

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.011

基于正交试验的汽车座椅调角器注射成型质量优化

郭巍^{1,2,3}, 李金松^{1,2,3}, 严崙^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;

3. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

摘要: 以短玻纤增强聚酰胺 6 制备的汽车座椅调角器注塑件为研究对象, 使用 Moldex3D 软件对调角器注塑件进行注射成型仿真, 以熔体温度、模具温度、最大保压压力百分比、保压时间和充填时间为设计工艺参数, 以翘曲变形量和体积收缩率为质量优化目标, 设计五因素五水平正交试验方案, 利用极差分析分别得到了调角器注塑件翘曲变形量和体积收缩率各自的最优工艺参数组合, 最终得到的注塑件翘曲变形量和体积收缩率的最优工艺参数组合为: 熔体温度 265℃, 模具温度 70℃, 最大保压压力百分比为 98%, 保压时间 8.4 s, 充填时间为 1.6 s, 此时最大翘曲变形量为 1.470 mm, 最大体积收缩率为 8.106%, 相比初始设计分别减少了 23.95% 和 11.89%, 两个质量优化目标都得到明显改善。通过方差分析研究了各设计工艺参数对调角器注塑件翘曲变形量、体积收缩率的影响, 发现最大保压压力百分比、熔体温度和模具温度对翘曲变形量和体积收缩率的影响显著。

关键词: 正交试验; 方差分析; 极差分析; 工艺参数; 汽车座椅调角器; 翘曲变形量; 体积收缩率

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0064-06

Optimization of Injection Molding Quality of Automotive Seat Recliner based on Orthogonal Test

Guo Wei^{1,2,3}, Li Jinsong^{1,2,3}, Yan Kui^{1,2,3}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract : Taking the injection molded parts of the automobile seat recliner made of short glass fiber reinforced polyamide 6 as the research object, the injection molding simulation of the recliner injection molded parts was carried out by using Moldex3D software. The melt temperature, mold temperature, maximum holding pressure percentage, holding time and filling time were taken as the design process parameters, and the warpage deformation and volume shrinkage were taken as the quality optimization objectives. The orthogonal test scheme of five factors and five levels was designed. The optimal process parameter combinations of warpage deformation and volume shrinkage of the injection molded parts of the recliner were obtained by range analysis, and the optimal process parameter combinations of warpage deformation and volume shrinkage of the injection molded parts were obtained as follows: the melt temperature is 265℃, the mold temperature is 70℃, the maximum holding pressure percentage is 98%, the holding time is 8.4 s, and the filling time is 1.6 s. At this time, the maximum warpage deformation is 1.470 mm, and the maximum volume shrinkage is 8.106%, which are reduced by 23.95% and 11.89% respectively compared with the initial design, and the two quality optimization goals are significantly improved. Through analysis of variance, the influence of design process parameters on the warpage deformation and volume shrinkage of the recliner injection parts was studied. It is found the maximum holding pressure percentage, the melt temperature and the mold temperature have significant influence on the warpage deformation and volume shrinkage.

Keywords : orthogonal test; variance analysis; range analysis; process parameter; automotive seat recliner; warpage deformation; volume shrinkage

基金项目: 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地项目 (B17034), 中国教育部创新研究团队发展规划 (IRT_17R83)

通信作者: 郭巍, 副教授, 博导, 主要从事汽车轻量化等方面的研究

收稿日期: 2022-06-16

引用格式: 郭巍, 李金松, 严崙. 基于正交试验的汽车座椅调角器注射成型质量优化 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):64-69.

Guo Wei, Li Jinsong, Yan Kui. Optimization of injection molding quality of automotive seat recliner based on orthogonal test[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):64-69.

注射成型能够快速实现产品的大规模生产,然而成型过程中注塑件易产生翘曲、体积收缩等缺陷,所以得到合理的注塑件工艺参数就变得尤为重要。汽车座椅的调角器是用来完成座椅角度调节的结构,常采用注塑加工,其要承受一定的载荷。为提高汽车的安全性,调角器在聚酰胺 6 (PA6) 的基础上加入一定量玻纤 (GF) 来提高力学强度,但加入 GF 使成型过程更加复杂,表现出明显的各项异性^[1],这对注塑件的翘曲和体积收缩产生重要影响。注塑件的翘曲变形量及体积收缩率过大会导致其质量下降,为了使汽车座椅调角器注塑件具有良好的外观质量、装配性能,调角器注塑件的翘曲变形量和体积收缩率要尽可能地小,以提升其质量^[2-5]。

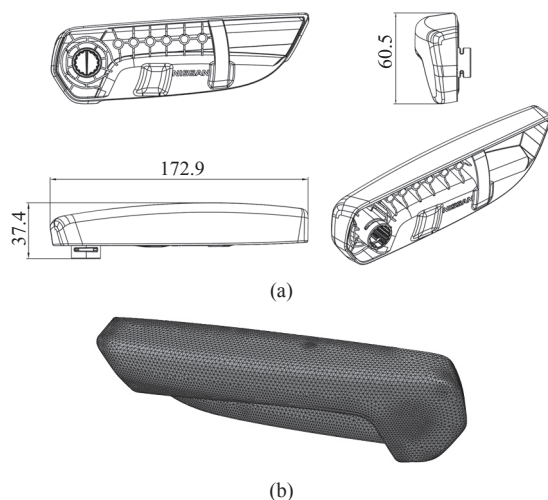
影响注塑件质量的因素有很多,为了得到更好质量的塑件,已有许多学者进行了相关的研究。Oliaei 等^[6]利用田口实验和人工神经网络得到的最优工艺参数组合非常接近。Li 等^[7]运用田口实验、响应面方法以及 NSGA-II 算法,发现纤维参数对零件质量有很大影响。Xu 等^[8-9]利用神经网络和粒子群优化算法得到了质量目标最优的工艺参数组合,提升了产品性能。翟豪瑞等^[10-11]和张维合等^[12]运用 Moldex3D 对仪表盘、碳罐、汽车后背门护板进行模流分析,并改善了成型质量。

笔者通过 Moldex3D 软件进行注射成型 CAE 分析和正交试验,利用极差分析和方差分析对工艺参数进行优化,分析了各设计参数对翘曲、体积收缩率两个质量目标的影响规律,得到了优化目标的最优工艺参数组合,该试验方法对纤维增强材料薄壁注塑件工艺参数优化有一定参考价值。

1 建立分析模型

1.1 注塑件结构及网格划分

调角器的几何模型如图 1a 所示,其整体尺寸为 172.9 mm × 60.5 mm × 37.4 mm,模型厚度集中在 1~5 mm。为提高模流分析的精度,首先在 Moldex3D CAD Doctor 中对调角器注塑件的拐角、尖角进行修复,避免自由边、干涉网格等缺陷的出现。在 Moldex3D 中对调角器进行实体网格划分,网格尺寸为 1,四面体个数为 337 962 个,得到有限元分析模型如图 1b 所示。对表面网格和实体网格进行检查,展弦比均小于 0.05,没有正交性不佳和雅可比不佳等缺陷,网格生成成功,满足 Moldex3D 分析的基本要求,可以进行后续分析,检查结果如图 2 所示。



a—几何示意图; b—有限元分析模型示意图

图1 调角器几何示意图和有限元分析模型示意图

▲ 表面网格缺陷	
自由边	0
T连接边	0
重叠网格	0
干涉网格	0
展弦比 (< 0.05)	0
尖锐角 (< 10.0°)	0
内壳	0
奇异点	0
失败点	0
尺寸差异过大	0
▲ 实体网格缺陷	
正交性不佳	0
Bad Jacobian	0

图2 网格质量检查结果

调角器成对使用,采用一模双腔,为了加快有限元分析速度,在 Moldex3D 之中设置对称结构,根据调角器结构特征进行流道设计,采用冷流道和侧边浇口。根据流道位置 and 实际模具特点,冷却液选择水,采用异形水路,如图 3 所示。

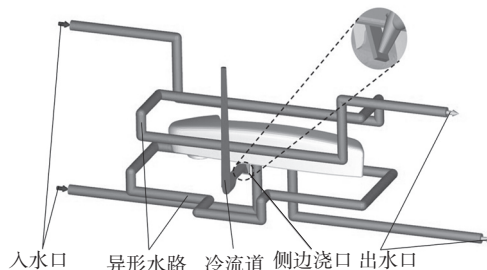


图3 流道、浇口及冷却系统

1.2 材料选择

以汽车座椅调角器为研究对象,使用 BASF 公司生产的牌号为 Ultramid B3WG3 的短 GF 增强 PA6 作为 Moldex3D 分析材料,GF 质量分数为 15%。PA6 采用 GF 增强后,热稳定性好、刚度大,尺

寸稳定性高。

1.3 初始注塑模拟分析

产品的质量在很大程度上受注射成型过程中工艺参数的影响,选取熔体温度(A)、模具温度(B)、最大保压压力百分比(C)、保压时间(D)和充填时间(E)五个因素为研究对象。根据前期尝试,调角器的原始工艺参数组合为: $A=270^{\circ}\text{C}$, $B=80^{\circ}\text{C}$, $C=84\%$, $D=8\text{ s}$, $E=1.5\text{ s}$,记为初始模拟组合为 G_1 ,得到的最大翘曲变形量(W_1)为1.933 mm,最大体积收缩率(W_2)为9.2%,如图4所示。

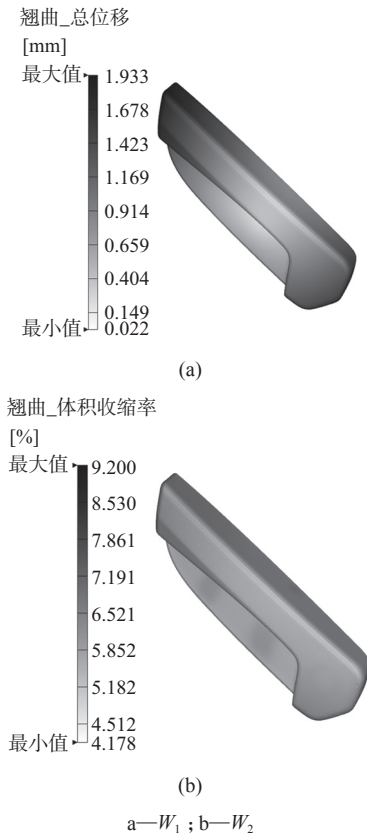


图4 初始模拟设计结果

2 正交试验与结果分析

传统的设计-试模-修模的迭代过程,能够得出可行的工艺参数,但费时费力且不够准确,增加了试模时间和成本,采用正交试验法^[13-14]能避免反复试凑,通过较少的试验次数,得到相关工艺参数在试验范围内的最优组合,从而提高产品的质量^[15-16]。

2.1 正交试验方案及结果

在试验中,忽略各因素之间的交互作用,确定五因素五水平 $L_{25}(5^5)$ 的正交方案,结果见表1,设计的25组试验在Moldex3D中进行模拟,以 W_1 , W_2 为质量指标,结果见表2。

表1 正交试验因素水平表

水平	因素				
	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/\%$	D/s	E/s
1	250	70	70	7.6	1.3
2	260	75	77	7.8	1.4
3	270	80	84	8	1.5
4	280	85	91	8.2	1.6
5	290	90	98	8.4	1.7

表2 正交试验方案及结果

组别	A	B	C	D	E	W_1/mm	$W_2/\%$
1	1	1	1	1	1	1.841 87	9.270 24
2	1	2	2	2	2	1.790 35	8.969 54
3	1	3	3	3	3	1.741 70	8.634 99
4	1	4	4	4	4	1.701 50	8.359 01
5	1	5	5	5	5	1.659 86	8.131 54
6	2	1	2	3	4	1.754 86	8.783 30
7	2	2	3	4	5	1.715 82	8.461 72
8	2	3	4	5	1	1.634 95	8.414 79
9	2	4	5	1	2	1.596 38	8.491 00
10	2	5	1	2	3	1.844 70	9.434 92
11	3	1	3	5	2	1.632 64	8.611 27
12	3	2	4	1	3	1.599 78	8.576 05
13	3	3	5	2	4	1.558 12	8.340 83
14	3	4	1	3	5	1.815 67	9.209 71
15	3	5	2	4	1	1.748 04	9.171 63
16	4	1	4	2	5	1.567 30	8.446 41
17	4	2	5	3	1	1.481 57	8.374 29
18	4	3	1	4	2	1.749 62	9.303 47
19	4	4	2	5	3	1.702 88	9.055 06
20	4	5	3	1	4	1.704 96	9.156 58
21	5	1	5	4	3	1.443 34	8.226 23
22	5	2	1	5	4	1.712 48	9.159 58
23	5	3	2	1	5	1.743 79	9.418 49
24	5	4	3	2	1	1.692 83	9.368 63
25	5	5	4	3	2	1.675 48	9.216 31

2.2 正交试验结果分析

根据正交试验结果,在Minitab软件中进行极差分析和方差分析,可以得到各工艺参数对质量指标的影响。

(1) 极差分析。

极差分析是一种直观分析方法,试验因素的极差越大,该因素对试验目标的影响就越大;试验因素的极差越小,该因素对试验目标的影响就越小。通过极差对试验因素进行排序,可以分析出主次因素,对影响大的因素选取使目标达到最佳的水平,对影响小的因素,可以任意选取一个水平,一般选取经济和实用的水平^[17]。优化目标的极差分析结果见表3和表4,其中, k_i 表示某一因素在 i ($i=1,2,3,4,5$)水平时 W_1 或 W_2 的均值,优化目标的均值主效应图如图5和图6所示。

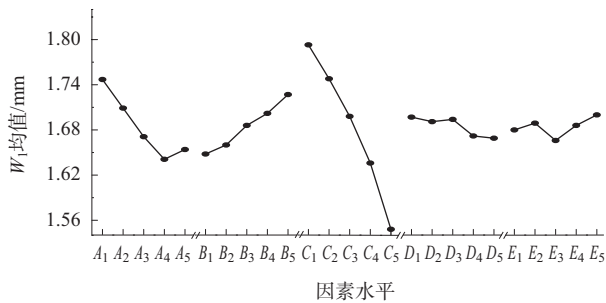
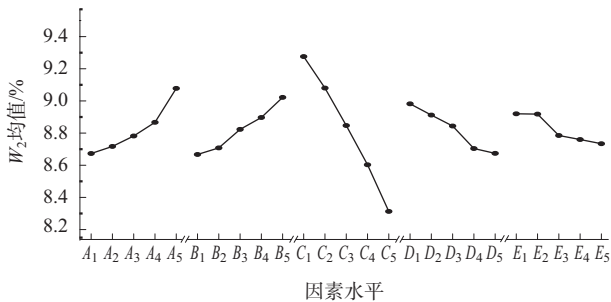
由表3、表4可以发现,各试验因素对 W_1 的影响主次顺序为: $C > A > B > E > D$;对 W_2 的影

表3 W_1 极差分析

项目	A	B	C	D	E
k_1	1.747	1.648	1.793	1.697	1.680
k_2	1.709	1.660	1.748	1.691	1.689
k_3	1.671	1.686	1.698	1.694	1.666
k_4	1.641	1.702	1.636	1.672	1.686
k_5	1.654	1.727	1.548	1.669	1.700
极差	0.106	0.079	0.245	0.029	0.034
排序	2	3	1	5	4

表4 W_2 极差分析

项目	A	B	C	D	E
k_1	8.673	8.667	9.276	8.982	8.920
k_2	8.717	8.708	9.080	8.912	8.918
k_3	8.782	8.823	8.847	8.844	8.785
k_4	8.867	8.897	8.603	8.704	8.760
k_5	9.078	9.022	8.313	8.674	8.734
极差	0.405	0.355	0.963	0.308	0.186
排序	2	3	1	4	5

图5 W_1 主效应图图6 W_2 主效应图

响主次顺序为: $C > A > B > D > E$ 。根据极差分析结果,使 W_1 最小的最优组合为 $A_4B_1C_5D_5E_3$,使 W_2 最小的最优组合为 $A_1B_1C_5D_5E_5$ 。

(2) 方差分析。

采用直观分析方法,虽然计算简单,工作量小且易懂,但它不能将试验中由于试验条件改变引起的数据波动与试验误差引起的波动区分开,也无法精确估计各因素对试验结果的精度,而方差分析将数据的总变异分解为因素引起的变异和误差引起的变异,可以精确估计各因素对试验结果的影响程度,判断因素作用是否显著^[17]。

方差分析结果可以确定误差对结果的影响以及试验因素对优化目标的影响情况。表5、表6

分别为 W_1 , W_2 的方差分析结果。取显著性水平 $\alpha=0.05$,查 F 分布表可知, $F_{0.05}(4,4)=6.39$ 。根据表5、表6的方差分析结果,可以发现调角器注塑件的 C , A 和 B 对 W_1 的影响显著,而 D 和 E 对 W_2 的影响不显著,按检验统计值 F 值大小排序为: $C > A > B > D > E$,与极差分析得到的结果略有不同; C , A , B 和 D 对 W_2 的影响显著, E 对 W_2 的影响不显著,按 F 值大小排序为: $C > A > B > D > E$,与极差分析得到的结果一致。

表5 W_1 方差分析

项目	自由度	平方和	均方差	F 值
A	4	0.037 708	0.009 427	17.19
B	4	0.020 039	0.005 010	9.14
C	4	0.184 944	0.046 236	84.33
D	4	0.003 548	0.000 887	1.62
E	4	0.003 124	0.000 781	1.42
残差误差	4	0.002 193	0.000 548	
合计	24			

表6 W_2 方差分析

项目	自由度	平方和	均方差	F 值
A	4	0.511 36	0.127 840	20.38
B	4	0.412 31	0.103 077	16.43
C	4	2.900 88	0.725 220	115.62
D	4	0.349 62	0.087 404	13.93
E	4	0.159 36	0.039 839	6.35
残差误差	4	0.025 09	0.006 273	
合计	24			

3 优化结果与验证

通过前述分析,已经分别得到使 W_1 , W_2 最小对应的工艺参数组合,为得到两个优化目标都较好的工艺参数组合,取 W_1 , W_2 各自对应最优工艺参数的平均值^[18],结果见表7。由表7可以看出,采用正交试验优化方法,最终得到 W_1 和 W_2 的最优工艺参数组合为: $A=265^\circ\text{C}$, $B=70^\circ\text{C}$, $C=98\%$, $D=8.4\text{ s}$, $E=1.6\text{ s}$ 。将得到的工艺参数组合进行 Moldex3D 仿真验证,结果如图7所示。由图7可以看出,其最大 W_1 为 1.470 mm ,最大 W_2 为 8.106% ,两个优化目标都得到了明显改善, W_1 和 W_2 减少了 23.95% 和 11.89% 。用图8所示的模具生产的调角器注塑件如图9所示,可以发现,注塑件的整体质量良好,收缩较为均匀,整体变形较小,无明显外观质量问题。

表7 最优工艺参数组合

因素	W_1 最优组合	W_2 最优组合	W_1 和 W_2 最优组合
A/ $^\circ\text{C}$	280	250	265
B/ $^\circ\text{C}$	70	70	70
C/%	98	98	98
D/s	8.4	8.4	8.4
E/s	1.5	1.7	1.6

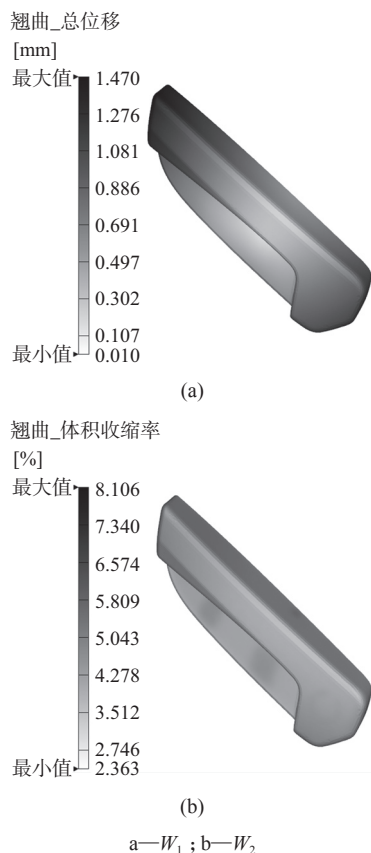


图7 优化后的结果

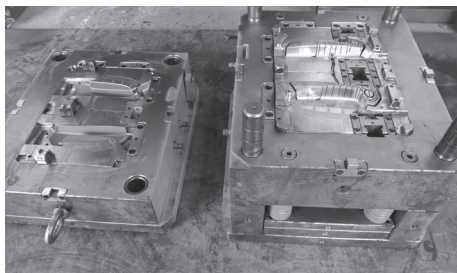


图8 调角器注塑件模具



图9 调角器注塑件

4 结论

(1) 根据极差分析结果可知,各试验因素对 W_1 的影响主次顺序为: $C > A > B > E > D$; 对 W_2 的影响主次顺序为: $C > A > B > D > E$ 。使 W_1 最小的最优组合为 $A_4B_1C_5D_5E_3$, 使 W_2 最小的最优组合为 $A_1B_1C_5D_5E_5$ 。

(2) 根据方差分析结果可知,调角器注塑件的 C , A 和 B 对 W_1 影响显著,而 D 和 E 对翘曲影响不显著,按照检验统计值 F 值大小排序为: $C > A > B > D > E$,与极差分析得到的结果略有不同; C , A ,

B 和 D 对 W_2 的影响显著, E 对 W_2 的影响不显著,按 F 值大小排序为: $C > A > B > D > E$,与极差分析得到的结果一致。

(3) 采用正交优化得到的最佳参数组合为: $A=265^\circ\text{C}$, $B=70^\circ\text{C}$, $C=98\%$, $D=8.4\text{ s}$, $E=1.6\text{ s}$,此时最大 W_1 为 1.470 mm ,最大 W_2 为 8.106% ,相比初始模拟设计,分别减少了 23.95% 和 11.89% ,两个优化目标都得到了明显改善。

参考文献

- [1] 杨波,孙玲.工艺参数对短玻璃纤维增强PP注塑制品翘曲变形的影响研究[J].中国塑料,2015,29(1):90-94.
Yang Bo, Sun Ling. Influence of processing parameters on short glass fiber reinforced PP injection part warpage[J]. China Plastics, 2015, 29(1):90-94.
- [2] 薛茂远,梅益,唐芳艳,等.基于灰色关联分析的注塑工艺多目标优化及 PSO-SVM 预测模型的建立[J].工程塑料应用,2021,49(3):58-64.
Xue Maoyuan, Mei Yi, Tang Fangyan, et al. Multi-objective optimization of injection molding process based on grey relational analysis and establishment of PSO-SVM prediction model[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):58-64.
- [3] 覃清仪,范希营,曹艳丽,等.基于正交试验的注塑成型质量多目标影响因素研究[J].塑料科技,2020,48(10):17-20.
Qin Qingyi, Fan Xiyang, Cao Yanli, et al. Research on multi-objective influencing factors of injection molding quality based on orthogonal experiment[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(10):17-20.
- [4] 姜淑梅,陈志远,殷文英,等.基于正交试验的高压固定板注塑工艺优化[J].塑料科技,2020,48(7):106-109.
Lou Shumei, Chen Zhiyuan, Yin Wenying, et al. Optimization of injection molding process of high-pressure fixed plate based on orthogonal experiment[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(7):106-109.
- [5] 郑尧刚,翟豪瑞,熊新,等.基于 Moldex3D 和灰色关联理论在空气滤清器上壳的工艺优化[J].工程塑料应用,2018,46(10):72-75,85.
Zheng Yaogang, Zhai Haorui, Xiong Xin, et al. Process optimization of air filter upper shell based on Moldex3D analysis and grey relational theory[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):72-75,85.
- [6] Oliaei E, Heidari B S, Davachi S M, et al. Warpage and shrinkage optimization of injection-molded plastic spoon parts for biodegradable polymers using Taguchi, ANOVA and artificial neural network methods[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(8):710-720.
- [7] Li K, Yan S L, Zhong Y C, et al. Multi-objective optimization of the fiber-reinforced composite injection molding process using Taguchi method, RSM, and NSGA-II[J]. Simulation Modelling Prac-

- tice and Theory, 2019, 91:69–82.
- [8] Xu Y J, Zhang Q W, Zhang W H. Optimization of injection molding process parameters to improve the mechanical performance of polymer product against impact[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76:2 199–2 208.
- [9] Bensingh R J, Machavaram R, Boopathy S R, et al. Injection molding process optimization of a bi-aspheric lens using hybrid artificial neural networks (ANNs) and particle swarm optimization (PSO)[J]. Measurement, 2019, 134:359–374.
- [10] 翟豪瑞, 王小松, 熊新, 等. 用 Moldex3D 对副仪表盘热流道浇口时序的优化 [J]. 现代塑料加工应用, 2017, 29(6):54–56.
- Zhai Haorui, Wang Xiaosong, Xiong Xin, et al. Optimization of hot runner gate time sequence of auxiliary instrument panel by Moldex3D[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2017, 29(6):54–56.
- [11] 翟豪瑞, 葛晓宏, 陈长秀, 等. 基于 Moldex3D 碳罐本体优化分析及模具设计 [J]. 模具工业, 2018, 44(1):40–45, 52.
- Zhai Haorui, Ge Xiaohong, Chen Changxiu, et al. Optimization analysis of carbon canister based on Moldex3D and the mould design[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(1):40–45, 52.
- [12] 张维合, 成永涛, 许淑娟, 等. 汽车后背门护板热流道大型注塑模设计 [J]. 中国塑料, 2019, 33(5):102–107.
- Zang Weihe, Cheng Yongtao, Xu Shujuan, et al. Design of large and hot runner injection mold for car rear door[J]. China Plastics, 2019, 33(5):102–107.
- [13] 徐伟, 王乾. 基于正交试验的塑料接线盒翘曲变形优化控制 [J]. 塑料, 2019, 48(5):74–77, 83.
- Xu Wei, Wang Qian. Warpage optimization of plastic junction box based on orthogonal test[J]. Plastics, 2019, 48(5):74–77, 83.
- [14] 刘强, 陈洪荣, 梅端, 等. 基于正交试验与 BPNN-GA 的航标灯外壳注塑工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27(7):123–129.
- Liu Qiang, Chen Hongrong, Mei Duan, et al. Process parameters optimization of injection molding of beacon light cover based on orthogonal test and BPNN-GA[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(7):123–129.
- [15] 易志斌, 吴林倩, 温慧, 等. 基于 Moldflow 的汽车操纵杆注塑成型质量分析与优化 [J]. 塑料科技, 2019, 47(6):72–77.
- Yi Zhibin, Wu Linqian, Wen Hui, et al. Quality analysis and optimization of injection molding of automotive control handle based on Moldflow[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(6):72–77.
- [16] 高源熙, 杜武青, 王莹, 等. 基于 Moldflow 的生物仪器盖板注塑模具优化设计 [J]. 塑料工业, 2019, 47(1):64–68.
- Gao Yuanxi, Du Wuqing, Wang Ying, et al. Optimized design of biological instrument cover of injection mould based on Moldflow[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):64–68.
- [17] 钟波, 刘琼荪, 刘超林, 等. 应用数理统计 [M] 北京: 科学出版社, 2017.
- Zhong Bo, Liu Qionsun, Liu Chaolin, et al. Applied mathematical statistics[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [18] Chen W C, Nguyen M H, Chiu W H, et al. Optimization of the plastic injection molding process using the Taguchi method, RSM, and hybrid GA-PSO[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9-12):1 873–1 886.
- 塑料, 2008, 37(4):83–86, 58.
- Li Zhiting, Zhang Shiqi. Torque rheological property experimental research of acetyl starch/PVA blends[J]. Plastics, 2008, 37(4):83–86, 58.
- [13] 杨晖, 黄明瑜, 王大中. 淀粉基生物降解塑料吹膜工艺及性能研究 [J]. 塑料制造, 2012(7):85–88.
- Yang Hui, Huang Mingyu, Wang Dazhong. Study on processing conditions and properties of starch-based biodegradable plastics blown film[J]. Plastics Manufacture, 2012(7):85–88.
- [14] Rodríguez-Castellanos W, Martínez-Bustos F, Rodrigue D, et al. Extrusion blow molding of a starch–gelatin polymer matrix reinforced with cellulose[J]. European Polymer Journal, 2015, 73:335–343.
- [15] 付吉瑞. 纳米二氧化硅改性 PHBH 包装膜的研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- Fu Jirui. Study on PHBH packaging film modified by nano-SiO₂[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.

(上接第 55 页)

Jin Ke. Study on starch plasticization and composite materials[D]. Wuhan:Hubei University of Technology, 2021.

- [8] Thunwall M, Kuthanová V, Boldizar A, et al. Film blowing of thermoplastic starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(4):583–590.
- [9] Wang W T, Zhang H, Jia R, et al. High performance extrusion blown starch/polyvinyl alcohol/clay nanocomposite films[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79:534–543.
- [10] 刘峰松. 聚乙烯醇对淀粉基发泡材料制备及性能的影响 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Liu Fengsong. Effect of PVA on processing and properties of starch-based foaming material[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [11] Aslam M, Kalyar M A, Raza Z A. Polyvinyl alcohol: A review of research status and use of polyvinyl alcohol based nanocomposites[J]. Polymer Engineering and Science, 2018, 58(12):2 119–2 132.
- [12] 李志庭, 张世奇. 乙酰淀粉/PVA 共混体系转矩流变试验研究 [J].