

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.06.012

基于缩痕最小的空调面框注塑成型工艺参数优化^{*}

胡邓平¹, 文泽军¹, 吴爱华², 刘湛¹

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南理工职业技术学院, 湖南湘潭 411104)

摘要: 针对带有网格的框形薄壁注塑件容易出现缩痕的问题, 开展基于缩痕最小的空调面框注塑成型工艺参数优化研究。首先构建空调面框三维几何模型, 设计浇道系统和冷却流道, 在运用 Moldflow 数值模拟和四水平正交试验 $L_{16}(4^5)$ 的基础上, 以注射时间、模具温度、熔体温度、相对保压压力、保压时间为设计变量, 采用极差分析和方差分析得到各参数对缩痕指数的影响程度, 并获得了最优的工艺参数组合, 其缩痕指数降低为 2.159%, 最后通过注塑成型试验验证该方法的有效性。这为框形薄壁注塑件低成本高质量设计提供了一种新的途径。

关键词: 空调面框; 工艺参数; 正交试验; 缩痕指数

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)06-0054-04

Optimization of Injection Molding Process Parameters for Air Conditioning Plane Frame Based on Minimization of Sink Index

Hu Dengping¹, Wen Zejun¹, Wu Aihua², Liu Zhan¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan 411104, China)

Abstract: Aimed at the problem that the sink marks is easy to appear in the frame thin-wall plastic products with grid, the research on the optimization of injection molding process parameters for air conditioning plane frame based on the minimization of sink index was carried out. First, the 3D model of air conditioning plane frame was built, the gating system and cooling flow channel were designed. Based on the use of moldflow simulation and four levels orthogonal experiment $L_{16}(4^5)$, injection time, mold temperature, melt temperature, relative packing pressure and packing time were designed as variables. The influence of various parameters on the sink mark index were obtained by using the range analysis and variance analysis, and the optimal process parameters combination were obtained, the sink mark index was decreased to 2.159%. Finally the method was confirmed to be effective by using injection molding experiments. It provides a new way of low-cost and high-quality design for the frame thin-wall plastic products.

Keywords: air conditioning plane frame; process parameter; orthogonal experiment; sink mark index

塑料件的质量取决于材料特性、模具结构和注塑工艺参数, 其注塑工艺参数对注塑成型质量具有重要的影响^[1]。近年来, 国内外学者关于控制注塑成型过程中缩痕缺陷开展了一系列研究, 取得了许多重要研究成果。对于空调面框等大型复杂的薄壁框形注塑件的注射成型, 为了减少试模次数、缩短成型周期, 通常采用数值模拟技术对缩痕缺陷进行分析^[2], 其中缩痕指数大小可以判断塑料件上产生缩痕的相对可能性^[3]。T. Erzurumlu 等^[4]研究了不同的注塑工艺参数和不同加强筋截面以及筋位布局方案对注塑制品缩痕指数和翘曲变形的影响, 考虑了对缩痕指数影响显著的工艺参数如模具温度、熔体温度、保压压力, 并选择了聚碳酸酯/丙烯腈-丁二

烯-苯乙烯塑料, 聚甲醛, 尼龙 66 三种材料进行了 Taguchi 实验得到了最小缩痕指数的优化组合。D. Mathivanan 等^[5-6]通过实验设计和遗传算法相结合的方法, 得到影响缩痕的因素有熔体温度、保压压力、模具温度、制品壁厚与加强筋的厚度比, 并运用正交试验和有限元结合的方法综合分析得到影响缩痕指数的主次顺序。Guo Wei 等^[7]以三角形薄板为研究案例, 利用实验设计和遗传算法分析得到最小缩痕深度。总之, 上述研究很少涉及带有网格的框

^{*} 国家自然科学基金项目 (51075141)

联系人: 文泽军, 博士, 教授, 主要从事产品制造/装配过程的稳健设计及模具 CAD/CAE 研究

收稿日期: 2015-03-24

形薄壁注塑件表面质量的研究,带有网格的框形薄壁注塑件在注塑成型过程中,在壁厚与壁薄的交接区域由于融合不均,同时厚壁部分在冷却时没有得到足够的熔料补偿都容易产生缩痕缺陷,这些都可以通过调整注塑工艺参数得到改善。

笔者在上述研究的基础上,以带有网格的空调面框为研究对象,在运用数值模拟和四水平正交试验 $L_{16}(4^5 \text{ 四水平五因素})$ 的基础上,以注射时间、模具温度、熔体温度、相对保压压力、保压时间为设计变量,缩痕指数为评价指标,采用极差分析和方差分析技术得到各参数对缩痕指数的影响程度,并由此获得最优的工艺参数组合。该研究方法为带有网格的框形薄壁注塑件表面质量的研究提供了新途径。

1 空调面框数值分析几何模型

1.1 空调面框结构分析与网格划分

空调面框属于带有网格的框形薄壁注塑件,经测量得到空调面框注塑件的外形尺寸为 $854.3 \text{ mm} \times 268.2 \text{ mm} \times 195.2 \text{ mm}$,壁薄处为 3.5 mm ,壁厚处为 13.2 mm ,首先根据空调面框的尺寸数据在 Pro/E 中建立三维模型,并以 STL 格式导出,在注塑仿真软件 Moldflow 中,导入空调面框 STL 模型部件,选择网格类型为双层面网格,最后统计得出网格模型三角形单元总数为 42 683 个,网格匹配率 87.6%,无自由边和多重边,网格质量较好,见图 1。由于空调面框属于比较大型的塑料件,故采用一模一腔布置,根据生活中空调面框性能要求,选择空调面框材料为高抗冲击性聚苯乙烯 (PS-HI) Polyrex PH-60。

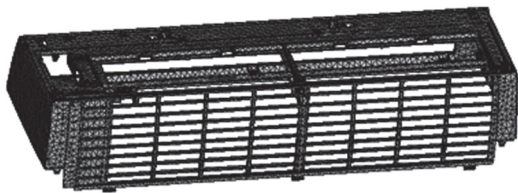


图 1 空调面框网格模型

1.2 空调面框数值分析模型

空调面框在内表面分布着数量较多的筋结构,在前部壳体又分布较多的网格结构,根据产品性能要求,本浇道系统采用开放式热流道系统,热流道浇道系统可以保证塑料均匀一致地流入各模腔,脱模后残余应力低,产生缩痕少,根据注塑仿真流场比分析选择最优的浇口排布位置,为了使进料流动均匀,设置进料口热嘴 6 个,热嘴直径设置为 3.5 mm ,热流道 a1, a2 的直径设置为 12 mm ,热流道 b1, b2

直径设置为 10 mm ,见图 2。冷却流道的几何特征、数量和排布位置,影响塑料件在模具型腔中受热是否均匀,根据空调面框的几何结构和冷却流道的排布规则设置门框式冷却流道,流道直径设置为 10 mm ,见图 2。冷却系统建立完成后,可以得到完整的空调面框有限元分析模型,即可使用 Moldflow 软件对空调面框注塑过程进行数值模拟。

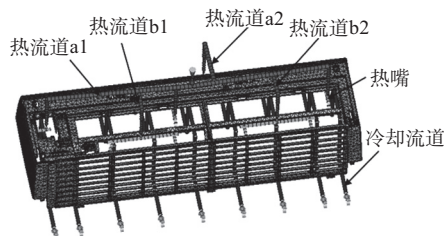


图 2 空调面框数值分析几何模型

2 工艺参数优化

2.1 变量设计及评价指标

设空调面框缩痕缺陷 F 受 n 个因素影响,由 $y=\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ 所决定,则 $F=f(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$,为了尽可能全面考虑工艺参数对空调面框缩痕的影响,这里将注射时间、模具温度、熔体温度、相对保压压力、保压时间五个参数作为影响缩痕的评价变量,缩痕指数是缩痕深度相对于该位置厚度的比值,故可以作为空调面框缩痕的评价指标。根据材料特性、注射条件、生产效率以及单因素取值范围对缩痕的影响程度,再结合实际经验和 Moldflow 软件的系统推荐值,笔者采用的设计变量及取值范围为:注射时间 A 取 $1.2 \sim 2.4 \text{ s}$,模具温度 B 取 $30 \sim 45^\circ\text{C}$,熔体温度 C 取 $200 \sim 230^\circ\text{C}$,相对保压压力 D 取 $65\% \sim 95\%$ (相对保压压力为保压压力与最大注射压力的百分比值,理论上最大注射压力是在数值模拟中自动计算的),保压时间 E 取 $7 \sim 13 \text{ s}$ 。

2.2 正交试验设计

正交试验是研究多因素、多水平的一种比较高效的方法,可以通过少数的试验代替全面的试验^[8]。本试验以注射时间、模具温度、熔体温度、相对保压压力、保压时间这五个参数为设计变量,根据上节中设计变量的取值范围,每个参数分别取四个水平值,见表 1。

表 1 5 因素 4 水平取值表

水平	因素				
	A/s	$B/^\circ\text{C}$	$C/^\circ\text{C}$	$D/\%$	E/s
水平 1	1.2	30	200	65	7
水平 2	1.6	35	210	75	9
水平 3	2.0	40	220	85	11
水平 4	2.4	45	230	95	13

2.3 试验数据与数据处理

本试验由于有 5 因素与 4 水平,故采用 $L_{16}(4^5)$,其中在表 2 中,第 1 号试验 A1B1C1D1E1,表示在试验过程中,注射时间为 1.2 s,模具温度为 30℃,熔体温度为 200℃,相对保压压力为 65%,保压时间为 7 s,依次类推,在数值模拟中取最大缩痕指数为参考,并每组进行 3 次数值模拟试验,表 2 中缩痕指数取 3 次试验的平均值。

表 2 试验方案及结果

试验号	工艺参数					缩痕指数 / %
	A/s	B/℃	C/℃	D/%	E/s	
1	1	1	1	1	1	3.642
2	1	2	2	2	2	3.713
3	1	3	3	3	3	3.770
4	1	4	4	4	4	3.936
5	2	1	2	3	4	3.337
6	2	2	1	4	3	2.520
7	2	3	4	1	2	4.882
8	2	4	3	2	1	4.769
9	3	1	3	4	2	3.792
10	3	2	4	3	1	5.047
11	3	3	1	2	4	3.108
12	3	4	2	1	3	3.811
13	4	1	4	2	3	4.052
14	4	2	3	1	4	4.111
15	4	3	2	4	1	3.697
16	4	4	1	3	2	2.882

(1) 极差分析。

根据表 2 中的数据,采用均值分析方法,得到表 3 的均值分析表。其中, $M_i (i=1,2,3,4)$ 表示每列因子在第 i 个水平下的缩痕指数平均值, $\bar{m}$ 表示所有因子在所有水平下的缩痕指数平均值, R 表示各因素不同水平下缩痕指数平均值的最大值与最小值之差。将试验因素水平作为横坐标,以每个水平下的缩痕指数的平均值为纵坐标,得到因素水平与试验指标的影响趋势图,见图 3。

表 3 试验数据极差分析结果

缩痕指数平均值	A	B	C	D	E
M_1	3.765 3	3.705 8	3.038 0	4.111 5	4.288 8
M_2	3.877 0	3.847 8	3.639 5	3.910 5	3.817 3
M_3	3.939 5	3.864 3	4.110 5	3.759 0	3.538 3
M_4	3.685 5	3.849 5	4.479 3	3.486 3	3.623 0
极差 R	0.254 0	0.158 5	1.441 3	0.625 2	0.750 5
$\bar{m}$	3.816 8				

(2) 方差分析。

方差分析是通过百分比量来评估工艺参数对缩痕指数的影响程度,使用的方差分析公式见式(3),式中 SS_E 表示偏差平均和, $M_i (i=1,2,3,4)$ 表示每列因子在第 i 个水平下缩痕指数的平均值。 SS_{Ei}

表示每个水平下的偏差平均和,表示所有因子在所有水平下缩痕指数的平均值, SS_T 表示总的偏差平均和,见式(4)。 SS_E 与 SS_T 比值则称为影响程度 P ,见式(5)。

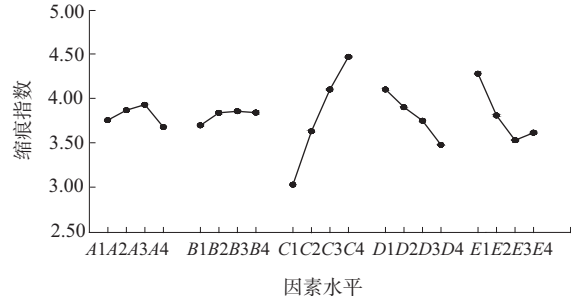


图 3 各因素对缩痕指数的影响

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{m})^2 \quad (1)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n SS_{Ei} \quad (2)$$

$$P = \frac{SS_E}{SS_T} \times 100\% \quad (3)$$

根据式(3)~式(5),得到了缩痕指数的偏差平均和、均方 (SS_E 与 f 的比值) 和影响程度 P ,见表 4。

表 4 试验数据方差分析结果

因素	SS_E	自由度 f	均方 (SS_E/f)	$P/\%$
A	0.038 6	3	0.012 9	2.19
B	0.016 6	3	0.005 5	0.94
C	1.163 1	3	0.387 7	65.92
D	0.208 2	3	0.069 4	11.80
E	0.337 9	3	0.112 6	19.15
总和	1.764 4	15		

由表 3、表 4 和图 3 可知,对于 PS-HI 材料,工艺参数对缩痕指数的影响程度如下:①熔体温度对缩痕指数的影响最为显著,随着熔体温度的增大,缩痕指数一直增大,空调面框表面质量将下降。②保压时间对缩痕指数的影响排第二位,随着保压时间的增长,缩痕指数先减小后增大,在 11 s 处取得最小值。③相对保压压力对缩痕指数的影响排第三位,随着相对保压压力由 65% 增加到 95% 时,缩痕指数一直减小,在 95% 处取得最小值。④注射时间对缩痕指数的影响排第四位,随着注射时间的增长,缩痕指数先增大后减小,在注射时间为 2.4 s 时取得最小值。⑤模具温度对缩痕指数的影响最小,随着模具温度的升高,缩痕指数先增大后有少许减小,在模具温度为 30℃时取得最小值。

3 最优参数组合数值模拟及试验验证

3.1 最优参数组合数值模拟

从图 3 可以得到,当注射时间为 2.4 s、模具

温度为 30℃、熔体温度为 200℃、相对保压压力为 95%、保压时间为 11 s 时,即 A4B1C1D4E3 为最小缩痕指数参数组合,缩痕指数见图 4。

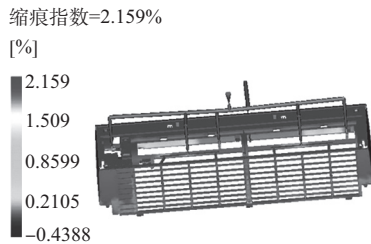


图 4 A4B1C1D4E3 组合的缩痕指数图

从图 4 数据可得, A4B1C1D4E3 组合的缩痕指数为 2.159%,满足所有试验组合的最小缩痕指数,证明了正交试验法的正确性与高效性,与此同时得到了相对于所有试验组合的最小值。

3.2 试验验证

根据得到的空调面框最小工艺参数组合,在注塑机上通过调整注射时间为 2.4 s、模具温度为 30℃、熔体温度为 200℃、相对保压压力为 95%、保压时间为 11 s 时,经测量得到空调面框样品表面缩痕深度取值范围为 [0,0.07]mm,缩痕深度最大值与空调面框壁厚 3.5 mm 处比值为 2.0%,与空调面框壁厚 13.2 处比值为 0.53%,即空调面框表面缩痕指数的取值范围为 [0.53%,2.0%],同时空调面框样品表面光洁度较高,达到生产工艺要求,见图 5。

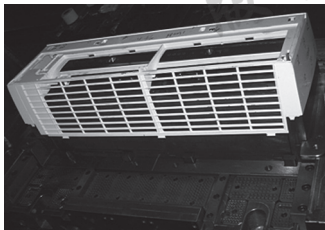


图 5 空调面框注塑样品

4 结论

(1) 运用数值模拟和正交试验的方法研究了各工艺参数对空调面框缩痕指数的影响规律,并采用极差分析和方差分析技术得到了最优的工艺参数组合 A4B1C1D4E3,即注射时间 2.4 s,模具温度 30℃,熔体温度 200℃,相对保压压力 95%,保压时间 11 s,节约了试模的时间。

(2) 注塑工艺参数对空调面框缩痕指数的影响程度由大至小依次为:熔体温度 C、保压时间 E、相对保压压力 D、注射时间 A、模具温度 B。

(3) 采用最佳注射工艺参数组合的空调面框缩痕指数降低为 2.159%,且通过注塑成型试验验证该方法的有效性。这为框形薄壁注塑件低成本高质量设计提供了一种新的途径。

参考文献

- [1] 程锦,谭建荣,余加红.基于 TOPSIS 的注塑工艺参数多目标稳健优化设计[J].机械工程学报,2011,47(6):27-32.
Cheng Jin, Tan Jianrong, Yu Jiahong. Multi-objective robust optimization of injection molding process parameters based on TOPSIS[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6):27-32.
- [2] Wang L, Li Q, Shen C, et al. Effects of process parameters and two-way interactions on sink mark depth of injection molded parts by using the design of experiment method[J]. Polymer Plastics Technology and Engineering, 2007, 47(1):30-35.
- [3] 孙玲,张冬,刘小明,等.基于缩痕最小的汽车保险杠成型工艺参数优化[J].中国塑料,2009,23(7):55-56.
Sun Ling, Zhang Dong, Liu Xiaoming, et al. Optimization of molding processing parameters for automobile bumpers based on minimization of sink index[J]. China Plastics, 2009, 23(7):55-56.
- [4] Erzurumlu T, Ozcelik B. Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method[J]. Materials & design, 2006, 27(10):853-861.
- [5] Mathivanan D, Parthasarathy N S. Sink-mark minimization in injection molding through response surface regression modeling and genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9-10):867-874.
- [6] Mathivanan D, Nouby M, Vidhya R. Minimization of sink mark defects in injection molding process—Taguchi approach[J]. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2(2):13-22.
- [7] Guo Wei, Hua Lin, Mao Huajie. Minimization of sink mark depth in injection-molded thermoplastic through design of experiments and genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4):365-375.
- [8] Tang S H, Tan Y J, Sapuan S M, et al. The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1):418-426.

拜耳材料科技展出聚碳酸酯材料

拜耳材料科技于 2015 年 5 月 5~9 日在米兰举办的塑料展会上展出聚碳酸酯材料概念。材料概念设计旨在针对未来汽车设计,满足了多样化的特殊需求,包括高效生产。公司还研发了特殊制样器,从而为汽车生产商和直接供应商

呈现多样的设计变化。该材料概念具备以下三个特点:

- (1) 创新型的表面结构成型概念。
- (2) 一步法工艺制高功能化部件。
- (3) 聚碳酸酯薄膜促进三维立体自由设计。

(中塑在线)