

[引用格式] 高文博, 赵振宇, 任建伟, 等. 表面覆水对浅埋爆炸冲量传递的影响[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(3): 292-299.

## 表面覆水对浅埋爆炸冲量传递的影响

高文博<sup>1,2</sup>, 赵振宇<sup>1,2</sup>, 任建伟<sup>1,2</sup>, 卢天健<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学 多功能轻量化材料与结构工信部重点实验室, 江苏 南京, 210016)

**摘要:** 表面覆水浅埋爆炸是装甲车辆在滩涂地区作战的主要威胁之一。由于同时具有水层和砂层的影响, 表面覆水浅埋爆炸的冲量传递特性与传统浅埋爆炸差异较大。为精细表征表面覆水对浅埋炸药爆炸冲量传递的影响, 文章借助 AUTODYN 有限元软件, 采用流固耦合算法对表面覆水的浅埋爆炸过程进行数值仿真。研究表明, 流固耦合方法能够有效仿真表面覆水工况下浅埋爆炸; 表面覆水增强了浅埋爆炸中传递给目标的冲量, 且冲量随水层厚度的增加逐渐增大; 同时, 炸药底部的垫层厚度对冲量传递也有一定的影响。文中结果可为滩涂地区用装甲车辆高性能防护结构设计提供有效的研究手段。

**关键词:** 浅埋爆炸; 表面覆水; 冲量传递; 流固耦合

中图分类号: TJ630.1; TB71.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2022)03-0292-08

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2022.03.003

## Effects of Water Covering on Impulse Transfer in Shallow Buried Explosions

GAO Wen-bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhen-yu<sup>1,2</sup>, REN Jian-wei<sup>1,2</sup>, LU Tian-jian<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. MIT Key Laboratory of Multifunctional Lightweight Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Shallow buried explosions covered by water are one of the major threats to armored vehicles fighting in tidal flat areas. Based on the influence of both the water layer and sand layer, the impulse transfer characteristics of shallow buried explosions covered by water are significantly different from those of traditional shallow buried explosions. To characterize the influence of water covering on impulse transfer, this study employed a fluid-structure coupling algorithm to simulate shallow buried explosions covered by water using the finite element software AUTODYN. The results demonstrate that the fluid-structure coupling method can effectively simulate shallow buried explosions covered by water. Water covering enhances the impulse transmitted to the target in shallow buried explosions and the impulse increases with an increasing depth of the water layer. The thickness of the cushion layer placed at the bottom of the explosive also affects impulse transfer. The results of this study can provide useful guide-lines for designing high-performance protection structures for armored vehicles used in tidal flat areas.

**Keywords:** shallow buried explosion; water covering; impulse transfer; fluid-structure coupling

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金(11972185, 12002156)、中国博士后科学基金(2020M671473).

作者简介: 高文博(1999-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为强动载荷下轻质材料与结构力学行为.

## 0 引言

现代战场中,爆炸载荷对装甲结构和乘员安全伤害较大<sup>[1]</sup>。依据爆炸波传播媒介的不同,可将爆炸载荷划分为空气爆炸、水下爆炸和岩石爆炸等形式<sup>[2]</sup>。依据爆炸物的布置位置和炸坑形貌<sup>[3]</sup>的不同,可将岩石爆炸细分为地表爆炸、浅埋爆炸、深埋爆炸和地下爆炸等<sup>[1]</sup>。目前,浅埋爆炸是陆地战场上最常见的爆炸载荷,对作战人员及装备安全威胁极大。根据表面是否覆水,又可将浅埋爆炸进一步分为无覆水浅埋爆炸和覆水浅埋爆炸。由于陆用装甲车辆在战场中应用较为普遍,国内外均针对无覆水浅埋爆炸展开了广泛研究,尤其对其冲量传递机理的研究较为深入,研究发现:爆炸过程中,爆炸物在爆炸瞬间产生的爆炸超压不仅会导致装甲车体的局部破坏与倾覆<sup>[4]</sup>,还会对乘员组织器官造成不可逆的伤害<sup>[5]</sup>;此外,高速飞溅的砂土颗粒会导致车体进一步变形,进而对乘员造成挤压性伤害<sup>[6]</sup>。

评价浅埋爆炸杀伤力的主要指标是爆炸后传递到结构的冲量<sup>[1]</sup>,故如何测量该冲量成为目前国内外研究的一个主要问题。现有针对冲量传递实验方法的定量化分析,多采用2种手段<sup>[1]</sup>。第1种是靶板自由式:采用高速摄影技术捕捉靶板在爆炸载荷作用下获得的速度,计算靶板的动量,依据动量的变化量表征传递给结构的冲量<sup>[7]</sup>;第2种是靶板固定式:靶板四边固定,采用在靶板上布置的压力传感器提取靶板所受压力随时间的变化曲线,计算压力对时间的积分表征传递给结构的冲量<sup>[8]</sup>。此外,还可采用多环嵌套装置,通过高速摄影技术捕捉圆环上升的位移,由此计算圆环的上升速度,同样能够准确获得传递给结构的冲量的空间分布<sup>[9-10]</sup>。

国内外目前针对无覆水浅埋爆炸的研究主要集中于探究不同地质条件下,传递给结构的冲量变化情况。研究发现,砂土的各种地质因素对浅埋爆炸事件中冲量的传递有较大影响<sup>[7]</sup>,包括砂土孔隙率、砂粒形状、土壤密度和含水量等,例如:砂土的孔隙率对冲量的传递有一定的影响,但随着砂土颗粒之间孔隙率的增加,传递给结构的冲量逐渐减少<sup>[11]</sup>;砂粒的形状在冲量传递过程

中发挥着重要作用,不同形状颗粒间的摩擦力不同,而颗粒间的摩擦力会增加冲量的损耗<sup>[12]</sup>;土壤密度和传递给结构的冲量成正比<sup>[7]</sup>,增加土壤的初始密度会增加传递给目标的冲量<sup>[13]</sup>。

但是在各类地质条件中,土壤颗粒的含水量对冲量的传递影响最大<sup>[7]</sup>。根据含水量的不同,可将砂土分为欠饱和态、完全饱和态和表面覆水态。土壤颗粒含水量较低(低于8%左右)时,冲量对含水量不敏感<sup>[7]</sup>。随着土壤含水量的增加直至达到完全饱和态,传递给目标结构的冲量显著增加<sup>[14]</sup>。砂土含水量足够高时,相较于同等条件下的干砂,传递给结构的冲量增加了近7倍<sup>[15]</sup>。高应变率变形下,土壤中的水分来不及排出,土壤的抗剪切能力明显提高,砂料在飞溅过程中更加不易松散,故传递给结构载荷的冲量增大<sup>[16]</sup>。

随着含水量的进一步增加,砂土由完全饱和态的无覆水浅埋爆炸转变为表面覆水的浅埋爆炸。相较于其他爆炸工况,有水参与的爆炸工况作用到结构上的载荷更为复杂。目前,国内外学者大多通过开展水下爆炸研究,探究水对爆炸威力的影响以及作用于结构的载荷类型和作用机理。近年来,针对水下爆炸的研究主要集中于探究爆炸冲击波的传播及其分布<sup>[17]</sup>、爆炸后产生的气泡脉动<sup>[18]</sup>、气泡坍塌引起的射流现象<sup>[19]</sup>,以及防护结构的破坏模式<sup>[20]</sup>等。现代登陆作战中,通常大量的水雷埋设在浅滩处,而相比于陆地浅埋地雷的爆炸,浅滩处的水雷爆炸强度更大<sup>[21]</sup>,故涉水抢滩是伤亡率最高的作战阶段<sup>[22]</sup>。目前,国内外缺乏有关滩涂处复杂地质条件对浅埋爆炸冲量传递影响的公开研究,其作用机理还有待探索。

文中旨在考虑表面覆水浅埋爆炸对于结构冲击作用的影响,采用传递到结构的冲量及分布情况表征该工况下的载荷特性。首先,建立表面覆水的浅埋爆炸模型,采用有限元方法计算冲量传递;然后,通过与文献中实验结果进行对比,验证仿真方法的准确性;最后,基于仿真结果,量化水层厚度及爆炸物的垫层厚度对冲量传递及分布情况的影响。

## 1 问题描述

简化起见,采用如图1所示的仿真模型分析表面覆水浅埋爆炸。为测量冲量的大小和分布规

律,参考靶板自由式实验方法,将靶板离散成为可自由移动的环状板块,靶板半径 $r$ ,每个板块横截面长度 $l$ ,厚度 $b$ 。为避免板块间发生网格重叠,板块之间设置固定间隔 $t$ ,靶板下方欧拉域半径为 $R$ 。在各板块的横截面中心处设置观察点以获取其速度,据此计算各板块的动量,并以板块动量的分布表征冲量的空间分布。靶板下表面距水层上表面的垂直距离定义为爆距 $SoD$ ,砂层上表面到水层上表面的垂直距离定义为水层厚度 $DoB_w$ ,炸药上表面到砂层上表面的垂直距离定义为砂层厚度 $DoB_s$ ,炸药下表面至模型下边界距离为垫层厚度 $D_s$ 。在靶板几何中心正下方的砂土中,埋置1枚圆柱形C4炸药,装药半径 $r_c$ ,装药高度 $h_c$ ,如图1所示。

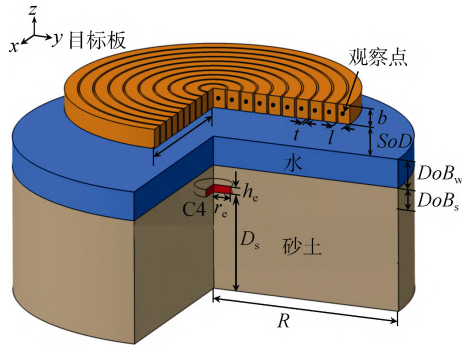


图1 表面覆水浅埋爆炸模型示意图  
Fig. 1 Schematic of the model for shallow buried explosions covered by water

## 2 数值仿真

### 2.1 几何模型

针对图1所示表面覆水浅埋爆炸模型中结构及载荷的轴对称性,采用AUTODYN软件建立二维轴对称有限元模型。以炸药几何中心为坐标原点, $x$ 轴为旋转轴方向, $y$ 轴为径向方向,模型及单元网格设置见图2。环形板块采用AUTODYN材料库中默认的4340钢材料,密度 $7830\text{ kg/m}^3$ ,体积模量 $1.59\times 10^8\text{ kPa}$ ,剪切模量 $7.7\times 10^7\text{ kPa}$ ,采用J-C(Johnson-Cook)本构模型,参数见表1。表中: $A$ 为材料的初始屈服应力; $B$ 为应变强化参数; $n$ 为应变强化系数; $C$ 为应变率强化参数; $m$ 为热软化指数; $T_{\text{melt}}$ 为材料的熔化温度。欧拉域半径 $R$ 设置为 $200\text{ mm}$ ,模型其他几何参数设置见表2。研究发现, $D_s = 100\text{ mm}$ 时,垫层厚度

对计算结果影响较小,因此固定砂子单元上表面到靶板的距离 $SoD + DoB_w = 60\text{ mm}$ ,主要探究水层对爆轰冲量传递的影响: $DoB_s$ 取固定值 $20\text{ mm}$ ,改变 $DoB_w$ ,计算相应的冲量大小以及分布。

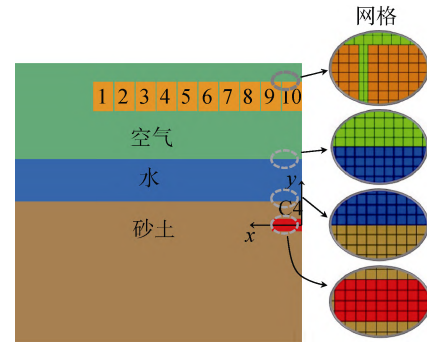


图2 表面覆水浅埋爆炸有限元模型  
Fig. 2 Finite element model of shallow buried explosions covered by water

表1 4340钢材料参数  
Table 1 Material parameters of 4340 steel

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$T_{\text{melt}}/\text{K}$
792	510	0.26	0.014	1.03	1793

表2 数值模型几何参数设置  
Table 2 Geometrical parameters of numerical model

$r/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$r_c/\text{mm}$	$h_c/\text{mm}$
300	13	20	2	19	8

目标板采用拉格朗日单元建模,边界自由。空气、水、C4、砂土均采用多物质欧拉单元建模。欧拉域底部采用固支反射边界,其余边界采用流出边界。开展网格无关性验证(见图3),发现欧拉单元网格尺寸设置为 $2\text{ mm}$ 时,计算结果较为精确且计算效率较高。为提高计算精度,将拉格朗日单元网格尺寸设为 $2\text{ mm}$ ,数值模型网格总数为 $16600$ 。

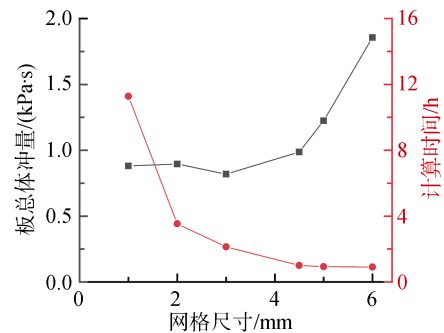


图3 网格无关性分析  
Fig. 3 Grid independence analysis

## 2.2 材料特性

空气材料模型<sup>[23]</sup>选择理想气体状态方程

$$P = \rho_g C_v T \cdot \left( \frac{C_p}{C_v} - 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $\rho_g$  为气体密度;  $C_v$  和  $C_p$  分别为气体的恒压比热和恒容比热;  $T$  为气体温度。空气初始内能设为  $2.068 \times 10^5$  Pa, 初始温度设为 288.2 K, 初始密度为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 其余参数采用 AUTODYN 中 Air 材料的默认参数。

采用 Shock 模型描述水的运动状态, 状态方程为

$$\begin{cases} P = \frac{\rho_0 C_0^2 u [1 + (1 - \gamma_0/2)u - au^2/2]}{[1 - (S_1 - 1)u - S_2 u^2 / (u+1) - S_3 u^3 / (u+1)^2]^2} + (\gamma_0 + au)E_v, u \geq 0 \\ P = \rho_0 C_0^2 u + (\gamma_0 + au)E_v, u < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma = (\gamma_0 + au)/(1+u) \quad (3)$$

式中:  $C_0$  为室温室压下的无扰动声速;  $u$  为冲击波后的粒子速度;  $E_v$  为材料单位体积内能的增量;  $\gamma_0$  为室温室压下的 Gruneisen 系数;  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  为材料待测参数。水的具体参数<sup>[24]</sup>见表 3, 其失效参数设置为  $-8000 \text{ kPa}$ 。

表 3 水状态方程具体参数

$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_1$	$\gamma_0$	$c / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
1 000	1 483	1.75	0.28	4.18

炸药材料选择 C4, 状态方程用如下 Jones-Wilkins-Lee 模型描述

$$P = A \left( 1 - \frac{w \rho_p}{R_1 \rho_e} \right)^{(-R_1 \rho_e / \rho_p)} + B \left( 1 - \frac{w \rho_p}{R_2 \rho_e} \right)^{(-R_2 \rho_e / \rho_p)} + w \rho E_0 \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\rho_p}{\rho_e} \quad (5)$$

式中:  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  和  $w$  为材料待测参数;  $\rho_e$  和  $\rho_p$  分别为爆炸物和爆炸产物的密度。具体参数<sup>[23]</sup>

设置见表 4, 其中  $CJV_{\text{det}}$ ,  $CJ \frac{\text{Energy}}{\text{Volume}}$  和  $CJP$  分别为爆炸物  $CJ$  点处的爆炸速度、比内能和爆炸压力。

表 4 C4 材料参数

$\rho_e / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$
1 601	609.8	12.95	4.5	1.4
$w$	$CJV_{\text{det}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$CJ \frac{\text{Energy}}{\text{Volume}} / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$CJP/\text{MPa}$	
0.25	8 193	$9.0 \times 10^6$	28	

砂土采用 AUTODYN 中默认的砂土模型描述, 该模型为 Laine 等<sup>[25]</sup>提出的砂土在动载荷作用下的响应本构模型。文中主要研究砂土颗粒和水对目标的冲击作用, 不考虑砂土颗粒的失效模型。

为验证表面覆水浅埋爆炸模型的准确性, 首先借鉴文献[23]和[24]中的实验结果对砂土和水的材料参数进行验证。文献[23]中实验板的长度  $L = 300 \text{ mm}$ , 板中点最大位移以  $w_m$  表示, 仿真和实验结果均采用无量纲挠度  $\bar{w} = 2w_m/L$  表示, 并采用多项式拟合, 结果如图 4 和图 5 所示。进一步采用文献[24]中的实验模型验证水状态方程

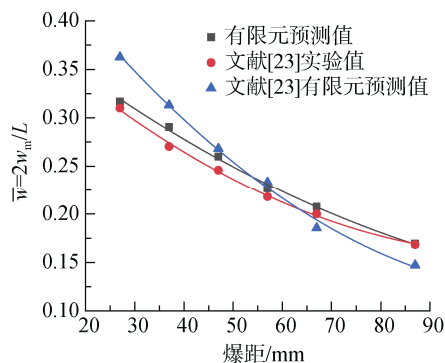


图 4 不同爆距下仿真与实验值对比曲线

Fig. 4 Comparison of simulation results and experimental measurements at different blast distances

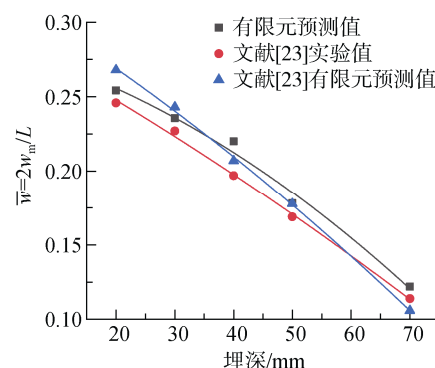


图 5 不同埋深下仿真与实验值对比曲线

Fig. 5 Comparison of simulation results and experimental measurements at different burial depths

的准确性,结果如图6所示。图4、图5和图6的结果表明,仿真预测与文献中的实验值趋势相同,结果相近,二者具有良好的一致性,故文中仿真方法的准确性得到了很好的验证。

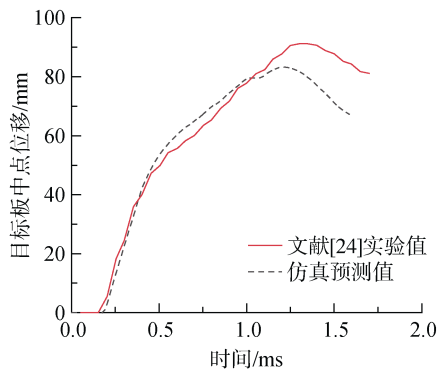


图6 水状态方程仿真与实验值对比曲线

Fig. 6 Comparison of simulation results and experimental measurements of state equation of water

### 3 实验结果与分析

文中采用靶板自由式方法,量化砂层表面覆水及垫层厚度对浅埋爆炸冲量传递的影响。

#### 3.1 水层厚度影响

炸药上表面至靶板的距离取固定值,分别设置水层厚度  $DoB_w = 0, 30$  和  $60$  mm 3种工况,同时忽略爆距对模型的影响,通过对比不同工况下爆炸产物、砂土及水传递给靶板的冲量大小及分布,分析水层在浅埋爆炸中的作用机理,为进一步了解浅埋爆炸中水层的作用及结构防护设计提供参考。

采用多环嵌套(如图1所示)基本思路,探究浅埋爆炸中传递给结构的冲量分布。将模型中靶板离散为10个均分的板块,板块分别编号(如图2所示),在各板块几何中心处设置高斯观察点,利用板块的动量变化间接描述板块受到的冲量,结果以比冲量  $\bar{I}_i$  表示,即

$$\bar{I}_i = \frac{m_i v_i}{A_i} = \rho v_i b \quad (6)$$

式中:  $m_i$  为各板块绕对称轴旋转后的质量;  $v_i$  为各板块速度;  $A_i$  为各板块绕对称轴旋转后下表面的表面积;  $\rho$  为板块的材料密度;  $b$  为板块厚度。

由图7可见,  $DoB_w = 60$  mm 时,各板块受到的比冲量均大于其他2种工况下的对应值,且随

$DoB_w$  的增加而增加。同一工况下,距离模型对称轴越远的板块受到的冲量越小。  $DoB_w = 0$  mm 时,随着板块逐渐远离模型中心轴,其比冲量迅速降低直至趋于0。上述结果说明,相较于无水浅埋爆炸,表面覆水下浅埋爆炸的影响范围更大、更广。

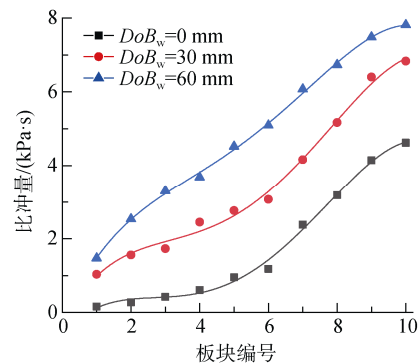


图7 板块所受冲量分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of impulse transmitted to plates

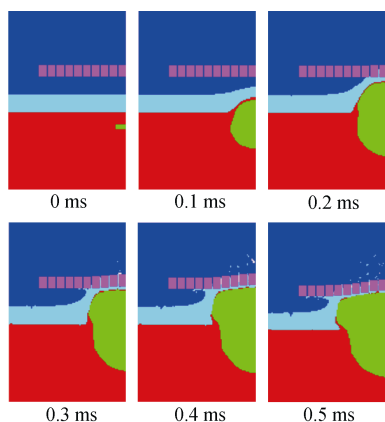
利用公式  $I = \sum_{i=1}^{10} m_i \cdot v_i$  和  $\bar{I} = I / \sum_{i=1}^{10} A_i$  估算由

10个子板块构成的整个靶板受到的比冲量,但由于各板块之间存在缝隙,所得比冲量可能会略低于真实值。表5比较了不同工况下整体靶板受到的比冲量,可见,随着  $DoB_w$  的增加,传递给结构的冲量随之显著增加,说明表面覆水对浅埋爆炸冲量的传递具有不可忽略的重要影响。

浅埋爆炸中,砂土颗粒在爆炸产物冲击作用下迅速向四周飞溅,不仅导致其与爆炸产物的接触时间大幅缩短,还为爆炸产物与空气的接触创造条件,由此造成爆炸产物的泄露。图8给出  $DoB_w = 30$  mm 工况下爆炸后0.5 ms内的时序图。可见,爆炸产物向四周膨胀过程中,水将爆炸产物紧紧包裹,促使水和砂子能够和爆炸产物长时间接触,从而获得更高的动量,最终作用于目标结构,故而相较于无表面覆水情形,表面覆水浅埋爆炸产生的冲量更高。

表5 不同工况下整体靶板受到的比冲量对比  
Table 5 Specific impulse sustained by all target plates under different working conditions

$DoB_w$ /mm	比冲量/(kPa·s)
0	0.91
30	2.42
60	3.69

图8  $DoB_w = 30$  mm 工况下浅埋爆炸时序图Fig. 8 Time sequence diagram of shallow buried explosions with  $DoB_w = 30$  mm

如图9所示,随着 $DoB_w$ 的增加,水层对爆炸产物的约束作用更加明显。在0.2 ms时, $DoB_w = 60$  mm 工况下爆炸产物的扩展程度小于 $DoB_w = 30$  mm 工况。因此,随着 $DoB_w$ 的增加,爆炸物与水、砂土的接触时间随之增加,导致砂土和水获得的动量更高。

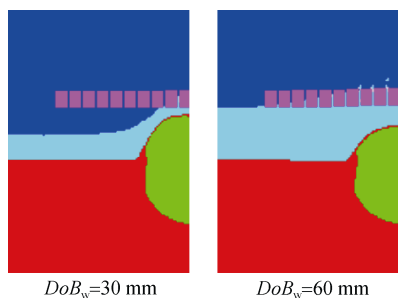


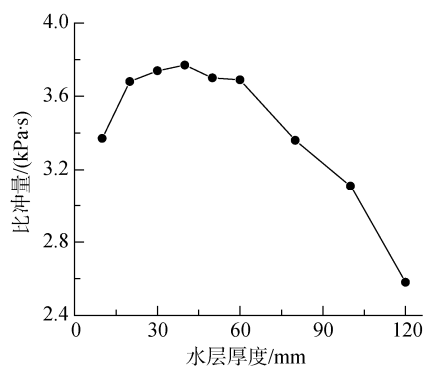
图9 爆炸后0.2 ms时不同工况模型对比图

Fig. 9 Comparison of numerical models under different working conditions at 0.2 ms after explosions

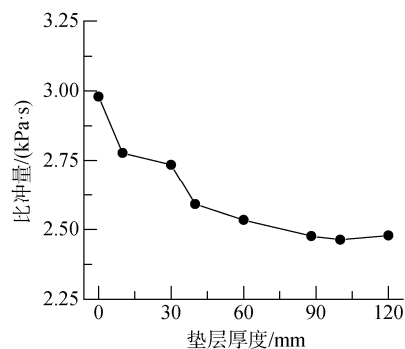
为了进一步探讨水层厚度 $DoB_w$ 对冲量传递的影响,考虑 $SoD = 0$  mm 时 $DoB_w$ 对爆炸冲量传递的影响,共设置9种厚度,结果如图10所示。 $DoB_w \leq 40$  mm 时,随着厚度的增加,传递给目标的总体比冲量增大;  $DoB_w > 40$  mm 时,随着厚度的增加,传递给目标的总体比冲量逐渐减小。此外, $DoB_w$ 达到阈值后,进一步增加厚度会导致爆轰载荷的作用范围增大,增加爆轰能量的消耗,从而导致能够传递给目标的能量大幅降低。

### 3.2 垫层厚度影响

选择合适的垫层厚度开展表面覆水浅埋爆炸

图10 不同水层厚度下爆炸物传递到目标的总冲量  
Fig. 10 Total impulse transmitted to target by explosive buried under different water depths

的仿真分析,结果如图11所示。可见,随着垫层厚度的增加,传递到结构的冲量逐渐减小,并在垫层厚度达到90 mm后趋于稳定。需要指出的是,为保证垫层厚度对结果影响较小的同时提高计算效率,文中在其他小节中给出的有限元仿真结果均基于100 mm的垫层厚度。

图11 垫层厚度对冲量传递影响  
Fig. 11 Effect of cushion thickness on impulse transfer

## 4 结束语

文中采用流固耦合算法,对表面覆水的浅埋爆炸过程进行有限元数值仿真,并基于文献中的实验结果验证了仿真模型的准确性,随后量化了不同水层厚度对浅埋爆炸中冲量传递的影响,得出以下主要结论:

- 1) 相较于没有水参与的浅埋爆炸,砂层之上有覆水层的浅埋爆炸传递到靶板结构的冲量显著增加;
- 2) 靶板各子结构受到的比冲量随着水层厚度的增加而增大;
- 3) 靶板所受到的比冲量随着爆炸物底部垫

层厚度的增加而逐渐减小,最终趋于稳定,随着水层厚度的增加,靶板受到的整体比冲量增大;

4) 爆距为0时,传递给靶板的冲量随水层厚度的增加呈现先增大后降低的趋势。

文中研究结果可为表面覆水浅埋爆炸结构防护设计提供理论参考。然而,文中仅采用有限元仿真方法对表面覆水浅埋爆炸工况进行了探究,且只考虑了爆炸物在砂土中埋置深度固定时,水层对冲量传递的影响。后续仍需进行相关实验及有限元仿真,并探究不同参数对冲量传递的影响。

#### 参考文献:

- [1] 赵振宇,任健伟,金峰,等.浅埋炸药爆炸动力学研究进展[J].应用力学学报,2022,39(1):1-11.  
Zhao Zhen-yu, Ren Jian-wei, Jin Feng, et al. Process of Explosion Dynamics of Shallow-buried Explosive[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 1-11.
- [2] 钱七虎.岩石爆炸动力学的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1945-1968.  
Qian Qi-hu. Some Advances in Rock Blasting Dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1945-1968.
- [3] Bangash M. Shock, Impact and Explosion: Structural Analysis and Design[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [4] Ramasamy A, Hill A M, Masouros S D, et al. Evaluating the Effect of Vehicle Modification in Reducing Injuries from Landmine Blasts. An Analysis of 2212 Incidents and Its Application for Humanitarian Purposes[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(5): 1878-1886.
- [5] Callaway D W, Burstein J L. Operational and Medical Management of Explosive and Blast Incidents[M]. Berlin: Springer, 2020.
- [6] Genson K W. Vehicle Shaping for Mine Blast Damage Reduction[D]. College Park: University of Maryland, 2006.
- [7] Clake S D, Fay S D, Warren J A, et al. Predicting the Role of Geotechnical Parameters on the Output from Shallow Buried Explosives[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 102: 117-128.
- [8] Rigby S E, Fay S D, Clarke S D, et al. Measuring Spatial Pressure Distribution from Explosives Buried in Dry Leighton Buzzard Sand[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 96: 89-104.
- [9] Denefeld V, Heider N, Holzwarth A. Measurement of the Spatial Specific Impulse Distribution Due to Buried High Explosive Charge Detonation[J]. Defence Technology, 2017, 13(3): 219-227.
- [10] 李晓坤,郭香华,张庆明.浅埋地雷爆炸载荷分布的数值仿真分析[J].兵器装备工程学报,2020,41(1):188-192.  
Li Xiao-kun, Guo Xiang-hua, Zhang Qing-ming. Numerical Simulation Analysis on the Distribution of Explosive Loads in Shallow Buried Mines[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(1): 188-192.
- [11] Fox D M, Lee J S. The Influence of Water, Dry Sand, and Unsaturated Sand Constitutive Behavior on the Blast Response of a Rigid Target[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 163-173.
- [12] Goel A, Uth T, Liu T, et al. Coupled Discrete/continuum Simulations of the Impact of Granular Slugs with Clamped Beams: Stand-off Effects[J]. Mechanics of Materials, 2018, 116: 90-103.
- [13] Deshpande V S, Mcmeeking R M, Wadley H, et al. Constitutive Model for Predicting Dynamic Interactions between Soil Ejecta and Structural Panels[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2009, 57(8): 1139-1164.
- [14] Mcshane G J, Deshpande V S, Fleck N A. A Laboratory-scale Buried Charge Simulator[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 62: 210-218.
- [15] Hlady S L. Effect of Soil Parameters on Landmine Blast[C]//18<sup>th</sup> Military Aspects of Blast and Shock Conference. Bad Reichenhall: Wehrtechnische Dienststelle für Schutz und Sondertechnik, 2004.
- [16] Grujicic M, Pandurangan B, Hariharan A. Comparative Discrete-particle versus Continuum-based Computational Investigation of Soil Response to Impulse Loading[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(9): 1520-1535.
- [17] Rajasekar J, Kim T H, Kim H D. Visualization of Shock Wave Propagation due to Underwater Explosion[J]. Journal of Visualization, 2020, 23(5): 1-13.
- [18] Jin Z Y, Yin C Y, Chen Y, et al. Dynamics of an Underwater Explosion Bubble Near a Sandwich Structure[J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 86, 247-265.
- [19] 文彦博,胡亮亮,秦健,等.近场水下爆炸气泡脉动及水射流的实验与数值模拟研究[J/OL].爆炸与冲击.[2022-05-06]. <http://www.bzyej.cn/article/doi/10.11883/bzyej-2021-0206>.
- [20] Feng L J, Wei G T, Yu G C, et al. Underwater Blast Behaviors of Enhanced Lattice Truss Sandwich Panels[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 150, 238-246.

- [21] 张森, 韩庚奋, 赖西南, 等. 涉水触雷爆炸伤的特点及机制[J]. 解放军医学杂志, 2017, 42(10): 914-919.  
Zhang Sen, Han Geng-fen, Lai Xi-nan, et al. The Characteristics of Mine Explosion Injury of Wading in Shoal: A Study on an Animal Model[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2017, 42(10): 914-919.
- [22] 韩庚奋. 浅滩地雷爆炸的损伤特点及力学机制研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2014.
- [23] Pickering E G, Yuen S, Nurick G N, et al. The Response of Quadrangular Plates to Buried Charges[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 103-114.
- [24] Bornstein H, Ryan S, Mouritz A. Physical Mechanisms for Near-field Blast Mitigation with Fluid Containers: Effect of Container Geometry[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 96: 61-77.
- [25] Laine L, Sandvik A. Derivation of Mechanical Properties for Sand[C]//4<sup>th</sup> Asian-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore: CI-Premier, 2001.
- (责任编辑: 吴攀)

## 《水下无人系统学报》“纪念创刊三十周年”专刊征稿启事

《水下无人系统学报》(前身《鱼雷技术》)创刊于1993年,是由中国船舶集团有限公司主管,中国造船工程学会和第七〇五研究所联合主办、国内外公开发行的综合性学术期刊,2017年更为现名,以报道国内外水下无人装备科学与技术领域的最新科研成果、相关交叉学科领域基础理论与应用技术,涵盖军民两用技术,繁荣学术交流,服务工程实践,促进行业发展为办刊宗旨,为国内从事水下无人系统研究的相关领域科研人员提供有价值的学术信息。该刊为国内多家主流数据库收录,现为中国科技核心期刊,读者分布于北美、澳洲、西欧、亚洲等9个国家和地区。主要刊登水下无人装备科学与技术领域的基础研究、应用研究和工程技术方面的论文,包括:水下无人系统相关技术、水下信息网/系统、声学及非声探测系统、水下无人平台、水下预置系统、无人水下航行器(UUV)、无人水面艇(USV)、水中兵器、海上跨域互联与智能协同等。

2023年正值《水下无人系统学报》创刊30周年。30年来,在广大读作者的关怀及支持下,《水下无人系统学报》不忘初心,以繁荣行业学术水平为己任,风雨兼程、砥砺前行。值此周年之际,为回馈广大读作者,本刊特开展专刊征文活动,力争打造一期学科全覆盖、内容质量高的精品专刊,并拟于2023年第1期以正刊形式出版。稿件具体要求如下。

### ★ 稿件基本要求:

1. 此次征文不设主题,但文章形式仅限行业或专项技术**综述性**文章;
2. 仅接受中文原创文章,所有来稿均须提供作者单位出具的保密审查证明,稿件内容不能涉及任何国家及商业秘密;
2. 稿件格式请参照《水下无人系统学报》投稿模板,详见期刊官网→作者园地;
3. 请登录官网 [www.yljszz.cn](http://www.yljszz.cn) (或 <http://sxwrxtxb.xml-journal.net>) 注册投稿,投稿时请在标题栏填写“论文题目+三十年专刊”字样;
4. 投稿截止日期: **2022年10月31日**。

《水下无人系统学报》编辑部