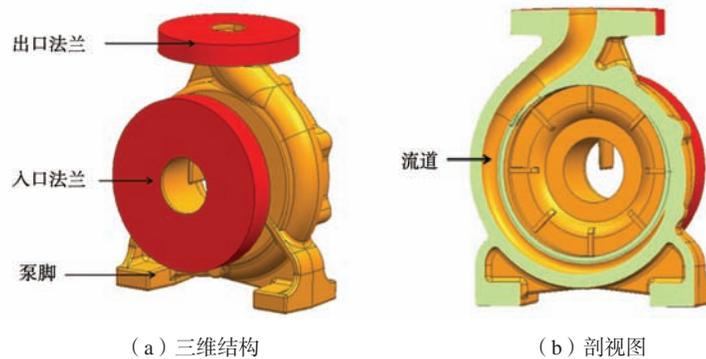


图1 泵体铸件三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of pump body casting

流道位置不规则，其结构主要由出口法兰、入口法兰、流道和泵脚等部分组成，存在壁厚不均和热节分散的结构特点。铸件轮廓尺寸为304 mm × 246 mm × 165 mm，最大壁厚为30 mm，最小壁厚为11 mm。泵体的出口法兰和入口法兰为铸件的厚大部位，其入口法兰直径为197 mm，厚度为30 mm，出口法兰直径为160 mm，厚度为25 mm。

2 不锈钢泵体初始熔模铸造工艺设计

该泵体的出口法兰和入口法兰是铸件厚大部位，为了能更好地设计浇注系统对其进行补缩，本次铸造的浇注位置选择为入口法兰朝上。浇注系统的设计还要保证金属液在铸件的各部位较均衡地流动，使热量的传导平稳进行，避免某个部位过热，导致热裂、应力集中等铸造缺陷^[10]。

初始熔模铸造工艺方案如图2所示。为了使铸件进行由下至上的顺序凝固原则，采用顶注式浇注系统，通过设计多个内浇道对该泵体铸件的各个热节处进行补缩。由于铸件结构的限制，各个内浇道与被补缩部位几何模数的比例不尽相同。其中1号和2号内浇口与被补缩部分的模数比例分别为1.15和1.18，而3号内浇

口由于泵脚处可放置浇口面较小，所以模数比例也相对较小，为0.9。其中1号内浇道的尺寸为80 mm × 60 mm × 40 mm（注：长 × 宽 × 高），设计两个1号内浇道用来补缩其入口法兰；2号内浇道的尺寸为90 mm × 55 mm × 60 mm，并为其设计延长至出口法兰面上的补贴高度为40 mm，用于补缩其出口法兰；3号内浇道的尺寸为30 mm × 40 mm × 20 mm，设计两个3号内浇道用于补缩泵体的两个底脚。

各个内浇道通过1号横浇道、2号横浇道和直浇道连接，其中1号横浇道的尺寸为330 mm × 70 mm × 70 mm；2号横浇道的尺寸为250 mm × 40 mm × 45 mm；直浇道的尺寸为60 mm × 60 mm × 80 mm。

设计2个明冒口补缩整个浇注系统并提供一定的压头，冒口的尺寸为 $\Phi 83$ mm × $\Phi 120$ mm × $\Phi 160$ mm（注：下直径 × 上直径 × 高），其中2号冒口为浇注口，两个冒口之间用两根10 mm × 15 mm拉筋相连，可以保证铸件凝固前两个冒口的温度趋于一致，更有效地持续为整个工艺的浇注系统提供金属液进行补缩，初始铸造工艺方案的总高度为435 mm。

3 数值模拟分析

3.1 计算参数设置

通过UG三维绘图软件将绘制的三维实体模型导出为.igs格式，将其导入至ProCAST数值模拟软件中。在Meshcast模块对导入的模型进行有限元网格剖分，其中铸件部分（含浇冒口系统）的单位网格步长为6 mm，型壳部分的单位网格步长为8 mm，划分后网格总节点数74 402个，总单元数612 220个。

在ProCAST中设置重力浇注的方式，选择铸件的材质为CF8，其固相线温度为1 370 °C，液相线温度为1 451 °C。选择型壳的材质为莫来石砂，铸件与型壳的传热系数为500 W/(m²·K)。根据工厂现场的浇注情况，设置数值模拟的边界条件和初始条件，浇注速度为

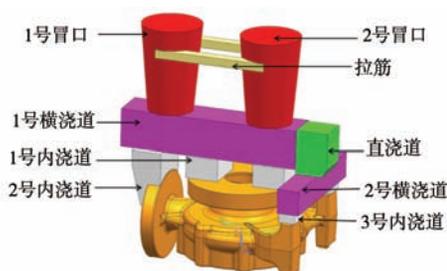


图2 泵体初始铸造工艺方案三维图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of initial casting process scheme for pump body

4 kg/s, 型壳温度为1 050 ℃, 浇注温度为1 600 ℃。采用顶注式浇注系统进行浇注, 浇注完成后, 在空气中自然冷却, 型壳与外界空气的传热系数为50 W/(m²·K)。

3.2 初始工艺方案充型数值模拟及速度场分析

如图3显示了针对不锈钢泵体初始铸造工艺方案的铸件充型状态变化数值模拟结果。图3(a)为充型1 s时金属液的流动状态, 可见金属液通过2号冒口进入型壳型腔, 再通过1号内浇道开始冲入铸件的入口法

兰处并往下流动填充铸件的泵脚部位。从图3(b)可以看出, 金属液流开始不平稳流动, 出现卷气和飞溅现象, 但由于泵脚壁厚较薄所以开始需要快速充型, 以防止该部位凝固过快从而产生浇不足缺陷。待泵体流道充型完整之后金属液流开始平稳上升, 从图3(c)、图3(d)可以看出, 金属液在7 s内充满整个铸件, 之后15 s内充满横浇道及浇口杯。整个工艺的充型时间为15 s。

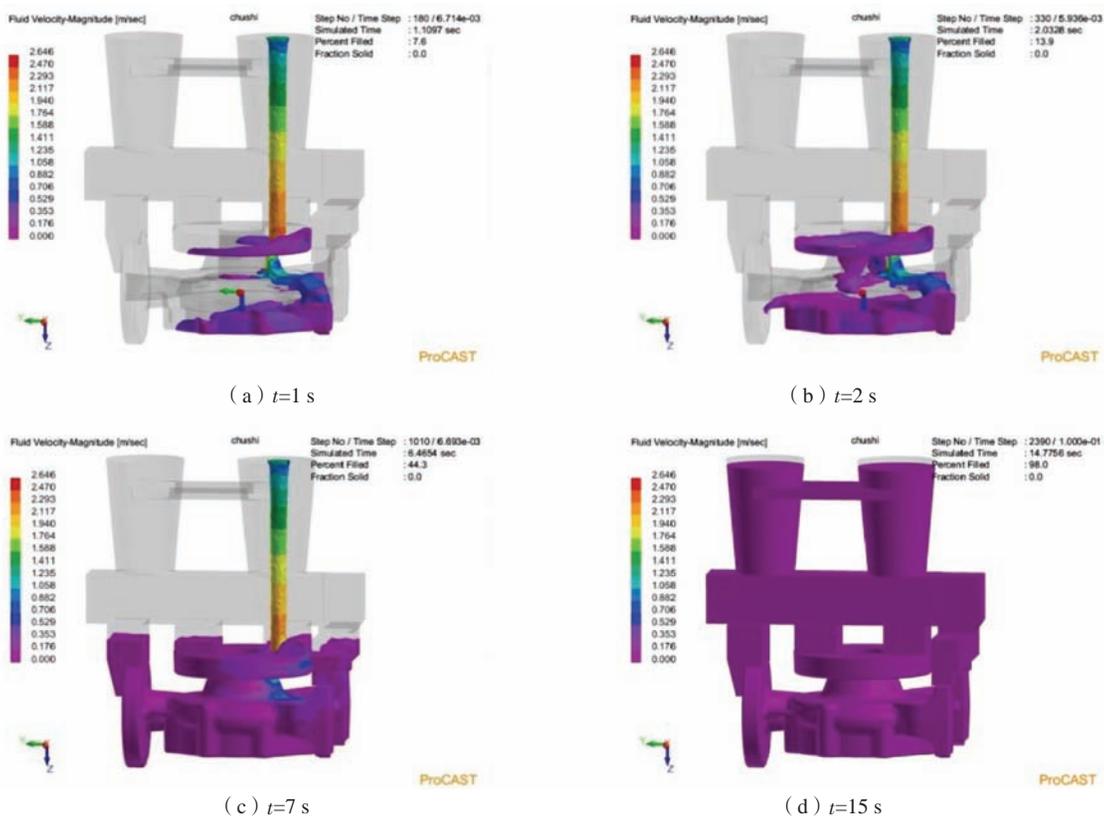


图3 初始铸造工艺方案的充型速度场

Fig. 3 Mold filling velocity field of the initial casting process scheme

3.3 初始工艺方案的凝固数值模拟结果

如图4所示为针对泵体初始铸造工艺方案的铸件在不同时刻的凝固固相率场。由图4可知, 铸件在凝固过程中, 基本上遵循了从下至上的顺序凝固原则。由图4(a)、图4(b)可以看出, 铸件开始从泵脚和出口法兰底部开始凝固, 但在330 s时泵体的外壳也开始凝固, 阻断了泵脚与流道连接处的通道。如图4(b)显示铸件在540 s左右, 由于没有补缩通道, 泵脚与流道连接处已经形成了孤立的液相区, 导致该部位产生缩孔缩松缺陷。如图4(c)、图4(d)所示, 其余结构均通过设计的内浇道进行了补缩直至全部凝固完毕, 铸件最后凝固区域在2号冒口下方横浇道处, 总体凝固

时间在1 600 s左右。初始铸造工艺方案泵体铸件的缩孔缩松缺陷分布如图5(a)所示, 选取显示的阈值为2 (此数值的选择主要基于笔者对于铸钢件的ProCAST数值模拟经验), 可见在泵脚与铸件流道连接处, 出现了图中紫色部分所示的缩孔缩松缺陷, 铸件的缩孔缩松体积总和为0.6 cm³。由于泵体常年工作在酸碱度较高的工作环境下, 所以对泵体的质量有着严格的要求, 不允许存在任何缩松缩孔、气孔和夹杂等缺陷, 铸件浇注完成后, 需进行打压试验以及X射线探伤检测, 看内部是否存在孔洞类缺陷。图5(b)显示出泵体铸件实际存在缩孔缩松缺陷的位置, 可见数值模拟与实际试件结果基本相一致。

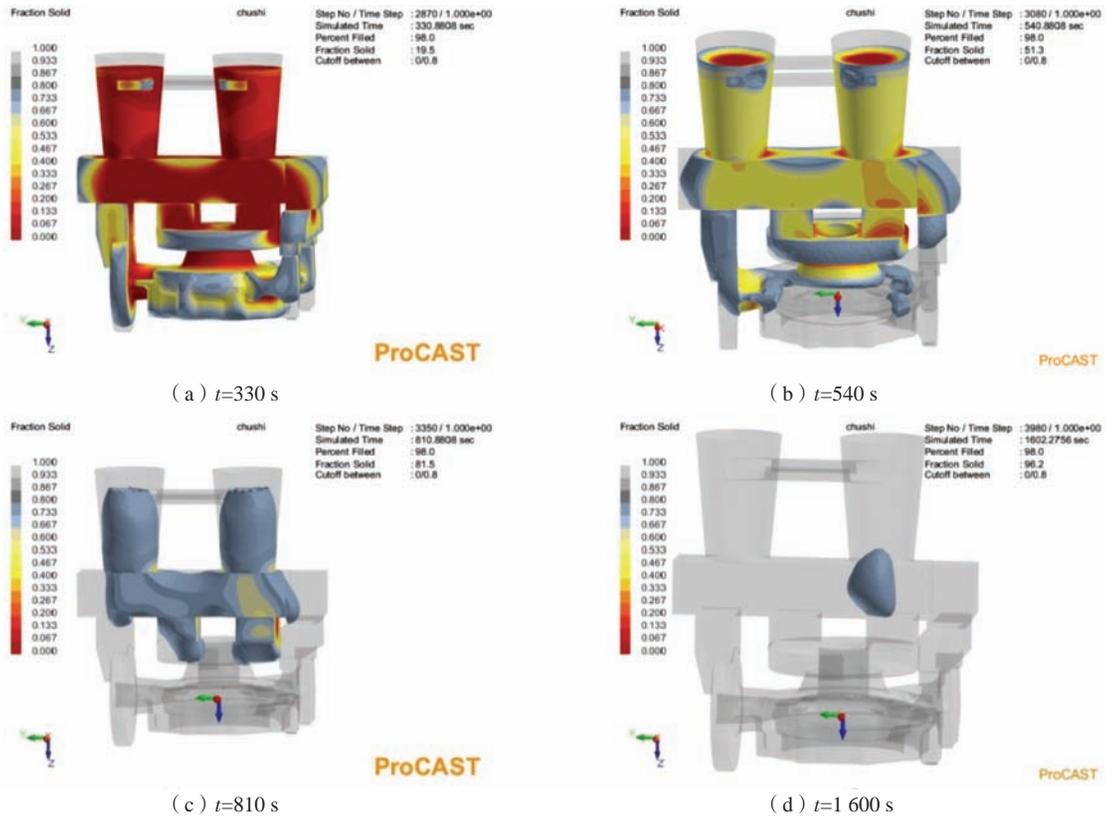


图4 初始铸造工艺方案的固相率场

Fig. 4 Solid phase fraction field of initial casting process scheme



(a) 数值模拟缺陷位置

(b) 实际缺陷位置

图5 初始铸造工艺方案铸件缩孔分布的数值模拟结果及实际生产结果

Fig. 5 Numerical simulation results of casting shrinkage cavity distribution of initial casting process scheme and actual production results

4 铸造工艺方案的优化与生产验证

4.1 铸造工艺方案的优化

通过对初始铸造工艺方案的数值模拟分析可知, 该泵体铸件的缩孔缩松部位集中分布在泵脚与流道连接处, 其实并不是因为冒口补缩不足, 而是由于初始铸造工艺浇注系统设计不合理。从上面的数值模拟结果可以看出, 铸件底脚位置的金属液主要通过内部流

道来进行补缩, 还有一小部分通过3号内浇道来进行补缩, 但由于初始铸造工艺方案浇注系统设计不合理, 致使泵脚与流道连接处部位形成孤立液相区, 其金属液收缩得不到补缩, 所以我们在原初始铸造工艺的基础上进行优化处理。优化后的铸造工艺方案三维图如图6所示。主要是改变了3号内浇道的位置, 将补缩顺序调整为直浇道补缩3号内浇道, 3号内浇道补缩铸件

流道，流道再补缩铸件底脚，使其构成完整的补缩顺序。同时增加2号拉筋起到排气排渣的作用。图6中直浇道的尺寸为60 mm × 60 mm × 250 mm；3号内浇道尺寸调整为160 mm × 60 mm × 40 mm；2号拉筋尺寸为20 mm × 25 mm × 135 mm。

4.2 优化工艺的充型数值模拟结果

图7显示了针对不锈钢泵体优化铸造工艺方案的铸件充型状态变化数值模拟结果。图7(a)为充型1 s时金属液的流动状态，可见金属液通过2号冒口进入型

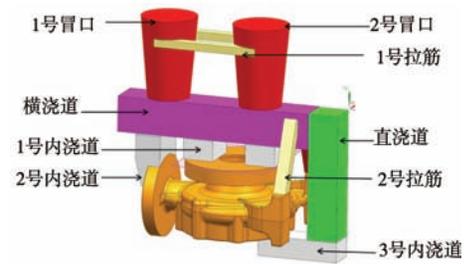


图6 优化铸造工艺方案的三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of optimized casting process scheme

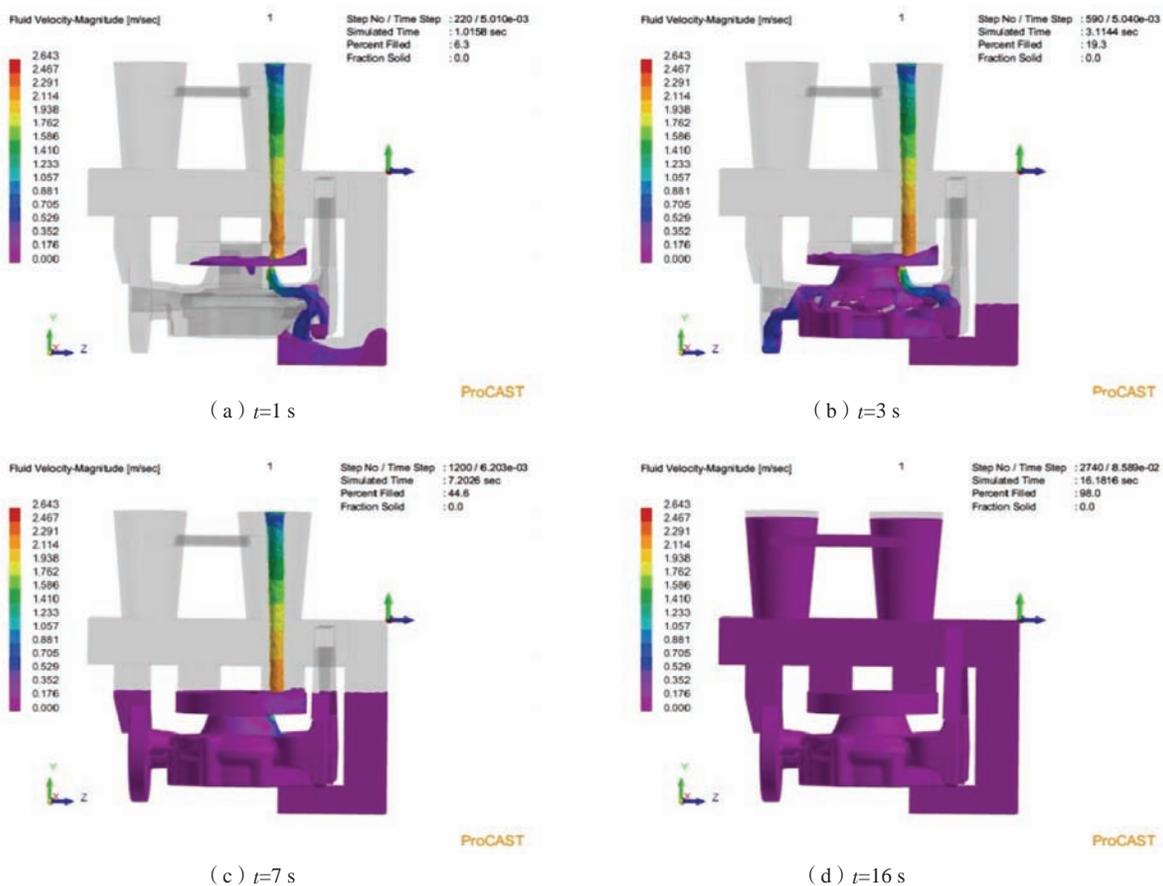


图7 优化铸造工艺方案的充型速度场

Fig. 7 Mold filling velocity field of optimized casting process scheme

壳型腔，再通过1号内浇道开始冲入铸件的入口法兰。由于3号内浇道位置的改变，金属液首先填充3号内浇道。从图7(b)可以看出，金属液流依然容易出现紊流和裹气等现象，待泵体流道充型完整之后金属液流开始平稳上升。从图7(c)和图7(d)可以看出，金属液在7 s左右充满铸件，之后16 s内充满横浇道及浇口杯。整个工艺的充型时间为16 s。

4.3 优化工艺方案的凝固数值模拟结果

如图8所示为泵体优化后的铸造工艺方案在不同

时刻的凝固固相率场。从图8(a)、图8(b)可以看出，铸件底脚位置的凝固顺序符合预期的设计，金属液从底脚开始凝固，通过泵体的流道被3号内浇道补缩。同时，出口法兰底部开始凝固，被2号内浇道补缩。在此之后，铸件的入口法兰由1号内浇道进行补缩。铸件各部分的热节位置都被其对应的内浇道进行补缩，符合预期设计的顺序凝固原则，没有出现孤立液相区。从图8(c)、图8(d)可以看出，铸件约在1 313 s时完全凝固，整个工艺约在1 443 s之后也全部凝固，最后凝固的位置在横浇道内。

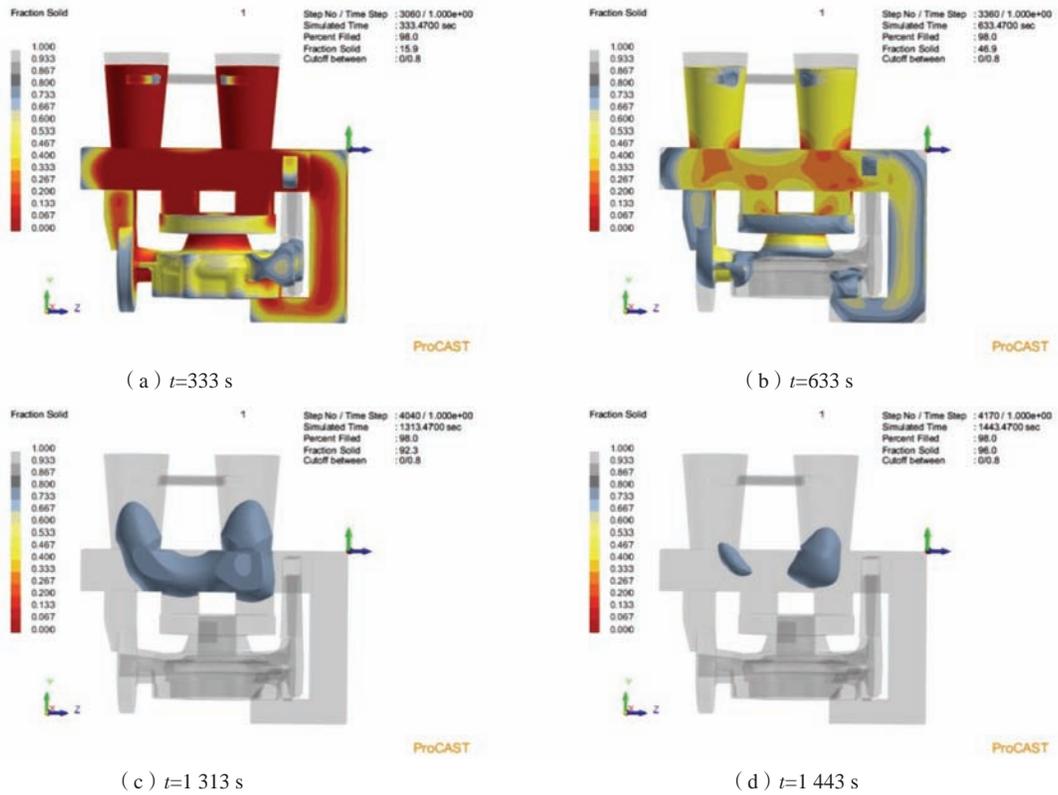


图8 优化铸造工艺方案的固相率场

Fig. 8 Solid phase fraction field of optimized casting process scheme

如图9所示为该泵体优化铸造工艺方案的缩孔缩松缺陷位置，选取显示的阈值为2，可见铸件上缺陷已完全消除，所有的缩孔缩松缺陷集中在浇注系统内。

4.4 生产验证

将优化后的铸造工艺方案作为最终铸造工艺方案进行实际生产验证，生产过程如图10所示。图10 (a)、图10 (b) 分别为蜡型组树照片和熔炼浇注后的照片，图10 (c)、图10 (d) 为实际生产出来的不锈钢泵体铸件。最后经打压试验和X射线探伤检验，泵体内部无孔洞类缺陷，满足客户对产品质量的要求。

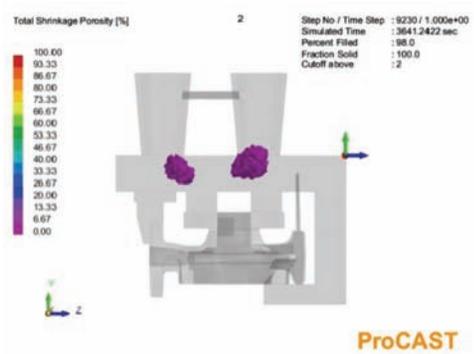


图9 优化铸造工艺方案铸件缩孔缩松缺陷分布的数值模拟结果
Fig. 9 Numerical simulation result of shrinkage hole and porosity defects according to the optimized casting process scheme



(a) 蜡型组树 (b) 熔炼浇注 (c) 切割清理 (d) 流道位置放大图

图10 不锈钢泵体铸件照片

Fig. 10 The stainless steel pump body casting photos

5 结论

(1) 利用ProCAST数值模拟软件对CF8不锈钢泵体初始熔模铸造工艺方案进行数值模拟, 通过固相率场及缩孔缩松缺陷位置的分析, 发现泵体铸件底脚和流道之间的凝固顺序不合理, 在铸件内部形成了孤立液相区, 是导致缩孔缩松缺陷形成的主要原因。实际

生产铸件产生的缺陷位置与数值模拟结果相一致。

(2) 通过合理地设计浇注系统, 改变3号内浇道的位置, 调整了泵体铸件的凝固顺序。利用ProCAST软件再次进行数值模拟分析和进行实际生产验证, 确定了CF8不锈钢泵体铸件的最终铸造工艺, 并获得了合格的泵体铸件产品。

参考文献:

- [1] 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): 77-80.
- [2] 张春波, 王峰, 张冰, 等. 泵体的熔模铸造工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (4): 351-352.
- [3] 杨武强, 冀晓磊, 王琳, 等. 基于ProCAST本体件熔模铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1477-1481.
- [4] 李峰, 郑福生, 王刚, 等. 基于ProCAST的叶轮熔模铸造凝固过程数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (7): 55-57.
- [5] 余四红, 贾相武. 基于ProCAST的壳体铸件数值模拟铸造工艺优化 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (10): 1347-1350.
- [6] 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.
- [7] 蒋梦麒, 陈双, 齐兵, 等. 基于ProCAST的支座件熔模铸造浇注系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (4): 978-982.
- [8] 王孝国, 刘挺, 吴煜, 等. 基于ProCAST的悬梁铸造模拟及工艺优化 [J]. 农业技术与装备, 2023 (1): 12-15.
- [9] 张孝元, 王孝国, 杨光印. 基于ProCAST的压壳铸造工艺设计及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (7): 823-826.
- [10] 谢颖. 基于ProCAST的浇注工艺对铸件质量影响的数值模拟 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2022, 24 (3): 35-36.

Investment Casting Process Optimization of CF8 Stainless Steel Pump Body

LI Song-shan¹, SHI Shu-kao¹, XIANG Qing-chun¹, CAO Mei-jia¹, ZHAO Jia-yi¹, WANG Cheng-yu¹, YANG Jian², WANG Yan-bin²

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

Abstract:

The CF8 stainless steel pump body castings are used for the pump equipments of chemicals and generally work in an acidic environment, and their internal quality and surface roughness are often highly required. Due to the complexity of their structures and the difficulty of their forming, they are usually produced through investment casting. Aiming at the shrinkage cavity and shrinkage porosity defects generated in the castings during trial production, the numerical simulation analysis was conducted by using of ProCAST software, and the causes of the defects under the initial process plan were identified. Then the investment casting process design was optimized through reasonable improvements to the gating and feeding systems. The feasibility of the optimization process plan was demonstrated by the results of numerical simulation and process implementation, and the pump body castings met the customers' quality requirements were produced.

Key words:

CF8; investment casting; numerical simulation; pump body; casting process optimization