

表面张力对固壁旁空泡运动特性影响的 理论和实验研究^{*}

刘秀梅¹⁾ 贺 杰²⁾ 陆 建^{1)†} 倪晓武¹⁾

1)(南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

2)(南京工程学院基础部, 南京 211167)

(2008 年 6 月 3 日收到, 2008 年 10 月 22 日收到修改稿)

表面张力是影响空泡脉动及空蚀的一个重要因素. 对五种不同表面张力液体中空泡脉动(膨胀和收缩)过程进行了研究, 并将实验结果与基于空泡生长和溃灭理论的计算结果进行了对比. 实验中, 用激光作为测试光源, 采用光偏转测试系统研究了不同表面张力液体中空泡泡壁运动规律及泡壁速度的变化. 结果表明: 表面张力对空泡膨胀过程起抑制作用, 故液体表面张力愈大, 空泡能达到的最大直径越小; 表面张力对空泡的收缩过程则起加速作用, 液体表面张力愈大, 收缩越迅速, 空泡泡壁运动速度越大, 其所产生的瞬时溃灭压强越大, 空化效果越好.

关键词: 表面张力, 空泡, 光偏转

PACC: 4755B

1. 引 言

空泡空化问题是目前流体力学最活跃的研究领域之一. 它的研究内容相当广泛, 目前主要包括空泡^[1]、冲击波^[2]、射流^[3]、逆射流^[2]以及空泡-空泡^[4]、空泡-固壁面^[5]、空泡-弹性壁面^[6]、空泡-自由面间^[5]的相互作用等方面. 空化的出现会产生广泛而又明显的作用, 在应用方面, 空化可用来清洗、侵蚀、切割、加速化学反应速度、清除有害细胞等, 是空化的有益作用; 而在防止剥蚀损坏方面, 则要避免空化的破坏作用.

空泡空化的初生与发展取决于许多复杂的因素, 如液体的物性(包括蒸汽压强、液体的表面张力、液体的密度、液体的压缩性等)、液体的流速、液体的温度等. 关于液体表面张力影响的研究, 最早起源于本世纪. 1942 年, Nowotny^[7]研究了表面张力对铝材料空蚀的影响; 1970 年, Plesset^[8]研究了具有不同表面张力的有机液体中材料的空蚀; 1996 年, 黄继汤等^[9]研究了表面张力对电火花放电引起的空泡特性的影响. 近些年, Iwai 等^[10, 11]研究了表面张力对空泡

云和空蚀的影响. 此外, 张振宇等^[4]采用数值模拟的方法研究了表面张力对空泡及射流的影响. 所有研究均表明液体表面张力是决定空泡溃灭速度和性质的基本因素之一, 它影响着其他空泡过程, 例如固壁面的腐蚀、声致发光、空泡导致的化学反应等.

本文采用基于光偏转原理的光纤传感器探测了不同表面张力液体中单空泡的膨胀和收缩过程, 研究了液体表面张力对空泡脉动全过程的影响, 并根据经典理论方程得到的数值计算结果进行了对比.

2. 基本理论方程及其求解

无穷域的静止状态、不可压缩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^[12]

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

式中 R , $\dot{R}$, $\ddot{R}$ 分别为空泡的半径、泡壁的运动速度及泡壁的运动加速度, P_R 及 P_∞ 分别为泡壁及流场中无限远处的压强, ρ 为液体的密度, μ 为液体的粘

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60578015)和高等学校优秀青年教师科研奖励计划(批准号: 20050288025)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

滞系数 σ 为液体的表面张力系数.

不考虑泡内含气量变化,假设 P_R 为常数.引入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 $R_0 \sqrt{(P_\infty - P_R)/\rho}$ ^[9].

对方程 (1) 进行如下无量纲化:

当 $P_\infty - P_R > 0$ 时,空泡收缩,设 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0 \sqrt{(P_\infty - P_R)/\rho}}$, $C = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(P_\infty - P_R)}}$, $D = \frac{\sigma}{R_0(P_\infty - P_R)}$,
则 (1) 式可改写为

$$\beta\ddot{\beta} + \frac{3}{2}\dot{\beta}^2 = -1 - \frac{C\dot{\beta}}{\beta} - \frac{2D}{\beta}. \tag{2}$$

当 $P_R - P_\infty > 0$ 时,空泡膨胀,设 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0 \sqrt{(P_R - P_\infty)/\rho}}$, $C = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(P_R - P_\infty)}}$, $D = \frac{\sigma}{R_0(P_R - P_\infty)}$,
则 (1) 式可改写为

$\frac{t}{R_0 \sqrt{(P_R - P_\infty)/\rho}}$, $C = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(P_R - P_\infty)}}$, $D = \frac{\sigma}{R_0(P_R - P_\infty)}$,
则 (1) 式可改写为

$$\beta\ddot{\beta} + \frac{3}{2}\dot{\beta}^2 = 1 - \frac{C\dot{\beta}}{\beta} - \frac{2D}{\beta}, \tag{3}$$

初始条件为 $\tau = 0$ 时, $\beta = 1$ 及 $\dot{\beta} = \ddot{\beta} = 0$.

为了仅考虑液体表面张力对空泡的影响,我们取 $\mu = 0$ (即 $C = 0$),由 (2) 式及 (3) 式利用有限差分法可以计算出不同表面张力下空泡膨胀和收缩全过程,如图 1 所示.由图可见,液体表面张力延缓了空泡的膨胀过程,但对空泡收缩过程则起加速作用.此外,液体表面张力还影响空泡的最大和最小泡半径,后面我们将作具体分析.

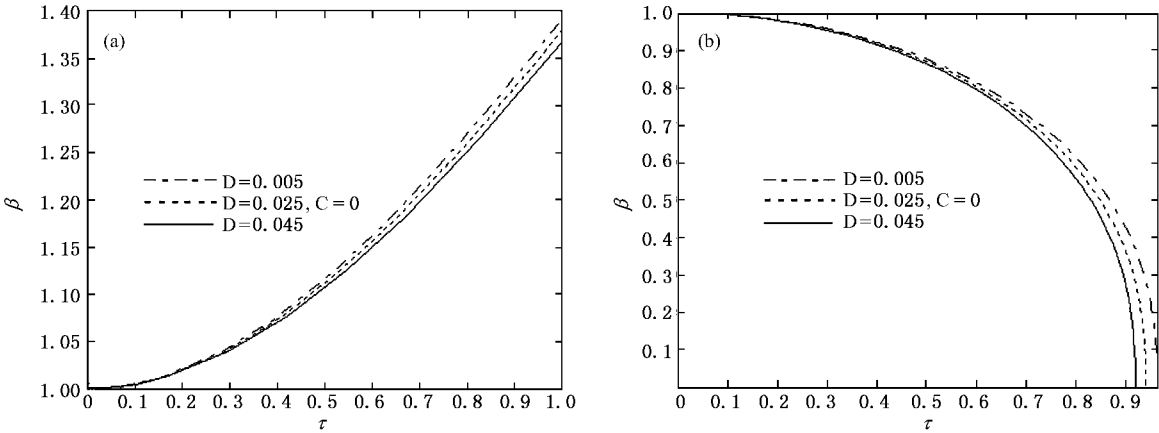


图 1 表面张力对空泡膨胀和收缩过程影响的数值计算结果 (a) 膨胀情况 (b) 收缩情况

3. 实验装置与测试液体

3.1. 实验装置

实验装置示意图见图 2. 脉冲 Nd:YAG 激光器产生的高强度激光(波长 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、脉宽 10 ns)通过分光片、衰减片和扩束装置后,由会聚透镜(焦距 150 mm)聚焦于置于液体中的铜靶上.实验触发信号由光电二极管获取激光反射光来实现.实验中靶面焦斑半径为 $50\text{ }\mu\text{m}$.

图 2 中探测光束由氦氖激光器(波长 $0.63\text{ }\mu\text{m}$, 功率 5 mW)发出.探测光束通过焦距为 50 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.图形的分析和处理则通过计算机来完成.实验探测装置被固定在二维可移动平台上,并可沿箭头方向移动.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 $10\text{ }\mu\text{m}$.有关实验装置及测量方法见参考文献[1].

3.2. 测试液体

由于本文研究液体表面张力变化对空泡膨胀和收缩过程的影响,因此所用液体的粘滞系数 μ 及密度 ρ 应大体相近、在空气中的表面张力应有较大差异.实验采用无水乙醇、冰醋酸、甘油水溶液(1 wt%)、蒸馏水和去离子水五种液体,其表面张力分别为 0.02405 , 0.02958 , 0.07164 , 0.07196 和 0.07288 N/m ^[13].

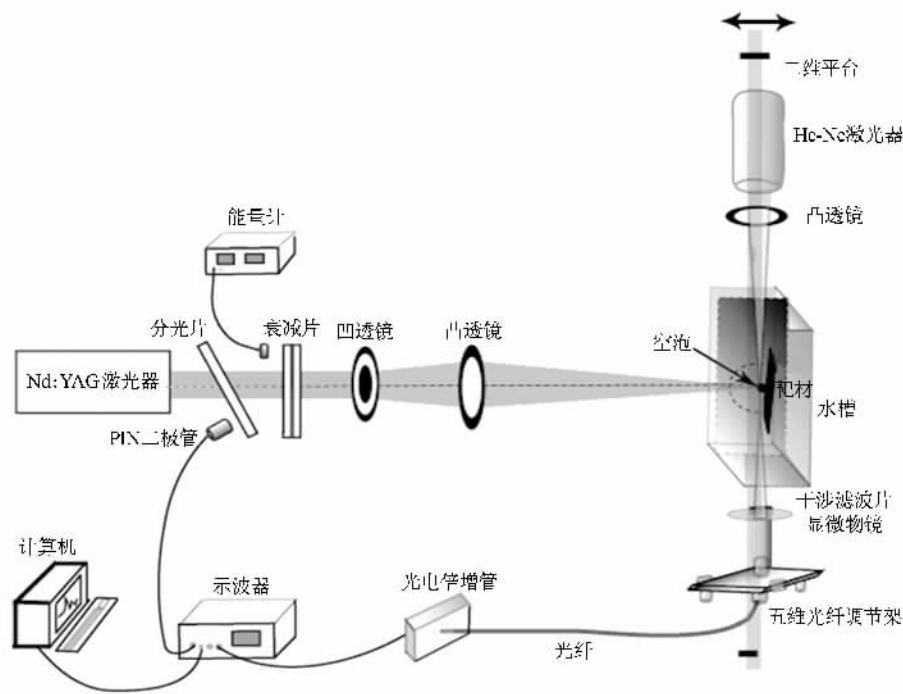


图 2 基于光偏转原理的实验装置示意图

4. 实验结果与讨论

当一束高功率激光聚焦于液体中靶材表面时，在聚焦区形成高温高压等离子体，冲击波和空泡现象。由于冲击波的传播，液体密度将发生改变，从而改变液体的折射率^[14]；而对于空泡而言，在蒸汽和液体的分界处即空泡壁处折射率也发生改变^[15]。当冲击波或空泡通过探测区时，探测光线由于流场折射率的变化而发生偏转，因此耦合进光纤传感器的光强将减小，我们可以通过示波器上图形的变化来追踪空泡变化过程。因此，采用该光纤传感器可以得到不同表面张力液体中单空泡膨胀和收缩的运动全过程对应的波形。

图 3 为空泡发展过程中实验获得的 11 个典型位置处光偏转信号波形图，它包含了激光作用于液体中靶材时的三种物理现象，即激光等离子体冲击波、空泡、空泡溃灭冲击波。实验中激光单脉冲能量为 32.6 mJ，探测距离依次对应 0, 0.22, 0.57, 1.17, 1.57, 1.77, 2.17, 2.22, 2.37, 2.47 和 2.62 mm。在实验中，不同位置处的空泡信号是由不同的激光脉冲产生的，因而本实验是建立在空泡具有良好的可重复性基础上的。

从图中可以看出，随着探测距离的不同，获得的

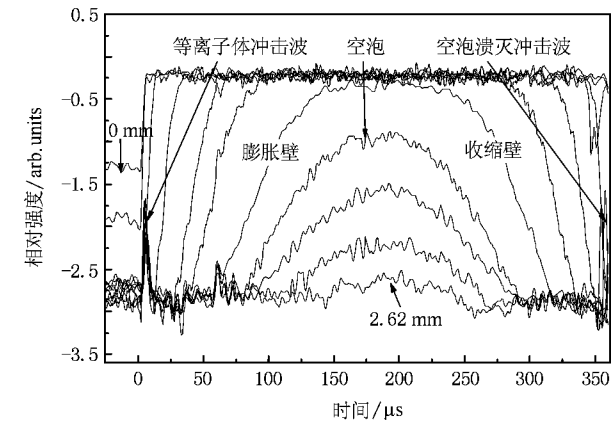


图 3 实验获得的典型的光偏转信号图

光偏转信号也随之发生改变。当探测距离较小时（0 mm），等离子体膨胀压缩周围介质所引起的冲击波信号和空泡膨胀壁信号难以区分。随着等离子体的熄灭和探测距离的进一步增大，冲击波和空泡壁逐步区分开来，这一过程在序列图中表现得十分明显。随着探测距离的逐渐增大，光偏转信号逐步由“平顶”状转为半椭圆状最终变为近直线状。当探测距离大于最大泡半径（2.62 mm）时，信号中只有冲击波脉冲信号，包括激光等离子体冲击波和空泡溃灭所辐射的冲击波信号，无因探测光经过空泡而产生的信号。

通过跟踪不同探测距离对应的空泡壁（膨胀壁

和收缩壁)到达的时间,可以得到泡壁的运动规律,即 $R = R(t)$. 空间每一探测距离平均采样5次,实验数据为5次的平均值.图4为不同表面张力液体中空泡膨胀、收缩半径随时间变化的实验曲线.结果表明:对于空泡膨胀过程,表面张力总是阻止空泡生长,延缓其膨胀过程,故表面张力大的液体中,空泡能达到的最大直径小.在空泡膨胀初期,液体表面张力影响不甚明显,愈到膨胀后期,受表面张力影响空泡膨胀变缓的现象愈明显.相反,表面张力加速了空泡的收缩过程,减小了空泡的最小泡半径.从图4还可以看出表面张力对空泡膨胀的影响要弱于对空泡

溃灭的影响.

由于表面张力总是起减小空泡体积的作用,因此对于一个凸形空泡来说,表面张力对空泡壁各处施加一个向内的压力,其作用与压差 Δp ($\Delta p = 2\sigma/R$)的作用相类似^[4].空泡半径一定时,表面张力 σ 越大,附加压强 Δp 越大,对空泡的紧缩作用越明显,从而对空泡运动的影响越大.对于初始是球形的固壁近旁的空泡,在生长的时候,表面张力能使空泡的生长变成一个稳定的过程,并尽量保持空泡的球形.在溃灭的时候,表面张力会加速空泡的溃灭,使空泡的溃灭过程不稳定,使其产生较大的瞬时冲击力.

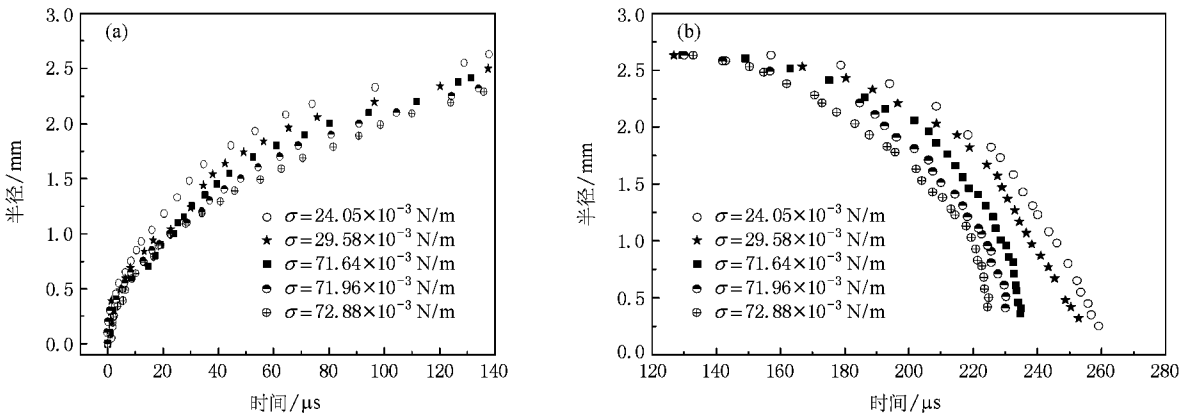


图4 表面张力对空泡泡径变化的影响 (a)膨胀情况 (b)收缩情况

对比图4和图1我们还可以发现实验结果与数值计算结果基本符合.但空泡的运动是一个非常复杂的物理过程,它不仅包含了压缩性、黏性、表面张力、热传导、气体扩散和热力学效应等多相耦合过程,还具有很强的非定性和非正常性.由于本文只考虑了液体表面张力的影响,因此数值计算结果与实验结果还有一定的差距.在今后的研究中我们将进

一步改进空泡的动力学模型,使数值模拟结果更贴近空泡的真实运动.

通过对图4中的实验数据求导数,可以获得空泡泡壁运动速度 $\dot{R}$ 随时间的变化关系,如图5所示.从图中可以看出,开始时泡壁运动速度较大,随着时间的增加,泡壁运动速度呈先减小后增大的趋势,这与文献[16]的结果是一致的.从图中还可以看

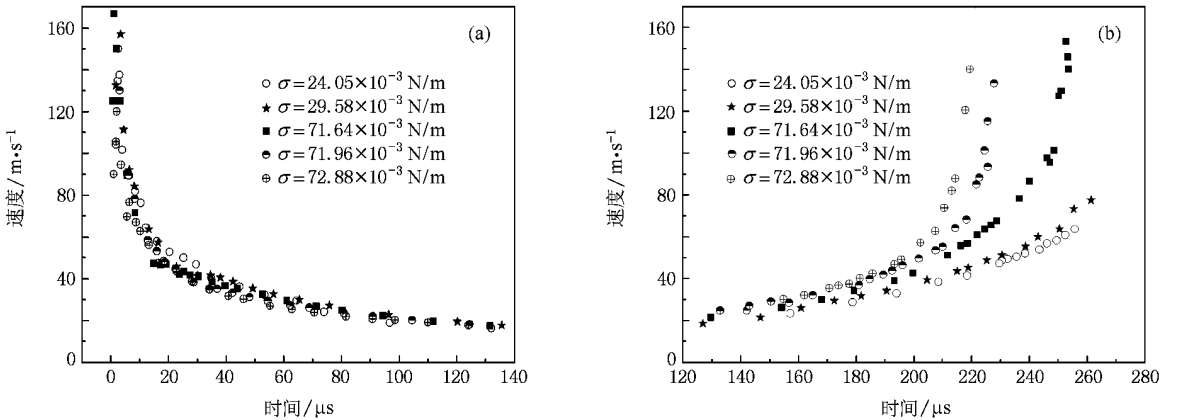


图5 表面张力对空泡泡壁运动速度变化的影响 (a)膨胀情况 (b)收缩情况

出液体表面张力对空泡壁膨胀速度的影响不大.但液体表面张力越大,空泡泡壁收缩速度越大,空泡收缩越迅速,其所产生的瞬时溃灭压强也愈大,空化效果越好.

5. 结 论

本文采用理想液体中单空泡的生长和溃灭运动的理论模型,对不同表面张力液体中空泡膨胀和收缩过程进行了数值模拟,并通过光偏转装置实验探

测了不同表面张力液体中空泡的脉动过程.数值模拟结果与实验结果趋势一致.研究表明,液体的表面张力是决定空泡膨胀、收缩最后阶段的重要因素,它直接决定空泡的泡半径、泡壁运动速度和收缩的剧烈程度.表面张力延缓空泡膨胀过程,加速空泡溃灭过程,且表面张力减小空泡最大和最小泡半径.此外,液体表面张力愈大,空泡泡壁收缩速度越大,空泡收缩越迅速,其所产生的瞬时溃灭压强也愈大,空化效果越好.

- [1] 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]
- [2] Lindau O , Lauterborn W 2003 *J. Fluid Mech.* **479** 327
- [3] Liu X M , Zhao R , He J , Lu J , Ni X W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6508 (in Chinese) [刘秀梅、赵 瑞、贺 杰、陆 建、倪晓武 2007 物理学报 **56** 6508]
- [4] Zhang Z Y , Zhang H S 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066302
- [5] Gregorčič P , Petkovšek R , Možina J 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 094904
- [6] Klaseboer E , Khoo B C 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5808
- [7] Nowotny H 1942 *Destruction of Materials by Cavitation* (Berlin : VDI Verlag) (in German)
- [8] Plesset M S 1970 *J. Trans. ASME* **92** 807
- [9] Huang J T , Chen J F , Ding T , Tian L Y 1996 *Journal of Hydraulic Engineering* **12** 1 (in Chinese) [黄继汤、陈嘉范、丁 彤、田立言 1996 水利学报 **12** 1]

- [10] Iwai Y , Okada T , Nishimoto T , Morishita T 1989 *J. JSLE Int. Ed.* **10** 45
- [11] Iwai Y , Li S C 2003 *Wear* **254** 1
- [12] Brennen C E 1995 *Cavitation and Bubble Dynamics* (New York : Oxford University Press)
- [13] Dean J A (Translated by Shang J F , Cao S J , Xin W M , Zheng F Y , Lu X M , Lin C Q *et al*) 1991 *Lange 's Handbook of Chemistry'* (Beijing : Science Press) p1734 (in Chinese) [Dean J A 著 尚久方、操时杰、辛无名、郑飞勇、陆晓明、林长青等译 1991 兰氏化学手册 (北京 : 科学出版社) 第 1734 页]
- [14] Davidson G P , Emmony D C 1980 *J. Phys. E : Sci. Instrum.* **13** 92
- [15] Vogel A 2001 *Optical Breakdown in Water and Ocular Media , and Its Use for Intraocular Photodisruption* (Aachen Verlag : Shaker) p192
- [16] Petkovšek R , Gregorčič P 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 044909

The effect of surface tension on bubble oscillation near a rigid boundary^{*}

Liu Xiu-Mei¹⁾ He Jie²⁾ Lu Jian^{1)†} Ni Xiao-Wu¹⁾

¹⁾ *Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*

²⁾ *Fundamental Department, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China*

(Received 3 June 2008; revised manuscript received 22 October 2008)

Abstract

The surface tension of a liquid is one of the basic factors determining cavitation and cavitation erosion. The expansion and contraction of cavitation bubble in liquids with different surface tensions are investigated experimentally, which are compared with theoretical analyses based on Rayleigh-Plesset equation. In the experimental study, cavitation bubble is induced by a laser pulse, the spatial evolution and velocity of the bubble wall in liquids with different surface tensions are detected by a fiber-optic diagnostic technique based on optical beam deflection. Experimental results show that the surface-tension forces hinder the bubble growth progress, so increasing surface-tension decreases the maximum bubble radii. On the other hand, the surface-tension forces speed up bubble collapse process. In larger surface tension cases, the bubble velocity is higher, and higher erosive power is produced.

Keywords: surface tension, cavitation bubble, optical beam deflection

PACC: 4755B

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60578015) and the Research Award Fund for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institute, China (Grant No. 20050288025).

[†] Corresponding author. E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn