

# 注塑工艺参数优化的数值模拟分析

张晓彬, 刘斌

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 采用数值模拟和正交试验相结合的方法,对注塑成型过程进行模拟分析,得到工艺参数对制品翘曲值的影响次序和最佳工艺参数组合.结果表明:各工艺参数对翘曲值的影响依次为保压压力、熔体温度、模具温度、注射时间、保压时间、冷却时间,且保压压力和熔体温度对制品翘曲值的影响较为明显;最佳工艺参数组合是模具温度为 75 ℃、熔体温度为 260 ℃、注射时间为 1.3 s、保压时间为 10 s、保压压力为 48 MPa 和冷却时间为 2 s.将得到的最佳工艺参数组合输入 Moldflow 中进行模拟,得到的翘曲值为 0.089 3.该翘曲值比正交试验中任何一组翘曲值都小,验证了通过极差分析得到的最佳工艺参数组合的有效性.

**关键词:** 注塑;成型过程;翘曲值;数值模拟;正交试验;神经网络

**中图分类号:** TQ 320.662

**文献标志码:** A

翘曲变形是指塑料制品的形状偏离模具型腔的变形,是注塑制品常见的缺陷之一,主要是由塑料制品的不均匀收缩引起的.当制品结构、制品材料和模具结构确定后,确定合理的工艺参数对于减小塑料制品的翘曲变形显得尤为重要.在注塑成型过程中,虽然制品的翘曲不可能完全消除,但是通过数值模拟和正交试验相结合的方法获得最佳工艺参数组合,能够有效地减小塑料制品的翘曲值<sup>[1]</sup>.因此,研究注塑成型工艺参数对塑料制品翘曲值的影响规律,具有重要的现实意义.曾盛渠等<sup>[2]</sup>用单因素方差分析法确定工艺参数对翘曲变形的影响程度,并以置信区间图表示各工艺参数对翘曲的影响规律;周婷等<sup>[1]</sup>在 CAE 模拟的基础上,利用 BP 人工神经网络建立了工艺参数和制品翘曲值之间的数学模型,从而达到预报的目的;周凤佳<sup>[3]</sup>以最大翘曲变形量作为优化目标,用基于移动最小二乘法的响应面模型建立了从注塑工艺参数到翘曲变形的非线性映射关系.本文通过数值模拟和正交试验法相结合的方法,研究各工艺参数对塑料制品翘曲值的影响.

## 1 模型建立与实验安排

### 1.1 实验制品模型

用 Pro/Engineer 软件建立塑料制品的三维模型,尺寸为 30 mm×20 mm×5 mm,壁厚  $t$  为 1 mm,圆角半径  $r$  为 2 mm,具体形状如图 1 所示.

### 1.2 有限元模型

模具采用一模四腔,浇口为矩形侧浇口.通过 Moldflow Design Link 将 .prt 文件导入并对模型进行网格划分,网格长度采用 Moldflow 软件默认的长度,得到三角形数为 23 750 个,节点数为 11 883 个,最大纵横比为 3.6,平均纵横比为 1.54,网格匹配百分比为 94.6%,符合后续分析要求.浇注系统尺寸与有限元模型,如图 2 和图 3 所示.

模具结构的主要尺寸<sup>[4]</sup>:主流道始端直径  $D_1=3$  mm,锥角  $\varphi=2^\circ$ ,高度  $h=80$  mm;分流道  $D_2=5$  mm;浇口长度  $L=1$  mm,宽度  $W=1$  mm,高度  $H=0.8$  mm;冷却管道直径  $D_3=6$  mm,长度  $l=80$  mm,与制品上、下表面距离分别为 15,12 mm.



图 1 塑料制品三维图  
Fig. 1 Three-dimension graph of plastic products

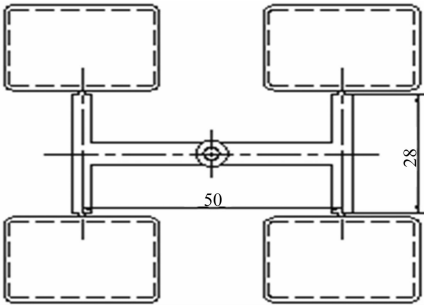


图2 浇注系统(单位:mm)  
Fig.2 Gating system (unit: mm)

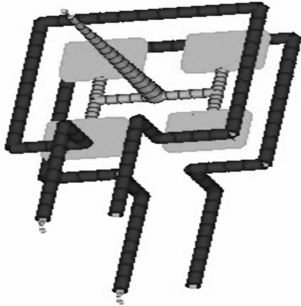


图3 制品有限元模型  
Fig.3 Finite element model

1.3 正交试验安排

实验制品所用材料为美国英力士(INEOS)ABS 公司的 Lustran ABS 1146. 根据相关手册和初步模拟结果确定合理的工艺参数范围, 具体的实验因素安排如表 1 所示. 表 1 中: $\theta_d$  为模具温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $\theta_m$  为熔体温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $t_i$  为注射时间(s); $t_d$  为保压时间(s); $p$  为保压压力(MPa); $t_c$  为冷却时间(s).

根据上述实验因素水平安排表, 采用  $L^{25}(5^6)$  正交试验表, 具体的实验数据安排如表 2 所示. 将正交试验表的 25 组不同工艺参数组合输入到 Moldflow 中进行模拟. 采用填充+保压+翘曲序列进行模拟分析, 可以得到制品翘曲值  $Z$ , 如表 2 所示.

表 1 因素水平安排表  
Tab.1 Arrangement of factor level

水平	因素					
	A ( $\theta_d/^{\circ}\text{C}$ )	B ( $\theta_m/^{\circ}\text{C}$ )	C ( $t_i/\text{s}$ )	D ( $t_d/\text{s}$ )	E ( $p/\text{MPa}$ )	F ( $t_c/\text{s}$ )
1	55	240	0.9	8	32	2
2	60	245	1.0	10	36	3
3	65	250	1.1	12	40	4
4	70	255	1.2	14	44	5
5	75	260	1.3	16	48	6

表 2 正交试验结果  
Tab.2 Result of orthogonal test

试验组	因素						Z/mm
	A ( $\theta_d/^{\circ}\text{C}$ )	B ( $\theta_m/^{\circ}\text{C}$ )	C ( $t_i/\text{s}$ )	D ( $t_d/\text{s}$ )	E ( $p/\text{MPa}$ )	F ( $t_c/\text{s}$ )	
1	55	240	0.9	8	32	2	0.139 1
2	55	245	1.0	10	36	3	0.125 4
3	55	250	1.1	12	40	4	0.112 6
4	55	255	1.2	14	44	5	0.100 8
5	55	260	1.3	16	48	6	0.093 2
6	60	240	1.0	12	44	6	0.110 7
7	60	245	1.1	14	48	2	0.101 5
8	60	250	1.2	16	32	3	0.129 4
9	60	255	1.3	8	36	4	0.115 1
10	60	260	0.9	10	40	5	0.105 4
11	65	240	1.1	16	36	5	0.125 3
12	65	245	1.2	8	40	6	0.113 3
13	65	260	1.3	10	44	2	0.096 3
14	65	255	0.9	12	48	3	0.094 5
15	65	260	1.0	14	32	4	0.120 4
16	70	240	1.2	10	48	4	0.101 8
17	70	245	1.3	12	32	5	0.130 7
18	70	250	0.9	14	36	6	0.117 0
19	70	255	1.0	16	40	2	0.105 2
20	70	260	1.1	8	44	3	0.096 2

续表

Continue table

试验组	因素						Z/mm
	A ( $\theta_d/^{\circ}\text{C}$ )	B ( $\theta_m/^{\circ}\text{C}$ )	C ( $t_i/\text{s}$ )	D ( $t_d/\text{s}$ )	E ( $p/\text{MPa}$ )	F ( $t_c/\text{s}$ )	
21	75	240	1.3	14	40	3	0.114 3
22	75	245	0.9	16	44	4	0.104 4
23	75	250	1.0	8	48	5	0.095 3
24	75	255	1.1	10	32	6	0.120 0
25	75	260	1.2	12	36	2	0.108 0

2 实验数据分析

2.1 极差分析<sup>[5]</sup>

对表 2 的数据进行极差(R)分析,结果如表 3 所示.表 3 中: $K_i$  为某个因子在第  $i$  水平的平均值.

表 3 极差分析表

Tab.3 Table of range analysis

指标	因素					
	A ( $\theta_d/^{\circ}\text{C}$ )	B ( $\theta_m/^{\circ}\text{C}$ )	C ( $t_i/\text{s}$ )	D ( $t_d/\text{s}$ )	E ( $p/\text{MPa}$ )	F ( $t_c/\text{s}$ )
$K_1$	0.114 2	0.118 2	0.112 1	0.111 8	0.127 9	0.110 0
$K_2$	0.112 4	0.115 1	0.111 4	0.109 8	0.118 2	0.112 0
$K_3$	0.110 0	0.110 1	0.111 1	0.111 3	0.110 2	0.110 9
$K_4$	0.110 2	0.107 1	0.110 7	0.110 8	0.101 7	0.111 5
$K_5$	0.108 4	0.104 6	0.110 8	0.111 5	0.097 3	0.110 8
R	0.005 8	0.013 6	0.002 2	0.002 0	0.030 7	0.001 9

由上述的分析计算结果可以得到以下 2 个结论.

- 1) 各工艺参数对翘曲值的影响次序:保压压力>熔体温度>模具温度>注射时间>保压时间>冷却时间.此外,保压压力和熔体温度对制品翘曲值的影响较为明显,而其他工艺参数的影响效果较小.
- 2) 最佳的工艺参数组合为 A5B5C5D2E5F1,即模具温度为 75 ℃,熔体温度为 260 ℃,注射时间为 1.3 s,保压时间为 10 s,保压压力为 48 MPa,冷却时间为 2 s.

为了验证预测结果的准确性,将最佳的工艺参数组合输入 Moldflow 中进行模拟,得到的翘曲值为 0.089 3.该翘曲值比正交试验中任何一组翘曲值都小,验证了通过极差分析得到的最佳工艺参数组合的有效性.

2.2 变量分析<sup>[6-7]</sup>

为了分析各个工艺参数对制品翘曲值的影响,采用 AVONA 技术,通过变量分析,确定各工艺参数对制品翘曲值的影响程度,从而提高工艺优化的效率.工艺参数对翘曲值的影响程度可以通过影响因子表征,其值越大,表明该工艺变量对塑料制品翘曲值的影响越显著.翘曲值的总偏差平方和( $S_T$ )定义为

$$S_T = \sum_{i=1}^N Z_i^2 - \frac{1}{N}(\sum_{i=1}^N Z_i)^2.$$

(1)

各工艺参数的偏差平方和( $S_i$ )定义为

$$S_i = \frac{1}{v} \sum_{j=1}^u (Z_{i,j})^2 - \frac{1}{N}(\sum_{j=1}^N Z_i)^2.$$

(2)

自由度( $f$ )定义为

$$f = u - 1.$$

(3)

则各工艺参数的方差( $V_i$ )定义为

$$V_i = S_i/f.$$

(4)

式(1)~(4)中: $N$  为总的试验次数,文中  $N$  取值 25; $u$  为工艺变量的水平数,文中  $u$  取值为 5; $v$  为各水平试验的重复次数,文中  $v$  取值为 5; $Z_{i,j}$  为工艺变量  $i$  水平下第  $j$  次实验的翘曲值.

工艺变量对塑料制品翘曲值的影响因子等于各工艺变量方差与各工艺变量方差和的比值,即有

$$F_i = V_i / S_T.$$

(5)

由于实验数据较小,所以将翘曲值均扩大 100 倍,以便于计算. 根据方差分析的计算原理,最终的计算结果将不会改变,其数据如表 4 所示. 由表 4 可知:保压压力、熔体温度和模具温度的贡献率总和超过 99%. 可见,在推荐的工艺参数范围内,这 3 个工艺参数对翘曲值的影响程度较大.

2.3 单因素实验<sup>[8]</sup>

由极差分析和变量分析的结果可知,对制品翘曲值影响较大的两个工艺参数分别是保压压力和熔体温度. 在最佳工艺参数组合的基础上,通过只改变其中某一个工艺参数的方法进行模拟分析,并研究这两个工艺参数对制品翘曲值的影响规律.

2.3.1 保压压力的单因素影响规律 在分析模拟过程中只改变保压压力这一工艺参数,其他参数按照最佳工艺参数组合来设定. 保压压力对制品翘曲值的影响趋势,如图 5 所示. 图 5 中:保压压力的变化范围与表 1 中的安排一致.

由图 5 可以看出:翘曲值随着保压压力的增大而变小. 究其原因主要是当保压压力较低时,制品的收缩率较大,增大了制品内外表面收缩率的差值,导致了制品翘曲值的增大. 另外,随着注塑过程中的保压压力增大,熔体在冷却收缩过程中,越来越多的物料可以进入模具型腔进行补缩,制品组织更为致密,从而抑制了翘曲变形的发生趋势.

2.3.2 熔体温度的单因素影响规律 在分析模拟过程中只改变熔体温度这一工艺参数,其他参数按照最佳工艺参数组合来设定,熔体温度对制品翘曲值的影响趋势,如图 6 所示. 图 6 中:熔体温度的变化范围与表 1 中的安排一致.

由图 6 可以看出:翘曲值随着熔体温度的增大而变小. 究其原因主要是在注塑过程中,随着熔体温度的升高,熔体的黏度下降,流动性增加,有利于熔体填充模具型腔. 另外,熔体相对于模具温度的温差变大,熔体固化的时间变长,有利于大分子的取向,减小制品的收缩率,从而减小了翘曲变形的发生.

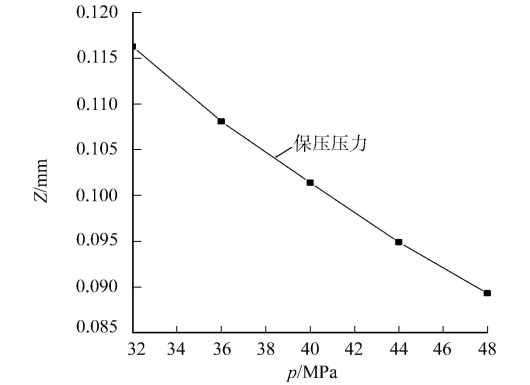


图 5 保压压力对翘曲值的影响趋势

Fig. 5 Influence trend of packing pressure on warpage

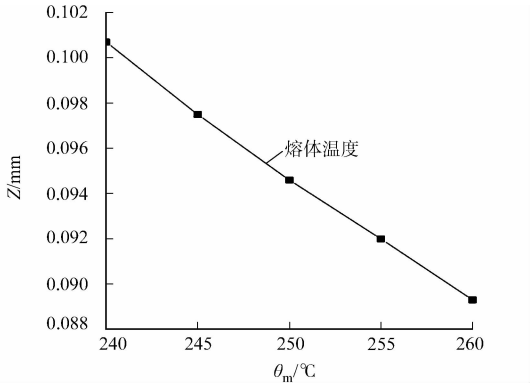


图 6 熔体对翘曲值的影响趋势

Fig. 6 Influence trend of melt temperature on warpage

3 BP 神经网络的建立<sup>[9-10]</sup>

为了研究 6 个工艺参数与翘曲变形之间的关系,建立一个 6-x-1 的神经网络模型. 将 6 个工艺参数作为输入,制品翘曲值作为输出,即网络的输入节点数为 6,输出节点数为 1.

3.1 隐藏层单元数目的确定

根据 Kolmogorov 定理来确定隐藏层的神经元数目,即有

$$l = \sqrt{m + n} + a.$$

(6)

式(6)中: $l$  为隐藏层的神经元数目; $m$  为输入层的神经元数目; $n$  为输出层的神经元数目; $a$  为 1~10 的常数. 由式(3)可知, $l$  的范围在 3~14 之间. 通过反复的试算和比较,确定神经网络的隐藏层单元数目  $x=11$ ,即神经网络模型的结构为 6-11-1,其拓扑结构如图 7 所示.

3.2 传递函数的选择

网络隐藏层和输出层的神经元传递函数分别采用 S 型正切函数和 S 型对数函数,它们在 Matlab 中的形式为

$$\tan c = \frac{2}{1 + \exp(-2c)} - 1,$$

(7)

$$\log d = \frac{2}{1 + \exp(-d)} - 1.$$

(8)

3.3 实验数据的归一化处理

为了避免由于参数不均引起的输出失真和加快网络的收敛速度,需要对输入参数进行归一化处理. 具体的归一化式为

$$x'_i = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} + 0.05.$$

(9)

式(9)中: $x_i$  为归一化前的实验数据; $x'_i$  为归一化后的实验数据; $x_{i,\min}$  和  $x_{i,\max}$  分别为该工艺参数值的最小值与最大值.

3.4 人工神经网络预测

将模拟得到的 25 组数据作为数据样本,随机选择 3 组作为测试样本,其余的数据作为训练样本. 设定最大训练次数为 500,经过学习,网络的性能为  $8.677\ 22 \times 10^{-7}$ ,其训练误差如图 8 所示. 3 组测试样本对网络性能的测试结果,如图 9 所示. 图 8,9 中: $e$  为训练误差; $n$  为训练次数; $N$  为样本号. 相对误差( $E_r$ )的计算公式为

$$E_r = \frac{(Z_{BP} - Z_M)}{Z_M} \times 100\%.$$

(10)

式(10)中: $Z_M$  表示由 Moldflow 模拟得到的翘曲值; $Z_{BP}$  为 BP 神经网络预测得到的翘曲值.

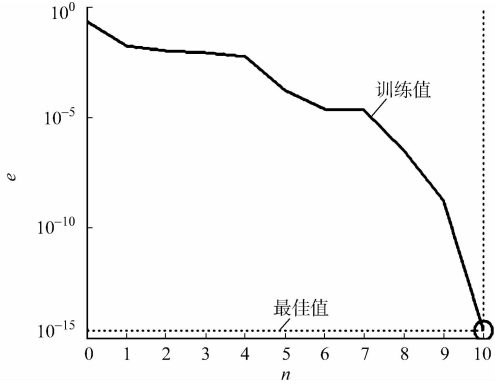


图 8 BP 神经网络训练误差图

Fig. 8 Graph of BP neutral network training error

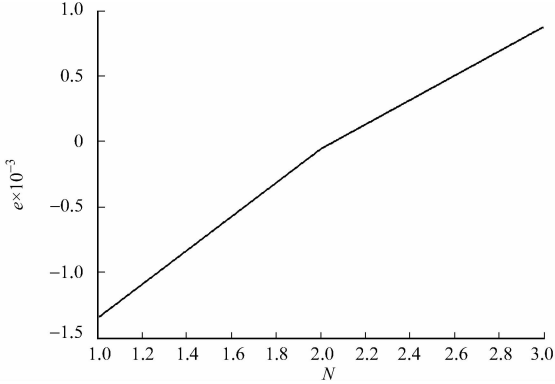


图 9 检验样本的误差

Fig. 9 Graph of test sample error

由 Moldflow 模拟可以得到 9,13,17 组测试样本的翘曲值分别为 0.115 1,0.096 3 和 0.130 7 mm, 而由 BP 神经网络预测得到 3 组的翘曲值分别为 0.116 5,0.096 4 和 0.129 8 mm,其相对误差分别为 1.22%,0.10%和 0.69%. 由上述的比较分析可知:神经网络预测得到的结果和相对误差均比较合理,说明神经网络对翘曲变形量的预测是可行的.

4 结论

以数值模拟为基础,基于人工神经网络建立预测制品翘曲值的 BP 神经网络,实现了对工艺的优化,得到以下 3 个主要结论.

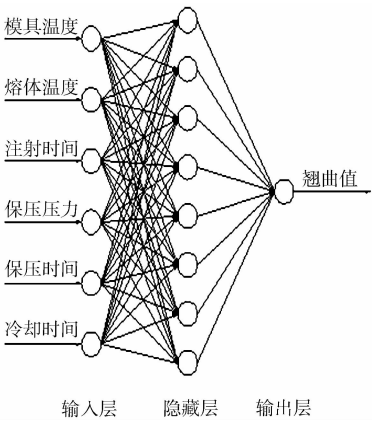


图 7 BP 神经网络拓扑结构

Fig. 7 Topological structure of BP neutral network

- 1) 通过极差分析得到各因素对翘曲变形量的影响次序:保压压力>熔体温度>模具温度>注射时间>保压时间>冷却时间,并得到最佳工艺参数组合 A5B5C5D4E5F3. 即最佳工艺参数组合:模具温度 75 ℃、熔体温度为 260 ℃、注射时间为 1.3 s、保压时间为 10 s、保压压力为 48 MPa 和冷却时间为 2 s.
- 2) 用方差分析法计算得到各工艺参数对翘曲制的影响百分数,分析保压压力和熔体温度对制品翘曲值的影响规律,表明随着保压压力和熔体温度的增大,翘曲值均变小.
- 3) 以正交实验得到的数据为样本,建立以保压压力、熔体温度、模具温度、注射时间、保压时间和冷却时间为输入,翘曲值为输出的 BP 神经网络模型. 经过训练后的神经网络能够较为准确地预测翘曲值,从而达到注塑成型工艺优化与控制的目的.

参考文献:

[1] 周婷,刘斌. 基于 BP 人工神经网络的异形透盖注塑件翘曲变形分析[J]. 塑料工业,2011,39(10):59-61.

[2] 曾盛渠,刘芬,黄志高,等. 注射成型工艺对制品收缩和翘曲的不同影响[J]. 化工学报,2011,62(3):846-855.

[3] 周凤佳. 基于移动最小二乘响应面的注塑件工艺优化[D]. 上海:上海交通大学,2008:67-69.

[4] 谭雪松,林晓新,温丽. 新编塑料模具设计手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2007:165-167.

[5] 葛娜,辛勇. LCD 电视机前面壳高光成型 CAE 分析及参数优化[J]. 塑料,2009,38(2):112-114.

[6] 吴真繁,孙宝寿,张勇. 基于 Taguchi 实验设计方法的注塑成型翘曲优化[J]. 宁波大学学报:理工版,2011,24(3):108-112.

[7] 王桂龙,赵国群,李辉平,等. 薄壁注塑件制品翘曲影响因素分析与工艺优化[J]. 中国机械工程,2009,2(4):488-492.

[8] 付士军. 注射模工艺参数对塑件翘曲量的影响及优化[J]. 机械设计与制造,2012(2):244-246.

[9] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:104-109.

[10] 许建文,刘斌. 注塑件体积收缩率变化的数值模拟优化与预报[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,13(3):241-245.

Optimization of Injection Molding Parameters  
Based on Numerical Simulation

ZHANG Xiao-bin, LIU Bin

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Using numerical simulation and orthogonal test, the injection molding process is simulated and analyzed. Then, the order of process parameters on warpage values and the optimum process parameters combination are obtained. The experimental results showed that the effect of process parameters on warpage values were packing press, melt temperature, mold temperature, injection time, packing time and cooling time, and the influence of packing pressure and melt temperature was more obvious. The optimum parameter combination is: the mold temperature is 75 ℃, the melt temperature is 225 ℃, the injection time is 1.3 s, the packing time is 10 s, the packing pressure is 48 MPa and the cooling time is 2 s. The warpage value is 0.089 3 with the optimum parameters simulated by Moldflow, and the value is smaller than that of the orthogonal test, which shows the optimum parameters gained by range analysis are effective.

**Keywords:** injection molding; molding process; warpage value; numerical simulation; orthogonal test; neural network

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)