

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.018

基于 Critic 权重法和阀浇口开启时序的车门内饰板 注塑优化分析

吴俊超

(江西职业技术大学,江西九江 332007)

摘要: 针对大型塑件车门内饰板注塑过程中出现的体积收缩率与翘曲变形超过标准要求问题,选取模具温度(A)、熔体温度(B)、注射压力(C)、保压压力(D)、保压时间(E) 5 个对成型质量影响较大的工艺参数作为因素,通过建立 $L_{16}(4^5)$ 正交试验方案,结合 Moldflow 模流分析获取不同参数组合下的成型质量数据。采用 Critic 权重法对双质量指标进行客观权重分配,实现多目标向单目标的转化,继而通过信噪比分析确定各参数影响程度排序为 $C>D>E>B>A$ 。经优化得到最佳工艺参数组合为模具温度 60 °C、熔体温度 250 °C、注射压力 85 MPa、保压压力 80 MPa、保压时间 20 s。确定最优工艺参数组合后,运用 Moldflow 进一步优化阀浇口开启时序,使多股熔体在非外观关键区域交汇,显著改善了熔接线(痕)缺陷和气穴缺陷。仿真验证显示上述方案使最大翘曲变形量降低 40.7%,体积收缩率降低 53.6%,最长熔接线(痕)从 143.65 mm 缩短到 12.67 mm,同时成功消除了 60% 以上的气穴缺陷。实际生产应用后,产品合格率由原始方案的 64.3% 提升至 88.63%。上述研究结果表明,针对大型复杂塑件翘曲变形过大、熔接线(痕)过多过长等缺陷,采用 Moldflow 软件、正交试验、Critic 权重法、阀浇口时序控制技术可以显著提升注塑质量,有效减少试模次数、提高产品合格率。

关键词: 汽车车门内饰板;大型塑件;Critic 权重法;阀浇口;正交试验;工艺参数优化

中图分类号: TQ320.5+2, TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0141-09

Optimization analysis of injection molding of automobile door interior panel based on Critic weight method and valve gate opening time sequence

WU Junchao

(Jiangxi Polytechnic University, Jiujiang 332007, China)

Abstract : In order to solve the problem of volumetric shrinkage and warpage deformation exceeding the standard requirement during the injection molding process of large-scale plastic automobile door interior panels, five process parameters that have great impacts on the molding quality, namely mould temperature (A), melt temperature (B), injection pressure (C), holding pressure (D), and holding pressure time (E), were selected as factors. The $L_{16}(4^5)$ orthogonal test scheme was established and the molding quality data under different parameter combinations were obtained by combining the mold flow analysis with Moldflow. The Critic weight method was used to objectively assign the weights of the dual-quality indicators to realize the transformation from multiple objectives to single objectives, and then the signal-to-noise ratio analysis was used to determine the influence degree of each parameter as follows: $C>D>E>B>A$. The optimal parameter combination is mould temperature of 60 °C, melt temperature of 250 °C, injection pressure of 85 MPa, holding pressure of 80 MPa, and holding time of 20 s. After determining the optimal combination of process parameters, Moldflow was used to further optimize the opening time sequence of the valve gates, so that the multiple strands of melt met in non-appearance critical areas, which significantly improved the defects of the weld line (mark) and air traps. Simulation verification shows that the proposed scheme reduces the maximum warpage deformation by 40.7% and the volumetric shrinkage by

基金项目: 江西省教育厅科技课题(GJJ2204813)

通信作者: 吴俊超,工程硕士,副教授,研究方向为模具 CAE/CAD/CAM 多轴精密加工

收稿日期: 2025-07-20

引用格式: 吴俊超. 基于 Critic 权重法和阀浇口开启时序的车门内饰板注塑优化分析[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 141-149.

WU Junchao. Optimization analysis of injection molding of automobile door interior panel based on Critic weight method and valve gate opening time sequence[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 141-149.

53.6%, shortens the longest weld line (trace) from 143.65 mm to 12.67 mm, and successfully eliminates more than 60% of the air trap defects. After actual production and application, the product qualification rate increases from the 64.3% of original scheme to 88.63%. The above results show that the use of Moldflow software, orthogonal test, Critic weight method, and valve gate opening time sequence technology can significantly improve the quality of injection molding, effectively reduce the number of mould trials, and improve the product qualification rate.

Keywords : automobile door interior panel ; large-scale plastic parts ; Critic weight method ; valve gate ; orthogonal test ; process parameters optimization

随着新能源汽车产业的高速发展,如何提升续航里程、如何优化能耗成为行业的核心竞争要素,汽车轻量化技术在新能源汽车行业持续向纵深推进。在此背景下,高分子材料凭借其优异的比强度、良好的设计自由度以及显著的成本效益优势,在车门内饰板等大型内饰件制造中应用日益广泛。然而,大型塑件在注射成型过程中很容易出现体积收缩不均、熔接线(痕)明显、存在气穴及翘曲变形量过大等缺陷,不仅直接影响内饰件的外观品质与装配精度,更可能引发车辆异响、结构松动等安全隐患,难以满足新能源汽车对内饰静谧性与可靠性的严苛要求。

为突破这一技术瓶颈,学术界和产业界通常从材料改性、结构优化、模具创新及工艺参数调控等多个维度展开研究。其中,注塑工艺参数优化因具备成本低、周期短和见效快等优势,成为学术界和产业界快速提升塑件质量的首选方案。康嘉起等^[1]通过建立代理模型对注射成型质量进行预测,系统介绍了BP神经网络、响应面法与Kriging模型三类代理建模和使用方法,以及遗传算法与粒子群算法两种智能优化算法,并分析了各类模型与优化算法结合的优缺点。张文超等^[2]针对汽车B柱上饰板翘曲变形量过大的问题,采用5因素2响应的16组正交试验设计,结合Moldex3D模流分析与Critic权重法,确定了关键因素的影响顺序及最优工艺参数组合。Guo等^[3]以汽车车门内饰板为研究对象,构建了最优神经网络预测模型,以生产能耗、质量和翘曲变形量作为优化目标^[3],并采用NSGA-II算法与基于批判方法的模糊决策法确定了最优工艺参数。肖振辉^[4]针对多目标优化介绍了多种仿真方法。刘长城等^[5]以车灯灯框为研究对象,体积收缩率与翘曲变形量为优化目标,建立正交试验,利用Critic权重法进行客观赋权,得到了工艺参数的最佳取值。虽然采用各种优化方法能在一定程度上改善注塑制件的翘曲等问题,但目前许多研究仍存在以下问

题:塑件结构较为简单,所得结论的普适性与代表性有限;研究结果缺乏实际生产验证,可行性与有效性尚待进一步检验。另外,大型复杂塑件中的熔接线控制与优化问题,目前在学术界与产业界尚未得到充分研究。

笔者聚焦新能源汽车车门内饰板(结构复杂的大型塑件)典型构件,选用含质量分数20%滑石粉的聚丙烯(PP+T20)材质作为车门内饰板基材。重点解决实际生产中因翘曲变形过大和熔接线(痕)明显导致的产品合格率低下问题。采用Critic权重法将两个优化目标转化为综合质量指标,结合极差分析和方差分析,高效准确地找到最优工艺参数组合。在此基础上,运用Moldflow进一步优化阀浇口开启时序,调整充填速度与熔体流向,显著改善了熔接线(痕)分布并减少了气穴缺陷。最终CAE仿真与实际试模验证表明,采用Moldflow软件、正交试验、Critic权重法、阀浇口时序技术可以显著提升注射成型质量,有效减少试模次数、提高产品合格率。该研究方法为新能源汽车大型薄壁内饰件的高品质注塑提供了一条高效、低成本的工艺优化路径。

1 工艺分析与CAE分析前处理

1.1 塑件分析

图1是车门内饰板的基本尺寸和设计要求,塑件最大外形尺寸为855.5 mm×578 mm×106 mm,质量约为1.5 kg,平均壁厚为2.23 mm,壁厚均匀,结构设计合理。塑件材料为PP+T20,年产100 000件,要求外观不能有凹痕、明显的熔接线(痕)、银纹、颜色不均及太阳纹等表面缺陷。该车门内饰板结构复杂,分布有多个加强筋、卡扣、Boss柱和装配孔。为确保塑件安装精度、避免间隙和松动,需严格控制注塑过程中的翘曲变形和体积收缩率。某车企在实际生产该塑件前没有进行完整模流分析。模具采用三点热流道,每个热流道的末端都点浇在设计冷浇口上。试模期间仅靠工人的经验进行注塑工艺参数的调试,经过多次试模塑件的平均合格率

仅有64.3%。主要缺陷是翘曲变形量超出装配的允许值,次要缺陷是塑件有明显的熔接线(痕)、气穴、缩痕等外观缺陷。笔者旨在保持现有模具结构不变的基础上(模具已经加工完成,进行了试模,如果更改模具结构必定要增加成本),通过模流分析技术与试验数据优化相结合的方法,提升车门内饰板注塑制品的合格率^[6]。

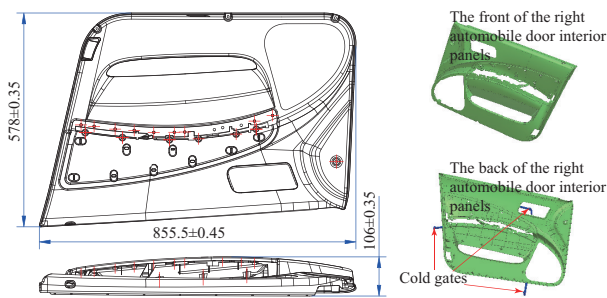


图1 车门内饰板分析

Fig. 1 Analysis of automobile door interior panel

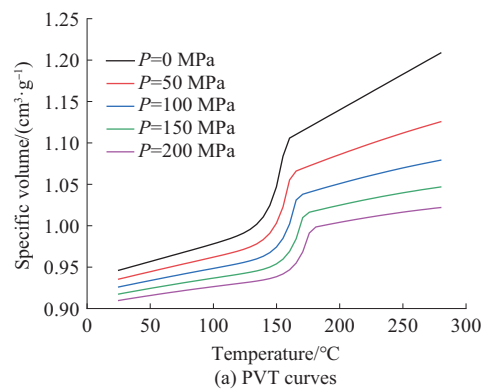
1.2 材料特性

注塑采用日本Ferro公司生产的PP+T20塑料原料,选用的牌号为TPP20AC17BK,该材料有良好的耐冲击性、刚性、耐热性和尺寸稳定性,易成型复杂形状制品。PP+T20的特性和推荐工艺见表1,值得一提的是该材料的“流变属性的转换温度”为135℃,该温度表明当浇口附近的温度达到135℃时,浇口就已经凝固,保压压力无法传递到塑件上,无须对塑件继续进行保压,这是判断保压结束时间的重要指标^[7-8]。图2a为材料的压力-体积-温度(PVT)曲线(图中 P 为压力),该曲线表示了材料在不同压力下体积与温度的对应关系,从图2a可以看出该材料在相同的温度下随着压力的增大体积会变小,即该材料具有可压缩性,对于具有这个特性的材料,如果采用过大的保压压力,当压力释放后塑

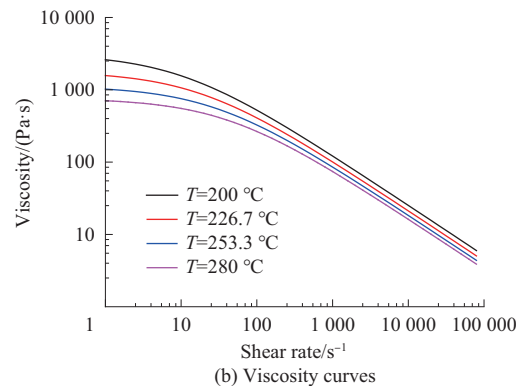
表1 PP+T20的材料特性和推荐工艺参数

Tab. 1 Material Characteristics and recommended process parameters of PP+T20

Parameters	Value range
Solid density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.056 8
Average nominal shrinkage/%	1.28
Recommended mould surface temperature/°C	50
Recommended melt temperature/°C	230
Mould temperature range (recommended)/°C	20~80
Melt temperature range (recommended)/°C	200~280
Absolute maximum melt temperature/°C	320
Transition temperature/°C	135
Ejection temperature/°C	93
Maximum shear stress/MPa	0.26
Maximum shear rate/ s^{-1}	24 000



(a) PVT curves



(b) Viscosity curves

图2 PP+T20材料特性曲线

Fig. 2 Material characteristic curves of PP+T20

件尺寸会变大^[9]。图2b为材料的黏度曲线(图中 T 为温度),该曲线表明PP+T20材料具有“剪切变稀”属性。

1.3 创建CAE分析模型

在NX软件中将车门内饰板3D模型和3个点浇口的3D模型合并并移除参数,用“优化面”和“修复几何体”等命令修复模型中存在的错误,然后将修复好的模型以“*.stp”格式导入Moldflow 2024,划分双层面网格,网格边长设定为3.2 mm。经过网格划分、网格局部细化、网格评价、网格诊断和网格修复,网格统计结果中自由边、多重边、配向不正确的单元、相交单元和重叠单元都为0,匹配百分比91.3%,网格数量27.974万,最大纵横比18.84。网格统计结果表明经过修复后的网格适合双层面模流分析。

在NX软件中提取热流道的流道中心线,冷却水路的中心线,提取后修剪多余的中心线,以“*.igs”格式“添加”到上一步做好的分析模型中。设定流道中心线、水路中心线的属性和尺寸。然后根据直径,设定网格划分的默认边长,根据Moldflow对柱体单元长径比的要求,划分柱体单元时,柱体单元的长度一般取直径的两倍左右。水路和流道的网

格划分完成后,利用“网格诊断”中的“柱体单元长径比”“有角度的柱体”“冷却回路”等检查柱体单元是否符合分析要求,如有错误需要修复错误后才能进行分析,需要说明的是 Moldflow 允许存在少许“有角度的柱体”,该错误数量不多的情况下是可以进行分析的,分析结果也不会有较大偏差。最后选中热流道最末尾的单元设定为“阀浇口”,设定入水口和出水口,选中热流道入口的第一单元设定为注射位置。最终的CAE分析模型如图3所示。

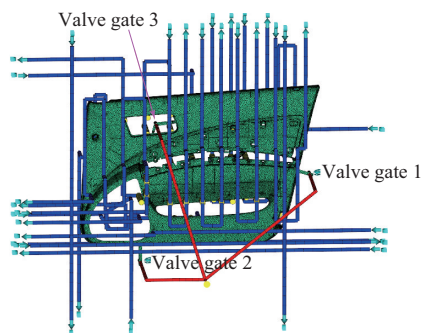


图3 CAE分析模型
Fig. 3 CAE analysis model

1.4 验证原始方案参数的合理性

将选用的原始注塑工艺参数设定在 Moldflow 中进行CAE分析,所得结果如图4所示。模流分析结果和实际生产情况基本一致。主要成型缺陷表现为翘曲变形量过大(如图4a所示,最大值达到10.22 mm),远远超出了验收标准 ISO 20457:2018 中TG3级要求;如图4b和图4c所示,翘曲变形量过大的主要原因在于收缩不均,而冷却不均和取向效应对翘曲变形的影响微乎其微,另外体积收缩率达到10.82%;次要缺陷是塑件有4条过长的、明显的熔接线(痕),最长的熔接线(痕)长达143.65 mm(如图4d所示),这不仅影响塑件的外观,还会影响车门内饰板的使用性能和力学性能;如图4e所示,车门内饰板塑件还存在较多的、分布不均的气穴,大部分气穴没有分布在大分型面边缘,也没有在滑块附件、顶针附近和镶件附近,无法通过大分型面、滑块、顶针、镶件等结构进行排气,还有一些气穴附近无法开设排气槽。

2 翘曲变形和体积收缩率的改善

2.1 正交试验的因素与水平

为解决翘曲变形量过大的问题,首先需对其成因进行分析。研究表明,翘曲变形的成因可归纳为4个主要方面:冷却不均、收缩不均、取向效应及角

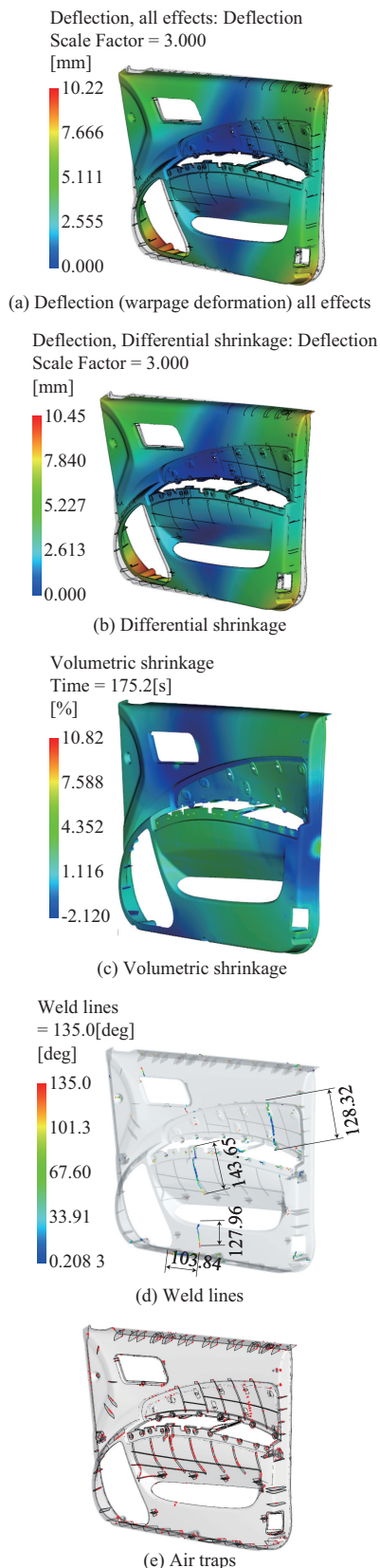


图4 原始注塑方案的模流分析结果
Fig. 4 Mold flow analysis results of the original injection molding scheme

落效应^[5]。结合图4a与图4b的分析结果可判定,车门内饰板产生翘曲变形的主要原因是收缩不均。考虑到车门内饰板有较高的装配要求和力学性能要求,选取总的翘曲变形量(Y_1)和体积收缩率(Y_2)和作为响应(优化目标)。根据生产经验,选取模具温度(A)、熔体温度(B)、注射压力(C)、保压压力(D)及保压时间(E)5个重要的工艺参数^[4]作为因素(影响优化

目标的要素)。根据Moldflow推荐工艺参数(见表1,主要确定如何选择模具温度、熔体温度的4个水平)、Moldflow成型窗口分析结果(主要确定如何选择注射压力的4个水平)和工厂生产经验(主要确定如何选择保压压力和保压时间的4个水平)为每个因素选取4个水平,每个因素在选择水平时尽量考虑可行区域分布均匀。表2为正交试验因素水平表。

表2 因素水平表

Tab. 2 Control factors and standard settings of levels

Levels	Factors				
	Mould temperature(A)/°C	Melt temperature (B)/°C	Injection pressure (C)/MPa	Holding pressure (D)/MPa	Holding time(E)/s
1	30	210	70	60	15
2	45	230	85	80	20
3	60	250	100	100	25
4	75	270	115	120	30

使用Minitab软件设计出五因素四水平的正交表 $[L_{16}(4^5)]$,使用Moldflow软件进行注射成型模拟田口试验,表3为模拟试验得出的指标结果。

表3 田口试验结果

Tab. 3 Experimental results of Taguchi test

No.	A /°C	B /°C	C /MPa	D /MPa	E /s	Y_1 /mm	Y_2 /%
1	30	210	70	60	15	12.34	10.82
2	30	230	85	80	20	7.47	5.51
3	30	250	100	100	25	6.08	5.24
4	30	270	115	120	30	10.22	10.55
5	45	210	85	100	30	8.55	8.26
6	45	230	70	120	25	9.87	10.32
7	45	250	115	60	20	9.61	9.27
8	45	270	100	80	15	8.85	7.52
9	60	210	100	120	20	8.73	7.18
10	60	230	115	100	15	9.32	9.64
11	60	250	70	80	30	7.93	6.19
12	60	270	85	60	25	7.77	6.24
13	75	210	115	80	25	9.43	9.84
14	75	230	100	60	30	9.52	10.28
15	75	250	85	120	15	9.22	9.35
16	75	270	70	100	20	8.93	7.28

2.2 Critic权重法处理响应数据

本试验具有翘曲变形量(Y_1)和体积收缩率(Y_2)两个优化目标(响应),因为选取的因素有交互作用,对结果的影响错综复杂,改变任何一个因素的水平都可能导致两个响应朝着不同的趋势发生不定量的变化,因此无法通过改变工艺参数同时让两个响应趋向好的方向发展,需要采用赋权方法将两个响应转化为一个评价因素。比较熵权法、Critic权重法、变异系数法等多个赋权方法,考虑到计算简单、试验次数少和本试验的实际情况,选择Critic权重法。

两个优化目标翘曲变形量(Y_1)和体积收缩率(Y_2)

具有不同的量纲和单位,要使用Critic权重法,首先需要根据优化目标的特点(本试验是望小,也就是优化目标的值越小越好)选用公式(1)进行无量纲化处理。

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (1)$$

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(范围[0, 1]); X_{ij} 表示第*i*次试验*j*指标所对应的试验值; $\max(X_j)$ 、 $\min(X_j)$ 分别表示第*j*项指标的最大值和最小值; $j=1, 2$ 。

由公式(1)可计算得到 Y_1 和 Y_2 的无量纲化处理后的值 Y'_1 和 Y'_2 ,结果见表4。

为反映一个数据集的离散程度,需采用标准差来表示各指标内取值的差异波动情况。较大的标准差表明指标更具区分度,因此在权重分配时,应依据标准差大小相应提高波动性显著指标的权重占比^[10]。标准差计算公式见公式(2)。利用公式(2)计算后 Y_1 对应的标准差为0.219 051 468; Y_2 对应的标准差为0.341 107 252。

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

式中: σ_j 表示第*j*个指标的标准差; $\bar{x}'_j$ 为第*j*项指标 x'_{ij} 的平均值; m 为样本的数量。

可以用公式(3)计算冲突化指标 r_{12} ,其大小反映指标间(任意两个指标1和2之间的)相关性:相关性越强(冲突化指标越小),指标权重越低。这是因为强相关指标包含更多重复信息,需要降低其权重以避免信息重叠^[10]。冲突化指标也可以使用excel中

表4 规范化处理指标的分析结果

Tab. 4 Analysis results of standardized processing indicators

No.	Y_1/mm	$Y_2/\%$	Y_1'	Y_2'	z_j
1	12.34	10.82	0	0	11.414 4
2	7.47	5.51	0.778 0	0.951 6	6.276 5
3	6.08	5.24	1	1	5.568 5
4	10.22	10.55	0.338 7	0.048 4	10.421 0
5	8.55	8.26	0.605 4	0.458 8	8.373 4
6	9.87	10.32	0.394 6	0.089 6	10.144 0
7	9.61	9.27	0.436 1	0.277 8	9.403 0
8	8.85	7.52	0.557 5	0.591 4	8.040 1
9	8.73	7.18	0.576 7	0.652 3	7.786 1
10	9.32	9.64	0.482 4	0.211 5	9.514 9
11	7.93	6.19	0.704 5	0.829 7	6.870 4
12	7.77	6.24	0.730 0	0.820 8	6.838 3
13	9.43	9.84	0.464 9	0.175 6	9.679 7
14	9.52	10.28	0.450 5	0.096 8	9.982 8
15	9.22	9.35	0.498 4	0.263 4	9.299 2
16	8.93	7.28	0.544 7	0.634 4	7.925 2

Notes: Y_1' , Y_2' are Y_1 and Y_2 values after dimensionless processing using equation (1) respectively; z_j is comprehensive evaluation factors after transformation.

的 Pearson 函数计算得出。本试验冲突化指标的计算结果为 0.877 987 042。

$$r_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{i1}' - \bar{x}_1')(x_{i2}' - \bar{x}_2')}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{i1}' - \bar{x}_1')^2 \sum_{i=1}^m (x_{i2}' - \bar{x}_2')^2}} \quad (3)$$

式中: r_{12} 为指标 1 与指标 2 的冲突化指标; $\bar{x}_1'$ 与 $\bar{x}_2'$ 分别为指标 1 与指标 2 无量纲化处理后的试验值的平均值。 x_{i1}' 和 x_{i2}' 分别表示第 i 次试验指标 1 和指标 2 所对应的无量纲化处理后的试验值。

结合对比标准差和冲突化指标,利用公式(4)计算每个指标的信息量 w_j ,最终分配的权重的多少与 w_j 相关,若 w_j 越大,表明第 j 个评价指标的作用越大,权重分配也应相应提高^[10]。本试验计算后 Y_1 对应的信息量为 0.026 727 118; Y_2 对应的信息量为 0.041 619 505。

$$w_j = \sigma_j \times \sum_{i=1}^m (1 - r_{12}) \quad (4)$$

第 j 个评价指标的权重用 w_j' 来表示,计算公式见公式(5)。本试验计算后 Y_1 对应的权重为 0.391 052 501; Y_2 对应的权重为 0.608 947 499。

$$w_j' = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (5)$$

式中: n 为优化目标的个数,本例 n 为 2。

最后,计算转化后的综合评价因素,转化后的综合评价因素 z_j 是原始数据 x_{ij} 与权重 w_j' 的乘积,见

公式(6)。计算结果见表 4 最后一列。

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_j' \times x_{ij} \quad (6)$$

2.3 数据分析筛选最优参数组合

Minitab 是一款高效的统计分析软件,主要用于数据分析、质量改进和统计教学。它由 Minitab LLC 公司开发,广泛应用于六西格玛、质量管理、学术研究、工业工程等领域。打开 Minitab,利用“统计”菜单下的“DOE”→“田口”→“创建田口设计”功能创建如表 2 所示的五因素四水平的田口试验,田口试验创建成功后将表 4 中最后一列“转化后的综合评价因素 z_j ”的数据,复制到软件下方的 C6 列中。并用该菜单里的“自定义田口设计”功能设置 C1 列至 C5 列为“因素”;“分析田口设计”功能设置 C6 列为“响应”,“选项”→“信噪比”里选择“望小”(即优化目标的数值越小,产品质量越好),在“存储”中勾选“信噪比”分析就可以看到信噪比响应表。表 5 是 Minitab 计算的信噪比响应表。

表5 Minitab 计算的信噪比响应表

Tab. 5 Response table of signal-to-noise ratio calculated by Minitab

Level	A	B	C	D	E
1	-18.09	-19.29	-19.00	-19.32	-19.55
2	-19.04	-18.91	-17.62	-17.63	-17.81
3	-17.71	-17.62	-17.71	-17.73	-17.86
4	-19.26	-18.29	-19.78	-19.42	-18.89
Range	1.55	1.67	2.16	1.79	1.74
Rank	5	4	1	2	3

表 5 表明,因素对综合指标 z_j 的影响各不相同。影响程度从大到小依次为注射压力>保压压力>保压时间>熔体温度>模具温度^[11]。由于本试验是望小,根据表 5 可以得出综合指标 z_j 最优的参数组合是 $A_3B_3C_2D_2E_2$ (无论是望大、望小还是望目,选择因素取值时都选信噪比大对应的水平),即模具温度 60 °C、熔体温度 250 °C、注射压力 85 MPa、保压压力 80 MPa、保压时间 20 s。

2.4 模拟验证

根据得到的最优工艺参数,通过 Moldflow 进行模拟分析,得到了最优工艺下总的翘曲变形量和体积收缩率,如图 5 所示。由图 5 看出,最优工艺参数下两个优化目标都有大幅度的降低,所有效应引起的最大翘曲变形量从原始工艺的 10.22 mm 降低到 6.057 mm,降低了 40.7%;体积收缩率从原始工艺的 10.82% 降低到 5.018%,降低了 53.6%。

3 熔接线(痕)、气穴等缺陷的改善

在充填过程中,当两股及以上塑料熔体交汇融

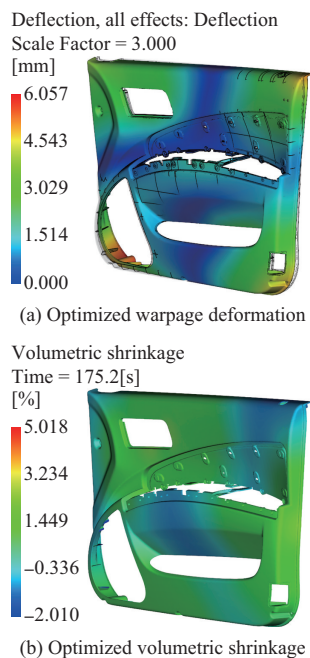


图5 优化后的翘曲变形量和体积收缩率CAE分析结果

Fig. 5 CAE analysis results of warpage deformation and volumetric shrinkage after optimization

合时,会形成熔接痕[两股或多股熔体以一定角度(通常 $>45^\circ$)相遇而形成]或熔接线[两股熔体以平行或近乎平行(角度很小,通常 $<45^\circ$)的方向相遇融合而形成]^[12-13]。熔接痕和熔接线往往伴随发生,共同出现于塑件同一区域。熔接线是注塑件常见的质量缺陷^[14],由多股熔体相遇且不完全融合所致,该缺陷不仅影响产品外观,还使塑件的拉伸强度、冲击韧性等力学性能指标明显下降。注射成型中,熔体分流后重新汇合(如流经孔或采用多浇口系统)时,若浇口开启时序设置不合理或同时开启多个浇口,极易产生熔接痕/熔接线缺陷。研究表明,当熔体前沿交汇温度维持在较高水平时,配合优化的保压工艺参数,可有效避免此类缺陷的产生。塑件上的气穴是因为塑料熔体里的气体、模具型腔里的气体不能及时排出而形成的,也会影响塑件的外观质量和力学性能。

优化阀浇口的打开时序,同时调整充填速度与熔体流向,使多股熔体在非外观关键区域交汇,是将熔接线(痕)转移至非外观面的有效手段^[15]。此外,优化阀浇口打开时序还能改变模具型腔内残余气体的流动路径,促使气体向大分型面边缘、滑块头区域、斜顶头区域等易排气位置聚集。最后根据模流分析的充填过程,在充填末端合理开设排气槽,在容易困气的区域增加顶针或设计镶件,可以

有效解决塑件存在较多气穴的缺陷。

如图3所示,热流道共有3个末端。先选择一个热流道末端设置为常开阀浇口(自始至终都是打开状态,后期根据分析结果,如果不合适就调换为另外一个热流道的末端),然后在Moldflow的“边界条件”→“阀浇口控制器”中,创建阀浇口1和阀浇口2,设置阀浇口1和阀浇口2的“阀浇口触发器”(也就是打开时间)为“流动前沿”,“触发位置”选择“浇口”,“初始状态”设置为“关闭”,“阀浇口打开/关闭速度”设置为“实时”。最后用Moldflow的“边界条件”→“指定给单元”将阀浇口1和阀浇口2设置到另外两个热流道的末端单元上。经过多次分析对比,最合理的阀浇口设置结果如图3所示。图6a是阀浇口打开时间的部分分析日志截图。从分析日志

Filling phase: Status: V = Velocity control
P = Pressure control
V/P = Velocity/pressure switch-over

Time (s)	Volume (%)	Pressure (MPa)	Clamp force (tonne)	Flow rate (cm ³ /s)	Status
0.150	0.21	60.34	0	154.86	V
0.301	2.79	96.93	3.17	396.16	V
0.601	12.03	103.01	42.91	482.30	V
0.900	21.25	108.39	120.74	467.67	V
1.201	30.22	118.99	244.75	467.68	V
1.501	38.89	133.23	485.48	463.76	V
1.651	43.26	140.59	613.65	471.11	V
1.951	52.12	152.28	875.94	475.84	V
2.401	65.38	170.20	1344.431	477.95	V
2.699	74.21	"Valve Gate 2"#4 (Elem#281036)			opened.
2.852	80.56	97.00	972.52	459.01	V
3.151	88.09	"Valve Gate 1"#3 (Elem#281033)			opened.
3.519	97.30	140.23	1782.831	483.35	V/P
3.552	100.00	148.25	12699.691	904.52	P
3.553	100.00	148.23	12700.711	903.16	Filled

(a) Partial analysis logs

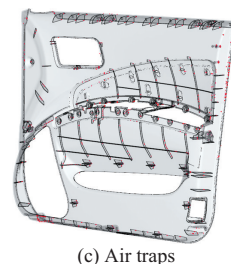
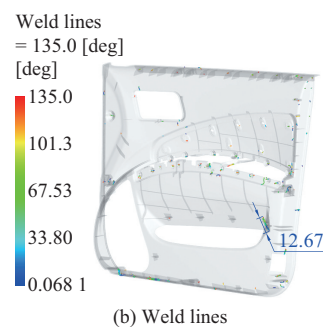


图6 次要缺陷优化结果

Fig. 6 Secondary defects optimization results

中可以查到阀浇口1的打开时间为3.151 s(取整为3.1 s),阀浇口2的打开时间为2.699 s(取整为2.7 s);阀浇口3始终打开。在上述阀浇口开启时序下,熔接线(痕)和气穴等次要缺陷的优化结果如图6b和图6c所示。结合图4d和图6b可以看出,优化后熔接线(痕)明显减少、缩短,最长熔接线(痕)从143.65 mm缩短到12.67 mm。结合图4e和图6c看出,气穴也明显减少,60%以上的气穴缺陷被消除,大部分气穴聚集在大分型面周围,可以采用开设排气槽进行排气加以解决。

4 实际生产验证

模流分析结果证实,通过工艺参数优化和阀浇口开启时序优化,翘曲变形量和体积收缩率均明显下降,熔接线(痕)及气穴等缺陷均得到明显改善,完全满足符合企业实际生产的技术要求。经实际生产(试模)验证,采用优化参数后产品合格率由64.3%大幅提升至88.63%,提升幅度达37.8%。按照年产10万件的生产规模计算,每年可减少废品损失约128万元,同时降低能耗15%,实现了生产成本的有效控制。图7是质量合格的轿车车门内饰板实物照片。



图7 质量合格的轿车车门内饰板实物照片

Fig. 7 Physical photos of qualified automobile door interior panels

5 结论

(1)基于Critic权重法构建双指标综合质量评价的响应方法。采用田口试验,结合信噪比分析,确定了关键注塑工艺参数的最优取值组合:最终确定关键工艺参数的最优组合为:模具温度60℃、熔体温度250℃、注射压力85 MPa、保压压力80 MPa、保压时间20 s。

(2)采用时序控制策略对阀浇口开启时间进行精确调控,优化后熔体的流动模式得到显著改善。该方法能够有效控制熔体流动前沿的汇合位置,使产品表面熔接线(痕)数量大幅度减少,最长熔接线(痕)从143.65 mm缩短到12.67 mm,同时成功消除了60%以上的气穴缺陷。

(3)在不改变现有模具结构的前提下,仅通过优

化工艺参数和阀浇口开启时序,就使产品合格率从基准水平的64.3%提升至88.63%,提升幅度达37.8%。按照年产10万件的生产规模计算,每年可减少废品损失约128万元,同时降低能耗15%,实现了显著的经济效益和环境效益。

(4)采用Moldflow软件、正交试验、Critic权重法、阀浇口开启时序调整技术能够迅速处理涉及多响应、多因素的优化难题,可以显著提升大型复杂塑件的注射成型质量,有效减少了试模次数、提高产品合格率。该研究方法为大型复杂塑件的高品质注塑提供了一条高效、低成本的工艺优化路径。

参考文献

- [1] 康嘉起,史鹏程,颜春,等.代理模型预测注塑件成形缺陷及工艺参数优化的研究进展[J].塑料工业,2025,53(5):30-37,56.
KANG Jiaqi, SHI Pengcheng, YAN Chun, et al. Advances in surrogate model prediction of molding defects and optimization of process parameters for injection molded parts[J]. China Plastics Industry, 2025, 53(5):30-37, 56.
- [2] 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.
- [3] GUO W, LU T Y, ZENG F K, et al. Multi-objective optimization of microcellular injection molding process parameters to reduce energy consumption and improve product quality[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134(11):5159-5173.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 吴俊超,邵海军,陈爱霞,等.基于CAE分析和熵值法的轿车前保险杠注塑工艺多响应优化[J].工程塑料应用,2023,51(2):74-83.
WU Junchao, SHAO Haijun, CHEN Aixia, et al. Multi-response optimization of injection molding process for front bumper of car based on CAE analysis and entropy method[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):74-83.

- [7] MOHAMMADI A, BARROS J A O, SENA-CRUZ J. Unbiased model of the contribution of NSM CFRP systems to shear resistance in RC beams utilizing multiobjective optimization[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2025, 29(5). DOI: 10.1061/JCCOF2.CCENG-5161.
- [8] WANG M H, LIU S, WU H R, et al. Optimization of extendable die SPR-bonded hybrid joining structures based on Kriging and multi-objective genetic algorithms[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 139(7-8): 3 657 – 3 674.
- [9] 刘巨保, 廉成林, 杨明, 等. 插排面板注塑成型多目标优化[J]. *塑料*, 2025, 54(3):112–119.
- LIU Jubao, LIAN Chenglin, YANG Ming, et al. Injection-molded multi-objective optimization for plug panels[J]. *Plastics*, 2025, 54(3):112–119.
- [10] 刘长城. 汽车空调风口本体注塑成型工艺参数多目标优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- LIU Changcheng. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for automotive air conditioning tuyere body[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024.
- [11] 李兴俊, 张英本, 余健, 等. 基于Moldflow及正交试验的箱包下底盘注塑工艺参数优化[J]. *模具技术*, 2024(5):64–69.
- LI Xingjun, ZHANG Yingben, YU Jian, et al. Optimization of injection molding parameters for lower chassis of luggage based on moldflow and orthogonal test[J]. *Die and Mould Technology*, 2024(5):64–69.
- [12] 吴掣, 余俊宝, 范保林, 等. 免喷涂金属质感改性塑料模具与制件结构优化[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(10):52–58.
- WU Luo, YU Junbao, FAN Baolin, et al. Optimization of mould and part structure for spray-free metallic plastics[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10):52–58.
- [13] 屠凯鑫, 徐嘉乐, 武艳军. 基于Moldflow的灯罩模具模拟设计[J]. *锻压装备与制造技术*, 2025, 60(4):147–151.
- TU Kaixin, XU Jiale, WU Yanjun. Moldflow-based simulation design of lampshade molds[J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2025, 60(4):147–151.
- [14] CHANG H, LU S Z, SUN Y, et al. Quality optimization of liquid silicon lenses based on sequential approximation optimization and radial basis function networks[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15. DOI:10.1038/s41598-025-87753-7.
- [15] SUDSAWAT S, SRISEUBSAI W. Optimized plastic injection molding process and minimized the warpage and volume shrinkage by response surface methodology with genetic algorithm and firefly algorithm techniques[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2017, 24(3):228–238.