

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.04.010

PS/PMMA 复合材料选区激光烧结成型收缩率

杨来侠, 桂玉莲, 白祥, 杜康
(西安科技大学机械工程学院, 西安 710054)

摘要: 针对选区激光烧结聚苯乙烯 (PS) 成型件收缩率大, 精度差的问题, 通过添加聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 粉末制备 PS/PMMA 复合材料来提高成型件精度。研究了预热温度、扫描速度、分层厚度和扫描间距对成型件尺寸收缩率的影响并进行了正交实验, 应用信噪比对结果降噪处理后再进行极差分析, 得到最优工艺参数组合; 在最优工艺参数组合下重新烧结, 利用修正系数补偿精度。结果表明: 竖直方向收缩率变化幅度大于水平方向, 扫描速度和分层厚度分别对水平方向与竖直方向收缩率影响最大; 最优工艺参数组合为: 预热温度 100℃, 扫描速度 2 400 mm/s, 分层厚度 0.27 mm, 扫描间距 0.28 mm; 此时水平方向与竖直修正系数为 1.0417 和 1.0138, 修正后水平方向收缩率与竖直方向收缩率分别为 0.947% 和 1.105%。

关键词: 选区激光烧结; 聚苯乙烯; 聚甲基丙烯酸甲酯; 收缩率; 信噪比

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)04-0048-05

Shrinkage of PS/PMMA Composite by Selective Laser Sintering

Yang Laixia, Gui Yulian, Bai Xiang, Du Kang

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract : Aiming at the problem of large shrinkage and poor precision of the selected laser-sintered polystyrene (PS) molded parts, the composite material of PS/PMMA was prepared by adding PMMA powder to improve the precision of the molded parts. The influence of thermal temperature, scanning speed, layer thickness and scanning pitch on the dimensional shrinkage of the molded part was studied and the orthogonal experiment was designed. The signal-to-noise ratio (SNR) was used to reduce the noise and then use the range analysis to obtain the optimal combination of process parameters. The model is modified by sintering experiment under the optimal combination of process parameters. The results show that the vertical direction shrinkage rate changes more than the horizontal direction, and the scanning speed and the layer thickness have the greatest influence on the horizontal and vertical shrinkage. The optimal process parameters are preheating temperature of 100℃ and scanning speed of 2 400 mm/s. The layer thickness is 0.27 mm and the scanning pitch is 0.28 mm; the horizontal direction and the vertical correction coefficient are 1.0417 and 1.0138. The horizontal shrinkage and vertical shrinkage are 0.947% and 1.105% respectively.

Keywords : selective laser sintering; polystyrene; polymethyl methacrylate; shrinkage; noise reduction ratio

选区激光烧结技术 (SLS) 是一种应用广泛的增材制造技术, 采用模型离散 / 材料堆积的原理, 按照加工模型有效截面信息, 由计算机操纵激光束按照特定的扫描路径, 烧结扫描区域内的粉末, 去掉多余粉末即可成型^[1]。在 SLS 成型过程中, 粉末受热熔化粘结, 温度下降, 材料收缩并固化, 烧结件的精度难以保证^[2], 因此控制成型件收缩率十分重要。在

零件成型过程中, 选取合理的工艺参数对减小成型件收缩率, 提高精度起着至关重要的作用。

目前, 陶瓷、木塑、聚碳酸酯 (PC)、石蜡和金属等均可应用于 SLS 技术中。聚苯乙烯 (PS) 粉具有吸湿率小, 粉末流动性好等优良性能, 因此 PS 粉已经被广泛应用于 SLS 技术中, 但 PS 成型件孔隙率高, 收缩率大, 精度差^[3]。聚甲基丙烯酸甲酯

基金项目: 国家 863 计划项目 (2015AA042503)

通讯作者: 杨来侠, 教授, 博士, 主要从事塑料快速成型模具制造技术研究 E-mail: 1366431310@qq.com

收稿日期: 2019-01-16

引用格式: 杨来侠, 桂玉莲, 白祥, 等. PS/PMMA 复合材料选区激光烧结成型收缩率 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4): 48-52, 79.

Yang Laixia, Gui Yulian, Bai Xiang, et al. Shrinkage of PS/PMMA composite by selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 48-52, 79.

(PMMA) 具有精度高, 价格低, 韧性强, 抗拉伸等优点, 且 PMMA 分子支链为短链, 更好地填充了 PS 的空隙, 减小了成型件的孔隙率^[4]。近年来, 众多学者做了关于 SLS 烧结件收缩率的研究。李坤淑^[5]单层烧结了 40 mm×40 mm 的盐/PS 复合粉末, 分析了激光功率与扫描速度对烧结件尺寸收缩率的影响规律。姜乐涛等^[6]以 PS 为原料, 通过烧结 100 mm×100 mm 的样件, 得到最佳工艺参数组合及修正系数。Liu Kai 等^[7]烧结了 $D \times H=20$ mm×10 mm 的高岭土-环氧树脂陶瓷粉末, 得到 SLS 激光能量密度为 0.3575 J/mm² 时, 轴向收缩率最大的结论。

鉴于此, 笔者以 PS/PMMA 复合粉末为原料, 通过大量烧结实验, 研究影响烧结件收缩率的因素, 并对结果进行降噪处理和极差分析, 获得最优工艺参数组合, 在最优组合下进行烧结实验, 通过修正系数对模型修正补偿精度, 减小了零件收缩率。

1 实验部分

1.1 实验材料

PS 粉末: 平均粒径 120 μm, 东莞市赢德塑胶原料有限公司;

PMMA 粉末: 平均粒径 75 μm, 太仓凯尔达塑胶原料有限公司;

用 120 μm 与 75 μm 筛子分别筛分 PS 与 PMMA 粉末, 将过筛后的 PS 与 PMMA 粉末混合, 得 PMMA 质量分数为 10% 的复合粉末, 并将混合粉末置于高速混合机中均匀混合 20 min, 得到本次实验所需的材料。

1.2 仪器与设备

激光快速成型机: SLS300 型, 陕西恒通智能机器有限公司;

数显游标卡尺: 0~150 mm, SYNTEK 公司;

电子天平秤: YP6001N 型, 上海胜卫科技有限责任公司;

高速混合机: SHR-10A 型, 张家港市万凯机械有限公司。

1.3 实验方法

(1) 实验目的。

权衡烧结件质量重要指标之一是尺寸精度。不同工艺参数下, 激光能量的不同引起收缩变形的不同, 且在各个方向表现有所差异。通过烧结图 1 所示样件, 探讨了在不同工艺参数下, 烧结件各个方向收缩率的变化值, 并得到最优工艺参数。在 SLS 成

型过程中, 收缩变形难以消除, 因此依据修正系数, 对模型的各个方向进行放缩调整, 降低工艺参数带来的误差影响, 保证成型精度。

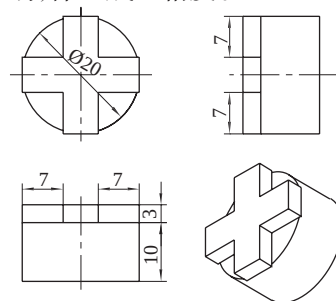


图 1 试件模型

(2) 实验设计。

在 SLS 成型过程中, 选取预热温度 (A), 扫描速度 (B), 分层厚度 (C) 和扫描间距 (D) 4 个主要工艺参数, 研究工艺参数与各个方向收缩率的相关变化规律。为了防止烧结初期因错层现象对实验结果带来的误差, 根据相关文献与前期基础性实验经验, 在测试件底部添加了可去除的十字烧结块。利用游标卡尺多次测量试样的圆柱部分直径与高度, 取平均值作为水平方向实际尺寸与竖直方向实际尺寸。修正系数如公式 (1)、(2)^[8]。

$$\delta = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{1 - \delta} \quad (2)$$

式中: δ ——收缩率;

A_0 ——样件理论尺寸;

A_1 ——样件实际尺寸;

C——修正系数。

2 结果与讨论

以前期大量实验数据为支撑, 得到较为合适的工艺参数组合为: 激光功率 30W, XYSTA 扫描方式, 预热温度 100℃, 扫描速度 2400 mm/s, 分层厚度 0.25 mm, 扫描间距 0.30 mm。为了获取单个工艺参数 (预热温度、扫描速度、分层厚度、扫描间距) 对 PS/PMMA 烧结件收缩率的影响规律, 改变上述组合中的单一工艺参数进行单因素实验, 测试烧结件精度计算收缩率。

2.1 预热温度对 PS/PMMA 烧结件收缩率的影响

SLS 成型之前必不可缺的环节是对原料进行一定时间的预热。一定时间的预热, 工作缸内形成了稳定均匀的温度场, 避免了激光束直接照射粉末时, 烧结区域粉末与周围粉末温差较大, 成型件出现翘

曲现象,同时减小了熔融所需能量^[9]。不同预热温度与烧结件收缩率的关系,如图2所示。

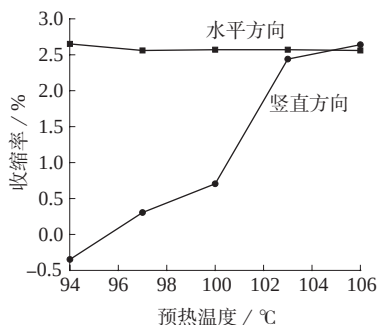


图2 不同预热温度与烧结件收缩率的关系

由图2可以看出,预热温度为94~106℃,随着温度的上升,水平方向收缩率整体呈现下降趋势,数据波动较小,平均在2.5%左右。垂直方向的收缩率大幅上升。预热温度为94℃时,垂直方向收缩率为负值,此时预热温度较低,激光扫描区域粉末与未扫描区域粉末温差梯度大,烧结件出现翘曲,烧结件实际尺寸大于理论尺寸。随着预热温度的不断升高,层与层之间的温度梯度逐渐下降,翘曲现象减少,制件精度变好。在103℃时接近PMMA的玻璃化转变温度(T_g) 105℃^[10],成型件收缩率明显上升,说明粉末充分熔融。热塑性材料的预热温度一般略低于 T_g ,且在97℃时制件实际尺寸最接近理论尺寸,因此选取97,100,103℃为正交实验水平值。

2.2 扫描速度对PS/PMMA烧结件收缩率的影响

扫描速度不仅影响激光束在成型材料上扫描照射时间的长短,而且影响着成型效率^[11]。因此在合适范围内选择扫描速度。不同扫描速度与烧结件收缩率的关系,如图3所示。

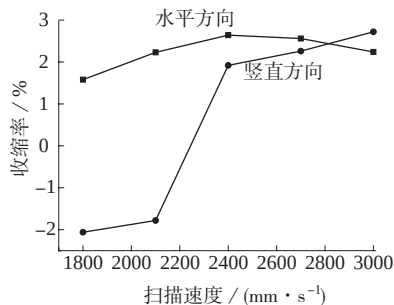


图3 不同扫描速度与烧结件收缩率的关系

选取的扫描速度范围为1800~3000 mm/s。由图3可以看出,随扫描速度的增大,水平方向收缩率先上升后下降。垂直方向收缩率整体呈现上升趋势。在1800~2000 mm/s时,收缩率为负值。此时扫描速度小,激光照射粉末时间变长从而粉末接收能量大,次烧结现象出现,实际尺寸大于理论尺

寸。当扫描速度大于3000 mm/s时,成型效率变快,但激光束照射粉末时间变短,粉末难以充分熔融,层与层之间粘结不足,粉末易被清除掉。因此选取2100,2400,2700 mm/s为正交实验水平值。

2.3 分层厚度对PS/PMMA烧结件收缩率的影响

分层厚度体现为模型的切片厚度,即铺粉厚度。粉末粒径,成型效率等众多因素共同确定分层厚度的大小。分层厚度过小,成型效率太低。分层厚度过大,“台阶效应”现象明显,烧结件精度变差^[12]。不同分层厚度与烧结件收缩率的关系见图4。

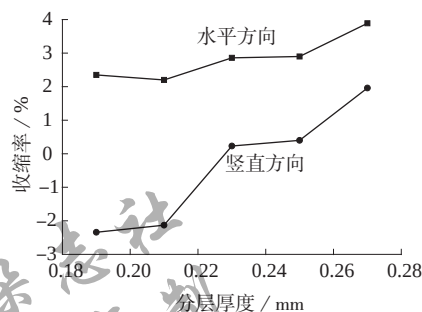


图4 不同分层厚度与烧结件收缩率的关系

选取的分层厚度范围为0.19~0.27 mm。由图4可以看出,随着分层厚度的增加,水平方向收缩率缓慢上升,且都为正值。垂直方向收缩率明显上升。分层厚度在0.19~0.21 mm时,垂直方向收缩率为负值,这是因为分层厚度太小,激光在粉末上穿透性强,扫描区域底部的粉末也被熔融粘结在制件上,导致烧结件的实际尺寸变大。分层厚度的逐步增加,激光的穿透性变弱,过烧结现象逐渐消失,烧结件精度提高。兼顾烧结件质量与成型效率,选取0.23,0.25,0.27 mm为正交实验水平值。

2.4 扫描间距对PS/PMMA烧结件收缩率的影响

扫描间距是指相邻两条的激光束扫描线之间的垂直距离^[13]。扫描间距的取值一般与激光直径有关。不同扫描间距与烧结件收缩率的关系,如图5所示。

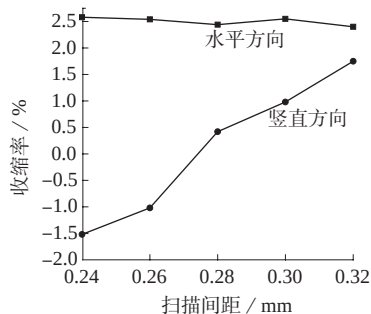


图5 不同扫描间距与烧结件收缩率的关系

选取的扫描间距范围为 0.24~0.32 mm。由图 5 可知,扫描间距对水平方向收缩率影响程度小,数值在 2.5% 左右波动。随扫描间距的增大,竖直方向收缩率呈现上升趋势。竖直方向收缩率在 0.24~0.26 mm 为负值,即实际尺寸大于理论尺寸。这是因为扫描间距过小时,相邻激光束多次照射重叠区域,此区域的能量过高,部分能量向下延伸,形成过烧结现象,烧结件底部粘结现象严重,烧结件尺寸变大,精度变差。扫描间距过大时,未接收到能量的区域变大,部分粉末处于未熔状态,容易被清粉时清掉。综合考虑选取 0.26,0.28,0.30 mm 为正交实验水平值。

3 工艺参数优化分析

3.1 正交实验设计

正交实验法是一种综合考虑多因素多水平交互影响,且大幅减少实验次数的科学方法。笔者设计 4 因素 3 水平正交实验。采用实验次数为 9 的 $L_9(3^4)$ 的正交实验表,如表 1 所示。

表 1 因素水平表

水平	因素			
	A/℃	B/(mm·s ⁻¹)	C/mm	D/mm
1	97	2100	0.23	0.26
2	100	2400	0.25	0.28
3	103	2700	0.27	0.30

3.2 实验结果分析

信噪比 (S/N) 是信号和噪声的比值^[14]。以正交实验结果为基础,引入信噪比,对结果重新分析,有效地减小了正交实验的不稳定因素,减小了抗干扰性。PS/PMMA 烧结件收缩率是本实验的目标期望值,其值越小烧结件质量越好。目标值具有望小特征。根据目标值类型选择望小特征函数计算信噪比,公式如下^[15]。表 2 为正交实验结果及信噪比值。

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

式中: n ——实验方案重复次数,本实验 $n=1$;

y_i ——第 i 次实验结果。

从表 2 可以得出,水平方向收缩率数值较为稳

表 2 正交实验结果及信噪比值

实验组号	实验因素				收缩率/%		信噪比	
	A/℃	B/(mm·s ⁻¹)	C/mm	D/mm	水平方向	竖直方向	收缩水平方向	收缩竖直方向
1	97	2100	0.23	0.26	2.913	-1.719	-9.287	-4.706
2	97	2400	0.25	0.28	2.562	1.095	-8.172	-0.788
3	97	2700	0.27	0.30	2.376	2.314	-7.517	-7.287
4	100	2700	0.23	0.28	2.881	0.882	-9.191	1.091
5	100	2100	0.25	0.30	2.432	-0.225	-7.720	12.956
6	100	2400	0.27	0.26	1.673	2.472	-4.470	-7.861
7	103	2400	0.23	0.30	2.433	0.629	-7.723	4.027
8	103	2700	0.25	0.26	2.512	0.618	-8.000	4.180
9	103	2100	0.27	0.28	3.035	2.125	-9.643	-6.547

定,而竖直方向收缩率浮动较大,且有正有负。负偏差的出现说明烧结件未完全烧结,制件精度差,因此工艺参数需要调整。为了直接有效地获得各工艺参数的最优值,对降噪后的收缩率结果进行均值分析与极差分析。水平方向与竖直方向信噪比均值与极差分析结果如表 3 与表 4 所示。

表 3 水平方向信噪比均值与极差分析表

项目	A	B	C	D
水平 1 均值	-8.344	-8.886	-8.755	-7.474
水平 2 均值	-7.301	-6.931	-7.924	-9.020
水平 3 均值	-8.492	-8.255	-7.456	-7.604
极差	1.191	1.955	1.299	1.546
最优组合	A2	B2	C3	D1

从表 3 结果可以得出,扫描速度对水平方向收缩率影响程度最大,预热温度最小,分层厚度与扫描间距位于两者之间。水平方向收缩率最小时工艺参

数组合为 A2B2C3D1。从表 4 结果可以得出,分层厚度对竖直方向收缩率影响程度最大,预热温度最小,扫描速度与扫描间距位于两者之间。竖直方向收缩率最小时工艺参数组合为 A3B2C3D2。

表 4 竖直方向信噪比均值与极差分析表

项目	A	B	C	D
水平 1 均值	-0.506	-2.568	-2.310	-0.679
水平 2 均值	0.036	0.291	-0.608	0.266
水平 3 均值	0.096	0.205	0.720	-0.090
极差	0.602	2.859	3.030	0.945
最优组合	A3	B2	C3	D2

2 组最优工艺参数组合并不一致,因素 B 与 C 水平值相同,即扫描速度 2 400 mm/s,分层厚度 0.27 mm。因素 A 对收缩率影响程度最小,A 取 A3 为 103℃时,粉末出现“结块”现象,铺粉困难,同时残渣变多,可回收粉末变少。综合考虑 A 取 A2 为

100℃,不仅减少了“结块”现象出现,而且加快烧结成型效率。扫描间距对水平收缩率的影响程度大于竖直方向。当激光能量确定时,扫描间距越小,能量越集中,粉末热应力增加,制件易翘曲,同时考虑本实验所用机型的光斑直径为0.30 mm,一般根据光斑直径大小来设定扫描间距。因此 D 取 D_2 为0.28 mm。此时最优工艺参数组合为:预热温度100℃,扫描速度2400 mm/s,分层厚度0.27 mm,扫描间距0.28 mm。在此工艺条件下,重新烧结试样,试样的水平方向与竖直方向收缩率分别为4.011%与1.362%。此时水平方向修正系数为1.0417,竖直方向修正系数为1.0138。

对在Magics RP软件中已修正的模型进行最优工艺参数组合烧结实验。修正后的烧结件图如图6所示。经测量计算,水平方向收缩率为0.947%。竖直方向收缩率为1.015%。发现,烧结件无翘曲,卷边,错层等缺陷,烧结件质量良好,为后续的研究奠定基础。



图6 修正后的烧结件

4 结论

(1) 对于PS/PMMA成型件而言,调整工艺参数对竖直方向收缩率有显著影响,而对于水平方向收缩率几乎无影响。

(2) 扫描速度与分层厚度分别对PS/PMMA成型件水平方向与竖直方向收缩率影响程度最大,预热温度对两者影响程度最小。

(3) 最优工艺参数组合为预热温度100℃,扫描速度2400 mm/s,分层厚度0.27 mm,扫描间距0.28 mm。此时PS/PMMA复合材料成型件水平方向与竖直方向修正系数分别为1.0417与1.0138;水平方向收缩率为0.947%。竖直方向收缩率为1.015%。模型修正后,成型件满足精度要求。

参考文献

[1] 宫玉玺,王庆顺,朱丽娟,等. 选择性激光烧结成形设备及原材料

的研究现状[J]. 铸造,2017,66(3):258-262.

Gong Yuxi, Wang Qingshun, Zhu Lijuan, et al. Review on the progress of forming equipment and materials for SLS[J]. Foundry, 2017, 66(3):258-262.

[2] 吴晓勇. 基于选择性激光烧结的聚苯乙烯成型工艺研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.

Wu Xiaoyong. Study on optimization of molding process based on selective laser sintering of polystyrene[D]. Chengdu:University of Electronic Science And Technology of China,2018.

[3] 周泽全,辛勇,曹传亮. 选择性激光烧结尼龙-12/聚苯乙烯复合材料[J]. 材料研究学报,2016,30(10):759-762.

Zhou Zequan, Xin Yong, Cao Chuanliang. Research of the selective laser sintering of nylon12 / polystyrene composite powder[J]. Chinese Journal of Materials Research,2016,30(10):759-762.

[4] 陈韶云,程欢,邹毅,等. PS/PMMA/SEBS三元共混体系的力学性能及相态结构研究[J]. 塑料工业,2016,44(9):120-124.

Chen Shaoyun, Cheng Huan, Zou Yi, et al. Mechanical properties and morphology of PS / PMMA / SEBS ternary blends[J]. China Plastics Industry,2016,44(9):120-124.

[5] 李坤淑. 盐/PS混合粉末激光烧结成型实验研究[J]. 激光杂志,2014,35(12):151-154.

Li Kunshu. Experimental study on laser sintering and forming of salt / PS mixed powder[J]. Laser Journal,2014,35(12):151-154.

[6] 姜乐涛,白培康,赵娜,等. PS粉末SLS快速成型收缩率实验研究[J]. 工程塑料应用,2015,43(4):41-45.

Jiang Letao, Bai Peikang, Zhao Na, et al. Study on shrinkage rate of PS powders with selective laser sintering rapid prototyping experiment [J]. Engineering Plastics Application,2015,43(4):41-45.

[7] Liu Kai, Sun Huajun, Shi Yusheng, et al. Research on selective laser sintering of kaolin-epoxy resin ceramic powders combined with cold isostatic pressing and sintering[J]. Ceramics International, 2016,42(9):10711-10718.

[8] 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.

[9] 赵松,龚林. 选择性激光烧结尼龙12/碳酸钙复合材料的成型工艺[J]. 工程塑料应用,2017,45(1):61-64,75.

Zhao Song, Gong Lin. Forming process of selective laser sintering nylon 12 / calcium carbonate composite[J]. Engineering Plastics Application,2017,45(1):61-64,75.

(下转第79页)

- Ding Yongfeng, Hu Shijie. Numerical simulation and process optimization of bottle cap injection molding based on orthogonal experiment[J]. *Plastics Science and Technology*, 2018, 46(8):91-94.
- [3] Min B H. A study on quality monitoring of injection-molded parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136(1-3):1-6.
- [4] 于延军, 庞继伟, 鹿洪荣. 汽车灯配光镜复杂侧抽芯注塑模具设计[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(8):87-92.
- Yu Yanjun, Pang Jiwei, Lu Hongrong. Design of complex side core pulling injection mold for light matching mirror on automobile lamp[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(8):87-92.
- [5] 沈忠良, 杨少增, 肖国华, 等. 蜗杆驱动外侧倒扣和内螺纹自动脱模机构注塑模设计[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(8):81-86, 92.
- Shen Zhongliang, Yang Shaozeng, Xiao Guohua, et al. Design of injection mould with automatic demoulding mechanism by worm driving lateral buckle and internal thread[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(8):81-86, 92.
- [6] 赵而团, 田玉晶, 许宽, 等. 基于 CAD/CAE 的风机罩注塑模设计及工艺优化[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(10):81-85.
- Zhao Ertuan, Tian Yujing, Xu Kuan, et al. Injection mold design of fan cover and optimization of forming process based on CAD/CAE[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(10):81-85.
- [7] Chang C Y. Simulation of mold filling in simultaneous resin injection / compression molding[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, 25(12):1 255-1 268.
- [8] Abdullah B. Modeling and evaluation of injection / compression moulding[J]. *Composites Science*, 2003, 63(10):1 359-1 375.
- [9] Chun D H. Cavity filling analyses of injection molding simulation: bubble and weld line formation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 89-90:177-181.
- [10] Lee B H, Kim B H. Automated design for the runner system of injection molds based on packing simulation[J]. *Journal of Macromolecular Science: Part D-Reviews in Polymer Processing*, 1996, 35(1):22.
- [11] Yang S Y, Nien L. Experimental study on injection compression molding of cylindrical parts[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2010, 15(3):205-213.
- [12] Farshi B, Gheshmi S, Miandoabchi E. Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm[J]. *Materials and Design*, 2011(32):414-423.
- [13] Matsumori T, Yamazaki K. Design improvement of cooling channel layout for plastic injection moulding[J]. *Engineering Optimization*, 2011, 43 (8):891-909.
- [14] Chen Wulin, Huang C Y, Hung C W. Optimization of plastic injection molding process by dual response surface method with non-linear programming[J]. *Engineering Computations*, 2010, 27(8):951-966.
- [15] Farshi B, Gheshmi S, Miandoabchi E. Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm[J]. *Materials and Design*, 2011(32):414-423.
- [16] Chang Tao C, Faison E. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the taguchi method[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2010, 41(5):703-710.

(上接第 52 页)

- [10] 王周锋, 王平, 丁国新, 等. 咪唑基离子液体增塑聚合物的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(7):1-6.
- Wang Zhoufeng, Wang Ping, Ding Guoxin, et al. Research progress of imidazolyl ionic liquid plasticized polymers[J]. *Materials For Mechanical Engineering*, 2016, 40(7):1-6.
- [11] 杨来侠, 龚林, 周文明, 等. 选择性激光烧结聚苯乙烯 / 玻璃纤维制件的工艺研究[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(8):50-53.
- Yang Laixia, Gong Lin, Zhou Wenming, et al. Technology study of polystyrene / glass fiber parts molded by selective laser sintering[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(8):50-53.
- [12] 吴海华, 鄢俊能, 李腾飞, 等. 石墨 / 酚醛树脂混合粉末选择性激光烧结成型工艺研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(2):195-201.
- Wu Haihua, Yan Junneng, Li Tengfei, et al. Study on selective laser sintering process of graphite / phenolic resin mixed powder[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(2):195-201.
- [13] 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 system[J]. *Light Industry Machinery*, 2017, 35(1):30-35.
- [14] 刘建鹏, 王震虎, 林启权, 等. 基于正交试验的铝代钢冲压成形工艺参数优化[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(5):110-116.
- Liu Jianpeng, Wang Zhenhu, Lin Qiquan, et al. Optimization of stamping process parameters for aluminum instead of steel based on orthogonal experiment[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25(5):110-116.
- [15] 孙首群, 张书魁, 黄梅仙. 基于信噪比及灰关联度的注塑工艺参数优化[J]. *塑性工程学报*, 2016, 23(1):141-145.
- Sun Shouqun, Zhang Shukui, Huang Meixian. Optimization of injection molding process parameters based on signal-to-noise ratio and gray relation grade[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2016, 23(1):141-145.