

# 长直坑道内爆炸冲击波相似规律研究

王新颖, 秦毅, 赵涯, 綦鸿力

(沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

**摘要:** 通过长直坑道内炸药爆炸后冲击波的超压峰值变化研究坑道内爆炸冲击波的相似规律。使用 AUTODYN 软件建立长直坑道仿真模型, 采用映射方法将 3.25 kg 当量的球形 TNT 炸药在空气中的爆炸状态映射到长直坑道中, 采用经典试验结果对模型进行验证。根据几何相似原理, 通过改变坑道尺寸、坑道截面形状、炸点位置和炸药当量建立多组不同的模型, 模拟计算得到坑道内爆炸冲击波的超压峰值, 分析超压峰值的相似规律。结果表明, 保持坑道截面积不变、改变截面形状及保持爆心距与炸药当量的比值不变、改变炸药当量, 各模型计算得到的冲击波超压峰值具有相似规律。采用本文方法可对其他满足几何相似原理的坑道内爆炸冲击波参数进行预测, 为地下空间设施的安全设计提供参考。

**关键词:** 长直坑道; 冲击波; 超压峰值; 相似规律

中图分类号: O382+.1 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2025.01.010

## Study on the Similarity Law of Explosion Shock Waves in Long Straight Tunnels

WANG Xinying, QIN Yi, ZHAO Ya, QI Hongli

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** The similarity law of explosion shock waves in long straight tunnels is studied through the variation of peak overpressure of shock waves after explosions. A simulation model of a long straight tunnel is established using AUTODYN software, and a mapping method is used to map the explosion state of a 3.25 kg equivalent spherical TNT explosive in the air to the long straight tunnel. The model is validated using classical experimental results. According to the principle of geometric similarity, multiple different models are established by changing the size of the tunnel, the cross-sectional shape of the tunnel, the position of the explosion point, and the explosive equivalent. The peak overpressure of the explosion shock wave in the tunnel is simulated and calculated, and the similarity law of the peak overpressure is analyzed. The results indicate that when keeping the cross-sectional area of the tunnel unchanged, changing the cross-sectional shape, and keeping the ratio of the blast center distance to the explosive equivalent unchanged, as well as changing the explosive equivalent, shock wave overpressure peaks calculated by any model are in similar patterns. The method described here can be used to predict the parameters of explosion shock waves in other tunnels with geometric similarity, providing reference for the safety design of underground space facilities.

**Key words:** long straight tunnel; shock wave; peak overpressure; similarity law

当前现代武器装备建设快速发展,很多国家的军事设施设置于山体或者地下空间内;随着城市建设的不断推进,城市地铁、地下停车场、地下商场等建筑设施的应用越来越广泛。坑道是一种典型的地下防护结构,一旦炸药在坑道内爆炸,所产生的冲击波在坑道内经过反射叠加,超压达到峰值,会对坑道内人员和设备造成严重的毁伤。由于坑道自身长度大、结构各有不同,为得到坑道内爆炸冲击波数据而进行的坑道爆炸试验不仅操作难度高、危险系数大,而且消耗大量的财力、物力,采用数值模拟方法则可大大减少试验消耗。

不同于空气自由场中的爆炸,坑道内部结构复杂,炸药在其中爆炸后会发生复杂的正反射、斜反射及绕流等现象。爆炸相似规律是爆炸冲击波的重要研究内容之一,目前坑道结构内的爆炸冲击波相似规律研究相对较少。文献[1-4]分别通过试验及数值模拟方法对冲击波在坑道内的传播过程进行了分析,并依据试验数据和数值模拟结果拟合得到了相关计算公式,为后续坑道内爆炸冲击波相似规律的研究提供了参考。

为研究坑道内爆炸冲击波的相似规律,国内外学者多从冲击波超压峰值入手,主要采用两种方法。一种方法是改变坑道结构,如改变坑道各方向长度或改变坑道截面形状。郭荣君<sup>[5]</sup>采用有限元仿真方法对L形及T形坑道内的爆炸冲击波进行研究,得到了相似规律的使用条件;纪玉国等<sup>[6]</sup>进行了炸药在单向式和穿廊式两种结构坑道中的爆炸试验,得到了两种坑道中的冲击波传播规律;马荣华等<sup>[7]</sup>建立了截面积相同但截面形状不同的四种坑道模型,并对坑道内炸药爆炸产生的冲击波传播过程进行了有限元模拟,结果表明,圆形和方形坑道内冲击波超压峰值和比冲量衰减快于圆拱形和半圆拱形坑道;杨科之等<sup>[8]</sup>分别建立了光滑坑道和穿廊式出入口丁字接头两种坑道模型,通过超压和作用时间双参数分析了冲击波传播和衰减规律;Kudriakov等<sup>[9]</sup>采用试验和数值模拟相结合的方法研究了两种不同结构的马蹄形坑道和矩形坑道中爆炸冲击波的传播规律。另一种方法是改变炸药的炸点位置及炸药当量。张玉磊等<sup>[10]</sup>设计了三种不同当量炸药在坑道内的爆炸试验,研究了冲击波超压峰值及冲量等参数的变化规律,并根据试验数据得到拟合公式,对方形坑道中冲击波超压峰值进行了预测;陈家辉等<sup>[11]</sup>在矩形坑道内进行了爆炸试验,通过对不同当量炸药在不同坑道内爆炸产生的冲击波压力进行测

试和处理,得到了冲击波超压峰值、比冲量等在坑道内的传播规律,并利用实测数据拟合得到了冲击波压力传播规律计算模型,验证了其有效性;Abedi等<sup>[12]</sup>建立了爆炸冲击波动力响应模型,研究了不同当量炸药下的冲击波超压峰值,确定了爆炸冲击波作用下的峰值粒子速度。

坑道内炸药爆炸后冲击波超压峰值不只与炸药相关参数有关,还与坑道结构有关,影响因素十分复杂,目前开展的关于冲击波相似规律的研究仍有待继续深入。本文首先建立长直坑道仿真模型,以典型坑道试验验证模型的可靠性,然后依据几何相似原理,探究坑道尺寸、坑道截面形状、炸点位置和炸药当量等因素对冲击波超压峰值的影响,分析长直坑道内爆炸冲击波的相似规律,为其他类型坑道中冲击波相似规律的研究提供参考。

## 1 长直坑道模型的建立及验证

### 1.1 长直坑道模型的建立

建立长直矩形坑道模型,长度为18 000 mm,坑道侧截面尺寸为1 200 mm×1 800 mm,将坑道壁简化为刚性壁面,用空气填充,使用1/4模型,三维网格大小为20 mm×20 mm×20 mm,两端边界条件设置为流出边界条件。球形TNT炸药当量为3.25 kg,将炸药在自由场空气中0.1 ms时的爆炸状态<sup>[13-14]</sup>映射到长直坑道模型中,映射后的炸药位置在坑道一端3 000 mm处,距炸点位置每隔1 000 mm设置一个高斯观测点。坑道模型如图1所示,同时建立非映射模型与映射模型进行对比。



图1 长直坑道模型

Fig.1 Model diagram of long straight tunnel

设置五种网格大小进行网格无关性验证,将一维模型计算得到的超压峰值与文献[14]中Henrych理论计算值进行比较,结果如图2所示。

由图2可见:随着爆心距增加,不同网格大小下计算得到的超压峰值衰减趋势一致,并逐渐趋于重合;网格大小为0.04 mm时的计算结果与网格大小为0.05 mm时相差很小,且与理论计算值的偏差也较小。考虑到网格越小,仿真运算量越

大,选用大小为 0.05 mm 的网格对一维映射模型进行网格划分。

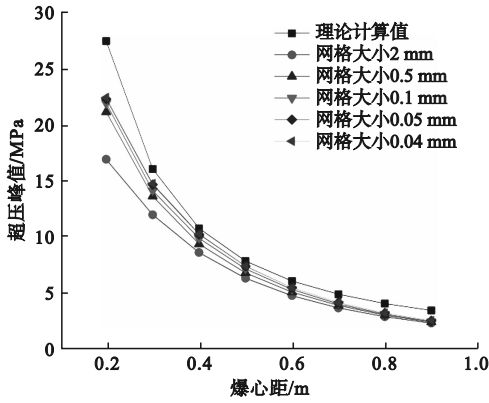


图 2 不同网格大小下计算得到的超压峰值对比  
Fig. 2 Comparison of overpressure peak values calculated under different grid sizes

空气假设为理想状态下的气体,其能量  $E$  和压力  $p_1$  的关系满足式(1),空气材料参数取自 AUTODYN 数据库,如表 1 所示。

$$p_1 = (k - 1)\rho_1 E \quad (1)$$

式中: $p_1$  是空气初始压力; $k$  为气体绝热系数; $\rho_1$  为空气初始密度; $E$  为空气的初始内能。

表 1 空气材料参数

Table 1 Material parameters of the air

$\rho_1 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$k$	$E / (\text{J} \cdot \text{cm}^{-3})$
$1.225 \times 10^{-3}$	1.4	$2.068 \times 10^5$

TNT 炸药采用 JWL 状态方程,如式(2)所示,使用 AUTODYN 中材料参数,如表 2 所示。

$$p_2 = A \left( 1 - \frac{w}{R_1 V_1} \right) e^{-R_1 V_1} + B \left( 1 - \frac{w}{R_2 V_1} \right) e^{-R_2 V_1} \quad (2)$$

式中: $p_2$  为爆压; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $w$  为状态方程参数; $V_1$  为爆轰产物的体积与未爆轰炸药的体积之比。表 2 中  $\rho_2$  为炸药密度。

表 2 TNT 材料参数

Table 2 Material parameters of TNT

$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$w$	$\rho_2 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
373.8	3.75	4.15	0.9	0.35	1.63

## 1.2 长直坑道模型的验证

超压峰值理论值采用文献[10]中试验数据得到的拟合公式进行计算,拟合公式如式(3)所示。仿真结果(包括映射与非映射模型)与理论计算值

对比如图 3 所示。

$$\Delta p_m = \frac{0.194}{(SL/m)^{1/3}} + \frac{0.405}{(SL/m)^{2/3}} + \frac{1.383}{SL/m} \quad (3)$$

式中: $\Delta p_m$  为冲击波超压峰值; $S$  为坑道截面积; $L$  为爆心距; $m$  为 TNT 炸药当量。

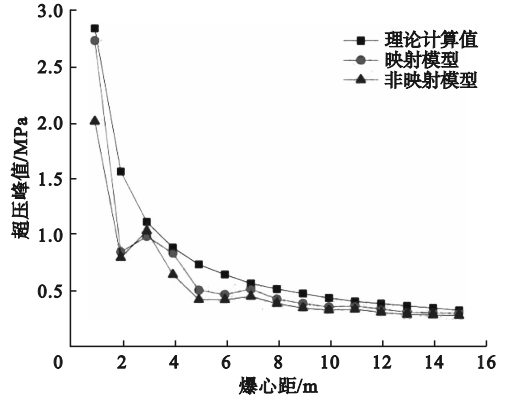


图 3 仿真结果与理论计算值对比  
Fig. 3 Comparison of the simulation results and the theoretical calculated values

由图 3 可见:采用映射模型得到的结果更接近理论计算值,非映射模型的冲击波超压峰值低于映射模型;随着爆心距的增加,三条曲线的偏差逐渐减小。因此,本文采用映射方法建立的数值计算模型具有一定的可靠性,可用于冲击波超压峰值相似规律的分析。

## 2 长直坑道内冲击波相似规律研究

按照爆炸相似规律,某一位置处的超压  $\Delta p$  与炸药当量  $m$  和传播距离  $R$  有关。当炸药当量一定时, $\Delta p$  与  $R$  的函数关系可表示为

$$\Delta p = f_1 \left( \frac{1}{R} \right) \quad (4)$$

比例距离  $Z$  定义为

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{m}} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,若要使两个位置处的超压相等,需满足式(6)。

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \sqrt[3]{\frac{m_2}{m_1}} \quad (6)$$

式中: $m_1$  和  $m_2$  为两种不同的炸药当量; $Z_1$  和  $Z_2$  为对应  $m_1$  和  $m_2$  的比例距离。

超压峰值是反映爆炸冲击波特征的重要参数。实际冲击波超压峰值不仅与炸药当量  $m$  有关,也与炸药密度  $\rho_2$ 、爆速  $D$  (代表炸药性能) 有关,介质的初始压力  $p_0$ 、初始密度  $\rho_0$  也影响冲击

波的超压峰值,且超压峰值随着传播距离  $R$  的增加而衰减。因此,冲击波超压峰值与影响因素间的函数关系可表示为

$$\Delta p_m = f_2(m, p_0, D, \rho_2, \rho_0, R) \quad (7)$$

可见,坑道内炸药爆炸后冲击波超压不仅和炸药有关,还与坑道结构有关,影响因素极其复杂,建立的仿真模型不能仅依靠理论分析进行验证,还需通过仿真结果进行相似规律验证。

本文依据几何相似原理,综合考虑炸药当量和坑道结构等影响因素,通过改变坑道尺寸、坑道截面形状、炸点位置和炸药当量,模拟计算得到不同情况下的爆炸冲击波超压峰值,对比分析冲击波相似规律。

## 2.1 坑道尺寸对冲击波传播过程的影响

在原有模型(编号1)基础上,通过等比例放大或缩小,改变坑道尺寸,设置6个新的模型,编号为2~7,其中4个为等比例放大、2个为等比例缩小。各模型具体参数如表3所示。

表3 不同坑道尺寸模型参数

Table 3 Model parameters for different pit sizes

模型编号	坑道尺寸 (mm × mm × mm)	放大比例
1	18 000 × 900 × 600	1
2	21 600 × 1 080 × 720	1.2
3	27 000 × 1 350 × 900	1.5
4	36 000 × 1 800 × 1 200	2
5	45 000 × 2 250 × 1 500	2.5
6	12 000 × 600 × 400	2/3
7	15 000 × 750 × 500	5/6

以模型4为例分析长直坑道内冲击波的传播过程,模拟计算得到冲击波压力云图,如图4所示。炸药在自由空气中爆炸时,瞬时完成反应并形成高温、高压、高速的气体,这些气体剧烈推动周围静止的空气,同时产生压缩波向四周传播,最后各个波相互叠加形成冲击波,冲击波以炸点为中心向四周传播,其压力达到峰值后开始降低,最后又有所回升。与在空气场中的情况不同,炸药在坑道中爆炸产生的冲击波在首次出现压力峰值后,继续传播到坑道壁面,经过壁面的反射、汇聚,会在部分节点处发生聚集,压力出现后续峰值现象。



图4 模型4坑道爆炸后冲击波压力云图

Fig. 4 Cloud map of shock wave pressure after tunnel explosion of model 4

计算得到模型1~7的冲击波超压峰值如图5所示。可以看出,同一当量炸药在等比例放大或缩小的不同尺寸坑道中爆炸时,不同爆心距处的冲击波超压峰值各不相同,各模型的冲击波传播曲线没有良好的一致性。因此,即使同一当量的炸药在满足等比例放大或缩小的坑道内爆炸,形成冲击波的超压峰值也不具有相似规律。

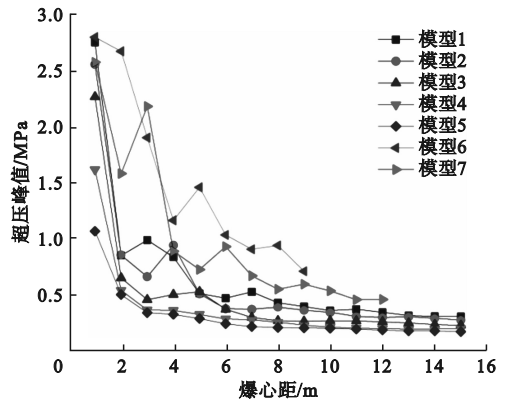


图5 不同坑道尺寸模型的冲击波超压峰值对比

Fig. 5 Comparison of shock wave overpressure data for different tunnel size models

## 2.2 坑道截面形状对冲击波传播过程的影响

对于两端开口的坑道,坑道内爆炸的比例距离因子为  $(SL/m)^{1/3}$ ,超压峰值与比例距离因子间的函数关系可表达为

$$\Delta p_m = f_3((SL/m)^{1/3}) \quad (8)$$

保持坑道截面积  $S = 2.16 \text{ m}^2$  不变,改变长直坑道截面尺寸,即改变坑道截面形状,建立4个长直坑道模型,炸药当量和炸点位置保持不变,对其编号为8~11。模型具体参数如表4所示。

仿真计算得到各模型的冲击波超压峰值曲线,如图6所示。可以看出,尽管冲击波传播到坑道内壁面和壁面角会发生反射,在近场处产生反射汇聚,图中5个模型的超压峰值衰减规律仍基本一致,且相同爆心距处的超压峰值接近重合。

因此,保持截面积不变,改变截面尺寸,各模型在相同爆心距处观测点上测得的超压峰值基本相同。

表 4 不同坑道截面尺寸模型参数

Table 4 Model parameters for different cross-sectional dimensions of tunnels

模型编号	截面尺寸/(mm × mm)
8	1 500 × 1 440
9	2 000 × 1 080
10	2 400 × 900
11	3 000 × 720

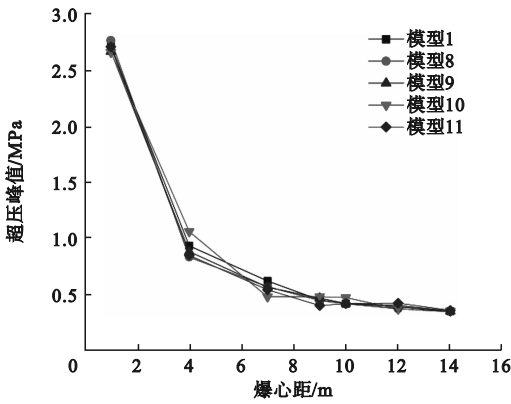


图 6 不同坑道截面尺寸模型的超压峰值数据对比  
Fig. 6 Comparison of peak overpressure data for models with different tunnel cross-sectional sizes

### 2.3 炸点位置对冲击波传播过程的影响

使用 3.25 kg 的 TNT 炸药,网格大小为 25 mm,不通过形变吸收爆炸冲击波的能量。设置不同的炸点位置,建立 5 个新的坑道全模型,编号为 12 ~ 16,具体参数如表 5 所示。

表 5 不同炸点位置模型参数

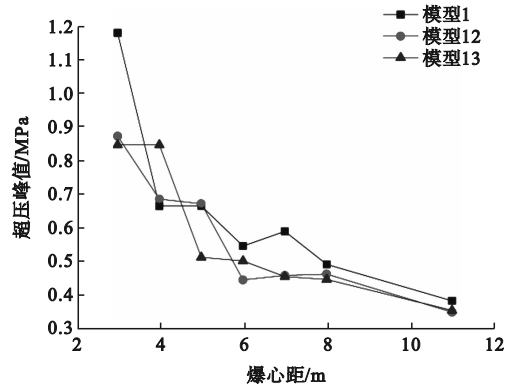
Table 5 Model parameters for different explosion point positions

模型编号	网格数量	炸点位置/mm
1	720 × 72 × 48	(3 000,0,0)
12	720 × 72 × 48	(3 000,100,0)
13	720 × 72 × 48	(3 000,100,100)
14	720 × 72 × 48	(3 500,0,0)
15	720 × 72 × 48	(3 500,100,0)
16	720 × 72 × 48	(3 500,100,100)

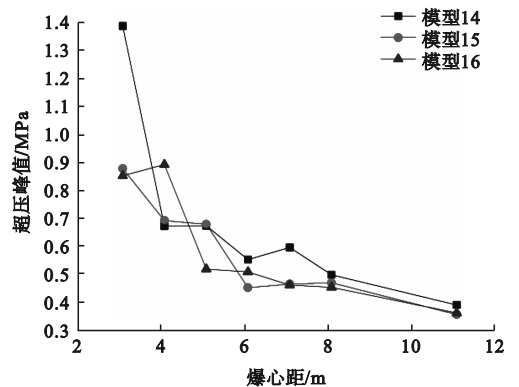
模型 1 和模型 12 ~ 13 的冲击波超压峰值仿真结果如图 7(a) 所示,模型 14 ~ 16 的冲击波超压峰值仿真结果如图 7(b) 所示。将模型 1、模型

12 ~ 13 的炸点位置分别记为炸点 1、炸点 2 和炸点 3。由图 7(a) 可知,三个炸点位置爆炸产生的冲击波超压峰值总体上呈衰减趋势,其中炸点 1 的超压峰值衰减较快,炸点 2 和炸点 3 的超压峰值衰减较慢。当  $L < 7$  m 时,各炸点对应的超压峰值变化未表现出一定规律,炸点 1 (位于坑道中心位置) 的超压峰值未全部大于或小于炸点 2 和炸点 3 (偏离坑道中心位置) 的超压峰值。当  $L \geq 7$  m 时,三个炸点的超压峰值衰减变慢,且超压峰值变化开始呈现一定规律,炸点 1 的超压峰值大于炸点 2 和炸点 3。图 7(b) 中模型 14 ~ 16 计算得到的冲击波超压峰值变化情况与图 7(a) 类似。

在相同坑道内,仅改变炸点位置时,各观测点处测得的超压峰值不同,冲击波传播不具备一定的规律性。



(a) 模型1和模型12~13



(b) 模型14~16

图 7 不同炸点位置模型的超压峰值对比

Fig. 7 Comparison of overpressure peak data for different explosion point location models

### 2.4 炸药当量对冲击波传播过程的影响

炸药当量分别设置为 4.875、6.500、13.000 和 32.500 kg,建立不同的仿真模型,模型编号为 17 ~ 20,具体参数如表 6 所示。

表6 不同炸药当量模型参数

Table 6 Different explosive equivalent model parameters

模型编号	炸药当量/kg	爆心距/mm	炸点位置/mm
17	4.875	1 000	(3 000,0,0)
18	6.500	1 000	(3 000,0,0)
19	13.000	1 000	(3 000,0,0)
20	32.500	1 000	(3 000,0,0)

模拟计算得到不同炸药当量下的冲击波超压峰值,如图8所示。

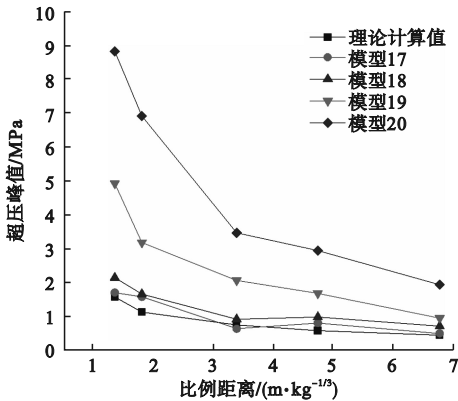


图8 不同炸药当量模型的超压峰值数据对比

Fig. 8 Comparison of overpressure peak data for different explosive equivalent models

由图8可知,随着炸药当量的增加,相同比例距离处的超压峰值也增加,但两者间不满足线性正比关系。

在模型17~20的基础上,保持爆心距 $L$ 和炸药当量 $m$ 的比值不变,进一步对应改变坑道长度为27、36、72、180 m,建立4个新的模型,编号为21~24。各模型的超压峰值仿真结果与理论计算值如图9所示。

由图9可知:与经验公式计算得到的理论值相比,在比例距离为 $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和 $6.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,模型21计算得到的超压峰值偏差为0.16%和8.60%,模型22计算得到的超压峰值偏差为2.27%和8.96%,所有偏差均小于10%,在合理偏差范围内。采用大当量炸药的情况下,在比例距离为 $2.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和 $6.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,模型23的超压峰值偏差分别为5.08%和9.14%,模型24的超压峰值偏差分别为5.50%和9.79%,偏差亦在10%以内。因此,保持爆心距与炸药当量的比值不变,改变炸药当量,各模型计算得到的超压峰值满足相似规律。

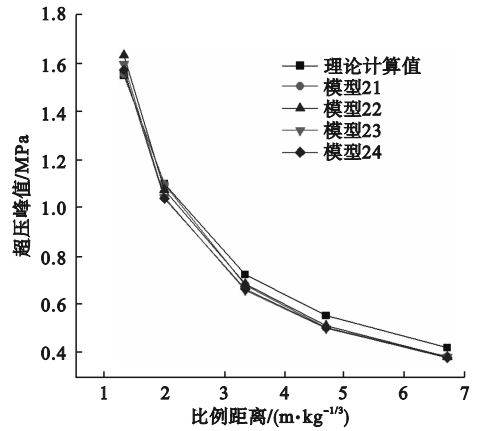


图9 理论计算值与模型21~24仿真数据对比

Fig. 9 Comparison among theoretical values and simulation data of models 21~24

### 3 结论

建立了长直坑道内炸药爆炸的仿真模型,并以典型坑道试验数据验证了模型的可靠性,依据爆炸相似规律,研究了不同因素对冲击波超压峰值的影响,得到以下结论。

1) 单独改变坑道尺寸、炸点位置的超压峰值仿真结果未表现出与坑道尺寸及炸点位置变化相似的规律性。

2) 改变坑道截面形状,各模型的超压峰值仿真结果与拟合公式计算得到的理论值偏差均小于10%,超压峰值衰减规律一致且基本重合,满足相似规律。

3) 单独改变TNT炸药当量,各模型的超压峰值仿真结果与炸药当量间不具有线性关系;保持爆心距与炸药当量的比值不变,对应改变坑道长度,则各模型的超压峰值数据曲线高度重合,仿真结果与拟合公式计算得到的理论值偏差均在10%以内,满足相似规律,具备可预测性。

### 参考文献 (References):

- [1] 李秀地,郑颖人,李列胜,等. 长坑道中化爆冲击波压力传播规律的数值模拟[J]. 爆破器材,2005,34(5):4-7.  
LI X D, ZHENG Y R, LI L S, et al. Simulation of the pressure attenuation of chemical shock wave in long tunnels[J]. Explosive Materials, 2005, 34(5): 4-7. (in Chinese)
- [2] 徐利娜,雍顺宁,王凤丹,等. 直坑道内爆炸冲击波超压传播规律研究[J]. 测试技术学报,2014,28(2):114-118.  
XU L N, YONG S N, WANG F D, et al. Study of blast wave overpressure propagation inside straight tunnel[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28(2): 114-118. (in Chinese)
- [3] 杨鑫,石少卿,程鹏飞. 空气中TNT爆炸冲击波超压峰值的

- 预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008, 25(1): 15-18, 31.
- YANG X, SHI S Q, CHENG P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air [J]. *Blasting*, 2008, 25(1): 15-18, 31. (in Chinese)
- [4] 刘晶波, 闫秋实, 伍俊. 坑道内爆炸冲击波传播规律的研究 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(6): 8-11, 191-192.
- LIU J B, YAN Q S, WU J. Analysis of blast wave propagation inside tunnels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(6): 8-11, 191-192. (in Chinese)
- [5] 郭荣君. 坑道内爆炸冲击波传播规律及坑道动力响应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [6] 纪玉国, 张国凯, 李干, 等. 单向式、穿廊式坑道中温压炸药爆炸冲击波消波性能及机理[J]. *兵工学报*, 2023, 44(S1): 26-40.
- JI Y G, ZHANG G K, LI G, et al. Attenuation characteristics and mechanism of explosion shock wave generated by thermobaric explosive in L-shaped and gallery tunnels[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(S1): 26-40. (in Chinese)
- [7] 马荣华, 贾波, 杨丽, 等. 坑道截面形状对爆炸冲击波传播规律的影响[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(2): 92-96.
- MA R H, JIA B, YANG L, et al. The influence of tunnel section shape on propagation law of blast shock wave[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(2): 92-96. (in Chinese)
- [8] 杨科之, 刘盛, 周布奎. 光滑坑道中基于波形参数的冲击波衰减规律[J]. *防护工程*, 2022, 44(4): 30-35.
- YANG K Z, LIU S, ZHOU B K. The law of shock wave attenuation based on waveform parameters in smooth tunnels[J]. *Protective Engineering*, 2022, 44(4): 30-35. (in Chinese)
- [9] KUDRIAKOV S, STUDER E, BERNARD-MICHEL G, et al. Full-scale tunnel experiments: blast wave and fireball evolution following hydrogen tank rupture[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(43): 18911-18933.
- [10] 张玉磊, 王胜强, 袁建飞, 等. 方形坑道内爆炸冲击波传播规律[J]. *含能材料*, 2020, 28(1): 46-51.
- ZHANG Y L, WANG S Q, YUAN J F, et al. Experimental study on the propagation law of blast waves in a square tunnel [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(1): 46-51. (in Chinese)
- [11] 陈家辉, 孔德仁, 徐春冬, 等. 坑道内冲击波压力测试与分析[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(12): 63-68.
- CHEN J H, KONG D R, XU C D, et al. Shock wave pressure test and analysis in tunnel [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(12): 63-68. (in Chinese)
- [12] ABEDI A S, HATAF N, GHAHRAMANI A. Analytical solution of the dynamic response of buried pipelines under blast wave[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 301-306.
- [13] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge [J]. *The Physics of Fluids*, 1959, 2(2): 217-229.
- [14] HENRYCH J, ABRAHAMSON G R. *The dynamics of explosion and its use* [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company, 1979.

(责任编辑: 宋颖韬)

(上接第 64 页)

- [5] HAN Z Y, LI D Y, ZHOU T, et al. Dynamic progressive fracture behavior of axially confined sandstone specimens containing a single flaw[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 122: 103597.
- [6] 孙家军, 肖桃李, 折海成, 等. 围压作用下不同裂隙位置复合岩裂纹演化研究[J]. *水利水电技术*, 2023, 54(9): 190-200.
- SUN J J, XIAO T L, SHE H C, et al. Study on the fracture evolution of composite rocks with different fracture locations under the action of surrounding pressure[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9): 190-200. (in Chinese)
- [7] 刘树新, 郑旭, 丁凯, 等. 含预制断续裂隙类岩石材料力学特性试验及数值模拟研究[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(4): 181-185.
- LIU S X, ZHENG X, DING K, et al. Experimental and numerical simulation study on mechanical properties of sandstone with prefabricated intermittent fissures [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(4): 181-185. (in Chinese)
- [8] 成小雨, 李树刚, 龚选平. 预制裂隙砂岩相似材料损伤破坏特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 171-178.
- CHENG X Y, LI S G, GONG X P. Experimental study on damage and failure characteristics of similar materials with prefabricated fracture sandstone [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 171-178. (in Chinese)
- [9] 卢家琦, 史文兵, 杨根兰, 等. 基于离散元法的采空区诱发斜坡变形破坏过程研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(3): 143-151.
- LU J Q, SHI W B, YANG G L, et al. Discrete element method-based study on failure process of goaf area-induced slope deformation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(3): 143-151. (in Chinese)
- [10] 刘伟, 薛浩东, 赵飞洋, 等. 基于 PFC<sup>2D</sup> 软件陶粒混凝土抗压强度分析[J]. *新型建筑材料*, 2022, 49(7): 45-49, 57.
- LIU W, XUE H D, ZHAO F Y, et al. Compressive strength analysis of ceramsite concrete based on PFC<sup>2D</sup> [J]. *New Building Materials*, 2022, 49(7): 45-49, 57. (in Chinese)
- [11] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L, et al. Experimental and DEM study on failure behavior and stress distribution of flawed sandstone specimens under uniaxial compression [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 118: 103266.
- [12] LI X W, YAO Z S, LIU X H, et al. Energy evolution and damage mechanism of fractured sandstone with different angles [J]. *Energies*, 2022, 15(4): 1518.

(责任编辑: 徐淑姣)