

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.013

塑料联接件结构设计与注塑工艺的联合优化^{*}

卓凯峰^{1,2}, 张炜³, 邓益民^{1,2}

[1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江宁波 315211;

3. 华纳圣龙(宁波)有限公司, 浙江宁波 315104]

摘要:以塑料联接件为研究对象,探讨一种综合考虑制品结构设计和注塑工艺的联合优化方法,即“结构-工艺联合优化法”,研究这两类不同类型的因素对成型质量的影响,将结构设计中的底座形状、壁厚以及注塑工艺中的模具温度和熔融温度作为因素,并采用正交实验设计法,借助于 Moldflow 软件进行注塑过程的模拟分析。结果表明,当底座去除部分占底座总面积的 25%,壁厚为 1.6 mm,模具与熔融温度分别为 85℃和 260℃时,注塑件的体积收缩率最大与最小值的差值和综合翘曲量分别较优化前降低了 26.5%和 30.3%,最终实现了注塑件体积收缩率及综合翘曲这两个成型缺陷指标值的最小化,为塑料联接件及类似塑料产品的优化设计提供了指导。

关键词:塑料联接件;结构设计;注塑工艺;联合优化;正交实验设计

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0066-05

Combined Optimization of Structural Design and Injection Molding Process of Plastic Connector

Zhuo Kaifeng^{1,2}, Zhang Wei³, Deng Yimin^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China; 3. BorgWarner Shenglong (Ningbo) Co. Ltd., Ningbo 315104, China)

Abstract: Taking a plastic connector as an example, a combined optimization methodology including the part structural design and the molding process setting was discussed. The proposed methodology is referred to as the “structure-cum-process combined optimization method”. The effects of the two different categories factors on the injection molding quality were studied, the base shape of the connector and wall thickness of the part structural design, as well as the mould and melt temperature of the process setting were chosen as the influencing factors for optimization. The strategy employs orthogonal design of experiment method for optimization, and the Moldflow software is employed to conduct CAE simulation of the molding process. The results show that, when the base remove part accounts for 25% of the base total area, the wall thickness is 1.6 mm, the mould and melt temperature is 85℃ and 260℃ respectively, the difference of volumetric shrinkage maximum value and minimum value and comprehensive warpage of the connector decrease 26.5% and 30.3% respectively compared with those before optimization, which indicates both the volumetric shrinkage and the comprehensive warpage are minimized from the optimization. The proposed methodology provides guidance for the optimal design of plastic connectors and other similar plastic products.

Keywords: plastic connector; structural design; injection molding; combined optimization; orthogonal DOE

如今的注塑产品日益复杂,对质量以及使用性能的要求也越来越高,对产品研发和模具设计人员的技术要求也随之增高。传统的注塑设计方法需要凭借经验且需试模多次,导致成本增加及研发周期的延长^[1]。在塑件的成型加工过程中,塑料材料要经过受热软化、熔融、注射、保压和冷却这 5 个阶段的物理变化过程,若在注塑过程中工艺参数等的设置不当,将导致塑件出现气泡、飞边、翘曲等问题^[2]。另一方面,若塑件几何结构设计不合理,则会加重这些质量问题,甚至造成成型工艺无法校正质量瑕疵的问题。塑料联接件作为一类用以提供联接、密封

等功能的小型塑料件,在汽车电子等机电设备中应用广泛。由于其特定的功能和使用特点,通常要求其联接面平整度高,气密性或防泄露能力强,因此对收缩和翘曲变形有较高要求。为此,除了正确设置注塑工艺条件外,一个重要的方法是在不影响产品功能和性能要求的前提下,对制品结构进行修改完善,从而在产品结构上尽可能弱化造成收缩和翘曲

^{*} 浙江省自然科学基金项目(R104247),校企合作项目(HX2014000120)

联系人:卓凯峰,硕士,主要从事机械设计理论与方法的研究

收稿日期:2017-08-01

等注塑缺陷的影响因素,以最大程度的满足相关设备的使用性能要求。

开展上述研究的一个重要工具是借助于成型CAE软件如Moldflow,该软件可以模拟整个注塑过程以及这一过程对成型质量的影响,包括预测塑件的收缩、翘曲变形等成型缺陷,优化浇注系统、确定最佳浇口位置等^[4]。基于Moldflow的模拟分析结果,设计人员可以对注塑工艺参数进行优化,获得在工艺参数可控范围内的最佳制品成型质量^[5-9]。但是,对塑料联接件这类具有特定要求的塑料件来说,如上分析可知,单纯的成型工艺优化方法往往难以从根本上解决由于注塑收缩和翘曲所带来的制品质量缺陷。

为此,笔者提出一个将制品结构设计和注塑工艺相结合的联合优化方法。目前在注塑优化领域综合考虑“结构-工艺”优化的研究还相对较少。例如,兰芳等^[5]针对电器设备下盖类产品,研究了结构和工艺参数两个方面的塑件质量影响因素,但其结构设计仅考虑了增加塑件散热栅的宽度和厚度两个结构参数,而缺少对结构本身的设计修改;邓益民等^[6]基于粒子群算法提出了一个同时优化结构参数和工艺参数的集成优化方法,但同样也只是仅将一种结构参数(制品厚度)列入优化变量,缺少对结构本身的修改。贺华波等^[7]针对笔筒注塑件产品,研究了笔筒注塑件底座的15种典型结构对塑件质量的影响因素,缺少对工艺参数变化时所造成的影响的综合考虑。可见,现有研究还缺少对制品结构进行设计修改并联合进行工艺参数优化的注塑优化方法,也就是说,现有研究还未能把结构设计作为一个优化变量考虑到优化算法中。笔者提出的“结构-工艺”联合优化方法将对解决此类问题提供一个新思路,该方法选用正交实验法,适用于处理离散变量的实验方案设计及相关的优化问题。

1 塑件结构及成型分析

1.1 塑件结构分析

以某公司生产的一款汽车冷却水泵塑料联接件为例,如图1所示,通过Pro/E建模并使用Moldflow软件进行模拟分析。该联接件由底座和顶部套筒及其它辅助结构特征构成,其中底座长28 mm,宽20 mm,整体高32 mm,所用材料为聚碳酸酯(PC)类,以注塑方法加工生产。由于注塑件普遍存在的收缩不均匀、翘曲变形等问题,使得此类制品在实际使用中存在漏气漏液等问题。为此,需

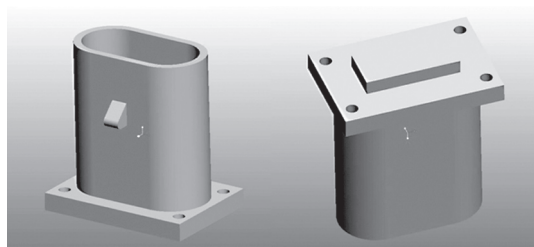


图1 塑料联接件几何形状

要在不影响制品功能的前提下进行制品结构的设计修正,并以最合适的成型工艺获得最小的收缩和翘曲变形缺陷,也就是说,需要进行结构和工艺的联合优化。

1.2 优化目标

如上所述,塑料联接件的优化设计目标是 minimized 塑件的不均匀收缩和翘曲变形。通过运用Moldflow对注塑过程的模拟分析,可以获得塑件体积收缩率和翘曲变形等方面的结果数据。体积收缩率指塑件在冷却后的体积收缩情况,如图2所示,塑件中部靠近底座区域的体积收缩率较大,而其余区域的体积收缩率较小。若体积收缩率最大与最小值的差值过大,则易造成塑件表面不平整、出现翘曲等问题^[8-11]。

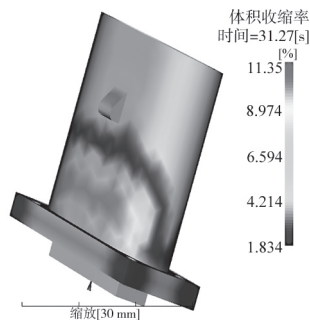


图2 塑件体积收缩率

翘曲变形是由于温度、压力、应力、塑件结构等多方面因素(包括由此造成的制品不均匀收缩等)综合作用所造成的一种成型质量缺陷,如图3所示,塑件颜色较深区域的底座以及接插口处易造成成型质量缺陷。

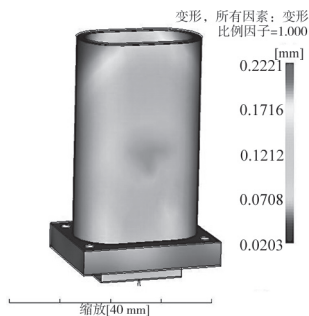


图3 塑件综合翘曲

两种情况都不利于待联接部件的精密装配,容易造成漏气漏液等密封问题。为此,选择体积收缩率最大与最小值差值(以下简称体积收缩率差值)和综合翘曲量作为优化目标。

1.3 优化变量

通过分析注塑中影响塑件收缩均匀性和造成翘曲的主要因素可以发现,塑件的形状、材料属性、注射压力、注射速度、模具温度等都是造成翘曲的原因^[12]。其中跟塑件结构有关的重要因素包括壁厚及其均匀性。壁厚过厚或过薄都不利于塑件的成型质量。过厚的壁厚会造成熔融塑料充填过程的层流现象,造成表面和内部应力分布不均匀;壁厚过薄会造成充填困难或不充分,容易造成缩痕或缩孔,这两种情况都会影响制品的收缩均匀性。因此,将塑件壁厚(以其中的套筒壁厚为准)作为塑料联接件的优化变量之一。

另外一个影响因素是壁厚均匀性。壁厚不均匀会造成塑件冷却过程中的不均匀收缩,从而进一步造成不必要的翘曲变形。分析该联接件的几何结构可见,该塑件主要由底板和套筒构成,相对于套筒来说,现有设计的底板厚度明显大于套筒(接近3倍)。为此,需要对底板结构进行设计修改,以功能需求为约束,以均匀壁厚为目标,所获得的不同结构设计可以作为优化变量之一。与其它优化变量如壁厚不同,该变量的取值属于离散量。

除了制品结构外,成型工艺参数中模具温度和熔融温度是影响塑料联接件成型质量的两个重要因素。模具温度过低会造成熔融塑料沿壁厚方向的温差梯度过大,造成塑件内部与表面温度冷却速度的不同;温度过高则会造成成型后期的冷却时间过长,冷却周期温差偏大。类似的,熔融温度过高会造成熔体沿厚度方向的温差梯度过大,甚至会造成塑料材料烧焦等极端情况;熔融温度过低则不利于熔体流动,造成型腔充填不均或不满等问题。这些情况都会影响制品收缩的均匀性。因此,选择模具温度和熔融温度作为另两个优化变量。

2 结构-工艺联合优化

2.1 优化方法的选择

从以上分析可见,所设计的优化变量包括连续变量(壁厚、模具及熔融温度)和离散变量(结构设计方案)两种情况,为此,选择正交实验法作为优化方法^[13]。

针对所选定的4个因素,每个因素选择3水平

用于优化运算。其中结构设计以减小底座部分厚度,提高塑件的整体壁厚均匀性为目标,提出了3种底座结构修正方案,分别如图4、图5、图6所示,其中图4所示的方案一是保留底座中必要部分,如中间部分的插头以及四角处的通孔,其余部分则予以去除;图5中的方案二在方案一的基础上保留底座左右两条边;图6中的方案三在方案二的基础上增加了上下两条边。3种方案的设计意图均是在去除部分面积后能在不同程度上加快注塑件冷却速度,以去除部分占底座总面积的百分数作为结构设计因素,其水平分别取63%,46%,25%。壁厚按照塑料联接件的设计要求(包括联接强度、载荷要求等),其水平分别选取1.6,1.8,2.0 mm。模具温度按照所选塑料材料PC的性能要求,通过查询Moldflow内部数据库确定其可选范围,在此基础上其水平分别选取85,95,105℃;类似地,熔融温度选择260,280,300℃3个水平。实验因素与水平如表1所示。

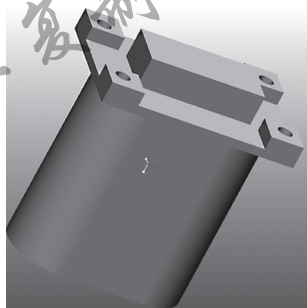


图4 结构设计修改方案一

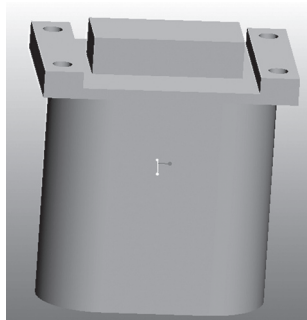


图5 结构设计修改方案二

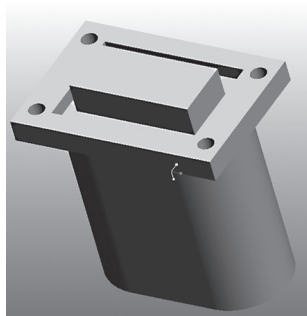


图6 结构设计修改方案三

表1 实验因素与水平

水平	去除部分占总 底座总面积 (因素A)/%	壁厚(因素 B)/mm	模具温度(因 素C)/℃	熔融温度(因 素D)/℃
1	63	1.6	85	260
2	46	1.8	95	280
3	25	2.0	105	300

2.2 实验结果与分析

选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行实验设计,实验方案与结果,以及极差分析结果如表2和表3所示。实验指标(体积收缩率差值和综合翘曲量)的因素水平影响趋势分别如图7、图8所示。由图7和图8可以发现,对于实验指标,尤其是综合翘曲量,其最优结果对应的水平值均在取值范围的边界处。对于因素A,其3个水平分别对应3种结构设计方案,直观反映的是去除部分占底座总面积百分数,属于离散型变量;对于因素B,根据制品的强度要求,其壁厚选择区间为1.6~2.0 mm;对于因素C、D,选用材料为PC,通过查询Moldflow的内部数据库,得知其熔融温度选择范围为250~320℃,模具温度选择范围为85~120℃。而企业在实际生产过程中选取温度的取值时,一般考虑到适用性广与经济效益高等因素,笔者结合企业实际,在设计正交实验时,最终选择熔融温度的范围为260~300℃,模具温度的范围为85~105℃,这类取值范围是最适宜的。因此,根据上述的合理取值范围,虽然综合翘曲量的最优水平大多位于取值范围的边界点,但可以排除取值范围外的影响,最终优化结果仍然选取边界点。

表2 正交实验方案与结果

实验 编号	因素A	因素B	因素C	因素D	体积收缩率 差值/%	综合翘曲量 /mm
1 [#]	1	1	1	1	6.811	0.0666
2 [#]	1	2	2	2	6.041	0.0768
3 [#]	1	3	3	3	8.941	0.0823
4 [#]	2	1	2	3	8.718	0.0694
5 [#]	2	2	3	1	6.363	0.0705
6 [#]	2	3	1	2	8.462	0.0813
7 [#]	3	1	3	2	7.484	0.0594
8 [#]	3	2	1	3	9.284	0.0579
9 [#]	3	3	2	1	6.299	0.0600

表3 极差分析结果

项目	体积收缩率差值				综合翘曲量			
	因素A	因素B	因素C	因素D	因素A	因素B	因素C	因素D
K_1	21.793	23.013	24.557	19.473	0.2257	0.1954	0.2058	0.1971
K_2	23.543	21.688	21.058	21.987	0.2212	0.2052	0.2062	0.2175
K_3	23.067	23.072	22.788	26.943	0.1773	0.2236	0.2122	0.2096
R	1.750	2.014	3.499	7.470	0.0484	0.0282	0.0064	0.0204
主次 顺序	$D > C > B > A$				$A > B > D > C$			

注: K_i 为某个因素第 i 个水平实验结果之和, R 为极差。

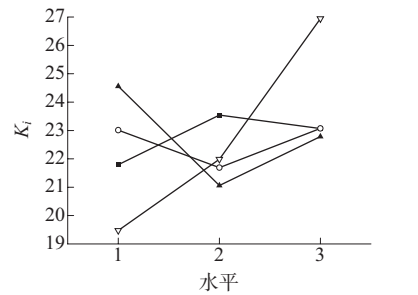


图7 体积收缩率差值的因素水平影响趋势

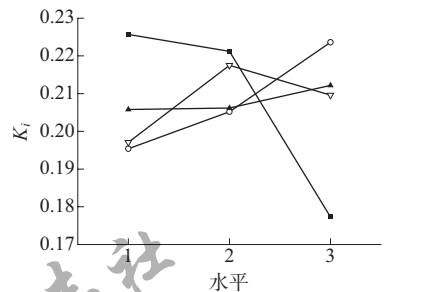


图8 综合翘曲量的因素水平影响趋势

表3中,极差 R 反映了各因素在水平变动时,实验指标的变动幅度。 R 越大,说明该因素对实验指标的影响越大,因此也越重要。根据 R 的大小,可以判断各因素对体积收缩率差值的影响大小主次顺序为 $D > C > A > B$;对于综合翘曲量,顺序为 $A > B > D > C$ 。 K_i 的大小可以判断因素的优水平,而各因素的优水平的确定与实验指标有关。

根据实验结果,对于体积收缩率差值,优化结果为 $A1B2C2D1$ (组合一);对于综合翘曲量,优化结果为 $A3B1C1D1$ (组合二)。显然,对于这两种组合,还需要测定其优化结果并进行比较,以确定最终方案。

对于组合一,其优化结果为:体积收缩率差值为6.654%,较优化前的9.43%降低了29.4%,综合翘曲量为0.0731 mm,较优化前的0.0803 mm降低了9.0%。对于组合二,其优化结果为:体积收缩率差值为6.935%,较优化前降低了26.5%,综合翘曲量为0.056 mm,较优化前降低了30.3%。

以两种组合下的两种实验指标降低幅度之和为总优化量,进行比较,优化量较大的表明优化效果好。组合二与优化前相比,总优化量为26.5%+30.3%=56.8%,而组合一总优化量为29.4%+9.0%=38.4%。相比之下,组合二的优化程度高,故选择组合二 $A3B1C1D1$ 为最终优化方案。即去除部分占底座总面积的25%,壁厚为1.6 mm,模具与熔

融温度分别为 85℃和 260℃,在此结构设计与注塑工艺的联合组合下,塑件的体积收缩率差值和综合翘曲量分别较优化前降低了 26.5% 和 30.3%。

3 结语

通过对汽车电子等设备中常用的塑料联接件的结构及成型过程中影响制品质量因素的分析,提出了一个利用正交实验设计方法开展塑件结构和成型工艺的联合优化方法,将塑件结构的设计修改与注塑工艺设置有机结合,有效减少了由于非均匀收缩所造成的制品翘曲变形,以及由此造成的应用设备中存在漏气漏液等技术问题。该方法不仅为汽车电子塑料联接件的高质量设计和注塑加工提供了一个值得借鉴的方法,更重要的是为单纯通过注塑工艺参数的优化、难以获得满足要求的制品质量这类注塑优化问题提供了一个新思路和新方法。

参考文献

- [1] 磨莉,谷林. 基于 Moldflow 的 PP 薄壁制品注塑工艺计算机模拟[J]. 工程塑料应用,2016,44(4):69-73.
Mo Li, Gu Lin. Computer simulation on injection molding process of PP thin-walled products based on Moldflow method[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):69-73.
- [2] 马晓东,娄淑梅,王安宁,等. 基于响应面法和保压曲线的注塑工艺参数优化分析[J]. 塑料科技,2017,45(7):81-86.
Ma Xiaodong, Lou Shumei, Wang Anning, et al. Injection molding parameter optimization based on response surface methodology and packing curve[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(7):81-86.
- [3] 齐孟雷. CAD/CAE/CAM 在汽车钣金模具开发中的应用[J]. 模具技术,2016(5):23-25.
Qi Menglei. Application of CAD/CAE/CAM in die development of automobile sheet metal[J]. Die and Mould Technology, 2016(5):23-25.
- [4] 蒋新萍,徐自明. 基于 CAD/CAE 的外壳塑件注塑模具创新优化设计[J]. 塑料科技,2014,42(11):96-100.
Jiang Xinping, Xu Ziming. Innovation and optimized design of mold for one plastic cover based on CAD/CAE[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(11):96-100.
- [5] 兰芳,廖小平,覃波. 基于 CAE 的注塑件结构及成型工艺参数优化[J]. 工程塑料应用,2009,37(5):42-44.
Lan Fang, Liao Xiaopin, Qin Bo. Optimization of structure and injection molding parameters for plastic product based on CAE[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5):42-44.
- [6] 邓益民,郑堤,路小江. 注塑产品结构尺寸与成型工艺参数的集成优化[C]//2007 年中国机械工程学会年会论文集. 长沙:机械工业出版社,2007.
Deng Yimin, Zheng Di, Lu Xiaojang. Integrated optimization of structural and process parameters of injection molded products[C]// Proceedings of 2007 annual meeting of China mechanical engineering institute. Changsha:China Mechanical Press, 2007.
- [7] 贺华波,邓益民,李红林. 基于 Moldflow 的笔筒注塑件结构优化设计[J]. 电加工与模具,2007(4):51-53.
He Huabo, Deng Yimin, Li Honglin. Structure design optimization of plastics pen pot based on Moldflow[J]. Electromachining and Mould, 2007(4):51-53.
- [8] 张国俊,刘文,毛睿,等. 基于 Moldflow 的注射成型工艺参数对塑件收缩痕的影响研究[J]. 模具工业,2014(6):15-19.
Zhang Guojun, Liu Wen, Mao Rui, et al. Study on influence of injection moulding processing parameters on sink marks of injection-piece based on Moldflow[J]. Mould Industry, 2014(6):15-19.
- [9] 杨勇辉,崔一. CAE/CAD 技术在塑料模具设计中的应用[J]. 工程塑料应用,2017,45(2):124-127.
Yang Yonghui, Cui Yi. Application of CAE/CAD technology in designing of plastic mould[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(2):124-127.
- [10] 邓召旭,刘泓滨,李华文. 高光注塑制品结构对翘曲变形的影响研究[J]. 塑料工业,2015,43(8):23-27.
Deng Zhaoxu, Liu Hongbin, Li Huawen. Research on the effect of the structure of plastic part manufactured by rapid heat cycle molding on its warpage[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):23-27.
- [11] 史忠进,王传洋,武锋,等. 带金属嵌件的塑料花键体积收缩率分析[J]. 模具工业,2012,38(11):53-55.
Shi Zhongjin, Wang Chuanyang, Wu Feng, et al. Analysis on volume shrinkage of plastic spline with metal insert[J]. Mould Industry, 2012, 38(11):53-55.
- [12] 汪希奎,梅益,邓江,等. 壁厚塑件翘曲优化方法研究及应用[J]. 现代塑料加工应用,2014,26(3):56-59.
Wang Xikui, Mei Yi, Deng Jiang, et al. Research and application on warping optimization of thick wall injection parts[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2014, 26(3):56-59.
- [13] 牛亚雯,冯志友,温淑鸿. 基于正交设计的 2UPS-RPU 并联机构误差分析[J]. 机械设计,2015(1):30-34.
Niu Yawen, Feng Zhiyou, Wen Shuhong. Error model analysis of the 2UPS-RPU parallel manipulator based on orthogonal design[J]. Journal of Machine Design, 2015(1):30-34.