Journal of Applied Acoustics

纪念应崇福院士诞辰100周年

# 声-流耦合空化场观测与量化表征探索\*

吴鹏飞<sup>1,2,3</sup> 白立新<sup>1,3</sup> 林伟军<sup>1,2,3†</sup> 王秀明<sup>1,2,3</sup> 张海澜<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)

**摘要** 该文利用搭建的高速摄影和空化噪声同步观测的声-流耦合空化实验平台,观察分析了声-流耦合场中 空化云的演化规律及相应的空化噪声特征。通过引入空化状态变量,给出了空化强度的一种新的明确表述, 并提出了一种基于高速摄影图像分析来测量和表征空化状态变量及空化强度的方法。利用该方法进一步对 声-流耦合空化时间演化周期性和空间强度分布进行了定量计算。结果表明,声-流耦合空化强度和作用范围 相比单独声空化和单独水力空化有显著的提升。

关键词 声空化,水力空化,空化强度,空化噪声,高速摄影

中图法分类号: O426.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)05-0801-10 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.028

# Observation and quantitative characterization of hydrodynamic-acoustic cavitation

WU Pengfei<sup>1,2,3</sup> BAI Lixin<sup>1,3</sup> LIN Weijun<sup>1,2,3</sup> WANG Xiuming<sup>1,2,3</sup> ZHANG Hailan<sup>1,2,3</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Deep Sea Drilling Measurement Engineering Technology Research Center, Beijing 100190, China)

**Abstract** In this paper, bubble clouds in hydrodynamic-acoustic cavitation (HAC) are investigated via an self-built HAC experimental platform with a high-speed camera and a PVDF needle hydrophone. Using this platform, the evolution image and the corresponding noise spectrum of HAC are obtained. Introducing a cavitation state variable, a definition of the cavitation intensity is presented, and a method based on high-speed photography image analysis for cavitation characterization is proposed. The periodic characteristics and intensity distributions of hydrodynamic cavitation, acoustic cavitation and HAC are quantitatively analyzed by this method. It is found that the range of HAC is evidently widened and the strength of HAC is significantly enhanced compared with hydrodynamic cavitation or acoustic cavitation.

**Key words** Acoustic cavitation, Hydrodynamic cavitation, Cavitation intensity, Cavitation noise, High-speed photograph

<sup>2018-06-16</sup> 收稿; 2018-08-02 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目 (11674350, 11174315)

作者简介: 吴鹏飞(1991-), 男, 甘肃平凉人, 博士研究生, 研究方向: 声空化。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: linwj@mail.ioa.ac.cn

# 1 引言

空化是液体介质中特有的一种物理现象,通常 指当液体的压强下降到足够低时液体中空泡的生 成及其后续的动力学行为<sup>[1]</sup>。按照产生方式,空化 可分为声空化、水力空化、光空化、粒子空化等<sup>[2-3]</sup>。 其中,声空化多由功率超声换能器在液体中激发产 生,故一般情况下,声空化特指的是超声空化。当 液体流经限流体,譬如孔板、文丘里管,会导致压力 下降,以至于达到液体的空化阈值而发生空化。这 种因流动引起的空化被称为流体动力空化或水力 空化。由于空化泡在急剧溃灭过程中产生的高温高 压<sup>[4]</sup>、光辐射<sup>[5]</sup>、冲击波<sup>[6]</sup>、微射流<sup>[7]</sup>等极端物理条 件及衍生的多种效应使其在很多领域有着广泛应 用<sup>[8]</sup>。

在诸多应用中,利用超声波引发和促进化学 反应很早就受到人们关注。早在1927年, Richards 等<sup>[9]</sup> 就做了关于超声波化学效应的调查报告,这 使人们意识到,超声波可以在促进化学反应过程 中发挥作用,随后陆续出现一些超声化学效应的研 究。1953年, Weissler<sup>[10]</sup>在一篇综述中第一次提到 了Sonochemistry (声化学)这个专用名词。1986年, 在 Lorimer 等<sup>[11]</sup> 的倡导下, 第一届国际声化学学术 研讨会在英国召开,不少化学家加入到声化学研 究当中,标志着Sonochemistry 成为物理-化学交叉 的学科领域。1994年,国际期刊Ultrasonics Sonochemistry 创刊, 专门接收声化学反应及其主动力 —声空化方面的文章。1996年,冯若等<sup>[12-13]</sup>在 第五届欧洲声化学学术会议上做了 Sonochemistry in China的特邀报告,我国声化学研究开始走向 世界。

近些年,国内外关于声化学方面的研究越来越 多,大量的研究表明,声化学具有巨大的潜在应用价 值<sup>[14]</sup>。然而在声化学反应器工业放大方面取得的 进展却非常有限,面临诸多瓶颈问题,诸如空化范围 小、空化强度低、经济性较差等<sup>[15-16]</sup>。2008年,应 崇福院士<sup>[17]</sup>对液体内大规模声处理中空化研究提 出几点思考并指出要使声空化从实验室研究真正 走向工程应用,一方面要设法实现高强度、大范围 的空化场即空化的工业"放大";另一方面要明确认 识空化的"作用才能"或"强度"的概念,其中一个关 键的问题就是怎么定义"强度"。此外,应先生还注 意到了流体动力空化在空化工程应用方面的潜力 并建议加深这方面的研究。随后几年,在应先生的 指导下,徐德龙<sup>[18]</sup>、李超等<sup>[19]</sup>在这些方面开展了 一些初步探索。

相比于声空化,水力空化的化学效应研究起步 较晚。这可能是因为长期以来,水力空化都是以反 面角色出现(比如对船舶螺旋桨、水泵叶片、泄洪大 坝水道的空蚀破坏,水下航行器螺旋桨产生的空化 噪声),人们研究的重点是如何防治它。随着声空 化诸多应用的发展,人们自然也开始探索水力空化 相应的应用。1993年,Pandit等<sup>[20]</sup>研究了水、蓖麻 油及红花油的水力空化水解过程,结果表明水力空 化对这两种有机物都能有效降解。随后国内外越 来越多的人对水力空化降解有机物的作用进行了 研究<sup>[21-24]</sup>,并将水力空化和声空化在降解水中有 机物时的表现进行了对比,发现水力空化具有处理 规模大、工艺简单等优点,但强度相对于声空化较 低<sup>[25-26]</sup>。

为进一步扩大空化规模,提高空化强度进而 提高声化学反应产率,人们尝试将声空化或者水 力空化与其他技术结合[27-30]。其中一种是将声 空化和水力空化联合[31-33],但这两种空化仅仅是 简单的串联,水力空化场和声空化场并不重合,即 两种空化并未耦合。我们将声空化与水力空化在 特定时空相互耦合产生的空化称为"声-流耦合空 化"(Hydrodynamic-acoustic cavitation, HAC), 在 这个名称中"声"代表的是声空化,"流"代表的是 水力空化(也叫流体动力空化)。从更广义的角度而 言,"声"代表的是波动,"流"代表的是流动。虽然 贾志富<sup>[34]</sup>在2007年中国声学学会功率超声分会上 曾提出将超声波引入到水力空化场内,使得水力空 化和声空化各自发挥优势的想法,但是首次将声空 化和水力空化耦合的想法作为一个科学问题进行 研究的是英国科学家 Amin 等<sup>[35]</sup>, 他们于 2010 年进 行了声-流耦合空化声化学实验并测量了空化产生 的羟基自由基(·OH),对单一空化和耦合空化进行 了对比,发现耦合空化的羟基自由基(·OH)产率提 高了15%。随后德国的Franke等<sup>[36]</sup>和Braeutigam 等[37-38]利用声-流耦合空化进行了一系列的有机 物降解的实验研究,并对耦合空化和单一空化进行 了对比,发现耦合空化具有协同效应,即耦合空化降 解效果比这两种空化单独作用相加的效果好。2018 年,Yi等<sup>[39]</sup>利用声空化、水力空化和声-流耦合空 化对罗丹明B进行了降解实验,并比较了不同参数 下的协同效应。

然而,截至目前,前人的工作都是利用声-流耦 合空化进行降解实验和简单的分析,并未对耦合空 化场本身的物理特性进行研究,也未对耦合空化场 的影响因素进行深入分析。本文旨在通过实验揭示 声-流耦合空化的一些初步的物理现象和规律,为其 进一步机理研究和应用提供指导。

## 2 声-流耦合空化实验平台

如图1所示,整个声-流耦合空化实验系统由声 空化激发系统、水力空化激发系统、声-流耦合腔、高 速-显微摄影系统、声压采集与同步触发控制系统 组成。



 高速提影机

 市算机

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市

 市
 </tr

(b) 实验平台示意图

图1 声-流耦合空化实验平台实物图及其示意图



声空化激发系统由换能器、电源两部分组成。 其中,换能器谐振频率为20.7 kHz,变幅杆辐射面为 矩形,尺寸为40.0 mm×62.0 mm,做纵向伸缩振动。 电源内置了电压表(分度值:10 V,量程:0~300 V) 和电流表(分度值:0.1 A,量程:0~2.0 A),其读数乘 积是换能器输入电功率。

水力空化系统由水泵、管路和喷嘴式水力空化

发生器组成。其中水泵是高扬程多级泵(MVI814-1, WILO SE),搭配变频器可以改变水泵涡轮转速从 而控制出水压力。水泵出水口至喷嘴式水力空化 发生器之间水压较大,常规的胶管容易压裂,这里 采用了非标定制的钢丝编织胶管。自制的水力空 化发生器喷口是直径为1 mm的圆形孔。测量孔板 入口压力的仪表为红旗Y-60普通压力表(分度值: 0.02 MPa, 量程: 0~1 MPa)。对于同一个喷嘴, 孔 板入口压力和孔口流速是一一对应的。换能器变 幅杆从耦合腔天花板上的窗口插入,通过法兰与 耦合腔连接固定,产生水力空化的喷嘴与耦合腔可 分离。为加快排除自来水中多余气泡的干扰,耦合 腔天花板上设计了两个排气阀。实验使用 Photron Fastcam SA-1 高速摄影机对空化云进行拍摄。 配备 的Zoom 6000型Navitar长焦显微镜头结合不同的 适配镜筒可分辨到微米级。高速摄影机曝光时间短, 进光量非常小,使用时需要辅助光源进行补光,本 文研究中使用的是PI-LUMINOR 高亮度LED常 亮光源,功率为150 W。使用 PT-1708381 聚偏氟乙 烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)探针式水听器 (中国科学院声学研究所)和DPO3032(Tektronix Inc.USA) 数字荧光示波器监测声压信号,针状水听 器通过耦合腔底部的小孔插入并用环氧树脂密封 粘接。将水听器输出信号作为触发源与高速摄影机 TTL in 触发输入端相连,可以使空化云的高速摄影数据与水听器测得的声压数据同步。

#### 3 声-流耦合空化高速摄影及噪声分析

图 2(a) 为保持换能器电功率不变,孔板入 口压力分别为0 MPa、0.150 MPa、0.300 MPa、 0.450 MPa时,两个超声周期内空化云高速摄影 照片。高速摄影机采用背透射式光补偿,空化云在 图上呈黑色(空化时,大量的空化泡通常会聚集在 一起形成团簇,称之为空化云<sup>[40-41]</sup>)。图 2(a) 中第 三列、第四列左边黑色窄带是喷口边缘的金属壁面 (由于孔板入口压力增大使喷口发生了微小前移,而 摄影机固定不动,因此,0.450 MPa时左边黑边更 多)。图中喷口水射流的方向如红色箭头所示,虚线 标示出的是同一片空化云不同时刻的位置,其倾斜 程度代表着这片空化云的移动速度。







图2(a)中第一列实际上是单独声空化。从图上 可以看到,空化云经历了两次膨胀与溃灭过程。需 要指出的是,这时的空化云看上去很模糊,这是因 为声空化云不像水力空化云那样集中在喷口轴线 附近,而是分散在换能器辐射面附近,因此,拍照 时远离焦平面的空化云会变模糊。当孔板入口压力 为0.150 MPa时,空化云显著增多。当孔板入口压 力提高到0.300 MPa时,空化云第一次膨胀和溃灭的程度比第二次大。当孔板入口压力为0.450 MPa时,空化云在两个超声周期内只完成了一次膨胀和溃灭,且膨胀的过程相对较长,表现出明显的倍周期特征。

图 2(b) 显示的孔板入口压力为 0.300 MPa, 超 声换能器电功率分别为 0 W、25.0 W、50.0 W、 100.0 W时,两个超声周期内空化云的快照。图2(b) 中第一列实际上是单独水力空化云。可以看到,空 化云并不是均匀分布,而是成"团"从喷口"脱落", 且无显著的周期特征。当超声电功率提高至25.0W 时,空化云规模显著增大。从图上能看到,空化云仍 然是成块分布,在两个超声周期内,空化云大致经 历了两次"从小到大再到小"的膨胀与收缩过程,即 这种情况下的耦合空化云中出现了和超声一致的 周期性特征。当超声波换能器电功率提高至50.0 W 时,空化云有所增大,相比超声波换能器电功率为 25.0 W时,其前一次膨胀与收缩的时间变长,后一 次膨胀与收缩的时间变短,展现出一定的倍周期特 征。当超声波换能器电功率提高至100.0 W时,可 以看到,在两个超声周期内,空化云只经历了一次膨 胀与收缩的过程,表现出明显的倍周期特征,并且空 化云成"团"分布的特征更加明显。

空化云由大量空化泡组成,其演化过程中包含 了空化泡胀缩振动的周期性特征,这种周期性特征 可以从空化噪声(空化泡作为声源辐射的噪声)中 反映出来。图3显示的是PVDF 水听器同步测量 的空化噪声谱(包含了换能器辐射的背景声)。图 中,红线代表换能器电功率为50.0 W时单独声空 化噪声谱; 蓝线代表换能器关闭, 孔板入口压力为 0.300 MPa 时单独水力空化噪声谱;黑线代表换能 器电功率为50.0 W、孔板入口压力为0.300 MPa 时 声-流耦合空化噪声谱。从图3中可以看到:水力 空化噪声谱峰值主要分布在10 kHz 以下; 声空化 噪声谱中含有频率为20.7 kHz的谱线,通常认为这 部分来自于换能器辐射声基频及气泡的小幅脉动, 10 kHz以下也出现一些峰值,幅值整体上高于水力 空化的;耦合空化的谱线在基频处相对超声空化的 明显下降,在次谐频及以下频带上升。这表明,当一 定的声空化和一定的水力空化耦合时,超声换能器 辐射的声能量更多地参与了空化,并使得整个耦合 空化加强。需要说明的是,直接通过空化云高速摄 影及噪声测量得到的结果是定性的,很难定量分析 空化强度特征。因此,接下来将介绍空化场的量化 表征方法及利用该方法对声-流耦合空化的进一步 分析。





Fig. 3 FFT amplitude spectrum of cavitation noise obtained by the PVDF needle hydrophone

### 4 声-流耦合空化场的量化表征

#### 4.1 空化状态变量 q 及空化强度的定义

空化是一个复杂的现象,它涉及诸多物理、化 学过程。目前还没有一种通用的方法对空化强度进 行统一度量。这主要是因为空化效应有很多方面, 实际的测量往往都只针对其中某一种效应。这或许 是目前"空化强度"这个提法已经被"默认"很多年, 却没有一个严格定义的根本原因。因此,实际中还 要结合具体问题给出定义并选择合适的测量方法。 Wu等<sup>[42]</sup>提出了一种基于高速摄影图像分析的空 化场测量及表征方法,在介绍该方法之前先介绍空 化状态变量q和空化强度的概念。

我们定义空化状态变量q为某一时刻在一定空间内所有空化泡的瞬时体积占据这个空间的比例, 其表示如下:

$$q(x, y, z, t) = \frac{1}{\mathrm{d}V} \sum_{j=1}^{J} \frac{4\pi}{3} R_{j}^{3}(t), \qquad (1)$$

式(1)中,  $R_i(t)$ 代表t时刻、第j个空化泡的半径; dV是位于空间位置 (x, y, z) 附近的体积元,这个体 积元相比整个空化云的尺度小很多,相比单个空化 泡的体积大很多,体积元内气泡振动是同步的。没 有发生空化时,由于气核很小,q接近于0;空化泡膨 胀时,q增大(最大值不会超过1),空化泡塌缩时,q 减小(最小值接近0); q值起伏越大,说明空化泡膨 胀塌缩越剧烈。因此,q的变化能够反映空化泡及空 化云的演化和强度特征。需要说明的是,空化状态 变量q和两相流中体积含气率(或者孔隙介质声学 中的孔隙度)在表述形式上相似,但是其物理内涵 不同。在两相流体积含气率中计入了所有气相体积 的贡献,而在空化状态变量中只计入空化泡内气相 体积的贡献,这是因为在空化场中并不是所有气泡 都是空化泡,通常只有那些剧烈胀缩着的气泡才是 空化泡。

考虑到无论空化的化学效应还是发光效应,归 根结底是因为空化泡在极短的时间内塌缩至很小 时能量聚集造成的高温高压。而q的起伏变化体现 的正是空化泡膨胀与塌缩,对q进行时间平均得到 的量代表了空化泡平均膨胀和塌缩程度,我们将其 定义为空化强度,其表示为

$$q_T(x,y,z) = \frac{1}{T} \int_T q(x,y,z,t) \mathrm{d}t.$$
 (2)

式(2)中,T为时间区间,通常取一个或多个声周期。

为了分析一定空间内空化云时间演化周期特征,我们先对q进行空间平均,即

$$q_V(t) = \frac{1}{V} \iiint_V q(x, y, z, t) \,\mathrm{d}V,\tag{3}$$

式(3)中,V为空化云的体积,它定义为包含所有空 化泡的最小单连通区域的体积。再对式(3)中的q<sub>V</sub> 进行傅里叶分析可得到其周期性信息。

#### 4.2 图像分析法测量空化状态变量 q 及空化强度

该方法有两个主要环节,如图4中两个黄色箭 头所示:第一步,建立空化状态变量q与透过空化云 的光强分布之间的物理关系;第二步,从观测照片 中提取光强分布信息,结合第一步得出空化状态变 量,再对空化状态变量进行时间平均即得到表征空 化强度的量。具体如下所述。

第一步,建立空化状态变量和光强分布观测量 之间的关系。通过上文实验观察可以发现,空化云 中的空化泡越大、越密集(q越大)的地方观察到的 空化云越"暗";反之,越"亮"。所以有空化和无空化 时观察到的透射光差别中携带了空化状态变量q的 信息。这个关系可近似地表示为

$$q(x, y, t) = \frac{1}{\mathrm{d}V} \sum_{j=1}^{J} \frac{4\pi}{3} R_j^3(t)$$
$$\approx \frac{I_0(x, y, 0) - I(x, y, t)}{I_0(x, y, 0)}, \qquad (4)$$

式(4)中,*I*(*x*,*y*,*t*)为*t*时刻一束光透过空化云在垂 直于*z*轴(光轴)某个平面(实际上是摄影机感光面)



图 4 图像分析法示意图 Fig. 4 Schematic illustration of the image analysis method for cavitation

上的光强分布。 $I_0(x, y, t)$ 是这束光在没有发生空化 时穿过同一区域在同一位置的光强。这里假设空化 云在光轴(平行于z轴)方向是均匀的(即空化状态 变量q只与x, y有关,与z无关)。作这个假设需考 虑到以下两点:(1)流动是沿着x轴方向的,流道在 z轴方向上的长度相比x轴方向的长度很小,因此z轴方向上的流动是次要。且空化云在z轴方向上的 尺度相对驱动声波波长很小,因此流场中z轴方向 上的差别很小;(2)观测到的光信息是光透过整个 空化云投影在垂直于z轴上的某个平面上的分布, 而不是三维空间的全部光信息。虽然式(4)是由经 验得出的,但是下文中将会看到,用水听器测量的空 化噪声谱分析的结果和用式(4)得到的结果有很好 的一致性,验证了这个经验关系的可靠性。

第二步,从观测照片中提取光强分布信息。观测照片是灰度图,在不过度曝光的情况下,第*n*张照片上像素点(l, m)上的灰度值g(l,m,n)与该像素此时接收的光强I(x,y,t)成正比,即 $I = \beta g$ 。其中, $\beta$ 是灰度和光强的转换系数,它与照相机设置有关。将其带入式(2)和式(3)中进行计算。对*N*张原始照片(图片像素尺寸: $L \times M$ ),式(2)和式(3)分别写为

$$q_T(l,m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \frac{g_0(l,m,0) - g(l,m,n)}{g_0(l,m,0)},$$
 (5)

$$q_V(n) = \frac{1}{L \times M} \sum_{l=1}^{L} \sum_{m=1}^{M} \frac{g_0(l, m, 0) - g(l, m, n)}{g_0(l, m, 0)},$$
(6)

其中, g(l, m, n) 代表第n张图片像素坐标 (l, m) 处的灰度值,  $g_0(l, m, 0)$  代表背景照片上像素坐标 (l, m) 处的灰度值。 $g(l, m, n) \in [0, 255] \cap \mathbf{N}$ , g = 0 代表黑, g = 255 代表白。如果g(l, m, n) = 0, 则  $q_{\text{max}} = 1$ , 这代表空化非常强, 几乎没有光透过; 如果  $g(l, m, n) = g_0(l, m, 0)$ , 则  $q_{\text{min}} = 0$ , 这代表没有 发生空化, 几乎所有的光都透过。

# 4.3 图像分析法测量空化状态变量及空化强度的 误差讨论

用图像分析法测量空化状态变量及空化强度 主要的误差来源有三个(见图4中三个箭头):

(1)虽然在定义空化状态变量时限定的是空化 泡,但是实际测量中难免会有气泡掺入,这会造成测 量结果偏高。因此,在实际测量中要排除气泡干扰 以减小误差。为此,我们的实验装置中有排气阀,用 以排除自来水中多余气泡对实验的干扰。

(2) 构建的空化状态变量和光强分布的关系 式(4)在不发生空化(q = 0)和发生很强的空化 (q接近1)时是显然成立的,但是在对于任意的  $q \in (0,1)$ ,式(4)在多大程度上成立还有待进一步 考虑。

(3) 空化云照片上的灰度和摄影机接收到的透过空化云光强度的关系只在光强度较小时是线性的。曝光过度会使得图片上某些有空化云的地方灰度达到饱和(灰度值255),呈现白色,从而使测量结果偏低。为此,拍摄照片时要调整曝光时间及镜头进光量以防止过度曝光。

# 4.4 用图像分析法对空化场时间演化周期性及空间强度分布的进一步分析

图5显示的是利用式(6)中 $q_V(n)$ 的离散傅里 叶变换,对高速摄影机同步拍摄的照片进行分析的 结果。其中,N = 7000是每次计算时照片的总张数, 拍照时高速摄影机的帧频率为250000 帧/s。从图5 中可以看到,图像分析得到的频谱特征和水听器测 得的非常相似。这不是偶然的,因为空化泡辐射的 声波与其本身的振动密切相关,而从 $q_V$ 中恰好能反 映出空化泡振动的特性。

当然,仔细对比图3和图5,可以发现这两种方 法得到的谱线相对幅值是有差别的,特别是基频谱 线。这是因为,空化的噪声谱构成非常复杂,通常 很难从测量的"空化噪声"(实际上是包含了背景声 的总噪声)分离出纯粹的空化噪声。因此,用水听器 直接测得的"空化噪声"中基频成分是高估了的。另 外,我们实验时还注意到,水听器插入以后附近会吸 引空化泡聚集,从而影响了原来空化场的分布。相 比于噪声法,这里提出的图像分析法不会影响空化 场的分布,也不受背景声的干扰。由此可见,这里提 出的图像分析法不仅是可靠的,而且在某种程度上 比水听器测噪声法更优越。

图6显示的分别是水力空化、声-流耦合空化和 声空化的快照(第一行)及按照式(5)计算的空化强 度分布(第二行)。图6(a)对应的是孔板入口压力为 0.600 MPa、换能器关闭时的单独水力空化;图6(b) 对应的是换能器电功率为50.0 W、孔板入口压力为





Fig. 5 FFT amplitude spectrum of the time series of the volume-averaging cavitation state variable  $q_V$  from the synchronous high-speed photograph





Fig. 6 Cavitation cloud snapshot (the first row) and cavitation intensity distribution (the second row)

0.600 MPa时的声-流耦合空化;图6(c)对应的是孔 板入口压力为0 MPa、换能器电功率为50.0 W时的 单独声空化。图6第二行中每一张图是由7000张原 始照片计算得到,拍照时帧频率为20000 帧/s。图 片的像素尺寸为512×512,标尺是0.028 mm/pixel。 比较三幅图可以发现,声-流耦合空化相比单独声空 化和单独水力空化强度和范围显著提升。此外,还 能发现,喷口壁面及PVDF水听器壁面附近空化相 比其他区域强。这也印证了水听器的存在的确对空 化场分布有较大影响,进而影响到通过噪声谱来评 估空化强度的准确性。

### 5 结论

本文利用搭建的高速摄影和空化噪声同步观测的声-流耦合空化实验平台,观察分析了声-流耦 合场中空化云的演化规律及相应的空化噪声特征。 通过观察发现,声-流耦合场中的空化云分布范围显 著超过单独声空化和单独水力空化的,膨胀收缩也 比单独声空化和单独水力空化的剧烈。空化噪声谱 中声-流耦合空化的次谐频及宽频带幅值高于单独 声空化和单独水力空化的。这些迹象表明声-流耦 合空化相比单独声空化和单独水力空化有所加强。 通过引入空化状态变量q的概念,本文给出了 空化强度的一种新的表述,并提出了一种基于高速 摄影图像分析来测量和表征空化状态变量及空化 强度的方法。通过与传统的水听器测噪声法比较发 现该方法是可靠的,并且相比水听器测噪声法,该方 法是非介入式的,测量时不会对空化场本身造成干 扰。利用提出的这种方法进一步对声-流耦合空化 时间演化周期性和空间强度分布进行了定量分析 表明,声-流耦合空化强度和范围相比单独超声和单 独水力空化有显著的提升,存在着协同效应。这为 空化的工业规模应用提供了一个思路。

声-流耦合空化的研究尚处于起步阶段,其机 理还有待深入研究。本文提出的空化强度概念虽然 简单明确,但是其测量方法还比较粗略,测量精度及 误差有待进一步考量。

#### 参考文献

- Bai L X, Xu W L, Zhang F X, et al. Cavitation characteristics of pit structure in ultrasonic field[J]. Science in China, 2009, 52(7): 1974–1980.
- [2] 陈伟中. 声空化物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] Young F R. Cavitation[M]. Singapore : World Scientific, 1999.
- [4] 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.
- [5] 汪承灏, 张德俊. 单一空化气泡的电磁辐射和光辐射 [J]. 声学 学报, 1964, 1(2): 59-68.
  Wang Chenghao, Zhang Dejun. Electromagnetic and optical radiations of single cavitation bubble[J]. Acta Acustica, 1964, 1(2): 59-68.
- [6] Pecha R, Gompf B. Microimplosions: cavitation collapse and shock wave emission on a nanosecond time scale[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(6): 1328.
- [7] Bai L X, Xu W L, Tian Z, et al. A high-speed photographic study of ultrasonic cavitation near rigid boundary[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(5): 637–644.
- [8] Ashokkumar M. Handbook of ultrasonics and sonochemistry[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [9] Richards W T, Loomis 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.
- [10] Weissler A. Sonochemistry: the production of chemical changes with sound waves[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(4): 651–657.
- [11] Lorimer J P, Mason T J. Sonochemistry. Part 1—The physical aspects[J]. Chem. Soc. Rev., 1987, 16(16): 239–274.

- [12] 冯若. 声化学基础研究中的声学问题[J]. 物理学进展, 1996(3): 402-412.
- [13] Feng R, Zhao Y, Bao C. Sonochemistry in China[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(2): 183–187.
- [14] Pokhrel N, Vabbina P K, Pala N. Sonochemistry: science and engineering[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 104–128.
- [15] 应崇福. 我国的声化学应尽快大力开展实用化工作 [J]. 应用 声学, 2005, 24(5): 265–268.
  Ying Chongfu. Turn the suitable laboratory achievements in sonochemistry to practical use[[J]. Journal of Applied Acoustics, 2005, 24(5): 265–268.
- [16] 应崇福.液体中的声处理应用和声空化工程[C].中国声学学会 2006 年全国声学学术会议论文集, 2006: 261–264.
- [17] 应崇福.关于液体内大规模声处理中空化研究的几点思考
  ——再论声空化工程 [J].应用声学, 2008, 27(5): 333-337.
  Ying Chongfu. Some thoughts on the behaviors of cavitation used in large-scale ultrasonic treatment in liquids: a second discussion of cavitation engineering[J]. Journal of Applied Acoustics, 2008, 27(5): 333–337.
- [18] 徐德龙. 声空化空间分布的控制 [D]. 北京: 中国科学院声学 研究所, 2009.
- [19] 李超, 应崇福, 白立新, 等. 流体动力空化的噪声特性及空化 强度的测量 [J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2012, 42(10): 987-995.

Li Chao, Ying Chongfu, Bai Lixin, et al. The characteristic of cavitation noise and the intensity measurement of hydrodynamic cavitation[J]. Sci. Sin-Phys. Mech. Astron., 2012, 42(10): 987–995.

- [20] Pandit A B, Joshi J B. Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(19): 3440–3442.
- [21] 李志义,张晓冬,刘学武,等.水力空化及其对化工过程的强化作用 [J].化学工程,2004,32(4):27-29.
  Li Zhiyi, Zhang Xiaodong, Liu Xuewu, et al. Hydrodynamic cavitation and its enhancement effects on chemical processes[J]. Chemical Engineering, 2004, 32(4):27-29.
- [22] 黄利波. 水力空化技术的实验研究与应用 [D]. 西安: 陕西师 范大学, 2006.
- [23] 冯中营.水力空化的声学特性及其应用实验研究 [D].西安: 陕西师范大学, 2008.
- [24] Kalumuck K M, Chahine G L. The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(3): 465–470.
- [25] Jyoti K, Pandit A B. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2001, 7(3): 201–212.
- [26] Bremner D H, Carlo S D, Chakinala A G, et al. Mineralisation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by acoustic or hydrodynamic cavitation in conjunction with the advanced Fenton process[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(4): 416–419.
- [27] Wu Z, Yuste-Córdoba F J, Cintas P, et al. Effects of ultrasonic and hydrodynamic cavitation on the treatment of cork wastewater by flocculation and Fenton processes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40(B): 3–8.

- Sonochemistry, 2016, 31: 135–142.
  [29] Thanekar P, Panda M, Gogate P R. Degradation of carbamazepine using hydrodynamic cavitation combined with advanced oxidation processes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40(A): 567.
- [30] Čehovin M, Medic A, Scheideler J, et al. Hydrodynamic cavitation in combination with the ozone, hydrogen peroxide and the UV-based advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 394–404.
- [31] Jyoti K, Pandit A. Hybrid cavitation methods for water disinfection[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 14(1): 9–17.
- [32] Kelkar M A, Gogate P R, Pandit A B. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(3): 188–194.
- [33] Chatterjee D, Arakeri V H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 332(332): 377–394.
- [34] 贾志富.水力空化发生器和液体动力超声换能器 [C].中国声 学学会功率超声分会 2007 年学术年会论文集, 2007.
- [35] Amin L P, Gogate P R, Burgess A E, et al. Optimization

of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 165–169.

- [36] Franke M, Braeutigam P, Wu Z L, et al. Enhancement of chloroform degradation by the combination of hydrodynamic and acoustic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 888–894.
- [37] Braeutigam P, Franke M, Schneider R J, et al. Degradation of carbamazepine in environmentally relevant concentrations in water by hydrodynamic-acoustic-cavitation (HAC)[J]. Water Research, 2012, 46(7): 2469–2477.
- [38] Braeutigam P. Degradation of organic micropollutants by hydrodynamic and/or acoustic cavitation[M]. Singapore: Springer, 2016.
- [39] Yi C, Lu Q, Wang Y, et al. Degradation of organic wastewater by hydrodynamic cavitation combined with acoustic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 43: 156–165.
- [40] Wu P, Bai L, Lin W, et al. Stability of cavitation structures in a thin liquid layer[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 75.
- [41] Bai L, Wu P, Liu H, et al. Rod-shaped cavitation bubble structure in ultrasonic field[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 44: 184–195.
- [42] Wu P, Bai L, Lin W, et al. Mechanism and dynamics of hydrodynamic-acoustic cavitation (HAC)[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 89–96.