

DOI: 10.11883/bzycj-2026-0072

浅水爆炸下独立植埋式钢板桩的毁伤特性 及判据研究

赵红宇¹, 张家齐¹, 孙可平¹, 赵银龙¹, 史旭阳¹¹, 王泓元^{1*}

(1.中国人民解放军 32213 部队, 河北 张家口 075421)

摘要: 独立植埋式钢板桩施工便捷、抗毁伤能力强, 广泛应用于近海防护等领域, 其在浅水爆炸下的毁伤特性决定了结构的抗爆能力。针对现有研究缺乏对该结构浅水爆炸下毁伤机理的研究问题, 基于水下爆炸荷载衰减规律, 建立了钢板桩浅水抗爆毁伤工程计算模型, 构建水-炸药-钢板桩-砂土耦合仿真计算模型。同时, 开展模型试验验证了工程模型与数值结果的可靠性, 分析了爆炸当量、爆源目标距离、水深对其毁伤效果的影响。研究表明: 钢板桩毁伤薄弱区集中于水土交界处, 主要破坏模式为冲切断裂与弯曲变形; 比例爆源目标距离是影响毁伤效果的核心参数, 当比例爆源目标距离小于 0.086 时发生冲切断裂, 大于 1.026 时无明显毁伤, 介于两者之间时产生塑性弯曲变形; 水深增大对钢板桩断裂毁伤影响较小, 但可延长弯曲段长度, 其增幅可达 35%。理论计算、数值模拟与模型试验结果吻合度较好, 相对误差小于 10%, 满足工程预测精度需求。研究成果为独立植埋式钢板桩的抗爆设计、毁伤评估及防护加固提供了可靠的理论支撑与工程技术参考。

关键词: 独立植埋式钢板桩; 浅水爆炸; 破坏模式; 毁伤判据; 水土耦合效应

中图分类号: O383.1

国家标准学科分类代码: 130.35

文献标识码: A

Analysis of Damage Characteristics and Criteria of Independent Embedded Steel Sheet Piles Under Shallow Water Explosion

ZHAO Hongyu¹, ZHANG Jiaqi¹, SUN Keping¹, ZHAO Yinlong¹, SHI Xuyang¹, WANG Hongyuan^{1*}

(1. Unit 32213, Zhangjiakou 075421, Hebei, China)

Abstract: Independent embedded steel sheet piles, characterized by convenient construction and strong resistance to damage, are widely used in nearshore coastal protection engineering. The damage characteristics of steel sheet piles under shallow water explosions play a decisive role in the reliability of their blast-resistant design. However, existing studies are still insufficient in revealing the damage mechanism of steel sheet piles subjected to shallow-water blast loading. Based on the attenuation law of underwater explosion loads, an engineering calculation model for evaluating blast-induced damage of steel sheet piles in shallow water was established. Meanwhile, a coupled numerical simulation model involving the interaction of multiple materials was developed. Model tests were further conducted to validate the reliability of both the engineering model and numerical simulations. The effects of explosive charge equivalent, stand off distance, and water depth on the damage response of the structure were systematically analyzed. Results indicate that the weak zone of steel sheet piles is mainly concentrated at the water and soil interface, and the dominant failure modes are punching shear fracture and bending deformation. The scaled distance is identified

*收稿日期: 2026-03-12; 修回日期: 2026-07-04

第一作者: 赵红宇 (1976 年—), 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 1536963660@qq.com;

通信作者: 王泓元 (1998 年—), 男, 学士, 助理工程师. E-mail: 1374958741@qq.com.

as the key parameter governing damage behavior. When the scaled distance is less than 0.086, punching shear fracture occurs; when it is greater than 1.026, no significant damage is observed; and in the intermediate range, plastic bending deformation develops. Increasing water depth has a limited influence on fracture failure but can significantly extend the bending deformation zone, with an increase of up to 35%. Good agreement is achieved among theoretical calculations, numerical simulations, and experimental results, with relative errors within 10%, satisfying the accuracy requirements for engineering prediction. The findings provide a reliable theoretical basis and practical guidance for blast-resistant design, damage assessment, and protective reinforcement of independent embedded steel sheet pile structures.

Keywords: Independently Embedded Steel Sheet Piles; Shallow Water Explosion; Failure Mode; Damage Characteristics; Water-Soil Coupling Effect

0 引言

独立植埋式钢板桩作为“深埋基础-植埋式(柱式)”复合结构,兼施工周期短、造价低廉等突出优势,已成为海岸防护设施的核心受力构件^[1-3]。该类结构埋置深度大、与砂土介质紧密耦合,在浅水爆炸场景中,需同时承受爆炸冲击波荷载与水土耦合效应的复合作用,其毁伤机理较水中自由爆炸场景更为复杂,毁伤评价显著提升^[4-6]。与深水爆炸相比,浅水爆炸冲击波传播过程中受水面稀疏、海底反射的双重作用,荷载分布规律呈现强非线性特征^[7,8];矩形装药外形、起爆位置会显著改变近场爆炸荷载空间分布,若直接采用球形炸药等效模型会大幅低估近场荷载峰值,给结构毁伤评估带来显著误差^[21];而独立植埋式结构特有的“桩—土—水”三相耦合效应,进一步加剧了荷载传递与能量耗散的复杂性,使得传统毁伤评估方法难以直接应用^[9,10]。

目前,水下爆炸结构毁伤研究已取得一定进展,但针对独立植埋式钢板桩的专项研究仍存在明显不足:①研究对象聚焦于自由场荷载特性^[11-12]、刚性结构或高桩码头等典型构件^[9,13],缺乏对植埋式钢板桩特征与水土界面耦合效应的针对性分析,如刘靖晗等^[1-3]研究了刚性柱体附近浅水爆炸荷载特性与沉箱码头累积毁伤效应,但未涉及植埋式钢板桩的水土界面毁伤规律;②荷载传递与毁伤机理研究不够深入,张振华等^[11]通过数值模拟分析了水下爆炸冲击波传播特性,但缺乏试验验证与毁伤机理的系统阐释,庄铁栓等^[6]开展了水中爆炸冲击波在高桩圆柱结构上的分布试验,但未考虑钢板桩的埋置效应与动态响应特征;③毁伤判据针对性不足,现有判据多基于通用结构推导,未充分考虑独立植埋式钢板桩的单端固定约束、水土耦合作用等特有属性,难以满足工程设计与安全评估需求^[10,11,14]。此外,关于水深不大于6m的浅水爆炸条件下爆炸当量、爆源目标距离、水深等关键参数对钢板桩毁伤效果的耦合影响规律尚未形成统一认知,制约了抗爆设计技术的发展^[5,15]。

近年来,国内外学者在水下爆炸结构响应领域开展了一系列拓展研究:孙远翔等^[16]综述了水下爆炸冲击波与结构相互作用的研究现状,指出植埋式结构水土耦合效应是未来重点研究方向;黄义铭等^[17]提出了植埋式结构水土耦合效应数值模拟方法,但未涉及爆炸荷载工况;CHENS等^[18]通过试验研究了钢结构浅水爆炸毁伤特性,但未针对独立植埋式钢板桩建立判据。为弥补上述研究空白,本文采用理论分析、数值模拟与模型试验相结合的耦合研究思路,以独立植埋式钢板桩为研究对象,系统开展以下工作:基于Zamyslyayev模型构建浅水爆炸冲击波荷载计算方法,揭示荷载分布规律;建立多物质ALE数值模型,探究钢板桩动态响应与毁伤机理;设计1:5缩尺模型试验,验证理论与数值结果的可靠性;建立针对独立植埋式钢板桩的毁伤判据,明确毁伤阈值与影响因素。研究成果可为该类结构的抗爆设计与毁伤评估提供技术支撑,具有重要的工程应用价值。

1 浅水爆炸条件下钢板桩毁伤机理

1.1 浅水爆炸冲击波荷载分析

水中爆炸冲击波的峰值压力与时间历程是钢板桩受力分析的核心基础，其传播与衰减规律直接决定结构动态响应特性^[8,10,11]。基于大量试验数据与爆炸相似律分析，采用 Zamyslyayev 水下爆炸冲击波荷载模型^[8]描述集团炸药爆炸的压力时程特性，如式（1）所示：

$$P(t) = \begin{cases} P_m e^{-\frac{t}{\theta}} & t \leq t_0 \\ 0.368 P_m \frac{\theta}{t} \left(1 - \left(\frac{t}{t_p}\right)^{1.5}\right) & t_0 < t \leq t_p \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P(t)$ 为冲击波压力时程（Pa）； P_m 为冲击波峰值压力（Pa）； t 为时间（s）； θ 为压力衰减系数（s）； t_0 为压力由峰值衰减至 $e^{-1}P_m$ 所对应的时间（s）； t_p 为压力作用时间（s）。

该模型为典型自由场水中爆炸经验模型，能够较好反映冲击波压力峰值及衰减规律。由于本文主要关注水底爆破作用下钢板桩结构的动力响应特征，因此采用该公式作为等效冲击荷载，用于表征爆炸初始冲击波载荷。实际的水底爆破过程中冲击波传播还会受到水底边界反射、地基耦合及局部约束效应影响，本文未进一步考虑上述复杂边界修正，其结果主要用于分析不同工况参数下结构响应的相对变化规律。

冲击波峰值压力 P_m 根据爆心距与药包特征尺寸的比值分段计算，如式（2）所示：

$$P_m = \begin{cases} 4.41 \times 10^7 \left(\frac{\sqrt{Q}}{R}\right)^{1.5} & 6 \leq \frac{R}{R_0} < 12 \\ 5.24 \times 10^7 \left(\frac{\sqrt{Q}}{R}\right)^{1.13} & 12 \leq \frac{R}{R_0} < 240 \end{cases} \quad (2)$$

式中： Q 为炸药当量（kg）； R 为爆源目标距离（m）； R_0 为药包初始半径（m）。该模型明确：冲击波压力早期呈指数形式快速衰减，当 $t > t_0$ 后，衰减呈近似时间倒数关系衰减^[8]。

钢板桩表面冲击波荷载的有效作用与几何姿态密切相关，其最小作用距离 R_{min} 由爆源目标距离 R 与钢板桩倾斜角 θ 决定，满足 $R_{min} = R \times \sin\theta$ ，荷载示意图如图 1 所示。图中 H 为水深（m）， F_x 为水平方向冲击波荷载（N）。

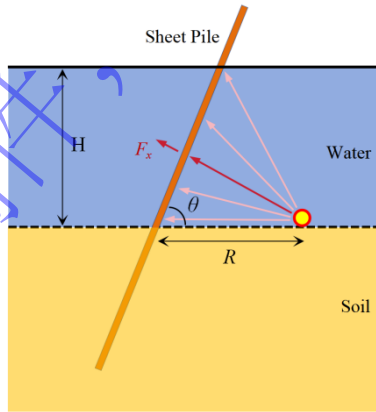


图 1 浅水爆炸钢板桩荷载示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Load on Steel Sheet Pile Under Shallow Water Explosion

以长 7.0m、宽 0.4m、埋深 3.0m、倾斜角 80°的典型独立植埋式钢板桩为研究对象，设计三类工况分析荷载分布规律：不同爆炸当量（爆源目标距离 0.5m、水深 4.0m）；不同爆源目标距离（TNT 当量 80kg、水深 4.0m）；不同水深（TNT 当量 80kg、爆源目标距离 0.5m），结果如图 2 所示。图中纵坐标为水中冲击波荷载峰值，横坐标为钢板桩高度。

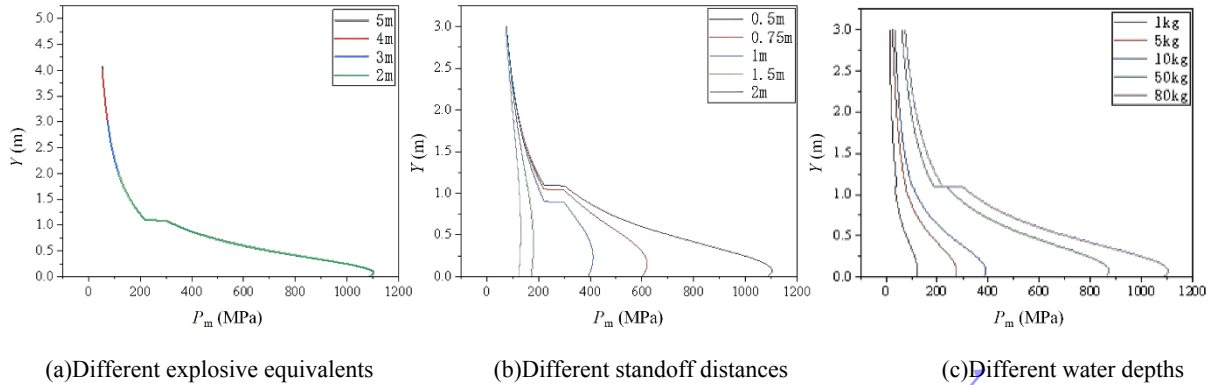


图 2 不同工况条件下钢板桩表面荷载分布

Fig.2 Load Distribution on the Surface of Steel Sheet Pile Under Different Working Conditions

由图 2 分析可得：钢板桩表面荷载峰值随爆炸当量增加而增长，由于水-土交界面的存在，导致荷载出现跳跃变化，且水-土交界处存在显著荷载放大效应，为全桩荷载最大值区域，这一现象与冲击波在水土界面的反射叠加效应密切相关^[7,19]；荷载峰值随爆源目标距离增加呈递减趋势，且爆源目标距离越大，荷载分布越均匀，符合冲击波球面扩散衰减规律^[7,11]；水深对荷载峰值影响较小，但对荷载作用范围影响显著，水深增大时，水面附近低峰值荷载区域范围扩大，进而影响钢板桩弯曲变形的空间分布特征。

1.2 钢板桩水中爆炸毁伤模式

通过受力机制分析可知，单端固定的独立植埋式钢板桩以冲切破坏为主要失效模式，水-土交界处因荷载集中与约束突变为典型毁伤特征区域；当爆源目标距离较大时，冲击波荷载产生的弯矩不足以使钢板桩发生塑性变形，结构无明显毁伤^[10,14,20]。

1.3 浅水爆炸条件下钢板桩毁伤工程判据

基于上述毁伤模式分析，浅水爆炸条件下独立植埋式钢板桩的毁伤工况可划分为三类：爆源目标比例距离较小（荷载强度高），钢板桩发生冲切断裂破坏；爆源目标比例距离适中，钢板桩发生塑性弯曲变形但未断裂；爆源目标比例距离较大（荷载强度低），钢板桩无明显毁伤。

为量化毁伤判定标准，结合 Zamyshlyayev 荷载模型与结构力学理论，推导得到钢板桩受爆炸冲击波作用的瞬间最大剪力 T_m 与最大弯矩 M_m 计算式，如式（3）～（4）所示：

$$T_m = (C_r - C_d) \times P_{m(R-R_{min})} \times B \dots\dots\dots (3)$$

$$M_m = (C_r - C_d) \times P_{m(R-R_{min})} \times R \times \cos\theta \dots\dots\dots (4)$$

式中： C_r 为水中冲击波反射系数^[19]，取值参考罗泽立等^[19]的试验结果； C_d 为与钢板桩结构形态相关的水中冲击波绕射系数，由数值模拟校准确定； $P_{m(R-R_{min})}$ 为对应距离处的冲击波峰值压力（Pa）；

R_{min} 为公式适用的最小爆源目标距离； B 为钢板桩宽度（m）； $\cos\theta$ 为荷载方向与桩轴夹角的余弦值； C_r 为荷载作用系数，反映荷载分布的不均匀性对弯矩的影响。

结合钢材动态力学特性，建立浅水爆炸条件下独立植埋式钢板桩毁伤工程判据：

1) 冲切断裂破坏判据：当最大剪切力满足下式时，钢板桩发生冲切断裂：

$$T_m \geq 2\tau \times DIF_\tau \times B \times t \dots\dots\dots (5)$$

2) 弯曲破坏判据：当最大弯矩满足下式时，钢板桩发生塑性弯曲变形：

$$M_m \geq 2\sigma \times DIF_\sigma \times W \dots \dots \dots (6)$$

3) 无明显毁伤判据: 当上述两式均不满足时, 钢板桩仅发生弹性变形, 无明显毁伤
式中: τ 为钢材动态抗剪强度 (Pa); σ 为钢材动态抗拉强度 (Pa); DIF_τ 为爆炸冲击作用下钢材抗剪能力放大系数^[14]; DIF_σ 为爆炸冲击作用下钢材抗拉能力放大系数^[14]; W 为钢板桩截面模量 (m^3); t 为钢板桩厚度 (m)。

2 浅水爆炸条件下钢板桩数值模拟

2.1 计算模型

采用多物质任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法构建水中近底爆炸作用下钢板桩-土-水耦合体系的三维轴对称计算模型, 为了准确模拟近距离爆炸荷载对钢桩的破坏效应, 砂土地基与钢桩采用 ALE 流固耦合模式进行计算。模型由炸药、水体、钢板桩及砂土地基四类介质组成, 其中水体与炸药采用欧拉网格, 钢板桩与砂土地基采用拉格朗日网格, 通过流固耦合算法实现多相介质间的相互作用, 几何模型如图 3 所示。其中 U 型钢板桩几何参数为: 长 7.0m、宽 0.4m、厚 1.0cm。

数值模拟工况设计: 相同爆源目标距离 (0.2m)、不同爆炸当量 (5kg、10kg、25kg、50kg); 相同爆炸当量 (25kg)、不同爆源目标距离 (0.2m、1.0m、2.0m、3.0m); 相同爆炸当量与爆源目标距离 (25kg、1.0m)、不同水深 (2.5m、5.0m)。

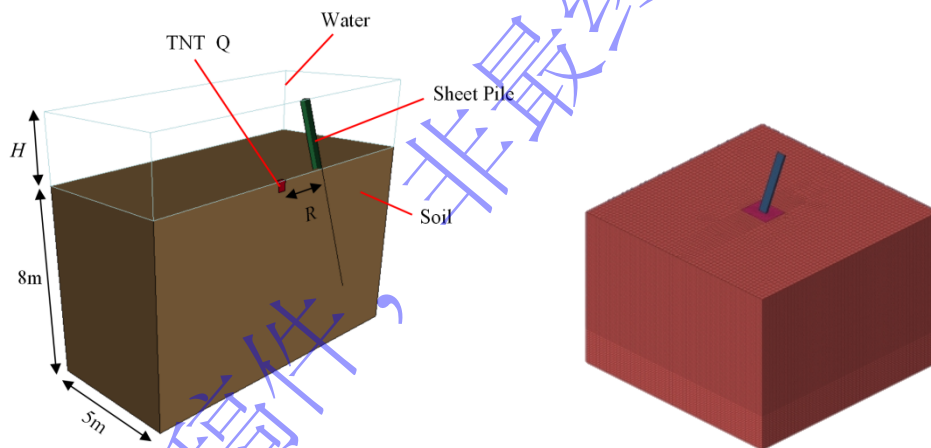


图 3 计算模型与数值网格

Fig.3 Calculation Model and Numerical Mesh

数值模拟采用 LS-DYNA 计算程序, 各材料本构模型与状态方程选取如下^[11]: 炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 本构模型, 搭配 EOS_JWL 状态方程描述爆轰过程; 水体采用 MAT_NULL 模型, 结合 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程表征其动态力学响应; 钢板桩采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 本构模型, 可有效反映钢材的塑性硬化与动态屈服特性; 砂土地基采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 本构模型, 适用于描述饱和砂土在爆炸荷载下的变形与强度特性。相关模型参数取值见表 1 与表 2。

表 1 炸药、水体、钢板桩模型参数取值

Table 1 Model Parameter Values of Explosive, Water Body and Steel Sheet Pile

炸药	密度 ρ kg/m ³	爆速 D m/s	爆轰压 PCJ GPa	A GPa	B GPa	R1	R2	ω	E GPa
	1630.0	6930.00	21.00	4371.3	7.43	4.15	0.95	0.30	7.00
水体	密度 ρ kg/m ³	声速 C m/s	S1	S2	S3	GAM A0	A	E0 Pa	V ₀
	998.00	1647	1.921	-0.096	0	0.35	0	2.895×10^5	1.00
钢桩	弹模 E Pa	泊松比	密度 ρ kg/m ³	屈服强度 Pa	β	C	P	E _{tan} Pa	失效 应变
	2.0×10^{11}	0.3	7850.00	2.35×10^8	0	40.00	5.00	1.1×10^9	0.20

表 2 砂土地基模型参数取值

Table 2 Model Parameter Values of Sandy Soil Foundation

模型参数	取值	模型参数	取值	模型参数	取值
G	12.0MPa	EPS1	0	P1	0kPa
BULK	25.0MPa	EPS2	-0.005	P2	100kPa
A0	0.005	EPS3	-0.1	P3	200kPa
A1	1.5×10^{-7}	EPS4	-0.15	P4	300kPa
A2	0.1	EPS5	-0.2	Ps	500kPa
PC	-50.0Pa	EPS6	-0.25	P6	800kPa
VCR	0	EPS7	-0.3	P7	1200kPa
		EPS8	-0.35	P8	1600kPa

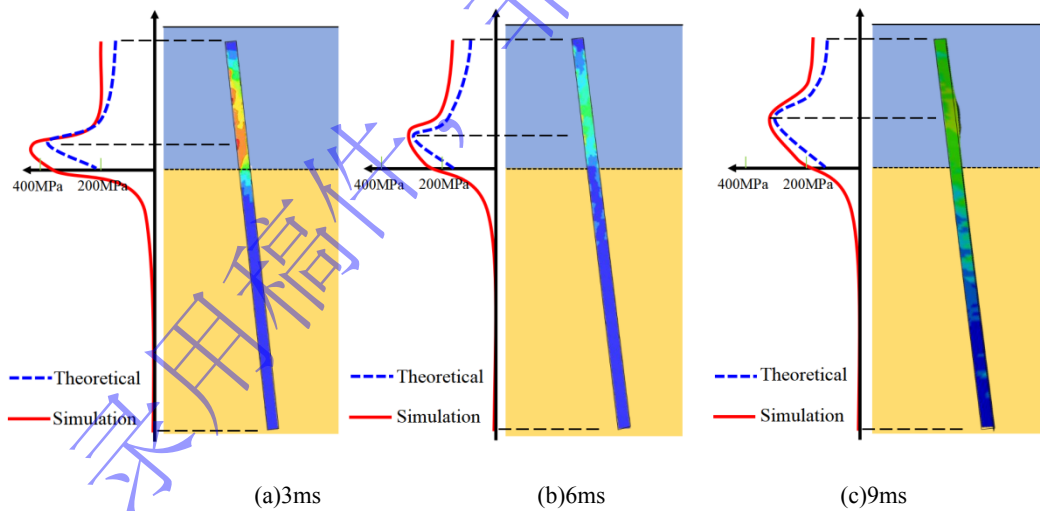


图 4 浅水爆炸钢板桩表面荷载分布对比

Fig. 4 Comparison of Load Distribution on the Surface of Steel Sheet Pile Under Shallow Water Explosion

2.2 荷载数值模拟分析

为验证理论计算的合理性,选取典型时刻(3ms、6ms、9ms)钢板桩表面荷载压力分布,与理论计算结果进行对比,如图 4 所示。结果表明:钢板桩表面荷载主要集中于水—土交界处,理论计算峰值与数值模拟结果相对误差小于 10%,满足工程应用要求;但在近水面区域与水—土交界附近,二者存在一定差异,主要原因是理论计算未充分考虑砂土地基对冲击波的反射叠加效应及水面自由面的

荷载干涉效应^[5,19]，在分析中重点考虑数值模拟计算与试验结果的对比分析，理论分析仅作为自由场中水中爆炸荷载的补充分析。

不同爆炸当量条件下钢板桩表面荷载峰值分布统计结果如图 5 所示。可知：钢板桩水中段荷载峰值近似呈线性分布，水—土交界处与水面附近存在显著荷载放大效应，且放大系数随爆炸当量增大而提升（50kg 当量时放大系数达 1.8）。这一结果表明，大当量浅水爆炸分析中，需重点校核水—土交界处钢板桩的抗剪与抗弯曲能力^[10,14,20]。

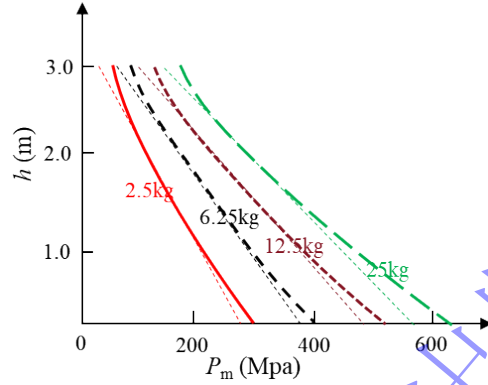


图 5 不同爆炸当量钢板桩受水中冲击波荷载峰值分布

Fig. 5 Peak Load Distribution of Underwater Shock Wave on Steel Sheet Pile with Different Explosion Equivalents

2.3 钢板桩毁伤特性数值模拟分析

不同爆炸当量、爆源目标距离及水深条件下钢板桩毁伤特性数值模拟结果如图 6 所示。

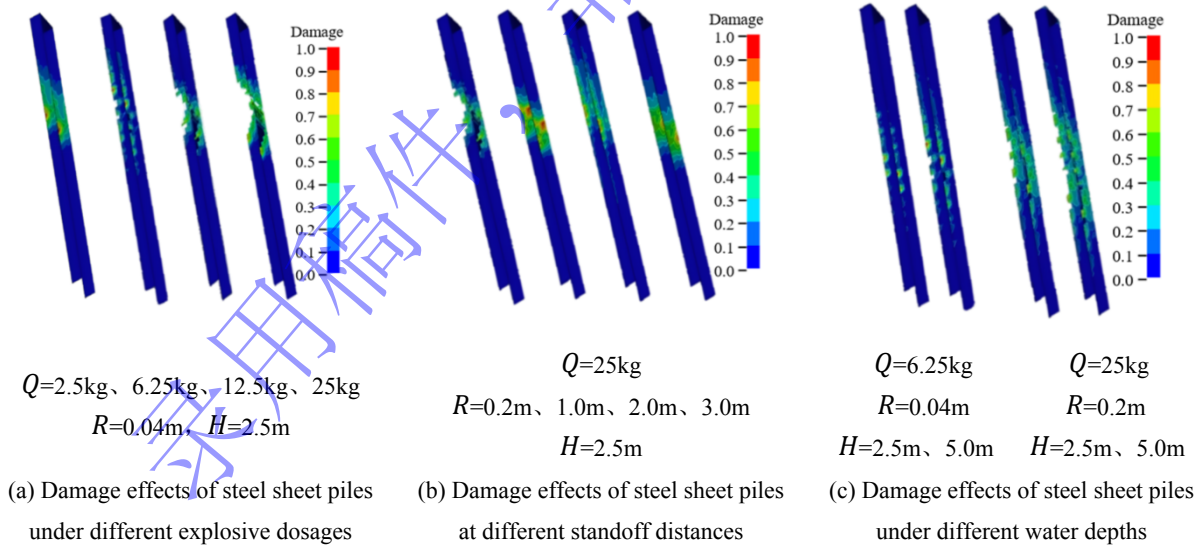


图 6 不同条件下钢板桩毁伤效果数值模拟结果

Fig. 6 Numerical Simulation Results of Steel Sheet Pile Damage Effect Under Different Conditions

由图 6 分析可得：钢板桩毁伤区域始终集中于水—土交界处，与荷载峰值分布规律及理论分析得出的薄弱部位完全吻合^[10,14]，验证了荷载分布与毁伤区域的相关性；随爆炸当量增加，毁伤破坏程度显著加剧，毁伤面积扩大，但毁伤核心区域仍局限于水—土交界附近，这一特征与荷载放大效应的空间分布一致；随爆源目标距离增加，毁伤效应呈递减趋势，当爆源目标距离超过 3.0m 时，钢板桩仅

出现微小弹性变形,表明存在毁伤效应临界距离;水深对毁伤范围影响显著,水深越大,水中段长度越长,弯曲变形范围越大,且大当量爆炸($\geq 25\text{kg}$)条件下,水深对毁伤深度的影响更为突出,与荷载分布规律及结构力学响应特征一致。

3 浅水爆炸条件下钢板桩模型试验

3.1 试验设计

为验证理论分析与数值模拟结果的可靠性,基于相似性原理开展浅水爆炸条件下钢板桩缩尺模型试验。模型几何缩尺比为 1:5,材料缩尺比为 1:1,即模型钢板桩材质与原型一致,以保证弹性模量、屈服强度及动态力学特性的一致性。根据爆炸相似律,爆炸药量按体积相似进行换算,其缩尺比为 1:125。

试验工况设计与数值模拟工况对应,涵盖不同爆炸当量、爆源目标距离及水深组合:不同爆炸当量(模型药量 $Q_{\text{模型}}=20\text{g}$ 、 50g 、 100g 、 200g ,对应原型药量 $Q_{\text{原型}}=2.5\text{kg}$ 、 6.25kg 、 12.5kg 、 25kg);不同爆源目标距离(模型距离 $R_{\text{模型}}=0.04\text{m}$ 、 0.2m 、 0.4m 、 0.6m ,对应原型距离 $R_{\text{原型}}=0.2\text{m}$ 、 1.0m 、 2.0m 、 3.0m);不同水深(模型水深 $H_{\text{模型}}=0.3\text{m}$ 、 0.5m ,对应原型水深 $H_{\text{原型}}=1.25\text{m}$ 、 2.5m)。其中 12.5kg 、 25.0kg 原型爆炸当量对应的模型药量分别为 100g 、 200g ,与数值模拟工况形成完整对照体系,确保试验结果可直接用于理论与数值方法的验证。图 7 为典型钢板桩模型试验布置与爆后效果图($Q=50\text{g}$ 、 $R=0.04\text{m}$ 、 $H=0.5\text{m}$)。

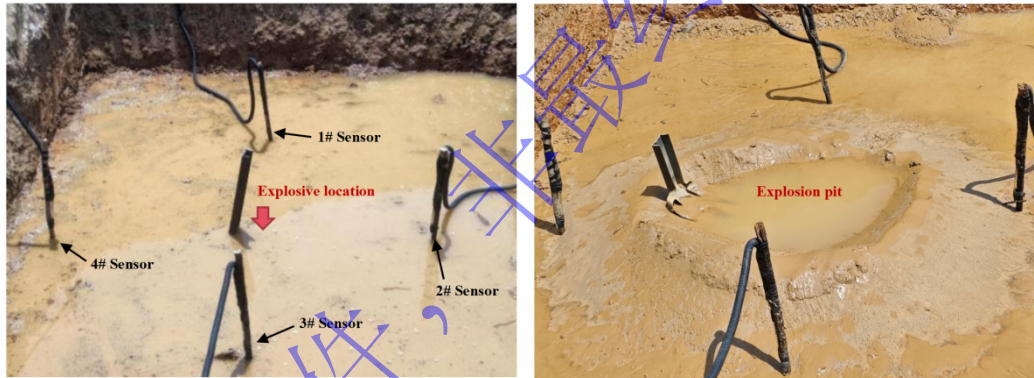


图 7 钢板桩模型试验布置与爆后效果图

Fig. 7 Model Test Arrangement and Post-Explosion Effect Diagram of Steel Sheet Pile.

3.2 试验结果与分析

爆后检查表明,砂土地基形成典型漏斗状爆坑,钢板桩呈现明显水平向位移;由于埋置段受土体约束作用显著,水中段与埋置段产生较大位移差,导致水-土交界处成为应力集中区域,极易引发剪切破坏,这一现象与理论分析及数值模拟结果一致^[10,14,20]。图 8 为模型试验中各压力传感器测得的典型水中爆炸冲击波荷载时程曲线($Q=50\text{g}$ 、 $R=0.04\text{m}$ 、 $H=0.5\text{m}$)。可知:1#~3#传感器(钢板桩前方及侧方)峰值压力相近,而 4#传感器(钢板桩背面)峰值压力显著降低(降幅达 60%),主要原因是钢板桩吸收并阻挡了大部分冲击波能量,验证了钢板桩对水下冲击波的屏蔽效应^[6,11,15]。该测试结果进一步佐证了荷载分布的非对称性,为理论模型中绕射系数 C_d 的校准提供了试验依据。

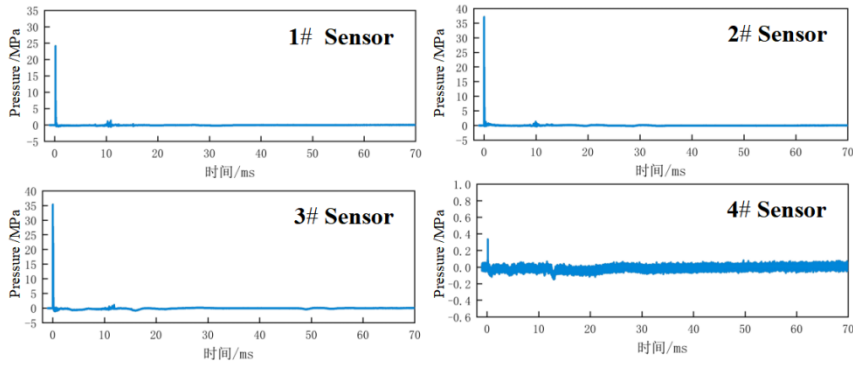


图 8 模型试验中各压力传感器测得的典型水中爆炸冲击波荷载时程曲线

Fig. 8 Typical time-history curves of underwater explosion shock wave loads measured by each pressure sensor in model tests.

图 9(a)为不同爆炸当量工况（爆源目标距离和水深一致， $R=0.04\text{m}$ ， $H=0.5\text{m}$ ），毁伤程度随当量增大依次为轻微弯曲（模型药量 20g，对应原型药量 2.5kg）、中度弯曲（模型药量 50g，对应原型药量 6.25kg）、严重弯曲（模型药量 100g，对应原型药量 12.5kg）、完全断裂（模型药量 200g，对应原型药量 25kg）；图 9(b)为不同爆源目标距离工况（爆炸当量和水深一致， $Q=200\text{g}$ ， $H=0.5\text{m}$ ），毁伤程度随距离增大依次为完全断裂（0.04m）、严重弯曲（0.2m）、中度弯曲（0.4m）、无明显变形（0.6m）；图 9(c)为不同水深工况（爆炸当量和爆源目标距离一致， $Q=200\text{g}$ ， $R=0.2\text{m}$ ），水深 0.5m 时弯曲段长度较 0.25m 时增加 35%，与数值模拟结果一致，验证了水深对弯曲变形范围的影响规律。

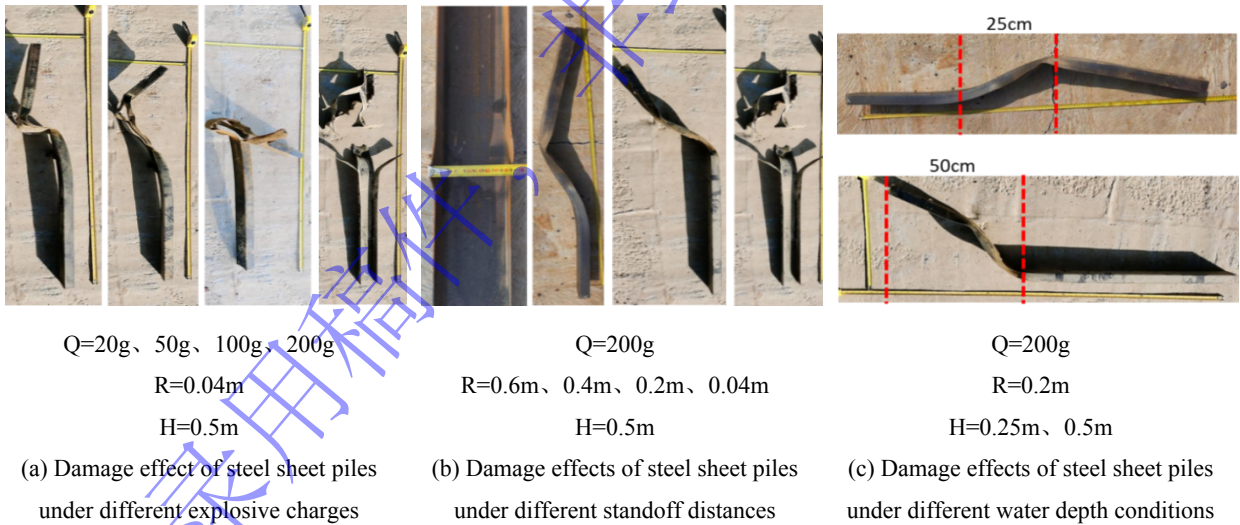


图 9 不同当量、爆源目标距离、水深条件下钢板桩毁伤效果

Fig. 9 Damage Effect of Steel Sheet Pile Under Different Explosion Equivalents, Standoff Distance and Water Depths

3.3 理论-数值-试验结果对比

针对文中使用的 U 型钢板桩，理论计算、数值模拟和模型试验得到的不同工况下毁伤效果对比见表 3。可知：当比例爆源目标距离小于 0.086 时，钢板桩发生断裂毁伤；当比例爆源目标距离大于 1.026 时，钢板桩无明显毁伤；水深对钢板桩毁伤判定阈值无影响，仅影响其弯曲段长度；三者得出的毁伤趋势完全一致，毁伤判定阈值相互验证，体现了研究方法的科学性；仅在 12.5kg 原型爆炸当量（模型爆炸当量 100g）时，理论与数值模拟判定为断裂，试验结果为严重弯曲变形，误差源于模

型试验中土体约束条件与理论假设的细微差异（原型土体密实度与模型土体存在轻微偏差），但总体满足工程应用精度要求^[6,9,11]。本文研究中数值模型直接采用原始尺寸钢板桩的力学参数（弹性模量、屈服强度、密度等），计算结果可直接反映真实结构的动力响应与损伤演化，并通过相似律换算将缩比试验结果映射至原型尺度，保证模型与原型在弗劳德数（Fr）、柯西数（Ca）等关键无量纲参数上的相似性，试验测得的关键值数据需按几何缩尺比的幂次关系反演至原型，其中，原型与模型的爆炸当量比为 1:125。

表 3 不同工况下钢板桩毁伤特征统计

Table 3 Statistics of Damage Characteristics of Steel Sheet Pile Under Different Working Conditions

设计参数	爆炸当量 kg	爆源目标 距离 m	比例爆源 目标距离 m/kg ^{1/3}	水深 m	钢板桩毁伤效果对比		
					工程算法及判据	数值模拟	模型试验
爆炸当量影响	2.5	0.2	0.147	0.5	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形
	6.25	0.2	0.109	0.5	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形
	12.5	0.2	0.086	0.5	断裂（判据 2）	断裂	严重弯曲变形
	25.0	0.2	0.068	0.5	断裂（判据 2）	断裂	断裂
爆源目标距离影响	25.0	0.2	0.068	0.5	断裂（判据 2）	断裂	断裂
	25.0	1.0	0.342	0.5	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形
	25.0	2.0	0.684	0.5	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形
	25.0	3.0	1.026	0.5	无毁伤（判据 1、2）	无毁伤	无毁伤
水深影响	25.0	1.0	0.342	2.5	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形
	25.0	1.0	0.342	1.25	弯曲变形（判据 1）	弯曲变形	弯曲变形

4 结论

（1）浅水爆炸作用下，独立植埋式钢板桩的荷载峰值集中于水-土交界处，该区域因冲击波反射叠加效应存在显著荷载放大，为结构抗爆薄弱部位，是毁伤特性研究的核心位置；荷载峰值随爆炸当量增加呈线性增长，随爆源目标距离增加呈递减趋势，水深主要影响荷载作用范围而非峰值大小。

（2）钢板桩主要毁伤模式为冲切断裂与弯曲变形，比例爆源目标距离是毁伤特性研究的核心参数：当比例爆源目标距离小于 0.086 时，发生冲切断裂毁伤；当比例爆源目标距离大于 1.026 时，无明显毁伤；介于两者之间时，发生塑性弯曲变形。该规律为毁伤评估与抗爆设计提供了关键量化依据。

（3）水深会对钢板桩断裂毁伤的判定阈值产生影响，并显著影响弯曲变形段长度，水深越大，弯曲段长度越长（增幅可达 35%），工程设计中需针对这一特征优化水-土交界及水中段的防护措施，提升结构整体抗爆性能。

（4）本文建立的浅水爆炸钢板桩毁伤判据，经理论计算、LS-DYNA 数值模拟与 1:5 缩尺模型试验三重验证，结果吻合度良好，相对误差小于 10%，满足工程应用要求，可为独立植埋式钢板桩的抗爆设计、毁伤评估与防护加固提供可靠的理论支撑与技术参考。

（5）后续研究可进一步拓展土体参数（如密实度、含水率、颗粒级配）、钢板桩材质（如高强度钢、复合材料）、材料厚度及爆炸类型（如接触爆炸、非接触爆炸、多次爆炸）对毁伤特性的影响，完善毁伤评估体系；同时可开展防护措施优化研究，开发针对性的抗爆加固技术，提升关键基础设施的抗爆炸冲击能力。

致谢 本文数值模拟与模型试验得到单位试验室各位同事的协助，审稿专家给出宝贵修改意见，在此一并致谢。

Acknowledgments: The numerical simulation and model tests in this paper were assisted by colleagues in the laboratory. We sincerely appreciate the valuable suggestions provided by the reviewers.

参考文献:

- [1] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 刚性柱附近浅水爆炸荷载特性研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5): 166-173.
LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Study on characteristics of shallow water explosion loads near a rigid cylinder [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5): 166-173.
- [2] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 浅水爆炸冲击波在柱体附近荷载规律研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 168-173.
LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Study on load laws of shallow water explosion shock wave near cylinder [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 168-173.
- [3] 刘靖晗, 唐廷, 韦灼彬, 等. 沉箱码头在空中和水下爆炸作用下的累积毁伤效应研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(12): 298-306. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.12.033.
LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Study on cumulative damage effects of caisson wharf subjected to air and underwater explosions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(12): 298-306. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.12.033.
- [4] 董琪, 韦灼彬, 唐廷, 等. 港池环境近水面水下爆炸特性及其毁伤效应[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 136-148.
DONG Q, WEI Z B, TANG T, et al. Characteristics and damage effects of near-surface underwater explosion in harbor basin environment [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 136-148.
- [5] 程淑杰, 梁争峰, 阮喜军, 等. 浅水爆炸冲击波特性及其毁伤效应研究进展[J]. 火炸药学报, 2024, 47(1): 17-28. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202304003.
CHENG S J, LIANG Z F, RUAN X J, et al. Research progress on characteristics and damage effects of shallow water explosion shock waves [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2024, 47(1): 17-28. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202304003.
- [6] 庄铁栓, 伍俊, 许文轩, 等. 水中爆炸冲击波在高桩圆柱结构上的分布规律试验研究[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 60-66.
ZHUANG T S, WU J, XU W X, et al. Experimental study on distribution law of underwater explosion shock waves on high-piled cylindrical structure [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(10): 60-66.
- [7] WARDLAW JR A B, LUTON J A. Fluid - Structure Interaction Mechanisms for Close - In Explosions[J]. Shock and Vibration, 2000, 7(5): 265-275. DOI: 10.1155/2000/141934.
- [8] ZAMYSHLYAEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic Loads in Underwater Explosion[J]. Dynamic Loads in Underwater Explosion, 1973.
- [9] LIU J H, TANG T, WEI Z B, et al. Damage Process of High-piled Wharf Subjected to Underwater Explosion[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 735(1): 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/735/1/012043.
- [10] 张秀华, 张唯佳, 张宇. Q460 高强钢柱在近爆荷载作用下的动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(3): 107-114+147. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.03.013.
ZHANG X H, ZHANG W J, ZHANG Y. Dynamic response of Q460 high strength steel columns under close-in blast loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3): 107-114+147. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.03.013.
- [11] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, (2): 182-188.
ZHANG Z H, ZHU X, BAI X F. Numerical simulation of shock waves in underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, (2): 182-188.
- [12] 余晓菲, 刘士光, 张涛. 水下爆炸冲击波的载荷强度计算[J]. 舰船科学技术, 2006, (5): 22-28.
YU X F, LIU T G, ZHANG T. Calculation of shock wave load intensity in underwater explosion [J]. Ship Science and

- Technology, 2006, (5): 22-28.
- [13] 刘钊, 武浩文, 孙文豪, 等. 水下爆破冲击波对混凝土坞门影响试验研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 33-36+136.
LIU Z, WU H W, SUN W H, et al. Experimental study on influence of underwater blasting shock waves on concrete dock gate [J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(12): 33-36+136.
- [14] SYMONDS P S. SURVEY OF METHODS OF ANALYSIS FOR PLASTIC DEFORMATION OF STRUCTURES UNDER DYNAMIC LOADING[J].ciência e tecnologia de alimentos, 1967. DOI: 10. 1590/S0101-20612011000400023.
- [15] 余晓菲, 刘土光, 张涛. 水下爆炸冲击波的载荷强度计算[J]. 舰船科学技术, 2006, (5): 22-28.
YU X F, LIU T G, ZHANG T. Calculation of shock wave load intensity in underwater explosion [J]. Ship Science and Technology, 2006, (5): 22-28.
- [16] 孙远翔, 陈岩武. 水下爆炸载荷下水面舰艇双层结构的毁伤与防护研究进展[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(3): 342-353.
SUN Y X, CHEN Y W. Research progress on damage and protection of surface ship double-layer structure under underwater explosion load [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(3): 342-353.
- [17] 黄义铭, 赵密, 王丕光, 等. 动力荷载作用下水-桩-土相互作用简化分析研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(6): 1511-1520. DOI: 10. 16385/j. cnki. issn. 1004-4523. 2022. 06. 023.
HUANG Y M, ZHAO M, WANG P G, et al. Simplified analysis of water-pile-soil interaction under dynamic loads [J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(6): 1511-1520. DOI: 10. 16385/j. cnki. issn. 1004-4523. 2022. 06. 023.
- [18] CHEN S, QIN J, DENG S, et al. Experimental and Numerical Studies on Fixed Steel Sheets Subjected to Underwater Explosion[J]. Materials (1996-1944), 2022, 15(18). DOI: 10. 3390/ma15186419.
- [19] 罗泽立, 周章涛, 毛海斌, 等. 水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法[J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 443-452.
LUO Z L, ZHOU Z T, MAO H B, et al. Theoretical analysis method for interaction between strong underwater explosion shock wave and plate structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(4): 443-452.
- [20] 胡红星. 复合钢板衬砌的抗爆防护性能研究[J]. 科技与创新, 2023, (11): 1-6. DOI: 10. 15913/j. cnki. kjycx. 2023. 11. 001.
HU H X. Research on anti-explosion protection performance of composite steel plate lining [J]. Science and Technology & Innovation, 2023, (11): 1-6. DOI: 10. 15913/j. cnki. kjycx. 2023. 11. 001.
- [21] Chen L K, Zhao H Y, Zhang Y L. Study on the effect of shape parameters and initiation points of rectangular high explosive on the spatial distribution of blast loads[J]. Acta Mechanica Sinica, 2025, 41(3): 1-19. DOI: 10. 1007/s10409-024-23470-x.