

# 3D 打印呋喃树脂砂型成形精度研究与控制

余洛生<sup>1</sup>, 刘 丰<sup>1</sup>, 刘丽敏<sup>2</sup>, 梁昊天<sup>1</sup>, 李 征<sup>1</sup>

(1. 中国机械科学研究总院集团有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044;

2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 为了提高打印砂型的制造精度, 使其更好地应用于铸造行业, 采用响应面法研究了工艺参数对3D打印砂型成形精度的影响规律。结果表明: 打印砂型的成形精度误差在0.22~0.85 mm, 均为正向误差; 型砂目数和树脂喷射量对成形精度有显著影响, 且随着砂粒直径的减小, 打印误差变小, 随着树脂含量提高误差变大; 固化剂含量对精度影响较小, 其加入量提高会使砂型打印精度先变好后变差。提出基于中心偏置的砂型精度补偿算法对精度进行了控制, 经控制后的砂型精度达到了 $\pm 0.1$  mm, 满足工程使用要求。

**关键词:** 3D打印; 砂型; 精度; 渗透

## 作者简介:

余洛生(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为先进成形技术与装备。电话: 15238640570, E-mail: cam\_yuluosheng@163.com  
通讯作者:  
刘丰, 男, 博士, 研究员。电话: 13521334740, E-mail: E-mail: liufengcam@162.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)11-1407-06

## 基金项目:

国家万人计划青年拔尖人才项目资助(W02070184)。收稿日期: 2022-03-18 收到初稿, 2022-04-22 收到修订稿。

近年来3D打印技术在铸造领域取得了较为成功的运用<sup>[1-3]</sup>, Deng等<sup>[4-5]</sup>利用其可设计性强的特点设计出了中空结构砂型及空间桁架结构砂型以确保在凝固过程中对铸件温度的灵活调控, 得到了性能更好的铸件。Sama S R等设计了特殊的浇道和冒口以起到控制金属液的流动速度和补缩过程, 提高了铸件的性能<sup>[6]</sup>。

在3D打印精度方面, 不少学者进行了相关研究。Vaezi M等研究了金属粉末喷墨打印过程粘结剂含量对打印精度造成的影响, 结果表明误差形成原因是粘结剂在粉末床上的渗透<sup>[7]</sup>。Zhao等研究了型砂粒径分布对打印精度的影响规律, 表明粗砂会使精度变差<sup>[8-9]</sup>; Lemu H G等研究了打印过程中数据格式对精度的影响规律, 结果表明STL格式相较于VRML格式打印出的砂型精度更高<sup>[10]</sup>。郭永斌等研究了喷头波形对打印精度影响, 指出波形会影响墨滴的直径和速度, 进而影响砂型的成形精度<sup>[11-12]</sup>。

为了进一步提高打印砂型的精度, 本文采用响应面法研究型砂目数、树脂含量、固化剂含量三者对打印精度误差的影响规律; 通过多项式拟合, 建立精度误差与工艺参数之间的预测模型; 最后提出基于中心偏置法的尺寸补偿方法对打印件的成形精度进行了控制。

## 1 试验材料与方法

试验所用的呋喃树脂及固化剂由济南圣泉公司生产, 树脂为3D打印专用树脂, 型号为SQ3D200, 密度为1.1~1.2 g/cm<sup>3</sup>, 粘度为10~16 mPa·s; 固化剂为混合磺酸, 型号为GS3D300, 密度1.2~1.3 g/cm<sup>3</sup>, 粘度不大于20 mPa·s; 砂子由北京德鲁克公司提供, 三种型砂分别为70/140目、100/200目、140/270目。打印所用设备由北京机科国创轻量化科学研究院有限公司自主研发, 型号为SMP600; 喷头型号为XAAR1003由英国XAAR公司提供, 设备如图1所示。为避免打印环境的波动影响到型砂流动性及砂型固化速度, 打印过程中控制环境温度为(25±1)℃, 湿度为35%~40%。采用马尔文激光粒度仪对三种不同目数的型砂进行粒度检测<sup>[13]</sup>, 结果如图2所示。其平均粒径分别为: 0.241 mm、0.176 mm、0.095 mm, 整体呈现多峰分布。

参考响应面试验法<sup>[14]</sup>, 本试验安排如表1所示。其中树脂含量指打印过程中每

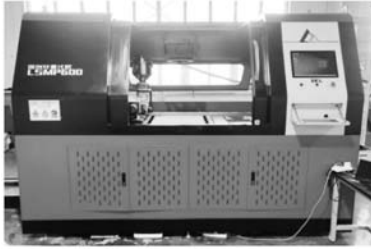


图1 砂型打印机

Fig. 1 Sand mold printing equipment

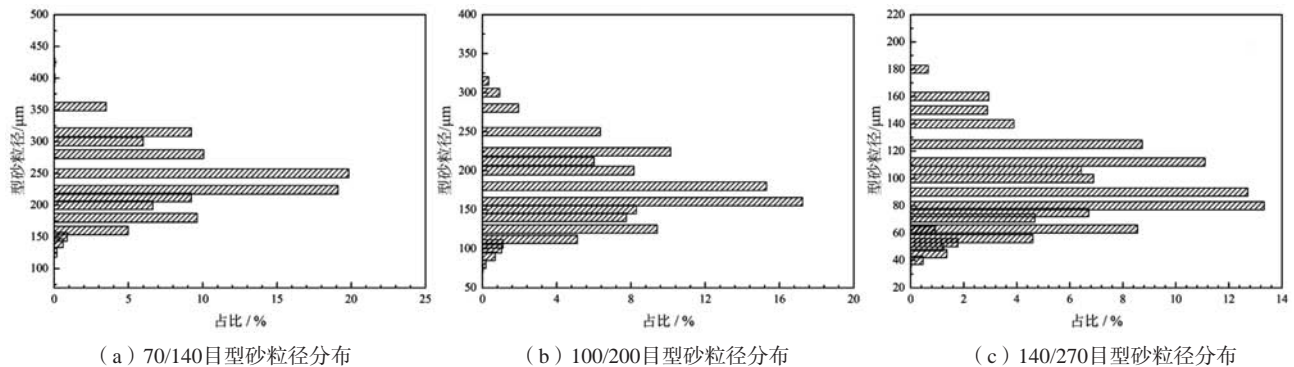


图2 型砂粒度分布

Fig. 2 Grain size distribution of mold sand

表1 打印误差研究试验表

Table 1 Experimental table of printing error research

因素	水平		
	-1	0	1
型砂目数A	70/140	100/200	140/270
树脂含量B/%	2.14	3.03	3.87
固化剂量C/%	0.3	0.4	0.5

表2 尺寸误差响应面试验结果

Table 2 Response surface experimental results for the dimension error

试验序号	型砂目数	树脂含量/%	固化剂含量/%	尺寸误差/mm
1	70/140	3.87	0.3	0.638
2	140/270	2.14	0.4	0.226
3	100/200	3.87	0.4	0.812
4	70/140	3.08	0.4	0.512
5	70/140	3.08	0.4	0.488
6	140/270	3.87	0.4	0.438
7	70/140	2.14	0.5	0.434
8	100/200	3.08	0.5	0.724
9	140/270	3.08	0.5	0.322
10	70/140	3.08	0.4	0.524
11	100/200	2.14	0.4	0.54
12	70/140	3.87	0.5	0.708
13	70/140	3.08	0.4	0.546
14	140/270	3.08	0.3	0.316
15	70/140	3.08	0.4	0.536
16	70/140	2.14	0.3	0.44
17	100/200	3.08	0.3	0.748

## 2 试验结果及讨论

按照表1所示的试验安排进行样件打印和测量。对尺寸误差的定义如式(1)所示。

$$L_{\text{err}} = L_{\text{printed}} - L_{\text{design}} \quad (1)$$

式中： $L_{\text{err}}$ 为砂型打印误差，是树脂含量、型砂目数和固化剂含量的函数； $L_{\text{printed}}$ 为打印完成后测量出的砂型尺寸精度； $L_{\text{design}}$ 为设计尺寸。

尺寸误差的试验结果如表2所示。将平均粒径代替型砂目数，然后对打印尺寸误差与工艺参数进行拟合，建立尺寸误差预测模型。拟合结果如式(2)所示。

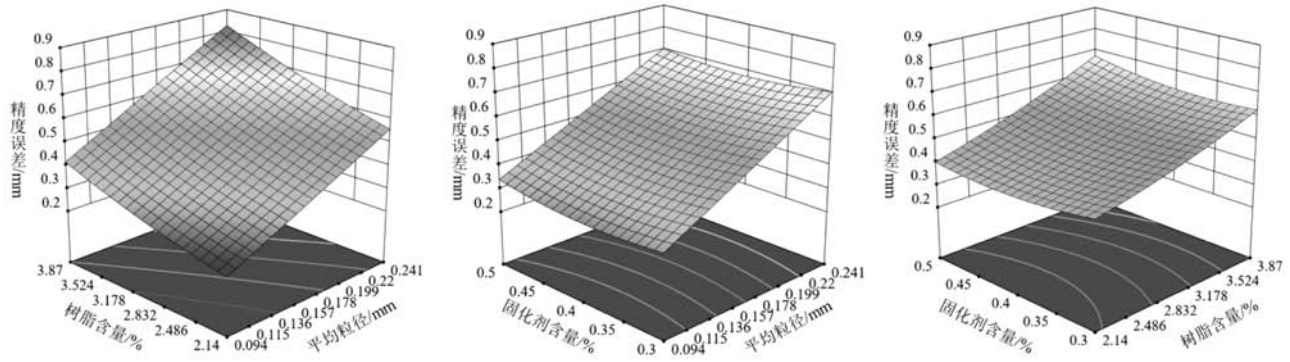
$$L_{\text{err}} = 0.49 + 0.19A + 0.12B + 0.005C + 0.017AB - 0.005AC + 0.018BC + 0.002A^2 + 0.016B^2 + 0.027C^2 \quad (2)$$

表3为尺寸误差的方差分析表，由该表可知，模型的 $P$ 值 $<0.0001$ ，且失拟项不显著，说明该模型可以很好地代表尺寸误差与工艺参数之间的关系。

对表2所列的尺寸误差数据进行响应面分析，结果

一层的喷墨量占该层成形区域型砂的质量分数。由于喷头的喷墨量采用灰度等级控制，且常用的灰度等级为3、4、5，其对应的喷墨量分别为2.14%、3.03%、3.87%，因此本试验树脂量的三个水平分别与其保持一致；固化剂含量指的是其添加量占预混型砂的质量分数。所打印的样件为50 mm × 50 mm × 10 mm的方块，使用游标卡尺进行测量，每个样件测量三次取平均值。

如图3所示。由图3可知，打印砂型精度主要受型砂目数的影响，其次受树脂含量的影响较大，受固化剂含量的影响较小。其中，随砂型目数的提高，精度有显著的提高；随树脂含量增加，精度变差；随固化剂含量增加，



(a) 固化剂为0.4%的树脂与平均粒径响应面 (b) 树脂为3.03%的固化剂与平均粒径响应面 (c) 目数为100/200的树脂与固化剂响应面  
图3 打印精度响应面分析图

Fig. 3 Response surface analysis diagram for print precision

表3 尺寸误差响应面方差分析  
Table 3 Response surface variance analysis for the dimension error

项目	自由度	F值	P值	显著性
模型	9	59.85	<0.000 1	显著
A-型砂目数	1	374.08	<0.000 1	-
B-树脂含量	1	146.92	<0.000 1	-
C-固化剂含量	1	0.246 8	0.634 6	-
AB	1	1.53	0.255 3	-
AC	1	0.150 2	0.709 9	-
BC	1	1.77	0.225	-
A <sup>2</sup>	1	0.021 1	0.888 6	-
B <sup>2</sup>	1	1.42	0.272 3	-
C <sup>2</sup>	1	4.02	0.085 1	-
残差	7	-	-	-
失拟项	3	2.06	0.248 6	不显著
纯误差	4	-	-	-
总离差	16	-	-	-

精度先变好后变差。

为了研究渗透机理，在测量尺寸误差的同时对打印时的砂床孔隙度做出测量。具体的测量方法如式(3)。

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_m - M_b - M_c}{V_m \rho_m} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon$ 为砂型的孔隙度； $M_m$ 为砂型质量； $M_b$ 为砂块中树脂的质量； $M_c$ 为固化剂质量； $V_m$ 为砂块体积； $\rho_m$ 为型砂密度。

孔隙度的试验结果如表4所示。将平均粒径代替型砂目数，然后对孔隙度与工艺参数进行拟合，建立孔隙度预测模型。因为树脂属于后加入的量，不会对铺砂过程的砂床孔隙度造成影响，因此拟合时排除代表树脂含量的B项及与其相关的交叉项和平方项。拟合结果如式(4)所示。

表4 孔隙度试验结果  
Table 4 Response surface experimental results for porosity

试验序号	型砂目数	树脂含量/%	固化剂含量/%	孔隙度/%
1	70/140	3.87	0.3	0.521
2	140/270	2.14	0.4	0.583
3	100/200	3.87	0.4	0.516
4	70/140	3.08	0.4	0.531
5	70/140	3.08	0.4	0.532
6	140/270	3.87	0.4	0.583
7	70/140	2.14	0.5	0.540
8	100/200	3.08	0.5	0.537
9	140/270	3.08	0.5	0.595
10	70/140	3.08	0.4	0.530
11	100/200	2.14	0.4	0.521
12	70/140	3.87	0.5	0.542
13	70/140	3.08	0.4	0.533
14	140/270	3.08	0.3	0.580
15	70/140	3.08	0.4	0.528
16	70/140	2.14	0.3	0.518
17	100/200	3.08	0.3	0.516

$$\varepsilon = 0.53 + 0.031 3A + 0.01C - 0.001 6AC + 0.02A^2 + 0.002 6C^2 \quad (4)$$

孔隙度的方差分析如表5所示，由表5可知，模型的P值<0.000 1，说明该模型可以很好地代表孔隙度与打印工艺参数之间的关系；同时，除交叉项以外，孔隙度与剩余4项之间有较强的关系。

打印精度及孔隙度回归方程拟合的可靠度如表6所示，由表6可知，尺寸误差的R<sup>2</sup>和调整R<sup>2</sup>均大于0.9，且预测R<sup>2</sup>与调整R<sup>2</sup>之间相差值小于0.2，说明该预测方程较为可靠；同理，孔隙度的R<sup>2</sup>和调整R<sup>2</sup>及预测R<sup>2</sup>均大于0.9，表明该模型具有很强的预测能力，满足使用要求。

砂床孔隙度与工艺参数之间的响应面如图4所示，孔隙度随着平均粒径的减小而显著提高，且为非线

表5 孔隙度响应面方差分析  
Table 5 Response surface variance analysis for porosity

项目	自由度	F值	P值	显著性
模型	5	269.19	< 0.000 1	显著
A-型砂目数	1	958.43	< 0.000 1	-
C-固化剂含量	1	93.18	< 0.000 1	-
AC	1	1.34	0.271 5	-
A <sup>2</sup>	1	200.44	< 0.000 1	-
C <sup>2</sup>	1	3.57	0.085 3	-
残差	11	-	-	-
失拟项	7	3.74	0.110 0	不显著
纯误差	4	-	-	-
总误差	16	-	-	-

表6 拟合可靠度  
Table 6 Reliability of response surface fitting

类型	尺寸误差	孔隙度
R <sup>2</sup>	0.987	0.991
调整R <sup>2</sup>	0.971	0.988
预测R <sup>2</sup>	0.865	0.971

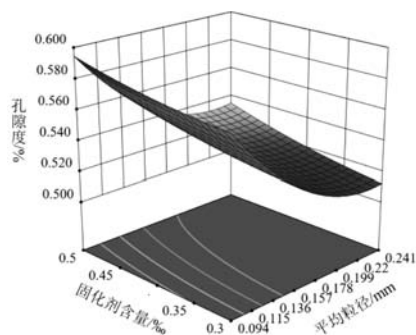
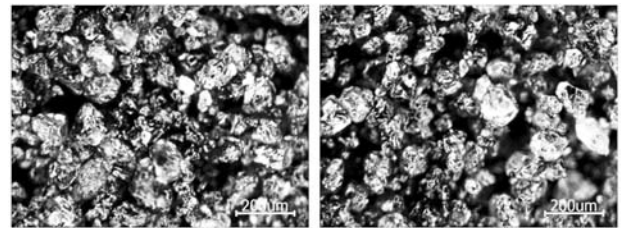


图4 孔隙度响应面分析图

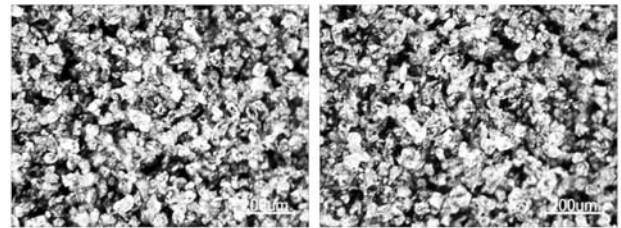
Fig. 4 Response surface analysis diagram for porosity

性关系，这与散沙状态下孔隙度与平均粒径的关系相反，表明3D打印的铺砂工艺改变了这种规律。在铺砂器前进的时候，受到刮刀的作用，型砂颗粒越细，其颗粒的动量越小，越难以挣脱固化剂膜的束缚，砂粒之间的间距会越大，造成了孔隙度的增大。随着固化剂含量的提高，砂床孔隙度增大，其主要原因为固化剂的加入改变了型砂的流动性<sup>[15]</sup>。型砂表面裹上了更多的固化剂，且由于铺砂器刮刀的作用，同样会拉大砂粒之间的间距，进而造成了孔隙度的提高。

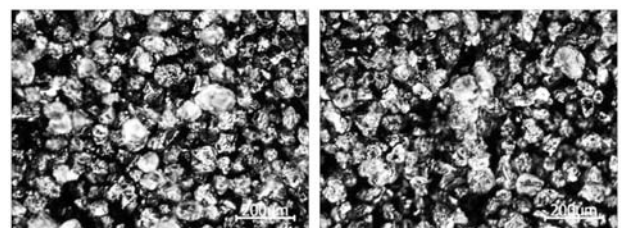
综上所述，树脂含量增加导致了其向外渗透距离的增加，进而导致了打印精度变差。随着砂型目数的提高，精度显著提高，原因在于目数增大带来了多介质砂床渗透率的减小，使得渗透阻力增大进而渗透距离减小。砂型在SZ61体视显微镜下的图像如图5所示。图5a、b为其他条件相同，不同型砂目数的砂型显



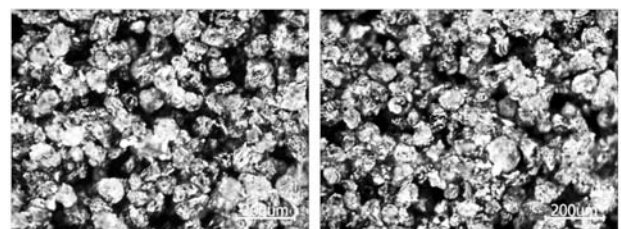
(a) 70/140目砂型显微照片(树脂含量3.03%，固化剂含量0.5%)



(b) 140/270目砂型显微照片(树脂含量3.03%，固化剂含量0.5%)



(c) 100/200目砂型显微照片(树脂含量3.03%，固化剂含量0.3%)



(d) 100/200目砂型显微照片(树脂含量3.03%，固化剂含量0.5%)

图5 砂型光镜显微图像

Fig. 5 Optical microscopic images of the sand molds

微图像，图5c、d为其他条件相同，不同固化剂含量的砂型显微图像。由图5a、b及图4综合分析可知，尽管型砂目数提高（平均粒径减小）带来了孔隙度的增加，但是孔隙尺寸在减小，因此断定影响树脂渗透距离的主要因素是孔隙大小而不是孔隙度。由图5c、d可知，固化剂含量的增加，使得砂粒间距增大，局部出现了砂粒团聚现象，造成了孔隙大小的增大。为了研究树脂与固化剂反应的速度，将固化剂、树脂与型砂混合，固化剂含量为0.4%，树脂含量分别为2.14%、3.03%、3.87%。使用分析天平分别记录反应过程中的脱水量，得到图6所示的质量减少量随时间的变化图。由图6可知，在反应时，树脂含量总是相对较多。当固化剂含量与树脂含量之比相对较大的时候，反应速率更快。因此，固化剂对渗透距离的影响为：开始阶段，固化剂含量的增大提高了反应速度，使得树脂粘度变大，渗透距离缩短，后续因为流动性变差，铺砂过程中砂床的孔隙尺寸逐渐增大，渗透距离逐渐变

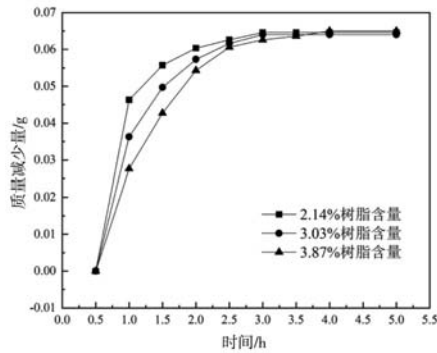


图6 质量减少量随时间变化  
Fig. 6 Mass reduction versus time

大。固化剂和树脂的反应与固化剂导致砂床孔隙尺寸的增大共同影响了渗透的误差。

图7即为70/140目型砂在不同固化剂含量下的流动性变化图。型砂流动性采用流动指数 $FF$ 来表征<sup>[16]</sup>，实验设备为南京土壤仪器厂生产的EDJ-1型直剪仪，由图7可知，在0.2%~0.4%的固化剂范围内，随着固化剂的加入，型砂流动性急剧减小。

为了检验预测模型的有效性，以便于对不同输入

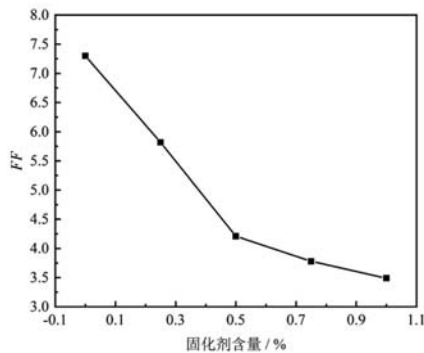


图7 型砂流动性指数变化  
Fig. 7 Variation diagram of molding sand fluidity index

的工艺参数下的尺寸误差做出预测，本文选择如表7所示的四组试验对模型进行检验，由表7可知，预测尺寸误差与试验尺寸误差之间的误差小于3.5%，满足使用要求。

### 3 精度控制方法与验证

为了提高打印砂型的精度，在打印砂型的尺寸误

表7 模型准确度检验表

Table 7 Verification experiment table of the model accuracy

序号	型砂目数	树脂含量/%	固化剂含量/%	实测/预测精度	误差/%
1	70/140	3.03	0.4	0.68/0.653	1.07
2	100/200	3.03	0.4	0.52/0.535	-2.80
3	100/200	3.87	0.5	0.66/0.662	-3.32
4	140/270	3.03	0.4	0.30/0.296 7	1.11

差影响规律研究的基础上，提出如式（5）所示的精度控制方法。其主要思想为：在打印过程中对每层的图像尺寸进行逆向尺寸补偿，成形区域的轮廓向各自的型腔内部偏移距离为打印误差 $L_{err}$ 的一半。

$$L_{offset} = L_{err} (A, B, C) / 2 \quad (5)$$

式中： $L_{offset}$ 为补偿距离； $L_{err}$ 为3D打印砂型的误差随工艺参数变化的函数； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 分别为型砂目数、树脂含量和固化剂含量。

本文所采用的典型件如图8所示，底部为正方形，其方向和打印机 $X$ 和 $Y$ 方向平行，验证 $X$ 方向和 $Y$ 方向精度；第二层为圆柱，第三层为旋转了45°的正方形，验证 $X$ 和 $Y$ 方向的耦合作用。打印的工艺参数为树脂含量3.03%，固化剂含量0.4%，型砂目数为100/200目。优化前和优化后的试样各两个；其待测量的关键尺寸及位置如图8所示，每个测量位置重复测量2次取平均值。由表8可知，优化前，尺寸误差在0.5 mm以上。通过误差补偿优化后，精度在 $\pm 0.1$  mm以内，满足工程使用需求。

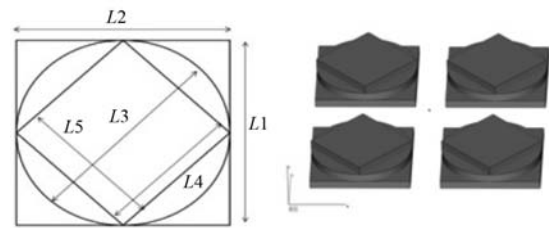


图8 典型样品精度验证  
Fig. 8 Accuracy verification of typical samples

表8 控制前后砂型精度误差

Table 8 Precision error of the sand molds before and after control

位置	设计尺寸/mm	优化前/mm		优化后/mm	
		样件1	样件2	样件1	样件2
L1	100	100.52	100.52	100.04	100.04
L2	100	100.66	100.7	99.96	100.02
L3	100	100.56	100.56	100.02	99.98
L4	70.71	71.34	71.32	70.74	70.72
L5	70.71	71.3	71.28	70.76	70.78

### 4 结论

(1) 采用Box-behnken响应面实验法研究了型砂目数、树脂含量及固化剂含量对打印砂型精度的基本规律，得出型砂目数的提高使误差减小，固化剂含量的提高使误差先减小后增大，树脂含量的提高使误差增大。

(2) 由于3D打印独特的铺砂工艺，使得型砂粒径越小，其多孔介质砂床的孔隙度越大；且随着固化剂的加入量提高，孔隙度越大。其原因为固化剂的存在

改变了型砂的流动性，且在刮刀的作用下改变了砂粒之间的距离。

(3) 提出了基于中心偏置的精度补偿方法，设计

典型件进行了验证。在未经控制前的砂型精度误差处于0.22~0.85 mm之间，经过补偿控制后，精度达到了 $\pm 0.1$  mm，满足工程使用要求。

#### 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 ( 12 ) : 101889.
- [2] TAL N, MOGNOL P, JY H. A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24.
- [3] LYNCH P, HASBROUCK C, WILCK J, et al. Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: metal casting and additive manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26: 1145-1154.
- [4] DENG Chengyang, KANG Jinwu, SHANG-GUAN Haolong, et al. Effects of hollow structures in sand mold manufactured using 3D printing technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 255: 516-523.
- [5] SHANG-GUAN Haolong, KANG Jinwu, Deng Chengyang, et al. 3D-printed shell-truss sand mold for aluminum castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 247-253.
- [6] SAMA S R, WANG J, MANOGHARAN G. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 765-775.
- [7] VAEZI M, CHUA C K. Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53 ( 1-4 ) : 275-284.
- [8] ZHAO Huoping, YE Chunsheng, FAN Zitian. Effect of particle size distribution on the properties of sand mold by three dimensional printing [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 190-191: 467-470.
- [9] 赵火平. 微喷射粘结快速成形铸造型芯关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [10] LEMU H G, KURTOVIC S. 3D printing for rapid manufacturing: study of dimensional and geometrical accuracy [C]// IFIP International Federation for Information Processing. 2012: 470-479.
- [11] 郭永斌, 张景豫, 王敏. 3D喷墨砂型打印机脉冲对砂型质量影响的研究 [J]. 现代铸铁, 2019, 39 ( 2 ) : 41-44.
- [12] LIU Hong, LEI Ting, MA Cong, et al. Optimization of driven waveform of piezoelectric printhead for 3D sand-printing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101627
- [13] 段世航, 崔若然, 江荣风, 等. 激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展 [J]. 土壤, 2020, 52 ( 2 ) : 247-253.
- [14] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [15] 郭智. 多材质砂型3D打印成形机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [16] 谢洪勇, 刘志军. 粉体力学与工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

## Research and Control on Dimensional Accuracy of 3D Printing Furan Resin Sand Mold

YU Luo-sheng<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, LIU Li-min<sup>2</sup>, LIANG Hao-tian<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>

(1. China Academy of Machinery Science and Technology, State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100044, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd, Beijing 100044, China)

#### Abstract:

In order to improve the manufacturing accuracy of printing sand mold, so that it is better used in the foundry industry. The influences of process parameters on the dimensional accuracy of 3D printing sand mold were studied by response surface method. The results showed that the forming accuracy error of the printing sand mold was 0.22-0.85 mm, which was a positive error. The mesh number of molding sand and the amount of resin injection had significant impact on the molding accuracy, and the error decreased with the increase of mesh number and increased with the increase of resin content. The content of curing agent had little effect on the accuracy, and the increase of its addition will make the forming accuracy better first and then worse. The sand mold accuracy compensation algorithm based on center offset was proposed to control the accuracy. The controlled sand mold accuracy reached  $\pm 0.1$  mm, which met the engineering requirements.

**Key words:** 3D printing; sand mold; accuracy; penetration