

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.11.011

成型工艺对精密双联小模数齿轮体积收缩性能的影响

周建华, 赵亦兵

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 采用注塑过程数值模拟手段, 结合 Taguchi 实验设计方法, 对小模数齿轮的精密成型工艺进行模拟实验。通过对实验数据进行信噪比和方差分析, 研究了模具温度、保压压力和保压时间及其三者的交互作用对小模数齿轮体积收缩性能的影响。结果表明, 影响小模数齿轮体积收缩性能的因素从大到小的顺序为: 模具温度、保压压力和模具温度与保压时间的交互作用。

关键词: 注塑成型; 工艺优化; 小模数齿轮; 体积收缩; Taguchi 实验设计

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2012)11-0042-04

Effect of Inject Forming Process on Volumetric Shrinkage of Precision Duplicate Fine-pitch Gear

Zhou Jianhua, Zhao Yibing

(College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: According to numerical simulation about inject forming process and Taguchi experimental method, precision molding process simulation experiment of fine-pitch gear was performed. Through the analysis of S/N ratio and ANOVA methods, the effect of mold surface temperature, packing pressure, and packing time as well as the interaction of the three parameters on the volumetric shrinkage were investigated. The results showed that the process parameters of effecting on volumetric shrinkage in descending order were: mold surface temperature, packing pressure and the interaction between mold surface temperature and packing time.

Keywords: injection forming; process optimum; fine-pitch gear; volumetric shrinkage; design of Taguchi experiment

注塑成型的小模数塑料齿轮被广泛应用于交通、电器、通信以及仪器仪表等行业。相对于金属齿轮, 注塑成型的塑料齿轮具有质量轻、噪声低、自润滑和加工成本低等显著特点。目前注塑成型小模数塑料齿轮所用成型材料大多数采用聚甲醛和聚酰胺, 两种材料都具有摩擦系数低、耐磨性好的优点。但聚酰胺材料由于具有高吸湿性, 易引起成型尺寸的变化, 从而影响齿轮精度。而聚甲醛材料的尺寸稳定性较好, 因此被广泛应用于注塑成型小模数塑料齿轮^[1-2]。但是聚甲醛成型收缩率较大(2%~3.5%), 从而影响小模数齿轮的尺寸精度。因此在采用聚甲醛成型精密小模数齿轮时, 必须优化成型工艺以减小其成型收缩率, 从而保证齿轮的精度。

小模数齿轮的模数一般在 0.3~1 之间, 考虑传动比的需要, 双联小模数齿轮其多齿数与少齿数处的直径相差较大, 考虑结构和安装要求, 两处的壁厚比在 1:3 左右。图 1 为典型的双联小模数齿轮结构, 其大径多齿数处的壁厚常为 1~1.5 mm, 小径少齿数处壁厚常为 4.5 mm 左右。由于壁厚相差较大,

双联小模数齿轮在注塑成型时, 齿轮精度受其体积收缩变化的影响较大。因此, 从注塑成型工艺上来控制和减少其体积收缩显得十分重要。

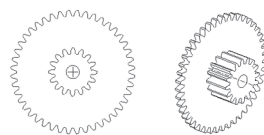


图 1 双联小模数齿轮结构图

1 成型工艺对体积收缩率的影响

在成型材料确定的情况下, 引起制品体积收缩率变化的主要因素包括制品结构、成型工艺和模具结构等。对于双联小模数齿轮的注塑成型, 其成型材料、制品结构和模具结构已经确定, 因此成型工艺成为引起制品体积收缩率变化的唯一因素。

塑料的成型收缩主要由热收缩、结晶收缩和分

联系人: 周建华, 讲师, 主要从事材料加工过程模拟及工艺优化技术的研究

收稿日期: 2012-08-13

子定向复原收缩引起。影响热收缩的主要因素是模具温度,影响结晶收缩和分子定向复原收缩的主要因素是制品在冷却定型阶段的保压压力和保压时间^[3]。因此笔者利用注塑成型过程数值模拟的方法,采用 Taguchi 实验设计的手段,研究了模具温度、保压压力和保压时间等参数对双联小模数齿轮成型时体积收缩率的影响,以获得对采用聚甲醛成型小模数齿轮体积收缩率最小的工艺方案。

2 实验设计

Taguchi 实验设计是由日本质量管理专家田口玄一创立的稳健设计方法。其方法是采用一定规则设计的正交实验矩阵,能确保以最小数目的实验获得全因子实验中影响性能参数的全部信息。Taguchi 实验设计的核心是系统设计、参数设计和容差设计,其中系统设计是产品的雏形设计,参数设计是产品的优化设计,容差设计是产品的改进设计。其核心是参数设计,即采用正交多因子实验设计方法选出影响产品性能因子的最佳值及最优的水平组合,使产品的品质最优,稳定性最好^[4-5]。

2.1 信噪比

在 Taguchi 实验设计中,采用信号噪声比(简称信噪比或 S/N)评定影响效果, S/N 越大,评定效果越好。本研究中的目标值是产品的体积收缩率,体积收缩率越小越好。因此采用 Taguchi 实验设计中的“望小”原则,即目标值“越小越优”的信噪比计算方法,具体公式如下:

$$S/N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

式中: S/N ——信噪比;

y_i ——第 i 次实验结果;

n ——实验次数。

2.2 方差分析

方差分析是将因素水平或交互作用的变化所引起的实验结果间的差异与误差波动引起的实验结果间的差异区分开来的一种数学方法,是用来分析实验数据中的必然因素与偶然因素的影响所占比例的一种数学统计方法^[6]。在方差分析中,一般考虑的因素如下^[5]:

偏差平方和 s :

$$s = Q - CT \quad (2)$$

式中: Q ——效应平均平方和;

CT ——实验数据总和的修正项。

其中考虑各因素之间的交互作用, Q 可由公式

(3)计算:

$$Q_{i_1 i_2} = \frac{1}{n_{i_1 i_2}} \sum_{j=1}^n I_{i_1 i_2 j}^2 \quad (3)$$

式中: $i_1 i_2$ ——第 i_1 个因素与第 i_2 个因素的交互作用;

$n_{i_1 i_2}$ ——该交互作用每个水平出现的次数;

$I_{i_1 i_2 j}$ ——该交互作用的第 j 个水平的 S/N 总和。

CT 可由公式(4)计算得到:

$$CT = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (4)$$

自由度 φ :

总自由度等于实验总次数减 1;每个因素的自由度等于其水平数减 1;交互作用的自由度等于相应各个因素的自由度的乘积。

总偏差平方和 S_T :

$$S_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

式中: $\bar{y} = \frac{y_i}{n}$

方差比 F :

$$F = (S_{\text{因素或交互作用}} / \varphi_{\text{因素或交互作用}}) / (S_{\text{误差}} / \varphi_{\text{误差}}) \quad (6)$$

式中: $S_{\text{因素或交互作用}}$ ——各因素的偏差平方和;

$\varphi_{\text{因素或交互作用}}$ ——各因素的自由度;

$S_{\text{误差}}$ ——试验误差的偏差平方和;

$\varphi_{\text{误差}}$ ——试验误差的自由度。

3 实验方案

笔者采用的实验模型是模数为 0.4 的双联齿轮,齿数分别为 44 和 16,壁厚分别是 1 mm 和 5 mm。材料采用 BASF 公司生产的聚甲醛材料,采用 3 个直径为 0.6 mm 的点浇口进料,如图 2 所示。从图 2 可以看出,产品中间为厚壁处,周边为薄壁处,笔者主要考察由于中间厚壁收缩所引起的周边薄壁的体积收缩率。

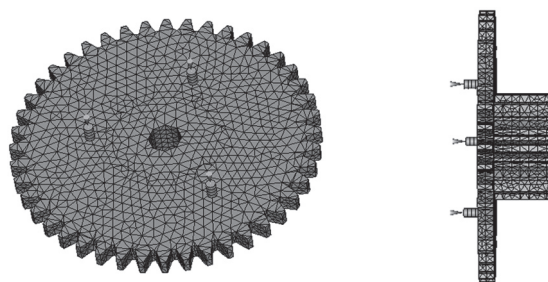


图 2 双联小模数齿轮实验模型图

由于影响聚甲醛小模数齿轮成型体积收缩的主要因素是模具温度、保压压力和保压时间,因此将上述三因素作为研究对象,采用含交互作用的三因素三水平的 27 次实验的正交实验。其成型工艺参数水平设置如表 1。

表 1 成型工艺参数水平设置

因素	水平 1	水平 2	水平 3
模具温度(x_1) / $^{\circ}\text{C}$	40	80	120
保压压力(x_2) / MPa	40	80	120
保压时间(x_3) / s	5	10	15

4 结果与讨论

4.1 信噪比分析

根据上述实验方案,采用模流分析软件 Moldflow 分析产品周边薄壁处的体积收缩率,基于实验结果,根据式(1)对体积收缩率进行信噪比的分析计算,结果见表 2。

表 2 实验方案分析结果与信噪比

序号	$x_1 / ^{\circ}\text{C}$	x_2 / MPa	$x_1 x_2$	x_3 / s	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	体积收缩率 / %	S/N
1	40	40	11	5	11	11	10.55	19.5350
2	40	40	11	10	22	22	10.51	19.5679
3	40	40	11	15	33	33	10.50	19.5762
4	40	80	22	5	11	23	9.818	20.1595
5	40	80	22	10	22	31	9.816	20.1613
6	40	80	22	15	33	12	9.816	20.1613
7	40	120	33	5	11	32	9.713	20.2529
8	40	120	33	10	22	13	9.711	20.2547
9	40	120	33	15	33	21	9.711	20.2547
10	80	40	23	5	23	11	10.87	19.2754
11	80	40	23	10	31	22	10.86	19.2834
12	80	40	23	15	12	33	10.86	19.2834
13	80	80	31	5	23	23	10.51	19.5679
14	80	80	31	10	31	31	8.804	21.1064
15	80	80	31	15	12	12	8.973	20.9412
16	80	120	12	5	23	32	10.43	19.6343
17	80	120	12	10	31	13	9.011	20.9045
18	80	120	12	15	12	21	9.011	20.9045
19	120	40	32	5	32	11	12.76	17.8830
20	120	40	32	10	13	22	13.46	17.4191
21	120	40	32	15	21	33	13.51	17.3869
22	120	80	13	5	32	23	11.88	18.5037
23	120	80	13	10	13	31	12.29	18.9461
24	120	80	13	15	21	12	12.56	18.0202
25	120	120	21	5	32	32	12.26	18.2302
26	120	120	21	10	13	13	12.73	17.9034
27	120	120	21	15	21	21	13.02	17.7078

根据表 2 的分析计算结果,对信噪比进行极差分析,得到各因素对信噪比的影响,如图 3 所示;各因素间的交互作用对信噪比的影响,如图 4 所示。

从图 3 可以看出,对体积收缩波动影响因素的显著性从大到小依次是:模具温度、保压压力、保压时间。从图 4 可以看出,在所有的实验方案中,考虑

各因素间的交互作用的影响,使得信噪比最大的方案即为最优方案。因此,最优工艺组合方案为:模具温度 80°C 、保压压力 80 MPa、保压时间 10 s。

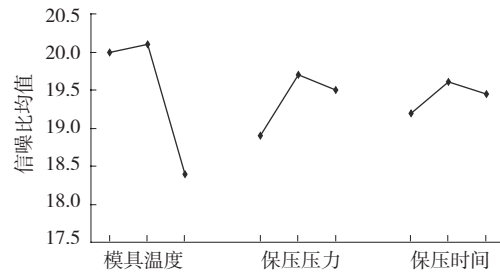


图 3 各因素对信噪比均值的影响

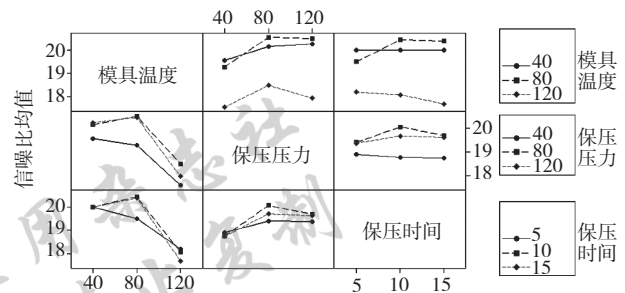


图 4 各因素间的交互作用对信噪比均值的影响

从表 2 可以看出,基于最优工艺组合方案的产品体积收缩率为 8.804%,该方案的信噪比为 21.1064,是所有实验方案中最大的。基于该组合的实验数值模拟结果见图 5。从图 5 可以看出,该产品成型的体积收缩率很好地控制在 9% 以下。

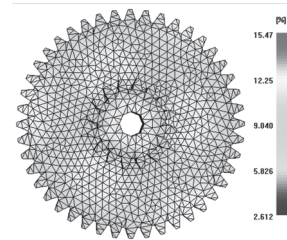


图 5 最优工艺组合方案的产品体积收缩率

4.2 方差分析

为进一步分析各因素及各因素之间的相互作用对目标的影响,基于上述分析结果和式(2)~(6),对实验数据进行方差分析,结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,影响聚甲醛小模数齿轮注塑成型体积收缩率最显著的因素是模具温度(贡献率为 74.96%),其次是保压压力(贡献率为 13.12%),第三因素是模具温度与保压时间的交互作用(贡献率为 5.15%);而保压时间(贡献率为 1.04%)、模具温度与保压压力的交互作用(贡献率为 2.31%)、保压压力与保压时间的交互作用(贡献率为 1.54%)

这3种因素对产品收缩率的影响较小,为非显著因素。

表3 实验结果的方差分析

因素	偏差平方和 s	自由度 φ	平均偏差平方和	方差比 F	显著性	贡献率 / %
x_1	25.164 4	2	12.582 2	159.53	*	74.96
x_2	4.403 8	2	2.201 9	27.92	*	13.12
x_3	0.348 9	2	0.174 4	2.21		1.04
x_1x_2	0.776 3	4	0.194 1	2.46		2.31
x_1x_3	1.729 3	4	0.432 3	5.48	*	5.15
x_2x_3	0.516 6	4	0.129 1	1.64		1.54
e	0.631 0	8	0.078 9			
总和	33.570 2	26				

5 结论

(1)对聚甲醛材料成型双联小模数齿轮体积收缩率影响因素的显著性从大到小依次是:模具温度、保压压力和模具温度与保压时间的交互作用。

(2)合理的组合和优化模具温度、保压压力和保压时间可以有效地控制聚甲醛材料成型双联小模

数齿轮的体积收缩率,从而更好地控制产品精度。

(3)模具温度、保压压力和保压时间的增大可以减小产品的成型收缩率,但是不能超出各自的“拐点”。

参考文献

- [1] 王学虎,祝铁丽,宋满仓,等.小模数塑料内齿轮注塑模具设计[J].工程塑料应用,2010,38(5):62-65.
- [2] 吴利英.聚甲醛双齿轮成型加工工艺研究[J].工程塑料应用,2002,30(2):22-23.
- [3] 曹文良.精密小模数齿轮的多型腔成型工艺及模具[J].模具工业,1989,104(10):33-36.
- [4] 田口玄一.实验设计方法(上)[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [5] 杨德.实验设计与分析[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [6] 胡广洪,徐潇明,杜艳丽,等.保压工艺和浇口尺寸对非球面镜头收缩性能的影响[J].中国塑料,2008,22(11):66-69.
- [7] 林师沛,赵洪,刘芳.塑料加工流变学及其应用[M].北京:国防工业出版社,2008.

优惠销售 2000~2012 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000~2012 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 13 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》,以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 《论文集》,优惠价为 330 元/套,单册价格如下:

- 《2012 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 75 篇,正文 290 页,50 元/册;
《2011 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 369 页,50 元/册;
《2010 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 371 页,45 元/册;
《2009 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 351 页,40 元/册;
《2008 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 351 页,35 元/册;
《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 343 页,30 元/册;
《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 346 页,25 元/册;
《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 338 页,20 元/册;
《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 337 页,20 元/册;
《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 105 篇,正文 373 页,20 元/册;
《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 351 页,20 元/册;
《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》,论文 80 篇,正文 270 页,20 元/册;
《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 339 页,20 元/册。

2. 论文集光盘,优惠价为 230 元/盘。

本光盘除收录上述 13 本《论文集》的全部内容外,还包括约 2500 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者,请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。