

文章编号: 1674-5566(2023)05-1024-12

DOI: 10.12024/jsou.20230604251

面向网衣清洗的内壁-中心体空化喷嘴数值模拟

王 斌¹, 申 颖¹, 许竞翔¹, 朱 峰², 徐 帆¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 采埃孚(中国)投资有限公司, 上海 201600)

摘 要: 为提高空化水射流清洗网衣表面的能力, 设计了一种内壁-中心体空化喷嘴。采用空化喷嘴空化流 CFD 数值方法, 对比分析仿真与理论解, 验证了基于两方程湍流模型的二维轴对称空化流数值模型的可靠性。开展了淹没水射流环境下的内壁-中心体空化喷嘴空化流数值计算, 获取了内壁空化器与中心体对喷嘴空化效果的影响, 并计算讨论了水深对空化效果的影响。结果表明: 水射流通过喷嘴喉部时, 分别在内壁空化器及中心体表面产生空泡; 中心体空化效果较内壁空化器更好, 但对射流阻塞作用更强; 内壁空化器会提高喷嘴喉部压强, 进一步提高中心体空化效果; 内壁空化器与中心体均可降低喷嘴空化效果对水深的敏感度; 本研究可为养殖网箱网衣清洗喷嘴设计提供空化流动力学机理研究基础, 并提供了低成本、高效率的设计方法。

关键词: 空化流; 网衣清洗; 数值模拟; 风琴管喷嘴; 中心体喷嘴

中图分类号: S 955 **文献标志码:** A

深水网箱养殖摆脱了近岸和陆地养殖受空间资源以及环境的制约, 拓宽了水产养殖空间, 是水产养殖活动的重要形式之一^[1]。近年来, 多种深远海大型智能养殖网箱投入生产和应用^[2]。而深水网箱在长时间浸泡下, 藤壶、藻类、双壳类^[3]等污损生物在网衣表面大量附着, 导致网衣更换困难, 内外水体交换堵塞, 制约鱼类生长的同时加剧了网衣过载破损, 从而损失养殖鱼类。因此研究网衣污损生物高效清洗设备的重要性越发突显。而空化射流清洗技术因其绿色环保, 并且在破坏网衣表面的情况下, 清洗海洋污损生物的效率高达 90% 以上^[4], 被广泛应用于网衣清洗。空化射流清洗技术利用水射流通过特定的空化喷嘴产生空化泡, 伴随射流进一步发展成为空化泡群, 接触清洗区域时空化泡发生溃灭, 释放出高温高压的能量以达到清洗物体表面效果。喷嘴作为射流产生空化的物理载体, 是影响空化效果的决定性因素。

自 1981 年 CONN 发明风琴管喷嘴^[5]以来, 以

传统风琴管喷嘴为代表自激振荡空化射流喷嘴在清洗效果和冲蚀特性上一直具有优势。与标准喷嘴相比, 传统风琴管喷嘴在侵蚀实验中引起的质量损失增加了 61%^[6]。在高围压条件下, 传统风琴管喷嘴造成侵蚀样本的质量损失是锥形喷嘴的两倍^[7]。因此, 国内外学者针对如何优化传统风琴管喷嘴几何结构参数, 从而提高射流空化能力这一问题, 进行了多方面研究。戚美等^[8]通过串联风琴管喷嘴和 Helmholtz 喷嘴形成双腔室放大射流振荡幅值。于海涛等^[9]设计了带二级谐振腔的双腔室风琴管喷嘴, 提高了轴向含气率。袁太平等^[10]对比了 3 种不同类型截面, 得出突变型截面喷嘴易于提高打击力, 更适用于网衣清洗。涂翊翔等^[11]揭示了射流流道嵌入不同形状中心体, 以及高低压射流剪切可提升空化效应。蔡腾飞等^[12]采用噪声信号分析的方法, WU 等^[13]采用计算流体力学 (CFD) 方法, 均探究了喷嘴扩口长度、流道长度、扩口角度等出口结构参数与风琴管空化作用的内在联系。SHI 等^[14]探究了风琴管喷嘴出口长宽比对

收稿日期: 2023-06-16 修回日期: 2023-07-07

基金项目: 国家重点研发计划“海洋农业与淡水渔业科技创新”专项“深远海大型养殖装备平台与智能养殖模式”项目 (2022YFD2401100); 上海市水下机器人工程技术创新中心 (21DZ2221600)

作者简介: 王 斌 (1975—), 男, 教授, 博士, 研究方向为海洋可再生能源、渔业机械装备等。E-mail: ycitwangbin@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

轴向压力振荡的影响。LIU 等^[15]设计了双孔风琴管喷嘴,针对流动特性进行了数值分析,较单孔射流侵蚀能力显著提高。HAITHAM 等^[16]研究了多孔射流出口,孔间相互作用的影响及其对空化泡初生和下游流动湍流的影响。HAN 等^[17]分析了风琴管内表面粗糙度对水射流强度的影响。

然而,传统风琴管喷嘴会由于压强变化射流空化程度急剧降低,难以满足实际中网衣表面清洗需求。因此,本文设计了一种内壁空化器和中心体复合的内壁-中心体空化喷嘴。淹没环境下,将内壁-中心体空化喷嘴、中心体空化喷嘴、内壁空化喷嘴和传统风琴管喷嘴进行射流空化强度对比;分析网衣清洗时水深对喷嘴空泡初生区域及数量的影响;建立网衣清洗水射流冲击模型,依据模型对比分析不同尺寸的内壁-中心体空化喷嘴网衣清洗特性。

1 数值方法及控制方程

1.1 多相流模型

由于水中溶解有大量气核,淹没式空化射流在清洗网衣时会在喷管喉部局部地区由于低压而发生空化,最终形成高速 water-vapor(液态水-蒸汽)两相混合流。Mixture 模型具有强耦合作用,允许选择颗粒相并计算颗粒相的所有属性。

Mixture 多相流模型相较于 VOF 模型与 Eulerian 模型,针对云空化问题的计算结果相对更为准确且对计算资源与计算时间的要求更低,更加适用于本文研究的气液两相流动问题,因此选择 Mixture 模型对控制方程进行离散求解。

Mixture 模型中的连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m V_m) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_m 为混合物密度, V_m 为混合物质量平均速度,分别定义如下

$$V_m = \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k v_k}{\rho_k} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

式中: ρ_k 、 α_k 分别为 n 相混合流中第 k 相的密度、速度和体积分数。

Mixture 模型中的动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_{mi}) + v_{mi} \frac{\partial(\rho_m v_{mi})}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu_m \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\partial v_{mj}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{mj}}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

式中: μ_m 为流体混合黏度, $\mu_m = \sum_{n=1}^2 \alpha_n \mu_n$ 。

1.2 湍流模型

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型不直接求解瞬态 N-S 方程,而采用 Reynolds 平均方法对雷诺应力作相应假设,将时均量和脉动量联系起来,其对分离流、二次流及旋流等复杂流动的计算精度较高,本研究采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型刻画流场非线性特征并预测耗散率。RNG 模型输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_i \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中: ∂_k 和 ∂_ε 分别是 k 和 ε 的有效普朗特数倒数, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ 。

μ_{mol} 和 μ_{eff} 的计算公式为

$$\left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929} \right|^{0.5679} = \frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}} \quad (7)$$

式中: $\alpha_0 = 1.0$,若在高雷诺数极限下($\frac{\mu_{\text{mol}}}{\mu_{\text{eff}}} = 1$);

$\partial_k = \partial_\varepsilon = 1.393$ 。其中 R_ε 为 ε 公式相对于标准 $k-\varepsilon$ 模型的增加项,表示为

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \quad (8)$$

式中: $\eta = SK/\varepsilon$; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$ 。

湍流黏度的计算公式为

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中:常数 $C_\mu = 0.0845$ 。

1.3 空化模型

因 SCHNNER-SAUER 空化模型^[18]鲁棒性强,计算周期短,可在小尺度范围内模拟微小液滴或气泡在微观流体中的运动和变形,所以采用该空化模型捕捉液态水流经喷管时发生的空化现象对流场的影响效应。空化模型为

$$\dot{m} = \begin{cases} \dot{m}^+ = C_{evap} \frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)\rho_1\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_1}}, P < P_v \\ \dot{m}^- = C_{cond} \frac{3\alpha_v(1-\alpha_v)\rho_1\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_1}}, P \geq P_v \end{cases} \quad (10)$$

式中： \dot{m} 为传质源项； $C_{evap} = 1.0$ 为蒸发项系数； $C_{cond} = -1.0$ 为凝结项系数； α_v 为气相体积分数； R_B 为气泡半径； P 为周围大气压力； ρ_m 、 ρ_v 和 ρ_1 分别表示混合物密度、气体密度和液体密度； P_v 为液态水发生空化相变的饱和蒸汽压。

2 数值方法验证

2.1 仿真算法验证

采用数值模拟技术分析淹没环境中网衣清洗作业情况。网衣清洗示意图如图1所示,带有内壁-中心体喷嘴的设备按图示箭头方向进行网衣清洗。

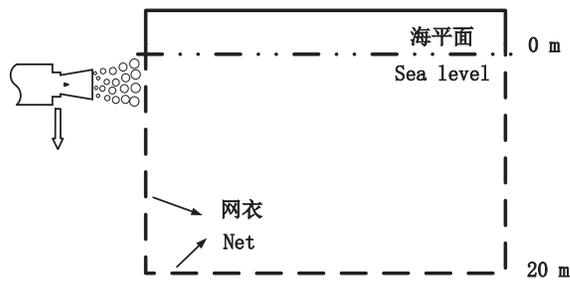


图1 网衣清洗示意图
Fig. 1 Schematic diagram of net cleaning

本文建立二维轴对称数值仿真模型,复现于海涛等^[19]的仿真实验结果,以验证内壁-中心体空化喷嘴数值仿真算法的正确性。本文基于计算流体力学手段分析空化喷嘴的内外流场特性。观察并分析空化喷嘴的内外流场特性,验证算例采用和于海涛等^[19]实验一致的传统风琴管喷嘴,模型如图2所示。模型的几何参数设置均1:1复刻该文章中传统风琴管喷嘴模型,出口结构中 $\theta = 25^\circ$,其余参数信息如表1所示。

外流场的几何形状对数值计算结果有重要影响。本算例设定喷射靶距为10 mm,外流场径向延伸10 mm,如图3a所示。本算例基于二维轴对称模型,采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型与SCHNNER-SAUER空化模型^[18]分别捕捉湍流与空化效应。模型喷嘴入口设定为压力入口,压强为20 MPa;外流场出口设定为压力出口,压强为101 325 Pa。

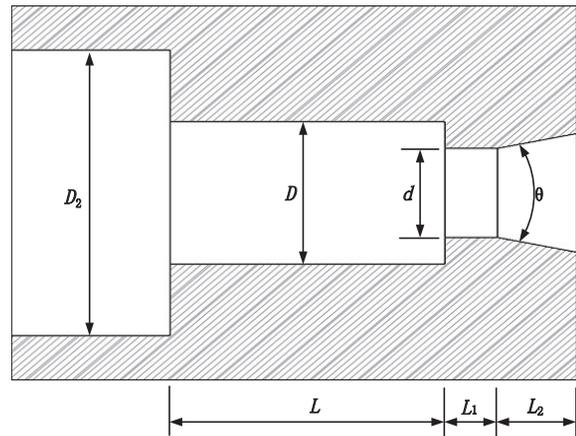


图2 传统风琴管喷嘴外形

Fig. 2 Traditional organ pipe nozzle shape

表1 传统风琴管喷嘴几何参数
Tab. 1 Geometric parameters of traditional organ pipe nozzles

谐振器结构 Resonator structure		出口结构 Outlet structure			
D_s	D	L	d	L_1	L_2
6.4	3.2	5.2	1	1	1.5

本算例考虑到喷嘴喉部及发散段射流流动特征活跃,选用四边形结构化网格。为提高射流冲击面处获取数据的精度,本算例在图3b网格分辨率的基础上针对以上两处区域进行网格加密。整体计算域网格总数为78 212个,整体结构性网格最小正交值达到0.99。

算例数值计算结果如图4所示,图4a~4c依次展示了验证算例中计算域内压强、速度与蒸汽相分布情况。传统风琴管喷嘴喉部前为高压区域,压强基本维持在20 MPa量级,高压流体通过传统风琴管喉部迅速向外流场扩散,压力出现骤降。在打击面轴线附近出现约4 MPa的高压区,分析原因为系该区域是高速射流主要冲击的区域。在传统风琴管喉部压力骤降区域,射流流速有显著提高,最大流速超过200 m/s。在打击面附近流场内,流体流速出现下降并沿径向流动。传统风琴管喷嘴在喉部形状突变处产生空化,蒸汽相随液态水向下游扩散,并在喷管外形成中心带有圆柱通路的圆锥形分布区域。传统风琴管喷

嘴在喉部及扩散段壁面附近蒸汽相体积分数较大,在靠近轴线的高速流动区域较小。

本文将验证算例的计算结果分别和薛胜雄等^[20]的理论结果、于海涛等^[19]的数值仿真结果进行定性、定量对比,以验证本文采用的仿真算法的可靠性。首先将计算结果和理论解析解进行定量对比。薛胜雄等^[20]建立了喷嘴进出口压差与沿喷嘴喉部轴线上最大截面平均速度之间的

对应关系,如公式^[20]所示。

$$u_{\max} = 44.7 \sqrt{P_i} \quad (11)$$

式中: u_{\max} 为射流最大速度,m/s; P_i 为空化喷嘴出口与入口压力差,MPa。在5~100 MPa进出口压差范围内,每间隔5 MPa建立一个数值仿真算例进行采样,获得不同进出口压差条件下的20组数据,并与理论值对比验证,对比结果如图5所示。

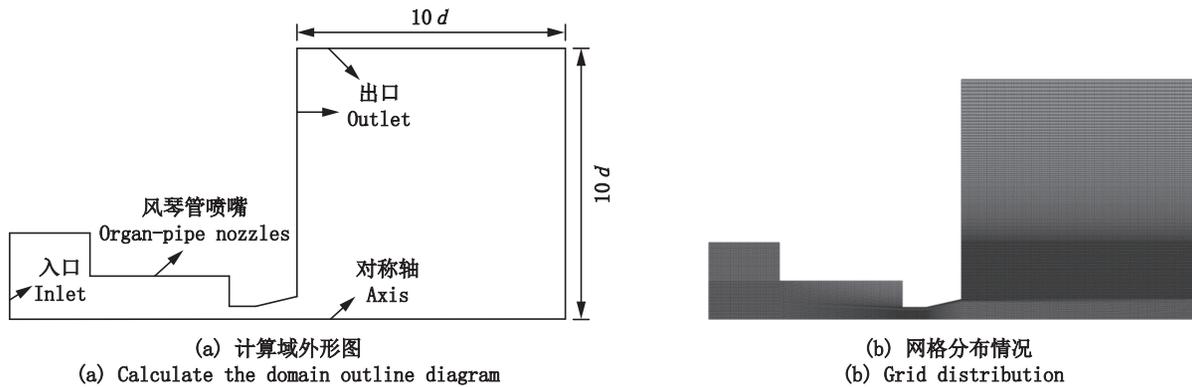


图3 算例计算域及网格分布情况
Fig. 3 Example calculation domain and grid distribution

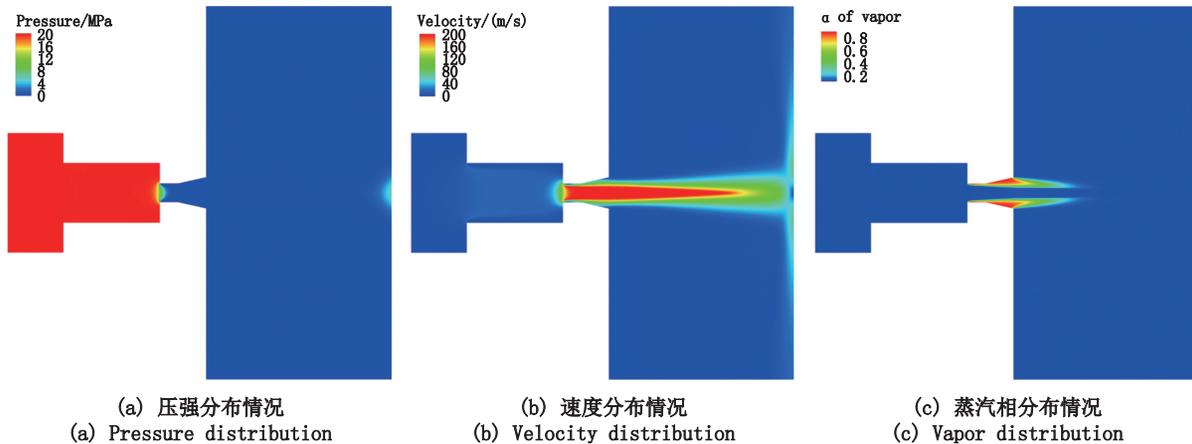


图4 算例数值计算结果
Fig. 4 The result of the example numerical calculation

图5中黑实线表示薛胜雄等^[20]的理论解析解,方块红点为本算例采样的20组数值仿真结果。对比结果显示在5~100 MPa范围内,本算例数值仿真算法的计算结果与理论值曲线拟合度高。如图6所示,在不同压差下,数值仿真结果与理论值最大误差为-1.63%。

图7a分别为于海涛等^[19]计算结果(上半)与本文数值仿真计算结果(下半),图7b展示了流场中压强沿轴线的变化情况,其中黑实线为本文计算结果,红虚线为于海涛等^[19]计算结果。图7a显

示,本算例计算结果在蒸汽相分布区域外形和蒸汽相下游扩散区域长度等方面均与于海涛等^[19]的结果对比良好。

图7b提供了压强沿轴线方向的分布情况对比,本算例和于海涛等^[19]的计算结果整体对应良好。在于海涛等^[19]的计算结果中,压强在喉部前有一定下降,与本文的计算结果存在一定差异。主要原因在于所选用的数值仿真模型存在差异,且网格分辨率和网格质量也存在一定差异。

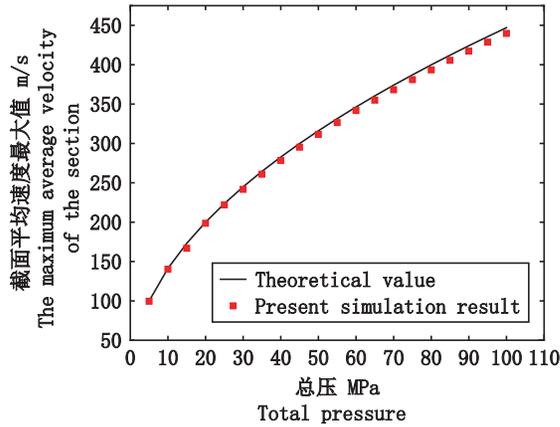


图5 不同压力差下数值仿真结果与理论值对比图

Fig. 5 Comparison of numerical simulation results and theoretical values under different pressure differences

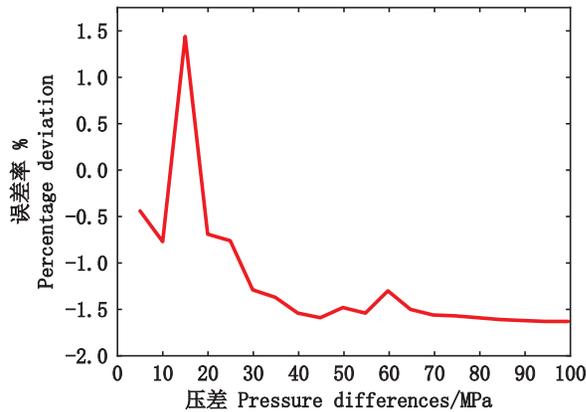
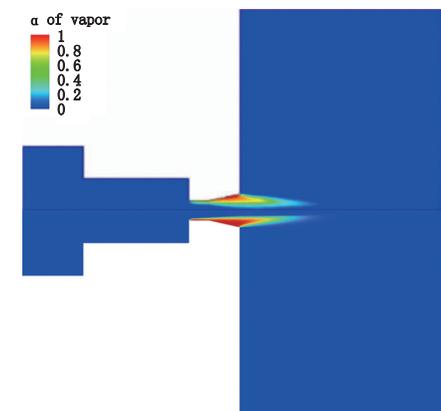


图6 不同压力差下数值仿真结果与理论值误差率

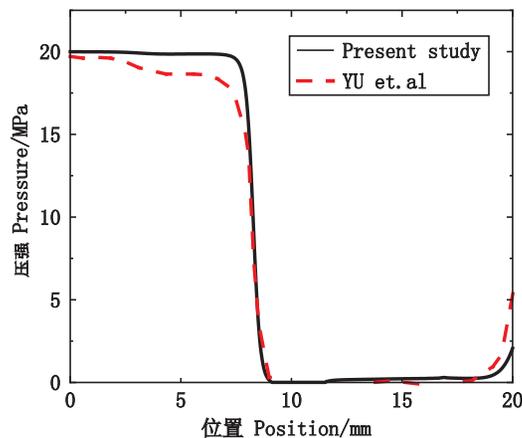
Fig. 6 Numerical simulation results and theoretical value error rate under different pressure differences

以上两组验证结果显示,在空化喷嘴流场特性捕捉上,本文采用的数值模拟方法可靠性强,



(a) 蒸汽相分布情况对比

(a) Comparison of vapor phase distributions



(b) 沿轴线方向压强数值仿真值对比

(b) Comparison of numerical simulation values of pressure along the axis

图7 数值仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical simulation results

满足了网衣清洗环境中空化喷嘴的清洗特性分析条件。

2.2 网格无关性验证

本算例取3组不同分辨率的网格模拟相同的工况,以验证网格无关性。在内壁-中心体空化喷嘴喉部、内壁空化器壁面、中心体壁面使用分辨率较高的四边形结构化网格,在内壁-中心体空化喷嘴谐振腔和外流场采用分辨率较低的四边形结构化网格。3组网格的具体信息如表2所示。

表2 3组网格分辨率信息

Tab. 2 Grid resolution information of the three groups

网格 Mesh	最小分辨率 $\Delta X_{min}/mm$	最大分辨率 $\Delta X_{max}/mm$	数量 Quantity
Mesh 1	0.04	0.15	9 207
Mesh 2	0.03	0.15	16 225
Mesh 3	0.02	0.15	32 540

此处采用的计算域外流场长为 $20d$,半径为 $10d$,内壁-中心体空化喷嘴射流流道喉部尺寸为 $d=1\text{ mm}$ 。其中坐标原点位于喷嘴轴线和喉部起始段交点处,计算域具体信息如图8所示。

内壁-中心体空化喷嘴作业时完全浸没于水中,故内外流场环境均充满介质水。实验采用RNG k-epsilon湍流模型,SCHNNER-SAUER空化模型,速度入口初始速度为 2.5 m/s ,压力出口压强为 5 MPa ,饱和蒸汽压设定为 810 Pa ,整体流场环境背压设置为1个标准大气压。

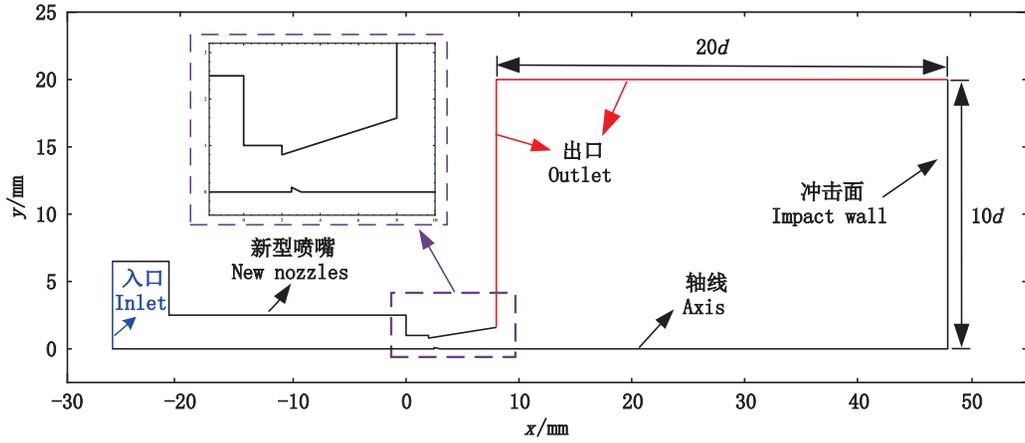


图8 二维轴对称计算域

Fig. 8 The two-dimensional axisymmetric computational domain

采用3组不同分辨率网格进行数值模拟,从而验证网格无关性。分别在 $y=0.4\text{ mm}$,空化喷嘴轴线处

建立监测线,获取两处监测线上压强和水相体积分数随位置变化情况,并绘制在图9中($1\text{ bar}=10^5\text{ Pa}$)。

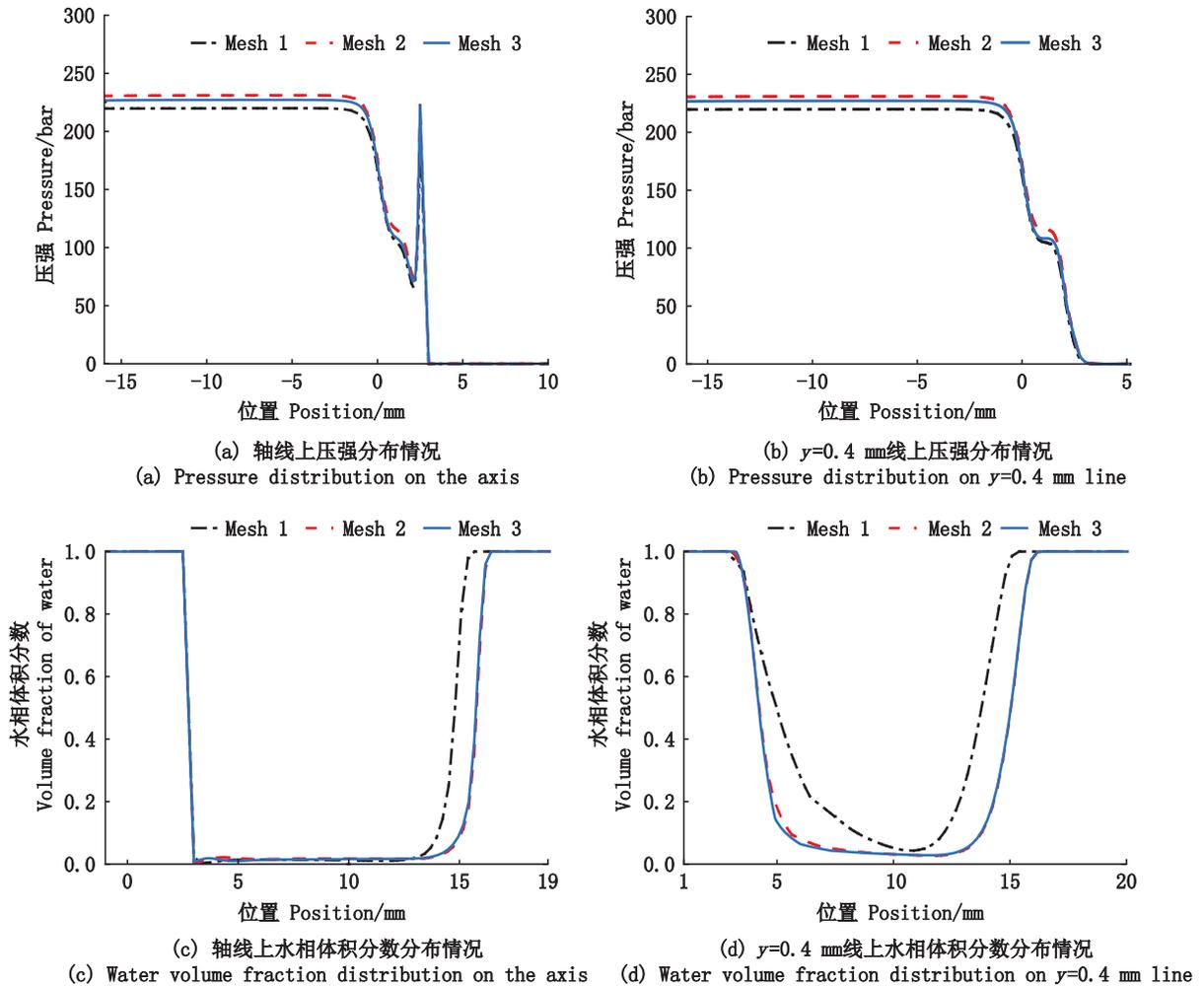


图9 3组不同分辨率网格计算结果

Fig. 9 Three sets of mesh calculation results with different resolutions

图9a~9d分别展示了轴线上和 $y=0.4\text{ mm}$ 线上的压强与水相体积分数分布情况。与Mesh 1

相比,Mesh 2和Mesh 3在两条监测线上的压强和体积分数随位置的变化差异很小。本文最终选

择 Mesh 2 对应的网格分辨率进行数值仿真。

Mesh 2 的仿真结果在图 10 中给出。图 10a~10c 分别展示了流场中压强、速度及蒸汽相的分布情况,图 a、b 中的黑色线为蒸汽相体积分

数为 0.5 的等值线。水射流流经喉部时,压力骤降,为空化产生提供了物理条件。空化区域自喉部一直延伸至外流场中,在空化区域尾部存在压力恢复区。

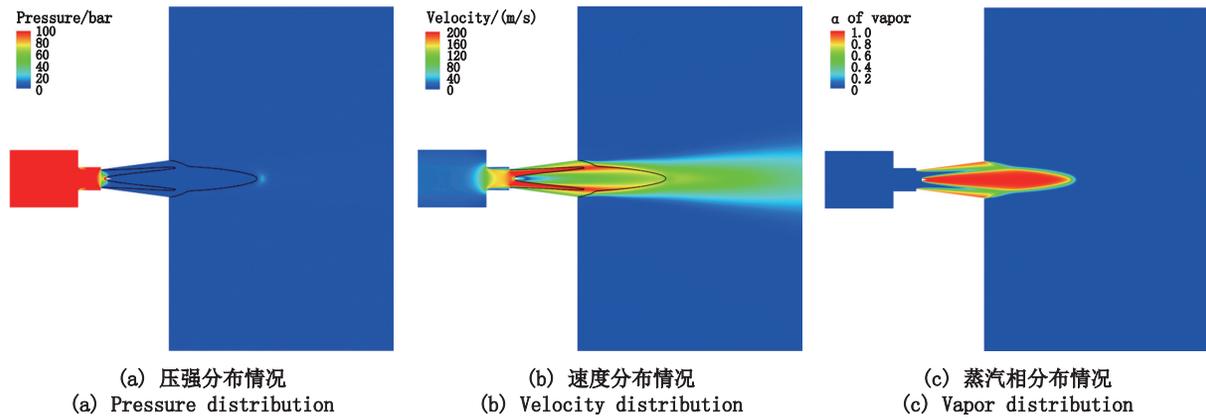


图 10 射流在流场内的流动情况

Fig. 10 The flow of jets within the flow field

3 数值结果与分析

3.1 内壁空化器与中心体对射流流动的影响

本文根据空化原理和风琴管喷嘴外形特性,有针对性地设计了带内壁空化器和中心体的内壁-中心体空化喷嘴。内壁空化器是指在传统风琴管喷嘴的喉部内壁上布置的环状空化器,迎流面为平面,空化发生在尖锐转角处。中心体是指在传统风琴管喷嘴轴线上布置的倒置圆锥体空化器,迎流面设置为平面,空化发生在圆锥底部转角处,如图 11 所示。内壁空化器与中心体均满足二维轴对称模型的要求。

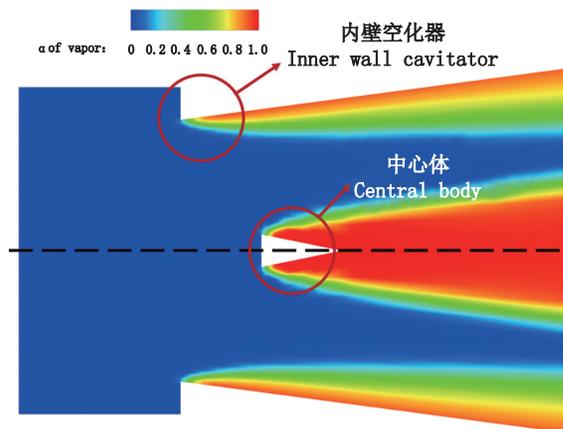


图 11 内壁空化器外形和中心体外形

Fig. 11 Inner wall cavitator shape and central body shape

本文对传统风琴管喷嘴、内壁空化喷嘴、中心体喷嘴、内壁-中心体空化喷嘴分别建立 4 组模型,分别命名为 Case 1、Case 2、Case 3、Case 4。令入口速度为 2.5 m/s,对 4 组 Case 进行了数值仿真,并显示流场中压强、速度、水相体积的分布情况,如图 12 所示。

图 12 中,Case 1、2 仅在喷嘴内壁附着有自然空泡,而 Case 3、4 除在喷嘴内壁附着空泡外,还在中心体下游携带梭形自然空泡区域。中心体导致侧壁自然空泡受到径向压缩。自 Case 1 至 Case 4,自然空泡体积逐步增加,自然空泡在外流场向下游延伸距离逐渐增加。Case 2 较 Case 1 空化位置自喉部后移至内壁空化器。Case 3、4 中内壁自然空泡与中心体下游空泡在喷管口发生融合。中心体空化效果优于内壁空化器。

依据 Case 1-4 中 4 组工况计算结果,进一步对轴线上压强、速度和水质体积分分布情况作定量分析,如图 13 所示。

图 13a 显示,内壁空化喷嘴(Case 2)和内壁-中心体空化喷嘴(Case 4)入口压力均为 225 bar 左右;传统风琴管喷嘴(Case 1)和中心体喷嘴(Case 3)入口压力一致,均为 138 bar。水射流经 4 组喷嘴喉部入口时($x=0$ mm),压强迅速降至饱和蒸汽压附近;经喷嘴扩张段末端($x=10$ mm)时,环境背压导致压力迅速回升恢复至背压水平。

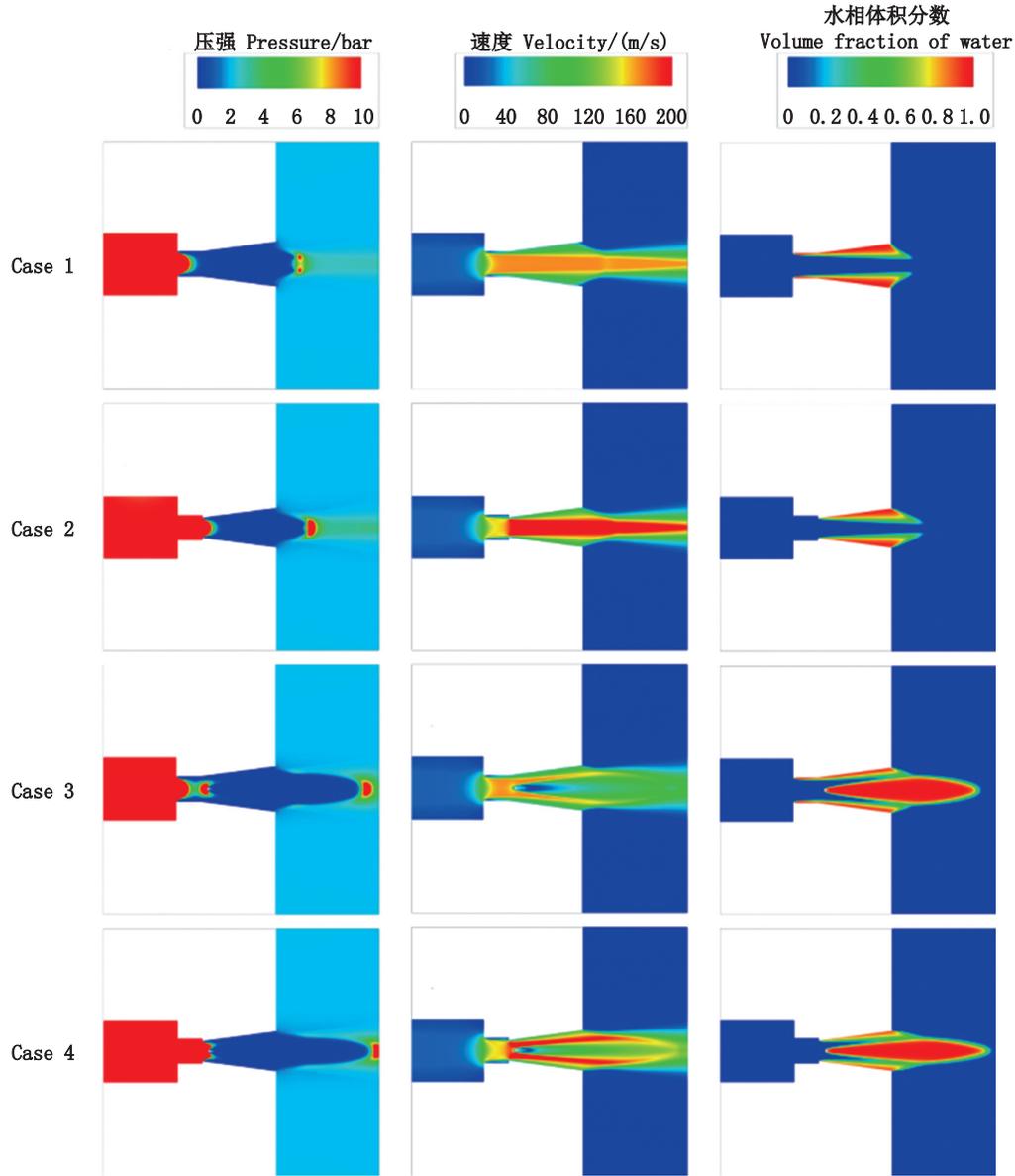


图 12 射流在 4 组空化喷嘴流场的流动情况

Fig. 12 Flow of jets in four sets of cavitation nozzle flow fields

分析认为:内壁空化器收缩了喷嘴喉部口径,会大幅提高喷嘴入口压力。同时布置中心体与内壁空化器会导致流路通畅程度大受影响,从而导致 Case 4 对入口压强的要求最高。

带中心体的喷嘴(Case 3、4)和无中心体的喷嘴(Case 1、2)轴线压强分布有显著区别。

Case 3 与 Case 4 在 $x=2.5\text{ mm}$ 附近出现的压力陡增峰值区域,且 Case 3 峰值明显低于 Case 4。分析原因为二者均在此放置中心体,使迎流面出现高压区,而 Case 4 轴线流速明显大于 Case 3(见图 13b),所以中心体迎流面所受动压更大。值得一提的是,Case 4 和 Case 3 在轴线上均形成了自然空

化,但 Case 4 形成的空化区域向下游扩散至更远,所以 Case 4 喷管外压力恢复区较 Case 3 更远。

图 13b 展示了 4 组喷嘴沿轴线速度分布。喉部前($x<0\text{ mm}$),4 组轴线速度几乎无区别。喉部后($x>0\text{ mm}$),由于 Case 2 和 Case 4 装配有内壁空化器,速度梯度减小。越过内壁空化器后,其轴线速度继续增加,梯度大小几乎完全恢复。Case 1 与 Case 3 由于未布置内壁空化器,所以在喉部位置($x=0\text{ mm}$)速度持续增加。

水射流越过内壁空化器后($x=2.5\text{ mm}$),Case 3 与 Case 4 由于中心体,流速出现明显下降,且降至几乎静止。下降过程中存在速度波动,主要原因

系中心体附近流路截面面积降低导致流速增加。

越过中心体后($x=2.5$ mm), Case 3 与 Case 4 轴线速度开始恢复。由于 Case 3 无内壁空化器, 截面积较大, 流速增加较慢, 而 Case 4 流速恢复更快。无中心体的 Case 1 与 Case 2 轴线流速则几乎保持不变。

4 组喷嘴在射流出口附近 (10 mm $< x < 17$ mm) 速度均有一定程度的突减-恢复波动。主要原因是射流中空化区域向下游扩散至该位置 (见图 13c) 时, 发生了溃灭形成的压力回复区导致此处流速波动。另外, 由于中心体产生的空化效果 $>$ 内壁空化器 $>$ 传统风琴管, 所以 4 组 Case

的空泡长度也依次增大, 速度突减-恢复波动也依次更靠近下游。此外, 由于 Case 3 与 Case 4 放置有中心体, 所以其波动幅度明显大于 Case 1 与 Case 2。

图 13c 展示了 4 组喷嘴沿轴线水相体积分数分布情况。由于 Case 1 与 Case 2 无中心体, 故在全流场轴线上水相体积分数均接近 1。Case 3 与 Case 4 在中心体位置开始发生空化, 轴线上水相体积分数几乎降至 0, 离开喷嘴进入外流场后 ($x=15$ mm 附近), 由于环境压力作用, 蒸汽相变为液态水。Case 4 较 Case 3 增加了内壁空化器, 对空化效应有一定增益, 其空化区域可以延伸至下游更远处。

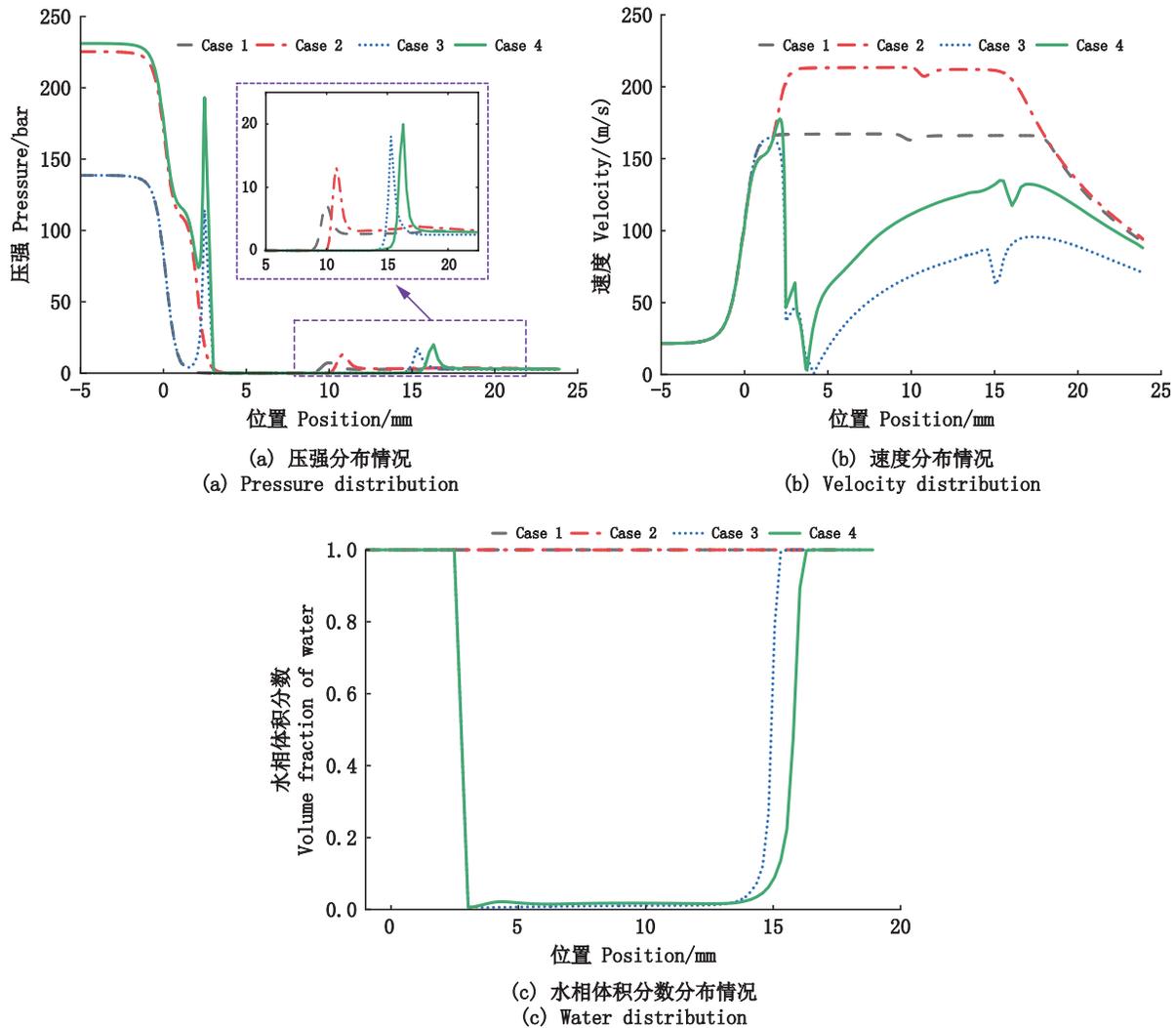


图 13 4 组空化喷嘴在轴线上的流场细节

Fig. 13 Detail of the flow fields of four sets of cavitation nozzles on the axis

3.2 水深对内壁空化器与中心体的空化效果的影响

本文考虑到深水网箱网衣清洗作业时, 水深

环境会产生变化, 故采取进一步分析。取 4 组 Case 在喷嘴外 $x=8$ mm 截面上水相体积分数分布情况进行分析 (关于对称轴作对称处理)。水深

范围为0~20 m,隔5 m采样。喷嘴入口流速固定2.5 m/s。计算结果如图14a~14d所示。

由于4组喷嘴空化器设计存在差异,喷口尺寸有所区别,所以为了消除喷嘴外形对结果分析的影响,这里对径向坐标做无量纲化处理,定义无量纲径向坐标 $y^*=y/R$ 。其中, R 为喷嘴口半径。

图14a~14d的结果显示,水深(环境背压)对喷嘴外蒸汽相分布存在影响。随着水深增加,射

流空化程度降低,截面上水汽掺混区中的水相体积分数增大。其中,Case 1水汽分布对环境背压变化最敏感(见图14a),Case 2、3对环境背压变化敏感度低(见图14b),环境背压变化对Case 4几乎无影响(见图14d)。图14证明:内壁空化器与中心体均可提高喷嘴空化效果抗环境背压影响的能力,Case 2-4抵抗水深环境变化的表现均优于Case 1,其中Case 4表现最优。

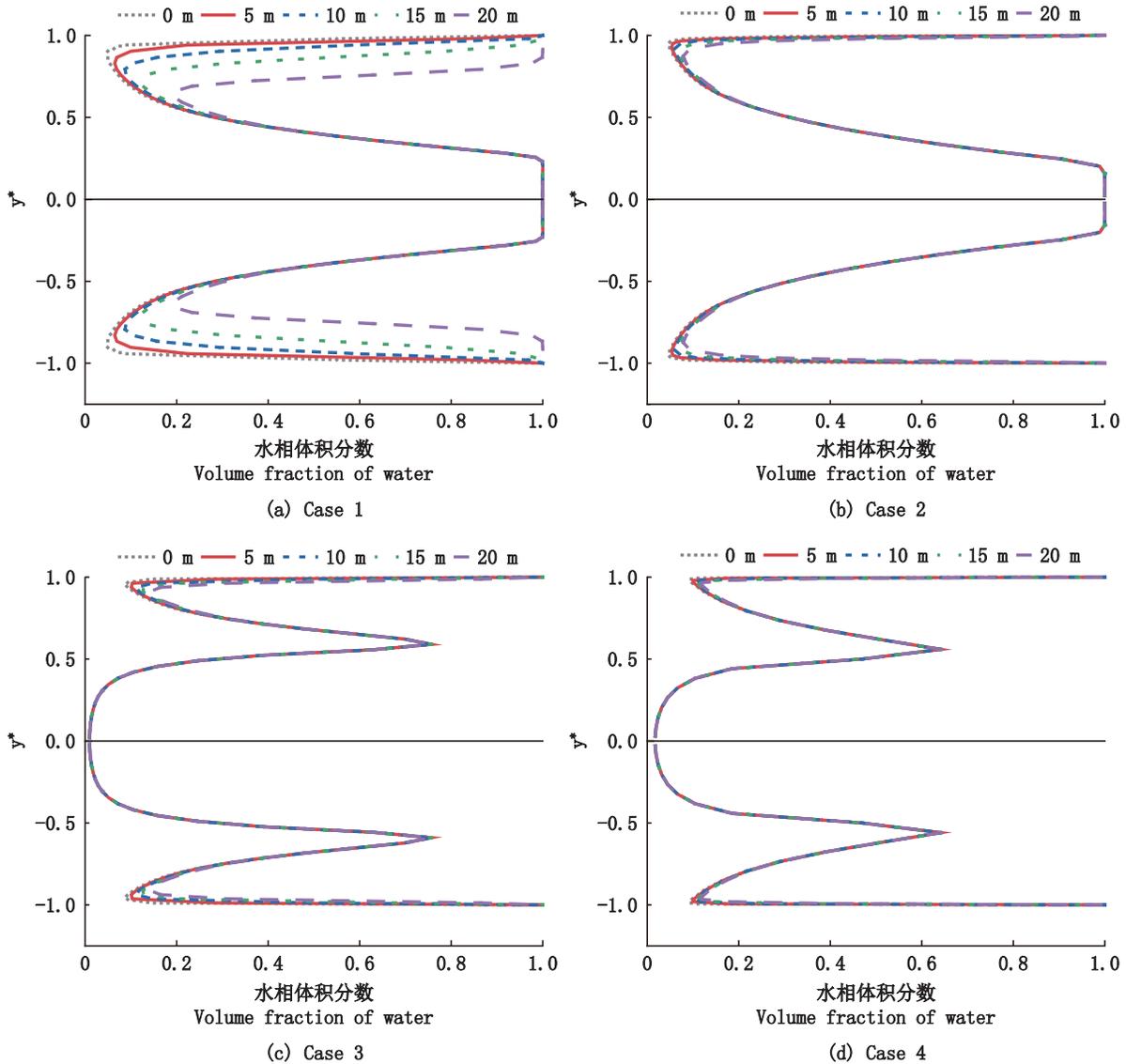


图 14 不同水深对四组喷嘴空化能力的影响

Fig. 14 Effect of different water depths on cavitation capacity of four sets of nozzles

4 结论

本文设计了一种新型内壁-中心体空化喷嘴,并进行了内壁空化器与中心体对水射流流场特性和网衣清洗特性的影响、水深(环境背压)对

内壁空化器与中心体空化效果的影响、两方面的数值模拟。主要结论如下:

(1)内壁空化器与中心体对促进喷嘴流空化均有积极作用,内壁空化器与中心体均可延长空化区域在外流场中的延伸距离、扩大自然空化区

域的体积。由于中心体可在射流核心区形成新空泡,所以比内壁空化器更易生成空化流,但中心体易阻塞射流,导致入口压强降低和射流流速减小。内壁空化器可提高中心体空化核心区流速,延长中心体形成的空化区域,提高喷嘴喉部压力。

(2)内壁空化器与中心体均可降低喷嘴空化效果对水深(环境背压)变化的敏感度。随水深深度增加,传统风琴管射流空化效果有明显降低,但增加任一空化器的喷嘴对水深的敏感度都有显著降低。其中,内壁空化器将进一步提高中心体的空化效果,提高下游蒸汽相体积分数。

参考文献:

- [1] 石建高,余雯雯,卢本才,等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报, 2021, 45(6): 992-1005.
SHI J G, YU W W, LU B C, et al. Development status and prospect of Chinese deep-sea cage [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(6): 992-1005.
- [2] 黄小华,庞国良,袁太平,等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131.
HUANG X H, PANG G L, YUAN T P, et al. Review of engineering and equipment technologies for deep-sea cage aquaculture in China [J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 121-131.
- [3] 石建高,余雯雯,赵奎,等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(3): 472-485.
SHI J G, YU W W, ZHAO K, et al. Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(3): 472-485.
- [4] 张丽婷,张莹,徐栋,等. 空化水射流技术在海洋污损生物清除领域的应用研究[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(8): 70-72.
ZHANG L T, ZHANG Y, XU D, et al. Application of cavitation water jet in the fields of marine fouling organisms removal [J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(8): 70-72.
- [5] CONN A F, JOHNSON JR V E. The fluid dynamics of submerged cavitating jet cutting [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Jet Cutting Technology. 1980.
- [6] VIDVANS A N, MELKOTE S N, SANDERS D G. Enhancing cavitation intensity in co-flow water cavitation peening with organ pipe nozzles [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(7): 071010.
- [7] LIAO H L, ZHAO S L, CAO Y F, et al. Erosion characteristics and mechanism of the self-resonating cavitating jet impacting aluminum specimens under the confining pressure conditions [J]. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(2): 375-384.
- [8] 戚美,王立夫,赵见龙,等. 双腔室自激振荡脉冲喷嘴空化射流外部流场的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(4): 515-521.
QI M, WANG L F, ZHAO J L, et al. Numerical simulation of external flow field self-excited oscillating pulsed cavitation jet of dual chamber nozzle [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(4): 515-521.
- [9] 于海涛,徐艳,刘海水,等. 双腔室自振脉冲喷嘴空化射流数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(4): 585-591.
YU H T, XU Y, LIU H S, et al. Study on numerical simulation of cavitation jet flow for two-chamber self-vibrating pulse nozzles [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(4): 585-591.
- [10] 袁太平,胡昱,王绍敏,等. 养殖网箱网衣清洗设备喷嘴的设计及力学特性分析[J]. 渔业现代化, 2020, 47(2): 16-24.
YUAN T P, HU Y, WANG S M, et al. Design and mechanical characteristics analysis of nozzles for net cleaning equipment in aquaculture cage [J]. Fishery Modernization, 2020, 47(2): 16-24.
- [11] 涂翊翔,樊辰星,钱亦楠,等. 双空化射流中心体结构优化及破煤岩特性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3250-3259.
TU Y X, FAN C X, QIAN Y N, et al. Structure optimization of central-body in dual cavitating jet and the behavior of coal breaking under its impact [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3250-3259.
- [12] 蔡腾飞,潘岩,马飞,等. 喷嘴出口结构参数对风琴管射流空化作用的影响[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 150-156.
CAI T F, PAN Y, MA F, et al. Effects of outlet geometry of organ-pipe nozzle on cavitation due to impingement of the waterjet [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 150-156.
- [13] WU X Y, ZHANG Y Q, XU Z Q, et al. Structure optimization of the organ-pipe cavitating nozzle and its erosion ability test on hydrate-bearing sediments [J]. Petroleum Science, 2023, 20(2): 1104-1118.
- [14] SHI H Q, KANG Y, LI D, et al. Effects of the exit aspect ratio of organ-pipe nozzle on the axial pressure oscillation characteristics of self-resonating waterjet [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(23): 4589-4598.
- [15] LIU B S, GAO Y, MA F. Aggressive ability improvement

- of self-resonating cavitating jets with double-hole nozzle [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 214: 110476.
- [16] OSMAN H, SEDRAK M, HOSSEINI S H, et al. A comprehensive study of hole-to-hole interaction for multi-hole orifice (MHO) in hydrodynamic cavitation process [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022, 85: 102163.
- [17] HAN X D, KANG Y, LI D, et al. Effects of surface roughness on self-excited cavitating water jet intensity in the organ-pipe nozzle: Numerical simulations and experimental results [J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(27): 1950324.
- [18] SAUER J, SCHNNER G H. Unsteady cavitating flow-A new cavitation model based on a modified front capturing method and bubble dynamics [C]//Proceedings of FEDSM'00 2000 ASME Fluids Engineering Summer Conference. Boston: ASME, 2000.
- [19] 于海涛,徐艳,王佳祥,等. 基于CFD的风琴管喷嘴结构优化[J]. *化工机械*, 2021, 48(6): 883-887, 938.
- YU H T, XU Y, WANG J X, et al. Optimization of organ pipe nozzle structure based on CFD [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2021, 48(6): 883-887, 938.
- [20] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006.
- XUE S X. High pressure waterjet technology & Engineering [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2006.

Numerical simulation of inner wall-central body cavitation nozzle for net cleaning

WANG Bin¹, SHEN Ying¹, XU Jingxiang¹, ZHU Feng², XU Fan¹

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. ZF Friedrichshafen AG, Shanghai 201600)

Abstract: In order to improve the ability of cavitation water jet to clean the surface of the net, an Inner wall-Central body cavitation nozzle is designed. The numerical method of cavitation nozzle cavitation flow CFD was used to compare and analyze the simulation and theoretical solution, and the reliability of the two-dimensional axisymmetric cavitation flow numerical model based on the two-equation turbulence model was verified. The numerical calculation of the cavitation flow of the Inner wall-Central body cavitation nozzle in the environment of submerged water jet was carried out, and the influence of the Inner wall cavitator and the Central body on the cavitation effect of the nozzle was obtained, and the influence of water depth on the cavitation effect was calculated and discussed. The results show that: The water jet passes through the nozzle throat, creating cavitations on the surface of the Inner wall cavitator and the Central body, respectively; The Central body cavitation effect is better than that of the Inner wall cavitation, but the effect on jet blockage is stronger; The Inner wall cavitator increases the nozzle throat pressure and further improves the cavitation effect of the Central body; Both the Inner wall cavitator and the Center body can reduce the sensitivity of the nozzle cavitation effect to water depth. This study provides a basis for the research of cavitation flow dynamics mechanism for nozzle design of net cleaning in aquaculture cages, and provides design ideas with low cost and high efficiency.

Key words: cavitation flow; net cleaning; numerical simulation; organ pipe nozzle; central body nozzle