

文章编号: 1000-5013(2011)02-0130-05

# 非球面塑料光学透镜收缩变形的数值分析

许建文, 刘斌

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 运用田口实验设计方法, 模拟分析不同工艺参数组合下的收缩变形, 研究不同工艺参数对非球面塑料光学透镜平均体积收缩率的影响程度. 分析结果表明, 保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸对塑件平均体积收缩率有显著的影响, 且影响程度依次降低. 正交实验得出其最优化的工艺参数组合: 模具温度为 45 ℃、熔体温度为 250 ℃、保压压力为 25 MPa、填充时间为 6.2 s、保压时间为 13 s、冷却时间为 38 s 和浇口尺寸(宽×深)为 3 mm×2 mm. 最后, 选取保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸进行有交互作用的正交试验, 结果显示 4 个参数之间的交互作用对非球面塑料光学透镜的平均体积收缩率影响较小.

**关键词:** 非球面塑料光学透镜; 田口实验; 工艺参数; 平均体积收缩率

**中图分类号:** TQ 320.66<sup>+</sup>1

**文献标志码:** A

注塑件的收缩行为对其最终尺寸和形状的确起着重要的作用<sup>[1]</sup>. 对注塑件收缩率有影响的因素, 主要为注塑材料特性、注塑工艺条件和模具成形结构<sup>[2]</sup>. 成型工艺参数是直接影响模具内塑料熔体的状态和最终塑件的质量, 而获取优化的工艺参数是成型高质量塑件的前提. 非球面塑料光学透镜表面质量要求较高, 收缩变形要求较小. 因此, 本文结合 Moldflow 软件和田口实验技术, 研究不同工艺参数对塑件平均体积收缩率的影响, 以及各主要影响因素之间的交互作用.

## 1 体积收缩变形的模拟分析

以透镜体积收缩变形量作为田口实验<sup>[3]</sup>的品质特性. 由于非球面塑料光学透镜表面质量要求高, 透光性好, 上下表面不能有残留痕迹, 因此, 选择聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为研究材料, 采用矩形侧浇口, 一模四腔. 塑件尺寸、浇注系统尺寸与塑件的分析模型, 如图 1~3 所示. 其中: 主流道小端直径为 4 mm, 大端直径为 6 mm, 高度为 40 mm; 分流道的直径为 5 mm; 浇口的长度为 2 mm; 冷却管道的直径为 10 mm, 长度为 100 mm, 与塑件表面的距离为 20 mm.

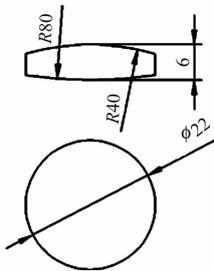


图 1 塑件的尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Sizes of injection product(unit:mm)

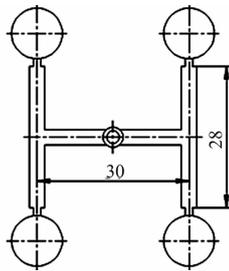


图 2 浇注系统尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Sizes of gating system(unit:mm)



图 3 塑件分析模型

Fig. 3 Analysis mode of injection product

利用前面的模拟分析结果, 确定适宜的工艺参数范围, 采用 7 参数 3 水平的正交表( $L_{18}(3^7)$ )进行

收稿日期: 2009-10-19

通信作者: 刘斌(1972-), 男, 副教授, 主要从事聚合物材料模塑成型的研究. E-mail: mold\_bin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0810040); 福建省青年创新基金资助项目(2004J033)

实验,各因素的水平配置如表 1 所示. 表 1 中:A 为模具温度;B 为熔体温度;C 为保压压力;D 为填充时间;E 为保压时间;F 为冷却时间;G 为浇口尺寸(浇口尺寸为截面尺寸的宽×深).

表 1 工艺参数水平安排表

Tab.1 Arrangement table of process parameter level

水平	A/°C	B/°C	C/MPa	D/s	E/s	F/s	G/mm
1	45	250	15	4.2	11	37	2×1
2	55	260	20	5.2	12	38	2×2
3	65	270	25	6.2	13	39	3×2

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 模拟结果

用 Moldflow 模拟来代替真实的实验,得到塑件在不同工艺参数设置下的体积收缩变形结果,如表 2 所示. 表 2 中: $\eta$  为平均体积收缩率, $r_{SN}$  为信噪比值. 定义均方偏差( $D_{MS}$ )和信噪比值( $r_{SN}$ )为

$$D_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = \bar{y}^2 + s^2, \quad r_{SN} = -10 \lg D_{MS}.$$

上式中: $y_i$  为第  $i$  个品质特性; $\bar{y}$  为平均品质特性; $n$  为实验数目; $s$  为标准差. 由表 2 模拟分析结果可计算出均方偏差与信噪比值,结果如表 2 所示.

表 2 分析结果与信噪比表

Tab.2 Table of analysis result and ratio of signal to noise

序号	A	B	C	D	E	F	G	$\eta/\%$	$r_{SN}$
1	1	1	1	1	1	1	1	6.240 1	-15.903 8
2	1	2	2	2	2	2	2	5.703 5	-15.122 8
3	1	3	3	3	3	3	3	5.356 4	-14.577 5
4	2	1	1	2	2	3	3	5.850 0	-15.343 1
5	2	2	2	3	3	1	1	5.737 2	-15.174 0
6	2	3	3	1	1	2	2	5.722 4	-15.151 6
7	3	1	2	1	3	2	3	5.685 3	-15.095 1
8	3	2	3	2	1	3	1	5.577 0	-14.928 0
9	3	3	1	3	2	1	2	6.029 4	-15.605 5
10	1	1	3	3	2	2	1	5.288 0	-14.465 8
11	1	2	1	1	3	3	2	6.200 7	-15.848 8
12	1	3	2	2	1	1	3	5.803 2	-15.273 4
13	2	1	2	3	1	3	2	5.421 2	-14.681 9
14	2	2	3	1	2	1	3	5.525 1	-14.846 8
15	2	3	1	2	3	2	1	6.361 4	-16.071 1
16	3	1	3	2	3	1	2	5.266 5	-14.430 4
17	3	2	1	3	1	2	3	5.812 1	-15.286 7
18	3	3	2	1	2	3	1	6.199 5	-15.847 1

### 2.2 模型的反应表

将因子所有相同水平的信噪比值取平均值,如 A 因子的各水平平均值分别为

$$\eta_{A_1} = \frac{1}{6}(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12}) = -15.198 7 \text{ dB},$$

$$\eta_{A_2} = \frac{1}{6}(\eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15}) = -15.211 4 \text{ dB},$$

$$\eta_{A_3} = \frac{1}{6}(\eta_7 + \eta_8 + \eta_9 + \eta_{16} + \eta_{17} + \eta_{18}) = -15.198 8 \text{ dB}.$$

模型控制因子对信噪比值的反应表,如表 3 所示. 从表 3 可得到如下 2 点结论.

表3 模型的信噪比值表  
Tab.3 Table of the value of model's signal to noise

水平	A	B	C	D	E	F	G
1	-15.198 7	-14.986 7	-15.676 5	-15.448 9	-15.204 2	-15.205 7	-15.398 3
2	-15.211 4	-15.201 2	-15.199 1	-15.194 8	-15.205 2	-15.198 9	-15.140 2
3	-15.198 8	-15.421 0	-14.733 4	-14.965 2	-15.199 5	-15.204 4	-15.070 4
极差	0.012 7	0.434 3	0.943 1	0.483 7	0.005 7	0.006 8	0.327 9
排序	5	3	1	2	7	6	4

(1) 由极差的大小可直观得出各工艺参数对平均体积收缩率的影响,其由大到小的顺次:保压压力、填充时间、熔体温度、浇口尺寸、模具温度、冷却时间和保压时间.其中:保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸的影响较为显著,其他因素的影响很小.因此,在下面研究中,主要探讨保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸之间的交互作用.

(2) 在考察的工艺参数水平上,最优化的工艺参数组合:模具温度为 45 ℃、熔体温度为 250 ℃、保压压力为 25 MPa、填充时间为 6.2 s、保压时间为 13 s、冷却时间为 38 s 和浇口尺寸(宽×深)为 3 mm×2 mm.在此工艺条件下,获得的平均体积收缩率为 5.061 6%,与已做过的实验相比,该工艺条件所得的平均体积收缩率确实最小.

### 2.3 变异分析

利用变异分析,可以精确地分析不同的注塑工艺参数对非球面镜片的体积收缩所造成的影响.下面分别定义 6 个变异参数.

(1) 因子的变异偏差  $\sigma$ . 其计算式为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{tot}} = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^r y_{i,l}^2 \right) - n \times r \times \bar{y}^2, \\ \sigma_{\text{F}} = \frac{n \times r}{L} \sum_{k=1}^L (\bar{y}_k - \bar{y})^2, \\ \sigma_{\text{e}} = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{F}}. \end{cases}$$

(2) 自由度  $D$ . 其计算式为

$$\begin{cases} D_{\text{tot}} = n \times r - 1, \\ D_{\text{F}} = L - 1, \\ D_{\text{e}} = D_{\text{tot}} - D_{\text{F}}. \end{cases}$$

(3) 平均变异偏差  $\bar{\sigma}$ . 其计算式为

$$\bar{\sigma}_{\text{F}} = \frac{\sigma_{\text{F}}}{D_{\text{F}}}, \quad \bar{\sigma}_{\text{e}} = \frac{\sigma_{\text{e}}}{D_{\text{e}}}.$$

(4) 纯变异偏差  $\sigma'$ . 其计算式为

$$\sigma'_{\text{F}} = \sigma_{\text{F}} - \bar{\sigma}_{\text{F}} \bar{\sigma}_{\text{e}}.$$

(5) 因子贡献的百分比  $\rho_{\text{F}}$ . 其计算式为

$$\rho_{\text{F}} = \frac{\sigma'_{\text{F}}}{\sigma_{\text{tot}}} \times 100\%.$$

(6) 变异数比( $R_{\text{F}}$ ). 变异数比值越大,表示该因子对  $\eta$  的贡献愈大或表示误差对  $\eta$  的影响较小.其计算式为

$$R_{\text{F}} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{F}}}{\bar{\sigma}_{\text{e}}}.$$

上几式中: $n \times r$  代表有  $n$  组实验,每组实验有  $r$  个重复的实验数据; $L$  为水平数; $\bar{y}$  为平均数; $\bar{y}_k$  为该因子在水平  $k$  时的反应值;下标 F,e 分别表示因子和误差; $\sigma_{\text{tot}}=4.297 5$ , $D_{\text{tot}}=17$ .

根据以上变异参数公式计算,结果如表 4 所示.由表 4 可知,保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸对塑件体积收缩的贡献百分比总和超过 99%.由此可见,这 4 个因素对塑件的体积收缩影响较大.这是因为保压压力能够补偿塑件因冷却收缩的量;填充时间与填充速率有关系,而填充速率的快慢能决

定塑件因流动所造成的分子配向性的收缩差异; 浇口尺寸的大小关系着塑件的流动情况和塑件能否被充分保压.

表 4 变异数据分析表  
Tab. 4 Analysis table of variance data

参数	A	B	C	D	E	F	G	误差
$\sigma$	0.000 640 1	0.565 9	2.668 4	0.702 5	0.000 111 2	0.000 156 4	0.358 0	0.001 792
D	2	2	2	2	2	2	2	3
$\bar{\sigma}$	0.000 320 1	0.283 0	1.334 2	0.351 3	0.000 055 6	0.000 078 2	0.179 0	0.000 597 3
$R_F$	0.535 9	473.798 8	2233.718 4	588.146 7	0.093 09	0.130 9	299.681 9	1
$\sigma'$	0.000 639 9	0.565 7	2.667 6	0.702 3	0.000 111 17	0.000 156 35	0.357 9	1
$\rho/\%$	0.014 89	13.163 5	62.073 3	16.342 1	0.002 587	0.003 638	8.328 1	0.0718 85

### 3 交互作用的模拟分析

选取保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸进行交互作用的模拟分析. 水平 1 的配置: 熔体温度 A 为 250 °C, 保压压力 B 为 15 MPa, 填充时间 C 为 4.2 s, 浇口尺寸 D(截面的宽×深)为 2 mm×1 mm; 水平 2 的配置: 熔体温度 A 为 260 °C, 保压压力 B 为 20 MPa, 填充时间 C 为 5.2 s, 浇口尺寸 D(截面的宽×深)为 2 mm×2 mm.

考虑到这 4 个因素及相互之间的交互作用共有 10 个因素, 故采用 15 参数 2 水平的  $L_{16}(2^{15})$  正交表来安排实验. 综合  $L_{16}(2^{15})$  的表头设计与  $L_{16}(2^{15})$  的正交表<sup>[4]</sup>, 其正交表及模拟分析结果如表 5 所示. 表 5 中:  $\eta$  表示平均体积收缩率.

表 5 模拟分析结果  
Tab. 5 Analysis result of simulation

序号	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D	A×D	B×D	C×D	$\eta/\%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.232 7
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	6.191 3
3	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	6.065 9
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	5.898 5
5	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	5.907 6
6	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	5.733 4
7	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	5.740 3
8	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	5.573 0
9	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	6.374 2
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	6.199 1
11	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	6.200 7
12	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	6.031 2
13	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	6.040 5
14	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	5.878 6
15	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	5.880 2
16	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	5.699 9

对实验结果进行直观分析, 即将各工艺参数在 3 个水平下的平均体积收缩率进行平均, 其计算式为

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

式中:  $m$  为工艺参数在某水平下的平均值,  $n$  为该水平下出现的次数,  $x_i$  为工艺参数在此水平下的平均体积收缩率. 由各工艺参数最大平均值和最小平均值之差计算出极差, 结果如表 6 所示.

由极差的大小可直观得出各工艺参数对塑件平均体积收缩率的影响, 其由大到小顺序为:  $B > C > D > A > A \times D > B \times C > C \times D > B \times D > A \times B > A \times C$ . 由极差值的大小还可知, 4 因素之间的交互作用对塑件的平均体积收缩率的影响不是很明显, 在进行体积收缩变形分析时可以不必考虑因素之间的交互作用.

表6 直观分析表  
Tab.6 Direct analysis table

水平	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D	A×D	B×D	C×D
1	5.917 8	6.149 2	5.986 0	6.069 7	5.984 6	5.986 3	6.055 3	5.969 4	5.969 8	5.969 7
2	6.038 1	5.806 7	5.969 9	5.886 2	5.971 3	5.969 6	5.900 6	5.986 5	5.986 1	5.986 2
极差	0.120 3	0.342 5	0.016 1	0.183 5	0.013 3	0.016 7	0.154 7	0.017 1	0.016 3	0.016 5
排序	4	1	9	2	10	6	3	5	8	7

## 4 结束语

将 Moldflow 软件和田口实验结合,有利于减少实验次数,田口实验设计法能快速安排实验并分析出优化的工艺参数方案.在对材料 PMMA 研究的工艺范围内,保压压力、填充时间、熔体温度和浇口尺寸对注塑件的平均体积收缩率影响较为显著,且影响程度依次降低,而模具温度、保压时间和冷却时间的影响很小.此外,在最优参数条件下,获得的平均体积收缩率为 5.061 6%.

### 参考文献:

- [1] 王利霞,杨杨,王蓓,等.注塑成型工艺参数对制品收缩率变化的影响及工艺参数优化[J].高分子材料科学与工程,2004,20(3):173.
- [2] 祝铁丽,王敏杰.注塑成型制品收缩过程的数值模拟[J].机械工程学报,2002,38(9):145.
- [3] MONTGOMERY DOUGLAS C. Design and analysis of experiments[M]. New York:John Wiley & Sons,1997.
- [4] 田胜元,肖日嵘.实验设计与数据处理[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:221-222.

## Numerical Simulation of Shrinkage Deformation for Aspherical Plastic Optical Lens

XU Jian-wen LIU Bin

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Using Taguchi method of experimental design, shrinkage deformation of injection product under different compages of process parameters is simulated and analyzed to study degrees of different process parameters' effects on average volumetric shrinkage of aspherical plastic optical lens. It can be concluded from analysis results that, effects of packing pressure, injection time, melt temperature and gate sizes on average volumetric shrinkage of products are prominent, the effect degree of which decreases in turn. And the results of orthogonal experiment have shown that, optimum process parameters are: mold temperature is 45 °C, melt temperature is 250 °C, packing pressure is 25 MPa, filling time is 6.2 s, packing time is 13 s, cooling time is 38 s and sizes of gate (width and depth) are 3 mm×2 mm. In the end, packing pressure, injection time, melt temperature and gate sizes are selected to conduct orthogonal experiments considering interaction, results have shown that interaction effects between these four process parameters on average volumetric shrinkage of aspherical plastic optical lens are smaller.

**Keywords:** aspherical plastic optical lens; Taguchi experiment; process parameter; average volumetric shrinkage

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)