

# 空化水射流研究方法综述

高元, 刘博, 赵蒙, 张有智, 慕晓刚, 王煊军

(中国人民解放军火箭军工程大学智剑实验室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 鉴于空化水射流技术的重要性, 对空化水射流的产生和作用机理进行了分析, 并从空化水射流的流场观测分析、冲蚀作用测量、数值计算仿真三个方面对近年来空化水射流技术研究过程中采用的试验和数值计算方法进行了综述, 归纳研究热点为设计喷嘴结构、拓展观测和测量实验方法、优化数值计算方法, 并从提高空化水射流观察和测量能力和运用人工智能技术优化数值计算方法等方面提出展望, 为空化水射流技术的研究和应用提供参考。

**关键词:** 空化水射流; 喷嘴; 高速摄影; 湍流; 冲蚀

**中图分类号:** TJ55; V435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)01-0018-08

**Review of research methods on cavitation water jet//GAO Yuan, LIU Bo, ZHAO Meng, ZHANG Youzhi, MU Xiaogang, WANG Xuanjun (Zhijian Laboratory, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)**

**Abstract:** In view of the significance of cavitation water jet technology, this paper analyzes the generation and action mechanisms of cavitation water jets, and provides a review of the experimental and numerical research methods used in recent years, focusing on three aspects: flow field observation and analysis, erosion measurement, and numerical simulation. The research hotspots are summarized as nozzle structure design, development of observation and measurement methods, and optimization of numerical simulation techniques. Additionally, the paper proposes future directions, including improving the observation and measurement capabilities of cavitation water jets and using artificial intelligence technology to optimize numerical calculation methods, providing references for the research and application of cavitation water jet technology.

**Key words:** cavitation water jet; nozzle; high-speed photography; turbulent flow; erosion

空化水射流技术是一项基于水力空化原理的水射流增强技术。高速水射流和淹没环境的剪切作用在剪切层附近形成负压区, 引发水体相变产生大量空化泡, 会聚形成空化云。空化云接近目标靶面时发生集中溃灭, 对靶面造成复杂的作用效果。相较于传统水射流技术, 空化水射流技术冲击靶面造成的蚀坑粗糙度更小, 且蚀坑不受喷嘴本身形状影响, 在材料强化处理等方面具有巨大优势; 另一方面, 相比传统的高压水射流, 空化水射流的冲击强度更高, 在相同的输入压力下, 空化水射流可以对射流冲击目标造成 8.6~124 倍的冲击作用<sup>[1]</sup>, 在煤岩破碎时可以使破碎效率提高 2~4 倍, 在较低射流入口压力下可以实现对目标材料的高效处理, 更加节能。空化水射流技术最早应用于轮船底部除锈和藤壶的清洗, 之后逐步扩展到煤岩破碎<sup>[1]</sup>、材料表面强化<sup>[2]</sup>、

改性、抛光、珩磨、塑性成形、钻孔、化工设备清洗、水体有机物污染降解<sup>[3]</sup>、废旧弹药处理<sup>[4]</sup>等诸多领域。近年来对空化水射流技术的研究主要围绕空化水射流对各种材料的作用过程和作用效果方面, 研究方法涉及球泡动力学、计算流体力学、冲击力学、弹性力学、光学、数字图像处理等多学科、多领域的技术方法。本文对近年来空化水射流技术研究中主要采用的研究方法进行综述, 以为空化水射流技术的研究和应用提供借鉴。

## 1 空化水射流机理

### 1.1 空化水射流产生原理

空化水射流的产生方式是将高速水射流注入水中, 具有空化效果的淹没水射流被称作空化水射流。在喷嘴内部, 以一定入射压力进入空化喷嘴的射流

**基金项目:** 火箭军工程大学青年基金项目(2021QN-B014)

**作者简介:** 高元(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体推进剂空化破碎研究。E-mail: 1971944090@qq.com

**通信作者:** 王煊军(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事特种能源理论与应用研究。E-mail: wangxj503@sina.com

在经过喷嘴的喉道处时,根据流体的连续性方程,流体的流动速度加快,根据伯努利方程,流体的压力则会降低。当流体压力下降至饱和蒸气压以下,造成局部低压,当低压区压力小于此刻温度对应的饱和蒸气压时引发水体相变,从而发生空化行为。这一过程会沿喉道边界层生成充满水蒸气的空泡,维持较稳定的片状空化,形成空腔,同时为喷嘴出口提供大量的微小空泡作为空化核,其尺寸一般在  $20\ \mu\text{m}$  以下<sup>[5]</sup>。当射流流出喷嘴后,高速射流与淹没环境中几乎静止的水体在界面处发生动量交换和剪切作用形成压力梯度,卷吸外围的水体,在射流边界附近形成大量涡旋,涡旋中心低压区的空化核会迅速膨胀,在水射流界面附近形成大量的空泡。产生的空泡远离喷嘴后发生脱落,高密度的微小空泡簇拥成云团状,被称作空化云。

空化云的周期性脱落决定了空化的频率,直接影响空化的作用效果,因此是空化水射流研究的一项重要内容。对于空化云发生周期性脱落现象的原因,Soyama 等<sup>[6]</sup>认为空化云周期性脱落与剪切层的压力梯度以及上游压力波动引起的高压柱塞泵的工作频率有关;Sato 等<sup>[7]</sup>认为空化云周期性与空化云的特征振荡以及涡的脱落频率有关;Watanabe 等<sup>[8]</sup>认为空泡云周期性脱落的原因在于空泡云溃灭诱导产生的周期性回射流,即流体从喷嘴外部向内部的回流。目前普遍认为空化云的脱落过程由射流的重入射流机制或凝结冲击机制决定,并且在各种流动条件下都能发现这两种机制存在的痕迹。然而,由于两种机制造成空化云脱落的时间频率是不同的,因此通常情况下只有其中一种机制会成为主导机制,其决定空化云脱落频率。Trummler 等<sup>[9]</sup>的研究结果证明在较低的空化数下,空化云的脱落由冷凝冲击决定,同时再入射流的形成与脱离后空化云溃灭引起的压力峰值有关。

Li<sup>[10]</sup>结合空化云动态演变和空化水射流的试验与分析结果,大致将空化水射流分为三个作用区域:液滴作用区、混合作用区、空化作用区。由于水体的黏性作用,射流动能耗散速度非常快,因此空化水射流比相同工艺条件下非淹没状态下的自由射流的作用距离要小得多。液滴作用区动能高度集中,因此液滴作用区的长度会随着射流压力的增加而增加;在混合作用区,随着靶距的增大,液滴的作用效果逐渐下降,空化的作用逐步上升;空化作用区的射流作用几乎可以忽略不计。

## 1.2 空化水射流空蚀作用

空化水射流产生的空化云撞击靶面并扩散形成环状云,在靶面附近产生的滞止压力使空泡云周围

液体压力增加。由于受到环境中不对称力的作用,局部背压升高,引发空泡坍塌、收缩,发生急剧溃灭<sup>[11]</sup>。空泡的溃灭会伴随瞬时的高速、高压和高温,使作用对象表面产生强烈的冲击波和高速微射流,造成高频率瞬时重复机械载荷,导致材料表面剥蚀,产生空蚀,这一过程发生在非常小的时间尺度上。

学者们根据对空蚀的研究建立了微射流理论、冲击波理论和群泡溃灭理论,并通过计算和试验进一步推导和测量了空蚀的机械效应。例如:Wang 等<sup>[12]</sup>研究发现,空泡在近壁面溃灭时会发生两次坍塌,第一次坍塌释放的能量占据主导,并且在距壁面不同距离时,坍塌周期和溃灭产生的峰值冲击力和冲量会有显著区别;冉彬君等<sup>[13]</sup>认为空泡近壁面生长的最大半径与泡壁无量纲距离之间存在幂函数关系,当泡壁无量纲距离大于 1.6 时为线性关系;应崇福等<sup>[14]</sup>采用 Gilmore 方程和欧拉方程计算得到的空泡溃灭压力峰值为  $10^4\ \text{MPa}$  量级,空泡中心温度为  $10^4\ \text{K}$  量级;Pecha 等<sup>[15]</sup>采用氦氖激光器测量得到的空泡溃灭压力峰值约为  $6\ 000\ \text{MPa}$ ;Suslick 等<sup>[16]</sup>通过光谱测量方法测得的空泡中心温度为  $4\ 000\sim 6\ 000\ \text{K}$ 。目前,公认的单个空泡近壁面溃灭压力峰值在  $10^2\sim 10^4\ \text{MPa}$ ,空泡中心温度在  $10^4\ \text{K}$  量级。上述结论是单个空泡在简单环境下得到的较为理想的结果,但空化水射流流场环境中的工况要复杂得多。复杂的流场结构、空泡间的相互作用、射流本身的速度和压力等都会对空泡溃灭过程和溃灭产生的效应造成影响,包括空化水射流对空泡的尺寸发展也起到了制约作用。

## 2 空化水射流技术试验研究方法

### 2.1 流场试验研究方法

目前对空化水射流进行了大量的试验研究,其中高速可视化是最常见的手段。高速可视化方法可以直接观察空化水射流内空化云的瞬时变化,它侧重于空化水射流的流动模式,尤其是空化云的周期性行为,对高速可视化结果的分析高度依赖各类图像处理方法。

Chahine 等<sup>[17]</sup>采用高速摄影技术对空化水射流的流场进行研究观测。如图 1 所示,高速摄影下连续拍摄的空化云的初生、发展、脱落过程呈现明显的周期性。对于高速摄影的拍摄结果,Wu 等<sup>[18]</sup>使用有机玻璃制成透明空化喷嘴,对高速摄影得到的结果采用帧间差分法(frame difference method, FDM)进行处理,分离背景和噪声干扰,得到清晰的空化云轮廓;谭雅文等<sup>[19]</sup>采用本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)将高速摄影图像灰度

值化,从而求取流场结构的时均特征,研究空化云形态变化规律和流场稳定性;彭炽等<sup>[20]</sup>用灰度值方法处理图像,再将相邻时刻(0.1 ms)的结果使用FDM叠加相减,得到了瞬态的空化云的消失和产生行为,用于空化云动态变化规律的研究;Li等<sup>[21]</sup>对进行过灰度图像处理的高速摄影图像选定范围内的所有像素点的灰度值求和,然后通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)给出了空泡云面积变化幅度与频率的关系;Fang等<sup>[22]</sup>通过动态模态分解(dynamic mode decomposition, DMD)方法分析了空化水射流中的能量信息和频率特性,用于确定相干涡旋和导致不同脱落行为的各种机制;Peng等<sup>[23]</sup>对高速摄影图像进行了光谱分析和适当的POD分析,计算并比较了区域平均灰度、线平均灰度、点灰度、空化长度、宽度和面积6种不同图像信号的光谱,认为线平均灰度值是确定空化云脱落频率的最优方法。

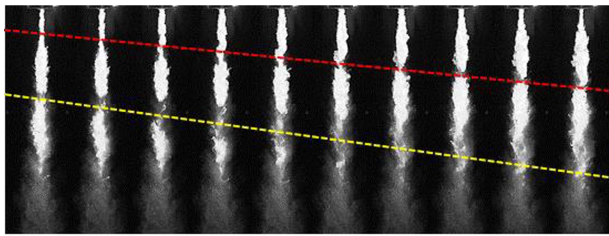


图1 高速摄影拍摄空化水射流流场

对于空化水射流的流场速度, Jasper等<sup>[24]</sup>借助射流中空泡的粒子特性,使用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术对不同压力条件下空化水射流的速度场进行了测量分析,研究空化水射流在水中的衰减规律。采用PIV技术来测量周围流体和变化的压力条件对水射流流动特性的影响可以对空化水射流的优化起到指导作用,但由于粒子图像测速仪发出的激光在喷嘴壁和较大的气液界面处强烈折射,并且被小气泡云多次散射,在空化水射流气泡密集处难以实现速度矢量的准确测量,因此目前主要关注对射流外部流场速度的测量。

此外,纹影法、空化磁化率仪、激光多普勒测速、X射线摄影、X射线计算机断层扫描技术<sup>[25]</sup>、X射线荧光光谱分析<sup>[26]</sup>等方法也被尝试应用于空化水射流流场的观察研究。

## 2.2 冲蚀作用研究方法

李根生等<sup>[27]</sup>将空化水射流冲蚀作用的研究方法归纳为:标准冲蚀试件法、冲击作用力测试法、激光测速法、高速摄影法、空化噪声测试法、测压膜测试法。目前对空化水射流冲蚀作用的研究以标准冲蚀试件法和冲击作用力测试法为主。

标准冲蚀试件法的核心在于如何通过表征冲蚀结果来说明空化的作用效果。美国材料与试验学会制定的G134-17《Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet》对标准冲蚀试件法进行了规范。通过控制冲蚀条件,获得不同工况下的蚀坑,并对蚀坑的数量、深度、面积、质量损失等参数进行测量分析,得到计算需要的数据。其本质是将材料本身作为一种传感器,直接记录空化水射流产生的侵蚀作用。

除此以外,对于空化水射流的冲蚀结果,还有一些其他表征方法。例如:使用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)相机直接拍摄冲蚀表面可以直观得到空化水射流冲蚀作用的分布情况;对受到冲蚀作用后变形或剥蚀比较微小、整体仍接近平面的材料,激光扫描共聚焦显微镜可以获得较好的全局冲蚀形貌;采用扫描电子显微镜可以观察空化水射流在材料表面造成的蚀坑细节<sup>[8]</sup>;电子计算机断层扫描可以对冲蚀结果进行断层扫描,并进行三维重构,获得完整的冲蚀形貌,适用于冲蚀损伤严重的情况<sup>[28]</sup>。根据冲蚀对象的特点选择不同的表征方法可以获得相应的结果,通过对冲蚀结果的分析可以尝试反向推导空化水射流的冲蚀特性。

空化水射流在目标上的作用力可以分解为水流惯性冲击力和空泡溃灭引起的冲击作用力。其中空泡溃灭作用力的作用面积小,时间短暂,测量难度较大。聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)薄膜的灵敏度高、耐久性好、带宽大,适用于高振幅脉冲场测量。例如:Soyama等<sup>[29]</sup>采用PVDF作为压敏材料,设计了一种基于换能器的动态载荷校准方法,可以直接读取载荷结果数据,取得了与蚀坑较为吻合的测量结果;Wang等<sup>[12]</sup>使用PVDF压电薄膜研究了空泡在固体边界附近破裂所产生的冲击力,结果表明,PVDF压电薄膜传感器测量空化射流冲击作用能够提高响应速度,准确测量更小脉冲宽度的冲击作用,其中PVDF膜的带宽和谐振频率使用气体动力学激波管确定。水听器曾被用于高速水流中空位置的观测<sup>[30]</sup>,Cai等<sup>[31]</sup>使用水听器和压力传感器对空化水射流冲蚀过程中的环境压力进行了监测,研究环境压力和空化自激频率的关联性。目前对单空泡的压力测量较为广泛,对空化水射流中空泡溃灭作用产生的冲击力的研究通常阵列多个微型压力传感器,以达到研究空化水射流压力分布的目的。但低强度材料的空化水射流冲蚀过程中随着空蚀作用的进行,实际上靶距会发生动态变化,不能直接应用平面空蚀作用的研究结果。针对现有技术无法测量固体推进剂表面空化冲击载荷的难题,张有

智等<sup>[32]</sup>提出了一种用于空化场中固体推进剂表面空化冲击载荷的测量方法,该方法也可用于测量金属材料以及塑料、橡胶等高分子材料表面所受的空化冲击载荷。相比于传统的空泡和空化云冲击载荷测量方法和手段,该方法不再局限于平面测量,对具有一定冲蚀深度的蚀坑内部受到的冲击载荷也能开展有效测量。

### 3 空化水射流技术数值研究方法

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法是研究流体的常用方法,在空化行为研究中,计算仿真同样是一项重要的研究手段。空化水射流是一种包含相变、介质压缩性、黏性及湍流效应的非定常复杂多相流<sup>[33]</sup>,涉及气液两相的相变和质量传递。空化水射流的流场复杂,大量的空泡致使试验方法在观测时会受到干扰或遮挡。因此,采用计算仿真方法可以直观地获得流场中各个点位的汽含率、压力、流速、涡量、雷诺数等参数,对空化水射流现象进行全方位解析。

#### 3.1 空泡动力学理论

空化水射流数值计算的理论基础是对空泡产生、溃灭、运动过程的数学描述。Besant 最早对均压无界流场中的球状空泡进行研究,建立了球泡运动模型<sup>[34]</sup>。Rayleigh 等推导出了不可压缩流中气泡振荡的经典 Rayleigh-Plesset 方程<sup>[35]</sup>; Gilmore 等<sup>[36-38]</sup>考虑各类复杂因素对方程进行了不断完善。Zhang 等<sup>[39]</sup>于 2023 年提出的气泡统一方程是一项里程碑式工作。该方程通过构造波动方程的移动点源的基本解,计入了气泡迁移可压缩性,同时考虑了边界效应、气泡间相互作用、流场环境、重力、气泡迁移、可压缩性、黏性、表面张力等条件和因素,将不同源、不同尺度、不同环境下的气泡动力学特性统一到方程中,还统一了以前的经典方程,能够更精确地预测气泡的动力学行为并发现新的物理现象。这一方程的提出代表了气泡理论领域近年来的重大突破,对进一步提高空化水射流数值计算的准确性有着重要的参考价值。主要的空泡动力学模型及其考虑的条件因素如表 1 所示。

#### 3.2 湍流模型研究

根据 Reynolds<sup>[41]</sup>提出的湍流判定准则,空化水射流的流动属于典型的湍流运动。湍流模型会显著影响仿真结果的准确性。由于湍流运动的非定常特性和空化水射流流场的复杂性,直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS) 似乎是最理想的方法,它可以解析所有尺度的湍流运动,对湍流运动实现精准描述,但巨大的计算成本使得 DNS 方法无法应用于空化水射流的数值计算。雷诺平均 N-S 方程 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 模型是空化水射流数值计算中的常用方法。RANS 模型被证明可以完整地模拟空化云的产生、发展、脱落和坍塌的非定常空化流动的整个周期<sup>[42]</sup>,但使用 RANS 模型计算时会在细节位置造成巨大的数值误差,原本由无数大涡与小涡组成的时变流场变成了稳定的单向简单流动,并且分离边界层区域的涡流黏度过高,会减小折反射流动量,从而抑制流动不稳定性<sup>[43]</sup>。但在进行喷嘴结构设计等工作时,RANS 模型由于简单有效而受到青睐。

近年来,大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 一直是研究湍流的重要方法之一。LES 方法对 N-S 方程在一定空间区域内进行平均,从而在流场中滤掉小尺度涡而导出大尺度涡所满足的方程,可以用于解析低于子网格尺度极限的涡。相较于 RANS 方法,LES 方法可以较好地预测涡流的发展,体现空化流动中复杂的涡结构,因此 LES 方法经常被用于研究水翼和螺旋桨周围流体的发展,探索不同水翼结构周围的瞬时空化流动,也适用于空化水射流数值模拟。王连安等<sup>[44]</sup>对比了 LES 的 Smagorinsky-Lilly 模型、壁面适应的局部涡黏模型 (wall-adapting local eddy-viscosity, WALE) 和代数壁面模型化的大涡模拟模型 (wall-modeled large eddy simulation resource, WMLES) 三种不同的亚格子模型对空化水射流特性、空化云演化规律及脱落频率的数值模拟结果,证明 WALE 模型在涡环结构和小尺度涡数值模拟方面具有优势,可更好地吻合试验结果。LES 的高计算精度也意味着需要庞大的算力,因此无法应用在复杂工程问题中。RANS-LES 混合模型在近壁区域

表 1 空泡动力学模型

文献	年份	流体可压缩性	流体黏性	表面张力	非平衡蒸发和冷凝	传热传质	不可凝性气体
Rayleigh <sup>[40]</sup>	1917	×	×	×	×	×	×
Brennen <sup>[35]</sup>	1949	×	√	√	×	×	×
Gilmore <sup>[36]</sup>	1952	√	√	√	×	×	√
Fujikawa 等 <sup>[37]</sup>	1980	√	√	√	√	√	√
Akhatov <sup>[38]</sup>	2001	√	√	√	√	√	√
Zhang 等 <sup>[39]</sup>	2023	√	√	√	√	√	√

注:“√”“×”分别表示考虑和未考虑该因素。

使用 RANS 湍流模型,可提供高效的建模,在远壁区域使用 LES 方法,可提供较高真实性。陈松平等<sup>[45]</sup>采用 RANS-LES 混合模型方法对一种缩放型喷嘴进行了数值模拟,捕捉到了更多的流场细节,得到了较为吻合的空化云形态。空化云沿射流方向以圆环状发展,初生阶段空化云的强度沿射流方向逐渐增强,空化环的宽度随时间的推移而扩大。应力混合涡模拟(stress-blended eddy simulation, SBES)被认为是最优的全局 RANS-LES 模型,屏蔽了网格相关性和网格诱导的非真流动分离对 RANS-LES 模型的影响。Zhu 等<sup>[46]</sup>采用 SBES 模型在应力水平混合的涡流模拟方法对空化水射流进行了数值模拟,对比分析了射流核心和空化云的发展,和著名试验结果在时均特性和非定常特性方面表现出良好的一致性,以此研究了空化云的发展和脱落过程,认为射流核心形态对空化云的发展起到重要作用。Apte 等<sup>[42]</sup>使用一系列不同的 RANS 模型和混合 RANS-LES 模型计算模拟了文丘里型空化喷嘴内的空化行为和湍流运动,通过在局部尺度对湍流运动和空化行为的相互作用进行分析,发现所有湍流模型都无法模拟如雷诺应力和湍流动能等与湍流相关的方面,揭示了准确模拟空化流动的瓶颈,为后续研究指明了方向。

由于空化水射流流动具有雷诺数高和存在气液相变现象的特点,其计算仿真的实现难度很大,空泡的发展、运移、脱离、溃灭过程难以完全实现,准确预测空化云的形态和非稳态行为仍然是一个挑战<sup>[47]</sup>。此外,由于缺乏详细的试验测量流场数据,模拟结果验证困难。目前对空化水射流数值模拟的验证方法尚未统一,总体来说主要从两个方面进行:①将计算得到的  $Q$  准则涡量结果或汽含率结果与高速摄影拍摄的某一时刻空化云的整体轮廓进行比较分析,以此对空化水射流仿真结果进行定性验证;②通过对比高速摄影得到的空化云周期时长和数值计算结果中空化云的周期时长进行定量验证。但由于这两种验证方式的可靠性没有得到确切的证明,因此在缺乏标准统一的判断依据的情况下,数值计算结果的可靠性和精度都很难保证,这也导致以往试验研究中的一些观点缺乏模拟或试验测量的详细佐证。

### 3.3 流固耦合研究

空化水射流流固耦合研究方法目前仍处于起步阶段。空化水射流流固耦合研究的主要问题在于如何探究宏观空化水射流流场对细观尺度的空泡运动和溃灭效应的影响,形成宏观-细观耦合的计算方法。空化水射流直接流固耦合的前提是将整个流域都离散为小于单个空泡尺寸至少两个数量级的网格尺度,对射流中每个单空泡实现运动追踪和生长、溃

灭过程数值模拟。这无疑需要庞大的计算量,以目前的计算机水平难以实现,因此往往需要通过间接方法来推导射流中空泡群在壁面处溃灭所造成的冲击损伤。

涂翔翔等<sup>[1]</sup>根据 Johnson 等<sup>[48]</sup>对等温压缩条件下的射流冲击力对比试验得到经验公式,将空化水射流造成的冲击压力等效为一定压力下水射流造成的冲击压力,计算出相应的压力和速度,并根据群泡溃灭动力学和射流冲击溃灭特性,将射流的等速核段定义为冲击段,以此得到等效水射流的初始条件,进行水射流流固耦合的数值模拟来体现空化水射流冲蚀效果。笔者认为这一方法可以用于高强度材料冲蚀的效果预测,但研究时直接代换没有考虑空化水射流本身的破碎机理和其中水射流的作用效果,在进行一些较低强度材料的冲蚀时,水射流的作用是不能被忽略的。

Trummler 等<sup>[49]</sup>提出了一种基于数值坑当量(numerical pit equivalents, NPEs)的数值侵蚀预测评价方法,基于对单元数值的监测和记录,采用物理激励聚类算法来识别空间和时间上连续的高于阈值的区域,得到峰值压力、空间分布、直径以及形成的持续时间等特征,用于实现与试验蚀坑的对应,获得额外的时间信息,提供更详细的损伤机制,在空化侵蚀定量数值预测方面取得了进一步提升。NPEs 中的压力阈值由空化水射流作用对象的材料力学性能决定,可以通过纳米压痕测速试验方法得到,可以很好地过滤其他因素产生的压力波动,凸显空泡溃灭产生的压力,同时也没有忽略射流本身的惯性力作用。这一方法的实现基于超高精度的网格分辨率,对算力的要求极高,否则无法正确识别空化损伤范围,同时实现的时间尺度非常小。

Liu 等<sup>[50]</sup>提出了一种将试验方法和数值模拟方法相结合的简化方法,对冲蚀过程中空化流场随冲蚀坑扩张产生的变化进行了分析。通过试验获得不同条件下空化水射流冲击铝片产生的蚀坑形貌,根据所得形貌建立几何模型。对得到的几何模型按照实际的试验条件进行数值模拟,得到一系列不同靶距、压力下空化流场的分布情况。该方法将数值模拟和试验研究相结合,两者同步相互验证,得到的结果更符合实际情况。将结果数据按照时间顺序排列分析后可以作为预测蚀坑发展趋势的依据。

综上所述,空化水射流流固耦合研究面临的主要问题是如何实现空泡溃灭产生的冲击力和水射流惯性力的作用的结合。对于不同的作用对象,射流中空化作用和水射流的惯性作用力起到的作用并不相同。对高强度材料,空化溃灭起主导作用,但对低

强度材料,水射流起到的并不仅仅是输运作用,也会对材料造成显著的侵蚀破坏效果。如何在计算时兼顾这两方面的作用效果,实现对空化水射流冲蚀材料全过程的仿真是需要研究的问题。

## 4 研究热点与展望

### 4.1 研究热点

**a. 优化空化水射流喷嘴。**从结构设计、多种空化发生机理协同等方面设计新型空化喷嘴,提高空化水射流汽含率,并实现对作用靶距、范围等参数的调控。

**b. 拓展空化水射流技术的作用范围。**同心喷嘴等技术的出现让空化水射流不受传统淹没环境的限制,实现了空化水射流在多维度的应用;高围压等条件下空化水射流的研究为在一些极端工作条件下采用空化水射流技术提供了支撑。

**c. 改进空化水射流数值仿真。**目前主要从球泡动力学模型、湍流模型、空化模型等方面对空化水射流流场的计算仿真进行优化,实现和试验结果的高度吻合并保留更多流场细节特征。

**d. 探究冲蚀机理,优化冲蚀工艺。**在各类金属材料的表面处理中,空化水射流对不同材料的微观组织和力学性能的影响不尽相同,在处理时需要选取适当的工艺参数,防止造成损伤。

### 4.2 研究展望

**a. 拓展同步观测方法。**由于空泡的产生,空化水射流流场特征和作用效果更加复杂,一些常规的流体试验方法无法直接用于空化水射流研究。当空化水射流作用在靶面上时,射流流场会进一步发生紊乱,常规的光学测量方法受限很大,需要探求新的观察测量手段。

**b. 拓展压力测量方法。**对空化水射流冲击力的测量仍有很大的局限性,目前的方法仅适用于平面或类平面的情况,需要进一步实现多维度的全面测量。

**c. 分析冲击性能试验结果。**通过整理空化水射流冲击性能的试验结果,分析得到影响空化水射流冲蚀作用和分布特性的因素及经验公式,从而建立适用于数值计算研究的表征方法,实现对空化水射流冲击性能进行定量预测的目的,为流固耦合研究提供参考<sup>[51]</sup>。

**d. 借助人工智能和大数据等技术。**智能流体力学是今后发展的重要趋势,机器学习方法已经初步应用在空化水射流研究中。目前主要集中在喷嘴优化<sup>[52]</sup>和工艺优化<sup>[53]</sup>等方面,通过神经网络或其他混合算法,对试验、计算得到的数据进行挖掘,实

现流动和冲蚀的预测以及结构、工艺等的优化。

## 参考文献:

- [1] 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 Yixiang, FAN Chenxing, QIAN Yi'nan, 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. (in Chinese))
- [2] SOYAMA H, KORSUNSKY A M. A critical comparative review of cavitation peening and other surface peening methods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 305: 117586.
- [3] 张婵,郑爽英. 超声空化效应及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(1): 136-138. (ZHANG Chan, ZHENG Shuangying. Effect of ultrasonic cavitation and its application[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(1): 136-138. (in Chinese))
- [4] 韩启龙,王焯军,蒋大勇. 报废固体推进剂处理技术研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2008, 6(6): 13-16. (HAN Qilong, WANG Xuanjun, JIANG Dayong. Research progress in treatment technology of obsolete solid propellant [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2008, 6(6): 13-16. (in Chinese))
- [5] 杨庆,张建民,戴光清,等. 空化机理和比尺效应综述[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 59-62. (YANG Qing, ZHANG Jianmin, DAI Guangqing, et al. Mechanism of cavitation and scale effect[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(2): 59-62. (in Chinese))
- [6] SOYAMA H, YAMAUCHI Y, ADACHI Y, et al. High-speed observations of the cavitation cloud around a high-speed submerged water jet[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 1995, 38(2): 245-251.
- [7] SATO K, TAGUCHI Y, HAYASHI S. High speed observation of periodic cavity behavior in a convergent-divergent nozzle for cavitating water jet [J]. Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2013, 1(3): 102-107.
- [8] WATANABE R, YANAGISAWA K, YAMAGATA T, et al. Simultaneous shadowgraph imaging and acceleration pulse measurement of cavitating jet [J]. Wear, 2016, 358-359: 72-79.
- [9] TRUMMLER T, SCHMIDT S J, ADAMS N A. Investigation of condensation shocks and re-entrant jet dynamics in a cavitating nozzle flow by Large-Eddy Simulation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 125: 103215.

- [10] LI Fuzhu. Study on dynamic evolution of cavitation clouds and optimization of standoff distance in water cavitation peening[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(9):120.
- [11] 杨春敏. 空化射流喷丸对金属表面性能强化影响的试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
- [12] WANG Yichun, CHEN Yuwen. Application of piezoelectric PVDF film to the measurement of impulsive forces generated by cavitation bubble collapse near a solid boundary[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32(2):403-414.
- [13] 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))
- [14] 应崇福, 安宇. 声空化气泡内部的高温和高压分布[J]. *中国科学 (A 辑)*, 2002, 32(4):305-313. ( YING Chongfu, AN Yu. High temperature and high pressure distribution in acoustic cavitation bubbles [J]. *Science in China (Series A)*, 2002, 32(4):305-313. (in Chinese))
- [15] PECHA R, GOMPF B. Microimplosions: cavitation collapse and shock wave emission on a nanosecond time scale[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(6):1328-1330.
- [16] SUSLICK K S, HAMMERTON D A, CLINE R E. Sonochemical hot spot [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1986, 108(18):5641-5642.
- [17] CHAHINE G L, KALUMUCK K M, FREDERICK G S, et al. Visualization study of structured cavitating jets[C]// *Proceedings of the ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum*. Atlanta: American Society of Mechanical Engineers, 1987.
- [18] WU Xiaoya, ZHANG Yiqun, TAN Yawen, et al. Flow-visualization and numerical investigation on the optimum design of cavitating jet nozzle [J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(5):2284-2296.
- [19] 谭雅文, 张逸群, 于超, 等. 空化射流空化云形态变化规律和流场稳定性研究[J]. *石油科学通报*, 2022, 7(1):71-80. ( TAN Yawen, ZHANG Yiqun, YU Chao, et al. Evolution of the cavitation cloud and stability of flow fields in a cavitating jet [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2022, 7(1):71-80. (in Chinese))
- [20] 彭炽, 李根生, 田守嵘. 淹没空化射流空泡云动态变化规律研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(2):228-239. ( PENG Chi, LI Gensheng, TIAN Shouceng. Dynamics of cavitation cloud in submerged cavitation water jet [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(2):228-239. (in Chinese))
- [21] LI Dezheng, KANG Yong, SHI Hanqing, et al. Cavitation cloud dynamic characteristics of dual-chamber self-excited oscillatory water jet [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2022, 39(12):3214-3226.
- [22] FANG Zhenlong, HOU Wenjiang, XU Zhifan, et al. Large eddy simulation of cavitation jets from an organ-pipe nozzle: the influence of cavitation on the vortex coherent structure [J]. *Processes*, 2023, 11(8):2460.
- [23] PENG Chi, TIAN Shouceng, LI Gensheng. Determination of the shedding frequency of cavitation cloud in a submerged cavitation jet based on high-speed photography images [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(1):127-139.
- [24] JASPER S, HUSSONG J, LINDKEN R. PIV investigation of high Reynolds number submerged water jets at high-pressure ambient conditions [J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 62(5):97.
- [25] JAHANGIR S, WAGNER E C, MUDDE R F, et al. Void fraction measurements in partial cavitation regimes by X-ray computed tomography [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 120:103085.
- [26] DUKE D J, SWANTEK A B, KASTENGREN A L, et al. X-ray diagnostics for cavitating nozzle flow [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 656:012110.
- [27] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 等. 自振空化射流研究与应用进展 [J]. *中国工程科学*, 2005, 7(1):27-32. ( LI Gensheng, SHEN Zhonghou, ZHOU Changshan, et al. Advances in investigation and application of self-resonating cavitating water jet [J]. *Engineering Science*, 2005, 7(1):27-32. (in Chinese))
- [28] ZHOU Wenjun, ZHAO Meng, LIU Bo, et al. Investigation of hydroxyl-terminated polybutadiene propellant breaking characteristics and mechanism impacted by submerged cavitation water jet [J]. *Defence Technology*, 2024, 33:559-572.
- [29] SOYAMA H, LICHTAROWICZ A, MOMMA T, et al. A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120(4):712-718.
- [30] 刘韩生, 于志忠, 杨顺玉, 等. 利用水听器测定空化位置初探 [J]. *西北水资源与水工程*, 1994, 5(2):59-62. ( LIU Hansheng, YU Zhizhong, YANG Shunyu, et al. Preliminary study on determination of cavitation position by hydrophone [J]. *Water Resources & Water Engineering*, 1994, 5(2):59-62. (in Chinese))
- [31] CAI Tengfei, PAN Yan, MA Fei, et al. Effects of ambient pressure on the frequency characteristics of self-excited cavitating waterjet [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 237:109623.
- [32] 张有智, 刘博, 赵蒙, 等. 空化场中固体推进剂表面空化冲击载荷的测量方法及装置: CN115711694A [P].

- [33] 黄彪,吴钦,王国玉. 非常空化流动研究现状与进展[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(1):1-14. (HUANG Biao, WU Qin, WANG Guoyu. Progress and prospects of investigation into unsteady cavitating flows[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1):1-14. (in Chinese))
- [34] FRANC J P, MICHEL J M. Fundamentals of Cavitation [M]. Dordrecht; Springer, 2005.
- [35] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. Cambridge; Cambridge University Press, 2013.
- [36] GILMORE F R. The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid [R]. Pasadena; California Institute of Technology, Hydrodynamics Laboratory, 1952;1-40.
- [37] FUJIKAWA S, AKAMATSU T. Effects of the non-equilibrium condensation of vapour on the pressure wave produced by the collapse of a bubble in a liquid [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1980, 97(3):481.
- [38] AKHATOV I, LINDAU O, TOPOLNIKOV A, et al. Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble [J]. Physics of Fluids, 2001, 13(10):2805-2819.
- [39] ZHANG Aman, LI Shimin, CUI Pu, et al. A unified theory for bubble dynamics [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(3):033323.
- [40] RAYLEIGH L. VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1917, 34(200):94-98.
- [41] REYNOLDS O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels [J]. Philosophical Transactions, 1883, 174:935-982.
- [42] APTE D, GE Mingming, COUTIER-DELGOSHA O. Numerical investigation of a cavitating nozzle for jetting and rock erosion based on different turbulence models [J]. Geenergy Science and Engineering, 2023, 231:212300.
- [43] CHEBLI R, AUDEBERT B, ZHANG G, et al. Influence of the turbulence modeling on the simulation of unsteady cavitating flows [J]. Computers & Fluids, 2021, 221:104898.
- [44] 王连安,徐艳,王尊策,等. 风琴管喷嘴空化水射流流场的大涡模拟[J]. 机械科学与技术,2024,43(9):1514-1521. (WANG Lianan, XU Yan, WANG Zunce, et al. Large eddy simulation on organ pipe cavitation nozzle [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(9):1514-1521. (in Chinese))
- [45] 陈松平,李伟,张文全,等. 缩放型喷嘴空化流动特性的数值分析[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(3):275-280. (CHEN Songping, LI Wei, ZHANG Wenquan, et al. Numerical analysis of shear cavitation flow characteristics of convergent-divergent nozzles [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(3):275-280. (in Chinese))
- [46] ZHU Runyu, ZHU Haitao, ZHANG Xiaohui. Numerical investigation about the unsteady behavior of a free submerged cavitation jet using the SBES approach [J]. Ocean Engineering, 2023, 281:115010.
- [47] 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))
- [48] JOHNSON V E JR, KOHL R A, THIRUVENGADAM A, et al. Tunnelling, fracturing, drilling, and mining with high speed water jets utilizing cavitation damage [C]// Proceedings International Symposium on Jet Cutting Technology. Cambridge; BHRA Fluid Engineering, 1972: A3. 37-A3. 55.
- [49] TRUMMLER T, SCHMIDT S J, ADAMS N A. Numerical prediction of erosion due to a cavitating jet [J]. Wear, 2022, 498-499:204304.
- [50] LIU Boshen, MA Fei. Erosion behavior of aluminum by an inclined cavitating jet [J]. Wear, 2021, 474-475:203751.
- [51] 林兴华,张敏革,秦青,等. 空化射流流场数值模拟的研究进展[J]. 化工进展,2015,34(4):921-929. (LIN Xinghua, ZHANG Minge, QIN Qing, et al. Progress in the numerical simulation for cavitation jet flow field [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4):921-929. (in Chinese))
- [52] 张浩男. 基于机器学习的空化射流喷嘴结构优化[D]. 大庆:东北石油大学,2021.
- [53] 周文君,刘博,张有智,等. 淹没空化水射流破碎 HTPB 工艺多目标优化[J]. 火炸药学报,2022,45(2):277-284. (ZHOU Wenjun, LIU Bo, ZHANG Youzhi, et al. Multi-objective optimization for HTPB propellant breaking process by submerged cavitating water jet [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(2):277-284. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-25 编辑:俞云利)