

# 动能杆斜撞击靶板后效破片描述研究<sup>\*</sup>

付滕强, 李向东, 蔡振华

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对动能杆式弹大倾角斜撞击靶板产生的靶后破片, 建立了其初始破片云数学描述模型, 并在此基础上对斜撞击靶后破片特征分布进行了建模。仿真结果与工程试验结果比较表明, 该模型具有较高的可信度。

关键词: 爆炸力学; 分布模型; 斜侵彻; 靶板后效破片; 建模仿真

中图分类号: O385; TJ012.1

国标学科代码: 130°3530

文献标志码: A

## 1 引言

靶板后效破片(简称靶后破片)是杆式毁伤元毁伤装甲目标的主要媒介, 对靶后破片特征分布的正确建模是研究装甲目标防护能力和动能弹药杀伤效能的重要内容。国外对靶后破片的研究始于 20 世纪 90 年代, 先后积累了大量的试验数据, 取得了一定的成果<sup>[1~3]</sup>; 国内近几年也开始了这方面的研究<sup>[4]</sup>。由于靶后破片试验研究耗资大、试验周期长, 且无法对随机因素进行研究, 因此基于试验的计算机仿真成为当前靶后破片研究的主要方法。

本文中通过斜撞击靶后破片形成机理及试验数据的分析, 建立初始靶后破片云的数学描述模型和特征分布模型, 以该模型为核心开发靶后破片仿真软件 (behind armour debris simulation tool, BADSiT), 并针对特定弹靶系统进行仿真试验。与同等条件下的实射试验结果对比表明, 仿真的靶后破片质量、速度和空间分布与试验符合较好, 验证该模型的正确性, 并足以满足目标毁伤研究工作的需要。

## 2 靶后破片云概念及假设

根据对大量杆式弹正、斜撞击靶后破片收集试验结果及所拍摄的 X 射线闪光照片分析, 认为无论弹杆着靶的情况如何, 当侵彻形成的鼓包完全破裂, 大量弹体碎渣和靶板崩落喷出, 形成具有杀伤力的靶后破片后, 经过破片与破片间相互挤撞、碰撞冲击波冲击等一系列复杂作用, 靶后破片整体将保持某一稳定形态(正撞击时近似为一个椭球缺形, 其铅垂截面为圆形; 斜撞击时的形态如图 1 所示, 其中  $v_p$  为弹的着靶速度,  $L_R$  为残余弹体的长度,  $v_R$  为残余弹体的速度, 其铅垂截面为椭圆形)等比例向外不断膨胀, 直至遇到障碍(人员、部件或后效靶)为止<sup>[1~3]</sup>。本文中将这种保持某一稳定形态, 等比例向外膨胀的靶后破片整体称为靶后破片云。

由于从鼓包完全破裂到破片云形成之间的时间间隔非常短, 因此不考虑这期间的多变状态, 只对稳定的靶后破片云进行研究, 据此做出如下假设:

(1) 不考虑从鼓包完全破裂到靶后破片云形成之间的复杂过程, 认为靶后破片在剩余侵彻体冲出鼓包后, 直接由初始靶后破片云开始, 以稳定的状态不断膨胀、飞散;

(2) 在初始靶后破片云中, 每个破片即获得不变的速度矢量, 且所有矢量的延伸线都经过一个点  $F$ ,  $F$  点位于弹轴入射线上。

\* 收稿日期: 2004-01-15; 修回日期: 2004-08-31

作者简介: 付滕强(1979—), 男, 硕士。

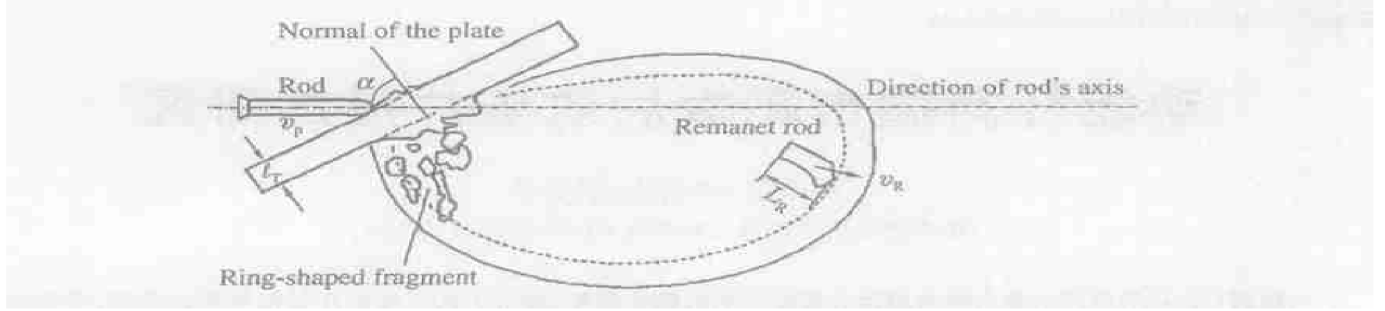


图 1 斜撞击靶后破片云形态示意图

Fig.1 Diagram of the armor debris cloud for oblique impact

### 3 斜撞击初始靶后破片云描述模型

杆式弹大倾角、高速撞击均质装甲钢靶, 侵彻过程可描述如下: 侵彻初期, 弹体紧贴坑底前进, 形成的弹坑翻口边几乎与弹体前进方向垂直, 并喷出大量靶前破片; 经过过渡阶段, 在侵彻后期, 弹坑为直通弹孔, 孔径为弹径的 1.5 倍或略大, 弹杆在此阶段向靶板表面法线方向有一个明显的折转角  $\phi$ , 此时弹体碎渣和靶板碎片不能再从靶前排, 而挤在弹杆周围从靶后喷出形成靶后破片, 此阶段类似于垂直侵彻过程<sup>[5]</sup>。据此认为斜撞击靶后破片云中的破片主要有两种运动趋势: 一部分破片在侵彻过渡阶段形成, 保持了杆式侵彻体侵彻靶板前半程的运动趋势, 将在以弹轴入射方向为中心线的椭球空间内飞散; 另一部分破片在侵彻后半程的直通弹孔内形成, 这部分破片的运动趋势与正撞击靶后破片的相同, 但其对称中心线与弹轴入射方向成  $\phi$  角。

根据假设 (2), 建立以  $F$  为原点的左手直角空间坐标系  $FXYZ$ , 其中杆式侵彻体轴线所在直线为  $Z$  轴, 入射方向为正方向, 如图 2 所示。椭圆  $O$  代表以弹轴入射方向为中心线的运动趋势椭球空间的初始位置投影, 椭圆  $O'$  代表直通弹孔运动趋势椭球空间的初始位置投影, 则整个斜撞击初始靶后破片云在空间上可分为三个区域: 区域 I 内的所有破片具有直通弹孔运动趋势; 区域 III 内的所有破片具有弹轴入射方向的运动趋势; 而区域 II 内的靶后破片则具有这两种运动趋势。综上所述, 斜撞击初始靶后破片云的描述模型为

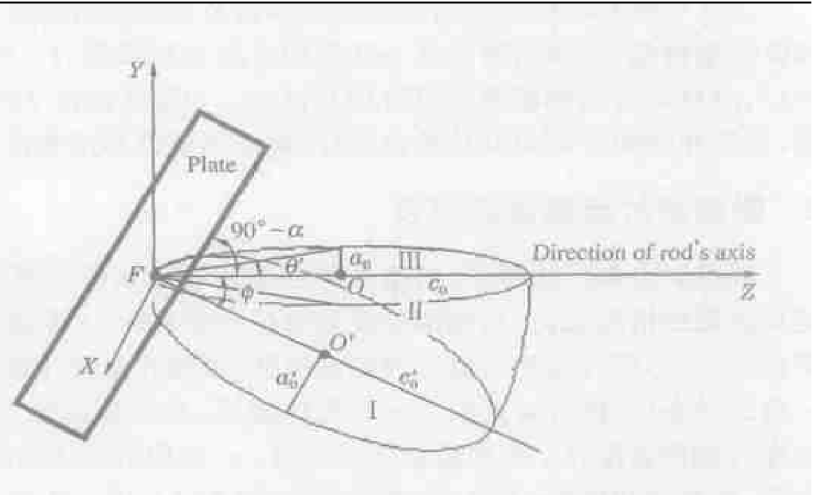


图 2 斜撞击初始靶后破片云分析图

Fig.2 Analysis diagram of the initial armor debris cloud for oblique impact

$$\text{区域 I : } \begin{cases} \frac{x^2}{a_0^2} + \frac{(y \cos \phi + z \sin \phi)^2}{a_0^2} + \frac{(z \cos \phi - y \sin \phi - z_0)^2}{c_0^2} \leq 1 \\ y \leq -z \tan \phi \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{区域 II : } \begin{cases} \frac{x^2}{a_0^2} + \frac{(z - c_0)^2}{c_0^2} \leq 1 \\ -z \tan \phi < y \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{区域 III : } \begin{cases} \frac{x^2}{a_0^2} + \frac{y^2}{a_0^2} + \frac{(z - c_0)^2}{c_0^2} \leq 1 \\ y > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $z_0$  为点  $O'$  到点  $F$  距离， $a_0$ 、 $a'_0$  和  $c_0$ 、 $c'_0$  分别为两椭圆的短半轴和长半轴。要定量描述斜撞击初始靶后破片云，必须确定  $\phi$ 、 $z_0$ 、 $a_0$ 、 $a'_0$ 、 $c_0$ 、 $c'_0$  的值。

试验研究发现，斜撞击靶后破片在后效靶上存在一个破片数量和质量的密集区，这个破片密集区成椭圆形<sup>[4]</sup>。形成这个破片密集区是因为该区域正对着靶板的直通弹孔，因此  $\phi$  角近似等于该区域中心与弹丸着靶点间连线同  $Z$  轴正方向的夹角，可由下式求得

$$\phi = k(v_i/940)^w - 2.4 \tag{4}$$

式中： $k = \exp(0.1137l_p/d_p + 2.6364)$ ， $l_p$  为弹杆长度，mm， $d_p$  为弹杆直径，mm； $v_i$  为弹杆着速，m/s； $w = 1.472 - 1.43t_T/d_p$ ， $t_T$  为靶板厚度，mm。图 3 为式(4)计算值与试验值对比图。

对于椭圆  $O'$  的初始参数，可以通过正撞击初始靶后破片云的描述模型确定，其分析图见图 4。则  $z_0 = h_0 - c'_0 + 2c'_0f - h_0f$ ，取等效弹坑直径  $D_{eq} = 1.5d_p$ ，点  $M$  的坐标为  $((2c'_0 - h_0)f, 0.75d_p)$ ，由文献[6]求得

$$\begin{cases} h_0 = 0.75d_p f \tan \theta_{\max} E^2 \\ a'_0 = 0.375 \frac{d_p}{E} \left[ \frac{1}{f \tan \theta_{\max}} + E^2 f \tan \theta_{\max} \right] \\ c'_0 = 0.375 d_p \left[ \frac{1}{f \tan \theta_{\max}} + E^2 f \tan \theta_{\max} \right] \end{cases} \tag{5}$$

式中： $f$  为靶后破片云形状系数； $E = c'_0/a'_0$  均为输入量，需要根据试验或经验确定，在文献[1]中， $E = 2 \sim 2.5$ ，在文献[2]中， $E = 1.5$ ，在文献[3]中， $E = 2$ ； $\theta_{\max}$  为最大散射角，一般取  $45^\circ$ 。

由图 2 中几何关系可求得椭圆  $O$  的初始参数

$$\begin{cases} c_0 = (2c'_0 - h_0)f/2 + h_0/2 \\ a_0 = c_0 \tan \theta' \end{cases} \tag{6}$$

式中： $\theta'$  一般取经验值  $15^\circ$ 。

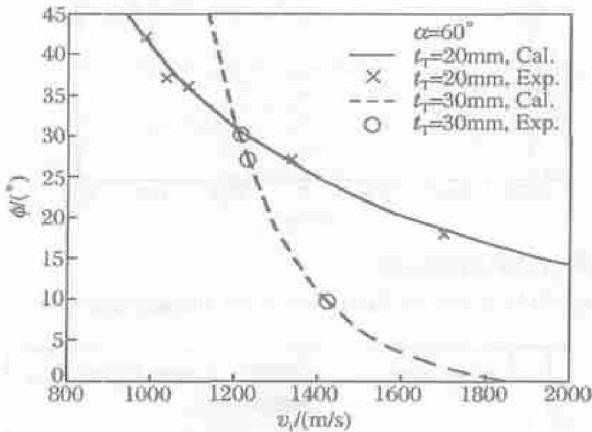


图 3 斜撞击靶后破片密集散布中心偏角  
Fig. 3 Deviation of the armor debris distribution centre for oblique impact

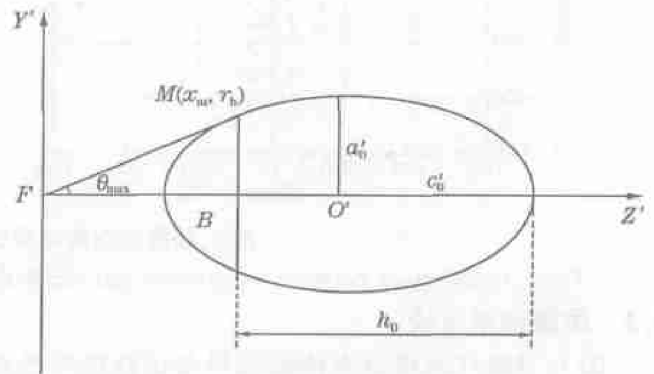


图 4 正撞击初始靶后破片云分析图  
Fig. 4 Analysis diagram of the initial armor debris cloud for normal impact

## 4 斜撞击靶后破片特征分布

### 4.1 空间分布

靶后破片在破片云中的相对位置由散射角  $\theta$  确定，在斜撞击中指破片速度矢量与图 2 中  $FO'$  所在直线的夹角。则空间分布模型为

$$N_\theta = \frac{\Delta\theta}{\theta_{\max}} \frac{5N_{tot}}{1.056 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -0.5 \left( \frac{5\theta/\theta_{\max} - 2.1}{1.1} \right)^2 \right] \tag{7}$$

式中： $N_\theta$  表示在散射角区域  $\theta \sim \theta + \Delta\theta$  内的破片数量； $\Delta\theta$  为散射角的划分单位，一般为  $5^\circ$ ； $\theta_{\max}$  为破片

最大散射角;  $N_{tot}$ 表示总破片数,可由文献[1]中公式求得。

### 4.2 速度分布

假设相同散射角区域里的破片具有相同的飞散速度,那么在散射角区域  $\theta \sim \theta + \Delta\theta$  内靶后破片的速度可由下式确定

$$v_{\theta} = v_r \cos(1.87\theta) / \cos\theta \tag{8}$$

式中:  $v_r$  为杆式弹斜穿透靶板后的剩余速度,可由文献[5]中公式求得。

### 4.3 质量分布

针对斜撞击,可以在各个散射角区域内分别使用 Mott 公式

$$N(m > M) = N_0 e^{-M/m_a} \tag{9}$$

式中:  $N(m > M)$ 表示质量大于  $M$  的破片的数量;  $m_a$ 表示靶后破片的平均质量。

## 5 斜撞击靶后破片仿真结果与试验结果比较

使用 BAdSiT 软件仿真了文献[4]中斜撞击靶后破片试验,并对结果进行了比较分析。仿真中取  $f = 0.9, E = 2$ 。

### 5.1 空间分布比较

图 5 为空间分布试验结果与仿真结果比较图,可见无论试验分布还是仿真分布,破片在后效靶上均成椭圆分布,且分布中心都位于点 (0, -200) 处;破片整体都散布在宽 400mm、高 800mm 的矩形范围内。但可以看出仿真结果比试验结果在破片横向分布上略窄,这主要是因为仿真模型中没有考虑散布在破片云最外围的环状破片。

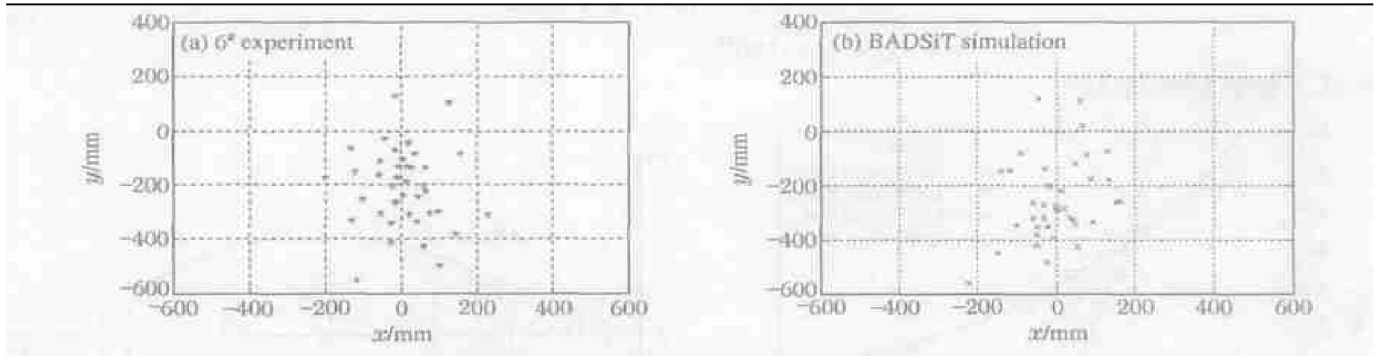


图 5 斜撞击空间分布试验结果与仿真结果比较

Fig.5 Comparison between experiment and simulation of the debris spacial distribution for oblique impact

### 5.2 质量分布比较

图 6 为破片质量分布仿真结果与试验结果的对比图,其中  $\beta$  为以弹轴入射方向为中心的同心圆张角。可以看出处于内部的破片,其质量分布仿真结果与试验结果拟合得较好,但在破片分布的外围,由于存在个数很少但质量很大的环状破片,使整体的质量分布不再满足分布规律,因此对这些环状破片予以剔除。对环状破片的特征分布需要单独进行研究。

### 5.3 速度分布比较

靶后破片的速度分布可以通过破片云的形状、位置随时间的变化情况来研究。图 7 为弹杆着靶速度为 1700m/s 时,利用 BAdSiT 软件对斜撞击靶后破片云的仿真与 X 射线照片所拍的破片云在各个

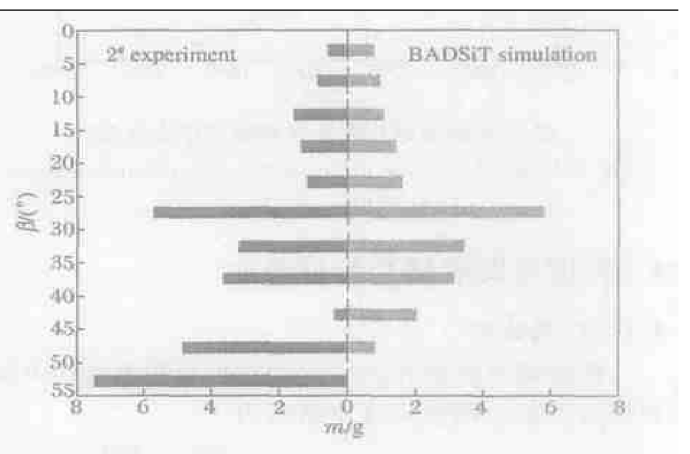


图 6 斜撞击质量分布试验与仿真对比图

Fig.6 Comparison between experiment and simulation of the debris mass distribution for oblique impact

时间点上的对比图。可以看出, 仿真破片云在各个时间点上的形状、大小、破片的分布与真实情况很相似, 这说明 BADSiT 对靶后破片云的描述和整体速度分布仿真得很好。由于仿真时没有考虑环状破片, 因此仿真的破片云中并没有体现出环状破片。

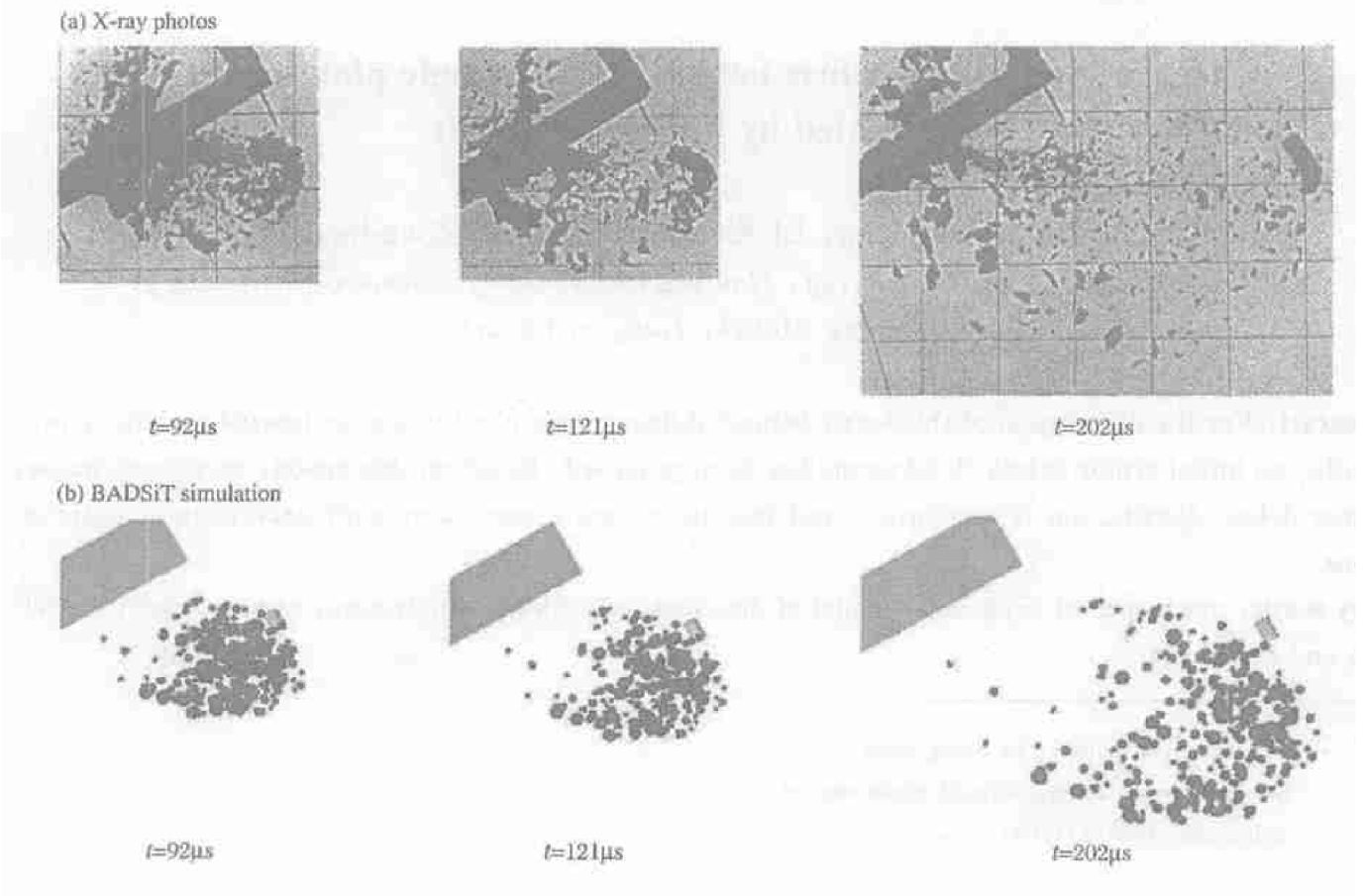


图7 X射线闪光照片与仿真结果比较

Fig.7 Comparison between X-ray photos and simulation results

## 6 结束语

提出了杆式弹大倾角穿透均质装甲钢所产生靶后破片的破片云描述模型, 及其质量、空间、速度分布模型。通过仿真结果与试验结果比较, 得出文中的模型是正确的, 能够满足目标毁伤研究工作的工程要求。本文实现了对斜撞击靶后破片的可视化仿真研究, 并具有一定的通用性。由于试验的样本较少, 对于不符合破片云整体特征分布规律, 并且随机性很强的环状破片暂时没予以考虑, 对其的研究还有待于试验数据的进一步积累。

## 参考文献:

- [1] Hohler V, Kleinschmitzer K, Schmolinske E, et al. Debris cloud expansion around a residual rod behind a perforated plate target [A]. Persson A, et al. 13th International Symposium on Ballistics[C]. Stockholm, Sweden: National Defence Research Establishment, 1992.
- [2] Yarin A L, Roisman I V, Weber K, et al. Model for ballistic fragmentation and behind-armor debris[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(2): 171—201.
- [3] Mayseless M, Sela N, Stilp A J, et al. Behind the armor debris distribution function[A]. Persson A, et al. 13th International Symposium on Ballistics[C]. Stockholm, Sweden: National Defence Research Establishment, 1992.
- [4] 李文彬, 沈培辉, 王晓鸣, 等. 射弹倾斜撞击靶板二次破片散布试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(3): 263—266.
- LI Wen-bin, SHEN Pei-hui, WANG Xiao-ming, et al. Experiment investigation on distribution of secondary fragments when pro-

jectile oblique penetrating target[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(3): 263—266.

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

[6] 付滕强. 目标毁伤数字仿真平台实现及其模型库系统的建立[D]. 南京理工大学, 2004.

## Description of the debris behind oblique single plate target perforated by kinetic projectile

FU Cheng-qiang, LI Xiang-dong<sup>\*</sup>, CAI Zhen-hua

(School of Mechanics Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** For the description of the debris behind oblique single plate target perforated by kinetic projectile, an initial armor debris cloud model has been proposed. Based on this model, an oblique impact armor debris distribution is computed, and results are quite consistent with experimental observations.

**Key words:** mechanics of explosion; model of distribution; oblique penetration; armor debris; modeling and simulation

---

\* Corresponding author: LI Xiang-dong

E-mail address: lixiangd@mail.njust.edu.cn

Telephone: 025-84317634

## 撤消声明

本刊 2003 年增刊为第七届全国爆炸力学学术会议论文专辑, 该会议由中国力学学会爆炸力学专业委员会主办, 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室承办。现据主办单位、承办单位、作者本人的意见, 撤消增刊中第 279 ~ 280 页何川等的文章《刚性弹丸侵彻混凝土的量纲一侵彻深度的计算公式》。特此声明。

《爆炸与冲击》编辑委员会

2004 年 11 月