

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0326

# 地面和埋置爆炸土中地冲击作用分区 数值模拟及试验研究\*

刘琦<sup>1</sup>, 翟超辰<sup>2</sup>, 张跃飞<sup>2</sup>, 曲建波<sup>2</sup>, 吴祥云<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105;

2. 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 为研究爆炸条件下土中应力波的时空分布, 基于黄土中接触爆炸和半埋爆炸试验, 验证了 ANSYS/AUTODYN 软件建立的计算模型, 并在此基础上开展了土中爆炸地冲击效应研究。结果表明: 随着土介质深度的增加, 感生地冲击峰值减小, 而直接地冲击峰值增大, 最终, 压力和竖向应力时程曲线中的 2 个峰值减少为 1 个峰值, 据此特征可将土中应力波场分为 3 个区域, 即地表区、近地表区和中心区; 当装药比例埋深为  $-0.05 \sim 0.075 \text{ m/kg}^{1/3}$  时, 随着装药比例埋深的增大, 中心区迅速扩大, 地表区迅速缩小, 近地表区逐渐扩大; 当装药比例埋深为  $0.1 \sim 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时, 地冲击作用区的分布趋于稳定; 爆炸耦合进入空气和土介质中的动能受炸药类型影响, 但在一定范围内, 地冲击作用区角度与地面空气冲击波超压冲量和直接地冲击应力冲量之比呈线性相关关系。

**关键词:** 地面爆炸; 埋置爆炸; 直接地冲击; 感生地冲击; 地冲击作用分区

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Numerical simulation and test study on ground shock subzones in soil produced by ground and buried explosion

LIU Qi<sup>1</sup>, ZHAI Chaochen<sup>2</sup>, ZHANG Yuefei<sup>2</sup>, QU Jianbo<sup>2</sup>, WU Xiangyun<sup>2</sup>

(1. Civil Engineering and Mechanics College, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

2. Institution of Engineering Protection, IDE, AMS, PLA, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** In order to investigate the temporal and spatial distribution of the stress wave in the soil produced by buried explosion, the ANSYS/AUTODYN software was employed for modelling and simulation, and the ground shock effect of explosion in soil was analyzed. Based on the relationship between the pressure and volumetric strain of Luoyang loess obtained by predecessors, the relationship between the pressure and density of the impact compaction in the SAND model was modified. The numerical model was validated by the test data, which were measured from the contact explosion and semi-buried explosion test in loess. Then, a total of 22 numerical simulation conditions were examined to study the influence of the scaled buried depth of the charge and the type of the explosive on the ground shock subzones. The results show that as the depth of the soil medium increases, the peak of induced ground shock decreases, while the peak of direct ground shock increases, until the peak of the pressure-time curve and the peak in the vertical stress-time curve finally merge into a single peak. According to the characteristics of the pressure and vertical stress at various depths, the stress wave field in soil can be divided into three subzones consisting of surface subzone, near-surface subzone and central subzone. With the increase of the scaled buried depth of the charge, the central subzone rapidly increases, the surface subzone rapidly decreases, and the near-surface subzone

\* 收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2022-02-21

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX20190495, CX20200648)

第一作者: 刘琦(1993—), 男, 博士研究生, [hxyliq@126.com](mailto:hxyliq@126.com)

通信作者: 吴祥云(1964—), 男, 博士, 研究员, [13503882599@139.com](mailto:13503882599@139.com)

gradually increases from zero, when the scaled buried depth of the charge ranges from  $-0.05 \text{ m/kg}^{1/3}$  to  $0.075 \text{ m/kg}^{1/3}$ . The distribution of the ground shock subzones tends to be stable, when the scaled buried depth of the charge ranges from  $0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$  to  $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ . The energy of the explosive coupling into the air and soil mediums is affected by the type of the explosive. In certain extent, the angle of the ground shock subzones is linearly related to the ratio of the air-blast overpressure impulse to the impulse of the direct ground shock stress.

**Keywords:** ground explosion; buried explosion; direct ground shock; induced ground shock; ground shock subzone

地表或浅埋爆炸产生的能量一方面用于破碎爆炸附近的岩土介质形成飞散的抛掷体, 另一方面与地表上面的空气发生相互作用, 在空气中形成冲击波。爆炸时, 通过直接压缩地介质并在其中形成的波称为直接地冲击, 而空气中的冲击波掠过地表, 通过压缩空气和地介质相互作用形成的在地介质中传播的波称为感生地冲击。所以爆心附近土中浅层地下介质所受地冲击荷载比较复杂, 既有直接地冲击, 也有感生地冲击。地冲击和空气冲击波到达地表观测点的时间相对关系由岩土介质中的地冲击传播速度和空气冲击波传播速度差异决定, 不同介质、不同埋置深度的爆炸造成地冲击应力、加速度场的不同分布。

近年来, 对于岩土介质中直接地冲击方面的研究已经较为完善。Wu 等<sup>[1]</sup>通过现场大型地下爆炸试验, 研究了介质内部、岩土界面和地表的爆炸应力波特性; 给出并分析了实测应力波时程及其特征参数, 如质点速度峰值和质点加速度峰值以及不同位置的主频率。何翔等<sup>[2]</sup>通过石灰岩中不同装药深度的爆炸试验, 得到了石灰岩中爆炸成坑经验公式以及地冲击传播规律。Leong 等<sup>[3]</sup>根据新加坡残积土的小规模现场爆破试验, 检验了 TM5-855-1 对应力峰值的估算。吴祥云等<sup>[4]</sup>通过现场试验研究了常规装药爆炸埋深对自由场直接地冲击参数的影响, 得到了不同岩土介质、不同地冲击参数等效当量埋深系数的计算方法。叶亚齐等<sup>[5]</sup>运用等效当量埋深系数, 给出了砂质黏土中不同深度爆炸自由场地冲击参数的预估方法。Yankelevsky 等<sup>[6]</sup>通过现有经验数据的分析和数值模拟, 研究了土中爆炸冲击波峰值压力衰减特性。Jayasinghe 等<sup>[7]</sup>对不同埋深爆炸条件下饱和砂土中桩的动力响应进行了数值分析, 给出了爆炸波在土体中的传播和桩的水平变形。Song 等<sup>[8]</sup>对聚能装药爆炸过程进行了数值模拟, 得到了土介质的动力响应、爆炸空腔的形成和发展规律以及爆炸波在土中的传播规律。

然而, 感生地冲击方面的研究则十分有限, 且大多是研究触地爆炸条件下的感生地冲击效应。埋置爆炸条件下土中感生地冲击的影响范围尚不明确。Alekseenko 等<sup>[9]</sup>基于相似理论进行了相关试验研究, 试验测量结果如图 1 所示, 得到了土中压缩波的大致分布情况以及表面区域地冲击有 2 个峰值等结论。Beshara<sup>[10]</sup>基于拟静态特性, 给出了包括烈性炸药、混合气体和粉尘悬浮物在内的多种内爆气体压力的半经验关系式和预测方法, 在忽略土-结构相互作用的情况下, 给出了一种感生地冲击和直接地冲击的简化计算形式。Wu 等<sup>[11]</sup>基于对地面爆炸的一系列参数化数值模拟, 确定了可以应用于结构响应分析的地冲击和空气冲击波荷载。然后, 他们以单层砌体填充的钢筋混凝土框架为例, 计算了结构在地冲击和空气冲击波共同作用下, 或单独在地冲击和空气冲击波作用下的动力响应和损伤<sup>[12]</sup>。范俊余等<sup>[13]</sup>结合 Alekseenko 等<sup>[9]</sup>的试验现象, 对炸药地面爆炸条件下浅地表波场的分布以及作用到土中浅埋结构上的荷载进行了数值模拟研究, 发现典型土中浅埋结构的顶板主要承受感生地冲击的作用, 外墙主要承受直接地冲击的作用。柳锦春等<sup>[14]</sup>基于数值模拟结果和试验数据, 对根据一维平面波理论和特征线解法得到的空气冲击波为突加三角形荷载的感生地冲击的理论计算公式进行修正, 提出了炸药地面接触爆炸下土中感生地冲击的实用计算方法。杨仁华等<sup>[15]</sup>采用平面装药

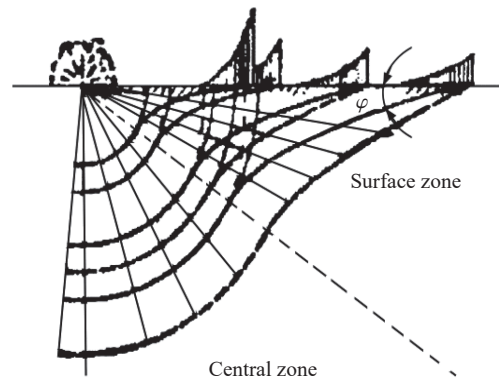


图 1 波阵面的连续位置<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Successive locations of wave fronts<sup>[9]</sup>

方法进行了核弹空爆试验模拟研究, 给出了间接地冲击在黄土中的衰减规律。吴祥云等<sup>[16]</sup>通过石灰岩中不同装药深度的爆炸试验, 研究了石灰岩中装药埋深对地表空气冲击波超压的影响, 给出了不同埋深爆炸地表空气冲击波超压峰值的预计方法。Krauthammer 等<sup>[17-18]</sup>和 Chee<sup>[19]</sup>基于高能炸药模拟技术(high explosive simulation technique, HEST)试验, 提出了一种改进的单自由度(single-degree-of-freedom, SDOF)方法, 并对浅埋钢筋混凝土箱形结构在空气冲击波荷载下的受力性能进行了一系列研究。荣吉利等<sup>[20]</sup>提出了考虑感生冲击波与直接冲击波叠加效应的核爆地冲击描述方法, 并以美军核爆地冲击试验为例研究了核爆地冲击作用下土体运动特性。

为了研究爆炸条件下土中直接地冲击和感生地冲击的影响范围, 本文中利用 ANSYS/AUTODYN 软件<sup>[21]</sup>建立二维轴对称有限元模型, 开展土中爆炸地冲击效应数值模拟分析; 通过黄土中爆炸试验, 测得不同比例爆距上地面空气冲击波超压和土中直接地冲击竖向应力, 并以此进行计算模型的验证; 利用验证后的计算模型, 对装药不同比例埋深和不同类型炸药的土中爆炸进行数值模拟; 根据不同工况的计算结果, 获得不同爆炸条件下土中感生地冲击和直接地冲击荷载的作用特征, 并以此对地冲击作用区域进行划分; 最后分析影响地冲击作用区的关键参数。

## 1 计算模型

### 1.1 几何模型

建立了如图 2 所示的模型, 该模型由炸药、空气和黄土 3 部分组成, 其中, 对炸药和空气采用欧拉算法, 对黄土采用拉格朗日算法。数值模拟中采用 ANSYS/AUTODYN 软件的自动流固耦合算法。炸药装药为圆柱体, 起爆点为炸药的几何中心。

计算工况如表 1 所示。B1~B10 为 TNT 炸药不同比例埋深的工况, 装药量为 1 kg, 比例埋深分别为 -0.05、-0.025、0、0.025、0.05、0.075、0.1、0.2、0.3 和 0.4 m/kg<sup>1/3</sup>。C1~C12 为不同类型炸药的工况, 不同工况以炸药的初始比内能  $E_0$  为依据进行等效处理。炸药类型分别为 ANFO、C4、EXPLOS.D、HMX、HNS 1.65、NM、PBX9407、PBX9502、PETN 1.77、SEISMOPLAS、TETRYL、TNT。

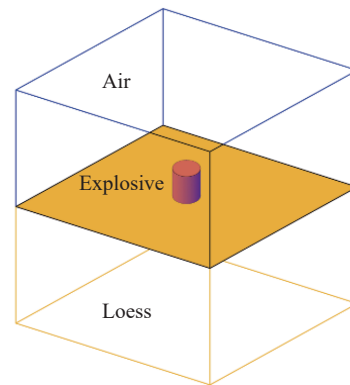


图 2 爆炸模型

Fig. 2 The explosion model

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况	炸药类型	装药量/kg	装药比例埋深/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	装药半径/mm	装药高度/mm
B1	TNT	1	-0.05	44.2	100
B2	TNT	1	-0.025	44.2	100
B3	TNT	1	0	44.2	100
B4	TNT	1	0.025	44.2	100
B5	TNT	1	0.05	44.2	100
B6	TNT	1	0.075	44.2	100
B7	TNT	1	0.1	44.2	100
B8	TNT	1	0.2	44.2	100

表 1 (续)  
Table 1 (Continued)

工况	炸药类型	装药量/kg	装药比例埋深/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	装药半径/mm	装药高度/mm
B9	TNT	1	0.3	44.2	100
B10	TNT	1	0.4	44.2	100
C1	ANFO	1.380	0	61.8	123.6
C2	C4	0.655	0	40.2	80.4
C3	EXPLOS.D	0.968	0	47.7	95.4
C4	HMX	0.663	0	38.2	76.4
C5	HNS 1.65	0.815	0	42.8	85.6
C6	NM	0.814	0	48.6	97.2
C7	PBX9407	0.685	0	40.8	81.6
C8	PBX9502	0.987	0	43.6	87.2
C9	PETN 1.77	0.645	0	38.7	77.4
C10	SEISMOPLAS	0.835	0	43.7	87.4
C11	TETRYL	0.777	0	41.5	83.0
C12	TNT	1	0	46.0	92.0

### 1.2 有限元模型

考虑到计算模型的对称性,建立了二维轴对称有限元模型<sup>[22]</sup>,计算域尺寸为 4 m×8 m,如图 3(a)所示。其中,空气尺寸为 4 m×8 m,炸药通过 Fill 命令填充在空气中。如图 3(b)所示,欧拉域的左边界为对称边界,其他 3 条边界为流出边界。如图 3(c)所示,拉格朗日域的左边界为对称边界,下边界和右边界为传输边界,其余边界为自由边界。

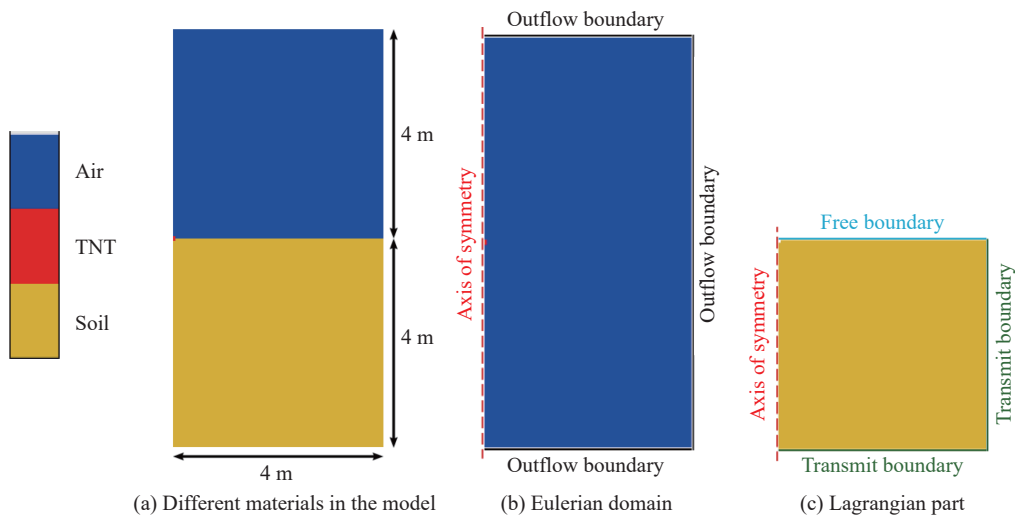


图 3 有限元模型和边界条件

Fig. 3 The finite element model and boundary conditions

如表 1 所示,对于计算工况 B1~B10,炸药尺寸为 $\varnothing 88.4 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。黄土的宽度为 4 m,随装药比例埋深的增大,黄土的高度略有差别。炸药附近区域的局部放大如图 4 所示,炸药放置位置以上为空气,以此模拟钻地武器的钻地效果。对于计算工况 C1~C12,炸药密度和装药量的不同导致装药尺寸略有差别,黄土的宽度为 4 m,高度为 4 m。

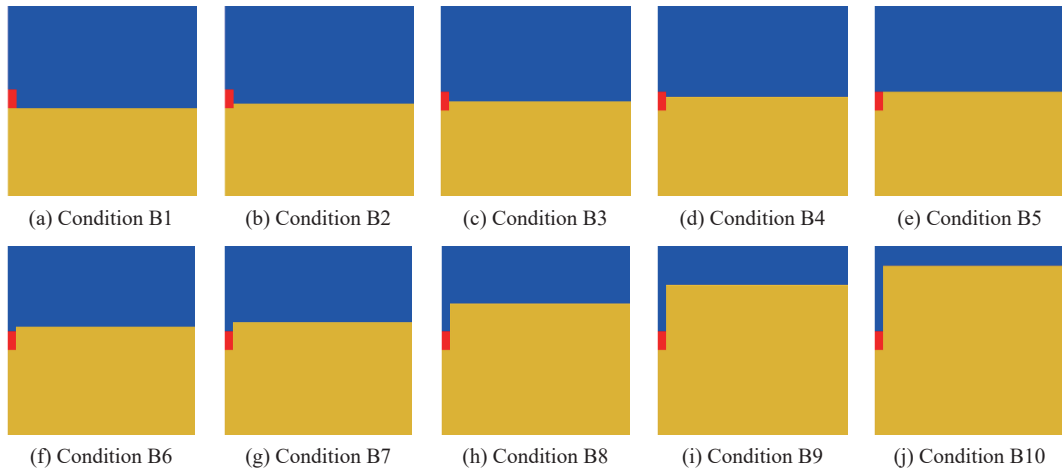


图 4 工况 B1~B10 下炸药附近区域的放大

Fig. 4 Enlarged details near TNT under conditions B1-B10

以工况 B3 为例, 图 5 给出了有限元模型的网格划分情况。炸药网格的径向长度为 4.42 mm, 高度方向长度为 5 mm。对空气和黄土以炸药网格的尺寸为基础采用渐变网格, 空气网格的最小尺寸为 4.42 mm×5.0 mm, 黄土网格的最小尺寸为 8.84 mm×10.0 mm。整个有限元模型中, 欧拉单元为 165 000 个, 拉格朗日单元为 36 000 个, 共 201 000 个单元。

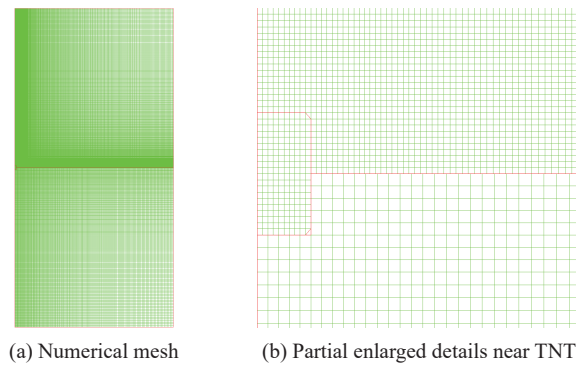


图 5 数值网格

Fig. 5 Numerical mesh

### 1.3 材料模型

#### 1.3.1 炸药

炸药采用 ANSYS/AUTODYN 内置材料库中的炸药模型<sup>[23]</sup>。Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程常用来描述炸药的爆炸和膨胀, 其表达式如下<sup>[24]</sup>:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中:  $V$  为相对体积,  $V=1/\rho$ ;  $E_0$  为初始比内能;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为特征参数。炸药模型参数取值如表 2 所示<sup>[23]</sup>, 表中  $\rho_0$  为炸药的初始密度,  $D_d$  为炸药的爆速,  $p_d$  为炸药的爆压。

#### 1.3.2 空气

对空气采用 ANSYS/AUTODYN 内置材料库中的 AIR 模型<sup>[25]</sup>, 其状态方程为:

$$p = (\gamma - 1) \rho E_0 \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为理想气体等熵绝热指数,  $\rho$  为气体密度,  $E_0$  为初始比内能。本文中空气的初始密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>,  $\gamma=1.4$ ,  $E_0=206.8$  J/g, 比热容为 717.6 J/(kg·K), 参考温度为 288.2 K, 这些参数均取自文献 [25]。

表 2 炸药参数<sup>[23]</sup>  
Table 2 Explosive parameters<sup>[23]</sup>

工况	炸药类型	$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$D_d/(m \cdot s^{-1})$	$p_d/GPa$	$E_d/(GJ \cdot m^{-3})$
C1	ANFO	0.931	49.46	1.891	3.907	1.118	0.333	4160	5.15	2.484
C2	C4	1.601	609.77	12.95	4.5	1.4	0.25	8193	28	9.0
C3	EXPLOS.D	1.42	300.7	3.94	4.3	1.2	0.35	6500	16	5.4
C4	HMX	1.891	778.28	7.0714	4.2	1.0	0.30	9110	42	10.5
C5	HNS 1.65	1.65	463.1	8.873	4.55	1.35	0.35	7030	21.5	7.45
C6	NM	1.128	209.25	5.689	4.4	1.2	0.30	6280	12.5	5.1
C7	PBX9407	1.60	573.2	14.64	4.6	1.4	0.32	7910	26.5	8.6
C8	PBX9502	1.895	460.3	9.544	4.0	1.7	0.48	7710	30.2	7.07
C9	PETN 1.77	1.77	617.05	16.926	4.4	1.2	0.25	8300	33.5	10.1
C10	SEISMOPLAS	1.588	620.60	23.27	5.399	1.651	0.282	7200	20.5	7.0
C11	TETRYL	1.73	586.83	10.671	4.4	1.2	0.275	7910	28.5	8.2
C12	TNT	1.63	373.77	3.7471	4.15	0.9	0.35	6930	21.0	6.0
B1~B10	TNT	1.63	373.77	3.7471	4.15	0.9	0.35	6930	21.0	6.0

1.3.3 黄土

对黄土采用 ANSYS/AUTODYN 软件内置材料库中的 SAND 模型<sup>[26]</sup>。Laine 等<sup>[27]</sup>根据砂土在动态加载条件下的响应提出了 SAND 模型,并基于该模型进行了一系列数值模拟研究<sup>[28-30]</sup>。SAND 模型主要包括状态方程与颗粒强度模型 2 个部分。ANSYS/AUTODYN 软件中的压实态状态方程分为线性和非线性 2 类, SAND 模型选用的是线性压实态状态方程。压实态状态方程还可以与多种强度模型、失效模型共同描述材料的力学行为。颗粒强度模型是 Drucker-Prager 强度模型<sup>[31]</sup>的拓展,考虑了包括粉末、黏土和砂土等颗粒介质的强度。除了压力强化效应, SAND 模型还描述了密度强化效应以及剪切模量与密度之间的函数关系。表 3 为 SAND 模型输入的参数值<sup>[32-33]</sup>。

表 3 SAND 模型参数<sup>[32-33]</sup>  
Table 3 Parameters of the SAND model<sup>[32-33]</sup>

冲击压实方程(参考密度 $\rho=2.641 g/cm^3$ )				颗粒强度模型			
压力/MPa	密度1/( $g \cdot cm^{-3}$ )	声速/( $km \cdot s^{-1}$ )	密度2/( $g \cdot cm^{-3}$ )	压力/MPa	强度/MPa	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	剪切模量/GPa
0	1.674	0.2652	1.674	0	0	1.674	0.077
4.577	1.739	0.8521	1.745	3.40	4.23	1.746	0.869
14.98	1.874	1.722	2.086	3.49	44.7	2.086	4.03
29.15	1.997	1.875	2.147	101	124	2.147	4.91
59.17	2.144	2.265	2.300	185	226	2.300	7.77
98.09	2.250	2.956	2.572	500	226	2.572	14.8
179.4	2.380	3.112	2.598			2.598	16.6
289.4	2.485	4.600	2.635			2.635	36.7
450.2	2.585	4.634	2.641			2.641	37.3
650.7	2.670	4.634	2.800			2.800	37.3
				静水拉力极限 $p_{min} = -1.00 kPa$			

注: (1)利用压力与密度1的分段线性函数来描述砂土的塑性压实过程; (2)利用声速与密度2的分段线性函数来描述砂土的弹性加载和卸载过程。

试验时,土介质为洛阳地区的黄土<sup>[34-36]</sup>,该黄土比重为 2.54~2.84,干密度为 1200~1790  $kg/m^3$ ,天然含水率为 10%~15%,黏聚力为 30~60 kPa,内摩擦角为 15°~25°。洛阳地区黄土的压力  $p$ (Pa)与体积应变  $\varepsilon$ 的关系为<sup>[37-38]</sup>:

$$p = 8.626 \times 10^5 \exp(18.93\varepsilon) \quad (3)$$

因此, 基于式 (3) 对 SAND 模型中冲击压实方程的压力与密度  $\rho$  的对应关系进行修正, 如表 4 所示。

表 4 线性压实状态方程中压力与密度  $\rho$  的关系(基于式 (3))

Table 4 Relationship between pressure and density  $\rho$  in the compaction linear equation of state (based on formula (3))

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	体应变 $\varepsilon_i = 1 - \rho_i / \rho_{i+1}$	累积体应变 $\varepsilon$	修正后压力 / MPa
1.674	0	0	0
1.739	0.03738	0.03738	1.750
1.874	0.07204	0.10942	6.844
1.997	0.06159	0.17101	21.96
2.144	0.06856	0.23957	80.42
2.250	0.04711	0.28668	196.2
2.380	0.05462	0.34131	551.8
2.485	0.04225	0.38356	1227.8
2.585	0.03868	0.42224	2553.6
2.670	0.03184	0.45408	4665.3

## 2 计算模型的试验验证

### 2.1 试验概况

图 6 为土中接触爆炸和半埋爆炸的布置图, TNT 炸药的比例埋深分别为  $-0.05$  和  $0.0$  m/kg<sup>1/3</sup>。地面布置空气冲击波超压测点 A1~A4, 土中爆心正下方布置直接地冲击竖向应力测点 S1~S4。

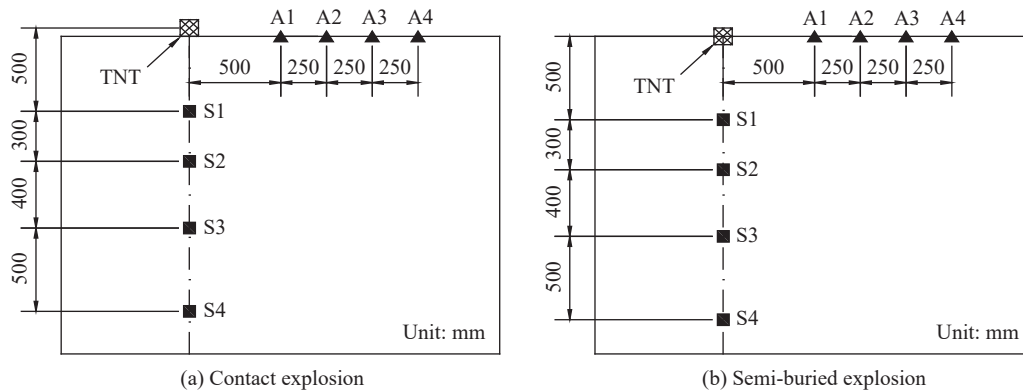


图 6 测试布置

Fig. 6 Test arrangements

试验中采用 PCB 压力传感器(见 图 7(a))测试地面空气冲击波超压, 采用电荷式压力传感器(见 图 7(b))测试土中应力。图 6 给出了 8 个传感器的位置, 4 个地面空气冲击波超压测点距爆心水平距离分别为 0.50、0.75、1.00 和 1.25 m, 4 个土中直接地冲击竖向应力测点的爆心距分别为 0.5、0.8、1.2 和 1.7 m。回填黄土的密度控制在 1 600~1 700 kg/m<sup>3</sup> 范围内。数据采集仪选用了东华测试公司生产的 DH5960 超动态信号测试分析仪(见 图 7(c)), 采样频率高达 1 MHz。



图 7 试验中的测量仪器

Fig. 7 Measuring instrumentation used in test

### 2.2 试验方案

试验共进行 2 炮次, 工况见表 5, 试验工况 E1 和 E2 分别对应数值模拟中的工况 B1 和 B3。图 8 为试验准备完成后的现场布置。炸药采用电雷管起爆, 将电雷管插入炸药中间, 使得起爆点接近炸药中心位置。

表 5 试验工况

Table 5 Test conditions

工况	装药量/kg	装药比例埋深/(m·kg <sup>-1/3</sup> )	地面空气冲击波超压测点	土中直接地冲击竖向应力测点
E1	1	-0.05	A1~A4	S1~S4
E2	1	0.00		

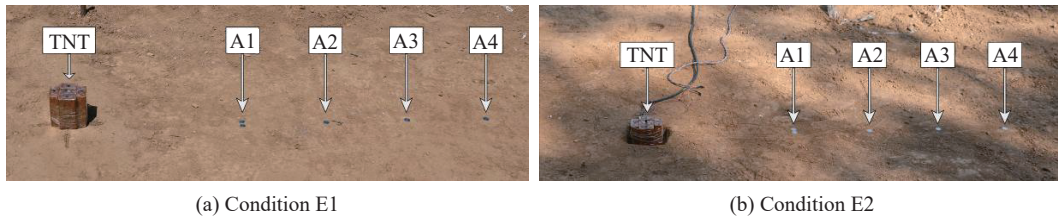


图 8 试验前现场布置

Fig. 8 Site layout before the test

### 2.3 试验结果与计算模型验证

图 9 为试验后的破坏情况。将坑底回落的土进行清理后, 测得试验 E1 的真实爆坑直径约为 69.0 cm, 真实爆坑深度约为 23.5 cm; 试验 E2 的真实爆坑直径约为 87.0 cm, 真实爆坑深度约为 27.5 cm。根据图 9 中传感器的位置判断, 试验 E1 的爆坑唇缘直径约为 140 cm, 试验 E2 的爆坑唇缘直径约为 160 cm。

采用截止频率为 2 000 Hz 的低通滤波方法处理试验数据, 这 2 次试验中各测点的时程曲线如图 10 所示, 由于数据异常, 部分测点未给出曲线。对比这 2 次试验数据, 随着装药比例埋深的增大, 地面空气冲击波超压峰值减小, 而土中直接地冲击应力峰值增大。图 10~12 和表 6 给出了试验与数值模拟结果的荷载峰值对比情况。其中, 图 10 测得的地下应力, 在不同距离的传感器上测得波形在相同的时间均出现 1 个类似的负向跳动, 这是由于试验时传感器距离爆心较近, 受到爆炸产生的电磁干扰。经计算, 试验数据与数值模拟结果的平均偏差约为 14.8%。由此表明, 试验与模拟结果的一致性较好, 可利用该计算模型做进一步分析研究。



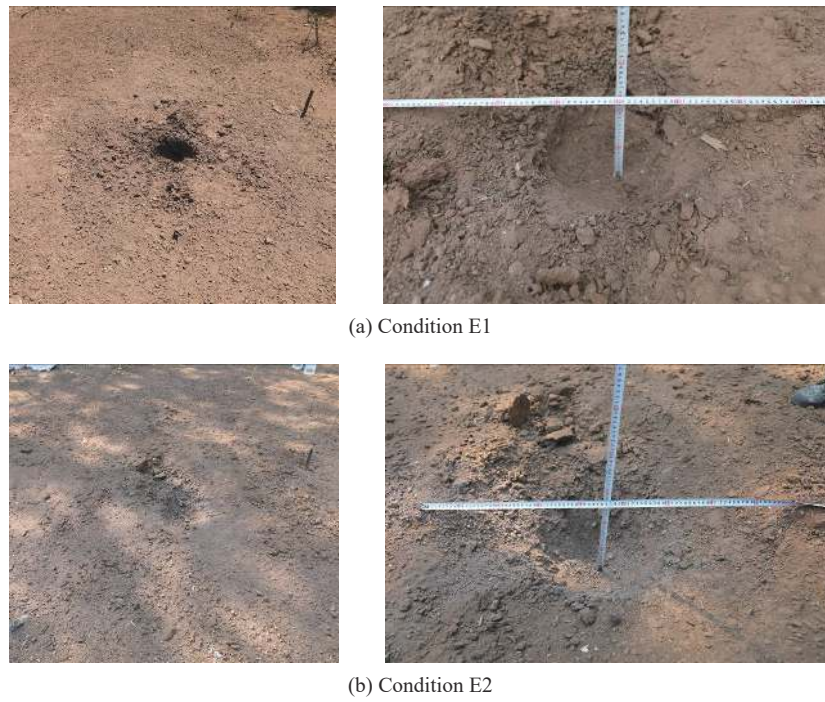


图 9 试验后破坏情况  
Fig. 9 Damages after the tests

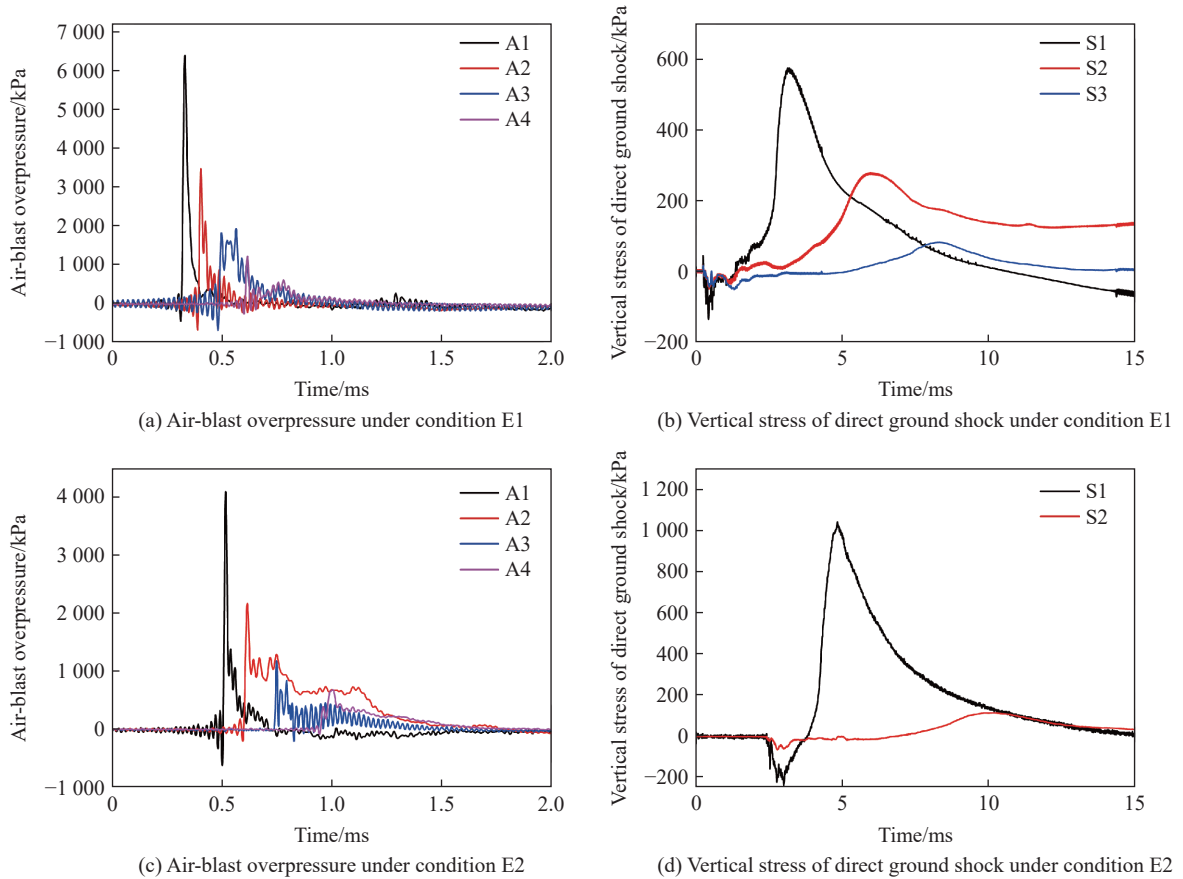


图 10 地面空气冲击波超压和土中直接地冲击竖向应力时程曲线试验结果  
Fig. 10 Tested time history curves of air-blast overpressure and vertical stress of direct ground shock

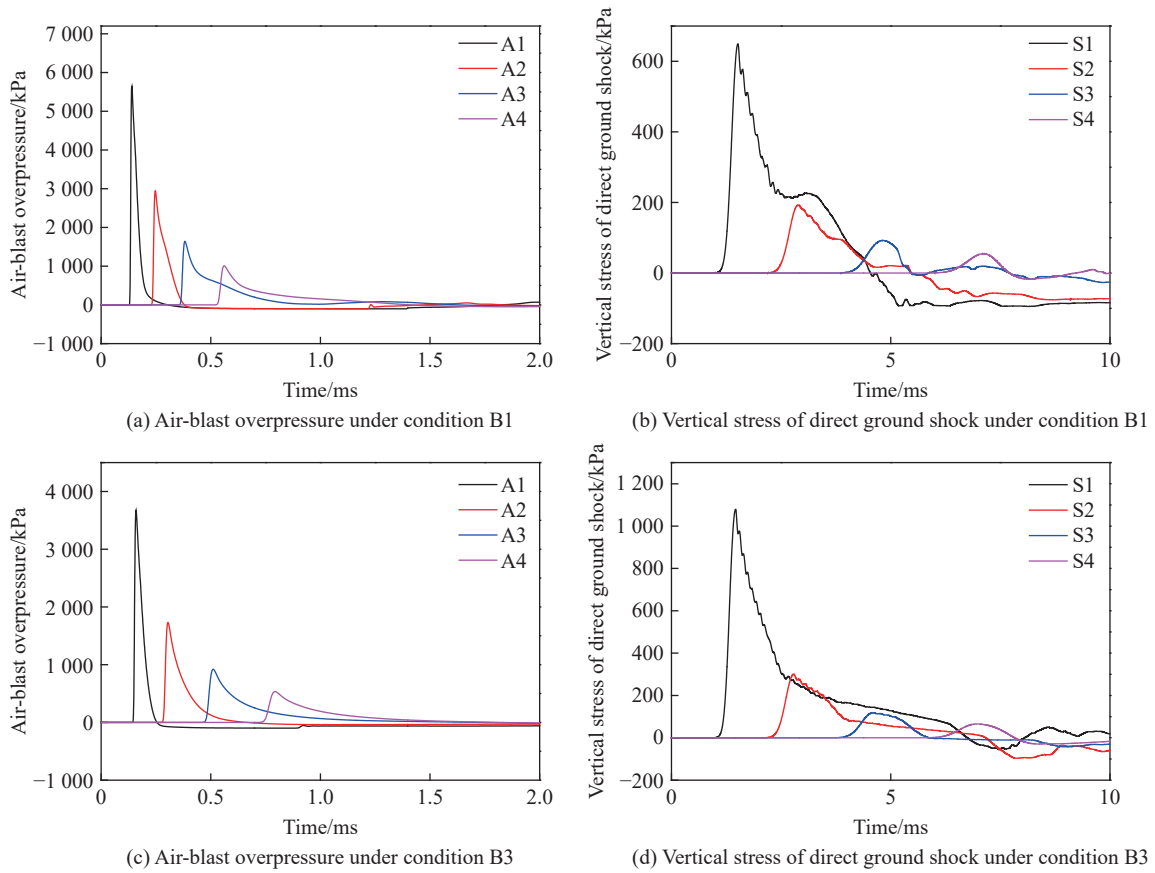


图 11 地面空气冲击波超压和土中直接地冲击竖向应力时程曲线数值模拟结果

Fig. 11 Numerically-simulated time history curves of air-blast overpressure and vertical stress of direct ground shock

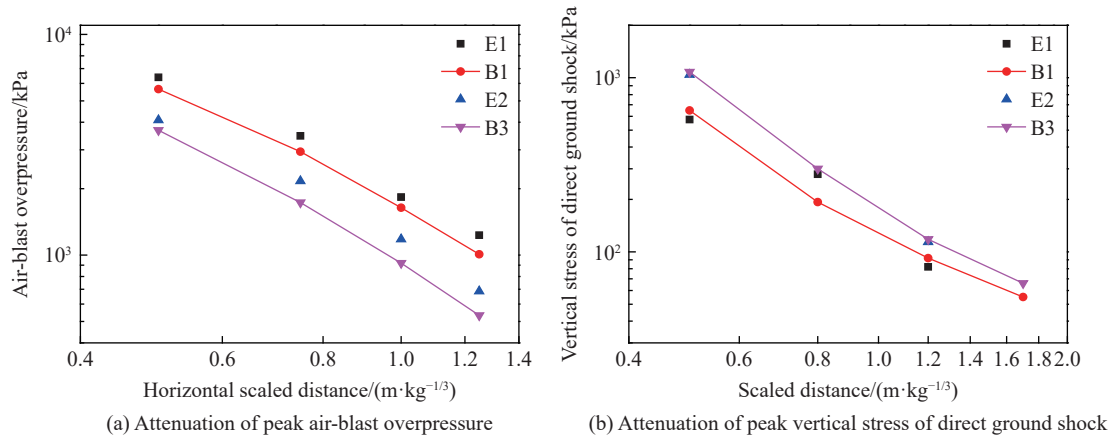


图 12 试验与数值模拟数据对比

Fig. 12 Comparison of tests and simulations

表 6 试验与数值模拟荷载峰值

Table 6 Peak loads obtained by tests and simulations

工况	测点	荷载峰值			工况	测点	荷载峰值		
		模拟值/kPa	试验值/kPa	偏差/%			模拟值/kPa	试验值/kPa	偏差/%
E1(B1)	A1	5650	6394	11.6	E2(B3)	A1	3678	4092	10.1
	A2	2943	3470	15.2		A2	1731	2167	20.1

表 6 (续)  
Table 6 (Continued)

工况	测点	荷载峰值			工况	测点	荷载峰值		
		模拟值/kPa	试验值/kPa	偏差/%			模拟值/kPa	试验值/kPa	偏差/%
E1(B1)	A3	1640	1832	10.5	E2(B3)	A3	920	1180	22.0
	A4	1008	1231	18.1		A4	533	686	22.3
	S1	649	575	12.9		S1	1079	1041	3.7
	S2	193	279	30.8		S2	300		
	S3	92	82	12.2		S3	118	114	3.5
	S4	55				S4	66		

### 3 地冲击作用分区

#### 3.1 感生地冲击影响范围

基于已验证的计算模型,对土中爆炸地冲击效应作进一步数值模拟研究。以工况 B3 为例,其压力云图如图 13 所示,从图中发现土中应力波的时空分布与图 1<sup>[9]</sup>相符,可将地冲击作用区域划分为表面区(即区域 A 和 B)和中心区(区域 C)。

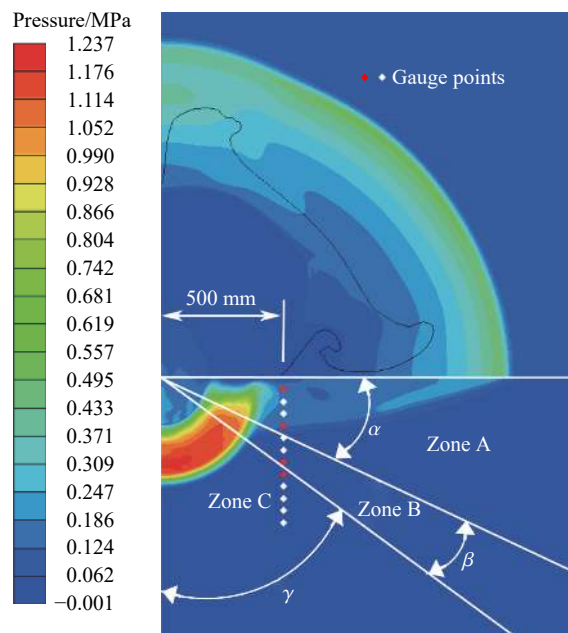


图 13 工况 B3 下的压力云图

Fig. 13 Pressure contours under condition B3

图 14(a) 为表面区中地下 5 cm 处压力时程曲线,该时程曲线存在 2 个明显的峰值(即感生地冲击峰值和直接地冲击峰值)。图 14(b) 为中心区中地下 40 cm 处压力时程曲线,该时程曲线只存在 1 个峰值(即直接地冲击峰值)。由地下 5 cm 至地下 40 cm 处的压力时程曲线从 2 个峰值减少为 1 个峰值,表明随着深度的增加,地冲击作用区域的受力特征从感生地冲击与直接地冲击共同作用演变为主要受直接地冲击作用。进一步分析表面区的受力特征,如图 15(a) 所示,在区域 A 中地下 20 cm 处的竖向应力时程曲线存在 2 个峰值,且感生地冲击应力峰值明显大于直接地冲击应力峰值,此时感生地冲击起主导作用。随着深度增加,在区域 B 中地下 35 cm 处的竖向应力时程曲线如图 15(b) 所示,此时同样存在 2 个峰值,但感生地冲击应力峰值与直接地冲击应力峰值相当,说明该区域受感生地冲击和直接地冲击联合作用。

用。根据表面区中不同深度竖向应力的特征, 将表面区划分为地表区(区域 A)和近地表区(区域 B)。图 14 和图 15 中地下测点具体位置在图 13 中用红色点进行标注。

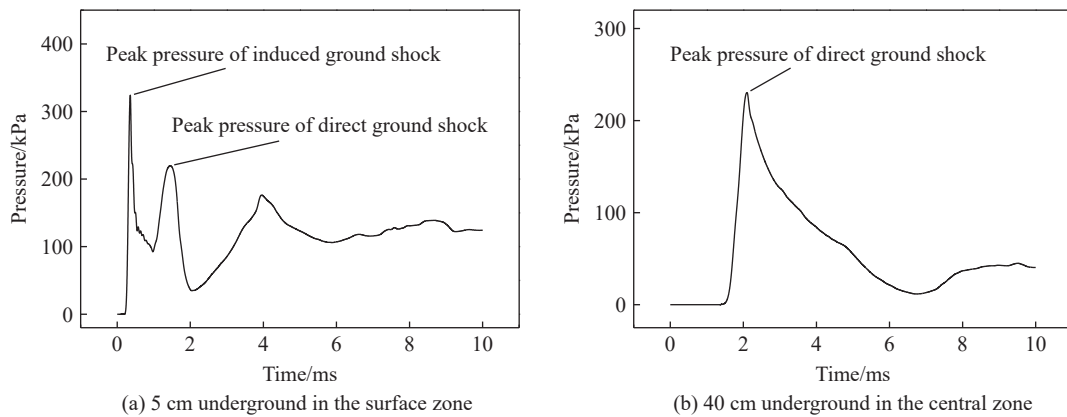


图 14 工况 B3 下爆心水平距离 0.5 m 处的压力时程曲线

Fig. 14 Pressure-time curves at the horizontal distance of 0.5 m from the detonation point under condition B3

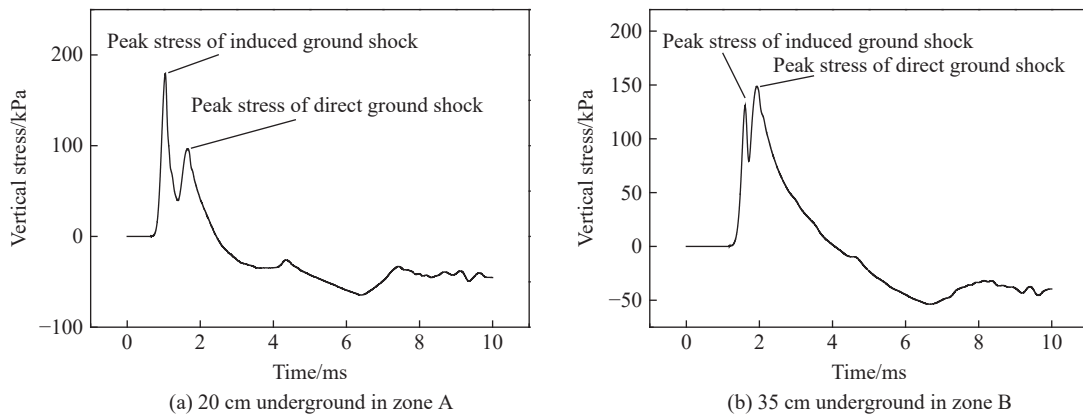


图 15 工况 B3 下爆心水平距离 0.5 m 处竖向应力时程曲线

Fig. 15 Vertical stress time curves at the horizontal distance of 0.5 m from the detonation point under condition B3

### 3.2 装药比例埋深的影响

图 16 是工况 B1~B10 下 1.0 ms 时的压力云图, 为了方便对比, 压力云图截取了炸药周围  $2.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$  的区域。图 16 的压力云图采用了相同的标尺, 可以发现相同时刻下, 随着装药比例埋深的增加, 黄土中直接地冲击的作用范围和压力值逐渐增大, 而接近地面处空气冲击波的作用范围和压力值逐渐减小。

图 17 以工况 B3 为例, 给出了数值模拟的总能量时程曲线和计算模型中空气、黄土和 TNT 的动能时程曲线。由图 17(a) 可知, 在 6.4 ms 左右, 空气冲击波到达流出边界, 随后空气冲击波溢出流出边界, 导致计算模型的能量逐渐降低。在 6.4 ms 时, 能量守恒误差为  $2.479 \times 10^5 \text{ J}$ , 计算模型能量为  $5.377 \times 10^7 \text{ J}$ , 能量守恒误差约为计算模型能量的 0.46%; 在计算终止时刻 10 ms 时, 能量守恒误差为  $2.532 \times 10^5 \text{ J}$ , 计算模型能量为  $4.898 \times 10^7 \text{ J}$ , 能量守恒误差约为计算模型能量的 0.52%。由图 17(b) 可知, 计算模型中空气、黄土和 TNT 炸药的动能达到峰值的时间均在 1 ms 以内, 此时空气冲击波尚未溢出流出边界。

图 18 给出了空气和黄土的动能峰值随装药比例埋深的变化情况。随装药比例埋深的增加, 空气的动能峰值迅速减小, 在装药比例埋深达到  $0.1 \text{ m/kg}^{1/3}$  后趋于稳定; 黄土的动能峰值迅速增大, 在装药比例埋深达到  $0.05 \text{ m/kg}^{1/3}$  后趋于稳定。这说明随着装药比例埋深的增加, 空气冲击波获得的能量越来越少, 更多的能量耦合进入黄土介质, 这将导致感生地冲击影响范围减小。

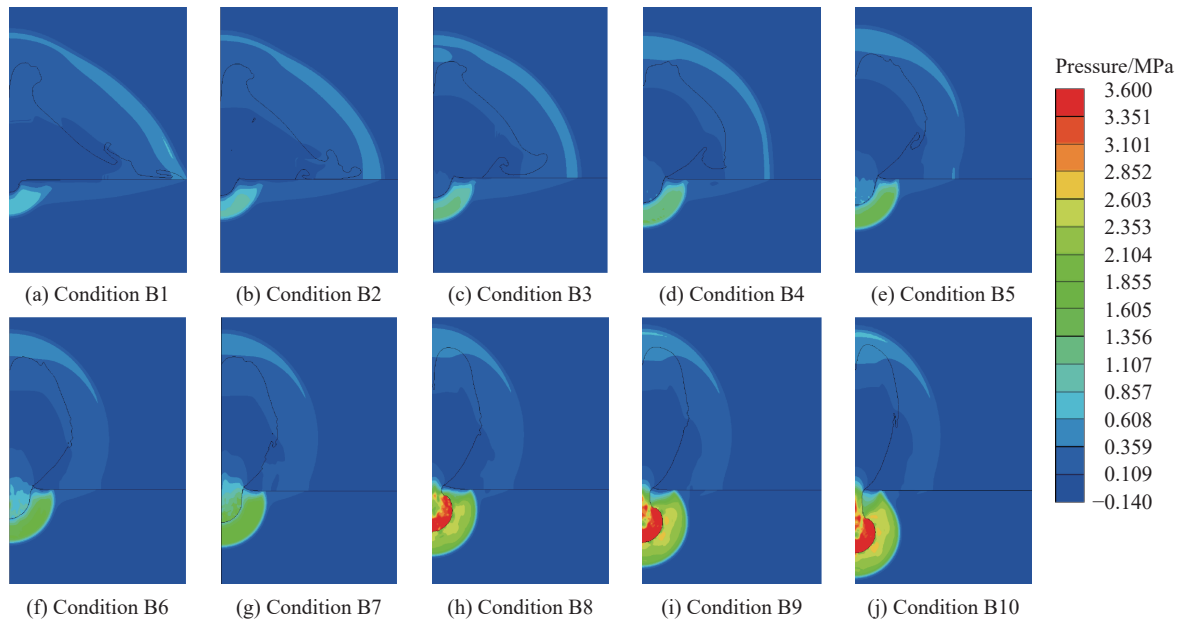


图 16 工况 B1~B10 下 1.0 ms 时的压力云图

Fig. 16 Pressure contours at 1.0 ms under conditions B1-B10

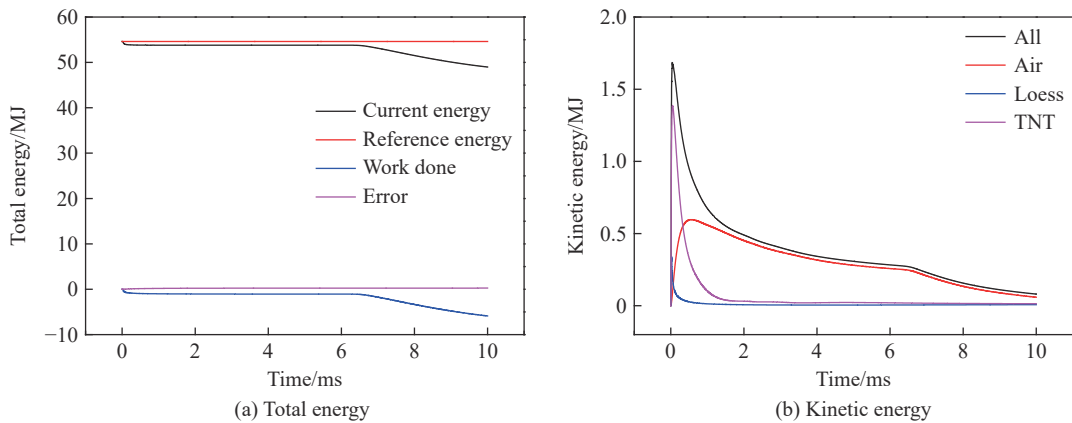


图 17 工况 B3 下的能量时程曲线

Fig. 17 Energy time history curves under condition B3

如图 19(a) 所示, 以地平线为角的一条边, 以对称轴和地平线的交点  $O$  为顶点; 从距离点  $O$  水平距离 500 mm 处的点  $H$  向下选取数据测点。通过对比分析  $H$  点正下方不同深度处数据测点的压力时程曲线, 同时根据压力云图中波阵面经过数据测点的大致时间, 可以发现, 随着深度的加深, 感生地冲击压力峰值迅速减小。在一定深度后, 从压力时程曲线上只能观察到直接地冲击峰值, 观察不到感生地冲击峰值。图 19(b) 仅展示部分数据测点, 实际为了判断准确, 所取数据测点间隔更小。存在某一深度处测点的压力时程曲线从 2 个明显的峰值转变为 1 个明显的峰值, 取这一点为点  $N$ , 用  $90^\circ$  减去  $\angle HON$  即

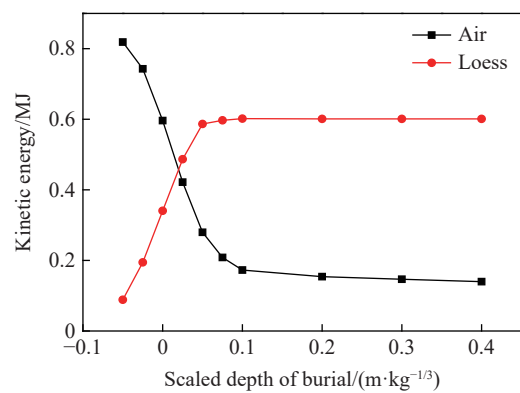


图 18 工况 B1~B10 下空气和黄土的动能峰值随装药比例埋深的变化

Fig. 18 Peak kinetic energy of air and loess varying with charge scaled depth of burial under conditions B1-B10

为  $\gamma$  的大小。然后, 对比点  $H$  和点  $N$  之间的数据测点的竖向应力时程曲线(见图 19(c)), 可以发现, 随着深度的增加, 感生地冲击竖向应力峰值减小, 直接地冲击竖向应力峰值增大。存在某一深度处测点的竖向应力时程曲线中, 感生地冲击和直接地冲击的竖向应力峰值相等, 取这一点为点  $M$ , 则  $\angle HOM = \alpha$ ,  $\angle HON - \angle HOM = \beta$ 。

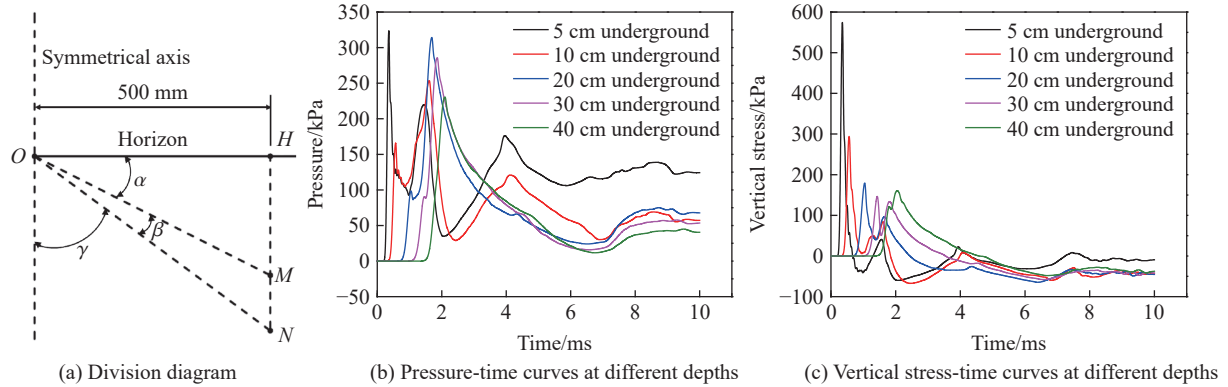


图 19  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的取值方法

Fig. 19 Determination methods of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$

图 20 给出了工况 B1~B10 下的数值模拟结果。其中,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别表示图 13 中地表区、近地表区和中心区的角度, 且  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三者之和为  $90^\circ$ 。随装药比例埋深的增大,  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的变化呈较强的规律性。

(1) 当装药比例埋深为  $-0.05 \sim 0.075 \text{ m/kg}^{1/3}$  时, 地冲击作用区角度的变化较剧烈。随着装药比例埋深的增加, 中心区的角度  $\gamma$  迅速增大, 地表区的角度  $\alpha$  迅速减小, 近地表区的角度  $\beta$  逐渐增大。

(2) 当装药比例埋深为  $0.1 \sim 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时, 地冲击作用区的角度趋于稳定。

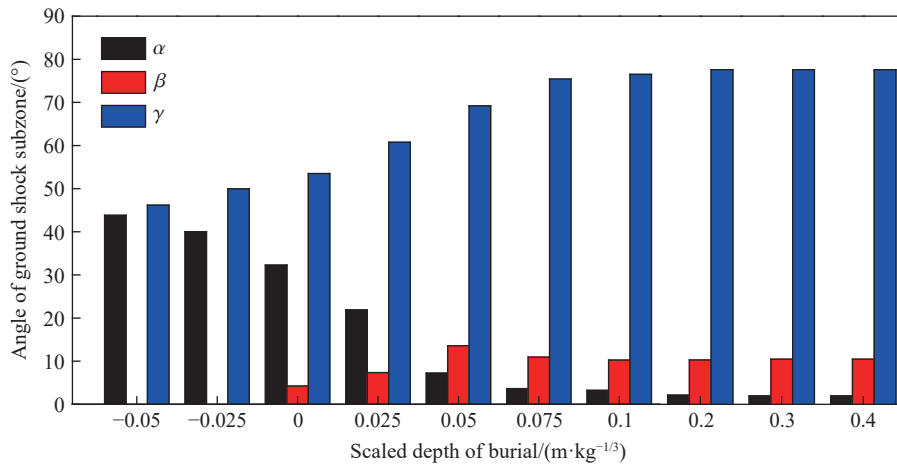


图 20 工况 B1~B10 下地冲击作用区的角度随装药比例埋深的变化

Fig. 20 Angles of ground shock subzones varying with charge scaled depth of burial under conditions B1~B10

### 3.3 炸药类型的影响

图 21 为工况 C1~C12 下 1.0 ms 时的压力云图, 同样截取了炸药周围 2.5 m×3.5 m 的区域。图 22 给出了不同工况下空气和黄土的动能峰值的变化情况。不同工况下, 直接地冲击和感生地冲击压力值不同, 爆炸耦合进入空气和黄土介质动能存在差异, 这将引起不同工况地冲击作用区角度的变化。

表 7 给出了工况 C1~C12 下的数值模拟结果。表 7 中:  $p_{0.5}$  为水平爆心距 0.5 m 处地面空气冲击波超压峰值,  $\sigma_{0.5}$  为爆心正下方 0.5 m 处直接地冲击应力峰值, 其位置可参见图 6(b) 中 A1 和 S1 测点;  $I_a$  为水平爆心距 0.5 m 处地面空气冲击波超压的冲量,  $I_s$  为爆心正下方 0.5 m 处直接地冲击应力的冲量。由图 23

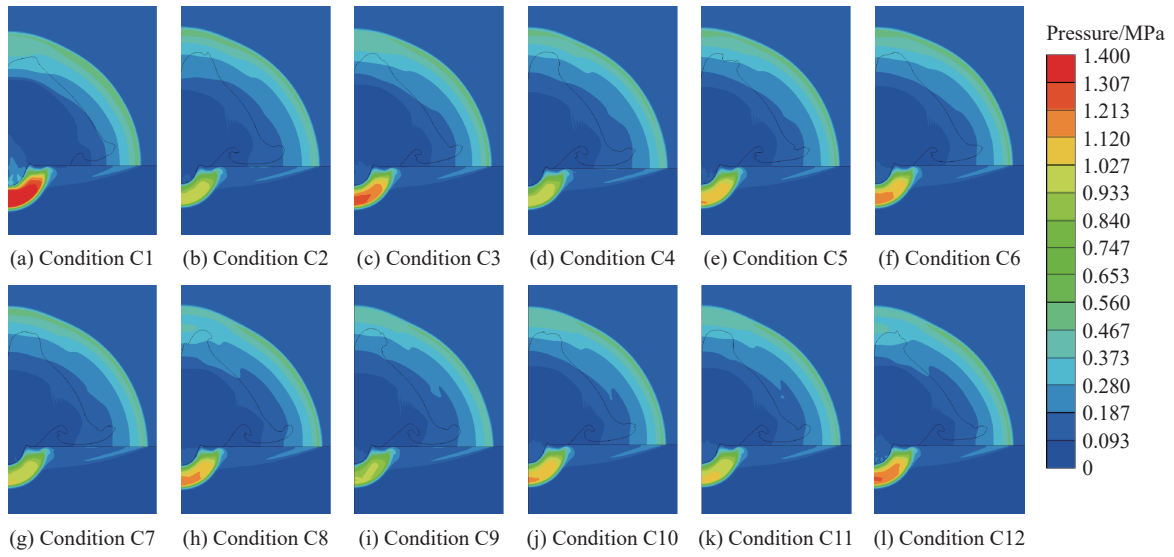


图 21 工况 C1~C12 下 1.0 ms 时的压力云图

Fig. 21 Pressure contours at 1.0 ms under conditions C1-C12

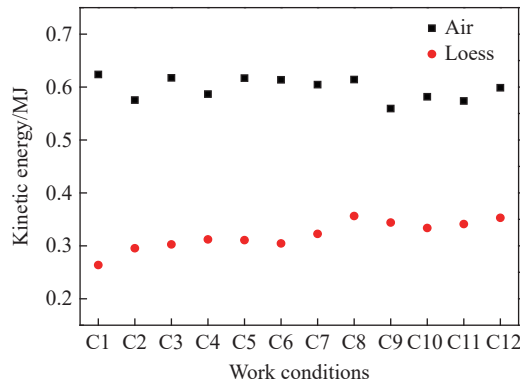


图 22 工况 C1~C12 下空气和黄土的动能峰值

Fig. 22 Peak kinetic energy of air and loess under conditions C1-C12

表 7 工况 C1~C12 下的数值模拟结果

Table 7 Numerically simulated results under conditions C1-C12

工况	炸药类型	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	$p_{0.5}/\text{kPa}$	$\sigma_{0.5}/\text{kPa}$	$I_a/(\text{kPa}\cdot\text{ms})$	$I_v/(\text{kPa}\cdot\text{ms})$	$I_d/I_s$
C1	ANFO	23.12	6.99	59.89	2835.50	1636.93	137.3128	2336.691	0.05876
C2	C4	42.18	0.43	47.39	3733.34	893.77	159.3808	1138.626	0.13998
C3	EXPLOS.D	30.67	4.32	55.01	3451.48	1164.38	147.5805	1575.046	0.09370
C4	HMX	44.51	0.00	45.49	4125.33	849.82	161.8497	1077.647	0.15019
C5	HNS1.65	36.01	1.94	52.05	3794.17	1043.78	153.7076	1364.579	0.11264
C6	NM	34.75	1.75	53.50	3535.13	1121.93	154.8051	1491.994	0.10376
C7	PBX9407	42.09	0.00	47.91	3990.68	894.76	162.5825	1153.090	0.14100
C8	PBX9502	32.66	3.10	54.24	3932.76	1064.81	150.5989	1415.379	0.10640
C9	PETN1.77	45.35	0.00	44.65	3907.44	843.95	162.0005	1058.838	0.15300
C10	SEISMOPLAS	34.59	3.36	52.05	3592.10	983.94	150.9218	1301.707	0.11594
C11	TETRYL	38.58	1.45	49.97	3758.19	963.50	152.3302	1240.691	0.12278
C12	TNT	32.90	3.60	53.50	3562.00	1133.18	146.1541	1515.783	0.09642

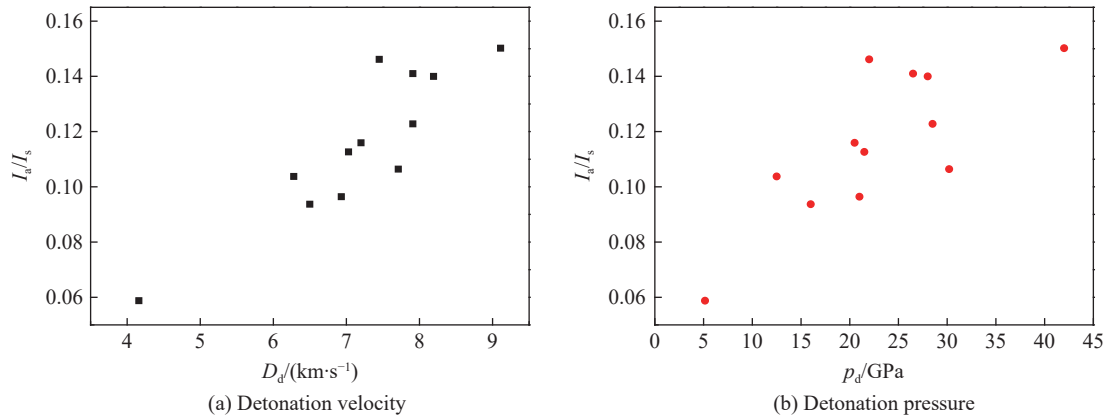


图 23  $I_a/I_s$  随炸药爆速和爆压的变化

Fig. 23 Variation of  $I_a/I_s$  with detonation velocity and detonation pressure of explosive

可知,  $I_a/I_s$  随炸药爆速和爆压的升高呈增大的趋势, 即随着炸药爆速和爆压的升高, 地面空气冲击波超压的冲量增大, 而直接地冲击应力的冲量减小。

经分析, 发现当  $I_a/I_s$  的取值范围为 0.058 76~0.153 00 时, 地冲击作用区角度与地面空气冲击波超压冲量和直接地冲击应力冲量之比呈线性相关关系(见图 24), 拟合后可得到:

$$\begin{cases} \alpha = 9.255 17 + 234.019 63 I_a/I_s \\ \beta = 10.899 93 - 74.470 72 I_a/I_s \\ \gamma = 69.844 90 - 159.548 91 I_a/I_s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的单位均为 ( $^\circ$ )。

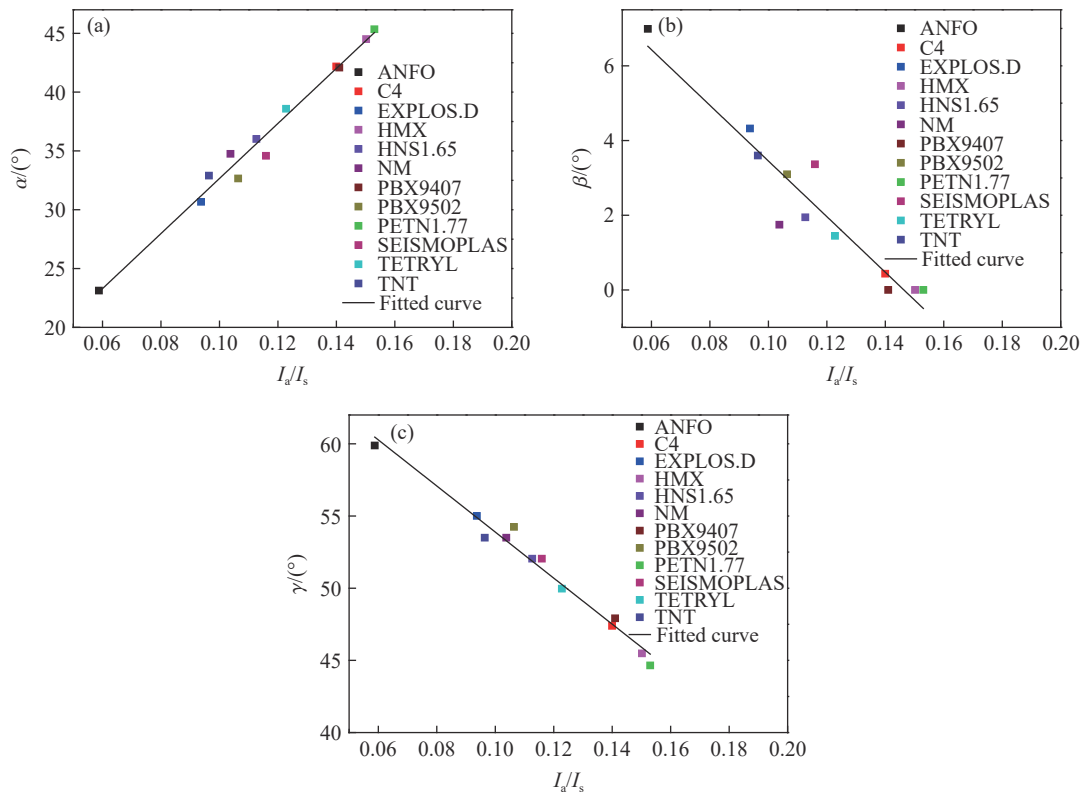


图 24  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  随  $I_a/I_s$  的变化

Fig. 24 Variation of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  with  $I_a/I_s$



## 4 结 论

针对土中爆炸应力波的时空分布问题,以数值模拟分析为主要手段,并辅以土中爆炸试验,得到以下主要结论。

(1) 通过黄土中接触爆炸和半埋爆炸试验,得到了不同比例爆距上地面空气冲击波超压和土中直接地冲击竖向应力,并以此验证了所建立计算模型的有效性。

(2) 根据土中不同深度压力和竖向应力的特征,将土中应力波场划分为地表区、近地表区和中心区。地表区的时程曲线出现 2 个峰值,且感生地冲击起主导作用;近地表区的时程曲线同样出现 2 个峰值,且受感生地冲击和直接地冲击的联合作用;中心区的时程曲线仅出现 1 个峰值,主要受直接地冲击的作用。

(3) 通过研究不同装药比例埋深爆炸工况,发现当装药比例埋深为  $-0.05 \sim 0.075 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,随着装药比例埋深的增加,土中应力波场的中心区迅速增大,地表区迅速减小,近地表区逐渐增大;当装药比例埋深为  $0.1 \sim 0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,地冲击作用区的分布趋于稳定。

(4) 通过研究装药比例埋深为  $0.0 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,不同类型炸药爆炸工况,发现随着炸药爆速和爆压的增加,地面空气冲击波超压的冲量增大,而直接地冲击应力的冲量减小,在一定范围内,地冲击作用区角度与地面空气冲击波超压冲量和直接地冲击应力冲量之比呈线性相关关系。

## 参考文献:

- [1] WU C, LU Y, HAO H, et al. Characterisation of underground blast-induced ground motions from large-scale field tests [J]. *Shock Waves*, 2003, 13(3): 237–252. DOI: 10.1007/s00193-003-0212-3.
- [2] 何翔, 吴祥云, 李永池, 等. 石灰岩中爆炸成坑和地冲击传播规律的试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 725–729. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.05.004.  
HE X, WU X Y, LI Y C, et al. Testing study on crater formed by explosion and propagation laws of ground shock in limestone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 725–729. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.05.004.
- [3] LEONG E C, ANAND S, CHEONG H K, et al. Re-examination of peak stress and scaled distance due to ground shock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(9): 1487–1499. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.10.009.
- [4] 吴祥云, 刘国军, 杨仁华, 等. 常规装药爆炸埋深对自由场直接地冲击参数的影响 [J]. *防护工程*, 2009, 31(5): 26–30.  
WU X Y, LIU G J, YANG R H, et al. The influence of buried depth of conventional charge on free field direct ground shock parameters [J]. *Protective Engineering*, 2009, 31(5): 26–30.
- [5] 叶亚齐, 任辉启, 李永池, 等. 砂质黏土中不同深度爆炸自由场地冲击参数预计方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1918–1923. DOI: CNKI:SUN:YSLX.0.2011-09-024.  
YE Y Q, REN H Q, LI Y C, et al. Study of prediction of ground shock parameters in free field at different depths of burst in sandy clay [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1918–1923. DOI: CNKI:SUN:YSLX.0.2011-09-024.
- [6] YANKELEVSKY D Z, KARINSKI Y S, FELDGUN V R. Re-examination of the shock wave's peak pressure attenuation in soils [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(11): 864–881. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.011.
- [7] JAYASINGHE L B, THAMBIRATNAM D P, PERERA N, et al. Blast induced ground shock effects on pile foundations [J]. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2013, 7(4): 176–180. DOI: 10.5281/zenodo.1073675.
- [8] SONG J, LI S C. Study on numerical simulation of explosion in soil based on fluid-solid coupling arithmetic [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 580-583: 2916–2919. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2916.
- [9] ALEKSEYENKO V D, GRIGORYAN S S, KOSHELEV L I, et al. Measurement of stress waves in soft soil [R]. Hanover, NH, USA: U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1970: 12–19.
- [10] BESHARA F B A. Modelling of blast loading on aboveground structures: II. internal blast and ground shock [J]. *Computers & Structures*, 1994, 51(5): 597–606. DOI: 10.1016/0045-7949(94)90067-1.
- [11] WU C Q, HAO H. Modeling of simultaneous ground shock and airblast pressure on nearby structures from surface explosions [J].

- International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(6): 699–717. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.03.002.
- [12] WU C Q, HAO H. Numerical simulation of structural response and damage to simultaneous ground shock and airblast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(3): 556–572. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.11.003.
- [13] 范俊余, 方秦, 柳锦春. 炸药地面爆炸条件下土中浅埋结构上荷载的作用特点 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2008, 9(6): 676–680. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.06.026.  
FAN J Y, FANG Q, LIU J C. Characteristics of loads on shallow-buried structures under the ground explosions [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(6): 676–680. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2008.06.026.
- [14] 柳锦春, 方秦, 还毅, 等. 炸药地面接触爆炸下土中感生地冲击的实用计算方法 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 11(2): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.02.005.  
LIU J C, FANG Q, HUAN Y, et al. Practicable calculating method of indirect ground shock in soil at surface contact explosion [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 11(2): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2010.02.005.
- [15] 杨仁华, 张新乐, 吴祥云, 等. 间接地冲击在黄土中衰减规律的试验研究 [J]. *防护工程*, 2010, 32(5): 6–9.  
YANG R H, ZHANG X L, WU X Y, et al. Experimental research on attenuation laws of airblast-induced ground shock in loess [J]. *Protective Engineering*, 2010, 32(5): 6–9.
- [16] 吴祥云, 曲建波, 李宝宝, 等. 岩石中装药埋深对地表空气冲击波超压的影响 [J]. *防护工程*, 2013, 35(4): 23–26.  
WU X Y, QU J B, LI B B, et al. The influence of buried depth of a conventional charge on the direct ground shock parameters [J]. *Protective Engineering*, 2013, 35(4): 23–26.
- [17] KRAUTHAMMER T, BAZEOS N, HOLMQUIST T J. Modified SDOF analysis of RC box-type structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112(4): 726–744. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:4(726).
- [18] KRAUTHAMMER T, ASTARLIOGLU S. Direct shear resistance models for simulating buried RC roof slabs under airblast-induced ground shock [J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 308–316. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.02.056.
- [19] CHEE K H. Analysis of shallow buried reinforced concrete box structures subjected to airblast loads [D]. Gainesville, Florida, USA: University of Florida, 2008: 19–53.
- [20] 荣吉利, 宋逸博, 王玺, 等. 核爆炸对地冲击作用下土体运动特性等效模拟 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(1): 56–64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.006.  
RONG J L, SONG Y B, WANG X, et al. Equivalent simulation of soil motion characteristics under the action of ground shock induced by nuclear explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(1): 56–64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.01.006.
- [21] 刘峥, 程怡豪, 邱艳宇, 等. 成层式防护结构抗超高速侵彻的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1317–1324. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0181.  
LIU Z, CHENG Y H, QIU Y Y, et al. Numerical analysis on hypervelocity penetration into layered protective structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1317–1324. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0181.
- [22] 陈材, 石全, 尤志锋, 等. 圆柱形弹药空气中爆炸相似性规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 092202. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0255.  
CHEN C, SHI Q, YOU Z F, et al. Similarity law of cylindrical ammunition explosions in air [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 092202. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0255.
- [23] Century Dynamics Inc. Ansys/Autodyn Version 11.0, User Documentation [Z]. Pennsylvania, USA: Century Dynamics Inc, 2007: 89–112.
- [24] LEE E L, TARVER C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *The Physics Fluids*, 1980, 23(12): 2362. DOI: 10.1063/1.862940.
- [25] LUCCIONI B, AMBROSINI D, NURICK G, et al. Craters produced by underground explosions [J]. *Computers & Structures*, 2009, 87(21/22): 1366–1373. DOI: 10.1016/j.compstruc.2009.06.002.
- [26] FISEROVA D. Numerical analysis of buried mine explosions with emphasis on effect of soil properties on loading [D]. Cranfield, England: Cranfield University, 2006: 37–51.
- [27] LAINE L, SANDVIK A. Derivation of mechanical properties for sand [C]//Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Shock and Impact Loads on Structures. Singapore: CI-Premier PTE LTD, 2001: 361–368.
- [28] LAINE L. Study of planar ground shock in different soils and its propagation around a rigid block [C]//Proceedings of the 77th

- Shock and Vibration Symposium. Monterey, CA, USA: Shock and Vibration Information Analysis Center, 2006: 1–10.
- [29] LAINE L, LARSEN O P. Proposal on how to model the unloading in a compaction equation of state based upon tri-axial tests on dry sand [C]//Proceedings of the 80th Shock and Vibration Symposium. San Diego, USA: Shock and Vibration Information Analysis Center, 2009: 1–14.
- [30] LAINE L, LARSEN O P. Implementation of equation of state for dry sand in Autodyn [C]//Proceedings of the 83rd Shock and Vibration Symposium. New Orleans, USA: Shock and Vibration Exchange, 2012: 1–15.
- [31] 肖诗云, 林皋, 王哲. Drucker-Prager 材料—致率型本构模型 [J]. *工程力学*, 2003, 20(4): 147–151. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.04.026.
- XIAO S Y, LIN G, WANG Z. A Drucker-Prager consistent rate-dependent model [J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(4): 147–151. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.04.026.
- [32] 张坤, 郑全平, 李四伟, 等. 土中爆炸对埋地管线冲击作用的数值模拟分析 [J]. *后勤工程学院学报*, 2013, 29(3): 12–17; 23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2013.03.003.
- ZHANG K, ZHENG Q P, LI S W, et al. Numerical simulation and analysis for impact of explosion under ground on buried pipelines [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2013, 29(3): 12–17; 23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7843.2013.03.003.
- [33] 金辉, 张庆明, 高春生, 等. 装药水下沉底爆炸压力场特性研究 [J]. *科技导报*, 2009, 27(14): 32–37. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2009.14.007.
- JIN H, ZHANG Q M, GAO C S, et al. Characteristics of pressure field in ground explosion [J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(14): 32–37. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2009.14.007.
- [34] 扶涛涛. 黄土湿陷和塌陷机理研究 [J]. *河南科技*, 2018(23): 104–105. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2018.23.058.
- FU T T. Discussion on collapsibility and collapse mechanism of loess [J]. *Henan Science and Technology*, 2018(23): 104–105. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5168.2018.23.058.
- [35] 王志良. 河南郑州-洛阳地区黄土湿陷机理研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2013: 7–14.
- WANG Z L. The study on collapsible mechanism of loess between Zhengzhou with Luoyang of Henan region [D]. Beijing, China: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013: 7-14.
- [36] 申永庆. 洛阳地区黄土湿陷性及其影响因素研究 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2015: 21–23.
- SHEN Y Q. Research on the collapsibility and influential factors of loess in Luoyang [D]. Shijiazhuang, Hebei, China: Hebei GEO University, 2015: 21–23.
- [37] 顾文彬, 叶序双, 詹发民, 等. 球形装药半无限土介质中爆炸动力学分析 [J]. *工程爆破*, 1999, 5(1): 5–10. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.1999.01.002.
- GU W B, YE X S, ZHAN F M, et al. Dynamic analysis on spherical charges exploding in semi-infinite soil medium [J]. *Engineering Blasting*, 1999, 5(1): 5–10. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.1999.01.002.
- [38] 陈亚娟, 王利. 土介质中 TNT 炸药爆炸波传播特性的数值模拟 [J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 29(1): 88–91. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9787.2010.01.018.
- CHEN Y J, WANG L. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasting wave with TNT in soil medium [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2010, 29(1): 88–91. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9787.2010.01.018.

(责任编辑 张凌云)