

圆柱壳下气泡脉动与射流试验特性研究

吴凯伦¹,于福临^{1,2*},安展逸¹,鲍永瑞¹,王志鹏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:为研究水下爆炸气泡在圆柱壳结构下的动力学特征,设计一种圆柱壳下气泡脉动与射流试验系统。通过电火花生成装置产生气泡,采用高速摄影机捕捉气泡动力学特征图像,采用压力传感器采集圆柱壳底部壁面压力载荷变化数据,分析无量纲参数 γ 对气泡载荷峰值压力及持续时间的影响。试验结果表明:1)当 γ 为0.25、0.50时,气泡外形为倒蘑菇状-云团状;当 γ 为0.75、1.00时,气泡外形为柱状-云团状;当 γ 为1.25、1.50时,气泡外形表现为鸡蛋状-扇状。2)0.25 $\leq\gamma\leq$ 1.50时,气泡冲击波载荷峰值压力随 γ 的增大而减小,冲击波载荷峰值压力持续时间随 γ 的增大而增大;气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力持续时间大于第二周期。3)0.25 $\leq\gamma\leq$ 0.75时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而减小。4)0.75 $<\gamma\leq$ 1.00时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而增大。5)1.00 $<\gamma\leq$ 1.50时,气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而减小,第二周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而缓慢增大。

关键词:水下爆炸;气泡;脉动;射流;圆柱壳

中图分类号:U661

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2026)01-0096-09

引用格式:吴凯伦,于福临,安展逸,等.圆柱壳下气泡脉动与射流试验特性研究[J].山东交通学院学报,2026,34(1):96-104.

WU Kailun, YU Fulin, AN Zhanyi, et al. Experimental characteristic study on bubble pulsation and jet under cylindrical shell[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2026, 34(1): 96-104.

0 引言

水下爆炸引发的气泡动力学行为及气泡与被冲击机械工程结构间的相互作用关系,一直是工程领域科学研究中的重要课题,对设计和防护海洋结构物、潜艇及其他水下设备具有重要意义^[1-2]。研究人员对复杂环境下潜艇冲击行为,尤其是水下爆炸作用下潜艇的冲击效应开展研究^[3-4],结果表明,气泡脉动及其诱导射流效应是决定结构物损伤程度的关键因素^[5]。圆柱壳是潜艇机械工程结构中的常见结构,研究其在水下爆炸气泡作用下的动力学响应特性及不同边界条件下流固耦合的相互作用,对提高水下爆炸效应的预测精度以及增强潜艇机械工程结构的抗冲击性能具有重要意义。

研究人员通过大量试验,系统分析和总结冲击波载荷^[6-7]、气泡脉动^[8]、气泡射流^[9]对气泡运动行为及其作用力的复杂影响,以及多种边界条件下气泡动力学响应与压力分布特征。Cui等^[10]研究小当量水下爆炸在不同边界条件下的气泡动力学行为,揭示气泡形态变化与压力峰值间的关系。Ma等^[11]采用霍普金森杆装置研究半球边界条件下气泡的膨胀、塌缩及其对边界的冲击压力,结合高速摄像机捕捉的水下爆炸演化图像与记录的压力-时间曲线,获取不同工况下的激波压力载荷和气泡溃灭压力载荷。李庆

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:吴凯伦(2001—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为船舶工程,E-mail:447415270@qq.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。

海等^[12]开展层冰边界多气泡破冰试验,发现气泡间距与布置方式显著影响冲击波与射流方向,且带孔层冰破裂效果弱于无孔层冰;龚月滢等^[13]开展船舶结构边界条件下多气泡脉动特性研究,发现壁面形状与气泡布置方式影响融合气泡动力学特性,气泡产生的射流对V型结构与水平壁面的冲击效果存在显著差异。

水下爆炸过程具有高风险性和不可控性,可采用试验手段研究水下爆炸气泡动力学及其对机械工程结构的影响。通过电火花释放能量,可有效模拟实际水下爆炸中气泡的膨胀、塌缩及射流现象,研究这些现象对结构的冲击作用^[14-16]。通过大量试验及数值模拟研究圆柱壳下气泡的动力学响应及其载荷特性。徐维铮等^[17]捕捉圆柱壳在爆炸冲击波和气泡作用下的动态行为,分析圆柱壳结构的应变响应和毁伤模式,发现爆炸距离的变化显著影响圆柱壳结构的毁伤形态。刘云龙等^[18]基于不可压缩势流理论,发现气泡膨胀、收缩及射流形成过程与攻角大小密切相关,攻角越小,气泡对结构的毁伤越大。陈高杰等^[19]开展气泡对圆柱壳的毁伤效应模拟试验,分析破口面积、最大垂向位移以及塑性应变区域等关键参数对圆柱壳结构的毁伤效果,发现同等当量的双爆源的爆炸对圆柱壳外板造成的毁伤比单爆源更严重。张轶凡等^[20]采用拉格朗日欧拉算法,通过数值模拟方法得到不同爆炸距离和装药方位下圆柱壳的变形与毁伤特性。李兵等^[21]通过数值模拟和海上试验验证水中鱼雷聚能战斗部对双层圆柱壳结构的毁伤效应,揭示射流穿透圆柱壳过程中阻力的变化规律。现有研究对圆柱壳附近气泡脉动与射流的动态耦合机制的定量分析尚有不足,多周期载荷下射流方向与壳体相互作用规律尚不明确。

为探究气泡脉动、射流与圆柱壳体的协同演化机制,基于电火花技术,开展气泡作用下圆柱壳结构的试验研究,分析气泡膨胀、坍塌及射流过程对壳体的冲击效应,采用高速摄影机拍摄气泡动力学图像,采用压力传感器采集气泡与圆柱壳结构相互作用的关键数据,探究圆柱壳结构在气泡作用下的动力学响应规律,以期为潜艇等水下结构的设计与防护提供理论依据与实践参考。

1 试验概述

1.1 试验系统

圆柱壳下气泡脉动与射流试验系统由电火花生成装置、信号采集分析仪、电荷放大器、透明水箱、可伸缩支架、圆柱壳、发光二极管(light emitting diode, LED)灯和高速摄影机组成,如图1所示。透明水箱的长、宽、高均为600 mm,水深为525 mm,圆柱壳底部距水箱底面310 mm,采用电火花生成装置在圆柱壳正下方产生气泡。圆柱壳采用为不锈钢材料,密度为 $7\ 800\text{ kg/m}^3$,弹性模量为210 GPa,切线模量为250 MPa,屈服应力为400 MPa,泊松比为0.3。圆柱壳由2个高度可调的支架支撑,调节支架高度,改变气泡与圆柱壳底部间的距离。透明水箱右侧设置LED灯,左侧设置高速摄影机。高速摄影机的拍摄速率为25 000 帧/s,曝光时间为 $4\times 10^{-5}\text{ s}$,拍摄分辨率为512 像素 \times 512 像素,记录圆柱壳下气泡的脉动过程。

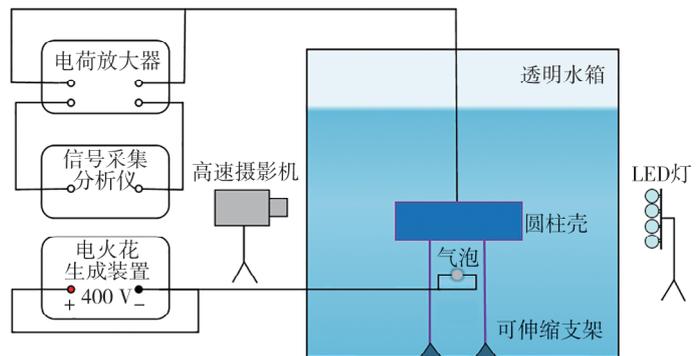


图1 圆柱壳下气泡脉动与射流试验系统

采用PCB-113B22压电型压力传感器测量气泡作用在圆柱壳底部的压力载荷。压力传感器的压敏元件为直径6.3 mm、高37.0 mm的圆柱体,测量范围为0~69.15 MPa,上升时间(传感器输出从稳态值的10%增至90%所需时间)小于 $1\ \mu\text{s}$,灵敏度为147.4 mV/MPa。采用聚四氟乙烯密封胶对压力传感器进行密封处理。信号采集分析仪的采样频率为20 kHz,实时采集压力数据并上传计算机。

1.2 数据采集

采用PCB-113B22压电型压力传感器测量气泡作用在圆柱壳底部的压力载荷。压力传感器的压敏元件为直径6.3 mm、高37.0 mm的圆柱体,测量范围为0~69.15 MPa,上升时间(传感器输出从稳态值的10%增至90%所需时间)小于 $1\ \mu\text{s}$,灵敏度为147.4 mV/MPa。采用聚四氟乙烯密封胶对压力传感器进行密封处理。信号采集分析仪的采样频率为20 kHz,实时采集压力数据并上传计算机。

1.3 试验方法

将电火花发生装置充电至400 V,放电时产生瞬时大电流,电流沿导线经过放置于圆柱壳底部的电阻

电阻丝产生热量对其周围的水快速加热,产生爆炸气泡。电阻丝通过直径为 0.6 mm 的铜导线与电火花发生装置连接。试验过程中,采用高速摄影机记录不同时刻的流场运动状态,拍摄环境为自然光照和 LED 灯辅助光照,高速摄像机透镜聚焦电阻丝与铜导线交界处。

假定电火花发生装置通过电阻丝在圆柱壳下产生爆炸气泡的流体环境为自由场,气泡与圆柱壳的位置关系如图 2 所示。 d 为爆炸气泡中心与圆柱壳底部的距离, R_m 为爆炸气泡的最大半径。基于冲击波的球形假设^[13],定义无量纲参数 $\gamma = d/R_m$, γ 为气泡对其周围结构边界产生影响的主要参数。在本试验条件下,经多次自由场水下爆炸气泡产生试验,高速摄影机测得爆炸气泡的平均等效直径为 56 mm,如图 3 所示。

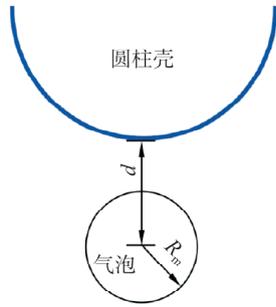


图 2 气泡与圆柱壳的位置关系示意图

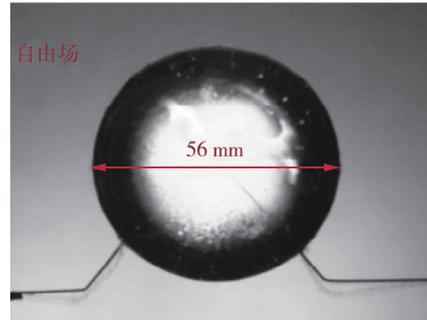


图 3 自由场中气泡

2 气泡脉动与射流试验

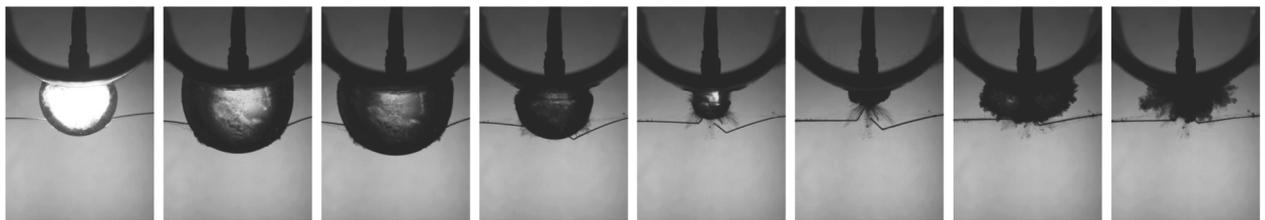
设置 6 组试验,气泡平均等效直径为 56 mm,试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

方案	γ	d/mm	方案	γ	d/mm	方案	γ	d/mm
1	0.25	7	3	0.75	21	5	1.25	35
2	0.50	14	4	1.00	28	6	1.50	42

2.1 I 型气泡

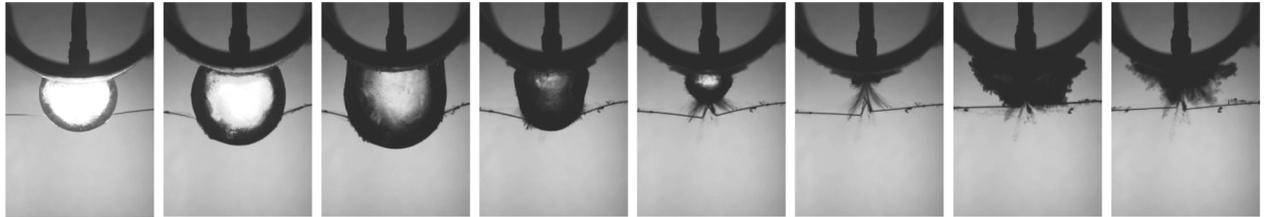
$\gamma = 0.25$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程如图 4 所示。由图 4 可知:1) 图 4a)~f) 为气泡自产生膨胀到最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一周期阶段。在气泡膨胀过程中,第 2.48 毫秒,气泡上部与圆柱壳底部相接,并逐渐包覆圆柱壳,气泡下部保持球形;第 3.24 毫秒,气泡达到最大体积,受 Bjerknes 效应和浮力影响,随后气泡进入坍塌过程,气泡在圆柱壳底部逐渐收缩;第 5.16 毫秒,气泡开始向上运动,形成倒蘑菇状;第 5.72 毫秒,气泡周围水流沿气泡边缘向内流动,推动气泡下部的“蘑菇头”继续向上运动,导致气泡出现颈缩现象;第 6.04 毫秒,气泡坍塌至最小体积。2) 图 4g)~h) 为气泡脉动第二次膨胀和收缩的过程,处于第二周期阶段。第 7.84 毫秒,气泡再次膨胀至最大体积,呈云团状;随着气泡不断运动,第 10.40 毫秒,气泡体积加速变小,直至第二周期气泡脉动与射流过程结束。



a) 第 0.92 毫秒 b) 第 2.48 毫秒 c) 第 3.24 毫秒 d) 第 5.16 毫秒 e) 第 5.72 毫秒 f) 第 6.04 毫秒 g) 第 7.84 毫秒 h) 第 10.40 毫秒

图 4 $\gamma = 0.25$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

$\gamma=0.50$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程如图 5 所示。由图 5 可知: $\gamma=0.50$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程的运动状态与 $\gamma=0.25$ 工况下相似。由于气泡中心与圆柱壳底部的距离增大,在第一周期膨胀过程中气泡上半部分受 Bjerknes 效应影响较显著,气泡被不断拉长最终导致坍塌。试验表明,当 γ 分别为 0.25、0.50 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程具有相似的动力学特征,气泡外形表现为倒蘑菇状-云团状 (I 型气泡)。



a) 第 0.84 毫秒 b) 第 1.68 毫秒 c) 第 3.00 毫秒 d) 第 5.08 毫秒 e) 第 5.72 毫秒 f) 第 6.00 毫秒 g) 第 8.00 毫秒 h) 第 9.48 毫秒

图 5 $\gamma=0.50$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

$\gamma=0.25$ 时,气泡载荷压力 P 随时间 t 变化的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知:在气泡膨胀初期,引发冲击波脉动压力,第 0.10 毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为 1.894 MPa;伴随气泡继续膨胀,第 5.95 毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为 9.123 MPa,随后气泡因坍塌导致压力下降至 0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第 9.20 毫秒出现气泡脉动压力峰值,为 3.413 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降至 0。

$\gamma=0.50$ 时,气泡载荷压力随时间变化的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知:在气泡膨胀初期,引发冲击波压力,第 0.20 毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为 0.822 MPa;伴随气泡继续膨胀,第 5.60 毫秒再次出现脉动压力峰值,为 3.987 MPa;第 5.70 毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为 6.808 MPa,随后气泡因坍塌导致压力下降至 0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第 9.00 毫秒出现气泡脉动压力峰值,为 2.040 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降至 0。

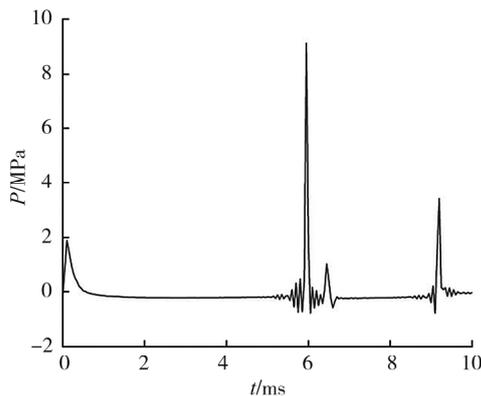


图 6 $\gamma=0.25$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

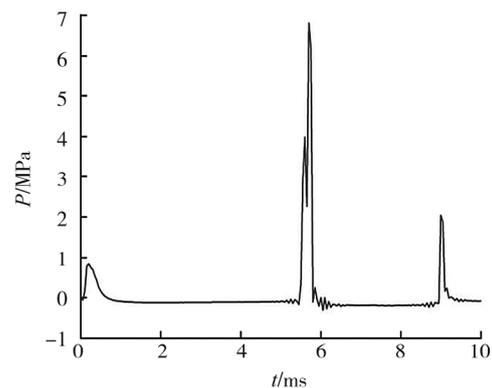
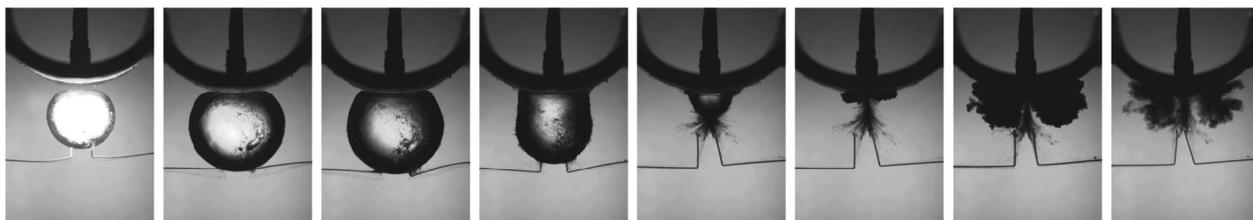


图 7 $\gamma=0.50$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

2.2 II 型气泡

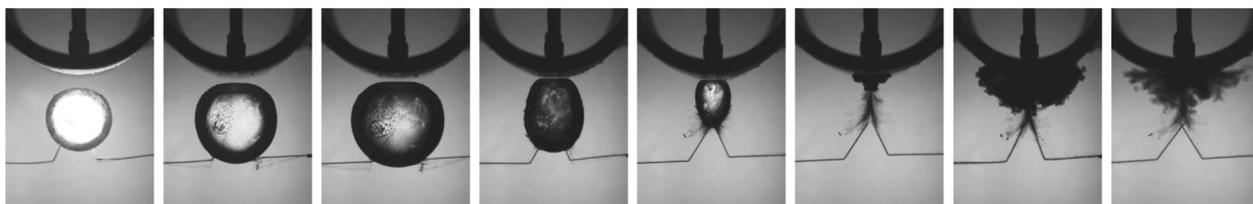
$\gamma=0.75$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程如图 8 所示。由图 8 可知:1) 图 8a)~f) 为气泡自产生膨胀到最大体积再至坍塌至最小体积的过程,处于第一周期阶段。气泡在第一周期初呈非球状脉动状态,气泡在膨胀时上半部受边界条件影响趋于扁平状,下半部保持球形;第 3.20 毫秒,气泡达到最大体积,受 Bjerknes 效应和浮力影响,气泡开始向上运动;第 4.44 毫秒,气泡上半部出现颈缩现象,沿圆柱壳底部逐渐收缩,呈柱状;第 5.52 毫秒,气泡周围水流沿气泡边缘向内流动,同时气泡因浮力作用沿圆柱壳收缩产生向上的射流;第 5.76 毫秒,气泡坍塌至最小体积。2) 图 8g)~h) 为气泡脉动第二次膨胀和收缩过程,处于第二周期阶段。第 7.04 毫秒,气泡再次膨胀至最大体积,呈云团状;随着气泡不断运动,第 10.40 毫秒,气泡体积加速变小,直至第二周期气泡脉动与射流过程结束。



a)第0.88毫秒 b)第2.32毫秒 c)第3.20毫秒 d)第4.44毫秒 e)第5.52毫秒 f)第5.76毫秒 g)第7.04毫秒 h)第10.08毫秒

图8 $\gamma=0.75$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

$\gamma=1.00$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程如图9所示。由图9可知: $\gamma=1.00$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程的运动状态与 $\gamma=0.75$ 工况下相似。由于气泡中心与圆柱壳底部的距离增大,圆柱壳对气泡膨胀影响减小,气泡上半部分受 Bjerknes 效应影响增大,气泡被拉长为柱状的现象较明显。试验表明,当 γ 分别为0.75、1.00时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程具有相似的动力学特征,气泡外形表现为柱状-云团状(II型气泡)。



a)第0.92毫秒 b)第2.04毫秒 c)第2.80毫秒 d)第4.72毫秒 e)第5.32毫秒 f)第5.76毫秒 g)第7.52毫秒 h)第9.24毫秒

图9 $\gamma=1.00$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

$\gamma=0.75$ 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:在气泡膨胀初期,引发冲击波压力,第0.10毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为0.567 MPa;伴随气泡继续脉动,第5.55毫秒再次出现脉动压力峰值,为4.955 MPa;第5.70毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为5.327 MPa;随后气泡因坍塌导致压力下降至0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第8.80毫秒出现气泡脉动压力峰值,为0.764 MPa;第8.90毫秒出现气泡射流压力峰值,为0.555 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降至0。

$\gamma=1.00$ 时,气泡载荷压力随时间变化的关系曲线如图11所示,由图11可知:在气泡膨胀初期,引发冲击波脉动压力,第0.20毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为0.494 MPa;伴随气泡继续膨胀,第5.75毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为6.762 MPa,随后气泡因坍塌导致压力下降至0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第9.40毫秒出现气泡脉动压力峰值,为3.269 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降至0。

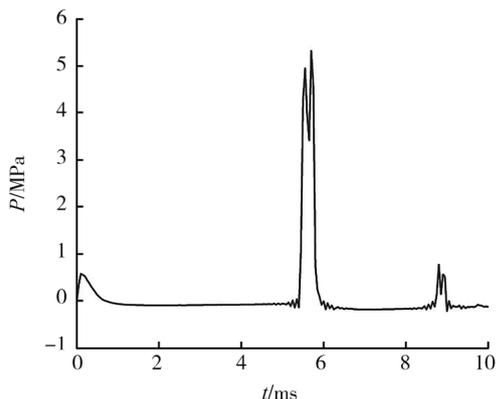


图10 $\gamma=0.75$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

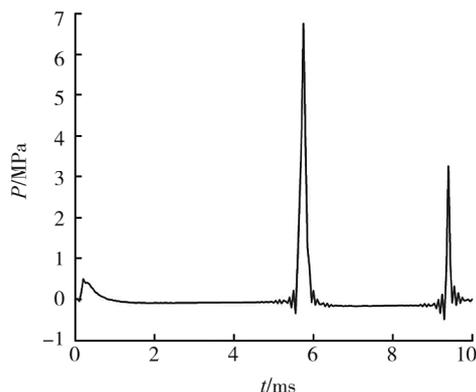
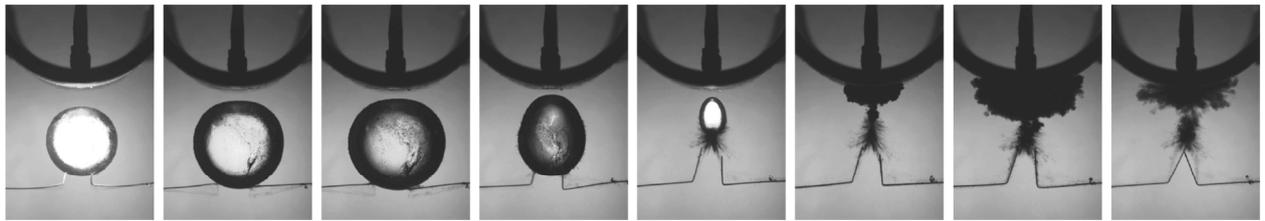


图11 $\gamma=1.00$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

2.3 III型气泡

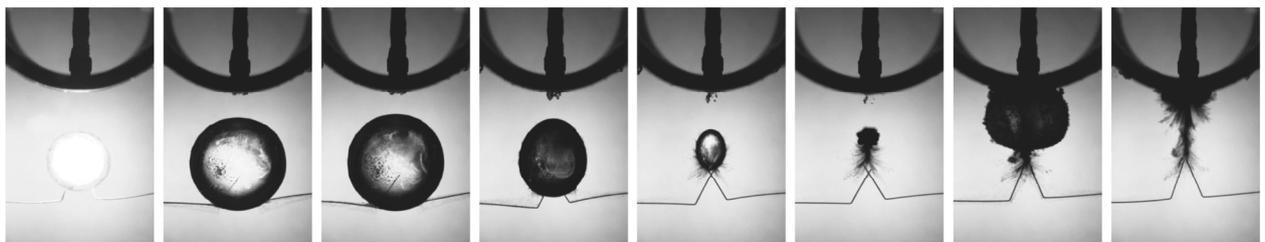
$\gamma=1.25$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程如图 12 所示。由图 12 可知:1)图 12a)~f)为气泡自产生膨胀到最大体积再到坍塌至最小体积的过程,处于第一周期阶段。气泡在第一周期初呈球状脉动状态,气泡在膨胀时上半部受圆柱壳底部水流反作用力影响出现收缩现象,下半部保持球形;第 3.08 毫秒,气泡达到最大体积,受 Bjerknes 效应和浮力影响,气泡开始向上运动,气泡上半部逐渐拉长,呈鸡蛋状;第 5.64 毫秒,气泡周围水流沿气泡边缘向内流动,产生向上的射流;第 6.08 毫秒,气泡坍塌至最小体积。2)图 12g)~h)为气泡脉动第二次膨胀和收缩的过程,处于第二周期阶段。第 7.96 毫秒,气泡再次膨胀至最大体积,与圆柱壳底部碰撞,气泡呈扇状;随着气泡不断运动,气泡开始坍塌,第 9.84 毫秒,水流从气泡内部向四周运动,气泡体积加速变小,直至第二周期气泡脉动与射流过程结束。



a)第 1.04 毫秒 b)第 2.28 毫秒 c)第 3.08 毫秒 d)第 4.92 毫秒 e)第 5.64 毫秒 f)第 6.08 毫秒 g)第 7.96 毫秒 h)第 9.84 毫秒

图 12 $\gamma=1.25$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

$\gamma=1.50$ 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程见图 13。由图 13 可知: $\gamma=1.50$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程的运动状态与 $\gamma=1.25$ 工况下相似。气泡中心与圆柱壳底部的距离增大,气泡在膨胀时上半部受圆柱壳底部水流反作用力影响减小,气泡外形保持球状。试验表明,当 γ 分别为 1.25、1.50 时,圆柱壳下气泡脉动与射流过程具有相似的动力学特征,气泡外形表现为鸡蛋状-扇状(III型气泡)。



a)第 0.68 毫秒 b)第 2.24 毫秒 c)第 2.92 毫秒 d)第 4.76 毫秒 e)第 5.40 毫秒 f)第 5.56 毫秒 g)第 7.36 毫秒 h)第 9.72 毫秒

图 13 $\gamma=1.50$ 时圆柱壳下气泡脉动与射流过程

γ 分别为 1.25、1.50 时,气泡载荷压力随时间变化的关系曲线如图 14、15 所示。

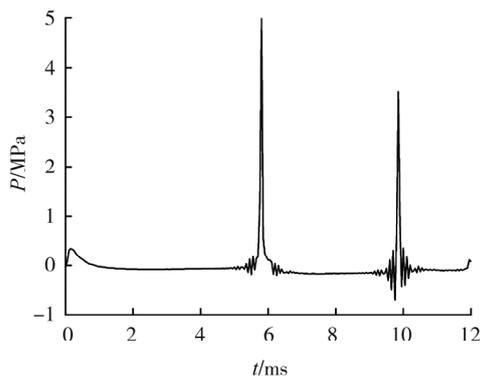


图 14 $\gamma=1.25$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

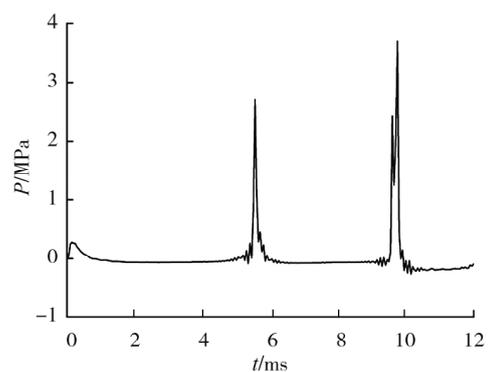


图 15 $\gamma=1.50$ 时气泡载荷压力随时间变化的关系曲线

由图 14 可知:在气泡膨胀初期,引发冲击波脉动压力,第 0.15 毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为 0.353 MPa;伴随气泡继续膨胀,第 5.87 毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为 4.978 MPa,随后气泡因坍塌导致压力下降至 0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第 9.85 毫秒出现气泡脉动压力峰值,为 3.505 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降 0。

由图 15 可知:在气泡膨胀初期,引发冲击波压力,第 0.15 毫秒首次出现气泡压力波峰,压力峰值为 0.267 MPa;伴随气泡继续脉动,第 5.55 毫秒出现第一周期射流最大压力峰值,为 2.700 MPa,随后气泡因坍塌导致压力下降至 0。在第二周期,气泡继续膨胀并再次引发脉动压力,第 9.60 毫秒出现气泡脉动压力峰值,为 2.428 MPa;第 9.75 毫秒出现气泡射流压力峰值,为 3.701 MPa;随后气泡再次坍塌,压力逐渐下降 0。

3 气泡载荷特性分析

分析不同无量纲参数下气泡载荷峰值压力及持续时间,结果如图 16、17 所示。

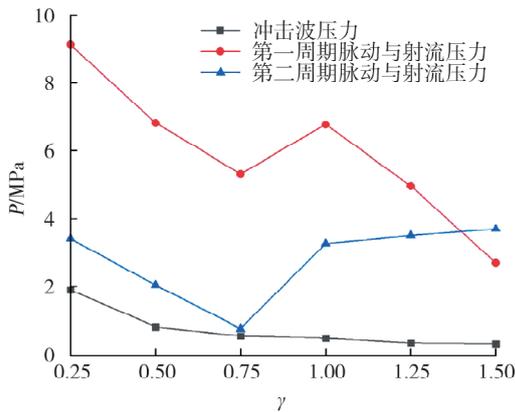


图 16 不同无量纲参数下气泡载荷峰值压力

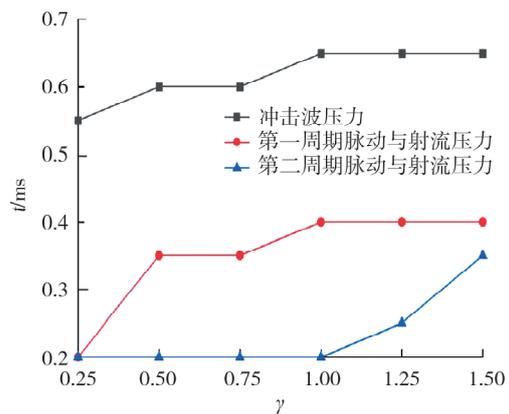


图 17 不同无量纲参数下气泡载荷峰值压力持续时间

由图 16 可知:无量纲参数 γ 对气泡冲击波载荷峰值压力、第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力产生影响。 $0.25 \leq \gamma \leq 1.50$ 时,气泡冲击波载荷峰值压力随 γ 的增大而减小。 $0.25 \leq \gamma \leq 0.75$ 时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而下降; $0.75 < \gamma \leq 1.00$ 时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而增大; $1.00 < \gamma \leq 1.50$ 时,气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而减小,第二周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而缓慢增大。

由图 17 可知: γ 对气泡冲击波载荷峰值压力持续时间、第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力持续时间产生影响。随 γ 的增大,冲击波峰值压力持续时间整体呈上升趋势,由于气泡中心与圆柱壳底部壁面的距离逐渐增大,导致气泡冲击波与圆柱壳底部壁面作用时间变长;气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力持续时间大于第二周期,受 Bjerknes 效应和浮力影响,气泡位置逐渐上移,在相同无量纲参数下,气泡在第一周期与圆柱壳底部的距离大于第二周期,导致第二周期脉动载荷峰值压力持续时间变短。

4 结论

本文对圆柱壳下气泡动力学行为及其载荷特性开展试验研究,通过电火花生成装置产生气泡,采用高速摄影机记录气泡膨胀、压缩、破裂、射流等过程,采用压力传感器测量气泡在圆柱壳底部产生的冲击波压力、脉动压力和射流压力。

1)无量纲参数 γ 对圆柱壳下气泡脉动与射流过程的动力学特征产生影响, γ 不同时,气泡外形不同。当 γ 分别为0.25、0.50时,气泡呈倒蘑菇状-云团状;当 γ 分别为0.75、1.00时,气泡呈柱状-云团状;当 γ 分别为1.25、1.50时,气泡呈鸡蛋状-扇状。

2) γ 对气泡冲击波载荷峰值压力、第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力产生影响。 $0.25 \leq \gamma \leq 1.50$ 时,气泡冲击波载荷峰值压力随 γ 的增大而减小。 $0.25 \leq \gamma \leq 0.75$ 时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而减小; $0.75 < \gamma \leq 1.00$ 时,气泡第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力均随 γ 的增大而增大; $1.00 < \gamma \leq 1.50$ 时,气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而减小,第二周期脉动和射流载荷峰值压力随 γ 的增大而缓慢增大。

3) γ 对气泡冲击波载荷峰值压力持续时间、第一周期和第二周期脉动和射流载荷峰值压力持续时间产生影响。冲击波峰值压力持续时间随 γ 的增大而增大,气泡第一周期脉动和射流载荷峰值压力持续时间大于第二周期。

参考文献:

- [1] 李莹,杜志鹏,陈赶超,等. 舰艇爆炸毁伤与防护若干关键问题研究进展[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3):3-60.
- [2] 李彦军,陈旭,曾庆鹏,等. 舰船动力设备抗冲击评估方法综述[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3):61-85.
- [3] 韩璐,冯麟涵,张磊,等. 潜艇设备冲击试验舱段环境特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(21):80-85.
- [4] 李晓文,范斌,杨勇,等. 水下爆炸作用下潜艇冲击环境影响因素研究[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6):72-76.
- [5] 张阿漫,姚熊亮. 近壁面气泡的运动规律研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3):1662-1671.
- [6] 刘奇奇,刘亮涛,王金相,等. 冲击波及气泡载荷联合作用下变截面加筋圆柱壳动态响应[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(3):321-331.
- [7] 刘晓波,李帅,张阿漫. 水下爆炸冲击波壁压理论及数值计算方法改进研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(1):120-132.
- [8] 张阿漫,姚熊亮. 近自由面水下爆炸气泡的运动规律研究[J]. 物理学报, 2008, 57(1):339-353.
- [9] 郑监,张舵,蒋邦海,等. 气泡与自由液面相互作用形成水射流的机理研究[J]. 物理学报, 2017, 66(4):169-178.
- [10] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(11):117103.
- [11] 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, 2020(1):3501845.
- [12] 李庆海,于福临,郭文琦,等. 层冰边界条件下多气泡破冰试验研究[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(3):104-111.
- [13] 龚月滢,于福临,苏超,等. 船舶结构边界条件下多气泡脉动特性[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(2):116-122.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张永坤,崔雄伟,金辉,等. 基于霍普金森杆的水下爆炸壁压测量系统研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(4):204-210.
- [17] 徐维铮,赵宏涛,李业勋,等. 水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构动态响应行为试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(9):207-217.
- [18] 刘云龙,张阿漫,田昭丽,等. 圆柱壳附近水下爆炸气泡动态特性研究[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(8):18-23.
- [19] 陈高杰,宋英杰,邢津浩. 双爆源水下爆炸对圆柱壳结构的毁伤特性研究[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3):134-149.
- [20] 张轶凡,刘亮涛,王金相,等. 水下爆炸冲击波和气泡载荷对典型圆柱壳结构的毁伤特性[J]. 兵工学报, 2023, 44(2):345-359.
- [21] 李兵,刘念念,陈高杰,等. 水中聚能战斗部毁伤双层圆柱壳的数值模拟与试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(1):38-45.

Experimental characteristic study on bubble pulsation and jet under cylindrical shell

WU Kailun¹, YU Fulin^{1,2*}, AN Zhanyi¹, BAO Yongrui¹, WANG Zhipeng¹

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 dynamic characteristics of underwater explosion bubbles under cylindrical shell structure, an experimental system for bubble pulsation and jet under cylindrical shell is designed. Bubbles are generated using an electric spark generation device, and bubble dynamic characteristic images are captured by a high-speed camera. Pressure sensors are employed to collect data on pressure load variations at the bottom wall of the cylindrical shell, and the influence of the dimensionless parameter γ on the peak pressure and duration of bubble loads are analyzed. Experimental results indicate that when γ is 0.25 and 0.50, the bubble shape is inverted mushroom-shaped to cumulous-shaped; when γ is 0.75 and 1.00, the bubble shape is columnar to cumulous-shaped; when γ is 1.25 and 1.50, the bubble shape exhibits egg-shaped to fan-shaped morphology. For $0.25 \leq \gamma \leq 1.50$, the peak pressure of bubble shock wave load decreases with increasing γ , while the duration of shock wave load peak pressure increases with increasing γ ; the duration of peak pressure from the first-cycle pulsation and jet load is greater than that of the second-cycle pulsation and jet load. For $0.25 \leq \gamma \leq 0.75$, the peak pressures of both first-cycle and second-cycle pulsation and jet loads decrease with increasing γ ; for $0.75 < \gamma \leq 1.00$, the peak pressures of both first-cycle and second-cycle pulsation and jet loads increase with increasing γ ; for $1.00 < \gamma \leq 1.50$, the peak pressure of first-cycle pulsation and jet load decreases with increasing γ , while the peak pressure of second-cycle pulsation and jet load increases slowly with increasing γ .

Keywords: underwater explosion; bubble; pulsation; jet; cylindrical shell

(责任编辑:边文超)