

粘性液体中激光空泡辐射声波的特性研究

李胜勇¹, 朱强华¹, 赵瑞², 沈中华³, 倪晓武³

(1 海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

(2 南京邮电学院 应用数理系, 南京 210003)

(3 南京理工大学 应用物理系, 南京 210094)

摘 要:通过 PZT 水听器对不同粘度粘性液体中激光空泡脉动辐射的声波特性进行了实验, 获得了粘性液体中激光泡声波并进行分析. 分析结果表明: 激光空泡在脉动过程中辐射的声波将受液体粘性影响, 粘性系数越大, 辐射声波强度越弱, 峰值频率呈现增大的趋势.

关键词:激光技术; 激光泡声波; 粘性; PZT 水听器

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2082-5

0 引言

空泡现象是高速运动的液体所特有的物理现象, 它的存在对水利机械设备、高速运动物体的水动力特性、舰船隐蔽性等有着重要的影响. 因此, 空化现象一直是人们研究的热点问题之一^[1-6].

空化问题的理论研究最早可追溯到 1917 年 Rayleigh 提出的球对称空泡运动方程, 由该方程可以求出空泡溃灭时周围流场内压强的瞬态分布以及泡径随时间的变化规律. 后来人们对空泡溃灭研究逐渐深入, 但在很大程度上仍局限于 Rayleigh 方程或在无粘流场中求解, 这显然离解决实际问题尚有一定的距离. 自激光产生空泡的方法出现以后, 人们主要用激光泡来研究空化现象. 液体粘性是影响空泡脉动的重要因素之一, 尤其对空泡膨胀(收缩)最后阶段的作用效果尤为明显, 它将直接决定空泡的最小泡半径、收缩周期和收缩的剧烈程度, 这些空泡特征都与辐射的声脉冲直接关联的. 目前, 国内外关于液体粘性对空泡辐射声波特性影响的研究尚不多见.

本文采用高频响应压电陶瓷水听器 PZT 测量了在不同粘性液体中空泡辐射的声波, 经过 FFT 变换, 得到了声谱分布, 进而结合空泡溃灭理论得到液体粘性系数对空泡辐射声波特性的影响. 这一研究结果不仅可以促进空化噪音研究的深入, 从而避免空化噪音可能带来的危害; 同时也可以为激光空泡辐射的声波进行合理利用提供依据.

1 理论基础

激光泡声波是由空泡脉动过程中空泡向外反弹, 瞬时辐射出的声脉冲, 在脉动过程中, 空泡将在

液体惯性, 以及周围液体和空泡内压力差的作用下产生、演化、溃灭和反弹等行为. 在忽略液体表面张力的情况下, 研究无穷域的静止状态、不可压缩粘性流体中球形单空泡的生长和溃灭运动. 空泡壁的运动方程可以表示为^[7]

$$R \cdot \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} [P_R - P_\infty - 4\mu \frac{\dot{R}}{R}] \quad (1)$$

式中 P_R 为泡内压强; P_∞ 为液体中无限远处的压强; ρ 为液体的密度; R 为空泡半径; \dot{R} 为泡壁的运动速度; \ddot{R} 为泡壁运动的加速度; μ 为液体的粘性系数.

为了考虑液体粘性对空泡脉动的影响, 假设泡内含气量是常量. 显然, 当 $P_\infty > P_R$ 时, 气泡收缩; 反之, 当 $P_\infty < P_R$ 时, 气泡膨胀. 引进无量纲分析方法将方程无量纲化: 长度尺度为 R_0 , 时间尺度为 $R_0 / \sqrt{(P_\infty - P_R) / \rho}$.

在空泡压缩情况下, 设 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0} \times \sqrt{(p_\infty - p_R) / \rho}$, $C = 4\mu / R_0 \sqrt{\rho(P_\infty - P_R)}$, 则式(1)可改写为无量纲方程

$$\beta \ddot{\beta} + \frac{3}{2} \dot{\beta}^2 = -1 - \frac{C \dot{\beta}}{\beta} \quad (2)$$

在空泡膨胀情况下, 令 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0} \times \sqrt{(p_R - p_\infty) / \rho}$, $C = 4\mu / R_0 \sqrt{\rho(P_R - P_\infty)}$. 此时, 式(1)可改写为

$$\beta \ddot{\beta} + \frac{3}{2} \dot{\beta}^2 = 1 - \frac{C \dot{\beta}}{\beta} \quad (3)$$

当初始条件 $\tau=0$ 时 $R=R_0$, 则有

$$\beta=1 \quad (4)$$

$$\dot{\beta}=\ddot{\beta}=0 \quad (5)$$

根据给定的初始条件式(4)和(5), 利用式(2)和

(3)可以计算出不同粘性液体中空泡膨胀及收缩情况(如图 1),从而得到粘性系数对空泡脉动特性的影响。由图可见,液体粘性的作用使气泡收缩时间延长,且粘性系数越大,空泡收缩越缓慢;同时,粘性对气泡膨胀运动起到减缓作用。

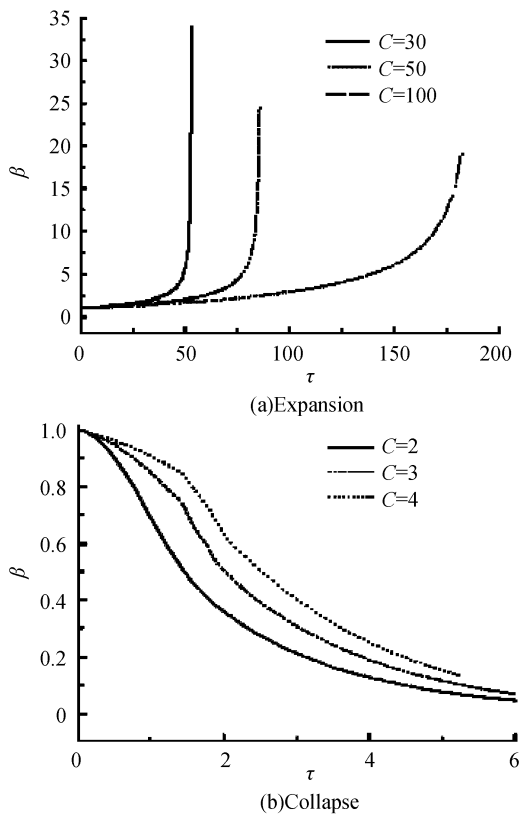


图 1 液体粘性对空泡脉动影响的数值计算结果

Fig. 1 The numerical calculation experimental results of influence by the liquid viscosity on bubble oscillation

通过实验测量液体粘性对空泡脉动的影响,通过跟踪各次脉动中空泡膨胀壁和收缩壁到达的时间,可以得到空泡半径随时间的变化关系,即 $R=R(t)$ 曲线。

图 2 为不同粘性系数液体中空泡膨胀、收缩半径随时间变化的实验曲线^[8]。结果表明,粘性作用将明显地减缓空泡的膨胀收缩过程,增大空泡的生存周期;液体粘性越大,空泡对应的最大泡半径越小而

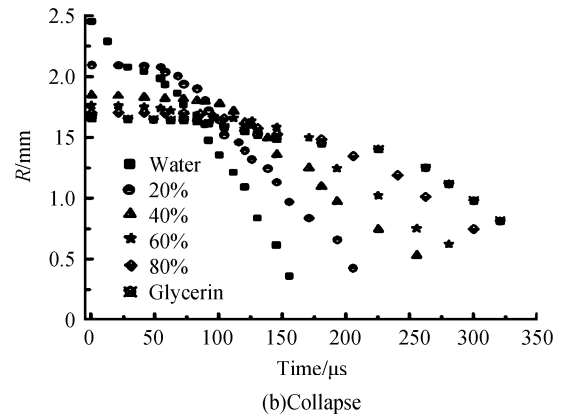
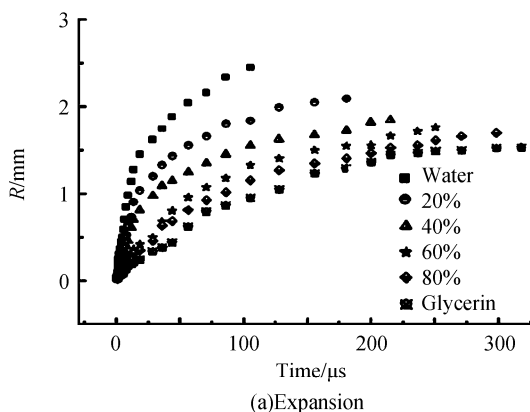


图 2 液体粘性对空泡脉动影响的实验结果

Fig. 2 The experimental results of influence by the liquid viscosity on bubble oscillation

收缩所能达到的最小泡半径越大;在初期,液体粘性影响不甚明显;愈到后期,受粘性影响因而过程变缓的现象愈明显。

粘性系数对空泡脉动特性的影响,理论计算与实验结果均表明:液体粘性对空泡的运动起阻尼作用;受液体粘性影响,空泡膨胀收缩过程明显变缓;在初期,液体粘性影响不甚明显;愈到后期,受粘性影响过程变缓的现象愈明显;粘性系数越大,空泡膨胀的最大泡半径越小而收缩的最小泡半径越大;此外,粘性作用将明显地增大空泡的生存周期。

也就是说液体粘性是影响空泡脉动的种要因素之一,尤其对空泡膨胀(收缩)最后阶段的作用效果尤为明显,它将直接决定空泡的最小泡半径、收缩周期和收缩的剧烈程度,这些特征都与辐射的声脉冲直接关联的,将对声脉冲的特性产生影响,因此考虑研究粘性液体中空泡辐射声波特性。

2 实验装置与结果分析

2.1 实验装置

实验装置见图 3。图中:1 为调 Q-Nd:YAG 激光器;2 为波片;3 为衰减片组;4 为扩束准直装置;5 为非球面镜;6 为水听器;7 为装有不同配比甘油的水槽;8 为数字存储示波器;9 为 PIN 二极管调 Q 固体 Nd:YAG 脉冲激光器(Continuum Surelite-II)输出波长 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽 10 ns ,最大能量 500 mJ 的单模激光脉冲;脉冲激光经过波片和衰减片组之后,采用光学扩束准直装置以增大会聚角,由透镜(焦距为 147 mm)聚焦。激光聚焦光斑尺寸约为 0.3 mm 。衰减片组是为不改变激光输出模式的情况下用来调节激光输出能量。PIN 光电二极管(上升时间 100 ps)用来接收波片的部分反射光作为示波器记录冲击波波形的计时零点。声波探测器采用中国科学院声学研究所研制的压电陶瓷探针式水听器

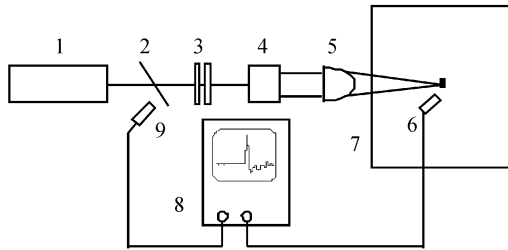


图3 实验装置
Fig.3 Experimental setup

PZT, 数字式存储示波器(Tek-TDS340)记录水听器探测到的声波信号。

不同甘油配比(容积配比)液体的粘度如表 1^[9]。

表 1 不同粘度液体的粘滞系数 μ

容积配比	蒸馏水	100	80	60	40	20	0
甘油	0	20	40	60	80	100	
粘滞系数 μ $/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.0113	0.0314	0.0595	0.2052	0.69	1.10	

2.2 实验结果与讨论

在实验中,脉冲激光单脉冲能量为 300 mJ, 容积配比为 0, 20%~100% 的甘油纯净水的混合溶液. 为了消除随机误差, 实验中每次平均采样 5 次, 实验数据为 5 次的平均值. 利用给定的水听器的灵敏度可将水听器输出的电信号转换为相应的声压信号, 图 4 为 20% 甘油配比溶液中激光空泡脉动过程中对外辐射的声波典型图. 图中第一个峰对应等离子体产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, 第三个峰对应空泡第二次溃灭辐射的声波, 实验中还发现当溶液含 90% 以上的甘油时, 只能探测到空泡第一次溃灭辐射声

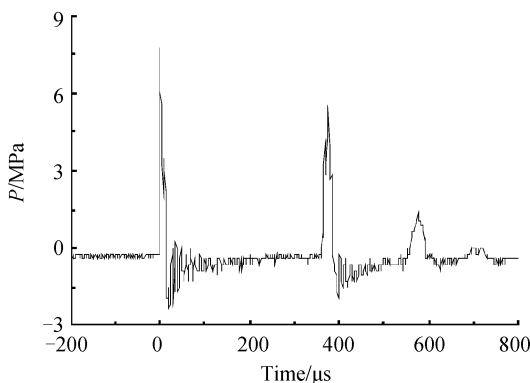


图4 粘性液体中典型的声信号图形
Fig.4 Typical signal of the sound in viscous fluid

波信号, 说明此时空泡的能量较低, 空泡第一次收缩后无力回弹. 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, 本文主要考虑空泡的第一次脉动过程辐射的声波^[10].

将图 4 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 5 所示的典型空泡溃灭辐射声波波形。

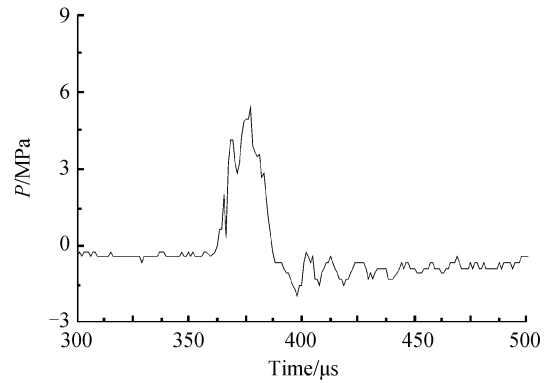


图5 粘性液体中激光泡第一次溃灭辐射声波典型图
Fig.5 Typical sound wave of the first bubble collapse in viscous fluid

图 6 给出了作用激光能量不变(300 mJ), 辐射的激光泡声波强度随液体粘度系数变化的关系图. 可以看出, 随着液体粘性的增强, 声波声压强度呈单调下降的趋势. 这是因为液体粘性的增加, 增强了空泡脉动的阻力, 当液体的粘度较大时, 泡能消耗较迅速, 空泡剧烈衰减. 所以空泡溃灭辐射声波的能量相应减弱, 辐射声波的强度呈现这种趋势。

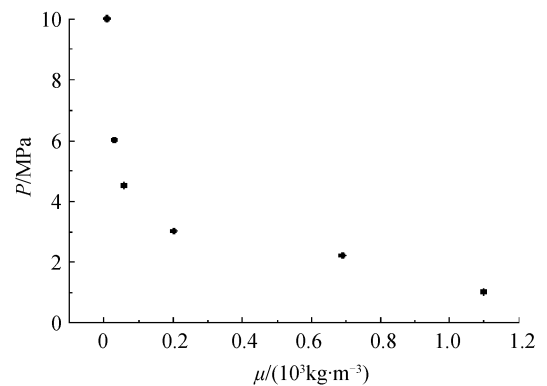


图6 激光泡声波强度与粘度系数 μ 的关系
Fig.6 Relation of laser-induced cavitation bubble sound waves intensity and viscous coefficient μ

将采样得到的空泡的第一次脉动过程辐射的声波信号通过傅里叶变换(FFT)就得到相应的粘性液体中激光泡声波声谱典型图 7。

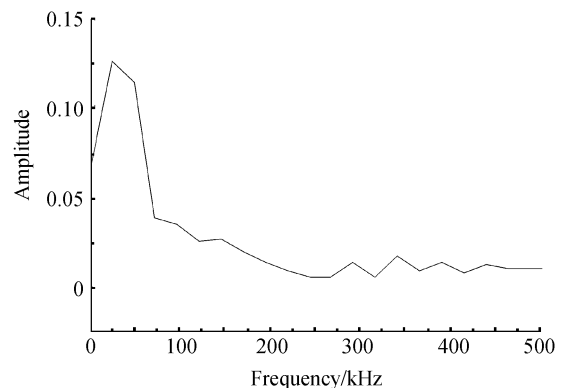


图7 粘性液体中激光泡声波声谱典型图
Fig.7 Typical spectrum of laser-induced cavitation bubble sound waves in viscous fluid

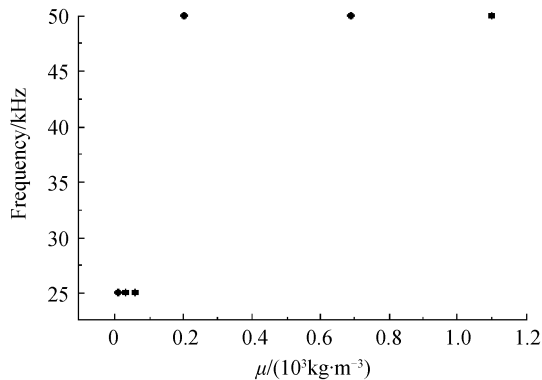


图8 激光泡声波峰值频率与粘度系数 μ 的关系
Fig. 8 Relation of peak of frequency and viscous coefficient μ

将不同粘性液体下采集的空泡溃灭声波均经过FFT变换,得到声波的峰值频率,给出辐射的声波峰值频率随液体粘性变化的关系图8。从图中可以看出,随着液体粘性增强,声波的峰值频率呈现增大趋势。根据理论与实验分析的液体粘性对空泡运动的影响,产生这种现象的原因是:随着液体粘性的增强,空泡膨胀的最大泡半径越小;随着空泡膨胀的最大泡半径下降,峰值频率呈现出这么一种增大的特征。

3 结论

本文理论分析了不同粘性系数下液体中激光空泡脉动的特性,结果表明:液体粘性对激光空泡生存周期、空泡半径、以及泡壁的运动速度等均有影响。这些将直接影响激光空泡溃灭辐射声波的特性,因此考虑不同粘性系数对激光泡声波的特性产生的影响。通过水听器对粘性液体中激光空泡脉动辐射的声波特性进行了实验研究,研究结果表明:粘性系数对激光泡声波产生影响,粘性系数越大,声波强度越弱;同时辐射声波的峰值频率随着粘性系数的增大而呈现增大的趋势。本文研究结果有助于建立液体中光击穿条件下激光泡声波信号的物理模型。

参考文献

- [1] VOGEL A, BUSCH S, PARLITZ U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water[J]. *J Acoust Soc Am*, 1996, **100** (1): 148-165.
- [2] SHAW S J, SCHIFFERS W P, EMMONY D C. Experimental observations of the stress experienced by a solid surface when a laser-created bubble oscillates in its vicinity[J]. *J Acoust Soc Am*, 2000, **107**(6): 3065-3072.
- [3] KODAMA T, TOMITA Y. Cavitation bubble behavior and bubble-shock wave interaction near a gelation surface as a study of in vivo bubble dynamics[J]. *Appl Phys B*, 2000, **70** (1): 139-149.
- [4] XU Rong-qing, CHEN Xiao, SHEN Zhong-hua, et al. Dynamics of laser-induced cavitation bubble near solid boundaries[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1413-1417.
徐荣青, 陈笑, 沈中华, 等. 固体壁面附近激光空泡的动力学特性研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1413-1417
- [5] LI Ming, ZHANG Hong-chao, SHEN Zhong-hua, et al. Physical analyses of optical breakdown and plasma formation in water induced by laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34** (11): 1610-1614.
李明, 张宏超, 沈中华, 等. 激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1610-1614.
- [6] YUAN Ling, SHEN Zhong-hua, GUAN Jian-fei, et al. Theoretical study on laser-generated ultrasound in the structure with conyinous changes of near-surface elastic property[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1769-1773.
袁玲, 沈中华, 关建飞, 等. 近表面弹性性质连续变化材料中激光声表面波的理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1769-1773.
- [7] RAYLEIGH L. On the pressure developed in liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Philosophical Magazine*, 1917, **34**(199): 94-98.
- [8] ZHAO Rui, XU Rong-qing, SHEN Zhong-hua, et al. The collapse and rebound of laser-induced cavitation bubble in viscous fluid[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55** (9): 4783-4788.
赵瑞, 徐荣青, 沈中华, 等. 黏性液体中激光空泡脉动特性的理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4783-4788.
- [9] HUANG Ji-tang. Effect of liquid viscosity on bubble living process[J]. *Journal of Beijing Institute of Civil Beijing and Architecture*, 1994, **10**(2): 29-31.
黄继汤. 液体粘性对空泡生存过程的影响[J]. *北京建筑工程学院学报*, 1994, **10**(2): 29-31.
- [10] LI Sheng-yong, HU Sheng-liang, LIU Xiao-ran, et al. Spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves[J]. *Laser Technology*, 2007, **31** (3): 281-284.
李胜勇, 胡生亮, 刘晓然, 等. 激光空泡溃灭辐射声波声谱特性研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(3): 29-31.

Properties of Laser-Induced Cavitation Bubble Sound Waves in Viscous Fluid

LI Sheng-yong¹, ZHU Qiang-hua¹, ZHAO Rui², SHEN Zhong-hua³, NI Xiao-wu³

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

(2 *Department of Applied Mathematics and Physics, Nanjing University of the Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China*)

(3 *Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: The properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves during the high-power laser and matter interaction in different viscous liquids were investigated by the piezoelectric transducer (PZT) hydrophone. The experimental results indicate that the liquid viscosity has an obvious influence on laser-induced cavitation bubble collapse sound waves, larger viscosity makes the intensity of sound waves more feeble, and the peak of frequency becomes higher and higher.

Key words: Laser technique; Laser-induced cavitation bubble sound waves; Viscidity fluid; PZT hydrophone



LI Sheng-yong received his M. S. degree from Naval University of Engineering in 2007. Now he is a prelector at Naval University of Engineering, and his research interests focus on photoelectricity countmeasured.