

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.015

基于回归分析的飞机航行灯罩注塑工艺参数多目标优化

王韬^{1,2}, 王博伦^{1,2}, 许雪婷^{2,3}, 葛勇^{1,2}, 郎建林^{1,2}, 孙琦伟^{1,2}, 颜悦^{1,2}(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095; 2. 北京市先进运载系统结构透明件工程技术研究中心, 北京 100095;
3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 针对飞机航行灯罩在注射成型过程中产生较大翘曲变形和残余应力, 导致产品在二次加工、装配以及使用过程中产生开裂等问题, 提出基于回归分析的方法, 对灯罩的翘曲变形和残余应力实施多目标优化。选择熔体温度、模具温度、注射时间、注射压力、保压时间、保压压力、冷却时间为试验因素, 以产品的翘曲变形和残余应力为优化目标, 建立7因素21水平均匀设计试验。通过熵权法与改进折中规划法将多目标优化问题转换为综合目标值评价, 并建立以综合目标值为响应值的多元回归方程。使用粒子群算法对回归方程进行迭代寻优, 求得最小响应值为0.096, 对应的最优工艺参数组合为熔体温度306℃、模具温度82℃、注射时间3s、注射压力85MPa、保压时间24s、保压压力138MPa、冷却时间54s。按照最优工艺参数组合对塑件进行模拟, 其最大翘曲变形为0.812mm, 最大残余应力为1.256MPa, 综合目标值为0.103, 优化方案的模拟结果与预测值差异较小, 表明回归模型预测精度较高。将优化后的工艺参数组合应用于实际试模生产, 产品的实测结果与优化模拟趋势一致, 满足装配和使用要求。

关键词: 注塑工艺参数; 多元回归分析; 均匀试验设计; 熵权法; 粒子群算法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0100-08

Multi-objective optimization of injection molding process parameters for aircraft navigation lampshade using regression analysis

WANG Tao^{1,2}, WANG Bolun^{1,2}, XU Xueting^{2,3}, GE Yong^{1,2}, LANG Jianlin^{1,2}, SUN Qiwei^{1,2}, YAN Yue^{1,2}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Advanced Structural Transparency for the Modern Traffic System, Beijing 100095, China; 3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

Abstract : For the serious warpage and residual stress in the injection molding process of aircraft navigation lampshades, which result in cracks during post-processing, assembly and use, the regression analysis was proposed to conduct multi-objective optimization for the warpage deformation and residual stress of the lampshade. The melt temperature, mold temperature, injection time, injection pressure, holding time, holding pressure and cooling time were selected as the process variables. The warpage and residual stress were selected as the optimization objectives. A 7-factor and 21-level uniform design test was established. The multi-objective optimization was transformed into a comprehensive target value evaluation by the entropy weight method and the improved compromise programming method. A multiple regression equation, with the comprehensive target value as the response value, was established. The particle swarm optimization algorithm was used to solve the regression equation, resulting in the minimum response value of 0.096. The optimal combination of process parameters are as follows: melt temperature 306℃, mold temperature 82℃, injection time 3s, injection pressure 85MPa, holding time 24s, holding pressure 138MPa, and cooling time 54s. Based on the optimal combination of process parameters, the simulated maximum warpage and residual stress is 0.812mm and 1.256MPa respectively. Meanwhile, the comprehensive target value is 0.103. The difference between the simulation results of the optimization scheme and the predicted values is small, indicating the higher prediction accuracy of the regression model. The opti-

通信作者: 王韬, 博士, 高级工程师, 研究方向为航空透明件制造技术及应用评价

收稿日期: 2025-05-14

引用格式: 王韬, 王博伦, 许雪婷, 等. 基于回归分析的飞机航行灯罩注塑工艺参数多目标优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 100-107.

WANG Tao, WANG Bolun, XU Xueting, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for aircraft navigation lampshade using regression analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 100-107.

mized process parameters were applied to the actual trial production. The corresponding measured values of warpage and residual stress satisfy the assembly and usage requirements and have a consistent trend with the optimized simulation results.

Keywords : injection molding parameter; multiple regression analysis; uniform experimental design; entropy weight method; particle swarm optimization algorithm

飞机航行灯罩需要在高低温差大、低气压以及强紫外辐射等空中极端环境中服役,对结构强度等要求较高。航行灯罩一般采用板弯或者注塑的方法进行制造,其中板弯仅适用形状简单的单曲率产品,且成型周期长、成本高,而注塑可以实现复杂结构的高精密成型,周期短且质量稳定优异,成为现役飞机航行灯罩的主要研制方法。大尺寸薄壁航行灯罩的注塑流长比超过80,其成型过程中极易产生翘曲变形和残余应力,使得产品在安装与使用过程中存在局部应力集中,特别在灯罩的周边连接区域,容易引发开裂等问题,威胁到信号灯的有效工作,进而影响飞行安全。注射成型下的翘曲变形和残余应力受到材料、工艺、模具和后处理等多方面影响,其中工艺参数(如时间、温度、压力等)直接决定了产品的质量状态,优化工艺参数成为控制上述两项性能的有效途径^[1]。正交试验设计是一种典型的试验优化方法,对于多指标优化问题,可以采用综合加权评分^[2]、熵权法^[3]、Critic权重法^[4-5]等加权方法将多个目标转化为综合目标,再对综合目标结果进行极差与方差分析,确定优化工艺参数组合。国内外学者还通过采用NSGA-II算法^[6]、多目标差分进化(MODE)算法^[7]、多目标粒子群优化(MOPSO)算法^[8]、改进粒子群优化算法^[9]等优化算法与正交试验设计结合,拟合出回归模型并对注塑产品进行最优工艺参数预测。当试验因素水平数较多时,正交试验方法要求做较多次数的试验,均匀设计可以从全面试验范围内挑选更少的试验点作为代表进行试验,且结果仍能反映分析系统的主要特征,具有明显优势。邓可心等^[10]采用均匀设计试验和遗传算法对汽车前照灯灯罩的翘曲变形进行了优化,得到产品的最小翘曲变形。刘帮禹等^[11]采用最优拉丁超立方抽样法设计试验方案,通过多岛遗传算法优化汽车尾灯双色灯罩的翘曲变形,最大翘曲变形下降了20.35%。

上述研究主要针对汽车用灯罩等常规产品,该类产品多采用胶接进行安装,装配中的应力集中小,与飞机航行灯罩差异较大。同时,现有研究仅对翘曲变形进行优化,未考虑飞机航行灯罩在特殊

工况下对结构强度的要求,未对注塑过程中的残余应力进行优化。笔者以某飞机航行灯罩为研究对象,采用均匀试验设计,对灯罩注射成型过程中的翘曲变形和残余应力进行多目标优化。通过熵权法和改进折中规划法将塑件最大翘曲变形与最大残余应力转化为综合目标值,拟合出以综合目标值为响应值的多元回归方程,并通过粒子群算法对该回归方程进行迭代寻优,求出最小综合目标值及其对应的工艺参数。按照最优工艺参数组合进行注塑模拟,结合回归分析与模拟仿真,指导航行灯罩的实际注塑生产。

1 产品分析

1.1 产品结构

飞机航行灯罩的结构如图1a所示,其基本尺寸为301 mm×220 mm×217.5 mm,厚度4 mm。航行灯罩实际使用过程中需要在周边进行二次加工制孔,孔位分布如图1a所示,通过螺栓连接的方式将灯罩紧固在机身上,装配示意图如图1b所示。当沿着X方向的产生较大翘曲变形时,灯罩装配过程中产品边缘会在机身与框架的挤压作用下产生较大的变形,此变形称为装配变形;若灯罩边缘的残余应力较大,会导致二次加工过程中在孔周围产生银纹甚至裂纹,使得产品失效报废。产品沿X方向的翘曲变形和残余应力较大,会增加产品在装配以及使用过程中开裂的风险,因此选择产品X方向上的最大翘曲变形和最大残余应力作为优化目标。

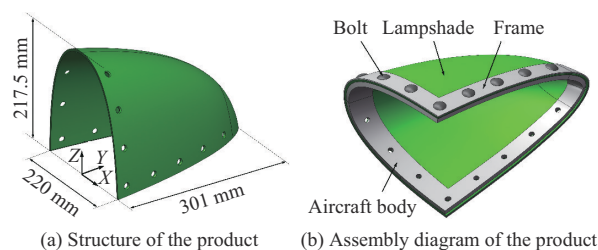


图1 产品结构与装配示意图

Fig. 1 Structure and assembly diagram of the product

1.2 浇注系统与冷却系统设计

灯罩模具型腔布置为一模两腔,采用冷流道、扇形浇口进胶。如图2所示,主流道长度为100 mm,上端直径为5 mm,下端直径为11.8 mm。扇形

浇口的长度为40 mm;浇口的起始端宽度为32.2 mm,厚度为4.5 mm;进胶端的形状为弧形,弦长为81.5 mm,弧长为84.8 mm,厚度为1.4 mm。

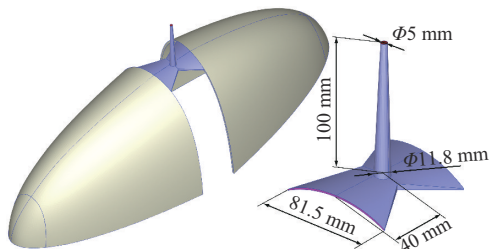


图2 浇注系统设计

Fig. 2 Design of the gating system

灯罩模具的冷却系统如图3所示。为保证冷却均匀,型腔侧设计为近似随形冷却,如图3a所示,设计为10条串联式冷却回路,水路管道直径均为12 mm,水路中心线与产品表面距离为20 mm,水路间距为40 mm。型芯侧设计为7条串联式冷却回路,设计隔板式水井以加强冷却效果,水井直径为18 mm,水井间距为38 mm,同一条回路的水路间距为40 mm,回路间距离为60 mm。

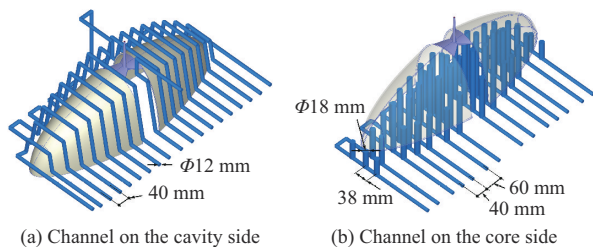


图3 冷却系统设计

Fig. 3 Design of the cooling system

1.3 初始方案模拟结果

将灯罩模型和浇注系统模型导入Moldex3D中,灯罩的网格尺寸为4 mm,浇注系统的网格尺寸为1 mm,其网格类型均为三维实体混合网格,即表层为3层三棱柱网格,内部为四面体网格。实体网格数共为8 490 554个。根据冷却系统设计建立水路的线性模型,网格尺寸为5 mm,网格类型为六面体网格。在Moldex3D的材料库中选择TEIJIN生产的聚碳酸酯(PC)材料Panlite L-1250,熔体温度推荐范围是280~320 °C,模具温度推荐范围是80~120 °C,顶出温度为129 °C,固化温度为149 °C。

基于产品几何结构特征,结合仿真软件的材料基本性质,设置初始工艺参数组合为:熔体温度300 °C、模具温度100 °C、注射时间3.8 s、注射压力160 MPa、保压时间22 s、保压压力160 MPa、冷却时

间为30 s、 V/P 切换点为体积充填98%时。初始方案的模拟结果如图4所示。灯罩的注射充填完整,产品沿 X 轴方向的翘曲变形中正值表示沿 X 轴正方向的变形,负值表示沿 X 轴负方向的变形,产品的最大翘曲变形取值为沿上述两方向翘曲变形绝对值中的最大值,因此初始方案下产品沿 X 方向的最大翘曲变形为3.556 mm,表现为两侧面向内收缩,最大残余应力为7.163 MPa,主要分布在产品内侧的充填末端。初始方案下产品的翘曲变形和残余应力均较大,在后期制孔加工和装配过程中极易因产品的装配变形和残余应力从而产生裂纹,无法满足使用要求。

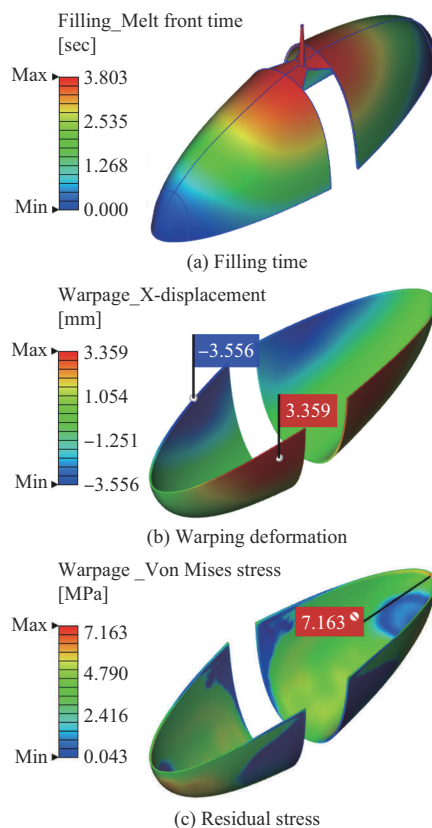


图4 初始方案模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the initial scheme

2 注塑工艺参数优化

为提高航行灯罩的注塑质量和生产效率,通过结合均匀设计试验和回归分析预测工艺参数与最优目标值的关系,并通过粒子群优化算法寻找到最优目标值及其对应的最优工艺参数组合,优化流程如图5所示,具体步骤如下。

步骤1:根据初始方案模拟分析结果确定需优化的指标,根据材料推荐工艺参数范围和实际生产要求确定各因素水平的取值范围。

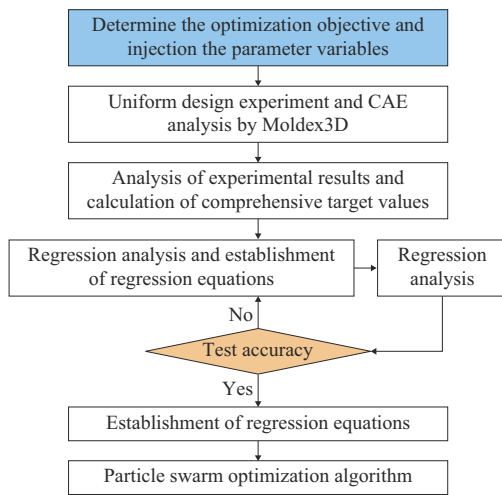


图5 试验优化方法流程图

Fig. 5 Flowchart of the experimental optimization method

步骤2:设计7因素21水平的均匀试验,并在Moldex3D中进行注塑模拟,分析计算得到两个优化目标的模拟值。

步骤3:采用熵权法计算两个优化目标的权重,并计算综合目标值。

步骤4:在SPSS软件中根据向后法对综合目标值进行二次多元回归分析,对每个拟合模型均进行回归分析,检验各个模型的拟合精度,得出预测精度较高的回归方程。

步骤5:编写粒子群优化算法,以最终确定的回归方程为适应度函数进行最优工艺参数组合预测。

2.1 均匀试验设计

均匀实验设计是将每个因素的每个水平仅做一次试验,任意两个试验点在平面格点上时,每行每列有且仅有一个试验点,保证试验点在试验范围内均匀分散,不再考虑整齐可比,因此相较于正交设计在因素与水平数较多时可以极大地减少试验次数,以较少的试验次数获得最多的信息,并且保证由此得到的结果仍能反映系统的主要特征^[12-13]。笔者选取熔体温度(A)、模具温度(B)、注射时间(C)、注射压力(D)、保压时间(E)、保压压力(F)、冷却时间(G)为试验因素,以 X 方向最大翘曲变形(Y_1)、最大残余应力(Y_2)为目标值。以初始方案工艺参数为中间值,根据实际工艺参数设置经验确定各因素水平值的范围分别为:280 °C≤ A ≤320 °C, 80 °C≤ B ≤120 °C, 2 s≤ C ≤6 s, 80 MPa≤ D ≤160 MPa, 20 s≤ E ≤60 s, 80 MPa≤ F ≤160 MPa, 20 s≤ G ≤60 s。使用拉丁超立方采样方法建立7因素21水平的均匀设计试验,见表1,用Moldex3D进行充填-保压-冷却-翘曲模拟分析。

2.2 试验结果与指标权重确定

为避免不同因素水平值之间较大的倍数差异

表1 均匀设计试验表

Tab. 1 Experiment table of uniform design

No.	$A/^\circ\text{C}$	$B/^\circ\text{C}$	C/s	D/MPa	E/s	F/MPa	G/s
1	320	102	3.4	84	36	112	56
2	280	92	2.5	104	42	140	44
3	298	110	3.2	80	30	116	34
4	308	98	2.3	92	24	80	40
5	292	96	2.7	132	34	104	28
6	288	114	2.6	136	32	124	58
7	310	88	2.8	152	48	108	60
8	304	94	2.4	124	46	92	46
9	302	116	3.0	88	44	160	26
10	306	82	2.2	156	22	144	32
11	282	118	3.8	144	20	148	24
12	296	86	2.1	100	38	96	42
13	300	106	4.0	116	28	120	48
14	290	100	3.1	160	56	152	54
15	312	108	2.0	128	60	156	36
16	318	90	2.9	148	26	136	38
17	294	104	3.6	108	50	88	20
18	314	112	3.7	112	54	128	52
19	284	80	3.3	120	40	84	30
20	316	84	3.5	96	52	100	22
21	286	120	3.9	140	58	132	50

Notes: A is melt temperature; B is mold temperature; C is injection time; D is injection pressure; E is holding time; F is holding pressure; G is cooling time.

使拟合的回归模拟出现误差,将各因素的水平值均以10为底取对数^[14],即 $\{a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i\} = \{\lg(A_i), \lg(B_i), \lg(C_i), \lg(D_i), \lg(E_i), \lg(F_i), \lg(G_i)\}$, $i = 1 \sim 21$ 。采用熵权法确定最大翘曲变形(Y_1)、最大残余应力(Y_2)两个优化目标在综合评价中的权重。由于两优化目标的类型、数量级均不同,因此首先须对数据进行标准化处理^[15]。本试验中翘曲变形与残余应力的优化目标均设定为望小特性(即目标值越小越好),采用负向指标的标准化式(1)计算获得标准化矩阵。

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

式中: X_{ij} 为标准化矩阵, x_{ij} 是第 i 个样本的第 j 个指标值, $i = 1 \sim 21, j = 1, 2$ 。

使用式(2)计算第 j 个指标下第 i 个样本的比重 p_{ij} 。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

式中: n 为样本数, $n=21$ 。

使用式(3)计算信息熵 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

将信息熵带入式(4)计算各指标的差异系数 g_j ,差异系数越大,指标重要性越高。

$$g_j = 1 - e_j \quad (4)$$

将差异系数代入式(5)确定各指标的权重 w_j 。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_i} \quad (5)$$

式中: m 为指标数, $m=2$ 。

根据熵权法计算确定 Y_1 的权重为40.82%, Y_2 的权重为59.18%。

根据吴鹏等^[14]提出的改进折中规划法,如式(6),计算两优化目标的综合目标值。

$$C(\rho) = \left[\sum_{j=1}^m w_j (C_j(\rho) / C_j^{\max})^p \right]^{1/p} \quad (6)$$

式中: $C(\rho)$ 为综合目标值; $C_j(\rho)$ 为第 j 个子目标的目标函数; $C_j^{\max}$ 为第 j 个子目标的目标函数对应的最大值; p 为惩罚因子,一般取值为2。

均匀试验结果与根据两目标值计算的综合目标值见表2。试验2的综合目标值最小,为0.133,灯罩的最大翘曲变形为2.397 mm,最大残余应力为1.303 MPa。

表2 试验结果与综合目标值

Tab. 2 Test results and comprehensive target values

No.	Max warpage (Y_1)/mm	Max residual stress (Y_2)/MPa	Comprehensive target values[$C(\rho)$]
1	1.669	6.066	0.484
2	2.397	1.303	0.133
3	1.369	5.330	0.425
4	0.549	4.200	0.333
5	0.667	5.480	0.435
6	6.672	5.843	0.518
7	1.311	7.244	0.576
8	1.405	5.151	0.411
9	18.347	7.373	0.866
10	3.036	9.475	0.758
11	17.152	5.323	0.731
12	1.993	5.490	0.441
13	2.904	5.995	0.486
14	0.642	5.075	0.403
15	5.470	6.570	0.555
16	0.849	9.705	0.770
17	0.638	3.871	0.308
18	7.674	6.539	0.583
19	2.012	6.339	0.507
20	1.943	8.040	0.641
21	9.799	5.799	0.572

2.3 回归分析模型与回归方程建立

回归分析是应用统计方法建立因变量与自变量之间的回归关系函数表达式,通过回归分析可以

获得影响因变量的主要因素,并利用回归方程对实际问题进行预测与控制^[16-17]。采用二次多元回归分析对试验数据进行分析,回归模型见式(7)。

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_{ii} + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_{ij} + \varepsilon \quad (7)$$

式中: Y 为响应值; m 为因子总数; X_i 为因子线性项; X_{ii} 为因子二次项; X_{ij} 为因子交互项; β_0 为常数项; $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 均为回归系数; ε 为随机误差。

在SPSS软件中采用向后法对试验结果进行二次多元回归分析,其原理为先拟合包括所有对响应值有影响的变量的回归方程,再根据因素重要性(F 值)依次删除无显著影响的自变量,直至留下的各项均对响应值有显著影响。模型1中自变量分别为 $X_{67}, X_{34}, X_{15}, X_1, X_{14}, X_{12}, X_{66}, X_{11}, X_{33}, X_{35}, X_{37}, X_{57}, X_3, X_{77}, X_{45}, X_{36}, X_{47}, X_{26}, X_{25}$ 。其中 X_{35} 的 F 值最小,其值为0.004 9,显著性水平(P 值)最大,其值为0.955,该因素的影响最不显著,因此将 X_{35} 删除。根据 F 值与 P 值,模型2到模型9依次将 $X_{35}, X_{33}, X_{66}, X_{77}, X_{36}, X_{34}, X_{14}, X_{57}$ 删除。在模型9中,相较于其他系数, X_{15} 的影响显著性最小。模型9的总自由度为20,残差自由度为9,查询 F 分布表可得 $F_{0.05}(1, 9)=5.12$, X_{15} 的 F 值为11.35>5.12; X_{15} 的 P 值为0.008<0.05,说明 X_{15} 对响应值影响较显著,该模型中已不存在影响不显著的因素。

各回归模型对比见表3,模型的相关系数(R)的绝对值越大,自变量与响应值的相关性越大;修正 R^2 是对 R^2 的调整,其考虑了模型中自变量的数量,更适合用于比较不同自变量数量的模型,修正 R^2 越大,说明模型对数据的解释能力更强;标准估计误差反映了模型的预测精度,其值越小,说明模型的预测精度越高。综合对比 R 、修正 R^2 、标准估计误差,模型7的修正 R^2 为0.981,说明模型对本次试验结果的解释性较强,模型可信;标准估计误差为0.022 353,其值为9个模型中的最小值,说明模型7的预测精度最高,因此选择模型7为最终拟合模型。

模型7的方差分析见表4,用 F 值来表征该模型的显著性,该值越大,说明模型的显著性越强。选定显著性水平 $\alpha=0.05$,查表得到 $F_{0.05}(13, 7)=3.550$,回归模型的 F 值为90.200,远大于3.550,因此可认为该模型显著。

在SPSS中根据21组试验结果所计算的综合目标值拟合回归方程见式(8)。

表3 向后法不同回归模型的对比

Tab. 3 Comparison of the regression models in the backward method

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Standard error of estimate
1	0.998	0.996	0.913	0.050 516
2	0.998	0.996	0.956	0.035 809
3	0.998	0.996	0.971	0.029 333
4	0.998	0.996	0.978	0.025 538
5	0.997	0.995	0.980	0.024 416
6	0.997	0.994	0.981	0.023 584
7	0.997	0.994	0.983	0.022 353
8	0.996	0.991	0.978	0.025 496
9	0.994	0.989	0.975	0.027 012

表4 回归模型7的方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of regression model 7

Item	Sum of squares	Degrees of freedom	Average square	F-statistic	Significance
Regression	0.586	13	0.045	90.200	0.000
Residual	0.003	7	0.000		
Total	0.589	20			

$$Y=17.024-13.839X_1-6.562X_3+5.216X_{11}-7.279X_{12}+0.773X_{14}+1.621X_{15}+4.354X_{25}+5.56X_{26}+4.5X_{37}-6.651X_{45}+5.569X_{47}+0.58X_{57}-7.162X_{67} \quad (8)$$

对回归方程各项进行回归系数分析,见表5,标准化系数的绝对值表示对应项对响应值的影响程度^[18],影响较大的交互因素为 X_{67} , X_{45} , X_{47} , X_{25} , X_{26} ,即保压压力与冷却时间,注射压力与保压时间、冷却时间,模具温度与保压时间、保压压力等工艺参数交互影响较显著,除 X_{14} , X_{57} 外,其余各项的显著性水平(P 值)均小于0.05。

表5 回归系数分析

Tab. 5 The analysis of the regression coefficient

Item	Not standard-ized regression coefficients	Standard error	Standard-ized coefficients	t-statistic	p-value
Constant	17.024	3.541		4.808	0.002
X_1	-13.839	2.636	-1.468	-5.251	0.001
X_3	-6.562	1.034	-3.561	-6.346	0.000
X_{11}	5.216	0.560	2.717	9.316	0.000
X_{12}	-7.279	0.582	-5.642	-12.509	0.000
X_{14}	0.773	0.419	1.012	1.846	0.107
X_{15}	1.621	0.612	3.408	2.647	0.033
X_{25}	4.354	0.706	7.829	6.170	0.000
X_{26}	5.560	0.298	8.284	18.642	0.000
X_{37}	4.500	0.652	4.100	6.902	0.000
X_{45}	-6.651	0.600	-12.925	-11.077	0.000
X_{47}	5.569	0.402	11.644	13.864	0.000
X_{57}	0.580	0.307	1.174	1.886	0.101
X_{67}	-7.162	0.393	-14.447	-18.213	0.000

将21组试验的工艺参数组合输入回归方程中计算得到预测值,并与各组试验的模拟值对比,如图6所示。其中试验2的偏差最大,其值为0.075,所

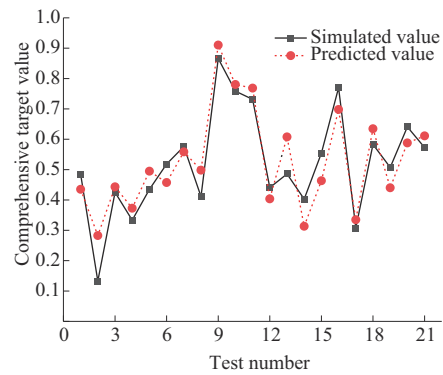


图6 模拟值与预测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated values and predicted values

有试验的平均偏差为0.029,约为模拟结果平均值的5.6%,模拟值与预测值之间的误差较小,验证了回归模型具有较高的准确性,能够较好地预测最优响应值以及最优工艺参数组合。

2.4 最优工艺参数组合预测

采用MATLAB编写标准粒子群算法(PSO),将回归拟合方程作为适应度函数,自变量的约束范围为工艺参数的取值范围,适应度函数的最小值为PSO的迭代寻优目标。设定搜索空间维度为7,粒子数量为30,迭代次数为100,惯性权重为0.5,个体学习因子、群体学习因子均为2,最大速度为0.1。算法的基本框架如图7所示,首先随机确定每个粒子的位置与速度,通过不断更新每个粒子的位置与速度,并记录个体与群体历史最优位置与适应度。结束条件为达到最大迭代次数或相邻两次迭代后

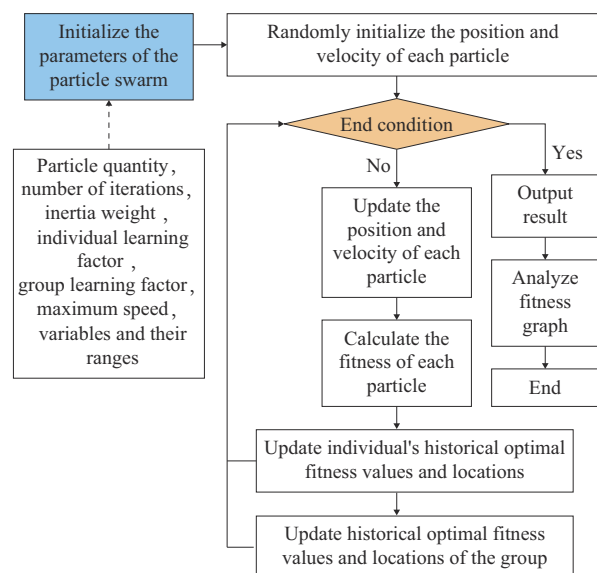


图7 粒子群优化算法基本框架

Fig. 7 Basic framework of the particle swarm optimization algorithm

的适应值相差最小,当达到结束条件后,输出最优值并进行分析。

上述算法程序运行在第 11 次迭代时达到最小值并开始收敛,如图 8 所示,适应度函数的最小值为 0.096,该值即利用回归拟合方程预测出的最小综合目标值,对应的工艺参数组合为:熔体温度(A), 306 °C;模具温度(B), 82 °C;注射时间(C), 3 s;注射压力(D), 85 MPa;保压时间(E), 24 s;保压压力(F), 138 MPa;冷却时间(G), 54 s。

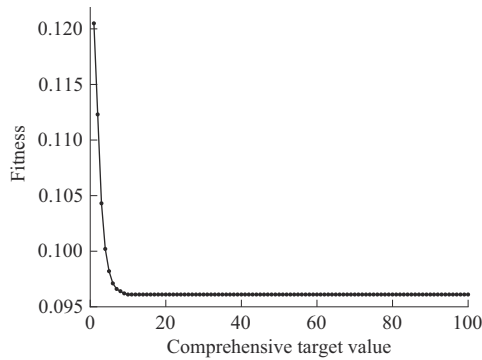


图 8 粒子群算法的迭代寻优过程

Fig. 8 Iterative optimization process of particle swarm optimization algorithm

3 工艺优化方案模拟与试验验证

3.1 优化工艺方案模拟

按照最优工艺参数组合在 Moldex3D 中进行充填-保压-冷却-翘曲分析。灯罩的翘曲变形和残余应力模拟结果如图 9 所示,最大翘曲变形为 0.812 mm,比初始方案减少了 2.744 mm,降低幅度达 77.17%;最大残余应力为 1.256 MPa,比初始方案减少了 5.907 MPa,降低幅度达 82.47%;综合目标值为 0.103,与预测最优值相差 0.007,误差较小,说明本研究中提出的回归模型有较高的预测精度,可供实际生产参考。

3.2 优化工艺试验验证

采用最优工艺参数组合开展了灯罩的实际注塑验证,注塑设备为海天 JU24000II s/14 600,成型出的产品如图 10 所示。塑件结构完整,无缩痕、流痕、气泡等外观缺陷,透光率达到 89% 以上,雾度低于 1%,满足产品设计要求。同时,对比了初始工艺与优化工艺的产品实测性能,见表 6,其中翘曲变形采

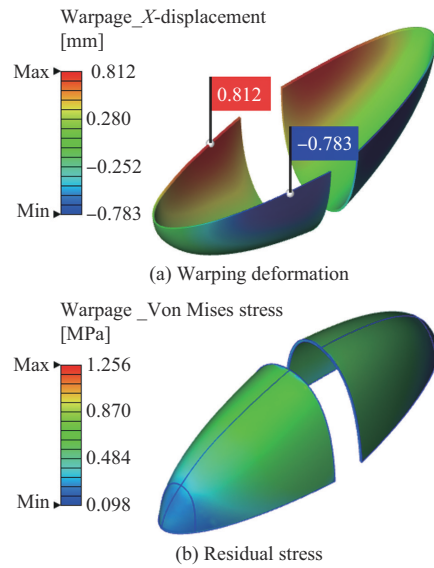


图 9 优化方案模拟结果

Fig. 9 Simulation results of the optimization scheme



图.10 试模样品

Fig. 10 Sample of mould trial

用钢直尺测量产品 X 方向上的跨距,残余应力采用 SINT 公司的 MTS3000-Restan 盲孔应力仪选择灯罩充填末端进行钻孔测试,钻孔深度为 1 mm。可以看出,优化后的产品在翘曲变形量和残余应力上都得到了明显改善,其中变形降低幅度达到 81.81%,残余应力降低幅度达到 46.15%。试验结果与模拟结果对比发现,航行灯罩的翘曲变形和残余应力的变化趋势与模拟值基本一致,翘曲的实际值大于仿真值,残余应力的实际降低幅度则低于仿真,其主要源于仿真分析的边界设定与实际工况存在一定偏差,且所使用的材料本构为黏性方程,忽略了材料的弹性效应,导致产品在变形和应力分析上存在一定偏差,后续将深入开展材料黏弹性本构关系研究,进一步提升仿真分析的精确性。同时,完成了

表 6 工艺优化的灯罩性能

Tab.6 Properties of lamp by process optimization

Item	Initial scheme	Optimization scheme	Improvement	Simulation improvement
Max warpage(Y_1)/mm	13.03±0.21	2.37±0.13	81.81%	77.17%
Max residual stress(Y_2)/MPa	3.25±0.07	1.75±0.04	46.15%	82.47%

优化工艺下制造的灯罩的制孔、装配与使用,经过超过1年的服役尚未出现产品边缘开裂等问题,较之前型号的灯罩产品在抗开裂能力上有明显改善。

4 结论

(1)针对飞机航行灯罩在服役工况下对结构强度和装配连接的要求,对灯罩注塑成型过程中的翘曲变形和残余应力进行多目标优化。通过设计7因素21水平的均匀试验,使用熵权法和改进折中规划法计算确定两个优化目标的综合目标值,使用向后法对试验结果进行二次回归分析,对比各模型的解释性和预测精度,确定最终的回归模型。

(2)采用SPSS软件拟合出以综合目标值为响应的多元回归方程,采用粒子群算法对拟合的回归模型进行迭代寻优,得到最优综合目标值为0.096,对应工艺参数取值为熔体温度306℃、模具温度82℃、注射时间3 s、注射压力85 MPa、保压时间24 s、保压压力138 MPa、冷却时间54 s。

(3)按照优化后的工艺参数进行注塑模拟,灯罩的最大翘曲变形为0.812 mm,比初始方案降低77.17%;最大残余应力为1.256 MPa,降低约82.47%。综合目标值为0.103,与预测最优值相差0.007,回归模型的预测误差较小。经过实际生产验证,产品质量满足使用要求。

参考文献

- [1] MAHSHID R, ZHANG Y, HANSEN H N, et al. Effect of mold compliance on dimensional variations of precision molded components in multi-cavity injection molding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67:12–22.
- [2] 汪健,叶星,李兵兵,等.基于综合加权评分的后防擦条内板注塑参数多目标优化[J].塑料,2024,53(1):172–177.
WANG Jian, YE Xing, LI Bingbing, et al. Multi-objective optimization of injection molding parameters of rear strip inner plate based on comprehensive weighted score[J]. Plastics, 2024, 53(1): 172–177.
- [3] 李姝,周纪委,王明伟,等.基于熵权法的汽车左侧前保险杠注塑成型工艺参数优化[J].塑料科技,2023,51(7):80–84.
LI Shu, ZHOU Jiwei, WANG Mingwei, et al. Optimization of injection molding process parameters for left front bumper of automobile based on entropy weight method[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(7):80–84.
- [4] 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.
- [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] HONG T J, HUANG D, DING F J, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters for junction boxes based on BP neural network and NSGA-II algorithm[J]. Materials, 2025, 18(3). DOI:10.3390/ma18030577.
- [7] 孙政,李俊,王卓成,等.高分子注塑成型产品质量关键工艺参数的多目标优化设计[J].高校化学工程学报,2023,37(3):483–491.
SUN Zheng, LI Jun, WANG Zhuocheng, et al. Multi-objective optimal design of key process parameters for plastic injection molding product quality[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2023, 37(3):483–491.
- [8] 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.
HUANG Guanshan, WANG Xinyan. Multi-objective optimization analysis of automotive filter shell based on DOE design and MOPSO algorithm[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(8):105–108.
- [9] 陈川,吕永峰.基于Kriging代理模型及改进PSO的变模温注塑成型翘曲变形优化[J].塑料,2024,53(4):166–172.
CHEN Chuan, LYU Yongfeng. Warping deformation optimization of dynamic mold temperature injection molding based on Kriging surrogate model and improved PSO algorithm[J]. Plastics, 2024, 53(4):166–172.
- [10] 邓可心,张新宇,吕文一,等.基于MoldFlow与均匀试验设计的汽车前照灯灯罩注射工艺参数优化[J].模具制造,2023,23(6):31–34.
DENG Kexin, ZHANG Xinyu, LYU Wenyi, et al. Optimization of injection molding process parameters for automobile headlamp lampshade based on MoldFlow and uniform test design[J]. Die & Mould Manufacture, 2023, 23(6):31–34.
- [11] 刘帮禹.汽车双色尾灯固定侧灯罩注射成型工艺参数多目标优化[D].镇江:江苏大学,2022.
LIU Bangyu. Multi-objective optimization of injection molding process for dual-color automotive taillight fixed side lamp covers [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [12] 张梅.均匀试验设计及其在大数据抽样中的应用[D].成都:四川大学,2021.
ZHANG Mei. Uniform designs and applications in big data subsampling[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [13] 贺平,林共进,刘民千,等.均匀设计理论与应用[J].中国科学:数学,2020,50(5):561–570.
HE Ping, LIN Gongjin, LIU Minqian, et al. Theory and application of uniform designs[J]. Scientia Sinica (Mathematica), 2020, 50(5):561–570.