

◇ 研究报告 ◇

超声空化现象影响因素的实验研究

马立康 暨勇策 沈国清[†] 张世平

(华北电力大学能源动力与机械工程学院 北京 102206)

摘要 超声空化在许多不同的学科和工业生产中有着广泛的应用。超声空化的应用与声场的分布及空化的机理密切相关,精准地反映空化场和空化机理是超声空化技术实际应用的关键。该文通过分析采集的声信号和金属箔膜空蚀法对空化区域随液位发生变化的现象进行研究,并利用 Matlab 对金属箔膜空蚀程度量化。实验发现,超声波会在液面与实验箱体底部形成驻波场。在某一液体温度下,随着液位高度的变化,超声空化现象的出现具有周期性。并且,在同一液位下,当超声功率改变时,空化区域强度分布情况随之改变。小功率时各空化区域空化强度分布均匀,当功率增大到一定时,会出现空化屏蔽现象。该研究为超声清洗设备的改良提供了借鉴,对进一步认识和利用超声空化效应具有重要意义。

关键词 液位,驻波场,空化噪声,空化屏蔽

中图法分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)06-0999-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.06.013

Experimental study on the influencing factors of ultrasonic cavitation

MA Likang JI Yongce SHEN Guoqing ZHANG Shiping

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract Ultrasonic cavitation has a wide range of applications in many different scientific and industrial productions. The application of ultrasonic cavitation is closely related to the distribution of sound field and the mechanism of cavitation. Accurate reflection of cavitation field and cavitation mechanism is the key to applying this technology. In this paper, the acoustic signal and thin film corrosion method are used to study the phenomenon of cavitation area changing with liquid level, and the degree of corrosion of the film is quantified by Matlab. The experiment found that the ultrasonic wave would form a standing wave field and a traveling wave field at the liquid level and the bottom of the experimental box. At a certain liquid temperature, the appearance of ultrasonic cavitation was periodic with the change of liquid level. Moreover, at the same liquid level, when the ultrasonic power changed, the intensity distribution of the cavitation region changed. At low power, the cavitation intensity of each cavitation area was evenly distributed. When the power increased to a certain extent, cavitation mask would occur. This study provides a reference for the improvement of ultrasonic cleaning equipment and is of great significance for further understanding and utilization of ultrasonic cavitation effect.

Key words Liquid height, Standing wave field, Cavitation noise, Cavitation mask

2018-12-05 收稿; 2019-08-28 定稿

作者简介: 马立康 (1992-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向: 声学。

[†] 通讯作者 E-mail: shenguoqing@ncepu.edu.cn

0 引言

超声场及其相关效应的研究一直是国内外学者的研究热点,其中超声空化是超声在液体媒质中传播产生的一种效应,由于其巨大的理论研究价值和潜力,越来越受到关注^[1-4],甚至已经发展到双频超声场领域^[5-6]。空化泛指液体中气泡(bubbles)或空穴(cavity)的形成及活动。声波的传播会导致媒质内部物质振动,形成密度、压力起伏。一般而言,声空化的成因是液体中的压强降低到一定程度(区别于因温度上升的沸腾),具体表现为气泡的急剧胀缩,同时伴有噪声辐射,某些时候还可能伴随电磁辐射。理论上,足够强的声波进入液体后,在声波稀疏、负压相拉伸作用下使得液体内部分子键链断裂,形成空腔;空腔在表面张力的作用下形成气泡^[7]。而实测表明,液体的实际空化阈值远低于理论值。为解释这种矛盾,便产生了“空化核”假说。现在,这一假说已被许多实验所证实^[8]。声空化能够在局部的时间空间范围内产生高温、高压、冲击波等非常极端的物理条件,并由此引发许多有着广泛用途的效应。已有研究表明,超声波强化传热主要基于超声波在液体内部及固液界面上产生的声空化效应和声流效应^[9-10],另外,超声在化工^[11]、生物^[12]、医药卫生^[13]以及去污除垢^[14]等方面的应用也与超声空化密不可分。

空化噪声是指空化泡胀缩及破裂整个过程中所辐射的声波。超声空化会产生包括谐波、分谐波及连续噪声在内的空化噪声谱,通过对空化噪声的分析可以在一定程度上判断声空化强度^[15]。相比于通过高速摄影观察空化气泡的大小和多少来判断空化强度的剧烈程度,测量空化噪声标定空化的强烈程度更加简单易行。

测量分析超声空化分布的方法主要有金属箔膜空蚀法、荧光光谱分析法、碘释放法、声致发光成像法、染色法等^[16]。其中金属箔膜空蚀法由于其方便、可视化和低成本等特点获得广泛应用。本文基于声波叠加过程分析了超声空化现象随液位和超声功率变化而变化的现象。

1 实验装置

实验设备主要包括34 cm×20 cm×30 cm的透明水浴容器、温度和声信号采集系统和超声发生系

统。本实验采用北京声望声电技术有限公司BSWA-MPA201型声学传感器在液体外部测得噪声信号,该型声学传感器可采集频率范围为0~22 kHz。传感器位于超声波换能器正上方30 cm位置。采用频率为28 kHz压电式倒喇叭型换能器,所用信号源为深圳广源达超声设备有限公司生产的GYD-M1型超声波发生器。实验装置如图1所示,水浴容器能够保证实验所需的温度并保持稳定;利用温度和声信号采集卡将采集到的声信号输入到计算机,能够实时地获取精准数据;通过垂直插入水中的长宽为18 cm×5 cm的锡箔纸实现薄膜空蚀法,然后在空蚀区域选取长宽为4 cm×2 cm的面积(所选区域能够包含该层所有空蚀点),利用Matlab软件将图片二值化,进而对薄膜空蚀程度量化。

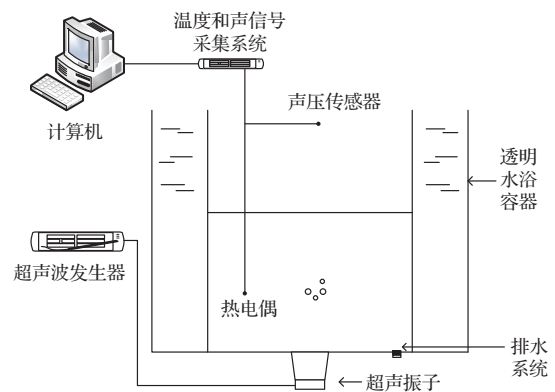


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental device diagram

2 实验结果与讨论

2.1 噪声信号特性

空化现象往往伴随空化噪声的出现而出现。空化噪声频谱是一个从低频到高频的连续谱,连续谱是由空化泡随机崩溃产生的激波所引起的。在频谱图中,空泡的非线性振动会产生基波整数倍($2f_0$ 、 $3f_0$ 、 $4f_0$ 、 \dots 、 nf_0)的谐波线谱和奇数倍($f_0/2$ 、 $3f_0/2$ 、 $5f_0/2$ 、 \dots)的分谐波线谱^[17]。胡淑芳等^[17]、吴鹏飞等^[18]曾利用谐波和倍频波进行空化方面的相关研究。本实验利用次谐波噪声信号(14 kHz)的有无和大小来反映空化现象的有无和空化强度。将采集的声信号进行频谱分析,(14000±500) Hz频率范围的噪声信号能够准确反映空化现象的发生(如图2(a)和图2(b)所示),并且在一定程度上能够反映空化程度的剧烈程度

(如图2(b) 和图2(c) 所示)。实验是在开放的环境中进行, 在频谱图中, 100~800 Hz 频率范围的声信号与(14000±500) Hz 频率范围的次谐波声信号表现出相同量级的较高的能量幅值, 但低频噪声对次谐波声信号影响不大。因此, 在进行液位与空化后续相关实验时选取8 kHz ~ 20 kHz 频率范围(能够包含次谐波)的噪声声信号进行采集和分析。

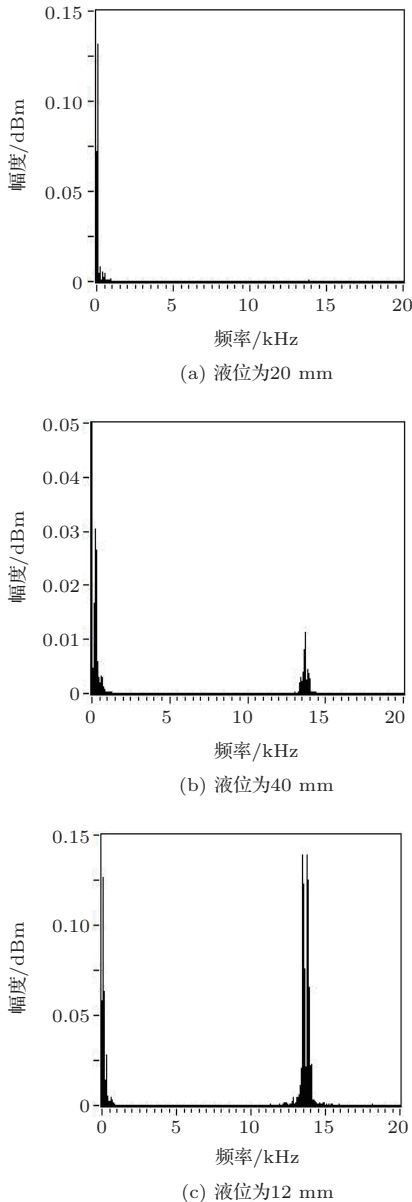


图2 不同液位高度下的噪声信号

Fig. 2 Cavitation noise at different liquid level heights

2.2 液位对空化现象的影响

实验前将液位调到25 cm位置, 维持水温在(20±0.5) °C, 打开超声波发生器, 使超声稳定发生。

排水系统可以保证容器内液体缓慢流出, 对实验现象影响很小, 因此可以忽略排水系统对实验的影响。图3是声压传感器采集到的空化噪声信号随液位变化图, 如图3所示, 在液位从25 cm降到1 cm过程中, 由超声空化产生的声信号随液位间隔出现。

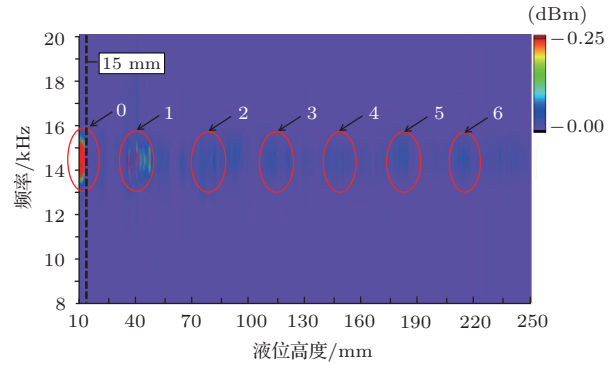


图3 空化噪声随液位变化关系

Fig. 3 Cavitation noise changes with liquid height

大振幅(有空化)声波可以看作小振幅线性声波和非线性声波的叠加, 垂直粘连在箱体底部的超声振子产生的超声在液面处经反射与初始波干涉。在振子正上方的小块区域, 声波可以近似看作平面波, 两列沿相反方向行进的平面波可以分别表示为^[19]

$$p_i = p_{ia} e^{j(\omega t - kx)}, \quad (1)$$

$$p_r = p_{ra} e^{j(\omega t + kx)}. \quad (2)$$

根据线性声波可叠加原理, 合成声场的声压为

$$p = p_i + p_r = 2p_{ra} \cos(kx) e^{j\omega t} + (p_{ia} - p_{ra}) e^{j(\omega t - kx)}. \quad (3)$$

由于声波在媒质中传播存在吸收衰减、散射衰减和扩散衰减等声能量的损失^[20], 以及声波在液面处发生非全反射, 使得 $p_{ia} \neq p_{ra}$ 。鉴于功率超声应用中声场边界条件多为绝对“硬”或绝对“软”界面, 而液体和空气分界面属于绝对“软”界面, 可近似认为声波在界面发生所谓全反射。取 $p_{ra} = -p_{ia}$, 则超声波会在液面与实验箱体底部之间形成“纯粹”的驻波场。

声波从液体射入空气介质时, 在软介质面上, 反射波质点速度与入射波质点速度相位相同, 反射波的声压与入射波的声压相位改变180°。当液位高度 $h_1 = \frac{n}{2} \lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 时, 液体内部产生驻波场; 当液位的高度 $h_2 = \frac{2n+1}{4} \lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 时, 驻

波场随之消失,因此空化噪声将伴随着液位高度的变化而间隔出现。

另从图3还可以看出,位置1对应液位高度下空化程度强于位置2~位置6对应液位高度下空化程度,这是因为超声波在媒质中传播存在衰减使声能量产生损失^[21],当液位增加时,远离超声换能器区域声压强度明显降低,从而削弱空化程度;并且随着液位增加,空化泡释放能量和溃灭功率均显著减小^[22],也使得低液位状态下的空化程度较强。而当液位降到15 mm之后,空化噪声异常强烈(图3位置0所示),这可能与薄液空化及柱状泡群^[23]有关。

2.3 功率对空化现象的影响

声空化包含多种效应,其中就包含空蚀效应。超声空化气泡在溃灭的瞬间会产生强烈的冲击力^[22],对垂直放入水中的薄膜有明显的空蚀。将一张整洁的长宽为18 cm × 5 cm的锡箔垂直置于水中,然后开启超声波一段时间(均为1 min),金属薄膜就会出现明显的空蚀现象(如图4(a)所示),薄膜的空蚀程度能够反映空化的强度。本实验利用Matlab软件将图4(a)所选区域二值化(如图4(b)所示),进而计算和分析薄膜的穿透度。

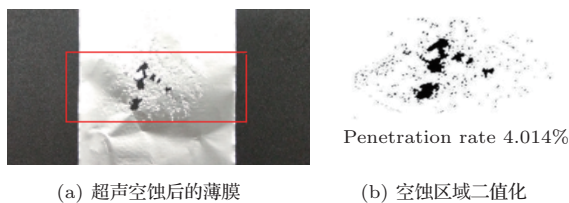


图4 发生空蚀的薄膜及其二值化

Fig. 4 Corroded film and its binarization

当超声功率较大时,薄膜空蚀程度会在距离振子最近的空蚀区域表现为最强(如图5所示),而其他空蚀区域明显变弱,这是由空化屏蔽现象导致的^[24]。当液体中某一点的压力小于空化阈值时,空化气泡产生。因此当功率增大时压力幅值随之增大,在驻波场的负压区便产生大量的气泡。空化气泡受到声辐射压力和声流力的共同作用从负压区移动到正压区,然后在正压区溃灭并使薄膜发生空蚀。由于声波在传播过程中入射到气泡上时,气泡会对声波产生折射、透射和反射现象,在气泡与声波的接触面上声波所携带的能量被转化消耗^[25],在驻波场中靠近换能器的空化区的空化强度必定大于远离换能器的空化区的空化强度,从而导致空蚀

严重不均。当超声功率较小时,超声空蚀的程度在各个区域分布均匀(如图6所示)。

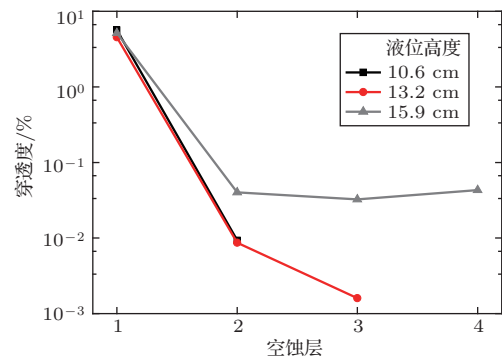


图5 大功率时,不同液位下超声空蚀程度

Fig. 5 Ultrasonic corrosion degree at different liquid heights at high power

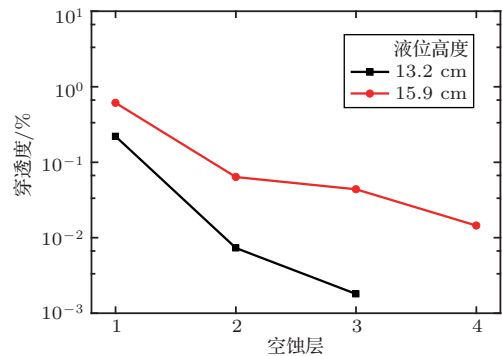


图6 小功率时,不同液位下超声空蚀程度

Fig. 6 Ultrasonic corrosion degree at different liquid heights at low power

3 结论

本文利用声压传感器对空化噪声信号进行液外采集,探究了驻波场和空化现象之间的关系,揭示了空化液体深度优选值的存在,得出以下结论:

(1) 空化噪声是空化现象发生时一个重要的信号特征,它能够准确地反映空化现象的发生与否,并且一定程度上能够表征超声空化的强弱,本论文利用这一信号特征,从实验现象和理论分析两方面揭示了超声场中驻波场的存在。

(2) 空化气泡溃灭瞬间能够在局部产生较强的冲击力,造成薄膜发生空蚀,利用Matlab软件将图片二值化,进而对薄膜空蚀程度量化,能够反映空蚀区域的空化程度。

(3) 超声空化的强度与输入的功率有关。当超声功率较大时会产生空化屏蔽现象,阻碍声能量的

传播,使得第二层及以后各层空化现象减弱;超声功率较小时,各空化区域强度相对均匀。

本文对超声空化在超声清洗方面的应用具有指导意义。同时,实验发现厚液空化与薄液空化之间可能存在临界液位,为该领域的进一步研究提供了方向和依据。

参 考 文 献

- [1] Chahine G L, Kapahi A, Choi J K, et al. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 528–549.
- [2] 程效锐, 张舒研, 房宁. 超声空化技术在化工领域的应用研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(8): 1753–1757.
Cheng Xiaorui, Zhang Shuyan, Fang Ning. Research progress and application situation of the ultrasonic cavitation technology in chemical industry field[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(8): 1753–1757.
- [3] Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles—an overview[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 864–872.
- [4] Liu L, Yang Y, Liu P, et al. The influence of air content in water on ultrasonic cavitation field[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(2): 566–571.
- [5] Zhang Y, Zhang Y, Li S. Combination and simultaneous resonances of gas bubbles oscillating in liquids under dual-frequency acoustic excitation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35(Pt A): 431.
- [6] Zhang Y, Zhang Y, Li S. The secondary Bjerknes force between two gas bubbles under dual-frequency acoustic excitation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 129–145.
- [7] 陈伟中. 声空化物理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [9] Kiani H, Sun D W, Zhang Z. The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(6): 1238–1245.
- [10] Leong T S H, Martin G J O, Ashokkumar M. Ultrasonic Encapsulation—A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35(Pt B): 605–614.
- [11] Pollet B G. The use of ultrasound for the fabrication of fuel cell materials[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(21): 11986–12004.
- [12] 张萍. 微流体环境下超声波基因细胞导入系统的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [13] Miller D L, Lu X, Dou C, et al. Ultrasonic cavitation-enabled treatment for therapy of hypertrophic cardiomyopathy: proof of principle[J]. *Ultrasound Medicine and Biology*, 2018, 44(7): 1439–1450.
- [14] Mason T J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 519–523.
- [15] 江涛, 林书玉. 超声空化的物理机制及进展[J]. *声学技术*, 2016, 35(4): 293–298.
Jiang Tao, Lin Shuyu. The physical mechanism of ultrasonic cavitation and progress[J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(4): 293–298.
- [16] 莫润阳, 林书玉, 王成会. 超声空化的研究方法及进展[J]. *应用声学*, 2009, 28(5): 389–400.
Mo Runyang, Lin Shuyu, Wang Chenghui. Methods of study on sound cavitation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2009, 28(5): 389–400.
- [17] 胡淑芳, 吴胜举, 苏婕, 等. 运用谱分析法研究水中空化阈[J]. *声学技术*, 2009, 28(6): 92–94.
Hu Shufang, Wu Shengju, Su Jie, et al. The study of cavitation threshold in water based on spectral analysis method[J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28(6): 92–94.
- [18] 吴鹏飞, 白立新, 林伟军, 等. 声流耦合空化场观测与量化表征探索[J]. *应用声学*, 2018, 37(5): 801–810.
Wu Pengfei, Bai Lixin, Lin Weijun, et al. Observation and quantitative characterization of hydrodynamic-acoustic cavitation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(5): 801–810.
- [19] 梁召峰, 周光平, 林书玉. 大功率低频超声场测量研究进展[J]. *声学技术*, 2004, 23(1): 61–66.
Liang Zhaofeng, Zhou Guangping, Lin Shuyu. Review of the high-power low-frequency ultrasonic fields measurement[J]. *Technical Acoustics*, 2004, 23(1): 61–66.
- [20] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 第二版. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [21] 吴强, 姚澄, 朱昌平, 等. 超声清洗过程环境压力对声空化效应的影响[J]. *应用声学*, 2015, 34(5): 391–397.
Wu Qiang, Yao Cheng, Zhu Changping, et al. The influence of ambient pressure on acoustic cavitation during the process of ultrasonic cleaning[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2015, 34(5): 391–397.
- [22] 王成会, 莫润阳, 胡静. 低频超声空化场中柱状泡群内气泡的声响应[J]. *物理学报*, 2016, 65(14): 144301.
Wang Chenghui, Mo Runyang, Hu Jing. Acoustic response of bubbles inside a cylindrical cavitation bubble cluster generated by low-frequency ultrasound[J]. *Acta Physics Sinica*, 2016, 65(14): 144301.
- [23] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [24] 沈建中. 关于表述空化场强弱术语的讨论[J]. *应用声学*, 2018, 37(5): 831–833.
Shen Jianzhong. Some words about how to describe the degree of the strength of the cavitation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2018, 37(5): 831–833.
- [25] Pečnik B, Hočevar M, Širok B. et al. Scale deposit removal by means of ultrasonic cavitation[J]. *Wear*, 2016, 356–357: 45–52.