

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.019

## 近场水下爆炸气泡与目标尺寸匹配关系研究\*

刘元凯<sup>1</sup>,秦健<sup>1,2</sup>,迟卉<sup>3</sup>,孟祥尧<sup>2</sup>,文彦博<sup>4</sup>,黄瑞源<sup>4</sup>

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,南京 210094;2. 海军研究院,北京 100161;  
3. 防化研究院,北京 102205;4. 福州大学土木工程学院,福州 350116)

**摘要:** 为了探究不同尺寸结构与气泡的相互作用机理,开展了2.5 g TNT在边长为20 cm、40 cm和70 cm固支方板底部15 cm处起爆的水下爆炸实验,通过观察实验高速录像以及传感器测得的压力数据结果得到:板的尺寸过小时,气泡在膨胀过程中会与空气接触,使得气泡脉动过程终止。为进一步探究爆炸气泡与目标尺寸的匹配关系,采用Abaqus软件中的CEL算法,固支方板以拉格朗日网格建立,其余部分以欧拉网格建立,对近场水下爆炸气泡的动力学行为以及压力数据进行数值模拟,通过将仿真结果与实验拍摄到的气泡现象与测得的压力时程曲线做对比验证了仿真方法的可行性。以爆炸深度除以最大气泡半径为比深度,以板的边长除以最大气泡半径为边长,接着开展了板边长为0.455到3.182倍最大理论气泡半径、爆距为0.455到1.136倍最大理论气泡半径的系列仿真。仿真结果表明:随着板尺寸的减小,气泡越容易提前溃散;无量纲板尺寸和无量纲爆深为变量给出能否形成一个完成气泡脉动的分界函数;爆距与板尺寸距离分界线越近,气泡脉动结束时间越早。

**关键词:** 水下爆炸;气泡脉动;固支方板;爆炸深度

中图分类号: O382.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)04-0142-12

## Study on Matching Relationship Between Bubble and Target Size in Near-field Underwater Explosion

LIU Yuan-kai<sup>1</sup>, QIN Jian<sup>1,2</sup>, CHI Hui<sup>3</sup>, MENG Xiang-yao<sup>2</sup>, WEN Yan-bo<sup>4</sup>, HUANG Rui-yuan<sup>4</sup>

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China;  
3. Research Institution of Chemical Defense, Beijing 102205, China;  
4. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** In order to explore the interaction mechanism between the structure of different sizes and the bubbles, an underwater explosion experiment of 2.5 g TNT was carried out at the bottom 15 cm of the fixed square plates with side lengths of 20 cm, 40 cm and 70 cm. Through the observation of the experimental high-speed video and the pressure data measured by the sensor, it is found that when the size of the plate is too small, the bubble will contact with the air during the expansion process, and the bubble pulsation process will be terminated. In order to further explore the matching relationship between the explosion bubble and the target size, CEL algorithm in Abaqus software was

收稿日期 (Date of reception): 2022-11-17

网络首发日期 (Published online): 2023-04-06

作者简介: 刘元凯 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水下爆炸载荷研究, (E-mail) yuankailiu@njust.edu.cn。

通讯作者: 黄瑞源 (1984-), 男, 博士、研究员, 主要从事爆炸与冲击动力学研究, (E-mail) huangruiyuan1984@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (12172178)

**About the author:** LIU Yuan-kai (1998-), male, postgraduate student, mainly engaged in the underwater explosion load research, (E-mail) yuankailiu@njust.edu.cn.

**Corresponding author:** HUANG Rui-yuan (1984-), male, Ph. D., mainly engaged in explosive and shock dynamics research, (E-mail) huangruiyuan1984@163.com.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (12172178)

used to establish the fixed square plate with Lagrange grid and the remaining part with Euler grid. The dynamic behavior and pressure data of the near-field underwater explosion bubble were numerically simulated. The feasibility of the simulation method is verified by comparing the simulation results with the bubble phenomenon captured in the experiment and the measured pressure time history curve. Taking the explosion depth divided by the maximum bubble radius as the specific depth and the side length of the board divided by the maximum bubble radius as the side length, a series of simulations were carried out with the side length of the board being 0.455 to 3.182 times the maximum theoretical bubble radius and the explosion distance being 0.455 to 1.136 times the maximum theoretical bubble radius. The simulation results show that with the decrease of plate size, the bubbles are more likely to collapse in advance. With dimensionless plate size and dimensionless explosion depth as variables, a boundary function is given to complete the bubble pulsation. The closer the distance between explosion distance and plate size, the earlier the end time of bubble pulsation.

**Key words:** underwater explosion; bubble pulsation; fixed square plate; explosion depth

鱼雷作为现代海上战争中重要的武器<sup>[1,2]</sup>,具有杀伤力大,毁伤效果强等特点。相比同当量的反舰导弹,鱼雷可以对敌方船体造成更严重的打击效果。这主要是因为鱼雷在水下爆炸,不但会形成冲击波,还会形成气泡脉动以及水射流对船体造成毁伤<sup>[3-6]</sup>。所以关于水下爆炸的研究一直是近现代的热点,如 Cole 在 1948 年发表《Underwater Explosion》一书从水下爆炸现象、水下爆炸冲击波以及气泡理论等方面阐述水下爆炸相关理论与机理<sup>[7]</sup>,之后 Zamyshlyayev 在其基础上改进水下爆炸冲击波载荷经验公式也得到广泛使用<sup>[8]</sup>。近些年来各学者对于水下爆炸公式与参数的研究依然没有停止<sup>[9-14]</sup>。现代随着科学技术的发展,有更多的方法测量水下爆炸的载荷以及气泡特性<sup>[15-17]</sup>,越来越多学者开始着手研究之前难以观测研究的气泡脉动水射流阶段。段超伟等对气泡动态特性的研究进展从实验、理论以及数值模拟进行了系统阐述<sup>[18]</sup>。文彦博等经过研究得出固支方板加快气泡坍塌过程且炸药与板距离越小会更加速气泡坍塌的结论<sup>[19]</sup>,即近场结构对于气泡脉动的影响。董琪等利用 LS-DYNA 软件对不同深度浅水爆炸进行数值模拟来研究爆炸深度对于气泡脉动的影响<sup>[20]</sup>,得出了随着爆炸深度的增加,气泡脉动受到自由面与重力影响减小的结论。王树山等人利用实验研究了不同比例深度条件下的气泡横向半径、纵向半径、膨胀时间等特性<sup>[21]</sup>,深入探究了水下爆炸气泡动力学过程,也是对于气泡脉动阶段的进一步探索。张姝红等依靠实验对水下爆炸气泡脉动的形成原因、周期等特点进行探讨<sup>[22]</sup>。关于近场结构对气泡的影响, Tong Shiyu 等利用实验与仿真结合<sup>[23]</sup>,揭示气泡破碎机理,研究气泡与板间距离对于气泡射流特性以及气泡动力学行为的影响; Hu Zhenyu 等通过数值模拟以及火花空化气泡试验分析气泡脉动与结构之间的相互作用关

系<sup>[24]</sup>,并分析了四种不同的气泡破碎模式;胡振宇等结合试验研究了五种不同的射流模式<sup>[25]</sup>,罗列了不同的气泡到结构的距离下,浮力与 Bjerknes 力对于气泡脉动阶段的影响特点。水下气泡脉动的形成与否极大影响爆炸毁伤效果,如果目标尺寸无法满爆炸气泡形成气泡脉动将极大地浪费爆炸能量。但是目前对于水下爆炸气泡关于板尺寸与爆炸深度之间的匹配关系研究较少,对于气泡脉动形成的边界研究不多,所以文章内容具有一定研究价值。

近场水下爆炸的毁伤效果受到目标尺寸以及气泡半径的共同影响,这些因素决定了气泡能否从空气中吸入气体从而影响气泡演化。为探究近场水下爆炸气泡与目标尺寸匹配关系,开展 2.5 g TNT 在不同大小固支方板下 15 cm 的水下爆炸试验,得到气泡图像以及压力曲线,从压力曲线可以得出相应工况下水下爆炸产生的气泡脉动峰值、比冲量以及周期等特性。同时开展数值模拟与实验对比证明仿真可行性。然后利用 ABAQUS 软件进行系列仿真,根据系列仿真结果总结近场水下爆炸气泡与目标尺寸匹配关系,将结果进行无量纲化处理并使用不同当量仿真结果进行验证,最后以爆深和气泡半径为变量给出了能否形成一个完整气泡脉动的分界线函数。

## 1 水下爆炸实验

### 1.1 实验装置

水下爆炸实验在江苏省淮安市盱眙县江苏永丰机械有限责任公司的水箱中完成。水箱规格为 2 m × 2 m × 2.2 m,厚度为 10 mm。水箱四周有 0.6 m × 0.6 m 的钢化玻璃窗,通过一侧的玻璃窗完成高速录像的记录,在另一侧玻璃窗利用补光灯对箱内进行补光,使高速摄像所捕捉到的影像更加清晰。高速录像使用的设备为 Vision Research 公司生产的 Phantom 高速摄像机。见图 1、图 2。

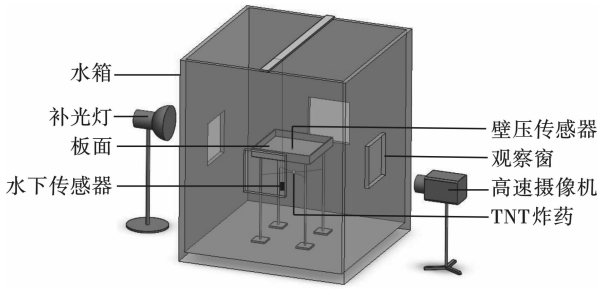


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup



图2 实验所使用的固支方板

Fig. 2 The clamped square plate used in the experiment

试验所使用炸药为 2.5 g 圆柱形压药的 TNT 炸药,炸药长径比为 1:1。TNT 采用 8 号雷管于底端引爆。实验所采用的固支方板分别是 20 cm × 20 cm × 1 cm、40 cm × 40 cm × 1 cm、70 cm × 70 cm × 1 cm 三种,焊接在 1.3 m 高的支架架上,支架为直

径 2 cm 的实心钢柱,四个柱脚分别焊接 20 cm × 20 cm × 0.5 cm 底板,钢架总重 80 kg,尽可能使固支方板在实验过程中减小晃动。在固支方板上连接有一个美国 PCB 公司生产的传感器,传感器位于固支方板正中心,炸药在传感器正下方相应爆距引爆,壁压传感器型号为 109C11 8771,量程为 690 MPa,灵敏度为 0.01 mV/kPa。在炸药水平面相应距离有水下传感器,编号为 11491。水下传感器下方绑有 1 kg 的铅锤确保实验过程中传感器的距离炸药距离不变,防止在实验准备阶段因为传感器质量较轻而随水漂动,实验所使用的传感器及灵敏度如表 1 所示。

表 1 实验所用传感器

Table 1 Parameters of example toroidal drive system

传感器类型	传感器编号	灵敏度 $\mu\text{C}/\text{MPa}$
壁压传感器	109C11 8771	10.70
水下传感器	11491	144.5

## 1.2 实验结果

实验使用 Phantom 高速摄影机进行拍摄,爆炸开始前 1 s 左右按下记录键开始记录,拍摄频率为 3200 fps,像素为 1280 × 800。试验结束后在整段录像中截取取出实验气泡图像从开始产生到完全溃散的图像。

图 3 为 70 cm × 70 cm × 1 cm 的板下爆炸产生的气泡图像,由实验录像看出气泡爆炸后 0 ms 到 22.50 ms 为气泡膨胀阶段,22.50 ms 到 39.06 ms 气泡收缩。由图像可以看出因板的尺寸较大,对爆炸气泡和空气起到良好的阻隔作用,所以气泡在膨胀后收缩形成气泡脉动。

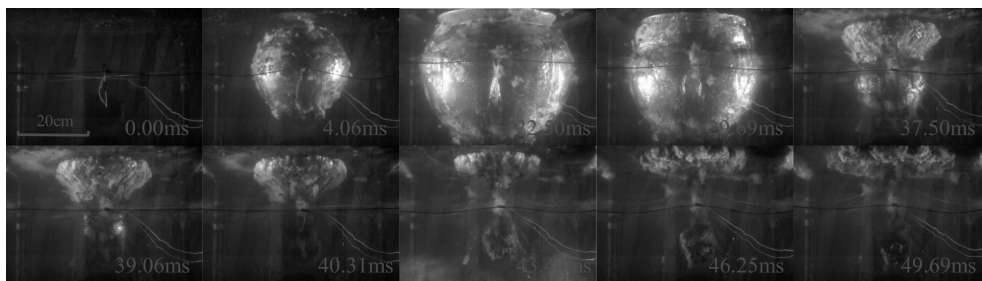


图3 70 cm × 70 cm × 1 cm 板下 15 cm 爆距实验录像

Fig. 3 Experimental image of 15 cm blast distance under 70 cm × 70 cm × 1 cm board

图 4 为 40 cm × 40 cm × 1 cm 板下实验录像图像,0 ms 到 20.63 ms 左右是气泡膨胀阶段,20.63 ms 到 40.94 ms 是气泡的收缩阶段。该板相较于 70 cm × 70 cm × 1 cm 的板更小,所以对空气的阻碍效果相对较差。从实验录像中可以明显看出气泡在收缩阶

段从空气中吸入的气体,即图 4 中 37.50 ms 图像虚线内区域,所以气泡在收缩后即溃灭。

20 cm × 20 cm × 1 cm 板下实验高速录像如图 5,由于当气泡膨胀到较大半径时依靠惯性继续膨胀,此时气泡内部压力小于外部,所以可以看出实验

爆炸产生的气泡在膨胀过程中到约 13.75 ms 时有明显的空气吸入,即气泡上方环状小气泡,随后原本

光滑的气泡表面迅速布满细碎的小气泡,爆炸产生的气泡在膨胀过程中溃散。

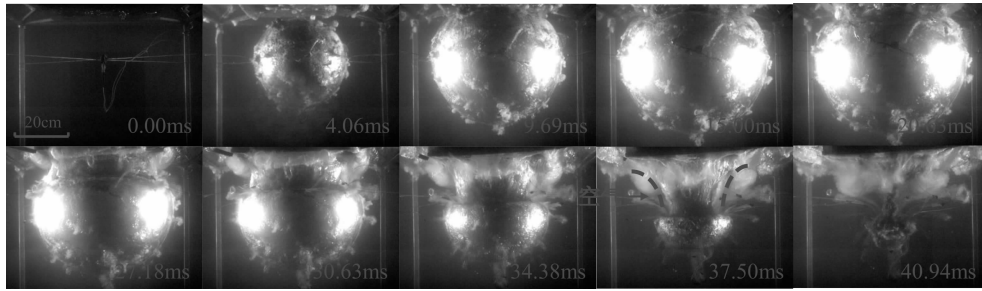


图4 40 cm × 40 cm × 1 cm 板下 15cm 爆距实验录像

Fig. 4 Experimental image of 15 cm blast distance under 40 cm × 40 cm × 1 cm board

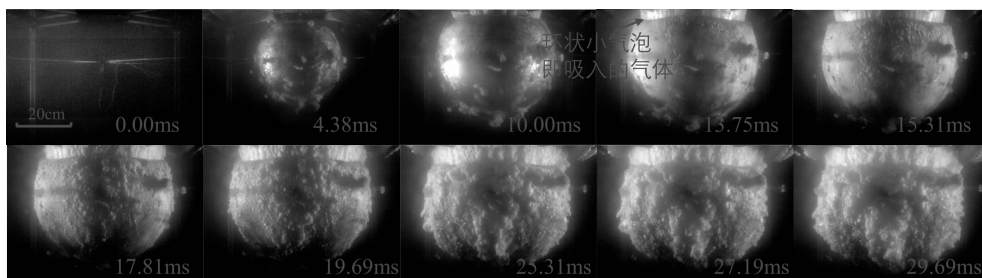


图5 20 cm × 20 cm × 1 cm 板下 15 cm 爆距实验录像

Fig. 5 Experimental image of 15 cm blast distance under 20 cm × 20 cm × 1 cm board

由三种板下的实验录像对比可以看出,在同一爆距下,板尺寸更大时,水下爆炸的气泡可以存在更久,70 cm × 70 cm × 1 cm 的板下爆炸气泡膨胀后形成气泡脉动才溃散,而 40 cm × 40 cm × 1 cm 板下的板下的爆炸气泡在膨胀后即收缩过程中溃散,20 cm × 20 cm × 1 cm 板下爆炸气泡在膨胀过程中就溃散。由实验可以看出当爆距固定时,板的尺寸大小对水下爆炸气泡有较明显的影响。

图6为40 cm × 40 cm × 1 cm 固支方板 15 cm 爆距下测得壁压数据,实验测得板下壁压冲击波峰值为 75.788 MPa。

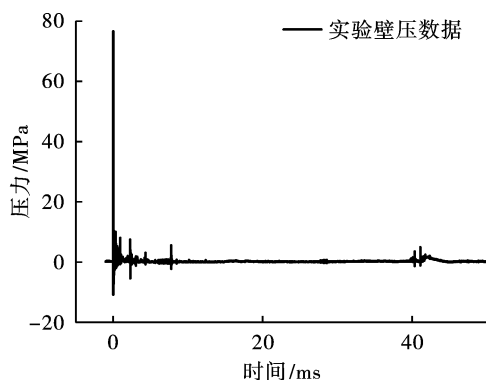


图6 40 cm × 40 cm × 1 cm 固支方板实验壁压传感器测得压力曲线

Fig. 6 The pressure curve measured by the wall pressure sensor on the 40 cm × 40 cm × 1 cm clamped square plate

图7是70 cm × 70 cm × 1 cm 固支方板 15 cm 爆距下测得壁压数据,其中冲击波载荷峰值为 73.425 MPa,与 40 cm × 40 cm × 1 cm 固支方板下同样爆距测得的冲击波峰值仅差 2.363 MPa,相差约 3.12%,即同样的爆距下板的尺寸大小不影响冲击波峰值。

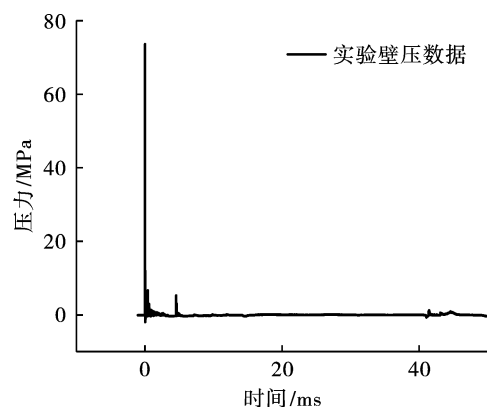


图7 70 cm × 70 cm × 1 cm 固支方板实验壁压传感器测得压力曲线

Fig. 7 The pressure curve measured by the wall pressure sensor on the 70 cm × 70 cm × 1 cm clamped square plate

由 Cole 总结, Zamyshlyayev 在其基础上改进的 TNT 水下爆炸冲击波载荷经验公式<sup>[8]</sup>

$$P(t) = \begin{cases} P_m e^{-t/\theta}, & t < 0 \\ 0.368 P_m \theta [1 - (t/t_p)^{1.5}] / t, & \theta \leq t \leq t_p \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} 44.1 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.5}, & 6 \leq R/R_0 \leq 12 \\ 52.4 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.13}, & 12 \leq R/R_0 \leq 240 \end{cases}$$

$$\theta = 0.084 \times \sqrt[3]{W} \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{-0.23}$$

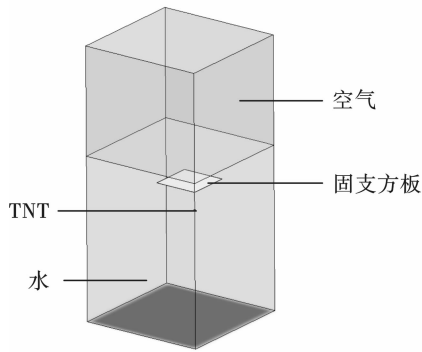
$$I = 5768 \times \sqrt[3]{W} \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{0.89}$$

式中:  $P(t)$  为冲击波压力, MPa;  $P_m$  为冲击波压力峰值, MPa;  $\theta$  为冲击波衰减系数, 即冲击波压力  $P_m$  衰减到  $P_m/e$  所需的时间, s;  $R$  测点到爆心的距离, m;  $R_0$  为炸药初始半径, m;  $I$  为冲击波比冲量,  $N \cdot s/m^2$ 。当测点距离爆心 40 cm 时, 根据经验公式冲击波峰值应当为 15.49 MPa, 实验测得数据为 14.09 MPa, 如图 8, 偏差为 9.03%, 即实验得到的数据较为准确。

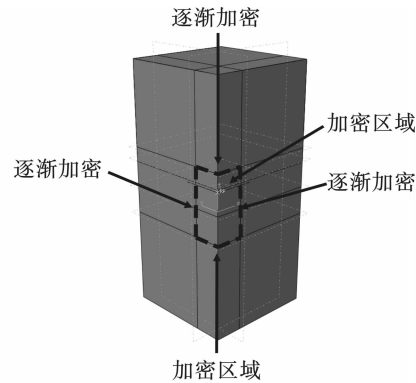
## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

对实验工况使用 ABAQUS 软件中的 CEL 算法开展系列数值模拟。



(a) 模型装配示意图  
(a) Model assembly schematic



(b) 网格划分方法示意图  
(b) Schematic diagram of mesh division

图 9 模型建立方法

Fig. 9 Modeling method

空气材料参数使用理想气体方程进行定义

$$p + p_A = \rho R (\theta - \theta_z)$$

式中: 空气密度  $\rho$  为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ; 空气环境压力  $p_A$  为  $101\,300 \text{ Pa}$ ; 空气比热为  $717.4 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。

炸药使用 JWL 状态方程进行定义<sup>[26]</sup>

$$P = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e$$

式中:  $p$  为爆炸产物压力;  $\eta$  为相对密度,  $\eta = \rho/\rho_0$ ;  $\rho$  为水的密度;  $\rho_0$  为 TNT 理论密度;  $e$  为 TNT

比内能;  $A, B, \omega, R_1, R_2$  为常数, 具体数据如表 2。

水使用 Mie-Grüneisen 状态方程进行定义, 方程具体形式为

$$\begin{cases} p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[ 1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) e, & \mu \geq 0 \\ p = \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) e, & \mu < 0 \end{cases}$$

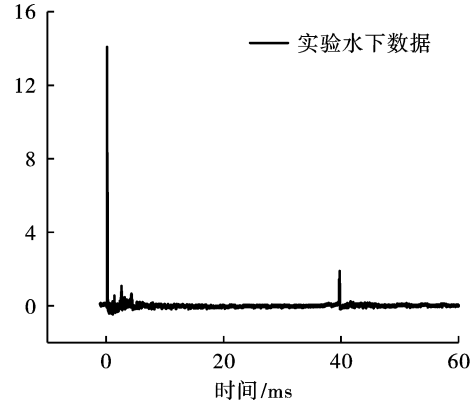


图 8 40 cm × 40 cm × 1 cm 固支方板实验距炸药 50 cm 水下传感器测得压力曲线

Fig. 8 The pressure curve measured by the underwater sensor at a distance of 50 cm from the explosive in the experiment of 40 cm × 40 cm × 1 cm fixed square plate

对水下爆炸模型的整体进行 1/4 建模, 模型分为水、空气、炸药以及固支方板。对水、空气、炸药使用欧拉单元建模。其中整体欧拉域尺寸为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$  长方体, 空气为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.88 \text{ m}$ , 炸药为直径 12.8 mm, 高 12.8 mm 的 1/4 圆柱体, 整体欧拉域除了空气与炸药之外的区域都是水。将固支方板设定为相应大小的壳单元刚体, 板面放置略微低于水面。模型装配方式如图 9(a)。

式中: $\mu$  为压缩比; $a$  为体积修正系数; $\gamma_0$  为 Mie-Grüneisen 系数; $C_0$  为声速; $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  是实验拟

合系数。对水设置密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,水中声速为  $1450 \text{ m/s}$ 。

表 2 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of the JWL equation of state

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$e/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$
373.77	3.7471	4.15	0.9	0.35	1630	$3.8 \times 10^6$

将总体计算时长设置为  $50 \text{ ms}$ ,分三个 step 进行计算:首先因为冲击波持续时间非常短暂,由实验测得的数据可知冲击波峰值在前  $0.3 \text{ ms}$  就产生,为了得到准确的冲击波峰值,将第一个 step 时长  $0.5 \text{ ms}$ ,输出 500 步;第二个 step 主要观察气泡膨胀与收缩的现象,时长  $34.5 \text{ ms}$ ,输出 200 步;第三个 step 为了得到形成一个完整气泡脉动的压力曲线,所以设置时长  $15 \text{ ms}$  输出 200 步。

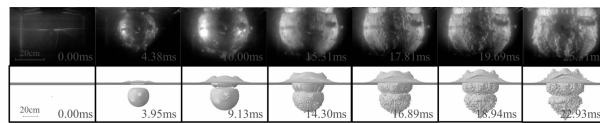
模型的边界条件设置为整体欧拉域的顶面,侧面和底面边界条件设定为固定,对称面设置为对称边界条件。将固支方板侧面设置为固定,对称面设置为对称边界条件。

模型网格划分采用局部加密的方法。通过计算得到  $2.5 \text{ g}$  TNT 爆炸的气泡半径约为  $21 \text{ cm}$ ,所以选

择 TNT 周围  $25 \text{ cm}$  的长方体区域为加密网格,为了预防空气对仿真结果的影响,将 TNT 上方加密网格区域拓展为  $35 \text{ cm}$ ,网格尺寸为  $0.3 \text{ cm}$  立方体,其余部分网格为  $0.3 \text{ cm}$  到  $4 \text{ cm}$  逐渐过渡的立方体,如图 9(b)。

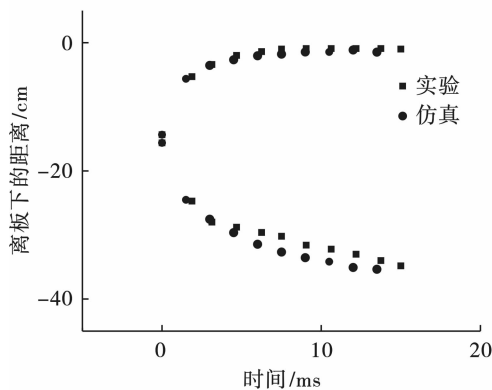
2.2 仿真结果

图 10 到图 12 为实验与仿真结果的气泡现象对比。仿真结果取水的边界,这样既可以看到爆炸气泡也可以看到空气被吸入的现象。同时给出每一种板下气泡的上下点运动情况以及气泡半径实验与仿真对比图。其中气泡上下点运动采用各个时刻气泡最高点与最低点到板底的距离,通过对比实验与仿真气泡上下点运动情况可以得出仿真结果关于气泡竖直方向上动力学行为的仿真准确性。



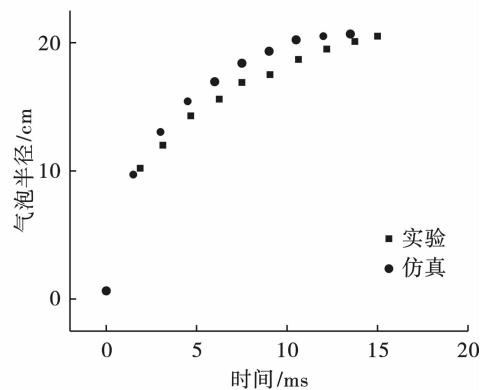
(a) 实验与数值模拟气泡现象对比

(a) Experiment and numerical simulation of bubble phenomenon



(b) 气泡上下点运动对比

(b) Comparison of upper and lower points of the bubble



(c) 气泡半径对比

(c) Bubble radius comparison

图 10  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  板实验与仿真对比

Fig. 10 Comparison between experiment and simulation of  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  board

由图 10 到图 12 可以看出,边长为  $20 \text{ cm}$  板下约  $14.30 \text{ ms}$  时气泡膨胀到最大半径,试验时气泡在约  $15.31 \text{ ms}$  时膨胀到最大半径,随之因为空气的吸入气泡表面出现越来越多细碎的小气泡直至气泡溃散。边长为  $40 \text{ cm}$  的板下仿真结果气泡在约

$16.03 \text{ ms}$  时膨胀到最大半径,因板尺寸的增大阻碍了气泡与空气的接触,使得气泡有明显的收缩过程,而气泡因为能量损失过大,导致气泡溃散为小气泡,仿真结果气泡约于  $34.83 \text{ ms}$  完全溃散,实验气泡在约  $39.38 \text{ ms}$  完全溃散。边长为  $70 \text{ cm}$  的仿真所得

气泡于 21.20 ms 时膨胀到最大半径,实验气泡在约 22.50 ms 时膨胀到最大半径。随后气泡的演化过

程现象与对应的时刻仿真结果都可以较好与实验结果进行对应。

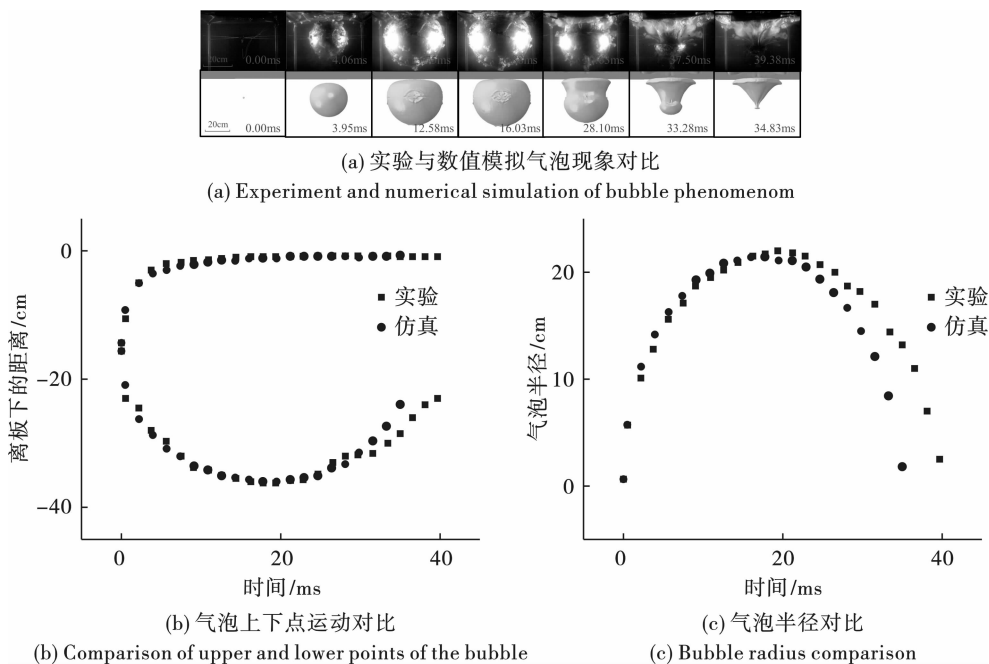


图 11 40 cm × 40 cm 板实验与仿真现象对比

Fig. 11 Comparison between experiment and simulation of 40 cm × 40 cm board

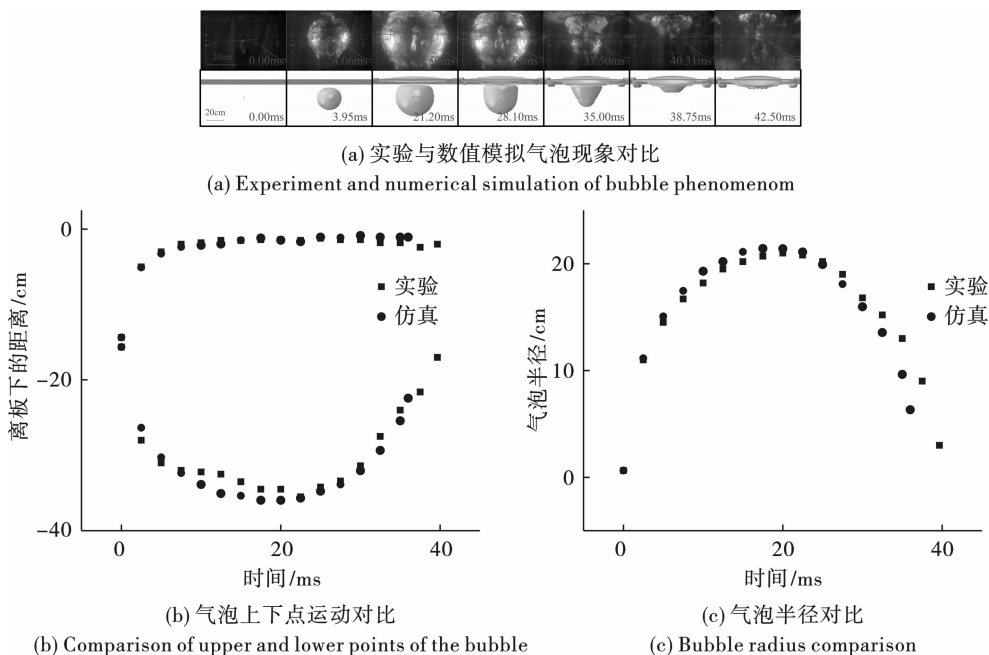


图 12 70 cm × 70 cm 板实验与仿真现象对比

Fig. 12 Comparison between experiment and simulation of 70 cm × 70 cm board

三种实验工况的气泡相较于仿真的结果都稍有延后,因为数值模拟的欧拉域采用固定边界,所以仿真的气泡会相比实验收缩更快一些。但总体仿真得到的气泡在周期与变化过程上都和实验结果比较接近,所以仿真可以较好模拟出实验现象。

图 13 为 70 cm × 70 cm × 1 cm 板下 22.5 m 水下爆炸实验与数值模拟板下方流体单元的入射压力时程曲线对比。

实验测得冲击波峰值为 50.227 MPa,数值模拟生成的压力数据冲击波峰值为 45.396 MPa,误差约

为9.62%。仿真压力曲线上气泡脉动阶段载荷峰值产生时间为38.223 ms;实验所测得压力曲线气泡脉动阶段峰值产生时间为41.50 ms。实验测得气泡脉动峰值为19.456 MPa,仿真得到的气泡脉动峰值为22.158 MPa。对比得到仿真结果与实验所测结果在冲击波峰值、周期、气泡脉动峰值以及气泡脉动持续时间等方面均吻合良好,证明了仿真设置的准确性。

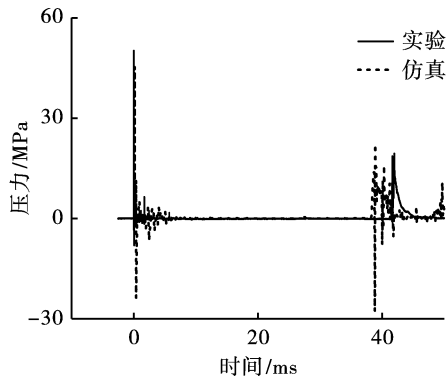


图13 70 cm × 70 cm × 1 cm 板下 22.5 m 爆距实验与数值模拟壁压对比

Fig. 13 Comparison of experimental and numerical simulation of wall pressure curves at 22.5 m blast distance under 70 cm × 70 cm × 1 cm slab

### 3 系列仿真

#### 3.1 不同板与爆距下的系列仿真

由实验结果可以看出在 20 cm × 20 cm × 1 cm 板下 15 cm 爆距的爆炸气泡在膨胀过程中就溃散,不能到达气泡脉动阶段;而 70 cm × 70 cm × 1 cm 板下 15 cm 爆距的爆炸气泡可以完整进行完第一次气泡脉动的演化。为了探究气泡脉动从无到有的过程,对 10 cm × 10 cm、20 cm × 20 cm、30 cm × 30 cm、40 cm × 40 cm、50 cm × 50 cm、60 cm × 60 cm、70 cm × 70 cm 板下 10 cm、12.5 cm、15 cm、17.5 cm、20 cm、25 cm 的爆距进行系列仿真,仿真工况如表 3。

系列仿真包含了从无法产生气泡脉动到能产生完整气泡脉动的工况,并对爆距以及板的尺寸进行延伸与细化,以得到气泡脉动从无到有的过程。

表 4 是由系列仿真得到的相应工况气泡脉动生成情况,以及由压力曲线计算出的气泡脉动阶段载荷和比冲量。

在 10 cm 的爆距下,板的大小对冲击波阶段载荷与冲量不构成影响。当板的尺寸过小时,固支方板不能有效地阻拦爆炸产生的气泡在膨胀过程中吸入空气,所以在膨胀过程中便发生溃散。

表 3 仿真工况表

Table 3 Simulation condition table

板尺寸/cm	10 × 10	20 × 20	30 × 30	40 × 40	50 × 50	60 × 60	70 × 70
爆距/cm	10	10	10	10	10	10	10
	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	15	15	15	15	15	15	15
	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5
	20	20	20	20	20	20	20
	25	25	25	25	25	25	25

同样在 12.5 cm 爆距下,也是在板尺寸在 40 cm × 40 cm 到 50 cm × 50 cm 工况内开始出现气泡脉动。随着爆距的增加,越明显地在 50 cm × 50 cm 板下看到开始出现气泡脉动现象,且随着板尺寸增加,气泡脉动的载荷峰值和比冲量趋于稳定。

由表 4 中数据可以看出气泡脉动与目标尺寸的匹配关系总体趋势是当板尺寸与爆距都较小时候,爆炸气泡无法形成气泡脉动和水射流,当板大小到达一定值后板的尺寸会对近场水下爆炸气泡的气泡脉动水射流形成有较显著的作用,当板的尺寸接着增大到一定值后气泡脉动阶段比冲量趋于稳定。

#### 3.2 40 cm 到 50 cm 板边长范围内的细化仿真

由表 4 可以发现在仿真的各个爆距下,板尺寸在 40 cm × 40 cm 增加到 50 cm × 50 cm 的过程中出

现了爆炸气泡的气泡脉动从无到有的转变,所以对 42.5 cm × 42.5 cm、45 cm × 45 cm、47.5 cm × 47.5 cm 三种板尺寸下不同爆距水下爆炸展开系列仿真,得到结果。

图 14 给出了 42.5 cm × 42.5 cm 板下压力曲线。由图 14 可以看出,当爆炸深度加深时,气泡脉动形成时间逐渐后延,当爆距为 12.5 cm 时,因为爆距太小气泡更容易接触并吸入气体,所以造成气泡未形成气泡脉动就溃散,当爆距为 15 cm、17.5 cm、20 cm 时气泡脉动峰值所在时间分别为 25.02 ms、27.88 ms、28.85 ms。这是因为当爆炸深度过小时,爆炸产生的气泡会提前从空气中吸入气体,导致气泡提前收缩,当爆距加大,气泡吸入空气难度增加有助于爆炸气泡完整地完气泡脉动阶段的演化。

表 4 仿真结果

Table 4 Simulation results

爆距	板尺寸/cm	气泡脉动		爆距	板尺寸/cm	气泡脉动	
		载荷/MPa	比冲量/(N·s/m <sup>2</sup> )			载荷/MPa	比冲量/(N·s/m <sup>2</sup> )
10 cm	10 × 10	无	无	12.5 cm	10 × 10	无	无
	20 × 20	无	无		20 × 20	无	无
	30 × 30	无	无		30 × 30	无	无
	40 × 40	无	无		40 × 40	无	无
	50 × 50	8.91571	4409.82		50 × 50	2.49675	3031.41
	60 × 60	9.59042	11 455.73		60 × 60	20.3256	15 603.20
	70 × 70	8.55057	11 651.45		70 × 70	36.6737	16 243.64
15cm	10 × 10	无	无	17.5 cm	10 × 10	无	无
	20 × 20	无	无		20 × 20	无	无
	30 × 30	无	无		30 × 30	无	无
	40 × 40	无	无		40 × 40	无	无
	50 × 50	55.7886	33 494.75		50 × 50	59.0833	38 133.76
	60 × 60	23.5785	24 681.88		60 × 60	19.5335	24 200.03
	70 × 70	15.8301	18 655.71		70 × 70	10.3229	19 347.10
20 cm	10 × 10	无	无	25cm	10 × 10	无	无
	20 × 20	无	无		20 × 20	无	无
	30 × 30	无	无		30 × 30	无	无
	40 × 40	无	无		40 × 40	无	无
	50 × 50	54.2338	49 845.06		50 × 50	33.6605	34 967.42
	60 × 60	39.3979	29 974.12		60 × 60	33.9983	31 012.31
	70 × 70	36.1349	23 794.29		70 × 70	25.4643	21 623.98

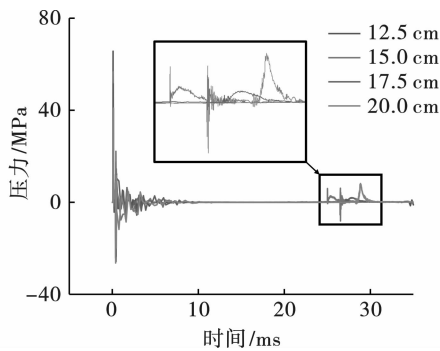


图 14 42.5 cm × 42.5 cm 板下不同爆距仿真图像  
Fig. 14 Simulation images of different blast distances under the 42.5 cm × 42.5 cm board

通过数值模拟也得到 45 cm × 45 cm 板下 12.5 cm、15 cm、17.5 cm、20 cm 爆距的板下压力时程曲线,如图 15。由压力时程曲线看出即使板边长略有提升,但在 12.5cm 爆距下气泡依然无法形成气泡脉动。在 15 cm、17.5 cm 和 20 cm 爆距下气泡脉动峰值产生的时间分别为 26.39 ms、28.44 ms 和 29.63 ms。

图 16 是 47.5 cm × 47.5 cm 板下四个爆距数值模拟得到的板下压力时程曲线,同样在 12.5 cm 爆距下爆炸气泡不形成气泡脉动,在 15 cm、17.5 cm 和

20 cm 爆距下气泡脉动形成时间分别为 27.86 ms、30.28 ms、31.02 ms,随着爆距的增加气泡脉动形成时间逐渐延后。

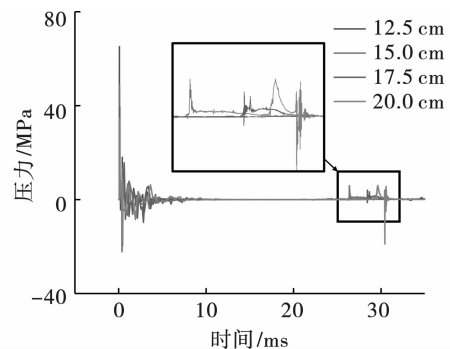


图 15 45 cm × 45 cm 板下不同爆距仿真图像  
Fig. 15 Simulation images of different blast distances under the 45 cm × 45 cm board

#### 4 板尺寸与深度对气泡脉动形成的影响

取板的边长  $L$  与该当量下最大气泡半径  $R_m$  比值  $L/R_m$  为比边长  $\bar{L}$ ,代表板的尺寸与炸药当量的影响;取爆炸深度  $h$  与最大气泡半径  $R_m$  比值  $h/R_m$  为比深度  $\bar{h}$ ,代表爆炸深度与当量的影响。

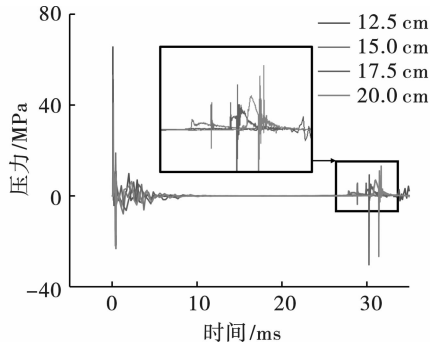


图 16 47.5 cm × 47.5 cm 板下不同爆距仿真图像

Fig. 16 Simulation images of different blast distances under the 47.5 cm × 47.5 cm board

对于最大气泡半径有经验公式

$$R_m = 3.5 \times \left( \frac{W}{h + 10} \right)^{\frac{1}{3}}$$

式中:  $R_m$  为气泡膨胀最大半径, m;  $W$  为炸药当量, kg;  $h$  为水深, m。计算可得本次系列仿真的若干爆距下, 气泡膨胀最大半径理论上都应该大约为 22 cm。

针对 5 g、10 g 的 TNT, 在同一比深度下, 对不同的板尺寸进行系列仿真, 观察气泡脉动是否存在。并以比边长为  $y$  轴, 比深度为  $x$  轴, 系列仿真结果如图 17。

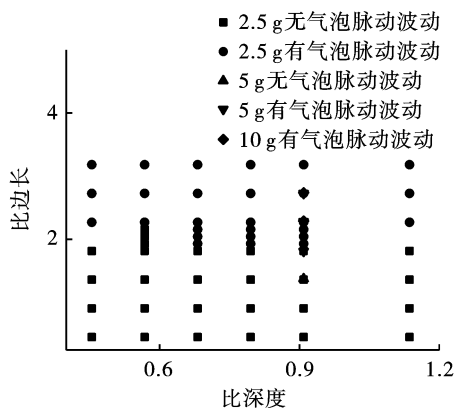


图 17 不同的比深度与比边长对气泡脉动的影响

Fig. 17 Effects of depth and side length on bubble pulsation

对仿真得到的气泡脉动产生与否的边界进行拟合, 得到图 18。

其中拟合曲线表达式为  $y = 1.9x^{-0.22}$  ( $0.455 \leq x \leq 3.182, 0.455 \leq y \leq 1.136$ ), 该式表示当固支方板边长比最大气泡半径范围在 0.455 到 3.182, 爆炸深度比最大气泡半径范围在 0.455 到 1.136, 即爆炸深度为 1 倍最大气泡半径左右时, 水下爆炸气泡能否产生第一次气泡脉动的分界线。当实际比边长  $y_0$  大于代入比深度  $x$  得到的  $y$  值时, 实际情况可以

产生气泡脉动, 反之不能产生。

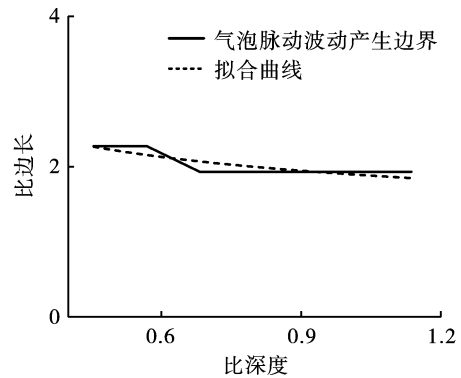


图 18 拟合结果

Fig. 18 Fitting results

## 5 结论

利用近场水下爆炸与数值模拟结合的方法, 研究了近场结构尺寸以及爆炸深度对于气泡脉动形成的影响。利用系列仿真结果讨论了仿真工况范围内气泡脉动形成与否的分界线, 并将目标尺寸以及爆炸深度参数进行无量纲化处理讨论, 得到的主要结论如下:

1) 近场水下爆炸目标板尺寸与爆炸深度对于气泡脉动形成的影响主要在于影响空气的吸入, 如果爆炸气泡提前吸入空气则气泡不能正常地进行膨胀收缩过程, 导致气泡提前溃散不形成气泡脉动以及水射流。当目标尺寸在一定范围内增大时吸入空气的时间会从气泡膨胀阶段逐渐延后至收缩阶段。

2) 近场水下爆炸当比深度  $\bar{h}$  在 0.455 到 1.136 区间内, 比边长  $\bar{L}$  小于 1.82 时均因为外部空气涌入气泡中而不形成气泡脉动。比边长在 1.82 到 2.27 区间内, 随着板尺寸加大, 第一次气泡脉动逐渐可以形成, 完成一次气泡脉动所需的时间变长。

3) 得到了当水下爆炸工况的  $\bar{h}$  值在 0.455 到 1.136 以内,  $\bar{L}$  值在 0.455 到 3.182 以内时, 气泡脉动能否产生的分界线函数。

## 参考文献 (References)

[1] 刘文思, 陆 越, 周庆飞, 等. 鱼雷近场爆炸复杂载荷及对舰船毁伤模式[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 842-850.  
 [1] LIU Wen-si, LU Yue, ZHOU Qing-fei, et al. Complex load of torpedo near-field explosion and its damage mode to ships[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 842-850. (in Chinese)  
 [2] 严 平, 赵娅丽, 李 昕, 等. 基于耗能模型的超空泡

- 射弹水下侵彻鱼雷等效关系研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(9):63-77.
- [2] YAN Ping, ZHAO Ya-li, LI Xin, et al. Research on the equivalent relationship of torpedo penetrated by underwater supercavitation projectile based on energy consumption model[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(9):63-77. (in Chinese)
- [3] 贾 则, 陈高杰, 高浩鹏, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动载荷联合作用下舰船冲击响应研究[J]. 中国测试, 2018, 44(12):28-32.
- [3] JIA Ze, CHEN Gao-jie, GAO Hao-peng, et al. The research of impact response of warship based on underwater explosion shock wave and bubble impulse [J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2018, 44(12):28-32. (in Chinese)
- [4] 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.
- [4] YAO Xiong-liang, LIU Wen-tao, ZHANG A-man, 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. (in Chinese)
- [5] 崔 杰, 李世铭, 黄超, 等. 射流冲击模型在水下爆炸实验中的应用研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(5):523-530.
- [5] CUI Jie, LI Shi-ming, HUANG Chao, et al. Application reach of jet impact model in an underwater explosion experiment[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(5):523-530. (in Chinese)
- [6] 金 辉, 周学滨, 管起亮, 等. 水下爆炸气泡射流对船体破坏效应研究[J]. 爆破, 2015, 32(2):47-50.
- [6] JIN Hui, ZHOU Xue-bin, GUAN Qi-liang, et al. Damage effect of underwater explosion bubble on hull structure [J]. *Blasting*, 2015, 32(2):47-50. (in Chinese)
- [7] COLE R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948:118-127.
- [8] ZAMYSHLYAEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic loads in underwater explosion [R]. Technical Report, AD-757183, 1972:86-120.
- [9] LIU L T, YAO X L, ZHANG A M, et al. Research on the estimate formulas for underwater explosion bubble jet parameters[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 164( SEP. 15 ): 563-576.
- [10] LI Tong, WANG Shi-ping, LI Shuai, et al. Numerical investigation of an underwater explosion bubble based on FVM and VOF[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 74:49-58.
- [11] PHAN T H, NGUYEN V T, PARK W G. Numerical study on dynamics of an underwater explosion bubble based on compressible homogeneous mixture model [J]. *Computers & Fluids*, 2019, 191:104262.
- [12] 段超伟, 宋 浦, 胡宏伟, 等. 水下爆炸气泡脉动周期的简便计算方法[J]. 高压物理学报, 2022, 36(1):187-193.
- [12] DUAN Chao-wei, SONG Pu, HU Hong-wei, et al. Simple method for the calculation of bubble pulsation period in underwater explosion[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1):187-193. (in Chinese)
- [13] 秦 健, 文彦博, 孟祥尧, 等. 固支方板底部水下爆炸气泡射流研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(12):118-128.
- [13] QIN Jian, WEN Yan-bo, MENG Xiang-yao, et al. Research on bubble jet of underwater explosion at the bottom of fixed square plate [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 51(12):118-128. (in Chinese)
- [14] 姜忠涛, 李 焯, 庞学佳, 等. 近场水下爆炸气泡射流载荷冲击船体外板的动响应分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9):214-220.
- [14] JIANG Zhong-tao, LI Ye, PANG Xue-jia, et al. Dynamic response of hull plates subjected to near field underwater explosion bubble jet load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9):214-220. (in Chinese)
- [15] 崔雄伟, 陈莹玉, 苏 标, 等. 水下爆炸中气泡射流壁压特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(11):64-75.
- [15] CUI Xiong-wei, CHEN Ying-yu, SU Biao, et al. Characteristics of wall pressure generated by bubble jets in an underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11):64-75. (in Chinese)
- [16] 盛振新, 刘建湖, 张显丕, 等. 水下爆炸气泡射流载荷阵列测量技术探索[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(3):55-62.
- [16] SHENG Zhen-xin, LIU Jian-hu, ZHANG Xian-pi, et al. On an array-sensor technology for measuring bubble jet load generated by underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(3):55-62. (in Chinese)
- [17] CHEN Y, YAO X, CUI X, et al. Study on the quantitative law of wall pressure caused by mini-charge underwater explosion bubble [J]. *Ocean Engineering*, 2020:213.
- [18] 段超伟, 宋 浦, 胡宏伟, 等. 水下爆炸气泡动态特性的研究进展[J]. 爆破, 2022, 39(1):140-151.
- [18] DUAN Wei-chao, SONG Pu, HU Hong-wei, et al. Research progress on dynamic characteristics of underwater explosion bubbles [J]. *Blasting*, 2022, 39(1):140-151. (in Chinese)
- [19] 文彦博, 胡亮亮, 秦 健, 等. 近场水下爆炸气泡脉动及水射流的实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(5):73-91.
- [19] WEN Yan-bo, HU Liang-liang, QIN Jian, et al. Experi-

- mental study and numerical simulation on bubble pulsation and water jet in near-field underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5): 73-91. (in Chinese)
- [20] 董琪,韦灼彬,唐廷,等. 爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(2): 85-93.
- [20] DONG Qi, WEI Zhuo-bin, TANG Ting, et al. Influence of explosion depth on bubble pulsation in shallow water explosion[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(2): 85-93. (in Chinese)
- [21] 王树山,李梅,马峰. 爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(19): 239-248.
- [21] WANG Shu-shan, LI Mei, MA Feng. Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(19): 239-248. (in Chinese)
- [22] 张姝红,周华,权琳,等. 水下爆炸气泡脉动试验研究[J]. *爆破*, 2014, 31(1): 106-109.
- [22] ZHANG Shu-hong, ZHOU Hua, QUAN Lin, et al. Experimental Study for Bubble Impulsion in Underwater Explosion[J]. *Blasting*, 2014, 31(1): 106-109. (in Chinese)
- [23] 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: 095224.
- [24] HU Z Y, LI S, WANG S P, et al. The role of fluid-structure interaction in pulsating bubble dynamics near a movable structure[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 238: 109650.
- [25] 胡振宇,曹卓尔,李帅,等. 水中高压脉动气泡与浮体流固耦合特性研究[J]. *力学学报*, 2021, 53(4): 944-961.
- [25] HU Zhen-yu, CAO Zhuo-er, LI Shuai, et al. Fluid-structure interaction between a high-pressure pulsating bubble and a floating structure[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(4): 944-961. (in Chinese)
- [26] GAN N, LIU L T, YAO X L, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic response of a simplified open floating slender structure subjected to underwater explosion bubble[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108308.

英文编辑:黄刚

(上接第65页)

- [10] 刘优平,周正义,黎剑华. 井巷掏槽爆破中空孔效应的理论与试验分析[J]. *金属矿山*, 2007, 368(2): 12-14.
- [10] LIU You-ping, ZHOU Zheng-yi, LI Jian-hua. Theoretical and experimental study on empty hole effect in tunnel cut blasting[J]. *Metal Mine*, 2007, 368(2): 12-14. (in Chinese)
- [11] 李启月,徐敏,范作鹏,等. 直眼掏槽爆破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. *爆破*, 2011, 28(4): 23-26.
- [11] LI Qi-yue, XU Min, FAN Zuo-peng, et al. Simulation of rock failure process in cutting by parallel hole and analysis on empty hole effect[J]. *Blasting*, 2011, 28(4): 23-26. (in Chinese)
- [12] ZHENG Zhi-tao, XU Ying, DONG Jiang-hui, et al. Hard rock deep hole cutting blasting technology in vertical shaft freezing bedrock section construction[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2015, 17(3): 1105-1119.
- [13] 宗琦,邵连军. 立井深孔直眼掏槽大直径中心空孔作用分析和参数计算[J]. *爆破*, 2015, 32(1): 11-15.
- [13] ZONG Qi, SHAO Lian-jun. Large diameter empty hole effect analysis and parameters calculation of parallel cut in rock shaft[J]. *Blasting*, 2015, 32(1): 11-15. (in Chinese)
- [14] 任行,傅菊根,罗吉. 直眼掏槽爆破中空孔应力集中效应数值模拟[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(1): 195-197.
- [14] REN Xing, FU Jun-gen, LUO Ji. Parallel cut blasting hollow hole stress concentration effect numerical simulation[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(1): 195-197. (in Chinese)
- [15] 郭东明,王豪,李孝林,等. 益新矿中心大空孔掏槽爆破扩腔过程数值分析[J]. *爆破*, 2017, 34(2): 9-14.
- [15] GUO Dong-ming, WANG Hao, LI Xiao-lin, et al. Numerical analysis on chamber process of large hollow hole cut blasting in Yixin coal mine[J]. *Blasting*, 2017, 34(2): 9-14. (in Chinese)
- [16] TIAN Xiao-xu, SONG Zhan-ping, WANG Jun-bao. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 126: 105813.
- [17] LURIE A-I. *Theory of Elasticity*[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [18] MOHAMED Abdel-Kader. Modified settings of concrete parameters in RHT model for predicting the response of concrete panels to impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103312.

英文编辑:陈东方