

爆炸冲击波在扁平大空间内的传播规律

刘中辉^{1,2}, 匡志平¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 为研究爆炸冲击波在地下停车场等扁平大空间内的传播规律, 采用 AUTODYN 软件建立了二维轴对称分析模型, 分析了 8 种质量的 TNT 在扁平大空间中间位置地面处引爆后冲击波的传播特性。通过结合爆炸冲击波传播云图和部分测点的压力时程曲线, 分析发现冲击波在传播过程中会形成多个马赫波, 首个马赫波的马赫杆高度可以达到空间净高, 后续马赫波的马赫杆高度较小, 但传播速率大, 最终会追上首个马赫波, 并与其汇合, 在汇合处峰值超压较马赫杆其他位置有所增加, 随着传播距离的增加后续马赫波对首个马赫波的影响越来越小。给出了根据比例净高确定马赫波阵面峰值超压恒定的临界点水平位置 and 对应最大峰值超压值的计算公式, 给出了根据平面比例爆距确定最大峰值超压平均值的计算公式。

关键词: 爆炸; 冲击波; 扁平大空间; 马赫波; 超压峰值

中图分类号: O389

文献标志码: A

Propagation Law of Blast Wave in a Flat Large Space

LIU Zhonghui^{1,2}, KUANG Zhiping¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to study the propagation law of blast shock wave in a flat large space such as underground parking lot, a 2D axisymmetric analysis model was established using AUTODYN software. The propagation characteristics of shock wave after 8 different masses of TNT detonated at the ground in the middle of the flat large space were analyzed. By combining the propagation cloud picture of blast shock wave and the pressure time history curve of some gauges, it is found that the shock wave will form multiple Mach waves in the propagation process, and the height of the Mach stem of the first Mach wave can reach the space net height. The height of the Mach

stem of the subsequent Mach wave is small, but the propagation speed is fast, and it will eventually catch up with the first Mach wave, and converge with it. The peak overpressure at the junction is increased compared with other positions of the Mach stem. As the propagation distance increases, the influence of subsequent Mach wave waves on the first Mach wave decreases. The formula for determining the horizontal position of the critical point where the peak overpressure of the Mach wave front is constant and the corresponding maximum peak overpressure value according to the scaled clear height, and the formula for determining the average value of the maximum peak overpressure according to the plane scaled distance are given.

Key words: blast; shock wave; flat large space; Mach wave; overpressure peak

根据炸药在空气中爆炸时受周围环境约束程度的不同, 爆炸可以分为自由空气中爆炸、近地空气中爆炸和内部空间爆炸。峰值超压、正相比冲量等是确定冲击波作用效果的主要参数, 很多学者和机构, 如 Brode^[1]、Henrych^[2]、Wu 等^[3] 和美国 UFC 3-340-02 手册^[4] 通过试验和数值模拟等方法给出了自由空气中爆炸时这些参数的计算公式。

近地空气中爆炸是指炸药在地面上方的爆炸, 要求炸药距离地面的比例爆距不小于 $0.35\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 。冲击波与地面碰撞后, 根据入射角度的不同可以产生 3 种类型的反射: 正反射、规则反射和马赫反射^[5]。在炸药正下方的地面处, 入射角为零, 产生正反射, Henrych^[2] 和 闫秋实^[6] 给出了正反射超压计算公式, 对理想气体而言, 正反射超压峰值接近于入射超压峰值的 8 倍, 对真实气体而言, 可达到 13 倍^[7]。当入射角在零与与某个临界角 (40° 左右) 之间时, 产生规

收稿日期: 2023-05-06

第一作者: 刘中辉(1981—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为爆炸冲击波的数值模拟。E-mail: fringeliu@126.com

通信作者: 匡志平(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗爆性能。

E-mail: zhipingkuang@163.com



论文
拓展
介绍

则反射,规则反射超压计算非常复杂,但当入射冲击波压力小于0.3MPa时,可以采用正反射的公式计算^[8]。当入射角大于临界角后,规则反射波与入射波在地面处开始合成为马赫波,入射波、规则反射波和马赫波的交点称为三波点,随着入射角的不断增大,三波点的位置逐渐升高。在三波点轨迹线下方区域,压力时程曲线有一个波峰,在上方区域有2个波峰^[9],利用这一特点,郭炜等^[10]对三波点的位置进行了试验研究。此外,廖真等^[9]研究发现马赫杆顶部的超压峰值仅为底部的67.6%~80.3%。

发生内部爆炸的空间主要有:单间或多间密闭房间、机库、舰艇舱室、弹药库、地铁车站、坑道、洞室、地下停车场等^[11-12]。其中,密闭容器、弹药库、舰艇舱室、建筑房间等多由单个或多个密闭或半密闭空间组成,将发生在这类空间内的爆炸统称为有限空间内部爆炸^[13]。在有限空间内发生爆炸时,准静态压力不能忽略,且在某些工况下是导致结构破坏的主要原因^[14]。Baker^[15]提出了内爆炸荷载多三角形脉冲估算法,该方法的准确性得到了部分工况的验证^[11, 16]。张舵等^[17]指出Baker的三脉冲模型理论上只适用于一维或二维问题,无法很好地适用于箱型结构等较复杂的情况。夏志成等^[18]指出准静态压力随着装药量容积比 m/V 的增加而增加,王鑫等^[12]、张明明等^[19]给出了准静态压力的计算公式。郭玉斌等^[20]应用LS-DYNA软件研究了地下建筑某房间产生的爆炸冲击波在邻近房间的传播情况。周晓青等^[21]应用AUTODYN软件研究了地下室发生爆炸后,冲击波沿不同竖向通道传播到地表后的分布情况及引起地面的震动情况。此外,一些学者对地铁车站内的爆炸进行了数值模拟研究,采用的软件主要为AUTODYN^[22-25]和LS-DYNA^[26-28],研究普遍发现,爆炸冲击波最初以近似球面的形状传播,到达2~3倍^[22, 24-25]柱间距的位置后,近似以平面的形式传播。在距爆源较远处,爆炸冲击波仅有一个显著的超压峰值,其他峰值相对很小;距离爆源稍远处,爆炸冲击波的超压峰值降低,但有多峰值,且峰值大小呈递减趋势^[22, 27];柱对其附近区域冲击波的超压峰值影响较大,但对其整体传播规律影响不大^[23, 26]。

可见,目前对于自由空气中爆炸和近地空气中爆炸的研究已经比较全面,对这2种爆炸环境下冲击波的传播规律也认识得比较清晰;对于小型密闭和半密闭空间内爆炸的研究也比较多,发现了准静态压力在这种环境下是不能忽略的,并给出了计算

公式;对地铁车站、隧道等较大空间内爆炸的研究也已经开始,并取得了一定的成果。但对内部布置了大量柱且高度远小于长度和宽度的地下停车场和地下大型商场等扁平大空间内爆炸的研究却鲜见报道。这类扁平大空间的显著特点是高度远小于长度和宽度,因此,发生内部爆炸时冲击波将在空间底面和顶面间来回反射,并不断向远处传播,这种传播特性既不同于自由空气中爆炸和近地空气中爆炸,也不同于密闭、半密闭空间内爆炸,同时,与地铁车站、隧道等长方体形大空间内爆炸也不尽相同。研究爆炸冲击波在扁平大空间内的传播规律既可以丰富人们对冲击波传播特性的认识,又可以为峰值超压估算和人员伤亡预测提供依据。鉴于此,采用AUTODYN软件分析了扁平大空间中间位置地面处发生爆炸后冲击波在扁平大空间内的传播规律,给出马赫波阵面超压恒定位置的计算公式和该位置的最大超压计算公式以及任一点沿高度方向平均最大超压计算公式。

1 数值分析模型

某典型扁平大空间地下停车场平面图如图1所示,图中小方形代表柱。根据文献^[23]和^[26]以及笔者的前期分析结果,柱对爆炸冲击波在扁平大空间内的传播规律影响较小,因此,可以去掉柱,采用AUTODYN软件提供的Euler2D多物质二维轴对称矩形模型^[29]对爆炸冲击波在扁平大空间内的传播规律进行分析,如图2所示。该模型涉及三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)和空气2种物质, TNT为半球形,由于轴对称性在模型中用1/4圆表示。模型的上下边界都是刚性,用于模拟地面和顶板,模型左侧设置了流出(flow out)边界条件,允许空气流出,从而模拟大空间。

TNT采用JWL状态方程^[9, 30],如式(1):

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

式中: p 为静水压力; V 为相对体积; E 为能量密度; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为材料常数。当炸药爆炸后体积大于其初始体积的10倍后,程序自动将其状态方程转化为理想气体状态方程进行计算。方程中各参数均采用AUTODYN软件默认值。其中,TNT的初始密度为 $1.63\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,其他材料参数采用Lee等^[31]给出的值,如表1所示。

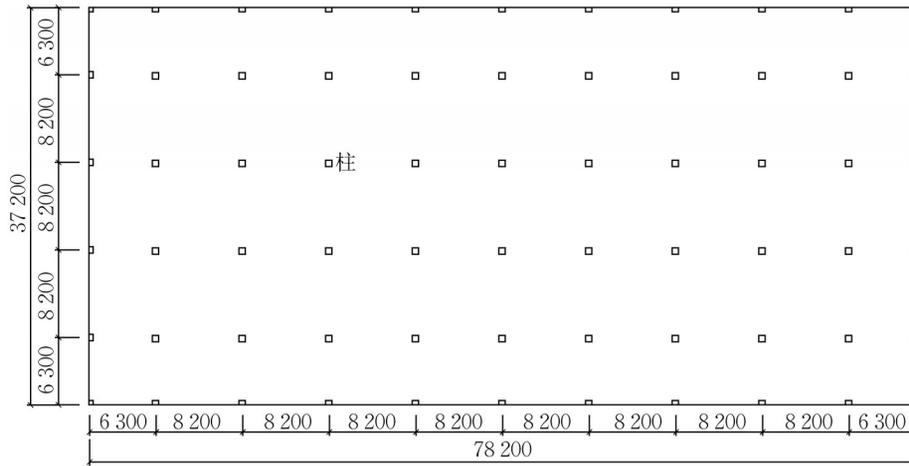


图 1 典型扁平大空间地下停车场平面图(单位:mm)

Fig. 1 Plan view of a typical flat large space underground parking lot (unit:mm)



图 2 半球形 TNT 扁平大空间内爆炸二维轴对称矩形模型

Fig. 2 2D axisymmetric rectangular model of hemispherical TNT blast in flat large space

表 1 炸药材料参数

Tab. 1 Parameters of explosive material

A /GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2
373.75	3.747	0.35	4.15	0.90

空气采用理想气体状态方程^[9, 32], 如式(2):

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

式中: p 为静水压力; γ 为绝热指数; ρ 为质量密度; E 为能量密度。各参数值采用 AUTODYN 软件默认值, 如表 2 所示。

表 2 理想气体材料参数

Tab. 2 Parameters of ideal gas material

γ	$\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$
1.4	1.225	2.068×10^5

模型高度 H 为 3.6m, 长度为 40m, 沿长度方向每隔 5m 设置一系列测点, 每列各测点与地面的距离分别为 $0, 0.25H, 0.50H, 0.75H, 1.00H$, 即: $0, 0.9, 1.8, 2.7$ 和 3.6m 。爆炸 TNT 当量分别采用 1、5、8、27、64、125、343 和 512kg。结合文献[33]给出的最佳网格尺寸确定方法, 综合考虑各种爆炸工况统一取网格尺寸为 20mm。文献[33]已证实了采用 AUTODYN 软件提供的 Euler2D 多物质二维轴对称矩形模型对地面爆炸进行模拟的准确性。

2 爆炸冲击波在扁平大空间内的传播特性

以 5kg 爆炸 TNT 当量为例, 给出爆炸冲击波在扁平大空间内的传播过程和部分测点的压力时程曲线, 分别如图 3 和 4 所示。

由图 3 可见, 爆炸冲击波开始以球面的形式向外传播, 首次碰到顶板后发生了正反射, 此时入射角和反射角均为零, 反射波竖直向下传播。随着入射波不断向前传播, 其在顶板处的入射角不断变大, 反射角也相应变大, 反射波的传播方向由竖向逐渐变成左下方向。当入射角大于某个临界值 $40^\circ \sim 70^\circ$ ^[2] 后, 反射波在水平方向的速度分量大于入射波, 因此, 反射波追上了入射波, 并与其合成了首个马赫波。由于马赫波的速率大于入射波的速率, 随着时间的推移, 马赫波的范围不断扩大, 该马赫波范围称为马赫杆。马赫杆经过区域的压力时程曲线为单峰值, 其外侧的区域为双峰值, 分别为入射超压和反射超压引起, 且单峰值较双峰值压力大很多。

结合图 3, 对图 4 中各测点压力时程曲线峰值对应的冲击波类型描述如下。

图 4 测点 5 的第 1 个峰值是马赫波产生的, 测点 4 的第 1 和第 2 个峰值分别是初始入射波和顶板初次

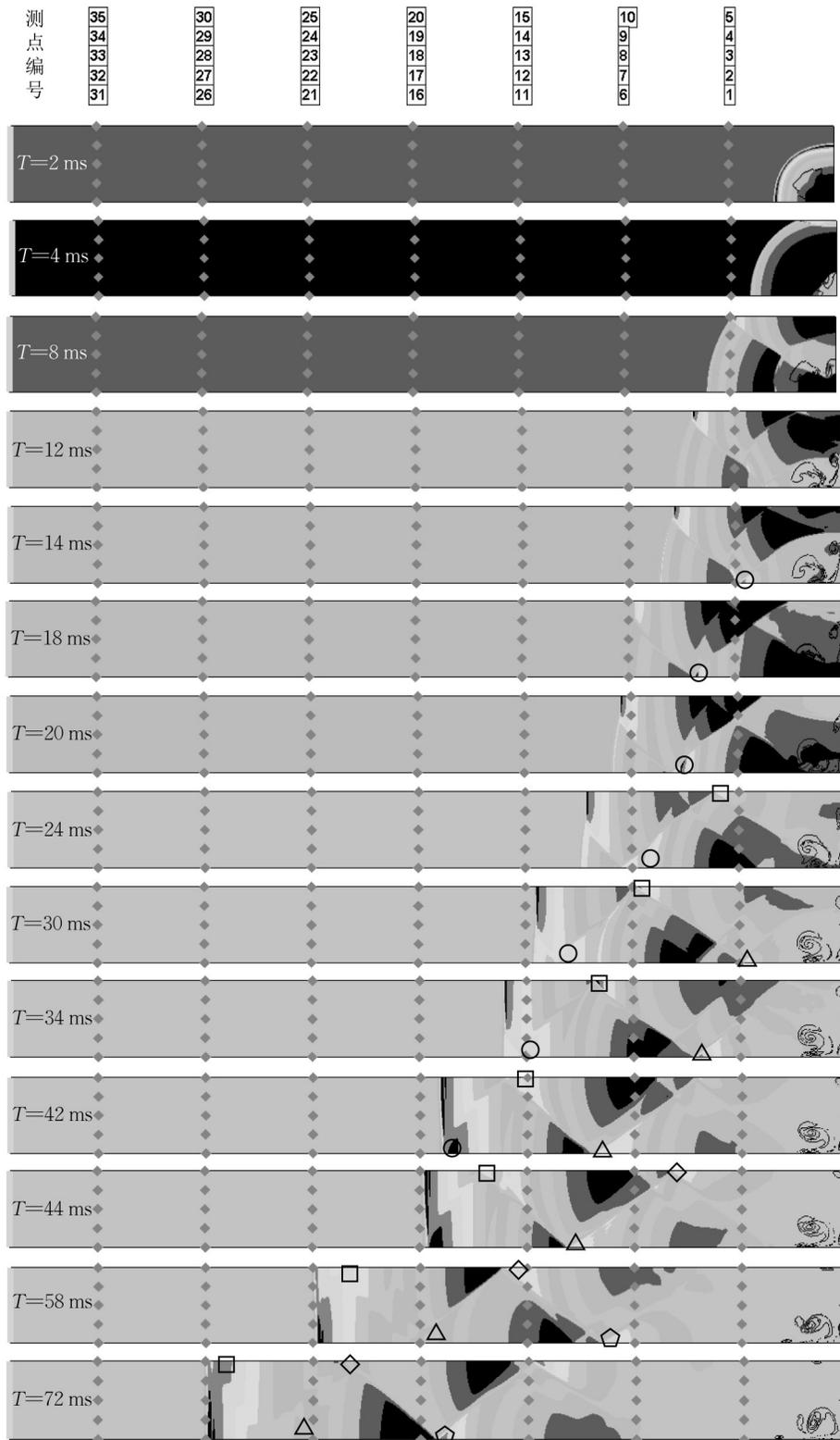


图3 爆炸冲击波在扁平大空间内的传播过程

Fig. 3 Propagation process of shock waves in flat large space

反射波产生的,测点1的第1个峰值是初始入射波产生的,第2个峰值是顶板初次反射波和地面初次反射波形成的第2个马赫波产生的,该波在图3中 $T=14\text{ms}$ 时已用圆圈出,该马赫波传播速率较首个马赫

波大,但马赫杆高度一直不大。测点4和测点5在 20ms 左右的2个峰值分别是地面初次反射波和顶板二次反射波产生的。

测点6和测点7的前3个峰值分别是由初始入

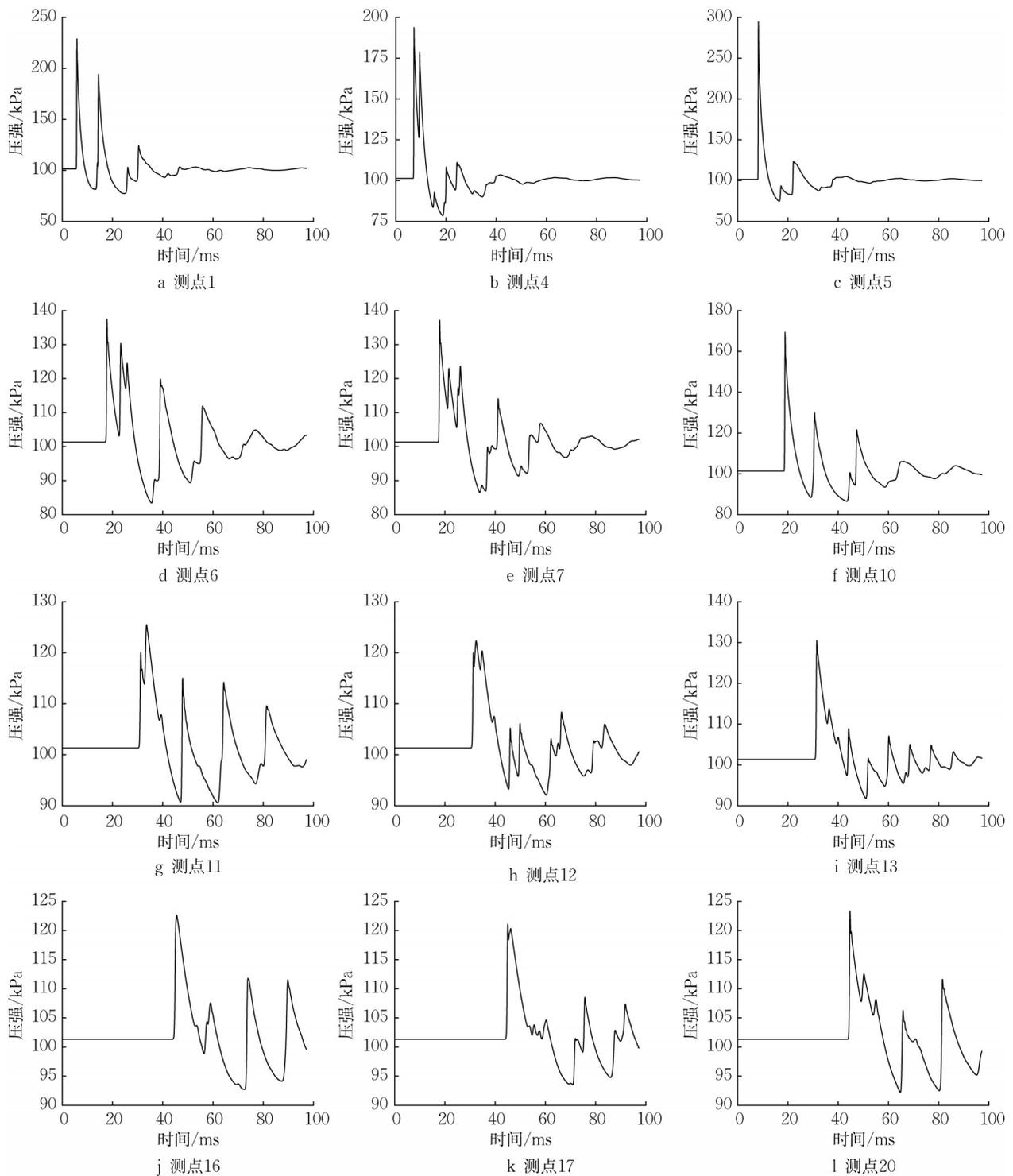


图4 部分测点的压力历程曲线

Fig. 4 Pressure time history of some gauges

射波、顶板初次反射波和第2个马赫波产生的,测点10的第1个峰值是由首个马赫波产生的,第2个峰值是由地面初次反射波和顶板二次反射波形成的第3个马赫波产生的,在图3中 $T=30\text{ms}$ 时已用方框标记出,该马赫波传播速率较首个马赫波大,但马赫杆高度一直不大。

测点13第1个峰值是由首个马赫波产生的,如图3中 $T=30\text{ms}$ 时所示,说明这个位置处首个马赫波已经覆盖13~15这3个测点,第2到第4个峰值是地面初次反射波、顶板二次反射波和地面二次反射波引起的,其中,地面二次反射波的前沿即第4个马赫波已用三角形标记出。12号测点前3个峰值是由

初始入射波、顶板初次反射波和地面初次反射波产生的,第4和第5个峰值是由顶板二次反射波和地面二次反射波引起的。11号测点第1个峰值是由初始马赫波引起的,第2个峰值是由第2个马赫波引起的,如图3中 $T=34\text{ms}$ 时所示,此时,第2个马赫波即将追上首个马赫波,第3个峰值是由第4个马赫波引起的。

测点16第1个峰值是由首个马赫波引起,说明首个马赫波已经覆盖整个竖向空间,且第2个马赫波已经在这个位置追上首个马赫波,第2个峰值是由第4个马赫波产生的。测点17的前2个峰值挨得很近,是首个和第2个马赫波产生的,说明在这个位置处第2个马赫波即将追上第1个马赫波,第3个峰值是由第4个马赫波产生的。测点20第1个峰值是由首个马赫波产生的,第2、第3和第4个峰值分别是由地面初次反射波、第3个马赫波和第4个马赫波产生的。

总之,与在近地空爆情况下特定位置仅承受一次马赫波或入射波和反射波作用不同,在扁平大空间地面处发生爆炸的情况下,特定位置既要承受首个马赫波或初始入射波和顶板初次反射波作用,还要承受来自地面和顶板的多次反射波,以及沿着顶板或地面快速传播的其他后续马赫波作用。由于后续马赫波的作用范围始终较小,因此,承受后续马赫波作用的位置基本在地面和顶板处,或距离地面和顶板很近的位置。同时,后续马赫波的传播速率均较首个马赫波大,因此,后续马赫波最终都追上首个马赫波,并与其交汇,在交汇处的压力较首个马赫波其他位置要大。后续马赫波出现的位置在地面和顶板间交替出现,随着距离爆源越来越远,强度逐渐减弱。

3 最大峰值超压分析

在8种爆炸TNT当量情况下,距离地面5种高度处最大峰值超压随距离爆源水平距离的变化关系如图5所示。可见,距离地面各种高度处的最大峰值超压均随着距离爆源水平距离的增加而减小,且减小幅度逐渐降低;当水平位置相同时,5种高度处最大峰值超压值的差异因距离爆源水平距离远近的不同而不同,距离爆源越近差异越大,距离爆源越远差异越小,直至几乎相同。爆炸TNT当量越小,竖向5个最大峰值超压值趋于相同时所对应的水平距离越大。根据第2节分析可知,竖向最大峰值超压

差异的逐渐变小反映了后续马赫波对首个马赫波影响程度的逐渐降低。对于特定的爆炸TNT当量,存在着某个水平位置临界点,在该位置及其外侧区域任意水平位置处马赫波阵面最大峰值超压恒定。

为了确定竖向各测点最大峰值超压相同时所对应的平面位置以及最大峰值超压值,取竖向各测点所记录最大峰值超压值的最大和最小者的相对误差不大于5%作为马赫波阵面在此位置峰值超压是否恒定的判据,初步判断各工况马赫波阵面峰值超压恒定的位置。然后,在该位置附近加密测点,比较精确地确定各工况马赫波阵面峰值超压恒定的临界点位置。临界点平面比例爆距 Z_s 和临界点最大峰值超压值 P_M 随比例净高 Z_H 的变化关系如图6所示。 Z_s 和 Z_H 的表达式分别为

$$Z_s = \frac{S}{\sqrt[3]{W}} \quad (3)$$

$$Z_H = \frac{H}{\sqrt[3]{W}} \quad (4)$$

式中: S 为某位置与爆源之间的水平距离,m; W 为爆炸TNT当量,kg。

由图6可见,比例净高 Z_H 越大即在相同净高条件下爆炸TNT当量越小,临界点平面比例爆距 Z_s 越大;临界点最大峰值超压值随比例净高的增加呈指数形式衰减。对比分析各工况临界点和临界点外的最大峰值超压发现,临界点外与临界点处的最大峰值超压相对误差均在10%以内,即自临界点向外最大峰值超压值衰减缓慢,这一特点与爆炸冲击波在等截面矩形隧道内的传播情况相同^[34]。

利用最小二乘法对图6数据进行拟合,得到马赫波阵面峰值超压恒定时平面比例爆距 Z_s 和临界点最大峰值超压值 P_M 的计算式为

$$Z_s = 5.75Z_H + 1.89 \quad (5)$$

$$P_M = 11.14 + 18\,127 e^{-12.25Z_H} + 305 e^{-1.88Z_H} \quad (6)$$

二者的相关系数 R^2 分别为0.9916和0.9978。

利用式(3)~(6)可以根据爆炸TNT当量和空间净高快速确定马赫波阵面峰值超压恒定的临界点位置以及该位置处的最大峰值超压值。同时,也可以根据空间净高和临界点距离爆源的水平距离 S 或临界点处的最大峰值超压值确定爆源处的爆炸TNT当量。

由于爆炸冲击波在扁平大空间内传播时会在地面和顶面之间多次反射,导致同一平面位置竖向各点的最大峰值超压不尽相同,为较合理地描述最大

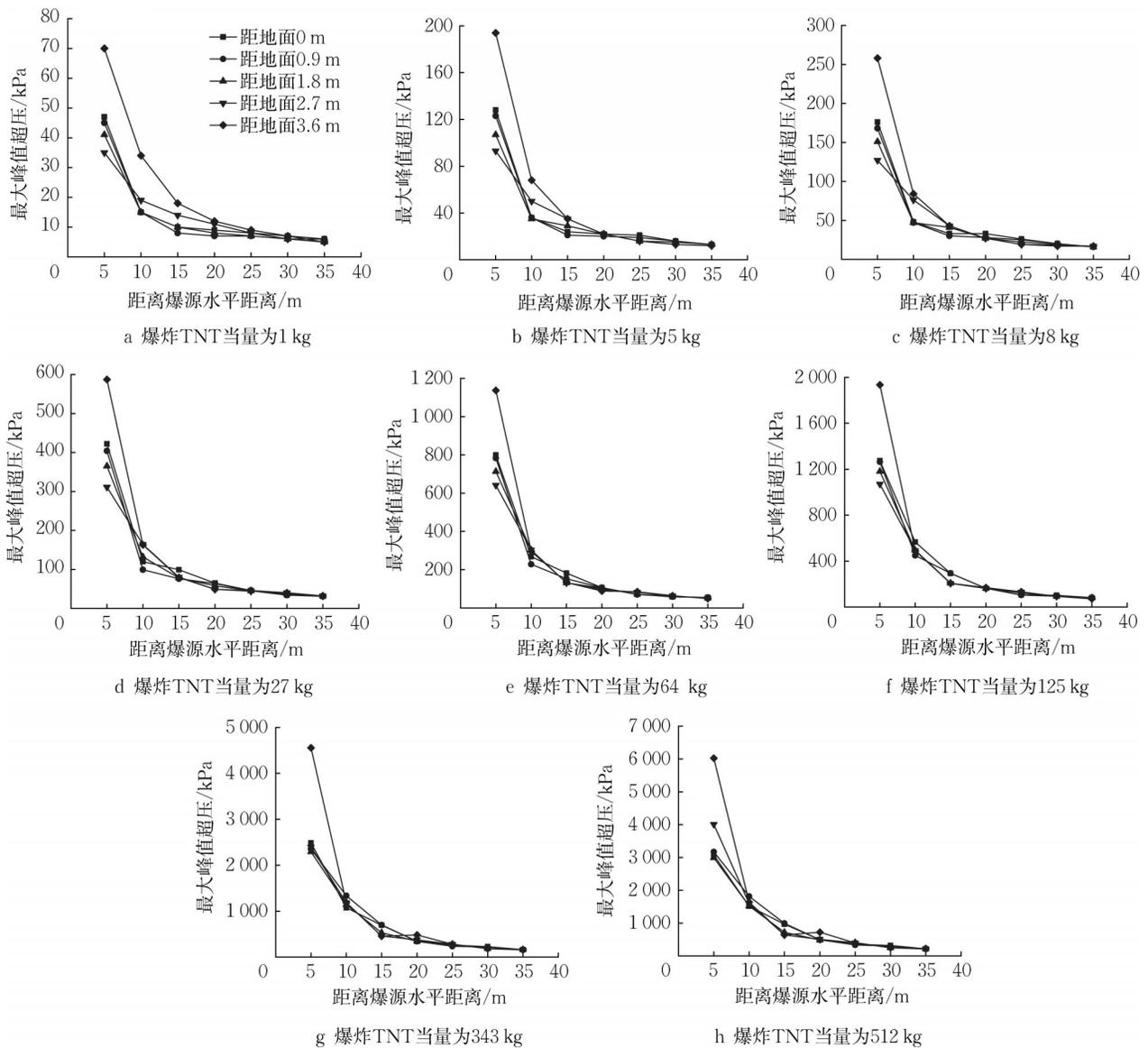


图5 最大峰值超压随距爆源水平距离的变化

Fig. 5 Relationship between maximum peak overpressure and horizontal distance from explosion source

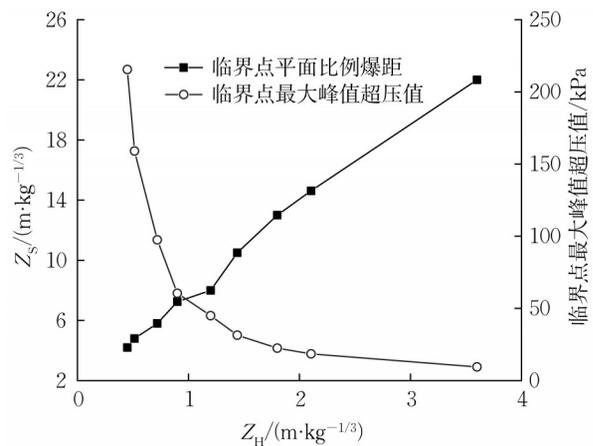


图6 马赫波阵面最大峰值超压恒定临界位置 and 对应值
Fig. 6 Constant critical position and corresponding value of maximum peak overpressure of Mach wave

峰值超压在平面的分布情况,可以采用竖向各点最大峰值超压的平均值来表示。各工况竖向最大峰值超压平均值随平面比例爆距 Z_s 的变化关系如图7所示。

利用最小二乘法对图7数据进行拟合,得到任意平面位置竖向最大峰值超压平均值的计算式如式(7):

$$\bar{P}_{\max} = y_0 + A_1 e^{-Z_s/t_1} \quad (7)$$

其中 y_0 、 A_1 和 t_1 的计算式为

$$y_0 = \frac{1}{a + bZ_H^c}$$

$$A_1 = \frac{1}{a + bZ_H^c}$$

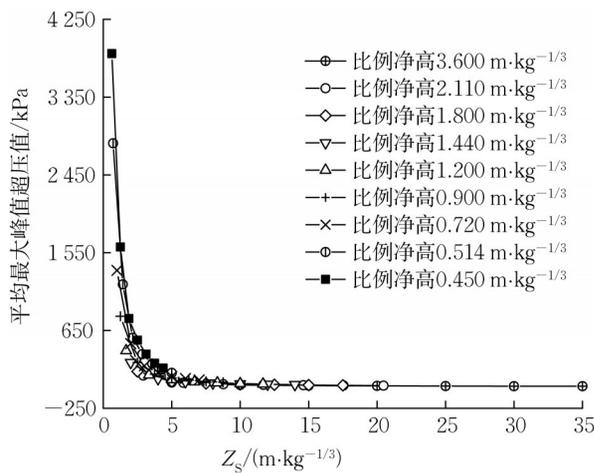


图7 竖向最大峰值超压平均值随比例爆距的变化

Fig. 7 Relationship between average vertical maximum peak overpressure value and scaled distance

$$t_1 = \frac{1}{a + bZ_0^c} \quad (8)$$

式中: a 、 b 和 c 的取值如表3所示。应用该式,并结合文献[35-37]给出的人体伤亡超压阈值,可以快速确定特定爆炸工况下人体伤亡的分布区域。

表3 拟合公式系数和相关系数

Tab. 3 Fitting formula coefficients and correlation coefficients R^2

式(7)待定系数	a	b	c	R^2
y_0	-0.003 3	0.021 8	1.391 0	0.999 8
A_1	-1.016×10^{-5}	5.274×10^{-4}	1.864	0.998 8
t_1	-0.502	1.369	-0.504	0.999 3

4 结论

采用AUTODYN软件分析了爆炸冲击波在地下停车场等扁平大空间内的传播规律,主要结论如下:

(1)与在近地空爆情况下特定位置仅承受一次马赫波或入射波和反射波作用不同,在扁平大空间地面处发生爆炸的情况下,特定位置既要承受首个马赫波或初始入射波和顶板初次反射波作用,还要承受来自地面和顶板的多次反射波以及沿着顶板或地面快速传播的其他后续马赫波作用。后续马赫波的马赫杆高度均较低,但传播速率均较大于马赫波,最终都会追上首个马赫波,并与其交汇,在交汇处的压力较首个马赫波其他位置要大。后续马赫波出现的位置在地面和顶板间交替出现,且距离爆源越来

越远,强度越来越弱。

(2)距离地面各种高度处的最大峰值超压均随着距离爆源水平距离的增加而减小,且减小幅度逐渐降低;同一水平位置竖向各点最大峰值超压值的差异因距离爆源水平距离远近的不同而不同,距离越近差异越大,距离越远差异越小,直至几乎相同。竖向最大峰值超压差异的逐渐变小反映了后续马赫波对首个马赫波影响程度的逐渐降低。

(3)存在着某个水平位置临界点,在该位置及其外侧区域任意水平位置处马赫波阵面最大峰值超压恒定,该位置对应的平面比例爆距随着比例净高的增加而线性增大,该位置的最大峰值超压随比例净高的增加呈指数形式减小。

(4)扁平大空间内任意水平位置处最大峰值超压平均值是比例净高和平面比例爆距的函数,当比例净高相同时,最大峰值超压平均值随平面比例爆距的增加呈指数形式减小。

作者贡献声明:

刘中辉:完成数值模拟、数据分析,撰写论文初稿。

匡志平:确定具体研究内容和实施方案,指导论文撰写及修改成稿。

参考文献:

- [1] BRODE H L. Numerical solutions of spherical blast waves[J]. Journal of Applied Physics, 1955,26(6): 766.
- [2] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [3] 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.
- [4] Department of Defense of the United States of America. Unified facilities criteria (UFC): structures to resist the effects of accidental explosions (UFC 3-340-02) [S]. Washington D C: Department of Defense of the United States of America, 2008.
- [5] 郗洪柱,孔德仁,彭泳卿,等.近地空爆冲击波流场中三波点的轨迹预测方法[J].火炸药学报,2021,44(4): 514. XI Hongzhu, KONG Deren, PENG Yongqing, et al. Prediction method of triple point trajectory in shock wave flow field of near-earth air blast [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021,44(4):514.
- [6] 闫秋实.典型地铁结构内爆炸流场分布及动力反应研究[D].北京:清华大学,2011. YAN Qiushi. Flow field distribution and dynamic response analysis of typical subway structure subjected to internal explosion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

- [7] 周丰峻, 陈叶青, 任辉启. 爆炸近区空气冲击波规则反射和非规则反射[C]//祝贺郑哲敏先生八十华诞应用力学报告会——应用力学进展论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 98-112.
ZHOU Fengjun, CHEN Yeqing, REN Huiqi. Regular and irregular reflection of air shock waves in the vicinity of explosions [C]// Congratulations to Mr. Zheng zhemin on his 80th birthday at the applied mechanics conference——Proceedings of Applied Advances in Mechanics. Beijing: Science Press, 2004: 98-112.
- [8] 杜红棉, 曹学友, 何志文, 等. 近地爆炸空中和地面冲击波特性和验证[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(4): 65.
DU Hongmian, CAO Xueyou, HE Zhiwen, *et al.* Analysis and validation for characteristics of air and ground shock wave near field explosion [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(4): 65.
- [9] 廖真, 唐德高, 李治中, 等. 近地空中爆炸马赫反射数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 164.
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.
- [10] 郭炜, 俞统昌, 金朋刚. 三波点的测量与实验技术研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 55.
GUO Wei, YU Tongchang, JIN Penggang. Test of triple point and study on its test technology [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(4): 55.
- [11] 郭志昆, 宋锋良, 刘峰, 等. 扁平箱形密闭结构内爆炸的模型试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(4): 345.
GUO Zhikun, SONG Fengliang, LIU Feng, *et al.* Experiment of closed flat box structure subjected to internal detonation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2008, 9(4): 345.
- [12] 王鑫, 张连生, 张明明, 等. 密闭空间TNT内爆炸准静态压力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 188.
WANG Xin, ZHANG Liansheng, ZHANG Mingming, *et al.* Study on quasi-static pressure of TNT internal explosion in confined spaces [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 188.
- [13] 胡宏伟, 宋浦, 赵省向, 等. 有限空间内部爆炸研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(4): 539.
HU Hongwei, SONG Pu, ZHAO Shengxiang, *et al.* Progress in explosion in confined space [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(4): 539.
- [14] 胡宏伟, 肖川, 李丽, 等. 有限空间炸药装药内爆炸威力的评估方法综述[J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 1.
HU Hongwei, XIAO Chuan, LI Li, *et al.* Review on evaluation methods of blast power in confined space [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(4): 1.
- [15] BAKER W E. Explosion hazards and evaluation [M]. New York: Elsevier Publishing Company, 1983.
- [16] 胡洋, 朱建芳, 朱锴. 长方体单腔室空腔环境内爆炸效应的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 340.
HU Yang, ZHU Jianfang, ZHU Kai. Experimental study on explosion effect in a closed single rectangular cavity [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(3): 340.
- [17] 张舵, 姚术健, 黄河, 等. 箱型结构内部爆炸破坏研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 18.
ZHANG Duo, YAO Shujian, HUANG He, *et al.* A review on internal blast damage effects of multi-box type structures [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 18.
- [18] 夏志成, 王静, 施翠英, 等. 内爆炸作用下抗爆单元防护隔墙厚度计算[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 144.
XIA Zhicheng, WANG Jing, SHI Cuiying, *et al.* Calculation of thickness of blast wall of antiknock cell under internal explosion [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1): 144.
- [19] 张明明, 张连生, 王鑫. TNT内爆准静态压力实验和数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 195.
ZHANG Mingming, ZHANG Liansheng, WANG Xin. Quasi-static pressure experiment and numerical simulation of TNT internal explosion [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(5): 195.
- [20] 邹玉斌, 田宇隆, 张斌. 地下建筑内爆炸冲击波荷载分布规律研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9): 88.
WU Yubin, TIAN Yulong, ZHANG Bin. Distribution law of in-underground structure explosion-induced shock wave load [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9): 88.
- [21] 周晓青, 郝洪, 李忠献. 地下建筑遭受恐怖爆炸袭击的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 567.
ZHOU Xiaqing, HAO Hong, LI Zhongxian. Numerical simulation of an underground structure under a hypothetical terrorist bombing [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6): 567.
- [22] 曲树盛, 李忠献. 地铁站内爆炸波的传播规律与超压荷载[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 240.
QU Shusheng, LI Zhongxian. Propagation law and overpressure load of blast wave inside subway station [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 240.
- [23] 李世强, 李鑫, 吴桂英. 地铁站内爆炸冲击波传播规律数值模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 175.
LI Shiqiang, LI Xin, WU Guiying. Numerical simulation of propagation law of blast wave inside a subway station [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 175.
- [24] 舒奕展, 王高辉, 卢文波, 等. 爆炸冲击波在双层地铁站内的传播规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1859.
SHU Yizhan, WANG Gaohui, LU Wenbo, *et al.* Study on propagation law of explosive shock wave inside metro station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1859.
- [25] 余晨, 王高辉, 卢文波, 等. 地铁站突发爆炸人员伤亡评估模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1273.
YU Chen, WANG Gaohui, LU Wenbo, *et al.* Research on evaluation model of sudden explosion casualty in subway station

- [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021,17(4): 1273.
- [26] 闫秋实,刘晶波,伍俊.典型地铁站内爆炸致人员伤亡区域的预测研究[J].工程力学,2012,29(2): 81.
YAN Qiushi, LIU Jingbo, WU Jun. Estimation of casualty areas in subway station subjected to terrorist bomb [J]. Engineering Mechanics, 2012,29(2): 81.
- [27] 孔德森,史明臣,张伟伟,等.爆炸冲击波在地铁站内的传播规律研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(5): 863.
KONG Desen, SHI Mingchen, ZHANG Weiwei. Research on propagation laws of explosive shock wave inside metro station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(5): 863.
- [28] 廖维张,杜修力.爆炸波在地铁站中的传播规律研究[J].防灾减灾工程学报,2010,30(5): 538.
LIAO Weizhang, DU Xiuli. Study on propagation regularity of blast wave in subway stations [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010,30(5): 538.
- [29] Century Dynamics Inc. Ansys autodyn user manual [M]. Concord: Century Dynamics, 2010.
- [30] 姚成宝,王宏亮,张柏华,等. TNT 空中爆炸冲击波传播数值模拟及数值影响因素分析[J].现代应用物理,2014,5(1): 39.
YAO Chengbao, WANG Hongliang, ZHANG Baihua, *et al.* Numerical simulation of shock wave generated by tnt explosions in infinite air[J]. Modern Applied Physics, 2014,5(1): 39.
- [31] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWLE Equation of State coefficients for high explosives [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1973.
- [32] SHIN J, WHITTAKER A S, CORMIE D. Incident and normally reflected overpressure and impulse for detonations of spherical high explosives in free air [J]. Journal of Structural Engineering, 2015,141(12): 04015057.
- [33] 匡志平,刘中辉.地面爆炸二维数值模拟的网格尺寸分析[J].防护工程,2021,43(3): 26.
KUANG Zhiping, LIU Zhonghui. Mesh size analysis for two-dimensional numerical simulation of surface explosion [J]. Protective Engineering, 2021,43(3):26.
- [34] BENSELAMA A M, WILLIAM-LOUIS M, MONNOYER F, *et al.* A numerical study of the evolution of the blast wave shape in tunnels [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181: 609.
- [35] North Atlantic Treaty Organization. NATO guidelines for the storage of military ammunition and explosives AASTP-1 [S]. Brussels: North Atlantic Treaty Organization, 2015.
- [36] Department of Defense of the United States of America. DOD ammunition and explosive safety standards; DOD 6055.9-STD [S]. Washington D C: Department of Defense of the United States of America, 2009.
- [37] 李铮.空气冲击波作用下的安全距离[J].爆炸与冲击,1984,4(2): 39.
LI Zheng. Safe distance under airblast loading [J]. Explosion and Shock Waves, 1984,4(2): 39.

(上接第 1867 页)

- Culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [17] CHEN S R, WU J. Modeling stochastic live load for long-span bridge based on microscopic traffic flow simulation [J]. Computers & Structures, 2011, 89 (9/10) : 813. DOI: 10.1016/j.compstruc.2010.12.017.
- [18] 陆晓俊,李雪红,李枝军,等.基于CA模型的大跨桥梁车流荷载模拟方法研究[J].中外公路,2013,33(6): 89. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.06.007.
LU Xiaojun, LI Xuehong, LI Zhijun, *et al.* Study on the simulation method of traffic flow load of long-span bridge based on CA model[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(6): 89. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.06.007.
- [19] 韩万水,武隽,马麟,等.基于微观交通流模型的风—车—桥系统高真实度模拟[J].中国公路学报,2015,28(11): 37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.11.006.
HAN Wanshui, WU Jun, MA Lin, *et al.* High-fidelity simulation of wind-vehicle-bridge system based on microscopic traffic flow model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (11) : 37. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.11.006.
- [20] RUAN X, ZHOU J, TU H, *et al.* An improved cellular automaton with axis information for microscopic traffic simulation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 78: 63. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.023.