

高压物理学报

基于PIV实验研究带破口双层圆柱结构附近气泡的动力学特性

孙远翔 秦嘉鸿 陈岩武 王成

Bubble Dynamics Characteristics Near Double-Layer Cylindrical Structures with a Hole Based on PIV Experiments

SUN Yuanxiang, QIN Jiahong, CHEN Yanwu, WANG Cheng

引用本文:

孙远翔, 秦嘉鸿, 陈岩武, 等. 基于PIV实验研究带破口双层圆柱结构附近气泡的动力学特性[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6):064104. DOI: 10.11858/gywlb.20240756

SUN Yuanxiang, QIN Jiahong, CHEN Yanwu, et al. Bubble Dynamics Characteristics Near Double-Layer Cylindrical Structures with a Hole Based on PIV Experiments[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6):064104. DOI: 10.11858/gywlb.20240756

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240756>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水下爆炸气泡脉动周期的简便计算方法

Simple Method for the Calculation of Bubble Pulsation Period in Underwater Explosion

高压物理学报. 2022, 36(1): 015101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210782>

乳化炸药水下爆炸载荷输出特性实验研究

Experimental Study on Load Characteristics of Underwater Explosion for an Emulsion Explosive

高压物理学报. 2022, 36(4): 045101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220502>

水下爆炸作用下高桩码头毁伤效应的数值研究

Numerical Study of Damage Effect for High-Piled Wharf Subjected to Underwater Explosion

高压物理学报. 2020, 34(4): 045101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190850>

基于正交试验法的气泡帷幕削波特性研究

Bubble Curtain Clipping Characteristics Based on Orthogonal Test Method

高压物理学报. 2023, 37(6): 065302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230684>

港池环境近水面水下爆炸特性及其毁伤效应

Loading Characteristics and Damage Effect of Near-Surface Underwater Explosion in Harbor Basin

高压物理学报. 2019, 33(4): 045103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180638>

典型结构参数对船体梁抗水下爆炸特性的影响

Effects of Typical Structural Parameters on Underwater Explosion Resistance of Girders

高压物理学报. 2022, 36(3): 035102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210881>

基于 PIV 实验研究带破口双层圆柱结构 附近气泡的动力学特性

孙远翔, 秦嘉鸿, 陈岩武, 王 成

(北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 近场水下爆炸冲击波破坏双壳体潜艇外壳结构后, 后续的气泡脉动和射流载荷会对潜艇的内壳体继续造成严重毁伤, 因此研究破口附近的气泡脉动和气泡载荷特性具有重要意义。基于受冲击波毁伤后的双壳体潜艇结构, 制作预制圆形破口的双层圆柱结构模型, 将电火花装置作为气泡发生源, 开展了不同爆距参数 (爆距与气泡的最大直径之比) 和不同破口参数 (破口直径与气泡的最大直径之比) 条件下气泡与带破口双层圆柱结构的相互作用实验。通过高速摄影机捕捉气泡在双层圆柱结构附近的脉动和射流形成过程, 采用粒子图像测速技术对爆炸流场速度进行测试, 得到气泡溃灭后产生的水射流速度, 同时采用压力传感器测量内层圆柱壳壁面处的压力载荷。实验结果表明: 爆距参数决定了内板壁面所受压力的载荷形式、气泡溃灭后是否产生有效射流以及产生的射流速度; 当爆距参数在一定范围内时, 破口参数影响气泡的脉动以及气泡溃灭后产生的水射流方向。

关键词: 水下爆炸; 气泡脉动; 气泡射流; 粒子图像测速技术

中图分类号: O383; O521.9

文献标志码: A

目前, 潜艇是世界各国使用最多的大型水下航行体, 潜艇具有隐蔽性和机动性, 其制海范围比水面舰船要大, 同时潜艇还具备较好的攻击性能, 使其成为海战中的重要组成部分。潜艇的典型外观结构形式为圆柱壳形, 我国潜艇借鉴了俄罗斯风格, 采用双壳体结构。双壳体潜艇与单壳体潜艇的最大区别在于压载水舱的布置方式, 双壳体潜艇的压载水舱包裹在潜艇耐压结构外侧, 形成了非耐压壳包裹耐压壳体的双层结构。对于此种潜艇的双层结构, 当冲击波载荷将外侧的非耐压壳体破坏后, 内部的耐压壳体会受到气泡脉动载荷和射流载荷的冲击。王玉等^[1]研究了 3 种聚能战斗部对典型潜艇目标的毁伤效应, 发现 3 种战斗部的毁伤均表现为潜艇壳体小尺寸穿孔和大面积凹陷变形。贺铭等^[2]对近场水下爆炸气泡与双层破口结构的相互作用机理进行了研究, 发现水下爆炸冲击波首先使外层板出现破口, 随后气泡通过破口进入双层板间舱室, 进而对内底板造成毁伤。

气泡载荷对双壳体潜艇耐压壳的作用过程本质上是近场水下爆炸气泡与双层圆柱破口结构的相互作用问题。目前, 对于水下爆炸冲击波作用于外板毁伤效应的研究较多^[3-7], 但往往忽略了后续气泡与破口边界的耦合问题。气泡与具有初始破口的结构的相互作用问题较为复杂, 需要考虑气泡与不完整边界的耦合效应, 探索气泡对结构的毁伤规律^[8]。Quah 等^[9]利用高速相机同时捕捉气泡动力学的侧视图和前视图, 发现气泡形成射流的方向取决于双层板间的无量纲间隙宽度。Chen 等^[10]建立了一个带有圆孔的双层板简化模型, 探究圆孔直径、两板间距以及爆距对气泡运动的影响。陈岩武等^[11]进行了电火花气泡与双层结构模型实验, 基于实验结果建立了实尺度的舰船双层底舱段模型, 模拟结

* 收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(12141201, 12221002)

作者简介: 孙远翔(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下爆炸研究. E-mail: sunyuanxiang002@126.com

通信作者: 王 成(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: wangcheng@bit.edu.cn

果表明,水下炸药在距离舰船底部结构 2.5 倍装药半径爆炸时,其毁伤威力最大。

本研究将基于双层潜艇结构建立带破口的双层圆柱模型,利用电火花装置产生爆炸脉动气泡,观测气泡与破口之间的相互作用,利用粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术测量气泡周围流场速度以及气泡溃灭后产生的水射流速度,并测量圆柱内壁面处的压力载荷,探究爆距和破口直径对气泡脉动过程的影响。

1 实验概况

1.1 双层圆柱结构模型

依据典型双壳体潜艇结构设计的双层圆柱模型如图 1 所示,外壳外径为 70 mm,内壳内径为 40 mm,外壳和内壳均为 5 mm 厚的透明亚克力板制成,以保证高速摄像机能够清晰捕捉到内外壳间的气泡脉动图像。不同破口直径的圆柱模型尺寸见表 1。外壳底部预制直径 d_w 分别为 10、20 和 30 mm 的破口,探究不同破口直径对气泡脉动的影响;内壁面预制直径 d_N 为 6 mm 的破口,用于放置 PCB 压力传感器,测量内壁面受到的压力载荷。

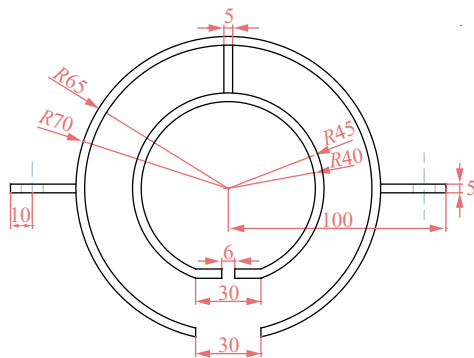


图 1 双层圆柱模型 (单位: mm)

Fig. 1 Double layered cylindrical model (Unit: mm)

表 1 双层圆柱模型的尺寸以及参数

Table 1 Dimensions and parameters of the double layered cylindrical model

Model No.	Outer radius/mm	Inner radius/mm	Plate thickness/mm	d_w /mm	d_N /mm
1	70	45	5	10	6
2	70	45	5	20	6
3	70	45	5	30	6

1.2 实验装置

实验在长、宽、高均为 60 cm 的透明水箱内进行,水深约为 50 cm,实验装置布置如图 2 所示。双层圆柱模型浸没于水面下方,实验中主要观察内外壳间的气泡脉动情况,内壳体环境对实验的影响较小,因此模型两端不封口,整体浸没于水中。搭接直径为 0.3 mm 的细铜丝制作电火花气泡发生装置,用于代替传统 TNT 炸药水下爆炸产生的气泡,定义铜丝交点到圆柱模型破口的距离为爆距 D_M ,该装置产生的气泡内部为高压气体,避免了爆炸产物对气泡观测的影响,同时使得气泡脉动以及周围流场情况测量更为准确。实验中使用的电火花气泡发生装置产生的气泡最大直径不超过 6 cm,水箱直径为 60 cm,大于 10 倍气泡直径,因此水箱侧面和底部边界对气泡脉动的影响可忽略不计。

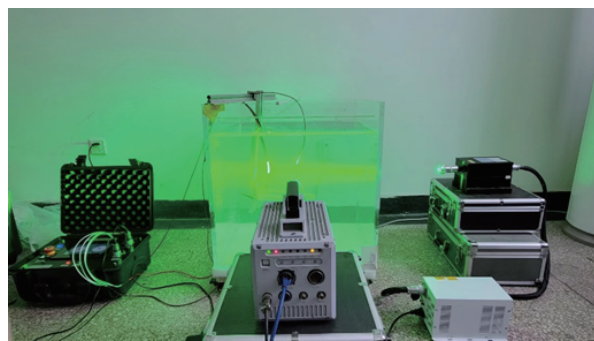


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental device

1.3 PIV 测速法

为测量水射流速度,引入 PIV 技术对圆柱模型底部水下爆炸时的流场进行观测及测量。在待测流

场中均匀布满粒径为 $10 \sim 60 \mu\text{m}$ 的玻璃示踪粒子, 玻璃示踪粒子为硅酸钠、二氧化硅和碳酸钠等烧结的混合物, 密度为 1.05 g/cm^3 , 折射率为 1.33%, 适用于 $1 \sim 50 \text{ m/s}$ 流速范围内的流体速度测量实验。激光器产生的激光通过扩束器及透镜组后转变为厚度 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 的均匀片光源覆盖待测流场, 示踪粒子在激光照射后折射一部分激光进入 CCD 相机, 通过高速摄像机连续采集时间间隔为 Δt 的目标场粒子位置图像, 得到不同时刻的瞬态粒子场, 测速系统如图 3 所示。

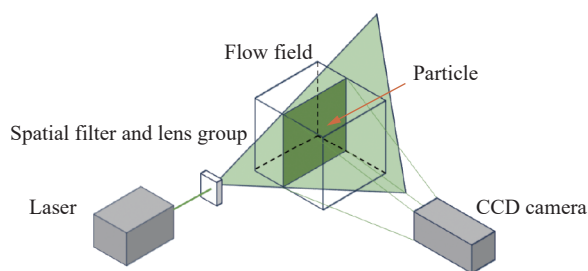


图 3 PIV 原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of PIV method

在 PIV lab 后处理软件中对比 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻 2 帧图像中示踪粒子的位置, 利用 2 个瞬态粒子场的空间信息得出某一瞬时时刻 t 的速度向量场, 重复此步骤即可得到完整气泡脉动周期的流场速度和水射流速度。PIV 测量实验的设备参数: 使用 10 W 连续激光器产生 532 nm 激光作为光源, 利用高速摄像机(型号: Photron SA4)拍摄清晰的气泡运动画面, 相机帧率为 10000 幅/秒 , 分辨率为 768×768 , 捕捉时间间隔为 0.1 ms 的清晰流场图像。对高速摄像机拍摄的画面进行标定, 调整相机的位置和焦距, 使拍摄画面尺寸与实际尺寸的比例为 $1:1$ 。

1.4 实验工况

1.4.1 自由场放电气泡脉动参照组实验

为了确定自由场条件下气泡的动力学行为, 首先进行了 3 组自由场放电气泡脉动实验作为参照组, 控制电火花装置放电电压均为 500 V 。参照组实验中, 气泡的最大半径分别为 4.95 、 5.01 和 5.00 cm , 记为工况 1~工况 3, 气泡脉动周期均为 4.8 ms 。如图 4 所示, 以工况 1 为例进行分析, 放电时铜丝交点处短路燃烧放热, 使得周围液体汽化, 并在内部高压驱动下迅速膨胀形成电火花气泡; 经过 2.4 ms 后气泡膨胀到最大, 此时气泡的最大半径为 4.95 cm ; 气泡达到最大体积后, 在内外压力差的作用下开始收缩, 4.8 ms 时被压缩到最小体积, 完成一个气泡脉动周期。由于细铜线的直径远小于气泡直径, 因此其对气泡脉动过程的影响可以忽略不计。

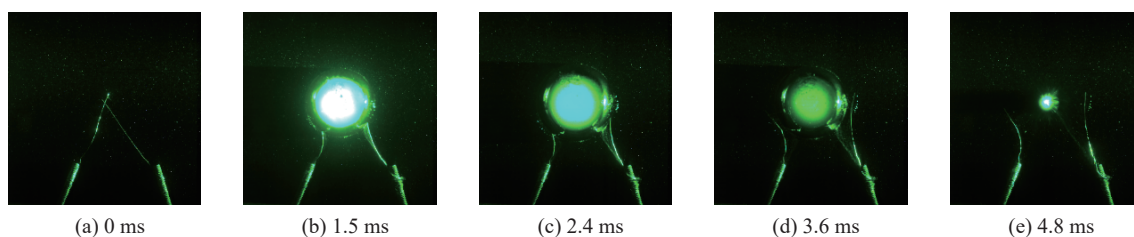


图 4 参照组实验(工况 1)的气泡脉动过程

Fig. 4 Bubble pulsation process of the reference group experiment (Case 1)

1.4.2 压力载荷实验

为了研究双层圆柱外壳结构对内壳壁面受到的压力载荷的影响, 分别在自由场条件下和双层圆柱结构附近进行压力载荷实验。在自由场条件下, 利用 PCB 自由场传感器, 分别测量 4 、 5 、 6 、 7 、 8 cm 爆距处的压力数据, 记为工况 F-1~工况 F-5。自由场中的爆距 D_F 为铜丝交点(爆心)到传感器的水平距离。将传感器垂直放置于铜丝交点附近, 连接电荷转换器和示波器, 自由场传感器灵敏度为 145 mV/MPa , 将示波器所示电压换算为压力数值(压力单位为 MPa)。

对模型 2 进行爆距为 1 、 2 、 3 、 4 、 5 cm 的电火花压力载荷实验, 记为工况 M1~工况 M5 测量内壁面的冲击波峰值压力、气泡脉动压力和气泡射流载荷压力。为了使实验工作具有普遍意义, 将爆距 D 和破口直径 d_w 2 个变量进行无量纲化, 定义爆距参数 γ 和破口参数 λ 分别为

$$\gamma = D/d_b \quad (1)$$

$$\lambda = d_w/d_b \quad (2)$$

式中： d_b 为自由场条件下气泡脉动的最大直径，取参照组工况 3 的实验结果 5.00 cm 进行计算。工况 M1~M5 的 γ 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0。

考虑到破口到内壁面的距离为 3 cm，因此对比自由场与模型 2 的实验压力数据时，选用的模型 2 的工况爆距比自由场条件下的爆距小 3 cm，例如，将模型 2 爆距为 1 cm 的实验工况与自由场条件下爆距为 4 cm 的实验工况进行对比。

1.4.3 不同破口参数电火花爆炸实验

为了研究不同破口参数对气泡脉动的影响，对 3 个模型分别进行爆距参数 γ 为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.6 和 0.8 的水下电火花爆炸实验，实验工况如表 2 所示。

表 2 模型 1~模型 3 的实验工况
Table 2 Experimental cases for Model 1–Model 3

Model	Case	λ	γ
1	M1-1	0.2	0
	M1-2	0.2	0.1
	M1-3	0.2	0.2
	M1-4	0.2	0.3
	M1-5	0.2	0.4
	M1-6	0.2	0.6
	M1-7	0.2	0.8
2	M2-1	0.4	0
	M2-2	0.4	0.1
	M2-3	0.4	0.2
	M2-4	0.4	0.3
	M2-5	0.4	0.4
	M2-6	0.4	0.6
	M2-7	0.4	0.8
3	M3-1	0.6	0
	M3-2	0.6	0.1
	M3-3	0.6	0.2
	M3-4	0.6	0.3
	M3-5	0.6	0.4
	M3-6	0.6	0.6
	M3-7	0.6	0.8

1.5 PIV 系统有效性验证

为了验证 PIV 实验测量的准确性，通过 LS-DYNA 软件对自由场下的第 3 参照组进行模拟，水下爆炸气泡的最大半径

$$R_m = 3.56 \left(\frac{W}{H + 10.33} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式中： W 为装药质量，单位 kg； H 为炸药所处位置水深，单位 m。由式 (3) 计算可知，在自由场条件下，0.0037 g TNT 产生的水下爆炸气泡最大直径为 5.01 cm，与实验中电火花装置产生的气泡最大直径十分接近，因

此,选取该当量 TNT 作为爆炸源进行模拟。

由于自由场实验工况具有对称性,为了提高计算效率,建立图 5 所示的 1/4 有限元模型,模拟水域大小为 30 cm×30 cm×60 cm,炸药位于 30 cm 水深处,采用渐变网格对模型进行划分,爆心区域网格尺寸为 0.45 mm,最远端网格尺寸为 10 mm,炸药采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 爆轰产物状态方程描述,即

$$p_e = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_z}{V} \quad (4)$$

式中: p_e 为爆轰产物的压力; V 为爆轰产物的相对体积; E_z 为炸药单位体积内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为表征炸药特性的参数,取值见表 3。表中: D_{CJ} 为 CJ 爆速, p_{CJ} 为 CJ 爆轰压力。

表 3 炸药的材料模型及状态方程参数

Table 3 Material model and equation of state parameter of the explosive

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D_{CJ}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{CJ}/GPa	E_z/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1630	6930	21.0	7.17	373.7	3.74	4.15	0.9	0.35

水介质选用*MAT_NULL 材料模型和*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 多项式状态方程描述

$$p_w = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_C \quad (5)$$

式中: p_w 为压力, $C_0 \sim C_6$ 为常数, E_C 为水的单位体积内能。具体参数取值见表 4。

表 4 水的材料模型及状态方程参数

Table 4 Material model and equation of state parameter of water

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0/GPa	C_1/GPa	C_2/GPa	C_3/GPa	C_4	C_5	C_6	E_C
1010	1.01×10^{-4}	2.036	8.432	8.014	0.4934	1.3937	0	2.05×10^{-4}

由于自由场条件下不会产生气泡射流,因此对第 1 次脉动周期结束时的气泡收缩速度进行分析,第 3 参照组气泡的最大收缩速度如图 6 所示,选取气泡最大直径 d_b 、气泡脉动周期 T_b 和气泡最大收缩速度(v_b)3 个关键参数进行对比(表 5),模拟计算结果与实验结果的最大误差为 12.1%,说明本实验中采用的 PIV 测速系统的测量结果准确。

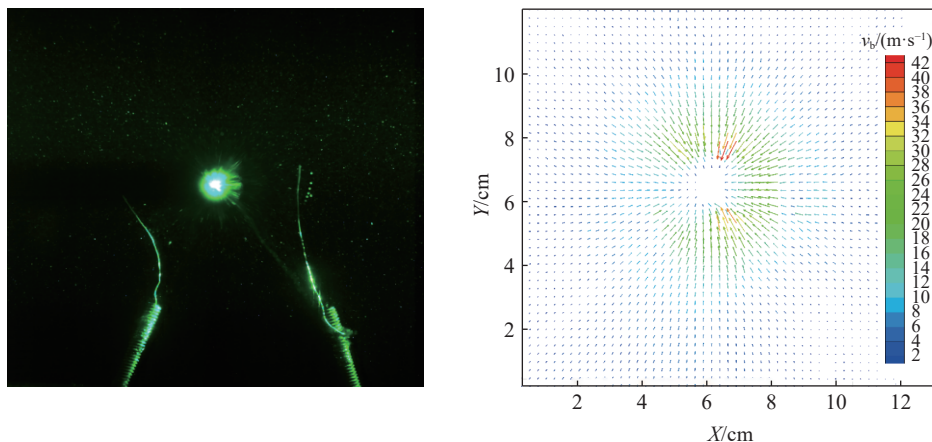


图 6 实验工况 3 气泡最大收缩速度测量结果

Fig. 6 Measurement results of maximum bubble contraction velocity of Case 3

表 5 实验与数值模拟结果对比

Table 5 Comparison between experimental and simulation results

d_b			T_b			v_b		
Exp./cm	Sim./cm	Error/%	Exp./ms	Sim./ms	Error/%	Exp./($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Sim./($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Error/%
5.00	4.99	0.2	4.80	4.42	8.5	43.118	49.069	12.1

2 实验结果及分析

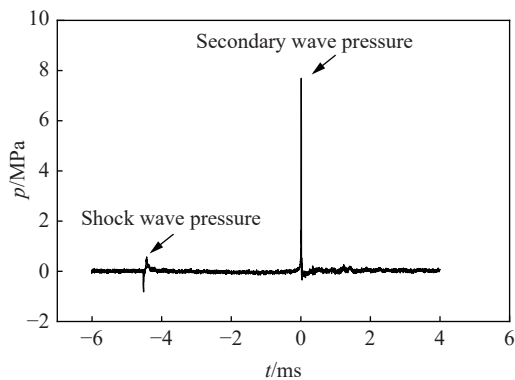
2.1 压力载荷实验结果及分析

在自由场条件下,电火花水下爆炸气泡能量主要集中于第 1 个气泡脉动周期,第 2、3 个脉动周期中能量较少,且第 2、3 个脉动周期中的气泡直径与第 1 个脉动周期相比大幅减小,因此研究重点放在气泡的第 1 个脉动周期。自由场条件下压力测试实验结果如表 6 和图 7 所示。第 1 个压力峰值为冲击波压力峰值,由铜丝通电短路燃烧瞬间产生,第 2 个压力峰值为气泡二次脉动压力峰值。气泡结束第 1 个脉动周期后,气泡体积缩小到最小,其内部压力高于周围环境的平衡压力,于是进行二次膨胀,产生气泡二次脉动压力。在自由场条件下,冲击波压力峰值和气泡二次脉动压力峰值均随着 D_F 的增大而减小。

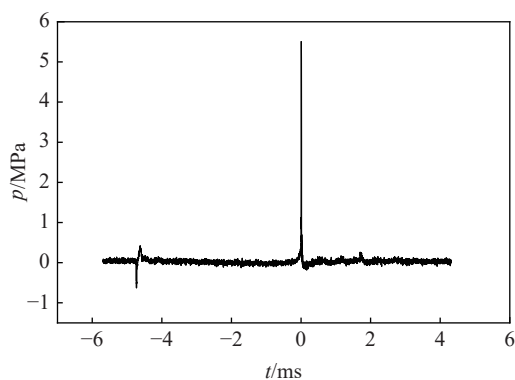
表 6 自由场压力测量实验结果

Table 6 Experimental results of free field pressure measurement

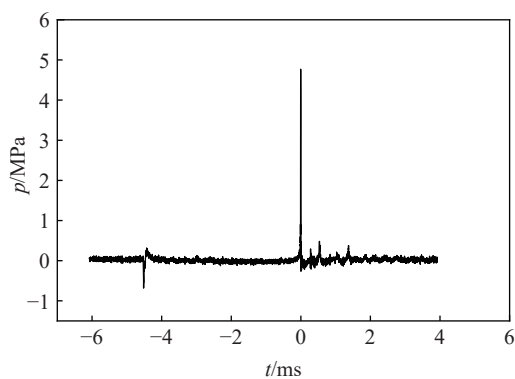
Case	D_F/cm	Shock wave pressure/MPa	Pressure of bubble secondary wave/MPa
F-1	4	0.573	7.692
F-2	5	0.454	5.818
F-3	6	0.372	4.772
F-4	7	0.291	3.798
F-5	8	0.261	2.482



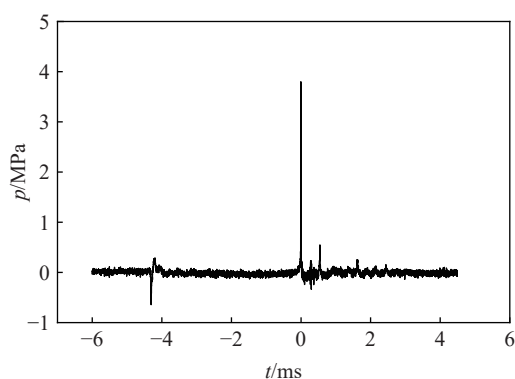
(a) Case F-1



(b) Case F-2



(c) Case F-3



(d) Case F-4

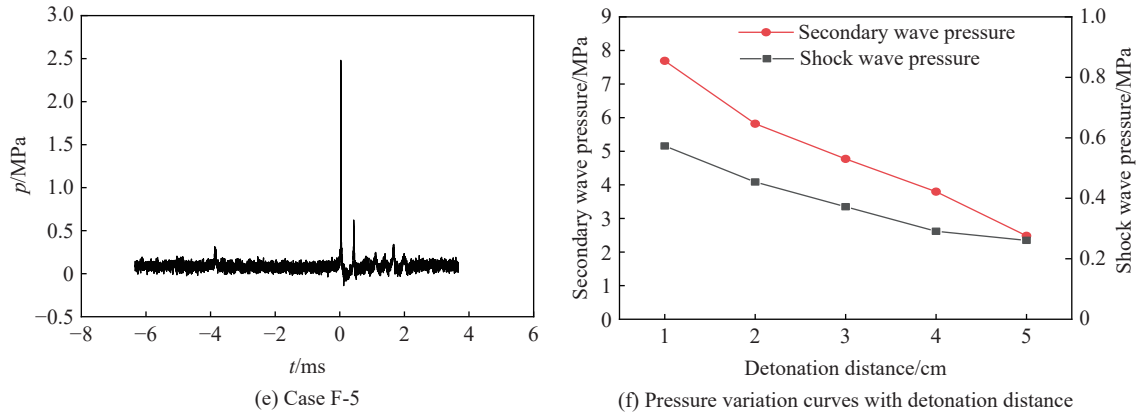


图 7 自由场条件下不同工况的压力时程曲线

Fig. 7 Pressure-time history curves of different cases under free field conditions

与自由场条件下相比,模型 2 的气泡脉动情况较为复杂。表 7 列出了模型 2 的压力实验结果。当周围存在圆柱壁面结构时,气泡脉动会受到结构的影响,在膨胀阶段受到结构表面的轻微排斥,而在坍塌阶段被结构强烈吸引,气泡二次和三次脉动时释放的气泡能占比增大。与自由场条件下相比,当周围存在壁面结构时,气泡二次和三次脉动时的最大直径会增大。对比自由场电火花实验结果与模型 2 的压力实验结果可以看出,圆柱结构壁面对冲击波峰值压力的影响不大,主要影响气泡脉动压力和气泡射流载荷,如图 8 所示。

表 7 模型 2 的压力实验结果

Table 7 Pressure experiment results of Model 2

Case	D/cm	γ	Shock wave pressure/MPa	Pressure of secondary wave/MPa	Pressure of triple wave/MPa	Bubble jet load/MPa
M-1	1	0.2	0.594	3.575		1.025
M-2	2	0.4	0.466	2.085		1.297
M-3	3	0.6	0.381	6.325	2.338	0.404
M-4	4	0.8	0.284	7.317	3.032	
M-5	5	1.0	0.267	2.332	0.372	

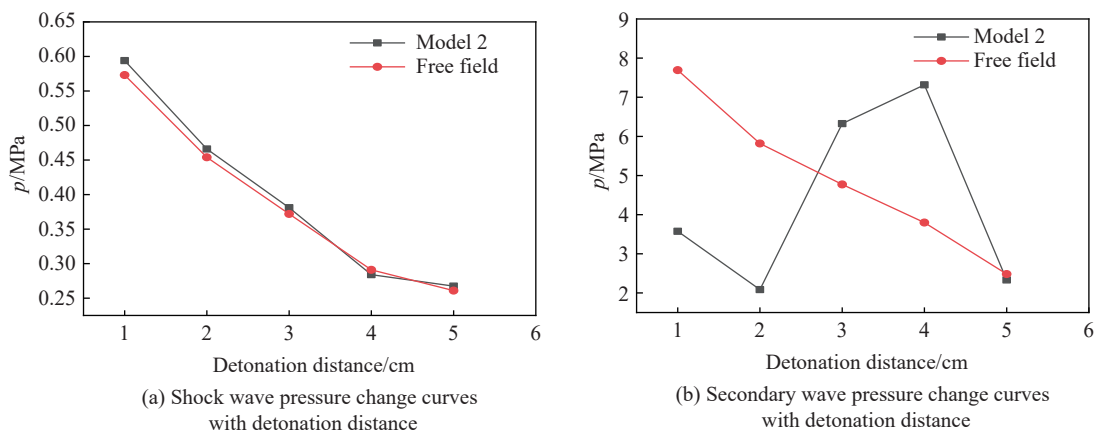


图 8 自由场和模型 2 的压力-爆距曲线对比

Fig. 8 Comparison of pressure-explosion distance curves between the free field and Model 2

如图 9(a)~图 9(b) 所示,模型 2 中,当 γ 为 0.2 和 0.4 时,气泡二次脉动压力小于自由场条件下的二次峰值压力,且气泡溃灭后产生了气泡射流,对双层圆柱内壁面施加了射流载荷。结合图 10 所示的高

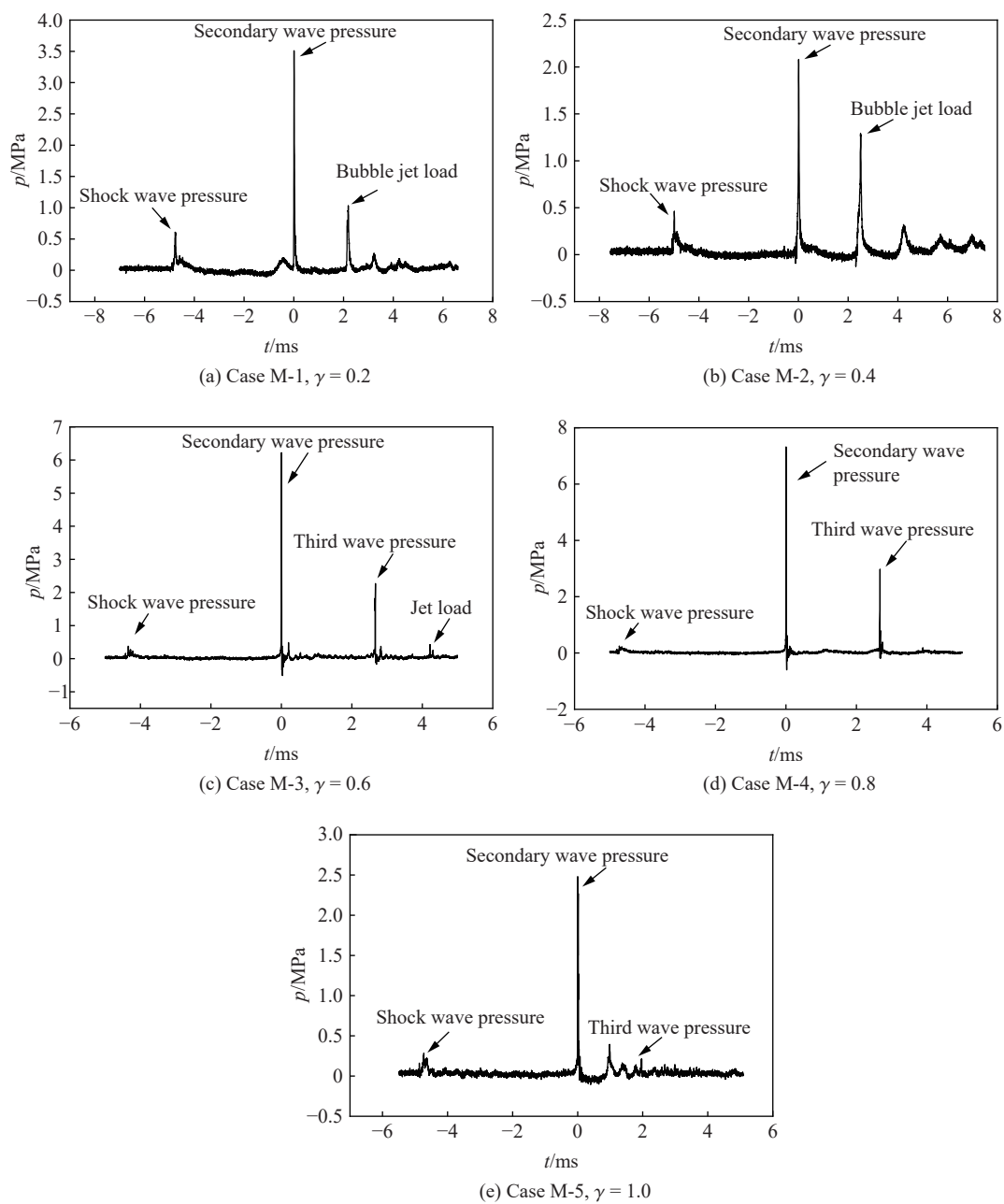
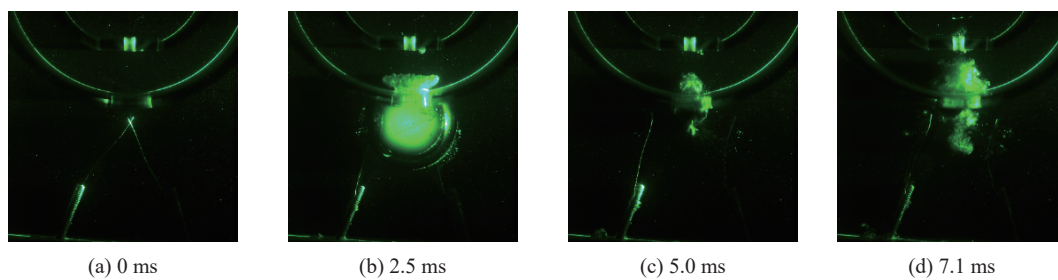


图 9 不同爆距下模型 2 的压力时程曲线

Fig. 9 Pressure-time history curves of Model 2 with different γ 图 10 $\gamma = 0.2$ 时模型 2 的气泡脉动过程Fig. 10 Bubble pulsation process of Model 2 with $\gamma = 0.2$

速摄影机拍摄的脉动过程,分析发现:当 $\gamma = 0.2$ 时,电火花装置起爆后首先产生的第 1 个峰值压力为冲击波压力;随后气泡开始膨胀进入第 1 个气泡脉动周期,由于气泡距离破口较近,气泡膨胀时发生了“腔吸效应”,气泡被分割成“舱内”气泡和“舱外”气泡,部分气泡能量随着“舱内”气泡的溃灭而释放,而“舱外”气泡体积相对于自由场中的气泡小,在 5.0 ms 时收缩到最小体积,产生的气泡二次脉动压力相较于自由场条件下也较小;受破口的限制,在 7.1 ms,第 2 个气泡脉动周期未完成时气泡溃灭形成了射流,产生第 3 个峰值压力,即气泡射流载荷。

如图 11 所示,当 $\gamma = 0.6$ 时,由于起爆点距离破口较远,破口对气泡形态的影响减弱,在 2.5 ms 时,气泡膨胀到最大体积,气泡在第 1 个脉动周期中保持完整的球形。但受壁面结构的限制,更多气泡能量在第 2 个脉动周期中释放,4.8 ms 时产生的气泡二次脉动压力峰值大于自由场条件下的气泡二次脉动压力峰值。气泡上方仍有空间,允许气泡完成第 2 个脉动周期,气泡在 7.0 ms 时膨胀到第二次脉动周期中的最大体积,在 7.5 ms 时产生了气泡三次脉动压力,9.5 ms 时溃灭形成射流产生气泡射流载荷,如图 9(c) 所示。

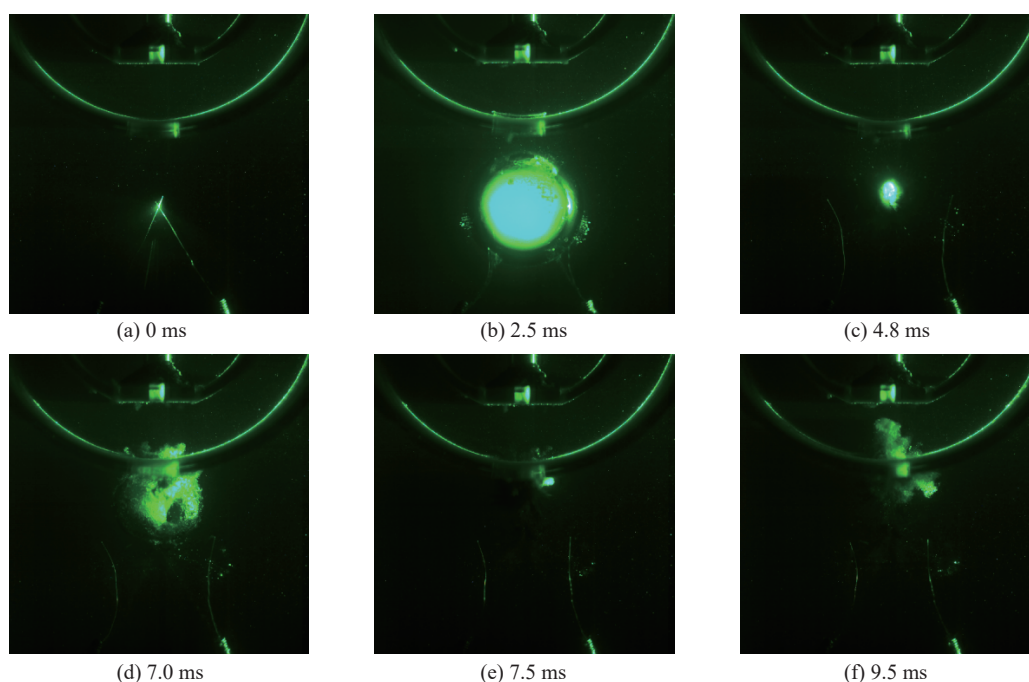


图 11 $\gamma = 0.6$ 时模型 2 的气泡脉动过程

Fig. 11 Bubble pulsation process of Model 2 with $\gamma = 0.6$

当 $\gamma = 0.8$ 时,气泡脉动过程与 $\gamma = 0.6$ 的工况相近,此工况条件下气泡二次脉动压力峰值最大,产生了气泡三次脉动压力波,但内壁面没有检测到气泡射流载荷,如图 9(d) 所示。当 $\gamma = 1.0$ 时,气泡二次脉动峰值压力小于自由场条件下的二次压力波载荷,但存在气泡三次压力波,如图 9(e) 所示。此时,圆筒结构对气泡脉动的影响较小,模型 2 的压力实验结果与自由场接近。

2.2 不同爆距参数下的气泡脉动实验结果与分析

2.2.1 气泡脉动实验结果及分析

不同 γ 下 3 个模型的水下电火花爆炸实验结果见表 8~表 10。利用 PIV lab 软件对高速摄像机拍摄的图像进行后处理,得到气泡射流方向和速度。由于气泡溃灭生成射流时的速度在极短时间内变化较大,高速相机难以捕捉图像,因此选取拍摄到的气泡收缩至最小时的图像进行分析,取计算得到的最大速度为瞬时射流速度。通过测量水射流产生之后到达内壁面的行进距离以及花费的时间,计算得到速度,将其记为平均射流速度。表 8~表 10 中的射流速度均指朝向圆筒内壁即向上的射流速度。

表 8 模型 1 的气泡脉动实验结果

Table 8 Bubble pulsation experiment results of Model 1

Case	γ	Maximum bubble diameter/cm	Bubble pulsation period/ms	Jet direction	Instantaneous jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Mean jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
M1-1	0	4.50	4.0	Upward and downward	34.75	19.55
M1-2	0.1	4.95	4.5	Upward and downward	41.44	25.56
M1-3	0.2	5.08	4.9	Upward and downward	38.56	17.49
M1-4	0.3	4.95	5.0	Upward and downward	38.88	12.68
M1-5	0.4	5.02	5.1	Upward and downward	41.68	12.01
M1-6	0.6	5.01	5.0	Upward	24.51	7.85
M1-7	0.8	5.02	4.9			

表 9 模型 2 的气泡脉动实验结果

Table 9 Bubble pulsation experiment results of Model 2

Case	γ	Maximum bubble diameter/cm	Bubble pulsation period/ms	Jet direction	Instantaneous jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Mean jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
M2-1	0	4.97	4.4	Upward and downward	44.74	25.08
M2-2	0.1	4.95	4.8	Upward and downward	42.18	23.03
M2-3	0.2	5.15	5.0	Upward and downward	44.31	17.88
M2-4	0.3	5.05	4.9	Upward and downward	42.01	12.94
M2-5	0.4	5.00	4.7	Upward	40.13	10.42
M2-6	0.6	5.19	5.1	Upward		5.61
M2-7	0.8	5.00	5.0			

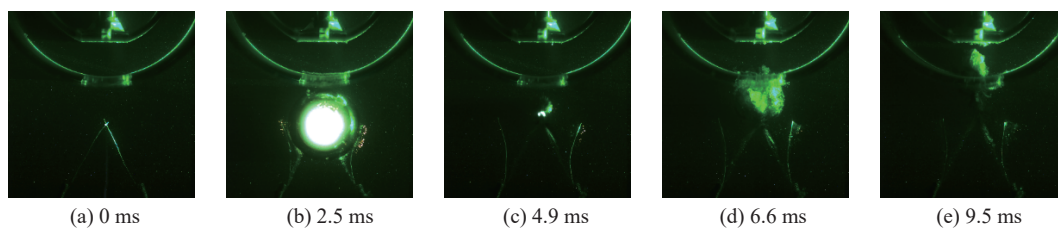
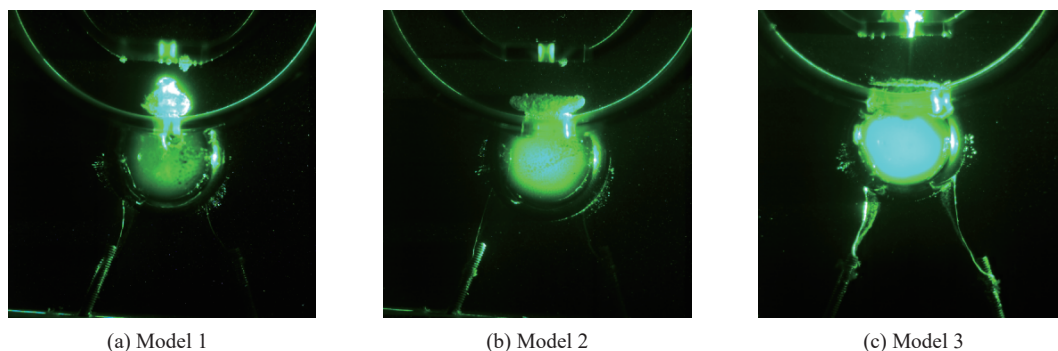
表 10 模型 3 的气泡脉动实验结果

Table 10 Bubble pulsation experiment results of Model 3

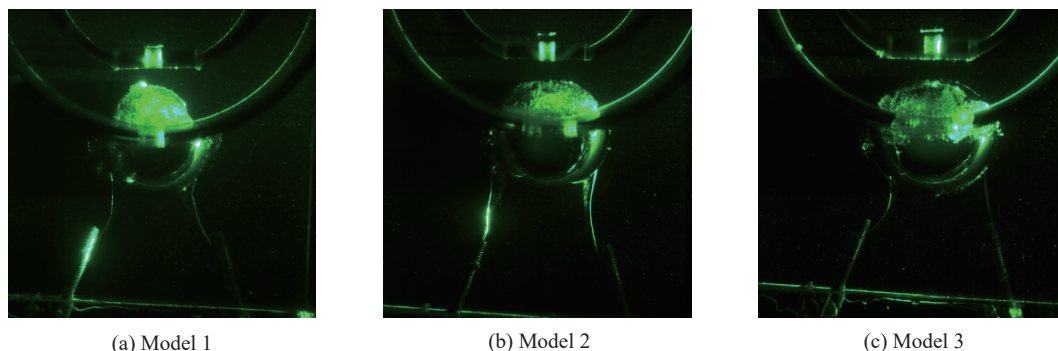
Case	γ	Maximum bubble diameter/cm	Bubble pulsation period/ms	Jet direction	Instantaneous jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Mean jet velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
M3-1	0	5.37	4.8	Upward	40.91	30.49
M3-2	0.1	4.90	4.9	Upward	43.17	26.92
M3-3	0.2	4.75	5.0	Upward	42.79	16.37
M3-4	0.3	5.01	5.0	Upward	46.51	17.69
M3-5	0.4	4.95	4.8	Upward	28.76	9.38
M3-6	0.6	4.98	4.9	Upward		2.88
M3-7	0.8	5.00	5.0			

爆距参数 γ 和破口参数 λ 是影响气泡脉动和气泡射流的重要参数。当 $\gamma \geq 0.6$ 时, 双层圆柱结构对气泡脉动的影响逐渐减小, 气泡第 1 次脉动周期和气泡最大直径逐渐趋近于自由场条件下的脉动周期和最大直径。选取模型 3($\gamma = 0.6$)作为典型工况进行分析, 结果如图 12 所示。初始时刻铜丝通电, 气泡随之产生并膨胀, 2.5 ms 时膨胀至最大, 4.9 ms 时收缩至最小, 随后气泡进行二次脉动, 二次脉动周期结束后气泡溃灭, 9.5 ms 时产生了向上的射流。

当 $\gamma \leq 0.4$ 时, 气泡在第 1 次脉动周期内会受到破口边界的阻碍作用, 气泡分为舱内气泡和舱外气泡, 如图 13 所示。舱内气泡还受到破口大小的影响, 破口越小, 对舱内气泡膨胀的限制越大。模型 1 破口直径最小, 舱内气泡的运动范围也最小。

图 12 $\gamma = 0.6$ 时模型 3 的气泡脉动过程Fig. 12 Bubble pulsation process of Model 3 with $\gamma = 0.6$ 图 13 $\gamma = 0.2$ 时不同模型破口附近的气泡脉动形态Fig. 13 Bubble pulsation patterns near different models with $\gamma = 0.2$

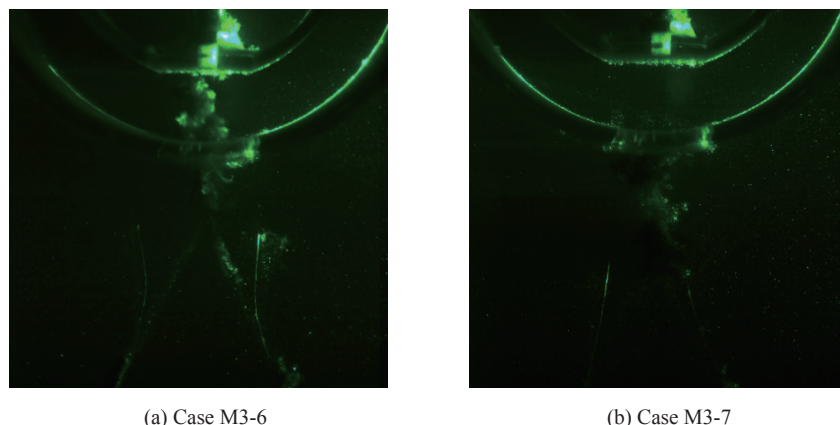
如图 14 所示, 当 $\gamma = 0$ 时, 舱外气泡脉动会受到破口参数的影响。模型 1 的破口参数 $\lambda = 0.2$, 舱外气泡膨胀受到破口的限制较大, 舱外气泡的最大直径最小; 模型 2 的破口参数 $\lambda = 0.4$, 舱外气泡受破口的影响较小, 舱外气泡的最大直径与自由场气泡的最大直径接近; 模型 3 的破口参数 $\lambda = 0.6$, 舱外气泡的最大直径大于自由场气泡的最大直径。

图 14 $\gamma = 0$ 时不同模型破口附近的气泡脉动形态Fig. 14 Bubble pulsation patterns near different models with $\gamma = 0$

2.2.2 气泡射流实验结果及分析

爆距参数 γ 决定了是否能够产生有效射流以及射流速度, 如图 15 所示, 选取工况 M3-6 和 M3-7 作为典型工况进行分析, 可以看出: $\gamma \geq 0.8$ 时, 射流无法到达内壁面, 属于无效射流; 当 $\gamma = 0.6$ 时, 气泡溃灭后形成的射流在到达内壁面时速度已经大幅衰减, 毁伤效果减弱。

PIV 测量的不同 γ 下气泡的射流速度流场结果见表 8~表 10。当 $\gamma \leq 0.6$ 时, 射流的成因可以用著名的 Bjerknes 效应来解释。在 Bjerknes 力作用下, 气泡会被水中壁面结构吸引而向壁面结构方向运动, 由于气泡在圆柱模型下方生成, 因此在 Bjerknes 力、浮力、惯性力等因素的影响下, 气泡脉动时会向上朝圆柱模型运动, 气泡下表面往上收缩, 沿着气泡坍塌方向形成高速射流。当 $\gamma = 0.8$ 时, 模型 1~模型 3 附近均不产生有效射流。当 $\gamma \leq 0.4$ 、 $\lambda \leq 0.4$ 或 $\gamma \leq 0.3$ 、 $\lambda = 0.6$ 时, 受破口的限制, 气泡一次脉动后就溃灭形成射流, 最大射流速度在 34.75~46.51 m/s 范围内。



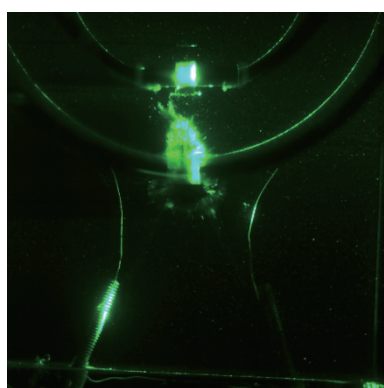
(a) Case M3-6

(b) Case M3-7

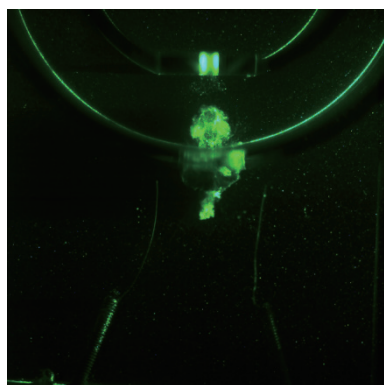
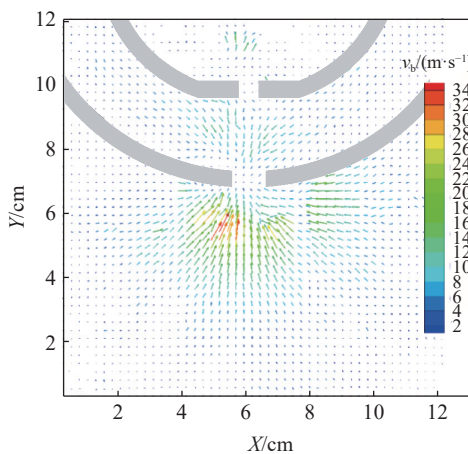
图 15 工况 M3-6 和工况 M3-7 气泡的射流形态

Fig. 15 Bubble jet pattern of Case M3-6 and Case M3-7

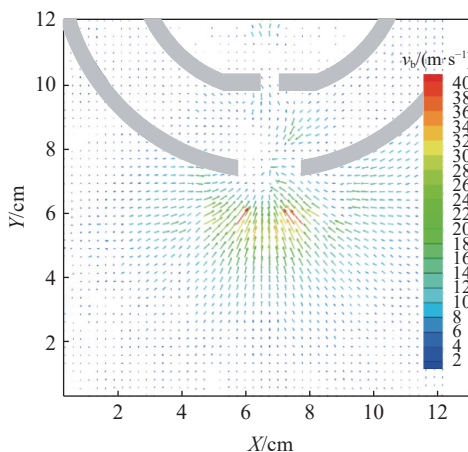
几种典型工况下气泡的射流速度测量结果如图 16 所示。工况 M1-1 中, 气泡的瞬时射流速度最小, 这是由于起爆点距离破口最近且破口直径最小, 气泡脉动受到的限制最大。工况 M3-5 中, 当 $\gamma = 0.4$ 、 $\lambda = 0.6$ 时, 气泡距离结构较远, 且破口直径较大, 气泡上方有充足的空间可以进行二次脉动, 气泡完成二次脉动周期后溃灭形成气泡射流, 二次脉动释放了部分能量, 此时气泡的瞬时射流速度减小至 28.76 m/s, 如图 16(d) 所示。如图 16(e) 所示, 当 $\gamma = 0.6$ 时, 模型 1~模型 3 破口附近气泡均进入二次脉动周期, 测得工况 M1-6 的瞬时射流速度为 24.51 m/s, 但模型 2、模型 3 破口附近在二次脉动周期时气泡运动的范围过小, 软件无法分析, 无瞬时射流速度。



(a) M1-1



(b) M2-3



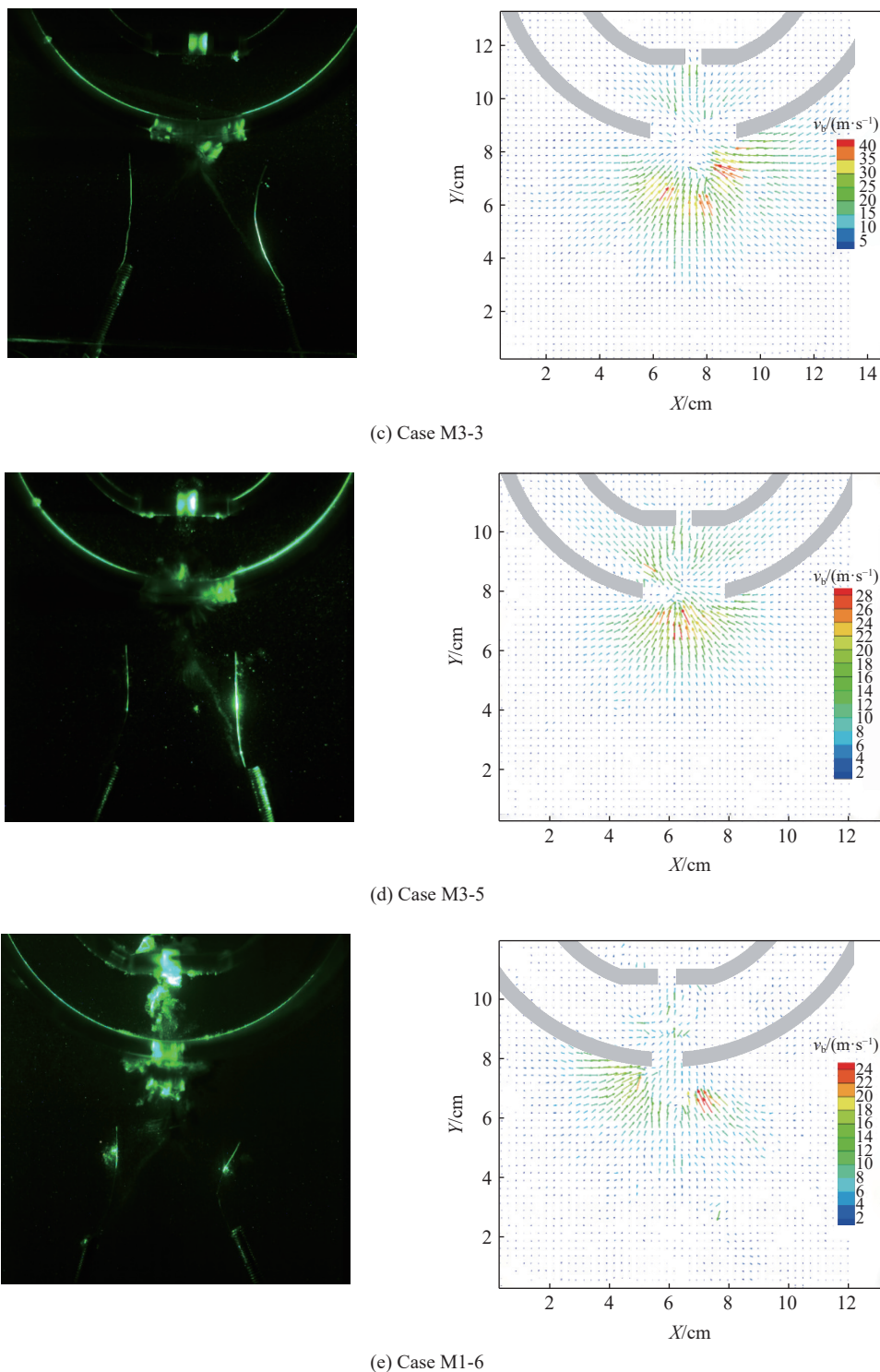


图 16 几种典型工况下瞬时射流速度的 PIV 结果

Fig. 16 Jet velocities obtained by PIV for several typical cases

当 γ 较小时, λ 决定了射流的方向。当 $\lambda \geq 0.6$ 时, 舱内气泡受到破口的限制作用较小, 与舱外气泡同时脉动并溃灭, 形成向上的射流。当 $\lambda \leq 0.4$ 时, 出现向上、向下及其他不同方向的水射流, 这是由于舱内气泡受到破口的限制作用较大, 其收缩速度大于舱外气泡, 舱内气泡先溃灭形成向下的射流, 击穿舱外气泡, 随后舱外气泡继续收缩, 最终形成向上的射流, 如图 17 所示。不同工况下射流的形成条件如图 18 所示。模型 1 的 $\lambda = 0.2$, 当 $\gamma \leq 0.4$ 时, 有向上、向下射流产生; 当 $0.4 < \gamma \leq 0.6$ 时, 只产生向上射

流; $\gamma \geq 0.8$ 时, 不产生有效射流。模型 2 的 $\lambda = 0.4$, 当 $\gamma \leq 0.3$ 时, 有向上、向下射流产生; 当 $0.3 < \gamma \leq 0.6$ 时, 只产生了向上射流; 当 $\gamma \geq 0.8$ 时, 不产生有效射流。模型 3 的 $\lambda = 0.6$, 当爆距参数 $\gamma \leq 0.6$ 时, 只产生向上的有效射流; 当 $\gamma \geq 0.8$ 时, 不产生有效射流。从表 8~表 10 中的数据可以看出, 平均射流速度随着 γ 的增大而减小, 这是因为随着射流向前运动, 射流速度不断衰减。

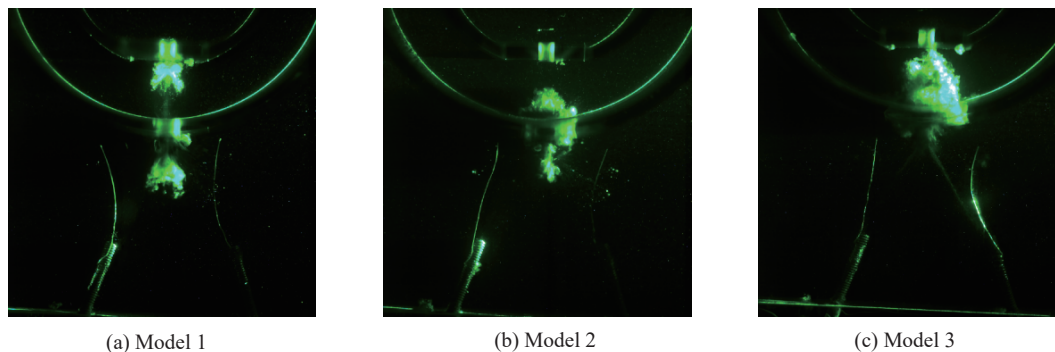


图 17 $\gamma = 0.2$ 时不同模型破口附近的气泡射流形态
Fig. 17 Bubble jet pattern near different models with $\gamma = 0.2$

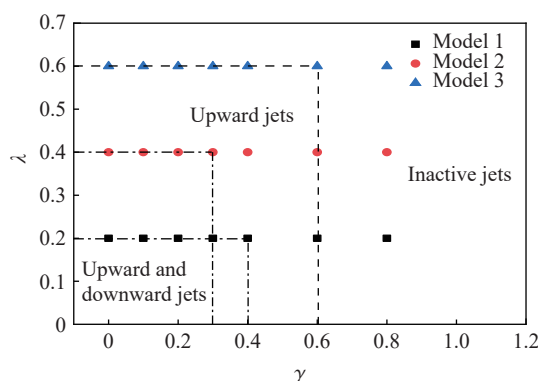


图 18 不同模型破口附近射流的形成条件
Fig. 18 Conditions of jet formation near different models

3 结 论

基于 PIV 技术对带破口双层圆柱结构附近气泡脉动和气泡载荷特性开展了实验研究, 探究了爆距参数和破口参数对气泡脉动和流场特征的影响, 得出如下结论。

(1) 带破口的双层圆柱结构对水下爆炸冲击波峰值压力的影响较小, 主要影响气泡脉动压力和射流载荷压力。当 $\gamma = 0.2$, $\gamma = 0.4$ 时, 气泡的二次压力波相对于自由场工况小, 且产生了射流载荷; 当 $\gamma = 0.6$, $\gamma = 0.8$ 时, 气泡的二次压力波相对于自由场工况大, 且存在三次压力波; 当 $\gamma = 1.0$ 时, 压力结果与自由场结果相似。

(2) 爆距参数 γ 和破口参数 λ 是影响气泡脉动和气泡射流的 2 个重要参数。当 $\gamma \geq 0.4$ 时, 气泡脉动的第 1 个周期与自由场大致相同; 当 $\gamma < 0.4$ 时, 脉动受到破口边界的阻碍作用, 产生的气泡分为舱内气泡和舱外气泡; 当 $\gamma = 0$ 时, 舱外气泡的脉动受破口参数 λ 的影响; 当 $\lambda = 0.6$ 时, 舱外气泡的最大直径大于自由场条件下气泡的最大直径; 当 $\lambda \leq 0.2$ 时, 舱外气泡的膨胀受到破口的限制较大, 舱外气泡的最大直径小于自由场气泡的最大直径。

(3) 采用 PIV 技术, 获得了不同时刻气泡周围水介质的速度矢量图, 测量得到不同 γ 下双层圆柱破口附近的瞬时最大水射流速度为 24.51~46.51 m/s, 平均水射流速度 (2.88~30.49 m/s) 随着爆距的增大而减小。

(4) 爆距参数 γ 决定了是否产生有效射流。当 $\gamma \leq 0.6$ 时, 气泡溃灭产生的射流能够到达双层圆柱内壁面, 内壁面受到气泡射流压力的影响; 当 $\gamma \geq 0.8$ 时, 气泡射流无法到达圆筒内壁面, 属于无效射流。

(5) 当 $\gamma \leq 0.4$ 时, 破口参数 λ 决定了射流的方向。当 $\lambda \geq 0.6$ 时, 气泡溃灭只产生向上的射流; 当 $\lambda \leq 0.4$ 时, 舱内气泡先溃灭形成向下的射流, 射流击穿舱外气泡后, 舱外气泡继续收缩, 最终形成向上的射流。

参考文献:

- [1] 王玉, 卢熹, 张方方, 等. 反潜鱼雷战斗部对典型潜艇目标毁伤效应研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(12): 112–116.
WANG Y, LU X, ZHANG F F, et al. Damage effect of anti-submarine torpedo warhead on typical submarine targets [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(12): 112–116.
- [2] 贺铭, 张阿漫, 刘云龙. 近场水下爆炸气泡与双层破口结构的相互作用 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 111402.
HE M, ZHANG A M, LIU Y L. Interaction of the underwater explosion bubbles and nearby double-layer structures with circular holes [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 111402.
- [3] 吴林杰, 侯海量, 朱锡, 等. 水下接触爆炸下防雷舱舷侧空舱的内压载荷特性仿真研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(1): 143–150.
WU L J, HOU H L, ZHU X, et al. Numerical simulation on inside load characteristics of broadside cabin of defensive structure subjected to underwater contact explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(1): 143–150.
- [4] 杨棣, 姚熊亮, 张玮, 等. 水下近场及接触爆炸作用下双层底结构损伤试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(2): 161–165, 186.
YANG D, YAO X L, ZHANG W, et al. Experimental on double bottom's structural damage under underwater near-field and contact explosions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(2): 161–165, 186.
- [5] 苏标, 姚熊亮, 孙龙泉, 等. 水下接触爆炸作用下双层加筋板架结构的损伤特征 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(Suppl 1): 127–134.
SU B, YAO X L, SUN L Q, et al. Damage characteristics of double-layer stiffened shell subjected to underwater contact explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(Suppl 1): 127–134.
- [6] 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.
SUN Y X, LIU X, CHEN Y W, et al. Research progress of underwater explosion bubble jet and its damage to structures [J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(1): 1–7.
- [7] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(5): 055104.
LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Pressure characteristics of shallow water explosion near the rigid column [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(5): 055104.
- [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.
YAO X L, LIU W T, ZHANG A M, et al. Review of the research on underwater explosion bubbles and the corresponding structural damage [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(1): 36–45.
- [9] QUAH E W, KARRI B, OHL S W, et al. Expansion and collapse of an initially off-centered bubble within a narrow gap and the effect of a free surface [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 99: 62–72.
- [10] CHEN Y Y, YAO X L, CUI X W, et al. Experimental investigation of bubble dynamics near a double-layer plate with a circular hole [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109715.
- [11] 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.
CHEN Y W, SUN Y X, WANG C. Damage characteristics of ship's double bottom structure subjected to underwater explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(3): 670–681.

Bubble Dynamics Characteristics Near Double-Layer Cylindrical Structures with a Hole Based on PIV Experiments

SUN Yuanxiang, QIN Jiahong, CHEN Yanwu, WANG Cheng

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: After the outer shell of the double-shell submarine is damaged by the near-field underwater explosion shock wave, the subsequent bubble pulsation and jet load will continue to cause serious damage to the inner shell of the submarine. Therefore, it is of great significance to study the characteristics of bubble pulsation and bubble load near the hole. Based on the double-shell submarine structure damaged by the shock wave, a double-layer cylindrical structure model with a prefabricated circular hole is made. Using an electric spark device as the bubble generator, the interaction experiments between bubbles and double-layer cylindrical structure with a hole under different explosion distance parameters (the ratio of explosion distance to the maximum diameter of bubbles) and different hole parameters (the ratio of hole diameter to the maximum diameter of bubbles) are carried out. A high-speed camera is used to capture the bubble pulsation and jet formation process near the double-layer cylindrical structure. The particle image velocimetry technology is used to test the velocity of the explosion flow field to obtain the jet velocity after the bubble collapse. At the same time, a pressure sensor is used to measure the pressure load on the inner cylindrical shell wall. The experimental results show that the detonation distance parameters determine the form of pressure load on the inner wall, whether effective jet is generated after the bubble collapse, and the jet velocity. When the detonation distance parameters are within a certain range, the hole parameters will affect the bubble pulsation and the direction of the water jet generated after the bubble collapse.

Keywords: underwater explosion; bubble pulsation; bubble jet; particle image velocimetry technology