

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.02.013

节流阀双 U 阀槽二次结构优化后特性分析*

周知进^{1,2}, 李松波², 罗先聪²

(1. 贵州理工学院 机械工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:在节流阀工作过程中,节流槽的结构形式影响节流阀阀芯温度与变形,进而影响阀芯的卡滞。通过对阀芯节流槽处结构进行优化,降低阀芯上的最高温度和最大变形量具有重要意义。为此,将呈线性接触的阀槽结构优化成小圆角接触的阀槽结构,并对优化后阀槽处最高温度与最大变形进行研究。首先,介绍了节流阀的结构,并对节流槽口结构圆角半径进行了优化;然后,采用数值仿真方法建立了节流阀三维模型,导入了有限元分析软件 Workbench 模块,定义了参数与边界,划分了网格,并对节流阀槽口圆角半径、不同阀口开度、压差对阀芯处最高温度与最大变形量影响进行了分析;最后,分析了圆角半径、阀口开度、阀口压差对阀槽温度与变形量的影响。研究表明:当圆角半径优化值为 2 mm 时,其阀芯上最高温度与最大变形量均处于极小值;当阀口开度为 4 mm 时,节流槽结构经二次优化后,阀芯上最高温度与最大变形量均有明显的降低;当阀口开度为 6 mm 时,阀芯上最高温度与最大变形量也有减小,且随着压差增大,其优化效果越好。节流槽阀芯圆角优化对降低第二节节流槽棱角处的最高温度与最大变形量均有较好效果,该结论可以为优化节流阀槽结构,降低阀芯最高温度与最大变形量提供参考。

关键词:流量控制阀;节流槽结构;阀芯圆角;阀芯最高温度;阀芯最大变形量;阀口开度;阀口压差

中图分类号:TH137.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)02-0252-06

Characteristic analysis on throttle valve after secondary structure optimization of double U-groove

ZHOU Zhi-jin^{1,2}, LI Song-bo², LUO Xian-cong²

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 2. Mechanical and Electrical Engineering College, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: During the working process of the throttle valve, the structure of the throttle groove affects the temperature and deformation of the throttle valve core, which in turn affects the sticking of the valve core. It is of great significance to reduce the maximum temperature and maximum deformation on the valve core by optimizing the structure at the valve core throttle groove. Therefore, the valve groove structure with linear contact was optimized into a valve groove structure with small fillet contact, and the maximum temperature and maximum deformation at the optimized valve groove were studied. Firstly, the structure of the throttle valve was introduced, and the radius of the fillet of the throttle notch structure was optimized. Then, the influences of fillet radius, valve opening, and valve pressure difference on the valve groove temperature and deformation were analyzed. Finally, the influences of the throttle valve notch fillet radius, different valve openings, and differential pressure on the maximum temperature and maximum deformation at the valve core were analyzed. The research results show that when the optimal value of the fillet radius is 2 mm, the maximum temperature and the maximum deformation on the valve core are both at a minimum value; when the valve opening is 4 mm, the throttling groove structure after the secondary optimization has a negative effect on the valve core. The maximum temperature and maximum deformation are significantly reduced; when the valve opening is 6 mm, the maximum temperature and maximum deformation on the valve core also decreased, and as the pressure difference increased, the optimization effect is better. It shows that the optimization of throttle groove spool fillet has a good effect on reducing the maximum temperature and maximum deformation at the corner of the second throttle groove, which provides a design basis for optimizing the throttle groove structure and reducing the maximum temperature and maximum deformation of the spool.

Key words: flow control valve; throttling groove structure; valve core fillet; valve core maximum temperature; valve core maximum deformation; valve opening; valve pressure

收稿日期:2022-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51479073);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2018]1407)

作者简介:周知进(1969-),男,湖南娄底人,教授,主要从事液压系统设计与控制方面的研究。E-mail:20140590@git.edu.cn

0 引言

节流阀作为液压传动和控制技术中的基础元件之一,具有密封性能好、过流能力强、响应速度快等众多优点^[1],在人类工业生产生活中得到了广泛应用。

节流阀通过改变节流口的液阻大小来控制节流口的流量。节流槽是节流阀的关键部位,节流口的形状在很大程度上决定着节流阀的节流性能^[2]。节流阀阀槽在工作过程中影响流场变化与结构变形,进而影响阀芯卡滞。

易迪升等人^[3]对系统调节性能受三角槽形节流阀口结构参数的影响情况进行了分析研究,通过对不同节流槽进行优化,验证了所研发的节流槽优化设计软件的有效性。王安麟等人^[4]针对多路换向阀换向过程中的多阀口节流耦合作用问题,提出了一种多路换向阀耦合节流槽结构设计方法,该方法以圆型、U型以及半圆型3种基本节流拓扑结构的参数作为设计变量。李维嘉等人^[5]利用粒子群优化了算法,得到了满足定压差条件下阀口开度流量特性要求的节流槽优化尺寸,并通过实例验证了其优化结果。毕长飞^[6]采用AMESim软件对节流阀口形状改变时系统的动态特性进行了研究,并为液压自动制动系统流控阀节流阀口选取了三角槽形,根据分析结果得出了结论,即系统的调节性受节流阀口三角槽的深度和宽度影响较小,且随节流阀口三角槽长度的增加,系统的调节性能得到了明显改善。张鑫等人^[7]研究了节流槽数量、阀口压差对阀腔内流体速度场、阀芯温度场及阀芯应变场动态特性的影响,并得出了结论,即随着阀口压差的增加,流体的最大流速以及阀芯的最高温度和最大变形增大。张健等人^[8]基于ADINA软件的流固耦合模块,对3种阀芯情况下,阀体内流道的压力分布和流场情况进行了仿真研究,并得出了结论,即节流阀的内流道压力在经过阀口后迅速降低,在阀口的边缘位置有内流道中的最小值。谢海波等人^[9]对阀芯所受液动力进行了数值求解,并对液压阀的压降曲线进行了比较,为液压阀的结构优化提供了指导。张俊俊等人^[10]对液压滑阀阀芯卡紧力进行了数值模拟研究,并根据研究结果,得到了均压槽合理的结构尺寸。晏静江等人^[11]计算了U型节流阀在不同工作压力下,不同节流槽口的宽度和深度,以及不同开度的速度场和阀芯表面温度场。晏静江等人^[12]对U形节流阀的速度场以及油液黏性热效应进行了计算流体力学解析,得出了阀芯的温度场分布。袁王博等人^[13]研究了U形节流槽的滑阀阀芯热变形,该研究结果可以为阀芯的热变

形研究提供借鉴。CHEN Qi等人^[14]基于MATLAB-AMESim-FLUENT联合仿真方法,对滑阀的流量进行了研究,对其结构进行了优化。YANG Ye等人^[15]采用计算流体动力学(CFD)和实验研究的方法,阐明了凹槽形状对流动特性的影响;并采用RNG k- ϵ 湍流模型,模拟了3个槽口及其典型结构槽内流场的压力分布,分析了限制位置随开口的变化规律,进而计算出了槽口的流场面积;通过将计算结果与实验数据进行比较,证明了所采用模型的准确性。YOON W等人^[16]研究了可调面积节流阀的流量测量与仪表流量控制的特性。孙后环等人^[17]采用CFD软件对V-U及U-U型节流槽及其阀内流动进行了仿真分析,并通过实验获得了可以反映节流槽阀口阻尼特性的流量系数,及其随阀口开度变化的规律。HUANG Jia-wu等人^[18]使用CFD分析了阀门节流槽口的流动特性,模拟了不同工况下的流量、流量系数、流出角、流动力的流动特性,并分析了槽口形状和数量对其的影响。

以上学者针对多种节流阀阀口结构进行了优化设计,得出了阀口在不同开度、压差等工况下,流场特性、温度场特性及阀芯应变场的特性,研究了阀口参数对阀芯处温度与应力变形的影响。但是,上述研究并没有对双节节流阀槽结构分开进行研究,且针对的研究对象是阀槽接合面呈线性接触的结构,从而体现不出第一节槽与第二节槽在阀芯最高温度与最大变形的差异性。

在工作过程中,节流阀阀槽不同形状影响流场特性与变形,进而影响阀芯卡滞。因此,通过对阀芯节流槽处结构进行优化,来降低阀芯上的最高温度和最大变形量具有十分重要意义。

为此,笔者将呈线性接触的阀槽结构优化成小圆角接触的阀槽结构,并对优化后阀槽处最高温度与最大变形进行研究。

1 节流阀结构

油液流动方向通常以节流槽为判断标准,即油液从节流槽流入阀腔为流入方向,从阀腔流入节流槽为流出方向。

双U型节流槽结构示意图与流入流出方向如图1所示。

此处,笔者采用图1(b)所示流向,油液通过阀腔从U型节流槽流出,经过B1、B2-A2、A1过程。其过流面有2个:第一节U型槽过流面A1与B1,第二节U型槽过流面为A2与B2。

节流阀的双U型节流槽的节流原理如图2所示。

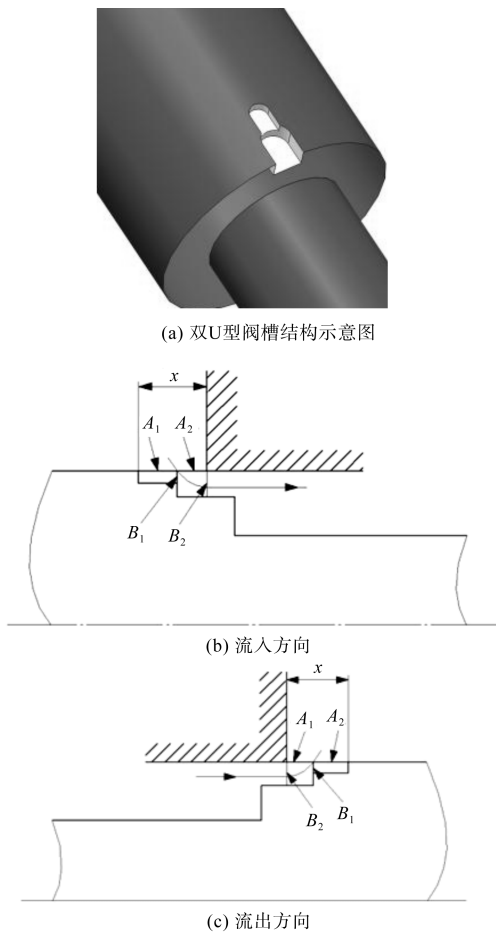


图 1 节流槽结构与流动方向

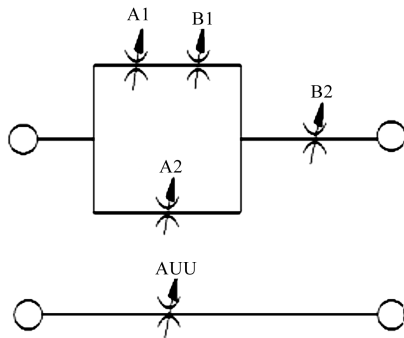


图 2 双 U 型节流槽的节流原理

从图 2 可以看出: A1 与 B1 串联等效得 AU1, AU1 与 A2 并联后再与 B2 串联, 等效得到二节矩形节流槽阀口面积 AUU。

其等效计算公式为:

$$A_{U1} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{B_1^2}}} \quad (1)$$

$$A_{UU} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(A_{U1} + A_2)^2} + \frac{1}{B_2^2}}} \quad (2)$$

双 U 形节流槽的结构简图如图 3 所示。

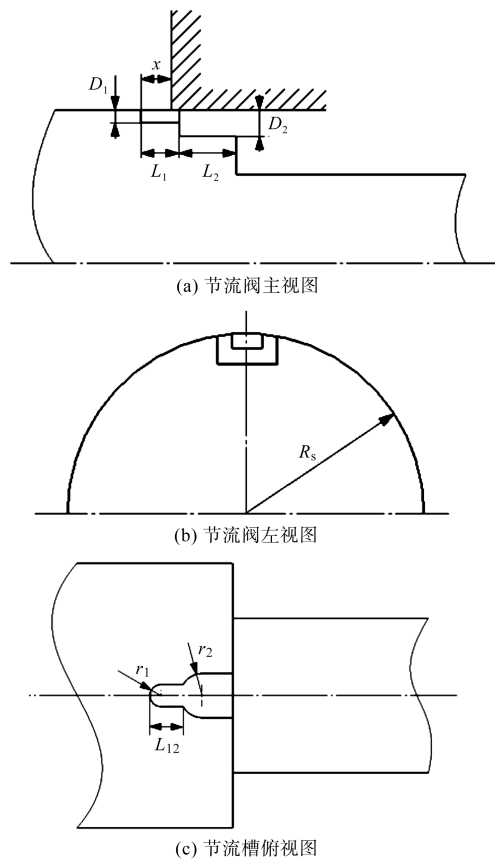


图 3 双 U 型节流槽结构简图

x —阀口开度; R_s —阀心半径; r_1 —第一节矩形槽半径; D_1 —第一节 U 形槽深度; L_1 —第一节矩形槽长度; r_2 —第二节矩形槽半径; D_2 —第二节矩形槽深度; L_2 —第二节矩形槽长度

2 节流槽结构二次优化

笔者采用双向热流固耦合方法, 对阀芯温度场与变形场进行研究, 结果可知: 在不同阀口开度与阀口压差下, 双 U 型节流阀的节流槽处温度较高, 且有明显的变形, 这就会导致阀芯在工作时出现卡滞的现象。因此, 需要通过对比阀芯节流槽处结构予以优化, 以降低阀芯处的最高温度与最大变形量。

经过第一次结构优化后, 结果可知: 阀口开度在 0.5 mm ~ 4 mm, 最大变形主要集中在第一节 U 型槽棱角地方; 阀口开度在 5 mm ~ 6 mm, 最大变形量则转移至第二节 U 型槽棱角。

为有效减小节流槽棱角区域的变形, 笔者将两节节流槽都优化成渐扩型节流槽结构, 如图 4 所示。

图 4 中, 节流槽通过了第一次优化, 即将原有节流槽结构优化成渐扩型, 大大降低了第一节节流槽处最高温度与最大变形量; 但是第二节节流槽最高温度与最大变形量仍较大, 显示其优化效果仍然不好。

因此, 笔者对阀芯节流槽处结构做进一步优化, 即

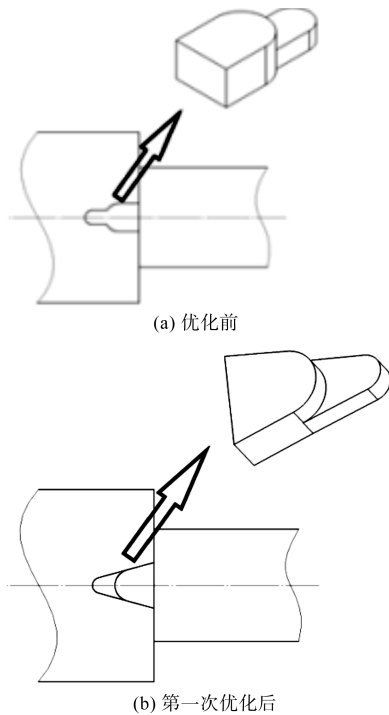


图 4 第一次优化前后阀芯节流槽处的结构示意图

将其棱边进行圆角化处理,其优化后的结构示意图如图 5 所示。

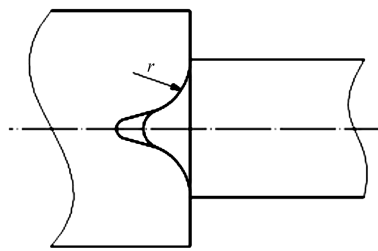


图 5 第二次优化阀芯节流槽处结构示意图

笔者通过对双 U 型节流阀槽形状进行二次优化,改成小圆角过渡后,利用 Workbench 建立其实体模型,进而建立流固耦合模型中的流体域和固体域,并对其进行网格划分。

综合考虑节流阀所处的工况,笔者完成了仿真过程中相关边界条件和求解参数的设置。

3 优化后结果分析

3.1 圆角半径对温度与变形的影响

第一次节流槽结构优化后,阀槽处最高温度为 656.23 K,最大变形量为 14.616 μm 。

通过与优化前的数值对比可知:其最高温度降低了 82.24 K,最大变形量降低了 1.027 μm 。从中可以看出,阀槽处的优化虽然对最高温度与最大变形有效果,但最大变形的优化效果仍然不够理想。

第二次阀芯节流槽结构优化成圆角,初步分析后

可知,阀槽处最高温度与最大变形量均有降低,但是哪个圆角值效果最优,还需要进一步研究。

为此,笔者分别取圆角半径 r 为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm,保持阀口开度与阀口压差工况不变,进而对不同圆角下最高温度与最大变形量进行分析。

不同圆角半径节流槽处的最高温度与最大变形量,如图 6 所示。

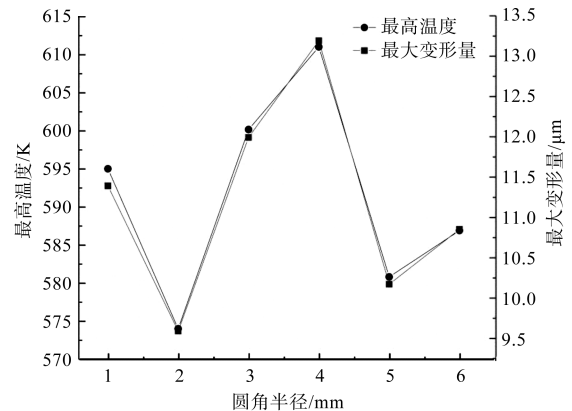
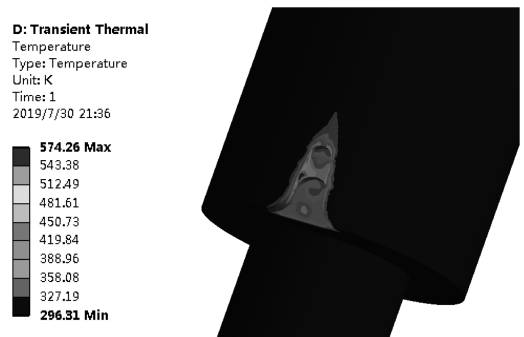


图 6 不同圆角半径节流槽处最高温度与最大变形量

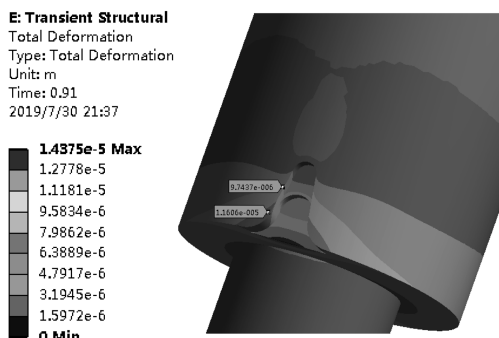
由图 6 可知:圆角半径 2 mm,阀芯上最高温度值与最大变形量出现第一个极小值;圆角半径 5 mm,出现第二个极小值。

但圆角半径 $r = 2 \text{ mm}$ 效果更好。

当阀口开度 6 mm、圆角半径 2 mm 时,阀芯温度场与变形场分布云图,如图 7 所示。



(a) 第二次优化后阀芯温度场云图



(b) 第二次优化后阀芯变形场分布云图

图 7 第二次优化后阀芯的温度场和变形场分布云图

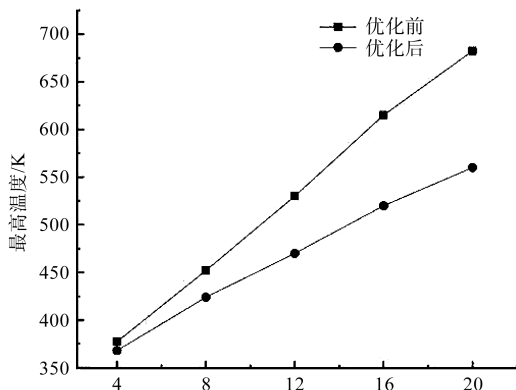
由图 7 可知:第二次优化后,在圆角半径在 1 mm ~6 mm 范围内,节流槽处的最佳结果为 $r=2$ mm 的最高温度 574.26 K,最大变形量为 11.606 μm ;

通过第一次优化最优数据进行对比可知,其最高温度降低 81.97 K,最大变形量降低 3.01 μm 。

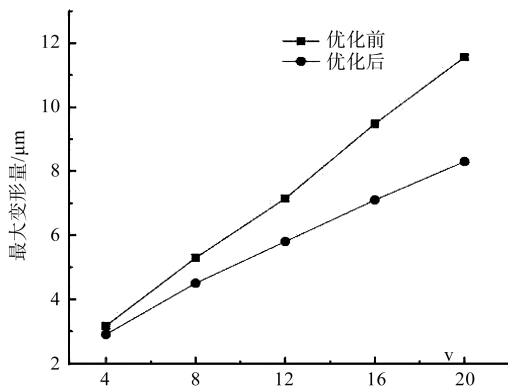
3.2 阀口开度为 4 mm 时压差对温度与变形量影响

为了探明第二次优化后,节流槽结构对阀槽处最高温度与最大变形量有较好的效果,笔者在阀口开度为 4 mm,压差取值 4 MPa、8 MPa、12 MPa、16 MPa、20 MPa 情况下分别对其进行模拟。

阀口开度为 4 mm 时阀芯最高温度与最大变形量,如图 8 所示。



(a) 优化前后阀芯最高温度值比较



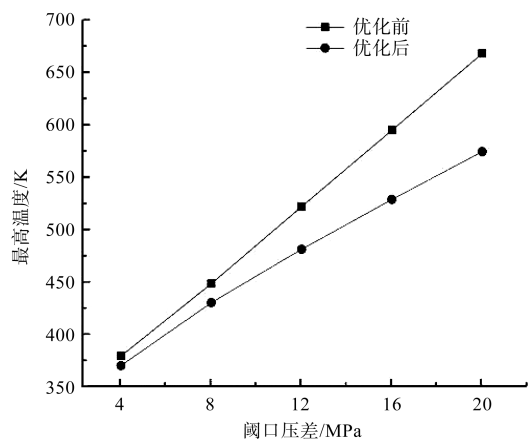
(b) 优化前后阀芯最大变形量比较

图 8 阀口开度为 4 mm 时阀芯最高温度与最大变形量

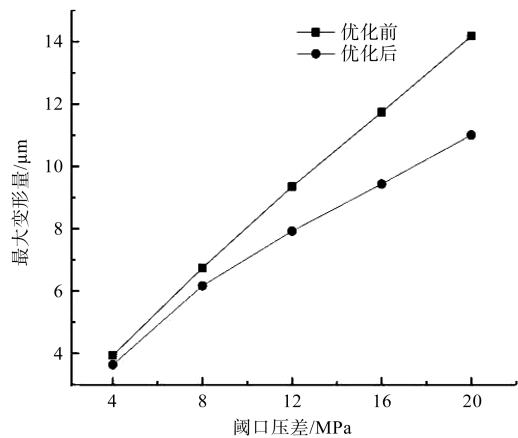
由图 8 可知:经过第二次优化后,节流槽结构阀芯上最高温度与最大变形量均有减小,其中,温度最高减小 127.27 k,最大变形量减小 2.82 μm ^[19,20]。

3.3 阀口开度为 6 mm 时压差对温度与变形量影响

阀口开度为 6 mm,压差取值 4 MPa、8 MPa、12 MPa、16 MPa、20 Ma,笔者对其进行模拟分析,得到不同压差下开度为 6 mm 优化前后结果,如图 9 所示。



(a) 优化前后阀芯最高温度值比较



(b) 优化前后阀芯最大变形量比较

图 9 不同压差下开度为 6 mm 优化前后结果

由图 9 可知:第二次优化后,阀槽处最高温度与最大变形量都有降低,且随着压差的增大,其优化效果越明显;阀槽处最高温度的最大降幅为 95.6 K,最大变形量降幅为 3.28 μm 。

上述结果进一步证明,圆角优化方法对降低第二节节流槽棱角区域最高温度与最大变形量具有显著的效果。

4 结束语

笔者对双 U 型节流阀槽形状进行了二次优化,将其改成小圆角过渡后,利用 Workbench 建立了节流阀的实体模型,用流体仿真软件建立了流固耦合模型中的流体域和固体域,并对其进行了网格划分;综合考虑了节流阀不同工况,完成了对仿真过程中相关边界条件和求解参数的设置;重点研究了在阀口开度为 4 mm、6 mm 两种工况条件时,节流槽处最高温度与最大变形量的变化规律。

研究结论如下:

(1)当优化圆角半径 r 为 2 mm,其阀芯上最高温度值与最大变形量处于最小值,且其最高温度降低

81.97 K,最大变形量降低 3.01 μm ;

(2)当阀口开度为 4 mm 时,经过结构优化后,节流槽阀芯上最高温度与最大变形量均有减小;其中,温度最高减小 127.27 K,最大变形量减小 2.82 μm ;

(3)当阀口开度为 6 mm 时,优化后阀槽处最高温度与最大变形量也都有降低,其中,最高温度降幅达 95.6 K,最大变形量降幅为 3.28 μm ;且随着压差不断增大,其优化效果越明显;

(4)节流阀阀槽圆角优化后,对降低第二节节流槽转角区域最高温度与最大变形量均具有了较好的效果。

在接下来的工作中,笔者将研究当含有污染颗粒的液压油流经优化后的节流阀阀槽时,污染颗粒粒径、浓度对阀芯最高温度与最大变形量的影响。

参考文献(References):

- [1] XU En-le, CHEN Yuan-long, MIAO Zhen-yong, et al. A novel structure of throttle trap valve for self-adjustment of discharge capacity in high pressure heat exchangers [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 13(5): 103719.
- [2] 张立强,黄素丹,宫文娜,等. 节流截止阀阀芯端面形状对线性度的影响[J]. 液压气动与密封, 2017, 37(10): 14-16.
- [3] 易迪升,彭勇,兰秋华,等. 典型滑阀节流槽的优化设计[J]. 液压与气动, 2015, 39(11): 35-39.
- [4] 王安麟,况龙,张小路. 多路阀耦合节流槽结构的拓扑变量空间优化[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 103-109.
- [5] 李维嘉,兰秋华,彭勇,等. 基于粒子群算法的滑阀节流槽优化设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 995-999.
- [6] 毕长飞. 节流阀口形状对液压制动系统影响的分析研究[J]. 液压气动与密封, 2018, 38(11): 7-9, 12.
- [7] 张鑫,韩进,马德建,等. 双U形节流槽滑阀多场耦合特性研究[J]. 液压与气动, 2021, 45(4): 13-18.
- [8] 张健,姜继海,白云峰,等. 锥型节流阀压力特性仿真与试验[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2015, 43(4): 64-68.
- [9] 谢海波,谭礼,刘建彬,等. 不同阀口形态对内流式锥阀液动力的影响[J]. 液压与气动, 2019, 43(1): 90-94.
- [10] 张俊俊,刘罡,王江勇. 液压滑阀阀芯卡紧力研究[J]. 机床与液压, 2014, 42(13): 71-73.
- [11] 晏静江,刘桓龙,柯坚. 基于 FSI 的 U 形节流阀油流粘性热效应分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(4): 533-537.
- [12] 晏静江,柯坚,刘桓龙. 液压滑阀 U 形节流槽速度场的 CFD 解析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(9): 1508-1511.
- [13] 袁王博,冀宏,杨旭博,等. 节流槽个数对滑阀阀芯热变形的影响[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(2): 17-20.
- [14] CHEN Qi, ZHU Jin-hua. Proposal for optimization of spool valve flow force based on the MATLAB-AMESim-FLUENT joint simulation method [J]. *IEEE Access*, 2018(6): 3310-3315.
- [15] YANG Ye, BAO Yin-chang, Li Xue-dong, et al. Effects of groove shape of notch on the flow characteristics of spool valve [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86(10): 1091-1101.
- [16] YOON W, YOON H S, AHN J H, et al. Flow measurement and instrumentation flow control characteristics of throttling venture valve with adjustable area [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 81(10): 102034.
- [17] 孙后环,徐海涵,贾文华. 液压阀 V-U 及 U-U 型节流槽特性研究[J]. 液压与气动, 2012, 36(11): 74-76.
- [18] HUANG Jia-wu, BAO Yin-chang. Computational Analysis of the Flow Characteristics of V-U and U-U Notch in Spools of Valves [C]. The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering Singapore: ICCAE, 2010, (3): 222-225.
- [19] 邓丰曼. 基于 UG 的液压机械臂建模与故障诊断方法研究[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(8): 69-71, 74.
- [20] 张涛. 基于国产化技术的连铸机液压系统升级改造及应用浅析[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(2): 40-44.

[编辑:全瑶]

本文引用格式:

周知进,李松波,罗先聪. 节流阀双U阀槽二次结构优化后特性分析[J]. 机电工程, 2023, 40(2): 252-257.

ZHOU Zhi-jin, LI Song-bo, LUO Xian-cong. Characteristic analysis on throttle valve after secondary structure optimization of double U-groove [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(2): 252-257.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>