

基于 OpenFOAM 的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟

杜先荣¹, 尹建勇¹, 张永学^{2,3}, 田磊^{2,3}, 马明凯¹

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249;
3. 中国石油大学(北京)过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249)

摘要: 基于 OpenFOAM 平台, 采用汽液两相可压缩空化泡动力学模型对缺陷壁面附近空化泡的动力学行为进行了深入研究。结果表明: 缺陷深度及缺陷形状显著影响了空化泡的动力学特性; 相比于矩形缺陷, 楔形缺陷更容易导致空化泡溃灭时能量集中, 从而形成更为强烈的溃灭, 造成更大的壁面压力峰值; 随着缺陷深度的增加, 空化泡第一次溃灭所造成的壁面压力峰值出现先减小后几乎不变的情况, 空化泡第二次溃灭所造成的压力峰值一直在减小。

关键词: 空化泡; 缺陷壁面; 压力峰值; 数值模拟; OpenFOAM

中图分类号: O351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)01-0039-08

Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM//DU Xianrong¹, YIN Jianyong¹, ZHANG Yongxue^{2,3}, TIAN Lei^{2,3}, MA Mingkai¹ (1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 3. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on OpenFOAM, the dynamic behavior of the cavitation bubble near the defective wall surface was investigated using a compressible cavitation bubble dynamics model for two-phase flow. The results demonstrate that the depth and shape of defects significantly affect the dynamics of the cavitation bubble. Compared with rectangular defects, wedge-shaped defects are more likely to concentrate energy when the cavitation bubble collapses, which results in more intense collapse and higher peak wall pressure. With the increase in defect depth, the peak wall pressure caused by the first collapse of the cavitation bubble initially decreases and then remains almost unchanged, while the pressure peak caused by the second collapse of the cavitation bubble continues to decrease.

Key words: cavitation bubble; defective wall surface; pressure peak; numerical simulation; OpenFOAM

空化是指液体在流动过程中, 当流体内局部压力低于当地饱和蒸汽压时, 液相发生汽化, 进而与液体中已存在的空化核一起形成成群空穴, 并随着液体流动历经多次成核、膨胀、溃灭和反弹的过程。一般认为, 空化泡群在流经高压区域时会发生剧烈溃灭, 其溃灭时形成的高速射流及所发射的冲击波会对水力机械过流部件表面产生强烈的冲击^[1]。在长时间运行的水力机械设备中(如水轮机^[2]、水泵^[3-4]、螺旋桨^[5]及阀门^[6]等), 空化泡溃灭带来的冲击效应引发量到质的转变进而造成对过流部件的

严重损坏。

为了探究空化泡对过流部件表面破坏的微观机理, 众多学者对其进行了相关研究。例如: Lauterborn 等^[7]发现由于刚性壁面的存在, 空化泡溃灭所发射的压力波在壁面上存在反射, 这一现象对射流的形成有直接影响, 而且显著改变了空化泡溃灭的动力学过程; 罗晶等^[8]基于高压直流-单脉冲放电系统诱发空化泡试验研究了刚性壁面附近的空化泡动力学特性, 发现当空化泡离刚性壁面的距离与空化泡的最大半径相差不大时, 在电极中心至壁

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179094); 贵州省省级科技计划项目(ZK[2023]一般069); 贵州大学自然科学专项(特岗)科研基金项目([2022]14号)

作者简介: 杜先荣(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事空化泡数值模拟研究。E-mail: xianrongdu@foxmail.com

通信作者: 尹建勇(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事空化与空蚀机理研究。E-mail: jyyin@gzu.edu.cn

面法线上形成垂直于壁面向电极方向的射流,在其两侧形成两股远离壁面的射流; Yin 等^[9]对刚性固体壁面附近空化泡的反弹动力学行为进行了试验和数值模拟研究,将空化泡到壁面距离对压力峰值的影响分为4个区间; Tong 等^[10]对刚性壁面附近空化泡引起的壁面压力冲量进行了全面研究,认为空化泡溃灭产生的压力峰值虽小于空化泡膨胀产生的冲击波峰值,但由于持续时间长,其所引起的压力冲量是初始冲击波所引起的7倍; Zhang 等^[11]调查了刚性壁面和弹性壁面之间空化泡溃灭的动力学行为,发现空化泡在靠近刚性壁面时呈锥状溃灭,在靠近弹性壁面时呈蘑菇状溃灭; Wang 等^[12]对刚性壁面附近的空化泡和无限域中空化泡的非线性脉动进行了比较,发现空化泡远离刚性壁面时,壁面对空化泡非线性脉动的增强作用减弱。Yang 等^[13]采用格子玻尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM)研究了壁面温度对空化泡演变的影响,发现当壁面温度大于0℃时,近壁面液体被均匀加热形成热边界层,空化泡溃灭引起壁面中心温度升高,而冷却壁会导致过冷液体的形成,在空化泡的正下方形成一个低温区,第一次溃灭时在冷却壁上形成一个高压区; 冉彬君等^[14]同样采用LBM的热流耦合模型对近壁区空化泡的生长与溃灭过程进行了模拟研究,结果表明,当特征距离小于1.6时,空化泡膨胀阶段受壁面的影响呈现非球形变化,其最大半径与特征距离之间存在幂函数关系; 袁浩等^[15]引入动态接触角模型,发现壁面润湿性与黏滞系数对微射流的体积和流速分布具有一定影响,对于润湿性壁面,黏滞系数增大会导致溃灭强度减小,但对于非润湿性壁面,溃灭强度则呈现先减小后增大的趋势; Cui 等^[16]对曲面边界附近的空化泡动力学行为进行了试验和数值研究,发现空化泡的动力学特性与曲面的曲率大小息息相关,随着曲率的增大,射流冲击点更靠近壁面,但空化泡体积压缩程度有所减弱,空化泡周期变长,射流速度随空化泡与曲面之间距离的增大呈近似线性减小; Kou 等^[17]研究了不同种类壁面(刚性壁面和软壁面)附近空化泡的平移机制,结果发现空化泡始终靠近刚性壁面,而远离软壁面; Tzanakis 等^[18]基于高精度的三维光学干涉仪技术观察了空化泡溃灭时在钢试件表面上形成的点坑,认为空化泡溃灭时的微射流是形成蚀坑的主要原因,他们通过逆向工程方法量化了空化泡溃灭时所产生的冲击压力和对应的射流速度; 叶林征等^[19]基于流体力学和冲击动力学,建立了近壁区空化泡溃灭微射流冲击壁面流固耦合三维模型,结果显示微射流冲击下壁面表面出现微型坑蚀,凹坑深度主要由微射流速

度和微射流直径共同决定,且随其增大而增大,他们通过反演方法展示了在16~18的径深比下的微射流冲击强度和对应的微射流速度; 张啸等^[20]基于耦合欧拉-拉格朗日(coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)方法对空化泡与破损边界的相互作用机理进行了研究,结果显示破口附近空化泡运动朝向破口甚至穿过破口呈现尖嘴状的“凸进”现象。

综上所述,目前对壁面附近空化泡的动力学研究主要集中于平直的刚性壁面和曲壁面,然而在实际工程中,因为长期运行液流壁面很容易出现各种缺陷,如水轮机转轮叶片的点蚀、小裂纹、焊缝、表面粗糙度变大及水工溢流大坝因为钢筋凸出或者局部出现塌陷坑等的不平整表面。当空化泡出现在有缺陷或凹坑的壁面附近时,其凹陷结构将会导致空化泡的动力学特性发生显著变化。张钰鹏等^[21]对垂直凹壁面对称位置上的空化泡动力学行为进行了研究,发现空化泡在溃灭阶段会产生主射流和斜射流,且两股射流对壁面的压力大小与空化泡到壁面的距离成反比。Trummler 等^[22]研究了凹壁面对空化泡在第一周期内的动力学行为影响,发现凹壁面的存在促使波反射及波相互叠加的现象,导致凹壁面处出现多个压力峰值。Andrews 等^[23]进一步研究了凹槽宽度以及凹槽与空化泡的水平位置关系等因素对空化泡动力学特性的影响,发现随着空化泡远离凹槽,最大射流角趋于零且空化泡的位置是影响最大射流角度的主要因素。曾卿丰^[24]对不同凹槽结构下的空化泡动力学行为开展了研究,重点分析了空化泡形态演变、射流行为以及空化泡的迁移特性。

已有的缺陷壁面附近的空化泡动力学特性的研究多是关注空化泡形态演变以及空化泡在第一周期内的动力学行为。然而,试验结果表明空化泡在反弹阶段再次溃灭时对结构表面造成的损伤与第一次溃灭相当甚至更为严重^[25]。因此,本文拟基于已开发的考虑热力学效应和相变传质作用的空化泡动力学模型^[9]对缺陷壁面附近的空化泡多周期动力学特性开展深入研究,并通过压力这一参数来评估空化泡多周期演变过程中对壁面潜在的损伤程度。

1 数值模型

采用已建立的汽液两相空化泡动力学数值模型^[9]模拟缺陷壁面附近的空化泡动力学特性,其动力学模型包含连续性方程、动量方程和能量方程^[26]。另外,模型还考虑了汽液两相之间的相变传质现象,各相的质量方程均需考虑存在相间质量交换情况。考虑质量交换后的各相连续性方程如下:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \square \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{U}) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\partial t} + \square \cdot (\alpha_s \rho_s \mathbf{U}) = -\dot{m} \quad (2)$$

其中 $\dot{m} = \dot{m}^+ - \dot{m}^-$
 式中: α_f, ρ_f 分别为液体体积分数和密度; α_s, ρ_s 分别为汽体体积分数和密度; t 为时间; \mathbf{U} 为速度矢量; \dot{m} 为质量交换率^[27]; \dot{m}^+ 为汽相冷凝速率; \dot{m}^- 为液相蒸发速率。

2 模型验证及设定

2.1 物理模型

图 1(a) 和 1(b) 分别为矩形和楔形缺陷壁面附近的空化泡示意图, 其中 h 为缺陷深度, 为了便于描述, 使用空化泡最大半径 R_{\max} 对其进行无量纲化得到特征深度:

$$\gamma = h/R_{\max} \quad (3)$$

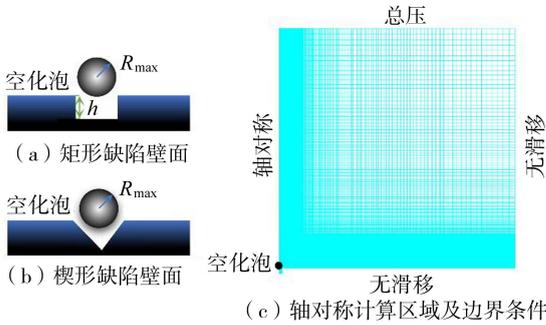


图 1 缺陷壁面附近空化泡示意图及计算区域网格

如图 1(c) 所示, 此次缺陷壁面附近空化泡的模拟采用轴对称计算区域, 其大小范围为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 缺陷深度和宽度分别为 1.14 mm 和 1.20 mm , 并对空化泡发生剧烈演变的区域及缺陷部分进行网格均匀加密。计算域的底部、缺陷及右侧均采用无滑移边界条件, 顶部为总压边界条件。空化泡初始半径为 $10 \mu\text{m}$, 泡内初始温度为 2298 K , 初始压力为 1180 MPa ; 泡外环境温度为 293.15 K , 环境压力为 0.1 MPa 。采用五套均匀加密区域内网格单元大小不同的网格进行网格无关性验证, 结果发现, 当加密区域内的网格大小为 $3.3 \mu\text{m}$ 时(总网格数为 1183741), 其模拟的结果满足要求, 有关网格无关性的内容见文献[9]。

2.2 模型验证

为了验证本文数值模型的准确性, 图 2 定性展示了缺陷壁面附近空化泡试验图像^[24]与当前数值模拟结果的逐帧对比, 试验图像和数据模拟图像中各小图对应的 t/t_c 依次为 $0.027, 0.135, 0.459, 0.784, 0.892, 1.000, 1.108, 1.432, 1.649, 2.081$, 其

中 t_c 为空化泡第一次溃灭的时间。在第一周期的膨胀阶段, 空化泡近似呈球形向外膨胀, 膨胀至最大半径后, 进入溃灭阶段, 空化泡溃灭至最小半径; 随后进入反弹阶段, 由于受缺陷壁面的影响, 空化泡逐渐朝向底部运动并接触底部壁面。图 2 中无论是试验还是模拟结果都展示了空化泡具有相同的运动趋势, 即空化泡自上而下, 朝向缺陷底部运动的情形。 t/t_c 为 0.892 时出现差异, 主要是由于数值模拟与试验之间存在时间上的微小差异, 但总体模拟结果与试验保持一致。

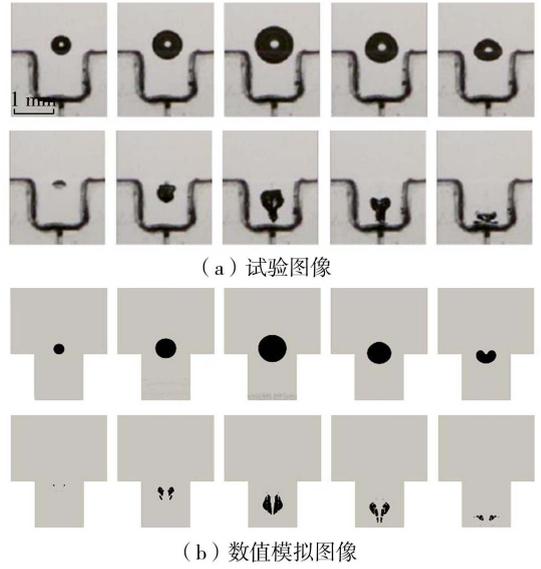


图 2 缺陷壁面附近空化泡试验^[24]与数值模拟对比

图 3 定量展示了空化泡试验的半径与数值模拟数据对比。由于矩形缺陷壁面试验并未提供空化泡半径的数据, 当前所获得的试验半径是基于试验图像利用 ImageJ 软件多次提取空化泡的轮廓, 获得面积后再通过 $S = 4\pi R^2$ 公式换算出空化泡的近似当量半径, 其中 S 为空化泡面积, R 为当量半径。图中试验半径误差主要来源于提取空化泡轮廓过程中出现的误差, 对于非球形形状的空化泡其提取误差较大, 球形形状的空化泡误差较小。从上述对比可以看出模拟结果在定性和定量上均与试验结果吻合, 表明本文中数值模型具有可靠性和准确性。

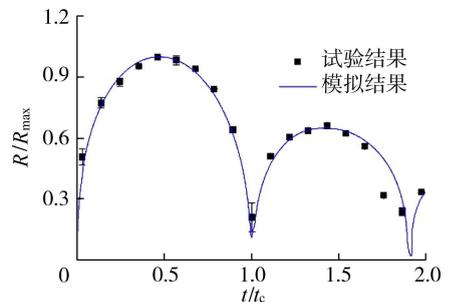


图 3 矩形缺陷壁面试验^[24]与模拟半径的对比

3 结果与分析

为了便于比较,本文将时间 t 用 t_s 进行无量纲化^[28], t_s 定义如下:

$$t_s = 2 \times 0.915R_{\max} \sqrt{\rho_l / \Delta p} \quad (4)$$

其中 $\Delta p = p_{\infty} - p_v$
式中: p_{∞} 为环境流体压力; p_v 为水的饱和蒸汽压力。

3.1 较大特征深度下空化泡的演变规律

图4为 $\gamma = 3.25$ 时空化泡在多周期演变过程中的压力(p)及速度(u)场,左侧为速度场,右侧为压力场,白色实线表示两相界面。 $t/t_s = 0.018$ 时由于泡内初始高压空化泡近似呈球形向外膨胀,在该过程中发射膨胀冲击波,冲击波逐渐向外传播,并冲击到缺陷底面进而在缺陷底部形成高压区; $t/t_s = 0.632$ 时空化泡膨胀到最大半径,此时泡内压力远小于泡外压力; $t/t_s = 1.344$ 时空化泡溃灭至最小体积并朝向缺陷底部运动; $t/t_s = 1.880$ 时空化泡第一次反弹期间空化泡下表面由于受液体射流的影响出现明显的凸起部分并逐渐向底部运动; $t/t_s = 2.534$ 时空化泡发生第二次溃灭,此时溃灭发生在缺陷底部附近。 $t/t_s = 3.421$ 时空化泡发生第三次溃灭,此时空化泡紧贴壁面溃灭。

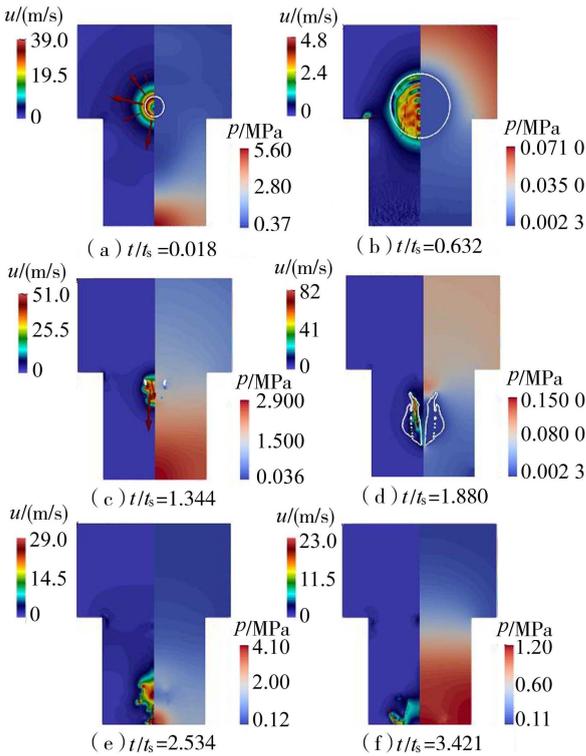


图4 $\gamma = 3.25$ 时空化泡在多周期演变过程中的压力及速度场

图5为 $\gamma = 3.25$ 时空化泡半径、泡内最大温度(T)以及缺陷底部壁面中心压力随时间的变化。当空化泡膨胀至最大半径时,泡内速度几乎为

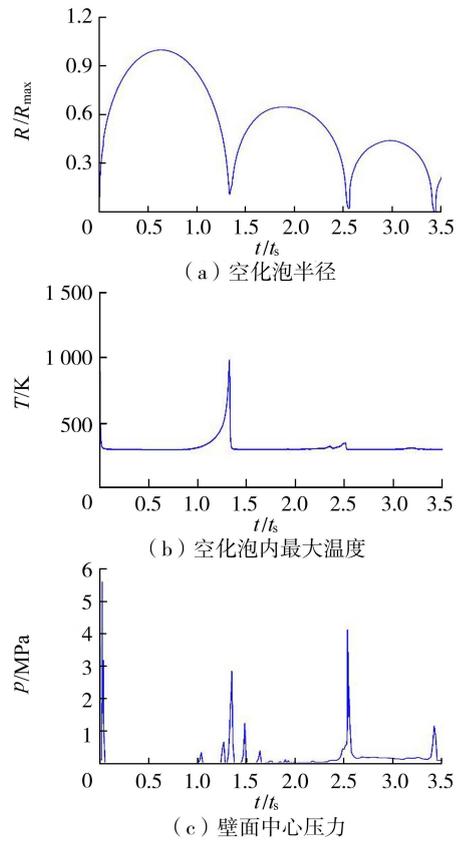


图5 $\gamma = 3.25$ 时空化泡半径、泡内最大温度及壁面中心压力随时间的变化

零,泡与周围流体的温差达到平衡状态。此时,空化泡初始能量可由泡最大半径时的势能粗略计算获得^[29],即 $E = 4\pi R_{\max}^3 \Delta p / 3$,表明空化泡最大半径的减少对应空化泡能量的损失。从图5(a)可知,空化泡在第二周期的最大半径仅为第一周期的64.7%,意味着空化泡在第一周期释放了72.9%的初始能量,即仅有27.1%的能量进入空化泡的第二周期。另外,空化泡在第三周期的最大反弹半径为最大半径的44%,意味着仅有8.5%的初始能量进入此阶段。从图5(b)可知,温度出现两次峰值,分别对应空化泡的第一次溃灭(988.0 K)以及第二次溃灭(353.0 K),但第二次峰值较小,并不明显。这是由于空化泡距离缺陷底部较远,受缺陷底部的影响较小,空化泡在第一周期溃灭时已损耗大部分能量,从而进入第二周期的能量较小,最终造成空化泡第二次溃灭时泡内温度变化不明显。从图5(c)可知,整个空化泡演变过程中缺陷底部壁面中心处出现了4个明显的压力峰值点,前两个峰值分别由空化泡的初始膨胀冲击波及第一次溃灭所发射的溃灭冲击波冲击壁面而形成。第三个峰值点对应空化泡的第二周期溃灭,其值高于第一次溃灭,主要是因为空化泡在第一周期溃灭时距离缺陷底部较远($\gamma = 3.25$),其底部的压力峰值由第一次溃灭冲击波向外传播穿过较厚水层后撞击底部壁面形成;而随着空化泡不断

向底部运动,第二次溃灭时部分空化泡已紧贴壁面溃灭,其溃灭后所形成的冲击波直接作用于壁面,从而造成更大的冲击

3.2 较小特征深度下空化泡的演变规律

图6为 $\gamma=1.31$ 时空化泡在多周期演变过程中的压力及速度场。如图6所示,当 $\gamma=1.31$ 时,空化泡同样在多周期演变过程中形成射流并撞击壁面。不同于 $\gamma=3.25$ 时的情况是空化泡距离缺陷底面较近,受壁面的影响较为强烈,因而其第一次膨胀到最大体积及溃灭至最小半径的时间均有所提前。随后,空化泡紧贴于壁面反弹并多次溃灭。

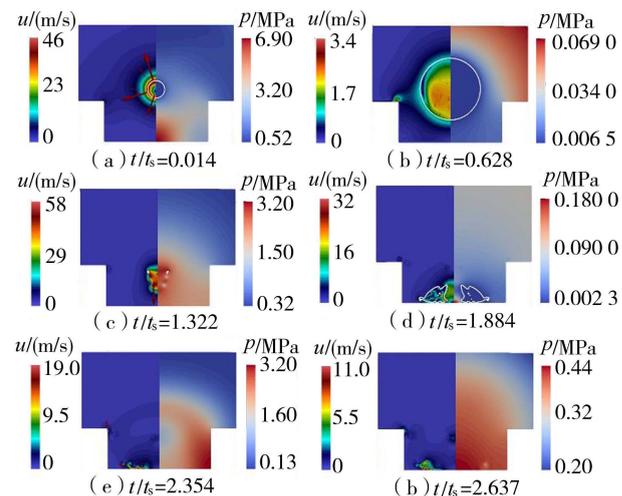


图6 $\gamma=1.31$ 时空化泡多周期演变过程中的压力及速度场

图7为 $\gamma=1.31$ 时空化泡半径、泡内最大温度以及缺陷底部壁面中心处的压力随时间的变化。从图7可以看出,空化泡在第二周期的最大反弹半径为空化泡最大半径的64.4%,意味着有26.7%的初始能量进入第二周期。通过对比不同特征深度($\gamma=3.25, 1.31$)下空化泡的多周期演变过程,发现二者具有一定的相似性,但缺陷深度较小的空化泡演变周期要提前些且在第二次溃灭时所形成的压力峰值更大。

3.3 矩形缺陷不同特征深度下空化泡的演变规律

图8为矩形缺陷不同特征深度下缺陷底部壁面中心处压力峰值的变化情况。从图8可以看出,空化泡在溃灭过程中对缺陷壁面造成的压力峰值随着 γ 的增加而减小。具体而言,按照压力峰值的来源不同可以分为两个阶段。如图8的云图所示,当 $\gamma < 1.0$ 时,空化泡紧贴缺陷底面溃灭,其压力峰值主要由液体射流撞击底面而形成;当 $\gamma > 1.0$ 时,空化泡溃灭时仍然远离缺陷底面,其底面压力峰值主要由溃灭冲击波冲击形成。图9展示了不同 γ 下空化泡在前两个周期溃灭所耗散的能量占比。当 $\gamma < 1.0$ 时,空化泡膨胀期间空化泡下表面由于受缺陷底部的挤压而变得平坦,且随着 γ 的减小,挤压作用越明

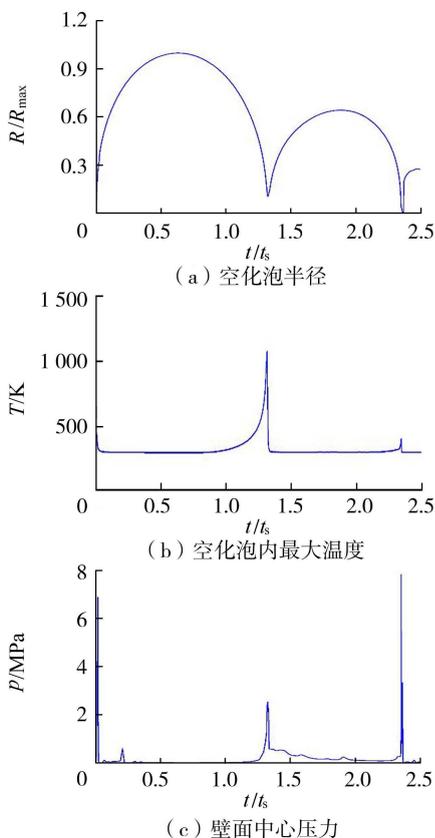


图7 $\gamma=1.31$ 时空化泡半径、泡内最大温度及壁面中心压力随时间的变化

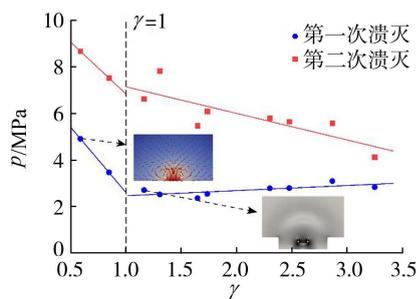


图8 不同特征深度下缺陷壁面中心处压力峰值变化情况

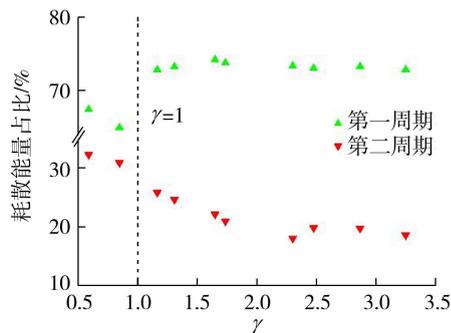


图9 不同 γ 下空化泡在前两个周期溃灭所耗散的能量占比(最大半径呈非球形形状越显著);溃灭期间空化泡下表面和缺陷底部之间会存在薄薄的水层,水层厚度随着 γ 的减小而减小直至消失,导致液体射流直接作用于缺陷底部,造成空化泡溃灭更为剧烈^[29]。因此,此阶段内空化泡在前两个周期中所耗

散的能量随着 γ 的增加而减少,所对应的壁面压力峰值也在降低(如图 8 所示)。当 $\gamma > 1.0$ 时,由于空化泡距离缺陷底部较远,空化泡第一次膨胀期间几乎不受底部壁面的影响(最大半径呈球形形状),第一次溃灭时也几乎不受壁面的影响。因此,空化泡在第一周期溃灭过程中所耗散的能量变化不大,所对应的壁面压力峰值变化也不大。然而,此阶段内空化泡在第二周期演变过程中存在紧贴缺陷底部壁面溃灭的现象(如图 6 所示),导致空化泡二次溃灭更为剧烈。此外,随着 γ 的增加,空化泡距离底部越远,二次溃灭也将紧贴底部到远离底部溃灭。因此,空化泡在第二周期溃灭过程中所耗散的能量随着 γ 的增加而减少,对应的压力峰值也在降低。

3.4 矩形缺陷和楔形缺陷下空化泡演变过程比较

为了研究不同缺陷形状对空化泡演变规律的影响,图 10 为 $\gamma = 2.87$ 时矩形缺陷和楔形缺陷(示意图如图 1(a)和 1(b)所示)下空化泡半径、泡内最大温度及壁面中心压力随时间的变化情况,图 11 为相应的压力及速度场。从图 10 可以看出,楔形缺陷下的空化泡多周期反弹半径均要小于矩形缺陷下的半径,对应着更少的空化泡初始能量进入楔形缺陷下空化泡的反弹阶段,也意味着更多的能量已耗散在空化泡的溃灭过程中和转换为液体动能或所发射的

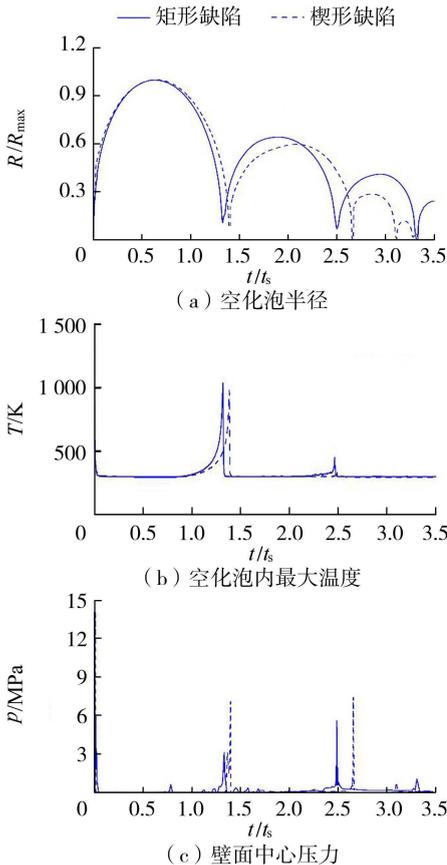


图 10 $\gamma = 2.87$ 时矩形缺陷与楔形缺陷下空化泡半径、泡内最大温度及壁面中心压力随时间的变化

溃灭冲击波能。最终,楔形缺陷内空化泡溃灭所引起的压力峰值明显高于矩形缺陷内空化泡溃灭所引起的压力峰值。这表明楔形侧边的刚性壁面对空化泡演变存在较大影响,空化泡溃灭时向四周发射溃灭冲击波,经过侧面刚性壁面的反射,导致楔形底部中心受到更大的冲击压力,且由于楔形侧面刚性壁面的影响,空化泡溃灭成两个小空化泡后分别向左右两侧壁面靠近(如图 11(b)所示)。此外,正如图 10 所示(半径、压力峰值),楔形缺陷下空化泡的演变也要滞后些。

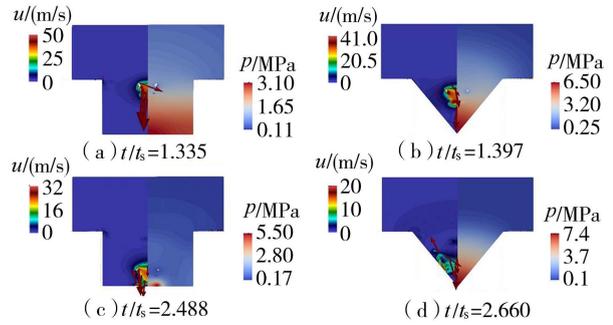


图 11 $\gamma = 2.87$ 时矩形缺陷与楔形缺陷下空化泡多周期演变过程中的压力及速度场

4 结论

a. 空化泡多周期演变过程中始终朝向缺陷底面运动。对于楔形缺陷而言,空化泡在朝向楔形缺陷运动的过程中会分裂为两个子空化泡,分别朝向楔形两侧壁面运动。

b. 当 $\gamma < 1.0$ 时,空化泡膨胀期间空化泡下表面由于受缺陷底部的挤压而变得平坦,且随着 γ 的减小,挤压作用越明显;空化泡在前两个周期中所耗散的能量随着 γ 的增加而减少,其所对应的壁面压力峰值也在减小;当 $\gamma > 1.0$ 时,由于空化泡距离缺陷底部较远,空化泡第一次膨胀期间几乎不受底部壁面的影响,第一次溃灭时也几乎不受壁面的影响。空化泡在第二周期溃灭过程中所耗散的能量随着 γ 的增加而减少,相对应的压力峰值也在降低。

c. 相比于矩形缺陷,楔形缺陷附近的空化泡溃灭时向四周所发射溃灭冲击波,经过楔形侧面刚性壁面的反射,导致楔形底部中心受到更大的冲击压力,更易导致空化泡溃灭能量集中,形成更为强烈的溃灭,造成更大的压力峰值,然而其演变时间要相对滞后些。

参考文献:

[1] 李欣. 水轮机的空化与空蚀[J]. 科技创新与应用, 2016 (14): 109. (LI Xin. Cavitation and air cavity in hydroelectric turbines [J]. Technology Innovation and

- Application, 2016(14):109. (in Chinese))
- [2] 王煜, 翟振男, 姜德政. 影响轴流转桨式水轮机过鱼能力的关键运行参数[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 56-62. (WANG Yu, ZHAI Zhenan, JIANG Dezheng. Key operation parameters affecting fish passing capability in Kaplan turbines[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 56-62. (in Chinese))
- [3] 曹卫东, 张骞, 徐玉敏. 高速潜水轴流泵大流量工况的空化特性[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 55-61. (CAO Weidong, ZHANG Qian, XU Yumin. Cavitation characteristics of high-speed submersible axial-flow pump in high flow condition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 55-61. (in Chinese))
- [4] 汪宝罗, 张弋扬, 苏胜利, 等. 斜轴变桨轴流泵空化特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 33-38. (WANG Baoluo, ZHANG Yiyang, SU Shengli, et al. Experiments on cavitation characteristics of an inclined shaft variable propeller axial flow pump[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 33-38. (in Chinese))
- [5] 林鹏, 胡东, 吕云杰, 等. 含沙空化对轴流泵内流动特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 21-26. (LIN Peng, HU Dong, LYU Yunjie, et al. Effect of cavitation on flow characteristics in axial-flow pump under sand conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 21-26. (in Chinese))
- [6] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 高水头船闸阀门段体型优化三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 10-13. (YANG Zhongchao, YANG Bin, CHEN Mingdong, et al. Three-dimensional numerical simulation of figure optimization of valves of high head locks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 10-13. (in Chinese))
- [7] LAUTERBORN W, KURZ T. Physics of bubble oscillations[J]. Reports on Progress in Physics, 2010, 73(10): 106501.
- [8] 罗晶, 程飞, 牛志攀, 等. 近壁面电火花空泡运动特性的高速摄影研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊2): 71-76. (LUO Jing, CHENG Fei, NIU Zhipan, et al. Experimental study on the movement characteristics of spark-induced cavitation bubble with a wall by high-speed photography [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(Sup2): 71-76. (in Chinese))
- [9] YIN Jianyong, ZHANG Yongxue, ZHU Jianjun, et al. An experimental and numerical study on the dynamical behaviors of the rebound cavitation bubble near the solid wall[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121525.
- [10] TONG Shiyu, ZHANG Shuai, WANG Shiping, et al. Characteristics of the bubble-induced pressure, force, and impulse on a rigid wall [J]. Ocean Engineering, 2022, 255: 111484.
- [11] ZHANG Chao, YIN Zhaoqin, TU Chengxu, et al. Dynamic behavior of the cavitation bubbles collapsing between a rigid wall and an elastic wall[J]. AIP Advances, 2021, 11(6): 065025.
- [12] WANG Xun, CHEN Weizhong, ZHOU Min, et al. Influence of rigid wall on the nonlinear pulsation of nearby bubble [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 87: 106034.
- [13] YANG Yu, SHAN Minglei, SU Nana, et al. Role of wall temperature on cavitation bubble collapse near a wall investigated using thermal lattice Boltzmann method[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 134: 105988.
- [14] 冉彬君, 汪磊, 袁浩, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的近壁区空化泡生长溃灭过程模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 32-37. (RAN Binjun, WANG Lei, YUAN Hao, et al. Simulation of growth and collapse processes of near-wall cavitation bubbles with lattice Boltzmann method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 32-37. (in Chinese))
- [15] 袁浩, 詹蝶, 宋翔, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的附壁型空化泡演化模拟[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 7-13. (YUAN Hao, ZHAN Die, SONG Xiang, et al. Simulation on evolution of an attached-wall cavitation bubble based on lattice Boltzmann method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 7-13. (in Chinese))
- [16] CUI Ruiman, LI Shuai, WANG Shiping, et al. Pulsating bubbles dynamics near a concave surface [J]. Ocean Engineering, 2022, 250: 110989.
- [17] KOU Shaoyang, CHEN Weizhong, WU Yaorong, et al. Translation of cavitation bubble near the different walls [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106352.
- [18] TZANAKIS I, ESKIN D G, GEORGOULAS A, et al. Incubation pit analysis and calculation of the hydrodynamic impact pressure from the implosion of an acoustic cavitation bubble[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(2): 866-878.
- [19] 叶林征, 祝锡晶, 王建青. 近壁声空泡溃灭微射流冲击流固耦合模型及蚀坑反演分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 062201. (YE Linzheng, ZHU Xijing, WANG Jianqing. Fluid-solid coupling model of micro-jet impact from acoustic cavitation bubble collapses near a wall and pit inversion analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 062201. (in Chinese))
- [20] 张啸, 崔杰, 李明远, 等. 基于 CEL 法的破损边界附近气泡动力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(1): 99-106. (ZHANG Xiao, CUI Jie, LI Mingyuan, et al.

- Dynamic characteristics of bubbles near damaged boundary based on CEL method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(1):99-106. (in Chinese))
- [21] 张钰鹏,徐倩倩,余志伟,等.垂直凹壁面对称位置的空泡动力学模拟研究[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(8):61-68. (ZHANG Yupeng, XU Qianqian, YU Zhiwei, et al. Numerical study on dynamic behaviors of cavitation bubbles in symmetrical position near right-angled concave walls[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(8):61-68. (in Chinese))
- [22] TRUMMLER T, BRYNGELSON S H, SCHMIDMAYER K, et al. Near-surface dynamics of a gas bubble collapsing above a crevice [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 899:A16.
- [23] ANDREWS E D, RIVAS D F, PETERS I R. Cavity collapse near slot geometries [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 901:A29.
- [24] 曾卿丰. 近凹陷空化泡动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [25] SUPPONEN O, OBRESCHKOW D, FARHAT M. Rebounds of deformed cavitation bubbles [J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(10):103604.
- [26] KOCH M, LECHNER C, REUTER F, et al. Numerical modeling of laser generated cavitation bubbles with the finite volume and volume of fluid method, using OpenFOAM [J]. *Computers & Fluids*, 2016, 126:71-90.
- [27] ZHU Jiakai, CHEN Yao, ZHAO Dongfang, et al. Extension of the Schnerr-Sauer model for cryogenic cavitation [J]. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 2015, 52: 1-10.
- [28] RAYLEIGH L O M F R S. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. *Philosophical Magazine*, 1917, 34(200):94-98.
- [29] 尹建勇. 水力空化泡动力学模型及数值求解 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. (收稿日期: 2023-12-08 编辑: 俞云利)

(上接第9页)

- [57] 王泽雨,李建章. 基于遥感与 GIS 的江西省洪涝灾害评估研究 [J]. *时空信息学报*, 2023, 30(4):595-604. (WANG Zeyu, LI Jianzhang. Flood disaster assessment in Jiangxi Province based on remote sensing and GIS [J]. *Journal of Spatio-Temporal Information*, 2023, 30(4):595-604. (in Chinese))
- [58] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [59] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望 [J]. *水利学报*, 2021, 52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4):381-392. (in Chinese))
- [60] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估 [J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(6):6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(6):6-12. (in Chinese))
- [61] DARKWAH G K, KALYANAPU A, OWUSU C. Machine learning-based flood forecasting system for Window Cliffs State Natural Area, Tennessee [J]. *GeoHazards*, 2024, 5(1):64-90.
- [62] COELHO G D A, FERREIRA C M, KINTER J L. Multiscale and multi event evaluation of short-range real-time flood forecasting in large metropolitan areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612:128212.
- [63] 李文波,郭啸天,毛雪岷,等. 基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态评估 [J]. *灾害学*, 2015, 30(3):80-87. (LI Wenbo, GUO Xiaotian, MIAO Xuemin, et al. The dynamic population risk assessment model for rainstorm-flood utilization multi-agent [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(3):80-87. (in Chinese))
- [64] 朱净萱,戴强,蔡俊逸,等. 基于多智能体的城市洪涝灾害动态脆弱性计算模型构建 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(10):1787-1797. (ZHU Jingxuan, DAI Qiang, CAI Junyi, et al. An agent-based computing model of urban vulnerability to flood hazard [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(10):1787-1797. (in Chinese))
- [65] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(4):36-47. (in Chinese)) (收稿日期: 2024-06-13 编辑: 俞云利)