

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.022

硅酸铝增强数字光固化光敏树脂制备及工艺参数优化

谷明辉, 龚培双, 郭小锋, 李宽, 朱从云

(中原工学院智能机电工程学院, 郑州 450000)

摘要: 通过数字光固化(DLP) 3D 打印技术制备硅酸铝增强 DLP 光敏树脂制件, 为了优化出最佳的硅酸铝用量和成型工艺, 首先采用单因素实验研究了 DLP 工艺参数(曝光时间、打印层厚)以及不同硅酸铝用量对制件成型误差及拉伸强度的影响规律, 选取合适的参数范围作为响应面法水平值; 随后, 在 Design-Expert 13 软件中, 采用响应面法构建以打印层厚、曝光时间以及硅酸铝用量为实验变量, 以成型误差与拉伸强度为响应值的二次多项式回归模型; 最后, 将成型误差最小、拉伸强度最大同时作为优化目标, 进行工艺参数优化。得到的最佳工艺参数组合为打印层厚 0.04 mm、曝光时间 5 s、硅酸铝质量分数 2%。按照此参数组合条件, 打印成型件最终的成型误差和拉伸强度分别为 0.41% 和 64.3 MPa, 与理论预测值接近, 优化结果可靠。

关键词: 工艺参数优化; 响应面法; 光敏树脂; 硅酸铝; 成型误差; 拉伸强度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0158-07

Preparation of aluminum silicate reinforced digital light processing photosensitive resin and optimization of process parameters

GU Minghui, GONG Peishuang, GUO Xiaofeng, LI Kuan, ZHU Congyun

(Intelligent Mechanical and Electrical Engineering School, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract : Through digital light processing (DLP) 3D printing technology, the aluminum silicate reinforced DLP photosensitive resin parts were prepared, in order to optimize the optimal aluminum silicate content and molding process, the influences of DLP process parameters (exposure time, printing layer thickness) and different aluminum silicate contents on the forming error and tensile strength of the part were studied by single factor experiment, and the appropriate parameter range was selected as the level value of the response surface method. Then, in Design-Expert 13 software, the response surface method was used to construct quadratic polynomial regression models with the printing layer thickness, exposure time and aluminum silicate content as experimental variables, and forming error and tensile strength as response values. Finally, the minimum forming error and the maximum tensile strength were taken as the optimization goals for optimizing process parameters. The obtained optimum process parameter combination is that the printing layer thickness is 0.04 mm, the exposure time is 5 s, and the aluminum silicate mass fraction is 2%. According to this parameter combination condition, the final forming error and tensile strength of the printed molded parts are 0.41% and 64.3 MPa respectively, which are close to the theoretical prediction values, and the optimization results are reliable.

Keywords : optimization of process parameters ; response surface method ; photosensitive resin ; aluminum silicate ; forming error ; tensile strength

近年来,数字光固化(DLP) 3D 打印技术在多领域得到广泛应用,其独特的优势包括低成型误差、打印实体稳定以及高打印效率^[1]。该技术将三维实体模型(STL 格式)进行切片储存为二维数据文件,

然后根据二维数据文件控制特定波长的紫外光照射光敏树脂,在光引发剂的影响下,光敏树脂中预聚物进行交联聚合反应,从而实现模型的叠加固化步骤^[2]。然而,传统的光敏树脂材料在固化之后会

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2024046),国家自然科学基金项目(51705545)

通信作者: 谷明辉,博士,讲师,研究方向为快速成型技术

收稿日期: 2024-09-07

引用格式: 谷明辉,龚培双,郭小锋,等. 硅酸铝增强数字光固化光敏树脂制备及工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 158-164.

GU Minghui, GONG Peishuang, GUO Xiaofeng, et al. Preparation of aluminum silicate reinforced digital light processing photosensitive resin and optimization of process parameters[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 158-164.

出现强度不足等问题,因此,对于光敏树脂3D打印工艺的优化,无论是从材料改良还是工艺参数的角度,都有着重大的研究价值^[3]。DLP打印制件过程复杂,制件成型质量和成型效率受到多方面的影响,如光敏树脂本身材料限制、打印机精度稳定性以及工艺参数的选择等^[4]。刘莹莹等^[5]通过纳米氧化铝改性光敏树脂,在改善树脂制件力学性能和降低收缩率等方面作了研究;宗学文等^[6]采用碳化硅优化光敏树脂性能,利用响应面法得到液晶显示(LCD)面成型光固化技术打印制件最佳工艺参数及碳化硅配比;王世崇等^[7]通过改性碳纤维/光敏树脂复合树脂的光固化动力学研究,提高复合材料的强度与韧性;冯满^[8]利用不同掺杂量的纳米SiO₂改性酚醛树脂复合材料,复合材料整体的拉伸强度和断裂伸长率均得到了提高。目前,对于纳米硅酸铝颗粒增强DLP光敏树脂力学性能改善及工艺参数优化方面研究较少。

硅酸铝作为一种无机纳米颗粒,填充到光敏树脂中,可起到增韧增强的作用,硅酸铝的添加会使树脂周围的基体产生屈服,由于纳米硅酸铝颗粒集中效应的影响,能吸收树脂周围的能量,减弱成型件断裂纹的扩展,在降低树脂成型误差的同时增强力学性能^[9]。笔者研究的自制光敏树脂属于自由基光敏树脂,采用的预聚物由聚氨酯丙烯酸酯(PUA)和环氧丙烯酸树脂(EA)按质量比2:1混合配制而成,在硅酸铝增强DLP光敏树脂3D打印成型中,硅酸铝的用量与打印厚度、曝光时间等工艺参数间存在耦合影响关系,因此,基于响应面法构建硅酸铝用量及3D打印工艺参数对数值成型件性能的影响关系函数,进而寻求最佳的硅酸铝用量和成型工艺。

1 实验部分

1.1 主要原料及制备

PUA,EA:四城光电材料有限公司;

光引发剂(TPO):东莞井上化工有限公司;

三丙二醇二丙烯酸酯(TPGDA):上海引昌新材料公司;

硅酸铝粉末:工业级,上海阿拉丁试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

DLP光固化3D打印机:波长为405 nm,打印尺寸为82.24 mm×51.4 mm×100 mm,自制;

电子天平:ME104,瑞士梅特勒—托利多仪器有限公司;

磁力搅拌器:NTLLAB,深圳市嘉实科技有限公司;

超声波清洗机:GD1030,深圳市冠博士科技实业有限公司;

电子显微镜:Dino-Lite,上海巴拓仪器有限公司;

电子强力试验机:YG026MD,温州方圆仪器有限公司。

1.3 试样制备

纳米硅酸铝增强光敏树脂实验室制备过程如下:将实验烧杯置于遮光恒温40℃的环境中,称取PUA 40 g和EA 20 g先后加入实验烧杯中搅拌均匀,再加入稀释剂TPGDA 35 g和TPO 5 g,磁力搅拌器搅拌至液体颜色均匀,静置待温度降至室温,再依次加入质量分数为1%,2%,3%,4%的硅酸铝粉末,搅拌至硅酸铝粉末分散均匀,静置待气泡消除,将混合好的纳米硅酸铝增强光敏树脂放置于黑色遮光瓶中保存备用。

1.4 测试制件设计

按照GB/T 1040.2-2006,设计了拉伸试验制件,如图1所示。

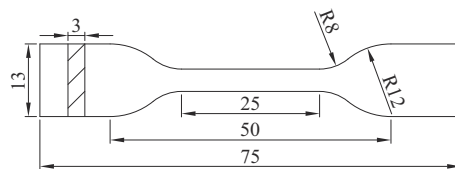


图1 测试制件外观尺寸

Fig. 1 Appearance and dimensions of test parts

1.5 实验设计

选取DLP工艺参数中的曝光时间、打印层厚及硅酸铝用量作为实验的主要参数变量,研究这些参数对制件成型误差和拉伸强度的影响。采用不同工艺参数打印制件,将制件从成型平台上取下,为了去除制件表面残留的树脂浆料,放入超声波清洗机中清洗,室温静置。接着测量制件在长度方向上的实际尺寸,使用电子显微镜测量3次制件的实际长度,取其平均值,与设定的理论长度对比,计算得出测试件的成型误差。

采用电子强力试验机对制件进行拉伸性能测试,在相同工艺参数下打印4组制件,经超声波清洗后在拉伸速度为5 mm/min的条件下进行拉伸试验,剔除不合理的数据后,最终取其平均值作为制件实际的拉伸强度。

2 单因素实验分析及讨论

由于光敏树脂中加入硅酸铝粉末,而硅酸铝粉末的紫外光吸收特性会影响光敏树脂体系中光引发剂的有效吸收能力,因此如果采用普通光敏树脂的底层曝光时间设置,会导致树脂从液体转变为固态所需的曝光能量不足,从而阻碍了光敏树脂体系中预聚物与硅酸铝粉末之间的交联反应,进而影响固化过程,最终使制件与成型平台无法形成有效的黏结。

为了有效提高制件与成型平台的附着力,经过反复打印制件测试,DLP打印机设定底层层数6层,底层曝光时间20 s,在该条件下制件能黏结在成型平台上,从而保证制件能够顺利地打印完成。

2.1 打印层厚对制件的影响

打印层厚是指切片软件中相邻层之间的厚度,打印层厚对打印件的成型精度有着直接影响^[10]。在本实验中,忽略硅酸铝填充量,制件成型机制与光敏树脂的成型机制相似,固化原理为Beer-Lambert定律^[11],见公式(1)。

$$C_d = D_p \ln E/E_c \quad (1)$$

式中: C_d 为固化深度; D_p 为穿透深度; E 为曝光能量; E_c 为临界曝光能量。

图2展示了不同打印层厚下制件的成型误差与拉伸强度。从图2可以看出,随着打印层厚的增加,成型误差先降低后增加,当打印层厚小于穿透深度时,每层光敏树脂的曝光能量过高,就会出现过固化现象,导致制件较大的收缩,从而增加成型误差。反之,打印层厚增加,成型误差也随之降低。当打印层厚超过0.05 mm时,由于复合树脂中的硅酸铝粉末对紫外光的吸收效果,打印层厚过大,单层树脂在曝光时吸收的能量不足,出现了欠固化的情

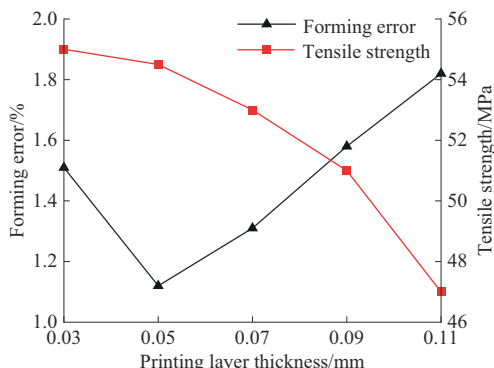


图2 不同打印层厚制件的成型误差和拉伸强度

Fig. 2 Forming error and tensile strength of parts with different printing layer thicknesses

况,从而影响了成型质量,导致成型误差增加。同时,当打印层厚过大时,层间树脂网状结构与硅酸铝粉末的结合情况逐渐减弱,导致整体拉伸强度也随之下降,尤其当打印层厚超过0.09 mm时,拉伸强度显著降低。综合考虑这些因素,在响应面实验中选择0.03,0.05,0.07 mm作为打印层厚的水平值。

2.2 曝光时间对制件的影响

单层光敏树脂紫外灯照射的固化时间为曝光时间,与其直接相关的是曝光能量^[12]。曝光能量的计算见式(2)。

$$E = I t \quad (2)$$

式中: I 为曝光强度; t 为曝光时间。

图3展示了不同曝光时间下制件的成型误差与拉伸强度。式(2)中的曝光强度不变时,曝光能量与曝光时间成正比的线性关系,设定的DLP曝光强度不变,为4 mW/cm²。

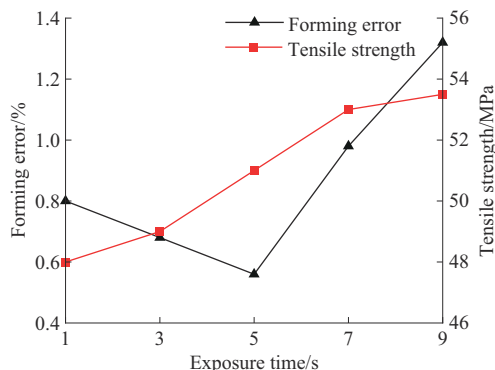


图3 不同曝光时间制件的成型误差和拉伸强度

Fig. 3 Forming error and tensile strength of parts with different exposure times

从图3可以看出,在曝光时间较短的情况下,曝光能量会直接影响复合树脂的光固化转化效率^[13],曝光时间较短直接导致曝光能量不足,复合树脂固化程度不足,出现欠固化现象,最终造成较大的成型误差。树脂的固化程度与曝光时间存在显著关联,通过延长曝光时间可有效提高交联密度。曝光时间的延长不仅提高了复合树脂的固化程度,也有助于提升尺寸的精确度。然而,若持续增加曝光时间,会出现一些不利影响,可能会导致树脂出现过固化的情况。当曝光时间超过9 s时,实验发现制件的体积收缩明显,尺寸精度降低,成型误差显著增加。随着曝光时间的增加,制件的拉伸强度呈现出逐步上升的趋势。延长的曝光时间使得树脂吸收更多的曝光能量,从而加剧了复合树脂的交联反应,促进了硅酸铝粉末与树脂单体之间形成的高分

子交联网络的连接,这一过程提升了制件的拉伸强度。然而,当曝光时间超过7 s后,由于复合树脂材料自身拉伸强度的限制,制件的拉伸强度增加的速率开始减缓。综合以上因素,在响应面实验中选择3,5,7 s作为曝光时间的水平值。

2.3 硅酸铝用量对制件的影响

在光敏树脂预聚物固化过程中,反应过程会引起不同程度的体积收缩和线性收缩,存在翘曲变形等,产生较大的内部应力^[14]。图4展示了不同硅酸铝用量下制件的成型误差与拉伸强度。从图4可以看出,制件成型误差随着硅酸铝粉末用量的增加而减少,当添加质量分数4%硅酸铝填充剂后,制件成型误差显著减少。由于硅酸铝粉末本身不参与树脂的化学反应,且硅酸铝颗粒与树脂基体之间存在良好的界面结合,有效地防止裂纹的扩展,从而使得整个系统的成型误差得以降低。拉伸强度随着硅酸铝用量的增加呈现先增大后减小的趋势,在硅酸铝质量分数为2%时达到最大值,硅酸铝改性光敏树脂的性能改变,归因于高交联密度,以及硅酸铝与光敏树脂之间的界面交互作用增强。当硅酸铝质量分数大于2%时,制件的拉伸强度逐渐下降。由于树脂与硅酸铝不互溶,过多的用量导致硅酸铝粉末在树脂中出现部分沉积,树脂固化后存在不均匀现象,造成整体拉伸强度降低。综合考虑以上因素,在响应面实验中选择质量分数1%,2%和3%作为硅酸铝用量的水平值。

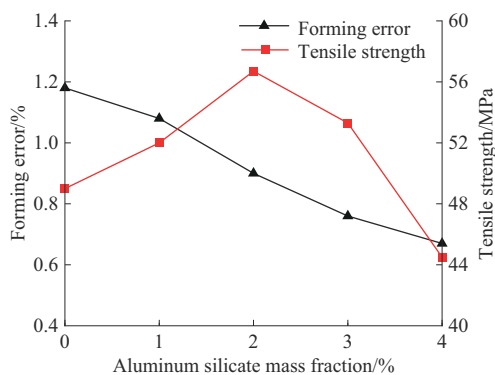


图4 不同硅酸铝用量制件的成型误差和拉伸强度

Fig. 4 Forming error and tensile strength of parts with different aluminum silicate contents

3 基于响应面法工艺优化分析

3.1 响应面实验设计

基于单因素实验的结论,通过 Design-Expert 13 软件中 Box-Behnken 设计 3 因素 3 水平的响应面实验^[15],对光敏树脂的工艺参数进行优化。实验 3 因

素包括打印层厚(A)、曝光时间(B)和硅酸铝用量(C),而成型误差和拉伸强度则作为响应变量。共进行了 17 次实验,其中针对 5 组工艺参数进行了重复实验,以处理实验误差。所有实验均在 26 °C 的温度和 60% 以下的湿度条件下进行,实验因素及其水平的具体取值见表 1。

表 1 响应面法实验因素水平

Tab. 1 Experimental factors and levels of response surface method

Factors	Levels		
	-1	0	1
A/mm	0.03	0.05	0.07
B/s	3	5	7
C/%	1	2	3

3.2 响应面法模型方差分析

表 2 为响应面实验方案和结果,根据表 2 中的测量数据,得到了制件成型误差和拉伸强度的响应面模型的方差及二次拟合方程,结果见表 3。通过对表 3 数据分析得出,两组响应变量值的检验统计量(F 值)为 79.42 和 100.93,均显著大于 1,显著性概率(P 值)也均不高于 0.000 1,表明模型极显著,验证了该实验方案的准确性。两个模型的相关系数(R^2 值)为 0.990 3 和 0.992 4,调整相关系数(R^2_{Adj} 值)为 0.977 8,0.982 5,数值大小近似于 1,表明该模型与实验因素的关联度高,二次回归方程的拟合度好,得出的结果是稳定且可信^[16]。通过比较回归模型的系数大小可知,对成型误差的影响最显著的是曝光时间,其次是打印层厚,影响最小的是硅酸铝用量;

表 2 实验方案与实验结果

Tab. 2 Experimental schemes and experimental results

Number	Factors and levels			Forming error	Tensile strength
	A/mm	B/s	C/%	R_1 /%	R_2 /MPa
1 [#]	0.07	5	3	1.08	50.98
2 [#]	0.03	5	3	0.68	62.98
3 [#]	0.05	3	3	0.79	55.92
4 [#]	0.05	7	1	0.82	56.97
5 [#]	0.03	3	2	0.76	61.74
6 [#]	0.03	5	1	0.61	62.73
7 [#]	0.07	3	2	1.18	49.42
8 [#]	0.07	5	1	1.04	51.72
9 [#]	0.05	7	3	0.87	56.88
10 [#]	0.03	7	2	0.89	64.74
11 [#]	0.05	5	2	0.44	61.41
12 [#]	0.05	5	2	0.37	60.75
13 [#]	0.05	3	1	0.89	55.95
14 [#]	0.05	5	2	0.40	61.04
15 [#]	0.07	7	2	1.09	52.16
16 [#]	0.05	5	2	0.39	61.72
17 [#]	0.05	5	2	0.41	61.06

表 3 响应面模型方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of response surface model

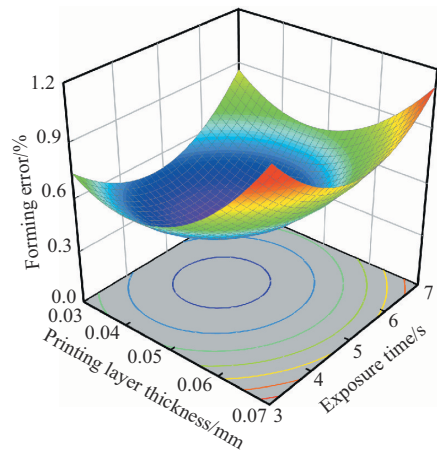
Items	Fitting equation	
	$R_1=0.402+0.18A+0.006B+0.008C-0.06AB-0.008AC+0.038BC+0.29A^2+0.28B^2+0.16C^2$	$R_2=61.2-5.9A+0.97B-0.08C-0.07AB-0.25AC-0.015BC-1.75A^2-2.43B^2-2.34C^2$
F value	79.42	100.93
R^2	0.990 3	0.992 4
R^2_{Adj}	0.977 8	0.982 5

而对制件的拉伸强度影响最大的是打印层厚,曝光时间次之,硅酸铝用量的影响最小。

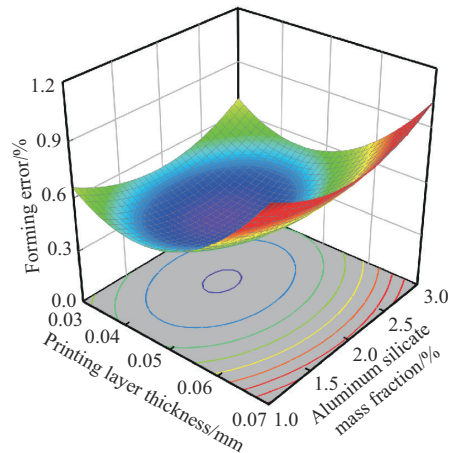
3.3 工艺参数耦合作用分析

根据表 3 的回归方程,利用软件 Origin 2023 绘制直观的 3D 响应曲面图。图 5 展示了不同因素交互作用下制件成型误差的响应面图。从图 5a 可以看出打印层厚与曝光时间对成型误差的协同影响。当打印层厚或曝光时间保持不变时,随另一工艺参数数值增加,成型误差均呈现先减小后增大的趋势。在实验取值范围内,当这两个工艺参数同时取最大值或最小值时,都会使成型误差达到相对最大。这一现象的原因在于打印层厚过小和曝光时间过长,都可能会使树脂出现过度固化的情况,导致非预期的区域也发生聚合反应,使成型的部件尺寸超出设计范围;而曝光时间过短和打印层厚过大时,都会导致曝光能量不足,未达到临界曝光能量,出现树脂欠固化的现象,导致树脂自身结构不稳定而发生收缩、变形,最终导致成型误差增加。由图 5b 和图 5c 也能明显看出这一现象,另外还可以看到,与单因素实验不同,在打印层厚与曝光时间的影响下,硅酸铝用量过高或过低也会使成型误差有所增加。

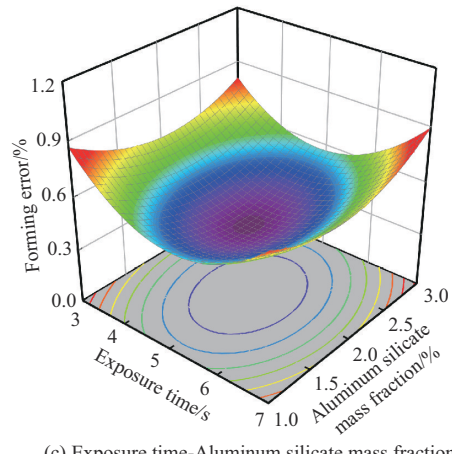
图 6 展示了不同因素交互作用下制件拉伸强度的响应面。通过图 6a 可以观察到,当打印层厚一定时,拉伸强度随曝光时间的增加而增大,当曝光时间一定时,拉伸强度随打印层厚的减小而增大,这与单因素实验的影响趋势一致。由于更小的打印层厚或更长的曝光时间均能使光敏树脂聚合形成的网状结构与填充的纳米硅酸铝粉末更好地结合,最终制件成型质量得到提升,拉伸强度也随之增加。同时,图 6b 显示,当硅酸铝的用量一定时,拉伸强度与打印层厚呈反相关。由于树脂的透射深度与打印层厚相关,过大的层厚会导致制件成型过程中产生台阶效应,影响相邻层之间固化程度,削弱层与层之间的黏结性能,降低了拉伸强度。反之,



(a) Printing layer thickness-Exposure time



(b) Printing layer thickness-Aluminum silicate mass fraction

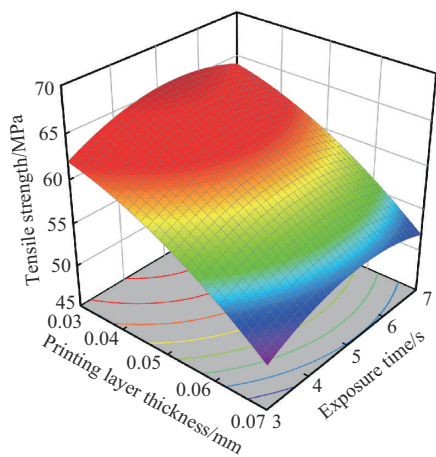


(c) Exposure time-Aluminum silicate mass fraction

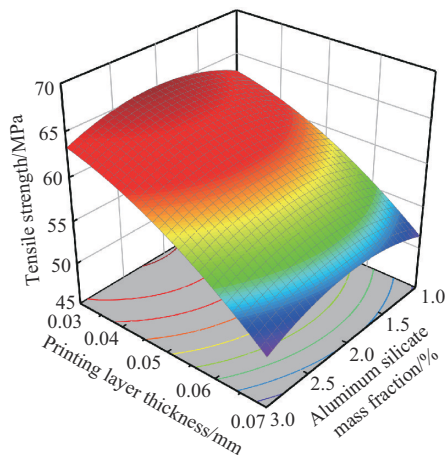
图 5 不同因素交互影响制件成型误差的响应面图

Fig. 5 Response surface diagram of different factors interacting with each other to affect forming error of part

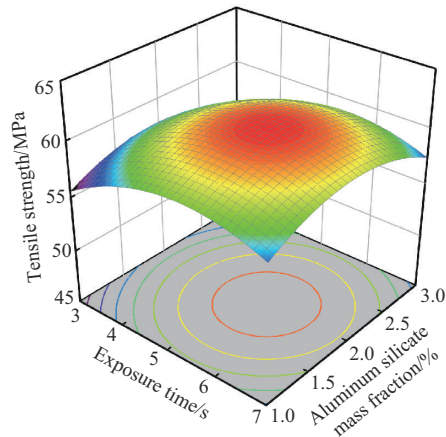
打印层厚减小,则拉伸强度得到提升。由图 6c 可看出,受硅酸铝用量的影响,曝光时间对拉伸强度的影响趋势与单因素实验不同,在相同硅酸铝用量下,随曝光时间延长,拉伸强度呈现先升高后降低的趋势。



(a) Printing layer thickness-Exposure time



(b) Printing layer thickness-Aluminum silicate mass fraction



(c) Exposure time-Aluminum silicate mass fraction

图6 不同因素交互影响制件拉伸强度的响应面图

Fig. 6 Response surface diagram of different factors interacting with each other to affect tensile strength of part

3.4 工艺参数优化和模型验证

为了实现制件成型误差最小化和拉伸强度最大化的目标,通过 Design-Expert 13 软件中的响应面分析方法进行优化,最终得到的优化结果为打印层厚 0.04 mm、曝光时间 5 s、硅酸铝质量分数 2%。在

此参数条件下,制件最终的成型误差和拉伸强度理论预测值分别为 0.37% 和 65 MPa。为了验证在允许误差范围内,验证响应面优化模型的是否可靠及实际测量值与理论预测值是否接近,采用最佳工艺参数打印制件进行比对,然后对制件进行测量取得实际测量值,结果显示对比件成型误差为 0.41%,拉伸强度为 64.3 MPa,通过与响应面法理论预测值对比,误差在可允许范围内,表明优化结果的可靠性。由此证明,回归模型具有良好的拟合性和可靠性,利用响应面法优化光敏树脂固化过程中硅酸铝用量及工艺参数的研究方法可行。

4 结论

(1)单因素实验中,随着打印层厚的增加,拉伸强度不断下降的同时制件的成型误差先减小后增大;拉伸强度随着曝光时间的增加不断增加,但成型误差则是先减小后增大;填充剂硅酸铝用量增加,成型误差得到很好的改善,其不断减小的同时拉伸强度先增加后减小。

(2)通过响应面分析,对成型误差影响显著的 DLP 工艺参数是曝光时间、打印层厚;而对拉伸强度影响显著的是打印层厚、曝光时间。

(3)利用响应面法以成型误差最小及拉伸强度最大同时为优化目标,得到的最优工艺参数为打印层厚 0.04 mm、曝光时间 5 s、硅酸铝质量分数 2%。采用此参数条件,打印制件的实际成型误差和拉伸强度分别为 0.41% 和 64.3 MPa,与理论预测值接近,优化结果可靠。

参考文献

- [1] 郭小锋,李思卿,崔陆军,等.基于响应面法的DLP光敏树脂氧化铝增强成型工艺优化[J].塑料工业,2023,51(3):96-101.
GUO Xiaofeng, LI Siqing, CUI Lujun, et al. Forming process optimization of alumina reinforced DLP photosensitive resin based on response surface method[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(3): 96-101.
- [2] 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.
- [3] 王琛,任思雨,张晨赞.成型参数对3D打印柔性聚氨酯制件层间黏结性能的影响[J].塑料工业,2023,51(5):181-186.
WANG Chen, REN Siyu, ZHANG Chenyun. Effect of molding parameters on interlaminar bonding properties of 3D printed flexible polyurethane parts[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(5):

- 181–186.
- [4] 宗学文,韦毅博,刘亮晶.基于NSGA-II的面曝光3D打印工艺参数多目标优化[J].塑料,2024,53(1):86–91,155.
- ZONG Xuewen, WEI Yibo, LIU Liangjing. Multi-objective optimization of mask projection stereolithography process parameters based on NSGA-II [J]. *Plastics*, 2024, 53(1):86–91, 155.
- [5] 刘莹莹,陈进,宁蕾,等.纳米氧化铝改性3D打印光敏材料的制备及性能研究[J].塑料工业,2021,49(10):18–22,61.
- LIU Yingying, CHEN Jin, NING Lei, et al. Preparation and performance research of nano-alumina modified 3D printing photosensitive material[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(10):18–22, 61.
- [6] 宗学文,刘亮晶,倪铭佑,等.响应曲面法碳化硅增强光敏树脂器件工艺[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.
- [7] 王世崇,陈彦羽,侯阳,等.光固化3D打印改性碳纤维/光敏树脂复合材料的制备与性能调控[J].复合材料学报,2022,39(10):4 509–4 517.
- WANG Shichong, CHEN Yanyu, HOU Yang, et al. Preparation and property regulation of modified carbon fiber/photosensitive resin composite for UV-curing 3D printing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(10):4 509–4 517.
- [8] 冯满.纳米SiO₂/酚醛树脂复合材料的制备及性能研究[J].功能材料,2022,53(6):6 219–6 223.
- FENG Man. Preparation and properties of nano-SiO₂/phenolic resin composites[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(6):6 219–6 223.
- [9] 钟亚洲.3D打印材料光敏树脂的合成及其改性研究[D].广州:广东工业大学,2018.
- ZHONG Yazhou. Study on synthesis and modification of photosensitive resin for 3D printing materials[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [10] 王世崇,朱雨薇,吴瑶,等.光固化3D打印技术及光敏树脂的开发与应用[J].功能高分子学报,2022,35(1):19–35.
- WANG Shichong, ZHU Yuwei, WU Yao, et al. Development and applications of uv-curing 3D printing and photosensitive resin[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2022, 35(1):19–35.
- [11] 裴芸宁,胡可辉,吕志刚.基于光固化增材制造技术的陶瓷成形方法[J].精密成形工程,2020,12(5):117–121.
- QIU Yunning, HU Kehui, LYU Zhigang. Ceramic forming method based on stereolithography additive manufacturing[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2020, 12(5):117–121.
- [12] 钱波,陈子龙,王明义,等.面曝光固化快速成型曝光时间的参数优化研究[J].机械科学与技术,2018,37(2):313–317.
- QIAN Bo, CHEN Zilong, WANG Mingyi, et al. Optimization study on exposure time for mask projection stereolithography system[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2018, 37(2):313–317.
- [13] 秦静,李贤玉.大块充填树脂固化深度及聚合转化率的比较研究[J].右江医学,2023,51(12):1 082–1 086.
- QIN Jing, LI Xianyu. Comparative study on the solidification depth and polymerization conversion rate of bulk—filling resin[J]. *Chinese Youjiang Medical Journal*, 2023, 51(12):1 082–1 086.
- [14] 魏雪玉,王棣,刘晓秋.不同光引发剂口腔复合树脂单体的设计合成及性能[J].中国组织工程研究,2024,28(5):731–735.
- WEI Yuxue, WANG Di, LIU Xiaoqi. Design, synthesis and properties of oral composite resin monomers with different photoinitiators[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2024, 28(5):731–735.
- [15] 赵婉,武海棠,赵爱国,等.响应面法优化漆酚环氧丙烯酸酯涂层性能研究[J].涂料工业,2021,51(1):40–45.
- ZHAO Wan, WU Haitang, ZHAO Aiguo, et al. Optimization of properties of urushiol epoxy acrylate coatings by response surface methodology[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2021, 51(1):40–45.
- [16] YAN Xiaoju, WANG Guodong, MA Cong, et al. Effects of pollutants in alkali/surfactant/polymer (ASP) flooding oilfield wastewater on membrane fouling in direct contact membrane distillation by response surface methodology[J]. *Chemosphere*, 2021, 282. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131130.