

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.06.005

# 激光空泡诱导自由面水花动力学特性研究

王广航<sup>1,3</sup>, 王傲<sup>2,3</sup>, 王静竹<sup>3\*</sup>, 王一伟<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 100049, E-mail: wangjingzhu@imech.ac.cn;  
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;  
3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 空泡与自由面相互作用涉及自由面的强非线性变化和空泡非定常演化, 是前沿的基础科学问题。该文通过实验观测和理论建模相结合的方式, 分析了激光空泡诱导自由面水花动力学特征。在实验中, 利用脉冲激光在水中聚焦的光学击穿原理生成空泡, 建立了基于物距补偿原理的两相联合观测的实验方法, 可以同时清晰获得自由面水花和水下空泡的成像。在理论建模方面, 借鉴光滑粒子建模(SPH)思想, 建立了自由面水花演化动力学模型, 能够分析空泡通气膨胀过程中自由面水花的演化过程, 与实验观测结果吻合较好。

**关键词:** 激光空泡; 水花动力学; 水花闭合

**中图分类号:** O359.1

**文献标志码:** A

## Study on dynamics characteristics of splash sheet generated by laser-induced cavitation bubble

WANG Guang-hang<sup>1,3</sup>, WANG Ao<sup>2,3</sup>, WANG Jing-zhu<sup>3\*</sup>, WANG Yi-wei<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The interaction between a cavitation bubble and the free surface, involving the nonlinear deformation of the free surface and the unsteady evolution of a cavitation bubble, is a frontier scientific issue in the field of the fluid mechanics and bubble dynamics. In this paper, experimental observation and theoretical analysis are combined to investigate the dynamic characteristics of the splash sheet induced by an expanding cavitation bubble. In the experiment, the cavitation bubble is generated by focusing the pulsed laser in water due to the optical breakdown principle. An experimental setup based on the object distance compensation method is designed to obtain images of the splash sheet and the cavitation bubble clear simultaneously. To analyze the evolution of the splash sheet with the expansion of the cavitation bubble, a dynamic model is developed referring to the

**收稿日期:** 2021-10-30(2021-11-19 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金(11802311、12122214)、中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y201906)

**作者简介:** 王广航(1997-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生.

**Received:** October 30, 2021 (**Revised** November 19, 2021)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(11802311、12122214) and Excellent Member (Y201906) Project of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences

**Biography:** WANG Guang-hang (1997-), Male, Doctor.

idea of Smooth Particle Hydrodynamics model (SPH). The results obtained by the analytical model show good agreements with experimental observation.

**Key words:** Laser-induced cavitation bubble; Splash dynamics; Splash closure

## 引言

当液体局部压力瞬间低于其饱和蒸汽压, 会发生相变形成空化<sup>[1]</sup>, 这一现象普遍存在于自然界及工程领域中<sup>[2-4]</sup>。空泡非球形演化和溃灭过程, 会生成高速射流和冲击波等, 包含了相变传质、非稳态及可压缩等复杂因素。当空泡与自由液面相互作用时, 由于自由面的惯性约束非常小, 进一步涉及到自由面的非线性变形、破碎及飞溅等现象, 是流体力学和空泡动力学研究的关键点。在实验研究方面, 生成空泡的方式主要有2种: 电火花放电<sup>[5]</sup>和激光聚焦<sup>[6-7]</sup>。其原理都是利用瞬时的高能量将液体击穿, 形成高温高压的等离子体, 使得周围液体汽化形成空泡, 在内外压强差作用下, 产生了空泡的振荡现象。

Gibson<sup>[8]</sup>第一次通过实验观测到空泡脉动下自由面的变形行为。随后很多学者也通过实验观测和数值计算研究空泡与自由面的相互作用<sup>[9-11]</sup>, 其中自由液面变形更加复杂<sup>[12]</sup>。当空泡中心的初始位置离自由液面较近时, 在空泡振荡过程中, 自由液面会出现较大的起伏, 导致界面飞溅, 形成透明水层、水柱、细射流和粗射流等。当离液面距离较远时, 自由液面可能发生小幅度扰动<sup>[13-15]</sup>。随着两者距离继续扩大, 空泡与液面相互作用趋近于0。通过实验研究, 哈尔滨工程大学流固耦合技术研究团队<sup>[14]</sup>利用电火花生成空泡, 根据自由液面的演化特征, 提出了四种典型现象: 透明水层及水柱生成、不稳定冠状结构、稳定冠状结构和非冠状结构。其中透明水层就是本论文中关注的自由面水花, 其主要特点在于, 在空泡快速膨胀过程中, 自由面获得了极高速度向外飞溅, 形成透明水花, 使得空泡内部与外界空气连通。随着空泡继续膨胀, 透明水层在进气流动作用下从两侧向中心收缩。然后在重力作用下, 水花开始下落, 并穿透空泡的下表面。Thoroddsen等<sup>[16]</sup>认为, 生成的水花发展前期是由惯性力主导的, 随后的闭合是在腔内低压和表面张力的共同作用下完成的。Marston等<sup>[17]</sup>认为自由液面下方的空泡快速膨胀会产生吸气压力, 是导致水层闭合的最主要因素。同时, 他们研究了不同空气压力下透明水层的运动规律, 研究表明, 周围压力的减小, 会导致水层空腔体积增大, 水层厚度变薄, 水层闭合时间延长。通过对实验数据分析, 他们发现水层闭合时间与周围气压的关系是 $t-p^{-1/2}$ , 此外, 他们对水层厚度和韦伯数的关系分析表明, 表面张力效

应在水层闭合中的作用很小。由上所述, 水下空泡的体积振荡引起的吸气压力是水花闭合的最主要因素, 但是在Marston等<sup>[17]</sup>工作中并没有考虑两者的耦合作用, 这是因为激光诱导生成的空泡尺寸比较小, 在实验观测过程中需要使用大倍率镜头, 由于气/液光程差的影响, 导致相机不能同时对焦自由面上水花和水下空泡, 即在图片上两者不能同时清晰成像。

在本研究中, 基于脉冲激光水下聚焦技术及物距补偿原理的思想, 建立了两相联合观测的实验方法。通过在空气一侧加入有机玻璃板进行物距补偿, 保证自由面上下两侧可以同时高速摄影机中清晰成像, 进而分析自由面与空泡的强耦合作用。而且, 参考光滑粒子建模思路, 建立了自由面水花受力与运动模型, 分析了自由面飞溅水花演化及闭合规律。

## 1 两相联合测量实验方法

前人实验中通常使用长焦镜头拍摄电火花空泡和自由面变形。但相比于电火花空泡, 激光空泡尺寸较小, 最大半径只有几毫米, 甚至几微米。若使用长焦镜头进行观测, 会捕捉不到细节信息。因此, 在拍摄过程中需要使用微距镜头。但由于其景深较小, 从而导致水上和水下研究对象不能同时对焦。

针对这一问题, 本研究提出了基于物距补偿原理的两相联合观测方法。即在空气一侧放置一块玻璃板来补偿气/液两相的光程差。具体光路图如图1所示。图1(a)展示的是没有加玻璃板补偿之前的光路图, 可以看到水上与水下在相机中的成像不在同一平面内, 这就是水上和水下不能同时对焦的原因。当在空气一侧放置补偿用的玻璃板之后, 水上和水下的成像在同一平面内, 即说明两相可以同时对焦, 如图1(b)所示。

图2为基于物距补偿法的实验布置示意图。实验系统主要包括脉冲激光器(Nd: YAG, 波长1 064 nm, 脉宽10 ns, 能量750 mJ, Spectra Physics Ltd., USA)、高速摄影(Phantom V1612, Vision Research)、同步仪(BNC, Model:575-8C)、高功率LED光源(CLL-4800TDX, Falcon Eyes Ltd.)及微距镜头(SIGMA 105 mm F2.8 EX DG MACRO OS)等。

实验中, 扩束5倍的脉冲激光通过水中的离轴反射镜聚焦在水中, 由于光击穿原理产生高温高压等离子体, 汽化形成最初的空泡。高速摄影机与脉冲激光器通过同步仪连接, 保证激光诱导空泡产生的同时高速摄影工作。

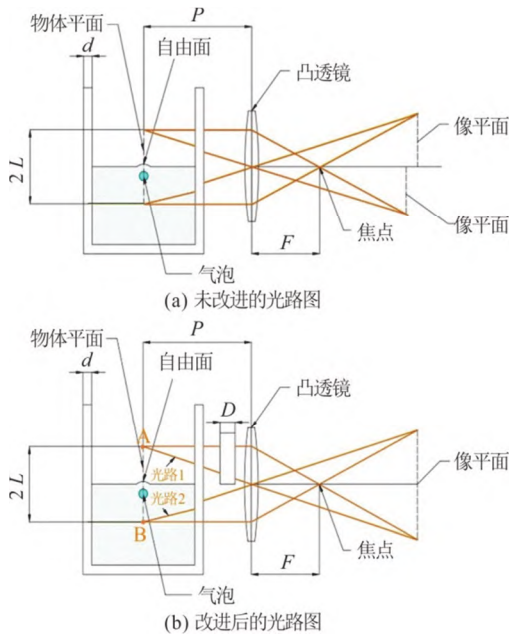


图1 (网上彩图) 基于物距补偿原理的两相联合观测方法的光路图  
Fig.1 (Color online) Optical path diagram of two-phase joint observation based on the principle of object distance compensation

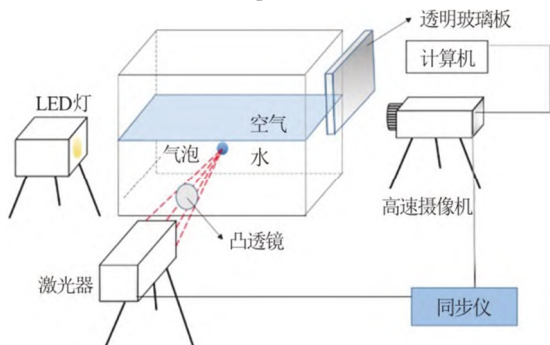


图2 (网上彩图) 基于物距补偿原理的实验布置示意图  
Fig.2 (Color online) Schematic diagram of experiment layout based on the principle of object distance compensation

## 2 自由面水花动力学模型

当空泡生成位置与自由面十分接近时,在初始空泡的膨胀作用下,自由液面向上运动形成冠状水层。这时空泡与外界大气连通。随着空泡继续膨胀,空泡内部压强低于大气压时,外部空气进入到空泡内部,形成通气空泡。随后水花向中心线运动。

本文借鉴了光滑粒子建模思想,建立了空泡膨胀作用下水花动力学模型。将自由液面喷射出的水花的发展看成是一系列离散的粒子组抛射的过程,如图3所示。通过对自由面水花进行受力分析可知,其主要受到重力、表面张力、文丘里吸力及空气阻力的共同作用。



图3 (网上彩图) 基于光滑粒子模型思想的水花动力学模型分析示意图  
Fig.3 (Color online) Analysis diagram of splash dynamics model based on Smooth Particle Hydrodynamics model

基于牛顿运动学第二定律,可以获得水花中粒子 $P_j$ 的力平衡方程

$$\sum F = dm \cdot \frac{dv}{dt} = F_\sigma + G + F_v + F_d \tag{1}$$

式中: $dm$ 为单位长度的质量, $dm=Hdl$ , $H$ 为冠状水层的厚度,方程右边的力分别为表面张力 $F_\sigma$ ,重力 $G$ ,文丘里吸力 $F_v$ 以及空气阻力 $F_d$ 。其中表面张力指向水层曲率中心,各力可表示如下

$$F_\sigma = \frac{2\sigma}{\kappa} dl \tag{2}$$

$$F_d = -\frac{1}{2} C_d \rho_a dl \|v_j\| v_j \tag{3}$$

$$F_v = -\frac{1}{2} K \rho_a v_a^2 dl_1 \tag{4}$$

式中: $\sigma$ 为表面张力系数, $\kappa$ 为曲率, $C_d$ 为阻力系数, $K$ 为可调参数,用以平衡理论模型与实验结果, $v_a$ 为空腔进气速度,可以通过空泡体积膨胀率表示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 自由面水花实验观测

图4是基于物距补偿原理建立的两相联合观测实验方法的拍摄效果,实验使用的高速摄像机拍摄帧数为88 kfps-110 kfps,曝光时间为300 ns。

观察可知,与物距补偿前的拍摄效果相比,采用本文所提出的基于物距补偿原理建立的两相联合观测的实验方法,可以同时清晰地观察到自由面变形和空泡振荡图像,证明了本文所提出的方法是切实可行的。

分析实验观测结果,根据空泡通气后水花是否能完全闭合,将自由面水花分成两大类:(a)不闭合水花和(b)闭合水花,如图5所示。在不闭合水花工况中,水花保持和水平面垂直,没有闭合趋势。在闭合水花工况中,可看到生成的透明水花在进气流作用下,向中心线运动,最终实现闭合。

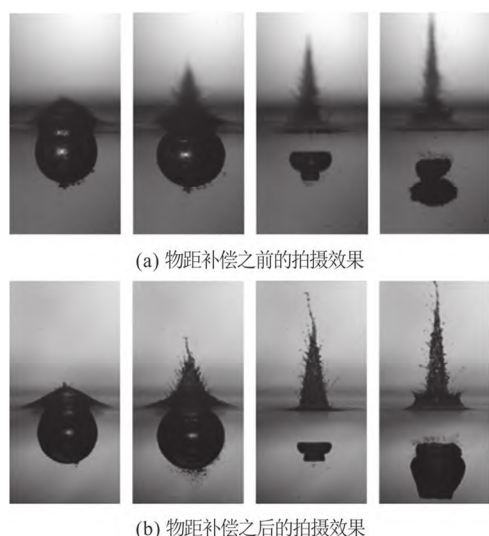


图4 基于物距补偿原理建立的两相联合观测实验方法的拍摄效果

Fig.4 The photographing effect of the experimental method of two-phase joint observation based on the principle of object distance compensation

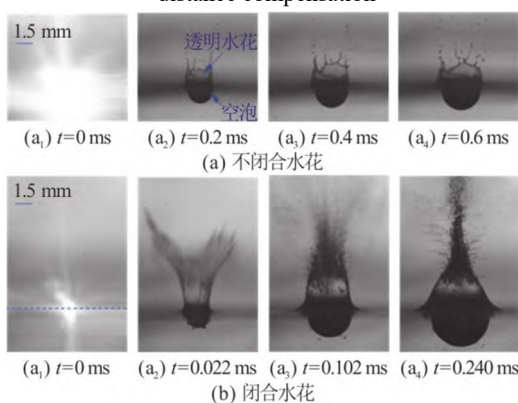


图5 空泡膨胀作用下自由面水花类型

Fig.5 Patterns of splash sheet induced by the expansion of laser-induced cavitation bubble

### 3.2 水花动力学模型验证

图6和图7分别为实验观察到的不闭合水花和闭合水花工况与理论模型导出的水花对比图, 每个时刻的图像左侧为实验拍摄图, 右侧为理论模型的计算结果。

观察图6不闭合水花工况可知, 空泡瞬间破裂与外界空气连通, 水层近似垂直于自由面, 水层曲率近似为0, 可以认为表面张力和文丘里吸力保持平衡, 然后在重力的作用下, 水花慢慢回落, 但并未出现闭合趋势。

观察图7闭合水花工况可知, 空泡瞬间破裂与外界空气连通, 水花在表面张力、文丘里吸力、重力和空气阻力的作用下向中心线运动, 逐渐闭合。

通过上述理论与实验结果对比, 认为建立的自由面水花演化动力学模型可以用于很好地分析近自由面处空泡膨胀初期阶段自由面水花演化规律。

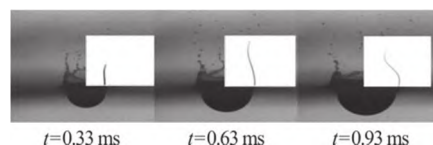


图6 不闭合水花工况: 实验与理论模型对比

Fig.6 Unsealed splash case: comparison of experimental and theoretical models

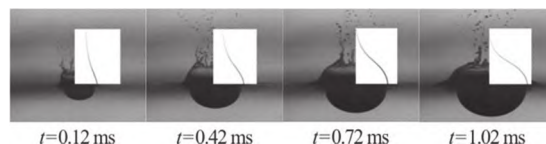


图7 闭合水花工况: 实验与理论模型对比

Fig.7 Sealed splash case: comparison of experimental and theoretical models

## 4 结论

本文采用实验与理论相结合的手段分析了激光空泡与自由面强耦合作用。在实验中, 将脉冲激光器先进行5倍扩速, 然后通过水下离轴反射镜聚焦到自由面附近处, 生成初始空泡。在其膨胀作用下, 自由面破碎形成透明的水花。为了解决水上和水上不能同时聚焦的问题, 本文提出了基于物距补偿原理的联合观测方法, 在空气一侧放置一定厚度的玻璃板, 来补偿气/液两相的光程差。第一次在实验中同时观测到了通气空泡与自由面水花的相互作用。并根据空泡通气后是否再完全闭合, 归纳了两种水花类型: 不闭合水花和闭合水花。

在理论建模方面, 借鉴了光滑粒子模型方法, 将水花的发展视为连续质点抛出的过程。然后再基于牛顿第二定律, 通过受力分析提出了水花受力与运动模型。其中, 进气流引起的动压是影响水花发展最主要的因素。本文利用空泡通气的体积变化率求得进气流的速度, 进而获得动压, 与实验观测结果对比良好。

## 参 考 文 献:

- [1] BRENNEN C E. Cavitation and bubble dynamics[M]. UK: Oxford University Press, 1995.
- [2] HUANG Y, WANG J, ABE A, et al. A theoretical model to estimate inactivation effects of oh radicals on marine vibrio sp. in bubble-shock interaction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 35: 359-368.
- [3] WANG J, ABE A, KOITA T, et al. Study of sterilization effects on marine vibrio sp. using interaction of cavitation with shock wave in a narrow water chamber[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(21): 213301.1-213301.11.

- [4] WANG J, ABE A, WANG Y, et al. Fundamental study of sterilization effects on marine *Vibrio* sp. in a cylindrical water chamber with supply of only underwater shock waves[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 541-550.
- [5] ZHANG A M, CUI P, CUI J, et al. Experimental study on bubble dynamics subject to buoyancy[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 776: 137-160.
- [6] PHILIPP A, LAUTERBORN W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 361: 75-116.
- [7] CHEN R, YU Y T, SU K W, et al. Exploration of water jet generated by Q-switched laser induced water breakdown with different depths beneath a flat free surface[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 445-453.
- [8] GIBSON D C. Cavitation adjacent to plane boundaries[C]. *Proceeding of 3rd Conference Hydraulic Fluid Mechanics*, Sydney, Australia, 1968.
- [9] OBRESCHKOW D, TINGUELY M, DORSAZ N, et al. Universal scaling law for jets of collapsing bubbles[J]. *Physical review letters*, 2011, 107(20): 204501. 1-204501. 5.
- [10] OBRESCHKOW D, TINGUELY M, DORSAZ N, et al. The quest for the most spherical bubble: experimental setup and data overview[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(4): 1503.
- [11] SUPPONEN O, OBRESCHKOW D, TINGUELY M, et al. Scaling laws for jets of single cavitation bubbles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 802: 263-293.
- [12] 张阿漫, 王超, 王诗平, 等. 空泡与自由液面相互作用的实验研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 300-312.  
ZHANG A-man, WANG Chao, WANG Shi-ping, et al. Experimental study of interaction between bubble and free surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 084701.
- [13] 李帅, 张阿漫, 王诗平. 空泡引起的皇冠型水豕实验与数值研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(19): 194703.  
LI Shuai, ZHANG A-man, WANG Shi-ping. Experimental and numerical studies on “crown” spike generated by a bubble near free-surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(19): 194703.
- [14] ZHANG S, WANG S P, ZHANG A M. Experimental study on the interaction between bubble and free surface using a high-voltage spark generator[J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(3): 0321096.
- [15] KANG Y J, CHO Y. Gravity-capillary jet-like surface waves generated by an underwater bubble[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 866: 841-864.
- [16] THORODDSEN S T, TAKEHARA K, ETOH T G, et al. Spray and microjets produced by focusing a laser pulse into a hemispherical drop[J]. *Physics of Fluids*, 2009, 21(11): 112101.
- [17] MARSTON J O, MANSOOR M M, THORODDSEN S T, et al. The effect of ambient pressure on ejecta sheets from free-surface ablation[J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(5): 61-70.