

冲击波在水土界面斜反射压力的计算方法*

严富怀, 岳松林*, 邱艳宇, 王明洋

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 冲击波在水土交界面斜反射压力的计算理论尚有不足, 本研究结合前期理论推导, 建立了冲击波在水土交界面斜反射压力的解析方程; 在此基础上, 开展了水中爆炸试验, 并建立了流固耦合数值模型, 通过试验数据对理论与数值模型进行了验证。为了研究不同参数对正反射压力系数的影响, 采用不同当量 TNT 炸药, 距离水土交界面 0.52 m (比例爆距为 0.326~2.936 m/kg^{1/3}) 爆炸时, 根据水中爆炸经验公式所得入射压力, 计算得到正反射压力系数在 1.26~1.50 范围内。距离水土交界面 0.3 m 时, 饱和土的含气量在 0~10% 范围内变化, 得到的反射压力的范围为 64.15~81.77 MPa, 此时反射压力系数在 1.19~1.52 范围内。为了研究不同参数对斜反射压力计算模型的影响, 通过对不同比例爆距与不同入射角 (0°~40°) 的数值模型结果进行分析, 明确了理论模型的适用范围: 在入射角 ≤ 20° 时, 模型预测误差普遍低于 10%, 具有较高工程精度; 当入射角 > 30° 且爆距较小时, 模型误差显著增大, 为实际应用提供了明确的边界条件。推导得出的冲击波在水土交界面斜反射压力的计算方法, 物理意义明确、计算精度高, 可为开展水下爆炸对水底土中工程结构的毁伤评估提供理论基础。

关键词: 水土交界面; 冲击波传播; 斜反射; 理论计算; 数值模拟

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 1303520

文献标识码: A

Method for Calculating the pressure of oblique reflection of shock waves at the water-soil interface

YAN Fuhuai, YUE Songlin, QIU Yanyu, WANG Mingyang

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The existing theoretical framework for calculating the oblique reflection pressure of shock waves at the water-soil interface remained insufficient. In this study, an analytical equation for the oblique reflection pressure at the water-soil interface was established on the basis of prior theoretical derivations. Subsequently, underwater explosion experiments were conducted, and a fluid-structure interaction numerical model was developed. The theoretical and numerical models were validated against experimental data.

To investigate the effects of various parameters on the normal reflection pressure coefficient, explosions with different TNT equivalent charges were detonated at a distance of 0.52 m from the water-soil interface, corresponding to scaled standoff distances ranging from 0.326 to 2.936 m/kg^{1/3}. The incident pressures were estimated using empirical formulas for underwater explosions. The resulting normal reflection pressure coefficients are found to range between 1.26 and 1.50. At a standoff distance of 0.3 m, the air content of the saturated soil varies from 0% to 10%, yielding reflected pressures in the range of 64.15~81.77 MPa, with corresponding reflection coefficients between 1.19 and 1.52. To examine the influence of different parameters on the oblique

*收稿日期: 2026-04-09; 修回日期: 2026-06-26

基金项目: 江苏省自立项目 (KYFYGKQTSZ24005);

第一作者: 严富怀 (2000—), 男, 博士研究生. E-mail: 13101890239@163.com;

通信作者: 岳松林 (1987—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. E-mail: yslseu@hotmail.com。

reflection pressure model, numerical results under various scaled standoff distances and incidence angles (0° – 40°) were systematically analyzed. The applicable range of the proposed theoretical model was thereby delineated. It is shown that for incidence angles not exceeding 20° , the model prediction errors are generally below 10%, demonstrating satisfactory engineering accuracy; however, when the incidence angle exceeds 30° combined with small standoff distances, the model errors increase considerably. These findings provide clearly defined boundary conditions for practical applications. The derived calculation method for the oblique reflection pressure of shock waves at the water–soil interface features clear physical significance and high computational accuracy, and therefore provides a theoretical basis for damage assessment of underwater structures embedded in subaqueous soils subjected to underwater explosions.

Keywords: Soil-water interface; shock wave propagation; oblique reflection; theoretical calculations; numerical simulation

水中爆炸产生的冲击波在传播至水土交界面时会发生反射，其反射系数主要取决于冲击波强度以及水与土介质的物理参数。深入研究冲击波在水土介质中的传播规律，是对埋置于交界面以下结构进行爆炸毁伤评估与抗爆设计的重要基础。

目前，关于爆炸波在水、土等单一介质中传播的研究已较为充分。在水下爆炸荷载研究领域，Cole^[1]基于质量与冲量守恒及 Tait 等熵状态方程，提出了水下爆炸冲击波入射压力的经典计算方法，奠定了后续研究的理论基础。在饱和土爆炸荷载方面，钱七虎等^[2]基于气、液、固三相介质的压力-密度关系，构建了三相介质压力-密度方程，明确指出含气量是控制爆炸波衰减程度的关键参数。随后，Shim^[3]借助离心机爆炸试验，进一步验证了高饱和度条件下饱和土中冲击波传播的规律。进入 21 世纪，Wang 等^[4]系统分析了含水饱和度的影响，证实其对爆炸波传播具有决定性作用。由于饱和土试样制备难度大、试验可重复性差，数值模拟逐渐成为该领域不可或缺的研究手段^[5-6]，而构建合理的状态方程则是数值方法的核心。An 等^[7]建立了适用于爆炸试验模拟的三相土体状态方程，Wang 等^[8]通过改进本构模型并引入半饱和土壤的描述方法，提升了数值模型对实际工况的适应能力。上述研究从不同侧面揭示了爆炸波在单一介质中的传播机制，为后续探讨复杂界面条件下的波动力学行为提供了重要基础。

当爆炸波由一种介质传播至另一种介质时，界面两侧介质的阻抗及状态变化会改变波的传播形态。这一问题的复杂性促使学者研究内容从单一介质拓展至多介质耦合场景。Kedrinskii^[9]基于两相介质模型，分析了水-空气界面规则反射区内空化带的发展对稀疏波参数的影响，揭示了自由表面附近特有的物理现象。进入 21 世纪，Klaseboer 等^[10]通过试验与数值模拟，系统研究了弹性与刚性结构周边冲击波及气泡的动力响应特征，明确了结构刚度对载荷特性的影响规律。Wang 等^[11]发现激波冲击自由表面时会在其周围诱发空化效应，进一步丰富了自由表面附近爆炸波传播的理论内涵。Cui 等^[12]开展了不同边界条件下的小当量水下爆炸试验，系统分析了边界条件对冲击波载荷与气泡形态的影响。上述研究表明，界面效应并非简单的反射与透射叠加，而是涉及空化、非线性波形演化等多重物理过程的耦合问题。

因为饱和土为非均匀介质，导致水土交界面的力学问题更为复杂。Zamyshlyaev 与 Yakovlev^[13]较早将海床简化为各向同性弹性半空间，推导了海床反射波的理论计算公式，为定量分析海底反射效应提供了理论工具。杨莉等^[14]针对沉底装药条件开展研究，发现水底界面的强反射特性导致叠加后的冲击波峰值压力显著高于入射波。此后，Xu 等^[15]采用数值方法分析了浅水爆炸中海床对冲击波传播与气泡脉动的影响，揭示了有限水深条件下界面效应的空间分布特征。Favretto-Cristini 等^[16-17]在地中海海域开展了系列大当量爆炸试验，在接近实际工程尺度的条件下系统研究了海底引爆时冲击波的衰减特性。Nowak 等^[18]通过浅水缸试验探讨了底部与壁面反射对冲击波的耦合影响，进一步强调了多边界共存时的复杂干涉效应。Yan 等^[19]通过数值模拟研究了近交界面水下爆炸气泡与土体的相互作用，发现交界面的存在会显著增大气泡半径、延长气泡脉动周期。Zhang 等^[20]借助离心机模型试验，

进一步验证了上述现象，表明水土交界面不仅影响冲击波传播，还对后续气泡动力学行为产生深远影响。前期研究已建立了爆炸冲击波在水土交界面正反射的理论模型^[21]，然而实际工况多为斜入射，由此引发冲击波在水土界面斜入射时反射压力计算的问题亟需解决。

为解决上述难题，本文基于质量守恒方程、动量守恒方程、界面边界条件、水与土介质的状态方程以及莫尔圆方程，推导了适用于水土交界面的冲击波反射压力理论计算模型。通过开展水中爆炸作用下冲击波在交界面反射压力的试验研究，并结合饱和土取样与土工试验获取模型参数，将理论计算结果与试验数据进行了对比验证，以期水土交界面冲击波传播机理研究及其工程荷载计算提供参考。

1 斜反射压力的推导

在冲击波垂直入射的基本假设下，文献^[21]给出了正反射压力的计算模型，通过质量守恒、动量守恒以及介质状态方程，推导得到了水的 $u-p$ 关系和饱和土的 $u-p$ 关系。在此基础上，利用图解法直接求解反射压力。然而，在实际爆炸荷载作用下，冲击波往往以斜入射方式作用于水土交界面。斜入射情况下的波传播机制更为复杂，涉及波阵面方向的改变以及切向速度的匹配等问题。此时，正反射理论的基本假设不再适用，需要推导斜反射理论。如图 1 所示，冲击波在水土交界面发生正反射和斜反射，其中 θ 为质点速度矢量与界面法线的夹角。

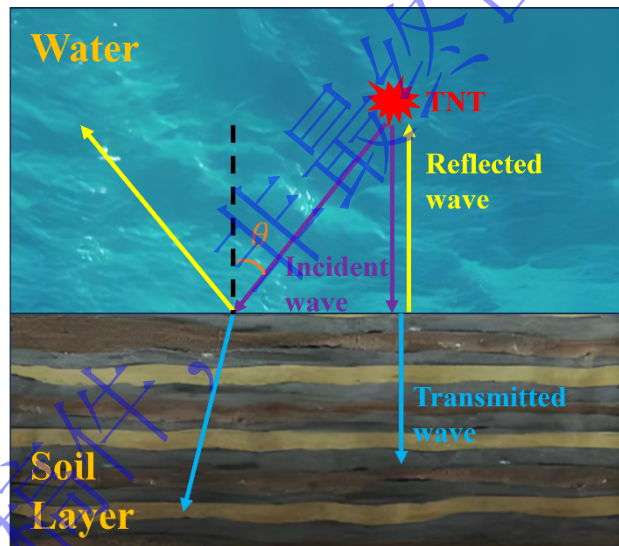


图 1 冲击波在水土交界面的正入射与斜入射

Fig.1 Normal and oblique incidence of shock waves at the soil water interface

1.1 基本方程推导

1.1.1 冲击波阵面上的守恒方程

对于任意冲击波阵面，都存在质量守恒：

$$\rho_1(D_n - u_{1n}) = \rho_2(D_n - u_{2n}) \quad (1)$$

其中 ρ_1 、 ρ_2 、 D_n 、 u_{1n} 、 u_{2n} 分别为介质 1 的密度、介质 2 的密度、冲击波法向速度、介质 1 的质点法向速度、介质 2 的质点法向速度。

也存在动量守恒：

$$p_2 - p_1 = \rho_1(D_n - u_{1n})(u_{2n} - u_{1n}) \quad (2)$$

其中， p_1 、 p_2 分别为介质 1 和介质 2 的压力。

同样存在切向速度连续:

$$u_{1\tau} = u_{2\tau} \quad (3)$$

其中, $u_{1\tau}$ 、 $u_{2\tau}$ 分别为介质 1 和介质 2 的质点切向速度。

1.1.2 界面边界条件

在水土交界面处, 满足以下条件:

压力连续:

$$p_i + p_r = p_t \quad (4)$$

其中, p_i 、 p_r 、 p_t 分别为入射、反射和透射波的压力。

法向及切向速度连续:

$$\begin{aligned} u_{i,n} - u_{r,n} &= u_{t,n} \\ u_{i,\tau} - u_{r,\tau} &= u_{t,\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

斯涅尔定律:

$$\frac{D_i}{\sin \theta_i} = \frac{D_r}{\sin \theta_r} = \frac{D_t}{\sin \theta_t} \quad (6)$$

1.1.3 几何关系与速度分解

质点速度矢量可以分解为法向和切向分量:

$$u_n = u \cos \theta, \quad u_\tau = u \sin \theta$$

其中 θ 为质点速度矢量与界面法线的夹角。

由切向速度连续条件可知:

$$u_i \sin \theta_i = u_r \sin \theta_r = u_t \sin \theta_t \quad (7)$$

1.2 介质的状态方程

1.2.1 水的状态方程

对于介质的状态方程, 由介质的压力和质点速度可以表示为 u - p 方程:

$$u_w = \frac{C_{w0}}{2S_w} \left(\sqrt{1 + \frac{4S_w p}{\rho_{w0} C_{w0}^2}} - 1 \right) \quad (8)$$

其中 u_w 、 C_{w0} 、 S_w 、 ρ_{w0} 分别为水的粒子速度、初始波速、经验参数及初始密度。

1.2.2 饱和土的状态方程

土的 u - p 方程采用文献^[2]中的状态方程推导, 推导结果可参考作者前述发表的文章^[21]。土的状态方程如下:

$$\rho_s = \rho_{s0} \left(\alpha_1 \left(\frac{p}{p_{s0}} \right)^{\frac{1}{k_1}} + \alpha_2 \left[\frac{k_2(p-p_{s0})}{\rho_{s2} c_{s2}^2} + 1 \right]^{\frac{1}{k_2}} + \alpha_3 \left[\frac{k_3(p-p_{s0})}{\rho_{s3} c_{s3}^2} + 1 \right]^{\frac{1}{k_3}} \right)^{-1} \quad (9)$$

其中 k_1 、 k_2 、 k_3 为相应组分熵指数; α_1 、 α_2 、 α_3 为气体、液体、固体的组分含量; ρ_{s1} 、 ρ_{s2} 、 ρ_{s3} 为组分密度, ρ_{s0} 、 p_{s0} 分别为土的初始密度、压力。

土的经验参数 S 为:

$$S = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{s0}} + C_{s0} \sqrt{\frac{\rho_s \rho_{s0}}{(p-p_{s0})(\rho_s - \rho_{s0})}} \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10) 后, 再将式 (10) 代入式 (8) 即可得到土的 u - p 方程。

1.3 斜反射方程的建立

结合水的状态方程 (入射波、反射波)、土的状态方程 (透射波)、斯涅尔定律 (入射-反射-透射)

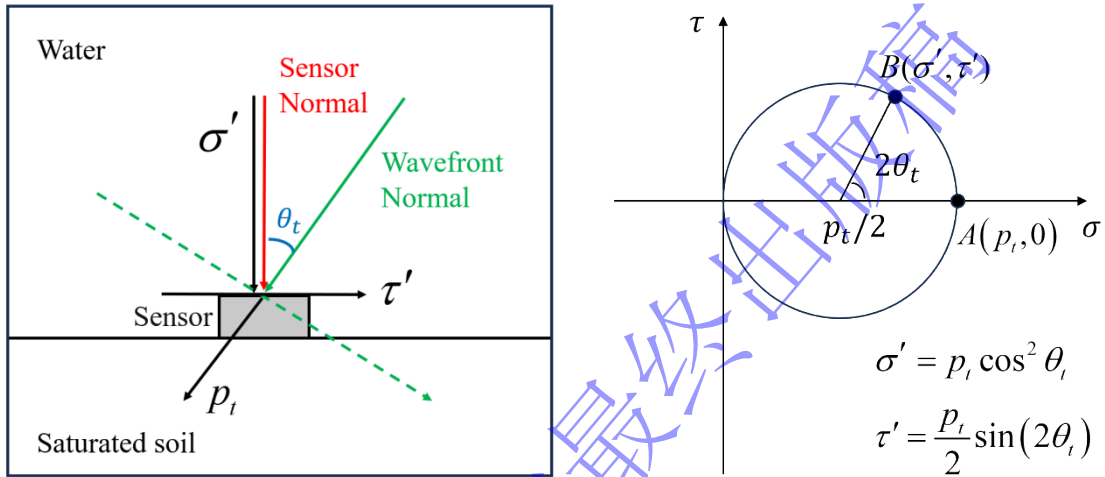
、切向速度连续（入射-反射）、法向速度连续（入射-反射-透射）、压力连续（入射-反射-透射），将上述方程（8）—（10）结合计算，得到关于 p_t 的方程：

$$F(p_t) = u_w(p_t) \cos \theta_i - u_w(p_t - p_i) \sqrt{1 - \left[\frac{u_w(p_t)}{u_w(p_t - p_i)} \sin \theta_i \right]^2} - u_s(p_t) \sqrt{1 - \left[\frac{u_w(p_t)}{u_s(p_t)} \sin \theta_i \right]^2} = 0 \quad (11)$$

由上述方程通过理论计算的方式可求得斜反射压力。

1.4 透射波在竖直方向的应力（传感器实测值）

如图 2 (a) 所示，对于透射波，波阵面上的应力为 p_t （切向应力为 0），波阵面法线与传感器法线夹角为 θ_t 。



(a) Schematic of the sensor normal and wavefront normal (b) Schematic of Mohr's circle

图 2 波阵面应力坐标转换

Fig.2 Coordinate transformation of the wavefront stress

在波阵面坐标系 (n, τ) 中：

$$\sigma_{nn} = p_t, \sigma_{\tau\tau} = 0, \sigma_{n\tau} = 0 \quad (12)$$

这是一个主应力状态：

$$\sigma_1 = p_t, \sigma_2 = 0 \quad (13)$$

主平面方向为波阵面法线方向。

莫尔圆的参数为：

$$C = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{p_t}{2}, R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{p_t}{2} \quad (14)$$

如图 2 (b) 所示，莫尔圆方程为：

$$\left(\sigma - \frac{p_t}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{p_t}{2} \right)^2 \quad (15)$$

从波阵面坐标系旋转 θ_t 到传感器坐标系，在莫尔圆上对应旋转 $2\theta_t$ 角度。

初始点 A 在波阵面坐标系 $\theta=0$ 的坐标为：

$$A: (\sigma_{nn}, \sigma_{n\tau}) = (p_t, 0) \quad (16)$$

该点为莫尔圆右端点：

$$A: \left(\frac{p_t}{2} + \frac{p_t}{2}, 0 \right) = (p_t, 0) \quad (17)$$

旋转 $2\theta_t$ 后，新点的坐标为：

$$\sigma' = C + R \cos(2\theta_i), \tau' = R \sin(2\theta_i) \quad (18)$$

代入 $C = \frac{P_t}{2}, R = \frac{P_t}{2}$:

$$\sigma' = \frac{P_t}{2} + \frac{P_t}{2} \cos(2\theta_i), \tau' = \frac{P_t}{2} \sin(2\theta_i) \quad (19)$$

利用三角恒等式 $\cos(2\theta_i) = 2\cos^2\theta_i - 1$ 化简:

$$\sigma' = \frac{P_t}{2} + \frac{P_t}{2} (2\cos^2\theta_i - 1) = P_t \cos^2\theta_i \quad (20)$$

因此可得垂直方向的应力 (即传感器测得的应力) 为:

$$\sigma = P_t \cos^2\theta_i \quad (21)$$

2 试验设计与参数获取

2.1 试验装置与测量系统

本研究采用“试验-参数-模型”一体化的研究策略。理论预测与数值模拟均建立在直接源自试验饱和和土测量得到的物理参数基础上,从而实现了模型输入与实际工况的高度一致性。

如图3所示,在水中及水土交界面布置压力传感器。水中自由场压力传感器距离炸药的距离与炸药到水土交界面的距离一致。水土交界面中心和相邻土压传感器之间的距离为0.45 m。此布置方案可直接获取冲击波入射、反射和透射的数据,为理论和数值模型验证提供详细的试验结果。

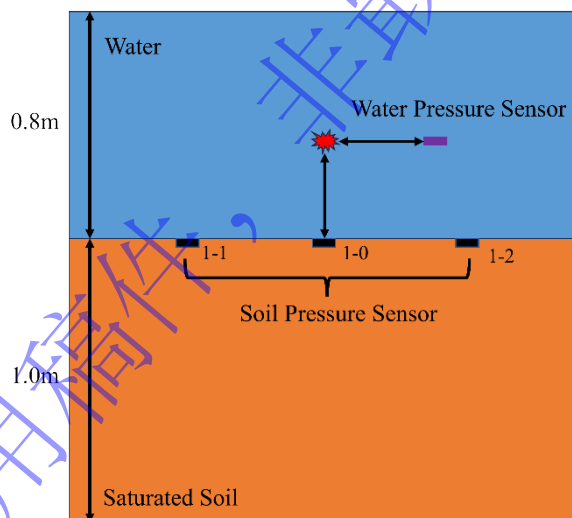


图3 土压传感器布设

Fig.3 Layout of soil pressure sensors

本研究采用真空饱和法制备饱和土样。饱和土容器为直径1.8 m、高度1.6 m的圆柱形钢结构,置于真空罐内处理,真空度 ≤ 0.1 MPa。试验采用28.00 g TNT标准球形装药。压力信号由DH8302型采集仪同步采集,采样频率1.0 MHz。试验装置结构、装药形态及采集系统见图4(a)-(c)。



图4 试验装置、炸药及数据采集系统

Fig.4 Experimental setup, explosive charge, and data acquisition system

2.2 饱和土参数的测量

为构建理论模型的参数体系，在正式试验前依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)规范，本试验采用标准取样方法，使用环刀取土器获取2组代表性试样。通过实验室标准测试程序，采用烘干法（105℃恒温烘干24小时）测定试样含水率，使用比重瓶法（依据GB/T 50123-2019标准）测定土粒比重，并计算得到饱和土试样的干密度、湿密度及比重等关键参数。

通过饱和土试样的湿密度、干密度及比重等参数可以得到饱和土的密度、组分含量、固体颗粒密度等参数。具体参数如表1所示。

表1 饱和土试样基本参数

Table 1 Basic parameters of saturated soil samples

饱和土试样组	密度/(kg·m ⁻³)	饱和度	气体含量	液体含量	固体含量
1	2092	99.6%	0.0162	0.3544	0.6294
2	2070	94.2%	0.0176	0.3390	0.6434
平均值	2081	96.9%	0.0169	0.3467	0.6364

2.3 试验结果与理论模型验证

2.3.1 正反射压力验证

图5呈现了在不同爆距条件下（0.3 m和0.52 m）水压传感器、中心土压传感器的实测数据以及

通过理论公式计算得到的不同爆距条件下的理论反射压力-时间曲线。

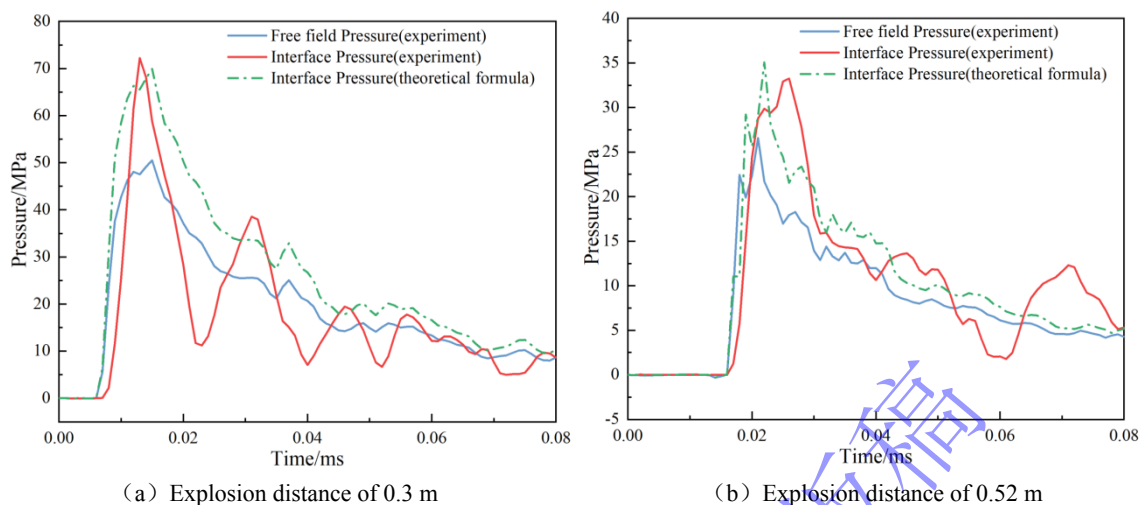


图 5 理论公式结果与试验结果的比较

Fig.5 Comparison between theoretical formula results and experimental results

为验证试验水中自由场爆炸波传播的正确性，取 Zamyslyayev 等^[13]给出的水下爆炸冲击波峰值压力计算公式：

$$P_m = \begin{cases} 44.1 \times \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{1.5}, & 6 \leq \frac{R}{r_0} < 12 \\ 52.4 \times \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{1.13}, & 12 \leq \frac{R}{r_0} < 240 \end{cases} \quad (22)$$

式中： p_m 为自由场冲击波峰压，MPa； W 为装药量，kg； R 为测点到药包中心距离，m。

试验观测数据显示，当爆距分别为 0.3 m 和 0.52 m 时，实测水压峰值分别为 50.50 MPa 和 26.58 MPa。基于经典爆炸力学理论公式计算得到的理论预测值分别为 53.69 MPa 和 28.84 MPa。经误差分析，实测值与理论值的相对误差分别为 6.3% 和 8.5%，这一误差范围在爆炸冲击波测试的可接受范围内，表明试验数据具有较高的可靠性和准确性。

当爆距设定为 0.3 m 时，测得水中自由场压力峰值为 50.50 MPa，水土交界面处观测到显著的反射增强现象，其压力峰值达到 72.21 MPa，经计算得到反射系数为 1.43，该数值与理论预测值相符。当爆距增大至 0.52 m 时，由于爆炸能量随距离衰减，水中自由场压力峰值降低至 26.58 MPa，相应水土交界面的反射压力峰值为 33.26 MPa，此时反射系数减小为 1.25，这一变化趋势符合爆炸冲击波在介质界面反射的基本物理规律。

将表 1 中的平均值数据替代文献^[21]中表 1 数据并代入理论公式后，通过理论公式计算得到了不同爆距条件下的理论反射压力-时间曲线。计算结果显示，在爆距为 0.3 m 和 0.52 m 两种工况下，理论计算结果与试验实测数据呈现出良好的一致性。具体而言，理论模型预测的反射压力峰值分别为 69.92 MPa 和 35.07 MPa，与相应试验结果（72.21 MPa 和 33.26 MPa）的相对误差分别为 3.28% 和 5.44%。这一误差范围处于工程计算可接受范围内，验证了所推导理论公式的可靠性和准确性。

2.3.2 斜反射压力验证

表 2 呈现了爆距为 0.52 m 情况下侧面土压传感器的实测峰值和理论计算结果。由于试验中未测到与侧面压力传感器同距离的自由场压力入射曲线，因此使用公式（22）得到侧面位置土压传感器的入射水压峰值为 20.73 MPa。将自由场压力入射峰值及入射角度代入斜反射公式，得到斜反射压力峰值为 19.00 MPa。表中试验测得斜反射压力峰值为 18.64 MPa，斜反射理论公式结果与试验结果的误差为 1.93%。因此斜反射理论公式具有较高的准确度。

表 2 斜反射压力试验与理论结果

Table 2 Oblique reflection pressure test and theoretical results

斜反射压力	试验结果/MPa	理论结果/MPa	偏差
爆距 0.52 m	18.64	19.00	+1.93%

3 数值模型建立与验证

3.1 数值方法与本构模型

3.1.1 数值求解器

在利用LS-DYNA进行显式动力分析时，求解策略的选择至关重要。拉格朗日格式虽适于模拟固体材料的变形，却受限于严重的网格畸变问题；欧拉格式虽能有效处理流体大变形，但其材料界面追踪的计算精度与效率面临挑战。为兼顾界面追踪的精确性与大变形处理的鲁棒性，任意拉格朗日-欧拉（ALE）格式应运而生，它通过引入可独立运动的网格，巧妙地结合了前述两种格式的优势。鉴于本研究涉及炸药、水及饱和土之间剧烈的流固耦合作用，特采用多材料ALE求解方法，并利用 ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP关键字将三者集成于同一多材料组内进行模拟。

3.1.2 材料参数

水材料选用 9 号材料模型 MAT_NULL 模型，以及 4 号状态方程 EOS_GRUNEISEN，该状态方程适用于高压条件，因此可用于模拟爆炸过程中水被高度压缩的过程。其中流体单元在受压状态下的应力为：

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1) - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \quad (23)$$

式中， ρ_0 为初始密度， C 为冲击波速度 u_s 和质点速度 u_p 的截距， $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ， γ_0 为 GRUNEISEN 系数， α 为对 γ_0 的一阶体积修正； S_1 、 S_2 、 S_3 为 u_s - u_p 曲线斜率的系数， E 为初始内能。本文中水的材料和状态方程参数均参考前人文章^[21]，设置如表 3 所示。

表 3 水参数

Table 3 Water parameters

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	γ_0	α	S_1	S_2	S_3	E
1025	1520	0.28	0	1.92	0	0	0

在 LS-DYNA 中选取的炸药为 TNT，选用 8 号材料模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN，它可以用于模拟烈性炸药的爆炸过程。选用 2 号状态方程 EOS_JWL，其中压力计算为：

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (24)$$

此方程常用于高能炸药的爆轰产物，式中 ω 、 R_1 、 R_2 为描述炸药特性的无量纲常数， A 、 B 、 E 都有压强单位， V 为相对体积。TNT 的材料及状态方程参数参考前人文章^[21]，如表 4 所示：

表 4 炸药参数

Table 4 Parameters of explosives

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	p_{ci}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa
1583	19.4	307	3.898	4.485	0.79	0.3	6.9684

饱和土采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 模型，采用土工试验及理论模型所得参数，具体参数如表 5

所示。

表 5 饱和土参数

Table 5 Saturated soil parameters

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/MPa	K/Mpa	$a0/\text{Mpa}^2$	$a1/\text{Mpa}$	$a2$	pc/Mpa	$Eps1$	$Eps2$
2081	254.44	6265	3.339×10^{-7}	2.251×10^{-1}	3.794	-6.9×10^{-3}	0	-0.015769
$Eps3$	$Eps4$	$Eps5$	$Eps6$	$Eps7$	$Eps8$	$Eps9$	$Eps10$	$p1/\text{Mpa}$
-0.017641	-0.019308	-0.020906	-0.022464	-0.023992	-0.025496	-0.026976	-0.028436	0
$p2/\text{Mpa}$	$p3/\text{Mpa}$	$p4/\text{Mpa}$	$p5/\text{Mpa}$	$p6/\text{Mpa}$	$p7/\text{Mpa}$	$p8/\text{Mpa}$	$p9/\text{Mpa}$	$p10/\text{Mpa}$
8.8	18.4	28.0	37.6	47.2	56.8	66.4	76.0	85.6

3.2 模型设置与结果对比

3.2.1 模型建立

如图6所示，对水土交界面工况建立二维对称数值模型。水区域的大小为 $0.9\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ ，饱和土区域的大为 $0.9\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 。模型左边界设置为对称边界，底部和右侧边界为固定边界，顶部边界设置为无反射边界。采用28 g球形TNT炸药，距离水土交界面分别为0.3 m和0.52 m。

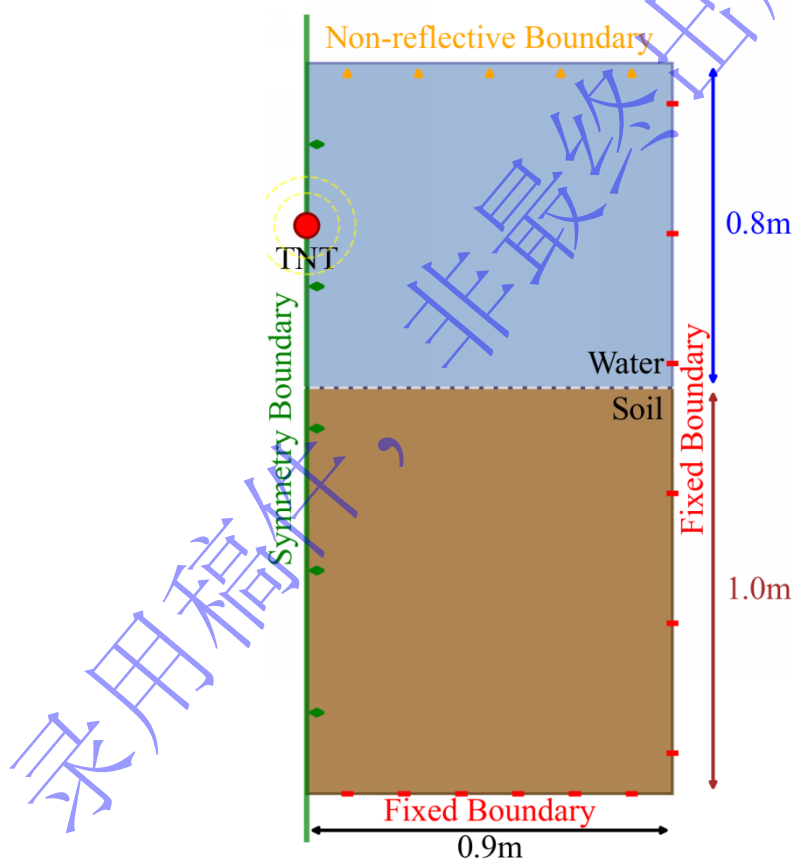


图 6 数值模型

Fig.6 Numerical model

为选择合适网格，现对二维水中自由场爆炸进行网格收敛性分析，采用28 g球形TNT，观测0.3 m爆距处水土交界面压力，从图7中可以看出，界面压力在网格尺寸逐渐减小时收敛，模拟中网格尺寸为1.5 mm、1.0 mm、0.5 mm时结果相差不大，且当网格为1.5 mm时，峰值压力接近收敛值，综合运算精度及计算成本考虑数值计算时采用1.5 mm网格进行模拟。

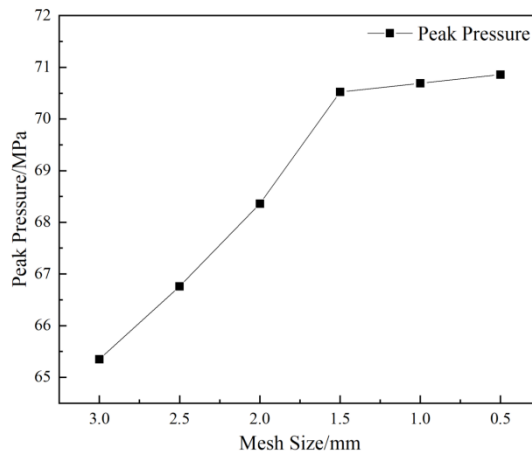


图7 网格敏感性分析

Fig.7 Grid sensitivity analysis

3.2.2 数值模型结果

采用该模型计算所得水土交界面压力及水中自由场压力如图8所示。从图中可以看出，数值模拟的正反射压力峰值分别为70.52 Mpa和31.54 Mpa，与相应试验结果（72.21 Mpa和33.26 Mpa）的相对误差分别为2.34%和5.17%，数值模拟与试验结果具有高度的一致性。因此采用三相饱和土理论获取饱和土参数是可行的。从上升沿与脉冲宽度来看，0.52 m爆距的上升时间约20至25 μs ，比0.3 m爆距的15至20 μs 延长约25%，这体现了冲击波随传播距离增加而变胖变缓的典型特征。

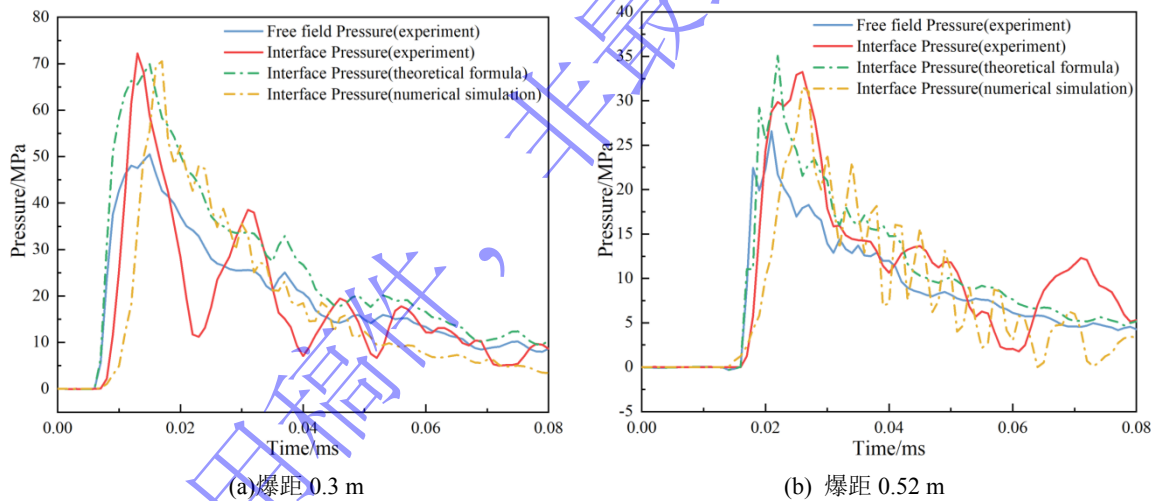


图8 正反射数值模型结果

Fig.8 Results of the normal-reflection numerical model

试验与数值模拟所得水土交界面斜反射压力峰值如表6所示。从表中可以看出，数值模拟的反射压力峰值分别为19.74 Mpa，与相应试验结果（18.64 Mpa）的相对误差为5.90%。

表6 斜反射压力试验与模拟结果

Table 6 Oblique reflection pressure test and simulation results

斜反射压力	试验结果/MPa	模拟结果/MPa	偏差
爆距 0.52 m	18.64	19.74	+5.9%

以上结果说明，采用三相饱和土理论获取饱和土参数进行数值模拟得到的结果，正反射和斜反射都具有较高的一致性。

综合对比试验结果、理论结果以及数值模拟结果，三者具有较高的一致性，说明推导得出的理论

公式与建立的数值模型具有较好的适用性。

4 参数影响分析与讨论

4.1 比例爆距的影响

本研究采用 TNT 标准药柱作为爆炸源，爆炸距离与试验设置相同 (0.52 m)。通过改变 TNT 当量设置了比例爆距范围为 0.326-2.936 $\text{m/kg}^{1/3}$ ，以评估比例爆距对正反射压力和反射系数的影响。通过理论模型推导得到了不同比例爆距条件下的正反射压力及反射系数理论值，具体计算结果详见图 9。

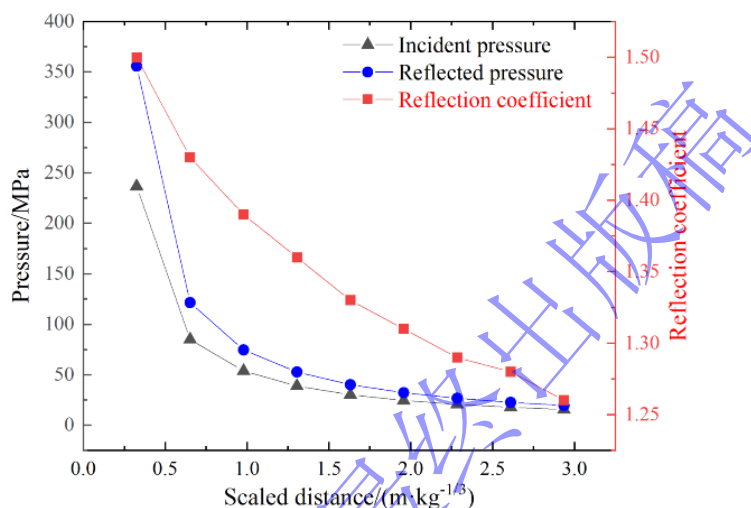


图 9 不同比例爆距下的入射、反射压力和反射系数

Fig.9 Incident and reflected pressures and reflection coefficient under different scaled distances

数据分析表明，反射系数与比例爆距之间存在显著的关联性。如图 8 所示，当比例爆距在 0.326-2.936 $\text{m/kg}^{1/3}$ 范围内变化时，反射系数呈现明显的递减趋势。反射系数数值从 1.50 逐渐降低至 1.26。这一变化规律具有以下特征：单调递减性：反射系数随比例爆距增大而持续减小；非线性特征：递减速率随比例爆距增大而逐渐减缓；变化幅度：在比例爆距范围内，反射系数变化幅度达 16%。

这一现象是由以下原因造成的：冲击波能量衰减效应，随着传播距离增加，冲击波能量呈指数衰减；介质阻抗匹配变化，水土界面阻抗比随冲击波强度变化而改变；非线性传播特性，强冲击波在介质中的传播具有显著非线性特征。

4.2 不同含气量下反射压力

饱和土介质中的含气量作为影响爆炸应力波传播特性的关键参数，其作用机制在土体接近饱和状态时尤为显著^[2]。为定量研究含气量对水土界面反射压力特征的调控作用，基于试验数据的理论模型进行了如下研究：采用 28 g TNT 当量装药，在固定爆距 0.3 m (对应比例爆距 0.980 $\text{m/kg}^{1/3}$) 条件下，系统考察含气量在 0-10% 范围内的变化影响。试验测得基准入射压力为 50.50 MPa，通过理论模型计算获得了不同含气量条件下的反射压力及反射系数演变规律，结果如图 10 所示。

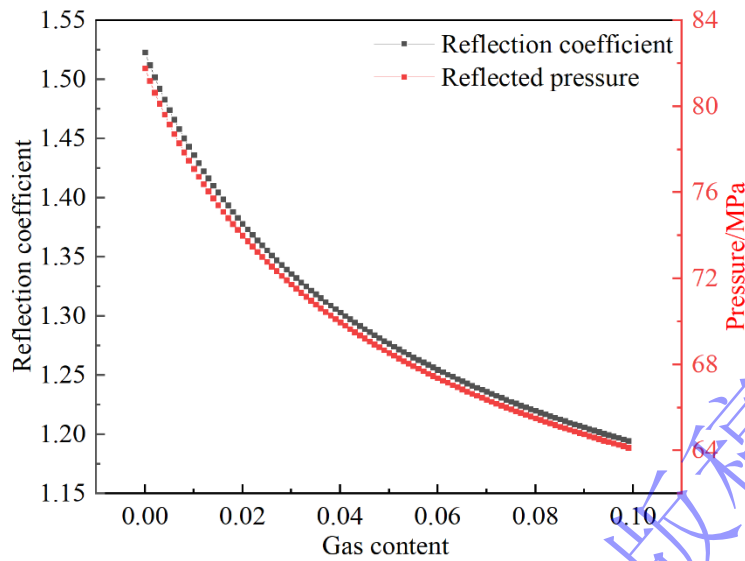


图 10 含气量对水土交界面反射压力和反射系数的影响

Fig.10 The influence of gas content on the reflection pressure and reflection coefficient at the water soil interface

基于试验数据的理论模型定量揭示了含气量对水土界面反射特性的影响规律。将理论模型输入编程软件，进而调控理论模型饱和土三相组分中气相的含量，得到含气量对水土交界面反射压力及反射系数的影响。当饱和土含气量从 10%降低至 0%时，反射压力呈现非线性增长趋势，其数值范围从 64.15 MPa 显著提升至 81.77 MPa，对应的反射系数由 1.19 增至 1.52，变化幅度达 27.7%，含气量每降低 1%，反射压力平均提升 1.76 MPa。造成此现象的原因含气量增加导致土体中微气泡在冲击波作用下的振荡增强；饱和土三相介质阻抗差异随含气量变化而改变；气泡存在改变了冲击波能量的传播路径与耗散方式。

4.3 斜反射压力模型适用性分析与误差讨论

为系统验证本文推导的水土界面冲击波斜反射压力计算模型的适用性，本研究采用已通过试验验证的数值模拟结果作为基准。通过构建不同比例爆距 ($Z=1.307-1.961 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$) 和不同入射角 ($\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$) 共 15 组工况，对比理论计算反射压力与数值模拟结果。数值模拟参数均源自第 3 节中经试验标定的饱和土材料模型（见表 5），确保了对比条件的一致性。

将入射角 θ 作为核心变量，系统对比理论计算反射压力与数值模拟结果。表 7 汇总了典型工况下的对比数据，图 10-11 展示了系统的对比结果。

表 7 水土界面冲击波反射压力理论计算与数值模拟对比（代表性数据）

Table 7 Comparative Analysis of Theoretical Calculation and Numerical Simulation for Shock Wave Reflection Pressure at the Soil-Water Interface (Representative Data)

比例爆距/($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	入射角/ $^\circ$	入射压/MPa	数值模拟反射压/MPa	理论计算反射压/MPa	偏差
1.307	0	36.36	44	46.32	5.27%
	10	35.71	44.86	44.26	-1.34%
	20	33.48	42.09	38.21	-9.22%
	30	30.3	35.9	30.45	-15.18%
	40	25.71	27.26	22.61	-17.06%

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

1.634	0	27.1	32.57	33.63	3.25%
	10	26.67	31.17	32.48	4.20%
	20	25.13	29.17	28.87	-1.03%
	30	22.67	24.3	23.85	-1.85%
	40	19.31	17.41	18.39	5.63%
1.961	0	21.51	23.63	26.08	10.37%
	10	21.16	23.01	25.38	10.30%
	20	19.87	20.71	22.95	10.82%
	30	17.82	16.84	19.48	15.68%
	40	15.27	13.1	13.45	2.67%

从表中可得，正入射 ($\theta=0^\circ$) 精度高，在比例爆距为1.307及1.634时，正入射理论计算与数值模拟吻合良好，误差在5.5%以内，当比例爆距增大至1.961时，正入射误差升至10.37%，表明远场条件下理论模型的适用性有所下降。斜入射时，误差随入射角增大而增加，且受爆距非单调影响。在 40° 大入射角下，比例爆距1.307为近场爆炸，误差高达-17.06%，理论值显著低估了反射压；而在比例爆距为1.961时，此时为远场爆炸，误差仅为+2.67%，此时波系接近平面波，非线性效应和剪切作用减弱，理论公式的适用性恢复。这表明该理论模型在中等爆距、中小入射角范围内精度最优，在近场大角度工况下需谨慎使用。

为更直观地揭示误差分布规律，绘制了不同比例爆距反射压力曲线图。图 11 展示了不同比例爆距下，理论计算与数值模拟反射压力随入射角的变化曲线。总体来看，两条曲线在 $\theta \leq 20^\circ$ 的区域内吻合良好。当 $\theta > 30^\circ$ 后，理论计算值开始系统性偏低，且爆距越小，偏低趋势越显著。这表明，本文推导的理论方法在中小入射角范围内具有更高的计算精度。

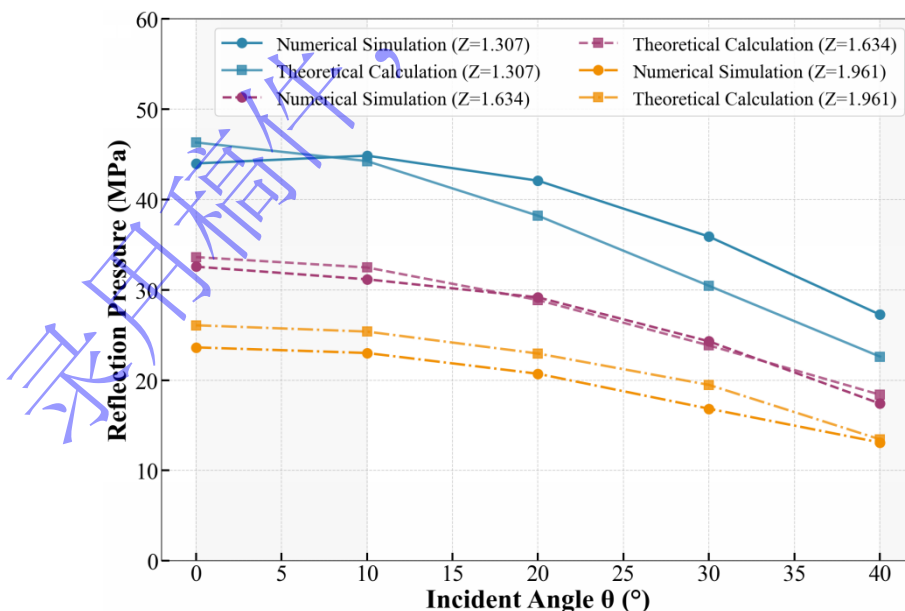


图 11 不同比例爆距反射压力的比较

Fig.11 Comparison of Reflection Pressure at Different Scaled Distances

图 12 展示了理论计算误差随入射角变化的趋势，进一步揭示了模型的适用范围，在 $\theta \leq 20^\circ$ 范围内，误差绝对值普遍小于 10%，表明本文模型在小入射角时具有较高的计算精度，适用于大多数近

场正入射及小角度斜入射工况。在 $20^\circ < \theta \leq 40^\circ$ 区间内，误差绝对值逐渐增大，主要集中在 10%–20% 之间。这说明在大入射角、近爆距工况下，模型的假设简化可能导致显著的预测偏差。

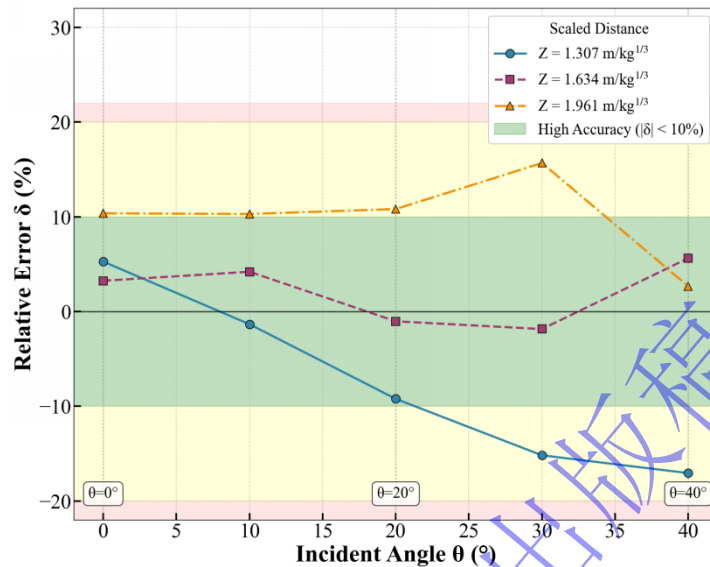


图 12 计算模型误差随入射角的变化

Fig.12 Variation of Theoretical Calculation Error with Incident Angle

5 结论

本研究通过紧密耦合的试验、理论与数值模拟，对冲击波在水-饱和土交界面的反射行为进行了系统性的研究，主要取得了以下结论：

(1) 建立并验证了适用于水土交界面的冲击波斜反射压力预测模型。该模型在正反射理论基础上，通过引入动量分解与状态方程耦合，拓展至任意入射角的斜反射工况。试验与数值验证表明，模型对正反射及小入射角 ($\leq 20^\circ$) 斜反射的峰值压力预测误差普遍低于 6%，展现出良好的工程适用性；同时明确了模型在大入射角 ($> 30^\circ$) 近爆距工况下的预测局限，为实际应用提供了明确的边界指导。

(2) 设计并实施了系统的水下爆炸试验，采用真空饱和法制制备标准饱和土试样，结合土工试验精确获取密度、饱和度、含气量等关键参数。通过高精度传感器阵列同步获取了水中自由场及界面处的压力时程，为理论模型与数值模拟提供了可靠的验证数据。结果表明，理论预测与实测峰值压力偏差小于 6%，验证了模型的可靠性。

(3) 基于试验标定的饱和土参数，建立了高保真流固耦合数值模型。模拟结果与试验数据高度吻合，进一步验证了所采用的三相饱和土本构模型与多物质 ALE 方法的有效性。该模型为揭示冲击波在水土介质中的传播机理、参数影响及界面响应行为提供了可靠的分析工具。

(4) 通过参数分析系统揭示了比例爆距与含气量对反射压力的影响规律。随着比例爆距增大 ($0.326\text{--}2.936 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$)，正反射系数由 1.50 降至 1.26；含气量在 0%–10% 范围内增加时，反射压力下降约 27.7%，表明土体饱和度对界面动力响应具有显著影响，在实际工程中应予以充分考虑。

参考文献

- [1] Cole R H. Underwater Explosions[J]. Physics today. 1948(6). DOI:10.1063/1.3066176.
- [2] 钱七虎, 王明洋. 三相介质饱和土自由场中爆炸波的传播规律 [J]. 爆炸与冲击, 1994(2): 97-104.
QIAN Q H, WANG M Y. Propagation law of explosion wave in free field of three-phase saturated soil [J]. Explosion and Shock Waves, 1994(2): 97-104. DOI:10.11883/1001-1455(1994)02-0097-8.

- [3] SHIM H S. Response of piles in saturated soil under blast loading [D]. Boulder: University of Colorado, 1996.
- [4] WANG Z, LU Y, HAO H. Numerical investigation of effects of water saturation on blast wave propagation in soil mass [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(5): 551-561. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:5(551).
- [5] LIU Y L, ZHANG A M, TIAN Z L, et al. Investigation of free-field underwater explosion with eulerian finite element method [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 166: 182-190. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.001.
- [6] GAO Y, WANG S S, ZHANG J X, et al. Influence of water depth on the peak overpressure and energy of the secondary pressure wave of underwater explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 293: 116580. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116580.
- [7] AN J, TUAN C Y, CHEESEMAN B A, et al. Simulation of soil behavior under blast loading [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2011, 11(4): 323-334. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000086.
- [8] WANG S H, ZHAO Y T, ZHANG Z H, et al. Plane shock wave propagation in partially saturated soil [J]. *Journal of King Saud University - Science*, 2022, 34(4): 101917. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.101917.
- [9] KEDRINSKII V K. Negative pressure profile in cavitation zone at underwater explosion near free surface [J]. *Acta Astronautica*, 1976, 3(7): 623-632. DOI: 10.1016/0094-5765(76)90166-1.
- [10] KLASEBOER 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.
- [11] WANG G H, ZHUANG S R, YU M, et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries [J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 46: 40-53. DOI: 10.1016/j.apor.2014.02.003.
- [12] 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.
- [13] ZAMYSHLYAEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic loads in underwater explosion [M]. Washington DC: Naval Intelligence Support Center Translation DIV, 1973.
- [14] 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. Propagation law of shock wave from underwater explosion of bottom charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(1): 100-104. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.018.
- [15] XU L Y, WANG S P, LIU Y L, et al. Numerical simulation on the whole process of an underwater explosion between a deformable seabed and a free surface [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108311. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108311.
- [16] FAVRETTO-CRISTINI N, GARLAN T, MORIO O, et al. Assessment of risks induced by countermining unexploded large-charge historical ordnance in a shallow water environment—part i: real case study [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2022, 47(2): 350-373. DOI: 10.1109/JOE.2021.3111819.
- [17] FAVRETTO-CRISTINI N, WANG F, CRISTINI P, et al. Assessment of risks induced by countermining unexploded large-charge historical ordnance in a shallow water environment—part ii: modeling of seismo-acoustic wave propagation [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2022, 47(2): 374-398. DOI: 10.1109/JOE.2021.3111791.
- [18] NOWAK P R, SZLACHTA A, GAJEWSKI T, et al. Small-scale underwater explosion in shallow-water tank [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 288: 115894. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115894.
- [19] YAN F H, QIU Y Y, YUE S L, et al. Interaction between underwater explosion bubbles and soil-water interface: a numerical and experimental study [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(10): 103334. DOI: 10.1063/5.0225202.
- [20] ZHANG J, GUAN L H, LI W J, et al. Centrifuge modeling of underwater explosion near the water-soil interface [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(4): 1-15. DOI: 10.1063/5.0260821.
- [21] 严富怀, 岳松林, 邱艳宇, 等. 冲击波在水土交界面透射和反射压力的计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(11): 51-61.
YAN F H, YUE S L, QIU Y Y, et al. Calculation of transmission and reflection pressure of shock wave at water-soil interface [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(11): 51-61. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0440.

录用稿件，非最终出版稿