

化爆冲击波在90°拐角通道内的到时规律

沈俊^{1,2}, 李永池¹, 庞伟宾^{1,2}

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 合肥 230027;

2. 洛阳水利工程研究所, 河南洛阳 471023)

[摘要] 对空气冲击波在90°拐角坑道内传播的到时规律及其影响因素进行了实验研究, 在无量纲分析基础上建立了简化的工程模型。通过对实验数据拟合建立了可以对高能炸药在90°拐角坑道内爆炸产生的空气冲击波到达时间进行预计的公式, 利用该公式可以进一步求得空气冲击波在90°拐角坑道内的传播速度。

[关键词] 内爆炸; 冲击波; 到时

[中图分类号] O354.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)03-0053-05

1 引言

坑道内爆炸是常见的爆炸形式之一。内爆炸事件具有多发性、不可预测性和严重的杀伤性, 内爆炸现象具有复杂性和多变性。研究内爆炸效应的目的就是揭示内爆炸现象的一般规律, 评估和预测内爆炸效应对人员的杀伤率、对结构和装备的破坏程度, 寻找防御内爆炸发生的有效方法, 探索减少内爆炸危害的合理措施。作为一类典型的爆炸现象, 坑道内的爆炸早就引起许多研究者的重视。对于坑道内的化学装药爆炸现象, Charles 和 Lunderman 等根据模型与原型试验数据, 提出了坑道内冲击波超压的计算公式^[1,2], 可以预测高能炸药在坑道内部、外部以及在等截面直线坑道口爆炸时坑道内的空气冲击波峰值超压。在国内, 通过改进大气中点爆炸的经验公式, 给出了计算超压峰值的近似方法^[3]。但是, 爆炸及其作用是一个高速的动力学过程, 除了爆炸源的自身特性外, 对环境条件极为敏感, 给理论分析和实验研究带来较大的困难, 目前尚处于进一步研究中。

文献[4]给出了TNT炸药在直坑道口内外爆炸时冲击波传播的到时规律。冲击波在90°拐角坑道中传播时, 由于受到多种波系的共同作用, 其强

度发生衰减, 但仍可恢复稳定。笔者以90°拐角坑道为研究对象, 得出冲击波在经过90°拐角后的到时规律。

2 试验装置

试验是在跨度为0.6 m、高度1.0 m、等效直径0.846 m、长度25.1 m的直墙圆拱形坑道内进行的, 90°拐角通道采用二四砖墙砌成, 覆盖层用块石堆砌而成。为简化起见, 将模型几何尺寸简化成如图1所示, 坑道横断面如图2所示。 X 是炸药到拐角中心的距离, L_0 表示拐角中心到波阵面在坑道内传播的距离, 波阵面在坑道内的距离 $L = X + L_0$, D 为坑道等效直径, Q 为等效TNT质量。

TNT炸药放在坑道地面的中轴线上, 沿坑道轴线到坑口0.5 m, 距拐角中心 $X = 3.5$ m。共进行4次对比试验, 炸药量分别为0.5, 1.0, 2.37, 8.0 kg TNT。本次试验所用炸药全部为散状TNT, 装在长径比1:1的布袋内。4次试验中每次在长坑道里安装10个空气压力传感器, 用来测量空气冲击波到时、超压及作用时间。安装传感器时, 其受压面与坑道内表面齐平, 安装位置距炸药点为 $L = 6.54 \sim 31.02$ m不等。

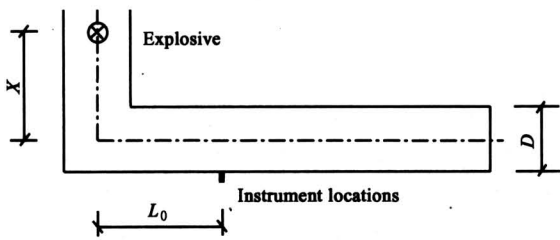


图 1 实验示意图

Fig.1 Scheme of test section

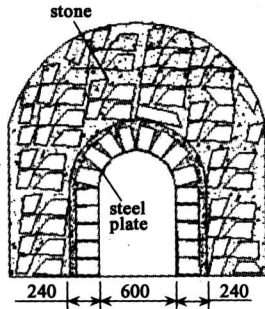


图 2 隧道模型断面

Fig.2 Cross of tunnel model

3 空气冲击波在坑道内的到时规律

3.1 量纲分析

对于复杂的力学问题，试验研究是必不可少的。在试验之前，通常先对问题进行系统的分析，在影响问题的诸多因素中找出主要因素，建立反映问题的简化的函数关系式，这一过程即为确定问题的工程模型。建立工程模型通常要对问题进行量纲分析。笔者首先用量纲理论分析沿等截面 90°拐角坑道传播的冲击波到时的函数关系，进而确定其工程模型。炸药在坑道内爆炸时影响空气冲击波到时的主要物理量有：炸药质量 Q （等效 TNT 当量），炸药密度 ρ_0 ，爆速 v ，介质（空气）的初始状态 P_0 ， ρ_{a0} ，冲击波传播的距离 L ，坑道的等效直径 D （坑道截面积为 $S = \pi D^2/4$ ），横廊长度 X 。

于是该力学问题的主定参量组为 $Q, P_0, v, \rho_0, \rho_{a0}, L, X, D$ ；待定参量为到达时间为 t_d （从爆轰完成时刻算起）。

如果忽略介质的粘性和热传导，对空气冲击波的到达时间可写成以下函数关系：

$$t_d = f(Q, P_0, v, \rho_0, \rho_{a0}, L, X, D) \quad (1)$$

采用 L-T-M 度量单位系统，根据 π 定理，

其中独立量纲取为 ρ_0, P_0, D ，可从主定参量组中做出以下无量纲组合^[5]：

$$\pi = \frac{t_d}{\sqrt{\rho_0/P_0} D}, \pi_1 = \frac{Q}{\rho_0 D^3}, \pi_2 = \frac{v}{\sqrt{P_0/\rho_0}},$$

$$\pi_3 = \frac{\rho_{a0}}{\rho_0}, \pi_4 = \frac{X}{D}, \pi_5 = \frac{L}{D}.$$

将 $\pi, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ 代入式 (1) 可得

$$\frac{t_d}{\sqrt{\rho_0/P_0} D} = f\left(\frac{Q}{\rho_0 D^3}, \frac{v}{\sqrt{P_0/\rho_0}}, \frac{\rho_{a0}}{\rho_0}, \frac{X}{D}, \frac{L}{D}\right) \quad (2)$$

由于 $\rho_{a0} \ll \rho_0$ ，可以忽略 ρ_{a0}/ρ_0 并做如下变换：

$$\pi'_1 = (\rho_0 \pi_1)^{-1/3} = \frac{D}{Q^{1/3}},$$

$$\pi'_4 = \frac{\pi}{4} \frac{\pi_4}{\rho_0 \cdot \pi_1} = \frac{\pi}{4} \frac{XD^2}{Q} = \frac{XS}{Q} \quad (3)$$

在整理函数 f 的形式时， v, P_0, ρ_0 保持不变。考虑到实际应用和方便，令 $P_0 = \rho_0 = v = 1$ ，得到在 90°拐角通道坑口内爆炸时，空气冲击波传播到时规律的简化工程模型为

$$t_d/D = f(D/Q^{1/3}, X \cdot S/Q, L/D) \quad (4)$$

3.2 试验结果及拟合公式

拟合经验公式是一项复杂而烦琐的工作。要获得一个理想的经验公式，一方面要求公式形式简单，其中所含的任意参数越少越好；另一方面要求它能够准确地代表一组试验数据。对于冲击波参数的拟合，首先要分析所研究的物理量之间的函数关系，即用量纲分析方法，找出无量纲的函数关系，然后用最小二乘法对试验数据进行拟合，得到函数关系的具体表达式。笔者根据坑口内爆炸模型试验测得的大量波形，采用线性回归的拟合方法，得到在 90°拐角通道坑口内爆炸空气冲击波沿坑道传播的到时规律。

3.2.1 在每次试验中 t_d/D 与 L/D 的关系 在用试验方法整理函数 f 的形式时，往往能在自变量的某一范围内采用指数关系的形式，即

$$\pi = A \cdot \pi_1^{B_1} \cdot \pi_2^{B_2} \cdot \pi_3^{B_3} \quad (5)$$

笔者在整理试验数据时发现，如果固定 π_2 和 π_3 时， π_1 的指数和系数均随其他无量纲量的变化而改变。

首先令 Q 不变，即在每次试验中 t_d/D 与比例距离 L/D 的关系如图 3 所示，采取如下指数形式：

$$t_d/D = A_1 (L/D)^{B_1} \quad (6)$$

从图 4、图 5 中可以发现，当炸药质量变化时， L/D 的指数 B_1 和系数 A_1 并不是常数，而是与

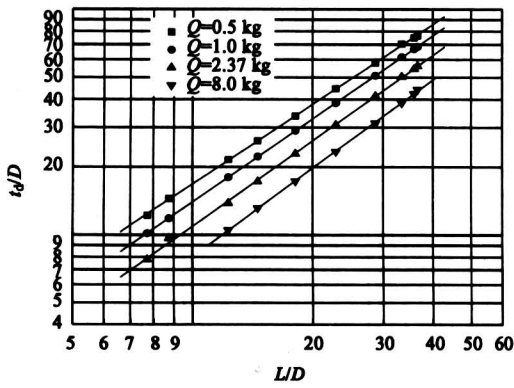


图3 t_d/D 与 L/D 的关系曲线

Fig.3 The relation between t_d/D and L/D

比例直径 $D/Q^{1/3}$ 按如下规律变化：

$$0.074 \text{ m}^3/\text{kg} \leq D^3/Q \leq 1.19 \text{ m}^3/\text{kg},$$

$$A_1 = 1.02(D/Q^{1/3})^{1.1} \quad (7)$$

$$B_1 = 1.38 - 0.19D/Q^{1/3} \quad (8)$$

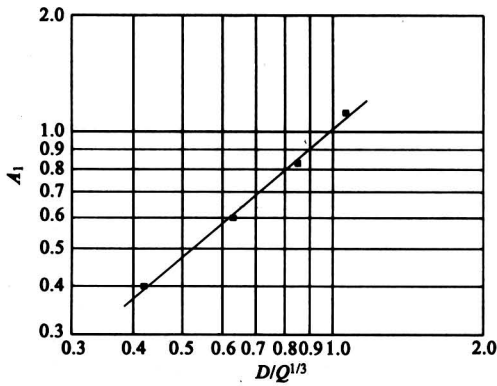


图4 系数 A_1 随 $D/Q^{1/3}$ 的变化

Fig.4 Coefficient A_1 changes with $D/Q^{1/3}$

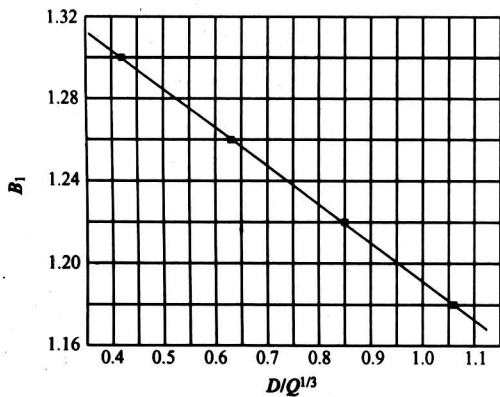


图5 指数 B_1 随 $D/Q^{1/3}$ 的变化

Fig.5 Exponent B_1 changes with $D/Q^{1/3}$

3.2.2 固定位置处 t_d/D 与 $D/Q^{1/3}$ 的关系 当位置不变时，即在不同炸药量的4次试验中 t_d/D 与比例直径 $D/Q^{1/3}$ 的关系曲线如图6所示，采取的指数形式有

$$t_d/D = A_2(D/Q^{1/3})^{B_2} \quad (9)$$

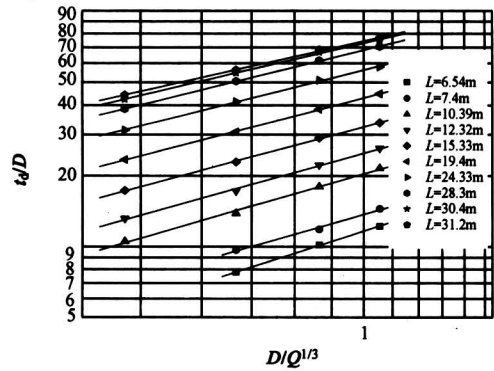


图6 t_d/D 与 $D/Q^{1/3}$ 的关系曲线

Fig.6 The relation between t_d/D and $D/Q^{1/3}$

从图7、图8中可以发现，在不同位置处， $D/Q^{1/3}$ 的指数 B_2 和系数 A_2 也不是常数，而是与 L/D 按如下规律变化：

$$7.73 \leq L/D \leq 36.67,$$

$$A_2 = 1.02(L/D)^{1.19} \quad (10)$$

$$B_2 = 0.90 - 0.01(L/D) + 8.40 \times 10^{-5}(L/D)^2 \quad (11)$$

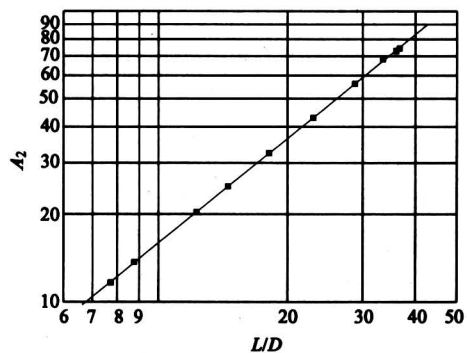


图7 系数 A_2 随 L/D 的变化

Fig.7 Coefficient A_2 changes with L/D

3.2.3 拟合公式的确立 为了得到最终的拟合公式，笔者仍然采用指数关系的形式，并令 $D/Q^{1/3}$ 的指数保持不变，取 $B_2 = 2/3$ ，如式(12)所示：

$$t_d/D = A_3(L/D)^{B_3}(D/Q^{1/3})^{2/3} \quad (12)$$

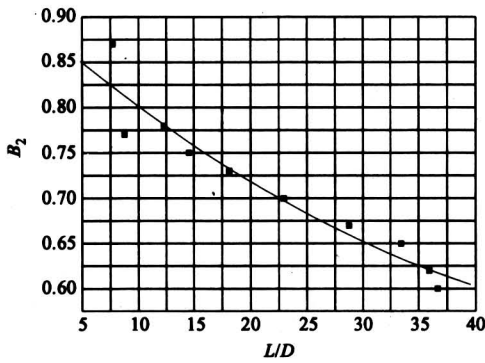


图 8 指数 B_2 随 L/D 的变化

Fig.8 Exponent B_2 changes with L/D

将式 (12) 中的 $(D/Q^{1/3})^{2/3}$ 移到等式左边, 重新整理所有试验数据并画在双对数坐标图中, 如图 9 所示。

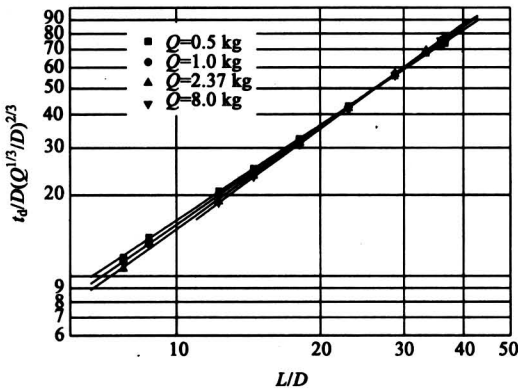


图 9 L/D 与 $t_d/D(Q^{1/3}/D)^{2/3}$ 的关系曲线

Fig.9 The relation between L/D and $t_d/D(Q^{1/3}/D)^{2/3}$

在图 10、图 11 中发现, 对于不同炸药量的 4 次试验分别进行线性拟合后, L/D 的指数和系数随 $(X \cdot S)/Q$ 的不同按以下规律变化:

$$0.98 \leq (X \cdot S)/Q \leq 15.75,$$

$$A_3 = 0.7(X \cdot S/Q)^{0.15},$$

$$B_3 = 1.31 - 0.015(X \cdot S/Q) + 3.8 \times 10^{-4}(X \cdot S/Q)^2, \quad (13)$$

将式 (13) 中的 A_3 代入式 (12) 中, 最终得到的函数关系式为

$$t_d/D = 0.7(X \cdot S/Q)^{0.15} (L/D)^{B_3} (D/Q^{1/3})^{2/3} \quad (14)$$

式中 B_3 由式 (13) 确定。

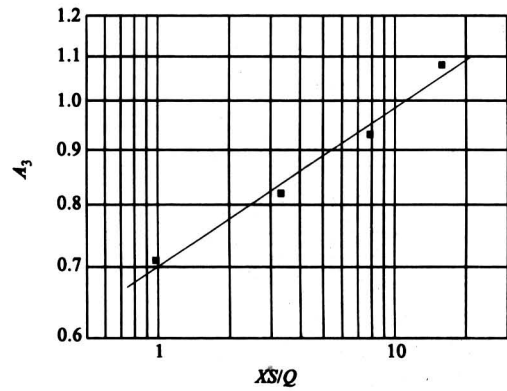


图 10 系数 A_3 随 $X \cdot S/D$ 的变化

Fig.10 Coefficient A_3 changes with $X \cdot S/D$

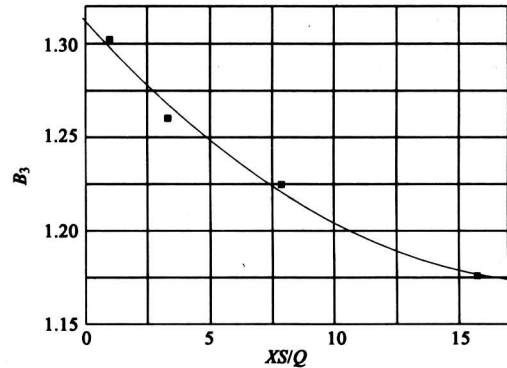


图 11 指数 B_3 随 $X \cdot S/D$ 的变化

Fig.11 Exponent B_3 changes with $X \cdot S/D$

4 结论

内爆炸在坑道内形成空气冲击波, 其在距爆点一定距离处为平面波。冲击波到达时间是描述坑道内爆炸时爆炸波基本性质的参数之一。笔者根据量纲理论, 分析影响到达时间的重要因素, 进而确定其工程模型, 在此基础上建立了预计高能炸药在 90°拐角坑道内爆炸的空气冲击波到时的公式。通过研究到达时间, 可以给出冲击波传播的 $X-t$ 图, 对其求导, 可得到冲击波传播速度及 Ma 数, 进而利用冲击波关系预测超压峰值。

参考文献

[1] Charles R W. In tunnel airblast engineering model for internal and external detonations[A]. Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions With Structures[C]. McLean Virginia, 1997. 195 ~ 208

- [2] Lunderman C, Ohrt A P. Small scale experiment of in tunnel airblast from external and internal detonations[A]. Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures [C]. McLean Virginia, 1997. 209 ~ 221
- [3] 随树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 285 ~ 289
- [4] 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
- [5] 李翼祺. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 156 ~ 162

The Regularity of Time of Arrival in 90° Bend Tunnel for Shock Wave due to Explosions From High Explosive Charges

Shen Jun^{1,2}, Li Yongchi¹, Pang Weibin^{1,2}

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Luoyang Hydraulic Engineering Technology Institute, Luoyang, Henan 471023, China)

[Abstract] The propagating regularity and its influencing matter of shock wave in a 90° bend tunnel were studied experimentally. On the basis of dimensional analysis, a simplified engineering model was built. Through collecting data gained from 4 experiments, a formula was proposed which can compute time of arrival in a 90° bend tunnel due to explosions from high explosive charges. This formula can also be used to compute velocity of shock in the 90° bend tunnel.

[Key words] internal explosion; shock wave; time of arrival

(cont. from p.52)

Adaptive Wavelet Thresholding Denoising Used in Gravitational Signal Processing

Zhao Liye, Zhou Bailing, Li Kunyu

(Dept. of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The theory of wavelet thresholding denoising is analyzed and applied to process the data measured by gravimeter in order to effectively alleviate the effect of different noise in high precise gravitational system. The signal to noise ration (SNR) is used as the index for evaluating the performance of the data processing methods. Theoretical analysis and emulation experiments indicate that wavelet thresholding denoising, adaptive wavelet thresholding denoising and adaptive Kalman filtering are all effective in alleviating the effects of different noise, but the performance of adaptive wavelet thresholding denoising is best.

[Key words] gravimeter; signal processing; wavelet transform; adaptive wavelet threshold; adaptive Kalman; filtering