DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3231

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

穆英朋[1],鲁一勤[1],林雨霄[1],吴　明[1],张　驰[1],刘　浩[1],徐　凯[1],陈　辉[2],韩光超[1,2],刘富初[1,3]
(1. 中国地质大学(武汉) 机械与电子信息学院,湖北 武汉 430074; 2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 3. 中国地质大学深圳研究院,广东 深圳 518057)

摘　要:针对复杂内腔精密铸件用氧化钙陶瓷型芯,研究基于浆料挤出的陶瓷型芯3D打印工艺。采用碳酸钙粉末与聚乙二醇溶液混制陶瓷浆料,通过自制挤出式3D打印装置进行陶瓷坯体制备,再经过烧结工艺得到铸造用陶瓷型芯。以坯体表面粗糙度为衡量指标,基于响应面法以针头内径、层高/内径和打印速度进行三因素三水平Box-Behnken试验。采用逐步回归法拟合得到表面精度回归模型,通过方差分析得出最优工艺方案。结果表明,针头内径是影响陶瓷型芯坯体精度的主要因素。最优3D打印工艺参数为针头内径0.41 mm、层高与针头内径之比0.75、打印速率29.87 mm/s,此时陶瓷型芯坯体表面粗糙度为35.39 μm。

关键词:氧化钙陶瓷型芯;挤出式3D打印;响应面分析法;表面粗糙度;工艺优化
中图分类号:TG241; TH164　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)11-1012-08

Optimization for the 3D Printing Process of Water-soluble Calcia Ceramic Cores for Complex Castings Based on Response Surface Methodology

MU Yingpeng[1], LU Yiqin[1], LIN Yuxiao[1], WU Ming[1], ZHANG Chi[1], LIU Hao[1], XU Kai[1], CHEN Hui[2], HAN Guangchao[1,2], LIU Fuchu[1,3]
(1. School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China; 3. Shenzhen Research Institute, China University of Geosciences, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The 3D printing process of calcia ceramic cores based on slurry extrusion was investigated for precision casting with complex inner cavities. The ceramic slurry was prepared by mixing calcium carbonate powder with polyethylene glycol solution, and ceramic green bodies were prepared using a self-constructed extrusion 3D printing device, followed by a sintering process to obtain ceramic cores for casting. A three-factor, three-level Box-Behnken test was conducted based on the response surface method with needle internal diameter, layer height/internal diameter and printing speed, using the surface roughness of the green bodies as a measure. A stepwise regression method was used to fit a surface accuracy regression model and the optimal process strategy was derived by Analysis of Variance (ANOVA). The results indicate that the inner diameter of the needle is the main factor affecting the accuracy of the ceramic green body. With the optimal 3D

收稿日期:2023-09-11
基金项目:凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202325);中央引导地方科技发展资金自由探索类基础研究项目(2021Szvup158, 2021Szvup159);材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题(P2021-020);中央高校基本科研业务费专项资金(CUG2106346);装备预研教育部联合基金创新团队项目(8091B042207);湖北省揭榜制科技项目(2021BEC010);国家自然科学基金(52375395);湖北省支持企业技术创新发展项目(高新技术企业类)(2021BAB050);国家级大学生创新创业训练计划项目(202310491008, 202310491028, 202310491045, 202310491065, S202310491121, S202310491010);中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2021113, SKJ2021131, SKJ2022119, SKJ2022136);教育部产学合作协同育人项目(220604555150617)

作者简介:穆英朋,1997出生,硕士研究生.研究方向为水溶性陶瓷型芯增材制造等.Email: muyingpeng@cug.edu.cn
通讯作者:刘富初,1987年生,博士,副教授.研究方向为陶瓷型芯增材制造和精密铸造等研究.Email: liufuchu@cug.edu.cn
韩光超,1974年生,博士,教授.研究方向为增材制造与特种加工等.Email: hgc009@cug.edu.cn

引用格式:穆英朋,鲁一勤,林雨霄,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
MU Y P, LU Y Q, LIN Y X, et al. Optimization for the 3D printing process of water-soluble calcia ceramic cores for complex castings based on response surface methodology[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1012-1019

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

printing process parameters, which are 0.41 mm for the needle inner diameter, 0.75 for the ratio of the layer height/needle diameter, and 29.87 mm/s for the printing speed, the surface roughness of the ceramic body is 35.39 μm.

Key words: calcia ceramic core; extrusion 3D printing; response surface method; surface roughness; process optimization

随着航空航天、汽车和轨道交通等行业的快速发展，产品的更新换代日益频繁，复杂精密铸件的需求量显著增加，并且铸件向轻量化、空心薄壁化和复杂化方向发展[1-3]。这类铸件内腔结构较为复杂，通常具有较多形状不同的弯曲孔道，结构细长且基本封闭，在铸造生产中必须采用预先制备的型芯来成形复杂内腔，待浇注完成后设法脱除型芯[4]。因此用于成形复杂内腔的型芯形状也变得复杂、结构更加精细、整体成形难度较大并且存在铸后残留型芯难以清理的问题，这对铸造型芯的性能和成形提出了更高的要求。

在熔模铸造过程中，复杂铸件内腔铸造所用的型芯需要具有良好的尺寸精度、较好的化学稳定性和优异的溃散性[5]。目前常用型芯种类包括金属型芯、树脂砂型芯和陶瓷型芯[6]。其中金属型芯、树脂砂芯和氧化铝[7]、氧化硅陶瓷型芯具有较好的高温化学稳定性和较高的强度，但封闭内腔的残余型芯清理困难[8]。多采用专门的设备或使用氢氟酸法和碱溶液法等进行脱芯处理，这不仅使铸件生产周期变长，而且会对铸件的表面产生腐蚀而导致缺陷。水溶性型芯可以很好地解决铸后难以清理的问题，其中 CaO 陶瓷型芯的熔点高、热力学稳定性好，铸件成形后通过水溶解即可快速清理残留型芯[9]，是一种极具吸引力的陶瓷型芯材料，可广泛应用于复杂零件的熔模铸造[10-12]。

传统陶瓷型芯成形方法包括热压铸法、灌浆成形法、凝胶注模成形法和传递模法，这些方法都无法摆脱模具对陶瓷型芯生产的限制，生产周期较长，无法满足不断缩短的产品更新周期和频繁的产品改型需求，更无法实现形状复杂、结构精细型芯的生产[13-14]。近年来 3D 打印技术在成形复杂形状和结构方面更加灵活，为解决制备内部复杂结构型芯提供了一种新的方法[15-16]。3D 打印技术无需昂贵的模具就可以实现所需的设计，尤其是一些传统制造工艺难以成形的复杂形状和结构[17]。

挤出式 3D 打印成形(direct ink writing)作为一种增材制造技术，以具有剪切变稀特性的非牛顿流体油墨为成形原料，根据设计的几何形状的切片数据，在一定的压力下逐层堆积成形三维物体[18]。相比于光固化成形技术(stereo lithography appearance, SLA)、激光选区烧结成形技术(selective laser sintering, SLS)和黏结剂喷射成形技术(three-dimension printing, 3DP)相比，挤出式 3D 打印成形设备简单、成本较低，材料适用性广，在陶瓷、生物骨架、合金、食品等领域都有广泛应用[19]。因此，挤出式 3D 打印更适合于快速无模制造复杂结构陶瓷型芯。然而，挤出式 3D 打印成形陶瓷型芯的表面质量相对较低，限制了该技术在复杂陶瓷型芯快速制造中的应用。

已有研究结果表明，挤出式 3D 打印成形陶瓷的精度受多个工艺参数影响[20-24]。张静等[20]通过建立沉积层高度变化模型以确定最佳层高，系统研究了打印层高对打印样件质量的影响，当 $h/d = 0.96$ 时，零件上表面平滑无缺陷、侧面纹路清晰。刘骥远等[21]分析了挤出压力、分层厚度、扫描速度和挤出速度对陶瓷零件的成型精度的影响，并确定了各个打印工艺参数范围。Tang 等[22]通过分析打印层高、针头内径和打印速度对陶瓷零件表面质量的影响，经优化后陶瓷零件表面粗糙度较低。Chen 等[23]研究发现挤出式 3D 打印样件表面质量表现出各向异性，氧化锆零件侧面粗糙度远大于表面粗糙度。上述研究表明，打印层高、扫描速度和针头内径等参数对 3D 打印陶瓷零件表面质量有显著影响，然而打印参数之间耦合作用对表面质量的影响规律研究较少。

本研究基于响应面法以针头内径、层高/内径和打印速度进行三因素三水平 Box-Behnken 试验。以打印陶瓷坯体表面粗糙度为衡量指标建立二次回归模型，通过方差分析(analysis of variance, ANOVA)对所建立模型进行可信度分析。讨论了 3 个因素与响应值表面粗糙度之间的关系，分析了 3 个因素之间的交互作用，确定了最优工艺参数组合并通过试验进行验证。为获得高质量和高精度的复杂陶瓷型芯提供了数据支撑，对工业发展具有重要的理论和实践意义。

1　实验材料与方法

1.1　陶瓷浆料制备

使用 1250 目 $CaCO_3$ 粉末(D_{50}=4.62 μm，常州禹恩新材料科技有限公司)作为基体材料，颗粒的微观形貌呈现不规则形状。以去离子水为溶剂配置质量分数为 30%的聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG, M_w=4 000 g/mol，国药集团化学试剂有限公司)溶液作为黏结剂。使用有机硅消泡剂(武汉卓岩科技有限

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

公司)去除陶瓷浆料中的气泡。

称取 147.34 g 的 $CaCO_3$ 粉末加入 30%(质量分数)的 PEG 溶液中混合,并加入 0.5%的有机硅消泡剂去除浆料中气泡。为获得分散性和稳定性较好的陶瓷浆料,将浆料转移至行星式球磨机(QM-QX,南京莱步科技有限公司)中以 300 r/min 的转速球磨 9 h。

1.2 3D 打印成形设备

使用自主搭建的打印装置(3D 打印成形陶瓷型芯坯体),该打印设备包括机械运动模块、驱动浆料挤出装置和软件控制系统,如图 1 所示。将球磨后的陶瓷浆料装填入注射器中并安装在打印机的夹具上,注射器在步进电动机的控制下可以沿 x 轴和 y 轴移动,浆料以逐层累积的方式沉积在成形平台的基板上。挤出系统采用气动挤出模式,空气压缩机提供浆料的挤出动力,通过压力控制器调节气压的大小。使用 Simplify 3D 软件控制和调整打印参数。

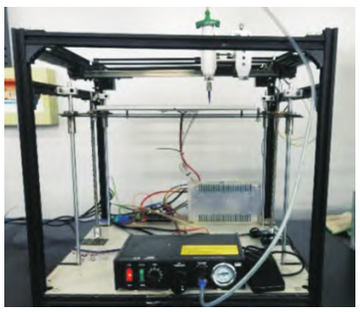


图 1 自主搭建挤压式 3D 打印设备

Fig.1 Self-built extrusion 3D printing equipment

1.3 型芯坯体打印与表征

通过 SolidWorks 三维建模,模型为 60 mm×10 mm×6 mm 的长方体,将模型导入 Simplify 3D 软件中。为了便于打印完成坯体的脱除,将坯体打印在铝板上,并在铝板上均匀涂抹一层二甲基硅油(美国道康宁)。打印完成的坯体自然干燥 24 h 后从基板上取出,之后将坯体转移至恒温干燥箱中 70 ℃干燥 8 h 去除表面多余水分。为测量坯体的表面粗糙度,使用接触式粗糙度测量仪(上海泰明轮廓仪 JB-6C)测量坯体表面的粗糙度,测量长度为 4 mm,每个试样测量 5 次。使用超景深显微镜(日本浩视 RX-100)拍摄氧化钙陶瓷型芯坯体的表面形貌。

1.4 试验设计

在响应面优化 3D 打印型芯坯体成形工艺参数前,首先通过单因素试验来确定各因素的取值范围。对针头内径、层高/内径和打印速度 3 个因变量分别进行单因素试验,用坯体的成形性以及坯体表面质量为评价指标。基于团队前期单因素试验结果,三因素的取值范围分别为针头内径 0.41~0.61 mm,层高/内径比值 0.75~0.95,打印速度 20~30 mm/s。

基于单因素试验结果,根据 Box-Behnken 设计原理,以针头内径、层高/内径和打印速度为自变量,分别用 A、B 和 C 表示,陶瓷型芯坯体表面(层层累积的侧表面)粗糙度为响应值,用 Y 表示。以三因素三水平进行响应面试验优化陶瓷型芯坯体挤出成形工艺,试验因素水平设计如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素水平

Tab.1 Response surface test factor levels

Level	Factor		
	Nozzle internal diameter (A)/mm	Layer height/internal diameter (B)	Printing speed (C) /(mm·s^{-1})
-1	0.41	0.75	20
0	0.51	0.85	25
1	0.61	0.95	30

2 实验结果及讨论

2.1 响应面试验结果

将表 1 试验参数输入至 Design-expert 软件中,根据计算,共 17 组工艺参数组合,其中 5 组中心点重复组用于评估试验误差。通过接触式粗糙度测量仪得到不同工艺参数下型芯坯体表面粗糙度,不同工艺参数组合及试验结果如表 2 所示。

表 2 响应面试验及结果

Tab.2 Response surface methodology test tables and results

Experiment number	Input variable			Response value
	A/mm	B	C/(mm·s^{-1})	Y-surface roughness /μm
1	0.41	0.75	25	41.03
2	0.61	0.75	25	59.56
3	0.41	0.95	25	46.13
4	0.61	0.95	25	72.71
5	0.41	0.85	20	42.56
6	0.61	0.85	20	67.78
7	0.41	0.85	30	37.23
8	0.61	0.85	30	66.27
9	0.51	0.75	20	42.36
10	0.51	0.95	20	57.39
11	0.51	0.75	30	42.37
12	0.51	0.95	30	45.66
13	0.51	0.85	25	54.28
14	0.51	0.85	25	55.03
15	0.51	0.85	25	51.73
16	0.51	0.85	25	57.69
17	0.51	0.85	25	56.53

2.2 回归模型建立与可信度分析

回归分析是一种预测性的建模技术,用来研究自变量和因变量之间的关系。回归分析通过建立回归模型,并根据实测数据求解模型的各个参数,然后评价回归模型是否能够很好地拟合实测数据;如果拟

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合得好，则该模型可以对未知因变量进行估计和预测。根据前期实验数据和经验,3D 打印陶瓷坯体表面精度与针头内径、层高/内径比值和打印速度有关,因此以“表面精度”为因变量,“针头内径”“层高/内径比值”和“打印速度”为自变量,作线性回归分析。

通过对不同参数打印的坯体表面粗糙度的测量和计算,对实验结果进行二次回归分析,建立陶瓷型芯坯体表面粗糙度的回归模型,得到自变量针头内径、层高/内径和打印速度与因变量表面粗糙度之间的回归模型方程:

$$Y=55.05+12.42A+4.57B-2.32C+2.01AB+0.69AC-2.94BC+3.16A^2-3.35B^2-4.75C^2 \quad (1)$$

为探究回归模型中各因素与响应值之间的影响显著性及模型的可信度,对回归方程进行方差分析,其结果如表 3 所示。

F 值和 P 值为显著性检验指标,F 值越大表示回归模型的显著性越强,P 值越小表示模型不成立的概率越小,模型精度越高。由表 3 回归模型方差分析表明,表面粗糙度回归模型的 F 值为 38.18,$P<0.000\ 1$，则表明该回归方程模型具有统计学显著性。而回归模型中失拟项的 P 值可反映试验数据与模型的不显著程度，本模型 P 值为 0.529 5 远大于 0.05，因此该模型在拟合过程中存在的误差并不显著,回归模型与试验数据拟合程度较高。

R^2 为决定系数(拟合度),R^2_{pred} 为预测决定系数,R^2_{Adj} 为校正决定系数,表面粗糙度模型的决定系数、预测决定系数和校正决定系数分别为 0.98、0.855 6 和 0.954 4,均接近 1,且 R^2_{pred} 和 R^2_{Adj} 间差值小于 0.2,这证明实际值与预测值较为接近，模型拟合效果良好。同时模型的信噪比(S/N)为 21.288,远远大于所要求的数值 4,证明此回归方程具有较高的可信度。分别以氧化钙陶瓷型芯坯体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 2 所示。由图可知,散点均匀分布在 $y=x$ 直线上,说明模型具有足够高的精确度，可以用于预测和分析打印参数对坯体粗糙度的影响。

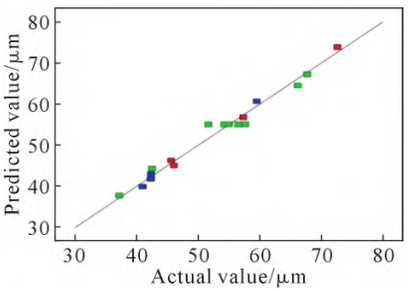


图 2 表面粗糙度实测值与预测值散点图

Fig.2 Scatter plot of actual and predicted surface roughness values

经方差分析,根据表 3 中各因素 P 值的大小,单因素 A、B、C 对坯体表面粗糙度影响显著性次序为 $A>B>C$,说明 A 因素(针头内径)对型芯坯体表面粗粗都影响最大,层高/内径比值的影响次之,打印速度的影响最小。针头内径的大小决定浆料挤出丝的状态,进而影响陶瓷坯体表面的成形质量。当针头内径过小，陶瓷坯体在挤出过程中容易引起针头堵塞而导致挤出丝不连续,降低表面精度;当针头内径过

表 3 响应曲面回归模型方差分析

Tab.3 Analysis of variance of the response surface methodology regression model

Source of variance	Sum of square	Degrees of freedom	Mean squarevalue	*F*-value	*P*-value Prob> *F*	Significance
Model	1 679.89	9	186.65	38.18	< 0.000 1	Significant
A	1 234.30	1	1 234.30	252.50	< 0.000 1	
B	167.17	1	167.17	34.20	0.000 6	
C	43.06	1	43.06	8.81	0.020 9	
AB	16.20	1	16.20	3.31	0.111 5	
AC	3.65	1	3.65	0.75	0.416 3	
BC	34.46	1	34.46	7.05	0.032 7	
A^2	42.05	1	42.05	8.60	0.021 9	
B^2	47.39	1	47.39	9.69	0.017 0	
C^2	95.09	1	95.09	19.45	0.003 1	
Residual	34.22	7	4.89			
Lack of fit	13.44	3	4.48	0.86	0.529 5	Insignificant
Pure error	20.78	4	5.19			
Sum	1 714.11	16				
R^2=0.98	R^2_{pred}=0.85					
R^2_{Adj}=0.9	CV/%=4.91					

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大，挤出丝的横截面较大、干燥速度变慢，在层层累积的过程中容易导致坍塌，不利于精度控制。

图 3 所示为使用不同内径打印氧化钙陶瓷型芯坯体表面形貌。由图可知，随着针头内径的增加，挤出丝直径变大，层纹深度增加，陶瓷坯体表面精度降低。针头内径对陶瓷型芯坯体影响机理模型如图 4 所示，其中 d 为针头内径，h/d 为打印层高(打印过程中针头每层抬升高度)，Δx 为层纹深度，代表坯体表面的平整度。在层高/内径相同的情况下，随着针头内径从 d_1 增加至 d_2，层纹深度从 Δx_1 增加到 Δx_2，坯体表面粗糙度随之增加。

图 5 所示为层高/内径比值对坯体表面形貌及粗糙度影响模型。层高/内径比值也是通过层纹深度来影响坯体表面粗糙度。在挤出头直径相同的情况下，当打印层高从 h_1 增加到 h_2，层纹深度从 Δx_1 增加到 Δx_2，坯体侧面的粗糙度也随之增加，坯体侧表面的精度下降。

打印速度是通过影响挤出丝的形状来影响坯体表面粗糙度。图 6 所示为不同打印速度对挤出丝形态影响机理。当挤出平衡时，挤出丝直径接近针头内径，此时通过施加适当气压实现陶瓷丝材均匀流畅挤出；当挤出速度较低时，挤出的陶瓷浆料供大于求，挤出丝被过渡堆积而产生膨胀出现过挤出的现象，因此在成形坯体时会降低表面质量；当挤出速度过快，陶瓷浆料未沉积就产生拉伸，进而使得挤出丝直径小于针头内径，降低表面质量的同时降低层间黏附力。

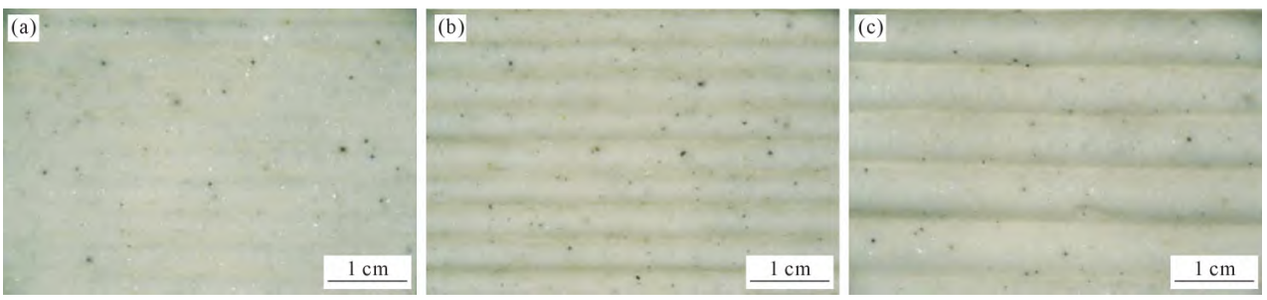


图 3 不同针头内径打印陶瓷型芯坯体表面形貌：(a) 0.41 mm，(b) 0.51 mm，(c) 0.61 mm

Fig.3 Surface morphology of ceramic core green bodies printed with different needle diameters: (a) 0.41 mm, (b) 0.51 mm, (c) 0.61 mm

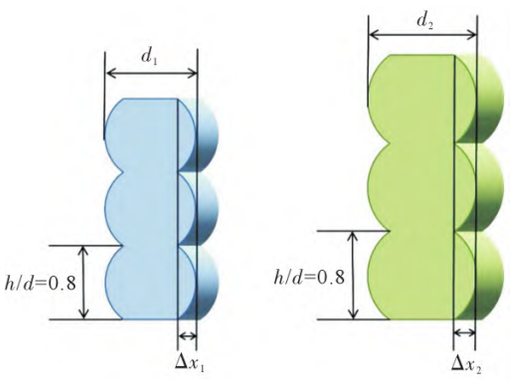


图 4 不同针头内径挤出丝堆积对坯体表面粗糙度影响模型 ($d_1<d_2$, $\Delta x_1<\Delta x_2$)

Fig.4 Modeling the effect of extruded filament build-up on the surface roughness of green bodies with different needle inner diameters($d_1<d_2$, $\Delta x_1<\Delta x_2$)

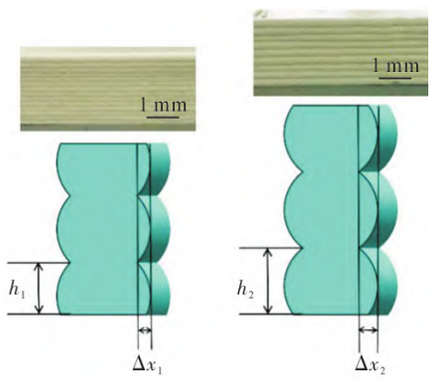


图 5 不同层高/内径比值对坯体表面影响($h_1<h_2$, $\Delta x_1<\Delta x_2$)

Fig.5 Effect of different layer height/inner diameter ratios on the surface morphology of ceramic green bodies($h_1<h_2$, $\Delta x_1<\Delta x_2$)

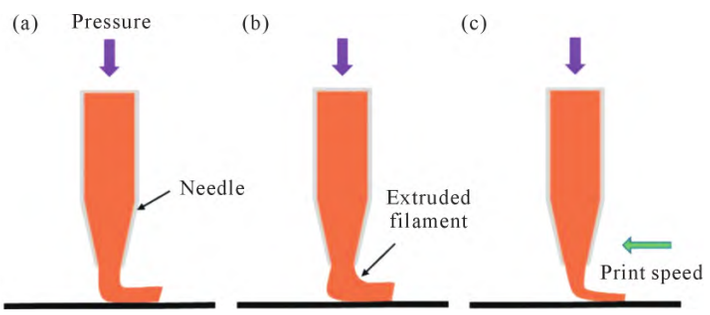


图 6 不同打印速度对挤出丝影响：(a) 挤出平衡，(b) 过挤出，(c) 欠挤出

Fig.6 Effect of different print speeds on extruded filaments: (a) balanced extrusion, (b) over extrusion, (c) under extrusion

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3 因素交互作用响应分析

使用 Design-Expert 软件 Analysis 模块分析并得到各个参数之间的响应面曲线图以及相应的等高线图，以此来研究某一因素固定中心值不变时，其余不同两种工艺参数的交互作用对坯体表面粗糙度的影响。

等高线图中的等高线为椭圆形则表明两个影响因素之间交互作用显著，而圆形的等高线则表明两个影响因素之间交互作用不显著。当响应面坡度较陡，斜率较大，则说明两个影响因素之间具有较强交互作用。响应曲面图与等高线图中的不同颜色分布主要表明了粗糙度变化幅度的大小，当偏向于深色时则说明变化幅度大，当偏向于浅色时则说明变化幅度小。等高线图和响应曲面中的红点为实际测得的实验组数据在图表中的分布位置。

图 7 为针头内径和层高/内径比值的等高线和响应曲面图。由图 7a 知，在打印速度不变的情况下，针头内径和层高/内径比值等高线图接近椭圆形状；由图 7b 知，随着针头内径与层高/内径的增大，响应面坡度较大、弯曲明显。由此可知，针头内径与层高/针头内径对型芯坯体粗糙度影响较大，同时两个影响因素之间的交互作用显著。

图 8 为针头内径和打印速度等高线和响应曲面。由图 8a 知，在层高/内径比值不变的情况下，针头内径和打印速度等高线图近似椭圆形状；由图 8b 知，随着针头内径与打印速度的增大，响应面坡度较陡。由此可知，针头内径与打印速度对型芯坯体粗糙度影响较大，同时 2 个影响因素之间的交互作用显著。

图 9 为层高/内径和打印速度的等高线图和响应曲面图。由图 9a 知，在针头内径不变的情况下，层高/内径和打印速度等高线图为椭圆形状；由图

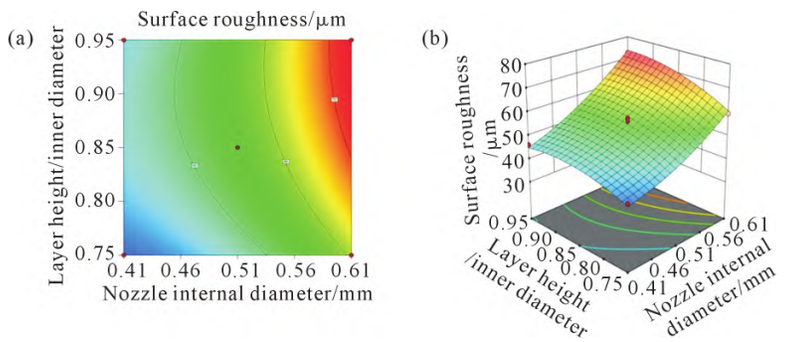


图 7 针头内径和层高/内径的等高线及响应面：(a) 等高线图，(b) 响应面图

Fig.7 Contour line and response surface of the needle inner diameter and layer height/inner diameter of the needle: (a) contour diagram, (b) response polygon

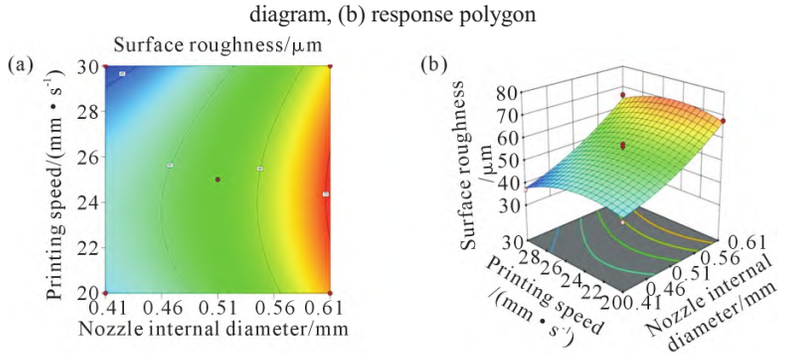


图 8 针头内径和打印速度的等高线及响应面：(a) 等高线图，(b) 响应面图

Fig.8 Contour line and response surface of the needle inner diameter and printing speed: (a) contour diagram, (b) response polygon

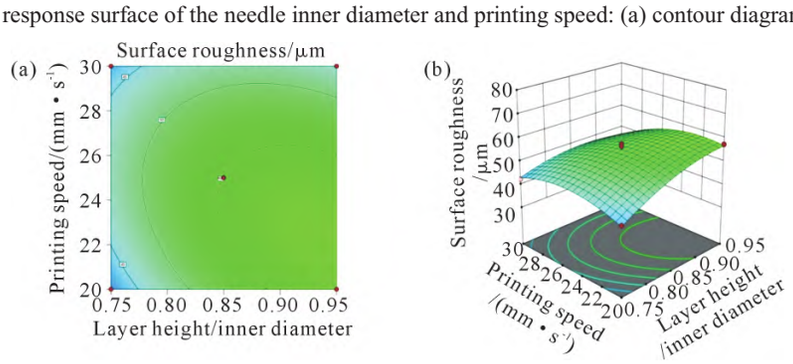


图 9 层高/内径和打印速度的等高线及响应面

Fig.9 Contour line and response surface of the layer height/inner diameter of the needle and printing speed

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

9b 知，随着层高/内径与打印速度的增大，响应面坡度平缓。由此可知，层高/内径与打印速度 2 个影响因素之间交互作用显著，但对陶瓷坯体粗糙度的影响较小。

两种工艺参数的交互作用 AB、AC、BC 对坯体表面粗糙度影响显著性次序为 $BC>AB>AC$。二次项对坯体表面粗糙度影响显著性次序为 $C^2>B^2>A^2$。

2.4 响应面最优结果预测与验证

利用 Design-Expert 软件 Optimization 功能中的数值模块对型芯坯体表面粗糙度 Y 回归方程进行回归拟合，分析并求解模型的最优化参数值。当针头内径 A 为 0.41 mm、层高/内径比值 B 为 0.75、打印速度 C 为 29.87 mm/s 时，3D 打印成型陶瓷型芯坯体的表面粗糙度最小，预测值为 35.41 μm。在该试验条件下对响应面最优值进行试验验证，陶瓷型芯坯体表面形貌如图 10 所示，坯体表面呈现出线性度较好的层纹。重复 3 次实验并分别测量坯体表面粗糙度，陶瓷型芯坯体表面粗糙度分别为 34.91、35.81、35.46 μm，取其平均值 35.39 μm，与回归模型预测值相比非常接近。通过响应面建立的陶瓷型芯坯体表面粗糙度回归模型真实地拟合了实际情况，对于 3D 打印直接成形陶瓷型芯工艺参数优化具有较好的指导与实践意义。

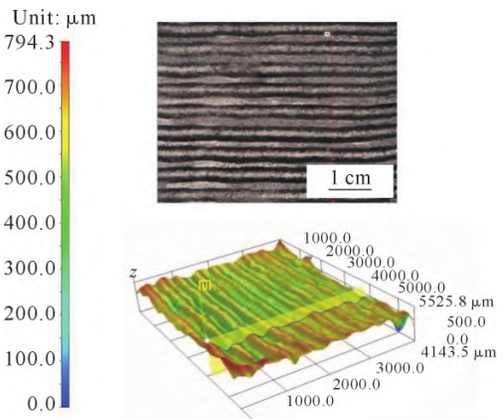


图 10 优化工艺参数 3D 打印陶瓷坯体表面形貌

Fig.10 Surface morphology of the 3D printed ceramic green body obtained by optimizing the process parameters

3 结论

(1)在单因素试验结果的基础上，采用 Box-Behnken 响应面试验建立回归模型，通过对回归模型方差分析表明所建立模型能准确的预测结果，为高精度 3D 打印成形陶瓷型芯提供了指导意义。

(2)针头内径、层高/内径和打印速度 3 个因素对型芯坯体表面粗糙度影响的显著程度从大到小依次为针头内径、层高/内径、打印速度。两两因素交互作用等高线图和响应面图分析表明，双因素对表面粗糙度影响的显著程度从大到小依次为层高/内径与打印速度、针头内径与层高/内径和针头内径与打印速度。

(3)通过响应面法建立的型芯坯体表面粗糙度预测模型最佳工艺参数组合为：针头内径 0.41 mm、层高/内径比值为 0.75、打印速度为 29.87 mm/s。通过试验验证，在此条件下所得陶瓷型芯表面粗糙度为 35.39 μm，试验结果与理论预测值 35.41 μm 非常接近，验证了响应面法用于 3D 打印工艺参数优化的准确性。

参考文献：

[1] LIU F C, 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.

[2] YANG L, FENG Q C, TANG S Y, et al. Effect of $CaTiO_3$ on sintering properties of Y_2O_3-based ceramic shell *via* extrusion-based 3D printing for titanium alloy casting [J]. Ceramics International, 2023, 49(11): 19338-19345.

[3] JIANG W G, DONG J S, LOU L H, et al. Preparation and properties of a novel water soluble core material [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2010, 26(3): 270-275.

[4] 孙冰，刘义辉，乔海滨，等. 水溶蜡芯在钛合金精铸件生产中的应用[J]. 铸造技术，2022, 43(6): 468-472.
SUN B, LIU Y H, QIAO H B, et al. Application of water-soluble wax core in titanium alloy investment casting [J]. Foundry Technology, 2022, 43(6): 468-472.

[5] ZHAO H P, YE C S, XIONG S H, et al. Fabricating an effective calcium zirconate layer over the calcia grains via binder-jet 3D-printing for improving the properties of calcia ceramic cores [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101025.

[6] GONG X L, LIU X W, CHEN Z, et al. 3D printing of high-strength water-soluble salt cores via material extrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118: 2993-3003.

[7] LI G J, TANG S Y, YANG L, et al. Fabrication of soluble salt-based support for suspended ceramic structure by layered extrusion forming method[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108173.

[8] KE R, DONG Y S. Preparation and properties of water-soluble ceramic core for light alloy investment casting [J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101918.

[9] LIU F C, FAN Z T, LIU X W, et al. Aqueous gel casting of water-soluble calcia-based ceramic core for investment casting using epoxy resin as a binder[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 1235-1242.

[10] ZHAO H P, YE C S, FAN Z T, et al. 3D printing of CaO-based ceramic core using nanozirconia suspension as a binder[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(15): 5119-5125.

[11] YANG L, TANG S Y, LI G J, et al. Performance characteristics of collapsible CaO-SiO_2 based ceramic core material via layered ex-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

trusion forming[J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7681-7689.

[12] YANG Q, ZHU W J, LU Z L, et al. Rapid fabrication of high-performance CaO-based integral ceramic mould by stereolithography and non-aqueous gelcasting[J]. Materials, 2019, 12(6): 934.

[13] 梁启如，吴玉胜，刘孝福，等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展[J]. 铸造，2018, 67(9): 790-793.
LIANG Q R, WU Y S, LIU X F, et al. Development progress of ceramic cores for casting turbine blades of aero engines[J]. Foundry, 2018, 67(9): 790-793.

[14] TANG S Y, YANG L, LIU X W, et al. Direct ink writing additive manufacturing of porous alumina-based ceramic cores modified with nanosized MgO[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(15): 5758-5766.

[15] HU K H, WANG H Y, LU K, et al. Fabrication of silica-based ceramic cores with internal lattice structures by stereolithography[J]. China Foundry, 2022, 19: 369-379.

[16] 卢宝胜，程东霞. 3D 打印砂芯技术在铸件开发中的应用[J]. 铸造技术，2021, 42(12): 1026-1029, 1037.
LU B S, CHENG D X. Application of 3D sand core printing technology in casting development[J]. Foundry Technology, 2021, 42 (12): 1026-1029, 1037.

[17] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.

[18] LING Q, YANG L, TANG S Y, et al. Direct ink writing of hierarchically porous Al_2O_3 matrix composites with enhanced wettability of Al[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 1580-1588.

[19] HON K K B, LI L, HUTCHINGS I M. Direct writing technology-Advances and developments[J]. CIRP Annals, 2008, 57(2): 601-620.

[20] 张静，周婧，张旭，等. 层高对陶瓷浆料微流挤出成形质量的影响研究[J]. 中国机械工程，2021, 32(15): 1844-1853, 1860.
ZHANG J, ZHOU J, ZHANG X, et al. Study on influences layer height on forming quality of ceramic slurry microfluidic extrusion[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1844-1853, 1860.

[21] 刘骥远，吴懋亮，蔡杰，等. 工艺参数对 3D 打印陶瓷零件质量的影响[J]. 上海电力学院学报，2015, 31(4): 376-380.
LIU J Y, WU M L, CAI J, et al. Influence of operating parameters on 3D printing ceramic parts[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(4): 376-380.

[22] TANG S Y, YANG L, LI G J, et al. 3D printing of highly-loaded slurries via layered extrusion forming: Parameters optimization and control[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 546-553.

[23] CHEN X J, LI Y M, ZHAO G R. Preparation and characterization of 3D printed ZrO_2 ceramic parts fabricated by powder extrusion printing[J]. Ceramics International, 2023, 49(2): 2721-2729.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net