

# 基于 OpenFOAM 有限域水下两点爆炸冲击波特性的数值模拟\*

郭权势, 方厚林, 姚成宝, 张洋, 丁洋, 吴祖堂, 卢强

(强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室; 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 多爆源水下爆炸现象多见于水下爆破等工程领域中, 多爆源协同作用比单爆源水下爆炸有着更为复杂的冲击波载荷特性。基于开源软件 OpenFOAM, 针对存在自由面与刚性底面的有限水域场景建立二维水下多点爆炸多物理场耦合数值模型, 对不同空间分布和起爆时序下水下多爆源爆炸冲击波载荷的复杂演化规律进行数值研究。发现双爆源间距与起爆相位差是调控冲击波叠加的关键参数, 双爆源间距变化对双爆源系统水平方向左右两侧空间压强场影响不大, 对与双爆源中心连线垂直的区域内压强场影响较大, 一定范围内较大的爆源间距可增大冲击波的正压作用时间; 一定时间间隔的微差起爆可显著增强初次叠加波的超压峰值。在自由面附近会出现明显的压力截断现象, 在刚性底部边界区域, 冲击波多次叠加, 显著增大附近压强场, 产生反射波增强效应。

**关键词:** OpenFOAM; BlastFOAM; 水下爆炸; 冲击波; 多点爆炸; 起爆时序; 超压峰值

**中图分类号:** O382.1 **文献标识码:** A

## Numerical simulation on the characteristics of underwater two-point explosion shock waves in limited regions based on OpenFOAM

GUO Quanshi, FANG Houlin, YAO Chengbao, ZHANG Yang, DING Yang, WU Zutang, LU Qiang

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect; Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

**Abstract:** Underwater multi-point explosions in a finite water domain bounded by a free surface and a rigid bottom are frequently encountered in practical blasting engineering, yet the coupled effects of source spacing, initiation sequence, and confined boundaries on shockwave loading remain insufficiently understood. This study quantitatively investigated the evolution of shockwave pressure fields generated by two underwater explosion sources under such confined conditions, focusing on the influence of source spacing and delayed initiation as well as the interaction with the free surface and the rigid bottom. A two-dimensional multi-physics coupled numerical model was developed using the open-source software OpenFOAM with the BlastFOAM solver. The computational domain measured 4000 mm in length and 1500 mm in width, consisting of a 500 mm air layer above a 1000 mm water column. Two 1 g TNT charges were placed at a depth of 500 mm

\*收稿时间: 2026-02-04; 修回日期: 2026-05-14 **基金项目:** 基金项目全称(批准号); 国家自然科学基金项目(00000000)

**第一作者:** 郭权势(1994-), 男, 助理研究员,

**通信作者:** 吴祖堂, E-mail: wuzutang@nint.ac.cn

with center-to-center distances of 160 mm, 320 mm and 480 mm, respectively. The bottom and side walls were set as rigid boundaries, while the top of the air domain was treated as a non-reflecting boundary. The adaptive mesh refinement (AMR) technique based on a pressure-gradient criterion was employed with a maximum refinement level of six to accurately capture the shockwave front. Water was described by a polynomial equation of state, air by the stiffened gas equation of state, and the TNT detonation products by the Jones–Wilkins–Lee (JWL) equation of state. The numerical model was validated by comparing the computed overpressure peaks and impulses at various scaled distances with empirical formulas, experimental data and LS-DYNA simulations, showing a relative error below 10%. Fourteen pressure monitoring points (G1–G14) were arranged horizontally, vertically and obliquely around the two-source system to record pressure histories, and both simultaneous and delayed initiation (with a time interval of 0.2 ms) were simulated. The source spacing had little effect on the overpressure peaks on the left and right sides of the two-source system, but significantly influenced the pressure field in the region perpendicular to the line connecting the two sources. Within a certain range, a larger spacing increased the positive pressure duration of the shockwave from 0.152 ms at 160 mm to 0.222 ms at 480 mm. For delayed initiation with a 0.2 ms interval, the initial superimposed wave exhibited a peak overpressure 327% higher than that under simultaneous initiation. The overpressure time histories near the free surface showed a distinct pressure truncation phenomenon, while the region adjacent to the rigid bottom experienced multiple reflections and superpositions, amplifying the local pressure by a factor of 1.5 compared to the free-field condition. Delayed initiation also produced multi-peak overpressure curves and stepwise impulse loading. It is concluded that source spacing and initiation timing are key parameters governing shockwave superposition in underwater two-point explosions: spacing mainly affects the pressure field in the direction perpendicular to the source alignment, while delayed initiation can significantly enhance the initial superimposed overpressure but may reduce far-field impulse. The free surface causes pressure truncation, whereas the rigid bottom generates reflected-wave enhancement. The two-dimensional numerical model based on OpenFOAM is capable of qualitatively capturing these complex phenomena, providing theoretical guidance for the spatiotemporal design of multi-source underwater blasting. Quantitative three-dimensional engineering assessments require further simulation or experimental validation.

**Keywords:** OpenFOAM; BlastFOAM; underwater explosion; shock wave; multi-point explosion; Initiation sequence; Peak overpressure.

近年来,水下多爆源协同作用的冲击波载荷特性研究成为国际水下爆炸力学领域的热点方向。随着水中爆破技术的发展,通过时空协同设计多爆源布局,可在相同装药总量下显著提升冲击波超压峰值,从而增强爆破效率。前人对不同装药形式和边界条件等工况下的水下单点爆炸冲击波载荷特性已经进行大量研究<sup>[1-7]</sup>,而对于水下多点爆炸冲击波规律的研究仍有较大需求<sup>[8]</sup>。2011年,吴国群<sup>[9]</sup>使用雷管进行水下两点爆炸实验,探究起爆时间和爆源间距对水下爆炸冲击波载荷的影响规律。2012年,盛振新<sup>[10]</sup>利用AUTODYN商业软件数值研究了水下两点起爆中起爆间距和起爆时序对冲击波超压的影响规律,发现冲击波会受到临近爆炸气泡的影响产生衰减,延时起爆对冲击波超压具有增益作用。2014年,孟闻远<sup>[11]</sup>在水下爆炸破冰的研究中对水下两点爆炸冲击波载荷特性随起爆间距的影响进行分析,发现了冲击波压力时程曲线的“双峰”现象。2020年,林尚剑<sup>[12]</sup>理论推导了水下爆炸冲击波的叠加公式并利用数值计算和水箱实验验证了理论公式的准确性,发现叠加后的冲击波有着更大的超压峰值。2021年,余俊<sup>[8]</sup>采用自研的多相可压流求解器对水下两点爆炸进行数值研究发现双爆源对称面处冲击波超压峰值较单爆源有所提升。胡宏伟<sup>[13]</sup>实验探究了水下两点、四点爆炸冲击波传播规律,分析了爆源数量、爆源间距对冲击波超压峰值和冲量的影响,发现多爆源系统对称方向超压形成叠加,非对称方向形成延时耦合特性。2022年,俞晞晖<sup>[14]</sup>对含铝炸药水下两点爆炸冲击波特性进行实验和数值研究,发现无法通过简单线性叠加的方式预测叠加波的超压峰值。2023年,安心阳<sup>[15]</sup>利用商业软件LS-DYNA中重新启动技术对水下单点多次爆炸和多点多次阵列爆炸对船体结构毁伤效应进行数值研究。

以上研究多是针对同步起爆，较少涉及微差起爆，同时现有的公开文献较少的考虑到自由面和刚性底面联合作用的影响，因此所建立的数值计算模型较为简单，并且对多爆源爆炸冲击波传播过程的详细分析较少。而在实际的爆破作业中，多点爆破、微差起爆、水面和底面的影响等是真实且客观存在的。因此本文基于开源软件 OpenFOAM 框架，利用 BlastFOAM 求解器建立了存在空气-水-TNT-刚性底面的水下两点爆炸多相数值模型，进行有限域内（空气-水面-底面）水下多点爆炸冲击波载荷的数值研究，探究空间分布和起爆时序对冲击波载荷的影响规律，并详细分析冲击波叠加传播的细节与规律。

## 1 控制方程

水中爆炸分为无限水中爆炸、广阔水域浅层水下爆炸和有限水域爆炸三种情况。通常情况下，对于水下爆炸而言，由于水域的有限性，水下爆炸冲击波受自由面和水底的影响，属于有限水域爆炸范畴。对有限水域水下多点爆炸的冲击波特性研究，不仅要考虑冲击波与自由面的相互作用，还要考虑水域底部及周壁对冲击波的反射作用。无论是那种爆炸形式，水下爆炸产生的冲击波是强间断面<sup>[16, 17]</sup>。间断面两侧的状态参数有突跃式变化，满足质量、动量、能量守恒定律<sup>[18, 19]</sup>。水中冲击波的基本方程可写为：

$$U_f - U_b = \sqrt{(P_f - P_b) \left( \frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_f} \right)} \quad (1)$$

$$D - U_b = \frac{1}{\rho_b} \sqrt{\frac{P_f - P_b}{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_f}}} \quad (2)$$

$$e_f - e_b = \frac{1}{2} (P_f + P_b) \left( \frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_b} \right) \quad (3)$$

式中，其中， $P_b$ 、 $\rho_b$ 、 $e_b$ 、 $U_b$  分别为未扰动前水介质的压力、密度、内能和质点速度， $P_f$ 、 $\rho_f$ 、 $e_f$ 、 $U_f$  分别为扰动后的流场的压力、密度、内能和质点速度。 $D$  为冲击波阵面速度。

Zamyshlyay 和 Cole<sup>[17]</sup>总结的水下爆炸冲击波超压经验公式为：

当  $6 < R/R_0 \leq 12$  时：

$$P_m = 44.1 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.5} \quad (4)$$

当  $12 < R/R_0 \leq 240$  时：

$$P_m = 52.4 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \quad (5)$$

式中， $P_m$  为水下爆炸冲击波超压峰值，MPa； $W$  为 TNT 装药质量，kg； $R$  为爆炸距离，m。

BlastFOAM 是一款基于 OpenFOAM 平台的免费、开源可压缩流求解器，对于多相流模型，其控制方程为 Navier-Stokes (N-S) 方程，其连续方程、动量方程和能量方程通式表示为<sup>[20]</sup>：

$$\partial_t U + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{S} \quad (6)$$

其中，

$$U_i = \begin{pmatrix} \alpha_i \\ \alpha_i \rho_i \\ \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \\ \alpha_i \rho_i E_i \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \alpha_i \mathbf{u}_i \\ \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \\ \alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \otimes \mathbf{u}_i + \alpha_i p_i \mathbf{I} \\ \alpha_i (\rho_i E_i + p_i) \mathbf{u}_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$S = \begin{pmatrix} \alpha_i \nabla \cdot \mathbf{u}_i + \sum_{i \neq j} \frac{\dot{\omega}_{ij}}{I(\rho_i, \rho_j)} \\ \sum_{i \neq j} \dot{\omega}_{ij} \\ \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \sum_{i \neq j} \dot{M}_{ij} + \dot{M}_{v,i} \\ \alpha_i \rho_i \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}_i + \sum_{i \neq j} (\dot{E}_{ij} + \dot{M}_{ij} \cdot \mathbf{u}_{int,ij}) + \dot{E}_{det,i} + \dot{E}_{v,i} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中， $\alpha_i$  为相体积分数， $\rho_i$  为相密度， $\mathbf{u}_i$  为相速度， $E_i$  为相能量， $p_i$  为相压强。 $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

源相中的  $\dot{M}_{ij}$  和  $\dot{E}_{ij}$  为各相之间相互作用产生的动量和能量项， $\dot{M}_{v,i}$  和  $\dot{E}_{v,i}$  为粘度项，（对于无粘无旋流体， $\dot{M}_{v,i}$  和  $\dot{E}_{v,i}$  均为 0）， $\mathbf{g}$  为重力加速度， $E_{det,i}$  为由化学反应所添加的能量，本文不涉及化学反应，该项为 0， $\mathbf{u}_{int,ij}$  为两相间的界面速度。当考虑质量传递时， $\dot{\omega}_{ij}$  表示从第  $i$  相向第  $j$  相的质量传递速率， $I$  为用于选择传递量的传递函数。

## 2 数值模型

基于 OpenFOAM 构建如图 1 所示的有限域中水下两点爆炸二维数值计算模型，该模型分为空气域和水域两部分，计算域长 4000 mm，宽 1500 mm，其中水深 1000 mm，空气域宽度为 500 mm。计算域底部和四周为刚性边界，上部空气域边界为无反射边界，G1-G14 为压力监测点，分布在双爆源系统的水平向、斜向和竖向空间。双爆源布置于水下 500 mm 处，爆心距  $d$  分别为 160 mm、320 mm 和 480 mm，当量均为 1g TNT。值得说明的是，本文采用二维平面数值模型，重点揭示有限域水下两点爆炸冲击波的演化规律与参数影响趋势。因二维与三维传播特性存在差异，本研究结论仅用于定性分析与物理机制阐释，三维工程定量需进一步开展三维仿真或实验。

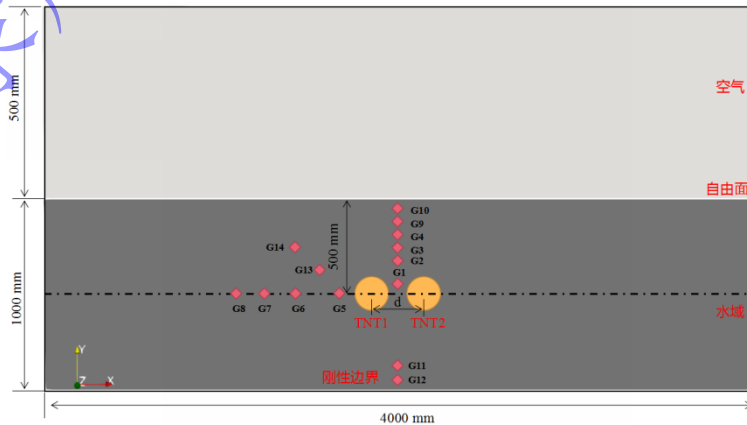


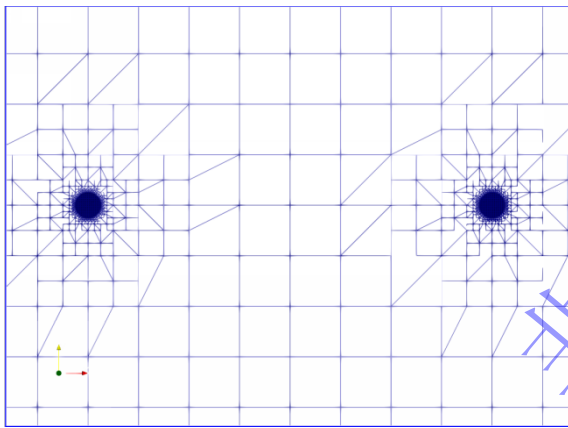
图 1 有限域中水下两点爆炸二维数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model for two-point underwater explosions in the finite water area

Berger 和 Oliger<sup>[21, 22]</sup>在 1983 年提出自适应网格加密法 AMR (Adaptive Mesh Refinement)。通过定义误差准则, 实现网格在变化较为剧烈的区域, 如大变形、激波面、接触间断面和滑移面上的迭代过程中不断调节, 将网格细化, 做到网格点分布与物理解的耦合, 从而提高解的精度和分辨率。而在物理解变化平缓区域网格相对稀疏, 这样在保持计算高效率的同时得到高精度的解<sup>[23]</sup>。

计算域采用自适应网格技术进行网格划分, 如图 2 (a) 初始时刻双爆源自适应网格示意图所示。采用压力基 (pressureGradient) 自适应网格加密准则, 能够保证冲击波在传播过程中波阵面始终处于加密状态, 波后流场随着压力的下降, 其计算域网格数量会逐渐降低, 以取得冲击波阵面的捕捉精度和计算效率的平衡, 如图 2 (b) 所示, 通过设置压强误差估计, 计算单元和其相邻单元面上的压强梯度, 其所有面误差的最大值被作为该单元中心处的误差值, 并用于确定需要加密的单元, 每一层加密, 网格单元被分割为 4 个小单元, 通过设置好的加密层数, 初始网格被自动加密至最大层级。

(a) Adaptive mesh refinement for two explosions



(b) Adaptive mesh refinement based on pressure gradient criterion for shock wave front

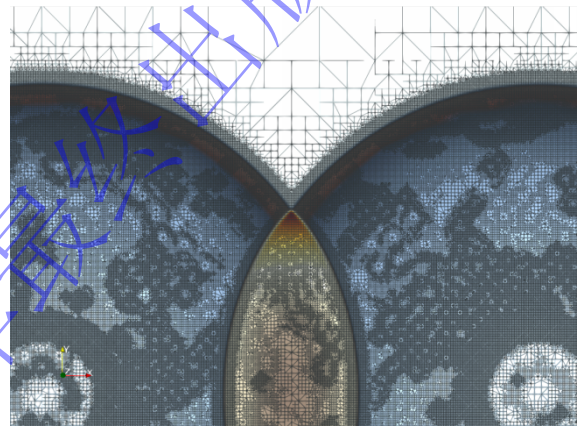


图 2 有限域中水下两点爆炸自适应加密网格策略

Fig.2 AMR strategy for two-point underwater explosions in the finite water area

## 2.1 数值求解器

BlastFOAM 是一款基于 OpenFOAM 平台的免费、开源可压缩流求解器<sup>[24, 25]</sup>。对固体、流体、气体及相互作用的高度非线性动力学问题有着较高的求解精度, 可用于炸药或高温高压气团爆炸威力的数值模拟。不同的学者利用 BlastFOAM 进行大量的爆炸效应相关研究<sup>[26-30]</sup>。BlastFOAM 提供了较高精度的单相和多相可压流体系统的求解算法, 内置二阶和三阶的数值格式、多种状态方程 (ideal gas、stiffened gas、Jones-Wilkins-Lee 等)、实时可选择的通量格式 (HLL、HLLC、AUSM+、Kurganov/Tadmor 等) 和高阶精度的显式时间差分格式。除此之外, BlastFOAM 提供了多种激活模型、爆轰模型来模拟高能材料的初始爆炸及场的发展, 是国际上比较流行的计算爆炸相关问题的开源计算软件<sup>[31]</sup>。

## 2.2 物性参数

### 2.2.1 水状态方程

水体采用多项式状态方程<sup>[32]</sup>, 有:

- (1) 当水压缩时 ( $\mu > 0$ )

$$P = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad (9)$$

- (2) 当水膨胀时 ( $\mu < 0$ )

$$P = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0e \quad (10)$$

(3) 当水既不压缩也不膨胀时 ( $\mu = 0$ )

$$P = B_0\rho_0e \quad (11)$$

式中,  $P$  为水中压力,  $\mu$  为压缩比,  $\mu = \rho_{w1}/\rho_{w0} - 1$ ,  $e$  为水的内能,  $\rho_{w1}$  为扰动后水的密度,  $\rho_{w0}$  为扰动前水的初始密度,  $B$  为水的体积模量。

### 2.2.2 空气状态方程

空气采用 stiffenedGas 状态方程<sup>[33]</sup>, 有:

$$P = (\gamma - 1)\rho_a e_a - \gamma a \quad (12)$$

式中,  $\gamma$  和  $a$  为材料参数, 对于空气有  $\gamma = 1.4$ ,  $a = 0$ 。  $e_a$  为空气的比内能。

### 2.2.3 炸药状态方程

炸药采用 JWL 状态方程<sup>[34]</sup>, 有:

$$p = A_g \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B_g \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\rho e \quad (13)$$

式中,  $A_g$ 、 $B_g$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  为经验系数,  $\eta$  为爆轰产物密度与炸药 (爆轰气体) 初始密度的比值。其中,  $\eta = \rho_b/\rho_0$ ,  $\rho_b$  为爆轰产物密度,  $\rho_0$  为炸药初始密度,  $e$  为比内能,  $\omega$  为 Grüneisen 系数。

## 2.3 网格无关性验证

水下爆炸冲击波在不同物理属性介质中的传播特性差异显著, 导致其对数值模拟网格尺寸的要求存在明显区别。针对特定爆炸场景合理确定计算网格尺度是数值仿真研究的核心问题, 需在保障模拟精度的同时尽可能减少网格数量以提升计算效率。然而, 由于各类介质物性参数的异质性及不同装药当量几何特征差异, 基于某组具体条件 (如固定当量与介质类型) 所确定的网格无关解方案具有显著局限性——其适用范围受限于介质属性变化或装药当量调整带来的物理场演化差异。因此, 系统开展近场、中场和远场的网格独立性研究具有重要工程意义, 有望在确保数值解精确度的前提下, 通过优化网格划分策略将计算耗时降至最低。

采用 AMR 网格技术对 1g TNT 当量爆源水下爆炸计算域进行网格划分, 其中背景网格均为爆源半径尺寸, 在此基础上对爆源区域进行加密。两次网格加密之间的时间步数 refineInterval 设置为 1, 缓冲层 nBufferLayers 设置为 3 层, 最大加密等级 maxRefinement 设置为 6 层, 设药球半径为  $R_0$ , 网格尺寸为  $l$ , 定义  $\lambda = R_0/l$  为网格划分系数, 图 3 为网格划分策略对 1g tnt 当量药球水下爆炸冲击波超压峰值和演化过程的影响。由图可知, 对于 1g TNT 当量药球, 随着网格分辨率的提高, 冲击波压强也随着提高, 计算精度逐渐提高, 随着网格分辨率的进一步提高, 计算精度不再有明显的提高。综合对比图 3 (a) 和 (b), 选取  $\lambda = 16$  时, 满足计算精度。因此, 选择  $\lambda = 16$  作为计算域划分策略。

(a) Shock wave overpressure peak

(b) Shock wave overpressure propagation

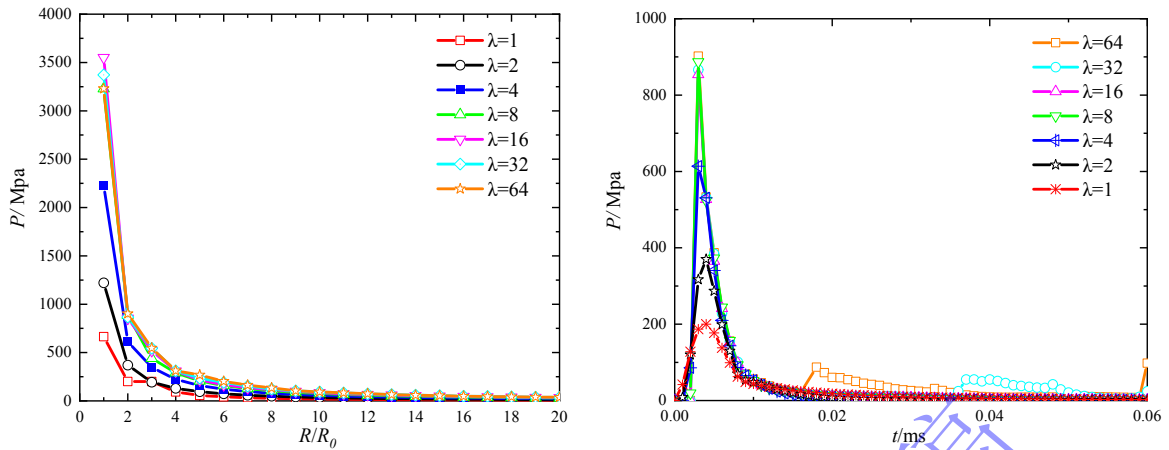


图3 网格尺寸对冲击波计算精度的影响

Fig.3 Influence of grid size on shock wave overpressure and propagation

## 2.4 状态方程验证

在水下爆炸动力学研究中，当考虑冲击波在水中传播过程时，传统不可压缩流体假设已不再适用。为准确表征冲击波传播过程中的能量衰减规律与冲量耗散特性，水的状态方程的选取对水下爆炸可压问题数值求解的准确性至关重要。本研究重点探讨不同状态方程对水下爆炸数值模拟精度的影响机制。本文通过对比分析 Linear Tillotson、Polynomial（多项式）、Tait 和 Stiffened Gas 四类典型状态方程的数值特性，建立了不同比例距离下的冲击波超压峰值与冲量峰值。图 4 所示的数值结果表明：在超压峰值和冲量衰减特性方面，Linear Tillotson 方程与多项式方程的计算结果与经典经验公式具有良好的—致性（相对误差<10%）；而 Tait 方程和 Stiffened Gas 方程在近场和中场区域（比例距离  $R/R_0 < 30$ ）与经验值呈现显著的偏差，且部分区域存在明显的数值异常点。基于上述对比分析，本文采用多项式状态方程作为水下爆炸数值模拟的本构模型。该方程在保持计算稳定性的同时，能够准确反映冲击波在中远场的衰减规律。

(a) Overpressure peak

(b) shock wave impulse

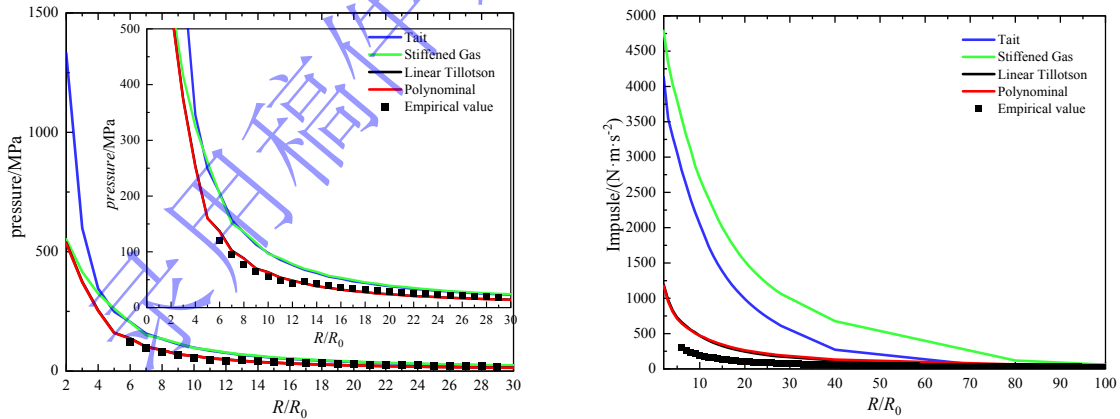


图4 不同状态方程的压强和冲量随比例距离变化曲线

Fig.4 The curve of pressure and impulse varying with proportional distance for different equations of state

## 2.5 数值求解模型验证

基于开源软件 OpenFOAM，通过引入水介质和多项式状态方程并设置多相体积分数，将空爆数值模拟求解器 BlastFOAM 调试为可计算单相/多相的多物理场水下爆炸的数值求解器，为了验证

搭建的数值模型的求解能力与计算精度，对水下 1g TNT 当量药球爆炸进行数值模拟，并将模拟结果与经验公式和实验结果作比较。

图 5 为数值计算验证模型，计算域采用轴对称模型，采用自适应网格技术对计算域进行空间划分。为了更好地对水下爆炸冲击波进行精确捕捉，减少数值耗散，本文将修正密度梯度准则修改为修正压力梯度准则并成功编译到 BlastFOAM 中。图 5 (a) 为 TNT 计算域网格加密示意图，可以看到 TNT 药球半径内网格分辨率较高，药球边缘无发散，极大降低了药球填充造成的质量亏损导致的数值耗散。图 5 (b) 为水下爆炸冲击波波阵面网格加密示意图，可以看到冲击波边缘网格被加密，冲击波形状规则，边缘清晰，证明基于压力梯度的准则能够很好地捕捉到冲击波边缘并进行网格局部细化，具有较高的求解精度。

(a) Adaptive mesh refinement of the numerical model

(b) Adaptive mesh refinement of the shock wave front

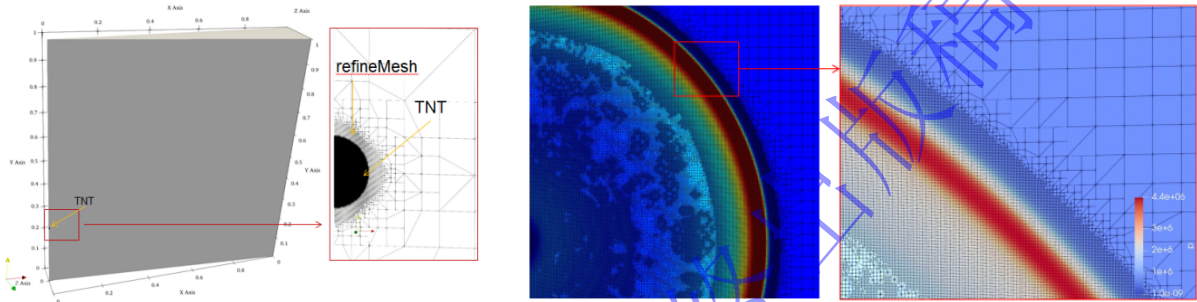


图 5 数值验证模型

Fig.5 Numerical verification model

为了验证数值计算模型的有效性，同时采用行业公认的数值计算软件 LS-DYNA 进行辅助验证，并开展了水下爆炸验证实验。图 6 为利用 BlastFOAM 计算得到的 1g TNT 当量药球水下爆炸在不同比例距离处压强结果与经验公式、商业软件和实验值的比较。可以看到 BlastFOAM 计算结果与经验公式（式 (4) - (5)）、LS-DYNA 计算结果和实验结果匹配良好，证明 BlastFOAM 具备较精确的 TNT 炸药水下爆炸求解能力。

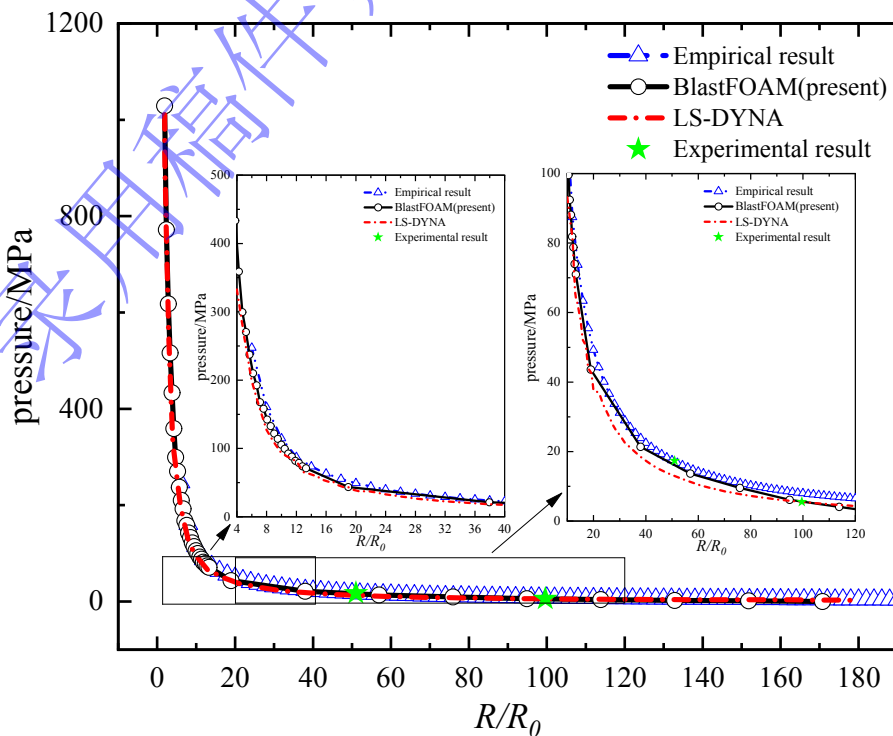


图 6 不同比距离处超压对比(经验公式、实验、OpenFOAM、LS-DYNA)

Fig.6 Overpressure comparison at different distance (empirical formula, experiment, OpenFOAM, LS-DYNA)

### 3 结果与讨论

为使数据和结果更具普适性和可比性，同时简化分析和计算过程，定义压力和比冲量的无量纲量：

$$P^* = \frac{P_i}{P_m} \quad (14)$$

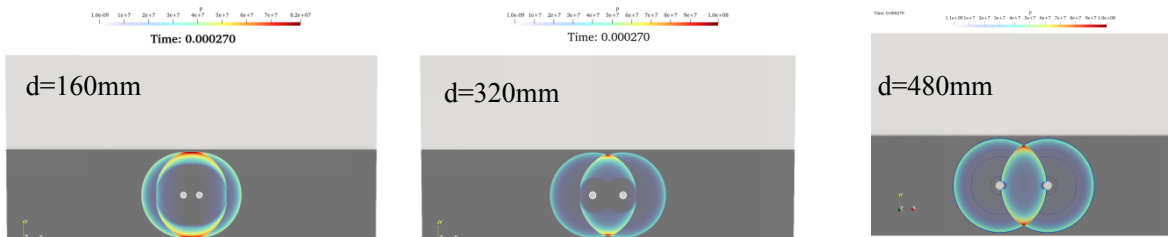
$$I^* = \frac{I_i}{I_m} \quad (15)$$

式中， $P^*$ 和 $I^*$ 分别为冲击波超压与比冲量的无量纲量， $P_m$ 和 $I_m$ 分别为 $d=160\text{mm}$ 工况下双爆源系统左侧监测点冲击波超压峰值和比冲量峰值， $P_i$ 和 $I_i$ 分别为其他监测点的冲击波超压和比冲量值。

#### 3.1 空间分布的影响

图 7 为不同间距下水下双爆源冲击波演化云图。由图可知，不同间距的双爆源水下爆炸，其冲击波在初期阶段有着相似的传播规律。初始时刻，双爆源同时起爆，产生初始冲击波向四周传播，随后左爆源的右行波阵面与右爆源的左行波阵面在两爆源中心位置处相遇并发生叠加形成叠加波，叠加波区域冲击波超压峰值增大，随着左、右行波的进一步传播，叠加区域逐渐变大，内部压强逐渐降低，叠加区在竖直方向上向着两端移动，形成两道“环状”冲击波阵面。随着叠加波区域的扩大，叠加波与气泡相互作用，气泡表面反射稀疏波，进一步降低叠加区域的压强，内部叠加波进一步在气泡周围发生绕射后向前方传播，形成第二道波阵面，但由于与气泡发生了相互作用，第二道波阵面较平坦，曲率较小，类似于“平面波”特性，而初始冲击波波阵面在传播过程中形态几乎不发生变化。值得注意的是，对于水平布置的双爆源水下爆炸冲击波在传播过程中，流场中超压最大值总是集中在竖直方向的两端，且“内环”波阵面超压峰值大于“外环”波阵面超压峰值。当冲击波阵面遇到底部刚性和上部自由面时具有不同的反射特征，对于自由面，当较大超压峰值的冲击波与自由面接触时，自由面处会反射稀疏波，稀疏波沿着与入射波相反的方向向下传播，与入射波相互抵消，降低流场超压峰值，靠近自由面处的冲击波超压历时曲线会出现截断现象。而底部刚性边界，会发射压缩波，发射波与入射波相向而行，形成叠加波，增大超压峰值。随着底部较大超压峰值的叠加波继续向四周运动，与左右两侧行波继续产生叠加，形成叠加波沿着底部边界向前传播。向上运动的叠加波与气泡发生相互作用，与气泡表面反射的稀疏波叠加，压强降低。一部分绕射过气泡的叠加波在上行过程中与来自水面反射的稀疏波相遇，其超压峰值进一步降低，如图 7 (c) 所示。

(a)  $t=0.27\text{ms}$



(b)  $t=0.35\text{ms}$

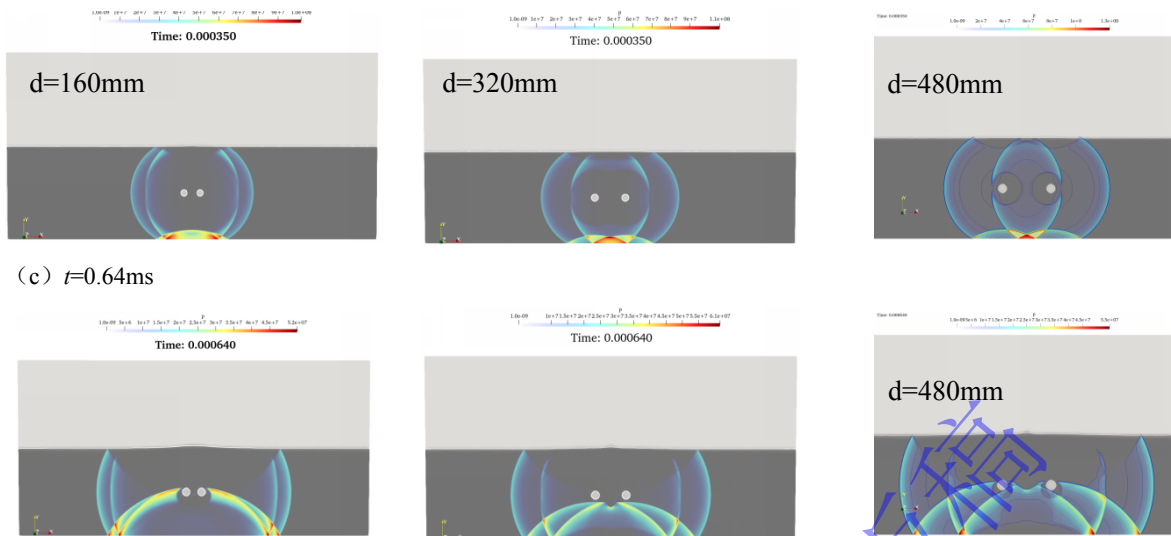


图 7 不同间距下水下双爆源冲击波演化云图

Fig.7 Cloud image of shock wave propagation of underwater double detonation source under different spacing

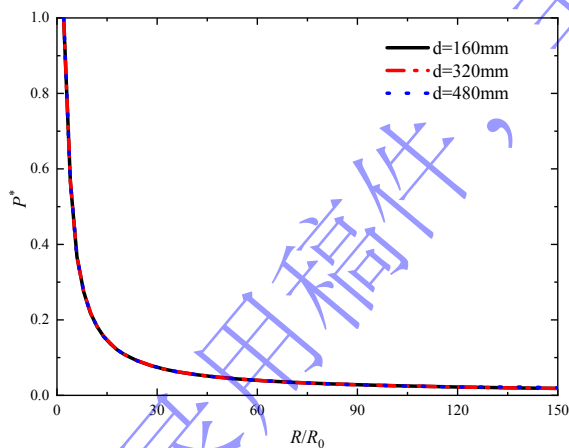
图 8 为不同间距下各测点超压峰值及超压历时曲线。图 8 (a) 为不同间距双爆源系统左侧超压峰值随比例距离变化的曲线，可以看到，对于双爆源系统，当比例距离一定时，间距对双爆源系统左侧区域超压峰值几乎没有影响。对于双爆源系统上方区域，间距对超压峰值的影响就变得显著。从图 8 (b) 可知，三条曲线有着相似的变化规律，超压峰值都随着比例距离的增大而减小。而对于不同的起爆间距，双爆源系统超压峰值在近、中、远场对间距有着不同的敏感度。在近场和中场，双爆源间距越小，其中心上部区域的冲击波超压峰值就越大。在远场，双爆源间距对冲击波超压峰值的影响则变得不太明显。对于双爆源系统下部，由于反射压缩波的存在，其超压峰值随比例距离变化规律与上部区域有所不同。由图 8 (c) 可知，冲击波峰值超压随着比例距离的增大先减小随后增大，这说明在双爆源系统与刚性底面之间存在一个临界距离，小于此临界距离的区域，冲击波超压峰值大于反射波超压峰值，大于此临界距离的区域，其冲击波超压峰值小于反射波超压峰值，在本文中，这个临界距离为  $R/R_0=80$ ，值得注意的是，在临界距离以下的下部区域，双爆源系统间距超过 160mm 后，间距的变化对该区域超压峰值的影响降低。

进一步，选取典型位置超压历时曲线进行对比分析，图 8 (d) 为不同比例距离下双爆源系统左上方区域一定点处超压历时曲线对比。由图可知，对于空间中一固定点，双爆源不同的空间分布对该点超压历时曲线影响较大，但总体来说，不同空间分布下的超压历时曲线也有着相似的规律。不同间距下超压历时曲线都有着明显的“双峰”特征，很显然这是因为此处受到了两道初始冲击波的加载。当间距为 160mm 时，第二道冲击波超压峰值大于第一道冲击波超压峰值。当双爆源间距进一步扩大，两道超压峰值出现了差异，第一道超压峰值随着间距的增大而增大，而第二道超压峰值却有着相反的规律，这可能是因为间距越大，左爆源（第一道冲击波产生源）与监测点的距离越近，而右爆源（第二道冲击波产生源）则远离监测点，比例距离增大。进一步发现，当间距为 480mm 时，第一道冲击波出现了明显的截断现象，这说明间距的增大，扩大了气泡反射的稀疏波的作用区域，延长了第二道冲击波的到时，进而影响了该区域压强，当双爆源间距较小时，没有出现压强降为 0 的现象，在截断现象出现之前（即气泡反射的稀疏波未到达时），第二道冲击波到达，监测点超压峰值骤增，形成双峰现象。同时发现，当  $d=160\text{mm}$  时，G14 测点冲击波正压作用时间为 0.152ms，当  $d=320\text{mm}$  时，正压作用时间为 0.194ms，当  $d=480\text{mm}$  时，虽然冲击波超压曲线出现截断，但考虑第二道冲击波的加载，综合正压作用时间为 0.222ms，这说明间距的增大对冲击波正压作用时间有着显著的影响，一定间距内，正压作用时间随着间距的增大而增大。

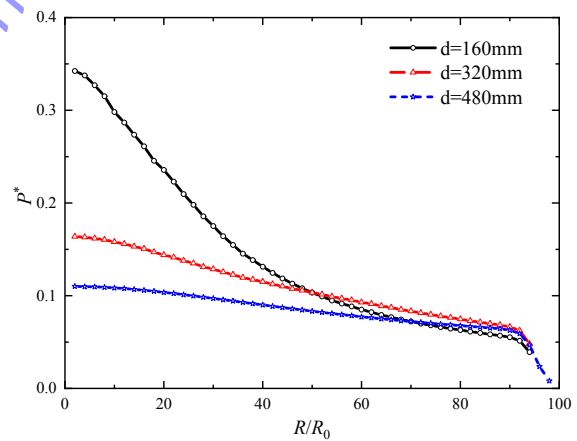
接下来，将双爆源系统看成一个整体，进一步探究空间分布对不同比例距离处冲击波超压演化规律的影响。图 8 (e) 为双爆源系统不同内部间距下左侧区域不同比例距离处冲击波超压历时曲线，发现双爆源系统内部空间分布不影响系统外近场第一道冲击波超压演化特性，但在远场区域，冲击波演化特性对双爆源系统内间距的变化较为敏感。理论上讲，虽然双爆源间距不同，但是距离双爆源系统的比例距离相同，其获得的冲击波超压曲线也相同，但事实并非如此，可以看到， $d=480\text{mm}$  时，远场测点有着较大的冲击波超压峰值和较快的冲击波到时，随着间距的减小，冲击波超压峰值降低，到时增大，但随着间距的进一步减小至  $d=160\text{mm}$  时，冲击波超压峰值反倒增大，冲击波到时减小。这是因为存在自由面和底部边界以及内部的气泡，双爆源系统内部及远场区域压力场较为复杂，这说明存在较优的空间分布使得双爆源在近场和远场都有着较大的冲击波超压时程。图 8 (f) 为双爆源系统中心上方区域冲击波超压历时曲线，由图可知，近场区域，冲击波超压峰值随着双爆源间距的增大而降低，但正压作用时间却有着相反的规律。在远场，冲击波超压峰值对双爆源间距的变化敏感度降低，正压作用时间随着间距的增大而增大，随着间距的进一步增大，正压作用时间增幅不明显。在底部附近，随着双爆源间距的增大，靠近底部的区域入射波超压和反射波超压显著增大，但是，随着双爆源间距的进一步增大，这种增益效果变得微乎其微，这说明，双爆源空间分布形式对双爆源系统底部区域的冲击波超压峰值和演化特性的影响存在一个临界距离，超过这个临界距离，双爆源间距的变化将不会产生任何较大的影响，本文这个临界距离为  $d=320\text{mm}$  (见图 8 (g))。而在自由面附近，双爆源间距的改变对靠近自由面区域的冲击波正压作用时间和冲击波超压峰值影响不大 (最大差值小于 16%)，当  $d=320\text{mm}$  时有着较大的冲击波超压峰值，如图 8 (h) 所示。

总的来说，装药间距对双爆源系统水平方向的超压峰值几乎没有影响，对竖直方向冲击波超压峰值和演化规律都有较大的影响，这种影响在近场区域和近边界区域最为明显。

(a) Overpressure peak on the left



(b) Overpressure peak up the center



(c) Overpressure peak blow the center

(d) Overpressure duration curve at G14

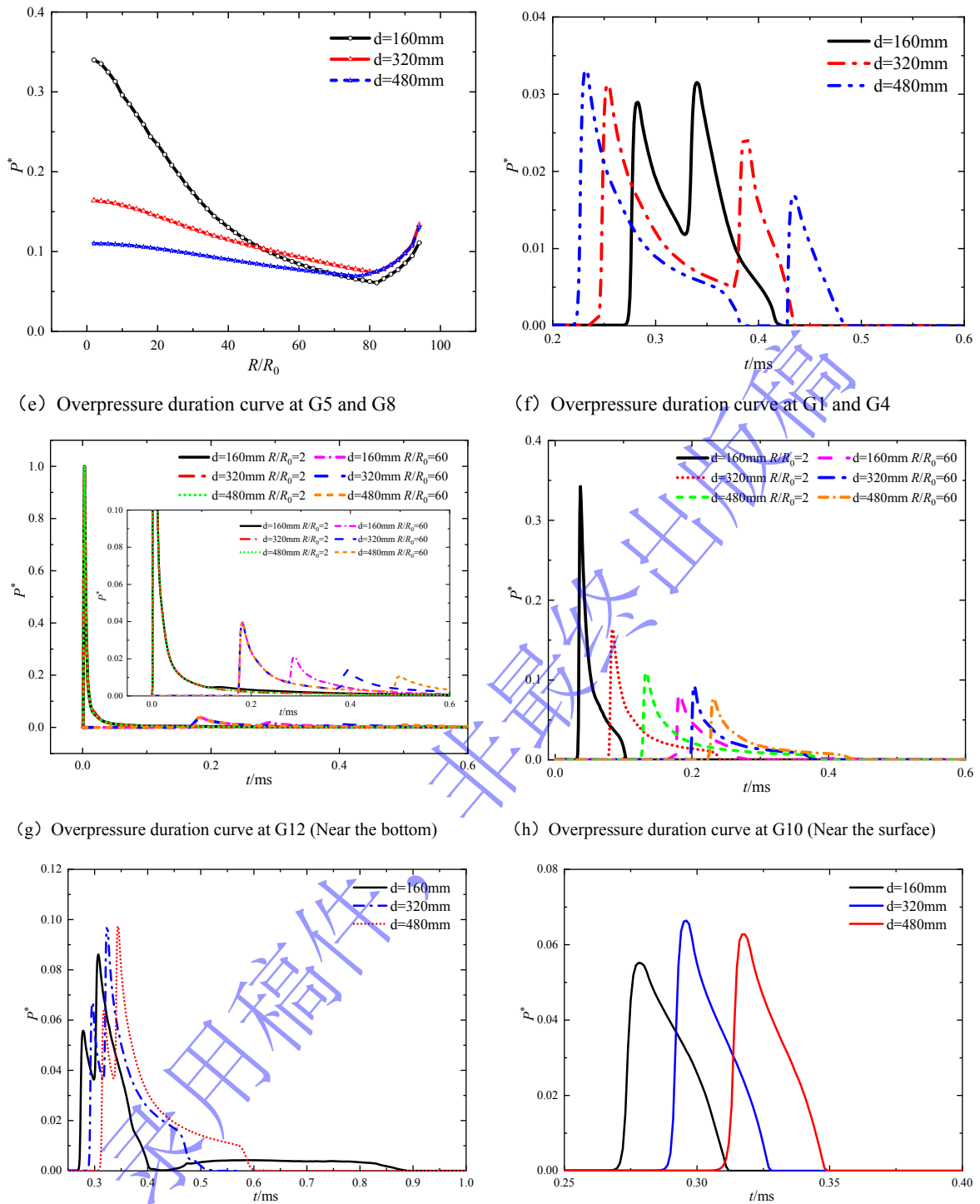


图 8 不同间距对双爆源系统周围超压峰值及演化过程的影响

Fig.8 Effect of different spacing on the peak overpressure and propagation around double detonation system

### 3.2 起爆时序的影响

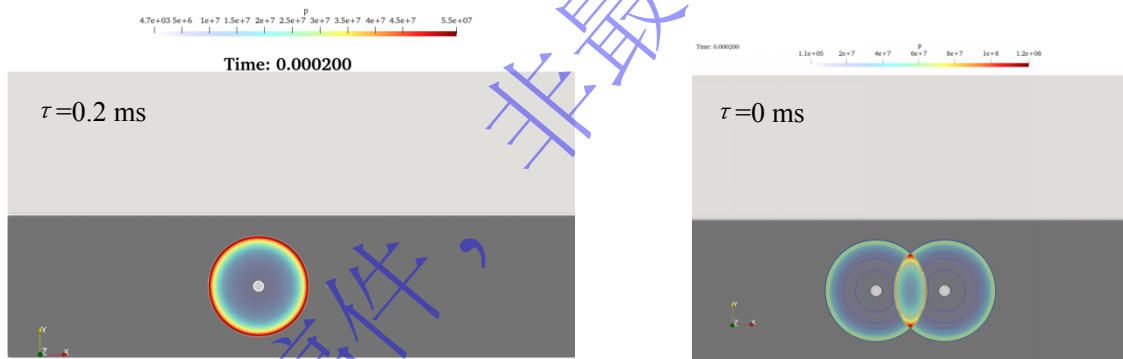
定义  $\tau$  为双爆源微差起爆时间, 选取爆心间距  $d=480\text{ mm}$  的水下双爆源工况开展微差起爆对爆炸冲击波载荷特性的影响机制研究。图 9 (a) - (d) 分别展示了微差起爆与同时起爆工况在相同时刻的冲击波演化特征。在微差起爆模式下, 左爆源作为先导装药提前  $0.2\text{ ms}$  起爆, 其初始冲击波以

球面波形式向四周介质传播；当右爆源延时起爆时 ( $t=0.2 \text{ ms}$ )，同时起爆工况的双爆源冲击波已完成首次叠加（见图 9 (a) - (b)），形成与微差起爆显著差异的压力场分布。

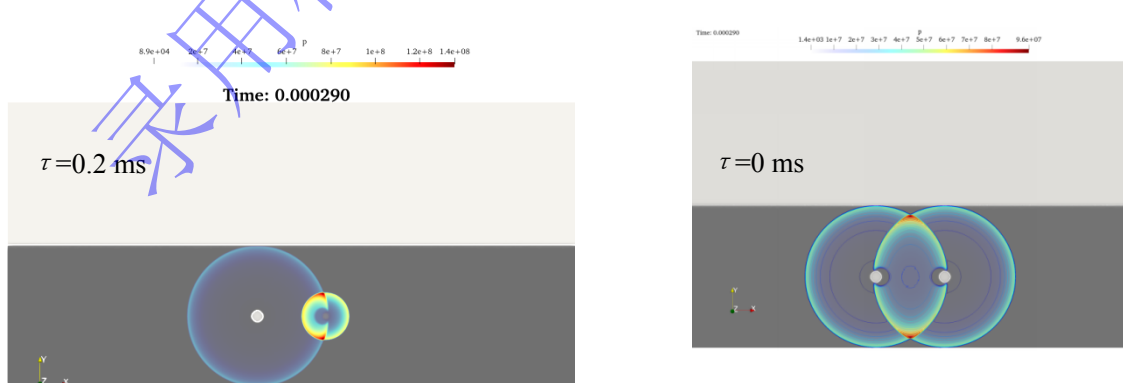
数值模拟结果表明：在微差起爆过程中，右爆源左行冲击波与左爆源右行冲击波形成叠加区域冲击波超压峰值无量纲量  $P^*$  约为 0.47，而同时起爆中冲击波首次叠加出现时间约为 0.13ms，叠加点在双爆源中心距离处，叠加区初始超压无量纲量  $P^*$  约为 0.11。可见，一定时间间隔的微差起爆叠加波初始压强较同时起爆工况提升 327%，这是因为微差起爆中两波相遇时间为 0.236ms，叠加区域在靠近右侧爆源处，其爆炸产生的初始冲击波压强峰值较大、衰减较小。随着波阵面传播，叠加区域进一步扩大，叠加区内超压峰值点空间位置发生变化，延时起爆的叠加区内多个超压峰值点在水平和竖直方向均发生移动，而同时起爆的叠加波峰值点仅发生竖向移动。 $t=0.45 \text{ ms}$  时，左爆源冲击波在自由面发生稀疏反射，同时在底部边界产生压缩反射波。此时右爆源左行冲击波与上述反射波系形成复合叠加，导致流场中出现具有显著压力梯度的局部高压区与低压区，如图 9 (c) 所示。随后叠加波区域进一步演化，形成多次叠加波效应（见图 9 (d)）。

进一步对比分析表明，冲击波多次叠加效应主要源于三个物理过程：首先，右爆源左行冲击波与左爆源右行波首先相遇形成初次叠加波，随后，初次叠加波与底部反射压缩波在  $t=0.43 \text{ ms}$  形成二次叠加波；最终，二次叠加波继续向底面传播，在底面处发生反射，形成反射压缩波，该反射压缩波沿着水平底面向前扩张，与向右移动的初次叠加波再次发生叠加，形成超压场复合波系。通过时程对比发现，微差起爆因相位差效应导致叠加波作用区域较同时起爆减少，且压力场复杂度系数大大降低，但叠加区初始压强却显著升高，这为优化水下爆炸载荷分布提供了参考。

(a)  $t=0.2\text{ms}$



(b)  $t=0.29\text{ms}$



(c)  $t=0.45\text{ms}$

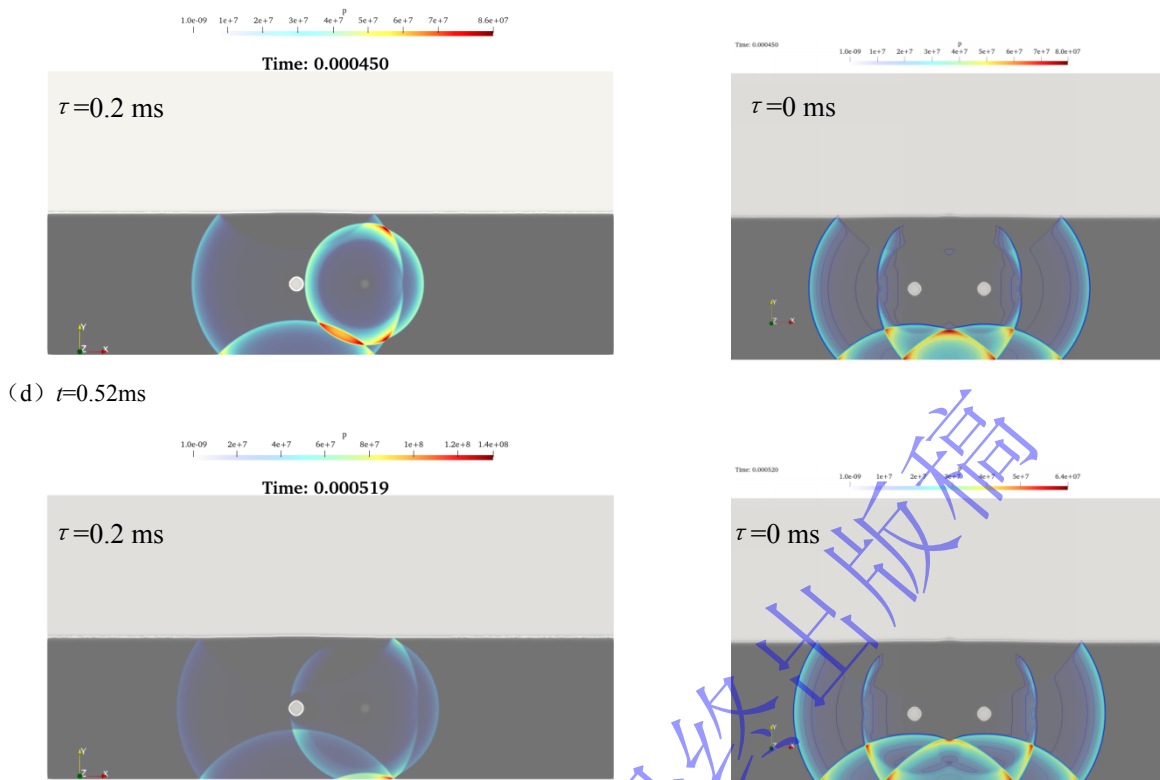


图 9 水下双爆源延时起爆与同时起爆冲击波传播特性对比

Fig.9 Comparison of shock wave propagation characteristics between delayed detonation and simultaneous explosion of underwater dual charges

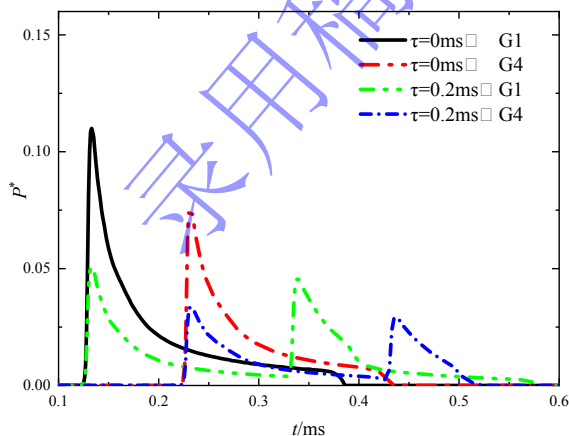
进一步对空间中冲击波载荷特性进行定量分析。图 10 为水下两点爆炸同时和延时起爆空间监测点超压历时曲线对比图。图 10 (a) 为双爆源中心上部区域监测点的同时起爆与微差起爆超压历史曲线图，可以发现，由于同时起爆在初始时刻形成较强的叠加波，因此该区域冲击波超压峰值远远大于微差起爆的冲击波超压峰值（单爆源冲击波超压峰值），经过计算可知同时起爆形成的叠加波超压峰值是单爆源起爆超压峰值的 2.16 倍，这说明冲击波叠加后对超压峰值有较强的增益效果。同时发现，无论是近场还是远场，在相同位置处，同时起爆都有着比微差起爆更大的冲击波超压峰值，值得注意的是，虽然微差起爆冲击波超压峰值比较小，但由于微差起爆超压历时曲线具有“双峰值”特性，因此在整个时间历程里正压作用时间远远大于同时起爆的正压作用时间，如同时起爆 G1 点超压正压作用时间为 0.262ms，同一监测点微差起爆冲击波正压作用时间为 0.455ms。从比冲量角度分析，由图 10 (b) 所示，可以看到，虽然同时起爆冲击波超压正压作用时间短，但是由于超压峰值较大，所以在整个作用时间内，其比冲量都远远超过微差起爆的比冲量，但是值得注意的是，微差起爆由于存在多次冲击，因此比冲量曲线存在“跳跃式分段”特性，这在实际爆破作业中，可以实现二次冲击、持续加载的爆破效果。同时可以发现，同时起爆时，在与双爆源系统中心线垂直的上部区域由于存在叠加波，因此其叠加波在远场的比冲量在爆炸后的一段时间内远远大于近场微差起爆冲击波的比冲量。

图 10 (c) 为双爆源系统左侧区域同时起爆与微差起爆冲击波历时曲线对比。可以发现，起爆时序对双爆源系统率先起爆的一侧的近场区域的冲击波超压没有影响。在远场区域，同时起爆冲击波超压历时曲线出现“三峰”现象。第一个峰为左爆源初始冲击波，第二个峰为右爆源左行初始冲击波，第三个峰为底部反射波。而微差起爆中相同测点处冲击波超压曲线中在监测时间段内只出现两个峰值，这是因为底部反射波先于右侧爆源冲击波到达，其中第一个峰值为左爆源初始冲击波，第二个峰值为底部反射波，两条超压历时曲线在波峰处峰值大小相等且衰减规律一致。这说明起爆时

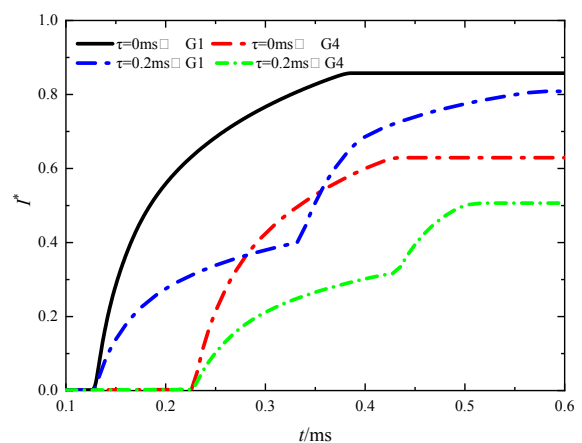
序对水平排列的双爆源系统在水平方向的冲击波超压峰值影响较小，但对冲击波的到时有较大影响。从各冲击波的比冲量曲线来看（见图 10（d）），可以发现相同的规律，值得注意的是，由于微差起爆改变了空间点的冲击波到时间，因此微差起爆与同时起爆的相同区域的比冲量大小出现了差异。

进一步探究微差起爆对边界处冲击波演化特性的影响。图 10（e）为近水面和近底部区域同时起爆及微差起爆时冲击波超压历时曲线。在水面区域（G10 测点），同时起爆下同一测点比微差起爆有着更大的冲击波超压峰值，但是由于水面稀疏波的存在，两条曲线都出现了压力截断现象且冲击波具有相同的正压作用时间，但值得注意的是，在 0.546ms 时，微差起爆下 G10 测点出现了第二个超压峰值，这是右爆源的左行冲击波所致，而在同时起爆工况下却没有出现这一现象，这是因为在同时起爆中，水面和气泡反射的稀疏波降低了此区域流场压强，这一点从云图 9（c）中也可以看出，该处的比冲量也比微差起爆要大（见图 10（f）），这说明，微差起爆改变了水面处超压峰值的大小，本质上是改变了冲击波的叠加过程和冲击波演化形态。而在底部边界，由于存在反射波及多次叠加波，因此此处冲击波场比较复杂。从图 10（e）中红色虚线与绿色虚线中可以看出，微差起爆显著增加了近底面冲击波历时曲线的形态特征，曲线出现“四峰值”特征，其中第一与第三个峰值为双爆源的初始冲击波，第二和第四个峰为双爆源的反射波。可以看出，微差起爆可增强后续爆源的初始冲击波和反射波压强，同时增大了反射波与入射波的超压强度比（反射波与入射波超压比：同时起爆为 1.53；微差起爆为 1.59）。这是因为率先起爆的爆源引起了扰动场，增大了扰动场中压强及密度。从比冲量曲线来看，尽管微差起爆对底边区域形成多次冲击波加载，但冲击波叠加度较弱，因此超压峰值比较小，其比冲量也比同时起爆小。但由于微差起爆大大延长了冲击波超压的正压作用时间，因此在冲击阶段的后期，其比冲量值逐渐接近同时起爆的比冲量值。对于微差起爆而言，与同时起爆不同的是，其双爆源系统周围压强场不再具有对称性，如图 10（g）所示。黑色实线与绿色虚线分别为微差起爆左侧和右侧比例距离  $R/R_0=70$  处冲击波超压历时曲线，可以看到两条曲线有着截然不同的特征，微差起爆右侧的超压峰值较小，但右侧区域的冲击波比冲量较大，因此双爆源系统右侧比左侧有着更强的冲击载荷。比较同一位置处同时起爆与微差起爆下超压与比冲量历时曲线可知，同时起爆有着比微差起爆更大的超压峰值，因此在冲击的后续阶段有着比微差起爆更大的比冲量，这说明，微差起爆在某种程度上降低了远场冲击强度。

(a) Overpressure up the center (G1:  $R/R_0=2$ , G4:  $R/R_0=60$ )

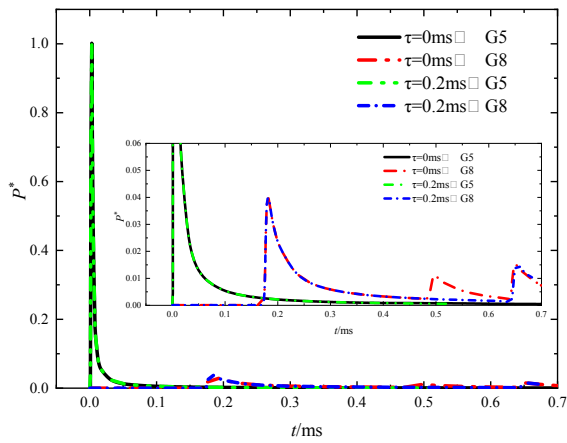


(b) Impulse up the center (G1:  $R/R_0=2$ , G4:  $R/R_0=60$ )

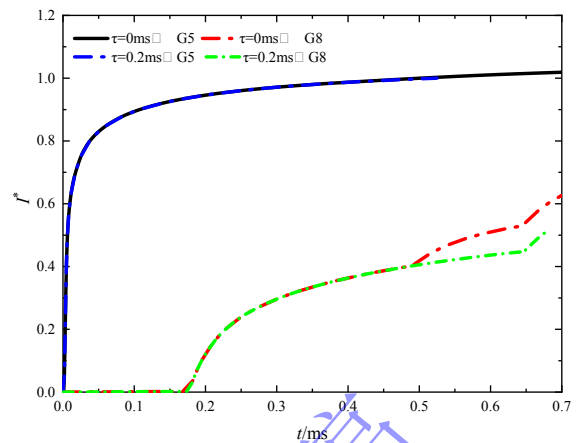


(c) Overpressure on the left (G5:  $R/R_0=2$ , G8:  $R/R_0=60$ )

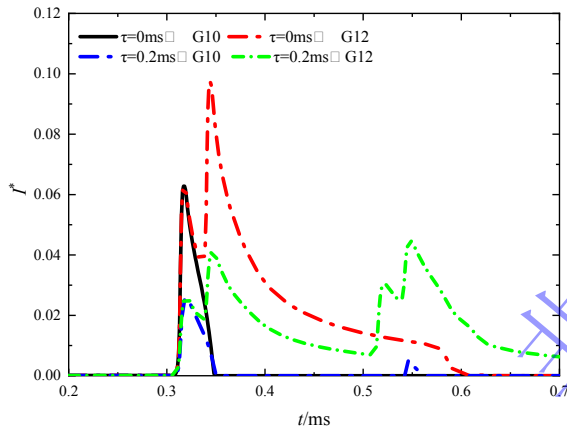
(d) Impulse on the left (G5:  $R/R_0=2$ , G8:  $R/R_0=60$ )



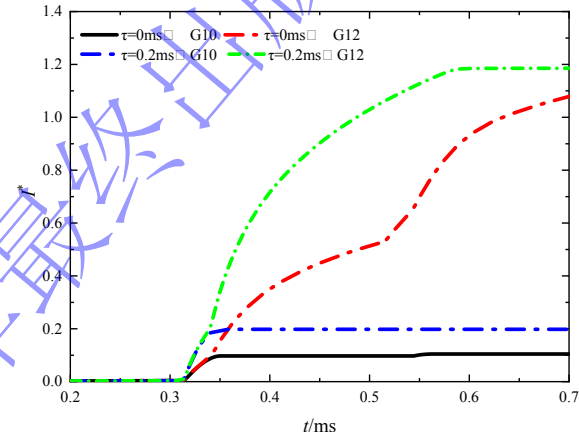
(e) Overpressure near the surface and the bottom  
(G10:  $R/R_0=80$ , G12:  $R/R_0=90$ )



(f) Impulse near the surface and the bottom  
(G10:  $R/R_0=80$ , G12:  $R/R_0=90$ )



(g) Overpressure on the right



(h) Impulse on the right

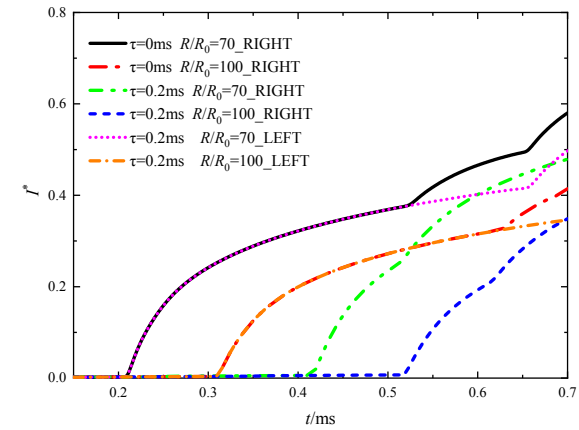
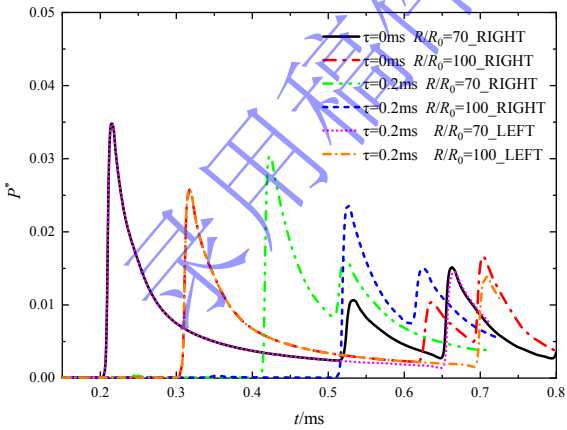


图 10 起爆时序对水下双爆源冲爆炸击波载荷特性的影响分析

Fig.10 Effect of detonation timing on shock wave load characteristics from underwater dual explosive sources

## 4 结论

本研究基于水下多点爆破的工程实际场景，针对存在自由表面及刚性基底的受限水域环境，利用开源计算流体力学软件 OpenFOAM 平台构建了二维多物理场耦合数值模型，首先基于实验和经验公式对水下双爆源二维数值计算模型进行验证，证明了数值计算模型的有效性，在此基础上初步探究不同空间布局及起爆时序下多爆源爆炸冲击波压力场动态演变规律，得到的结论如下：

(1) 基于 OpenFOAM 及 BlastFOAM 求解器搭建的水下多点爆炸数值计算模型，结合基于压力梯度的自适应网格加密技术（最大加密层数 6 层，网格划分系数  $\lambda=15$ ），能够实现对水下爆炸冲击波阵面的高精度捕捉。通过与经验公式、LS-DYNA 模拟及实验数据的对比验证，可有效应用于水下爆炸力学效应的定性及半定量计算。

(2) 爆源间距是调控冲击波叠加效应的关键参数之一。在双爆源系统中，水平方向（轴向两侧）的压强分布对爆源间距变化不敏感，冲击波历时曲线呈现多峰值特征；而垂直于两爆源连线的中间区域则呈现显著的空间响应差异，叠加波超压峰值远大于爆源个数的线性叠加。当间距达到一定临界值（本文中为 320 mm）后，进一步增大爆源间距可有效延长冲击波正相位持续时间（从 160 mm 间距时的 0.152 ms 增大到 480 mm 间距时的 0.222 ms），但对底部附近超压峰值的增益效果变得微乎其微。

(3) 起爆时序对双爆源冲击波的叠加区域和超压峰值具有显著影响。相比于同步起爆，一定时间间隔（本文中为 0.2 ms）的微差起爆可使初次叠加波的超压峰值提升 327%，同时产生“多峰值”超压曲线和比冲量“脉动”加载特性，实现二次冲击、持续加载的爆破效果。然而，微差起爆可能降低远场区域的冲击强度（比冲量较同步起爆小）。此外，微差起爆使流场压强呈现非对称分布，先爆源一侧与后爆源一侧的冲击波载荷特性存在明显差异。

(4) 边界条件对冲击波载荷特性的影响显著。自由表面附近出现明显的压力截断效应，冲击波超压历时曲线在稀疏波作用下骤降。刚性底面区域由于冲击波的多次反射与叠加，形成叠加增强效应，使局部压力幅值较自由场状态提升 1.5 倍（本文中反射波与入射波超压比：同步起爆为 1.53，微差起爆为 1.59）。这种非线性耦合现象揭示了复杂水域环境中爆破安全评估必须考虑的自由面与底面联合边界效应。

(5) 本文基于二维水下两点爆炸数值模型得到的冲击波演化规律与参数影响趋势，仅适用于定性揭示有限域水下两点爆炸冲击波演化规律，可为多爆源时空协同设计提供理论参考；若需开展三维工程场景的定量评估与应用，应在本研究基础上进一步开展三维数值模拟或实验验证。

## 参考文献

- [1] 敖启源, 卢熹, 姜智雅, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真精度研究[J]. 水下无人系统学报. 2024(01). DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2023-0098.  
AO Q Y, LU X, JIANG Z Y, et al. Numerical Simulation Accuracy Study of Underwater Explosion Shock Waves[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems. 2024(01). DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2023-0098.
- [2] 徐维铮, 黄超, 张磐, 等. 锥形长药柱水下爆炸冲击波参数计算方法[J]. 爆炸与冲击. 2022(01). DOI: 10.11883/bzycj-2021-0095.  
XU W Z, HUANG C, ZHANG P, et al. A method for calculating underwater explosion shock wave parameters of slender cone-shaped charges [J]. Explosion and Shock Waves. 2022(01). DOI: 10.11883/bzycj-2021-0095.
- [3] 孙远翔, 田俊宏, 张之凡, 等. 含铝炸药近场水下爆炸冲击波的实验及数值模拟[J]. 振动与冲击. 2020(14). DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.025.  
SUN Y X, TIAN J H, ZHANG Z F, et al. Experiment and numerical simulation study on the near-field underwater explosion of aluminized explosive [J]. Explosion and Shock Waves. 2022(01). DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.14.025.
- [4] 钟冬望, 黄小武, 殷秀红, 等. 水下爆炸冲击波的数值模拟与试验研究[J]. 爆破. 2015(04). DOI:

- 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.04.004.
- ZHONG D W, HUANG X W, YIN X H, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Underwater Explosion Shock Wave[J]. *Blasting*. 2015(04). DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2015.04.004.
- [5] 王高辉, 张社荣, 卢文波. 近边界面的水下爆炸冲击波传播特性及气穴效应[J]. *水利学报*. 2015(08). DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20140035.
- WANG G H, ZHANG S R, LU W B, et al. The influence of boundaries on the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2015(08). DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20140035.
- [6] DARAMIZADEH A, ANSARI M R. Numerical simulation of underwater explosion near air-water free surface using a five-equation reduced model[J]. *Ocean Engineering*. 2015, 110(PartA): 25-35. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.003.
- [7] Petrov N V, Schmidt A A. Multiphase phenomena in underwater explosion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, 60(000): 367-373. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2014.05.008.
- [8] 余俊, 盛振新, 毛海斌, 等. 水下多点爆炸条件下的冲击波载荷特性[J]. *高压物理学报*. 2021(02). DOI: 10.11858/gywlb.20200597.
- YU J, SHENG Z X, MAO H B, et al. Load Characteristics of Shock Wave under Condition of Multiple Underwater Explosion(UNDEX)[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*. 2021(02). DOI: 10.11858/gywlb.20200597.
- [9] 吴国群, 张明晓, 弓启祥, 等. 水下爆炸冲击波相互作用的研究[J]. *煤矿爆破*. 2011(02). DOI: CNKI:SUN:MKBP.0.2011-02-006.
- WU G Q, ZHANG M X, GONG Q X, et al. Study on the Interaction of the Shock Waves in Underwater Explosions[J]. *Coal Mine Blasting*. 2011(02). DOI: CNKI:SUN:MKBP.0.2011-02-006.
- [10] 盛振新, 刘荣忠, 郭锐. 水下爆炸冲击波相互作用的仿真分析[J]. *火工品*. 2012(03). DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.007.
- SHENG Z X, LIU R Z, GUO R, et al. Study on the Shock Waves Interaction of Underwater Explosions[J]. *Initiators & Pyrotechnics*. 2012(03). DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2012.03.007.
- [11] 孟闻远, 郭军伟, 郭颖奎, 等. 两点爆炸冲击波对冰的破坏效应的仿真分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*. 2014(01). DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2014.01.005.
- MENG W Y, GUO J W, GUO Y K, et al. Simulation and Analysis of Damage Effect of Double Explosions Shock Wave on the Ice[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*. 2014(01). DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2014.01.005.
- [12] 林尚剑, 王金相, 马腾, 等. 水下多点爆炸冲击波叠加效应研究[J]. *兵工学报*. 2020(S1). DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2020-S1-006.
- LIN S J, WANG J X, MA T, et al. Superimposed Effect of Shock Waves of Underwater Explosion[J]. *Acta Armamentarii*. 2020(S1). DOI: CNKI:SUN:BIGO.0.2020-S1-006.
- [13] 胡宏伟, 王健, 冯海云, 等. 多点水中阵列爆炸冲击波的传播特性[J]. *含能材料*. 2021(05). DOI: 10.11943/CJEM2021026.
- HU Hongwei, WANG Jian, FENG Haiyun, et al. The Propagation Characteristics of Shock Wave for Multi-charge Underwater Array Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*. 2021(05). DOI: 10.11943/CJEM2021026.
- [14] 俞旻晖, 郭锐, 宋浦, 等. 含铝炸药水下两点爆炸冲击波超压特性研究[J]. *水下无人系统学报*. 2022(03). DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2022.03.004.
- YU Y H, GUO R, SONG P, et al. Overpressure Characteristics of Shock Waves Generated by Underwater Two-point Explosion from Aluminized Explosives[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*. 2022(03). DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2022.03.004.
- [15] 安心阳. 多次水下爆炸冲击载荷下结构的损伤研究[Z]. 哈尔滨工程大学, 2023.

- AN X Y. Study of Structural Damage under Multiple Underwater Explosion Impact Loads[Z]. Harbin Engineering University, 2023.
- [16] GAO Y, WANG S S, ZHANG J X, et al. Effects of underwater explosion depth on shock wave overpressure and energy[J]. *Physics of Fluids (1994-present)*. 2022, 34(3): 37108. DOI: 10.1063/5.0081107.
- [17] Cole R H. Underwater Explosions[J]. *Physics today*. 1948, 1(6). DOI:10.1063/1.3066176.
- [18] 方厚林, 卢强, 郭权势, 等. 水下爆炸冲击波和气泡行为自由面效应的实验研究[J]. *爆炸与冲击*. 2024(08). DOI: 10.11883/bzycj-2024-0003.
- FANG H L, LU Q, GUO Q S, et al. Experimental research on the free surface effect of shock wave and bubble behavior of small yield underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*. 2024(08). DOI:10.11883/bzycj-2024-0003.
- [19] Hu H W, Song P, GUO S F, 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.
- [20] BlastFoam: An OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with Application to High-Explosive Detonation[R]. Synthetik Applied Technologies LLC., 2020.
- [21] BERGER M J, OLIGER J. Adaptive Mesh Refinement for Hyperbolic Partial Differential Equations[R]. Stanford Univ Ca Dept Of Computer Science, 1983. DOI:10.1016/0021-9991(84)90073-1.
- [22] THORNBURG J. Adaptive mesh refinement for characteristic grids[J]. *General Relativity and Gravitation*. 2011, 43(5): 1211-1251. DOI:10.1007/s10714-010-1096-z.
- [23] WU WB, LIU Y L, ZHANG A M, et al. An h-adaptive local discontinuous Galerkin method for second order wave equation: Applications for the underwater explosion shock hydrodynamics[J]. *Ocean Engineering*. 2022, 264(000). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112526.
- [24] 郭权势, 卢强, 方厚林, 等. 基于光学法的水下爆炸冲击波流场压强测量与分析[J]. *现代应用物理*. 2024(02). DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2024.021002.
- GUO Q S, LU Q, FANG H L, et al. Measurement and Analysis of Underwater Explosion Shockwave Overpressure Based on Optical Method[J]. *Modern Applied Physics*. 2024(02). DOI:10.12061/j.issn.2095-6223.2024.021002.
- [25] JASAK H. OpenFOAM: Open source cfd in research and industry[J]. *Hrvatska znanstvena bibliografija i MZOS-Svibor*, 2009. DOI:10.2478/IJNAOE-2013-0011.
- [26] Wang L, Yang L, Yue L. Study on the influence of expansion waves on the reflection type of shock wave in double-wedge configurations[J]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024, 2882(000): 12025. DOI: 10.1088/1742-6596/2882/1/012025.
- [27] 张森. 面向爆轰波冲击响应模拟的并行流固耦合计算平台关键技术研究[Z]. 国防科技大学, 2021.
- ZHANG S. Research on Key Technology of Parallel Fluid-Structure Interaction Computing Platform for Simulating Structural Responses to a Detonation Shock[Z]. National University of Defense Technology, 2021.
- [28] 张森, 郭晓威, 甘新标, 等. 面向爆轰冲击的分离式流固耦合数值模拟[J]. *空气动力学学报*. 2022(06). DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0095.
- ZHANG S, GUO X W, GAN X B, et al. Numerical study of detonation shock with partitioned fluid-structure interaction simulations[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*. 2022(06). DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0095.
- [29] WENG Z F, MÉVEL R. Implementation of an OpenFOAM solver for shock and detonation simulation at high pressure[J]. *Computers & Fluids*. 2023, 265(000): 106012. DOI:10.1016/j.compfluid.2023.106012.
- [30] ZHAO Y, MIAO Z, GAO Y, et al. Research on the Propagation Law of Explosion Shock Waves in Ship Engine Rooms Based on OpenFOAM[J]. 2025. DOI:10.3390/fire8030115.
- [31] HEYLMUN J, VONK P, BREWER T. blastFoam 6.0 User Guide[Z]. Synthetik Applied Technologies, LLC., 2022.
- [32] 李晓杰, 张程娇, 王小红, 等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J]. *工程力学*. 2014(08). DOI:

[10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180).

LI X J,ZHANG C J,WANG X H, et al.Numerical study on the effect of equations of state of water on underwater explosions[J].Engineering Mechanics.2014(08). DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180).

[33] ZHENG H W, SHU C, CHEW Y T, QIN N. A solution adaptive simulation of compressible multi-fluid flows with general equation of state[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2011, 67(5): 616-637.DOI:[10.1002/flid.2380](https://doi.org/10.1002/flid.2380).

[34] 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(06).DOI: [10.11809/bqzbgcxb2024.06.002](https://doi.org/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(06). DOI: [10.11809/bqzbgcxb2024.06.002](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2024.06.002).

录用稿件，  
非最终出版稿