DOI: 10.11883/bzycj-2017-0210
文章编号: 1001-1455(2018)06-1278-08

# 圆柱形钨破片撞击铝靶时的跳飞临界角*

蓝肖颖[1],李向东[1],周兰伟[1],官小泽[2],姚志军[2]
(1.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094;
2.中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001)

**摘要**: 采用理论计算、数值模拟与实验相结合的方法,研究了直径 5.7 mm、长 6.7 mm 的圆柱形破片以 800～1 200 m/s 的速度撞击 2～10 mm 厚铝靶时的跳飞特性。建立了破片斜侵彻有限厚靶板的跳飞临界角理论模型,计算得到破片跳飞临界角与破片入射速度、靶板厚度的关系,并与模拟值、实验值对比,三者吻合较好。结果表明:破片撞靶速度相同时,随着靶板厚度的增加,破片的跳飞临界角减小。靶板厚度相同的情况下,在所计算的速度范围内,入射速度越大,破片跳飞临界角越大。速度在 800～1 200 m/s 时,破片撞击 2 mm厚靶板的跳飞临界角为 81°～81.25°;撞击 4 mm 厚靶板的跳飞临界角为 72.5°～76.25°。

**关键词**: 破片;跳飞临界角;LS-DYNA;有限厚铝靶
**中图分类号**: O385;TJ410　　**国标学科代码**: 13035　　**文献标志码**: A

破片是很多战斗部杀伤目标的毁伤元素,是用于穿透部件结构、杀伤有生力量、毁坏战场目标的功能部件。当破片以大着角撞击目标或部件蒙皮时,靶板的反作用力使破片运动方向发生偏转,破片会在翻转力矩作用下发生跳飞,无法持续侵入靶板。破片跳飞影响其后续侵彻能力,达不到预定的毁伤效果,因此研究破片跳飞的条件及影响因素对战斗部设计和毁伤效能评估等都具有非常重要的意义。

相关的研究主要针对长径比较大的弹丸(如穿甲弹、榴弹等)。赵国志[1]建立了长杆弹斜侵彻有限厚钢板的简化模型,得出了长杆弹发生跳飞的条件。吴荣波等[2]对弹丸以不同入射角侵彻半无限厚靶板进行了数值模拟,得出入射角不大于 75°不能发生跳飞的结论。董玉财等[3]研究了钨合金长杆体侵彻薄装甲钢靶板上的跳飞特性,得出随着靶板厚度的增加,着角因素对跳飞的影响呈强化趋势,而靶板厚度因素呈逐渐弱化趋势的结论。米双山等[4]利用数值模拟方法研究了球形破片侵彻不同厚度靶板的过程,得出了破片穿透靶板和跳飞的临界值。Tate[5]、Rosenberg 等[6]、Segletes[7]分别建立了关于长杆弹的不同跳飞模型,但模型均未考虑到靶板厚度对跳飞角的影响[5-7]。Zook 等[8]利用 X 光摄影实验的方法对钢球冲击铝板的现象进行了研究,实验得到破片斜侵彻过程中速度衰减规律与靶板厚度、入射角度的关系。

本文中主要研究圆柱形破片(3.13 g)以 800～1 200 m/s 的速度撞击有限厚铝板时的跳飞临界角,并分析靶板的厚度、入射速度对跳飞临界角的影响。

## 1 破片跳飞临界角计算模型

### 1.1 破片斜侵彻过程受力分析

当破片以较大的入射角撞击靶板时,在靶板抗力的作用下,破片的运动方向发生改变,出现跳飞。过程如图 1 所示。

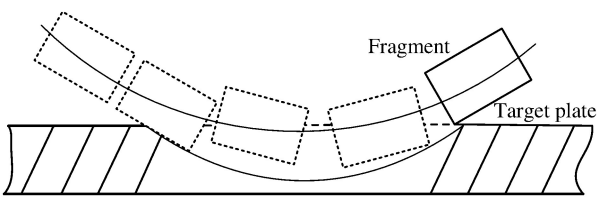



图 1 破片撞击靶板跳飞过程示意图
Fig. 1 Ricochet process of fragment impacting target plate

破片撞击侵入靶板的各个状态如图 2 所示,图

* 收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-08-09
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11572159)
第一作者: 蓝肖颖(1993— ),女,硕士; 通信作者: 李向东,lixiangd@njust.edu.cn。

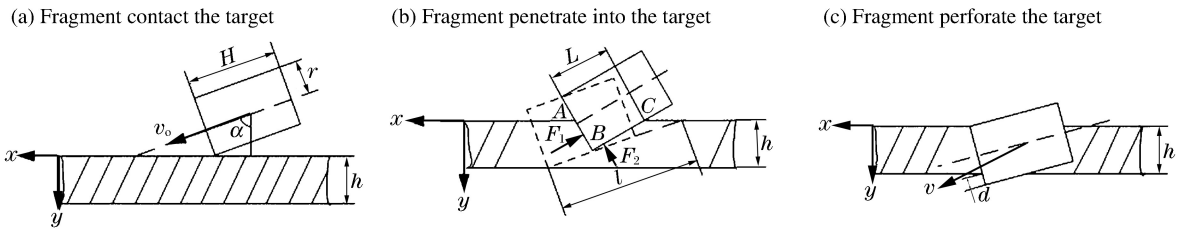



图 2　破片斜侵彻有限厚靶板示意图

Fig. 2　Fragment obliquely penetrating target of limited thickness

2(a)表示破片刚接触靶板，图 2(b)表示破片在靶板中运动至靶板底面的过程，图 2(c)表示破片开始穿出靶板一定距离。为了便于分析破片的受力及跳飞条件，假设破片撞击侵入靶板过程中不变形。破片受力情况如图 2(b)所示，侵彻阻力 $F_1$、$F_2$ 等于靶板强度极限乘以破片和靶板的接触面积[9]，即：

$$F_1 = \sigma_t S_1 \tag{1}$$

$$F_2 = \sigma_t S_2 \tag{2}$$

式中：$\sigma_t$ 为靶板材料强度极限；$S_1$、$S_2$ 分别为破片前端和侧面与靶板的接触面积，即分别为图 2(b)中 $AB$ 段所对应的面积和 $BC$ 段所对应的面积。接触面积的计算分两种情况，即破片未穿出靶板和破片部分穿出靶板：

$$S_1 = \begin{cases} \pi r^2 \arccos\left(1 - \dfrac{l}{r\tan\alpha}\right) \Big/ 180 + A & l\cos\alpha \leqslant h \\ A - A_1 + \pi r^2 \left[\arccos\left(1 - \dfrac{l}{r\tan\alpha}\right) - \arccos\left(1 - \dfrac{d}{r}\right)\right] \Big/ 180 + A & l\cos\alpha > h \end{cases} \tag{3}$$

$$S_2 = \begin{cases} 2rl & l\cos\alpha \leqslant h \\ 2r\left(H - l + \dfrac{h}{\cos\alpha}\right) & l\cos\alpha > h \end{cases} \tag{4}$$

式中：$r$ 为破片半径，$H$ 为破片的高度，$h$ 为靶板厚度，$l$ 为撞击过程中破片在靶板内的运动距离，$\alpha$ 为速度方向与靶板法线方向的夹角，$L$ 为破片未穿出靶板前侵入靶板的距离，$d$ 为破片前端穿出靶板的距离。其中 $l$、$A$、$A_1$、$d$、$L$ 的表达式分别为：

$$l = \int_0^t v\,\mathrm{d}t \tag{5}$$

$$A = \left(\frac{l}{\tan\alpha} - r\right)\sqrt{\frac{l}{\tan\alpha}\left(2r - \frac{l}{\tan\alpha}\right)} \tag{6}$$

$$A_1 = (d - r)\sqrt{2rd - d^2} \tag{7}$$

$$d = \frac{(l - h/\cos\alpha)}{\tan\alpha} \tag{8}$$

$$L = \begin{cases} \int_0^t v\mathrm{d}t & \int_0^t v\,\mathrm{d}t \leqslant H \\ H & \int_0^t v\,\mathrm{d}t > H \end{cases} \tag{9}$$

### 1.2　破片的运动及跳飞条件

作用在破片质心的力矩 $M_c$ 使破片在侵彻过程中发生偏转，使速度方向与靶板法线方向的夹角 $\alpha$ 在侵彻过程中发生变化。$\alpha$ 与破片角速度 $\omega$ 的关系为：

$$\alpha = \alpha_0 + \int \omega\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

式中：$\alpha_0$ 为破片撞靶时速度方向与靶板法线的夹角(入射角)。

破片偏转的角速度与角加速度的关系为：

$$d\omega = \varepsilon\, dt = \frac{M_c}{J_c} dt \tag{11}$$

式中：$J_c$ 为破片绕质心转动惯量。

作用在破片质心的力矩 $M_c$ 与破片受到的侵彻阻力 $F_1$、$F_2$ 有关，所受的阻力矩 $M_1$、$M_2$ 分别为：

$$M_1 = \begin{cases} F_1\left(\dfrac{l}{2\tan\alpha} - r\right) & 0 < l < r\tan\alpha \\ -\dfrac{F_1 l}{2\tan\alpha} & r\tan\alpha \leqslant l \leqslant 2r\tan\alpha \end{cases} \tag{12}$$

$$M_2 = \begin{cases} \dfrac{F_2 L}{2} & 0 < l < \dfrac{H}{2} \\ F_2(H - L) & \dfrac{H}{2} \leqslant l \leqslant H \\ -F_2 l & l > H \end{cases} \tag{13}$$

由式(12)～(13)，可求出作用在破片质心的力矩：$M_c = M_1 + M_2$。结合式(10)～(11)可求出任意时刻的 $\alpha$ 角。

在力 $F_1$ 和 $F_2$ 的作用下，破片速度减小，如图 2 所示，取向下为正，若出现跳弹现象，破片剩余速度在 $y$ 轴的分量必会反向，即沿着 $y$ 轴的速度分量小于 0 时跳飞。综合以上式子可得：

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{F_1 + F_2/\tan\alpha}{m} \tag{14}$$

由式(14)可求得 $v$，当 $v_y = v\cos\alpha < 0$ 时，破片跳飞，由此可求得破片跳飞临界角 $\alpha_{cr}$。

### 1.3 破片跳飞临界角计算

根据上述模型，计算了圆柱形破片以 800～1 200 m/s 的速度撞击 2～10 mm 厚的 2A12 T4 铝板时的破片跳飞临界角。其中，破片材料为钨，密度为18.3 g/cm$^3$，直径5.7 mm，高度 6.7 mm，质量3.13 g。靶板密度为 2.8 g/cm$^3$，强度极限 420 MPa。计算结果如表 1 所示。

**表 1 计算得到的破片侵彻靶板跳飞临界角**

**Table 1 Calculated results of critical ricochets of penetrators impacting targets**

| 靶板厚度 /mm | $\alpha_{cr}$/(°) | | |
|---|---|---|---|
| | 800 m/s | 1 000 m/s | 1 200 m/s |
| 2 | 81 | 82 | 83 |
| 4 | 75 | 77 | 78 |
| 6 | 70 | 72 | 74 |
| 8 | 69 | 71 | 73 |
| 10 | 68 | 70 | 72 |

## 2 跳飞过程及临界角的数值模拟

在 800～1 200 m/s 的速度范围内，对圆柱形钨破片侵彻铝板的跳飞过程进行了数值模拟，计算破片撞击不同厚度(2～10 mm)铝板的跳飞临界角，本节以 4 mm 靶板为例分析跳飞的过程。

### 2.1 模拟计算模型

采用 LS-DYNA 有限元软件计算圆柱形破片斜侵彻 2A12 T4 铝合金靶板的过程。破片和靶板单元类型均选择 SOLID164，网格单元采用八节点六面体。对破片直接作用的靶板区域加密，加密部分单元尺寸为 1 mm，其余部分网格划分相对稀疏。破片与靶板的接触方式为 ERODING_SURFACE_TO_SURFACE，破片和靶板均采用 Johnson-Cook 材料模型和 Grüneisen 状态方程。对靶板侧面施加全自由度约束和非反射边界约束。采用侵蚀算法，并与失效准则连用，当单元的有效塑性应变达到失效应变或者单元压力达到最小压力时，则单元失效，计算中失效的单元将被删除[10]。

Johnson-Cook 模型的应力应变关系为：

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}_p^n)(1 + c\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \tag{15}$$

式中：$A$、$B$、$C$、$n$ 为材料常数；$m$ 为温度系数；$\bar{\varepsilon}_p$ 为有效塑性应变；$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\bar{\varepsilon}}_p/\dot{\varepsilon}_0$ 为有效塑性应变率；$T^* =$

$(T-T_r)/(T_m-T_r)$，$T^*$ 为无量纲温度；$T_r$ 为室温；$T_m$ 为熔化温度。Johnson-Cook 失效模型应用了累计损伤的概念来考虑温度、应变和应变率效应。单元的损伤度定义为 $D=\sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f}$，$D$ 表示单个单元的损伤，当 $D=1.0$ 时材料失效；$\Delta\varepsilon_p$ 为塑性应变增量；$\varepsilon_f$ 为失效应变，定义为：

$$\varepsilon_f=[D_1+D_2\exp(D_3\sigma^*)](1+D_4\ln\varepsilon^*)(1+D_5T^*) \tag{16}$$

式中：$\sigma^*=p/\bar{\sigma}$ 为压力与等效应力的比值；$D_1$、$D_2$、$D_3$、$D_4$ 和 $D_5$ 为材料常数。

计算时采用 Grüneisen 状态方程，对可压缩材料，压力的表达式为：

$$p=\frac{\rho_0c^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]^2} \tag{17}$$

式中：$S_1$、$S_2$、$S_3$ 是 $u_s$-$u_p$ 曲线斜率的系数；$c$ 为体积声速；$\gamma_0$ 是 Grüneisen 常数；$\mu=\rho/\rho_0-1$，$\rho$ 是当前密度，$\rho_0$ 是初始密度；$a$ 是 $\gamma_0$ 的一阶体积修正。

具体的材料参数如表 2 所示。表中，$\rho$、$E$、$\mu$ 分别为材料的密度、杨氏模量、泊松比；$A$ 为与材料屈服极限相关的常数；$B$、$C$、$n$ 为与材料的应变硬化及应变率相关的系数；$m$ 为温度系数。

**表 2　Johnson-Cook 材料参数**

**Table 2　Johnson-Cook material parameters**

| 材料 | $\rho$/(g·cm$^{-3}$) | $E$/GPa | $\mu$ | $A$/MPa | $B$/MPa | $C$ | $n$ | $m$ | $T_m$/K | $T_r$/K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 钨 | 18.3 | 350 | 0.28 | 1 806 | 177 | 0.016 | 0.12 | 1.0 | 1 450 | 294 |
| 2A12 T4 铝 | 2.797 | 69.6 | 0.33 | 265 | 426 | 0.015 | 0.34 | 1.0 | 775.5 | 294 |

## 2.2　数值模拟结果及分析

在数值模拟过程中，通过每次改变 1°入射角来计算破片撞击靶板时的跳飞临界角。图 3～4 所示为破片以 1 000 m/s 着速撞击 4 mm 厚靶板时数值模拟的过程。如图 3 所示，入射角为 77°时，破片先开坑，然后随着侵彻的进行沿着靶板表面向前运动，继续侵彻靶板，最终穿透 4 mm 板。由于 77°时破片没有发生跳飞，因此将入射角增大到 78°重复上述计算。如图 4 所示，在 84 μs 时破片翻转跳飞。

破片的速度及姿态说明破片在侵彻过程中发生了跳飞。图 5 为破片分别以 77°、78°入射角、

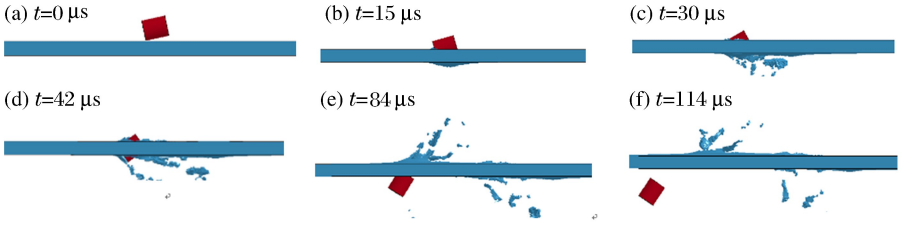



图 3　入射角为 77°时破片的侵彻过程

Fig. 3　Process of fragments penetrating target at $\alpha_0=77°$

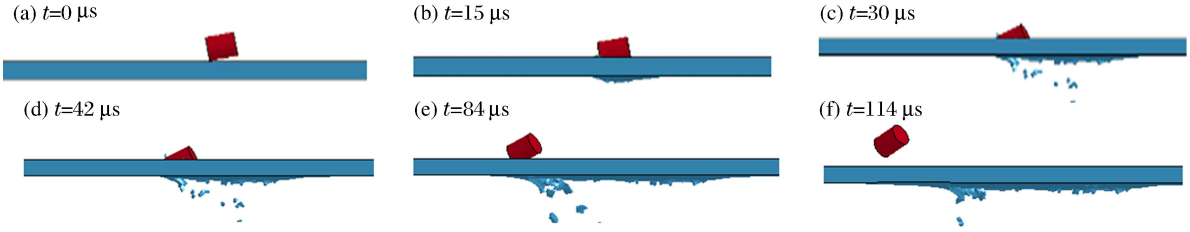



图 4　入射角为 78°时破片的侵彻过程

Fig. 4　Process of fragments penetrating target at $\alpha_0=78°$

1 000 m/s的速度撞击 4 mm 厚靶板时，破片速度沿靶板法线方向的分量随时间的变化曲线。由图 5 可知，入射角为 77°时，破片速度分量方向并没有改变；78°时，破片速度分量方向改变，发生跳飞。结合图 3～4 的模拟结果可知，当破片沿着靶板法线方向的速度分量方向改变时，发生跳飞现象。如图 6 所示，破片开始侵彻靶板时，受到靶板的阻力，破片与靶板的夹角逐渐增大，若破片跳飞，角度会继续增大。

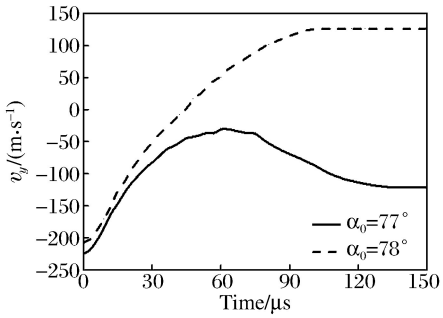



图 5 破片剩余速度沿靶板法线方向的分量随时间的变化

Fig. 5 $v_y$-$t$ curves of normal velocity

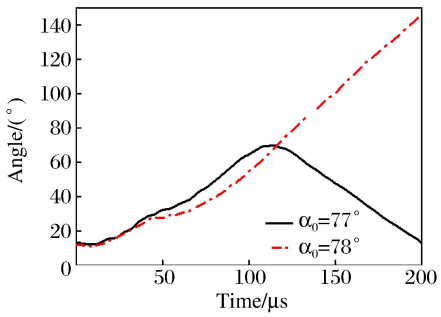



图 6 破片轴线与靶板平面的夹角随时间的变化

Fig. 6 Variation of angle between fragment axis and target with time

取跳飞和不跳飞情况入射角的平均值作为跳飞临界角，因此，以 1 000 m/s 撞击 4 mm 靶板时的临界跳飞角为 77.5°。重复上述过程计算得到破片以 800～1 200 m/s 的速度撞击 2～10 mm 靶板时的跳飞临界角。

图 7 为理论计算得到的破片跳飞临界角与破片入射速度、靶板厚度之间的关系。由图 7 可知，破片的跳飞临界角随着靶厚的增加而减小，随着速度的增大而增大。由图 7 可知，数值模拟计算结果和理论模型计算结果吻合较好。

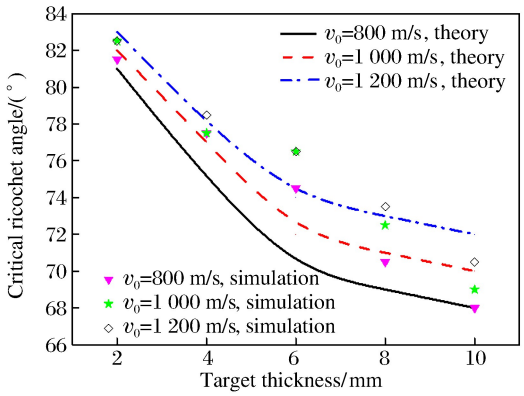



图 7 破片跳飞临界角与入射速度、靶板厚度的关系

Fig. 7 Relation of critical ricochet angle with incident speed and target thickness

## 3 破片撞击铝靶跳飞临界角实验

### 3.1 实验方法

为了验证上述模型的正确性，进行了破片以不同速度撞击不同厚度靶板的实验。实验装置如图 8 所示，由弹道枪、破片测速系统（测速靶和测试仪组成）、靶板、高速录像机等组成，具体的实验场地布置如图 9 所示。通过弹道枪控制并获取破片的撞靶速度；破片测速系统测试破片撞靶时的速度；高速录像记录撞靶过程，并判断破片是否跳飞。

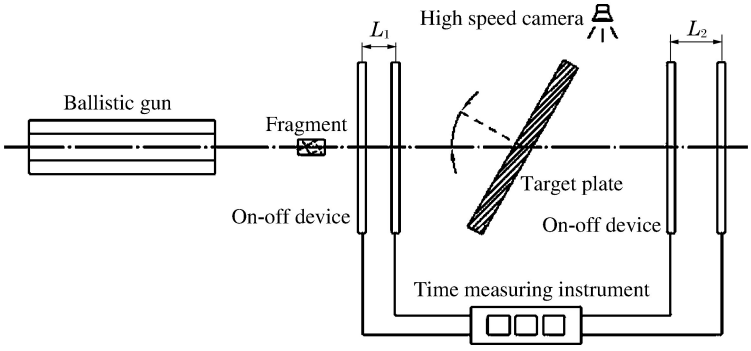



图 8 实验系统的组成

Fig. 8 Experiment system

实验时靶板厚度选用 2、4 mm 两种，控制破片以 800～1 100 m/s 的速度撞击铝靶板。通过调整靶板的放置倾角控制破片撞靶时的入射角。若破片没有跳飞，则增大入射角度重复实验；若破片跳飞，则减小入射角度。当不跳飞的最大入射角和跳飞的最小入射角之差小于 3°时，取两角度的平均值作为破片的跳飞临界角。如图 10 所示为高速摄影记录的破片斜撞击 4 mm 厚靶板过程。当撞击角度为 75°、速度为 1 060 m/s 时，破片穿透了靶板；增大角度至 77.5°，速度为 1 053 m/s 时，破片撞板之后发生跳飞。

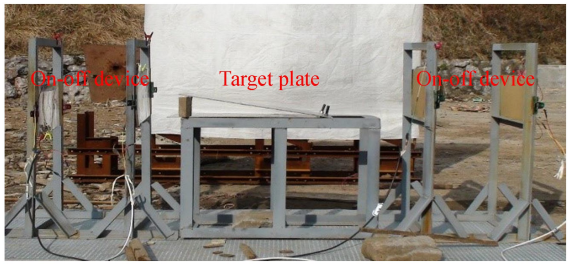



图 9 实验现场布置照片

Fig. 9 Experiment setup

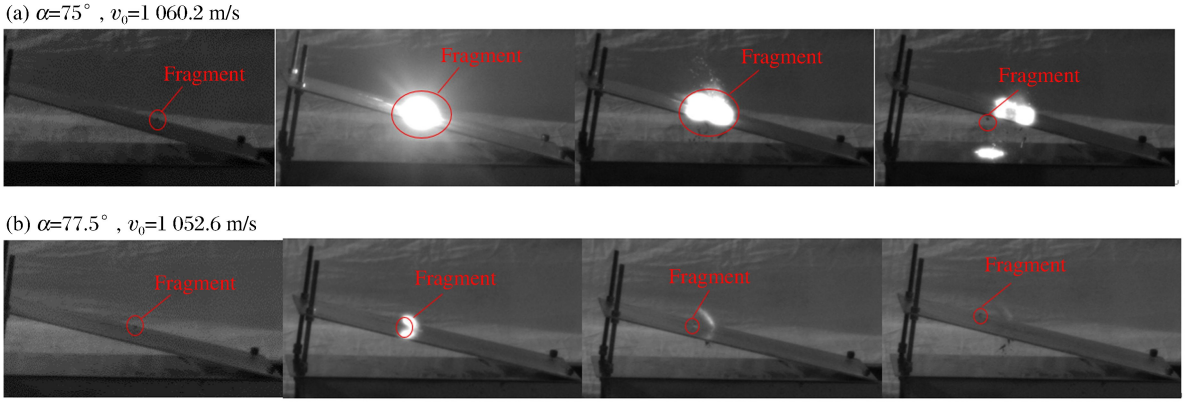



图 10 高速摄影记录的实验过程

Fig. 10 Experiment process recorded by high speed camera

### 3.2 实验结果及分析

参考理论及数值模拟结果，使破片以 800～1 200 m/s 的速度分别以 80～85°的入射角撞击 2 mm 厚靶板，70～80°入射角撞击 4 mm 厚靶板，共进行了 26 发实验。由于实验数据较多，因此节选跳飞临界角附近的实验结果数据，如表 3 所示。

表 4 为实验得到的破片在不同速度范围内撞击不同厚度靶板时的跳飞临界角。实验得到破片撞击 2 mm 厚靶板的跳飞临界角为 81°～81.25°，破片撞击 4 mm 厚靶板的跳飞临界角为 72.5°～76.25°。

**表 3 破片撞击靶板实验结果**

**Table 3 Experimental results of fragment impacting target**

| 靶板厚度/mm | 入射角/(°) | 入射速度/(m·s$^{-1}$) | 是否跳飞 | 靶板厚度/mm | 入射角/(°) | 入射速度/(m·s$^{-1}$) | 是否跳飞 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 80.0 | 812 | 否 | 4 | 70.0 | 862 | 否 |
| 2 | 80.0 | 980 | 否 | 4 | 72.5 | 907 | 否 |
| 2 | 82.0 | 822 | 是 | 4 | 73.8 | 833 | 是 |
| 2 | 82.5 | 997 | 是 | 4 | 73.8 | 921 | 否 |
| 2 | 82.5 | 1 015 | 是 | 4 | 75.0 | 868 | 是 |
| 2 | 82.5 | 1 042 | 是 | 4 | 75.0 | 1 060 | 否 |
| 2 | 85.0 | 1 059 | 是 | 4 | 77.5 | 970 | 是 |
| 2 | 80.0 | 1 064 | 否 | 4 | 77.5 | 1 053 | 是 |

表 4 破片撞击靶板跳飞临界角对比

Table 4 Results of critical ricochets of fragment impacting target

| 靶板厚度/mm | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 入射速度/(m·s$^{-1}$) | 800～900 | 900～1 000 | 1 000～1 100 | 800～900 | 900～1 000 | 1 000～1 100 |
| 跳飞角度/(°) | 81.00 | 81.25 | 81.25 | 72.5 | 76.25 | 76.25 |

## 4 理论、计算及实验结果的对比分析

图 11(a)～(b)为破片以 980 m/s 的速度、82.5°的入射角撞击 2 mm 厚靶板的实验和数值模拟切口情况，实验靶板上的切口长 59 mm、宽 10 mm；模拟切口长 66 mm、宽 7.5 mm。图 11(c)～(d)为破片以 950 m/s 的速度、75°的入射角撞击 4 mm 厚靶板的实验和模拟靶况，实验靶板上的切口长 47 mm、宽 8 mm；模拟切口长 50 mm、宽 9.5 mm。对比实验和模拟结果，破片撞击靶板后，靶板上切口形状相似，但模拟得到的切口长度比实验得到的长 10%左右。这是因为模拟时，靶板单元的有效塑性应变达到失效应变时，单元将被删除[10]。

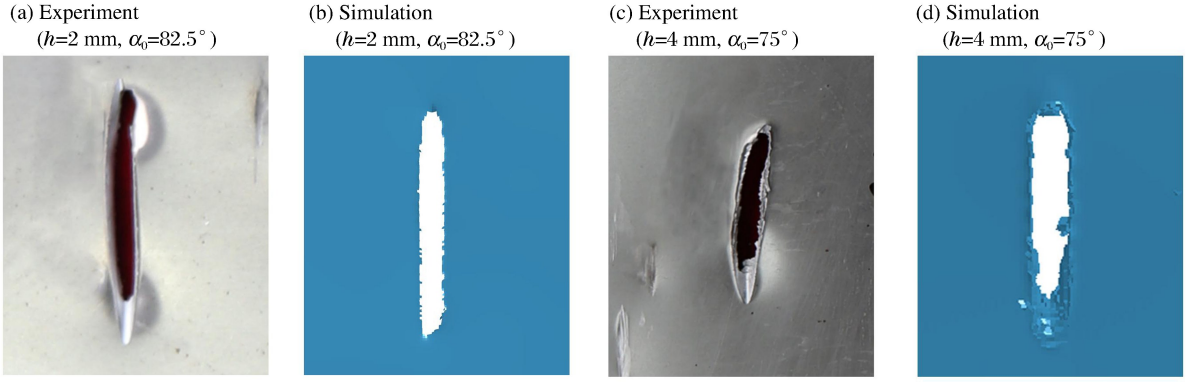



图 11 实验及模拟靶板切口对比图

Fig. 11 Experimental and simulated target craters

图 12 为破片跳飞临界角理论计算值、模拟值与实验值的对比。由图 12 可看出，破片以 800 m/s 的速度撞击 4 mm 板时的理论计算结果、模拟结果和实验数据的偏差最大，这可能是因为实验中存在小攻角的情况，但总体数值模拟计算和实验结果的最大偏差为 1.8%、理论计算和实验结果最大偏差为 3%。对比表明，理论计算结果、模拟结果和实验结果是一致的。说明所建立的理论跳飞模型及数值计算方法是正确的。

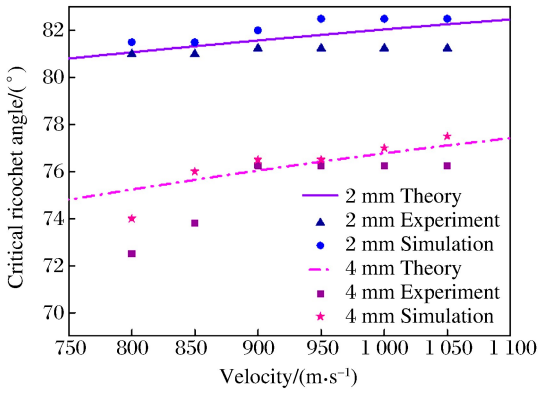



图 12 理论计算值、实验值、模拟值的对比

Fig. 12 Comparison of calculated, experimental, and simulated results

## 5 结 论

(1)破片撞击靶板的速度相同时，随着靶板厚度的增加，破片的跳飞临界角减小；靶板厚度相同的情况下，在所计算的速度范围内，入射速度越大，破片跳飞临界角越大。

(2)本文中所建立的理论模型与数值模拟计算结果和弹道实验结果一致性较好，表明所建立的理论模型能够有效预测破片斜侵彻有限厚靶板的跳飞临界角，可为装甲的破片防护设计、战斗部设计及毁伤效能评估提供参考。

## 参考文献：


[1] 赵国志. 长杆弹斜侵彻有限厚钢甲的简化模型[J]. 兵工学报，1989，10(4)：1-8.
ZHAO Guozhi. A simplified model for the oblique pentration of a long rod into a plate of finite thickness[J]. Acta Armamentarii，1989，10(4)：1-8.

[2] 吴荣波，陈智刚，王庆华. 入射角对跳弹现象影响的数值模拟[J]. 设计与研究，2011，10(38)：18-32.
WU Rongbo，CHEN Zhigang，WANG Qinghua. Numerical simulation on the impact effect of incidence angle impacting ricochet[J]. Design and Research，2011，10(38)：18-32.

[3] 董玉财，杜忠华，刘荣忠，等. 钨合金长杆体高速撞击薄钢板的跳飞研究[J]. 弹道学报，2014，26(1)：73-77.
DONG Yucai，DU Zhonghua，LIU Rongzhong，et al. Research on ricochet of tungsten alloy long rod impacting thin steel target with high-velocity[J]. Journal of Ballistics，2014，26(1)：73-77.

[4] 米双山，张锡恩，陶贵明. 钨球侵彻 LY-12 铝合金靶板的有限元分析[J]. 爆炸与冲击，2005，25(5)：477-480.
MI Shuangshan，ZHANG Xien，TAO Guiming. Finite element analysis of spherical fragments penetrating LY-12 aluminum alloy target[J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(5)：477-480.

[5] TATE A. A simple estimate of the minimum target obliquity required for the ricochet of a high speed long rod projectile[J]. Journal of Physics D：Applied Physics，1979，12(11)：1825-1829.

[6] ROSENBERG Z，YESHURUN Y，MAYSELESS M. On the ricochet of long rod projectiles[C]// Proceedings on the 11th International Symposium on Ballistics. Jerusalem，1989：501.

[7] SEGLETES S B. A model for rod ricochet[J]. International Journal of Impact Engineering，2006，32(9)：1403-1439.

[8] ZOOK J. An analytical model of kinetic energy projectile/fragment penetration[R]. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD，1977.

[9] GOLDSMITH W. Review non-ideal projectile impact on targets[J]. International Journal of Impact Engineering，1999，22：95-395.

[10] 赵国志. 穿甲工程力学[M]. 北京：兵器工业出版社，1992：106-107.


# Critical ricochet angle of cylindrical tungsten fragment impacting aluminum target


LAN Xiaoying[1]，LI Xiangdong[1]，ZHOU Lanwei[1]，GONG Xiaoze[2]，YAO Zhijun[2]

(1. *School of Mechanical Engineering，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing* 210094，*Jiangsu*，*China*；
2. *Baicheng Ordnance Test Center of China*，*Baicheng* 137001，*Jilin*，*China*)



**Abstract**：In the present study，we performed theoretical calculation，numerical simulation and experimental test to investigate the ricochet performance of cylindrical fragments. The fragment，5.7 mm in diameter and 6.7 mm in length，impacted aluminum plates 2－10 mm in thickness at speeds of 800－1 200 m/s. A theoretical model of the ricochet was established，the relation between the critical angle and the initial velocity and the thickness of the target plate were obtained. The results of theoretical calculation agreed well with both the simulation and experiment. The results show that the higher the impacting velocity，the larger the critical ricochet angle；and the thicker the target，the smaller the critical ricochet angle. When a fragment impacts a 2 mm target plate at 800－1 200 m/s，the critical ricochet angle is 81°－81.25°；when a fragment impacts a 4 mm target plate at 800－1 200 m/s，the critical ricochet angle is72.5°－76.25°.



**Keywords**：fragments；critical ricochet angle；numerical simulation；aluminum plate of limited thickness


(责任编辑　曾月蓉)