

文章编号: 0258-7025(2009)02-0342-05

表面张力对固壁旁空泡生长和溃灭行为的影响

贺 杰^{1,2} 刘秀梅¹ 陆 建¹ 倪晓武¹

(¹ 南京理工大学应用物理系, 江苏 南京 210094; ² 南京工程学院基础部, 江苏 南京 211167)

摘要 采用两套光偏转测试装置对不同表面张力液体中激光空泡脉动及溃灭特性进行了实验研究, 获得了液体表面张力改变对固壁近旁空泡生长和溃灭过程的影响。结果表明, 表面张力延缓了空泡的膨胀过程, 加速了空泡的溃灭; 表面张力对空泡溃灭的影响要强于对膨胀的影响; 液体张力越大, 空泡脉动周期越短, 且空泡对应的最大泡半径越小而收缩所能达到的最小泡半径亦越小。此外, 液体张力越大, 射流所产生的瞬时冲击力越大, 即表面张力加强了液体射流对固壁的空蚀作用。研究结果可为水下激光加工、激光医疗、空化空蚀相关流体力学的研究提供一定的理论和实验支持。

关键词 激光技术; 激光空泡; 光纤传感器; 液体表面张力; 空蚀

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0342

Surface Tension Effects on the Growth and Collapse of Cavitation Bubbles near a Rigid Boundary

He Jie^{1,2} Liu Xiumei¹ Lu Jian¹ Ni Xiaowu¹

(¹ Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)
(² Fundamental Department, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

Abstract The growth and collapse of a cavitation bubble near a rigid boundary in liquids with different surface tensions was investigated by two sensitive fiber-optic sensors based on optical beam deflection. The experimental results show that the surface-tension forces slow down bubble growth progress, but speed up bubble collapse process. The influence of the surface tension on bubble expansion is stronger than that on collapse. Increasing surface-tension decreases the maximum and the minimum bubble radii and shortens the oscillation times. Furthermore, the larger the surface tension is, the stronger impact of the high pressure liquid jet will be. That is to say, cavitation erosion is reduced as decreasing the surface tension. These results help to better understand the cavitation erosion and optimize laser parameters in the fields of laser ophthalmology and underwater laser processing.

Key words laser technique; laser-induced cavitation bubble; fiber sensor; surface tension; cavitation erosion

1 引 言

空泡研究是目前流体力学最活跃的领域之一^[1~3]。当一束高功率激光聚焦于水下靶材表面时, 在聚焦区形成高温高压等离子体^[4]、冲击波和空泡现象^[1]。空泡在内外压差的作用下进行多次脉动, 最终溃灭^[5]。固壁附近空泡的溃灭和反弹不仅会造成水泵叶片表面、船舰和潜艇螺旋桨表面以及

控制管道和腔室中液体流动的阀门(包括人工心脏的阀门)表面的空蚀损坏, 降低水力机械的性能, 而且所产生的空化噪声还会对军舰和潜艇的安全造成危害。医学中激光在人体组织中所产生的空泡溃灭时会对人体组织产生严重的裂损等不良影响, 但结合有毒药物的使用也会起杀伤癌细胞等的治疗作用。此外, 空泡溃灭时将形成局部的高压高温(可达

收稿日期: 2007-12-19; 收到修改稿日期: 2008-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(60578015)资助项目。

作者简介: 贺 杰(1977—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为激光与物质的相互作用及相关测试技术。

E-mail: hejie_hj992@yahoo.com.cn

导师简介: 陆 建(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为激光与材料相互作用及测试技术、激光等离子体瞬态光电测试技术。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

1 亿度),这可为核武器的研制和可控热核反应的研究提供一种新途径。随着科技的发展,不断有伴随空泡所发生的新的物理现象的发现,而弄清这些复杂物理现象的机制对流体力学科学的发展和实际应用都具有重要的意义。

空泡现象是高速运动的液体所特有的物理现象,它的初生与发展取决于许多复杂的因素,如液体的物性(包括蒸气压强、液体的表面张力大小、液体的密度、液体的压缩性等)、液体的流速、液体的温度等。张力是影响空泡膨胀(收缩)最后阶段的重要因素,它将直接决定空泡的泡半径、收缩周期和收缩的剧烈程度。目前,国内外很多学者对液体张力对空泡的影响进行了大量研究^[6~8],但是研究主要集中在液体张力改变对射流和空蚀的影响。

在对空泡及空蚀效应的实验检测方面,文献报道的非扰动诊断方法主要有高速摄影法^[9]、条纹摄像法^[5]、干涉法^[10]及光束偏转法^[11]等。其中高速摄影法、干涉法和纹影法使空泡溃灭研究取得了很大进展,但存在造价昂贵、结构复杂等困难。本文采用两套基于光偏转原理的光纤传感器,利用光纤作为位置敏感探测器来提高光束偏折探测系统的灵敏度,对空泡的整个运动过程和溃灭对固壁面造成的空蚀作用进行全面的研

2 实验方法

2.1 实验装置

实验装置的主体部分如图 1 所示,脉冲 Nd:YAG 激光 1(波长 1.06 μm,脉宽 10 ns,最大激光能量 500 mJ)经过分光镜 2,衰减片 3 和扩束装置 4 后,由会聚透镜 5(焦距 150 mm)聚焦于铜靶 7 上。水槽 8 里装有具有不同表面张力的液体。能量计 6 用来实时监测入射激光的能量。实验中靶面焦斑半径为 50 μm。

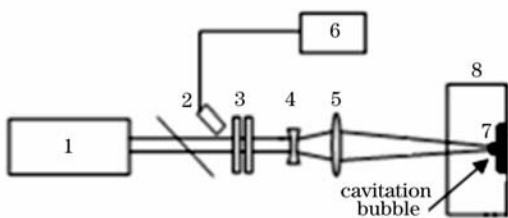


图 1 光偏转实验的主体装置

Fig. 1 Basic experimental arrangement based on optical beam deflection

探测装置由两套基于光偏转原理的光纤传感器组成。该传感器由 He-Ne 激光器 9,聚焦透镜 10,

显微物镜 11,干涉滤光片 12,光纤调节器 13,单模光纤 14,光电倍增管 15 以及数字存储示波器 16 等构成,分别如图 2(a)和(b)所示。图 2(a)为探测空泡脉动特性的实验装置,其中探测组件 9~14 被固定在二维可移动平台 18 上,如图虚框所示,该平台沿靶面法线方向(图示箭头方向)移动精度为 10 μm。当一束高功率激光聚焦到水下靶材表面时,会在作用区产生等离子体、空泡和冲击波等一系列现象。当探测光束通过靶面焦点正前方与空泡或冲击波相互作用时将产生微小的改变,原光束传播方向也将发生偏转,因此耦合进光纤传感器的光强将减小。由于光通量的变化体现为光电流或电压的变化,因此空泡半径的演变可以从数字存储示波器上的电压变化反映;图 2(b)为探测空泡溃灭对固壁面空蚀作用的实验装置。在脉冲激光作用下,靶材作用点的背面将产生微小的锥形突起,因此光束反射时相对原有反射光路要偏转一定的角度。当探测光束照在因激光作用而形成凸起的锥形上,且光斑中心与锥心重合时,反射光束变为一环形光斑,耦合进光纤的光通量会变小。因光通量的变化体现为光电流或电压的变化,因此靶材所受力的变化可以从数字存储示波器上的电压变化来反映。该光纤传感

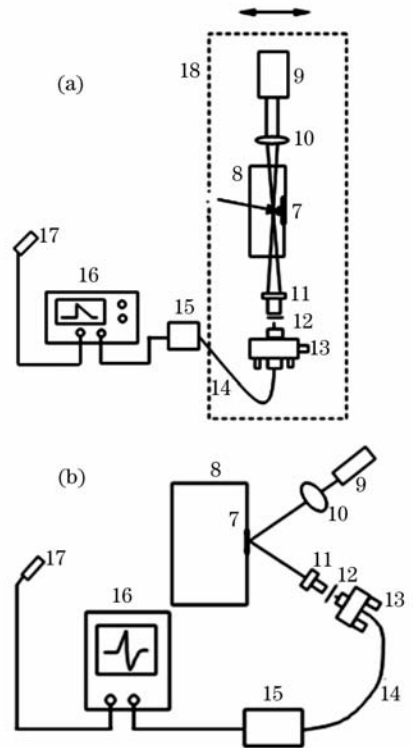


图 2 探测装置。(a) 探测空泡脉动规律;
(b) 探测空泡溃灭对固壁面的空蚀作用

Fig. 2 Detection setup. (a) for bubble radius evolution;
(b) for cavitation erosion

器的相关测试原理分别见参考文献[2,11]。本实验触发信号由光电二极管 17(上升时间100 ps)获取激光反射光来实现。

2.2 实验用液体

由于本文研究液体张力变化对固壁面近旁空泡生长和溃灭过程的影响,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 5 种液体,其表面张力如表 1 所示^[12]。

表 1 实验液体的表面张力

Table 1 Surface tension of experimental liquids

Liquids	Surface tension/ (10^{-3} N/m)
Absolute alcohol	24.05
Glacial acetic acid	29.58
Glycerol-water mixture (1% mass fraction)	71.64
Distilled water	71.96
Deionized water	72.88

3 实验结果与讨论

3.1 空泡的脉动过程

图 3 给出了探测光经过脉动空泡的示意图,图中空泡脉动特性曲线是基于空泡半径随时间变化的数值模拟^[13]得到的。图 4 即为由探测装置图 2(a)获得的对应的典型光偏转信号波形图,它包含了激光作用于水中靶材时的三种物理现象和过程,即激光等离子体冲击波、等离子体空泡及其反弹现象、空泡溃灭冲击波。图中峰 a 为激光等离子体冲击波;c 为等离子体空泡信号;e 为空泡反弹信号;f 为空泡收缩到最小泡体积时辐射的冲击波信号;b 为空泡膨胀壁;d 为空泡收缩壁。

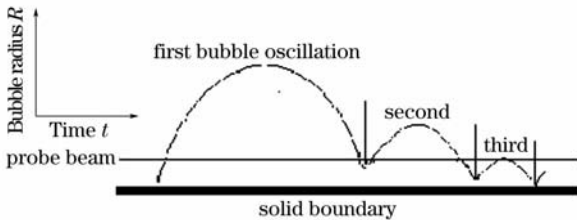


图 3 探测光经过脉动空泡的示意图

Fig. 3 Schematic of a probe beam passing through an oscillating cavitation bubble

实验中激光单脉冲能量为 32.6 mJ,探测距离从 0 mm 变化到 3.56 mm。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 $R = R(t)$,如图 5 所示,该图

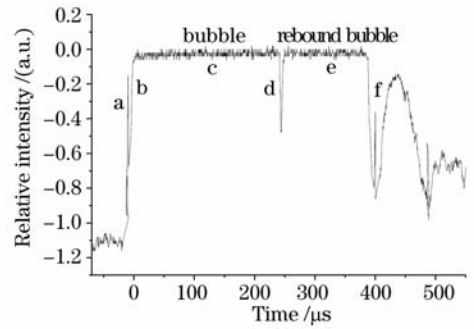


图 4 实验获得的典型的光偏转波形

Fig. 4 Characteristic signal of optical beam deflection on an oscilloscope in the experiment

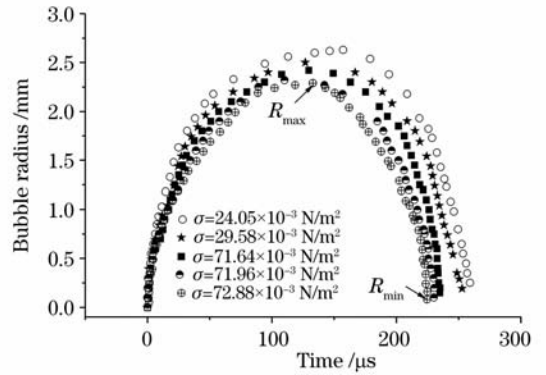


图 5 激光泡半径随时间的变化关系

Fig. 5 Relationship of radius versus times of a cavitation bubble

定性上与文献[14]给出的结果一致。从图 5 可以看出,表面张力减缓了空泡的膨胀过程。在初期,空泡膨胀变缓的现象不甚明显,愈到后期越明显。液体张力越大,空泡对应的最大泡半径越小;表面张力加速了空泡的收缩。表面张力越大,空泡收缩所能达到的最小泡半径越小,且表面张力缩短了空泡脉动周期。从图 5 还可以看出表面张力对空泡溃灭的影响要强于对膨胀的影响。此外,激光泡半径随表面张力变化与液体的表面张力数值并不为线性关系,其关系有待研究。

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。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,从而对空泡的运动影响越大。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。

3.2 空泡的溃灭过程

若空泡在固壁面附近溃灭,泡表面的压力梯度会形成指向靶材的高速液体射流^[5]。图 6 为由探测装置图 2(b)获得的对应单脉冲能量为 34 mJ 时,铜片在激光作用全过程中所受的典型力学信号。图中可以明显看到两个峰的存在,峰 a 为激光等离子体产生的烧蚀压力脉冲信号,峰 b 为射流冲击力信号^[2]。从图 6 可以看出,该激光能量作用下,射流冲击力的强度远大于等离子体烧蚀力。

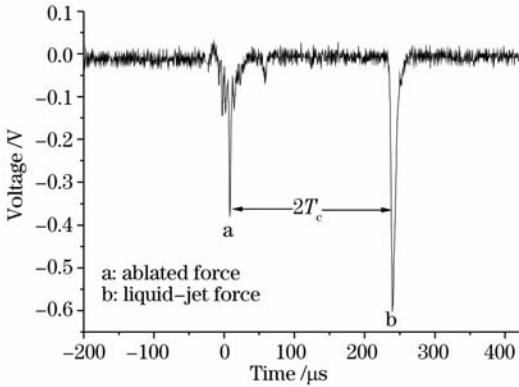


图 6 靶材在水中所受的典型力学信号

Fig. 6 Typical signal of the sample in water detected by the optical beam deflection method

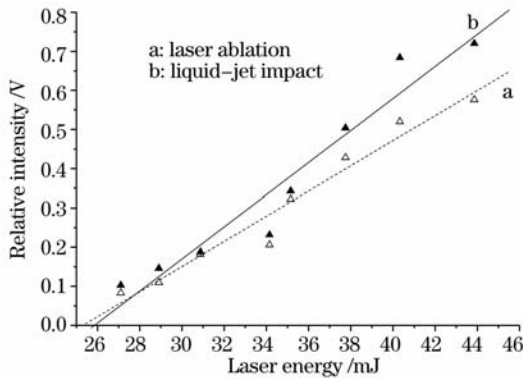


图 7 力学信号与入射激光能量的关系

Fig. 7 Signal amplitude of impact force as a function of laser energy

图 7 给出了水中力学信号随入射激光能量变化的关系,其中等离子体烧蚀力和射流冲击力分别为 a 和 b。由图可见,随着激光作用能量的增加,等离子体烧蚀力及射流冲击力的幅值均呈单调上升趋势。这是因为入射激光能量越大,激光泡所含能量相应变大,空泡溃灭时所产生的射流速度和射流冲击力也相应变大。但射流冲击力 b 强于等离子体烧蚀力 a 的关系没有改变,这说明射流冲击力是造成靶材被破坏的主要原因。

图 8 为射流冲击力随液体表面张力的变化关系,从图可以看出,随着液体表面张力的增大射流冲击力也增大;且液体张力越大,靶材受到的射流冲击强度越大,这是因为液体表面张力加速了空泡的收缩,缩短了空泡溃灭历时,增加了空泡溃灭速度,所以空泡溃灭时表面张力所起的加速作用也愈大,其所产生的瞬时冲击力也愈大。因射流冲击力是造成靶材破坏的主要原因,所以张力较大的液体中空泡能产生较大的空蚀效应。

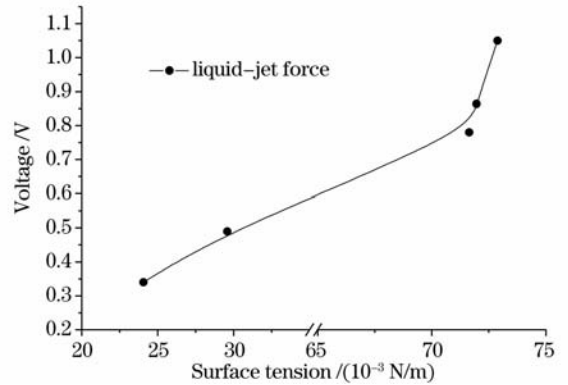


图 8 射流冲击力与表面张力的关系

Fig. 8 Signal amplitude of liquid jet impact as a function of surface tension

4 结 论

实验研究了液体表面张力对固壁近旁空泡生长和溃灭过程的影响。通过研究液体表面张力对空泡最大和最小泡半径的影响,得出表面张力减缓空泡膨胀过程的结论;此外,通过分析不同张力液体中靶材所受射流冲击力的大小,得出表面张力增加射流冲击强度,产生较大的空蚀效应的结论。该研究成果不仅可以促进空化研究的深入,从而避免空泡可能带来的危害,同时也为合理利用空化现象提供参考。

参 考 文 献

- 1 R. Toegel, S. Luther, D. Lohse. Viscosity destabilizes sonoluminescing bubbles [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(11): 114301
- 2 R. Q. Xu, X. Chen, Z. H. Shen *et al.*. A fiber-optic diagnostic technique for mechanical detection of the laser-metal interaction underwater [J]. *Phys. Fluids*, 2004, **16**(3): 832~835
- 3 Liping Su, Weijiang Zhao, Xiaoyong Hu *et al.*. Experimental investigation on wake profile detection based on laser scattering by bubbles [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10): 609~612
- 4 Chen Qingming, Cheng Zuhai, Zhu Haihong. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulsed laser in water [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 341~344

- 陈清明,程祖海,朱海红. 脉冲激光在水中激发声脉冲的光声能量转换效率[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):341~344
- 5 Y. Tomita, A. Shima. Mechanism of impulsive pressure generated and damage pit formation by bubble collapse [J]. *J. Fluid Mech.*, 1986, **169**:535~564
- 6 Y. Iwai, S. C. Li. Cavitation erosion in waters having different surface tensions [J]. *Wear*, 2003, **254**:1~9
- 7 Zhenyu Zhang, Huisheng Zhang. Surface tension effects on the behavior of a cavity growing, collapsing, and rebounding near a rigid wall [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(5):056310
- 8 Huang Jitang, Chen Jiafan, Ding Tong *et al.*. Influence of fluid surface tension on the kinematic characteristics of single bubble [J]. *Shuili Xuebao*, 1996, (12):1~7
- 黄继汤,陈嘉范,丁 彤等. 表面张力对单空泡运动特性的影响[J]. 水利学报, 1996, (12):1~7
- 9 A. Philipp, W. Lauterborn. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles [J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, **361**:75~116
- 10 B. Ward, D. C. Emmony. Direct observation of the pressure developed in a liquid during cavitation-bubble collapse [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(18):2228~2230
- 11 Xu Rongqing, Zhao Rui, Shen Zhonghua *et al.*. Experimental investigation of the oscillation of a laser-generated cavitation bubble near a solid Boundary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):571~575
- 徐荣青,赵 瑞,沈中华等. 固壁面附近激光产生空泡脉动过程的实验研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(4):571~575
- 12 J. A. Dean. Lange's Handbook of Chemistry [M]. 13th ed. Beijing: Science Press, 1991. 1734~1747
- J. A. 迪安编. 兰氏化学手册[M]. 第13版. 北京:科学出版社, 1991. 1734~1747
- 13 A. Vogel, W. Hentschel, J. Holzfuss *et al.*. Cavitation bubble dynamics and acoustic transient generation in ocular surgery with pulsed neodymium: YAG lasers [J]. *Ophthalmology*, 1986, **93**(10):1259~1269
- 14 R. Petkovšek, G. Močnik, J. Možina. Measurements of the high pressure ultrasonic wave and the cavitation bubble by optodynamic method [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2007, **256**:158~162

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。执笔人(第一作者)应是在激光及其相关领域具有一定造诣,对某一方面有较深入研究的专家、学者。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。投稿同时,请作者提供详细的作者简介(包括研究领域、主要研究成果等)。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

投稿方式:网上投稿:www.opticsjournal.net 或 E-mail:zhgig@mail.shcnc.ac.cn

咨询电话:021-69918427