

## 地面类型及起爆高度对爆炸冲击波峰值的影响

王宁<sup>1,2</sup>, 韦利金<sup>3</sup>, 范少博<sup>4</sup>, 田石磊<sup>5</sup>, 付建平<sup>2</sup>, 任凯<sup>2</sup>, 陈智刚<sup>2</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051; 2. 中北大学智能武器研究院, 山西太原 030051;  
3. 晋西工业集团有限责任公司, 山西太原 030027; 4. 西北工业集团有限公司, 陕西西安 710043;  
5. 河北第二机械工业有限公司, 河北石家庄 050031)

**摘要:** 爆炸冲击波作为一种重要毁伤元, 其超压峰值直接影响对目标的毁伤能力。为了探究地面类型及起爆高度对爆炸冲击波峰值的影响, 利用ANSYS/AUTODYN软件建立了TNT近地爆轰模型。通过对比不同起爆高度下沙土地面和混凝土地面的冲击波超压峰值, 得到以下结论: 当起爆高度过低时, 反射波会对爆源造成影响, 可以导致冲击波超压峰值下降, 且由于混凝土波阻抗较高使得这种影响在混凝土地面上更加明显。随着起爆高度的增加, 装药正下方冲击波超压峰值逐渐降低; 地面对装药爆轰的影响随着起爆高度的增加而降低, 起爆高度增加会减小沙土地面和混凝土地面超压峰值的差异; TNT爆轰时会在沙土地面产生凹坑, 凹坑能够汇聚冲击波, 当观测点位于凹坑焦点时测得的冲击波超压会发生突跃。

**关键词:** 冲击波; 近地爆轰; 超压峰值

**中图分类号:** TJ55

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.05.0008

**引用格式:** 王宁, 韦利金, 范少博, 等. 地面类型及起爆高度对爆炸冲击波峰值的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 140-147.

WANG Ning, WEI Lijin, FAN Shaobo, et al. Influence of ground type and detonation height on the peak value of explosion shock wave[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(2): 140-147.

## Influence of Ground Type and Detonation Height on the Peak Value of Explosion Shock Wave

WANG Ning<sup>1,2</sup>, WEI Lijin<sup>3</sup>, FAN Shaobo<sup>4</sup>, TIAN Shilei<sup>5</sup>, FU Jianping<sup>2</sup>, REN Kai<sup>2</sup>, CHEN Zhigang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Intelligent Weapon Research Institute, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
3. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China;  
4. Northwest Industries Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;  
5. Hebei Second Machinery Industry Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** As an important damage element, the overpressure peak of explosion shock wave directly affects the damage ability of the target. In order to explore the influence of ground type and detonation height on the peak value of explosion shock wave, a TNT near-ground detonation model was established by using ANSYS/AUTODYN software. By comparing the peak value of shock wave overpressure on

收稿日期: 2024-05-13

作者简介: 王宁(2001-), 男, 硕士生, 主要从事战斗部高效毁伤的研究。

通信作者: 付建平(1987-), 男, 教授, 博士, 主从事弹药高效毁伤技术的研究。E-mail: jianping\_fu@nuc.edu.cn.

sand ground and concrete ground under different initiation heights, the following conclusions were obtained: when the detonation height is too low, the reflected wave will affect the explosion source, resulting in a decrease in the peak value of shock wave overpressure. Due to the high wave impedance of concrete, this effect is more obvious on the concrete ground; the peak value of shock wave overpressure below the charge gradually decreases with the increase of detonation height. The influence of ground on charge detonation decreases with the increase of detonation height. When the detonation height increases, the difference of overpressure peak between sand ground and concrete ground decreases. TNT explosion creates a crater on the sand ground, which converge the shock wave. When the observation point is located at the focus of the crater, the measured shock wave overpressure will jump.

**Key words:** shock wave; near-ground detonation; peak overpressure

## 0 引 言

爆炸冲击波作对人员、轻型物资等软目标的重要毁伤元之一,冲击波的强度一定程度上决定了战斗部的毁伤能力,爆炸冲击波参数主要有超压峰值、正压作用时间、比冲量<sup>[1-2]</sup>。为了对冲击波的毁伤能力有直观的认识,需要对装药爆轰时的冲击波阵面的演化规律进行研究。曹涛等<sup>[3]</sup>建立了特定当量的 TNT 的自由场爆轰和近地爆轰模型。吴浩等<sup>[4]</sup>研究了沙土地面对柱形炸药爆轰波的影响,发现沙土地面会增加正压作用时间,同时炸药方位角为 $0^\circ$ 时,两侧峰值超压较大。畅博等<sup>[5]</sup>利用 AUTODYN 对近地炸药爆轰进行仿真,研究了运动炸药近地爆炸冲击波场的分布特性,认为运动速度对地面峰值超压的增益在 3 倍比例距离外就可忽略。

Thornhill 等<sup>[6]</sup>分析了装药爆炸时的运动速度对爆炸冲击波的影响。Xue 等<sup>[7]</sup>对自由场中爆炸冲击波进行研究,根据爆炸相似性原理和经验公式提出了爆炸冲击波的全过程模型,该模型表示为超压峰值、衰减和振荡三个因子函数的乘积,同时引入缩放参数,并通过 AUTODYN 数值方法对该模型进行验证。汪维等<sup>[8]</sup>研究了大当量 TNT 的远场毁伤能力,利用 AUTODYN-2D 软件模拟了 1 000 kg TNT 在空气中爆炸的情况,结果显示:近场( $S < 10$  m)时峰值超压随着起爆高度  $h$  的增加而减小,远场( $S > 30$  m)时冲击波超压峰值到达时间较晚,峰值超压的最大值出现在起爆高度与水平距离之比  $h/S$  为 0.1 时。李福龙等<sup>[9]</sup>通过改变空气初始压强来模拟不同海拔 TNT 的爆轰,发现 TNT 当量相同时,冲击波峰值、比冲量随海拔的升高而逐渐减小。Wang 等<sup>[10]</sup>探究了初始环境

压力对装药爆轰产生爆炸冲击波的影响,发现爆炸冲击波的超压峰值随初始环境压力的减小而减小;爆炸冲击波的传播速度随环境压力的降低而增加。

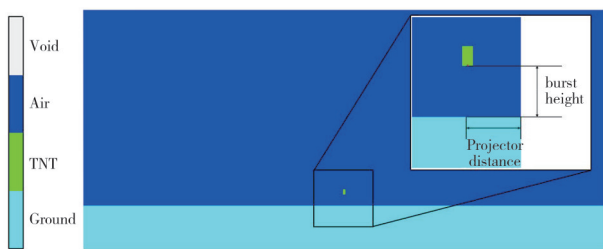
目前关于地面类型对爆炸冲击波影响的研究还较少,为了解炸药在城市混凝土地面和野外沙土地面爆炸时产生冲击波的差异,以及不同起爆高度下地表冲击波超压变化的规律,本文利用 AUTODYN 软件建立炸药在不同种类地面上方爆炸的冲击波模型,并分析地面种类以及装药起爆高度对炸药爆炸冲击波的影响。

## 1 仿真模型及工况设置

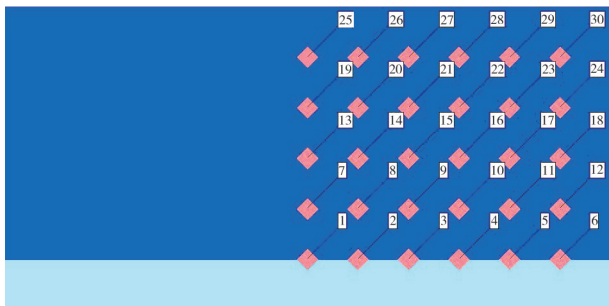
### 1.1 仿真模型

利用 AUTODYN 软件对柱形裸装药的近地面爆轰冲击波场进行数值仿真。空气和 TNT 采用欧拉算法,利用 AUTODYN 建立空气域后将 TNT 填充到空气域中;地面采用拉格朗日算法;利用流固耦合建立空气、炸药和地面之间的相互作用。为了能够观测远场冲击波超压的变化规律,设置空气域计算尺寸为  $2\ 400\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$ ,炸药采用 Euler 填充,尺寸为  $12\ \text{mm} \times 24\ \text{mm}$ ,起爆点设置为炸药下端轴线处。为了模拟无限空气域,将流场边界设置为 flow out。由于起爆点设置在炸药中点,所以爆炸冲击波可近似看作关于 Y 轴对称,由此在炸药一侧设置固定观测点,各观测点间隔为 200 mm,共设置 30 个观测点,仿真模型如图 1 所示。

为了探究不同起爆高度和不同地面类型对炸药爆炸冲击波的影响,共设置 12 个不同工况,具体设置如表 1 所示。



(a) 模型示意图



(b) 观测点示意

图1 计算模型示意图

Fig. 1 Calculation model diagram

表1 仿真工况设置

Tab. 1 Simulation condition setting

工况	地面类型	起爆高度/mm	工况	地面类型	起爆高度/mm
1	沙土	20	7	混凝土	20
2	沙土	60	8	混凝土	60
3	沙土	100	9	混凝土	100
4	沙土	140	10	混凝土	140
5	沙土	180	11	混凝土	180
6	沙土	220	12	混凝土	220

### 1.2 材料模型

空气状态方程采用理想气体状态方程描述,表达式为

$$p_a = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0, \quad (1)$$

式中:  $p_a$  为空气压力;  $\rho$  为空气密度;  $\rho_0$  为空气初始密度,  $\rho_0 = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ;  $\gamma$  为绝热指数,  $\gamma = 1.4$ ;  $E_0 = 2.068 \times 10^5 \text{ mJ/g}$ 。

炸药为 TNT, 采用 JWL 状态方程描述表达式为

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

式中:  $p$  为压力;  $V$  为相对体积;  $E$  为内能密度;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料常数, 取值参考 AUTODYN 材料库中的参数, 具体取值如表 2 所示。

沙土地面采用 AUTODYN 材料库中的

SAND 模型。采用 Compaction 状态方程来描述沙土地面受压后孔隙致密的过程。材料的弹性体积刚度定义为声速 ( $c$ ) 与密度 ( $\rho_0$ ) 的分段线性曲线。材料的体积刚度

$$K = \rho_0 c^2, \quad (3)$$

式中:  $\rho_0$  为材料密度;  $c$  为材料中的声速。

表2 TNT材料参数

Tab. 2 TNT material parameters

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_{c-y}/\text{kPa}$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega$	$R_1$	$R_2$
1.63	$2.17 \times 10^7$	$6.93 \times 10^3$	0.35	4.15	0.90

材料的压实度

$$\alpha = \frac{\rho_s}{\rho_0}, \quad (4)$$

式中:  $\rho_0$  为材料密度;  $\rho_s$  为材料压实后的密度。

AUTODYN 中定义的沙土材料参数为沙土初始密度  $\rho_0 = 2.641 \text{ g/cm}^3$ 、沙土压实曲线、压力卸载曲线, 且沙土压实曲线、压力卸载曲线均引用自 AUTODYN 材料库。

混凝土地面使用 AUTODYN 材料库中的 CONC-35MPA, 采用 P-alpha 状态方程来描述, 该方程能够正确描述材料在高应力下的力学行为, 参考取值如表 3 所示。

表3 混凝土材料参数

Tab. 3 Concrete material parameters

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\rho_c/\text{kPa}$	$\rho_s/\text{kPa}$	$E/\text{kPa}$	$T/\text{K}$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1})$
2.314	$2.33 \times 10^4$	$6 \times 10^6$	$3.527 \times 10^7$	300	$3.75 \times 10^8$

### 1.3 网格敏感性分析

网格尺寸直接影响有限元计算的精度以及计算效率, 所以需要选取合适的网格尺寸对后续仿真进行计算, 选取工况 1, 将网格边长设置为 1, 2, 3 和 5 mm。

对比不同单元网格尺寸下各观测点的超压, 得到距爆心不同水平距离 ( $200 \text{ mm} \leq L \leq 1000 \text{ mm}$ ) 的各观测点冲击波参数与单元网格尺寸的关系曲线, 如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 网格边长为 1 mm 和 2 mm 时的超压峰值曲线基本重合。当网格尺寸增加到 3 mm 以上时, 近场条件下超压峰值计算结果偏小, 而远场条件下超压峰值对网格敏感性较低。为了兼顾计算精度以及计算结果, 选取网格尺寸为 2 mm 进行后续仿真。

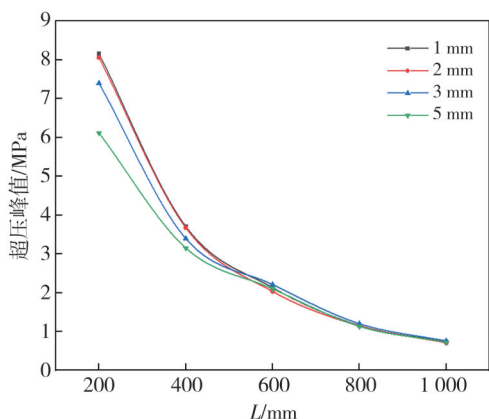


图 2 网格尺寸对超压峰值的影响

Fig. 2 The influence of grid size on peak overpressure

### 1.4 数值计算结果有效性分析

为了验证数值计算的有效性,参照文献[11]的试验,并利用本文的数值模拟方法和材料参数建立相应的数值计算模型,如图 3 所示。

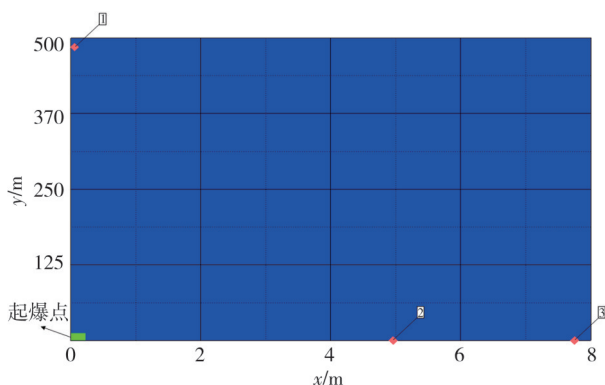


图 3 对应于试验的计算模型

Fig. 3 The calculation model corresponding to the test

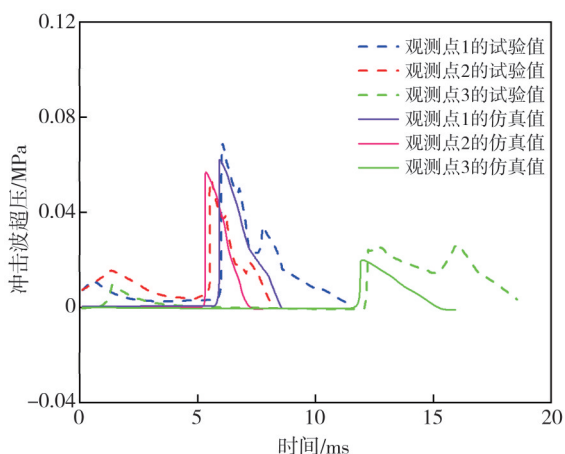


图 4 试验与数值仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and numerical simulation results

由图 4 可以看出,3 个观测点超压峰值的仿真值均与试验值相差不大,但是各点处正压作用的仿真时长均小于试验时长。由于后续工作主要关

注 TNT 爆轰产生的超压峰值,所以可以认为文中数值计算方法满足计算结果准确性的要求。

## 2 数值仿真结果

### 2.1 不同地面类型的波阵面超压演化规律

以工况 1 为例,炸药在地面的爆轰产物演化过程如图 5 所示。

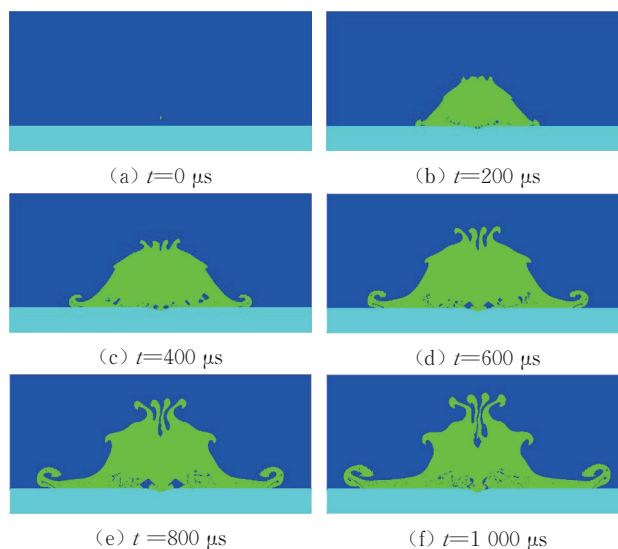


图 5 起爆高度 20 mm 时的沙土地面爆轰产物的演化过程  
Fig. 5 The evolution process of detonation products on sand ground at detonation height of 20 mm

由图 5 可知,由于在地面上方空气场中无其他障碍及干扰,所以爆轰过程中爆炸产物基本关于 Y 轴对称。此外,由于炸药距地面有一定距离,所以产物内部有部分空气掺杂。同时,在炸药爆轰过程中会发生冲击波的反射、入射波和反射波叠加形成马赫波等现象,导致爆轰产物周围的空气被压缩和加热的程度不同,使得爆轰产物并不是均匀地向四周运动。由于马赫波峰值超压较高,导致马赫反射区内的爆轰产物形态被拉长。

图 6(a) 中,由于炸药爆轰强烈的压碎效应,沙土地面出现了凹坑,并且此时冲击波场的压力峰值出现在凹坑处,这是由于凹坑对反射波具有汇聚作用。假设地面均匀,则炸药爆炸产生的凹坑可看作一条圆弧曲线,此时反射波被汇聚到圆弧焦点处形成压力峰值。由于冲击波的传播速度远大于爆轰产物,所以冲击波阵面逐渐脱离爆轰产物,同时由于爆轰产物的过度膨胀,爆轰产物内部的压力降低形成稀疏波,并开始反向收缩,图 6(c) 中靠近地面一侧已经开始收缩,图 6(f) 中这种收缩效应更加明显。

通过选取不同时刻波阵面上的峰值超压得到图 7

和图8所示的超压曲线。

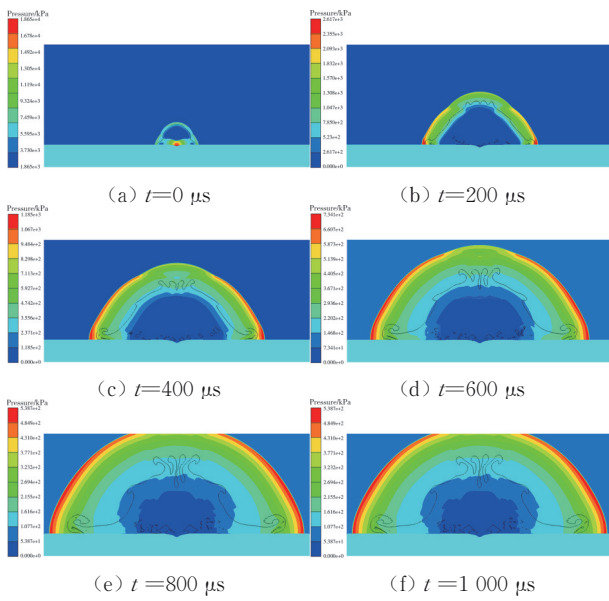


图6 起爆高度20 mm时的沙土地面冲击波压力云图  
Fig. 6 The shock wave pressure cloud diagram of sand ground at the detonation height of 20 mm

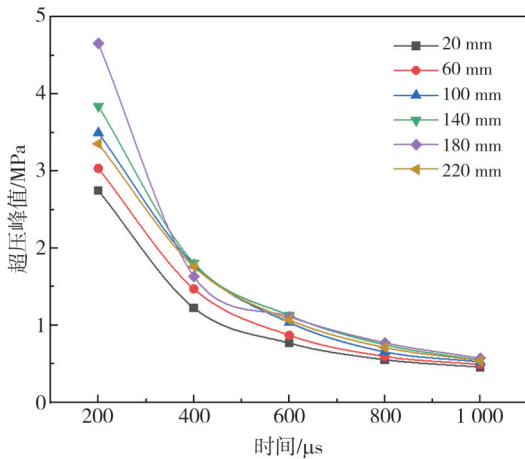


图7 沙土地面不同时刻冲击波阵面的超压  
Fig. 7 Overpressure of shock wave front on sand ground at different times

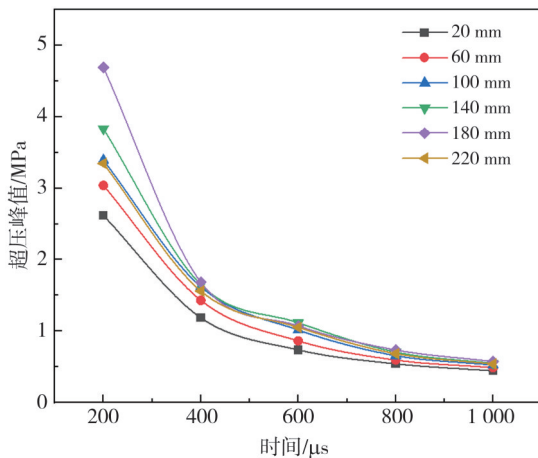
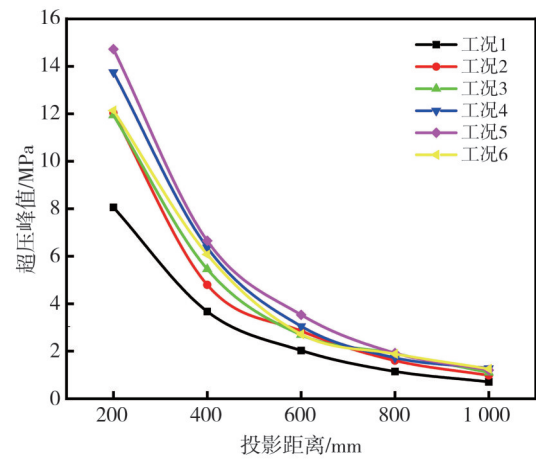


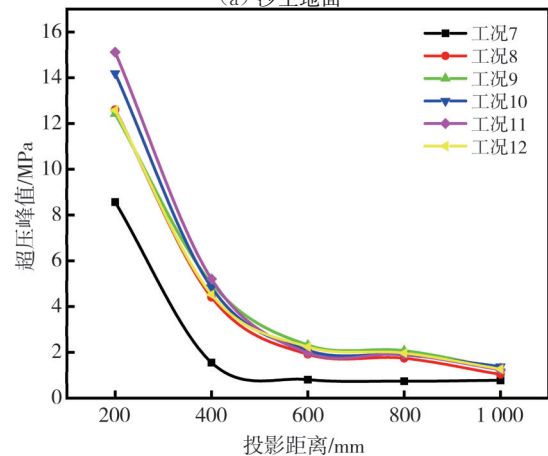
图8 混凝土地面不同时刻冲击波阵面的超压  
Fig. 8 Overpressure of shock wave front on concrete ground at different times

由图7和图8可知,随着冲击波不断演化,最终在沙土地面和混凝土地面的冲击波阵面的超压峰值差异逐渐降低。并且随着起爆高度的提高,地面对冲击波的干扰逐渐降低,此时两种地面的冲击波超压值差异也在逐渐降低。

炸药在不同高度爆轰时地面(即观测点2~6处)冲击波的超压峰值曲线如图9所示。



(a) 沙土地面



(b) 混凝土地面

图9 地面冲击波超压峰值变化曲线

Fig. 9 Change curve of ground shock wave overpressure peak

由图9可知,地面为混凝土时,地面冲击波超压的变化趋势与沙土地面基本一致,起爆高度为180 mm时,距炸药投影距离200 mm处的冲击波超压最高,此时峰值为15.119 MPa,较沙土地面高2.63%。随着投影距离的增加,沙土地面和混凝土地面的超压峰值差距逐渐减小,可以认为远场爆轰情况下,地面类型对爆炸冲击波传播的影响不大。

在炸药起爆高度为20 mm时,两种类型地面在投影距离为200 mm时的超压峰值均远小于其他工况,造成这种情况的原因是,起爆高度较小,

爆轰波未完全扩散<sup>[4]</sup>,入射波到达地面后形成较强的反射波,反射波传递到爆源处时 TNT 未爆轰完全,从而对爆源造成影响。由于混凝土地面波阻抗较高,使得反射波较强,导致爆源受反射波的影响更加明显。因此,起爆高度为 20 mm 时冲击波超压在混凝土地面的衰减速度高于沙土地面,说明地面为混凝土时反射波对爆源的影响更明显。

### 2.2 不同起爆高度的地面峰值超压变化趋势

上述分析中讨论了不同地面类型对波阵面上峰值超压的影响,为了进一步探究起爆高度对冲击波超压的影响,将空气域扩展为 3 000 mm × 15 000 mm,同时为了兼顾计算时间和计算精度,参考文献[12-13],网格尺寸采用 1 cm × 1 cm,在垂直距离间隔 300 mm,水平距离间隔 750 mm 设置观测点。

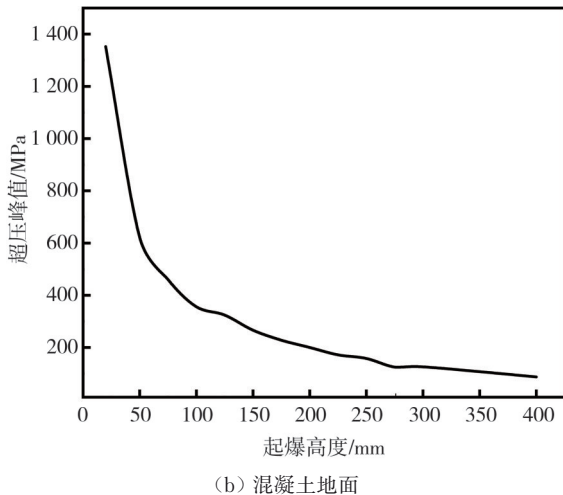
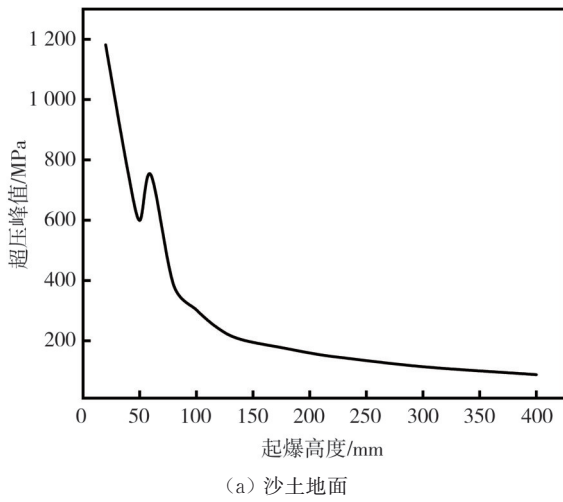


图 10 不同起爆高度时地面峰值超压的变化曲线

Fig. 10 Change curve of ground peak overpressure at different detonation heights

通过对比不同起爆高度情况下沙土地面的冲击波超压,发现投影距离为 0 mm(观测点 1 处)时,随着起爆高度的升高,冲击波超压逐渐降低,在起爆高度为 60 mm 处超压峰值出现突跃,原因是该起爆高度下,观测点 1 位于炸药爆轰后产生凹坑的焦点处,造成起爆高度 60 mm 时观测点 1 处的冲击波超压出现突跃。

自由场爆轰冲击波超压与对比距离有关<sup>[14-15]</sup>,可以表示为<sup>[1]</sup>

$$\Delta p_1 = \frac{A_1}{r} + \frac{B_1}{r^2} + \frac{C_1}{r^3} \quad (5)$$

在 TNT 质量一定时,  $\Delta p_1$  为起爆高度  $h$  的函数,且随着起爆高度  $h$  的增加而降低,所以装药正下方地面的峰值超压  $\Delta p$  也可以认为是起爆高度  $h$  的函数,且其变化趋势与  $\Delta p_1$  相同,因此,可以将地面峰值超压表示为

$$\Delta p_z = \frac{A\sqrt[3]{\omega}}{h} + \frac{B(\sqrt[3]{\omega})^2}{h^2} + \frac{C\omega}{h^3}, \quad (6)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数;  $h$  为起爆高度;  $\omega$  为装药量。

由于起爆高度为 60 mm 时,观测点 1 位于凹坑焦点附近,使得该观测点处峰值超压发生突跃。为了简化公式拟合过程,不考虑该点处的峰值超压。利用 Origin 对上述数据进行拟合,得到 TNT 正下方沙土地面峰值超压的经验公式为

$$\Delta p = \frac{40.60132 \times \sqrt[3]{\omega}}{h} + \frac{0.24562 \times (\sqrt[3]{\omega})^2}{h^2} - \frac{0.01311\omega}{h^3}, \quad (7)$$

式中:  $h$  的单位为 m,  $\omega$  的单位为 kg,  $\Delta p$  的单位为 MPa。

当装药质量为 0.5 kg 时,沙土地面超压峰值的仿真值与计算值如表 4 所示。上述公式的计算结果与仿真值的相对误差为 7.81%。

类似可以得到 TNT 正下方混凝土地面峰值超压的经验公式为

$$\Delta p = \frac{54.29787 \times \sqrt[3]{\omega}}{h} - \frac{1.22154 \times (\sqrt[3]{\omega})^2}{h^2} + \frac{0.01794\omega}{h^3} \quad (8)$$

混凝土地面超压峰值的仿真值与计算值如表 5 所示。拟合公式计算值与仿真值的平均相对误差为 5.45%。

上述经验公式能够计算不同起爆高度下,炸药正下方地表冲击波的超压峰值。

表4 不同炸高下TNT正下方沙土地面的超压峰值

Tab. 4 Peak value of sand ground overpressure under TNT at different explosion heights

起爆高度/mm	超压峰值/MPa	
	仿真值	计算值
20	1181.4	1178.72
40	754.07	799.92
50	599.14	653.96
80	384.19	414.19
100	302.69	331.17
120	239.63	275.50
140	203.82	235.69
180	173.75	182.68
200	159.84	164.18
220	148.11	149.06
300	113.98	108.89
400	87.73	81.43

表5 不同炸高下TNT正下方混凝土地面的超压峰值

Tab. 5 Peak overpressure of concrete ground directly below TNT under different explosion heights

起爆高度/mm	超压峰值/MPa	
	仿真值	计算值
20	1352.60	1352.26
50	622.08	625.88
75	460.11	459.08
100	356.28	362.98
125	324.19	300.11
150	266.28	255.77
200	200.35	197.36
250	157.93	160.64
300	125.76	135.43
400	87.73	103.71

### 3 结 论

通过对TNT在不同起爆高度及不同类型地面爆炸产生的冲击波超压进行仿真分析,得到如下结论:

1) 当TNT起爆高度过低时,入射波到达地面后形成较强反射波,并对爆源造成影响,使得超压峰值明显降低,这种影响在混凝土地面更加显著。

2) 随着起爆高度的升高,地面冲击波峰值超压逐渐降低。同时,由于地面对冲击波的干扰减弱,混凝土地面和沙土地面冲击波超压峰值的差异逐渐减小。

3) TNT爆轰时会在沙土地面上产生凹坑,同时凹坑对爆炸冲击波有汇聚作用。当观测点位于凹坑交点处时,测得的冲击波超压峰值会出现突跃。

#### 参考文献:

[1] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[2] JAMES H R. Predicting the response of explosives to attack by high-density shaped-charge jets[J]. Journal of Energetic Materials, 1989, 7(4/5): 243-264.

[3] 曹涛, 孙浩, 周游, 等. 近地爆炸冲击波传播特性数值模拟与应用[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 187-191.

CAO Tao, SUN Hao, ZHOU You, et al. Numerical simulation and application of propagation characteristics of shock wave near ground explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 187-191. (in Chinese)

[4] 吴浩, 吴国东, 王振宁, 等. 沙土地面对柱形装药近地爆轰波的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43(1): 8-15.

WU Hao, WU Guodong, WANG Zhenning, et al. Influence of sand land on near-earth detonation wave of cylindrical charge[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2023, 43(1): 8-15. (in Chinese)

[5] 畅博, 谷鸿平, 牛晨伟, 等. 运动炸药近地爆炸冲击波场特性研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 49-54.

CHANG Bo, GU Hongping, NIU Chenwei, et al. Characteristics investigation on shock wave field of near ground blasting of moving explosive charge[J]. Blasting, 2018, 35(3): 49-54. (in Chinese)

[6] THORNHILLI C K, HETHERINGTON R. Some notes on explosions of moving charges [M]. British: Armament Re-search Establishment, 1953.

[7] XUE Z Q, LI S P, XIN C L, et al. Modeling of the whole process of shock wave overpressure of free-field air explosion[J]. Defence Technology, 2019, 15(5): 815-820.

[8] 汪维, 吴克刚, 卢芳云, 等. TNT装药爆轰的远场超压数值模拟研究[J]. 采矿技术, 2009, 9(5): 59-62.

WANG Wei, WU Kegang, LU Fangyun, et al. Numerical simulation of far-field overpressure of TNT charge detonation[J]. Mining Technology, 2009, 9(5): 59-62. (in Chinese)

[9] 李福龙, 孔德仁, 王良全, 等. 海拔高度对化爆冲击波压力分布规律影响分析[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(2): 158-165.

LI Fulong, KONG Deren, WANG Liangquan, et al. Analysis of the effect of altitude on the pressure distribution pattern of chemical explosion shock wave[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(2): 158-165. (in Chinese)

[10] WANG F Q, WANG Q, WANG Y J, et al. Propagation rules of shock waves in confined space under differ-

- ent initial pressure environments [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 14352.
- [11] 王明涛, 程月华, 吴昊. 柱形装药空中爆炸冲击波荷载研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(4): 62-82.  
WANG Mingtao, CHENG Yuehua, WU Hao. Study on blast loadings of cylindrical charges air explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(4): 62-82. (in Chinese)
- [12] 廖真, 唐德高, 李治中, 等. 近地面空中爆炸马赫反射数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 164-169.  
LIAO Zhen, TANG Degao, LI Zhizhong, et al. Numerical simulation for Mach reflection in air explosion near ground[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(5): 164-169. (in Chinese)
- [13] 马浩伟, 张亚栋, 陈力, 等. 大型工房内爆炸冲击波流场分布规律 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (S1): 142-150.  
MA Haowei, ZHANG Yadong, CHEN Li, et al. Distribution law of flow field of shock wave in large-scale workshop [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42 (S1): 142-150. (in Chinese)
- [14] WANG Z Q, KONIETZKY H, SHEN R F. Coupled finite element and discrete element method for underground blast in faulted rock masses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(6): 939-945.
- [15] 冯伟涛, 徐春平, 李夏. 爆坑尺寸的计算与试验研究 [J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 68-72.  
FENG Weitao, XU Chunping, LI Xia. Calculation and experimental study of blasting crater size[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 68-72. (in Chinese)