

DOI: 10.3901/JME.2023.01.286

微纳增材制造微圆柱结构的形貌分析与工艺优化研究*

陈玉田¹ 吴重军^{1,2} 魏馨怡¹ 孟宪凯³ 刘 杰⁴ 王琪冰²

- (1. 东华大学机械工程学院 上海 201620;
2. 森赫电梯股份有限公司 湖州 313009;
3. 江苏大学机械工程学院 镇江 212013;
4. 普利生机电科技有限公司 上海 201600)

摘要: 针对目前亚像素微扫描的 LCD 式光固化 3D 打印技术在微纳结构增材制造中存在的典型打印瑕疵, 通过优化打印工艺和分析打印结构, 以提高打印成型质量和生产效率。首先, 通过对打印材料后处理工艺研究, 设计单因素试验并打印平板模型, 分析后固化时长对零件硬度、粗糙度及形貌影响规律。其次, 结合打印工艺参数, 设计正交试验并打印圆柱阵列模型, 分析打印层厚、曝光时间、振动次数对微圆柱成型的影响规律。结果表明: 后固化时间在 5~10 min 时, 后固化效果最优, 此时表面粗糙度 Ra 值约为 29 nm, 邵氏硬度在 88 HD 左右。打印工艺参数对微圆柱直径尺寸影响大小排序为: 曝光时间>打印层厚>振动次数。在均衡打印质量和打印效率的前提下, 打印参数优化后, 打印直径 50 μm , 高度 210 μm 的微圆柱结构应采用打印层厚 10 μm , 曝光时间 2 500 ms, 振动次数 64 x 的打印工艺参数。

关键词: 光固化 3D 打印; 微纳增材; 后固化; 工艺参数

中图分类号: TG156

Morphology Analysis and Process Optimization of Micro-cylinder Structure in Micro-nano Additive Manufacturing

CHEN Yutian¹ WU Chongjun^{1,2} WEI Xinyi¹ MENG Xiankai³ LIU Jie⁴ WANG Qibing²

- (1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620;
2. Sicher Elevator Co., Ltd., Huzhou 313009;
3. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;
4. Shanghai PrismLab Electromechanical Technology Co., Ltd., Shanghai 201600)

Abstract: In view of the typical printing defects existing in the micro-nano structure additive manufacturing of sub-pixel microscanning LCD photocuring 3D printing technology, it is devoted to optimize the printing process and analyzed the printing structure to improve the printing quality and production efficiency. Firstly, the post-treatment time is determined by designing the single factor test and printing model, and the influence of post-curing time on the hardness, roughness and morphology of parts is analyzed. Secondly, combined with the printing process parameters, the orthogonal test and printing cylinder array model are designed to analyze the influence of printing layer thickness, exposure time and vibration times on the forming of micro-cylinder. The results show that the best curing effect is obtained when the curing time is 5~10 min, and the surface roughness Ra is about 29 nm and shore hardness is about 88 HD. The influence order of printing process parameters on the diameter of micro-cylinder is exposure time, print layer thickness and number of vibrations. Under the premise of balanced printing quality and printing efficiency with optimized

* 上海市自然科学基金资助项目(22ZR1402400)。20220322 收到初稿,
20221011 收到修改稿

printing parameters, the micro cylinder with diameter of 50 μm and height of 210 μm can be well printed under the print layer thickness of 10 μm , the exposure time of 2 500 s and the number of vibrations is 64 x.

Key words: photocuring 3D printing; micro-nano additive manufacturing; post-curing; process parameter

0 前言

增材制造技术兴起于 20 世纪 80 年代, 而光固化 3D 打印技术又是精度相对较高、应用前景广阔的一种先进成形制造技术^[1-3]。该技术主要是根据数字模型以及预先设定的打印工艺参数控制光源发出特定波长及强度的紫外光, 紫外光通过透镜聚焦到光敏树脂上, 从而使液态光敏树脂因曝光而交联固化, 最终经过层层固化完成一个三维实体的成型^[4-5]。近年来, 光固化 3D 打印技术在打印精度、树脂材料、打印质量上均有很大的进步, 被广泛应用于生物医疗^[6-10]、工业制造^[11-13]、教育科研^[14-15]等领域。

关于光固化 3D 打印的成型工艺的研究中, 叶淑源等^[16]研究了 CLIP 式光固化 3D 打印中打印速度与成型质量之间的关系, 得出较低的连续打印速度有利于形成更好的表面质量。MENG 等^[17]利用 DLP 式光固化 3D 对含金刚石树脂浆料的打印工艺进行研究, 发现在曝光时间为 2~10 s 时, 抗弯强度随曝光时间的增加而增加, 当曝光时间超过 4 s 时, 试样的几何精度逐渐降低, 试样发生变形。车江宁等^[18]采用基于 DLP 式光固化 3D 对以光敏树脂和碳纤维为打印材料的碳纤维质量分数、打印层厚、曝光时间进行研究, 并得出在碳纤维质量分数为 15%, 打印层厚为 0.04 mm, 曝光时间为 3 s 时, 制件的成型质量最优。杨建明等^[19]通过自制的光固化 3D 打印设备, 研究了打印层厚和曝光时间两个参数对零件成型精度的影响关系, 最终确定层厚为 0.1~0.2 mm 且曝光时间为 30~35 s 时, 零件的收缩率可以控制在 15% 左右。但是研究人员开展的工艺研究更多的是基于 DLP 曝光原理的光固化成型技术, 相对于近年来发展的更加经济适用的基于 LCD 曝光原理的工艺研究以及采用亚像素微扫描技术的 LCD 上置式面阵曝光成型工艺研究相对比较少。鉴于采用亚像素微扫描技术的 LCD 上置式面阵曝光成型技术在微纳结构成型过程中存在如打印参数设置不合理会导致微结构难以成型、结构膨

胀、弯曲倒塌等问题以及打印层厚、曝光时间、振动次数等参数对打印精度、打印时长之间的影响, 后固化的时长对零件的硬度、粗糙度、生产效率之间的关系还需要进一步的分析。

为充分发挥基于亚像素微扫描的 LCD 式光固化 3D 打印技术的成型优势, 本文对装备打印工艺、后固化时长进行试验分析, 从而进一步优化微圆柱结构打印成型质量和打印时长的均衡性。光固化 3D 打印技术以其微米、亚微米级精度优势和能够快速加工复杂三维结构的技术优势, 已在微结构成型领域发挥出强有力的应用潜力^[20]。本研究有望继续为探索微纳制造技术采用更经济的基于亚像素微扫描的 LCD 式光固化 3D 打印制造工艺提供了新的思路, 有望应用于微纳仿生表面技术、微创医疗、微型检测芯片等领域的研究。

1 光固化装备成型原理及试验

1.1 打印成型原理

本文的光固化 3D 打印试验在上海普利生机电科技有限公司研发的 MP 系列科研级微纳 3D 打印装备上进行。该设备的型号为 MP-36-3L; 分辨率为 1.6 μm , 打印精度为 3.2 μm , 成型范围为 36.48 mm×20.52 mm×30 mm。

该装备不同于传统 SLA 的由点到面曝光成型的方式, 采用基于亚像素微扫描的 LCD 面曝光成型技术。装备成型原理如图 1 所示, 计算机根据三维实体模型切片处理后的数据, 控制光源发出特定波长与强度的紫外光以及扫描器和打印升降台运动, 紫外光通过光学镜组、扫描器等, 成像出零件的切片截面并曝光聚焦到液态光敏树脂上, 从而引发液态树脂发生光聚合反应并完成一个层面的一次性固化。之后压膜平台保持不动, 打印平台在垂直方向下降一个打印层厚的高度。这时光敏树脂材料会重新浸满这个待打印层的空腔, 装备会再次发出紫外光在树脂上投影出零件截面使液态树脂固化。打印过程以这样的方式由下而上, 层层固化, 最后打印出与设计模型一样的三维实体。

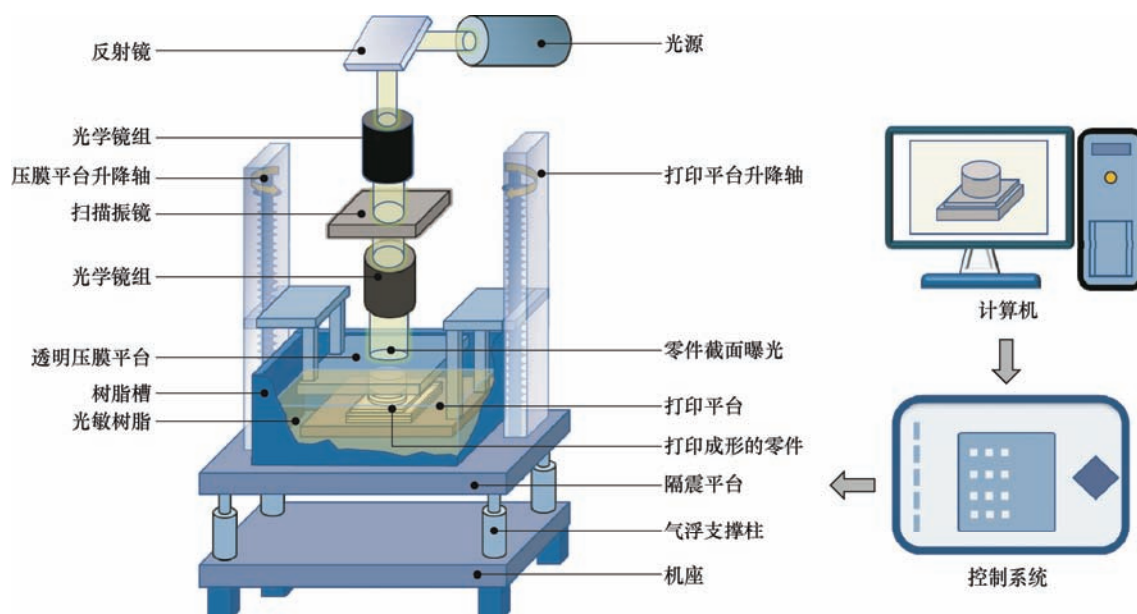


图 1 光固化 3D 打印装备成型原理图

1.2 光敏树脂材料

液态的光敏树脂材料是光固化打印过程中零件成型的原材料。光敏树脂材料一般是先将预聚物单体、交联剂、光引发剂等按比例混合成均匀的液态混合物。其固化机理是在特定波长和强度的紫外光照射下，光引发剂产生自由基或者离子促使预聚物单体、交联剂等材料分子之间发生化学键断裂并形成新的连接。最终，实现液态的光敏树脂转变成固态三维网状结构的高分子聚合物^[21-22]，本试验中光敏树脂的固化机理如图 2 所示。

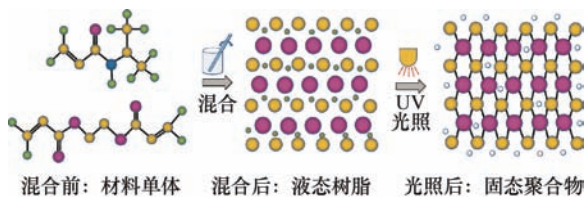


图 2 光固化机理示意图

根据本试验的成型精度、装备适配的要求，本试验中使用的光敏树脂材料选用上海普利生机电科技有限公司生产的光敏树脂。该树脂具有结构强度高、固化速度快、收缩率低等优点。树脂的主要参数为：硬度 80~90 HD，抗弯强度 90~112 MPa，拉伸强度 35~42 MPa。根据对打印成型后的零件分析 EDS 能谱结果可以得出试验中使用的光敏树脂在微结构打印成型后的成分仅由碳、氧、氮三种元素构成。其中，碳含量占比 71.3%，氧含量占比 24.11%，氮含量占比 4.59%，元素分布 EDS 图像及面总谱图如图 3a~3e 所示。

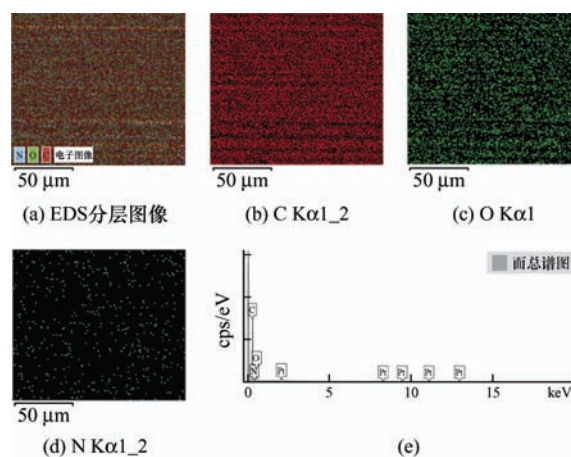


图 3 光敏树脂元素成分 EDS 能谱

1.3 成型工艺流程

本试验光固化 3D 打印的工艺流程主要分为三个阶段。首先是打印前的准备阶段。此阶段的主要工作是在计算机中用三维 CAD 软件(Solidworks 2020)绘制出设计的三维实体模型，导出成打印装备可识别的 STL 格式文件，并运用 STL 处理软件(Materialise magics)对导出的模型进行检查、修复等处理。

接着是打印阶段，根据零件的精度要求、使用要求等选择合适的光敏树脂，在装备中设置符合零件成型的打印参数并导入 STL 模型，然后启动装备开始打印。启动打印后，计算机控制光源的曝光、扫描器、打印平台等联动。这时激光器会负责发出特定波长与强度的紫外光，紫外光依次通过光学镜组、扫描器、成像镜组，最终透过压膜平台将零件

截面照射到液态光敏树脂层中。打印平台主要负责配合系统运动,让光敏树脂按设定层厚依次预留出待固化的层厚空腔并让液态光敏树脂浸满,这样液态光敏树脂在激光照射下根据零件截面数据逐层固化,最终打印出零件原型。

打印结束后的零件依旧牢固地粘连在打印平台上,须将零件从打印平台上用铲刀取出。之后将零件浸没在纯度 95% 以上的工业酒精中进行超声波清洗,以去除零件表面未固化且粘连的液态光敏树脂,清洗完成后在无尘室中风干零件表面的残余酒精。最后的后处理阶段将风干的零件在后固化设备中进行后固化处理,即得到需求的零件,打印成型工艺流程如图 4 所示。

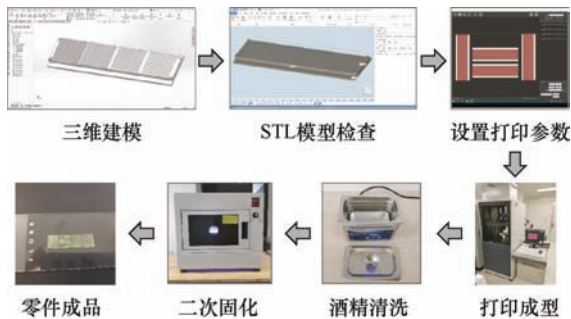


图 4 打印成型工艺流程

1.4 打印瑕疵分析

打印缺陷包括打印参数设置不合理、后固化时长不合理、打印装备精度误差以及模型设计不当导致的打印瑕疵等。其中打印参数的设置对零件打印质量的影响最明显,其次是后固化时长对零件成型后二次固化效果的影响。打印参数的影响中,打印层厚会影响打印总时间、打印分层大小。例如层厚越小,打印时间则越长,对打印部件的运动精度要求也越高;打印层厚越大,光能量穿过树脂时的难度也增大。曝光时间会影响打印结构的 x 、 y 、 z 方向尺寸。例如曝光时间过长,液态光敏树脂则会吸收更多的光能量而使实际打印的尺寸大于设计尺寸。振动次数则和曝光成像面投影时像素点的缩放倍数以及在原像素面积区域内像素点扫描曝光次数有关,会表现在打印结构每层的细小圆柱排列结构中。本试验中存在的打印瑕疵如图 5 所示,其中图 5a 为打印三维模型,图 5b 反映曝光时间偏长导致实际成型的圆柱直径尺寸增大,且尺寸越小,增大越明显;图 5c 反映曝光时间过长导致结构外的树脂也固化;图 5d 反映曝光时间不够,直径 $10\sim 100\ \mu\text{m}$,高度 $100\ \mu\text{m}$ 的圆柱结构未打印成型;图 5e 反映成型后在侧面留下的层层固化痕迹;图 5f 中,(1)为厚

度 $0.25\ \text{mm}$ 的零件后固化时间不足的自然弯曲,(2)为厚度 $0.3\ \text{mm}$ 的零件后固化过长的收缩弯曲,(3)为厚度 $0.8\ \text{mm}$ 的零件固化时间过长后,脆性变大,易受力脆断,且颜色由固化前的无色转向黄色。

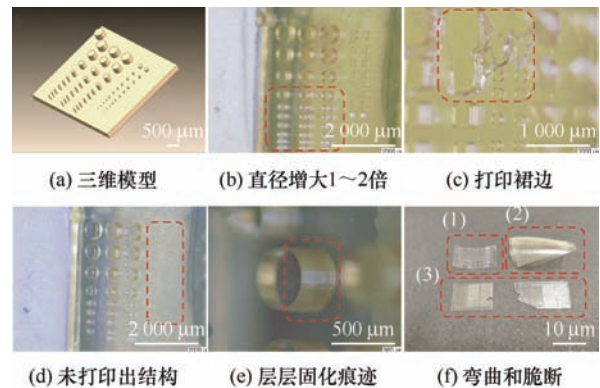


图 5 打印瑕疵

1.5 试验规划

本试验以优化微圆柱结构的成型质量为目标,对成型过程中的打印工艺参数设置以及后固化时长进行试验分析,从而得出相对较优的工艺参数组合。

试验规划如图 6 所示,首先是第一阶段的后处理工艺试验,研究后处理时长对零件质量的影响规律。具体流程为:① 设计试验零件三维模型并打印;② 开展单因素试验,分别对零件进行不同时间的后固化处理;③ 用白光扫描干涉轮廓仪、D 型邵氏硬度计、三维数字显微镜对零件进行粗糙度、硬度指标测试及形貌表征并进行结果分析。

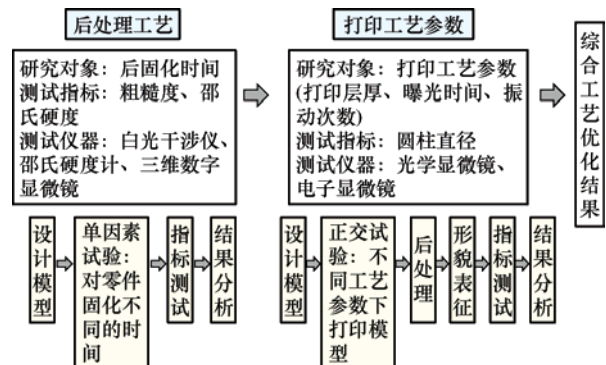


图 6 试验规划

接着是第二阶段的打印工艺参数试验,研究打印工艺参数对零件成型的影响规律。具体流程包括:① 确定研究的主要工艺参数对象;② 设计试验零件三维模型;③ 规划正交试验并打印出零件,同时对零件进行相同的后处理;④ 然后用环境扫描电子显微镜(ESEM)对零件上微圆柱结构特征进行三维形貌表征及尺寸测量;⑤ 最后分析工艺参数对零件成型质量的影响规律,并得出一个综合优化的结果。

2 后处理工艺分析

2.1 模型和固化试验设计

光固化成型后的零件,为了使零件充分固化,保证零件成型精度,须进行后固化处理。然而当后固化时间达不到零件需要的固化时间,零件会因固化不充分,容易收缩变形;当后固化时间超过零件需要的固化时间,零件会发生翘曲变形、硬脆的问题,从而增加生产成本,降低生产效率。本试验设计测试零件尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,左上角附有凸台结构,以识别零件的正反面,零件模型如图 7 所示。采用打印工艺参数:层厚 $10\text{ }\mu\text{m}$,曝光 $3\text{ }000\text{ ms}$,振动 64 x ,功率 100% ,6 个相同的测试零件在一起同时打印,避免分批打印产生的成型误差。打印完成后,取后固化时间分别为 0 min 、 1 min 、 5 min 、 10 min 、 15 min 、 20 min 共 6 个变化数值对零件分别进行后固化处理。

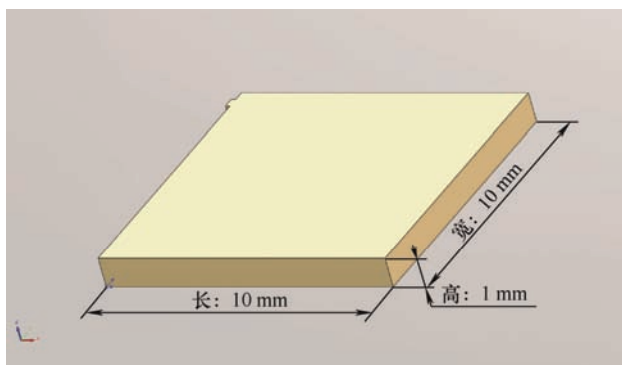


图 7 后固化测试件模型

2.2 指标测试

2.2.1 粗糙度测试

表面粗糙度形貌是评价加工质量最重要的参数之一^[23-24],是评价增材打印质量的关键指标。试验对零件的上表面的粗糙度 Ra 值进行测量,零件表面测量长度设置为 6 mm ,采样间距大于 1 mm ,测量 5 个点位的粗糙度,并去除极值和异常值后取平均值,后固化时间与对应的粗糙度值 Ra 如表 1 所示。

表 1 后固化时间与粗糙度值 Ra

试验号	1	2	3	4	5	6
后固化时间/min	0	1	5	10	15	20
粗糙度 Ra/nm	52.35	37.83	33.84	29.52	31.33	34.23
	53.19	38.84	34.56	29.5	33.1	34.75
平均值	52.28	38.06	34.09	29.23	32.19	34.03

零件上表面在不同后固化时间下的表面形貌如图 8 所示,试验号 1~6 分别对应图中序号 a~f。从图 8a~8f 中可以看出,做过后固化处理的表面粗糙程度要优于未做过后固化处理的面。

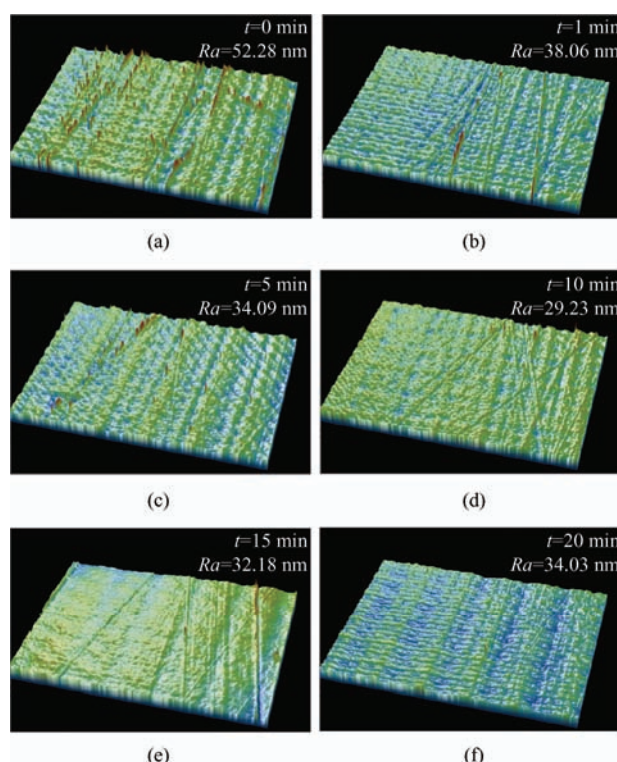


图 8 表面粗糙度测试

根据后固化时间与粗糙度值 Ra 结果绘制的变化曲线如图 9 所示。零件未固化和固化后粗糙度极差值约为 23 nm ,固化后极差值约为 9 nm 。表明未做后固化处理的零件表面粗糙度大于固化后的表面,其次固化后零件表面的粗糙度先减小再变大。固化时间在 $5\sim 15\text{ min}$ 时,零件的粗糙度均低于 35 nm ,且在 10 min 时粗糙度值最小。

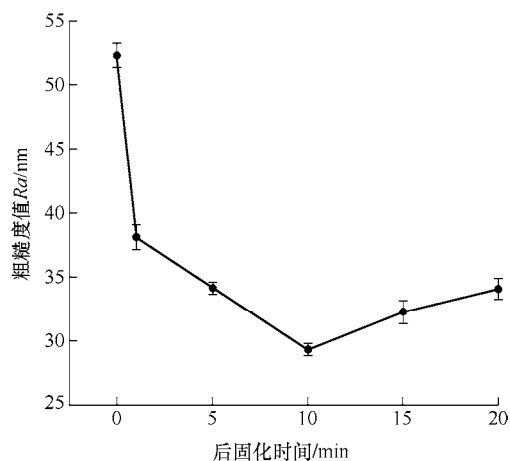


图 9 后固化时间和粗糙度变化曲线

2.2.2 硬度测试

邵氏硬度(D 型)常用于测定硬塑料、硬树脂、有机玻璃等高硬度的橡塑材料。检测原理是将标准形状和硬度的压针在试验力的作用下垂直压入测试样品表面^[25]。当硬度计的压足平面与被测件表面紧密贴合时停止下压,并根据压足平面到压针顶端的长度可按式(1)进行硬度值计算。试验使用邵氏硬度计(LX-D 型, HANDPI)进行硬度测试,硬度测试范围为 0~100 HD。

$$HD = 100 - \frac{L}{0.025} \quad (1)$$

式中, HD 为 D 型邵氏硬度; L 为压针压入长度。

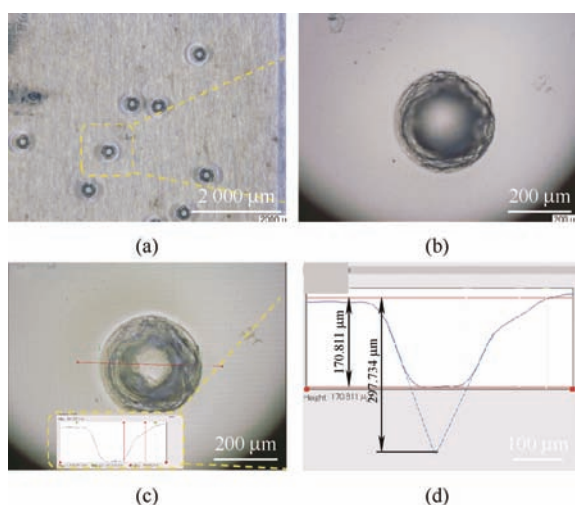


图 10 压痕测试分析

硬度测试压痕如图 10a、10b 所示。根据三维数字显微镜(KH-7700, 日本)拍摄的压痕三维形貌进行计算,如图 10c、10d 所示,得出压痕深度分别为 297.734 μm 、296.811 μm 、297.994 μm 。按式(1)计算得出的硬度值为 88.099 HD,误差值 0.99 HD,表盘直接读数结果基本等于计算的硬度值。硬度测试读数结果如表 2 所示,后固化时间和对应的邵氏硬度变化曲线如图 11 所示。

表 2 后固化时间与邵氏硬度值

试验号	1	2	3	4	5	6
后固化时间/min	0	1	5	10	15	20
邵氏硬度值/HD	80.7	84.1	87.8	89.1	89.6	89.5
	80.8	84.5	88.1	89.3	89.4	89.6
	80.4	84.6	87.9	89.4	89.5	89.3
平均值	80.6	84.4	87.9	89.3	89.5	89.5

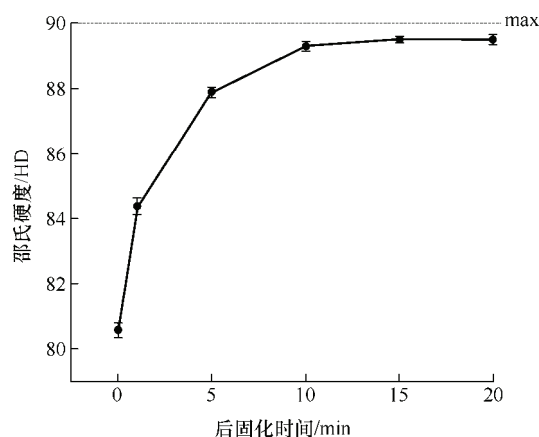


图 11 后固化时间和邵氏硬度变化曲线

2.3 结果分析

本试验中使用的树脂材料固化后,邵氏硬度一般不超过 90 HD。根据本试验中的表面粗糙度测试结果以及邵氏硬度压痕硬度测试结果对比分析可以得出,试验中零件后固化时间为 5 min 时,零件硬度 87.9 HD,粗糙度 $Ra=34.09 \text{ nm}$ 。后固化时间为 10 min 时,零件硬度 89.3 HD,粗糙度 $Ra=29.23 \text{ nm}$,硬度值相差 1.4 HD。且固化时间超过 10 min 时,零件硬度值过大,对于薄的零件会显出很大的脆性。综合以上可以得出该零件选用固化时间在 5~10 min 之间比较适宜。

3 打印工艺参数分析

3.1 模型设计

工艺参数试验每组参数的差异需要借助模型打印并验证。根据研究过程零件的归类,本论文主要研究等截面结构模型在正交试验打印参数变化时的成型质量。模型用三维绘图软件(Solidworks 2020)绘制试验零件整体尺寸长、宽、高为:1.4 mm×8 mm×0.6 mm。其中微圆柱结构尺寸为直径 50 μm ,高度 210 μm ,中心距为 100 μm ,沿阶梯边缘单向成一行共 10 个,试验打印三维模型如图 12 所示。

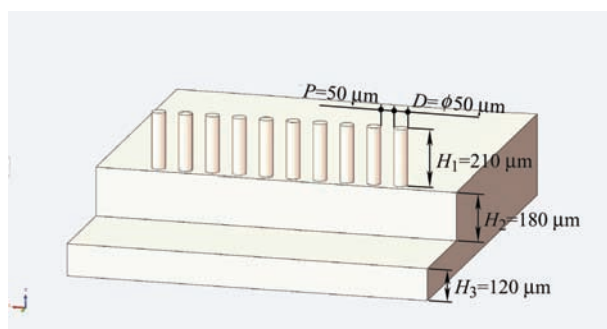


图 12 打印三维模型设计

3.2 正交试验设计

加工工艺参数的优化对于打印质量与工艺分析具有重要作用^[26]。根据前期研究总结的经验,打印前需要设置的的工艺参数中打印层厚、曝光时间、振动次数对打印质量影响最明显,开展正交试验分析主要参数组合下的打印质量,并最终确定出相对适合的打印工艺参数。正交试验研究的因素共有 3 个,分别是打印层厚(A)、曝光时间(B)、振动次数(C)。开展 3 因素 3 水平的正交试验,试验因素以及水平的取值如表 3 所示,正交试验组如表 4 所示。零件打印成型后,在后固化设备中固化 10 min。

表 3 因素水平表

水平	因素		
	打印层厚(A)/ μm	曝光时间(B)/ms	振动次数(C)/x
1	5	2 000	64
2	10	2 500	100
3	15	3 000	144

表 4 正交试验表

试验号	打印层厚(A)/ μm	曝光时间(B)/ms	振动次数(C)/x
1	5	2 000	64
2	5	2 500	100
3	5	3 000	144
4	10	2 000	100
5	10	2 500	144
6	10	3 000	64
7	15	2 000	144
8	15	2 500	64
9	15	3 000	100

3.3 形貌表征

试验使用环境扫描电子显微镜(QUANTA-250, 捷克)对打印零件上的圆柱结构进行不同放大倍数的形貌表征,放大倍数分别为 500、1 000、2 500 倍。9 组参数不同打印参数下的圆柱 ESEM 三维形貌如图 13~15 所示,试验号分别对应图中序号 a、b、c。

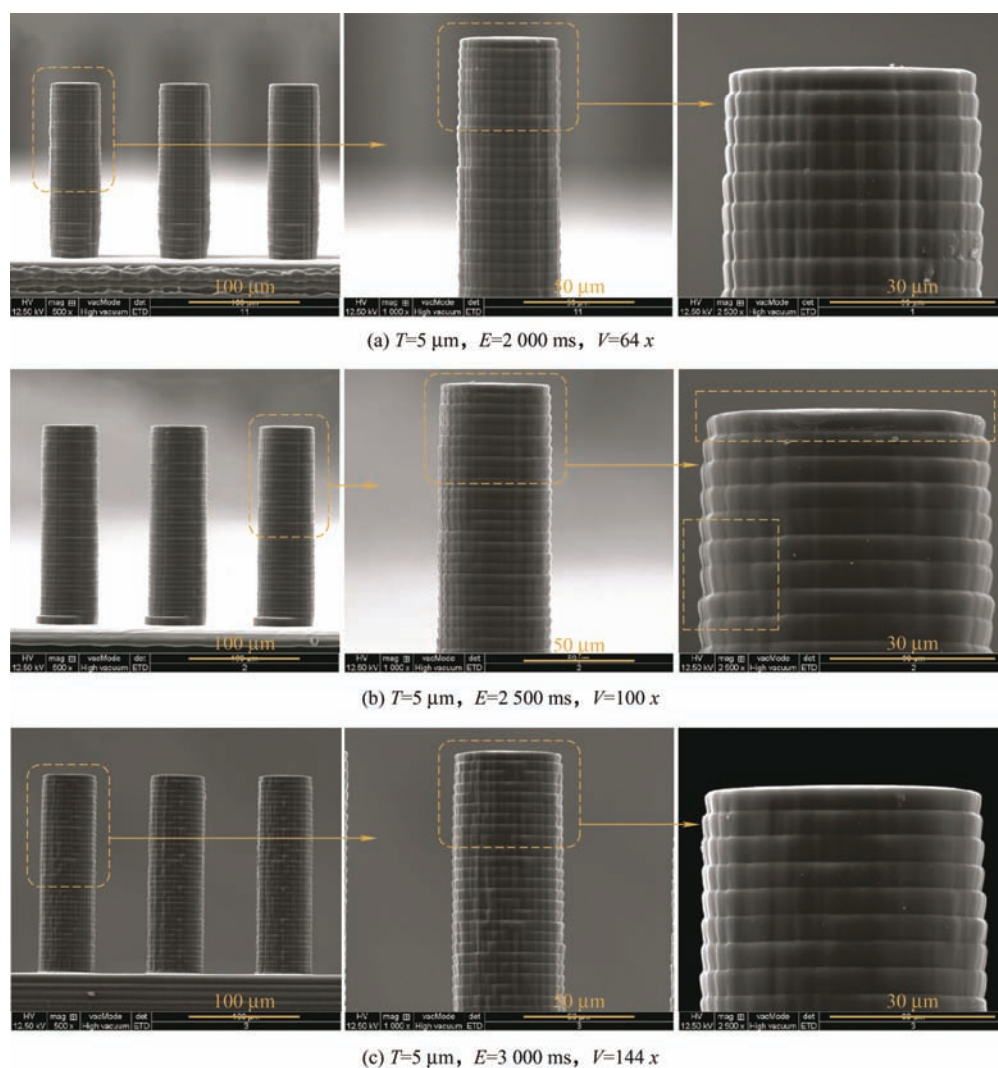


图 13 试验号 1、2、3 打印参数下的圆柱 ESEM 三维形貌

图 13~15 中共 9 组参数下圆柱结构特征放大 500 倍(100 μm 比例尺)的形貌基本符合设计的三维模型几何结构。圆柱层层堆叠的痕迹随打印层厚的增加而更明显。

圆柱结构特征放大 1 000 倍(50 μm 比例尺)的

微观形貌中,图 13、14、15 中圆柱上下层之间的过渡随打印层厚的增加在圆柱侧面呈现更大的起伏变化。在图 15 中,光穿过光敏树脂时能量递减产生的倒圆台形的痕迹随曝光时间的增加而降低。

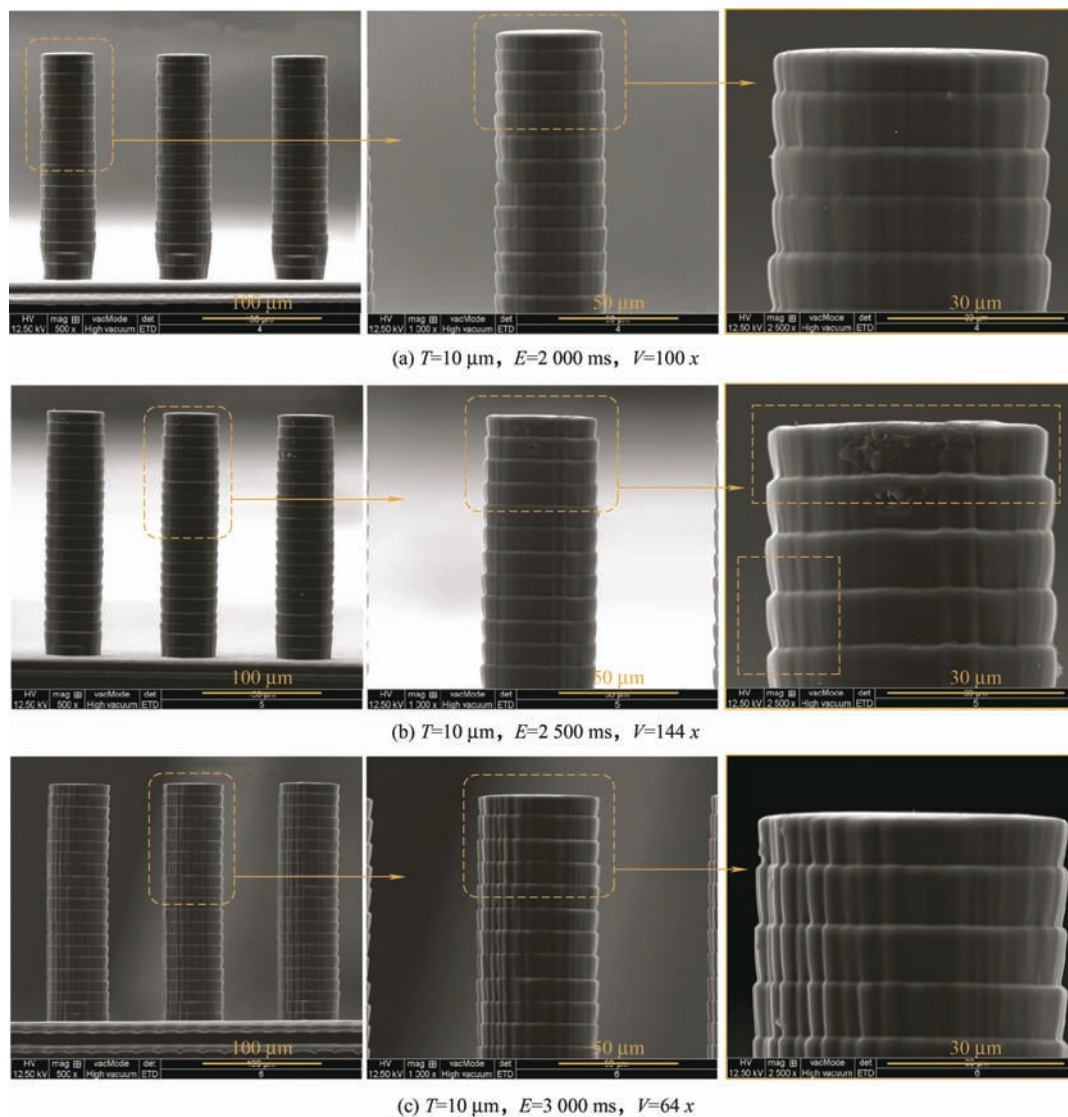
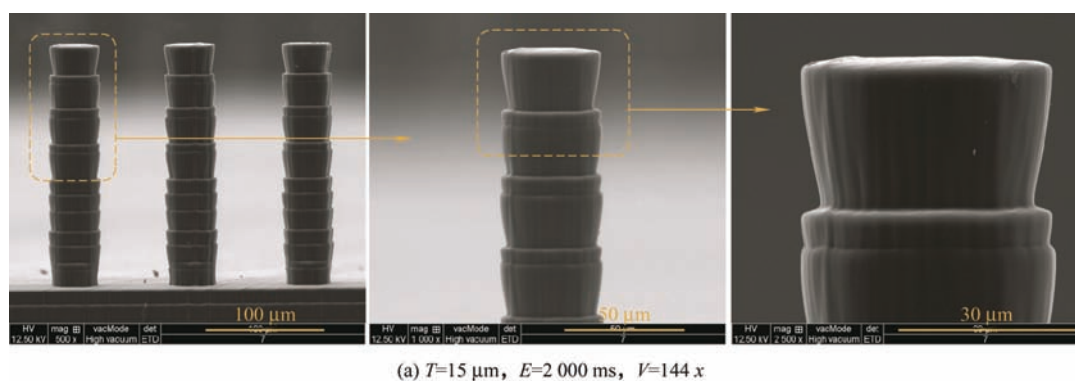


图 14 试验号 4、5、6 打印参数下的圆柱 ESEM 三维形貌



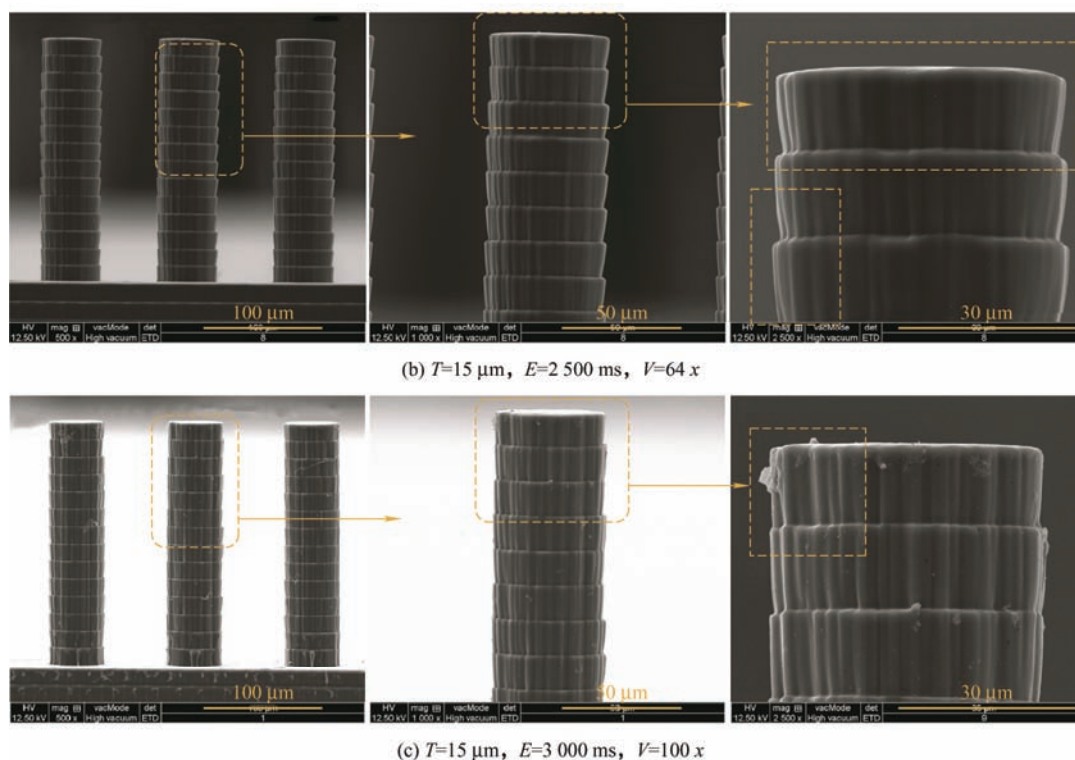


图 15 试验号 7、8、9 打印参数下的圆柱 ESEM 三维形貌

圆柱结构特征放大 2 500 倍(30 μm 比例尺)的微观形貌中,图 13~15 中随曝光时间增加,圆柱直径随之增加,圆柱顶部矩形框中为单次打印固化的层厚以及和下一层的分界痕迹;图 13a、13b、13c 中,圆柱上下层过渡紧密,在横向上呈现许多颗粒状的凸起;图 14 中,圆柱侧面光滑程度 $a>b>c$,初步分析是振动次数改变导致对投影图像的像素点缩放扫描次数产生的;图 15a、15b、15c 下层之间层间形貌差别较大,形貌的均一性较差;图 15c 表面片状杂质为后固化前清洗不够彻底。

3.4 结果分析

微圆柱的打印成型误差包括直径误差、高度误差、垂直度等。其中高度误差主要受装备的系统误差影响,垂直度误差受零件高度与直径的比值影响。直径误差受打印参数影响最为明显,试验主要分析直径误差的影响。圆柱直径测量如图 16 所示,测量时将微圆柱结构均分为上、中、下三段,先分别测量三个圆柱的上段直径,再测量中段、下段的直径,最后对测量结果取平均值,计算公式如式(2)所示。

$$D_1 = (D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{21} + D_{22} + D_{23} + D_{31} + D_{32} + D_{33}) / 9 \quad (2)$$

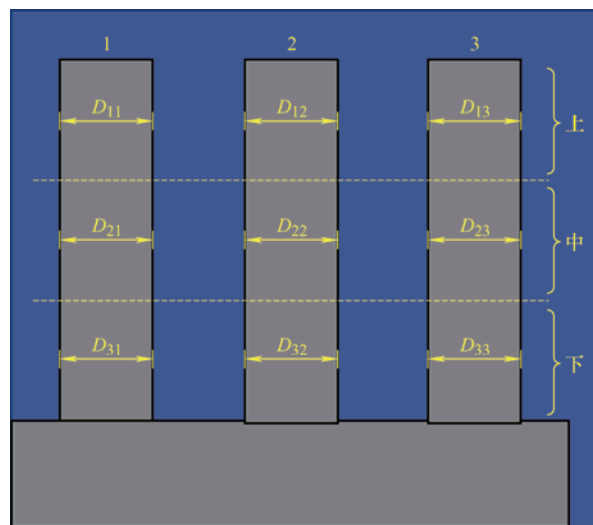


图 16 三段式测量

以相对误差 ΔD 衡量圆柱结构直径的打印精度,计算公式如式(3)所示。9 组不同工艺参数下测量圆柱的误差结果如表 5 所示。

$$\Delta D = \frac{|D_0 - D_1|}{D_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ΔD 为相对尺寸误差; D_0 为设计值; D_1 为实际尺寸测量值。

表 5 正交试验表和试验结果

试验号	打印层厚 (A)/ μm	曝光时间 (B)/ms	振动次数 (C)/x	相对尺寸误差 $\Delta D(\%)$
1	5	2 000	64	6.899
2	5	2 500	100	3.279
3	5	3 000	144	0.804
4	10	2 000	100	5.713
5	10	2 500	144	2.347
6	10	3 000	64	4.136
7	15	2 000	144	15.204
8	15	2 500	64	10.499
9	15	3 000	100	6.777

直径误差的正交试验结果采用极差分析法处理, 该方法处理正交试验每组测量结果可以分析各因素对打印质量的影响大小、优水平和最优参数组合, 其尺寸相对误差的极差分析如表 6 所示。

表 6 直径相对误差极差分析表

项目	打印层厚 (A)/ μm	曝光时间 (B)/ms	振动次数(C)/x
K1	3.661	9.272	4.178
K2	4.065	2.375	5.256
K3	7.827	3.906	6.118
极差 R	4.166	6.898	1.940
优水平	A1	B2	C1
主次因素	B	A	C
最优组合	A1B2C1		

正交试验的极差分析法中, 极差 R 的大小反映了试验因素对评价指标的影响幅度。极差值越大, 说明该因素对评价指标的影响越明显, 反之越小。表 6 中, 曝光时间(B)的极差为 6.898, 打印层厚(A)的极差为 4.166, 振动次数(C)的极差为 1.940。根据极差值的对比, 可以得出打印工艺参数中对微圆柱直径影响因素从大到小的顺序为: 曝光时间(B)>打印层厚(A)>振动次数(C), 且曝光是影响圆柱直径精度的主要因素。

K 值与每个因素的优水平有关。因素层中第一列即打印层厚(A)的 K_1 值最小, 第二列即曝光时间(B)的 K_2 值最小, 第三列即振动次数(C)的 K_1 值最小, 即这些水平对圆柱直径误差的作用最小。所以试验结果按极差分析的最优组合为 A1B2C1。

但进一步从生产效率角度考虑, 打印层厚是打印时长的主要影响因素。试验中的零件总高度为 600 μm , 打印层厚 5 μm 时, 打印层数 120 层, 打印时间为 76.22 min; 打印层厚 10 μm 时, 打印层数

60 层, 打印时间为 40.49 min; 打印层厚 15 μm 时, 打印层数 40 层, 打印时间为 27.42 min。且从正交试验中可以得出, 层厚为 5 μm 与层厚为 10 μm 的极差为 0.404, 远小于试验层厚项目的总体极差 4.166, 说明吧层厚从 5 μm 增加为 10 μm 对圆柱直径的误差影响很小; 同时, 圆柱体属于上下等截面层层固化成型的立体结构, 改变层厚不会像球形、圆锥体成型时有明显的阶梯形貌, 进一步从图 13 和图 14 中可以看出, 打印层厚为 5 μm 或 10 μm 除了层间厚度痕迹有明显区别外, 其余并没有明显区别, 但打印时间却相差近 2 倍, 从打印效率角度考虑应采用 10 μm 的打印层厚。所以, 最终确定打印试验优化后圆柱微结构打印工艺参数组合为 A2B2C1, 即打印层厚 10 μm , 曝光时间 2 500 ms, 振动次数 64 x。

4 结论

(1) 后固化试验中, 随着后固化时间的增加, 零件表面的粗糙度有所降低, 平均降低约 15 nm; 零件硬度从 84.4 HD 增加到 89.5 HD。零件厚度在 1 mm 左右时, 后固化时间应在 5~10 min 内选择。

(2) 通过环境扫描电镜图像和打印时长等对比分析, 打印层厚为 15 μm 时, 打印形貌均一性较差; 打印层厚为 5 μm 时, 耗时最长, 是层厚为 10 μm 的 2 倍, 且层厚为 5 μm 与 10 μm 对打印质量影响的极差为 0.404, 远小于层厚项目的总体极差 4.166, 所以在满足打印质量的前提下应采用 10 μm 的打印层厚以兼顾打印效率。

(3) 打印工艺参数中对微圆柱直径尺寸误差影响从大到小的顺序为: 曝光时间(B)>打印层厚(A)>振动次数(C)。打印参数在均衡打印质量和打印效率的条件下优化后, 打印直径 50 μm , 高度 210 μm 的圆柱微结构应采用打印层厚 10 μm , 曝光时间 2 500 ms, 振动次数 64 x 的打印工艺参数。

参 考 文 献

- [1] GE Qi, LI Zhiqin, WANG Zhaolong, et al. Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(2): 72-90.
- [2] GU Zeming, FU Jianzhong, LIN Hui, et al. Development of 3D bioprinting: From printing methods to biomedical

- applications[J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2019, 15(5): 529-557.
- [3] ZHANG Keqiang, MENG Qiaoyu, ZHANG Xueqin, et al. Quantitative characterization of defects in stereolithographic additive manufactured ceramic using X-ray computed tomography[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 118: 144-157.
- [4] QUAN Haoyuan, ZHANG Ting, XU Hang, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. Bioactive Materials, 2020, 5(1): 110-115.
- [5] HUGHES T, SIMON G P, SAITO K. Photocuring of 4-arm coumarin-functionalised monomers to form highly photoreversible crosslinked epoxy coatings[J]. Polymer Chemistry, 2019, 10(17): 2134-2142.
- [6] ZHANG Peng, WANG Haoxuan, WANG Peng, et al. Lightweight 3D bioprinting with point by point photocuring[J]. Bioactive Materials, 2021, 6(5): 1402-1412.
- [7] LIU Nanbo, YE Xing, YAO Bin, et al. Advances in 3D bioprinting technology for cardiac tissue engineering and regeneration[J]. Bioactive Materials, 2021, 6(5): 1388-1401.
- [8] SINGH S, CHOUDHURY D, YU F, et al. In situ bioprinting - Bioprinting from benchside to bedside[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 101: 14-25.
- [9] 牛梓源, 陈燕, 张泽群, 等. 特种加工技术在再制造领域中的应用与发展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(5): 1-8.
- NIU Ziyuan, CHEN Yan, ZHANG Zequn, et al. Application and development of special machining technology in remanufacturing field[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(5): 1-8.
- [10] AKTER F, ARAF Y, NASER I B, et al. Prospect of 3D bioprinting over cardiac cell therapy and conventional tissue engineering in the treatment of COVID-19 patients with myocardial injury[J]. Regenerative Therapy, 2021, 18:447-456.
- [11] ZHANG Cheng, LUO Zhongqiang, LIU Chengbo, et al. Dimensional retention of photocured ceramic units during 3D printing and sintering processes[J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 11097-11108.
- [12] HE Chong, CAO Yueqi, MA Cong, et al. Digital light processing of complex-shaped 3D-zircon (ZrSiO_4) ceramic components from a photocurable polysiloxane/ ZrO_2 slurry[J]. Ceramics International, 2021, 47(23): 32905-32914.
- [13] AL-DULIMI Z, WALLIS M, TAN D, et al. 3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications[J]. Drug Discovery Today, 2021, 26(2): 360-383.
- [14] SOCHOL R, SWEET E, GLICK C, et al. 3D printed microfluidics and microelectronics[J]. Microelectronic Engineering, 2017, 189(5): 52-68.
- [15] CHEN Zhangwei, LIU Chengbo, LI Junjie, et al. Mechanical properties and microstructures of 3D printed bulk cordierite parts[J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 19257-19267.
- [16] 叶淑源, 周习远, 苑景坤, 等. 高速连续光固化 3D 打印工艺与树脂打印件性能研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(15): 255-263.
- YE Shuyuan, ZHOU Xiyuan, YUAN Jingkun, et al. Study on high-speed continuous photopolymerization 3D printing process and properties of printed resin parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(15): 255-263.
- [17] MENG Xiaoyan, YANG Wenxin, DENG Xin. Research on 3D printing process and properties of diamond-resin composites based on digital light processing[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 120: 108715.
- [18] 车江宁, 杨旭, 郭小锋, 等. 基于 DLP 成型的碳纤维增强光敏树脂 3D 打印工艺及性能[J]. 塑料工业, 2020, 48(11): 71-74, 83.
- CHE Jiangning, YANG Xu, GUO Xiaofeng, et al. Processing and properties of carbon fiber reinforced photosensitive resin for 3D printing based on DLP molding[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11): 71-74, 83.
- [19] 杨建明, 肖志文, 王永宽, 等. DLP 光固化 3D 打印精密铸造陶瓷型壳的研究[J]. 制造技术与机床, 2021(9): 49-53, 57.
- YANG Jianming, XIAO Zhiwen, WANG Yongkuan, et al. Study on fabrication of precise casting ceramic shell by DLP light curing 3D printing[J]. Design and Research, 2021(9): 49-53, 57.
- [20] LEE Y, TAN W, AN J, et al. The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 499:480-490.
- [21] KANG Xiaoqing, LI Xiaogang, LI Yuexuan, et al. Continuous 3D printing by controlling the curing degree of hybrid UV curing resin polymer[J]. Polymer, 2021, 237, 124284.
- [22] TUGHES T, SLIMON G, SAITO K. Photocuring of

- 4-arm coumarin-functionalised monomers to form highly photoreversible crosslinked epoxy coatings[J]. *Polymer Chemistry*, 2019, 10(17): 2134-2142.
- [23] 李全城, 沈剑云, 黄国钦. 微粉金刚石钎焊砂轮磨削氧化铝陶瓷的磨削力和表面粗糙度特征[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(5): 59-64.
- LI Quancheng, SHEN Jianyun, HUANG Guoqin. Grinding force and surface roughness of alumina ceramics ground by brazed micro powder diamond wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(5): 59-64.
- [24] 张家有, 宋万万, 白玉珍, 等. 基于逐步回归分析法的表面粗糙度预测[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(6): 63-67.
- ZHANG Jiayou, SONG Wanwan, BAI Yuzhen, et al. Surface roughness prediction based on stepwise regression analysis[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(6): 63-67.
- [25] MOHAMED M I, AGGAG G A. Uncertainty evaluation of shore hardness testers[J]. *Measurement*, 2003, 33(3): 251-257.
- [26] 邱陆一, 王秋燕, 白硕玮, 等. 金刚石薄圆锯片基体的磨削工艺参数优化[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2021, 41(5): 84-88.
- QIU Luyi, WANG Qiuyan, BAI Shuowei, et al. Optimization of grinding process parameters of diamond thin circular saw blade substrate[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2021, 41(5): 84-88.

作者简介: 陈玉田, 男, 1995 年出生。主要研究方向为精密制造。

E-mail: 1823765202@qq.com

吴重军(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。

主要研究方向为精密制造技术、智能制造。

E-mail: wcjunm@dhu.edu.cn