

壅塞空化与射流空化噪声谱特性的实验研究

张凤华, 刘海峰, 徐俊超, 唐川林

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 水力空化已成为一种很有潜力的水处理技术。利用水听器采集空化噪声信号, 通过对比分析不同喷嘴产生的空化噪声的功率谱特性, 得出壅塞空化器具有宽频高能量平台的功率谱曲线, 特别适合于水动力空化处理污水和净化水等领域。

关键词: 壅塞空化; 喷嘴; 射流; 空化噪声

中图分类号: TP602

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)06-0047-04

Experimental Investigation on the Noise Spectrum Features of Choking-Cavitation and Jet-Cavitation

Zhang Fenghua, Liu Haifeng, Xu Junchao, Tang Chuanlin

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Hydrodynamic cavitation has been a potential technology of water treatment. By collecting cavitation noise signal with hydrophone and analyzing comparatively the features of power spectrum of cavitation noises produced by different nozzles, it is obtained that the choking cavitator has a flat roof in power spectrum curve which is a broadband and high energy. So the choking cavitator is suitable especially for hydrodynamic cavitation treating waste water and purifying water.

Keywords: choking-cavitation; nozzle; jet; cavitation noise

0 引言

随着我国经济的快速发展, 环境问题也凸显出来。工业污水和生活污水由于得不到有效地处理, 严重污染了人们赖以生存的宝贵水资源。寻找经济、易行、有效的水处理技术成为当务之急。

空化现象是指液体内部局部压力降低时, 液体内部或液固交界面上内含蒸汽、气体或挥发性有机物的空泡初生、长大和溃灭的过程。空泡溃灭瞬间产生极短暂的强压力脉冲, 气泡周围微小空间形成局部热点, 产生极端的高温、高压环境, 局部温度可达 5 000 K 的高温和超过 50 MPa 的高压。温度变化率高达 10^9 K/s, 并伴有强烈的冲击波和速度高达

100 m/s 以上的微射流。^[1-2]这样的极端条件将为在一般条件下难以实现或不可能实现的化学反应提供一种非常特殊的物理环境。

关于应用空化效应进行水处理问题的研究, 较为普遍的是超声空化和水力空化。超声空化装置产生的能量集中、空化效应强烈, 对各类有机物有良好的氧化效果, 得到了众多学者广泛深入的研究, 在理论和实验方面已取得了大量的成果^[3-4]。但因超声空化效应只在超声探头附近产生, 能量转换率低, 空化反应器放大效果差, 难以对污水实现工业化处理。相对而言, 水力空化的能量利用率高^[5], 比尺效应影响小, 易于放大, 因而被业界认为是很有潜力

收稿日期: 2011-09-28

作者简介: 张凤华(1960-), 男(彝族), 云南弥勒人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事水射流技术及应用方面的研究,

E-mail: fenghua387@126.com

的处理有毒难降解污水和水净化的新途径^[6-8]。

目前,国内外研究的水力空化主要有3种形式:射流空化^[9-12]、孔板空化^[13-16]和漩涡空化^[17-19]。这些空化方法都未能很好地解决增加空化区域占水体的体积比和使空泡有效溃灭(即不能快速溃灭并在高频段释放高能量)的问题,严重制约了水力空化处理污水的工业应用。本小组研究人员在研究射流空化的基础上,提出了壅塞空化的概念,并从空化噪声谱特性的角度对其进行了初步研究。

1 实验系统与条件

实验系统示意图见图1。

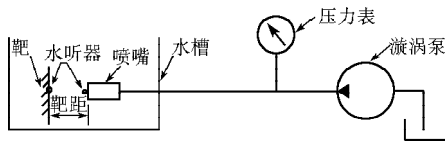


图1 实验系统示意图
Fig. 1 Diagram of experiment system

图1中,水泵型号为1W-2.5-12型涡旋泵,其流量为2.5 m³/h,扬程为120 m,功率为3 kW,为空化发生装置提供压力;水槽尺寸为1.0 m × 0.5 m × 0.4 m。在测试空化噪声信号实验中,水泵接自来水,实验系统为开放系统。

空化噪声用水听器在水下采集。水听器分别水平布置在喷嘴出口处和靶盘位置,与喷嘴轴线等高,距喷嘴轴线40 mm,如图1所示。

水听器CS-3是中国科学院声学研究所生产的二级标准水听器,CS-3的敏感元件为直径10 mm、高8 mm的PZT-5压电陶瓷圆管,可在几Hz至160 kHz的频率范围工作,灵敏度为M = -210 dB。电缆长6 m。

测试系统为湖南工业大学和清华大学联合开发的CavTest11空化噪声测试系统。实验中采用了3种空化发生装置:普通喷嘴、空化喷嘴和壅塞空化器。空化喷嘴具有自激振荡腔结构,且出口为角型扩散的;普通喷嘴的入口锥角与空化喷嘴相同。其结构示意图如图2所示。普通喷嘴和空化喷嘴出口直径均为3.6 mm,泵压0.8 MPa,淹没深度0.5 m,靶距为35 mm。

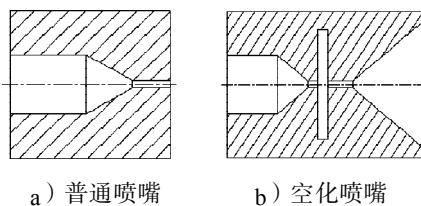


图2 喷嘴结构示意图
Fig. 2 Configuration of nozzles

壅塞空化器示意图见图3,水听器安装在空化器内,位置如图3中所示。等效喷嘴直径2.6 mm,围压孔直径4 mm,泵压1.2 MPa。

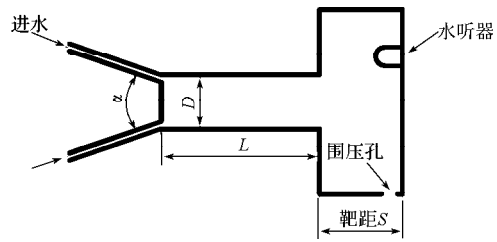


图3 壅塞空化器示意图
Fig. 3 Configuration of choking-cavitator

2 试验结果与分析

空化噪声时域信号和功率谱分布的实验结果如图4~6所示。图中设时间单元 $\tau = \frac{1}{625\ 000}$ s。

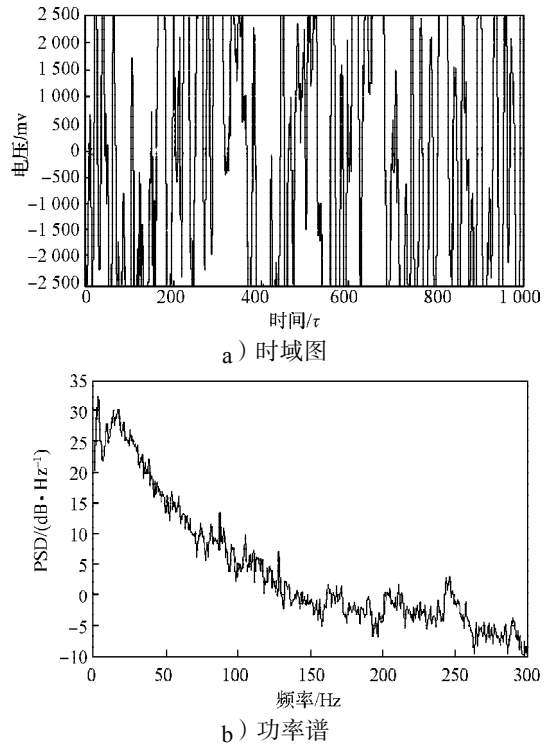
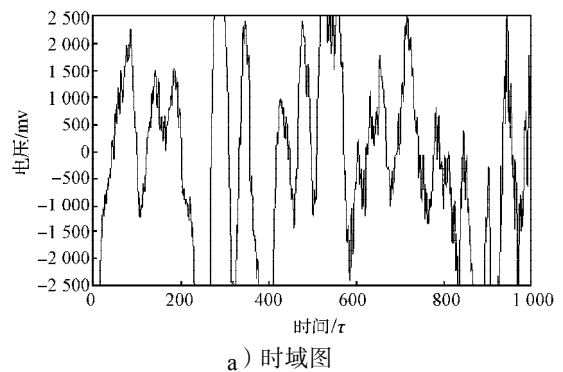


图4 普通喷嘴空化噪声信号
Fig. 4 Signal of cavitation noise by conventional nozzle



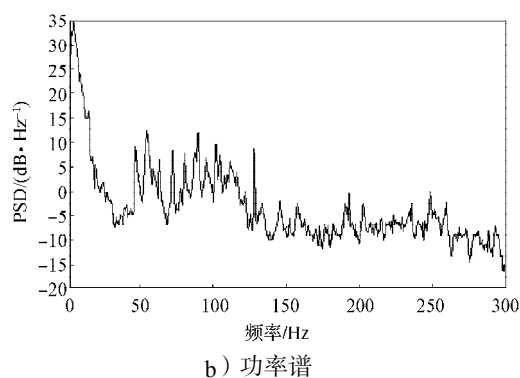
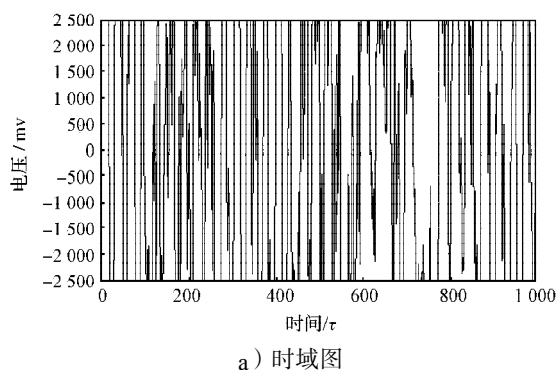


图5 空化喷嘴空化噪声信号

Fig. 5 Signal of cavitation noise by cavitating nozzle



a) 时域图

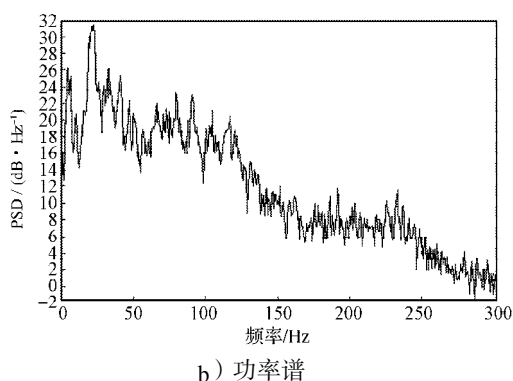


图6 壅塞空化器空化噪声信号

Fig. 6 Signal of cavitation noise by choking cavitator

对比分析图4~6中分图b)可知,由于采用不同的空化发生装置,其产生空泡和空泡溃灭的机理不同,测得噪声信号所对应的功率谱明显具有不同的特点。

当采用普通喷嘴(见图2a)时,压力水经喷嘴加速后射入淹没水中,并喷射到靶盘上。空泡主要产生在射流与周围静止水体的环形剪切区内,空化区域占水体的体积比较小。当空泡随射流打击到靶盘上时,在滞止压力作用下空泡溃灭,但由于受到滞止点附近流场的影响和靶盘上水垫的作用,到达靶盘的空泡多数不能有效溃灭。所以,图4b中观察到空化噪声的功率密度随频率增加而下降,在高频段(50~120 kHz)没有能量的积蓄现象。

空化射流是指水流通过特殊结构设计的空化喷嘴(见图2b),在喷嘴振荡腔的作用下开始产生空泡,然后在喷嘴出口的锥形扩散区这些空泡进一步长大并产生更多的新空泡。携带大量空泡的射流冲击靶盘时在滞止压力作用下空泡溃灭。由于喷嘴内振荡腔的作用,连续射流经过喷嘴后调制成了振荡脉冲射流,此振荡脉冲射流打击靶物时破坏水垫作用,从而较之普通喷嘴而言,提高了空泡溃灭的效果。图5b中观察到了在高频段(50~120 kHz)有能量的积蓄现象,空化噪声的功率密度随频率变化,在50~120 kHz段出现一平台,但由于靶盘溃灭方式的限制,空泡有效溃灭的量仍然有限,所以图5b中高频段的功率密度幅值还较小。

根据汽液两相临界流理论,作者提出充分利用壅塞现象产生的特殊流场特性,通过设计特定的空化器结构(见图3),控制流场临界点(当地马赫数 $Ma=1$)的变化,壅塞空化器巧妙地同时解决了在更大范围水体产生空泡和使空泡有效溃灭的问题。

如图3所示,水流从环状喷嘴射入壅塞管内,在壅塞管的前部开始出现大量的空泡,随着携带大量空泡的流体(气液两相流)在壅塞管内流动,管内气相含量快速增加,当地音速急剧下降。在壅塞管后部,当地马赫数 $Ma=1$ 的某断面(称为壅塞截面),出现了所谓的气液两相流“壅塞”现象。根据气液两相临界流理论,壅塞截面下游的流场压力增加不会影响上游流场的压力。一旦在壅塞空化器内建立起了稳定的壅塞流动,当地马赫数为1的壅塞截面就把管内流场一分为二,壅塞截面相当于一扇天然的闸门,把管内流场分为了2个区域。其上游为空泡的产生区(低压区),下游为空泡的溃灭区(高压区),这样,一个壅塞空化器就同时满足了空化效应的空泡产生和溃灭需要不同流场的要求,使空化过程中所产生的空泡几乎全部得到有效溃灭。

图6b中观察到空化噪声的功率密度随频率增加出现了频带较宽(≤ 120 kHz)的高能量平台,在整个平台上都有很好的能量积蓄现象,特别可贵的是在频率50~120 kHz段,壅塞空化器的这种宽频高能量的平台特性,特别有利于空化效应用于水处理领域。因此,壅塞空化技术是一种有效的、很有潜力的水力空化处理污水的全新技术。

3 结论及展望

在认识空泡溃灭机理并掌握控制空泡有效溃灭技术方面的不足,成为了水力空化技术工业化应用

的瓶颈。突破这一瓶颈,从而进一步提高空化效应处理水的效果,是目前十分有意义的研究课题。十几年来,作者一直从事空化水射流的研究,提出并研制了壅塞空化器。壅塞空化器能在大范围水体产生空泡并使空泡有效溃灭,在有毒难降解污水的处理、水净化、水资源的循环利用、水体环境污染的控制等方面,具有较大的应用潜力和广阔的应用前景。

深化对壅塞空化器空化机理的认识,优化壅塞空化器的结构和特征尺寸,探索壅塞空化器处理各种污水的运行参数等,都还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Suslick K S. Sonochemistry[J]. Science, 1990, 247 (4949): 1439-1445.
- [2] Flint E B, Suslick K S. The Temperature of Cavitation[J]. Science, 1991, 253(5026): 1397-1399.
- [3] Lifka J, Ondruschka B, Hofmann J. The Use of Ultrasound for the Degradation of Organic Compounds in Water: Aquasonolysis: A Review[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2002, 74(4): 403-413.
- [4] Didenko Y T, Suslick K S. The Energy Efficiency of Formation of Photons, Radicals and Ions during Single-Bubble Cavitation[J]. Nature, 2002, 418(6896): 394-397.
- [5] Kalumuck K M, Chahine G L. The Use of Cavitating Jets to Oxidize Organic Compounds in Water[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 2000(3): 465-470.
- [6] Mezule L, Tsyfanskyy S, Yakushevich V, et al. A Simple Technique for Water Disinfection with Hydrodynamic Cavitation: Effect on Survival of Escherichia Coli[J]. Desalination, 2010, 251: 152-159.
- [7] Amin Lekhraj P, Gogate Parag R, Burgess Arthur E, et al. Optimization of a Hydrodynamic Cavitation Reactor Using Salicylic Acid Dosimetry[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(1): 165-169.
- [8] 朱孟府, 曾艳, 邓橙, 等. 水力空化在水处理中的应用与研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊2): 445-449.
Zhu Mengfu, Zeng Yan, Deng Cheng, et al. Application and Research of Hydrodynamic Cavitation Technology in Water Treatment Field[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(S2): 445-449.
- [9] 邓松圣, 李赵杰, 张福伦, 等. 空化射流降解毒性有机物实验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2009, 25(6): 46-49.
Deng Songsheng, Li Zhaojie, Zhang Fulun, et al. Experimental Study on Degradation of Toxic Organic Compounds with Cavitation Jet Flow[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2009, 25(6): 46-49.
- [10] Chahine Georges L, Kalumuck Kenneth M. Fluid Jet Cavitation Method and System for Efficient Decontamination of Liquids: US, 6200486 B1[P]. 2001-03-13.
- [11] 王超, 张风华, 张伟, 等. 水射流空化噪声的自适应滤波处理[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(3): 83-85.
Wang Chao, Zhang Fenghua, Zhang Wei, et al. Self-Adaptive Filtering Processing of Cavitation Noise Generated by Cavitation Water Jet[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(3): 83-85.
- [12] 刘江辉, 张风华, 唐川林, 等. 空化喷嘴混沌特性的辨识[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(4): 65-68.
Liu Jianghui, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, et al. Identification of the Chaotic Property of Cavitation Nozzles [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(4): 65-68.
- [13] Sivakumar Manickam, Pandit Aniruddha B. Wastewater Treatment a Novel Energy Efficient Hydrodynamic Cavitation Technique[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2002, 9(3): 123-131.
- [14] Gogate Parag R, Pandit Aniruddha B. Hydrodynamic Cavitations Reactors: A State of the Art Review[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2001, 17(1): 1-85.
- [15] Braeutigam Patrick, Franke Marcus, Wu Zhilin, et al. Role of Different Parameters in the Optimization of Hydrodynamic Cavitation[J]. Chemical Engineering & Technology, 2010, 33(6): 932-940.
- [16] 魏群, 高孟理, 孙三祥, 等. 基于水力空化技术的废水处理装置及设计[J]. 水处理技术, 2005, 31(6): 73-75.
Wei Qun, Gao Mengli, Sun Sanxiang, et al. Experimental Study on Wastewater Treatment Equipment Based on Hydrodynamic Cavitation Technique[J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(6): 73-75.
- [17] Chahine Georges L, Kalumuck Kenneth M. Swirling Fluid Jet Cavitation Method and System for Efficient Decontamination of Liquids: US, 6221260 B1[P]. 2001-04-24.
- [18] 王金刚, 王西奎, 郭培全, 等. 利用涡流空化效应降解水中罗丹明B[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 129-131.
Wang Jingang, Wang Xikui, Guo Peiquan, et al. Degradation of Rhodamine B in Water by Swirling Jet-Induced Cavitation [J]. China Environmental Science, 2007, 27(1): 129-131.
- [19] Wang Xikui, Wang Jingang, Guo Peiquan, et al. Chemical Effect of Swirling Jet-Induced Cavitation: Degradation of Rhodamine B in Aqueous Solution[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(4): 357-363.

(责任编辑: 李玉珍)