

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.05.007

结构参数对文丘里管空化性能影响的数值模拟研究

董波¹, 罗景泉¹, 张家辉¹, 徐振¹, 刘爱贤², 孙强¹, 王逸伟², 郭绪强^{2*}

(1. 中国石油大学(北京) 化学工程与环境学院, 北京 102249;
2. 中国石油大学克拉玛依校区 工学院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:为了达到更好的空化效果,课题组基于FLUENT软件,采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型和Schnerr-Sauer空化模型对文丘里管的空化流场进行数值模拟研究。通过对模拟所得的空化云图、蒸气体积分数及空化数进行对比分析,探究了文丘里管的喉径与管径比、入口角度、喉径与喉长比以及出口角度等结构参数对空化效果的影响规律。结果表明:空化效果随着喉径与管径比的增大先增强后减弱,且存在一个最适值;随着入口角度的增大,空化效果减弱;随着喉径与喉长比的增大,空化效应增强;随着出口角度的增大,空化效应减弱。研究结果可应用于文丘里管空化器的优化设计。

关键词:文丘里管;水力空化;标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型;Schnerr-Sauer空化模型

中图分类号:TQ051.1;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)05-0037-06

Numerical Simulation of Effect of Structural Parameters on Cavitation Performance of Venturi Tube

DONG Bo¹, LUO Jingquan¹, ZHANG Jiahui¹, XU Zhen¹,
LIU Aixian², SUN Qiang¹, WANG Yiwei¹, GUO Xuqiang^{2*}

(1. College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: In order to achieve a better cavitation effect, the standard $\kappa-\varepsilon$ turbulence model and the Schnerr-Sauer cavitation model were used to numerically simulate the cavitation flow fields of Venturi tubes based on FLUENT software. By comparing and analyzing the cavitation contours, vapor volume fraction and cavitation number obtained by simulation, the effects of structural parameters such as throat diameter to pipe diameter ratio, inlet angle, throat diameter to length ratio and outlet angle of Venturi tubes on cavitation were investigated. The results show that the cavitation effect firstly increases and then decreases along with the increase of throat diameter to pipe diameter ratio, and there is an optimum value. With the increase of inlet angle, the cavitation effect is weakened. With the increase of throat diameter to length ratio, the cavitation effect is enhanced. With the increase of outlet angle, the cavitation effect is weakened. The study results provide several references for the optimum design of Venturi tube cavitators.

Keywords: Venturi tube; hydrodynamic cavitation; standard $\kappa-\varepsilon$ turbulence model; Schnerr-Sauer cavitation model

水力空化现象是当流体流经一定的限流区域时,流速上升而压力下降,当压力降低到流体温度对应的饱和蒸气压时,溶解在流体中的气体会逸出,同时流体

发生汽化,从而形成许多由气体和蒸气组成的空化泡,当流体挟带着空泡流经下游压力较高的区域时,空化泡急剧塌缩、溃灭的过程^[1]。当空泡发生溃灭时,会

收稿日期:2021-03-19;修回日期:2021-07-13

基金项目:克拉玛依市技术创新引导计划(成果转化)项目(2020CGZH0001)。

第一作者简介:董波(1995),男,山东诸城人,博士研究生,主要从事水力空化技术应用的研究。通信作者:郭绪强(1963),男,山东定陶人,博士,教授,博士生导师,主要从事水合物分离技术开发、高压流体相平衡等方面的研究。E-mail:guoxq@cup.edu.cn

在其周围极小的空间内形成局部的高温 ($10^3 \sim 10^4$ K 量级) 和高压 ($10^2 \sim 10^4$ MPa 量级) 环境, 同时还伴有强烈的冲击波、高速的微射流以及自由基的产生, 从而引发各种空化效应, 如机械效应、热效应、化学效应和界面效应等^[2]。这些空化效应可以强化各种物理、化学过程, 在水处理、生化工程、石油化工、食品处理、均质混合与破乳等领域有广阔的应用前景^[3]。

水力空化技术的空化效果与空化器结构紧密相关, 探究最优的空化器结构参数, 强化空化效果, 设计出高效率的空化器装置是水力空化技术研究的一项重要内容。孔板和文丘里管是常用的水力空化反应器装置。与孔板相比, 文丘里管的流通截面积变化较为缓慢, 空化强度相对温和, 其压力损失也相对较小, 本研究采用文丘里管空化反应器。

随着计算流体力学 (CFD) 的快速发展, 模拟空化流场的数值仿真技术已经成为研究水力空化的一种重要方法。目前, 国内外许多学者利用数值模拟技术对文丘里管的结构及其空化现象进行了研究分析。Bashir 等^[4]对圆型、狭缝型及椭圆型等多种文丘里空化器的重要结构参数进行 CFD 模拟优化。结果表明: 喉部周长与面积比值较大时可产生更高的蒸气体积分数。狭缝型文丘里管的喉部长度与高度比为 1:1, 扩散角度为 5.5° 时, 空化效果达到最佳。Kuldeep 等^[5]也进行了类似的研究工作, 当文丘里型空化器喉部高度/直径与长度比为 1:1, 扩散角度为 6.5° 时, 获得最佳空化效果。黄群等^[6]对文丘里管的空化流场进行数值模拟, 结果表明: 空化效果的强度随着入口锥角的增大、喉部长度的减小而增大; 喉部直径和出口锥角对空化效果的影响存在最适值, 分别为 5 mm 和 30° 。Li 等^[7]对文丘里管进行了 CFD 单相数值模拟, 发现入口角度和喉部长度对空化流场的影响有限, 出口角度和直径比分别是控制喉部压力和功率消耗的关键参数。Shi 等^[8]利用 CFD 数值模拟研究了文丘里管的收缩角度以及比尺效应对空化效果的影响。结果表明: 较大的收缩角度对应着较高的空化率, 但是能耗更高; 同时, 规模比放大的文丘里管也会产生更高的汽化率。Abbas-Shiroodi 等^[9]采用响应面法 (RSM) 对文丘里管进行 CFD 模拟优化, 在入口角度为 22.7° , 喉部长度为 4 mm, 出口角度为 6.5° 时, 文丘里管中空化区域最大。而且这 3 个结构参数之间具有相互关联性, 出口角度是影响空化区域的最显著参数。Abbasi 等^[10]结合响应面法 (RSM) 和 CFD 模拟对狭缝文丘里管进行结构优化, 确定了空化数为 0.2 时最优的结构参数。当文

丘里管的喉部面积为 56.39 mm^2 , 扩散角度为 4° , 喉部长度、宽度和高度分别为 4.5, 18.0 和 3.0 mm 时, 空化区域长度和空化体积达到最大。

综上所述, 大部分学者主要探究了文丘里管的部分结构参数对于空化效果的影响, 针对文丘里管结构参数的全面研究总结相对较少。课题组采用计算流体力学软件 ANSYS FLUENT 19.0 对文丘里管的空化流场进行数值模拟, 研究分析了文丘里管的喉径与管径比、入口角度、喉径与喉长比以及出口角度等结构参数对空化效果的影响。研究结果对文丘里管的优化设计与使用提供一些参考。

1 计算方法

1.1 几何建模及网格划分

文丘里管主要由收缩段、喉部和扩散段 3 部分组成。本研究模拟的文丘里管固定入口和出口直径 $D = 20 \text{ mm}$, 喉径与管径比 d/D 、收缩角度或入口角度 α 、喉径与喉长比 d/L 、扩散角度或出口角度 β , 如图 1 所示。由于文丘里管为回转对称结构, 故只需选取文丘里管轴截面的一半作为计算模型。

课题组采用前处理软件 ICEM 对二维模型进行网格划分, 如图 2 所示。

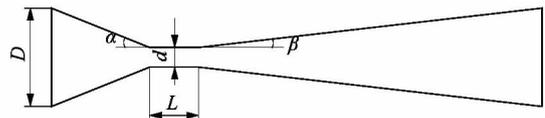


图 1 文丘里管及其结构参数符号示意图
Figure 1 Schematic diagram of Venturi tube and its structural parameter symbols

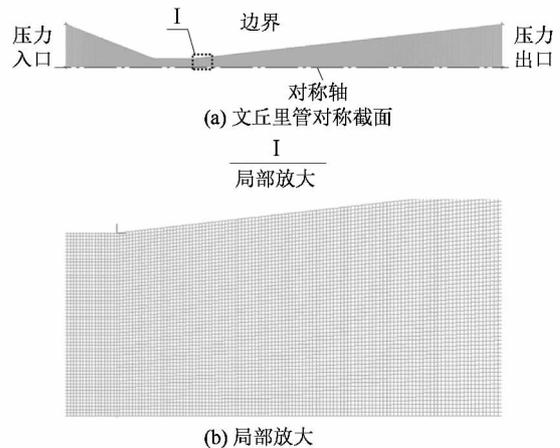


图 2 网格划分

Figure 2 Gridding of venturi tube

整个流场采用结构化网格进行划分, 可以节省计算成本, 计算结果的准确性和收敛性好。网格划分时,

需要对网格数量进行无关性验证,如图3所示。从图中可以看出,随着网格数量的增加,最大蒸气体积分数先增加后趋于平稳,综合考虑计算结果及效率,确定本文计算所用网格数量在80 000以上较为合适。

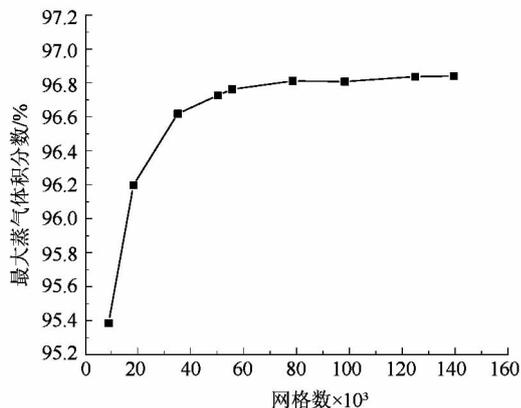


图3 网格无关性验证

Figure 3 Grid independence verification

1.2 计算策略及步骤

在 FLUENT 模拟过程中,湍流模型选择标准 $\kappa-\epsilon$ 模型和标准壁面函数法,多相流模型选择 Mixture 模型耦合 FLUENT 自带的 Schnerr-Sauer 空化模型。选取 27 °C 水和水蒸气作为流动介质,饱和蒸气压为 3 540 Pa,选用压力入口、压力出口以及无滑移标准壁面函数边界条件,入口压力设定为 0.5 MPa,出口压力设定为 0.1 MPa,环境操作压力设定为 0 Pa。压力速度耦合方式选用 SIMPLE 算法,计算中使用欠松弛因子的方法,动量松弛因子设定为 0.4,残差的迭代收敛精度设置为 10^{-8} 。其它相关参数的设置保持 FLUENT 默认值。

1.3 表征参数

针对不同结构参数的文丘里管进行模拟计算,通过蒸气体积分数和空化数来表征文丘里管的空化效果。液体的蒸气体积分数是研究空化程度的一个重要参数,蒸气体积分数越大,表明液体中空化泡数量越多,空化发生的程度越剧烈^[11]。其表达式为:

$$\alpha_v = \frac{V_v}{V_v + V_l} \quad (1)$$

式中: α_v 表示蒸气体积分数, V_v 和 V_l 分别为蒸气和液体的体积。

空化数是描述空化初生和空化状态的量纲一的数,表征了流场中是否出现空化及空化发生程度。空化数越小,空化程度越剧烈。其表达式为:

$$C_v = \frac{p_2 - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2} \quad (2)$$

式中: C_v 表示空化数; p_2 为下游恢复压力,选取模拟时文丘里管的出口压力; p_v 为模拟温度下水的饱和蒸气压; ρ 为水的密度; v_0 为喉部中轴平均速度值,由 FLUENT 模拟计算得到。

2 结果与分析

2.1 喉径与管径比对空化效果的影响

课题组对喉径与管径比分别为 0.1,0.2,0.3,0.4 和 0.5,入口角度为 21.8°,喉径与喉长为 1:2.5,出口角度为 6.5°的文丘里管的空化流场进行 FLUENT 模拟,所得到的蒸气体积分数云图以及最大蒸气体积分数、空化数关系图分别如图 4~5 所示;并由图中数据分析文丘里管喉径与管径比对空化效果的影响。

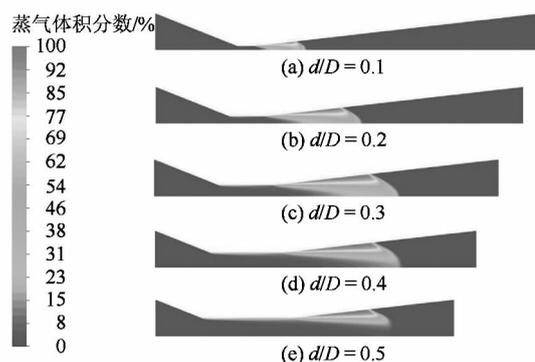


图4 不同喉径与管径比的蒸气体积分数云图

Figure 4 Contours of vapor volume fraction at different throat diameter to pipe diameter ratios

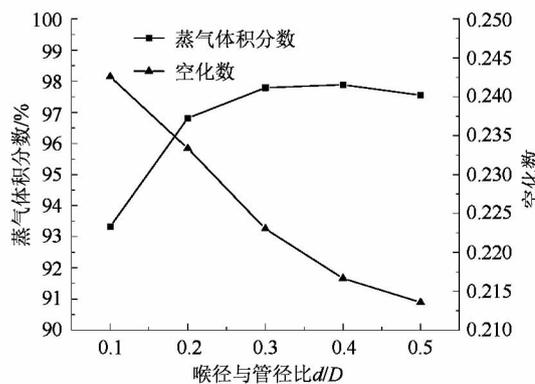


图5 喉径与管径比与蒸气体积分数和空化数的关系

Figure 5 Relationship between throat diameter to pipe diameter ratio and vapor volume fraction & cavitation number

从图4中可以看出,随着喉径与管径比的增大,空化区域先增大后减小。当喉径与管径比为0.3时,空化区域最大,空化程度越剧烈。从图5中可以看出,随着喉径与管径比的增大,最大蒸气体积分数先增大后

减小,而且在 0.3 ~ 0.5 范围内变化较小;空化数逐渐减小,但相差均较小。所以综合考虑,当喉径与管径比为 0.3 时,文丘里管的空化效果达到最好。因为喉径与管径比值过小会使得下游压力恢复速度加快,空泡受到的破坏强度增加,导致空泡寿命减小,空化现象受到抑制^[12]。但是比值过大则会使压力梯度变化不明显,不易形成负压区,使液体不容易汽化,空化强度也会降低^[13]。所以,在满足空化发生的条件下,适当增大喉径与管径比可以强化空化现象,但是不宜过大。

2.2 入口角度对空化效果的影响

课题组对喉径与管径比为 0.2,入口角度分别为 11.3°,15.0°,21.8°,38.7°和 45.0°,喉径与喉长比为 1:2.5,出口角度为 6.5°的文丘里管的空化流场进行 FLUENT 模拟,所得到的蒸气体积分数云图以及最大蒸气体积分数、空化数的关系图分别如图 6~7 所示;并由此分析文丘里管入口角度对空化效果的影响。

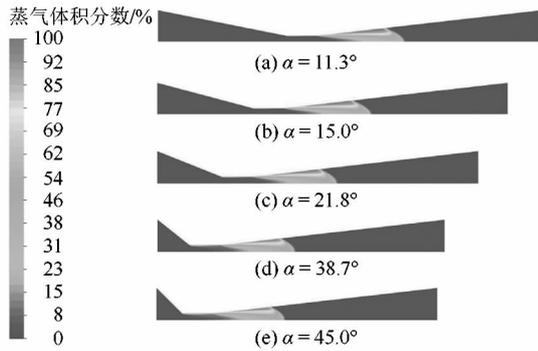


图 6 不同入口角度的蒸气体积分数云图
Figure 6 Contours of vapor volume fraction at different inlet angles

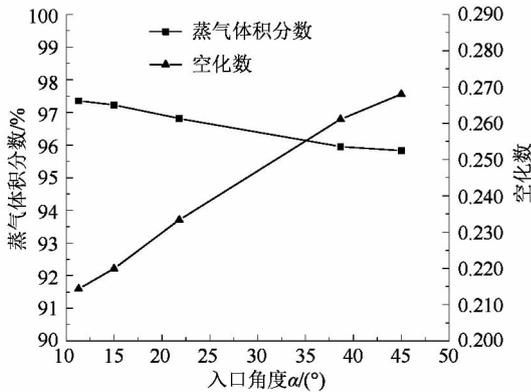


图 7 入口角度与蒸气体积分数和空化数的关系
Figure 7 Relationship between inlet angle and vapor volume fraction & cavitation number

从图 6 中可以看出,随着入口角度的增大,空化区域逐渐变小。当入口角度约为 11.3°时,空化区域相对较大,空化程度较为剧烈。从图 7 可知,随着入口角度的增大,最大蒸气体积分数逐渐减小,空化数逐渐增大,说明空化强度是逐渐减弱的。所以综合考虑,当入口角度约为 11.3°时,文丘里管的空化效果相对较好。因为当入口角度较大时,流体流经文丘里管收缩段时,流动阻力也随着增大,从而导致流体的流速降低,空化数增加,故空化效果减弱^[14]。所以,在满足空化发生的条件下,适当减小入口角度可以强化空化现象。

2.3 喉径与喉长比对空化效果的影响

课题组对喉径与喉长比分别为 1:0.5、1:1.0、1:2.0、1:2.5 和 1:5.0,入口角度为 21.8°,喉径与管径比为 0.2,出口角度为 6.5°的文丘里管的空化流场进行 FLUENT 模拟,得到的蒸气体积分数云图以及最大蒸气体积分数、空化数的关系图分别如图 8~9 所示;由此分析不同喉径与喉长比对空化效果的影响。

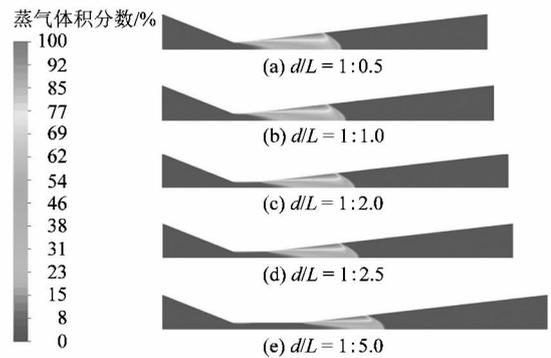


图 8 不同喉径与喉长比的蒸气体积分数云图
Figure 8 Contours of vapor volume fraction at different throat diameter to length ratios

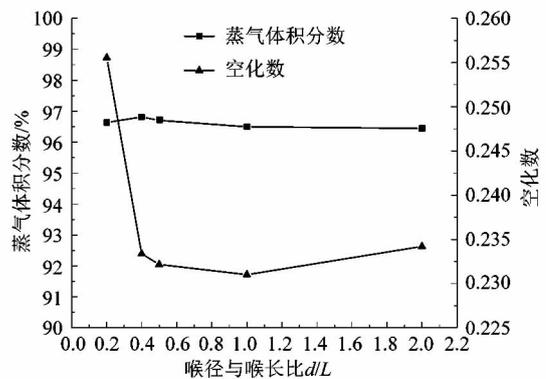


图 9 喉径与喉长比与蒸气体积分数和空化数的关系
Figure 9 Relationship between throat diameter to length ratio and vapor volume fraction & cavitation number

从图 8 中可以看出,随着喉径与喉长比的增大,空化区域也逐渐增大。当喉径与喉长比为 1:0.5 时,空化区域最大,空化程度较为剧烈。从图 9 中可以看出,随着喉径与喉长比的增大,最大蒸气体积分数基本没有发生变化;空化数则先减小后增加,但是变化都较小。所以综合考虑,当喉径与喉长比为 1:0.5 时,文丘里管的空化效果相对较好。因为在管径、喉径一定时,较长的喉部长度可能会导致持续性压降,空泡不能在扩散段的情况下经历周围压力场的振荡行为,这些空泡无法成为活跃的空泡,而是溶解在周围的液体介质中,从而使空化区域减小^{[5]302}。若喉部长度较短,喉部的收缩-扩张会更显著,压力变化急剧,从而使空化效果更明显。所以,在满足空化发生的情况下,适当增大喉径与喉长比可以强化空化现象。

2.4 出口角度对空化效果的影响

课题组对喉径与管径比为 0.2, 入口角度为 21.8°, 喉径与喉长比为 1:2.5, 出口角度分别为 5.1°, 5.7°, 6.5°, 7.6° 和 9.1° 的文丘里管的空化流场进行 FLUENT 模拟, 所得到的蒸气体积分数云图以及最大蒸气体积分数、空化数的关系图分别如图 10~11 所示; 由此分析文丘里管出口角度对空化效果的影响。

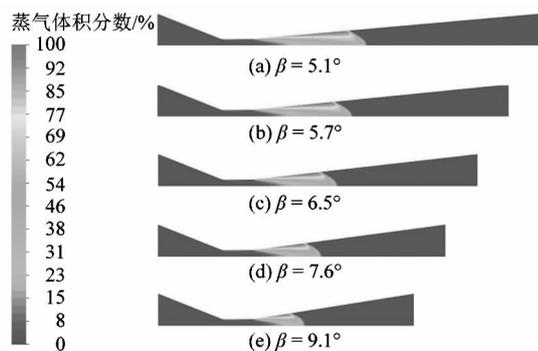


图 10 不同出口角度的蒸气体积分数云图

Figure 10 Contours of vapor volume fraction at different outlet angles

从图 10 中可以看出,随着出口角度的增加,空化区域逐渐减小。当出口角度为 5.1° 时,空化区域最大,空化程度比较剧烈。从图 11 中可以看出,随着出口角度的增加,最大蒸气体积分数和空化数基本都没有变化。所以综合考虑,当出口角度为 5.1° 时,文丘里管的空化效果相对较好。因为出口角度较小时,低压区域范围较大,压力恢复相对缓慢,空泡受压的破坏程度减小,使空泡得以生长,空泡寿命相对较长,空化区域相对较大^[15]。所以,在满足空化发生的情况下,适当减小出口角度可以强化空化现象。

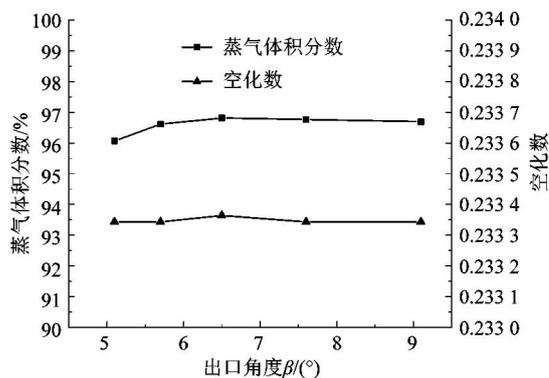


图 11 出口角度和蒸气体积分数、空化数的关系

Figure 11 Relationship between outlet angle and vapor volume fraction & cavitation number

3 结论

课题组采用 ANSYS FLUENT 软件对文丘里管的喉径与管径比、入口角度、喉径与喉长比以及出口角度等结构参数进行了单因素的数值模拟,采用控制变量法比较不同结构参数对文丘里管空化效果的影响,得出以下结论:

1) 喉径与管径比对空化效果的影响存在一个最适宜值。

2) 空化效果的强度随着入口角度的增大而减小,随着喉径与喉长比的增大而增大,随着出口角度的增大而减小。

3) 在本研究对文丘里管结构参数的模拟范围内,当管径为 20 mm 时,文丘里管的喉径与管径比、入口角度、喉径与喉长比、出口角度等最适宜的参数分别为 0.3, 11.3°, 1:0.5 和 5.1°。

尽管文丘里管空化流动的 CFD 模拟研究已经取得了较大的发展,但是还需要从以下方面进一步探索研究:

1) 当前的研究对于文丘里管结构参数的模拟量不足,模拟的数据点较少,因此需要对各个结构参数进行大范围、大数据量的模拟计算,进而总结经验规律和数学模型。

2) 对于文丘里管结构参数大部分是进行单因素的数值模拟,今后需要采用合理的方法设计模拟实验,从而确定各个结构参数之间的交互影响以及对空化效果的综合影响。

3) FLUENT 中的空化模型采用的 R-P 方程是一个截断方程,省略了 R-P 方程的加速度项(半径随时间的二阶导数),而加速度项与空泡内的溃灭压力和温度相关,因此需要结合模拟数据求解出溃灭压力和温度,

合理预测文丘里管在化学工程应用中的空化强度。

参考文献:

[1] 王永广,赵连玉,邓橙,等. 基于孔板和文丘里管复合结构空化器的空化效果数值模拟[J]. 环境工程,2012,30(增刊2):458.

[2] 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,2018:10-11.

[3] CARPENTER J, BADVE M, RAJORIYA S, et al. Hydrodynamic cavitation; an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry[J]. Reviews in Chemical Engineering,2017,33(5):11-31.

[4] BASHIR T A, SONI A G, MAHULKAR A, et al. The CFD driven optimisation of a modified Venturi for cavitation activity[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011, 89(6):1366-1375.

[5] KULDEEP V K S. Computational study of different Venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices [J]. Journal of Hydrodynamics:Series B,2016,28(2):293-305.

[6] 黄群,刘昭明,程谦伟,等. 文丘里管在棉籽油预处理中的结构设计与应用[J]. 粮油食品科技,2016,24(4):42-46.

[7] LI M D, BUSSONNIERE A, BRONSON M, et al. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles[J]. Minerals Engineering, 2019, 132:268-274.

[8] SHI H B, LI M D, NIKRITYUK P, et al. Experimental and numerical study of cavitation flows in Venturi tubes; from CFD to an empirical model[J]. Chemical Engineering Science,2019,207:672-687.

[9] ABBAS-SHIROODI Z, SADEGHI M T, BARADARAN S. Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization; experimental investigation and CFD simulation [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2021,71:105386.

[10] ABBASI E, SAADAT S, JASHNI A K, et al. A novel method for optimization of slit Venturi dimensions through CFD simulation and RSM design[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2020,67:105088.

[11] 刘文明,孙浩然,刘雪东. 操作参数对拉瓦尔喷管空化强度的影响[J]. 常州大学学报(自然科学版),2016,28(5):61.

[12] 张宁宁. 水力空化规律研究及其在油田污水处理上的应用[D]. 北京:中国石油大学,2007:44.

[13] 庄水田. 文丘里管的模拟优化及其实验研究[D]. 西安:陕西师范大学,2009:22.

[14] 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,2019:36.

[15] 王常斌,王敏,于远洋,等. 文丘里管水力空化现象的 CFD 模拟[J]. 管道技术与设备,2013(1):12.

QC检测仪器网(www.QCtester.com)

为您量身打造仪器采购方案, 提供先进仪器产品咨询;

专业的仪器使用技巧, 品种繁多的仪器种类;

立志打造更专业、更有效、更合理的仪器咨询平台!

期待您的加入!

