# 熵权–TOPSIS–灰色关联法在涡轮管注塑工艺参数优化中的应用研究

李妍缘[1]，刘进来[2]，张江城[3]

（1.郑州电力高等专科学校，河南 郑州 450002；2.海军工程大学，湖北 武汉 430032；
3.湖北三峡职业技术大学，湖北 宜昌 443000）

**摘　要：**研究针对聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）涡轮管道注塑成型工艺参数优化问题，构建熵权–TOPSIS–灰色关联法三阶段多目标优化框架。在初始仿真条件下，涡轮管道最大翘曲变形量为1.561 0 mm，体积收缩率为8.979 0%，存在明显成型缺陷。研究采用$L_{25}(5^6)$正交表设计试验，通过熵权法确定翘曲变形量权重为0.691 9，体积收缩率权重为0.308 1。TOPSIS分析表明，当模具温度为120 ℃、熔体温度为280 ℃、保压压力为120 MPa、冷却时间为25 s、顶出温度为75 ℃时，相对贴近度最高（0.875 8），灰色关联度为0.887 8。极差分析显示，保压压力对系统性能影响最大。优化后翘曲变形量降至0.499 1 mm，体积收缩率降至4.226 0%，缩痕指数由4.114%降至3.555%，实际注塑试验验证了该优化方案的有效性与工业适应性，形成“客观赋权–多指标排序–结果验证”的闭环优化路径，为复杂结构透明注塑件的多目标工艺优化提供参考。

**关键词：**熵权–TOPSIS–灰色关联法；翘曲变形量；多目标决策

**中图分类号：**TQ320.66　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）09-0174-06

**DOI：**10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.031

## Application and Study of Entropy Weight–TOPSIS–Grey Correlation Method in Optimization of Injection Molding Process Parameters for Turbine Pipe

LI Yanyuan[1], LIU Jinlai[2], ZHANG Jiangcheng[3]

(1. Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450002, China; 2. Naval Engineering University, Wuhan 430032, China;
3. Hubei Three Gorges Technical University, Yichang 443000, China)

**Abstract:** To address the optimization of process parameters for the injection molding of polymethyl methacrylate (PMMA) turbine pipes, a three-stage multi-objective optimization framework integrating the entropy weight-TOPSIS-grey correlation method was established. Under the initial simulation conditions, the maximum warpage deformation of the turbine pipe was 1.561 0 mm, and the volumetric shrinkage was 8.979 0%, indicating significant molding defects. An $L_{25}(5^6)$ orthogonal array was employed for test design. The entropy weight method determined the weights for warpage deformation and volumetric shrinkage as 0.691 9 and 0.308 1, respectively. The TOPSIS analysis revealed that the highest relative closeness (0.875 8) and a grey relational grade of 0.887 8 were achieved under the conditions of a mold temperature of 120 ℃, a melt temperature of 280 ℃, a holding pressure of 120 MPa, a cooling time of 25 s, and an ejection temperature of 75 ℃. Range analysis indicated that holding pressure exerted the greatest influence on system performance. After optimization, the warpage deformation was reduced to 0.499 1 mm, the volumetric shrinkage decreased to 4.226 0%, and the sink mark index was reduced from 4.114% to 3.555%. Actual injection molding trials validated the effectiveness and industrial adaptability of the optimized scheme, forming a closed-loop optimization path of "objective weighting-multi-index ranking-result validation", which provides a reference for the multi-objective process optimization of complex transparent injection-molded parts.

**Keywords:** Entropy weight-TOPSIS-grey correlation method; Warpage deformation; Multi-objective decision-making

收稿日期 Submitted date 2026-02-10；修回日期 Revised date 2026-03-15；录用日期 Accepted date 2026-04-20

基金项目：湖北省教育厅2023年教育智库研究重点委托项目（HBZJZK2305）

联系人，13653826109@163.com

引用本文：李妍缘，刘进来，张江城. 熵权–TOPSIS–灰色关联法在涡轮管注塑工艺参数优化中的应用研究[J]. 塑料科技，2026，54(9)：174–179.

Citation：LI Y Y, LIU J L, ZHANG J C. Application and study of entropy weight-TOPSIS-grey correlation method in optimization of injection molding process parameters for turbine pipe[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 174-179.

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)因其优异的光学透明性与力学性能,在涡轮系统透明防护罩及可视化流道等部件中得到广泛应用[1]。然而,注塑成型过程涉及熔体流动、热传递及固化收缩等多物理场耦合效应,工艺参数之间高度非线性耦合,使涡轮管道这类壁厚不均的复杂结构件易产生翘曲变形、体积收缩不均及熔接线等典型缺陷。因此,构建高效且可靠的多参数协同优化方法以实现多质量指标协调控制,已成为制约其工程应用的关键问题之一。围绕注塑工艺参数优化,相关研究经历了由经验驱动向数据驱动的演进过程。早期研究多采用单因素分析与正交试验设计方法识别关键工艺参数,仅表明模具温度与保压压力对翘曲变形具有显著影响[2-3]。然而,正交试验主要关注因素主效应,难以刻画参数间的交互作用,且在多质量指标协同优化方面存在明显局限。为进一步提升建模精度,响应曲面法被引入用于构建工艺参数与质量指标之间的非线性映射关系,并结合期望函数实现多目标优化[4-5]。尽管该方法能够在一定程度上平衡多指标冲突,但其对样本规模较为敏感,且优化结果依赖于权重设定,存在一定主观性。

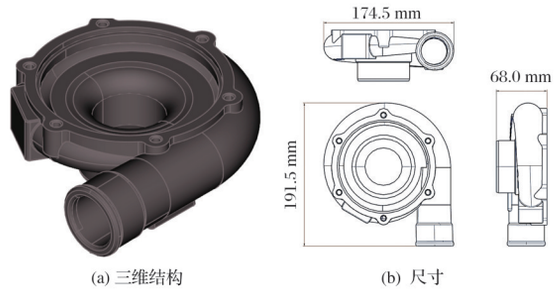
近年来,多指标决策方法在注塑工艺优化中逐渐得到应用。熵权法通过指标离散程度实现客观赋权,有助于降低人为干扰[6];逼近理想解排序法(TOPSIS)基于方案与理想解之间的距离关系进行排序,具有明确的几何意义[7];灰色关联分析通过度量序列曲线的几何相似性来表征指标间的关联程度,并在小样本及信息不完全条件下具有良好的适用性[8]。已有研究尝试将上述方法进行组合应用,以提升多指标评价的综合性与稳定性[9-11]。然而,不同方法在评价机制上存在本质差异。TOPSIS 依赖距离度量,而灰色关联分析侧重序列形态相似性,这种差异可能导致方案排序结果不一致,从而增加工艺决策的不确定性。针对多方法评价结果一致性与稳健性的系统性验证仍较为缺乏[12]。此外,现有研究多集中于仿真分析,缺乏与实际注塑试验相结合的验证过程,限制了优化方法在工程场景中的应用可信度。

针对上述问题,本研究构建一种基于熵权法、TOPSIS与灰色关联分析的三阶段多目标优化框架,将其应用于PMMA涡轮管道注塑成型工艺参数优化。首先,利用熵权法确定翘曲变形量与体积收缩率的客观权重,以减少人为赋权带来的偏差;其次,基于TOPSIS方法对正交试验方案进行多指标综合排序,实现最优参数组合的初步筛选;最后,引入灰色关联分析对排序结果进行一致性验证,结合灰色关联度均值响应分析各工艺参数对系统性能的影响程度。

## 1 模拟仿真

### 1.1 构建模型

在前期准备阶段,采用UG 12.0软件进行三维建模。图1为涡轮管道的三维结构及尺寸。从图1可以看出,涡轮管道模型的尺寸为191.5 mm×174.5 mm×68.0 mm。在模型构建过程中,充分考虑涡轮管道的复杂结构特征,保证几何形状的准确性和完整性,为模拟注塑过程中的流动行为、热传递及应力分布提供真实有效的几何输入条件[13]。




(a) 三维结构 (b) 尺寸

图1 涡轮管道的三维结构及尺寸

Fig.1 Three dimensional structure and dimensions of turbine pipe

### 1.2 网格划分

完成三维建模后,利用Moldflow软件对涡轮管道模型进行网格划分,以实现精细的注塑模拟分析。图2为涡轮管道的网格划分。将构建好的三维模型导入Moldflow中,按照网格划分策略,生成50 011个网格单元,最大纵横比达到15.42,网格匹配率高达96.6%,保证了网格划分的均匀性和连续性,有利于模拟计算的稳定性和准确性[14]。

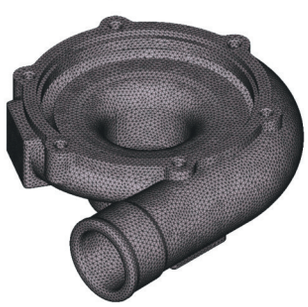


图2 涡轮管道的网格划分

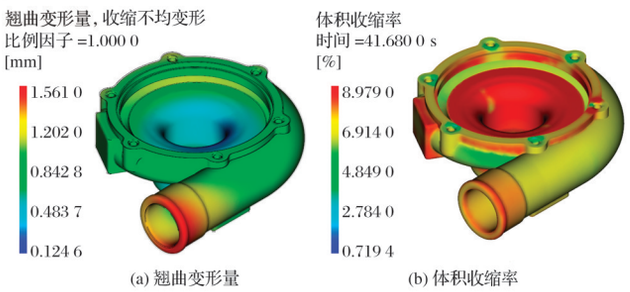
Fig.2 Grid division of turbine pipe

### 1.3 初始模拟

初始参数设置基于PMMA材料的物理属性,特别是其比热容曲线中的熔点分析,确定了注射温度的合理范围。PMMA材料的参数范围:模具温度为70~120 ℃;注射压力为80~150 MPa;注射温度为260~280 ℃;保压压力为70~120 MPa;冷却时间为10~30 s;顶出温度为60~90.0 ℃;熔体温度为280~300 ℃。为保证聚合物熔体的良好流动性及低黏度状态,模具温度为120 ℃,熔体温度为300 ℃,保压压力为120 MPa,冷却时间为20 s,顶出温度设定为90 ℃。这些参数的合理设定旨在确保模具充填完全,避免缺料和气孔的产生,降低冷却过程中内应力的积累,防止制件翘曲变形,确保注塑件的稳定性和质量[15]。图3为涡轮管道的模拟分析结果。从图3可以看出,PMMA制件的最大翘曲变形量为1.561 0 mm,体积收缩率为8.979 0%,最大翘曲变形主要集中于涡轮管口处。

图4为涡轮管道的初始缺陷分析。从图4可以看出,气穴和熔接线主要分布在制件正面,这些缺陷在实际使用中可能导致涡轮管道结构在冲击和高压环境下发生破裂,

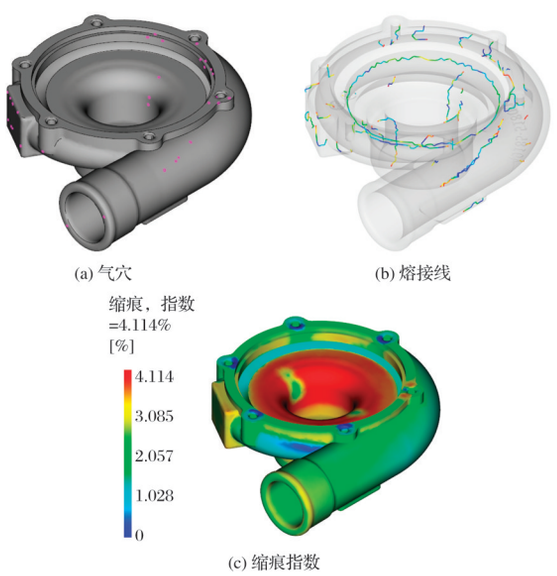
严重影响制件的机械性能和使用寿命，缩痕指数较高难以满足基本工艺需求，表明成型过程中存在明显的质量隐患[16-17]。




(a) 翘曲变形量　(b) 体积收缩率

图 3　涡轮管道的模拟分析结果

Fig.3 Simulation analysis results of turbine pipe




(a) 气穴　(b) 熔接线

(c) 缩痕指数

图 4　涡轮管道的初始缺陷分析

Fig.4 Initial defect analysis of turbine pipe

## 2　工艺参数优化

### 2.1　建立正交试验因素水平

为了系统优化注塑工艺参数，根据实际生产经验，本研究选取5个关键因素，每个因素设置5个水平，采用$L_{25}(5^6)$正交表进行试验设计。表1为$L_{25}(5^6)$正交试验因素水平设计。5个因素包括模具温度($A$)、熔体温度($B$)、保压压力($C$)、冷却时间(D)和顶出温度($E$)。选取顶出时的翘曲变形量($X$)和体积收缩率($Y$)作为响应指标，这两个指标直接关系到涡轮管道的尺寸精度和结构稳定性。

表 1　$L_{25}(5^6)$正交试验因素水平设计

Tab.1 $L_{25}(5^6)$ orthogonal test factor level design

| 水平 | $A$/℃ | $B$/℃ | $C$/MPa | $D$/s | $E$/℃ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 70.0 | 280.0 | 70.0 | 10.0 | 60.0 |
| 2 | 82.5 | 285.0 | 82.5 | 15.0 | 67.5 |
| 3 | 95.0 | 290.0 | 95.0 | 20.0 | 75.0 |
| 4 | 107.5 | 295.0 | 107.5 | 25.0 | 82.5 |
| 5 | 120.0 | 300.0 | 120.0 | 30.0 | 90.0 |

### 2.2　正交试验结果与极差分析

表2为$L_{25}(5^6)$正交试验结果。表3为翘曲变形量的极差分析。从表3可以看出，各因素对翘曲变形量的影响程度依次为：模具温度、顶出温度、熔体温度、冷却时间和保压压力。模具温度对翘曲变形量的影响最显著。

表 2　$L_{25}(5^6)$正交试验结果

Tab.2 Results of $L_{25}(5^6)$ orthogonal test

| 试验号 | $A$/℃ | $B$/℃ | $C$/MPa | $D$/s | $E$/℃ | $X$/mm | $Y$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 95.0 | 295.0 | 70.0 | 20.0 | 90.0 | 1.496 0 | 7.065 |
| 2 | 120.0 | 285.0 | 70.0 | 30.0 | 82.5 | 0.922 2 | 6.663 |
| 3 | 70.0 | 290.0 | 95.0 | 20.0 | 75.0 | 1.246 0 | 5.905 |
| 4 | 120.0 | 295.0 | 95.0 | 15.0 | 60.0 | 0.915 8 | 9.103 |
| 5 | 120.0 | 290.0 | 82.5 | 10.0 | 90.0 | 1.335 2 | 7.897 |
| 6 | 95.0 | 280.0 | 95.0 | 30.0 | 67.5 | 0.681 9 | 5.526 |
| 7 | 120.0 | 280.0 | 120.0 | 25.0 | 75.0 | 0.499 1 | 4.226 |
| 8 | 82.5 | 295.0 | 120.0 | 10.0 | 67.5 | 1.171 8 | 7.103 |
| 9 | 70.0 | 285.0 | 82.5 | 15.0 | 67.5 | 1.251 3 | 6.735 |
| 10 | 82.5 | 280.0 | 82.5 | 20.0 | 82.5 | 1.175 8 | 5.472 |
| 11 | 95.0 | 300.0 | 82.5 | 25.0 | 60.0 | 1.081 3 | 8.321 |
| 12 | 70.0 | 280.0 | 70.0 | 10.0 | 60.0 | 1.252 7 | 7.520 |
| 13 | 82.5 | 300.0 | 70.0 | 15.0 | 75.0 | 1.583 3 | 8.298 |
| 14 | 95.0 | 290.0 | 120.0 | 15.0 | 82.5 | 1.093 0 | 5.899 |
| 15 | 82.5 | 290.0 | 107.5 | 30.0 | 60.0 | 0.764 6 | 5.865 |
| 16 | 120.0 | 300.0 | 107.5 | 20.0 | 67.5 | 0.922 2 | 8.276 |
| 17 | 107.5 | 280.0 | 107.5 | 15.0 | 90.0 | 0.996 4 | 5.494 |
| 18 | 82.5 | 285.0 | 95.0 | 25.0 | 90.0 | 1.165 8 | 4.706 |
| 19 | 107.5 | 295.0 | 82.5 | 30.0 | 75.0 | 0.998 7 | 7.161 |
| 20 | 70.0 | 295.0 | 107.5 | 25.0 | 82.5 | 1.265 2 | 5.074 |
| 21 | 107.5 | 300.0 | 95.0 | 10.0 | 82.5 | 1.414 6 | 8.308 |
| 22 | 70.0 | 300.0 | 120.0 | 30.0 | 90.0 | 1.256 5 | 4.286 |
| 23 | 107.5 | 290.0 | 70.0 | 25.0 | 67.5 | 1.003 4 | 7.855 |
| 24 | 95.0 | 285.0 | 107.5 | 10.0 | 75.0 | 1.091 9 | 6.686 |
| 25 | 107.5 | 285.0 | 120.0 | 20.0 | 60.0 | 0.586 8 | 6.654 |

表 3　翘曲变形量的极差分析

Tab.3 Range analysis of warpage deformation

| 项目 | $A$ | $B$ | $C$ | $D$ | $E$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $K_1$ | 1.254 3 | 0.923 0 | 1.251 5 | 1.253 2 | 0.920 2 |
| $K_2$ | 1.172 3 | 1.003 6 | 1.168 5 | 1.168 0 | 1.006 1 |
| $K_3$ | 1.088 8 | 1.088 4 | 1.084 8 | 1.085 4 | 1.085 6 |
| $K_4$ | 0.999 9 | 1.169 5 | 1.008 1 | 1.004 8 | 1.174 2 |
| $K_5$ | 0.920 7 | 1.251 6 | 0.923 3 | 0.924 8 | 1.250 0 |
| 极差 | 0.333 6 | 0.328 6 | 0.328 2 | 0.328 5 | 0.329 7 |
| 排秩 | 1 | 3 | 5 | 4 | 2 |

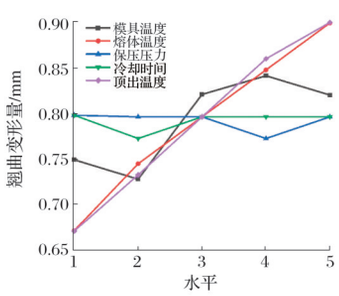
表4为体积收缩率的极差分析。从表4可以看出，各因素对体积收缩率的影响程度依次为：顶出温度、冷却时间、熔体温度、保压压力和模具温度。顶出温度对体积收缩率的影响最显著。

表4 体积收缩率的极差分析

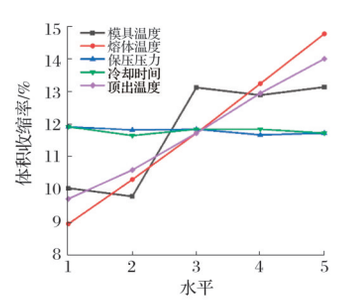
Tab.4 Range analysis of volume shrinkage

| 项目 | *A* | *B* | *C* | *D* | *E* |
|---|---|---|---|---|---|
| $K_1$ | 5.904 0 | 5.902 2 | 7.480 2 | 7.502 8 | 7.492 6 |
| $K_2$ | 6.288 8 | 6.288 8 | 7.117 2 | 7.105 8 | 7.099 0 |
| $K_3$ | 6.699 4 | 6.684 2 | 6.709 6 | 6.674 4 | 6.709 8 |
| $K_4$ | 7.094 4 | 7.101 2 | 6.279 0 | 6.291 0 | 6.283 2 |
| $K_5$ | 7.487 6 | 7.497 8 | 5.888 2 | 5.900 2 | 5.889 6 |
| 极差 | 1.583 6 | 1.595 6 | 1.592 0 | 1.602 6 | 1.603 0 |
| 排秩 | 5 | 3 | 4 | 2 | 1 |

图5为各因素水平对翘曲变形量和体积收缩率的影响。从图5a可以看出，模具温度和顶出温度的变化范围对翘曲变形的调控更加敏感，但各因素的极差整体偏小。这表明正交试验的水平设置可能存在一定限制，未能充分覆盖翘曲变形的全部变化范围[18]。此外，极差分析无法表征因素间的交互作用，限制对复杂成型机制的深入理解，反映出正交方法在解析多种因素耦合影响时存在不足。从图5b可以看出，各因素对体积收缩率的极差差异较小，相对集中反映出正交设计的分辨率有限，难以准确区分各因素的细微影响。体积收缩率的变化趋势较为复杂，可能受到多种因素交互作用和非线性影响的制约，正交试验未能同时揭示各工艺参数对翘曲变形量和体积收缩率的影响，限制了模型的预测精度和实际应用效果[19]。




(a) 翘曲变形量




(b) 体积收缩率

图5 各因素水平对翘曲变形量和体积收缩率的影响

Fig.5 Effect of each factor and level on warpage deformation and volume shrinkage

因此，为了更全面、准确地评价各注塑工艺参数对两类指标的影响，引入熵权-TOPSIS-灰色关联法等多指标综合评价方法，以克服正交试验在因素交互、权重分配和多目标优化方面的局限，提升模型的实用性和指导价值。

## 2.3 TOPSIS多目标决策

将标准化翘曲变形量和标准化体积收缩率均经归一化处理，方便不同量纲指标的比较和综合分析。翘曲变形量加权标准化矩阵 $\alpha(X)$ 与体积收缩率加权标准化矩阵 $\alpha(Y)$ 是在原始标准化数据的基础上，结合熵权法计算的权重进行加权，体现各指标在综合评价中的相对重要性。标准化翘曲变形量 $Z(X)$ 的熵权值为0.691 9，标准化体积收缩率 $Z(Y)$ 的熵权值为0.308 1，表明翘曲变形量在综合性能中占据更高权重。相对贴近度($C_i$)作为TOPSIS方法的关键输出，反映各试验条件组合在多指标综合评价中的优劣排序，数值越大代表综合性能越优[20]。表5为 $C_i$ 计算结果。从表5可以看出，试验号7和25的 $C_i$ 较高，分别为0.875 8和0.726 4，表明这两组注塑参数组合在控制翘曲和收缩方面表现最佳。而试验号1、13和21的 $C_i$ 较低，分别为0.084 8、0.027 8和0.060 1，表明其综合性能较差。整体来看，$C_i$ 的波动与加权标准化指标密切相关。翘曲变形量权重越大，翘曲变形量对相对贴近度的影响越显著；体积收缩率虽权重较小，但仍对最终评价有一定贡献。

表5 $C_i$ 计算结果

Tab.5 Calculation results of $C_i$

| 试验号 | *Z*(*X*) | *Z*(*Y*) | *α*(*X*) | *α*(*Y*) | $C_i$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.235 1 | 0.186 9 | 0.24 | 0.19 | 0.084 8 |
| 2 | 0.381 3 | 0.198 2 | 0.38 | 0.20 | 0.337 6 |
| 3 | 0.282 2 | 0.223 7 | 0.28 | 0.22 | 0.191 3 |
| 4 | 0.384 0 | 0.145 1 | 0.38 | 0.15 | 0.317 3 |
| 5 | 0.263 4 | 0.167 2 | 0.26 | 0.17 | 0.094 1 |
| 6 | 0.515 7 | 0.239 0 | 0.52 | 0.24 | 0.619 6 |
| 7 | 0.691 9 | 0.240 2 | 0.69 | 0.24 | 0.875 8 |
| 8 | 0.300 1 | 0.185 9 | 0.30 | 0.19 | 0.176 7 |
| 9 | 0.281 0 | 0.196 1 | 0.28 | 0.20 | 0.154 7 |
| 10 | 0.299 1 | 0.241 4 | 0.30 | 0.24 | 0.236 3 |
| 11 | 0.325 2 | 0.158 7 | 0.33 | 0.16 | 0.208 1 |
| 12 | 0.280 7 | 0.175 6 | 0.28 | 0.18 | 0.132 7 |
| 13 | 0.222 1 | 0.159 2 | 0.22 | 0.16 | 0.027 8 |
| 14 | 0.321 7 | 0.223 9 | 0.32 | 0.22 | 0.250 8 |
| 15 | 0.459 9 | 0.225 2 | 0.46 | 0.23 | 0.504 7 |
| 16 | 0.381 3 | 0.159 6 | 0.38 | 0.16 | 0.317 2 |
| 17 | 0.352 9 | 0.240 4 | 0.35 | 0.24 | 0.319 0 |
| 18 | 0.301 7 | 0.280 6 | 0.30 | 0.28 | 0.286 6 |
| 19 | 0.352 1 | 0.184 4 | 0.35 | 0.18 | 0.273 1 |
| 20 | 0.278 0 | 0.260 3 | 0.28 | 0.26 | 0.235 1 |
| 21 | 0.248 6 | 0.159 0 | 0.25 | 0.16 | 0.060 1 |
| 22 | 0.279 9 | 0.308 2 | 0.28 | 0.31 | 0.295 7 |
| 23 | 0.350 5 | 0.168 1 | 0.35 | 0.17 | 0.261 2 |
| 24 | 0.322 1 | 0.197 5 | 0.32 | 0.20 | 0.226 3 |
| 25 | 0.599 3 | 0.198 5 | 0.60 | 0.20 | 0.726 4 |

因此，确定试验号7，即模具温度为120 ℃、熔体温度为280 ℃、保压压力为120 MPa、冷却时间为25 s和顶出温

度为75 ℃为最优参数。该结果为优化注塑工艺参数提供了量化依据，指示应优先调整影响翘曲的关键因素，同时兼顾体积收缩率的控制，以实现产品成型质量的综合提升。

### 2.4 灰色关联分析稳健性验证及工艺优化

为验证最优参数的稳健性，计算关联系数[$\xi(X)$和$\xi(Y)$]以及灰色关联度。表6为灰色关联度的计算结果。从表6可以看出，$\xi(X)$和$\xi(Y)$在不同试验组别中呈现较大波动，$\xi(X)$最低为0.333 3，最高达到1.000 0；$\xi(Y)$最低约为0.590 2，最高达到1.000 0。这表明不同因素对响应变量的影响程度存在显著差异。灰色关联度的范围约在0.472 6~0.887 8，显示出较为合理的相关强度分布。灰色关联度最高值出现在第7组，表明该组参数组合对系统性能的影响最为显著。以上结果表明，模型对试验数据的敏感性和辨识能力较强，能够有效区分不同工艺条件下的性能表现。此外，灰色关联度的连续性和无异常跳变也说明计算过程稳定，避免因数据噪声或异常值导致的误判[21-22]。结合试验设计的多维参数空间，灰色关联分析能够较为全面地揭示各参数间的内在联系，为后续工艺优化提供定量依据。

表6 灰色关联度的计算结果

Tab.6 Calculation results of grey correlation degree

| 试验号 | $\xi(X)$ | $\xi(Y)$ | 灰色关联度 |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.762 7 | 0.659 6 | 0.711 1 |
| 2 | 0.430 6 | 0.681 2 | 0.555 9 |
| 3 | 0.364 4 | 0.735 4 | 0.549 9 |
| 4 | 0.432 8 | 0.590 2 | 0.511 5 |
| 5 | 0.354 1 | 0.625 0 | 0.489 5 |
| 6 | 0.571 5 | 0.772 6 | 0.672 0 |
| 7 | 1.000 0 | 0.775 5 | 0.887 8 |
| 8 | 0.374 8 | 0.657 8 | 0.516 3 |
| 9 | 0.363 8 | 0.677 0 | 0.520 4 |
| 10 | 0.374 2 | 0.778 6 | 0.576 4 |
| 11 | 0.390 5 | 0.611 2 | 0.500 8 |
| 12 | 0.363 6 | 0.639 3 | 0.501 4 |
| 13 | 0.333 3 | 0.611 9 | 0.472 6 |
| 14 | 0.388 2 | 0.736 0 | 0.562 1 |
| 15 | 0.503 2 | 0.739 0 | 0.621 1 |
| 16 | 0.430 6 | 0.612 5 | 0.521 6 |
| 17 | 0.409 3 | 0.776 1 | 0.592 7 |
| 18 | 0.375 8 | 0.895 2 | 0.635 5 |
| 19 | 0.408 8 | 0.655 0 | 0.531 9 |
| 20 | 0.362 0 | 0.830 7 | 0.596 4 |
| 21 | 0.346 4 | 0.611 6 | 0.479 0 |
| 22 | 0.363 1 | 1.000 0 | 0.681 6 |
| 23 | 0.407 6 | 0.626 5 | 0.517 1 |
| 24 | 0.388 4 | 0.679 8 | 0.534 1 |
| 25 | 0.717 3 | 0.681 7 | 0.699 5 |

表7为灰色关联度均值响应，图6为灰色关联度均值主效应。从表7和图6可以看出，各因素对系统性能的影响程度依次为：保压压力、冷却时间、熔体温度、顶出温度和模具温度。该排序为实际生产提供明确的参数优化方向，强调应优先从保压压力和冷却时间入手，以最大化提升产品质量和稳定性。同时，各参数均值响应的波动趋势也反映试验设计的合理性和数据的代表性，为后续工艺参数的精细调整提供参考。

表7 灰色关联度均值响应

Tab.7 Mean response of grey correlation degree

| 水平 | *A* | *B* | *C* | *D* | *E* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.569 9 | 0.646 1 | 0.551 6 | 0.504 1 | 0.566 9 |
| 2 | 0.564 4 | 0.589 1 | 0.523 8 | 0.531 9 | 0.549 5 |
| 3 | 0.596 0 | 0.547 9 | 0.569 6 | 0.611 7 | 0.595 3 |
| 4 | 0.564 0 | 0.573 4 | 0.573 2 | 0.627 5 | 0.554 0 |
| 5 | 0.593 3 | 0.531 1 | 0.669 5 | 0.612 5 | 0.622 1 |
| 极差 | 0.032 0 | 0.114 9 | 0.145 7 | 0.123 5 | 0.072 6 |
| 排秩 | 5 | 3 | 1 | 2 | 4 |

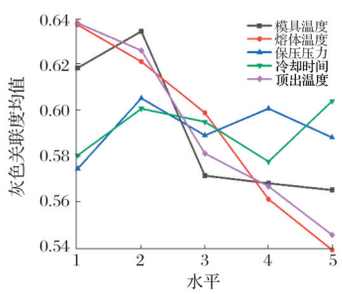
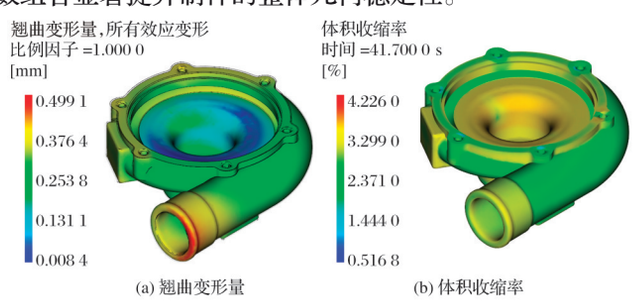



图6 灰色关联度均值主效应

Fig.6 Main effect of mean gray correlation degree

## 3 模拟验证

图7为优化后的仿真分析结果。从图7可以看出，PMMA制件的翘曲变形量由初始的1.561 0 mm降低至0.499 1 mm；体积收缩率由初始的8.979 0%降低至4.226 0%。这一数据反映了熵权-TOPSIS-灰色关联法在预测和控制翘曲变形方面的高效性和准确性，优化后的参数组合显著提升制件的整体几何稳定性。




(a) 翘曲变形量 (b) 体积收缩率

图7 优化后的仿真分析结果

Fig.7 Results of optimized simulation analysis

图8为优化后的缺陷分析结果。从图8可以看出，优化工艺能够显著改善成型缺陷。气穴数量明显减少，表明熔体流动及填充过程更加均匀，气体排出效率提升。熔接线的分布趋于集中且均匀，主要聚集于侧面区域，避免关键受力部位产生弱点，有助于提升机械性能和外观质量。缩痕指数由4.114%降低至3.555%，这一指标的下降直接体现了熔体冷却收缩行为的优化，减少了局部表面缺陷。

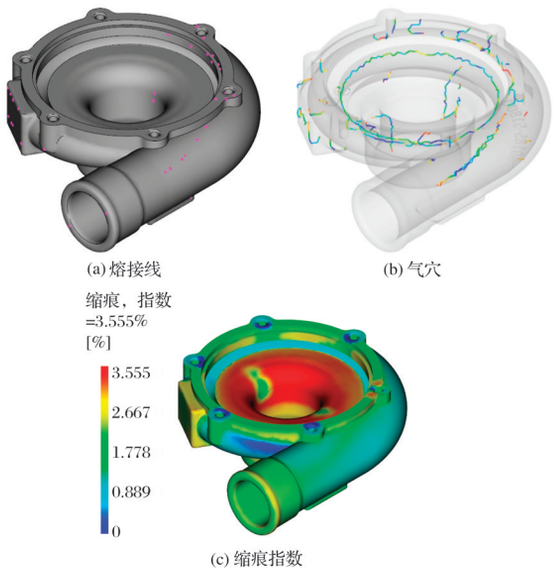



图 8　优化后的缺陷分析结果

Fig.8 Results of optimized defect analysis

选用海天HTF400XB注塑机配合MD-2303-16型模具开展实际注塑试验。模具尺寸为200 mm×180 mm×70 mm、模具温度为120 ℃，熔体温度为280 ℃，保压压力为120 MPa，冷却时间为25 s，顶出温度为75 ℃，合模力调整为1 400 kN，顶出行程为170 mm，顶出力为60 kN，确保工艺参数的稳定性和重复性[23-24]。图9为涡轮管道试模制品。从图9可以看出，成型后的制件结构成型完整，外观光滑平整，无缺陷，无明显的翘曲和收缩变形。

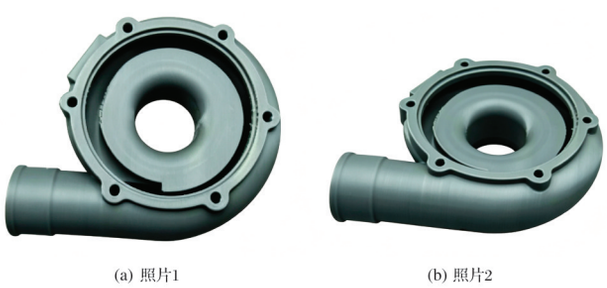



图 9　涡轮管道试模制品

Fig.9 Turbine pipe tryout products

## 4　结论

本研究构建“熵权法客观赋权-TOPSIS多指标排序-灰色关联稳健性验证”三阶段多目标优化框架，实现PMMA涡轮管道注塑成型工艺参数的系统优化，有效突破传统方法在多质量指标协同优化中权重主观性强、评价结果一致性不足的局限。经模拟验证与实际试模，优化后的工艺参数(模具温度120 ℃、熔体温度280 ℃、保压压力120 MPa、冷却时间25 s、顶出温度75 ℃)使翘曲变形量由1.561 0 mm降至0.499 1 mm，体积收缩率由8.979 0%降至4.226 0%，气穴、熔接线及缩痕等成型缺陷显著改善。该方法在复杂结构透明注塑件质量控制中具有高效性与可靠性。灰色关联分析进一步揭示了保压压力和冷却时间为影响系统性能的关键因素，为实际生产中的参数调控提供明确方向，为同类注塑工艺参数优化提供参考。

## 参考文献

[1] 王圆霞, 谷振宇, 梁倩, 等. 声化学法制备聚甲基丙烯酸甲酯/黄芪油微胶囊[J]. 塑料科技, 2026, 54(4): 130-134.
[2] 黄可, 钱子龙, 李恒, 等. 轮胎内衬板注塑成型参数优化及实验验证[J]. 合成树脂及塑料, 2026, 43(1): 66-69.
[3] 妙磊. 基于多物理场耦合的双色注塑成型过程仿真与工艺优化[D]. 大连: 大连工业大学, 2025.
[4] 廉成林. 风机面壳塑件成型质量双目标优化及联合仿真分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2025.
[5] TRINH V L. Reducing warpage of injection molding products using response surface methodology[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2025, 15(3): 22355-22359.
[6] 陈业高, 吴迪, 杜新成. 汽车仪表板装饰条注塑成型工艺多目标优化与模具设计[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 158-163.
[7] 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.
[8] WEI B L, LI Y W. Grey relational analysis in the metric space of continuous functions: Foundations, extensions, and applications[J]. Applied Mathematical Modelling, 2025, 142: 115978.
[9] 陈先忱. 精密车载镜筒注塑成形模具设计及工艺优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2026.
[10] 张庆, 葛东东, 何也能. 基于NSGA-II和熵权TOPSIS法的注塑工艺参数多目标优化[J]. 塑料工业, 2022, 50(9): 95-100.
[11] 戴璐钰, 张永弟, 王宇康, 等. 基于Moldflow和灰色关联分析的内齿圈注塑参数优化[J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37(5): 54-57.
[12] 杜威. 注射成型熔体波动及重复精度控制的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
[13] 林娜, 康淑贤, 吴海勇, 等. 基于Moldflow对湿巾盖翘曲变形分析及工艺参数优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(11): 178-182.
[14] 袁邦剑. 精密注塑模具冷却系统优化及轻量化研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
[15] 张俊豪, 蔡伟南, 宋志钊, 等. PP带筋柱薄壁镂空注塑件缩痕测量与控制[J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37(5): 49-53.
[16] 洪梅, 刘小艳, 周小丽, 等. 图像识别器外壳成型缺陷分析及优化设计[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 137-142.
[17] 陈丽, 任小鸿, 刘惺, 等. 多孔类塑料件困气特性分析及优化策略[J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(3): 61-65.
[18] ZHANG L, CHANG T L, TSAO C C, et al. Analysis and optimization of injection molding process on warpage based on Taguchi design and PSO algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 137(1): 981-988.
[19] 吴俊超, 黄帅, 邓锐, 等. 基于Moldflow的轿车后视镜镜框注塑工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(7): 71-78.
[20] 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.
[21] 黄关山, 王新艳. 基于DOE设计及MOPSO算法的汽车滤清器外壳多目标优化分析[J]. 塑料科技, 2024, 52(8): 105-108.
[22] AI X S, YU Y X, LIANG Z M, et al. Multilayer entropy-weighted TOPSIS method and its decision-making in ecological operation during the subsidence period of the Three Gorges Reservoir[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 2954.
[23] 王雅君, 王宗强, 王明伟, 等. 基于灰色关联分析的汽车散热器导风板注塑成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2026, 54(3): 193-199.
[24] 姜若琳, 常杰, 崔永生, 等. 基于Moldflow的玻璃纤维增强PA66绝缘轨距块翘曲变形预测及材料加工参数优化[J]. 广东化工, 2025, 52(21): 15-20.