

AlSiCuSc 合金涡轮蜗壳熔模铸造工艺与数值模拟研究

郑宗文^{1, 2}, 张荣强², 付金龙², 孟晓东², 李俊涛¹

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 涡轮蜗壳作为涡轮增压器的关键承压部件, 其内部质量直接决定了增压器的可靠性与寿命。熔模铸造是生产该类复杂薄壁件的常用方法, 但在生产过程中易因工艺设计不当而产生缩孔、缩松及裂纹等铸造缺陷。本研究以某型号AlSiCuSc合金涡轮蜗壳为对象, 利用ProCAST软件对设计的三种工艺方案进行数值模拟, 对比和分析铸件铸造缺陷产生的位置及原因, 确定了最优的工艺方案并进行了试验验证。结果表明, 模拟与试验结果保持一致, 验证了模拟的可行性和准确性。本研究为涡轮蜗壳的高质量、高合格率熔模铸造生产提供了可靠的理论依据和工艺优化途径。

关键词: 涡轮蜗壳; 熔模铸造; AlSiCuSc合金; 数值模拟; ProCAST; 铸造缺陷; 工艺优化

中图分类号: TG249.5; TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0426-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0059

Research on Investment Casting Process and Numerical Simulation of AlSiCuSc Alloy Turbine Volute

ZHENG Zong-wen^{1, 2}, ZHANG Rong-qiang², FU Jin-long², MENG Xiao-dong², LI Jun-tao¹

(1. China Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract: The turbine volute, as a critical pressure-bearing component of the turbocharger, its internal quality directly determines the reliability and lifespan of the turbocharger. Investment casting is a common method for producing such complex thin-walled parts, but defects such as shrinkage cavity, shrinkage porosity, crack and so on easily occur during the manufacturing process due to improper process design. In this study, taking a certain model of AlSiCuSc alloy turbine volute as object, numerical simulations for three kinds of process schemes had been carried out by using of ProCAST software, and through comparing and analyzing the locations and causes of casting defects generated in the castings, an optimal process scheme was identified and the experimental verification was put into effect. The results show that the simulation and experimental results are consistent, verifying the feasibility and accuracy of the simulation. This research provides a reliable theoretical basis and process optimization approach for the high-quality and high-yield investment casting production of the turbine volutes.

Key words: turbine volute; investment casting; AlSiCuSc alloy; numerical simulation; ProCAST; casting defect; process optimization

涡轮增压技术作为提升内燃机功率、提高运行效率及降低尾气排放的关键核心技术之一, 在现代动力系统中占据重要地位。涡轮蜗壳作为该技术的核心组件, 长期工作于高温、高压及频繁热循环的严苛环境中, 对其材料的高温力学性能有极高要求, 同时必须确保结构完整性和长期运行可靠性^[1-4]。熔模铸造工艺因其能制造形状复杂、尺寸精度高、表面光洁度优良的铸件独特优势, 成为制造涡轮蜗壳等精密关键部件

的理想选择^[5]。然而, 涡轮蜗壳结构极为复杂, 普遍存在壁厚分布不均问题, 其螺旋流道区域与进口法兰连接部位常形成显著的厚大热节。在传统熔模铸造工艺中, 若浇注系统设计不当、冒口补缩措施不合理或冷却条件控制不佳, 熔融金属在凝固过程中极易在这些热节区域产生缩孔、缩松等严重内部冶金缺陷。此类缺陷会显著降低零件的疲劳强度和高温蠕变抗力, 使其在实际工况下易成为裂纹萌生源, 最终可能导致零

收稿日期: 2025-12-23 收到初稿, 2026-02-03 收到修订稿。

作者简介: 郑宗文 (1983-), 男, 博士, 主要研究方向为铝镁合金新材料, 熔模精密铸造, 晶界偏聚。电话: 18911710785, E-mail: 905014177@qq.com

引用格式: 郑宗文, 张荣强, 付金龙, 等. AlSiCuSc 合金涡轮蜗壳熔模铸造工艺与数值模拟研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 426-432.
ZHENG Zongwen, ZHANG Rongqiang, FU Jinlong, et al. Research on investment casting process and numerical simulation of AlSiCuSc alloy turbine volute [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 426-432.

件过早失效,严重影响整机性能与安全性。传统工艺开发模式主要依赖工程师经验积累和反复试制验证,这种“试错法”不仅开发成本高昂,周期漫长,且难以实现对内部缺陷的精准预测与有效控制^[6-10]。

随着计算机技术的飞速发展,铸造过程数值模拟技术已逐渐成为攻克这一技术难题的强大工具。技术人员通过专业模拟软件,可直观、动态展示充型过程中的流动状态、凝固过程中的温度场演变规律,并结合Niyama准则等多种科学判据,准确预测缩孔、缩松等缺陷的潜在位置和形成趋势^[11-12]。这使得工艺参数优化能在虚拟环境下高效完成,从而显著缩短研发周期、降低生产成本,并有效提升铸件质量的稳定性和可靠性^[13-15]。

为满足高温工况使用需求,某型号涡轮蜗壳设计采用新型AlSiCuSc合金进行铸造。本研究通过三维造型软件建立模型,利用ProCAST软件对三种不同工艺方案下的AlSiCuSc合金涡轮蜗壳熔模铸造工艺进行数值模拟分析,并对最优工艺方案开展试验,最终获得

了尺寸精确、表面光洁且无铸造缺陷的优质涡轮蜗壳铸件。

1 涡轮蜗壳结构分析与铸造工艺方案设计

1.1 涡轮蜗壳结构分析

铸件为蜗壳类结构件,其壁厚分布不均,法兰及凸台处存在厚大区域,最大壁厚达16 mm,平均壁厚5.54 mm,蜗壳管壁厚3 mm,壁厚变化显著。壁厚分析详见图1。此类铸件易出现变形,且热节数量较多,补缩难度大,易产生夹渣、裂纹、缩松及缩孔等缺陷。传统工艺依赖经验试错,研发成本高,周期长,无法精准预测内部缺陷,且AlSiCuSc合金需匹配熔模铸造工艺,需精准控制充型与凝固过程,以保障高温力学性能。铸件外形尺寸为134 mm × 129 mm × 104 mm,体积298 738 mm³,质量0.83 kg,属小型结构件。

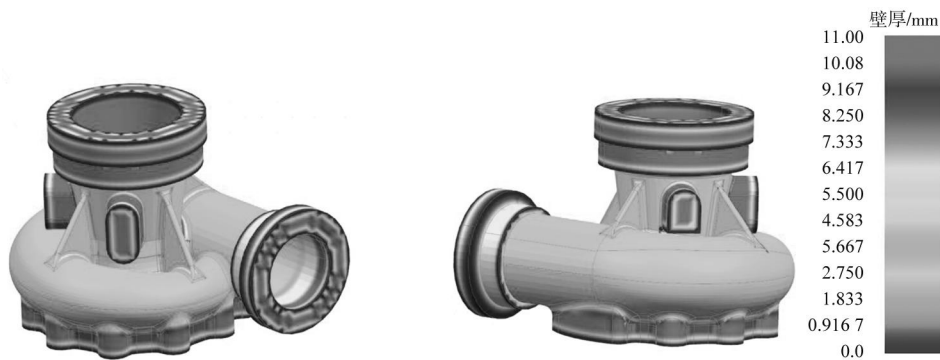


图1 涡轮蜗壳壁厚分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wall thickness analysis of turbine volute

1.2 涡轮蜗壳铸造工艺方案设计

根据涡轮蜗壳结构分析结果,在铸件厚大部位增加冒口或者放置随形冷铁,使铸件能够顺序凝固,按照上述理论指导,设计了3种铸造工艺方案。第1种铸造工艺方案大体尺寸为361 mm × 179 mm × 359 mm,工艺出品率为8.6%;第2种铸造工艺方案大体尺寸为367 mm × 179 mm × 282 mm,工艺出品率为13.1%;第3种铸造工艺方案大体尺寸为331 mm × 151 mm × 359 mm,工艺出品率为12.6%;3种工艺方案如图2所示。

2 数值模拟分析与讨论

本研究选用的AlSiCuSc合金其化学成分如表1所示。利用ProCAST软件计算材料的热物性参数,如图3所示。铸件浇注温度均为710 ℃,浇注时间均为15 s。将从三维造型软件导出的模型加载到ProCAST软件,对以上三种涡轮蜗壳铸造工艺方案进行数值模拟,分析铸件充型过程、凝固过程孤立液相区和缩松缺陷以及三种涡轮蜗壳铸造工艺方案的可行性,快速筛选出最优方案。

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

										w_B /%
Si	Cu	Sc	Mg	Ti	Zn	Mn	Be	Al	其他杂质含量	杂质总量
7.5	1.7	0.6	0.4	0.15	0.1	0.1	0.07	余量	0.05	0.15

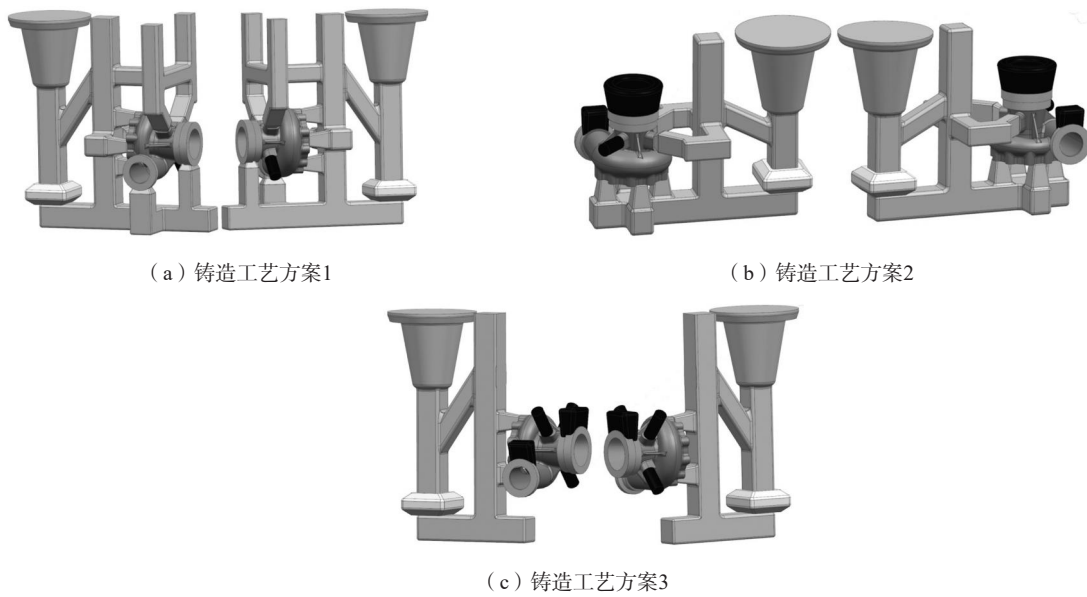


图2 涡轮蜗壳铸造工艺方案

Fig. 2 Casting process schemes for the turbine volute

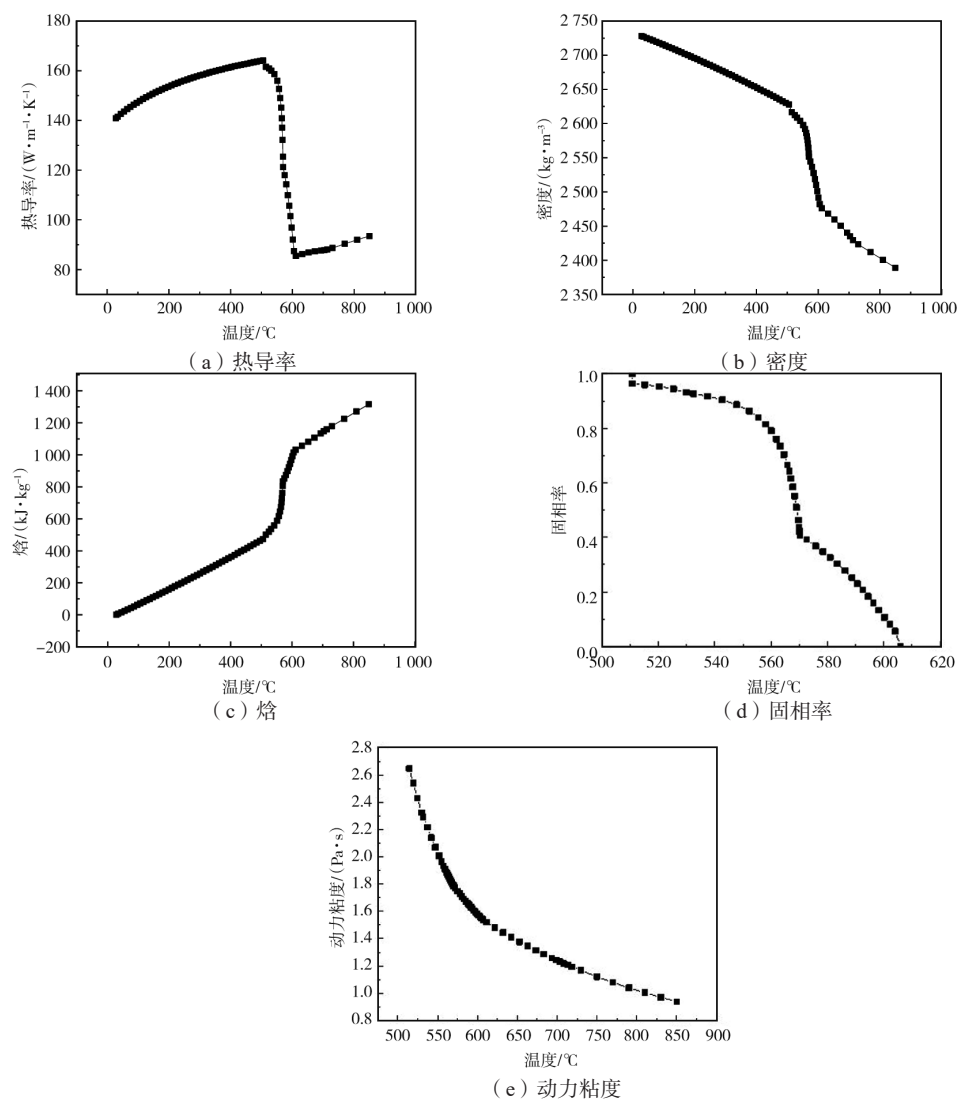


图3 AlSiCuSc合金热物性参数

Fig. 3 Termophysical property parameters of AlSiCuSc alloy

2.1 充型分析与讨论

图4为涡轮蜗壳三种铸造工艺方案的充型过程数值模拟结果。

根据图4所示的涡轮蜗壳充型模拟结果可知：①铸造工艺方案1中，金属液首先对铸件左端进行充型，充型完成后左端金属液开始下落，并与底部水口进入的金属液汇合，随后金属液液面平稳上升直至充型结束。②铸造工艺方案2中，整个充型过程金属液流动平缓稳定，未出现金属液下落及汇流现象。③铸造工艺方案3中，初期金属液对铸件底端进行充型，液面相对平稳；随着充型继续，上端水口开始注入金属液对铸件顶端充型，金属液发生回落并与底部进入的金属液汇合，直至铸件完全充型完毕。

2.2 孤立液相区分析与讨论

图5为涡轮蜗壳三种铸造工艺方案孤立液相区分布示意图。

根据图5孤立液相区模拟结果可知，尽管铸造工艺方案1与铸造工艺方案2下的凝固顺序存在差异，但两种方案下铸件均未出现孤立液相区；而在铸造工艺方案3下，铸件的小端法兰底部位置存在孤立液相区，实际铸造过程中，该位置会出现疏松现象。

2.3 疏松分析与讨论

图6为涡轮蜗壳三种铸造工艺方案铸件缩松分布示意图。

图6所得的缩松模拟结果显示，在缩松判别率为

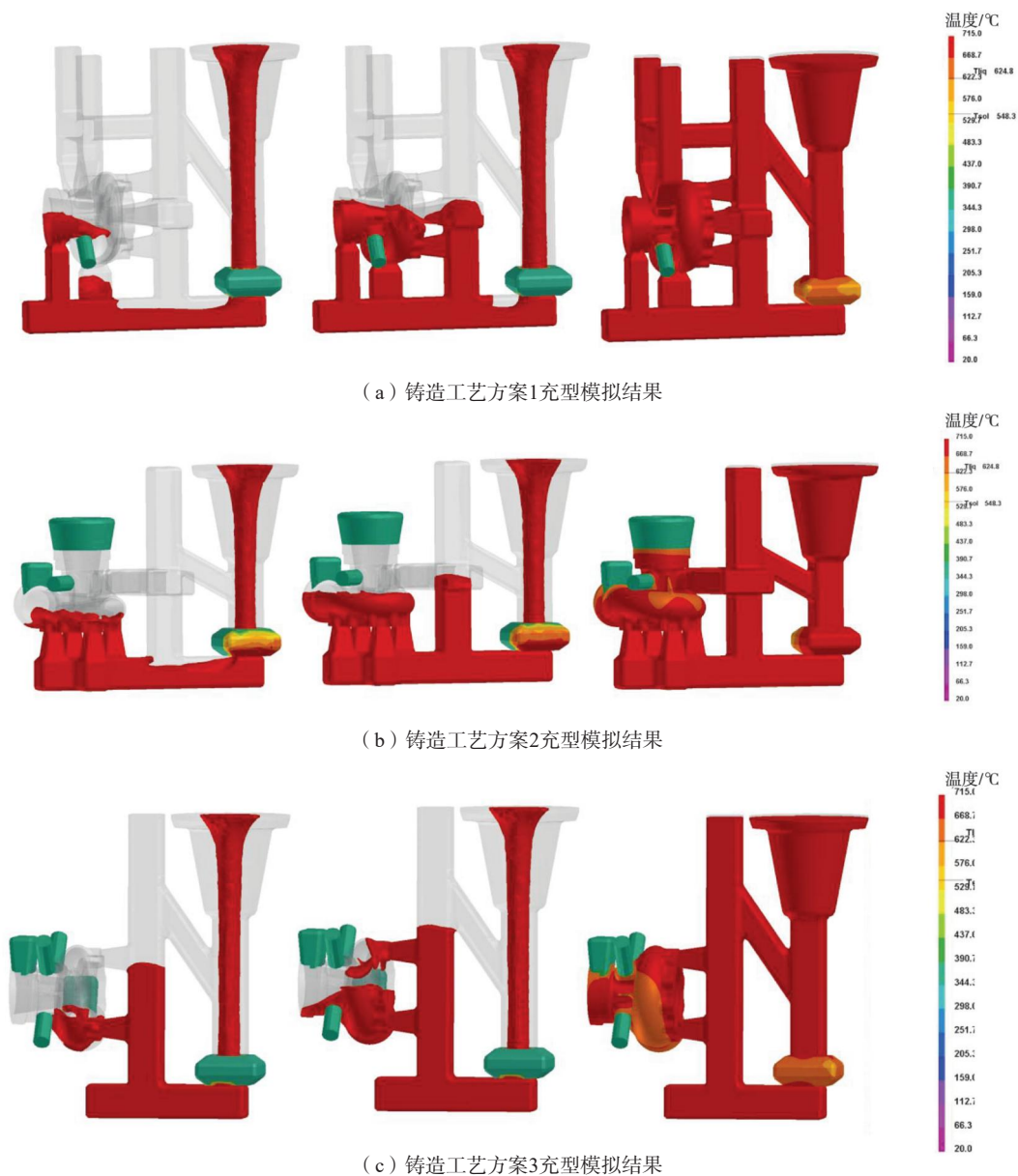


图4 涡轮蜗壳不同铸造工艺方案的充型模拟结果

Fig. 4 The mold filling simulation results of different casting process schemes for the turbine volute

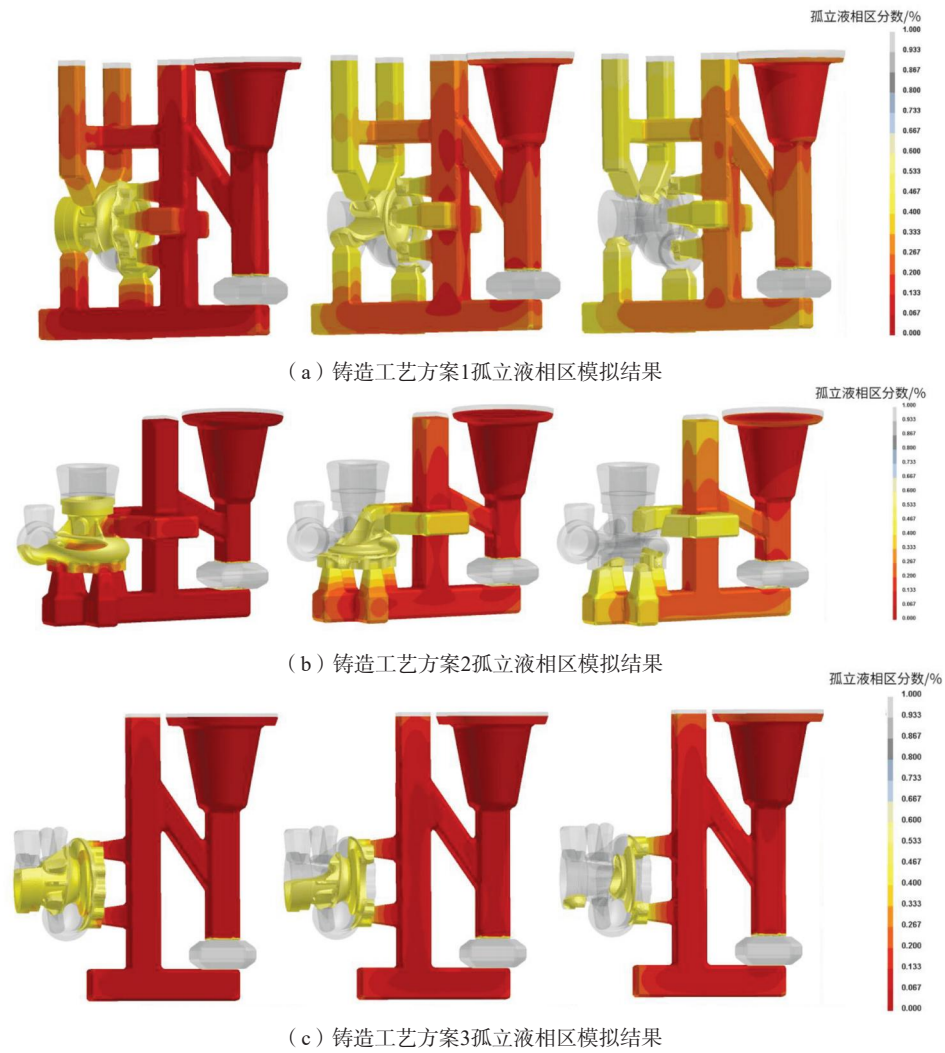


图5 不同铸造工艺方案下孤立液相区模拟结果

Fig. 5 Simulation results of isolated liquid phase regions under different casting process schemes

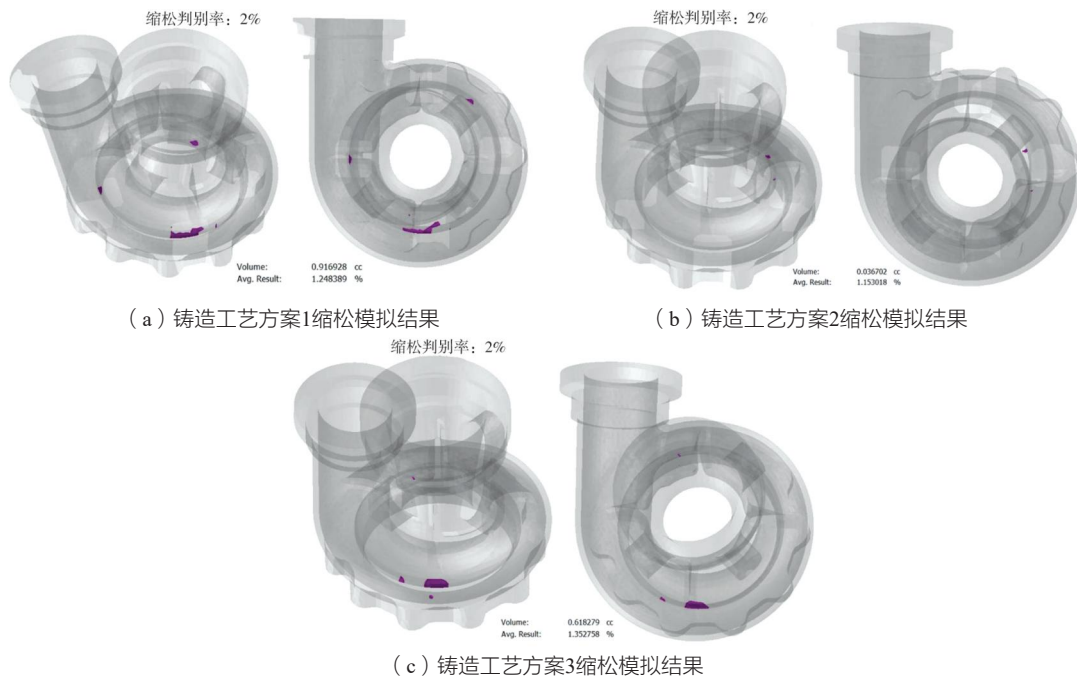


图6 不同铸造工艺方案下缩松模拟结果

Fig. 6 Simulation results of porosities under different casting process schemes

2%时, 铸造工艺方案1与铸造工艺方案3下铸件产生的缩松位置及体积基本一致; 铸造工艺方案1下的铸件缩松体积最大, 达 0.92 cm^3 ; 而铸造工艺方案2下的铸件缩松体积最小, 仅为 0.04 cm^3 。基于上述模拟结果, 最优工艺方案确定为铸造工艺方案2。

3 试验验证

基于模拟结果得出的最优铸造工艺方案2, 已完成

模具设计与制作、蜡模制造、型壳制备、脱蜡、型壳焙烧、熔炼与浇注、脱壳与切割、清理及后处理、检验与交付等全套工序。为保证试验结果的准确性, 对铸造工艺方案2进行了多批次熔铸, 清切后铸件经DR检测显示, 内部均无缩松、缩孔等铸造缺陷, 如图7所示, 其结果与模拟分析一致。



图7 铸件DR检测结果

Fig. 7 The DR inspection results of the castings

4 结论

采用三维造型软件完成涡轮蜗壳的几何建模与结构分析, 并设计了三种不同的铸造工艺方案。利用ProCAST软件对这三种铸造工艺方案进行充型过程、

孤立液相区及缩松缺陷的数值模拟与分析, 结果显示第二种铸造工艺方案最优。随后对该方案进行了试验验证, 获得了与模拟结果一致、无缩松和夹渣等缺陷的合格铸件。

参考文献:

- [1] 傅兴达. 基于ProCAST的涡轮增压器蜗壳快速铸造工艺研究 [D]. 衡阳: 南华大学, 2023.
- [2] 蒋文淼. 基于数值模拟的铝合金涡轮蜗壳铸造工艺研究 [D]. 成都: 西华大学, 2023.
- [3] 纪汉成, 葛修亚. 厚大高镍球铁涡轮壳铸造工艺改进 [J]. 铸造设备与工艺, 2018 (3): 14-16.
- [4] 郑浩勇. 复杂涡轮蜗壳零件金属型铸造模具设计 [J]. 模具技术, 2016 (4): 21-25.
- [5] 沈昀, 郑功, 冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (1): 54-62.
- [6] 刘其涛. Ti48Al2Cr2Nb合金铸件应力和变形的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [7] 吴士平, 张军, 徐琴, 等. 钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究 [J]. 中国体视学与图像分析, 2010, 15 (2): 134-140.
- [8] 江长, 向思雨. 基于ProCAST的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (5): 40-43.
- [9] 朱勇, 龚伟, 白朝中, 等. 基于ProCAST的进气管砂型铸造的充型凝固数值模拟 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (8): 1859-1862.
- [10] 袁焕龙, 曹喜彪, 黄挺挺. 铝合金缸盖倾转铸造数值模拟及优化研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (10): 1068-1071.
- [11] 王泽凯, 刘华, 徐宁, 等. VAR熔炼TC4铸锭凝固组织模拟 [J]. 金属学及金属工艺, 2025, 31 (4): 16-19.
- [12] 徐荣嫒, 赵艺萌, 王璐, 等. 模拟空间微重力与几何约束协同下铝合金凝固行为的原位成像研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55 (12): 2121-2140.
- [13] 孙浩, 王明明, 张晓妍, 等. 大型铸件铸造工艺及数值模拟研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2026, 49 (1): 200-214.
- [14] 殷亚军, 刘振伟, 张勇佳, 等. 铸造数值模拟软件技术及应用进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1297-1311.
- [15] LI Y M. Effect of the casting process variables on microporosity and mechanical properties in an investment cast aluminium alloy [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2 (3): 277-280.