

基于砂型 3D 打印技术的壳体 低压铸造工艺开发与验证

艾雨蒙¹, 游志勇¹, 刘世龙¹, 张笙辉², 李成坤², 谭锐³

(1. 太原理工大学材料科学与工程学院, 山西太原 030024; 2. 康硕(山西)智能制造有限公司, 山西高平 046700;
3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 壳体型腔复杂且壁薄, 采用传统工艺不仅造型困难, 而且从模具设计到整体铸造工艺开发与验证, 所用周期长、效率低, 生产成本高。基于砂型3D打印技术快速制样优势, 本文对壳体浇注系统采用随形设计方案, 实现了型腔、叶片一体化结构成形制造, 结合数值仿真计算分析, 对浇注工艺进行设计优化, 开展了浇注试制与铸件实物检测。结果表明, 选用3D打印砂型整体成形工艺可实现复杂结构壳体的短周期、低成本与高精制造, 实现工艺样件的快速制造。

关键词: 砂型3D打印; 铸造工艺; 数值模拟; 快速定制

作者简介:

艾雨蒙(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为复杂结构砂型3D打印成形工艺。
E-mail: 15502458062@163.com

通讯作者:

游志勇, 男, 副教授, 硕士生导师。电话: 13603511486, E-mail: 13603511486@163.com

中图分类号: TG249.2;
TP311

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2024)08-1159-06

基金项目:

山西省重点研发计划项目(2022ZDYF072)。

收稿日期:

2024-01-25 收到初稿,
2024-04-07 收到修订稿。

近年来, 随着装备铸件的更新换代速度不断提升, 诸如航空航天、汽车、船舶等制造行业对于复杂铸件的铸造工艺设计需求越来越多^[1]。对于传统铸造工艺, 重要的制模环节是其设计的瓶颈部分^[2], 因为模具受到铸件壁厚、起模斜度等的影响, 增加了模具设计难度。除此之外, 铸件的结构复杂程度决定了型芯组合数量, 这些因素直接影响铸件成形质量的稳定性, 最终限制了复杂铸件的开发。而砂型3D打印技术有着对铸件结构敏感度低、无需制模和分型自由的优势, 增加了铸造工艺设计的灵活性; 同时, 通过整体打印砂型可以实现型芯一体化的设计, 显著减少型芯装配的数量, 降低了因装配操作产生的尺寸误差, 提升了铸件成形精度^[3-4]。因此, 日趋成熟的砂型3D打印技术以其快速、便捷和灵活的特性在铸造工业领域得到了广泛的应用。

数值模拟技术于20世纪80年代中期便与传统铸造工艺设计相结合, 在实际生产前, 工程师都会利用模拟软件对其充型凝固过程进行模拟仿真, 根据模拟情况改进铸造工艺的设计, 从而提升铸件生产的合格率, 这种仿真优势使得数值模拟技术在传统铸造工艺设计中得到广泛应用^[5]。近年来, 针对复杂铸件3D打印砂型铸造工艺的设计, 国内不少学者仍然采用数值模拟技术对铸造工艺进行仿真与优化。倪允强等利用Magma软件对气缸体在浇注过程中流场和温度场进行模拟来评估浇注系统设计的合理性, 试验结果表明, 数值模拟技术可以有效提高复杂铸件一次成功率, 极大减少开发成本^[6]。徐伟业等利用ProCAST软件对机匣3D打印重力铸造工艺进行模拟, 通过铸件固相率和缺陷分布对冒口和冷铁进行优化设计, 机匣经试制检测后验证了优化工艺方案的可行性, 表明数值模拟技术可以为复杂铸件的工艺设计优化提供理论指导依据^[7]。杨成龙等利用Magma软件对出气连通管进行零件工艺的单凝固计算来定位可能产生缩孔、缩松缺陷位置, 为铸造工艺设计提供参考, 试验结果表明, 该方法可以有效缩短工艺设计周期, 实现复杂铸件的快速试制^[8]。

本文以某型号的壳体为研究对象, 建立铸造工艺模型并模拟仿真, 利用模拟结果预测缺陷形成, 以此确定浇注系统随形化的铸造工艺方案。根据方案设计一体化成形的型芯结构, 最后打印并浇注试制, 对试制铸件进行X射线探伤和尺寸精度检

测。利用砂型3D打印和数值模拟相结合的优势，短期内完成壳体的铸造工艺开发与验证。

1 试验方法

1.1 铸件的3D打印铸造工艺设计

本文以某复杂壳体铸件为研究对象，如图1所示，整体轮廓尺寸456 mm × 408 mm × 225 mm，最大壁厚16 mm，最小壁厚3 mm，壁厚差异悬殊。内腔形状为变截面，内外两侧由叶片连接，整体结构复杂。铸件重13.6 kg，材质为ZL114A合金。针对上述结构和材料特征，拟确定铸造方式为砂型低压铸造，浇注系统采用开放式，浇注系统截面积比为： $\Sigma A_{直} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{内} = 1.0 : 4.0 : 4.6$ 。为确保金属液有更好的充型能力和补缩效果，浇道可以遵循“随形设计”原则^[9]，整体呈圆环形，内浇道有序环绕分布在壳体四周。对拟确定的铸造工艺进行模拟仿真，对浇注系统进行优化，确定最佳的铸造工艺。



图1 某复杂壳体铸件三维模型
Fig. 1 3D model of the shell casting

1.2 砂型(芯)的3D打印工艺确定

喷墨式砂型3D打印属于一种选区成形的增材制造技术。打印头将呋喃树脂液滴按需喷射至砂层表面，在固化剂的催化下树脂固化形成粘结桥粘接砂粒。打印过程中砂层逐层累积，直至整个部件被打印出来为止。有研究表明^[10-13]，打印砂型(芯)的性能直接影响到铸件的成形质量，而砂型(芯)的性能与3D打印的材料性能配比和参数设置等密切相关。因此，合理设置3D打印工艺参数至关重要。试验原材料由康硕集团提供，打印设备为ExOne S-Max Pro，成形尺寸1 800 mm × 1 000 mm × 700 mm。具体工艺参数的设置如表1所示，本试验中树脂加入量指3D打印过程中树脂占每层成形区域型砂的质量分数，固化剂加入量指固化剂占预混型砂的质量分数。试验打印的砂型(芯)的24 h抗拉强度在1.8~2.3 MPa，发气量≤10 mL/g，砂型尺寸精度控制在±0.015%。

表1 3D打印砂型成形工艺参数

Table 1 Process parameters of 3D sand printed forming

树脂加入量/%	固化剂加入量/%	铺砂速度 / (mm·s ⁻¹)	分辨率 /mm	层厚 /mm
1.50	0.30	200	0.10	0.30

2 试验结果与讨论

2.1 铸造工艺的优化与模拟

针对铝合金壳体铸件的结构特点，选用低压铸造成形工艺，金属液从底部自下而上平稳充型，并且在一定气压作用下增强金属液充型能力，有利于薄壁壳体的成形。建立优化的铸造工艺模型，如图2所示，结合3D打印技术的优势，在叶片部位设计了随形缝隙式内浇道，其余内浇道设计成立柱式；浇道截面尺寸采用内切圆滚圆法设计^[14]，各内浇道与铸件之间设置合理的距离，立柱式内浇道与铸件的间距为60 mm，缝隙式内浇道与铸件的间距为24 mm，保证良好的充型能力和补缩效果。铸件顶部和法兰等厚大部位设置冷铁，冷铁开设通气槽，槽深1.5 mm、宽1.5 mm、夹角60°，配合浇注系统控制铸件凝固顺序，消除局部热应力，保证铸件的成形质量。直浇道底部放置过滤网，可有效去除熔体中的气泡、夹杂氧化物等，保证冶金质量。

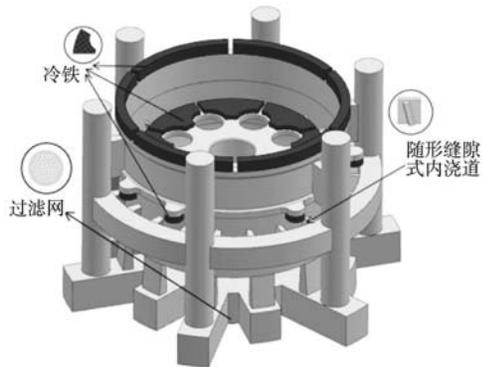


图2 壳体3D打印铸造工艺
Fig. 2 3D printing casting process of the shell

铸造工艺设计后，采用模拟软件模拟其充型凝固过程。图3给出了充型阶段模拟结果，从图中可以看出，金属液充型平稳，最大流速不超过23 mm/s；液面没有出现扰动，避免卷气产生双层氧化膜。图4给出了凝固顺序和缺陷预测的模拟结果，可以看出，铸件凝固时温度梯度分布合理，铸件优先于浇注系统凝固，有利于浇道补缩作用的发挥。缩松缺陷基本都集中在浇道部位。从模拟结果可以看出，3D打印技术可以提高铸件铸造工艺设计的自由度。根据铸件叶片的结构

特征，增加一圈横浇道和对应的缝隙式内浇道，并且缝隙浇道随形设计，以此更好地满足铸件所需要的充

型和补缩条件。通过模拟仿真验证了浇注系统设计的合理性，从而能在较短的时间内获得高质量的铸件。

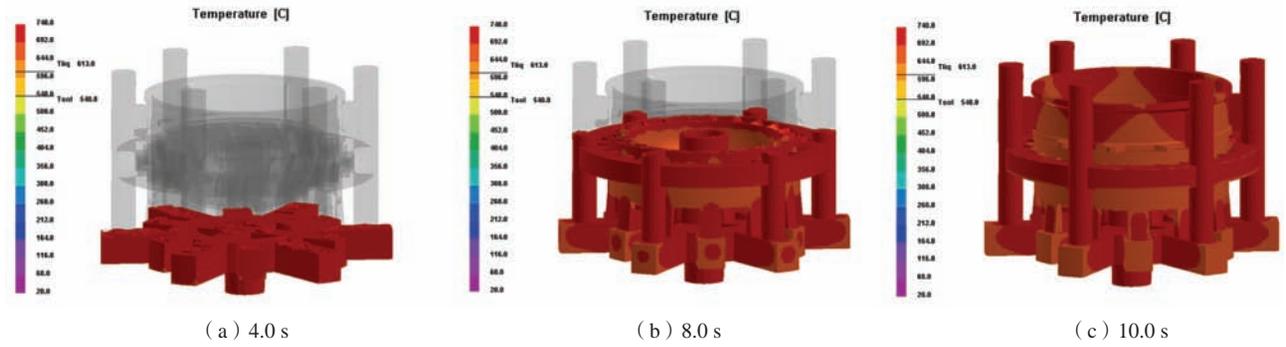


图3 充型过程的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of the filling process

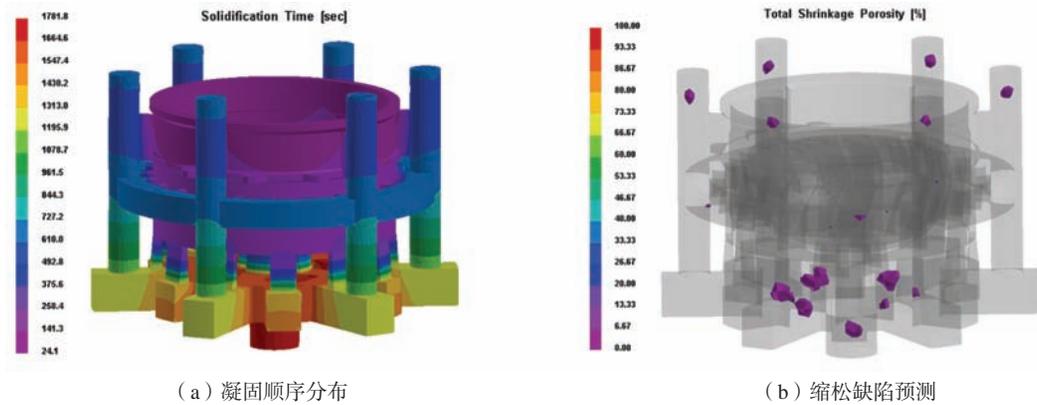


图4 凝固过程的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the solidification process

2.2 砂型（芯）结构与装配的设计

壳体造型难度在于变截面空腔与叶片砂芯的成形，如图5a所示，传统造型需要一定的起模斜度，叶片需要分割造芯来组成其整体结构，不仅增加造型难度，还难以控制型芯配合精度，而砂型3D打印可实现铸型一体化成形，造型效率和产品质量都能得到极大提升。基于壳体铸件成形工艺优化设计整体砂型（芯）结构，考虑到清砂和涂料浸刷，型芯由6部分组

成，外型包括浇注系统、冷铁和铸件外轮廓，设计了紧固装置作为砂箱；内芯包括铸件叶片、内腔结构，如图5b所示。根据工艺设计，铸件内腔封闭面朝下，因此，内腔厚大砂芯设计了吊装工艺，方便下芯。另外，开设了多组直通铸件的排气孔，有利于型腔内气体的排出。整体砂型（芯）设计与装配结构如图6所示。

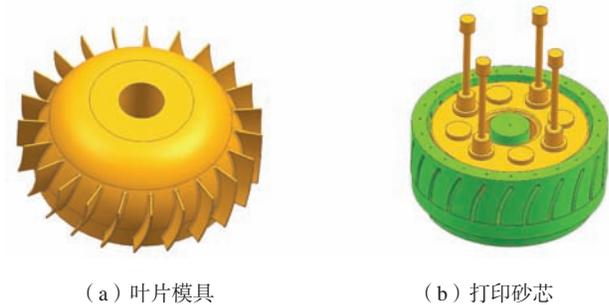


图5 传统造型和3D打印对比

Fig. 5 The comparison of traditional modeling and 3D printing

2.3 铸件的浇注与检测

完成砂（芯）结构设计后进行打印，将模型导入打印系统中进行切片处理，分层厚度为0.30 mm。完成打印后，在工作箱内静置90 min，使型芯固化具有一定的初始强度，随后取出进行清砂、烘干、涂料浸刷和组型，结果如图7a所示。考虑到壳体铸件壁厚差异大，在浇注前对砂型进行90℃预热处理。浇注初温在735℃左右，保压压力为28 kPa，以保证金属液能够充满铸型型腔，增强对薄壁部位的补缩。自然空冷12 h后开箱，精整处理后的壳体毛坯如图7b所示，表面光

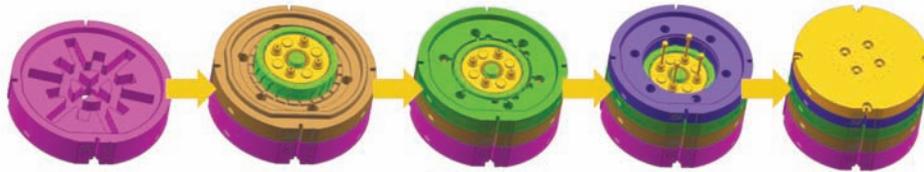
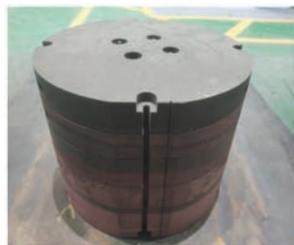


图6 3D打印砂型(芯)的设计和装配

Fig. 6 Design and assemble of the 3D printed sand mold (core)



(a) 组型



(b) 毛坯

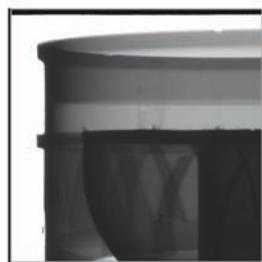
图7 砂型组型和铸件毛坯

Fig. 7 Sand mould and shell castings

洁、叶片与内腔等薄壁处成形完整。X射线探伤检测结果见图8, 铸件关键部位未发现空洞类铸造缺陷。使用手持式三维扫描仪进行尺寸检测, 结果如图9所示, 铸件尺寸精度控制在 ± 0.9 mm 范围内, 达到HB 6103—2004 CT6级尺寸公差。



(a) 内腔



(b) 叶片

图8 X-Ray探伤检测

Fig. 8 X-Ray flaw detection

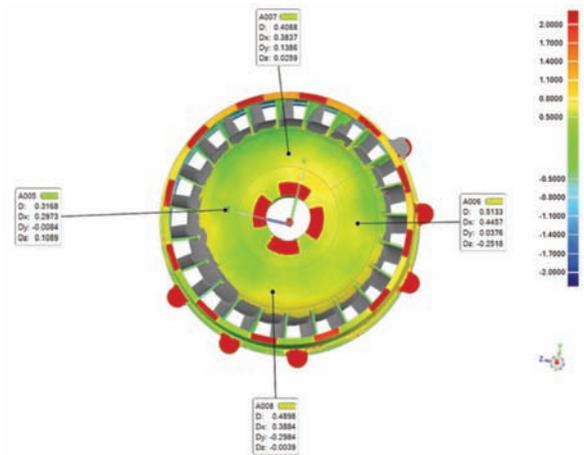


图9 尺寸精度检测

Fig. 9 The diagram of dimensional accuracy detection

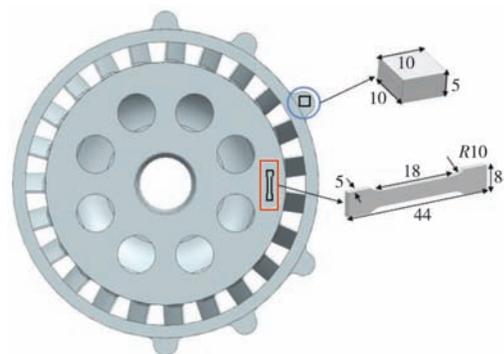


图10 壳体试样示意图和分布位置

Fig. 10 Schematic diagram and distribution position of the shell samples

2.4 金相组织和力学性能分析

对试制的壳体铸件进行T6热处理, 工艺包括固溶处理和人工时效。铸件在535 °C的立式固溶炉内保温12 h, 然后取出迅速放入80 °C的热水中进行水淬, 在水中停留10 min后放入175 °C的时效炉内保温6 h。热处理结束后在壳体铸件上取本体试棒和试块, 取样示意如图10所示。对本体试块的显微组织进行金相观测, 不同造型工艺的试块金相显微组织对比如图11所示, 经T6热处理后, 3D打印砂型试块的枝晶生长比传统砂型较发达; 采用粒径分布计算软件对合金的二次枝晶臂间距(SDAS)进行测量计算, 分别为20.96 μm 和18.80 μm , 虽然造型工艺不同, 但是所用原材料都为硅

砂, 砂型具有相似的热导率, 热导率又决定了合金的冷却速率, 因此, 传统砂型与3D打印砂型试样二次枝晶臂间距差别不大, 3D打印砂型的试块二次枝晶臂间距略低于传统砂型的试块, 对应图11b中表现为铝基体组织更致密, 枝晶间的元素偏析区域就越少。

对本体试棒进行室温拉伸试验, 传统砂型拉伸试棒的抗拉强度为315 MPa, 伸长率为6.4%; 3D打印砂型拉伸试棒的抗拉强度为328 MPa、伸长率为7.2%。对T6态拉伸断口进行SEM测试, 断口形貌如图12所示, 两种造型工艺的试棒拉伸断口存在少量的解理面, 可以看到河流花样和断裂棱, 大部分由长椭圆状韧窝构成, 总体断裂机制以韧窝断裂为主, 存在一定数量的

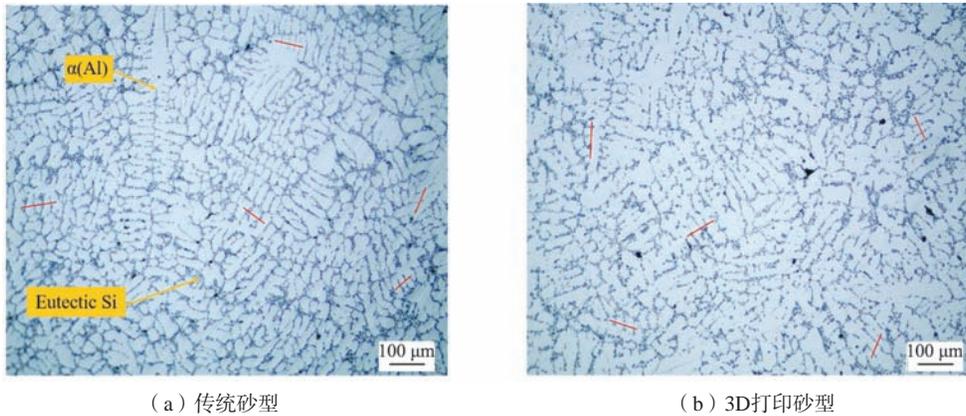


图11 不同造型工艺的试块金相显微组织对比
Fig. 11 Comparison of the metallographic microstructures at different molding processes

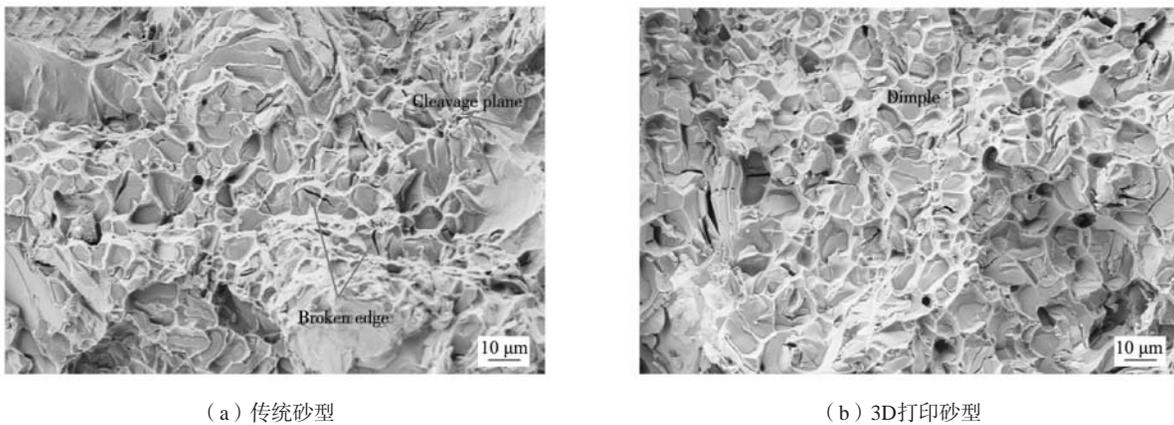


图12 不同造型工艺的试样拉伸断口SEM形貌
Fig. 12 SEM morphologies of the tensile fracture of different molding processes

沿晶断裂；3D打印砂型的试样拉伸断口韧窝数量相比于传统砂型的试样较多，因此，表现出较优的力学性能。

3 结论

(1) 应用砂型3D打印技术，将构成叶片和内腔的砂芯合并为一个整体，降低了造型制芯的难度，消除了因砂芯装配而造成的尺寸误差，从而获得高成形精度的铸件；将浇注系统随形化设计，更有利于铸造合金的充型和补缩，从而提高铸件的成形质量。

(2) 针对复杂薄壁的壳体铸件，将砂型3D打印技术与数值模拟技术应用于铸造工艺的设计中，可有效应对设计过程中改模制芯的问题。采用传统工艺试制

壳体至少需要21天，而采用砂型3D打印技术完成壳体的工艺试制只用4天，试制的周期缩短70%以上，使复杂壳体铸件在短时间内完成铸造工艺的开发与验证，可以满足制造业对于新型复杂铸件个性化定制的需求。

(3) 应用砂型3D打印技术试制的壳体铸件，其金相显微组织的状态与力学性能都略优于传统工艺，表现为铝基体组织更致密，减少了枝晶间的元素偏析区域；抗拉强度提升了13 MPa，伸长率提高了11%，尽管断裂机制都以韧窝断裂为主，但是砂型3D打印的断口韧窝数量比传统工艺的断口韧窝数量多，因而表现出较优的力学性能。

参考文献:

- [1] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, SAXENA P, et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting [J]. Additive Manufacturing, 2021, 40: 101889.
- [2] SAMA S R, BADAMO T, LYNCH P, et al. Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing [J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 563-578.
- [3] 游志勇, 张鹏, 孙战, 等. 砂型3D打印技术对刹车盘铸造工艺的优化 [J]. 中国铸造装备与技术, 2017 (2): 11-13.
- [4] 何捷军, 杨建国, 赵龙. 铸造砂型3D打印技术应用及展望 [J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56 (3): 8-11.
- [5] KHAN M A A, SHEIKH A K. A Comparative study of simulation software for modelling metal casting processes [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2018, 17 (2): 197-209.
- [6] 倪允强, 王佳, 陈秀明, 等. 基于砂型3D打印技术的气缸体快速铸造工艺开发 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 911-915.
- [7] 徐伟业, 陈维平, 金枫, 等. 基于数值模拟和砂型3D打印的机匣整体重力铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (8): 905-910.
- [8] 杨成龙, 刘士渊, 徐宏, 等. 基于数值模拟和3D打印砂型的出气联通管铸造工艺设计及验证 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1413-1417.
- [9] 左强, 杨国娟, 洪润洲, 等. 应用砂型3D打印技术制备复杂铝合金铸件 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 493-497.
- [10] 高桂丽, 张伟坤, 杜志敏, 等. 基于喷墨3D打印的铸造砂型(芯)成形工艺参数应用研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (6): 627-631.
- [11] BRYANT N, FRUSH T, THIEL J, et al. Influence of machine parameters on the physical characteristics of 3D-printed sand molds for metal casting [J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15 (2): 361-372.
- [12] 谭锐, 尹绍奎, 姜延春, 等. 砂型喷墨3D打印用呋喃树脂的制备工艺与性能研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1217-1222.
- [13] 余洛生, 刘丰, 刘丽敏, 等. 3D打印呋喃树脂砂型成形精度研究与控制 [J]. 铸造, 2022, 71 (11): 1407-1412.
- [14] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 368-388.

Development and Verification of Shell Low Pressure Die Casting Process Based on Sand Mould 3D Printing Technology

AI Yu-meng¹, YOU Zhi-yong¹, LIU Shi-long¹, ZHANG Sheng-hui², LI Cheng-kun², TAN Rui³

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. KANGSHUO (Shanxi) Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Gaoping 046700, Shanxi, China; 3. State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

The shell casting has characteristics of complex internal cavity and thin-walled structure, therefore, it is not only difficult to adopt the traditional method of molding, but also from the mould design to the development and verification of the overall casting process, has characteristics of long cycle and low efficiency. Thus, the production cost is increased. Based on the advantages of 3D sand printing technology, this experiment adopted the shape design scheme for the shell pouring system to realize the integrated structure forming manufacturing of cavity and blade. Combined with the numerical simulation calculation and analysis, the pouring process was optimized, and the pouring trial production and casting detection were carried out. The results showed that the 3D sand printing integral forming process could achieve the short period, low cost and high precision manufacturing of complex structure shell, and realize the rapid manufacturing of process samples.

Key words:

sand mould 3D printing; foundry process; numerical simulation; fast customization