王槐国, 庞家维, 宋其晖,等. 强化文丘里管水力空化现象的数值模拟研究[J]. 智能计算机与应用,2026,16(6):136-141.
DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24092901

强化文丘里管水力空化现象的数值模拟研究

王槐国, 庞家维, 宋其晖, 李 环, 杨 旭, 邓天漂
(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘 要: 水力空化作为一种复杂的多相流动问题,该现象所产生的空化泡在其溃灭时蕴含的巨大的能量,使得水力空化技术在污水处理等领域具有很强的应用价值。本文基于 ANSYS Fluent 建立仿真模型,模拟在传统文丘里管喉部放置一个固定钝体,研究不同钝体结构对空化效果的影响。通过分析不同结构对文丘里管空化特性与空化效果的影响因素,确定了空化效果最好的空化器结构。结果表明,放置钝体后的空化器在一定程度上提升了传统文丘里型水力空化发生器的空化发生率,其中放置六边形钝体的文丘里管的气含率能够达到 0.585,空化效果最佳。此结构的水力空化发生器用于污水降解,将极大提升污水降解效率。

关键词: 水力空化; 文丘里管; 气含率; 数值模拟
中图分类号: X703 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)06-0136-06

Numerical simulation of enhanced Venturi hydrodynamic cavitation phenomenon

WANG Huaiguo, PANG Jiawei, SONG Qihui, LI Huan, YANG Xu, DENG Tianpiao
(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The phenomenon of hydrodynamic cavitation, as a complex multiphase flow problem, releases enormous energy during the collapse of cavitation bubbles, making cavitation technology highly valuable for applications like wastewater treatment. In this paper, a simulation model is established based on ANSYS Fluent to simulate the placement of a fixed bluff body in the throat of a traditional Venturi tube. The study investigates the impact of different bluff body structures on the cavitation effect. By analyzing the influencing factors of cavitation characteristics and effects under different structures, the optimal cavitator structure for enhancing cavitation is determined. The results show that placing a bluff body in the cavitator improves the cavitation occurrence rate of a traditional Venturi-type hydrodynamic cavitator to a certain extent. Among these, the Venturi tube with a hexagonal bluff body achieves a gas volume fraction of 0.585, exhibiting the best cavitation effect. Applying this cavitator structure to wastewater degradation will significantly enhance the efficiency of wastewater treatment.

Key words: hydrodynamic cavitation; Venturi; gas content; numerical simulation

0 引 言

空化是由于液体中的局部低压使液体汽化而引发的气泡初生、发展、膨胀、收缩直至溃灭的一系列现象[1]。空化的破坏性很强,其所造成的危害范围很广,小到一般水力机械,大到大型水力工程。随着科学技术的不断发展,人们也发现水力空化现象并不是完全是有害的,如果对水力空化的空化泡溃灭时产生的高湍流和高能量加以利用,对现行节能减排将具有重大意义。水力空化技术作为一种新颖的高级氧化处理手段,成功实现了对各类有机污染物的高效去除,其特点还包括无继发性污染及设备构造简明等优势[2],尤其在处置具生物毒害性及难降解特性的有机水体污染方面展现出独特且卓越的效能[3]。该技术在污水处理领域的融入,为应对水体污染问题开辟了一条创新路径与策略。

目前,关于文丘里管空化现象的数值模拟技术已趋于完善,可通过应用稳态 RANS 模型来精确计

基金项目: 贵州大学"SRT"计划项目([2023]089)。
作者简介: 王槐国(2002—),男,本科生。主要研究方向:能源与资源节约利用数值模拟技术。
通信作者: 李 环(1978—),女,硕士生导师。主要研究方向:多尺度数值模拟与仿真技术。Email:871308476@qq.com。
收稿日期: 2024-09-29

算空化流场，借此评估文丘里管内部空化区、压力分布与速度场等关键参数，为优化水力空化设备性能提供了强有力的分析和优化的方法[4]。在设备设计层面，文丘里管喉部周长与流通截面比值 α 是衡量剪切区域尺度的一个重要指标。马良等学者[5]通过改良喉部结构设计，运用大涡模拟技术进行数值研究，探讨了内置空腔结构对文丘里管内流体动力学特性的影响。张阳等学者[6]借助 FLUENT 软件，系统分析了不同工况下空化泡分布、压力场变化等空化特性规律，指出增加空化器喉部直径能有效减缓流体动荡强度及变率，进而减少空化气泡的数量。董波等学者[7]则详细探究了文丘里管结构参数，如喉径与管径比例、入口角、喉径与喉长比及出口角等对空化效果的作用规律。另一方面，宋永兴等学者[8]的研究表明，入口锥角与喉部直径的变化对文丘里管空化特性有着显著影响，其中前者主要影响初始空化发生的阈值，后者则对下游气含率有较大影响。海青等学者[4]基于稳态 RANS 框架，结合均匀多相流模型及 Schnerr-Sauer 空化模型，对文丘里管进行了细致的数值模拟实验，并在研究中设定喉部特征长度 L 与总喉道长度 L_{th} 的比例 γ 为关键变量，发现当空化数低于 0.45 时，γ 的调整对空化体积有明显效应，且空化程度随入口压力加大而增强，随着扩张角增大而减弱；实验条件设为入口压力 0.6 MPa（此时空化数 C_v 为 0.22）、扩张角 10°及 γ 值为 0.67 时，达到了最大的空化体积。

本研究提出一种创新设计的文丘里管，该管内嵌有特制的钝体结构。为了深入探索这一设计在空化流场中的特性表现，研究选取了多种不同的钝体构型，并利用 Fluent 软件进行了详尽的数值模拟与数据分析。

1　结构设计

文丘里管作为一种传统装置，其结构组成涉及收缩部、喉部及扩散部。关于收缩角度对空化现象的影响，研究指出变化范围在 22.6°至 90.0°内，对空化体积分数的变动影响有限，仅约 2%的变化幅度[8]。在此基础上，众多研究者倾向于将收缩部分的角度设定于 40°~50°区间内。另一方面，扩散角的大小直接关联到喉部下游的压力分布状态及空泡的发展进程，实验降解数据分析表明，最为理想的扩散角度范畴通常落在 10°~14°之间。此外，喉部的长径比例对空化演变过程有所作用，尽管从已有文献[9]的研究成果来看，这一参数对于文丘里型空化器效能的影响程度不如孔板型显著，但普遍认为最佳的长径比为 1∶1。

综上，本研究基于大量仿真发现文丘里管收缩段角度为 40°、扩张段角度为 20°，入口直径和出口直径均为 20 mm，喉道长及其直径分别为 5 mm 和 4 mm，主管道边长 55 mm 的文丘里管具有良好的空化效应。传统文丘里管结构如图 1 所示。基于此，在传统文丘里管喉部放置一个固定钝体，考察不同钝体结构对空化效果的影响，通过数值模拟对文丘里管空化特性与空化效果的影响因素进行研究，确定空化效果的最好的空化器。

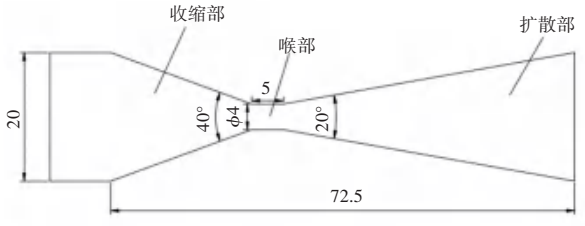


图 1　传统文丘里管结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of traditional Venturi tube

2　仿真模型建立

2.1　几何建模与网格划分

2.1.1　几何模型

本研究以传统文丘里管为基础，建立 2D 模型，在此基础上喉部放置不同结构的钝体，各钝体结构尺寸见表 1。

表 1　钝体结构尺寸

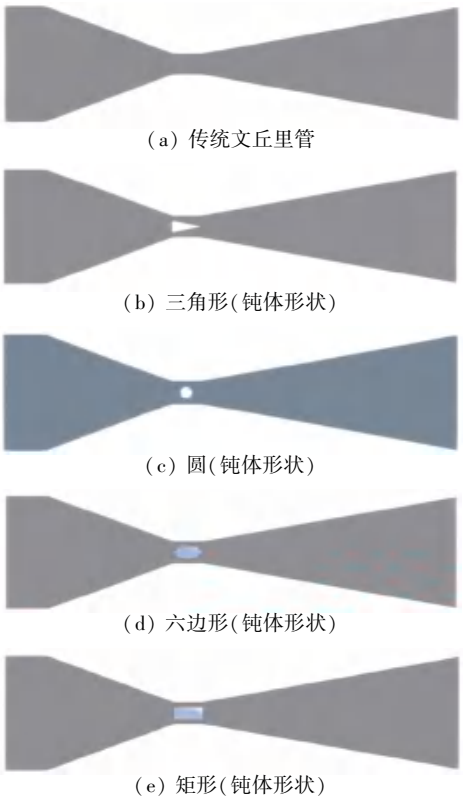
Table 1　Size of blunt body structure

钝体结构	结构尺寸
矩形/(mm×mm)	2×5
六边形	θ = 45 °, h = l_1 = 3 mm
圆/mm	R = 2
三角形/(mm×mm)	2×5

根据各文丘里管的结构参数，利用 SpaceClaim 对所涉及到的研究对象进行 2D 建模。网格划分时，需对网格进行无关性验证，建立的各研究对象模型如图 2 所示。

2.1.2　网格划分

网格是求解结果的重要步骤，而网格质量对计算准确度和计算收敛性是至关重要的。通过 Fluent Meshing 来划分网格，网格应该尽可能结构化，四边形网格适用于二维流动，六面体网格适用于三维流动，此次对网格划分使用了四面体网格，并对其喉部流道进行网格加密，具体如图 3 所示。



(a) 传统文丘里管

(b) 三角形(钝体形状)

(c) 圆(钝体形状)

(d) 六边形(钝体形状)

(e) 矩形(钝体形状)

图 2 不同钝体的文丘里管模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Venturi models with different blunt bodies



图 3 传统文丘里管网格划分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of traditional Venturi tube grid division

2.2 数学模型与求解条件设定

2.2.1 数学模型

针对湍流模型[10],本文选用 Realizable $k-\varepsilon$ Model。当空化稳流产生时,在近壁面空化处存在高速微射流与撞击流,2 种流动碰撞产生涡旋状态,从而产生涡旋流动。时变化率较大,在实践分析中,要防止因为时均应变率而产生负的正应力的现象、进而造成正应力施加数学限制[11],故对于管路湍流的模拟采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型(Realizable $k-\varepsilon$ 模型)。湍流动能与耗散率输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k\mu_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon\mu_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}+\rho C_1E\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{2}$$

其中,G_k 表示平均速度梯度产生的湍流动能;G_b 表示浮力产生的湍流动能;Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率影响;$C_{1\varepsilon}$,$C_{3\varepsilon}$,C_2 均为经验常数,在 Fluent 中,$C_{1\varepsilon}=1.44$,$C_{3\varepsilon}=0.09$,$C_2=1.90$;σ_k,σ_ε 分别表示湍流动能和湍流动能耗散率对应的普朗特数,默认值为 $\sigma_k=1.0$,$\sigma_\varepsilon=1.5$。

多相流的实验模型选用 Mixture Model,这是一种简化的两相流模型,使用单流体适用于模拟各相有不同速度的两(多)相流。混合模型可以求解混合相的连续性方程、混合的动量方程、第二相的体积分数方程和相对速度的代数方式[12]。在该模型中定义了平均速度 $\bar{\nu}_m$:

$$\bar{\nu}_m=\frac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\nu_k}{\rho_m} \tag{3}$$

其中,α_k 表示第 k 相的体积分数;ρ_m 表示混合密度;由此可以得出两相流的控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_m+\nabla\cdot(\rho_m\nu_m)=\dot{m} \tag{4}$$

其中,$\dot{m}$ 定义了空化产生的质量源项。

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\bar{\nu}_m)+\nabla\cdot(\rho_m\bar{\nu}_m\bar{\nu}_m)=-\nabla P+\nabla\cdot[\mu_m(\nabla\bar{\nu}_m+\nabla\bar{\nu}_m^{\mathrm{T}})]+\rho_m\bar{g}+\nabla(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\bar{\nu}_{\mathrm{dr},k}\bar{\nu}_{\mathrm{dr},k}) \tag{5}$$

其中,n 表示相数;μ_m 表示混合粘度,其公式为:

$$\mu_m=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\vec{\mu}_k \tag{6}$$

同时,研究中用到的 $\vec{\nu}_{d\tau}$ 表示第二相的漂移速度。推得的公式为:

$$\vec{\nu}_{\mathrm{dr},k}=\vec{\nu}_k-\vec{\nu}_m \tag{7}$$

在使用混合模型时加入空化模块,其空化模块为 Cavitation Model,空化临界压力设置为 3 540 Pa。

2.2.2 求解条件设定

文丘里管的入口和出口均设置为压力入口、出口。其中,入口压力为 0.5 MPa(表压),出口压力为 0.1 MPa(表压),出口和入口湍流强度[13]为 5%,水力直径设置为 20 mm。气相体积分数初始值为 0,近壁面计算采用标准壁面函数计算[14]。

在求解方法设置中,使用压力基求解器时,求解过程会涉及到算法的问题,这里的算法一般有以下 4 种:SIMPLE、SIMPLEC、PISO 和 Coupled,本文选用

PISO 求解算法、PISO 压力隐式算子分离法，在更大程度上提升了压力和速度之间的近似程度，通过引入 2 个校正指标：领域校正（Neighbor Correction）和偏度校正（Skewness Correction），在每个迭代步骤中，增加了动量修正和网格畸变修正。这也使得分离算法中，求解压力校正方程后，迭代步骤获得的压强场与动量方程存在较大偏差，导致速度和相关通量不满足动量平衡的问题得到了有效解决。尽管 PISO 算法的计算量相较于 SIMPLE 和 SIMPLEC 算法更大，然而其在每个迭代步骤中得到的压强场更为准确，也就是大幅减少了获得收敛解所需要的迭代步数[15]。压力差分格式设置为 PRESTO！格式，其它项采用 First order Upwind 格式，并且选用伪时间法计算。

3　数值模拟结果分析与讨论

本文首先对传统文丘里管（无钝体）进行数值模拟研究，然后再对含有不同钝体的文丘里管在同等条件进行数值模拟。并将模拟计算结果、即最大气含率、气含率、空化数进行比较，以此来评判水力空化现象的强弱。

3.1　最大气含率

最大气含率[16-18]代表流体域内部空化发生最剧烈处、气相所占气液混合相的体积比例，可作为该处空化发生剧烈程度的表征。最大气含率结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，传统文丘里管的最大气含率与有钝体的相比要稍低，有钝体的最大气含率可以达到 0.985 以上，由此表明加装了钝体后的文丘里管的空化发生剧烈程度要更高。

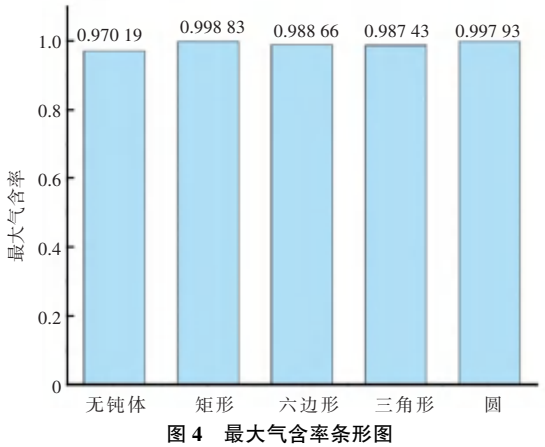


图 4　最大气含率条形图

Fig. 4　Bar chart of maximum atmospheric holdup

3.2　空化数

当空化数减小到一定值时，才会发生空化现象。相同的空化数值可以通过不同组合的压力和速度来实现，只要空化数相同，其对应的空化状态也会相同（不考虑尺度效应、粘性效应和空化介质等因素）。因此，空化数的引入为不同空化状态提供了一个定量的统一描述。空化数越小，表明空化程度越强（空化泡数量增加），但空化强度（如溃灭温度和溃灭压力）不一定随之提高。研究推得的公式为：

$$C_v = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \tag{8}$$

其中，P_∞ 表示截面压力；在计算中，V_∞ 表示喉部流速，取喉部截面的平均速度，本文设为 1 个标准大气压；P_v 表示液体饱和蒸汽压。

气含率与空化数所反应的空化效果有时并不一定一致[8]，空化数主要受流场内的流速和压强的影响而发生明显变化，而钝体对喉部流速和压强有着直接影响，因此，有无钝体对空化数大小有着决定性作用，各文丘里管下的空化数见表 2。由表 2 可知，无钝体的文丘里管的空化数较有钝体的文丘里管的较大，其中与矩形相比较，差距最大，所以，矩形钝体所能产生的空化泡数目较无钝体的要多。

表 2　各文丘里管下的空化数

Table 2　Cavitation numbers under each Venturi tube

结构	空化数
传统文丘里管	0.018 7
矩形（钝体结构）	0.002 8
六边形（钝体结构）	0.017 7
三角形（钝体结构）	0.003 7
圆（钝体结构）	0.134 5

3.3　气含率

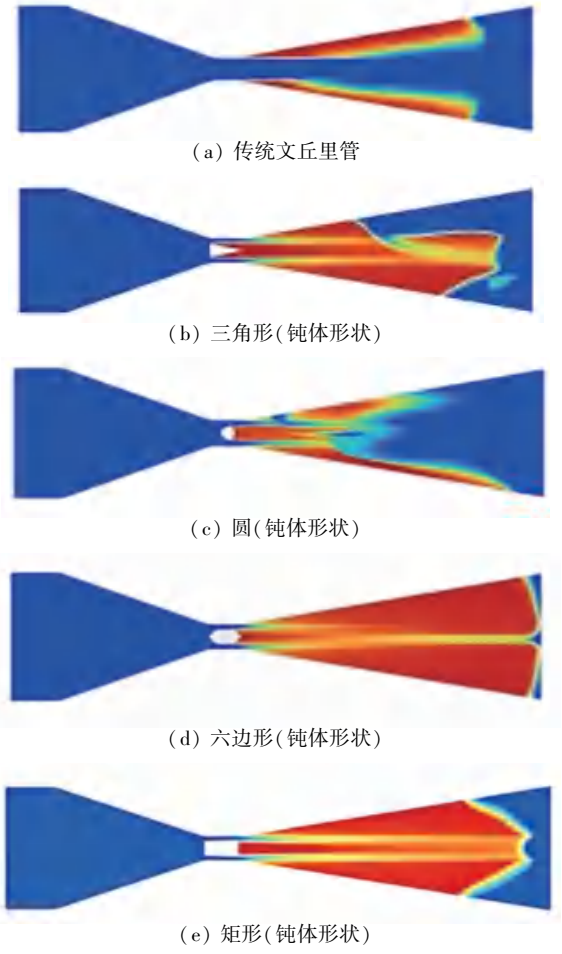
气含率一直是衡量空化效果好坏的一个标准[18]，通过空化流场的气含率 α_V 表征空化流场的强度。其公式为：

$$\alpha_V = \frac{V_V}{V_V + V_l} \times 100\% \tag{9}$$

其中，V_V、V_l 分别表示气体、液体的体积；α_V 表示液体中气体或蒸汽所占体积份额。由于空化主要是由低压区液体汽化引起，因此，气含率中只考虑了蒸汽泡所占比例，忽略液体中所含气体的影响。由式（9）可知，α_V 值越大表示液体中空化泡数目越多，空化发生的程度越剧烈。

为更直观地比较不同钝体对空化效果的影响，研究给出了各文丘里管气含率云图如图 5 所示，气含率条形图如图 6 所示。由图 5 和图 6 对比发现，无钝体的文丘里管的气含率明显比有钝体的文丘里

管要低,无钝体的空化泡呈树杈分布,中间部分空化泡明显稀少,这是由于当液体高速通过喉部后,即在相当高速度的情况下,气泡本身要从水中发展,由于喉部射出水流的作用,把气泡冲散到了文丘里管扩散端的两端,最后到扩散段的中末端溃灭。



(a) 传统文丘里管

(b) 三角形(钝体形状)

(c) 圆(钝体形状)

(d) 六边形(钝体形状)

(e) 矩形(钝体形状)

图 5 各文丘里管气含率云图

Fig. 5 Cloud image of gas holdup of each Venturi tube

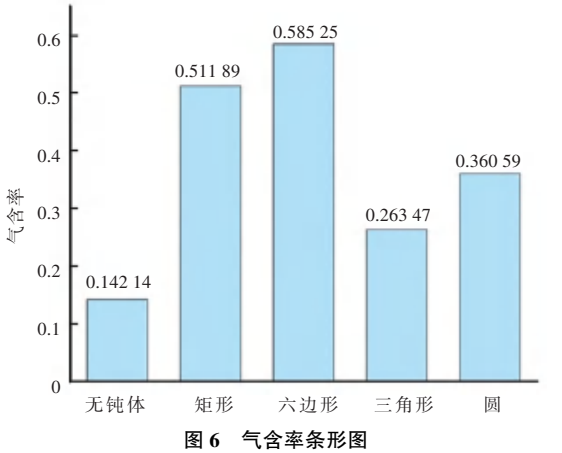


图 6 气含率条形图

Fig. 6 Gas holdup bar chart

加装了钝体的文丘里管的气含率最大能够达到 0.585,并且其空化泡不会呈现树杈分布,这是因为喉部放置的钝体阻碍住了喉部射出的水流,不能把气泡冲出扩散部两端[19]。钝体将喉部分隔为上下两个通道,上下两个通道产生的空化泡同样朝扩散段两端散去,因此,扩散部中间部分的空化泡较多。喉部加装的钝体一方面具有强化剪切周长的作用,可以增强发生空化现象,增加空化汽泡数进而增大 · OH 产量;另一方面,通过增加处理溶液在单位时间内通过空化发生器的次数,产生了二次空化,从而显著增强了空化现象。

在加装了钝体的文丘里管中,其中钝体结构为六边形的文丘里管气含率最大,能达到 0.585。通过对比不同云图可以发现,气含率与钝体迎水面坡角有关。随着迎水面坡角增大,收缩部的压力梯度和速度梯度愈发集中,更易形成低压区域[20],在钝体两端形成的空化泡越多,由此形成的空化区域越大。此外,六边形与矩形钝体结构相比可知,由于矩形后缘存在近似直角的突变,虽然这种结构可以形成更强的压力突变,但扩散段的压力恢复速率较快,不利于空化泡的发展。综上,添加了六边形钝体结构的文丘里管的气含率最大,空化效果最好。

4 结束语

通过对比有无钝体的不同文丘里管表征量可以得出以下结论:

(1)有钝体的和无钝体的文丘里管相比可得,有钝体的气含率更大,空化效果更好。

(2)不同钝体的迎水面坡角不同,坡角越大的,则能够在钝体两端形成更多的空化区域。因此,六边形钝体的气含率最大,空化强度最好。

参考文献

[1] 刘亚楠. 文丘里管内空化演变过程及其影响因素研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2019.

[2] 赵辉. 基于不同结构的水力空化器空化特性研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.

[3] 陶跃群. 水力空化降解废水中有机污染物的理论与实验研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2018.

[4] 海青,陈伟政,颜开. 新型文丘里空化器及其空化特性的数值模拟[J]. 船舶力学,2023,27(10):1464-1474.

[5] 马良,李鹏,任万龙,等. 空腔结构对文丘里管的流场特性影响[J]. 工程与试验,2023,63(2):27-29.

[6] 张阳,李杰. 可调文丘里管水力空化发生特性研究[J]. 流体机械,2022,50(4):85-91.

[7] 董波,罗景泉,张家辉,等. 结构参数对文丘里管空化性能影响的数值模拟研究[J]. 轻工机械,2021,39(5):37-42.

[8] 宋永兴,柴怡,王嘉麒,等. 文丘里管空化反应器的空化特性研究[J]. 山东建筑大学学报,2022,37(1):56-61.

[9] WANG Baowei, SU Huijuan, ZHANG Bo. Hydrodynamie cavitation as a promising route for wastewater treatment-A review [J]. Chemical Engineering Joumal, 2021,412: 28685.
[10]刘馥瑜,胡效东,梁之西,等. 基于 FLUENT 的文丘里管稳流性能数值模拟[J]. 系统仿真学报,2019,31(7):1460-1468.
[11]米博,党建涛. 文丘里疏水阀流场的有限元分析[J]. 机械研究与应用, 2021,34(3):59-62.
[12]杨会中. 水力空化强化效应实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
[13]王杰. 基于 Fluent 的波纹状弯曲排水管的流动特征研究[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(5):168-172.
[14]王海琛. 基于计算流体动力学的无回流可调布浆器的研究[D]. 西安:陕西科技大学,2016.
[15]杨利. 溢洪道挑流消能段水气两相流数值模拟研究[D]. 济南:山东大学,2011.
[16]杨旭东. 文丘里管型孔板空化特性及影响因素研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2023.
[17]张丽丽. 液体介质物性参数对水力空化的影响研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
[18]章昱. 水力空化及 CFD 数值模拟[D]. 杭州:浙江工业大学,2011.
[19]石宇. 文丘里管水力空化器的数值模拟[D]. 天津:天津科技大学,2018.
[20]蔡宗航. 文丘里管型水力空化装置的流场仿真与实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.