

超高压笼套式节流阀结构优化研究

郑兴华¹, 洪毅^{1,2*}, 万宇航^{1,2}, 宋永朋¹, 严伟超¹, 杨涵¹, 杜宇飞¹

(1. 湖北省地质局第七地质大队, 湖北宜昌 443100; 2. 宜昌市地质资源与地质工程重点实验室, 湖北宜昌 443100)

摘要:为解决鄂西页岩气开采超高压工况下现有节流阀易失效、调节精度不足等问题,本研究开展超高压笼套式节流阀结构优化研究。通过流体力学理论计算确定了节流孔的关键几何参数,借助ANSYS软件,采用RSM湍流模型对不同阀芯曲面形状与节流孔排列方式开展流场模拟分析。结果表明,半圆形曲面阀芯受到的压力最小、抗冲刷性更好且便于加工;节流孔直线均匀排列为综合最优方案,其压力分布均匀,可有效抑制涡流产生,提升结构稳定性与调节精度,且加工便捷。优化后的节流阀结构在100 MPa超高压环境下表现出良好的节流效果与调节精度,对提高页岩气井口关键阀件的可靠性具有显著工程应用价值与推广前景。

关键词:笼套式节流阀;阀芯结构;超高压;节流孔;抗冲刷;结构优化;流场分析;页岩气

中图分类号:TE37 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)02-0124-07

Research on structural optimization of ultra-high pressure cage type throttle valve

ZHENG Xinghua¹, HONG Yi^{1,2*}, WAN Yuhang^{1,2}, SONG Yongpeng¹, YAN Weichao¹, YANG Han¹, DU Yufei¹

(1. The Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang Hubei 443100, China; 2. Yichang Key Laboratory of Geological Resources and Geological Engineering, Yichang Hubei 443100, China)

Abstract: To address issues such as the susceptibility to failure and insufficient regulation accuracy of existing throttle valves under ultra-high pressure conditions in shale gas extraction in western Hubei, this study conducts structural optimization research on an ultra-high pressure cage-type throttle valve. The key geometric parameters of the throttle orifices were determined through theoretical fluid dynamics calculations. Utilizing ANSYS Fluent software and adopting the Reynolds Stress Model (RSM) for turbulence simulation, flow field simulations were performed to analyze different valve core surface profiles and throttle orifice arrangements. The results indicate that the semi-circular curved valve core exhibits the lowest pressure, superior erosion resistance, and ease of machining. Furthermore, the linear uniform arrangement of throttle orifices is identified as the comprehensive optimal scheme, offering uniform pressure distribution, effectively suppressing vortex generation, enhancing structural stability and regulation accuracy, and providing manufacturing convenience. The optimized throttle valve structure demonstrates excellent throttling performance and regulation accuracy under 100 MPa ultra-high pressure conditions, showing significant engineering application value and promising prospects for enhancing the reliability of key wellhead components in shale gas extraction.

Key words: cage type throttle valve; valve core structure; ultra-high pressure; throttle hole; erosion resistance; structure optimization; flow field analysis; shale gas

收稿日期:2025-09-21; 修回日期:2025-12-07 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.02.014

基金项目:湖北省地质局科技项目“鄂西页岩气井井控设备优化与控压返排技术研究”(编号:DQKJ2024-4)

第一作者:郑兴华,男,汉族,1991年生,工程师,探矿工程专业,主要从事地热井及页岩气井的钻完井工程技术研究与管理工作,湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号,535275861@qq.com。

通信作者:洪毅,男,汉族,1988年生,工程师,探矿工程专业,博士,主要从事地热井及页岩气井的钻完井工程技术研究与管理工作,湖北省宜昌市夷陵区夷兴大道35号,710829272@qq.com。

引用格式:郑兴华,洪毅,万宇航,等.超高压笼套式节流阀结构优化研究[J].钻探工程,2026,53(2):124-130.

ZHENG Xinghua, HONG Yi, WAN Yuhang, et al. Research on structural optimization of ultra-high pressure cage type throttle valve [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 124-130.

0 引言

随着鄂西地区页岩气开采力度加大,对页岩气井井口管汇及关键阀件可靠性、稳定性要求越来越高,现有的高压管件、针型节流阀、楔形节流阀以及笼套式节流阀等经常出现失效或者刺漏事故,国内外学者对于节流阀的设计和内部结构改进做过较多研究。谭建国等^[1]、冯美贵等^[2]、薛婷等^[3]为了优化和优选井口常规管汇布置情况,根据计算流体力学基本理论,建立了不同角度弯管模型,对高压弯头及管汇系统进行了流场研究,不同角度下,管道内部流场差异较大,并进行了试验模拟研究,确定不同材料管道的最佳角度和材料优选,有助于改善管道的布置,提高使用寿命。聂涛等^[4]、李俊逸等^[5]为了提高压降比,减少孔板的冲蚀,自主研发了超高压笼套式节流阀,对节流阀阀芯小孔位置进行了优化设计,结果表明该设计提高了节流阀使用安全性和节流效果。华剑等^[6]采用大涡模拟和响应面法对外笼套式节流阀流场进行计算和优化,优化节流孔板孔径既可以改善湍流和涡动,还可以减少气动噪声,为笼套式节流阀设计提供理论指导。Yu等^[7]、Eladeb等^[8]、Qian等^[9]对节流阀进行了参数化分析,并介绍了用于减压的锥形节流阀的组成,锥角和压力的影响,还研究了进口和出口对氢气减压性能的影响。结果表明,锥角和压差对阀芯锥面附近的流动区域的流态和流动特性有显著影响,当锥形角小、压差高时,沿锥面下有较强的紊流。Lisowski等^[10]、Heo等^[11]为了对节流阀阀芯几何形状进行修正,采用CFD方法对节流阀内部流场进行了数值模拟,确定流体对阀芯部位的轴向力和径向力。仿真结果表明,使用单切槽的阀芯可保证节流阀能够在较低流量下工作,但存在径向力不对称,使用对称切槽阀芯减少了阀芯位置的径向力的不均匀性,轴向力增加幅度相对较小。Zhang等^[12]、Zheng等^[13]、Galoppi等^[14]研究发现压缩机内部换热系统对节流阀性能影响较大,基于实际气体的状态方程和热力学方程建立了压缩空气中各成分的数学模型,空气温度和腔室初始温度对总能量系数影响较大,较高的注入空气温度和较低的腔室初始温度降低了节流阀失效概率。Wang等^[15]、伍晓龙等^[16]、曹龙龙等^[17]、吴景华等^[18]为了验证离散相位模型(DPM)预测钻井管道内部的冲蚀损失和侵蚀分布规律,运用计算流体力学理论和相应的实验,

结果表明通过选择最佳腔室结构可有效减少管道内部的冲蚀。

上述研究大多采用了计算流体力学理论和方法,包括钻井液对钻井井口不同节流阀关键结构的流场仿真,得到改进节流阀内部结构的优化措施。本研究借鉴上述研究方法,针对节流阀在超高压工况下的使用要求,聚焦于超高压笼套式节流阀结构,对阀芯、笼套、密封圈等关键部件进行设计,对节流阀关键结构进行优化,有效提升节流阀的抗冲蚀性能与流量调节精度。并详细阐述了各部件间的协同工作机制,其中笼套的开孔布局及阀芯与笼套的配合方式,不仅提高了节流精度,还增强了节流阀的稳定性与可靠性。对该超高压笼套式节流阀进行流体分析,最后判断节流阀设计的合理性和可行性。经模拟分析,优化后的超高压笼套式节流阀可在100 MPa工况下稳定运行,满足高压流体系统对超高压节流控制的需求,具有显著的工程应用价值与推广前景。

1 笼套式节流阀结构及工作原理

随着页岩气勘探开发向更深、更复杂的领域推进,气井井口压力可达数十甚至上百 MPa,而下游管道运行压力通常在3~6 MPa,需要节流阀实现从井口高压到下游低压的转换,传统节流阀在超高压工况下调节流量和压力时,易出现精度不足、冲蚀严重等问题。超高压笼套式节流阀研究旨在为超高压工况下节流阀能稳定、可靠地工作。高压、高速且含有腐蚀成分和杂质的流体介质,会对节流阀造成严重的冲蚀和腐蚀,导致节流阀寿命缩短、性能下降,含有颗粒也会造成阀芯刺穿断裂等现象,如图1所示。超高压笼套式节流阀是指适用于极高压工况,通常公称压力 ≥ 80 MPa,甚至可达数百 MPa,在常规笼套式节流阀基础上进行结构优化,核心在于解决高压差下的密封、抗气蚀、结构强度及可靠性问题。如采用多列错位节流孔等方式,使介质过流面积与笼套轴向开度呈线性关系,从而实现介质流量的精确调节。

本次设计超高压笼套式节流阀通径 $D_n=80$ mm,压力载荷 $P=100$ MPa,工作介质为钻井液,适应于井口钻井液压力调节。

装配图如图2所示。其工作原理:超高压流体进入阀体后,通过笼套时,因过流面积减小产生第



(a) 阀芯断裂



(b) 阀芯侧壁刺穿



(c) 阀芯刺穿

图1 阀芯失效图片

Fig.1 Pictures of valve core failure

一次压降;流体流过节流孔后,撞击阀芯曲面,动能转化为热能,形成第二次压降;再通过手轮控制阀芯位移,每圈对应0.5 mm,最后通道截面积减小,阻力增大,流量减小,压力减小,形成第三次压降。

2 笼套节流孔设计

节流阀笼套的外形通常采用圆柱形,可以更好地适应节流阀的安装和工作要求^[19],圆柱形笼套的加工相对简单且安装方便,可在此基础上进行节流孔的设计。钻井液通过节流孔的流量可以用孔口处流量公式来计算:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

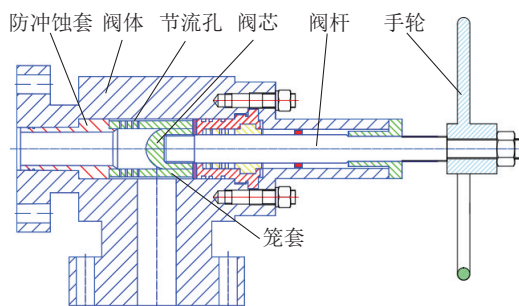


图2 超高压笼套式节流阀结构

Fig.2 Structure diagram of the ultra-high pressure cage type throttle valve

式中: Q ——流量,取 3.8 L/s; C_d ——流量系数,通常由实验确定,对于尖锐边缘的孔口取 0.9~0.95 之间,本文取 0.9^[20]; A ——节流孔的截面积; ΔP ——节流孔前后的压力差; ρ ——钻井液密度,取 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

节流孔引起的压力损失可以用伯努利方程和能量守恒原理来推导。在理想情况下,不考虑黏性损失,根据伯努利方程,节流孔前后的压力差与流速的关系为:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (2)$$

式中: v_1 、 v_2 ——节流孔前、后流体的流速。

实际应用中,由于存在黏性阻力等因素,需要引入阻力系数来修正压力损失,实际的压力损失:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \xi \quad (3)$$

式中: v ——流体通过节流孔的平均流速,取 16.9 m/s; ξ ——阻力系数,与节流孔的形状、尺寸以及流体的流动状态有关,本文取 2.94。

由(3)可得压力差 $\Delta P = 0.504 \text{ MPa}$ 。代入式(1)可得节流孔总的截面积 $A = 651.1 \text{ mm}^2$,进而得到节流孔的直径 $D = 28.8 \text{ mm}$ 。笼套节流孔数量定为 48,则单孔直径 $d = 4.16 \text{ mm}$ 。

3 不同线型阀芯流场分析

为揭示 100 MPa 超高压工况下节流过程的流体特性^[21],通过 ANSYS 软件模拟流体在阀内的速度、压力、动能等参数分布,为阀门结构优化、工程可靠性设计提供理论依据。结合已有的曲面阀芯数据,分析流体从 100 MPa 高压端经节流阀降压至下游压力的衰减规律,验证不同曲面阀芯与不

同节流孔排列方式的降压效果,最后确定合适的阀芯曲面曲率。曲面形状可为半圆或抛物线。

曲面节流阀主要由阀体、阀杆、阀芯组成,阀芯通过阀杆的上下移动来调整位置,从而改变流体通过的通道面积。因为曲面节流阀结构复杂,本文使用简化模型进行分析,图3为不同曲线的阀芯结构简图。在SolidWorks中分别建立流体模型,如图4所示,再导入ANSYS中生成流体网格,流体连续相湍流采用RSM模型,网格为四面体网格,网格数量为203260,设置好inlet和outlet。如图4(c)所示,蓝色部分左边为出口,右下部分为入口。最后设置好相关参数,输入速度为8.8 m/s,输出速度为25 m/s,温度为380 K。

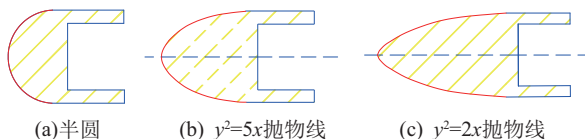


图3 不同曲线状阀芯结构

Fig.3 Different curved valve core structures

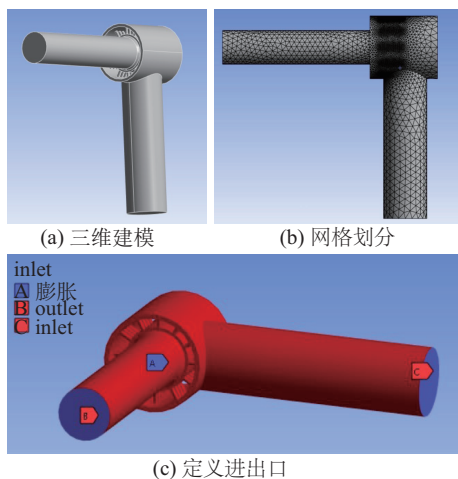
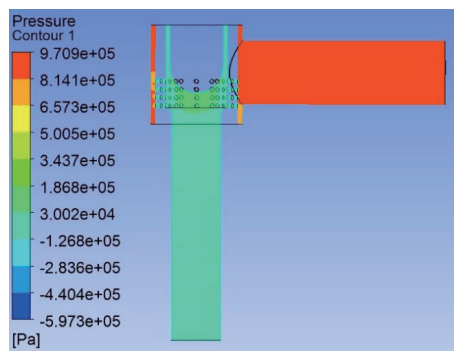


图4 半圆曲面内流场模型

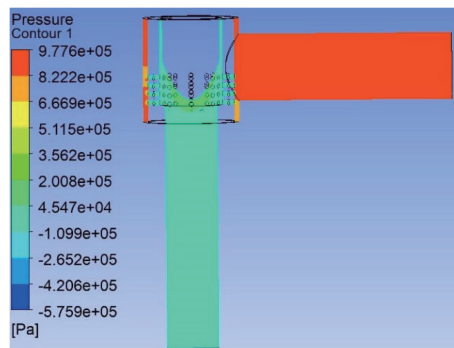
Fig.4 The flow field model within the semi-circular curved surface

设置节流阀入口流速相同,阀芯位置不变,得到不同曲面的压力分布,如图5所示。在不同抛物线标准方程 $y^2=2Ax$ 中, A 决定了抛物线的开口大小, A 越大,开口越宽。

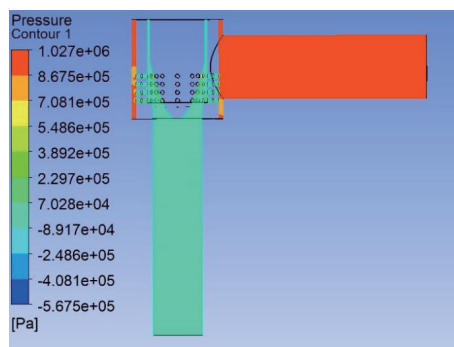
由图5可知,阀芯曲面为半圆时,节流阀阀芯的流体压力最小。阀芯曲面为抛物线形时,抛物线开口度越小流体压力越大。不同阀芯曲面时,节流阀



(a) 半圆



(b) $y^2=5x$ 抛物线



(c) $y^2=2x$ 抛物线

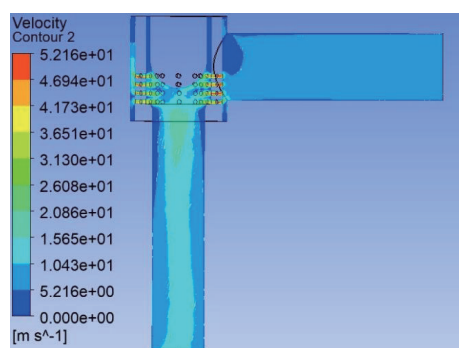
图5 不同曲线状压力云图

Fig.5 Pressure contours in different curvilinear shapes

内流体速度云图见图6。可以看出,流体流速相同和阀芯位置不变情况下,曲面为半圆时流体在阀体内部速度衰减最大。阀芯曲面为抛物线时,其开口度较小时,内部流体速度较大,阀芯受冲蚀较大,节流效果较差。本次分析里,开口越大,其内部流场最大压力越小。故半圆形曲面节流效果较好,阀芯受到的冲蚀较小,且便于加工。

4 不同节流孔分布流场研究

笼套节流孔排列也会对流体流动特性产生影响,如阀体内部的压力分布、节流前后流体的能量



(a) 半圆

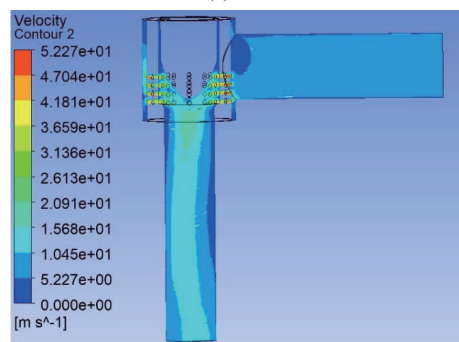
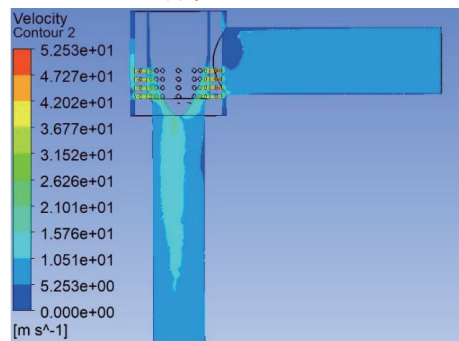
(b) $y^2=5x$ 抛物线(c) $y^2=2x$ 抛物线

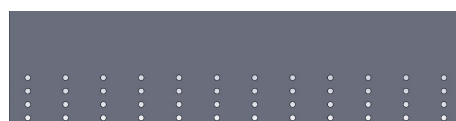
图6 不同曲线状速度云图

Fig.6 Velocity contours of different curvilinear shapes

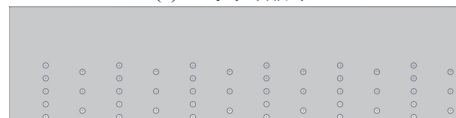
变化等。一般来说,节流孔对称排列会使阀芯附近流场分布更均匀,减少局部涡流和偏流现象,而错位排列会使流体随机改变流动方向,形成更复杂的漩涡结构,这种结构一般适用于需要强化流体搅拌、混合或能量耗散的场合。

图7展示了节流孔的排列方式,图8为流场模型及其网格划分和进出口设置,设置入口压力为100 MPa,出口压力为0.1 MPa。

求解后处理得到剖视图如图9所示,节流孔直线均匀排列相比错位排列和环形排列所受压力更加均匀,从而减少受力不均而导致的局部磨损和变形,且更好地调控流量和压力,减少阀体内部紊流



(a) 直线均匀排列



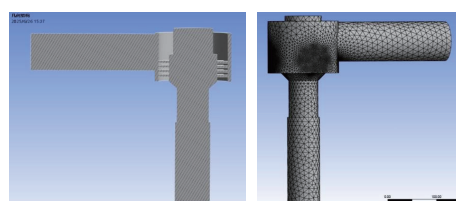
(b) 错位排列



(c) 环形排列

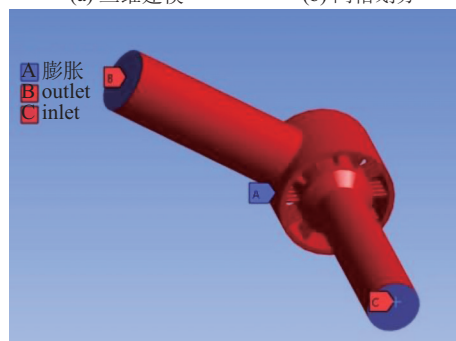
图7 节流孔排列方式

Fig.7 Arrangement of throttle holes



(a) 三维建模

(b) 网格划分



(c) 定义进出口

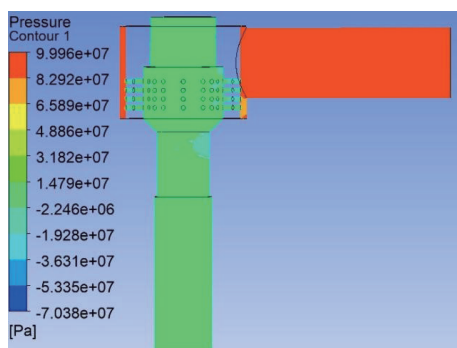
图8 流场模型及边界条件

Fig.8 Flow field model and boundary conditions

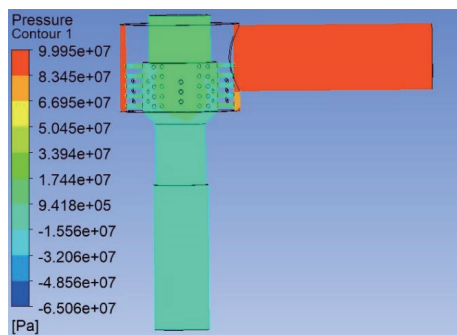
和涡流的生成,同时,直线均匀排列的节流孔便于加工。

由图10可知,流体经环形排列的节流孔调节后,其速度降低较多,使得阀芯受到的冲蚀较小,表明其节流效果较好。而直线均匀排列时速度衰减相对较小,节流效果相对较差,但与另外两种排列相比,三者速度差异较小。

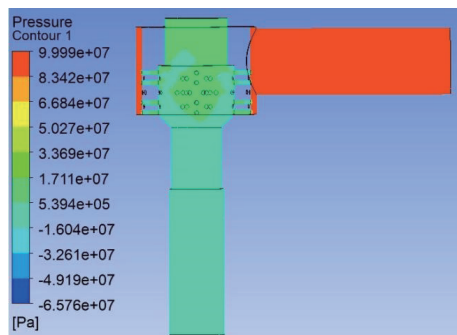
综上,节流孔采用直线均匀排列方式设计,流体压力和流速均匀分布,节流阀整体结构足够稳定,能更好地实现对流量压力的精准调控。



(a) 直线均匀排列



(b) 错位排列



(c) 环形排列

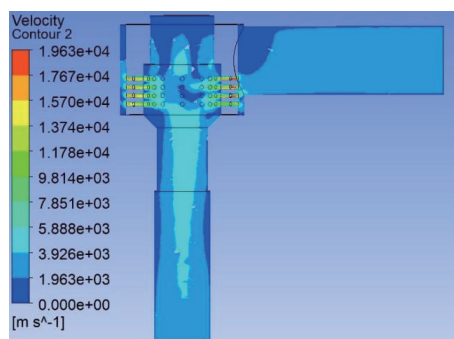
图9 不同排列下的压力云图

Fig.9 Pressure contours under different arrangements

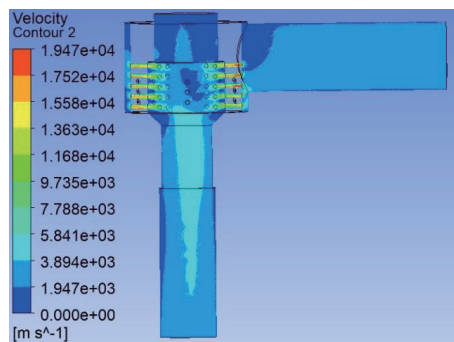
5 结论

本文从流体力学角度出发,完成节流孔的设计及理论计算和分析,得到以下结论。

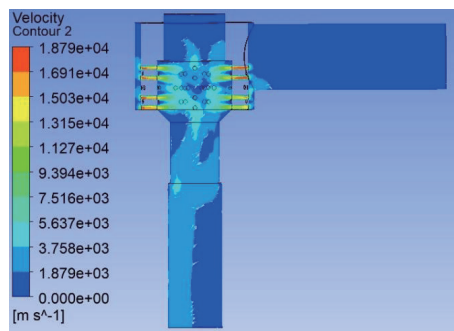
(1) 阀芯曲面曲率不同时阀芯受压和流体速度不同。阀芯曲面为半圆时节流阀阀芯受到的压力最小,为抛物线时阀芯压力随开口度减小而变大。阀芯曲面为半圆时,流体在阀体内部的速度衰减最大;阀芯曲面为抛物线时,其开口度越小,流体速度越大,阀芯受冲蚀越大,节流效果越差。开口越大,其最大压力越小,故半圆形曲面节流效果较好,阀芯受到的冲蚀最小,且便于加工,本次设计采用半圆形曲面。



(a) 直线均匀排列



(b) 错位排列



(c) 环形排列

图10 不同排列下的速度云图

Fig.10 Velocity contours under different arrangements

(2) 节流孔直线均匀排列相比错位排列和环形排列时受到的压力更加均匀,从而减少因受力不均而导致的局部磨损和变形。均匀的流场和受力也能使节流阀更好地调控流量和压力,减少阀体内部紊流和涡流的生成。而直线均匀排列的节流孔在阀体内部流体的速度衰减相对较小,节流效果较差,环形排列的节流孔部位的速度降低最大,阀芯受到的冲蚀较小,其节流效果较好。

(3) 综合分析发现,节流孔采用直线均匀排列方式设计时,其内部流体压力和流速均匀分布,节流阀整体结构足够稳定,能更好地实现对流量压力的精准调节,且便于加工。

参考文献(References):

- [1] 谭建国,洪毅,张所邦,等.近井口高压管汇布置结构设计及选材优化研究[J].钻探工程,2022,49(5):163-170.
TAN Jianguo, HONG Yi, ZHANG Suobang, et al. Structural design and material selection optimization for high pressure manifolds near the wellhead[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 163-170.
- [2] 冯美贵,刘一静,朱丽娜,等.钻井液离心机关键部件内部流场及冲蚀磨损特性研究[J].钻探工程,2025,52(5):51-60.
FENG Meigui, LIU Yijing, ZHU Lina, et al. Study on the internal flow field and erosion wear characteristics of key components of drilling fluid centrifuge[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 51-60.
- [3] 薛婷,王瑜,张凯,等.非接触式端面密封流体动压效应的研究进展[J].钻探工程,2023,50(S1):38-43.
XUE Ting, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Research on progress of hydrodynamic pressure effect of non-contact face seal[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 38-43.
- [4] 聂涛,胡桂川,周群,等.超高压多级笼套式节流阀的压差分析[J].流体机械,2022,50(6):98-104.
NIE Tao, HU Guichuan, ZHOU Qun, et al. Differential pressure analysis of ultra-high pressure multi-stage cage type throttle valve[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(6): 98-104.
- [5] 李俊逸,李长俊,贾文龙,等.含硫钻井液井口笼套式节流阀硫沉积数值模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(3):61-67.
LI Junyi, LI Changjun, JIA Wenlong, et al. Numerical simulation study on sulfur deposition of cage sleeve throttle valve in sour natural gas wellhead[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 61-67.
- [6] 华剑,王婧宇,程荫,等.外笼套式节流阀气动噪声特性分析及优化[J].机床与液压,2024,52(17):168-175.
HUA Jian, WANG Jingyu, CHENG Yin, et al. Analysis and optimization of aerodynamic noise characteristics of corbula-type throttle valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(17): 168-175.
- [7] Yu L J, Yang X H, Zhang Z X, et al. Parametric analysis on throttling elements of conical throttling valve for hydrogen decompression in hydrogen fuel cell vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 65: 107342.
- [8] Eladeb A, Ali A B M, Ghodrattallah P, et al. Performance enhancement of organic single-flash cycles by eliminating the throttle valves: a comparative exergy-economic assessment[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 67: 105810.
- [9] Qian J Y, Wu J Y, Gao Z X, et al. Effects of throttling window on flow rate through feed-water valves[J]. ISA Transactions, 2020, 104: 393-405.
- [10] Lisowski E, Filo G, Rajda J. Analysis of flow forces in the initial phase of throttle gap opening in a proportional control valve[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 59: 157-167.
- [11] Heo S, Jeong J, Kim D H, et al. Spray angle prediction model for a multi-slit type throttleable gas-liquid pintle injector[J]. Acta Astronautica, 2025, 231: 113-126.
- [12] Zhang S Y, Wang H R, Li R X, et al. Thermodynamic analysis of cavern and throttle valve in large-scale compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 183: 721-731.
- [13] Zheng Z Y, Yang Q C, Zhang W T, et al. Thermodynamic analysis and comparison of mechanical subcooling transcritical CO₂ refrigeration system with expander and throttling valve[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 65: 105625.
- [14] Galoppi G, Secchi R, Ferrari L, et al. Radial piston expander as a throttling valve in a heat pump: focus on the 2-phase expansion[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82: 273-282.
- [15] Wang G R, Chu F, Tao S Y, et al. Optimization design for throttle valve of managed pressure drilling based on CFD erosion simulation and response surface methodology[J]. Wear, 2015, 338/339: 114-121.
- [16] 伍晓龙,冯钰琦,杜焱森,等.气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J].钻探工程,2022,49(3):83-91.
WU Xiaolong, FENG Yuqi, DU Yaosen, et al. Simulation analysis of the flow field of the air lift reverse circulation dual wall drill tool[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 83-91.
- [17] 曹龙龙,张恒春,王稳石,等.密闭取心钻头两相流流场CFD模拟研究[J].钻探工程,2021,48(11):35-41.
CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. CFD simulation of the two phase flow field in the sealed coring bit[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 35-41.
- [18] 吴景华,冯海涛,谢俊革,等.中深地热井复杂地层钻进高温钻井液研制[J].钻探工程,2025,52(5):61-66.
WU Jinghua, FENG Haitao, XIE Junge, et al. Research and development of high-temperature drilling fluid for complex strata in deep geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 61-66.
- [19] 韩泽龙,李小洋,赵明,等.保压取心钻具球阀工作动力学分析[J].钻探工程,2024,51(6):32-38.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, ZHAO Ming, et al. Analysis of working dynamics of ball valve with pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 32-38.
- [20] 符运豪.高压笼套式节流阀阀芯结构研究与优化分析[D].成都:西南石油大学,2016.
FU Yunhao. Research and optimization analysis on the core structure of high-pressure cage-type throttle valve[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [21] 彭博一,李晓东,王康,等.废弃无固相钻井液无害化处理技术研究与应用[J].钻探工程,2025,52(2):45-50.
PENG Boyi, LI Xiaodong, WANG Kang, et al. Research and application of harmless treatment technology for waste non-solid phase drilling fluid[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 45-50.

(编辑 王跃伟)