

DOI: 10.3901/JME.2011.14.054

基于响应曲面法与改进遗传算法的 RHCM 成型工艺优化*

刘东雷^{1,2} 申长雨^{1,2} 刘春太^{1,2} 辛勇³ 孙玲³ 伍晓宇⁴

(1. 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心 郑州 450002;

2. 郑州大学材料成型过程与模具教育部重点实验室 郑州 450002;

3. 南昌大学机电工程学院 南昌 330031;

4. 深圳大学机电与控制工程学院 深圳 518060)

摘要: 以自主开发的车载高光蓝牙产品为例, 研究高光注射成型(Rapid heat cycle molding, RHCM)工艺优化技术。以中心复合试验法(Center composite design, CCD)进行试验规划, 采用成型试验与数值模拟并重之方法获取试验样本数据, 通过人为引入干扰因子的方法以实现仿真结果可以更真实地反映实际成型状态; 引入熵值权重法(Entropy-based weight, EBW)确定各品质指标对制品综合品质影响权重, 并结合顺序偏好法(Technique for order preference by similarity ideal solution, TOPSIS)等数据处理技术, 从数理角度处理试验数据使之能更客观反应制品最终成型品质状况; 引入响应曲面法(Response surface methodology, RSM), 结合方差分析(Analysis of variance, ANOVA)与误差统计分析, 建立高光注射成型制品综合品质预测模型; 针对传统遗传算法的不足之处提出改进算法(Improved genetic algorithm, IGA), 实现品质预测模型的寻优过程; 并经生产验证该优化技术具有很好的适用性。

关键词: 高光注射成型 工艺优化 响应曲面法 改进遗传算法

中图分类号: TQ320

Efficient Process Parameters Optimization of Rapid Heat Cycling Molding Technology Based on Response Surface Methodology and Improved Genetic Algorithm

LIU Donglei^{1,2} SHEN Changyu^{1,2} LIU Chuntai^{1,2} XIN Yong³ SUN Ling³ WU Xiaoyu⁴

(1. National Engineering Research Center for Application Plastic Processing Technology,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450002;

2. Key Laboratory of Materials Process & Mold of Ministry of Education,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450002;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031;

4. College of Electro Mechanical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: An independently developed vehicle-borne high-gloss bluetooth product is taken as an example in the research of optimization of rapid heat cycle molding (RHCM) technology. Coupling with the experiment and numerical simulation technology, the center composite design (CCD) method is employed in arranging the experimental points. With an interference factor introduced artificially, the simulation results are kept in good consistency with experimental result. And the samples qualitative data is processed to more truly response the product quality by integrating entropy-based weight (EBW) method and technique for order preference by similarity ideal solution (TOPSIS) method. Then a predictive response surface model (RS) for comprehensive quality index is created by using response surface methodology (RSM) based on analysis of variance (ANOVA) method. The RS model is interfaced with an

* 国家自然科学基金资助项目(10872186)。20101020 收到初稿,
20110210 收到修改稿

effective improved genetic algorithm (IGA) to find the optimum process parameters values. And the actual production achieves good result, which shows that the process control technology is feasible and effective in processing quality optimization of high-gloss plastic part.

Key words: Rapid heat cycle molding Parameters optimization Response surface methodology Improved genetic algorithm

0 前言

高光注射成型^[1](Rapid heat cycle molding, RHCM)技术是近年来发展起来的一种新型精密注塑成型工艺,与传统成型技术相比,具有精密、高效、节能和绿色环保等诸多优势。RHCM 技术核心在于变模温注射成型,即利用三维无汇线模具及温控装置令模具内温度急速加热及冷却以改善产品品质。当前有关该技术的研究主要集中在模具温控技术和成型控制领域,CHEN 等^[2-4]分别采用电磁感应加热、红外线照射加热和瞬间气体火焰加热等方法控制模具温度以达到提高制品成型品质的目的。SU 等^[5]采用仿真和试验方法研究了微型腔内聚合物的流动行为,得出温度因素(模具温度和熔体温度)是影响微结构成型的主要因素。YU 等^[6]认为模具温度必须高于某一特定温度才能明显改善制品填充状况,且该特定温度随保压压力的增大而降低。SHEN 等^[7]研究发现模具温度对微注射成型制品品质影响最为大,且模具温度必须高于塑料热变形温度才能保证成型品质。

工程优化问题的关键在于构造高适配性优化模型和高保真度寻优算法,目前在相关领域的研究相当广泛也较为成熟,所涉及的技术方法也包罗万象,诸如数值模拟理论^[8-10]、Taguchi 理论^[11-12]、人工神经网络技术^[13-15]、模拟退火与爬山法^[16-17]、灰色理论^[18]等,相关理论的相互结合应用更是不一而足。响应曲面法(Response surface methodology, RSM)^[19-20]是一种数学与统计方法相结合最佳化设计方法,因具有建模简单和可靠性高两大优势而得到广泛的关注。遗传算法^[21-23](Genetic algorithm, GA)则是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应搜索算法,该算法具有隐含并行性和对全局信息的有效利用能力两大显著特点,使优化问题的处理也变得简单、高效。本研究以自主开发的车用蓝牙高光模具及温控辅助装置为基础,采用 RSM 与 GA 相结合的方法并加以改进,结合必要的试验及数据处理技术,对 RHCM 成型工艺进行优化研究,以期得出可用于指导生产实践的 RHCM 成型工艺优化方法。

1 RHCM 成型品质考核指标及量化表征

对于工程优化问题来说,首先需要确定优化目标及优化变量。鉴于 RHCM 制品的高光洁度外观品质要求(达到镜面精度),采用制品外观质量指标作为该问题的评价目标是比较可行的。这里认为高光制品品质影响因素主要包括制品对模具型腔的复原性能、制品收缩、翘曲变形表面及凹痕(表面沉降)等,且沿袭相关研究,采用制品成型质量与设计质量之比来确定制品对型腔复原性能的量化值;成型收缩以制件长度方向的线收缩率来衡量;同时参考复合木质板材行业中翘曲度概念来定义制品翘曲度。相关指标及定义为

$$Y_1 = \frac{m_p}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{l_p}{l_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_3 = \frac{h}{l_p} \times 100\% = \frac{h_1 - h_2}{l_p} \times 100\% \quad (3)$$

式中, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 依次表示制件对型腔复制率、线收缩率和制件翘曲度; m_p 、 m_0 分别表示制件成型质量和设计质量, l_p 、 l_0 分别表示制件长度方向的线长度和设计值; h 、 h_1 、 h_2 定义见图 1。具体测量时,取制件长度方向中心线上对称两点进行测量,取其中较大者为样品测量结果。

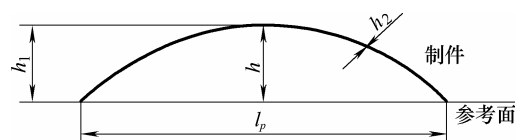


图 1 制件翘曲度评价策略

对于制品沉降斑的表征,可通过仿真分析来获取试验数据,仿真结果中的沉降指数(由 Y_4 表示,见后边研究)可以很好地表征沉降斑的深度。

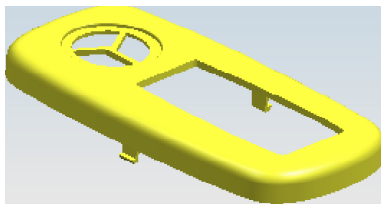
确定制品综合品质指标之前,首先需要对各品质指标权重加以量化,这里首先采用熵值权重法(Entropy-based weight, EBW)确定各品质指标的权重,进而引入顺序偏好法(Technique for order

preference by similarity ideal solution, TOPSIS)对各样本数据进行归一化处理。

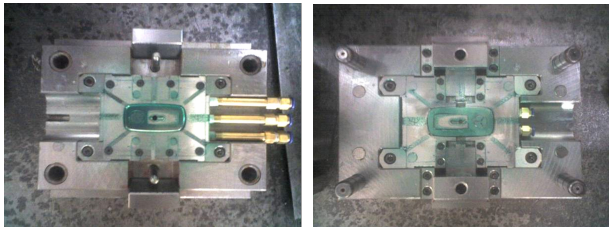
2 试验模具及温控系统开发

2.1 试验产品及模具

某车载蓝牙产品模型如图 2a 所示, 结构相对简单, 包容尺寸为 $82.5\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}$, 壁厚 1.5 mm , 设计质量 4.887 g 。自主开发的车载高光蓝牙模具如图 2b 所示, 该模具结构设计的主要特点将型腔板分为型腔板和型腔背板上下两部分。上部为型腔板, 并在其正面设计为高光型腔结构, 背面设计与产品外壳面相仿的仿形结构并开设半圆形介质通道; 型腔板下面为型腔背板, 设计时在其正面开设与型腔结构相仿的仿形结构及相应的半圆形介质通道, 二者贴合即可形成随形介质通道。由于该通道是按照产品结构特点随形设计, 一方面解决了热传递的均匀性, 另一方面提高模具型腔对加热温度的快速响应能力。



(a) 产品模型



(b) 蓝牙模具

图 2 车载高光蓝牙产品及模具

2.2 温控辅助设备

为了实现对模具温度的实时、精确控制, 项目组开发了以高温水为加热介质、冷冻水(或常温水)为冷却介质的成型温控辅助系统, 该系统主要包括模温机、控制台、冷却塔、空气压缩机、增压泵、热电偶、信号控制卡及其他电器元件, 工作原理示意图见图 3。

J11-W-160 型模温机(图 4)为该系统的核心, 主要有加热系统、冷却系统、温度调节系统、增压系统、减压与排气系统等几部分组成, 且分别设计内、外两条介质循环路线以保证加热或冷却介质的循环利用。该设备可在短时间内将模温最高升至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$,

具有升温效率高、响应速度快等优点, 可实现对模具温度的精确控制。

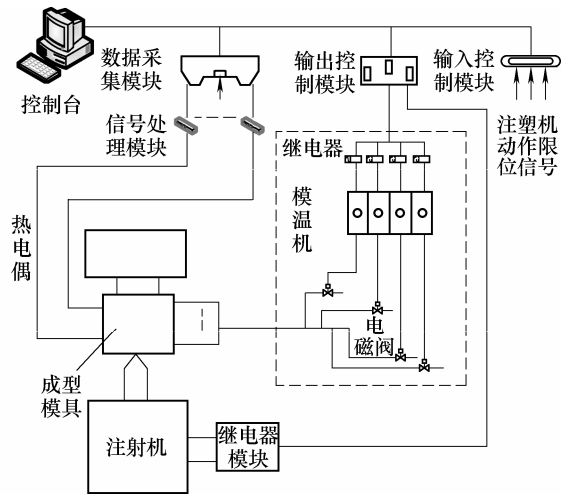


图 3 模具温控系统原理图



图 4 J11-W-160 型模温机

2.3 试验材料

选用台化 ABS(AG15A1)塑料为试验材料, 相关成型参数推荐取值范围见表 1, 表中模具温度是在普通成型推荐值基础上重新设计的。

表 1 成型参数取值范围表

成型参数	取值范围
模具温度 $\theta_1/^{\circ}\text{C}$	80~130
熔体温度 $\theta_2/^{\circ}\text{C}$	190~240
注射压力 p_1/MPa	70~120
注射时间 t/s	0.5~1
保压压力 p_2/MPa	50~100
保压时间 t_1/s	2~10
冷却时间 t_2/s	3~15

3 因素显著性试验

3.1 试验规划

为考核表 1 中各参数对 RHCM 制品品质的影响效应, 这里按照 $L_8(2^7)$ 正交表进行试验安排, 其中高、低水平值对应于各参数上、下界。具体试验中, 模具温度由模温机控制, 熔体温度由机筒前段温度设定, 机筒中段、后段及喷嘴温度均随前段温度调

整;成型压力均设定为单一阶段。另外,其他参数设定如下:螺杆转速 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、吹气时间 1 s 和吹气延时 0.1 s 。每次试验从第 11 件开始取样 10 件并标样,且在脱模空放 48 h 后,依次测得复制率、线收缩率和翘曲度等品质指标值,取平均值作为最终测量结果。

如前所述,采用 Moldflow7.0 模拟获得沉降指数样品值。为了更真实的“模拟”实际成型状况,本研究采用人为干扰的方法对最易受外界因素“干扰”的温度因素(模具温度和熔体温度)在预设温度值的基础上人为添加一个扰动因子,如取扰动因子 $\delta = \pm 4\%$ 。对于每一试验方案,将扰动值和预设值一一配对,共可得到 9 种组合,在假设预设值具有更高试验概率情况下,可得到 10 个沉降指数模拟值,取其平均值作为该次试验的最终结果。

试验结果如表 2 所示,综合品质指标 Y 为采用 TOPSIS 法对试验数据的最终计算结果,且由 EBW 法得到复制率、线收缩率、翘曲度和沉降指数等各指标权重依次为 0.000 4、0.178 3、0.214 0 和 0.607 3。

表 2 成型参数对制品品质影响显著性试验结果

试验数	试验结果				Y
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	
1	4.629 6	5.835	0.41	3.940 0	0
2	4.856 4	2.491	0.16	0.826 5	0.893 3
3	4.767 4	4.582	0.30	2.807 0	0.331 6
4	4.847 2	3.541	0.25	1.728 0	0.633 5
5	4.847 6	2.397	0.17	0.732 0	0.911 7
6	4.803 3	2.996	0.29	1.300 0	0.733 2
7	4.874 7	2.110	0.10	0.489 8	1.000 0
8	4.767 2	4.594	0.27	2.789 0	0.341 4

3.2 因素显著性分析

为确定个工艺因素影响效应,需要对试验样本进行方差统计分析,结果见表 3,表 3 中字母 A~G 依次表示模具温度、熔体温度、注射压力、注射时间、保压压力、保压时间和冷却时间。 S_Y 为各参数偏差平方和, S_E 为试验误差平方和, S_T 为总偏差平方和; D_F 代表自由度, M_{SD} 代表均方差。由表 3 可知,保压压力(E)、模具温度(A)和保压时间(F)对制品品质影响显著,而其他参数则影响较小。

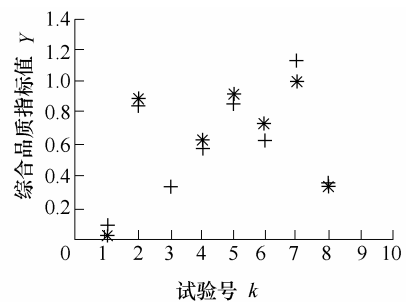
另外,在不考虑模型适配性的前提下,可通过建立成型参数与成型品质之间的关系模型,比较模型预测值与试验值之间的误差大小及分布来判断各成型参数影响效应。以模具温度、保压压力和保压时间等为反应变量的成型品质预测线性模型如图 5 所示,图 5 中“*”代表试验结果,“+”代表模型预测结果,“o”代表二者之误差,通过对图 5 分析发现,模型预测结果与试验结果基本吻合,二者最

大误差仅为 0.134 5,且误差分布具有均散性的特点,这说明在试验数据足够充分的条件下,总可以找到一个以上述三个参数为变量的具有较高适配度的预测模型。

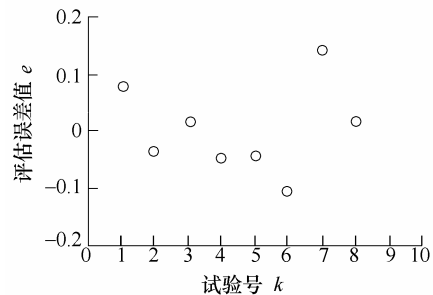
表 3 方差分析表

	偏差平方和 S_Y	自由度 D_F	均方差 M_{SD}	F 值	显著性
A	0.159 0	1	0.159 0	661.3	**
B	0.006 7	1	0.006 7	27.9	—
C	0.017 6	1	0.017 6	73.2	—
D	0.016 0	1	0.016 0	66.7	—
E	0.516 3	1	0.516 3	2 147.1	**
F	0.143 5	1	0.143 5	596.8	**
G	0.001 5	1	0.001 5	6.4	—
试验误差平方和 S_E	$2.404 5 \times 10^{-5}$	1	$2.404 5 \times 10^{-5}$	—	—
总偏差平方和 S_T	0.860 7	—	—	—	—

注: $F_{0.05}(1,1)=161$ 。



(a) 评估结果比较图



(b) 误差分布图

图 5 评估结果比较及误差分布图

4 RHCM 成型品质评价模型

4.1 试验规划

根据上述试验结果,确定模具温度、保压压力和保压时间作为控制参数,采用中心复合设计法(Center composite design, CCD)进行试验设计,如表 4 所示,表 4 中 X_1 、 X_2 、 X_3 依次代表模具温度、保压压力和保压时间。具体试验中,除了相关参数设定与前述类同之外,同时设定机筒前段温度(熔体温度) $210 \text{ }^\circ\text{C}$,注射压力 95 MPa ,注射时间 0.6 s 和冷

却时间 6 s,以简化试验。结果见表 5,且同样有 EBW 法得到各指标权重依次为复制率(0.000 1)、线收缩率(0.155 4)、翘曲度(0.294 0)和沉降指数(0.550 4),与前述试验结果得出的影响效应趋势相同。

表 4 优化变量取值水平表

成型参数	取值水平				
	-1.68	-1	0	1	1.68
X_1	80	90	105	120	130
X_2	50	60	75	90	100
X_3	2	3.6	6	8.4	10

表 5 中心复合设计试验结果

试验号	成型参数			试验结果				Y
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	
1	-1	-1	-1	97.931	4.291	0.305	2.476	0.217 5
2	1	-1	-1	98.115	4.251	0.293	2.458	0.232 5
3	-1	1	-1	99.132	2.896	0.182	1.157	0.822 5
4	1	1	-1	99.228	2.916	0.174	1.192	0.813 7
5	-1	-1	1	97.939	4.287	0.305	2.480	0.216 1
6	1	-1	1	98.125	4.271	0.293	2.482	0.223 5
7	-1	1	1	99.147	2.889	0.181	1.158	0.822 8
8	1	1	1	99.241	2.939	0.173	1.214	0.805 4
9	0	0	-1.68	98.574	3.572	0.231	1.814	0.528 9
10	0	0	1.68	98.641	3.575	0.285	1.823	0.491 8
11	0	-1.68	0	97.610	4.771	0.344	2.959	0
12	0	1.68	0	99.568	2.471	0.139	0.781	1.000 0
13	-1.68	0	0	98.569	3.565	0.242	1.826	0.517 3
14	1.68	0	0	98.706	3.555	0.231	1.800	0.534 5
15	0	0	0	98.637	3.570	0.235	1.815	0.526 2
16	0	0	0	98.637	3.570	0.235	1.815	0.526 2
17	0	0	0	98.621	3.576	0.236	1.826	0.521 1
18	0	0	0	98.637	3.570	0.235	1.815	0.526 2
19	0	0	0	98.637	3.570	0.235	1.815	0.526 2
20	0	0	0	98.645	3.561	0.234	1.808	0.529 7

表 6 响应面模型方差分析(ANOVA)表

RS 模型	模型误差			拟合系数		F 统计
	试验误差平方和 S_E	回归误差平方和 S_R	总偏差平方和 S_Y	多重误差系数 R^2	修正多重拟合系数 R^2_{adj}	
模型 1[+++]	$6.068 7 \times 10^{-4}$	1.206 8	1.207 4	0.999 5	0.999 4	5.330 7
模型 2[++-]	$9.342 2 \times 10^{-4}$	1.206 5	1.207 4	0.999 2	0.999 1	5.329 2
模型 3[+-+]	0.055 1	1.152 3	1.207 4	0.954 4	0.945 8	5.090 0
模型 4[-++]	0.001 0	1.206 4	1.207 4	0.999 2	0.999 0	5.328 9
模型 5[+--]	0.056 0	1.151 4	1.207 4	0.953 6	0.944 9	5.085 9
模型 6[-+-]	0.001 3	1.206 1	1.207 4	0.998 9	0.998 7	5.327 6
模型 7[--+]	0.002 6	1.204 8	1.207 4	0.997 8	0.997 4	5.321 7
模型 8[---]	0.002 6	1.204 8	1.207 4	0.997 8	0.997 4	5.321 7

注:回归模型与回归误差自由度分别为 9、10,总自由度为 19。 $F_{0.01}(9,10)=5.26$; $F_{0.05}(9,10)=3.14$ 。

另一方面,通过进一步分析 8 个 RS 模型的因子响应图发现,模型 3 和模型 5 响应值偏大,模型 7 和模型 8 响应值偏小,该 4 个模型对应于方差分析结果也相应较差;其余模型的响应值与试验值较

4.2 品质评价模型

这里引入 RSM 理论构建 RHCM 成型工艺优化模型,具体求解过程中,采用二阶响应面模式对该工艺过程进行定量描述。RSM 二阶回归模式表示如下。

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (4)$$

式中, k 为反应变量(成型参数)数目, β_0 、 β_j 、 β_{ij} 为回归系数,可由回归分析求得。具体求解过程中,考虑到反应变量矩阵 X 的态性,可对某一个或几个反应变量取倒数,总共可得 8 个响应面模型(RS 模型)。如式(5)、(6)分别为“[+++]”和“[+-]”模型(按“ $[X_1 X_2 X_3]$ ”顺序排列)的表达形式

$$Y = -1.340 2 + 0.000 9 X_1 + 0.027 8 X_2 + 0.010 9 X_3 - 0.000 1 X_1 X_3 - 0.000 7 X_3^2 \quad (5)$$

$$Y = -1.320 1 + 0.000 5 X_1 + 0.028 0 X_2 + 0.133 7 \frac{1}{X_3} + 0.000 8 \frac{X_1}{X_3} - 0.000 6 \frac{X_2}{X_3} - 0.242 7 \frac{1}{X_3^2} \quad (6)$$

4.3 模型检测

各 RS 模型方差分析结果如表 6 所示。表 6 中 S_R 为回归误差平方和; R^2 为模型多重误差系数, R^2_{adj} 为修正多重拟合系数;均由相关理论求得。由表 6 可知,各 RS 模型对应的 R^2 值均在 0.9 以上,除模型 3 和模型 5 之外,其余模型 R^2_{adj} 均接近于 1,且 F 统计结果显示均具有很好的适配性,从统计理论角度来均可满足设计要求。

为接近,尤其是模型 2 和模型 6,均能比较适当地反映成型工艺过程。本研究考虑选用模型 2 进行后续优化研究,图 6 为各参数设定为中值时随机 9 次试验结果在该模型响应空间分布情况,图 6 中网格

曲面为响应面，符号“○”为随机试验结果。由图 6 可知，该模型预测结果与试验结果基本吻合，可以很好地对该问题进行描述。

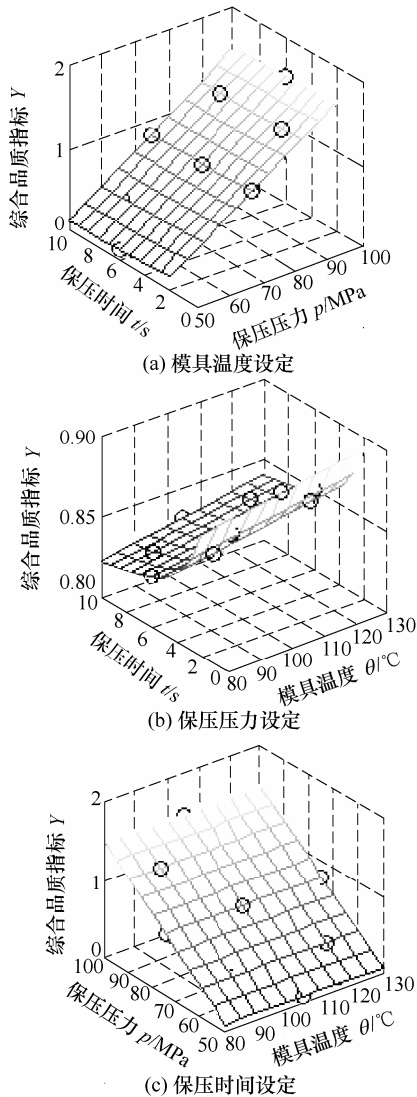


图 6 模型 2 响应曲面及随机试验结果分布

5 模型寻优及试验验证

5.1 模型寻优

本研究引入 GA 理论实现模型寻优，并利用传统算法中某些算子具有良好的局部搜索功能，对传统算法进行改进，开发了改进遗传算法(Improved genetic algorithm, IGA)源程序，该算法主要采用全局搜索和局部搜索相协调的方法进行寻优迭代，以实现可较快达到寻优目的。优化过程中相关参数设定如下：初始种群规模为 50，中止代数数为 600，全局杂交和变异概率分别为 0.42 和 0.06，局部杂交和变异概率分别为 0.8 和 0.015，全局搜索向局部搜索转换时刻为 3/4 中止代数。优化过程曲线如图 7 所示。寻优结果显示，模具温度 112.07 °C、保压压力

99.80 MPa、保压时间 5.45 s，综合品质评价指标为 1.016 2。

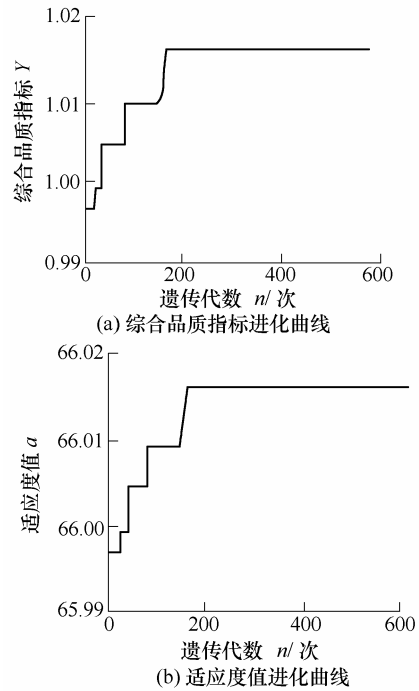


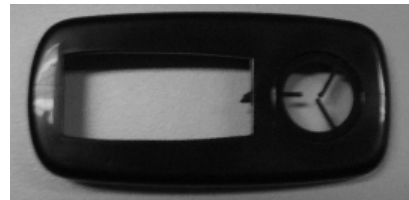
图 7 优化过程遗传进化曲线

5.2 试验验证

通过对优化结果进行试验验证，样品测试结果显示，制品复制率 99.87%，线收缩率 2.186%，翘曲度 0.114%，沉降指数 0.521 7%。将上述数据转换为综合品质指标为 1.045 8，与理论值相比二者相对误差为 2.83%，从工程角度来说比较理想。进一步对不同优化阶段进行随机试验，结果(图 8)显示整合优化过程产品品质也是一个逐步提高的过程。



(a) 遗传进化第 1 代



(b) 遗传进化第 100 代



(c) 遗传进化第 600 代

图 8 试验结果

6 结论

以自主开发的车载高光蓝牙产品为例,采用成型试验与数值模拟相结合的方法,综合运用正交设计与中心复合试验法等试验技术,EBW、TOPSIS、方差与误差分析等数据处理技术,RSM 建模理论和 GA 优化理论的相关理论和技术,实现了 RHCM 成型工艺优化研究。

(1) 以自主开发的 RHCM 成型高光模具及成型温控辅助系统为试验基础,通过因素显著性试验、结合方差与误差分析,研究得出了模具温度、保压压力和保压时间是影响 RHCM 成型制品品质的主要因素,而其他因素影响较小的结论。

(2) 在数据处理方面,通过人为引入干扰因子的方法实现数值仿真对实际成型状态的客观再现;采用 EBW 和 TOPSIS 理论从数理角度处理样品数据,使得试验结果能够较为客观的反映制品成型品质状况。

(3) 引入 RSM 建立了成型参数与制品综合品质之关系模型,结合方差分析和因子响应曲面分析,得到了适当描述 RHCM 成型工艺过程的最佳工艺优化模型。

(4) 针对传统遗传算法的不足之处提出改进算法(IGA),采用全局和局部搜索相协调的策略保证了求解过程的稳定性与可靠性;开发出相应的源程序代码,实现了工艺预测模型的寻优过程,且优化结果与试验结果能够较好的吻合,为 RHCM 成型工艺过程的制定提供了一种可行的工艺规划技术。

参 考 文 献

- [1] 王桂龙,赵国群,李辉平,等. 变模温注塑热响应模拟与模具结构优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(6): 216-221.
WANG Guilong, ZHAO Guoqun, LI Huiping, et al. Heat response simulation of variotherm injection molding and optimization of mold structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 216-221.
- [2] CHEN S C, JONG W R. Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on surface appearance of weld lines[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 101(2): 1174-1180.
- [3] SAITO T, SATOH I, KURSAKI Y. A new concept of active temperature control for an injection molding process using infrared radiation heating[J]. Polymer Engineering and Science, 2002, 42(12): 234-241.
- [4] KIM D H, KANG M H, CHUN Y H. Development of a new injection molding technology: Momentary mold surface heating process[J]. Journal of Injection Molding Technology, 2001, 5(4): 229-232.
- [5] SU Y C, SHAN J, IAN I W. Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding[J]. Micromesh Microeng, 2004, 14(3): 415-422.
- [6] YU M C, YOUNG W B, HSU P M. Micro-injection molding with the infrared assisted mold heating system[J]. Material Science and Engineering A, 2007, 460-461(7): 288-295.
- [7] SHEN Y K, SHIE Y J, WU W Y. Extension method and numerical simulation of micro-injection molding[J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 2004, 31(6): 795-804.
- [8] 余晓容,申长雨,陈静波,等. 注塑模浇注系统位置的自动设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(6): 174-178.
YU Xiaorong, SHEN Changyu, CHEN Jingbo, et al. Automated design for the optimal gate location in injection molds[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 174-178.
- [9] MIGULE P, JUAN B, JULIO B. Limiting thickness estimation in polycarbonate lenses injection using CAE tools[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143-144(10): 438-441.
- [10] HONG Jun, WANG Wei, TANG Yiping. Part builded orientation optimization method in stereo lithography[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(1): 14-18.
- [11] CHANG T C. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the Taguchi method[J]. Polym. Eng. & Sci., 2001, 41(5): 703-710.
- [12] 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 Material Processing Technology, 2001, 110(3): 1-9.
- [13] ZHANG Dazhi, SUN Yikang, WANG Yanping, et al. Mended genetic BP network and application to rolling force predication of 4-STAND tandem cold strip mill[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(2): 297-300.
- [14] SHEN Xiang, YI Hong, NI Zhonghua, et al. Optimization of coronary stent structure design for maximizing the anticompression mechanical property[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(6): 98-102.
- [15] LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing, et al. Mechanical properties prediction of the mechanical clinching joints based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,

- 2009, 22(1): 36-41.
- [16] DENG Shigan, PAI Pingfeng, LAI C C, et al. A solution to the stacking sequence of a composite laminate plate with constant thickness using simulated annealing algorithms[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(9): 499-504.
- [17] GANESH K, PUNNIYAMOORTHY M. Optimization of continuous-time production planning using hybrid genetic algorithms-simulated annealing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(7): 148-154.
- [18] CHANG S H, HWANG J R, GONG J L. Optimization of the injection molding process of short glass fiber reinforced polycarbonate composites using grey relational analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 97(1): 186-193.
- [19] LU W K, CHIU T Y, HUANG S H, et al. Use of response surface methodology to optimize culture medium for production of poly- γ -glutamic acid by bacillus licheniformis[J]. International Journal of Applied Science and Engineering, 2004, 2(1): 49-58.
- [20] BABUR O, TUNCAY E. Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(8): 1085-1094.
- [21] LIAO Y G. Optimal design of weld pattern in sheet metal assembly based on a genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(9): 512-516.
- [22] XIANG Guoqi, HUANG Dagui. A metamodeling method based on support vector regression for robust optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(2): 242-251.
- [23] XU Gang, WU Zhiming. Deadlock-free scheduling method based on Petri net and GA[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(4): 371-375.
-
- 作者简介:** 刘东雷, 男, 1979 年出生, 博士后, 讲师。主要研究方向为高分子材料成型加工及模具 CAD/CAE。
E-mail: ldl_yang@sina.com
- 申长雨, 男, 1963 年出生, 博士研究生导师, 中国科学院院士。主要研究方向为塑料成型加工、塑料模具优化设计与制造等领域的理论、技术和数值模拟方法技术等。
E-mail: scy@zzu.edu.cn
- 刘春太, 男, 1966 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为注塑成型宏、微观的数值预测原理和高效算法, 短纤维增强注塑成型模拟和制品性能预测等。
E-mail: ctliu@zzu.edu.cn
- 辛勇, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高分子材料成型 CAD/CAE 与模具工程智能化与 CAX 集成技术。
E-mail: xinyong_sh@sina.com
- 孙玲, 女, 1966 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为塑料成型及模具 CAD/CAE。
E-mail: sunling18@163.com
- 伍晓宇, 男, 1963 年出生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为模具 CAD/CAM。
E-mail: wuxy@szu.edu.cn