

球阀关闭过程对水锤效应的影响分析

梁 潇, 张红艳

长安大学理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月11日; 录用日期: 2021年11月15日; 发布日期: 2021年12月7日

摘 要

本文为了对球阀不同关闭过程下水锤效应产生的影响进行分析, 采用fluent软件滑移网格和udf技术模拟球阀关闭时的转动过程, 对球阀关闭过程中的流场变化以及水锤压力变化进行了研究分析。研究结果表明: 随着阀门的关闭, 球阀流速先上升后下降, 当球阀流速达到最大值时, 流体介质对阀芯产生最大冲击, 球阀水锤压力达到最大值。球阀水锤压力的最大值随着关闭时间的增加逐渐减小, 且在相同关闭时间下, 采用匀加速关闭和匀减速关闭会比匀速关闭产生更大的水锤压力。

关键词

球阀, 水锤效应, CFD数值模拟, 关闭时间, 关闭规律

Analysis of Influence of Closing Process of Ball Valve on Water Hammer Effect

Xiao Liang, Hongyan Zhang

School of Science, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 11th, 2021; accepted: Nov. 15th, 2021; published: Dec. 7th, 2021

Abstract

In this paper, in order to analyze the influence of water hammer effect in different closing processes of ball valve, the sliding grid of fluent software and udf technology are used to simulate the rotation process of ball valve when it is closed, and the changes of flow field and water hammer pressure during the closing process of ball valve are studied and analyzed. The results show that with the closing of the valve, the flow rate of the ball valve increases first and then decreases. When the flow rate of the ball valve reaches the maximum value, the fluid medium has the maximum impact on the valve core, and the water hammer pressure of the ball valve reaches the maximum value. The maximum water hammer pressure of ball valve gradually decreases with the increase of valve

closing time, and under the same valve closing time, uniform acceleration and uniform deceleration will produce greater water hammer pressure than uniform speed.

Keywords

Ball Valve, Water Hammer Effect, CFD Numerical Simulation, Valve Closing Time, Valve Closing Way

Copyright © 2021 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

因为某些原因使管道中的流体流速产生急剧变化, 导致流体压力因流体惯性作用产生急剧变化的现象, 被称为水锤现象[1]。其中球阀迅速关闭产生的水锤压力不仅会造成管路噪声, 还有可能导致管路系统和阀门等设备的损坏[2]。因此研究球阀关闭规律对水锤效应的影响十分必要。

过去, 水锤压力的计算常采用解析法和图解法, 随着计算方法的不断发展, 目前计算水锤压力的方法常采用特征线法、有限元法、有限差分法、有限体积法等数值计算方法[3] [4]。其中, 特征线法将水锤偏微分方程沿特征线化为常微分方程, 因其计算效率高、计算结果较为精确, 被广泛应用于水锤压力计算中[5]。然而随着计算机和 CFD 仿真技术的发展, 基于有限体积法的 CFD 仿真越来越受大家欢迎。华晔[6]等、马康[7]等将 CFD 仿真、特征线法计算结果与实验数据进行了对比验证, 证明了 CFD 方法计算水锤压力的可靠性。刘华坪[8]等采用 CFD 动网格技术对阀门内部流场进行了仿真分析。郭兰兰[9]等、许文奇[10]等运用 fluent 软件对阀门变速关闭过程的水锤压力进行了计算研究。

本文将采用 fluent 滑移网格的方法模拟不同关闭规律下球阀关闭过程, 分析研究不同关闭时间下以及同一关闭时间下不同关闭速度的水锤压力变化, 为以后阀门使用中更有效率稳定的关闭提供理论指导。

2. 流动控制方程[11]

流体运动守恒方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程三个基础方程。本文没有考虑管道中的热传递及能量交换, 管路-球阀系统中的流场为可压缩的黏性流体的湍流流动, 在定常条件下, 选用连续性方程(质量守恒方程)、动量方程来模拟球阀流场。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_1) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2)$$

式中: p 为作用在流体上的压力; ρ 为液体密度; μ 为液体的分子黏性系数; μ_1 为湍流动力黏性系数。

文中 CFD 仿真计算时采用 $k-\varepsilon$ 模型, 其运输方程如下:

k (湍动能)方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + Y_M + S_k \quad (3)$$

ϵ (湍流耗散率)方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

式中: G_k 和 G_b 分别为平均速度梯度和浮力引起的湍动能的产生项; Y_M 代表可压缩流中的脉动作用; S_k 和 S_ϵ 为用户自定义源项, 本文中均为 0; σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 和 ϵ 对应的普朗特数分别为 1.0 和 1.3; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数, $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 分别取为 1.44 和 1.92, $C_{3\epsilon}$ 与浮力相关。

3. 数值模拟计算

3.1. 几何模型及其网格划分

某管道系统中, 阀芯球体直径为 45.4 mm, 球阀通径为 24.7 mm, 管道直径为 36 mm。文章针对该实验管道系统建立几何模型, 几何模型分为进、出口管道、阀芯通道三个部分, 阀门进、出口管路长度分别取为 3000 mm、500 mm, 阀芯通道内部结构图如图 1 所示, 几何模型图如图 2 所示。然后, 对几何模型进行网格划分, 模拟时需采用 fluent 滑移网格技术控制阀芯转动来实现关阀过程, 因此阀芯部分流场较复杂, 是流体压力、速度等参数变化较大的部分, 所以为了提高计算精确度, 对球阀阀芯进行单独加密, 网格单元总数为 635,762。

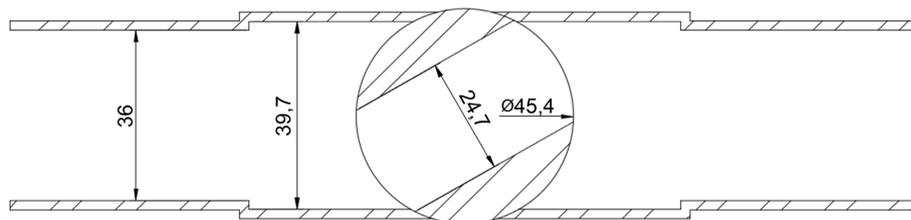


Figure 1. Internal structure diagram of ball valve

图 1. 球阀内部结构图



Figure 2. Geometric model drawing

图 2. 几何模型图

3.2. 边界条件

根据管道系统的工况, 流体介质设置为水, 采用标准的壁面函数和标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型。入口边界条件设为压力入口, 总压 16,000 Pa, 出口边界条件选用压力出口 0 Pa。水的密度采用 udf 定义为可压缩流体, 阀芯的转动规律亦由 udf 控制。在靠近阀前入口处设置检测点, 以该平面检测到的平均压力作为水锤压力结果进行分析。同时, 为了提高计算的速度和稳定性, 先进行阀门全开时的稳态计算, 待流场稳定后再进行关阀计算。

3.3. 计算结果分析

3.3.1. 球阀不同开度下流场分析

球阀关阀时计算得到球阀在不同开度下靠近阀芯的速度云图如图 3 所示。从图 3 可以看出, 由于球

阀芯上下开口处流通面积迅速减小, 导致压强迅速增加, 速度增大, 在阀芯开口处产生最大速度, 且小开度下球阀流场较为复杂, 阀芯开口处会产生涡流。随着球阀的关闭, 阀门开度不断增大, 球阀流速明显增大, 最大流速并非产生在完全闭合后, 最大流速产生在阀门开度在 30°~60°之间, 此时流体对阀芯的冲击最强, 最大水锤压力应该出现在这附近。

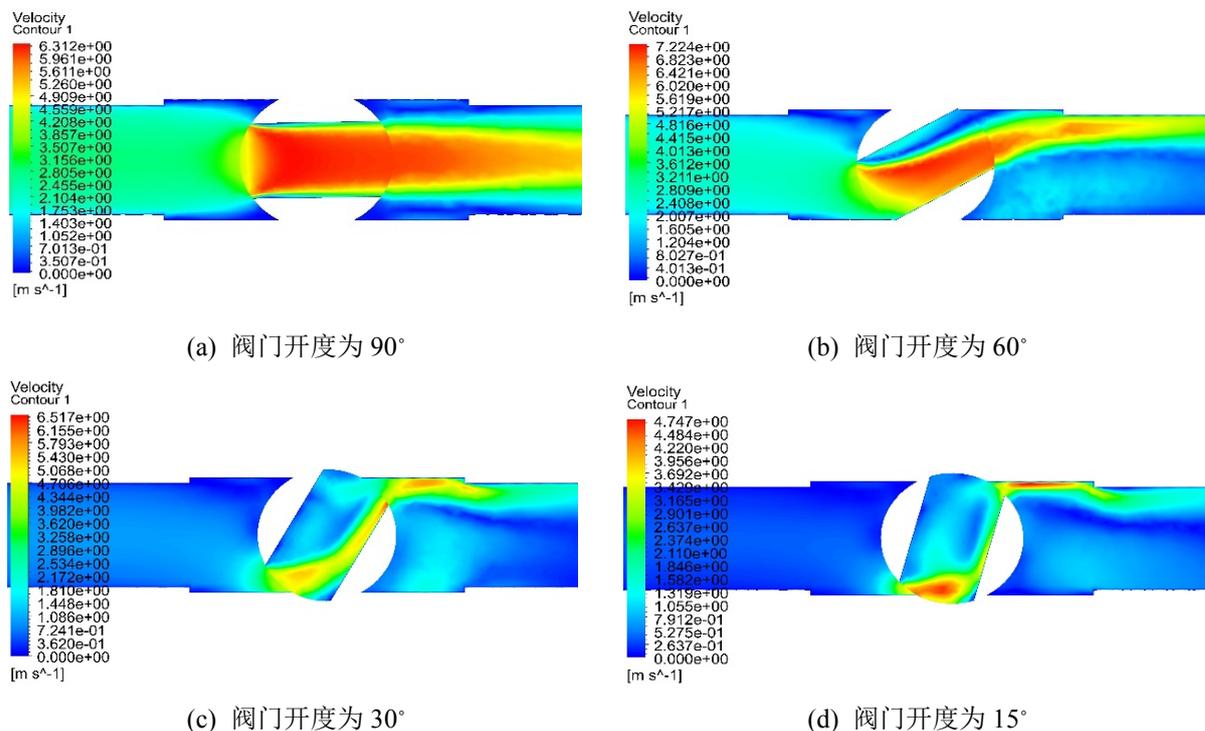


Figure 3. Ball valve velocity nephogram
图 3. 球阀速度云图

3.3.2. 球阀关闭时间对水锤压力的影响

图 4 为关闭时间 0.2 s、0.4 s、0.6 s、0.8 s 时水锤压力随时间变化曲线。图中, 0.2 s、0.4 s、0.6 s、0.8 s

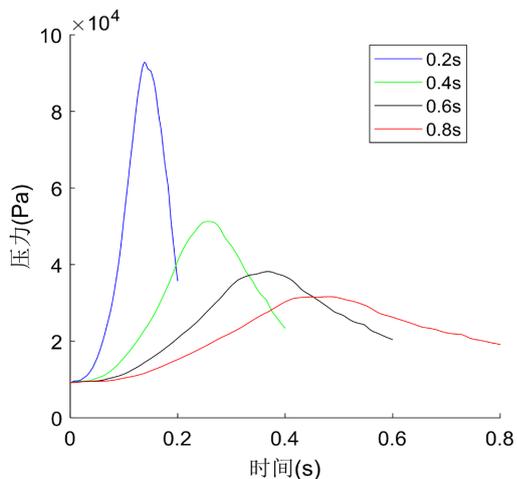


Figure 4. Water hammer pressure at different valve closure times
图 4. 不同关闭时间水锤压力变化曲线

时最大水锤压力出现在关阀 30°~60°之间, 分别为 92,824.7 Pa、51,259.4 Pa、38,201.6 Pa、31,614.5 Pa。可以看出水锤压力随着关阀时长的增加逐渐降低, 其中关阀时间越短, 同样时间间隔下增加关阀时间, 水锤压力下降更为明显。

水锤压力变化曲线图 5, 最大水锤压力变化曲线。

图 5 为 0.1~1 s 间最大水锤压力变化曲线, 表 1 为最大水锤压力值及其减小率变化。从图和表中可以看出水锤压力最大值随这阀门关闭时间的增加而减小。其中 0.1 s 关阀时最大水锤压力值为 185,463 Pa 远高于其它关阀时间, 0.1~0.2 s 关阀时间内最大水锤压力减小最为明显, 减小率最大。之后关阀时间在 0.1 s 间隔内改变最大水锤压力减小率逐步递减, 0.4 s 关阀时间后最大水锤压力的变化不再明显。

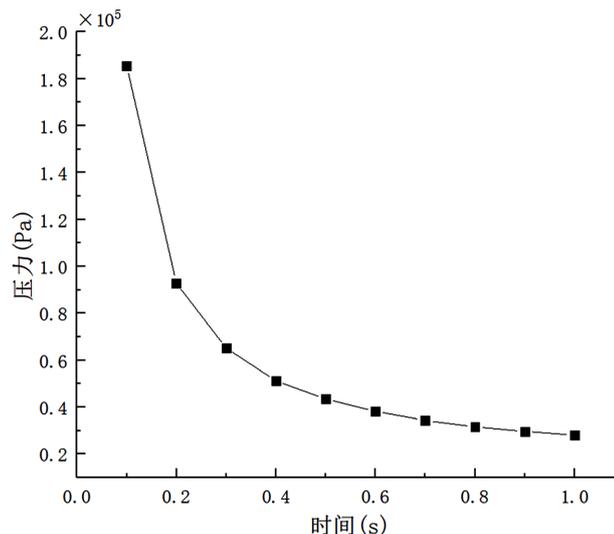


Figure 5. Maximum water hammer pressure variation curve

图 5. 最大水锤压力变化曲线

Table 1. Maximum water hammer pressure value and reduction rate

表 1. 最大水锤压力值及减小率

关阀时间(s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
最大水锤压力(Pa)	185,463	92,824.7	65,160.6	51,259.4	43,462.9	38,201.6	34,334.1	31,614.5	29,661.8	28,094.2
水锤压力减小率(%)	-	49.95	29.80	21.33	12.11	10.12	7.92	6.18	5.28	-

3.3.3. 球阀关阀规律对水锤压力的影响

调整阀门关阀规律, 使阀门在 0.4 s 关阀的情况下分别按匀加速关阀、匀速关阀、匀减速关阀三种关阀方式进行关阀。图 6 为阀门在 0.4 s 关阀时匀加速关阀、匀速关阀、匀减速关阀三种情况下阀门开度随时间变化曲线, 图 7 为这三种情况下水锤压力随时间变化曲线。从图中可以看出当采取匀加速关阀时阀门最初关阀较慢, 导致匀加速关阀初始压力增长速度较慢, 关阀速度随着时间逐渐增加, 水锤压力逐渐增加至最大值 72,209.1 Pa, 之后迅速降低; 匀减速关阀初始关阀较快, 导致匀减速关阀初始压力增长速度较快, 水锤压力迅速增加至最大值 63,726.6 Pa, 关阀速度随着时间逐渐降低, 水锤压力也逐渐降低; 匀速关阀由于其关阀速度不变, 水锤压强变化较前两种情况较为平缓, 其最大水锤压力值为 51,259.4 Pa, 相较于其它两种情况水锤压力明显偏低, 因此采用匀速关阀可以减弱水锤现象带来的影响。

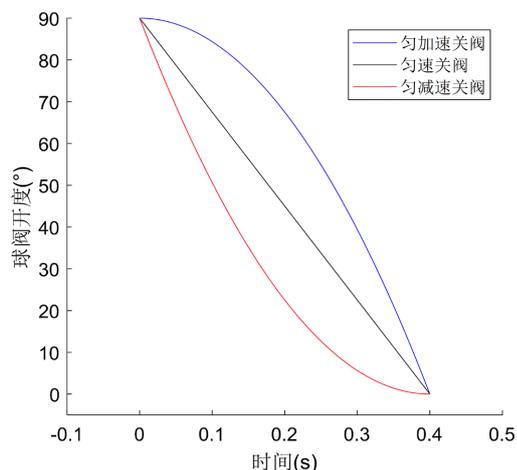


Figure 6. Valve opening change curve

图 6. 阀门开度变化曲线

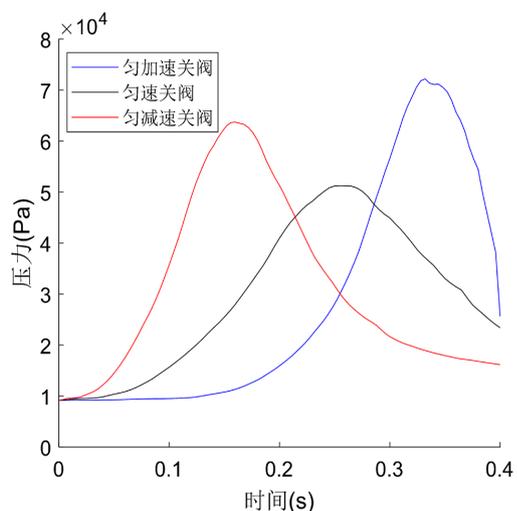


Figure 7. Water hammer pressure at different valve closure times

图 7. 不同关闭规律水锤压力变化曲线

4. 结论

本文采用 fluent 对球阀关闭过程进行了数值模拟, 数值模拟结果表明:

1) 在球阀所有开度下, 阀芯开口处产生最大速度, 通过开口后, 压强开始下降, 速度也开始减小。在球阀关闭过程中, 随着阀门不断关闭, 流场逐渐变得复杂, 阀芯开口处逐渐出现涡流, 球阀流速先增大后减小, 最大流速出现在 30° ~ 60° 之间。

2) 球阀关闭过程中水锤压力会随着关闭时间的增加不断减小, 当球阀关闭时间减小到一定数值后再增加关闭时间对水锤压力的影响不再明显, 故适当提高关闭时间可以很好地抑制水锤效应的影响。

3) 球阀在同样关闭时间下, 采用匀速关闭相较于匀加速、匀减速关闭有着更小水锤压力, 且匀速关闭压力变化过程更为平缓, 故采用匀速关闭能更好地起到水锤防护的作用。

参考文献

- [1] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.

- [2] 彭利坤, 张阳阳, 邢继峰. 舰船纵倾均衡水舱加气调水时管路冲击特性研究[J]. 液压与气动, 2013(8): 9-12.
- [3] 潘子超, 阮欣, 陈艾荣. 基于任意级配的二维随机骨料生成方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 759-764.
- [4] Bazant, Z.P. and Tabbara, M.R. (1990) Random Particle Models for Fracture of Aggregate or Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, **116**, 1686-1705. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1990\)116:8\(1686\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:8(1686))
- [5] 王学芳, 叶宏开, 汤荣铭. 工业管道中的水锤[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [6] 华晔, 廖伟丽. CFD 技术在管道阀门水击计算中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(3): 72-75.
- [7] 马康, 顾振杰, 白长青. 改进的特征线方法及过载对水锤效应影响分析[J]. 计算力学学报, 2020, 37(5): 623-628.
- [8] 刘华坪, 陈浮, 马波. 基于动网格与 UDF 技术的阀门流场数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2008(2): 106-108.
- [9] 郭兰兰, 耿介, 石硕, 苑飞, 雷丽, 杜广生. 基于 UDF 方法的阀门变速关闭过程中的水击压强计算研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2014, 49(3): 27-30.
- [10] 许文奇, 彭利坤, 屈铎. 基于 CFD 的球阀关闭过程水击现象研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(11): 170-174.
- [11] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.