



# 屏蔽装药的冲击引爆特性研究和量纲分析

陈兴旺<sup>1\*</sup>, 王冕<sup>1</sup>, 贾波<sup>2</sup>, 陈超<sup>2</sup>, 焦元威<sup>1</sup>, 唐奎<sup>3</sup>

(1.西北工业集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2.陆军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710043;

3.南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:**为研究屏蔽装药的冲击引爆特性,从理论上建立了带屏蔽板殉爆现象的量纲分析方法。采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对屏蔽装药的冲击引爆过程进行数值模拟,重点分析了屏蔽板厚度、主发装药的质量、主发装药的长径比和爆距对屏蔽装药冲击引爆的影响。利用(非)线性最小二乘法,拟合得到屏蔽板厚度与殉爆距离的函数关系以及主发装药的质量与殉爆距离的函数关系。结果表明:量纲分析结果和拟合关系式吻合良好,充分论证了拟合公式的有效性和准确性。非接触爆炸时,随着屏蔽板厚度的逐渐增大,殉爆距离呈指数衰减,屏蔽板厚度在 3 mm 以内时,增大屏蔽板厚度对殉爆距离影响较大;大于 3 mm 时,进一步增大屏蔽板厚度对提高炸药抗冲击引爆毁伤能力影响显著变小。非接触爆炸时,在主发装药长径比保持不变的情况下,殉爆距离与主发装药的半径呈线性关系,与主发装药的质量呈立方根关系;在主发装药质量保持不变的情况下,当主发装药和被发装药的直径相等时,殉爆距离最大。

**关键词:**屏蔽装药;冲击引爆;殉爆距离;量纲分析;拟合公式

**中图分类号:** O383.1; TJ55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2024)04-0055-08

## Dimensional Analysis and Investigation of the Shock Initiation Characteristics of Covered Charge

CHEN Xingwang<sup>1\*</sup>, WANG Mian<sup>1</sup>, JIA Bo<sup>2</sup>, CHEN Chao<sup>2</sup>, JIAO Yuanwei<sup>1</sup>, TANG Kui<sup>3</sup>

(1.Northwest Industries Group Co., Ltd, Xi'an 710043, China;

2.Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Xi'an Region, Xi'an 710043, China;

3.National Key Laboratory of Transient Physic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to study the damage effect of the near-field strong shock wave on the covered charge, the dimensional analysis method on the sympathetic detonation with covered plate was established theoretically. The shock initiation process of covered-pressed TNT was numerically simulated by nonlinear finite element program ANSYS/LS-DYNA. The influence of covered plate thickness, donor charge mass, length-diameter ratio of donor charge on the detonation distance during non-contact explosion was analyzed. The functional relationship between covered-plate thickness and sympathetic detonation distance was obtained by a non-linear least square method, as well as the functional relationship between donor charge mass and sympathetic detonation distance. The results show that the dimensional analysis results are in good agreement with the fitting formula, which fully demonstrates the validity and accuracy of the fitting formula. The calculated detonation distance of the non-contact explosion decreases with the increase of the covered-plate thickness. While the covered-plate thickness is less than 3 mm, the increase of the covered-plate thickness has a greater impact on the sympathetic detonation distance. While the thickness is greater than 3 mm, further increasing the covered-plate thickness has significantly smaller effect on

increasing the shock initiation resistance of explosive. When the length-diameter ratio of the donor charge remaining constant, the detonation distance of the non-contact explosion is linear with the donor-charge radius, and cubic with the donor-charge mass. Under the donor-charge mass remains constant, the detonation distance of the non-contact explosion is the largest when the diameters of the donor-charge and the acceptor charge are equal.

**Key words:** covered charge; shock initiation; sympathetic detonation distance; dimensional analysis; fitting formula

研究屏蔽装药结构在冲击波作用下的安全性对武器弹药的发展具有重要意义,研究含装药结构在上述外界能量作用下的冲击起爆特性,将为含装药弹药的安全性设计提供重要依据<sup>[1-2]</sup>。爆炸冲击波作用炸药的冲击引爆,一直以来是国内外学者研究的重点课题。WALKER<sup>[3]</sup>以热起爆理论为基础,推导出著名的非均相炸药的起爆判据,为不敏感弹药的冲击引爆研究提供了理论基础。HOWE 等<sup>[4]</sup>利用欧拉程序对屏蔽炸药殉爆实验进行了二维数值模拟,分析计算了较小殉爆距离下爆炸冲击波对被发炸药的冲击毁伤结果,得到了殉爆距离、壳体厚度,以及主发炸药和被发炸药的间隔板对殉爆结果的影响。明路遥等<sup>[5]</sup>基于侧壁效应忽略假设和冲击波一维假定,将冲击波作用下的战斗部简化为屏蔽装药模型,在简化主炸药爆轰波形的基础上,将主炸药的作用等效为破片的撞击过程,得到了简化战斗部模型的冲击起爆判据。文献[6]根据物理化学性质,在数值模拟中将殉爆过程分为两个阶段,且两个阶段使用两种不同的网格大小,以提高计算精度和效率,解决了可变网格大小和时间步长的两个求解器之间的数据交互,实现了殉爆的三维并行计算。屏蔽装药结构在超近场强冲击波作用下的响应作为不敏感弹药研究的重要方面,相关研究还鲜见报道。在试验研究方面,对于超近场爆炸,由于试验条件和经费等的限制,获得的试验数据很少;在理论研究方面,目前尚未建立有关超近场下爆炸冲击波对屏蔽装药的成熟理论和经验拟合公式,因此需开展爆炸冲击波对屏蔽装药的冲击引爆研究,为弹药安全性设计提供指导。

本文以压装 TNT 为例,屏蔽板为 45# 钢,从理论上建立了带屏蔽板殉爆现象的量纲分析方法。通过数值仿真重点分析屏蔽板厚度、主发装药的质量、主发装药的长径比和爆距对屏蔽装药冲击引爆的影响,量化殉爆距离与屏蔽板厚度、主发装药的质量及

主发装药的长径比之间的关系。

## 1 殉爆相似率的量纲分析

主发装药的爆轰过程和爆轰产物在空中介质中的传播过程与如下控制参数有关:主发装药密度  $\rho_0$ 、装药质量  $W$ 、爆轰速度  $D_j$ 、C-J 爆压  $p_j$ 、质点速度  $u_j$ 、爆温  $T_j$ 、爆容  $V_j$ 、爆轰产物传播过程时的压力  $p_s$ 、密度  $\rho_s$ 、质点速度  $u_s$  和多方气体指数  $\gamma$ 。上述这些参数是相互关联的物理量,因为装药爆炸后,爆轰波阵面上满足质量守恒、动量守恒以及能量守恒,再加上 C-J 爆轰的稳定条件,通过上述 4 个方程,只要知道主发装药的  $\rho_0$  和爆轰速度  $D_j$ ,便可求出爆轰过程中的其他量。同理,在计算爆轰产物传播过程时,可以将 C-J 状态时的压力、密度和质点速度作为初始状态条件,通过 3 个状态方程,便可求出爆轰产物传播过程时的压力  $p_s$ 、密度  $\rho_s$ 、质点速度  $u_s$ 。由此可见,对于主发装药的爆轰过程和爆轰产物在空中介质中的传播过程,独立的物理量只有  $W, \rho_0, D_j, \gamma$ 。

主发装药爆轰后,首先是爆轰波入射到空气介质中产生冲击波,而后是爆轰产物的膨胀运动,冲击波波阵面上也是满足三大守恒定律。因此,通过将空气的初始密度  $\rho_{a0}$ 、初始压力  $p_{a0}$ 、绝热指数  $\gamma_{a0}$  作为初始状态条件,便可求得距离  $h$  处的各参数,如压力  $p_i$ 、质点速度  $u_i$  以及冲击波速度  $v_i$  等。所以,对于空气来说,独立的物理量有  $\rho_{a0}, p_{a0}, \gamma_{a0}, h$ 。

当冲击波经空气衰减后传入到屏蔽板时,在空气-屏蔽板界面处满足连续界面条件,即界面处的压力和速度相等。将压力  $p_i$ 、质点速度  $u_i$  作为初始状态条件,通过连续界面条件,便可求出进入隔板的冲击波压力和质点速度。而后冲击波经隔板衰减传入到被发装药。因此,只要知道屏蔽板的密度  $\rho_f$ 、屏蔽板的尺寸  $l_f$ 、冲击雨果尼奥参数  $a_i, b_i$ 、衰减系数  $\alpha$  ( $\alpha$  与屏蔽板的材料及种类相关)便可求出传出屏蔽板时的压力  $p_x$ 、质点速度  $u_x$  等。由此可见,对于

屏蔽板来说,独立的物理量有  $\rho_f, l_f, a_i, b_i, \alpha$ 。

同理,当冲击波经屏蔽板衰减后传入到屏蔽板时,在屏蔽板-被发装药界面处满足连续界面条件,即界面处的压力和速度相等。将压力  $p_x$ 、质点速度  $u_x$  作为初始状态条件,通过连续界面条件,便可求出进入被发装药的冲击波压力  $p_e$  和质点速度  $u_e$ ,因此只要知道被发装药密度  $\rho'_0$ ,被发装药冲击雨果尼奥参数  $a_e, b_e$  便可求出传出屏蔽板时的压力  $p_i$ 、质点速度  $u_i$  等。另外,被发装药被引爆不仅与传入被发装药的能量有关(即入射冲击波的压力、正压作用时间、质点速度、温度等),还与被发装药的物理化学性质有关,如装药密度  $\rho'_0$ 、装药尺寸  $l_e$ 、比热  $C$ 、活化能  $E$ 、炸药的导热率  $\tau$ 、指前因子  $Z$ 、临界温度  $T_{cr}$  等。由此可见,对于被发装药,独立的物理量有  $\rho'_0, a_e, b_e, l_e, C, E, \tau, Z$ 。

综上所述,对于整个殉爆系统来说,独立的物理量有  $W, \rho_0, D_j, \gamma, \rho_{a0}, p_{a0}, \gamma_{a0}, h, \rho_f, l_f, a_i, b_i, \alpha, \rho'_0, a_e, b_e, l_e, C, E, \tau, Z$ 。其中,殉爆距离  $h$  为主发装药到屏蔽板表面的距离。冲击雨果尼奥参数  $b_i$  和  $b_e$  为无量纲,空气介质中的初始密度  $\rho_{a0}$ 、初始压力  $p_{a0}$ 、绝热指数  $\gamma_{a0}$ 、多方气体指数  $\gamma$  均不变,因此一共只有15个物理量,殉爆距离关系式可以写成:

$$f(x_i) = f(h, W, \rho_0, D_j, \rho_f, l_f, a_i, \alpha, \rho'_0, a_e, l_e, C, E, \tau, Z) = 0 \quad (1)$$

式(1)物理量的量纲如下所示:

$$[h] = L, [W] = M, [\rho_0] = ML^{-3}, [D_j] = LT^{-1}$$

$$[\rho_f] = ML^{-3}, [l_f] = L, [\alpha] = L^{-1}, [a_i] = LT^{-2}$$

$$[\rho'_0] = ML^{-3}, [a_e] = LT^{-1}, [l_e] = L, [C] = L^2 K^{-1} T^{-2}$$

$$[E] = L^2 MT^{-2} \text{mol}^{-1}, [\tau] = LMK^{-1} T^{-3}, [Z] = T^{-1}$$

上述量纲分析的基本单位是长度  $L$ 、质量  $M$ 、时间  $T$ 、热力学温度  $K$  和物质的量  $n$ ,共5个基本独立量纲。因此,选  $\rho_0, D_j, l_e, C, E$  为基本量,根据  $\pi$  定理可知,式(1)可以构成10个  $\pi$  数的无量纲物理关系,如下式所示:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0$$

式中:  $\pi_n$  是用5个基本独立的物理无量纲化后构成的  $\pi$  数,  $n=10$ 。

假设  $\pi_1 = h/(\rho'_0 a_f l_e^c E^f)$ , 其中,  $a, b, c, e, f$  为待定常数,因  $\pi_1$  是无量纲量,所以分母和分子的量纲应相等。则有:

$$L = [ML^{-3}]^a [LT^{-1}]^b [L]^c [L^2 K^{-1} T^{-2}]^e [L^2 MT^{-2} n]^f$$

通过上式可求得  $a=0, b=0, c=1, e=0, f=0$ 。因此,  $\pi_1 = h/l_e$ 。

同理可得:  $\pi_2 = W/(\rho_0 l_e^3), \pi_3 = \rho_f/\rho_0, \pi_4 = l_f/l_e, \pi_5 = \rho'_0/\rho_0, \pi_6 = a_i/D_j, \pi_7 = \alpha l_e, \pi_8 = a_e/D_j, \pi_9 = \tau/(\rho_0 D_j l_e C), \pi_{10} = Z/(D_j l_e^{-1})$ ; 则有:

$$F\left(\frac{h}{l_e}, \frac{W}{\rho_0 l_e^3}, \frac{\rho_f}{\rho_0}, \frac{l_f}{l_e}, \frac{\rho'_0}{\rho_0}, \frac{a_i}{D_j}, \alpha l_e, \frac{a_e}{D_j}, \frac{\tau}{\rho_0 D_j l_e C}, \frac{Z}{D_j l_e^{-1}}\right) = 0$$

令  $\pi'_9 = \pi_9 \cdot \pi_{10} = Z\tau/(\rho_0 D_j^2 C), \pi'_{10} = \pi_{10} \cdot \pi_9 = Z\tau/(\rho_0 D_j^2 C)$ , 则有:

$$\frac{h}{l_e} = F\left(\frac{W}{\rho_0 l_e^3}, \frac{\rho_f}{\rho_0}, \frac{l_f}{l_e}, \frac{\rho'_0}{\rho_0}, \frac{a_i}{D_j}, \alpha l_e, \frac{a_e}{D_j}, \frac{Z\tau}{\rho_0 D_j^2 C}, \frac{Z\tau}{\rho_0 D_j^2 C}\right)$$

因本文试验和数值模拟中的主发装药和被发装药材料和种类不变,装药密度相同,则有  $\rho_0 = \rho'_0$ , 且反映炸药性质的其他物理量  $a_i, a_e, \rho_0, D_j, C, E, \tau, Z$  都不变。同理,每次试验和数值模拟中的屏蔽板材料也不变,反映屏蔽板性质的物理量  $\rho_f$  和  $a_i$  也将保持不变,则  $\frac{\rho_f}{\rho_0}, \frac{\rho'_0}{\rho_0}, \frac{a_i}{D_j}, \frac{a_e}{D_j}, \frac{Z\tau}{\rho_0 D_j^2 C}, \frac{Z\tau}{\rho_0 D_j^2 C}$  在每次试验中将保持不变,于是有:

$$\frac{h}{l_e} = F\left(\frac{W}{\rho_0 l_e^3}, \frac{l_f}{l_e}, \alpha l_e\right) \quad (2)$$

式中:相似参数  $W/(\rho_0 l_e^3)$  的物理意义为主发装药量与被发装药量之比,相似参数  $l_f/l_e$  的物理意义为屏蔽板厚度与被发装药长度之比,相似参数  $\alpha l_e$  的物理意义为冲击波在屏蔽板内衰减的程度。当屏蔽装药以冲击波传播过程中的压力作为判别殉爆依据时,上述量纲分析得到的公式适用于所有屏蔽装药的殉爆。对于给定的主发装药和被发装药,主发装药以及被发装药的尺寸、密度已知,则  $W/(\rho_0 l_e^3)$  在每次试验中将保持不变,于是式(2)可简化为

$$\frac{h}{l_e} = F\left(\frac{l_f}{l_e}, \alpha l_e\right) \quad (3)$$

结合式(3)和冲击波压力在屏蔽板中衰减理论计算公式<sup>[7]</sup>可推断,当以冲击波传播过程中的压力作为判别殉爆的主要参数时,殉爆距离  $h$  与屏蔽板衰减系数与厚度的乘积存在指数函数关系。

对于给定的屏蔽板和被发装药,屏蔽板的厚度,衰减系数以及被发装药的尺寸、密度已知,则  $l_f/l_e, \alpha l_e$  在每次试验中保持不变,于是式(2)可简化为

$$\frac{h}{l_e} = F\left(\frac{W}{\rho_0 l_e^3}\right) \quad (4)$$

由式(4)可推断,当以冲击波传播过程中的压力作为判别殉爆的主要参数时,在主发装药的长径比保持不变的情况下,殉爆距离  $h$  与主发装药质量存在立方根关系。

## 2 屏蔽装药冲击引爆有限元仿真

### 2.1 计算模拟

采用非线性有限元计算程序 ANSYS/LS-DYNA 对屏蔽装药的冲击引爆过程进行数值模拟计算,有限元计算模型如图 1 所示。模型包括:空气域、主发装药、屏蔽板、被发装药和见证板,数值计算采用 ALE 算法,主发装药和空气域采用 Euler 网格,隔板、被发装药和见证板采用 Lagrange 网格,且屏蔽板与被发装药,被发装药与见证板之间的接触均采用滑移接触,起爆点设置在主发装药上表面中心点处。

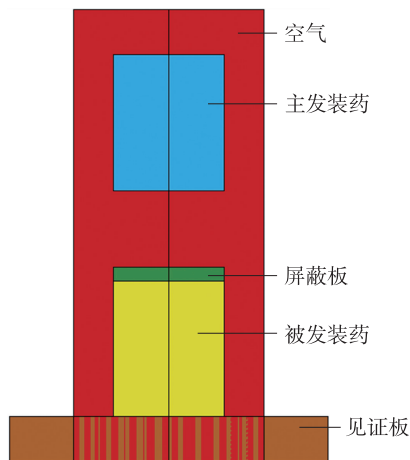


图 1 屏蔽装药冲击引爆数值计算模型图

Fig. 1 Model of shock initiation of covered charge

### 2.2 材料模型

空气域采用无偏应力动力模型 (Null) 和 Linear Polynomial 状态方程<sup>[8]</sup>,主发装药采用 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 本构模型和 JWL 状态方程,屏蔽板和见证板材料模型均采用 Johnson-Cook 模型和 Gruneisen 状态方程,被发装药采用点火增长反应模型,上述所有材料的具体材料参数可见文献[9]。文献[9~10]均已通过多次试验证明上述数值计算中各个材料参数的有效性,因此,本文将不再验证。

## 3 不同参数对屏蔽装药殉爆的影响

### 3.1 主发装药质量对屏蔽装药冲击引爆的影响

由于装药质量对炸药爆炸后冲击波的传播有着重要影响,因此有必要研究主发装药的质量对屏蔽

装药冲击引爆的影响。令文献[9~10]中殉爆试验的主发装药高度为  $L_1$ ,  $L_1 = 30$  mm;主发装药的直径为  $D_1$ ,  $D_1 = 35$  mm;半径为  $R_1$ ,  $R_1 = 17.5$  mm。基于数值仿真的有效性,以殉爆试验中主发装药的高度和半径为基准,在保持主发装药长径比不变的情况下,增大或减小主发装药的半径,计算主发装药对屏蔽装药的冲击引爆过程。图 2 和图 3 分别为主发装药半径 35 mm 时(即半径为  $2R_1$  时),42 mm 和 43 mm 殉爆距离下屏蔽压装 TNT 的压力云图。

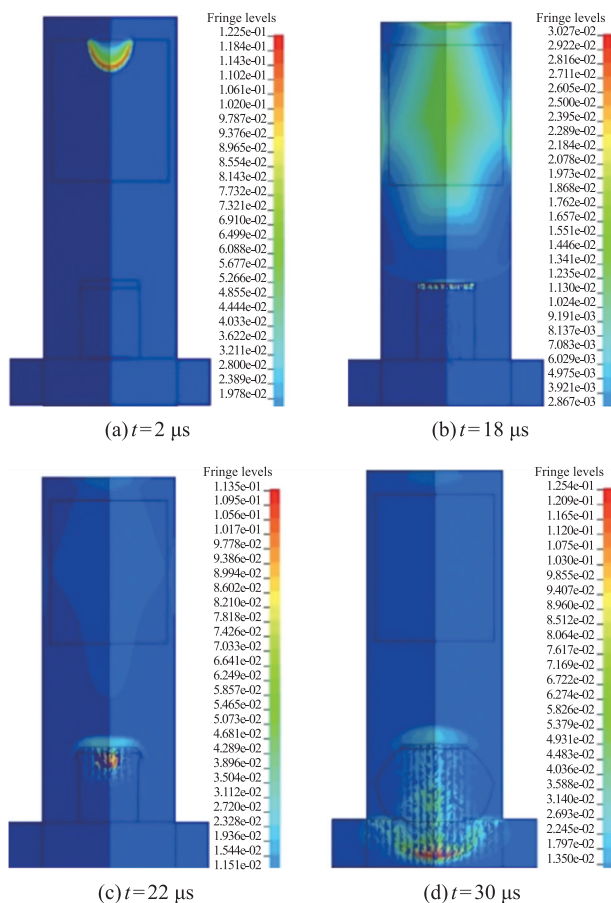


图 2 殉爆距离为 42 mm 时屏蔽装药冲击引爆的压力云图

Fig. 2 Pressure of the covered charge on shock initiation when the detonation distance is 42 mm

由图 2 可见,18  $\mu$ s 时,主发炸药爆炸产生的冲击波已作用到屏蔽板,此时屏蔽板内的最大压力达到 3.02 GPa;当时间达到 22  $\mu$ s 时,炸药内部出现了明显的压力阶跃,被发装药已爆炸;26  $\mu$ s 以后,被发炸药已完全起爆,见证板出现明显凹坑。由图 3 可见, $t = 18$   $\mu$ s 时,冲击波已经传入到屏蔽板一段时间,屏蔽板内的最大压力达到 2.71 GPa;随后,冲击波经屏蔽板传入到被发装药,经过几  $\mu$ s 后被发装药的压力有所提升,但此时被发装药内最大压力仅为

1.8 GPa, 未能达到被发装药的临界起爆压力 2.1 GPa, 被发装药未能被引爆; 当时间为 26 μs 时, 主发装药爆炸产生的冲击波经空气传播作用到见证板, 见证板内的压力剧增; 当时间为 30 μs 以后, 被发装药仍没有爆炸。接下来, 采用“升降法”, 进一步计算不同半径下主发装药对屏蔽压装 TNT 冲击引爆的殉爆距离。计算结果如表 1 所示。

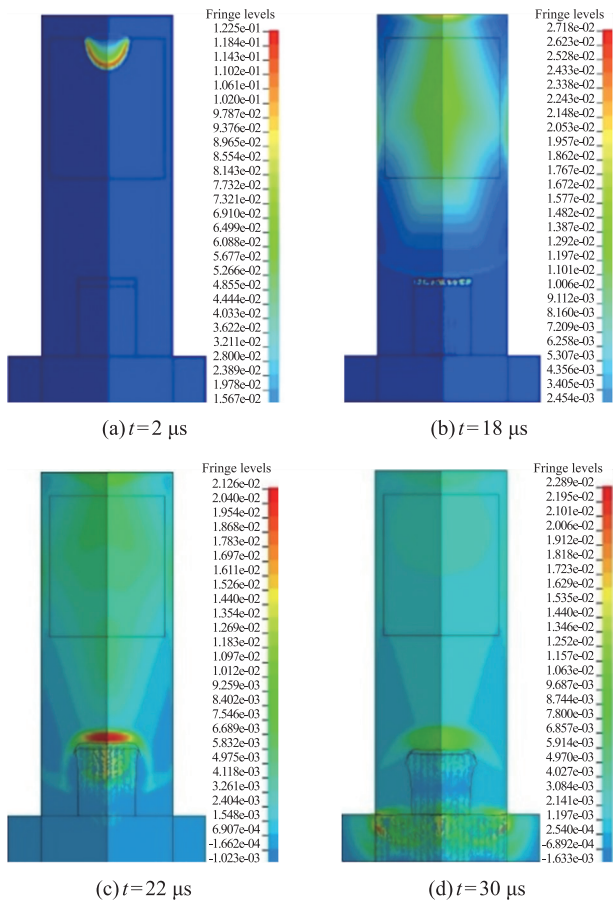


图 3 殉爆距离为 43 mm 时屏蔽装药冲击引爆的压力云图  
Fig. 3 Pressure of the covered charge on shock initiation when the detonation distance is 43 mm

为分析主发装药的半径对殉爆距离的影响, 本文结合试验和数值仿真结果, 通过线性最小二乘法拟合得到二者的关系, 具体形式为

$$h=k_1R+b_1 \tag{5}$$

式中: 主发装药的半径  $R>9\text{ mm}$ ,  $h$  为殉爆距离, 单位均为 mm;  $k_1$ 、 $b_1$  为表征冲击引爆的特性参数, 此参数与炸药和屏蔽板性质有关, 均为常数, 且为无量纲物理量。通过拟合表 1 中数据可得到:  $k_1=1.66$ ,  $b_1=-14.9$ , 线形回归的相关系数为 0.995 5。图 4 为主发装药的半径与殉爆距离之间的关系曲线。

表 1 不同半径下殉爆距离的仿真结果

Table 1 Simulation results of detonation distance

| 屏蔽板厚度/mm | 主发装药高度            | 主发装药半径            | 殉爆距离/mm |
|----------|-------------------|-------------------|---------|
| 3        | 0.8L <sub>1</sub> | 0.8R <sub>1</sub> | 9       |
| 3        | L <sub>1</sub>    | R <sub>1</sub>    | 13      |
| 3        | 1.1L <sub>1</sub> | 1.1R <sub>1</sub> | 17      |
| 3        | 1.3L <sub>1</sub> | 1.3R <sub>1</sub> | 23      |
| 3        | 1.5L <sub>1</sub> | 1.5R <sub>1</sub> | 28      |
| 3        | 1.7L <sub>1</sub> | 1.7R <sub>1</sub> | 35      |
| 3        | 1.9L <sub>1</sub> | 1.9R <sub>1</sub> | 39      |
| 3        | 2L <sub>1</sub>   | 2.0R <sub>1</sub> | 42      |
| 3        | 2.1L <sub>1</sub> | 2.1R <sub>1</sub> | 47      |
| 3        | 2.3L <sub>1</sub> | 2.3R <sub>1</sub> | 52      |
| 3        | 2.5L <sub>1</sub> | 2.5R <sub>1</sub> | 58      |
| 3        | 3L <sub>1</sub>   | 3R <sub>1</sub>   | 72      |

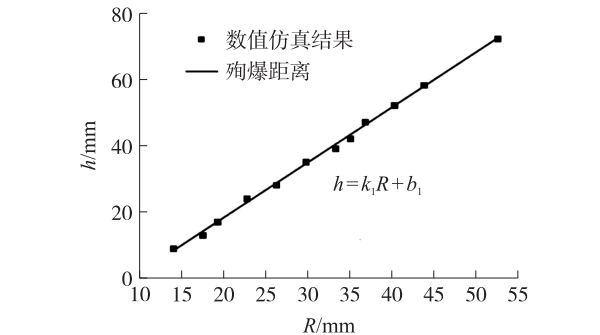


图 4 主发装药的半径与殉爆距离之间的关系曲线  
Fig. 4 Relation of detonation distance and the radius of charge

由图 4 可知, 随着主发装药的半径逐渐增大, 殉爆距离呈线形增大。当殉爆距离为 0, 半径为 9 mm 时, 此点(即曲线与横轴的交点)的物理意义表示当主发装药的半径足够小时, 爆炸后产生的能量不足以引爆被发装药。另外, 基于主发装药长径比不变的情况下, 主发装药的质量与主发装药的半径成 3 次幂关系, 因此, 式(5)可写为

$$h=k_2\sqrt[3]{W}+b_1 \tag{6}$$

式中:  $k_2$  为表征冲击引爆的特性参数, 此参数与炸药和屏蔽板板性质有关,  $k_2$  为常数, 是有量纲物理量。上述公式与量纲分析得到的式(4)非常吻合, 进一步论证了拟合公式的有效性和准确性。

### 3.2 屏蔽板厚度对屏蔽装药冲击引爆的影响

采用“升降法”, 数值计算不同屏蔽板厚度下主发装药对屏蔽压装 TNT 冲击引爆的殉爆距离, 计算结果如表 2 所示。为分析近场非接触爆炸时屏蔽板厚度对殉爆距离的影响, 结合试验<sup>[9]</sup>和数值仿真结果, 通过非线性最小二乘法拟合得到二者的关系, 具体形式为

$$h=h_0\exp(Bad) \tag{7}$$

式中: $d$  为屏蔽板厚度;对于本文的 45#钢屏蔽板, $\alpha=0.053\ 6$ 。 $h_0$ 、 $B$  为表征冲击引爆的特性参数,与装药以及屏蔽板的材料和尺寸等相关。其中  $h_0$  为屏蔽板厚度为 0 时的殉爆距离,为有量纲物理量,单位为 mm; $B$  为无量纲物理量。通过表 2 中的初始数据拟合得到各参数的数值,其中  $h_0=81$ , $B=-10.5$ ,非线性回归的相关系数为 0.991 8,殉爆距离与屏蔽板厚度的函数关系如图 5 所示。

表 2 不同屏蔽板厚度下殉爆距离的仿真结果

| Table 2 Simulation results of detonation distance under different thickness of covered plate |               |               |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|-------------|
| 屏蔽板厚度<br>/mm                                                                                 | 主发装药高度<br>/mm | 主发装药半径<br>/mm | 殉爆距离<br>/mm |
| 0                                                                                            | 30            | 17.5          | 81          |
| 1                                                                                            | 30            | 17.5          | 51          |
| 2                                                                                            | 30            | 17.5          | 20          |
| 3                                                                                            | 30            | 17.5          | 13          |
| 4                                                                                            | 30            | 17.5          | 10.5        |
| 5                                                                                            | 30            | 17.5          | 7           |
| 6                                                                                            | 30            | 17.5          | 5.5         |
| 7                                                                                            | 30            | 17.5          | 3.5         |
| 8                                                                                            | 30            | 17.5          | 2.5         |
| 9                                                                                            | 30            | 17.5          | 1.5         |
| 20                                                                                           | 30            | 17.5          | 趋向于 0       |

由式(7)可知,随着屏蔽板厚度的逐渐增大,殉爆距离呈指数衰减。上述公式与量纲分析推断的结论相吻合,进一步论证了拟合公式的有效性和准确性。由图 5 曲线可知,当屏蔽板厚度从 1 mm 逐渐增加到 9 mm 时,屏蔽装药的殉爆距离从 51 mm 逐渐降为 1.5 mm,屏蔽板对冲击波毁伤元有着显著的防护作用;屏蔽板厚度在 3 mm 以内时,增大厚度对冲击引爆效应影响较大,大于 3 mm 时,进一步增大屏蔽板厚度对提高炸药抗冲击引爆能力影响显著变小。

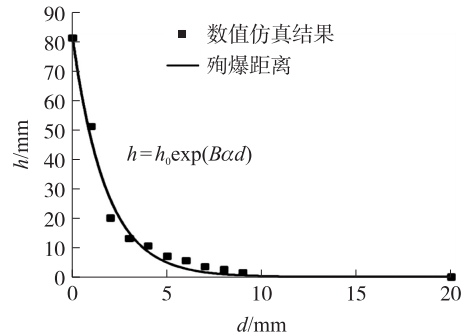


图 5 殉爆距离随屏蔽板厚度变化曲线  
Fig. 5 Relation of detonation distance and the thickness of covered plate

当屏蔽板厚度等于 10 mm 时,殉爆距离已经趋向于 0;然而当殉爆距离等于 0 时,即为接触爆炸,

此情况下的临界屏蔽板厚度为 24 mm,与非接触爆炸趋向于 0 的屏蔽板厚度 10 mm 相差较大。这是因为非接触爆炸和接触爆炸能量传递有本质上的区别,非接触爆炸时,主发装药爆炸产生的冲击波和爆轰产物的能量在间隔的空气介质中耗散很快,因此,相比于接触爆炸,威力会大大降低。

3.3 主发装药长径比对屏蔽装药冲击引爆的影响

空气爆炸超压场是影响爆炸毁伤效应和结构防护设计的重要因素,对毁伤模式的评估具有重要的意义。在远场(等效距离  $h'=h/\sqrt[3]{W}\geq 5$ )情况下,由于装药爆炸后空爆冲击波压力峰值已衰减至大气压量级,且冲击波的形状和强度受初始装药形状、起爆方式等因素的影响较小,所以在远场情况下,一般将模型简化为等效 TNT 当量下的球形装药中心起爆进行建模和分析讨论<sup>[11]</sup>。在近场(等效距离  $h'=h/\sqrt[3]{W}\leq 5$ )情况下,相关实验和数值模拟的研究均表明,装药形状和起爆方式对近场空爆冲击波压力流场有较大影响<sup>[12-13]</sup>,这些因素对空爆冲击波流场的超压及冲量的影响不可忽略。本文的研究目标属于超近场情况(等效距离  $h'\leq 0.2$ ),装药的形状对空爆冲击波流场的超压及冲量影响更大;而且圆柱形装药空爆在超近场空间存在复杂的波系相互作用,超压强度和分布极不均匀,故研究主发装药的长径比对屏蔽装药冲击引爆的影响是有必要的。

3.3.1 网格敏感性分析

因需要模拟和统计空气域中不同衰减距离下的压力峰值,为了避免网格大小对空气域中各单元的压力峰值的影响,对比了网格大小  $q$  分别为 0.5 mm、0.75 mm、1 mm、1.25 mm、1.5 mm 的数值模拟结果,并输出了主发装药质量为 109.1 g,且长径比为 2 时,距离主发装药下表面中心 5 mm 处的冲击波压力时程曲线,如图 6 所示。

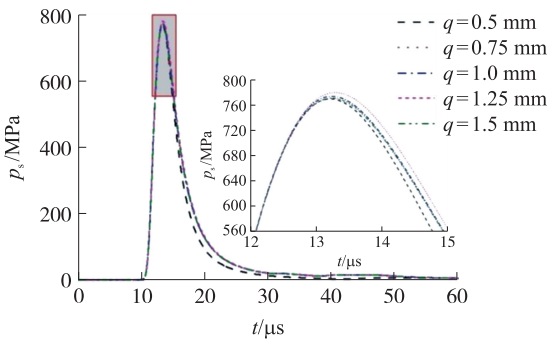


图 6 网格敏感性分析图  
Fig 6 Diagram of grid-convergence analysis

由图 6 可知,当网格大小  $q$  从 1.5 mm 细化到 0.5 mm 时,其对空气域中冲击波峰值压力影响很小,网格大小为 0.5~1.5 mm 时数值计算结果均收敛,本节选取的网格大小为 1 mm。

3.3.2 主发装药长径比对屏蔽装药冲击引爆的影响

基于数值模拟的有效性,在主发装药质量保持不变的情况下,通过数值模拟方法研究和分析了柱状装药长径比对屏蔽装药冲击引爆的影响。在保持研究方法、模型、材料参数不变的基础上,将 109.1 g 圆柱形 TNT(装药高度为 40 mm,直径为 46.6 mm)改为长径比  $l/D$  分别为 1/2,6/7,1,2,3,4 的圆柱形装药进行模拟。不同长径比下屏蔽压装 TNT 装药的数值计算模型尺寸见表 3。炸药的起爆点位于主发装药上表面的中心处,以圆柱旋转轴方向为轴线方向,距离主发装药下表面中心每隔 5 mm 处,设立一个高斯点,模拟并统计轴线方向不同衰减距离的压力峰值。为避免冲击波作用到屏蔽板反射对高斯点处压力的影响,以及被发装药反应后对高斯点( $G_1 \sim G_5$ )处压力的影响,在数值计算轴线方向上不同衰减距离的压力峰值时,数值模型图只包括主发装药和空气,如图 7 所示。

表 3 不同长径比下压装 TNT 装药的殉爆距离

Table 3 Simulation results of detonation distance under different length-diameter ratios

| 装药<br>长径比 | 主发装药<br>质量/g | 主发装药<br>高度/mm | 主发装药<br>直径/mm | 殉爆距离<br>/mm |
|-----------|--------------|---------------|---------------|-------------|
| 1/2       | 109.1        | 27.9          | 55.8          | 15          |
| 6/7       | 109.1        | 40.0          | 46.6          | 23          |
| 1         | 109.1        | 44.3          | 44.3          | 23.5        |
| 2         | 109.1        | 70.4          | 35.2          | 29          |
| 3         | 109.1        | 92.1          | 30.7          | 22          |
| 4         | 109.1        | 111.6         | 27.9          | 17          |

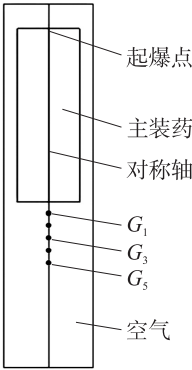


图 7 不同衰减距离的压力峰值数值计算模型图

Fig. 7 Numerical calculation model of donor charge at different distances

图 8 和图 9 分别为不同长径比下距离主发装药下表面中心 5 mm( $G_1$ )、15mm( $G_3$ )处的压力时程曲线对比图。由图 8 和图 9 可知,随着主发装药长径比的增大,距离主发装药下表面中心 5 mm、15 mm 处高斯点的压力峰值逐渐增大。根据文献[13]可知,在缺乏圆柱形空气爆炸近场实验数据的情况下,利用实验有效性的模拟数据对样本空间进行补充,通过数据拟合给出了不同长径比条件下,小等效衰减距离圆柱形 TNT 装药空气爆炸超压估算公式。研究表明,在近场传播过程中,空气冲击波的形状由扁椭球向高椭球转变,气体冲击波的形状转变现象是复杂波系(多次反射后)相互作用的结果。在超近场(等效距离  $h' = h/\sqrt[3]{W} \leq 0.2$ )情况下,随着主发装药长径比的增大,旋转轴线方向上的压力逐渐增大;随着传播距离的逐渐增大,在近场(等效距离  $0.2 \leq h' = h/\sqrt[3]{W} \leq 5$ )情况下,随着主发装药长径比的增大,旋转轴线方向上的压力逐渐减小。由此可见,数值计算结果与文献结论吻合较好。由表 3 可知,当主发装药长径比  $l/D$  为 2 时(此工况下,主发装药的直径与被发装药的直径相等),主发装药冲击引爆屏蔽装药的殉爆距离最大,殉爆距离为 29 mm。当主发装药长径比大于 2 时(此工况下,主发装药的直径小于被发装药的直径),随着主发装药长径比增大,主发装药冲击引爆屏蔽装药的殉爆距离逐渐减小;当主发装药长径比小于 2 时(此工况下,主发装药的直径大于被发装药的直径),随着主发装药长径比增大,主发装药冲击引爆屏蔽装药的殉爆距离逐渐增大。由此可见,主发装药冲击引爆屏蔽装药的临界殉爆距离不仅与主发装药的长径比有关,与被发装药的尺寸也相关。在主发装药的质量保持不变的情况下,当主发装药的直径与被发装药的直径相等时,主发装药爆炸后的冲击波更有利于起爆被发装药。这是因为,当主发装药和被发装药的直径相等时,主发装药爆炸产生的冲击波作用于被发装药的单位有效面积的能量更大,在被发装药内部产生的总能量更大,热点数量增长更多,所以更易于起爆被发装药。因此,当主发装药长径比大于 2 时,随着主发装药长径比的增大,即使轴线方向的压力增大了,但相比于主发装药和被发装药直径相等的情况,实际上作用于被发装药的总能量是减小的。而且通过式(2)也能发现殉爆距离和主发装药量与被发装药量之比相关。

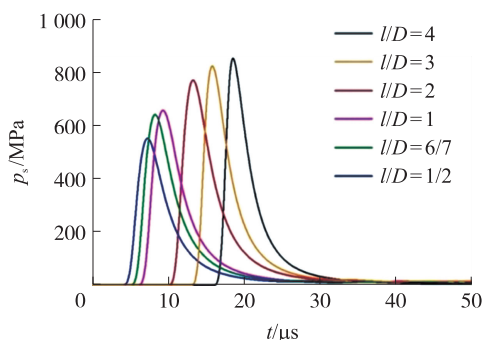


图8 距离主发装药下表面中心 5 mm ( $G_1$ ) 处的压力时程曲线对比图

Fig. 8 Variation of pressure at different length-diameter ratios of donor charge

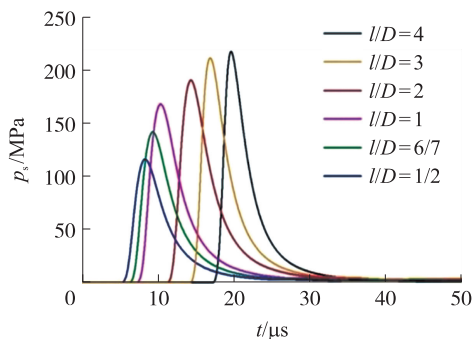


图9 距离主发装药下表面中心 15 mm ( $G_3$ ) 处的压力时程曲线对比图

Fig. 9 Variation of pressure at different length-diameter ratios of donor charge

## 4 结束语

①非接触爆炸时,在主发装药长径比保持不变的情况下,随着主发装药半径逐渐增大,殉爆距离呈线形增加;殉爆距离与主发装药的半径呈线形关系,与主发装药质量的立方根呈线形关系。

②非接触爆炸时,随着屏蔽板厚度的逐渐增大,殉爆距离呈指数衰减。当无屏蔽板时,压装 TNT 的殉爆距离为 81 mm;当屏蔽板厚度从 1 mm 逐渐增加到 9 mm 时,屏蔽装药的殉爆距离从 51 mm 逐渐降为 1.5 m,屏蔽板对冲击波毁伤元有着显著的防护作用;屏蔽板厚度在 3 mm 以内时,厚度加大对殉爆距离影响较大,大于 3 mm 时,进一步增大屏蔽板厚度对提高炸药抗冲击引爆毁伤能力影响显著变小。

③非接触爆炸时,在主发装药质量保持不变的情况下,主发装药冲击引爆屏蔽装药的临界殉爆距离不仅与主发装药的长径比有关,与被发装药的尺寸也相关,即殉爆距离和主发装药量与被发装药量

之比相关;当主发装药长径比为 2 时(此工况下,主发装药的直径与被发装药的直径相等),主发装药冲击引爆屏蔽装药的殉爆距离最大。

## 参考文献

- [1] ERKMAN J O, CHRISTENSEN A B. Attenuation of shock waves in aluminum[J]. Journal of Applied Physics, 1967, 38(13): 5395.
- [2] WALKER F E, WASLEY R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. Explosivstoffe, 1969, 17(1): 9-13.
- [3] WALKER F E, WASLEY R J. Critical energy shock initiation of heteropterous explosive[C]//Explosive Pyrotechnics, 1968.
- [4] HOWE P W, HUANG Y K, ARBUCKLE A L. A numerical study of detonation propagation between munitions[C]//Proceedings of the 7th Symposium International on Detonation, 1982: 1055-1061.
- [5] 明路遥, 李昌坤, 程波, 等. 爆炸冲击波作用下屏蔽装药模型起爆判据研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 95-97.  
MING Luyao, LI Changkun, CHENG Bo. Research on initiation criterion of covered charge model loaded by explosive shock wave[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(4): 95-97. (in Chinese)
- [6] YANG Tonghui, WANG Cheng, Li Tao. Numerical simulation study of sympathetic detonation in stages[J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1382-1393.
- [7] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [8] LIVERMORE. LS-DYNA keyword user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003: 2042-2510.
- [9] 陈兴旺, 王金相, 唐奎, 等. 近场爆炸冲击波对屏蔽压装 TNT 的冲击引爆试验和仿真研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(1): 127-134.  
CHEN Xingwang, WANG Jinxiang, TANG Kui, et al. Experimental and numerical study on shock initiation of covered tnt by near-field blast shock wave[J]. Chinese Journal of High Voltage Physics, 2019, 33(1): 127-134. (in Chinese)
- [10] CHEN Xingwang, WANG Jinxiang, TANG Kui, et al. Investigation of shock initiation in covered charges under shock wave and fragment impacts[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 1-10.
- [11] FALLON C, MCSHANE G J. Fluid-structure interactions for the air blast loading of elastomer-coated concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2019, 168: 138-152.
- [12] ZAKRISSON B, WIKMAN B, HAGBLAD H A. Numerical simulations of blast loads and structural deformation from nearfield explosions in air[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(7): 597-612.
- [13] 刘军, 王政, 熊俊, 等. 圆柱形炸药空爆在近场空间的超压估算公式[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(9): 918-927.  
LIU Jun, WANG Zheng, XIONG Jun. A near-field overpressure estimation equation of cylindrical charge explosive air blast[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(9): 918-927. (in Chinese)