

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.003

砂型增材制造表面质量精准调控工艺

宋魏飞^{1,2}, 单忠德^{1,2,3}, 杨浩秦^{1,2}, 任洪稳^{1,2}, 闫丹丹^{2,3}, 姜二彪⁴

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106;

2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016;

3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 4. 通用技术集团机床工程研究院有限公司, 北京 100000)

摘要: 针对砂型增材制造出现的成形精度和表面质量不高等问题, 本文系统地研究了打印工艺参数和砂型表面粗糙度之间的关系, 并验证砂型打印自适应切片优化砂型表面质量的可行性。通过设计定倾角砂型打印响应面实验研究树脂质量百分数、分层层厚和型砂目数对砂型表面粗糙度的影响, 优化打印工艺参数, 设计变倾角砂型打印正交试验研究分层层厚和打印倾角影响砂型表面粗糙度的显著性, 并选取叶轮下砂型验证自适应切片工艺。研究结果表明: 树脂质量百分数 2.08%、分层层厚 0.3 mm、型砂 100/200 目时, 定倾角砂型具有较好的表面质量。在打印垂直方向上具有曲率变化的砂型时, 打印倾角对砂型打印样件表面粗糙度影响较大, 并提出一种自适应分层切片工艺打印叶轮下砂型, 与传统等厚分层工艺相比, 尺寸精度和表面粗糙度分别提高了约 51.03% 和 30.11%。本文基于砂型打印表面粗糙度开展基础工艺调控研究, 相关研究结论有助于进一步实现复杂结构砂型高精高效增材制造。

关键词: 砂型增材制造; 表面粗糙度; 自适应切片; 工艺优化; 高精高效制造

中图分类号: TG242.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)01-0034-11

Precise Regulation Process of Surface Quality of Sand Mold Additive Manufacturing

SONG Weifei^{1,2}, SHAN Zhongde^{1,2,3}, YANG Haoqin^{1,2}, REN Hongwen^{1,2},

YAN Dandan^{2,3}, JIANG Erbiao⁴

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. GENERTEC Machine Tool Engineering Research Institute Co.,

Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor forming accuracy and low surface quality in sand mold additive manufacturing, this paper systematically studies the relationship between printing process parameters and sand mold surface roughness, and verifies the feasibility of sand mold printing adaptive slicing for optimizing sand mold surface quality. The influence of resin content, layer thickness and sand mesh on sand surface roughness is studied by designing the response surface experiment of sand print with constant inclination

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3401200); 装备预研专用技术项目(30104040302); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金(BK20230885); 教育部可持续制造国际合作联合实验室, 中央高校基本科研业务费(NG2024012)。

收稿日期: 2024-05-30; **修订日期:** 2025-01-03

通信作者: 单忠德, 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn; 杨浩秦, 男, 副研究员, E-mail: yang-haoqin@nuaa.edu.cn。

引用格式: 宋魏飞, 单忠德, 杨浩秦, 等. 砂型增材制造表面质量精准调控工艺[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 34-44. SONG Weifei, SHAN Zhongde, YANG Haoqin, et al. Precise regulation process of surface quality of sand mold additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 34-44.

angle, and the printing process parameters are optimized. The orthogonal test of sand print with variable inclination angle is designed to study the significance of layer thickness and print angle on sand surface roughness, and the impeller sand mold is selected to verify the adaptive slicing process. The results show that the surface quality of sand mold with constant angle is better when resin content is 2.08%, layer thickness is 0.3 mm and sand is 100/200 mesh. When the sand mold with curvature change in the vertical direction is printed, the printing angle has a great influence on the surface roughness of the sand sample. An adaptive slicing process is proposed to print the impeller sand mold. Compared with the sand mold prepared by traditional equal thickness stratification, the dimensional accuracy and surface roughness of the sand mold with adaptive layering are increased by about 51.03% and 30.11%. The basic process control research based on the surface roughness of sand mold printing is carried out. The relevant research conclusions are helpful to realize the high precision and high efficiency additive manufacturing of sand mold with complex structure.

Key words: sand mold additive manufacturing; surface roughness; adaptive slicing; process optimization; high-precision and high-efficiency manufacturing

铸造业是民生大计的基础保障,是航空航天、汽车船舶和动力机械等支柱产业的基础工艺,是制造业不可或缺的组成部分^[1-3]。传统铸造技术结合增材制造而衍生的砂型3D打印技术^[4],是基于离散-堆积原理,由切片软件将3D砂型模型离散分层,层层铺砂并选择喷射树脂粘接剂,经固化剂交联反应得到实体砂型的“近净成形”技术^[5-7]。砂型3D打印技术成形效率高、成形尺寸大,有柔性化、快速化和智能化等优势,因此具有广阔应用前景^[8-9]。

近年来,砂型3D打印发展十分迅速,自动化程度进一步提高^[10-13]。但目前关于砂型打印工艺的研究主要围绕着砂型的强度、发气量、透气性和热物性能等铸造性能展开^[14-19],而关于砂型表面质量精准调控的研究有限。砂型打印因为分层厚度和模型曲率的存在,表面会出现明显的台阶梯度和台阶效应。北京轻量化院的李征等^[20]研究了树脂渗透对砂型尺寸精度的影响规律,并建立了相应的理论模型,研究结果表明渗透过程通过树脂黏度、水力半径和渗透压力3个因素影响砂型精度。中国机械科学研究总院的余洛生等^[21]系统研究了型砂目数、树脂质量百分数和固化剂含量等打印工艺参数对成形精度的影响规律,研究结果表明型砂目数和树脂喷射量两个参数对成形精度影响较为明显,打印误差随砂粒直径减小而变小,随树脂质量百分数提高而变大,固化剂含量对砂型精度影响较小。为了改善打印砂型的表面质量与成形精度,国内外学者也开展了一系列相应的研究。河北工业大学的杨伟东等^[22-23]聚焦打印过程中的渗透误差,针对渗透造成的误差提出了一种补偿算法,将渗透误差分解为水平和竖直方向的两个分量,并对它们进行补偿,试验结果表明补偿后砂型其尺寸误差和圆度误差均得到显著改善。清华大学的马旭龙^[24]在前述补偿算法的基础上,将球面立体光刻(STereoLithog-

raphy,STL)模型沿X、Y和Z方向分别转化成不同轴长的椭球体,从而在STL文件上对砂型的渗透误差进行补偿,同样提高了砂型的精度。杨百翰大学的Nathan^[25]设计了一端加热的打印装置,研究加热工艺和多层打印粘接剂沉积过程对砂型精度的影响,发现加热工艺可以有效限制粘接剂在X、Y方向上的扩散,从而提高砂型的打印精度,一定程度上解决树脂渗透影响砂型精度的问题。

在上述国内外学者研究的基础上,南京航空航天大学绿色智能制造装备团队进一步系统地研究砂型打印工艺参数对砂型表面质量的影响规律,提出一种优化砂型表面质量的工艺,减少台阶效应对砂型表面质量影响,对实现砂型增材制造快速工程化应用具有十分重要的理论和现实意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验条件

采用数字化多材质砂型整体打印成形装备(NUAA-3DP 400)进行砂型增材制造表面精度调控工艺研究。其中,打印型砂由天津致勤生产,试验采用的型砂目数包括50/100目、70/140目和100/200目,粒度分布较为集中。打印固化剂和呋喃树脂粘接剂均由济南圣泉集团股份有限公司生产,呋喃树脂(SQ3D200)密度 1.14 g/cm^3 ,pH值6.6,黏度 $11 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,固化剂(GS3D300)密度为 1.2 g/cm^3 ,pH值小于1,黏度小于 $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,打印时固化剂质量百分数选用0.2%^[26]。

测试设备是保证试验结果可靠性的关键。采用奥林巴斯激光扫描共聚焦显微镜(OLS5100)测量和计算砂型的表面粗糙度,其宽广测量范围与低噪特性能够确保获得满足表面结构分析基本要求的测量结果,如图1(a)所示。采用多功能激光手持三维扫描仪(FreeScan UE Pro)对打印砂型进行逆向建模生成3D模型,并通过辅助软件Geomagic

Control进行打印样件扫描模型和设计模型尺寸偏差计算,衡量打印砂型的尺寸精度,如图1(b)所示。

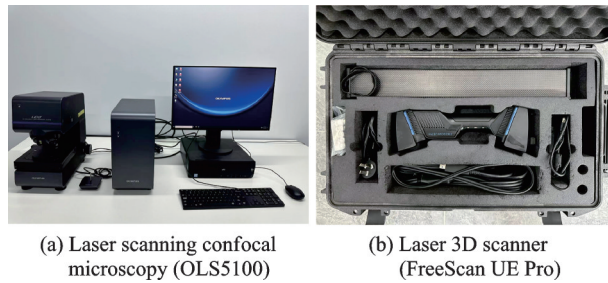


图1 测试分析仪器

Fig.1 Test and analysis instruments

1.2 试验方案

1.2.1 定倾角砂型打印响应面试验设计

响应面设计方法是寻求最佳参数设计的一种统计方法,用于解决多变量问题。该方法通过设计实验得到一系列数据,并采用多元二次回归方程拟合得到各因素与响应值之间的函数关系,分析回归方程寻求最佳的工艺参数。

在不考虑打印模型在竖直方向上曲率变化(定倾角)的条件下,针对本试验的砂型打印过程,砂型表面质量的好坏是打印基础工艺参数(树脂质量百分数 A 、分层厚度 B 和型砂目数 C)共同作用的结果,首先开展单因素试验探究打印基础工艺参数对砂型表面质量的影响规律。并在单因素试验的基础上,利用 Design-Expert 软件进行实验设计,建立 3 水平 3 因素的 Box-Behnken 响应面模型,具体实验参数设计如表 1 所示。

表 1 响应面实验因素水平

| 水平 | 树脂质量百分数 $A/\%$ | 分层厚度 B/mm | 型砂目数 C |
|----|----------------|--------------------|----------|
| -1 | 2.08 | 0.3 | 50/100 |
| 0 | 2.84 | 0.45 | 70/140 |
| 1 | 3.45 | 0.6 | 100/200 |

本试验打印的砂型试样是尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的长方体样块,测量试样侧表面粗糙度,并以表面粗糙度为响应模型优化工艺参数,进一步确定定倾角砂型打印的优化参数组合,同时为后续变倾角打印工艺试验提供依据。

1.2.2 变倾角砂型打印正交试验设计

考虑到实际打印模型在竖直方向上多为斜面或曲面,采用定倾角砂型打印响应面优化的基础工艺参数在打印砂型时仍不能取得理想打印效果,打印砂型的台阶效应较为明显。台阶效应一方面受打印模型竖直方向上曲率变化的影响,另一方面受打印分层厚度的影响。

在本试验中,通过改变 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$

长方体样块的摆放角度以获得不同的打印倾角,模拟实际砂型在竖直方向上不同的曲率特征,如图 2 所示。开展变倾角砂型打印正交试验,对打印倾角 D 和分层厚度 B 两个因素进行分析,选取的分层厚度范围为 $0.3 \sim 0.6\text{ mm}$,变倾角砂型打印正交试验参数如表 2 所示。本试验的目的在于研究打印倾角和分层厚度对砂型表面粗糙度的影响规律,确定打印倾角和分层厚度对砂型表面质量影响的显著性水平,打印倾角和分层厚度两个因素取 4 个水平,因此可选用正交表 $L_{16}(4^2)$ 。

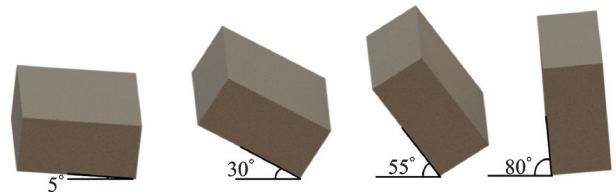


图 2 摆放角度示意图

Fig.2 Arrangement angle diagrams

表 2 正交实验因素水平

| 水平 | 打印倾角 $D/(\text{°})$ | 分层层厚 B/mm |
|----|---------------------|--------------------|
| 1 | 5 | 0.3 |
| 2 | 30 | 0.4 |
| 3 | 55 | 0.5 |
| 4 | 80 | 0.6 |

1.3 砂型打印自适应分层理论

分层切片处理是砂型打印必不可少的工艺环节之一。在砂型打印过程中,需在切片软件中导入 STL 格式的砂型/芯模型,确定分层厚度,输出切片信息,并根据切片结果通过砂型打印设备打印制备砂型。切片结果极大地影响了砂型成形效率与产品精度,因此切片软件的开发设计与优化是砂型打印的关键环节。大多数砂型打印设备上采用的是基于等厚分层原理的切片软件,各切片分层均采用相同的分层厚度,无需考虑砂型结构特征,因而得到广泛应用。但当分层厚度较大时,砂型物件往往存在明显台阶效应,整体表面质量差;而当分层厚度较小时,又会致使成形时间相对较长。

为解决上述问题,南京航空航天大学绿色智能制造装备团队提出砂型打印自适应切片工艺,并开发了相应的砂型打印自适应切片软件,其切片算法主要包括砂型模型文件的读取、法向量预处理、在与切平面相交的三角面片单位法向量中提取绝对值最大值 $|Z|_{\max}$ 以保证砂型内部的最高精度、建立拓扑邻接有序三角面片环以高效处理三角面片计算数据,算法逻辑步骤如图 3 所示^[27]。

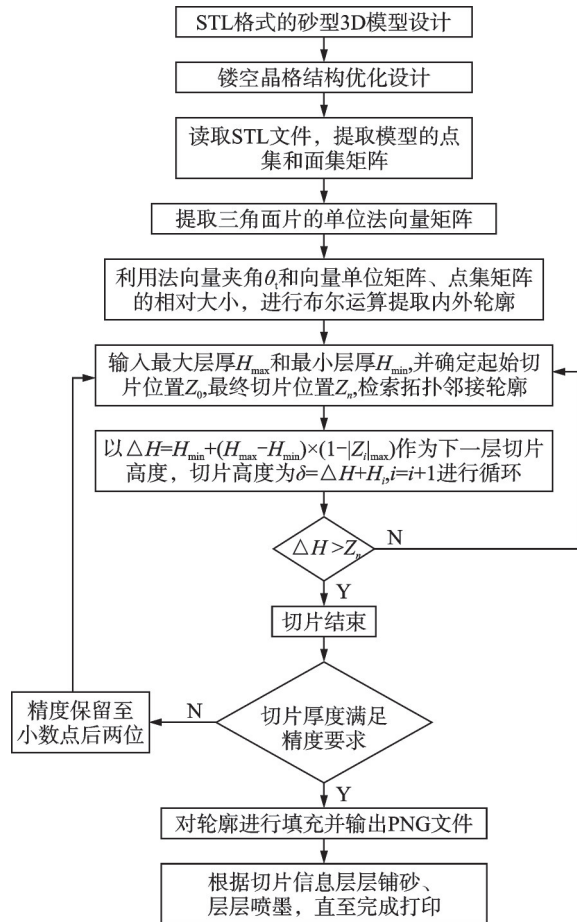


图3 砂型打印自适应分层切片逻辑图^[27]

Fig.3 Adaptive slicing logic diagram for sand printing^[27]

通过内嵌的Stread函数读取STL格式的砂型3D模型,调用Patch函数显示模型的透明度、线条颜色和三角面片点集坐标等信息,输出模型的三角面片点集和三角剖分连接列表。采用FaceNormal函数提取模型法向量,单位化处理提取的三角面片法向量,判定内外轮廓,并通过Seldiff函数提取其中的非外部轮廓,对砂型内部结构进行自适应分层。确定初始切平面、最小分层厚度、最大分层厚度和分层厚度范围,并初始化层厚为最小分层厚度,通过检索每层切平面的三角面片法向量Z'向分量的最大值计算各层的分层高度,并求取切平面与每组三角面片的交点坐标,在此基础上继续确定下一层分层厚度,直至自适应分层切片完成。采用MATLAB编程实现了上述算法。

2 试验结果分析

2.1 定倾角砂型打印试验结果分析

2.1.1 单因素对定倾角砂型打印表面质量的影响

开展单因素对定倾角砂型打印表面质量的影响研究,分别研究树脂质量百分数、分层层厚和型砂目数对砂型表面粗糙度Ra的影响规律,结果如图4所示。研究表明,砂型表面粗糙度随树脂

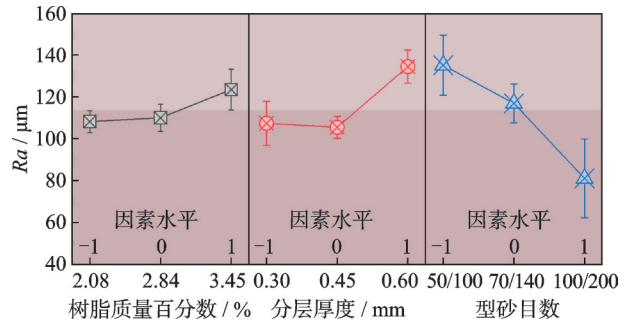


图4 单因素对定倾角砂型打印表面粗糙度的影响

Fig.4 Influence of single factor on surface roughness of fixed inclination sand mold

质量百分数的升高而增大,随分层厚度的增大先几乎不变后明显增大,随型砂目数的增大而降低,其中树脂质量百分数对砂型表面粗糙度的影响较小,而型砂目数对砂型表面粗糙度的影响最大。

树脂的渗透扩散过程是影响砂型表面质量的主要原因之一。当树脂质量百分数逐渐增大时,其在水平方向上的扩散距离也逐渐增大,最终导致砂型侧表面粗糙度的下降。分层厚度为0.6 mm的砂型表面质量较差的原因是在铺砂落砂量恒定的情况下,分层厚度越厚,粉末床致密度越低,树脂扩散更容易,进而导致成形件侧表面粗糙度较差。而随着型砂目数的提高,型砂粒径逐渐减小,粉末床中的孔隙率也随之降低,树脂在型砂颗粒间的流动性变差,渗透扩散受阻,因此当型砂目数增大时,砂型的侧表面质量显著上升。

2.1.2 定倾角砂型打印响应面试验结果

根据1.2.1节所述定倾角砂型打印响应面试验设计进行相关试验,获得的试验结果如表3所示。

表3 响应面试验结果

Table 3 Response surface test results

| 实验组 | 树脂质量百分数 A/% | 分层厚度 B/mm | 型砂目数 C | 表面粗糙度 Ra/μm |
|-----|-------------|-----------|--------|-------------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | 122.092 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 125.374 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 126.548 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 140.667 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 124.125 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 132.424 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 59.970 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 95.454 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 127.890 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 156.093 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 54.240 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 114.564 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 107.724 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 106.582 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 108.210 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 107.156 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 107.530 |

利用 Design Expert 软件对表 3 试验数据进行二次多项回归拟合,可得表面粗糙度关于树脂质量百分数 A 、分层厚度 B 和型砂目数 C 的二次多项式回归方程为

$$Ra = 105.62 + 12.65 \times A + 27.60 \times B - 18.60 \times C - 7.29 \times AB + 6.80 \times AC + 7.91 \times BC + 1.36 \times A^2 + 11.69 \times B^2 - 3.99 \times C^2$$

表面粗糙度二次回归方程方差分析见表 4,结果表明该回归方程差异极为显著($P < 0.000 1$)。表面粗糙度实际值与预测值的分布情况见图 5,数据呈现线性分布的特点。上述结果说明了该数学模型数据的预测值与实际值拟合匹配度高,具有良

好的模型拟合度。根据表 4 中 P 的大小对砂型表面粗糙度进行工艺参数的显著性分析,其中分层厚度 B 和型砂目数 C 的 P 均小于 0.000 1,说明分层厚度 B 和型砂目数 C 影响砂型表面质量最为显著,最终对砂型表面粗糙度的影响由大到小排序为:分层厚度 $B >$ 型砂目数 $C >$ 树脂质量百分数 A 。此外,3 组多因素耦合下的 P 均小于 0.5,说明耦合后对砂型表面粗糙度的影响都较为显著。由响应面方差分析可知,多工艺参数耦合下对砂型表面粗糙度的影响由大到小排序为: $BC > AC > AB$,说明分层厚度 B 和型砂目数 C 的交互作用对定倾角砂型表面粗糙度的影响比较显著。

表 4 响应面回归方程方差分析

Table 4 Analysis of variance for regression equation of response surface test

| 变量 | 平方和 | 自由度 | 均方值 | F 统计量 | P | 显著性 |
|--------------------|-----------|-----|----------|---------|----------|-----|
| Model | 11 206.34 | 9 | 1 245.15 | 44.47 | <0.000 1 | 极显著 |
| 树脂质量百分数 $A/\%$ | 1 279.78 | 1 | 1 279.78 | 45.70 | 0.000 3 | 极显著 |
| 分层厚度 B/mm | 5 875.50 | 1 | 5 875.50 | 209.82 | <0.000 1 | 极显著 |
| 型砂目数 C | 2 766.79 | 1 | 2 766.79 | 98.81 | <0.000 1 | 极显著 |
| AB | 184.76 | 1 | 184.76 | 6.60 | 0.037 1 | 显著 |
| AC | 212.62 | 1 | 212.62 | 7.59 | 0.028 3 | 显著 |
| BC | 249.97 | 1 | 249.97 | 8.93 | 0.020 3 | 显著 |
| A^2 | 7.80 | 1 | 7.80 | 0.278 6 | 0.613 9 | 不显著 |
| B^2 | 66.94 | 1 | 66.94 | 2.39 | 0.166 0 | 不显著 |
| C^2 | 575.36 | 1 | 575.36 | 20.55 | 0.002 7 | 极显著 |
| 残差 | 196.02 | 7 | 196.02 | | | |
| 失拟项 | 156.81 | 3 | 156.81 | 5.33 | 0.068 9 | 不显著 |
| 纯误差 | 39.21 | 4 | 9.80 | | | |
| 总离差 | 1 140.25 | 16 | | | | |

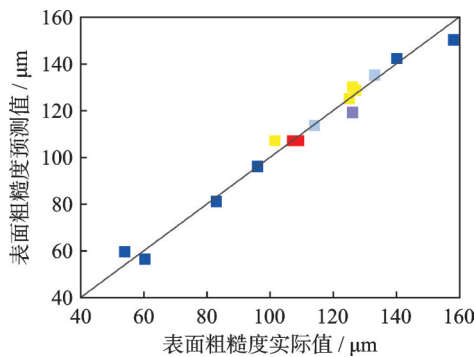


图 5 表面粗糙度实际值与预测值分布

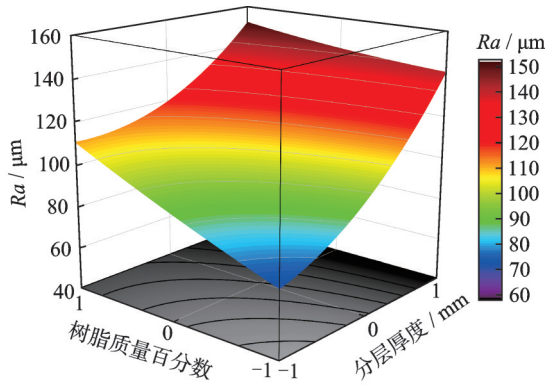
Fig.5 Distribution of actual and predicted values of surface roughness

2.1.3 定倾角砂型打印响应面试验分析

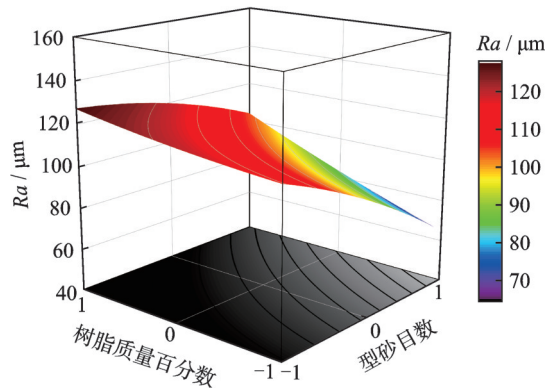
根据拟合得到的回归方程,利用 Origin 软件绘制各因素两两间交互作用对定倾角砂型表面粗糙度影响的响应曲面,结果如图 6 所示。通过响应面模型生成,图 6 中的曲面变化可以有效地反映各工

艺参数对砂型表面粗糙度的影响。其中, AB 的响应面图(图 6(a))和 AC 的响应面图(图 6(b))等高线更接近于圆形,说明树脂质量百分数 A 和分层厚度 B 、树脂质量百分数 A 和型砂目数 C 因素间的交互作用相对较弱。 BC 的响应面图(图 6(c))坡度较陡峭,等高线呈现出椭圆形的趋势,说明分层厚度 B 和型砂目数 C 因素间存在较明显的交互作用。坡度的陡峭程度: $BC > AB > AC$,说明分层厚度 B 和型砂目数 C 对定倾角砂型的表面粗糙度具有较大的影响,该分析结果与上述方差分析的结果一致。

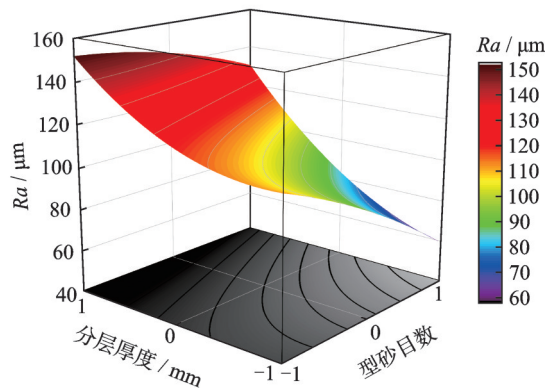
分析树脂质量百分数和分层厚度对定倾角砂型表面粗糙度的综合影响曲面图,当树脂质量百分数较低而分层厚度也较小时,砂型表面粗糙度也相对更低,表面质量明显更优。分析树脂质量百分数和型砂目数对砂型表面粗糙度的综合影响曲面图,



(a) Response surface diagram of resin content and delamination thickness



(b) Response surface diagram of resin content and sand mesh



(c) Response surface diagram of layer thickness and sand mesh

图6 不同因素交互作用对定倾角砂型表面粗糙度响应面图

Fig.6 Response surface diagrams of different factors' interaction on surface roughness of sand mold with fixed inclination angle

树脂质量百分数较低且型砂粒径更小时,表面质量明显更优。分析分层层厚和型砂目数对砂型表面粗糙度的综合影响曲面图,当分层层厚维持在同一水平时,其表面粗糙度随型砂目数的减小逐渐增大,型砂粒径较大导致水力半径过大进而影响砂型的表面质量。综上,由定倾角砂型打印试验可知,当树脂质量百分数为 2.08%,分层层厚为 0.3 mm,型砂选用 100/200 目时,砂型侧表面粗糙度最低,表面质量更好。此外,在实际砂型打印生

产工艺中,除考虑砂型的表面质量外,还需兼顾砂型强度、透气性等综合性能,100/200 目型砂颗粒粒径较小导致制得砂型透气性大多较差,因此实际的生产制备中往往需要对选用的砂型目数进行适当调整。

2.2 变倾角砂型打印实验结果分析

2.2.1 变倾角砂型打印正交试验结果

根据 1.2.2 节设计的定倾角砂型打印响应面试验进行相关试验,获得的实验结果如表 5 所示。

表 5 正交实验结果

Table 5 Orthogonal experimental results

| 实验组 | 打印倾角 $D/(^\circ)$ | 分层层厚 B/mm | $Ra/\mu\text{m}$ |
|-----|-------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 1 | 1 | 115.286 |
| 2 | 1 | 2 | 127.071 |
| 3 | 1 | 3 | 151.153 |
| 4 | 1 | 4 | 165.634 |
| 5 | 2 | 1 | 87.880 |
| 6 | 2 | 2 | 94.548 |
| 7 | 2 | 3 | 97.632 |
| 8 | 2 | 4 | 101.644 |
| 9 | 3 | 1 | 74.342 |
| 10 | 3 | 2 | 85.331 |
| 11 | 3 | 3 | 89.321 |
| 12 | 3 | 4 | 92.113 |
| 13 | 4 | 1 | 71.426 |
| 14 | 4 | 2 | 71.334 |
| 15 | 4 | 3 | 72.336 |
| 16 | 4 | 4 | 70.552 |

采用 SPSSAU 软件进行分析,可得表面粗糙度对打印倾角 D 和分层层厚 B 的线性回归方程为

$$Ra = 134.596 - 231.527 \times D + 6.879 \times B$$

根据回归方程可知相比分层层厚,打印倾角对变倾角砂型表面粗糙度的影响更大。为进一步验证该线性回归方程的准确性,对正交试验进行方差分析,方差分析结果如表 6 所示。结果表明打印倾角 $D(F=35.379, P=0.0001 < 0.05)$ 对表面粗糙度

表 6 正交实验回归方程方差分析

Table 6 Variance analysis of orthogonal experiment regression equation

| 差异源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 统计量 | P |
|--------------------|----------|-----|----------|---------|----------|
| Intercept | 153 588 | 1 | 153 588 | 1 554.6 | <0.000 1 |
| 打印倾角 $D/(^\circ)$ | 10 485.9 | 3 | 3 495.32 | 35.379 | <0.000 1 |
| 分层层厚 B/mm | 955.487 | 3 | 318.496 | 3 224 | 0.015 |
| 残差 | 889.161 | 9 | 98.796 | | |

呈现出显著性,分层厚度 $B(F=3.224, P=0.015 < 0.05)$ 对表面粗糙度产生的主效应明显较小。

2.2.2 分层厚度和打印倾角对砂型表面粗糙度影响规律

将正交实验数据通过 SPSSAU 软件进行分析,得到各因素水平下,砂型表面粗糙度平均值折线图,结果如图 7 所示。绘制打印倾角和分层层厚两因素综合影响下对砂型表面粗糙度的影响云图,结果如图 8 所示。砂型打印样件的表面粗糙度随着打印倾角的增大而降低,随着分层层厚的增加而增大,其中打印倾角的影响更为显著。从影响云图中同样可以看出,当处于同一因素水平时,打印倾角对砂型表面粗糙度影响更为显著。因此,针对于大多数在垂直方向上具有倾角变化的砂型模型,在切片工艺设置分层厚度时,应着重考虑砂型模型不同位置的曲率特征以确定相应的打印层厚。

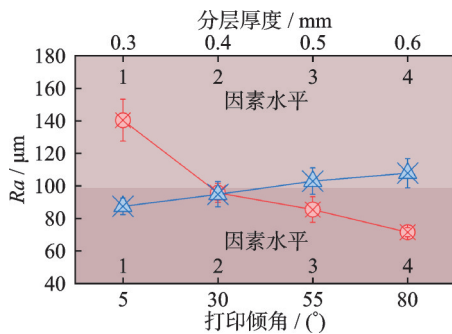


图 7 单因素对变倾角砂型表面粗糙度的影响

Fig.7 Influence of single factor on surface roughness of variable inclination sand mold

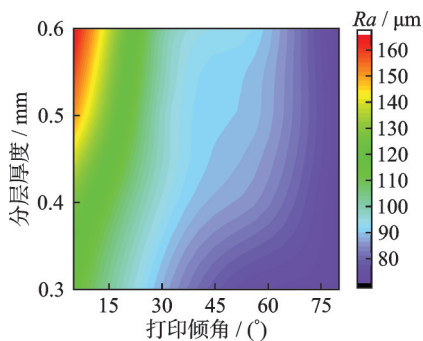


图 8 打印倾角与分层厚度对变倾角砂型表面质量耦合影响云图

Fig.8 Coupling influence of printing inclination angle and layered thickness on surface quality of variable inclination sand mold

2.3 砂型打印自适应切片工艺与应用验证

本文 2.2 节研究发现打印倾角是影响实际变倾角砂型表面粗糙度的最主要因素,在实际砂型打印中,模型摆放位置一旦固定,沿打印方向模型表面曲率不可改变,选择较小的打印层厚可以减小台阶效应以获得较好的砂型表面质量^[28],但打印层厚又在很大程度上决定了成形效率。基于上述理论基础,针对如何兼顾砂型打印的表面质量和成形效率,南京航空航天大学绿色智能制造团队提出了砂型打印自适应分层切片成形工艺,由本文 1.3 节理论可知,自适应分层切片根据砂型打印机的最小打印层厚和最大打印层厚,考虑模型各切平面单位法向量 Z 向坐标的最大值,综合确定分层厚度,有效解决了传统打印过程中表面质量和生产效率无法兼顾的难题。本小节基于砂型打印自适应切片工艺,选取叶轮下砂型进行应用验证,对比传统的等厚分层切片工艺,探究砂型打印的高精度高效率成形工艺。

2.3.1 叶轮下砂型制备

叶轮下砂型的尺寸精度设计需求为不超过 $\pm 0.2 \text{ mm}$ ^[29]。将叶轮下砂型 STL 模型 ($176 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$) 分别进行等厚分层和自适应分层,切片结果如表 7 和图 9 所示。当叶轮下砂型采用 0.48 mm 分层厚度进行等厚分层时,分层层数为 172,当采用 $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 分层厚度的自适应分层时,分层层数也为 172 层,因此采用自适应分层切片工艺并没有导致叶轮下砂型分层层数的增加和打印时间的延长。将叶轮模型的切片信息以 PNG 格式文件依次导入到砂型 3D 打印系统中,并采用相同的打印工艺参数(树脂质量百分数为 2.08%、固化剂质量百分数为 0.2%、打印速度为 45 mm/s) 进行打印成形。考虑到 100/200 目型砂制备的砂型透气性较差,不适用于叶轮下砂型,故本节试验选用型砂目数为 70/140。

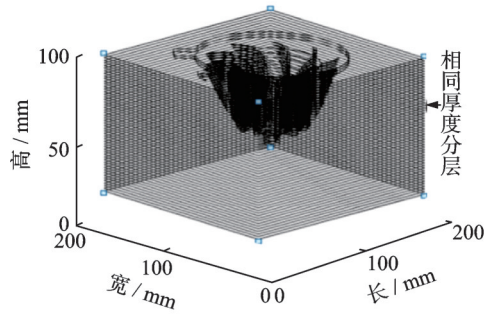
2.3.2 叶轮下砂型尺寸精度分析

叶轮下砂型打印成形后,采用蓝光扫描仪对成形样件进行扫描,并通过 Geomagic Control 软件对扫描模型与原打印模型进行对比,对比结果如图 10 所示,测量结果如表 8 和图 11 所示。从对比图可以看出,相比等厚分层成形的打印样件,采用自适应分层方式成形的叶轮下砂型在 X 方向、Y 方

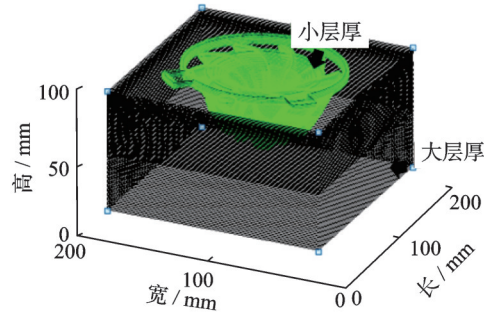
表 7 切片结果

Table 7 Slice results

| STL 模型 | 分层方式 | 分层厚度/mm | 层数 | 最大尖端高度/mm | 三角面片数量 | 切片所需时间/s |
|--------|-------|---------|-----|-----------|--------|----------|
| 叶轮 | 自适应分层 | 0.3~0.6 | 172 | 0.27 | 43 180 | 3.9 |
| 下砂型 | 等厚分层 | 0.48 | 172 | 0.45 | 43 180 | 2.9 |



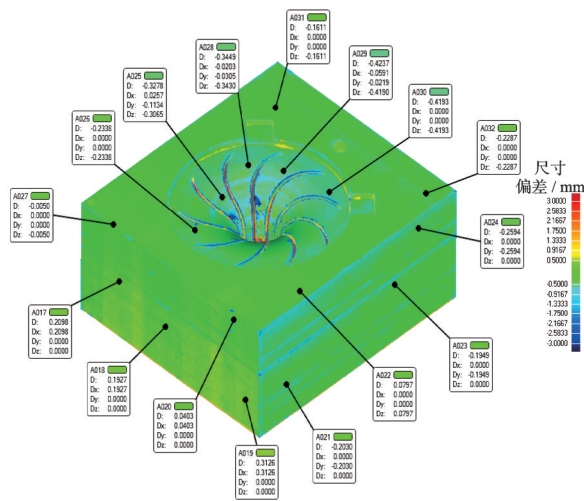
(a) Equal thickness slicing



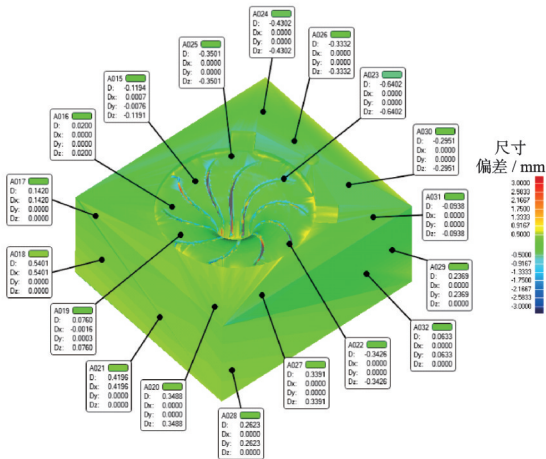
(b) Adaptive slicing

图 9 叶轮下砂型分层结果

Fig.9 Slicing results of impeller bottom sand mold



(a) Equal thickness slicing



(b) Adaptive slicing

图 10 叶轮下砂型蓝光扫描结果

Fig.10 Blue light scanning results of impeller bottom sand mold

表 8 叶轮下砂型尺寸精度对比结果

Table 8 Comparison results of dimensional accuracies of impeller bottom sand mold

| 模型 | 检测编号 | 偏差 | 绘制尺寸/mm | 整体成形件尺寸/mm | 测量平均偏差/mm |
|-----|----------|------------|---------|------------|-----------|
| 叶轮 | 自适应分层成形件 | ΔX | 176 | 176.04 | 0.028 |
| | | ΔY | 160 | 160.08 | 0.014 |
| | | ΔZ | 80 | 80.07 | 0.197 |
| 下砂型 | 等厚分层成形件 | ΔX | 176 | 176.07 | 0.052 |
| | | ΔY | 160 | 160.06 | 0.061 |
| | | ΔZ | 80 | 80.04 | 0.281 |

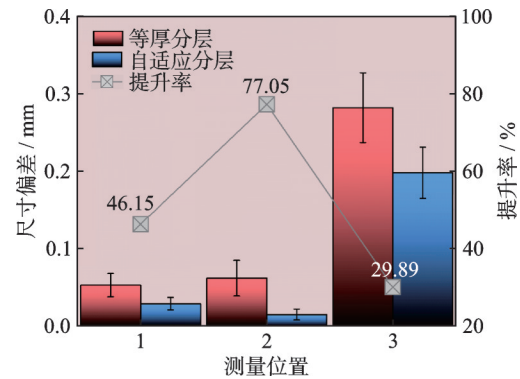


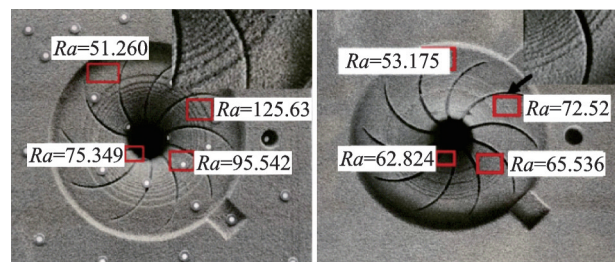
图 11 叶轮下砂型尺寸精度对比

Fig.11 Comparison of dimensional accuracies of impeller bottom sand mold

向、Z方向上均具有更小的尺寸精度误差,尺寸精度分别提高了约46.15%、77.05%和29.89%。当采用自适应分层切片时,叶轮下砂型的成形尺寸与绘制模型尺寸的误差小于0.2 mm,满足设计需求。

2.3.3 叶轮下砂型表面粗糙度分析

进一步对比自适应分层切片和等厚分层切片成形工艺下叶轮下砂型的表面粗糙度,在两个叶轮下砂型的4组对应区域分别切割测量样块,通过激光扫描共聚焦显微镜测量表面粗糙度,测量样块的取样位置如图12所示,表面粗糙度对比结果如图13所示,其中2号位置处的测量结果如图14所示。从对比结果可以看出,除1号取样位置处两种分层方式成形的打印样件表面质量相近,在2、3、4号取



(a) Equal thickness slicing

(b) Adaptive slicing

图 12 叶轮下砂型表面粗糙度对比区域

Fig.12 Comparison area of surface roughnesses of impeller bottom sand mold

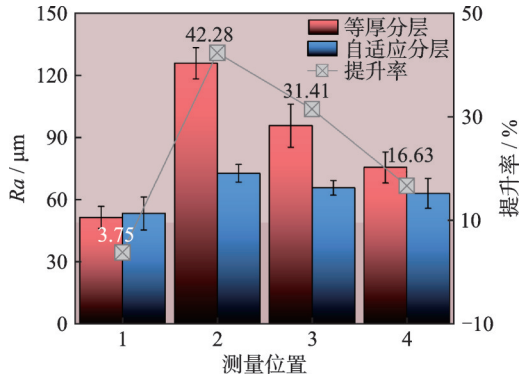


图 13 叶轮下砂型表面粗糙度对比

Fig.13 Comparison of surface roughnesses impeller bottom sand mold

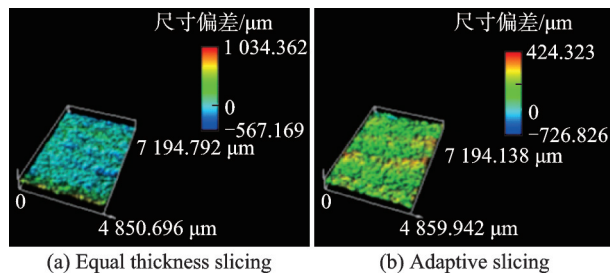


图 14 叶轮下砂型 2 号位置测量结果

Fig.14 Measurement results of No.2 position impeller bottom sand mold

样位置处采用自适应分层切片工艺成形的打印样件表面粗糙度均明显更低,表面质量分别提高了约 42.28%、31.41% 和 16.63%。从微观形貌同样可以看出,和等厚分层工艺对比,自适应分层的打印方式所成形的砂型样件具有更加光滑的表面。

3 结 论

本文聚焦如何提高砂型打印表面质量等关键问题,开展砂型打印表面粗糙度基础工艺调控研究,通过定倾角砂型打印响应面实验、变倾角砂型打印正交实验以及叶轮下砂型自适应分层工艺验证,全方位探究了砂型打印表面质量的优化工艺,旨在推动多曲率复杂砂型的高精高效制造,主要结论如下:

(1) 研究树脂质量百分数、分层层厚和型砂目数对定倾角砂型表面粗糙度的影响规律,随树脂质量百分数降低、分层厚度减小、型砂目数增大,砂型表面粗糙度降低。通过定倾角砂型打印响应面实验,优选一组定倾角砂型打印工艺参数:树脂质量百分数 2.08%、分层厚度 0.3 mm、型砂 100/200 目,优选结果制备的砂型表面质量最佳。

(2) 通过变倾角砂型打印正交实验研究分层厚度和打印倾角对砂型打印表面粗糙度的影响显

著性,研究结果表明打印倾角是影响砂型打印表面质量的最显著因素。

(3) 提出一种平衡砂型打印表面质量和成形效率的自适应分层切片工艺。研究结果表明与传统等厚分层工艺相比,在打印叶轮下砂型时,自适应分层砂型尺寸精度和表面粗糙度分别改善了约 51.03% 和 30.11%,实现了砂型打印的高精高效成形。

参考文献:

- [1] 单忠德. 无模铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 37-69.
SHAN Zhongde. Patternless casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 37-69.
- [2] 卢军. 2018 年铸造机械标准化工作综述[J]. 机械工业标准化与质量, 2019(7): 18-20.
LU Jun. Summary of Standardization of foundry machinery in 2018[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2019(7): 18-20.
- [3] 徐世钰. 论绿色可持续发展理念下的中国铸造强国之路[J]. 产品可靠性报告, 2023(1): 53-54.
XU Shiyu. On China's road to a strong country under the concept of green sustainable development[J]. Reliability Reports, 2023(1): 53-54.
- [4] 戴开明, 黄金富, 宋彬. 3D 打印技术与铸造技术的融合应用与展望[J]. 金属加工(热加工), 2023(11): 17-21.
DAI Kaiming, HUANG Jinfu, SONG Bin. The fusion application and prospect of 3D printing technology and casting technology[J]. MW Metal Forming, 2023(11): 17-21.
- [5] PEARCE H, ARAYA V. Case studies experience in using 3D sand printing to produce molds for new and replacement cast components[J]. International Journal of Metal Casting, 2024. DOI: 10.1007/s40962-024-01426-1.
- [6] 高博, 匡锐, 范玉虎. 基于砂型 3D 打印技术的薄壁筒形件铸造成形技术[J]. 热加工工艺, 2024, 53(12): 139-144.
GAO Bo, KUANG Rui, FAN Yuhu. Casting and forming technology of thin-walled cylindrical parts based on sand mould 3D printing technology[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(12): 139-144.
- [7] FELIX H, ALEX F. Fabrication of a stainless-steel pump impeller by integrated 3D sand printing and casting: Mechanical characterization and performance study in a chemical plant[J]. Applied Sciences, 2022,

- 12(7): 3539-3539.
- [8] 戴志煌. 大型无木模铸型制造工艺的研究与开发[D]. 北京: 清华大学, 2023.
DAI Zhihuang. Research and development of manufacturing process of large woodless mold[D]. Beijing: Tsinghua University, 2023.
- [9] 李瑛辉, 李天才. 砂型 3D 打印技术在航空发动机领域的研究与应用[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 439-442.
LI Yinghui, LI Tiancai. Research and application of sand 3D printing technology in aero-engine field[J]. Materials Reports, 2024, 38(S1): 439-442.
- [10] KUK H, JIN W, TAE W. Digital transformation of metal casting process using sand 3D printing technology with a novel methodology of casting design inside a core[J]. International Journal of Metal Casting, 2023, 17: 2674-2679.
- [11] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, SAXENA P. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting[J]. Additive Manufacturing, 2021, 40(12): 101889.
- [12] 鲁云, 张颖, 马娅玲. 共享创新中心 3D 打印智能工厂颠覆传统铸造[J]. 企业管理, 2023(10): 64-69.
LU Yun, ZHANG Ying, MA Yaling. Shared innovation center 3D printing intelligent factory overturns traditional casting[J]. Enterprise Management, 2023(10): 64-69.
- [13] 覃荣武, 黄本锐, 卢大林. 基于 3D 打印的机器人手臂无模快速铸造方法研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(12): 32-34, 37.
QIN Rongwu, HUANG Benrui, LU Dalin. Research on rapid casting method of robot arm based on 3D printing[J]. Automation Application, 2024, 65(12): 32-34, 37.
- [14] 闫丹丹. 多材质复合砂型 3D 打印形性调控技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
YAN Dandan. Study on the precision and performance regulation technology of multi-material composite sand mold by 3D printing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [15] 郭树人, 林少凯, 曹华堂. 原砂粒度级配对增材制造砂型性能的影响[J]. 铸造, 2023, 72(4): 420-425.
GUO Shuren, LIN Shaokai, CAO Huatang. Effects of particle gradation of base sand on performance of additive manufacturing sand mold[J]. Foundry, 2023, 72(4): 420-425.
- [16] 李征, 明禹, 王驰腾. 冲击压实工艺对 3D 打印砂型成形性能影响规律研究[J]. 铸造工程, 2022, 46(4): 67-71.
LI Zheng, MING Yu, WANG Chiteng. The study on influence of impact compaction process on the sand mould property by sand 3D printing[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(4): 67-71.
- [17] HYEON J, SEONG W, HYO J. Mechanical integrity and erosion resistance of 3D sand printing materials[J]. Materials Design, 2023, 233(6): 112204.
- [18] WANG C, YANG G, AREDAKE A. Effect of printing parameters of 3DP sand mold on the casting performance of ZL205A alloy[J]. Acta Metall Sin, 2022, 58(7): 921-931.
- [19] WANG Xiaolong, WU Qihua, HUANG Yuhang. Study on the gas release of 3D-printed furan resin sand core during the casting process[J]. Materials, 2023, 16(11): 4152.
- [20] 李征, 单忠德, 孙启利. 树脂渗透对砂型 3D 打印成型精度影响机理研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(4): 247-251.
LI Zheng, SHAN Zhongde, SUN Qili. Influence mechanism of resin penetration on molding accuracy of sand 3D printing[J]. Foundry Technology, 2021, 42(4): 247-251.
- [21] 余洛生, 刘丰, 刘丽敏. 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.
YU Luosheng, LIU Feng, LIU Limin. Research and control on dimensional accuracy of 3D printing furan resin sand mold[J]. Foundry, 2022, 71(11): 1407-1412.
- [22] 杨伟东, 颜永年, 檀润华. 无模铸型制造工艺中提高铸型表面质量的研究[C]//2005 年中国机械工程学会年会论文集. 重庆: [s.n.], 2005.
YANG Weidong, YAN Yongnian, TAN Runhua. Research on improving the surface quality of the mold in the moldless casting process[C]//Proceedings of 2005 Annual Meeting of China Society of Mechanical Engineering. Chongqing: [s.n.], 2005.
- [23] 杨伟东, 高翔宇, 刘卫胜. 基于微滴喷射的 3DP 工艺中渗透误差补偿算法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 269-278.
YANG Weidong, GAO Xiangyu, LIU Weisheng. The compensation algorithm of infiltration error of the droplet injection in 3DP technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 269-278.
- [24] 马旭龙. 铸造砂型三维打印工艺中渗透误差分析及补偿技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

- MA Xulong. Research on penetration error analysis and compensation technology in three-dimensional printing process of casting sand mold[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [25] NATHAN B. Impact of part thickness and drying conditions on saturation limits in binder jet additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020(33): 101-127.
- [26] 张敬骥, 郭智, 王超. 砂型 3D 打印铺砂工艺参数匹配研究[J]. 铸造技术, 2023, 44(12): 1130-1138.
ZHANG Jingji, GUO Zhi, WANG Chao. Parameter match research of the coating process of sand mold 3D printing [J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1130-1138.
- [27] 任洪稳, 单忠德, 杨浩秦. 砂型增材制造多轮廓自适应切片算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(3): 447-456.
- REN Hongwen, SHAN Zhongde, YANG Haoqin. Multi-contour adaptive slicing algorithm for sand mold additive manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(3): 447-456.
- [28] 惠记庄, 黄健, 吕景祥. 响应曲面法 3D 打印制件表面质量的实验研究[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(1): 41-46.
HUI Jizhuang, HUANG Jian, LV Jingxiang. Experimental study on surface quality of 3D printing parts by using response surface methodology[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(1): 41-46.
- [29] 杨文亮, 洪海春, 苏容超. 开式叶轮倒置式铸造工艺研究[J]. 铸造, 2023, 72(1): 72-76.
YANG Wenliang, HONG Haichun, SU Rongchao. Research on upside-down type casting process of open impeller[J]. Foundry, 2023, 72(1): 72-76.

(编辑:陈珺)