

# 激光空泡诱导自由面水花动力学特性研究

王静竹, 郭文璐, 王广航, 王一伟

(中国科学院力学研究所, 北京 100190, Email: wangjingzhu@imech.ac.cn)

**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。本研究以单空泡与自由面的相互作用为研究对象, 以理论分析与实验观测为主要研究手段, 建立了自由面约束下空泡溃灭动力学模型, 分析了近自由面空泡溃灭和运动规律, 发展了空泡运动影响下自由面大变形和飞溅的理论计算方法。

**关键词:** 激光空泡; 空泡体积变化; 水花动力学; 水花闭合

## 1 引言

当液体局部压力瞬间低于饱和蒸汽压, 会发生相变形成空化, 这一现象普遍存在于自然界及工程领域中。空泡非球形演化和溃灭过程, 生成高速射流、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, 是流体力学和气泡动力学研究的前沿。在实验研究方面, 生成空泡的方式主要有 2 种: 电火花放电和激光聚焦。其原理都是利用瞬时的高能将液体击穿, 形成高温高压的等离子体, 周围液体汽化后形成空泡, 在内外压强作用下, 进行收缩膨胀式体积振荡。

Gibson 等<sup>[1]</sup>第一次通过实验观测到气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气泡与自由面的相互作用。在气泡与自由液面相互作用过程中, 相比气泡非球形演化, 自由液面变形更加复杂<sup>[2]</sup>。当空泡中心的初始位置离自由液面较近时, 自由液面出现较大的起伏, 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>[3-5]</sup>。随着两者距离继续扩大, 气泡与液面相互作用趋近于 0。通过实验研究, 张阿漫团队<sup>[4]</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, 主要特点在于, 空泡生成初期自由面质点已经获得了极高速度向外飞溅, 形成透明水花。在气泡膨胀过程中, 气泡内部与外界空气连通。随后, 自由液面上部透明水层从两侧向中心轴收缩, 形成水柱。然后在重力作用下, 水柱开始下落, 并穿透气泡的下表面。Thoroddsen 等<sup>[6]</sup>认为, 生成的水花发展前期是由惯性力主导的, 随后在腔内低压和表面张力的共同作用下, 透明水层从两

侧向中心闭合。另外, Marston 等<sup>[7]</sup>认为自由液面下方的空泡快速膨胀会引起吸气压力,也是导致水层闭合的重要因素。同时,他们对不同空气压力下研究了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。通过对实验数据的分析发现,他们发现水层闭合时间与周围气压的关系是  $t \sim p^{-1/2}$ ,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,水下空泡的体积膨胀是水花的生长与闭合的最主要因素,但是在 Marston 等工作中并没有考虑两者的耦合作用规律,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,需要使用扩大镜头,由于气/液光程差的影响,导致相机不能对自由面和水下空泡同时对焦,也就是在照片上,自由面和水下空泡不能同时清晰成像。

在本研究中,基于脉冲激光水下聚焦,建立了空泡与自由面相互作用的实验方法,通过在空气一侧加入有机玻璃板进行折射率补偿,形成一种以折射率补偿为核心的拍摄方法,保证自由面上下两侧可以同时的高速摄影机中清晰成像,获得气泡与自由面相互作用的精细演化图像。并且借鉴光滑粒子流体力学思想,建立了自由面冠状水层受力与运动模型,分析了自由面飞溅水花演化及闭合规律。

## 2 实验方法

图 1 展示了为研究自由面约束下空泡脉动特性及自由面演化规律在实验室搭建的激光空化系统与高速摄影系统。实验中,使用 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光(波长 1 064 nm,脉宽 10 ns,电压 750V)穿过凸透镜聚焦在水缸内液体中,在高温高压等离子体的诱导下生成空泡。使用带微距镜头的高速摄影机拍摄整个实验过程,拍摄帧数为 88 kfps 至 110 kfps,曝光时间 300 ns。在相机对面位置架设一台高功率 LED 照明灯,确保有足够的光线可以照亮气泡至自由面上一定距离的空间,保证相机可以同时拍摄到空泡与自由面变形。同时使用同步仪,将高速摄影机与激光器链接,保证激光诱导空泡产生的同时高速摄影即可开始拍摄记录。为了使自由面和水下空泡同时清晰成像,在空气一侧放置玻璃板来补偿气/液的光程差。图 2 展示了光路图。

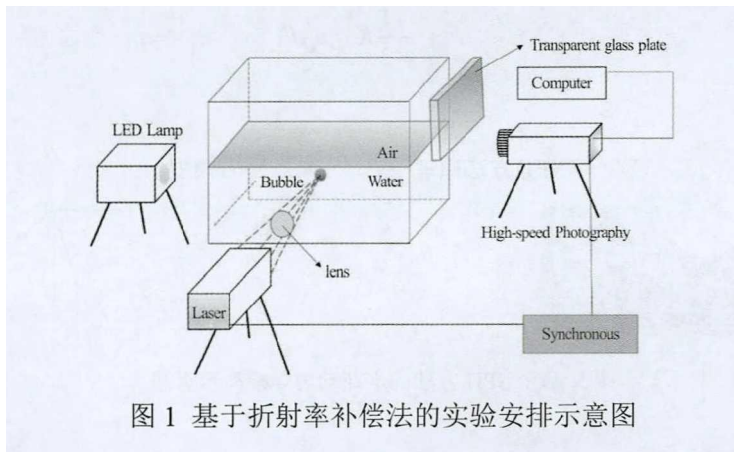


图 1 基于折射率补偿法的实验安排示意图

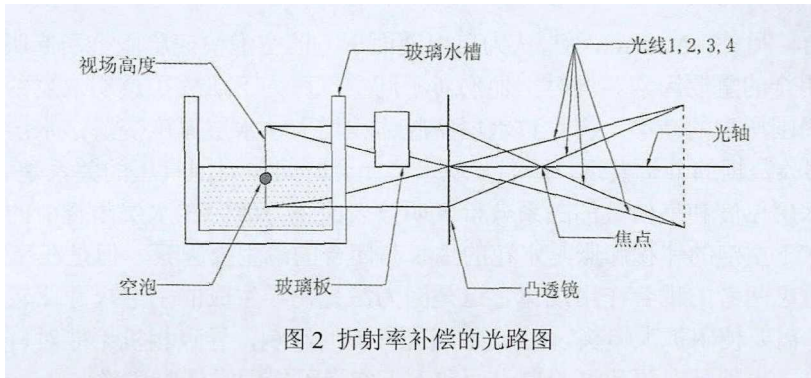


图2 折射率补偿的光路图

### 3 水花动力学模型

本文借鉴了 SPH 方法思想建立了空泡诱导生成水花的动力学模型。通过受力分析可得平衡方程：

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

式中： $dm$  是单位长度的质量， $dm = Hdl$ 。其中  $H$  是冠状水层的厚度，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  $F_d$ 。

表面张力  $F_{\sigma}$  可以表示为：

$$F_{\sigma} = \frac{2\sigma}{\kappa} dl \quad (2)$$

空气阻力即为阻碍冠状水层生长发展的力，可以简单写为：

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

文丘里吸力  $F_v$  沿冠状水层部法线方向分布：

$$F_v = -\frac{1}{2} K \rho_a v_a^2 dl_{\perp} \quad (6)$$

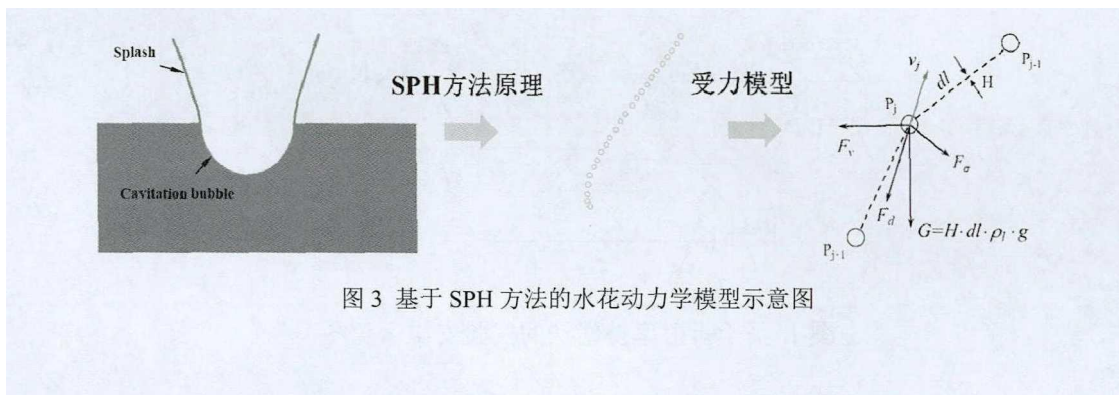


图3 基于 SPH 方法的水花动力学模型示意图

## 4 结果与讨论

图 4 展示了折射率补偿前后的实验观测对比。利用折射率补偿方法之后，自由面和水下空泡可以同时清晰成像，验证这个方法是有可行性的。

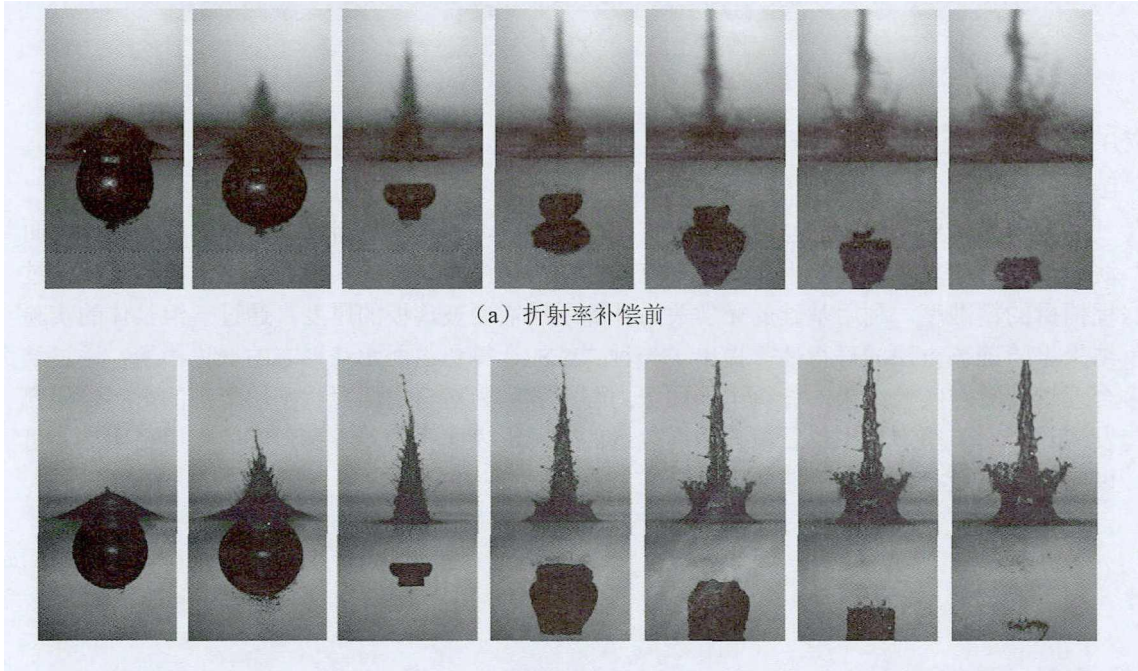


图 4 实验观测结果对比

图 5 与图 6 展示了从理论模型导出的冠状水层剖面与高速摄影图像之间的对比。每个时刻的图像左边为实验拍摄图，右边为理论模型的计算结果。通过对比可以看出，理论模型与实验结果在气泡膨胀第一周期内具有良好的一致性，并未对之后的自由面发展情形进行计算与观测。可认为该模型可以用于预测近自由面处空泡膨胀初期阶段自由面演化规律。

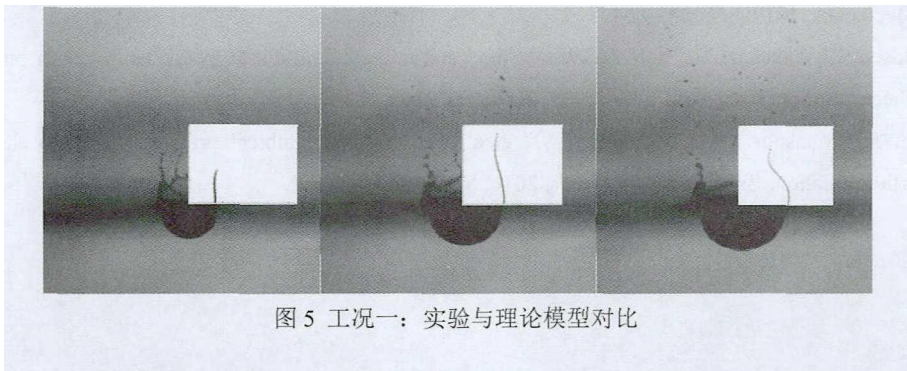


图 5 工况一：实验与理论模型对比

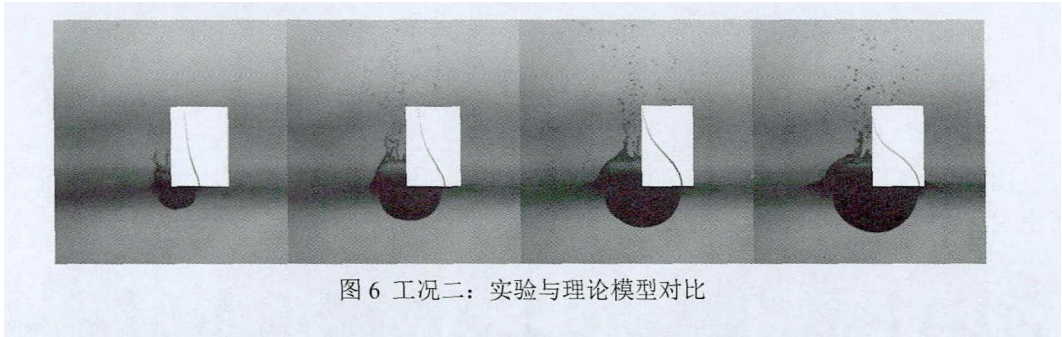


图 6 工况二：实验与理论模型对比

## 5 结论

本研究主要采用实验与理论研究相结合的手段，探讨了近自由面处空泡脉动和自由面演化规律。建立了研究自由面约束下空泡脉动与自由面变形的实验新方法，提高了实验过程拍摄的精准度。利用基础的光学关系计算了所需要玻璃板的厚度，通过一组具体的实验结果来验证该方法的可行性。提出了一种二维的计算自由面水花形态的理论模型。通过结合理论计算与实验结果，分析了表面张力与空腔吸力对自由面冠状水层形态的影响，研究发现对于空泡初生位置离自由面较远的工况，表面张力对维持形态的作用更明显，可以明显看到冠状水层在后期的闭合趋势。

## 参考文献

- 1 Gibson DC. Cavitation adjacent to plane boundaries. Sydney: Proceeding of 3rd Conference Hydraulic Fluid Mechanics, 1968: 210-214.
- 2 张阿漫, 王超, 王诗平, 等. 气泡与自由液面相互作用的实验研究. 物理学报, 2012, 61(8): 300-312.
- 3 李帅, 张阿漫, 王诗平. 气泡引起的皇冠型水花实验与数值研究. 物理学报, 2013, 62(19): 300-3105.
- 4 Zhang S, Wang SP, Zhang AM. Experimental study on the interaction between bubble and free surface using a high-voltage spark generator. Physics of Fluids, 2016, 28(3): 0321096.
- 5 Kang Y J, Cho Y. Gravity-capillary jet-like surface waves generated by an underwater bubble. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 866: 841-864.
- 6 Thoroddsen ST, Takehara K, Etoh TG, et al. Spray and microjets produced by focusing a laser pulse into a hemispherical drop. Physics of Fluids, 2009, 21(11): 112101.
- 7 Marston JO, Mansoor MM, Thoroddsen ST, et al. The effect of ambient pressure on ejecta sheets from free-surface ablation. Experiments in Fluids, 2016, 57(5): 61-70.

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

WANG Jing-zhu, GUO Wen-lu, WANG Guang-hang, WANG Yi-wei

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100190. Email: wangjingzhu@imech.ac.cn)

**Abstract:** The interaction between cavitation and free surface, involving the nonlinear deformation of free surface and non-spherical collapse of cavitation bubble, is a frontier scientific issue in fluid mechanics and bubble dynamics. In this paper, theoretical analysis and experiments are performed to investigate the interaction between laser-induced cavitation bubble and free surface. The mechanism of bubble collapse under the constraint of a free surface is obtained. The theoretical Model of the generation and closure of the splash sheet is developed.

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