[新设备·新材料·新方法]
DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.03.014

基于响应面法的报警器上盖注塑工艺优化

赵 毅,刘淑梅*,潘泓谊

(上海工程技术大学 材料工程学院,上海 201620)

摘 要:为降低某报警器上盖注塑的翘曲变形,课题组在分析不同尺寸浇口的翘曲量和剪切力结果后,选用了较优的1.3 mm浇口。在此基础上建立了响应面方案,对工艺参数进行优化。选择注塑时间、保压时间和保压压力为优化参数,以翘曲量为响应目标,利用Moldflow进行模拟,结合Design Expert软件对方案结果进行分析,利用回归方程拟合预测值。得到了最优工艺参数为:注塑时间1.5 s,保压时间9.6 s,保压压力70 MPa。根据最优方案获得了合格的产品,证明了优化结果的可靠性。

关 键 词:注塑成型;翘曲;响应面法;Moldflow;Design Expert

中图分类号:TQ320.66;TH145.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2021)03-0077-05

Optimization of Injection Molding Process for Upper Cover of Alarm Based on Response Surface Method

ZHAO Yi, LIU Shumei*, PAN Hongyi

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to reduce the warpage deformation of the upper cover of an alarm, the research team analyzed the warpage and shear force results of different sizes of gates, and chose the better 1.3 mm gate. On this basis, a response surface method was established to optimize the process parameters. The injection molding time, holding pressure time, holding pressure were selected as the optimization parameters, and the warpage was taken as the response objective, the simulation was carried out by Moldflow; the results of the scheme were analyzed by Design Expert software, and the predicted values were fitted by regression equation. The optimal process parameters were obtained as follows: injection time 1.5 s, holding time 9.6 s, holding pressure 70 MPa. According to the optimal scheme, qualified products are obtained, which proves the reliability of the optimization results.

Keywords: injection molding; warpage; response surface method; Moldflow; Design Expert

报警器在汽车领域有许多应用,本课题研究的报警器在车速低于30 km/h时,会模拟发动机引擎的声音来提醒行人,属于车辆低速报警器。通常报警器壳体为注塑件,壳体内部装载电子系统,因此壳体上盖需要与底座紧密配合,确保良好的密封性,以保护其内部系统不受腐蚀。基于此,注塑时尽量减少翘曲以降低尺寸误差。王桂龙等[1-3]发现在盖类零件的注塑过程中影响较大的工艺参数有保压压力、注射时间和保压时间,其余参数影响较小。此外,对于工艺参数的优化,响应面法可以根据参数指定范围内的样本点和测试结果,拟合目标和参数的线性回归方程,根据方程预测最优参数组合;响应面法精密度高、预测性能好,比较适合做工艺参数的优化设计[4-5]。课题组结合前人的研究成果,在数值模拟的基础上建立响应面方案,研究注射时间、保压时间和保压压力对报警器上盖翘曲变形的影响,通过实际生产和产品测试证实了优化结果的可靠性。

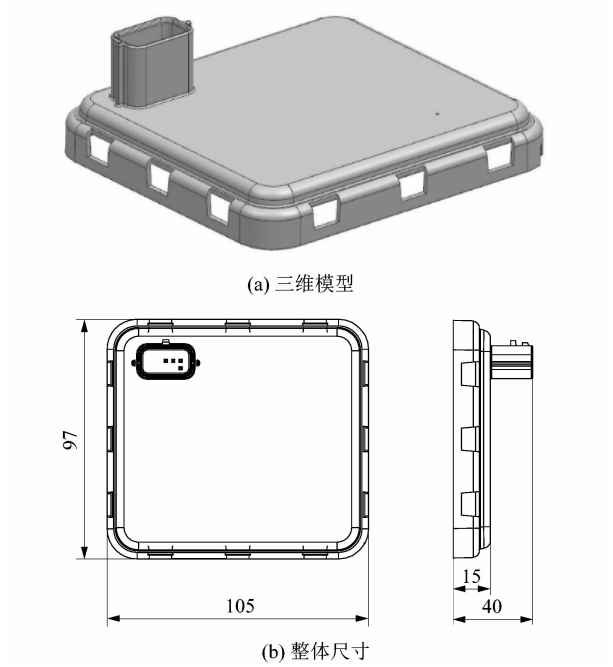
1 工艺分析

报警器上盖的结构如图1所示,所用材料为PBT+PC,含有质量分数为15%的玻纤,牌号为Pocan B 7616。

收稿日期:2020-09-22;**修回日期**:2021-04-07

第一作者简介:赵毅(1995),男,山西运城人,硕士,主要研究方向为注塑成型工艺优化。通信作者:刘淑梅(1968),女,上海人,副教授,主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM。E-mail:958551046@qq.com

由于具有优良的耐热性能、电气性能和阻燃性能以及吸水率低的优点,该种材料常用于电子电器设备中。



(a) 三维模型

(b) 整体尺寸

图 1 上盖结构图

Figure 1 Upper cover structure diagram

由图 1 可以看出,报警器上盖长 105 mm,宽 97 mm,是典型的方盒件。在其注塑成型过程中,模具结构是影响翘曲的关键因素之一,该报警器上盖形状规则,尺寸居中,出于模具成本考虑,采用单浇口,结合 Moldflow 的浇口位置分析,最终选用中心点浇口注塑。注塑过程中浇口尺寸过大会导致熔料各向异性增大,垂直料流方向的收缩率变大;浇口尺寸太小会导致浇口处的剪切速率和剪切应力变大,导致塑料断层,影响产品性能[6]。课题组采用点浇口注塑,设计了 4 个浇口尺寸,分别为 1.0,1.3,1.5 和 2.0 mm。采用相同的工艺参数仿真模拟,观察 4 个方案对于产品性能的影响。各浇口尺寸对应的翘曲量和剪切应力如表 1 所示。

表 1 不同浇口尺寸的分析结果

Table 1 Analysis results of different gate sizes

浇口尺寸/mm	翘曲量/mm	剪切应力/MPa
1.0	0.485	0.416
1.3	0.486	0.382
1.5	0.494	0.366
2.0	0.501	0.364

对比发现,采用 1.0 和 1.3 mm 浇口产生的翘曲较小,但根据材料注塑性能,材料允许的最大剪切应力为 0.4 MPa,1.0 mm 浇口的剪切应力为 0.416 MPa,超过了临界值,所以考虑选用 1.3 mm 浇口尺寸。

2 基于响应面法的参数优化

2.1 设计变量和响应目标

工艺参数对不同类型零件翘曲影响有差异,根据前文分析,在报警器上盖成型优化中,挑选注射时间 A、保压时间 B 和保压压力 C 3 个参数作为优化对象,翘曲量 D 作为响应值。由成型窗口分析的质量填充发现,在 0.3 ~ 2.8 s 内可以完成注塑,因此选取注射时间为 0.5 ~ 1.5 s,保压时间为 4.0 ~ 12.0 s,保压压力为 50 ~ 70 MPa。各工艺参数的取值范围如表 2 所示。

表 2 各参数取值范围

Table 2 Value range of each parameter

注射时间 A/s	保压时间 B/s	保压压力 C/MPa
0.5 ~ 1.5	4.0 ~ 12.0	50 ~ 70

2.2 建立响应面方案

响应面法(RSM)是一种将数学方法和统计方法相互联系,根据试验方案的样本点,建立试验变量与响应值之间函数关系的方法。响应面法有 BBD(box behnken)和 CCD(central composite design)两种试验设计方法,CCD 会选出超出参数范围的样本点,可以更好地拟合响应曲面[7-8]。因此课题组采用中心复合响应面设计方法(CCD)进行优化设计,根据 Design Expert 中的 CCD 设计方案,试验因素水平表如表 3 所示,$-\alpha$ 和 $+\alpha$ 分别表示各因素超出上下限范围的样本点。

表 3 因素水平表

Table 3 Factor level table

水平	因素		
	注射时间 A/s	保压时间 B/s	保压压力 C/MPa
下限	0.50	4.00	50.00
上限	1.50	12.00	70.00
$-\alpha$	0.32	3.45	43.18
$+\alpha$	1.84	14.73	76.82

将参数范围输入到 Design Expert 软件中,生成 CCD 设计方案并进行试验模拟,表 4 所示为试验方案和翘曲量(响应值)结果。

3 试验结果分析

3.1 回归方程拟合

基于表 4 的样本点和响应结果,采用二阶方程拟合翘曲量 D 与注射时间 A、保压时间 B 和保压压力 C 之间的回归模型,公式为

$$D = 0.424 + 0.142A + 0.013B + 5.353\times10^{-4}C + 3\times10^{-3}AB - 1.9\times10^{-3}AC - 1.437\times10^{-4}BC - 0.021A^2 - 3.339\times10^{-4}B^2 - 7.745\times10^{-6}C^2。\quad (1)$$

表4　试验方案和响应值结果

Table 4　Test plan and response value results

序号	因素			翘曲量
	A/s	B/s	C/MPa	D/mm
1	1.50	12.00	50.00	0.542
2	1.00	14.73	60.00	0.466
3	1.00	8.00	60.00	0.473
4	0.32	8.00	60.00	0.463
5	1.50	4.00	70.00	0.416
6	1.00	8.00	60.00	0.472
7	1.50	4.00	50.00	0.489
8	0.50	4.00	50.00	0.473
9	1.00	8.00	60.00	0.474
10	0.50	12.00	70.00	0.434
11	1.00	8.00	60.00	0.473
12	1.00	8.00	76.82	0.416
13	1.00	3.45	60.00	0.473
14	1.00	8.00	60.00	0.475
15	1.00	8.00	60.00	0.472
16	0.50	4.00	70.00	0.428
17	1.50	12.00	70.00	0.436
18	0.50	12.00	50.00	0.492
19	1.84	8.00	60.00	0.464
20	1.00	8.00	43.18	0.528

Design Expert 可以根据拟合的回归方程预测翘曲响应值,图2为报警器上盖翘曲的预测值和实际模拟值的离散对比图,以翘曲量实际值作为离散点。由图2可知,预测值与实际模拟值较为接近,由此说明该响应面模型的准确度较高,可以准确预测报警器上盖的翘曲量。

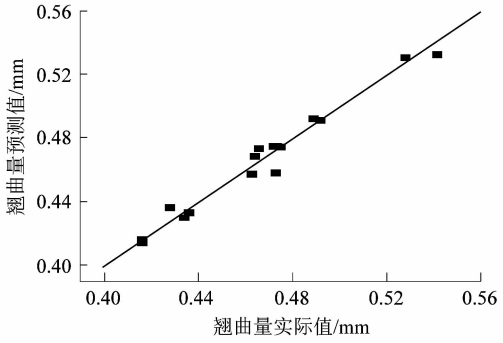


图2　响应预测值与实际值对比曲线

Figure 2　Comparison curve of response predicted value and actual value

3.2　响应曲面分析

为了更直观地分析因素之间的交互作用,通过响应曲面图来观测因素之间对目标的影响。图3为响应模型的三维曲面,反映了3个因素交互作用对翘曲量的影响。由图3(a)可以看出,当保压时间 B 不变时,翘曲量随着注射时间的减小有所降低,因为注射速率增大,可以减少残余应力的堆积。由图3(b)和3(c)可以看出,当注射时间 A 和保压时间 B 不变时,翘曲量随着保压压力 C 的增大而减少,是由于保压压力高可以使补料充足,从而减少收缩和翘曲[9],响应曲面的趋势和实际预测基本一致。

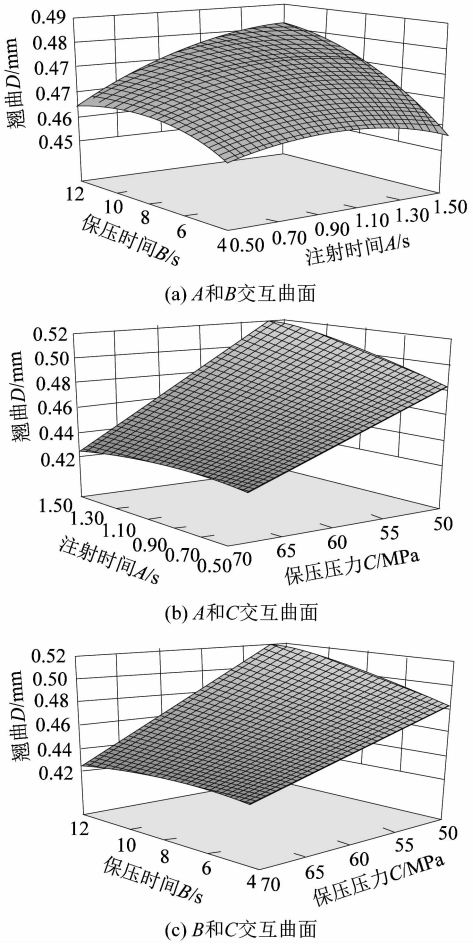


图3　翘曲量响应面

Figure 3　Warpage response surface

表5为翘曲量响应模型的方差分析表。其中,模型 P 值越小代表模型对响应值的影响越显著,P 值小于0.05时表明为显著项,大于0.1时为非显著项。由此可以判断,A,B,C,AB,AC 和 A^2 为显著项,其余为非显著项。此外,模型相关系数 $R^2=87.3\%$,表明响应面模型的拟合程度良好,校正系数为94.6%,说明只有5.4%的响应值不能用此模型来解释。本模型的信噪比为22.42(大于4即是合理的),证明模型的分辨能力良好[10]。

表 5 方差分析表

Table 5 Variance analysis table

方差源	偏差平方和 $\times 10^{-4}$	方差 $\times 10^{-4}$	F 值	P 值
模型	190.000 00	21.100 00	38.06	<0.000 1
$A-A$	3.312 00	3.312 00	5.97	0.034 6
$B-B$	8.084 00	8.084 00	14.58	0.003 4
$C-C$	160.000 00	160.000 00	292.20	<0.000 1
AB	2.880 00	2.880 00	5.19	0.045 8
AC	7.220 00	7.220 00	13.02	0.004 8
BC	2.645 00	2.645 00	4.77	0.053 9
A^2	3.096 00	3.096 00	5.58	0.039 7
B^2	2.736 00	2.736 00	4.93	0.050 6
C^2	0.087 72	0.087 72	0.16	0.699 2

4 试验结果验证

4.1 模拟验证

以最小翘曲量为期望目标,通过 Design Expert 软件可以预测报警器上盖的最优工艺参数, 即注射时间为 1.5 s,保压时间为 9.6 s, 保压压力为 70 MPa,翘曲量的预测值为 0.409 2 mm。重新利用 Moldflow 软件对该组合进行仿真分析,模拟的翘曲结果为 0.411 2 mm,与优化的预测值较为接近,说明最优参数组合的选取比较合理。图 4 为工艺参数优化前后的最大翘曲量对比。由图 4 可以看出,与最初方案的翘曲量 0.486 1 mm 相比,优化后的翘曲量降低了 15%。

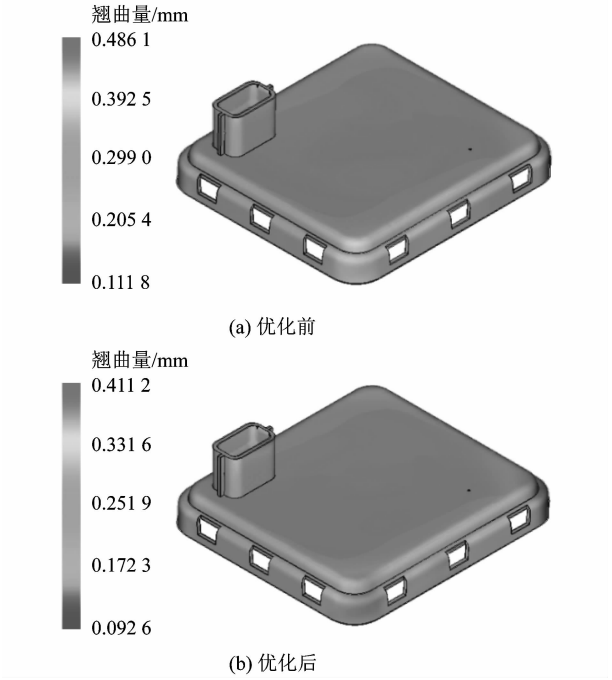


图 4 优化前后的最大翘曲量对比

Figure 4 Comparison of maximum warpage before and after optimization

4.2 生产验证

为了验证优化结果的可靠性,采用最优工艺参数组合生产报警器上盖,图 5 为试生产的样品。经过三维尺寸测量,产品实际翘曲变形与模拟结果相似。同时优化的目的是提高上盖与底座配合的可靠性,将产品与底座装配后进行 -40 ~ +105 ℃、60 min 的温度循环,随后浸入 40 ℃水中进行防水测试,结果显示无泄漏,说明经过温度循环后产品没有出现较大变形,仍具有良好的防水性,由此判定产品质量合格。

图 5 试生产样品

Figure 5 Trial production samples

5 结语

课题组对报警器上盖的注塑方案进行分析,对比不同尺寸浇口的翘曲量和剪切应力,后采用了 1.3 mm 浇口,发现产品翘曲小,剪切应力适中。在此基础上,设计响应面优化方案,结合前人分析经验,选择注射时间、保压时间和保压压力进行参数优化,期望减少产品翘曲,通过回归模型的预测得到了最优工艺参数组合:注射时间为 1.5 s,保压时间为 9.6 s,保压压力为 70 MPa。利用 Moldflow 对最优工艺参数进行模拟,结果证明优化后的产品翘曲降低了 15%。同时,将最优工艺参数组合用于指导样品生产,得到的产品尺寸测量结果符合预期。经过测试产品温度循环和防水性能,确认产品质量合格,验证了优化结果的可靠性。

参考文献:

[1] 王桂龙,赵国群,李辉平,等. 薄壁注塑制品翘曲影响因素分析与工艺优化[J]. 中国机械工程,2009,20(4):488 -491.

[2] 周应国,申长雨,陈静波,等. 工艺参数对注塑制品翘曲影响的 CAE 分析[J]. 工程塑料应用,2006,34(11):28 -31.

[3] 张继祥,秦海涛,钟厉,等. 薄壁件注塑翘曲变形综合优化分析[J]. 塑料工业,2014,42(5):56 -61.

[4] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41 -42.

(下转第 84 页)