

文章编号: 0258-7025(2010)04-1000-07

激光空泡的溃灭发光及冲击波辐射

宗思光 王江安 马治国

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 分析了空泡溃灭辐射光子的基础理论,建立了自由场液体中激光空泡的产生、脉动及溃灭冲击波、溃灭发光的高速摄影测量实验平台。采用高速摄影技术对不同液体、不同空泡尺寸条件下空泡脉动的外形特征、溃灭冲击波、溃灭发光强度等参数进行测量。结果表明,激光空化技术是产生稳态单一空泡的较好手段;对于不同的液体介质中的激光空泡,激光等离子体空泡膨胀、空泡溃灭辐射冲击波强度主要与液体的粘性系数相关;激光空泡发光与最终溃灭是同相位的;空泡溃灭发光强度与液体的表面张力、饱和蒸气压力有极强的相关性。

关键词 激光物理;激光空化;溃灭发光;溃灭冲击波

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.1000

Lighting and Shock Wave Emission of Laser Cavitation Bubble Collapse

Zong Siguang Wang Jiang'an Ma Zhiguo

(Department of Electron Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract Cavitation bubble characteristic through laser cavitation and high speed photography is investigated. The characteristic data of bubble dynamics, collapse lighting and bubble collapse shock wave is measured based on apparatus of laser bubble measure. It is shown that the laser bubble is a good simulation of single-bubble. The shock wave intensity of plasma bubble expansion and bubble collapse are related to liquid viscosity. The intensity of the bubble collapse lighting is dependent on bubble collapse least size. The intensity of collapse photon is pertinent with liquid surface and steam tension.

Key words laser physics; laser cavitation; bubble collapse lighting; bubble collapse shock wave

1 引 言

近年来声致空化泡溃灭发光及强冲击波辐射已成为热门课题,这不仅是由于这一声能转换为光能的奇异现象吸引了众多的科技工作者,而且由于这一小小的气泡可以成为人们研究极端条件下超快速的非线性过程的神奇实验室。对声致单空泡溃灭发光的观察表明,空化气泡在半径剧烈塌缩至微米数量级时仍能保持良好的球对称性,同时能量密度上升 12 个数量级,而整个发光脉冲的宽度小于 50 ps,并与激励的超声信号的周期在 10^{-11} 数量级精确同步,空泡溃灭时泡内形成的内激波可产生上万摄氏度的高温和上千大气压的高压,可能高到核聚变所需的条件^[1,2]。溃灭发光空泡已成为开展研究极端条件下声学、流体力学、量子光学、惯性核剧变以及

生命科学等研究的神奇实验室。由于对空泡溃灭发光的机理至今还没有令人信服的解释,对空泡溃灭核聚变是否可以实现的争论也未曾终止,对空泡溃灭发光的研究可谓意义重大。

空化泡溃灭发光大致分为单空泡产生、声致和发光三部分,即形成稳定的单泡、发光的参数空间、单泡在声场激励下的动力学特性以及发光机理^[3]。目前国内外对空泡溃灭发光特性的研究多集中在声致单空泡领域,激光空化产生单空泡溃灭特性的研究非常少。

高功率激光聚焦于液体中,击穿液体介质是产生单一空化泡的手段之一^[4]。和声致空泡相比,激光空泡与其具有相似性,如两者的溃灭都具有很快的时间过程,同时激光空泡也具有更为丰富多彩的

收稿日期:2009-05-16;收到修改稿日期:2009-07-06

基金项目:国防科研基金(9140A14060207JB11)资助课题。

作者简介:宗思光(1979—),男,博士,讲师,主要从事光声学和 水下激光探测等方面的研究。

E-mail: zongsiguang@163.com

现象,如通过改变聚焦击穿的激光能量,激光空泡半径可以从几十微米到几毫米,而声致单空泡只能保持在几十微米左右^[5,6],激光空泡为空泡动力学特性的观测带来方便;激光空泡溃灭时辐射光子的能量远高于声致空泡;多空泡间的相互作用是理解多空泡系统发光、空化空蚀的基础,通过调整两束或多束激光的焦点位置、光束入射时刻,易于控制空泡间的相对空间位置、脉动的相位,可以方便地研究空泡与空泡之间的相互作用,可以说激光空泡是研究空泡现象(空泡发光、空泡空蚀等)的有力工具^[6~8]。

本文分析了激光空泡溃灭发光、冲击波辐射的基本理论,利用高功率激光器、光束会聚系统、高速相机、测量水听器、液体介质构建了激光空化泡生成、空泡高速摄影、空泡溃灭冲击波及发光测量的实验平台。观测了无限域自由场中激光击穿硅油、乙醇、水 3 种液体介质形成的空泡脉动、冲击波辐射、空泡溃灭发光等效应,通过对图像序列的处理得出了激光空泡脉动、空泡溃灭冲击波及空泡溃灭发光的特征。

2 空泡溃灭发光的理论

水中稳态单一空泡溃灭发出的光多为连续谱。按照已知理论,连续光谱的光子辐射多为黑体辐射或等离子体辐射。由于实测的空泡溃灭发光的脉冲宽度与光的波长无关,与经典的黑体辐射理论不符。在假设气泡内温度和压强均匀,泡内最高温度不超过 $2 \times 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}$,泡内等离子体是弱离子化类型的条件下,也有学者认为^[5],当计入电子-离子韧致辐射、电子-原子韧致辐射、复合辐射这 3 项等离子体辐射机理,可以解释实测的一些声致发光的数据,如连续谱形状、光强、脉冲宽度以及光强、脉冲宽度随声压、温度等参量的变化。

一般来说,空泡溃灭时存在着非常复杂的物理化学反应,其发光机理目前众说纷纭,各有优缺点,但还没有一种机理可圆满地解释所有的实验现象。

关于空泡溃灭发光的成因主要理论有^[8~10]:

1) 微放电理论,假设非球形空泡被双电荷包围,当空泡溃灭至最小体积时,泡壁极不稳定,双电荷层被打破发生放电而发光。

2) 韦尔-玛保的机械-化学理论,在声场形成的空穴新表面上,当分子被扰动时,形成自由离子,当离子重新结合时,空泡便会发光。

3) 尼皮拉斯和诺尔丁克的热点理论,在空泡溃灭时,泡内气体被急剧压缩,压缩气体白热化而闪光。

4) 化学闪光,这一理论认为,空泡溃灭时,由于热而分解的分子重新进行光化结合而闪光。

3 测量装置

激光空泡产生及溃灭特性实验测量系统如图 1 所示。采用调 Q Nd:YAG 激光器输出脉冲激光($\lambda = 1.06 \text{ } \mu\text{m}$, 脉冲宽度 8 ns, 单脉冲能量 40 ~ 1000 mJ 可调, 脉冲频率可调)。为避免焦斑弥散,实验使用消色差透镜组,对激光光束经负透镜扩束后再通过正透镜会聚至水槽中。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。在光束扩束聚焦前的光路中安置了 45° 分光镜,通过激光能量计测量分光镜分出部分光束的能量,依据分光镜分光比例及每次能量测量值,可对激光束的能量进行监测。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,空泡溃灭时向液体中辐射冲击波、光子。同时空泡溃灭辐射的冲击波信号通过无指向性的水听器进行接收,水听器距离击穿点 50 mm,避免对空泡周围流场的扰动。

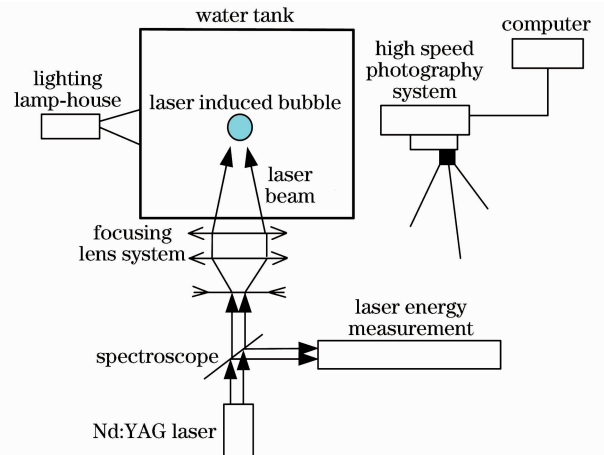


图 1 激光空泡测量系统框图

Fig. 1 Diagram of the apparatus of laser bubble cavitation experiment

实验用高速摄影装置为 FASTCAM SA1.1 型高速摄像机,拍摄帧率为 $3.6 \times 10^5 \text{ frame/s}$,像幅尺寸为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$,曝光时间可调。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。

液体粘性、表面张力、饱和蒸气压是影响空泡脉动的重要因素,对空泡溃灭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、溃灭的剧烈程度。表 1 列出了实验采用的几种液体在 20 °C 时的几项物理参数(注:液体粘度是实测得到的,其他数据来源于参考文献[11])。

表 1 液体介质的物理参数

Table 1 Characteristic of liquid targets

Liquid	Viscosity /cP	Surface tension /Pa	Steam tension /Pa	Sound velocity /(m/s)
Alcohol	1.2	2.24	5853.14	1168.0
Water	1.002	7.28	2337.92	1481.0
Silicon	1107	2.10	~0	1055.0

对比可见,乙醇的蒸气压比较大,表面张力和粘度都很小,水是表面张力比较大的液体,有一定的蒸气压,粘度很小,硅油是一种聚合物,其物理性质与其聚合度有直接的联系,由于其聚合度的不同,粘度范围很大(0.65~10⁶ cP,1 cP=10⁻³ Pa·s),但该液体的表面张力和蒸气压都非常小。可见对这些液

体进行研究可较好地分辨不同的液体参数对激光空泡脉动及溃灭的影响。

4 实验结果与分析

4.1 激光空泡的脉动特性

在 3.6×10⁵ frame/s 帧率下激光击穿水、硅油、

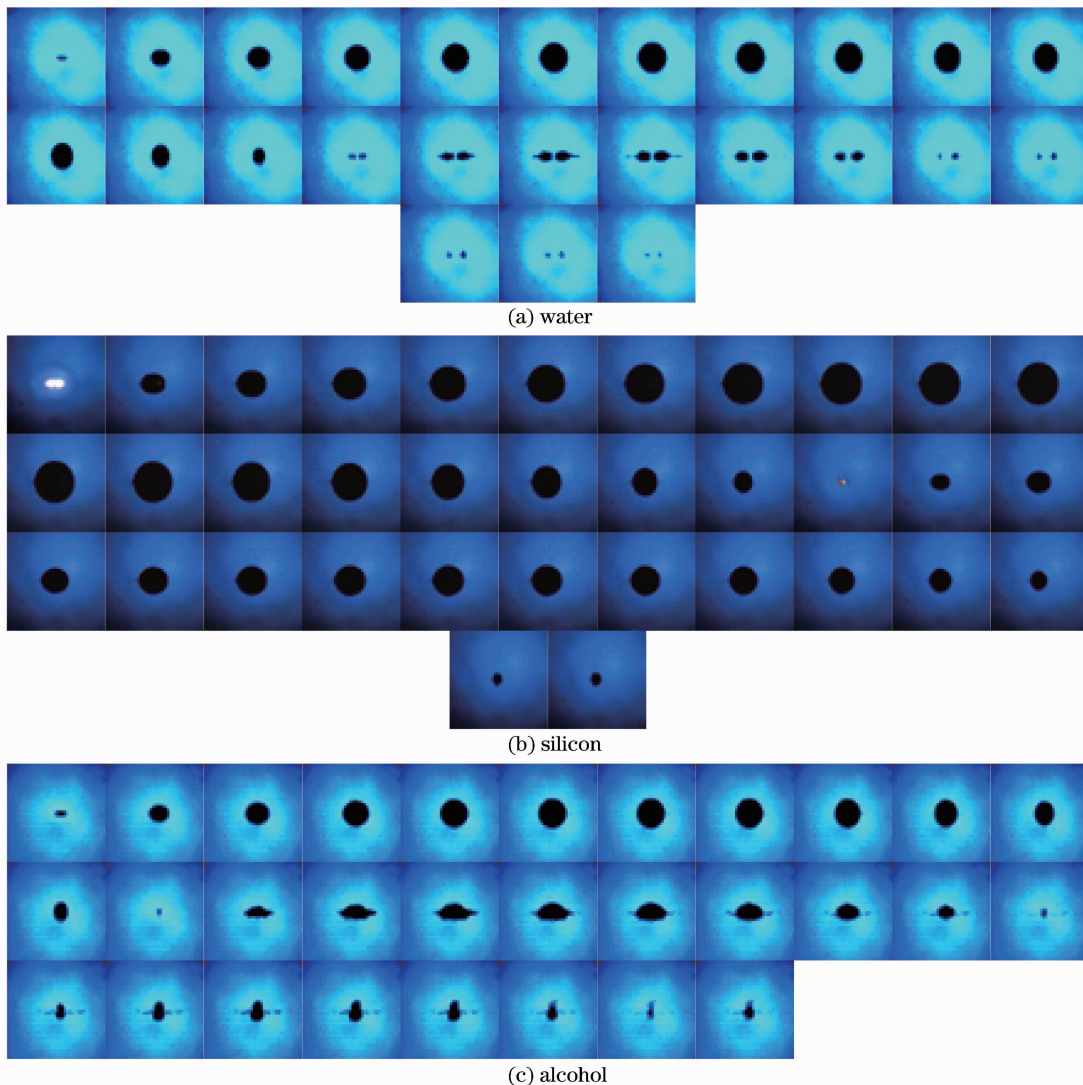


图 2 3.6×10⁵ frame/s 记录的激光空泡脉动

Fig.2 Laser bubble dynamics based on photograph frequency 3.6×10⁵ frame/s

乙醇液体的获取空泡图像如图 2 所示(图像序列中从每隔10 frame取1 frame,画幅间隔30.55 μs)。

从摄影结果可以看出,在相同入射激光能量,不同液体条件下获得空泡的脉动周期、空泡尺寸具有差异性。对空泡脉动图像序列进行识别,可得到空

泡尺寸的变化曲线。单帧图像识别的原理可参考文献[12]。由于空泡溃灭后为非规则的球状,在计算中分别考虑了空泡在水平和垂直方向的尺寸变化。不同激光能量、不同液体中激光空泡在水平和垂直方向的尺寸与时间的变化关系分别如图 3~5 所示。

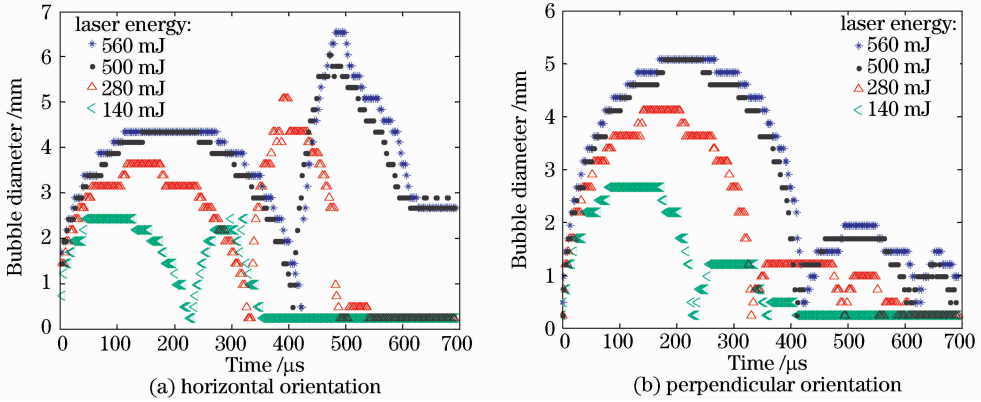


图 3 水空泡直径随时间的变化关系

Fig. 3 Relation between water laser bubble diameter and time

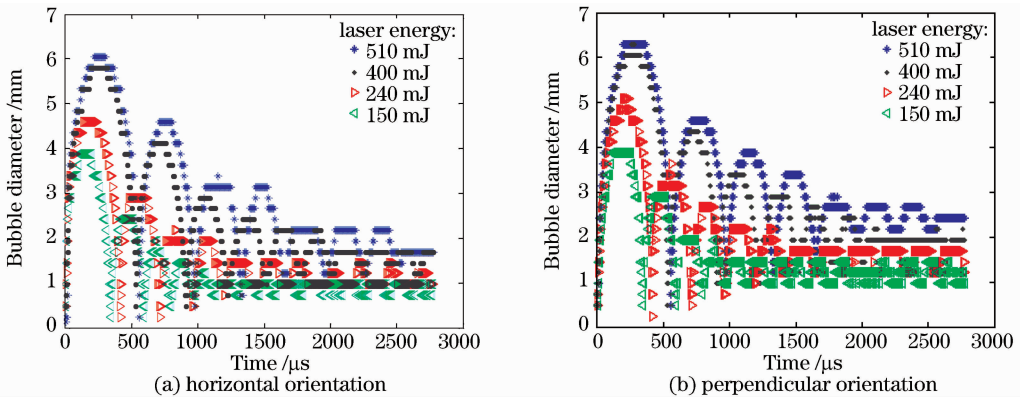


图 4 硅油空泡直径随时间的变化关系

Fig. 4 Relation between silicon laser bubble diameter and time

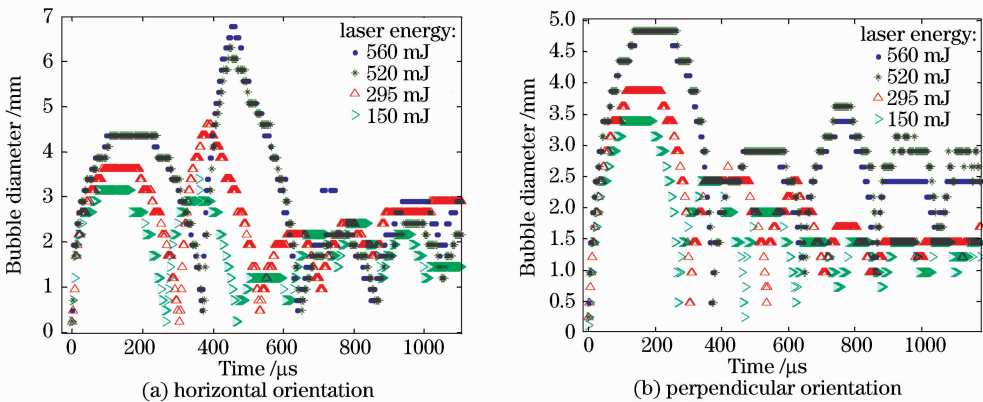


图 5 乙醇空泡直径随时间的变化关系

Fig. 5 Relation between alcohol laser bubble diameter and time

通过对激光空泡图像序列的分析,可得出结论: 1) 随着激光能量的增加,激光空泡膨胀至最大尺寸时的直径变大,但当激光脉动能量大于400 mJ时,

空泡最大直径随激光脉冲能量增加速度变缓;2) 在相同入射光能量条件下,硅油击穿得到的最大空泡直径大于乙醇、水击穿获得的最大空泡直径,考虑到

3 种液体的粘性系数,原因在于硅油击穿获得的等离子体对激光的吸收系数大于水、乙醇对激光的吸收系数;3) 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、乙醇液体)或以单空泡(硅油)上浮至液体表面;4) 在激光空泡膨胀初期和闭合末期,空泡壁运动速度最快;5) 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;6) 水空泡膨胀达到最大尺寸时,近似呈球状,同时边缘依附许多小空泡,而当空泡闭合至最小尺寸时,表现出极不规则的四极形状,水空泡第一次即溃灭成两个小空泡进行第二次膨胀;7) 乙醇空泡在第一次膨胀到最大尺寸时,呈近球形,大泡上也出现很多小空泡,在第一次闭合后破裂成扁平状的空泡进行反弹,同时空泡的边缘更不规则,在第二次闭合后破裂成树状空泡进行反弹;8) 由于液体粘性系数大,硅油空泡膨胀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,闭合至最小尺寸时,空泡辐射出冲击波,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及乙醇空泡;9) 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体初期的各向异性造成的。

4.2 激光空泡溃灭冲击波辐射

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^[13,14]。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,等离子体以超声速膨胀,产生高压波前,空泡内的液体蒸气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,发生内爆,空泡内的温度、压强再一次升高,导致空泡第二次膨胀及第二次辐射冲击波。

激光等离子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。

激光击穿水、硅油、乙醇液体形成的等离子体空泡膨胀冲击波序列如图 6 所示(摄影频率 3.6×10^5 frame/s,画幅间隔 $2.778 \mu\text{s}$)。

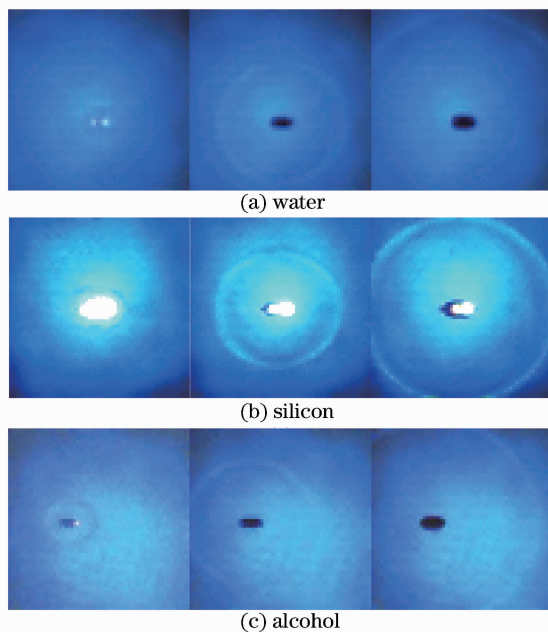


图 6 等离子体空泡膨胀冲击波图像

Fig. 6 Shock wave image of laser-induced cavitation bubble expansion

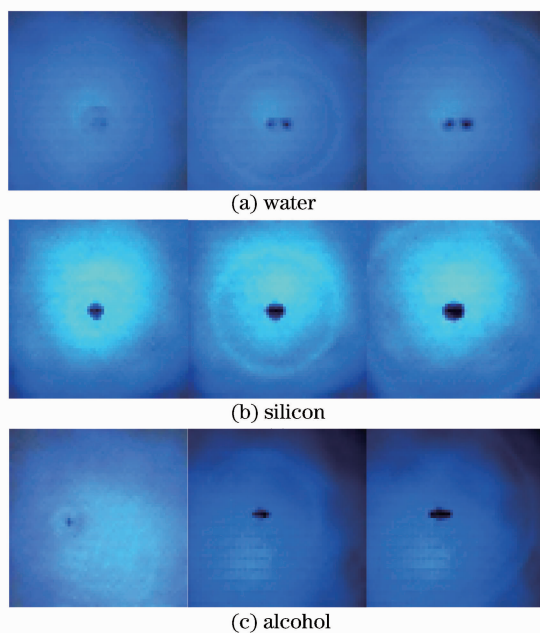


图 7 空泡溃灭冲击波图像

Fig. 7 Shock wave image of laser-induced cavitation bubble collapse

从冲击波发展的图像序列可以看出,等离子体空泡膨胀冲击波发生于等离子体膨胀初期,并迅速

与等离子体空泡壁分离,冲击波波阵面近似球面波向外辐射,在激光入射方向冲击波速度较垂直光束方向稍大。

水、硅油、乙醇 3 种液体中空泡溃灭至最小尺寸后辐射的冲击波发展序列如图 7 所示(摄影频率 3.6×10^5 frame/s,画幅间隔 $2.778 \mu\text{s}$)。

空泡溃灭冲击波的图像表明,空泡溃灭冲击波发生于空泡溃灭至最小尺寸后开始反弹之际,并迅速与反弹泡的泡壁分离,波阵面也近似球面波,不同的液体介质中冲击波的传输速度也不同。根据图像

表 2 空泡膨胀、溃灭辐射冲击波传播速度统计

Table 2 Shock wave velocity of plasma bubble expansion and bubble collapse

Liquid		Plasma bubble expansion			Bubble collapse		
Silicon liquid (laser energy: 560 mJ)	d /mm	2.66	6.77	10.16	4.12	7.71	10.61
	v /(m/s)	1917	1481	1220	1484	1289	1047
Water liquid (laser energy: 572 mJ)	d /mm	5.99	10.36	—	5.57	10.44	—
	v /(m/s)	2157	1572	—	2329	1753	—
Alcohol liquid (laser energy: 565 mJ)	d /mm	5.57	9.43	—	5.67	9.57	—
	v /(m/s)	1515	1388	—	1780	1404	—

需要说明的是在同一测量中,硅油液体中由于冲击波传播速度相对乙醇、水中冲击波速度慢,可获取 4 frame 冲击波序列图像,而乙醇、水液体中获取的冲击波图像序列为 3 frame。

对于水介质在距离空泡中心点 50 mm 处,典型的采用水听器测量的等离子体空泡膨胀、空泡溃灭的辐射的冲击压力曲线如图 8 所示(激光脉冲能量为 820 mJ)。

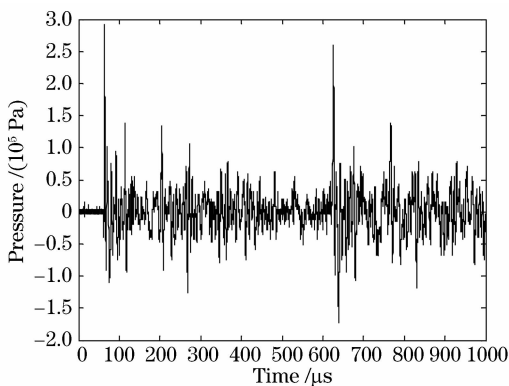


图 8 水介质激光空泡辐射声波压力曲线

Fig. 8 Pressure curve of water acoustic wave generated by laser bubble

图 8 中第一个脉冲为激光空泡膨胀辐射的声压力脉冲,第二个脉冲为激光空泡第一次溃灭辐射的声压力脉冲。对于水听器测量到声信号中脉冲特性的判断,主要依据激光击穿液体产生冲击波到达水听器的先后时间来判断。

分析方法,可将冲击波波阵面距泡心的像素距离转化为绝对距离。

根据冲击波波前在不同时刻的位置,可计算出冲击波传播的绝对速度及变化规律。同时也可根据图像强度特征的变化,观测冲击波强度的相对变化。根据激光击穿硅油、水、乙醇液体等离子体空泡膨胀、溃灭的冲击波图像序列,距空泡中心不同距离上冲击波传播速度统计如表 2 所示,其中 d 为冲击波波阵面距空泡中心的距离, v 为冲击波波阵面传播速度。

在不同能量条件下,对多次获得的 3 种液体击穿图像计算可得出结论:1) 距离泡心越近,冲击波速度增加越快。当 572 mJ 激光脉冲击穿水时,对于等离子体空泡膨胀冲击波,距离泡心约 5.99 mm 处,实测的冲击波速度可达 2157 m/s;对于水液体中空泡第一次溃灭冲击波,距离泡心约 5.57 mm 处,实测的冲击波速度可达 2329 m/s,在距离泡心 12~13 mm 时,衰减为普通声波信号;2) 硅油空泡溃灭辐射的冲击波强度弱于等离子体空泡膨胀辐射的冲击波强度,其原因是硅油粘性系数大,减缓了空泡溃灭时泡壁的速度,空泡不易溃灭。而乙醇空泡、水空泡溃灭辐射的冲击波强度强于等离子体空泡膨胀辐射的冲击波强度,其原因是乙醇、水粘性系数小,空泡溃灭时泡壁速度快,空泡易溃灭,空泡能量更易转换为冲击波能量对外辐射,该结论与采用水听器测试结果一致^[9]。

4.3 激光空泡溃灭的发光特性

对于空泡的溃灭发光的测量,在激光空泡第一次溃灭至最小尺寸时,空泡内部达到一定的压力或者温度条件,空泡发光。实验中发现,相机采用不同的曝光时间,同一液体,相同激光能量下,拍摄的空泡发光图像的亮度不同。不同曝光时间的高速摄影拍摄的激光空泡闭合发光图像如图 9 所示(图中亮点部分为发光的溃灭空泡)。

实验发现,激光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

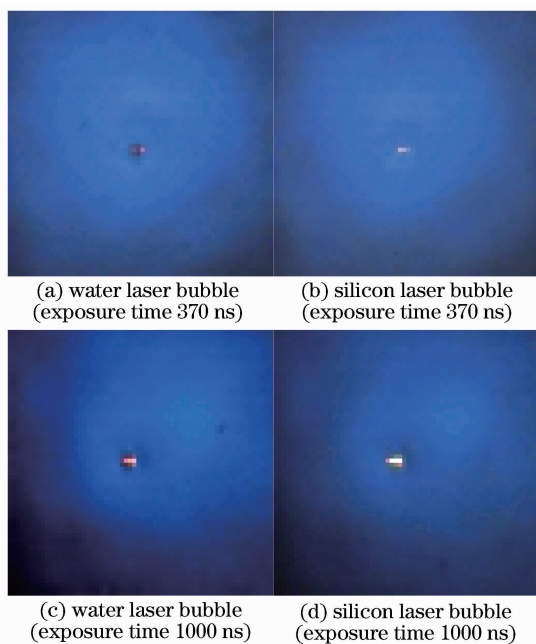


图 9 激光空泡溃灭发光图像

Fig. 9 Single bubble irradiance based on laser bubble collapse

论上还未有定论,从本文实验观测,在相同入射激光能量下,不同液体中激光空泡溃灭发光强度由弱至强的顺序为:乙醇、水、硅油。

该结果与 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气压力有极强的相关性,存在近似关系^[10]

$$W \propto \sigma^2 / P, \quad (1)$$

式中 W 为空泡溃灭发光强度, σ 为液体表面张力系数, P 为液体的饱和蒸气压力。

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地降低溃灭时的温度,导致热传导性质较差的介质空泡溃灭发光的强度较大。在稳态空泡溃灭发光的研究中,理论分析一般认为,液体空泡内的蒸气会降低泡内的最高温度,因此会降低空泡溃灭发光的强度。在本文中由实验观察到液体蒸气与液体激光空泡溃灭发光强度的相对关系,可为空泡发光的相关研究提供参考。

5 结 论

1) 激光空化技术是研究稳态单一空泡溃灭特性的较好手段;

2) 对于不同的液体介质中的激光空泡,激光等离子体空泡膨胀、空泡溃灭辐射冲击波强度主要与液体的粘性系数相关;

3) 激光空泡发光与最终溃灭是同相位的;空泡溃灭发光强度与液体的表面张力与蒸气压力有极强的相关性。

参 考 文 献

- M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse. Single-bubble sonoluminescence [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, **74**(2):425~484
- Qian Menglu, Peng Ruolong. Phenomenon of single bubble sonoluminescence and its stability [J]. *Technical Acoustics*, 2003, **22**(2):130~135
钱梦碌,彭若龙. 单泡声致发光现象——气泡的稳定性[J]. *声学技术*, 2003, **22**(2):130~135
- Qian Zuwen. On the mechanism of sonoluminescence [J]. *Technical Acoustics*, 2000, **19**(3):106~107
钱祖文. 关于声致发光机理研究[J]. *声学技术*, 2000, **19**(3):106~107
- Zong Siguang, Wang Jiang'an. Study breakdown-generated sound in different optical focusing lens system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1384~1390
宗思光,王江安. 不同光聚焦状态的光击穿声辐射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5):1384~1390
- E. A. Brujan, K. Nahen, P. Schmidt *et al.*. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near an elastic boundary [J]. *J. Fluid Mech.*, 2001, **433**:251~281
- Alfred Vogel, Joachim Noack, Kester Nahen. Energy balance of optical breakdown in water [C]. *SPIE*, 1997, **3245**:168~179
- Chen Qingming, Cheng Zuhai, Zhu Haihong. 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,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):341~444
- Li Yutong, Zhang Jie. Physical phenomena related to sonoluminescence of bubbles in liquid [J]. *Physics*, 2002, **31**(5):293~297
李玉同,张杰. 液体介质中的空泡发光现象及其他[J]. *物理*, 2002, **31**(5):293~297
- Ying Chongfu. Recent developments in the study of acoustic cavitation and sonoluminescence [J]. *Chinese Science (G)*, 2007, **37**(2):129~136
应崇福. 新世纪内声空化声致发光的研究进展[J]. *中国科学 (G)*, 2007, **37**(2):129~136
- F. Knipe. Cavitation and Erosion [M]. Beijing: Water Conservancy Press, 1980. 164~168
柯乃普. 空化与空蚀[M]. 北京:水利出版社, 1980. 164~168
- Liu Guangqi, Ma Lianxiang. Chemical Material Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 189~192
刘光启,马连湘. 化工物性算图手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002. 189~192
- Zong Siguang, Wang Jiang'an, Wang Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2197~2202
宗思光,王江安,王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2197~2202
- Zong Siguang, Wang Jiang'an. Experiment investigation of acoustics source generated by optical breakdown in viscid liquid [J]. *Applied Laser*, 2009, **29**(1):29~31
宗思光,王江安. 不同粘性液体激光击穿声辐射特性研究[J]. *应用激光*, 2009, **29**(1):29~31
- Wang Sande, Zhang Xiao'an, 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