

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.014

氧化锌改性光敏树脂的光固化 3D 打印工艺参数优化

宗学文, 田航, 刘亮晶, 倪铭佑

(西安科技大学机械工程学院, 西安科技大学增材制造技术研究所, 西安 710054)

摘要: 为了研究氧化锌改性光敏树脂成型制件的变形率和硬度, 以光固化 3D 打印制件为研究对象, 以氧化锌改性光敏树脂的临界曝光量和光透射深度为基础, 通过单因素试验分析分层厚度、曝光时间和灭灯时间三种打印工艺参数对制件变形率和硬度的影响, 最终选取分层厚度分别为 0.04, 0.06, 0.08 mm, 曝光时间分别为 10, 12, 14 s, 灭灯时间分别为 8, 10, 12 s 作为正交试验中三种不同因素的三个水平值, 并通过计算得到工艺参数对变形率和硬度的信噪比以及最佳打印工艺参数组合。结果表明, 随着分层厚度、曝光时间和灭灯时间的增加, 打印制件的变形率呈现先减小后增大的趋势, 而硬度呈现先增大后减小的趋势。通过分析计算得到最终的最优工艺参数为分层厚度 0.05 mm、曝光时间 11 s、灭灯时间 9 s。利用最终的最优工艺参数组合打印的涡轮叶片整体收缩率为 0.44%、表面硬度为 95.5, 其表面光滑、无错层, 满足使用需求。

关键词: 氧化锌改性光敏树脂; 正交试验; 工艺参数; 变形率; 硬度

中图分类号: TB332, TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0080-07

Optimization of Light-Curing 3D Printing Process Parameters of Photosensitive Resin Modified by Zinc Oxide

Zong Xuwen, Tian Hang, Liu Liangjing, Ni Mingyou

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology,

Institute of Additive Manufacturing Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : In order to study the deformation rate and hardness of zinc oxide modified photosensitive resin molded parts, the parts prepared by light-curing 3D printing technology were used as the research object, and the critical exposure and light transmission depth of the modified photosensitive resin were used as the basis, the influences of three printing process parameters, such as layered thickness, exposure time and light-off time, on deformation and hardness of model parts were obtained through single factor experimental analysis. The final selection of layer thickness is 0.04, 0.06, 0.08 mm, the exposure time is 10, 12, 14 s and light-off time is 8, 10, 12 s, as the three horizontal values of the three different factors in the orthogonal experiment. The signal-to-noise ratio and the best combination of printing process parameters on the deformation rate and hardness were obtained by calculation. The results show that with the increase of the layered thickness, exposure time and light-off time, the deformation rate of the printed parts tends to decrease and then increase, the hardness of the printed parts tends to increase and then decrease. Through analysis and calculation, the optimal process parameters are the layer thickness of 0.05 mm, the exposure time of 11 s and the light-off time of 9 s. The overall deformation rate of the turbine blade printed with the best combination of process parameters is 0.44% and the hardness is 95.5, the surface of turbine blades is smooth and no staggered layers, which meeting usage requirements.

Keywords : zinc oxide modified photosensitive resin ; orthogonal experiment ; process parameter ; deformation rate ; hardness

光固化 3D 打印技术是现有快速成型技术中最成熟的技术之一, 具备高效和环保等优点, 此技术主要通过控制特定波长的紫外光照射液态原料, 在引

发剂的作用下使液态材料发生交联聚合反应, 以此来完成整个模型的固化过程^[1]。而光敏树脂作为光固化技术的主要原料, 目前在使用过程中由于存在

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51875452)

通信作者: 宗学文, 副教授, 博士, 主要研究领域为增材制造

收稿日期: 2022-07-08

引用格式: 宗学文, 田航, 刘亮晶, 等. 氧化锌改性光敏树脂的光固化 3D 打印工艺参数优化 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):80-86.

Zong Xuwen, Tian Hang, Liu Liangjing, et al. Optimization of light-curing 3D printing process parameters of photosensitive resin modified by zinc oxide[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):80-86.

精度、强度不足以及材料种类少、稳定性差等缺点,致使光固化 3D 打印技术在多个领域的应用受到了极大的限制,因此利用陶瓷、纤维以及无机粉末等增强光敏树脂性能的研究工作具有重要意义。

目前影响光固化 3D 打印技术发展的限制之一是光敏树脂的固化性能,为了可以满足各类打印场景的需求,光敏树脂需要达到高效的固化过程、较高的成型精度以及良好的储存性能才能成为合格的打印原料^[2],因此研究人员在寻找不同类型树脂的同时,对各类光敏树脂还进行一系列的改性研究^[3]。研究发现,由于氧化锌(ZnO)具有良好的单晶性和独特的空间三维立体构型,其组成的复合材料呈各向同性^[4],可有效提升光敏树脂的耐磨性、吸波性、抗氧化性、耐腐蚀性、抗菌性以及耐老化性^[5-6]。

光敏树脂在光固化过程中由于光引发聚合反应,使分子之间原有的不饱和化学键生成了新的化学键,从而使分子单元的间距变小,使得打印制件尺寸收缩变形^[7],ZnO 颗粒在整个打印过程中自身尺寸大小不发生变化,因此可有效填补由于树脂固化收缩时产生的空隙,并有效加强制件的硬度,降低制件尺寸的收缩变形^[8],但由于 ZnO 自身具有屏蔽紫外线的能力,致使 ZnO 改性光敏树脂的透光性减弱,同时增强光的散射现象,增加了制件的横向多余固化宽度,使制件发生扩展变形^[9]。为了研究 ZnO 改性光敏树脂后打印参数对成型制件变形率和硬度的影响,笔者制备了 ZnO 改性光敏树脂,以分层厚度、曝光时间、灭灯时间为变量设计正交试验,对变形率和硬度的信噪比进行分析,最终得到最佳打印工艺参数并进行了验证。

1 实验部分

1.1 主要原料

双酚 A 型环氧丙烯酸酯(EA):AgiSyn 1030,荷兰帝斯曼公司;

1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA):AgiSyn 2816,荷兰帝斯曼公司;

三丙二醇二丙烯酸酯(TPGDA):AgiSyn 2815,荷兰帝斯曼公司;

聚氨酯丙烯酸酯(PUA):纯度为 80%,科思创聚合物(中国)有限公司;

(2,4,6-三甲基苯甲酰氯)二苯基氧化膦(TPO):纯度为 99%,德国巴斯夫股份公司;

γ -氨基三乙氧基硅烷:KH550,上海麦克林生化科技公司;

ZnO:分析纯,上海麦克林生化科技公司;

多官能度丙烯酸酯磷酸酯:KM2160,广州谨诚化工科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

光固化 3D 打印机:Anycubic Photon 型,深圳市纵维立方科技有限公司;

数显游标卡尺:0~150 mm,宁波永汇仪器科技有限公司;

邵氏硬度计:BTE-YDJZS 型,丹阳市邦特工具制造有限公司;

超声波清洗机:F-020 型,深圳福洋科技集团有限公司;

磁力加热搅拌器:CJJ78-1 型,上海梅香仪器有限公司;

数显测厚仪:G5130 型,金华市世匠工具有限公司;

紫外辐照计:ST-510 型,台湾先驰光电股份有限公司。

1.3 ZnO 改性光敏树脂样品制备

ZnO 改性光敏树脂的配方见表 1。按照表 1 配方将预聚物 EA 和 PUA、活性稀释剂 HDDA 和 TPGDA 加入烧杯中,通过磁力搅拌器混合 1 h,转速为 700 r/min;随后加入无机填料 ZnO、分散剂 KH550 及促进剂 KM2160,保持转速不变,再次进行搅拌 1 h;最后加入光引发剂 TPO 并将转速调至 400 r/min,搅拌 0.5 h,得到 ZnO 改性光敏树脂溶液。

表 1 ZnO 改性光敏树脂主要成分的质量分数 %

类型	名称	用量
预聚物	EA	22
	PUA	43
活性稀释剂	HDDA	15
	TPGDA	15
光引发剂	TPO	5

注:在 ZnO 改性光敏树脂配方中,ZnO 用量为预聚物 EA 和 PUA 质量的 3%,KH550 用量为 ZnO 质量的 3%,KM2160 用量为光敏树脂质量的 3%。

选取 80 mm×10 mm×4 mm 的长方体作为打印模型件,通过 Cura 切片软件设置模型件的不同曝光时间、分层厚度、灭灯时间的参数组合,随后将 ZnO 改性光敏树脂溶液倒入光固化 3D 打印机的树脂槽中进行打印,得到 80 mm×10 mm×4 mm 的 ZnO 改性光敏树脂样品。

1.4 ZnO 改性光敏树脂的固化特性

光敏树脂的固化方程式如式(1)所示^[10]:

$$C_d = D_p \ln E_0 - D_p \ln E_c \quad (1)$$

式中: C_d ——固化深度;

D_p ——光透射深度;

E_0 ——入射光能量;

E_c ——临界曝光量。

由式(1)可知,设定不同的入射光能量,即不同的曝光时间,使用光固化3D打印机制备单层薄片,用酒精清洗单层固化薄片后,通过数显测厚仪测量薄片的厚度,即ZnO改性光敏树脂的固化深度 C_d ,所测数据见表2。

表2 ZnO改性光敏树脂固化特性测试结果

序号	曝光时间/s	$E_0/(\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2})$	C_d/mm	$\ln E_0$
1	8	4.5673	0.026	1.5188565
2	10	5.6852	0.046	1.7376525
3	12	6.7846	0.066	1.9145664
4	14	7.6046	0.08	2.0287533
5	16	8.7412	0.09	2.1680246
6	18	10.0071	0.09	2.3032948
7	20	11.1096	0.10	2.4078095
8	22	12.1762	0.11	2.4994832
9	24	13.2496	0.13	2.5839673
10	26	14.3858	0.14	2.6662416
11	28	15.3122	0.15	2.7286499
12	30	16.0515	0.16	2.7758023
13	32	17.4481	0.17	2.8592250
14	34	18.5254	0.18	2.9191427
15	36	19.5732	0.19	2.9741612
16	38	20.7172	0.19	3.0309642
17	40	21.8961	0.20	3.0863085

结合式(1),利用最小二乘法对上述结果进行直线拟合,得到ZnO改性光敏树脂的固化深度 C_d 和曝光能量的自然对数 $\ln E_0$ 的拟合直线,如图1所示。

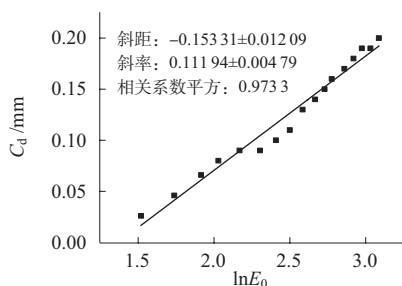


图1 固化深度 C_d 与曝光能量的自然对数 $\ln E_0$ 的拟合直线

由图1可知,直线的斜率大小代表ZnO改性光敏树脂的 D_p ,即 $D_p=0.11194 \text{ mm}$,因此在固化成型时,打印件的分层厚度不能大于 0.112 mm ,否则固化层之间将不能粘连在一起,最终导致打印失败。随后通过式(1)和拟合直线的截距可计算得到ZnO改性光敏树脂的 $E_c=3.934 \text{ mJ/cm}^2$,表明当曝光能量大于 3.934 mJ/cm^2 时,ZnO改性光敏树脂将发生聚合反应。

1.5 正交试验设计

通过对ZnO改性光敏树脂固化特性测试可知,改性光敏树脂的最大透射深度为 0.112 mm ,临界曝光量为 3.934 mJ/cm^2 。选取分层厚度(X)、曝光时间(Y)、灭灯时间(Z)作为正交试验的三个实验因素,随后进行单因素分析试验,选取 $0.04, 0.06, 0.08 \text{ mm}$ 作为 X 的水平值;选取 $10, 12, 14 \text{ s}$ 作为 Y 的水平值;选取 $8, 10, 12 \text{ s}$ 作为 Z 的水平值,最终完成正交试验,设计的正交试验表 $L_9(3^3)$ 见表3。

表3 正交试验因素水平表

水平	因素		
	X/mm	Y/s	Z/s
1	0.04	10	8
2	0.06	12	10
3	0.08	14	12

利用信噪比(S/N)作为质量特性的重要评判指标,其中“信号”代表输出特性的期望值大小,“噪声”代表输出特性的不期望值大小。在通过信噪比进行分析时,质量特征主要分为望大特性、望小特性以及望目特性。在实验中,变形率为望小特性,硬度为望大特性,分别采用式(2)、式(3)得到变形率和硬度的 $S/N^{[11]}$ 。

$$S_1/N_1 = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

$$S_2/N_2 = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

式中: S_1/N_1 ——变形率的信噪比;

S_2/N_2 ——硬度的信噪比;

n ——试验次数, $n=4$;

y ——试验响应值;

i ——试验编号。

随后对各项试验结果进行统计分析,最终获取最佳的打印工艺参数组合。

1.6 性能测试

(1) 变形率测试。

为了降低测量误差,同一个参数组合打印3个制件。使用数显游标卡尺分别对每个制件的长度(L)、宽度(W)、高度(H)各测量4次,并求得平均值作为实测值,然后计算制件的变形率,计算公式如式(4)所示^[12]:

$$D = \left(\frac{|L - L_0|}{3L_0} + \frac{|W - W_0|}{3W_0} + \frac{|H - H_0|}{3H_0} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: D ——变形率;

L, W, H ——制件的长度、宽度、高度实测值;

L_0, W_0, H_0 ——制件的长度、宽度、高度设计值。

(2) 硬度测试。

选取各制件上的四个不同点,按照 GB/T 531-1999,使用硬度计测量其硬度,以四个点位的均值作为硬度的实测值。

2 结果与讨论

2.1 单因素工艺参数对制件变形率和硬度的影响

经测试,光固化3D打印机的曝光强度为 0.55 mW/cm^2 , ZnO 改性树脂的临界曝光量为 3.934 mJ/cm^2 ,透射深度为 0.112 mm 。当底层曝光时间为 50 s ,层数为 5 时,打印制件与成型平台的粘接效果最好。以上述数据为基础,设定不同的分层厚度、曝光时间、灭灯时间的参数组合,分析其对改性光敏树脂打印制件变形率及硬度的影响规律。

(1) 分层厚度对制件变形率和硬度的影响。

分层厚度代表了对预设模型进行切片处理时的单层厚度大小,此参数的选择将直接影响制件精度的高低^[13],当分层厚度较大时,制件侧边将出现明显的阶梯效应,严重影响制件的表面质量和精度;当分层厚度较小时,虽然可以有效避免阶梯效应的出现,但是成型效率将会明显降低。通过对 ZnO 改性后树脂的透射深度测试,得到分层厚度不能大于 0.112 mm ,当分层厚度大于 0.112 mm 时将出现层与层之间的粘结力不足或者未粘结的状态,从而导致打印失败。不同分层厚度下制件的变形率和硬度如图 2 所示。

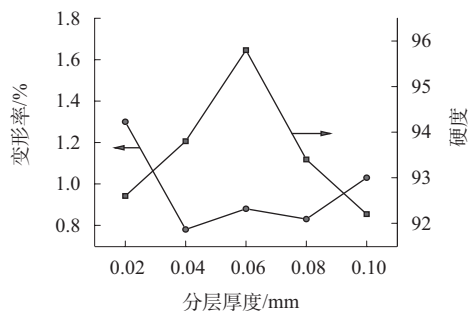


图2 不同分层厚度下制件的变形率和硬度

由图 2 可知,随着分层厚度的增加,制件的变形率整体呈现先减小后增大的变化趋势,硬度则呈现先增大后减小的变化趋势。这是由于当分层厚度较小时,由于光的散射现象导致制件的横向尺寸变大,使得制件的变形率较大;而当分层厚度大于 0.08 mm 时,由于 ZnO 颗粒自身的折射率较大,对紫外光具有一定的吸收能力,降低了光的透射深度,因此出现欠固化现象,导致制件的变形率出现增大的趋势。同时,当分层厚度较小时,用于单层光敏树

脂固化的光能量过大,使得底层出现翘曲变形现象,从而影响后续打印层之间的粘接,导致制件的整体性能下降,因此硬度相对较小;而当分层厚度大于 0.08 mm 时,由于欠固化现象而导致内部层间容易出现未固化层,同时各个层之间结合较弱,硬度则出现减小的趋势。最终结合变形率和硬度曲线,选择 $0.04, 0.06, 0.08 \text{ mm}$ 作为正交试验中分层厚度的水平值。

(2) 曝光时间对制件变形率和硬度的影响。

曝光时间的长短决定了每层树脂固化的能量大小,曝光能量的计算公式如式 (5) 所示^[14]:

$$E = lt \quad (5)$$

式中: E ——曝光能量;

l ——曝光强度;

t ——曝光时间。

当曝光能量远大于临界曝光量时,各个打印层都将出现不同程度的过固化情况,导致打印件出现严重的翘曲变形;而光敏树脂固化所需要的曝光能量不足时,将出现未完全固化现象,不仅使制件的尺寸精度降低,甚至其内部由于出现未固化区而导致硬度降低。ZnO 改性光敏树脂特性的临界曝光量 $E_c = 3.934 \text{ mJ/cm}^2$,光固化3D打印机的曝光强度 $l = 0.55 \text{ mW/cm}^2$,根据式 (5) 计算可知,设定的曝光时间不得小于 7.2 s ,否则将出现打印失败的状况。不同曝光时间下制件的变形率和硬度如图 3 所示。

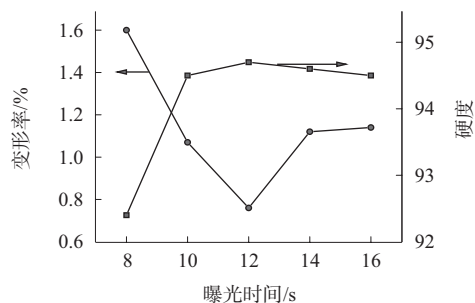


图3 不同曝光时间下制件的变形率和硬度

由图 3 可知,随着曝光时间的增加,制件的变形率出现一个急速减小的阶段,在 12 s 时变形率达到最小值,随后变形率又明显增大,当曝光时间大于 14 s 时,变形率出现轻微增大的趋势。这是由于曝光时间过短时,曝光能量不足,从而无法满足每层树脂所需的固化能量,纵向固化深度不足,出现欠固化现象,从而导致制件收缩严重,变形率变大;当曝光时间过长时,曝光能量增大,由于 ZnO 改性光敏树脂内 ZnO 颗粒的存在而导致散射现象发生,使得横

向固化宽度增加,制件的实际尺寸大于设计尺寸,因此变形率出现增大的趋势。同时,随着曝光时间的增加,吸收的能量增大,从而导致 ZnO 改性光敏树脂内部分子之间的交联程度加强,因此制件的硬度增大;当曝光时间过长时,由于曝光能量的增加而导致制件产生翘曲变形,层与层之间的粘接力下降,使得硬度出现降低的趋势。最终选取 10,12,14 s 作为正交试验中曝光时间的水平值。

(3) 灭灯时间对制件变形率和硬度的影响。

灭灯时间是指在打印过程中层与层之间打印的间隔时间,以保证光敏树脂在该间隔时间内完成新一层树脂的填充,灭灯时间增加,可保证打印件同离型膜的分离速度降低,同时可有效释放同离型膜之间的附着应力和其内应力,降低由于剥离而产生的翘曲和变形。不同灭灯时间下制件的变形率和硬度如图 4 所示。

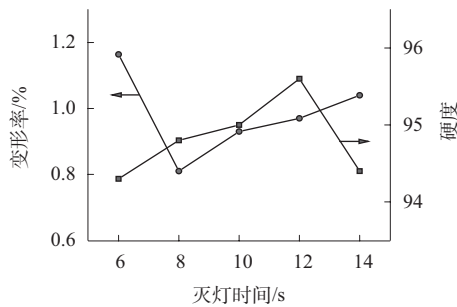


图4 灭灯时间对模型件的变形率和硬度的影响

由图 4 可知,随着灭灯时间的增加,制件的变形率呈现先减小后增大的变化趋势,硬度则呈现先增大后减小的变化趋势。当灭灯时间较短时,制件的变形率较大。这是由于打印过程中制件内部的残余应力没有完全释放就开始下一层的打印,从而导致制件发生变形,硬度也随之降低。随着灭灯时间的增加,每层都有充分释放应力的时间,使得制件的变形率下降,硬度有一定提升;而过长的灭灯时间将影响整体的打印效率,同时打印平台的抬升时间越长,与空气的接触时间越久,将导致氧阻聚的作用越大,使下一层固化所需的能量越高,进一步降低打印质量。最终选取 8,10,12 s 作为正交试验中灭灯时间的水平值。

2.2 正交试验结果及分析

正交试验结果见表 4。对表 4 各工艺参数试验结果进行方差分析,得到各工艺参数对打印制件变形率和硬度的影响程度,结果见表 5 和表 6。检验统计量 F 值越大,说明该工艺参数对打印制件性能的影响越大。通过信噪比来分析各工艺参数对制件

变形率和硬度的影响规律,结果如图 5、图 6 所示,信噪比越大,说明打印制件的质量越好。

表 4 正交试验结果

序号	X/mm	Y/s	Z/s	变形率/%	硬度
1	0.04	10	8	0.49	95.4
2	0.04	12	10	0.57	96.3
3	0.04	14	12	0.55	95.6
4	0.06	10	10	0.49	94.6
5	0.06	12	12	0.46	95.5
6	0.06	14	8	0.45	94.9
7	0.08	10	12	0.59	95.0
8	0.08	12	8	0.63	96.3
9	0.08	14	10	0.67	95.8

表 5 变形率方差分析

因素	自由度	平方和	均方差	F 值
X/mm	2	0.040 289	0.020 144	58.48
Y/s	2	0.002 022	0.001 011	2.94
Z/s	2	0.004 822	0.002 411	7.00
残差误差	2	0.000 689	0.000 344	
合计	8			

表 6 硬度方差分析

来源	自由度	平方和	均方差	F 值
X/mm	2	1.082 22	0.541 11	25.63
Y/s	2	1.615 56	0.807 78	38.26
Z/s	2	0.068 89	0.034 44	1.63
残差误差	2	0.042 22	0.021 11	
合计	8			

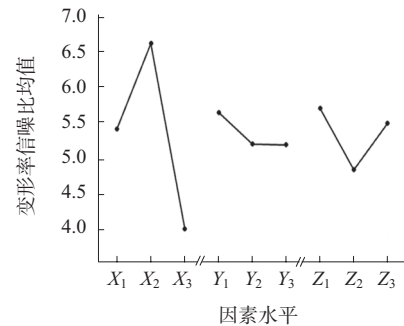


图 5 不同因素水平时制件的变形率信噪比均值

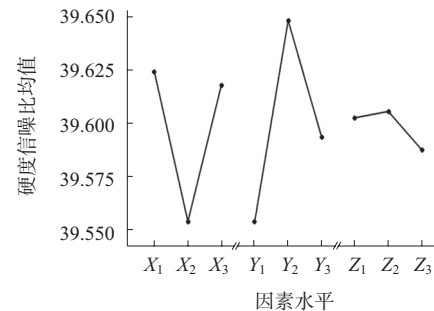


图 6 不同因素水平时制件的硬度信噪比均值

取显著性水平 $\alpha=0.05$, 通过 F 分布表可知, $F_{0.05}(2,2)=19$ 。由表 5 可知, X 对打印制件变形率的影响显著, 而 Y 和 Z 对制件变形率的影响不显著, 其影响大小顺序为 $X > Z > Y$; 由表 6 可知, X 和 Y 对打印制件硬度的影响显著, 而 Z 对于制件硬度

的影响不显著,其影响大小顺序为 $Y > X > Z$ 。

由图5、图6可知,制件变形率最小时的打印参数组合为 $X_2Y_1Z_1$,即: $X=0.06$ mm, $Y=10$ s, $Z=8$ s;硬度最大时的打印参数组合为 $X_1Y_2Z_2$,即: $X=0.04$ mm, $Y=12$ s, $Z=10$ s。制件变形率和硬度两组最优工艺参数有所不同,最终的最优工艺参数组合应为 X, Y, Z 各自所对应最优工艺参数的平均值^[15],因此,最终优化后制件变形率和硬度的最佳打印工艺参数组合为: $X=0.05$ mm, $Y=11$ s, $Z=9$ s。

表7 最优工艺参数组合

因素	变形率最优组合	硬度最优组合	变形率和硬度最优组合
X	0.06	0.04	0.05
Y	10	12	11
Z	8	10	9

2.3 最优工艺参数的验证

为了验证正交试验优化得到的最优工艺参数的合理性及可行性,依照所得最优工艺参数组合,即分层厚度0.05 mm、曝光时间11 s、灭灯时间9 s再次打印由ZnO改性光敏树脂,打印制件为涡轮叶片,结果如图7所示。经过测量得到制件的变形率为0.44%、硬度为95.5,同时叶片表面光滑、无错层,满足使用需求。

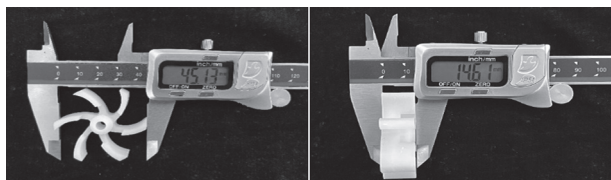


图7 最优工艺参数组合打印的涡轮叶片

3 结论

(1) 对ZnO改性光敏树脂打印制件的变形率及硬度进行了实验研究,随着 X, Y, Z 的增加,打印制件的变形率呈现先减小后增大的趋势,而硬度呈现先增大后减小的趋势。

(2) 通过对各工艺参数信噪比的均值进行方差分析可知, X 对打印制件变形率的影响显著,而 Y 和 Z 对制件变形率的影响不显著,其影响大小顺序为 $X > Z > Y$; X 和 Y 对打印制件硬度的影响显著,而 Z 对于制件硬度的影响不显著,其影响大小顺序为 $Y > X > Z$ 。

(3) 对变形率和硬度的最优工艺参数计算均值,得到最终的最优工艺参数组合为:分层厚度0.05 mm、曝光时间11 s、灭灯时间9 s。在此工艺参数组合下,打印出的涡轮叶片变形率为0.44%,外表面硬度为95.5,满足使用需求。

参考文献

- [1] 赵杰,李伶,沈涛,等.光固化3D打印中光敏树脂的研究进展[J].山东陶瓷,2021,44(5):15-19.
Zhao Jie, Li Ling, Shen Tao, et al. Research progress of UV curable ceramic photosensitive resin for 3D printing[J]. Shandong Ceramics, 2021, 44(5):15-19.
- [2] 宗学文,周升栋,刘洁,等.光固化3D打印及光敏树脂改性研究进展[J].塑料工业,2020,48(1):12-17.
Zong Xuewen, Zhou Shengdong, Liu Jie, et al. Research progress in photo-curing 3D printing and photosensitive resin modification[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(1):12-17.
- [3] 郭璐.3D打印用光敏树脂材料研究进展[J].塑料科技,2020,48(2):135-140.
Guo Lu. Research developments on photosensitive resin materials for 3D printing[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(2):135-140.
- [4] 张荣良,柳亚输,金云学.针状纳米ZnO制备EP/ZnO复合材料及其力学性能的研究[J].材料工程,2011(12):78-82.
Zhang Rongliang, Liu Yashu, Jin Yunxue. Preparation of EP/ZnO composites with needle Nano-ZnO and its mechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(12):78-82.
- [5] 周茗萱,李文翔,高念,等.纳米氧化锌改性环氧树脂的性能研究[J].粘接,2017,38(11):28-31.
Zhou Mingxuan, Li Wenxiang, Gao Nian, et al. Properties of epoxy resin modified with nano-ZnO[J]. Adhesion, 2017, 38(11):28-31.
- [6] 柳亚输,王荣,魏仕华.纳米ZnO改性环氧树脂研究[J].四川化工,2016,19(4):1-4, 11.
Liu Yashu, Wang Rong, Wei Shihua. Research of nano-ZnO modified epoxy[J]. Sichuan Chemical Industry, 2016, 19(4):1-4, 11.
- [7] 张佳亮.紫外光固化面成形关键技术研究[D].西安:西安科技大学,2021.
Zhang Jialiang. Research on key technology of ultraviolet curing mask-image projection stereolithography[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [8] 宗学文,张佳亮,刘文杰,等.陶瓷增强光敏树脂制件的工艺研究[J].塑料工业,2021,49(4):69-74.
Zong Xuewen, Zhang Jialiang, Liu Wenjie, et al. Process research on ceramic particles reinforced photosensitive resin parts[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(4):69-74.
- [9] 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):1895-1904.
- [10] 唐富兰,莫健华,薛邵玲.纳米SiO₂改性光固化成型材料的研究[J].高分子材料科学与工程,2007(5):210-213.
Tang Fulan, Mo Jianhua, Xue Shaoling. Study on radiation-curable composition modified by nanosilica[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2007(5):210-213.
- [11] Haleel A J. Optimization drilling parameters of aluminum alloy

- based on taguchi method[J]. Al-Khawarizmi Engineering Journal, 2018, 14(2). DOI:10.22153/kej.2018.12.001.
- [12] 宗学文,刘亮晶,倪铭佑,等.响应曲面法碳化硅增强光敏树脂制件工艺[J].工程塑料应用,2021,49(10):61-67.
Zong Xuewen, Liu Liangjing, Ni Mingyou, et al. Fabrication process of silicon carbide reinforced photosensitive resin by response surface method[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):61-67.
- [13] Boca M-A, Sover A, Slătineanu L. The printing parameters effects on the dimensional accuracy of the parts made of photosensitive resin[J]. Macromolecular Symposia, 2021, 396(1). DOI:10.1002/masy.202000287.
- [14] 权坤.双紫外掩模面成型机理及成型精度研究[D].西安:西安科技大学,2019.
Quan Kun. Research on forming mechanism and accuracy of double ultraviolet mask projection stereolithography technology[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [15] 钟厉,姚志军,张继祥,等.基于田口方法的碳纤维保险杠注射成型质量分析研究[J].塑料工业,2020,48(10):97-102.
Zhong Li, Yao Zhijun, Zhang Jixiang, et al. Research on quality analysis of carbon fiber bumper injection molding based on taguchi method[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):97-102.
- =====
- (上接第74页)
- [8] 秦玉洁.一种可激光焊接用的改性塑料及其制备方法:CN107652653A[P]. 2018-02-02.
Qin Yujie. A modified plastic for laser welding and its preparation method:CN107652653A[P]. 2018-02-02.
- [9] 秦玉洁,卢先博,王俊,等.改性聚丙烯各组分对激光焊接性能的影响[J].上海塑料,2021,49(3):49-54.
Qin Yujie, Lu Xianbo, Wang Jun, et al. Effect of Modified polypropylene components on laser welding performance[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(3):49-54.
- [10] 孔茗. PE与PA66激光透射焊接及其性能研究[J].塑料科技, 2019, 47(9):47-50.
Kong ming. Laser Transmission welding of PE and PA66 and its properties[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(9):47-50.
- [11] Atsushi M, Shingo N, Yasushi N, et al. Polyamide resin composition for laser welding:JP2018012759A[P]. 2018-01-25.
- [12] 杨振英,于博.3D打印在汽车塑料件设计中的应用与研究进展[J].塑料工业,2017,45(5):11-15.
Yang Zhenying, Yu Bo. Application and research progress of 3D printing in automotive plastic parts design[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(5):11-15.
- [13] Amanat N, Chaminade C, Grace J, et al. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry[J]. Materials & Design, 2010, 31(10):4 823-4 830.
- [14] Paganoa N, Campana G, Fiorini M, et al. Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films industry[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91:80-84.
- [15] Chen Z, Huang Y, Han F L, et al. Numerical and experimental investigation on laser transmission welding of fiberglass-doped PP and ABS[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31:1-8.
- [16] 上官同英,刘冬敏,陈志.激光透射焊接掺杂玻璃纤维ABS和PP塑料工艺研究[J].应用激光,2019,39(1):93-97.
Shangguan Tongying, Liu Dongmin, Chen Zhi. Laser transmission welding of fiberglass-doped ABS and PP[J]. Applied Laser, 2019, 39(1):93-97.