

不同尺度下水力诱发空泡溃灭特性研究进展

葛杰¹,徐伟²,王秀礼³,郭文卓³,赵媛媛⁴

(1. 新界泵业(浙江)有限公司; 2. 江苏大学能源与动力工程学院; 3. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心;
4. 江苏大学环境与安全工程学院)

摘要:从实验与数值模拟两个角度综述了水力诱发空泡溃灭特性的研究进展。实验方面,对比分析了电火花与激光两种主要水力诱发空泡方式的优缺点,并从自由域、近壁面、远壁面及空泡与颗粒相互作用4个方面阐述了空泡溃灭物理特性的研究进展;数值模拟方面,从宏观、介观、微观和多尺度4个方面综述了空泡数值模拟方法的发展,并重点探讨了空泡溃灭过程中空泡与壁面、颗粒、气泡之间的相互作用机理。指出未来水力诱发空泡研究可围绕同步观测技术的改进、压力测量技术的革新以及与人工智能、大数据等技术的深度融合等方向展开。

关键词:空泡溃灭;水力诱发;激光诱导;电火花诱导;多尺度;综述

Research progress on characteristics of hydrodynamic-induced cavitation bubble collapse at different scales//Ge Jie¹, Xu Wei², Wang Xiuli³, Guo Wenzhuo³, Zhao Yuanyuan⁴ (1. *Shimge Pump Industry (Zhejiang) Co., Ltd.*; 2. *School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University*; 3. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University*; 4. *School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University*)

Abstract: This paper reviews the research progress on the characteristics of hydrodynamic-induced cavitation bubble collapse from both experimental and numerical simulation perspectives. In terms of experimental approaches, the advantages and disadvantages of two main methods of hydrodynamically inducing bubbles, namely electric spark and laser, are compared and analyzed. The research progress on the physical characteristics of bubble collapse is elaborated from four aspects: free field, near-wall region, far-wall region, and the interaction between bubbles and particles. In terms of numerical simulation, the development of bubble numerical simulation methods is reviewed from macroscopic, mesoscopic, microscopic and multi-scale perspectives, with a focus on the interaction mechanisms between cavitation bubbles and walls, particles, and other bubbles during the collapse process. It is pointed out that future research on hydrodynamic-induced bubbles can be carried out in directions such as improving synchronous observation techniques, innovating pressure measurement technologies, and promoting deep integration with artificial intelligence and big data technologies.

Key words: cavitation bubble collapse; hydrodynamic induction; laser induction; electric spark induction; multiple scales; review

在水力机械等领域中,空化是一种特有且无法避免的现象^[1],空泡是产生空化现象的直观表现。在空泡溃灭过程中,内部能量的释放会引发高温和高压及微射流现象。这些极端物理特性可能对液压机和螺旋桨等流体机械设备产生破坏作用,从而导致压力脉动^[2]、振动^[3]、噪音^[4]、侵蚀和负载突变^[5]等问题。

为了有效利用空泡溃灭释放的能量,研究人员进行了广泛的探索^[6],如有机和无机化合物的合成和降解^[7]、电化学反应^[8]、药物或材料的清洁^[9],以及在特定环境下的射流切割和金属表面处理等,为

此,需研发可适配不同工程应用领域的解决方案,进而充分挖掘并发挥空泡溃灭所蕴含的技术潜力。

空泡的尺度可分为宏观^[10]、介观^[11]和微观^[12]3种,对应毫米(mm)、微米(μm)和纳米(nm)3种不同的半径单位,在这些不同的尺度下,空泡的演变规律存在一定的差异。总体而言,空泡体积小、演化周期短^[13],肉眼观测困难。本文综述了近年来空泡溃灭相关实验与数值模拟的研究进展,并对不同尺度空泡的研究现状进行了系统分析,对其未来发展趋势进行了展望,以期后续相关研究与工程应用提供理论参考。

基金项目:国家自然科学基金项目(52409116)

作者简介:葛杰(1986—),男,高级工程师,主要从事流体机械水力设计及结构优化研究。E-mail:gj@shimge.com

通信作者:赵媛媛(1987—),女,副教授,博士,主要从事多相流及多尺度瞬变流特性研究。E-mail:zywx1987@163.com

1 空泡实验技术进展

实验是推动人们对空泡认识的基本方法,研究人员早期通过仪器观察,采取激光或电火花等方法生成一个或几个控制良好的单个空泡,使用高速摄像机记录空泡的初生、发展及溃灭等阶段的图像,从而记录空泡的动态特性。

1.1 电火花诱导

电火花诱导空泡实验装置^[14]由以下模块组成:①空泡生成模块。电火花诱导产生空泡,通过控制电火花电量来控制产生的空泡半径。②定位控制模块。通过三维运动控制平台控制空泡与壁面(颗粒)之间的相对位置。③数据采集模块。利用高速摄像机记录空泡生成与溃灭动态过程,同时配置专用光源,为影像采集提供稳定均匀的照明。④控制模块。采用数字延迟发生器实现高速摄像机、电容开关和光源等主要部件的同步。

研究人员对电火花诱导的空泡进行了大量的实验研究。在半球形气泡附近^[15],空泡溃灭出现向内外喷射的现象;空泡在壁面附近溃灭,第一次溃灭对壁面的冲击随距离的增加而减弱,而第二次溃灭对壁面的冲击呈现出先增大后急剧减小的趋势^[13];在自由域与壁面之间,Huang等^[16]发现空泡存在无尖峰的单涡形、带尖峰的单涡形和双涡形3种不同的形态。空泡与气泡相互作用时,离空泡较远的气泡对其影响较小,空泡会在演化过程中与气泡合并,并在溃灭时形态发生变化^[17];空泡与空泡相互作用时,其圆度、大小和间距会对空泡溃灭方向和声压产生影响^[18];在固体颗粒附近,颗粒数量会影响空泡的溃灭形式和方向,颗粒距离与空泡半径的比值会影响空泡溃灭方向,而颗粒与壁面之间的距离也会对空泡溃灭方向产生影响^[19]。

电火花诱导空泡的方法成本低、操作简单^[18],但是精度较差,而且容易产生振动与噪音^[14]。而上述的研究结果表明,电火花诱导的空泡之间的相互作用以及它们与气泡、壁面和颗粒之间的复杂关系都具有重要的研究价值,这些研究结果有助于深入理解电火花诱导的空泡行为,并为相关领域的应用和理论研究提供了参考。

1.2 激光诱导

激光诱导空泡实验装置^[20]由以下模块组成:①空泡生成模块。激光发生器产生空泡,通过控制激光发生器产生的能量来控制空泡的半径。②定位控制模块。借助三维运动控制平台,精准调控空泡的发生位置,以研究其与壁面或颗粒的不同相对位置的溃灭特性。③数据采集模块。与电火花诱导实

验装置类似,该模块的主要部件为高速摄像机,用于记录空泡的生成与溃灭过程。同时配备显微镜透镜以调整观测视角,并在摄像机工作期间提供必要的照明支持。④控制模块。采用数字延迟发生器实现高速摄像机、激光发生器和光源等主要部件的同步。所有的操作都在数字延迟发生器的控制面板上完成。

对激光诱导的空泡实验主要针对以下4个研究方向:

a. 自由域中空泡溃灭:空泡首先以球形膨胀,然后收缩,接着再次增大并演变成不对称的形状,最终溃灭为更小的空泡^[21]。

b. 壁面附近空泡溃灭:空泡中心到壁面的距离与空泡最大半径的比值对空泡形状演化具有显著影响。在空泡溃灭过程中,其运动方向受射流作用影响^[22]。当空泡靠近刚性壁边缘时,其运动将受到限制,溃灭时间也会延迟,并且在溃灭过程中呈现出橄榄形^[23]。针对不同壁面材料,如铝、钢、铜和丙烯酸树脂等,空泡的形态和冲击力大小因壁面材料的不同而异,壁面反射率的增大会导致空泡的运动行为得到放大,从而导致墙体上的初始冲击力增大^[24]。提高激光频率会增大空泡尺寸,同时空泡溃灭时对表面产生的弹性模量和表面硬度将降低^[25]。在空泡的工程应用方面,Wang等^[26]研究表明,可利用空泡溃灭产生的能量实现工件的重复冲压成形。

c. 液面和壁面之间的空泡溃灭:空泡溃灭时产生的射流总是指向密度较大的液体。当空泡接近液体界面时,空泡溃灭将穿透该界面,并在界面处形成蘑菇形液柱、尖峰液滴和球形液滴^[27]。增加空泡中的不可冷凝气体量会削弱溃灭过程,并降低最大压力、温度和延伸速率^[28]。

d. 空泡与颗粒相互作用:空泡的半径和与颗粒的距离对颗粒的位移产生影响,小距离下颗粒远离空泡,大距离下颗粒靠近空泡^[20],而颗粒的大小对空泡的影响并不显著^[29]。Luo等^[30]的研究探讨了不同激光能量和砂粒含量条件下,无限域和固壁附近空泡的脉动特性,发现高能量激光可增强降解效果,但能量过高等等离子体的吸收作用趋于饱和,使得降解效果下降。液体介质中的颗粒会抑制降解,而在适宜的砂粒含量下,降解效果可能恢复。

激光诱导方法产生的空泡具有纯度高、球形度高、重复性好和同步性好的优点^[20],但操作复杂,而且仪器价格较高,然而激光诱导空泡的实验研究为相关领域的进一步研究和应用提供了指导和启示。

2 空泡数值模拟进展

空泡的实验技术虽然不断演进,但仍存在诸多

局限性,包括高昂的成本、复杂的操作流程以及对仪器精度和实验环境条件的严格依赖。例如,激光诱导空泡实验需依赖高功率激光器与高速摄影系统,且极端高压、高速流场等工况下的测试存在安全风险与设备损坏隐患^[31-32];电火花诱导空泡实验虽成本相对可控,但也难以捕捉空泡溃灭微射流、冲击波等瞬态微尺度过程^[33]。这些因素限制了空泡的实验技术在复杂工况和极端条件下的应用范围,也使得单一变量精准调控、分子层面微观机制解析等研究目标难以通过实验直接实现。而数值模拟凭借其低成本、高灵活性和良好的可重复性,能够提供高度可控且可重复的模拟环境,能针对性弥补实验技术的局限性,且数值模拟发展可以从宏观、介观、微观和多尺度4个方面进行分析,如图1所示。其中,宏观计算流体力学(CFD)模拟可实现工程尺度空泡群演化与全流场参数的定量刻画;介观格子玻尔兹曼方法(LBM)可精细化捕捉近壁空泡与壁面、颗粒的介观相互作用,补充实验在局部流场细节观测上的不足;微观分子动力学(MD)模拟则可解析纳米级空泡成核、溃灭的分子作用机制,实现实验无法观测的微尺度效应研究;多尺度耦合模拟进一步整合不同尺度模拟优势。

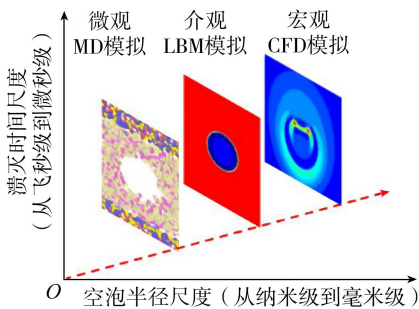


图1 不同尺度空泡示意图

此外,部分学者选择利用克努森数(Kn)将流动分为多个特征尺寸且有相应的流动基本方程。随克努森数增大,流动分为连续区、滑移区、过渡区与自由分子区^[34-35]。宏观的CFD计算基于连续介质假设,采用的是纳维-斯托克斯方程(N-S方程)作为控制方程,仅适用于 $Kn < 0.1$ 的流动。而在大克努森数($Kn > 0.1$)的流动中,就无法使用有限体积法、有限单元法等方法求解N-S方程进行分析。甚至随着克努森数的继续增大,进入自由分子区($Kn > 10$),分子间的碰撞起主导作用,这个时候往往需要使用微观MD进行模拟求解^[35]。而LBM基于玻尔兹曼方程,适用尺度广泛,尤其适用于 $0.1 < Kn < 10$ 的介观流动,计算时需进行格子单位与物理单位的转换。

2.1 空泡的宏观尺度研究

在宏观尺度的空泡研究中,CFD模拟被广泛应

用。CFD模拟可以研究复杂的流场,避免了传统实验带来的干扰和限制,能够精确控制和调整模型的参数,提供了高分辨率的空间和时间域,同时降低了模拟成本^[15]。此外,CFD模拟还能生成可视化的结果,直观地展示空泡的行为和流场特性^[36]。更重要的是,CFD模拟可以生成定量结果,与实验数据相对应,研究人员能够对空泡的特性进行深入分析和比较。

Zhan等^[37]发现,在溃灭阶段,改进的高分辨率交界面捕捉(MHRIC)捕获到的界面相对稳定,空泡半径的演化与理论解吻合较好。但实际上会出现多个空泡的情形且空泡的大小和尺度往往不同。基于此,Han等^[36]通过使用流体体积(VOF)方法,模拟了单空泡和双空泡系统的溃灭过程,并研究了空泡半径、压力、径向速度和加速度的变化。3个空泡相互作用时^[10],其位置和大小会影响溃灭顺序。此外,不同强度的射流可能会使空泡穿透射流或不受射流影响,如Goh等^[15]研究了水平放置在水下平板下方的空泡与附着在其上的空泡之间的相互作用,发现空泡溃灭形成的射流在不同距离下会朝向或远离水平板。

Tian等^[38]构建了含不凝气体的气-汽-液三相可压缩空泡动力学模型,可精准预测空泡多周期振荡,且发现不凝气体会削弱空泡溃灭强度;该团队还探究了曲面附近空泡多周期演化特性^[39],并且利用类似模型研究了缺陷壁面附近空泡动力学行为,发现缺陷深度与形状显著影响其特性,楔形缺陷易导致溃灭能量集中,缺陷深度增加会降低压力峰值^[40]。近几年,Zhang等^[41-42]建立了可以同时考虑边界、气泡相互作用、环境流场、重力、气泡迁移、流体压缩率、黏度和表面张力影响的新的气泡动力学统一理论,可以用于空泡、水下爆炸气泡等振荡气泡领域。基于气泡动力学统一理论,有学者对声场双气泡耦合作用^[43]、混合边界和多气泡之间的相互作用^[44]、气枪源产生的气泡的迁移效应等情形开展了研究^[45]。

Luo等^[46]对有壁面或无壁面条件下两个空泡的溃灭过程进行了研究,发现在有壁面的情况下两个空泡会朝对方溃灭并逐渐合并,合并之后会快速向壁面移动;随后还探讨了不同距离下空泡溃灭对壁面的冲击特性。除此之外,有学者还研究了不同类型的边界与空泡的相互作用,包括刚性边界^[47]、通孔平板^[48]、弹性边界^[49]以及平面壁^[50]等,结果表明,在弹性液面附近,受到球形约束的空泡会快速振荡,空泡振动的振幅和周期会随着弹性模量的增大和约束尺寸的减小而减小。同时,偏心率对空泡表面的约束作用较强,导致空泡表面呈现出非球形的变形^[50]。

对宏观尺度下空泡与颗粒相互作用的研究包括水利水电工程中的砂粒^[19]、生物体内抗体或蛋白质^[51]、超声波结晶过程中方解石晶体^[52]以及超声波清洗中聚苯乙烯胶乳颗粒^[53]等。Xu 等^[19]研究了不同尺寸和距离的砂粒对空泡溃灭特性的影响,发现砂粒会影响空泡溃灭的方式和方向;他们定量分析了颗粒与空泡的间距与颗粒尺寸的比值对空泡溃灭方向的影响,这对于控制固液两相流中的空化损伤具有重要意义。针对亲水颗粒,Arora 等^[54]研究了其附近初始阶段空化行为。

上述研究中,空泡溃灭产生的冲击波与污染物的相互作用是污水处理中的一个重要研究课题;在医学领域,空泡溃灭导致的脂质膜穿孔也是空泡与壁面相互作用的结果;而在水利工程中,空泡溃灭会产生微射流和冲击波,这会对流体机械造成破坏,影响其水力性能,从而导致能量损耗。

2.2 空泡的介观尺度研究

LBM 是近年来出现的一种新的高效数值模拟技术,与一系列传统宏观 CFD 模拟方法相比,LBM 具有计算效率高、复杂边界处理简单以及压力求解简便等优点^[55],是研究介观尺度空泡的主要方法。

a. 模型研究。Sukop 等^[56]最早采用 Shan-Chen 模型模拟了空化诱导下空泡的生长和溃灭过程;Chen 等^[57]研究了静态及剪切流中空泡的形成过程,并发现基于 Rayleigh-Plesset (R-P) 方程的计算结果与数值模拟的数据具有良好的一致性;Peng 等^[11]还对激光诱导形成的单个空泡进行了动力学数值模拟。为了深入研究 LBM 方法,Yang 等^[58-59]建立多松弛模型,研究了溃灭空泡的热力学特性,验证了该模型的有效性,并探究了含不凝气体的空泡溃灭过程。在当前 LBM 空泡生长与溃灭研究中,普遍采用热流耦合模型^[58-62],该模型可兼顾温度场与流场的相互作用,保障研究的准确性。对于多空泡,Shi 等^[63]结合 Carnahan-Starling (C-S) 状态方程进行了数值模拟,并对双空泡和多空泡系统进行了测试。

b. 壁面研究。空泡与壁面的 LBM 模拟研究中,Peng 等^[11]模拟分析了与固体边界不同距离处单空泡溃灭的过程并与实验结果进行了比较,给出了速度矢量、密度、压力和温度场。为了降低空化对实际工程固体材料的影响,Mao 等^[64]模拟了近壁面区域的单个空泡和多个空泡溃灭过程,比较了这两种溃灭过程对壁面造成的影响。对于不同类型的壁面或边界,Liu 等^[65]研究了无限域、直壁和凸壁 3 种典型边界的空泡生长和溃灭,并提出采用改进双分布函数来模拟非等温空化的演变。袁浩等^[66]也采用 LBM 探究了附壁型空泡的演化过程,发现壁面润

湿性通过非平衡杨氏力影响空泡演化,微射流体积与接触角余弦呈指数关系,黏度增大会减小射流体积并延长演化时间。

c. 影响因素研究。Peng 等^[67]研究了密度和黏度比较大的刚性边界附近单、双空泡的溃灭过程,分析了空泡与刚性边界距离对空泡寿命、最大溃灭压力、最快溃灭速度、最高溃灭温度的影响;除了二维的研究,他们还开展了三维空泡溃灭的数值模拟研究^[68]。袁晓龙等^[69]也采用 LBM 探究了汽液黏滞系数对空泡溃灭演化过程的影响规律,结果表明,汽相黏滞系数对溃灭过程中产生的最大微射流流速、峰值溃灭压力及最大溃灭时间均无显著影响;而液相黏滞系数与最大射流流速、最大压力呈负相关关系,与最大溃灭时间呈正相关关系。对于内部有不同气体的空泡,Ezzatneshan 等^[55]研究了固体壁面附近的 H₂O、LN₂ 和 LH₂ 空泡溃灭及表面的润湿性对空泡溃灭的影响。空泡与壁面的相互作用可以用于实际工程中降低空化对固体材料的影响,也可以利用空泡与不同壁面类型及间距所产生的差异化效应,来增强或者减弱空化诱导空泡的产生。

上述研究表明,LBM 方法在研究介观尺度空泡生长和溃灭过程中具有较好的适用性,研究人员能够更好地理解和预测空泡的运动、形态和相变行为。这些模拟结果可以与实验数据进行比较,从而验证模型的准确性和可靠性;此外,该方法还能提供空泡内部密度、温度等详细参数信息,为深入探究空泡动力学特性与热力学行为提供有力支撑。

2.3 空泡的微观尺度研究

人的肉眼所能观测到的尺度很有限,利用高速摄影实验装置也只能观测到微米级的空泡,纳米尺度下的空泡仍难以观测到,需采用 MD 模拟方法对微观尺度的空泡进行模拟分析^[70]。微观 MD 模拟是一种纳米尺度的模拟方法,通过模拟分子运动轨迹揭示空泡空化成核以及空泡溃灭的详细过程,从而深入了解其特征^[71]。

a. 壁面研究。在空泡溃灭过程中,会形成高速射流并释放能量。壁面作为与空泡相互作用的重要界面,在空泡研究中占据着重要地位。研究人员深入探讨了空泡与壁面的关系,旨在更好地理解空泡的初生、发展和溃灭过程,并揭示了它们之间的相互作用机制。例如:Xu 等^[12]构建了空泡与苯甲酰胺壁面不同间距的 MD 模型,采用 TIP4P-FB 水分子模型和 ReaxFF 力场研究空泡溃灭的动态特性和压力场变化规律,发现空泡与苯甲酰胺壁面之间的距离会影响空泡的溃灭;随后 Xu 等^[72]又构建了不同半径空泡的重金属复合模型,以压能、溃灭时间和空泡

面积变化率为研究对象,总结了应变率和空泡半径对空泡溃灭产生的影响;Pellegrin 等^[73]使用可调的原子间电势进行 MD 模拟,研究了在立方外壳中承受负压的受限 Lennard-Jones (L-J) 势流体中空泡的形成过程。空泡与壁面的研究是在各个尺度下都备受关注的研究领域,空泡与壁面的相互作用在多个领域具有重要的应用,如流体力学、声学、生物医学和材料科学等。

b. 颗粒研究。除了壁面,空泡与颗粒微观尺度研究也备受关注,主要涉及细胞膜^[74]、SiO₂ 和 PE 纳米颗粒^[75] 以及原子核^[76] 等。Nan 等^[74] 采用 Martini 粗粒化力场研究了冲击波作用下空泡溃灭与细胞膜的相互作用,当空泡溃灭产生的纳米射流穿透细胞膜时,在孔附近观察到环状空化区域。在纳米技术和医学研究中,发现纳米粒子会对空化造成影响,如 Li 等^[75] 研究了不同直径的 SiO₂ 和 PE 纳米颗粒对水中空化初生特性的影响,结果表明两类纳米颗粒均会破坏水体氢键网络稳定性;相同直径下 PE 纳米颗粒对空化初生的促进作用显著强于 SiO₂ 纳米颗粒。高殿荣等^[76] 在水或液态铜中嵌入不同尺寸的原子核,发现纳米核促进了空化发生。

c. 介质研究。Zhan 等^[77] 研究了不同速度水分子影响下空泡的收缩和溃灭过程,发现冲击速度越快,空泡溃灭时间越短,微射流的速度越高。除水介质之外,al Mahmud 等^[78] 对比了水和凝胶中纳米级空泡生长的压力要求,发现空泡需要更高的压力才能能在凝胶溶液中生长,同时空泡溃灭时间受介质黏度的影响;Baidakov 等^[79] 研究了拉伸 L-J 势流体中的自发空化现象,完整捕捉了跨越 230 个数量级的空泡初生率变化规律,研究发现模拟结果与毛细近似下经典理论只存在 16 个数量级的偏差。Dockar 等^[70] 基于力学平衡分析构建并验证了适用于准二维、三维空泡的新型空化阈值模型,结果表明,表面纳米空泡稳定性偏离经典 Blake 空化阈值,可在高负压条件下保持稳定;随后又进行了外部振荡压力场影响的表面纳米空泡的 MD 模拟^[71],揭示了表面纳米空泡的初生机理,证明经典球形空泡模型在此情形下不再适用。同样地,针对浸没基底上球形帽状表面纳米空泡的溃灭动力学问题,Dockar 等^[80] 模拟研究了不同尺寸和接触角下表面纳米空泡的空化诱导溃灭特性,并将结果与接近固体基底的球形空泡溃灭进行了比较,结果表明,表面纳米空泡模拟中的点蚀损伤大大减少,溃灭产生的凹坑深度取决于它们的接触角。这些特征适用于先进纳米材料制造、健康和精密清洁及易碎材料应用等领域。

d. 溶解气体研究。除了介质存在差异,空泡在

溶解不同气体时呈现出不同的性质。例如 Fu 等^[81] 采用柔性水分子模型进行 MD 模拟,系统探究了氧分子对溶解氧液体空泡成核的影响,并依据氧分子含量及氧分子与水分子的相互作用形式设置了 3 组不同的研究初始状态,结果表明溶解氧可显著降低空化成核势垒,促进异质空化成核;Zhou 等^[82] 研究了氧气和氮气对水空泡生成的影响,发现含有溶解气体的水具有更高的成核率,并且比纯水更容易导致空泡的形成。此外,对于空泡与介质之间的不同物质的研究,Man 等^[83] 开发了一种脂质涂层空泡模型,用于模拟双层脂质存在情况下的稳定空化现象,结果表明空泡振动产生的壁面剪切应力不会导致膜孔的形成。

以上研究表明,基于 MD 的模拟方法非常适用于研究微观尺度下的空泡行为。通过 MD 模拟,研究者能够深入探讨纳米尺度下空泡与周围环境的相互作用,包括表面张力、溶质扩散以及温度等因素的影响。这对于微流体学、纳米技术和生物医学等领域的研究具有深远意义。

2.4 空泡的多尺度研究

空泡的多尺度研究代表了一种综合性的探索方法,旨在全面理解和揭示空泡在不同尺度下的行为和相互影响。这种多尺度研究广泛涵盖了微观到宏观各种尺度范围,能更加全面地洞察空泡的性质和行为特征。相较单尺度模拟方法,多尺度研究能有效弥补宏观模拟缺失微观作用机制、微观模拟难以拓展至工程实际尺度的固有局限,在复杂空化流动刻画与工程效应预测中优势显著,例如近壁空化侵蚀预测^[84]、空化噪声预测^[85] 等。

Ghahramani 等^[86] 在 2018 年提出了一种多尺度模型,采用 VOF 和 Schnerr-Sauer 空化模型从宏观层面描述水和水蒸气,同时在微观层面开发了基于拉格朗日公式的离散气泡模型 (DBM),并成功进行了 DBM 和 VOF 之间的有效转换,实现了多尺度模拟;2021 年该团队^[87] 研究了多尺度空化流动,耦合了混合模型与基于拉格朗日的气泡模型,其中拉格朗日模型采用了一种四路耦合方法,考虑了各种小尺度现象的空化动力学,这一耦合模型清晰展示了多尺度空腔,准确揭示了各尺度气体结构与连续流之间的相互作用。随后,Li 等^[85] 在 2023 年的多尺度模拟中利用 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 方程确定了空化产生的噪声。Li 等^[88] 应用多尺度模型模拟缩放试验段中的空化流动,该模型基于 Schnerr-Sauer 空化模型求解宏观相间传质特性,结合简化 R-P 方程模拟微观离散气泡演化,并提出了跨尺度桥接算法,实现了宏观流场与微观空泡行为

的耦合模拟。同样地,田北晨等^[89-92]采用了欧拉-拉格朗日耦合求解算法,通过在欧拉体系下求解宏观尺度连续介质的空化过程,并在拉格朗日体系下模拟亚网格尺度微空泡与空化核的演化过程,深入研究了流场中多尺度空泡的演变特性,成功捕捉了离散空泡在一个云状空化周期内的时空分布特征。此外, Maeda 等^[93]在 2018 年提出了一种欧拉-拉格朗日耦合方法,用于模拟可压缩液体中的云空化现象,该方法以球形的点气泡作为气相,并通过 Keller-Miksis 方程在亚网格尺度实现其径向演变的跟踪;2023 年 Wang 等^[94]改进了上述方法,并应用于模拟收敛-发散试验段中的非定常空化流动,同时研究了多尺度的空化流动特性,成功预测了由脱落空泡溃灭引起的消散空泡现象。这项研究不仅有助于深入理解收敛-发散试验段内的非定常空化流动,还提供了一种强大的多尺度建模方法,能够更准确地捕捉不同尺度下的空泡行为和相互作用。Wang 等^[95-97]还构建了一套基于欧拉-拉格朗日耦合方法的多尺度空化流动精细模拟程序,采用欧拉法求解全域流场、拉格朗日法追踪空泡演化,完成了水翼绕流与工业喷管内的空化流动模拟,揭示了宏观流动对微观空泡团的影响;此外,他们借助该方法,成功预测了考虑不凝气体存在时的尖端涡流空化^[98],并获取了近壁空泡非球形坍塌的侵蚀冲击载荷^[84],为研究空化不稳定性机制提供了可靠的方法。

这些多尺度方法有望在空化流动研究的不同领域发挥重要作用,通过在不同尺度上采用不同方法,更直观地展示空泡在空化流动中的溃灭过程。但当前多尺度模型的发展与工程化应用仍面临一些难点:①计算成本高昂。多尺度模型需对不同尺度采用差异化的计算网格与算法,宏观尺度采用的网格比较粗糙,而微观或者介观尺度则需要极为精细的网格,跨尺度数据传递、迭代耦合会大幅增加计算量,对高性能计算资源依赖度高,并且难以实现大规模工程场景的快速模拟^[87]。②耦合界面复杂性高。宏观尺度基于连续介质假设,微观尺度依托于 MD 模拟,不同尺度的控制方程与参数体系存在差异,耦合过程中的参数匹配、数据传递与边界条件的转换比较困难,尚未形成统一的理论标准,数值的稳定性与模拟的精度也难以保证^[99]。

3 研究展望

近年来空泡溃灭的研究热点主要集中在以下几个方面:①水力诱导的空泡实验研究主要采用电火花和激光技术,通过高速摄影系统记录空泡溃灭过程,实验研究内容逐步丰富;②不同尺度下的空泡溃

灭数据模拟主要包括宏观、介观、微观和多尺度 4 个方面,其中 CFD 是主流方向,研究较深,其他方向的研究相对较为有限;③空泡溃灭的研究涵盖多个方向,包括空泡数量、模型类型、壁面类型、颗粒、不同介质以及不同气体等因素。

从空泡溃灭研究方法上来看,今后应重点在以下几个方面开展研究:

a. 同步观测技术的改进。空泡尺寸小、溃灭时间短,常规的观测方法受限很大,而空泡破裂形态变化和压力动态变化的协同研究、高速摄影系统和动态压力采集系统的配合使用,有助于更全面地认识空泡破裂动力学,因此需要寻求新的观察测量手段。

b. 压力测量技术的革新。空泡溃灭过程中,压力传播需要时间,使得测量结果不够准确;而空泡溃灭会产生振动,加上空泡溃灭的不对称性使得固定的压力传感器无法获得压力响应的全过程;当空泡比较小时,传感器感应区域的冲击面积也很小,实验得到的压力是整个传感区域接收到的压力的平均值,相当于降低了实际值。因此,目前实验的定量化研究仍面临诸多挑战,需要进一步革新压力测量技术。

c. 人工智能和大数据等技术的结合。智能流体力学是未来发展的重要趋势,机器学习技术已初步应用于空泡溃灭研究领域,目前相关研究主要集中在流体结构和工艺优化等方面,通过神经网络、算法改进或混合算法对实验和计算数据进行挖掘,实现对空泡溃灭过程的预测以及结构和工艺的优化。

未来空泡技术有望在多个领域实现创新发展。在水处理方面,可依托水力空化与高级氧化技术的耦合体系,利用空泡溃灭产生的微射流、高温高压及自由基效应,强化对难降解有机污染物、微塑料及重金属的去除,构建空化降解数值模型,为空化降解反应器的结构与运行参数优化提供理论依据;在声学方面,可以结合深度学习方法,构建螺旋桨梢涡空化噪声的精准建模方法,捕捉空化噪声的随机特性与声学特征,为水利枢纽、水下装备的空化噪声防控提供新路径;在化学合成中,借助空泡的瞬间高温高压及强湍流作用,提升反应速率与选择性,降低对催化剂的依赖,助力绿色合成与精细化工发展。这些拓展将为空泡技术的应用开创更广阔的前景。

参考文献:

[1] 佟艳群,黄建宇,吴笑漪,等. 纳秒激光诱导空化空泡的作用特性及影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1013-1017. (Tong Yanqun, Huang Jianyu, Wu Xiaoyi, et al. Characteristics and influence of cavitation bubble induced by nanosecond pulsed laser[J]. Journal of

- Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35 (12):1013-1017. (in Chinese)
- [2] Zhang Wenwu, Yu Zhiyi, Zhu Baoshan. Influence of tip clearance on pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump passage [J]. Energies, 2017, 10 (2) : 148.
- [3] Liu Fushui, Hua Yang, Wu Han, et al. Experimental investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons growth characteristics of gasoline mixed with methanol, ethanol, or n-butanol in laminar diffusion flames [J]. Energy & Fuels, 2018, 32 (6) : 6823-6833.
- [4] Zupanc M, Pandur Ž, Perdih T S, et al. Effects of cavitation on different microorganisms: the current understanding of the mechanisms taking place behind the phenomenon. a review and proposals for further research [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57: 147-165.
- [5] Wu Pengfei, Bai Lixin, Lin Weijun, et al. Mechanism and dynamics of hydrodynamic-acoustic cavitation (HAC) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 89-96.
- [6] Richards W T, Loomi A L. The chemical effects of high frequency sound waves I. a preliminary survey [J]. Journal of the American Chemical Society, 1927, 49 (12) : 3086-3100.
- [7] Colussi A J, Hung H M, Hoffmann M R. Sonochemical degradation rates of volatile solutes [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 1999, 103 (15) : 2696-2699.
- [8] Hua I, Höechemer R H, Hoffmann M R. Sonolytic hydrolysis of *p*-nitrophenyl acetate: the role of supercritical water [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1995, 99 (8) : 2335-2342.
- [9] Lesko T M. Chemical effects of acoustic cavitation [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2004.
- [10] Fong S W, Adhikari D, Klaseboer E, et al. Interactions of multiple spark-generated bubbles with phase differences [J]. Experiments in Fluids, 2009, 46 (4) : 705-724.
- [11] Peng Chi, Tian Shoucheng, Li Gensheng, et al. Simulation of laser-produced single cavitation bubbles with hybrid thermal Lattice Boltzmann method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119136.
- [12] Xu Wei, Zhu Rongsheng, Wang Jian, et al. Molecular dynamics simulations of the distance between the cavitation bubble and benzamide wall impacting collapse characteristics [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 352: 131633.
- [13] Luo Jing, Xu Weilin, Deng Jun, et al. Experimental study on the impact characteristics of cavitation bubble collapse on a wall [J]. Water, 2018, 10 (9) : 1262.
- [14] Zhang Qi, Luo Jing, Zhai Yanwei, et al. Improved instruments and methods for the photographic study of spark-induced cavitation bubbles [J]. Water, 2018, 10 (11) : 1683.
- [15] Goh B H T, Ohl S W, Klaseboer E, et al. Jet orientation of a collapsing bubble near a solid wall with an attached air bubble [J]. Physics of Fluids, 2014, 26 (4) : 042103.
- [16] Huang Guohao, Zhang Mindi, Ma Xiaojian, et al. Dynamic behavior of a single bubble between the free surface and rigid wall [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105147.
- [17] Luo Jing, Xu Weilin, Niu Zhipan, et al. Experimental study of the interaction between the spark-induced cavitation bubble and the air bubble [J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25 (6) : 895-902.
- [18] Xu Weilin, Li Jianbo, Luo Jing, et al. Effect of a single air bubble on the collapse direction and collapse noise of a cavitation bubble [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120: 110218.
- [19] Xu Weilin, Zhang Yalei, Luo Jing, et al. The impact of particles on the collapse characteristics of cavitation bubbles [J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 15-24.
- [20] Zhang Yuning, Xie Xiaoyang, Zhang Yuning, et al. Experimental study of influences of a particle on the collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near a solid wall [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 105: 289-306.
- [21] Zhao Y L, Yin H L, Shi J C, et al. Dynamics of laser-induced shock wave and cavitation during laser ablation of aliphatic nitroalkanes [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 165: 107548.
- [22] Sun Yurong, Du Yuxin, Yao Zhifeng, et al. The effect of surface geometry of solid wall on the collapse of a cavitation bubble [J]. Journal of Fluids Engineering, 2022, 144 (7) : 071402.
- [23] Zhang Yuning, Qiu Xu, Zhang Xiangqing, et al. Collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near the edge of a rigid wall [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105157.
- [24] Fujisawa N. Laser-induced cavitation bubble behavior on solid walls of different materials [J]. Heat and Mass Transfer, 2022, 58 (3) : 499-504.
- [25] Zhang Zhen, Zhang Yi, Liu Denghua, et al. Bubble behavior and its effect on surface integrity in laser-induced plasma micro-machining silicon wafer [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144 (9) : 091008.
- [26] Wang Liangliang, Guo Zhongning, Deng Yu, et al. Experimental research into microgroove stamping by laser-induced cavitation [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 146: 107549.
- [27] Yin Zhaoqin, Huang Zemin, Tu Chengxu, et al. Dynamic characteristics of bubble collapse near the liquid-liquid interface [J]. Water, 2020, 12 (10) : 2794.
- [28] Zhong Xiaoxu, Eshraghi J, Vlachos P, et al. A model for a laser-induced cavitation bubble [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 132: 103433.

- [29] Lyu Liang, Zhang Yongxue, Zhang Yuning, et al. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 56: 63-76.
- [30] Luo Chunhui, Gu Jiayang, Xu Xinchao, et al. Impact of solid particles on cavitation behaviors and laser-induced degradation in aqueous suspension [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 76: 105632.
- [31] 谢小柱, 苑学瑞, 陈蔚芳, 等. 激光诱导空泡技术研究和应用新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080017. (Xie Xiaozhu, Yuan Xuerui, Chen Weifang, et al. New development and applications of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080017. (in Chinese))
- [32] 马剑军, 胡冉冉. 激光诱导空泡观测技术变化的研究进展[J]. *技术与市场*, 2024, 31(3): 100-104. (Ma Jianjun, Hu Ranran. Research progress on the changes of laser-induced cavitation observation technology [J]. *Technology and Market*, 2024, 31(3): 100-104. (in Chinese))
- [33] 吴焱, 张鹏飞, 黄钰期. 振动及加热壁面条件下的近壁空泡溃灭可视化研究[J]. *内燃机工程*, 2024, 45(2): 102-108. (Wu Yan, Zhang Pengfei, Huang Yuqi. Visualization of bubble collapse near the wall under vibrating and heating wall boundaries[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2024, 45(2): 102-108. (in Chinese))
- [34] 朱维耀, 李华, 邓庆军, 等. 多孔介质细观流动理论研究进展[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(5): 951-962. (Zhu Weiyao, Li Hua, Deng Qingjun, et al. Review on mesoscopic flow theory in porous media [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(5): 951-962. (in Chinese))
- [35] Li Wenrui, Wang Dengke, Wang J G. Improved mathematical model of apparent permeability: a focused study on free and multilayer adsorptive phase flow [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 101: 104508.
- [36] Han Sen, Zhu Hanhua. Theoretical and numerical studies on the collapse of single- and double-bubble system in water [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2021, 93(3): 527-542.
- [37] Zhan Jiemin, Chen Yuehan, Li Yutian. Research on theoretical and numerical methods of single bubble oscillation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(4): 872-877.
- [38] Tian Lei, Zhang Yongxue, Yin Jianyong, et al. Investigation on heat and mass transfer characteristics of a near-wall multi-cycle cavitation bubble and its thermal effects on the wall using an improved compressible multiphase model [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117118.
- [39] 田磊, 张永学, 尹建勇, 等. 曲面附近空化泡多周期演变
- 的动力学特性及其对壁面的破坏作用[J]. *水动力学研究与进展*, 2023, 38(6): 996-1006. (Tian Lei, Zhang Yongxue, Yin Jianyong, et al. Dynamic characteristics of multi period bubbles near curved walls and their damage to the walls [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2023, 38(6): 996-1006. (in Chinese))
- [40] 杜先荣, 尹建勇, 张永学, 等. 基于 OpenFOAM 的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1): 39-46. (Du Xianrong, Yin Jianyong, Zhang Yongxue, et al. Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 39-46. (in Chinese))
- [41] Zhang Aman, Li Shimin, Cui Pu, et al. A unified theory for bubble dynamics [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(3): 033323.
- [42] Zhang Aman, Li Shimin, Xu Runze, et al. A theoretical model for compressible bubble dynamics considering phase transition and migration [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2024, 999: A58.
- [43] 谈乃正, 詹立蕾, 李世民, 等. 基于气泡统一方程的声场双气泡耦合作用研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(2): 213-222. (Tan Naizheng, Zhan Lilei, Li Shimin, et al. A study on the coupling effect of double bubbles in sound field based on the unified equation for bubble dynamics [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(2): 213-222. (in Chinese))
- [44] Zhang Aman, Li Shimin, Cui Pu, et al. Theoretical study on bubble dynamics under hybrid-boundary and multi-bubble conditions using the unified equation [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 66(12): 124711.
- [45] Liu Yi, Zhang Shuai, Li Shuai, et al. Application of the unified equation of bubble dynamics for simulating the large-scale air-gun bubble with migration effect [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(12): 127125.
- [46] Luo Jing, Xu Weilin, Li Rui. High-speed photographic observation of collapse of two cavitation bubbles [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(11): 1707-1716.
- [47] Ma Xiaojian, Zhao Xin, Huang Biao, et al. On study of non-spherical bubble collapse near a rigid boundary [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(3): 523-535.
- [48] 马明凯, 尹建勇, 龚德鸿, 等. 通孔平板附近空化泡动力学特性数值模拟研究 [J]. *水力发电学报*, 2024, 43(10): 63-75. (Ma Mingkai, Yin Jianyong, Gong Dehong, et al. Numerical study on dynamic behaviors of cavitation bubbles near through-hole flat plate [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(10): 63-75. (in Chinese))
- [49] Yang Xiaobin, Liu Cheng, Wan Decheng, et al. Numerical study of the shock wave and pressure induced by single bubble collapse near planar solid wall [J]. *Physics of*

- Fluids,2021,33(7):073311.
- [50] Liu Junliang, Xiao Wei, Yao Xiongliang, et al. Dynamics of a bubble in a liquid fully confined by an elastic boundary [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6):063303.
- [51] McLaughlan J R, Roy R A, Ju Hengyi, et al. Ultrasonic enhancement of photoacoustic emissions by nanoparticle-targeted cavitation [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13):2127-2129.
- [52] Wagterveld R M, Boels L, Mayer M J, et al. Visualization of acoustic cavitation effects on suspended calcite crystals [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(1):216-225.
- [53] Gonzalez-Avila S R, Huang Xiaohu, Quinto-Su P A, et al. Motion of micrometer sized spherical particles exposed to a transient radial flow: attraction, repulsion, and rotation [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(7):074503.
- [54] Arora M, Ohl C D, Mørch K A. Cavitation inception on microparticles: a self-propelled particle accelerator [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(17):174501.
- [55] Ezzatneshan E, Vaseghnia H. Simulation of collapsing cavitation bubbles in various liquids by lattice Boltzmann model coupled with the Redlich-Kwong-Soave equation of state [J]. *Physical Review E*, 2020, 102(5):053309.
- [56] Sukop M C, Or D. Lattice Boltzmann method for homogeneous and heterogeneous cavitation [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(4):046703.
- [57] Chen Xiaopeng, Zhong Chengwen, Yuan Xulong. Lattice Boltzmann simulation of cavitating bubble growth with large density ratio [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(12):3577-3584.
- [58] Yang Yu, Shan Minglei, Kan Xuefen, et al. Thermodynamic of collapsing cavitation bubble investigated by pseudopotential and thermal MRT-LBM [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 62:104873.
- [59] Yang Yu, Shan Minglei, Han Qingbang, et al. Effect of non-condensable gas on a collapsing cavitation bubble near solid wall investigated by multicomponent thermal MRT-LBM [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(2):024701.
- [60] 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.
- [61] He Xiaolong, Peng Haonan. Modeling inception and evolution of near-wall vapor thermo-cavitation bubbles via a lattice Boltzmann method [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49:828-849.
- [62] 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))
- [63] Shi Yazhen, Luo Kai, Chen Xiaopeng, et al. A numerical study of the early-stage dynamics of a bubble cluster [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(5):845-852.
- [64] Mao Yunfei, Peng Yong, Zhang Jianmin. Study of cavitation bubble collapse near a wall by the modified lattice Boltzmann method [J]. *Water*, 2018, 10(10):1439.
- [65] Liu Yang, Peng Yong. Study on the collapse process of cavitation bubbles including heat transfer by lattice Boltzmann method [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2):219.
- [66] 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))
- [67] Peng Haonan, Zhang Jianmin, He Xiaolong, et al. Thermal pseudo-potential lattice Boltzmann method for simulating cavitation bubbles collapse near a rigid boundary [J]. *Computers & Fluids*, 2021, 217:104817.
- [68] Peng Haonan, Fei Linlin, He Xiaolong, et al. Three-dimensional modelling of cavitation bubble collapse using non-orthogonal multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 294:116720.
- [69] 袁晓龙, 何小泷, 汪凯迪. 汽液黏滞系数对空化泡溃灭过程影响的数值模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(5):19-23. (Yuan Xiaolong, He Xiaolong, Wang Kaidi. Numerical simulation of effects of vapor and liquid phase viscosity coefficients on cavitation bubble collapse process [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(5):19-23. (in Chinese))
- [70] Dockar D, Borg M K, Reese J M. Mechanical stability of surface nanobubbles [J]. *Langmuir*, 2018, 35(29):9325-9333.
- [71] Dockar D, Gibelli L, Borg M K. Forced oscillation dynamics of surface nanobubbles [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2020, 153(18):184705.
- [72] Xu Wei, Zhu Rongsheng, Fu Qiang, et al. Analysis of the influence of factor parameters on bubble collapse in a heavy metal complex system [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 347:118377.
- [73] Pellegrin M, Bouret Y, Celestini F, et al. Cavitation mean expectation time in a stretched Lennard-Jones fluid under confinement [J]. *Langmuir*, 2020, 36(47):14181-14188.
- [74] Nan Nan, Si Dongqing, Hu Guohui. Nanoscale cavitation in perforation of cellular membrane by shock-wave induced nanobubble collapse [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, 149(7):074902.
- [75] Li Buxuan, Gu Youwei, Chen Min. Cavitation inception of

- water with solid nanoparticles; a molecular dynamics study [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 120-128.
- [76] 高殿荣, 孙亚楠, 张宗熠. 气液双相微纳米气泡发生器的关键结构优化分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(2): 129-136. (Gao Dianrong, Sun Yanan, Zhang Zongyi. Optimization analysis of key structure of gas-liquid two-phase micro-nano bubble generator [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 129-136. (in Chinese))
- [77] Zhan Shengpeng, Duan Haitao, Pan Lin, et al. Molecular dynamics simulation of shock-induced microscopic bubble collapse[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(14): 8446-8455.
- [78] al Mahmud K A H, Hasan F, Khan M I, et al. On the molecular level cavitation in soft gelatin hydrogel [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 9635.
- [79] Baidakov V G, Protsenko K R. Molecular dynamics simulation of cavitation in a Lennard-Jones liquid at negative pressures [J]. *Chemical Physics Letters*, 2020, 760: 138030.
- [80] Dockar D, Gibelli L, Borg M K. Shock-induced collapse of surface nanobubbles[J]. *Soft Matter*, 2021, 17(28): 6884-6898.
- [81] Fu Qiang, Liu Gang, Wang Xiuli, et al. Cavitation of dissolved oxygen liquid water under negative pressure[J]. *Molecular Simulation*, 2018, 44(18): 1501-1507.
- [82] Zhou Tingting, Zhao Fuqi, Zhou Hongqiang, et al. Atomistic simulation and continuum modeling of the dynamic tensile fracture and damage evolution of solid single crystalline Al with He bubble [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 234: 107681.
- [83] Man V H, Truong P M, Li M S, et al. Molecular mechanism of the cell membrane pore formation induced by bubble stable cavitation [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 123(1): 71-78.
- [84] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Luo Xianwu, et al. An improved Eulerian-Lagrangian method combined with ductile material model for cavitation erosion assessment [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2025, 147(5): 051502.
- [85] Li Linmin, Niu Yabiao, Wei Guolai, et al. Investigation of cavitation noise using Eulerian-Lagrangian multiscale modeling [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 97: 106446.
- [86] Ghahramani E, Arabnejad M H, Bensow R E. Realizability improvements to a hybrid mixture-bubble model for simulation of cavitating flows [J]. *Computers & Fluids*, 2018, 174: 135-143.
- [87] Ghahramani E, Ström H, Bensow R E. Numerical simulation and analysis of multi-scale cavitating flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 922: A22.
- [88] Li Linmin, Wang Zhengdong, Li Xiaojun, et al. Very large eddy simulation of cavitation from inception to sheet/cloud regimes by a multiscale model [J]. *China Ocean Engineering*, 2021, 35(3): 361-371.
- [89] 田北辰, 李林敏, 陈杰, 等. 绕水翼空化流动多尺度数值研究 [J]. *力学学报*, 2022, 54(6): 1557-1571. (Tian Beichen, Li Linmin, Chen Jie, et al. Numerical study of multiscale cavitating flow around a hydrofoil [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(6): 1557-1571. (in Chinese))
- [90] 田北辰, 李林敏, 黄彪. 不同空泡脱落模式下空化多尺度特性研究 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2024, 39(1): 87-96. (Tian Beichen, Li Linmin, Huang Biao. Investigation into the multiscale characteristics of cavitation flow under different cavity shedding mechanism [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2024, 39(1): 87-96. (in Chinese))
- [91] Tian Beichen, Li Linmin, Meng Yang, et al. Multiscale modeling of different cavitating flow patterns around NACA66 hydrofoil [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(10): 103322.
- [92] Tian Beichen, Huang Biao, Li Linmin. Investigation of transient sheet/cloud cavitating flow dynamics from multiscale perspective [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(7): 077115.
- [93] Maeda K, Colonius T. Eulerian-Lagrangian method for simulation of cloud cavitation [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 371: 994-1017.
- [94] Wang Zhengdong, Li Linmin, Li Xiaojun, et al. Investigation on multiscale features of cavitating flow in convergent-divergent test section using Eulerian-Lagrangian method [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 238: 107853.
- [95] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Ji Bin. Euler-Lagrange study of cavitating turbulent flow around a hydrofoil [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(11): 112108.
- [96] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Ji Bin. Numerical prediction of cavitation erosion risk in an axisymmetric nozzle using a multi-scale approach [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(6): 062112.
- [97] Zhou Mingzhe, Wang Ziyang, Bai Xiaorui, et al. Numerical simulation of multi-scale cavitating flow with special emphasis on the influence of vortex on micro-bubbles [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, 34(6): 1032-1043.
- [98] Cheng Huaiyu, Long Xinping, Ji Bin, et al. A new Euler-Lagrangian cavitation model for tip-vortex cavitation with the effect of non-condensable gas [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 134: 103441.
- [99] Li Linmin, Xu Weisen, Jiang Bowen, et al. A multiscale Eulerian-Lagrangian cavitating flow solver in OpenFOAM [J]. *SoftwareX*, 2023, 21: 101304.

(收稿日期: 2024-11-07 编辑: 熊水斌)