

石油集输管道缩径式球阀内部流场研究

陈豪, 陈青, 王斌, 丁朱波, 纪如鹏, 顾金彤

盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月10日; 发布日期: 2024年7月17日

摘要

在石油管道运输系统中, 阀门内部流场的稳定与否, 将会影响整个管道运输系统的稳定性。针对缩径式球阀内部流场研究, 探讨阀门开度和通道直径对其内部流场的影响。研究方法运用了NX12.0建立几何模型, 采用了Fluent软件进行数值模拟, 并对缩径式球阀内部的速度分布、压力分布以及流通能力进行分析。研究结果表明, 随着开度增大, 最大压力和最大流速增大、最小压力减小, 并加剧了湍流现象。随着通道直径增大, 阀门内部的高压区和中压区压力减小, 低压区压力增大, 最大流速减小, 并减缓了湍流现象。最后, 通过对流量系数和流阻系数的计算分析, 验证了不同开度和通道直径对缩径式球阀流通能力的影响。结果显示, 阀门的流通能力随着开度增大而减弱, 随着通道直径增加而增强。以上研究结果对缩径式球阀的设计和 optimization 提供了重要参考, 为提高石油管道运输系统的稳定性和效率提供理论支持。

关键词

缩径式球阀, 内部流场, 阀门开度, 通道直径

Study on Internal Flow Field of Reduced-Diameter Ball Valve in Oil Gathering and Transportation Pipeline

Hao Chen, Qing Chen, Bin Wang, Zhubo Ding, Rupeng Ji, Jintong Gu

School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 10th, 2024; published: Jul. 17th, 2024

文章引用: 陈豪, 陈青, 王斌, 丁朱波, 纪如鹏, 顾金彤. 石油集输管道缩径式球阀内部流场研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(4): 4487-4497. DOI: 10.12677/mos.2024.134405

Abstract

In the oil pipeline transportation system, the stability of the flow field inside the valve will affect the stability of the whole pipeline transportation system. In order to study the internal flow field of reduced-diameter ball valve, the influence of valve opening and channel diameter on the internal flow field is discussed. Research methods NX12.0 was used to establish a geometric model, fluent software was used for numerical simulation, and the speed distribution, pressure distribution and flow capacity inside the reduced-diameter ball valve were analyzed. The results show that with the increase of the opening, the maximum pressure and the maximum flow rate increase and the minimum pressure decreases, and the turbulence phenomenon is intensified. With the increase of the diameter of the channel, the pressure in the high and medium pressure areas of the valve decreases, the pressure in the low pressure area increases, the maximum flow velocity decreases, and the turbulent flow phenomenon is slowed down. Finally, through the calculation and analysis of the flow coefficient and flow resistance coefficient, the influence of different opening and channel diameter on the flow capacity of the reduced-diameter ball valve is verified. The results show that the flow capacity of the valve decreases with the increase of opening and increases with the increase of channel diameter. The above research results provide an important reference for the design and optimization of the reduced-diameter ball valve, and provide theoretical support for improving the stability and efficiency of the oil pipeline transportation system.

Keywords

Reduced-Diameter Ball Valve, Flow Field Inside, Valve Opening, Channel Diameter

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石油是全球主要能源之一，广泛应用于发电、供暖、工业和交通。由于石油资源分布不均，需要通过各种运输方式进行输送，目前采用较多的运输方式为管道运输[1] [2]。在整个石油管道运输系统中，阀门作为石油管道运输中的“咽喉”对系统的稳定运行起到关键作用。在众多阀门中，球阀因可靠性高、启闭速度快等优点在管道运输中被大规模使用[3] [4]。

球阀由流道结构的不同可分为全通径式球阀和缩径式球阀，在全通径式球阀中公称直径等于通道直径，在缩径式球阀中公称直径大于通道直径。目前大多数学者针对全通径式球阀进行内部流场研究，但对缩径式球阀内部流场研究较少。Cheng [5]等基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型对全通径式 V 型球阀内部流场进行了数值模拟，研究了不同开度和阀芯锥角下的内部流动特性，为天然气管道高效运行提供技术支撑。王佳琪 [6]等应用 CFD 软件对阀芯锥角分别为 30° ， 60° ， 90° 的全通径式 V 型球阀进行数值模拟，对其内部流场进行了研究，为 V 型球阀的设计与优化提供了参考。梁潇 [7]运用 Fluent 针对球阀管路系统，通过改变阀门开度、管道构型等因素对其启闭过程的流场变化进行研究，为提高球阀管路系统稳定性提供依据。Ma [8]等利用自定义 UDF 技术和 $k-\varepsilon$ 湍流模型，对全通径式球阀在变转速规律和不同开度下的内部流场进行了瞬态数值模拟，为球阀选用提供理论支撑。

本文的目的在于拓展对缩径式球阀内部流场的研究，为缩径式球阀设计与优化提供参考。本文提出

改变缩径式球阀的通道直径和阀门开度，利用 **Fluent** 软件模拟分析速度云图、压力云图和流通能力，对缩径式球阀内部流场进行深入研究。

2. 计算模型

2.1. 几何模型

缩径式球阀是一种常用的流体控制装置，如图 1 所示其主要结构由阀体、阀杆、球体等部分组成。本文针对缩径式球阀内部流场研究运用 **NX12.0** 对其进行结构简化以有利于数值模拟的收敛，为了降低进出口边界对球阀附近区域流场的影响，在阀前与阀后分别添加 $5D$ 和 $10D$ 的管道(D 为阀门公称直径)如图 2 所示[9] [10]。

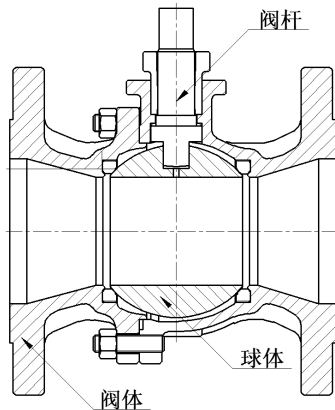


Figure 1. Structure diagram
图 1. 结构图

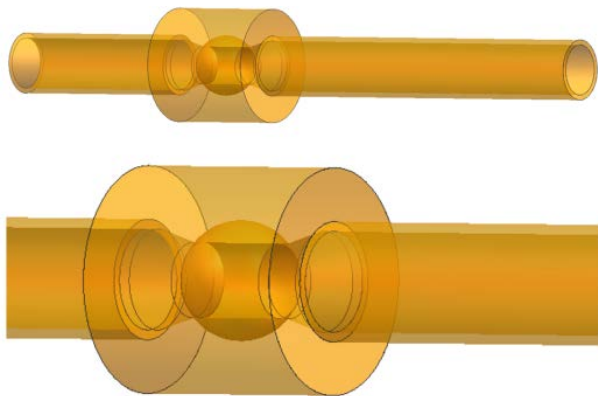


Figure 2. Simplified 3D structure diagram
图 2. 三维结构简化图

2.2. 网格划分

本文将简化后的几何模型导入 **Design Modeler** 中进行流体域的抽取，利用 **Fluent Meshing** 对抽取得到的流体域进行网格划分，对阀门球体以及阀门前后范围区域流场采用加密处理。体网格类型选择 **poly-hexcore** 以确保数值模拟的准确性、计算效率和收敛性。图 3 为缩径式球阀在 30° 开度下的网格划分情况。

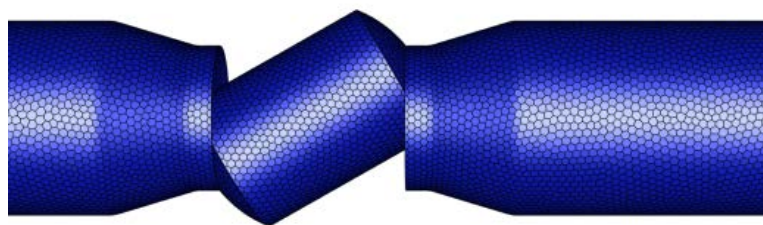


Figure 3. Mesh model
图 3. 网格模型

2.3. 边界条件设定

本文为探究缩径式球阀内部流场分布,研究范围涵盖了阀门不同开度(30° 、 45° 、 60°)和不同通道直径(66 mm、76 mm、86 mm)的变化对内部流场的影响。计算涉及的边界条件:湍流模型设置为 Realizable k- ϵ 模型,流体密度为 1350 kg/m^3 ,流体粘度为 $1 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$,流体速度为 5 m/s ,入口设置为速度入口,出口设置为压力出口,求解方法为 SIMPLE [11] [12]。

2.4. 准确性验证

为确保本文选取的湍流模型及求解方法的准确性,本文将进行准确性验证,本次准确性验证主要采用对比验证的方法。主要步骤如下:首先寻找对比验证所需的文献;接着,建立必要的对比验证几何模型;然后,应用本文选取的湍流模型及求解方法,并使用文献中的实验参数进行数值模拟;最后,将模拟结果与文献中的数据进行对比,从而验证所选取的湍流模型及求解方法的准确性。

本文对姬鹏[13]的实验数据进行数值模拟,采用与其相同的流体参数和工作参数,并选用本文的湍流模型和求解方法,通过计算对比速度分布和压力分布的情况,从而验证本文湍流模型和求解方法的准确性。本次准确性验证的几何模型如图 4 所示。

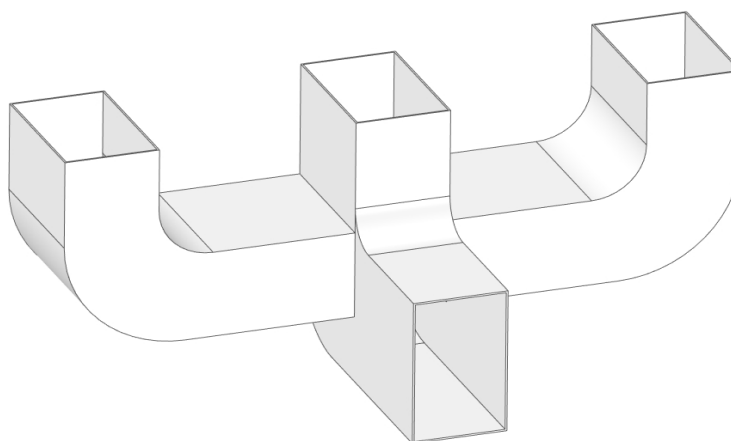


Figure 4. Geometric model
图 4. 几何模型

在本次准确性验证中,速度分布和压力分布的情况如图 5 所示。通过对比分析可以得出,本次准确性验证中的速度分布和压力分布的情况与文献中的速度分布和压力分布的情况基本一致。这一结果表明,本文选取的湍流模型与求解方法是准确的。

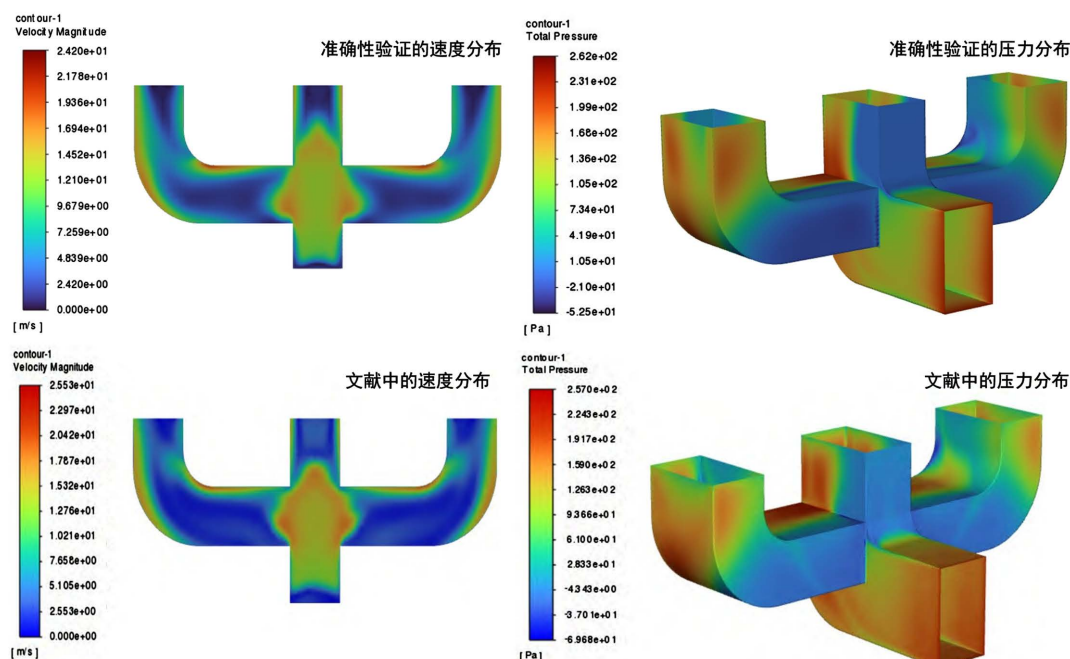


Figure 5. Accuracy verification diagram
图 5. 准确性验证图

3. 流场仿真模拟结果及分析

3.1. 不同开度对内部流场的影响

当流体速度为 5 m/s, 通道直径为 76 mm 时, 截取 XY 平面观察阀门不同开度下的内部流场分布情况, 图 6 由上至下分别为阀门开度在 30°、45°以及 60°时的压力分布情况。由图 6 可知, 阀内最大压力在流体进口处产生, 球体内的上部压力小于下部压力, 由于流体的流动在球体出口处的压力逐渐减小, 最小压力产生在球体出口与管道连接处的下部。当阀门开度在 30°向 60°变化时, 随着阀门开度的增大, 阀内最大压力呈现一个逐渐增大的过程, 而阀内最小压力的变化呈逐渐减小的趋势。

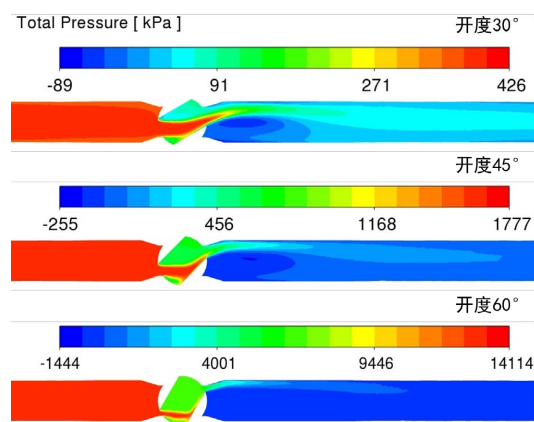


Figure 6. Pressure distribution diagram
图 6. 压力分布图

在图 7 和图 8 中, 由上至下阀门开度分别 30°、45°以及 60°。由速度分布图(图 7)可知, 当流体流入

管道和流出管道时流体速度较为均匀,当流体流经球体入口处和出口处时由于流道的改变,流体速度急剧增大从而形成高速使流体喷向球体内部和管道内壁,同时随着阀门开度的增大导致最大流速的增大,该现象将逐渐加剧。

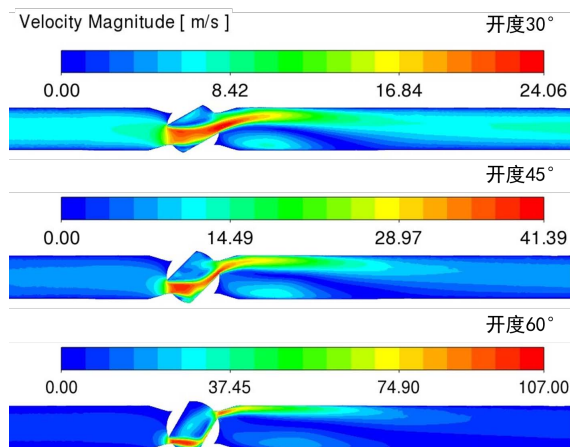


Figure 7. Velocity distribution diagram

图 7. 速度分布图

由粒子迹线图(图 8)可知,流体在流入球体时球体内部会产生湍流,随着开度增加湍流现象将逐步加剧,流体流出球体时球体出口处与管道连接处的下部会产生涡旋,随着开度增加涡旋将愈发增大。

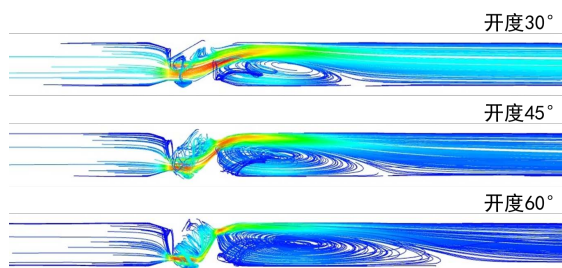


Figure 8. Particle trace diagram

图 8. 粒子迹线图

3.2. 不同通道直径对内部流场的影响

在缩径式球阀设计中,通道直径的大小是一个至关重要的参数,它直接影响着阀门的流体控制性能、压力损失等。因此,进行不同通道直径下的流场研究,有助于全面了解阀门的性能特征。

图 9 表明阀门开度为 45°,流速在 5 m/s 的情况下,不同通道直径对阀门内部压力分布的影响。在图 9 中,由上至下通道直径分别为 66 mm、76 mm 以及 86 mm。如图 9 所示,在管道入口至球体入口这一部分区域为高压区,球体部分为中压区,球体出口至管道出口这一部分为低压区。当缩径的直径由 66 mm 向 86 mm 转变的过程中,高压区和中压区的压力逐渐减小,低压区的压力逐渐增大。

在图 10 中,由上至下通道直径分别为 66 mm、76 mm 以及 86 mm。如图 10 所示,在缩径式球阀的球体进口、球体出口以及球体内部,均产生了剧烈的速度变化,成为了出现速度梯度的主要区域。在通道直径由 66 mm 向 86 mm 变化的过程中,由于通道直径增加,阀内最大速度减小,速度梯度减小。

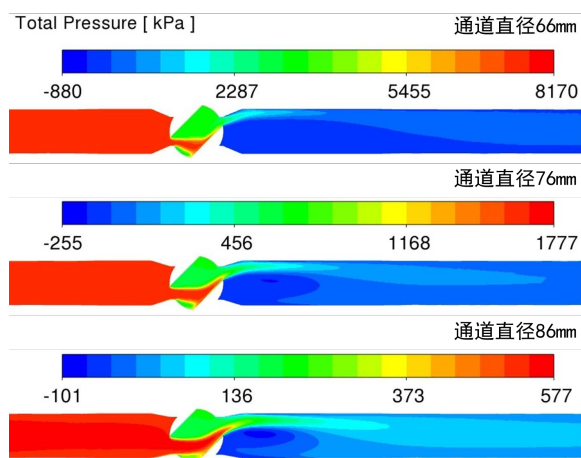


Figure 9. Pressure distribution diagram
图 9. 压力分布图

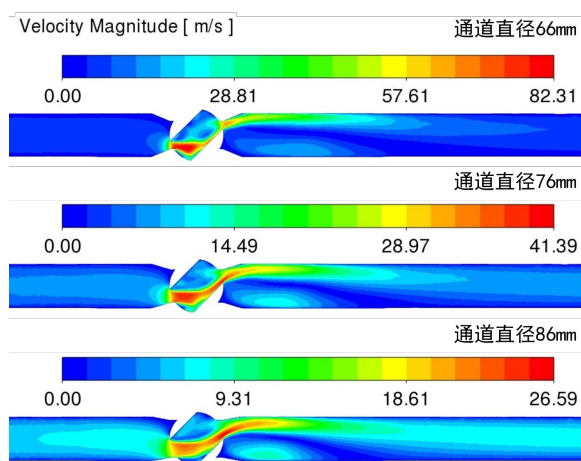


Figure 10. Velocity distribution diagram
图 10. 速度分布图

由图 11 可知，缩径式球阀由上至下通道直径分别为 66 mm、76 mm 以及 86 mm。如图 11 所示，在流体流动过程中会产生湍流和涡旋，随着通道直径的增加，最大速度的减小，球体内部的湍流逐渐减缓，球体出口处与管道连接处下部产生的涡旋逐渐缩小。

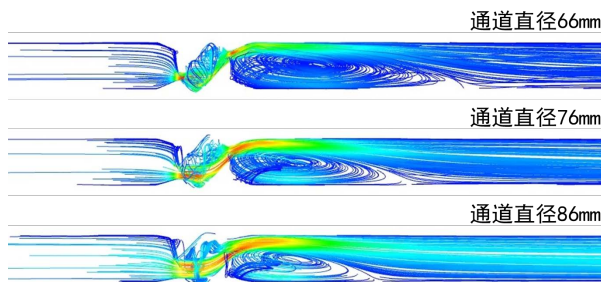


Figure 11. Particle trace diagram
图 11. 粒子迹线图

4. 缩径式球阀流通能力

4.1. 流量系数

流量系数在阀门设计中至关重要，它反映了流体介质、阀门结构、阀门开度等因素对阀门流通能力的影响程度，因此它被视为衡量阀门流通能力的关键指标[14]。流量系数的大小直接反映了阀门的流通能力的优劣，通常来说，流量系数越大，阀门的流通能力就越好，流量系数越小则意味着阀门的流通能力越差[15] [16]。阀门的流量系数理论公式[17]如下：

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (1)$$

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}} \quad (2)$$

故：

$$C = Q \sqrt{\frac{\rho}{P_1 - P_2}} \quad (3)$$

式中， P_1 为阀门进口压力，Pa； P_2 为阀门出口压力，Pa； ΔP 为压差，Pa； C 为流量系数，无量纲； Q 为体积流量， m^3/h ； ρ 为流体密度 kg/m^3 。

根据数值模拟所得数据，对缩径式球阀的流量系数进行计算，计算结果如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可知，在缩径式球阀的流量系数计算中，缩径式球阀的不同通道直径和开度的变化，会导致相应的流量变化。

由表 1 可知，当通道直径保持为 76 mm 不变时，阀门开度由 30°向 60°逐渐增大，流量系数将随着阀门开度的增大而减小，阀门流通能力变弱。

Table 1. Flow coefficient
表 1. 流量系数

阀门开度	流量系数
30°	11.14
45°	5.39
60°	1.91

由表 2 可知，当阀门开度保持为 45°不变时，阀门通道直径由 66 mm 向 86 mm 增加，流量系数将随着阀门通道直径的增加而增大，阀门流通能力变强。

Table 2. Flow coefficient
表 2. 流量系数

通道直径	流量系数
66 mm	2.53
76 mm	5.39
86 mm	9.36

4.2. 流阻系数

流阻系数是衡量流体在通过阀门或管道时所产生的能量损失的重要参数[18]。对流阻系数进行深入研究和分析有助于我们更好地理解阀门结构对流体流动的影响，并且可以借此优化设计以减少能量损失。优化流阻系数不仅可以改善流体控制系统的性能，还可以降低系统的能耗和运行成本。一般情况下，流阻系数越大则意味能量损失越大、流通能力越差，流阻系数越小则表明能量损失越小、流通能力越好[19][20]。阀门流阻系数的计算公式[21]如下：

$$\zeta = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} \quad (4)$$

结合式(1)则：

$$\zeta = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho v^2} \quad (5)$$

式中， P_1 为阀门进口压力，Pa； P_2 为阀门出口压力，Pa； ΔP 为压差，Pa； ζ 为流阻系数，无量纲； v 为流速，m/s； ρ 为流体密度 kg/m³。

结合式(5)和数值模拟所得数据，对缩径式球阀进行流阻系数计算，计算结果如表3和表4所示。根据表3中的数据可得，当通道直径保持为76 mm不变时，随着阀门开度从30°逐渐增大至60°，流阻系数呈现逐渐增大的趋势。这表明随着阀门开度的增加，阀门的流通能力逐渐减弱，且在开度从45°向60°旋转时，流阻系数急剧增大。

Table 3. Flow resistance coefficient

表 3. 流阻系数

阀门开度	流阻系数
30°	19.13
45°	66.86
60°	333.49

由表4可知，当阀门开度保持为45°不变时，随着通道直径从66 mm增加到86 mm，流阻系数则呈现逐渐减小的趋势。这意味着阀门通道直径的增加会降低流体通过阀门时的阻力，从而增强阀门的流通能力。

Table 4. Flow resistance coefficient

表 4. 流阻系数

通道直径	流阻系数
66 mm	223.63
76 mm	66.86
86 mm	26.45

故在设计缩径式球阀时，需要综合考虑通道直径和开度的变化，以全面评估阀门的流通能力。

5. 总结

本文通过数值模拟对缩径式球阀的内部流场进行了深入研究，并得出了以下结论。

首先, 对于不同开度下的影响, 研究发现随着阀门开度增大, 阀内最大压力逐渐增大, 最小压力逐渐减小。而阀门开度的增加导致流体速度梯度加剧, 尤其在球体入口和出口处, 流速急剧增大, 形成高速喷流现象。此外, 随着开度增加, 涡旋现象和球体内部湍流现象加剧, 流体流动变得更加复杂。

其次, 针对不同通道直径的研究发现, 通道直径的增加使阀内高压区和中压区的压力逐渐减小, 低压区的压力逐渐增大。同时, 通道直径的增加导致了速度梯度减小, 使得球体内部湍流逐渐减缓, 球体出口处产生的涡旋逐渐减小。

最后, 在缩径式球阀的流量系数和流阻系数计算中, 结果显示阀门的流量系数随着阀门开度增大而减小, 随着通道直径增大而增大。而流阻系数则呈现相反的趋势, 随着阀门开度增大而增大, 随着通道直径增大而减小。

综上所述, 缩径式球阀的内部流场受到阀门开度和通道直径的影响, 需要综合考虑这些因素来评估阀门性能。在实际应用中, 该研究结果对于优化阀门设计、提高石油管道运输系统的稳定性和效率具有重要意义。

参考文献

- [1] 石凌峰. 石油长输管道安全运行管理探究[J]. 石化技术, 2023, 30(9): 206-208.
- [2] 周英鹏. 石油管道储运安全事故的防范策略研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(2): 228-229.
- [3] Sotoodeh, K. (2020) Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Pipeline Ball Valves in the Offshore Industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **20**, 1175-1183. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00924-8>
- [4] 陆怡, 查涵清, 姚润盐. 特大口径全焊接球阀的密封性分析及结构改进[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 441-445, 455.
- [5] Cheng, W. and Peng, H. (2022) Dependence of Flow Coefficient on the Cone Angle and Relative Opening of Natural Gas Control Ball Valves. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, **45**, 649-660. <https://doi.org/10.1177/01423312221119378>
- [6] 王佳琪, 何世权, 喻临风, 等. V 型球阀阀芯优化及流场分析[J]. 流体机械, 2022, 50(9): 100-104.
- [7] 梁潇. 球阀管路系统流场特性分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2022.
- [8] Ma, G., Lin, Z., Zhu, Z. and Fang, Y. (2021) Effect of Variable Speed Motion Curve of Electric Actuator on Ball Valve Performance and Internal Flow Field. *Advances in Mechanical Engineering*, **13**, 1-13. <https://doi.org/10.1177/16878140211028003>
- [9] 王奇根, 章城, 张淼, 等. 基于导流板结构的通海阀内部流阻和噪声特性数值模拟研究[J/OL]. <https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202308006>, 2024-3-20.
- [10] 王朝富, 马浩南, 卢鉴, 等. 强制密封球阀流场模拟分析及优化[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(11): 87-88, 90.
- [11] 毛伟. V 型球阀流阻特性及空化特性分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [12] 郑溟阳. 固液两相流的流动特性分析及仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [13] 姬鹏, 宋洪尧, 张俊龙. 基于 FLUENT 的矩形管道流场数值模拟[J]. 南方农机, 2023, 54(16): 49-51.
- [14] Nguyen, Q.K., Jung, K.H., Lee, G.N., Park, S.B., Kim, J.M., Suh, S.B., et al. (2023) Experimental Study on Pressure Characteristics and Flow Coefficient of Butterfly Valve. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **15**, Article 100495. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2022.100495>
- [15] 王蛟, 胡亚安, 陈亮, 等. 阀后管道突扩对控制阀门流阻特性的影响[J]. 流体机械, 2024, 52(1): 41-47.
- [16] Nguyen, Q.K., Jung, K.H., Lee, G.N., Suh, S.B. and To, P. (2020) Experimental Study on Pressure Distribution and Flow Coefficient of Globe Valve. *Processes*, **8**, Article 875. <https://doi.org/10.3390/pr8070875>
- [17] 陆洪光, 苗晓丹, 刘世海, 等. 单向微球阀的设计及流场特性仿真与实验[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(12): 26-30.
- [18] Zhao, L., Wu, J., Jin, Z. and Qian, J. (2022) Cavitation Effect on Flow Resistance of Sleeve Regulating Valve. *Flow Measurement and Instrumentation*, **88**, Article 102259. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102259>
- [19] Wang, Y., Zhu, C., Zhang, G., Wang, D., Jiang, M., Zhu, Z., et al. (2020) Numerical Analysis to the Effect of Guiding

Plate on Flow Characteristics in a Ball Valve. *Processes*, **8**, Article 69. <https://doi.org/10.3390/pr8010069>

- [20] 王会杰, 王泓, 柴永生, 等. 大风量密闭阀门流阻性能数值分析[J]. 防护工程, 2024, 46(1): 36-40.
- [21] 张伟政, 曹石婧, 陈修高. 基于 CFD 的调节阀流场数值模拟与实验研究[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(3): 108-113.