

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.05.010

注塑件翘曲变形分析与成型工艺参数优化^{*}

陈吉平, 丁智平

(湖南工业大学机械工程学院, 湖南株洲 412007)

摘要:基于正交实验设计,利用 Moldflow 软件对注塑件注塑成型进行数值模拟。结果表明,保压时间、注射时间、熔体温度对注塑件翘曲变形的影响高度显著。运用方差分析,研究注塑成型参数对注塑件翘曲变形的影响,进行多元线性回归分析,发现注塑件翘曲变形幂函数回归模型与实验数据有很好的相关性。以影响翘曲变形的主要工艺参数为设计变量、翘曲变形为目标函数,建立幂函数回归优化模型,对成型工艺参数进行优化,得到的翘曲变形值小于主实验中的翘曲变形最小值,表明该方法具有较好的工程实用价值。

关键词: 注塑成型; 翘曲变形; 正交实验设计; 方差分析; 回归分析

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)05-0046-04

Warpage Analysis and Optimization of Molding Parameters for Injection Parts

Chen Jiping, Ding Zhiping

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract : Based on orthogonal experiment design, numerical simulation of injection molding for plastic parts using Moldflow was done. Results indicate that the highly significant factor affecting warpage of plastic parts is the packing time, filling time and melt temperature. The effects of injection molding parameters on the warpage of injection parts using analysis of variance were researched. The multiple linear regression analysis was done, it was found that there is a very good correlation between power function regression model for the warpage of plastic part and experimental data. Then the optimization regression model of the power function was established with process parameters which affecting warpage as design variables and warpage regression model as objective function, and the processing parameters was optimized. The warpage value of plastic parts is less than the minimum warpage value in the main experiment, which indicates that the method has a good practical value in engineering.

Keywords : injection molding ; warpage ; orthogonal experiment design ; analysis of variance ; regression analysis

塑料注射成型在塑料加工行业中占有十分重要的地位,是最有效的塑料加工方法之一^[1]。翘曲是注塑件注塑成型常见的缺陷,它破坏塑件的模塑形体,严重的会引起塑件开裂。塑件翘曲的主要原因之一是不均匀收缩,而不均匀收缩多为材料、工艺条件、机器的变化所致^[2]。

如何提高注塑件质量、优化注塑成型参数、降低翘曲值,一直是研究者关注的热点。由于注塑过程极其复杂,尚无通用的注塑成型参数优化模型。目前常用的优化方法有神经网络技术、遗传算法、模拟退火法、爬山法等,同时还有 CAE 技术和 Taguchi DOE 技术。近年来,研究者将多种优化方法组合运用,提高了注塑成型优化的效率。笔者以某电子产品壳体为例,基于正交实验设计,利用 Moldflow 软件对注塑件注塑成型进行数值模拟,分析影响注塑件翘曲变形的工艺因素,进行翘曲变形回归分析,提

出优化成型工艺参数的方法,为注塑件注塑成型质量控制提供指导依据。

1 实验设计

1.1 实验物理模型

电子产品壳体物理模型见图 1。其外形尺寸为

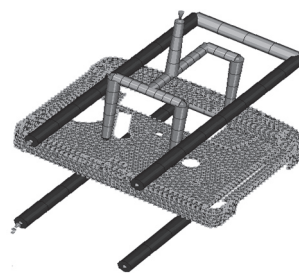


图 1 壳体物理模型

^{*} 湖南省十二五重点学科(机械工程)项目(湘教发[2011]78号)

联系人: 陈吉平, 教授, 主要研究方向为塑性成型、机械强度

收稿日期: 2013-02-18

118 mm×85 mm×20 mm,壁厚为1 mm。模具采用三浇口,型芯、凹模分别采用两冷却水道。

选用 Fusion 网格,全局网格边长 2.7 mm,弦高 0.1 mm,IGES 合并公差 0.1 mm。三角形单元 10848 个,节点数 5400,网格匹配百分比 91%。材料为 Bulksam TM-21,日本 UMG 株式会社生产。

1.2 实验因素及水平

笔者以注塑件翘曲变形作为质量控制目标,选择填充/后填充过程中影响注塑件翘曲的注塑成型工艺参数作为实验因素。实验因素水平设置如表 1 所示。

表 1 因素水平表

因素	水平		
	1	2	3
模具温度 X_1 / °C	50	60	70
熔体温度 X_2 / °C	220	230	240
注射时间 X_3 / s	0.35	0.5	0.65
保压压力 X_4 / %	65	80	95
保压时间 X_5 / s	1	3	5

1.3 正交实验设计

为了用较少的实验,获得实验因素的重要信息,得出主因素及交互作用因素对注塑件翘曲的影响及排序,找出影响注塑件翘曲的关键因素,提供建立注塑件翘曲变形模型的科学依据,简化后续成型工艺参数,笔者选用 $L_{27}3^{13}$ 进行工艺参数五因素三水平的正交实验设计^[3]。将实验因素 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 分别置于 1,2,5,9,13 列,同时考虑 X_1X_2, X_2X_3 的交互作用,且分别置于 3,4 及 8,11 列,其余为误差列。Moldflow 数值模拟中采用 CFW 组合进行翘曲分析,假设熔体温度恒定。实验设计及 27 个模拟实验的注塑件最大翘曲值结果见表 2。

(1) 因素效应。

图 2 为实验目标随主因素变化的情况。由图 2 可以看出,在实验参数范围内,随着模具温度的提高,注塑件翘曲值略有下降;保压时间延长,注塑件翘曲值的降低幅度非常显著,特别是在保压时间的初始阶段。当保压时间达到一定值后,翘曲值减小缓慢;熔体温度增加,翘曲值增加明显;翘曲值最初随注射时间的延长增长明显,但延长一定时间后则略有下降;翘曲值先随保压压力增加有所降低,而后随保压压力增加反而有所增加。

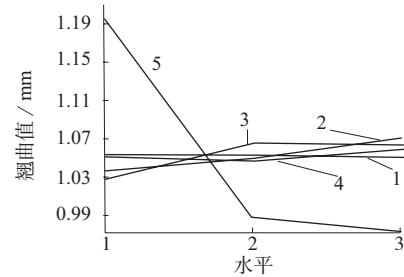
(2) 方差分析。

为了定量分析各主因素及因素间交互作用对实验目标是否有影响,利用方差分析 (ANOVA) 对

表 2 正交实验设计及结果¹⁾

序号	X_1	X_2	X_1X_2	X_1X_3	X_3	e	e	X_2X_3	X_4	e	X_2X_3	e	X_5	翘曲值/mm
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.123
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.9773
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.9865
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0.9528
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1.226
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	1.007
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1.004
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	0.9849
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1.229
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0.9496
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	1.194
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1.002
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	0.9644
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	0.9900
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	1.202
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	1.197
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	1.008
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	0.9795
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	0.9489
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	0.9868
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	1.171
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	1.157
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	0.9756
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	0.9813
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	0.9636
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	1.257
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	1.022

注: 1)e 为误差。



1—模具温度; 2—熔体温度; 3—注射时间;
4—保压压力; 5—保压时间

图 2 主因素效应

表 2 实验结果进行显著性检验,计算公式如下^[4]:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} = \left[\frac{1}{n_g - 1} \sum_{j=1}^{n_g} (n_j - 1) \right] \frac{SS_{\text{between}}}{SS_{\text{within}}} \quad (1)$$

其中:

$$SS_{\text{between}} = n_j \sum_{j=1}^{n_g} (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$SS_{\text{within}} = \sum_{j=1}^{n_g} \sum_{i=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (3)$$

式中: s_1^2 ——组间方差;

s_2^2 ——组内方差;

SS_{between} ——组间偏差平方和;

SS_{within} ——组内偏差平方和;

n_g ——水平数;

n_j ——第 j 组水平的实验数;

x_{ij} ——第 j 组水平第 i 个实验值;

$\bar{x}_j$ ——第 j 组水平实验平均值;

$\bar{x}$ ——全部实验值的平均值。

方差分析结果见表3。由表3可知,熔体温度 X_2 、注射时间 X_3 、保压时间 X_5 的 F 值均超过了 $F_{0.01}(2, 16)=6.23$, 在实验参数范围内对实验目标影响高度显著,且影响排序为: $X_5 > X_3 > X_2$ 。模具温度 X_1 、保压压力 X_4 及熔体温度与注射时间之间的交互作用 X_2X_3 的组间方差均小于误差的组内方差,故将它们偏差平方和并入误差项。而模具温度与熔体温度间的交互作用 X_1X_2 的 F 值小于临界值 $F_{0.10}(4, 16)=2.33$, 表明对实验目标无影响。

表3 方差分析结果¹⁾

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	显著性
X_1	4.8303×10^{-5}	2	2.4151×10^{-5}		
X_2	0.0053	2	0.0026	9.4522	高度显著
X_3	0.0081	2	0.0040	14.4082	高度显著
X_4	7.2354×10^{-4}	2	3.6177×10^{-4}		
X_5	0.2723	2	0.1362	486.2134	高度显著
X_1X_2	2.0055×10^{-3}	4	5.0137×10^{-4}	1.7902	无影响
X_2X_3	4.8135×10^{-4}	4	1.2034×10^{-4}		
e	0.0032	8	4.0347×10^{-4}		
$e+X_1+X_4+X_2X_3$	0.0167	16	2.8006×10^{-4}		
总和	0.2922	26			

注: 1) F 临界值^[5]: $F_{0.10}(2, 16)=2.67$; $F_{0.05}(2, 16)=3.63$; $F_{0.01}(2, 16)=6.23$; $F_{0.10}(4, 16)=2.33$; $F_{0.05}(4, 16)=3.01$; $F_{0.01}(4, 16)=4.77$ 。

2 回归分析与优化

2.1 回归分析

根据表2实验结果,以对实验目标影响高度显著的成型工艺参数作为独立变量,利用最小二乘法进行多元线性回归分析,得出注塑件翘曲变形回归方程。回归方程与实验数据的相关度用复相关系数 R^2 表示。 R^2 的表达式为^[6]:

$$R^2 = \text{回归平方和} / \text{总变差平方和} =$$

$$1 - (\text{残差平方和} / \text{总变差平方和}) \quad (4)$$

线性回归模型为:

$$F(X) = 0.7683 + 0.0017X_2 + 0.1185X_3 - 0.055X_5 \quad (5)$$

相关系数 $R^2=0.7835$ 。

二次回归模型为:

$$F(X) = 2.8213 - 0.0167X_2 + 1.004X_3 - 0.1977X_5 - 0.8854X_3^2 + 0.0238X_5^2 \quad (6)$$

相关系数 $R^2=0.2294$, 表明二次回归模型与注塑件翘曲变形无相关性。

幂函数回归模型为:

$$F(X) = 0.1817 \times X_2^{0.3521} \times X_3^{0.0573} \times X_5^{-0.1334} \quad (7)$$

相关系数 $R^2=0.9255$ 。

由此可见,与线性回归、二次回归模型相比,幂函数回归模型描述塑件翘曲变形精确度更高。

2.2 成型工艺参数优化

以熔体温度、注射时间、保压时间为设计变量,以翘曲变形的幂函数回归模型为目标函数,建立优化数学模型如下:

$$\min F(X) = 0.1817 \times X_2^{0.3521} \times X_3^{0.0573} \times X_5^{-0.1334} \quad (8)$$

约束条件:

$$220^\circ\text{C} \leq X_2 \leq 240^\circ\text{C}$$

$$0.35 \text{ s} \leq X_3 \leq 0.65 \text{ s}$$

$$1 \text{ s} \leq X_5 \leq 5 \text{ s}$$

采用惩罚函数法对模型求解,收敛精度为0.0001,得到设计变量的最优工艺方案为:

$$X = [224.9274, 0.3500, 5.0000]^T$$

将工艺参数熔体温度、注射时间、保压时间设置为最优方案,模具温度、保压压力设置为水平2,经Moldflow分析计算,得出注塑件翘曲值为0.9477 mm,低于表2中主实验的最低翘曲值0.9489 mm,表明翘曲回归模型优化结果是有效的。

3 结论

(1) 基于正交实验设计,利用Moldflow软件对注塑件注塑成型过程进行数值模拟,结果表明,在实验参数范围内,随着保压时间的延长,注塑件翘曲值降低。熔体温度增加,注塑件翘曲值增加。注射时间对注塑件翘曲值的影响先是随时间延长而增加,到一定值后随时间的增加反而下降。

(2) 方差分析结果表明,熔体温度、注射时间、保压时间对注塑件翘曲影响高度显著,且影响排序为保压时间>注射时间>熔体温度,而实验因素模具温度、保压压力及模具温度与熔体温度、熔体温度与注射时间间的交互作用对注塑件翘曲变形无影响。

(3) 对数值模拟实验结果进行多元线性回归分析表明,注塑件翘曲变形的幂函数回归模型精度远高于线性回归模型,与实验数据有很好的相关性,二次回归模型与翘曲变形实验数据无相关性。

(4) 以影响注塑件翘曲变形的主要工艺因素为设计变量,以幂函数回归模型为目标函数,建立优化模型,对注塑成型工艺参数进行优化,注塑件翘曲变

形值小于主实验中的翘曲变形最小值,表明该方法有效,具有工程实用价值。

参考文献

- [1] 李德群. 现代塑料注塑成型的原理、方法与应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005: 159.
- Li Dequn. Principle, method and application of modern plastic injection molding [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2005: 159.
- [2] 毛华杰, 袁乐健, 史宏江. 利用 CAE 技术解决注塑件的翘曲问题 [J]. 塑料科技, 2005(4): 30-33.
- Mao Huajie, Yuan Lejian, Shi Hongjiang. Solving the problem of warping in the injection moulding parts through computer-aided-engineering technology [J]. Plastics Sci & Technology, 2005(4): 30-33.
- [3] 张志莲, 江波. 考虑因子之间交互作用优化注塑成型工艺参数 [J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(2): 30-34.

Zhang Zhilian, Jiang Bo. Multi-objective optimization design of processing parameters of injection molding cooling system considering the interactions [J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2006, 22(2): 30-34.

- [4] Park K, Ahn J H. Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 221-227.
- [5] 刘振学, 黄仁合, 田爱民. 实验设计与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 183.
- Liu Zhenxue, Huang Renhe, Tian Aimin. Experimental design and data processing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 183.
- [6] Tsai Kuoming, Hsieh Chungyu, Lo Weichun. A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (7): 3 469-3 477.

塑料灯泡或有望成为新型光源

美国维克森林大学的科学家们近期研制出了一种全新的塑料灯泡, 该产品拥有 LED 灯的所有优点, 更让人感到惊讶的是这种塑料灯泡没有 LED 的任何缺点。有报道称这种塑料灯泡有望取代 LED 成为新型光源。当电流经过这种新型灯泡的特制塑料层时就会发出光线, 这种塑料层是利用纳米技术研制而成的。研发团队表示, 这种新型的塑料灯泡具有非常好的伸展性, 可以设计成各种形状, 比如常用的灯棍状。使用者不用担心这种灯泡会被摔碎, 而且使用时也不会产生任何杂音。这种新型灯泡暂时被简称为 FIPEL。(中化)

我国注塑机出口超进口, 超大型成功出口欧洲

最新统计数据表明, 我国 2012 年注塑机出口量首超进口量, 并且在今年实现了超大型注塑机出口欧洲, 产业发展状况良好。

注塑机是塑料加工业中使用量最大的加工机械, 不仅有大量的产品可用注塑机直接生产, 而且还是组成注拉吹工艺的关键设备。我国已成为世界注塑机生产的第一大国, 促进我国注塑机设备制造业发展的原因在于: 一是与国际著名企业进行合资及技术合作; 二是我国企业逐渐适应了机械零部件的国际采购方式, 掌握了采购渠道。同时, 我国注塑机的生产还呈现出很强的区域特色, 浙江宁波和广东东莞等地, 已成为我国乃至全球重要的注塑机生产基地。

最新统计数据表明, 我国的注塑机国际贸易在去年达到了一个转折点。注塑机的出口量首次超过进口, 出口总值将近 10 亿美元。行业管理者和中国塑料机械工业协会认为, 这一转折要归功于两大原因: 其一, 中国塑机行业在全球市场上的竞争力日益增强; 其二, 国外机械生产商越来越多地在中国建造生产厂, 更好地打开了发展中的中国市场。

我国在 2012 年的注塑机出口额达 9 亿美元, 进口额为 8.1 亿美元。2011 年注塑机的出口额为 8.24 亿美元, 进口额

为 8.42 亿美元。与 2010 年相比, 差异更大, 中国塑料机械工业协会的数据显示, 2010 年我国注塑机出口额为 6.24 亿美元, 进口额为 9.26 亿美元。

此外, 我国在超大注塑机方面也取得突破, 正式向欧洲出口了产品。业内人士介绍, 近年一些高速发展的行业 (如白色家电、汽车、高铁等) 对超大型注塑机的需求亦迅速增加, 发展超大型注塑机有极迫切的市场需要。超过 4000 t 锁模力的“超级”大型注塑机, 由于技术含量要求极高, 以往被少数欧洲及日本品牌所垄断。坪山新区的企业成功突破超级大型注塑机的技术及生产难关, 开发出国内第一台超过 4000 t 的超级大型注塑机, 并反销欧洲客户, 标志着深圳市机械行业已开始迈向世界。

(中聚网)

汽用塑料零部件快速发展, 或带动相关塑料业

汽车用零部件按照原材料不同有可分为金属类零部件、塑料类零部件、电子类零部件。

现如今, 汽车行业发展的首要特征是轻量化和环保, 而用塑料制作零部件恰好可实现以上目标。实验数据显示, 用塑料零部件可减轻车身重量至少 10%, 相应燃油消耗可减少 6%~8%, 降低二氧化碳排放 13%。因此, 以塑带钢可实现减量与节能。

常见的塑料类零部件原料包含 PP, PE, PVC, ABS 合金, PC, PA, EVA 及 PUR 等。其中, 外饰塑料零部件用量占全车总塑料用量的百分比在不同车型中是不同的, 经济车型占 25%~28%, 中端车型占 20%~22%, 高端车型占 15%~18%。

长期来看, 车身塑料的使用除了性能要求及工艺要求等客观条件外, 车身的内饰环境、气味等对材料的处理要求也会逐渐提高, 正如今年宝马等高端车“异味门”事件逐渐引起消费者对健康环境的要求和重视。总之, 零部件塑料化发展趋势仍在正向快速发展, 未来几年, 国内汽车行业的发展也将带动相关塑料行业快速发展。

(中聚网)