

文章编号:1006-9941(2008)06-0741-04

数值模拟研究分叉巷道中冲击波传播规律

覃 彬, 张 奇, 向 聪, 王登贵, 李 伟

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:为了研究几何分叉结构对冲击波传播特性的影响,利用 LS-DYNA 三维数值模拟计算程序,对同一弱冲击波通过不同角度的两向分叉巷道时传播、衰减的情况行了数值模拟,并提出了超压/冲量(比)准则来衡量“平面波”。研究表明:超压(比)准则适用于描述分布的不均性,而冲量(比)准则能更好地衡量分叉巷道中冲击波的破坏作用;分叉角度的影响较大,随着分叉偏转角增大,主巷道内冲量将增大而分叉巷道内冲量将减小,恢复“平面波”的距离也增大,但不超过 6 倍巷道等效直径。

关键词:爆炸力学;分叉巷道;平面冲击波;数值模拟
中图分类号:TJ55; O38

文献标识码:A

1 引 言

分叉是巷道常见建筑结构之一,对通过的空气冲击波将造成一定的影响。对分叉巷道内冲击波传播规律的研究是弹药等武器作战效能评估的重要依据,也是对煤矿井下爆炸事故的系统安全性进行分析的基础。超压及冲量是衡量冲击波强度的参量,壁面粗糙程度、管径、分叉及转弯结构、障碍物是造成冲击波能量损失的主要原因。在一般的光滑巷道中,冲击波的超压指其峰值功率,冲量则代表其能量,冲量的衰减要比超压衰减慢很多。

国内外对于冲击波在地下巷道内的传播规律已进行了一定研究。前苏联的萨文科等^[1]科学家通过微缩管道实验近似测定了冲击波通过分叉巷道的衰减系数;意大利学者 Dadone^[2]通过五种管道实验,考查了空气冲击波通过交叉点的压力衰减特征,认为冲击波在交叉点处的应力衰减可以忽略管道的尺度效应,为微缩模型实验提供了理论依据;R. W. Charles^[3]及 C. Lunderman^[4]则根据模型与原型实验数据提出了巷道内冲击波超压的计算公式;Britan A^[5]通过计算机数值模拟的方法研究空气冲击波在网状结构中的衰减规律,并由此提出了地下空间防爆设计的基本思路。国内的研究是在继承国外经验的基础上展开的,杨科之^[6]等人通过数值计算对巷道内化爆冲击波的传播进行模拟;庞伟宾^[7-9]等人采用实验研究,并通过量纲分析、经验公式拟合,研究空气冲击波在 T 型及直

角转弯巷道结构内的走时规律。上述研究具有参考意义,但都没有对分叉角度的影响作系统研究,某些实验数据较为陈旧,也没有考虑冲击波反射后在巷道截面上的不均匀性(紊流区,非平面波),因此本工作将针对分叉角度及“平面波”这两方面进行研究。

数值模拟选取了 LS-DYNA 软件,充分利用其重启分析的优势,对同一冲击波通过五种不同分叉结构的情况进行了分析,考察分叉角度对超压及冲量变化的影响,并采用超压比准则或冲量比准则对紊流区进行了量化描述,给出在不同分叉角度下冲量衰减的估算方法。

2 计算物理模型

为了考查分叉几何结构的影响,选取了恒定的初始冲击波——波阵面压力为 470.6 MPa,作用时间为毫秒量级,进而连接不同分叉角的巷道进行后续分析。巷道截面积为 6 m²,分叉结构分别选取 45°、90°、135°、Y 型及 T 型,为井下巷道较常见的结构,图 1 为典型结构的示意图。

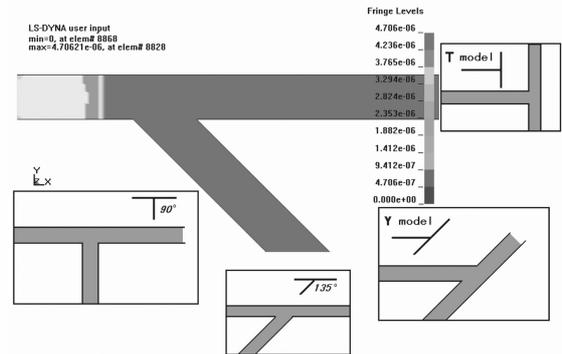


图 1 分叉巷道结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of branch tunnels

收稿日期:2008-03-14;修回日期:2008-6-25

基金项目:国家自然科学基金资助课题(10772029),国家博士点基金资助课题(20050007029)

作者简介:覃彬(1982-),男,博士研究生。

计算采用了欧拉-拉格朗日耦合(ALE)算法,巷道内空气采用了*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL状态方程描述,其线性多项式状态方程为:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

式中, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$, $\frac{\rho}{\rho_0}$ 是当前密度和初始密度的比值, $C_0 - C_6$ 均为状态方程常数,计算选取标准状态下的值 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0.00, C_4 = 0.40, C_5 = 0.40, C_6 = 0.00$ 。

巷道壁面材料的力学性能及粗糙程度都对冲击波有影响,对于不强的冲击波,壁面的弹性变形很小,可

采用刚性壁面模拟,忽略弹性变形对反射过程的影响;壁面的粗糙程度难以准确量化,故在此暂不予考虑,仅考虑光滑刚性壁面时分叉结构的影响。

3 计算结果及分析

3.1 计算结果的图形演示

数值模拟的优势在于能以图形或动画的形式给出直观结果。以90°分叉结构为典型示例,图2和图3分别选取了巷道中心的测点,展示了典型应力分布云图及冲击波超压/冲量曲线。

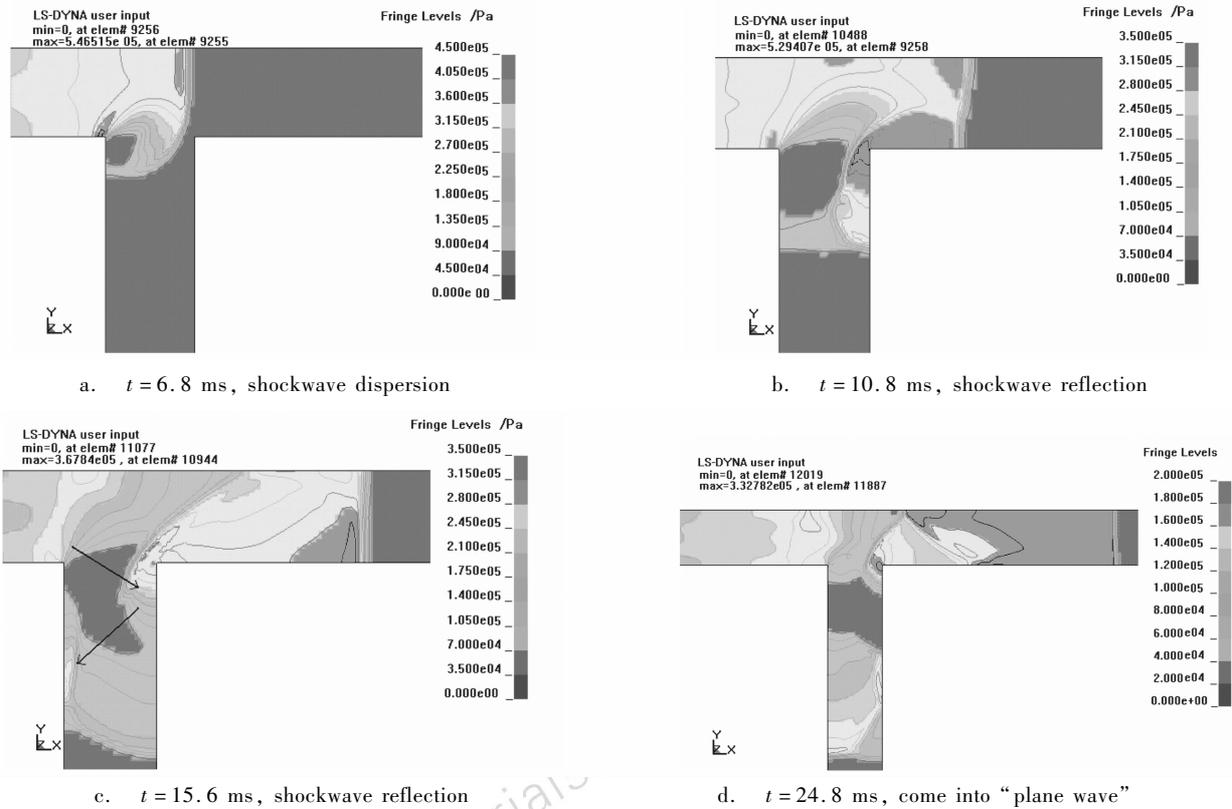


图2 冲击波通过90°分叉巷道

Fig.2 Shockwave goes through 90° branch tunnels

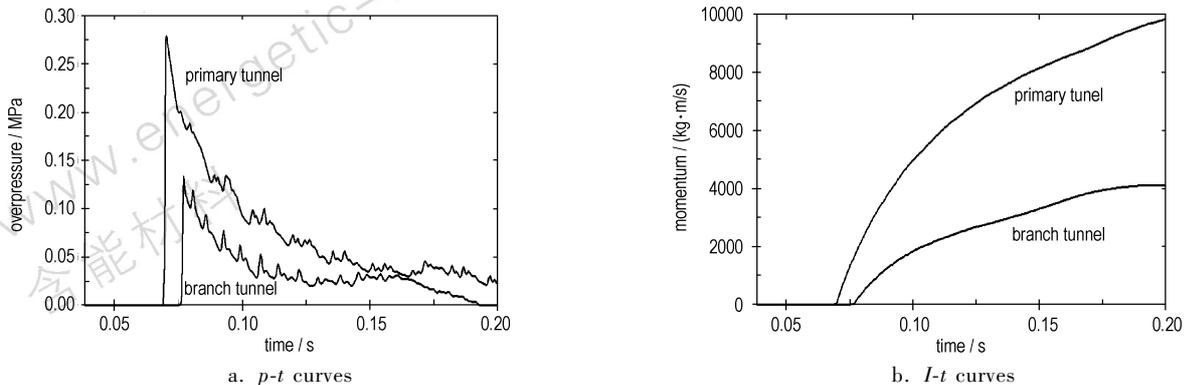


图3 主/分巷道的超压/冲量-时间曲线(90°分叉巷道,距分叉点15 m)

Fig.3 Overpressure/momentum-time curves for the primary/branch tunnel (90° branch tunnels, 15 m from the branch point)

依照工程上的习惯,将无偏向或偏向角较小的巷道称为主巷道,另一侧称为分巷道。冲击波通过分叉点时,在靠近分巷道一侧产生散射、绕射,在巷道的内侧壁面产生较强的斜反射高压区,在绕射的一侧产生低压区;图 2 展示了冲击波的强度并标示了反射叠加的方向,反射叠加的区域称为紊流区,分图时间是基于计算起始点的相对量,仅说明冲击波传播随时间历程的改变;图 3 超压/冲量-时间曲线的波动展示了反射叠加的影响——冲击波通过在壁面两侧的不断反射形成多个峰值。图示还说明:① 主巷道内冲击波的超压及冲量均强于分巷道;② 主巷道紊流区较短,分巷道内的紊流区相对长一些。

3.2 对冲击波的量化评价及“平面波”标准

“平面波”是对巷道内冲击波的一种定义,满足“传播方向在特定的一维方向上(如 Z 方向上),且波面是一系列相互平行的平面的波”,则可说冲击波是平面波。严格满足条件的绝对“平”的冲击波是不存在的,因此,笔者提出了以超压或冲量分布的均匀程度来衡量平面波的量化标准:超压、冲量都是评价冲击波毁伤程度的参数,若在巷道截面上 p_{max}/p_{min} 及 I_{max}/I_{min} 的比值足够近于 1,则说明冲击波在巷道平面上各点

的毁伤作用相当,可看成平面波。

在此取 $p_{max}/p_{min} \leq \vartheta_p$ 及 $I_{max}/I_{min} \leq \vartheta_i$ 作为判别准则,其中 p_{max} 、 p_{min} 、 I_{max} 、 I_{min} 分别为波平面上的最大/最小超压峰值、最大/最小单位面积冲量, ϑ_p 及 ϑ_i 分别为衡量超压及冲量相等程度的参数,根据实验结果,笔者判断,取 $\vartheta_p = 1.5$ 及 $\vartheta_i = 1.05$ 是较为合理的。

按照上述标准,分别提取 45° 、 90° 、 135° 、Y 型及 T 型分叉巷道中,分叉点后不同巷道平面上的 p_{max}/p_{min} 及 I_{max}/I_{min} 值进行绘图,如图 4 所示,其中 D_1 为主巷道后距分叉点的距离, D_2 为分巷道后距分叉点的距离。

图 4a 和图 4b 展示主巷道的概况,可见偏转角越小,恢复平面波的距离也越短; 45° 、 90° 、 135° 三种情况中,主巷道无偏转,在很短的距离内即恢复成平面波; Y 型及 T 型分叉巷道的主巷道分别偏转 45° 及 90° ,则需要较长的距离方可恢复成平面波。

图 4c 和图 4d 展示了分巷道的复杂情况,可见采用不同准则评判时,所得的恢复平面波的距离也不相同;依照冲量比准则进行评判时,偏转角度越大,恢复平面波的距离越长;依照超压比准则评判时,偏转角度越接近 90° 直角,恢复平面波的距离越长——其主要是因几何结构的差异,导致冲击波反射叠加的角度不同所致。

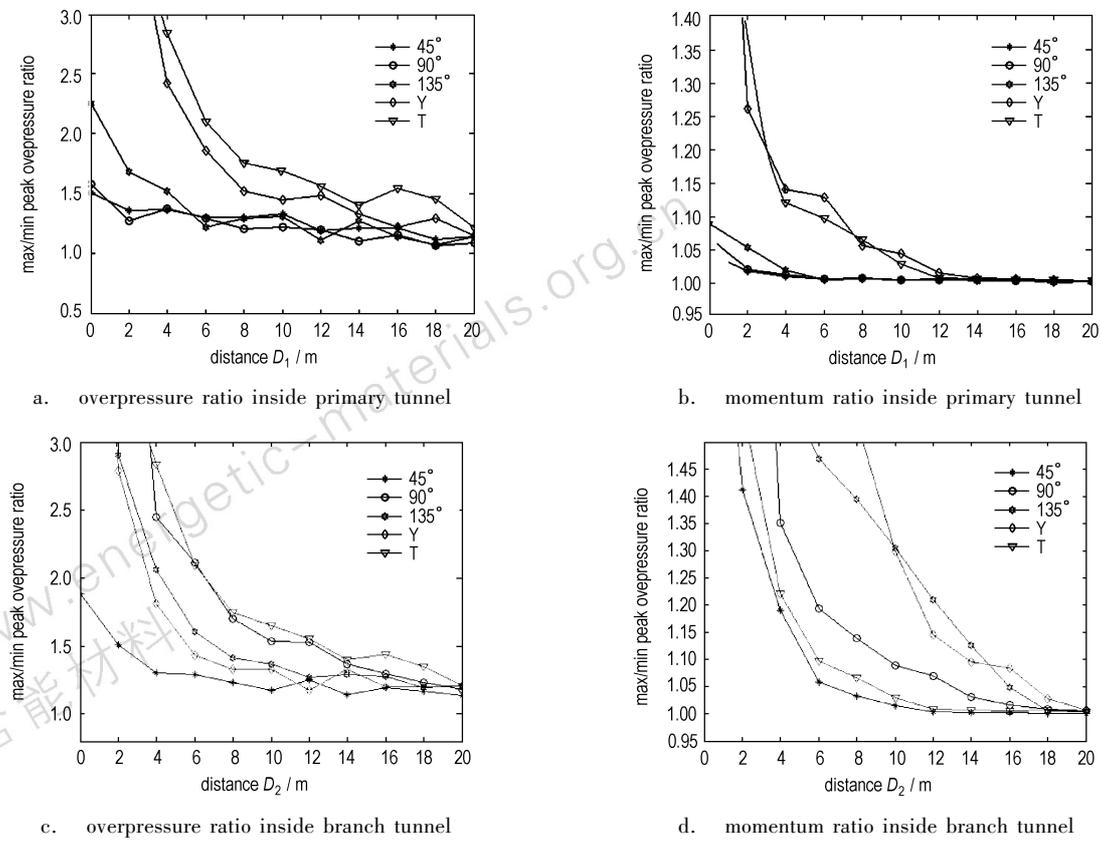


图 4 主/分叉巷道中的冲击波超压比及冲量比概况

Fig. 4 Summary of shockwave overpressure ratio and momentum ratio inside the primary/branch tunnels

峰值超压相同而作用时间不同的冲击波所造成的毁伤程度是不同的。上述计算中,冲击波的超压量级为 10^5 Pa,大于20 kPa的正压作用时间从10~100 ms不等;此时,冲量更能衡量该情况下冲击波的毁伤作用,也能更好地衡量冲击波能量在分叉巷道中的分布情况。 6 m^2 巷道的等效巷道直径 $\Phi=2.82\text{ m}$,表1采用冲量比准则,取各种情况下恢复平面波的距离与等效巷道直径之比,无量纲化的给出了恢复平面波的相对距离。

3.3 分叉角度对冲击波能量在主/分巷道中分布的影响

如表1,可认为冲击波在主巷道通过4倍等效巷道直径,在分巷道通过6倍等效巷道直径的距离之后可完全恢复为平面波。取其较大者(6倍 Φ ,约17 m),查看主/分巷道中的冲量及超压分布。

依照表2所给出的冲量值,可计算出冲击波通过 45° 、 90° 、 135° 、Y型及T型分叉巷道时,与无分叉巷道相比,主巷道冲量衰减系数分别为0.81,0.85,0.87,0.78,0.65,分巷道冲量衰减系数分别为0.44,0.40,0.38,0.45,0.65;由于冲击波强度不同,其反射峰值及衰减速度也不相同,表2所给出的超压分布仅作为数值模拟的结果,给出一个感性的认识。

表1 主/分巷道中恢复平面波的相对距离

Table 1 Plane shockwave recover distance inside the primary/branch tunnel

tunnel	45°	90°	135°	Y	T
primary tunnel	<0.7	<0.7	0.9	3.47	3.19
branch tunnel	2.30	4.62	5.67	6.02	3.15

表2 恢复平面波后主/分巷道中的冲量/超压分布

Table 2 Momentum and overpressure distribution inside the primary/branch tunnel after recovered to plane shockwave

	tunnel	tunnel branch point	45°	90°	135°	Y	T
$I/(\text{kg}\cdot\text{m/s})$	primary		9228	9717	9898	8851	
	branch	11402	5002	4548	4307	5082	7450
$\Delta p/(10^5\text{ Pa})$ (max/min)	primary		2.61/2.15	2.89/2.50	2.78/2.44	2.73/2.24	
	branch	4.706	1.77/1.48	1.44/1.11	1.25/0.977	1.53/1.27	2.64/1.71

考虑主巷道方向无变化的情况,参考上述计算结果,可得到分巷道的冲量衰减系数随偏转角度变化(由0增大至 π)的曲线,如图5所示。

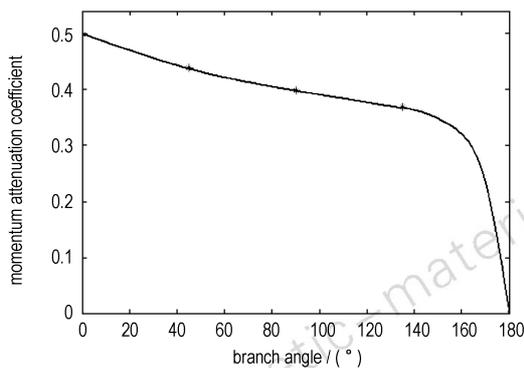


图5 分巷道冲量衰减系数随角度的变化

Fig.5 Curve of momentum attenuation coefficient vs branch angle

4 结论

采用LS-DYNA软件对冲击波通过不同几何结构分叉巷道的情况进行了数值模拟。计算结果的图形显示及数据结果的分析对比表明:

(1) 冲击波在分叉巷道的壁面上的产生反射,外壁面上形成局部的高压区,绕射区域形成低压区,形成紊乱的超压场分布;超压(比)准则适用于描述分布的

不均性,而冲量(比)准则能更好的衡量分叉巷道中冲击波的破坏作用。

(2) 冲击波须通过反射、叠加以形成沿巷道轴向传播的冲击波,因此分巷道的偏转夹角的增大,将造成主巷道冲量增大及分巷道冲量减小,同时,恢复“平面波”的距离也增大,按照超压/冲量(比)准则衡量,不会超过6倍巷道等效直径。

(3) 本文数据是基于波阵面压力为470.6 MPa,作用时间为毫秒量级的冲击波计算得出,在数量级相差不大时,冲击波通过 45° 、 90° 、 135° 、Y型及T型分叉巷道的主巷道冲量衰减系数分别为0.81,0.85,0.87,0.78,0.65,分巷道冲量衰减系数分别为0.44,0.40,0.38,0.45,0.65。

参考文献:

- [1] 萨文科 C K. 龙维祺译. 井下空气冲击波[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [2] Dadone A, Pandolfi M, Tamanini F. Shock waves propagating in a straight duct with a side branch [C] // 8th International Shock Tube Symposium, 1971: 13.
- [3] Charles R W. In tunnel airblast engineering model for internal and external detonations [C] // Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of Effects of Munitions with Structures. McLean Virginia, 1997: 195-208.

(下转 757 页)

decomposition of β -HMX at high pressures [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1999, 111 (22): 10229 – 10235.

of HMX and the pressure-induced phase transition at 27 GPa [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85 (6): 949 – 951.

[29] Hare D E, Forbes J W, Reisman D B. Isentropic compression loading

Review on $\beta \rightarrow \delta$ Phase Transition of HMX

XUE Chao^{1,2}, SUN Jie¹, SONG Gong-bao², KANG Bin¹, XIA Yun-xia¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX) is one of the most important energetic materials used in various propellants and explosives. The β -HMX undergoes a phase transition into δ -HMX before detonation. The study of the $\beta \rightarrow \delta$ phase transition in the HMX can deepen our understanding of the sensitivity, detonation process and storing safety of HMX. The crystal structure of HMX, kinetics of the $\beta \rightarrow \delta$ phase transition and the influencing factors of phase transition were reviewed. The crystal quality of HMX and the solid additive effect on the $\beta \rightarrow \delta$ phase transition were proposed as the future research direction.

Key words: crystal chemistry; octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX); crystal structure; phase transition; kinetics; influencing factor

(上接 744 页)

[4] Lunderman C, Obart A P. Small scale experiment of in tunnel airblast from external and internal detonations [C] // Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of Effects of Munitions with Structures. McLean Virginia, 1997: 209 – 221.

[5] Britan A Igra O, Ben-Dor G, Shapiro H. Shock wave attenuation by grids and orifice plates [J]. *Shock Waves*, 2006 (16): 1 – 15.

[6] 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 Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shockwaves propagation inside tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23 (1): 37 – 40.

[7] 庞伟宾, 何翔, 李茂生, 等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23 (6): 573 – 576.

PANG Wei-bin, HE Xiang, LI Mao-sheng, et al. The formula for

airblast time of arrival in tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23 (6): 573 – 576.

[8] 沈俊, 李永池, 庞伟宾. 化爆冲击波在 90° 拐角通道内的到时规律 [J]. *中国工程科学*, 2006 (3): 53 – 57.

SHEN Jun, LI Yong-chi, PANG Wei-bin. The regularity of time of arrival in 90° bend tunnel for shock wave due to explosions from high explosive charge [J]. *Engineering Science*, 2006 (3): 53 – 57.

[9] 庞伟宾, 李永池, 何翔. 化爆冲击波在 T 型通道内到时规律的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2007 (1): 63 – 67.

PANG Wei-bin, LI Yong-chi, HE Xiang. The regularity of arrival time in T-shaped tunnel for shock wave due to explosions from high explosive charges [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007 (1): 63 – 67.

Numerical Simulation Research on Shockwave Propagation Characteristics Inside Branch Tunnel

QIN Bin, ZHANG Qi, XIANG Cong, WANG Deng-gui, LI Wei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to find out how the branch structure affected the characteristic of shockwave propagation, LS-DYNA software was used to compute, and simulate certain shockwave propagating through the branch tunnels with different angle, and the overpressure/momentum (ratio) bench mark to measure “plane wave” was proposed. The results show that overpressure (ratio) bench mark is well suited for describing anomaly distribution, and momentum (ratio) bench mark can provide better measure for shockwave damage. Along with increasing of the branch deflexion angle, the primary tunnel momentum increases and the branch tunnel momentum decreases, and plane shockwave recover distance also increase but will not exceed six times equivalent diameter.

Key words: explosion mechanics; branch tunnel; plane shockwave; numerical simulation