

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.012

# 卡车前顶柜门外板注射成型工艺多目标优化

王明伟<sup>1</sup>, 张晗<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 李小虎<sup>1</sup>, 林连明<sup>2</sup>, 叶星辉<sup>2</sup>

(1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁大连 116034; 2. 浙江凯华模具有限公司, 浙江台州 318020)

**摘要:** 以卡车前顶柜门外板为研究对象, 基于 Moldex3D 模流分析软件对其注射成型过程进行模拟分析。根据初始模拟分析结果可知, 体积收缩率( $\alpha_1$ )和 Z 方向(产品脱模方向)翘曲位移( $\alpha_2$ )数值过大, 故选取模具温度(A)、熔体温度(B)、注射时间(C)、保压时间(D)和保压压力(E)为试验因素, 以  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为指标进行 16 组正交试验, 通过极差分析分别得到  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的最优工艺组合。经对比两工艺组合参数不同, 故使用熵权 TOPSIS 法对工艺参数进行综合评价分析。通过对综合评价指数进行极差分析, 得到各因素对  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  影响程度的顺序为  $E>A>D>C>B$ ; 最优工艺参数组合为  $A_1B_1C_2D_1E_4$ 。在 Moldex3D 中对最优工艺参数组合进行模拟, 得到分析结果:  $\alpha_1$  为 8.237%,  $\alpha_2$  为 1.198 mm。与初始工艺参数相比, 优化后的  $\alpha_1$  减少了 5.105%,  $\alpha_2$  减少了 1.082 mm, 分别比优化前降低了 38.26% 和 47.46%。同时对注塑模具进行设计和制造, 并将最优工艺参数组合进行现场实际试模, 产品合格率为 83.33%, 满足生产要求。因此, 证明使用 Moldex3D 模流分析软件和熵权 TOPSIS 法可有效解决在注射成型中的多目标优化问题。

**关键词:** 模流分析; 卡车前顶柜门外板; 正交试验; 综合评价; 极差分析

**中图分类号:** TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0075-09

## Multi-objective optimization of injection molding process for truck front roof cabinet door outer panel

WANG Mingwei<sup>1</sup>, ZHANG Han<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, LI Xiaohu<sup>1</sup>, LIN Lianming<sup>2</sup>, YE Xinghui<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2. Zhejiang Kaihua Mould Co., Ltd., Taizhou 318020, China)

**Abstract:** Taking the truck front roof cabinet door outer panel as the research object, the injection molding process was simulated and analyzed based on Moldex3D mold flow analysis software. According to the results of the initial simulation analysis, the values of volumetric shrinkage and Z-direction (product demolding direction) warpage displacement were too large, so the mould temperature (A), melt temperature (B), injection time (C), holding time (D) and holding pressure (E) were selected as the test factors, and 16 groups of orthogonal tests were carried out with volumetric shrinkage ( $\alpha_1$ ) and Z-direction warpage displacement ( $\alpha_2$ ) as the indexes and the optimal process combinations of volumetric shrinkage and Z-direction warpage displacement were obtained by polar analysis, respectively. The optimal process combinations of volumetric shrinkage and Z-direction warpage displacement were obtained by polar analysis, respectively. After comparing the parameters of the two process combinations, the entropy weight TOPSIS method was used to comprehensively evaluate and analyzed the process parameters. Through the polar analysis of the comprehensive evaluation index, the influence of each factor on the volumetric shrinkage and Z-direction warpage displacement is in the order of  $E>A>D>C>B$ , and the optimal combination of process parameters is  $A_1B_1C_2D_1E_4$ . The optimal combination of process parameters was simulated in Moldex3D, and the analytical results were as follows: the volumetric shrinkage rate is 8.237%, and Z-direction warpage displacement is 1.198 mm. Compared with the initial process parameters, the optimized volumetric shrinkage is reduced by 5.105% and the Z-direction warpage displacement is reduced by 1.082 mm, which are 38.26% and 47.46% lower than before optimization, respectively. At the same time, the injection mold is designed and manufactured, and the combination of the optimal process parameters is used for the actual trial mold on site, and the product qualification rate is 83.33%, which meets the production requirements. Therefore, it is proved that the multi-objective optimization problem in injection molding can be effectively solved by using Moldex3D mould flow analysis software and entropy weight TOPSIS method.

**基金项目:** 2023 年度辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20230403)

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

**收稿日期:** 2024-07-14

**引用格式:** 王明伟, 张晗, 吴迪, 等. 卡车前顶柜门外板注射成型工艺多目标优化[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10): 75-83.

WANG Mingwei, ZHANG Han, WU Di, et al. Multi-objective optimization of injection molding process for truck front roof cabinet door outer panel[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 75-83.

**Keywords :** mold flow analysis ; truck front roof cabinet door outer panel ; orthogonal test ; comprehensively evaluate ; range analysis

在卡车内饰设计中,前顶柜门外板不仅要具有较高的结构强度,还需要注重外观装饰性。它应与车顶内饰板紧密衔接,确保色调协调一致,形成一个统一的整体。因此,前顶柜门外板的外观装饰性和实用性已成为评估整车内饰质量的重要标准。对此类塑件进行初始分析时,由于其结构的复杂性,塑件的体积收缩率和Z方向(产品脱模方向)翘曲位移数值均未能达到生产要求,故需要对其注射成型工艺参数进行优化,从而提高塑件的成型质量。国内外学者对如何优化注射成型工艺参数进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>。Chen等<sup>[5]</sup>使用Taguchi方法和方差分析确定了碳酸饮料瓶在注射成型过程中使翘曲变形最显著的参数,使用Solid Works Plastics和数值方法优化工艺参数以减少翘曲变形。马昊等<sup>[6]</sup>使用正交试验并通过灰狼算法,对冰箱饰条成型工艺进行研究,得到最佳工艺参数组合。高洪晨等<sup>[7]</sup>使用正交试验及极差分析得到空气净化器外壳注射成型过程中不同工艺参数对翘曲变形的影响顺序,并使用遗传算法得到最优注塑工艺参数组合和翘曲变形量。谭波<sup>[8]</sup>采用拉丁超立方抽样方法和建立RBF神经网络代理模型,以产品的翘曲变形量为响应目标,使用模拟退火算法得到电子元器件外壳注射成型的最优工艺参数组合。刘长城等<sup>[9]</sup>利用Critic权重法对两个目标值进行客观赋权,将多目标优化变为单目标优化,使车灯灯框的翘曲变形量与体积收缩率得到了优化。陈川等<sup>[10]</sup>使用响应面设计和改进NSCA-II多目标算法相结合的方法,有效地优化了变模温技术的体积收缩率和翘曲值。Liu等<sup>[11]</sup>使用反向传播神经网络建立了工艺参数与三个优化目标之间复杂的非线性映射关系;然后,通过多目标粒子群优化算法和TOPSIS法从帕累托前沿中获得最优解,成功减小了中厚平面透镜的翘曲、凹痕和夹紧力的最大值。Huang等<sup>[12]</sup>以温度分布和翘曲对汽车锁具的影响为研究对象,采用信噪比归一化的灰色关联分析得到灰色关联系数,代入模糊理论得到多重性能特征指标,并通过最大的多重性能特征指标寻找多个质量特征优化的工艺参数,成功使翘曲量降低12.2%,平均温度降低0.46%。

笔者以卡车前顶柜门外板为研究对象,利用Moldex3D软件对塑件进行模流分析,以塑件的体

积收缩率和Z方向翘曲位移数值为优化指标。使用正交试验法对塑件在不同工艺参数下的成型过程进行模拟,分别得到体积收缩率和Z方向翘曲位移的最优工艺参数组合,对比两工艺参数组合不同。考虑当前的多目标优化方法多数采用复杂的抽样方法和优化算法,在实际生产中无法快速得到客观准确的优化方案,而使用熵权TOPSIS方法的优点在于其结合了熵权法的客观性和TOPSIS的全面性,且该方法不需要数据满足严格的分布假设,概念直观、计算步骤清晰,故利用熵权TOPSIS法将体积收缩率和Z方向翘曲位移转化为以综合评价指数 $C_i$ 为指标的单目标优化问题。将指标数据以成本属性进行规范化处理,并以每个方案到正理想解距离评判综合评价指数 $C_i$ ,最后对 $C_i$ 进行极差分析,得到体积收缩率和Z方向翘曲位移数值最佳的工艺参数组合,并进行注塑模具设计和现场实际试模验证。

## 1 卡车前顶柜门外板模型建立和分析

### 1.1 模型分析

图1为卡车前顶柜门外板三维模型,整体呈长条状,背面有较多的加强筋和凹槽,结构较为复杂,易产生较大的翘曲位移和体积收缩等缺陷。卡车前顶柜门外板整体尺寸为750 mm×239 mm×80 mm,平均壁厚为2.5 mm。

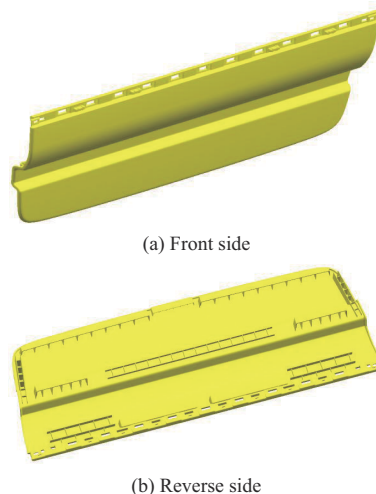


图1 卡车前顶柜门外板三维模型

Fig. 1 3D model of truck front roof cabinet door outer panel

### 1.2 材料属性

选用Ravago公司生产的Ravaplen 72 T43-9聚丙烯(PP)+20%滑石粉(Talc)填充材料,该材料具有

较优的耐刮擦性能、抗紫外线性能、较高的拉伸强度和弯曲模量。表1为材料推荐工艺参数。

表1 材料推荐工艺参数

Tab. 1 Recommended process parameters for materials

| Forming process parameter  | Value   |
|----------------------------|---------|
| Melt temperature/°C        | 220~260 |
| Mould temperature/°C       | 30~50   |
| Ejection temperature/°C    | 116     |
| Non-flowing temperature/°C | 136     |

### 1.3 网格划分

将模型以step格式导入Moldex3D软件中,运用CAD doctor软件对模型进行必要的简化处理。然后使用Moldex3D studio模块对模型进行撒点网格划分和网格修复。网格划分结果如图2所示,该塑件网格采用Solid类型,整体网格质量较好,塑件表面网格数量176 386,实体网格数803 723。

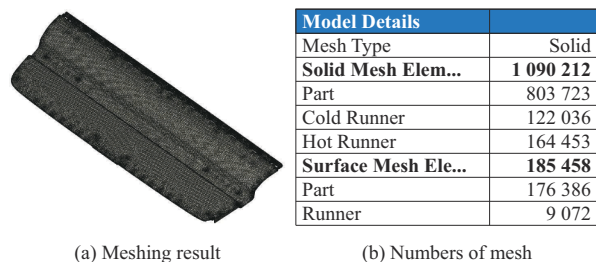


图2 卡车前顶柜门外板网格划分

Fig. 2 Mesh delineation of truck front roof cabinet door outer panel

### 1.4 浇注系统的建立

塑件采用侧浇口的进浇方式,并使用阀式热流道与U型冷流道相结合的方式进行注射成型。图3为卡车前顶柜门外板浇注系统。热流道直径为16 mm,U型冷流道宽度为10 mm,高度为8 mm;侧浇口的始端高度为1.2 mm,始端宽度为15 mm,末端高度为8 mm,末端宽度为10 mm。

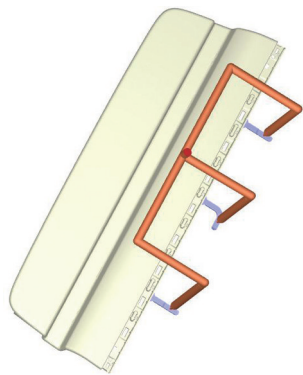


图3 卡车前顶柜门外板浇注系统

Fig. 3 Pouring system of truck front roof cabinet door outer panel

### 1.5 初始参数结果分析

按Moldex3D软件默认初始注塑工艺参数(熔体温度240 °C、模具温度40 °C、注射时间2.3 s、V/P切换体积99%、保压压力25 MPa、保压时间6 s)进行模拟,模拟结果如图4所示。根据模拟结果,可以看出塑件充填完整均匀,且表面质量较好,无明显缝合线;但塑件成型时的体积收缩率和Z方向翘曲位移较大,分别为13.342%和2.280 mm,超过塑件的生产要求(体积收缩率不超过8.5%,Z方向翘曲位移不

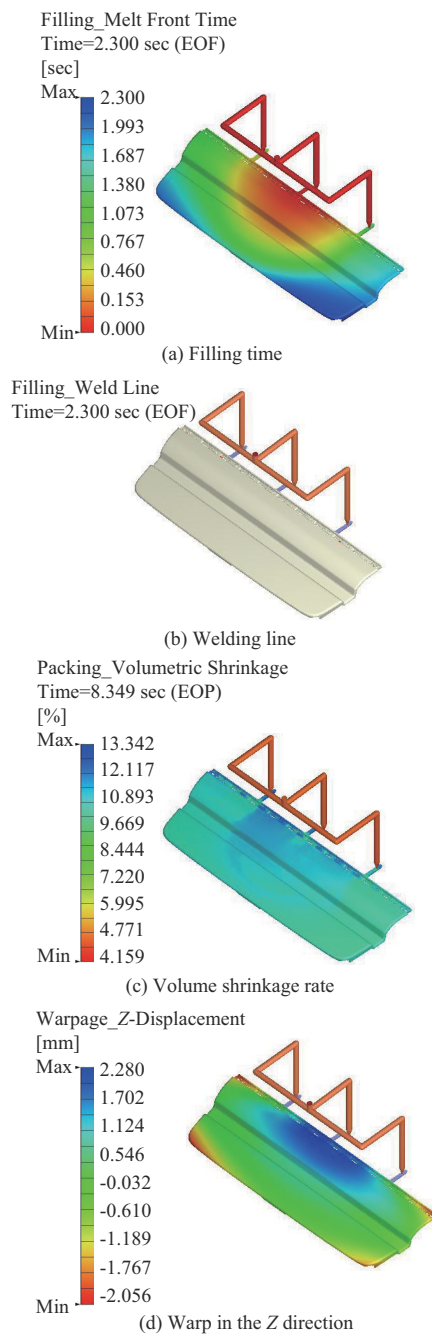


图4 初始参数模拟结果

Fig. 4 Initial parameter simulation results

超过 1.3 mm)。过大的体积收缩率会使塑件出现尺寸精度下降、外观变形等缺陷;Z 方向翘曲位移较大 会使塑件的结构强度降低,无法与其他部件进行精 确装配<sup>[13]</sup>。

## 2 正交试验

### 2.1 因素水平设计

根据 CAE 分析结果以及塑件对外观、装配精度 的要求和以往生产经验,以模具温度(A)、熔体温度 (B)、注射时间(C)、保压时间(D)和保压压力(E) 5 个 工艺参数作为试验因素,体积收缩率( $\alpha_1$ )和 Z 方向翘 曲位移( $\alpha_2$ )作为试验指标。参考初始参数和材料推 荐的工艺参数范围,每个工艺参数选取 4 个水平,表 2 为  $L_{16}(4^5)$  正交试验表。

| 表 2 $L_{16}(4^5)$ 正交试验表                    |        |      |     |     |       |
|--------------------------------------------|--------|------|-----|-----|-------|
| Tab. 2 $L_{16}(4^5)$ orthogonal test table |        |      |     |     |       |
| Level                                      | Factor |      |     |     |       |
|                                            | A/°C   | B/°C | C/s | D/s | E/MPa |
| 1                                          | 35     | 230  | 2.3 | 6   | 35    |
| 2                                          | 40     | 240  | 2.5 | 8   | 50    |
| 3                                          | 45     | 250  | 2.7 | 10  | 65    |
| 4                                          | 50     | 260  | 2.9 | 12  | 80    |

### 2.2 正交试验结果分析

使用 Moldex3D 软件对卡车前顶柜门外板进行 注射成型过程模拟,模拟的体积收缩率和 Z 方向翘 曲位移结果列于表 3;对试验指标进行极差分析,体 积收缩率和 Z 方向翘曲位移的极差分析结果(R 和  $R^*$ )列于表 4 和表 5。

| 表 3 $L_{16}(4^5)$ 正交试验结果                     |                      |      |     |     |       |               |                      |
|----------------------------------------------|----------------------|------|-----|-----|-------|---------------|----------------------|
| Tab. 3 $L_{16}(4^5)$ orthogonal test results |                      |      |     |     |       |               |                      |
| No.                                          | Experimental factors |      |     |     |       | Test results  |                      |
|                                              | A/°C                 | B/°C | C/s | D/s | E/MPa | $\alpha_1/\%$ | $\alpha_2/\text{mm}$ |
| 1                                            | 1                    | 1    | 1   | 1   | 1     | 11.750        | 1.703                |
| 2                                            | 1                    | 2    | 2   | 2   | 2     | 10.705        | 1.563                |
| 3                                            | 1                    | 3    | 3   | 3   | 3     | 9.984         | 1.283                |
| 4                                            | 1                    | 4    | 4   | 4   | 4     | 9.388         | 1.106                |
| 5                                            | 2                    | 1    | 2   | 3   | 4     | 8.201         | 1.417                |
| 6                                            | 2                    | 2    | 1   | 4   | 3     | 9.753         | 1.585                |
| 7                                            | 2                    | 3    | 4   | 1   | 2     | 11.407        | 1.870                |
| 8                                            | 2                    | 4    | 3   | 2   | 1     | 12.974        | 2.028                |
| 9                                            | 3                    | 1    | 3   | 4   | 2     | 10.460        | 5.126                |
| 10                                           | 3                    | 2    | 4   | 3   | 1     | 12.084        | 5.652                |
| 11                                           | 3                    | 3    | 1   | 2   | 4     | 8.857         | 2.536                |
| 12                                           | 3                    | 4    | 2   | 1   | 3     | 8.485         | 2.667                |
| 13                                           | 4                    | 1    | 4   | 2   | 3     | 9.172         | 6.377                |
| 14                                           | 4                    | 2    | 3   | 1   | 4     | 8.754         | 5.175                |
| 15                                           | 4                    | 3    | 2   | 4   | 1     | 12.563        | 7.392                |
| 16                                           | 4                    | 4    | 1   | 3   | 2     | 11.613        | 6.070                |

Notes:  $\alpha_1$  is volume shrinkage;  $\alpha_2$  is Z-direction warpage displacement.

| 表 4 体积收缩率极差分析结果                                |        |        |        |        |        |
|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tab. 4 Volume shrinkage range analysis results |        |        |        |        |        |
| Item                                           | A      | B      | C      | D      | E      |
| k1                                             | 10.457 | 9.896  | 10.493 | 10.099 | 12.343 |
| k2                                             | 10.584 | 10.324 | 9.989  | 10.427 | 11.046 |
| k3                                             | 9.972  | 10.703 | 10.543 | 10.471 | 9.349  |
| k4                                             | 10.526 | 10.615 | 10.513 | 10.541 | 8.800  |
| R                                              | 0.612  | 0.807  | 0.554  | 0.442  | 3.543  |

| 表 5 Z 方向翘曲位移极差分析结果                                             |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tab. 5 Z-direction warpage displacement range analysis results |       |       |       |       |       |
| Item                                                           | A     | B     | C     | D     | E     |
| k1                                                             | 1.414 | 3.656 | 2.974 | 2.854 | 4.194 |
| k2                                                             | 1.725 | 3.494 | 3.260 | 3.126 | 3.657 |
| k3                                                             | 3.995 | 3.270 | 3.403 | 3.606 | 2.978 |
| k4                                                             | 6.254 | 2.968 | 3.751 | 3.802 | 2.559 |
| R*                                                             | 4.840 | 0.688 | 0.778 | 0.949 | 1.635 |

由表 4 体积收缩率极差分析结果可知,对体积 收缩率影响最大的工艺参数为保压压力;由表 5 Z 方向翘曲位移极差分析结果可知,对 Z 方向翘曲位 移影响最大的工艺参数为模具温度。当工艺参数 组合为  $A_3B_1C_2D_1E_4$  时,体积收缩率为最优值;工 艺参数组合为  $A_1B_4C_1D_1E_4$  时,Z 方向翘曲位移为 最优值。因正交试验得到的体积收缩率和 Z 方向 翘曲位移最优工艺参数组合不同,不能同时得到 体积收缩率和 Z 方向翘曲位移最优数值。为进一 步提高塑件的成型质量,故采用熵权 TOPSIS 法 对工艺参数进行综合评价分析。

## 3 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法是将熵权法和 TOPSIS 法相 结合的一种多指标综合评价法<sup>[14]</sup>。熵权法通过 各指标的信息熵确定各指标的权重,指标的权重 越大,其所提供的信息量越多,在综合评价时产生 的影响也会较大<sup>[15]</sup>。TOPSIS 法将熵权法得到 的指标权重和原始评价指标矩阵构成加权决策 矩阵,由相关公式确定优化指标的正、负理想解, 再利用欧几里得距离公式计算出每个备选方案 与正负理想解决方案之间的相对距离,并计算出 综合评价指数  $C_i$ 。熵权 TOPSIS 法计算步骤如 下<sup>[14]</sup>。

①建立原始评价指标矩阵 A。

设  $i$  次试验, $j$  个试验指标  $a$ ,原始评价指标 矩阵如式(1)所示。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \quad (1)$$

②数据规范化处理。

为了统一不同指标的数量级差异,需要对原始数据进行标准化处理<sup>[14]</sup>。因所有指标的值要求越小越好,属于成本属性<sup>[16]</sup>,按式(2)对数据进行规范化处理。

$$Z_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (2)$$

式中: $Z_{ij}$ 为第*i*次试验、第*j*个试验指标按照成本属性进行规范化处理得到的数值。由表3可知,一共进行16次试验,2个试验指标。

### ③比重的计算。

对于每个指标,计算所有样本在该指标上的比重,即每个样本的值占该指标总值的比例。按式(3)计算试验指标的比重。指标的比重计算结果列于表6。

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^m Z_{ij}} \quad (3)$$

式中: $m$ 为试验次数, $m=16$ 。

表6 指标比重计算结果

Tab. 6 Calculation results of indicator proportions

| No. | Indicator proportions |          |
|-----|-----------------------|----------|
|     | $P_{i1}$              | $P_{i2}$ |
| 1   | 0.029                 | 0.087    |
| 2   | 0.054                 | 0.090    |
| 3   | 0.072                 | 0.094    |
| 4   | 0.086                 | 0.097    |
| 5   | 0.115                 | 0.092    |
| 6   | 0.077                 | 0.089    |
| 7   | 0.037                 | 0.085    |
| 8   | 0.000                 | 0.082    |
| 9   | 0.060                 | 0.035    |
| 10  | 0.021                 | 0.026    |
| 11  | 0.099                 | 0.075    |
| 12  | 0.108                 | 0.073    |
| 13  | 0.091                 | 0.015    |
| 14  | 0.101                 | 0.034    |
| 15  | 0.009                 | 0.000    |
| 16  | 0.032                 | 0.020    |

### ④熵值的计算。

根据比重计算每个指标的熵值,熵值反映了指标的离散程度,熵值越大,表示该指标提供的信息越少,各样本在该指标上的差异越小。利用式(4)求出各指标的熵值 $E_j$ 。

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

式(4)中,当 $P_{ij} = 0, P_{ij} \ln(P_{ij}) = 0$ <sup>[17]</sup>。

⑤熵权的计算。由式(5)计算各指标的权重系

数 $\omega_j$ 。

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $n$ 为试验指标个数, $n=2$ 。

将表3的试验指标分别代入式(2)~式(5)中,试验指标体积收缩率和Z方向翘曲位移的熵值分别为0.926和0.935,权重系数为53.14%和46.86%。

⑥由熵权法确定的指标权重系数 $\omega_j$ ,构建加权决策矩阵 $V$ ,具体见式(6)和式(7)。

$$V = (v_{ij})_{m \times n} \quad (6)$$

$$v_{ij} = \omega_j \times Z_{ij} \quad (7)$$

⑦确定正负理想解。因为本次试验的优化指标属于成本属性,所以正理想解 $V_j^+$ 和负理想解 $V_j^-$ 分别由各评价指标在加权决策矩阵中的最小值和最大值组成。

⑧使用式(8)和式(9)欧几里得距离公式计算每个方案与正负理想解的距离( $D_i^+$ 和 $D_i^-$ )。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j^+ - v_{ij})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_j^- - v_{ij})^2} \quad (9)$$

⑨因指标数据按成本属性进行规范化处理,故由式(9)计算各试验方案的综合评价指数 $C_i$ 。

$$C_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

将通过熵权法得到的指标权重系数代入式(6)~式(10),计算出加权决策矩阵、每个方案与正负理想解的距离和综合评价指数 $C_i$ ,结果列于表7。对表7中的综合评价指数 $C_i$ 进行极差分析, $C_i$ 均值的最大值和最小值的差值越大,所代表的工艺参数对优化指标的影响越大<sup>[18]</sup>,分析结果见表8。各试验因素对优化指标(体积收缩率和Z方向翘曲位移)的影响程度从大到小为 $E > A > D > C > B$ ,保压压力对优化指标的影响最大。最优工艺参数组合为 $A_1 B_1 C_2 D_1 E_4$ ,即:模具温度 35 °C、熔体温度 230 °C、充填时间 2.5 s、保压时间 6 s、保压压力 80 MPa。

## 4 模具主要结构设计及工作原理

### 4.1 成型零部件及冷却系统设计

综合考虑卡车前顶柜门外板的复杂结构、装配要求和已设计的浇注系统,在型腔和型芯上均采用整体式结构,整体式型腔和型芯具有较高的精度和

表7 TOPSIS综合评价结果

Tab. 7 TOPSIS comprehensive evaluation results

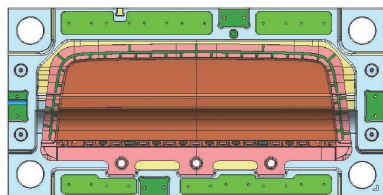
| No. | Weighting decision matrix |          | $D_i^+$ | $D_i^-$ | $C_i$ |
|-----|---------------------------|----------|---------|---------|-------|
|     | $V_{i1}$                  | $V_{i2}$ |         |         |       |
| 1   | 0.136                     | 0.424    | 0.445   | 0.397   | 0.528 |
| 2   | 0.253                     | 0.435    | 0.502   | 0.280   | 0.642 |
| 3   | 0.333                     | 0.455    | 0.564   | 0.199   | 0.739 |
| 4   | 0.399                     | 0.469    | 0.615   | 0.132   | 0.823 |
| 5   | 0.531                     | 0.445    | 0.693   | 0.023   | 0.968 |
| 6   | 0.359                     | 0.433    | 0.562   | 0.176   | 0.761 |
| 7   | 0.174                     | 0.412    | 0.447   | 0.361   | 0.553 |
| 8   | 0.000                     | 0.400    | 0.399   | 0.535   | 0.427 |
| 9   | 0.280                     | 0.169    | 0.326   | 0.391   | 0.455 |
| 10  | 0.099                     | 0.130    | 0.163   | 0.549   | 0.229 |
| 11  | 0.458                     | 0.362    | 0.584   | 0.129   | 0.819 |
| 12  | 0.500                     | 0.352    | 0.611   | 0.120   | 0.835 |
| 13  | 0.423                     | 0.076    | 0.430   | 0.407   | 0.513 |
| 14  | 0.470                     | 0.165    | 0.498   | 0.309   | 0.617 |
| 15  | 0.046                     | 0.000    | 0.045   | 0.674   | 0.064 |
| 16  | 0.152                     | 0.099    | 0.180   | 0.530   | 0.254 |

表8 综合评价值极差分析结果

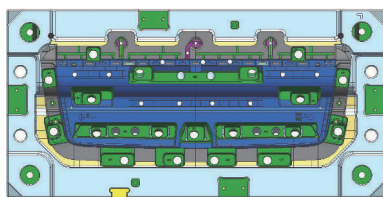
Tab. 8 Results of range analysis of composite rehensive value

| Item | Factor |       |       |       |       |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|
|      | A      | B     | C     | D     | E     |
| k1   | 0.683  | 0.616 | 0.591 | 0.633 | 0.312 |
| k2   | 0.677  | 0.562 | 0.627 | 0.600 | 0.476 |
| k3   | 0.585  | 0.544 | 0.560 | 0.548 | 0.712 |
| k4   | 0.362  | 0.585 | 0.530 | 0.526 | 0.807 |
| R    | 0.321  | 0.073 | 0.097 | 0.108 | 0.495 |

结构强度,因其是一体成型的,不需要复杂的配合,可以有效地减少因配合不良而产生的误差。型腔和型芯如图5所示,型腔和型芯尺寸均为1 000 mm×500 mm×150 mm。型腔和型芯均设计了宽6 mm、深0.5 mm的排气槽,排气槽可以帮助消除塑件在成型时产生的气泡,从而提高塑件的成型质量。由于卡车前顶柜门外板整体尺寸较大,故型腔和型



(a) Cavity

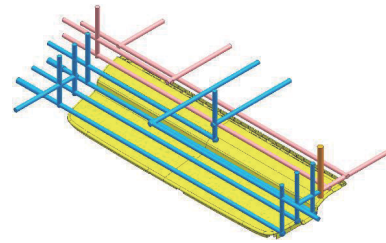


(b) Core

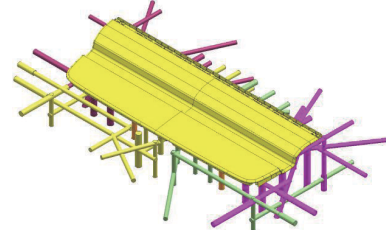
图5 型腔和型芯

Fig. 5 Cavity and core

芯采用“直通式+隔板式”的组合式循环水路,如图6所示,水路中心距离塑件20 mm,直通式水路直径为11.5 mm,隔板式水路直径为18 mm。



(a) Cavity waterway



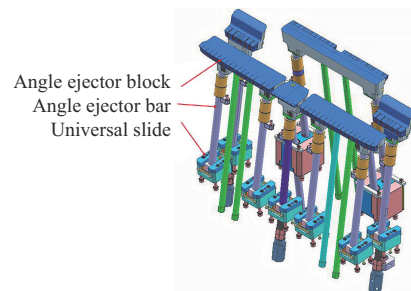
(b) Core waterway

图6 冷却系统

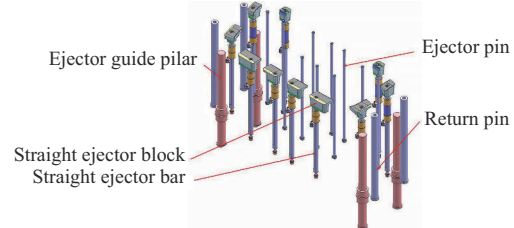
Fig. 6 Cooling system

#### 4.2 侧抽芯机构和顶出机构设计

由于塑件背面具有较多的加强筋和凹槽设计,模具需要设计侧向抽芯结构,否则无法顺利脱模。由于是向脱模方向进行抽芯,故采用“斜顶杆+万向滑座+斜顶块”的侧抽芯机构,侧抽芯机构如图7a所示。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<sup>[19]</sup>,故采用“顶针+直顶杆+直顶块+推板导柱+复位杆”的组合顶出机构,顶出机构如图7b所示。



(a) Side core pulling mechanism



(b) Ejector mechanism

图7 侧抽芯机构和顶出机构

Fig. 7 Side core pulling mechanism and ejector mechanism

### 4.3 工作原理

将上述的模具各部件进行装配,得到了卡车前顶柜门外板注塑模具的二维模具总装图及模具3D模型,如图8所示。模具结构为一模一腔,采用阀式热流道和U型冷流道相结合的浇注系统,利用斜顶杆进行侧向抽芯。模具的工作原理如下。

(1)模具通过定位圈13安装在注塑机上,并将熵权TOPSIS得到的最优工艺参数组合应用到注塑机上。注塑机将塑料加热到设定温度,按阀式热流道18开启的顺序将熔融塑料通过浇注系统注入到模具型腔9中。待熔体完全充满型腔,按照设定的保压时间和保压压力进行保压和冷却。

(2)当塑件温度达到顶出温度时,注塑机通过动模板1拉动模具型芯6从分型面I处打开,型芯6移动到一定位置时,停止移动;同时,利用顶出油缸8带动推板2推动斜顶杆26和斜顶块25进行侧向抽芯;顶针14、直顶杆5和直顶块7一起将塑件顶出,拉料杆20将废料拉出。

(3)待塑件取出后,顶出油缸8驱动推板2使斜顶杆26、顶针14和直顶杆5复位;同时,在复位杆4、推板导柱15的作用下模具闭合,开始下一次注塑循环。

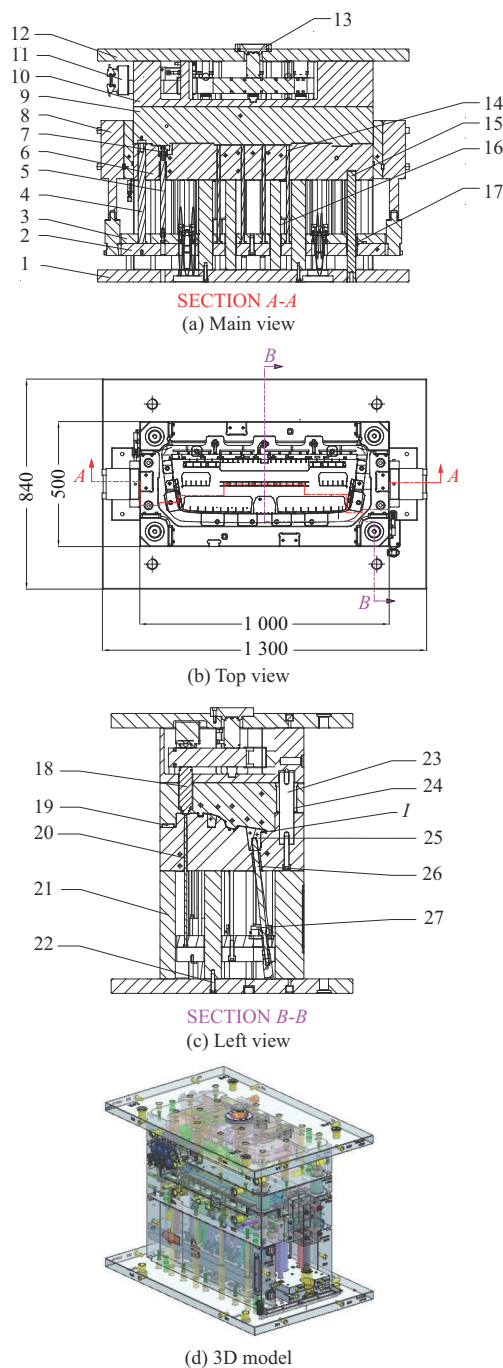
### 5 结果验证

将由熵权TOPSIS法得到的最优工艺参数组合在Moldex3D软件中进行模拟和实际试模验证。由图9熵权TOPSIS法优化模拟结果可知:塑件的体积收缩率为8.237%,Z方向翘曲位移为1.198 mm,分别比初始分析减少了5.105%和1.082 mm,降低了38.26%和47.46%。由图10卡车前顶柜门外板试模样品可知:样品表面无短射、缝合线、缩痕等外观缺陷;对样品进行测量,其Z方向翘曲为1.025 mm,与模拟值相比误差为14.44%;产品合格率为83.33%,达到生产要求。

### 6 结论

(1)针对卡车前顶柜门外板在初始设计中出现的成型缺陷(体积收缩率和Z方向翘曲位移过大),采用正交试验结合极差分析的方法得到2组最优方案,但无法同时使体积收缩率和Z方向翘曲位移达到最优,故需要对方案进一步优化。

(2)采用熵权TOPSIS法将体积收缩率和Z方向翘曲位移转化为综合评价指数 $C_i$ 进行单目标优化,



1—Moving template; 2—Ejector base plate; 3—Ejector pin panel; 4—Return pin; 5—Straight ejector bar; 6—Core; 7—Straight ejector block; 8—Ejector cylinder; 9—Cavity; 10—Hot runner fixing plate; 11—Hot runner junction; 12—Fixed template; 13—Positioning ring; 14—Ejector pin; 15—Ejector guide pillar; 16—Spacer; 17—Ejector guide sleeve; 18—Valve type hot runner; 19—Pressure-forming plate; 20—Sprue puller; 21—Pad; 22—Screw; 23—Guide pillar; 24—Guide sleeve; 25—Angle ejector block; 26—Angle ejector bar; 27—Universal slide; I—Angle ejector

图8 二维模具总装图及模具三维模型

Fig. 8 2D mould assembly drawing and mould 3D model

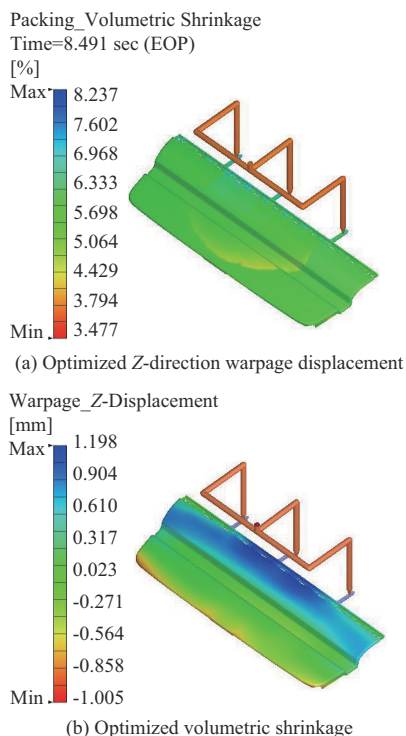


图9 熵权TOPSIS法优化模拟结果

Fig. 9 Optimization simulation results of entropy weight TOPSIS method

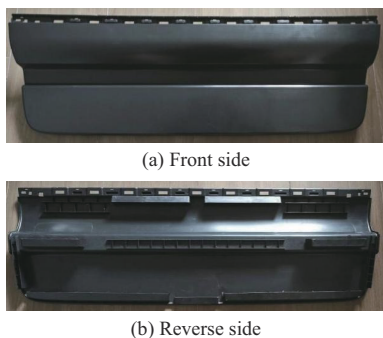


图10 卡车前顶柜门外板试模样品

Fig. 10 Molding products of truck front roof cabinet door outer panel

得到体积收缩率和Z方向翘曲位移同时最优的工艺参数组合:模具温度 35℃、熔体温度 230℃、充填时间 2.5 s、保压时间 6 s、保压压力 80 MPa,各工艺参数对体积收缩率和Z方向翘曲位移影响程度从大到小为 $E>A>D>C>B$ 。

(3)对最优工艺参数组合进行仿真模拟和实际试模,模拟的体积收缩率为8.237%,Z方向翘曲位移为1.198 mm;与初始分析结果相比,分别降低了38.26%和47.46%;试模样品外观质量良好,Z方向翘曲位移为1.025 mm,与模拟值相比误差为14.44%,产品合格率为83.33%。因此,证明采用Moldex3D模流分析软件和熵权TOPSIS法可有效

解决注射成型中的多目标优化问题。

#### 参考文献

- [1] 吴虎.汽车前端框架上支架结构轻量化及其注射成型工艺参数优化研究[D].芜湖:安徽工程大学,2023.  
WU Hu. Research on lightweight structure of automobile front end frame and optimization of injection molding process parameters [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2023.
- [2] 周纪委,王明伟,张文超,等.基于响应面法和灰色关联分析的汽车雾灯灯罩注塑工艺多目标优化[J].塑料,2023,52(6):122-129.  
ZHOU Jiwei, WANG Mingwei, ZHANG Wenchao, et al. Multi-objective optimization of automotive fog lampshade injection molding process based on response surface method and grey correlation analysis[J]. Plastics, 2023, 52(6):122-129.
- [3] 吴迪,周纪委,王明伟,等.基于灰色关联分析的汽车前风窗玻璃除霜格栅注塑成型工艺多目标优化[J].塑料科技,2023,51(9):98-102.  
WU Di, ZHOU Jiwei, WANG Mingwei, et al. Multi-objective optimization of automotive front windshield defrost grille injection molding process based on grey correlation analysis[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(9):98-102.
- [4] 张尧,李章宇,章金字,等.基于Moldex3D的油漆桶桶盖注塑成型过程分析[J].合成树脂及塑料,2024,41(1):62-67.  
ZHANG Yao, LI Zhangyu, ZHANG Jinyu, et al. Analysis of injection molding process of paint barrel cap based on Moldex3D[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2024, 41(1):62-67.
- [5] CHEN J, CUI Y, LIU Y, et al. Design and parametric optimization of the injection molding process using statistical analysis and numerical simulation[J]. Processes, 2023, 11(2). DOI: 10.3390/pr11020414.
- [6] 马昊,许善鹏,于昕世,等.基于灰狼算法和正交试验的冰箱饰条参数优化[J].塑料科技,2023,51(9):93-97.  
MA Hao, XU Shanpeng, YU Xinshi, et al. Optimization of refrigerator trim parameters based on gray wolf algorithm and orthogonal tests[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(9):93-97.
- [7] 高洪晨,薛松,肖梦曦,等.基于正交试验与BP神经网络-遗传算法的空气净化器外壳注塑工艺参数优化[J].精密成形工程,2023,15(8):204-210.  
GAO Hongchen, XUE Song, XIAO Mengxi, et al. Optimization of air purifier shell injection molding process parameters based on orthogonal experiment and BP neural network-genetic algorithm[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(8):204-210.
- [8] 谭波. ABS自动化设备电子元器件外壳注塑成型工艺优化研究[J].塑料科技,2023,51(6):75-79.  
TAN Bo. Study on optimization of injection molding process of electronic components shell of ABS automation equipment[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(6):75-79.
- [9] 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试验[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.
- [10] 陈川,吕永锋.基于响应面设计及改进NSGA-II的变模温注塑成型工艺多目标优化[J]. *塑料工业*, 2023, 51(6):75–81.  
CHEN Chuan, LYU Yongfeng. Multi-objective optimization of dynamic mold temperature injection molding process based on response surface model and improved NSGA- II algorithm[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(6):75–81.
- [11] LIU F, PANG J, XU Z. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for moderately thick plane lens based on PSO-BPNN, OMOPSO, and TOPSIS[J]. *Processes*, 2024, 12(1). DOI:10.3390/pr12010036.
- [12] HUANG W T, TSAI C L, HO W H, et al. Application of intelligent modeling method to optimize the multiple quality characteristics of the injection molding process of automobile lock parts[J]. *Polymers*, 2021, 13. DOI:10.3390/polym13152515.
- [13] 余钰洋.基于CAE的某生化仪内支架注塑成型过程模拟及工艺参数优化研究[D].合肥:安徽建筑大学,2023.  
YU Yuyang. CAE-based simulation of injection molding process and optimization of process parameters for a biochemical instrument inner support[D]. Hefei:Anhui Jianzhu University, 2023.
- [14] 彭文意.钢铁企业财务风险评价模型构建[J]. *合作经济与科技*, 2024(8):146–149.  
PENG Wenyi. Construction of financial risk evaluation model for iron and steel enterprises[J]. *Co-Operative Economy & Science*, 2024(8):146–149.
- [15] 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.
- [16] 张杰,邱志敏,林静章,等.基于熵权的Topsis综合评价法的工艺优化及模具设计[J]. *塑料工业*, 2021, 49(12):86–90.  
ZHANG Jie, QIU Zhimin, LIN Jingzhang, et al. Process optimization and die design with Topsis comprehensive evaluation method based on entropy weight[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(12):86–90.
- [17] 李泽东,曹振,张如明,等.熵权-TOPSIS法在华北石质山区常用造林树种抗旱性评价中的应用[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2020, 55(1):117–126.  
LI Zedong, CAO Zhen, ZHANG Ruming, et al. Application of entropy weight-TOPSIS method to drought resistance evaluation of common afforestation tree species in the lithoid hilly area of North China[J]. *Journal of Shandong University(Natural Science)*, 2020, 55(1):117–126.
- [18] 方明月,张宇,王彻,等.汽车仪表内饰件注塑成型工艺的多目标优化[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(9):83–89.  
FANG Mingyue, ZHANG Yu, WANG Che, et al. Multi-objective optimization of injection molding process for interior trim of automobile instrument[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9):83–89.
- [19] 周纪委,王明伟,吴迪,等.汽车尾门左右窗框饰板气辅注塑模具设计[J]. *中国塑料*, 2023, 37(11):141–148.  
ZHOU Jiwei, WANG Mingwei, WU Di, et al. Design of gas assisted injection mold construction for left and right window frame trim panels of automobile tailgate[J]. *China Plastics*, 2023, 37(11):141–148.