

基于 Taguchi 方法的塑件工艺参数优化

撰文 / 合肥工业大学 武宏发 秦晓雄 杨林 杜承信

注塑制品的使用性能和外观质量主要取决于注塑模具的质量和注塑成型过程。为了得到最优的工艺产品，工程技术人员往往需要多次修模改模、反复调整工艺参数或更换材料，传统的试错法应用范围窄且成本高、效率低。通过采用 Taguchi 试验和数值模拟相结合的方法，对注塑成型过程进行模拟分析，得到熔体温度、模具温度、注射时间、保压压力和保压时间对翘曲量和体积收缩率的影响，其中保压压力和时间对翘曲量和体积收缩率的影响程度较大，由此得到一组最优工艺，减少了调整工艺参数的时间，提高了注塑件设计效率。

一、引言

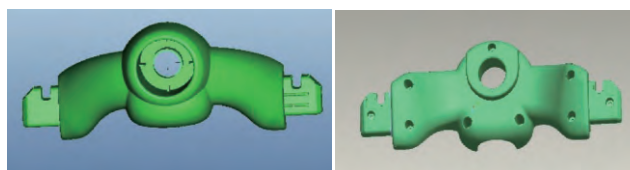
随着制造技术向智能化的方向发展，利用 CAE 软件并结合有关算法对工艺参数进行模拟优化在工艺设计中起着日渐重要的作用，CAE 技术可以提前预测缺陷，优化设计和方案，大大提高了设计效率，节约了成本。

Taguchi 方法又称为田口方法、正交法，最初是日本学者田口玄一提出的信噪比实验设计，随后结合质量损失函数、三次设计理念逐渐发展为 Taguchi 实验法。Taguchi 实验设计主要包括两部分内容：①选定实验因素及因素水平范围②通过信噪比 S/N (Signal-to-Noise Ratio) 对实验结果优化分析，从中选出最佳工艺参数组合。Taguchi 方法具有均衡搭配性和整齐可比性，通过调用标准正交矩阵，使实验可以通过最少的试验次数而获得与全面试验相同的效果。

二、注塑件分析

塑件充填型腔和取件冷却过程的尺寸变化以翘曲量和体积收缩率来衡量。图 1 为一玩具汽车转向器装配件，材料为聚丙烯，牌号 HG168，密度 $0.91\text{g}/\text{cm}^3$ 。此塑件属于中

型薄壁件，主体壁厚 2mm，上壳尺寸为 $260 \times 90 \times 55\text{mm}$ ，下壳尺寸为 $260 \times 90 \times 35\text{mm}$ 。无镶件，无侧向抽芯机构，结构复杂，腔体较深，有大量的曲面过渡，因此塑件容易产生翘曲变形和离壳错位。



(a) 装配体上壳

(b) 装配体下壳

图 1 玩具汽车转向器塑料件装配体结构示意图

三、Taguchi 实验设计与结果分析

本文选取翘曲量和体积收缩率为玩具汽车转向器优化目标，选取模具温度 (A)、熔体温度 (B)、注射时间 (C)、保压压力 (D)、保压时间 (E) 为主要的实验因素，取 6 个水平参数为研究对象，进行工艺参数的优化。因素水平表如表 1 所示。

正交试验表选择 L36 (65) 型实验表，其中 $n=36$ ， $s=6$ ， $r=5$ ($i=1, 2, 3 \dots 36$)。试验中选取最小特性信噪比函数，

表 1 因素水平表

水平	A/°C	B/°C	C/S	D/MPa	E/S
1	30	200	1.0	55	5
2	33	208	1.5	61	8
3	36	216	2.0	67	11
4	39	224	2.5	73	14
5	42	232	3.0	79	17
6	45	240	3.5	85	20

翘曲与收缩率越小越优。因此，当 Z 向翘曲 Y 与体积收缩率 R 越小时，得到的信噪比 S/N 越大，因此分析中取 S/N 越大越好。以单一因素包含的所有信噪比值来反映不同因素对实验目标的影响情况，翘曲量和体积收缩率均值分析结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 翘曲均值分析

项目	A/°C	B/°C	C/S	D/MPa	E/S
m1	4.2741	4.484	1.9907	1.7737	4.3526
m2	3.0791	4.7592	3.7589	1.2761	1.6836
m3	4.3429	3.5483	4.5364	3.0972	6.4059
m4	2.3833	2.5477	5.452	5.4745	6.3241
m5	3.8209	4.5099	3.9566	6.7812	6.5674
m6	5.5101	3.5614	3.7159	5.0078	6.7821
m			3.9017		

表 3 体积收缩率均值分析

项目	A/°C	B/°C	C/S	D/MPa	E/S
m1	-24.843	-24.289	-23.111	-24.22	-24.862
m2	-24.401	-24.531	-24.556	-24.465	-24.899
m3	-24.205	-23.968	-24.939	-24.402	-24.466
m4	-24.86	-24.536	-24.891	-24.976	-24.835
m5	-23.598	-24.516	-24.715	-24.88	-24.025
m6	-24.875	-24.944	-24.571	-23.841	-24.025
m			-24.4638		

将表 2、表 3 中的数据转化为如图 2、3 所示，更直观的反映各工艺参数对体积收缩率的影响规律。

由图 2 可知，翘曲变形信噪比最大时的工艺参数组合为：A6B2C4D5E6，即模具温度 45℃、熔体温度 208℃、注射时间 2.5s、保压压力 79MPa、保压时间 5 到 8 秒；图 3 中体积收缩率信噪比最大时的工艺参数组合为：A5B3C1D6E6，即模具温度 42℃、熔体温度 216℃、注射时间 1.0s、保压压力 85MPa 且保压时间 5 到 8 秒。提高模具温度，可以有

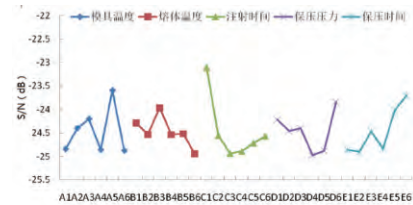


图 2 工艺参数对翘曲的影响规律

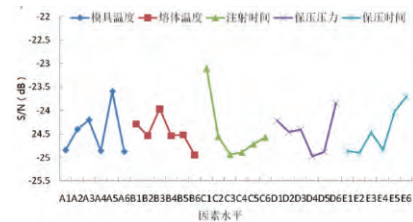


图 3 工艺参数对体积收缩率的影响规律

效的降低模具出模前后温差，冷却后易均匀收缩，促使翘曲量达到最低；熔体温度对塑料母料本身影响较大；当单位注射量确定以后，注射速度过快，易出现翘曲、气纹、蛇纹和飞边等缺陷；保压压力对塑件的影响主要体现在型腔压力保持阶段，适当提高保压压力，可以有效的降低翘曲量和体积收缩率，提高塑件性能和表面质量，但太高会导致塑件内应力和残余应力过大，变形增大；塑件在保压阶段时，初期时，随着保压时间逐渐增加，塑件致密度迅速增加直到浇口凝固时结束。当保压时间足够长时，则可降低塑件体积收缩率，间接的降低翘曲量。但在实际生产中，太长的保压时间会导致产品生产周期增长，生产效率降低，故参考实际情况，保压时间取 5 到 8 秒。对于体积收缩率，模具温度在 A5 时较为适合，熔体温度在 B3 时已达到最优，若适当降低注射时间并增加保压压力，还将进一步降低体积收缩率。

分别对翘曲量和体积收缩率所选最优工艺参数组合在 MoldFlow 软件中进行模拟实验，其模拟结果如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出 Z 方向的翘曲为 0.4265mm，体积收缩率为 10.18%，接近正交试验最小值。

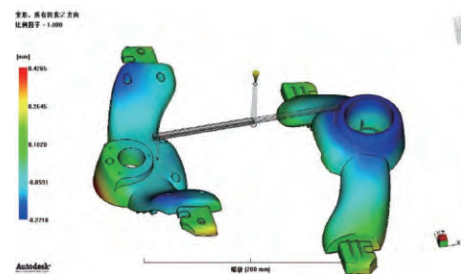


图 4 优化后的翘曲模拟结果

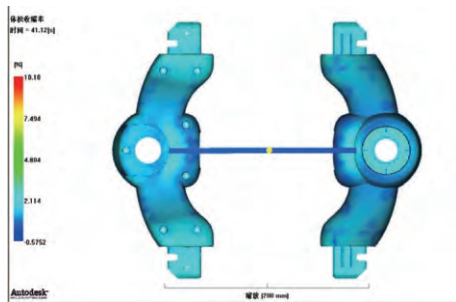


图5 优化后的体积收缩率模拟结果

分别对翘曲和体积收缩率影响度进行方差分析,分析结果如表4和表5所示。由表4可知,D(保压压力)和E(保压时间)对翘曲的影响最大,其中保压压力对翘曲的影响远大于其他因素。因此,适当加大保压压力是改善翘曲的重要方法。由表5可知,C(注射时间)、D(保压压力)、E(保压时间)对体积收缩率的影响最大,其中保压压力和保压时间对体积收缩率的影响远大于其他因素。因此,适当调节保压压力和保压时间是减小体积收缩率的重要方式。

表4 翘曲影响度方差分析

方差来源	差变平方和	自由度	F 值	影响度	显著性
A	29.5202	5	1.9082	4.031	*
C	32.5807	5	2.106	4.449	*
D	120.2904	5	7.7757	16.426	****
E	502.9758	5	32.513	68.684	****
误差 e+B	46.9412	15	1	6.410	
总和	722.3083	35		100	

表5 体积收缩率影响度方差分析

方差来源	差变平方和	自由度	F 值	影响度	显著性
A	8.456	5	1.77	7.16	*
C	11.604	5	2.432	9.83	**
D	39.746	5	8.3307	33.67	****
E	43.897	5	9.2008	37.19	****
误差 e+B	14.314	15	1	12.12	
总和	118.017	35		100	

注: $F_{0.25}(5, 15) = 1.49$; $F_{0.1}(5, 15) = 2.27$; $F_{0.05}(5, 15) = 2.9$; $F_{0.01}(5, 15) = 4.56$; 其中F值在 $F_{0.25}(5, 15)$ — $F_{0.1}(5, 15)$ 用“*” ; $F_{0.1}(5, 15)$ — $F_{0.05}(5, 15)$ 用“**” ; $F_{0.05}(5, 15)$ — $F_{0.01}(5, 15)$ 用“***” ; 大于 $F_{0.01}(5, 15)$ 用“****”。

根据数据分析得到的最佳工艺参数组合在工厂注塑机中进行了实际验证,从图6中可以明显看出曲面过渡阶段的翘曲变形和离壳错位缺陷消失,说明优化模拟后的最佳工艺

参数组合是真实的。

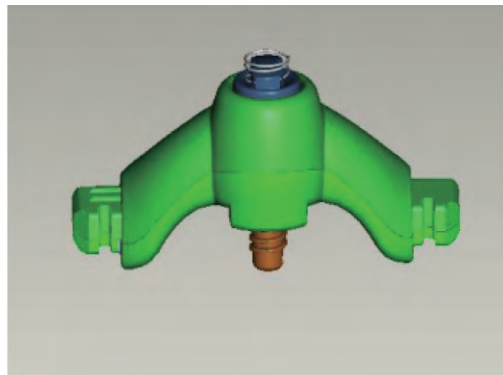


图6 优化后的转向器塑件

四、结语

通过 Taguchi 试验法对不同工艺参数进行正交实验设计,得到了单一目标的最佳工艺参数组合。翘曲量最大时的工艺参数组合为模具温度 42℃、熔体温度 216℃、注射时间 1.0s、保压压力 85MPa 且保压时间 20s,模拟验证 Z 方向的翘曲为 0.42mm;体积收缩率最大时的工艺参数组合为模具温度 42℃、熔体温度 216℃、注射时间 1.0s、保压压力 85MPa 且保压时间 20s,模拟验证体积收缩率为 10.18%。翘曲量和体积收缩率的模拟值均接近正交试验所有数据的最小值。保压压力和保压时间对翘曲量和体积收缩率的影响程度远远大于其他三个因素。因此,适当加大保压压力是改善翘曲的重要方法。