

Bjerknes 力与浮力耦合作用下水下爆炸 气泡脉动载荷特性

安展逸¹, 于福临^{1,2*}, 吴凯伦¹, 吕鹏伟¹, 戴英东¹

1. 山东交通学院船舶与港口工程学院, 山东 威海 264209; 2. 威海市流固耦合动力学重点实验室, 山东 威海 264209

摘要:为研究 Bjerknes 力与浮力耦合作用对水下爆炸气泡脉动载荷特性的影响,设计一种水下爆炸气泡产生与测量试验平台,通过气泡生成装置对水下铜电极加热产生气泡,采用高速摄影机记录气泡的脉动过程,采用压力传感器测量刚性壁面载荷压力。通过调节刚性壁面方位改变 Bjerknes 力方向,开展 Bjerknes 力与浮力方向相反和垂直 2 种工况下气泡脉动试验,分析无量纲参数 γ 对气泡脉动过程中形态变化、载荷特性及压力峰值变化的影响。试验结果表明:在 Bjerknes 力与浮力方向相反工况下, γ 分别为 0.7、1.0、1.3 时,气泡在坍塌阶段分别呈锥状、梨状、球状;在 Bjerknes 力与浮力方向垂直工况下, γ 分别为 0.7、1.0、1.3 时,气泡在坍塌阶段分别呈橄榄球状、锥状、水滴状;Bjerknes 力与浮力方向相反或垂直时,气泡载荷压力峰值随 γ 增大均先增大后减小, $\gamma=1.0$ 时,气泡载荷压力峰值最大。 γ 相同时,Bjerknes 力与浮力方向相反工况下气泡载荷压力峰值均高于 Bjerknes 力与浮力方向垂直工况,压力峰值差随 γ 增大先增大后减小, $\gamma=1.0$ 时,压力峰值差最大。

关键词: Bjerknes 力;脉动载荷;水下爆炸气泡;浮力;无量纲参数

中图分类号:U661

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0105-09

引用格式:安展逸,于福临,吴凯伦,等. Bjerknes 力与浮力耦合作用下水下爆炸气泡脉动载荷特性[J]. 山东交通学院学报,2026,34(1):105-113.

AN Zhanyi, YU Fulin, WU Kailun, et al. The pulsatile load characteristics of underwater explosion bubble under the coupled effect of Bjerknes force and buoyancy[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1):105-113.

0 引言

水下爆炸气泡动力学是船舶与海洋工程流固耦合领域的重要研究方向。气泡在演化过程中经历高速膨胀与溃灭^[1-3],伴随产生高速射流和冲击波载荷^[4-5],易对舰船结构造成严重破坏^[6]。气泡的运动轨迹与射流方向受浮力和 Bjerknes 力影响^[7]。研究浮力与 Bjerknes 力的耦合机制及其对水下爆炸气泡冲击载荷的影响规律,对优化舰船的抗冲击防护设计具有重要意义^[8-9]。

国内外学者针对水下爆炸气泡演化过程及脉动载荷特性开展了大量试验和数值模拟研究。Liu 等^[10]通过试验发现当气泡靠近水平刚性壁面时,在溃灭阶段产生的高速射流会引发强烈的冲击载荷。Cui 等^[11]通过试验研究发现开口曲面边界条件下,Bjerknes 力导致气泡非对称变形,并使射流朝向开口方向偏移。Meng 等^[12]通过试验与数值模拟相结合的方法分析刚性壁面对水下爆炸气泡动力学行为的影响,发现在刚性边界条件下,Bjerknes 力促使气泡在收缩阶段更易形成集中性强、方向性明确的高速射流,显著增强刚性壁面附近的载荷效应。Li 等^[13]采用数值模拟分析气泡在自由液面附近的相互作用及

收稿日期:2025-05-09

基金项目:山东省高等学校青创科技支持计划项目(2022KJ211)

第一作者简介:安展逸(1999—),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为船舶工程,E-mail:anzhanyi@icloud.com。

* 通信作者简介:于福临(1988—),男,山东烟台人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为船舶减振降噪与爆炸抗冲击,E-mail:yufulin@sdjtu.edu.cn。

破裂行为,认为浮力和 Bjerknes 力的共同作用导致气泡运动路径复杂化,影响其稳定性和射流特性。Ma 等^[14]通过对比弹性与刚性壁面条件下的气泡脉动特性,发现弹性壁面可削弱射流强度。Ma 等^[15]采用霍普金森杆装置研究不同边界几何条件下电火花生成气泡的壁面压力特征,对比分析气泡在半球形与平面边界附近的演化过程,发现在非平整边界条件下,气泡受 Bjerknes 力影响导致压力峰值分布呈复杂的空间模式。陈岩武等^[16]开展带破口双层圆柱壳结构与气泡相互作用试验,研究冲击波与气泡载荷对舰船双层底结构的毁伤机制。于福临等^[17]采用水平集方法构建近场空中爆炸流场动力学模型,求解不同近壁面条件下的空中爆炸流场压力载荷,得到近壁爆炸对壁面结构产生的压力分布机制。Li 等^[18]提出一套系统的气泡动力学理论,整合多类工程结构下气泡演变模型,为复杂工况下的气泡演化模拟提供数值研究基础。现有研究聚焦于特定 Bjerknes 力方向下的水下爆炸气泡脉动载荷特性^[19],对 Bjerknes 力与浮力方向相反或垂直条件下气泡脉动载荷特性的研究较少。

为研究 Bjerknes 力与浮力方向相反或垂直条件下的气泡脉动载荷特性,设计水下爆炸气泡产生与测量试验平台,采集并分析水下爆炸气泡形态演化特征图像及脉动载荷压力变化数据,通过调整钢板壁面方位及改变无量纲参数 γ ,探究 Bjerknes 力与浮力耦合作用对气泡脉动载荷特征的影响,以期为水下舰船防护结构设计与爆炸响应评估提供理论依据与实践参考。

1 试验概述

1.1 试验平台

水下爆炸气泡产生与测量试验平台由气泡生成装置、数据采集系统、电荷放大器、高速摄影机、透明水箱、钢板、可伸缩支架、压力传感器和发光二极管(light emitting diode, LED)灯组成,如图 1 所示。透明水箱的长、宽、高均为 600 mm,水深 450 mm,采用长 200 mm、宽 200 mm、高 8 mm 的钢板作为刚性壁面,通过可伸缩支架固定于水箱底部。改变刚性壁面方位,构建两种测试工况:1)刚性壁面水平放置,水下爆炸气泡位于刚性壁面正上方,作用于气泡的 Bjerknes 力方向与与浮力方向相反。2)刚性壁面垂直放置,水下爆炸气泡位于刚性壁面侧面,作用于气泡的 Bjerknes 力方向与与浮力方向垂直。采用软件 Phantom Camera Control 校准刚性壁面水平或垂直角度,通过调节可伸缩支架高度控制气泡与刚性壁面间的距离。在透明水箱的左侧设置 Phantom V1212 高速摄影机,记录气泡脉动过程,拍摄速率为 25 000 帧/s。在透明水箱的右侧设置 LED 灯,提供辅助照明。采用 PCB113B22 型压电式压力传感器,灵敏度为 145.7 mV/MPa,固定在刚性壁面一侧。压力传感器与导线接口处采用有机硅密封胶进行防水密封处理,压力传感器信号经 PCB482C05 型电荷放大器调理后,传输至东华 DH5902N 数据采集系统,信号采样频率为 20 kHz。

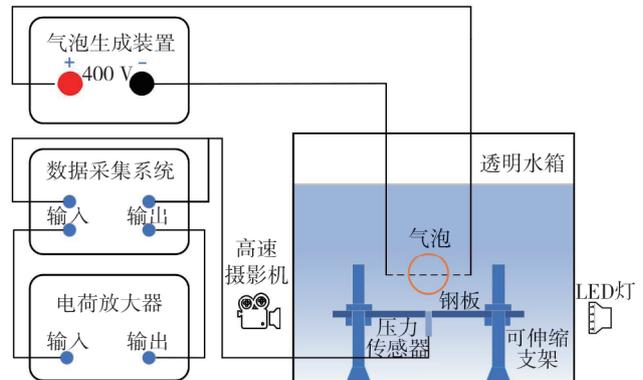


图 1 水下爆炸气泡产生与测量试验平台

在透明水箱的左侧设置 Phantom V1212 高速摄影机,记录气泡脉动过程,拍摄速率为 25 000 帧/s。在透明水箱的右侧设置 LED 灯,提供辅助照明。采用 PCB113B22 型压电式压力传感器,灵敏度为 145.7 mV/MPa,固定在刚性壁面一侧。压力传感器与导线接口处采用有机硅密封胶进行防水密封处理,压力传感器信号经 PCB482C05 型电荷放大器调理后,传输至东华 DH5902N 数据采集系统,信号采样频率为 20 kHz。

1.2 试验方法

气泡生成装置中通过直流电源将 3 个并联的 6 600 μF 电容器充电至 400 V,通过手动开关使电容器放电。连接电容两端的铜电极插入水中,电容器放电时,铜电极通过较大电流,瞬时产生高温,加热铜电极周围的水,形成气泡并迅速膨胀。高速摄影机主要拍摄铜电极与刚性壁面间气泡的演化过程。假定本试验的流体环境为自由场,进行多次水下爆炸气泡产生试验,测得气泡平均等效直径为 50 mm,如图 2 所示。假设冲击波为球形^[7],定义无量纲参数 γ 为气泡中心至刚性壁面的距离 d 与气泡平均等效半径 R_m 之比,即 $\gamma = d/R_m$,表

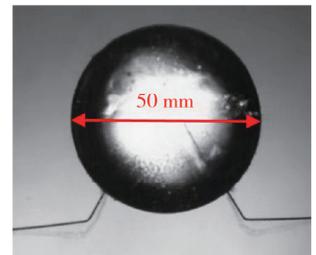


图 2 自由场气泡

示水下爆炸气泡中心与碰撞边界的距离关系,是研究碰撞边界对气泡运动学行为影响的主要参数。

2 不同 Bjerknes 力与浮力方向下气泡脉动载荷特性分析

设置 6 组试验,其中 3 组 Bjerknes 力与浮力的方向相反,3 组二者方向垂直,气泡平均等效半径为 25 mm,试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

方案	Bjerknes 力与浮力方向	γ	d/mm	方案	Bjerknes 力与浮力方向	γ	d/mm
1		0.7	17.5	4		0.7	17.5
2	相反	1.0	25.0	5	垂直	1.0	25.0
3		1.3	32.5	6		1.3	32.5

2.1 Bjerknes 力与浮力方向相反时气泡脉动载荷特性分析

当 $\gamma=0.7$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时,气泡脉动过程如图 3 所示。由图 3 可知:1)图 3a)~g) 为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图 3a)~b) 为气泡膨胀阶段,气泡受刚性壁面抑制,底部扁平化,与壁面间存在清晰的液体层;第 3.423 毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡进入坍塌阶段(图 3c)~g)),气泡底部接触壁面坍塌速度减慢,导致气泡呈锥状结构;第 6.225 毫秒,气泡顶部迅速塌陷并产生高速向下的射流,射流穿透气泡内部并冲击刚性壁面(图 3f));第 6.614 毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积。2)图 3h)~j) 为气泡第二个脉动周期。受射流反作用力影响,第 8.287 毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡迅速坍塌至最小体积。

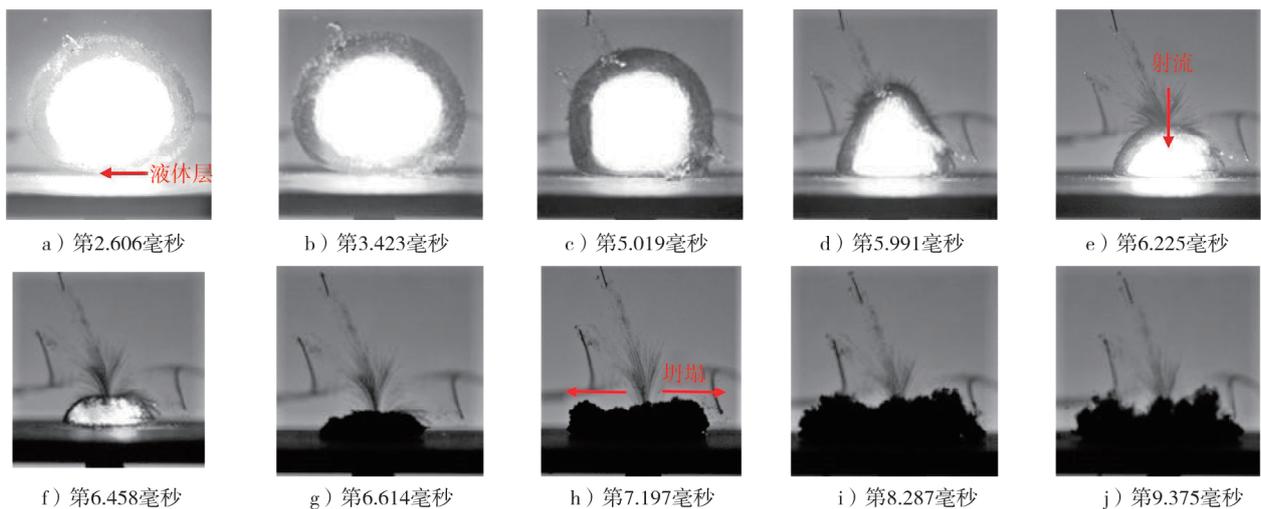


图 3 $\gamma=0.7$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时的气泡脉动过程

当 $\gamma=1.0$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时,气泡脉动过程如图 4 所示。由图 4 可知:1)图 4a)~g) 为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图 4a)~b) 为气泡膨胀阶段,由于 γ 增大,气泡中心至刚性壁面的距离变大,气泡在膨胀过程中未碰触刚性壁面,气泡形状呈球状;第 2.888 毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡进入坍塌阶段(图 4c)~g));第 5.096 毫秒,气泡受自身重力作用且受刚性壁面约束,底部坍塌速度变慢,顶部塌陷速度较快,球状气泡逐渐演变为上窄下宽的梨状结构;第 5.368 毫秒,气泡顶部迅速塌陷并产生集中射流,射流穿透气泡并在气泡底部产生尖锐突起(图 4f));第 5.485 毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积;在第

一个脉动周期结束时,气泡底部与刚性壁面碰撞。2)图4h)~j)为气泡第二个脉动周期。在刚性壁面的碰撞反作用下,气泡再次膨胀,第6.867毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡底部向四周扩张,顶部坍塌内凹。

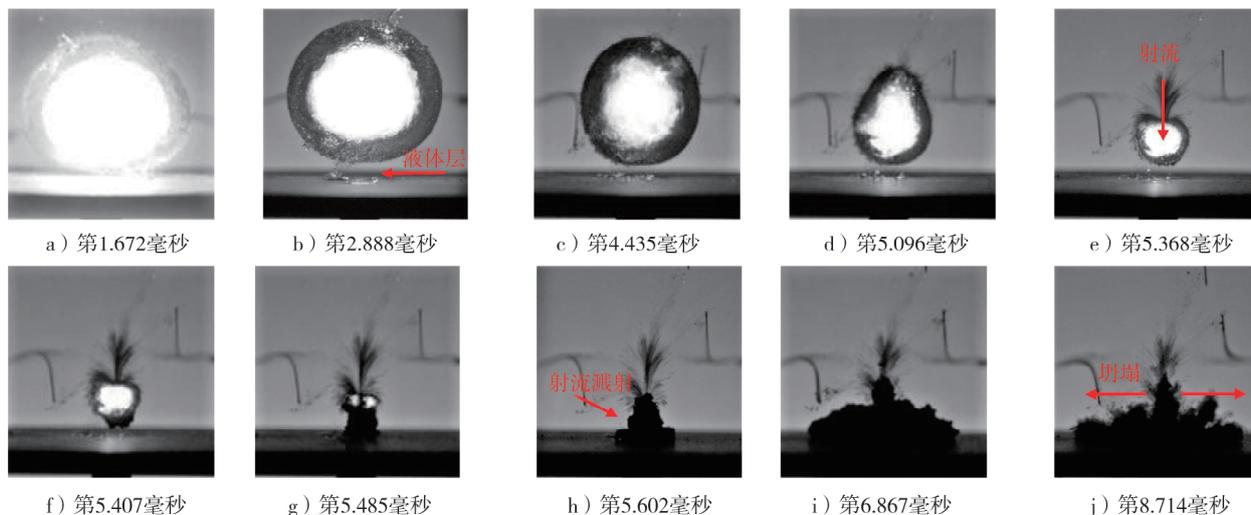


图4 $\gamma=1.0$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时的气泡脉动过程

当 $\gamma=1.3$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时,气泡脉动过程如图5所示。由图5可知:1)图5a)~g)为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图5a)~b)为气泡膨胀阶段,气泡中心至刚性壁面的距离较远,气泡在膨胀过程中未碰触刚性壁面,气泡呈球状;第2.917毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡进入坍塌阶段(图5c)~g)),坍塌初期,气泡保持球状;第5.446毫秒,气泡顶部产生射流,体积迅速变小;第5.602毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积;在第一个脉动周期结束时,气泡底部未碰撞刚性壁面。2)图5h)~j)为气泡第二个脉动周期。第5.719毫秒,气泡底部与刚性壁面碰撞,气泡再次膨胀;第8.948毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡内部稳定性破坏,进入坍塌阶段,气泡内液体迅速向四周扩散。

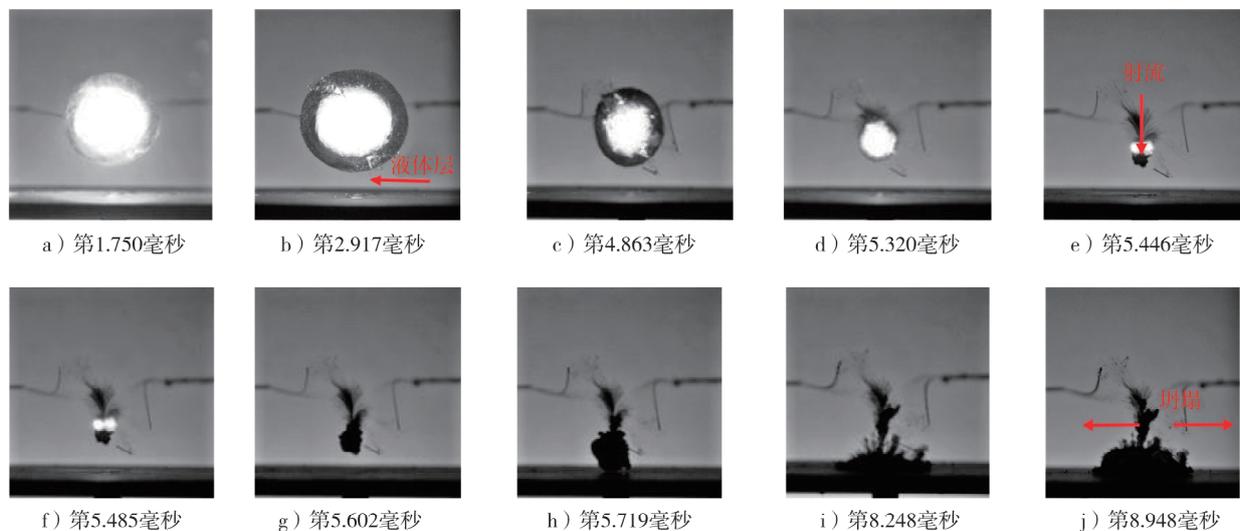


图5 $\gamma=1.3$ 且 Bjerknes 力与浮力方向相反时的气泡脉动过程

由图3~5可知:Bjerknes 力与浮力方向相反时, γ 是影响刚性壁面 Bjerknes 力对气泡脉动载荷特性的关键参数; γ 越小,Bjerknes 力作用越强,坍塌阶段气泡形态的非对称性越显著; $\gamma=0.7$ 时,Bjerknes 力作用最强,气泡底部为扁平状,顶部收缩,呈锥状; $\gamma=1.0$ 时,Bjerknes 力作用减弱,受刚性壁面影响,气泡下

部坍塌速度变慢,上部坍塌速度较快,呈梨状; $\gamma=1.3$ 时,Bjerknes力作用最小,气泡在膨胀和坍塌过程中均呈球状。

Bjerknes力与浮力方向相反时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线如图6所示。由图6可知:1)当 $\gamma=0.7$ 时,在第一个脉动周期中,第7.2毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为3.27 MPa,载荷压力持续0.401 ms;第7.6毫秒,因射流冲击壁面形成冲击压力峰值,为2.25 MPa,射流冲击压力持续0.345 ms;在第二个脉动周期中,第10.2毫秒,气泡产生载荷压力峰值为0.63 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的19.27%。2)当 $\gamma=1.0$ 时,在第一个脉动周期中,第5.4毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为5.43 MPa,载荷压力持续0.572 ms;在第二个脉动周期中,第9.5毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为1.49 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的27.45%。3)当 $\gamma=1.3$ 时,在第一个脉动周期中,第6.4毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为1.78 MPa,载荷压力持续0.442 ms;在第二个脉动周期中,第9.7毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为1.69 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的94.94%。

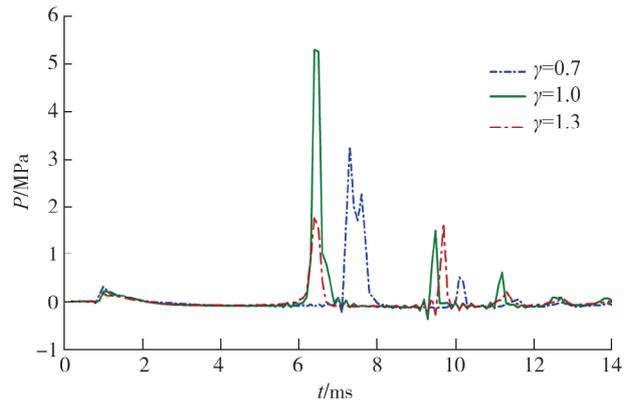


图6 Bjerknes力与浮力方向相反时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

$\gamma=1.0$ 时的气泡载荷最大压力峰值显著高于 γ 分别为0.7、1.3时,主要有两方面原因:1) $\gamma=1.0$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离为气泡溃灭时高速射流的形成与发展提供最佳条件; $\gamma=0.7$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离较小,脉动载荷受刚性壁面约束较大; $\gamma=1.3$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离较大,气泡顶部产生的射流在冲击壁面时耗散部分动能。2)因Bjerknes力方向与浮力方向相反,Bjerknes力在气泡坍塌过程中对气泡施加作用,增大气泡射流速度与动能,提高气泡射流冲击壁面的载荷强度。

2.2 Bjerknes力与浮力方向垂直时气泡脉动载荷特性分析

当 $\gamma=0.7$ 且Bjerknes力与浮力方向垂直时,气泡脉动过程如图7所示。

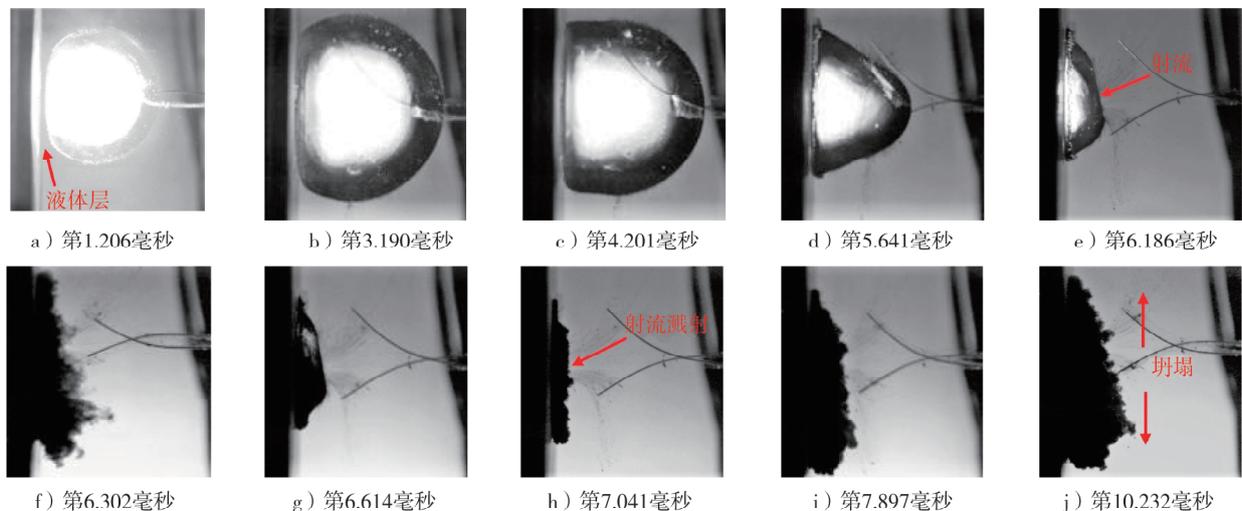


图7 $\gamma=0.7$ 且Bjerknes力与浮力方向垂直时气泡脉动过程

由图7可知:1)图7a)~h)为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图7a)~b)为气泡膨胀阶段,气泡左侧接触刚性壁面,受刚性壁面约束,呈扁平状结构,与刚性壁面间存在清晰的液体层;第3.190毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡进入坍塌阶段(图7c)~h)),刚性壁面显著阻滞气泡左侧液体流场运动,气泡右侧坍塌速度明显快于左侧,重

力引起的垂向压力梯度导致气泡上方区域的坍塌阻力相对较小,使气泡上方区域的曲率增大,气泡呈橄榄球状;第6.302毫秒,气泡右侧迅速塌陷并产生较小倾角的射流,射流穿透气泡内部并冲击刚性壁面,引发射流溅射;第7.041毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积。2)图7i)~j)为气泡第二个脉动周期。受射流反作用力影响,气泡在刚性壁面附近膨胀;第10.232毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡迅速坍塌至最小体积。

当 $\gamma=1.0$ 且Bjerknes力与浮力方向垂直时,气泡脉动过程如图8所示。由图8可知:1)图8a)~h)为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图8a)~d)为气泡膨胀阶段, γ 增大,气泡中心至刚性壁面的距离变大,气泡受刚性壁面约束变小;第5.362毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡进入坍塌阶段(图8e)~h)),因Bjerknes力作用减弱,浮力作用增强,气泡下方坍塌速度比上方慢;第6.847毫秒,气泡右侧迅速塌陷并产生较大倾角的射流,射流方向稳定,穿透气泡内部并冲击刚性壁面;第7.158毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积。2)图8i)~j)为气泡第二个脉动周期。受射流反作用力影响,气泡在刚性壁面附近膨胀。第9.531毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡迅速坍塌至最小体积。受Bjerknes力与浮力方向垂直耦合作用的约束,第二个脉动周期中气泡形状显著非对称,表现为气泡上方扩散体积小于下方。

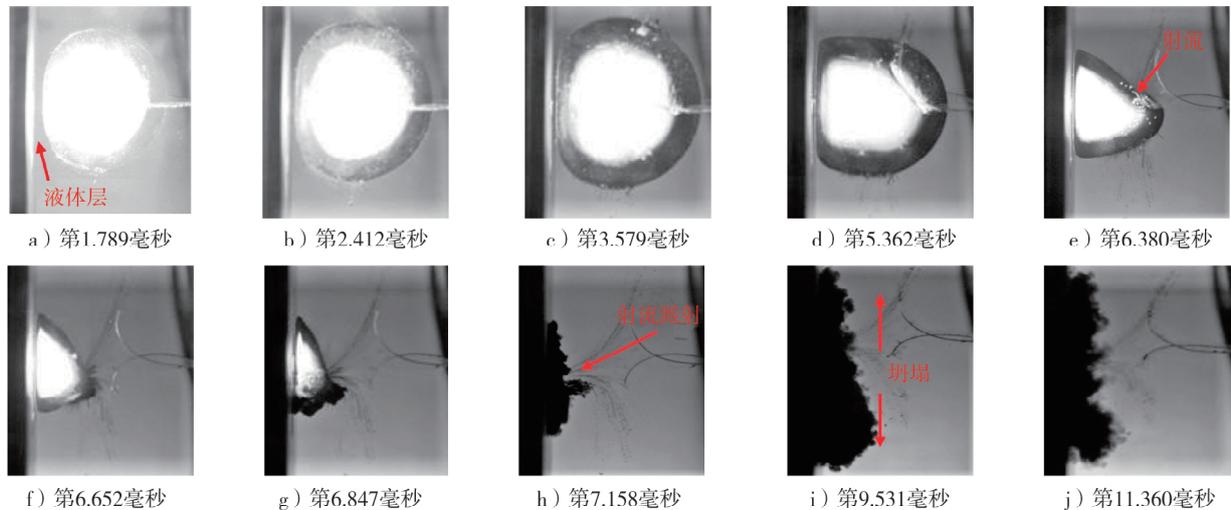


图8 $\gamma=1.0$ 且Bjerknes力与浮力方向垂直时的气泡脉动过程

当 $\gamma=1.3$ 且Bjerknes力与浮力方向垂直时,气泡脉动过程如图9所示。由图9可知:1)图9a)~g)为气泡自产生到膨胀至最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一个脉动周期。图9a)~b)为气泡膨胀阶段, γ 增大,气泡中心至刚性壁面的距离增大,气泡在膨胀阶段未碰撞刚性壁面;第3.540毫秒,气泡在第一个脉动周期中膨胀至最大体积;随后气泡进入坍塌阶段(图9c)~g)),因Bjerknes力作用微弱,气泡主要受浮力作用,下方坍塌速度明显比上方慢;第6.662毫秒,气泡右侧迅速塌陷并产生较大倾角的射流,因气泡至刚性壁面的距离较大,射流穿透气泡后未冲击到壁面;第6.808毫秒,气泡在第一个脉动周期中坍塌至最小体积。2)图9h)~j)为气泡第二个脉动周期。残余气泡体积在射流反作用下膨胀;第8.676毫秒,气泡在第二个脉动周期中膨胀至最大体积,随后气泡分裂为小气泡群并迅速溃灭。

由图7~9可知:Bjerknes力与浮力方向垂直时,二者形成耦合正交力场,气泡产生后逐渐向刚性壁面移动;随 γ 增大,Bjerknes力作用逐渐减弱,气泡形态与射流特性发生显著变化,射流倾角逐渐增大; $\gamma=0.7$ 时,Bjerknes力作用较强,气泡在膨胀阶段初期碰撞刚性壁面,气泡呈橄榄球状,射流倾角较小且能冲击刚性壁面; $\gamma=1.0$ 时,Bjerknes力作用减弱,浮力作用增强,气泡在膨胀阶段末期碰撞刚性壁面,气泡呈锥状,射流倾角增大且集中冲击刚性壁面; $\gamma=1.3$ 时,Bjerknes力作用较弱,气泡在第一个脉动周期未碰撞刚性壁面,气泡呈水滴状,射流倾角增大,因气泡至刚性壁面的距离较大,射流冲击刚性壁面作用减弱。

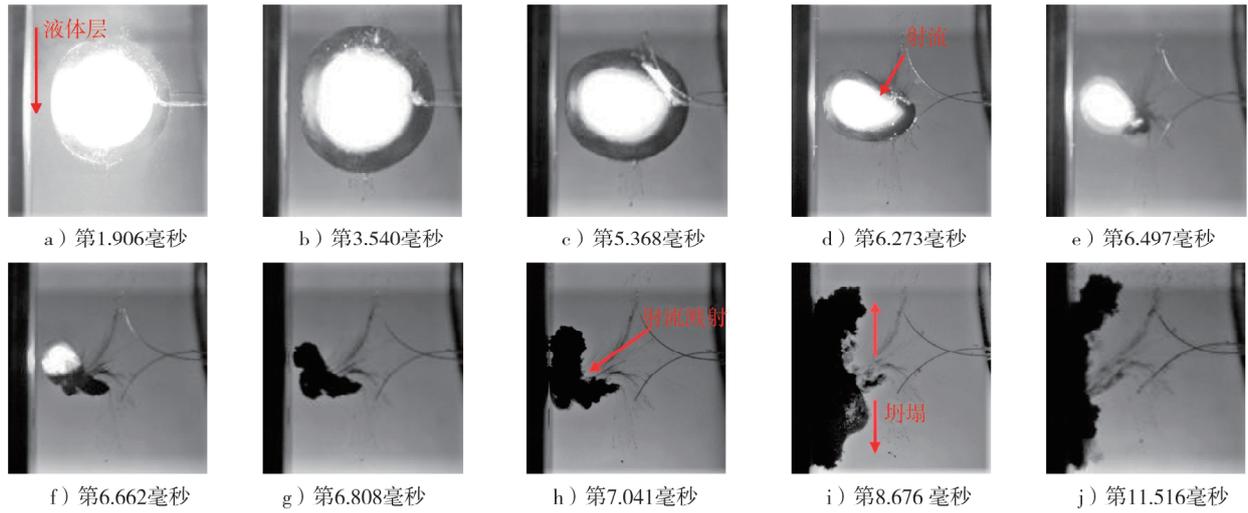


图9 $\gamma=1.3$ 且 Bjerknes 力与浮力方向垂直时的气泡脉动过程

Bjerknes 力与浮力方向垂直时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知:1)当 $\gamma=0.7$ 时,在第一个脉动周期中,第 7.5 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 3.08 MPa,载荷压力持续 0.303 ms;在第二个脉动周期中,第 11.1 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 0.31 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的 10.06%。2)当 $\gamma=1.0$ 时,在第一个脉动周期中,第 8.2 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 3.47 MPa,载荷压力持续 0.283 ms;在第二个脉动周期中,第 12.3 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 0.61 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的 17.58%。3)当 $\gamma=1.3$ 时,在第一个脉动周期中,第 8.2 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 1.41 MPa,载荷压力持续 0.334 ms;在第二个脉动周期中,第 12.8 毫秒,气泡产生载荷压力峰值,为 0.49 MPa,约为第一个脉动周期最大压力峰值的 34.75%。

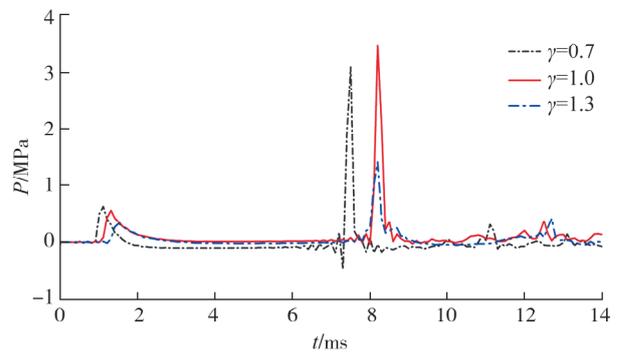


图 10 Bjerknes 力与浮力方向垂直时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

$\gamma=1.0$ 时的气泡载荷最大压力峰值显著高于 γ 分别为 0.7、1.3 时,主要有两方面原因:1) $\gamma=1.0$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离较适中,为射流的形成与发展提供最佳条件; $\gamma=0.7$ 时,气泡距刚性壁面的距离较短,射流冲击刚性壁面时动能较小; $\gamma=1.3$ 时,气泡距刚性壁面的距离较远,射流在运动过程中产生湍流耗散。2) Bjerknes 力对气泡产生水平吸引,增强射流冲击刚性壁面的方向稳定性。

2.3 气泡载荷压力峰值分析

根据压力传感器采集的刚性壁面压力载荷数据,分析不同无量纲参数下气泡载荷压力峰值变化规律,如图 11 所示。由图 11 可知:Bjerknes 力与浮力方向相反或垂直时,气泡载荷压力峰值随 γ 增大均先增大后减小;0.7 $\leq \gamma < 1.0$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离较小,射流冲击刚性壁面的动能较小,随 γ 增大,气泡中心至刚性壁面的距离逐渐增大,

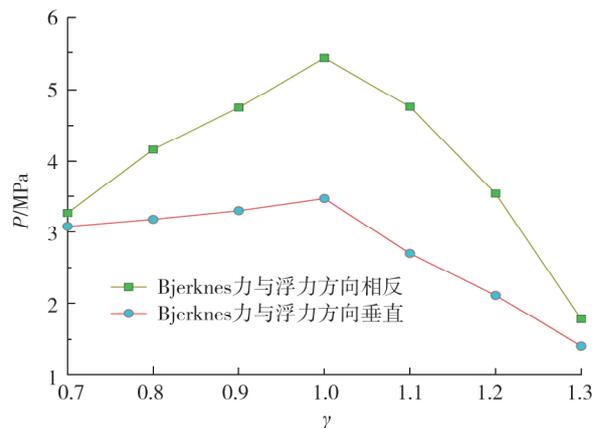


图 11 不同无量纲参数下气泡载荷压力峰值曲线

射流动能逐渐增强,气泡压力载荷峰值逐渐增大; $\gamma=1.0$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离适中,射流在冲击刚性壁面过程中产生的湍流耗散与射流动能之和最大,此时气泡载荷压力峰值最大; $1.0<\gamma\leq 1.3$ 时,气泡中心至刚性壁面的距离较大,射流在冲击刚性壁面过程中产生的湍流耗散衰减射流动能较大,气泡载荷压力峰值随 γ 增大而减小。

γ 相同时,Bjerknes力与浮力方向相反工况下气泡载荷压力峰值均高于Bjerknes力与浮力方向垂直工况,压力峰值差随 γ 增大先增大后减小, $\gamma=1.0$ 时,二者压力峰值差最大,为1.96 MPa。主要有两方面原因:1)Bjerknes力与浮力方向相反时,刚性壁面Bjerknes力吸引气泡产生的能量全部转化为气泡射流动能;Bjerknes力与浮力方向垂直时,刚性壁面Bjerknes力吸引气泡产生的能量一部分抵消气泡重力势能。2)Bjerknes力与浮力方向相反时,射流方向垂直于刚性壁面,射流动能全部转化为冲击载荷;Bjerknes力与浮力方向垂直时,射流方向与刚性壁面法向存在夹角,射流动能未全部转化为冲击载荷。

3 结论

本文对Bjerknes力与浮力方向相反与垂直两种工况下气泡脉动载荷特性影响开展试验研究,搭建水下爆炸气泡产生与测量试验平台,通过气泡生成装置对水下铜电极加热产生气泡,通过调节刚性壁面方位改变Bjerknes力方向,采用高速摄影机记录气泡的脉动过程,采用压力传感器测量刚性壁面载荷压力。

1)Bjerknes力与浮力方向相反,无量纲参数 $\gamma=0.7$ 时,气泡在坍塌阶段呈锥状,载荷压力峰值为3.27 MPa; $\gamma=1.0$ 时,气泡在坍塌阶段呈梨状,载荷压力峰值为5.43 MPa; $\gamma=1.3$ 时,气泡在坍塌阶段呈球状,载荷压力峰值为1.78 MPa。

2)Bjerknes力与浮力方向垂直, $\gamma=0.7$ 时,气泡在坍塌阶段呈橄榄球状,载荷压力峰值为3.08 MPa; $\gamma=1.0$ 时,气泡在坍塌阶段呈锥状,载荷压力峰值为3.47 MPa; $\gamma=1.3$ 时,气泡在坍塌阶段呈水滴状,载荷压力峰值为1.41 MPa。

3)Bjerknes力与浮力方向相反或垂直时,气泡载荷压力峰值随 γ 增大均先增大后减小, $\gamma=1.0$ 时,气泡载荷压力峰值最大。 γ 相同时,Bjerknes力与浮力方向相反工况下气泡载荷压力峰值均高于Bjerknes力与浮力方向垂直工况,压力峰值差随 γ 增大先增大后减小, $\gamma=1.0$ 时,压力峰值差最大。

参考文献:

- [1] JAVIER C, GALUSKA M, PAPA M, et al. Underwater explosive bubble interaction with an adjacent submerged structure [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100:103189.
- [2] LI M K, WANG S P, ZHANG S, et al. Experimental study of underwater explosions below a free surface: bubble dynamics and pressure wave emission [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(8):083313.
- [3] ZHOU Z T, LIU J H, WANG H K, et al. Experimental and numerical investigation on cavitation collapse reloading and bubble evolution for close-in and contact underwater explosion [J]. Ocean Engineering, 2024, 293:116549.
- [4] MA W T, ZHAO X N, GILBERT C, et al. Computational analysis of bubble-structure interactions in near-field underwater explosion [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 242:111527.
- [5] TONG S Y, WANG S P, YAN S, et al. Fluid-structure interactions between a near-field underwater explosion bubble and a suspended plate [J]. AIP Advances, 2022, 12(9):095224.
- [6] JAVIER C, GALUSKA M, PAPA M, et al. Underwater explosive bubble interaction with an adjacent submerged structure [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100:103189.
- [7] 黄毅, 张弩. 水下爆炸气泡脉动载荷影响因素分析 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6):33-39.
- [8] 姚熊亮, 刘文韬, 张阿漫, 等. 水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1):36-45.
- [9] 孙远翔, 刘新, 陈岩武, 等. 水下爆炸气泡射流载荷及对结构毁伤研究进展 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46(1):1-7.
- [10] LIU L T, CHEN X B, ZHANG W Q, et al. Study on the transient characteristics of pulsation bubble near a free surface based on finite volume method and front tracking method [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(5):052107.
- [11] CUI P, ZHANG A M, WANG S P, et al. Experimental investigation of bubble dynamics near the bilge with a circular

- opening[J]. Applied Ocean Research, 2013, 41:65–75.
- [12] MENG L, HUANG R Y, QIN J, et al. Study on the influence of rigid wall surface on the bubble characteristics of underwater explosion[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020, 1507(3):032020.
- [13] LI T, WANG S P, LI S, et al. Numerical investigation of an underwater explosion bubble based on FVM and VOF[J]. Applied Ocean Research, 2018, 74:49–58.
- [14] MA X J, HUANG B, ZHAO X, et al. Comparisons of spark-charge bubble dynamics near the elastic and rigid boundaries [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 43:80–90.
- [15] MA C L, SHI D Y, CUI X W, et al. A new measurement based on HPB to measure the wall pressure of electric-spark-generated bubble near the hemispheric boundary[J]. Shock and Vibration, 2020(1):3501845.
- [16] 陈岩武, 孙远翔, 王成. 水下爆炸载荷下舰船双层底部结构的毁伤特性[J]. 兵工学报, 2023, 44(3):670–681.
- [17] 于福临, 宋磊, 朱庆飞, 等. 基于 DG-LS-MGF-FEM 方法的空中爆炸载荷高精度数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(24):69–75.
- [18] LI T, ZHANG A M, WANG S P, et al. Bubble interactions and bursting behaviors near a free surface[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(4):042104.
- [19] 王树山, 贾曦雨, 高原, 等. 水下爆炸动力学的起源、发展与展望[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1):10–29.

The pulsatile load characteristics of underwater explosion bubble under the coupled effect of Bjerknes force and buoyancy

AN Zhanyi¹, YU Fulin^{1,2*}, WU Kailun¹, LÜ Pengwei¹, DAI Yingdong¹

1. Naval Architecture and Port Engineering College, Shandong Jiaotong University, Weihai 264209, China;

2. Weihai Key Laboratory of Fluid-Structure Coupling Dynamics, Weihai 264209, China

Abstract: To investigate the coupled effects of Bjerknes force and buoyancy on the pulsatile load characteristics of underwater explosion bubble, an experimental platform for underwater explosion bubble generation and measurement is designed. Bubbles are generated by heating underwater copper electrodes through a bubble generation device, the bubble pulsation process is recorded using a high-speed camera, and the rigid wall load pressure is measured using pressure sensors. By adjusting the orientation of the rigid wall to change the direction of Bjerknes force, bubble pulsation experiments are conducted under two working conditions: Bjerknes force opposite to buoyancy direction and Bjerknes force perpendicular to buoyancy direction. The morphological changes, load characteristics, and pressure peak variation patterns during bubble pulsation are analyzed for different dimensionless distances γ . The experimental results show that under the condition where Bjerknes force is opposite to buoyancy direction, when γ is 0.7, 1.0, and 1.3 respectively, the bubbles exhibit conical, pear-shaped, and spherical structures during the collapse stage; under the condition where Bjerknes force is perpendicular to buoyancy direction, when γ is 0.7, 1.0, and 1.3 respectively, the bubbles exhibit football-shaped, conical, and water-droplet structures during the collapse stage; when Bjerknes force is opposite to or perpendicular to buoyancy direction, the bubble load pressure peak first increases and then decreases with increasing γ , reaching maximum at $\gamma=1.0$. Under the same γ condition, the bubble load pressure peak when Bjerknes force is opposite to buoyancy direction is consistently higher than that when Bjerknes force is perpendicular to buoyancy direction, and the pressure peak difference value first increases and then decreases with increasing γ , reaching its maximum value at $\gamma=1.0$.

Keywords: Bjerknes force; pulsatile load; underwater explosion bubble; buoyancy; dimensionless distance

(责任编辑:边文超)