

文章编号:1006-9941(2020)11-1068-08

EFP垂直侵彻靶板后效破片云形状描述

黄炫宁¹,李伟兵¹,郭腾飞²,李文彬¹,王晓鸣¹

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了准确描述爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)垂直侵彻有限厚靶板后效破片云的形状,基于量纲分析及正交设计理论,利用AUTODYN软件中SPH算法研究了EFP成型参数、弹靶材料参数对靶后破片云形状的影响,建立了EFP垂直侵彻靶后破片云形状的数学描述模型。利用该模型计算了EFP垂直侵彻靶后破片云形状参量长半轴,并和仿真结果及相关试验结果进行对比,结果表明,该模型计算的后效破片云长半轴结果与相关试验结果误差控制在3%以内,能够准确描述EFP垂直侵彻有限厚靶板后效破片云的形状。

关键词: 爆炸成型弹丸(EFP);垂直侵彻;靶后破片云;光滑质点流体力学(SPH);描述模型

中图分类号: TJ55;O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019297

1 引言

爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)战斗部对装甲目标毁伤效能的评估取决于EFP的侵彻深度和靶板后效破片对装甲目标内部仪器、仪表及有生力量的打击能力。随着数值模拟研究手段的日趋成熟,国内外学者对EFP毁伤元的成型、稳定飞行以及侵彻的研究取得了长足的进步,积累了大量研究数据^[1-3]。但针对EFP侵彻有限厚靶板的后效研究相对较少,未能全面、准确地评估EFP对装甲目标的毁伤效能,因此EFP的靶后效应研究以及EFP对装甲目标毁伤效能评估应是下一步研究工作的重点。

Arnold W^[4]提出聚能射流(JET)的靶后破片云为空心椭球。相较于JET,EFP弹径较粗,侵彻孔径较大,穿透靶板后在装甲目标内部会形成毁伤面积相对较大

的破片场。Carleone J^[5]基于X光试验结果,对比分析了JET和EFP的侵彻后效,结果表明,EFP靶后破片的密集度及数量大于JET,因此,针对EFP靶后效应的研究逐步展开。Kim H S^[6]等在不考虑质量大、速度低的环状破片的情况下,建立了靶板后效破片云椭圆参数方程,得到了靶后破片的散布特性、最大径向飞散速度。针对靶后效应仿真方法的研究,Dalzell M W^[7]等采用AUTODYN软件中的SPH算法对EFP侵彻靶板后效破片进行仿真研究,认为SPH算法对靶后破片的模拟优于Lagrange、Euler算法。国内学者对靶后破片的研究多基于动能杆式弹^[8-9],对EFP后效的研究则相对较少,主要基于工程试验、侵彻理论对EFP靶后破片的数量、质量等分布特性进行研究。张先锋^[10]通过建立的EFP侵彻有限厚靶板模型,计算得到了侵彻体剩余长度、剩余速度等后效参数。王昕^[11-12]等通过试验研究了不同靶板厚度对EFP靶后破片数量散布及侵彻能力的影响,且采用FEM-SPH自适应转换算法,得到了靶后破片数量、速度空间分布的工程计算模型。邢柏阳^[13-14]考虑EFP变截面的特性,改进了EFP靶后破片质量模型,并得到了平均应变率和Mott公式的拟合因子,从而获得了靶后破片数量和质量分布的计算方法。而关于EFP后效破片云形状的研究中,叶严^[15]在一定的假设基础上,从崩落环的飞散特性出发,建立了EFP垂直侵彻靶后破片云形状描述模型,破片云长半轴、短半

收稿日期:2019-11-26;修回日期:2020-03-17

网络出版日期:2020-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(11972018),装备预研兵器工业联合基金(6141B012858),江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYCX19_0328)

作者简介:黄炫宁(1994-),男,博士研究生,主要从事弹丸高效毁伤与终点效应研究。e-mail:njhxuaning@163.com

通信联系人:李伟兵(1982-),男,副研究员,博士生导师,主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究。e-mail:njustlwb@163.com

引用本文: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 Xuan-ning, LI Wei-bing, GUO Teng-fei, et al. Shape Description of Behind-armor Debris Cloud from Vertical Penetration of Target Plate by EFP[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(11):1068-1075.

轴均为靶板背面最大开孔孔径的单值线性函数。曹兵^[16]、王昕^[11-12]采用 X 光摄像技术获得了 EFP 靶后破片云形状,计算了飞散角、长短轴之比,但是没有具体给出破片云形状参数的与弹靶参数的定量关系。

上述研究中 EFP 后效破片云形状描述模型主要涉及了靶板背面最大开孔直径,并未涉及 EFP 参数。而空间防护领域中超高速碰撞碎片云形状描述发展较成熟,区分了弹丸碎片云、薄板碎片云和中心大碎块^[17],且涉及多层薄板的各层碎片云形状^[18]。

因此,为了准确描述 EFP 垂直侵彻有限厚靶板后效破片云的形状,本研究基于量纲分析和正交设计理论,结合数值模拟的研究手段建立了破片云形状参量与 EFP 成型参量、弹靶材料参量的关系,并将计算结果与仿真结果及相关试验结果进行了对比,以期对破片云对靶后目标的毁伤效能评估工作提供参考。

2 破片云形状分析及基本假设

EFP 对有限厚靶板的侵彻过程可分为塑性侵彻阶段、剪切带或拉伸断面的形成阶段、冲塞穿透或崩落飞出阶段^[10]。当剪切带或崩落拉伸断面完全形成后,剩余 EFP 从靶体冲出,其后跟随着弹、靶材料的碎片以及靶板背面的崩落环,将这些具有杀伤力的破片称为靶后破片。靶后破片在飞散过程中经碰撞、冲击波冲击等作用,形成某一稳定状态等比例地向外膨胀,将达到稳定状态瞬时的靶后破片云称为初始靶后破片云^[19]。

典型的破片云形状如图 1 所示:破片云整体呈椭球形,最前端为剩余 EFP,中间部分为 EFP 和靶板材料的碎片,最末端是由冲击波运动至靶板背部自由界面(空气阻抗远小于靶板阻抗,可近似为自由界面)反射形成的拉伸波导致靶背崩落生成的崩落环。当崩落拉伸断面完全形成后,剩余 EFP、弹靶材料碎片、靶板崩落物经 P(靶板背面与弹轴线的交点)点喷发,向外飞散。由于崩落环质量大、速度低^[4,6],且其空间分布不符合大部分破片的分布规律(整体呈椭球形),不予考虑,据此可以认为破片云最前端至靶板背面的距离为破片云长轴长 $2a$,破片云中垂直弹轴方向最大截面直径为短轴长 $2b$ 。

考虑靶后破片的形成及飞散过程极其复杂,从鼓包破裂到靶后破片云形成之间的时间间隔非常短^[19],且稳定后的破片云长轴随时间近似呈线性增大^[20-21],为了对问题进行简化,在后续研究中进行如下假设:

(1) 破片云形态可以描述为一个空心椭球^[4,6];

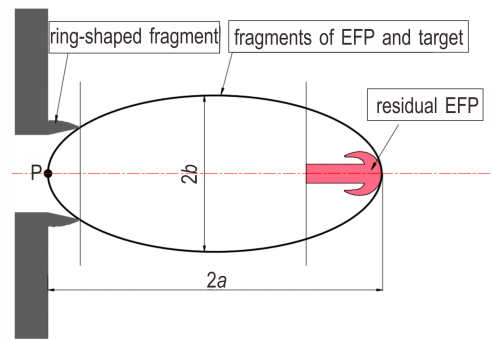


图 1 破片云形状示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of the debris cloud shape

(2) 当崩落拉伸断面完全形成后,认为靶后破片直接进入初始靶后破片云阶段,即以稳定状态等比膨胀;

(3) 破片云中所有破片均由 P(见图 1)点喷发,且沿初始飞散方向作匀速直线运动。

3 基本模型

3.1 破片云形态影响因素分析

依据假设(1),靶后破片云的形态可以通过一个简单的椭球方程进行描述。考虑到对称性,可以简化为一个椭圆方程。故在图 1 的基础上建立以下坐标系:以 P 点为原点,以 EFP 飞行方向为 x 轴正向,以向上飞散的破片径向飞散速度方向为 y 轴正向。那么,初始靶后破片云的形状就可以描述为:

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

根据方程(1),只要确定长半轴 a 及短半轴 b 的值,就可以确定椭圆方程。再由假设(2),破片群体进入初始靶后破片云阶段后,椭圆长半轴与短半轴的比值就成为了一个相对固定的值,将该比值定义为 E (即 $E=a/b$),取 $E=1.5$ ^[21]。式(1)可转化为

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{(a/E)^2} = 1 \quad (2)$$

对于式(2),得到参量 a 就可以对初始靶后破片云的形状进行数学描述。故应当建立破片云长半轴 a 与 EFP、靶板参数的关系。

在侵彻行为中,影响侵彻效率最关键的因素为弹靶材料密度比。故影响破片云形态的主要因素为 EFP 的成型参数(实心长度 l 、最大实心直径 d 、着靶速度 v),靶板厚度 t 、弹靶材料参数(药型罩密度 ρ_p 、靶板密度 ρ_t 、靶板屈服极限 Y 以及靶板杨氏模量 E_t)。所涉及的弹靶参数如图 2 所示。

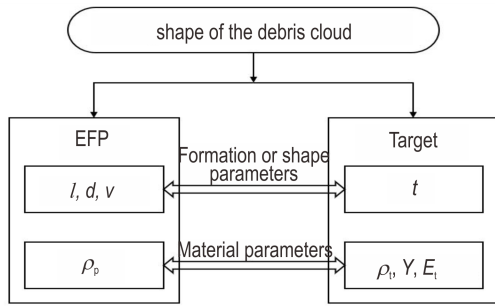


图2 破片云形态的影响因素

Fig.2 Influencing factors of the debris cloud shape

3.2 长半轴 a 的量纲分析

模型试验是解决物理模型尚不清楚的问题的有效办法,通过模型试验或数值模拟的方法得到

$$\Pi = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \tag{3}$$

式中, n 为该物理模型所涉及的所有物理量的个数, k 为独立量纲参量的最大数目。只要使得模型中的 $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$ 与原型分别对应相等, 该物理问题便相似。层裂不服从几何相似率^[22], 并且引起的靶后破片主要为质量大、速度低的环状破片, 在本研究中不予考虑。在剔除崩落环的情况下, 研究长半轴的相似性。

根据图2可得:

$$a = f(l, d, v; t; \rho_p; \rho_t, Y, E_t) \tag{4}$$

选取 d, ρ_p, Y 为基本量, 通过量纲变换可以将上式转化为几个无量纲量之间的关系, 即:

$$\frac{a}{d} = f\left(\frac{l}{d}, \frac{v}{\sqrt{\frac{Y}{\rho_p}}}, \frac{t}{d}, \frac{\rho_t}{\rho_p}, \frac{E_t}{Y}\right) \tag{5}$$

式中, 有三项物理参量, 两项几何参量, 若模型与原型速度相同、弹靶材料相同、几何相似, 则模型与原型相似。

为了确定式(5)中的 f , 结合式中的参量对杆式弹正撞击靶后破片云长半轴的工程模型进行修正。由文献^[19]可得杆式弹正撞击靶板后破片云长半轴为:

$$a_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{f_0 \cdot \tan \theta_{\max}} + E^2 f_0 \cdot \tan \theta_{\max} \right) \cdot d_p \cdot \left[3.4 \left(\frac{t_r}{d_p} \right)^3 \left(\frac{V_i}{C_T} \right) + 0.8 \right] \tag{6}$$

式中, f_0, E 均为试验常数, 由试验确定, θ_{\max} 为靶后破片最大飞散角, 一般为 50° 左右, 因此, $\frac{1}{4} \left(\frac{1}{f_0 \cdot \tan \theta_{\max}} + E^2 f_0 \cdot \tan \theta_{\max} \right)$ 可视为试验常量。 d_p 为杆弹直径、 t_r 为靶板厚度、 V_i 为弹丸着靶速度、 C_T 为应力波在靶板材料中的传播速度。

结合式(5)对式(6)进行修正, 增加式(5)中相应的无量纲量修正项, 从而引入 EFP 实心长度 l 、弹靶材料密度 ρ_p, ρ_t 、靶板屈服极限 Y 以及靶板杨氏模量 E_t 等

参量, 能够反映 EFP 成型参数、弹靶材料参数对破片云形状的影响。则初始靶后破片云长半轴可以表示为:

$$a = A \cdot d \cdot \left[B \cdot \left(\frac{t}{d} \right)^m \cdot \left(\frac{l}{d} \right)^n \cdot \left(\frac{v}{10^3 \sqrt{\frac{Y}{\rho_p}}} \right)^p \cdot \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^q \cdot \left(\frac{E_t}{Y} \right)^r + C \right] \tag{7}$$

式中, A, B, C, m, n, p, q, r 为待拟合参数; d 为 EFP 最大实心直径, mm; l 为 EFP 实心长度, mm; t 为靶板厚度, mm; v 为 EFP 着靶速度, $m \cdot s^{-1}$; ρ_p, ρ_t 分别为药型罩、靶板的密度, $g \cdot cm^{-3}$; Y, E_t 分别为靶板屈服极限、杨氏模量, GPa; a 为初始靶后破片云长半轴, mm。只要确定出待拟合参数的具体数值, 就可以建立长半轴 a 与 EFP、靶板参数的关系, 进而可以对初始靶后破片云形状进行准确描述。

4 初始靶后破片云形状描述与验证

4.1 EFP 等效模型的建立

通过大量的数值模拟对式(7)进行参数拟合, 就需要研究 EFP 的各个成型参数对初始靶后破片云形状的影响。但由于 EFP 的成型受药型罩结构、装药结构、起爆点位置等诸多因素的影响, 很难对单个成型参数进行规律性定量调控, 而目前大多数研究^[1, 12, 23-24]都是通过建立 EFP 的等效模型来解决该问题, 且解决了 EFP 从成型、飞行、侵彻到靶后破片飞散等一系列过程所涉及的网格畸变、计算量大的问题, 提高计算精度。故有必要先建立 EFP 的等效模型。

4.1.1 形状模拟

采用装药口径为 D_k 、装药高度为 H 、壳体厚度为 t_s 的成型装药结构, 如图3所示, 炸药采用 JH-2, 药型罩材料为紫铜, 起爆模式为药型罩顶端单点起爆。经过数值模拟计算, EFP 的实心长度 l 为 56.948 mm、最大实心直径 d 为 24.444 mm、着靶速度 v 为 $2317 m \cdot s^{-1}$, 对 45°

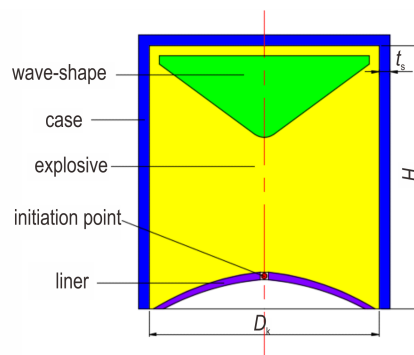


图3 成型装药结构图

Fig.3 The diagram of shaped charge

钢靶的侵彻深度 h 为 77.720 mm。EFP 成型形状如图 4a 所示,在此基础上建立 EFP 的等效模型如图 4b 所示。EFP 模拟弹与真实 EFP 的具体参数如表 1 所示。

由图 4 及表 1 可知,EFP 模拟弹与真实 EFP 在形状和质量上相近。由于弹丸的侵彻行为直接影响着靶后破片的特性,因此,为了进一步验证该模拟弹的等效性,将真实 EFP 与 EFP 模拟弹的侵彻效果进行对比研究。

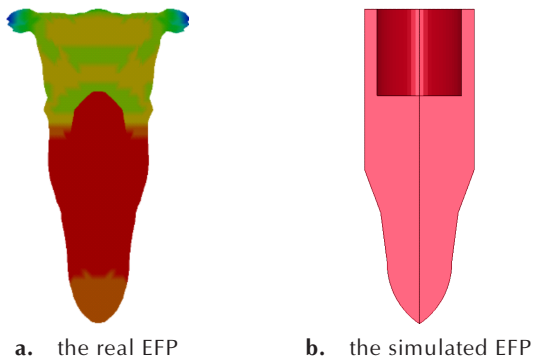


图 4 EFP 形状

Fig.4 The shape of EFP

表 1 EFP 模拟弹和真实 EFP 的参数对比

Table 1 Comparison of parameters between the real EFP and the simulated EFP

projectile	solid length / mm	maximum solid diameter / mm	volume / cm ³	mass / g
real EFP	56.948	24.444	23.732	212.639
simulated EFP	55.450	26.000	22.444	201.098

4.1.2 侵彻效果验证

EFP 的侵彻性能主要为侵彻深度、侵彻孔径。其中:侵彻深度决定了弹丸对靶板的穿透能力,进而影响靶后破片云的形成与头部膨胀速度;根据文献^[6,15,19,25],入孔直径与靶板后效破片的形成及飞散过程无直接关联,因此,本研究对侵彻深度、出孔孔径进行对比验证。

考虑 EFP 模拟弹的材料为紫铜,屈服极限较低,试验中利用火炮发射很难保证弹丸在满足发射强度的条件下加速到真实 EFP 的速度($2317 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),为了便于研究,利用 AUTODYN 仿真软件,建立 EFP 模拟弹侵

表 2 EFP 模拟弹和靶板的材料模型

Table 2 Material model of the simulated EFP and target plate

part	material	equation of stste	strength model	erosion model	erosion strain
simulated EFP	copper	liner	Johnson Cook	Inst. Geom. Strain	4
target plate	45*steel	shock	Johnson Cook	Inst. Geom. Strain	2

彻钢锭的二维轴对称仿真模型,如图 5 所示,侵彻靶板直径为 180 mm,厚度为 100 mm。弹丸与靶板均采用 Lagrange 算法,两个 Part 的材料模型如表 2 所示,具体材料参数见表 3^[26]。赋予 EFP 模拟弹 $2317 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初始速度,计算该模拟弹对钢锭的侵彻,得到其侵彻深度 h 为 78.18 mm。

针对图 3 所示成型装药结构,进行 EFP 威力侵彻试验,试验布置如图 6 所示,靶块的材料及尺寸与仿真完全相同,测量侵彻深度为 85 mm。

对比侵彻深度可知,真实 EFP 与 EFP 模拟弹对钢靶侵彻深度的仿真值基本一致,与真实 EFP 试验值的误差均控制在 8% 左右。并计算获得靶板厚度分别为 20, 30, 40 mm 和 50 mm 时,真实 EFP 与 EFP 模拟弹的侵彻出孔孔径 D_c ,如图 7 所示。分析图 7 可知:真实 EFP 与 EFP 模拟弹的侵彻出孔孔径与靶板厚度均呈正相关,且同一靶板厚度下,两者相对误差在 8% 以内。

综上,可以认为该等效模型能够模拟真实 EFP 的侵彻行为,证明了等效模型的可行性。

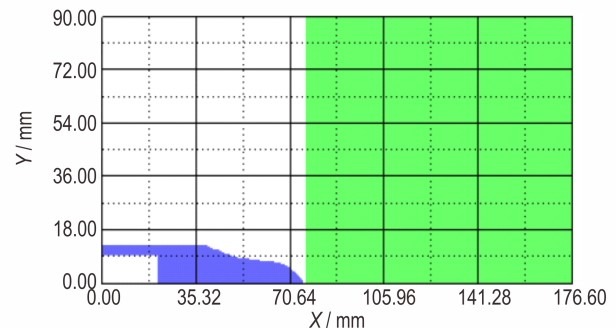


图 5 EFP 模拟弹侵彻靶板仿真模型

Fig.5 Simulation model of the penetration of target plate by simulated EFP

表 3 EFP 模拟弹及靶板材料参数

Table 3 Material parameters of the simulated EFP and target plate

part	σ_b / MPa	G / GPa	ρ / g \cdot cm ⁻³	C^*	n^*
simulated EFP	90	46	8.96	0.025	0.31
target plate	352	77	7.85	0.014	0.26

Note: σ_b is quasi-static yield stress, G is shear modulus, ρ is density, C^* is strain rate sensitivity coefficient, n^* is strain hardening exponent.

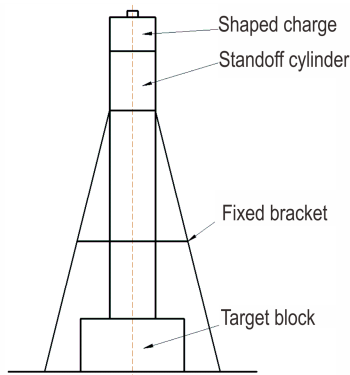


图6 EFP威力侵彻试验布置图
Fig.6 Test setup diagram of EFP penetration

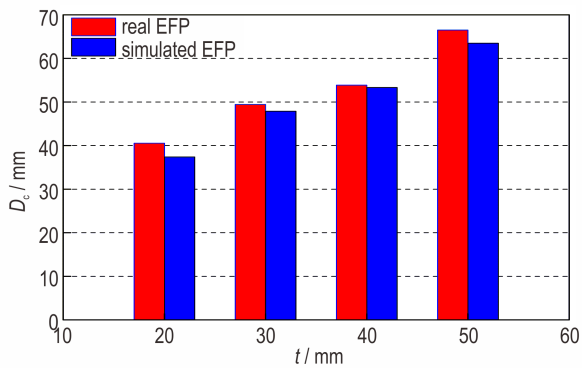


图7 不同靶板厚度下EFP的侵彻出孔孔径
Fig.7 Penetration exit hole calibers of EFP under different target thicknesses

4.2 椭圆方程的建立

基于EFP的等效模型研究EFP垂直侵彻有限厚靶板后效破片云的形状。由于Lagrange算法侵蚀失效设置的必要,在计算连续体碎裂的过程中会导致靶后破片的形成无法有效地描述。而SPH算法是一种无网格的Lagrange算法,可用于解决连续体结构的碎裂、固体的层裂、脆性断裂等问题,适用于靶板贯穿过程的计算模拟^[27]。因此,弹丸与靶板均采用SPH算法,弹丸根据图4b建立几何模型,同时建立长、宽均为200 mm的靶板模型,然后用SPH粒子进行填充,其中,SPH粒子直径为0.8 mm,在靶板边界设置固定约束,并对弹丸施加初始速度,仿真模型、弹靶材料模型及参数见图5、表2和表3。

由前文知,本研究对靶板的研究范围应限于45#钢,根据文献[10],45#钢的屈服极限 Y 为2.1 GPa、密度 ρ_s 为7.85 g·cm⁻³、杨氏模量 E_s 为209.822 GPa。因此,在靶板材料参数确定的基础上研究破片云长半轴 a 与EFP实心长度 l 、最大实心直径 d 、着靶速度 v 、密度 ρ_p 及靶板厚度 t 等参数之间的关系。

根据表1,选取EFP实心长度 l 的变化范围为38~70 mm(参量增量为8 mm);EFP最大实心直径 d 的变化范围为22~30 mm(参量增量为2 mm);EFP着靶速度 v 的变化范围为1500~2300 m·s⁻¹(参量增量为200 m·s⁻¹);EFP密度 ρ_p 为2.71,7.85,8.96,16.65 g·cm⁻³和19.22 g·cm⁻³;靶板厚度 t 的变化范围为10~50 mm(参量增量为10 mm)。

基于上述仿真方案,若进行全面研究,需要穷尽5⁵次数值计算,仿真规模过大,耗时过长。因此,利用正交设计理论,得到表4所示的正交设计因素水平表。针对表4中5因素5水平的情况,可利用正交表L₂₅进行计算分析。由于方案较多,不一一列举仿真结果,列出如图8所示的方案5、10、15、25下的初始靶后破片云图。统计 $E=1.5$ 的工况下各方案初始靶后破片云长半轴 a 的值,L₂₅及长半轴 a 的计算结果见表5。其中“-”表示弹丸未穿透靶板或靶后破片极少的情况,未作统计。

表4 正交设计因素水平表

Table 4 The level factors for orthogonal design

level	factor				
	$v/m \cdot s^{-1}$	l/mm	d/mm	$\rho_p/g \cdot cm^{-3}$	t/mm
1	1500	38	22	2.71	10
2	1700	46	24	7.85	20
3	1900	54	26	8.96	30
4	2100	62	28	16.65	40
5	2300	70	30	19.22	50

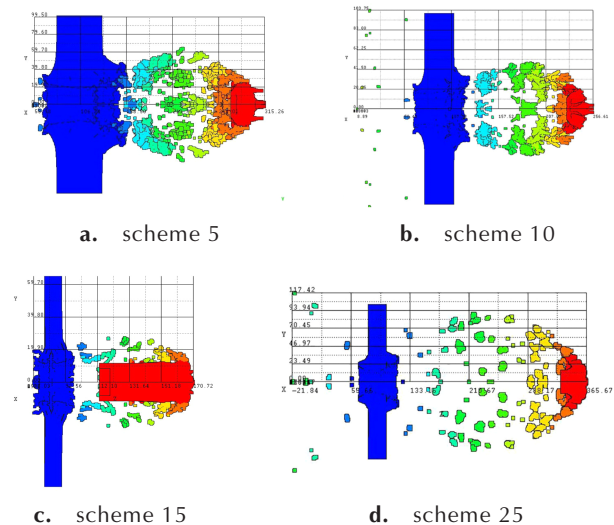


图8 方案5、10、15、25下破片云形貌图

Fig.8 Debris cloud morphology of schemes 5, 10, 15 and 25

结合表5对式(7)进行非线性函数拟合,利用Origin软件中自定义多自变量多参数函数功能,得到各拟

表5 破片云长半轴正交计算表

Table 5 Orthogonal table of debris cloud major semi-axis

scheme	factor						indicator
	$v/m \cdot s^{-1}$	l/mm	d/mm	$\rho_p/g \cdot cm^{-3}$	t/mm	a/mm	
1	1	1	1	1	1	46.330	
2	1	2	2	2	2	55.770	
3	1	3	3	3	3	69.760	
4	1	4	4	4	4	79.033	
5	1	5	5	5	5	93.130	
6	2	1	2	3	4	85.995	
7	2	2	3	4	5	91.460	
8	2	3	4	5	1	42.846	
9	2	4	5	1	2	92.360	
10	2	5	1	2	3	73.805	
11	3	1	3	5	2	63.600	
12	3	2	4	1	3	-	
13	3	3	5	2	4	113.350	
14	3	4	1	3	5	110.925	
15	3	5	2	4	1	40.860	
16	4	1	4	2	5	-	
17	4	2	5	3	1	51.275	
18	4	3	1	4	2	60.680	
19	4	4	2	5	3	76.695	
20	4	5	3	1	4	-	
21	5	1	5	4	3	100.256	
22	5	2	1	5	4	97.835	
23	5	3	2	1	5	-	
24	5	4	3	2	1	60.400	
25	5	5	4	3	2	133.335	

合参数的值,如表6所示。故,最终得到初始靶后破片云长半轴 a 的表达式如式(8)所示,将式(8)代入式(2)即可得到EFP垂直侵彻初始靶后破片云椭圆方程。

$$a = 0.238 \cdot d \cdot [0.217 \cdot \left(\frac{t}{d}\right)^{0.336} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0.105} \cdot \left(\frac{v}{10^3 \sqrt{\frac{2.1}{\rho_p}}}\right)^{0.767} \cdot \left(\frac{7.85}{\rho_p}\right)^{0.529} \cdot 32.488 - 6.266] \quad (8)$$

表6 破片云长半轴拟合结果

Table 6 Fitting results of debris cloud major semi-axis

parameter	A	B	C	m	n	p	q	r
fitting result	0.238	0.217	-6.266	0.336	0.105	0.767	0.529	0.756

4.3 模型有效性验证

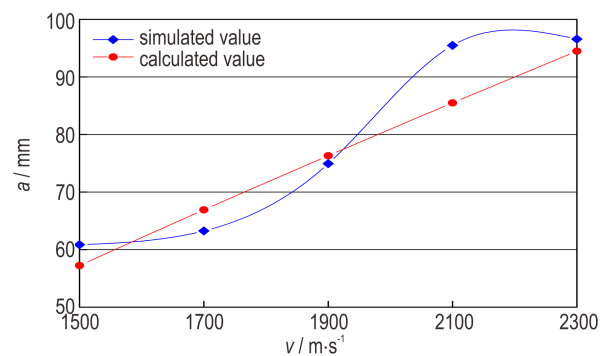
4.3.1 数值计算与模型计算对比

EFP着靶速度 v 直接决定了靶后破片云的轴向膨胀能力,是影响靶后破片云形态的关键因素。控制

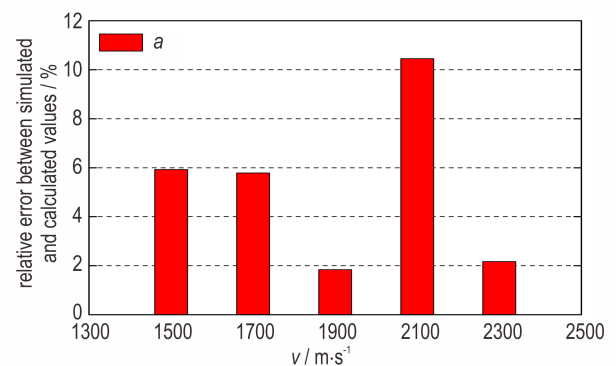
EFP模拟弹的实心长度 l 为 55.45 mm、实心直径 d 为 26 mm、密度 ρ_p 为 $8.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、靶板厚度 t 为 20 mm 不变,计算EFP着靶速度 v 在 $1500 \sim 2300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化时,初始靶后破片云的形状参量,并与本研究所建立的破片云描述模型计算结果进行对比,得到如图9所示的变化规律曲线及误差分布图。

分析图9a可知:随着EFP着靶速度 v 的增加,破片云长半轴 a 的计算值及仿真值均呈上升趋势,且着靶速度 v 由 $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $2300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,计算结果增加了 65.08%、仿真结果增加了 58.74%。这是因为EFP着靶速度的增加导致其在遭遇并贯穿相同的靶板目标时,剩余EFP及二次破片的飞散速度增加,破片云膨胀能力增强,故,破片云长半轴随之增大。

观察图9b可得:EFP着靶速度 v 从 $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $2300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,破片云长半轴 a 的计算值与仿真值的相对误差均控制在 11% 以内,且 v 为 $1900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,计算结果与仿真结果吻合最好,相对误差降至 1.84% 左右,表明了该破片云数学描述模型的准确性。



a. variation curves



b. error distribution

图9 不同EFP速度下破片云长半轴 a 的计算值与仿真值及其误差分布

Fig.9 Calculated value, simulated value and error distribution of debris cloud major semi-axis a with different EFP velocities v

4.3.2 试验验证

利用本研究所建立的破片云描述模型对文献[11]中EFP垂直侵彻20 mm厚45#钢靶后效破片云长半轴进行计算。根据文献[11,28],该破片云试验所用EFP的具体参数如表7所示。

表7 EFP成型及材料参数

Table 7 Molding and material parameters of EFP

parameter	maximum solid diameter /mm	solid length /mm	impact velocity /m·s ⁻¹	density /g·cm ⁻³
experiment result	12.800	23.789	2120	8.960

靶后破片云脉冲X光图像如图10所示。对X光图像进行分析,以图中靶板厚度与实际靶厚的比值作为缩放比,得到破片云形状参数:长半轴 a 为59.375 mm、短半轴 b 为39.375 mm。

结合表7中EFP的成型及材料参数,利用本文所建立的描述模型计算该试验条件下破片云的长半轴,计算结果与试验结果如表8所示。

由表8可知,本文所建立的描述模型与试验的误差降低至3%以内,进一步证明了该模型能够对EFP垂直侵彻有限厚靶板后效破片云形状进行准确地描述。

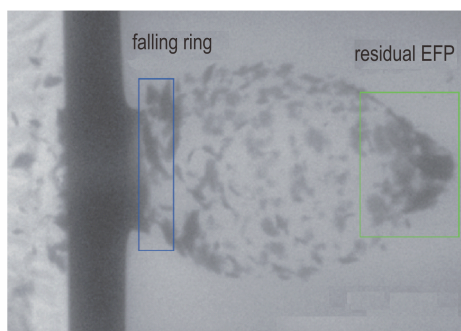


图10 靶后破片云X光图像^[11]

Fig.10 X-ray image of behind armor debris cloud^[11]

表8 模型计算结果与试验结果

Table 8 Results of model calculation and experiment

result	experiment	model calculation	relative error / %
major semi-axis / mm	59.375	57.986	2.339

5 结论

(1)基于量纲分析,结合正交设计理论及数值仿真的方法得到了EFP垂直侵彻靶板后效破片云长半轴的表达式,从而建立了靶后破片云形状描述模型,可以

有效地反映EFP、靶板参数对破片云形状的影响。

(2)运用形状描述模型分析了EFP着靶速度对破片云长半轴的影响。当EFP着靶速度从1500 m·s⁻¹变化至2300 m·s⁻¹时,破片云长半轴呈快速上升趋势。

(3)将后效破片云长半轴的模型计算结果与试验结果进行了对比,误差小于3%,验证了形状描述模型的准确性。

参考文献:

- [1] WU Jun, LIU Jing-bo, DU Yi-xin. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34:1147-1162.
- [2] 刘建青, 顾文彬, 徐浩铭, 等. 多点起爆装药结构参数对尾翼EFP成型的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(5):594-599. LIU Jian-qing, GU Wen-bin, XU Hao-ming, et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5):594-599.
- [3] 林加剑. EFP成型及其终点效应研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009. LIN Jia-jian. Research on the Formability of EFP and its Terminal Effect [D]. Hefei: university of science and technology of china, 2009.
- [4] Arnold W, Rottenkolber E. Behind armor debris investigation (Part II) [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29:95-104.
- [5] Carleone J. Tactical missile warhead[R]. USA: AIAA, 1993.
- [6] Kim H S, Arnold W, Hartmann T, et al. A Model for Behind Armor Debris from EFP Impact[C]//26th International Symposium on Ballistics. Miami, USA: 2011, 1410-1419.
- [7] Dalzell M W, Hazell P J, Meulman J H. Modeling Behind-Armor Debris Formed By The Perforation of an EFP Through a Steel Target [C]//20th International Symposium on Ballistics. Orlando, USA: 2002, 23-27.
- [8] 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. Experimental investigation on distribution of secondary fragments when projectile oblique penetrating target [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(3):263-266.
- [9] 付滕强, 李向东, 蔡振华. 动能杆斜撞击靶板后效破片描述研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6):503-508. FU Cheng-qiang, LI Xiang-dong, CAI Zhen-hua. Description of the debris behind oblique single plate target perforated by kinetic projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(6):503-508.
- [10] 张先锋, 陈惠武, 赵有守. EFP对有限厚靶板侵彻过程及后效研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4):323-327. ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu, ZHAO You-shou. Investigation of process and aftereffect of EFP penetration into target of finite thickness [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4):323-327.
- [11] 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 Xin, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. Experimental research on fragments after explosively formed projec-

- tile penetrating into steel target[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(7): 1284-1290.
- [12] 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*, <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.016>
- [13] 邢柏阳, 刘荣忠, 张东江, 等. 变截面爆炸成型弹丸垂直侵彻装甲钢板靶后破片质量模型[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(7): 118-128. XING Bo-yang, LIU Rong-zhong, ZHANG Dong-jiang, et al. A mass model for behind-armor debris generated by normal penetration of a variable cross-section explosively-formed projectile into an armor steel plate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(7): 118-128.
- [14] 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.
- [15] 叶严, 姚志敏, 杨州, 等. EFP垂直侵彻靶后破片云描述模型[J]. *工程爆破*, 2016, 22(6): 28-31. YE Yan, YAO Zhi-min, YANG Zhou, et al. EFP vertical penetration target description model of debris cloud[J]. *Engineering Blasting*, 2016, 22(6): 28-31.
- [16] 曹兵. EFP对有限厚45#碳钢板侵彻实验研究[J]. *火炸药学报*, 2007, 30(3): 19-21. CAO Bing. Experimental study on EFP penetrating 45# steel plate [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(3): 19-21.
- [17] Schafer F K. An engineering fragmentation model for the impact of spherical projectiles on thin metallic plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1): 745-762.
- [18] Wang Q T, Zhang Q M, Huang F L, et al. An analytical model for the motion of debris clouds induced by hypervelocity impact projectiles with different shapes on multi-plate structures[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 74: 157-164.
- [19] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013. LI Xiang-dong, DU Zhong-hua. Target Vulnerability [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.
- [20] Hohler V, Kleinschitger K, Schmolinske E, et al. Debris cloud expansion around a residual rod behind a perforated plate target [C]//13th international symposium on ballistics, Stockholm, Sweden: 1992, 327-334.
- [21] 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.
- [22] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005. TAN Qing-ming. Dimensional Analysis [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.
- [23] Kim H S, Arnold W, Hartmann T, et al. Effects of EFP Solidity in Terminal Ballistics [C]//26th International Symposium on Ballistics. Miami, USA: 2011, 1429-1436.
- [24] Rondot F. Terminal Ballistics Of EFPs-A Numerical Comparative Study Between Hollow And Solid Simulants [C]//19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland: 2001, 1455-1461.
- [25] Mayselless M, Sela N, Stilp A J, et al. Behind the armor debris distribution function [C]//13th International Symposium on Ballistics. Stockholm, Sweden: 1992, 77-85.
- [26] 张先锋. 聚能侵彻体对带壳炸药引爆研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005. ZHANG Xian-feng. Research on the shaped charge penetrator detonating the shelled explosive [D]. Nanjing: University of Science & Technology, 2005.
- [27] 石党勇, 李裕春, 张胜民. 基于ANSYS/LS-DYNA 8.1进行显示动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. SHI Dang-yong, LI Yu-chun, ZHANG Sheng-min. Dynamic Analysis of Display Based on ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [28] WANG Yang-yang, JIANG Jian-wei, MENG Jia-yu, et al. Effect of Add-on Explosive Reactive Armor on EFP Penetration [C]//29th International Symposium on Ballistics. Edinburgh, Scotland, UK: 2016, 2395-2406.

Shape Description of Behind-armor Debris Cloud from Vertical Penetration of Target Plate by EFP

HUANG Xuan-ning¹, LI Wei-bing¹, GUO Teng-fei², LI Wen-bin¹, WANG Xiao-ming¹

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to accurately describe the shape of behind-armor debris cloud from vertical penetration of a finite-thickness target plate by an explosively formed projectile (EFP), the dimensional analysis and the theory of orthogonal design were used as bases in this work. The effect of EFP molding parameters and the material parameters of projectile and target plate on the shape of behind-armor debris cloud were studied using SPH algorithm in AUTODYN software. A mathematical description model of the debris cloud shape behind armor from vertical penetration by an EFP was established. The shape parameter of major semi-axis of behind-armor debris cloud from a vertical EFP penetration was calculated using that model and compared with the simulated and related experimental results. It is proved that the error between the calculated major semi-axis result of debris cloud by that model and the related experimental result is controlled within 3%, and the shape of behind-armor debris cloud formed by an vertical EFP penetration can be described accurately with this model.

Key words: explosively formed projectile (EFP); vertical penetration; behind-armor debris cloud; smoothed particle hydrodynamics (SPH); description model

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019297

(责编:高毅)