

文章编号: 1001-1455(2011)06-0641-06

# 激光聚焦击穿液体的爆炸气泡特性\*

宗思光<sup>1,2</sup>, 王江安<sup>1</sup>, 刘涛<sup>1</sup>, 郭广立<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

3. 中国人民解放军 91431 部队, 广东 湛江 524005)

**摘要:** 高功率激光聚焦击穿液体介质, 类似于聚焦区域发生了微爆炸。研究了激光聚焦击穿爆炸与水下微爆炸之间的相似性。采用高功率脉冲激光器、光学聚焦系统、高速摄像、测量水听器建立了激光击穿爆炸源的产生及爆炸气泡、爆炸声波特性测量系统。对不同参数激光聚焦击穿水、酒精、硅油等粘性液体, 观测到了激光击穿爆炸冲击波、气泡脉动、气泡压缩冲击波辐射。通过对爆炸气泡高速图像序列的分析, 得到了不同液体介质中爆炸气泡的脉动特征、冲击波强度、爆炸声波等特性规律。实验结果可为舰船生命力、舰船结构防护等水下爆炸气泡的研究提供参考。

**关键词:** 爆炸力学; 爆炸气泡; 激光击穿; 激光聚焦

**中图分类号:** O383; TN249

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

当药包在水下界面附近被引爆时, 爆炸冲击波、气泡脉动、气泡压缩冲击波、气泡压缩射流是爆炸载荷对边界冲击破坏的基础<sup>[1]</sup>。实药爆炸是研究水下爆炸气泡的重要手段, 但对实验设备要求高、成本大、实验条件难以控制, 难以从微观角度对气泡、水质特性与冲击波、射流强度等定量关系进行研究<sup>[2-4]</sup>。强激光聚焦击穿是利用光学扩束聚焦系统将强脉冲激光聚焦于液体之中, 当聚焦区域的激光功率密度达到液体光击穿阈值时, 在聚焦区域将发生高温高压等离子体产生及膨胀、爆炸强闪光、气泡脉动、气泡压缩冲击波等现象。当气泡在界面附近压缩时, 由于气泡变形失稳还将形成射向边界的射流<sup>[5-6]</sup>。该过程类似于在光束聚焦区域发生了微爆炸。

本文中, 利用调 Q Nd:YAG 1.06  $\mu\text{m}$  激光聚焦击穿液体介质, 采用高速摄像机、压力传感测量系统对激光击穿微爆炸冲击波、气泡脉动、气泡压缩冲击波等参数进行测量, 得到爆炸气泡相关特性。

## 1 水下爆炸气泡与激光击穿气泡相似性分析

强激光聚焦水下击穿水介质, 在聚焦区域将产生高温、高压的等离子体, 等离子体向外膨胀, 在辐射等离子体冲击波的同时, 气泡形成。气泡源于等离子体, 因而可认为起始气泡的半径就是激光聚焦区域对应的半径值。通常, 气泡在经历了一系列膨胀、收缩、反弹并伴随着若干次冲击波辐射之后泡能最终将全部耗散。如果气泡周围存在固体壁面, 则气泡在压缩阶段还将产生高速射流等现象。

激光聚焦击穿爆炸气泡的动力学特性与水下药包爆炸气泡具有相似性, 主要体现在: (1) 从产生机理上来讲, 两者本质上都是由于内外压力差急剧扩大所产生。(2) 两者对外界的作用及其本身的发展过程类似。激光气泡在固体界面附近压缩时将产生冲击波和射流; 药包爆炸气泡压缩时同样会产生冲击波和射流, 两者引起冲击破坏的作用力基本相同; 另外, 两者都具有脉动特性, 即膨胀-压缩-膨胀过程。同时, 相比炸药爆炸而言, 强激光聚焦击穿爆炸具有爆炸源尺寸、气泡尺寸、炸点相对界面位置可控等优点, 通过调节多路激光聚焦光束, 可方便地研究多点爆炸气泡脉动及压缩效应的相互作用。

\* 收稿日期: 2010-08-31; 修回日期: 2011-04-15

基金项目: 国家国防基金项目(9140A14060207JB11);

爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ10-11M)

作者简介: 宗思光(1979—), 男, 博士, 讲师。

## 2 实验设计

### 2.1 产生水下点爆炸的液体激光击穿装置

激光击穿爆炸实验测量系统如图 1 所示。采用调 Q Nd:YAG 激光器输出脉冲激光,光束经负透镜扩束后再通过正透镜汇聚至水槽中。光路中安置了  $45^\circ$  分光镜,通过激光能量计测量分光镜分出部分光束的能量达到对入射激光能量的监测。在聚焦点,激光能量密度超过液体的击穿阈值,发生光击穿,产生点爆炸源,发出耀眼的等离子体闪光,等离子体对外膨胀形成脉动气泡。随着时间增加,气泡脉动结束,在液体浮力作用下,气泡上浮至液体表面。

对激光击穿爆炸摄像采用的高速摄像机摄影频率为  $360\,000\text{ s}^{-1}$ 。对击穿爆炸辐射的声波信号,采用水听器进行接收。根据不同距离上的不同强度爆炸冲击波强度实测结果,可得到爆炸强度、气泡特性与冲击波、射流特性的相互关系。

### 2.2 液体特性

由于液体粘性、表面张力、液体饱和蒸汽压是影响气泡脉动的重要因素,尤其对气泡膨胀(或收缩)最后阶段的作用效果尤为明显,它将直接决定气泡的最小半径、脉动周期和收缩的剧烈程度,因此选用在液体粘性、表面张力、液体饱和蒸汽压方面具有代表性的酒精、水、硅油 3 种液体。液体参数特性可见文献[7],其中酒精的蒸汽压比较大、表面张力和粘度都很小,水的表面张力比较大、有一定的蒸汽压、粘度很小,硅油粘度比较大、表面张力和蒸汽压都非常小。

## 3 数据分析

### 3.1 激光击穿爆炸气泡的脉动特性

典型的在  $360\,000\text{ s}^{-1}$  帧率下激光击穿水、硅油、酒精液体的获取击穿爆炸图像如图 2 所示(从图像序列中从每隔 10 帧取 1 帧,画幅间隔  $30.55\ \mu\text{s}$ )。

从图 2 可以看出,相同入射激光能量下,不同液体条件下获得气泡的脉动周期、气泡尺寸具有差异性。对气泡脉动图像序列进行识别,可得到气泡尺寸的变化曲线。由于气泡压缩后为非规则的球状,在计算中分别考虑了气泡在水平和垂直方向的尺寸变化。以不同激光能量  $E$  击穿不同液体时爆炸气泡在水平和垂直方向的尺寸  $D$  随时间的变化关系分别如图 3~5 所示。

通过对激光击穿爆炸气泡图像序列的分析,可得出以下结论:(1)随着激光能量的增加,激光击穿爆炸气泡膨胀至最大尺寸时的直径变大;(2)在相同入射光能量条件下,硅油击穿得到的最大气泡直径大于酒精击穿、水击穿获得的最大气泡直径,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、酒精对激光的吸收系数;(3)激光击穿爆炸气泡尺寸随着时间逐渐变小,在脉动后期,破裂成小气泡群(水、酒精液体)或以单气泡(硅油)上浮至液体表面;(4)在激光击穿爆炸气泡膨胀初期和闭合末期,气泡壁运动速度最快;(5)激光击穿水形成爆炸气泡脉动次数较少,在第 1 次闭合后,气泡的大部分能量以冲击波的形式对外辐射;(6)水中爆炸气泡膨胀达到最大尺寸时,近似呈球状,同时边缘依附着许多小气泡,而当气泡闭合至最小尺寸时,表现出极不规则的四极形状,水气泡第 1 次即压缩成 2 个小气泡进行第 2 次膨胀;(7)酒精中爆炸气泡在第 1 次膨胀到最大尺寸时,呈近球形,大泡上也出现很多小气泡,在

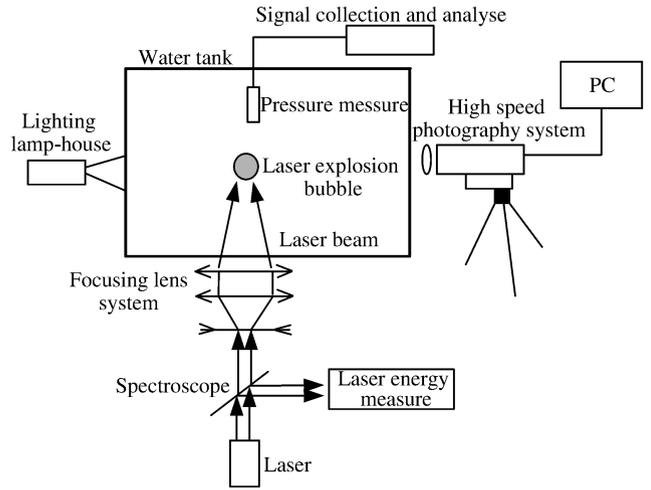


图 1 水下激光击穿爆炸特性实验测量系统框图  
Fig. 1 Diagram of the experiment apparatus of laser-induced breakdown explosion bubble

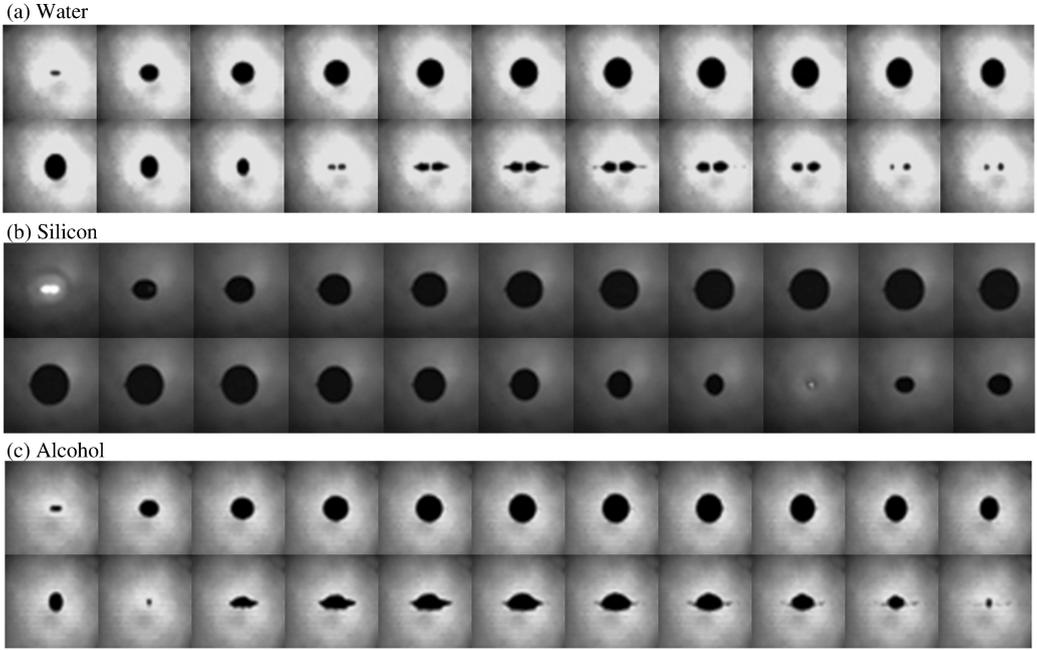


图 2 360 000 s<sup>-1</sup>记录激光击穿爆炸气泡脉动

Fig. 2 Explosion bubble dynamics based on photograph frequency 360 000 s<sup>-1</sup>

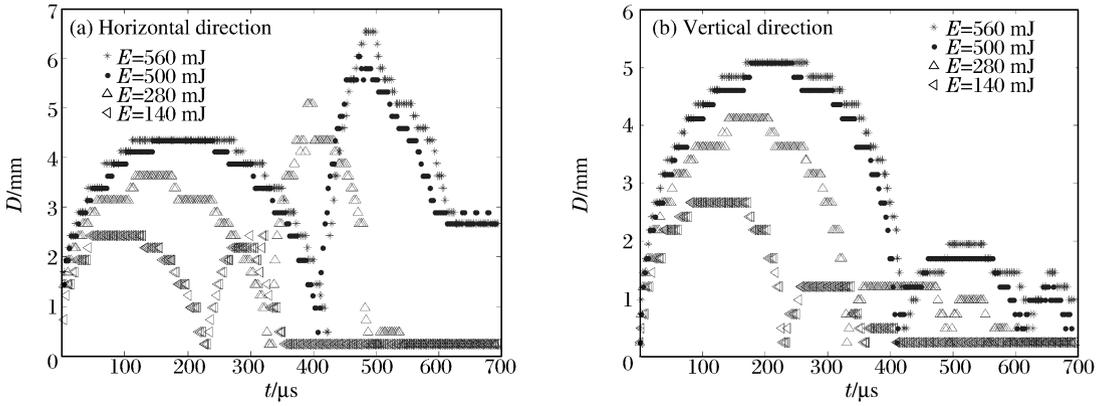


图 3 水气泡直径随时间变化关系

Fig. 3 Relation between water explosion bubble diameter and time

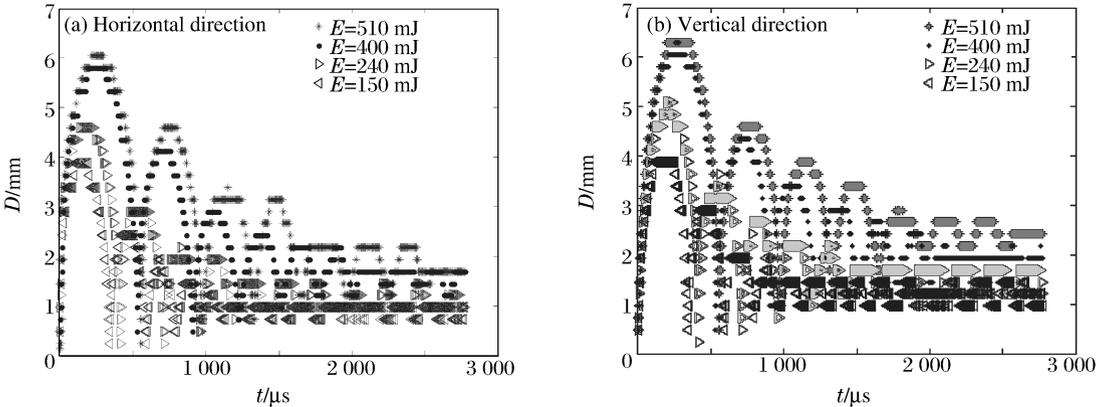


图 4 硅油气泡直径随时间变化关系

Fig. 4 Relation between silicon explosion bubble diameter and time

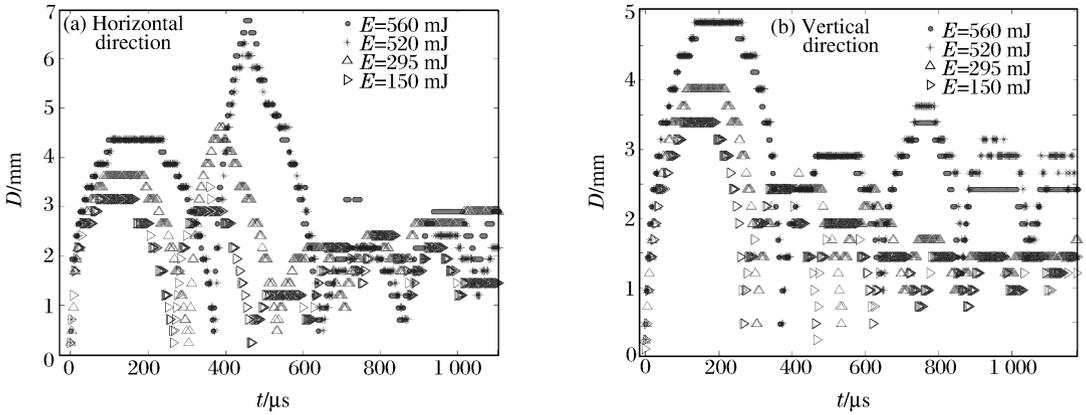


图 5 酒精气泡直径随时间变化关系

Fig. 5 Relation between alcohol explosion bubble diameter and time

第 1 次闭合后破裂成扁平状的气泡进行反弹,同时气泡的边缘更不规则,在第 2 次闭合后破裂成树状气泡进行反弹;(8)由于液体粘性系数大,硅油中爆炸气泡膨胀到最大尺寸时接近球形,气泡边缘平滑,气泡闭合后不会破裂,闭合至最小尺寸时,气泡辐射出冲击波,接着气泡作整泡反弹,而不是作为小气泡群反弹,同时气泡反弹次数明显高于水气泡及酒精气泡;(9)激光击穿爆炸气泡在闭合坍塌时,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 激光击穿爆炸冲击波速度特性

激光击穿爆炸冲击波、气泡压缩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、酒精液体形成的爆炸冲击波序列如图 6 所示(画幅间隔  $2.778 \mu s$ )。

从冲击波发展的图像序列可以看出,激光击穿爆炸冲击波发生于等离子体膨胀初期,并迅速与等离子体气泡壁分离,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。3 种液体中气泡压缩至最小尺寸后辐射的冲击波发展序列见图 7 (画幅间隔  $2.778 \mu s$ )。

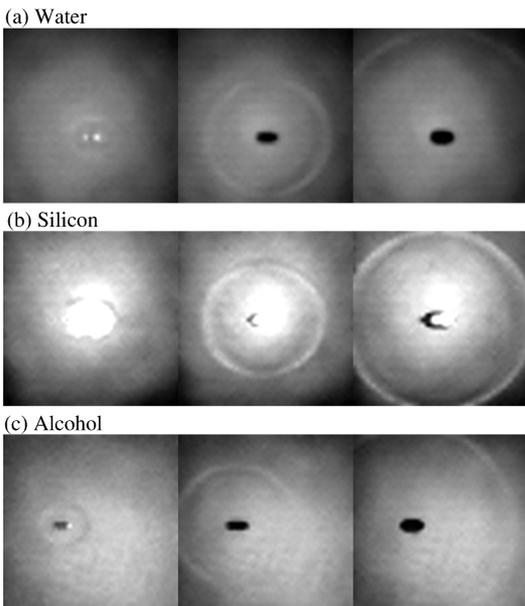


图 6 激光击穿爆炸冲击波图像

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

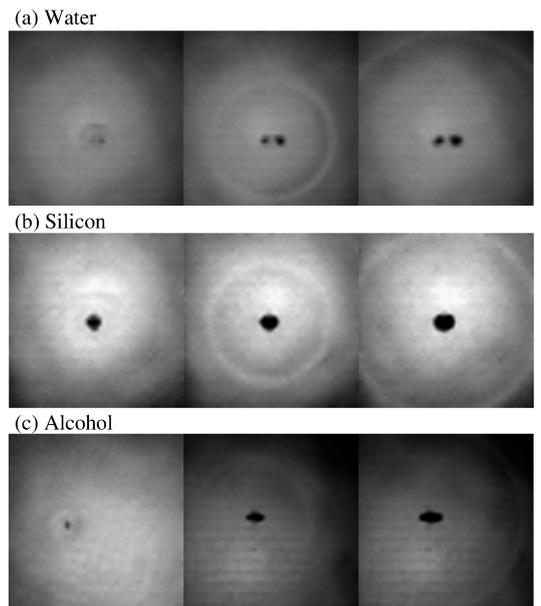


图 7 气泡压缩冲击波图像

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

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。距气泡中心不同距离上冲击波传播速度如表 1 所示,表中  $E$  为激光能量, $d$  为冲击波波阵面距气泡中心的距离, $v$  为冲击波波阵面传播速度。

表 1 激光击穿爆炸冲击波、气泡压缩辐射冲击波传播速度

Table 1 Shock wave velocity of plasma bubble expansion and bubble collapse

液体介质	$E/\text{mJ}$	气泡膨胀		气泡压缩	
		$d/\text{mm}$	$v/(\text{m/s})$	$d/\text{mm}$	$v/(\text{m/s})$
硅油	560	2.66	1 917	4.12	1 484
		6.77	1 481	7.71	1 289
		10.16	1 220	10.61	1 047
水	572	5.99	2 157	5.57	2 329
		10.36	1 572	10.44	1 753
酒精	565	5.57	1 515	5.67	1 780
		9.43	1 388	9.57	1 404

从不同能量条件下对多次获得的 3 种液体击穿爆炸图像计算可得出论:(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,对于激光击穿爆炸冲击波,距离泡心约 5.99 mm 处,实测的冲击波速度可达 2 157 m/s;对于水中气泡第 1 次压缩冲击波,距离泡心约 5.57 mm 处,实测的冲击波速度可达 2 329 m/s,在距离泡心 12~13 mm 时,衰减为普通声波信号;(2)硅油气泡压缩辐射的冲击波强度弱于激光击穿爆炸冲击波强度,原因是硅油粘性系数大,减缓了气泡压缩时泡壁的速度,气泡不易压缩。而酒精气泡、水气泡压缩辐射的冲击波强度强于等离子体气泡膨胀辐射的冲击波强度,原因是酒精、水粘性系数小,气泡压缩时泡壁速度快,气泡易压缩,气泡能量更易转换为冲击波能量对外辐射。

### 3.3 激光击穿爆炸冲击波强度变化特性

在对激光聚焦击穿爆炸声信号分析时,以直达波为主。在距离击穿点 2.5 m 处,水听器测量到的声脉冲序列如图 8 所示。通过调节激光器的输出能量,统计得到的激光束聚焦击穿、距离击穿点 150 mm 处,激光击穿爆炸声波强度、气泡压缩声波强度随入射激光能量的变化规律如图 9 所示。

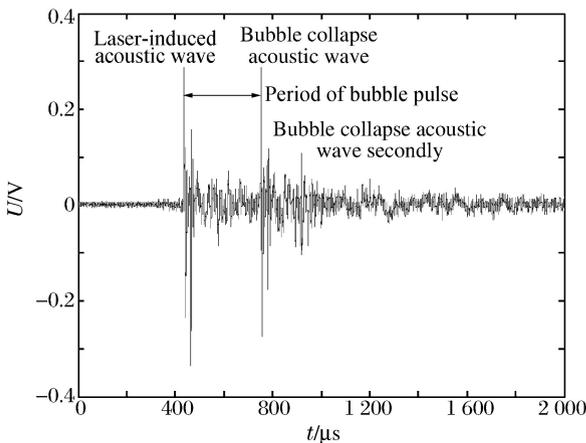


图 8 距离击穿点 2.5 m 处水听器测量到的直达激光声脉冲序列

Fig. 8 Through laser-induced acoustic signal at 2.5 m

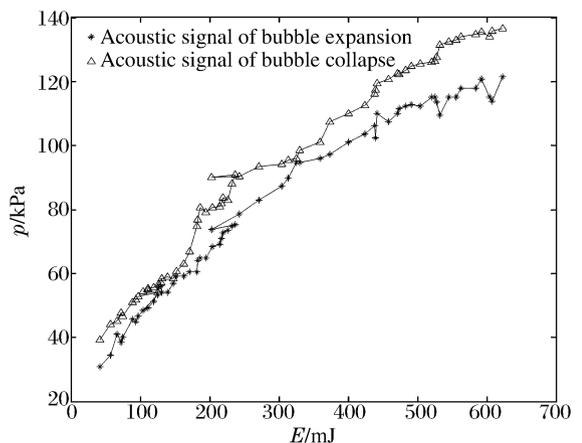


图 9 激光声信号强度与入射激光能量关系

Fig. 9 Relation between acoustic signal intensity and laser energy

从实验数据可以看出:(1)整体来看,激光聚焦击穿爆炸的声信号强度与入射激光能量成正比,入射激光能量越高,声信号越强;但随着激光能量提高,激光击穿辐射的声信号强度增长速度变缓;(2)气泡压缩声信号强度大于激光聚焦击穿爆炸声信号强度,该结论与高速摄影结果一致。

## 4 结 论

(1)激光击穿爆炸技术是研究单一点爆炸气泡特性的较好手段;(2)对于不同的液体介质中的激光击穿爆炸,激光击穿爆炸声波、气泡压缩辐射声波强度的变化关系主要与液体的粘性系数相关。

### 参考文献:

- [1] 库尔 P. 水下爆炸[M]. 罗耀杰,韩润泽,官信,等,译. 北京:国防工业出版社,1960.
- [2] 方斌,朱锡,陈细弟,等. 水平刚性面下方水下爆炸气泡垂向运动的理论研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(4):345-350. FANG Bin, ZHU Xi, CHEN Xi-di, et al. Pulsation dynamics of an underwater explosion bubble vertical migrating to a horizontal rigid plane[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(4):345-350.
- [3] 张阿漫,姚熊亮. 水下爆炸气泡与复杂弹塑性结构的相互作用研究[J]. 应用数学和力学,2008,29(1):81-92. ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. Interaction of underwater explosion bubble with complex elastic-plastic structure[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008,29(1):81-92.
- [4] 方斌,朱锡,张振华,等. 水下爆炸冲击波数值模拟中的参数影响[J]. 哈尔滨工程大学学报,2005,26(4):419-424. FANG Bin, ZHU Xi, ZHANG Zhen-hua, et al. Effect of parameters in numerical simulation of underwater shock wave[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005,26(4):419-424.
- [5] Vogel A, Lauterborn W, Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary[J]. Fluid Mechanics, 1989,206:299-338.
- [6] Vogel A, Busch S, Parlitz U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water[J]. Journal Acoustics Society, 1996,100(1):148-165.
- [7] 刘光启,马连湘. 化工物性手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002:189-192.

## Characteristics of explosion bubbles generated by laser-induced breakdown in liquids\*

ZONG Si-guang<sup>1,2</sup>, WANG Jiang-an<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, GUO Guang-li<sup>3</sup>

(1. *Department of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. *Department 91431 of People Liberation Army, Zhanjiang 524005, Guangdong, China)*

**Abstract:** The similitude was analyzed between the characteristics of explosion bubbles generated by laser-induced breakdown and detonator explosion in water. By combining a high power laser, an optical focus system, a high-speed camera and a hydrophone, a measurement system was developed to experimentally investigate the laser-induced breakdown in liquids such as water, alcohol, silicon in the cases of the different laser energy. Based on the developed measurement system, a series of laser-induced bubble characteristics were obtained, which included the image lists of explosion bubble dynamics, expansion and collapse, and the parameters of explosion bubble diameter evolvments, bubble expansion and collapse shock wave velocities and acoustic signal intensities.

**Key words:** mechanics of explosion; explosion bubble; laser-induced breakdown; laser-induced

\* Received 31 August 2010; Revised 15 April 2011

Corresponding author: ZONG Si-guang, zongsiguang@163.com