

# 正交试验法优化挤出 3D 打印水溶性盐芯的成形精度

夏萌呈<sup>1, 2</sup>, 王 妙<sup>1, 2</sup>, 张浩远<sup>1, 2</sup>, 胡柏林<sup>1, 2</sup>, 漆金良<sup>1, 2</sup>,  
林学雄<sup>3</sup>, 徐 凯<sup>1</sup>, 刘 浩<sup>1</sup>, 韩光超<sup>1, 2</sup>, 刘富初<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学深圳研究院, 广东深圳 518057; 3. 湖北文理学院理工学院机械与汽车工程学院, 湖北襄阳 441025)

**摘要:** 以无机盐碳酸钠和氯化钠粉末为基体材料、聚乙烯吡咯烷酮为粘结剂、聚丙烯酸铵为分散剂、无水乙醇为溶剂, 采用挤出3D打印技术和分步式烧结工艺制备水溶性盐芯。以挤出头内径、层高/挤出头内径、打印速度和填充方向四个关键工艺参数进行四因素三水平正交试验, 通过对不同工艺参数的3D打印成形水溶性盐芯的表面粗糙度和尺寸收缩率的测量, 并采用极差分析确定各个打印参数对水溶性盐芯成形精度影响的主次顺序, 得到了最优打印参数。结果表明, 挤出头内径和层高/挤出头内径比值是影响水溶性盐芯成形精度的主要因素。当挤出头内径为0.51 mm、层高/挤出头内径比值为70%、打印速度为600 mm/min、填充方向为45°时, 挤出3D打印的水溶性盐芯具有较好的成形精度, 其表面粗糙度为49.67 μm、尺寸收缩率为17.49% (X方向)和18.32% (Z方向)。

**关键词:** 水溶性盐芯; 挤出3D打印; 表面粗糙度; 收缩率; 正交试验; 成形精度

**中图分类号:** TG249.9; TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0595-10

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0079

## Forming Accuracy Optimization of Water-Soluble Salt Cores Fabricated by Extrusion 3D Printing Technology via Orthogonal Experimental Method

XIA Meng-cheng<sup>1, 2</sup>, WANG Miao<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hao-yuan<sup>1, 2</sup>, HU Bo-lin<sup>1, 2</sup>, QI Jin-liang<sup>1, 2</sup>, LIN Xue-xiong<sup>3</sup>,  
XU Kai<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, HAN Guang-chao<sup>1, 2</sup>, LIU Fu-chu<sup>1, 2, 3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, Guangdong, China; 3. School of Engineering Machinery and Motor Vehicles, Science and Technology College of Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441025, Hubei, China)

**Abstract:** Water-soluble salt cores were fabricated by extrusion 3D printing technology and stepwise sintering process using the inorganic salt sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) and sodium chloride ( $\text{NaCl}$ ) powders as matrix materials, the polyvinylpyrrolidone (PVP) as binder, the ammonium polyacrylate as dispersant, and the anhydrous ethanol as solvent. Taking the extrusion nozzle inner diameter, the layer height-to-extrusion nozzle inner diameter ratio, the printing speed and the infilling direction as four critical factors, a four-factor, three-level orthogonal experiment was carried out, and optimal printing parameters were obtained through measuring the surface roughness and dimensional shrinkage rates of the water-soluble salt cores fabricated by the extrusion 3D printing technology with different process parameters, and determining the influence order of priority of different printing parameters on the forming precision of the water-

**基金项目:** 国家重点研发计划(2023YFB4605603和2022YFB4602502); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(2024A1515013258); 深圳市科技计划资助(JCYJ20240813114009013); 国家自然科学基金(52375395); 深圳市基础研究重点项目(JCYJ20220818102601004); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费资助项目(2024XLB25和2024XLB26); 中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金项目(SKJ2024121、SKJ2025124和SKJ2025125); 国家级大学生创新创业训练计划(202510491020和S202510491202)。

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

**作者简介:** 夏萌呈(2003-), 男, 硕士生, 主要研究方向为水溶性盐芯增材制造。E-mail: 2654624371@qq.com

**通信作者:** 林学雄, 男, 高级工程师, 硕士。E-mail: 122809865@qq.com; 刘富初, 男, 副教授, 工学博士/博士后。E-mail: liufuchu@cug.edu.cn

**引用格式:** 夏萌呈, 王妙, 张浩远, 等. 正交试验法优化挤出 3D 打印水溶性盐芯的成形精度[J]. 铸造, 2026, 75(6): 595-604.  
XIA Mengcheng, WANG Miao, ZHANG Haoyuan, et al. Forming accuracy optimization of water-soluble salt cores fabricated by extrusion 3D printing technology via orthogonal experimental method [J]. Foundry, 2026, 75(6): 595-604.

soluble salt cores by using of range analysis. The results show that the extrusion nozzle inner diameter and layer height-to-extrusion nozzle inner diameter ratio are the dominant factors affecting forming accuracy of the water-soluble salt cores. Under the optimal printing conditions of extrusion nozzle inner diameter of 0.51 mm, layer height-to-extrusion nozzle inner diameter ratio of 70%, printing speed of 600 mm/min and infilling direction of 45°, the obtained salt cores possess better forming accuracy, with a surface roughness of 49.67  $\mu\text{m}$  and dimensional shrinkage rates of 17.49% in the X direction and 18.32% in the Z direction.

**Key words:** water-soluble salt core; extrusion 3D printing; surface roughness; shrinkage rate; orthogonal experiment; forming precision

随着航空航天、高铁和新能源汽车行业的快速发展, 零部件向着高度集成、结构复杂、轻量化、薄壁化演进<sup>[1]</sup>, 市场对性能卓越、复杂形状、内部薄壁的高精密铸件需求日益凸显。这些复杂薄壁铸件生产中需采用型芯材料来成形复杂内腔, 且铸后需要清理干净。传统的型芯成形方法主要有热压铸法、凝胶注模法和粘结法等, 上述方法都需借助模具来成形复杂形状, 耗时较长且流程复杂, 目前常用的树脂砂芯、氧化硅或氧化铝陶瓷型芯铸后很难清理, 无法满足不断缩短的产品更新周期和产品改型需求。因此, 需要研发快速的型芯材料成形方法和清理性能优异的材料体系<sup>[2-3]</sup>。

水溶性型芯用水即可溶解清理, 不需要专用除芯设备和外场辅助, 也不需要使用化学腐蚀法去除型芯, 是复杂内腔铸件用易清理型芯的理想材料。目前常用的水溶性型芯包括水溶性盐芯和水溶性陶瓷型芯<sup>[4-6]</sup>。水溶性陶瓷型芯水溶速率较慢和高温烧结工艺复杂且周期长等问题制约了它在实际铸造中的广泛应用<sup>[7]</sup>。水溶性盐芯是以水溶性无机盐为基体材料, 具有良好水溶溃散性和强度的型芯材料, 且具有发气量小、绿色环保可回收的特性, 被广泛应用于低熔点合金(如铝合金、锌合金和镁合金等)铸件铸造成形, 如发动机活塞内冷油道、汽车用中空轮毂等<sup>[8-11]</sup>。目前, 水溶性盐芯的成形大多采用熔融浇注法和压制烧结法等依托模具的制备工艺, 难以快速制备出复杂形状型芯<sup>[12]</sup>。

浆料挤出式3D打印成形又称墨水直写成形, 该技术采用外力挤压作用将浆料从挤出头挤出直接沉积成形所需形状, 这为制造复杂的型芯结构提供了新方法。相比于其他3D打印工艺, 如光固化成形、粘结剂喷射成形和粉末床熔融成形等, 挤出式3D打印设备结构简单、轻便且成本低, 可以快速制备复杂内部结构<sup>[13-14]</sup>。但是挤出3D打印成形精度与较多因素相关, 如挤出头内径、层高、打印速度等, 上述因素相互影响, 难以协同调控获得高成形精度的样品。

现有研究多聚焦于水溶性盐芯的成分改性(如多元复合盐芯)、力学性能优化(如添加剂强化等)<sup>[15-18]</sup>。型芯坯体的挤出3D打印精度受多个因素的影响, 若只通过单因素分析较为复杂且试验量较大。目前国内外

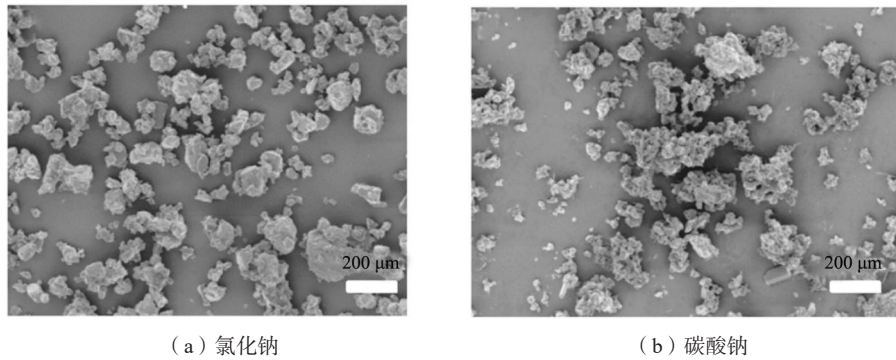
研究者大多选择正交试验或响应面法进行精度提升研究。穆英朋等基于正交试验研究了针头内径、层高/针头内径和打印速度对氧化钙陶瓷型芯坯体成形精度的影响规律<sup>[19-20]</sup>, 通过增加外轮廓层数可有效提高表面成形精度, 响应面法优化了高精度氧化钙陶瓷型芯坯体的3D打印工艺参数, 表面粗糙度可达到35.39  $\mu\text{m}$ 。陈拯等采用正交试验法研究了打印速度、打印层高、针头内径对盐芯尺寸精度和侧表面粗糙度的影响<sup>[21]</sup>, 当打印速度为20 mm/s, 层高/针头内径为80%、针头内径为0.41 mm时, 盐芯拥有较好的尺寸精度和侧表面粗糙度。Wu等采用正交试验优化了偏高岭土陶瓷挤出3D打印精确成形参数, 当针头内径为0.41 mm、填充率为100%、层高/针头内径为50%和打印速度为15 mm/s时, 偏高岭土陶瓷打印成形精度最佳<sup>[22]</sup>。上述针对挤出3D打印工艺参数的研究中较少提到填充方向, 且各工艺参数对盐芯成形收缩率的影响研究较少。挤出头内径、层高、打印速度、填充方向作为关键打印参数, 直接影响盐芯的尺寸一致性与表面质量, 决定最终成形精度。因此, 本研究聚焦挤出3D打印水溶性盐芯成形精度, 探究上述参数的影响规律并优化工艺, 为高精度盐芯制备提供参考。

为使3D打印能制备出高成形精度的水溶性盐芯, 作者基于浆料挤出3D打印成形技术, 在本团队研发的适于3D打印挤出成形的的水溶性复合盐芯材料体系<sup>[23-24]</sup>基础上, 以挤出头内径、层高/挤出头内径、打印速度和填充方向为变化因子, 采用正交试验方法协同优化水溶性盐芯的粗糙度与尺寸收缩率, 对正交试验结果进行极差分析, 确定影响盐芯成形精度的主次顺序, 并得到了优化的水溶性盐芯挤出3D打印参数。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 盐芯浆料的配置

试验使用无机盐粉末氯化钠NaCl ( $D_{50}=10.17 \mu\text{m}$ ) 和碳酸钠粉末 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( $D_{50}=6.49 \mu\text{m}$ ) 作为基体材料, 两种无机盐粉末的微观形貌如图1所示。以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为粘结剂; 以聚丙烯酸铵为分散剂、无水乙醇为溶剂; 并辅以有机硅消泡剂消除浆料配制过程中产生的气泡。使用本团队自研的打印装置, 用



(a) 氯化钠

(b) 碳酸钠

图1 无机盐粉末的微观形貌

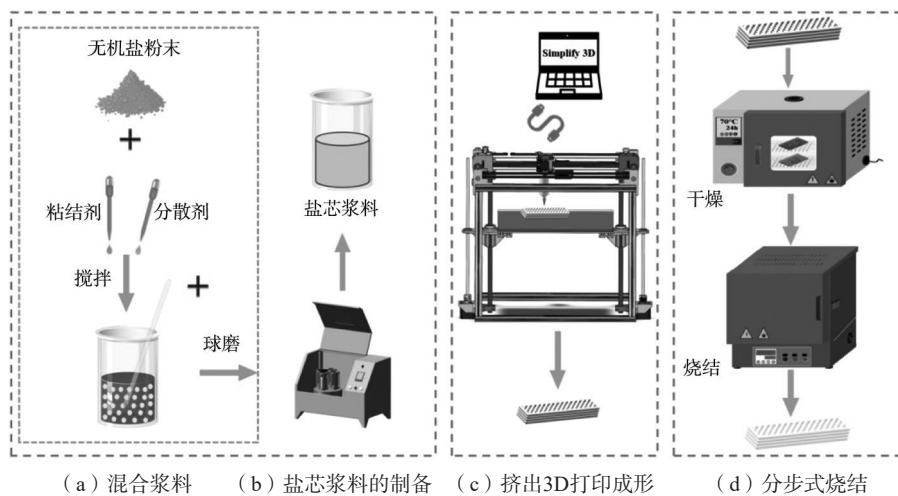
Fig. 1 Morphologies of inorganic salt powders

夹具固定好装有浆料的罐子，开启球磨机，调整转速为300 r/min，球磨13 h。将球磨好的浆料装入打印针筒，期间尽量做到少量多次快速加入，以减少气泡同时防止浆料凝固。本研究采用的盐芯浆料固含量为66wt.%、分散剂加入量为0.5wt.%、粘结剂浓度为12.5wt.%，其中每100 g浆料含12.6 g的30mol% NaCl和53.4 g的70mol%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 。

## 1.2 盐芯坯体的3D打印成形

将无机盐粉末、粘结剂和分散剂混合并加入少量消泡剂制备盐芯浆料，随后进行球磨分散、打印成

形、干燥、烧结，制得水溶性盐芯，具体制备流程如图2所示。在Simplify3D软件上对预设的3D模型（60 mm × 10 mm × 6 mm的长方体）进行切片，并调整挤出头内径、层高/挤出头内径、打印速度及填充方向等关键参数。打印过程中，浆料借助气压调控实现均匀挤出，沿预设轨迹精准沉积于基板表面并逐层堆叠。前一层浆料完成凝固后，再进行下一层的打印作业，以此保障层间结合的稳固性，逐步完成坯体成形，最终得到结构稳定、外形精度符合设计要求的坯体成品。



(a) 混合浆料

(b) 盐芯浆料的制备

(c) 挤出3D打印成形

(d) 分步式烧结

图2 水溶性盐芯的制备流程

Fig. 2 Flow chart of water-soluble salt core preparation

## 1.3 盐芯坯体干燥和烧结

将打印成形坯体放置一至两天后放入干燥箱进行70 °C恒温干燥24 h。将干燥的坯体进行分步式烧结，第一个阶段在310 min内从室温升温至360 °C并保温60 min，PVP在此时快速分解使得复合盐芯质量下降，第二个阶段在80 min内升温至600 °C进行固相烧结并保温60 min，第三阶段再以5 °C/min的升温速度升到620 °C、保温30 min进行液相烧结，烧结结束后，待其

随炉冷却至室温，最终获得细长盐芯。

## 1.4 性能表征方法

采用表面粗糙度轮廓仪即触针式粗糙度仪测量盐芯表面粗糙度，测试前用无水乙醇轻擦表面去除浮粉，将盐芯固定在工作台，触针沿表面匀速滑动，采集表面轮廓数据；同一区域测量不少于5次，取平均值为终值。

用游标卡尺分别测量干燥前盐芯坯体和烧结后盐芯试样的尺寸数据（长、高），每组试样测量值不少于5个，取平均值为终值。记干燥前尺寸为 $L_0$ ，烧结后尺寸为 $L_1$ ，则收缩率计算方法如公式（1）所示。

$$L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $L$ 为各尺寸收缩率（%）； $L_0$ 为干燥前尺寸（mm）； $L_1$ 为烧结后尺寸（mm）。

使用微机控制电子万能试验机（ETM105D-T），根据三点弯曲法测试盐芯试样断裂时的最大载荷，采用式（2）计算得到陶瓷试样的抗弯强度，设定测试跨距为30 mm，压头加载速率为0.05 mm/min。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (2)$$

式中： $\sigma$ 为陶瓷试样的抗弯强度（MPa）； $P$ 为试样断裂时承受的最大载荷（N）； $L$ 为两支点间的跨距； $b$ 为试样的宽度（mm）； $h$ 为试样的厚度（mm）。

在恒温水浴锅中加热烧杯使烧杯中的水维持80℃，将盐芯坯体加入水中测量其溶解时间。采用公式（3）计算盐芯试样的水溶速率。

$$K = \frac{m}{s \times t} \quad (3)$$

式中： $K$ 为水溶速率[g/(s·m<sup>2</sup>)]； $s$ 为水溶性盐芯块的表面积（m<sup>2</sup>）； $m$ 为其干重（g）； $t$ 为完全溶解所需的时间（s）。

将水溶性盐芯试样放入恒湿瓶中，每间隔2 h测量一次质量 $m_1$ ，测量48 h，原本干重为 $m_0$ ，采用公式（4）计算盐芯试样的吸湿率。

$$\varphi = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $\varphi$ 为盐芯吸湿率（%）， $m_0$ 和 $m_1$ 分别为两小时前后的质量（g）。

使用密度天平（LQ-C5003），基于阿基米德原理测试水溶性盐芯的气孔率，由于其原材料容易在水中溃散，故选择煤油为测量介质（常温下煤油密度 $\rho_0=0.78 \text{ g/cm}^3$ ），分别记录干燥的水溶性盐芯在空气中质量、饱和了煤油的水溶性盐芯在空气中质量和饱和了煤油的水溶性盐芯在煤油中质量，采用公式（5）计算盐芯试样的气孔率。

$$p = \frac{G_2 - G_1}{G_2 - G_3} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $p$ 为孔隙率（%）， $G_1$ 为空气中干燥水溶性盐芯的质量（g）； $G_2$ 为饱和了煤油的盐芯试样在空气中的质量； $G_3$ 为饱和了煤油的盐芯试样在煤油中的质量。

利用超景深显微镜（RX-100，HIROX，Japan）拍摄水溶性盐芯的上表面及侧表面形貌，扫描电子显微镜（Sigma 300，Carl Zeiss AG，Germany）用于观察

和分析盐芯的微观组织。

## 1.5 正交试验方案

本文重点讨论打印速度、层高、挤出头内径和填充方向对于水溶性盐芯挤出3D打印成形的影响。在打印成形的过程中，打印速度需保持和浆料挤出速率相对平衡。当打印速度过快时容易出现挤出的材料量不足导致打印出来的表面不均匀光滑的问题，且容易导致挤出头温度升高影响浆料挤出时的流动性。当打印速度过慢时则容易造成挤出浆料的堆积，浆料冷却所需时间更长，容易造成坍塌和膨胀现象的发生<sup>[25]</sup>，影响水溶性盐芯打印成形的精度。

在打印成形过程中，层高需要选取一个相对合适的区间，当层高过高时，打印过程中挤出头离上一层打印表面过高，挤出丝在挤出悬空时容易由于空间上的滞后偏离预定的轨迹，造成打印轨迹的不规则扭曲。当层高过低时则容易在挤出过程中，浆料从挤出头侧面过度挤出，造成表面纹路模糊，出现挤出头划痕，同时坯体每一层打印的宽度出现较大偏差，也容易造成挤出头堵塞。挤出头内径对于盐芯成形性能的影响主要在于挤出头内径的大小往往直接影响挤出丝的直径，盐芯样品由挤出丝层层堆叠而成。当挤出头内径较小时，受限于浆料的粘稠度和流动性，浆料难以挤出。同时挤出丝的直径也会直接影响盐芯成形后的表面粗糙度。随着挤出头内径的增加，其表面粗糙度通常会变大<sup>[26]</sup>。

不同的填充方向会影响盐芯成形的结构稳定性，同时会影响盐芯内部的应力分布与孔隙结构。正确选择填充方向可以减少烧结收缩引起的盐芯形变和裂纹，也可以提高材料的烧结密度。不同填充方向示意图如图3所示。

确定正交试验的各因素变量如表1所示。表中A为挤出头内径，B为层高/挤出头内径，C为打印速度，D为填充方向。

## 2 试验结果与讨论

水溶性盐芯的表面粗糙度和X、Z方向的尺寸收缩率正交试验结果如表2所示。

结果表明，挤出头内径、层高、打印速度和填充方向对水溶性盐芯的粗糙度及尺寸收缩率影响较大。本研究旨在制备具有高表面精度的水溶性盐芯，探究挤出3D打印成形低表面粗糙度和低尺寸收缩率的水溶性盐芯优化方案。

### 2.1 表面粗糙度分析

水溶性盐芯的表面粗糙度如表2和图4所示。由表

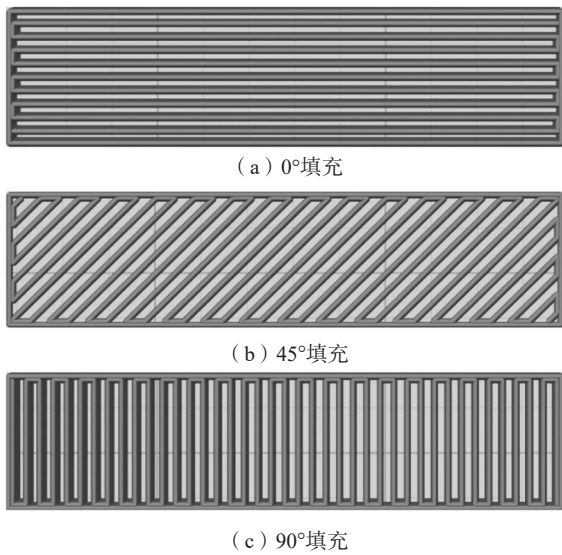


图3 打印过程中盐芯内部不同填充方向

Fig. 3 Different infilling orientations inside the salt core during the printing process

2和图4可知,不同参数组合下打印水溶性盐芯表面粗糙度相差较大。因此,采用极差分析(又称直观分析法)对表面粗糙度正交试验结果进一步分析得到表3,表中 $k$ 为均值、 $R$ 为极差。

由表3中极差 $R$ 值可知,对粗糙度影响的主次顺序为挤出头内径>层高/挤出头内径>打印速度>填充方向;由 $k$ 值可知,制备低表面粗糙度水溶性盐芯的最优组合为 $A_1B_1C_3D_2$ 。即挤出头内径为0.51 mm、层高/挤出头内径为70%、打印速度为600 mm/min、填充方向45°。

图5为正交试验各因素对水溶性盐芯表面粗糙度的影响规律直观分析图。由图可知,随着挤出头内径、层高/挤出头内径的增大,盐芯表面粗糙度呈现上升趋势,所以采用小尺寸的挤出头和层高/挤出头内径低比值更有利于表面粗糙度的降低;打印速度为600 mm/min、填充方向为45°时,水溶性盐芯试样的表面粗糙度最

表1 正交试验因素水平表  
Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	A: 挤出头内径/mm	B: (层高/挤出头内径)/%	C: 打印速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	D: 填充方向/(°)
1	0.51	70	400	0
2	0.61	80	500	45
3	0.84	90	600	90

表2 表面粗糙度和尺寸收缩率试验结果  
Tab. 2 Experimental results of surface roughness and dimensional shrinkage rates

试验 序号	因素				表面粗 糙度/ $\mu\text{m}$	尺寸收缩率/%	
	A: 挤出头内径/mm	B: (层高/挤出头内径)/%	C: 打印速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	D: 填充方向/(°)		长 $X$	高 $Z$
1	0.51	70	400	0	56.54	17.72	19.33
2	0.51	80	500	45	64.23	18.06	18.13
3	0.51	90	600	90	73.35	16.23	16.21
4	0.61	70	500	90	77.23	17.75	17.83
5	0.61	80	600	0	78.40	16.61	19.36
6	0.61	90	400	45	92.15	17.04	17.49
7	0.84	70	600	45	101.27	16.86	17.68
8	0.84	80	400	90	120.54	17.08	16.22
9	0.84	90	500	0	131.80	16.35	19.13

低,能较好满足高成形精度的性能要求。

建立多元线性回归方程用具体数学模型表示表面粗糙度与各因素之间的关系。得到表面粗糙度回归模型方程如式(6)所示。分别以水溶性盐芯表面粗糙度的实测值和预测值为横纵坐标绘制散点图,如图6所示。回归模型的 $R$ 为拟合优度,是用来衡量回归模型拟合程度的指标, $R^2$ 表示自变量能反应因变量方差百分比, $R^2$ 越接近1则表示回归方程的拟合程度越高。根据

拟合结果,回归模型的拟合度 $R^2$ 为0.982,拟合模型具有较高的可靠性。

$$Ra = -78.1532 + 159.7602A + 0.9775B - 0.0359C + 0.0429D \quad (6)$$

## 2.2 尺寸收缩率分析

水溶性盐芯在 $X$ 、 $Z$ 两个方向上的尺寸收缩率如表2和图7所示。

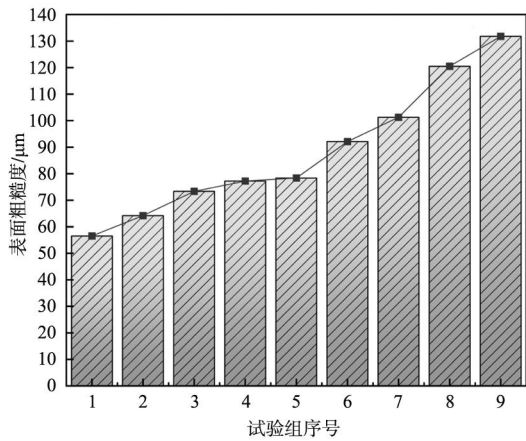


图4 表面粗糙度  
Fig. 4 Surface roughness

表3 表面粗糙度均值和极差  
Tab. 3 Mean and range of surface roughness

参数分析值	A	B	C	D
$k_1$	64.71	78.35	89.75	88.91
$k_2$	82.59	87.72	91.09	85.89
$k_3$	117.87	99.10	84.34	90.37
$R$	53.16	20.75	6.75	4.49

由表2和图7可见,水溶性盐芯在X方向上的尺寸收缩率在17%左右波动,Z方向上的尺寸收缩率在18%左右波动。该结果与其他3D打印试样的收缩率结果一致<sup>[27]</sup>。

对尺寸收缩率进行正交试验直观分析得到结果如表4所示。X方向上尺寸收缩率各因素影响程度从大

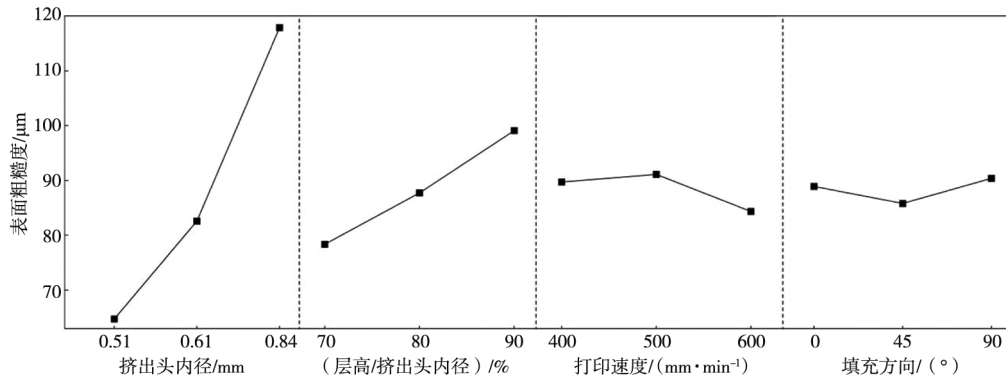


图5 各因素对表面粗糙度的影响规律  
Fig. 5 Influence laws of various factors on surface roughness

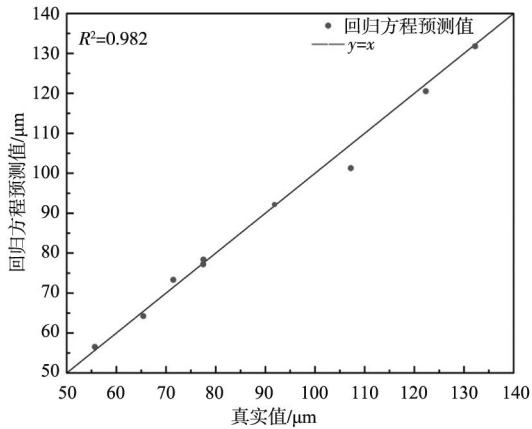


图6 表面粗糙度回归模型预测值和真实值  
Fig. 6 Predicted and actual values of regression model for surface roughness

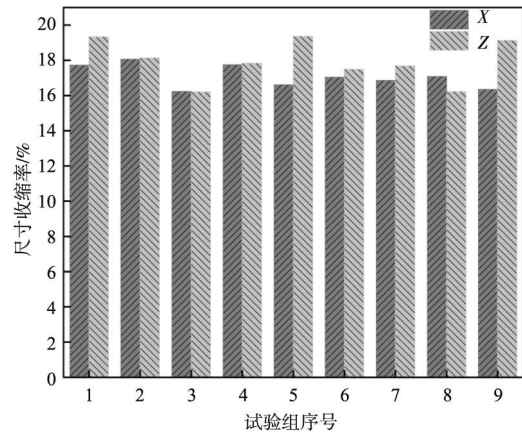


图7 尺寸收缩率  
Fig. 7 Dimensional shrinkage rate

到小排列为层高/挤出头内径>打印速度>挤出头内径>填充方向,Z方向上尺寸收缩率各因素影响程度从大到小排列为层高/挤出头内径>填充方向>挤出头内径>打印速度。X方向上尺寸收缩率打印参数最优组别为A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>1</sub>,Z方向上收缩率打印参数最优组别为A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>。

图8为正交试验各因素对水溶性盐芯X方向收缩

率的影响规律直观分析图。由图可知,随着挤出头内径、层高/挤出头内径的增大,盐芯X方向收缩率呈现下降趋势,所以采用大尺寸的挤出头和层高/挤出头内径高比值可降低X方向收缩率;打印速度为600 mm/min、填充方向为0°时,水溶性盐芯试样的X方向收缩率较低,能较好满足高成形精度的性能要求。

图9为正交试验各因素对水溶性盐芯Z方向收缩率

表4 X、Z方向尺寸收缩率均值和极差  
Tab. 4 Mean and range values of dimensional shrinkage rates in X and Z directions

参数分析值	A	B	C	D
$k_{x1}$	17.34	17.44	17.28	16.89
$k_{x2}$	17.13	17.25	17.39	17.32
$k_{x3}$	16.76	16.54	16.57	17.02
$R_x$	0.57	0.90	0.82	0.43
$k_{z1}$	17.89	18.28	17.68	19.27
$k_{z2}$	18.23	17.90	18.36	17.77
$k_{z3}$	17.68	17.61	17.75	16.75
$R_z$	0.55	0.67	0.68	2.52

的影响规律直观分析图。由图可知,随着层高/挤出头内径、填充方向的增大,盐芯Z方向收缩率呈现下降趋势,所以采用层高/挤出头内径高比值和90°填充方向可降低Z方向收缩率;挤出头内径为0.84 mm、打印速度为400 mm/min时,水溶性盐芯试样Z方向收缩率较低,能较好满足高成形精度的性能要求。

建立多元线性回归方程用具体数学模型表示表面粗糙度与各因素之间的关系。得到各方向收缩率回归模型方程如式(7)、(8)所示。分别以水溶性盐芯X、Z方向收缩率的真实值和预测值为横纵坐标绘制散点图。如图10所示。根据拟合结果,X方向回归模型的

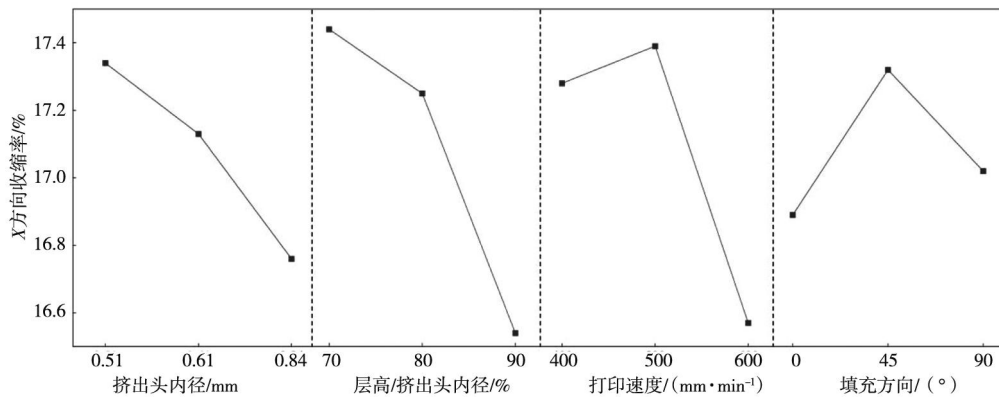


图8 各因素对X方向收缩率的影响规律

Fig. 8 Influence laws of various factors on the shrinkage rates in the X-direction

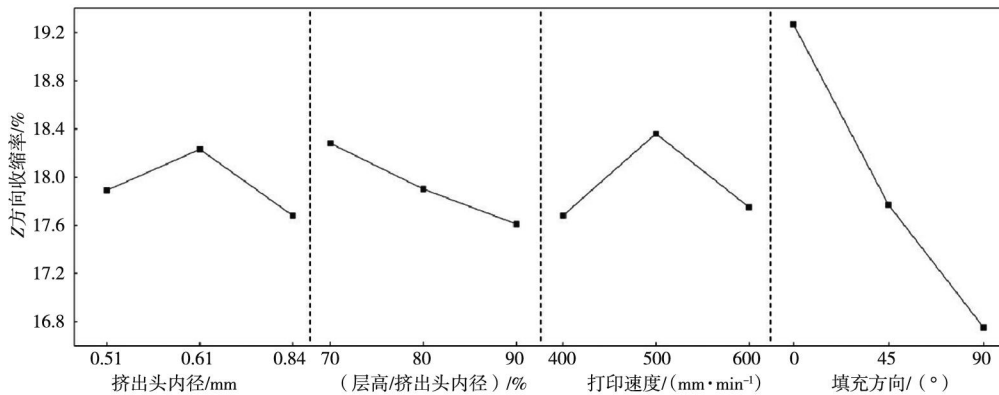


图9 各因素对Z方向收缩率的影响规律

Fig. 9 Influence laws of various factors on the shrinkage rates in the Z-direction

拟合度 $R_x^2$ 为0.51,拟合效果一般; $R_z^2=0.79$ ,拟合模型具有较高的可靠性。

$$L_x=24.0573-1.7150A-0.0516B-0.0039C+0.0043D \quad (7)$$

$$L_z=23.0899-0.9501A-0.0352B-9.9677 \times 10^{-4}C-0.0273D \quad (8)$$

综合盐芯表面粗糙度和尺寸收缩率的分析可知,其在X方向与Z方向收缩率在各组试验中表现出较高的一致性,且数值变动范围处于打印精度允许的误差

包络线内,可通过前期的模型补偿进行修正。然而,粗糙度直接影响水溶性盐芯的表面形貌及后续铸件的表面质量。鉴于粗糙度指标在试验中展现出更宽的调节窗口和更明显的梯度变化,选择粗糙度的最优组合 $A_1B_1C_3D_2$ 具有更高的工程实践价值。

### 2.3 正交试验多性能指标优化方案

基于正交试验结果得到的优化工艺参数组合,采用挤出3D打印技术制备水溶性盐芯。打印参数如下:

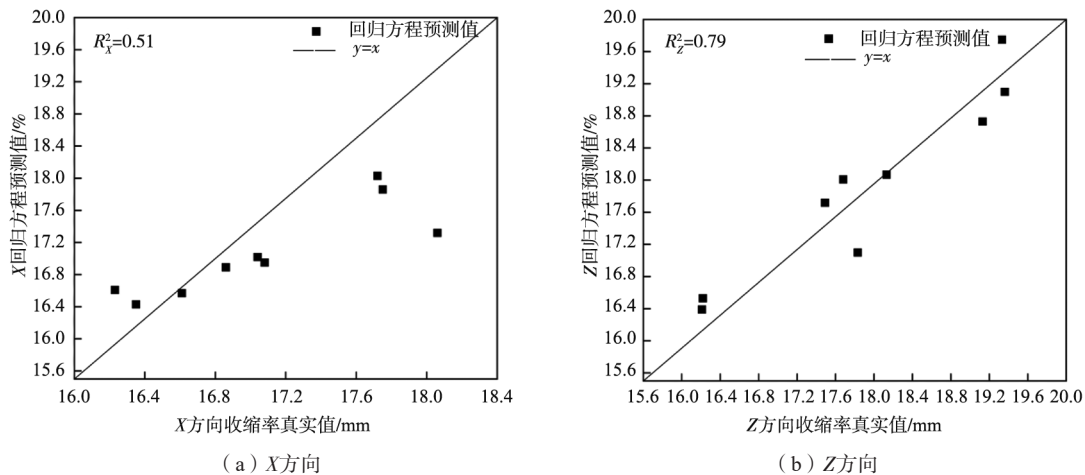


图10 各方向收缩率回归模型预测值和真实值

Fig. 10 Predicted and actual values of shrinkage rate regression models in different directions

挤出头内径为0.51 mm、层高/挤出头内径比值为70%、打印速度为600 mm/min和填充方向为45°，盐芯性能结果如表5所示。

当层高/挤出头内径为70%时，不同挤出头内径对应的水溶性盐芯的表面形貌如图11 (a)、11 (b)和11 (c)所示。由图可知，当挤出头内径增大，挤出丝直径逐渐增大，侧面层数减少，纹理逐渐粗糙，与正交试验结论相符合，挤出头内径对表面粗糙度影响具有一定显著性。

当挤出头内径为0.61 mm时，不同层高/挤出头内径对应的水溶性盐芯的表面形貌如图11 (d)、11 (e)和

11 (f)所示。由图可知，当层高增大，侧面阶梯层数减少且纹路不平整，纹理逐渐粗糙，与正交试验结论相符合，层高/挤出头内径对表面粗糙度影响具有一定显著性。

图12为挤出头内径为0.51 mm、层高/挤出头内径为70%、打印速度为600 mm/min、填充方向为45°时制备的水溶性盐芯微观形貌。由图可知，水溶性盐芯试样具有一定的层纹（与前面粗糙度测试结果符合）、层间结合良好，如图12 (a)所示，内部有少量孔隙，利于水溶清理，无明显大尺寸孔洞或沿层间富集现象；晶粒大小较均匀，未见明显未融合颗粒或烧结空洞，

表5 最优组合参数下打印成型的水溶性盐芯性能

Tab. 5 Performances of water-soluble salt core printed by optimal parameters

优化打印工艺参数组合				水溶性盐芯性能						
挤出头内径/mm	层高/挤出头内径/%	打印速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	填充方向/(°)	表面粗糙度/μm	尺寸收缩率/%		抗弯强度/MPa	水溶速率/(g·s <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	吸湿率/%	孔隙率/%
					X方向	Z方向				
0.51	70	600	45	49.67	17.49	18.32	11.59	1.84	7.85	23.35

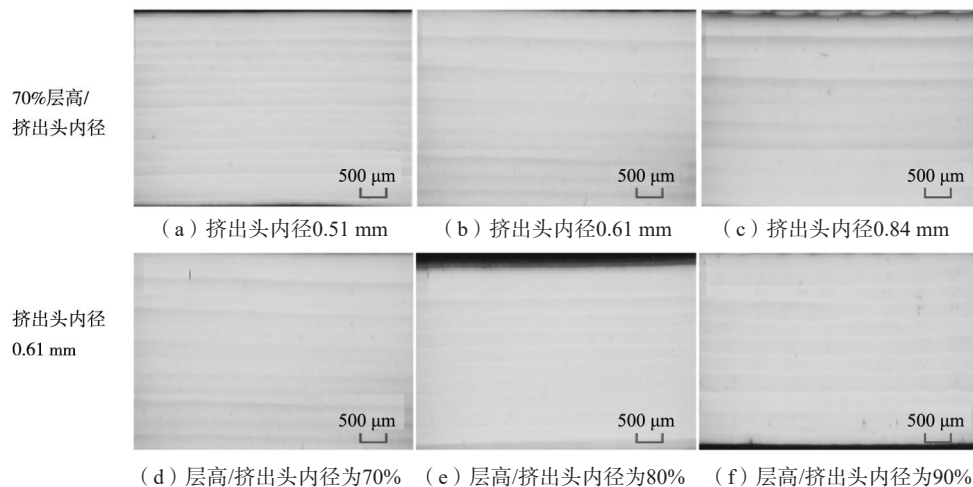


图11 水溶性盐芯的表面形貌

Fig. 11 Surface morphologies of water-soluble salt cores

晶界区域呈现连续的熔融重结晶特征，因此盐芯具有较好的强度性能。

### 2.4 典型构件的成形精度

基于复杂铸件内腔结构多类形状特征（如弯曲、拐弯等结构）和长条形难以完整反映这些结构的成形

特征，本研究基于上述正交试验优化得到的挤出3D打印成形工艺参数，打印成形了典型多形状结构件，如图13所示，成形精度测试结果如表6所示。结果表明，采用优化3D打印工艺参数可制备结构完整的多形状典型结构盐芯样品。样品外形轮廓清晰，可较精确地复现设计的几何特征；内部结构连续均匀，无明显分层

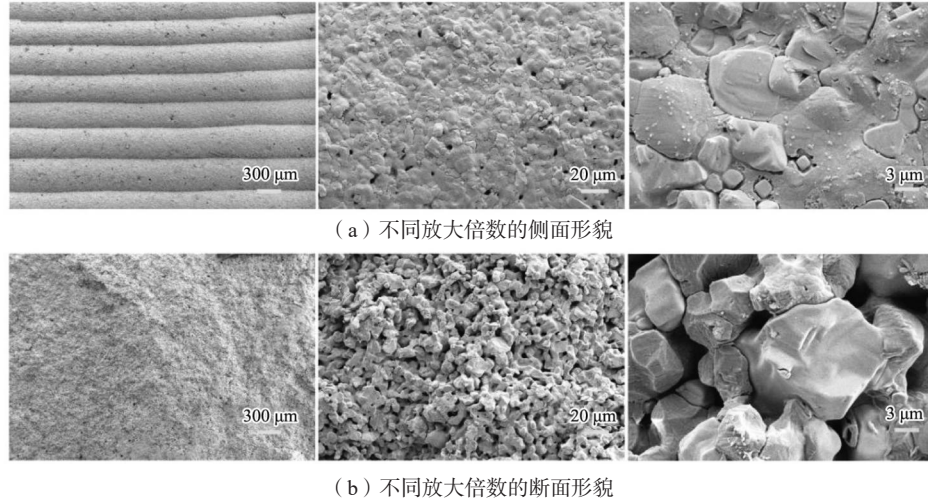


图12 水溶性盐芯试样微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphologies of the water-soluble salt core samples

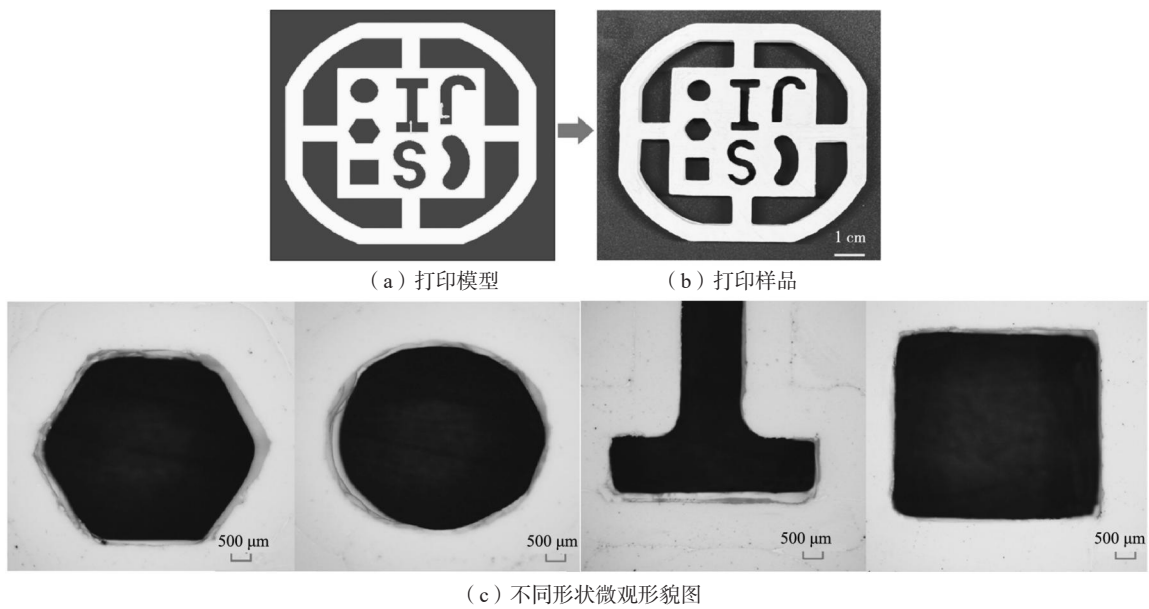


图13 典型结构挤出3D打印

Fig. 13 Typical structures formed by using of extrusion 3D printing technology

表6 挤出3D打印成形典型结构水溶性盐芯的性能  
Tab. 6 Properties of the water-soluble salt core typical structures formed by using of extrusion 3D printing technology

形状	设计尺寸/mm	性能结果				
		打印坯体尺寸/mm	烧结后盐芯尺寸/mm	打印偏差/%	烧结收缩率/%	总偏差/%
圆形	7	6.94	6.37	0.86	8.21	9.00
正六边形	7	6.91	6.33	1.29	8.39	9.57
正方形	7	6.87	6.29	1.86	8.44	10.14
工字形	3	2.94	2.65	2.00	9.86	11.67

或孔隙缺陷。因此，优化后的工艺参数能有效突破传统盐芯的形状限制，为复杂内腔构件的快速铸造提供可靠支撑。

### 3 结论

(1) 工艺参数对水溶性盐芯成形精度的影响程度的主次顺序为：挤出头内径>层高/挤出头内径>打印速度>填充方向。

(2) 综合分析获得高成形精度挤出3D打印成形水溶性盐芯工艺参数优化方案为：挤出头内径

为0.51 mm、层高/挤出头内径为70%、打印速度为600 mm/min、填充方向为45°，此时水溶性盐芯的表面粗糙度为49.67  $\mu\text{m}$ ，尺寸收缩率为17.49% (X方向) 和18.32% (Z方向)，抗弯强度为11.59 MPa，水溶速率为1.84  $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ，吸湿率为7.85%。

(3) 超景深和SEM形貌图表明，优化工艺参数下打印的水溶性盐芯轮廓清晰，结构完整，表面无明显缺陷，颗粒结合紧密。

(4) 采用优化的挤出3D打印工艺参数实现了多形状典型结构盐芯的快速成形。

#### 参考文献:

- [1] 贺艳明, 赵小强, 郎红专, 等. 先进镁合金材料钎焊技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (11): 3662-3688.
- [2] 杨小平, 李瑛辉, 李天才. 3D打印砂型硬化技术的研究与应用[J]. 铸造, 2025, 74 (3): 288-297.
- [3] JIANG W, DONG J, LOU L, et al. Preparation and properties of a novel water soluble core material [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010 (26): 270-275.
- [4] 邹仁啸, 尹绍奎, 于瑞龙, 等. 涡轮叶片用陶瓷型芯3D打印技术研究应用现状及展望[J]. 铸造, 2025, 74 (2): 135-142.
- [5] 刘富初, 黄捷飞, 韩光超, 等. 复杂内腔铸件用水溶性型芯的研究进展(1)[J]. 现代铸铁, 2021, 41 (5): 52-58.
- [6] LIU F, JIANG P, HUANG Y, et al. A water-soluble magnesium sulfate bonded sand core material for manufacturing hollow composite castings [J]. Composite Structures, 2018, 201: 553-560.
- [7] KE R, DONG Y. Preparation and properties of water-soluble ceramic core for light alloy investment casting [J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101918.
- [8] MU Yingpeng, LIU Fuchu, ZHANG Chi, et al. Fabrication of high-strength and anti-hydration water-soluble calcia-based ceramic core modified with nano-ZrO<sub>2</sub> via direct ink writing method [J]. Ceramics International, 2023, 49 (23PB): 38623-38634.
- [9] LIU F, TU S, GONG X, et al. Comparative study on performance and microstructure of composite water-soluble salt core material for manufacturing hollow zinc alloy castings [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 252: 123257.
- [10] 刘富初. 复杂镁合金铸件的型芯材料及清理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [11] 葛旺生, 安肇勇. 金属3D打印及真空技术在曲轴箱开发上的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (11): 1748-1751.
- [12] 龚小龙, 赵建伟, 杨力, 等. 粘结剂喷射增材制造水溶性盐芯材料与性能研究[J]. 铸造, 2025, 74 (2): 143-149.
- [13] HUANG J, LIU F, MU Y, et al. Parameter optimization and precision control of water-soluble support cores for hollow composite castings fabricated by slurry microextrusion direct forming method [J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2024, 11 (5): 1768-1786.
- [14] 卢亚辉. 多材料光固化3D打印的设计和应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2025.
- [15] 龚小龙. 压力铸造用水溶性盐芯的性能强化及回用技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [16] 胡柏林, 穆英朋, 刘富初, 等. 烧结升温速率对微挤出3D打印水溶性氧化钙陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2025, 74 (3): 279-287.
- [17] 赵京京, 赵海滨. 热塑性夹芯结构复合材料制造及改性工艺研究进展[J]. 材料研究与应用, 2024, 18 (3): 437-446.
- [18] MA Y, YU R, ZHOU Y, et al. High-temperature performance of silica ceramic cores with additives prepared by stereolithography 3D printing [J]. China Foundry, 2025, 22 (6): 673-680.
- [19] 穆英朋, 鲁一勤, 林雨露, 等. 铸造用水溶性氧化钙陶瓷型芯3D打印工艺响应面优化研究[J]. 铸造技术, 2023, 44 (11): 1012-1019.
- [20] 穆英朋, 刘富初, 张驰, 等. 水溶性氧化钙陶瓷型芯的挤出式3D打印参数优化与表面精度控制研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60 (1): 170-178.
- [21] 陈拯. 分层挤出成形水溶性盐芯的精度及性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [22] WU M, LIU F, LIN Y, et al. Parameter optimization via wrthogonal experiment to improve accuracy of metakaolin ceramics fabricated by direct ink writing [J]. Additive Manufacturing Frontiers, 2023, 2 (4): 51-66.
- [23] 刘富初, 王妙, 赵彦鹤, 等. 一种基于浆料直写成形3D打印技术制备水溶性复合盐芯的方法: 202411626602.8 [P]. 2025-09-23.
- [24] 刘富初, 王妙, 赵彦鹤, 等. 一种基于热熔挤出3D打印技术制备水溶性复合盐芯的方法: 202411626604.7 [P]. 2025-09-23.
- [25] 朱东彬, 朱秀旭, 吴卓鸿, 等. 直写式梯度材料3D打印装置设计分析与试验研究[J]. 机械设计, 2024, 41 (12): 15-23.
- [26] 穆英朋. 微挤出3D打印成形水溶性CaO陶瓷型芯的精度控制及性能研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2024.
- [27] 许西庆, 李世元, 杨永康, 等. 氧化铝纤维强化陶瓷型芯的3D打印及尺寸精度控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61 (5): 323-329.