

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.09.016

CRITIC 权重法多目标优化汽车后门上护板本体注塑成型工艺

于峻伟¹, 吴迪², 张晗¹, 王明伟¹, 叶星辉³(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁大连 116034; 2. 南阳职业学院智能制造技术学院, 河南南阳 474500;
3. 浙江凯华模具有限公司, 浙江台州 318020)

摘要: 汽车后门上护板本体为长条形带密集加强筋的汽车内饰构件, 采用三元乙丙橡胶-滑石粉改性聚丙烯(PP+EPDM-TD20)注塑成型, 生产中易因工艺参数匹配不当产生翘曲变形与表面缩痕缺陷。为协同改善上述成型缺陷、提升塑件综合质量, 开展注塑工艺参数多目标优化研究。采用NX软件完成产品三维建模, 基于Moldflow搭建仿真分析环境, 选取模具温度、熔体温度、注射时间、保压压力、保压时间5项关键工艺变量, 设计 $L_{16}(4^5)$ 正交试验方案; 针对单目标最优工艺组合存在差异、难以协同优化的问题, 引入CRITIC权重法, 该方法可同时结合指标数据的变异性与冲突性计算权重: 有效规避主观偏差, 将多目标优化转化为单目标综合评分优化, 通过极差分析明确参数影响规律与最优工艺组合。结果表明, 各参数对综合质量的影响程度大小顺序为保压时间、注射时间、保压压力、熔体温度、模具温度; 最优工艺为模具温度45℃、熔体温度220℃、注射时间3s、保压压力50MPa、保压时间12s。经仿真与实际试模双重验证, 优化后脱模方向上翘降至1.975mm(改善25.2%), 缩痕估算值降至0.1127mm(改善49.7%), 试模产品同步满足装配精度与外观品质要求。

关键词: 汽车后门上护板; 正交试验; CRITIC权重法; 多目标优化

中图分类号: TP391.7, TQ320.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)09-0148-08

CRITIC weight method for multi-objective optimization of the injection molding process of the main body of the automobile rear door upper trim panel

YU Junwei¹, WU Di², ZHANG Han¹, WANG Mingwei¹, YE Xinghui³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. School of Intelligent Manufacturing Technology, Nanyang Vocational College, Nanyang 474500, China; 3. Zhejiang Kaihua Mould Co., Ltd., Taizhou 318020, China)

Abstract: The main body of the rear upper door trim panel is a long, strip-shaped automotive interior component featuring dense reinforcing ribs. It is injection-moulded using polypropylene modified with ethylene-propylene-diene monomer rubber and talc (PP+EPDM-TD20); during production, warping and surface sink marks are prone to occur due to inappropriate process parameter settings. To collaboratively address these moulding defects and enhance the overall quality of the plastic parts, a multi-objective optimisation of injection moulding process parameters was conducted. NX software was used to complete the 3D modelling of the product, and a simulation and analysis environment was established using Moldflow. Five key process variables—mould temperature, melt temperature, injection time, holding pressure and holding time—were selected, and an $L_{16}(4^5)$ orthogonal test design was devised; To address the issue that single-objective optimal process combinations may differ and are difficult to optimize in a coordinated manner, the CRITIC weighting method was introduced. This method calculates weights by simultaneously considering both the variability and conflict among indicator data, effectively avoiding subjective bias. It transforms multi-objective optimisation into single-objective comprehensive scoring optimisation, and utilizes range analysis to clarify the patterns of parameter influence and

通信作者: 王明伟, 博士, 教授, 主要从事材料成型加工、智能制造等方面研究

收稿日期: 2026-06-21

引用格式: 于峻伟, 吴迪, 张晗, 等. CRITIC权重法多目标优化汽车后门上护板本体注塑成型工艺[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(9): 148-155.

YU Junwei, WU Di, ZHANG Han, et al. CRITIC weight method for multi-objective optimization of the injection molding process of the main body of the automobile rear door upper trim panel[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(9): 148-155.

identify the optimal process combination. The results indicate that the parameters influence on overall quality, in descending order of significance, is holding time, injection time, holding pressure, melt temperature and mould temperature; the optimal process parameters are a mould temperature of 45 °C, a melt temperature of 220 °C, an injection time of 3 s, a holding pressure of 50 MPa and a holding time of 12 s. Following by verification through both simulation and actual trial moulding, the warpage in the demoulding direction is reduced to 1.975 mm (a 25.2% improvement), whilst the estimated sink mark is reduced to 0.112 7 mm (a 49.7% improvement); the trial moulding products simultaneously meet the requirements for assembly precision and surface quality.

Keywords: automobile rear door upper trim panel ; orthogonal test ; CRITIC weight method ; multi-objective optimization

汽车后门上护板本体是汽车后门的上部结构件,通常位于汽车后门的内侧上部,能够包覆车门金属钣金,与车内其他内饰件相协调,提升车内整体的美观度和质感,营造舒适的驾乘环境;同时在车辆发生侧面碰撞时,可以起到一定的缓冲吸能作用,减轻对车内人员的伤害。这类汽车内饰结构件在材料选择上有明确的性能与成本考量,而塑料及其复合材料因具有质量轻、成本低、易于成型、设计灵活、能够承受较大强度等诸多优点,是部分汽车结构件产品的首选材料^[1]。然而塑料的成型性虽好,但因受成型工艺参数的影响,会产生如短射、熔接痕、缩痕、翘曲变形等成型缺陷,选择合理的成型工艺参数可以提高产品质量^[2]。

为降低成型缺陷的出现,目前国内外学者利针对成型工艺参数的优化,利用模流分析技术进行了大量研究。张浩添等^[3]以多孔结构、尺寸与外观变形要求较高的车机垫板为研究对象,聚焦体积收缩率与翘曲变形两大核心缺陷,利用灰色关联度与熵权法进行优化获得了最佳成型工艺参数;熊继芬等^[4]针对重型卡车保险杠注塑成型中的翘曲变形问题,基于Moldflow展开 $L_{25}(5^6)$ 正交试验进行极差分析后,进一步通过二次多项式回归分析构建注塑工艺数学模型,经显著性检验验证模型可靠性后,利用Python的differential_evolution函数进行全局寻优,得到理论最优参数;张晗等^[5]以大型塑件卡车轮罩横梁的体积收缩率Z方向最大翘曲变形量为研究对象,构建了最优拉丁超立方试验+贝叶斯正则化神经网络(BRNN)+非支配排序遗传算法II(NSGA-II)的优化体系,确定了最优工艺参数组合;孙庆东等^[6]针对汽车地毯压条检修盖因浇口位置不合理、工艺参数匹配不当导致的熔接线缺陷、体积收缩率及翘曲变形超标问题,通过Minitab“响应优化器”进行多响应优化,得到最优工艺参数组合;Tan^[7]以新能源车薄壁连接器为对象,结合Moldflow仿真,采用田口正交与灰色关联法开展多目标优化。选取

六项工艺参数,经信噪比、方差分析明确填充、保压时长分别主导翘曲、收缩,得到兼顾两类缺陷的最优工艺组合。Moayyedien^[8]针对汽车仪表台塑件,依托有限元仿真构建数据集,对比决策树(DT)、多层感知机(MLP)等软计算模型,将高精度代理模型嵌入MOPSO算法求解三维帕累托最优解集,同步降低缩痕、收缩、翘曲三类成型缺陷。

上述研究为注塑工艺优化提供了多元技术路径,但多目标权重分配与综合评价仍存在局限:熵权法仅以指标离散程度为赋权依据,未充分考量质量指标间的耦合冲突特性;智能进化算法、多响应优化方案或输出多组帕累托解集,或依赖默认权重设置,难以直接输出工程适配的综合最优工艺。近年来,CRITIC权重法作为数据驱动的客观赋权方法,已逐步应用于注塑工艺多目标优化领域,但现有研究多针对车灯、立柱饰板等典型结构件展开,针对长条形、带密集加强筋的汽车后门上护板内饰件,聚焦脱模方向翘曲与缩痕两大核心缺陷开展协同优化的系统研究仍较为匮乏;同时多数研究仅停留在仿真验证层面,缺乏实际生产试模的实测数据支撑,方法的工程适用性有待进一步验证。CRITIC权重法从指标变异性与冲突性双维度量化信息量,可基于试验数据自动赋权并转化为单目标综合评分,结果更具科学性与实用价值。

本文以汽车后门上护板本体为研究对象,使用NX软件进行产品三维建模后,将其导入Moldflow软件进行注塑成型过程初始工艺模拟分析,以脱模方向上翘与缩痕估算为优化目标进行正交试验设计,将结果分别进行极差分析后发现脱模方向上翘与缩痕估算最佳工艺参数组合不同,再结合CRITIC权重法把多目标优化问题转化为单目标优化,最后对综合评分进行极差分析得到最优成型工艺参数组合,并将所得最优成型工艺参数在Moldflow中进行验证。研究为同类汽车内饰注塑件的多目标工艺优化提供了可行的技术参考。

1 产品模型建立与有限元分析

1.1 产品模型分析

如图1所示为使用NX软件建模后的汽车后门上护板本体,其三维尺寸为194 mm×830 mm×94 mm,主体壁厚为2.5~3.2 mm,整体为长条状,背部存在较多加强筋和限位卡扣。产品表面处理为包覆,但由于包覆层较薄,在包覆完成后,在标准光源下、正常目视距离(30~50 cm)内,包覆层表面不得显现出骨架缩痕对应的凹陷、光影差;用手触摸包覆面无明显凹凸触感;同时装配上需严格控制翘曲变形量,确保塑件的安装精度。

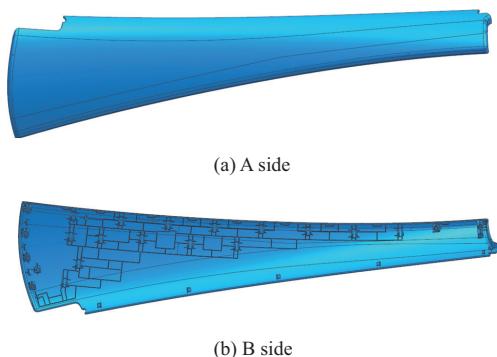


图1 汽车后门上护板本体模型

Fig. 1 Model of the rear door upper guard body

1.2 材料特性

汽车后门上护板本体选用的是由金发科技公司生产的一款三元乙丙橡胶-滑石粉改性聚丙烯(PP+EPDM-TD20)材料,牌号为AIP-2016,该材料主要面向汽车内饰件应用。相比普通聚丙烯材料,此材料的核心优势在于通过添加EPDM实现增韧改性,显著提升了产品的抗冲击能力;同时填充质量分数20%滑石粉以增强材料刚性,最终实现优异的刚韧平衡。同时该材料在耐划伤性、低气味性、热尺寸稳定性与加工适配性等方面实现了全面升级,可完美匹配汽车内饰件的严苛要求^[9-10]。PP+EPDM-TD20材料参数见表1。

表1 PP+EPDM-TD20材料的参数

Tab. 1 parameters of PP+EPDM-TD20 material	
Material parameters	Range
Melt temperature/°C	200~250
Mold surface temperature/°C	30~60
Ejection temperature/°C	119
Absolute maximum melt temperature/°C	290
Melt density/(g·cm ⁻³)	0.883 3
Maximum shear rate/(s ⁻¹)	100 000
Maximum shear stress/MPa	0.25

1.3 网格划分

将在NX软件中完成建模的产品以X-T格式导出后进入CADdoctor中进行模型简化与修复,然后导入Moldflow 2023软件中进行双层面网格划分。产品为1+1左右镜像件,为确保网格模型完全一致,仅对其中一个产品进行网格划分,后续通过镜像方式得到另一个产品。网格划分后模型如图2所示,网格数量为162 440个,无自由边、多重边、重叠网格等缺陷,最大纵横比为18.29,网格匹配率为94.2%,各项数据均满足模流分析条件。



图2 网格划分后模型

Fig. 2 Results of mesh divisions

1.4 浇注系统设计

合理的浇注系统设计可以提高产品的成型质量,降低研发成本并缩短生产周期,根据模具一模两腔的设计方案,采用3点阀式热流道转U形冷流道的组合设计,同时考虑到产品的外观要求,为避免浇口印记外露,采用隧道浇口进胶,图3为本次分析的浇注系统设计方案。阀式热流道外径为18 mm,内径为6 mm,热流道浇口尺寸为 $\varnothing 5$ mm,U形冷流道尺寸为10 mm×8 mm,隧道浇口尺寸为15 mm×1.2 mm。分析时采用顺序接力开启方式,G1浇口先开,待熔融塑料流过G2/G3浇口约100 mm后同时开启G2/G3浇口,确保产品面不会出现熔接线与温差线。

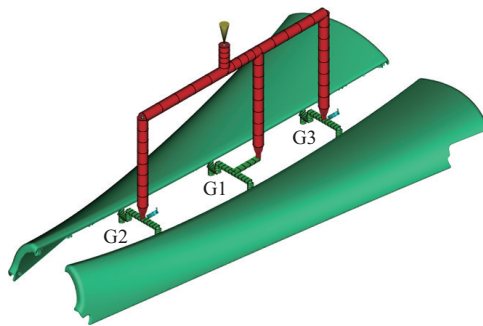


图3 浇注系统设计

Fig. 3 Pouring system design

1.5 默认工艺参数分析

在Moldflow中选择“充填+保压+翘曲”分析序列,对产品进行默认工艺参数分析,其中模具温度45℃,熔体温度225℃,注射时间2 s,保压压力35 MPa,保压时间8 s,默认工艺参数分析结果如图4所示。由图4a可知,产品在2.798 s时充填完成,无短射或迟滞现象出现;图4b显示为熔接线结果,由图可知产品表面外观质量良好,无熔接线出现;图4c反映产品在脱模方向,上翘最大值为2.639 mm,下榻为

1.735 mm;图4d为产品缩痕估算结果,最大值为0.224 0 mm。其中脱模方向较大的上翘变形会直接影响产品的装配精度与外观质感,严重时还会损害结构力学性能与长期使用可靠性,埋下安全隐患,因此将脱模方向上翘变形作为优化目标之一;同时汽车后门上本体护板属于可视件,明显的缩痕会大幅降低内饰精致度,且其加强筋与边角连接处为主要受力区域,缩痕易引发应力集中,进而导致裂纹、崩边等结构失效,故将缩痕估算作为另一优化目标^[1]。

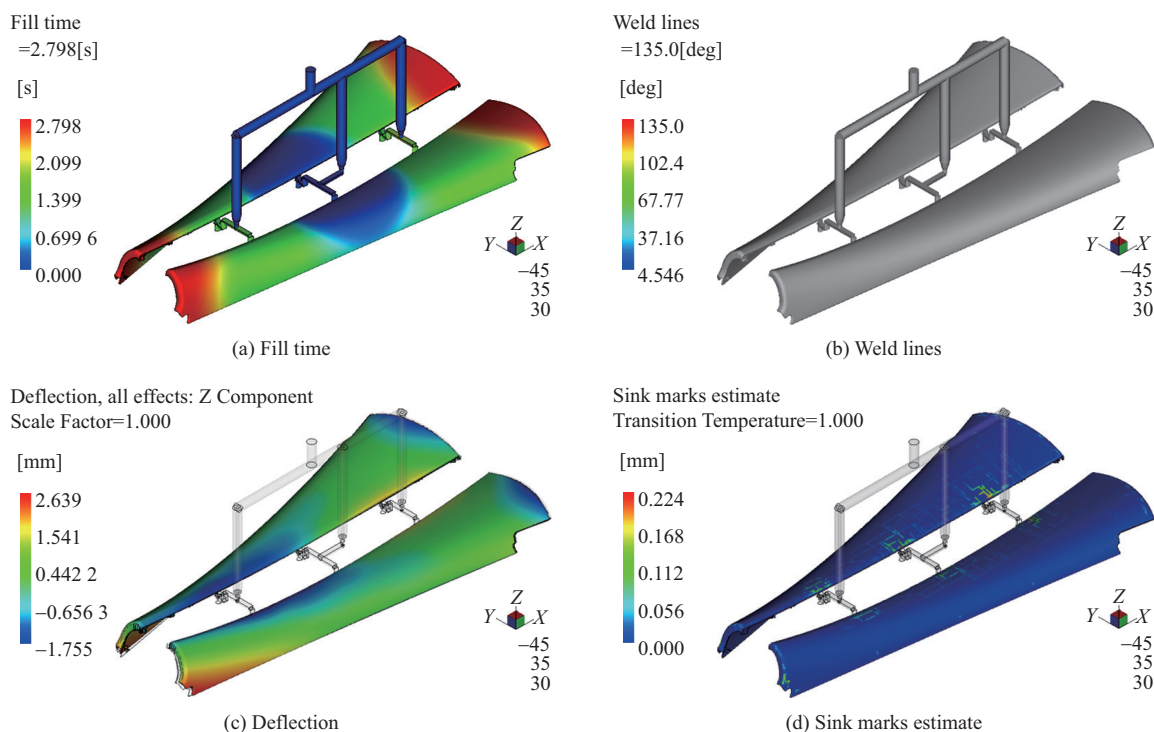


图4 默认工艺分析结果

Fig. 4 Default process analysis results

2 正交实验设计及结果分析

2.1 正交实验的因素与水平

较低的脱模方向上翘和较低的缩痕估算是本次分析的优化目标:为满足装配需求,脱模方向上翘需控制在2 mm以内;在有包覆层的情况下,为满足外观需求,缩痕估算需控制在0.15 mm以内。针对这两项,需将成型工艺参数进行优化。根据默认分析结果选择以下工艺参数为变量:模具温度(A)、熔体温度(B)、注射时间(C)、保压压力(D)、保压时间(E),根据所用的材料基本信息,在材料参数范围内选择4个水平进行正交实验设计,因素水平表如表2所示。

2.2 正交实验结果分析

根据表2内容可知,选用 $L_{16}(4^5)$ 正交实验表,基于Moldflow模流分析软件对成型过程进行16次模

表2 正交试验因素水平表

Tab. 2 Orthogonal test factor level table

Level	Factors				
	A/°C	B/°C	C/s	D/MPa	E/s
1	40	220	2	35	6
2	45	225	2.5	40	8
3	50	230	3	45	10
4	55	235	3.5	50	12

Notes: A is mould temperature; B is melt temperature; C is injection time; D is holding pressure; E is holding time.

拟分析,得到每次模拟分析后的脱模方向上翘与缩痕估算结果如表3所示。

为了直观得到各因素取不同水平时对脱模方向上翘和缩痕估算的影响程度,对表3进行极差分析。极差(R)是指各因素在不同水平下模拟结果均值的最大值与最小值之差,极差值的大小与工艺参

表 3 正交实验结果

Tab. 3 Orthogonal test results

No.	Experimental factors					Experimental results	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	Deflection in the <i>Z</i> direction/mm	Sink marks estimate/mm
1	1	1	1	1	1	2.551	0.253 2
2	1	2	2	2	2	2.538	0.211 9
3	1	3	3	3	3	2.244	0.123 4
4	1	4	4	4	4	2.304	0.110 7
5	2	1	2	3	4	2.124	0.125 7
6	2	2	1	4	3	2.142	0.112 0
7	2	3	4	1	2	2.852	0.236 7
8	2	4	3	2	1	2.336	0.266 4
9	3	1	3	4	2	2.425	0.203 8
10	3	2	4	3	1	2.841	0.254 1
11	3	3	1	2	4	2.046	0.173 8
12	3	4	2	1	3	2.350	0.192 5
13	4	1	4	2	3	2.357	0.124 8
14	4	2	3	1	4	2.208	0.145 7
15	4	3	2	4	1	2.576	0.211 9
16	4	4	1	3	2	2.467	0.271 7

数对指标的影响显著性呈正相关,即极差值越大,工艺参数对指标的影响越显著^[12]。

对脱模方向上翘进行极差分析,结果见表 4。由表 4 可知,5 个因素中保压时间对脱模方向翘曲影响程度最大,影响程度由大到小的排序为:保压时间、注射时间、保压压力、熔体温度、模具温度。最佳成型工艺参数组合为 $A_2B_1C_1D_2E_4$ 或 $A_2B_4C_1D_2E_4$,即模具温度 45 °C,熔体温度 220 °C,注射时间 2 s,保压压力 40 MPa,保压时间 12 s;或模具温度 45 °C,熔体温度 235 °C,注射时间 2 s,保压压力 40 MPa,保压时间 12 s。

表 4 脱模方向上翘极差分析

Tab. 4 Ejection direction extreme variance analysis

Factors	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>K</i> 1	9.637	9.457	9.205	9.961	10.304
<i>K</i> 2	9.454	9.729	9.588	9.276	10.282
<i>K</i> 3	9.661	9.717	9.213	9.676	9.093
<i>K</i> 4	9.608	9.457	10.354	9.447	8.681
<i>k</i> 1	2.409	2.364	2.301	2.490	2.576
<i>k</i> 2	2.364	2.432	2.397	2.319	2.571
<i>k</i> 3	2.416	2.429	2.303	2.419	2.273
<i>k</i> 4	2.402	2.364	2.589	2.362	2.170
<i>R</i>	0.052	0.068	0.288	0.171	0.406

Notes: *K**n* is sum of responses at level *n*; *k**n* is mean response at level *n*; *R* is range.

对缩痕估算进行极差分析,结果见表 5。由表 5 可知,5 个因素中保压时间对缩痕估算影响程度最大,影响程度由大到小的排序为:保压时间、保压压力、熔体温度、模具温度、注射时间。最佳成型工艺参数组合为最佳工艺参数为 $A_1B_1C_4D_4E_3$,即模具温

表 5 缩痕估算极差分析

Tab. 5 Sink marks extreme variance analysis

Factor	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>K</i> 1	0.699 2	0.707 5	0.810 7	0.828 1	0.985 6
<i>K</i> 2	0.740 8	0.723 7	0.742 0	0.776 9	0.924 1
<i>K</i> 3	0.824 2	0.745 8	0.739 3	0.774 9	0.552 7
<i>K</i> 4	0.754 1	0.841 3	0.726 3	0.638 4	0.555 9
<i>k</i> 1	0.174 8	0.176 9	0.202 7	0.207 0	0.246 4
<i>k</i> 2	0.185 2	0.180 9	0.185 5	0.194 2	0.231 0
<i>k</i> 3	0.206 1	0.186 5	0.184 8	0.193 7	0.138 2
<i>k</i> 4	0.188 5	0.210 3	0.181 6	0.159 6	0.139 0
<i>R</i>	0.031 3	0.033 4	0.021 1	0.047 4	0.108 2

度 40 °C,熔体温度 220 °C,注射时间 3.5 s,保压压力 50 MPa,保压时间 12 s。

由以上分析结果可知,脱模方向上翘和缩痕估算的最佳工艺参数组合并不相同,且改变任何一个参数可能会导致结果朝着不同趋势方向变化,而实际生产时产品的优劣情况需根据二者综合评估,所以需通过赋权方法将多响应转化为单响应,进一步进行分析。

3 CRITIC 权重法

CRITIC 权重法是一种客观赋权法,核心基于评价指标的变异性(区分能力)和冲突性(独立程度)两个维度,对多指标评价体系中的各指标进行定量赋权,权重结果完全由指标的实际数据特征决定,避免了主观赋权法中人为主观判断的偏差,是多指标综合评价、工艺优化、数据分析中常用的客观权重计算方法^[13]。

CRITIC 权重法的第一步是进行无量纲化处理。

本次需要优化的是脱模方向上翘与缩痕估算,虽然二者的量纲和单位均为mm,但脱模方向上翘的取值范围为2.045~2.852 mm,缩痕估算的取值范围为0.110 7~0.271 7 mm,二者的取值范围相差过大,这会导致脱模方向上翘的标准差远大于缩痕估算,所以仍需要进行无量纲化处理^[14]。由于脱模方向上翘与缩痕估算均是越小越好,所以选择望小特性对应的无量纲公式,计算公式见式(1)。

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (1)$$

式中: x'_{ij} 表示第*i*次试验*j*指标所对应的无量纲化处理后的试验值; x_{ij} 表示第*i*次试验*j*指标所对应的试验值; $\max(x_j)$ 表示第*j*项指标的最大值; $\min(x_j)$ 表示第*j*项指标的最小值; $j=1,2;i=1,2,\dots,16$ 。

在CRITIC权重法中,通常采用标准差衡量各项指标内部数据取值的离散与波动程度,标准差数值越大,说明该指标下样本数值差异越明显、区分度更高,所能承载的有效评价信息量更充足,指标自身评价强度更强,因此在权重分配环节,应当依据标准差大小,对波动特征显著、分辨能力突出的指标赋予更高权重占比^[15]。标准差计算公式见式(2)。

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_{ij} - \bar{x}'_j)^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: S_j 表示第*j*个指标的标准差, x'_{ij} 表示平均值, $\bar{x}'_j$ 表示第*j*项指标, n 取16。

信息量是决定单项指标客观权重大小的核心依据^[16],计算公式见式(3)。

$$C_j = S_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (3)$$

式中: C_j 表示第*j*个指标的信息量; r_{ij} 表示评价指标*i*和*j*之间的相关系数。

权重用以界定各评价指标在综合评价体系中的相对贡献度^[17],计算公式见(4)。

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^n C_j} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ω_j 表示第*j*个指标的权重。

Critic综合评分值计算公式如式(5)所示。

$$I = \sum_{i=1}^2 x_{ij} \omega_j \quad (5)$$

式中: I 表示综合评分。

将表2试验数据依次代入公式(1)至公式(5)中,求得各指标:无量纲化、标准差、信息量、权重以及综合评分,其中标准差与权重计算结果分别为:脱模方向上翘 $S_j=0.290\ 475$, $\omega_j=44.43\%$; 缩痕估算 $S_j=0.363\ 379$, $\omega_j=55.57\%$ 。各组试验对应的无量纲化值与综合评分结果如表6所示。

表6 各参数计算结果

Tab. 6 Calculated data for each parameter

No.	x'_{ij}		Comprehensive score
	Delfection in the Z direction	Sink marks estimate	
1	0.372 986	0.114 907	1.274 0
2	0.389 095	0.371 429	1.245 3
3	0.753 408	0.921 118	1.065 5
4	0.679 058	1	1.085 1
5	0.902 107	0.906 832	1.013 4
6	0.879 802	0.991 925	1.013 8
7	0	0.217 391	1.398 5
8	0.639 405	0.032 919	1.185 8
9	0.529 120	0.421 739	1.190 6
10	0.013 631	0.109 317	1.403 3
11	1	0.608 075	1.005 1
12	0.622 057	0.491 925	1.151 0
13	0.613 383	0.912 422	1.116 5
14	0.798 017	0.782 609	1.061 9
15	0.342 007	0.371 429	1.262 2
16	0.477 076	0	1.247 0

Notes: x'_{ij} is normalized dimensionless experimental value.

对综合评分开展极差分析,结果如表7所示,极差值与因素影响程度正相关,极差值越大,代表该工艺因素对脱模方向上翘、缩痕估算构成的综合评分影响权重越大。

表7 综合评分极差分析

Tab. 7 Comprehensive score extreme variance analysis

Items		Factor				
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
NO.	1	1.167 5	1.148 6	1.135 0	1.221 3	1.281 3
	2	1.152 9	1.181 1	1.168 0	1.138 2	1.270 3
	3	1.187 5	1.182 8	1.125 9	1.182 3	1.086 7
	4	1.171 9	1.167 2	1.250 9	1.137 9	1.041 4
<i>R</i>		0.034 6	0.034 2	0.125 0	0.083 4	0.239 9

通过表7数据可得,各因素对综合评分影响程度由大到小的排序为保压时间,注射时间,保压压力,熔体温度,模具温度,并通过极差分析表得到的最佳成型工艺参数为 $A_2B_1C_3D_4E_4$,即模具温度 45 °C,熔体温度 220 °C,注射时间 3 s,保压压力 50 MPa,保压时间 12 s。

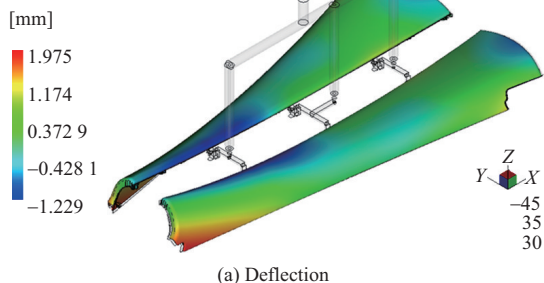
4 结果对比

将分析所得的最佳成型工艺参数:模具温度 45 °C,熔体温度 220 °C,注射时间 3 s,保压压力 50 MPa,保压时间 12 s,在Moldflow中进行仿真分析,模拟结果见图5。综合评分工艺参数与初始工艺参数数据对比见表8。

表8 工艺参数结果对比

Tab. 8 Comparison of process parameter results		
Items	Initial parameter	Optimal parameter
$A/^{\circ}\text{C}$	45	45
$B/^{\circ}\text{C}$	225	220
C/s	2	3
D/MPa	35	50
E/s	8	12
Deflection in the Z direction/mm	2.639	1.975
Sink marks estimate /mm	0.224 0	0.112 7

Deflection, all effects: Z Component
Scale Factor=1.000



Sink marks estimate
Transition Temperature=1.000

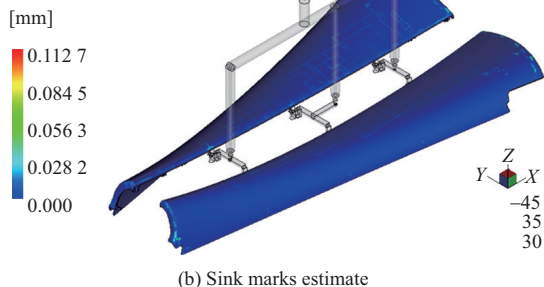


图5 最佳成型工艺分析结果

Fig. 5 Analysis of the optimal moulding process

经分析,优化后的最佳成型方案脱模方向上翘为 1.975 mm,缩痕估算为 0.112 7 mm,相比原始工艺优化程度分别为 25.2% 和 49.7%,大幅度提高了汽车后门上护板本体产品质量,并满足脱模方向上翘需控制在 2 mm 以内和缩痕估算需控制在 0.15 mm 以内的要求。后续将优化分析所得工艺参数应用实际生产,得到的产品图片如图6所示,通过对实物的观察可以得出该产品外观质量良

好,脱模方向翘曲和缩痕估算均满足要求。验证了正交试验与 CRITIC 权重法相结合对产品质量进行优化的可行性,满足装配需求的同时大大提高生产效率。

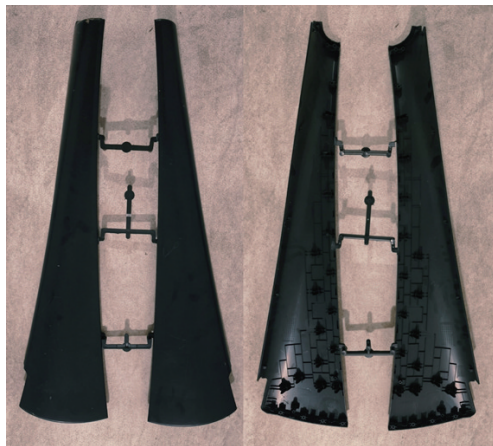


图6 试模样品

Fig. 6 Trial model

5 结论

(1)为提升汽车后门上护板本体的注塑成型质量,本文以脱模方向上翘与缩痕估算为优化目标,使用Moldflow软件完成流道设计与初始模流分析,并设计 $L_{16}(4^5)$ 正交实验开展极差分析,分别得到了针对两个缺陷指标的单目标最优成型工艺方案。

(2)由于两个缺陷指标对应的单目标最优工艺参数组合存在差异,本文引入 CRITIC 权重法将多目标优化问题转化为单目标综合评分优化问题。通过对综合评分进行极差分析,明确各工艺参数对综合成型质量的影响程度由大到小的排序为:保压时间、注射时间、保压压力、熔体温度、模具温度,并得出最优成型工艺方案为 $A_2B_1C_3D_4E_4$,即模具温度 45 °C,熔体温度 220 °C,注射时间 3 s,保压压力 50 MPa,保压时间 12 s。

(3)对最优工艺参数组合进行模流验证分析,结果显示:优化后脱模方向上翘变形量降至 1.975 mm,缩痕估算值降至 0.1127 mm,与初始工艺相比分别降低 25.2% 和 49.7%。将该最优工艺方案应用于实际生产,所得塑件成型质量良好,满足装车要求。

参考文献

- [1] 肖振辉. 汽车保险杠中支座塑件联合仿真及成型多目标优化[D]. 南昌:南昌大学,2022.
XIAO Zhenhui. Co-simulation and molding Multi-objective optimization of plastic parts of automobile bumper[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

- [2] 张晓光,孟泉,程志超.基于Moldflow的无人机探照灯灯筒模流分析[J].合成树脂及塑料,2025,42(6):59-63.
ZHANG Xiaoguang, MENG Xiao, CHENG Zhichao. Mold flow analysis for UAV searchlight based on Moldflow[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2025, 42(6):59-63.
- [3] 张浩添,刘文杰,朱煜,等.基于灰色关联度与熵权法的车机垫板注塑成型工艺参数优化[J].塑料工业,2025,53(11):79-85,143.
ZHANG Haotian, LIU Wenjie, ZHU Yu, et al. Optimizations of injection molding process parameters for car console pads based on the grey relational degree and entropy weight method[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(11):79-85, 143.
- [4] 熊继芬,许明疆,吴定勇.基于Moldflow仿真及实验的重型卡车保险杠翘曲变形优化[J].塑料工业,2025,53(11):72-78.
XIONG Jifen, XU Mingjiang, WU Dingyong. Warpage deformation optimizations for heavy truck bumpers based on moldflow simulation and experiments[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(11):72-78.
- [5] 张晗,王明伟,蔡世铭,等.基于贝叶斯正则化神经网络的卡车轮罩横梁注塑工艺多目标优化[J].工程塑料应用,2025,53(10):95-103.
ZHANG Han, WANG Mingwei, CAI Shiming, et al. Multi-objective optimization of injection molding processes for truck wheel cover cross beams based on Bayesian regularized neural networks[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10):95-103.
- [6] 孙庆东,杜晋,池根才,等.汽车地毯压条检修盖成型仿真与工艺参数优化[J].工程塑料应用,2025,53(7):83-89.
SUN Qingdong, DU Jin, CHI Gencai, et al. Simulation and process parameter optimization of automotive carpet strip inspection cover forming[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7):83-89.
- [7] TAN M B, PENG S Z, HUO Y F, et al. Multi-objective optimization of injection molding parameters for manufacturing thin-walled composite connector terminals[J]. Materials, 2024, 17(16). DOI: 10.3390/ma17163949.
- [8] MOAYYEDIAN M, QAZANI M R C, AMIRKHZI P J, et al. Multiple objectives optimization of injection-moulding process for dashboard using soft computing and particle swarm optimization[J]. Scientific Reports, 2024, 14. DOI:10.1038/s41598-024-62618-7.
- [9] 邵灵芝,李术,符茂华,等.聚丙烯在汽车内外饰方面的研究进展[J].汽车实用技术,2022,47(10):184-187.
SHAO Lingzhi, LI Shu, FU Maohua, et al. Research progress of polypropylene in automobile interior and exterior decoration[J]. Automobile Technology, 2022, 47(10):184-187.
- [10] 王丹,陈哲.新能源汽车防火隔热植物纤维内饰增强PP复合材料制备及性能研究[J].造纸科学与技术,2025,44(10):61-64.
WANG Dan, CHEN Zhe. Preparation and performance research of fireproof and heat-insulating plant fiber interior reinforced PP composite materials for new energy vehicles[J]. Paper Science & Technology, 2025, 44(10):61-64.
- [11] WANG Z J, FAN X Y, GUO Y H, et al. Control of quality defects of the glass fiber injection molded product based on LSO-RF and NSWOA[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(10):5 639-5 647.
- [12] 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.
- [13] 张文超,吴迪,王明伟,等.基于Critic权重法多目标优化汽车B柱上饰板注塑成型工艺[J].工程塑料应用,2024,52(4):83-88.
ZHANG Wenchao, WU Di, WANG Mingwei, et al. Multi-objective optimization of automotive B-pillar upper trim plate injection molding process based on Critic weight method[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4):83-88.
- [14] 程方启.基于TOPSIS-灰色关联的壳体盖注塑制品成型浇口位置与工艺参数优化分析[J].模具技术,2022(6):1-7.
CHENG Fangqi. Optimization of process parameters and gate position in injection molding for housing cover based on TOPSIS-gray correlation method[J]. Die and Mould Technology, 2022(6):1-7.
- [15] 王韬,王博伦,许雪婷,等.基于回归分析的飞机航行灯罩注塑工艺参数多目标优化[J].工程塑料应用,2025,53(7):100-107,114.
WANG Tao, WANG Bolun, XU Xueting, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for aircraft navigation lampshade using regression analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7):100-107, 114.
- [16] 刘长城,刘泓滨.基于Critic权重法的车灯灯框注塑成型工艺参数的多目标优化实验[J].塑料科技,2023,51(1):101-104.
LIU Changcheng, LIU Hongbin. Multi-objective optimization experiment of injection molding process parameters of car light frame based on critic weight method[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(1):101-104.
- [17] 汪健,叶星,李兵兵,等.基于综合加权评分的后防擦条内板注塑参数多目标优化[J].塑料,2024,53(1):172-177.
WANG Jian, YE Xing, LI Bingbing, et al. Multi-objective optimization of injection molding parameters of rear strip inner plate based on comprehensive weighted score[J]. Plastics, 2024, 53(1):172-177.