

正交试验设计的注塑成型工艺 参数多目标优化设计

卫炜, 胡泽豪

(中南林业科技大学机电工程学院, 长沙 410004)

摘要:结合正交试验设计和注塑成型模拟软件 Moldflow, 对不同工艺条件下的注塑成型过程进行模拟分析, 并运用模糊数学中的综合评判法, 对塑件成型后的体积收缩率变化、表面缩痕指数和最大翘曲变形量三个目标值进行综合评判, 得到综合评分。通过对综合评分的极差分析, 确定模具温度、熔体温度、注塑时间、保压参数、冷却时间等工艺参数对综合评分的影响程度, 并绘制因素水平影响趋势图, 分析得出最优的注塑工艺参数组合方案, 并对该工艺组合方案进行模拟验证。

关键词:正交试验设计; 注塑成型; 工艺参数优化; 综合评判法

中图分类号: TH12; TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671—3133 (2009) 02—0094—05

Multiobjective optimization design of the injection molding process parameters based on orthogonal experimental design

WEI Wei, HU Ze-hao

(College of Mechanical Engineering, Central South

University of Forestry and Technology, Changsha 410004, CHN)

Abstract: Injection molding process of injected part is simulated under various technological conditions by using analysis software of Moldflow and orthogonal experiment design. The comprehensive evaluation to volume shrinkage ratio change, surface sink index and maximal warp value of the injected part is obtained by means of fuzzy mathematics. From this evaluation, the extent of the overall influence to the process parameters, such as mold temperature, melt temperature, injection time, packing parameters, cooling time, etc., is clarified. Through analyzing the diagrams of influential factors resulted from the simulation results, the optimized process parameter scheme is obtained and further verified by simulation.

Key words: orthogonal experiment design; injection molding; process parameters optimize design; comprehensive evaluation method

0 引言

注塑成型过程中工艺条件对制品质量的影响存在诸多非线性时变和不确定因素, 是成型过程工艺优化和质量控制的一大难点。传统的试模方法不仅费时、成本高, 而且过于依赖经验和以往案例, 精确度不高, 难以胜任新产品投产周期短的要求。数值仿真虽然可以降低试模的成本, 也可对工艺调整做出定性指导, 但这种指导缺乏定量的精度, 要想获得好的结果, 经验和反复的试验调整仍是必需的。试验设计方法在一定程度上可以减少反复试凑的盲目性, 能以较少的试验次数得到试验范围内较优的工艺组合。

翘曲变形、收缩、飞边、熔接痕和尺寸变化等缺陷是塑料产品注塑成型中最常见的缺陷。引起这些缺陷的因素很多, 除了成型材料自身的性能外, 塑件的形状、壁厚、注射压力、注射时间以及浇口形式、流动方向、冷却速度和模具温度等因素对塑件的成型收缩都会产生一定的影响^[1]。模具温度、熔体温度、填充时间、保压和冷却等参数对产品的表面缩痕、翘曲等缺陷产生或多或少的的影响。由于评定注塑产品质量的指标很多, 仅仅优化一个目标值很难获得最优的工艺方案。为了使产品的各指标都达到一个理想的状态, 本文提出正交试验法和模糊数学的综合评判法相结合的方法, 根据各目标值对产品外观、应用等方面

影响的重要程度,进行加权综合评分,然后通过极差分析,确定各因素及各因素的水平对综合值的影响程度,找出一组最优的工艺参数。

1 注塑成型工艺参数优化设计方法

1.1 正交试验设计

正交试验设计是利用规格化的正交表,恰当地设计出试验方案和有效地分析试验结果,提出最优配方和工艺条件,进而设计出可能更优秀的试验方案的一种科学方法^[4]。注塑工艺是一个复杂的过程,影响塑件的工艺参数很多,为了减少试验次数,同时获得足够的参数,模拟试验采用正交试验法,通过分析试验结果,提出最优的注塑工艺条件。

1.2 优化目标设计

对于某些注塑产品,翘曲、收缩、表面沉降、飞边和尺寸变化等缺陷是一些无法彻底消除的问题,只能通过对工艺参数的优化,减轻塑件的这些缺陷,从而满足塑件的设计要求。体积收缩率^[5,6]是聚合物材料线收缩率的定性表示,如果材料收缩是各向同性的,线收缩率近似等于体积收缩率的 1/3。成型过程中制品在型腔中非均匀的体积收缩率是引起制品翘曲的主要原因。型腔中制品的体积收缩率变化(体积收缩率的最大值与最小值的差值)越小越好,即制品的体积收缩率越均匀越好。缩痕指数^[7]反映制品的表面质量。沉降斑被视为制品表面质量的退化。缩痕指数用于说明缩痕深度受制品材料及几何特征、充模成型条件影响的严重程度。翘曲变形^[7]是指注塑制品从型腔脱模后由于制品内残余应力的存在而使制品的形状产生变形,它是注塑制品最常见的缺陷之一。如果注塑制品结构中壁厚不均和不对称,浇口位置、流道系统和冷却系统设计不当,或成型工艺参数不合理等均会使注塑制品收缩不均而产生翘曲变形。本文针对体积收缩率变化、表面缩痕指数和最大翘曲变形量三个指标的综合值,讨论如何使综合指标达到最优的工艺参数组合。

1.3 正交试验设计的注塑成型工艺参数优化流程

试验采用正交试验设计法,运用模流分析软件 Moldflow 进行模拟分析,对得到的结果进行数据处理,以达到优化的目的,具体流程如图 1 所示。

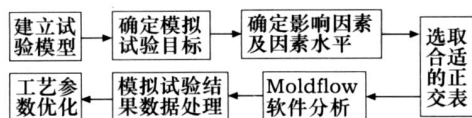


图 1 注塑成型工艺参数优化流程

2 注塑成型工艺参数优化设计

2.1 试验模型的建立

需要优化的产品为一办公用品文件盘,尺寸为 117.47mm × 60.33mm × 33.34mm,厚度为 1.52mm,材料选用韩国 Kumho 化学公司的 ABS 塑料,牌号为 750。制品模型如图 2 所示。

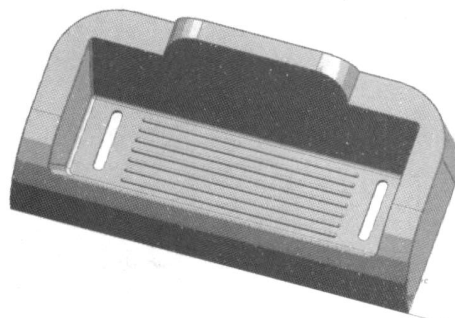


图 2 注塑件几何模型

在 Moldflow 分析中,网格质量的好坏对分析结果有很大的影响,因此为保证本产品在本 Moldflow 中划分的网格质量良好,在 UG 中将产品的小圆角和小特征去掉(在 Fusion 类型分析中,这种简化对结果的影响很小),然后生成 STL 格式文件导入 Moldflow 中,以 Fusion 类型划分网格。产品划分网格后网格体积为 26.0725cm³。网格面积为 346.339cm²。共划分三角形网格 6746 个,如图 3 所示,网格边长为 3.89mm,三角形平均纵横比为 2.362,匹配百分比为 91.4%。

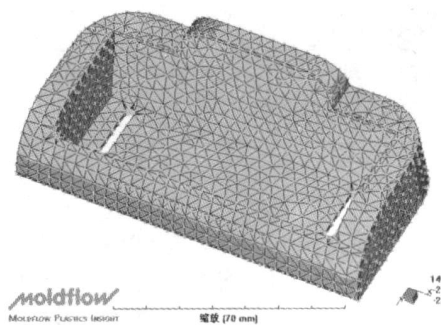


图 3 注塑件有限元网格模型

为了确保正交试验设计能得到最优解,需要确定因素水平的范围,因此对图 3 所示网格模型分别进行浇口位置分析、成型窗口分析和填充分析,建立浇注系统和冷却系统,然后再进行流动分析和冷却分析,最终使创建的浇注系统和冷却系统符合基本要求,并确定各因素的选择范围。建立的试验模型如图 4 所示,注塑机机型为 Magna250 - a45 (303g/110z)。

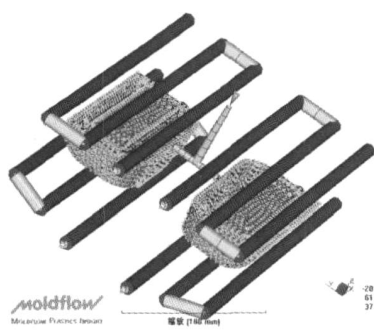


图 4 试验模型

2.2 正交试验的设计

分析的目标是确定体积收缩率变化 (Y_1)、表面缩痕指数 (Y_2)和最大翘曲变形量 (Y_3)三个指标的综合值。为保证产品外观质量和使用要求,体积收缩率变化、表面缩痕指数和最大翘曲变形量必须满足以下条件: 4.4% Y_1 6.8%; Y_2 5.4%; 0.4mm Y_3 1.3mm。

影响注塑成型质量的因素很多,选取对注塑成型过程影响较大的 7 个因素,每个因素安排 3 个水平。因素分别为模具温度 A,熔体温度 B,填充时间 C,第一段保压工艺 D (填充压力百分比与时间),第二段保压工艺 E (填充压力百分比与时间),第三段保压工艺 F (保压压力递减到 0MPa 的时间),冷却时间 G。其中保压曲线为分段设置,以期得到更好的产品质量。保压时间范围的选取是根据建立试验模型所做分析时浇口的冷却时间确定的。因素水平如表 1 所示。

表 1 因素水平表

水平	因 素						
	A/	B/	C/s	D/(% - s)	E/(% - s)	F/s	G/s
水平 1	48	215	0.6	70	50	1	10
水平 2	54	230	0.8	80	60	2	20
水平 3	60	245	1.0	90	70	3	30

根据 7 因素 3 水平,选取田口型正交表 $L_{18}(3^7)$ 。根据正交表所规定的试验方案,经过 Moldflow 的分析,提取出产品的体积收缩率变化、表面缩痕指数和翘曲变形量的数据。

表 3 正交试验及试验结果

试验号	影响因素参数设置							结 果			
	A	B	C	D	E	F	G	体积收缩率变化 /%	缩痕指数 /%	最大翘曲变形量 /mm	综合评分
1	1	1	1	1	1	1	1	5.4215	4.446	0.9893	36.292
2	1	2	2	2	2	2	2	5.5354	4.407	0.8020	47.488
3	1	3	3	3	3	3	3	5.5956	4.357	0.7668	48.352
4	2	1	1	2	2	3	3	5.4427	4.241	0.7504	54.614
5	2	2	2	3	3	1	1	5.4600	4.214	0.9629	37.550
6	2	3	3	1	1	2	2	5.7204	4.809	0.8801	34.080
7	3	1	2	1	3	2	3	5.6781	4.231	0.7939	44.030
8	3	2	3	2	1	3	1	5.1359	4.211	0.9138	49.152

2.3 试验结果数据处理

模拟试验所选取的目标指标对产品质量的影响程度各有侧重,同时各指标的量纲并不一致,为兼顾各个指标,有必要建立一个使各个指标都尽可能好的综合评判方法,从而将多目标问题转化为单目标,实现多目标问题的综合优化。因此,采用模糊数学中的映射函数^[8]进行处理,将各个指标值统一映射到 [0, 1] 的数值空间中,结合加权评分法,在模糊处理的基础上再对权值进行分配。权值分配根据正交试验分析结果和指标对制品综合质量的影响程度,按百分制加权,体积收缩率变化、表面缩痕指数和翘曲变形量的权值分别为 $b_1 = 40$, $b_2 = 20$, $b_3 = 40$ 。加权综合评分值 Y_j 的计算公式如下:

$$Y_j = b_1 Y_{j1} + b_2 Y_{j2} + b_3 Y_{j3} = \sum_{i=1}^3 b_i Y_{ji} \dots\dots\dots (1)$$

根据各目标的约束条件,采用 S 型分布的映射函数来实现对各目标的映射,函数式如式 (2) 所示。函数的各参数取值如表 2 所示。

$$Y_{ji} = \begin{cases} 1 & x_{ji} < c \\ 1 - 2 \left(\frac{x_{ji} - c}{a - c} \right)^2 & c < x_{ji} < b \\ \left(\frac{x_{ji} - c}{a - c} \right)^2 & b < x_{ji} < a \\ 0 & x_{ji} > a \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

式中: j 为试验号; i 为目标指标,体积收缩率变化、表面缩痕指数和最大翘曲变形量的 i 分别为 1, 2, 3。 Y_j 为第 j 次试验的综合评分; Y_{ji} 为第 j 次试验的第 i 项指标的映射值; x_{ji} 为第 j 次试验的第 i 项指标的实验值; a 、 b 、 c 分别为各个目标指标映射函数的边界点取值。综合评分结果见表 3。

表 2 函数各参数取值

参 数	指 标		
	a	b	c
体积收缩变化率 /%	6.8	5.6	4.4
缩痕指数 /%	5.4	2.7	0
最大翘曲变形量 /mm	1.3	0.85	0.4

表 3续

试验号	影响因素参数设置							结 果			
	A	B	C	D	E	F	G	体积收缩率变化 /%	缩痕指数 /%	最大翘曲变形量 /mm	综合评分
9	3	3	1	3	2	1	2	5.7193	4.714	0.8493	36.930
10	1	1	3	3	2	2	1	4.8091	3.632	0.8095	65.404
11	1	2	1	1	3	3	2	6.0844	4.820	0.8526	27.342
12	1	3	2	2	1	1	3	5.6632	4.739	0.8238	40.808
13	2	1	2	3	1	3	2	4.9979	3.846	0.7498	66.264
14	2	2	3	1	2	1	3	5.6644	4.479	0.8137	42.172
15	2	3	1	2	3	2	1	5.8105	4.901	1.0120	22.134
16	3	1	3	2	3	1	2	5.3328	3.899	0.7620	58.062
17	3	2	1	3	1	2	3	5.2872	4.359	0.7678	57.194
18	3	3	2	1	2	3	1	5.8890	5.006	0.9800	21.852

为得到各因素与指标的关系,找出指标随因素变化的规律和趋势,寻求各因素水平的最佳搭配,采用直观分析法,即计算出各因素在各水平上的平均值和极差。极差^[4]是指一组数据中最大值和最小值之差,差值越大,表示该因素对指标的影响程度越大,该因素越关键;差值越小,表示影响程度越不显著,因素重要程度一般。试验中各因素的差值见表 4。水平影响趋势如图 5所示。

表 4 综合评判极差分析结果

综合评分 均值	因 素						
	A	B	C	D	E	F	G
均值 1	44.281	54.111	39.084	34.295	47.298	41.969	38.731
均值 2	42.802	43.483	42.999	45.376	44.743	45.055	45.028
均值 3	44.537	34.026	49.537	51.949	39.578	44.596	47.862
极 差	1.735	20.085	10.453	17.654	7.720	3.086	9.131

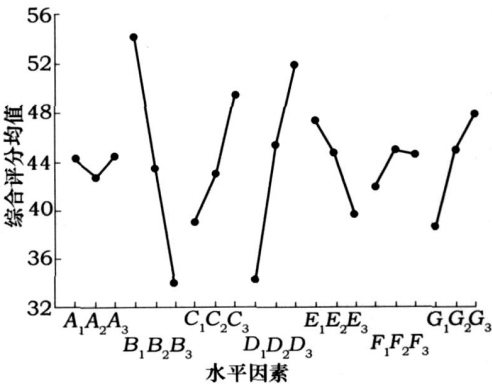


图 5 水平影响趋势图

2.4 结果分析

根据极差分析法,由表 4和图 5可直观地观察出,熔体温度 B 的差值最大,对综合评分的影响较大,为主要因素。模具温度 A 的差值最小,为次要因素。因素的重要程度依次为 B、D、C、G、E、F、A。水平影响趋势图 5中各因素水平的综合评分值越高,所组成的工艺方案越好。由图 5得最优的因素水平组合方案是

$A_3B_1C_3D_3E_1F_2G_3$ 。表 3中没有相应的组合方案,因此需要通过试验进行验证。经过 Moldflow 分析后,该方案的体积收缩率变化为 4.9593%,表面缩痕指数为 3.695%,最大翘曲变形量为 0.7066mm,综合评分为 70.448。与表 3进行比较可知,该方案的综合评分最高,表明该方案为最优工艺组合方案。

3 结语

试验证明,采用注塑成型分析软件 Moldflow,结合正交试验设计以及运用综合评判法,可以对注塑成型工艺参数进行多目标优化设计,能够得到一组综合评分最高的工艺参数组合,证明这种方法是切实可行的。另外,通过对试验结果水平影响趋势图的分析可知,对本产品来说,熔体温度不能过高,过高的温度一方面容易使熔料在经过浇口时产生降解,另一方面,在冷却过程中制品产生的收缩将增大,进而导致制品成型质量的下降。适当增加保压压力以及采用多级保压能更好地对制品进行缩补,有利于改善制品的成型质量。延长填充时间,可以减少熔体的剪切应力,进而减少制品的残余应力,对改善制品成型质量也有一定影响。增加冷却时间,能够很好地减少制品的翘曲变形。

参考文献:

[1] 刘来英. 注塑成型工艺 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
[2] 陈兰贞. 基于数值模拟与正交试验结合的注塑模多工艺参数优化设计 [J]. 现代制造工程, 2006 (12): 77 - 79.
[3] 黄娜斌,江波,张志莲,等. Taguchi DOE实验设计法注射成型工艺参数优化 [J]. 工程塑料应用, 2007 (3): 28 - 31.
[4] 田胜元,萧曰嵘. 实验设计与数据处理 [M]. 武汉:中国建筑工业出版社, 2005.

(下转第 133页)

示。不真实的动态数据,无法给动态测试设计提供正确的设计数据,也无法为力传感器设计提供真实的动态数据,使其无法正确分析和修改力传感器的设计方案和工艺流程。

3 试验研究

北京理工大学新研制的 500kN 负阶跃力校准装置,消除了质量块 M 的影响,能够校准力传感器,提供真实动态参数。以压电式力传感器 YD360 为例,其负阶跃响应曲线如图 6 所示。利用评定方法,对动态数据进行真实评定。

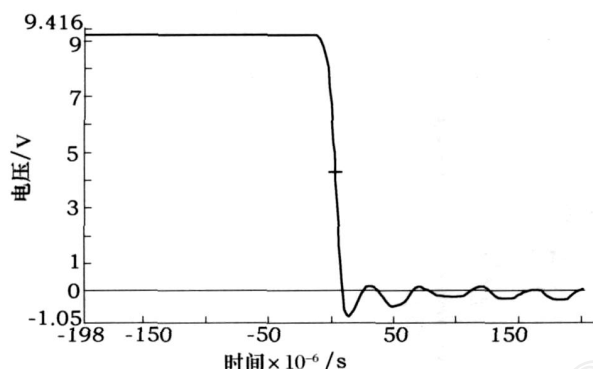


图 6 压电式力传感器 YD360 的负阶跃响应曲线

根据响应曲线试验数据,可以计算出动态特性参数:1)力值不变,误差为 0.1%。2)下降沿时间 T_3 为 22.6 μ s,第二个半周期 T_2 为 20.8 μ s, T_3 基本上等于 T_2 ,误差在 2 μ s 内。3)超调量为 9.28%。4)阻尼比为 0.07。5)第一个波谷值 $P_1 = -0.8536$ V,第一峰值 $P_2 = 0.2003$ V, P_1 的绝对值远大于 P_2 的绝对值;同时表明评定方法合理正确。6)信号归零。

利用评定方法,可以对校准力传感器的边界条件,力传感器的受力面粗糙度,受力面加油和安装条件等临界条件进行试验研究,以保证力传感器动态特

性校准能够提供真实数据。

4 结语

本文利用力传感器响应曲线和方程的内在特征,提出了真实动态特性的评定方法:1)负阶跃力的力值保持不变。2)力传感器响应曲线的下降沿时间 T_3 基本上等于第二个半周期 T_2 。3)第一个波谷值 P_1 的绝对值大于第一个波峰值 P_2 的绝对值。4)信号归零。利用评定方法能够评定校准数据的真实性,能够判断校准装置在原理或者方法上是否有缺陷。试验表明了评定方法正确合理。

参考文献:

- [1] 王维. 动态压力测量原理及方法 [M]. 北京:中国计量出版社, 1986
- [2] Yusaku Fujii Proposal for a step response evaluation method for force transducers [J]. Measurement Science and Technology, 2003 (14): 1741 - 1746
- [3] Crossby F L, Kalh H T. Investigation of dynamic rocket thrust measurement techniques (AD823181), 1967.
- [4] 黄俊钦,王效葵,李行善,等. 力传感器的动态重复性、线性度与动态性能改进研究 [J]. 计量学报, 1995, 16 (1): 58 - 67.
- [5] 袁希光. 传感器技术手册 [M]. 北京:国防工业出版社, 1986
- [6] 国家技术监督局. 国家计量技术规范 JJG1053 - 96, 1996

作者简介:谢殿煌,博士研究生,研究方向:检测,控制。

作者通讯地址:北京理工大学宇航科学技术学院 2005 级博 3 班 (100081)

收稿日期:2008-06-28

(上接第 97 页)

- [5] 王利霞,杨杨,王蓓,等. 注射成型工艺参数对制品的体积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 (2): 173 - 176
- [6] 张志莲,江波. 考虑因子之间交互作用优化注射成型工艺参数 [J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22 (2): 30 - 34.
- [7] Tuncay Erzum lu, Babur Ozelik Minimization of Waipage and Sink Index in Injection-molded Thermoplastic Parts Using Taguchi Optimization Method [J]. Material & Design, 2006, 27 (10): 853 - 861.

- [8] 彭祖赠,孙温玉. 模糊 (Fuzzy) 数学及其应用 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 1999.

作者简介:卫伟,硕士研究生,主要研究方向为模具 CAE/CAD。

作者通讯地址:湖南省长沙市中南林业科技大学 2006 级硕士一班 (410004)

E-mail: papeman20@126.com

收稿日期:2008-09-25