

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.015

基于正交试验的长条薄壁板件注塑工艺 参数优化与定量分析

黄海龙¹, 狄金叶²

(1. 吉林大学 工程训练中心, 吉林 长春 130025; 2. 青岛工学院 机电工程学院, 山东 胶州 266300)

摘 要:针对塑件成型过程中体积收缩率对成型塑件尺寸精度的影响,文章选取长条薄壁板件作为研究对象,利用AMI有限元分析软件对长条薄壁板注塑成型过程进行数值模拟,采用多因素交互正交试验的方法获得常用ABS塑料在不同的工艺参数下成型薄壁件的体积收缩率。以体积收缩率为研究目标,对试验结果进行定量分析,对比分析每一个工艺参数对研究目标的贡献率,并计算得到最优的工艺参数组合,依据实验结果优化塑件成型工艺。该方法的应用为注塑成型工艺参数优化提供了定量的数据参考,是一种快速而实用的方法。

关 键 词:注塑成型;体积收缩率;正交试验;数值模拟;AMI软件;定量分析

中图分类号:TQ320.63 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)03-0065-05

Optimizing and Quantitative Analysis of Injection Molding Process Parameters for Strip Thin-Walled Plastic Plate Based on Orthogonal Test

HUANG Hailong¹, DI Jinye²

(1. Engineering Training Center, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Technology, Jiaozhou, Shandong 266300, China)

Abstract: Aiming at the effect of volume shrinkage rate on plastic size accuracy in the plastic molding process, the paper focused on strip thin-walled plastic plates as the main research object, with finite element analysis software AMI, numerical simulation was made on injection molding process, the flat thin-wall processing molding volume shrinkage of frequently used ABS plastics was obtained by using multi-factors interaction orthogonal experimental method in different parameters. With the volume shrinkage as the control target, quantitative analyses was made on the test results, compared different process parameters on the importance of target value, optimal process parameters was obtained by analysis on experimental data, and then optimized the plastic molding process according to the results of the experiment. The application of the study results provides quantitative data reference for injection molding process parameters optimization, and the study results is a quick and practical method.

Key words: injection molding; volume shrinkage; orthogonal test; numeric simulation; AMI; quantitative analysis

随着注塑成型产品在各行业中的广泛应用,对注塑成型过程的控制以及注塑工艺参数的优化也得到了行业内的高度重视^[1]。在塑料成型模具设计和注射成型生产过程中,利用计算机有限元数值模拟塑料熔体流动成型过程,得到最优化的工艺参数组合,从而指导和优化注塑模具结构设计和注塑成型生产过程,用数据分析的量化指标替代对传统工艺经验的依赖,对

模具设计和注塑成型工艺有很好的指导作用^[2]。

正交试验设计是利用数理统计学与正交性原理研究多个因素分别在多水平下对研究目标值的影响规律的试验设计方法,依据正交性按照正交表设计并进行试验,以较少的试验次数得到最佳的试验参数组合,是一种快速探索合理工艺组合的科学试验方法^[3]。

本文以长条形薄壁板件作为研究对象,以塑件成

收稿日期:2015-10-19;修回日期:2016-01-10

作者简介:黄海龙(1985),男,内蒙古多伦人,硕士研究生,工程师,主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM。E-mail:405215163@qq.com

型体积收缩率最大值最小为研究目标,主要研究注塑成型过程中模具温度、熔体温度、注射速率、保压压力、冷却时间对体积收缩率的影响,同时考虑模具温度与熔体温度、注射速率与熔体温度之间的交互作用。每个因子在成型条件范围内选取3个水平,根据正交表 $L_{27}(3^3)$ 进行试验设计,利用AMI(Autodesk Moldflow Insight)进行数值模拟试验,获得最优化的工艺参数组合,并对试验结果进行极差、方差、检验等定量分析,分析每个因子对研究目标值的影响程度和具体的贡献率,并计算出最优工艺组合下的体积收缩率^[46]。

1 正交试验设计与AMI模拟分析

1.1 有限元模型建立

以100 mm×15 mm×2 mm长条薄壁件作为研究对象,利用NX6.0建立三维模型后以x_t实体模型文件格式导入AMI2012,采用双层面网格类型,1.5 mm×2.0 mm矩形浇口,其有限元模型及浇注、冷却系统设计如图1所示。其中,冷却系统管道直径 $\varnothing 6$ mm,入口水温25℃,雷诺数为10 000。

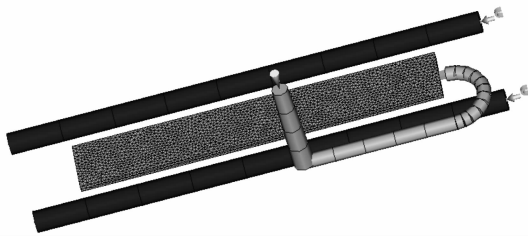


图1 平板薄壁件有限元模型及浇注、冷却系统设计

Figure 1 Fem model, gating and cooling system of flat thin-wall part

1.2 材料选择

成型材料选择AMI标准材料库中的LG Chemical ABS AF303非结晶型ABS塑料,材料全名:丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物;物理属性:弹性模量 $E=2.24$ GPa,泊松比 $\mu=0.392$,比热容 $C_p=156.5$ J·kg⁻¹·℃⁻¹,热传导率 $k=0.16$ W·m⁻¹·℃⁻¹,玻璃化转换温度103℃,剪切模量804.6 MPa。材料库推荐的所选材料的成型工艺参数范围:模具温度60℃(范围40~80℃),熔体温度200℃(范围180~220℃)。

1.3 正交试验设计

正交试验设计的关键是根据产品结构、材料属性和研究目标合理选择每个工艺参数因子的水平,文中根据材料库推荐的工艺参数,结合实际经验对参数因子的3个水平设置如表1所示。

表1 因子水平表
Table 1 Levels of factor

水平	因子				
	模具 温度/℃	熔体 温度/℃	注射速率/ (cm ³ ·s ⁻¹)	保压 压力/%	冷却 时间/s
1	40	180	10	70	15
2	60	200	20	80	20
3	80	220	30	90	25

在因子水平设计中,以 x_1 代表模具温度, x_2 代表熔体温度, x_3 代表注射速率, x_4 代表保压压力, x_5 代表冷却时间, $x_1 \times x_2$ 表示模具温度和熔体温度对目标值的交互作用, $x_2 \times x_3$ 表示注射速率和熔体温度对目标值的交互作用,交互作用在正交试验表头设计时各占相应的列^[7]。

试验中所用注塑机型号震雄EM80-SPV2,最大注射压力153 MPa,最大锁模力800 kN,最大注射速率60 cm³·s⁻¹,射胶容积121 cm³。采用冷却+填充+保压的分析序列进行数值模拟试验^[8]。

采用 $L_{27}(3^3)$ 正交表并考察交互作用进行表头设计^[9],对长条薄板塑件体积收缩率数值模拟分析的试验结果如表2所示,实验中每一个因子对试验结果期望的离差平方和计算结果如表3所示。

表2 $L_{27}(3^3)$ 试验设计及试验结果

Table 2 Experimental design and results of $L_{27}(3^3)$

试验 序号	参数因子														
	x_1	x_2	$x_1 \times x_2$	x_3	x_4	x_5	$x_2 \times x_3$	e	e	$x_2 \times x_3$	e	e	e	e	$y_i/\%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.131 7
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.010 0
3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1.720 6
4	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2.252 9
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1	2.135 0
6	1	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1.896 1
7	1	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2.466 4
8	1	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	3	3	2.431 4
9	1	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	2.382 1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1.917 7
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1	1.835 7
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	2.121 2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	2	2.080 0
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	1	1.987 6
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	1	2.243 8
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1	2.341 6
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	2	2.449 3
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	2	2.479 3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1.734 2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	2.194 9
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1	1.926 1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1	1.924 9
23	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1	3	2	1	2	2.302 3
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	2	2.081 6
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	2	2.358 3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	2	2.444 6
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	2	2.471 2

注:表中 y_i 为每一行工艺参数组合下塑件的最大体积收缩率; e 表示试验误差列。

表3 离差平方和计算结果

Table 3 Calculation result of dispersion squares sum

参数因子	K_1	K_2	K_3	S_j
x_1	19.426 2	19.456 2	19.438 1	0.000 0
x_2	17.592 1	18.904 2	21.824 2	1.042 9
$x_1 \times x_2$	19.441 3	19.432 7	19.446 5	0.000 0
$x_1 \times x_2$	19.447 8	19.409 4	19.463 3	0.000 1
x_3	19.207 7	19.790 8	19.322 0	0.021 2
x_4	20.637 1	19.394 6	18.288 8	0.306 7
x_5	19.602 5	19.438 1	19.279 9	0.005 7
$x_2 \times x_3$	19.330 4	19.631 0	19.359 1	0.006 1
e	19.500 6	19.842 5	18.977 4	0.042 1
e	19.440 9	19.355 8	19.523 8	0.001 5
$x_2 \times x_3$	19.541 1	19.428 4	19.351 0	0.002 0
e	19.934 1	19.052 7	19.333 7	0.045 0
e	19.365 5	19.530 7	19.424 3	0.001 5

注:表中 K_1, K_2, K_3 分别表示试验中每一列在第1,2,3这3个水平上质量指标值之和; S_j 表示每一个列对试验结果期望的离差平方和。

1.4 试验结果定量分析

1) 极差分析

正交试验表中每一个因子分别在 k_1, k_2, k_3 3个水平下引起体积收缩率的平均值最大与最小之差为试验结果的极差^[10],各因子及交互作用的极差如表4所示。

表4 因子极差表

Table 4 Factor range

参数因子	k_1	k_2	k_3	R
x_1	2.158 5	2.161 8	2.159 8	0.003 3
x_2	1.954 7	2.100 5	2.424 9	0.470 2
$x_1 \times x_2$	2.160 1	2.159 2	2.160 7	0.001 5
$x_1 \times x_2$	2.160 9	2.156 6	2.162 6	0.006 0
x_3	2.134 2	2.199 0	2.146 9	0.064 8
x_4	2.293 0	2.155 0	2.032 1	0.260 9
x_5	2.178 1	2.159 8	2.142 2	0.035 8
$x_2 \times x_3$	2.147 8	2.181 2	2.151 0	0.033 4
$x_2 \times x_3$	2.171 2	2.158 7	2.150 1	0.021 1

注:表中 k_1, k_2, k_3 为每一个因子列在第1,2,3这3个水平上质量指标值的均值; R 为每个因子列的极差。

极差反映一组试验结果的离散程度,极差值越大说明试验目标值对因子的变化越敏感,因子对目标值的影响越重要。

2) 体积收缩率指标折线图

根据试验结果中每一个参数因子列在第1,2,3这

3个水平上的质量指标的平均值分析每个工艺参数对塑件体积收缩率的影响规律如图2所示^[11]。

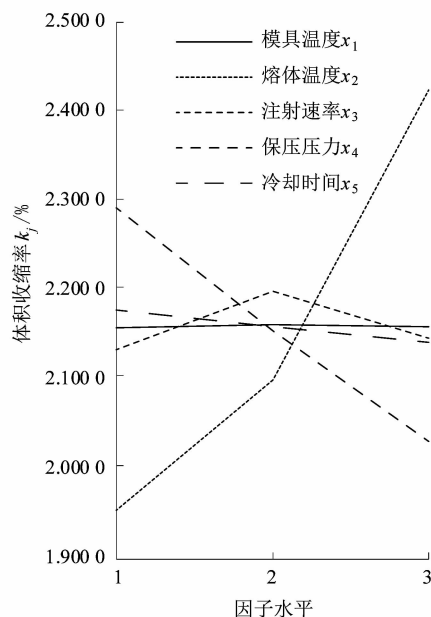


图2 体积收缩率指标折线图

Figure 2 Line chart of volume shrinkage target

3) 方差分析

方差分析反应试验结果与期望值之间的偏离程度,用于量化试验因子对目标值的影响程度和贡献率。并利用统计学的检验标准判定某个因子对试验结果是否具有显著性的影响,从而确定在注塑成型过程中是否应该重视该因子的参数变化对塑件体积收缩率的影响^[10]。

因子的离差平方和

$$S_j = \frac{r}{n} \left(\sum_{j=0}^r k_j^2 \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^r y_i \right)^2$$

式中: r —因子水平数; n —总试验次数; j —参数因子; i —试验编号。

其中 $S_{(x_1 \times x_2)} = S_3 + S_4$; $S_{(x_2 \times x_3)} = S_8 + S_{11}$; $S_e = S_9 + S_{10} + S_{12} + S_{13}$; 试验结果方差分析如表5所示。

1.5 最优工艺组合分析

由表4可以看出:以体积收缩率最大值最小为目标的最优工艺组合为 $x_1(1), x_2(1), x_3(1), x_4(3), x_5(3)$,即:模具温度(x_1)40℃,熔体温度(x_2)180℃,注射速率(x_3)10 cm³·s⁻¹,保压压力(x_4)90%,冷却时间(x_5)25 s。将最优工艺参数组合输入AMI进行注塑成型数值模拟,其分析结果如图3所示。塑件体积收缩率为1.715 6%^[12-13],结果验证了的正交试验设计法的准确性。

表5 因子方差分析表
Table 5 Analysis of variance

参数因子	$S_j/\%$	d_{f_j}	$M_{S_j}/\%$	F_j	$F_{0.05}$	显著性	$S_j'/\%$	贡献率/%
x_1	0.000 0	2	0.000 00	×	3.44	×	—	—
x_2	1.042 9	2	0.521 45	91.63	3.44	√	1.031 5	69.94
x_3	0.021 2	2	0.010 60	×	3.44	×	—	—
x_4	0.306 7	2	0.153 35	26.95	3.44	√	0.295 3	20.02
x_5	0.005 7	2	0.002 85	×	3.44	×	—	—
$x_1 \times x_2$	0.000 1	4	0.000 03	×	2.82	×	—	—
$x_2 \times x_3$	0.008 1	4	0.002 03	×	2.82	×	—	—
e	0.090 1	8	0.011 26	—	—	—	—	—
total	1.474 8	26	0.056 72	—	—	—	1.474 8	100.00
total/ e	0.125 2	22	0.005 69	—	—	—	0.148 0	10.03

注: d_{f_j} 为自由度; M_{S_j} 为均方离差平方和; S_j' 为根据试验误差修正后的因子离差平方和; $F_j, F_{0.05}$ 的物理量为试验数据处理中 F 检验方法中的, F_j 为试验结果计算的 F 值, $F_{0.05}$ 为标注 F 分布表的值;贡献率为因子离差平方和与样本总体离差平方和的百分比;√表示有显著影响;×表示无显著影响;—表示无意义。

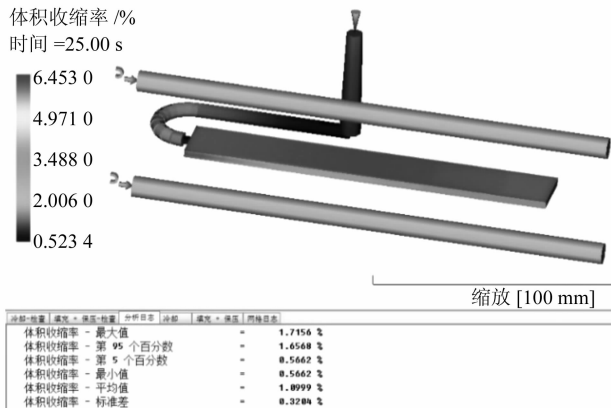


图3 工艺优化后的体积收缩率分析结果

Figure 3 Optimal analysis result of volume shrinkage

2 结论

通过对长条薄壁板件成型过程的正交试验、数值模拟和数据定量分析,得出以下结论:

1) 以体积收缩率最大值最小为研究目标的最优方案组合为:模具温度 40 ℃,熔体温度 180 ℃,注射速率 $10 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,保压压力 90%,冷却时间 25 s,数值模拟得出此时体积收缩率为 1.715 6%,比试验中其它任何工艺条件下的目标值都小,达到了快速优化体积收缩率的目的。

2) 从方差分析结果可以看出,各工艺参数对体积收缩率影响的重要性从大到小依次为:熔体温度、保压压力、注射速率、注射速率与熔体温度的交互作用、冷却时间、模具温度与熔体温度的交互作用、模具温度。

3) 通过对实验数据的定量分析得出:影响体积收缩率最显著的因子是熔体温度,贡献率为 69.94%,其次是保压压力,贡献率为 20.02%,而其它参数对目标

值无显著性影响,可以忽略。

4) 从体积收缩率指标折线图可以看出对目标值有显著影响的各个工艺参数对体积收缩率大小的影响规律:随着熔体温度的升高,体积收缩率在明显升高,因为此时在用密度相对较低的熔体进行注射填充,分子间距较大导致收缩率升高^[14];随着保压压力的增大,熔体在压力作用下被压缩,保压压力越大,压缩量也越大,使得顶出时体积收缩率变小^[15];冷却时间的延长在一定程度上减小了体积收缩率,但对于此薄板试验件效果并不明显。

参考文献:

- [1] ZHU Chundong, LI Futao, ZHU Hongyan. Optimizing the injection molding process parameters based on orthogonal test and MoldFlow [J]. China plastics industry, 2009, 37 (sup. 1): 30-32.
- [2] SEOW L W, LAM Y C. Optimizing flow in plastic injection molding [J]. Journal of materials processing technology, 1997, 72 (3): 333-341.
- [3] LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental technology and management, 2010 (9): 52-55.
- [4] WANG Lixia, YANG Yang, WANG Bei, et al. Investigation of the influence of processing parameter on volumetric shrinkage variation of plastics injection molded parts and process optimization [J]. Polymer materials science and engineering, 2004, 20 (2): 173-176.
- [5] ZHAO Guo, XIN Yong. Optimization of parameters in injection molding based on multi-target comprehensive evaluation [J]. Engineering plastics application, 2008, 36 (1): 31-34.
- [6] 朱洪艳. 薄壳件注塑成型的计算机模拟及工艺参数优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004: 5-14.
- [7] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 100-150.

(下转第 73 页)