

基于翘曲的注塑工艺优化与均值估计

季正伟 张益华

徐 成

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016) (南京凯盛水泥技术工程有限公司, 南京 210036)

摘要 运用 MPI 软件对所选塑料件在预先设定的各种注射成型工艺参数下进行 CAE 模拟仿真。利用 Taguchi $L_{27}(3^{13})$ 正交实验表进行试验计划设计, 并记录塑料件的最大翘曲量作为数据处理对象。最后对所得翘曲量进行相关统计学分析, 得出各种工艺参数组合下最大翘曲量的置信区间及工艺参数的最佳组合, 为下一步模具设计和注塑工艺设计提供计算和实验依据。

关键词 CAE 正交实验 注射成型 最佳工艺组合

翘曲变形是指注塑制品的形状偏离了模具型腔的形状, 它是塑料制品常见的质量缺陷之一。翘曲变形程度作为评定制品质量的重要指标正逐渐受到关注和重视。而影响翘曲变形的因素很多且复杂, 注塑过程的条件和参数对制品的翘曲变形均有明显的作用^[1]。笔者从影响翘曲变形较大的模具温度、材料温度、注射时间、冷却时间、保压压力五大因素出发, 运用 CAE 软件, 改变不同的工艺参数组合, 对所选的试件在不同的水平下进行正交实验, 并对不同的结果进行极差、方差分析。然后在此基础上找到制品翘曲的均值估计, 进一步得到工艺参数的最佳组合, 以达到大幅度减少试验次数、节约成本和时间的目的。

1 参数设定与试验计划制定

1.1 参数设定

试验所用的试件是某品牌电视机遥控器面板, 前处理模型如图 1 所示。材料为(丙烯腈/丁二烯/苯乙烯)共混物(ABS), 牌号为 Cyclic GPM5500, GE Plastics (Europe) 生产; 试件总体积为 46.5037 cm^3 , 网格划分匹配率为 94.4%, 满足了 MPI 对其进行 Cool + Flow + Warp 分析的前提要求。初始模拟工艺参数如表 1 所示。经过初步模拟, 试件翘曲变形发生在两端, 最大处为 0.2470 mm, 模拟情况基本和实际生产一致, 如图 2 所示。试件翘曲量过大, 需要对注塑工艺参数作进一步修改, 以满足生产要求。

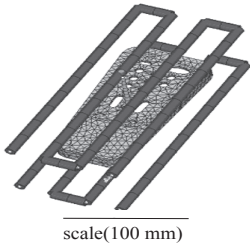


图 1 试件 CAE 前处理模型

表 1 初始模拟工艺参数表

项 目	模具温度 / ℃	材料温度 / ℃	注射时间 / s	冷却时间 / s	保压压力 / MPa
数 据	50	230	3	15	80

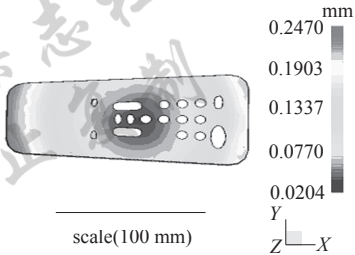


图 2 初始模拟工艺下翘曲量分析结果

1.2 试验方案制定和数据计算

以试件最大翘曲量作为评价指标, 并希望其越小越好, 称之为指标的望小特性^[2]。为了减小试件的最大翘曲量, 笔者从实际生产经验出发, 归纳了注塑工艺参数中的模具温度、材料温度、注射时间、冷却时间、保压压力五个主要因素, 分别将其简称为因子 A、B、C、D、E。并在预先考察的各因子范围内, 将因子分为 3 个水平分别称为 I、II、III。由此得到影响试件翘曲变形的因子和因子水平表, 如表 2 所示。

表 2 影响塑料件翘曲变形因子和因子水平表

水平	A 模具温度 / ℃	B 材料温度 / ℃	C 注射时间 / s	D 冷却时间 / s	E 保压压力 / MPa
I	50	230	3	15	80
II	60	240	4	20	90
III	70	250	5	25	100

在试验方案设计中也考虑了材料温度与冷却时间的交互作用, 简称为 B × D; 模具温度与冷却时间的交互作用, 简称为 A × D; 注射时间与保压压力的交互作用, 简称为 C × E。由考虑的因子及因子水平可知, 在 Taguchi 正交实验设计表中, 正交表 $L_{27}(3^{13})$

能较好地符合本次试验的安排。其中 27 表示试验的次数为 27, 指数 13 表示在这张表格中, 最多能安排 13 个因子。对照本试验, 包含交互作用在内共有 11 个因子, 余下的两个恰好安排试验误差, 用以考证试验误差对结果所产生的影响。由此得到正交实验计算表^[3], 如表 3 所示。

表 3 L₂₇(3¹³) 正交实验计算表

项目	A	B	B × D		C	A × D		D	E	C × E		e		翘曲量 y/mm
1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	0.2471
2	I	I	I	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	0.1803
3	I	I	I	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III	0.1307
4	I	II	II	II	I	I	I	II	II	II	III	III	III	0.2401
5	I	II	II	II	II	II	II	III	III	III	I	I	I	0.1434
6	I	II	II	II	III	III	III	I	I	I	II	II	II	0.2212
7	I	III	III	III	I	I	I	III	III	III	II	II	II	0.1769
8	I	III	III	III	II	II	II	I	I	I	III	III	III	0.2301
9	I	III	III	III	III	III	III	II	II	II	I	I	I	0.1961
10	II	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	0.2252
11	II	I	II	III	II	III	I	II	III	I	II	III	I	0.1718
12	II	I	II	III	III	I	II	III	I	II	III	I	II	0.2493
13	II	II	III	I	I	II	III	II	III	I	III	I	II	0.1967
14	II	II	III	I	II	III	I	III	I	II	I	II	III	0.2584
15	II	II	III	I	III	I	II	I	III	III	II	III	I	0.2241
16	II	III	I	II	I	II	III	III	I	II	II	III	I	0.2654
17	II	III	I	II	II	III	I	II	II	III	III	I	II	0.2370
18	II	III	I	II	III	I	II	II	III	I	I	II	III	0.2034
19	III	I	III	II	I	III	II	I	II	II	I	III	II	0.2147
20	III	I	III	II	II	I	III	II	I	III	II	I	III	0.2896
21	III	I	III	II	III	II	I	III	II	I	III	II	I	0.2483
22	III	II	I	III	I	III	II	II	II	III	III	II	I	0.2637
23	III	II	I	III	II	I	III	III	III	I	I	III	II	0.2305
24	III	II	I	III	III	II	I	I	I	II	II	I	III	0.2908
25	III	III	II	I	I	III	II	III	I	I	II	I	III	0.2959
26	III	III	II	I	II	I	III	I	II	II	III	II	I	0.2764
27	III	III	II	I	III	II	I	II	III	III	I	III	II	0.2565
$\bar{T}_I$	0.1962	0.2174	0.2277	0.2296	0.2362	0.2375	0.2363	0.2407	0.2609	0.2272	0.2195	0.2384	0.2263	$\bar{y} = 0.2283$
$\bar{T}_{II}$	0.2257	0.2299	0.2311	0.2292	0.2242	0.2263	0.2228	0.2220	0.2324	0.2413	0.2351	0.2282	0.2181	
$\bar{T}_{III}$	0.2629	0.2375	0.2261	0.2260	0.2245	0.2211	0.2258	0.2221	0.1916	0.2164	0.2303	0.2182	0.2405	
R	0.6606	0.1808	0.0005	0.0036	0.1082	0.0164	0.0105	0.0186	0.6231	0.0249	0.0156	0.0202	0.0224	

注: $\bar{T}_I$ 、 $\bar{T}_{II}$ 、 $\bar{T}_{III}$ 分别表示每列因子在三个水平下的翘曲量平均值; R 表示极差, 即均值中最大值与最小值之差; e 表示由误差引起的波动。

2 基于 CAE 与数理统计的试验数据分析

2.1 试验数据的极差分析

利用表 3 中的数据进行了同一因子下的极差计算, 结合极差大小作出各因子在不同水平下所得结果的因子反应图, 如图 3 所示。

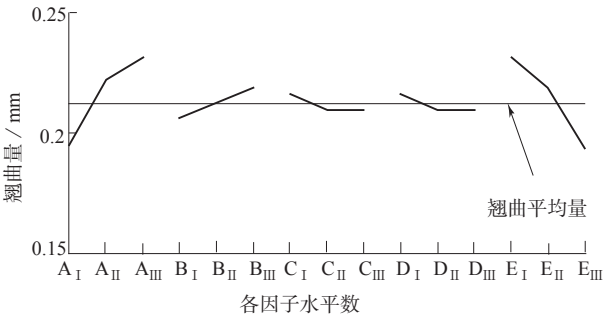


图 3 因子反应图

极差 R 的大小(即因子反应图倾斜度的变化大小)能够相对清晰地反映该因子对试验结果的影响趋势, 于是结合起初设定的翘曲量望小特性, 只需取反应图最小值点便能得到最佳工艺组合为: A_I B_I C_{III} D_{II} E_{III}。另外由于交互作用和误差的极差都非常小, 因此在因子反应图中不予标出, 即忽略两者对试验结果的影响。

2.2 试验数据的方差分析

对试验数据进行直观的极差分析, 其优点是较简单明确。但直观的极差分析并不能估计试验过程及试验结果测定中必然存在的误差大小, 也就不能区分各因子水平所对应的试验结果间的差异究竟是由因子水平还是试验误差而引起的, 因此分析结果的精度较差。且在新的工艺组合下得不出相对准确

的翘曲量估计值。为了弥补这个缺点,试验数据的处理进一步采用了方差分析方法。前提是假设数据满足等方差正态分布,相应的方差计算表如表4所示。

表4 方差计算表

项目	A	B	B ×D		C	A ×D		D	E	C ×E		e	
I _j	1.7659	1.9570	2.0489	2.0662	2.1257	2.1374	2.1270	2.1666	2.3478	2.0450	1.9754	2.1459	2.0363
II _j	2.3665	2.1378	2.0349	2.0344	2.0205	2.0368	2.0318	1.9988	1.7247	1.9472	2.1160	1.9640	1.9632
III _j	2.0313	2.0689	2.0799	2.0631	2.0175	1.9895	2.0049	1.9983	2.0912	2.1715	2.0723	2.0538	2.1642
I ² _j	3.1184	3.8298	4.1980	4.2692	4.5186	4.5685	4.5241	4.6942	5.5122	4.1820	3.9022	4.6049	4.1465
II ² _j	4.1262	4.2803	4.3260	4.1388	4.0824	3.9581	4.1282	3.9952	2.9746	3.7916	4.2944	3.8573	4.6838
III ² _j	5.6003	4.5702	4.1408	4.2564	4.0703	4.1486	4.0196	3.9932	4.3731	4.7154	4.4775	4.2181	3.8542
Σ/9	1.4272	1.4089	1.4072	1.4071	1.4079	1.4083	1.4080	1.4092	1.4289	1.4099	1.4082	1.4089	1.4094
S _j	0.0201	0.0019	0.0001	0.0001	0.0008	0.0012	0.0009	0.0021	0.0218	0.0028	0.0011	0.0018	0.0023
f	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

注: $\Sigma = I_j^2 + II_j^2 + III_j^2$, I_j 、 II_j 、 III_j 分别代表第 j 列中 “I”、“II”、“III” 水平对应的试验结果之和; $S_j = \Sigma/9 - CT$, S_j 表示第 j 列因子3 个水平所引起的试验结果的差异即偏差平方和(包含试验误差), $CT = (\sum_{i=1}^{27} y_i^2)/27$; f : 各因子偏差平方和的自由度) = 因子水平数 - 1, 交互作用及误差作用的自由度为所在两列自由度之和。

由表4 得出以上数据以后,考虑某因子水平的改变所引起的平均偏差平方和与误差的平均偏差平方和的比值 $F = \frac{S_j/f_j}{S_e/f_e}$ 。并将所求到的值与在预先设定的置信度 α 下查得的 F 分布中 $F_{1-\alpha}$ (分子自由度,分母自由度)比较,如果满足 $F > F_{1-\alpha}$,就有大概 $(1 - \alpha)$ 的几率证明该因子 j 对指标有显著影响,因此所得的方差分析表如表5 所示。

表5 方差分析表

因子	S_j	自由度	F
A	0.0201	2	9.8196
B	0.0019	2	0.9026
C	0.0008	2	0.4116
D	0.0021	2	1.0205
E	0.0218	2	10.6309
B ×D	0.0002	4	0.0976
A ×D	0.0021	4	0.5122
C ×E	0.0039	4	0.9512
e	0.0041	4	
总计		26	

根据方差分析表5,并结合 F 分布的分位表可得表中 $S_j < 0.05$, 即该方差分析可在显著性水平0.05下进行。并且计算得到 $F_A(2,4) = 9.8196 > F_{0.95}(2,4) = 6.94$; $F_E(2,4) = 10.6309 > F_{0.95}(2,4) = 6.94$ 。于是在显著性水平下,只有因子A 和E 是高度显著的,交互作用和B、C、D 3 个因子作用不显著,其中A 是稳健因素、E 是调整因素,当最优水平的影响值没有达到目标值时,可以通过因素E 进行调整。于是由方差分析可得注塑工艺最佳组合是 $A_1 BCDE_{III}$ 下的任何组合。但与极差分析下得到的组合综合考虑,可初选最佳工艺组合为 $A_1 B_1 C_{III} D_{II} E_{III}$,然后再对其准确性进行验证。

2.3 $A_1 BCDE_{III}$ 工艺组合下翘曲量指标均值估计及试验验证

$A_1 BCDE_{III}$ 工艺组合下翘曲量均值估计为:

$$\mu_{1,3} = \bar{\mu} + \bar{\alpha}_1 + \bar{e}_3 = 0.1378$$

$\mu_{1,3}$ 的95% 的置信区间是:

$$\mu_{1,3} \pm t_{1-\alpha/2}(f'_e) \cdot \hat{\sigma} / \sqrt{n_e}$$

其中: $\hat{\sigma} = \sqrt{S'_e/f'_e}$, $S'_e = S_e + S_B + S_C + S_D$, $f'_e = f_e + f_B + f_C + f_D$ ^[5]。经计算翘曲量的置信区间为(0.1111,0.1663)。

为了考察初选的最佳注塑工艺组合下的翘曲量能否在 $A_1 BCDE_{III}$ 置信区间内取得优化特性,特将试件在工艺组合 $A_1 B_1 C_{III} D_{II} E_{III}$ 下做一组MPI 的仿真试验,结果如图4 所示。在该方案下的试件最大翘曲仍然发生在两端,翘曲量也是所有工艺参数组合中最小的,为0.1143 mm,同时该值刚好在 $A_1 BCDE_{III}$ 的置信区间内,无需再进行均值校正,该工艺组合可以采用。

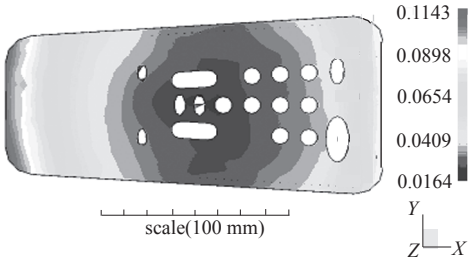


图4 优化后试件翘曲示意图

3 结论

(1) 利用科学的正交实验设计和数理统计相关知识研究了多个注塑工艺参数对注塑制品翘曲量的影响,并获得了最佳工艺参数。最后给出注塑工艺组合下的翘曲量置信区间,并通过试验验证了最佳

工艺组合的正确性, 弥补了目前只对某个参数进行研究的不足, 为模具设计和注塑工艺设计提供了科学的依据。

(2) 从本次研究中可以得出熔体温度和保压压力对塑料制品翘曲的影响非常显著, 可以通过降低熔体温度、提高保压压力的方法有效减小塑料制品的翘曲。

参考文献

[1] 申长雨. 橡塑模具优化设计技术[M]. 北京: 化学工业出版社,

1995: 136 - 138.

- [2] Ghani J A, Choudhury I A, Hassan H H. Application of taguchi method in the optimization of end milling parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(1): 84 - 92.
- [3] Subramanian N R, Tingu L, Seng Y A. Optimizing warpage analysis for an optical housing[J]. Mechatronics, 2005(2): 111 - 127.
- [4] Wu Yulin, Wu Alan. Taguchi methods for robust design[M]. New York: The American Society of Mechanical Engineers Press, 2000.
- [5] 茆诗松, 周纪芄, 陈颖. 试验设计 DOE[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004: 141 - 175.

THE OPTIMIZATION OF INJECTION PROCESS AND THE ESTIMATION OF AVERAGE VALUE BASED ON THE WARP

Ji Zhengwei, Zhang Yihua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Xu Cheng

(Nanjing Triumph Cement Technology Engineering Co. Ltd., Nanjing 210036, China)

ABSTRACT By using the software MPI, the CAE simulation on the plastic products with the injection molding process parameters which had been set beforehand was done. The Taguchi $L_{27}(3^3)$ experiment table was served as the guidance of experiment plan, and the highest warp value of plastic products was recorded as the data process object. Finally, through analyzing the warp value with statistic method, the best injection process combination and the biggest warp confidence interval were obtained, that provided calculating basis for further mould design.

KEYWORDS CAE, orthogonal experiment, injection molding, best process combination

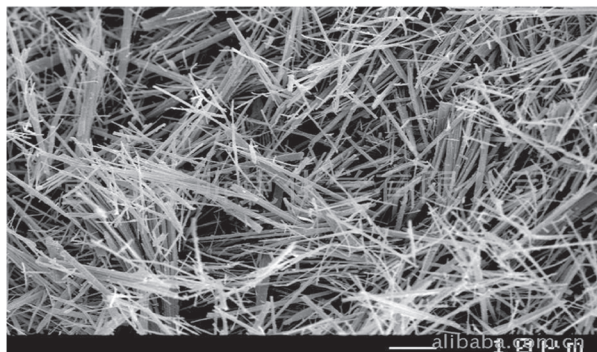


www.wskchem.com

晶须新材料：国际品质、轻质、高强、环保的镁盐晶须（短纤维）

我们提供具有国际品质的聚烯烃类塑料改性填充新材料——碱式硫酸镁晶须。适合PP增强、增刚、稳定尺寸、提高热稳定性。满足汽车专用的仪表板、内饰件等轻质、高强、降低壁厚、光洁美观的需求。满足PP制品形状复杂、尺寸小、壁厚薄需要增强要求。

放大1000倍的电镜照片



典型应用在汽车仪表板上的图片



营口威斯克化学有限公司

电话: 0417-2255013、3803038

联系人: 孙贵楠

地址: 中国营口市六三路韩家学坊

邮编: 115001

传真: 0417-3801048