

铝合金储油柜铸造工艺数值模拟与优化

刘春伟¹, 李兴华¹, 蒋永浩¹, 顾生达¹, 李寿坤², 冯柳³, 赵而团²

(1. 山东鸿源新材料有限公司, 山东淄博 256100; 2. 山东理工大学 机械工程学院, 山东淄博 255049;
3. 山东理工大学 分析测试中心, 山东淄博 255049)

摘要: 通过对铝合金储油柜进行结构分析, 结合产品生产需求, 初步采用砂型铸造对其进行试制, 分析了铸件的铸造缺陷位置及成因, 并基于此提出采用低压铸造、增加保温冒口和工艺补贴, 以及局部增加冷却的优化工艺方案。利用 AnyCasting 软件对改进后的铸造工艺方案进行数值模拟, 结果表明, 铸件成形质量较好, 探伤部位未产生缩孔、缩松缺陷, 最终采用该方案生产出了合格铸件。

关键词: 铝合金; 储油柜; 低压铸造; 铸件缺陷; 数值模拟

中图分类号: TG249.5; TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 03-0318-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0045

Numerical Simulation and Optimization of Casting Process for Aluminum Alloy Oil Conservator

LIU Chun-wei¹, LI Xing-hua¹, JIANG Yong-hao¹, GU Sheng-da¹, LI Shou-kun², FENG Liu³, ZHAO Er-tuan²

(1. Shandong Hongyuan New Materials Co., Ltd., Zibo 256100, Shandong, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 3. Branch Analysis and Testing Center, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: Through structural analysis of the aluminum alloy oil conservator and combined with production requirements, sand casting was initially used for the trial production, and the positions and causes of casting defects were analyzed. Based on this, an optimized process was proposed, including using low pressure casting, adding insulated risers and process subsidies, and local cooling enhancement. The optimized casting process was numerically simulated via AnyCasting software. The results show that the forming quality of the castings is better, with no shrinkage cavity and shrinkage porosity defects generating in the flaw detection areas, and qualified castings are successfully produced using the optimized process.

Key words: aluminum alloy; oil conservator; low pressure casting; casting defect; numerical simulation

储油柜(亦称膨胀器或油枕)是油浸式电力互感器顶部的关键部件,负责绝缘油进行呼吸调节和密封保护,以确保互感器在恶劣环境下长期安全可靠运行。储油柜多采用铝合金铸造成形,但铝合金铸件易产生缩松、缩孔等缺陷,导致部件致密性降低,甚至影响其服役性能和寿命^[1]。仅靠传统经验方法设计铸造工艺方案,开发周期长,试错成本高。随着制造业向数字化与智能化发展,充分利用模拟软件对铸造工艺进行优化,可以快速进行数据处理,大幅提高设计效率,降低成本^[2]。为此,本研究通过AnyCasting软件对铝合金储油柜的铸造工艺进行数值模拟,根据计算结

果及生产验证优化铸造工艺方案,最终解决了铝合金储油柜铸件的缩孔、缩松缺陷问题,提高了铸件质量和生产效率^[3]。

1 储油柜铸件结构特点

储油柜三维结构如图1(a)所示。铸件材料为A356铝合金,毛坯质量为27.65 kg,轮廓尺寸为609 mm × 585 mm × 530 mm。铸件成形质量要求不能有缩孔、缩松、夹杂物、气孔和针孔等超标铸造缺陷。按照ASTM E155标准对铸件成品进行探伤,铸件探伤部位见图1(b)中框线处,探伤等级均为I级。

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2025TSGCCZZB0362)。

收稿日期: 2025-12-15 收到初稿, 2026-01-11 收到修订稿。

作者简介: 刘春伟(1981-),男,学士,高级工程师,主要从事铝合金铸造工艺相关研究。E-mail: liuchunwei999999@163.com

通信作者: 赵而团,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail: etzhao@sdut.edu.cn

引用格式: 刘春伟,李兴华,蒋永浩,等.铝合金储油柜铸造工艺数值模拟与优化[J].铸造,2026,75(3):318-322.

LIU Chunwei, LI Xinghua, JIANG Yonghao, et al. Numerical simulation and optimization of casting process for aluminum alloy oil conservator [J]. Foundry, 2026, 75 (3) : 318-322.

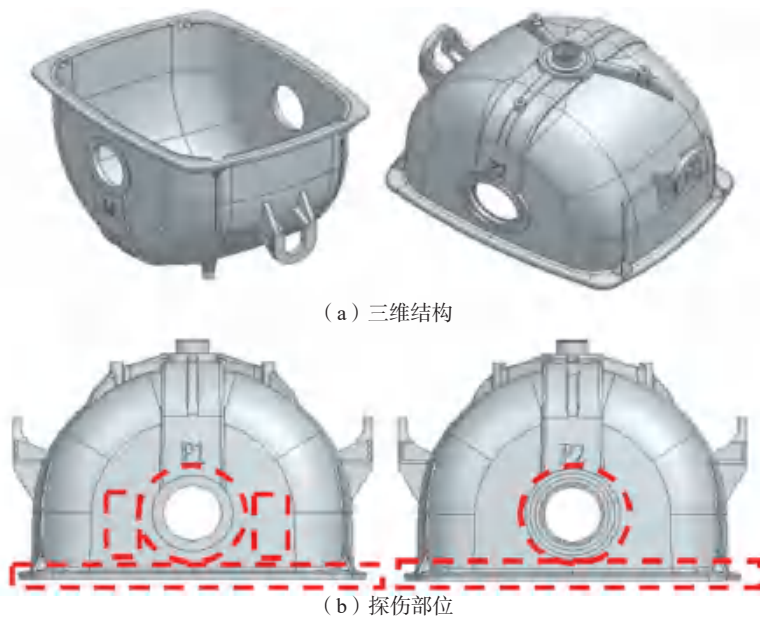


图1 铝合金储油柜铸件结构及探伤部位

Fig. 1 Structure and flaw detection areas of the aluminum alloy oil conservator casting

储油柜铸件的壁厚分布情况如图2所示。可见，其上端法兰、底部中心四周及筋所在部位壁厚较大，最大壁厚为27 mm；两侧吊装孔壁厚较薄，仅有5 mm；中间部位壁厚约7 mm。该储油柜铸件整体属于薄壁件。

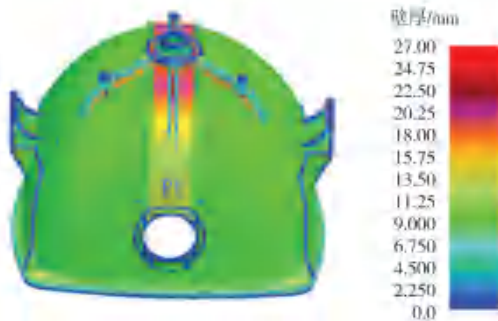


图2 铝合金储油柜铸件壁厚

Fig. 2 Wall thickness of the aluminum alloy oil conservator casting

2 原砂型铸造工艺方案及缺陷分析

根据铸件结构，同时考虑生产成本，初始铸造工艺方案采用了砂型重力铸造^[4]。铸件采用上下分型结构，分型面为储油柜最大轮廓密封面，铸型与型芯均为自硬呋喃树脂砂，浇注系统选用顶注式^[5]。为补缩热节及壁厚较大部位，采用浇冒一体式补缩通道。为保证探伤部位的成形质量，在端面和两侧中心孔处均放置有冷铁，以加速凝固。为避免合金熔体直接冲击砂芯，同时起到过滤熔体中夹渣的作用，在浇道处设置孔径为20 μm 的陶瓷过滤网，在小圆端顶部设置3处排气针，如图3所示。

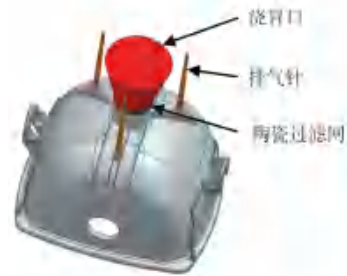


图3 铝合金储油柜砂型铸造工艺模型

Fig. 3 Sand casting process model for the aluminum alloy oil conservator

利用AnyCasting软件对砂型铸造工艺方案的缺陷分布进行数值模拟预测^[6-8]，结果如图4所示。可以看到，缺陷位置多而分散，同时底部法兰也存在缩孔、缩松等缺陷。由铸件充型过程数值模拟结果可知，由于采用顶注式浇注系统，充型过程中极易发生紊流和卷气，图5中圆圈处为卷气部位，这些区域容易形成气孔缺陷。

对实际浇注后的铸件进行清理并去除浇冒口，然后实施X射线探伤，探伤结果见图6。可以看出，在



图4 砂型铸造工艺方案铸件缺陷预测

Fig. 4 The prediction of casting defects for the sand casting process scheme

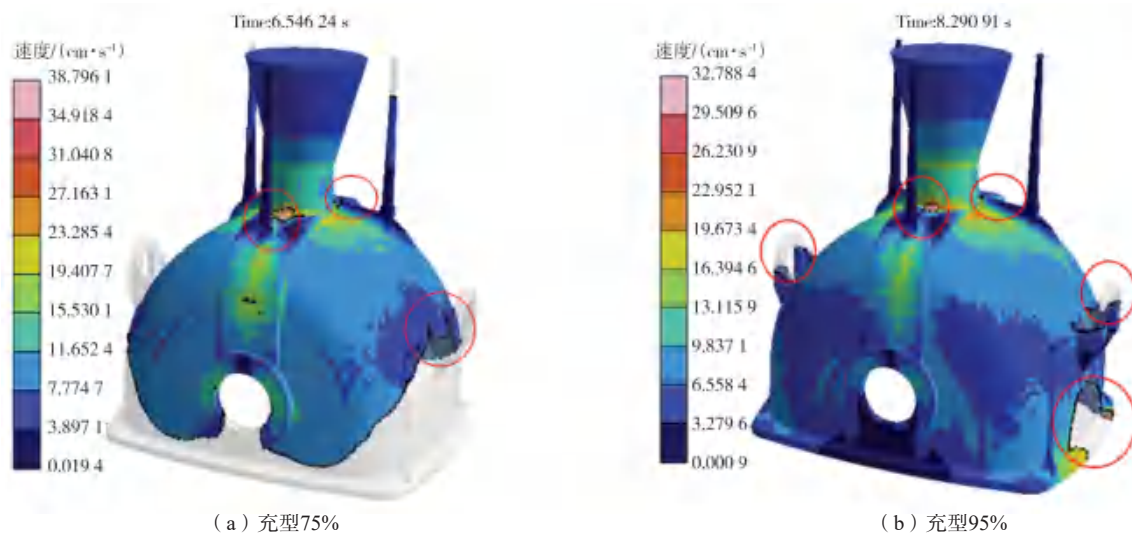


图5 铸件充型过程数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of mold filling process of the casting

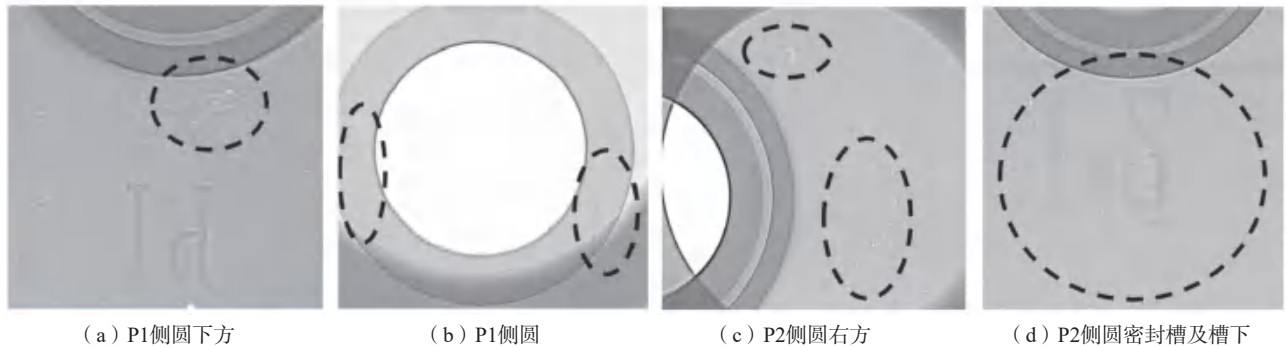


图6 砂型铸造储油柜铸件X射线探伤结果

Fig. 6 X-ray inspection results of the oil conservator casting formed by sand casting

P1侧圆周边及下方、P2侧圆右方及密封槽处要求探伤的区域均存在缩孔、缩松缺陷；P2侧圆上方有气孔缺陷，如图6(c)所示。以上缺陷主要发生在两侧面中心圆孔周围与密封槽内。分析缺陷成因可知，尽管端面处和两侧中心孔处均放置了冷铁，使得这两个部位的凝固冷却速度加快，但铸件壁厚较薄，距离冒口较远，不能形成很好的补缩通道，从而形成了缩孔、缩松缺陷^[9]。因此，需要对砂型铸造工艺进行改进。

3 铸造工艺改进

砂型铸造工艺，铸件最大法兰端面处于最下方，远离浇冒口，由于补缩通道长、铸件侧壁较薄，补缩效果差。加之两侧中心圆孔部位布置有冷铁，更无法实现补缩，所以应考虑法兰端面向上的方案。结合铸件的密封性要求，为避免该薄壁储油柜原砂型铸造工艺方案补缩不佳、缺陷较多的问题，经过分析，决定采用金属型低压铸造工艺成形铸件。

金属型低压铸造冷却速度快，可显著细化晶粒，

缩小二次枝晶间距，提升铸件力学性能^[10-11]。为形成顺序凝固，便于补缩，铸件浇注方式如图7所示，将厚壁部位于下端，靠近浇道。为有效对端面法兰部位进行补缩，首先将与端面法兰相连接的主体外形壁厚增加至8 mm。法兰面上端处于充型末端，因此需要放置保温冒口，从而能够对整个厚平面进行凝固补缩^[12]。对于中心孔侧面的2个孤立热节，在两侧中心孔上部分别增加对应的补缩通道，同时在中心孔四周端面增加水雾冷却镶块。

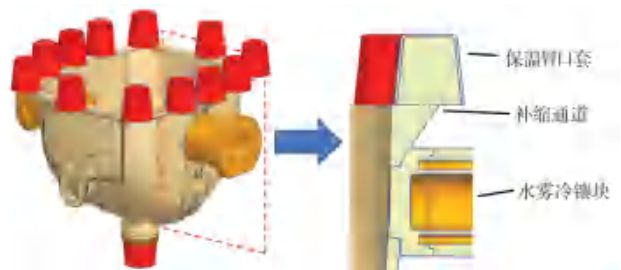


图7 改进后的铸造工艺

Fig. 7 The improved casting process

将原砂型铸造工艺改为金属型低压铸造后, 还要考虑铸件的收缩受阻差异。基于生产经验, 采用砂型铸造时产品整体收缩率为0.7%, 改进后金属型模具内腔尺寸的收缩率设计为0.3%, 顶孔轴线方向收缩率设计为0.6%。为减少凝固收缩阻力, 顺利脱模, 铸件外壁两个吊装部分的根部采用圆角过渡, 避免尖锐内角, 同时增加 2° 拔模斜度。对铸件其他因收缩受阻而阻碍开模的部位, 除采用圆角过渡外, 在模具内腔和型芯喷涂脱模涂料以减少机械阻碍, 同时合理控制开模时间(卸压后220 s), 有效避免因工艺改变导致铸件收缩受阻而产生应力开裂问题。

对改进后的铸造工艺方案进行数值模拟^[13-15], 结果如图8所示。图8(b)为凝固顺序剖视图, 上面红色部位为补缩冒口, 由上向下补缩产品端面厚大部位, 最后凝固部位处于冒口内。下面红色区域温度较高, 凝固较晚, 这是由于此处模具结构上设有分流锥, 铝液充型时分流锥不断被加热而呈高温状态, 使得熔体温度也较高。并且, 结合图8(d)铸造缺陷模拟结果可知, 凝固时此处出现缩松缺陷, 但实际缺陷不在产品上, 而是在浇口上。原产品结构中此处为一孔, 因低压铸造工艺需要, 将该内孔封堵, 形成浇口, 最后加工时予以去除, 故此处的缩松缺陷对铸件质量没有影响。

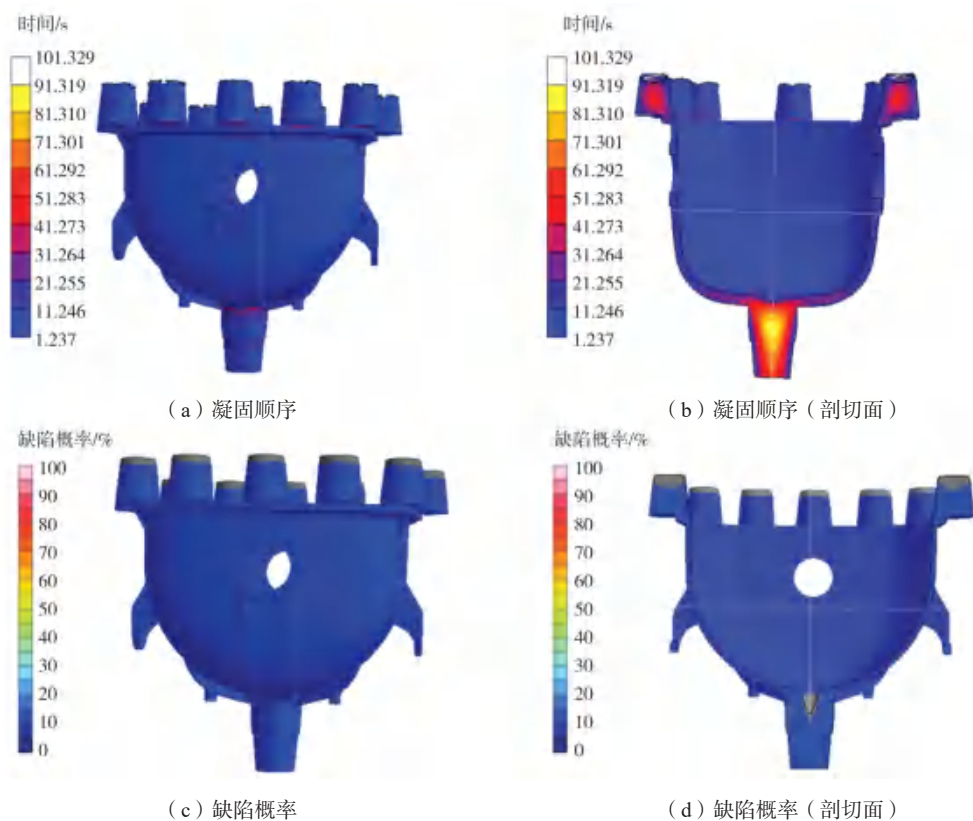


图8 改进后的低压铸造工艺方案数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of the improved low pressure casting process

由上述数值模拟结果可以看出, 改进工艺后, 整个铸件实现了顺序凝固, 缩孔、缩松缺陷全部转移到冒口和浇注系统中, 原来出现缩孔、缩松的法兰端面周围和两侧中心圆周围的热节处均无缩孔、缩松缺陷出现。

4 生产验证与分析

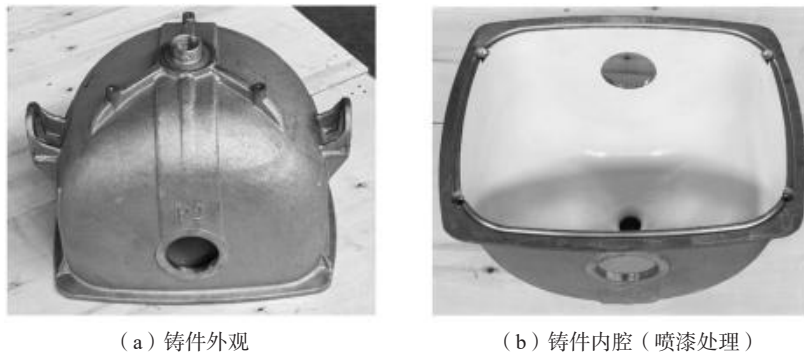
利用改进后的金属型低压铸造工艺进行浇注试验, 图9为浇注清理后的铸件外观及内腔表面(进行了喷漆处理)。从外观来看, 铸件质量良好, 没有肉眼可见的铸造缺陷。按照铸件质量要求对储油柜关

键部位进行X射线探伤, 探伤结果如图10所示。可以看到, 探伤部位成形质量较好, 均没有缩孔、缩松出现, 这与数值模拟结果相一致。试制的储油柜铸件全部合格, 现已实现批量生产。

5 结束语

(1) 铝合金储油柜成形质量要求较高, 原工艺采用砂型重力铸造, 由于铸件主体壁厚较薄, 不能形成有效的补缩通道对热节处进行补缩, 导致铸件探伤部位存在缩孔、缩松缺陷。

(2) 将工艺改为金属型低压铸造, 铸件带法兰端

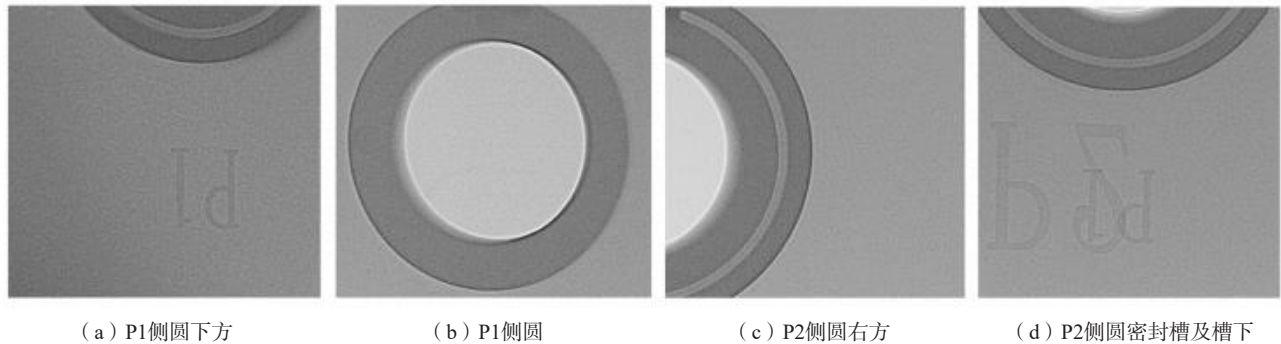


(a) 铸件外观

(b) 铸件内腔 (喷漆处理)

图9 金属型低压铸造铸件实物

Fig. 9 Casting produced by metal mold low pressure casting



(a) P1侧圆下方

(b) P1侧圆

(c) P2侧圆右方

(d) P2侧圆密封槽及槽下

图10 低压铸造储油柜铸件的X射线探伤结果

Fig. 10 X-ray inspection results of the oil conservator castings formed by low pressure casting

面朝上, 采用增加保温冒口和工艺补贴以及局部增加冷却的优化方案, 利用铸造模拟软件对工艺过程进行

数值模拟分析, 最后生产出质量合格的储油柜铸件, 证明了优化后工艺的可行性。

参考文献:

- [1] 陈国栋. 铸件缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 522.
- [2] 陈煌. 计算机模拟辅助技术在铸造工艺设计中的应用 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1387.
- [3] QIU Z A, ZHAO X Y, ZHANG C J, et al. Optimization of pressurization process in low-pressure casting of a 5.4-ton gigantic C95800 copper alloy casting [J]. China Foundry, 2024, 21 (6): 717-726.
- [4] 李欣珂, 于鑫泓, 于金瑞, 等. 铝合金转向壳铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1561-1564.
- [5] WANG Q G, WANG A, CORYELL J. Ultra-large aluminum shape casting: opportunities and challenges [J]. China Foundry, 2024, 21 (5): 397-408.
- [6] DENG S, ZHOU A H, CHEN Y. Structural optimization and performance study of squeeze casting suspension arm under multi-condition loads [J]. Applied Sciences, 2025, 15 (18): 10153.
- [7] GUO Z J, LIU D R, BAO H Y, et al. Process optimization of gravity sand casting process for thin-walled castings of Al-7Si-0.5Mg alloy using a coupled simulation-experiment method [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 432-450.
- [8] 何若虚. 铝硅合金减速器壳体砂型铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2020, 69 (7): 761-763.
- [9] HAO X, LIU G H, WANG Y, et al. Optimization of investment casting process for K477 superalloy aero-engine turbine nozzle by simulation and experiment [J]. China Foundry, 2022, 19 (4): 351-358.
- [10] 李玲玉, 王翔, 孙克山, 等. 砂型铸造和低压铸造对超长铝合金箱梁组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (3): 197-202.
- [11] 陈红圣, 王仕明, 梁超, 等. 金属型低压铸造铝合金裂纹分析及改进 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 556-559.
- [12] 王亮, 刘中令. 铝合金变速箱壳体低压铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2025, 74 (2): 203-210.
- [13] ZHENG Q C, XIAO Y H, ZHANG T, et al. Numerical simulation of latent heat of solidification for low pressure casting of aluminum alloy wheels [J]. Metals, 2020, 10 (8): 1024.
- [14] 朱洪军. 基于AnyCasting缸盖罩盖压铸工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 248-252.
- [15] 马小军, 邹书云, 刘海滨, 等. 铝合金副车架铸造工艺分析及结构优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (11): 1597-1605.