

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.014

基于 SLA 成型的光敏树脂 3D 打印工艺及性能

蒋三生

(北京农业职业学院,北京 102208)

摘要:以国产光敏树脂为打印材料,基于立体光刻 (SLA) 光固化技术制备实验样品,研究了激光功率、光斑直径、切片厚度和填充扫描速度几个 SLA 工艺参数对样品的打印时间、密度、尺寸偏差、表面粗糙度和弯曲强度的影响。结果表明,基于 SLA 技术打印的实验样品,其密度和弯曲强度的大小主要由材质本身决定;当填充扫描速度为 5 000~8 000 mm/s 时,样品的打印效果较好;打印时间与切片厚度几乎成反比例函数关系;样品尺寸偏差的绝对值随着切片厚度的增加呈现先下降后上升的趋势,表面粗糙度随着切片厚度的增加而增大;当切片厚度为 0.15 mm 时,X 向和 Y 向尺寸偏差绝对值的平均值最小,为 0.01 mm;当切片厚度为 0.1 mm 时,XZ 平面和 YZ 平面的表面粗糙度的平均值最小,为 0.784 μm 。

关键词:3D 打印;立体光刻技术;光敏树脂;工艺

中图分类号:TQ320.63 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)01-0076-06

Processing and Properties of Photosensitive Resin for 3D Printing Based on SLA Molding

Jiang Sansheng

(Beijing Vocational College of Agricultural, Beijing 102208, China)

Abstract : Based on stereo lithography apparatus (SLA) curing technology, experimental samples were prepared by domestic photosensitive resin. The influences of laser power, laser spot diameter, slice thickness and filling scanning speed on the printing time, density, size deviation, surface roughness and bending strength of samples were studied. The results indicate that the density and bending strength of the sample manufactured by SLA are determined by the material itself. When the filling scanning speed is set to 5 000~8 000 mm/s, the printing effects of sample is better. Printing time is almost inverse proportional function with the slice thickness. The absolute value of the sample size deviation are decrease first and then increase with the increase of the slice thickness, and the surface roughness of the sample increase with the increase of the slice thickness. When the thickness of the slice is set to 0.15 mm, the absolute value of the X dimension and Y dimension size deviation is the smallest, which is 0.01 mm. When the slice thickness is set to 0.1 mm, the surface roughness on the XZ plane and YZ plane is the smallest, which is 0.784 μm .

Keywords : 3D printing ; stereo lithography apparatus technology ; photosensitive resin ; process

3D 打印又称为增材制造,是快速成型技术的一种。它以数字化模型文件为依据,以熔融塑料、液态树脂、片状薄膜、粉末金属或粉末陶瓷等为原材料,在加热、光照或烧结等条件下,材料在三维空间内通过打印、粘合和逐层堆叠累积,从而实现物体的制造。3D 打印机最早出现在 20 世纪 90 年代中期,是利用光固化和纸层叠等技术的一种快速成型装置。

目前,3D 打印的工艺类型主要分为六种^[1-2]: 立体光刻 (SLA)、叠层实体制造 (LOM)、熔融沉积成型 (FDM)、选择性激光烧结 (SLS)、选择性激光熔化 (SLM) 及三维打印与胶粘 (3DP)。SLA 工艺在 1984 年由 Charles Hull 提出并获得了美国专利,并被 3D Systems 公司商品化,被公认为是世界上研究最深入、应用最早的一种 3D 打印工艺^[3],主要应用于模

基金项目:北京市教委科技计划一般项目 (KM201812448005),北京农业职业学院科技研发推广类项目 (XY-YF-17-17)

通讯作者:蒋三生,副教授,硕士,研究方向为材料加工工程、逆向工程和 3D 打印技术等 E-mail : 82503@bvca.edu.cn

收稿日期:2018-10-18

引用格式:蒋三生. 基于 SLA 成型的光敏树脂 3D 打印工艺及性能 [J]. 工程塑料应用,2019,47(1) : 76-81.

Jiang Sansheng. Processing and properties of photosensitive resin for 3D printing based on SLA[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1) : 76-81.

具、医疗器械和汽车制造等领域^[4-7]。目前,SLA 工艺用原材料主要为感光性的液态树脂,即光敏树脂。该类光敏树脂的主要成分为低聚物、反应性稀释剂和引发剂。根据引发机理的不同,可将这类光敏树脂材料分为三类:自由基光固化树脂、阳离子光固化树脂和混杂型光固化树脂。自由基体系是由光引发剂受照射激发产生自由基,引发单体和预聚物聚合交联;阳离子体系是由阳离子光引发剂受辐射产生强质子酸,催化加速聚合,使树脂固化^[8-9];混杂型体系则混合了上述两种固化原理。

近年来,3D 打印工艺作为影响打印制品质量的关键因素,受到科研工作者的关注。其中,关于 FDM 打印工艺性能的研究最为广泛。闫丽静等^[10]采用 3D 打印方式制备了聚乳酸 (PLA) 样品,通过对打印速度、打印温度、填充密度、层厚的调节,研究了打印工艺对 PLA 产品力学性能的影响;韩红等^[11]通过 3D 打印机与上位机建立 FDM 3D 打印机试验平台,并设计了基于正交试验法的 FDM 3D 打印机参数优化方案。金泽枫等^[12]通过熔融共混法制备了 PLA 3D 打印材料,通过对打印温度、打印精度、打印填充度等打印工艺参数的调节,探究了打印工艺对打印制品力学性能的影响;C. S. Lee 等^[13]研究了基于 FDM 打印制品的各向拉伸强度;B. H. Lee 等^[14]以丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 为原材料,对 FDM 成型的加工参数打印轨迹、打印轨迹间隙、层厚等进行了研究;S. Raut 等^[15]研究了 FDM 打印轨迹对 ABS 打印制品力学性能和打印耗材量的影响。

目前,针对 SLA 光固化成型打印工艺对材料制品的性能影响研究报道较少。杨娜娜^[16]将国产和进口的几种树脂打印成国标样品进行拉伸性能试验,对其拉伸强度以及断裂方式进行分析,结果表明,国产和进口的一些同类型树脂其力学性能相当;不同体系的光敏树脂,其力学性能和断裂方式差异较大;刘海涛等^[17]比较了两种光敏树脂的特性参数、力学性能和黏度,研究了两种光敏树脂对快速原型件表面质量的影响,结果表明,快速原型件表面质量受到光敏树脂组分、透射深度、单层固化强度和黏度的影响;郭亮等^[18]以 VisiJet® SL Black 光敏树脂为打印材料,从成型过程及后处理工艺出发,研究了切片层厚、支撑角度对成型件尺寸精度和表面精度的影响及二次固化时间对拉伸性能的影响。笔者基于光敏树脂 3D 打印材料,研究了打印工艺参数对

打印制品质量及力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

光敏树脂: SZUV-W8001, 上海数造机电科技股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子分析天平: BSM-520.3 型, 重复性误差为 ± 1 mg, 上海卓精电子科技有限公司;

外径千分尺: 规格为 0~25 mm, 精度为 0.01 mm, 桂林量具刃具有限责任公司;

3D 打印机: 3DSL-360 型, 上海数造机电科技股份有限公司;

切片软件: Materialise Magics 21.0 型, 比利时 Materialise 公司;

万能试验机: Z005 型, 德国 Zwick 公司;

粗糙度轮廓仪: MMD-HR100C 型, 广州威而信精密仪器有限公司。

1.3 样品制备

将样品的建模尺寸定为 3 mm (X 方向) $\times$ 4 mm (Y 方向) $\times$ 36 mm (Z 方向), 按表 1 中的 SLA 成型工艺参数制备样品, 其中填充扫描速度、切片厚度、激光功率和光斑直径分别选取 2~3 个参数值, 其它工艺参数不变; 打印时, 取 3 mm $\times$ 4 mm 底面作为打印支撑面 (XY 平面), 统计样品的打印时间。在不同工艺参数下打印样品的编号列于表 2。

1.4 性能测试

样品密度测量: 采用阿基米德排水法测试, 按式 (1) 计算:

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \rho_L \quad (1)$$

式中: ρ_b ——样品的密度, g/cm³;

m_1 ——干燥样品的质量, g;

m_2 ——样品吸水饱和后在空气中的质量, g;

m_3 ——样品吸水饱和后在水中的质量, g;

ρ_L ——水的密度, g/cm³。

X 向、Y 向尺寸偏差测量: 在样品两端及中间位置测量 3 次, 然后取平均值。

XZ 平面、YZ 平面的表面粗糙度值测量: 采用触针法测量, 取样长度为 0.8 mm, 评定长度为 4 mm, 在样品不同位置测量 3 次, 然后取平均值。

弯曲强度依照 GB/T 9341-2008 标准, 采用三点弯曲简支梁法测量, 加载速率 0.1 mm/min, 跨距 30 mm。

表1 SLA成型工艺参数

环境温度 / °C	22 ~ 28
环境湿度 / %	30 ~ 40
树脂临界辐射强度 / (mJ · cm ⁻²)	9.4
树脂固化深度 / mm	0.4
轮廓扫描速度 / (mm · s ⁻¹)	1200
支撑扫描速度 / (mm · s ⁻¹)	1200
填充扫描速度 / mm · s ⁻¹	2000, 5000, 8000
激光功率 / mW	300, 400
切片厚度 / mm	0.1, 0.15, 0.2
光斑直径 / mm	0.1, 0.15

表2 样品编号

样品编号	切片厚度 / mm	填充扫描速度 / (mm · s ⁻¹)
A ₁₁	0.1	2000
A ₁₂	0.1	5000
A ₁₃	0.1	8000
A ₂₁	0.15	2000
A ₂₂	0.15	5000
A ₂₃	0.15	8000
A ₃₁	0.2	2000
A ₃₂	0.2	5000
A ₃₃	0.2	8000
B ₁₁	0.1	2000
B ₁₂	0.1	5000
B ₁₃	0.1	8000
B ₂₁	0.15	2000
B ₂₂	0.15	5000
B ₂₃	0.15	8000
B ₃₁	0.2	2000
B ₃₂	0.2	5000
B ₃₃	0.2	8000

注: A组样品的激光功率为300 mW, 光斑直径为0.1 mm; B组样品的激光功率为400 mW, 光斑直径为0.15 mm。

2 结果与讨论

2.1 结果统计

表3为各样品的打印结果统计, 包含打印时间、密度、尺寸偏差、表面粗糙度和弯曲强度。根据表3统计的打印结果信息, 各样品的密度在1.14 g/cm³左右, 弯曲强度在74.1 MPa左右, 变化不大, 并没有随着填充扫描速度、切片厚度、激光功率和光斑直径几个工艺参数的变化而发生明显变化, 说明光敏树脂经SLA打印成型后, 其密度和弯曲强度的大小主要由材质本身决定; 但上述几个参数对打印制品尺寸精度(X向、Y向尺寸偏差)和表面质量(XZ平面、YZ平面表面粗糙度)都有影响。

2.2 激光参数对样品打印结果的影响

根据表3的打印结果, A组9个样品(激光功率300 mW、光斑直径0.1 mm)的打印时间、X向和Y向尺寸偏差三个指标的平均值和B组9个样品(激光功率400 mW、光斑直径0.15 mm)的平均值基本一致, 说明激光参数的变化对打印制品的尺寸精度和打印时间几乎没有影响。从理论上分析, 当激光功率和光斑直径变大后, 液态光敏树脂单位时间内受到的激光照射强度和面积均增大, 从而提高打印制品的致密度, 改善材料的表面质量和力学性能。从打印结果分析, B组样品的密度平均值仅比A组样品增加0.01 g/cm³, 弯曲强度平均

表3 SLA打印结果统计

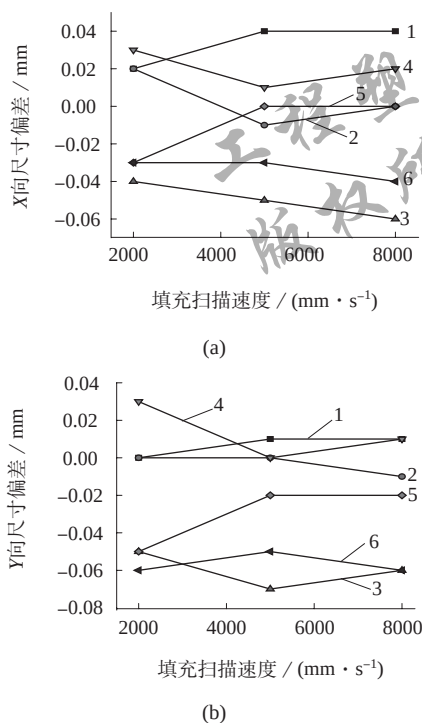
样品编号	打印时间 / min	密度 / (g · cm ⁻³)	X向尺寸偏差 / mm	Y向尺寸偏差 / mm	XZ平面表面粗糙度 / μm	YZ平面表面粗糙度 / μm	弯曲强度 / MPa
A ₁₁	89	1.12	0.02	0.00	0.459	0.951	73.5
A ₁₂	87	1.14	0.04	0.01	0.852	1.004	73.9
A ₁₃	87	1.15	0.04	0.01	0.866	0.888	74.3
A ₂₁	61	1.15	0.02	0.00	2.037	2.256	74.1
A ₂₂	60.5	1.15	-0.01	0.00	2.116	2.122	74.2
A ₂₃	60.5	1.15	0.00	-0.01	1.734	2.182	74.1
A ₃₁	46	1.14	-0.04	-0.05	4.750	7.094	73.8
A ₃₂	45.5	1.15	-0.05	-0.07	4.136	4.899	74.3
A ₃₃	45.5	1.15	-0.06	-0.06	2.859	4.997	74.2
A组平均值	64.7	1.14	0.00	-0.02	2.201	2.933	74.0
B ₁₁	88.5	1.15	0.03	0.03	0.959	0.875	74.1
B ₁₂	88.2	1.15	0.01	0.00	0.732	0.681	74.3
B ₁₃	87.9	1.16	0.02	0.01	0.488	0.654	74.1
B ₂₁	61.4	1.15	-0.03	-0.05	0.970	2.149	74.2
B ₂₂	61.2	1.15	0.00	-0.02	0.605	1.738	74.3
B ₂₃	61.1	1.15	0.00	-0.02	0.725	2.003	74.5
B ₃₁	47	1.15	-0.03	-0.06	2.498	5.180	73.8
B ₃₂	47	1.14	-0.03	-0.05	3.602	4.429	74.1
B ₃₃	45.9	1.14	-0.04	-0.06	3.994	4.585	74.2
B组平均值	65.4	1.15	0.00	-0.02	1.620	2.477	74.2

值仅增加 0.2 MPa; 但 XZ 平面的表面粗糙度平均值从 2.201 μm 降低到 1.620 μm , 降幅达 26.4%, YZ 平面的表面粗糙度平均值从 2.933 μm 降低到 2.477 μm , 降幅达到 15.5%。综上所述, SLA 打印激光功率对样品的打印时间和尺寸精度基本没有影响, 但对表面质量有一定影响。

2.3 填充扫描速度对样品打印结果的影响

填充扫描速度是指在打印过程中, 激光扫描材料内部区域 (不含轮廓边界) 的速度。增加填充扫描速度, 可以提高打印效率。从表 3 统计的各样品的打印时间可以看出, 填充扫描速度的成倍增长并没有明显缩短打印时间。打印时间的长短涉及的因素比较多, 不仅包括内部填充扫描速度, 还包括轮廓扫描速度、支撑扫描速度和刮刀移动速度等。因此, 填充扫描速度对打印效率的影响并不明显。

图 1 是 A 组和 B 组六组样品在同一切片厚度下, 其 X 向、Y 向尺寸偏差随着填充扫描速度变化的曲线。



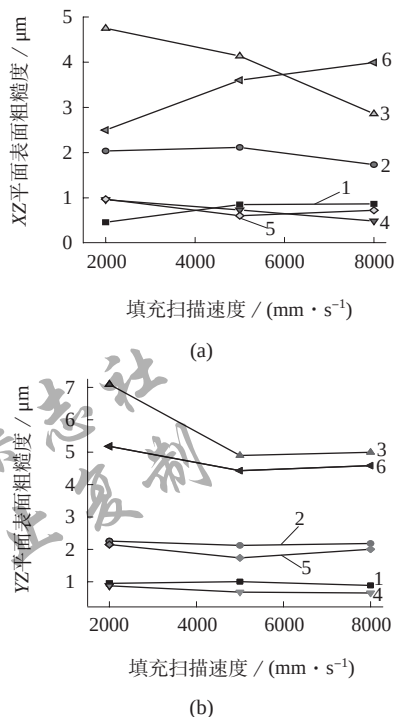
1—A 组, 切片厚度为 0.1 mm; 2—A 组, 切片厚度为 0.15 mm;
3—A 组, 切片厚度为 0.2 mm; 4—B 组, 切片厚度为 0.1 mm;
5—B 组, 切片厚度为 0.15 mm; 6—B 组, 切片厚度为 0.2 mm
a—X 向尺寸偏差; b—Y 向尺寸偏差

图 1 不同填充扫描速度下 X 向、Y 向的尺寸偏差

由图 1 可知, 随着填充扫描速度的增加, 各组样品的 X 向、Y 向尺寸偏差的绝对值变化规律并不一致。以 X 向和 Y 向尺寸偏差绝对值的平均值进行比

较, 当填充扫描速度分别为 2000, 5000, 8000 mm/s 时, 其平均值分别为 0.03, 0.02, 0.03 mm, 填充扫描速度为 5000 mm/s 时的平均值最小。

图 2 是 A 组和 B 组六组样品在同一切片厚度下, 其 XZ 平面、YZ 平面表面粗糙度随着填充扫描速度变化的曲线。



1—A 组, 切片厚度为 0.1 mm; 2—A 组, 切片厚度为 0.15 mm;
3—A 组, 切片厚度为 0.2 mm; 4—B 组, 切片厚度为 0.1 mm;
5—B 组, 切片厚度为 0.15 mm; 6—B 组, 切片厚度为 0.2 mm
a—XZ 平面表面粗糙度; b—YZ 平面表面粗糙度

图 2 不同填充扫描速度下 XZ 平面、YZ 平面的表面粗糙度

由图 2 可知, 随着填充扫描速度的增加, 切片厚度为 0.1 mm 的 A 组样品和切片厚度为 0.2 mm 的 B 组样品的 XZ 平面的表面粗糙度逐渐增大, 而其余 10 组样品的 XZ 平面、YZ 平面的表面粗糙度整体上呈下降趋势。以 XZ 平面表面粗糙度和 YZ 平面表面粗糙度的平均值进行比较, 当填充扫描速度分别为 2000, 5000, 8000 mm/s 时, 其平均值分别为 2.515, 2.243, 2.165 μm , 填充扫描速度为 8000 mm/s 时的平均值最小。

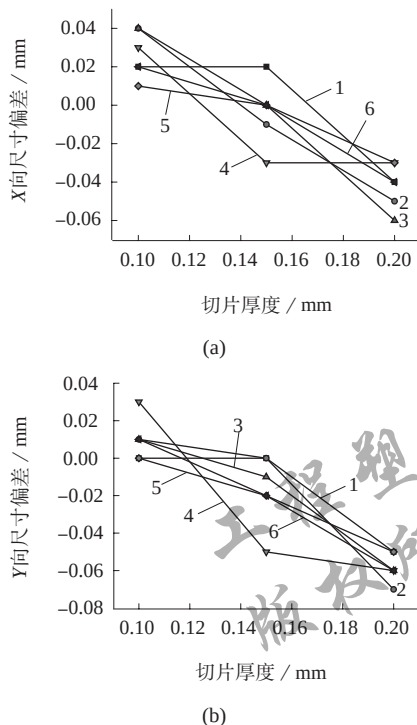
综上所述, 虽然填充扫描速度的大小对样品的尺寸偏差和表面粗糙度影响规律不一致, 但从其平均值来看, 将填充扫描速度设定为 5000 ~ 8000 mm/s 时, 样品的整体打印效果较好。

2.4 切片厚度对样品打印结果的影响

切片厚度是打印每一层材料的高度, 其值的设

定不仅影响打印效率,还对打印制品的质量有重要影响。切片厚度的大小直接决定打印时间。从表3统计的各组样品的打印时间来看,切片厚度分别为0.1,0.15,0.2 mm时,其消耗的打印时间分别为87.9,61.0,46.2 min。由此可见,打印时间与切片厚度几乎成反比例函数关系。

图3是A组和B组六组样品在同一填充扫描速度下,其X向、Y向尺寸偏差值随着切片厚度变化的曲线。

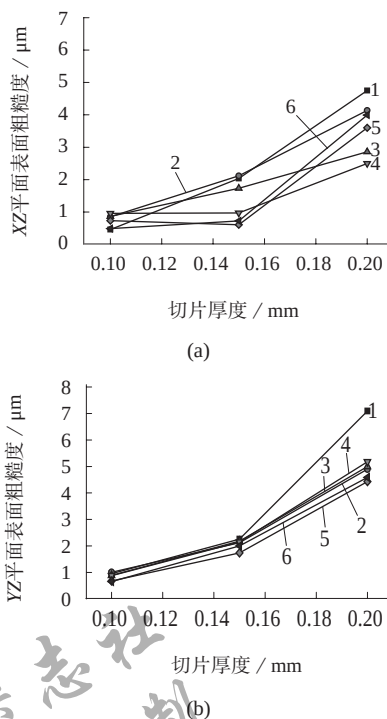


- 1—A组,填充扫描速度 2000 mm/s;
2—A组,填充扫描速度 5000 mm/s;
3—A组,填充扫描速度 8000 mm/s;
4—B组,填充扫描速度 2000 mm/s;
5—B组,填充扫描速度 5000 mm/s;
6—B组,填充扫描速度 8000 mm/s
- a—X向尺寸偏差; b—Y向尺寸偏差

图3 不同切片厚度下X向、Y向的尺寸偏差

由图3可知,随着切片厚度的增加,六组样品的X向、Y向尺寸偏差的绝对值呈现先下降后上升的趋势。以X向和Y向尺寸偏差绝对值的平均值进行比较,当切片厚度分别为0.1,0.15,0.2 mm时,X向和Y向尺寸偏差的平均值分别为0.02,0.01,0.05 mm,切片厚度为0.15 mm的平均值最小。

图4是A组和B组六组样品在同一填充扫描速度下,其XZ平面、YZ平面的表面粗糙度随着切片厚度变化的曲线。



- 1—A组,填充扫描速度 2000 mm/s;
2—A组,填充扫描速度 5000 mm/s;
3—A组,填充扫描速度 8000 mm/s;
4—B组,填充扫描速度 2000 mm/s;
5—B组,填充扫描速度 5000 mm/s;
6—B组,填充扫描速度 8000 mm/s
- a—XZ平面表面粗糙度; b—YZ平面表面粗糙度

图4 不同切片厚度下XZ平面、YZ平面的表面粗糙度

由图4可知,随着切片厚度的增加,六组样品的XZ平面、YZ平面的表面粗糙度均呈现上升趋势。以XZ平面和YZ平面的表面粗糙度的平均值进行比较,当切片厚度分别为0.1,0.15,0.2 mm时,XZ平面和YZ平面的表面粗糙度的平均值分别为0.748,1.720,4.419 μm ,切片厚度为0.1 mm的平均值最小。

综上所述,切片厚度的大小对于样品的打印时间、尺寸偏差和表面粗糙度的影响规律比较明显。其中,打印时间与切片厚度几乎成反比例函数关系;X向、Y向尺寸偏差的绝对值随切片厚度的增加呈现先下降后上升趋势;XZ平面、YZ平面的表面粗糙度随着切片厚度的增加呈现上升趋势。

3 结论

(1) 基于SLA技术打印的样品,其密度和弯曲强度不随着填充扫描速度、切片厚度、激光功率和光斑直径几个工艺参数的变化而发生明显变化,其大小主要由样品的材质本身决定。

(2) 激光功率对样品的打印时间和尺寸精度基本没有影响,但对表面质量有一定影响。

(3) 填充扫描速度的大小对打印时间、尺寸偏差和表面粗糙度的影响规律不一致,其值设定为 5000 ~ 8000 mm/s 时样品的整体打印效果较好。

(4) 打印时间与切片厚度几乎成反比例函数关系;随着切片厚度的增加,样品尺寸偏差的绝对值呈现先下降后上升趋势,而表面粗糙度呈现增大趋势;当切片厚度为 0.15 mm 时, X 向和 Y 向尺寸偏差绝对值的平均值最小,为 0.01 mm;当切片厚度为 0.1 mm 时, XZ 平面和 YZ 平面的表面粗糙度平均值最小,为 0.784 μm 。

参考文献

- [1] 王延庆,沈竞兴,吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报,2016,36(4):89-98.
Wang Yanqing, Shen Jingxing, Wu Haiquan. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4):89-98.
- [2] 邱海飞. 3D 打印成型工艺及其应用研究[J]. 中国塑料,2016,30(11):76-83.
Qiu Haifei. Study of molding process and application of 3D printing technology[J]. China Plastics, 2016, 30(11):76-83.
- [3] 王广春,赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用[M]. 第3版. 北京:机械工业出版社,2009.
Wang Guangchun, Zhao Guoqun. Rapid prototyping and rapid mold manufacturing technology and its application[M]. 3rd ed. Beijing:China Machine Industry Press, 2009.
- [4] 鲁中良,周江平,杨东升,等. 基于 3D 打印技术的预研涡轮叶片精铸蜡型快速制造方法[J]. 航空学报,2015,36(2):651-660.
Lu Zhongliang, Zhou Jiangping, Yang Dongsheng, et al. Rapid fabrication method of pre-research turbine blade wax precision mould based on 3D printing technology[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2015, 36(2):651-660.
- [5] 周鹏,郭龙,赖书城,等. 光固化 3D 打印快速成型技术[J]. 物联网技术,2017,4:97-98.
Zhou Peng, Guo Long, Lai Shucheng, et al. 3D printing rapid prototyping technology of optical curing[J]. Internet of Things Technologies, 2017, 4:97-98.
- [6] 王广春,袁圆,刘东旭. 光固化快速成型技术的应用及其进展[J]. 航空制造技术,2011(6):26-29.
Wang Guangchun, Yuan Yuan, Liu Dongxu. Application and progress of SLA rapid prototyping technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(6):26-29.
- [7] 张新聚,刘雷,李亚男. 一种基于 3D 打印的塑料零件快速制造工艺研究[J]. 塑料工业,2018,46(1):75-78.
Zhang Xinju, Liu Lei, Li Yanan. Research on a rapid manufacturing technology of plastic parts based on 3D printing[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):75-78.
- [8] 孙晓林. 3D 打印技术的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2013(4):108-109.
Sun Xiaolin. Application of 3D printing technology[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2013(4):108-109.
- [9] Li Mengxiao, Zhou Shubao. Research on the application of 3D printing technology in the field of packaging[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 731:304-308.
- [10] 闫丽静,李真真,冯婧,等. 聚乳酸(PLA) 3D 打印工艺研究[J]. 塑料工业,2017,45(2):71-74.
Yan Lijing, Li Zhenzhen, Feng Jing, et al. Research of three-dimensional printing process for PLA[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(2):71-74.
- [11] 韩江,王益康,田晓青,等. 熔融沉积(FDM) 3D 打印工艺参数优化设计研究[J]. 制造技术与机床,2016(6):139-142, 146.
Han Jiang, Wang Yikang, Tian Xiaoqing, et al. Design and study of fused deposition modeling(FDM) 3D printing process parameters optimization[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(6):139-142, 146.
- [12] 金泽枫,金杨福,周密,等. 基于 FDM 聚乳酸 3D 打印材料的工艺性能研究[J]. 塑料工业,2016,44(2):67-70.
Jin Zefeng, Jin Yangfu, Zhou Mi, et al. Research of processing property of PLA materials for 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2):67-70.
- [13] Lee C S, Kim S G, Kim H J, et al. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts[J]. J Mater Process Technol, 2007, 187-188:627-630.
- [14] Lee B H, Abdullah J, Khan Z A. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object[J]. J Mater Process Technol, 2005, 169:54-61.
- [15] Raut S, Jatti V K S, Khedkar N K. Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts[J]. Procedia Mater Sci, 2014(6):1625-1630.
- [16] 杨娜娜. SLA 光固化树脂的力学行为研究[J]. 橡塑技术与装备, 2017, 43(8):52-54.
Yang Nana. Study on mechanical behavior of SLA light cured resin[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2017, 43(8):52-54.
- [17] 刘海涛,黄树槐,莫健华,等. 光敏树脂对快速原型件表面质量的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2007,23(5):170-173.
Liu Haitao, Huang Shuhuai, Mo Jianhua, et al. Effects of photo-sensitive resin on the surface quality of prototype object[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(5):170-173.
- [18] 郭亮,陈忠旭,张庆茂,等. 层厚/支撑角度及后处理对 SLA 零件性能的影响[J]. 中国塑料,2017,31(9):91-96.
Guo Liang, Chen Zhongxu, Zhang Qingmao, et al. Effect of layer thickness, support angle and post-processing on properties of SLA parts[J]. China Plastics, 2017, 31(9):91-96.