

# 时序起爆双发装药对典型靶板的冲击响应特性\*

颜帅<sup>1</sup>, 鲁林<sup>1</sup>, 吕可<sup>1</sup>, 张阿漫<sup>1,2</sup>, 李帅<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学 船舶结构安全全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 水下爆炸气泡蕴含巨大能量, 其非对称坍塌行为在近场爆炸中可对海洋结构物造成严重毁伤。为充分聚焦水下爆炸气泡的能量, 本文通过水箱小当量爆炸实验, 开展了时序起爆双发装药对典型靶板的冲击响应特性研究。该方法将总装药分解为两个独立爆源, 通过控制其空间相对位置与起爆延迟时间, 利用双气泡的耦合效应对目标结构进行加载。通过系列实验, 对比分析了单发基准工况与三种双发典型工况(等药量弹弓效应、等药量坍塌增强、不等药量坍塌增强)的结构响应。结果表明, 不等药量坍塌增强方案(18.5 g + 1.5 g TNT 当量)能够显著增强主气泡对结构的冲击效果, 在总药量不变的条件下实现了优于单发基准工况(20 g TNT 当量)的结构响应, 靶板中心应变峰值较单发基准工况提升约 39%。研究结果可为水下爆炸气泡调控技术提供理论与实验参考。

**关键词:** 水下爆炸; 气泡; 冲击增强

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

## Impact Response of a Typical Target Plate to Time-Sequenced Two Underwater Explosions

YAN Shuai<sup>1</sup>, LU Lin<sup>1</sup>, LYU Ke<sup>1</sup>, ZHANG A-Man<sup>1,2</sup>, LI Shuai<sup>1,2</sup>

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, Heilongjiang, China

2. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** An underwater explosion bubble contains enormous energy, which can cause severe localized damage to structures in near-field scenarios. To fully utilize the damage potential of such bubbles, this paper proposes a synergistic impact method based on spatiotemporal control of two out-of-phase underwater explosions. The total charge is divided into two independent explosive sources. By precisely adjusting their relative spatial configuration and initiation delay time, the interaction between the shock waves and bubble oscillations is used to achieve an enhanced and synergistic impact on the target structure. A series of experiments are conducted to compare a reference single-charge underwater explosion with three specially designed two-charge configurations. The results demonstrate that the proposed two-charge scheme with an unequal charge distribution significantly amplifies the jetting and collapse loads exerted by the primary bubble on the structure. Under the same total charge mass, this out-of-phase two-bubble configuration achieves a markedly superior impact effect compared to the traditional single-charge explosion. These findings provide theoretical insights and experimental references for the development of novel bubble control techniques in underwater explosions.

\*收稿日期: 2026-04-28; 修回日期: 2026-10-09;

基金项目: 国家自然科学基金(52622116, 12372239); 船舶结构安全全国重点实验室基金(Naklas2024ZZ004-J); 黑龙江省重点研发计划项目(JD24A002)

第一作者: 颜 帅(1999—), 男, 博士. E-mail: yanshuai@hrbeu.edu.cn;

通信作者: 李 帅(1990—), 男, 博士, 教授. E-mail: lishuai@hrbeu.edu.cn.

**Keywords:** Underwater explosion; Bubble; Impact enhancement

## 1 引言

水下爆炸作为水中兵器的一种高效毁伤手段，在海军作战与海洋工程领域始终占据核心地位，其毁伤机制源于冲击波与气泡脉动两类典型载荷的联合作用<sup>[1]-[3]</sup>。传统炸药在水下起爆后，其能量大致均分到冲击波和气泡中，其中冲击波虽具有极高的瞬时峰值压力，但其能量随传播距离呈指数衰减<sup>[4][5]</sup>，作用范围有限；而气泡在收缩阶段形成的射流与坍塌载荷<sup>[6][7]</sup>，具备极高的能量密度和指向性，但在传统单发水下爆炸中，由于气泡演化受边界条件约束，往往难以发挥其全部毁伤潜力。面对现代水面与水下目标日益增强的抗爆抗冲击能力，如何有效发掘并利用气泡能量以增强其对结构的冲击效果，已成为水下爆炸领域关注的重点。因此，充分发挥水下爆炸气泡的能量，发展能够超越传统模式，实现效能提升的新型水下爆炸调控方法，已成为该领域的研究重点。

现有研究多聚焦于通过优化单发战斗部的装药配方、装药结构或起爆方式以提高效能<sup>[8]-[12]</sup>，但其毁伤能力上限受限于单一爆源的能量释放规律。近年来，一种前沿思路是将总能量分布于多个爆源，并通过时空调控实现多个爆源的协同增强<sup>[13]-[15]</sup>，这为突破单发爆炸的毁伤极限开辟了新途径。其中，双发水下爆炸是多爆源体系中最基本的形式，其两个爆源产生的冲击波与水下爆炸气泡之间存在复杂的相互作用。通过主动调控这种相互作用可实现对结构的冲击增强，例如已有多篇研究通过实验和仿真证明，同步起爆的双发爆炸产生的冲击波在特定区域（如对称面）会发生非线性叠加，压力峰值显著高于单发爆炸<sup>[16]-[18]</sup>。在双爆源基础上，张之凡等人<sup>[19]</sup>针对三角阵列装药接触爆炸的数值研究表明，若设计的阵列间距得当，其对圆柱壳结构的冲击效果较等质量单发装药可提升高达48.3%。谢洋洋等人<sup>[20]</sup>的数值模拟显示，三装药和四装药阵列爆炸时，冲击波在空间形成多个高压区，测点载荷时历曲线呈现多峰特征，这为理解多爆源载荷提供了参考。

尽管目前针对冲击波叠加特性的研究已相对成熟，但近场水下爆炸对结构的毁伤能力不只来自冲击波，气泡的脉动坍塌载荷往往起着更为重要的作用。张阿漫等人<sup>[3]</sup>基于势流理论与边界元法，系统研究了水下爆炸气泡与弹塑性结构的流固耦合问题，指出气泡坍塌时刻的压力脉冲与射流是导致结构产生最大应力的关键因素。为进一步衡量水下爆炸气泡对结构的冲击能力，盛振新等人<sup>[21]</sup>设计了阵列传感器，成功获取了气泡水射流载荷的时空分布特性，发现气泡射流可使能量更集中地作用于目标，在无量纲泡壁距离为0.8时，结构中心处的气泡射流载荷可达冲击波峰压的1.16倍。王琦等人<sup>[22]</sup>通过近刚性壁面水下爆炸实验，系统测量了壁面不同位置处的冲击波与气泡坍塌载荷，揭示了泡壁距离对壁面压力峰值与冲量的非线性衰减规律。田昭丽等人<sup>[23]</sup>采用欧拉有限元法研究了固壁面附近水下爆炸气泡的射流演化及其对壁面的冲击载荷，发现当气泡位于壁面上方时，浮力与Bjerknes力相互竞争，射流方向与强度呈现非单调变化；而当气泡位于壁面下方时，浮力与Bjerknes力方向一致，可产生更强的射流冲击，其破坏力甚至超过冲击波。

相较于单发水下爆炸，多发水下爆炸通过气泡间的非线性耦合作用，可衍生出更为多样的动力学行为与载荷特性，但随着爆源数量的增加，气泡间非线性耦合更加复杂化，在实际工程应用中面临较大的时空调控难度。双发水下爆炸作为多爆源体系的基础，是揭示多泡耦合规律的关键环节，探明其能量传递机制可为未来复杂阵列技术提供坚实支撑。然而，在同时起爆的双爆源系统中，两个气泡之间往往形成对射流模式，在一定程度上削弱了气泡的射流和坍塌强度，消耗了原本可向结构聚焦的能量<sup>[24]-[25]</sup>。这一现象表明，同相双发水下爆炸产生的冲击波虽然能相互叠加提高压力峰值，但其气泡能量输出的方向性和集中度仍有待优化。

近年来，研究者开始关注异相（延时）生成的双气泡系统，发现了同相系统所不具备的独特动力学模式，为新型水下爆炸气泡调控技术的突破提供了可能。本文中的“异相”指两个气泡因起爆时间不同而在耦合过程中处于不同的脉动相位状态，即后起爆的气泡在前一气泡的某一演化阶段

(如膨胀阶段或坍塌阶段)生成,二者之间存在非零的起爆时间延迟,“同相”则指两个气泡同时生成。Fong 等人<sup>[26]</sup>的研究提出了气泡弹射机制的概念,他们通过实验揭示了一个新奇的双气泡耦合过程:首先,气泡 1(本文中统一定义为第一个生成的气泡)吸引气泡 2(本文中统一定义为第二个生成的气泡)的相邻表面向气泡 1 拉伸;随后,被拉伸的表面快速回弹,形成一股高速液体射流。Fan 等人<sup>[27]</sup>和 Yan 等人<sup>[28]</sup>进一步探索了该定向射流的加速机制并发现其最大泡内速度可达 1000 m/s 以上,具有较大的破坏潜力。这种仅需两个气泡相互作用即可生成的定向高速射流突破了边界条件对气泡形成射流的限制,大大提高了气泡射流在各领域的适用性。但该模式(本文中统一称为“弹弓效应”)能否作为一种新的冲击增强方法应用于水下爆炸领域仍需实践和探索。吕可等人<sup>[29]</sup>针对厘米级异相双气泡系统提出了一种双气泡调控策略,即在气泡 1 坍塌阶段初期在射流基部处起爆气泡 2,利用气泡 2 生成时释放的冲击波以及向外辐射的高压增强气泡 1 朝向壁面的坍塌强度,从而提高气泡 1 诱导的壁面载荷,但该模式(本文中统一称为“坍塌增强效应”)在水下爆炸场景下的适用性尚未探索。此外,Liu 等人<sup>[30]</sup>和唐皓<sup>[31]</sup>等人进一步研究了自由场中的异相双发水下爆炸气泡的动力学行为,揭示了相位差对气泡脉动周期、形态演化及坍塌压力波的影响规律。然而,上述研究多聚焦于自由场中异相双气泡的动力学行为,对于异相双发水下爆炸气泡与结构耦合效应的实验研究仍较为有限,“弹弓效应”和“坍塌增强效应”能否有效提高双发水下爆炸对结构的冲击效果有待揭示。

综上所述,目前单发水下爆炸毁伤效能难以突破单一爆源的物理瓶颈,而同时起爆的双发水下爆炸系统对气泡能量利用不足,现有研究虽初步揭示了异相双气泡系统的演化规律,但在探索其与结构耦合的冲击增强方面,仍缺乏系统的理论与实验支撑。鉴于此,本文以提升水下爆炸气泡对结构的冲击效果为目标,开展了时序起爆双发装药对典型靶板的冲击响应特性研究。其核心思想是将既定总装药拆分为具有特定当量比和空间构型的两个独立爆源,通过精确延时控制,实现双泡耦合模式中的“弹弓效应”和“坍塌增强效应”,采用高速摄像技术精细捕捉气泡与结构耦合的演化过程,并结合数据采集系统获取结构中心的应变响应。通过对比不同工况下结构中心的应变响应峰值,找出异相双发水下爆炸的最佳冲击模式,联合高速摄影图像与动态应变数据分析其力学机理,旨在为发展新型水下爆炸气泡调控技术提供依据。

## 2 实验设计

本研究设计并搭建了异相双发水下爆炸靶板响应测试系统,实验装置如图 1 所示。靶板选用厚度 20 mm、边长 1.5 m 的方形 Q235 钢板,通过周边连续焊接的方式与厚度 15 mm、高 0.5 m 的箱型边板固连为一体。该构型可实现靶板在水面的自由漂浮,同时还满足箱体内部空气介质的背空边界条件,可有效模拟舰船外板的水下爆炸场景。实验水箱尺寸为 8 m × 8 m × 8 m,水箱上方设置有供实验人员操作的移动平台,可用于吊放压力传感器等测量装置。药包采用球形装药,装药成分为纯 RDX,装药密度约为 1000 kg/m<sup>3</sup>,通过尼龙线悬吊于目标深度。双药包起爆系统通过控制电子雷管引爆炸药,经实测该系统的延时控制精度优于±0.5 ms,小于实验工况下最小气泡脉动周期的 2%,对于本文研究的双泡“弹弓效应”和“坍塌增强效应”的影响并不大<sup>[28][29]</sup>。图 1(b)中的尼龙绳用于对靶板进行空间定位,当靶板到达指定位置后松掉尼龙绳,防止其对靶板的垂向运动造成干扰。

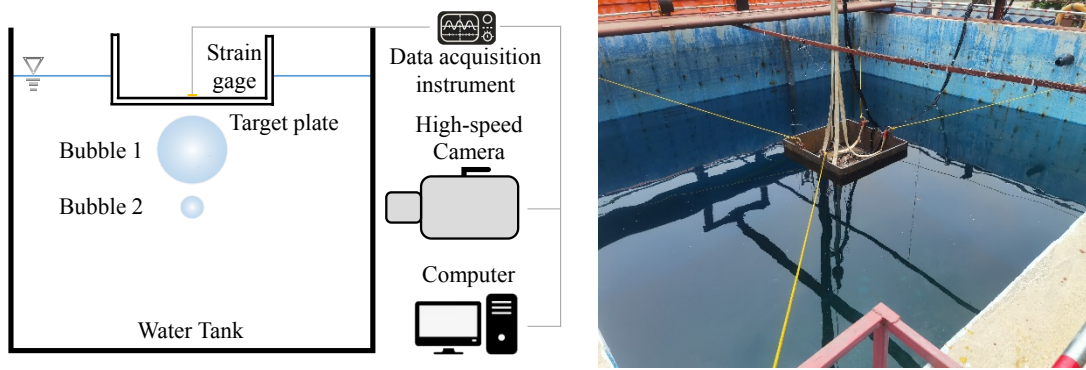


图 1 实验装置示意图，其中左侧为异相双发水下爆炸实验装置示意图，右侧为箱型靶板及其在水箱中的布置图

Figure 1 Schematic of experimental setup: (a) schematic diagram of the experimental setup for two out-of-phase underwater explosions; (b) diagram of the box-type target plate and its arrangement in the water tank.

为精确捕捉靶板中心区域的动态响应，在靶板背空一侧的几何中心正交布置两枚 KYOWA 单轴电阻应变片，分别沿靶板长宽方向测量应变响应。自由场压力传感器采用 KD2101L 型号，其测得的压力信号使用动态信号测试分析系统 DH8302 采集，信号采样频率为 1 MHz，压力信号主要用于辅助识别气泡溃灭时刻及结构响应时序分析。需说明的是，由于传感器距水面较近（水深 1.0 m），自由水面反射稀疏波可能对冲击波阶段的高频信号产生一定的截断效应，因此本文不将冲击波峰值压力作为定量分析的主要依据。应变片测得的结构响应信号使用 XZ-5971 动态信号测试分析系统采集，信号采样频率为 200 kHz，正应变代表靶板的背空面发生拉伸，即中拱状态，负应变则代表靶板为中垂状态。水下高速摄影采用深视智能 SH3-105 摄像机对水下爆炸气泡的瞬态行为进行捕捉，拍摄频率为 5000 Hz，配套电脑的摄像机控制软件（Photron PFV4）进行拍摄记录。

为便于在不同装药量和爆炸工况条件下对比分析双发水下爆炸的结构响应规律，本文对关键实验参数进行无量纲化处理。以气泡最大半径  $R_{\max}$ 、环境压力  $P_{\infty}$  和水的密度  $\rho$  作为特征量对泡壁距离  $D_{bw}$ （最靠近靶板的药包中心位置与靶板中心的距离）、泡泡距离  $D_{bb}$ （药包 1 和 2 的距离）和延迟时间  $\Delta t$ （药包 1 和 2 的起爆时间差）进行无量纲化，得到无量纲参数如下：

$$\gamma_{bw} = \frac{D_{bw}}{R_{\max 1}}, \quad \gamma_{bb} = \frac{D_{bb}}{R_{\max 1} + R_{\max 2}}, \quad \theta = \frac{\Delta t}{R_{\max 1} \sqrt{\rho / P_{\infty}}} \quad (1)$$

其中  $R_{\max 1}$  和  $R_{\max 2}$  分别代表气泡 1 和气泡 2 在相同水深无限流域中可膨胀达到的最大半径。本实验采用 RDX 药包水下爆炸产生气泡，其内部气体以爆轰产物为主（主要为不可冷凝气体），相变效应相对较弱<sup>[32]</sup>，气泡演化主要受惯性力与压力差驱动，可采用经典气泡动力学理论<sup>[33]-[35]</sup>描述气泡最大半径及演化过程，并据此辅助实验初始参数设计。实验中 RDX 当量经自由场单发水下爆炸标定后，统一按 1.3 系数换算为 TNT 当量。

### 3 异相双发水下爆炸冲击模式对比

本文以 20 g TNT 当量作为总药量开展异相双发水下爆炸冲击模式的对比研究，设计并完成了四组对比实验，实验中自由场压力传感器放置在水深 1 m 处，且距靶板中心水平距离 1.5 m。各工况的参数设置依据如下：在合适的泡泡距离下，若气泡 2 在气泡 1 膨胀至最大半径附近起爆，则双气泡之间易形成“弹弓效应”；若气泡 2 在气泡 1 坍塌阶段起爆，则可诱导形成“坍塌增强效应”。基于上述机制，本文结合前期工作<sup>[28][29]</sup>对相关无量纲参数进行了设计，具体参数如下表所示：

表 1 异相双发水下爆炸实验工况表

Table 1 Table of experimental conditions for two out-of-phase underwater explosions

| 工况               | 药包 1 的 TNT<br>药量/g | 药包 2 的 TNT<br>药量/g | 泡壁距离<br>$\gamma_{bw}$ | 泡泡距离 $\gamma_{bb}$ | 延迟时间 $\theta$ |
|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------|
| 工况一：单发基准工况       | 20                 | -                  | 0.50                  | -                  | -             |
| 工况二：双发“弹弓效应”工况   | 10                 | 10                 | 0.53                  | 0.79               | 0.99          |
| 工况三：双发“坍塌增强效应”工况 | 10                 | 10                 | 0.51                  | 0.57               | 1.82          |
| 工况四：双发“坍塌增强效应”工况 | 18.5               | 1.5                | 0.51                  | 0.66               | 1.80          |

### 3.1 单发基准工况

为准确量化本文提出的异相双发水下爆炸协同冲击方法的结构响应增强效果，首先需要开展药量等于总装药量的单发水下爆炸实验作为基准工况。同时，在探讨复杂的双爆源协同冲击机制之前，明确传统单发水下爆炸的结构响应规律也是开展对比研究的必要前提。本小节以 20 g TNT 当量单发工况作为基准工况，分析冲击波与气泡射流坍塌载荷对结构响应的的作用规律，为后续揭示双发水下爆炸工况的冲击机制提供参考。

图 2 和 3 给出了单发 20 g TNT 当量水下爆炸工况的实验结果，图 2 中的两条应变时历曲线分别代表靶板中心处沿靶板长宽方向的应变响应，两条曲线中由冲击波激励起的最大应变峰值相对误差约为 7.1%，6 时刻对应峰值的相对误差为 7.8%，其较好的一致性表明靶板的结构响应在两个方向上是同性的，同时也证明了本实验数据的可重复性与可靠性。因此本文在后续的分析中，选择同一通道的应变数据进行对比研究，与之垂直方向的应变数据不再重复展示。在冲击波阶段，靶板中心出现快速的应变抬升，其峰值约为 2300  $\mu\epsilon$ 。在第一个波峰处可以看到靶板被冲击波激励起的高频振动，同时还伴随着频率约为 45 Hz 的周期性振动（第一个波峰与第二个波峰之间），该频率与结构在气泡完全消散后的自由振动频率（固有频率）吻合。气泡在膨胀阶段会推动周围流体向靶板运动，对靶板中心的中垂运动形成抑制作用，并引起靶板附加水质量的改变。在此影响下，靶板中心在达到第二个波谷后迅速回弹，形成第三个波峰，表现出明显的受迫振动特征，其振动频率偏离了结构固有频率，第二个波峰与 1 时刻对应的第三个波峰之间的振动频率约为 77 Hz，与靶板固有频率（约 45 Hz）相差约 71%。同时，第三个波峰的峰值明显低于前两个峰值，其原因在于气泡膨胀至最大半径时对靶板产生的向下吸引作用，以及结构惯性振动过程中的阻尼耗散。在气泡收缩过程中，浮力效应并未主导气泡界面的演化，相反，由于流固耦合效应的显著增强，气泡两侧界面的收缩速度明显快于下表面<sup>[36][37]</sup>（2-3 时刻），呈现出类似于气泡在弹性边界附近运动的动力学特征。两侧界面率先汇聚至对称轴处，与下表面共同向上射流并坍塌（4-6 时刻）。在 6 时刻，靶板中心出现了明显的应变响应峰值，并随后达到其最大峰值 4136  $\mu\epsilon$ ，较冲击波首峰提升 80%。约 1ms 后，距离气泡 1.5m 处的自由场压力传感器捕捉到了气泡坍塌时释放的溃灭压力波。该现象表明，在本工况的水下爆炸气泡与结构耦合作用过程中，气泡射流与坍塌载荷诱导的结构响应大于水下爆炸初始冲击波的激励效果，气泡能量相比较冲击波能量实现了更为聚焦的结构冲击作用。

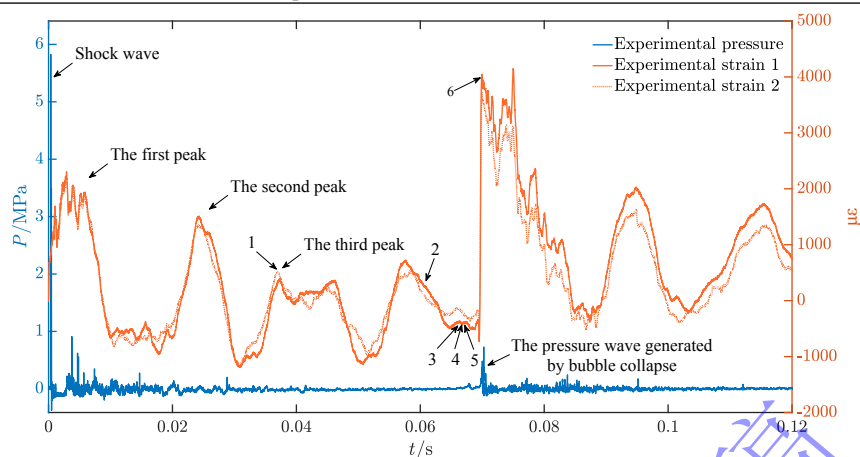


图 2 单发基准工况的结构响应及自由场压力载荷时历曲线图

Figure 2 Temporal variations of structural response and free-field pressure for benchmark case of a single underwater explosion.

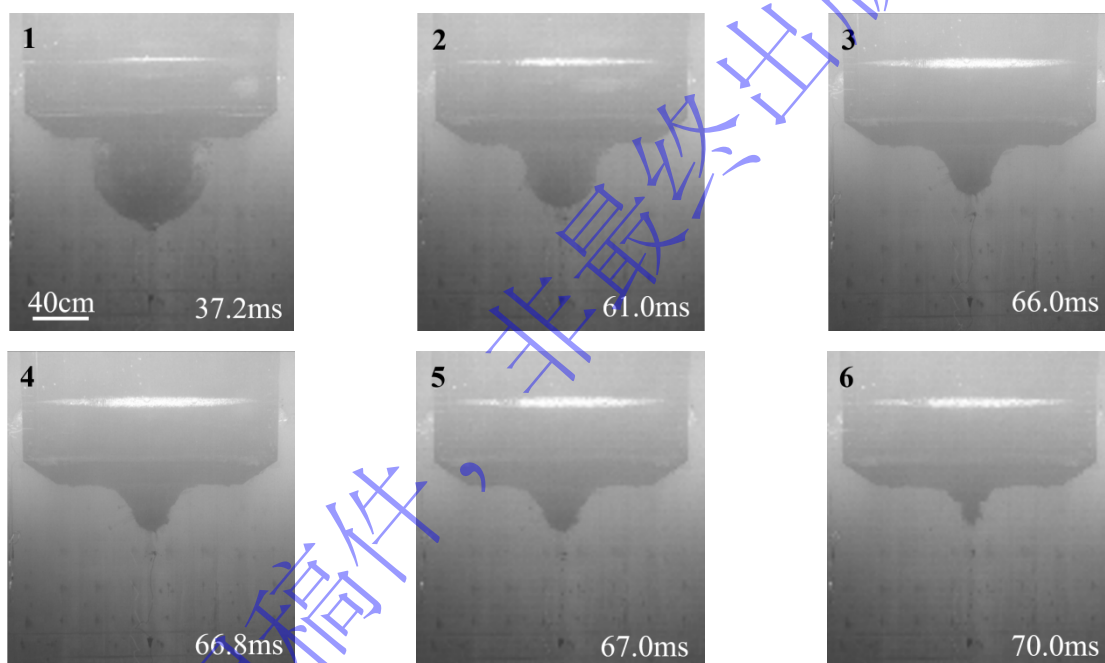


图 3 单发基准工况气泡与结构耦合作用高速摄影图像

Figure 3 High-speed photographs for benchmark case of a single underwater explosion.

### 3.2 双发“弹弓效应”工况

在明确了单发 20 g TNT 当量工况下结构受到冲击后的响应规律后, 本文接下来探讨如何通过装药的空间分配与起爆时序调控来优化水下爆炸气泡对结构的冲击能力。本小节首先将总药量等分为两个 10g TNT 当量的药包, 考察能够形成高速水射流的双泡“弹弓效应”工况对结构的冲击响应效果。

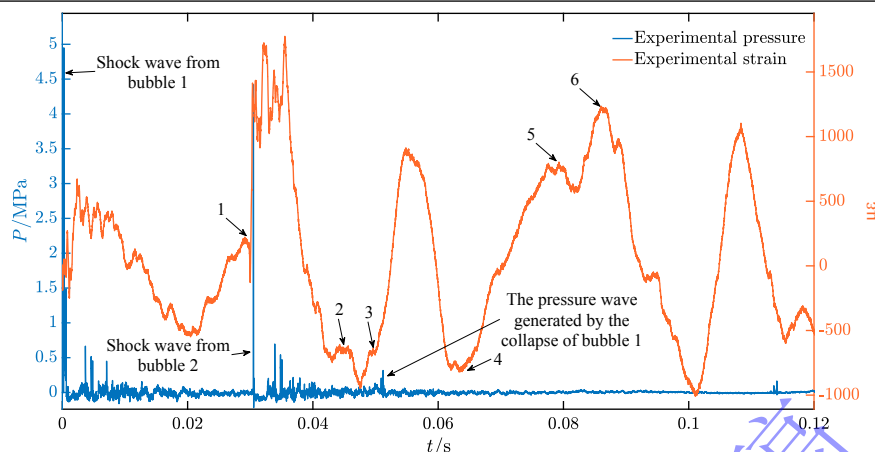


图4 双发“弹弓效应”工况的结构响应及自由场压力载荷时历曲线图

Figure 4 Temporal variations of structural response and free-field pressure for the two-charge “catapult effect” case.

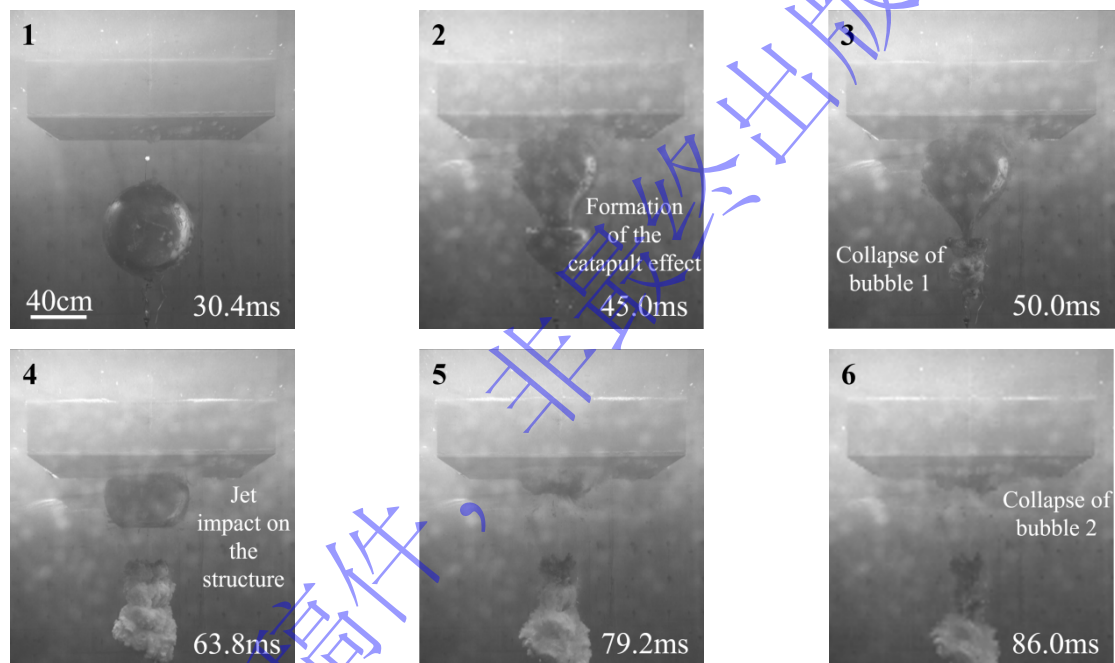


图5 双发“弹弓效应”工况气泡与结构耦合作用高速摄影图

Figure 5 High-speed photographs for the two-charge “catapult effect” case.

图4和5给出了双发“弹弓效应”工况的实验结果，可以看到距离结构较远的气泡1率先生成，其释放的冲击波激励结构产生向上的应变响应，最大应变值可达  $672 \mu\epsilon$ 。在1时刻起爆第二个药包形成气泡2时，结构再一次在冲击波的激励下出现  $1766 \mu\epsilon$  的应变峰值。由于气泡2生成时气泡1处于最大体积并呈低压状态，气泡2的下表面会被气泡1大幅度拉长生长为水滴状。气泡1收缩过程中，其上表面在气泡2的作用下相比下表面运动得更快，进而砰击下表面形成环状气泡并坍塌。此时气泡2的伸长端仍处于环状气泡中心，受到环状气泡坍塌的高压作用发生径向收缩运动（2-3时刻），并最终颈缩形成约  $60 \text{ m/s}$  的液体射流。这里的“颈缩”是指气液界面快速汇聚至对称轴处发生砰击，从而形成高压驻点加速两侧流体形成液体射流<sup>[27]-[28]</sup>。然而，应变曲线显示，射流抵达靶板表面时，结构正处于气泡2低压场诱导的中垂状态，射流激励的中拱变形被大幅抵消，导致应变响应峰值仅为  $803 \mu\epsilon$ ，显著低于单发基准工况。此外，气泡2在6时刻后其坍塌诱导的结构响应虽然叠加于射流激励响应之上，但其峰值仅达到  $1234 \mu\epsilon$ 。由于射流的形成消耗了气泡所积攒的势能，其后续朝向结构的坍塌未能显著增强结构响应，在自由场压力曲线上也没有观察到明显的坍塌压力波，所以结构

的最大应变峰值由气泡 2 的初始冲击波诱导。相比单发基准工况，“弹弓效应”工况虽然能够形成高速的液体射流持续冲击结构表面，但射流砰击时机与结构运动相位失谐，其冲击能力反而弱于 20 g TNT 当量的单发水下爆炸，该模式并不适用于以结构瞬态响应峰值为指标的响应增强场景。

### 3.3 双发“坍塌增强”工况

前文分析表明，“弹弓效应”虽能产生高速液体射流，但因其砰击时机与结构运动相位失谐，反而削弱了水下爆炸气泡对结构的冲击能力。基于此，本小节开展双发水下爆炸协同冲击研究的第二种模式，将总药量等分为两个 10 g TNT 当量药包，考察利用双泡“坍塌增强效应”能否激励出超越单发基准工况的结构响应。

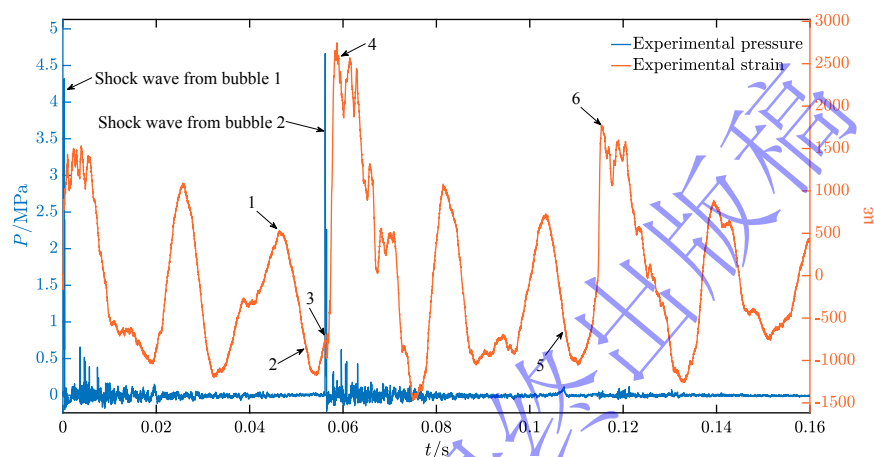


图 6 双发“坍塌增强”工况的结构响应及自由场压力载荷时历曲线图

Figure 6 Temporal variations of structural response and free-field pressure for the two-charge "collapse enhancement" case.

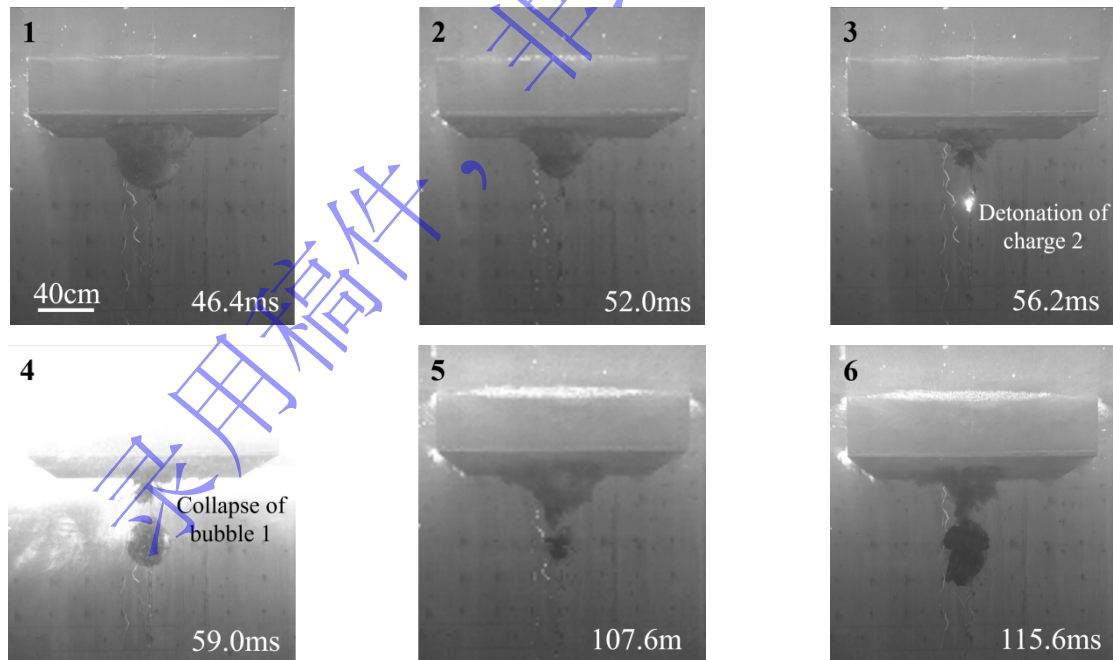


图 7 双发“坍塌增强”工况气泡与结构耦合作用高速摄影图

Figure 7 High-speed photographs for the two-charge "collapse enhancement" case.

图 6 和 7 给出了双发“坍塌增强”工况的实验结果，气泡 1 的演化行为与工况一基本一致。在 3 时刻气泡 1 即将朝向结构坍塌时，气泡 2 起爆并向外辐射冲击波，此时流场压力由气泡 2 的内部高压主导，促使气泡 1 形成更强的射流和坍塌。由结构响应曲线可以看到，气泡 1 射流坍塌载荷所激励的结构最大响应为 2747  $\mu\epsilon$ ，并没有达到 20 g TNT 基准工况的应变峰值。在该工况下，虽然气泡 1 的

坍塌强度得到了气泡 2 的局部增强，但由于气泡 1 的初始装药量仅为基准工况的一半，其本身能量较小，且气泡 2 仅在初生阶段对气泡 1 有短暂的增益作用，其自身的膨胀与坍塌未能有效聚焦于目标结构。这意味着气泡 2 过高的药量分配反而导致了系统总能量的浪费，最终未能超越等药量单发基准工况的结构响应峰值。

### 3.4 不等药量的双发“坍塌增强”工况

上述等药量工况中，气泡 1 因初始药量减半导致自身能量不足，其坍塌过程虽受到增强，仍难以产生显著的结构响应。气泡 2 则在提供短暂的高压扰动后，由于气泡与结构距离较远，剩余能量未能有效作用于结构，整体协同增益有限。基于上述分析，本文对药量配置进行优化，将总药量分配调整为 18.5 g（气泡 1）与 1.5 g（气泡 2）。在保持总药量不变的条件下，适当压缩气泡 2 的能量占比，将更多能量集中于气泡 1，从而更合理地利用气泡 2 的增益作用。

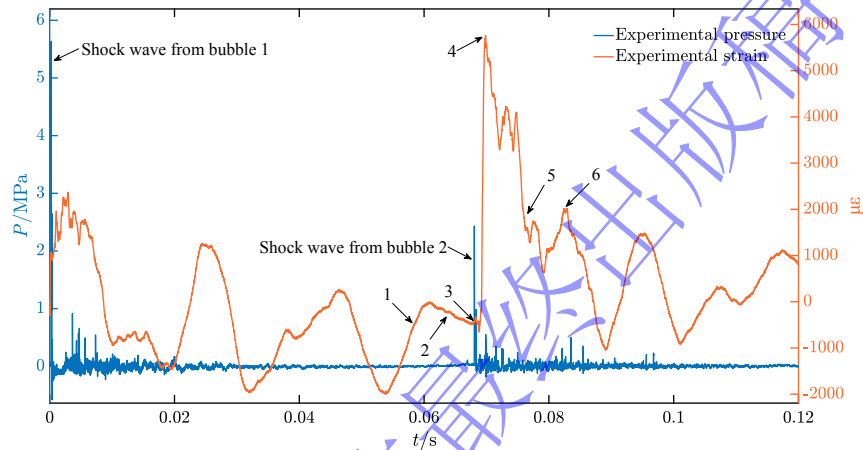


图 8 不等药量的双发“坍塌增强”工况的结构响应及自由场压力载荷时历曲线图

Figure 8 Temporal variations of structural response and free-field pressure for the two-charge "collapse enhancement" case with unequal charge distribution.

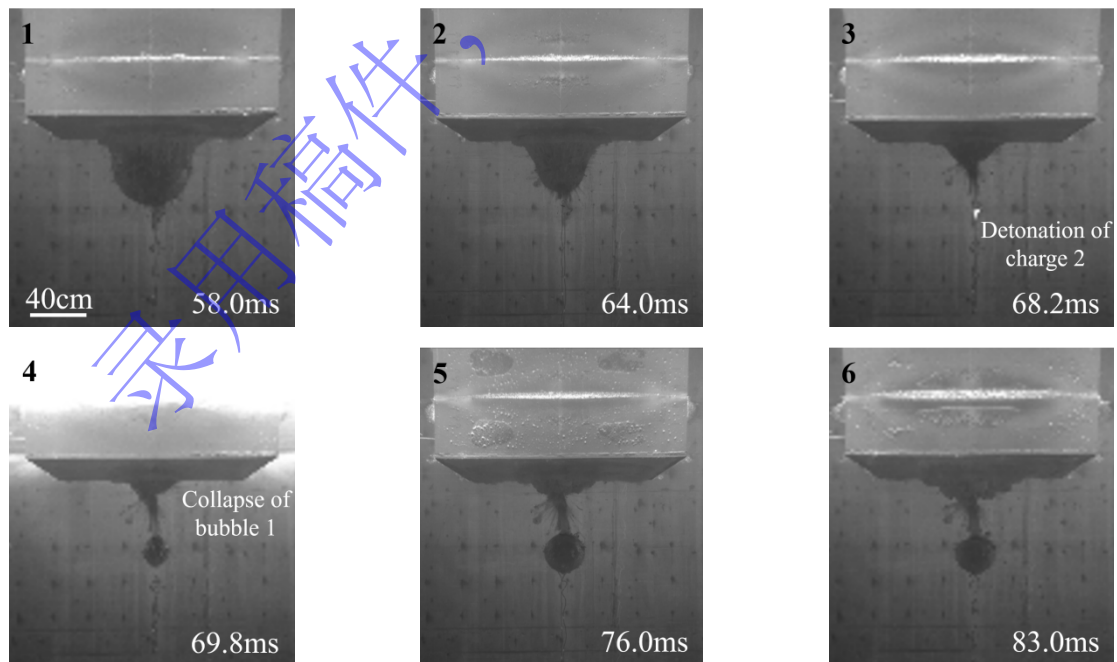


图 9 不等药量的双发“坍塌增强”工况气泡与结构耦合作用高速摄影图

Figure 9 High-speed photographs for the two-charge "collapse enhancement" case with unequal charge distribution.

图 8 和 9 给出了该工况的实验结果，在冲击波激励阶段，18.5 g TNT 当量的气泡 1 诱导结构产生

2370  $\mu\text{ε}$  的应变峰值, 与工况一(单发 20 g TNT 当量)冲击波阶段的结构应变峰值基本一致, 二者相差约 2.9%, 这说明 18.5 g TNT 当量装药并未因泡壁距离约 0.008 m 的减小量而产生更强的冲击能力。气泡 2 在 3 时刻生成, 在约 1 ms 延迟后气泡 1 坍塌并激励结构出现高达 5760  $\mu\text{ε}$  的应变峰值, 相比 20 g TNT 当量基准工况提高了约 39%。6 时刻时气泡 1 破碎后的气团正在向外膨胀, 应变曲线中出现的尖峰可能是由气泡 1 溃灭后撕裂出的小气泡的坍塌导致。该工况的结果清晰揭示了“坍塌增强效应”对结构的冲击增益高度依赖于气泡 1 的能量份额, 气泡 2 的核心作用是在关键时刻提供局部压力扰动, 过度分配药量反而会削弱气泡 1 对结构的冲击能力。本研究通过调整药量比及相应的延迟时间, 实现了气泡 2 起爆与气泡 1 坍塌的较优相位匹配, 相比单发基准工况显著提高了 20 g TNT 当量水下爆炸对结构的冲击能力, 为该加载模式的工程化应用提供了实验验证。

综合四组工况的实验结果, 在气泡坍塌激励阶段, 四组工况的靶板中心最大应变响应分别为 4136  $\mu\text{ε}$ 、1234  $\mu\text{ε}$ 、2747  $\mu\text{ε}$  和 5760  $\mu\text{ε}$ , 除“弹弓效应”工况外, 其余三组工况的冲击波应变响应均弱于气泡坍塌激励, 表明在当前的结构形式和泡壁距离下, 气泡坍塌载荷对结构的冲击效果优于冲击波。对比工况二与工况三, 虽然二者药量配比相同, 但由于双气泡空间耦合与时间相位的差异, 二者的气泡动力学行为不同, 其气泡坍塌激励所诱导的结构响应亦呈现显著差别, 这说明合理调控主气泡(距离结构最近的气泡)的坍塌行为是提升水下爆炸结构冲击能力的关键。“弹弓效应”所形成的高速水射流虽能对结构产生持续的射流冲击, 但其诱导的结构应变响应较弱, 对于本文所研究的刚性材料而言, 该模式的冲击效果有限, 而粘弹性材料可能更适合作为此类高速射流的破坏对象。工况四验证了“坍塌增强效应”的可行性, 证明了在合理的药量比与延时参数下, 水下爆炸气泡的坍塌威力可被另一气泡有效调控并增强, 最终在总药量不变的前提下, 实现较单发基准工况更为显著的冲击效果。

## 4 结论

本文在特定实验条件下(无量纲泡壁距离  $\gamma_{bw} = 0.5$ , 目标为箱型靶板结构)验证了一种基于时序起爆的双发水下爆炸协同冲击方法, 通过将总装药量分解为两个具有特定当量比与空间构型的独立爆源, 并精确控制起爆延时时间, 成功在水下近场构建了“弹弓效应”与“坍塌增强效应”两种典型双泡耦合模式。系统对比了四组工况(单发基准、等药量“弹弓效应”、等药量“坍塌增强效应”、不等药量“坍塌增强效应”)的结构响应, 得出以下结论: 在总装药一致的前提下, 10 g + 10 g TNT 当量弹弓效应工况虽诱导出定向高速射流, 但因射流砰击时机与气泡低压场相位耦合失谐, 其对结构的冲击能力反而弱于单发 20 g TNT 当量装药; 10 g + 10 g TNT 当量“坍塌增强效应”工况对气泡 1 坍塌载荷的增益有限, 结构响应峰值仅为单发基准的 69%, 而 18.5 g + 1.5 g TNT 当量“坍塌增强效应”工况实现了显著突破, 气泡 1 坍塌诱导的结构中心应变峰值达 5760  $\mu\text{ε}$ , 较单发基准工况提升 39%, 可见“坍塌增强效应”的结构冲击增强效果依赖于合理的能量分配。实验结果表明, 在总药量保持不变的前提下, 合理调整双发药量配比与起爆延时, 可有效增强气泡 1 的坍塌过程, 将气泡 2 初生阶段的能量高效转化为对结构的定向冲击。本研究验证了异相双气泡“坍塌增强效应”在水下爆炸气泡尺度的工程可行性, 为发展新型水下爆炸气泡调控技术提供了实验依据与设计思路。

致谢 感谢国家自然科学基金(12372239)、船舶结构安全全国重点实验室基金(Naklas2024ZZ004-J)、黑龙江省重点研发计划项目(JD24A002)的资助。

## 参考文献

- [1] 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. DOI: 10.1063/1.4967700.

- [2] KLASSEBOER E, HUNG K C, WANG C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 537: 387-413. DOI: 10.1017/S0022112005005306.
- [3] ZHANG A M, YAO X L, LI J. The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure[J]. *Applied Ocean Research*, 2008, 30(3): 159-171. DOI: 10.1016/j.apor.2008.11.003.
- [4] 牟金磊,朱锡,李海涛,等.炸药水下爆炸能量输出特性试验研究[J].*高压物理学报*,2010,24(02):88-92. DOI: CNKI: SUN: GYWL. 0.2010-02-002.  
MU J L, ZHU X, LI H T, et al. Experimental Research on Underwater Explosion Energy Output of Explosive[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2010,24(02):88-92. DOI: CNKI: SUN: GYWL. 0.2010-02-002.
- [5] 黄超, 张磐, 曾繁, 等. 一种水下爆炸冲击波压力调控方法[J]. *爆炸与冲击*, 2022(008): 042. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0450.  
HUANG C, ZHANG P, ZENG F, et al. A method for adjusting and controlling underwater explosion shock wave[J]. *Explosion And Shock Waves*, 2022(008): 042. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0450.
- [6] HU J, LU X, LIU Y, et al. Numerical and experimental investigations on the jet and shock wave dynamics during the cavitation bubble collapsing near spherical particles based on OpenFOAM[J].*Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 99(000): 18.- DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106576.
- [7] YAN S, CHEN Y, LYU K, et al. Numerical and experimental benchmark study of nonspherical cavitation bubble dynamics near a rigid wall[J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 154: 104423. DOI: 10.1016/j.apor.2025.104423.
- [8] 王晓峰, 郝仲璋. 炸药发展中的新技术[J]. *火炸药学报*, 2002, 25(4): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.04.014.  
WANG X F, HAO Z Z. New development of explosives technology[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25 (4): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.04.014.
- [9] 杨志剑, 刘晓波, 何冠松, 等. 混合炸药设计研究进展[J]. *含能材料*, 2017, 25(1): 2-11. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.001.  
YANG Z Z, LIU X B, HE G S, et al. Advances in design and research of composite explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(1): 2-11. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.001.
- [10] 邓海,全嘉林,梁争峰.偏心起爆对战斗部装药能量分配增益的影响[J].*爆炸与冲击*, 2022, 42(5):1-13. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0280.  
DENG H, QUAN J L, LIANG Z F. Influence of eccentric initiation on energy distribution gain of a warhead charge[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(5):1-13. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0280.
- [11] 黎勤, 苏成海, 王中, 等. 非轴对称复合聚能装药水下成形特性[J]. *兵工学报*, 2025, 46(S2): 164-172. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0922.  
LI Q, SU C H, WANG Z, et al. Study on underwater forming characteristics of non-axisymmetric composite shaped charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2025,46(S2):164-172. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0922.
- [12] 代伟, 王军, 赵雪, 等. 含铝炸药装药的能量提升与调控研究进展[J]. *兵工学报*, 2025, 46(12): 35-53. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0393.  
DAI W, WANG J, ZHAO X, et al. Research progress on energy enhancement and regulation of aluminized explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2025,46(12):35-53. DOI: 10.12382/bgxb.2025.0393.
- [13] 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. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03536.  
CHEN G J, SONG Y J, XING J H. Damage characteristics of cylindrical shell structure subjected to double UNDEX[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(3): 134-149. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03536.
- [14] 车靖平, 李健翔, 虎若曦, 等. 多爆源耦合威力场研究概述[J]. *科技与创新*, 2022, (23): 106-108. DOI: 10.15913/j.

- cnki. kjycx. 2022. 23. 032.
- CHE J P, LI J X, HU R X, et al. Overview of research on coupled power field of multiple explosive sources[J]. Science and Technology & Innovation, 2022,(23):106-108. DOI: 10. 15913/ j. cnki. kjycx. 2022. 23. 032.
- [15] 武海军, 成乐乐, 陈文戈, 等. 典型舰船结构的水下爆炸耦合毁伤研究进展[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(05): 439-459. DOI: 10. 15918/ j. tbit1001-0645. 2022. 146.
- WU H J, CHENG L L, CHEN W G, et al. Review on coupling damage effects of underwater explosion on typical ship structures[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(5): 439-459. DOI: 10. 15918/ j. tbit1001-0645. 2022. 146.
- [16] LIN S, WANG J, LIU L, et al. Research on damage effect of underwater multipoint synchronous explosion shock waves on air-backed clamped circular plate[J]. Ocean Engineering, 2021, 240: 109985. DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2021. 109985.
- [17] HU H W, SONG P, GUO S, et al. Shock wave and bubble characteristics of underwater array explosion of charges[J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1445-1453. DOI: 10. 1016/ j. dt. 2021. 05. 020.
- [18] 黄超, 张磐, 曾繁, 等. 一种水下爆炸冲击波压力调控方法[J]. 爆炸与冲击, 2022(008): 042. DOI: 10. 11883/ bzycj-2021-0450.
- HUANG C, ZHANG P, ZENG F, XU W Z, WANG J, LIU N. A method for adjusting and controlling underwater explosion shock wave[J]. Explosion And Shock Waves, 2022(008): 042. DOI: 10. 11883/ bzycj-2021-0450.
- [19] ZHANG Z, ZHAO Y, WANG L, et al. Damage characteristics of typical structures subjected to underwater contact explosion of array charges Available to Purchase[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(4): 047146. DOI: 10. 1063/ 5. 0266656.
- [20] 谢洋洋, 孙岩. 水下爆炸多气泡耦合形态及载荷分布特性[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(6) : 10-18. DOI: 10. 11809/ bqzbgcxb2024. 06. 002.
- XIE Y Y, SUN Y. Coupling shape and load distribution characteristics of underwater explosion multi-bubble[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(6): 10-18. DOI: 10. 11809/ bqzbgcxb2024. 06. 002.
- [21] 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): 031405. DOI: 10. 11883/ bzycj-2020-0346.
- SHENG Z X, LIU J H, ZHANG X P, GAO T, CHEN J T, YANG J. On an array-sensor technology for measuring bubble jet load generated by underwater explosion[J]. Explosion And Shock Waves, 2021, 41(3): 031405. DOI: 10. 11883/ bzycj-2020-0346.
- [22] WANG Q, FENG L H, LIU N N, et al. Experimental study of load characteristics caused by underwater explosion bubble collapsing in the neighborhood of a rigid wall[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115903. DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2023. 115903.
- [23] TIAN, Z L, LIU Y L, ZHANG A M, et al. Jet development and impact load of underwater explosion bubble on solid wall[J]. Applied Ocean Research, 2020, 95: 102013. DOI: 10. 1016/ j. apor. 2019. 102013.
- [24] LI S, ZHANG A M, HAN R, et al. Experimental and numerical study of two underwater explosion bubbles: Coalescence, fragmentation and shock wave emission[J]. Ocean Engineering, 2019, 190: 106414. DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2019. 106414.
- [25] LIU N N, ZHANG A M, LIU Y L, et al. Numerical analysis of the interaction of two underwater explosion bubbles using the compressible Eulerian finite-element method[J]. Physics of Fluids, 2020, 32(4). DOI: 10. 1063/ 1. 5143095.
- [26] FONG S W, ADHIKARI D, KLASEBOER E, et al. Interactions of multiple spark-generated bubbles with phase differences[J]. Experiments in fluids, 2009, 46(4): 705-724. DOI: 10. 1007/ s00348-008-0603-4.
- [27] FAN Y, BUßMANN A, REUTER F, et al. Amplification of supersonic microjets by resonant inertial cavitation-bubble pair[J]. Physical Review Letters, 2024, 132(10): 104004. DOI: 10. 1103/ PhysRevLett. 132. 104004.
- [28] YAN S, ZHANG A M, ZHANG T, et al. Supersonic jet dynamics from two-cavitation-bubble interactions: acceleration, tip fragmentation and penetration[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2026, 1030: A17. DOI: 10. 1017/ jfm. 2026. 11159.

- [29] 吕可, 邹佳俊, 陈颖, 等. 近刚性壁面异相双气泡耦合及射流增强效应研究[J]. 力学学报, 2023, 55(8): 1605-1617. DOI: 10. 6052/ 0459-1879-23-105.
- LÜ K, ZOU J J, CHEN Y, YAN S, LI S, ZHANG A M. Study on the interaction and jet enhancement effect of two out-of-phase bubbles near a rigid boundary[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(8): 1605-1617. DOI: 10. 6052/ 0459-1879-23-105.
- [30] LIU N N, ZHANG A M, CUI P, et al. Interaction of two out-of-phase underwater explosion bubbles[J]. Physics of Fluids, 2021, 33:106103. DOI: 10. 1063/ 5. 0064164.
- [31] 唐皓, 刘云龙, 冯集团, 等. 水下爆炸异相气泡动力学特性的 Euler 有限元数值模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(8): 895-908. DOI: 10. 21656/ 1000-0887. 440047.
- TANG H, LIU Y L, FENG J T, et al. Eulerian finite-element numerical simulation investigation on the dynamic characteristics of out-of-phase bubbles in underwater explosions[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2023, 44(8): 895-908. DOI: 10. 21656/ 1000-0887. 440047.
- [32] ZHANG A M, LI S M, XU R Z, et al. A theoretical model for compressible bubble dynamics considering phase transition and migration[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2024, 999: A58. DOI: 10. 1017/ jfm. 2024. 954.
- [33] Rayleigh L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical Magazine, 1917, 34(200): 94-98. DOI: 10.1080/14786440808635681.
- [34] ZHANG A M, LI S M, CUI P, et al. A unified theory for bubble dynamics[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(3): 033323. DOI: 10. 1063/ 5. 0145415.
- [35] Keller J, Miksis M. Bubble oscillations of large amplitude[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 68(2): 628-633. DOI: 10.1121/1.384720.
- [36] BRUJAN E A, NAHEN K, SCHMIDT P, et al. Dynamics of laser-induced cavitation bubbles near elastic boundaries: Influence of the elastic modulus[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 433. DOI: 10. 1017/S0022112000003335.
- [37] KLASEBOER E, TURANGAN C K, KHOO B C. Dynamic behaviour of a bubble near an elastic infinite interface[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(9): 1110-1122. DOI: 10. 1016/ j. ijmultiphaseflow. 2006. 05. 005.