

激光空泡在近自由液面运动特性的实验研究

刘 涛 王江安 宗思光 梁善永

(海军工程大学电子工程学院光电研究所, 湖北 武汉 430033)

摘要 采用激光技术聚焦击穿液体产生空泡, 利用高速摄像系统开展激光空泡与自由液面的相互作用的实验研究。实验研究发现, 空泡与自由液面之间的无量纲距离对水下空泡的脉动特性和自由液面的水冢现象存在影响。通过大量实验总结了无量纲距离与空泡半径、空泡脉动周期、自由液面水柱的最大高度和产生水冢时间的相互关系。实验表明无量纲距离越小, 空泡脉动周期越短, 自由面的水冢现象越明显。同时统计出了在不同无量纲距离范围内所出现的 5 种不同水冢现象的规律。研究内容为空泡与自由液面相互作用的理论提供了实验依据。

关键词 激光技术; 空泡运动; 激光空泡; 自由液面; 水冢

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0714003

Experimental Study of Laser-Generated Cavitation Bubble Motion Near a Free Liquid Surface

Liu Tao Wang Jiang'an Zong Siguang Liang Shanyong

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

Abstract The subject in the study of the characteristic and interaction about the bubble occurring near a free liquid surface of water is carried out by the method of laser-generated cavitation bubble and high speed camera system. The experimental results indicate that the dimensionless distance between the bubble and free surface affects the bubble motion and plume of water. The summary of the relation between the dimensionless distance and the maximum radius, period of motion, the height of water column and the time of the plume of water are provided. There are five different plumes for different dimensionless distances. It provides an experimental reference to the research on the interaction of the bubble and free liquid surface.

Key words laser technique; bubble motion; laser-generated bubble; free liquid surface; plume of water

OCIS codes 040.1490; 140.3330; 140.3390; 140.3538

1 引 言

水下爆炸产生的空化气泡脉动、气泡压缩射流是爆炸荷载对边界冲击破坏的基础。空化气泡的产生、膨胀、溃灭和射流总是伴随着与周围介质的相互作用。特别是在自由液面附近, 空泡会产生特别复杂的脉动现象, 同时在自由液面附近也会产生 Bjerknes 射流^[1,2], 水上部分则产生水柱, 即水冢现象。目前对爆炸空泡脉动的研究缺乏较为完善的理论支撑, 开展空泡在不同外界因素的运动特性, 完善空泡机理并运用到国防、工业和制造等各个领域。研究空泡与自由液面的相互作用具有重要的理论和

工程应用前景。国内外对空泡与周围介质之间相互作用已经开始了相关研究, 研究过程发现, 由于空泡脉动现象比较复杂, 数值模拟计算无法得到完善的结果, 因此实验方法成为研究近自由面空泡脉动规律的主要手段。对于空泡产生的方法, 早期实验是利用 TNT 爆炸实验, 但是产生空泡的安全性差, 成本高, 可重复性差。后来人们开始利用简单空泡产生方式代替传统方式。例如动力泡^[3,4], 火花泡^[5]和声空泡^[6]做实验, 但是这些空泡缺乏球对称性, 不易控制。

激光与液体介质产生光击穿的物理过程是伴随

收稿日期: 2011-12-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51109217)和武器装备预研重点基金项目(9140A14060207JB11)资助课题。

作者简介: 刘 涛(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事激光空泡特性方面的研究。E-mail: ltbeteto2002@163.com

导师简介: 王江安(1951—), 男, 硕士, 教授, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: gdyfzx@163.com

着声、光、热和机械效应等一系列现象的复杂物理过程。Vogel等^[7,8]利用激光聚焦于液体介质中产生空泡的方法,其优点是空泡具有良好的球对称性,通过调节激光能量与聚焦点位置可对空泡产生的时间和位置进行控制,使实验具有可重复性和易操作性。这种方法适用于空泡在自由液面附近运动特性的实验研究^[9~12]。

本文利用激光空化空泡技术模拟水下爆炸空泡,通过对激光器参数的控制,设定激光空泡产生的位置,并调整激光击穿点与自由液面的相对位置。采用高速相机观察激光空泡与自由液面之间不同相对位置条件下,空泡在自由面的运动特性和水面的水豕现象,并对实验结果进行详细分析,总结自由液面附近空泡运动规律。研究结果可为空泡在近自由液面附近的运动特性研究提供参考。

2 实验原理

2.1 激光空泡的产生机理

当高功率激光聚焦液体中,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,击穿区域腔体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,高压波前与腔体脱离。此时在液体内部形成空腔,即“空泡”,激光空泡将在液体静压力及腔体内压力的共同作用下进行脉动运动。通常,空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。由于激光参数的多样性和可调性,激光空泡现象非常丰富。可以通过调节激光参数来自由控制空泡的产生时间、大小及位置,激光空泡半径可以从几十微米到几毫米,这为观测带来方便。

Lord Rayleigh^[13]最早开展了空泡动力学的理论研究。理想球形空泡的运动方程为

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{P_R - P_\infty}{\rho}, \quad (1)$$

式中 P_R 为空泡内压强, P_∞ 为液体无穷远处压强, ρ 为液体的密度, R 为空泡半径, \dot{R} 为空泡壁运动速度, \ddot{R} 空泡壁运动加速度。当 $P_\infty > P_R$ 时,空泡溃灭,当 $P_R > P_\infty$ 空泡膨胀。

激光空泡与水下药包爆炸空泡存在相似性,这是由于两者都是因为内外瞬间产生的压力差急剧扩大而产生的,同时两者对外界的作用及其本身的脉动过程相似。虽然能量上存在着差异,但是可以通

过产生空泡的尺寸来对应激光能量和实药爆炸能量,因此可以利用激光空泡研究水下爆炸空泡相关特性。

2.2 空泡与自由液面的相互作用

Gibson等^[14,15]通过实验发现当空泡出现在自由液面附近时,自由液面为空泡提供了一个常压的边界条件。在不考虑浮力的情况下,空泡在自由液面附近将受到 Bjerknes 力影响,即流体中脉动的流体在同相振荡时相互吸引,反相振荡时相互排斥。从而使空泡脉动过程中,在自由液面附近产生一个由自由液面内部射出的射流。

因为激光空泡与水下实药爆炸空泡的能量存在差别,产生的空泡尺寸也存在差异,为了利用激光空泡研究近自由面水下爆炸特性,定义空泡泡心到自由液面之间的无量纲距离 γ ($\gamma = L/R_{\max}$, L 为自由液面离泡心的距离, R_{\max} 为最大泡半径)。当空泡与自由液面的距离与空泡最大半径比值在一定范围内,空泡脉动过程中将会产生水豕现象。通过仿真实验,可以得到无量纲距离(对激光空泡在自由液面附近运动情况的数值仿真图(图1)。由图1可知,当泡心与自由液面距离的减小,自由液面将明显产生与空泡运动方向相反的水柱,并且水柱的高度随之增高。

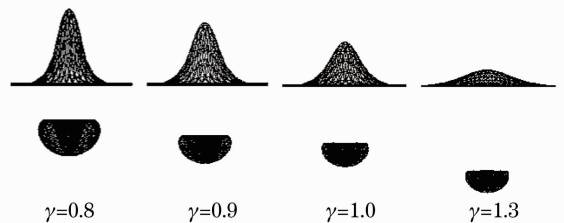


图1 激光空泡的运动特征

Fig. 1 Movement characteristic of laser-generated bubble

3 实验系统

本文利用强脉冲激光产生空泡的方法,设计了一套激光空泡与自由液面之间相互作用的高速摄像实验系统。通过改变激光能量参数和空泡与自由液面之间的距离参数,拍摄空泡的运动情况和水豕现象,总结空泡在自由液面的运动规律。

实验系统如图2所示,采用固体 Nd:YAG 激光器,激光脉冲宽度为 8 ns,波长为 1064 nm,激光能量控制在 450 mJ。利用 NIM-E1000 型硅光二极管激光脉冲能量计测量激光器的能量。发射的激光脉冲首先经过凹透镜扩束,然后经过凸透镜组形成平行光,再经过消像差非球面凸透镜组聚焦,通过水槽的增透

玻璃窗口聚焦到水中,形成激光空泡。水槽的尺寸为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$,实验采用温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水。采用 FASTCAM SA1.1 型高速相机观察激光空泡对自由液面的影响,相机放置于水槽的侧方,垂直于激光进入水槽的方向,以使其方便观察空泡脉动时在液面产生的水冢现象。FASTCAM SA1.1 型高速相机最高可以以 $6.5\times 10^5\text{ frame/s}$ 的速率拍摄,但是

成像的画幅较小,不利于拍摄水冢现象,因此本文实验以 $6\times 10^4\text{ frame/s}$ 的速率拍摄激光空泡在水面附近的运动情况,并存入计算机进行处理。在高速相机的对面用白光照明光源。激光器置于升降平台上,通过调节平台高度,控制激光空泡与水面之间的距离。

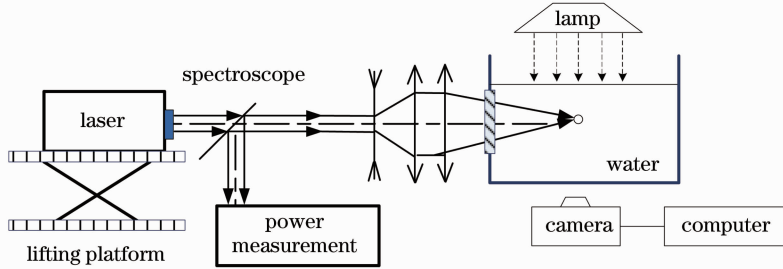


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental arrangement

4 实验结果与讨论

本文实验研究的内容是当改变空泡泡心到自由液面之间的无量纲距离 γ ,空泡与自由液面相互作用的变化情况。通过调整激光器升降平台改变 γ 值,利用高速相机记录不同 γ 值情况下的水下空泡脉动和水冢情况。通过大量实验总结发现,不同的无量纲距离 γ 下,激光空泡和自由液面的运动形态可以归纳为以下 5 种不同情况,每种情况选取一个

展开分析。

1) 无量纲距离 γ 的范围 $0\sim 0.6$

如图 3 所示,激光击穿点与水面的距离非常近, $L\approx 0.977\text{ mm}$,空泡可以达到的最大半径 $R_{\max}\approx 3.320\text{ mm}$,无量纲距离 $\gamma=0.29$ 。在 $t=0.083\text{ ms}$ 时,由于击穿点离自由液面非常近,在激光空泡产生的一瞬间就把自由表面击碎,向水面外溅射出水雾。在 $t=0.182\text{ ms}$ 时,激光空泡达到最大半径,此时空

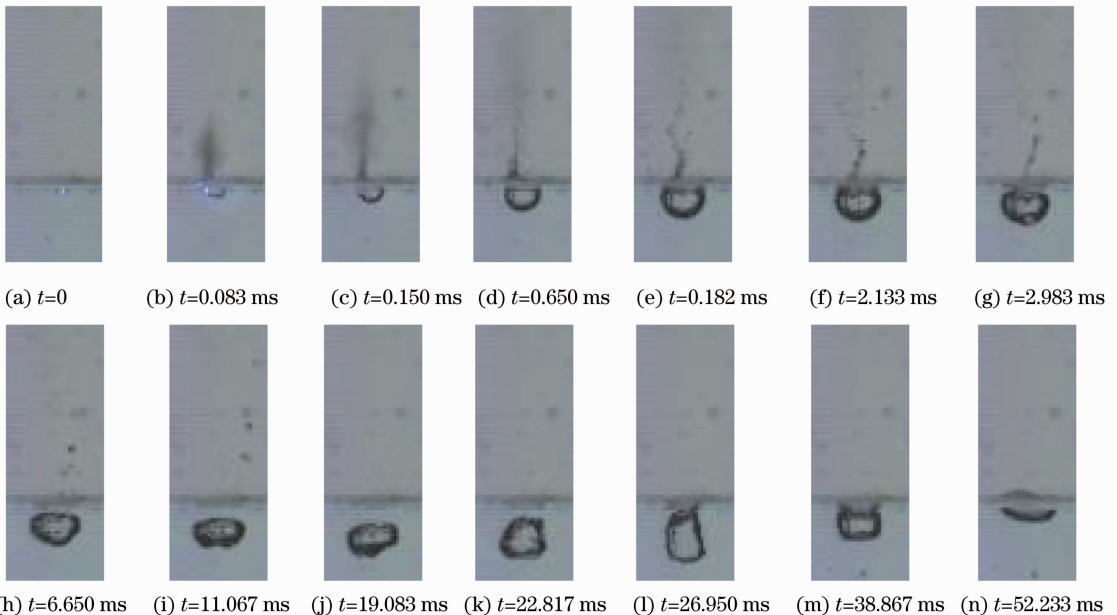


图 3 不同时刻 $\gamma=0.29$ 的水冢现象

Fig. 3 Plume of water at different time when $\gamma=0.29$

泡上部分与自由液面外界空气相通,使空泡内部的压强趋于与外部相同,空泡下部分膨胀至最大半径。水面雾化气泡逐渐消失,出现零星小气泡向向外飞溅。在 $t=6.650$ ms 时,水面基本没有向外溅射的水珠,空泡背离液面向下运动,但是没有出现空泡典型的脉动现象,这是由于在空泡产生时刻内部与外界空气相同,空泡内外压强一致。在随后的时间中,由于浮力的影响,空泡最后浮出自由液面。这种无量纲距离情况下没有形成明显的水冢现象。

2) 无量纲距离 γ 的范围 0.6~1.4

如图 4 所示,激光击穿点与水面距离 $L \approx 1.953$ mm,激光空泡的最大半径 $R_{\max} \approx 2.343$ mm,无量纲距离 $\gamma = 0.83$ 。从图中可以观察到空泡在 $t =$

0.133 ms时空泡达到最大值,此时自由液面出现凸起现象,同时空泡上部被吸入自由面,形状发生变化。在 $t=0.167$ ms 时,观察到空泡内部向下的射流,空泡的整个运动趋势时背离自由液面的。在 $t=0.283$ ms 时,空泡第一次溃灭结束,水面此时的小水柱更加明显。在 $t=0.583$ ms 时,空泡第二次溃灭结束时,水柱出现分支,存在向四周扩散的水柱和垂直向上的中心水柱。在 $t=4.600$ ms 时,空泡基本消失,水面水柱的分支渐渐消失,中心水柱更加明显。在 $t=18.950$ ms 时,水柱主峰达到最高值 48.632 mm,水柱最大宽度大约是 5.078 mm。此后水柱将脱离水面,变成单个小水珠继续向上运动。整个过程中溅起的小水珠最高可以达到大约 750 mm。

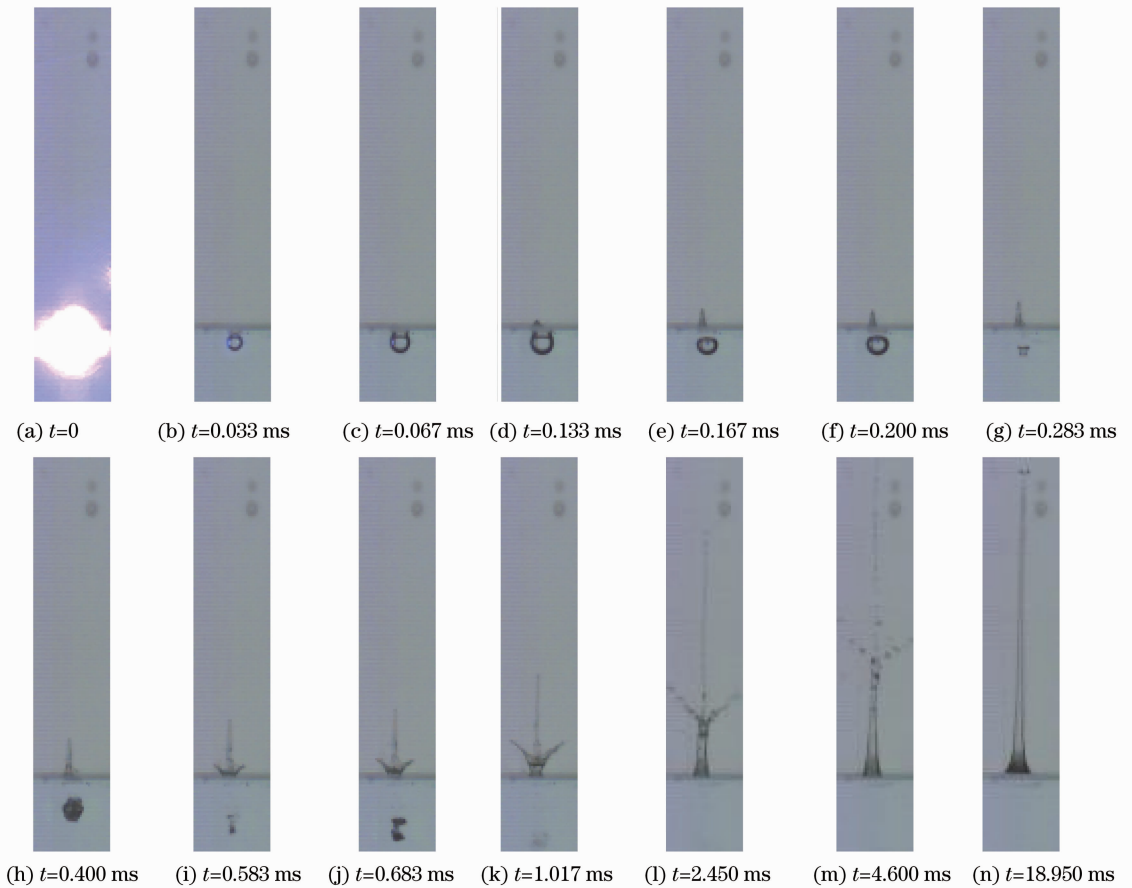


图 4 不同时刻 $\gamma=0.83$ 的水冢现象

Fig. 4 Plume of water at different time when $\gamma=0.83$

3) 无量纲距离 γ 的范围 1.4~2.0

如图 5 所示,激光击穿点与水面距离 $L \approx 4.102$ mm,激光空泡的最大半径 $R_{\max} \approx 2.344$ mm,无量纲距离 $\gamma = 1.75$ 。从图中可以到空泡产生后在整个脉动过程中,是背离自由液面向下运动。在 $t=0.167$ ms 时,空泡达到最大半径。在 $t=0.333$ ms 时空泡第一次脉动周期结束。在 $t=0.417$ ms 时,可以

观察到空泡内部产生向下的射流。在空泡脉动结束后 $t=1.417$ ms 时,水面才开始出现凸起现象。在随后的时间观察到了一个明显的水冢现象。在 $t=17.583$ ms 时,中心水柱达到最大值约为 13.477 mm,随后水柱顶峰将分离出单个水珠继续向上运动,水柱最大宽度大约是 4.687 mm。

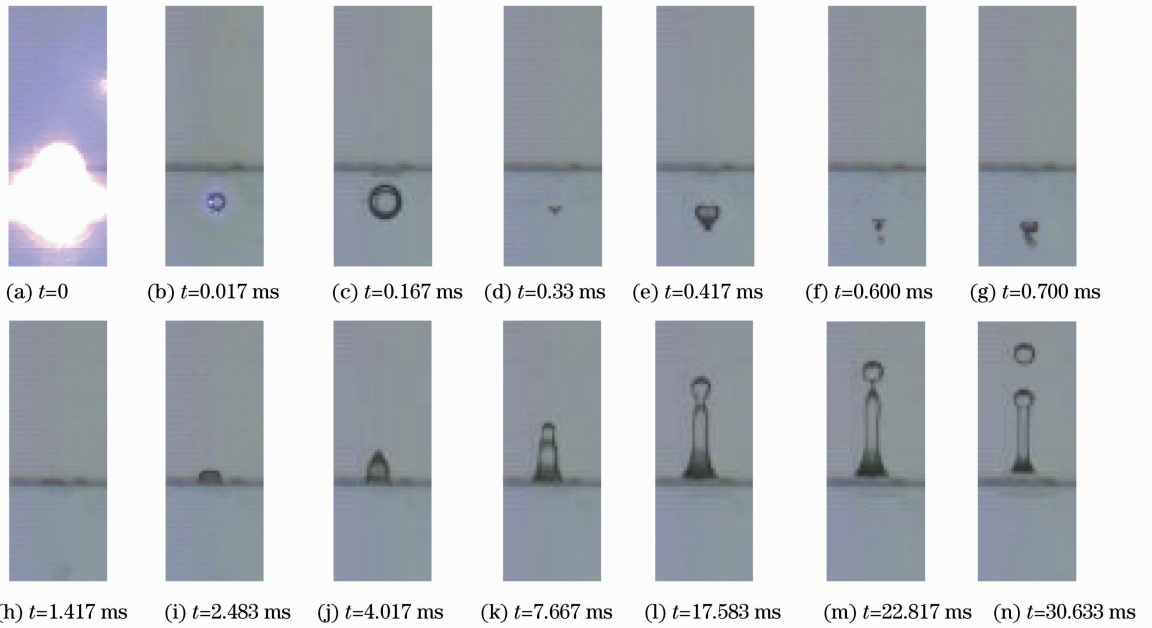


图 5 不同时刻 $\gamma=1.75$ 的水冢现象

Fig. 5 Plume of water at different time when $\gamma=1.75$

4) 无量纲距离 γ 的范围 2.0~2.6

如图 6 所示, 激光击穿点与水面距离 $L \approx 5.078 \text{ mm}$, 激光空泡的最大半径 $R_{\max} \approx 2.343 \text{ mm}$, 无量纲距离 $\gamma=2.17$ 。这种情况下的激光空泡离自由表面的距离较远, 在空泡的整个膨胀溃灭过程中水面均没有出现水冢现象。自由液面对空泡脉动过程的影响比较小。在 $t=0.550 \text{ ms}$ 时, 空泡第二次膨胀的过程中可以观察到明显向下的射流。在 $t=$

3.717 ms 时, 水面才出现凸起现象。随后中心水柱继续上升, 达到最大高度 2.734 mm 后, 凸起水面部分开始下塌, 没有出现图 5 所示向上溅出的水珠, 凸起部分最大宽度为 4.492 。

5) 无量纲距离 γ 的范围 2.6~3.0

如图 7 所示, 激光击穿点与水面距离 $L \approx 6.641 \text{ mm}$, 激光空泡的最大半径 $R_{\max} \approx 2.441 \text{ mm}$, 无量纲距离 $\gamma=2.72$ 。同图 6 观察到的现象一样, 空泡

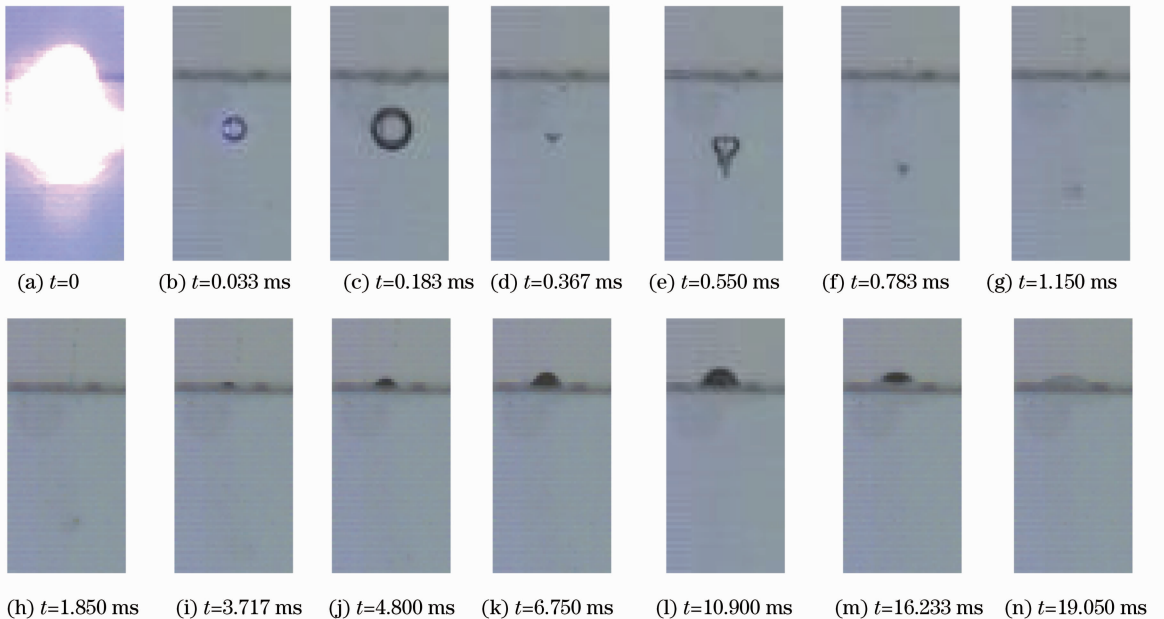


图 6 不同时刻 $\gamma=2.75$ 的水冢现象

Fig. 6 Plume of water at different time when $\gamma=2.75$

背离自由液面向下运动。水下到 $t = 5.983 \text{ ms}$ 时才出现微微鼓起的现象,最大高度大约为 0.586 mm 。

当无量纲距离 $\gamma > 3$ 时,空泡与自由液面之间将观察不到水冢现象,它们之间的相互作用非常弱。

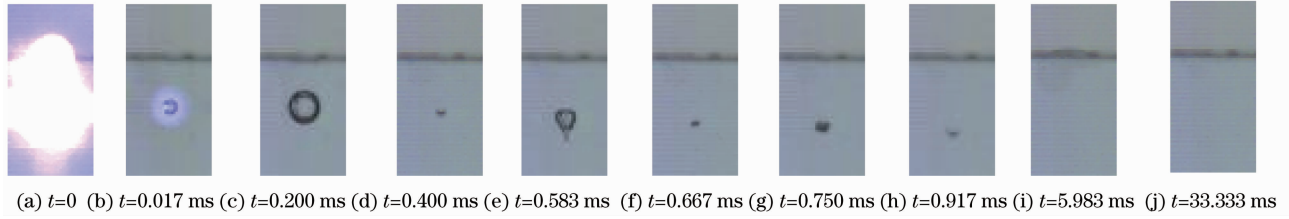


图 7 不同时刻 $\gamma = 2.72$ 的水冢现象

Fig. 7 Plume of water at different times when $\gamma = 2.72$

根据以上 5 个典型的无量纲距离条件下的实验结果,发现激光空泡脉动过程和自由液面的运动形态有着很大的区别。实验总结规律如下:

此时空泡半径变化比较大。当 $\gamma > 0.6$ 时,空泡半径没有明显变化。

1) 如图 8(a)所示,在激光能量一定的条件下,水下产生空泡的最大半径不受无量纲距离 γ 的改变而影响,其空泡半径基本不变。但是当 $\gamma \leq 0.6$ 时,即击穿点基本就在水面的情况下,由于空泡上部基本与空气相同,空泡膨胀过程中大量外界空气进入,

2) 实验结果表面水下激光空泡脉动过程受到 γ 的影响比较明显,随着 γ 值的增加,空泡脉动周期变长。空泡第一次溃灭时间与 γ 之间的关系如图 8(b)所示。当 $\gamma \leq 0.6$,由于空泡产生后直接与外界空气接触,空泡内外不存在明显的压力差,所以空泡脉动过程没有发生。

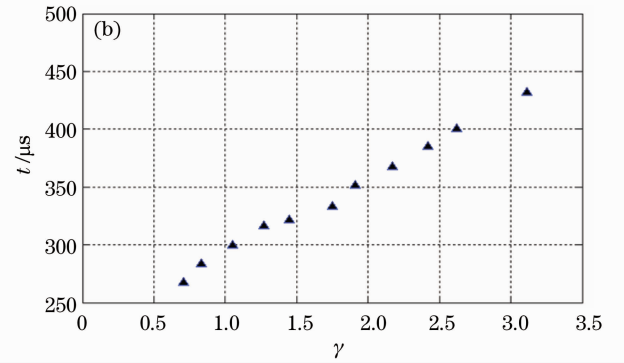
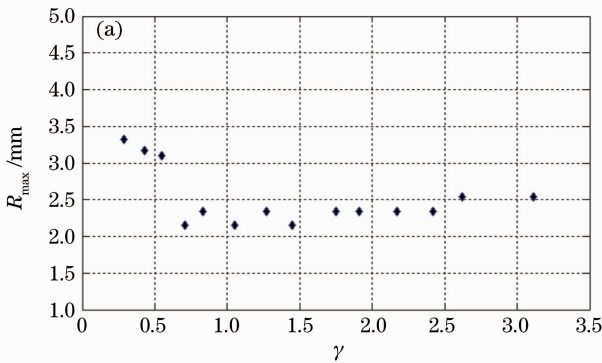


图 8 不同无量纲距离下空泡脉动情况。(a)空泡半径;(b)第一次溃灭时间

Fig. 8 Bubble motion for different dimensionless distances. (a) Radius of bubble; (b) time of the first bubble collapse

3) 无量纲距离的取值决定着自由液面水冢现象的发生和状态变化。当 $\gamma \leq 0.6$ 时,由于击穿点离水面很近,造成水面破碎。没有出现水柱,不能观察到稳定的水冢现象。当 γ 取值范围在 $0.6 \sim 3.0$ 时,自由液面水冢现象比较稳定。但是在这个取值范围内水冢存在类别差异,例如取值为 $0.6 \sim 1.4$ 时,自由液面除了有一个主水柱外,还存在向四周扩散的侧水柱; γ 取值为 $1.4 \sim 2.0$ 时,自由液面只出现一个背离液面的冲天水柱,水柱顶部在到达最大高度后会向外溅出小水珠; γ 取值为 $2.0 \sim 2.6$ 时,水面出现类似一个小山丘的凸起水柱,达到最大高度后向下坍塌,不会向外溅出水珠; γ 取值为 $2.6 \sim 3.0$ 时,空泡溃灭结束后,自由液面有微小凸起现象发生; γ 取值大于 3.0 时,自由液面观察不到水冢现象。

4) 水冢现象的出现时间同无量纲距离 γ 的相互关系如图 9(a)所示。击穿点离水面越远,水冢出现的时间就越晚。当 γ 小于 0.6 时,击穿一瞬间水面就被击碎;当 γ 取值为 $0.6 \sim 1.4$ 时,曲线平缓上升,时间变化较小;当 $\gamma > 1.4$ 时,时间值变化的较快,水冢现象都是在空泡完成多次膨胀溃灭后才发生的。

5) γ 取值为 $0.6 \sim 3.0$ 时,自由液面将产生稳定的水柱。如图 9(b)所示,水柱的最大高度 h_{\max} 随着无量纲距离的减小而增大。当 γ 取值 $0.6 \sim 2.0$ 时,曲线陡峭,说明水柱的最大高度变化趋势明显;当 γ 取值大于 2.0 时,水柱高度变化平缓;当 γ 取值大于 3.0 时,观察不到水面凸起的现象了。通过实验发现水柱底部最大宽度没有受无量纲距离的变化影响,基本上是保持不变的,且与空泡的直径最大值差不多。

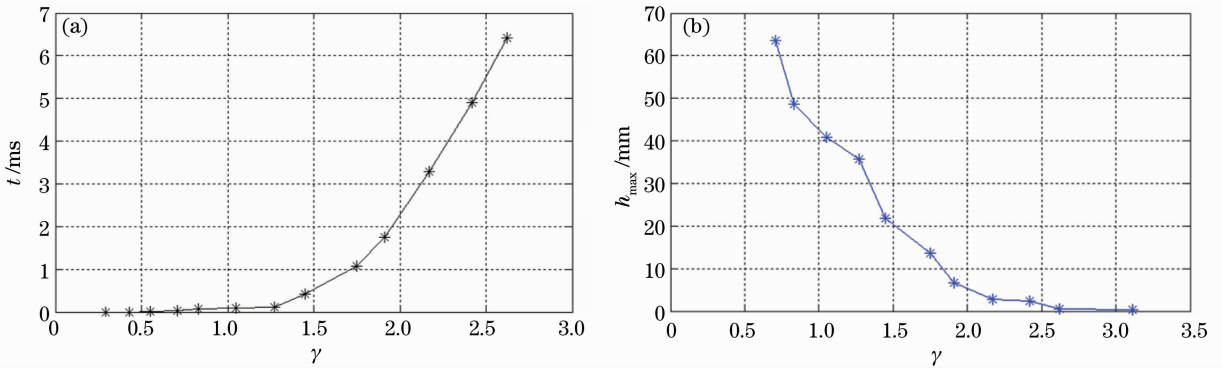


图 9 不同无量纲距离下水冢情况。(a) 出现时间;(b) 最大高度

Fig. 9 Plume for different dimensionless distances. (a) Time of occurrence; (b) the maximum height

5 结 论

本文采用激光产生空泡技术和高速摄像系统构建了激光空泡运动特性的观测实验平台,开展了激光空泡与自由液面相互作用的实验研究,完成了大量实验数据的整理和分析。实验发现,空泡在水下脉动情况、自由液面的水冢现象受无量纲距离 γ 的影响。空泡与自由液面的距离越近,即 γ 值约小,空泡的脉动周期越小,说明空泡的运动特性与其距水面的距离密切相关。当 γ 取值为 $0 \sim 3.0$ 时,水面将会观察到水冢现象;当 γ 取值为 $0.6 \sim 3.0$ 时,自由水面将会形成稳定向上凸起的水柱,水柱的最大高度随 γ 值的增大而变小。研究结果可为水下爆炸空泡在近自由液面附近的运动特性研究提供实验参考依据。

参 考 文 献

- 1 C. B. Schaffer, N. Nishimura, E. Mazur. Thresholds for femtosecond laser-induced breakdown in bulk transparent solids and water [C]. *SPIE*, 1998, **3451**(1): 2~8
- 2 E. A. Brujan, K. Nahen, P. Schmidt *et al.*. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near an elastic boundary [J]. *Fluid Mech.*, 2001, **433**: 251~281
- 3 T. B. Benjamin, A. T. Ellis. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries[J]. *Phil. Tran. A*, 1966, **260**: 221~240
- 4 He Yousheng, Liu Ye, Zhao Gang. A study on pulsation of two-dimensional cavitating flow [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, **29**(1): 1~7
何友声, 刘 桦, 赵 岗. 二维空泡流的脉动性态研究[J]. *力学学报*, 1997, **29**(1): 1~7
- 5 R. H. Smith, R. B. Mesler. A photographic study of the effect if an air bubble on the growth and collapse of a vapor bubble near a surface[J]. *Trans. ASME. J. Basic Engng.*, 1972, **94**(4): 933~940

- 6 M. P. Brenner, D. L. Lohse, T. F. Dupont. Bubble shape oscillations and the onset of sonoluminescence [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(5): 954~957
- 7 A. Vogel, W. Lauterborn, R. Timm. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary [J]. *J. Fluid Mech.*, 1989, **206**: 299~338
- 8 A. Philipp, W. Lauterborn. Cavitation erosion by single-laser produced bubbles [J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, **361**: 75~116
- 9 Zong Siguang, Wang Jiang'an. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown [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
- 10 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
- 11 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo. Erosion characteristics of laser bubble collapse in the vicinity of a solid boundary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 885~892
宗思光, 王江安, 马治国. 壁面附近激光空泡溃灭的空蚀特性 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 885~892
- 12 Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang. 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. 激光空泡在刚性壁面附近空蚀特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(2): 298~302
- 13 L. Rayleigh. On the pressure developed in liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. *Philos. Mag.*, 1917, **34**: 94~98
- 14 D. C. Gibson. Cavitaion adjacent to plane boundaries [C]. Sydney: Proceeding of 3rd Conference on Hydraulic Fluid Mechanics, 1968. 210~214
- 15 G. L. Chahine. Interaction between an oscillating bubble and a free surface [J]. *J. Fluids Engng.*, 1977, **99**(4): 709~716

栏目编辑: 宋梅梅