

水下光击穿的能量分布研究

王晓宇 王江安 宗思光 刘涛

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 分析了激光击穿水介质时的能量分布情况,给出了相应的能量计算方法。构建了研究激光击穿水介质能量分布的实验系统,利用高速摄像机对激光击穿水介质过程中的冲击波辐射、空泡脉动等现象进行了记录,得到了冲击波速度以及空泡尺寸等参数。利用水听器对远场声波信号进行了测量。研究表明:激光击穿水介质的过程中,大部分激光能量转换成了冲击波和空泡能量,两者占到的比例为60%~90%;激光能量的改变对激光击穿水介质的能量分布影响不大;当激光会聚角增加时,冲击波和空泡能量变大,同时透射激光能量减小。

关键词 激光光学; 水下光击穿; 高速摄影; 激光空泡

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002007

Research on Energy Distribution after Laser-Induced Optical Breakdown Underwater

Wang Xiaoyu Wang Jiang'an Zong Siguang Liu Tao

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

Abstract The distribution of laser energy after laser-induced optical breakdown in water is theoretically analyzed. The calculation methods for energy are given. Experimental platform is built to research energy distribution after laser-induced optical breakdown underwater. A high speed camera is used to record the procession of laser-induced optical breakdown underwater, from which the speed of shockwaves and maximum radius of bubble are got. A hydrophone is used to measure the acoustic signals in far field. The results show that 60%~90% of laser energy is converted into shock wave energy and bubble energy. The laser energy has no influence on experimental results. With the increase of laser focusing angle, the energies of shock wave and bubble both increase, and that of transmitted laser decreases.

Key words laser optics; laser-induced optical breakdown underwater; high speed photograph; laser-induced bubble

OCIS codes 140.3440; 140.3530; 140.3540

1 引言

高功率脉冲激光在水下聚焦,当聚焦区域的功率密度超过一定阈值时,会产生水介质的光击穿^[1]。水介质被击穿后会在击穿区域产生等离子体,等离子体吸收激光能量对外膨胀,由于等离子体的高温高压特性,在其膨胀过程中会将周围水介质汽化,同时在等离子体边缘开始辐射冲击波。激光脉冲作用时间结束后,击穿区域形成空泡,在内外压强差的作用下开始脉动。近年来,研究人员对水下光击穿的研究主要集中在该过程中所产生的激光声信号辐射以及空泡

脉动等现象上。其中,Blackmon等^[2-3]提出了利用激光声信号实现水下通信的方法;宗思光等^[4-5]利用激光声信号进行了水下目标探测,通过高速摄像技术拍摄了激光空泡的运动过程;刘涛^[6-7]等利用该过程产生的空泡对空蚀现象进行了研究;王雨虹等^[8]对激光空泡的运动过程进行了数值计算。上述研究更加侧重于该过程中某一种现象的特性及应用潜力,均未涉及这一过程的能量分布问题。

本文构建了实验平台,通过实验测量和数值计算对激光击穿水介质后的能量分布特性进行了研

收稿日期: 2013-04-03; **收到修改稿日期**: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51109217,51209210)

作者简介: 王晓宇(1987—),男,博士研究生,主要从事激光声方面的研究。E-mail: xiaoyu198725@sina.com

导师简介: 王江安(1951—),男,教授,博士生导师,主要从事激光应用方面的研究。E-mail: gdyfzx@163.com

究。研究结果对实现该过程在相关领域的应用有一定的参考价值。

2 理论分析

2.1 水下光击穿过程中激光能量的转移途径

激光击穿水介质前,其能量损耗主要是由激光在透镜镜面的反射以及水分子的吸收引起的。激光经过会聚后,随着传输距离的增加,其功率密度逐渐变大,当高于水的击穿阈值时,水的光击穿现象就产生了。此时在击穿区域产生等离子体,这样激光与水的相互作用就变成激光与等离子体的相互作用。等离子体通过逆韧致机制吸收激光能量^[9],不断对外膨胀,在膨胀过程中将周围水介质汽化,同时其边缘出现高压冲击波,冲击波对外传播,其传播速度远大于等离子体的膨胀速度,冲击波和等离子体逐渐脱离。在激光和等离子体相互作用的整个过程中,有部分激光没有被等离子体吸收,在等离子体内部发生透射。当等离子体消失后,击穿区域形成脉动的空泡。

通过上面的分析可知,激光击穿水介质的现象涉及到的能量转移过程是十分复杂的。总体看来,在此过程中激光能量主要转换成以下5部分:1)冲击波能量 E_s ;2)空泡能量 E_B ;3)等离子体膨胀过程中蒸发周围水介质所需能量 E_V ;4)在等离子体内部透射的激光能量 E_T ;5)激光在传输过程中的损耗能量 E_L 。在现有实验条件下,主要将前面4种能量作为研究内容,忽略传输损耗的影响。下面将对 E_s 、 E_B 、 E_V 的计算方法以及 E_T 的测量方法进行具体说明。

2.2 E_s 的计算方法

在冲击波的传播过程中,其能量转换成了水介质的内能。冲击波的能量损耗可以利用 Rankine-Hugoniot 方程来计算^[10]。该方程将冲击波经过区域水介质内能的变化与压力、密度变化联系起来,冲击波传输单位距离引起的水介质内能变化表示为

$$\Delta\epsilon(r) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_s} \right] (p_s + p_0), \quad (1)$$

式中 ρ_0 和 p_0 分别表示在冲击波经过之前水介质的密度和压力, ρ_s 和 p_s 分别表示冲击波经过之后,水介质的密度和压力。

由于 $p_s(r) \gg p_0$,所以(1)式可以写成

$$\Delta\epsilon(r) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_s} \right) p_s, \quad (2)$$

式中 p_s 可以用冲击波速度表示为^[11]

$$p_s = c_1 \rho_0 u_s [10^{(u_s - c_0)/c_2} - 1] + p_0, \quad (3)$$

式中 c_0 表示水中声速, $c_1 = 5190$ m/s, $c_2 = 25306$ m/s,

u_s 表示冲击波速度。

根据质量守恒原理有

$$u_s \rho_0 = (u_s - u_p) \rho_s, \quad (4)$$

式中 u_p 为冲击波经过区域的粒子速度。

根据动量守恒原理有

$$p_s - p_0 = u_s u_p \rho_0. \quad (5)$$

由以上两式可以得到

$$\rho_s = \frac{\rho_0}{1 - (p_s/u_s^2 \rho_0)}. \quad (6)$$

这样,冲击波从 r_0 传播到 r_1 时,其能量的损耗可以表示为

$$\Delta E = \int_{r_0}^{r_1} 4\pi r^2 \rho_s(r) \Delta\epsilon(r) dr. \quad (7)$$

由于冲击波的能量衰减速度非常快,所以可以利用近场的 ΔE 对冲击波传输到远场时的能量损耗做近似。传播到远场时,冲击波已经衰减成普通声波,可以利用水听器对其进行接收。则远场普通声波的能量 E' 可以表示为

$$E' = \frac{4\pi r_m^2}{\rho_0 c_0} \int p(t)^2 dt, \quad (8)$$

式中 r_m 表示水听器到击穿点的距离。 $p(t)$ 表示由水听器测量得到的声波的压力。

这样,冲击波的总能量可以表示为

$$E_s = \Delta E + E'. \quad (9)$$

2.3 E_B 的计算方法

空泡的能量可以表示为^[12]

$$E_B = \frac{4}{3} \pi P_\infty R_{\max}^3, \quad (10)$$

式中 P_∞ 为液体静压强,可以近似为一个大气压, R_{\max} 为最大空泡半径。

2.4 E_V 的计算方法

为了计算 E_V ,假设等离子体体积内的所有水都汽化,并且忽略水汽化过程中同周围介质的热传导。则有^[10]

$$E_V = \rho_0 V [c(T_2 - T_1) + h], \quad (11)$$

式中 V 为激光等离子体体积, $T_2 = 100$ °C 为标准大气压下水的沸点, T_1 为击穿区域水的初始温度, $c = 4.2$ kJ/(kg·°C) 为水的比热容, $h = 2256$ kJ·kg⁻¹ 为水的等压蒸发比焓。

2.5 E_T 的测量方法

为了得到 E_T ,设计了以下实验结构,如图1所示。激光经过扩束聚焦系统击穿水介质以后,在等离子体内部发生透射的激光再次经过一个会聚透镜,最终由能量探测计实现对 E_T 的直接测量。

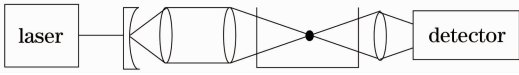


图 1 测量设计图

Fig. 1 Schematic diagram for energy measurement

3 实验设计

水下光击穿能量分布测量系统如图 2 所示。采用调 Q Nd:YAG 脉冲激光器,输出激光波长为 532 nm,脉冲宽度为 6 ns,单脉冲能量在 10~30 mJ 范围内可调。脉冲激光经过聚焦系统在水中实现光击穿,透射的激光经过会聚后,由激光能量计进行监测。对产生的远场冲击波信号通过无指向性的水听器进行接收,水听器线性频带宽度为 2~600 kHz,灵敏度为 -216 dB(参考值为 1 V/ μ Pa),水听器与激光击穿点相距 20 mm,其接收到的声信号通过电缆送入 Agilent7104A 型示波器进行采集。整个击穿过程通过高速摄像机进行记录。

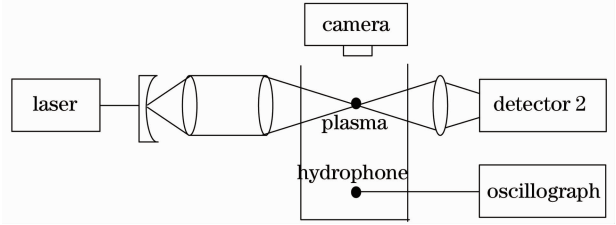


图 2 实验装置系统图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

4 实验结果与分析

4.1 水下光击穿高速图像测量

图 3 所示为用高速摄像机记录的冲击波传播过程,图中相邻两帧的时间间隔为 1 μ s。可以看出第 1、2 帧图片中等离子体的膨胀过程。第 3 帧图片等离子体消失,出现了向外传播的冲击波以及脉动的空泡。图中圆环状阴影即为冲击波波阵面。之所以会产生圆环状阴影,是由于冲击波对周围水介质的作用改变了其折射率,使得光线未能进入镜头。

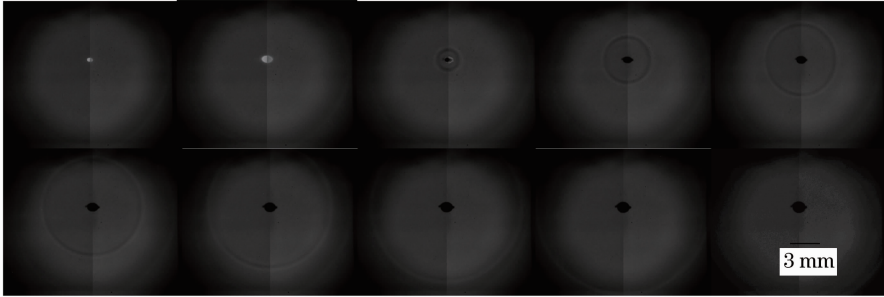


图 3 冲击波图像

Fig. 3 Images of shock waves

通过计算相邻两帧间冲击波和等离子体的距离,结合拍摄帧率,就可以计算出冲击波速度 u_s 。图 4 得出了不同位置处冲击波速度。可以看出,随着传输距离的增加,冲击波速度逐渐减小。

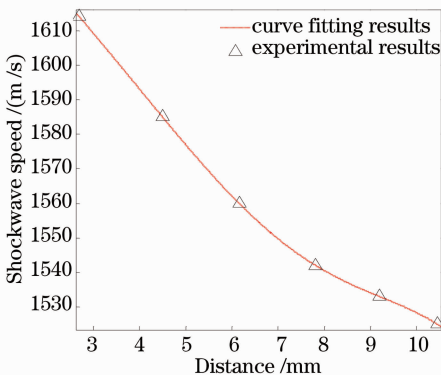


图 4 不同距离处的冲击波速度

Fig. 4 Shockwave speeds in different distances

由实验结果得到的冲击波速度和传输距离的拟合式可以写为

$$v = -0.004696d^5 + 0.1188d^4 - 0.9768d^3 + 3.333d^2 - 20.46d + 1659, \quad (12)$$

式中 v 表示冲击波速度, d 表示冲击波传输距离。

由于高速摄像机拍摄一次存储数据的容量有限,因此未能在一次拍摄中将冲击波辐射和空泡脉动完整记录下来。图 5 所示为用高速摄像机记录的空泡完整脉动过程,相邻两帧图片的时间间隔为 28 μ s。可以看出空泡在膨胀和收缩阶段具有很好的对称性。从图 5 中可以得出空泡脉动的最大半径 R_{max} ,代入(10)式即可求出空泡能量。

4.2 改变激光能量

表 1 列出了激光会聚角为 32°时,不同能量激光聚焦击穿水介质后的能量分布情况。可以看出,随着激光能量的增加, E_S/E_L 、 E_B/E_L 、 E_V/E_L 和 E_T/E_L

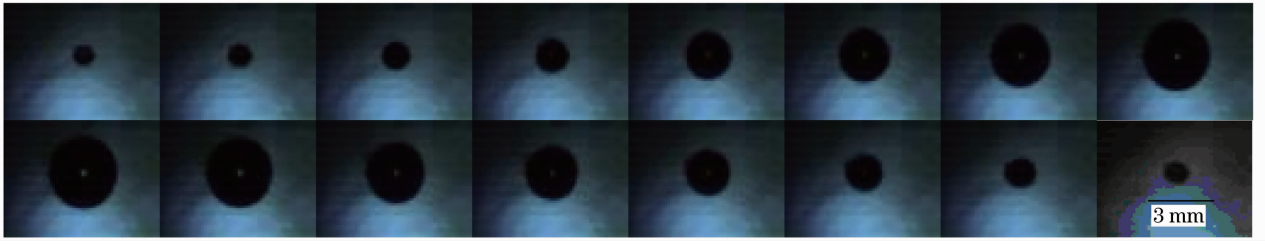


图 5 空泡脉动图像

Fig. 5 Images of bubble movements

都基本保持稳定。这说明激光能量与水下光击穿的能量分布关系不大。

表 1 水下光击穿的能量分布

Table 1 Energy distribution after optical breakdown in water

Energy /mJ	E_S/E_L	E_B/E_L	E_V/E_L	E_T/E_L
10	53%	27%	7%	3%
20	52%	29%	5%	3%
30	55%	26%	5%	2%

从前面的分析可以得出, E_S 、 E_B 、 E_V 三者的和可以看作是等离子体吸收的激光能量, 因此 $(E_S + E_B + E_V)/E_L$ 可以看作是等离子体对激光能量的吸收系数 a 。从实验结果可知, 随着激光能量的增加, a 基本保持稳定。 a 取决于等离子体的自由电子密度以及自由电子和分子、原子的碰撞概率^[9]。这说明虽然激光能量的增加使得更多的水分子被电离, 增加了自由电子的数目, 但是同时等离子体的体积增大, 因此等离子体内部自由电子密度, 以及自由电子和分子、原子的碰撞概率不变, 这样 a 基本保持稳定, 未被等离子体吸收的激光能量比例因此也保持稳定, 即 E_T/E_L 基本保持不变。当激光能量为 10、20、30 mJ 时, 实验测量得到等离子体体积分别为 0.2、0.37、0.57 mm³, 如图 6 所示。可知激光等离子体的体积与激光能量呈线性关系, 根据(11)式可知 E_V 和激光能量成比例, 所以 E_V/E_L 保持稳定。 a 和 E_V/E_L 都变化很小, 又有 $(E_S + E_B + E_V)/E_L \approx a$, 所以 $(E_S + E_B)/E_L$ 基本不变, 在激光脉宽、波长等参数一定时, E_S 、 E_B 的比例基本恒定^[10], 所以 E_S/E_L 、

E_B/E_L 保持稳定。

4.3 改变激光会聚角

表 2 列出了能量为 30 mJ 时, 激光以不同会聚角聚焦击穿水介质后的能量分布情况。可以看出, 随着激光会聚角的增加, E_V/E_L 和 E_T/E_L 都逐渐减小, E_S/E_L 、 E_B/E_L 则逐渐变大。

表 2 水下光击穿的能量分布

Table 2 Energy distribution after optical breakdown in water

Angle /($^{\circ}$)	E_S/E_L	E_B/E_L	E_V/E_L	E_T/E_L
15	36%	19%	20%	27%
22	47%	25%	11%	12%
32	54%	28%	6%	3%

在激光能量保持稳定时, 激光会聚角的增加会引起等离子体体积的减小^[7], 又因为激光能量不变, 这样电离产生的自由电子数目保持稳定, 因此等离子体的自由电子密度变大, 同时自由电子和分子、原子的碰撞概率增大, 这就使得等离子体对激光能量的吸收系数 a 变大, 从而未被等离子体吸收的激光能量比例, 即 E_T/E_L 减小。又因为激光等离子体的体积近似为发生汽化的水的体积, 因此, 激光会聚角的增加会使发生汽化的水的体积减小, 从而根据(11)式可知, E_V 减小, 又因为 E_L 保持不变, 所以 E_V/E_L 减小。随着激光会聚角的增加, a 变大, E_V/E_L 减小, 又有 $(E_S + E_B + E_V)/E_L \approx a$, 所以 $(E_S + E_B)/E_L$ 增大。在激光脉宽、波长等参数一定时, E_S 、 E_B 的比例保持稳定^[13], 所以 E_S/E_L 、 E_B/E_L 都逐渐增大。

5 结 论

通过利用脉冲激光聚焦击穿水介质, 对激光能量、会聚角和水下光击穿后的能量分布之间的关系开展了实验研究。通过研究得到的结论如下:

1) 激光击穿水介质的过程中, 大部分激光能量转换成了冲击波和空泡能量, 两者占到的比例为 60%~90%。

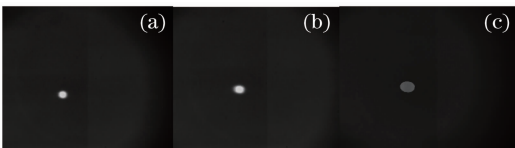


图 6 不同激光能量下激光等离子体图像。

(a) 10 mJ; (b) 20 mJ; (c) 30 mJ

Fig. 6 Images of laser-induced plasma at different laser energies. (a) 10 mJ; (b) 20 mJ; (c) 30 mJ

2) 激光能量大小和水下光击穿后的能量分布没有必然的关系。

3) 激光会聚角的增加可以提高等离子体对激光能量的吸收系数,提高冲击波能量和空泡能量,同时蒸发水介质和透射激光能量降低。

以上结果可以为水下光击穿效应的实际应用提供一定的理论参考。今后将建立相应的实验系统,对更大参数下激光击穿水介质的能量分布展开研究。

参 考 文 献

- 1 E A Brujan, A Vogel. Stress wave emission and cavitation bubble dynamics by nanosecond optical breakdown in a tissue phantom [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 558(1): 281-308.
- 2 F Blackmon, L Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar[C]. *SPIE*, 2005, 5778: 800-808.
- 3 L Antonelli, F Blackmon. Experiment demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(1): 103-112.
- 4 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Mingkui, *et al.*. Investigation of laser-induced acoustics signal for target detection[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1332-1337.
宗思光, 王江安, 马明奎, 等. 水下目标探测的激光声特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1332-1337.
- 5 Zong Siguang, Wang Jiang'an. Study of laser bubble erosion in the vicinity of a solid boundary[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2197-2201.
宗思光, 王江安. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2197-2201.

- 6 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.*. Cavitation erosion by laser-generated bubble near rigid boundary[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 298-302.
刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 激光空泡在刚性壁面附近的空蚀特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(2): 298-302.
- 7 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang. Influence of air content on cavitation erosion by laser-generated bubble near rigid boundaries[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2576-2580.
刘涛, 王江安, 宗思光. 含气量对激光空泡在刚性壁面空蚀的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2576-2580.
- 8 Wang Yuhong, Wang Jiang'an, Ren Xichuang. Laser induced bubble characteristics with experimental and numerical methods [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8372-8378.
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*, 2009, 58(12): 8372-8378.
- 9 Chang Tieqiang, Zhang Jun, Zhang Jiatai, *et al.*. *Laser-Plasma Interaction and Laser Fusion*[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1991. 23-34.
常铁强, 张均, 张家泰, 等. *激光等离子体相互作用与激光聚变*[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991. 23-34.
- 10 A Vogel, J Noack, K Nahen, *et al.*. Energy balance of optical breakdown in water[C]. *SPIE*, 1998, 3254: 168-179.
- 11 A Vogel, J Noack, K Nahen, *et al.*. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales[J]. *Appl phys B*, 1999, 68(2): 271-280.
- 12 C Brennen. *Cavitation and Bubble Dynamics*[M]. New York: Oxford University Press, 1995. 80.
- 13 A Vogel, J Noack. Shock wave energy and acoustic energy dissipation after laser-induced breakdown [C]. *SPIE*, 1998, 3254: 180-189.

栏目编辑:宋梅梅