**DOI:** 10.11858/gywlxb.20230744

# 不同底质条件下近海底爆炸冲击波载荷特性研究

吴易烜[1], 邵 岩[2], 谢宇杰[2], 高宏林[3], 张之凡[2]

(1. 西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024;
2. 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 大连海事大学轮机学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 近海底爆炸冲击波会对海底光缆、海底管道等设施造成严重的破坏, 不同底质条件的冲击阻抗会影响冲击波的时空演化规律, 因此, 研究不同底质条件下近海底爆炸冲击波载荷具有重要的意义。基于耦合欧拉-拉格朗日方法建立近海底爆炸模型, 探究海底底质对近海底爆炸冲击波载荷的影响, 结果显示: 测点角度在 20°～50°范围内时, 海底底质材料会显著影响冲击波峰值压力, 近海底反射的影响随爆距比的增加而增强, 当测点角度超出该范围时, 该现象逐渐消失; 海底底质影响范围不随底质的变化而变化, 但是在不同底质条件下, 受影响区域的反射系数截然不同, 当海底底质较软时, 海底底质影响区域内的冲击波反射系数在 0.81～1.05 之间, 当海底底质为刚壁时, 海底底质影响区域内的冲击波反射系数在 0.98～1.33 之间; 水深不会导致冲击波峰值压力发生显著变化。

**关键词:** 水下爆炸; 近海底; 冲击波; 耦合欧拉-拉格朗日方法; 底质条件; 水深

**中图分类号:** O382.1 **文献标志码:** A

海床已成为一个全新的冲突领域, 近海底爆炸可以对海底光缆、海底管道等设施造成严重的破坏, 其破坏过程涉及近海底反射、多相流掺混、结构与流体的耦合作用, 开展近海底爆炸冲击波时空演化规律研究对于水中兵器研制及海底设施抗爆抗冲击设计具有重要的意义。

目前, 国内外对近海底水下爆炸研究已经取得了一定成果。基于 Kelvin 的冲击理论, Blake 等[1] 得出了判断自由面附近气泡射流方向和气泡运动方向的方法, 该方法对近壁面也同样适用。张永坤[2] 对沉底水雷在水下爆炸作用下的毁伤情况进行了研究, 总结了水雷在不同情况下被毁伤的特点, 为提高水下灭雷武器的作战能力奠定了理论基础。邵建军等[3] 基于相似理论, 研究了海底对爆炸的影响, 发现海底底质变化显著影响水下爆炸的冲击波能和气泡能。杨莉等[4−7] 在泥底、砂底及石底 3 种条件下进行了沉底爆炸试验, 发现在 3 种底质条件下, 气泡后期溃灭形态存在差异, 最大峰值压力通常出现在装药靠近水底面一侧的斜上方, 对于爆距较小的水底面测点, 反射波追上入射波会形成马赫波。黄潇等[8] 采用镜像法模拟海底边界的影响, 发现自由场爆炸气泡比近海底爆炸气泡对潜艇施加的总纵弯矩更大。姚熊亮等[9] 基于光滑粒子流体动力学(smooth particle hydrodynamics, SPH)方法模拟沉底水下爆炸, 研究了水底底质厚度和炸药当量对冲击波压力的影响。邵宗战等[10] 提出了沉底水雷海上爆炸威力的测量方法, 给出了冲击波峰值压力的拟合方法及爆炸能量计算方法。前人在近海底水下爆炸冲击波载

* **收稿日期:** 2023-10-07; **修回日期:** 2023-11-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(52271307, 52192692, 52061135107); 辽宁省自然科学基金优秀青年基金(2023JH3/10200012); 辽宁省兴辽英才计划高水平创新创业团队项目(XLYC1908027); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT20TD108); 大连市重点领域创新团队支持计划项目(2020RT03)

**作者简介:** 吴易烜(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事爆炸力学与毁伤评估研究. E-mail: wuyixuan@nint.ac.cn

**通信作者:** 张之凡(1990—), 女, 博士, 副教授, 主要从事舰船水下爆炸毁伤与防护研究.
E-mail: zhifanzhang@dlut.edu.cn

荷分析方面已取得了一些成果，然而，针对不同底质条件下近海底水下爆炸冲击波载荷时空分布规律的定量研究尚不充分。

本研究拟采用耦合欧拉-拉格朗日（coupled Eulerian-Lagrangian, CEL）方法建立近海底水下爆炸模型，探讨不同底质条件下近海底爆炸冲击波的时空分布规律，以期为近海底设施的抗爆抗冲击结构设计提供支撑。

# 1　数值模型与数值验证

## 1.1　状态方程

本研究采用 TNT 炸药，爆轰产物通过 JWL 方程[11] 描述

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 v}\right)\mathrm{e}^{-R_1 v} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 v}\right)\mathrm{e}^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \tag{1}$$

式中：$A$、$B$、$R_1$、$R_2$ 及 $\omega$ 为与炸药状态有关的常数，$v$ 为爆轰产物的相对比容，$e$ 为炸药单位质量所蕴含的内能。TNT 炸药的材料参数及 JWL 状态方程参数如表 1[12] 所示，其中：$\rho$ 为密度，$D$ 为爆速。

**表 1　TNT 的 JWL 状态方程参数[12]**

**Table 1　Parameters of JWL equation of state of TNT[12]**

| $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | $D$/(km·s$^{-1}$) | $A$/GPa | $B$/GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $e$/(kJ·g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.630 | 6.93 | 371.2 | 3.21 | 4.15 | 0.95 | 0.3 | 4.29 |

水采用 Mie-Grüneisen 状态方程描述，表达式[11] 为

$$p = p_{\mathrm{H}}(1-\Gamma_0\eta/2) + \Gamma_0\rho_0 E_{\mathrm{m}} \tag{2}$$

式中：$p_{\mathrm{H}}$ 为 Hugoniot 压力；$\rho_0$ 为初始密度；$E_{\mathrm{m}}$ 为单位质量内能；$\Gamma_0$ 为 Grüneisen 常数；$\eta$ 为名义体积压缩应变，$\eta = 1-\rho_0/\rho$。$p_{\mathrm{H}}$ 的表达式[11] 为

$$p_{\mathrm{H}} = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1-S\eta)^2} \tag{3}$$

$$u_{\mathrm{s}} = C_0 + S u_{\mathrm{p}} \tag{4}$$

式中：$u_{\mathrm{s}}$ 为冲击速度，$u_{\mathrm{p}}$ 为粒子速度，$S$ 和 $C_0$ 为 $u_{\mathrm{s}}$-$u_{\mathrm{p}}$ 曲线参数。水的状态方程参数列于表 2[12]。

**表 2　水的状态方程参数[12]**

**Table 2　Parameters of equation of state of water[12]**

| $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | $C_0$/(km·s$^{-1}$) | $S$ | $\Gamma_0$ |
|---|---|---|---|
| 1.024 | 1.483 | 1.75 | 0.28 |

在数值模型中，设空气为理想气体，其状态方程[11] 为

$$p + p_{\mathrm{a}} = (\gamma-1)\rho E_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

$$E_{\mathrm{m}} = c_V(\theta-\theta_{\mathrm{z}}) \tag{6}$$

式中：$\gamma$ 为绝热指数，$p_{\mathrm{a}}$ 为外界压力，$c_V$ 为比定容热容，$\theta$ 为当前温度，$\theta_{\mathrm{z}}$ 为绝对零度。空气的状态方程参数如表 3[12] 所示。

**表 3　空气的状态方程参数[12]**

**Table 3　Parameters of equation of state of air[12]**

| $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $\gamma$ | $p_{\mathrm{a}}$/MPa | $c_V$/(J·g$^{-1}$·K$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1.17 | 1.4 | 0.10 | 1.012 |

## 1.2　数值模型

为研究近海底水下爆炸冲击波的传播规律，建立了数值模型，欧拉域尺寸为 15.0 m×6.5 m×15.0 m，模拟 50 kg TNT 在 50 m 水深处的近海底爆炸，TNT 底部距海底 0.05 m。将整个欧拉域的边界条件设置为流出无反射，海底底质采用模型 1 或模型 2 描述。模型 1 是一种较软的土壤模型，参考了 Ambrosini 等[13]和 Luccioni 等[14]的研究结果，具体参数见表 4[13−14]，其中：$E$ 为杨氏模量，$\nu$ 为泊松比，$\phi$ 为内摩擦角，$c$ 为黏聚力。模型 2 为刚性固壁，通过在欧拉域中的海底底质区域放置拉格朗日刚体实现。

**表 4　不同海底底质参数[13−14]**

**Table 4　Parameters of different seafloor substrates[13−14]**

| Seafloor sediment | $\rho$/(kg·m$^{-3}$) | $E$/MPa | $\nu$ | $\phi$/(°) | $c$/MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| Model 1 | 1.4 | 50 | 0.3 | 24 | 0.1 |

为了更准确地获得同一位置的冲击波压力，在模型的不同位置设置测点，测点布局如图 1 所示。设装药半径为 $r$，测点到爆心的距离为 $R$，测点与水平方向的夹角为测点角度 $\alpha$。在距离爆心分别为 7$r$、12$r$、17$r$、22$r$、27$r$，测点角度分别为 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°、90°处布置测点，共计 50 个测点。为方便后续分析，用测点距爆心的距离（爆距）以及测点角度命名测点，爆距 7$r$、12$r$、17$r$、22$r$、27$r$ 用数字 2～6 表示，测点角度 0°～90°用数字 0～9 表示，例如：将爆距为 7$r$、测点角度为 0°的测点命名为 2-0。

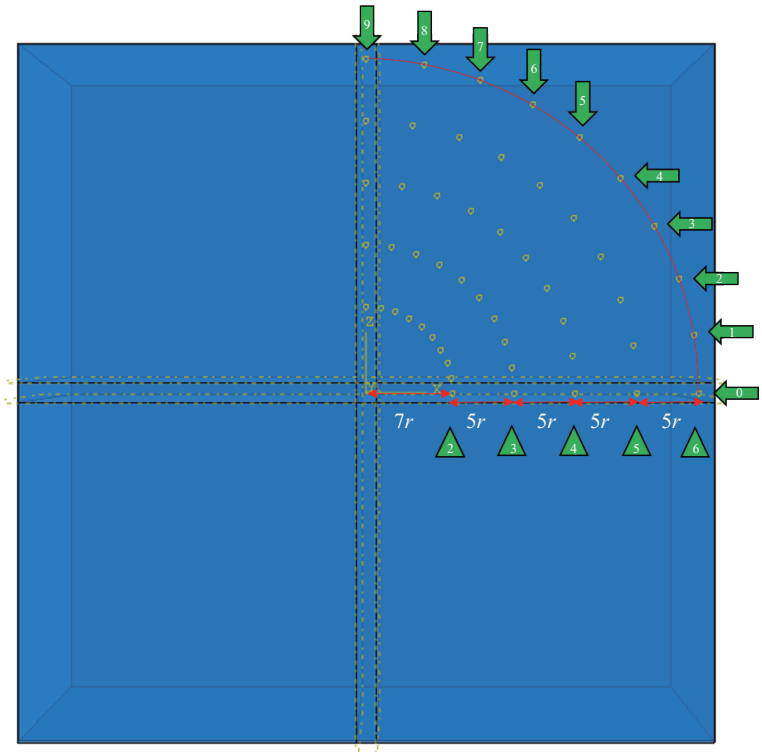



图 1　测点分布

Fig. 1　Distribution of measurement points

为验证结果的可靠性，对测点 3-0、4-0、5-0、6-0 测得的冲击波峰值压力进行收敛性分析，得到冲击波峰值压力 $p_{\max}$ 随网格数量 $k$ 的变化曲线，如图 2 所示。当网格数量为 3 080 988 时，测点测得的冲击波峰值压力基本收敛。为此，选取网格数量为 5 324 000 来研究近海底水下爆炸冲击波的载荷特性。

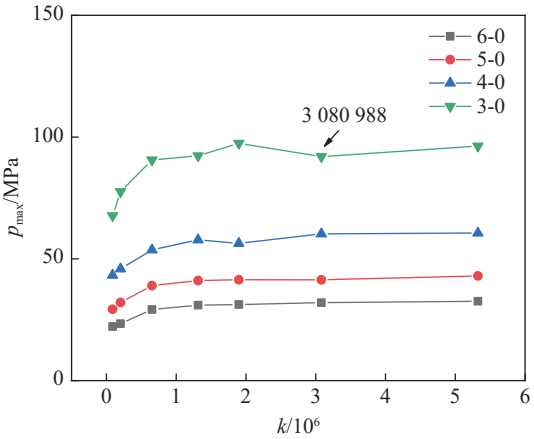



图 2　不同网格数量下不同测点测得的压力峰值

Fig. 2　Peak pressures measured at different points and grid numbers

## 1.3　数值验证

为验证模型的准确性，选取测点 2-0、3-0、4-0、5-0、6-0 在无海底底质时测得的峰值压力与 Zamyshlyayev 经验公式计算结果进行对比，如图 3 和表 5 所示。可以看出，数值模拟结果与经验公式拟合结果符合得较好，说明该模型能够用于近海底水下爆炸冲击波研究。

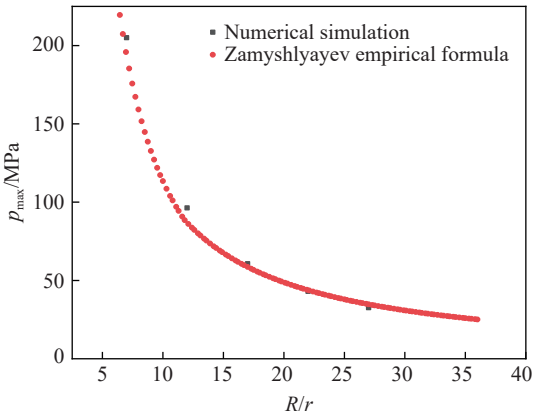



图 3　不同距离处冲击波峰值压力对比

Fig. 3　Comparison of peak pressure of shock waves at different distances

表 5　数值模拟与经验公式结果对比

**Table 5　Comparison of numerical simulation and empirical formula results**

| $R/r$ | Peak pressure/MPa | | Error/% |
|---|---|---|---|
| | Simulation | Empirical formula | |
| 7 | 205.03 | 193.72 | 5.84 |
| 12 | 96.32 | 86.90 | 10.84 |
| 17 | 60.65 | 58.62 | 3.45 |
| 22 | 43.04 | 43.81 | 1.75 |
| 27 | 32.58 | 37.91 | 14.07 |

## 1.4　工况设置

为研究水深($H$)及海底底质对近海底水下爆炸冲击波载荷特性的影响，仅改变海底底质及静水压力，其他条件保持不变，进行数值模拟，计算工况如表 6 所示，其中：工况 1 和工况 2 用于研究自由场与

表 6　数值模拟工况设置

**Table 6　Settings of simulation cases**

| Case | $H$/m | Seafloor sediment | Explosive environment |
|---|---|---|---|
| 1 | 50 | Nothing | Free field |
| 2 | 50 | Model 1 | Near the seabed |
| 3 | 50 | Model 2 | Near the seabed |
| 4 | 100 | Model 1 | Near the seabed |
| 5 | 150 | Model 1 | Near the seabed |

近海底冲击波压力的差异，工况 2 和工况 3 用于研究底质条件对近海底爆炸冲击波载荷特性的影响，工况 2、工况 4 和工况 5 用于研究水深对近海底水下爆炸冲击波载荷特性的影响。

## 2　结果讨论与分析

### 2.1　自由场和近海底爆炸冲击波特性对比

图 4 为工况 1 和工况 2 下不同时刻的冲击波压力云图，图 5 为测点 5-3 在工况 1 和工况 2 下测得的爆炸冲击波压力时程曲线。可以看出，自由场水下爆炸与近海底水下爆炸存在明显差别，受近海底条件的影响，近海底水下爆炸冲击波形状不是规则的圆形，冲击波波面上的压力峰值并非处处相等，而是越靠近海底区域，冲击波压力越小，测点 5-3 在近海底条件下测得的冲击波峰值压力及后续的脉动压力均小于自由场条件下测得的压力。由于水的冲击阻抗大于海底底质模型 1 的冲击阻抗，因此，水中冲击波在近海底的反射波为稀疏波，稀疏波追上冲击波波面将会导致冲击波压力降低；另外，海底底质模型 1 是一种较软且易变形的底质，冲击波作用在海底底质上，不仅会发生反射，还会发生透射，部分能量传递到海底底质中，使海底底质发生形变，冲击波能量也会发生损耗。因此，在近海底条件下，冲击波峰值压力和气泡脉动压力均小于自由场下的压力，理论与数值模拟结果相符。

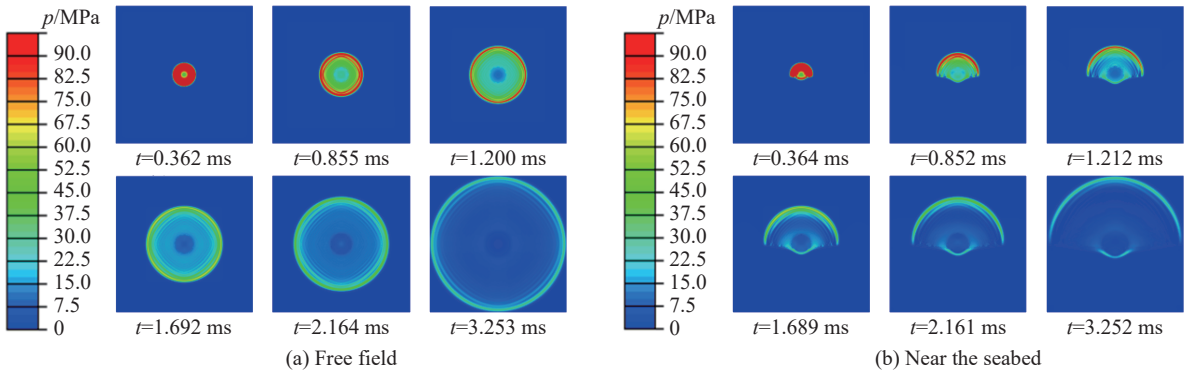



图 4　自由场及近海底水下爆炸冲击波压力云图

Fig. 4　Pressure distribution of free-field and near-seabed underwater explosion shock wave

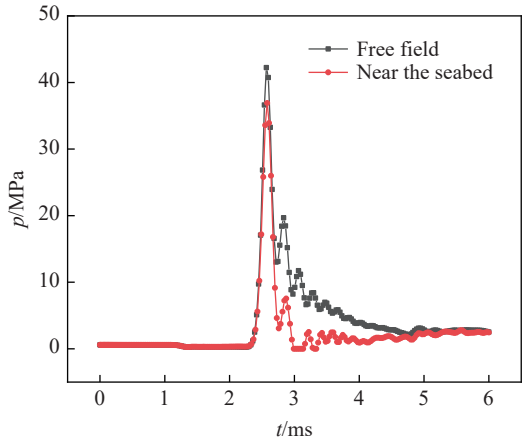



图 5　自由场及近海底工况下测点 5-3 的水下爆炸冲击波压力时程曲线

Fig. 5　Time history curves of shock wave pressure at measuring point 5-3 in free field and near seabed underwater explosion

近海底水下爆炸时，靠近海底区域处的冲击波压力明显偏小，即不同测点角度（$\alpha$）条件下的冲击波峰值压力存在差异。定义测点测得的冲击波峰值压力与自由场时的冲击波峰值压力之比为该测点的反射系数。计算所有测点的反射系数，结果如图 6 所示。当爆距比一定时，随着 $\alpha$ 的增大，反射系数也

逐渐增大，即海底吸能现象和稀疏波的影响逐渐减小；$\alpha$ 在 0°～10°区间时，海底的吸能现象过于剧烈，故不对该角度范围进行深入研究；当 $\alpha$ 处于 20°～30°区间时，测点的反射系数随爆距比增加呈减小趋势，即近海底反射的影响随爆距比的增大而增强；当 $\alpha>40°$ 时，海底吸能现象不明显。

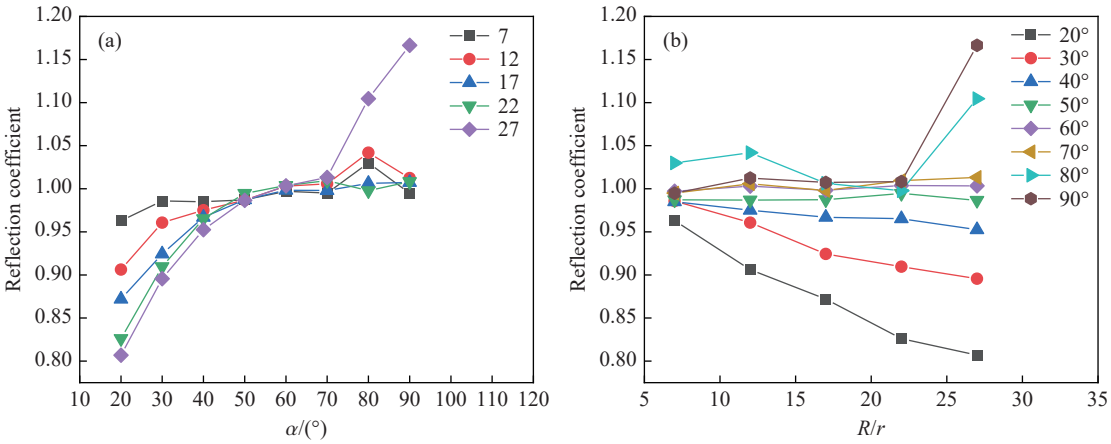



图 6　不同测点处的反射系数

Fig. 6　Reflection coefficient at different measurement points

为了更细致地研究近海底反射规律，将自由场与近海底工况下测点 2-2～测点 2-9、测点 3-2～测点 3-9、测点 4-2～测点 4-9 的冲击波峰值压力进行对比，结果如表 7 所示，可以看出：当 $\alpha$ 处于 20°～30°时，近海底工况下，冲击波峰值压力是自由场工况下冲击波峰值压力的 81%～91%；随着 $\alpha$ 的增大，测点距海底越来越远，近海底反射现象也越来越弱，近海底反射影响逐渐消失。

**表 7　自由场与近海底测得的冲击波峰值压力对比**

**Table 7　Comparison of peak pressures of free-field and near-seabed underwater explosion shock wave**

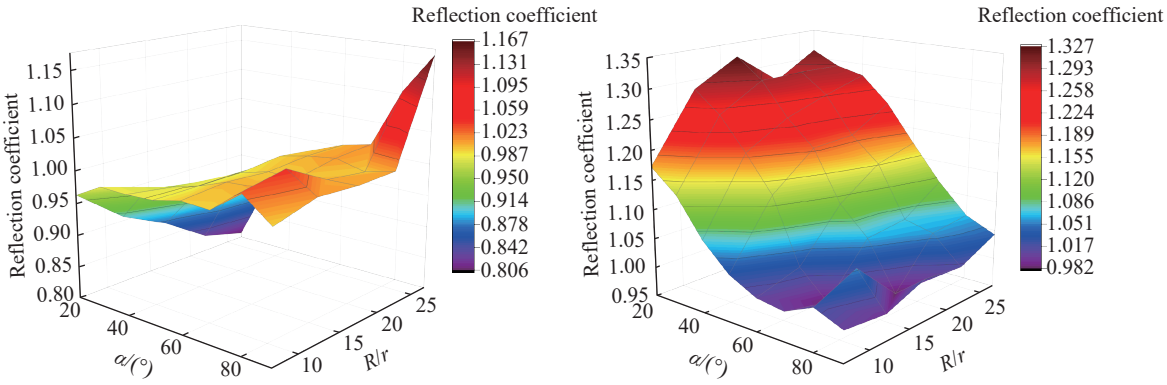
| $R/r$ | $\alpha$/(°) | $p_{max}$/MPa | | Reflection coefficient | $R/r$ | $\alpha$/(°) | $p_{max}$/MPa | | Reflection coefficient |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Near seabed | Free field | | | | Near seabed | Free field | |
| 7 | 20 | 179.29 | 201.44 | 0.89 | 12 | 60 | 92.73 | 95.67 | 0.97 |
| 7 | 30 | 186.21 | 203.80 | 0.91 | 12 | 70 | 95.00 | 97.86 | 0.97 |
| 7 | 40 | 193.43 | 204.80 | 0.94 | 12 | 80 | 98.33 | 93.98 | 1.05 |
| 7 | 50 | 194.98 | 204.80 | 0.95 | 12 | 90 | 92.42 | 96.30 | 0.96 |
| 7 | 60 | 192.78 | 203.80 | 0.95 | 17 | 20 | 47.78 | 58.76 | 0.81 |
| 7 | 70 | 195.10 | 201.43 | 0.97 | 17 | 30 | 53.24 | 59.25 | 0.90 |
| 7 | 80 | 202.46 | 201.74 | 1.00 | 17 | 40 | 56.52 | 58.58 | 0.96 |
| 7 | 90 | 196.41 | 195.79 | 1.00 | 17 | 50 | 58.40 | 58.58 | 1.00 |
| 12 | 20 | 82.82 | 97.87 | 0.85 | 17 | 60 | 59.44 | 59.27 | 1.00 |
| 12 | 30 | 86.62 | 95.67 | 0.91 | 17 | 70 | 61.07 | 60.10 | 1.02 |
| 12 | 40 | 93.96 | 94.66 | 0.99 | 17 | 80 | 60.00 | 61.17 | 0.98 |
| 12 | 50 | 96.23 | 94.65 | 1.02 | 17 | 90 | 57.77 | 59.91 | 0.96 |

## 2.2　海底底质对近海底爆炸冲击波载荷特性的影响

图 7 显示了工况 2 和工况 3 下相同测点测得的近海底冲击波反射系数对比。可以发现，2 种底质条件下冲击波传播规律存在明显差异：当底质为模型 1 时，由于近海底反射波为稀疏波，稀疏波追上冲击波波面将导致冲击波峰值压力变小，且海底底质模型 1 较软，吸能作用较强，因此，绝大部分测点的反射系数小于 1；当海底底质为模型 2 时，受刚固边界的影响，近海底反射波为压缩波，压缩波追上冲击波波面会导致冲击波峰值压力增大，且海底底质模型 2 的吸能作用较弱，绝大部分测点的反射系数大

于 1。无论底质是模型 1 还是模型 2，反射系数异常均发生在爆距比为 7～15、$\alpha$ 在 60°～90°范围内。

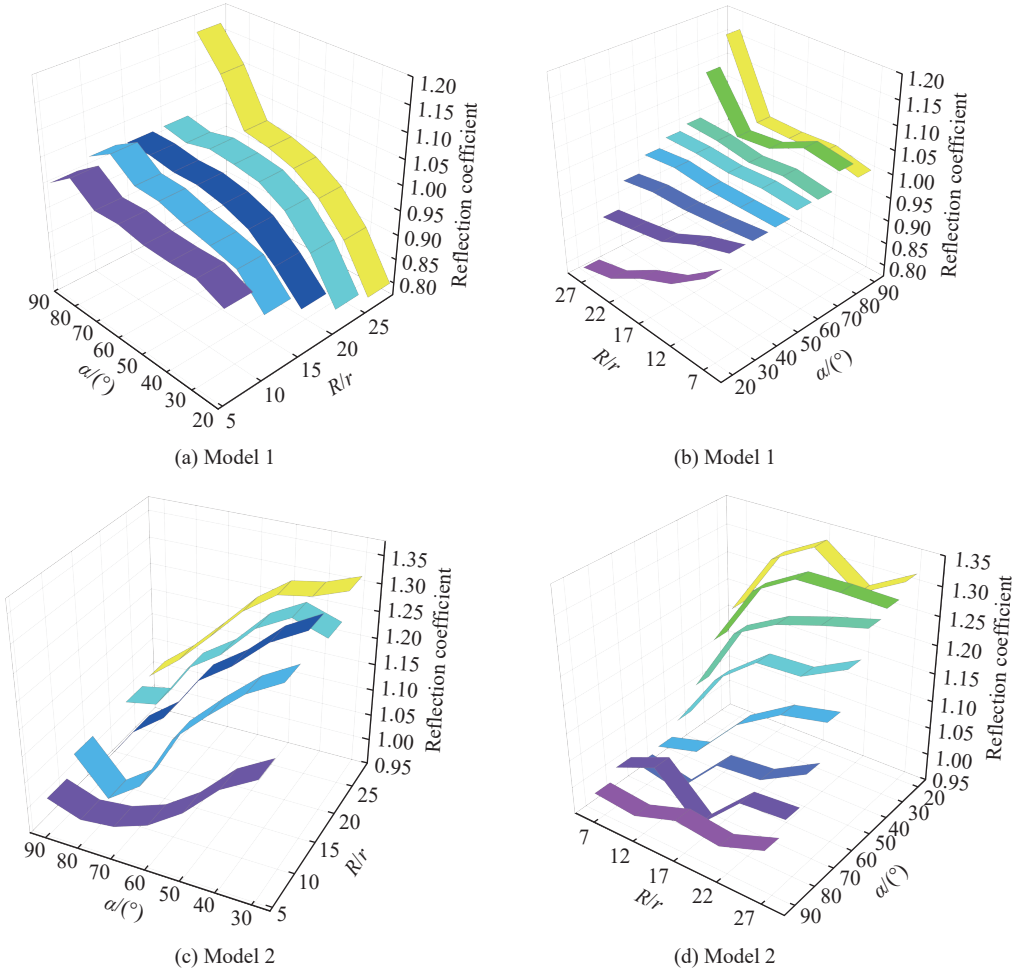
为更清楚地研究不同底质条件对反射系数的影响，将不同底质条件下反射系数随测点角度和爆距比的变化绘制成图 8。由图 8(a) 可知，当海底底质为模型 1、爆距比保持不变时，反射系数随测点角度的增大呈增大趋势。由图 8(c) 可知，当海底底质为模型 2、爆距比一定时，反射系数随测点角度的增大呈减小趋势。




(a) Model 1　　(b) Model 2

图 7　不同底质条件下测点反射系数的对比

Fig. 7　Comparison of reflection coefficient of test points under different substrate conditions




(a) Model 1　　(b) Model 1

(c) Model 2　　(d) Model 2

图 8　不同底质条件下反射系数分布对比

Fig. 8　Comparison of reflection coefficient distribution under different substrate conditions

当海底底质为模型 1 时，海底底质较软，海底反射稀疏波，对 TNT 爆炸冲击波的吸收较强，因此，近海底冲击波峰值压力减小，反射系数小于 1 是常态。图 8(a) 显示，当爆距比一定时，测点角度越大，反射系数就越大，因而可以推断，海底底质对不同测点角度处反射系数的影响随测点角度的增大而减弱。当海底底质为模型 2 时，海底底质较硬，海底反射压缩波，对冲击波的吸收很弱，因此，近海底冲击波峰值压力更大，反射系数大于 1 是常态。图 8(c) 显示，当爆距比一定时，测点角度越大，反射系数越小，同样可以得到海底底质对不同测点角度处反射系数的影响随测点角度增大而减弱的结论。

从图 8(b) 可以看出，当测点角度处于 20°～40°区间时，不同测点测得的近海底冲击波反射系数随着爆距比的增大而减小；而图 8(d) 显示，当测点角度处于 20°～60°区间时，不同测点测得的近海底冲击波反射系数随着爆距比的增大而增大。由于 2 种底质对近海底冲击波反射系数的影响截然相反，因此，综合图 8(b) 和图 8(d) 可以看出，测点角度在一定范围内时，海底底质对反射系数的影响随着测点爆距比的增大而增强。当测点角度超出该范围时，该现象减弱甚至消失。综合图 8(a)～图 8(d) 可以发现，虽然海底底质发生了变化，不同海底底质对冲击波的影响效果不同，但是测点反射系数受显著影响的区域均集中在 20°～50°范围。

为研究近海底水下爆炸反射波对冲击波的影响是否与起爆深度有关，将底质条件为模型 1 时不同水深处各测点的反射系数进行对比，结果如图 9 所示。从图 9 可以看出，随着水深的增加，同一测点处的反射系数基本一致，说明水深并不能显著影响反射系数，即水深的变化并不会对近海底反射现象造成显著影响，也不会对海底底质的吸能作用造成显著影响，近海底反射稀疏波对冲击波的削减作用并不会随着静水压力的变化而发生显著变化。

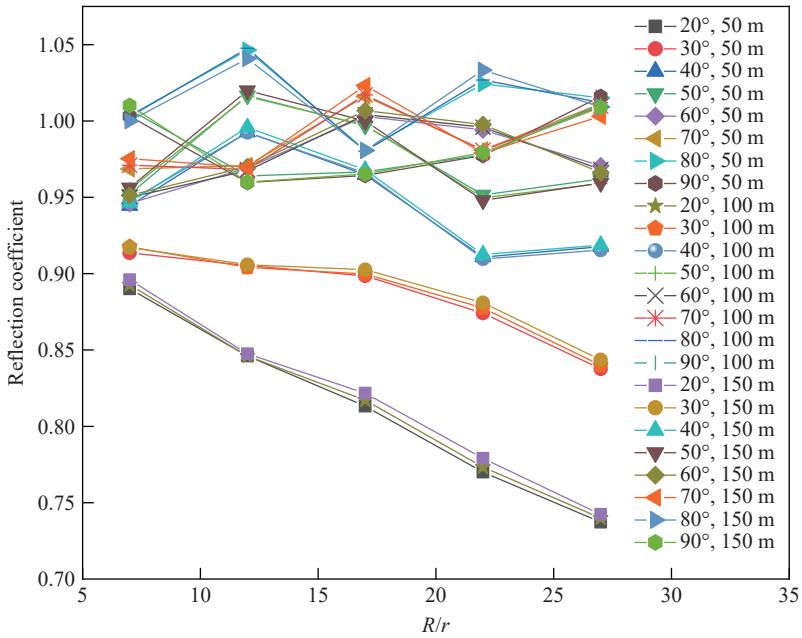



图 9　不同水深反射系数随测点角度及爆距比的变化关系

Fig. 9　Relationship between reflection coefficient and explosion distance ratio in different water depths

## 3　结　论

基于 CEL 方法建立了近海底水下爆炸数值模型，对近海底爆炸冲击波的时空分布规律进行了研究，探究了海底底质和水深对近海底爆炸冲击波载荷特性的影响规律，得到如下结论。

(1) 近海底水下爆炸冲击波载荷特性与自由场明显不同。当测点角度为 20°～30°时，近海底反射系数为 0.81～0.91；随着测点角度进一步增大，近海底反射的影响逐渐减弱；当测点角度达到 80°～90°时，近海底反射的影响基本消失。

(2) 在一定的角度范围内，近海底反射的影响随着爆距比的增大而增强，超出该角度范围后，该现象基本消失。改变底质时，近海底反射的影响使冲击波峰值压力增强或减弱，并且影响区域基本一致。水深对近海底水下爆炸反射系数无显著影响。

(3) 海底底质材料属性不同时，其对爆炸冲击波的吸收作用也存在差异，近海底水下爆炸反射波的种类也不一致。当海底底质较硬时，海底底质对冲击波的吸收作用相对较弱，反射波为压缩波，致使测点角度在 20°～50°范围内的冲击波峰值压力增大，当测点角度在 20°～50°范围内且测点角度一定时，反射系数随爆距比的增大而增大；当海底底质较软时，海底底质对冲击波的吸收作用较强，近海底反射波为稀疏波，致使 20°～50°角度范围内冲击波峰值压力减小，当测点角度在 20°～50°范围内且测点角度一定时，反射系数随爆距比的增大而减小。海底底质对反射系数的影响区域主要集中在 20°～50°测点范围内，超出该范围时，海底底质对反射系数的影响随着测点角度的增大而逐渐消失，海底底质对反射系数的影响随爆距比的增大而增强的现象也随测点角度的增大而逐渐消失。

## 参考文献：


[1] BLAKE J R, GIBSON D C. Cavitation bubbles near boundaries [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1987, 19: 99–123.

[2] 张永坤. 水下爆炸对沉底目标毁伤效应试验验证研究 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42(5): 154–159.
ZHANG Y K. Experimental research on the damage effects of bottom torpedoes shocked by underwater explosions [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(5): 154–159.

[3] 邵建军, 张永坤, 赵红光, 等. 基于相似理论的炸药海中沉底爆炸能量计算 [J]. 四川兵工学报, 2015, 36(6): 124–127.
SHAO J J, ZHANG Y K, ZHAO H G, et al. Energy calculation of underwater explosion over seabed charge based on similarity law [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(6): 124–127.

[4] 杨莉, 汪玉, 黄超, 等. 不同水底介质对有限域中装药沉底爆炸特性的影响 [J]. 高压物理学报, 2012, 26(5): 545–550.
YANG L, WANG Y, HUANG C, et al. Effects of different grounds on the loading characteristics of limited underwater explosion from a bottom charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(5): 545–550.

[5] 杨莉, 汪玉, 汪斌, 等. 沉底装药水中爆炸现象的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 175–180.
YANG L, WANG Y, WANG B, et al. Experimental investigation on loading characteristics of underwater explosion from a bottom charge [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 175–180.

[6] 杨莉, 巨圆圆, 武堃, 等. 装药沉底爆炸峰值压力试验及数值模拟研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(Suppl 2): 368–372.
YANG L, JU Y Y, WU K, et al. Experiment and simulation on peak pressure of underwater explosion of a bottom charge [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(Suppl 2): 368–372.

[7] 杨莉, 汪玉, 杜志鹏, 等. 沉底装药水下爆炸冲击波传播规律 [J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 100–104.
YANG L, WANG Y, DU Z P, et al. Research on shock wave propagation of underwater explosion of bottom charge [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 100–104.

[8] 黄潇, 张玮, 张阿漫. 近海底爆炸气泡对潜艇影响的研究 [J]. 中国造船, 2014, 55(3): 25–35.
HUANG X, ZHANG W, ZHANG A M. Study on the effect of a grounding explosion bubble on submarine [J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(3): 25–35.

[9] 姚熊亮, 杨文山, 陈娟, 等. 沉底水雷爆炸威力的数值计算 [J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 173–178.
YAO X L, YANG W S, CHEN J, et al. Numerical calculation of explosion power of mines lying on seabed [J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(2): 173–178.

[10] 邵宗战, 宋敬利, 贾则. 沉底水雷爆炸威力测量与评估方法研究 [J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(1): 15–17, 46.
SHAO Z Z, SONG J L, JIA Z. Research on the measurement and evaluation methods of the bottom mine’s explosive power [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2012, 20(1): 15–17, 46.

[11] 叶林征, 祝锡晶, 王建青, 等. 基于 CEL 不同角度超声空化微射流冲击的仿真分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 130–134, 157.
YE L Z, ZHU X J, WANG J Q, et al. Simulations of ultrasonic cavitation micro-jet impact with different angles based on CEL [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 130–134, 157.

［12］谭皓洋. 基于 CEL 方法的舰船近场水下爆炸全过程数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
TAN H Y. Numerical simulation of the whole process of underwater explosion near warship based on CEL method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.

［13］AMBROSINI R D, LUCCIONI B M, DANESI R F, et al. Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface [J]. Shock Waves, 2002, 12(1): 69–78.

［14］LUCCIONI B, AMBROSINI D, NURICK G, et al. Craters produced by underground explosions [J]. Computers & Structures, 2009, 87(21/22): 1366–1373.

# Load Characteristics of Underwater Explosion Shock Wave near Seabed Charge Projectile

WU Yixuan[1], SHAO Yan[2], XIE Yujie[2], GAO Honglin[3], ZHANG Zhifan[2]

（1. *National Key Laboratory of Strong Pulse Radiation Environment Simulation and Effects*, *Northwest Institute of Nuclear Technology*, *Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*;
2. *School of Ship Engineering*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116024, *Liaoning*, *China*;
3. *College of Marine Engineering*, *Dalian Maritime University*, *Dalian* 116026, *Liaoning*, *China*）

**Abstract:** The near-seabed explosion shock wave can cause serious damage to such facilities as submarine optical cables and pipelines. The spatiotemporal evolution of the underwater explosion shock wave can be affected by the impedance of different types of substrate. Therefore, it is of great significance to study the near-seabed explosion shock wave load under different substrate conditions. Based on the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, a numerical model of near seabed explosion is established to investigate the effect of seabed material on the shock wave load of near seabed explosions. The results show that the seabed material significantly affects the peak pressure of the shock wave within a certain range of measuring point angles of 20°–50°. The reflection effect of the near seabed increases with the increase of the explosion distance ratio within a certain range of measurement point angles of 20°–50°. When the measurement point angle exceeds this range, this phenomenon gradually disappears. The effect regions of these two types of seabed sediment are similar while their reflection coefficients are significantly different. When the seafloor sediment is soft, the reflection coefficient near seafloor ranges from 0.81 to 1.05. However, when the seafloor sediment is hard, the reflection coefficient near seafloor ranges from 0.98 to 1.33. The water depth has little effect on the peak pressure of the shock wave.

**Keywords:** underwater explosion; near seabed; shock wave; coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method; substrate conditions; water depth