

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.12.010

PTFE轴套零件注塑工艺参数优化及模具设计

杜鹏辉¹, 王蕴晴¹, 谢传颖², 李衡², 王钧², 李磊², 王小新¹

(1. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 山东青岛 266042; 2. 山东崇锦汽车零部件有限公司, 济南 250100)

摘要: 针对以聚四氟乙烯(PTFE)为原料的重型卡车高耐磨自润滑轴套零件, 利用模拟仿真软件Moldflow进行模拟分析, 通过正交实验方法对注塑成型工艺参数进行优化设计, 得到了熔体温度420℃、模具温度160℃、保压压力60 MPa、保压时间15 s的优化工艺参数组合。对模具的浇注系统、滑块结构、顶出系统、冷却系统等进行优化设计, 并对冷却效果进行仿真分析, 确认了冷却系统的有效性。经过实际注塑生产和测试验证, 生产出了合格的高耐磨自润滑轴套零件, 可替代重型卡车中的金属轴套零件, 助力汽车轻量化和节能减排。

关键词: 聚四氟乙烯; 高耐磨自润滑; 模拟仿真; 正交实验法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)12-0056-05

Injection Molding Process Parameter Optimization and Mold Design to Shaft Bush Parts Made of PTFE

Du Penghui¹, Wang Yunqing¹, Xie Chuanying², Li Heng², Wang Jun², Li Lei², Wang Xiaoxin¹

(1. School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Shandong Chongjin Auto Parts Co. Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract : For the high-wear-resistant self-lubricating bushing parts of heavy-duty trucks made of polytetrafluoroethylene (PTFE) as raw material, the Moldflow software was used to simulate, and the injection molding parameters were optimized and designed by orthogonal experimental methods, and the optimal process parameters combination of melt temperature 420℃, mold temperature 160℃, packing pressure 60 MPa and packing time 15 s were obtained. The running system, slider structure, ejection system, cooling system, et al of the mold are designed, and the cooling effect is simulated, and the effectiveness of the cooling system is confirmed. After actual injection molding production and test verification, qualified bushing parts have been obtained, which can replace the metal bushing parts in heavy-duty trucks, helping to reduce the weight of the car and save energy and reduce emissions.

Keywords : polytetrafluoroethylene ; high wear resistance & self-lubricating ; simulation ; orthogonal experimental method

聚四氟乙烯(PTFE)是以四氟乙烯作为单体聚合制得的高分子聚合物, 是重要的特种工程塑料, 具有高强度、超耐磨、自润滑、抗老化、耐酸碱等优良性能, 其应用涉及军工和民用的诸多领域^[1-6]。

传统汽车轴套为金属零件, 不仅增加质量, 在汽车行驶过程中如果润滑不充分, 还会导致金属零件损坏。而PTFE具有优异的耐磨和自润滑性能, 能够显著减少使用过程中的摩擦损耗, 是汽车轴套产品轻量化的理想材料^[7-9]。

PTFE性能优良, 但由于成型困难, 其应用受很多局限。因此, 研究PTFE制品成型加工工艺对开

发性能优良的高端产品、推进PTFE的应用具有重要意义。

笔者以汽车轴套塑料件为研究对象, 应用正交实验和Moldflow软件对汽车轴套塑料件的注塑过程进行模拟仿真, 研究不同工艺参数对产品成型质量的影响, 优化注塑工艺参数及模具结构, 为后期的注塑生产提供有效的工艺方案。

1 PTFE轴套结构、性能分析

PTFE轴套零件的三维结构如图1所示。该产品内径48.5 mm, 高度20 mm, 壁厚1.5 mm, 中部法兰最大外径56.5 mm, 底部有0.55 mm宽的凸缘, 与

基金项目: 山东省研究生教育质量提升计划项目(SDYAL21102)

通信作者: 王小新, 教授, 主要研究方向为高分子材料先进成型及模具技术

收稿日期: 2022-11-15

引用格式: 杜鹏辉, 王蕴晴, 谢传颖, 等. PTFE轴套零件注塑工艺参数优化及模具设计[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(12): 56-60.

Du Penghui, Wang Yunqing, Xie Chuanying, et al. Injection molding process parameter optimization and mold design to shaft bush parts made of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(12): 56-60.

中部法兰之间形成内凹结构。该产品要求具有较高的强度和尺寸精度,以及优良的耐磨和自润滑性能,以满足重型卡车对轴套的使用要求。



图1 PTFE轴套零件

PTFE材料的耐高低温性能好,可在较宽的温度范围($-180 \sim 260^{\circ}\text{C}$)内使用,特别是在较高温度下仍能保持形状和力学性能。同时具有优异的耐磨和自润滑性能,可用于替代金属轴套产品。但PTFE难熔融,成型加工困难,传统的加工方法主要为冷压烧结,整个过程效率低、能耗高,产品性能和尺寸精度容易受到烧结条件的影响,波动较大^[10-11]。

近年来,开发出来了可熔融PTFE,为少量全氟丙基全氟乙烯基醚与PTFE的共聚物。可熔融PTFE熔融粘结性增强,熔体黏度下降,而性能与纯PTFE相比基本上无变化。可熔融PTFE可以直接采用注塑、挤出等方法进行加工,大大提高了PTFE零件的生产效率和产品品质。

选择美国苏威公司生产的Hyflon P450可熔融PTFE作为汽车轴套产品的材料,该材料推荐的注塑工艺参数范围列于表1。由表1可以看出,其熔体温度达到 $380 \sim 420^{\circ}\text{C}$,模具温度要求 $160 \sim 200^{\circ}\text{C}$,均远高于普通塑料,对注塑设备和模具都提出了更高的要求。

表1 PTFE注塑成型条件

工艺参数	数值
熔体温度/ $^{\circ}\text{C}$	380~420
模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	160~200
注射速率/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	10~20
保压压力/MPa	40~80
保压时间/s	5~15

2 注塑成型工艺参数优化

采用Moldflow进行注塑过程仿真分析,该软件能够模拟塑件填充、保压、冷却、翘曲等成型过程,是注塑工艺参数优化的有效工具^[12-14]。

由于轴套工作时内表面与轴相互接触,要求内表面保持光滑,因此浇口需要设计在产品外围,不能设置在产品内侧。同时为了节省原料,降低模具

压力损失,决定采用热流道系统。经过Moldflow软件模拟仿真分析,确定采用4点浇口的热流道,模具采用一模一腔,浇口均布在零件圆周上,浇口形状为锥形,流道直径为5 mm,末端浇口直径为1.5 mm。图2为Moldflow模拟仿真分析结果。该方案的充填时间分析结果如图2a所示,速度/压力转换时所需的最大注塑压力为38.8 MPa,如图2b所示。可以看出,该浇口方案能够较好地满足产品的充填要求。

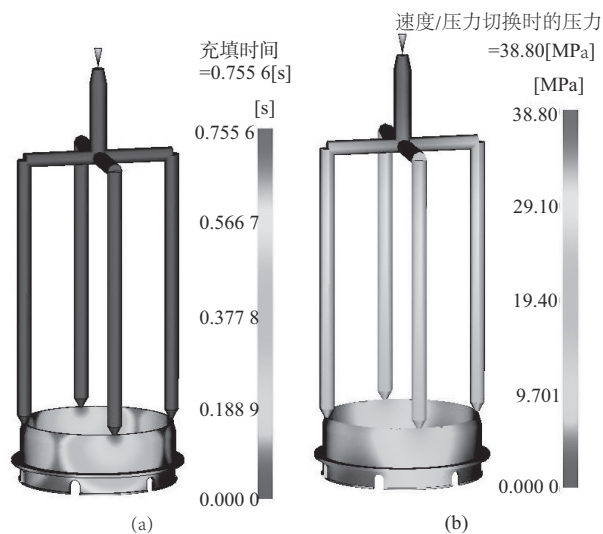


图2 Moldflow模拟仿真分析结果

轴套产品因为要与轴相互配合,因此对尺寸精度要求较高。而注塑成型工艺过程中,成型参数对产品相变过程中的收缩变形影响较大,进而影响到产品的尺寸。为了有效控制轴套产品的尺寸精度,笔者应用田口试验方法,针对注塑工艺参数对制件变形的影响,设计正交试验进行量化分析和优化。

田口试验方法是针对生产过程参数变量进行优化的有效方法^[15-16]。笔者设计的正交试验,以熔体温度(A)、模具温度(B)、保压压力(C)、保压时间(D)4个工艺参数为因素,每个因素参照该材料推荐的成型参数范围取3个水平,列于表2。

表2 正交试验因素和水平

水平	因素			
	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s
1	380	160	40	5
2	400	180	60	10
3	420	200	80	15

在表2的基础上设计 $L_9(3^4)$ 正交表进行正交试验,考虑到所研究的轴套产品为圆形部件,4个浇口也是均匀分布的,因此 X 方向变形量和 Y 方向变形

量应该是基本一致的。选用 X 方向的变形量作为优化目标,试验方案及结果列于表3。

表3 正交试验方案及结果

试验号	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s	X 方向 变形量/mm
1 [#]	380	160	40	5	2.644
2 [#]	380	180	60	10	2.583
3 [#]	380	200	80	15	2.787
4 [#]	400	160	60	15	2.464
5 [#]	400	180	80	5	2.668
6 [#]	400	200	40	10	2.746
7 [#]	420	160	80	10	2.505
8 [#]	420	180	40	15	2.527
9 [#]	420	200	60	5	2.812

首先对试验结果进行极差分析。极差分析是连续样本中最大值与最小值的差值,表征数据的离散程度。正交试验各因素的极差 R 列于表4。

表4 各因素的极差分析

项目	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s
k_1	2.671	2.538	2.639	2.708
k_2	2.626	2.593	2.620	2.611
k_3	2.615	2.782	2.653	2.593
R	0.057	0.244	0.034	0.115

根据表4中极差值的大小,可以判断出对汽车轴套产品变形影响程度的顺序依次为:模具温度>保压时间>熔体温度>保压压力。

根据表4可绘制出变形量与各因素之间的影响效应趋势图,如图3所示。

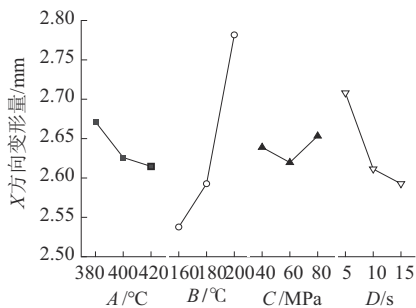


图3 各因素对变形量影响效应趋势图

选取 X 方向翘曲变形最小的参数组合在一起,得到优化的工艺参数组合为 $A_3B_1C_2D_3$,即熔体温度 420°C 、模具温度 160°C 、保压压力 60 MPa 、保压时间 15 s 。

由于优化方案组合不在正交试验表中,再次对优化得到的工艺参数组合进行仿真分析,得到 X 方向变形量为 2.441 mm ,如图4所示,小于全部9次正交试验方案中的变形数值; Y 方向变形量为 2.432 mm ,如图5所示。 X, Y 方向的变形量均小于 2.5

mm ,满足产品要求。二者的差值为 0.009 mm ,小于 0.01 mm ,说明轴套的圆度很好。

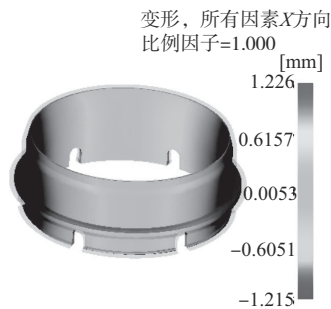


图4 优化方案 X 方向变形量

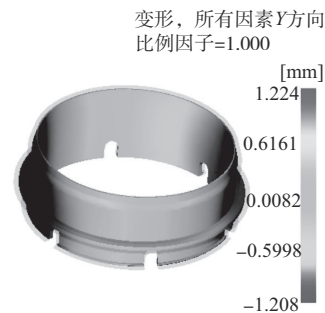
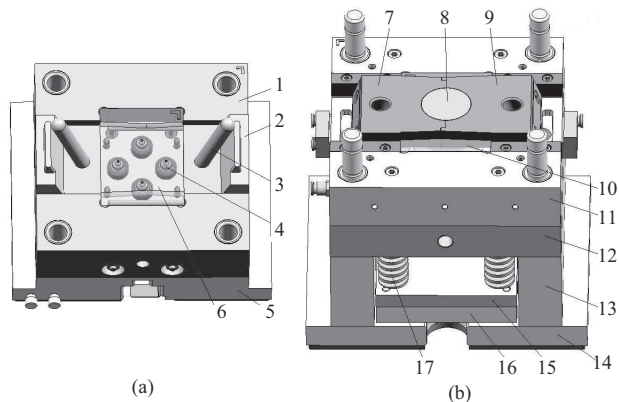


图5 优化方案 Y 方向变形量

3 模具结构优化设计

该轴套产品的注塑模具结构如图6所示。模具采用两板模,四点热流道浇注。因产品外侧有环形内凹,模具采用左右双滑块+斜导柱结构。

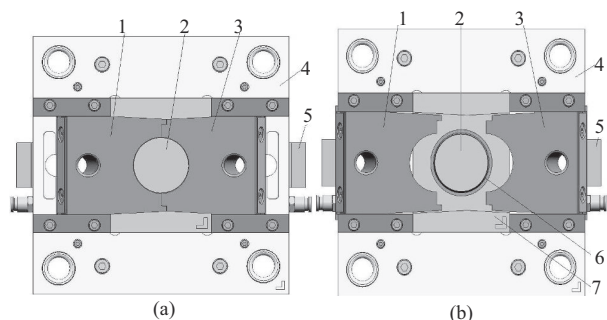


- 1—静模板;2—滑块楔紧块;3—斜导柱;4—热嘴;5—静模座板;
6—静模镶块;7—左滑块;8—型芯;9—右滑块;
10—动模镶块;11—动模板;12—型芯固定板;13—垫块;
14—动模座板;15—推杆固定板;16—推出板;17—弹簧
a—静模;b—动模

图6 轴套注塑模具结构

斜导柱与开模方向的夹角为 18° ,作用长度 75 mm ,滑块横向抽拔距约 23 mm 。开模时左右滑块在斜导柱的作用下打开,脱离产品外侧;然后中间的圆形型芯及固定板不动,动模板带着动模镶块及

滑块整体向上运动,使轴套与型芯脱离,从而顶出制品,滑块横向打开及顶出示意图如图7所示。



1—左滑块;2—型芯;3—右滑块;4—动模板;5—滑块限位块;
6—轴套制品;7—动模镶块
a—滑块闭合;b—滑块打开及顶出
图7 滑块横向打开及顶出示意图

模具的浇注系统及冷却系统如图8所示,采用4点热嘴的热流道浇注,左右滑块上各有一道冷却回路,动模镶块上有一道环形冷却回路,中间型芯采用隔板式的冷却井进行冷却。由于PTFE注塑成型时要求的模具温度较高,需采用热油介质的模温机对模具温度进行控制。

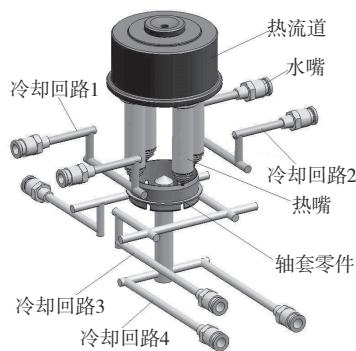


图8 模具浇注系统及冷却系统

采用Moldflow软件对模具冷却情况进行了仿真分析,所用冷却介质为热油,温度为160℃。图9显示了回路冷却液温度分析结果,可以看出4条回路冷却液进口和出口温差最大只有0.6℃,说明冷却效果较好,模具温度比较恒定。

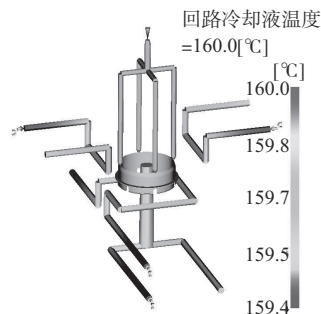


图9 回路冷却液温度分析结果

4 注塑生产验证

实际注塑生产在海天MA860注塑机上进行,注塑前将PTFE在110℃下干燥4~6 h。采用优化设计制造的模具和成型工艺参数组合进行注塑,生产出的轴套零件如图10所示。该零件的注塑成型周期为25 s,生产效率较高。通过实验测试和实际使用验证,该汽车轴套零件整体性能良好,可以替代金属零件使用,助力汽车轻量化。



图10 注塑生产出的汽车轴套零件

5 结论

(1)以汽车轴套产品为研究对象,应用Moldflow软件对成型过程进行仿真分析,采用正交试验方法对其成型工艺参数进行优化。

(2)在符合生产条件的情况下,选取熔体温度420℃、模具温度160℃、保压压力60 MPa、保压时间15 s为最优的工艺参数组合。

(3)针对注塑模具结构进行优化设计并进行实际生产验证。结果表明,按照优化工艺参数组合可以生产出符合使用要求的轴套零件,能够替代金属轴套,助力汽车轻量化和节能降耗。

参考文献

- [1] 钱知勉,包永忠. 氟塑料加工与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
Qian Zhimian, Bao Yongzhong. Processing and application of fluoroplastics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [2] 崔锦峰,文泽东,白常宁,等. 聚四氟乙烯改性研究进展[J]. 塑料工业, 2020, 48(11): 8-13.
Cui Jinfeng, Wen Zedong, Bai Changning, et al. Research progress on modification of polytetrafluoroethylene[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11): 8-13.
- [3] 樊学峰,许永坤,李萌. 不同混合工艺对PTFE复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(4): 65-69.
Fan Xuefeng, Xu Yongkun, Li Meng. Effects of different mixing processes on properties of PTFE composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4): 65-69.
- [4] 栗小茜,葛正浩. 无机材料填充改性PTFE复合材料研究进展[J]. 中国塑料, 2020, 34(1): 92-101.
Li Xiaoqian, Ge Zhenghao. A review on PTFE composites filled with inorganic materials[J]. China Plastics, 2020, 34(1): 92-101.

- [5] 黄彧,王文东,黄炜,等.聚四氟乙烯在滑动轴承中的应用[J].有机氟工业,2020(4):47-51.
Huang Yu, Wang Wendong, Huang Wei, et al. Application of polytetrafluoroethylene in plain bearings[J]. Organofluorine Industry, 2020(4):47-51.
- [6] 冯经明,张庆丰. C型切口的聚四氟乙烯活塞环在变速器中的设计与应用[J]. 中国塑料, 2019, 33(7):96-101.
Feng Jingming, Zhang Qingfeng. Design of PTFE piston ring with c-type cut and its applications in transmission[J]. China Plastics, 2019, 33(7):96-101.
- [7] 吴迪,赵福燕,李桂金,等.凹凸棒石和硅灰石对PTFE摩擦磨损行为影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10):102-109.
Wu Di, Zhao Fuyan, Li Guijin, et al. Influence of attapulgite and wollastonite on the friction and wear behavior of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):102-109.
- [8] 牛永平,王亮,杜三明,等.不同温度下PTFE纳米复合材料摩擦学性能的研究[J]. 塑料工业, 2011, 39(7):83-86, 106.
Niu Yongping, Wang Liang, Du Sanming, et al. Study on tribological properties of PTFE nanocomposites at different temperatures[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(7):83-86, 106.
- [9] 郑合静,杨兆方,丁晓龙,等.层状 α -磷酸锆改性聚四氟乙烯摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11):126-131, 138.
Zheng Hejing, Yang Zhao Fang, Ding Xiaolong, et al. Friction and wear properties of layered α -zirconium phosphate modified PTFE [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11):126-131, 138.
- [10] 杨兆方,郑合静,丁晓龙,等.网带炉烧结工艺对PTFE基三层复合材料摩擦学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(3):53-57.
Yang Zhao Fang, Zheng Hejing, Ding Xiaolong, et al. Effect of sintering process in mesh belt furnace on tribological properties of PTFE based three-layer composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):53-57.
- [11] 焦明华,温丹丹,田明,等.塑化烧结对无铅PTFE 3层复合材料减摩耐磨性能影响[J]. 轴承, 2010(9):28-31.
Jiao Minghua, Wen Dandan, Tian Ming, et al. Effect of sintering process on tribological properties of lead-free PTFE three-layer composites[J]. Bearing, 2010(9):28-31.
- [12] 杨振,陈再良.基于Moldflow和BP神经网络的汽车后视镜外壳注塑工艺优化[J]. 塑料科技, 2019, 47(11):96-99.
Yang Zhen, Chen Zailiang. Injection molding process optimization of automotive rearview mirror shell based on Moldflow and BP neural network[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(11):96-99.
- [13] 吴俊超.基于Moldflow的汽车仪表板大型塑件注塑模工艺优化[J]. 中国塑料, 2021, 35(12):121-128.
Wu Junchao. Process optimization of injection mold for large plastic parts of automobile dashboard based on Moldflow[J]. China Plastics, 2021, 35(12):121-128.
- [14] 马一恒,王小新,刘琴.基于Moldflow的洗衣机平衡环叠层注塑模设计及工艺优化[J]. 中国塑料, 2018, 32(7):132-133.
Ma Yiheng, Wang Xiaoxin, Liu Qin. Design and process optimization of stack injection mould for balance ring of washing machine based on moldflow software[J]. China Plastics, 2018, 32(7): 132-133.
- [15] 曾军亮,王荣吉,冯晓欣.注射成型工艺参数对塑料制品翘曲变形的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):56-59.
Zeng Junliang, Wang Rongji, Feng Xiaoxin. Effects of injection molding process parameters on warpage of plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):56-59.
- [16] 刘锋,庞建军,陈宇轩,等.基于Taguchi与BPNN-PSO的薄壁注塑件翘曲变形优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2):74-79.
Liu Feng, Pang Jianjun, Chen Yuxuan, et al. Optimization of warpage deformation of thin-wall injection molded part based on taguchi test and BPNN-PSO[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2):74-79.