

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.019

## 破片冲击起爆屏蔽装药的临界判据

蓝肖颖

(国营长虹机械厂技勤车间, 广西 桂林 541000)

**摘要:** 为研究破片对带盖板屏蔽装药的冲击起爆问题, 通过理论计算得到等效破片的直径与速度, 结合 Held 判据得到破片冲击起爆屏蔽装药临界判据。用已有的实验数据验证了判据的正确性, 并利用 AUTODYN 软件进行仿真比较, 得到不同材料破片的临界起爆速度。仿真结果表明: 通过该临界判据计算出的屏蔽炸药临界起爆速度和数值模拟所得结果误差均小于 2%, 计算结果与实验数据计算结果基本一致。

**关键词:** 冲击起爆; 低易损性; 屏蔽装药; 临界判据

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标志码:** A

## Critical Criterion of Shock Initiation of Covered Explosive Impacted by Fragment

Lan Xiaoying

(Technical Service Workshop, The State Owned Factory of Changhong Machinery, Guilin 541000, China)

**Abstract:** In order to study the shock initiation of the fragment on the covered explosive, the equivalent diameter and velocity of the fragment were obtained through theoretical calculations, and the critical criterion for the shock initiation of explosive was obtained by combining the Held criterion. Existing experimental data were used to verify the correctness of the criterion, and the simulation comparison using AUTODYN software was performed to obtain the critical initiation velocity of fragments with different materials. The simulation results show that errors of the critical initiation velocity of the covered explosive obtained by numerical simulation and theory are less than 2%, and the calculated results are basically consistent with the experimental data.

**Keywords:** detonation; low vulnerability; covered explosive; critical criterion

## 0 引言

高速破片引爆战斗部是反导技术中采用的主要毁伤方式, 其本质是破片对带盖板装药的冲击起爆问题, 该方面的研究在提高弹药的易损性方面有很大意义<sup>[1]</sup>。国内外学者通过研究非均质炸药在弹丸、破片、射流等侵彻体作用下的冲击起爆, 得出许多起爆判据: 1) Held 判据<sup>[2]</sup>, Held 总结了大量裸装药冲击起爆的实验结果, 得出裸装药冲击起爆的判据  $u^2 d = \text{const}$ , 式中  $u$  为破片的速度,  $d$  为破片的直径; 2) 临界起爆能量判据<sup>[3]</sup>,  $p^2 D^2 t = \text{const}$ , 式中  $p$  为作用于炸药的压强,  $D$  为装药中冲击波速度,  $t$  为冲击载荷作用时间; 3) Jacobs-Roslund 经验准则<sup>[4-5]</sup>,  $v_{cr} d^{1/2} = (1+k)[A+BT/(d \cos \theta)]$ , 式中,  $v_{cr}$  为破片冲击速度,  $d$  为破片直径,  $k$  为尖头系数, 垂直撞击时  $k=0$ ,  $A$ 、 $B$  为经验参数,  $T$  为盖板厚度,  $\theta$  为破片速度与盖板的夹角。

现有关于破片冲击起爆带有盖板装药的研究多

集中在实验和数值模拟方面<sup>[6-10]</sup>, 理论研究较少。笔者将破片垂直冲击带盖板的屏蔽装药等效为与盖板材料相同的破片垂直冲击裸装药, 通过理论计算得到等效破片的直径与速度, 并结合 Held 判据, 建立了破片垂直冲击起爆带盖板装药的临界判据。利用已知实验的临界速度数据得到了判据常数, 并利用数值模拟得到了不同材料破片的临界速度, 再与实验结果比较, 验证了建立判据的正确性。

## 1 临界判据的建立及验证

## 1.1 冲击起爆模型

破片撞击屏蔽炸药的过程如图 1 所示。

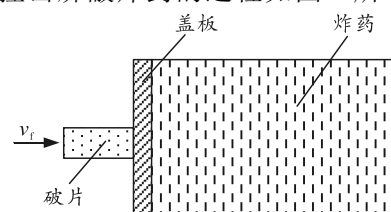


图 1 炸药冲击起爆

收稿日期: 2020-06-20; 修回日期: 2020-07-27

作者简介: 蓝肖颖(1993—), 女, 广西人, 硕士, 从事目标易损性、装备维修工程研究。E-mail: shanicelan@gmail.com。

破片以速度  $v_f$  垂直撞击盖板, 在接触面上将产生一左行波和一右行波, 并分别向破片和盖板并透盖板向炸药内传播。当冲击波的强度及作用时间达到某一临界值时, 炸药会发生冲击起爆。

根据撞击时的动量守恒定律和界面上的连续性条件, 可得出:

$$p_f = \rho_f(a_f + b_f u_f)u_f; \quad (1)$$

$$p_p = \rho_p(a_p + b_p u_p)u_p; \quad (2)$$

$$p_f = p_p; \quad (3)$$

$$v_p = u_f + u_p。 \quad (4)$$

式中:  $p_f$ ,  $u_f$  分别为作用在破片上的冲击压力和质点运动速度;  $p_p$ ,  $u_p$  分别为作用在盖板上的冲击压力和质点运动速度;  $a_f$ ,  $b_f$  和  $a_p$ ,  $b_p$  分别为破片和盖板材料的冲击 Hugoniot 常数。通过式(1)–(4)可解出  $p_f$ ,  $u_f$ ,  $p_p$ ,  $u_p$ 。

破片中的冲击波速度

$$D = a_p + b_p \cdot u_p。 \quad (5)$$

冲击波经衰减后到达盖板-炸药分界面时的压力<sup>[10]</sup>为:

$$p_i = p_p e^{-\alpha h}。 \quad (6)$$

式中:  $p_i$  为冲击波衰减后的压力;  $\alpha$  为盖板材料的衰减系数;  $h$  为盖板的厚度。

当冲击波传播到盖板与炸药的分界面时, 在炸药中形成的初始冲击波压力  $p_e$  和质点的速度  $u_e$  可通过下式求出:

$$\rho_e(a_e + b_e u_e)u_e = \rho_p[a_p + b_p(2u_i - u_e)](2u_i - u_e); \quad (7)$$

$$p_e = \rho_e(a_e + b_e u_e)u_e。 \quad (8)$$

Cook 等<sup>[6]</sup>指出: 薄盖板装药受圆柱形平头破片正冲击时, 盖板的作用主要在于减小了炸药的受载面积, 相当于把破片原始直径减小后冲击裸装药的情况。直径为  $d_0$  的柱形破片以速度  $v_f$  垂直撞击盖板为  $h$  的带盖板装药, 可等效为与盖板材料相同的直径为  $d_c$  的柱状破片以速度  $v_c$  垂直撞击裸装药<sup>[6]</sup>, 等效破片直径  $d_c$  的计算公式为:

$$d_c = d_0 - h / D \sqrt{C^2 - (D - u_p)^2}。 \quad (9)$$

式中  $C$  为破片中的声速, 可由下式计算得到:

$$C = a_p(D - u_e)(b_p D + u_e)^{1/2} / (D - b_p u_e)^{3/2}。 \quad (10)$$

等效破片速度  $v_c$  的计算公式为:

$$v_c = 2u_i, v_c = 2u_i \quad (11)$$

式中,  $u_i$  为  $p_i$  对应的质点速度, 可参照式(1)求出。将上述等效方法与 Held 判据结合, 可得到破片冲击

起爆带盖板装药的临界判据:

$$G_k = v_c^2 d_c = \text{const}。 \quad (12)$$

## 1.2 理论模型验证

方青等<sup>[4]</sup>给出了直径为 13.2 mm 的 45#钢圆柱形破片撞击起爆不同厚度的带 45#钢盖板 B 炸药的临界速度的实验数据。根据文献给出的实验工况, 计算得到的破片等效直径  $d_c$ 、等效速度  $v_c$  和  $G_k$  的计算结果见表 1。随着盖板逐渐变厚, 破片的临界起爆速度逐渐增大, 而计算所得到的等效速度也逐渐增大, 破片等效直径逐渐减小。盖板厚度为 2 mm 时, 得到的  $G_k$  值相对偏小, 这是由于实验得到临界起爆速度偏小导致。从表中可以看出: 盖板厚度 2 mm 时破片的临界起爆速度小于盖板厚度 1 mm 时, 不符合整体规律; 因此, 将该组数据剔除。此外, 盖板厚度大于 8 mm 时, 计算得到的  $G_k$  值与其他情况差异偏大, 这可能是由于炸药的起爆机理发生了变化。当盖板厚度较厚时, 即使破片所产生的冲击波不足以直接引爆炸药, 但随着破片侵彻的继续进行, 破片穿透盖板产生充塞或者崩落, 剩余的破片以及盖板崩落的动能也能引爆炸药<sup>[5]</sup>。总体而言, 理论计算得到的  $G_k$  均保持在一定范围内, 表明该临界判据的可靠性较好。

表 1 圆柱形平头破片垂直撞击带 45#钢盖板 B 炸药引爆的临界速度及计算结果

盖板厚度/mm	临界起爆速度/(km/s)	等效直径/mm	等效速度/(km/s)	$G_k$
0	0.89±0.04	13.20	0.930	11.42
1	0.99±0.02	12.43	0.966	11.59
2	0.96±0.04	11.50	0.914	9.61
3	1.21±0.03	10.51	1.080	12.44
5	1.45±0.05	8.77	1.214	12.93
6	1.60±0.05	7.94	1.284	13.09
7	1.70±0.05	7.24	1.308	12.39
8	1.93±0.07	6.40	1.444	13.35
9	1.85±0.01	6.17	1.282	10.14
10	1.99	5.63	1.320	9.81

## 2 数值模拟结果及比较

### 2.1 仿真模型

利用 AUTODYN 软件建立如图 2 所示的仿真模型。破片的直径为 10 mm, 选取的材料为 45#钢、紫铜和钨; 盖板的厚度取 1~7 mm, 材料为 45#钢; 被发炸药为 B 炸药, 尺寸为 50 mm×50 mm。在炸药内部沿轴线。方向每 10 mm 设一个 Gauges 点, 共设置 5 个 Gauges 点。为了防止边界效应对仿真结果产生影响, 在盖板和炸药的相应位置定义了无反射边界条件。

破片和盖板采用的材料均选用 Shock 状态方

程, Johnson-Cook 强度模型和 Geometric Strain 侵蚀准。B 炸药采用 Lee-Tarver 状态方程, 仿真中所有的材料参数均取自 AUTODYN 的自带材料库<sup>[11]</sup>。

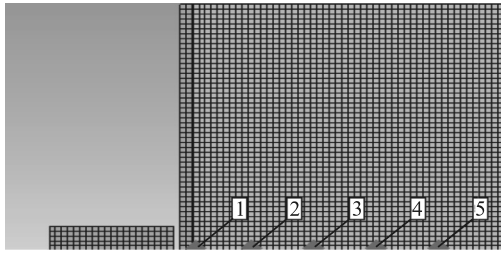


图 2 仿真计算模型

### 2.2 临界起爆速度获取方法

仿真中通过 2 种方法判断炸药是否发生了完全爆轰, 即观察表示已反应炸药质量百分数的 ALPHA 云图和 Gauge 点的压力值是否达到炸药的 C-J 爆轰压力。3 种不同情况下(未爆轰、临界爆轰和完全爆轰)炸药的 ALPHA 云图如图 3 所示。仿真结束后再对观测点的压力值进行检验, 判断炸药的状态, 图 4 为 2 种不同情况下(未爆轰和爆轰)炸药的压力云图与观测点压力变化。最终通过升降法得到破片的临界起爆速度。

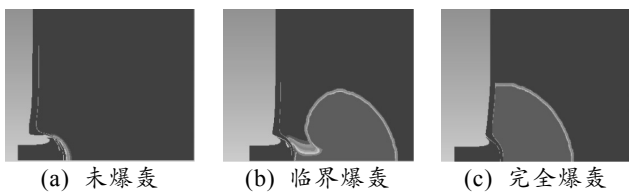


图 3 不同情况下炸药的 ALPHA 云图

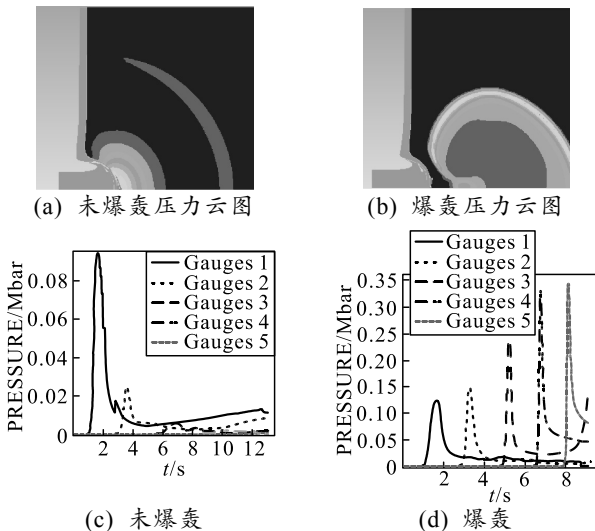


图 4 不同情况下炸药压力云图与观测点压力随时间变化

### 2.3 仿真模型的验证

利用建立的数值模型对 1.2 节中的工况进行计算, 得到了破片的临界起爆速度, 与实验数据的对

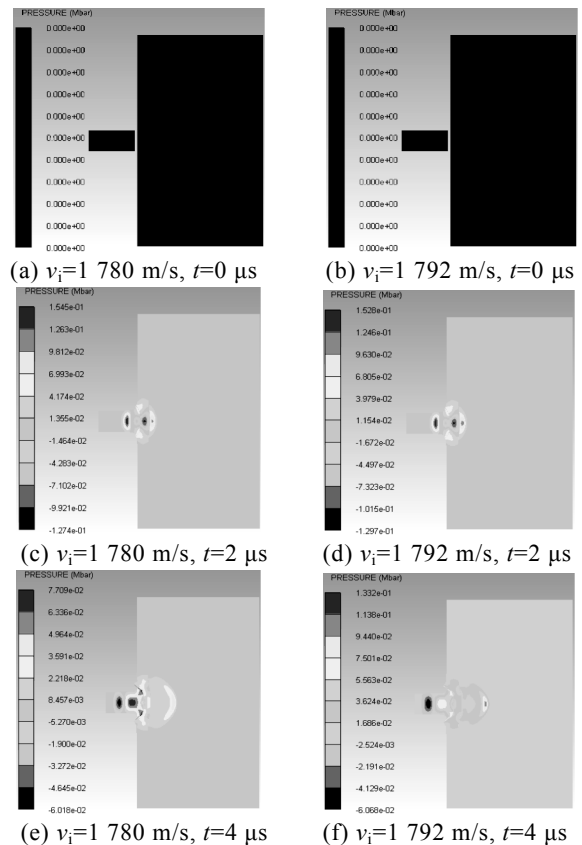
比见表 2, 数值模拟结果与实验结果吻合较好, 说明模拟数值结果真实可信。

表 2 实验与数值模拟的临界起爆速度

盖板厚度/mm	实验结果/(km/s)	数值模拟结果/(km/s)	误差/%
0	0.89±0.04	0.873	-1.91
1	0.99±0.02	1.002	1.21
2	0.96±0.04	1.070	11.46
3	1.21±0.03	1.267	4.71
5	1.45±0.05	1.422	-1.93
6	1.60±0.05	1.486	-7.13

### 2.4 典型仿真结果

以 45# 钢质破片撞击覆有 5 mm 厚的 45# 钢质盖板的炸药为例, 图 5 比较了破片速度为 1 780 和 1 792 m/s 时炸药的动态响应, 其中 1 780 m/s 时炸药未发生爆轰, 而 1 792 m/s 为该工况下破片的临界起爆速度。初始时, 2 种速度破片的作用都表现为对盖板的侵彻和对炸药的挤压, 且冲击波不断向炸药内传播; 但在 4 μs 时, 两者出现了明显差异。破片速度为 1 792 m/s 的炸药压力云图中, 在距离盖板一定距离的炸药中产生了一个高压区, 且以此为中心形成一个强压力波, 正面迅速向炸药层传播, 传播速度远大于破片冲击速度。显然, 此时炸药发生了爆轰, 初始高压区即起爆点。反观破片速度为 1 780 m/s 时, 破片一直稳定侵彻, 炸药未能被引爆。



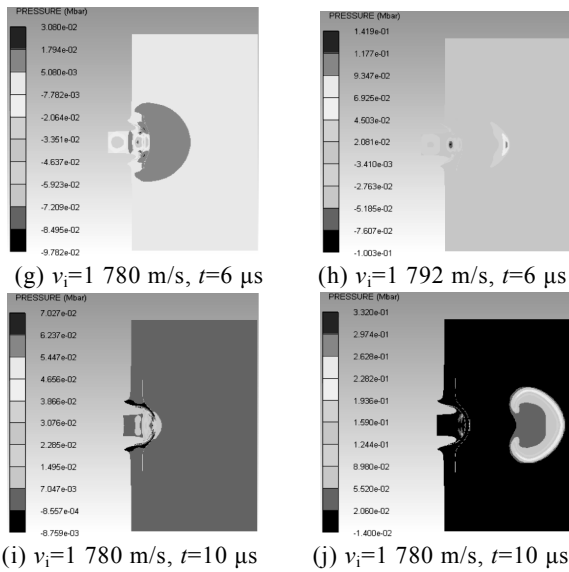


图 5 2 种情况下炸药的冲击压力云图

图 6 为 2 种情况下 Gauges 点的压力变化。破片速度为 1 780 m/s 时，炸药内部压力先升高达到一个峰值然后逐渐衰减，各 Gauges 点的压力依次减少，表明破片冲击没有引起炸药的爆轰。破片速度为 1 792 m/s 时，在第 4 个 Gauges 点附近，即距离交界面 3 cm 左右处的压力突然升高，并且在此之后压力继续升高，这是由于冲击波作用使炸药发生了明显的化学反应，进而导致压力上升。随后压力峰值逐渐稳定，炸药发生完全爆轰，且起爆点在第 4 个 Gauges 点附近。

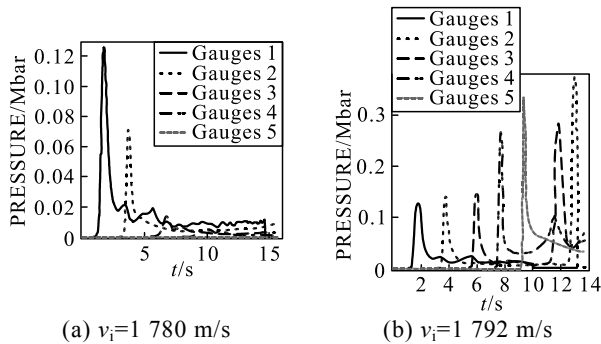


图 6 2 种情况下 Gauges 点的时间-压力

### 2.5 理论及数值模拟的对比

利用数值模拟得到不同破片材料、盖板厚度时破片对 B 炸药的临界起爆速度后，利用式(1)–(12)计算得到不同工况下破片的等效速度  $v_c$  和等效直径  $d_c$ ，计算中使用的材料参数见表 3。图 7 为计算结果，其中曲线为  $v_c^2 d_c = G_k$ ， $G_k$  取表 1 中有效数据的平均数 12.46。从图可以看出：随着盖板厚度增大无论哪种破片材料，等效速度都不断增大，而等效直径不断减小。理论计算得到的数据点均保持在一定

的范围内，且大部分落在曲线附近，证明了建立的临界判据适用于破片材料不同的情况。

表 3 理论计算中用到的材料参数<sup>[8]</sup>

类型	材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$a/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$b$
破片	45#钢	7.850	3.874	1.920
	紫铜	8.930	3.940	1.489
	钨	19.224	4.029	1.237
盖板	45#钢	7.850	3.874	1.920
炸药	B 炸药	1.700	3.030	1.730

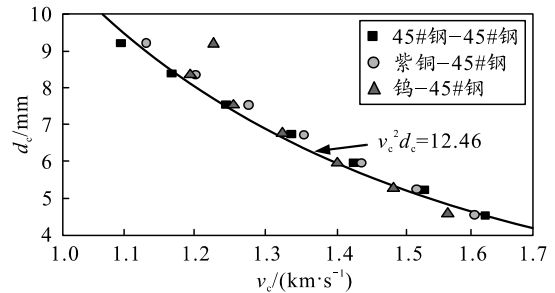


图 7 仿真和理论计算对比

为了进一步检验建立的判据的正确性，将表 1 中得到的  $G_k$  代入式(1)–(12)，逆推得到破片材料与盖板材料均为 45#钢时，破片对不同厚度盖板炸药的临界起爆速度，计算结果与仿真结果对比见表 4，所得结果误差均小于 2%，一致性较好。

表 4 理论结果与仿真结果比较

盖板厚度/mm	起爆速度/( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )		误差/%
	仿真结果	计算结果	
1	1.181	1.204	-1.95
2	1.309	1.318	-0.71
3	1.453	1.446	0.48
4	1.617	1.593	1.48
5	1.792	1.760	1.79
6	1.979	1.954	1.26
7	2.171	2.180	-0.41

### 3 结论

圆柱形平头破片冲击带盖板装药可等效为与盖板材料相同的破片冲击裸炸药。结合这一假设和 Held 判据，可以得到破片对带盖板的屏蔽装药的冲击起爆判据。利用已有实验结果验证了该判据的正确性。

利用数值仿真得到不同材料破片冲击起爆不同厚度的带 45#钢质盖板 B 炸药的临界速度。根据得到的速度计算  $G_k$  值，均保持在一定范围内，且与已有实验结果得到的  $G_k$  值相吻合，进一步证明所建立判据适用于不同破片材料时。此外，利用该临界判据计算出带盖板屏蔽炸药的临界起爆速度和数值模拟所得结果误差均小于 2%，符合较好。