

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.07.012

基于 Moldflow 的轿车后视镜镜框注塑工艺优化

吴俊超, 黄帅, 邓锐, 黄坚

(九江职业技术学院, 江西, 九江 332007)

摘要: 以轿车后视镜镜框为例, 根据行标 QCn29017-1991, 确定了后视镜镜框塑件 8 个抽检尺寸的尺寸公差。在 Moldflow 2021 DOE 功能的帮助下, 采用田口方法筛选因子, 建立了针对塑件尺寸公差影响产品合格率的两响应 (优化目标) 7 因子实验方案。通过模流分析, 分别确定了对 2 个响应影响最大的 3 个因子。选用响应面法中的 Box-Behnken Design (BBD) 实验设计方法, 建立针对两个响应的两大组实验。根据实验结果利用 Minitab 建立分析模型并求解最优值。在考虑因子实际取值范围和工艺条件容易实现的情况下, 分别求解两个响应取最小值时对应因子的取值。用 Moldflow 证明体积收缩率和翘曲变形量都大幅度降低。结果表明, 利用 Moldflow 2021 DOE 功能能快速筛选出对响应影响较大的因子, 结合 Moldflow 的模流分析、响应面法和 Minitab, 无论是几个响应, 也无论因子是否有交互作用, 该法都能够快速有效地解决因子取值问题。该研究方法能够高效地解决复杂条件下工艺参数的取值问题, 在不改变模具结构的情况下能够有效提高塑件产品合格率。

关键词: 多响应; 交互作用; 多因子; 轿车后视镜; 田口方法; 响应面法; 翘曲变形量

中图分类号: TQ320.66+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)07-0071-08

Optimization of Injection Molding Process for Car Rearview Mirror Frame Based on Moldflow

Wu Junchao, Huang Shuai, Deng Rui, Huang Jian

(Jiujiang Vocational and Technical College, Jiujiang 332007, China)

Abstract : Taking the car rearview mirror frame as an example, according to the standard QCn29017-1991, the dimensional tolerances of 8 sampling dimensions of rearview mirror frame plastic parts were determined. With the help of Moldflow 2021 DOE function, Taguchi method was used to screen factors, and a 2-response (optimization objective), 7-factor experimental scheme for the influence of plastic part dimensional tolerance on product qualification rate was established. Through mode flow analysis, the three factors that have the greatest impact on the two responses were determined respectively. Using the Box-Behnken Design (BBD) experimental design method of response surface method, two groups of experiments for two responses were established. According to the experimental results, Minitab was used to establish the analysis model (function) and solve the optimal value. Considering the actual value range of factors and the easy realization of process conditions, the value of the corresponding factor when the two responses take the minimum value was solved respectively. It is verified by Moldflow that the volume shrinkage and warpage deformation during ejection were greatly reduced. The results show that using Moldflow 2021 DOE function can quickly screen out the factors that have a great impact on the response. Combined with Moldflow's model flow analysis, response surface method and Minitab, this method can quickly and effectively solve the problem of factor value regardless of several responses and whether the factors interact or not. This research method can efficiently solve the value problem of process parameters under complex conditions, and can effectively improve the qualified rate of plastic parts without changing the die structure.

Keywords : multi response ; interaction ; multi factor ; car rearview mirror ; Taguchi method ; response surface methodology ; warpage deformation

通信作者: 吴俊超, 硕士, 副教授, 主要研究方向为注塑成型 CAD/CAE/CAM

收稿日期: 2022-03-03

引用格式: 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, 98.

Wu Junchao, Huang Shuai, Deng Rui, et al. Optimization of injection molding process for car rearview mirror frame based on moldflow[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):71-78, 98.

轿车内部前方和左右两侧都安装有后视镜。它被誉为驾乘人员的“第二只眼睛”,后视镜能够帮助驾驶员看清汽车侧面和后面的情况,能有效的扩展驾乘人员的视线范围。轿车后视镜属于轿车的紧要安全部件,轿车后视镜组成零件的尺寸精度和成型质量以及零部件的组装、检验都有严格的国家标准和行业企业标准。

轿车后视镜和其它汽车(大货车、农用车等)后视镜相比,要求更为严格。在生产过程中要严格控制塑料制件的体积收缩率、翘曲变形量、飞边等缺陷^[1]。后视镜的功能、结构、材料以及用于生产后视镜的模具在注射成型前已经确定。如果在生产过程中塑料制件出现缺陷,若能在不改变模具结构的情况下通过数值模拟优化成型工艺参数来提高塑件质量,那将是高效、节能的好方法。

鉴于某轿车外后视镜镜框注塑生产中产品合格率较低的问题,笔者采用 Moldflow 2021 进行后视镜镜框 CAE 分析,借助 Minitab 2021 进行响应面法试验设计和数据分析,探求如何快速有效地寻求多响应(优化目标)的最优解,以及当优化目标取最优解时对应因子(注塑工艺参数)的取值,研究出了一套高效的注射成型工艺参数的优化方法,用以指导实际注塑生产^[2]。

1 塑件结构与工艺分析

1.1 研究对象

研究对象如图 1 所示,材料为不含玻纤的聚碳酸酯(PC)。注塑生产中产品的合格率较低,注塑后不经任何后处理产品合格率仅有 53.67%。主要缺陷表现在塑件有缩孔、缩松、飞边,尺寸超差,翘曲变形量过大等,无法满足装配要求。研究目的就是通过模流分析、数值分析等方法优化注塑工艺参数以提高轿车后视镜镜框塑件的产品合格率。



图1 研究对象

依据实际生产需求,参照行业标准 QCn29017-1991,确定长 208 mm、宽 131 mm、高 84 mm 这 3 个整体尺寸和定位尺寸 33 mm、关键尺寸 82 mm、20.15 mm、安装尺寸全周 2.5 mm、60 mm 这 5 个重要尺寸做为实际生产中的必检尺寸,其余尺寸做为

抽检尺寸,以确保塑件尺寸精度。8 个必检尺寸的尺寸公差如图 2 所示,检测时将按照此要求进行必检,超差即为不良品。

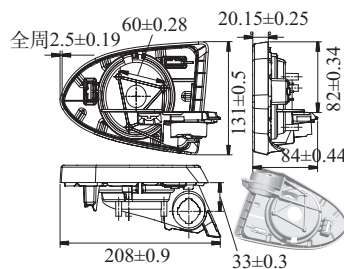


图2 后视镜镜框的必检尺寸

1.2 CAE 模型的创建

采用 NX1980 软件,绘制轿车后视镜镜框模型,外形尺寸为 208 mm×131 mm×84 mm,平均厚度为 2.5 mm,尺寸精度按照 QCn29017-1991 生产和验收,要求表面外观光洁,无飞边。将后视镜镜框 3D 模型导入 Moldflow 2021,选择双层面网格划分,网格边长 1.8 mm。经过塑件模型缺陷修复、网格划分、网格局部细化、网格评价、网格诊断和网格修复,网格统计匹配百分比达到 95.4%,网格数量 31.358 万,产品模型和产品分析模型如图 3 所示。



图3 后视镜镜框模型

后视镜镜框模具选用热流道模具,单点潜伏式浇口,一模两腔,一次生产出一套左右两件后视镜镜框,结合模具三维设计,综合考虑加工的实际情况,最终设计的模流分析模型如图 4 所示。

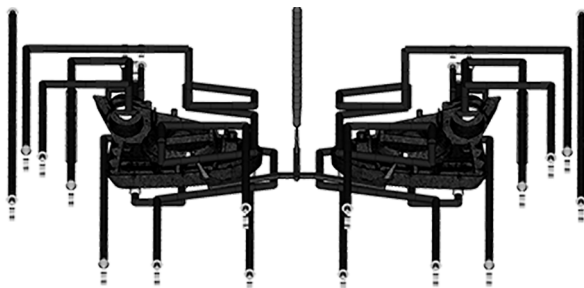


图4 CAE 分析模型

后视镜镜框的塑件原材料选择通用收缩性材料 PC。熔体温度位于 250 ~ 270℃,绝对最大熔体温度为 310℃,推荐熔体温度为 265℃,推荐模具温

度为 60 ~ 90℃,推荐顶出温度为 133℃,该塑料原料推荐的最大剪切应力为 0.5 MPa。

2 响应面优化模型的建立

2.1 筛选因子设计

采用 Moldflow 软件的 DOE 分析功能,可以方便地分析出因子对响应的影响程度,从而筛选出对响应影响大的因子,进而采用较少的试验组数进行响应面法分析,求出因子响应的回归方程,得到响应的最优值以及响应取最优值时因子所取的水平值。

CAE 模型建立后,在 Moldflow 软件中设置分析序列为“冷却+充填+保压+翘曲”,同时还需要设置“优化 DOE”选项。DOE 设置中采用筛选因子设计:“变量影响 (Taguchi)”选项,勾选熔体温度、模具表面温度、顶出温度、充填控制(注塑时间的方式),持续时间(保压时间),保压压力(占充填压力的百分数)和冷却介质入口温度共 7 个变量因子,并设定因子(变量,即注射成型工艺参数)的最大值和最小值。在质量标准中勾选所有因素引起的变形和体积收缩率做为响应(评价指标)^[4]。表 1 是利用 Moldflow 软件 DOE 功能进行筛选因子时每组试验的因子水平(取值)和响应结果。用 Moldflow 做因子筛选试验时,采用的是田口试验方法,在软件中只需要勾选需要进行筛选的因子,并设定每个因子的最大取值、最小取值和推荐值,然后再勾选响应。最影响模流分析时间的因子是熔体温度,为尽快筛选出对响应影响大的因子,在此缩小熔体温度的取值范围(将其缩小至 260 ~ 270℃)。后期正式模拟时再将熔体温度恢复到合理的取值范围(250 ~ 280℃)。Moldflow 软件会按照田口方法的原理自动设定每个因子的水平并形成成组实验。表 1 中 1 ~ 8 组实验因子的水平都是最大值、最小值和推荐值形成的组合,但 6 ~ 8 组试验进行分析时,

分析结果出现了短射, Moldflow 软件自动调整了因子的取值。第 6 组试验调整了 3 次,第 7 组和第 8 组分别调整了 2 次和 4 次才运行出正确的结果。

Moldflow 软件对因子取值调整的方法是:第 1 次调整时,如果该因子取最大取值时将因子取值减去(最大取值-推荐值)/2;如果该因子取最小取值时将因子取值加上(最大取值-推荐值)/2,得到新的取值重新分析计算。如果第 1 次调整分析过程中仍出现短射就需要进行第 2 次调整,第 2 次调整时如果该因子取最大取值,将第 1 次调整得到的因子取值减去(最大取值-推荐值)/4;如果该因子取最小取值,将第 1 次调整得到的因子取值加上(最大取值-推荐值)/4;第 3 次调整时如果该因子取最大取值,将第 2 次调整得到的因子取值减去(最大取值-推荐值)/8;如果该因子取最小取值,将第 2 次调整得到的因子取值加上(最大取值-推荐值)/8;依次而推,直到出现正确的分析结果。

在选择 7 个因子中,对体积收缩率各变量的影响百分比分别为保压压力 45.60%、保压时间 22.01%、熔体温度 9.88%、顶出温度 7.96%、模具表面温度 7.01%、注塑时间 4.20%、冷却介质入口温度 3.34%。如果响应是翘曲变形量时,各因子对其影响的百分比分别是保压时间 40.87%、冷却介质入口温度 17.85%、模具表面温度 14.14%、注塑时间 10.80%、保压压力 6.93%、顶出温度 6.15%、熔体温度 3.25%,数据见表 2。

7 个注射成型工艺参数中对体积收缩率影响程度从大到小是保压压力^[5]>保压时间>熔体温度>顶出温度>模具表面温度>充填控制>冷却介质入口温度,保压压力、保压时间、熔体温度排在前三位^[5]。对翘曲变形量影响程度从大到小依次是保压时间>冷却介质入口温度^[6]>模具表面温度>充填

表 1 Moldflow 因子筛选试验数据

方案编号	注射时间/s	熔体温度/℃	保压时间/s	冷却介质入口温度/℃	保压压力/%	模具表面温度/℃	顶出温度/℃	体积收缩率/%	翘曲变形总量/mm
1	0.64	260	8	22	64	70	130	0.699	0.928
2	0.64	260	12	22	96	80	136	0.408	0.779
3	0.64	270	8	28	64	80	136	0.722	0.964
4	0.64	270	12	28	96	70	130	0.44	0.857
5	0.96	260	8	28	96	70	136	0.44	1
6	0.96	260	12	28	64	80	130	有短射,无结果,需调整因子取值	
7	0.96	270	8	22	96	80	130	有短射,无结果,需调整因子取值	
8	0.96	270	12	22	64	70	136	有短射,无结果,需调整因子取值	
6(调整)	0.82	264.38	10.25	25.37	78	75.62	132.62	0.603	0.858
7(调整)	0.84	266.25	9.5	24.25	84	76.25	132.25	0.559	0.91
8(调整)	0.81	265.31	10.125	24.81	79	74.69	133.19	0.596	0.873

表 2 因子对响应的影响程度

选定的 7 个因子	对体积收缩率影响的 百分比 /%	对翘曲变形影响的 百分比 /%
保压压力	45.60	6.93
保压时间	22.01	40.87
熔体温度	9.88	3.25
顶出温度	7.96	6.15
模具表面温度	7.01	14.14
注射时间	4.20	10.80
冷却介质入口温度	0.0334	0.1785

控制 > 保压压力 > 顶出温度 > 熔体温度,保压时间、冷却介质入口温度、模具表面温度排前三位^[7]。

对于体积收缩率和翘曲变形两个响应来说,对其影响最大的 3 个因子中只有保压时间这个因子对两者都有较大影响,其余的因子并不相同。综合考虑,在接下来的试验中将分成两大组单独的试验分别求出响应的最优值和对应的因子水平。第一大组单独试验响应是顶出时体积收缩率,因子是保压压力、保压时间、熔体温度^[8]。第二大组单独试验响应是翘曲变形量,对应的因子是保压时间、冷却介质入口温度、模具表面温度。

2.2 响应面法

响应面法是一种应用科学的、广泛的统计学方法^[9]。它能够根据部分试验方便快捷地找到响应的最优值,以及响应是最优值时各因子的取值。基本原理是从部分确定性试验中求出一个多项式函数,来近似代替要求解的问题。然后通过合理选取因子取值和迭代策略(如遗传算法等),求出函数的最优值和对应因子的取值。笔者采用“完全二次”多项式回归模型,建立的变量与响应之间的近似函数^[10]如公式(1)所示。

$$F(x) = c_0 + \sum_{i=1}^n (c_i x_i + c_{ii} x_i^2) + \sum_{i < j} c_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

式中: $F(x)$ ——优化的目标函数,试验响应值;

c_0, c_i, c_{ii}, c_{ij} ——待定系数;

n ——设计变量个数;

x_i, x_j ——设计变量;

ϵ ——统计误差。

为了提高轿车后视镜镜框注塑阶段的产品合格率,既要避免缩孔、缩松、翘曲变形量过大、飞边等缺陷的发生,又要保证后期能够轻松地装配,这是一个多目标优化的问题^[11]。综合考虑各方面的因素笔者最终选择塑件的最大翘曲变形量和最大体积收缩率作为优化目标,实现多响应与多变量之间的优

化决策^[1]。

3 响应面法试验设计

笔者借助 Minitab 进行响应面法试验设计和数据分析^[12],通过因子筛选试验的数据,可以初步推断在因子的取值区间内回归方程的曲线可能是弯曲的,为了减少试验次数,采用 Box-Behnken Design (BBD) 设计方法,建立二次多项式响应面模型,求取响应的最优值以及对应的因子取值^[13]。前面确定了要做两大组试验,第一大组单独试验响应是顶出时体积收缩率,将成型工艺参数中对体积收缩率影响最大的保压压力、保压时间、熔体温度 3 个因素作为因子。表 3 是对应的第一大组 BBD 试验所采用的响应面因素水平表。第二大组单独试验响应是翘曲变形量,对应的因子是保压时间、冷却介质入口温度、模具表面温度。表 4 是对应的第二大组 BBD 试验所采用的响应面因素水平表。

表 3 响应是“顶出时体积收缩率”的因素水平

因素	保压压力 /%	保压时间 /s	熔体温度 /℃
-1	0.64(充填压力的 64%)	8	250
0	0.8(充填压力的 80%)	10	265
1	0.96(充填压力的 96%)	12	280

表 4 响应是“翘曲变形量”的因素水平表

因素	保压时间 /s	冷却介质入口温度 /℃	模具表面温度 /℃
-1	8	22	70
0	10	25	75
1	12	28	80

根据表 3 和表 4 设定的因素水平表,建立 BBD 试验,两大组试验采用统一的 BBD 试验设置。具体设置有: 仿行为 1,中心点为 3,基础次数和总试验次数均为 15,基础区组和合计区组都选择 1。方案设计及试验结果见表 5 和表 6。

表 5 响应是“体积收缩率”的 BBD 试验设计与试验结果

运行序	点类型	区组	保压压力 /%	保压时间 /s	熔体温度 /℃	Y_1
1	2	1	0.64	8	265	0.651
2	2	1	0.96	8	265	0.981
3	2	1	0.64	12	265	0.764
4	2	1	0.96	12	265	0.320
5	2	1	0.64	10	250	0.510
6	2	1	0.96	10	250	0.412
7	2	1	0.64	10	280	0.620
8	2	1	0.96	10	280	0.503
9	2	1	0.8	8	250	0.742
10	2	1	0.8	12	250	0.582
11	2	1	0.8	8	280	0.980
12	2	1	0.8	12	280	0.640
13	0	1	0.8	10	265	0.332
14	0	1	0.8	10	265	0.332
15	0	1	0.8	10	265	0.332

表 6 响应是“翘曲变形量”的 BBD 试验设计与试验结果

运行序	点类型	区组	保压时间 /s	冷却介质入口温度 /℃	模具表面温度 /℃	$Y_2/\%$
1	2	1	8	22	75	0.739 9
2	2	1	8	28	75	1.000 0
3	2	1	12	22	75	0.829
4	2	1	12	28	75	0.479
5	2	1	10	22	70	0.628 8
6	2	1	10	28	70	0.551 5
7	2	1	10	22	80	0.715 5
8	2	1	10	28	80	0.623 2
9	2	1	8	25	70	0.811 6
10	2	1	12	25	70	0.685 5
11	2	1	8	25	80	0.999 2
12	2	1	12	25	80	0.731 2
13	0	1	10	25	75	0.488 5
14	0	1	10	25	75	0.488 5
15	0	1	10	25	75	0.488 5

3.1 响应面法求“顶出时体积收缩率”最小值时各因素的取值

针对表 5 的试验结果利用 Minitab 进行数据分析。表 7 为响应是“顶出时体积收缩率”的方差分析初次计算结果,初次计算得到的回归方程(2)。

表 7 响应是“顶出时体积收缩率”的方差分析初次计算结果

来源	自由度	离均差平方和	均方	F 值	P 值
模型	9	0.679 620	0.075 513	140.29	0.000
线性项总体评价	3	0.181 694	0.060 565	112.52	0.000
A	1	0.013 530	0.013 530	25.14	0.004
B	1	0.137 288	0.137 288	255.06	0.000
C	1	0.030 876	0.030 876	57.36	0.001
平方项总体评价	3	0.339 966	0.113 322	210.54	0.000
A*A	1	0.013 795	0.013 795	25.63	0.004
B*B	1	0.301 752	0.301 752	560.62	0.000
C*C	1	0.051 521	0.051 521	95.72	0.000
双因子交互作用项总体评价	3	0.157 959	0.052 653	97.82	0.000
A*B	1	0.149 769	0.149 769	278.25	0.000
A*C	1	0.000 090	0.000 090	0.17	0.699
B*C	1	0.008 100	0.008 100	15.05	0.012
误差综合评价	5	0.002 691	0.000 538		
失拟	3	0.002 691	0.000 897	*	*
纯误差	2	0.000 000	0.000 000		
合计	14	0.682 311			

$$Y_1=36.41+2.49*A-0.614*B-0.257\ 5*C+2.388*A*A+0.07147*B*B+0.000525*C*C-0.604\ 7*A*B-0.001\ 98*A*C-0.001\ 5*B*C \quad (2)$$

式中: Y_1 ——体积收缩率;

A——保压压力;

B——保压时间;

C——熔体温度。

该回归方程的预测值为 93.69%, 调整后可达

98.9%, 从数值上看, 预测值很高, 预测效果已经很好了。但是从 P 值判断, P 值大于 0.05 的项是失拟项^[14]。需要将失拟项 A*C 剔除后再次进行计算并分析, 这样才能建立更为合理的回归方程。剔除失拟交互项 A*C 后, 运用 Minitab 重新运算, 最终建立的关于响应是“顶出时体积收缩率 Y_1 ”的回归方程如式(3)所示。

$$Y_1=36.83+1.97*A-0.614*B-0.259\ 1*C+2.388*A*A+0.07147*B*B+0.000525*C*C-0.604\ 7*A*B-0.001\ 5*B*C \quad (3)$$

最终回归方程的预测值为 95.75%, 调整后可达 99.05%。相比初次运算, 最终回归方程更加合理, 预测的准确性也有一定程度的提高。

响应是“体积收缩率”的方差分析最终结果见表 8。P 值越小对响应的的影响程度越显著, 从表 8 的 P 值中可以看出, 一次项中的 $B^{[15]}$ 、C(对体积收缩率的线性效应极为显著 ($P < 0.001$); 二次项中的 $B*B$ 、 $C*C$ 对体积收缩率的效应极为显著 ($P < 0.001$); 交互项中 $A*B$ 对体积收缩率的效应极为显著 ($P < 0.001$)。其余项 A, $A*A$, $B*C$ 对体积收缩率的效应影响显著 ($P < 0.05$); 最终回归方程的预测值超过了 95%, 预测准确, 可信度高。这些分析都表明选用的模型与实际情况拟合较好、误差小, 能较好反应出各因素与顶出时体积收缩率之间关系。由 F 值可知, 在试验范围内各因素对体积收缩率影响大小依次为^[16] $B > C > A$ 。

表 8 响应是“体积收缩率”的方差分析最终结果

来源	自由度	离均差平方和	均方	F 值	P 值
模型	8	0.679 529	0.084 941	183.23	0.000
线性项总体评价	3	0.181 694	0.060 565	130.64	0.000
A	1	0.013 530	0.013 530	29.19	0.002
B	1	0.137 288	0.137 288	296.15	0.000
C	1	0.030 876	0.030 876	66.60	0.000
平方项总体评价	3	0.339 966	0.113 322	244.45	0.000
A*A	1	0.013 795	0.013 795	29.76	0.002
B*B	1	0.301 752	0.301 752	650.91	0.000
C*C	1	0.051 521	0.051 521	111.14	0.000
双因子交互作用项总体评价	2	0.157 869	0.078 935	170.27	0.000
A*B	1	0.149 769	0.149 769	323.07	0.000
B*C	1	0.008 100	0.008 100	17.47	0.006
误差综合评价	6	0.002 781	0.000 464		
失拟	4	0.002 781	0.000 695	*	*
纯误差	2	0.000 000	0.000 000		
合计	14	0.682 311			

Minitab 软件可以直接导出各因素交互作用对体积收缩率的曲面图, 如图 5 所示。从图中可以看

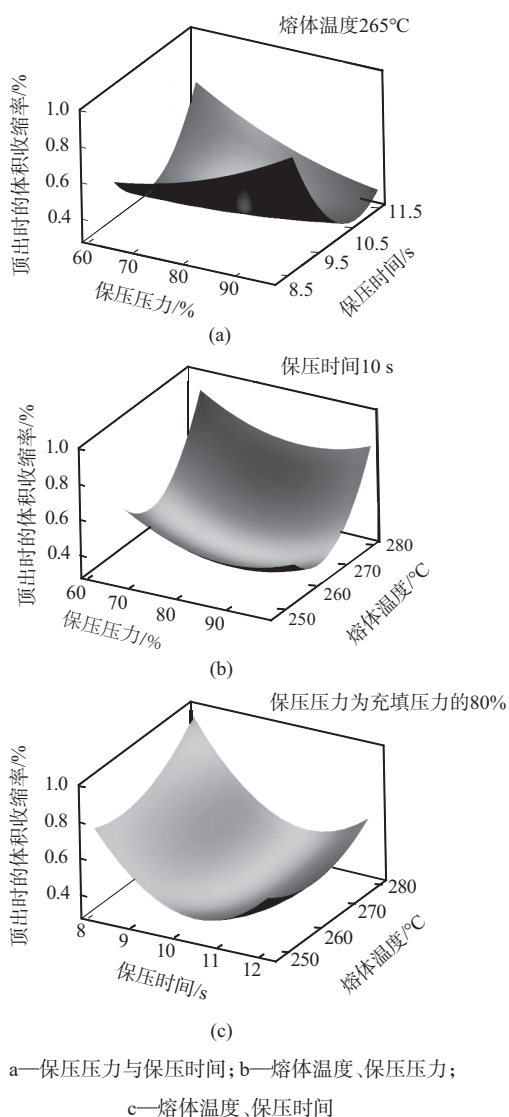


图5 各因素交互作用对顶出时体积收缩率影响的响应面图

出保压时间、熔体温度对体积收缩率影响显著^[17],图中曲面曲率较大,看上去很陡峭,熔体温度对顶出时体积收缩率的影响是随着熔体温度的升高^[18],体积收缩率有所降低,但体积收缩率达到一个较低的值后,随着熔体温度的升高,体积收缩率将快速增大。保压时间对顶出时体积收缩率的影响也是随着保压时间的增大而减少,当达到一定值后,保压时间再增加,体积收缩率反而有增大。保压压力的影响比较复杂,看不出明显的变化趋势。

通过回归模型的分析,以顶出时体积收缩率为评价指标,当体积收缩率取最小值(0.257)时,保压时间应为11.1111 s,保压压力为充填压力的96%。熔体温度应为262.727℃。

在考虑可操作性的前提下,将工艺条件进行

适当修正。 B 取11 s, A 取充填压力的96%。 C 应为263℃。在此条件下,再次用模流分析软件Moldflow进行模拟分析,得到顶出时体积收缩率为0.2604。将 B 取11 s,保压压力 A 取充填压力的96%。熔体温度 C 应为263℃代入理论分析模型公式(3)得出 $Y_1=0.261144$ 。实际模流分析模拟结果和理论模型误差0.000744,实际值和理论值基本相符。说明该模型对体积收缩率工艺参数优化可靠。

3.2 响应面法求翘曲变形量最小值时各因素的取值

用同样的方法将表6中的数据复制到Minitab中进行分析计算,很容易求出响应是翘曲变形量时的回归方程,其回归方程为公式(4)。模型预测的准确度很高,调整后达到96.31%。

$$Y_2 = 23.65 - 0.543 * E - 0.006 * F - 0.543 * G + 0.05633 * E * E + 0.00535 * F * F + 0.003724 * G * G - 0.02542 * E * F - 0.00025 * F * G \quad (4)$$

式中: Y_2 ——翘曲变形量,mm;

E ——保压时间,s;

F ——冷却介质入水口温度,℃;

G ——模具表面温度,℃。

从各因素对翘曲变形量影响的曲面图中可以看出:

(1) 在模具表面温度不变的情况下,保压时间在一一定的范围内能够找到翘曲变形量的极小值。

(2) 保持保压时间不变,冷却介质入口温度越低,总的翘曲变形量越小,但实际生产中冷却介质的入口温度要有一个合理的取值。

(3) 在保证冷却水入口温度恒定的情况下,保压时间越短、模具表面温度越低,翘曲变形量越小。

实际生产中各种因素的影响是相互交错的,改变因素的水平值,分析结果又不一样。所以上面的三个结论只能用于参考。分析时可以作为参考。现在可以采用Minitab的功能,求出分析模型望小(越小越好)时各因素的取值。在Moldflow中重新设定注射成型工艺参数并运行分析^[19]。如果模流分析结果和理论模型预测比较接近。就说明分析模型可靠。通过查询Minitab计算的最优值可以得到保压时间11.1515 s。冷却介质入口温度28℃,模具表面温度73.7374℃。考虑实际生产的需求保压时间11 s。冷却介质入口温度28℃,模具表面温度74℃。通过Moldflow重新分析计算得到的最终翘曲变形量为0.382594 mm。

4 响应面法的结果

通过 3.1 分析,响应是顶出时体积收缩率(本例是望小)时,影响最显著的三个因素取值分别为: B 取 11 s, A 取充填压力的 96%, C 为 263 ℃。通过 3.2 分析,当响应是翘曲变形量(本例是望小)时,影响最显著的三个因素取值为:保压时间 11 s。冷却介质入口温度 28 ℃,模具表面温度 74 ℃。

最后在 Moldflow 中设定这 5 个因素的取值,重新运行模流分析。图 6 是重新设置后顶出时体积收缩率的计算结果。从图中可以看出体积收缩数值均匀,有收缩的(正值)也有膨胀的(负值),零件上大部分区域的体积收缩率数值都小于 1%,零件表面体积收缩率最大的地方约 3%,而且区域很少,外观面上体积收缩率大于 3% 的地方几乎找不到,这样的模拟结果能够满足企业实际生产需求。图 7 是重新设置后翘曲变形量的计算机结果。从图中可以看出,翘曲变形相比之前的模拟明显减少,大部分区域都小于 1 mm,对于这样第一个中等大小的塑件来说,翘曲变形小于 1 mm 是一个很不错的优化分析结果。从分析结果上看,该优化结果可用于实际生产。建议进行生产验证。

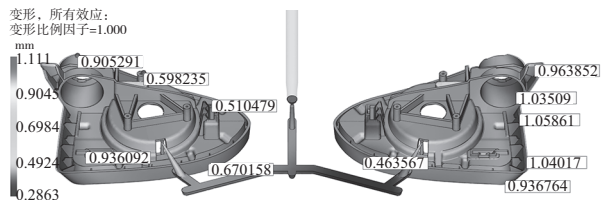


图 6 按照响应面法的结果设定参数后模拟的体积收缩率

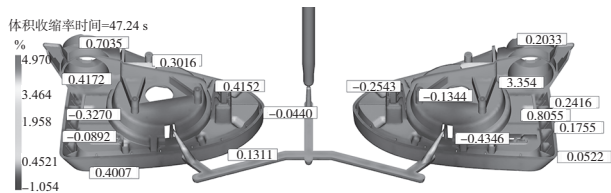
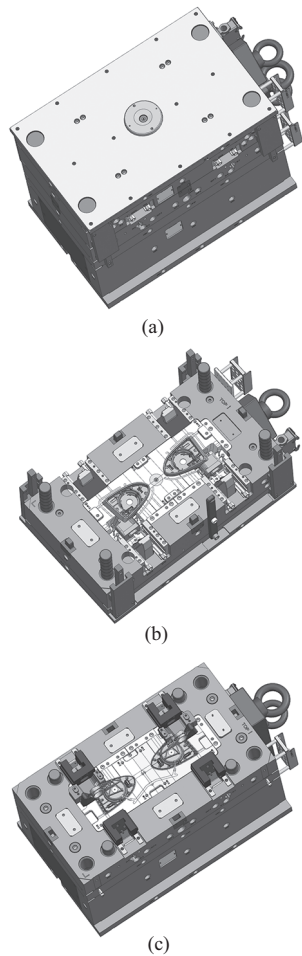


图 7 按照响应面法的结果设定参数后模拟的翘曲变形量

5 生产验证

图 8 是后视镜镜框模具的三维设计结果。图 9 是企业生产采用的模具。图 10 是生产出来的合格产品。根据模拟结果,无论是体积收缩率还是翘曲变形量都优于企业生产标准。参照行业标准 QCn29017-1991,在实际生产中抽检确定的 8 个尺寸,检验合格率从 53.67% 提高到 95.55%,明显提高了产品的合格率。



a—整体的模具三维结构;b—模具上模部分;c—模具下模部分

图 8 后视镜镜框模具的三维设计结果



图 9 后视镜镜框模具实物图



图 10 合格的后视镜镜框塑料制品

6 结论

(1) 利用 Moldflow 的 DOE 功能,从 7 个工艺参数中筛选出对响应(优化目标)影响最大的 3 个因子。采用响应面法中的 BBD 实验设计方法,结合 Minitab 软件优化了轿车后视镜镜框的注塑工艺参数。确定的最终参数为保压时间 11 s,保压压力取充填压力的 96%,熔体温度为 263 ℃^[20],冷却介质

入口温度为 28℃,模具表面温度为 74℃。

(2) 通过实际生产验证,在没有改变模具结构仅改变工艺参数的情况下,产品合格率得到了大幅度的提高。从抽检的 8 个尺寸看,产品合格率从 53.67% 提高到 95.55%。

(3) 采用模流分析软件,在田口方法的帮助下能够快速地进行因子(工艺参数)筛选。结合响应面法 BBD 试验和质量管理统计分析软件 Minitab,能够快速解决针对多响应的有交互作用的多因子取值问题。该方法能够高效地解决复杂条件下多个有交互作用的工艺参数的取值问题,在不改变模具结构的情况下能够有效地提高塑件产品合格率^[21],助力低碳排放,促进发展绿色经济。

参考文献

- [1] 蔡厚道. 基于数值模拟和响应面法的支架注塑工艺优化[J]. 塑料工业, 2015, 43(11):56-60.
Cai Houdao. Injection molding parameter optimization of a bracket based on numerical simulation and response surface method[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(11):56-60.
- [2] 曾文瑜. 汽车保险杠冷热流道结合注塑成型工艺 CAE 优化分析[J]. 塑料工业, 2016, 44(3):83-88.
Zeng Wenyu. Optimization analysis of cold hot runner injection molding technology with cae for the car bumper[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(3):83-88.
- [3] 柳存昭. 对尺寸公差控制较为有利的设计方法[J]. 汽车科技, 2015(2):28-32.
Liu Cunzhao. The appropriate design methods for dimension tolerance control[J]. Auto SCI-Tech, 2015(2):28-32.
- [4] 沈娟. 薄壁塑件注射成型工艺优化与模具设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
Shen Juan. Injection process optimum and mold design of the thin-walled plastic parts[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [5] 刘峰, 沈洪雷. 工艺参数对平板类塑件翘曲变形的影响及优化[J]. 常州工学院学报, 2018, 31(2):23-26.
Liu Feng, Shen Honglei. The influence and optimization of processing parameters on warpage of injection molded panel products[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2018, 31(2):23-26.
- [6] 黄继战, 陈炜, 仇文宁, 等. 汽车音响面板热流道注射成型工艺优化研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(10):81-85.
Huang Jizhan, Chen Wei, Qiu Wenning, et al. Process optimization of hot runner injection molding for a automotive audio panel[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(10):81-85.
- [7] 周大路, 黄薇. 基于 CAE 技术的充电器盖注塑成型分析[J]. 塑料科技, 2007(5):76-78.
Zhou Dalu, Huang Wei. Injection molding analysis of battery charger cover based on CAE technology[J]. Plastics Science and Technology, 2007(5):76-78.
- [8] 聂胜利. 注塑成型熔体/模具界面接触热阻研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
Nie Shengzhao. Research on interface thermal contact resistance in injection molding[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] 张智圆, 张贵君, 王晶娟, 等. 响应面法优化零陵香水溶性多糖组分提取工艺及其抗炎作用的研究[J]. 天津中医药, 2013, 30(4):235-238.
Zhang Zhiyuan, Zhang Guijun, Wang Jingjuan, et al. Extract technique of water-soluble polysaccharide of *Lysimachia foenum-graecum* Hance optimized by RSM and its anti-inflammatory actions[J]. Tianjin Journal of Traditional Chinese Medicine, 2013, 30(4):235-238.
- [10] 史经纬. 固定几何气动矢量喷管流动机理及性能评估技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
Shi Jingwei. Investigation on flow mechanism and performance estimation of fixed-geometric thrust vectoring nozzle[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [11] 吴凯, 徐宏海, 李辉. RV 减速器零部件的选配研究[J]. 机械工程师, 2017(11):71-74.
Wu Kai, Xu Honghai, Li Hui. Research on parts selective assembly of RV Reducer[J]. Mechanical Engineer, 2017(11):71-74.
- [12] 叶砚, 蒋冬花, 嵇豪. 响应面法优化红曲霉 X27 液态发酵产 γ -氨基丁酸工艺条件[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(9):106-110.
Ye Yan, Jiang Donghua, Ji Hao. Optimization of fermentation conditions of *monascus* X27 for producing- γ -aminobutyric acid[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(9):106-110.
- [13] 侯读成, 尧珍玉, 刘劲芸, 等. 烟梗中纤维素和果胶酶解条件的响应面优化[J]. 江西农业学报, 2016, 28(8):46-50.
Hou Ducheng, Yao Zhenyu, Liu Jinyun, et al. Optimization of conditions for enzymolysis of cellulose and pectin in tobacco stem by response surface methodology[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(8):46-50.
- [14] 尹宁. 补料分批发酵生产乳链菌肽及其抑菌性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
Yin Ning. Research on fed batch fermentation for nisin and its antibacterial properties[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2016.
- [15] 李雷, 周峰, 尧超群, 等. 微反应器内制备 4-(6-羟基己氧基)苯酚工艺[J]. 化工学报, 2017, 68(6):2336-2343.
Li Lei, Zhou Feng, Yao Chaoqun, et al. Synthesis process of 4-(6-hydroxyhexyloxy)phenol in microreactor[J]. CIESC Journal, 2017, 68(6):2336-2343.

(下转第 98 页)

- 塑料,2021,35(6):106-110.
- Chen Hongtu, Zhang Weihe. Design of bicolor injection mold for fixing frame of vehicle[J]. China Plastics,2021,35(6):106-110.
- [9] 魏东坡,周静. 转轴零件注塑工艺分析及双色模具设计[J]. 工程塑料应用,2020,48(6):88-91.
- Wei Dongpo, Zhou Jing. The analysis of injection process and bicolor injection mold design for rotating shaft parts[J]. Engineering Plastics Application,2020,48(6):88-91.
- [10] 石波,郝加杰. 汽车雾灯装饰盖倒装双色注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2022,50(2):112-116,122.
- Shi Bo, Hao Jiajie. Design of inverted double color injection mold for automobile fog lamp decoration cover[J]. Engineering Plastics Application,2022,50(2):112-116,122.
- [11] 杨剑萍,肖国华,刘路兴,等. 防疫消毒瓶盖异型子模双色注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2021,49(2):97-102.
- Yang Jianping, Xiao Guohua, Liu Luxing, et al. Design of bi-color injection mold with different sub-mold for epidemic prevention and disinfection bottle cap[J]. Engineering Plastics Application,2021,49(2):97-102.
- [12] 张少飞. 汽车风管控制器双色注射模设计[J]. 模具工业,2019,45(1):45-49.
- Zhang Shaofei. Design of two-color injection mould half for automobile air duct controller[J]. Die & Mould Industry,2019,45(1):45-49.
- [13] 苏慧祯. 型芯旋转式双色模具设计[J]. 工程塑料应用,2015,43(7):87-90.
- Su Huiwei. Design of double color mould with core rotary type[J]. Engineering Plastics Application,2015,43(7):87-90.
- [14] 范有发,肖雪清. 控制开关面板双色注射模设计[J]. 工程塑料应用,2012,40(1):51-54.
- Fan Youfa, Xiao Xueqing. Design of bi-color injection mold for control switch facepanel plastic[J]. Engineering Plastics Application,2012,40(1):51-54.
- [15] 杨明池. 转盘旋转式双色注塑模结构设计[J]. 模具技术,2017,3:39-43.
- Yang Mingchi. Rotating double-colour injection mould design[J]. Die and Mould Technology,2017,3:39-43.
- [16] 石世铄. 注射模具设计[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
- Shi Shizhao. Injection mold design[M]. Beijing:Chemical Industrial Press,2017.
- Industry,2012,40(8):60-64.
- [19] 贾玉龙. 汽车内饰 IMD 成型工艺研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- Jia Yulong. Research on in-mold decoration molding process in automotive interior [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2012.
- [20] 刘苗苗. 高分子复合材料储罐封头精密成型的研究[D]. 北京:北京化工大学,2016.
- Liu Miaomiao. Study on the precision molding of poiymmer composites tank head[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2016.
- [21] 吴俊超,陈爱霞. 单反相机机身注塑件注塑成型工艺研究[J]. 九江职业技术学院学报,2014(3):81-83.
- Wu Junchao, Chen Aixia. Research of injection molding process based on the fuselage of SLR cameras[J]. Journal of Jiujiang Vocational and Technical College,2014(3):81-83.
- (上接第78页)
- [16] 陆玲梅. 基于 CAE 汽车天窗滑轨注塑工艺多目标优化与模具设计[D]. 镇江:江苏大学,2018.
- Lu Lingmei. Injection process multi-objective optimum and mold design of the car skylight guiding rail based on CAE [D]. Zhenjiang:Jiangsu Universty,2018.
- [17] 孙丽丽,苏学满. 工艺参数对输液瓶瓶坯注塑性能的影响分析[J]. 中国塑料,2015,29(2):90-97.
- Sun Lili, Su Xueman. analysis of process parameters' influence on the injection's molding of infusion bottle parisons[J]. China Piastics,2015,29(2):90-97.
- [18] 吴书婷,刘泓滨,李雪峰. 基于正交试验法的汽车保险杠注塑成型工艺参数多目标优化研究[J]. 塑料工业,2012,40(8):60-64.
- Wu Shuting, Liu Hongbin, Li Xuefeng. Multi-objective optimization of injection molding process of automobile bumper based on orthogonal experimental method[J]. China Plastics