

收缩扩张形喷嘴内外流场的数值模拟

吴林峰, 宋璐颐, 苏来华, 高丹

华北水利水电大学, 河南 郑州
Email: 327644048@qq.com, 781493933@qq.com

收稿日期: 2021年7月2日; 录用日期: 2021年7月28日; 发布日期: 2021年8月12日

摘要

为了探究不同工况下的收缩扩张形喷嘴对空化射流的影响, 利用ICEM网格划分软件、FLUENT流体仿真软件, 采用多相流模型、空化模型、可实现的湍流模型对喷嘴内外流场进行数值模拟, 得出了流场中空化的分布区域, 验证了空化产生的原因是由于液体中形成了局部低压, 并以气泡体积分数的大小作为判断空化强弱标准, 分析入口压力、喉部直径、水深等参数对水利空化的影响, 结果表明: 入口压力、喉部直径、水深都对空化形成有较大影响, 其中入口压力和喉部直径与空化强度呈正相关, 水深与空化强度呈负相关。此次淹没环境下的空化数值模拟结果能够为其它空化喷嘴的设计提供一定的理论支持。

关键词

空化喷嘴, 淹没环境, 流场分析

Numerical Simulation of Internal and External Flow Field of Contraction and Expansion Nozzle

Linfeng Wu, Junyi Song, Laihua Su, Dan Gao

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan
Email: 327644048@qq.com, 781493933@qq.com

Received: Jul. 2nd, 2021; accepted: Jul. 28th, 2021; published: Aug. 12th, 2021

Abstract

In order to explore the influence of contraction and expansion nozzle on cavitation jet under different working conditions, ICEM mesh generation software and FLUENT fluid simulation software

were used to simulate the flow field inside and outside the nozzle by using multiphase flow model, cavitation model and realizable turbulence model, and the distribution area of cavitation in the flow field was obtained. It was verified that the cavitation was caused by the formation of local low pressure in the liquid, and the bubble volume fraction was used as the criterion to judge the cavitation strength. The effects of inlet pressure, throat diameter and water depth on cavitation are analyzed. The results show that inlet pressure, throat diameter and water depth all have great influence on cavitation formation, in which inlet pressure and throat diameter are positively correlated with cavitation intensity, while water depth is negatively correlated with cavitation intensity. The numerical simulation results of cavitation in submerged environment can provide theoretical support for the design of other cavitation nozzles.

Keywords

Cavitation Nozzle, Submerged Environment, Flow Field Analysis

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

19 世纪末,人们在检查船舶航速突然下跌的问题时发现螺旋桨桨叶被不知名物体击穿了,这是空化第一次出现在人们的视野中,此后人们致力于探索此类水动力学现象的内在机理及其在工程上的应用。对于空化机理的研究,Thomas 提出了一个无量纲数 σ (空化数)用于描述空化现象,并设定临界空化数用于判断空化是否发生,但是由于空化及液体的复杂性,空化数存在诸多缺陷[1]; Rayleigh 提出了单个空泡在无边液体中的溃灭方程, Plesset 在此基础上考虑了液体的粘性和张力,建立了空泡动力学基本方程,为空泡动力学奠定了基础,此后,空化理论的研究进入了一个蓬勃发展的时期[2]。

对于空化的应用,人们早已从当初的避免空化走向了利用空化,这其中以水射流的应用最为广泛。Kewen Peng、Shouceng Tian 等人搭建封闭实验室研究了高环境压力和流量对气泡输运效率的影响,结果表明气泡输运效率随压力增大而减小,随流量的增大而增大[3]; Yanzhen Chen、Yihuai Hu 等人提出了一种混合算法用于优化角形喷嘴的几何形状,优化后的角形喷嘴显著提升了空化射流在深水空化效应[4]; Changling Wu 等人发现用空化水射流处理豆渣中提取的膳食纤维,可以明显增加可溶性膳食纤维含量[5]; 王萍辉通过实验发现采用自激振荡空化喷嘴清洗管道内壁,能大大提高清洗效率[6]; 林礼群、刘平等人对角形喷嘴在淹没环境下进行了数值模拟,设计一款用于清除深海养殖网箱附着物的专用装置[7]; 袁太平、胡昱、王绍敏等人通过数值模拟和冲蚀实验分析了不同结构尺寸的网衣清洗设备喷嘴的水下空化效果、速度特性、冲蚀效果,结果表明,喷嘴出口角度对空蚀效应的影响最大[8]。由此可见,水利空化带来的能量能有效解决众多工业领域中的问题。

本文在前人研究的基础上,基于有限体积法,采用 CFD 流体分析软件 FLUENT 对收缩扩张形喷嘴的内外流场进行数值模拟,分析入口压力、喉部直径、水深等因素对其空化效果的影响[9]。

2. 数学模型

空化是由于液体中出现局部低压致使液体中的小气泡或者气核爆发性生长现象,空化的本质是液体分子与蒸汽分子之间的相变,因此,数学模型采用空化模型、多相流模型以及湍流模型[10]。

2.1. 空化模型

空化模型采用 Schnerr & Sauer 模型, 该模型展示了空泡质量变化率与空泡体积分数变化率之间的关系。

$$\dot{m}_1 = \frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R} \frac{\rho_1\rho_2}{\rho_3} \sqrt{\frac{2(p_v-p)}{3\rho_1}}, \quad p < p_v \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 = -\frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)}{R} \frac{\rho_1\rho_2}{\rho_3} \sqrt{\frac{2(p-p_v)}{3\rho_1}}, \quad p \geq p_v \quad (2)$$

式中: \dot{m}_1 为气泡质量变化率; α_v 为空泡体积分数; R 为空泡半径; ρ_1 为空泡密度; ρ_2 为液相密度; ρ_3 为混合相密度; p_v 为该液体当前温度下的饱和蒸气压; p 为混合相压力。

2.2. 多相流模型

多相流模型采用 Mixture 混合模型, 它用于模拟不同速度的多相流动。其连续性方程和动量方程分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho * \mu) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho * \mu)}{\partial t} + \nabla(\rho * \mu \mu) = -\nabla p + \nabla \tau + \int \delta(t)^{\sigma kn \delta(x-x')} dS \quad (4)$$

式中: t 为时间; μ 为速度; ρ 为混合相密度; p 为压力; σ 为表面张力系数; τ 为剪切应力; $\delta(x)$ 为狄拉克函数。

2.3. 湍流模型

湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 它对于圆柱类射流的发散比率有着更精准的预测, 其湍流动能能量与耗散率的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha_k \mu_{ef} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G - \rho \epsilon - Y_m \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha_\epsilon \mu_{ef} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{K} (G_k + C_3 G_b) G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} - R \quad (7)$$

式中: k 为湍动能; v_i 为第 i 方向的速度分量; x_i 为第 i 方向的空间变量分量; α_k 、 α_ϵ 为湍动能及耗散率所对应的普朗特数; μ_{ef} 为有效粘度系数; G_k 、 G_b 为湍动能受速度梯度和浮力所影响的生成项; Y_m 湍流脉动膨胀的贡献项; C_1 、 C_2 、 C_3 为经验常数; R 为适应计算而增加的附加项。

3. 数值模拟

3.1. 几何模型创建

结合空化射流形成的必要条件需在射流中形成局部低压, 设计了一种收缩扩张形喷嘴, 其主要结构由入口段、喉部段、扩张段组成, 喷嘴示意图如图 1 所示。

3.2. 流场网格划分

采用 ICEM 网格划分软件对喷嘴内外流场进行网格划分, 考虑到所研究的流场区域为完全对称结构, 只需选取流场截面的一半计算即可, 流场示意图如图 2 所示, 流场网格示意图如图 3 所示。

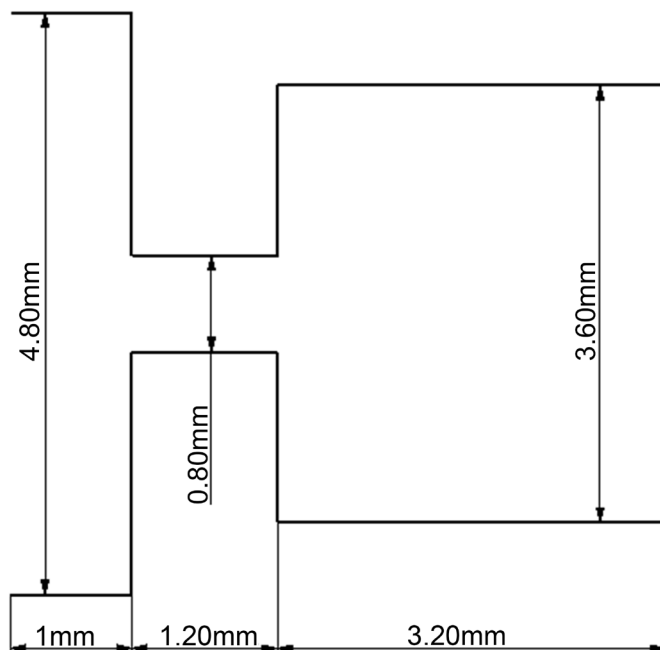


Figure 1. Schematic diagram of nozzle structure
图 1. 喷嘴结构示意图

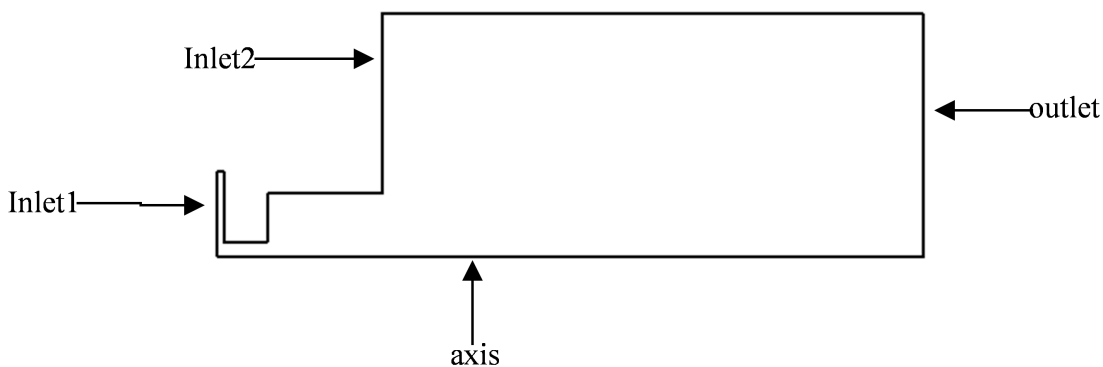


Figure 2. Schematic diagram of flow field
图 2. 流场示意图



Figure 3. Schematic diagram of flow field grid
图 3. 流场网格示意图

3.3. 喷嘴流场的初始化设置

流场初始化设置如表 1 所示。

Table 1. Flow field initialization settings
表 1. 流场初始化设置

数学模型	Schnerr-Sauer空化模型 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型 Mixture模型
边界条件	压力入口、压力出口
材料	water-vapor water-liquid
压力速度耦合算法	Couple
压力离散格式	Presto
动量、体积分数、湍流动能、湍流耗散率离散格式	Quick

3.4. 结果及分析

图 4、图 5、图 6、图 7 分别为入口压力 12 Mpa，喷嘴喉部直径 0.8 mm 下的速度云图、气化云图、轴线处速度变化图、气泡体积分数散点图。从速度流线图可以看出，流体从喷嘴入口射出后沿轴线方向整体呈现集束状，在进入扩散段后，开始呈现发散状态，随着距离的增加，发散状态越发明显，且由内向外伴随着明显的速度梯度；从轴线处速度变化图能够看出，流体最高流速为 145 m/s，在进入扩散段以前流速越来越高，进入扩散段后因受周围液体的阻滞作用，速度逐渐减小。

从气化云图和气泡体积分数散点图能够清晰的看出空泡在流场中的分布区域，空化最早在喉部上方少量出现，进入扩散段后开始大量出现，并覆盖整个扩散段的上方，空化效果最好的位置出现在扩散段的末端，在外流场区域也伴随着少量空化现象。

由速度流线图和气化云图可以得出，空化不易在射流内部形成，说明射流内部速度较高难以出现压强波动，而射流从喉部流出后，受到周围流体的阻滞，与周围流体发生剪切作用，速度慢下来的同时扰动了周围流体，致使射流外部形成了局部低压区，该低压区的压力小于该流体当前气温下的饱和蒸气压，进而发生空化，空化发生所产生的空泡流随流体流出扩散段后进入外流场，由于外流场的压力大于空泡内部的压力，空泡随之发生湮灭[11]。

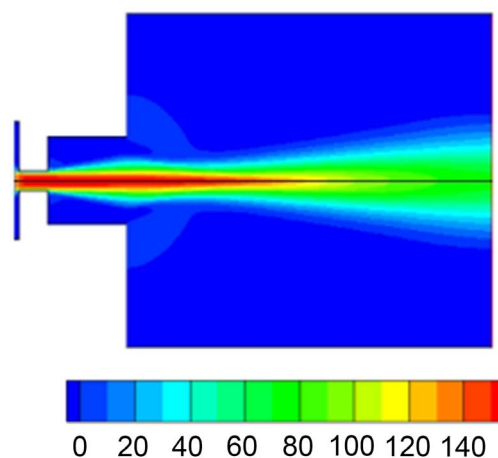


Figure 4. Velocity nephogram
图 4. 速度云图

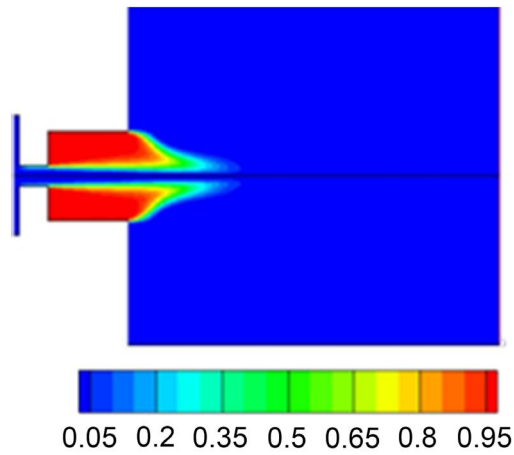


Figure 5. Cloud picture of gasification
图 5. 气化云图

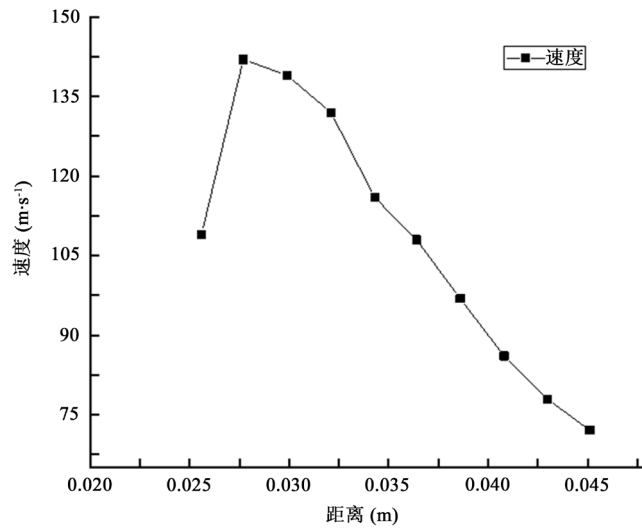


Figure 6. Velocity change diagram at axis
图 6. 轴线处速度变化图

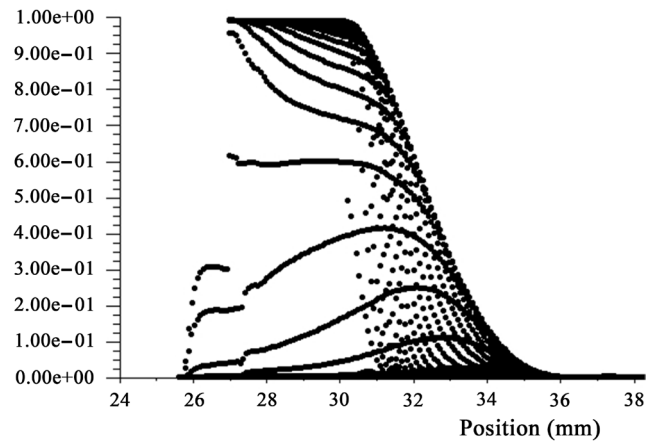


Figure 7. Bubble volume fraction scatter plot
图 7. 气泡体积分散点图

4. 入口压力对空化效果的影响

气含率代表混合相中气泡的体积分数，以气含率的大小来判断空化的强弱，采用控制变量法思想，保持其它结构参数不变的情况下分析入口压力对流场空化效应的影响。图 8、图 9 分别为入口压力在 2 Mpa、20 Mpa 时的气化云图及速度云图，从速度云图可以看出，不同入口压力下的射流在流场中的运动轨迹并无明显变化，都是先呈集束状，进入扩散段后开始发散，但随着入口压力的增大，射流的最大流速逐渐增大，分别为 63 m/s、199 m/s。

对比不同入口压力下的气化云图可以看出，随着入口压力的增大，流场中产生空化的区域显著增多，主要体现在喷嘴的扩散段和外流场的初始段，说明随着入口压力的增大导致射流流速的提高，进而加强了对周围流体的扰动，形成了更多的低压区，导致空化效应显著提升。

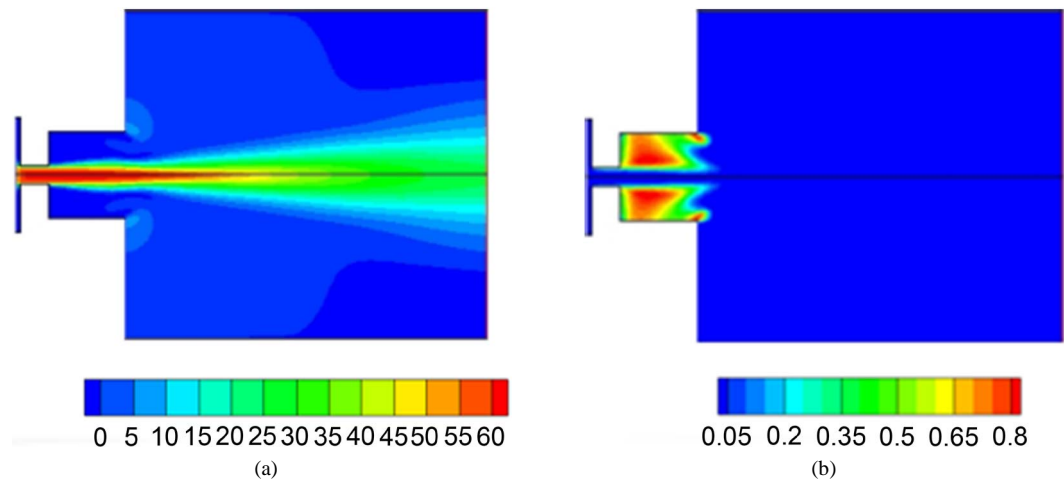


Figure 8. 2 Mpa. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification

图 8. 2 Mpa。 (a) 速度云图; (b) 气化云图

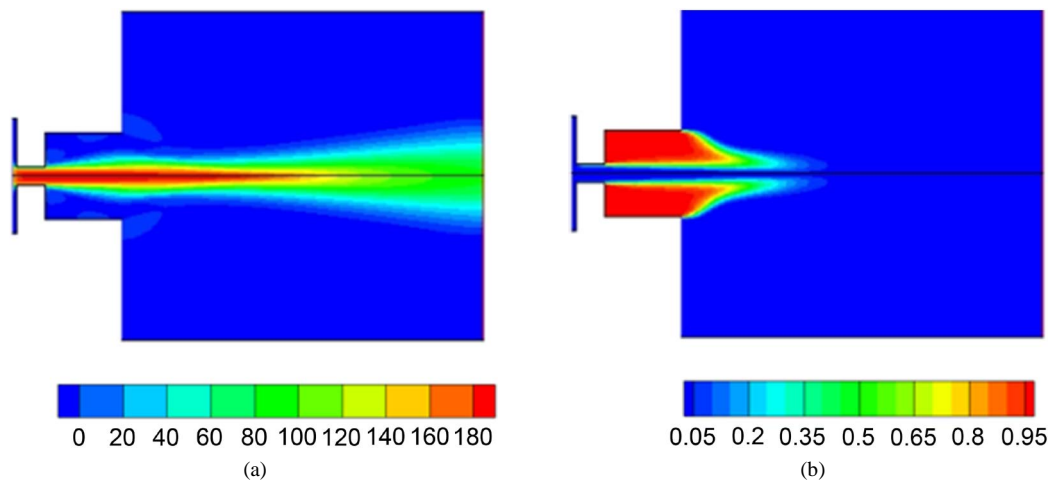


Figure 9. 20 Mpa. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification

图 9. 20 Mpa。 (a) 速度云图; (b) 气化云图

图 10 为不同的入口压力下气含率及最大流速的变化点线图，从图中不难看出气含率及射流的最大流速都伴随着入口压力的增大而增大，因此，在实际工程运用中，为了能够产生更好的空化效应，在考虑到水泵与流量的匹配情况下，应尽可能的增加喷嘴的入口压力。

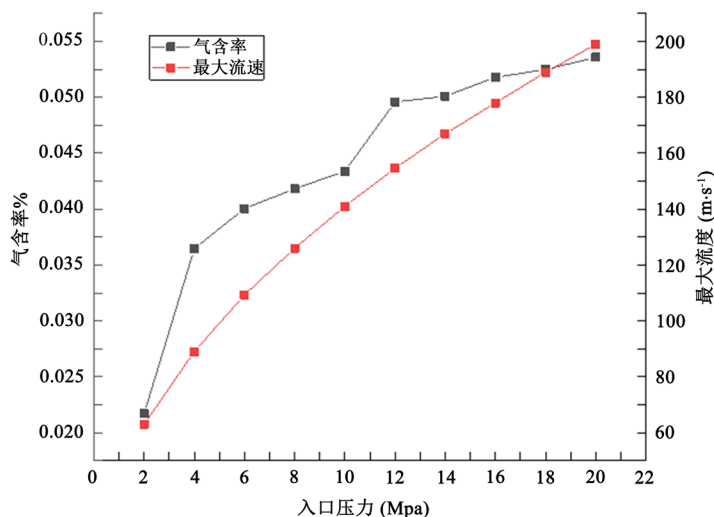


Figure 10. Variation of gas holdup and flow rate with inlet pressure
图 10. 气含率和流速随入口压力变化图

5. 喉部直径对空化效果的影响

图 11 和图 12 是在入口压力 12 Mpa，喉部直径分别为 0.4 mm、1.2 mm 下的气化云图及速度云图，从速度云图可以看出，相同的入口压力下，射流的最大流速并无差异，但其影响效果不尽相同，当射流从喷嘴入口流出后，在喉部直径为 0.4 mm 的工况下，射流流速沿着轴线方向迅速减小，在喉部直径 1.2 mm 的工况下，流体的最大流速可以维持到流场的末端。根据气化云图可以看出两种工况下，空化产生的区域都集中在喷嘴的扩散段和外流场的初始段，但喉部直径为 1.2 mm 的工况下，外流场中的空化区域更大。

根据上述仿真结果分析可以得出，喉部直径越大，空化效果越好，说明即使射流从喷嘴入口流出的最大流速一样，但随着直径的增大，在此流速下流出的液体更多，从而对流场中其它区域的液体扰动更大，会产生更多的低压区，因此，相较于喉部直径为 0.4 mm 的空化喷嘴，喉部直径 1.2 mm 时，空化强度更大。

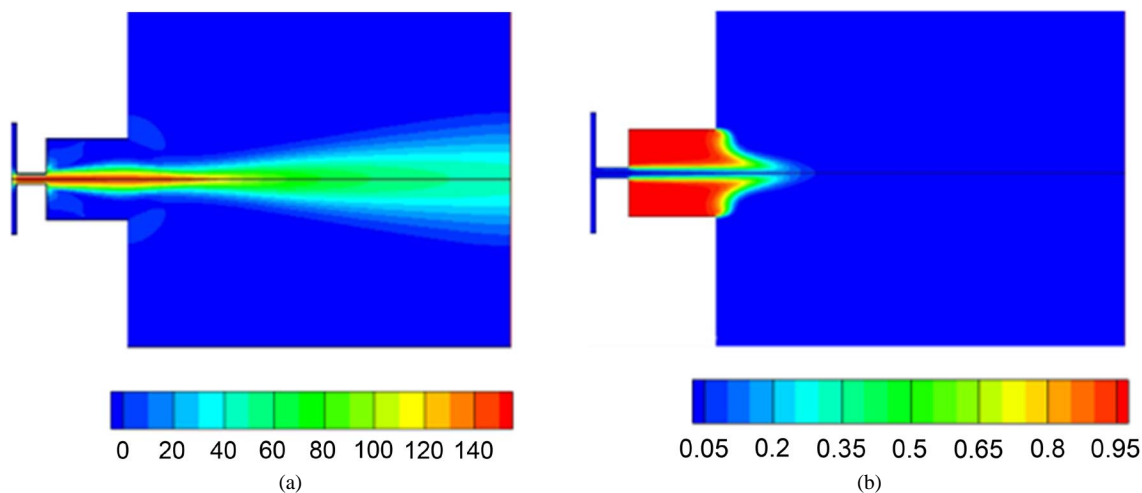


Figure 11. Throat diameter is 0.2 mm. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification
图 11. 喉部直径为 0.2 mm。(a) 速度云图；(b) 气化云图

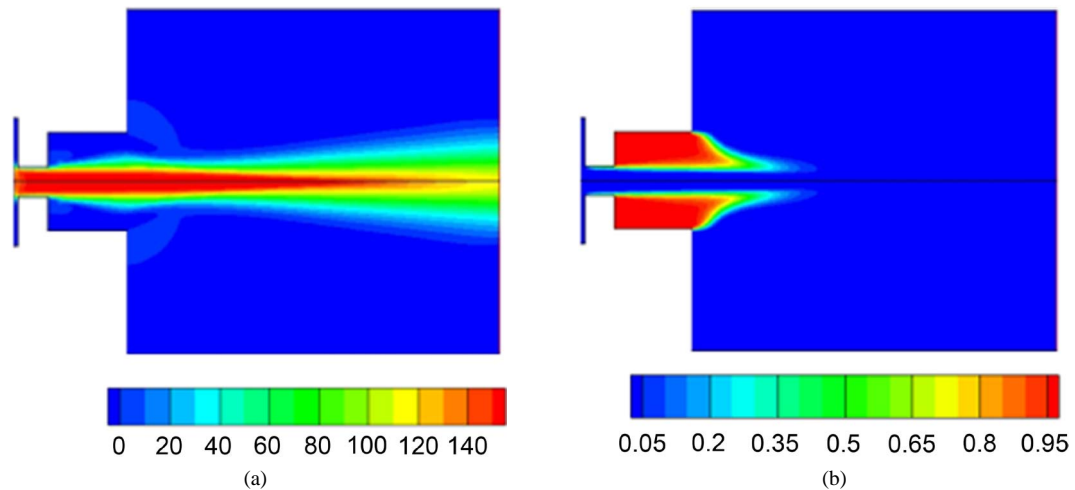


Figure 12. Throat diameter is 0.6 mm. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification
图 12. 喉部直径为 0.6 mm。(a) 速度云图; (b) 气化云图

6. 水深对空化效果的影响

图 13 和图 14 是入口压力 5 Mpa、喉部直径 0.8 mm，水深 0 m、10 m 下的速度云图及气化云图，从气化云图能够看出水深对于空化喷嘴的空化效果影响较大，水深 0 m 的空化效果优于水深 10 m，说明了随着水深的增加，射流从喷嘴入口流出后，对周围流体的扰动效果减弱，流场中的低压区减小，空化效果减弱。

图 15 为气含率随着水深的变化点线图，从图中可以看出，气含率随着水深的增加而减小，因此，在实际工程运用中，如果空化喷嘴涉及到深水作业，需要考虑到水深对于空化效果的影响。

7. 结论

- 1) 利用 CFD 流体仿真软件 FLUENT 能详细模拟出收缩扩张管内外流场中的流体流动规律，得到不同工况下流场中空化的分布区域。
- 2) 通过对比不同结构参数的喷嘴的数值模拟结果可知，入口压力、喉部直径、水深对流场中的空化效应都有较大影响，其中，入口压力、喉部直径越大，空化效果越好，水深越深，空化效果越差。

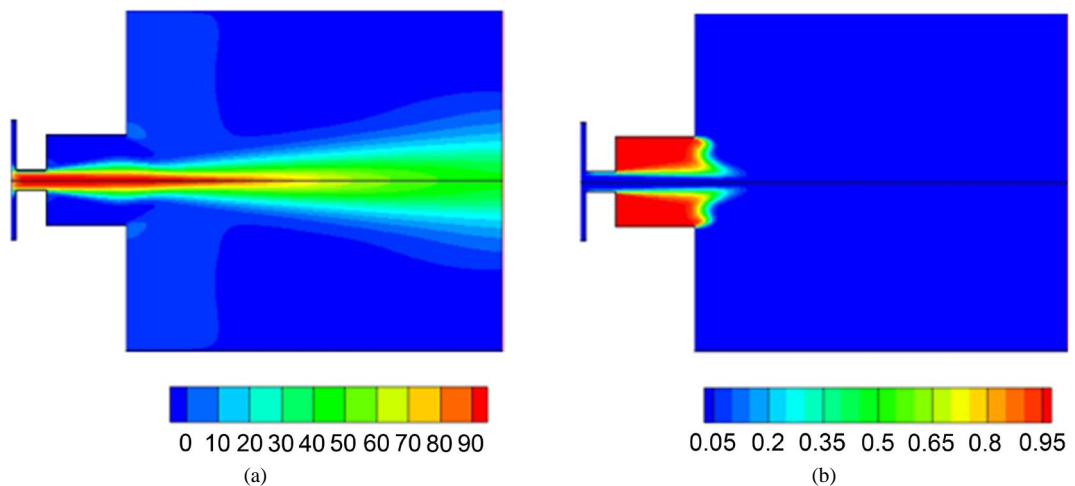


Figure 13. Water depth 0 m. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification
图 13. 水深 0 m。(a) 速度云图; (b) 气化云图

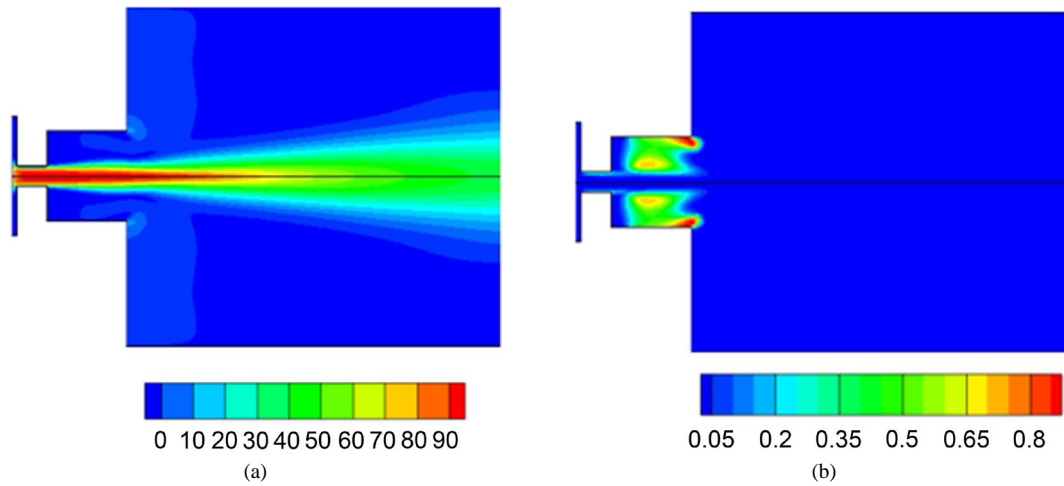


Figure 14. Water depth 10 m. (a) Velocity nephogram; (b) Cloud picture of gasification
 图 14. 水深 10 m。 (a) 速度云图; (b) 气化云图

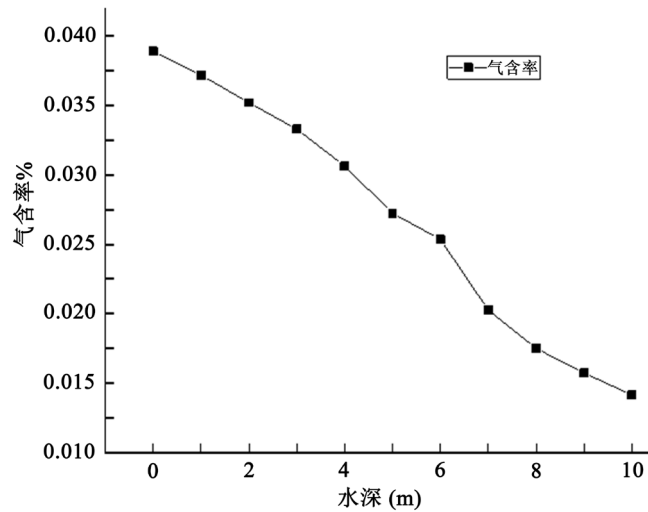


Figure 15. Variation of gas holdup with water depth
 图 15. 气含率随水深变化图

3) 空化喷嘴在生产设计中,为了能在流场中实现更好的空化效果,在考虑水泵与流量的匹配前提下,应尽可能地提升入口压力和喉部直径,同时当含有空化喷嘴的设备在深水中工作时,需考虑水深对于空化效果的影响。

参考文献

- [1] 李子丰. 空化射流及其在钻井破岩中的应用前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 86-89.
- [2] 王建杰, 陈立宇, 杨夏明, 许桢英, 王匀. 空化水射流的研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 156-162.
- [3] Peng, K., Tian, S., Li, G., Huang, Z. and Zhang, Z. (2017) Cavitation in Water Jet under High Ambient Pressure Conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **89**, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.07.021>
- [4] Chen, Y., Hu, Y. and Zhang, S. (2019) Structure Optimization of Submerged Water Jet Cavitating Nozzle with a Hybrid Algorithm. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, **13**, 591-608. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1628106>
- [5] Wu, C., Teng, F., McClements, D.J., Zhang, S., Li, Y. and Wang, Z. (2020) Effect of Cavitation Jet Processing on the

Physicochemical Properties and Structural Characteristics of Okara Dietary Fiber. *Food Research International*, **134**, Article ID: 109251. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109251>

- [6] 王萍辉. 空化水射流清洗的实验研究[J]. 水力采煤与管道运输, 2004(1): 23.
- [7] 林礼群, 刘平, 王志勇. 基于空化射流技术的养殖网箱水下清洗喷嘴数值模拟[J]. 渔业现代化, 2020, 47(5): 59-65.
- [8] 袁太平, 胡昱, 王绍敏, 刘海阳, 黄小华, 陶启友, 等. 喷嘴结构对网衣清洗装备水下空化特性的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(2): 296-305.
- [9] 万春浩, 王瑞和, 周卫东, 李罗鹏. 角形空化喷嘴内外流场的数值模拟[J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 257-260.
- [10] Yang, Y., Li, W., Shi, W., Zhang, W. and El-Emam, M.A. (2019) Numerical Investigation of a High-Pressure Submerged Jet Using a Cavitation Model Considering Effects of Shear Stress. *Processes*, **7**, 541. <https://doi.org/10.3390/pr7080541>
- [11] 刘印, 孙鲁杰, 李哲, 王云翔. 双腔室自激振荡脉冲喷嘴空化射流的数值模拟[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(9): 95-98+110.