

空化场中固体材料表面空化冲击力 测量方法综述

张有智, 刘 博, 马有志, 高 元
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对空化场中的空化冲击力测量在空化理论研究、技术开发和工程设计等方面的重要作用, 从实验测量的角度, 综述了空化场中固体材料表面空化冲击力测量方法研究的发展概况, 重点分析了基于压电晶体/金属压杆和基于聚偏二氟乙烯压电薄膜这 2 类主要测量方法的原理、装置设计以及存在的技术难点与问题, 展望了空化冲击力测量方法未来发展方向, 并提出了所要解决的关键问题。

关键词: 空化; 空化冲击力; 测量方法; 压电传感器

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-111-008

A Review of Measurement Methods for Cavitation Impact Force on the Surface of Solid Materials in a Cavitation Field

ZHANG Youzhi, LIU Bo, MA Youzhi, GAO Yuan
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: As the measurement of cavitation impact force plays an important role in cavitation theory research, technological development and engineering design, this paper summarized the research progress of measurement methods for cavitation impact force on the surface of solid materials in a cavitation field from the experimental viewpoint. The principle and device design of two main measurement methods respectively based on piezoelectric crystal/metal pressure rod and polyvinylidene fluoride piezoelectric film, as well as the technical difficulties and problems were analyzed in detail. Finally, directions and trends of measurement methods for cavitation impact force in the future were prospected, and the key technical issues were proposed.

KEYWORDS: cavitation; cavitation impact force; measurement method; piezoelectric transducer

空化是一种非常重要的复杂流体动力学现象, 长期以来一直是流体动力学领域研究的重点与难点课题之一^[1]。空化现象普遍存在于火箭发动机液体燃料泵、船舶及水下兵器, 以及水轮机、泵、阀和水工建筑等领域^[2-3]。空化的发生会引起内部流场不稳、产生大压力脉冲和负载突变, 使相关

装备设备出现性能下降、产生结构振动和噪声、材料空蚀破坏等系列负面影响^[4-5]。特别是空蚀, 作为空化最为显著的破坏作用, 会给相关设备和构件造成严重威胁^[2]。当然, 科学地利用空化现象也会变“害”为“益”并起到意想不到的技术效果。例如: 利用空化的减阻效应设计的超空泡

收稿日期: 2024-04-03

第一作者: 张有智 (1970—), 男, 教授, 主要从事特种能源理论与技术研究。E-mail: zyouchi@163.com

引用格式: 张有智, 刘博, 马有志, 等. 空化场中固体材料表面空化冲击力测量方法综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 111-118.

鱼雷, 可使航行阻力大幅降低, 航速大幅提升^[6]; 利用空泡溃灭产生的局部瞬间高温高压强化化学反应降解有机污染物^[7]; 利用空泡溃灭产生的空化冲击强化射流作用效果来处理废旧弹药装药^[8]、清洗结构物表面附着物和污垢层^[9]、地下钻探(提高破岩效率)和金属材料表面修饰(提高疲劳强度)^[10-12], 等等。因此, 空化研究对于高速船舶和大型水电机组^[2]、水中兵器^[4, 13]、潜射导弹^[4, 14]、低温液体火箭发动机^[15]、废旧弹药处理^[16]等方面尖端技术的研发具有重大意义。

空化冲击力是空化研究的核心问题, 在研究空蚀、抑制空蚀、金属空化喷丸加工强化、空化射流处理废旧弹药以及空化射流破岩等方面都发挥重要作用。从力学角度看, 空化冲击力是空化流场中空泡(单个空泡或空泡群)溃灭产生的冲击波、微射流与材料相互作用的结果, 属于冲击力学范畴^[2, 17]。自 Jones 和 Edwards 于 1960 年用压电晶体材料设计传感器测量空化冲击力^[18]以来, 经过 60 多年的努力, 空化冲击力测量方法已有了较大进展, 现将有关情况综述如下。

1 空化冲击力的产生及其主要特征

空化是液体内部局部范围发生的一种特有现象, 是液体中的气核(亦称为空化核)经历巨大压力变化过程中发生的气核爆炸性生长为空泡及空泡的强烈溃灭的现象。空化是一个系列过程, 涉及空泡形成、发展直至溃灭的全过程^[2, 19]。图 1 为作者用高速摄像机拍摄的水力空化射流(喉径 1.5 mm 的亥姆霍兹空化喷嘴, 上游压力 22.5 MPa, 下游压力 0.1 MPa, 高速摄像机帧率 150 000 帧/s)图像, 可以看出大量空泡与水射流混合形成空化云。空泡溃灭产生强大的冲击波和高速微射流, 冲击波的影响范围可达空泡初始半径的 2 倍以上^[2], 微射流直径大约为空泡直径的 1/10^[19], 冲击波和微射流作用于物体表面即产生冲击力, 这种冲击力就是空化冲击力。

空化冲击力具有下述特征。

(1) 数值较大。根据众多理论计算和试验结果, 目前, 学术界比较公认的空泡溃灭产生的冲击波压力峰值量级为 $10^2 \sim 10^4$ MPa^[20], 空泡溃灭产生的微射流速度峰值量级为 $10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[20-21]。如此强烈的冲击波和微射流作用于物体表面时所产生的冲击力是相当可观的, 根据现有文献, 其量级

为 $10^1 \sim 10^2 \text{ N}$ ^[19]。



图 1 高速摄像机拍摄的水力空化射流图像

Fig. 1 Hydrodynamic cavitation jet photographed by a high-speed camera

(2) 作用时间极短。量级为 $10^{-1} \sim 10^1 \mu\text{s}$ ^[2, 19, 22], 因而要求测力传感器具有至少 1 MHz 以上自然频率。法国格勒诺布尔第一大学教授 France 等^[23]在其著作《空化基础》中指出: 由于空泡溃灭产生的压力脉冲上升时间很短, 空化冲击力传感器需要很高的自然频率, 至少也要 1 MHz。

(3) 作用面积极小。作用面积等效圆半径量级为 $10^0 \sim 10^2 \mu\text{m}$ ^[2, 19, 22, 24], 远远小于传感器敏感区面积(直径一般为 mm 量级)。空化冲击力作用面积如此之小, 而空化冲击力又相当大, 因此, 空化冲击压强很高, 量值可达 GPa 以上, 可使材料产生塑性变形并形成凹坑。

(4) 空化冲击过程中材料的应变率极高, 可达 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ^[19, 23]。高应变率下, 材料动态力学行为显著改变, 例如, Okada 等^[25]研究认为, Al、Cu、Fe、Ni 等金属材料在空化冲击载荷作用下的硬度比静态载荷作用下的硬度高 1 个数量级以上。

(5) 通常工况下, 空化流场中空化冲击的频次很高。据报道, 微射流对固体壁面的冲击频次达 $100 \sim 1\,000 \text{ 次}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ^[2, 21]。作者在水力空化射流实验(喉径 1.3 mm 的锥形空化喷嘴, 上游压力 12.5 MPa, 下游压力 0.1 MPa)中发现, 敏感区直径为 8 mm 的圆形聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)传感器采集到的空化冲击频率可达 1 000 次以上。

以上这些特征的存在使得空化冲击力的测量十分困难。

2 空化冲击力测量方法

基于现有文献, 测量空化场中固体材料表面

空化冲击力的主要方法有基于压电晶体/金属压杆方法和基于 PVDF 压电薄膜方法, 其他方法研究很少。

2.1 基于压电晶体/金属压杆的测量方法

该方法的测量装置如图 2 所示。

基本原理: 金属压杆上端面暴露于空化场中, 空泡溃灭产生的冲击波或微射流作用于金属压杆上端面产生冲击力, 应力波通过金属压杆传播至压电晶体和反射金属杆, 压电晶体在应力波作用下产生的脉冲电压信号由数据采集系统采集并记录, 根据空化冲击脉冲信号电压幅值和传感器标定数据计算冲击力。传感器的动态标定通常采用落球冲击法^[23]。

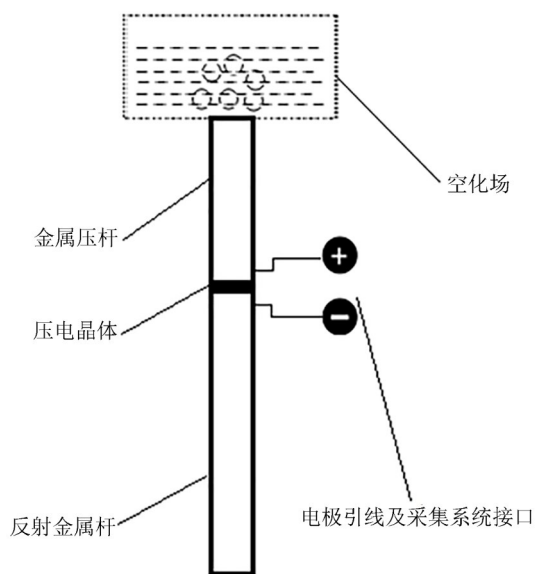


图 2 压电晶体/金属压杆装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of piezoelectric crystal/metal pressure rod device

1960 年,《Journal of Fluid Mechanics》报道英国亚伯大学 Jones 等^[18]采用压电晶体/金属压杆装置(如图 3 所示)测量了水体中由钨针放电产生的单空泡溃灭对硬铝杆上端面产生的空化冲击力。其中: 石英晶片作为压电体; 为匹配声阻抗以抑制反射应力波, 压杆由硬铝棒、重硅酸盐燧石玻璃棒、铅棒组成; 反射杆为铅棒。以铜盒作为外壳, 外壳与传感器元件之间采用油封。基于测量得到的空泡溃灭对硬铝表面产生的冲击力, 估算冲击压强峰值可达 10^3 MPa 以上。

为了满足测量空化流场中空化冲击力的需求, 研究者对压电晶体/金属压杆装置持续进行了改进。Okada 等^[26-27]采用直径 10 mm、厚 0.5 mm 的

压电陶瓷片, 以直径 2 mm、长 14 mm 的不锈钢棒(底端面直径 10 mm)作为压杆和直径 10 mm、长 100 mm 铜棒为反射杆组成传感器, 外壳与传感器之间用软硅橡胶填充密封。传感器的标定采用落球冲击法, 钢球直径 4.75 mm、质量 0.446 g, 落高 10~210 mm。他们采用该装置在磁致伸缩振动空化场中进行了系列实验, 通过高通滤波器去除 14.5 kHz 的磁致振动波, 得到了空化冲击力脉冲波形, 并基于实验数据得出: 对于铝、铜和软钢, 形成直径 4 μm 的凹坑所需的空化冲击力分别为 9.1 N、9.7 N 和 13.7 N。

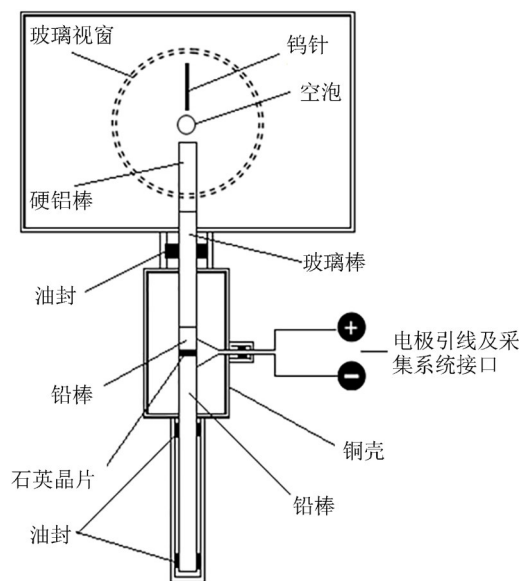


图 3 文献[18]使用的测量装置

Fig. 3 Schematic diagram of the measuring device used in Reference [18]

后来, Okada 等^[28-29]又对测量装置进行了 2 次改进。第 1 次改进: 主要是将压电体替换为直径 3 mm、厚 0.2 mm、自然频率 10 MHz 的压电陶瓷片, 压电陶瓷片下端与反射铜棒上端面用导电黏合剂连接, 使用收缩管和 O 形圈提供绝缘、密封防水和排除外部振动。第 2 次改进: 如图 4 所示, 压电体仍然是直径 3 mm、厚 0.2 mm、自然频率 10 MHz 的压电陶瓷片, 但金属压杆(试件)的形状以及压电片与压杆、反射杆之间的结合方式改进较大, 主要是压杆为倒“T”形金属件(长杆直径 3 mm, 圆盘底座直径 16 mm), 压电陶瓷片的上下表面分别通过导电黏合剂与直径 16 mm 铜盘、直径 3 mm 的铜棒(反射杆)结合, 压杆的圆盘底座与铜盘用螺栓固定; 有机玻璃外壳与传感器之间填充环氧树脂密封防水、防止振动。采用

改进的装置, Okada 等^[29]在文丘里管(温度 25 ℃, 喉部水流速 30 m·s⁻¹, 空化数 0.592)和磁致振动(温度 25 ℃, 振幅 40 μm, 振动片与测试面间距 1 mm, 振动频率 19.5 kHz)空化场中测量得到的铜试件表面最大冲击力分别为 30.2 N、10.3 N^[29]。Mori 等^[30]、Hattori 等^[31]和 Filali 等^[32]以自然频率 8 MHz 的压电陶瓷片作为压电体也设计了类似的测量装置, 在此不再赘述。

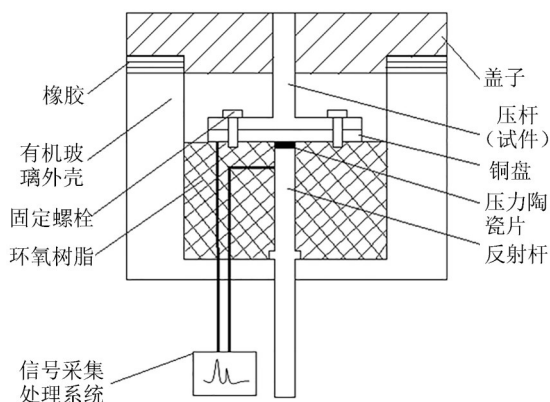


图 4 Okada 等第 2 次改进的装置^[29]

Fig. 4 Schematic diagram of the device improved by Okada for the second time^[29]

基于压电晶体/金属杆装置测量水体空化场中固体材料表面空化冲击力的方法, 其难点在于: 一是为达到声阻抗的正确匹配, 抑制反射应力波引起的信号失真, 需要对入射金属杆、反射金属杆进行优化设计以及大量的实验验证。但在实际应用中, 由于单位面积、单位时间的空化冲击频次很高, 反射应力波引起的空化冲击信号失真问题难以完全避免; 二是为保证测量结果的可靠性, 传感器的动态标定需要保证所施加的冲击信号波形同空化冲击基本一致, 冲击作用时间和冲击力的幅值同空化冲击具有相同的数量级^[23], 这对传统的落球冲击标定法来说是一个巨大的挑战; 三是为提高测试灵敏度, 需要压下杆端面、压电晶体片、反射杆上端面三者之间既要可靠紧密接触又不能施加较大的外应力, 这对传感器的结合、包装和密封都提出了很高的要求。

2.2 基于 PVDF 压电薄膜的测量方法

极化的 PVDF 薄膜因具有压电应变常数高、声阻抗低、动态敏感(对应力变化响应快)、灵敏度高、薄而柔韧性好等优越性能而受到广泛关注^[33-35]。特别是: ①通常 PVDF 膜的自然频率高达 10 MHz 以上(自然频率 f_n 与其厚度 t 和音速 C

(2200 m·s⁻¹) 的关系式为 $f_n = C/2t$ ^[36], 常用的 PVDF 膜的厚度有 110 μm、50 μm、25 μm 等几种, 其自然频率分别为 10 MHz、22 MHz、44 MHz), 完全满足空化冲击力传感器应具有至少 1 MHz 以上自然频率的要求; ②PVDF 的压电应变常数高、不需要电荷放大器就可以获得响应优异的低噪声信号^[35-36]; ③与压电陶瓷相比, PVDF 的声阻抗低, 与水的声阻抗匹配性好, 使其在水中能更有效地转换声信号, 从而有更优异的灵敏度和高带宽^[37]。这些特征使 PVDF 薄膜成为空化冲击力测试传感器的理想材料。

PVDF 薄膜薄而柔韧, 可以很方便地制作成各种形状的传感器并粘贴于固体表面。通常情况下, 基于 PVDF 膜制作的水体空化场中固体表面空化冲击力传感器的组成与结构如图 5 所示。

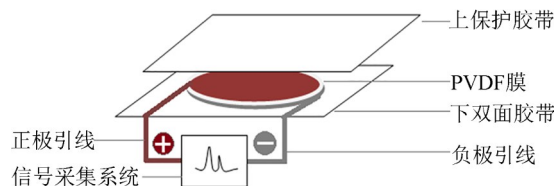


图 5 PVDF 传感器组成结构

Fig. 5 PVDF transducer composition and structure

由图 5 可以看出, PVDF 压电薄膜位于底层双面胶带和上层保护胶带之间, 上下胶带合力使 PVDF 薄膜密封、绝缘、防水。同时, 上层胶带还起保护 PVDF 膜作用, 底层双面胶带还起粘贴固定作用。从 PVDF 膜上下表面金属电极引出的接线接入信号采集系统。

基于 PVDF 压电薄膜测量方法的工作原理是: 在空化场中, PVDF 膜在空化冲击作用下产生脉冲电压信号, 并由数据采集系统采集、记录, 根据空化冲击脉冲信号电压幅值、传感器标定曲线计算冲击力。传感器的动态标定通常采用落球冲击法^[32, 36, 38]。

Momma 等使用厚 110 μm 的 PVDF 薄膜、上层聚酰亚胺 (Polyimide, PI) 胶带、底层 Kapton 胶带, 制作了 PVDF 敏感区面积为 8.8 mm² 的空化冲击力传感器, 将其粘贴在不锈钢靶板上, 使用英国诺丁汉大学的淹没空化水射流装置(喷嘴口径 2.0 mm、长 5.0 mm), 在相同工况(上游压力 8 MPa、下游压力 0.24 MPa、空化数 0.03、喷距 40 mm)条件下测量得到了空化冲击力分布与空化冲击凹痕尺寸分布, 部分典型数据列于表 1^[38]。

PVDF 空化冲击力传感器所采用的传统落球标定法存在的主要问题是：落球直径较大，落球自由落体产生冲击速度，在落高不大的情况下，冲击速度通常很小，因此落球冲击 PVDF 压电薄膜产生脉冲信号的持续时间至少是空化冲击脉冲信号的 4 倍，即传感器的标定条件与空化冲击特性相差较大，从而对测量结果的准确性产生影响。为了解决这个问题，Soyama 等^[36]开发了铅笔芯折断标定法来标定 PVDF 传感器，该法得到的脉冲信号波形持续时间及上升时间与空化冲击信号基本一致。

表 1 文献[38]得到的部分典型数据
Tab. 1 Partial typical data obtained by Reference [38]

测量条件	空化冲击凹痕直径/ μm	空化冲击力/N
上游压力 8 MPa 下游压力 0.24 MPa 空化数 0.03 喷距 40 mm	10	22.4
	20	27.9
	30	34.6
	50	40.0
	100	46.4
	150	50.7
	200	58.0

Filali 等^[32, 39]利用 Cavermod (Cavitation Erosion Model) 装置产生高速空化涡流的轴向溃灭，分别对 MgO 单晶、压电陶瓷片/金属压杆、PVDF 压电薄膜等方法测量空化冲击力进行了研究。其中，PVDF 压电薄膜空化冲击力传感器的结构为：PVDF 膜厚 40 μm 、自然频率 25 MHz、敏感区直径 5 mm，由 2 层聚酰亚胺胶带密封于中间，并通过底层双面聚酰亚胺胶带粘贴于金属靶上。对于长涡空化，当 Cavermod 装置转速 4 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、活塞位移 0.5 mm 条件下，测量得到的空化冲击力与驱动压差 Δp 成线性关系，且当 $\Delta p = 0.4 \text{ MPa}$ 时，空化冲击力接近 300 N。

需要特别指出的是：图 5 所示的 PVDF 压电传感器粘贴固定在靶件上，测试得到的空化冲击力是空泡溃灭产生的微射流、冲击波与上层胶带动态作用的结果，并非空化作用直接冲击靶件产生的冲击力。因此，当胶带与靶件材质差异较大时，测量结果的可靠性值得怀疑。文献[32]曾指出，用图 5 所示的 PVDF 传感器粘贴在金属靶件和压电陶瓷/铜压杆装置上，在同等条件下测得的

最大空化冲击力数值相差近 1 倍。笔者认为其原因可能就在于此。

张有智等^[40]基于 PVDF 压电薄膜设计制作了 PVDF/端羟基聚丁二烯 (Hydroxyl-terminated Polybutadiene, HTPB) 推进剂复合传感器，并以电磁式加速器垂直加速小型不锈钢弹丸的冲击标定传感器（相比传统落球标定法，弹丸尺寸更小、冲击速度更快，产生的冲击作用时间更短而接近空化冲击），测量了水力空化射流场中复合固体推进剂 HTPB 表面的空化冲击力。PVDF/HTPB 复合传感器采集得到的空化冲击脉冲信号可直接反映空化场中空化对 HTPB 推进剂表面的冲击力学响应，解决了现有技术无法测量固体推进剂等火炸药表面所受的空化冲击力的难题。

2.3 其他测量方法

除了以上 2 种方法外，也有个别文献报道了基于 MgO 单晶位错组态和直接利用商用压电传感器测量空化冲击力的方法，在此进行简要介绍。

2.3.1 基于 MgO 单晶位错组态的测量方法

MgO 单晶位错组态最初应用于润滑领域，后来被用于空化冲蚀^[32]。MgO 单晶在滑移系方面具有简单特性，遭受冲击载荷时，即使在高应变率下其表面上也能清晰地显示出位错蚀斑。利用 MgO 单晶的这种特性，Okada 等^[41]将 MgO 单晶暴露在振动空化场中，空化冲击载荷作用于单晶表面产生位错蚀斑组态，实现了空化冲击载荷作用痕迹的可视化，使从力学角度评估空化损伤成为可能。Filali 等^[32]首先使用静态洛氏硬度法测试产生的压痕来校准 MgO 单晶，然后利用 MgO 单晶并通过 Cavermod 装置，在 Cavermod 装置转速 4 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、活塞位移 0.1 mm 条件下，测量得到的空化冲击力与驱动压差 Δp 成线性关系，且当 $\Delta p = 0.1 \text{ MPa}$ 、0.4 MPa 时，空化冲击力分别为 20 N 和 150 N。

2.3.2 基于商用压电传感器的测量方法

Franc 等^[42]直接利用某型商用压电传感器（外径 6.2 mm，敏感区直径 3.6 mm，自然频率 >250 kHz，上升时间 < 2 μs ）在循环水洞中测量空化冲击力。传感器采用落球法标定，不锈钢球直径 3.6 mm、质量 0.44 g，落高 0.5 mm，冲击作用时间约 14 μs 。传感器安装在直径 100 mm 金属靶盘上且传感器表面与靶盘表面平齐，测试过程中保持空化数 $\sigma = 0.9$ 不变、空腔长度不变，测试得到了不同工况（上游压力分别为 1 MPa、1.5 MPa、2.0

MPa、3.0 MPa、4.0 MPa) 下的空化冲击载荷谱, 空化冲击力在 100~500 N 范围。

空化冲击力传感器需要至少 1 MHz 的自然频率, 但当前一般的商用压电传感器的自然频率往往低于 1 MHz, 当空化冲击载荷的特征频率大大超过传感器的自然频率时, 传感器不能准确跟踪冲击信号的上升而使信号幅值被低估^[42]。

3 总结与展望

空化冲击力作为空化研究的核心问题, 获取准确的空化冲击力是空化理论与技术研究、相关领域工程设计所必需, 空化冲击力的测量具有良好的应用前景^[43-45]。但由于空化冲击具有作用时间极短、作用面积积极小、冲击过程材料应变率极高等极端特性, 致使空化冲击力的测量十分困难。所以, 尽管对空化冲击力测量方法的研究已有 60 余年, 在国内外相关研究人员的持续努力下也有了很大进展, 但总体来说, 研究人数、文献数量偏少, 且报道的研究结果彼此之间尚存在较大的差异。因此, 关于空化冲击力测量方法的研究仍然有很大发展空间。

(1) 关于基于压电晶体/金属压杆装置的测量方法。虽然该方法对测量装置的设计制作要求极高, 但该方法能在测量金属材料表面空化冲击力的同时观察金属表面(经抛光处理)产生的空化冲击凹痕、测量金属材料空蚀产生的质量损失, 从而计算空化冲击压强和空化强度, 这具有非常大的理论与工程应用价值。目前未见有用该方法测量非金属材料表面空化冲击力方面的文献报道, 如果能通过声阻抗的恰当匹配、脉冲信号的科学处理, 实现空化场中非金属材料表面空化冲击力的测量, 将进一步拓展该方法的研究空间。

(2) 关于基于 PVDF 压电薄膜的测量方法。由于 PVDF 是高分子压电材料, 声阻抗低且与水的声阻抗匹配性好, 是水体空化场中空化冲击力测试传感器的理想材料。通过声阻抗的正确匹配, 将塑料、橡胶等高分子材料以及复合固体推进剂、高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)等含能材料与 PVDF 膜复合, 设计制作复合型传感器, 实现水体空化场中上述材料表面空化冲击力的测量, 将是非常重要且有广阔应用前景的发展方向。

(3) 关于空化冲击力传感器的标定。应根据

空化冲击的特性及空化冲击脉冲信号特征, 进一步研究建立与上述特性、特征相一致的空化冲击力传感器标定方法, 替代传统的落球冲击标定法, 以提高空化冲击力测量的准确性。

参考文献:

- [1] 季斌, 程怀玉, 黄彪, 等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望[J]. 力学进展, 2019, 49: 428-479.
JI B, CHENG H Y, HUANG B, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation[J]. Advances in Mechanics, 2019, 49: 428-479.
- [2] 罗先武, 季斌, 彭晓星, 等. 空化基础理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [3] 郑雪玉, 吴时强, 杨家修. 水工建筑物初生空化数及其比尺效应研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 87-94.
ZHENG X Y, WU S Q, YANG J X. Research progress of incipient cavitation number and its scale effects in hydraulic structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 87-94.
- [4] 吴钦, 郭一梦, 刘韵晴, 等. 非定常空化流动及其诱导振动特性研究综述[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 746-760.
WU Q, GUO Y M, LIU Y Q, et al. Review on the cavitating flow-induced vibrations[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(4): 746-760.
- [5] 张伟, 杨朴, 朱兵. 云空化结构的溃灭与空蚀风险预估研究进展[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4): 761-770.
ZHANG W, YANG P, ZHU B. Review of cloud cavitation structure collapse and its prediction of erosion risk[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(4): 761-770.
- [6] 寇祝, 刘晓光, 李伟. 世界超高速鱼雷发展现状与关键技术[J]. 飞航导弹, 2019(7): 56-58.
- [7] 王秀礼, 赵国辉, 徐伟, 等. 有机废水水动力空化降解研究综述[J]. 排灌机械工程学, 2023, 41(9): 913-919.
WANG X L, ZHAO G H, XU W, et al. Review on hydrodynamic cavitation degradation of organic wastewater[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(9): 913-919.
- [8] 李全俊, 王国辉, 雷林, 等. 废旧弹药拆分技术现状与发展[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 93-96.
LI Q J, WANG G H, LEI L, et al. Present sit-

- uation and development of waste ammunition decomposition technology[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(5): 93-96.
- [9] 张宇, 巩雪, 刘贞军. 空化射流清洗设备的选型分析[J]. *石油和化工设备*, 2021, 24(7): 122-124.
- [10] PENG K W, TIAN S C, LI G S, et al. Mapping cavitation impact field in a submerged cavitating jet[J]. *Wear*, 2018, 396-397: 22-33.
- [11] PENG K W, TIAN S C, LI G S, et al. Cavitation in water jet under high ambient pressure conditions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 89: 9-18.
- [12] SOYAMA H, CHIGHIZOLA C R, HILL M R. Effect of compressive residual stress introduced by cavitation peening and shot peening on the improvement of fatigue strength of stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 116877.
- [13] 黄彪, 黄瀚锐, 刘涛涛, 等. 通气空泡流动特性研究现状及进展[J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(4): 724-745.
- HUANG B, HUANG H R, LIU T T, et al. Research progress and prospects of ventilated cavitating flows characteristics[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2020, 38(4): 724-745.
- [14] 张重先, 李向林, 刘玉秋. 潜射导弹出水过程空化流数值计算[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(3): 160-166.
- ZHANG C X, LI X L, LIU Y Q. Numerical investigation of water-exit cavitation flow of submarine-launched missile[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(3): 160-166.
- [15] 项乐, 许开富, 陈晖, 等. 液体火箭发动机涡轮泵低温空化实验研究进展[J]. *航空学报*, 2023, 44(7): 27131.
- XIANG L, XU K F, CHEN H, et al. Experimental studies on cavitating flow for liquid rocket engine cryogenic turbopump: Review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(7): 27131.
- [16] 史明明, 万丽强, 陆鹏, 等. 国内外报废弹药处理技术发展现状[J]. *火工品*, 2022(3): 75-80.
- SHI M M, WAN L Q, LU P, et al. Present situation of obsolete ammunitions disposal technologies development at home and abroad[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022(3): 75-80.
- [17] SOYAMA H. Cavitating jet: A review[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20): 7280.
- [18] JONES I R, EDWARDS D H. An experimental study of the forces generated by the collapse of transient cavities in water[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, 7(4): 596-609.
- [19] KIM K H, CHAHINE G, FRANC J P, et al. Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [20] 蔡军, 淮秀兰, 刘斌, 等. 液体空化技术应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 17-18.
- [21] 潘森森, 彭晓星. 空化机理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 123-126.
- [22] CHOI J K, CHAHINE G L. Relationship between material pitting and cavitation field impulsive pressures[J]. *Wear*, 2016, 352-353: 42-53.
- [23] FRANCE J P, MICHEL J M. 空化基础[M]. 宋云露, 冯光译. 北京: 国防工业出版社, 2017: 220-222.
- FRANCE J P, MICHEL J M. *Fundamentals of Cavitation*[M]. Netherlands: Springer, 2005.
- [24] SOYAMA H, FUTAKAWA M, HOMMA K. Estimation of pitting damage induced by cavitation impacts[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, 343(1-3): 116-122.
- [25] OKADA T, IWAI Y, ISHIMARU H, et al. Measurement and evaluation of cavitation bubble collapse pressures[J]. *JSME International Journal*, 1994, 37(1): 37-42.
- [26] OKADA T, IWAI Y, AWAZU K. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion, part 1: A method for measurement of collapse pressures[J]. *Wear*, 1989, 133: 219-232.
- [27] IWAI Y, OKADA T, TANAKA S. A study of cavitation bubble collapse pressures and erosion, part 2: Estimation of erosion from the distribution of bubble collapse pressures[J]. *Wear*, 1989, 133: 233-243.
- [28] OKADA T, IWAI Y, ISHIMARU H, et al. Measurement and evaluation of cavitation bubble collapse pressures[J]. *JSME International Journal*, 1994, 37(1): 37-42.
- [29] OKADA T, IWAI Y, HATTOI S, et al. Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse[J]. *Wear*, 1995, 184: 231-239.
- [30] MORI H, HATTORI S, OKADA T. Role of bubble collapse pressure in cavitation erosion[J]. *JSME International Journal*, 1998, 41(1): 96-102.
- [31] HATTORI S, MORI H, OKADA T. Quantita-

- tive evaluation of cavitation erosion[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120: 179-185.
- [32] FILALI E G, MICHEL J M, HATTORI S, et al. The cavermod device: Force measurements[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121: 312-317.
- [33] 谢林, 刘迎彬, 范志强, 等. 基于复合压电效应的 PVDF 传感器测量性能调控[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(4): 37-46.
- XIE L, LIU Y B, FAN Z Q, et al. Measurement performance regulation of PVDF sensor based on composite piezoelectricity[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(4): 37-46.
- [34] 白石, 周智, 申宇, 等. 基于 PVDF 的无线智能疲劳监测系统[J]. *航空学报*, 2014, 35(8): 2190-2198.
- BAI S, ZHOU Z, SHEN Y, et al. A wireless intelligent fatigue monitoring system based on PVDF[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(8): 2190-2198.
- [35] 具典淑, 周智, 欧进萍. PVDF 压电薄膜的应变传感特性研究[J]. *功能材料*, 2004, 35(4): 450-452, 456.
- JU D S, ZHOU Z, OU J P. Study on strain-sensing of PVDF films[J]. *Journal of Functional Materials*, 2004, 35(4): 450-452, 456.
- [36] 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: 712-718.
- [37] WANG Y C, HUANG C H, LEE Y C, et al. Development of a PVDF sensor array for measurement of the impulsive pressure generated by cavitation bubble collapse[J]. *Experiments in Fluids*, 2006, 41: 365-373.
- [38] MOMMA T, LICHTAROWICZ A. A study of pressures and erosion produced by collapsing cavitation[J]. *Wear*, 1995, 186-187: 425-436.
- [39] FILALI E G, MICHEL J M. The cavermod device: Hydrodynamic aspects and erosion tests[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1999, 121: 305-311.
- [40] 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: CN115711694B[P]. 2023-02-24.
- [41] OKADA T, HATTORI S, SHIMIZU M. A fundamental study of cavitation erosion using a magnesium oxide single crystal (intensity and distribution of bubble collapse impact loads)[J]. *Wear*, 1995, 186-187: 437-443.
- [42] FRANC J P, RIONDET M, KARIMI A, et al. Impact load measurements in an erosive cavitating flow[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2011, 133: 12301.
- [43] 王健, 田文慧, 赵嘉卿, 等. 水力机械中的空蚀研究综述[J]. *船舶力学*, 2020, 24(4): 536-542.
- WANG J, TIAN W H, ZHAO J Q, et al. A review of research development of cavitation erosion in hydraulic machinery[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(4): 536-542.
- [44] MELISSARIS T, SCHENKE S, BULTEN N, et al. On the accuracy of predicting cavitation impact loads on marine propellers[J]. *Wear*, 2020, 456-457: 203393.
- [45] 董建帅, 李子如, 贺伟, 等. 常见螺旋桨材料空蚀特性分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(8): 1319-1327.
- DONG J S, LI Z R, HE W, et al. Analysis of the cavitation characteristics of common propeller materials[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(8): 1319-1327.