

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5241

低压铸造燃油壳体 3D 打印砂型特性及涂料工艺

张龙光¹, 周学才¹, 林波², 肖华强²

(1. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 燃油壳体内部结构日趋复杂, 采用 3D 打印低压砂型铸造工艺可满足其生产技术要求。但是对砂型、涂料性能也提出了新要求。本研究使用智能型砂强度仪、发气量测试仪以及透气性测定仪, 分析了树脂含量对砂型强度、发气量和透气性的影响。在此基础上, 研究了涂料工艺对 3D 打印砂型发气量和透气性的影响。当树脂含量为 1.2%, 涂料波美度为 20°Bé, 且浸涂时间为 4 s 时, 砂型试样的抗压强度可达 3.6 MPa, 发气量和透气性分别能达到 9.1 mL/g 和 32 cm³/(g·min), 3D 打印砂型具有较好的强度、发气量及透气性。优化后的验证生产表明, ZL114A 铝合金低压砂型铸造燃油壳体气孔缺陷得以消除。

关键词: 低压砂型铸造; 3D 打印砂型; 涂料; 发气量; 透气性

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)09-1072-06

Characteristics of 3D Printed Sand Molds and Coating Processes for Low Pressure Casting Fuel Housings

ZHANG Longguang¹, ZHOU Xuecai¹, LIN Bo², XIAO Huaqiang²

(1. AECC Guizhou Honglin Aeroengine Control Technology Co., Ltd., Guiyang 550009, China; 2. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The internal structure of fuel housing is becoming increasingly complex. The 3D-printed sand mold low-pressure casting process can meet its production requirements. However, it also imposes new demands on the sand mold and coating properties. An intelligent sand strength tester, gas evolution tester, and permeability tester were used to analyse the effects of the resin content on the sand mold strength, gas evolution, and permeability. Therefore, the influence of the coating process parameters on gas evolution and permeability in 3D-printed sand molds was investigated. Under the conditions of a 1.2% resin content, a 20°Bé Baumé degree for the coating and a 4 s dipping time, the compressive strength of the sand mold sample reaches 3.6 MPa, with a corresponding gas evolution rate and permeability coefficient of 9.1 mL/g and 32 cm³/(g·min), respectively. The 3D-printed sand mold demonstrates favourable strength, gas evolution, and permeability. Validation production via optimized parameters demonstrates that gas porosity defects in ZL114A sand mold low-pressure cast fuel housings are eliminated.

Key words: low-pressure casting; 3D printed sand mold; coating; gas evolution; permeability

燃油壳体作为航空发动机燃油系统中的关键部件,其质量和性能直接关系到整个发动机的稳定性和可靠性。随着航空发动机性能需求的提升,航空燃油壳体内部结构日趋复杂,对燃油壳体的制造要求也越来越高,不仅需要具备高强度、高精度和良好的密封性,还要求具备较长的使用寿命和较低的废品率^[1-3]。传统的砂型铸造工艺虽然具有广泛的适应性,但

在燃油壳体的制造过程中,由于燃油壳体结构复杂、壁厚不均,以及铸件在充型和凝固过程中易产生各种缺陷,使得传统砂型铸造工艺难以满足高质量、高效率的生产需求^[4]。3D 打印低压砂型铸造工艺作为一种新的铸造技术,其具备较好的结构设计自由度和平稳的充型能力,尤其适合燃油壳体的铸造生产。

近年来,低压砂型铸造工艺已成功应用于复杂

收稿日期: 2025-11-06

基金项目: 贵州省基础研究计划重点项目(黔科合基础-ZK[2024]重点 031); 企业委托项目(2024520103000658)

作者简介: 张龙光, 1974 年生, 学士, 高级工程师。主要从事铸造工艺工作。Email: 764491313@qq.com

通信作者: 肖华强, 1983 年生, 博士, 教授。研究方向为高性能轻合金及其复合材料。Email: xhq-314@163.com

引用格式: 张龙光, 周学才, 林波, 肖华强. 低压铸造燃油壳体 3D 打印砂型特性及涂料工艺[J]. 铸造技术, 2026, 47(9): 1072-1077.

ZHANG L G, ZHOU X C, LIN B, XIAO H Q. Characteristics of 3D printed sand molds and coating processes for low pressure casting fuel housings[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1072-1077.

铝合金壳体的铸造生产实践当中。金延竹等^[5-6]采用低压砂型铸造工艺成功实现了铝合金水冷电机壳的生产,通过冒口和浇注系统的合理设计解决了电机壳上下端面及侧壁的缩松问题,满足了侧壁环绕冷却水套的密封问题。石飞等^[7]采用低压砂型铸造试制了薄壁复杂 A201 铝合金壳体,研究表明排气顺畅、充型平稳是保证铸造质量的关键因素。传统的冷芯盒和热芯盒已经无法满足高集成度复杂内腔结构燃油壳体的开发,3D 打印砂型技术提供了解决方案。郑行^[8]采用 3D 打印技术直接制备了带浇注系统的整体砂型,并采用低压铸造技术成功实现了航空发动机滑油泵的铸造生产。3D 打印砂型的树脂含量对砂型强度、发气量和透气性具有重要的影响^[9]。此外,通过在砂型表面涂刷一层特定的涂料,可以显著提高铸件的质量和尺寸精度,尤其是获得高表面质量的油路内腔,从而提高燃油壳体的整体质量和性能^[10-13]。但是,涂料工艺也显著影响砂型的发气量尤其是透气性,这些都给砂型低压铸造工艺的设计和应用带了挑战。

本文基于某铝合金航空燃油壳体铸造生产中的实际问题,从 3D 打印砂型特性和涂料工艺两个方面开展研究,系统研究树脂含量和涂料工艺对砂型试样强度、发气量和透气性的影响,获得综合优化后的 3D 砂型及涂料涂覆工艺,通过生产验证解决复杂燃油壳体低压铸造生产中的气孔缺陷。相关结论可为铝合金复杂壳体类零件的 3D 打印砂型低压铸造生产提供借鉴。

1 实验材料与方法

1.1 3D 打印砂型

实验用砂为 70~140 目的石英砂,根据实验设计添加不同含量(0.8%、1.2%、1.6%、2.0%,质量分数,下同)的呋喃树脂。根据试样及验证生产要求,利用 3D 砂型打印机直接完成试验砂块以及验证砂型的打印。

1.2 发气量测试

使用 FQX-2000 高智能造型材料发气性测试仪测试型砂和涂料的发气量。将待测的型砂和涂料制成粉末且混合均匀,用电子天平称 1.00 g 的待测试样粉末,测试时将称好的粉末放入烧舟中,当高温分解炉温度上升至 710 ℃后,将烧舟推入分解炉的恒温区,迅速盖上密封盖,设备自动记录发气量,测试时间为 100 s。

1.3 透气性测试

利用 ZTY 智能透气性测定仪测试不同树脂含

量 3D 打印砂块的透气性。透气性测试采用标准圆柱试样,试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。测试方法为将打印的试样放在带有橡皮圈的试样筒内,随后进行充气密封,然后放到试样座上进行测定。透气性测试气源压力为 $(981 \pm 5) \text{ Pa}$ ($100 \text{ mm H}_2\text{O}$),气体介质为空气。

1.4 性能测试

选择不同树脂含量的型砂制备室温强度测试试样,使用 XQY-II 智能型砂强度仪研究型砂室温条件下的力学性能。利用 XQY-II 智能型砂强度机测试砂型的抗拉强度、抗压强度。其中,测试抗拉强度的试样为标准“8”字试样,抗压所用的试样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 圆柱形试样。其中,每种试样至少进行 3 组重复试验,以保证数据准确性。

2 实验结果及讨论

2.1 树脂含量对砂型的影响

2.1.1 强度性能

不同含量树脂下型砂的抗拉强度和抗压强度是砂型铸造中需要重点关注的技术指标。通过对树脂含量的调整,可以有效提高型砂的力学性能,保证铸件的质量和稳定性^[14-15]。砂型在铸造过程中需承受来自熔融金属的挤压和拉伸力,而高抗拉强度能够有效减少砂型的变形和破裂,保证铸件的尺寸和形状精度。但是过高的树脂含量会导致砂型退让性和溃散性较差,还增加砂型的发气量、降低透气性。根据企业生产中实际树脂使用范围,图 1 测试了树脂含量在 0.8%~2.0%之间的力学性能。图 1a 实验结果表明,树脂含量的增加可以提高型砂的抗拉强度,使得砂型更加坚固耐用,在 2.0% 含量下抗拉强度达到最大。从图 1b 中也可看出,随着树脂含量从 0.8%~1.6%,型砂抗压强度显著上升,当树脂含量进一步增加至 2.0% 时,其抗压强度仅有少量增加。对于树脂砂而言,随树脂含量增加,型砂强度呈单峰特征,即一开始随树脂含量增加型砂强度上升,当树脂含量过高时,型砂强度也会下降^[16-17]。过高的树脂含量会堵塞砂粒间隙,会导致落砂困难和气孔缺陷。

2.1.2 发气量和透气性

在铸造过程中,树脂会因高温而分解,产生大量气体,这些气体需顺利从铸型中排出,否则会在铸件内部形成气孔,影响零件的质量。当树脂的含量增加时,从铸型中排出的气体量也会随之增加。这是因为更多的树脂分解会产生更多的气体,而这些气体需要通过一定的通道排出。因此,随着树脂含量的增加,铸件内部的气体排出将变得更为困难,容易导致

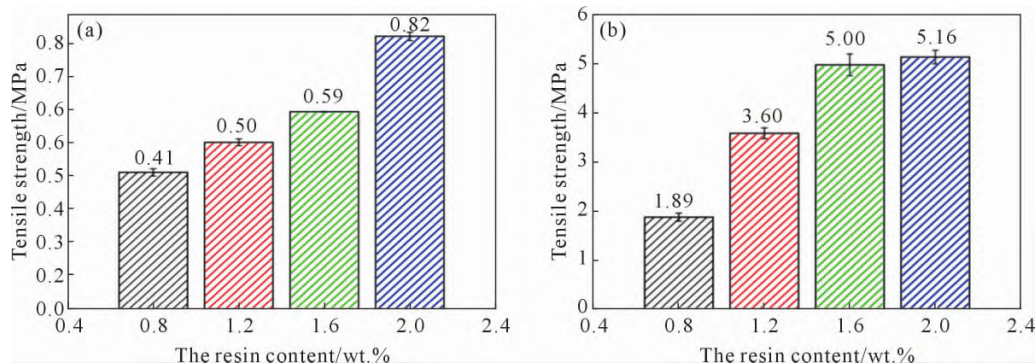


图1 不同含量树脂下砂型性能分析:(a) 抗拉强度;(b) 抗压强度

Fig.1 Analysis of the properties of sand molds with different resin contents: (a) tensile strength; (b) compressive strength

气孔的产生。另一方面,树脂含量的增加也会影响铸模的机械性能。过多的树脂会导致铸模变得过分脆弱,容易在浇注过程中发生破裂。因此,在确定树脂含量时,需兼顾铸模强度和发气性能,以保证铸件的质量。在实际生产中,为有效控制树脂含量和发气量的关系,可通过调整树脂配方和加工工艺来达到最佳效果。图2展示了不同含量树脂下的发气量演变结果。从结果可以分析,随树脂含量增加,发气量呈现逐步上升的趋势(2.83 mL/g 逐渐增加至 10.70 mL/g)。因此,后续需要在铸造过程中及时监测气孔的情况,进行必要的调整和改进。

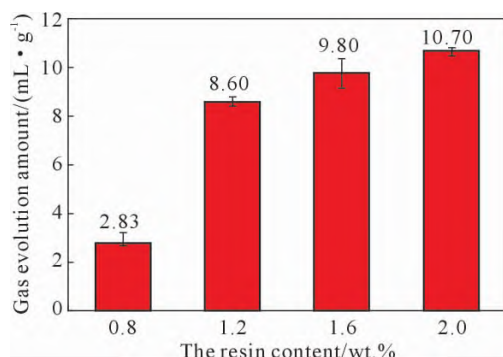


图2 不同含量树脂发气量分析

Fig.2 Analysis of gas emission volume with different resin contents

图3给出了不同树脂含量砂型的透气性测试结果。可以发现,随着树脂含量的增加,砂型的透气性略微降低,但是总体而言其差别不大。可见,在企业实际工艺范围内,树脂含量对其发气量影响较大,而对透气性影响较小。树脂在高温下分解是型砂发气量的主要来源,因而其含量对发气量影响显著。而型砂整体的透气性不仅受树脂含量影响,同时更重要的是原砂的粒度及形态^[18]。在本实验测试条件下,可见型砂整体透气性受砂粒本身物性影响更大,受树脂含量(0.8%~2.0%)影响较小。

综上所述,随树脂含量增加,树脂渗透、扩散形成的黏结桥接作用在增强,砂型强度显著提升。

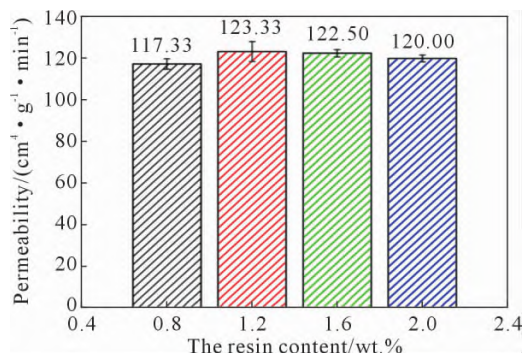


图3 不同含量树脂下砂型的透气性结果

Fig.3 Permeability results of the sand molds with different resin contents

砂型中树脂在高温下分解产生的气体量增加,砂型发气量显著提升。但是由于总的树脂含量较低,砂型致密度差别不大,树脂含量的提升对透气性影响不大。综合考虑实际生产当中产品结构特征,1.2%树脂含量下砂型具有较好的综合性能。

2.2 涂料工艺对砂型的影响

2.2.1 浸涂工艺

研究涂料的浸涂时间对型砂发气量和透气性的影响具有重要意义,这主要源于型砂在铸造过程中的关键作用^[19-20]。合适的浸涂时间可以确保涂料均匀覆盖在型砂表面,形成有效涂层,从而提高型砂的透气性和降低发气量。过短的浸涂时间可能导致涂料未能充分渗透和覆盖,影响涂层的质量和性能;而过长的浸涂时间则可能导致涂料过度渗透,破坏型砂的结构,降低其透气性。

从图4可以看出,随着水加入量的增加,除8s浸泡工艺外,涂料经稀释后发气量整体呈现先降低后增加的趋势,尤其水溶液为200mL浸泡时间为4s时,发气量达到最低。这意味着在实际应用中,为了控制树脂砂的发气量,水溶液添加最好不要超过200mL。此外,浸泡时间较短或延长,也会导致发气量的增长。因此,型砂的发气量取决于涂料浸涂过程中的多种因素,浸泡时间及涂料稀释率都会对发气量

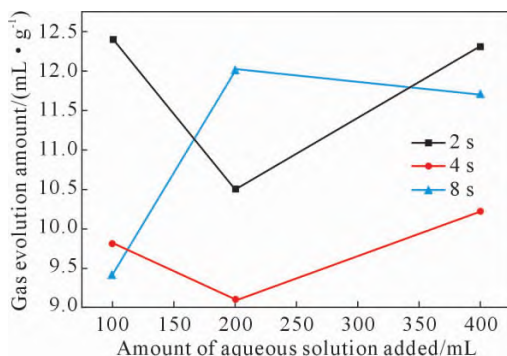


图4 不同涂料稀释程度及浸涂时间的型砂发气量结果
Fig.4 Gas emission results of molding sand with different coating dilutions and immersion times

有重要影响,需要根据具体的铸造要求和生产条件来进行合适调节。

一般来说,浸涂时间过长往往会导致砂粒之间的间隙被涂层所填充,从而降低了砂型的透气性,这一现象在浇铸过程中尤为明显,可能导致气体无法顺利逸出,进而引发铸造缺陷,如气孔、夹沙等问题。相反,适中的浸涂时间能够在确保砂型强度和表面光滑度的同时,保持良好的透气性,从而促进熔融金属的顺利铸造。因此,找到一个最优的浸涂时间,以达到砂型强度与透气性的平衡,是提升铸件质量及生产效率的重要措施。在实际应用中,需通过试验与工艺调控,综合考虑材料特性与生产需求,以实现最佳的铸造效果。

从图5可以看出,随着涂料稀释程度(即水溶液加入量)的增加,透气性表现出明显的递增趋势。涂料的涂覆对于铸造表面质量而言尽管好处明显,但无可避免地在一定程度上会影响气体流通性,而较低浓度的涂料则会对透气性有较好优化效果。因此,从图5中涂料浸泡时间判断,型砂较短时间内即可达到良好的透气效果。

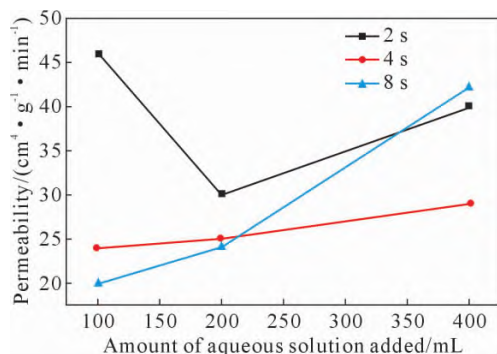


图5 不同涂料稀释程度及浸涂时间的透气性结果
Fig.5 Permeability results of molding sand with different coating dilutions and immersion times

从上述结果可以看出,浸涂涂料后整体型砂的发气量有少许增加,这是由于涂料中含有的部分高分子材料分解所致。相比于发气量,更重要的是涂料

工艺对透气性的影响。浸涂涂料后砂型的透气性显著下降。在发气量较大、砂型排气设计不畅的条件下,会显著提高型内气体压力,不仅对补缩产生影响,无法逸出的气体还容易形成气孔缺陷。但是在燃油壳体实际生产中还需保证复杂内腔的表面质量。因此,在实际铸造生产过程中,基于涂料浓度确定的条件下,需综合考虑发气量和透气性效果,以保证后续铸件的质量。从目前试验结果和生产情况来看,对本铸件而言,浸涂时间在2~4 s时发气量和透气性相对较好。

2.2.2 涂料黏度

砂型用涂料的黏度测试是确保铸造过程中产品质量的重要环节。该测试主要通过一系列精确的方法来评估涂料的黏稠度及其成分比例,从而确定其在砂型铸造工艺中的适用性和稳定性^[2]。波美度法测试黏度在实际铸造生产中展现出其独特的优势。波美度测量操作简便快捷,能够快速提供涂料浓度的直观数据,这对于铸造生产中需要频繁监测涂料状态以确保铸件质量至关重要。此外,波美度与涂料的某些关键性能如流动性、附着力和覆盖能力等有一定的相关性,通过波美度的测量可以在一定程度上预测涂料在铸造过程中的表现,从而帮助生产者及时调整涂料配方或工艺参数,以达到最佳的铸造效果。

图6a展示了不同波美度条件下砂型的透气性结果,根据理论推断,透气性数值越高越好。但涂料的使用需要综合考虑其铸造过程中的防护效果,低于20°Bé时的涂料过于稀薄,涂覆效果较差。而过高的波美度除了影响透气性外,过厚的涂料将在烘干后引起掉渣脱落现象,如图6b所示。综合考虑透气性和涂料防护效果,涂料波美度为20°~24°Bé时效果最佳。根据上述研究结果,当树脂含量为1.2%,涂料波美度为20°~24°Bé,且浸涂时间为2~4 s时,3D打印砂型具有较好的强度、发气量及透气性。优化后的验证生产表明,ZL114A铝合金低压砂型铸造燃油壳体气孔缺陷得以消除。

3 结论

(1)树脂含量对砂型强度影响非常大,随着树脂含量上升,砂型强度显著上升。此外,树脂含量增加,型砂发气量明显上升,当树脂含量为1.2%和1.6%时,其发气量分别为8.6和9.8 mL/g,差异并非十分明显。

(2)在其他条件相同时,浸涂时间决定了砂型的发气量和透气性,浸涂时间在2~4 s时型砂的发气量和透气性综合效果最佳。

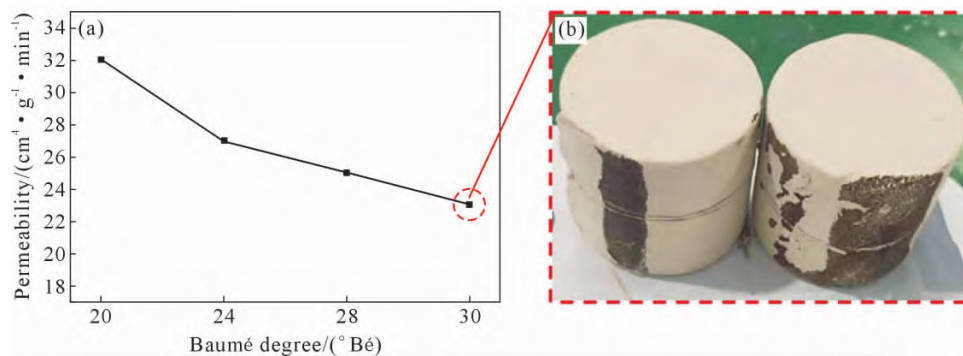


图6 不同波美度条件下砂型的透气性结果及高波美度条件下涂料涂挂烘干后的实物图:(a) 砂型透气性;(b) 实物图

Fig.6 Permeability results of the sand molds with different Baumé degrees and photographs of the coatings applied and dried with high Baumé degrees: (a) permeability results of the sand molds; (b) photograph

(3)较低波美度时(低于 20°Bé)的涂料过于稀薄,涂覆效果较差。而过高的波美度(30°Bé)除了影响透气性外,过厚的涂料将在烘干后引起掉渣脱落现象,因此,综合考虑透气性和涂料防护效果,建议选择波美度为 20°~24°Bé。

参考文献:

- [1] 张晓东,吴宝海,罗明,张定华. 航空发动机燃油控制系统复杂零件制造技术发展[J]. 航空制造技术, 2015(12): 55-58.
ZHANG X D, WU B H, LUO M, ZHANG D H. Development tendency of complex component manufacturing of aeroengine fuel control system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (12): 55-58.
- [2] 张晓东,韩策. 航空复杂壳体零件深孔加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2017(15): 50-57.
ZHANG X D, HAN C. Research review of deep hole machining technology for complex shell part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(15): 50-57.
- [3] 杨立新,毛娜,王江云,卢书勇,王勇. 燃油控制系统复杂铝合金壳体铸造技术[J]. 航空动力, 2019(3): 29-30.
YANG L X, MAO N, WANG J Y, LU S Y, WANG Y. Casting technology of complex aluminum alloy housing for fuel control system[J]. Aerospace Power, 2019(3): 29-30.
- [4] 罗传彪. 提高 ZL105A 燃油壳体铸件力学性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
LUO C B. Research on the mechanical performance improvement of ZL105A Fuel adapter[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [5] 金延竹,孙树臣,王文权,崔伟,冯海舟,黄海波,詹健. 铝合金电机壳低压砂型铸造工艺设计[J]. 铸造, 2022, 71(2): 198-202.
JIN Y Z, SUN S C, WANG W Q, CUI W, FENG H Z, HUANG H B, ZHAN J. Process design of low pressure sand casting for aluminum alloy motor shell[J]. Foundry, 2022, 71(2): 198-202.
- [6] 金延竹,崔伟,孙树臣,王成刚,冯海舟,黄海波,张云峰,吴景波. 铝合金电机壳铸件的工艺开发[J]. 铸造技术, 2021, 42(11): 937-942.
JIN Y Z, CUI W, SUN S C, WANG C G, FENG H Z, HUANG H B, ZHANG Y F, WU J B. Discussion on the development of aluminum alloy motor housing castings[J]. Foundry Technology, 2021, 42(11): 937-942.
- [7] 石飞,冯志军,荣福杰,曲银辉. 薄壁复杂 A201 铝合金壳体铸件的试制[J]. 铸造, 2015, 64(2): 171-174.
SHI F, FENG Z J, RONG F J, QU Y H. Manufacturing of thin wall complex shell casting of A201 aluminum alloy[J]. Foundry, 2022, 71 (2): 171-174.
- [8] 郑行. 基于 3D 打印砂型滑油泵铸件整体铸造研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
ZHENG H. A study of integral casting for lube oil pump based on 3D printed sand mould[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [9] 洪海春,邵春艳,徐继福,李斌,景文霞,王凯强. 3D 打印砂型性能影响因素研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(8): 688-690.
HONG H C, SHAO C Y, XU J F, LI B, JING W X, WANG K Q. Study on the influencing factors of 3D printing sand mold performance[J]. Foundry Technology, 2021, 42(8): 688-690.
- [10] 孙国进,张守军. 搅拌时间和放置时间对消失模空壳铸造涂料性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(1): 142-146.
SUN G J, ZHANG S J. Effect of mixing time and standing time on properties of lost foam shell cast coating[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(1): 142-146.
- [11] 刘立强,刘婧,王振果,李继超. 铸造工艺中涂料的应用及控制[J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(4): 87-90.
LIU L Q, LIU J, WANG Z G, LI J C. Application and control of coatings in casting process[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(4): 87-90.
- [12] 王艳辉,莱恩哈特,刘生寅. 铸造涂料在灰铸铁缸体上的选配及应用[J]. 现代铸铁, 2021, 41(2): 44-50.
WANG Y H, REINHART S, LIU S Y. Selection making-up and application of casting coating on gray iron cylinder block[J]. Modern Cast Iron, 2021, 41(2): 44-50.
- [13] 刘军晖,温洪洪,陈世斌,张世伟. 4H 缸体水套内腔烧结粘砂缺陷分析及对策[J]. 铸造技术, 2020, 41(11): 1050-1053.
LIU J H, WEN H H, CHEN S B, ZHANG S W. Analysis and countermeasures of sand sintering defects in water jacket cavity of 4H cylinder block[J]. Foundry Technology, 2020, 41(11): 1050-1053.
- [14] 黄金鑫,蔡森,王恒. 不同添加剂配比对镁合金砂型铸造用树脂砂性能的影响研究[J]. 山西冶金, 2024, 47(7): 7-8, 14.
HUANG J X, CAI S, WANG H. Study on the effect of different additive ratio on the properties of resin used for sand casting of magnesium alloy[J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(7): 7-8, 14.
- [15] 任现伟. 混砂工艺和芯砂对粘土湿型砂性能的影响[J]. 铸造,

- 2023, 72(4): 431-436.
- REN X W. Effect of sand mixing process and core sand on properties of green sand[J]. Foundry, 2023, 72(4): 431-436.
- [16] 李明波.砂型 3D 打印技术在铸造中应用现状及展望[J]. 铸造, 2025, 74(10): 1411-1416.
- LI M B. Research on current applications and future prospects of sand mold 3D printing technology in casting[J]. Foundry, 2025, 74(10): 1411-1416.
- [17] 陈志平,叶福源. 树脂和热处理对 3D 打印成形砂型抗拉强度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1380-1384.
- CHEN Z P, YE F Y. Effects of resin content and heat treatment temperature on the tensile strength of sand molds fabricated by three-dimensional printing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(12): 1380-1384.
- [18] 杨兴翔,夏永喜,李沛根. 基于 3D 打印的高压开关铝合金壳体铸造成型工艺[J]. 铸造技术, 2026, 47(1): 108-113.
- YANG X X, XIA Y X, LI P G. Casting forming process of a certain type of high-voltage switchgear cast aluminium alloy shell based on 3D printing[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 108-113.
- [19] 丁业腾,石利彤,姚平坤,姚山. 水基涂料涂覆工艺对 3D 打印砂型表面质量影响的研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(5): 7-12.
- DING Y T, SHI L T, YAO P K, YAO S. Study on the effect of water-based coating process on the surface quality of 3D printed sand molds[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2024, 59(5): 7-12.
- [20] 李娜,伍启华,黄小帅,张文强. 砂型铸造涂料透气性检测技术研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(5): 63-65.
- LIN W Q H, HUANG X S, ZHANG W Q. Research on permeability testing technology for sand casting coatings [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(5): 63-65.
- [21] 周景吉,闫德刚,赵亚宁. 铸造砂芯表面浸涂涂料搅拌及配比的控制方法研究[J]. 科技与创新, 2024(9): 79-82.

(责任编辑:杨浩雪)