

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.07.010

汽车精密塑料件注射成型工艺研究^{*}

袁甘林, 辛勇

(南昌大学机电工程学院, 南昌 330031)

摘要:以汽车后车灯灯壳为研究对象,选取模具温度、熔体温度、注射时间及保压压力作为试验变量,以灯壳翘曲变形作为优化目标,采用响应曲面的中心复合设计方法,结合CAE分析模拟技术,建立了试验变量与优化目标之间的二阶响应模型。通过粒子群优化算法得出了最优工艺参数组合,对最佳工艺参数组合进行了数值模拟和实际工程试验验证。结果表明,响应模型获得的翘曲预测值与模拟翘曲值的偏差为0.42%、与实际工程试验获得的翘曲变形值的偏差为5.59%,三者结果相吻合,塑料件满足精度要求,这表明应用二阶响应模型优化设计是解决注射成型塑料件质量问题的一种有效途径。

关键词:翘曲变形;中心复合设计;二阶响应模型;优化设计;注塑

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)07-0041-05

Research on Injection Processing of Precise Plastic Part for Automobile

Yuan Ganlin, Xin Yong

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Taking automotive rear lamp envelope as research object, mold temperature, melt temperature, injection time and packing pressure were selected as the test variables, with the warpage as the optimization goals. The second-order response surface model which described the relationship between test variables and optimization goals were founded by using central composite design of response surface and CAE simulation technique. Optimal injection molding parameters sequence was obtained by using particle swarm optimization algorithm, and the validation was done by numerical simulation and practical production test. The results suggest that the deviation of the predicted warpage value obtained from the response surface model and the simulation value is 0.42%, and the deviation of the predicted value and the practical measurement value is 5.59%, which indicate that the predicted value is in good agreement with the simulation value and the practical measurement value and the parts prepared with the optimal parameters sequence can meet precision requirement well. Hence, the second-order response surface model is the effective way which resolves quality problems in injection molding.

Keywords: warpage deformation; central composite design; second-order response surface model; optimal design; injection molding

注射成型是成型塑料件的主要方法。注射成型过程主要包括塑化、充模、压实和保压、冷却以及顶出这几个阶段。在注射成型平板及类平板塑料件的过程中,塑料件容易出现翘曲等质量问题,且其翘曲程度与注射成型工艺参数高度相关^[1]。如果注射成型工艺参数能够选择在一个适当的水平,那么塑料件的翘曲变形程度就可以最小化到一个可以接受的公差水平^[2]。

目前,国内外有许多文献研究了成型工艺参数对塑料件翘曲的影响。B. Ozcelik等^[3]的研究报告指出,保压压力对塑料件的翘曲行为影响最为明显。Liao Shijie等^[4]通过对手机外壳注射成型的研究得到了一组最佳工艺参数,从而获得了收缩和翘曲明

显减小的塑料件。他们的研究同样指出,对塑料件收缩和翘曲而言,保压压力是最具影响力的参数。R. Zheng等^[5]研究发现较高的保压压力有助于降低收缩与翘曲。C. P. Chen等^[6]的研究结果表明熔体温度和保压压力是影响翘曲的关键因素。K. T. Chiang^[7]指出,对于薄壳类塑料件而言,模具温度对塑料件的强度、收缩以及翘曲的影响不容忽视。M. C. Huang等^[8]采用C-Mold商用软件,通过运用田

^{*} 国家自然科学基金项目(51365038),江西省科技支撑计划项目(20122BBE500044),江西省高校科技落地计划项目(KJLD12058)

联系人: 辛勇,工学博士,教授,博士生导师,主要从事注塑成型新技术及其精密模具数字化设计与制造

收稿日期: 2014-05-20

口试验方法研究了注射成型工艺参数对塑料件翘曲的影响。结果表明,对翘曲而言,注塑压力以及充填时间的控制至关重要。S. H. Tang 等^[9]研究了熔体温度、填充时间、保压压力以及保压时间这4个成型工艺参数对塑料件翘曲的影响。结果表明,塑料件的翘曲对熔体温度最为敏感。

笔者以汽车后车灯灯壳为研究对象,结合前人的研究方法及结论,选取模具温度、熔体温度、注射时间以及保压压力作为试验变量,以灯壳翘曲变形作为优化目标,采用响应曲面的中心复合设计方法,结合 CAE 分析模拟技术,建立了试验变量与优化目标之间的响应模型。通过粒子群优化算法得出了最优工艺参数组合,并对最佳工艺参数组合进行了数值模拟和生产试验验证。

1 塑料件基本信息及评价指标

图1为某知名汽车品牌的某款车型汽车后车灯灯壳 CAD 模型,该塑料件形状为四边形的类平板的曲面,包容尺寸为 314 mm × 260 mm × 5 mm,壳体壁厚 3 mm,厚度分布均匀。材料为 RTP 公司生产的牌号为 RTP0107CC 的 40% 玻璃纤维 (GF) 增强聚丙烯 (PP) 复合材料,其具体性能参数如表1所示。

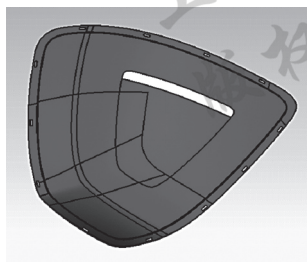


图1 汽车后车灯灯壳 CAD 模型

表1 牌号为 RTP0107CC 的 GF 增强 PP 复合材料性能参数

项 目	指标值
推荐模具温度范围 / °C	35 ~ 65
推荐熔体温度范围 / °C	190 ~ 230
顶出温度 / °C	108
最大剪切速率 / s ⁻¹	100 000
最大剪切应力 / MPa	0.25
剪切模量 / MPa	2 400
拉伸弹性模量 / MPa	7 030
泊松比	0.42

为保证 Moldflow 软件 CAE 分析的精度,对塑料件采用四面体网格划分网格,厚度方向设置为 6 层,产品网格质量很好。根据文献 [10],塑料件翘曲是由于各处非均匀冷却导致在厚度方向上产生非对称应力引起的,在设计塑料件模具时,最好能使得模具型芯、型腔冷却速率均匀。因此,在设计模具时,采用了工艺比较复杂的近随形冷却水路,以提高冷

却回路热去除效率^[11]。为保证汽车灯壳的透光性能,灯壳的表面不允许设置浇口,因此浇口设置在灯壳边缘。塑料件 CAE 分析模型如图2所示。

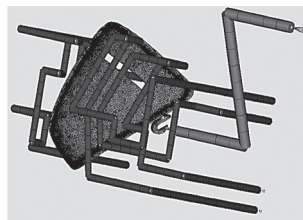


图2 汽车后车灯灯壳 CAE 模型

为保证同周边部件之间的装配精度,灯壳的翘曲变形应控制在 1 mm 以内。结合实际注射成型情况,在灯壳的注射成型模拟过程中,选取灯壳的翘曲变形为主要成型质量指标,以保证灯壳安装时与周边部件的装配精度。

2 工艺参数的选择及试验设计

在注射成型中,工艺参数及其水平的选择至关重要,应选择注塑过程中的主要影响因素,而所选择的水平更要同实际注射成型条件相符合。根据文献 [1-9] 研究的结果,选取模具温度 (A)、熔体温度 (B)、注射时间 (C) 以及保压压力 (以注塑压力的百分数表示) (D) 作为试验的 4 个因素,工艺参数及其水平见表2。

表2 工艺参数及其水平

工艺参数	水 平			
A / °C	35	50	65	80
B / °C	190	210	230	250
C / s	1	1.85	2.7	3.55
D / %	60	80	100	120

响应曲面法是优化试验方案或者建立指标和因素关系模型的方法,可以给出指标和因素的函数关系式。采用二次响应曲面的中心复合设计的方法进行试验设计。4 因子二阶响应曲面的中心复合设计由以下几点组成:(1)4 因子的全因子设计;(2)包含 6 个中心点;(3)包含 8 个位于坐标轴上的星号点, $\alpha=2$ 。基于此,设计安排了 L_{30} 试验,如表3所示。

在响应曲面中,目标变量 y 称为响应函数,而一系列的工艺参数则称为因素,输出响应同输入因素之间满足 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)+\varepsilon$ (其中 ε 表示响应误差)。然而实际上,输出响应和输入因素之间的关系一般是不能直接用一个数学表达式表达。在优化过程中,一般通过回归分析方法拟合得到数学函数用以近似替代两者之间真正的关系,二阶响应曲面常用的二阶响应模型如式 (1) 所示。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

表3 响应曲面中心复合设计翘曲实验结果

序号	A/℃	B/℃	C/s	D/%	翘曲值/mm
1	35	230	2.70	60	2.099
2	50	210	1.85	80	1.332
3	50	210	1.85	80	1.332
4	50	210	1.85	80	1.332
5	65	230	1.00	60	1.640
6	80	210	1.85	80	1.318
7	35	190	1.00	60	1.455
8	65	190	1.00	100	0.928 0
9	50	210	1.85	80	1.332
10	20	210	1.85	80	1.447
11	65	190	2.70	100	1.117
12	65	230	2.70	100	1.200
13	50	210	1.85	40	1.856
14	50	250	1.85	80	1.531
15	50	210	3.55	80	1.550
16	65	230	1.00	100	0.970 9
17	35	190	2.70	60	1.863
18	65	230	2.70	60	2.258
19	35	190	1.00	100	0.867 0
20	50	210	1.85	120	0.861 1
21	50	210	1.85	80	1.332
22	65	190	1.00	60	1.510
23	65	190	2.70	60	1.846
24	35	230	1.00	100	0.947 2
25	35	230	2.70	100	1.155
26	35	190	2.70	100	1.134
27	50	210	0.15	80	0.939 0
28	50	170	1.85	80	1.258
29	35	230	1.00	60	1.582
30	50	210	1.85	80	1.332

式中: y ——响应翘曲;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ ——系数;

x_i, x_j ——不同水平的不同因子。

3 结果与讨论

塑料件翘曲变形由软件 Moldflow 分析模拟所得,翘曲变形结果如图 3 所示,不同工艺参数条件下翘曲结果详见表 3。

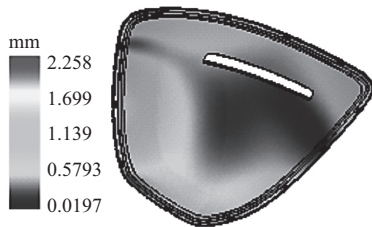


图3 CAE 分析翘曲结果

3.1 方差分析与非线性回归分析

采用 Design-Expert 对表 3 结果进行方差分析,分析结果如表 4 所示。表中, P 值为大于值的概率,其小于 0.05 则意味着在统计学上具有显著性,说明实验因素对响应结果具有显著影响^[12]。由表 4 可以看出,因素 B, C, D 以及 C 与 D 之间的交互作用形成翘曲响应模型的主要组成部分。

对表 3 中塑料件翘曲结果进行非线性回归分

表4 方差分析结果

来源	平方和	自由度	均方值	f 值	P 值
模型	3.860	14	0.280	32.20	<0.000 1
A	3.920×10^{-6}	1	3.920×10^{-6}	4.576×10^{-4}	0.983 2
B	0.130	1	0.130	15.38	0.001 4
C	0.770	1	0.770	89.67	<0.000 1
D	2.820	1	2.820	328.91	<0.000 1
AB	5.765×10^{-3}	1	5.765×10^{-3}	0.67	0.424 9
AC	3.267×10^{-4}	1	3.267×10^{-4}	0.038	0.847 8
AD	3.669×10^{-3}	1	3.669×10^{-3}	0.43	0.522 7
BC	4.621×10^{-3}	1	4.621×10^{-3}	0.54	0.474 0
BD	0.021	1	0.021	2.44	0.139 4
CD	0.049	1	0.049	5.73	0.030 2
A^2	0.020	1	0.020	2.28	0.151 5
B^2	0.024	1	0.024	2.83	0.113 5
C^2	0.011	1	0.011	1.32	0.268 9
D^2	1.853×10^{-3}	1	1.853×10^{-3}	0.22	0.648 5

析,建立了如下式所示的翘曲响应模型,可用于计算预测塑料件的翘曲量。

$$\begin{aligned} \text{翘曲量} = & 4.02576 - 0.021747A - 0.025277B + 0.34738C + \\ & 7.09246 \times 10^{-3}D + 6.32708 \times 10^{-5}AB + 6.32708 \times 10^{-5}AB + \\ & 3.54412 \times 10^{-4}AC - 5.04792 \times 10^{-5}AD + 9.99632 \times 10^{-4}BC - \\ & 9.02969 \times 10^{-5}BD - 3.25772 \times 10^{-3}CD + 1.18699 \times 10^{-4}A^2 + \\ & 7.42682 \times 10^{-5}B^2 - 0.028087C^2 + 2.05495 \times 10^{-5}D^2 \end{aligned}$$

图 4 为翘曲残差正态概率图。如图 4 所示,翘曲残差基本位于直线上,说明翘曲残差呈现正态分布,而且充分满足最小二乘拟合。

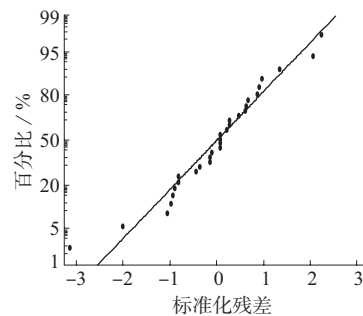


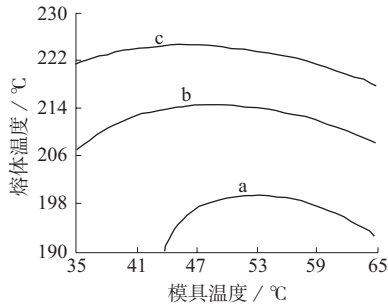
图4 翘曲残差正态概率图

3.2 工艺参数对翘曲的影响

翘曲同模具温度及熔体温度之间的关系如图 5 所示,同注射时间及保压压力之间关系如图 6 所示。从图 5 可以看出,随着熔体温度的升高,翘曲值逐渐增加,然而增加幅度逐步减小;随着模具温度的上升,翘曲值先减后增。从图 6 可以看出,翘曲值随保压压力的增加而减小,随注射时间的延长而增加。

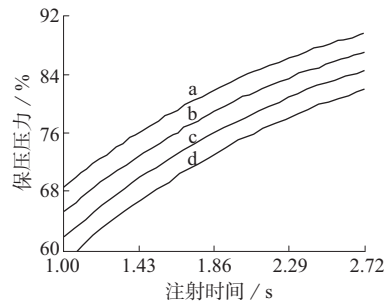
3.3 工艺参数优化

运用 Matlab 软件,采用粒子群算法对响应面模型寻优以获得最佳工艺参数组合。迭代初始工艺参数如下:模具温度为 35℃;熔体温度为 190℃;注射时间为 1 s;保压压力为注塑压力的 60%。表 5 为粒子群算法寻优结果。由表 5 可以看出,优化后的



翘曲值: a—1.3 mm; b—1.35 mm; c—1.4 mm

图 5 翘曲与模具温度及熔体温度之间的关系图



翘曲值: a—1.3 mm; b—1.35 mm; c—1.4 mm; d—1.45 mm

图 6 翘曲与注射时间及保压压力之间的关系图

工艺参数如下: 模具温度为 58.23℃; 熔体温度为 199.45℃; 注射时间为 1 s; 保压压力为注塑压力的 100%。优化后的翘曲值由 1.455 mm 降低到了 0.8429 mm, 下降了 42%。

表 5 初始值同优化值比较

参 数	初始值	优化值
模具温度 /℃	35	58.23
熔体温度 /℃	190	199.45
注射时间 /s	1	1
保压压力 /%	60	100
翘曲值 /mm	1.455	0.8429

4 CAE 与实际工程试验验证

为验证上述二阶响应模型的实用性,并获得尺寸精度满足使用需求的塑料件,采用优化所得工艺参数分别进行了 CAE 分析模拟验证以及实际工程试验验证。实际工程试验所用模具如图 7 所示。利用该模具进行实际注射成型,生产的塑料件如图 8 所示。试验中塑料件翘曲测量方法如图 9 所示,翘曲值按式 (2) 进行计算。

$$W=H-H_1-H_2 \quad (2)$$

式中: W ——翘曲值;

H ——塑料件测量点距型芯底部距离;

H_1 ——型芯上对应测量点距型芯底部距离;

H_2 ——塑料件测量点处壁厚。

二阶响应模型预测翘曲值, CAE 分析模拟翘曲值及实际工程试验得到的翘曲值如表 6 所示。由表 6 可以看出,通过 CAE 分析模拟所得翘曲值同响应

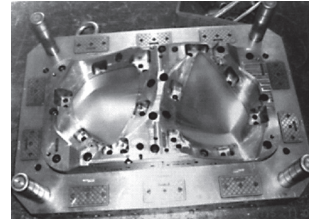


图 7 实际试验所用模具



图 8 实际注射生产的汽车后车灯灯壳

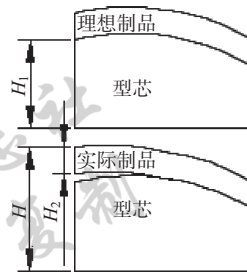


图 9 翘曲测量方法机理图

模型预测值偏差 0.42%, 通过工程实际试验获得的翘曲值同响应模型预测翘曲值偏差 5.59%, 三者翘曲结果吻合较好。

表 6 不同方法获得的翘曲值大小

项 目	翘曲值 /mm
响应模型预测	0.8429
CAE 模拟	0.8464
实际工程试验	0.89

5 结论

(1) 基于二阶响应曲面的中心复合设计试验方法,以某款汽车后车灯灯壳注塑翘曲变形作为实验指标,通过 CAE 软件分析模拟实验建立了可以表达响应翘曲同塑件翘曲变形关系的二阶响应模型。

(2) 对二阶响应模型采用粒子群算法寻优得到最佳工艺参数组合,即模具温度 58.23℃、熔体温度 199.45℃、注射时间 1 s、保压压力为最大注塑压力的 100%。

(3) 对最佳工艺参数组合采用 CAE 分析模拟,所得翘曲变形结果同响应模型预测值偏差 0.42%。将最佳工艺参数组合应用于实际注塑过程,测得塑料件翘曲值为 0.89 mm,同二阶响应模型预测翘曲值偏差 5.59%,满足塑料件精度要求。

参考文献

- [1] Kurtaran H, Erzurumlu T. Efficient warpage optimization of thin

- shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(5-6):468-472.
- [2] Hakimian E, Sulong A B. Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method[J]. Materials & Design, 2012, 42:62-71.
- [3] Ozcelik B, Erzurumlu T. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(3):437-445.
- [4] Liao Shijie. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin - wall parts[J]. Polymer Engineering & Science, 2004, 44(5):917-928.
- [5] Zheng R, Kennedy P, Phan-Thien N, et al. Thermoviscoelastic simulation of thermally and pressure-induced stresses in injection moulding for the prediction of shrinkage and warpage for fibre-reinforced thermoplastics[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1999, 84(2-3):159-190.
- [6] Chen C P, Chuang M T, Hsiao Y H, et al. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(7):10 752-10 759.
- [7] Chiang K T. The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin shell feature using grey-fuzzy logic: A case study on machining the PC / ABS cell phone shell[J]. Materials & Design, 2007, 28(6):1 851-1 860.
- [8] Huang M C, Tai C C. The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(1):1-9.
- [9] Tang S H, Tan Y J, Sapuan S M, et al. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1):418-426.
- [10] Jacques M S. An analysis of thermal warpage in injection molded flat parts due to unbalanced cooling[J]. Polymer Engineering & Science, 1982, 22(4):241-247.
- [11] Wang Yu, Yu Kaimin, Wang Charlie C L, et al. Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(8):1 001-1 010.
- [12] Chiang K T, Chang Fuping. Analysis of shrinkage and warpage in an injection-molded part with a thin shell feature using the response surface methodology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 35(5-6):468-479.

欢迎订阅 2014 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2014 年定价 15 元/期,全年 180 元。目前杂志社尚有部分 1986 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2014 年定价 15 元/期,全年 90 元。目前杂志社尚有部分 1992 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2013 年底共 41 卷 290 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2013 年底

共 22 卷 96 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 530 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 230 元。

邮局汇款:

收款单位:济南市天桥区田庄东路 3 号杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户 名:中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

账 号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>