

doi: 10.7690/bgzd.2016.02.016

## 柱形破片冲击带壳装药起爆判据研究

濮赞泉, 李文彬, 郑宇

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为得到柱形破片冲击带壳装药的临界起爆判据, 在一维脉冲冲击起爆判据及长杆判据的基础上, 构建一种破片冲击起爆带薄壳炸药的等效模型。将破片冲击带壳装药的过程等效为破片冲击裸装药, 导出包含破片长度、直径以及炸药壳体厚度等参量的临界起爆判据, 并利用仿真软件对所得结论进行模拟验证。仿真结果表明: 当壳体厚度较薄时, 冲击波冲击起爆是炸药发生爆轰的主控制机制, 数值模拟与理论计算结果基本一致, 该起爆判据适用, 且破片长径比存在临界值, 当破片长径大于该临界值时, 破片长径比的变化对临界起爆速度影响很小。

**关键词:** 柱状破片; 撞击动力学; 起爆判据; 数值模拟

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## Research on the Critical Energy Criterion of Covered Explosive by Cylindrical Fragment Impacting

Pu Zanquan, Li Wenbin, Zheng Yu

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to investigate the critical energy criterion of covered explosive detonated by cylindrical fragment impacting, a new equivalent model was made based on the rod criterion and one-dimensional initiation criterion. The initiation progress of covered explosive impacting by fragment is dealt as an equivalent to the progress of bared explosive by the method of theoretical calculation. Critical energy criterion contained with the length, diameter of the fragment and the thickness of the shell was deduced. Numerical simulation was done by software to validate the correctness of the conclusion. The results show that: the shock wave initiation is the main mechanism of explosive detonation while the explosive covered with thin shell, and the results of numerical simulation and theoretical calculation are basically the same, the critical energy criterion is applicable to the explosive covered with thin shell detonated by cylindrical fragment. And the L/D ratio has little effect on the critical detonation velocity while the L/D ratio is greater than the critical value.

**Keywords:** cylindrical fragment; impact dynamics; initiation criterion; numerical simulation

### 0 引言

随着现代弹药技术的发展, 对弹药在储存、运输及使用过程中自身的安全性能要求日益提高, 其中破片冲击炸药的起爆行为和影响因素已经成为炸药安定性和不敏感弹药设计的重要课题之一。该问题的本质是破片对带壳炸药的冲击起爆问题, 其作用过程是一个高温、高压和多相的非定常反应过程<sup>[1]</sup>。前人采用理论分析、数值模拟和试验对此问题展开了诸多研究。江增荣等<sup>[2]</sup>采用数值模拟方法研究了预制破片对战斗部的冲击起爆规律; 李小笠等<sup>[3]</sup>着重研究了不同类型破片对冲击起爆带壳炸药的影响和规律; M Held<sup>[4-6]</sup>研究了不同密度破片冲击高能炸药的起爆判据, 得到的 $u^2d$ 判据可以很好地描述试验起爆阈值和数值模拟数据; Walker 和 Wasley<sup>[7]</sup>提出了非均质裸炸药的临界能量起爆准则, 广泛地应用于高速飞片冲击起爆裸装药。以上大多是研究破片冲击起爆裸装药, 对带壳装药也只

是定性地研究其起爆规律, 缺乏对破片冲击起爆带壳装药定量的、有物理依据的起爆判据研究。

基于此, 笔者在 Walker 和 Wasley 一维脉冲冲击起爆判据及 James H.R 长杆判据的基础上, 通过理论计算导出包含破片长度、直径以及炸药壳体厚度的临界起爆判据, 利用数值模拟软件验证所得判据的正确性, 并研究柱状破片的长径比及壳体厚度对冲击起爆带壳炸药的影响规律。

### 1 柱形破片冲击起爆带壳炸药理论判据

#### 1.1 等效模型计算

笔者所研究内容的简化模型为柱形破片冲击带壳体炸药, 通过理论计算, 将破片冲击带壳炸药问题等效为破片冲击裸炸药。理论计算中所取破片为圆柱形破片, 长度为 $l$ , 截面半径为 $R$ 。破片以一定速度撞击带壳炸药时, 首先会在破片与壳体接触面上产生 2 个冲击波, 其中一个向破片内传播, 另一

收稿日期: 2015-09-25; 修回日期: 2015-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11302108)

作者简介: 濮赞泉(1991—), 男, 江苏人, 硕士, 从事不敏感战斗部、弹药毁伤技术研究。

个向壳体并透过壳体向炸药内传播。除了撞击产生的冲击波，破片与壳体接触面边缘还会产生一个稀疏波，如果壳体中稀疏波波速大于等于破片中稀疏波波速，那么壳体中的稀疏波将会以破片边缘为圆心向壳体内传播，在壳体中形成一个漏斗状的未受稀疏波干扰的区域<sup>[8]</sup>，如图 1 所示。

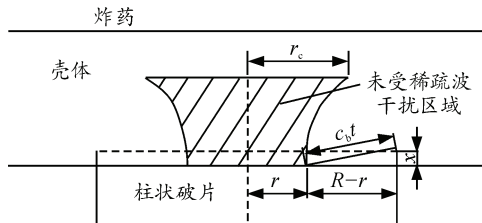


图 1 破片撞击时靶板中未受稀疏波干扰区域

根据几何关系可知

$$(c_b t)^2 = x^2 + (R - r)^2。$$

式中： $c_b$  为壳体内稀疏波传播速度； $x$  为初始冲击波波阵面到破片的垂直距离； $r$  为对应于  $x$  的初始冲击波半径。

那么，任意  $t$  时刻初始冲击波的半径为

$$r_t = R - \sqrt{(c_b t)^2 - x^2} = R - t \sqrt{c_b^2 - (v_b - u_b)^2}。$$

式中： $v_b$  为壳体中冲击波的速度； $u_b$  为壳体中质点运动速度。

当初始冲击波到达壳体和炸药的接触面时，冲击波的半径为

$$r_c = R - \frac{h}{v_b} \sqrt{c_b^2 - (v_b - u_b)^2}。$$

式中  $h$  为壳体厚度。

破片撞击瞬间在破片与壳体接触面处向破片内反射一个冲击波，该反射波到达破片后界面后，随即反射一个稀疏波，此时破片的长度为  $\frac{\rho_{p0}}{\rho_p} l$ ，该稀疏波到达破片与壳体的接触面处继续向壳体内传播，此时破片的厚度为  $\frac{\rho_{b0}}{\rho_b} h$ ，其到达壳体与炸药接触面处的时间为

$$T = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{l}{v_p} + \frac{\rho_{p0}}{\rho_p} \frac{l}{c_p} + \frac{\rho_{b0}}{\rho_b} \frac{h}{c_b}。$$

式中： $v_p$  为破片中冲击波的速度； $c_p$  为破片内稀疏波传播速度； $\rho_{p0}, \rho_{b0}$  为破片和壳体材料初始密度； $\rho_p, \rho_b$  为破片和壳体材料压缩后的密度。

为保证反射稀疏波到达壳体与炸药接触面处的时间不变，与壳体材料相同的等效柱形破片长度为

$$l' = \frac{v_b c_b}{v_b + c_b} T。$$

由于在壳体内传播的衰减，破片撞击壳体产生的冲击波到达壳体和炸药接触面时的压力为

$$p'_b = p_b \exp(-\alpha h)。$$

式中： $p_b$  为破片撞击壳体时初始冲击波压力； $\alpha$  为衰减系数。

半径为  $R$ ，长度为  $l$  的柱状破片撞击壳体厚度为  $h$  的带壳炸药，撞击产生的冲击波到达壳体和炸药接触面时半径为  $r_c$ ，压力为  $p'_b$ 。由上述计算可知：可以其等效为半径为  $r_c$ ，长度为  $l'$ ，与壳体相同材料的柱状破片以  $2u'_b$  的速度撞击裸炸药，其中  $u'_b$  为对应于  $p'_b$  的质点速度。

### 1.2 冲击起爆理论判据

根据临界能量准则，炸药在破片撞击下获得一定的能量，并在炸药与破片接触面附近形成一个高压区，炸药能否起爆与能量的分布区域以及高压区体积有关<sup>[9]</sup>。半径为  $r_c$ ，长度为  $l'$  的柱状破片撞击裸装药时，炸药中形成的高压区和破片中未受稀疏波影响的区域如图 2 所示。

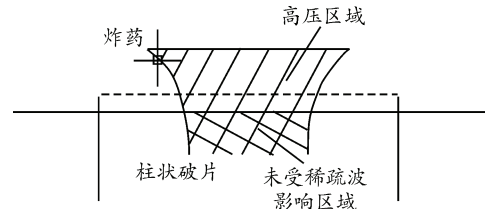


图 2 破片撞击炸药形成的高压区

任意  $t$  时刻破片中未受稀疏波影响的区域截面积为

$$S(t) = \pi(r_c - c_b t)^2，$$

破片传递给炸药的能近似计算为

$$E_\tau = \int_0^\tau p u_c S(t) dt = \int_0^\tau p u_c \pi (r_c - c_b t)^2 dt。$$

式中： $p$  为炸药中冲击压力； $u_c$  为炸药中质点速度； $\tau$  为作用时间。

根据上式可知，半径为  $r_c$ ，长度为  $l'$  的破片撞击裸装药的瞬间，其初始截面单位面积上的能量为

$$E = \frac{E_\tau}{\pi r_c^2} = p u_c \tau \left( 1 - \frac{c_b \tau}{r_c} + \frac{c_b^2 \tau^2}{3 r_c^2} \right)。$$

在任意  $t$  时刻，破片撞击炸药形成的高压区的体积为

$$V = (v_c - u_c) \pi \int_0^\tau (r_c - c_b t)^2 dt = (v_c - u_c) \pi \left( \frac{1}{3} c_b^2 \tau^3 - r_c c_b \tau^2 + r_c^2 \tau \right)。$$

式中  $v_c$  为炸药中冲击波速度。

高压区的体积越大，其所包含的能量就越大。由上式可知，高压区的体积随着冲击波作用时间的增大而增大，冲击波的作用时间受到来自破片侧向和轴向稀疏波的影响，取侧向和轴向稀疏波到达破片中心的最短时间为作用时间，

$$\tau = \min\left(\frac{2l'}{v_b}, \frac{r_c}{c_b}\right)。$$

综合上述计算，可以得到破片冲击起爆带壳炸药等效模型的临界能量判据

$$\begin{cases} E = \frac{E_\tau}{\pi r_c^2} = \rho u_c \tau \left(1 - \frac{c_b \tau}{r_c} + \frac{c_b^2 \tau^2}{3r_c^2}\right) \\ \tau = \min\left(\frac{2l'}{v_b}, \frac{r_c}{c_b}\right) \\ r_c = R - \frac{h}{v_b} \sqrt{c_b^2 - (v_b - u_b)^2} \\ l' = \frac{v_b c_b}{v_b + c_b} T \\ T = \frac{l}{v_p} + \frac{\rho_{p0}}{\rho_p} \frac{l}{c_p} + \frac{\rho_{b0}}{\rho_b} \frac{h}{c_b} \end{cases}。$$

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 计算模型及算法

利用 AUTODYN-2D 软件进行数值模拟计算，对上述理论验证，其中破片及壳体材料为 45 钢，装药为 B 炸药。为简化计算过程，取 1/2 对称模型。在炸药上距壳体 8 mm 处每隔 8 mm 选取一个高斯点，共选取 5 个高斯点以观测起爆过程中炸药内部的压力变化。破片撞击带壳炸药简化模型如图 3。

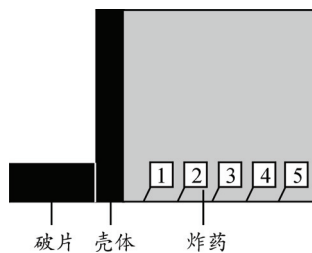


图 3 仿真计算模型

采用 Lagrange 网格计算，破片、壳体、和炸药分别定义接触。为消除起爆过程中的边界效应，在炸药和壳体的相关位置定义无反射边界条件。在数值模拟过程中为了观察和准确判断炸药的爆轰情况，选取炸药内部各点压力和反应度  $\alpha$  值作为判断炸药是否发生爆轰的参数。

### 2.2 计算结果与分析

利用数值模拟结果对前文所得破片冲击起爆带壳炸药等效模型的临界能量判据进行计算验证。通

过控制变量法分别改变圆柱形破片的直径、长度以及壳体厚度，得到不同条件下破片撞击带壳炸药的临界起爆速度。数值模拟和理论计算中破片及壳体材料均为 45 钢，装药为 B 炸药。

图 4 为长度为 12 mm，直径为 12 mm 的柱形破片垂直撞击不同厚度壳体装药数值模拟和理论计算所得临界起爆速度曲线图。

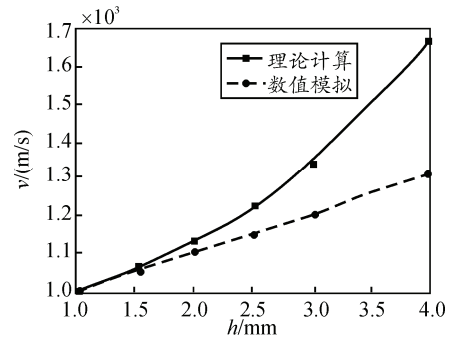


图 4 不同厚度壳体带壳装药临界速度对比

由图 4 可知，临界起爆速度随着壳体厚度的增大而增大。不同壳体厚度下理论计算和数值模拟误差如表 1 所示。

表 1 不同壳体厚度下临界起爆速度理论计算和数值模拟误差

壳体厚度/mm	误差/%	壳体厚度/mm	误差/%
1.0	0.60	2.5	6.8
1.5	0.56	3.0	10.2
2.0	3.50	4.0	25.7

由表 1 可知，当壳体厚度  $h \leq 3$  mm 时，带壳炸药临界起爆速度理论计算和数值模拟所得结果两者误差小于 10.2%，符合较好；当壳体厚度增大时，理论计算和数值模拟数据偏差较大。这是因为当装药壳体较薄时，通常认为冲击波冲击起爆是炸药发生爆轰的主控机制，可使用文中所建立的冲击起爆等效模型来描述。随着壳体厚度的增加，破片侵入壳体，宏观剪切和摩擦也将引发炸药的爆轰<sup>[10]</sup>，这时候再使用上述冲击起爆模型就会产生较大误差。

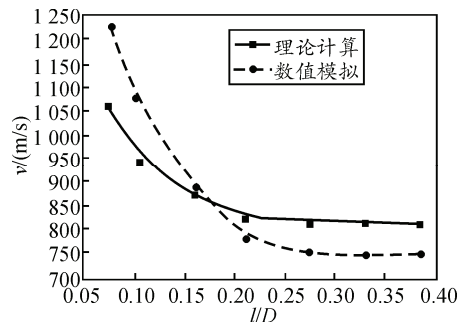


图 5 不同长径比破片撞击带壳装药临界速度对比

图 5 为不同长径比的柱形破片垂直撞击壳体厚度为 2 mm 的带壳装药数值模拟和理论计算所得临

界起爆速度曲线图。

由图5可知,理论计算和数值模拟所得结果基本一致,临界起爆速度均随着破片长径比的增大而减小。当破片长径比 $l/D > 1/5$ 时,由于破片后续的能量对起爆炸药的贡献较小,可以忽略,破片的临界起爆速度趋于一致,这一推论与通常认为的 $l/D = 1/4$ 相近。

### 3 结论

柱形破片撞击壳体厚度较薄的带壳装药时,冲击波冲击起爆是炸药发生爆轰的主控机制。在考虑破片撞击带壳装药时受到来自破片边缘以及背面稀疏波影响的基础上,笔者从破片传递给炸药的能量和炸药中由撞击所形成的高压区体积2个方面出发,得到破片撞击起爆带薄壳炸药的等效模型,并推导出相应的临界能量判据,并进行了数值模拟计算。计算结果表明:当壳体厚度较薄时,数值模拟与理论计算结果基本一致;当壳体厚度较厚时,由于炸药起爆机制的改变,文中冲击起爆模型偏差较大;对于给定厚度带壳炸药,破片的长径存在临界值,文中该临界值约为 $1/5$ ,当破片长径比大于该临界值时,临界起爆速度基本保持不变,不再受破片长径比变化的影响。

\*\*\*\*\*

(上接第61页)

### 3 工艺技术

#### 3.1 工艺流程

测试中操作者主要任务是用天平称量试样块质量并记录输入PC机,同时将试样放入试样室内,根据系统提示选择测试模式,点击鼠标按开关开始进行测试,系统自动显示检测结果。

#### 3.2 技术参数

检测的精度为0.1 mg,准确度:优于 $\pm 0.08\%$ (相对误差);重复性:优于 $\pm 0.04\%$ (相对标准差);工作台尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)2 100 mm $\times$ 1 200 mm $\times$ 900 mm;测试箱尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)500 cm $\times$ 400 cm $\times$ 300 cm;工作效率:过程时间不大于100 s;被检测物密度大于1 g/cm<sup>3</sup>(为固体),体积为0~40 cm<sup>3</sup>。

### 4 结论

1) 本药柱密度检测装置技术先进、设计合理,在满足各项检测指标的前提下,为使用者充分考虑,着重强调人性化设计,使系统在安全、精准的同时

### 参考文献:

- [1] 章冠人,陈大年.凝聚炸药起爆动力学[M].北京:国防工业出版社,1991:96-100.
- [2] 江增荣,李向荣,李世才,等.预制破片对战斗部冲击起爆数值模拟[J].弹道学报,2009,21(1):9-13.
- [3] 李小笠,屈明,路中华,等.三种破片对带壳炸药冲击起爆能力的数值分析[J].弹道学报,2009,21(4):72-75.
- [4] Held M. Initiation criteria of high explosives attacked with projectiles of different densities[C]//27th Int. Annual Conference of ICT. 1996.
- [5] Held M. Discussion of the experimental findings from the initiation of covered, but unconfined high explosive charges with shaped charge jets[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1986, 12: 167-174.
- [6] Held M. Hydrodynamic theory of Discussion of shaped charge jet penetration[J]. Journal of Explosive and Propellants -R.O.C.-Taiwan, 1991(7): 9-24.
- [7] Walker F E, Wasley R J. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosives[J]. Explosivstoffe, 1969, 17(1): 9.
- [8] 李小笠,赵国志,李文彬,等.长杆体垂直冲击带盖板炸药的临界起爆准则[J].弹道学报,2004,16(2):51-55.
- [9] 赵峰,孙承纬,卫玉章,等.非均质固体炸药的冲击引爆临界能量判据研究[J].爆炸与冲击,1993,13(1):41-48.
- [10] James H R, Haskins P J, Cook M D. Prompt shock initiation of cased explosives by projectile impact[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996, 21: 251-257.

易学易用,为操作人员带来极大便利,大大提高了检测效率。

2) 本药柱密度检测装置提供自检功能,防止人为因素的干扰,比如有杂质物掉入气室的情况,为设备设计了校准过程,即在测试之前将匹配的标准块放入试样室内取代被测的试样块进行测试,将计算机控制界面内的模式选择为校准,按照显示器上的提示进行操作,计算机便可计算出系统参数 $v_1$ , $v_2$ ,并自动修订原有值,从而大大增加了检测效率和准确率<sup>[4]</sup>。

3) 该装置的广泛应用具有较强的经济价值和军事意义。

### 参考文献:

- [1] 王宝成,牛国涛,金大勇.国内炸药老化及寿命评估的进展和评述[J].兵工自动化,2015,34(6):44-47.
- [2] 马增祥,卢连军,张均法,等.弹药装药技术的数值研究[J].兵工自动化,2015,34(4):92-93.
- [3] 熊四昌,李栋,高玉科,等.基于嵌入式的差压式容积补偿气体泄漏检测装置的研究[J].机电工程,2014,31(1):38-42.
- [4] 熊尚,戴荣,纪京新.弹药长期储存可靠性数据分析方法[J].兵工自动化,2015,34(6):5-6.