

大型钛合金薄壁构件熔模铸造工艺数值模拟与浇冒系统优化

张美娟¹, 杨其航², 马聚怀², 郅喜望¹, 南海¹, 许庆彦²

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094;

2. 清华大学 材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对大型钛合金薄壁构件熔模铸造中易出现的缩松缩孔缺陷, 以某环形铸件为研究对象, 基于自主开发的数值模拟软件对其充型凝固过程进行研究, 确定了缩松缩孔分布规律, 并对复杂铸件薄壁处和薄厚壁转接处进行多轮优化方案模拟。结果表明, 优化工艺方案下缩松缩孔集中于冒口与浇道内, 铸件本体缺陷显著减少。实际生产铸件的CT检测验证显示, 缺陷位置与数值模拟结果高度吻合。本研究可为大型钛合金薄壁构件熔模铸造工艺优化提供科学依据与技术参考。

关键词: 钛合金; 熔模铸造; 数值模拟; 缩孔缺陷

中图分类号: TG249; TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0513-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0069

Numerical Simulation of Investment Casting Process and Optimization of Gating-Feeding System for Large-Size and Thin-Walled Titanium Alloy Components

ZHANG Mei-juan¹, YANG Qi-hang², MA Ju-huai², QIE Xi-wang¹, NAN Hai¹, XU Qing-yan²

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To address common defects such as shrinkage porosity and cavity easily occurring in the investment casting of large-size and thin-walled titanium alloy components, taking an annular casting as research object, and based on self-developed numerical simulation software, the mold filling and solidification processes of it were studied in order to determine the distribution law of shrinkage porosity and cavity, and multiple rounds of optimization scheme simulations were carried out for the thin-walled parts and the transition parts between thin and thick walls of complex castings. The results show that under the optimized process scheme, the shrinkage porosity and cavity are concentrated in the feeders and runners, and the defects in the casting body are significantly reduced. The CT detection verification of the actual production casting shows that the defect positions are highly consistent with the numerical simulation results. This research can provide scientific basis and technical reference for the process optimization of investment casting of large-size and thin-walled titanium alloy components.

Key words: titanium alloy; investment casting; numerical simulation; shrinkage cavity defect

钛合金凭借高比强度、优异的耐高温与耐腐蚀性能, 成为航空航天领域大型构件(如机匣、框架、头罩等)的核心材料^[1-2]。此类构件通常具有外廓尺寸大、壁薄、结构复杂等特征, 其制造精度与内部质量直接决定装备的服役可靠性^[3-4]。钛合金的制造工艺主要有锻造、铸造和增材制造(AM)等^[5]。锻造加工适合制备简单钛合金零部件, 而复杂钛合金部件

的锻造制备周期长, 并且材料利用率不足5%。增材制造方法可制备复杂薄壁钛合金零件, 但加工成本高、效率低, 难以进行批量生产。铸造特别是熔模铸造的成形精密度和制备效率均较高, 适用于批量生产复杂薄壁零部件^[6]。随着钛合金铸件尺寸需求不断增大而壁厚逐渐减薄, 铸件成形难度也在增加, 充型过程中薄壁区域冷却速率快, 厚大部位易形成孤立热

收稿日期: 2025-12-22 收到初稿, 2026-01-06 收到修订稿。

作者简介: 张美娟(1982-), 女, 研究员, 主要研究方向为钛合金熔模铸造。E-mail: zhangmj121@126.com

通信作者: 许庆彦, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: scjxqy@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 张美娟, 杨其航, 马聚怀, 等. 大型钛合金薄壁构件熔模铸造工艺数值模拟与浇冒系统优化[J]. 铸造, 2026, 75(5): 513-519.

ZHANG Meijuan, YANG Qihang, MA Juhuai, et al. Numerical simulation of investment casting process and optimization of gating-feeding system for large-size and thin-walled titanium alloy components [J]. Foundry, 2026, 75(5): 513-519.

节, 引发缩松缩孔, 显著降低铸件服役可靠性^[7-8]。传统钛合金薄壁构件熔模铸造工艺开发依赖“经验试错”模式, 成本高、效率低^[9-10]。随着计算机技术的发展, 数值模拟可将充型过程的温度场、流动场可视化, 通过对凝固组织模拟分析, 实现对铸造缺陷的精准预测, 极大加快工艺优化过程, 缩短新产品开发周期, 大幅降低开发成本^[11]。ProCAST、MagmaSoft等软件已被广泛应用于预测充型流动、凝固缺陷, 实现工艺参数的精准调控。李峰等^[11]基于ProCAST软件对环形钛合金铸件开展模拟, 预测热节与缩孔分布, 调整浇注系统后, 成功降低了铸件缩孔缺陷。冉兴等^[12]采用ProCAST模拟大型钛合金机匣离心精铸过程, 设计了螺旋型浇注系统, 模拟的缩松缩孔位置与X光检测结果高度吻合。刘云超等^[13]借助ProCAST软件分析ZTi60大型薄壁构件的浇不足风险与孤立液相区, 优化了型壳预热温度与浇注时间, 结合热等静压工艺有效改善了铸件内部缺陷。孙冰等^[14]用ProCAST系统对比了不同浇注方式对缩松缩孔缺陷的影响。Tao等^[15]利用清华大学自主开发的软件针对大型机匣离心与重力不同充型方式对缩松缩孔缺陷的影响进行了数值模拟。

本课题以大型钛合金薄壁构件为研究对象, 采用清华大学自主开发的软件对铸件熔模铸造充型凝固过程进行数值模拟分析, 基于此优化浇注系统, 并进行了实际生产验证, 有效降低了该铸件的缩孔缺陷, 可为同类构件的高效、高质量制造提供技术参考。

1 试验方法

1.1 铸件结构分析

如图1所示, 取大型环状钛合金薄壁构件的1/6对称体作为研究对象。铸件整体尺寸为 $\Phi 1\ 400\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$, 由支臂连接前后环形支板, 前后支板上下

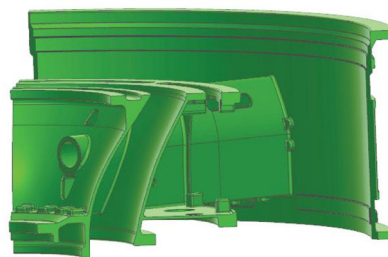


图1 钛合金薄壁构件模型图

Fig. 1 Diagram of titanium alloy thin-walled component model

环形壁厚40 mm。由于构件结构复杂, 薄壁和曲面区域多、尺寸大, 易产生内部冶金缺陷和变形, 整体制造难度较高。

1.2 浇注系统设计

浇注系统初始设计方案如图2所示, 由于铸件结构复杂且壁厚差异较大, 故采用重力铸造, 浇注系统为底注式, 以确保铸件平稳充型、顺序凝固, 避免浇不足。

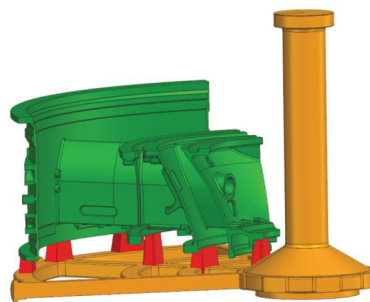


图2 初始工艺方案模型

Fig. 2 Model of initial process scheme

1.3 数值模拟参数设置

铸件材料为ZTC4合金, 其液相线温度 T_L 和固相线温度 T_S 分别为1 650 °C和1 600 °C。铸件和铸型的温度相关热物理参数可参考文献[16-17], ZTC4合金化学成分如表1所示。

表1 ZTC4 合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of ZTC4 alloy

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	余量

数值模拟参数设置如表2所示, 铸件最小壁厚为2 mm, 为确保模拟精度, 网格尺寸设置为0.5 mm, 型壳厚度为6 mm, 铸件(含型壳与浇注系统)网格划分完成后的模型如图3所示。采用重力铸造, 浇注温度为1 720 °C, 浇注速度为 $3\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 型壳预热温度为300 °C。铸件与型壳的换热系数为 $600\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

表2 数值模拟参数设置
Tab. 2 Numerical simulation parameter settings

参数	数值
网格尺寸/mm	0.5
型壳预热温度/°C	300
浇注温度/°C	1 720
浇注速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3

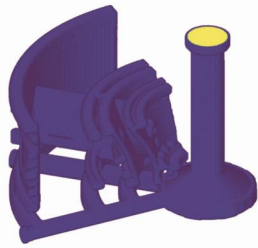


图3 初始工艺方案模型网格划分
Fig. 3 Mesh generation of initial process scheme model

2 数值模拟结果与讨论

2.1 初始工艺方案数值模拟结果

初始工艺方案下熔体充型凝固过程如图4所示。随

着充型进行，熔体依次填充支臂、支板结构，不同结构部位（厚大处、薄壁处）形成差异化的温度场。熔体最先进入前支板，由于厚度突变（由38 mm降至2 mm），温度瞬间降低，流动性变差，导致中间支臂的充型过程为前支板与远端后支板熔体共同填充，低温熔体使得支臂后期凝固过程中容易产生缩松缩孔。同时，由于前支板熔体温度下降较快，在顶部环形结构处也容易产生较大的缩松缩孔缺陷。

图5（a）为铸件凝固300 s后的温度场分布，可以看出，此时铸件大部分区域温度降低至1 000 ℃以下，图中标示处由于金属液最后填充，在凝固过程中熔体向下补缩，已经出现表面凹坑。位置1处于熔体充型最远段，后支板环壁已凝固，难以进行补缩，进而导致支臂与支板连接的位置2处也产生局部热节，增加缩松

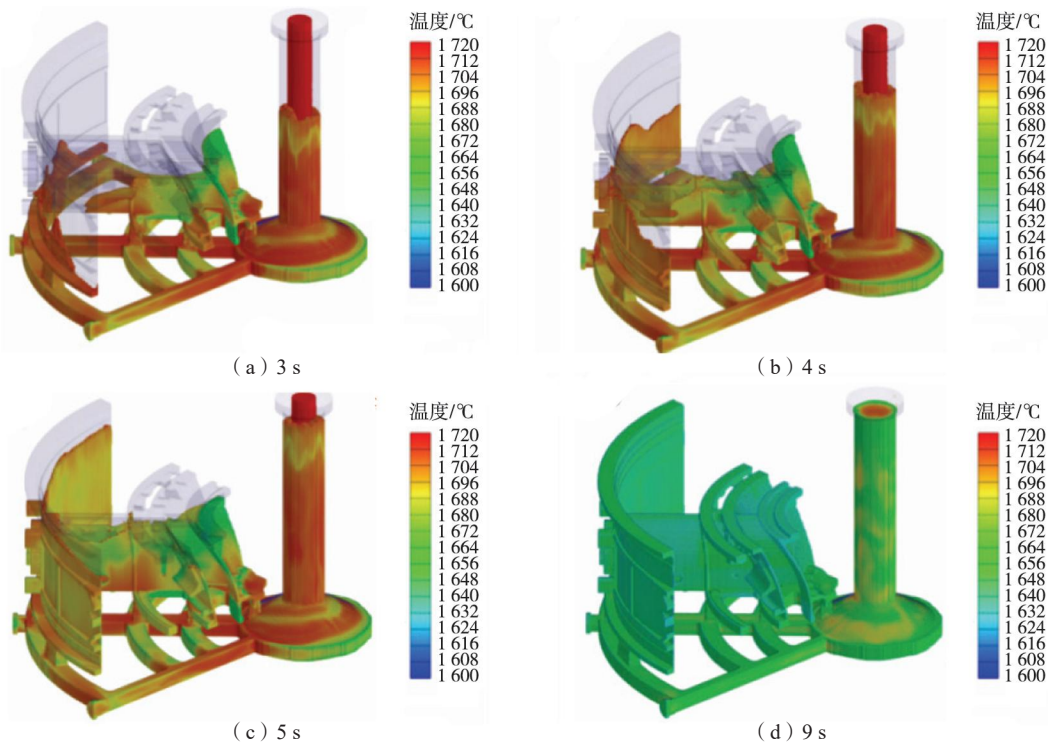


图4 初始工艺方案熔体充型凝固过程数值模拟结果
Fig. 4 Numerical simulation results of mold filling and solidification processes of molten metal under initial process scheme

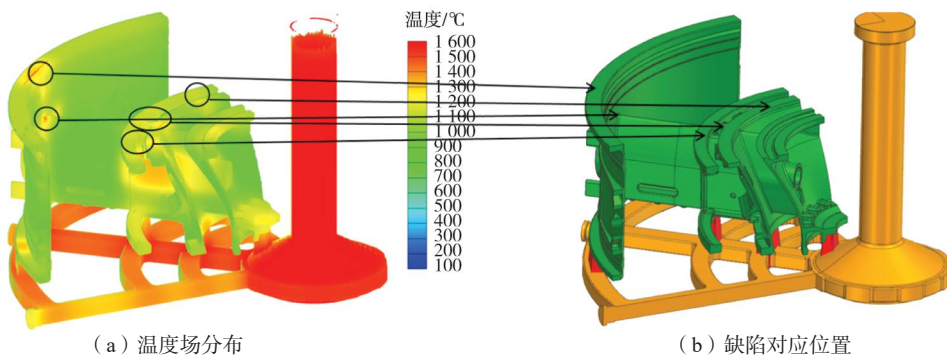


图5 初始工艺方案铸件凝固300 s后的温度场数值模拟结果
Fig. 5 Numerical simulation result of temperature field of casting at 300 s after solidification under initial process scheme

缩孔产生风险。

初始工艺方案的缩松缩孔数值模拟结果如图6(a)所示,与根据凝固温度场(图5)预测的分布位

置相同,前后支板上环形表面出现大量缩松缩孔,这会在铸件表面形成大的缩痕,铸件完整性与表面质量难以达标,因此需对初始工艺方案进行优化。

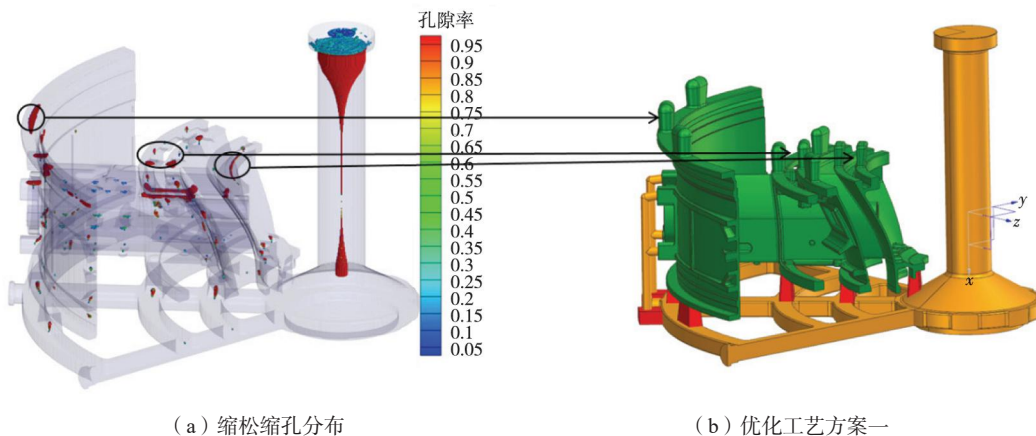


图6 初始工艺方案缩松缩孔分布数值模拟结果及优化工艺方案一模型图

Fig. 6 Numerical simulation results of shrinkage porosity and cavity distribution for initial process scheme, and the model diagram of optimized process scheme 1

2.2 优化工艺方案一数值模拟结果

结合初始工艺方案的缺陷分布位置,设计优化工艺方案一,见图6(b)。在前后支板顶部环形表面设计椭圆形冒口,考虑到后支板环形结构较为复杂,熔体充型路径远,从底浇盘加入两条辅浇道进行熔体补充,避免浇不足。

该方案的熔体充型过程如图7所示,随着充型进行,熔体依次填充支臂、支板结构,由于外部辅浇道的存在,熔体充型过程更加迅速,充型能力更强,后支板薄壁温度下降幅度减小。但是,由于充型路径仍然较长,中间支臂的充型过程仍为前支板与远端后支板熔体共同填充,使得支臂后期凝固过程中容易产生缩松缩孔。

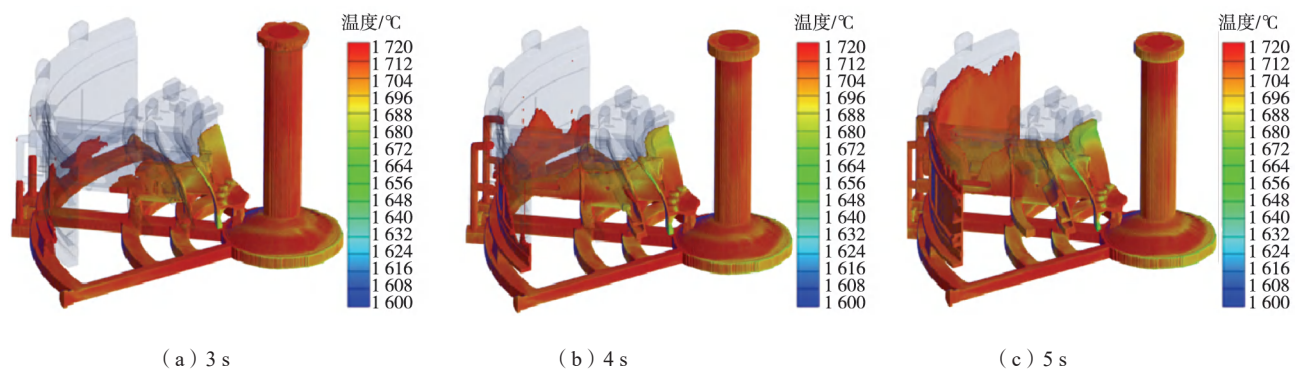


图7 优化工艺方案一熔体充型过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of mold filling processes of molten metal under optimized process scheme 1

图8为铸件凝固300 s后的温度场云图,可以看出铸件大部分区域温度同样降至1 000 °C以下,此时前后支板环形表面无明显凹陷,表明冒口的增加使得最后凝固位置从铸件本体转移到冒口中。然而,辅浇道的引入导致支臂与支板连接处凝固较慢,出现局部热节。同时,支臂前端下环形表面由于没有金属液补缩而存在缩松缩孔风险。

优化工艺方案一的缩松缩孔情况如图9(a)所

示,缩松缩孔主要集中在冒口内,前后支板上环形表面未出现大量缩松缩孔。然而,由于支臂内熔体流动速度较慢,其温度下降较快,支臂内与支臂前端下环形内部出现缩松缩孔。

2.3 优化工艺方案二模拟结果

结合优化方案一的缺陷分布位置,由底浇盘另增加6条细小辅浇通道,使支臂内部有3条填充方向。另

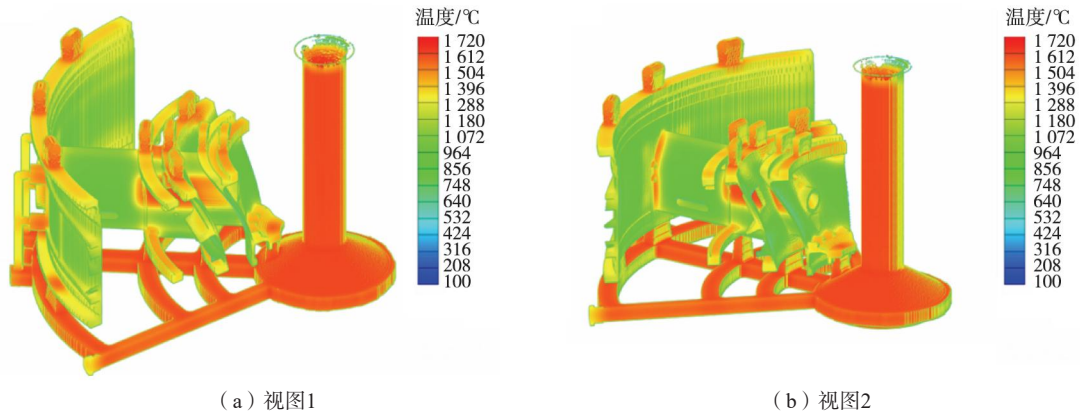


图8 优化工艺方案一铸件凝固300 s后的温度场数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of temperature field of casting at 300 s after solidification under optimized process scheme 1

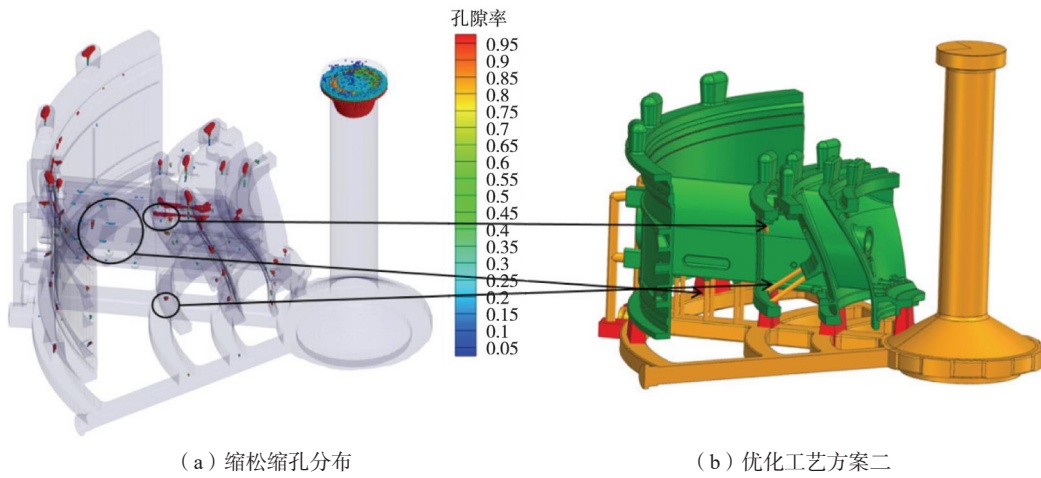


图9 优化工艺方案一缩松缩孔分布数值模拟结果及优化工艺方案二模型图

Fig. 9 Numerical simulation results of shrinkage porosity and cavity distribution for optimized process scheme 1, and the model diagram of optimized process scheme 2

外，针对前支板上下环面孤立热节，增加3条补缩通道，以降低缩松缩孔出现概率，此方案记为优化工艺方案二，如图9（b）所示。

由图10可以看出，优化工艺方案二的熔体充型更为平缓，由于辅浇通道的存在，熔体可以通过前支板+后支板+底浇盘进入支臂型腔中同时填充，填充速率更快，避免了支臂内金属液温度过低导致温度场差异较

大而引起缩松缩孔缺陷。

采用优化工艺方案二所得铸件凝固300 s后的温度场如图11（a）、（b）所示。与优化工艺方案一相比，引入底浇盘辅浇道后，支臂内熔体充型较为平缓，支臂与支板连接处温度分布更为均匀，局部热节消失。同时，由于支臂前端上下环形部位加入了补缩通道，支臂前端温度场分布更加均匀，局部热区范围减小，

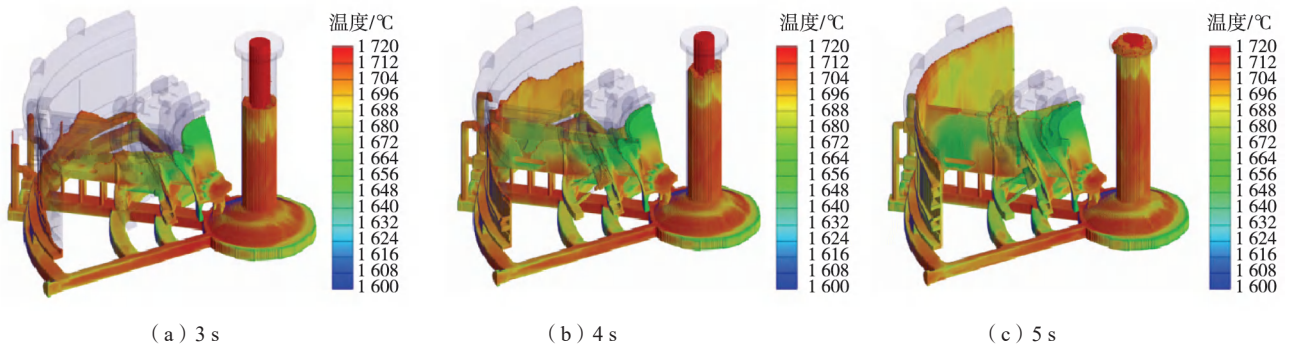


图10 优化工艺方案二熔体充型过程数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results of mold filling processes of molten metal under optimized process scheme 2

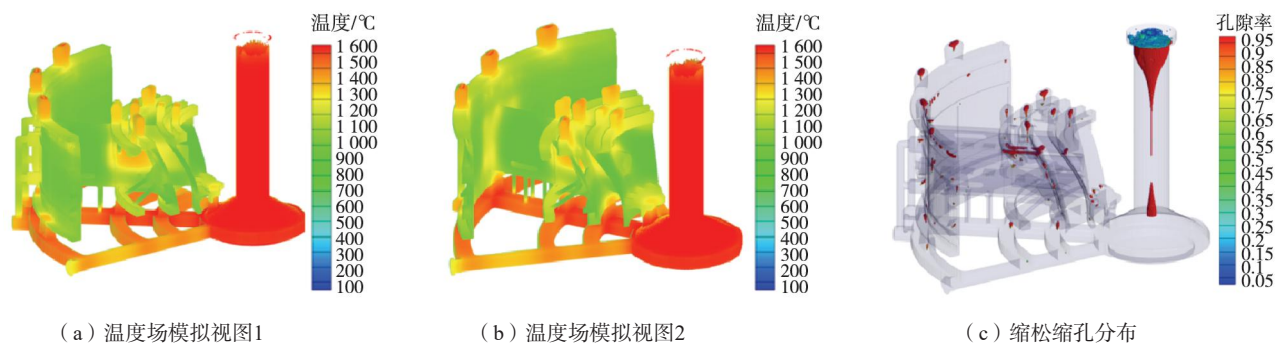


图11 优化工艺方案二铸件凝固300 s后的温度场及缩松缩孔分布数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results of temperature field of casting at 300 s after solidification, and shrinkage porosity and cavity distribution under optimized process scheme 2

支臂内出现缩松缩孔的概率降低。由对应的缩松缩孔分布模拟结果可知，铸件大部分缩松缩孔存在于冒口与浇道内，支臂内部缩松缩孔几乎全部消除，前支板下环形部位则完全消除，仅有少量缩松缩孔出现在前支板上环形内部与支臂前端后壁区域，如图11(c)所示。

3 优化工艺方案生产验证

采用优化工艺方案对铸件进行实际生产，浇注完

成后切除浇冒系统进行CT检测，记录铸件缩松缩孔位置，以便与数值模拟结果进行比对。

如图12所示，采用优化工艺方案一所制备的铸件，前支板环形上部结构内部、后支板安装孔以及支臂内部均发现缩松缩孔缺陷，与模拟结果吻合度较高，证明此方案有效降低了前后支板上环形表面的缺陷数量，但其内部仍有缩松缩孔。

采用优化工艺方案二所制备铸件的CT检测结果见图13。铸件本体前支板环形上部结构内部以及支臂内

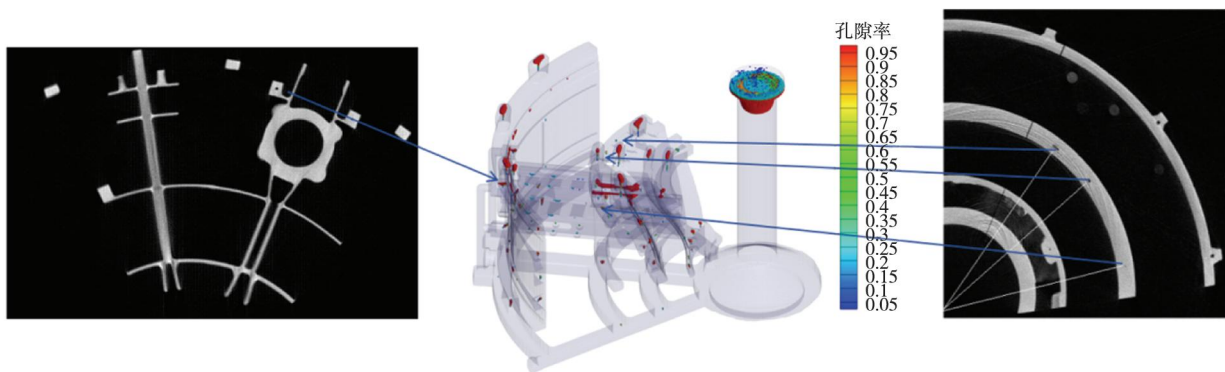
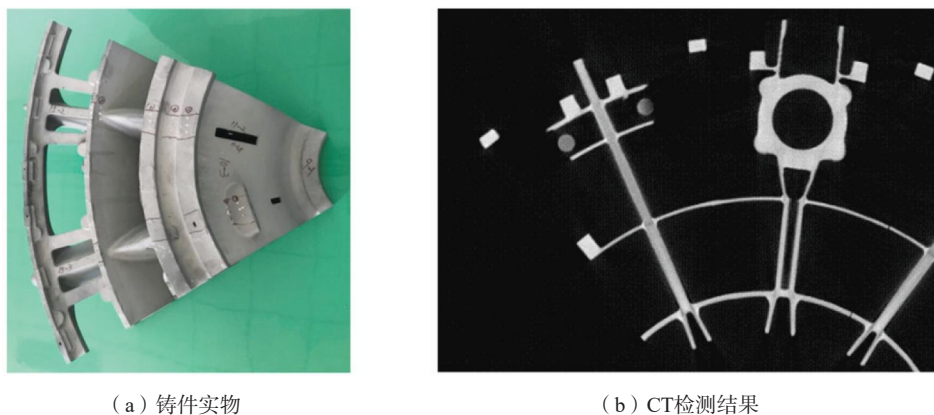


图12 优化工艺方案一铸件CT检测结果

Fig. 12 CT inspection result of the casting prepared by optimized process scheme 1



(a) 铸件实物

(b) CT检测结果

图13 优化工艺方案二铸件实物及CT检测结果

Fig. 13 Casting prepared by optimized process scheme 2 and its CT inspection result

部均未出现缩松缩孔缺陷，证明此优化方案有效降低了铸件中的缩松缩孔缺陷，与模拟结果亦高度吻合。

4 结论

本研究针对某大型环形钛合金薄壁件熔模铸造过程，采用自主开发的数值模拟软件进行多轮数值模拟，通过增设冒口与辅浇通道降低了薄壁区域温度梯度，显著降低了缩松缩孔缺陷，主要结论如下：

(1) 针对复杂铸件薄壁处与薄厚壁转接处，通过

冒口设置-辅浇道增设-补缩通道优化多阶段工艺改进，实现了金属液对薄壁支臂、薄厚壁转接区的均匀充型与顺序补缩，使铸件本体的缩松缩孔缺陷转移至冒口与浇道内，显著提升了铸件质量。

(2) 基于自主开发数值模拟软件的铸件缩松缩孔模拟结果与实际铸件CT检测结果吻合度较高，验证了数值模拟在复杂钛合金熔模铸造工艺优化中的可靠性，为大型钛合金薄壁构件熔模铸造工艺优化提供了科学依据与技术参考。

参考文献：

- [1] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1304-1311.
- [2] WIJESINGHE K, HERATH C, MICHPOULOS J G, et al. Hierarchical anisotropic material response of directed energy deposited (DED) Ti-6Al-4V alloy [J]. Acta Materialia, 2024, 276: 120080.
- [3] FU P X, KANG X H, MA Y C, et al. Centrifugal casting of TiAl exhaust valves [J]. Intermetallics, 2008, 16 (2): 130-138.
- [4] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 139-146.
- [5] XIAO Z Y, LÜ Z Z, NIE S, et al. Numerical simulation and optimization of investment casting for complex thin-walled castings [J]. International Journal of Metal Casting, 2024, 18 (1): 159-179.
- [6] 赵瑞斌. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成形技术研究进展 [J]. 钛工业进展, 2015 (2): 7-12.
- [7] WU S P, LIU D R, GUO J J, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in vertical centrifugal casting [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 426 (1/2): 240-249.
- [8] 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.
- [9] 刘艳磊, 孟磊, 周含宣. 大型复杂钛合金底座铸造工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (19): 69-72.
- [10] 李义军, 朱明渝. 大型薄壁复杂框架式结构钛合金铸件的研制 [J]. 铸造, 2015, 64 (3): 256-259.
- [11] 李峰, 王德季, 肖强伟, 等. 某环形钛合金砂型铸造工艺模拟及优化分析 [J/OL]. 特种铸造及有色合金, 2025-06-27. <https://doi.org/10.15980/j.tzzz.T20250072>.
- [12] 冉兴, 陈义斯, 高晓慧, 等. 离心精铸大型钛合金机匣铸造模拟及缩松缩孔缺陷分析 [J]. 铸造, 2025, 74 (3): 344-349.
- [13] 刘云超, 李弘, 刘珍君, 等. ZTi60钛合金大型构件熔模精密铸造工艺及组织性能研究 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (10): 994-1003.
- [14] 孙冰, 杨光, 李渤渤, 等. 薄壁框型钛合金铸件熔模铸造数值模拟及验证 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (10): 925-931.
- [15] TAO P, SHAO H, JI Z J, et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28 (6): 520-528.
- [16] SHAO H, LI Y, ZHAO P, et al. Numerical simulation of centrifugal casting process of large thin-wall Ti alloy casting [J]. Materials Science Forum, 2016, 850: 469-481.
- [17] 邵珩, 李岩, 南海, 等. 熔模铸造条件下Ti6Al4V合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究 [J]. 金属学报, 2015, 51 (8): 976-984.