

# 含气量对黏性液体中空泡脉动特性的影响<sup>\*</sup>

赵 瑞<sup>1)</sup> 徐荣青<sup>1)</sup> 梁忠诚<sup>1)</sup> 陆 建<sup>2)</sup> 倪晓武<sup>2)†</sup>

1) 南京邮电大学光电工程学院, 南京 210003)

2) 南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

(2009 年 1 月 13 日收到, 2009 年 3 月 31 日收到修改稿)

采用自行研制的高灵敏度光偏转测试系统, 研究黏性液体中激光空泡脉动特性. 判定了空泡两次脉动对应的最大和最小泡半径, 进而计算了激光空泡在前两次脉动过程中泡内的含气量. 研究表明: 泡内含气量对泡脉动特性有较大影响. 随着脉动次数的增加, 空泡泡内含气量增大. 空泡最大泡半径随含气量的增加而增大. 此外, 受液体黏性影响, 空泡膨胀和收缩过程明显变缓.

关键词: 含气量, 黏性, 激光空泡, 脉动特性

PACC: 4755B

## 1. 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. 空化现象的作用后果主要表现为三个方面. 一是改变液体的水动力作用. 空化的出现会增加水流的阻力, 降低机械效率. 二是产生空蚀. 在水利机械、泄水建筑物以及其他高速流水设备方面, 空蚀常会引起设备工作效率降低、剥蚀破坏甚至不能正常运行. 三是辐射空化噪声. 空化噪声不仅降低了水中设备自身的隐蔽性, 而且干扰其水声探测仪器的性能. 鉴于上述原因以及空泡运动的复杂性, 近几十年来, 空化现象一直是流体科研工作者研究的一个热点<sup>[1-6]</sup>.

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<sup>[7]</sup>. 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 方程或在无黏流场中求解. 液体黏性和空泡含气量是影响空泡脉动的两个重要因素, 将直接决定空泡的泡半径  $R$  和脉动剧烈程度. 然而, 国内外关于黏性液体中空腔含气量的研究尚不多见. 空化实验是一种直观显示空泡溃灭过程的研究方法. 自从利用激光产生空泡的方法出现之后, 由于激光泡具有球对称性好、可控性好及无机械形变的特点, 因

而促使空泡溃灭的实验研究得到了长足发展. 本文主要考虑了空泡含气量和液体的黏性对空泡脉动情况的影响, 采用自行研制的基于光偏转原理的光纤传感器探测了在不同黏性液体中空泡脉动规律. 结合空泡溃灭理论, 计算了空泡的含气量并分析了含气量对空泡脉动特性的影响.

## 2. 理论分析

无穷域静止状态、不可压缩流体中球形单空泡的运动方程可以表示为<sup>[7]</sup>

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{P_0 - P_\infty}{\rho_0}, \quad (1)$$

其中  $P_0$  为泡内压力,  $P_\infty$  为未受扰动的环境液体压力,  $\rho_0$  为液体密度.

考虑液体黏性和泡内含气量对空泡脉动影响, 空泡壁的运动方程可表示为

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho_0} \left[ P_\infty - P_v - \left( P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \times \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4\mu \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma}{R} \right] = 0. \quad (2)$$

其中  $P_v$  为饱和蒸汽压强 (2330 Pa, 20 °C),  $P_0$  为泡内压力,  $P_\infty$  为液体中无限远处的压强 ( $1 \times 10^5$  Pa),  $\rho_0$  为液体的密度,  $R$  为空泡在时刻  $t$  的半径,  $\dot{R}$  为泡壁的运动速度,  $\ddot{R}$  为泡壁运动的加速度,  $\mu$  为液

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 60578015, 60778007, 60878037), 南京邮电大学攀登计划 (批准号: NY206076, NY207023, NY207030) 和江苏省高校自然科学基金 (批准号: 09KJB510013) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: nxwhome@mail.njust.edu.cn

体的黏性系数,  $\sigma$  为液体的表面张力(假定液体表面张力  $\sigma$  为常数), 多方系数  $\gamma = 1.4$ . 由于实际空泡内总含有一定量的水蒸气和从周围水体汇集到泡内原溶于水的某些气体, 因此腔内压力不为零.

为了讨论含气量对空泡脉动特性的影响, 令

$$P_0 = kP_\infty \quad (0 < k < 1), \quad (3)$$

其中参数  $k$  表征空泡含气量比例. 将(3)式代入(2)式, 得

$$\begin{aligned} R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho_0} \left[ P_\infty - P_v - \left( kP_\infty - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right. \\ \left. \times \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4\mu \frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\sigma}{R} \right] = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

根据给定空泡的初始半径  $R_0$  和温度  $T$ , 利用(4)式可以得到液体黏性系数和泡内含气量对空泡脉动特性的影响.

假定泡内含气量不变, 取表征空泡含气量的参数  $k = 0.2$ , 初始泡半径  $R_0 = 0.5 \text{ mm}$ . 由于表面张力对空泡脉动的影响很小, 可以近似认为恒为水的表面张力  $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时水的表面张力). 图 1 为利用(4)式计算得到的表征泡内含气量的参数  $k = 0.2$  时不同黏性系数下空泡脉动半径  $R$  随时间  $t$  的变化曲线, 曲线 1, 2, 3, 4 分别表示甘油和水的混合溶液中甘油的体积分数为 0, 40%, 60% 和 100% 时的空泡脉动曲线. 不同甘油配比的液体中各特征参数如表 1 所列. 从图 1 可见, 液体黏性对空泡脉动起到阻尼作用. 当运动速度较大时, 惯性力远大于黏性力, 可以忽略黏性的影响. 在气泡运动速度较小时(如空泡的成长阶段), 必须考虑黏性的影响. 空泡膨胀的最大泡半径  $R_{\max}$  随液体黏度的增加而减小; 振幅减小的幅度随黏度的增加而越来越大; 空泡所能脉动的次数随黏度的增加而减少; 空泡在最小半径  $R_{\min}$  附近的泡壁运动速度(收缩或膨胀)要明显快于其在  $R_{\max}$  附近的运动速度.

表 1 利用(4)式计算时混合液的黏性系数和液体密度的取值

甘油的体积分数/%	0	40	60	100
黏性系数/ $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.0113	0.0595	0.2052	1.10
液体密度/ $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.000	1.1032	1.2064	1.258

由于空泡内总含有蒸汽和一定量的空气, 且泡内含气量并非为一成不变的常量, 即随着泡壁膨胀收缩, 泡内水蒸气含量会发生变化, 从而导致泡内含气量发生变化. 选定空泡的初始半径  $R_0 = 0.5 \text{ mm}$ ,

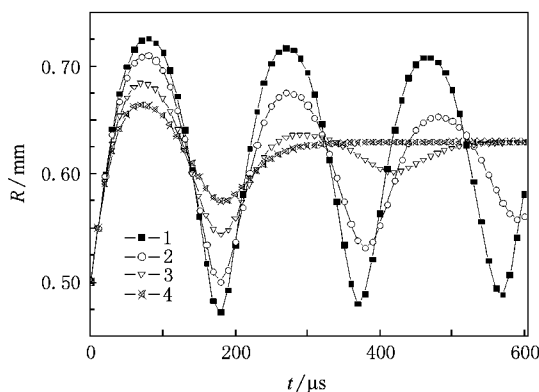


图 1 不同黏度的液体中空泡半径  $R$  随时间  $t$  的变化

温度  $T = 293.15 \text{ K}$ , 混合液体的黏性系数为  $0.0595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 液体密度为  $1.1032 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . 利用(4)式数值模拟了空泡内含气量分别为  $k = 0.1, 0.15$  和  $0.2$  时对空泡脉动过程的影响, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出: 空泡脉动过程中含气量越大, 气泡膨胀所能达到的  $R_{\max}$  越大; 含气量越小, 气泡收缩达到的  $R_{\min}$  也就越小. 含气量越大, 空泡脉动越缓慢, 脉动周期也就越长. 在空泡脉动的初始阶段, 含气量的多少对脉动的影响不大.

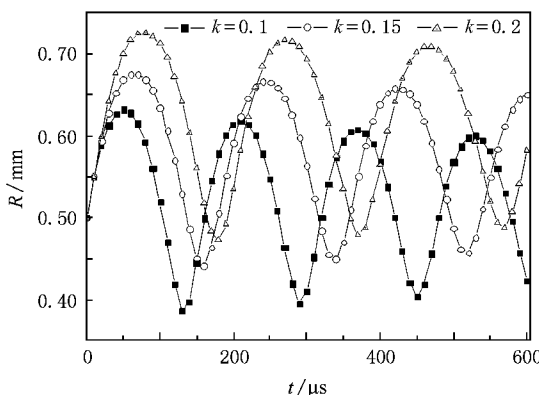


图 2 不同含气量下空泡半径  $R$  随时间  $t$  的变化

图 3 为空泡第一次脉动过程中膨胀速度和收缩速度随含气量  $k$  的变化关系. 从图 3 可以看出: 空泡膨胀和收缩时泡壁的运动速度  $v$  均随空泡初始含气量的变化而变化; 对膨胀过程而言, 当含气量( $k$  值)增大, 曲线变得平缓, 即加速度变小, 膨胀持续时间随含气量的增大而延长; 当气泡收缩时存在最大收缩速度, 且最大收缩速度随含气量的变大而变小. 此外, 气泡收缩起始时间随着含气量的增大滞后, 且持续时间呈现延长的趋势.

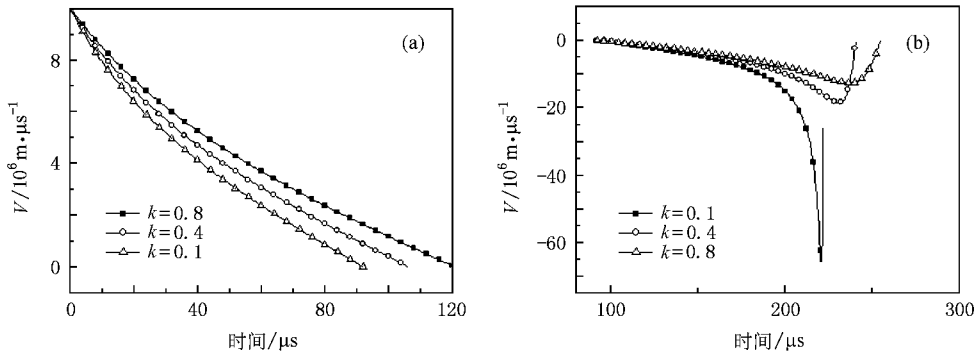


图 3  $k$  值与空泡膨胀速度及收缩速度的关系 (a) 膨胀 (b) 收缩

### 3. 实验装置与结果分析

#### 3.1. 实验装置

实验装置如图 4 所示. 调  $Q$  固体 Nd:YAG 脉冲激光器可输出波长为  $1.06 \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ 、最大能量为  $500 \text{ mJ}$  的单模激光束; 分光镜反射部分光由 PIN 光电二极管(上升时间为  $100 \text{ ps}$ )采集, 作为示波器采集数据的同步触发信号; 通过衰减片组可以调节作用于靶材所需的激光能量而不改变其空间和时间分布; 凹透镜(焦距为  $50 \text{ mm}$ )和凸透镜(焦距为  $150 \text{ mm}$ )构成了光学扩束系统, 其作用是将脉冲激光扩束并垂直聚焦于液体中 Al 靶的表面上; 尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的水槽实验时, 装有不同配比的甘油与水的混合液体.

图 4 中用于测试空泡及其脉动特性的传感器是基于光偏转原理的光纤传感器, 即由 He-Ne 激光器、聚焦透镜、显微物镜、干涉滤波片、光纤调节架、单模光纤以及光电倍增管等组成. 探测组件被固定在二维可移动平台上, 如图 4 虚线框所示. 探测光束与靶面之间的距离可直接从二维平台上的刻度尺读取, 该平台沿靶面法线方向的移动精度为  $10 \mu\text{m}$ .

He-Ne 激光器发射波长  $0.63 \mu\text{m}$ 、功率  $5 \text{ mW}$  的连续激光, 通过焦距为  $50 \text{ mm}$  的透镜聚焦于靶面焦点的正前方, 该光束与冲击波或空泡相互作用时产生的微小改变也将使原光束传播方向发生偏转, 再通过 20 倍的显微物镜聚焦于单模光纤的端面上. 光纤与探测光的耦合可通过光纤微调架进行调节. 光电倍增管则用来将光纤出射的光强变化转变成电信号输出至数字存储示波器. 图形的分析和处理通过计算机来完成.

实验中 Al 靶被预先置于作用激光的前焦区, 同时采用光学扩束装置以增大会聚角, 这样可有效地防止液体先被激光击穿, 从而保证初始的激光等离子体空泡具有较好的半球状, 且其泡心始终位于靶材表面. 当这束强脉冲激光聚焦于液体中靶材时, 会在作用区产生等离子体、冲击波和空泡等一系列现象. 当激光泡到达探测光所在位置时, 因泡的边缘是气液分界面, 探测光将会偏转. 在实验中, 为研究激光泡及其反弹信号随探测距离的变化规律, 我们通过移动二维平台(移动方向如图 3 中箭头所示)可以调节探测光与靶表面之间的距离, 并将空间“零”位置定义为当探测光刚好被靶材挡去一半时所对应的位置, 即输出信号幅值为最大信号的一半, 这可以直接从示波器上的波形幅值进行判定.

#### 3.2. 实验结果与讨论

在实验中, 激光单脉冲能量为  $40 \text{ mJ}$ , 探测距离

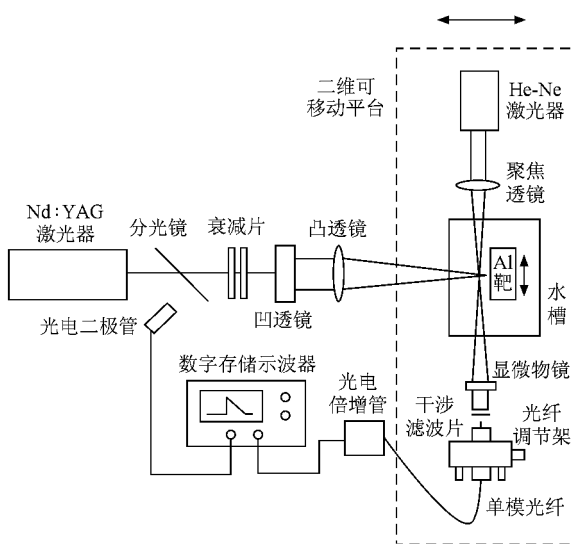


图 4 基于光偏转原理的实验装置示意图

从 0 变化到 3 mm,所使用的液体是体积分数为 0, 20%—100% 的甘油与纯净水的混合溶液.为了消除随机误差,实验中每一探测距离平均采样 5 次,实验数据为其平均值.当探测光经过探测区域时,发现随着探测距离  $d$  (探测光束到靶材表面) 的不同,所获得的光偏转波形信号也随之发生变化.

我们知道,液体黏性会对空泡脉动过程带来影响,因此,改变液体的黏性,空泡的生存周期、对应的最大泡半径  $R_{\max}$  及收缩所能达到的最小泡半径  $R_{\min}$  随之发生变化.文献 [8] 对此作了详细的分析研究,本文仅研究液体黏性不变时空泡脉动特性.图 5 给出了甘油体积分数为 60% 的溶液中激光等离子体空泡脉动的典型序列波形.根据文献 [9] 阐述的测试方法,测得激光空泡前两次脉动过程对应的  $R_{\max}$  和  $R_{\min}$  分别

对  $R_{\max 1} = 1.445 \text{ mm}$ ,  $R_{\min 1} = 0.496 \text{ mm}$ ,  $R_{\max 2} = 1.591 \text{ mm}$ ,  $R_{\min 2} = 0.568 \text{ mm}$ ,下标 1、2 分别对应两次脉动.实验结果表明,随着脉动次数的增加,空泡的最大泡半径  $R_{\max}$  没有减小反而增大,同时泡收缩所能达到的最小泡半径  $R_{\min}$  也增大,即有  $R_{\max 1} < R_{\max 2}$ ,  $R_{\min 1} < R_{\min 2}$ . 作者认为,这是由于在脉动过程中空泡的  $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  由腔内含气量和泡能共同决定.通常泡能减小,空泡膨胀所能达到的  $R_{\max}$  减小而空泡收缩所能达到的  $R_{\min}$  增大,而当含气量减少时,空泡膨胀和收缩所能达到的  $R_{\max}$  和  $R_{\min}$  均变小.我们知道,在脉动过程中空泡泡能损失了很大部分<sup>[10]</sup>,尽管空泡收缩所能达到的  $R_{\min}$  由于泡能的减小而增大,然而泡能的减小将导致空泡膨胀所能达到的  $R_{\max}$  减小.此外,空泡泡能

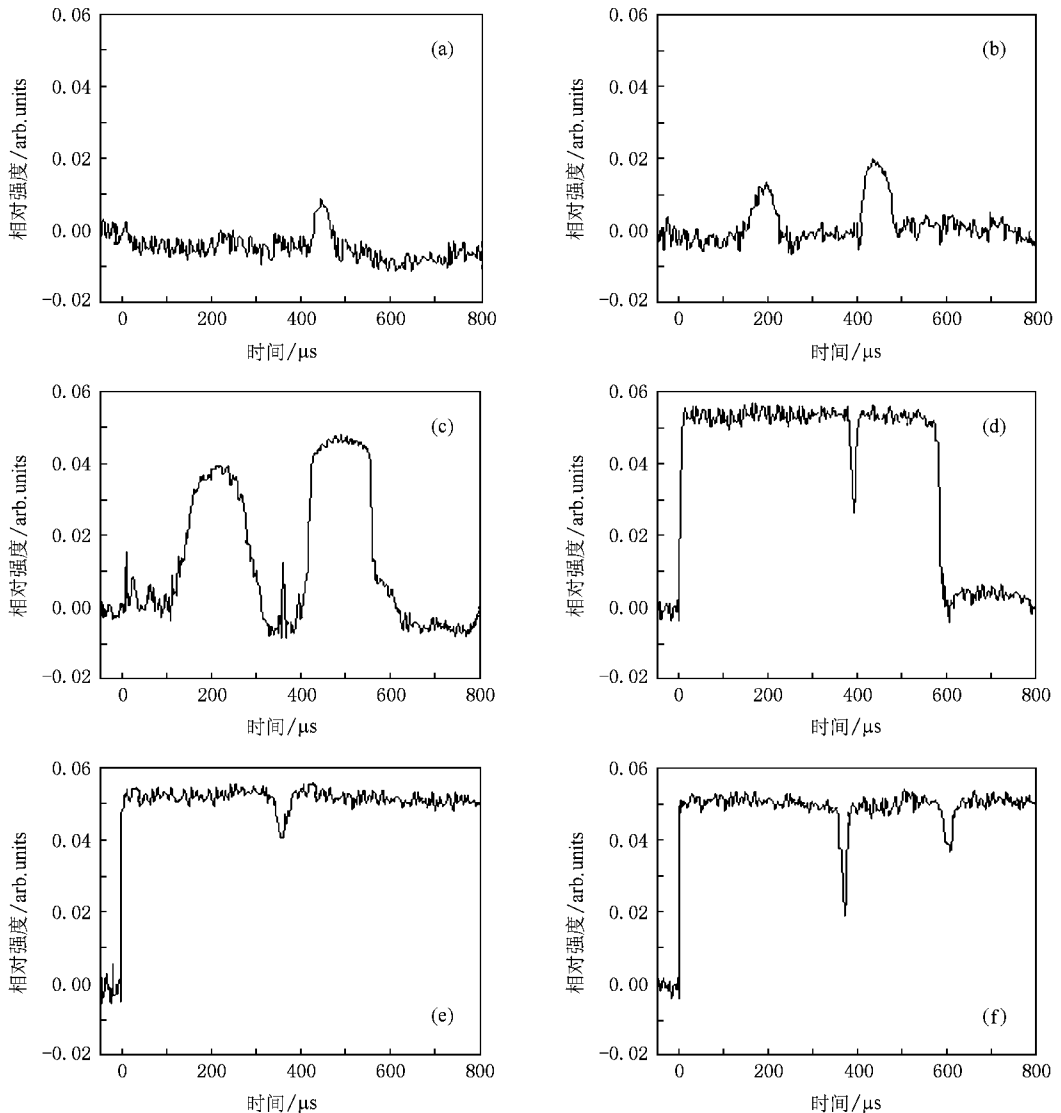


图 5 实验探测到空泡随探测距离  $d$  变化的发展序列波形 (a)  $d = 1.591 \text{ mm}$  (b)  $d = 1.445 \text{ mm}$  (c)  $d = 1.309 \text{ mm}$ , (d)  $d = 1.160 \text{ mm}$  (e)  $d = 0.496 \text{ mm}$  (f)  $d = 0.568 \text{ mm}$

的减小使空泡周围部分液体汽化并迅速汇集到泡内,造成了腔内含气量的增加.泡内含气量的增加使得空泡膨胀和收缩所能达到的  $R_{\max}$  和  $R_{\min}$  均变大.实验结果表明,相对较泡能的减小,泡内含气量的增加对泡半径  $R$  的影响较泡能减小的影响大.同时,空泡第二次脉动过程中泡内含气量大于第一次脉动过程中泡内含气量,进而导致激光空泡的最大泡半径  $R_{\max}$  随脉动次数增加呈现增大趋势且增幅较大.图 2 的数值模拟结果也显示并验证了空泡的  $R_{\max}$  和  $R_{\min}$  随着含气量增大而增大的规律.

表 2 实验所使用的混合液相关参量取值

$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$\mu$
1206.4	0.073	0.2052

为了验证空泡腔内含气量在脉动过程中是增大的这一结论,根据实验获得的序列波形图,结合空泡溃灭理论计算激光空泡在前两次脉动过程中泡内含气量的大小.通过跟踪不同探测距离处泡壁对应的时间,可以得到泡壁膨胀和收缩的运动特性及泡壁的平均速度.将实验结果  $R_{\max 1} = 1.445 \text{ mm}$  和  $R_{\max 2} = 1.591 \text{ mm}$  及表 2 中的相关数值代入(4)式,通过调整表征空泡含气量的参数  $k$ ,使得实验数据和理

论曲线的拟合效果最好,进而推算出激光空泡在前两次脉动周期中的含气量.计算结果发现,在甘油体积分数为 60% 的溶液中前两次脉动过程中空泡泡内表征含气量的参数  $k$  分别为 0.26 和 0.45.由此可以得到空泡第一次脉动过程中腔内气体含量小于第二次脉动过程中泡内气体含量的结论,这一结果和上述推测相一致.

## 4. 结 论

以黏性液体中激光空泡作为研究对象,考虑了含气量对空泡脉动特性的影响.结果发现在不同振荡周期内,随着脉动次数的增加,最大泡半径不减反增,且幅度较大.针对这一反常现象,作者认为随着空泡脉动次数的增加,空泡泡内含气量是增加的.尽管泡能的减小将会使空泡半径减小,然而泡内含气量的增加使泡半径增大占主导作用.根据实验测得的激光泡的脉动特性,结合空泡溃灭理论,推算了激光空泡在各次脉动过程中的含气量,验证了本文的推测.该结果可以促进空化研究的深入,为合理利用空化现象提供理论和实验依据.

[1] Shaw S J, Schiffers W P, Emmony D C 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 1822  
 [2] Philipp A, Lauterborn W 1998 *J. Fluid Mech.* **361** 75  
 [3] Zhao R, Liang Z C, Xu R Q, Lu J, Ni X W 2008 *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** 5482  
 [4] Kodama T, Tomita Y 2000 *Appl. Phys. B* **70** 139  
 [5] Zwaan E, Le Gac S, Tsuji K, Ohl C D 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 254501  
 [6] Liu X M, He J, Lu J, Ni X W 2008 *Chin. Phys.* **17** 2574

[7] Rayleigh L 1917 *Philos. Mag.* **34** 94  
 [8] Zhao R, Xu R Q, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4783 (in Chinese) [赵 瑞、徐荣青、沈中华、陆 建、倪晓武 2006 物理学报 **55** 4783]  
 [9] Xu R Q, Chen X, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2004 *Phys. Fluids* **16** 832  
 [10] Qi D M, Lu C J, He Y S 1988 *Acta Acust.* **25** 532 (in Chinese) [戚定满、鲁传敬、何友声 1988 声学学报 **25** 532]

# Influence of bubble content on laser-induced cavitation bubble oscillation in glycerol-water mixture<sup>\*</sup>

Zhao Rui<sup>1)</sup> Xu Rong-Qing<sup>1)</sup> Liang Zhong-Cheng<sup>1)</sup> Lu Jian<sup>2)</sup> Ni Xiao-Wu<sup>2)†</sup>

<sup>1)</sup> College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

<sup>2)</sup> Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

( Received 22 January 2009 ; revised manuscript received 31 March 2009 )

## Abstract

The effect of viscosity and bubble content on cavitation bubble oscillation is investigated by the fiber-optical sensor based on the beam deflection in combination with theoretical analysis. The maximum bubble radius at each oscillating cycle in different viscous fluid is determined by experiment. It is observed that the maximum bubble radius at each oscillating cycle does not decrease but increases. A reasonable explanation based on experimental results and numerical calculation is given to this anomaly. The results indicate that both the bubble content and the viscosity have obvious influence on the bubble oscillation and it does increase during the bubble oscillating cycle.

**Keywords :** bubble content , viscosity , laser-induced cavitation bubble , oscillation

**PACC :** 4755B

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60578015 , 60778007 , 60878037 ) , the Climbing Program of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China ( Grant Nos. NY206076 , NY207023 , NY207030 ) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Provincial Higher Education Institutions, China ( Grant No. 09KJB510013 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : nxwhome@mail.njust.edu.cn