

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314002

环境压强对空泡脉动特性的影响

李胜勇, 吴荣华, 王晓宇, 王江安, 宗思光, 刘涛

(海军工程大学 电子工程学院 武汉 430033)

摘 要: 基于空泡生长和溃灭理论分析不同环境压强对空泡膨胀的最大泡半径、收缩的最小泡半径、膨胀与收缩速度的影响。同时, 利用高功率激光与液体物质相互作用产生空泡, 采用高速照相机、高频测量水听器实验研究不同环境压强下液体中空泡运动规律, 并将实验结果与计算结果进行对比。结果表明: 环境压强对空泡脉动特性有较大影响。相同激光能量击穿液体介质时, 随着外界环境压强的增加, 空泡脉动周期呈现递减趋势; 空泡第一次脉动的最大泡半径同脉动周期的变化趋势一致, 且数值由快到慢递减; 随着外界压强的增加, 空泡溃灭的速度越快。随着压强的增大, 空泡膨胀与收缩更为剧烈, 持续时间更短。

关键词: 激光光学; 环境压强; 空泡; 脉动特性

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0314002-5

Effect of Ambient Pressure on Bubble Oscillation

LI Sheng-yong, WU Rong-hua, WANG Xiao-yu, WANG Jiang-an, ZONG Si-guang, LIU Tao
(*Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

Abstract: The expansion and contraction of cavitation bubble in liquids with different ambient pressure were investigated experimentally, which are compared with the analyses based on Rayleigh-Plesset equation. In the experimental study, cavitation bubble was induced by the high-power laser and matter interaction in liquid, laser-induced cavitation bubble collapse in liquids with different ambient pressure were detected by high-speed video and high-frequency hydrophone. The results show that the ambient pressure has obvious influence on the bubble oscillation. Increasing the ambient pressure speeds up bubble collapse process, decreases the oscillating cycle and maximum bubble radii, and shortens the time of expansion and contraction of cavitation bubble.

Key words: Laser optics; Ambient pressure; Bubble; Oscillation

OCIS Codes: 140.3440; 040.1490; 120.5475

0 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^[1-5]。空泡的脉动特性受到液体的粘性^[6]、表面张力^[7]、空泡含气量^[8]、温度^[9]以及环境压强^[10]等诸多因素的影响。

关于环境压强对空泡脉动特性的影响, 众多学者开展了广泛的研究。KONDIC^[11]和 DAN^[12]等讨论了环境压强对单空泡声致发光的影响, 单空泡声致发光现象随着环境压强的减弱而增强; LU^[13]研究了 0.1 MPa~

10 MPa 情况下电火花泡的脉动过程及冲击波的峰值压强, 随着压强增大, 电火花泡的泡半径与脉动周期变短, 峰值压强增大; Li B B^[14]等研究了环境压强对空泡溃灭射流的影响, 研究表明环境压强越大, 溃灭时间越小, 射流冲击压强越大; 王聪^[15]等数值研究了空气压强对垂直入水空泡的影响, 随着空气域压强的降低, 空泡表面闭合无量纲时间呈增加趋势变化。所有研究表明, 环境压强是决定空泡脉动性质的基本因素之一, 它影响着其他空泡过程。

在空泡实验研究中, 产生空泡的主要方法有电火

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51209210)资助

第一作者: 李胜勇(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光空化及激光声特性。Email: lsy929@163.com

收稿日期: 2015-09-07; **录用日期:** 2016-01-04

<http://www.photon.ac.cn>

花、超声波、激光脉冲^[12-13,16-17]. 现代实验中最常用的方法是激光脉冲产生空泡^[18-20], 通过调节激光能量与聚焦点位置对空泡产生的时间和位置进行控制, 且具有高度的球对称性. 同时采用高速摄影光学测试方法, 可以在一次测量中完成某时刻空泡的二维探测.

本文基于空泡的生长和溃灭的运动方程, 计算分析了环境压强对空泡脉动特性的影响. 并采用高速照相机辅助高频测量水听器, 探测不同环境压强下, 液体中激光空泡的膨胀和收缩过程, 研究环境压强对激光空泡脉动全过程的影响.

1 基本理论方程及其求解

无穷域静止状态、不可压缩流体中球形单空泡的生长和溃灭运动的运动方程为^[21]

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho} \left[(P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}) \cdot \left[\frac{R_0}{R} \right]^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - (P_p - P_v) - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right] = 0 \quad (1)$$

式中: R, \dot{R}, \ddot{R} 分别为空泡在 t 时刻的半径、空泡径向运动速度及空泡运动的加速度; P_0 为水中无限远处的压强; P_0 为泡内压强. 由于实际空泡内含有一定量的水蒸气和从周围水体扩散到泡内的原溶于水的某些气体, 因此腔内压力不为 0. P_v 为饱和蒸气压强, σ 为液体的表面张力, ρ 为液体的密度, μ 为液体的粘滞系数. 在周围介质为水的情况下, 忽略粘滞效应的影响, 即 $\mu=0$.

考虑水中无限远处压强对空泡脉动特性的影响, 令

$$P_p = kP_\infty \quad (1 < k) \quad (2)$$

式中参量 k 表示压强的倍数. 将式(2)代入式(1), 得

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

将式(3)进行变换, 可得

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho} \left[- \left(P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left[\frac{R_0}{R} \right]^{3\gamma} + \frac{2\sigma}{R} \right] = \frac{1}{\rho} (P_v - kP_\infty) = f(R) \quad (4)$$

从式(4)可以看出, $f(R)$ 决定空泡的脉动特性, 当 $f(R) > 0$, 即空泡内饱和和蒸汽压强大于周围环境压强, 内外压强差 $p_v - kP_\infty > 0$ 时, 空泡为膨胀运动趋势; 当 $f(R) < 0$, 内外压强差 $p_v - kP_\infty < 0$ 时, 空泡为溃灭运动趋势; 当 $f(R) = 0$ 时, 空泡处于平衡状态.

给定空泡的初始半径 R_0 和温度 T , 利用式(3), 通过改变参量 k , 可以得到无限远处不同压强对空泡运动特性的影响. 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°C

时水的表面张力). 图 1 为利用式(3)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. 曲线 1, 2, 3 分别表示压强为 $k=1, 2, 3$, 即 1 个大气压, 2 个大气压和 3 个大气压时的空泡运动曲线. 从图 1 可以看出: 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_{\min} 越小. 环境压强越小, 空泡脉动越缓慢, 脉动周期越长.

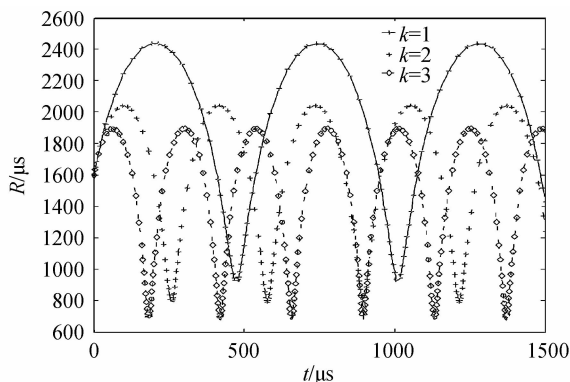


图 1 水中不同压强下的 $R(t)$

Fig. 1 The $R(t)$ of bubble with various pressure in water

图 2 为空泡第一次脉动过程中膨胀速度和收缩速度随环境压强的变化关系. 从图 2 可以看出: 空泡膨胀和收缩速度 v 均随环境压强的变化而变化. 对于膨胀过程, 当环境压强较小时, 加速度减小, 曲线较为平缓; 膨胀持续时间随环境压强的减小而延长. 对于收缩过程, 最大收缩速度随着环境压强增大而增大; 收缩持续

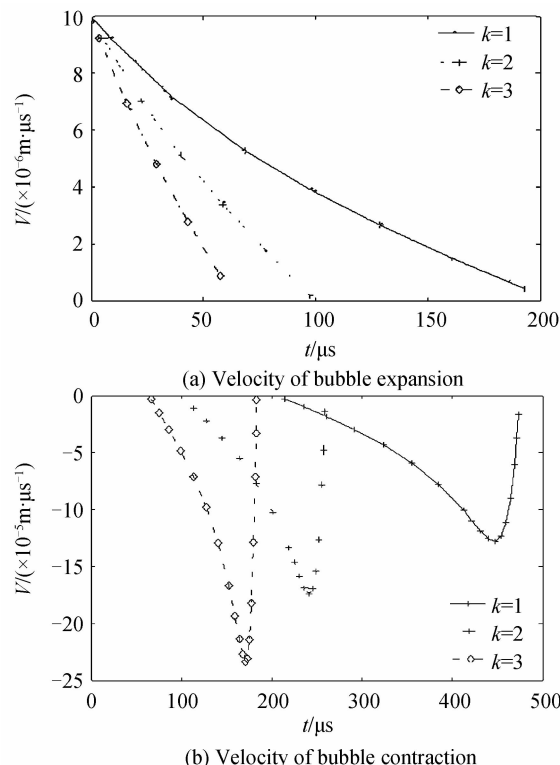


图 2 环境压强与空泡膨胀速度及收缩速度的关系
Fig. 2 The relation of velocity of bubble expansion and contraction with various pressure in water

时间呈现缩短的趋势。

由于环境压强增大,对空泡运动过程的阻尼效应更明显,对于空泡膨胀过程,外部压强总是阻止空泡生长,延缓其膨胀过程,故外部压强大的液体中,空泡能达到的最大直径小。相反,外部压强加速了空泡的收缩过程,减小了空泡的最小半径。

2 实验装置与结果分析

2.1 实验装置

实验装置如图 3^[22],采用 MC-10 型固体脉冲激光器,其输出的激光脉冲宽度 8 ns,波长 1 064 nm,单脉冲能量范围在 40~1 000 mJ 可调。输出的激光由出光口放置的 45°分光镜分为两路,一路采用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测量激光能量,由分光片分光比计算出激光入射能量;另一路激光经过扩束透镜组,对激光光束经扩束后再聚焦于水槽中,以增大激光的会聚角和消像差,提高聚焦质量。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)。

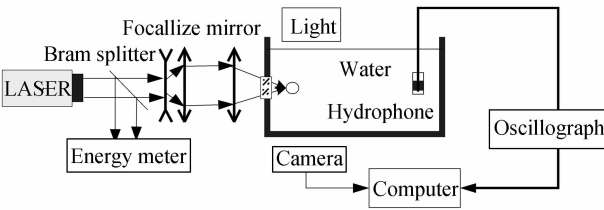


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental schematic diagram

由于激光与液体作用产生的冲击波在很短的距离内就衰减成为普通的声波,所以可以利用水听器辅助测量空泡的脉动周期。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 MS07104A 数字示波器(频带宽度 1 GHz,最高采样率 4G Samples/s)接收并把实验数据传到计算机中。

采用 FASTCAM SA1.1 型高速相机,以 250 000 fps 速率拍摄照片。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 直流灯照明,照明光源与高速摄影机相对于水槽两侧,照明光透过水槽中的空泡直接进入高速摄影机镜头。

为了进行高压试验,图 3 中水槽为高压水箱。高压水箱的设计图如图 4。高压水箱内部放置蒸馏水,其内部压强通过空气泵充气来控制。箱体内部压强数据从气压表上获取。

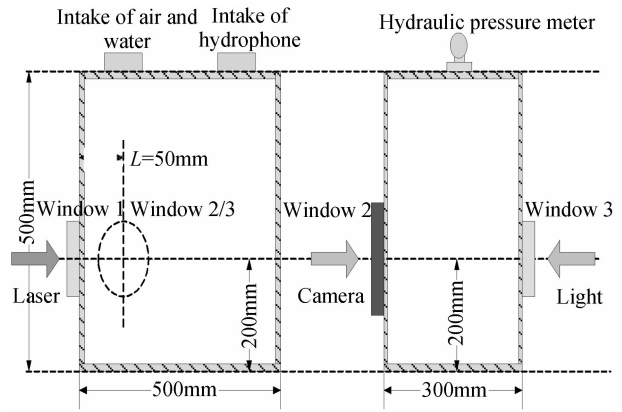


图 4 高压水箱设计

Fig. 4 Structural representation of high pressure water tank

2.2 实验结果与讨论

采用图 3 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,通过高速照相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特性影响的研究。采集的典型声波图如图 5,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。

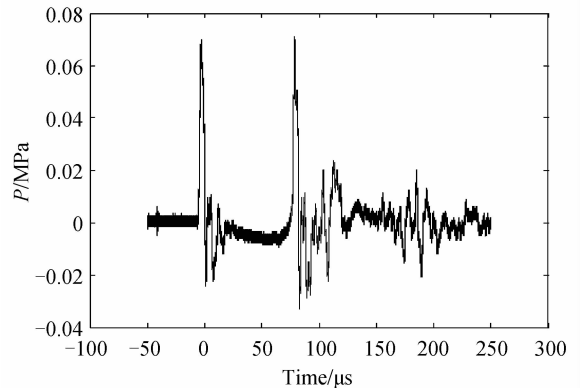


图 5 典型的声信号图形(3 个大气压)

Fig. 5 Typical signal of the sound

由于激光脉冲为纳秒量级且周围水介质为静止的,因此认为第 1 个峰与第 2 个峰之间的时间间隔代表空泡第 1 次脉动周期 T_1 ^[23]。由于空泡脉动周期等于空泡溃灭周期 $2T_c$,由图 5 可以读出空泡的溃灭周期,求出空泡的最大泡半径 R_{max} ^[24],即

$$R_{max} = T_c / 0.915 [\rho / (P_p - P_v)]^{1/2} \quad (5)$$

式中: P_p 为水中无限远处的压强; P_v 为饱和蒸汽压强(2 330 Pa, 20℃); T_c 为空泡溃灭周期; ρ 为水的密度(1 000 kg/m³)。

改变压强,得到不同压强情况下的声波波形图,分别读取空泡的脉动周期,空泡脉动周期随压强变化的

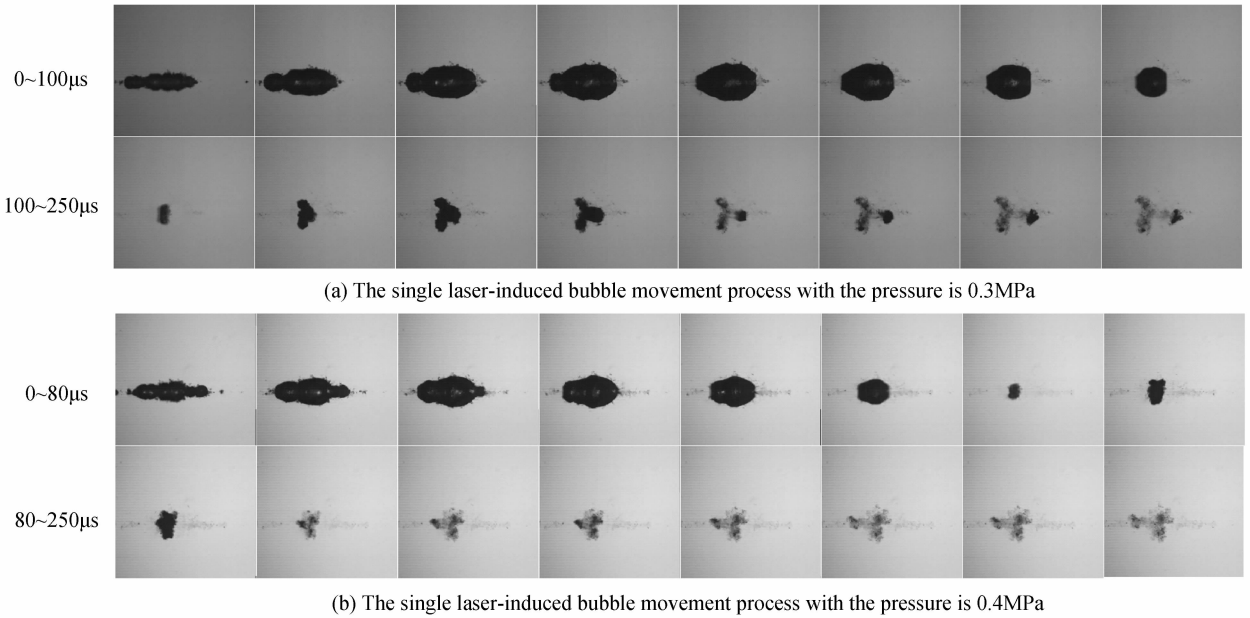


图6 空泡脉动序列图
Fig. 6 Movement process of single laser-induced bubble

关系如图7,将空泡溃灭周期分别代入式(5),计算得到空泡所对应的最大泡半径,最大泡半径随压强变化的关系如图8.对实验数据进行分析,可知在相同激光

能量击穿液体介质的情况下,随着外界环境压强的增加,空泡脉动周期呈现递减趋势,且这种减弱趋势逐渐变缓慢.空泡第一次脉动的最大半径同脉动周期的变化趋势一致,数值的递减由快到慢,当外界压强增加到一定程度时,最大半径值减弱的非常缓慢.通过比较不同压强条件下拍摄的空泡脉动序列照片,发现,随着压强的增大,空泡膨胀与收缩持续更为剧烈,持续时间更短.

当外部压强成倍数增长时,空泡脉动周期与最大泡半径增长速度逐渐变缓,这是由于外界压强逐渐增大, $p_v - k p_\infty \ll 0$,空泡已经无力反弹,空泡的脉动周期和最大泡半径将慢慢逼近一个临界值,影响空泡脉动的发生.实验结果和压力对空泡脉动影响的理论分析基本一致.

3 结论

本文采用理想液体中单空泡脉动的理论模型,对不同环境压强下液体中空泡脉动过程进行了数值模拟,并通过高速照相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.数值模拟结果与实验结果趋势一致.研究表明,环境压强是影响空泡运动的重要因素,它直接决定空泡的泡半径、空泡膨胀和收缩的剧烈程度.膨胀加速度和最大收缩速度随着环境压强增大而增大;膨胀持续时间和收缩持续时间呈现缩短的趋势.同时,随着环境压强增大,空泡脉动周期和最大泡半径呈现递减趋势.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.

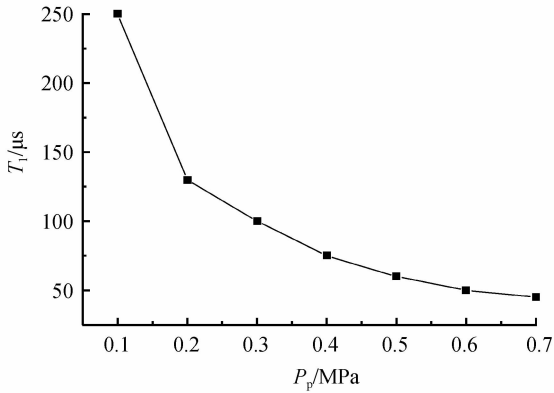


图7 水中不同环境压强下的空泡脉动周期
Fig. 7 The T_1 of bubble with various ambient pressure in water

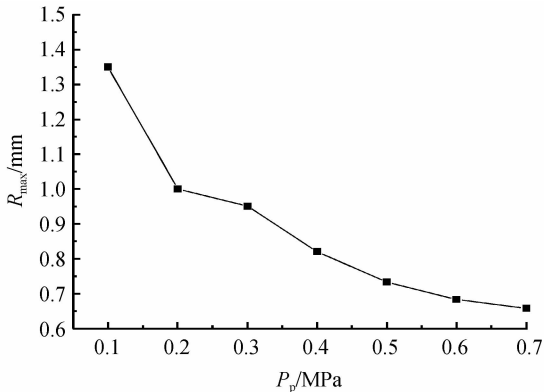


图8 水中不同环境压强下的空泡最大泡半径
Fig. 8 The R_{max} of bubble with various ambient pressure in water

参考文献

- [1] TOEGEL R, LUTBER S, LOHSE D. Viscosity destabilizes sonoluminescing bubbles[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(11): 114301.
- [2] YE Xi, YAO Xiong-liang, ZHANG A-man, *et al.* The motion and acoustic radiation characteristics for cavitation in the compressible vortex fluid[J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, **62**(11): 114702.
叶曦,姚熊亮,张阿漫,等.可压缩涡流场中空泡运动规律及声辐射特性研究[J].*物理学报*,2013,**62**(11):114702.
- [3] SU L P, ZHAO W J, HU X Y, *et al.* Experimental investigation on wake profile detection based on laser scattering by bubbles[J]. *Chinese Optical Letters*, 2007, **5**(10): 609-612.
- [4] LAUTERBORN W, KURZ T. Physics of bubble oscillations [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2010, **73**(10): 106501.
- [5] LAUTERBORN W, KURZ T, GEISLER R, *et al.* Acoustic cavitation bubble dynamics and sonoluminescence [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, **14**(4): 484-491.
- [6] LI Sheng-yong, ZHU Qiang-hua, ZHAO Rui, *et al.* The study on properties of laser-induced cavitation bubble sound waves in viscous fluid[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2082-2086.
李胜勇,朱强华,赵瑞,等.粘性液体中激光空泡辐射声波的特性研究[J].*光子学报*,2009,**38**(8):2082-2086.
- [7] LIU X M, HE J, LU J, *et al.* Effect of surface tension on a liquid-jet produced by the collapse of a laser-induced bubble against a rigid boundary [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(1): 21-24.
- [8] ZHAO Rui, XU Rong-qing, LIANG Zhong-cheng, *et al.* Influence of bubble content on laser-induced cavitation bubble oscillation in glycerol-water mixture[J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, **55**(9): 4783-4788.
赵瑞,徐荣青,梁忠诚,等.含气量对黏性液体中空泡脉动特性的影响[J].*物理学报*,2006,**55**(9):4783-4788.
- [9] LIU Xiu-mei, HOU You-fu, HE Jie, *et al.* Temperature effect on the behavior of a laser-induced cavitation bubble[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(5): 791-794.
刘秀梅,侯有夫,贺杰,等.液体温度对空泡生长和溃灭过程的影响[J].*光电子·激光*,2010,**21**(5):791-794.
- [10] LI B B, ZHANG H C, LU J, *et al.* Experimental investigation of the effect of ambient pressure on laser-induced bubble dynamics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(8): 1499-1503.
- [11] KONDIC L, YUAN C, CHAN C K. Ambient pressure and single-bubble sonoluminescence[J]. *Physical review*, 1998, **E57**(1): R32.
- [12] DAN M, CHEEKE J D N, KONDIC L. Ambient pressure effect on single-bubble sonoluminescence[J]. *Physical Review Letters*, 1999, **83**(9): 1870.
- [13] LU X P, LIU M H, JIANG Z H, *et al.* Effects of ambient pressure on bubble characteristics [J]. *Chinese Physics letters*, 2002, **19**(5): 704-706.
- [14] LI Bei-bei, ZHANG Hong-chao, NI Xiao-wu, *et al.* Experiment investigation on the liquid jet of laser-induced bubble in different ambient pressures[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 749-753.
- [15] WANG Cong, HE Chun-tao, QUAN Xiao-bo, *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.
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.
- [16] GREGORCIC P, PETKOVŠEK R, MOZINA J. Investigation of a cavi-tation bubble between a rigid boundary and a free surface[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**(9): 094904.
- [17] PETKOVŠEK R, GREGORCIC P. A laser probe measurement of cavi-tation bubble dynamics improved by shock wave detection and compared to shadow photography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**(4): 044909.
- [18] DENG Yuan, JIN Tao, CHI Hao, *et al.* Collapse of laser induced bubbles and generated sound pressure waves[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(11): 2793-2798.
邓圆,金韬,池灏,等.激光空泡溃灭及其产生的声波[J].*强激光与粒子束*,2013,**25**(11):2793-2798.
- [19] LIU Tao, WANG Jiang-an, ZONG Si-guang, *et al.* Experimental study of Laser-generated cavitation bubble motion near a free liquid surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0714003.
刘涛,王江安,宗思光,等.激光空泡在近自由液面运动特性的实验研究[J].*光学学报*,2012,**32**(7):0714003.
- [20] LI Xiao-lei, QIN Chang-jian, ZHANG Hui-chen. Dynamic characteristics of laser-induced bubble moving in venture[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(5): 054707.
李小磊,秦长剑,张会臣.激光空泡在文丘里管中运动的动力学特性[J].*物理学报*,2014,**63**(5):054707.
- [21] CHEN Xiao, XU Rong-qing, SHEN Zhong-hua, *et al.* Experimental and theoretical study of the oscillation of a laser-Induced bubble[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2005, **32**(3): 331-335.
陈笑,徐荣青,沈中华,等.激光空泡脉动特性的实验和理论研究[J].*中国激光*,2005,**32**(3):331-335.
- [22] ZONG Si-guang, WANG Jiang-an, JIANG Xing-zhou, *et al.* Experiment investigation of characters of bubble impulsion by optical breakdown[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1543-1547.
宗思光,王江安,蒋兴舟,等.水中激光击穿空泡的高速摄影研究[J].*光子学报*,2009,**38**(6):1543-1547.
- [23] WANG Yu-hong, WANG Jiang-an, REN Xi-chuang. Laser induced bubble characteristics with experimental and numerical methods[J]. *Acta Physics Sinica*, 2010, **65**(9): 5783-5788.
王雨虹,王江安,任席闯.激光空泡特性实验与数值计算研究[J].*物理学报*,2010,**65**(9):5783-5788.
- [24] LIU X M, HE Jie, LU Jian, *et al.* Effect of liquid viscosity on a liquid jet produced by the collapse of a laser-induced bubble near a rigid boundary [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, **48**: 016504.