

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.09.010

# 固化深度对光固化3D打印成型性能和精度的影响

申金福,周志祥,曹升,余敏,韩小瑜

(浙江科技学院生物与化学工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为了获得高质量的制件,研究了打印参数、固化深度与制件性能和精度间的关系。首先,通过响应面法研究了打印参数对固化深度的影响。实验结果表明,与功率和温度相比,曝光时间对固化深度的影响最为显著。通过检测不同固化深度下制件的拉伸强度、凝胶率、Z轴(垂直方向)和X-Y轴(水平方向)尺寸的变化,研究分析了固化深度对零件力学性能和精度的影响。结果表明,打印参数会直接影响制件打印完成时的性能。然而,进行二次固化处理后,性能差异性降低。随着固化深度的增加,零件在Z轴上的精度降低,在X-Y轴上的精度则表现为先增加后降低的趋势。线宽未增至设计尺寸时,紫外光溢出现象也会导致小间距特征结构的黏附和堵塞。通过对试验树脂的工艺参数进行优化,选择固化深度为0.1 mm时,成功制备出具有清晰通道结构的微流芯片。

**关键词:** 3D打印;响应面;固化深度;力学性能;精度

**中图分类号:** TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)09-0057-06

## The Influence of Curing Depth on The Products Properties and Precision of UV-Curing 3D Printing

Shen Jinfu, Zhou Zhixiang, Cao Sheng, Yu Min, Han Xiaoyu

(School of Biological and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract :** In order to produce high-quality products, the relationship between printing parameters, curing depth, mechanical properties and precision of products was investigated. The effect of printing parameters on curing depth was initially analyzed by response surface methodology. The experimental results show that the exposure time has the most significant effect on curing depth comparing with curing power and temperature. Additionally, the influence of curing depth on the mechanical properties and precision of products was studied by investigation of the tensile strength, gelation rate, Z-axis (vertical) and X-Y-axis (horizontal) dimensions of curing products at different curing depths. The results show that the printing parameters directly affect the mechanical properties of the products. However, the differentials of mechanical properties could be reduced after the secondary curing. As the curing depth increases, the products precision decreases in the Z-axis, while the precision in the X-Y-axis increases followed by a decrease. Furthermore, although the line width is not expanded to the design size, the UV overflow causes the adhesion and blocking of small-pitch feature structures as the curing depth increases. Based on the optimization of printing technologies, a microfluidic chip with a high-precision transparent channel structure was successfully prepared under a curing depth of 0.1 mm.

**Keywords :** 3D printing ; response surface ; curing depth ; mechanical property ; precision

光固化打印技术是目前应用最为广泛的3D打印成型技术,它使用特定波长的紫外光逐层固化液态光敏树脂来制造出三维物体,具有成型精度高、材料利用率高和制作周期短等优势,被广泛应用于快速原型制作、医学、珠宝、鞋类、汽车等领域<sup>[1-4]</sup>。

在光固化成型过程中,工艺参数选择不合理

时,极易出现特征失真、打印失败等情形<sup>[5]</sup>。因此,研究成型工艺对提高打印质量和提升打印效率至关重要。近年来,国内外学者对影响打印件质量的工艺因素进行了广泛研究,不仅考察了构建平台位置、工件取向角和层厚等工艺因素与尺寸精度之间的关系<sup>[6]</sup>,还探讨了成型方向和后固化工艺对打印

**基金项目:** 浙江省基础公益计划项目/国际合作项目(LGJ22B020001)

**通信作者:** 韩小瑜,教授,主要研究方向为3D打印智能制造新材料

**收稿日期:** 2023-07-10

**引用格式:** 申金福,周志祥,曹升,等. 固化深度对光固化3D打印成型性能和精度的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9): 57-62.

Shen Jinfu, Zhou Zhixiang, Cao Sheng, et al. The influence of curing depth on the products properties and precision of UV-curing 3D printing [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 57-62.

制件性能的影响<sup>[8]</sup>。除了工艺因素外,设备的打印参数也会对制件的性能和精度产生较大的影响。宗学文等<sup>[9]</sup>研究了分层厚度、曝光时间和回合等待时间等因素对制件尺寸精度的影响。郭小峰等<sup>[10]</sup>以激光功率、扫描速度和扫描间距等作为输入变量,分析了光固化成型技术(SLA)设备打印参数对制件性能、精度和效率的影响,并制定了不同工艺策略。孔双祥等<sup>[11]</sup>针对面曝光成形系统,通过正交实验得出了以减小过固化深度为优化目标的最佳打印参数组合。事实上,调节打印参数会直接影响树脂的固化深度,且固化深度随着曝光能量增加呈现半对数变化趋势<sup>[12]</sup>。目前所报道文献仅提出打印过程中树脂的固化深度应大于构建层厚<sup>[13]</sup>,针对固化深度对光固化成型性能和精度的影响还未见相关研究。

笔者基于市场流行的面成型光固化打印机,采用Box-Behnken响应面法探究了打印参数对固化深度的影响,并考察了固化深度对3D打印成型性能和精度的影响,得出打印参数与树脂固化深度、制件性能和精度之间的关系。在最优的工艺参数下,通过光固化3D打印成型技术制作出清晰的高精度的芯片通道结构。该研究可为用户快速制作出兼具性能和精度的制件提供参考依据。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

聚酯丙烯酸酯类树脂(树脂A): eResin-PLA Pro, 黑色, 深圳光华伟业股份有限公司;

丙烯酸酯类树脂(树脂B): PM200, 无色透明, 深圳光华伟业股份有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

3D打印机: MONO 4K型, 深圳市纵维立方科技有限公司;

二次固化箱: Wash and Cure型, 深圳市纵维立方科技有限公司;

万能试验机: C61.104型, 新三思(深圳)实验设备有限公司;

数字显微镜: ZWSP-4KHC型, 深圳市中微科创科技有限公司;

外径千分尺: 规格为0~25 mm, 精度0.001 mm, 桂林广陆数字测控股份有限公司。

### 1.3 试样制备

#### (1) 单层树脂制备。

为了使用树脂A制备出厚度均匀的单层树脂,

同时避免氧阻聚现象带来的误差,设计了一个只有侧面的长方体罩,直接放置在玻璃片表面,能够容纳一定体积的液态树脂。在利用设备屏幕进行曝光并移除多余树脂后,测量单层固化树脂的厚度。

#### (2) 性能和精度测试件制备。

基础工艺参数包括打印层厚度为0.05 mm,支撑高度设为5 mm,后固化时间为30 min,环境温度25℃。使用树脂A,分别在固化深度为0.06, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175 mm对应的参数下打印拉伸性能和精度测试件。

#### (3) 微流芯片制备。

为了更好观察微流通道的打印情况,使用无色透明的树脂B制备Y字形微流芯片,通道尺寸0.4 mm×0.4 mm,固化深度选择0.1 mm(功率50%,曝光时间2 s),Z轴补偿0.15 mm。

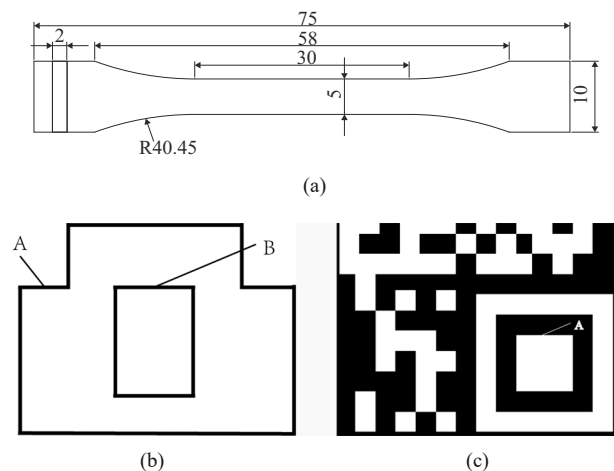
## 1.4 测试与表征

#### (1) 凝胶率测量。

将测试样品称重后放入索氏提取器中用丙酮溶解12 h。对其过滤、干燥后,通过称量固体的质量和原始样品质量的比值计算凝胶含量。

#### (2) 拉伸性能测试。

拉伸强度按GB/T 1040.2-2006进行测试,加载速度5 mm/min,1BA型试样,原始标距25 mm,如图1a所示。



a—拉伸测试件;b—Z轴精度测试件;c—X-Y精度测试件

图1 拉伸性能和精度测试件

#### (3) 精度测量。

为了量化Z轴尺寸精度,设计了一个桥接测试部件,如图1b所示,使用数字显微镜测量AB两个基准面的差值,作为Z轴的尺寸误差。在研究X-Y方向精度时,部分掩膜图像如图1c所示,白色部分为

曝光像素。其中A位置线宽为14个像素,其余位置线宽均为5个像素,实际打印的线宽由LCD打印屏幕的像素尺寸决定(使用设备像素精度为0.035 mm)。使用数字显微镜测量打印完成后的线宽,并计算X-Y方向的平均偏差值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 影响固化深度的因素

功率、曝光时间和温度是面成型光固化设备打印过程中重要的参数。功率是指光源提供的能量强度,用户可以按照最大功率的百分比调节,选择50%,75%,100%作为响应面实验的功率水平值。曝光时间是指紫外光固化每层树脂的时间,综合考虑功率为50%时的固化深度,选择2,5,8 s作为曝光时间水平值。温度会影响树脂的黏度和流动性,室温变化、树脂固化和打印过程中增加树脂都会改变料槽内树脂的温度,综合考虑以上因素,选择11,22.5,35 °C作为温度水平值。

利用Design-Expert 13.0.1.0软件,以固化深度作为响应值,对功率(A)、曝光时间(B)、树脂温度(C)三个因素进行Box-Behnken响应面设计,建立水平编码表,见表1。对应的设计方案与结果见表2。

表1 水平编码表

| 因素   | 水平 |      |     |
|------|----|------|-----|
|      | -1 | 0    | 1   |
| A/%  | 50 | 75   | 100 |
| B/s  | 2  | 5    | 8   |
| C/°C | 11 | 22.5 | 35  |

表2 Box-Behnken响应面实验的设计与结果

| 试验号 | A/% | B/s | C/°C | 固化深度/mm |
|-----|-----|-----|------|---------|
| 1   | 75  | 8   | 35   | 0.190 4 |
| 2   | 100 | 5   | 10   | 0.156   |
| 3   | 75  | 2   | 35   | 0.078 8 |
| 4   | 75  | 5   | 22.5 | 0.151 8 |
| 5   | 100 | 8   | 22.5 | 0.214 6 |
| 6   | 100 | 2   | 22.5 | 0.095 2 |
| 7   | 75  | 8   | 10   | 0.181 4 |
| 8   | 50  | 8   | 22.5 | 0.177   |
| 9   | 50  | 2   | 22.5 | 0.057 6 |
| 10  | 100 | 5   | 35   | 0.166 2 |
| 11  | 50  | 5   | 10   | 0.117   |
| 12  | 75  | 5   | 22.5 | 0.154 2 |
| 13  | 75  | 5   | 22.5 | 0.154   |
| 14  | 75  | 5   | 22.5 | 0.153 8 |
| 15  | 75  | 2   | 10   | 0.064 6 |
| 16  | 75  | 5   | 22.5 | 0.150 4 |
| 17  | 50  | 5   | 35   | 0.127 8 |

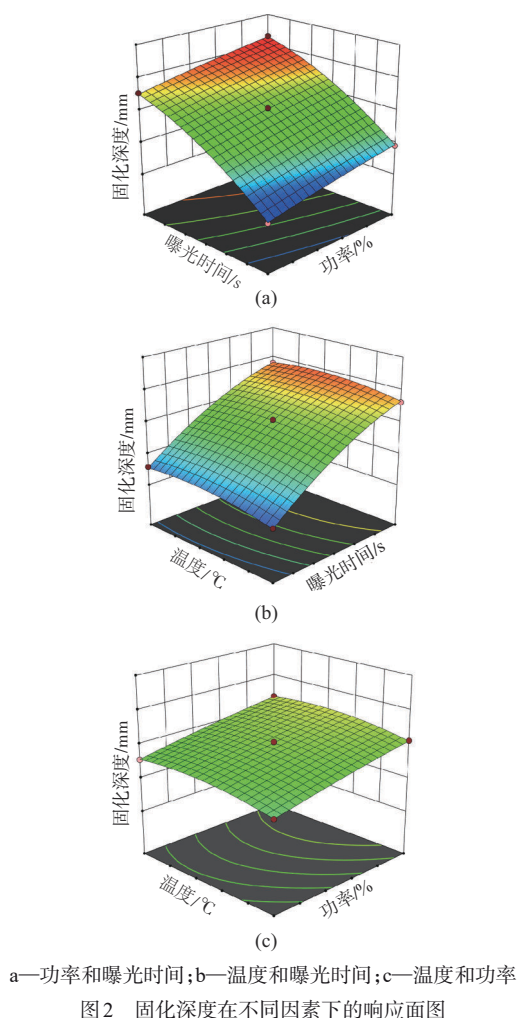
通过Design-Expert软件对表2实验数据进行多元二次回归拟合,拟合方程为: $Y = 0.015\ 28 + 0.019\ 1A + 0.058\ 4B + 0.005\ 5C - 0.000\ 2AC - 0.001\ 9A^2 - 0.014\ 8B^2 - 0.009\ 2C^2$ 。

表3为回归模型方差分析。由表3可知,模型的P值小于0.000 1,失拟项未见显著性( $P=0.293\ 2 > 0.05$ ),表明该二次回归模型存在着极为显著的差异性。比较各因素F值的大小,可知各因素对固化深度的影响顺序为: $B > A > C$ 。另外,模型的决定系数 $R^2=0.999\ 2$ ,调整系数 $R^2_{\text{ADJ}}=0.998\ 1$ ,说明模型的拟合度较高。

表3 回归模型方差分析

| 来源             | 自由度       | 平方和 | 均方和       | F       | P         | 显著性 |
|----------------|-----------|-----|-----------|---------|-----------|-----|
| Model          | 0.031 8   | 9   | 0.003 5   | 956.78  | < 0.000 1 | 显著  |
| A              | 0.002 9   | 1   | 0.002 9   | 787.26  | < 0.000 1 |     |
| B              | 0.027 3   | 1   | 0.027 3   | 7379.31 | < 0.000 1 |     |
| C              | 0.000 2   | 1   | 0.000 2   | 66.05   | < 0.000 1 |     |
| AC             | 9.000E-08 | 1   | 9.000E-08 | 0.0243  | 0.880 4   |     |
| A <sup>2</sup> | 0.000 0   | 1   | 0.0000    | 4.09    | 0.082 9   |     |
| B <sup>2</sup> | 0.000 9   | 1   | 0.0009    | 250.96  | < 0.000 1 |     |
| C <sup>2</sup> | 0.000 4   | 1   | 0.0004    | 96.28   | < 0.000 1 |     |
| 残差             | 0.000 0   | 7   | 3.697E-06 |         |           |     |
| 失拟项            | 0.000 0   | 3   | 4.910E-06 | 1.76    | 0.293 2   | 不显著 |
| 纯误差            | 0.000 0   | 4   | 2.788E-06 |         |           |     |
| 合计             | 0.0319    | 16  |           |         |           |     |

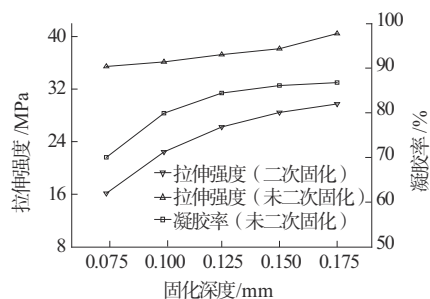
响应面图可以直观反映各因素对固化深度的影响,图的坡度越大,说明该因素对固化深度的影响越大。根据模型回归方程绘制响应面图,如图2所示。从图2可知,曝光时间对固化深度的影响最大,功率和温度的影响较小,与表3中F值的判断一致。由图2a可知,固化深度随着功率和曝光时间的增加而增加。这是由于提高功率和曝光时间可以使曝光像素内的树脂获得更多的能量,从而获得较大的固化深度。由图2b和2c可知,在保持曝光时间和功率不变的情况下,随着树脂温度的增加,固化深度也会增加。然而,进一步提高温度会导致增加速度减缓甚至固化深度降低,这可能是与过高的温度导致树脂反应速率过快有关。



## 2.2 固化深度对性能的影响

为确保制件层间具有基础的黏附力,最低固化深度选择为0.06 mm。尽管如此,拉伸测试件仍脱离支撑并附着在离型膜上。图3为树脂A在不同固化深度下拉伸强度和凝胶率的变化曲线。从图3可以看出,对于不进行二次固化的制件,增大固化深度,制件的凝胶含量和拉伸强度随之增加,但增长速率逐渐减慢。当固化深度小于0.1 mm时,制件的凝胶含量迅速增加,拉伸强度也在快速增长阶段;当固化深度达到0.1 mm时,即固化深度是构建层厚的两倍时,凝胶率达到80%以上,此时的拉伸强度达到二次固化后最大强度的50%;继续增大固化深度,增长速度不再明显。制件进行二次固化后,性能差异明显降低。

实验表明,当层厚一定时,随着固化深度的增加,制件的固化程度增大,进而提高了制件的力学性能,使制件在不进行二次固化的情况下就可以获得良好的性能。然而,二次固化过程可以显著降低



制件之间的性能差异。因此,综合考虑到制件精度和效率来确定打印参数时,可以在确保制件基本固化程度的前提下适度降低固化深度,最后通过二次固化来弥补制件的性能差异。

## 2.3 固化深度对精度的影响

### (1) Z轴尺寸误差。

在实际打印过程中,紫外光不仅会固化一个打印层厚,多余的能量将继续向下渗透。对于已经固化的层,这有助于进一步提高其固化程度。然而,对于悬垂面特征,如图4所示,多余的能量会引发液态树脂聚合,导致树脂过度生长,直到能量衰减至低于引发树脂固化的阈值。

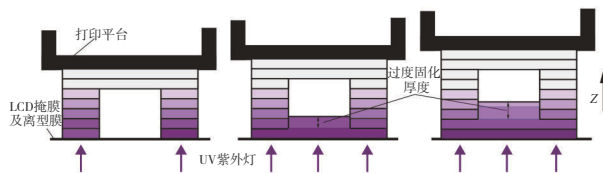


表4为树脂A在不同固化深度下的Z轴尺寸误差。随着固化深度增加,Z轴悬垂面的尺寸误差增大。这是导致Z轴精度降低的主要原因,会使制件Z方向内尺寸偏小,甚至打印孔堵塞等异常情况<sup>[4]</sup>。因此,在打印制件时,降低固化深度可以有效提高Z轴精度。然而,如果单层固化树脂的强度无法抵抗离型力和挤压力时,会导致悬垂面形变。在这种情况下,可以适当增加固化深度,并辅助使用软件进行尺寸补偿来提高Z轴精度。

表4 固化深度对Z轴尺寸误差的影响

| 固化深度/mm | Z轴尺寸误差/mm |
|---------|-----------|
| 0.075   | 0.08      |
| 0.1     | 0.11      |
| 0.125   | 0.13      |
| 0.15    | 0.18      |

### (2) X-Y方向精度。

图5为不同固化深度下线条宽度的绝对误差。

从图5中可以看出,随着固化深度的增加, $X$ - $Y$ 方向精度呈现由低到高再到低的变化趋势。当使用较小固化深度的参数进行打印时,曝光区域的能量较低,导致 $X$ - $Y$ 方向的打印线条尺寸小于曝光尺寸。随着固化深度增加,曝光区域能量增加, $X$ - $Y$ 方向的尺寸逐步趋于稳定。然而,进一步增加固化深度会导致多余能量扩散至未曝光区域,降低打印精度。树脂的散射是导致固化宽度增大的主要因素,且固化宽度对固化深度的敏感度因树脂成分而异<sup>[15]</sup>。

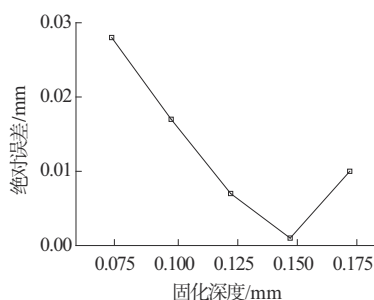
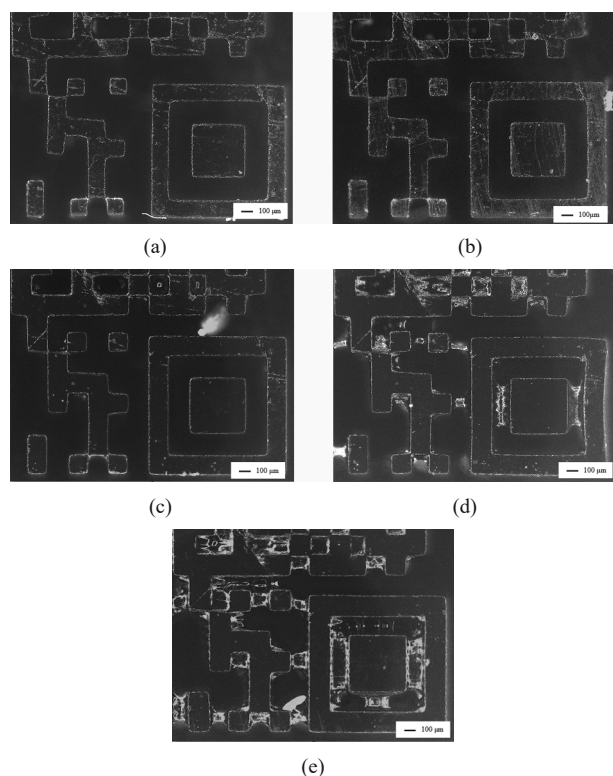


图5 固化深度对 $X$ - $Y$ 方向尺寸精度的影响

图6为不同固化深度下电子显微镜的实拍图。

从图中可以发现,当固化深度小于0.125 mm时,线条之间具有清晰的边界,这与树脂中光的衰减有关,曝光能量降低导致线条间隙的液态树脂无法固化。然而,当固化深度为0.125 mm时,线条宽



a—0.075 mm;b—0.1 mm;c—0.125 mm;d—0.15 mm;e—0.175 mm

图6 不同固化深度下的制件

度尚未达到设计尺寸,却开始出现过度固化的树脂堆积在线条边缘的情况。随着固化深度的增加,线条自身宽度增加的同时,线条之间堆积的树脂也更加明显。这是由于曝光能量增大导致紫外光溢出,并且曝光像素之间的小距离会增强这种过度聚合,从而造成精细结构的粘连堵塞。

## 2.4 微流通道打印试验

通过使用3D打印技术可以有效减少微流芯片的制作周期,但其精细的结构也对设备、材料和工艺提出了较高的要求<sup>[16]</sup>。前文对精度的研究,解释了打印微流通道时堵塞的两个主要原因: $Z$ 轴悬垂面的过度固化及 $X$ - $Y$ 方向上紫外光溢出导致的树脂堆积。因此,为了制备出具有清晰结构的通道,在保证打印完成时具备基本性能的条件下,尽量降低固化深度可以提高微流芯片的制备成功率。此外,对 $Z$ 轴进行适当的尺寸补偿也是必要的。打印实体如图7所示,其中入口分别为红、蓝墨水。试验结果表明,使用低成本的设备 and 材料,通过优化工艺参数也可以制备出具有清晰结构的微流芯片。

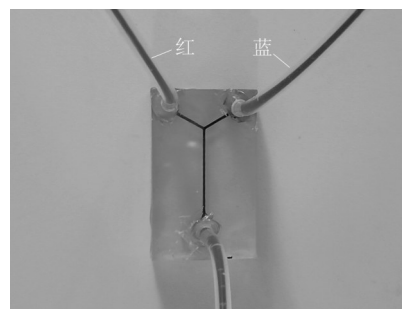


图7 微流通道打印实体

## 3 结论

(1) 通过响应面法研究了固化深度受影响的因素,结果显示曝光时间对固化深度的影响最显著,功率和温度次之。增加功率、曝光时间和温度可以提高固化深度,但过高的温度则会限制固化深度的增加。

(2) 随着固化深度的增加,打印完成时制件的拉伸强度和凝胶含量逐渐增加,但增长速率逐渐减缓。在二次固化后,制件的拉伸强度差异性减少。增加固化深度可以使制件在无需进行二次固化的情况下获得良好性能,然而降低固化深度可以有效提高打印速度,并通过后固化的方式来弥补制件的性能。

(3) 随着固化深度增加, $Z$ 轴精度逐渐降低,而 $X$ - $Y$ 方向的精度则呈现先增加后降低的趋势。进一

步发现,即使线宽未达到设计尺寸,紫外光的溢出也会导致过度固化的树脂堆积在小间距特征之间。

### 参考文献

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.  
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [2] 李小丽,马剑雄,李萍,等.3D打印技术及应用趋势[J].自动化仪表,2014,35(1):1-5.  
Li Xiaoli, Ma Jianxiong, Li Ping, et al. 3D printing technology and its application trend[J]. Automation Instrumentation, 2014, 35(1):1-5.
- [3] Quan H, Zhang T, Xu H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. Bioactive Materials, 2020, 5(1):110-115.
- [4] 李东方,陈继民,袁艳萍,等.光固化快速成型技术的进展及应用[J].北京工业大学学报,2015,41(12):1 769-1 774.  
Li Dongfang, Chen Jimin, Yuan Yanping, et al. Development and application of stereolithography apparatus[J]. Beijing University of Technology, 2015, 41(12):1 769-1 774.
- [5] 李晶晶,马世博,梁帅,等.工艺参数对SLA成型制件力学性能的影响[J].工程塑料应用,2019,47(10):75-79.  
Li Jingjing, Ma Shibao, Liang Shuai, et al. Effect of process parameters on mechanical properties of SLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):75-79.
- [6] Cotabarren I, Palla C A, McCue C T, et al. An assessment of the dimensional accuracy and geometry-resolution limit of desktop stereolithography using response surface methodology[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(7):1 169-1 186.
- [7] Monzón M, Ortega Z, Hernández A, et al. Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing[J]. Materials(Basel), 2017, 10(1):1-15.
- [8] Ambrosio D, Gabrion X, Malécot P, et al. Influence of manufacturing parameters on the mechanical properties of projection stereolithography - manufactured specimens[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1-2):265-277.
- [9] 宗学文,肖涵,徐文博,等.基于面成型光固化3D打印制件的尺寸精度[J].工程塑料应用,2018,46(2):41-46.  
Zong Xuewen, Xiao Han, Xu Wenbo, et al. Dimensional accuracy of surface-based photo-solidified 3D printing parts[J]. Engineering Plastics Applications, 2018, 46(2):41-46.
- [10] 郭小锋,王坦,崔陆军,等.基于响应面法SLA光敏树脂3D打印工艺策略[J].工程塑料应用,2022,50(1):60-65.  
Guo Xiaofeng, Wang Tan, Cui Lujun, et al. 3D printing process strategy of SLA photosensitive resin based on response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):60-65.
- [11] 孔双祥,胥光申,巨孔亮.面曝光快速成形固化深度试验研究[J].机电一体化,2016,22(9):16-19,67.  
Kong Shuangxiang, Xu Guangshen, Ju Kongliang. Research on over-cured depth in mask projection stereolithography system[J]. Mechatronics, 2016, 22(9):16-19, 67.
- [12] Gentry S P, Halloran J W. Light scattering in absorbing ceramic suspensions: Effect on the width and depth of photopolymerized features[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(6):1 895-1 904.
- [13] Conti L, Bienenstein D, Borlaf M, et al. Effects of the layer height and exposure energy on the lateral resolution of zirconia parts printed by lithography-based additive manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(6). DOI:10.3390/ma13061317.
- [14] 刘杰.光固化快速成型技术及成型精度控制研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.  
Liu Jie. Study on stereo lithography technology and control measures of prototype quality[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [15] Felzmann R, Gruber S, Mitteramkogler G, et al. Lithography-based additive manufacturing of cellular ceramic structures[J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(12):1 052-1 058.
- [16] Bhattacharjee N, Urrios A, Kang S, et al. The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics[J]. Lab on a Chip, 2016, 16(10):1 720-1 742.
- [16] Boparai K S, Singh R, Singh H. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(2):281-299.
- [17] Abuzaid W, Alkhader M, Omari M. Experimental analysis of heterogeneous shape recovery in 4 d printed honeycomb structures[J]. Polymer Testing, 2018, 68:100-109.
- [18] Wang J, Wang Z, Song Z, et al. Programming multistage shape memory and variable recovery force with 4D printing parameters[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(11). DOI:10.1002/admt.201900535.
- [19] Pivar M, Gregor-Svetic D, Muck D. Effect of printing process parameters on the shape transformation capability of 3D printed structures[J]. Polymers, 2021, 14(1). DOI: 10.3390/POLYM14010117.
- [20] Villacres J, Nobes D, Ayranci C. Additive manufacturing of shape memory polymers: effects of print orientation and infill percentage on shape memory recovery properties[J]. Rapid Prototyping Journal, 2020, 26(9):1 593-1 602.
- [21] Wu W, Ye W, Wu Z, et al. Influence of layer thickness, raster angle, deformation temperature and recovery temperature on the shape-memory effect of 3D-printed polylactic acid samples[J]. Materials, 2017, 10(8). DOI:10.3390/ma10080970.

(上接第56页)