

文章编号: 1001-1455(2003)06-0573-04

空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究^{*}

庞伟宾, 何 翔, 李茂生, 任辉启
(总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 介绍了内爆炸试验的发展及现状, 通过实验研究建立了可以对高能炸药在坑道内爆炸的空气冲击波到时进行预计的公式。该公式适用于爆点在固定横截面的直通道口外、口内及口部处爆炸的情况。利用该公式可以求出空气冲击波在坑道中传播速度的变化。

关键词: 爆炸力学; 走时规律; 内爆炸; 空气冲击波; 到时; 速度

中图分类号: O354.5 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 背景及简介

空气冲击波与破片是常规弹药爆炸对防护结构产生破坏效应的因素之一, 是防护结构设计时必须考虑的重要方面, 尤其是对于地上和齐地表的防护结构。当弹药在地下结构的出入口内或通风系统周围爆炸时, 地下结构设计必须考虑空气冲击波和破片造成的破坏作用^[1~2]。为了确定地下防护结构出入口或通风系统中的爆炸荷载, 必须了解爆炸波在洞室或管道中的传播。洞室入口处流场的形成是十分复杂的, 取决于洞口的方向和形状以及周围的地形。洞室中的超压可能因其几何形状的不同而增加或减小。洞室横截面面积的减小将导致超压的增加^[3]。

对于国防及民用工程的设计者来说, 空气冲击波在坑道内的传播规律具有很高的应用价值。为了了解爆炸波在洞室或管道中的传播, 国内外曾进行过许多试验, 并利用解析法、数值计算及试验结果研究了冲击波在坑道中的衰减规律。冲击波在洞室中衰减的大多数数据是通过激波管试验获得的, 激波管试验不仅用于模拟核爆炸冲击波, 也用于模拟常规武器的冲击波荷载。但目前还不能提供任意截面形状洞室的分析方法, 只能提供某些经验数据。

2 试验概况

为了研究冲击波在坑道中的传播规律, 进行了坑口内、外爆炸的模型试验, 主要介绍了冲击波在坑道内的走时规律, 进而可以由此推导出冲击波传播速度的变化规律。本次试验主要是利用一个废弃的坑道, 按照设计的尺寸, 采用直墙圆拱形状钢内模作为内衬套将整个坑道进行了回填, 坑道跨度 0.6m、高 1.0m、长 25.1m。工程布置如图 1 所示, 每次试验均布测点 11 个(T1~T11)。

为简化起见, 将模型几何尺寸简化成图 2 所示。 R 为炸药到坑口的距离, $R < 0$ 时表示坑口外爆炸, $R > 0$ 时表示坑口内爆炸, $R = 0$ 时表示在坑道口部处爆炸。 X 为波阵面在坑道内传播的距离, 因此对于坑口外爆炸或坑口部处爆炸时, X 就是波阵面到坑道内的距离, 而对于坑口内爆炸时, X 为爆点到测点的距离。 D 为坑道等效直径, Q 为等效 TNT 的质量。

爆点设在坑口内外四个不同的位置(沿坑道轴线距坑口的相对位置 $R = -1.0, -0.5, 0, 1.52\text{m}$), 每个爆点位置用两种药量(1.0、2.37kg)进行 2 次试验。共进行了 8 炮对比试验, 本次试验所用炸药全部为片状 TNT, 弹壳用布袋制成长径比为 1 的柱状。每炮的装药位置均在坑道地面的中轴线上, 炸药形状如图 3 所示。每次试验均在坑道中安装 11 个空压传感器, 用来测量空气冲击波超压。安装传感器时, 受压面与坑道内表面齐平, 对于坑口外爆炸, 传感器安装位置距坑口从 $X = 0.66\text{m}$ 到 $X = 25.1\text{m}$ 不

* 收稿日期: 2003-07-15; 修回日期: 2003-09-16

作者简介: 庞伟宾(1976—), 男, 研究实习员。

等,对于坑口内爆炸,空压传感器的位置不变。

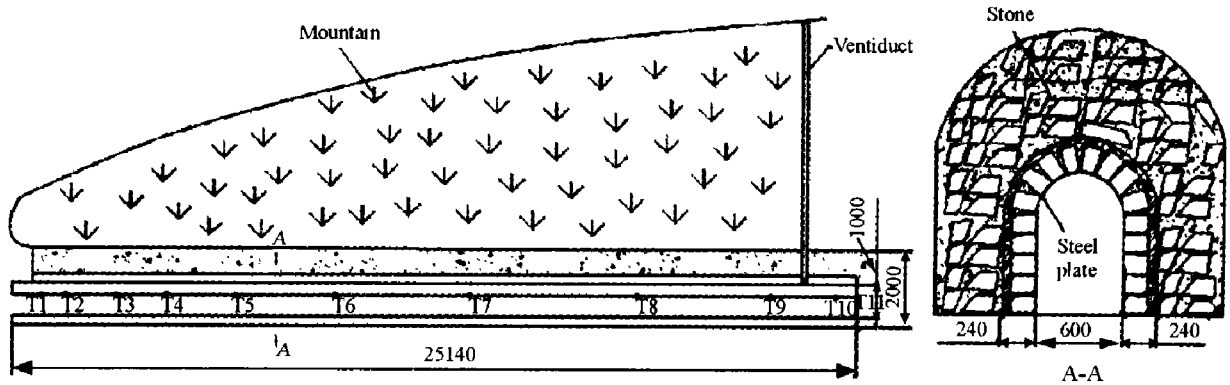


图 1 坑口内、外爆炸试验模型坑道

Fig.1 Engineering model for internal and external detonations

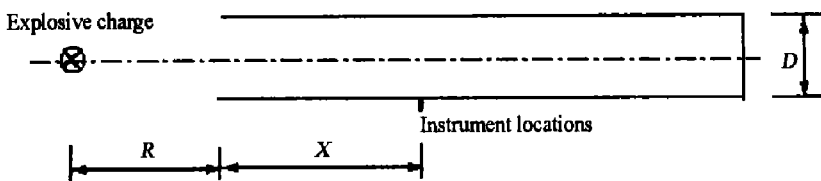


图 2 坑口内、外爆炸坑道示意图

Fig.2 Parameters used in engineering experiments



图 3 试验所用 TNT 炸药

Fig.3 TNT used in experiments

3 空气冲击波在坑道内的走时规律

3.1 空气冲击波传播的影响因素

冲击波在大气中的传播速度与波前气体初始状态的比容、波前后气体的压力差及比容差有关,也就是说,冲击波在空气中的传播速度是变化的。为了便于比较,将 8 次试验的距离和到时数据结果绘于图 4,图中 t_d 为空气冲击波到时, $B、C$ 分别为 1.0、2.37kg TNT 在 1.52m 坑口内爆炸, $E、F$ 分别为 1.0、2.37kg TNT 在 -0.5m 坑口外爆炸, $G、H$ 分别为 1.0、2.37kg TNT 在 -1.0m 坑口外爆炸, $I、J$ 分别为 1.0、2.37kg TNT 在坑口部位爆炸。

由图 4 可以看出,对于同一个爆点位置,当药量 Q 增大而其它条件不变时,到时明显减小。距离 X 和 R 变化时,到时随着 X 和 R 的增加而增大。因此,在坑道内爆炸横截面固定的条件下,可以将到时 t_d 视为 $X、R、D$ 和炸药质量 Q 的函数。在对各炮空气冲击波到时进行拟合的过程中,通过各种公式形式的比较,最终确定空气冲击波到时的公式形式如下

$$t_d = A (X/D)^B (D^2/Q)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $A = A(\lambda_R)$, $B = B(\lambda_R)$, 其中 $\lambda_R = R/Q^{1/3}$; t_d 的单位为 ms; Q 的单位为 kg; $X、D、R$ 的

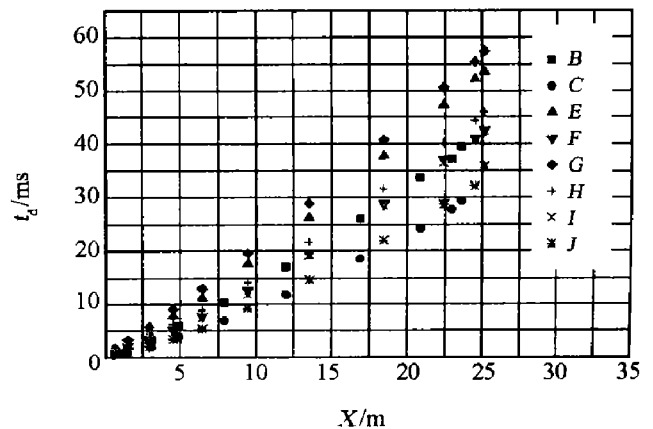


图 4 距离与到时关系曲线

Fig.4 Distance versus time of arrival

单位为 m 。

3.2 试验结果

在每一炮的拟合中,以比例距离 X/D 作为横坐标,将公式(1)中 $(D^2/Q^{1/3})$ 移到公式的左边,将 $t_d Q^{1/3}/D^2$ 作为纵坐标。图 5(a)、(b)分别为 1.0、2.37kg TNT 在 $R=1.52、0、-0.5$ 和 $-1.0m$ 位置爆炸时冲击波的走时数据结果。考虑到距爆点较近时,空气冲击波传播类似于触地爆炸,并在墙面上发生各种反射。与空气冲击波在坑道中传播的一维流动不一样,在拟合时, $5D$ 范围内数据不参与拟合。

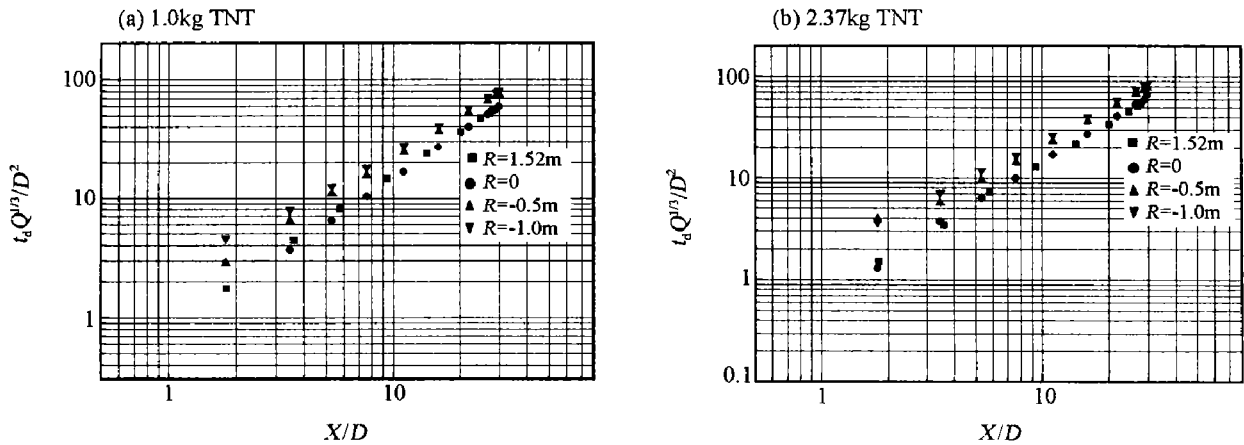


图 5 TNT 在不同位置爆炸时数据结果

Fig.5 Results of TNT detonating at different positions

在各次试验中这些数据都具有很好的一致性,总体上讲,空气冲击波到时沿着坑道传播随距离的增加而增加。根据文献[3~4],并经过分析认为:在坑口内爆炸时,空气冲击波的走时曲线基本不随 R 的变化而改变;而在坑口外爆炸时,空气冲击波的走时曲线随 R 的变化而改变。

以比例距离 $R/Q^{1/3}$ 为横坐标,以系数 A 为纵坐标,将各炮的系数 A 绘在同一坐标系下,如图 6 所示。由此可以得出 $A(\lambda_R)$ 。

以比例距离 $R/Q^{1/3}$ 为横坐标,以指数 B 为纵坐标,将各炮的指数 B 绘在同一坐标系下,如图 7 所示。由此可以得出 $B(\lambda_R)$ 。

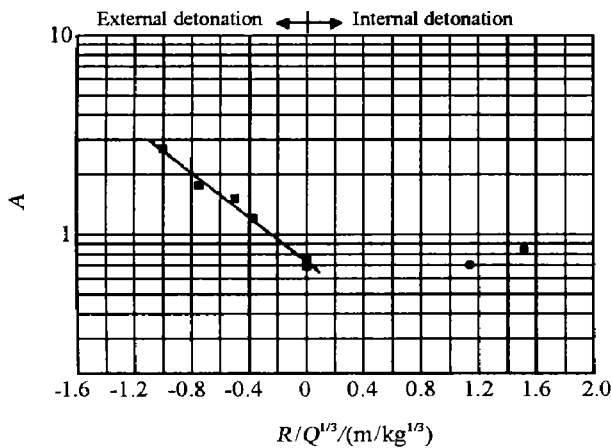


图 6 比例距离 $R/Q^{1/3}$ 确定的系数 A

Fig.6 Values of coefficient A determined by scaled distance $R/Q^{1/3}$

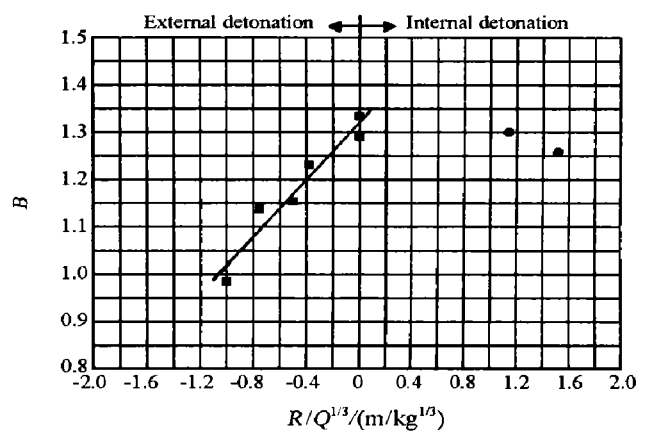


图 7 比例距离 $R/Q^{1/3}$ 确定的指数 B

Fig.7 Values of exponent B determined by scaled distance $R/Q^{1/3}$

3.3 试验确定的空气传播到时及速度公式

通过对试验中坑口内、外爆炸空气冲击波的到时数据进行拟合,得出冲击波沿等截面直坑道传播的衰减公式

$$t_d = A (X/D)^B (D^2/Q)^{1/3}$$

通过对上述公式进行求导, 可以得出冲击波沿等截面直隧道传播的速度衰减公式

$$\frac{dt_d}{dX} = \frac{1}{v} = AB \frac{1}{D} \left[\frac{X}{D} \right]^{B-1} \left[\frac{D^2}{Q^{1/3}} \right] \quad (2)$$

系数 A 、 B 根据试验数据确定(图 6、图 7)如下:

对于坑口外爆炸: $-1.0\text{m/kg}^{1/3} \leq \lambda_R < 0$, $A = 0.726 \times 10^{-0.561\lambda_R}$, $B = 1.321 + 0.303\lambda_R$ 。

对于坑口内爆炸: $\lambda_R \geq 0$, $A = 0.768$, $B = 1.279$ 。

4 结 论

介绍了内爆炸试验的发展及现状, 并且建立了可以对高能炸药在坑道内爆炸空气冲击波到时进行预计的公式。主要考虑了炸药质量、炸药和坑口的相对位置、坑道直径和冲击波在坑道内的传播距离。总体上讲, 空气冲击波到时沿坑道传播是随着距离的增加而增加。可以看出, 在坑口内爆炸时, 空气冲击波的走时曲线基本不随 R 的变化而改变; 而在坑口外爆炸时, 空气冲击波的走时曲线随 R 的变化而改变。该公式适用于爆点在固定横截面的直通道口外、口内及口部爆炸的情况。利用该公式可以求出空气冲击波在坑道中传播速度的变化。

参考文献:

- [1] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [2] 李晓军. 常规武器破坏效应与工程防护技术[M]. 洛阳: 总参工程兵科研三所出版社, 2001.
- [3] Welch C R. 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.
- [4] 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.

The formula for airblast time of arrival in tunnel

PANG Wei-bin^{*}, HE Xiang, LI Mao-sheng, REN Hui-qi

(The Third Research Institute of Engineer Troops, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: The development of internal detonation experiments is presented. A formula is obtained, which is used to compute the arriving time of the shock wave in the tunnel due to explosions from high explosive charges. This formula is adopted to treat detonations that occur outside, inside, and at the portal of a straight tunnel of constant cross-section, and to compute airblast velocity in tunnel.

Key words: mechanics of explosion; regularity of time of arrival; internal detonation; airblast; time of arrival; velocity

* Corresponding author: PANG Wei-bin

Telephone: 027-87274967