

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.10.014

基于光敏树脂的 3D 打印成型工艺优化

张军前¹, 刘宇²

(1. 西安航空学院, 西安 710077; 2. 西安红庆机械厂, 西安 710077)

摘要:以立体光固化 (SLA) 成型光敏树脂成型件的收缩率作为衡量指标,通过正交试验研究了工艺参数对某国产光敏树脂 SLA 成型精度的影响。首先通过控制变量法分别研究了激光功率、扫描间距、分层厚度变化对其成型精度的影响及变化规律,然后利用综合平衡法原则对正交试验结果进行分析,确定了最优的工艺参数组合,最后在最优条件下进行 SLA 成型实验,以确定光敏树脂 SLA 成型的模型尺寸修正系数。结果表明,以成型件的 X 向、Y 向及 Z 向的成型精度作为衡量指标,最优的工艺参数组合为激光功率 350 mW,扫描速度 3 500 mm/s,分层厚度 0.1 mm; 计算得出 X 向、Y 向及 Z 向的成型尺寸收缩修正系数分别为 1.001, 1.002 和 0.992,在最优条件下使用修正后的模型进行 SLA 成型验证试验,得出该成型件的各向成型尺寸精度分别为 -0.01%, -0.11% 和 0.43%。

关键词: 立体光固化成型; 光敏树脂; 工艺参数; 成型精度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)10-0075-05

3D Printing Process Optimization based on Photosensitive Resin

Zhang Junqian¹, Liu Yu²

(1. Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Hongqing Machinery Factory, Xi'an 710077, China)

Abstract: Taking the shrinkage rate of photosensitive resin molded parts formed by stereo lithography appearance (SLA) as a measure index, the influences of process parameters on the SLA forming accuracy of a domestic photosensitive resin were studied through orthogonal experiment. Firstly, the influences and change rules of laser power, scanning distance and layer thickness on its forming accuracy were studied respectively by control variable method, and then the optimal process parameters were determined by using the principle of comprehensive balance method for analyzing the results of orthogonal experiment, at last, in the optimal condition, and the molding model size correction coefficients of the photosensitive resin were determined by the SLA molding experiment. The results show that, taking the forming accuracy of X-direction, Y-direction and Z-direction as the measurement index, the optimal combination of process parameters is as follows: laser power 350 mW, scanning speed 3 500 mm/s, layer thickness 0.1 mm. The calculation results show that the shrinkage correction coefficients of X-direction, Y-direction and Z-direction size are 1.001, 1.002 and 0.992 respectively. Under the optimal conditions, the modified model is used to carry out SLA molding verification test, and the dimensional accuracy of the molding part in each direction is obtained, which are -0.01%, -0.11% and 0.43% respectively.

Keywords: stereo lithography appearance molding; photosensitive resin; process parameters; forming accuracy

随着科学技术的不断进步和发展,低能耗、智能化以及个性定制化已成为现代制造业的主要发展趋势,其中 3D 打印技术作为其中具有代表性的先进制造技术之一^[1-2],其基于离散-堆积的制造思想,将三维模型二维化,按照点-线-面-体的制造顺序,根据二维离散模型的形状尺寸数据逐点、逐线、逐面进行制造累积,从而实现三维模型的立体化

增材制造^[3-4]。在众多的 3D 打印工艺中,立体光固化 (SLA) 工艺作为出现最早的 3D 打印工艺之一,与其它 3D 打印工艺相比,其在打印效率、打印精度以及制件强度方面均有着较为明显的优势,在保证零件强度和精度的前提下不受零件复杂程度的影响,实现了复杂零部件的“自由制造”^[5-7]。

在 SLA 成型工艺中,成型工艺参数作为影响其

通信作者: 张军前,工程师,主要研究方向为泵类产品设计与制造、数控编程与加工 E-mail: zhangjunqian0159@163.com

收稿日期: 2020-07-20

引用格式: 张军前,刘宇. 基于光敏树脂的 3D 打印成型工艺优化 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 75-79, 92.

Zhang Junqian, Liu Yu. 3D printing process optimization based on photosensitive resin[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10): 75-79, 92.

成型质量最为重要的因素,相关学者对其展开了大量的研究:李晶晶等^[8]以SLA成型件的力学性能作为衡量指标,研究了成型工艺参数对其成型质量的影响,得出SLA成型工艺参数对SLA成型件力学性能的影响及变化规律;蒋三生^[9]和张新聚等^[10]研究了SLA成型工艺参数对光敏树脂成型件成型质量的影响,得出了在最佳成型强度及精度前提下的最优工艺参数组合,并对其合理性进行了实验验证。然而笔者发现对于SLA成型件的成型精度而言,在实验中常体现为收缩状态,过大的尺寸收缩会在影响成型件成型尺寸精度的同时,还会使成型件出现较为严重的变形,从而使成型件的成型质量出现大幅下滑,因此在SLA成型工艺中对于模型尺寸进行修正是非常有必要的,而对于该方面的研究报道相对少见。因此笔者以SLA成型光敏树脂成型件的收缩率作为衡量指标,研究了工艺参数对某国产光敏树脂SLA成型精度的影响;通过控制变量法研究了主要工艺参数对其成型质量的影响及变化规律,并经过正交试验和极差分析的方法确定了最优工艺参数组合,在最优条件下进行SLA成型实验以确定该光敏树脂的成型尺寸修正系数,最后使用该系数对模型X向、Y向和Z向的尺寸进行修正,并进行验证成型实验。这对于光敏树脂的3D打印工艺在成型精度的保证方面提供了一定的理论基础,对于光敏树脂3D打印精度的提高具有一定的帮助与指导意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SLA专用型光敏树脂:SZUV-W8001型,上海数造机电科技股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

SLA快速成型机:SPS500型,陕西恒通智能机器有限公司;

超声波清洗机:SG3300HE型,杭州亿捷科技有限公司;

UV固化机:JY-UV-1500型,东莞市精域环境测试设备有限公司;

数显式游标卡尺:100型,量程为0~150 mm,温州盛测仪器仪表有限公司。

1.3 实验过程

(1) 实验方案设计。

首先为了得出各工艺参数对光敏树脂SLA成型质量影响的基本规律,根据前期基础性实验的相

关数据,得出能够满足光敏树脂基本成型要求的工艺参数范围,并对其进行等间距的划分处理,作为后续单因素实验工艺参数的变化值,具体工艺参数范围如表1所示。

表1 实验工艺参数范围表

工艺参数	实验值
激光功率/mW	250,300,350,400,450
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	2000,3500,5000,6500,8000
分层厚度/mm	0.1,0.15,0.2,0.25,0.3

其次在通过控制变量法得出实验结果的基础上,分析得出在相同条件下能够使SLA成型件质量较好的3个工艺参数值,将其作为工艺参数优化实验中的实验变量;然后通过正交试验和极差分析,并根据综合平衡法原则得出最优的成型工艺参数组合。

最后在最优工艺参数组合的条件下进行SLA成型实验,通过计算得出成型件在X向、Y向和Z向的成型尺寸收缩修正系数;通过修正系数对三维模型修正后进行SLA成型验证实验,以验证实验结果的准确性。

(2) 试样制备。

在环境温度25℃、光斑直径0.1 mm、轮廓扫描速度1200 mm/s等基础参数不变的条件下,参照GB/T 1043-2008中的相关要求制备尺寸为120 mm×15 mm×10 mm的试样。同时为了排除其它次要因素对实验结果的影响,在每组实验中同时成型3个成型件,以三个成型件实验结果测量值的均值作为最终的实验结果^[11];此外为了排除因成型件表面多余光敏树脂的附着以及固化效果差的原因而造成测量结果误差较大的现象,首先选择超声波清洗机对成型件进行清洗以去除其表面的多余光敏树脂,其次将清洗好的成型件沥干水分后放入UV固化机进行后固化,处理时间在15 min左右,以保证实验结果的准确性。

1.4 实验结果的表征

(1) 成型件收缩率的测量。

以成型件X向、Y向和Z向的尺寸收缩率作为成型质量的衡量指标,其值越接近于0则说明其成型质量更为优良;尺寸收缩率的值为负值,当其值为正时表示成型件某方向尺寸大于设计尺寸。其具体的计算方法见式(1)^[12-13]。

$$S = [(A_1 - A_0) / A_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中:S——成型件的尺寸收缩率,%;

A_0 ——成型件设计尺寸,mm;

A_1 ——成型件实际尺寸,mm。

(2) 模型收缩修正系数的计算。

模型的成型尺寸收缩修正系数 C 计算方法见式(2)^[14-15]。

$$C=1/(1+S) \quad (2)$$

2 结果与讨论

在前期基础性实验中发现能够基本满足光敏树脂成型要求的一组工艺参数组合为:激光功率 350 mW,扫描速度 5000 mm/s,分层厚度 0.15 mm,因此选择以此组工艺参数作为单因素试验的基础变量,以分析各工艺参数变化对成型件成型质量的影响。

2.1 工艺参数对成型质量的影响

(1) 激光功率对成型件收缩率的影响。

激光功率作为 SLA 工艺中光敏树脂成型的唯一能量来源,当激光功率过小时,单位时间内光敏树脂接收的激光能量如不能满足光敏树脂固化的基本要求,便会造成成型件各成型层之间发生严重的分层、错层、翘边等缺陷,从而使得成型件的成型精度受到极为不利的影响;但当激光功率过大时,过高的激光能量会使得成型件的周围出现树脂粘连现象,从而使得成型件的成型精度以及表面质量出现大幅下降。因此在表 1 的基础上选定扫描速度和分层厚度分别为 5000 mm/s 和 0.15 mm,以激光功率值作为实验变量进行光敏树脂成型实验,实验结果如图 1 所示。

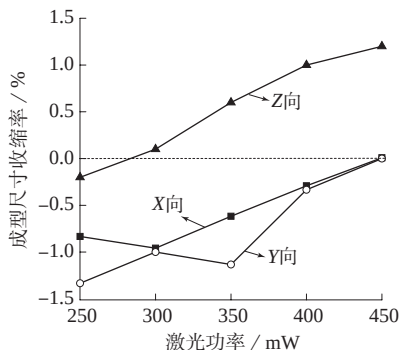


图1 不同激光功率下光敏树脂的SLA成型精度

从图1可以看出,在实验范围内随着激光功率的增大,成型件X向和Y向的成型尺寸收缩率不断减小,成型质量逐渐变好;但成型件的Z向成型尺寸收缩率基本偏向正值,即Z向尺寸并未出现明显的收缩现象,且尺寸偏差逐渐变大。因此综合以上现象,可看出当激光功率为300~400 mW时,可兼顾成型件的X向、Y向以及Z向尺寸精度,因此选择激光功率值分别为300,350,400 mW作为正交

试验中的三个水平变量。

(2) 扫描速度对成型件收缩率的影响。

扫描速度决定着SLA成型工艺的成型效率,适当的扫描速度在保证成型质量的同时还具有较高的成型效率,但当扫描速度过高时,激光作用在光敏树脂上的时间过短,从而造成光敏树脂固化效果下降,造成光敏树脂“欠固化”,从而导致光敏树脂成型件成型质量出现较为明显的下降;但当扫描速度过低时,激光能量的作用时间大幅延长,导致激光能量在一定范围内出现能量扩散现象,造成光敏树脂的“过固化”,从而使得SLA成型件出现光敏树脂粘连现象,导致成型质量变差,尤其在成型件的X向和Y向表现得极为突出。因此在表1的基础上选定激光功率和分层厚度分别为350 mW和0.15 mm,以扫描速度值作为实验变量进行光敏树脂成型实验,实验结果如图2所示。

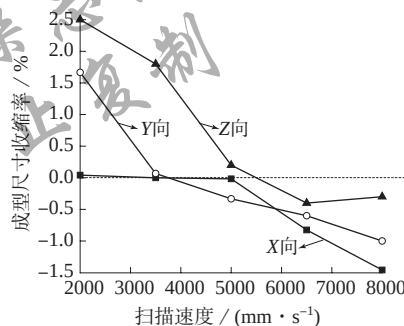


图2 不同扫描速度下光敏树脂的SLA成型精度

从图2可以看出,在实验范围内随着扫描速度的不断提高,成型件的X向、Y向以及Z向的尺寸收缩率均从正值逐渐变为负值,且偏差值逐渐变大;当扫描速度为3500~6500 mm/s时各向尺寸收缩率总体上处于相对较小的状态,因此选择扫描速度值分别为3500,5000,6500 mm/s作为正交试验中的三个水平变量。

(3) 分层厚度对成型件收缩率的影响。

分层厚度决定了光敏树脂SLA成型件的“精细度”,根据3D打印的基本原理可知越小的分层厚度会使得成型件具有更高的“精细度”^[16],但在实际中发现当分层厚度过小时,刮板在刮平树脂的过程中由于推动作用会造成成型层的微小移动,从而影响了光敏树脂成型件的成型精度;但当分层厚度过大时,由于3D打印工艺的固有属性,会导致成型件出现严重的“台阶效应”,从而使得成型件的成型质量急剧变差。因此在表1的基础上选定激光功率和扫描速度分别为350 mW和5000 mm/s,以分层

厚度值作为实验变量进行光敏树脂成型实验,实验结果如图3所示。

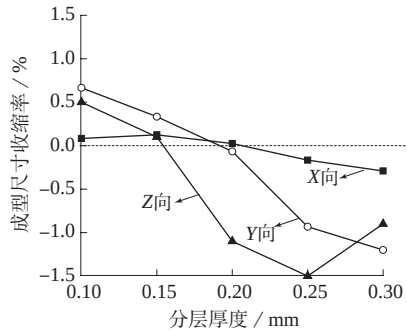


图3 不同分层厚度下光敏树脂的SLA成型质量

从图3可以看出,在实验范围内随着分层厚度的不断增大,成型件的X向尺寸收缩率并未出现明显变化,但对于成型件的Y向和Z向尺寸收缩率而言,其值逐渐从正值变向负值,当分层厚度为0.10~0.20 mm时,其成型尺寸收缩率总体上处于相对较小的状态,因此选择分层厚度值分别为0.10,0.15,0.20 mm作为正交试验中的三个水平变量。

2.2 成型工艺参数的优选

为了得出最优的工艺参数组合,选择正交试验以及极差分析的方法研究了各工艺参数对光敏树脂成型质量的影响程度以及变化规律,并根据综合平衡法的原则确定出了能够同时满足X向、Y向以及Z向尺寸精度要求的最优工艺参数组合。具体的“三因素三水平”正交试验设计方案如表2所示,结果如表3所示。

表2 “三因素三水平”正交试验设计方案

水平	因素		
	激光功率(A)/ mW	扫描速度(B)/ (mm·s ⁻¹)	分层厚度(C)/ mm
1	300	3500	0.10
2	350	5000	0.15
3	400	6500	0.20

从表3可以看出成型件在X向尺寸收缩率变化范围为-0.25%~-0.02%,Y向尺寸收缩率的变化范围为-0.75%~0%,Z向尺寸收缩率变化范围为-1.28%~1.21%。

对上述正交试验的结果进行极差分析,其中X向、Y向及Z向的尺寸收缩率的极差分析结果分别如表4、表5及表6所示,其中 $K_i(i=1,2,3)$ 值为同一因素三个水平下的结果之和,该值越接近于0,则证明结果越好。

从表4可以看出,以成型件X向成型尺寸收缩率作为衡量指标时,各工艺参数对其的影响程度大小为:扫描速度>分层厚度>激光功率;最佳的工

表3 正交试验结果

序号	因素水平			尺寸收缩率/%		
	A	B	C	X向	Y向	Z向
1	1	1	1	-0.08	-0.66	0.96
2	1	2	2	-0.13	-0.55	1.02
3	1	3	3	-0.18	-0.34	-0.96
4	2	1	2	-0.02	0	1.21
5	2	2	3	-0.085	-0.35	0.56
6	2	3	1	-0.25	-0.15	-1.28
7	3	1	3	-0.13	-0.55	0.21
8	3	2	1	-0.091	-0.28	0.18
9	3	3	2	-0.058	-0.75	-1.09

表4 X向成型尺寸收缩率极差分析

项目	因素		
	A	B	C
K_1	-0.390	-0.230	-0.421
K_2	-0.355	-0.306	-0.208
K_3	-0.279	-0.488	-0.395
极差	0.111	0.258	0.213

表5 Y向成型尺寸收缩率极差分析

项目	因素		
	A	B	C
K_1	-1.55	-1.21	-1.09
K_2	-0.50	-1.18	-1.30
K_3	-1.58	-1.24	-1.24
极差	1.08	0.06	0.21

表6 Z向成型尺寸收缩率极差分析

项目	因素		
	A	B	C
K_1	1.02	2.38	-0.14
K_2	0.49	1.76	1.14
K_3	-0.70	-3.33	-0.19
极差	1.72	5.71	1.33

艺参数组合为A3B1C2,即激光功率400 mW,扫描速度3500 mm/s,分层厚度0.15 mm。

从表5可以看出,以成型件Y向成型尺寸收缩率作为衡量指标时,各工艺参数对其的影响程度大小为:激光功率>分层厚度>扫描速度;其最佳的工艺参数组合为A2B2C1,即激光功率350 mW,扫描速度5000 mm/s,分层厚度0.1 mm。

从表6可以看出,以成型件Z向成型尺寸收缩率作为衡量指标时,各工艺参数对其的影响程度大小为:扫描速度>激光功率>分层厚度;其最佳的工艺参数组合为A2B2C1,即激光功率350 mW,扫描速度5000 mm/s,分层厚度0.1 mm。

综合以上分析可知,分别以X向、Y向以及Z向成型尺寸收缩率作为衡量指标时其分别对应的最优工艺参数组合不完全相同,同时还可看出,成型件Z向尺寸偏差多呈现为正值,这是因为Z向尺寸在成型过程中受到能量累积以及添加支撑等SLA

固有属性的影响较为严重,因此在后续进行工艺参数优选中主要将其作为次要参考值进行评判。最后为了获取能够同时满足X向、Y向以及Z向成型质量最优时所对应的工艺参数组合,根据综合平衡法原则进行综合评判^[17]:首先就激光功率而言,其对于X向成型尺寸精度的影响程度最小,对于Y向成型尺寸精度的影响程度最大,因此在对激光功率值进行优选时,应考虑该值首先满足Y向尺寸精度最优时的需求,进而可知其最优值为A2,即激光功率350 mW;其次就扫描速度而言,其对于X向成型尺寸精度的影响程度最大,对Y向成型尺寸精度的影响程度最小,因此在对扫描速度值进行优选时,应考虑该值首先满足X向尺寸精度最优时的需求,进而可知其最优值为B1,即扫描速度3500 mm/s;最后对于分层厚度而言,其对于X向和Y向的成型尺寸精度影响程度一致,故同时参考其对于Z向成型尺寸精度的影响,进而可确定其最优值应为C1,即分层厚度0.1 mm;进而可知能够同时满足X向、Y向以及Z向成型尺寸精度最优时所对应的工艺参数组合为:A2B1C1,即激光功率350 mW,扫描速度3500 mm/s,分层厚度0.1 mm。

2.3 尺寸修正系数的确定

在最优工艺参数组合进行光敏树脂SLA成型实验,可得到成型件的X向、Y向以及Z向的成型尺寸精度分别为-0.092%、-0.19%和0.78%,从而可知在SLA工艺中模型X向、Y向以及Z向的尺寸收缩修正系数分比为1.001,1.002和0.992。根据得出的尺寸修正系数对模型进行修正,在最优工艺参数组合下进行SLA成型验证试验,结果表明经过尺寸修正后模型X向、Y向以及Z向的打印尺寸精度分别为-0.01%、-0.11%和0.43%。

3 结论

(1) 光敏树脂SLA成型件的X向和Y向成型尺寸精度主要表现为收缩状态,其成型尺寸偏差多为负值,对于Z向尺寸偏差由于受到能量累积以及添加支撑等SLA固有属性的影响而主要表现为正值。

(2) 以成型件X向、Y向和Z成型尺寸收缩率作为衡量指标,其综合最优成型工艺参数组合为:激光功率350 mW,扫描速度3500 mm/s,分层厚度0.1 mm。

(3) 在实验范围内,光敏树脂SLA成型件模型的X向、Y向以及Z向的成型尺寸收缩修正系数分别为1.001,1.002和0.992,对模型经过尺寸修

正后进行SLA成型验证实验,成型件X向、Y向以及Z向的成型尺寸精度分别为-0.01%、-0.11%和0.43%。

参考文献

- [1] Hostaša J, Martin S T, Guido T, et al. Transparent laser ceramics by stereolithography[J]. Scripta Materialia, 2020, 187:194-196.
- [2] 王东峰. 光固化成型3D打印材料应用研究[J]. 新型工业化, 2016, 6(12):59-63.
Wang Dongfeng. Research on application of stereolithography 3D printing materials[J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(12):59-63.
- [3] 陈彩珠, 潘汉军. 3D打印高分子材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9):137-140.
Chen Caizhu, Pan Hanjun. Research progress of 3D printing polymer materials[J]. Engineering Plastics Applications, 2016, 44(9):137-140.
- [4] Li H Z, Lu S, Sun J L, et al. Stereolithography-fabricated zirconia dental prostheses: concerns based on clinical requirements[J]. Advances in Applied Ceramics, 2020, 119:5-6.
- [5] 李晓静, 杨丰翔, 刘保军. 典型快速成型技术的工艺分析与比较[J]. 新技术新工艺, 2015(6):15-19.
Li Xiaojing, Yang Fengxiang, Liu Baojun. Process analysis and comparison of typical rapid prototyping technology[J]. New Technology & New Process, 2015(6):15-19.
- [6] 王瑞昌, 蒋睿嵩, 明新国. 基于MIP-SLA的叶片陶瓷型芯光固化成型技术[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(2):162-168.
Wang Ruichang, Jiang Ruisong, Ming Xinguo. UV curing technology of blade ceramic core based on mip-sla[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(2):162-168.
- [7] 徐禹. 基于光敏树脂材料的3D打印首饰模型铸造工艺设计[J]. 铸造技术, 2017, 38(3):719-722.
Xu Yu. Casting process design of 3D printing jewelry model based on photosensitive resin[J]. Foundry Technology, 2017, 38(3):719-722.
- [8] 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 Applications, 2019, 47(10):75-79.
- [9] 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. 3D printing process and properties of photosensitive resin based on SLA[J]. Engineering Plastics Applications, 2019, 47(1):76-81.
- [10] 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.

- [9] 黎秋萍,赵明娟,李德英,等.汽车副仪表板装饰盖注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2009,37(5):68-70.
- Li Qiuping, Zhao Mingjuan, Li Deying, et al. Design of injection mould for decoration lid of automobile vice-instrument board[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5):68-70.
- [10] 周健波,胡纪全,汪传生,等.基于 Moldflow 的仪表板安全气囊框注塑模具设计[J]. 模具技术,2017(1):5-7.
- Zhou Jianbo, Hu Jiquan, Wang Chuansheng, et al. Design of injection mould of dashboard airbag box based on Moldflow[J]. Die and Mould Technology, 2017(1):5-7.
- [11] 俞卫东.汽车副仪表板注塑模具设计[J]. 塑料工业,2009, 37(10):45-47.
- Yu Weidong. Design of injection mould for console of automobile[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(10):45-47.
- [12] 俞芙芳,刘昌棋.仪表盒面板注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2009,37(1):64-66.
- Yu Fufang, Liu Changqi. Design of injection mold for board of instrument[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(1):64-66.
- [13] 赵战锋.某汽车轮毂罩热流道模流分析与模具设计[J]. 塑料工业,2016,44(9):58-62.
- Zhao Zhanfeng. Hot runner mold flow analysis and injection mould design of automobile hub cap[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(9):58-62.
- [14] 张建卿.汽车送风机前罩壳多行位注塑模具设计[J]. 塑料, 2016,45(3):112-116.
- Zhang Jianqing. Design of injection mould with many sliders for automobile front cover of blower fan[J]. Plastics, 2016, 45(3):112-116.
- [15] 范玉,范佳琦,黄继战.汽车 CD 面板热流道模具设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(11):76-79.
- Fan Yu, Fan Jiaqi, Huang Jizhan. Design of car CD panel hot runner mold[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11):76-79.
-
- (上接第 79 页)
- 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.
- [11] 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.
- [12] 康鹏.基于光固化成型的微结构增材制造技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2017.
- Kang Peng. Research on fabrication technology of microstructure additive based on UV curing molding[D]. Harbin :Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 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.
- [14] 李小城,任东风,王鹏程.聚苯乙烯粉 SLS 烧结件收缩率的实验研究[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2016,33(6):113-116.
- Li Xiaocheng, Ren Dongfeng, Wang Pengcheng. Experimental study on shrinkage of SLS sintered polystyrene powder[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University:Natural Science Edition, 2016, 33(6):113-116.
- [15] 杨来侠,杨繁荣,周文明.聚苯乙烯/玻璃纤维复合粉末 SLS 烧结件收缩率实验研究[J]. 塑料工业,2017,45(12):54-58.
- Yang Laixia, Yang Fanrong, Zhou Wenming. Study on shrinkage rate of polystyrene / glass fiber composite powders formed parts based on selective laser sintering experiment[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):54-58.
- [16] Timothy S, Yang Y R, Lee W J, et al. Reusable unit process life cycle inventory for manufacturing:stereolithography[J]. Production Engineering, 2019, 13(6):675-684.
- [17] 孔双祥,胥光申,巨孔亮,等.基于多指标正交试验设计的 SLS 快速成型工艺参数优化[J]. 轻工机械,2017,35(1):30-35.
- Kong Shuangxiang, Xu Guangshen, Ju Kongliang, et al. Optimization of process parameters by multi-index orthogonal experiment in selective laser sintering[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(1):30-35.