

正交试验法在塑件成形工艺参数优化中的作用

胡立大,赵 芹,阮灵伟,刘 红

(浙江工业大学 机械工程学院,杭州 310014)

摘 要: 在未知塑件的合适工艺参数范围内,探讨正交试验法在塑件翘曲分析中优化工艺参数的效果。通过正交试验法安排试验,采用 Moldflow 软件进行工艺参数的优化,获得翘曲变形量。通过正交试验法获得了塑件的一组较优的工艺参数。在未知塑件的合适工艺参数范围情况下,用正交试验法寻求最佳的工艺参数并不是一个理想的方法,通过单一参数比较进行优化,在翘曲变形分析中可以取得一个最佳解。正交试验法在塑件工艺参数优化中无疑具有一定的指导作用。

关键词: 注塑成形;正交试验;工艺参数;优化

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2009)03-0296-05

Function of orthogonal experiment in optimization of injection molding processing parameters

HU Li-da, ZHAO Qin, RUAN Ling-wei, LIU Hong

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Within the range of plastic parts in the unknown parameters of the appropriate technology, we explore the orthogonal experiment analysis of warpage in plastic parts to optimize the effect of process parameters. The orthogonal experiment and Moldflow software were used to optimize process parameters and obtain the amount of warping deformation and a better group of process parameters. Within the range of plastic parts in the unknown parameters of the appropriate technology, we use the orthogonal experimental method to find that the best process parameters is not an ideal way to compare a single parameter for optimization. Analysis of the warpage can be achieved in an optimal solution. Orthogonal experiment in the optimization of process parameters of plastic parts undoubtedly can have some functions in guiding.

Key words: injection molding; orthogonal experiment; processing parameters; optimiation

塑件产品在投入生产前,传统的做法是技术人员凭借经验,在选定的设备上通过不断试验来配置工艺参数。如果调整工艺参数无法满足生产要求时,再对模具设计参数或使用材料和设备进行更改。

该方法需要操作人员具有丰富的实践经验,而且费时,试模成本高,已不适应现代化生产的要求。因此,很多研究者在运用仿真试验优化注塑成形工艺参数、消除注塑件成形缺陷、提高成形质量方面,做

了大量的研究工作,但工艺参数的选择涉及成千上万种组合,在这无数多的组合面前,如果仅凭经验试凑,难以得到最优的成形工艺参数组合^[1]。本研究将正交试验法与仿真实验两者结合用于注塑过程参数优化,得出优化的工艺参数,验证了正交试验法在塑件工艺参数方面优化的可靠程度,得出了正交试验法用于优化工艺参数所需要的条件,以及出现试验偏差时的解决方案。

1 塑件的前处理

本研究所采用的塑件为图 1 所示的直角三角尺,尺寸为 195 mm × 175 mm,厚度均匀为 2.6 mm,最薄处为 1 mm。通过 Moldflow 软件的网格大纵横比单元修改、自由边修改、重叠、交叉单元修改、未定向单元修改等有限元前处理,得到的塑件网格单元如图 2 所示。

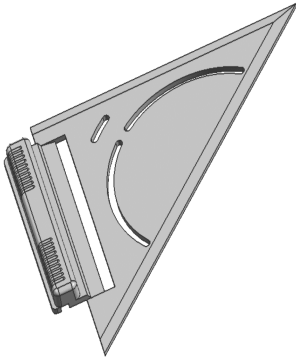


图 1 产品零件
Fig. 1 Manufactured product

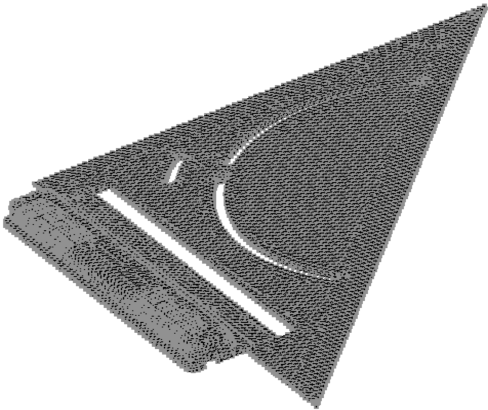


图 2 仿真分析模拟
Fig. 2 Simulation analysis

塑件采用 PS 材料,牌号为 8080 (E4),是一种无色透明的热塑性塑料。大多数商业用的 PS 都是透明的、非晶体材料。PS 具有非常好的几何稳定

性、热稳定性、光学透过特性、电绝缘特性以及很微小的吸湿倾向。典型应用范围:产品包装、家庭用品(餐具、托盘等)、电气(透明容器、光源散射器、绝缘薄膜等)^[2]。利用 Moldflow 最佳浇口位置分析,设计找到一个初步的最佳浇口位置,如图 3 所示。

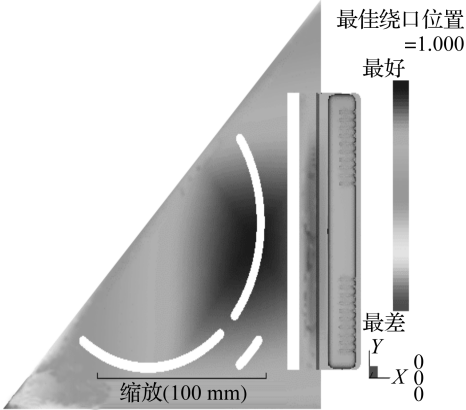


图 3 最佳浇口位置
Fig. 3 Best gate location

分析结果显示,最佳浇口位置在节点 N7864 附近比较合理,建立浇注系统、冷却系统等前置处理,最终得到的仿真分析模型如图 4 所示^[3-4]。

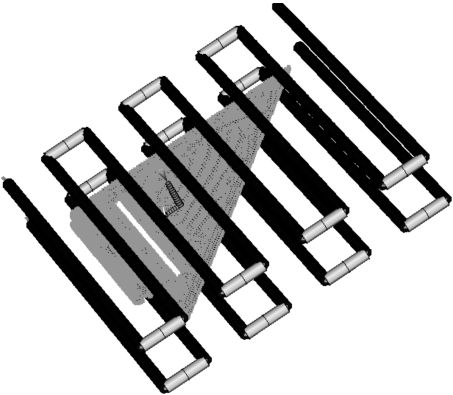


图 4 浇注系统和冷却系统的建立
Fig. 4 Establishing of runner system and cooling system

2 总体方案确定

翘曲变形是薄壳塑料件注塑成形中常见的缺陷,不同材料、不同形状注塑件的翘曲变形规律差别很大。翘曲变形问题的存在会影响注塑件的形状精度和表面质量,当翘曲变形量超过允许误差后,就成为成形缺陷,进而影响产品装配。翘曲作为塑件变形的重要特征之一,其研究极具工程价值。本研究定义工件的总翘曲变形量为考察指标。

2.1 设计变量及其取值范围的确定

在工艺参数优化过程中,设计变量的取值范围

相当重要。因为这不仅关系到所选范围是否包含最优解或者次优解,也影响到优化过程的搜索效率^[1]。总结前人的研究成果和软件初始的自动分析,本研究采用以下设计变量及变量的设计范围。

2.1.1 注塑温度(熔体温度) T_1 Moldflow 的塑料库提供了本研究所选取材料的注塑温度范围: $T_1 = 180 \sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$,在这个区间,均匀地取 5 个值,则 T_1 分别为 180,205,230,255,280 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 模具温度 T_2 Moldflow 的塑料库提供了本文所选取材料的注塑温度范围: $T_2 = 40 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,在这个区间,均匀地取 5 个值,则 T_2 分别为 20,32.5,45,57.5,70 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.3 注射时间 t_1 根据模拟分析,注射时间 $t_1 = 2.3\text{ s}$ 左右,在此值附近均匀地取 5 个值,则 t_1 分别为 0.6,1.3,2.0,2.7,3.3 s。

2.1.4 保压时间 t_2 根据模拟分析,设计的冷却时间为软件自动时间,根据前人研究成果^[1],取保压时间 t_2 分别为 5,10,15,20,25 s。

2.1.5 冷却时间 t_3 根据模拟分析,设计的冷却时间为软件自动时间,根据前人研究成果^[1],取冷却时间 t_3 分别为 40,60,80,100,120 s。

2.2 约束条件确定

根据工件尺寸,定义注射压力小于 144 MPa,锁模力小于 5 600 t,保压压力设定为注射压力的 80%。

2.3 确定影响翘曲指标的因子及水平

在工艺参数优化过程中,设计变量的取值范围相当重要,因为这不仅关系到所选范围是否包含最优解或者次优解,也影响到优化过程的搜索效率。影响塑料件注塑成形后翘曲变形量大小的主要因素为:注射温度 T_1 ,模具温度 T_2 ,注射时间 t_1 ,保压时间 t_2 和冷却时间 t_3 ,将它们简称为因子 A,B,C,D 和 E ,并假设各因子之间不存在交互作用。在各因子的取值范围内,每个因子均匀地取 5 个水平^[1,5],如表 1 所示。

表 1 正交试验的因素及水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test					
水平	A	B	C	D	E
1	180	20	0.6	5	40
2	205	32.5	1.3	10	60
3	230	45	2	15	80
4	255	57.5	2.7	20	100
5	280	70	3.3	25	120

2.4 正交表选用

这是 5 因素 5 水平的试验。对所有不同组合的

试验条件进行试验,称为全面试验,在本试验中,全面试验将包含 5 种不同条件的试验,要逐个进行试验显然是比较困难的。故采用正交试验法,选择 $L(5^5)$ 正交表设计试验方案,只需要进行 25 次试验。由于没有 5 因素 5 水平的正交表 $L(5^5)$,故以 $L_{25}(6^5)$ 代替,取前 5 列,得到相应的正交表,见表 2。

表 2 仿真试验数据

Table 2 Dates of orthogonal test						
水平	A	B	C	D	E	ΔZ
1	180	20	0.6	5	40	0.880 8
2	180	32.5	1.3	10	60	0.546 4
3	180	45	2	15	80	0.529 9
4	180	57.5	2.7	20	100	0.518 8
5	180	70	3.3	25	120	0.509 2
6	205	20	1.3	15	100	0.556 5
7	205	32.5	2	20	120	0.497 1
8	205	45	2.7	25	40	0.490 7
9	205	57.5	3.3	5	60	0.944 7
10	205	70	0.6	10	80	0.528 9
11	230	20	2	25	60	0.511 6
12	230	32.5	2.7	5	80	1.142 0
13	230	45	3.3	10	100	0.491 3
14	230	57.5	0.6	15	120	0.489 3
15	230	70	1.3	20	40	0.531 9
16	255	20	2.7	10	120	0.472 1
17	255	32.5	3.3	15	40	0.463 9
18	255	45	0.6	20	60	0.480 8
19	255	57.5	1.3	25	80	0.500 9
20	255	70	2	5	100	1.245 0
21	280	20	3.3	20	80	0.460 5
22	280	32.5	0.6	25	100	0.440 1
23	280	45	1.3	5	120	1.341 0
24	280	57.5	2	10	40	0.796 8
25	280	70	2.7	15	60	0.470 2

根据成形要求,塑件注塑成形后翘曲量越小越好,由表 3 可以得到各因子的优化组合为: $A_1B_2C_1D_5E_2$ 。

表 3 因子水平分析

Table 3 Analysis of factors levels					
	A	B	C	D	E
K_1	3.235 1	2.881 5	2.819 9	5.553 5	3.164 1
K_2	3.317 9	3.089 5	3.476 7	2.835 5	2.953 7
K_3	3.166 1	3.133 7	3.580 4	2.509 8	3.162 2
K_4	3.162 7	3.250 5	3.093 8	2.489 1	3.251 7
K_5	3.508 6	3.285 2	2.869 6	2.452 5	3.308 7

2.5 检验优化结果

当工艺参数组合为: $A_1B_2C_1D_5E_2$,即:注塑温度

为 180 ℃,模具温度为 32.5 ℃,注射时间为 0.6 s,保压时间为 25 s,冷却时间(总时间)为 60 s 时,采用 MPI 软件进行产品注塑成形模拟,得到翘曲量为 0.567 mm,所得不是最优解或较优解,也不满足产品要求(总翘曲量小于工件尺寸 3%)^[1]。

2.6 再次优化

从表 2 可以看出,保压时间为 5 s 的时候误差特别大,这是在设计初始保压时间范围时出现的保压时间过小,对最终翘曲值产生了很大的影响,导致最后的最优解或较优解出现了错误。现再次进行数学分析,排除保压时间为 5 s 时的实验数据进行分析,结果如表 4 所示。

表 4 因子水平分析 2

Table 4 Analysis of factors levels 2

	A	B	C	D	E
K ₁	2.104 3	2.000 7	1.939 1		2.283 3
K ₂	2.073 2	1.947 5	2.185 7	2.835 5	2.009
K ₃	2.024 1	1.992 7	2.335 4	2.509 8	2.020 2
K ₄	1.917 7	2.305 8	1.951	2.489 1	2.006 7
K ₅	2.167 6	2.040 2	1.924 9	2.452 5	1.967 7

2.7 检验优化结果

当工艺参数组合为:A₄B₂C₅D₅E₅,即:注塑温度为 255 ℃,模具温度为 32.5 ℃,注射时间为 3.3 s,保压时间为 25 s,冷却时间(总时间)为 120 s 时,采用 MPI 软件进行产品注塑成形模拟,得到翘曲量为 0.459 3 mm,所得结果表明为塑件翘曲的较优解,满足产品要求,但不是一组最优解。

2.8 单项因子比较分析

在五因子五水平试验中最好解为第 22 组数据,考虑采用单纯改变注射温度为 280 ℃,采用 A₅B₂C₅D₅E₅ 进行试验,所得试验总翘曲量为 0.458 4 mm,总翘曲量降低并不明显;考虑采用单纯改变冷却时间为 100 ℃,采用 A₅B₂C₅D₅E₄ 进行试验,所得试验总翘曲量为 0.459 2 mm,总翘曲量降低也不明显;考虑采用单纯改变注射时间为 0.6 ℃,采用 A₅B₂C₁D₅E₅ 进行试验,所得试验总翘曲量为 0.438 5 mm,总翘曲量降低明显,为所有试验中的最优解。

综合分析,试验中由于缺乏塑件的一些设计信息,导致在设计变量取值范围中出现了一些偏差,最终采用单个因子比较才获得最优解或较优解。所得的最优工艺参数的翘曲变形量如图 6 所示。

3 验证正交试验法的优化效果

为了验证正交试验法在塑件工艺参数优化方面

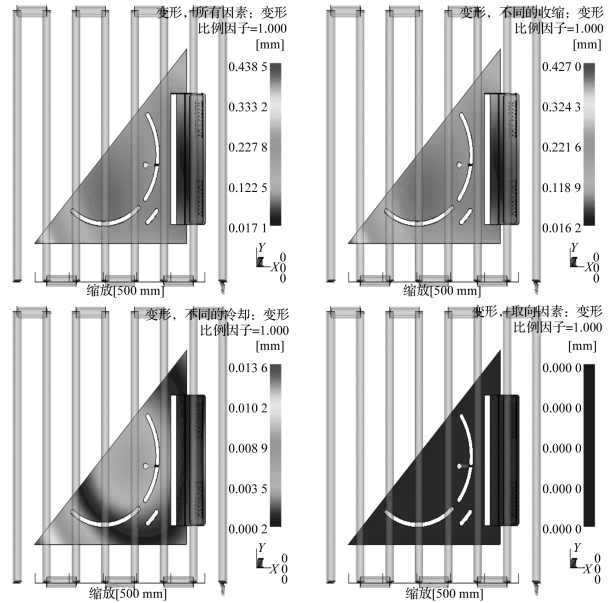


图 6 最优工艺参数的翘曲变形量

Fig. 6 Amount of warp with optimal process parameters

的效果,得知塑件的工艺参数范围后再次进行参数设计;为了优化设计方案,减少分析次数,冷却时间选为 120 s。

3.1 所取参数

3.1.1 注塑温度(熔体温度) T₁ Moldflow 的塑料库提供了本研究所选取材料的注塑温度范围: T₁ = 180 ~ 280 ℃,在这个区间,均匀地取 3 个值,则 T₁ 分别为 180, 230, 280 ℃。

3.1.2 模具温度 T₂ Moldflow 的塑料库提供了本研究所选取材料的注塑温度范围: T₂ = 20 ~ 70 ℃,在这个区间,均匀地取 3 个值,则 T₂ 分别为 20, 45, 70 ℃。

3.1.3 注射时间 t₁ 根据实际情况和模拟分析,注射时间 t₁ = 0.3 ~ 0.9 s,均匀地取 3 个值,则 t₁ 分别为 0.3, 0.6, 0.9 s。

3.1.4 保压时间 t₂ 根据实际情况和模拟分析,保压时间 t₂ = 20 ~ 30 s,均匀地取 3 个值,则 t₂ 分别为 20, 25, 30 s。

所取参数如表 5 所示。

3.2 正交表选用

这是 4 因素 3 水平的试验。在本试验中,由于优化了冷却时间,选择 L(3⁴) 正交表设计试验方案,只需要进行 9 次试验。

表 5 正交试验的因素及水平

Table 5 Factors and levels of orthogonal test

水平	A	B	C	D
----	---	---	---	---

1	180	20	0.3	20
2	230	45	0.6	25
3	280	70	0.9	30

3.3 工艺参数对翘曲量的影响分析

在表 6 中考察了 4 因素 3 水平对塑料件注塑翘曲变形量的影响,其所有不同的试验条件共有 4 个,现在用正交表安排试验只需要做 9 次试验,最后得出最佳参数组合。

表 6 仿真试验数据
Table 6 Dates of orthogonal test

水平	A	B	C	D	ΔZ
1	180	20	0.3	20	0.582
2	180	45	0.6	25	0.559 2
3	180	70	0.9	30	0.547 3
4	230	20	0.6	30	0.488 2
5	230	45	0.9	20	0.484
6	230	70	0.3	25	0.523
7	280	20	0.9	25	0.440 7
8	280	45	0.3	30	0.521 7
9	280	70	0.6	20	0.438 8

从表 7 中可以明显地看出,各因子(参数)对指标(翘曲量)的影响大小,在所分析的成形工艺参数中:注射温度对塑件翘曲量影响最大,保压时间对塑件翘曲量影响最小,即 $R_A > R_C > R_B > R_D$ 。由表 7 可知,除注射温度外的其他工艺参数,如模具温度、注射时间等参数对翘曲量控制同样起到不可忽视的作用。参照表 7,根据成形要求,塑件注塑成形后翘曲量越小越好,可以得到各因子的优化组合为: $A_3B_3C_3D_1$ 。

表 7 因子水平的极差分析

	A	B	C	D	
K_1	1.688 5	1.510 9	1.626 7	1.504 8	R 为因子在 4 个水平下最大值与最小值之差,即因子水平的极差。
K_2	1.495 2	1.564 9	1.486 2	1.522 9	
K_3	1.401 2	1.509 1	1.472 0	1.557 2	
K_1	0.562 8	0.503 6	0.542 2	0.501 6	
K_2	0.498 4	0.521 6	0.495 4	0.507 6	
K_3	0.467 1	0.503	0.490 7	0.519 1	
R	0.095 7	0.018 6	0.051 5	0.017 5	
排序	1	3	2	4	

3.4 检验优化结果

当工艺参数组合为: $A_3B_3C_3D_1$,即注塑温度为

280 ℃,模具温度为 70 ℃,注射时间为 0.9 s,保压时间为 20 s,冷却时间为 120 s 时,采用 MPI 软件进行产品注塑成形模拟。

最优工艺参数下得到的总翘曲变形量为 0.441 1 mm,与做过的试验结果比较,虽未获得最小的翘曲变形量,但已满足产品要求,而且在第二组试验中是一个次优解。

4 结 语

由 2 组正交试验分析结果可知,采用正交试验法优化工艺参数是可行的,可以寻找出一组次优的参数,但必须知道工艺参数(注射时间、保压时间、冷却时间)的一定范围,否则会加大优化的搜索难度或者出现优化偏差,导致优化失败。采用正交试验法寻找所有试验中的一个最优解,比较难以达到最优解,但是采用正交试验法和单个因素相互比较分析可寻找出一个最优解。在建立流道系统、冷却系统后,研究注射温度、模具温度、注射时间、保压时间和冷却时间等对塑件翘曲的影响并不是某种简单的线性关系,而是各个众多参数相互影响、互相作用的一个结果。本研究方法在对一些未知具体工艺参数范围的塑件的工艺参数优化,寻找一组较优的参数组合,以及用正交试验法优化工艺参数方面,具有一定的意义。

参考文献:

[1] 陈晓平,胡如夫,胡树根. 显示器前壳注塑仿真成型工艺参数的优化[J]. 轻工机械,2007(5):23-26.
[2] 李志刚. 中国模具设计大典[M]. 南昌:江西科学技术出版社,2003.
[3] 王刚,单岩. Moldflow 模具分析应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[4] 叶久新,王群. 塑料成型工艺及模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
[5] 吴梦陵,张珑. 基于 Taguchi 的水壶塑件注射工艺参数优化[J]. 模具工业,2008(12):11-16.