

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.001

爆炸冲击波在坑道内传播规律研究*

于文华^{①②} 张亚栋^①

①解放军理工大学国防工程学院(江苏南京,210007)

②中国人民解放军 66469 部队(北京,100042)

[摘 要] 为了给坑道防护工程防爆炸空气冲击波的设计与研究提供一定的参考依据,收集整理了国内外常用的计算坑道口外爆炸产生的坑道内爆炸空气冲击波传播参数的计算方法,对其进行了比较和分析后给出了能够较好描述冲击波传播规律的计算方法。采用 ANSYS AUTODYN 有限元软件对某坑道比例模型试验进行了数值模拟,将模拟结果与坑道模型试验数据进行了比较,说明采用 ANSYS AUTODYN 有限元软件进行爆炸冲击波问题的数值模拟是可行的。

[关键词] 爆炸冲击波 坑道 冲击波超压峰值 超压冲量 数值模拟

[分类号] O 382+.1 TQ560.7

引言

常规武器在坑道防护工程口部附近爆炸产生的爆炸冲击波在坑道内传播,对坑道内的人员和设备构成极大的威胁。以往进行防护工程设计与研究时大多依据核爆炸冲击波,这样常规弹药爆炸在坑道内爆炸冲击波的防护工程设计缺少有效的依据^[1]。国内外学者和专家对坑道内爆炸冲击波传播规律进行了研究,以不同形式给出了一些经验计算方法。为便于比较,将计算方法表达形式进行了统一。

1 冲击波超压峰值

1)工程兵科研三所的学者针对坑道内爆炸冲击波传播进行了野外爆炸试验^[2],结合国外研究成果,提出了坑道入射压力参数的计算方法:

$$\Delta p_m = 0.258 (nz^3/1.13^2)^{-0.519} z^{-1.58} e^{-0.642R/C^{1/3}} \quad (1)$$

式中: Δp_m 为入射冲击波超压峰值,MPa; $z = D/\sqrt[3]{C}$ 为坑道比例等效直径,m/kg^{1/3};C 为 TNT 等效装药质量,kg; D 为坑道等效直径,m; $n = L/D$ 为比例距离, L 为计算断面距洞口距离,m; R 为爆心距洞口距离,m。

2)美国工程兵水道试验站(WES)于 1984 年用比例模型实验模拟了球形装药在坑道入口正前方爆炸情况下,100 ~ 1000kg 的普通高爆弹药产生的短时高峰值冲击波^[3]:

$$\Delta p_m = p_i / \{1 + \tan[(\pi/2)\bar{X}/(\bar{X} + \bar{E})]\} \quad (2)$$

式中: p_i 为坑道入口处的压力,MPa; $\bar{X} = L/\sqrt{A}$ 为距入口的比例距离; A 为坑道截面积,m²; $\bar{E} = 0.586 \times (C^{2/3}/A)(p_0/p_i)$ 为无量纲经验衰减系数; p_0 为大气压力,MPa。

3)1997 年,WES 将装药沿坑道的中轴线悬挂,根据坑道模型和原型实验结果,提出了坑道口外爆炸时,坑道内空气冲击波峰值超压在坑道内衰减的计算方法^[4]:

$$\Delta p_m = C_1 n^{-B} z^{-1} \quad (-3.5 \text{ m/kg}^{1/3} \leq l_R \leq 0) \quad (3)$$

其中, $C_1 = 2200e^{l_D}$, $B = 0.95 + 0.16l_R$, $l_R = R/C^{1/3}$, $l_D = D/C^{1/3}$

4)德国厄恩斯特—马赫研究所对圆柱状高爆炸药在入口外地面不同位置和方向上直立爆炸进行了详细研究^[5]。将入口前爆炸转换为小药量的堵口爆炸:

$$p_{\text{out}}/p_{\text{in}} = 0.375R^{-0.96} (D \leq R \leq 5D) \quad (4)$$

式中: p_{out} 为装药在入口外爆炸时坑道内某点的压力,MPa; p_{in} 为装药在堵口爆炸时相应点的压力,MPa。

2 冲击波冲量

1)工程兵科研三所给出口外爆炸冲击波冲量的计算方法:

$$I/C^{1/3} = 0.24n^{-0.081} z^{-1.489} (R/C^{1/3})^{-0.196} \quad (5)$$

式中: I 为冲击波冲量,MPa · ms; R 为爆点距坑道

* 收稿日期:2013-03-06

作者简介:于文华(1985~),男,硕士,主要从事抗爆结构研究。E-mail:yuwangjinghua@126.com

通信作者:张亚栋(1970~),男,教授,主要从事抗爆结构研究。E-mail:zhyd@e172.com

口部距离, m ; C 为 TNT 等效装药质量, kg 。

2) 美国工程兵水道试验站 (WES) (1984) 给出计算方法:

$$I/C^{1/3} = 0.042(1.13z^{-1})^{1/2}[(p_0 + \Delta p_L)/p_0]^{0.6} \quad (6)$$

3) 后勤工程学院李秀地等由模型坑道爆炸试验(坑道截面积为 $0.67m^2$, 装药量 $1000 \sim 4600g$) 实测数据拟合出了冲击波冲量计算方法^[6]:

$$I/C^{1/3} = 0.1(1.13z^{-1})^{1/2}[(p_0 + \Delta p_L)/p_0]^{0.5} \quad (7)$$

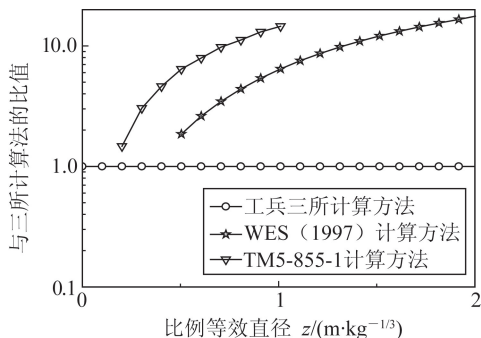
式中: p_0 为大气压力, MPa ; Δp_L 为冲击波超压峰值, MPa ; z 为坑道等效比例直径, $z = D/\sqrt[3]{C}$, $m/kg^{1/3}$ 。

3 爆炸冲击波参数的计算方法比较分析

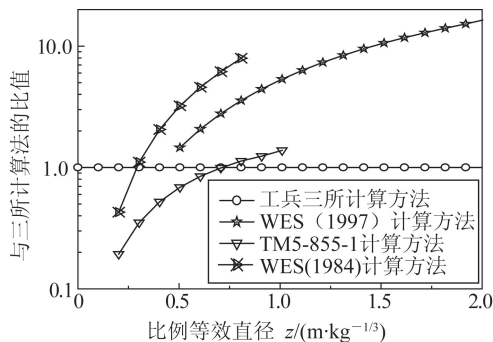
由于工程兵科研三所计算方法的适用范围最广, 本文以工程兵科研三所给出的计算坑道口外爆炸冲击波参数的计算方法为参照, 将各计算方法与其作比值来考虑各冲击波参数计算方法间的差异。通过改变 n 的取值, 研究坑道内不同断面处冲击波参数计算方法的差异随坑道比例装药等效直径的变化情况, 为今后的工程设计和应用提供依据。

3.1 沿轴线坑道口外 ($R=1.0D$) 爆炸时空气冲击波超压峰值比较分析

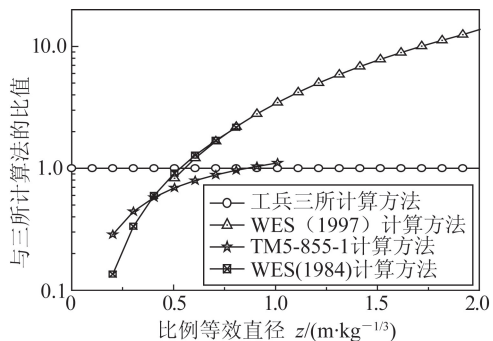
图 1 为坑道内不同断面处 ($L=0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $5.0D$ 和 $8.0D$) 不同计算方法预测的冲击波超压峰值的比较情况, 图中的 TM5-855-1 计算方法来自方秦等译的常规武器防护设计原理资料。由比较结果可见, 对于坑道口外轴线上爆炸冲击波超压峰值的计算, 各计算方法的计算结果有一定的差异, 特别是在距离坑道口部较近 ($n \leq 1.0$) 的坑道断面上, 计算结果更分散。比例等效直径较小 ($0.5 \leq z \leq 1.0$) 时, WES(1984) 计算方法和 WES(1997) 计算方法较为接近。在比例等效直径较大处, 不同计算方法之间差异较大, 工程兵三所算法的计算结果明显偏小, 德国厄恩斯特—马赫研究所的计算结果明显偏大, 而 WES(1997) 计算方法较适中。



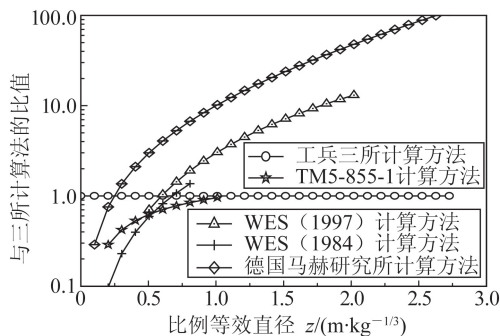
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) $L=0.5D$; (b) $L=1.0D$;

(c) $L=5.0D$; (d) $L=8.0D$

图 1 坑道内不同断面处的冲击波超压峰值比较

Fig. 1 Comparison of peak overpressure of shock wave at different cross-section of tunnels

经过比较分析后, 对于坑道内爆炸冲击波超压峰值的计算方法, 建议在比例等效直径 $0.5 \leq z \leq 2.0$ 的范围内使用 WES(1997) 的计算方法; 在 $0.25 \leq z \leq 0.5$ 的范围内使用 WES(1984) 的计算方法。

3.2 沿轴线坑道口外 ($R=1.0D$) 处爆炸时坑道内爆炸冲击波冲量比较分析

图 2 为坑道内不同断面处 ($L=0.5D$ 、 $1.0D$ 、 $5.0D$ 和 $8.0D$) 不同计算方法预测的冲击波冲量的比较情况。

由图 2 可知, 对于口外爆炸时的坑道内爆炸冲击波冲量, 不同计算方法的计算结果较为分散, 相比较而言, 工程兵三所的计算方法值明显偏小, 特别是

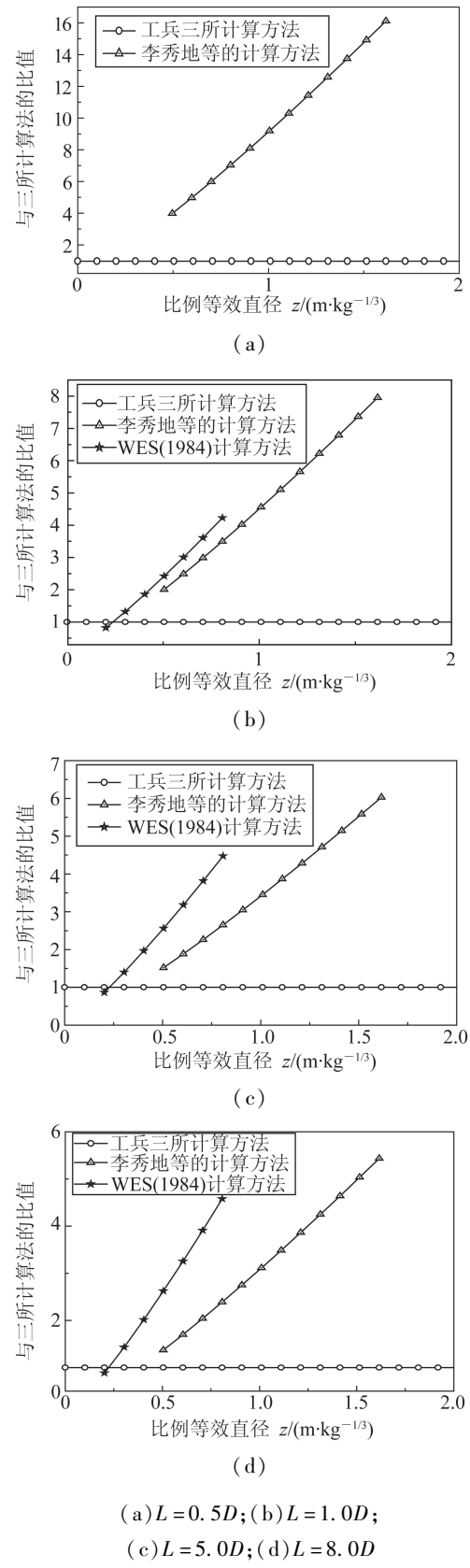


图2 坑道内不同断面处的冲击波冲量比较
Fig. 2 Comparison of impulse of shock wave
at different cross-section of tunnels

在比例等效直径较大的范围内。李秀地等的计算方法较为适中,但其适用范围较小,因此,建议进行坑

道内爆炸冲击波冲量的计算时,在 $0.50 \leq z \leq 1.75$ 的范围内,采用李秀地等的计算方法;在 $0.25 \leq z \leq 0.50$ 的范围内可以采用 WES(1984)的计算方法。

4 数值模拟

为验证采用数值模拟研究爆炸冲击问题的有效性,采用 AUTODYN 显式有限元计算软件,对坑道内爆炸冲击波传播规律进行模拟。

4.1 材料模型

AUTODYN 中自带的材料库中有上百种材料模型,其中的空气和炸药模型可以很好地用于模拟爆炸冲击波问题。

4.1.1 空气材料模型

理想空气状态方程如式(8),计算参数见表1。
$$p = (\gamma - 1)\rho C_v T + p_s \tag{8}$$

表1 空气材料模型计算参数

Tab. 1 Material calculated parameters of air molded						
$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$C_v/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$T/$ K	γ	$p_s/$ Pa	$E_0/$ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)	
1.255	717.6	288.2	1.4	0	2.068E5	

4.1.2 炸药材料模型

TNT 材料模型用式(9)JWL 状态方程,参数见表2。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \tag{9}$$

表2 TNT 材料模型计算参数*

Tab. 2 Material calculated parameters of TNT model					
$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$A/$ Pa	$B/$ Pa	R_1	R_2	
1630	3.738E11	3.747E9	4.15	0.9	
ω	$E_0/$ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$)	V_0	$D_0/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	p_{CJ}/Pa	
0.35	7.0E9	1.0	6930	2.7E10	

注: * A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 是材料常数; p 是压力; V_0 是相对体积; D_0 是 TNT 起爆速度; E_0 是初始比动能。

4.2 计算模型及计算结果分析

模拟的坑道模型是以某比例模型实验用坑道模型为参照,模型采用方形截面坑道,尺寸为 $360\text{mm} \times 360\text{mm}$,坑道为两端开口,长为 1200mm 。炸药采用集团装药的形式,将炸药置于距坑道口部 $1.0D$ 处的地面上。考虑对称性,建立 $1/2$ 模型进行分析,采用 Euler-Lagrange 耦合方法,网格为 8 节点 6 面体,网格尺寸 6mm ,共计 320000 个单元,将坑道四壁设置为刚性体,与空气采用 Full Couple 方式进行耦合。装药量见表3。

表 3 模拟采用的 TNT 装药量
Tab.3 TNT quality of simulated

比例等效直径 $z/(m \cdot kg^{-1/3})$	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
装药量/g	2986.0	373.0	110.6	46.7	23.9	13.8	8.7	5.8

表 4 数值模拟与试验数据对比
Tab.4 Data comparison of numerical simulation and experiment

装药量/g	142.7		42.0	
	$\Delta p_m/\text{MPa}$	$I/(\text{MPa} \cdot \text{ms})$	$\Delta p_m/\text{MPa}$	$I/(\text{MPa} \cdot \text{ms})$
试验数值	1.299	1.066	0.381	0.326
数值模拟	1.740	1.595	0.514	0.441
误差/%	33.97	45.30	34.94	26.20

由表 4 数值模拟结果与试验数据对比发现,虽然二者有一些差异,但当考虑模拟时的简化以及实验测量误差后,可以采用 AUTODYN 软件模拟坑道内爆炸冲击波传播问题。

5 结论

1) 现有的计算坑道口外爆炸冲击波的经验计算方法存在较大差异,各计算方法均有自己的适用范围,因此在实际的工程应用中应加以区分。在进行比较分析后,给出了较为适中的经验计算方法,可以作为工程设计与研究的参考;

2) 采用 AUTODYN 软件模拟坑道内爆炸冲击波传播,并将其与模型试验结果进行了比较后,说明采用 AUTODYN 软件进行数值模拟是可行的。

参 考 文 献

[1] 杨科之,杨秀敏.坑道内化爆冲击波的传播规律[J].爆炸与冲击,2003,23(1):37-40.
Yang Kezhi, Yang Xiumin. Shock waves propagation inside tunnels[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1):37-40.

[2] 李晓军,张殿臣,李清献,等. 常规武器破坏效应与工程防护技术[R]. 洛阳:总参工程兵科研三所,2001.

Li Xiaojun, Zhang Dianchen, Li Qingxian, et al. Damage effects of conventional weapon and engineering protection techniques[R]. 2001.

[3] Britt J R. Attenuation of short duration blast in entranceways and tunnels[C]//Proceeding of the 2nd Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structure. 1985:466-471.

[4] Welch. C R. In-tunnel air blast engineering model for internal and external detonations [C]//Proceeding of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Mclean, Virginia, 1997: 195-208.

[5] Scheklinski-Glück G . Blast in tunnels and rooms cylindrical HE-charges outside the tunnel entrance [C]//Proceeding of the 6th Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structure. Panama City Beach , Floride, 1993:450-455.

[6] 李秀地,郑颖人,郑云木,等. 坑道内冲击波冲量传播规律的实验研究[J]. 爆破器材,2007,36(3):4-7.
Li Xiudi , Zheng Yingren, Zheng Yunmu, et al. Scale model tests to determine blast impulse from HE-charges in-tunnel[J]. Explosive Materials , 2007,36(3):4-7.

Study on Propagation Laws of Explosion Shock Wave in Tunnels

YU Wenhua^{①②}, ZHANG Yadong^①

①College of Defense Engineering, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

②66469 Troops of PLA (Beijing, 100042)

[ABSTRACT] In order to provide some references for the design and research of the tunnel fortification engineering, some well accepted methods to calculate the parameters of air shock wave in tunnels were collected. After comparison and analysis of these methods, a better calculation method for describing the laws of shock wave propagation has been summed up. ANSYS AUTODYN software was used to simulate the spreading of air shock wave in the tunnel. Based on the further comparison of the numerical values and experimental data, it shows that it is feasible to analyze the problem of explosive shock by using ANSYS AUTODYN.

[KEY WORDS] explosion shock wave, tunnel, peak overpressure of shock wave, impulse of peak overpressure, numerical simulation