

特斯拉阀水力空化效应的数值模拟研究

李 璞, 刘国华*

华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京

收稿日期: 2023年5月8日; 录用日期: 2023年5月17日; 发布日期: 2023年6月21日

摘 要

水力空化作为一种高级氧化技术, 近年来在水处理领域得到了广泛的应用。特斯拉阀是一种被动式止回阀, 反向导通产生空化。本文以特斯拉阀空化器为研究对象, 空化体积为特征参数, 研究了结构参数对空化效应的影响。结果表明, 特斯拉阀中的空化现象主要发生在出口段; 通过减小圆弧段半径和增大直流道倾斜角度, 可以有效地增强空化效应; 随着出口长度和直流道长度的增加, 空化效应先增强后减弱且存在一个最佳参数。研究结果对研发新型水力空化消毒灭菌装置具有重要意义。

关键词

特斯拉阀, 水力空化, 结构参数, 空化效应

Numerical Simulation Study on Hydraulic Cavitation Effect of Tesla Valve

Pu Li, Guohua Liu*

School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: May 8th, 2023; accepted: May 17th, 2023; published: Jun. 21st, 2023

Abstract

Hydraulic cavitation as an advanced oxidation technology has been widely used in the field of water treatment in recent years. The Tesla valve is a passive check valve with a reverse guide to produce cavitation. In this paper, the influence of structural parameters on cavitation effect is studied by taking the cavitation volume as the characteristic parameter of the Tesla valve cavitation. The results show that the cavitation phenomenon of Tesla valve mainly occurs in the outlet section. The cavitation effect can be effectively enhanced by decreasing the radius of the arc section and increasing the inclination angle of the DC channel. With the increase of outlet length and DC

*通讯作者。

channel length, cavitation effect is first enhanced and then weakened, and there is an optimal parameter. The results are of great significance for the development of a new type of hydraulic cavitation disinfection and sterilization device.

Keywords

Tesla Valve, Hydraulic Cavitation, Structural Parameters, Cavitation Effect

Copyright © 2023 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

随着现代工业的快速发展,水污染已经成为十分严峻的环境问题,严重威胁着人类的健康和生态系统的可持续发展。因此污水处理已成为全球迫在眉睫的问题。传统水处理方法存在着能耗高、效率低等问题,不再能满足新的需求[1]。空化作为一种高级氧化技术,近年来被研究者重视并进行了广泛研究。

根据空化产生的方法一般可以分为超声空化、水力空化、光空化和粒子空化4种类型[2]。水力空化因其能耗低、装置简单、操作方便,是空化水处理技术的研究重点[3],水力空化作为一种新兴的水处理氧化技术,相比传统的水处理方法具有能效高,无污染,操作简便等特点。

水力空化研究中,常用的空化装置有孔板式空化器、文丘里管式空化器、旋转式空化器、涡流式空化器等[4]。其中特斯拉阀是一种被动式止回阀,反向导通时产生较大压降,发生显著的空化效应。近年来,国内外学者针对特斯拉阀的单向导通性进行了大量的研究,Thompson [5]等通过改变特斯拉阀的级数、阀与阀之间的距离和雷诺数来确定它们对多级特斯拉阀有效性的影响。S.F. de Vries [6]等为了促进脉动热管的循环,提高热管的热阻,设计了一种新型的特斯拉阀。通过层流单相模拟和稳态两相流实验,验证了该方法的强化换热的有效性。钱锦远[7]研究了不同进口速度下的液压直径、阀角和内曲线半径等结构参数对特斯拉阀压降性能的影响。任璞[8]基于Fluent仿真平台,研究了特斯拉阀反向导通时的流场特性,同时还分析了特斯拉阀产生空化的原因及空化模型对流场特性的影响。然而,目前结构参数对特斯拉阀空化效应的影响尚不明确。

本文以特斯拉阀为研究对象,采用标准k-ε湍流模型和Zwart-Gerber-Belamri空化模型对特斯拉阀空化器进行数值模拟。研究分析圆弧段半径、直流道倾斜角度、直流道长度、出口道长度等结构参数对特斯拉阀空化器空化效应的影响。以空化核心区域的空化体积作为特征参数,分析了空化效应随不同结构参数的变化关系。

2. 特斯拉阀的数值模拟

2.1. 几何建模及空化机理

特斯拉阀主要由入口段 L_1 、直流道 L_2 、圆弧段 R 、出口段 L_3 构成。采用Solidworks软件进行几何建模如图1所示,结构尺寸选用中心线作为尺寸标准,其截面为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的正方形。为了探究结构参数对特斯拉阀空化效应的影响,选择用空化核心区域的空化体积表征空化效应,空化体积越大,空化效应越好。表达式为:

$$V_c = V_m \times \alpha_v$$

式中: α_v 为空化核心区域的气相体积分数, V_m 是空化核心区域体积。

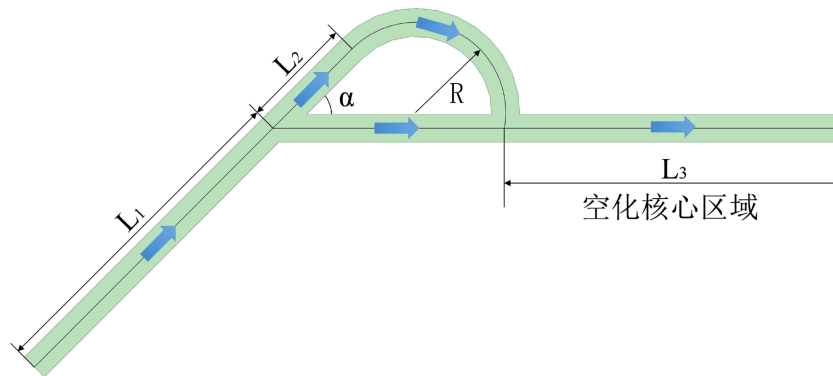


Figure 1. Model of Tesla Valve hydraulic cavitation

图 1. 特斯拉阀水力空化器模型

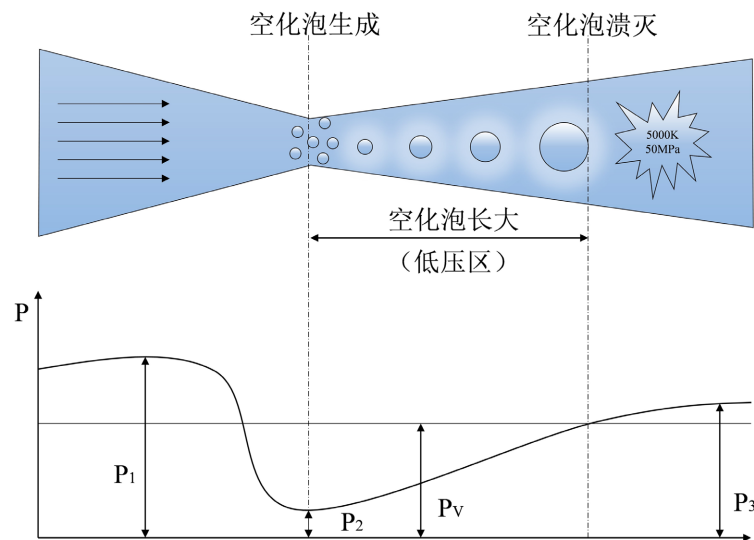


Figure 2. Schematic diagram of hydraulic cavitation

图 2. 水力空化原理图

水力空化原理图如图 2 所示。水力空化的产生是流体流过一个限流区域, 流速增大压强减小, 其局部压强降低至流体饱和蒸汽压 P_v 以下导致空泡的初生、发展、溃灭的过程。空化泡溃灭时会产生异常的高温 5000 K、瞬时高压 50 MPa, 同时又产生高速的冲击波和微射流, 导致液体产生机械效应、热效应、光效应、化学效应[9]。

然而特斯拉阀作为一种被动式止回阀, 反向导通时, 流体从压力入口进入, 由于在流体流动中, 由于惯性流体更趋向于沿通道中变化较为平缓的方向流动, 所以大部分流体沿直流道流至圆弧段, 只有少量流体流进水平通道。流体在交叉口处汇聚并产生冲击射流, 引起较大的速度梯度, 由伯努利方程可知压力骤降。压力降低至流体的饱和蒸汽压力以下时, 发生空化。

2.2. 计算方法及边界条件

选用流体计算软件 Fluent 对流场进行计算, 采用多相流 mixture 模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流方程、空化模型选用 Zwart-Gerber-Belamri 模型, 设置流体饱和蒸汽压力为 4133 Pa。计算方法选用压力 - 速度耦合器

Coupled 算法, 计算结果收敛残小于 10^{-6} , 采用二阶迎风格式分别 k 和 ε 进行差分。设置入口为压力入口, 压强为 0.35 MPa; 出口为压力出口, 出口压强为 0 MPa, 压强均为相对压强。

2.3. 空化模型

本论文选用空化模型为 Zwart-Gerber-Belamri 模型, 是一种基于简化 Rayleigh-Plesset 方程的空化模型, 在模型表达式的推导过程中简化了源项的表达式。该表达式的关键参数为气相体积分数、蒸发系数、凝结系数。蒸发源项和凝结源项如下:

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} (p \leq p_v)$$

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} (p > p_v)$$

式中: α_{nuc} 为气核体积分数, α_v 为气相体积分数, F_{vap} 、 F_{cond} 为分别为对应于蒸发和凝结过程的经验校正系数。在 Fluent 中, 以上经验系数的默认值分别为 $\alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4}$ 、 $R = 1.0 \times 10^{-6} m$ 、 $F_{vap} = 50$ 、 $F_{cond} = 0.01$ 。

3. 模拟结果分析

3.1. 圆弧段半径对空化效应的影响

采用倾斜角度为 45° 、出入口长度均为 60 mm、直流道长度为 20 mm、不同圆弧半径($16 \text{ mm} \leq R \leq 24 \text{ mm}$) 的特斯拉阀几何模型, 对特斯拉阀进行空化数值模拟, 得到气相云图、空化体积变化关系图。如图 3 所示; 并分析特斯拉阀圆弧段半径对空化效应的影响。

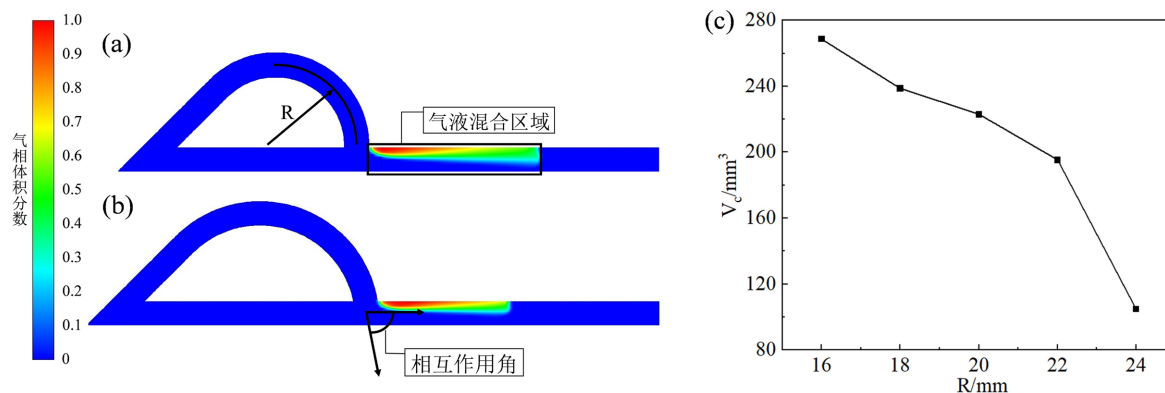


Figure 3. Simulation results of Tesla valves with different radii: (a) $R = 16 \text{ mm}$ gas cloud image; (b) $R = 22 \text{ mm}$ gas cloud image; (c) Change of cavitation volume with radius

图 3. 不同半径特斯拉阀的模拟结果: (a) $R = 16 \text{ mm}$ 气相云图; (b) $R = 22 \text{ mm}$ 气相云图; (c) 空化体积随半径的变化

由气相云图可知, 特斯拉阀空化器的空化主要发生在出口段。从入口段到出口段, 存在着液相 - 气液混合相 - 液相, 这是因为空化发生时, 因流体气化以及空化泡产生、长大, 导致液流中出现大量空泡, 形成液体 - 空化泡共存的气液两相流。随着圆弧半径的增大, 空化区域逐渐减小, 空化效应减弱。这是因为特斯拉阀空化的产生是由于圆弧段的流体与水平通道流体发生冲击相互作用引起的, 压力骤降产生空化泡, 然后进入低压区逐渐长大, 直至溃灭。随着半径的增大, 圆弧段和水平通道流体相互作用角减小, 同时入口段压强降低导致这种相互作用减弱, 空化效应减弱。并且低压区也逐渐减小, 使空化泡寿命降低, 导致空化泡没有得到充分长大就提前溃灭。从空化体积变化曲线可以看出, 空化体积随半径增

大而减小, 当半径大于 18 mm 时, 变化率逐渐增大。所以, 在满足空化发生和结构合理的情况下, 应尽量减小圆弧段半径, 可以强化空化效应。

3.2. 直流道倾斜角度对空化效应的影响

采用圆弧半径为 16 mm、出入口长度均为 60 mm、直流道长度为 20 mm、不同倾斜角度($30^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$)的特斯拉阀几何模型, 对特斯拉阀进行空化数值模拟, 得到气相云图、空化体积变化关系图。如图 4 所示; 并分析直流道倾斜角度对空化效应的影响。

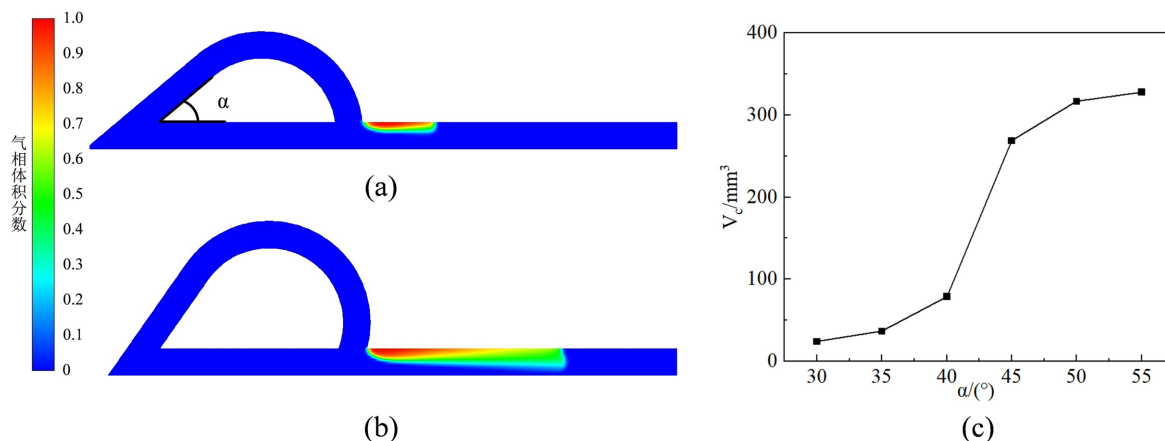


Figure 4. Simulation results of Tesla valves with different DC channel inclination angles: (a) $\alpha = 30^\circ$ gas cloud; (b) $\alpha = 55^\circ$ gas cloud; (c) Change of cavitation volume with Angle

图 4. 不同直流道倾斜角度特斯拉阀的模拟结果: (a) $\alpha = 30^\circ$ 气相云图; (b) $\alpha = 55^\circ$ 气相云图; (c) 空化体积随角度的变化

由气相云图可知, 随着特斯拉阀直流道倾斜角度的增大, 空化区域即气液混合相逐渐增大, 空化效应增强。这是因为随着角度的增大, 由于惯性更多的流体通过直流道进入圆弧段, 并且入口段流体压强增大, 圆弧段和水平通道流体相互作用角增大, 导致交叉口处流体相互作用增强, 压降增大, 空化效应增强。此外, 低压区面积也随着角度的增大而增大, 有利于空化泡的长大, 增强空化效应。图 4 显示了不同角度的特斯拉阀空化体积。当角度小于 45° 时, 空化体积随角度的增加呈线性增大; 当角度大于 45° 时, 空化体积的增长率逐渐减小。所以在结构尺寸允许的情况下, 通过增大直流道倾斜角度, 可以达到强化空化效应的目的。

3.3. 直流道长度对空化效应的影响

采用圆弧半径为 16 mm、出入口长度均为 60 mm、倾斜角度为 45° 、不同直流道长度($20 \text{ mm} \leq L_2 \leq 45 \text{ mm}$)的特斯拉阀几何模型, 对特斯拉阀进行空化数值模拟, 得到气相云图、空化体积变化关系图。如图 5 所示; 并分析直流道长度对空化效应的影响。

由气含率云图分析可知, 随着直流道长度的增加, 空化区域先增大后减小, 与之对应的空化体积先升高后降低, 空化效应先增强后减弱。这是因为随着直流道长度的增加, 相互作用角增大且达到 45° 时不再发生变化。另一方面随着直流道长度的增加, 入口段压强先加大后减小。导致圆弧段和水平通道流体相互作用先增强后减弱。同时, 低压区也随着先降低后升高。综上所述, 随着直流道长度的增加, 空化效应先增强后减弱。这表明在空化过程中, 适当增大直流道长度可以增强空化效应, 过度增加反而会减弱空化效应, 且在空化过程中存在一个适宜的直流道长度。

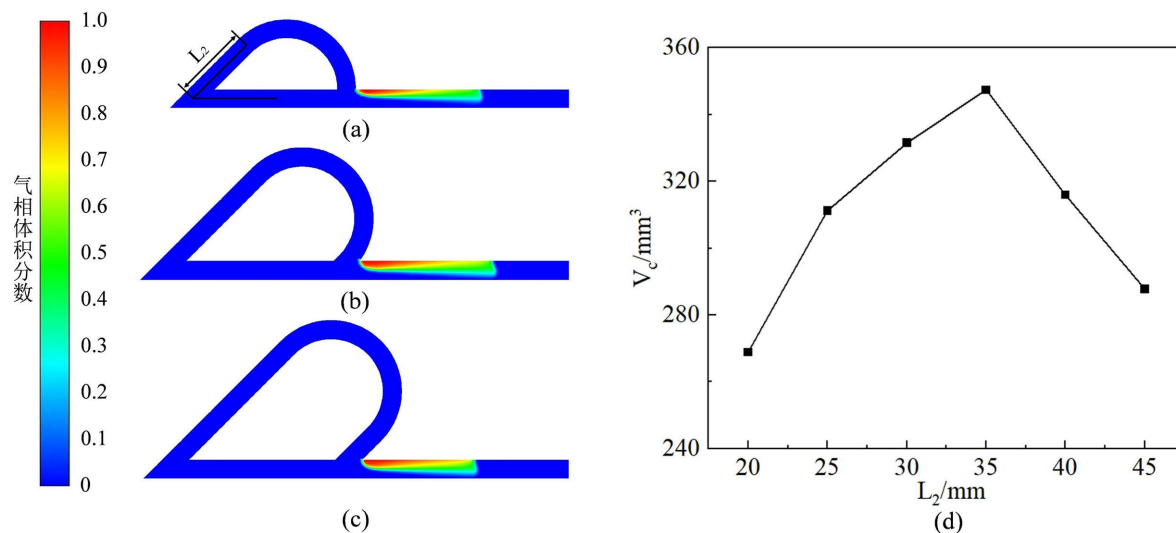


Figure 5. Simulation results of Tesla valves with different DC channel lengths: (a) $L_2 = 20$ mm gas cloud; (b) $L_2 = 35$ mm gas cloud; (c) $L_2 = 45$ mm gas cloud; (d) Change of cavitation volume with the length of DC channel

图 5. 不同直流道长度特斯拉阀的模拟结果: (a) $L_2 = 20$ mm 气相云图; (b) $L_2 = 35$ mm 气相云图; (c) $L_2 = 45$ mm 气相云图; (d) 空化体积随直流道长度的变化

3.4. 出口长度对空化效应的影响

采用圆弧半径为 16 mm、入口长度为 60 mm、直流道长度为 20 mm、倾斜角度 45° 、不同出口长度 ($20 \text{ mm} \leq L_3 \leq 120 \text{ mm}$) 的特斯拉阀几何模型, 对特斯拉阀进行空化数值模拟, 得到气相云图、空化体积变化关系图。如图 6 所示; 并分析出口长度对空化效应的影响。

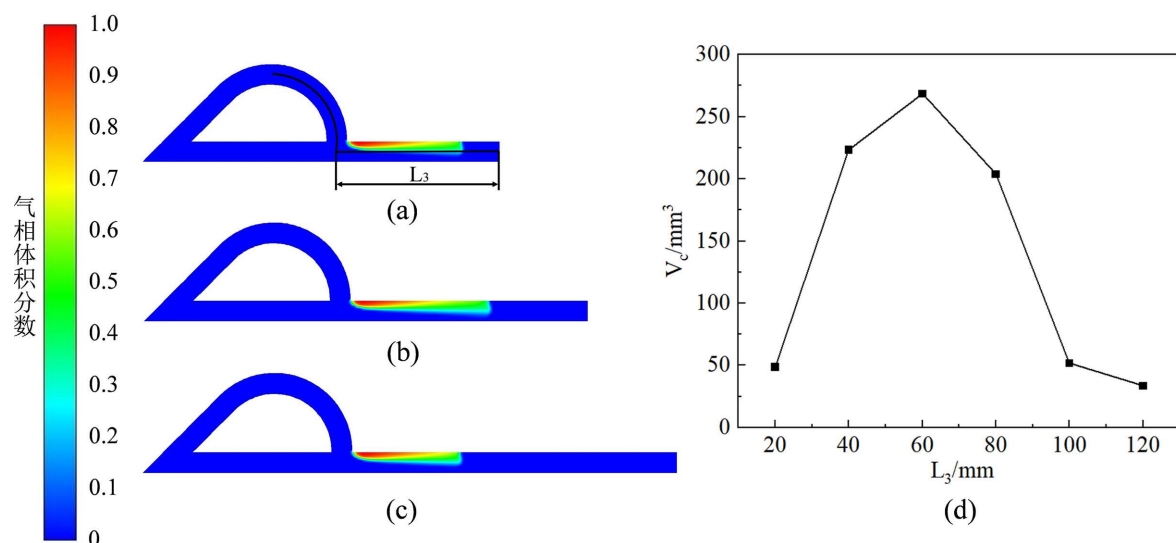


Figure 6. Simulation results of Tesla valves with different outlet lengths: (a) $L_3 = 40$ mm gas cloud image; (b) $L_3 = 60$ mm gas cloud image; (c) $L_3 = 80$ mm gas cloud image; (d) Variation of cavitation volume with outlet length

图 6. 不同出口长度特斯拉阀的模拟结果: (a) $L_3 = 40$ mm 气相云图; (b) $L_3 = 60$ mm 气相云图; (c) $L_3 = 80$ mm 气相云图; (d) 空化体积随出口长度的变化

由气相云图分析可知, 随着特斯拉阀出口长度的变大, 空化区域范围先增大后减小, 即空化程度先增强后减弱。随着出口长度的变化, 入口段压强基本不发生变化, 相互作用角也恒定, 表明出口长度并

不影响圆弧段和水平通道流体相互作用。但是随着出口段长度的增加, 压力恢复区即低压区逐渐增大然后减小, 说明出口长度影响的是压力恢复区, 压力恢复区增大有利于空化泡的长大; 反之会降低空化泡寿命, 使其提前发生溃灭导致空化效应减弱。从空化体积变化关系可以看出, 空化体积小于 60 mm 时, 和出口长度为正相关且变化率逐渐减小; 大于 60 mm 时, 空化体积与出口长度为负相关。综上所述, 随着特斯拉阀出口长度的增加, 空化效应先增强后减弱, 且出口长度对空化的影响存在一个最适值。

4. 结论

本文采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型对特斯拉阀空化器进行数值模拟, 主要考察了圆弧段半径、直流道倾斜角度、出口长度和直流道长度对特斯拉阀空化器空化效应的影响, 得到如下结论:

- 1) 特斯拉阀的空化现象主要发生出口段。
- 2) 随着特斯拉阀圆弧段半径的增加, 空化体积降低, 即空化效应减弱。
- 3) 其他结构参数不变, 特斯拉阀直流道倾斜角度越大, 空化体积越大, 空化效应就越强。
- 4) 随着特斯拉阀出口长度、直流道长度的增加, 空化体积先升高后降低, 即空化效应随之先增强后减弱。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 52076077); 中央高校基本科研业务费(2022JG001)。

参考文献

- [1] 赵辉. 基于不同结构的水力空化器空化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [2] Wang, B., Su, H. and Zhang, B. (2021) Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment—A Review. *Chemical Engineering Journal*, **412**, Article ID: 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>
- [3] 程效锐, 张舒研, 涂艺萱, 滕飞. 水力空化在水处理领域的应用研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 31-37. <https://doi.org/10.15890/j.cnki.jsjs.2019.01.006>
- [4] 洪锋, 袁喜, 刘书畅, 彭钦天, 施妍, 金蕾, 田海林, 叶立群, 贾金平, 应迪文, 黄应平. 水力空化技术在水处理领域的研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 1-15. <https://doi.org/10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2022.04.001>
- [5] Thompson, S.M., Paudel, B.J., Jamal, T., et al. (2014) Numerical Investigation of Multistaged Tesla Valves. *Journal of Fluids Engineering*, **136**, 081102-1-081102-9. <https://doi.org/10.1115/1.4026620>
- [6] De Vries, S.F., Florea, D., Homburg, F.G.A., et al. (2017) Design and Operation of a Tesla-Type Valve for Pulsating Heat Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **105**: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.062>
- [7] Jin, Z., Gao, Z., Chen, M., et al. (2018) Parametric Study on Tesla Valve with Reverse Flow for Hydrogen Decompression. *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**: 8888-8896. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.014>
- [8] 任璞, 龙威. 特斯拉阀流场特性及空化形成机理数值分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(8): 161-166.
- [9] 朱孟府, 曾艳, 邓橙, 宿红波, 游秀东, 陈平, 王建友. 水力空化在水处理中的应用与研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 445-449.