

爆炸成型弹丸贯穿靶板靶后破片空间分布模型*

邢柏阳¹, 郭锐², 侯云辉³, 骆强³, 张东江³, 杨赵兵¹, 徐伟华¹, 朱桂利¹, 崔浩²

(1. 中国航天科技集团有限公司第七研究院第七设计部, 四川成都 610100;

2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 3. 西安现代控制技术研究所, 陕西西安 710065)

摘要:深空撞击载荷对探测小天体内部物质成分和结构特性具有重要意义,因此,在考虑爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)可变截面的特性和区分靶后破片来源的基础上,建立了EFP贯穿靶板靶后破片空间分布模型。在靶板厚度30 mm至70 mm、EFP着靶速度1 650 m/s至1 860 m/s的条件下,该模型可以定量预测靶后破片云中各个破片的速度、质量、数量与空间位置的关系。结果表明,相对速度总是随相对空间位置的增加而呈线性增加,相对质量、相对数量总是随相对空间位置的增加而呈幂函数增加。

关键词:空间分布;爆炸成型弹丸;靶后破片;动能分布

中图分类号:TJ012.4; TJ413.+2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)04-141-10

Spatial distribution model for behind-armor debris formed by the perforation of explosively formed projectile through target

XING Boyang¹, GUO Rui², HOU Yunhui³, LUO Qiang³, ZHANG Dongjiang³, YANG Zhaobing¹, XU Weihua¹, ZHU Guili¹, CUI Hao²

(1. The Seventh Design Department, The Seventh Research Institute, China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The deep space impact load is of great significance to the detection of the internal material composition and structural characteristics of small celestial bodies. Therefore, based on considering the characteristics of the variable section of EFP (explosively formed projectile) and the differentiation of the BAD (behind-armor debris), a spatial distribution model for BAD formed by the perforation of variable cross-section EFP through the target was established. Under the condition that the target thickness is 30 mm to 70 mm and the EFP speed is 1 650 m/s to 1 860 m/s, the model can quantitatively predict the relationship between the velocity, mass, quantity and spatial position of each debris in the BAD cloud. The results indicate that the relative velocity increases by a linear function with the increase of the relative spatial position, the relative mass and the relative number increase by a power function with the increase of the relative spatial position.

Keywords: spatial distribution; explosively formed projectile; behind-armor debris; kinetic energy distribution

深空撞击载荷是一种通过引爆自身携带火药,将爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)以超高速(2 km/s以上)射向被探测小天体表面,制造人造撞击坑,暴露其表面风化层以下物质,为其他探测载荷开展探测或采样提供作业环境的高效式动能探测载荷,对探测小天体内部物质成分和结构特性具有重要意义^[1]。但是,在进行深空撞击载荷的地面试验时,只能分析反溅破片云的分布情况,如图1所示^[2]。

Corvonato等^[3]运用Bernoulli双纽线描述了包括反溅破片云在内的完整破片云,发现反溅破片云与靶后破片云的分布存在某种特定的联系。

另外,由于钢板的结构较简单,在进行深空撞击载荷相关试验前,有必要先建立EFP贯穿靶板靶后破片空间分布模型。

Piekutowski^[4-9]对破片云的结构进行了首次的系统定义,提出了圆柱状弹丸正撞击薄板所产生的破片云的模型,此模型使用圆柱直径、一个径向速度和四个轴向速度表示破片云的运动。Schäfer^[10]提出了球形弹丸正撞击薄板产生破片云的模型,并给出了中心破片速度、薄板破片的质心速度、椭球长半轴的速度和椭球短半轴的速度。蒋建伟等^[11-13]通过试验和数值仿真建立了工程计算模型,此模型可以很好地预测EFP产生的靶

* 收稿日期:2020-11-10

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(11972197,21875109);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX19_0331)

作者简介:邢柏阳(1992—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,E-mail:xing_boyang@163.com;

郭锐(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:guorui@njust.edu.cn

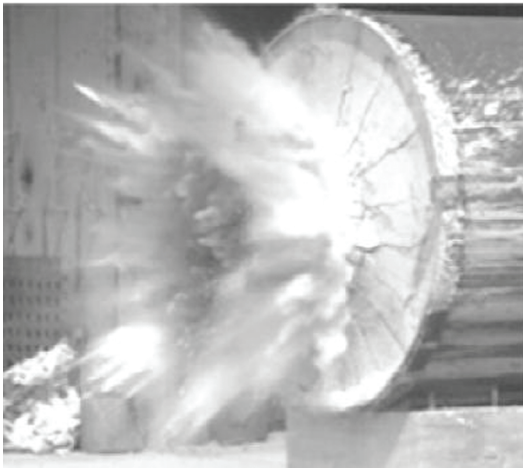


图 1 深空撞击载荷的地面试验^[2]

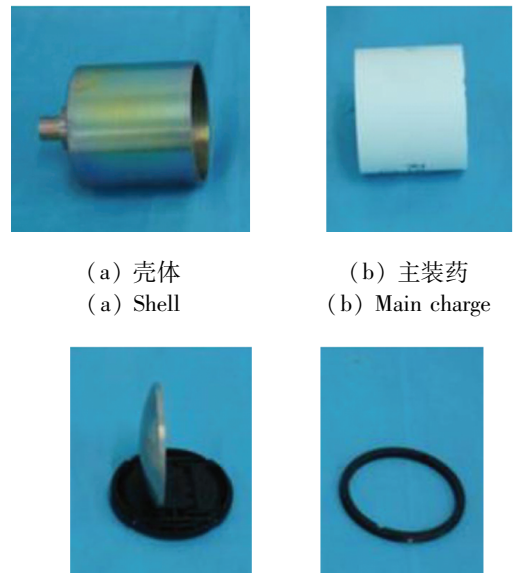
Fig. 1 Land experiment of deep space impact load^[2]

后破片的质量和速度的分布特性。黄炫宁等^[14]运用 AUTODYN 软件中光滑粒子动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 算法,并结合量纲分析及正交设计理论,建立了 EFP 正侵彻靶后破片云形状的数学描述模型。在分析靶后破片空间分布时,目前的文献通常是建立靶后破片云的形状方程或分析靶后破片云上个别重要点的速度等,还没有文献分析靶后破片云中所有破片的速度、质量、动能、数量与其空间位置间的关系,更没有文献建立靶后破片来源(靶板和侵彻体)、初始条件(靶板厚度、侵彻体着靶速度)与上述关系间的联系。因此,有必要在考虑 EFP 变截面特点的基础上,建立 EFP 贯穿靶板形成的靶后破片的空间分布模型。首先,验证数值仿真方法以及数值仿真结果;然后,分析靶后破片云中所有破片的速度、质量、动能、数量与其空间位置间的关系;最后,用一系列的数值仿真结果验证上述关系。

1 数值仿真模型

1.1 数值仿真方法验证

Dalzell 指出,当使用 AUTODYN-3D 对 EFP 贯穿钢板形成靶后破片进行数值仿真时,SPH 方法优于传统的 Euler 方法和 Lagrange 方法^[15]。因此本文使用 AUTODYN-3D 中的 SPH 方法对 EFP 贯穿靶板形成靶后破片的过程进行数值仿真。本小节将利用文献[11-13]中试验对本文的数值仿真方法进行验证,文献[11-13]中的 EFP 战斗部均相同,如图 2 所示。EFP 战斗部的装药直径为 56 mm,药型罩为壁厚 3 mm 的球缺形罩,装药为长径比 0.86 的压装 JH-2,壳体厚度为 2.52 mm。

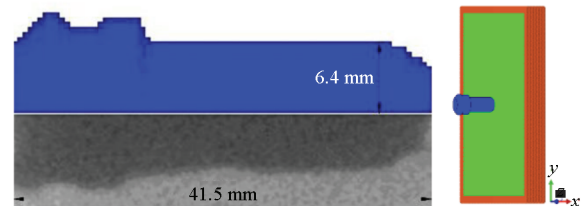


(a) 壳体
(a) Shell
(b) 主装药
(b) Main charge
(c) 药型罩
(c) Liner
(d) 压紧环
(d) Press-on ring

图 2 EFP 战斗部^[11-13]

Fig. 2 The EFP warhead^[11-13]

文献[11-13]中 EFP 的 X 光照片如图 3 (a) 下半部分所示,本文所建立的 EFP 数值仿真模型如图 3 (a) 上半部分所示。图 3 (b) 中的红色部分为靶板的固定约束,靶板和 EFP 的粒子直径均为 0.5 mm。



(a) EFP 形状
(a) Shape of EFP
(b) EFP 和靶板
(b) EFP and target

图 3 数值仿真模型

Fig. 3 Numerical simulation model

文献[11-13]中 EFP 正侵彻靶板,靶板厚度为 20 mm,EFP 着靶速度为 2 120 m/s,靶板长、宽均为 200 mm,本文对此试验进行复现,数值仿真得到的靶后破片云如图 4 上半部分所示,试验所拍的 X 光照片如图 4 下半部分所示。

对比图 4 (a) 和图 4 (b) 的上下部分可以发现,数值仿真复现的结果与试验结果非常吻合,这表明本文的数值仿真方法是具有可靠性的。

对比 95 μs 时刻数值仿真复现的靶后破片云径向膨胀速度与试验结果,如表 1 所示。

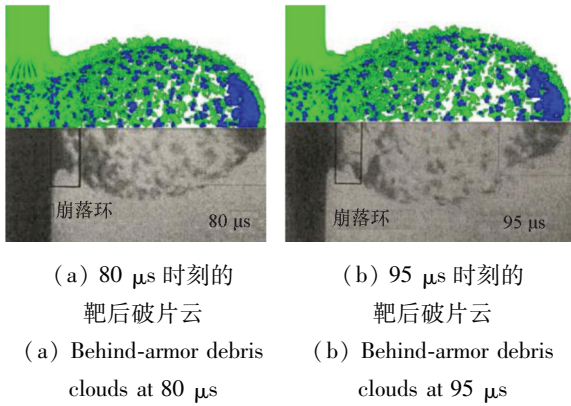


图 4 靶后破片云比较

Fig. 4 Comparison of behind-armor debris clouds

表 1 靶后破片云径向和头部膨胀速度

Tab. 1 Radial and head expansion velocity of the behind-armor debris clouds

位置	试验/(m/s)	仿真/(m/s)	偏差/%
径向膨胀速度	525	531	1.14
头部膨胀速度	1 678	1 690	0.72

由表 1 可以发现,数值仿真复现的结果与试验结果非常吻合,偏差不超过 2%,这表明本文的数值仿真方法是具有可靠性的。

1.2 数值仿真结果验证

为了验证本文数值仿真结果的可信性,针对某典型 EFP 进行了贯穿靶板的试验。EFP 的激光高速摄影如图 5 上半部分所示,所建立的数值仿真模型如图 5 下半部分所示。通过幕布墙上已知尺寸的标尺可以换算得到某典型 EFP 最大长度为 98.0 mm,最大半径为 28.5 mm。

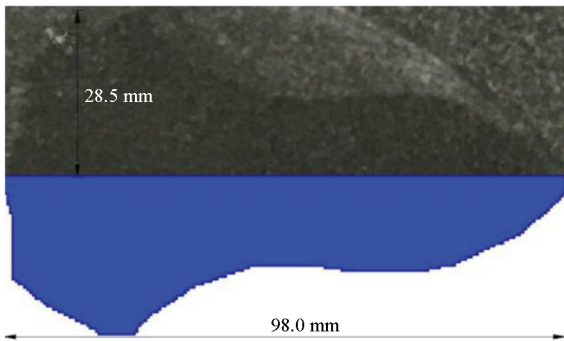


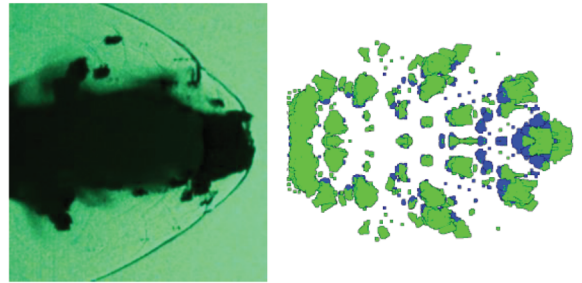
图 5 试验结果和数值仿真模型

Fig. 5 Experiment result and simulation model

数值仿真模型中靶板的材料为均质装甲钢,状态方程假设为线性;EFP 的材料为铜,状态方程假设为 Gruneisen,参数取自文献 [16 - 17]。在靶板厚度介于 30 ~ 70 mm 且 EFP 着靶速度介于

1 650 ~ 1 860 m/s 的条件下,当 EFP 着靶后经过 0.5 ms,侵彻过程已经彻底完成,此时靶后破片的速度、质量、动能、数量以及空间位置已经稳定,不再变化,故取 EFP 着靶后 0.5 ms 时刻的数值仿真结果进行统计分析。对比分析 SPH 粒子尺寸为 0.3 mm、0.4 mm 以及 0.5 mm 时的数值仿真结果发现,SPH 粒子尺寸为 0.5 mm 时的结果具备足够的精度并可以节约大量的时间成本。

EFP 正侵彻 60 mm 厚的靶板,测得 EFP 着靶速度约为 1 650 m/s,着靶后 0.5 ms 时刻的靶后破片云激光高速摄影如图 6 (a) 所示,对应时刻的数值仿真结果如图 6 (b) 所示。



(a) 激光高速摄影 (a) Laser high speed photography
(b) 数值仿真 (b) Numerical simulation

图 6 EFP 贯穿靶板形成的靶后破片云

Fig. 6 Behind-armor debris cloud formed by the perforation of EFP through the target

由图 6 可以发现,数值仿真得到的靶后破片云最前端的铜 - 钢粘结体是由 EFP 残体和冲塞块顶部共同组成的,这与激光高速摄影得到的图像是相吻合的。另外,二者的靶后破片云轮廓也是接近的。激光高速摄影中靶后破片云的上下不对称,主要是由于 EFP 的着靶距离很大(100 m),在飞行过程中难免会存在一定的俯仰偏航,使其在着靶时并非严格意义上的正侵彻。尽管 EFP 在着靶前存在的着靶角很小,但却使得数值仿真的结果与试验所得的激光高速摄影照片有一定差异。但是总体而言,数值仿真中的靶后破片云与试验所得的靶后破片云是基本吻合的,这表明本文的数值仿真结果是具有可信性的。

对比试验中靶后破片云最前端的铜 - 钢粘结体的轴向速度与数值仿真结果,如表 2 所示。

表 2 铜 - 钢粘结体的轴向速度

Tab. 2 Velocity of the steel-copper compound

试验/(m/s)	数值仿真/(m/s)	偏差/%
948.39	920.78	2.9

由表 2 可以发现,数值仿真所得的靶后破片云最前端的铜-钢粘结体的轴向速度与试验结果相吻合,偏差不超过 3%,这再次表明本文的数值仿真结果是具有可信性的。

将数值仿真得到的钢破片质量与试验结果以及通过文献 [18-19] 中的理论分析得到的结果作对比,如表 3 所示。在试验中为了兼顾回收效率以及回收精度,采用了 2 mm × 2 mm 孔径的筛网,可以保障质量不小于 0.5 g 的靶后破片都能被获取,故仅统计不小于 0.5 g 的靶后破片。同时,由于试验中铜破片质量为 174.90 g,与数值仿真结果 765.33 g 以及理论分析结果 719.80 g 差距较大,故不考虑铜破片。

表 3 靶板产生的靶后破片质量比较

Tab. 3 Comparison of mass of behind-armor debris from target

方法	钢破片质量/g	钢破片数量/个
试验统计	1 126.86	92
数值仿真	1 004.68	93
理论分析	1 094.67	107

由表 3 可以发现,数值仿真结果与试验统计结果和理论分析吻合,表明本文的数值仿真结果是具有可信性的。

综上所述,本文的数值仿真结果是具有可信性的,可以利用该数值仿真模型做进一步的分析与研究。

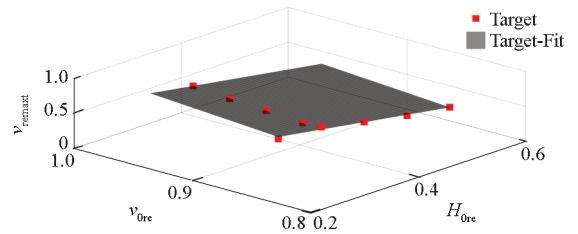
2 靶后破片空间分布模型

后文中的下标 t 表示靶板产生的靶后破片,下标 p 表示 EFP 产生的靶后破片。 $H_{0re} = H_0/D$ 表示相对靶板厚度, H_0 表示靶板厚度, $D = 125$ mm 表示 EFP 战斗部装药直径。 $v_{0re} = v_0/v_{int}$ 表示相对着靶速度, v_0 表示 EFP 着靶速度, $v_{int} = 1 950$ m/s 表示 EFP 成型速度。EFP 正侵彻靶板,“不同相对靶板厚度”表示相对着靶速度为 0.846 2,相对靶板厚度分别为 0.240 0、0.320 0、0.400 0、0.480 0 和 0.560 0;“不同相对着靶速度”表示相对着靶速度分别为 0.846 2、0.861 5、0.892 3、0.923 1 和 0.953 8,相对靶板厚度为 0.320 0。前文验证了数值仿真结果的可信性,为了分析更大的质量范围,故统计质量不小于 0.1 g 的靶后破片。

2.1 最大相对速度和相对初始条件的关系

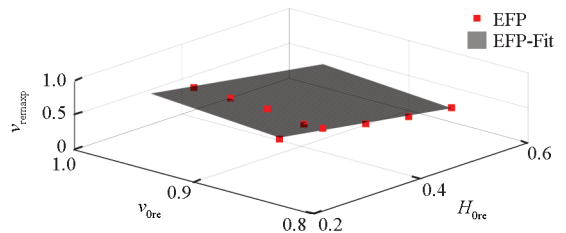
$v_{remax} = v_{max}/v_{int}$ 表示靶后破片云中破片的最大相对速度, v_{max} 表示靶后破片云中破片的最大

速度。最大相对速度和相对初始条件的关系可以通过一个平面加以表示,如图 7 所示。图 7 及后文的图中,Target 表示靶板产生的靶后破片,EFP 表示 EFP 产生的靶后破片,后缀 Fit 表示拟平面。



(a) 靶板产生的靶后破片

(a) Behind-armor debris from target



(b) EFP 产生的靶后破片

(b) Behind-armor debris from EFP

图 7 最大相对速度和相对初始条件的关系
Fig. 7 Relationship between the relative maximum velocity and the relative initial condition

图 7 的拟合平面表达式如式(1)~(2)所示。

$$v_{remax} = -1.233H_{0re} + 1.195v_{0re} + 0.05687 \quad (1)$$

$$v_{remaxp} = -1.246H_{0re} + 1.228v_{0re} + 0.04304 \quad (2)$$

式(1)~(2)的成立条件均为 $0.2400 \leq H_{0re} \leq 0.5600, 0.8462 \leq v_{0re} \leq 0.9538$,确定系数均为 0.98,表明拟合效果良好。由式(1)~(2)可以发现,最大相对速度随相对靶板厚度的减小和相对着靶速度的增加而增加。

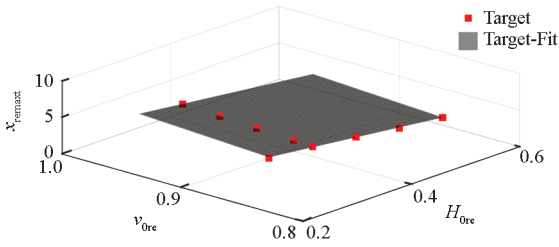
本文的确定系数均根据式(3)得到,其中, R_i^2 是确定系数, \hat{f}_{ik} 是估计值, f_{ik} 是样本值, \bar{f}_{ik} 是样本平均值。

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_k (\hat{f}_{ik} - f_{ik})^2}{\sum_k (f_{ik} - \bar{f}_{ik})^2} \quad (3)$$

2.2 相对最远空间位置和相对初始条件的关系

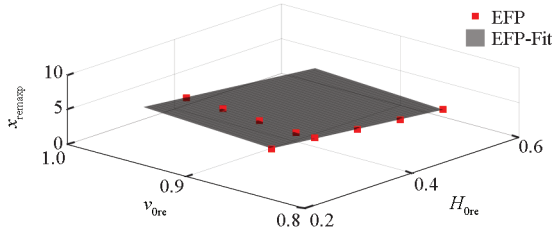
$x_{remax} = x_{max}/D$ 表示靶后破片云中破片的相对最远空间位置, x_{max} 表示靶后破片云中破片的最远空间位置,由于本文仅涉及 EFP 正侵彻靶板,因此该空间位置通常为靶后破片云顶端。相对最远空间位置和相对初始条件的关系可以通过一个平

面加以表示,如图8所示。



(a) 靶板产生的靶后破片

(a) Behind-armor debris from target



(b) EFP产生的靶后破片

(b) Behind-armor debris from EFP

图8 相对最远空间位置和相对初始条件的关系

Fig.8 Relationships between the relative farthest spatial position and the relative initial condition

图8的拟合平面表达式如式(4)~(5)所示。

$$x_{remax} = -8.592H_{ore} + 9.017v_{ore} + 0.075\ 03 \quad (4)$$

$$x_{remaxp} = -8.158H_{ore} + 9.204v_{ore} - 0.324\ 0 \quad (5)$$

式(4)~(5)的成立条件为 $0.240\ 0 \leq H_{ore} \leq 0.560\ 0, 0.846\ 2 \leq v_{ore} \leq 0.953\ 8$, 确定系数分别为 1.00、0.99。由式(4)~(5)可以发现,相对最远空间位置随相对靶板厚度的减小和相对着靶速度的增加而增加。

2.3 相对速度和相对空间位置的关系

$v_{re} = v/v_{max}$ 表示靶后破片云中破片的相对速度, v 表示靶后破片云中破片的速度; $x_{re} = x/x_{max}$ 表示靶后破片云中破片的相对空间位置, x 表示靶后破片云中破片的空间位置。相对速度和相对空间位置的关系如图9所示。

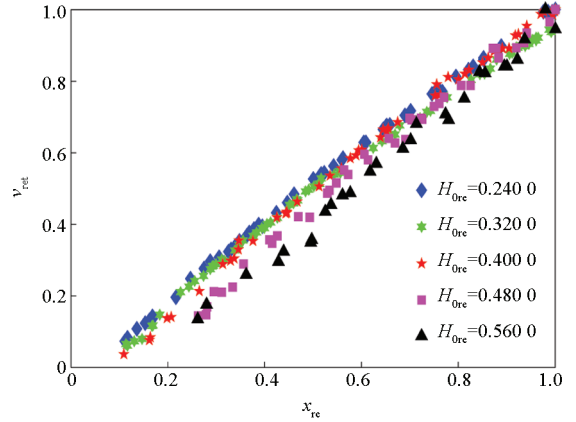
从图9(a)~(b)可以发现, v_{re} 与 x_{re} 的关系呈线性,但不同 H_{ore} 条件下的斜率不同。从图9(c)~(d)可以发现, v_{re} 与 x_{re} 的关系呈线性,不同 v_{ore} 条件下的斜率无明显差异。另外,可以认为最远空间位置处的靶后破片拥有最大的速度,因此拟合线经过(1,1)点。采用式(6)~(8)对相对速度和相对空间位置的关系进行描述。

$$v_{re} = \lambda x_{re} + (1 - \lambda) \quad (6)$$

$$\lambda_1 = 2.264H_{ore}^2 - 1.169H_{ore} + 1.153 \quad (7)$$

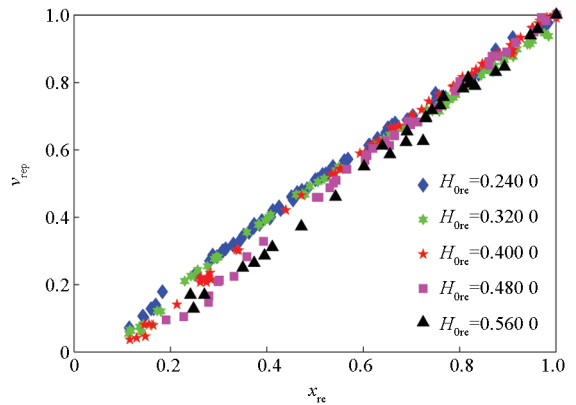
$$\lambda_p = 0.580\ 3H_{ore}^2 - 0.029\ 29H_{ore} + 0.988\ 0 \quad (8)$$

式(6)~(8)的成立条件为 $0.240\ 0 \leq H_{ore} \leq 0.560\ 0, 0.846\ 2 \leq v_{ore} \leq 0.953\ 8$ 。式(7)~(8)确定系数依次为 0.98、0.99。从式(7)~(8)可以发现,随着 H_{ore} 的增加, λ_1 先减小后增加, λ_p 一直增加,并且始终有 $\lambda_1 > 0, \lambda_p > 0$ 以及 v_{re} 始终随着 x_{re} 的增加而增加。



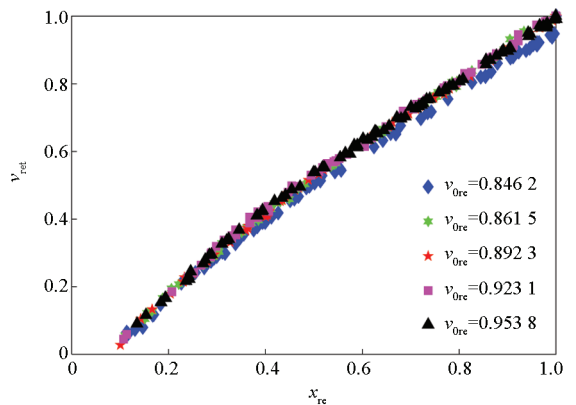
(a) 不同靶板厚度条件下靶板产生的靶后破片

(a) Behind-armor debris from target with different target thickness



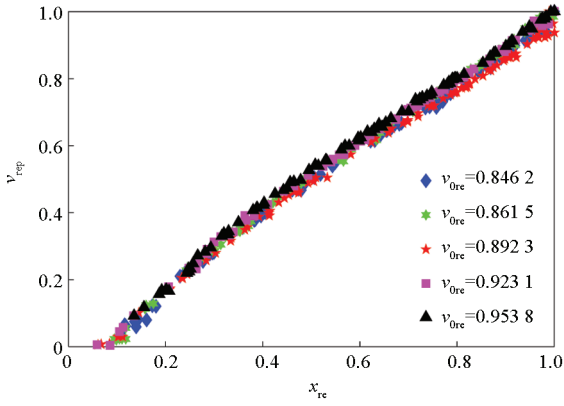
(b) 不同靶板厚度条件下EFP产生的靶后破片

(b) Behind-armor debris from EFP with different target thickness

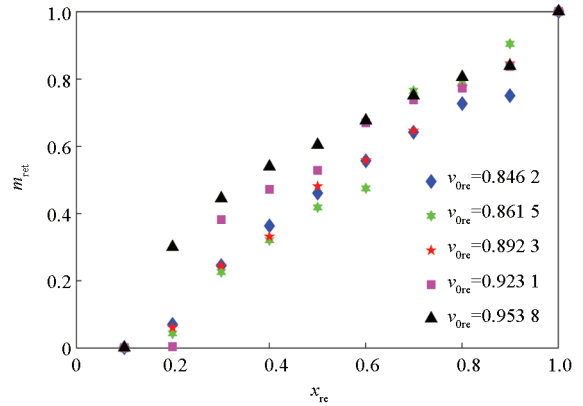


(c) 不同着靶速度条件下靶板产生的靶后破片

(c) Behind-armor debris from target with different EFP speed



(d) 不同着靶速度条件下 EFP 产生的靶后破片
(d) Behind-armor debris from EFP with different EFP speed



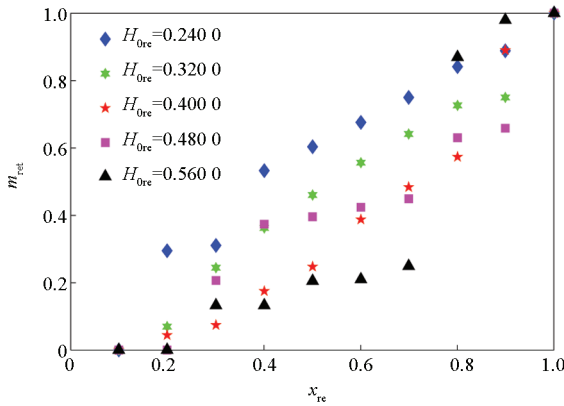
(c) 不同着靶速度条件下靶板产生的靶后破片
(c) Behind-armor debris from target with different EFP speed

图 9 相对速度和相对空间位置的关系

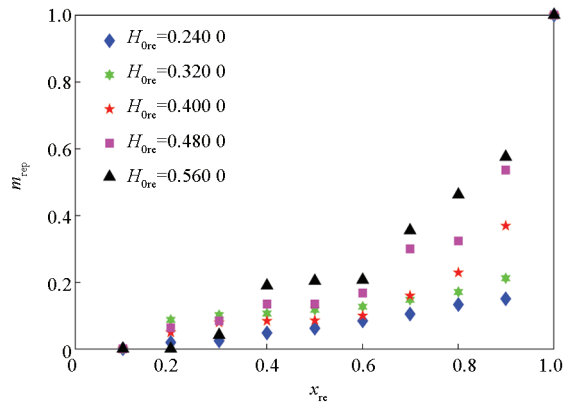
Fig. 9 Relationships between the relative velocity and the relative spatial position

2.4 相对质量和相对空间位置的关系

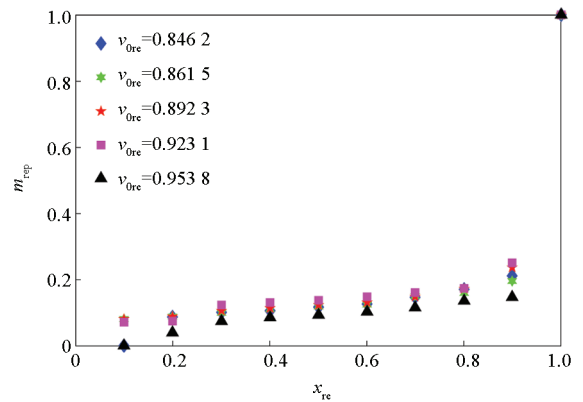
$m_{re} = m/m_{i0}$ 表示靶后破片云中破片的相对质量, m 表示靶后破片云中空间位置小于 x 的破片的质量, m_{i0} 表示靶后破片云中破片的总质量。相对质量和相对空间位置的关系如图 10 所示。



(a) 不同靶板厚度条件下靶板产生的靶后破片
(a) Behind-armor debris from target with different target thickness



(b) 不同靶板厚度条件下 EFP 产生的靶后破片
(b) Behind-armor debris from EFP with different target thickness



(d) 不同着靶速度条件下 EFP 产生的靶后破片
(d) Behind-armor debris from EFP with different EFP speed

图 10 相对质量和相对空间位置的关系

Fig. 10 Relationships between the relative mass and the relative spatial position

从图 10(a) ~ (b) 可以发现, m_{re} 与 x_{re} 的关系呈幂函数, 但不同 H_{ore} 条件下对应的幂函数关系明显不同。从图 10(c) ~ (d) 可以发现, m_{re} 与 x_{re} 的关系呈幂函数, 不同 v_{ore} 条件下对应的幂函数关系无明显差异。另外, 由横纵坐标的定义可知, 各个工况下的拟合线均经过 (1, 1) 点。采用式 (9) ~ (11) 对相对质量和相对空间位置的关系进行描述。

$$m_{re} = x_{re}^{\beta} \quad (9)$$

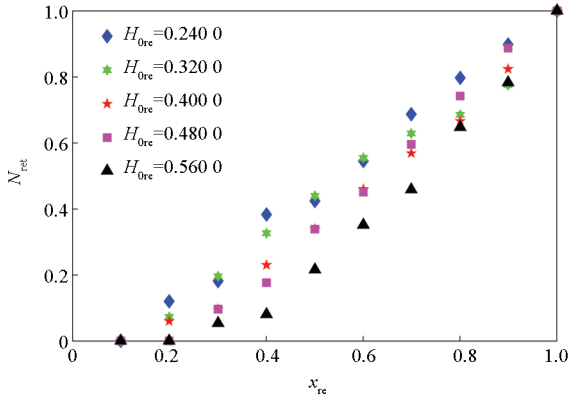
$$\beta_1 = -8.788H_{ore}^2 + 10.92H_{ore} - 1.266 \quad (10)$$

$$\beta_p = 80.97H_{ore}^2 - 105.6H_{ore} + 36.57 \quad (11)$$

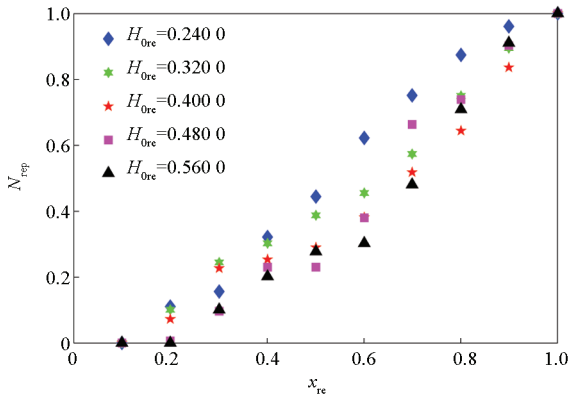
式 (9) ~ (11) 的成立条件为 $0.2400 \leq H_{ore} \leq 0.5600$, $0.8462 \leq v_{ore} \leq 0.9538$ 。式 (10) ~ (11) 确定系数分别为 0.84、0.99。从式 (10) ~ (11) 可以发现, 随着 H_{ore} 的增加, β_1 一直增加, β_p 一直减小, 并且始终有 $\beta_1 > 0, \beta_p > 0$ 。

2.5 相对数量和相对空间位置的关系

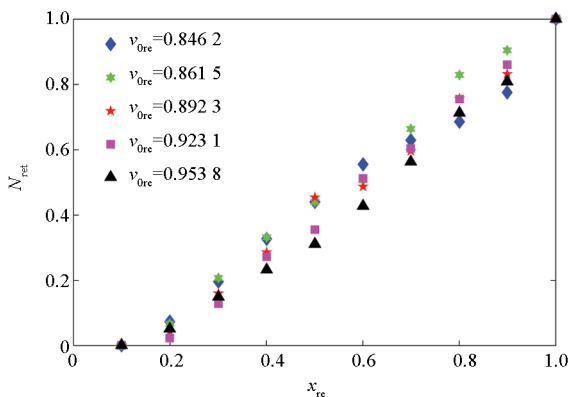
$N_{re} = N/N_{t0}$ 表示靶后破片云中破片的相对数量, N 表示靶后破片云中空间位置小于 x 的破片的相对数量, N_{t0} 表示靶后破片云中破片的总数量。相对数量和相对空间位置的关系如图 11 所示。



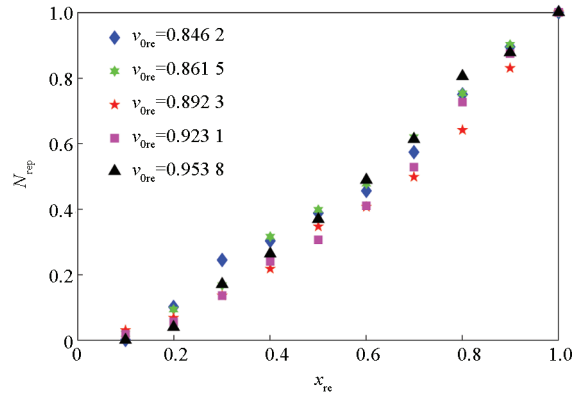
(a) 不同靶板厚度条件下靶板产生的靶后破片
(a) Behind-armor debris from target with different target thickness



(b) 不同靶板厚度条件下 EFP 产生的靶后破片
(b) Behind-armor debris from EFP with different target thicknesses



(c) 不同着靶速度条件下靶板产生的靶后破片
(c) Behind-armor debris from target with different EFP speed



(d) 不同着靶速度条件下 EFP 产生的靶后破片
(d) Behind-armor debris from EFP with different EFP speed

图 11 相对数量和相对空间位置的关系
Fig. 11 Relationships between the relative number and the relative spatial position

由图 11 (a) ~ (b) 可以发现, 当 v_{ore} 一定而 H_{ore} 变化时, N_{re} 随 x_{re} 的增加呈幂函数增加。由图 11 (c) ~ (d) 可以发现, 当 H_{ore} 一定而 v_{ore} 变化时, N_{re} 随 x_{re} 的增加呈幂函数增加。另外, 由纵横坐标的定义可知, 各个工况下的拟合线均经过 (1, 1) 点。采用式 (12) 对相对数量和相对空间位置的关系进行描述。

$$N_{re} = x_{re}^{1.534} \quad (12)$$

采用式 (12) 描述各工况时的确定系数如表 4 所示。从表 4 可以发现, 确定系数均接近于 1.00, 表明使用式 (12) 作为上述 9 种工况下的 18 组数据的拟合公式是合理的。

表 4 各工况下的确定系数

Tab. 4 Working condition and determination coefficient

序号	工况		确定系数	
	v_{ore}	H_{ore}	Target	EFP
1	0.846 2	0.240 0	0.98	0.90
2	0.846 2	0.320 0	0.96	0.99
3	0.846 2	0.400 0	0.99	0.97
4	0.846 2	0.480 0	1.00	0.98
5	0.846 2	0.560 0	0.97	0.97
6	0.861 5	0.320 0	0.97	0.99
7	0.892 3	0.320 0	0.99	0.97
8	0.923 1	0.320 0	1.00	0.99
9	0.953 8	0.320 0	0.99	0.99

3 靶后破片空间分布模型验证

由于在试验中极难准确地测量并统计所有靶

后破片的速度(质量、动能、数量)与空间位置的关系、区分靶后破片来源(靶板或 EFP),因此进行 2 组数值仿真,以验证 EFP 贯穿靶板靶后破片空间分布模型的可靠性。EFP 正侵彻靶板,第一组初始条件为 $H_{ore} = 0.480\ 0$ 、 $v_{ore} = 0.892\ 3$,第二组初始条件为 $H_{ore} = 0.560\ 0$ 、 $v_{ore} = 0.861\ 5$ 。由式(1)~(2)可以得到最大相对速度,由式(4)~(5)可以得到相对最远空间位置,其结果列于表 5~6,并与相应的数值仿真结果进行对比。

表 5 最大相对速度和相对最远空间位置(第一组)

Tab.5 Relative maximum velocity and relative farthest spatial position (the 1st group)

方法	v_{remax}		x_{remax}	
	Target	EFP	Target	EFP
空间分布模型	0.531 2	0.540 6	3.997	3.973
数值仿真	0.579 4	0.579 5	4.128	4.093
偏差/%	-8.319	-6.713	-3.173	-2.932

表 6 最大相对速度和相对最远空间位置(第二组)

Tab.6 Relative maximum velocity and relative farthest spatial position (the 2nd group)

方法	v_{remax}		x_{remax}	
	Target	EFP	Target	EFP
空间分布模型	0.395 9	0.403 2	3.032	3.037
数值仿真	0.403 3	0.400 8	3.271	3.096
偏差/%	-1.835	0.599	-7.307	-1.906

由表 5~6 可以发现,由空间分布模型得到的最大相对速度和相对最远空间位置与相应的数值仿真的结果均是比较吻合的,表明空间分布模型是可靠的。

设 E_{kre} 表示空间位置介于 x_{re1} 和 x_{re2} 之间的靶后破片云中破片的相对动能, $E_{kre} = E_k/E_{ke}$; E_{ke} 表示靶后破片云中破片的最大动能, $E_{ke} = 0.5 \cdot m_{to} \cdot v_{max}^2$; E_k 表示空间位置介于 x_{re1} 和 x_{re2} 之间的靶后破片云中破片的真实动能, $E_k = 0.5 [(m_{re1} - m_{re2})m_{to}] \cdot [(v_{re1} + v_{re2})v_{max}/2]^2$; $m_{re1} - m_{re2}$ 表示空间位置介于 x_{re1} 和 x_{re2} 之间的靶后破片云中破片的相对质量; $0.5(v_{re1} + v_{re2})$ 表示空间位置介于 x_{re1} 和 x_{re2} 之间的靶后破片云中破片的平均速度。相对动能与相对空间位置的关系如式(13)。

$$E_{kre} = (m_{re1} - m_{re2}) \left(\frac{v_{re1} + v_{re2}}{2} \right)^2 \quad (13)$$

第一组的相对动能与相对空间位置的关系如

图 12 所示,曲线由空间分布模型得到,数据点由数值仿真得到,其中, $\beta_1 = 1.951$, $\lambda_1 = 1.114$, $\beta_p = 4.537$, $\lambda_p = 1.108$, $\Delta x_{re} = 0.1$ 。

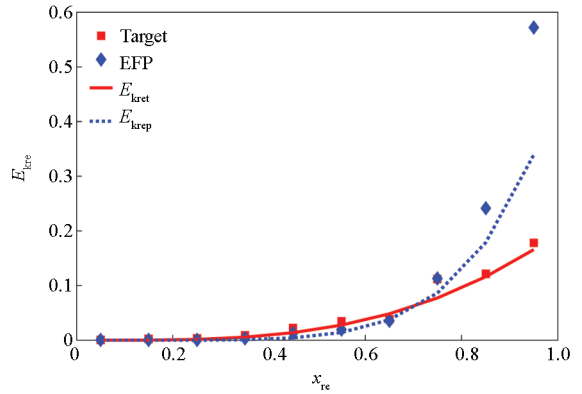


图 12 相对动能与相对空间位置的关系(第一组)

Fig.12 Relationship between the relative kinetic energy and the relative spatial position (the 1st group)

第二组的相对动能与相对空间位置的关系如图 13 所示,曲线由空间分布模型得到,数据点由数值仿真得到,其中, $\beta_1 = 2.093$, $\lambda_1 = 1.208$, $\beta_p = 2.826$, $\lambda_p = 1.154$, $\Delta x_{re} = 0.1$ 。

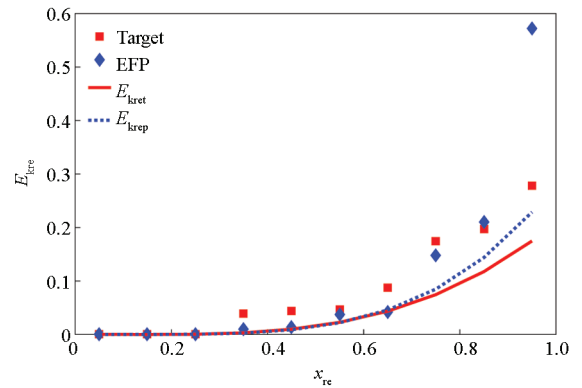


图 13 相对动能与相对空间位置的关系(第二组)

Fig.13 Relationship between the relative kinetic energy and the relative spatial position (the 2nd group)

在图 12~13 中,相对位置介于 $n\Delta x_{re}$ 和 $(n+1)\Delta x_{re}$ 之间的所有靶后破片的相对动能之和,以横坐标为 $x_{re} = 0.05 + n\Delta x_{re}$ 的点表示,其中 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 。由于此次数据统计中仅收集了 10 个点,所以曲线不够光滑。从图 12~13 中可以发现,分布模型均可以有效地预测数据点的变化趋势,以上均表明空间分布模型是可靠的。

第一组的相对数量和相对空间位置的关系如图 14 所示,曲线由空间分布模型得到,数据点由数值仿真得到。

第二组的相对数量和相对空间位置的关系如

图 15 所示,曲线由空间分布模型得到,数据点由数值仿真得到。

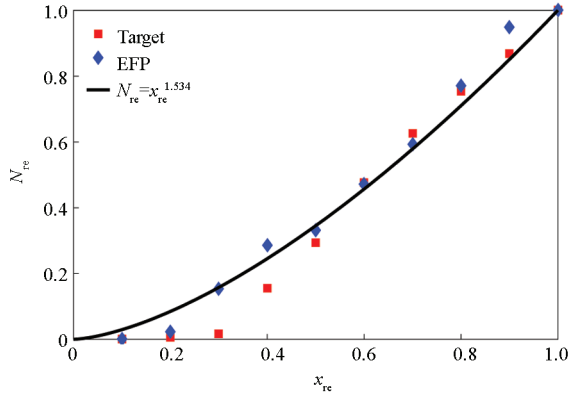


图 14 相对数量和相对空间位置的关系(第一组)

Fig. 14 Relationship between the relative number and the relative spatial position (the 1st group)

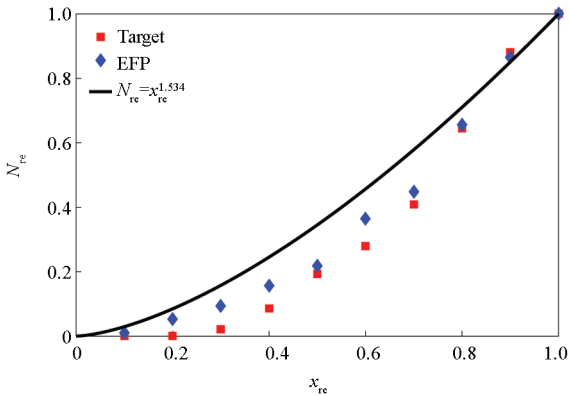


图 15 相对数量和相对空间位置的关系(第二组)

Fig. 15 Relationship between the relative number and the relative spatial position (the 2nd group)

图 14 中靶板和 EFP 的确定系数分别为 0.97 和 0.98,图 15 中靶板和 EFP 的确定系数分别为 0.89 和 0.95,均表明空间分布模型是可靠的。同时,可以发现相对数量随相对空间位置的增加而呈指数增加。

综上所述,空间分布模型是可靠的。

4 结论

本文建立了 EFP 贯穿靶板靶后破片空间分布模型,考虑了 EFP 变截面的特点,可以在区分靶后破片来源(来自靶板或 EFP)的基础上快速预测靶后破片云中所有破片的速度(质量、动能、数量)与其空间位置的定量关系,可以为建立毁伤评估软件系统奠定基础,为深空撞击载荷相关试验的设计提供一定的指导,并得到以下几点规律。

1)最大相对速度、相对最远空间位置随相对

靶板厚度的减小而增加,最大相对速度、相对最远空间位置随 EFP 相对着靶速度的增加而增加;

2)相对速度总是随相对空间位置的增加而呈线性增加,相对质量、相对数量总是随相对空间位置的增加而呈幂函数增加;

3)通过靶后破片空间分布模型得到的最大相对速度和相对最远空间位置与数值仿真结果偏差的绝对值的均值为 4.098%。

4)通过靶后破片空间分布模型得到的相对数量和相对空间位置的关系与数值仿真结果的确定系数的均值为 0.95。

致谢

埃因霍温理工大学(Eindhoven University of Technology)的博士生刘磊在论文撰写阶段与作者们进行了富有成果的讨论,谨致谢意!

参考文献(References)

- [1] 马鑫,周琪,李明涛,等.深空撞击载荷总体技术分析 with 效能仿真[J].中国空间科学技术,2021,41(1):120-130.
MA X, ZHOU Q, LI M T, et al. Overall technology analysis and efficiency simulation of the deep space impactor[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(1): 120-130. (in Chinese)
- [2] 周成,袁渊,于存贵,等.某深空撞击器侵彻试验研究[J].南京理工大学学报,2020,44(3):354-358,378.
ZHOU C, YUAN Y, YU C G, et al. Experimental study on penetration of deep space impactor[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2020, 44(3): 354-358, 378. (in Chinese)
- [3] CORVONATO E, DESTEFANIS R, FARAUD M. Integral model for the description of the debris cloud structure and impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26: 115-128.
- [4] PIEKUTOWSKI A J. A simple dynamic model for the formation of debris clouds[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10: 453-471.
- [5] PIEKUTOWSKI A J. Characteristics of debris clouds produced by hypervelocity impact of aluminum spheres with thin aluminum plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14: 573-586.
- [6] PIEKUTOWSKI A J. Fragmentation of a sphere initiated by hypervelocity impact with a thin sheet[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17: 627-638.
- [7] PIEKUTOWSKI A J. Effects of scale on debris cloud properties[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 20: 639-650.
- [8] PIEKUTOWSKI A J. Debris clouds produced by the hypervelocity impact of nonspherical projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26: 613-624.
- [9] PIEKUTOWSKI A J. Fragmentation-initiation threshold for spheres impacting at hypervelocity[J]. International Journal

- of Impact Engineering, 2003, 29: 563 – 574.
- [10] SCHÄFER F K. An engineering fragmentation model for the impact of spherical projectiles on thin metallic plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33: 745 – 762.
- [11] WANG X, JIANG J W, SUN S J, et al. Investigation on the spatial distribution characteristics of behind-armor debris formed by the perforation of EFP through steel target [J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 119 – 135.
- [12] 王昕, 蒋建伟, 王树有, 等. 爆炸成型弹丸侵彻钢靶的后效破片云实验研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1284 – 1290.
- WANG X, JIANG J W, WANG S Y, et al. Experimental research on fragments after explosively-formed projectile penetrating into steel target [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(7): 1284 – 1290. (in Chinese)
- [13] WANG Y Y, JIANG J W, MENG J Y, et al. Effect of add-on explosive reactive armor on EFP penetration [C]// Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics, 2016.
- [14] 黄炫宁, 李伟兵, 郭腾飞, 等. EFP 垂直侵彻靶板后效破片云形状描述 [J]. 含能材料, 2020, 28(11): 1068 – 1075.
- HUANG X N, LI W B, GUO T F, et al. Shape description of behind-armor debris cloud from vertical penetration of target plate by EFP [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(11): 1068 – 1075. (in Chinese)
- [15] DALZELL M W, HAZELL P J, MEULMAN J H. Modelling behind-armor debris formed by the perforation of an EFP through a steel target [C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, 2002: 786 – 793.
- [16] YOSSFON G, YARIN A L. Behind-the-armor debris analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27: 807 – 835.
- [17] WU J, LIU J B, DU Y X. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1147 – 1162.
- [18] XING B Y, GUO R, HOU Y H, et al. The mass distribution of behind-armor debris generated during the normal penetration of variable cross-section explosive formed projectile on rolled homogeneous armor steel [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 129: 12 – 25.
- [19] XING B Y, ZHANG D J, GUO Z Y, et al. Analysis of the mass of behind-armor debris generated by RHA subjected to normal penetration of variable cross-section EFP [J]. Defence Technology, 2019, 15(3): 390 – 397.