

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.015

导风件外板双色注塑工艺多目标优化及模具设计

王明伟¹, 林雨¹, 张晗¹, 王宗强¹, 蔡世铭^{1,2}, 何林军³

(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁大连 116034; 2. 大连四方电泵有限公司, 辽宁大连 116034;

3. 浙江靖凯模塑科技有限公司, 浙江台州 317108)

摘要: 本文以导风件外板双色注塑件为研究对象, 选用丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物(ASA)作为硬胶材料, 聚烯烃类热塑性弹性体(TPE)作为软胶材料。选取第一射与第二射的熔料温度、模具温度、冷却时间、保压压力、保压时间为工艺影响因素, 以翘曲变形总量和两次注射的平均体积收缩率为评价指标, 开展五因素四水平正交试验, 利用Moldex3D软件进行模流分析, 对模拟结果进行信噪比处理, 结合熵权法确定各评价指标的权重, 并采用灰色关联度法将多目标优化问题转变为单目标优化问题。结果表明, 各工艺参数对制品体积收缩率和翘曲变形影响的主次顺序为: 模具温度>保压时间>熔料温度>冷却时间>保压压力。获得两次注射(第一射/第二射)最优工艺参数组合为: 熔料温度250℃/185℃、模具温度35℃/35℃、冷却时间35 s/35 s、保压压力75 MPa/50 MPa、保压时间10 s/16 s。优化后, 第一射平均体积收缩率降低42.694%, 第二射平均体积收缩率降低47.227%, 翘曲变形总量减少9.715%。同时设计并加工双色倒装注塑模具, 以分析得到的最优工艺参数组合进行实际生产, 获得了较高的产品质量。本研究验证了正交试验、熵权法、灰色关联分析的综合方法在双色注塑工艺参数优化中的有效性。

关键词: 双色注塑; 多目标优化; 正交试验; 熵权法; 灰色关联度

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0126-09

Multi-objective optimization of two-color injection molding processes of outer plate of air guide and its mould design

WANG Mingwei¹, LIN Yu¹, ZHANG Han¹, WANG Zongqiang¹, CAI Shiming^{1,2}, HE Linjun³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. Dalian Sifang Electric Pump Co., Ltd., Dalian 116034, China; 3. Zhejiang Jingkai Moulding Technology Co., Ltd., Taizhou 317108, China)

Abstract: In this paper, the two-color injection molded plastic part of the outer plate of air guide was taken as the research object, using acrylonitrile-styrene-acrylate copolymer (ASA) as the hard plastic material and polyolefin thermoplastic elastomer (TPE) as the soft elastomer material. The melt temperature, mould temperature, cooling time, holding pressure and holding time of the first injection and the second injection were selected as the process influencing factors, and the total warping deformation and the average volume shrinkage of the two injections were taken as the evaluation indexes. The orthogonal test with five factors and four levels was carried out, and the mold flow was analyzed by Moldex3D software. The signal-to-noise ratio of the simulation results was processed, and the weight of each evaluation index was determined by entropy weight method. The multi-objective optimization problem was transformed into a single-objective optimization problem by grey relational degree method. The results show that the influence order of each process parameter on the volume shrinkage and warpage of the product is as follows: mould temperature, holding time, melt temperature, cooling time, holding pressure. The optimal process parameter combination for two injections (first injection/second injection) is as follows: melt temperature is 250 °C/185 °C, mould temperature is 35 °C/35 °C, cooling time is 35 s/35 s, holding pressure is 75 MPa/50 MPa, and holding time is 10 s/16 s. After optimization, the average volume shrinkage of the first injection and the second injection is reduced by 42.694% and 47.227% respectively, and the total warping deformation is reduced by 9.715%. At the same time, the two-color inverted injection mould was designed and processed, and the optimal combination of process parameters obtained by analysis was used for actual production, which achieved high product quality. This study veri-

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: 2026-04-07

引用格式: 王明伟, 林雨, 张晗, 等. 导风件外板双色注塑工艺多目标优化及模具设计[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 126-134.

WANG Mingwei, LIN Yu, ZHANG Han, et al. Multi-objective optimization of two-color injection molding processes of outer plate of air guide and its mould design[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 126-134.

fies the effectiveness of the comprehensive method of orthogonal test, entropy weight method and grey correlation analysis in the optimization of process parameters of two-color injection molding.

Keywords: two-color injection molding ; multi-objective optimization ; orthogonal test ; entropy weight method ; grey correlation degree

随着科技进步与汽车工业的持续创新,消费者对汽车产品多样化的需求日益提升。为满足用户对功能与个性化的要求,实现汽车零部件的多功能与定制化,可通过双色注塑技术提供可行的技术路径^[1]。双色注塑作为一种先进成型方式,通过将两种不同颜色或类型的塑料分阶段塑化,并分别经由独立的浇注系统注入型腔,利用熔融塑料的固化特性^[2],配合对温度、压力、时间等工艺参数的精确控制,从而形成符合生产需求的双色塑件,并由同一套顶出机构完成脱模^[3]。相较于传统单色注塑,双色注塑省去了后续装配环节,提高了生产效率,将原本需要在两台注塑机上完成的工序集成至一台设备,既节约设备资源,又降低成本^[4]。然而,多色注塑零件的表面质量要求高、成型工艺复杂,生产中需严格控制翘曲变形量和体积收缩率^[5-6]。

为提升双色注塑件成型质量,国内外学者在工艺参数优化和多目标寻优方面开展了广泛研究。苗盈等^[7]将第一射顶出时平均体积收缩率与第二射顶出时平均体积收缩率以及翘曲变形总量设置为试验的优化目标,构建了一组拥有五个因素、四个水平的正交试验,对试验结果进行归一化处理并计算综合得分,最终获得使多个指标趋于最优的工艺参数组合。Liu等^[8]以交流充电桩外壳为研究对象,选取两次注射的熔料温度、模具温度、保压压力为影响因素,采用最优拉丁超立方体试验设计方法,结合模流软件与RBF神经网络构建预测模型,并利用NSGA-II多目标优化算法获取最佳工艺参数。优化后翘曲变形量降低21.9%,体积收缩率下降34.3%,有效提升双色塑件成型质量。

在上述研究基础上,本文以某车型导风件外板为研究对象,设计5因素4水平的正交试验,选取第一射与第二射熔料温度(A 、 a)、模具温度(B 、 b)、冷却时间(C 、 c)、保压压力(D 、 d)和保压时间(E 、 e)作为试验因素,该零件在车辆中用于引导气流、阻隔杂质并构成局部密封结构,对尺寸精度与外观质量要求较高,因此选取两次射出时的体积收缩率与翘曲变形总量作为评价指标,利用Moldex3D进行模拟分析,结合信噪比、熵权法、灰色关联分析,将多目标

优化问题转化为单目标优化^[9],从而获取最优工艺参数组合。

1 模型建立与初始仿真分析

1.1 导风件外板模型有限元分析

导风件外板三维结构如图1所示,该产品特殊结构如图2所示,包含4个卡扣和4个加强筋。卡扣结构分布于导风件外板塑件两端,依靠塑料自身弹性实现快速安装和限位固定,拆装便捷;加强筋结构位于卡扣附近,起到辅助定位以及提升塑件抗变形强度的作用。塑件主体为硬胶结构,外侧包覆软胶材料。作为车身装饰功能件,其外观要求高,需确保硬胶表面光洁、软胶附着牢固且无明显形变。产品外形尺寸为275 mm×33 mm×22 mm,平均壁厚为2.5 mm。硬胶材料选用丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯共聚物(ASA),软胶材料选用聚烯烃类热塑性弹性体(TPE),两种材料的工艺性能参数取值,以Moldex3D软件材料库中的数值为依据,具体见表1。产品整



图1 导风件外板三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of outer plate of air guide

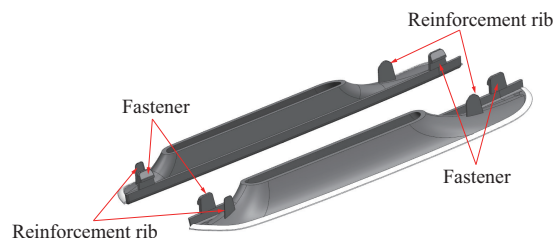


图2 产品特殊结构

Fig. 2 Special structure of products

表1 材料工艺性能

Tab. 1 Material process properties

Properties	Values	
	ASA	TPE
Melt temperature/°C	220~250	180~220
Mould temperature/°C	35~50	35~50
Ejection temperature/°C	96	80
Temperature of solidification/°C	101	87

体结构较细长,成型过程中易产生翘曲变形、表面缩痕及尺寸超差等缺陷。产品浇注系统如图 3 所示,模型网格划分情况见表 2。

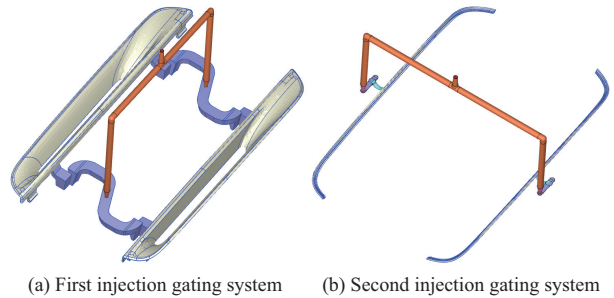


图 3 导风件外板浇注系统图

Fig. 3 Drawing of gating system for outer plate of air guide

表 2 网格划分情况

Tab. 2 Grid division

Grid division	Values for hard plastic	Values for soft elastomer
Number of entity grid elements	85 053	224 799
Plastic element	31 527	49 954
Cold runner element	22 206	36 747
Number of surface grid elements	14 820	17 916
Plastic volume/cm ³	59.641	2.500
Cold runner volume/cm ³	26.375	0.741

1.2 初始分析

在材料工艺参数范围内选取中间值作为初始工艺参数进行模拟分析。第一射硬胶工艺参数为:熔料温度(A)235 °C、模具温度(B)43 °C、冷却时间(C)28 s、保压压力(D)78 MPa、保压时间(E)7 s;第二射软胶参数为:熔料温度(a)200 °C、模具温度(b)43 °C、冷却时间(c)28 s、保压压力(d)53 MPa、保压时间(e)13 s。模拟结果如图 4 所示,可以发现塑件充填均匀完整,表面质量良好,无明显熔接痕;但第一射体积收缩率为 3.668%,第二射为 1.298%,翘曲变形总量为 0.597 mm,均偏大,需进一步优化。

2 注塑工艺参数优化

2.1 因素水平选择与试验结果

基于 CAE 分析结果与零件装配及外观要求,选

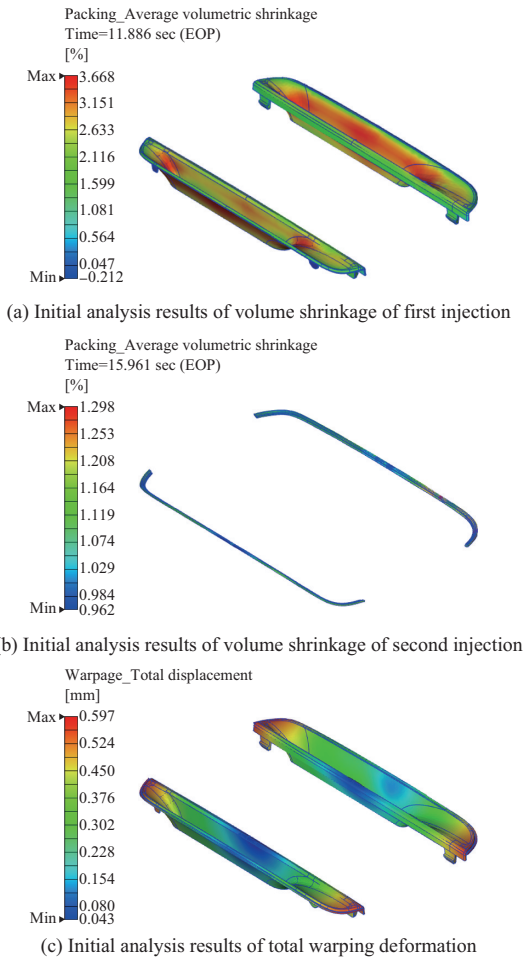


图 4 初始分析结果

Fig. 4 Initial analysis results

取第一射与第二射的熔料温度(A、a)、模具温度(B、b)、冷却时间(C、c)、保压压力(D、d)与保压时间(E、e)作为影响因素。由于该塑件水平方向设有定位筋与卡扣结构,需要综合考虑各方向的尺寸精度,因此将翘曲变形总量、第一射与第二射的平均体积收缩率作为评价指标^[10-11]。

以初始参数为基准,针对上述每个因素设置 4 个水平,具体取值见表 3,正交试验设计见表 4,每组参数组合均通过 Moldex3D 进行模拟分析,结果见表 4。

表 3 正交试验的因素水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal test

Factors	Hard plastic level				Soft elastomer level			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Melt temperature (A, a)/°C	220	230	240	250	215	205	195	185
Mould temperature (B, b)/°C	35	40	45	50	35	40	45	50
Cooling time (C, c)/s	20	25	30	35	20	25	30	35
Holding pressure (D, d)/MPa	70	75	80	85	45	50	55	60
Holding time (E, e)/s	4	6	8	10	10	12	14	16

表4 正交试验设计和结果
Tab. 4 Design and results of orthogonal test

Test number	Hard plastic					Soft elastomer					Analog results		
	A/°C	B/°C	C/s	D/MPa	E/s	a/°C	b/°C	c/s	d/MPa	e/s	First injection volume shrinkage/%	Second injection volume shrinkage/%	Total warping deformation/mm
1	220	35	20	70	4	215	35	20	45	10	4.822	0.931	0.537
2	220	40	25	75	6	215	40	25	50	12	3.953	1.161	0.558
3	220	45	30	80	8	215	45	30	55	14	3.259	1.405	0.570
4	220	50	35	85	10	215	50	35	60	16	2.717	1.671	0.589
5	230	35	25	80	10	205	35	25	55	16	2.507	0.840	0.538
6	230	40	20	85	8	205	40	20	60	14	3.293	1.170	0.560
7	230	45	35	70	6	205	45	35	45	12	4.239	1.388	0.583
8	230	50	30	75	4	205	50	30	50	10	4.881	1.709	0.606
9	240	35	30	85	6	195	35	30	60	12	2.806	0.808	0.522
10	240	40	35	80	4	195	40	35	55	10	4.347	1.093	0.559
11	240	45	20	75	10	195	45	20	50	16	2.885	1.451	0.588
12	240	50	25	70	8	195	50	25	45	14	3.782	1.705	0.619
13	250	35	35	75	8	185	35	35	50	14	2.810	0.704	0.545
14	250	40	30	70	10	185	40	30	45	16	2.617	1.091	0.557
15	250	45	25	85	4	185	45	25	60	10	4.024	1.411	0.582
16	250	50	20	80	6	185	50	20	55	12	3.772	1.723	0.637

2.2 试验结果处理

2.2.1 信噪比

信噪比分析可用于评估各因素对结果影响的显著程度,其“望大特性”适用于本研究中希望尽可能降低体积收缩率与翘曲变形的目标。信噪比计算公式见式(1)。

$$\eta_i = -10 \lg \left(\frac{1}{t} \sum_{l=1}^t x_i^2 \right) \quad (1)$$

式中: η_i 为第*i*组试验数据所对应的信噪比; t 为选取每组参数的重复次数,取值1; x_i 为第*i*次试验所得结果。

2.2.2 无量纲化

为消除不同指标量纲的影响,对信噪比结果进行无量纲化处理。由于体积收缩率与翘曲变形总量均为望小特性,其信噪比数值具有“望大特性”,即信噪比数值越大表示性能越优。标准化公式见式(2)。

$$\alpha_i = \frac{\eta_i - \eta_{\min}}{\eta_{\max} - \eta_{\min}} \quad (2)$$

式中: α_i 为无量纲化处理数值; $\eta_{\max}$ 为信噪比中的最大值; $\eta_{\min}$ 为信噪比中的最小值。

2.2.3 灰色关联度系数

灰色关联分析适用于小样本、非线性的系统建模,能够反映各试验结果与理想值之间的关联程度^[12],灰色关联度系数 ξ_i 计算公式见式(3)。

$$\xi_i = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{|\alpha_i^0 - \alpha_i| + \rho \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: α_i^0 为数据理想值,最佳试验次数所对应的无量纲化结果, $\alpha_i^0=1$; $\Delta_{\max}$ 为试验数据相差的最大数值,取1; $\Delta_{\min}$ 为试验数据相差的最小数值,取0; ρ 为分辨系数,取值范围0~1,一般取中间值0.5。

将正交试验结果按顺序分别代入到上述各式中,并将计算所得的结果置于表5,其中, X 表示第一射体积收缩率, Y 表示第二射体积收缩率, Z 表示翘曲变形总量。

(a)结合各试验无量纲化后的结果以及本次试验所选择的评价指标,构造决策矩阵*A*,见式(4)。

$$A_{m \times n} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \cdots & \alpha_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: m 为试验总次数,取值16; n 为评价指标数,取值3。

(b)为便于对比各项试验结果,按照式(5)对各项试验指标进行正则化处理。

$$\lambda_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

式中: λ_{ij} 为第*i*次试验中*j*项指标的正则化处理结果。

(c)按式(6)计算比重 P_{ij} ,由于上文已对试验数据

表5 正交试验结果经信噪比计算、无量纲化和灰色关联分析后的处理数据

Tab. 5 Processed data from orthogonal test results after signal-to-noise ratio calculation, dimensionless and grey correlation analysis

Test number	Signal noise ratio (η_i)			Dimensionless result (α_i)			Grey correlation coefficient (ξ_i)			Grey correlation degree (γ_i)	Sort
	$\eta_i(X)$	$\eta_i(Y)$	$\eta_i(Z)$	$\alpha_i(X)$	$\alpha_i(Y)$	$\alpha_i(Z)$	$\xi_i(X)$	$\xi_i(Y)$	$\xi_i(Z)$		
1	5.401	40.621	26.228	0.858	0.688	0	0.778	0.616	0.333	0.509	6
2	5.067	38.703	28.061	0.665	0.441	0.317	0.599	0.472	0.423	0.456	11
3	4.883	37.046	29.738	0.558	0.28	0.606	0.531	0.393	0.560	0.461	9
4	4.598	35.540	31.318	0.393	0.034	0.879	0.452	0.341	0.806	0.525	5
5	5.384	41.514	32.017	0.848	0.803	1	0.767	0.717	1	0.829	2
6	5.036	38.636	29.648	0.647	0.432	0.591	0.586	0.468	0.550	0.503	8
7	4.687	37.152	27.455	0.445	0.242	0.212	0.474	0.397	0.388	0.396	13
8	4.351	35.345	26.230	0.251	0.010	0.001	0.400	0.335	0.333	0.336	16
9	5.647	41.852	31.038	1	0.846	0.831	1	0.765	0.747	0.763	3
10	5.052	39.228	27.236	0.656	0.509	0.174	0.592	0.504	0.377	0.457	10
11	4.612	36.767	30.797	0.402	0.192	0.789	0.455	0.382	0.704	0.509	7
12	4.166	35.366	28.446	0.144	0.012	0.383	0.369	0.336	0.478	0.380	14
13	5.272	43.049	31.026	0.783	1	0.829	0.698	1	0.745	0.893	1
14	5.083	39.244	31.644	0.674	0.511	0.936	0.605	0.505	0.886	0.656	4
15	4.702	37.009	27.907	0.454	0.223	0.290	0.478	0.392	0.413	0.402	12
16	3.917	35.274	28.469	0	0	0.387	0.333	0.333	0.450	0.379	15

Notes: X, Y, Z are the first injection volume shrinkage, the second injection volume shrinkage and total warping deformation, respectively.

进行了归一化处理,因此直接将归一化处理后的数值代入式(6)即可,评价指标所占比重的计算结果见表6。

表6 评价指标比重计算结果

Tab. 6 Proportion calculation results of evaluation indexes

Test number	Proportion of evaluation indexes		
	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}
1	0.059	0.046	0.086
2	0.061	0.057	0.070
3	0.062	0.069	0.057
4	0.064	0.082	0.048
5	0.059	0.041	0.044
6	0.061	0.058	0.058
7	0.064	0.069	0.075
8	0.066	0.084	0.086
9	0.057	0.040	0.049
10	0.061	0.054	0.077
11	0.064	0.072	0.051
12	0.068	0.084	0.067
13	0.060	0.035	0.049
14	0.061	0.054	0.046
15	0.064	0.070	0.071
16	0.069	0.085	0.066

$$P_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^m \lambda_{ij}} \quad (6)$$

表7 各评价指标熵值、信息冗余度、权重计算结果

Tab. 7 Entropy values, information redundancy and weight calculation results of each evaluation index

Items	Entropy value (e_j)	Information entropy redundancy (d_j)	Weight (w_j)/%
First injection volume shrinkage	0.999 496 643	0.000 503 357	39.0
Second injection volume shrinkage	0.987 311 598	0.012 688 402	58.7
Total warping deformation	0.991 567 015	0.008 432 985	2.3

(d)计算试验指标的熵值 e_j ,见式(7)。试验指标的熵值越小,该试验指标的信息量越大,在注塑过程中越重要,权重越大^[13]。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (7)$$

式中: k 为常数项, $k = \frac{1}{\ln(m)}$ 。

(e)计算评价指标信息冗余度 d_j ,见式(8)。

$$d_j = 1 - e_j \quad (8)$$

(f)计算权重系数 w_j ,见式(9)。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \times 100\% \quad (9)$$

式中: n 为评价指标数,取值3。

按式(4)到式(9),将各试验结果分别代入到对应的公式中,通过计算得到本次试验两个评价指标所占的权重,见表7。

2.2.4 计算灰色关联度

结合上述计算结果,用式(10)计算灰色关联度 γ_i ^[14],并根据所得结果数值大小进行排序,将所得结果填入表5中。

$$\gamma_i = \xi_i(X)w_1 + \xi_i(Y)w_2 + \xi_i(Z)w_3 \quad (10)$$

3 多目标参数优化

通过灰色关联法将翘曲变形总量和体积收缩率的多目标问题转为单目标优化问题^[15],将计算得到的灰色关联度作为优化的目标,取不同因素水平下的灰色关联度平均值,并以此进行极差分析,将所得极差结果由大到小顺序排序,得到翘曲变形总

量和体积收缩率同时最优的一组工艺参数^[16],结果见表8。极差越大,表明该因素对结果影响越显著。表8的分析结果表明,按照对试验结果影响程度大小,将试验因素顺序排列:模具温度(B 、 b)>保压时间(E 、 e)>熔料温度(A 、 a)>冷却时间(C 、 c)>保压压力(D 、 d)。

表8 灰色关联度极差分析

Tab. 8 Grey correlation degree range analysis

level	Melt temperature (A , a)	Mould temperature (B , b)	Cooling time (C , c)	Holding pressure (D , d)	Holding time (E , e)
1	0.488	0.749	0.475	0.485	0.426
2	0.516	0.518	0.517	0.549	0.498
3	0.527	0.442	0.554	0.531	0.526
4	0.583	0.405	0.568	0.548	0.630
Range	0.095	0.344	0.093	0.063	0.204
Sort	3	1	4	5	2

以灰色关联度最大为原则,选取最优工艺参数组合,第一射: $A4=250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $B1=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $C4=35\text{ s}$ 、 $D2=75\text{ MPa}$ 、 $E4=10\text{ s}$;第二射: $a4=185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $b1=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $c4=35\text{ s}$ 、 $d2=50\text{ MPa}$ 、 $e4=16\text{ s}$ 。

4 模具主要结构设计及工作原理

4.1 浇注系统设计

针对塑件第一色主体硬胶 ASA 黑色塑料,采用2个热流道配合2个冷流道侧浇口的形式进胶,并在冷流道末端位置设置了冷料井,将熔料流动波前沿温度较低的部分留在冷流道中,以防止成型产品外观不良。针对第二色软胶 TPE,采用2个热流道配合2个冷流道潜式浇口的形式进胶,在冷流道末端位置同样设置了冷料井,以达到预防塑件成型不良的目的,浇注系统示意图如图5所示。

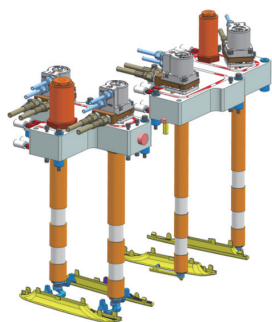


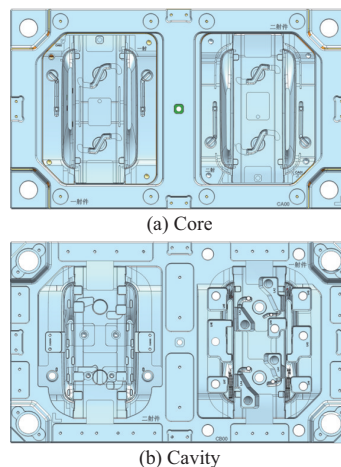
图5 浇注系统

Fig. 5 Gating system

4.2 成型机构设计

成型零件主要由型腔、型芯及成型滑块组成。型腔尺寸为 $760\text{ mm}\times 450\text{ mm}\times 130\text{ mm}$, 钢料选用 SW718H, 此种钢材强度、韧性、尺寸稳定性较好, 纯净度高, 抛光、蚀纹性极佳, 硬度 HRC33~36, 型芯尺

寸为 $760\text{ mm}\times 450\text{ mm}\times 128\text{ mm}$, 钢料采用 P20 模具钢, 此类钢材硬度均匀、韧性较好、尺寸稳定、切削及抛光性均较好, 硬度 HRC32~35。并且为了保证产品成型时气体有效排出, 在分型面处设计了宽 5 mm 、深 0.5 mm 的排气槽。型芯和型腔如图6所示。



(a) Core

(b) Cavity

图6 成型机构

Fig. 6 Forming mechanism

4.3 冷却水路设计

为尽可能降低塑件在注塑过程中出现的体积收缩率、翘曲变形偏高等问题, 影响其与车身其他部件的装配适配性及安装精度, 需让模具型芯与型腔尽可能均匀冷却。结合塑件结构特点, 型芯和型腔均采用直通式冷却水路, 同时确保各水路设计与模具结构之间不存在干涉情况, 直通式水路直径为 11.5 mm , 水路示意图如图7所示。

4.4 推出机构设计

为保证塑件可以顺利脱模, 防止在顶出时出现顶裂、顶白现象, 故采用“顶针+直顶杆+直顶块+推

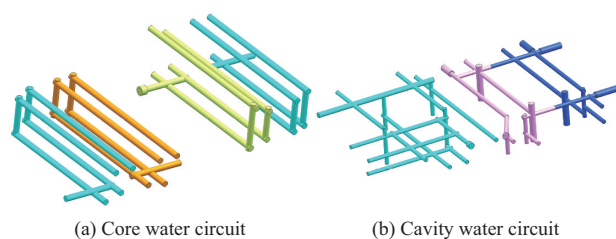


图7 冷却机构

Fig. 7 Cooling mechanism

板导柱+复位杆”的组合顶出机构,并且为方便冷流道及浇口脱出,在滑块上设计了与其相匹配的脱模结构。推出机构如图8所示。

4.5 模具整体结构

模具整体结构及实物如图9所示。该模具属于双色倒装型注塑模具,相比于传统注塑模具,倒装模的动模结构更简单,加工更快、寿命更长、在实际生产中更方便维护;其次,可以做到外观面无浇口、

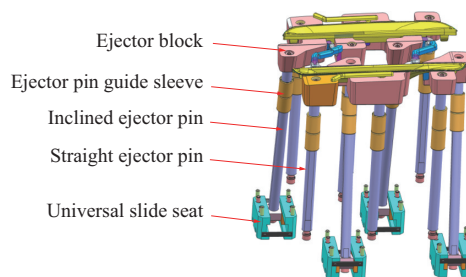
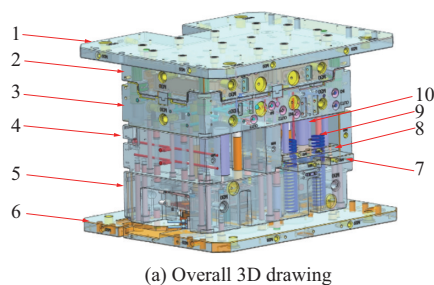


图8 推出机构

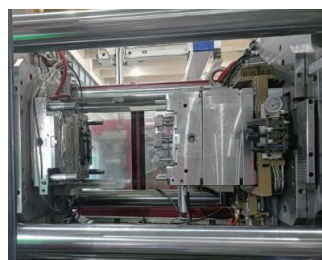
Fig. 8 Ejection mechanism

推出痕迹,能够满足更高的外观要求,提高良品率,提升材料利用率。

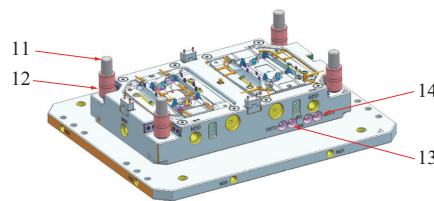
注塑加工过程中,完成第一色硬胶注塑后,其动模型芯依靠双色注塑机转盘旋转180°完成换位,以进行下一步软胶部分的注塑,完成整体注塑后,由推出机构配合机械手将留在动模一侧的塑件取出。



(a) Overall 3D drawing



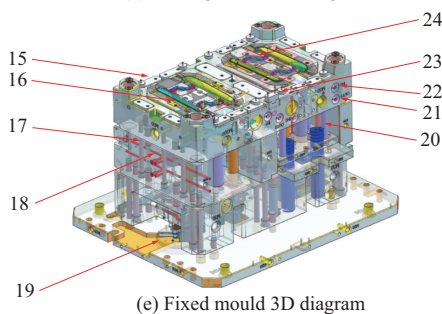
(b) Overall real machine diagram



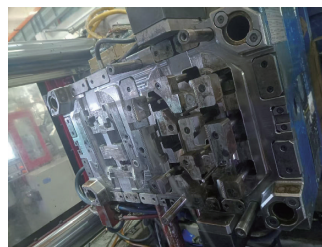
(c) Moving mould 3D diagram



(d) Moving mould real machine diagram



(e) Fixed mould 3D diagram



(f) Fixed mould real machine diagram

1—Moving mould clamping plate; 2—Core; 3—Cavity; 4—Support plate; 5—Fixed mould plate; 6—Fixed mould clamping plate; 7—Ejector pin fixing plate; 8—Ejector plate; 9—Return spring; 10—Hot runner; 11—Positioning column; 12—Positioning column guide sleeve; 13—Inlet of core cooling water circuit; 14—Outlet of core cooling water circuit; 15—Spacer block; 16—Soft elastomer cold runner; 17—Screw; 18—Supporting block cooling water circuit; 19—Locating ring; 20—Guide pillar; 21—Outlet of cavity cooling water circuit; 22—Inlet of cavity cooling water circuit; 23—Locking buckle; 24—Hard plastic cold runner

图9 模具结构图

Fig. 9 Mould structure diagram

5 试验结果验证

将经分析确定的最优工艺参数组合导入Moldex3D加工精灵模块开展模拟验证,所得结果如图10所示:第一射的平均体积收缩率为2.102%,第二射的平均体积收缩率为0.685%,翘曲变形总量为0.539 mm,相比于初始分析结果,优化后,第一射顶出时平均体积收缩率降低了42.694%,第二射顶出时平均体积收缩率降低了47.227%,翘曲变形总量降低9.715%,达到工艺生产要求的第一射的体积收缩率低于3%、第二射的体积收缩率低于1%、翘曲变形总量低于0.55 mm的标准,符合生产要求。

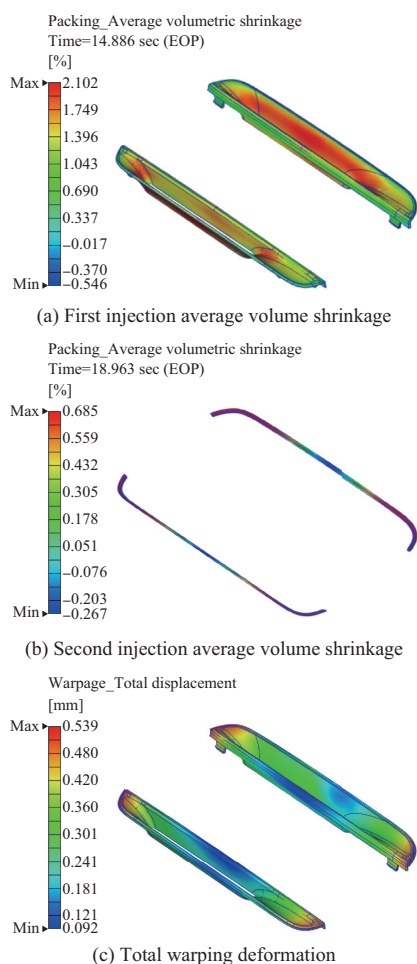


图10 最优工艺参数数值模拟分析结果

Fig. 10 Numerical simulation analysis results of optimal process parameters

实际生产验证后的产品质量状态如图11所示,产品表面光洁、无成型缺陷、软硬胶结合良好,满足实际批量生产需求。

6 结论

(1)设计了双色注塑五因素四水平正交试验,基于正交试验数据,借助信噪比,经无量纲化,采用熵



图11 优化后产品实物图

Fig. 11 Optimized product physical drawing

权法确定各评价指标所占权重系数,第一射平均体积收缩率、第二射平均体积收缩率、翘曲变形总量的权重分别为39.0%、58.7%、2.3%。以此为基础,计算得到灰色关联度。

(2)通过灰色关联度极差分析,获得各试验因素对试验结果影响程度的强弱顺序为:模具温度>保压时间>熔料温度>冷却时间>保压压力。

(3)相比于初始分析结果,优化后,第一射顶出时平均体积收缩率降低了42.694%,第二射顶出时平均体积收缩率降低了47.227%,翘曲变形总量降低9.715%。

(4)设计了相应的双色倒装注塑模具,并进行了实际生产验证。研究表明,结合正交试验法、信噪比分析方法、熵权法以及灰色关联分析方法,能较为有效地将多目标优化问题转变为单目标优化问题,显著提升了双色注塑件的成型质量。

参考文献

- [1] 毛元源,蒙焕霞,周宝聪.汽车灯饰面盖零件热流道双色注塑模具设计[J].汽车知识,2025,25(8):64-66.
MAO Yuanyuan, MENG Huanxia, ZHOU Baocong. Design of hot runner two-color injection molding for automobile lighting cover parts[J]. Automotive Knowledge, 2025, 25(8):64-66.
- [2] PANG L F, ZHANG C S, DONG H X, et al. Research on light-weight injection molding (CAE) and numerical simulation calculate of new energy vehicle[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2023, 8(1):789-798.
- [3] 姜旭,毕凤阳,刘长喜,等.基于田口法的汽车大灯灯罩双色注塑工艺参数多目标优化[J].塑料,2025,54(5):129-134.
JIANG Xu, BI Fengyang, LIU Changxi, et al. Multi-objective optimization of two-color injection molding process parameters of automobile headlight lampshade based on Taguchi method[J]. Plastics, 2025, 54(5):129-134.
- [4] 沈亮涵.汽车内饰件双色注射模设计[J].模具制造,2020,20(7):49-53.
SHEN Lianghan. The design of two-color injection mold for automobile interior decoration parts[J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20(7):49-53.
- [5] 王晓东,王权,陈拓,等.基于灰色关联分析和熵权法的双色注塑

- 多目标参数优化[J].中国塑料,2022,36(7):115-120.
- WANG Xiaodong, WANG Quan, CHEN Tuo, et al. Optimization of multi-objective parameters for double color injection-molding based on grey relational analysis and entropy weight method[J]. China Plastics, 2022, 36(7):115-120.
- [6] 王钊,魏翔宇,倪君杰,等.双色尾灯灯罩注射成型影响因素多目标优化[J].现代塑料加工应用,2020,32(1):50-53.
- WANG Zhao, WEI Xiangyu, NI Junjie, et al. Multi-objective optimization of influencing factors for automobile two-color taillight lampshade injection molding[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(1):50-53.
- [7] 苗盈,晏子翔.双色注塑成型工艺参数多目标优化[J].塑料工业,2020,48(8):96-99.
- MIAO Ying, YAN Zixiang. Multi-objective optimization of bi-color injection molding process parameters[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(8):96-99.
- [8] LIU H, JIANG B Y, JIANG H, et al. Multi-objective optimization of process parameters for dual-color injection molding of the middle cover of electric vehicle charging pile[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2025, 18(4):439-450.
- [9] 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.
- [10] 孟小林,张继祥,李又兵,等.汽车B柱外饰板双色注塑翘曲变形分析及工艺优化[J].工程塑料应用,2023,51(2):54-59.
- MENG Xiaolin, ZHANG Jixiang, LI Youbing, et al. Warpage deformation analysis and process optimization of automotive B-pillar exterior panel with two-color injection[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):54-59.
- [11] 翁礼杰,彭贤峰,傅莹龙,等.汽车激光雷达盖板的双色注塑模具设计[J].塑料,2024,53(3):50-55.
- WENG Lijie, PENG Xianfeng, FU Yinglong, et al. Design of dual color injection mold for automotive lidar cover[J]. Plastics, 2024, 53(3):50-55.
- [12] 谷婷婷,王星星,张庆稹,等.基于灰色关联-熵权法的置物架注塑工艺参数多目标优化[J].塑料工业,2024,52(12):96-102.
- GU Tingting, WANG Xingxing, ZHANG Qingzhen, et al. Multi-objective optimizations of shelf injection molding process parameters based on the grey correlation-entropy weight method[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(12):96-102.
- [13] 薛庆红,苗盈,薛兹键,等.基于熵权TOPSIS法的注塑工艺参数多目标优化[J].塑料,2023,52(6):142-146.
- XUE Qinghong, MIAO Ying, XUE Zijian, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters based on entropy-weight TOPSIS method[J]. Plastics, 2023, 52(6):142-146.
- [14] 魏翔宇,王钊,倪传龙,等.基于灰色关联度的车灯装饰框注塑工艺优化[J].现代塑料加工应用,2020,32(2):34-37.
- WEI Xiangyu, WANG Zhao, NI Chuanlong, et al. Injection molding process optimization of headlamp decoration frame based on grey relation analysis[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(2):34-37.
- [15] 周纪委,郭昊亮,张文超,等.基于灰色关联理论的副仪表板扶手底座注塑工艺多目标优化[J].工程塑料应用,2022,50(12):61-66.
- ZHOU Jiwei, GUO Haoliang, ZHANG Wenchao, et al. Multi-objective optimization of sub-dashboard armrest base injection molding process based on gray correlation theory[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12):61-66.
- [16] LIN G L, JIANG P P, CUI B W, et al. Predicting the performance of a functional ecological substrate via a generative model based on an orthogonal experiment[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(8). DOI: 10.1007/s10064-024-03798-4.