

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.014

基于 Moldflow 的汽车把手气辅注塑工艺多目标优化

程佳玮¹, 曹俊哲¹, 谢传颖², 李衡², 陈福松², 李磊², 王小新¹

(1. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266042; 2. 山东崇锦汽车零部件有限公司, 济南 250100)

摘要: 汽车内饰把手是典型的棒状类零件, 常采用气体辅助注射成型(GAIM)技术进行生产, 以满足把手强度和轻量化要求。由于 GAIM 技术的成型参数多, 塑件成型质量控制难度大, 通过运用 Moldflow 模流仿真分析并结合 Taguchi 试验方法, 以塑件的气体穿透长度和横截面最小壁厚为质量目标来优化成型工艺参数, 选择熔体温度、模具温度、气体压力、气体保压时间和预注射量 5 个主要因素进行正交试验, 采用极差分析研究上述 5 个工艺参数对气体穿透长度和横截面最小壁厚的影响规律, 应用多目标综合平衡法得到优化的工艺参数组合, 即熔体温度为 250 °C、模具温度为 50 °C、气体压力为 10 MPa、气体保压时间为 10 s、预注射量为 75%。通过实际 GAIM 验证, 塑件气体穿透效果良好, 满足穿透长度和横截面最小壁厚的要求, 塑件质量减轻 25% 以上, 并具有良好的表面质量和尺寸精度, 能够显著缩短成型周期, 节约塑料材料, 提高生产质量和效率, 并满足汽车轻量化要求。

关键词: 气体辅助注射成型; 模流仿真分析; Taguchi 试验; 极差分析; 多目标优化

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0089-05

Multi-objective optimization of automotive handles gas-assisted injection molding process based on Moldflow

CHENG Jiawei¹, CAO Junzhe¹, XIE Chuanying², LI Heng², CHEN Fusong², LI Lei², WANG Xiaoxin¹

(1. School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Shandong Chongjin Auto Parts Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract : Automotive interior handles are typical rod-shaped parts, which are often produced using gas-assisted injection molding (GAIM) technology to meet the strength and lightweight requirements. Due to the multiple molding parameters of GAIM, it is difficult to control the quality of plastic parts. By using Moldflow simulation analysis and combining with Taguchi test method, the molding process parameters were optimized such as gas penetration length and minimum wall thickness of the cross-section of the plastic parts. Five main factors, including melt temperature, mold temperature, gas pressure, gas holding time, and pre injection volume, were selected for orthogonal experiments, The influence of the five process parameters on gas penetration length and minimum wall thickness of the cross-section was studied using range analysis. The multi-objective comprehensive equilibrium method was applied to obtain the optimized process parameter combination, which includes a melt temperature of 250 °C, a mold temperature of 50 °C, a gas pressure of 10 MPa, a gas holding time of 10 s, and a pre injection volume of 75%. Through actual GAIM verification, the gas penetration effect of plastic parts is good, meeting the requirements of penetration length and minimum wall thickness of cross-section. The weight of plastic parts is reduced by more than 25%, and it has good surface quality and dimensional accuracy. It can significantly shorten the molding cycle, save plastic materials, improve production quality and efficiency, and meet the requirements of automotive light weighting..

Keywords : gas-assisted injection molding ; Moldflow ; Taguchi test ; range analysis ; multi-objective optimization

基金项目: 山东省研究生教育质量提升计划项目(SDYAL21102)

通信作者: 王小新, 教授, 硕士生导师, 主要从事高分子材料先进成型及模具技术研究

收稿日期: 2024-02-18

引用格式: 程佳玮, 曹俊哲, 谢传颖, 等. 基于 Moldflow 的汽车把手气辅注塑工艺多目标优化[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 89-93.

CHENG Jiawei, CAO Junzhe, XIE Chuanying, et al. Multi-objective optimization of automotive handles gas-assisted injection molding process based on Moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 89-93.

气体辅助注射成型(GAIM)技术在传统注射成型工艺中引入高压气体,在塑件中形成中空截面,既能降低制品所需原材料的用量,又能减少缩痕、降低注射压力、提高塑件品质,同时还能显著提高生产率^[1-2]。GAIM工艺过程分为熔体注射、气体注射、气体保压、冷却固化、制件顶出5个阶段,与普通注射成型工艺相比,其成型控制参数更多,塑件质量控制难度也更大^[3-5]。汽车把手是典型的棒状类零件,采用普通注塑工艺成型周期长、原料用量大,既影响生产效率,也不符合汽车轻量化的要求。

笔者针对汽车把手采用GAIM技术,通过多目标优化控制零件的气体穿透长度和横截面最小壁厚均在适当范围内,同时满足零件强度和轻量化要求,为此类零件的工艺控制提供指导。结合Moldflow模流分析软件对汽车把手等棒状类塑件进行注塑仿真模拟分析,通过Taguchi试验方法,研究熔体温度、模具温度、气体压力、气体保压时间、预注射量等工艺参数对塑件的气体穿透长度和横截面最小壁厚的影响,应用多目标综合平衡法确定最佳工艺参数组合,指导生产实践,缩短试模调试时间,生产出满足使用要求的合格制品。

1 产品分析

汽车内饰把手为汽车常用零件,该产品长为256 mm,宽为30 mm,高53 mm,其几何模型如图1所示。该产品主要是起保护和支撑作用,要求产品有良好的尺寸稳定性、强度和刚度。该零件同时也是汽车内饰件,具有较高的表面质量要求。该零件材料选择相对高强度、高流动性的改性聚丙烯,具体牌号为山东兰陵云塑高分子材料有限公司的CP231。该材料推荐的加工温度范围为220~260℃,模具温度为30~60℃。

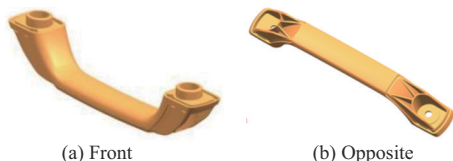


图1 汽车把手几何模型

Fig. 1 Geometric model of a car handlebar

本汽车把手产品为长圆形截面,横截面为30 mm×16 mm的椭圆,截面较粗。若采用普通注射成型实芯塑件,不仅质量大,而且截面中心熔体温度高、散热慢,如图2a所示,生产中会大大增加成型周期。同时冷却时制品收缩率大,容易在其表面产生

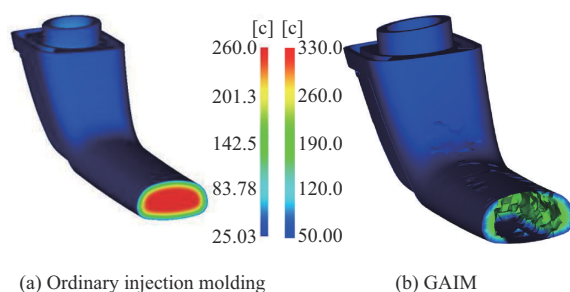


图2 把手截面温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of handle sections

缩痕,并导致产品尺寸出现偏差。

采用GAIM技术,在进浇口附近设置气针进气,利用塑件本身作为气道,通过高压气体在产品内部形成中空截面,则可以显著改善截面上的温度分布,减少热量聚集,缩短冷却时间,如图2b所示。同时气针与浇口放在塑件同一端,气体穿透方向与熔体流动方向一致,使得气体更易穿透熔体。为了更好地优化GAIM工艺参数,采用Moldflow模流分析软件进行GAIM模拟仿真分析,预测熔体充填及气体在型腔内的穿透情况,进而对塑件成型质量和气体穿透情况进行控制和优化。

由于影响GAIM的因素比普通注射成型显著增多,其控制参数数量增加,控制难度也相应提高。在GAIM技术中常遇到气体穿透距离短、气体吹破流动前锋、塑件壁厚不均等缺陷情况,导致生产失败,或者不能体现GAIM的优势。为此,笔者通过Taguchi试验,选择气体穿透长度和横截面最小壁厚作为多目标优化成型工艺参数,提高气辅技术应用的可行性和可靠性。

2 Taguchi试验

Taguchi试验是一种部分因子试验设计技术,通过运用基于正交矩阵的Taguchi方法对成型工艺优化,可以减少进行试验所需要的时间和成本^[6-10]。根据把手的产品结构和强度要求,选择气辅注塑的气体穿透长度和塑件横截面最小壁厚进行多目标优化,目标值分别为145 mm和2.5 mm。选择对GAIM效果影响较大的熔体温度(A)、模具温度(B)、气体压力(C)、气体保压时间(D)和熔体预注射量(E)5个因素设计正交试验,各参数水平根据材料的推荐参数范围以及设备能力等因素进行设置,见表1。其他注塑参数设置为:注射时间3 s,注气延迟时间1 s,冷却时间20 s。

根据Taguchi试验在计算机上进行16次模拟试验,得到5因素4水平的正交试验参数设置及气体

表1 正交试验因素和水平

Tab. 1 Orthogonal test factors and levels

Levels	Factors				
	A/°C	B/°C	C/MPa	D/s	E/%
1	230	30	5	5	65
2	240	40	8	8	70
3	250	50	10	10	75
4	260	60	15	15	80

穿透长度和横截面最小壁厚两个多目标优化结果,见表2。

表2 气体穿透长度和横截面最小壁厚正交试验结果

Tab. 2 Orthogonal test results of gas penetration length and minimum wall thickness of cross-section

No.	Factors					Gas penetra- tion length/ mm	Minimum wall thickness of cross-section/mm
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	1	1	179.18	2.11
2	1	2	2	2	2	167.38	2.21
3	1	3	3	3	3	156.08	2.00
4	1	4	4	4	4	147.49	3.89
5	2	1	2	3	4	113.96	2.22
6	2	2	1	4	3	139.40	2.45
7	2	3	4	1	2	165.87	3.72
8	2	4	3	2	1	145.05	3.79
9	3	1	3	4	2	171.36	2.07
10	3	2	4	3	1	144.60	3.49
11	3	3	1	2	4	104.09	1.99
12	3	4	2	1	3	147.52	2.88
13	4	1	4	2	3	172.33	3.25
14	4	2	3	1	4	122.09	2.21
15	4	3	2	4	1	170.31	2.12
16	4	4	1	3	2	162.40	2.46

2.1 气体穿透长度极差分析

极差分析又称直观分析法,具有计算简单、直观形象、简单易懂等优点,是正交试验结果分析最常用的方法^[11-13]。表3为5个工艺参数对汽车把手气辅成型气体穿透长度的极差分析。由表3可以看出,在GAIM工艺参数取值范围内,五个工艺参数极差R的大小顺序为 $R(E)>R(A)>R(B)>R(D)>R(C)$ 。

根据表3可以得出各工艺因素在不同水平下对

表3 气体穿透长度极差分析

Tab. 3 Analysis of gas penetration length ranges

Item	A	B	C	D	E
K1	162.53	159.21	146.27	153.67	159.79
K2	141.07	143.37	149.79	147.21	166.75
K3	141.89	149.09	148.65	144.26	153.83
K4	156.78	150.62	157.57	157.14	121.91
R	21.46	15.84	11.30	12.88	44.84

Note: K1, K2, K3, and K4 represent the average value of the sum of the corresponding test index values of the four levels, respectively; R is the range, which is the same as in the following table.

气体穿透长度的影响趋势,如图3所示。一般情况下,预注射量越大,气体运动阻力越大,气体穿透长度越短,但当预注射量减小到一定值时,出现峰值。由图3可知,随着预注射量的增加,气体穿透长度先稍有增加后明显下降,说明工艺参数取值范围合理;预注射量为65%时,熔体填充不足,气体运动受限小容易流动,随着预注射量的增加,气体运动阻力变大,气体穿透长度变短。可直观说明E对气体穿透长度的影响最大,C影响最小,优化组合为A3B2C1D3E3,即当熔体温度为250℃、模具温度为40℃、气体压力为5MPa、气体保压时间为10s、预注射量为75%时,产品的气体穿透长度最为合适。

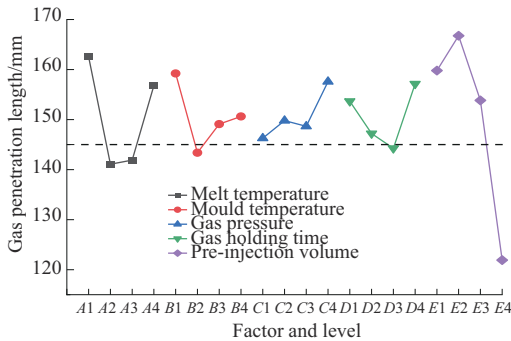


图3 各因素对气体穿透长度影响效应趋势图

Fig. 3 Trends of effects of various factors on gas penetration length

2.2 横截面最小壁厚极差分析

表4为5个工艺参数对汽车把手气辅成型横截面最小壁厚的影响的极差分析。由表4可以看出,对横截面最小壁厚最重要的两个影响因素是C和B,所考察的5个因素的极差R大小顺序分别为 $R(C)>R(B)>R(A)>R(E)>R(D)$ 。

表4 横截面最小壁厚极差分析

Tab. 4 Analysis of minimum wall thickness range of cross-section

Item	A	B	C	D	E
K1	2.55	2.41	2.25	2.73	2.88
K2	3.05	2.59	2.36	2.81	2.62
K3	2.61	2.46	2.52	2.54	2.65
K4	2.51	3.26	3.59	2.63	2.58
R	0.54	0.85	1.34	0.27	0.30

根据表4可以得出各工艺因素在不同水平下对横截面最小壁厚的影响趋势,如图4所示。随着气体压力的增加,气体流动速度越快,横截面最小壁厚越大,根据图4可直观看出,C对横截面最小壁厚的影响最大,优化效果显著,优化组合为A4B3C3D3E4,即当熔体温度为260℃、模具温度为50℃、气体压力为10MPa、气体保压时间为10s、预注射量为80%时,产品的横截面最小壁厚最为合适。

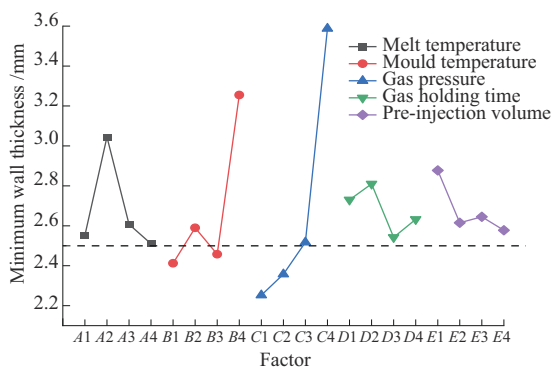


图4 各因素对横截面最小壁厚影响效应趋势图

Fig. 4 Trends of influences of various factors on minimum wall thickness of cross-section

2.3 综合平衡法多目标优化

在正交试验中,多个目标之间可能存在一定的矛盾,这时需兼顾各个目标,寻找使每个目标都尽可能好的生产条件。针对本汽车把手的注塑生产特点,运用多目标处理方法中的综合平衡法较为适合。综合平衡法是先根据计算分析得到的多组单一目标分别进行优化组合,再根据因素主次、水平优劣最后确定整体优化组合,是较为常用的多目标优化设计方法^[14-16]。针对气体穿透长度优化组合A3B2C1D3E3与横截面最小壁厚优化组合A4B3C3D3E4,从前述因素影响趋势和因素的主次关系可以看出,预注射量E对气体穿透长度的影响最大,对横截面最小壁厚的影响较小,故取E3作为最佳水平;气体压力C对横截面最小壁厚的影响最大,对气体穿透长度影响较小,故取C3作为最佳水平;熔体温度A对气体穿透长度影响大于对横截面最小壁厚的影响,故取A3作为最佳水平;模具温度B对横截面最小壁厚的影响大于对气体穿透长度的影响,故取B3作为最佳水平;气体保压时间D满足两个质量目标的最佳水平均为D3;由此得到最终优化方案为A3B3C3D3E3(熔体温度250℃、模具温度为50℃、气体压力为10 MPa、气体保压时间为10 s、预注射量为75%),由于该方案并未在上述的试验方案中,需对这个方案再进行模拟计算,得到气体穿透长度约为145 mm,横截面最小壁厚约为2.5 mm,满足在不吹破前提下,气体穿透到末端距离最优,2.5 mm的横截面最小壁厚保障塑件的强度要求(图5)。

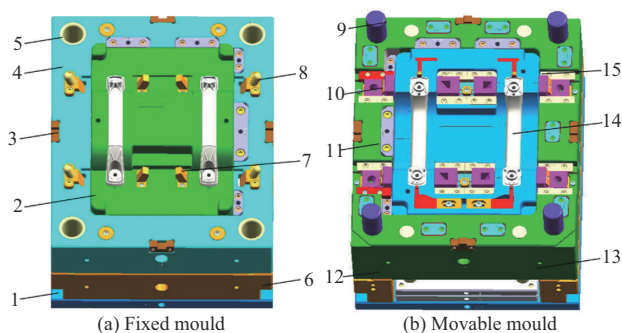


图5 优化方案的气体穿透效果图

Fig. 5 Gas core result of optimization scheme

3 模具设计及注塑生产验证

据该产品的产量和注塑机的能力,选用一模两穴的两板模具结构,模具结构如图6所示。汽车把手结构比较复杂,加强筋、薄壁区较多,壁厚差异较大,模具结构设计时需要许多滑块,浇注系统布置时必须避开这些滑块,本产品设计了4个方斜导柱(如图6a中7所示)和4个圆斜导柱(如图6a中8)顶出产品的加强筋和薄弱区。



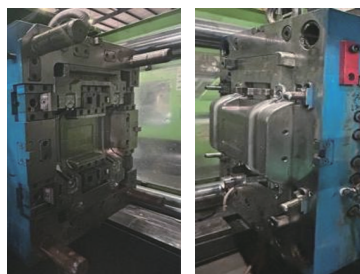
(a) Fixed mould (b) Movable mould

1—Guide sleeve; 2—Cavity plate; 3—Positioning block;
4—Fixed mould insert; 5—Fixed clamp plate; 6—Hot runner plate;
7—Square diagonal guide pillar; 8—Circular oblique guide pillar;
9—Guide pillar; 10—Slider; 11—Movable platen; 12—Moving clamping plate; 13—Base plate; 14—Moving mould insert; 15—Fixed block

图6 注塑模具结构

Fig. 6 Injection mould structure

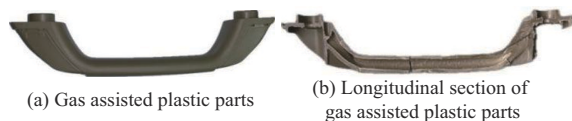
实际制造的模具如图7所示,利用上述模具和优化的注塑工艺参数进行注塑生产,得到塑件如图8所示。由图8可见,塑件表面无熔接痕,气体穿透长度在145 mm左右,横截面最小壁厚在2.5 mm左右,具有良好的强度和表面质量,满足生产和使用要求。



(a) Movable mould (b) Fixed mould

图7 实际制造的模具

Fig. 7 Actually manufactured mould



(a) Gas assisted plastic parts

(b) Longitudinal section of gas assisted plastic parts

图8 实际气辅注塑生产的塑件

Fig. 8 Plastic parts produced by actual gas assisted injection molding

4 结论

(1)利用Moldflow软件和正交试验法对汽车把手进行仿真分析,对仿真结果通过多目标优化方法进行处理。通过16组正交试验结果分析,分析熔体温度、模具温度、气体压力、气体保压时间和冷却时间5个工艺参数对气体穿透长度和横截面最小壁厚的影响,利用极差分析进行优化,获得优化的工艺参数组合,即熔体温度为250℃、模具温度为50℃、气体压力为10 MPa、气体保压时间为10 s、预注射量为75%。优化组合分析得到的塑件气体穿透长度为145 mm左右,横截面最小壁厚为2.5 mm左右。

(2)根据优化工艺参数进行实际生产验证,所得气辅把手中的气体穿透长度和横截面最小壁厚均达到了理想的效果,节约了试模时间,也验证了优化工艺参数组合的可行性,同时节约塑料原料25%以上,并提高了生产效率,也满足了汽车把手的强度和轻量化要求。

参考文献

- [1] 尹红灵,吴国洪.汽车门把手的气辅注射成型工艺优化[J].模具技术,2018(5):46-50.
YIN Hongling, WU Guohong. Optimization of gas assisted injection molding process for automotive door handle[J]. Die and Mould Technology, 2018(5):46-50.
- [2] 杨志杰.典型汽车注塑件的气辅注射成型工艺优化研究[J].科技创新导报,2018,15(26):101-102.
YANG Zhijie. Optimization of gas assisted injection molding process for typical automotive injection parts[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(26):101-102.
- [3] 林浩波,刘军辉.汽车内门把手注射模结构优化设计[J].模具制造,2021,21(7):50-54.
LIN Haobo, LIU Junhui. Optimization design of injection mold structure for automotive interior door handle[J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21(7):50-54.
- [4] 杜林芳,苗秋玲.汽车内饰把手气辅注射成型模具设计[J].中国塑料,2017,31(4):102-105.
DU Linfang, MIAO Qiuling. Design of injection molding molds for automotive interior handlebars with pneumatic assistance[J]. China Plastics, 2017, 31(4):102-105.
- [5] 任清海,耿铁.延迟时间对气辅注射成型气体穿透行为影响的数值模拟和实验研究[J].中国塑料,2016,30(8):70-74.
REN Qinghai, GENG Tie. Numerical simulation and experimental study on the effect of delay time on gas penetration behavior in gas assisted injection molding[J]. China Plastics, 2016, 30(8):70-74.
- [6] 李双君.基于正交试验法的气体辅助注射成型工艺模拟[D].郑州:郑州大学,2013.
LI Shuangjun. Gas assisted injection molding process simulation based on orthogonal experimental method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [7] 任清海,耿铁.正交试验优选气辅成型工艺参数[J].合成树脂及塑料,2022,39(1):54-59.
REN Qinghai, GENG Tie. Optimization of gas assisted forming process parameters through orthogonal experiments[J]. Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(1):54-59.
- [8] 周大路.气辅成型中成型工艺对制品翘曲的影响[J].塑料工业,2014,42(10):65-67.
ZHOU Dalu. The influence of forming process on product warping in gas assisted molding[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(10):65-67.
- [9] 尹红灵.基于CAE技术的汽车前面板注射成型工艺优化[J].模具技术,2015(2):47-51.
YIN Hongling. Optimization of injection molding process for automotive front panel based on CAE Technology[J]. Mold Technology, 2015(2):47-51.
- [10] 段家现.正交试验和综合评分法的注塑工艺多目标优化[J].塑料工业,2018,46(7):66-69,91.
DUAN Jiaxian. Multi objective optimization of injection molding process using orthogonal experiment and comprehensive scoring method[J]. China Plastic Industry, 2018, 46(7):66-69, 91.
- [11] 杜鹏辉,王蕴晴,谢传颖,等.PTFE轴套零件注塑工艺参数优化及模具设计[J].工程塑料应用,2022,50(12):56-60.
DU Penghui, WANG Yunqing, XIE Chuanying, et al. Optimization of injection molding process parameters and mold design for PTFE shaft sleeve parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12):56-60.
- [12] 杜鹏辉,于江涛,于昕世,等.基于Taguchi试验的空调导风板预变形控制[J].工程塑料应用,2023,51(6):68-72,84.
DU Penghui, YU Jiangtao, YU Xinshi, et al. Pre deformation control of air conditioning guide plates based on Taguchi test[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6):68-72, 84.
- [13] 王蕴晴,王小新,杜鹏辉,等.基于Moldflow的冰箱顶盖气体辅助注塑工艺优化设计[J].模具技术,2022(2):20-25.
WANG Yunqing, WANG Xiaoxin, DU Penghui, et al. Optimization design of gas assisted injection molding process for refrigerator top cover based on Moldflow[J]. Mold Technology, 2022(2):20-25.
- [14] 吴书婷,刘泓滨,李雪峰.基于正交试验法的汽车保险杠注射成型工艺参数多目标优化研究[J].塑料工业,2012,40(8):60-64.
WU Shuting, LIU Hongbin, LI Xuefeng. Multi objective optimization of injection molding process parameters for automotive bumpers based on orthogonal experimental method[J]. China Plastic Industry, 2012, 40(8):60-64.
- [15] 雷武,余坤,王科听,等.收纳盒注射成型工艺多目标优化[J].山东化工,2021,50(6):141-145.
LEI Wu, YU Kun, WANG Keting, et al. Multi-objective optimization of storage box injection molding process[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(6):141-145.
- [16] 傅莹龙.基于气辅技术与正交试验的汽车门把手成型工艺优化[J].模具制造,2022,22(12):37-40.
FU Yinglong. Optimization of automotive door handle forming process based on gas assisted technology and orthogonal experiments[J]. Mold Manufacturing, 2022, 22(12):37-40.