

文章编号: 1001-1455(2004)05-0475-05

# 防护门在空气冲击波和破片作用下的破坏<sup>\*</sup>

何翔<sup>1,2,3</sup>, 庞伟宾<sup>1</sup>, 曲建波<sup>1</sup>, 刘国军<sup>1</sup>, 李茂生<sup>1</sup>

(1. 洛阳水利工程研究所, 河南 洛阳 471023;

2. 解放军理工大学博士后流动站, 江苏 南京 210007;

3. 中国矿业大学岩土工程研究所, 北京 100084)

摘要: 随着精确制导武器被大量用于实战, 地下工程坑道内部遭受爆炸的可能性越来越大。利用原型坑道内爆炸试验, 考察了破片和空气冲击波的复合作用对防护门的宏观破坏效应。对破片的初始速度、质量分布和空间分布进行了定量计算, 分析了破片和冲击波对防护门的单一破坏作用, 定性讨论了冲击波和破片对防护门的复合破坏作用。

关键词: 爆炸力学; 破坏; 内爆炸; 防护门; 冲击波; 坑道; 破片

中图分类号: O383.3 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

## 1 引言

空气冲击波和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, 是防护结构设计必须考虑的重要方面。破片与冲击波对工程结构的复合破坏效应, 与两者单独作用于结构的破坏效应有显著差别, 也不是二者破坏效应的简单叠加, 而存在特殊的破坏机理和作用规律。美国丹佛大学研究人员研究了在室内或结构内部爆炸时的瞬态环境, 瞬态环境包括爆炸产生的灼热气体流动、空气冲击波、弹壳产生的破片和室内的急剧温升, 研究中发现破片运动在两个阶段有不同的运动特点, 在近区破片滞后于冲击波, 而在远区超前于冲击波<sup>[1]</sup>。美国国防威胁减灾局(DTRA)研究人员利用半尺寸结构模型试验研究冲击波与破片荷载的复合效应, 试验结果表明, 破片对内墙的破坏有很大作用, 在研究带壳装药在结构内部爆炸时, 必须考虑冲击波与破片的复合效应<sup>[1]</sup>。瑞典国防科学研究院研究人员开展了冲击波和破片对建筑物复合破坏效应的试验研究, 研究了 155mm 炮弹和 MK82 炸弹对不同类型普通建筑物墙壁的效应, 目的是估算各类墙的破坏距离<sup>[2]</sup>。美国应用研究合作公司研究人员对恐怖分子使用汽车炸弹爆炸时产生的冲击波和破片造成附近建筑物和人员的严重灾害进行了系列试验研究<sup>[3]</sup>。

国外研究人员对冲击波与破片的复合破坏效应进行的研究, 取得了一些有价值的试验数据和成果, 根据现有的国外资料分析, 由于对常规武器冲击波与破片复合破坏效应的研究还存在一定困难和待解决的关键问题, 还没有形成可靠和完善的分析计算方法。国内对该问题的研究还不够系统, 特别是缺少精确制导武器直接命中地下工程口部时冲击波和破片对防护门的破坏研究。

在我们所完成的原型坑道内爆炸试验中, 专门研究了装药在防护门附近爆炸时形成的冲击波和破片对防护门的破坏作用, 得到了一些有价值的数据和结论。

## 2 试验方案

某坑道构筑在石灰岩岩体中, 由两条通道交叉构成, 平面布置呈“丁”字状, 截面为直墙拱顶型, 南北方向长大于 100m, 东西方向长大于 70m, 坑道平均直径大于 3m。试验装药位于东西通道防护门前约 2m, 采用圆柱型弹壳, 内径大于 200mm, 壁厚大于 10mm, 长度大于 1.4m, 总弹重大于 100kg, 轴线与地面夹角 45°。试验前新构筑的模拟防护门为单扇受压拱防爆门, 两层钢板均采用 A3 钢, 厚度大于 8mm。

\* 收稿日期: 2003-08-13; 修回日期: 2003-12-05

作者简介: 何翔(1966—), 男, 博士。

在东西通道侧墙上,距爆心不同距离和离地板 1m 高度处布置了 7 个空压传感器,用来测量从防护门泄露到东西通道的空气冲击波超压,在防护门的门框墙上布置了 1 个空压传感器,用来测量防护门上的反射压力,在东西通道中离门 40m 处放置了一条狗,试验后对狗进行了解剖。

### 3 防护门在内爆炸产生的破片及空气冲击波作用下的破坏

#### 3.1 防护门破坏情况

在防护门正面(见图 1)形成很多弹孔,多数弹孔孔径为 2~7cm,个别达 10cm,最大近 30cm,弹坑和弹孔主要分布在防护门上部 1.4m 的范围内。除弹孔外,还分布有多条裂缝,宽度在 5~380mm 以内。

在防护门背面(见图 2),形成一长约 1m、宽约 0.3m 的裂口;并有多个弹孔,其直径在 1~5cm 之间。从裂开处向里看,发现防护门内部严重变形。防护门下端绞叶焊接处断裂,上部绞叶下片焊接处断裂,防护门已不能正常开启。显然上述破坏效应是破片和冲击波复合作用的结果,破片和冲击波的单独作用都不可能造成如此严重的破坏效果。



图 1 防护门正面破坏

Fig. 1 Damage on the front of protective door

图 2 防护门背面破坏

Fig. 2 Damage on the back of protective door

#### 3.2 破片对防护门的侵彻破坏作用

##### 3.2.1 破片的质量分布

试验装药由厚度均匀的金属圆筒包裹,且质量分布均匀,爆炸后产生的破片质量分布可按《现代防护结构设计、分析与评估》(TM 5-855-1)中的公式<sup>[4]</sup>计算

$$N_m = (Q_c / (2M)) e^{-\sqrt{m/M}} \quad (1)$$

式中:  $N_m$  为质量大于  $m$  的破片数量;  $Q_c$  为弹壳的总质量, g;  $M = B_x^2 t_c^{\frac{5}{3}} d_i^{\frac{2}{3}} [1 + t_c / d_i]^2$ , 其中  $B_x$  为爆炸常数, 对于 TNT 装药, 取  $B_x = 0.54 \text{g}^{1/2} / \text{cm}^{7/6}$ ;  $t_c$  为弹壳的平均厚度, cm;  $d_i$  为弹壳的平均内径, cm。上式中取  $m = 0$ , 即可得破片总数为  $Q_c / (2M)$ , 破片的平均质量为  $2M$ , 实际上  $M$  即为平均质量的一半, 经计算可得破片的平均质量为 6.8g。

##### 3.2.2 破片的初速度

破片的初始速度是装药质量与弹壳质量之比以及爆炸类型的函数。对于弹壳厚度均匀的圆柱形装药来说, 根据试验结果其破片的初始速度  $v_0$  可由 Gurney 方程<sup>[4]</sup>计算

$$v_0 = G \left| \frac{Q}{Q_c} \left/ \left[ 1 + \frac{Q}{2Q_c} \right] \right. \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:  $G$  为 Gurney 爆炸能量常量, 取  $G = 1.93 \text{m/s}$ ;  $Q$  为装药质量, kg;  $Q_c$  为弹壳质量, kg。由 (2) 式可得破片的平均初始速度  $v_0 = 1.725 \text{km/s}$ 。

### 3.2.3 破片的空间分布

下面计算击中防护门的破片数量,按照 Shapiro 预测破片飞散特性的基本思想<sup>[5]</sup>,假定外壳由许多环状物连续排列组成,诸环的中心均处于弹体的对称轴上。为了确定每个环形成的破片束的飞散角,根据 Shapiro 理论,爆轰波从雷管处出发,以球面波阵面的形式向外传播。假定外壳的法线与弹体对称轴构成夹角  $\phi_1$ ,爆轰波法线与弹体对称轴构成夹角  $\phi_2$ ,破片速度矢量偏离外壳法线的偏角  $\phi$  由下式确定

$$\tan \phi = \frac{v_f}{2v_d} \cos \left[ \frac{\pi}{2} + \phi_2 - \phi_1 \right] \quad (3)$$

式中: $v_f$ 为破片的初速; $v_d$ 为炸药的爆轰速度。经计算,弹壳两端(即  $D$  和  $F$  处,见图 3)的破片速度矢量偏离外壳法线偏角  $\phi$  分别为  $0^\circ$  和  $7^\circ$ ,弹壳两端之间其他位置处的破片速度矢量偏离外壳法线偏角  $\phi$  在  $0^\circ$  和  $7^\circ$  之间。因此可以近似认为弹壳所有位置上的破片速度矢量沿外壳法线方向。根据防护门和外壳的尺寸、空间位置以及他们之间的相对距离,只有弹壳中  $EF$  段形成的破片才能击中防护门上高度为  $h_3$  的  $AG$  段(见图 3)。

图 3 中: $AA_0$ 为防护门的中心线, $C$  为弹体中心, $C_0$ 、 $E_0$ 和  $F_0$ 分别为  $C$ 、 $E$  和  $F$  在地面上的投影。不难算得: $h_3=0.621\text{m}$ ,即弹坑和弹孔主要分布在防护门上部高度为  $0.621\text{m}$  的区域中,而且形成这部分弹坑和弹孔的破片来源于弹壳中  $EF=0.439\text{m}$  那一部分弹壳。从径向看并不是所有  $EF$  段的弹壳形成的破片都击中防护门,按照类似的计算方法,以  $A_0C_0$ 为对称轴,只有角度在  $\pm 17.5^\circ$  范围内的弹壳形成的破片才能撞击到防护门上,这部分弹壳除以破片的平均质量即可得到撞击到防护门上的破片数。按破片平均质量  $6.8\text{g}$  计算,撞击到防护门上的破片数为 308 个。

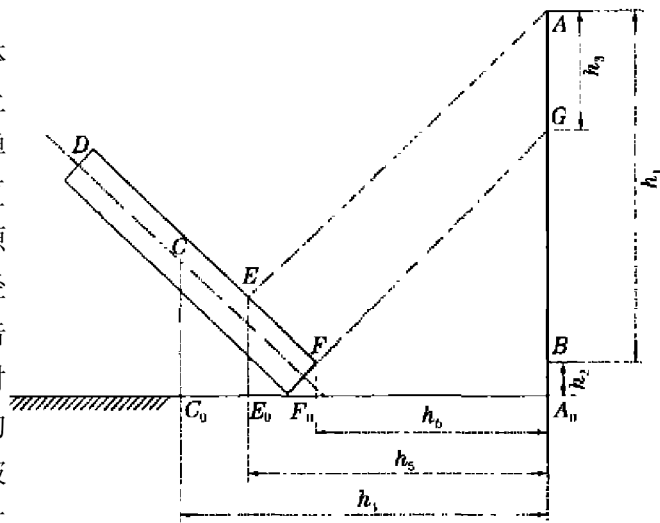


图 3 防护门上破片分布

Fig.3 Fragments distribution on protective door

### 3.2.4 防护门在单一破片侵彻作用下的破坏

通常采用法向撞击条件,破片对普通结构钢的侵彻计算公式<sup>[5]</sup>为

$$Z = 0.75 W_f^{0.33} v_f^{1.22} \quad (4)$$

式中: $Z$  为侵彻深度,  $\text{cm}$ ;  $W_f$ 为破片质量,  $\text{g}$ ;  $v_f$ 为撞击速度,  $\text{km/s}$ 。

本次试验的防护结构距爆炸点的距离小于  $3\text{m}$ ,其撞击速度可以取其初速度,所以  $v_f=1725\text{m/s}$ ,破片平均质量  $W_f=6.79\text{g}$ 。由式(4)可得  $Z=2.74\text{cm}$ 。破片将贯穿第一层钢板,破片穿透第一层钢板后的剩余速度可由下式计算<sup>[5]</sup>

$$v_r = \left[ v_f^2 - 1.62 \left[ \frac{t_s}{W_f^{1/3}} \right]^{1.64} \right]^{1/2} \left/ \left[ 1 + 1.73 \frac{t_s}{W_f^{1/3}} \right] \right. \quad (5)$$

式中: $t_s$ 为防护门钢板厚度。由式(5)可得  $v_r=811\text{m/s}$ 。由于防护门的两层钢板之间的距离很小,故可将此速度作为破片撞击第二层钢板的撞击速度,由式(4)可得,侵彻厚度  $Z=1.09\text{cm}$ ,故破片也将穿透第二层钢板。由式(5)可得该弹片穿透第二层钢板后的剩余速度为  $156\text{m/s}$ 。宏观调查发现,距防护门近  $40\text{m}$  处的一条狗被弹片击中头颅致死。

### 3.3 防护门在冲击波作用下的变形和破坏

根据试验结果,防护门框上实测空气冲击波超压大于  $140\text{MPa}$ ,作用时间大于  $1\text{ms}$ ,作用到防护门单位面积( $1\text{m}^2$ )上的冲量荷载最大值大于  $80\text{kPa}\cdot\text{s}$ ,根据防护门破坏情况,空气冲击波超压、冲量荷载和地冲击引起的震动会造成防护门产生以下变形和破坏:防护门和门框处的连接绞叶焊接处断裂、防护门和门框处的橡胶密封圈部分脱落、防护门第一层钢板整体产生轻微内陷、防护门第一层钢板局部产生塑性

变形、防护门第一层钢板后的支撑肋板产生弯曲变形等。

但不会产生下列现象和结果: (1)防护门正面和背面钢板上数量众多的弹孔、弹坑和面积较大的撕裂带; (2)从弹孔和撕裂带泄露到防护门后东西通道的冲击波超压参数相对较高。在完成的模型坑道内爆炸试验中,也安装了防护门,装药为裸露 TNT,装药量和坑道几何尺寸与原型坑道内爆炸试验相比,缩尺比均为 1:3,试验后防护门无明显变形和破坏,模型坑道内爆炸试验防护门后的冲击波超压(图 4(a))与原型坑道内爆炸试验冲击波超压(图 4(b))相比,峰值明显降低。图中,  $L$  和  $D$  分别为测点至爆心距离和坑道等效直径, m;  $S$  为坑道截面积,  $m^2$ ;  $Q$  为装药质量, kg;  $\Delta p$  为冲击波超压峰值, MPa。

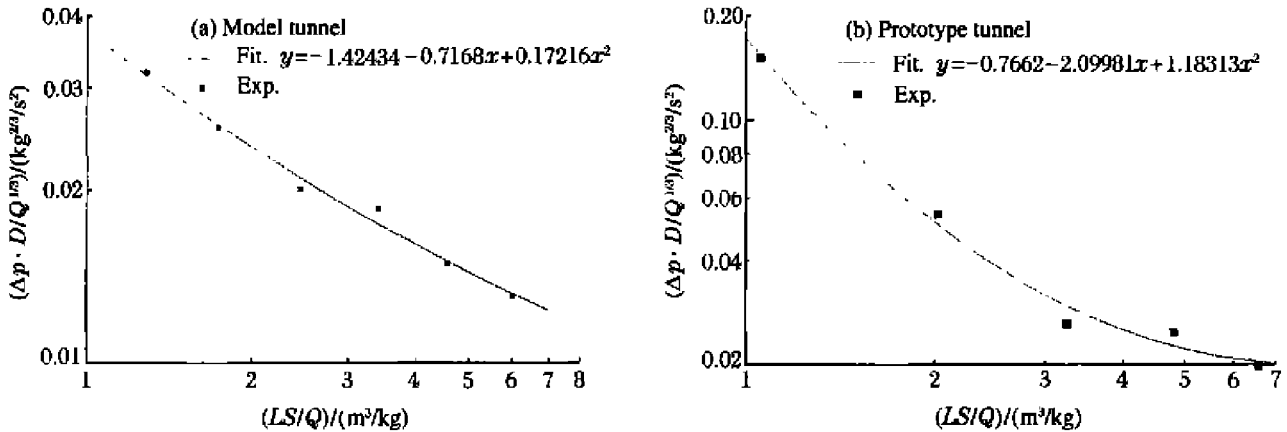


图 4 模型坑道和原型坑道防护门后冲击波超压的衰减

Fig.4 Peak overpressure attenuation of shock wave after protective door in model tunnel and prototype tunnel

### 3.4 防护门在冲击波和破片复合作用下的变形和破坏

当有壳体装药爆炸时,防护门的破坏必须考虑冲击波和破片的复合作用。以破片平均质量  $W_f = 6.8\text{g}$ 、 $v_f = 1725\text{m/s}$  计算,单个破片的冲量

$$I_f = W_f v_f = 11.7\text{kg} \cdot \text{m/s}$$

作用到防护门上所有破片的冲量为  $\sum I_f = 3612.8\text{kg} \cdot \text{m/s}$ ,单位面积 ( $1\text{m}^2$ ) 上破片的冲量为  $\sum I_f / S = 1806\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) = 1.806\text{kPa} \cdot \text{s}$ ,小于冲击波冲量(大于  $80\text{kPa} \cdot \text{s}$ )的 2.3%,在本次试验条件下破片冲量并未引起总冲量荷载的显著增加。

破片撞击防护门产生的瞬间压力

$$p_f = \rho v_f^2 = 5802\text{MPa}$$

当破片以平均速度  $v_f = 1725\text{m/s}$  超高速撞击用 A3 冷扎钢(动态屈服强度、动态抗压强度分别以 350、500MPa 计)制成的防护门时,除形成弹孔外,撞击瞬间弹孔周围 1~3 倍弹孔直径的介质几乎处于流体状态,强度接近于 0,3~5 倍弹孔直径的介质处于塑性状态。冲击波与破片的复合作用描述如下:

(1)由于弹体中心离门的最近距离为 2m,冲击波的传播速度按平均 1500m/s 计算,按统计平均的观点,在破片撞击防护门的瞬间后 0.174ms 冲击波到达,破片穿越 1cm 厚钢板约需 0.08ms,这一过程可以认为是绝热过程。由于弹孔周围的介质强度大大降低,超压强度为 145MPa 冲击波到达后,弹孔周围 1~3 倍弹孔直径的介质瞬间被强大的冲击波卷走,弹孔进一步扩大。

(2)当强度有较小降低的冲击波继续作用在已经扩大化的弹孔周围时,将在弹孔周围介质中形成应力集中,应力集中系数最高可达到 7。处于塑性状态(强度已降低)的 3~5 倍弹孔直径范围的介质受到高集中应力的作用,将在冲击波的继续作用下翻卷或形成裂纹甚至撕裂,在这一过程中弹孔继续扩大并伴随着裂隙的形成。

(3)上面的分析是基于速度较高、质量较小、形状规则的破片垂直撞击到门上,当质量较大、形状不规则、速度较低的破片斜向撞击门时,将在门上形成穿透、部分穿透或尚未穿透的条状切槽,虽然超压强度大于 140MPa 的直接冲击波可能已先于破片到达防护门,但从其他位置(如坑道两侧壁、坑道拱顶等)反射而来的冲击波超压强度依然较高,在此冲击波超压作用下,条状切槽将进一步穿透和扩大。

(4)当防护门某一区域受到破片的连续打击(即一串破片先后依次作用在该区域时)和集中打击时(即破片群几乎同时作用在该区域时),在冲击波的复合作用下,防护门的破坏更为严重,完全可以在门上形成面积较大的空洞或不规则的、较长、较宽的撕裂带。

## 4 结 论

通过坑道内爆炸试验防护门的破坏现象和分析,得到以下结论:(1)本文中采用的计算破片的质量分布、空间分布、初始速度和单个破片对防护门的侵彻作用的公式所得结果与试验宏观破坏现象基本相符。(2)防护门的破坏效应是破片和冲击波复合作用的结果,破片和冲击波的单独作用都不可能造成如此严重的破坏效果,因此在防护门的设计中不仅要考虑破片侵彻防护门和防护门在冲击波单独作用下的变形和破坏情况,更要重视破片和冲击波对防护门的复合破坏作用。

## 参考文献:

- [1] 周丰峻.国际常规武器效应与结构相互作用会议专题报告[R].洛阳:洛阳水利工程研究所,1997.
- [2] Lee B, Peyton S. A comparison of two methods for incorporating fragment damage in first principles airblast and fragment loading of structures[A]. 9th International Symposium on Interactions of the Effects of Munitions with Structures [C]. Berlin, Germany, 1999.
- [3] Bowles P K. Update of the vehicle bomb mitigation guide (VBMG) safe distances for secondary fragmentation[A]. 11th International Symposium on Interactions of the Effects of Munitions with Structures[C]. Mannheim, Germany, 2003.
- [4] 李晓军,张殿臣,李清献.常规武器破坏效应与工程防护技术[M].洛阳:洛阳水利工程研究所,2001.
- [5] 美军陆军装备部.终点弹道学原理[M].王维和,译.北京:国防工业出版社,1985.

## Protective door damaged by air shock wave and fragment arisen from explosion in prototype tunnel

HE Xiang<sup>1, 2, 3 \*</sup>, PANG Wei-bin<sup>1</sup>, QU Jian-bo<sup>1</sup>, LIU Guo-jun<sup>1</sup>, LI Mao-sheng<sup>1</sup>

(1. *Luoyang Hydraulic Engineering Technical Institute, Luoyang 471023, Henan, China;*

*2. Postdoctoral Scientific Research Station, Engineering Institute of PLA University  
of Science and Technology, Nanjing 100083, Jiangsu, China;*

*3. Rock-Soil Institute of Mining University of China, Beijing 100084, China)*

**Abstract:** The possibility of explosion in tunnel of underground engineering is greatly increased along with a great deal of precisely guided weapons are applied in actual combat. The macroscopic effects of protective door under compound action of shock wave and fragment are reviewed by explosion in Prototype tunnel. Initial speed and distribution of mass and space of fragments are computed. Protective door single damaged action by fragment and shock wave is analyzed. Protective door damaged under compound action arisen from shock wave and fragment is discussed at last.

**Key words:** mechanics of explosion; damage; explosion; protective door; shock wave; tunnel; fragment

---

\* Corresponding author: HE Xiang

E-mail address: hexiang660825@sina.com

Telephone: 0379-5981423-76747