

文章编号: 0253-2239(2009)08-2197-06

光击穿液体空泡特性的高速图像测量

宗思光¹ 王江安¹ 王辉华²

(¹ 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033; ² 海军装备研究院, 北京 100073)

摘要 为了分析激光击穿液体介质过程中的等离子体闪光、空泡脉动、冲击波辐射、空泡溃灭发光等综合效应,将高速摄影技术应用于液体激光击穿研究。采用高功率激光聚焦击穿水、酒精、甘油、硅油等粘性液体,观测到了激光击穿形成的等离子体闪光、空泡脉动及溃灭、空泡溃灭发光及冲击波辐射。通过对激光空泡图像序列的分析,得到了不同液体介质中激光空泡的脉动特征、冲击波辐射等特性。研究结果可为水下激光加工、激光医疗、空化空蚀、能源相关流体力学的研究提供一定的理论和实验支持。

关键词 激光物理; 光击穿; 高速摄像; 空泡脉动; 冲击波; 空泡发光

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2197

Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown

Zong Siguang¹ Wang Jiang'an¹ Wang Huihua²

(¹ Department of Electron Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)
² Academe of Navy Equip of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100073, China)

Abstract To study the integration phenomena such as the plasma, high pressure shock wave, cavitation bubbles, bubble crumble lighting when high intensity laser pulses interact with liquid targets, high speed photography technique is used in liquid laser breakdown investigation. Experimental investigation of cavitation bubble after light breakdown with Nd:YAG laser pulses in the liquid targets, such as water, glycerin, alcohol, silicon liquid are presented. The experimental investigation of the laser-induced cavitation bubble expansion and collapse were done with high-speed photography. Based on the analysis of bubble image list, the characteristics of the laser bubbles are gained. It may serve as a tool for the optimization in the bubble study and applications of laser medicine, laser machining and bubble impulsion.

Key words laser physics; light breakdown; high speed photography; bubble impulsion; shock wave; bubble lighting

1 引 言

在液体中,入射的激光功率密度超过液体的击穿阈值时,液体介质被击穿,将产生热等离子体、激光空泡脉动、强冲击波辐射、空泡溃灭发光等现象,激光与液体介质相互作用导致的空泡效应是激光医学、水下激光加工等领域的基础理论问题^[1,2]。同时激光空泡溃灭的发光能量来源于激光,空泡内爆时会形成极端物理条件,如高温(大约 1.0×10^4 K)、高能

(能量密度提高到大约 10^{12} 倍),并辐射光脉冲,这给化学、能源、天体等领域的科学研究提供了新舞台^[3]。在 2002 年 Science 就发表了关于空化空泡的中子辐射的研究论文。

目前液体激光击穿空化现象实验测试方法主要有高速摄影技术、米(Mie)散射测量、高频压电传感测量等手段^[4-6]。Mie 散射研究空泡的动力学特性技术成熟,且具有直至纳秒级的快速响应,可以得

收稿日期: 2008-09-22; 收到修改稿日期: 2008-12-10

基金项目: 国防武器装备重点基金(9140A14060207JB11)资助课题

作者简介: 宗思光(1979—)男,博士研究生,主要从事水下激光探测、光声学等方面的研究。

E-mail: zongsiguang@163.com

导师简介: 王江安(1951—),男,博士生导师,目前研究方向为激光探测、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: gdyfzx@163.com

到空泡大小的演化数据,但该方法只适应空泡为球形情况下,同时只能测量空泡半径的相对值,并且具有很强的角度相关性。高频压电传感测量只能测量空泡膨胀、闭合时辐射的声脉冲信号。高速摄影技术来研究空泡的运动规律有很多优点,可以直观的观察空泡的产生、脉动、溃灭的近似完整的动态过程,通过对拍摄的照片进行分析可以准确地得到空泡脉动的周期和空泡尺寸的变化过程。德国的学者 I. Akhatov, A. Vogel 等^[7~9]相继开展了空泡脉动及空泡在壁面附近溃灭的高速摄影测量研究。

由于实验条件的限制,国内对液体激光击穿特性研究还基本停留在简化的理论分析或者通过激光散射、压电传感测量来分析空泡脉动周期和其它特性^[10],很少采用高速摄影技术对光击穿液体形成的空泡脉动进行研究,同时对激光击穿不同粘性液体介质形成的空泡差异性研究未见报道。

本文利用调 Q Nd:YAG 1.06 μm 激光聚焦击穿水、酒精、硅油、甘油液体介质,采用高速摄像机拍摄了激光击穿液体介质瞬间的等离子体闪光空泡脉动、强冲击波辐射及空泡溃灭发光,通过对所得照片的分析,得到了空泡生长的规律,研究结果可为水下激光加工、激光医疗、空化空蚀、能源等相关空泡流体力学的研究提供一定的参考。

2 实验装置及技术

2.1 实验系统

激光空泡实验测量系统框图如图 1 所示。采用调 Q Nd:YAG 激光器输出脉冲激光($\lambda=1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度 8 ns, 单脉冲能量 40~800 mJ 可调, 激光处于 TEM₀₀ 阶模式工作状态, 脉冲频率可调)。为避免焦斑弥散, 实验使用消像差透镜组, 对激光光束经负透镜扩束后再通过正透镜(焦距为 52 mm)汇

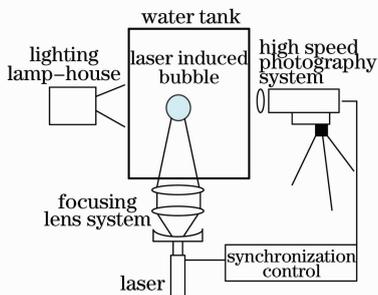


图 1 激光空化空泡实验测量系统

Fig. 1 Diagram of the apparatus of laser-induced bubble

聚至水槽中。系统采用光学扩束装置以增大会聚角,避免水介质在激光到达聚焦点前被击穿,保证初始的激光等离子体空泡具有较好的球状。在聚焦点,激光能量密度超过液体的击穿阈值,发生光击穿,发出耀眼的等离子体闪光,等离子体对外膨胀形成脉动空泡。随着时间增加,空泡脉动结束,在液体浮力作用下,空泡上浮至液体表面。

2.2 图像测量系统

对激光空泡摄像采用的是 FASTCAM SA1.1 型高速摄像机,其摄影频率可调。摄影频率越高,对目标的分辨程度越高,但对相机的光学系统及 CCD 也提出更高要求。曝光时间越短,物体由于高速运动引起的拖尾也越短,但对相机 CCD 的感光度、数据处理要求也越高。实验中采用摄影频率为 $2.0 \times 10^5 \text{ frame/s}$,分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 112 \text{ pixel}$,曝光时间为 $1 \mu\text{s}$ 。采用透光式拍摄,照明光源与高速摄影机处于水槽异侧,光透过水槽中的空泡进入高速摄影机镜头,照明光束通过空泡,发生折射和反射,通过空泡的光线在漫反射背景上反射后,部分光线再一次穿过空泡反射到高速摄像机上。该方式拍摄的空泡边缘以外的部分较亮,空泡整体为暗。

在摄影帧率 $2.0 \times 10^5 \text{ frame/s}$,相机系统内存为 4 G,分辨率为 $128 \text{ pixel} \times 112 \text{ pixel}$ 条件下,相机可连续摄影 4 s,在该过程中至少可拍摄一次完整激光空泡的生长过程,高速相机与空泡可很好的匹配。

2.3 液体特性

考虑到液体粘性、表面张力、液体饱和蒸汽压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、脉动周期和收缩的剧烈程度。目前,国内外关于不同液体中空泡脉动的研究尚不多见。根据空泡运动的理论与实践,液体的表面张力和粘度对空泡的运动有影响,蒸汽压的大小直接对液体的空化阈值有较直接的影响。表 1 列出了实验采用的几种液体在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的几项物理参数(注:液体粘度是通过粘度计测量得到,其余数据来源于参考文献[7])。

对比可见,酒精的蒸汽压比较大,表面张力和粘度都很小,水是表面张力比较大的液体,有一定的蒸汽压,粘度很小,硅油是粘度比较大,表面张力和蒸汽压都非常小;甘油的粘度非常大而蒸汽压非常小。对这些液体进行研究可较好的分辨不同的液体参数对激光空化空泡运动的影响。

表 1 液体介质的物理参数

Table 1 characteristic of liquid targets

Liquid	Viscosity /(cP=10 ⁻³ Pa·s)	Surface tension /(dyn/cm ²)	Steam pressure /(mmHg)	Sound velocity /(m/s)
Alcohol	1.2	22.39	43.9	1168.0
Water	1.002	72.8	17.535	1481.0
Silicon	1107	21	~0	1055.0
Glycerin	1810	63	~0	1923.0

3 实验结果与分析

在激光脉冲平均能量为 600 mJ 条件下,激光击穿不同液体介质形成的空泡脉动图像如图 2 所示,为便于观测,图像序列中前两帧为连续帧,其后每幅图像为原始图像序列间隔 11 frame 的图像。

从摄像结果可以看出,激光击穿液体介质可分为 2 个阶段,第一阶段为激光击穿区域形成的热等

离子体生长阶段,激光等离子体将发出耀眼的白光,击穿区域高温高压迅速向外膨胀,并辐射冲击波,等离子体对外膨胀形成空泡。第二阶段为激光空泡的脉动阶段。激光空泡在泡内外压差的作用下对外膨胀,推动周围液体介质朝外径向流动。泡内压力随着泡膨胀不断下降,当降到周围介质的静液压力时,由于液体的惯性作用,空泡将继续作“过度”的膨胀,一直达到最大泡半径。此时泡内压力低于周围介质的平衡压力,周围液体开始反向运动,即向中心聚合,同时压缩空泡,使之不断收缩,其腔内压力逐步增大。同时由于聚合液流惯性的作用,空泡被“过度”压缩,其内部压力再次高于周围的平衡压力,直至腔内压力高到能阻止空泡压缩而达到新的平衡,此时空泡内部再次达到极端的高温高压,并向外辐射光脉冲。由于泡内压力比周围介质的静压大,空泡再次向外膨胀,并辐射冲击波,经历第二次膨胀和压缩过程。

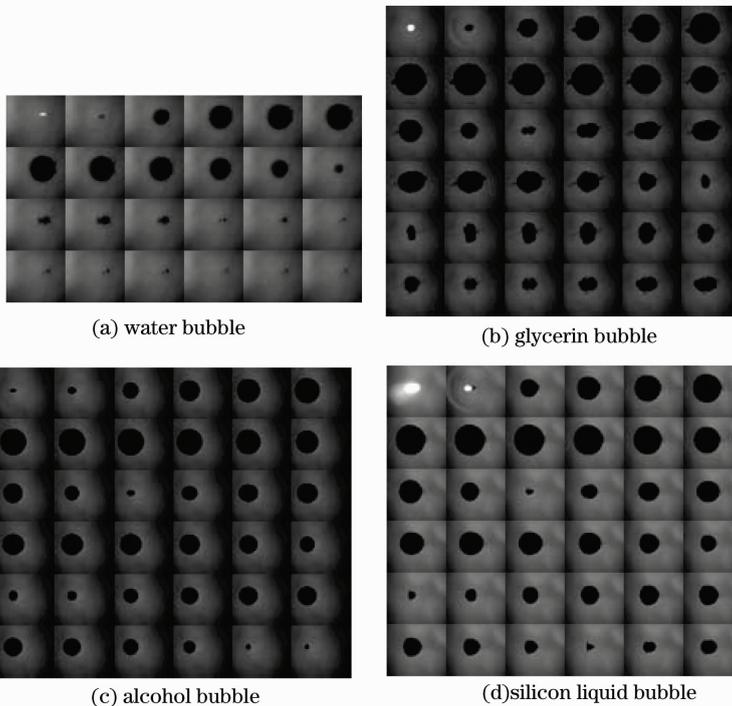


图 2 激光空泡脉动图像

Fig. 2 regulation impulsion process of laser-induced bubble

下面分别从空泡脉动周期、空泡尺寸、空泡能量、辐射冲击波等变化,来分析激光空泡的生长特性。

3.1 空泡脉动尺寸及周期

由于液体粘性、表面张力等特性的不同,不同液体介质中的激光空泡的脉动表现出不同的特征。对图像序列进行识别,可得到空泡尺寸。图像识别的

原理如下:先对所得到的灰度图像进行灰度值分级,适当调节黑白的阈值,对空泡边界识别;然后,对空泡区域的像素进行计数,再转换成空泡直径的值。对四种不同液体的空泡图像的识别,得到空泡在水平和垂直方向的尺寸与时间的变化关系见图 3。激光空泡的脉动周期及空泡在脉动过程中的最大尺寸与脉动对应的次数的关系见表 2。

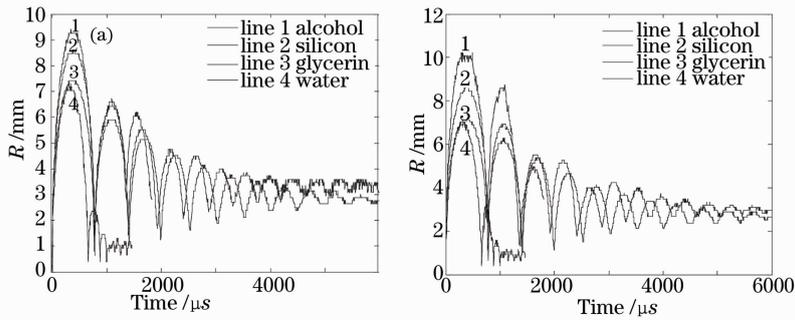


图 3 空泡直径随时间变化关系(a)垂直方向(b)水平方向

Fig. 3 the relation of bubble diameter and time (a) perpendicular way (b)horizontal way

表 2 激光空泡最大直径与脉冲次数关系

Tab 2 the relation of biggest bubble diameter and impulsion period with impulsion process

Liquid variety	Firs oscillation		Second oscillation		Third oscillation		Fourth oscillation		Fifth oscillation		sixed oscillation		seventh oscillation	
	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$	R_{max}/mm	$T/\mu s$
Water	7.3	665	2.4	215	1.9	170								
Glycerin	7.4	760	6.2	635	5.6	575	5.2	530	4.9	495	4.7	480	4.6	470
Silicon	8.6	775	6.8	610	5.9	530	5.5	490	5.1	455	5.2	465	4.4	395
Alcohol	9.4	760	7.2	585	5.9	475	5.1	415						

通过对激光空泡图像序列的分析,可得出以下结论:(1)激光空泡尺寸随着时间逐渐变小,在脉动后期,破裂成小空泡群(水、酒精液体)或以单空泡(甘油、硅油)上浮至液体表面;(2)在激光空泡膨胀初期和闭合末期,空泡壁运动最快;(3)激光击穿水形成水空泡脉动次数较少,在第一次闭合后,空泡的大部分能量以冲击波的形式对外辐射;(4)水空泡膨胀达到最大尺寸时,呈近球状,同时边缘附着许多小空泡,而当空泡接近坍塌点时,表现出极不规则的四极形状;(5)酒精空泡在第一次膨胀到最大尺寸时,呈近圆形,大泡上也出现很多小空泡,在第一次闭合后破裂成两个小空泡,在反弹膨胀中,又合并成一个空泡,同时空泡的边缘更不规则,在第三次脉动周期后,酒精空泡以两个小空泡的形成脉动;(6)硅油空泡和甘油空泡的外形特征具有相似性,由于液体粘性系数大,空泡生长到最大尺寸时接近球形,空泡边缘平滑,空泡闭合后不会破裂,但闭合至最小尺寸时,空泡辐射出强冲击波,接着空泡作整泡反弹,而不是作为小空泡群反弹,同时空泡反弹次数明显高于水空泡;(7)激光空泡的脉动周期随着时间增加逐渐变短;(8)空泡在闭合坍塌时,表现的形状具有不稳定性,有可能是激光击穿液体形成等离子初期的各向异性造成的。

3.2 空泡脉动能量的变化

液体介质中空泡具有的能量,可以近似为^[12]

$$E_{Bi} = \frac{4}{3}\pi P_{\infty} R_{max}^3, \quad (1)$$

其中 P_{∞} 为液体中的静压力,可用当地大气压近似(单位 Pa)。由该公式可近似计算激光空泡脉动到最大尺寸时所具有的能量。

在不同的液体介质条件下,激光空泡随着每次脉动到最大尺寸具有的能量统计如表 3 所示(注:空泡能量计算单位为 mJ)。从统计数据可以发现:

(1)第一次水、甘油、硅油、酒精激光空泡脉动到最大尺寸时,具有最大的泡能,分别占入射激光能量的 3.4%,3.6%,5.6%,7.3%,比例小,原因为激光到达击穿点前,被液体吸收或散射部分能量,同时等离子产生过程辐射的冲击波及液体粘性和表面张力又耗散部分能量,导致泡能较小;该数据与 Vogel, A 等通过压力传感器实测的数据相一致^[4,5];(2)随着脉动次数增加,空泡能量逐渐降低,损失的泡能大部分转化为空泡闭合时向外辐射的声能,可以说声辐射是激光空泡运动最主要的阻尼。(3)在激光空泡脉动过程中,水空泡和酒精的能量耗散高于甘油空泡、硅油空泡,原因在于水、酒精的粘性系数低,空泡闭合易破裂,向液体辐射声波能量。

表3 激光空泡最大能量与脉冲次数关系
Table 3 Relation of biggest bubble energy with impulsion process

Test data/mJ	First oscillation	Second oscillation	Third oscillation	Fourth oscillation	Fifth oscillation	Sixed oscillation	seventh oscillation
Water	20.6	7.0	4.0				
Glycerin	21.4	12.6	9.3	7.4	6.2	5.5	5.1
Silicon	33.6	16.6	10.9	8.8	7.0	7.4	4.5
Alcohol	43.9	19.7	10.9	7.0			

3.3 空泡冲击波辐射

激光击穿液体介质在击穿点可产生以超声速传播的高压波(冲击波),传播一段距离后,衰减为以声速传播的低压波。依据冲击波产生的时间,可分为激光等离子体空泡膨胀冲击波、空泡溃灭冲击波。激光等离子体空泡膨胀冲击波是液体介质吸收激光辐射能量快速相变产生等离子体而形成的。当激光聚焦液体中,聚焦点激光功率密度达到或超过液体的击穿阈值时,由于激光的高能辐射产生高温等离子体,等离子体以超声速绝热膨胀,产生高压波前,空泡内的液体蒸汽因膨胀使腔体温度降低,从而使等离子体腔体膨胀速度锐减,高压波前与空泡脱离,形成向液体辐射的高压冲击波。此后空泡继续膨胀,直到空泡的初始动能全部转化为势能,在外界液体的静压力作用下,空泡向泡心压缩,发生绝热内爆,空泡内的温度、压强再一次升高,导致第二次绝热膨胀及第二次辐射冲击波。

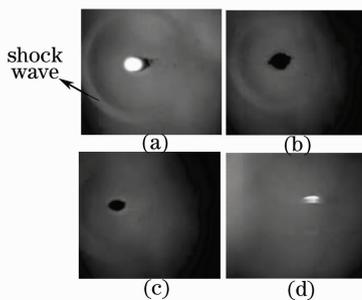


图4 激光空泡膨胀冲击波图像(a)硅油空泡 (b)酒精空泡 (c)甘油空泡 (d)水空泡

Fig. 4 Shock wave image of laser-induced cavitation bubble expansion (a) silicon bubble (b) alcohol bubble (c) glycerin bubble (d) water bubble

激光等离子体空泡膨胀及空泡闭合辐射的冲击波对液体流场扰动导致了液体的光学折射率发生变化,进而可通过光学成像观测到冲击波波前引起的图像特征的变化。通过图像序列中冲击波波前在不同时刻的位置,可计算出冲击波的传播速度及变化规律。激光等离子体空泡膨胀冲击波图像如图4所

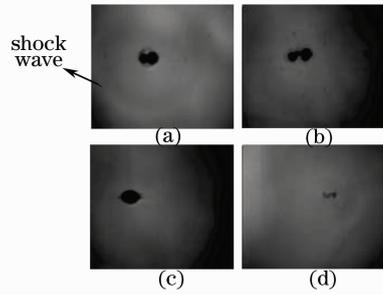


图5 激光空泡闭合冲击波图像(a)硅油空泡 (b)酒精空泡 (c)甘油空泡 (d)水空泡

Fig. 5 Shock wave image of laser-induced cavitation bubble collapse (a) silicon bubble (b) alcohol bubble (c) glycerin bubble (d) water bubble

示,空泡溃灭冲击波图像如图5所示。

从冲击波引起图像特征变化分析可以看出,(1)激光等离子体空泡膨胀及空泡第一次溃灭后辐射的冲击波在传播速度上具有较强的相似性,在距离泡中心时速度最大,向外传播过程中迅速衰减至普通声波;(2)在空泡膨胀的最初时刻,冲击波的速度可达到4000 m/s,在距离击穿点约10 mm处时,冲击波已转化为普通声波,以普通声波的形式向外传播。

3.4 空泡溃灭发光

空泡发光现象的研究有着很长的历史,吸引人之处是空泡发光具有一些惊人和特殊的性质,以往的研究多集中在声致空泡发光,即束缚在水中的空泡在周期性超声场的驱动下脉动发光,对激光空泡发光现象的研究很少。在对激光空泡的高速摄影中,观测到了激光空泡的发光现象。在激光击穿液体介质初始时刻,激光等离子体辐射的白光强度远高于空泡发光的强度,无法观测到空泡发光。在激光空泡第一次闭合至最小尺寸时,空泡内部达到压力或者温度条件,空泡发光。激光空泡闭合发光的典型图像如图6所示。

一般而言,空泡发光与最终溃灭是同相位的,但对于空泡发光强度与液体特性的关系,目前理论上还



图 6 激光空泡闭合发光图像

Fig.1 Image of bubble crumble lighting

未有定论,从本文实验观测,不同液体中激光空泡闭合发光强度由弱至强的顺序为:酒精、水、甘油、硅油。

与 Jarman. P 实验结果相一致,即空泡溃灭发光强度与液体的表面张力与蒸汽压力有极强的相关性^[12];空泡溃灭发光强度近似正比于表面张力的平方与蒸汽压力的比值。

同时液体的热传导性质将影响空泡的发光强度,对于溃灭时足够小的空泡,其耗散在液体中的热量将显著的降低溃灭时的温度,导致热传导性质较差的介质空泡溃灭发光的强度较大。

4 结 论

将高速摄影技术应用于液体激光击穿的研究,观察到了激光击穿液体形成的等离子体闪光、空泡脉动、冲击波辐射、空泡溃灭发光等效应,通过对图像序列的分析得出了激光空泡的生长规律、空泡能量变化及空泡发光特征。实验结果与已有的水下空泡理论计算结果吻合较好,证明了高速摄影技术在高功率激光与液态物质相互作用研究中的重要作用。研究结果可为水下激光加工、激光医疗、空化空蚀、能源等相关空泡流体力学的研究提供一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Zhang Dejun, Li Long, Yu Ming. A New Method of Opto-acoustic Transform Extra-corporeal Lithotripsy[J]. *Chinese J Ultrasound Med.*, 2003, **19**(1): 74~76
张德俊, 李 珑, 喻 明. 光-声转换体外碎石新方法的研究[J]. *中国超声医学杂志*, 2003, **19**(1): 74~76
- 2 Chen Qingming, Cheng Zuhai. Laser acoustic energy conversion efficiency induced by pulse laser in water[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 341~344
陈清明, 程祖海. 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
- 3 Yu Quanzhi, Li Yutong. Interaction of ultrashort high intensity laser pulses with liquids[J]. *Physics*, 2003 **32**(9): 585~589
于全芝, 李玉同. 超短超强激光与液体的相互作用研究[J]. *物理*, 2003, **32**(9): 585~589
- 4 Wang Sande, Zhang Xiaohan, Shang Zhiyuan. Study on effect of optical penetration on the thermoelastic ultrasound generated by laser in liquid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 225~228
王三德, 张小安, 尚志远. 液体中光声热弹光穿透效应的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 225~228
- 5 Alfred Vogel, Joachim Noack. Shock wave energy and acoustic energy dissipation after laser-induced breakdown [C]. *SPIE*, 1998, **3254**: 180~189
- 6 Alfred Vogel, Joachim Noack, Kester Nahen. Energy balance of optical breakdown in water[C]. *SPIE*1997, **3245**: 168~179
- 7 I. Akhatov, O. Lindau, A. Topolnikov. Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble[J]. *Physics of Fluids.*, 2001, **13**(10): 2805~2819
- 8 I. Akhatov, N. Vakhitova Dynamics of laser-induced cavitation bubbles[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, **26**: 731~737
- 9 E. A. Brujan, K. Nahen, A. Vogel. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near an elastic boundary[J]. *J. Fluid Mech.*, 2001, **433**: 251~281
- 10 Li Ming, Zhang Hongchao. Physical analyses of optical breakdown and plasma formation in water induced by water[J]. *Acta Photonica sinica*, 2005, **34**(11): 1610~1614
李 明, 张宏超. 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
- 11 Huang Jingquan. Noise at inception and collapse of a cavity[J]. *Applied mathematics and mechanics*. 1990, **11**(8): 725~730
黄景泉 空化起始和溃灭阶段的噪声[J]. *应用数学和力学*, 1990, **11**(8): 725~730
- 12 R. T. Knapp, J. W. Daily, F. G. Hammit. Cavitation and Erosion [M]. Institute of Water Resources and Hydropower Research, Transl. Beijing: Irrigation Press, 1981, 94~100
R T柯乃普, J W戴利, F G哈密托, 空化与空蚀[M]. 水利水电科学研究院译 北京: 水利出版社, 1981, 94~100