

基于 Taguchi 试验设计方法的注塑成型翘曲优化

吴真繁, 孙宝寿*, 张 勇

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 应用 Taguchi 试验设计方法, 选用正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验设计和方差分析, 对注塑流动过程进行 CAE 模拟分析, 研究了熔体温度、模具温度、保压压力和保压时间等因素对制品翘曲影响的显著性和贡献度. 并根据上述试验得到的影响度排名, 将最重要因素的水平进行密化, 通过混合水平正交试验设计, 获取各因素最佳水平组合, 对注塑工艺参数进行优化, 大大提高了注塑产品质量.

关键词: 注塑成型; Taguchi 试验; 翘曲; 工艺优化

中图分类号: TQ320.662

文献标识码: A

文章编号 1001-5132 (2011) 03-0108-05

注塑成型是一个相当复杂的物理过程, 是非牛顿塑料熔体在压力驱动下通过流道、浇口向较低温度的型腔充填, 熔体一方面由于模具传热而快速冷却, 另一方面因高速剪切产生热量, 同时伴随有熔体固化、体积收缩、分子取向和可能的结晶过程^[1]. 注塑成型过程是一个多变量、分布参数、非线性、强耦合且需要人参与的复杂过程, 这使得成型过程中工艺参数的设置变得非常困难, 而由于成型的过程工艺参数直接决定了熔体在模腔中的流动状态, 对制品的质量有着最直接的影响. 因此找到制件成型的最优工艺条件, 对成型过程进行工艺控制, 是提高塑料制品质量的有效途径.

随着 CAE 技术的不断进步和日趋成熟, 它已被广泛地应用到工业生产的各个领域, 在提高制品质量、降低成本等方面有着重大的技术经济意义. 尤其是将 CAE 技术应用在注塑成型行业, 更是其在工业界应用的典范. 它用数值模拟代替真实试验, 模拟在给定的工艺水平下熔体在模具内的流动、保压、冷却过程, 模拟制品产生的缺陷, 辅助工程师修改产品设计、修改模具、调整工艺等, 最终达到提高制品质量的目的, 也就是用计算机模拟代替真实的试模, 既节省时间, 又节约成本.

笔者利用 Taguchi 试验设计方法^[2-4]安排注塑

模 CAE 试验, 通过正交试验和方差分析技术, 得出注塑成型工艺过程中各工艺参数对制品翘曲的影响和贡献度, 并得出较优参数水平组合, 再用 CAE 的比较试验来验证结论的正确性, 以达到参数优化配置的目的.

1 DOE 试验设计

1.1 Taguchi 试验方法

Taguchi 试验设计方法是利用正交试验和方差分析的方法对多个试验因数进行优化的方法, 通过数目较少的试验可以找到在所有因素以及对水平条件下的最优水平组合和各个试验因数对试验指标的影响度. 在 Taguchi 试验设计中, 采用信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)作为试验稳定性的评价指标. 信噪比由损失函数推导而得的, 其形式依赖于目标函数的类型, 根据试验设计的目标可以把信噪比^[5]的计算方法分为三类:

(1) Large-the-Best: 目标值越大越优,

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right). \quad (1)$$

(2) Nominal-the-Best: 目标值越接近某值越优,

$$\eta = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right), \quad (2)$$

收稿日期: 2010-02-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 宁波市人才培养基地项目(jd070420); 宁波大学学科基金项目(xk0609027).

第一作者: 吴真繁(1986-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 注塑成型工艺优化. E-mail: wuzhenfan100@tom.com

*通讯作者: 孙宝寿(1961-), 男, 江苏泰兴人, 副教授, 主要研究方向: 模具技术及机械电子. E-mail: sunbaoshou@nbu.edu.cn

其中, $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$.

(3) Smaller-the-Best: 目标值越小越优,

$$\eta = -10 \lg\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right), \quad (3)$$

其中, η 为信噪比; y_i 为不同噪声条件下翘曲的观测值; n 为每个试验的重复次数.

根据试验目标的特点选取不同的损失函数, 笔者研究制品的翘曲问题, 属于目标越小越好, 所以选取(3)式. 并采用 CAE 技术模拟方法代替实际的注塑试验, 引入模型划分网格时网格的大小作为噪声的来源, 试验重复次数为 2 次.

1.2 正交试验

Taguchi 试验设计技术是一种应用正交矩阵执行最少的试验次数而获得足够试验信息的统计学工具, 它是一种同时研究多个工艺参数对制品质量影响的有效方法, 目前应用最多的是正交试验设计方法. 正交试验设计是通过正交表来安排试验的, 正交表能够在因素变化范围内均衡抽样, 使每次试验都具有较强的代表性, 由于正交表具备均衡分散的特点, 保证了全面试验的某些要求, 使这些试验往往能够较好或更好地达到目的.

2 数值模拟试验

2.1 分析前处理

(1) 基本分析模型的导入. 图 1 为研究对象, 由于其壁厚较薄, 容易产生翘曲.

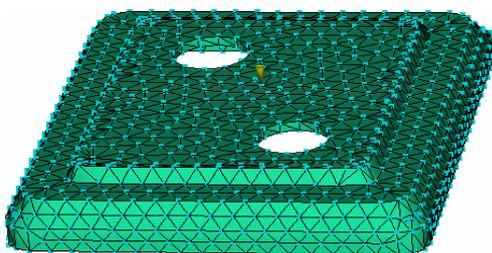


图 1 模型的浇注系统和网格模型

(2) 引入网格的大小作为噪声的来源, 试验重复次数 2 次. 当网格边长为 4 mm, 总共含有 3372 个单元, 匹配百分比为 91.5%; 当网格边长为 5 mm 时, 总共含有 2202 个单元, 匹配百分比为 89.0%.

(3) 分析类型设定. 在导入的基本分析模型中, 设定分析类型为“流动+翘曲”(flow + warp).

(4) 选择材料. 模型采用 GE Plastics (USA) 公

司生产的 PC 材料, 牌号为 Lexan PPC 4701-11000. 材料具体信息见表 1.

表 1 PC 材料的具体信息

种类	Polycarbonates (PC)
纤维(填充物)	未填充
熔体密度/(g·cm ⁻³)	1.011 4
导热系数/(W·(m·) ⁻¹)	0.25
比热容/(J·(kg·) ⁻¹)	2 300
推荐模具温度/	82~99
推荐注塑温度/	343~377
最大剪切应力/MPa	0.5
最大剪切率/(s ⁻¹)	40 000

(5) 按照 Moldflow MPI 默认工艺参数进行翘曲分析, 结果如图 2 所示, 其最大翘曲量为 0.646 3 mm, 结果不甚理想.

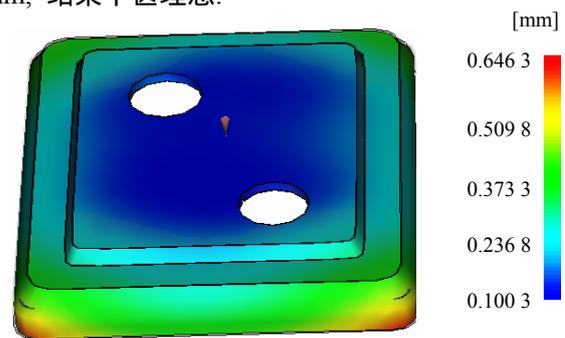


图 2 默认工艺参数翘曲量

2.2 工艺参数优化方案

2.2.1 正交试验表设计

选择熔体温度、模具温度、保压压力和保压时间作为影响翘曲的主要工艺参数, 由正交表 L₉(3⁴) 来安排正交试验, 表 2 为所选因素水平表.

表 2 因素水平表

因素	模具温度/	熔体温度/	压力/MPa	时间/s
水平 1	85	350	16.41	5
水平 2	90	360	19.56	10
水平 3	95	370	23.44	20

2.2.2 试验和结果

采用正交试验法与仿真试验相结合, 对塑件注射成型过程中的多因子进行优化设计, 以减少翘曲变形, 提高成型精度. 因此将工件的总翘曲变形量为试验指标, 根据表 1 中的因素和水平, 设置模拟试验正交表, 得到考核指标翘曲量 Y₁, Y₂, 并计算 S/N 比, 相应数据见表 3.

表3 正交试验表及分析结果

试验号	模具温度	熔体温度	保压压力	保压时间	翘曲量 Y_1 /mm	翘曲量 Y_2 /mm	S/N 比
1	1	1	1	1	0.617 3	0.527 5	4.819 367
2	1	2	2	2	0.645 3	0.546 6	4.466 124
3	1	3	3	3	0.608 2	0.516 4	4.971 796
4	2	1	2	3	0.638 1	0.544 4	4.537 394
5	2	2	3	1	0.550 5	0.516 4	5.453 691
6	2	3	1	2	0.661 4	0.466 4	4.848 027
7	3	1	3	2	0.593 6	0.576 9	4.652 288
8	3	2	1	3	0.663 3	0.568 1	4.186 737
9	3	3	2	1	0.591 4	0.498 7	5.239 980
K_1	4.085 767	4.669 667	4.618 033	5.171 000			
K_2	4.946 367	4.702 200	4.747 833	4.655 467			
K_3	4.693 000	5.019 933	5.025 933	4.565 300			

注: K_{ij} 是某个工艺参数第 i 个水平下第 j 个质量指标的 S/N 比的平均值; $i=1, 2, 3$ 代表 3 个水平; $j=1, 2, 3, 4$ 代表 4 个因素。

2.2.3 方差分析

基于方差分析对模拟结果进行分析, 并通过各个因素的离差平方和定量地估计各个因素对整体测量响应的相对贡献。正交试验表中所有试验信噪比的总体平均值(m)采用(4)式计算^[6]:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i, \quad (4)$$

其中: n 为试验次数; η_i 为第 i 次试验 S/N 比。

各因素水平对质量指标的主效应(m_{f_i})可通过求出包含该因素水平的所有试验的信噪比均值表示, 即采用(5)式计算:

$$m_{f_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i, \quad (5)$$

其中: f 为试验因素; i 为试验水平; N 为该因素该水平试验次数。

为了确定各个因素对制品质量指标的影响程度, 需要计算总离差平方和和各因素变化引起的离差平方和。总离差平方和(SS_T)定义为^[7]:

$$SS_T = \sum_{i=1}^9 (\eta_i - m)^2. \quad (6)$$

各因素变化引起的离差平方和(SS_F)定义为:

$$SS_F = 3 \sum_{i=1}^4 (m_{f_i} - m)^2 = 3(m_{f_1} - m)^2 + 3(m_{f_2} - m)^2 + 3(m_{f_3} - m)^2. \quad (7)$$

求解每个因素对试验质量指标的影响度, 比较简单的方法是求出每个因素对应的离差平方和在总体离差平方和中所占的百分比, 得到的就是

因素对试验质量指标的影响度。表 4 则为各个工艺参数对翘曲质量指标的影响度。

表4 各因素对翘曲的影响度 %

因素	模具温度	熔体温度	保压压力	保压时间
影响度	8.559 6	17.387 2	52.039 7	20.773 6

由表 4 可知, 对翘曲影响最重要的影响因素是保压压力, 次重要的影响因素是保压时间。上述试验采用 4 因素 3 水平的正交表安排试验, 各因素水平选取时跨度较大, 由于正交试验得到的仅为映射空间中若干个离散的点, 基于正交试验的参数优化是在离散的点集中寻找具有最优值的点, 但不能保证该点就是连续空间中使翘曲量最小的工艺参数组合点。因此水平选取时跨度过大会导致优化效果不佳, 下面再将对翘曲影响度最高的保压压力这个因素的水平进行密化, 并安排混合水平的正交试验来优化翘曲量。

2.2.4 混合水平的正交试验

选取 $L_8(4 \times 2^4)$ 正交表安排试验, 按照表 5 所示的因素和水平安排模拟正交试验, 得到试验结果见表 6。

表5 混合水平的正交试验因素水平表

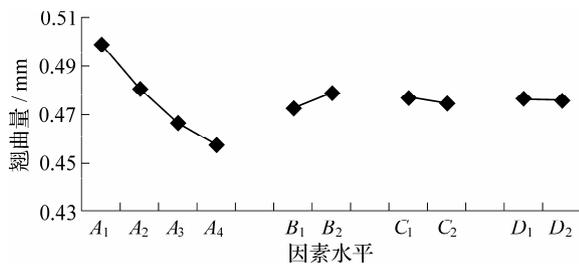
因素	保压压力/%	熔体温度/	模具温度/	保压时间/s
水平 1	90	360	90	5
水平 2	100	360	90	5
水平 3	110	370	95	10
水平 4	120	370	95	10

表 6 正交试验表及结果分析

试验号	保压压力	熔体温度	模具温度	保压时间	空列	翘曲量 Y/mm
1	1	1	1	1	1	0.477 5
2	1	2	2	2	2	0.520 1
3	2	1	1	2	2	0.497 7
4	2	2	2	1	1	0.462 7
5	3	1	2	1	2	0.482 3
6	3	2	1	2	1	0.450 5
7	4	1	2	2	1	0.432 9
8	4	2	1	1	2	0.481 1
K_1	0.498 8	0.472 6	0.476 7	0.475 9	0.455 9	
K_2	0.480 2	0.478 6	0.474 5	0.475 3	0.495 3	
K_3	0.466 4					
K_4	0.457 0					

注: K_{ij} 是某个工艺参数第 i 个水平下第 j 个质量指标的平均值; $i=1, 2, 3, 4$ 代表 4 个水平; $j=1, 2, 3, 4, 5$ 代表 5 个因素。

由表 6 可以得出各个因素对制品翘曲的影响, 其影响度如图 3 所示。



A: 保压压力, B: 熔体温度, C: 模具温度, D: 保压时间

图 3 工艺参数对制品翘曲的影响

2.2.5 工艺参数对翘曲值的影响及优化

由图 3 可以看到翘曲量随各个因素的变化情况, 图中给出了各因素对翘曲量的影响: (1)保压压力对翘曲的影响最大; 在试验水平范围内, 保压压力越大, 翘曲量越小。(2)熔体温度对翘曲值的影响也较强; 熔体温度越高, 翘曲值越大。(3)模具温度和保压时间对翘曲值的变化影响相对较小。

混合水平正交试验主要目的是确定各个因素的优化水平, 由图 3 可得使翘曲指数最小的优化因素水平, 得到的最优水平组合为 $A_4B_1C_2D_2$, 即保压压力为最大填充压力的 120%, 熔体温度为 360, 模具温度为 95, 保压时间为 10 s。由于得到的最优因素水平组合恰好包含在正交矩阵的主试验中, 所以不需要再次对所得的参数水平进行模拟试验, 直接从正交试验表中得到最优水平组合的翘曲量为 0.432 9 mm, 比 Moldflow 软件默认的参数模拟

出来的翘曲量 0.636 4 mm 降低了 31.98%, 通过试验验证, 在优化因素水平下, 注塑制品的翘曲得到了明显的改善。

2.2.6 试验验证

在 HTB58X/1A 型注塑机上进行了注塑试验, 表 7 为注塑机的主要技术参数。图 4 为注塑模模具, 通过调整注塑机的工艺参数进行注塑试验验证, 得到 8 组产品, 图 5 为 7 号试验(即最优化水平组合)得到的产品实物图, 工艺参数水平: 保压压力为最大填充压力的 120%, 熔体温度为 360, 模具温度为 95, 保压时间为 10 s。图 6 为采用 Moldflow 推荐参数试验得到的产品实物图, 工艺参数水平: 保压压力为最大填充压力的 80%, 熔体温度为 360, 模具温度为 91, 保压时间为 10%。对比 2 组产品中, 图 5 工艺参数优化后注塑件的翘曲变形明显优于图 6 的注塑件。

表 7 HTB58X/1A 注塑机主要技术参数

型号	HTB58X/1A
螺杆直径/mm	26
注射压力/MPa	24.5
注射速率/(g·s ⁻¹)	54.7
注射行程/mm	125
锁模力/kN	580
允许模具最大厚度/mm	320
允许模具最小厚度/mm	120
螺杆转速/(r·min ⁻¹)	0~205



图4 注塑模模具

图5 优化工艺参数
产品图图6 Moldflow 推荐
参数产品图

3 结论

(1) 注塑成型工艺优化是涉及多因素、多指标的参数优化问题, 将 CAE 和 Taguchi 试验设计方法结合起来, 是优化注塑工艺参数, 获得最佳工艺, 提高生产效益的有效途径。

(2) 通过试验分析, 保压压力、保压时间、模具温度和熔体温度是影响制品翘曲的主要因素, 其中保压压力是影响翘曲最重要的因素。

(3) 提高保压压力, 增加保压时间都可以降低制品的翘曲量, 在优化因素水平下, 制品翘曲量降低了 31.98%, 制品的翘曲现象得到了明显的改善。

参考文献:

- [1] 拉普申. 热塑性塑料注塑原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1983:189.
- [2] 马成良, 张海军, 李素平. 现代试验设计优化方法及应用[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007:323.
- [3] Chang T C, Faison E. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the tahuchi method[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(5):703-710.
- [4] Oktema H, Erzurumlu T, Uzman I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part[J]. Materials & Design, 2007, 28(4):1271-1278.
- [5] Lu Xuehong, Khim L S. A statistical experimental study of the injection molding of optical lenses[J]. Materials Processing Technology, 2001, 113:189-195.
- [6] 王利霞. 基于数值模拟的注塑成型工艺优化及制品质量控制研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2004.
- [7] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:235.

Warpage Optimization of Molded Part with Plastics Injection Based on Taguchi Method

WU Zhen-fan, SUN Bao-shou*, ZHANG Yong

(Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: A set of moldflow analyses are carried out by combining the process parameters based on the $L_9(3^4)$ Taguchi orthogonal design. These experiments are performed aiming at finding the influence on and the contribution to the warpage of the injection exerted by the process parameters such as the melting temperature, mold temperature, packing time, packing pressure and so on. The signal-to-noise and the analysis of variance (ANOVA) are used to find the optimal levels and to indicate the impact of the process parameters on warpage. An optimum condition for minimizing the warpage of the product has been found based on a number of tests using a mixed-level orthogonal array according to the order of importance of each parameter obtained in the first step of experiment. After the optimization, the warpage of the product is reduced by 31.98%, and the quality of the product is greatly improved.

Key words: injection molding; Taguchi DOE; warpage; optimization

(责任编辑 章践立)