

文章编号: 1006-9941(2008)01-0100-03

钨射弹引爆带盖板炸药阈值工程计算方法

傅 华, 谭多望, 李 涛, 李金河

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 629100)

摘要: 根据裸炸药的一维短脉冲冲击起爆能量判据, 结合射弹撞击带盖板炸药的冲击波传播规律, 获得了同尺寸钨射弹与钢射弹引爆带等厚度盖板装药的阈值速度关系式为 $V_w \approx 0.8 V_{Fc}$ 。采用非线性有限元程序数值模拟验证了该关系的合理性。

关键词: 爆炸力学; 冲击起爆; 能量判据; 盖板炸药; 阈值速度

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

1 引 言

射弹引爆带盖板炸药的阈值速度一直是反导战斗部设计的重要参考数据。射弹撞击带盖板炸药, 通常认为引发爆轰的主控机制是冲击波引爆机制, 入射到炸药内的压力脉冲时间、空间分布对引爆起决定性作用。

钢射弹撞击带盖板炸药的阈值速度已被广泛研究, 研究者给出了不同形式的引爆判据。Slade 等^[1]和 Rosland 等^[2]通过实验得到园柱形钢射弹正向撞击带钢盖板的 Comp. B 炸药引发爆轰的阈值速度随盖板厚度的变化近似呈线性关系, 可以用式(1)描述临界爆轰条件, 这是 Jacobs 判据的一种简化形式。

$$vd^{1/2} = A + B \frac{h}{d} \quad (1)$$

式中, v 是射弹引爆炸药的阈值速度, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; d 是射弹直径, mm ; h 是盖板厚度, mm 。 A 、 B 是炸药有关常数。对于 Comp. B 炸药, $A = 3.33$, $B = 5.34$ 。方青等^[3]人通过实验获得了钢射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的阈值速度表达式(2)。

$$vd^{1/2} = (1 + H) \left(A + B \frac{h}{d \cos \theta} \right) \quad (2)$$

式中, K 为尖头系数, 是射弹飞行方向与盖板法线的夹角, 其他参数与式(1)相同。钨材料射弹具有较强的穿甲能力被广泛于各类战斗部中, 但目前针对钨射弹撞击带盖板炸药引发爆轰临界条件的研究较少。本文基于经典的裸炸药一维短脉冲冲击起爆能量判据, 推导了同尺寸的钨射弹与钢射弹引发带等厚度盖板装药爆轰的阈值速度关系, 通过数值模拟验证了该关系的合理性。

2 简化模型

射弹撞击带盖板炸药的简化模型如图 1 所示。

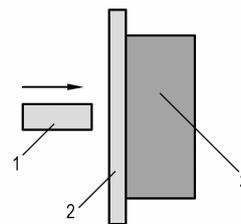


图 1 射弹撞击带盖板炸药模型

1—射弹, 2—盖板, 3—炸药

Fig. 1 Model of projectile impacting covered explosives

1—projectile, 2—covered plate, 3—explosive

射弹以速度 V_1 撞击静止钢盖板, 分别向射弹和盖板传播两个反向冲击波, 当通过盖板入射到炸药的冲击波强度和作用时间到达某临界值时, 便引发炸药爆轰。

根据射弹与盖板撞击面的动量守恒有

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_1 (c_1 + \lambda_1 u_1) u_1 \\ p_2 &= \rho_2 (c_2 + \lambda_2 u_2) u_2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 下标 1、2 分别代表射弹、盖板。

根据撞击面连续条件 $p_1 = p_2, u_1 = u_2$, 结合式(3)有,

$$\rho_1 [-c_1 + \lambda_1 (u_2 - V_1)] (u_2 - V_1) = \rho_2 (c_2 + \lambda_2 u_2) u_2 \quad (4)$$

求解上式得

$$u_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5)$$

式中, $A = \rho_1 \lambda_1 - \rho_2 \lambda_2$; $B = -\rho_1 c_1 - 2\lambda_1 V_1 \rho_1 - \rho_2 c_2$; $C = \rho_1 V_1 (\lambda_1 V_1 + c_1)$ 。

当冲击波达到盖板与炸药界面时, 将向炸药透射冲击波, 根据盖板与炸药界面的动量守恒与连续条件有

$$\rho_3 (c_3 + \lambda_3 u_3) u_3 = \rho_2 [c_2 + \lambda_2 (2u_2 - u_3)] (2u_2 - u_3) \quad (6)$$

收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-08-22

作者简介: 傅华(1979-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事炸药起爆机理研究。e-mail: fmyfuhua@163.com

式中,下标 3 代表炸药。求解上式得

$$u_3 = \frac{-B_1 - \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (7)$$

式中, $A_1 = \rho_2\lambda_2 - \rho_3\lambda_3$; $B_1 = -\rho_2c_2 - 4\lambda_2u_2\rho_2 - \rho_3c_3$; $C_1 = 2\rho_2u_2(2\lambda_2u_2 + c_2)$ 。

最后可以求出作用于炸药的冲击波强度 p_3

$$p_3 = \rho_3(c_3 + \lambda_3u_3)u_3 \quad (8)$$

圆柱形射弹作用于炸药的冲击载荷时间 τ 为

$$\tau = \min\left(\frac{2L}{c}, \frac{D}{2c}\right) \quad (9)$$

式中, c 为材料声速, L 、 D 分别为射弹的长度与直径。当射弹的长径比 (L/D) 大于 0.25 时, 撞击炸药后, 侧向稀疏波比背面稀疏波早进入炸药, 因此作用于炸药的冲击载荷时间取决于射弹的直径。

3 钨与钢射弹的阈值速度关系

关于裸炸药的冲击起爆问题, Walker 和 Wasley^[4] 提出一维短脉冲冲击起爆能量判据为

$$pu\tau = n \quad (10)$$

式中, p 是作用于炸药的压强; u 是炸药内的粒子速度; τ 是冲击载荷持续作用时间; n 是与炸药相关的常数。射弹撞击带盖板炸药是否引发爆轰最终取决于通过盖板入射到炸药内的冲击波能量, 当炸药材料、尺寸相同时, 冲击起爆能量阈值相同。

同尺寸的钨射弹与钢射弹, 撞击带等厚度盖板的同种炸药时有

$$(pu\tau)_w = (pu\tau)_{Fe} \quad (11)$$

式中, 两边下标 w 、 Fe 分别代表钨射弹与钢射弹。钨与钢射弹、炸药 (本文选用 PBX9404 炸药) 的冲击绝热参数见表 1^[5]。

表 1 冲击绝热参数

Table 1 Shock Hugoniot parameters

material	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$c/m \cdot s^{-1}$	λ
tungsten	17.20	4030	1.24
steel	7.85	3800	1.28
PBX9404	1.84	2490	2.09

设钢射弹撞击带盖板炸药引发爆轰的阈值速度为 V_{Fe} , 则钢射弹撞击钢盖板时盖板内的粒子速度 u_2 通过式 (5) 计算得

$$u_2 = 0.5V_{Fe} \quad (12)$$

冲击波由钢盖板向炸药入射后的炸药粒子速度 u_3 ,

可以根据式 (7) 得出

$$u_3 = 1.5u_2 \quad (13)$$

同理, 钨射弹撞击带盖板炸药引发爆轰的阈值速度 V_w 与钢盖板内粒子速度 u_2 , 以及 u_2 与炸药内粒子速度 u_3 的关系式有

$$u_2 = 0.64V_w \quad (14)$$

$$u_3 = 1.5u_2,$$

将式 (8、9、12 ~ 14) 代入 (11) 式有

$$\frac{D_w}{2c_w}\rho_3(c_3 + 1.5 \times 0.64\lambda_3V_w)1.5 \times 0.64V_w = \quad (15)$$

$$\frac{D_{Fe}}{2c_{Fe}}\rho_3(c_3 + 1.5 \times 0.64\lambda_3V_{Fe})1.5 \times 0.64V_{Fe}$$

式中, c_w 、 c_{Fe} 、 D_w 、 D_{Fe} 分别是钨与钢射弹的声速、直径。求解式 (15) 得到钨与钢射弹阈值速度 V_w 与 V_{Fe} 的关系为

$$V_w \approx 0.8V_{Fe} \quad (16)$$

4 数值模拟

采用非线性有限元程序 LS-DYNA, 对同尺寸的圆柱形钨射弹与钢射弹平头撞击带等厚度钢盖板的 PBX9404 炸药的引发过程进行了数值模拟。射弹材料模型采用流体弹塑性模型, 状态方程为格临爱森状态方程, PBX9404 炸药反应模型采用三项式点火-增长模型。

计算模型中钢盖板厚 6 mm, 炸药尺寸为 $\Phi 40$ mm \times 20 mm。选用的射弹尺寸及计算结果见表 2。阈值速度取发生化学反应与建立正常爆轰的速度平均值, 图 2 和图 3 分别是序号 1 钢射弹与序号 2 钨射弹在两种撞击速度条件下炸药内不同拉格朗日位置的压力历史曲线。

通过以上不同尺寸的两种材料射弹撞击带钢盖板的 PBX9404 炸药的数值模拟结果, 表明在冲击波引爆占主导机制的条件下, 关系式 (16) 具有合理性。同时应该看到, 式 (16) 是在撞击条件满足一维应变条件下获得的, 使用前提条件应该是射弹侧向稀疏波到达前, 纵向冲击波通过盖板已到达炸药界面, 即盖板厚度与弹丸的直径有一定约束关系。当盖板厚度一定, 射弹尺寸较小时, 计算结果略低。

表 2 射弹尺寸与计算结果

Table 2 The size of projectile and simulation results

No.	$D \times L/mm$	$V_w/m \cdot s^{-1}$	$V_{Fe}/m \cdot s^{-1}$	V_w/V_{Fe}
1	$\Phi 5 \times 10$	1956	2531	0.77
2	$\Phi 10 \times 20$	914	1157	0.79
3	$\Phi 15 \times 20$	698	863	0.81
4	$\Phi 18 \times 25$	411	512	0.80

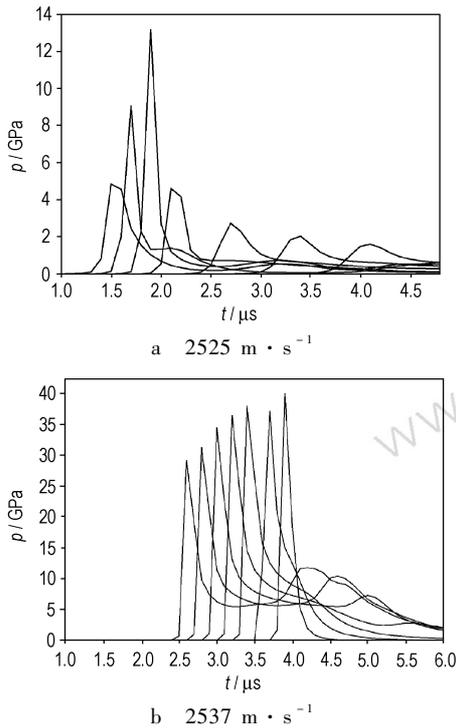


图2 钢射弹撞击炸药的冲击波压力历史曲线

Fig.2 Pressure history in explosives when steel projectile impacting

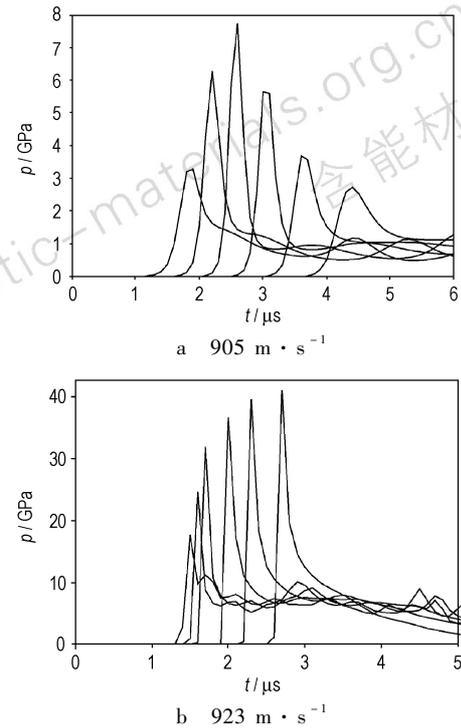


图3 钨射弹撞击炸药的冲击波压力历史曲线

Fig.3 Pressure history in explosives when tungsten projectile impacting

5 结论

根据射弹撞击带盖板炸药的冲击波传播规律,结合裸炸药的起爆能量判据,获得了在撞击条件满足一维应变条件下,同尺寸钨与钢射弹引爆带盖板装药的阈值速度关系式为 $V_w \approx 0.8 V_{Fe}$,通过数值模拟验证了该式的合理性。在当前射弹引爆带盖板炸药研究较充分,而钨材料射弹研究较少的情况下,可以利用该关系间接预估钨射弹引爆带等厚度盖板、同种炸药的阈值速度。已知材料的冲击参数,本文的方法可推广到其他材料射弹的速度预估。

参考文献:

- [1] Slade D C. High order initiation of two military explosives by projectile impact[R]. ARBRLTB-1021, Ballistics Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1957.
- [2] Roslund L A. Initiation of warhead fragments[R]. Normal Impacts, NOLTR 73-124, Naval Surface Weapons Center, White Oak, 1973.
- [3] 方青, 卫玉章, 张克明. 射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的条件[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 153-158.
FANG Qing, WEI Yu-zhang, ZHANG Ke-ming. On the projectile oblique-impact initiation conditions for explosive covered with a plate[J]. *Explosion and shock waves*, 1997, 17(2): 153-158.
- [4] Walker F E, Wasley R J. Critical energy shock initiation of heterogeneous explosive[J]. *Explosive Pyrotechnics*, 1968.
- [5] Gibbs T R, Popolato A. LASL Explosive Property Data[M]. University of California Press, 1980.

Engineering Calculation on Threshold Velocity of Covered Explosives Impacted by Tungsten Projectile

FU Hua, TAN Duo-wang, LI Tao, LI Jin-he

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the one-dimensional energy criterion of explosives shock initiation, considering the shock propagation of projectile impacting covered explosives, the relation formula of threshold velocity is obtained as $V_w \approx 0.8 V_{Fe}$ between tungsten and steel in the same size. The formula is validated using LS-DYNA numerical program.

Key words: explosion mechanics; shock initiation; energy criterion; covered explosive; threshold velocity