

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.013

汽车地毯压条检修盖成型仿真与工艺参数优化

孙庆东¹, 杜晋¹, 池根才², 金垚²

(1.扬州市职业大学机械工程学院, 江苏扬州 225009; 2.扬州盛世模塑科技有限公司, 江苏扬州 225002)

摘要: 针对汽车地毯压条检修盖因注塑工艺中浇口位置不合理导致熔接线出现在关键区域、工艺参数匹配不当引发体积收缩率和翘曲变形量超标的问题,开展注塑工艺优化研究。首先,利用Moldflow软件对候选浇口位置方案进行成型仿真,以熔接线是否避开格栅横条表面、靠近棱边汇合处为评价标准,筛选出偏上位置的最优浇口方案。在此基础上,选取模具温度、熔体温度、充填时间、保压时间和保压压力作为关键影响因素,采用1/2部分实施中心复合设计(CCD)响应面试验方案,通过有限的试验组数构建工艺参数与成型质量的关联模型。借助Minitab软件对体积收缩率和翘曲变形量数据进行方差分析,初次分析后剔除不显著非线性项,二次拟合得到两个质量指标的回归方程。以体积收缩率和翘曲变形量最小化为目标,通过Minitab“响应优化器”进行多响应优化,得到最优工艺参数组合:模具温度52.979 8℃、熔体温度160.0℃、充填时间2.50 s、保压时间4.0 s、保压压力107.0% (38.8MPa)。实际注塑生产验证结果显示,采用该优化方案后,汽车地毯压条检修盖的体积收缩率小于9%,翘曲变形量控制在0.95 mm以内。研究表明,1/2部分实施CCD响应面试验方案结合Minitab多响应优化的方法,可在减少试验数据量的同时保障优化结果的可靠性,可用于复杂结构汽车内饰件注塑工艺的高效优化。

关键词: Moldflow; 熔接线; 体积收缩率; 翘曲变形量; Minitab; 响应面

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0083-07

Simulation and process parameter optimization of automotive carpet strip inspection cover forming

SUN Qingdong¹, DU Jin¹, CHI Gencai², JIN yao²

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225009, China;

2. Yangzhou Shengshi Moulding Technology Co., Ltd., Yangzhou 225002, China)

Abstract : To address the issues of weld lines appearing in critical areas due to unreasonable gate positions and excessive volume shrinkage rate and warpage deformation caused by improper matching of process parameters in the injection molding process of car carpet pressure strip maintenance covers, research on injection molding process optimization was conducted. Firstly, Moldflow software was used to simulate the molding of candidate gate position schemes. The evaluation criterion was whether the weld lines avoided the surface of grid horizontal strips and were close to the intersection of edges, and the optimal gate scheme with the gate located on the upper side was selected. On this basis, mold temperature, melt temperature, filling time, holding time, and holding pressure were chosen as the key factors, and a 1/2 fractional factorial central composite design (CCD) response surface test scheme was adopted to construct a correlation model between process parameters and molding quality through a limited number of test groups. Minitab software was used to perform variance analysis on the data of volume shrinkage rate and warpage deformation. After the initial analysis, insignificant nonlinear terms were removed, and regression equations for the two quality indicators were obtained through secondary fitting. With the goal of minimizing volume shrinkage rate and warpage deformation, multi-response optimization was carried out using Minitab's "Response Optimizer", and the optimal combination of process parameters was obtained as follows: mold temperature of 52.979 8 °C, melt temperature of 160 °C, filling time of 2.5 s, holding time of 4 s, and holding pressure of 107% (38.8MPa). The results of actual injection production verification showed that after adopting this optimization scheme, the

基金项目: 江苏省“十四五”高校国际化人才培养品牌专业建设项目(202244)

通信作者: 杜晋, 博士, 副教授, 主要从事金属表面改性与腐蚀防护、模具材料性能的研究

收稿日期: 2024-12-31

引用格式: 孙庆东, 杜晋, 池根才, 等. 汽车地毯压条检修盖成型仿真与工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 83-89.

SUN Qingdong, DU Jin, CHI Gencai, et al. Simulation and process parameter optimization of automotive carpet strip inspection cover forming[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 83-89.

volume shrinkage rate of the car carpet pressure strip maintenance cover was less than 9%, and the warpage deformation was controlled within 0.95 mm. The research indicates that the method combining the 1/2 fractional factorial CCD response surface test scheme with Minitab's multi-response optimization can ensure the reliability of optimization results while reducing the amount of test data, and can be applied to the efficient optimization of injection molding processes for complex-structured automotive interior parts.

Keywords : Moldflow ; weld line ; volume shrinkage ; warpage deformation ; Minitab ; response surface

汽车地毯压条检修盖属于横竖条类格栅汽车内饰零件,由于熔接线出现在横条格栅位置时,会在表面出现线条和明显的颜色变化;同时较大的收缩和变形会影响外观的平整度和后续的装配。因此注塑成型时需严格控制熔接线的位置,并尽量减少体积收缩率和翘曲变形量。近年来,将注塑成型仿真技术与试验设计方法相结合进行数据分析,在此基础上进行模具结构与工艺参数的优化已成为减少成型缺陷的重要手段^[1-4]。林颖等^[5]针对外观熔接线缺陷问题,研究了不同孔型结构的熔接线对成型质量的影响,发现熔体在尖锐结构处汇合形成的熔接线V型角更大,长度更短,外观质量较好。刘奔奔等^[6]使用 Moldflow 软件模拟三元乙丙橡胶(EPDM)包覆层的注射成型过程,预测了熔接线的位置,根据模拟结果设计模具结构,使熔接线位于分型面附近,避免了熔接线位于两个浇口中心位置时造成的头部缺陷。吴掇等^[7]从模具与制件结构的角度研究了免喷涂金属质感改性材料在生产中出现的熔接线和流痕问题,并进行了实例验证。汪健等^[8]通过对翘曲变形量和缩痕指数进行综合加权评分,并进行正交试验和数据处理,得到了最佳工艺参数。印磊等^[9]以汽车外饰件为研究对象,设计了最优拉丁超立方试验方案,运用克里金近似模型的理论设置翘曲变形量和体积收缩率的权重,将多目标工艺参数优化问题转化为单目标优化问题。刘长城等^[10]采用指标间相关性确定指标重要性法计算体积收缩率和翘曲变形量的权重,并计算出综合评分,通过方差分析得到最优工艺参数组合。张庆等^[11]基于 Vague 集将翘曲变形量、体积收缩率和缩痕深度的多目标优化问题转化为单目标优化问题,建立了响应面模型,并使用灰狼算法进行工艺参数寻优。

上述众多学者采用有限元成型仿真结合正交、拉丁超立方、响应面等试验方法对熔接线、翘曲变形量和缩痕指数进行研究,并运用 Vague 集、Critic、灰狼算法对成型工艺参数进行优化。但生产实践中无论是采用简单的加权系数还是利用 Vague 集、

Critic 等权重法将多目标工艺参数优化问题转化为单目标优化问题时,常常会出现模型方差求解不显著的问题;而使用神经网络、灰狼算法等优化算法进行工艺参数的迭代寻优时,函数的选择、权重初始化和训练次数的设置较为复杂,往往出现不收敛的问题,试验方案不够简单、经济。鉴于此,笔者以汽车地毯压条检修盖为研究对象,先根据熔接线的位置确定浇口位置的最佳方案。然后,以体积收缩率和翘曲变形量为响应指标,设计了中心复合的 1/2 部分实施的 5 因素响应面试验方案,并利用 Minitab 对 Moldflow 仿真所得的数据进行方差分析,初次分析后剔除不显著的非线性项,再次求解分别得到体积收缩率和翘曲变形量的回归方程。最后,利用 Minitab 软件中“响应优化器”的多响应优化的功能,以体积收缩率和翘曲变形量的最小化为目标,对预测的变量值进行多响应优化的复合求解,从而实现工艺参数的优化。

1 塑件结构分析

汽车地毯压条检修盖的材质为牌号 Polypropylene 3727WZ 的聚丙烯(PP),结构如图 1 所示。产品尺寸为 174.50 mm×148.00 mm×13.80 mm,横竖格栅厚度为 5.00 mm,间距为 2.26 mm,周边壁厚为 2.50 mm,下表面有安装限位面和卡扣等特征。产品要求表面光洁无条纹、无缩痕且表面平整,因此在控制熔接线分布位置的同时也需要尽量减小收缩和翘曲变形量。

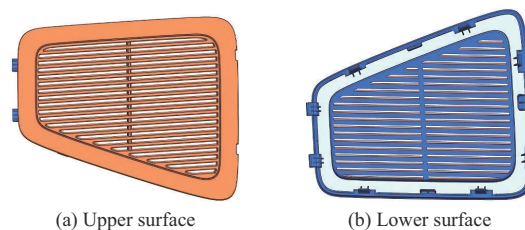


图1 汽车地毯压条检修盖结构

Fig. 1 Structure of automobile carpet strip access cover

2 成型方案设计

浇口位置对产品的外观和成型质量有很大的影响,通过成型仿真所得熔接线分析的结果可以判断产品的外观是否合格,从而确定浇口位置是否合

理。熔接线出现在两个或多个流动前沿的聚合处,由于熔料在相遇时前沿部分已经冷却,不能完全融合,从而可能在产品表面出现线条、凹槽或颜色变化^[12],因此应尽量将其控制在非外观面上或棱、边等的交汇处。

企业要求将浇口位置设置在产品按图 1a 所示摆放时的右侧面,且成型时将格栅横条表面是否出现线条、凹槽作为判断浇口位置方案是否合格的标准。依据设计要求,采用热流道、冷流道结合的浇注方案,浇口为由端部尺寸控制的矩形锥体浇口,浇注系统的结构与尺寸如图 2 所示。

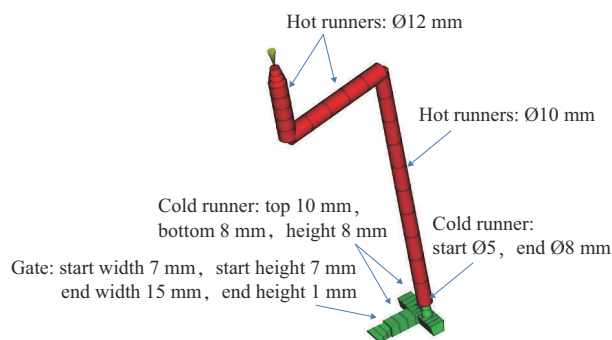


图2 浇注系统
Fig. 2 Gating system

为了考察浇口位置对熔接线的影响,设计了图 3 所示的偏上、居中、偏下的三个浇口位置方案。图中偏上和偏下表示浇口中心为塑件右侧中心点分别向上、向下偏置 19.5 mm。

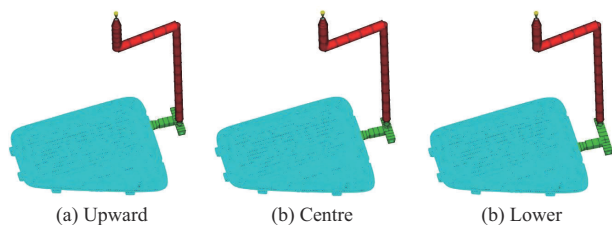


图3 浇口位置方案
Fig. 3 Gate location scheme

结合 PP 的材料性能,在 Moldflow 中进行如下设置:模具温度为 35℃,熔体温度为 200℃,注射时间为 1 s,速度/压力切换为 99%,保压控制为充填压力的 80%、持续时间 10 s。从图 4 熔接线的仿真结果可知,浇口位置在右侧面由下而上移动时,格栅横条处左侧的熔接线呈现出从右侧向左侧移动的趋势,且图 4a 中熔接线的位置分布在塑件中心即横竖格栅的交汇处,以及格栅与塑件的左、下、右三处内周边的棱、边等处汇合,成型后产品表面不会出现线条、凹槽和明显的颜色变化。

由于图 4a 中格栅与塑件左侧形成的熔接线更接近左侧的棱、边交汇处,因此距右侧面位置偏上的浇口方案表面成型质量最好,在该方案的基础上进行后续的冷却水路设计,水路直径为 10 mm,上下水路间距为 50 mm,最终的成型仿真模型如图 5 所示。

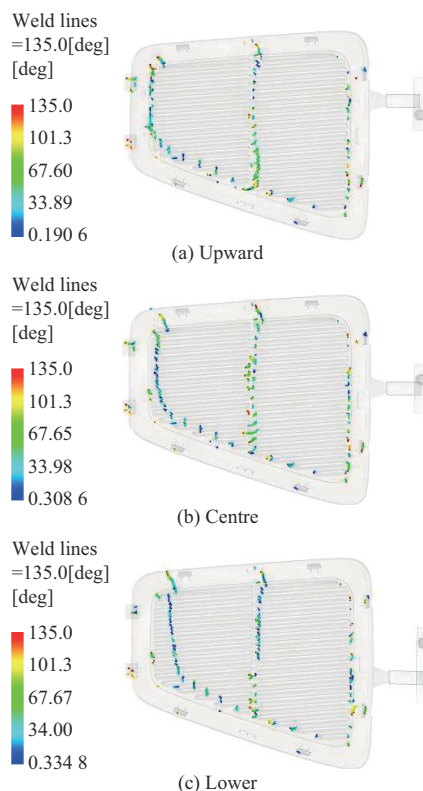


图4 熔接线仿真结果

Fig. 4 Simulation results of weld lines

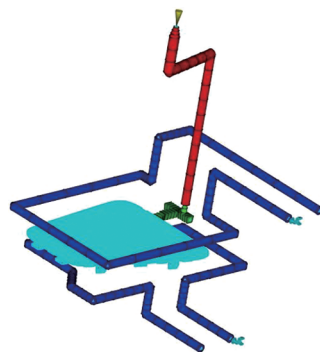


图5 浇注系统及冷却系统设计
Fig. 5 Design of gating system and cooling system

3 响应面设计

响应面法是一种解决多变量问题的统计方法,它通过对指定设计空间内一组有限样本点进行试验设计,并拟合出一个全局逼近模型来代替真实的响应面,从而探究设计因子与目标值间的响应特性,进而指导多变量优化问题^[13-14]。中心复合设计

(CCD)和 Box-Behnken 设计(BBD)是最常用的响应面试验设计方法。

体积收缩率和翘曲变形量是塑件成型质量的重要指标,而模具温度(A)、熔体温度(B)、充填时间(C)、保压时间(D)和保压压力(E)是影响成型质量的主要因素,因此将上述 5 个参数作为响应面设计的 5 个因素。在响应面设计的方案中,1/2 部分实施 CCD 需分析 32 组数据,全因子 CCD 需分析 52 组数据,BBD 需分析 46 组数据。由于因子数为 5 时,中心复合的 1/2 部分实施试验的分辨度为 V 级^[15],可见在保证试验精度的同时还具有较少的试验组数,因此

采用该方案进行试验分析。

依据生产实践和聚丙烯的材料性能,确定各因素的工艺范围,模具温度为 25~45 ℃,熔体温度为 180~220 ℃,充填时间为 1~2 s,保压时间为 8~16 s,保压压力为注塑压力(36.26MPa)的 80%~98%。在 Minitab 软件“统计”的实验设计(DOE)项里“创建响应曲面设计”对话框中将上述 5 因素的最小、最大值输入到“因子”项目中,得到响应面设计的 32 组试验见表 1。依据各组试验参数,运用 Moldflow 进行成型仿真,并将体积收缩率和翘曲变形量的数据填入表 1。

表 1 响应面设计与试验结果
Tab. 1 Response surface design and test results

Test number	A/℃	B/℃	C/s	D/s	E/%	Volume shrinkage/%	Warpage deformation/mm
1	25	220	2.0	8	98	15.00	1.168
2	35	160	1.5	12	89	12.09	2.907
3	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961
4	45	180	2.0	16	80	13.04	2.491
5	35	200	0.5	12	89	13.04	1.679
6	35	200	1.5	12	71	14.34	1.901
7	35	200	2.5	12	89	13.77	2.141
8	25	220	1.0	8	80	15.64	1.262
9	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961
10	45	220	2.0	16	98	15.09	2.197
11	55	200	1.5	12	89	14.40	1.167
12	45	220	1.0	8	98	15.60	1.227
13	25	180	2.0	8	80	12.98	1.484
14	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961
15	15	200	1.5	12	89	14.26	2.779
16	45	180	1.0	8	80	13.39	1.235
17	25	180	1.0	8	98	13.31	1.219
18	35	200	1.5	12	107	14.29	1.975
19	25	180	2.0	16	98	12.96	2.831
20	45	220	2.0	8	80	15.09	1.262
21	35	240	1.5	12	89	16.39	1.050
22	35	200	1.5	20	89	14.29	2.560
23	25	180	1.0	16	80	11.64	2.775
24	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961
25	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961
26	35	200	1.5	4	89	14.29	1.295
27	45	180	2.0	8	98	12.99	1.177
28	25	220	1.0	16	98	13.82	2.676
29	25	220	2.0	16	80	15.05	2.532
30	45	220	1.0	16	80	14.17	2.012
31	45	180	1.0	16	98	11.89	2.755
32	35	200	1.5	12	89	14.29	1.961

Notes: A is mould temperature; B is melt temperature; C is filling time; D is dwell time; E is holding pressure.

3.1 体积收缩率方差分析

将表 1 中体积收缩率的数据作为 Minitab 软件中响应面分析的响应项。由于首次计算前,各因素及平方、双因子交互项的方差计算结果是否显著尚

未明确,因此首次分析时将上述所有项目全部作为考察对象进行方差计算。体积收缩率的首次方差分析结果见表 2,概率值(P 值)用于检验来源项对应是否显著,且 P 值越小影响程度越显著。一般而

言, $P \leq 0.001$ 时表示极显著, $P \leq 0.05$ 时表示显著^[16-17]。可见除了线性特征明显外,平方和双因子交互作用均对体积收缩率有显著影响。从 P 值可以判断,一次项中 B 的效应极显著, C 和 D 的效应显著;平方项

中的 $C*C$ 效应极显著;交互项中 $C*D$ 效应极显著。表2中的 F 统计量(F 值)为差异显著性检验项,数值越大表示对响应的影响越大。由 F 值可知,各因素对体积收缩率影响大小为 $B > D > C > A > E$ 。

表2 体积收缩率方差分析结果

Tab. 2 ANOVA results of volume shrinkage

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean squares	F -value	p -value
Model	20	35.099 0	1.754 9	18.40	0.000
Linear	5	30.336 2	6.067 2	63.61	0.000
A	1	0.054 1	0.054 1	0.57	0.467
B	1	27.864 1	27.864 1	292.12	0.000
C	1	0.735 0	0.735 0	7.71	0.018
D	1	1.674 8	1.674 8	17.56	0.002
E	1	0.008 1	0.008 1	0.08	0.777
Square	5	2.035 9	0.407 2	4.27	0.021
$A*A$	1	0.026 0	0.026 0	0.27	0.612
$B*B$	1	0.080 2	0.080 2	0.84	0.379
$C*C$	1	1.998 6	1.998 6	20.95	0.001
$D*D$	1	0.046 4	0.046 4	0.49	0.500
$E*E$	1	0.033 0	0.033 0	0.35	0.568
2-Way interaction	10	2.726 9	0.272 7	2.86	0.050
$A*B$	1	0.000 0	0.000 0	0.00	0.987
$A*C$	1	0.011 0	0.011 0	0.12	0.740
$A*D$	1	0.021 0	0.021 0	0.22	0.648
$A*E$	1	0.000 6	0.000 6	0.01	0.937
$B*C$	1	0.034 2	0.034 2	0.36	0.561
$B*D$	1	0.000 2	0.000 2	0.00	0.962
$B*E$	1	0.018 2	0.018 2	0.19	0.670
$C*D$	1	2.640 6	2.640 6	27.68	0.000
$C*E$	1	0.000 6	0.000 6	0.01	0.937
$D*E$	1	0.000 2	0.000 2	0.00	0.962
Error	11	1.049 2	0.095 4		
Lack-of-fit	6	1.049 2	0.174 9	*	*
Pure error	5	0.000 0	0.000 0		
Total	31	36.148 2			

Note: * indicates significant effect.

为获得准确的计算结果,将表2中所有线性项以及 $C*C$ 和 $C*D$ 设置为方差分析的求解项进行再次分析计算,得到体积收缩率的回归方程,见式(1)。

$$R_v = 5.113 + 0.00475A + 0.05387B + 0.921C - 0.3707D - 0.00204E - 1.003C*C + 0.203C*D \quad (1)$$

式中: R_v 为体积收缩率。

3.2 翘曲变形量方差分析

用3.1的方法对表1中的翘曲变形量进行方差分析,并进行 P 值的显著性检验,可知一次项中 B 、 D 的效应极显著, A 的效应显著;平方项和双因子交互的效应均不显著。由 F 值可知,各因素对翘曲变形量影响大小依次为 $D > B > A > C > E$,同时求出翘曲变形量的回归方程,见式(2)。

$$W = 3.001 - 0.02006A - 0.01114B + 0.075C + 0.1330D + 0.00160E \quad (2)$$

式中: W 为翘曲变形量。

4 工艺参数优化及仿真验证

4.1 多响应优化

由于较高的体积收缩率往往表示塑件成型后存在缩痕或缩孔,因此为保证塑件具有良好的结构和外观完整性,体积收缩率越小越好;翘曲变形量表示塑件成型后形状偏离模具型腔的距离,因此为保证塑件具有良好的外观和安装尺寸,翘曲变形量越小越好。在生产实践中,较大的体积收缩率和翘曲变形量往往是造成良品率低的直接原因。因此,同时对体积收缩率和翘曲变形量进行最小化的优化对成型生产具有重要意义。Minitab软件的响应

优化器进行响应优化的理论算法是一套融合数学优化、统计学习与智能搜索的复合策略,通过计算迭代寻找最优解。Minitab 软件中的“响应优化器”可以对多个响应进行同时优化,可以避免将多目标工艺参数优化转化为单目标优化时由于权重系数不当造成方差求解不显著的问题,且操作流程简单、可靠。运用 Minitab“响应曲面”中的“响应优化器”,以体积收缩率和翘曲变形量的“最小化”为目标,对预测的变量值进行多响应优化的复合求解,优化的预测结果如图 6 所示,确定的最优参数组合为模具温度 52.979 8 °C、熔体温度 160.0 °C、充填时间 2.50 s、保压时间 4.0 s、保压压力 107.0% (38.8MPa)。

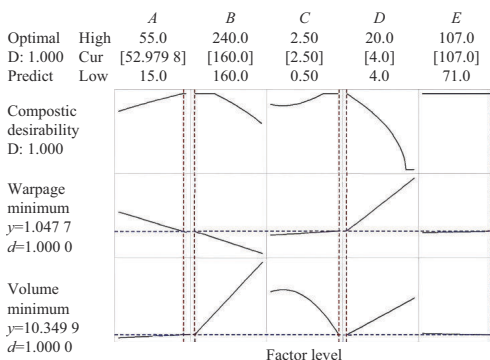


图 6 多响应优化预测结果

Fig. 6 Multi-response optimisation prediction results

4.2 优化参数的成型仿真

依据优化预测的结果设置成型参数,并进行成型仿真。图 7 为体积收缩率的仿真结果,体积收缩率的最大值在流道上,制品出模切除后不影响外观质量;塑件上表面的体积收缩率最大处在横条格栅与下表面的交汇处,数值均小于 9.6%。图 8 为翘曲变形量的仿真结果,最大值在塑件的四个圆角处,横竖格栅处的数值均较小。

5 生产验证

根据仿真模型和多响应优化后的成型工艺进行注塑生产,所得塑件如图 9 所示。考虑到塑件出

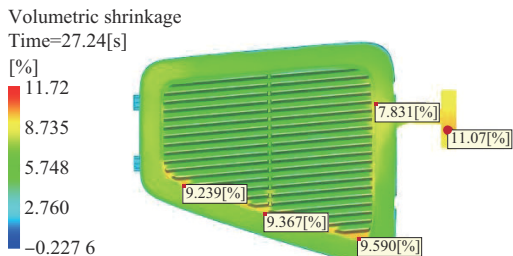


图 7 体积收缩率

Fig. 7 Volume shrinkage

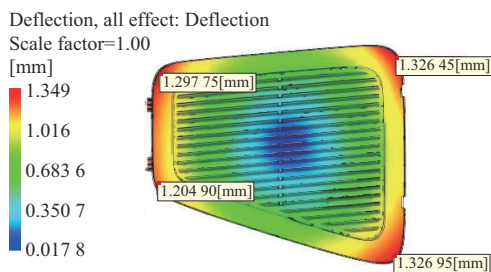


图 8 翘曲变形量

Fig.8 Warpge deformation

模后仍有余温,产品材料性能和环境条件尚未完全稳定,将产品放置在使用温度情况下的恒温房内 48 h,即实际工况条件下收缩和变形完毕后进行体积收缩率和翘曲变形量的测量。经测量,塑件表面的体积收缩率均小于 9.0%,小于图 7 中仿真的最大值 9.59%,符合尺寸收缩的要求。由于翘曲变形量在塑件安装后才具有实际意义,因此以图 1b 下表面侧边的安装卡扣为测量基准,对其他点进行变形量的测量。测量的最大值为 0.95 mm,小于图 8 中仿真的最大值 1.349 mm。同时塑件中的格栅横条表面没有出现线条、凹槽及明显的颜色变化,塑件周边没有出现明显收缩的现象,四个圆角处的变形量未使塑件出现明显的翘曲、弓背现象,说明右侧中心点偏上的浇口方案以及响应面法分析后进行的多响应优化预测的结果与质量控制的要求基本一致。



图 9 汽车地毯压条检修盖塑件图

Fig. 9 Diagram of plastic parts of automobile carpet strip overhaul cove

6 结论

(1)利用 Moldflow 软件对设置在塑件右侧边的 3 个位置的浇口方案进行成型仿真,将熔接线出现的位置是否在横竖格栅及棱、边等汇合处作为衡量方案优劣的标准,得到最优方案为右侧中心点向上偏置 19.5 mm 的浇口方案。

(2)将模具温度、熔体温度、充填时间、保压时间和保压压力作为响应面设计的 5 个因素,设计 1/2 部分实施 CCD 响应面试验方案,初次方差分析后剔除不显著的非线性项,再次求解得到体积收缩率和翘曲变形量的回归方程。

(3)运用 Minitab“响应曲面”中的“响应优化器”,以体积收缩率和翘曲变形量的“最小化”为目标,对预测的变量值进行多响应优化的复合求解,得到的预测结果为:模具温度 52.979 8 °C、熔体温度 160.0 °C、充填时间 2.50 s、保压时间 4.0 s、保压压力 107.0% (38.8MPa)。通过注塑生产验证了响应面中心复合的试验方案和使用 Minitab 的“响应优化器”进行多响应优化的合理性。

参考文献

- [1] 姜曙,周俊,王华欣,等.纤维增强注塑熔接线强度预测模型与实验研究[J].工程塑料应用,2024,52(5):81-87.
JIANG Shu, ZHOU Jun, WANG Huaxin, et al. Prediction model and experimental study of weld line strength in fiber reinforced injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 81-87.
- [2] 黄海龙.基于数值模拟的塑件熔接痕性能综合评估方法[J].现代塑料加工应用,2022,34(5):44-47.
HUANG Hailong. A method for comprehensive evaluation of plastic parts weld line performance based on numerical simulation [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2022, 34(5): 44-47.
- [3] 娄艳华,周建华.基于正交试验的高性能排水管注塑成型工艺优化[J].塑料科技,2024,52(11):136-139.
LOU Yanhua, ZHOU Jianhua. Optimization of injection molding process for high-performance drainage pipe based on orthogonal test[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(11):136-139.
- [4] 丁文杰,范希营,郭永环,等.基于二阶响应面模型和IPSO算法的注塑质量监测[J].塑料,2023,52(4):116-120,147.
DING Wenjie, FAN Xiyang, GUO Yonghuan, et al. Injection quality monitoring based on second-order response surface model and IPSO algorithm[J]. Plastics, 2023, 52(4):116-120, 147.
- [5] 林颖,胡光良,王笑生,等.基于 Moldflow 探究孔型结构对熔接线质量的影响及案例解析[J].塑料工业,2024,52(7):105-111,118.
LIN Ying, HU Guangliang, WANG Xiaosheng, et al. Influence of hole structures on welding line quality based on moldflow and case analysis[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(7):105-111, 118.
- [6] 刘奔奔,张慧,李军强,等. EPDM 包覆层注射成型模拟及工艺参数研究[J].火炸药学报,2022,45(1):103-108.
LIU Benben, ZHANG Hui, LI Junqiang, et al. Research on injection molding simulation and process parameters of EPDM coating [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(1): 103-108.
- [7] 吴掇,余俊宝,范保林,等.免喷涂金属质感改性塑料模具与制件结构优化[J].工程塑料应用,2020,48(10):52-58.
WU Luo, YU Junbao, FAN Baolin, et al. Optimization of mould and part structure for spray-free metallic plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):52-58.
- [8] 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.
- [9] 印磊,苏小平,潘杰.基于 NCGA 的汽车外饰件注塑成型工艺参数多目标优化[J].塑料工业,2024,52(8):95-100,164.
YIN Lei, SU Xiaoping, PAN Jie. Multi-objective optimizations of the injection molding process parameters for automotive exterior parts based on NCGA[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(8):95-100, 164.
- [10] 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.
- [11] 张庆,何也能.基于 Vague 集和响应面模型的注塑工艺多目标优化[J].塑料工业,2024,52(1):93-100.
ZHANG Qing, HE Yenang. Multi-objective optimization of injection molding process based on vague set and response surface model[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(1):93-100.
- [12] 陈叶娣. Moldflow 模流分析入门与实战[M].北京:机械工业出版社,2020.
CHEN Yedi. Moldflow Introduction and practice of mold flow analysis[M]. Beijing:Mechanical Engineering of University Press, 2020.
- [13] 吕英海,于昊,李国平.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2021.
LV Yinghai, YU Hao, LI Guoping. Experimental design and data processing[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2021.
- [14] 尹大帅,赵永强,黑刚刚,等.基于响应面法的螺杆转子注射成型工艺研究[J].中国塑料,2024,38(6):90-97.
YIN Dashuai, ZHAO Yongqiang, HEI Ganggang, et al. Optimization of injection-molding process of screw rotor based on response surface method[J]. China Plastics, 2024, 38(6):90-97.
- [15] 汪五二.六西格玛 DMAIC 理论及实践[M].北京:中国标准出版社,2019.
WANG Wuer. Theory and practice of six sigma DMAIC[M]. Beijing:Standards Press of China, 2019.
- [16] 孙庆东,汪五二,池根才,等.汽车车窗装饰板浇口分析及注塑工艺优化[J].工程塑料应用,2023,51(7):79-84.
SUN Qingdong, WANG Wuer, CHI Gencai, et al. Gate analysis and optimization of injection molding process for car window decorative panel[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 79-84.
- [17] 葛宜元.试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.
GE Yiyuan. Experimental design method and application of Design-Expert software[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015.