

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.03.010

响应面法在顺序注射成型工艺参数优化中的应用*

杨方洲

(重庆文理学院材料学院,重庆 402168)

摘要:以大尺度板条类塑料制品为例,集合 CAE 分析、试验设计和响应面代理模型技术,对 3 浇口方案下的顺序注射成型 (SIM) 工艺参数优化进行了研究。通过 Taguchi 方法,确定了对 SIM 制品综合成型质量指标影响显著的工艺因素,从大到小依次为中间阀浇口延迟关闭时间、熔体温度、注射速率、保压时间;基于响应面理论建立了可以适当描述 SIM 制品综合成型质量指标与主要工艺因素之间关系的评价模型;在确保模型高适配性的前提下,进而采用数据处理技术实现了对优化模型的求解,获得了最优工艺参数组合,即延迟关闭时间为 0.4 s,熔体温度为 210℃、注射速率为 57.2 cm³/s、保压时间为 10 s。经 CAE 验证最优工艺参数组合下的综合成型质量指标值的误差仅为 5.2%,证明该方法合理有效。

关键词: 顺序注射成型; 工艺参数优化; 响应面法; 试验设计

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)03-0047-04

Application of Response Surface Methodology on Process Parameter Optimization for Sequential Injection Molding

Yang Fangzhou

(School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402168, China)

Abstract: Taking large scale slat type plastic parts as example, an efficient optimization for process parameters of sequential injection molding (SIM) with three gates scheme was investigated by integrating CAE analysis, design of experiment and response surface methodology. The main process parameters which has significant effect on comprehensive molding quality index of the SIM parts were determined firstly by using Taguchi method, in descend order, they are delay closing time of middle valve gate, melt temperature, injection rate and packing time. Then an efficient predictive model which appropriately represented the relationship between comprehensive molding quality index and main process parameters was created based on response surface theory. On the premise of ensuring high fitness of the model, the optimum process parameter values were found through solving the established response surface model with Matlab software, they are that delay closing time is 0.4 s, melt temperature is 210 °C, injection rate is 57.2 cm³/s and packing time is 10 s. The error of comprehensive molding quality index value gained with combination of the optimum process parameters is only 5.2% through CAE verification and it shows that the optimization method proposed is reasonable and feasible.

Keywords: sequential injection molding ; process parameter optimization ; response surface methodology ; design of experiment

大尺度板条类外观塑料制品由于其形状结构的特殊性,采用顺序注射成型 (SIM) 工艺可有效解决常规注射成型多浇口方案时存在的熔接痕问题,显著改善注塑制品的表观质量和使用性能。

关于 SIM 技术及其工艺优化已有相关文献研究^[1-4]。然而这些研究大多侧重于熔接痕消除机理方面或仅针对顺序阀浇口时间参数优化,尚无综合顺序阀浇口设置参数和常规注塑工艺参数(温度、时间和压力等)对 SIM 制品成型质量进行改善的相关研究。在实际成型过程中,这 2 类工艺因素之间存在着相互作用,共同影响着注塑制品的最终成

型质量^[3]。

基于此,同时为了提高优化效率和分析精度,笔者提出集成 CAE 分析、试验设计 (DOE) 和响应面代理模型的方法,对包含顺序阀浇口时间参数在内的特异形状外观制品 SIM 工艺优化进行研究,探究工艺参数因素对 SIM 制品成型质量的影响规律,并寻求可行设计空间内工艺参数的最优组合,研究结果可为 SIM 制品成型质量的改善提供参考。

* 重庆市自然科学重点项目 (CSTC.2009BA4065)

联系人: 杨方洲,讲师,主要从事材料成形 CAD/CAE 研究

收稿日期: 2012-12-13

1 优化问题的建立

1.1 SIM 工艺分析

图1为长宽比约为15:1的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)空调辐条板,对其SIM工艺参数优化过程进行研究,其熔接痕消除原理如图2所示。常规注射成型时,由于各个浇口同时开启,不可避免地会在2股熔胶交汇处产生熔接痕缺陷,如图2a所示;采用如图2b的时序阀浇口SIM,可调整各个阀浇口的开启顺序,即先打开中间阀浇口2,至流动前沿刚好到达两侧阀浇口时再开启阀1和阀3,延时一段时间后关闭中间阀浇口2,依靠阀1和阀3完成剩余充填,可避免2股熔体的正面相汇,从而实现对接熔接痕缺陷的改善或对熔接痕位置的控制。

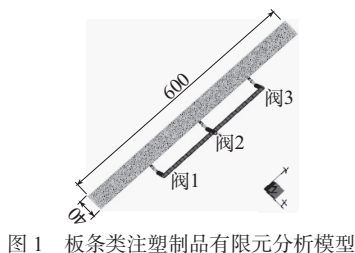


图1 板条类注塑制品有限元分析模型

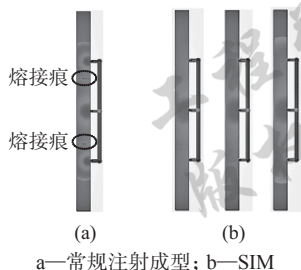


图2 SIM 消除熔接痕原理图

1.2 综合成型质量评价指标

由于外观制品的特殊要求,制品成型质量评价指标可以用制品外观质量指标来确定,这里以体积收缩率、翘曲变形量和降沉指数作为指标加以综合考察(由于SIM在消除熔接痕缺陷方面具有显著效果所以将其排除),且假设各指标影响权重相当,基于线性加权法^[5]的综合成型质量评价指标 y 可表示为式(1)。

$$y = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (1)$$

式中, w_i 是与评价指标 y_i 相应的权重系数($0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^n w_i = 1$)。

1.3 评价变量

在SIM中,除时序阀浇口参数对成型质量有影响外,诸如温度、时间和压力类工艺条件也需要综合考虑。根据已有文献^[6-8],初步确定对成型质量有重

要影响的温度、时间和压力工艺因素分别为模具温度(A)、熔体温度(B)、注射速率(C)、保压时间(D)、保压压力(E)(以最大注射压力的百分比表示);同时根据文献[9]对SIM阀浇口参数优化分析结果,并考虑到笔者所用制品的结构对称性,确定将中间阀浇口延迟关闭时间(F)作为阀浇口的待优化设计变量(两侧阀浇口采取流动前沿到达即时开启模式,忽略其延时开启时间)。基于注塑材料工艺推荐和生产经验,确定上述工艺参数的取值范围。

注射成型工艺优化时,过多的工艺参数会影响到优化分析效率和精度,且同时对这么多的成型工艺进行优化亦没有必要。故在实际操作过程中,需要首先确定对制品成型质量影响较为显著的因素。

2 优化数学模型

笔者引入响应面理论构建工艺变量与综合成型质量指标之间的数学模型,来近似表征它们之间的高度非线性隐式关系,从而替代传统的依靠试错法或通过反复修改参数进行模拟试验的优化方法,以提高优化工作效率和分析精度。关于响应面理论及其应用方法详见文献[10]。具体求解过程中,采用二阶响应面模型对该工艺优化过程进行定量描述,如式(2)所示。

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

式中, x 为工艺变量; n 为优化变量数目; β 为多项式各项系数,通过回归分析求得; ε 为误差综合项。

3 工艺优化过程

综上所述,可得集成CAE技术、DOE和响应面代理模型的SIM工艺优化流程,如图3所示。

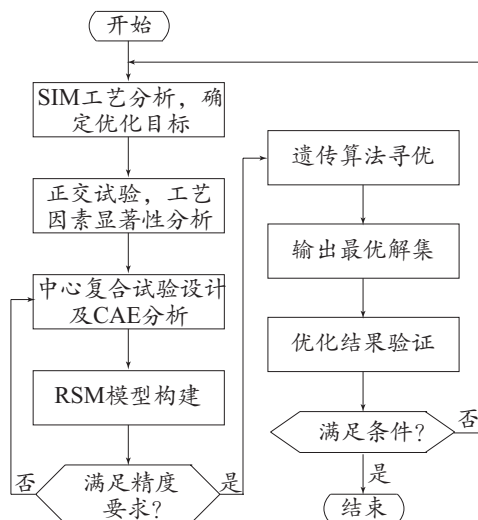


图3 SIM 工艺优化流程

3.1 析因实验及结果分析

采用正交试验进行因素显著性分析。对每个工艺因素取 5 个水平, 安排的 $L_{25}(5^6)$ 正交试验如表 1 所示, 并利用 Moldflow 软件进行模拟分析, 计算结果方差分析如表 2 所示。从表 2 可知, 熔体温度、注射速率、保压时间和延迟关闭时间是对综合成型质量影响显著的工艺因素, 从大到小依次为延迟关闭时间、熔体温度、注射速率、保压时间。因此, 考虑将它们作为后续待优化设计变量, 其它变量值恒定为最佳水平。

表 1 正交试验因素水平表

水平	因素					
	A/℃	B/℃	C/(cm ³ ·s ⁻¹)	D/s	E/%	F/s
1	30	210	50	2	50	0.0
2	40	220	70	4	60	0.1
3	50	230	90	6	70	0.2
4	60	240	110	8	80	0.3
5	70	250	130	10	90	0.4

表 2 方差分析结果

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性 ¹⁾
A	0.086	4	1.000	6.390	-
B	6.895	4	80.174	6.390	*
C	0.753	4	8.756	6.390	*
D	0.584	4	6.791	6.390	*
E	0.437	4	5.081	6.390	-
F	14.954	4	173.884	6.390	*
误差	0.090	4			

注: 1)- 表示不显著, * 表示显著。

3.2 RSM 模型构建及检验

在响应面模型创建前, 需通过适当的试验设计为该模型拟合并提供合理的样本数据空间。笔者采用中心复合设计^[11] 样本数据, 各因子水平如表 3 所示。

表 3 优化变量取值水平表

优化变量	水平 (编码及真实值)				
	-2	-1	0	+1	+2
熔体温度 (x_1)/℃	210	220	230	240	250
注射速率 (x_2)/(cm ³ ·s ⁻¹)	50	70	90	110	130
保压时间 (x_3)/s	2	4	6	8	10
延迟关闭时间 (x_4)/s	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4

通过 CAE 分析获取各样本点的响应值如表 4 所示。基于响应面理论, 对获得的样本点及其响应值进行数据拟合, 构建了综合成型质量评价模型如式 (3) 所示, 并采用复相关系数 R^2 ^[12] 对模型的拟合精度进行检验。检验结果 $R^2=0.9947$, 表明了模型具有较高的拟合精度。

3.3 优化结果及验证

采用遗传算法对构建的数学模型进行数值优化, 由 Matlab 语言编程实现。初始种群规模取为 100, 均匀交叉概率 0.5, 变异概率 0.02, 终止代数

表 4 部分中心复合试验结果

试验号	水平编码值				试验结果
	x_1 /℃	x_2 /(cm ³ ·s ⁻¹)	x_3 /s	x_4 /s	
1 [#]	230	90	6	0.2	5.345
2 [#]	240	70	8	0.3	5.713
3 [#]	240	110	8	0.1	5.679
4 [#]	220	110	4	0.3	4.781
5 [#]	230	50	6	0.2	5.774
6 [#]	240	70	8	0.1	5.721
7 [#]	220	70	4	0.1	5.315
8 [#]	230	90	2	0.2	5.461
9 [#]	220	110	4	0.1	4.803
.....					
25 [#]	240	110	4	0.3	5.498
26 [#]	220	110	8	0.3	4.415
27 [#]	230	90	6	0.0	5.358
28 [#]	220	110	8	0.1	4.428
29 [#]	220	70	8	0.1	4.472
30 [#]	220	70	8	0.3	4.471

$$y = -17.24936 + 0.21179x_1 - 0.036659x_2 - 1.68592x_3 + 0.39469x_4 - 0.0000116x_1x_2 + 0.0065344x_1x_3 + 0.0000625x_1x_4 + 0.0030484x_2x_3 - 0.0010938x_2x_4 + 0.0065625x_3x_4 - 0.0004399x_1^2 + 0.0000791x_2^2 - 0.014654x_3^2 - 1.01146x_4^2 \quad (3)$$

500。经过迭代计算得到该模型的最优结果为:

$$y^* = 4.17, x^* = [210, 57.2, 10, 0.4]^T$$

即当延迟关闭时间为 0.4 s, 熔体温度为 210℃、注射速率为 57.2 cm³/s、保压时间为 10 s 时可得综合成型质量指标值的最优解 (最小值) 为 4.17。

以获得的最优工艺参数组合为初始设置, 利用 Moldflow 软件进行模拟验证, 得到的综合成型质量指标值为 4.40。与模型优化值相比, 两者相对误差为 5.2%, 说明该模型优化结果较为合理。

4 结论

综合有限元分析技术、DOE 和代理模型技术, 研究了 SIM 诸工艺因素对 SIM 制品成型质量的影响规律, 获得了设计空间内工艺参数的最优组合, 得到如下结论:

(1) 通过正交试验确定了对 SIM 综合质量影响显著工艺参数, 按影响显著程度从大到小排序分别为: 中间阀浇口延迟关闭时间、熔体温度、注射速率和保压时间, 表明了 SIM 时序阀浇口参数对成型质量影响的重要性;

(2) 根据响应面理论构建了主要成型工艺参数与综合成型质量指标的近似模型, 简化了 CAE 分析计算的工作量, 且模型具有较高的拟合精度;

(3) 根据构建的模型获得了最优工艺参数组合,

并经 CAE 验证该工艺参数组合下的综合成型质量指标值的误差仅为 5.2%,验证了所提出优化方法的可靠性和合理性,为 SIM 过程的制定提供了一种可行的工艺规划技术。

参考文献

- [1] 江毅,余稀,肖任贤,等.基于 Moldflow 的时序进料系统在消除熔接痕中的应用[J].塑料工业,2011,39(2):49-52.
Jiang Yi, Yu Xi, Xiao Renxian, et al. Application of sequential feeding system in the elimination of weld lines based on Moldflow[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(2):49-52.
- [2] 刘毅,阮锋,冯杨,等.顺序浇注成型制品熔接痕强度预测[J].华南理工大学学报,2009,37(8):45-48.
Liu Yi, Ruan Feng, Feng Yang, et al. Prediction of weldline strength of parts fabricated by sequential injection molding[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(8):45-48.
- [3] 刘毅.热流道顺序注塑成型工艺改善制品熔接痕研究[D].广州:华南理工大学,2009.
Liu Yi. Studies on improving weld lines in molded parts by exploiting sequential injection molding[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [4] Aisa J, Castany J. Dimensional study of thermoplastic parts made using sequential injection molding[J]. Polymer Engineering and Science, 2009, 49(9):1 832-1 838.
- [5] 郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007.
Guo Yajun. Theory, method and application of comprehensive evaluation[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] Erzurumlu T, Ozcelik B. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method[J]. Materials and Design, 2006, 27(10):853-861.
- [7] Chen W C, Fu G L, Tai P H, et al. Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2):1 114-1 122.
- [8] Chen W C, Wang M W, Chen C T, et al. An integrated parameter optimization system for MISO plastic injection molding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(5-6):501-511.
- [9] Spina R. Injection moulding of automotive components: Comparison between hot runner systems for a case study[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156:1 497-1 504.
- [10] 马宝胜.响应面方法在多种实际优化问题中的应用[D].北京:北京工业大学,2007.
Ma Baosheng. The application of response surface methodology in some practical projects of optimization[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [11] 张志红,何楫,郭伟.在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究[J].沈阳航空工业学院学报,2007,24(1):87-91.
Zhang Zhihong, He Zhen, Guo Wei. A comparative study of three central composite designs in response surface methodology[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007, 24(1):87-91.
- [12] 虞跨海,杨茜,倪俊,等.基于响应面的涡轮叶片冷却通道设计优化[J].航空学报,2009,30(9):1 630-1 634.
Yu Kuahai, Yang Xi, Ni Jun, et al. Cooling passage design optimization of turbine blades based on response surface methodology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9):1 630-1 634.

瑞士和奥地利注塑市场保持增长

据悉,瑞士和奥地利的注塑市场在 2012 年保持了稳定增长,这归功于欧洲最具技术实力的一些大公司的有力推动。

瑞士在提供具有优势的电动、高技术和医疗用注塑设备上表现强势,而奥地利成型企业主要供应中欧和东欧的汽车企业。

瑞士成型企业在 2012 年的聚合物加工量约为 14.5 万 t,而奥地利成型企业约为 13 万 t。

瑞士和奥地利在注塑工厂的数量上都未有显著变化。但瑞士的工厂数减少了 2%,而奥地利减少了 3%。

一些注塑企业仍在设法提高盈利能力和减少成本,合并生产点,或把生产迁至捷克和匈牙利这类劳动力成本更低的地方。
(色母粒网)

高抗冲 PVC 复合树脂国产化

春节刚过,河北盛华化工有限公司与河北工业大学合作研发的高抗冲聚氯乙烯(PVC)复合树脂产品荣获“中都草原杯”张家口市最具影响力矿产品精深加工工业品牌。

经过 4 年多的攻关,到 2012 年年底,该公司已生产高抗冲 PVC 复合树脂 1 万 t,预计今年 7 月份将形成 5 万 t/a 的生产能力,且售价比美国产品每吨约低 5 000 元。专家称,高抗冲 PVC 复合树脂填补了国内空白,对推动我国 PVC 市场从通用型向特种专用型转变具有重要的意义。(色母粒网)

聚烯烃封装膜延长太阳能组件寿命

陶氏化学最近开发出用于太阳能板的 ENLIGHT 聚烯烃封装薄膜。与现有市场同类产品相比,该产品具有更好的电绝缘特性和防水性能,可以有效延长组件的使用寿命。测试表明,ENLIGHT 材料的太阳能板能经受湿热环境超过 1 万 h,远远高于竞争产品(2 000 h)。该产品可使太阳能板生产商减少 30% 以上的塑封时间,大大提高产能。而且由于这种薄膜不会产生具有腐蚀性的乙酸,可以有效降低生产过程中的设备损耗。

为更好地满足亚太客户对 ENLIGHT 聚烯烃封装薄膜的需求,陶氏在上海成立了光伏应用实验室,并在近期对其泰国生产基地进行了改造,使该产品的全球产能翻了两番。

(中国色母粒网)