

环境压强对激光空泡声波特性影响的实验研究

李胜勇, 王晓宇, 王江安, 宗思光, 刘涛

(海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 环境压强是影响空泡脉动的一个重要因素。为了研究环境压强对激光空泡声波特性的影响, 采用理想液体中单空泡运动的理论模型, 对不同环境压强下液体中空泡运动过程进行了数值模拟, 并通过充气泵精确调节高压水箱内的气压, 采用高速照相机、高频测量水听器, 得到了在不同压强条件下, 空泡脉动特性的序列图像和声谱图, 根据实验数据研究了不同环境压强下液体中激光诱导产生的空泡脉动规律与声波特性。结果表明: 环境压强的改变影响了空泡生存周期和脉动的剧烈程度, 但对声波的强度和声谱分布没有影响。辐射的频率集中在 0~50 kHz 范围内, 所辐射的声波能量主要集中在 0~20 kHz 频段范围, 并在 2 kHz 与 8 kHz 有两个明显的频率峰值。

关键词: 环境压强; 空泡; 脉动特性; 声波; 频谱

中图分类号: O434.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0879-05

Experimental investigation of influence of ambient pressure on properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves

Li Shengyong, Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, Liu Tao

(College of Electronics Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The ambient pressure is one of the basic factors determining cavitation. In order to investigate the influence of ambient pressure on properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves, besides analysing the influence of ambient pressure on properties of laser-induced cavitation bubble oscillation, the experimental investigation of the laser-induced cavitation bubble collapse in liquids with different ambient pressure was done with high-speed video, the cavity sound waves generated by the cavitation bubble was detected with the high-frequency hydrophone. The pressure inside the tank was accurately controlled by an air pump. The results show that the ambient pressure has obvious influence on the bubble oscillation, but has no influence on sound intensity and spectrum. The radiation frequency range is 0–50 kHz, the radiation sound wave energy is 0–20 kHz, and have two obvious frequency peak value at 2 kHz and 8 kHz.

Key words: ambient pressure; bubble; oscillation properties; sound waves; spectrum

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51209210); 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(KFJJ10-11M); 海洋工程国家重点实验室基金项目(0908); 武器装备预研重点课题

作者简介: 李胜勇(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: lsy929@163.com

0 引言

空化是流动液体或软组织中一种特有的物理现象,它是由于液体中局部压力低于该温度下的饱和蒸汽压所产生的一种动力学现象。通常,空化产生的空泡,经历了一系列膨胀、收缩、反弹并伴随着若干次冲击波辐射之后泡能最终将全部耗散,并对外辐射出声波。长期以来,空化引起的空化噪声是舰船、潜艇及鱼雷之类水中武器的主要噪声源,空化噪声降低了水中兵器自身的隐蔽性并且干扰其水声探测设备的性能。对空化噪声的形成机理与噪声特性研究已经引起国内外学者越来越多的关注。Lauterborn W 等^[1]研究了蒸馏水中空化声波的声压计算公式与测量方法。Andreas Hakansson 等^[2]采用自行研制的高压试验设备,测量了研究不同环境压强下的声波。基于牛顿第二力学和 Rayleigh-Plesset 方程,Kwangkun Park 等^[3]理论分析了水中空泡初始尺寸对空泡声波的影响。最近,对被击穿介质的物理性质与空泡声波特性之间对应关系的研究越来越受到重视,比如 Brujan 等^[4]研究了介质的弹塑性对激光声的影响。

由于声波的产生是与空泡脉动紧密相关的,因此空泡的脉动特性直接影响声波的特性。Kyuichi Yasui 等^[5]数值模拟了水中空泡运动的剧烈程度对空泡声波的影响,发现空泡运动越剧烈对空泡声波的特性影响越大。空泡的脉动特性受到诸多因素的影响,如液体的粘性、张力、可压缩性、热传导、物质扩散以及环境压强等。特别是环境压强对空泡的溃灭时间、最大泡半径、单空泡声致发光等都有明显影响,如 Dan 等^[6]在环境压强对单空泡声致发光的影响的研究中,讨论了环境压强对空泡动力学的影响。Li B B 等^[7]研究了环境压强对空泡溃灭射流的影响。王聪等^[8]对空气压强对垂直入水空泡影响的进行了数值研究。所有研究表明,环境压强是决定空泡运动性质的基本因素之一,它影响着其他空泡过程。

激光技术的发展,促进了空泡溃灭实验的发展^[9-11],为利用高功率激光与液体物质作用产生空泡,并对激光空泡辐射的声波信号特性研究提供了便利。因此,文中结合环境压强对空泡脉动特性的影响,采用高速照相机、高频测量水听器测量了不同环

境压强下,激光诱导的空泡声波,并对测量结果进行了分析。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,MC-10 型固体脉冲激光器输出的激光脉冲宽度 8 ns,波长 1064 nm,单脉冲能量范围在 40~1000 mJ 可调。激光器出光口安置了 45°分光镜,通过激光能量计测量分光镜分出部分光束的能量。激光能量计采用为中国计量科学研究院研制的 NIM-E1000 型硅光二极管光能探测器。通过分光镜出来的激光通过消像差透镜组,对激光光束经透镜扩束后再聚焦于水槽中,采用这种方法可以增大激光的会聚角,提高聚焦质量,从而使激光焦点更加集中。为了避免产生的激光空泡在脉动过程中受到边界的影响,激光器的扩束聚焦镜头的焦距为 60 mm,聚焦点距离液面 100 mm(水槽中放入液体深度为 400 mm)。

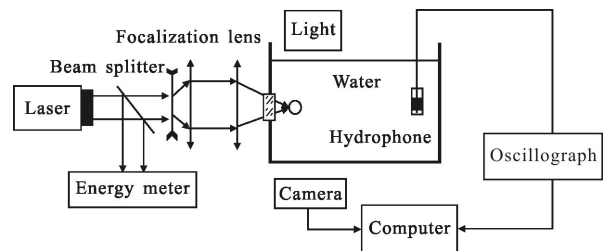


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Experimental schematic diagram

高速照相设备是 FASTCAM SA1.1 相机,实验以 250000 fps 进行高速照相实验。高速相机距离激光击穿点的距离是 85 cm。高速设备采用透光式拍摄,采用无频闪的 LED 直流灯光照明,照明光源与高速照相机相对于水槽两侧,照明光透过水槽中的空泡直接进入高速照相机镜头。

采用中国科学院声学研究所定制的水听器对压力信号进行测量,水听器的频带范围为 2~600 kHz。水听器所采集的信号通过 Agilent MSO7104A 数字示波器(频带宽度 1 GHz,最高采样率 4 G Samples/s)接收并把实验数据传到计算机中。

为了进行高压试验,图 1 中水槽为高压水箱。高压水箱的设计图如图 2 所示。高压水箱内部放置是蒸馏水,其内部压强的控制是通过空气泵充气来控制的。箱体内部压强数据从气压表上获取。

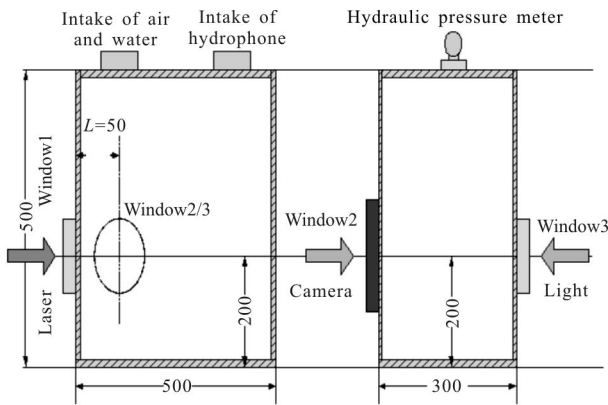


图 2 高压水箱设计图

Fig.2 Structural representation of high pressure water tank

2 实验结果与讨论

2.1 典型声信号

采用图 1 的实验装置观察空泡的脉动过程,实验过程中,以一个标准大气压(1.01×10^5 Pa)为单位,逐渐增加箱内压强,通过高速摄影测量空泡在箱体内部的变化,通过水听器采集空泡脉动过程中辐射的声波。激光器单脉冲能量选取 400 mJ,通过空气泵充气改变外界环境的压力,实现不同的外界静压力对空泡脉动以及声波特性影响的研究。采集的典型声波图如图 3 所示,图中第一个峰对应等离子体产

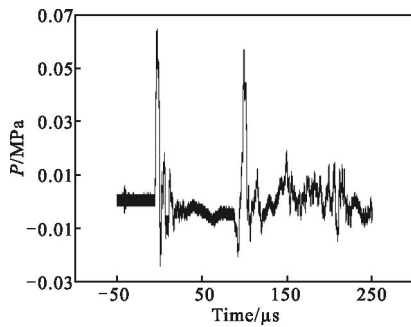


图 3 典型的声信号图形($P_p=0.3$ MPa)

Fig.3 Typical signal of the sound

生与膨胀过程中辐射的声波,第二个峰对应空泡第一次溃灭辐射的声波。由于空泡整个运动过程中,大部分泡能主要集中在第一次脉动过程中。因此,文中主要考虑空泡第一次脉动过程辐射的声波。将图 3 对应于空泡第一次脉动辐射的声波的过程放大,就可以得到图 4 所示的激光泡第一次溃灭辐射典型声波波形。

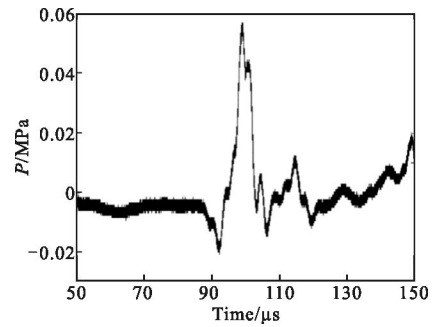


图 4 激光泡第一次溃灭辐射声波典型图

Fig.4 Typical sound wave of the first bubble collapse

2.2 环境压强对空泡脉动特性的影响

球形单空泡的生长和溃灭运动,考虑水中无限远处压强对空泡脉动特性的影响,其运动方程可以表示为:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho} \left[kP_\infty - P_v - \left(P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left[\frac{R_0}{R} \right]^{3\gamma} + \frac{2\sigma}{R_0} \right] = 0$$

式中: $R_0=1.6$ mm; $P_v=2330$ Pa (20°C); $P_\infty=100000$ Pa; $\sigma=0.073$ N/m; $\gamma=1.4$; k 表示压强的倍数。

在周围介质为水的情况下,忽略粘滞效应的影响,即 $\mu=0$ 。图 5 为利用上式计算得到的不同压强条件下空泡运动半径 R 随时间 t 的变化曲线。

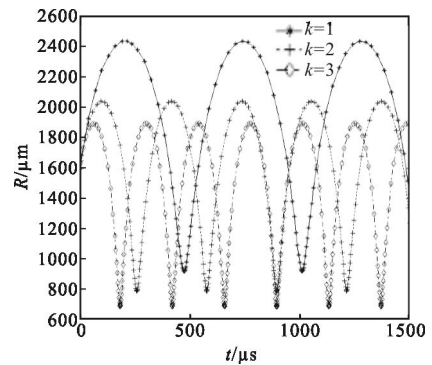


图 5 水中不同压强下的 $R(t)$

Fig.5 $R(t)$ of bubble with various pressure in water

在采集声波的同时,采用高速照相机拍摄空泡运动过程,测得的空泡运动序列图如图 6 所示。通过

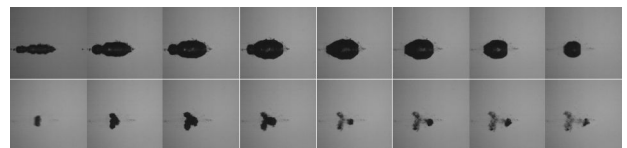


图 6 空泡脉动序列图($P_p=0.3$ MPa)

Fig.6 Movement process of single laser-induced bubble

系列的序列图进行比较,数值模拟结果与实验结果趋势一致,即环境压强越小,空泡膨胀所能达到的 R_{\max} 越大。环境压强越大,空泡收缩达到的 R_{\max} 越小。环境压强越小,空泡脉动越缓慢,脉动周期越长。

2.3 环境压强对声波特性的影响

通过图 1 实验装置采集的声波声压与不同的环境压强遵循如图 7 所示的规律,空泡第一次溃灭所辐射的声波声压基本上不随环境压强的改变而发生大的变化。

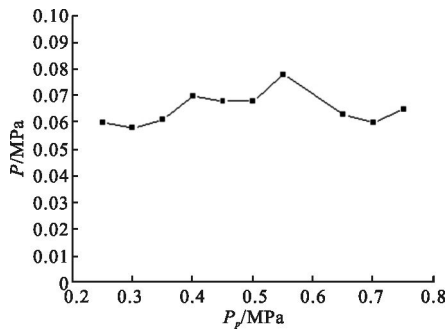


图 7 声压与环境压强关系

Fig.7 Sound pressure as a function of ambient pressure

将不同环境压强下采集的空泡第一次溃灭辐射的声波信号通过傅里叶变换(FFT)就得到不同环境压强下激光泡声波声谱如图 8 所示。通过分析图中不同压强条件下的声谱图,可以总结出如下规律:随着环境压强的增大,声谱分布并没有发生太大变化。

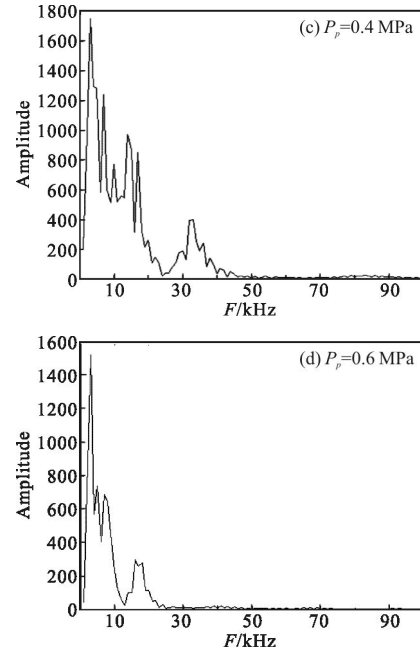
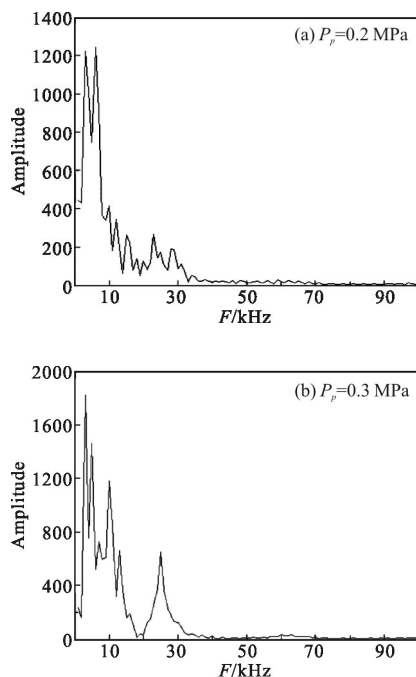


图 8 不同环境压强下的声谱图

Fig.8 Spectrum of sound wave with various ambient pressure

辐射的频率集中在 0~50 kHz 范围内,所辐射的声波能量主要集中在 0~20 kHz 频段范围,并在 2 kHz 与 8 kHz 有两个明显的频率峰值。

结合理论与实验分析环境压强对空泡的脉动特性影响,分析环境压强对声波强度的影响以及声谱分布的特点,可以得出如下结论,环境压强的改变影响了空泡生存周期和脉动的剧烈程度,但对声波的强度和声谱分布没有影响。

3 结论

文中采用理想液体中单空泡运动的理论模型,对不同环境压强下液体中空泡运动过程进行了数值模拟,通过高速摄像机与水听器实验探测了不同环境压强下液体中空泡的脉动过程和空泡溃灭辐射的声波,并对声波特性进行了分析。研究表明,环境压强的改变影响了空泡生存周期和脉动的剧烈程度,但对声波的强度和声谱分布没有影响。辐射的频率集中在 0~50 kHz 范围内,所辐射的声波能量主要集中在 0~20 kHz 频段范围,并在 2 kHz 与 8 kHz 有两个明显的频率峰值。该结果有助于建立液体中光击穿条件下激光诱导空泡声波信号的物理模型,而这一方法对于进一步研究光声效应的机理和应用有着一定的意义。

参考文献:

- [1] Lauterborn W, Kurz T, Geisler R, et al. Acoustic cavitation, bubble dynamics and sonoluminescence [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14(4): 484-491.
- [2] Andreas Hakansson, Laszlo Fuchs, Fredrik Innings, et al. Visual observations and acoustic measurements of cavitation in an experimental model of a high-pressure homogenizer[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100: 504-513.
- [3] Kwangkun Park, Hanshin Seol, Wooyoung Choi, et al. Numerical prediction of tip vortex cavitation behavior and noise considering nuclei size and distribution [J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70(5): 674-680.
- [4] Brujan E A, Vogel A. Stress wave emission and cavitation bubble dynamics by nanosecond optical breakdown in a tissue phantom [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 55(8): 281-308.
- [5] Kyuichi Yasui, Toru Tuziuti, Judy Lee, et al. Numerical simulations of acoustic cavitation noise with the temporal fluctuation in the number of bubbles [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(2): 460-472.
- [6] Dan M, Cheeke J D N, Kondic L. Ambient pressure effect on single-bubble sonoluminescence [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(9): 1870.
- [7] Li Beibei, Zhang Hongchao, Ni Xiaowu, et al. Experiment investigation on the liquid jet of laser-induced bubble in different ambient pressures [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 749-753. (in Chinese)
- 李贝贝, 张宏超, 倪晓武, 等. 不同环境压强下激光空泡溃灭射流的实验研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(6): 749-753.
- [8] Wang Cong, He Chuntao, Quan Xiaobo, et al. Numerical simulation of the influence of atmospheric pressure on water-cavity formed by cylinder with vertical water-entry [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(5): 14-19. (in Chinese)
- 王聪, 何春涛, 权晓波, 等. 空气压强对垂直入水空泡影响的数值研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(5): 14-19.
- [9] Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Design of underwater target detector by laser-induced sound signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1767-1771. (in Chinese)
- 刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 激光声水下目标探测器的设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1767-1771.
- [10] Li Xiaolong, Wang Jiang'an, Wu Yaming. Design and analysis of the MEMS dual fiber optic displacement acoustic sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2504-2509. (in Chinese)
- 李晓龙, 王江安, 吴亚明. MEMS 双光纤位移声传感器设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2504-2509.
- [11] Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Characteristics of laser-induced bubble in different surrounding pressures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 671-675. (in Chinese)
- 王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 不同环境压强下激光空泡特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 671-675.