

DOI: 10.12382/bgxb.



并联 EFP 侵彻钢靶特性及靶后破片分布规律

陈敏¹, 陈庭豪¹, 王鹏², 张昊洁¹, 王海福¹, 郭焕果^{1*}

(1. 北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081; 2. 北方科技信息研究所, 北京 100081)

摘要: 为探究并联爆炸成型弹丸(Explosively formed penetrator, EFP)战斗部对装甲钢靶的侵彻特性以及靶后破片分布特性,建立了并联 EFP 战斗部起爆、飞行、侵彻的全过程数值模型。通过数值模拟分析了并联 EFP 侵彻装甲钢靶的弹靶作用过程,得到了弹靶作用时能量交换特性、靶板不同位置处受力状态及靶后破片散布位置与形态。获得战斗部间距、起爆时间差及起爆方式对并联 EFP 侵彻孔径、靶后有效破片数量和靶后破片云分布特性的影响规律,揭示了 EFP 战斗部并联排布特性对装甲钢靶侵彻及后效毁伤影响机理。仿真结果表明,侵彻过程中 EFP 损失的动能转化为 EFP 的内能及靶板的动能和内能;并联 EFP 作用装甲钢靶时,由于受到同类应力波的非线性叠加,靶板中心受到的正负压力峰值明显升高,并且正负压交替频率显著增加;除 EFP 形成的碎片外,约占靶板整体厚度 3/5 的靶板背面材料参与形成靶后破片,破片质量约占靶板形成破片总质量的 96%;战斗部间距为 35mm、单点中心同步起爆时,形成的侵彻孔径最大、靶后有效破片数量最多;战斗部间距、起爆时间差、起爆方式分别对小型低速破片数量占比、有效破片质量分布及速度分布造成主要影响。

关键词: 并联战斗部; 聚能装药; 爆炸成型弹丸; 破片云; 毁伤能力

中图分类号: TJ410.3; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(XXXX)

XX--15

Penetration Characteristics of Parallel Explosively Formed Penetrators (EFPs) into a Steel Target and Backside Fragment Distribution

CHEN Min¹, CHEN Tinghao¹, WANG Peng², ZHANG Haojie¹, WANG Haifu¹, GUO Huanguo^{1*}

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, 100081, China; 2. North China Institute of Science and Technology Information, Beijing 100081, China)

Abstract: To explore the penetration characteristics of parallel Explosively Formed Penetrator (EFP) warheads against armored steel targets and the distribution characteristics of fragments behind the target, a full-process numerical model was established for the initiation, flight, and penetration of parallel EFP warheads. The interaction process between parallel EFPs and armored steel targets was analyzed through numerical simulation, revealing the energy exchange characteristics during the interaction, the stress states at different locations of the target plate, and the distribution positions and morphologies of fragments behind the target. The effects of warhead spacing, initiation time difference, and initiation methods on the penetration aperture, the number of effective fragments behind the target, and the distribution characteristics of the fragment cloud behind the target were obtained, elucidating the influence mecha-

收稿日期:XXXX-XX-XX

基金项目:2025 年自主研究课题青年基金项目(QNKT25-08)

* 通信作者邮箱:邮箱:6120220160@bit.edu.cn

nism of the parallel arrangement characteristics of EFP warheads on the penetration and post-penetration damage of armored steel targets. The simulation results show that the kinetic energy lost by the EFP during penetration is transformed into the internal energy of the EFP and the kinetic and internal energy of the target plate. When parallel EFPs act on armored steel targets, the positive and negative pressure peaks at the center of the target plate significantly increase due to the nonlinear superposition of similar stress waves, and the alternation frequency of positive and negative pressures increases markedly. In addition to the fragments formed by the EFP, approximately 3/5 of the material from the back of the target plate, accounting for about 97% of the total mass of fragments formed by the target plate, participates in forming fragments behind the target. When the warhead spacing is 35 mm with single-point center synchronous initiation, the penetration aperture is the largest, and the number of effective fragments behind the target is the highest. Warhead spacing, initiation time difference, and initiation methods mainly affect the proportion of small low-speed fragments, the mass distribution of effective fragments, and the velocity distribution, respectively.

Keywords: parallel warhead; shaped charge; EFP; fragment cloud; damage capability

0 引言

现代主战坦克顶部主动防御系统(Active Protection System, APS)与复合装甲技术的快速发展,对反坦克导弹的隐蔽性及战斗部的终端毁伤效果提出了更高要求^[1-2]。掠飞攻顶式导弹在最终攻击前,弹道与坦克几乎处于同一水平面,对于主要用于拦截来自正面和侧面威胁的 APS 雷达来说,探测和识别难度更大,显著提高了导弹的机动性和隐蔽性。

爆炸成型弹丸(Explosively formed penetrator, EFP)是一种依靠炸药爆轰能量驱动金属药型罩压垮形成的高速密实侵彻体^[3]。由于其速度梯度小、对炸高不敏感,现末敏弹、智能地雷和鱼雷等弹药均采用 EFP 战斗部^[3-4]。与传统反坦克弹药采用单个 EFP 战斗部不同,掠飞攻顶式导弹配备两个并联 EFP 战斗部^[6-7],通过饱和攻击来提升突防概率及毁伤能力。其毁伤能力并非简单的线性叠加,战斗部布设间距、起爆特性等参数均会引发战斗部间的复杂相互作用,显著影响对装甲钢靶的侵彻及靶后破片分布特性。

为了提高 EFP 战斗部的毁伤能力,许多学者对影响 EFP 成型和毁伤特性的不同因素进行了研究。潘建等^[8]在装药种类、结构尺寸和药型罩材料不变的条件下,开展了隔板结构和药型罩结构的正交优化数值计算,优化后带隔板装药 EFP 的速度提高了 8.8%,长径比提高了 164.3%。刘贞娴等^[9]针对球缺型紫铜药型罩的基准装药结构,系统研究了压环截面形状、轴向/径向厚度和材料对 EFP 成型的影

响,结果表明当压环与药型罩质量比 ≤ 0.2 时,矩形截面压环的轴向/径向厚度及材料对 EFP 初速影响极小,但对形态参数调控作用显著,有利于 EFP 翻转成型和形成更密实的杆式 EFP,并减小其迎风阻力。Liu 等^[10]提出了三点起爆形成带尾翼的 EFP。实验结果表明,带尾翼的 EFP 每米衰减速度远小于普通 EFP,姿态角稳定减小。李渊博等^[11]综合分析了 EFP 的构型对其气动特性和侵彻性能的影响,结果表明 EFP 小空腔结构提高了其飞行稳定性,空腔的增大降低了 EFP 的存速能力,实心、小空腔、大空腔三种结构在 1000 倍炸高时速度分布下降 158m/s, 172m/s, 210m/s。随着 EFP 空腔的增大,靶板开坑形貌由漏斗状逐渐转为等直径状。Li 等^[12]采用正交设计法结合极差分析对尾翼 EFP 进行优化,获得了药型罩结构、装药布局与壳体结构等参数的优化取值范围。李元等^[13]采用试验验证过的数值模型,以爆炸成型弹丸速度、比动能和长径比为评价指标,系统地研究了装药长径比、药型罩内径、外径和药型罩中心厚度等对指标的影响规律,获得一种基于非等壁厚药型罩的准球形爆炸成型弹丸成型方案。Yang 等^[14]基于拉格朗日法和任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)方法建立有限元模型,比较了 EFP 的形貌、速度以穿孔直径,发现了变壁厚与等壁厚药型罩形成 EFP 的不同机制,分别得到优化后的变壁厚和等壁厚药型罩结构。

除药型罩结构外,药型罩材料对 EFP 的成型侵彻性能也有较大影响,许多学者分别对高熵合金^[15]、铜^[16]、钨^[16]、钽^[17-19]等材料的 EFP 成形及力学

性能进行研究。结果表明,高熵合金罩经优化后可使EFP长径比提高至2.0~2.5,初速达到2260~2357 m/s,对100mm 4340钢和1000mm C35混凝土的侵彻深度分别达到37.8~41.5mm和287.6~303.7mm。与铜相比,钼EFP的动能可提高2.7%~5.9%,侵彻孔径提高9.2%。钽由于具有较高密度和良好塑性,优化后EFP长径比可达4.76,对半无限45#钢的侵彻深度可达1.08D,较铜EFP表现出更强的侵彻能力。在此基础上,付恒等^[20]以典型钨镍系合金为研究对象,对不同钨含量的平板飞片试样开展了爆炸加载试验,结合传统药型罩材料的共同特性,提出了EFP高密度合金罩材的选取准则,合金应为完全固溶体的单相合金,若溶剂金属为非面心立方结构,则须具备低于服役环境温度的韧脆转变温度。

综上所述,国内外相关专家对EFP战斗部成型及其对装甲钢靶侵彻与后效毁伤进行了大量研究,对不同口径、不同药型罩结构和材料的EFP战斗部结构进行了优化设计,为EFP性能提升奠定了基础。然而,现有研究多聚焦于单个EFP的成型和侵彻,对于掠飞攻顶导弹上配备的并联EFP战斗部毁伤机理缺乏研究。

因此,本文重点开展并联EFP对钢靶侵彻特性及靶后破片分布规律研究。首先,基于AUTODYN-3D对并联EFP成型、飞行及侵彻钢靶过程进行建模,并通过地面静爆实验验证数值方法的有效性;其次,深入分析并联EFP的弹靶作用过程、靶板受力状态和靶后破片位置分布;最后,开展战斗部距离、起爆时间差、起爆方式等因素对并联EFP作用钢靶的侵彻威力及靶后破片分布特性的影响规律研究,以期对并联EFP战斗部的优化设计提供理论依据和数据支撑。

1 数值模拟方法

1.1 计算及材料模型

并联EFP战斗部舱内布置和结构示意图分别见图1~2,两个战斗部垂直布设在战斗部舱内, K 表示两个战斗部之间的距离。EFP战斗部主要由壳体、主装药、药型罩等部件组成。装药直径 D_0 为113mm,长径比 L/D_0 为0.8,药型罩曲率半径 R 为90mm,药型罩厚度 δ 为 $0.02D_0$,战斗部直径 D 为117mm。

主装药采用8701炸药,采用Jones - Wilkins - Lee(JWL)状态方程,主要参数列于表1^[21]。药型罩

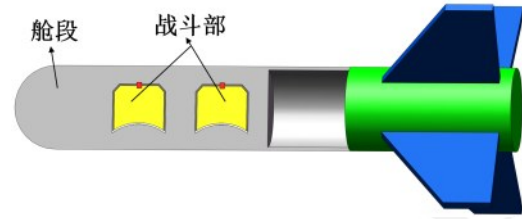


图1 战斗部舱内布置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Warhead Cabin Layout

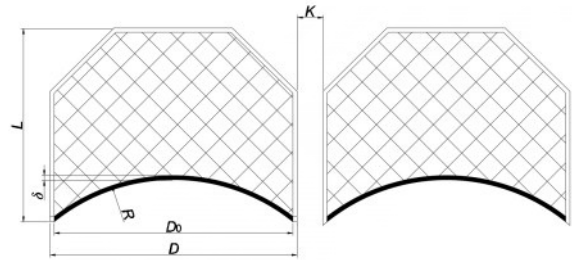


图2 结构设计图

Fig. 2 Structural Design Diagram

材料使用紫铜,壳体材料使用45#钢,这两种材料均采用Shock状态方程和Johnson-Cook强度模型^[22]。EFP在成型过程中为具有弹塑性特征的固态物质,Johnson-Cook模型本身能够表征材料在大变形、高应变率和温升条件下的力学响应,因此能够较好地反映EFP形成后至撞击前的主要力学特征^[23-24]。靶板采用均质轧制装甲钢(Rolled Homogeneous Armor, RHA),采用Linear状态方程、Johnson-Cook强度模型和Johnson-Cook失效模型^[22]。紫铜、45#钢和RHA的主要材料参数列于表2^[21-22]。

表1 8701炸药装药材料参数^[21]

Table 1 Material Parameters of the 8701 Explosive Charge^[21]

参数	数值	参数	数值
$\rho_0/(\text{g/cm}^3)$	1.71	R_1	4.22
$D_{C-J}/(\text{m/s})$	8315	R_2	1.1
$A/(\text{GPa})$	524.23	ω	0.34
$B/(\text{GPa})$	7.678	$E_0/(\text{kJ/m}^3)$	8.499
$P_{C-J}/(\text{GPa})$	28.6		

注: ρ_0 为炸药密度, D_{C-J} 为C-J爆速, P_{C-J} 为C-J压力, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数, E_0 为C-J能量。

并联EFP成型过程采用流固耦合算法进行计算,其中药型罩采用Lagrange算法,壳体、炸药与空气域采用Euler算法。网格收敛性分析如图3所示,为了兼顾计算准确性和计算效率,取Euler网格为0.3mm,根据流固耦合计算要求,Lagrange网格为

表2 紫铜、45#钢和RHA材料参数^[21-22]Table 2 Parameters of Copper, 45# Steel and RHA^[21-22]

参数	紫铜	45#钢	RHA
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	8.96	7.85	7.83
$A/(\text{MPa})$	90	792	1400
$B/(\text{MPa})$	292	510	510
C	0.025	0.014	0.014
n	0.31	0.26	0.26
m	1.09	1.13	1.03
$T_m/(\text{K})$	1356	1793	1793
$C_1/(\text{m}/\text{s})$	3958	4569	4610
S_1	1.497	1.49	1.73
γ_0	2	2.17	1.67
D_1	0.54	-	-2.2
D_2	4.89	-	5.43
D_3	-3.03	-	-0.47
D_4	0.014	-	0.16
D_5	1.12	-	0.63

注: ρ 为材料密度, A 为屈服强度, B 为应变硬化常数, C 为应变硬化常数, n 为应变硬化指数, m 为热软化系数, T_m 为材料熔点, $D_1 \sim D_5$ 为失效参数, C_1 为材料声速, S_1 为冲击斜率, γ_0 为Gruneisen系数。

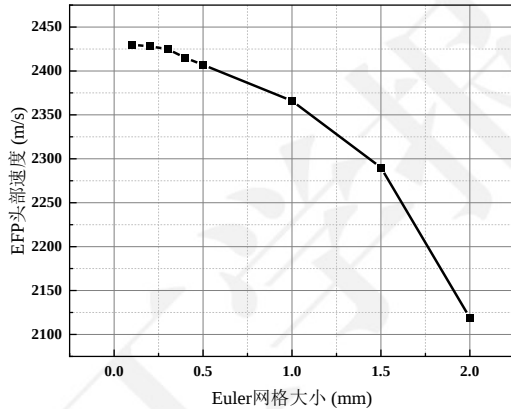


图3 网格收敛性分析

Fig. 3 Mesh Convergence Analysis

Euler 网格的两倍。在空气域添加 Flow-out 边界条件消除边界效应。为提高计算效率,对于这种轴对称结构,可使用 1/2 模型进行计算,如图 4 所示。模型关于 XOZ 平面对称,定义两个战斗部排列方向为 X 轴,战斗部径向与 X 轴垂直方向为 Y 轴,两个战斗部轴向为 Z 轴。定义轴线与 Z 轴重合,单点中心起爆时起爆点坐标为(0,0,0)的战斗部为主战斗部,对应的 EFP 为主 EFP。

根据相对性原理,EFP 在空气中飞行所受到的

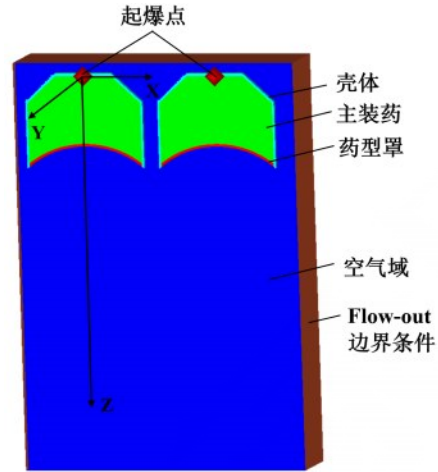


图4 并联EFP成型计算模型

Fig. 4 Computational Model for the Forming of Parallel EFPs

空气阻力与 EFP 静止不动,空气以同样的速度反方向吹来时受到的空气阻力作用相同。因此,添加空气域及流入流出边界对 EFP 外流场特性进行数值模拟,得到 EFP 在飞行过程中的速度降 V_d ^[25],计算公式如下:

$$V_d = \frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{\Delta v}{vt + 0.5 \frac{\Delta v}{t} t^2} = \frac{2\Delta v}{2vt + \Delta v} \quad (1)$$

式中: V_d 为 EFP 在空气中飞行过程中的速度衰减率; t 为 EFP 在空气中的飞行时间; Δv 为飞行时间 t 内 EFP 的速度降低量; Δx 为对应时间段内 EFP 的飞行距离; v 为 EFP 的初始飞行速度。

气动计算条件为标准状态^[26],即空气密度 $\rho=1.225\text{kg}/\text{m}^3$,空气压力 $P=101.325\text{kPa}$ 。以 $t=150\mu\text{s}$ 时 EFP 为研究对象,此时 EFP 保持稳定,速度为 v ,数值模拟中将 EFP 速度归置为 0,速度为 $-v$ 的空气从 EFP 头部一定距离处流入,计算模型如图 5 所示。

光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydro-

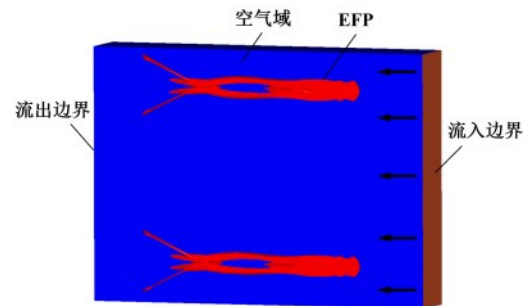


图5 并联EFP空气中飞行计算模型

Fig. 5 Computational Model for Flight of Parallel EFPs in Air

dynamics, SPH)算法在在处理大变形、自由表面、流体破碎等问题时具有优势。虽然会出现粒子删除现象,但仍然保留失效粒子的质量和动量,确保系统的质量和动量守恒,以保证计算准确性^[27]。并且计算结果与试验结构吻合度较高^[28-29]。因此将成型EFP导入侵彻模型中,把EFP的拉格朗日网格替换为SPH粒子进行计算^[30],粒子大小为0.5mm^[31]。靶板大小为400mm×200mm×60mm。选取20m炸高对EFP侵彻特性进行分析。由于到达所需炸高的距离较远,且EFP外形在飞行过程中无较大变化,为了节省计算时间,根据得到的EFP头部速度与速度降,计算得到EFP到达规定炸高时的侵彻速度,将此速度直接赋予EFP的SPH粒子进行计算,如图6所示。

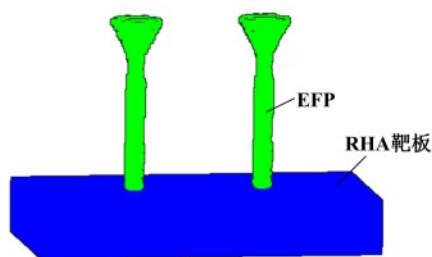


图6 SPH算法并联EFP侵彻RHA靶板计算模型

Fig. 6 Computational Model for Parallel EFPs Penetrating an RHA Target Plate Using the SPH Algorithm

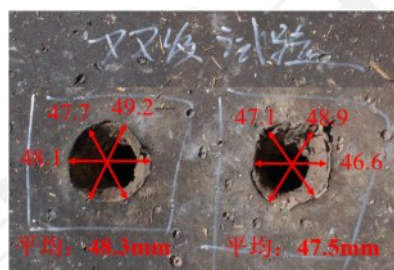
1.2 仿真有效性验证

为了验证材料模型及计算方法的准确性,开展地面静爆实验对仿真结果进行有效性验证。实验布置如图7所示,炸高为20m,战斗部各部件、钢靶的材料及尺寸与数值模拟一致。实验结束后,测量钢靶正面的侵彻孔径,与仿真结果进行对比,如图8所示。从实验结果可以看出,EFP战斗部对钢靶的开孔孔径不是一个严格的圆形,通过在不同位置取三个孔径值,得到并联EFP对60mm厚钢靶的平均开孔直径分别为48.3mm和47.5mm,仿真得到的侵彻孔径为45mm,误差为7.3%和5.5%。通过高速摄像得到EFP碰靶速度为2641m/s,数值模拟得到碰靶速度为2403m/s,误差为9%。侵彻孔径及EFP碰靶速度的实验与数值模拟误差均小于10%。因此,本文所采用的数值模拟方法和材料模型可以准确模拟并联EFP战斗部对钢靶的侵彻行为。



图7 实验布置图

Fig. 7 Experimental Setup Diagram



(a) 实验结果

(a) Experimental Results



(b) 侵彻孔形貌对比

(b) Comparison of penetration hole morphologies

图8 EFP实验结果及对钢靶侵彻仿真与实验对比

Fig. 8 EFP Experimental Results and Comparison of Simulation and Experiment on Steel Target Penetration

2 并联EFP对钢靶侵彻行为

2.1 EFP典型成型状态

图9为EFP成型过程中不同时刻塑性应变、速度和温度变化云图。如图所示,药型罩在爆轰闭合阶段经历了剧烈的塑性变形。塑性应变主要在轴线汇聚与拉伸区积累,EFP核心区域的最大塑性应变为3.3~4.4。EFP头部速度在2240~2800m/s之间,而尾部速度约为1680~1960m/s。速度差为EFP的拉伸成型提供支持,有利于形成飞行稳定性较好的流线型弹丸。应变率主要在 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 范围内,正处于Johnson-Cook(模型的高精度区间。EFP轴线

核心区域的峰值温度达到720~840K,局部受挤压严重区域可达960K,远低于紫铜熔点。表明EFP在成型过程中,药型罩材料整体处于固体弹塑性状态,进一步验证Johnson - Cook模型的适用性。

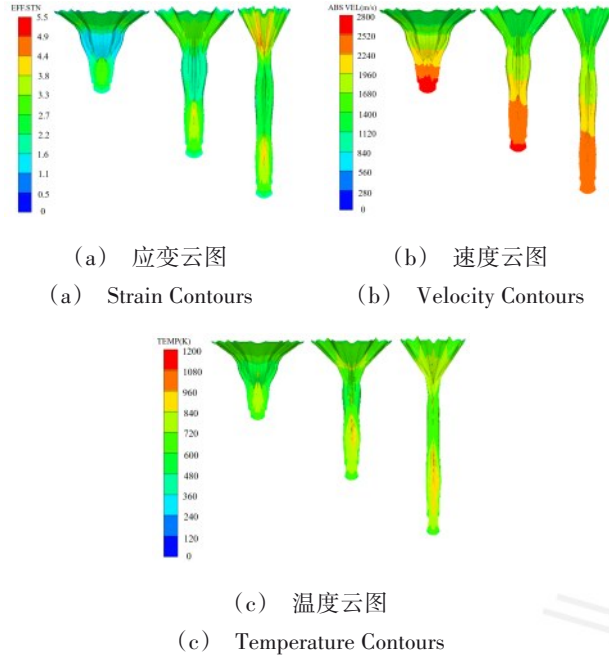


图9 EFP成型过程典型云图

Fig. 9 Typical contour plots of the EFP formation process

2.2 弹靶作用过程

并联EFP侵彻RHA靶板过程的典型速度云图如图10所示。50 μ s时,受到EFP冲击,靶板部分材料产生一定的速度,在靶后形成鼓包。此后继续受到EFP作用,鼓包形成轴向、径向的裂纹,产生大量尺寸不一的靶后破片。165 μ s时,EFP完全穿透钢靶,靶板与EFP在侵彻过程中形成破片云,此后穿透靶板的剩余EFP继续被墩粗,破片云不断膨胀,EFP侵彻过程也有部分碎片参与到整个破片云中。

提取EFP与靶板的能量信息,明确EFP侵彻靶板的能量转换过程。如图11所示,随着侵彻过程的进行,EFP动能(KE_{EFP})不断下降,弹靶作用传入EFP中的压缩波导致其内能(IE_{EFP})升高;100 μ s之后,内能变化趋于稳定,此后EFP停止与外界发生能量交换,保持剩余形状继续参与飞行。对于靶板来说,70 μ s之前为EFP稳定侵彻阶段,靶板内能(IE_{target})与动能(KE_{target})不断增加,之后由于靶板背面开始出现裂纹,靶板能量出现小幅度的跳跃式变化;70 μ s~150 μ s侵彻过程中EFP与靶板之间继续发生能量交换;150 μ s之后,能量交换基本完成,后续即为破片

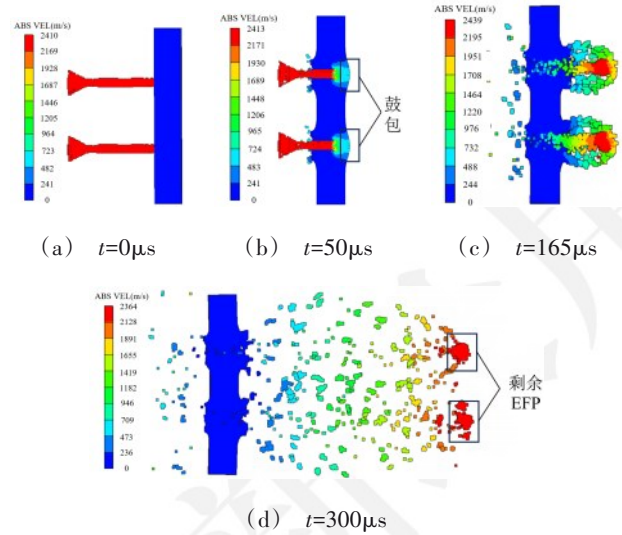


图10 并联EFP侵彻靶板速度云图

Fig. 10 Velocity Contour of Parallel EFPs Penetrating the Target Plate

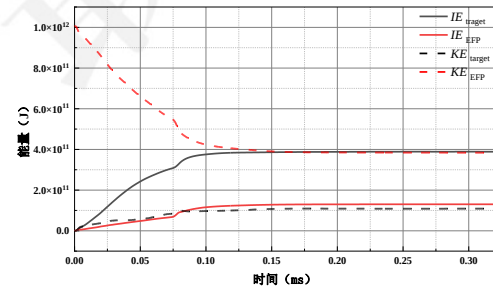


图11 EFP与靶板能量随时间变化曲线

Fig. 11 Energy vs. Time Curves for the EFP and the Target Plate

膨胀飞散过程。由此可见,侵彻过程中EFP损失的动能转化为EFP的内能与靶板的动能和内能,符合能量守恒定律。

2.3 靶板受力状态

为了探究并联EFP对靶板的作用过程及侵彻特性,在靶板中心设置如图12所示的4个等间隔观测点。分别得到单个EFP侵彻与并联EFP侵彻情况下靶板中心处的压力变化。

根据图13可以看出,由于战斗部完全对称且同

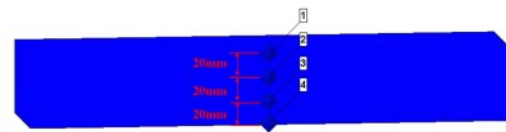


图12 中心观测点设置

Fig. 12 Setup of Central Observation Points

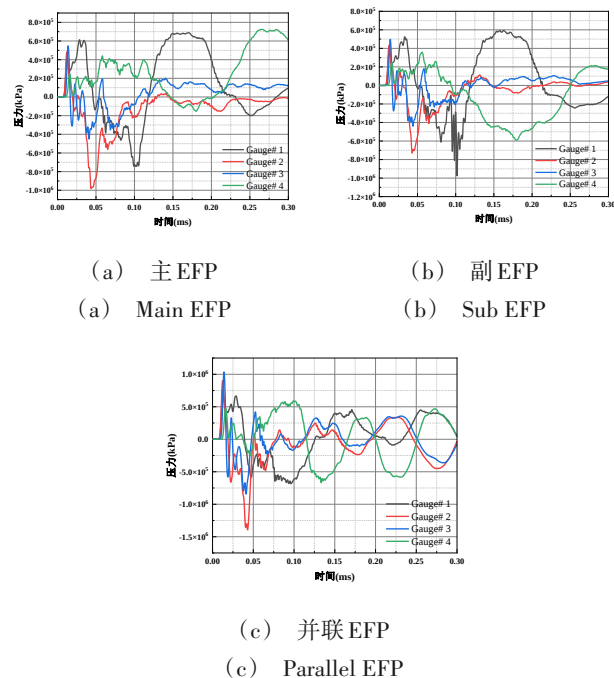


图13 不同EFP作用时靶板中心观测点压力变化

Fig. 13 Pressure Change at Target Plate Central Observation Point with Different EFPs

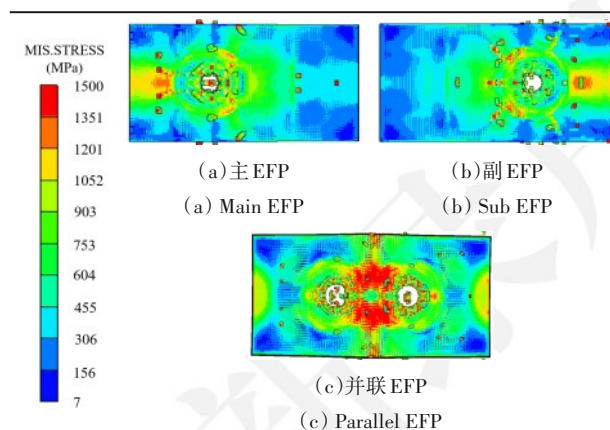
时起爆,EFP单独作用时,靶板中心的受力状态基本一致。但并联EFP同时作用靶板后 $50\mu\text{s}$ 内,由于受到同类应力波的非线性叠加,并联EFP作用时产生的正负波峰明显高于单个EFP。此后随着压缩波与拉伸波在靶板内的传播与反射,会出现压缩波与压缩波、压缩波与拉伸波、拉伸波与拉伸波三种情况的叠加,导致靶板受到正负压的交替作用,单个EFP和并联EFP作用时靶板中心均形成复杂的峰谷波动。但由于并联EFP在作用靶板过程中应力波的叠加情况较单个EFP来说更复杂,因此并联EFP作用时靶板中心的正负压交替频率明显提高,应力集中区域及应力集中强度显著增加,如图14所示,容易造成靶板的动态断裂。

2.4 破片形态及位置分布

AUTODYN软件通过SPH粒子的空间邻近关系自动识别破片。当粒子间距超过初始光滑长度的阈值倍数时,判定为不同破片。通过数值模拟结果可看出,EFP侵彻靶板时,靶板正面材料沿与EFP运动方向反向飞出,不是所有靶板的破片都参与靶后破片的形成。通过统计靶后破片与初始靶板位置的对应关系,对靶后破片形成位置进行追踪。采取靶板分“层”的理念实现靶板的区别显示,将靶板的不同“层”赋予不同的材料号,显示颜色不同但材料

图14 不同EFP作用下靶板应力云图

Fig. 14 Stress Contour Plots of Target Plate Under the Action of Different EFPs



属性一致,通过颜色即可对应到在初始靶板的位置^[32]。图15为并联EFP侵彻分“层”靶板的计算模型,其中每“层”厚度为12mm,共将靶板分为5层。

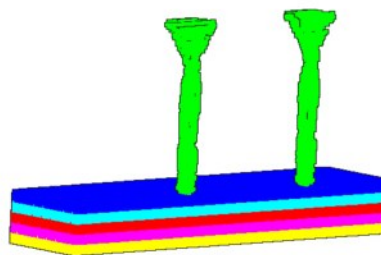


图15 靶板分“层”模型

Fig. 15 Layered Model of the Target Plate

图16为 $300\mu\text{s}$ 时的靶后破片形态。并联EFP的靶后破片云形状与单个EFP的有较大差别。对于单个EFP来说,侵彻薄靶后产生的破片云为椭圆形,而随着每个EFP穿靶后形成破片云的扩散,并联EFP的破片云会产生交错,不再呈椭圆形。本文将靶后沿EFP侵彻方向上距离靶板最远处的破片到靶板后侧的距离记为破片云的a轴,将与a轴垂直方向上破片云的宽度记为b轴。

图17将60mm厚靶板的靶后破片分“层”显示。可见,每层靶的破片均匀分布在椭球外层,靶板正面材料几乎不形成靶后破片,反而沿与EFP运动方向反向飞出,越靠近靶板背面,EFP侵彻后形成的靶后破片越多。对靶板不同位置形成的破片质量进行统计分析可知,除EFP形成的碎片外,约占靶板整体厚度 $3/5$ 的靶板背面材料参与形成了靶后破片,破片质量约占靶板形成破片总质量的96%。

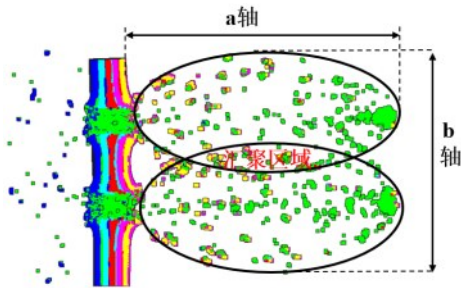


图 16 侵入300μs时靶后破片形态

Fig. 16 Morphology of Fragments Behind the Target at 300 μs Penetration Time

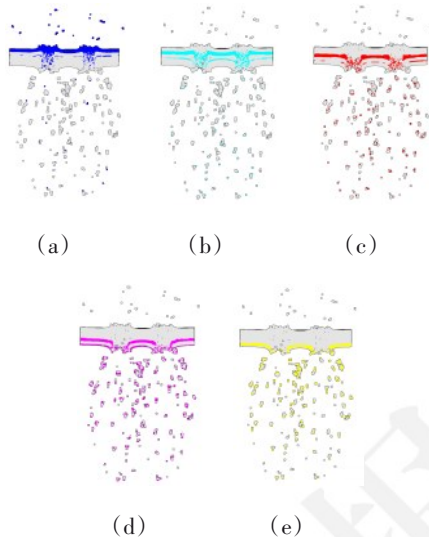


图 17 靶后破片分“层”显示

Fig. 17 Layered Display of Fragments Behind the Target

3 不同因素对靶后破片分布特性影响

3.1 战斗部间距影响

取两个战斗部的间距分别为5mm、15mm、25mm、35mm,两个战斗部均为单点中心同时起爆。由于在考虑战斗部间距影响的情况下,两个战斗部完全对称,因此只列出碰靶前主战斗部EFP的成型形貌,如图18所示。各工况下EFP成型及侵彻参数列于表3。

对开始侵彻后300μs的效果进行分析,不同战斗部间距下侵彻效果及靶后破片分布形态如图19所示。仿真结果表明,随战斗部间距从5mm增加到35mm,形成破片云的b轴长度变化不大,这是因为战斗部间距的变化幅度相对破片云横向散布范围较小,其对总宽度的贡献被自身侵彻破碎的横向散布所覆盖,因此宏观上变化不明显。战斗部间距的增加对EFP侵彻速度影响不大,但是间距增大后,

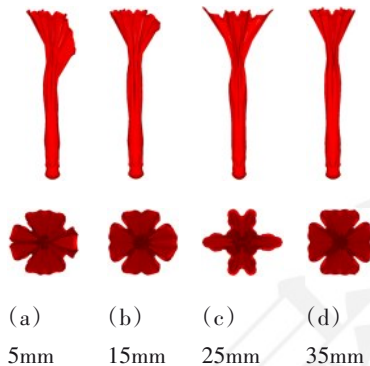


图 18 不同间距下主战斗部EFP成型形貌

Fig. 18 Morphologies of EFP Formed by Main Warhead Under Different Spacings

表 3 不同间距下主EFP成型及侵彻参数

Table 3 Penetration and Forming Parameters of the Main EFP with Different Spacings

战斗部间距/(mm)	5	15	25	35
速度降 $V_{dl}/(s^{-1})$	1.23	1.12	0.82	1.11
碰靶速度 $v_{s1}/(m/s)$	2407	2407	2405	2409
头部半径 $r_{t1}/(mm)$	6.36	5.5	7.5	6.3
尾部半径 $r_{t1}/(mm)$	26.8	27	37.4	26.6
长度 $l_1/(mm)$	195	195	201	196

注: 下标1、2分别表示主、副EFP。

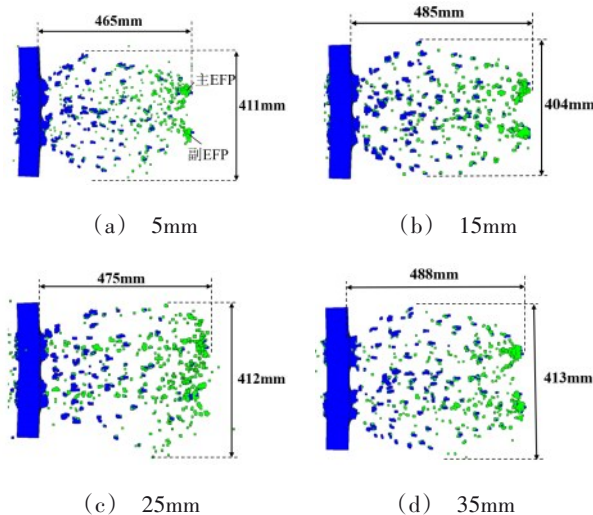


图 19 不同间距并联EFP穿靶后破片云状态

Fig. 19 Post-Penetration Fragment Cloud Status of Parallel EFPs with Different Spacings

两枚EFP产生的破片云初始空间分布更分散,破片之间的相互干涉、碰撞概率降低,运动阻碍减小。破片云轴向分布范围被进一步拉大,最终表现为a轴长度从465mm增加到了488mm。并且随战斗部

间距增大,靶后剩余EFP的完整性相对更好。

图20 不同间距并联EFP穿靶后靶板应力云图
Fig. 20 Stress Contour Plot of the Target Plate after Penetration by Parallel EFPs with Different Spacings

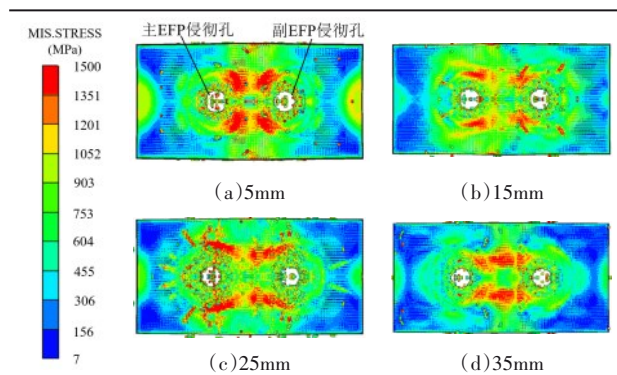


图20为不同战斗部间距的并联EFP穿靶后靶板背面应力云图。可以看出,战斗部间距越小,两个侵彻孔之间越容易造成应力集中,越接近于材料的极限应力。在受到其余外力时更容易造成断裂,再次扩大侵彻孔直径且产生靶后破片,有利于增强对装甲车辆内部人员与电器设施的毁伤。

相关杀伤标准规定破片质量大于或等于1g,且动能大于或等于98J^[33],符合杀伤标准的破片才为有效破片,在后处理中提取各破片的质量、速度等参数,按此标准统计靶后有效破片数量。如图21所示,随着战斗部间距的增加,两个EFP侵彻装甲钢产生的侵彻孔孔径与靶后有效破片数量均先减小后增加,在战斗部间距为15mm和35mm时取得最小值和最大值。但所有结构的有效破片数量均在150~220之间。

图22(a)为不同战斗部间距下靶后破片质量分

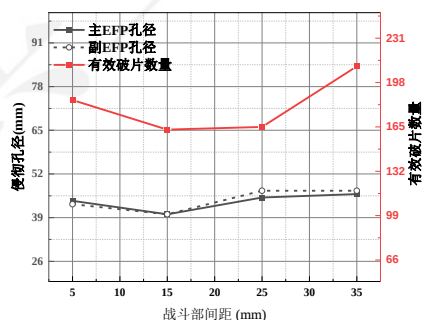
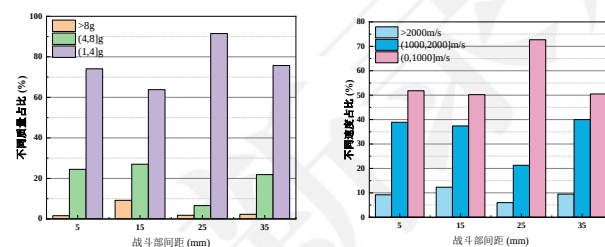


图21 侵彻孔径与有效破片数量
Fig. 21 Penetration Aperture and Number of Effective Fragments

布情况。如图所示,小破片(1g~4g)始终占有效破片的60%以上。随着战斗部间距从5mm增加到15mm,大破片(>8g)占比增加到峰值9.2%,小破片占比下降了10.3%。战斗部间距增加到25mm时,小破片占比增加到峰值91.5%,中型破片(4g~8g)占比下降到最小值6.6%。间距增加到35mm时,小破片占比下降15.8%,中型破片占比增加15.3%。



(a) 质量分布 (b) 速度分布
(a) Mass Distribution (b) Velocity Distribution

图22 靶后有效破片分布直方图

Fig. 22 Histogram of Effective Fragment Distribution Behind the Target

速度分布随战斗部间距改变的变化趋势与质量分布一致。当战斗部间距从5mm增加到15mm时,各速度区间占比变化平缓,高速破片(>2000m/s)占比增加3%,中速破片(1000m/s~2000m/s)占比下降2.5%。战斗部间距增加至25mm时,低速(0m/s~1000m/s)破片数量明显增加,占总破片数的72.7%,中高速破片占比下降。与质量分布的“细化”特征一致,结合图21,间距为25mm时侵彻孔直接明显增加,说明此时EFP的动能主要由于扩孔,导致靶后产生更多的低速、小质量破片。战斗部间距为35mm时靶后有效破片速度分布与5mm时几乎一致,出现与质量分布一致的“回归”趋势,表明研究范围内,战斗部间距对毁伤后效的影响存在敏感区间。

结合以上分析,战斗部间距对靶后有效破片的质量、速度分布的影响并非线性,并且存在敏感区间。战斗部间距在15mm~25mm时,间距对靶后破片的质量及速度分布情况影响显著。在此区间内,随战斗部间距的增加,大型高速破片占比明显下降,小型低速破片的占比增加。这是因为当间距从15mm增加到25mm时,EFP尾翼形状出现明显变化,对称性下降,尾翼部分在侵彻过程中与靶板接触面积增加,因此在此阶段EFP用于扩孔的动能部

分增加,转化为破片动能的部分减小。因此战斗部间距为25mm时,主、副EFP对靶板的扩孔孔径均增加,且靶后大型高速破片占比下降。当间距大于25mm时,EFP成型情况稳定,尾翼高度对称,各破片区间分布规律趋于稳定。

3.2 起爆时间差影响

与传统单个战斗部不同,并联战斗部需考虑异步起爆时爆轰波相互作用干扰EFP成型,进一步影响毁伤效果的问题。因此,采用单点中心起爆,两个战斗部间距为35mm,在此基础上探究起爆时间差分别为0 μ s、4 μ s、8 μ s、12 μ s时并联EFP侵彻RHA的效果。碰靶前并联EFP成型形貌如图23所示,EFP成型及侵彻参数列于表4。

表4 不同起爆时间差下并联EFP成型及侵彻参数
Table 4 Penetration and Forming Parameters of Parallel EFPs with Different Detonation Time Differences

起爆时间差/(μ s)	0	5	10	15
速度降				
$V_{d1}(\text{s}^{-1}) V_{d2}(\text{s}^{-1})$	1.11 1.11	1.11 0.89	1.11 1.32	1.11 2.76
碰靶速度 $v_1(\text{m/s}) v_2(\text{m/s})$	2409 2409	2409 2417	2409 2474	2409 2594
头部半径 $r_1(\text{mm}) r_2(\text{mm})$	6.8 6.3	6.84 5.25	6.8 4.5	6.87 3.5
尾部半径				
$r_{t1}(\text{mm}) r_{t2}(\text{mm})$	26.6 26.6	26.4 27.6	26.8 28.7	26.6 32.4
长度				
$l_1(\text{mm}) l_2(\text{mm})$	196 196	195.8 192	193 189	189.8 202

根据图24,随战斗部起爆时间差的增加,两个EFP侵彻靶板后形成的破片云对称性明显下降,破片分布逐渐稀疏。由不同起爆时间差下EFP成型特性可知,随着起爆时间差增加,副EFP的头部速度增加,传递给破片的动能也更大,在战斗部间距一致的情况下,开始侵彻后相同时间内形成的靶后破片云a轴长度增加。同时,由于起爆时间差对副EFP的形貌产生较大影响,导致b轴长度下降。随起爆时间差的增加,副EFP形变越大,在侵彻穿靶过程中无较好的气动外形,因此起爆时间差为12 μ s时剩余的副战斗部EFP碎裂变形程度最大。

图25为不同起爆时间差时并联EFP穿靶后靶板背面应力云图。随着起爆时间差的增加,两个侵彻孔之间的应力集中部分逐渐偏移。时间差为4 μ s时,应力集中分布在副EFP的侵彻孔附近。起爆时间差大于4 μ s时,应力集中逐渐向主EFP的侵彻孔偏移附近偏移,副EFP侵彻孔附近的应力减小。当

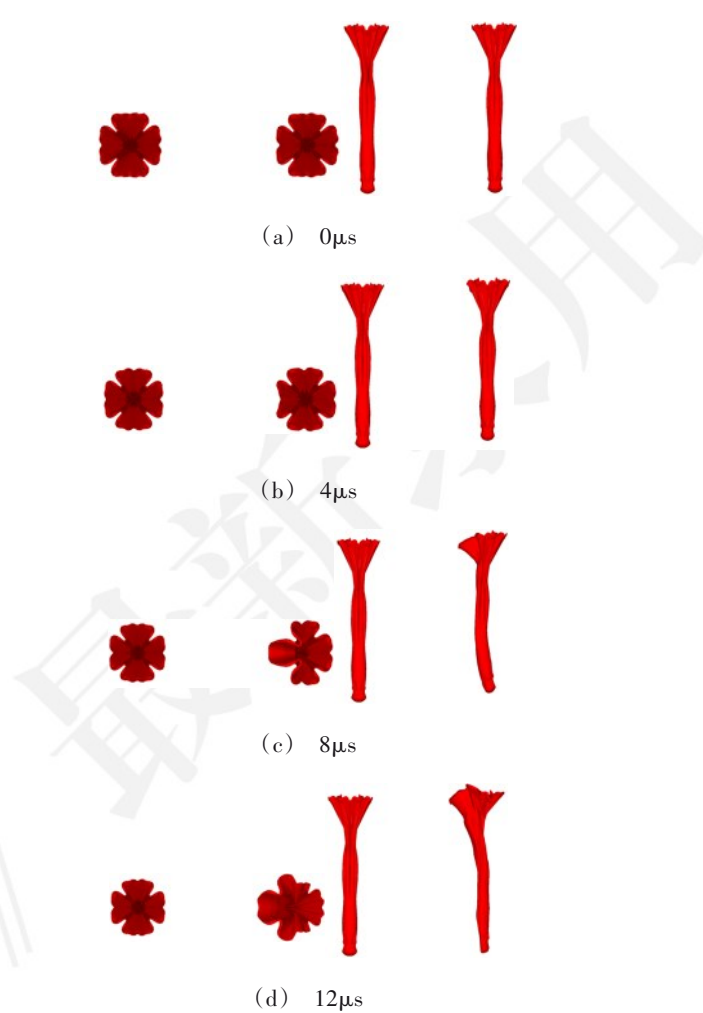


图23 不同起爆时间差并联EFP成型形貌
Fig. 23 Morphologies of Parallel EFPs Formed with Different Detonation Time Differences

起爆时间差增加到12 μ s时,副EFP侵彻孔直径明显下降。

图26为不同起爆时间差时侵彻孔径及靶后有效破片数量。主EFP的侵彻孔径几乎不受起爆时间差的影响,由于副EFP的成型受起爆时间差影响较大,随起爆时间差的增加副EFP的头部半径明显下降,因此侵彻孔径随起爆时间差的增大而减小。随着起爆时间差的增加,产生的靶后有效破片数量显著下降后逐渐增加,在起爆时间差为4 μ s时有效破片数量最少。

由图27可知,在质量分布上,小型破片始终占有效破片总数的60%以上,大型破片占比始终低于5%。不同的起爆时间差下小型破片(1g~4g)占比先减后增,中型破片(4g~8g)占比先增后减,均在4 μ s时达到最大最小值。因为此时EFP形态对称性略

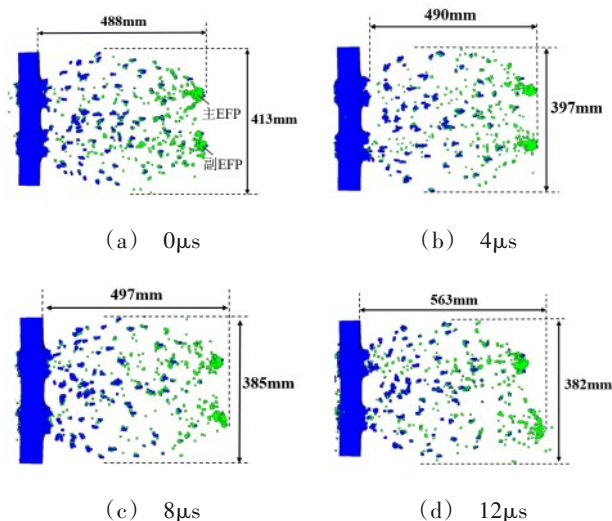


图24 不同起爆时间差并联EFP穿靶后破片云状态

Fig. 24 Post-Penetration Fragment Cloud Status of Parallel EFPs with Different Initiation Time Differences

图25 不同起爆时间差下并联EFP穿靶后靶板应力云图

Fig. 25 Stress Contour Plot of the Target Plate after Penetration by Parallel EFP Warheads with Variable Initiation Time Delays

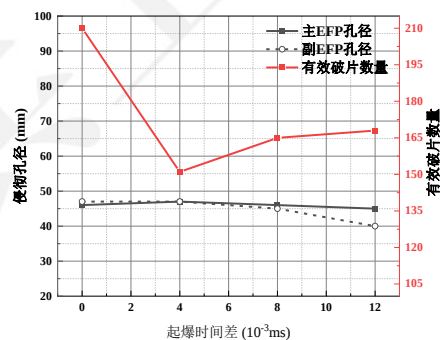
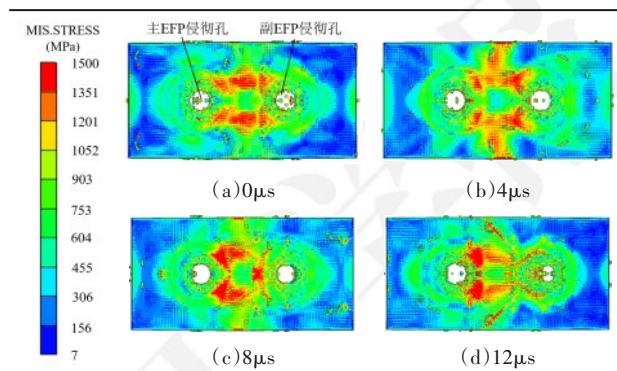
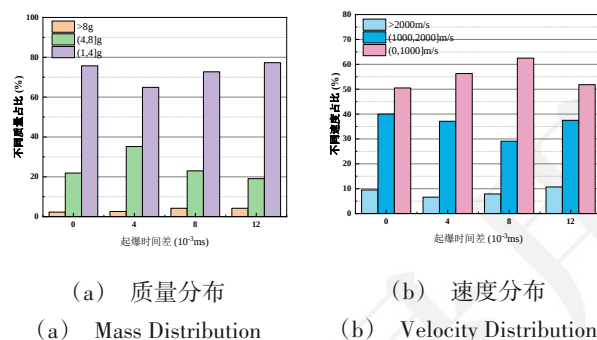


图26 侵彻孔径与有效破片数量

Fig. 26 Penetration Aperture and Number of Effective Fragments



(a) 质量分布

(b) 速度分布

(a) Mass Distribution

(b) Velocity Distribution

图27 不同起爆时间差有效破片分布直方图

Fig. 27 Histogram of Effective Fragment Distribution with Different Initiation Time Differences

有下降但仍保持较好一致性,双EFP在侵彻过程中应力波叠加效应增强,EFP动能主要作用于靶板,使其应力集中区域增加,如图25所示。起爆时间差继续增至 $8\mu\text{s}$ 、 $12\mu\text{s}$ 时,EFP形状呈现高度不对称性,双EFP应力波叠加效应减弱,靶板材料以细小撕裂为主。小型破片占比从64.9%回升至78.3%,中型破片占比从35.2%降至20.8%。

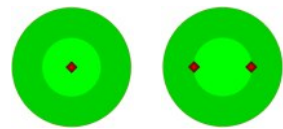
在速度分布方面,随起爆时间差的增加,高速破片占比先减小后增加,但均在11%以下。起爆时间差为 $0\mu\text{s}$ – $8\mu\text{s}$ 时,中速破片占比从40%减小到29.1%,时间差增加到 $12\mu\text{s}$ 时,回升至37.5%。低速破片在起爆时间差 $0\mu\text{s}$ – $8\mu\text{s}$ 区间内占比从50.5%增加到62.5%,时间差为 $12\mu\text{s}$ 时,下降至51.8%,呈现先升后降的趋势。但总体来说,起爆时间差对靶后有效破片的速度分布影响并不明显。

3.3 起爆方式影响

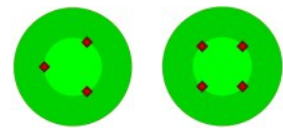
不同的起爆方式产生的爆轰波以及爆轰波的相互作用均有较大差别,导致EFP成型与飞行特性发生改变。两个战斗部间距设计为35mm且同时起爆,在此基础上探究单点中心起爆、两点起爆、三点起爆、四点起爆情况下并联EFP侵彻效果。除单点中心起爆外,其余起爆方式起爆点均沿半径为27mm的圆周均匀分布,起爆点设置如图28所示。

起爆方式对EFP的成型形貌产生较大影响,如图29所示。随起爆点数量的增加EFP头部半径逐渐减小。起爆点的对称性直接影响EFP尾翼的对称性,三点起爆时EFP尾翼对称性最差。各工况下EFP成型及侵彻参数列于表5。

不同起爆方式下并联EFP的侵彻效果如图30所示。当起爆点数大于1时,破片云汇聚区域面积减小,靶后破片总覆盖面积增加。两点起爆时形成



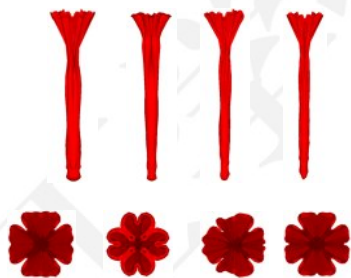
(a) 单点起爆 (b) 两点起爆
(a) Single-Point Initiation (b) Two-Point Initiation



(c) 三点起爆 (d) 四点起爆
(c) Three-Point Initiation (d) Four-Point Initiation

图 28 起爆点设置示意图

Fig. 28 Schematic Diagram of Detonation Point Setup



(a) 单点起爆 (b) 两点起爆 (c) 三点起爆 (d) 四点起爆
(a) Single-Point Initiation (b) Two-Point Initiation (c) Three-Point Initiation (d) Four-Point Initiation

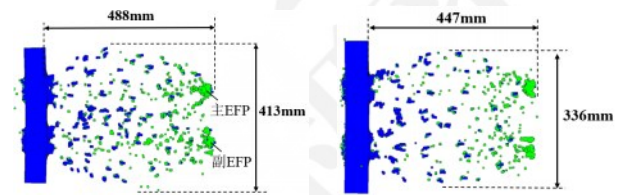
图 29 不同起爆方式主战斗部 EFP 成型形貌

Fig. 29 Morphologies of EFP Formed by the Main Warhead under Different Detonation Modes

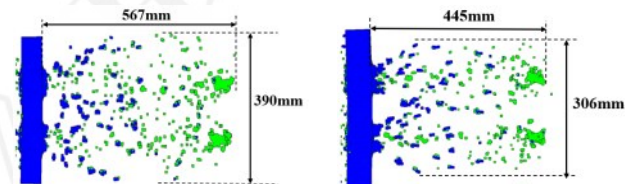
表 5 不同起爆方式下主 EFP 成型及侵彻参数

Table 5 Penetration and Forming Parameters of the Main EFP with Different Detonation Modes

起爆方式	单点起爆	两点起爆	三点起爆	四点起爆
速度降 $V_{dl}/(s^{-1})$	1.11	1.75	0.46	0.89
碰靶速度 $v_1/(m/s)$	2409	2270	2710	2278
头部半径 $r_{I1}/(mm)$	6.3	2.7	3.3	3
尾部半径 $r_{I1}/(mm)$	26.6	21.9	27.9	26.1
长度 $l_1/(mm)$	196	183	238	246



(a) 单点起爆 (b) 两点起爆
(a) Single-Point Initiation (b) Two-Point Initiation



(c) 三点起爆 (d) 四点起爆
(c) Three-Point Initiation (d) Four-Point Initiation

图 30 不同起爆方式并联 EFP 穿靶后破片云状态

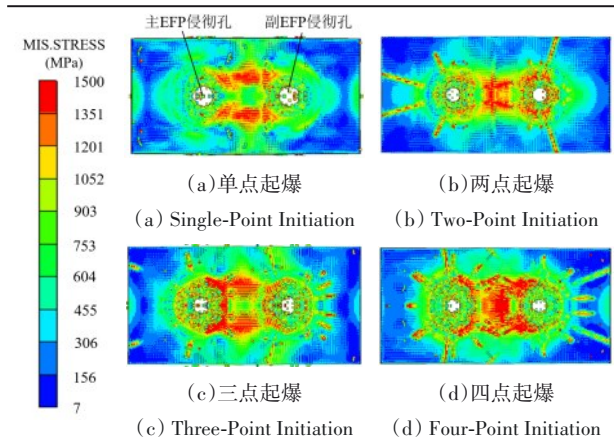
Fig. 30 Post-Penetration Fragment Cloud Status of Parallel EFPs with Different Initiation Methods

的破片云密度最小,三点起爆时由于 EFP 侵彻速度最高,因此破片云 a 轴长度明显增加,破片覆盖面积最大。起爆点增加到四个时, EFP 半径显著下降,因此并联 EFP 形成的靶后破片云之间交汇区域减小,更接近两个独立的 EFP 穿靶后形成的破片云,因此侵彻孔对称面附近的破片数量大幅下降。破片云 a 轴与 b 轴的长度随起爆点数的增加显著下降后出现波动,三点起爆时破片云的 a、b 轴长度最大,此时靶后破片覆盖面积最大,四点起爆时 a、b 轴长度最小,破片覆盖面积也最小。

图 31 为不同起爆方式下并联 EFP 穿靶后靶板背面应力云图。不同起爆方式形成的 EFP 穿靶后对靶板产生不同的应力集中分布。单点中心起爆时,应力集中主要围绕两个侵彻孔对称分布,在侵彻孔圆心的连线附近应力较小。随着起爆点数的

图31 不同起爆方式下并联EFP穿靶后靶板应力云图

Fig. 31 Stress Contour Plot of the Target Plate after Penetration by Parallel EFP Warheads with Different Initiation Configurations.



增加,两个侵彻孔之间的应力集中逐渐增加,并且面积逐渐扩大,即EFP穿靶后对靶板破坏程度增加。

图32为不同起爆方式时并联EFP穿靶后侵彻孔径及产生的靶后有效破片数量。两个EFP侵彻孔径相差不大,并且随着起爆点数的增加先下降后升高,逐渐稳定在37mm左右。单点起爆时孔径最大,为46mm。起爆点数大于1时,靶后有效破片的数量大幅下降,并且随着起爆点数的增加先增加后减小。单点中心起爆时有效破片的数量最多,达到210片,两点起爆与四点起爆时EFP穿靶后形成的有效破片数量最少。

图33为不同起爆方式下靶后有效破片的质量与速度分布。总体而言,起爆方式对破片质量分布的影响相对有限,对速度分布的影响更为显著。四

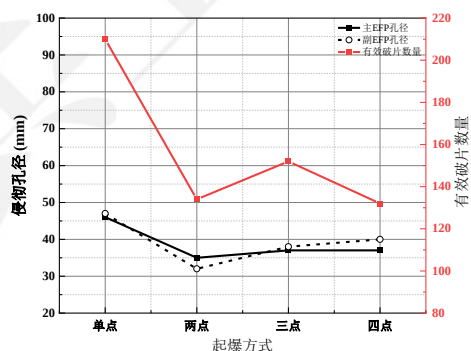


图32 侵彻孔径与有效破片数量

Fig. 32 Penetration Aperture and Number of Effective Fragments

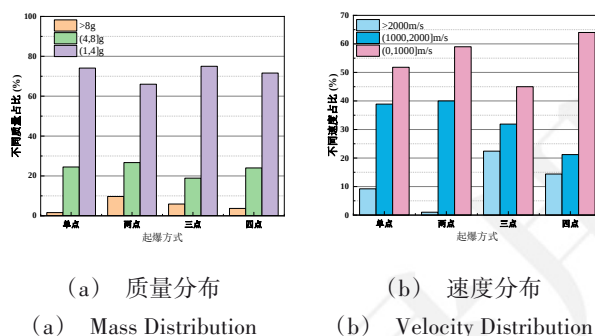


图33 不同起爆方式有效破片分布直方图

Fig. 33 Histogram of Effective Fragment Distribution with Different Initiation Methods

种起爆方式下,小破片占比始终高于60%,中型破片占比始终在20%左右,大破片占比仅两点起爆时略有提升,但均低于均10%。整体来看,起爆方式对中对大型破片的影响相对明显,但有效破片的质量分布随起爆方式变化没有明显变化趋势。

在速度分布上,根据图33(b),起爆方式的调控作用更为明显。两点起爆时,EFP初始速度较低且形态对称性下降,动能分散,因此高速破片占比极低,仅1%,有效破片主要集中于中、低速区间。四点起爆时EFP半径最小,速度最大,EFP动能主要用于形成贯穿通孔,此时低速破片占比最高,达到64%。三点起爆时,EFP速度和半径均介于四种起爆方式之间,此时靶后有效破片的速度分布均匀,高速破片占比超过20%,中、低速破片比例适中。

4 结论

本文通过数值模拟对并联EFP对钢靶的侵彻特性进行研究,分析了影响并联EFP侵彻特性及后效毁伤效果的主要影响因素。得到如下结论:

1) 分析了并联EFP对钢靶的侵彻过程,揭示了弹靶作用过程中能量交换、靶板不同位置处受力状态及靶后破片分布规律。

2) 通过对并联EFP战斗部起爆、飞行、侵彻全过程的数值模拟,得到了不同因素对并联EFP侵彻钢靶及靶后破片分布特性的影响规律,战斗部间距为35mm、单点中心同步起爆时,主、副EFP造成的平均孔径最大、靶后有效破片最多。

3) 通过对靶后有效破片的统计,得到了不同并联EFP对靶后有效破片质量、速度分布的影响规律,战斗部间距的变化对小型低速破片影响较大,起爆时间差主要影响有效破片的质量分布,而起爆

方式主要对有效破片的速度分布产生影响。

参考文献(References)

- [1] 张文龙, 张先锋, 王文杰, 等. 材料反应特性对反应装甲干扰聚能射流行为的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(10): 1031–1043.
- ZHANG W L, ZHANG X F, WANG W J, et al. Study on the influence of material reaction characteristics on the behavior of reactive armor interfering with shaped charge jet [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(10): 1031–1043. (in Chinese)
- [2] QI Z, ZU X, HUANG Z. Review of development and key technologies of reactive armor and anti-reactive armor [J]. Mechanics of Solids, 2025: 1–21.
- [3] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学, 2014: 376–378.
- HUANG Z X. Theory and practice of shaped charge [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 376–378. (in Chinese)
- [4] Xing B, Liu R, Guo R, et al. Influence of the embedded structure on the EFP formation of compact terminal sensitive projectile[J]. Defence Technology, 2017, 13(4): 310–315.
- [5] 冯伟, 崔东华, 刘海晓, 等. 反无人艇群弹药战斗部参数对效能影响分析[J]. 兵工学报, 2022, 43(S2): 26–31.
- FENG W, CUI D H, LIU H X, et al. Influence of warhead parameters of munitions against USV group on combat effectiveness [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(S2): 26–31. (in Chinese)
- [6] 吴鹏. 掠飞攻顶状态下聚能战斗部侵彻机理及仿真研究[D]. 中北大学, 2018.
- Wu P. The penetration mechanism and simulation study of shaped warhead in the state of skimming to attack the top [D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [7] 周健, 王竹萍, 焦勇, 等. 国外陆军高速动能导弹技术现状及发展趋势[J]. 兵工学报, 2010, 31(S2): 153–156.
- ZHOU J, WANG Z P, JIAO Y, et al. Present Situation and Development Tendency of Foreign Hypervelocity Kinetic Energy Missiles [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(S2): 153–156. (in Chinese)
- [8] 潘建, 张建军, 侯云辉, 等. 带隔板装药EFP成型数值模拟与实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 89–94.
- PAN J, ZHANG J J, HOU Y H, et al. Numerical simulation and experimental study on the EFP forming process with wave-shaper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 89–94. (in Chinese)
- [9] 刘贞娟, 蒋建伟, 李梅, 等. 压环对爆炸成型弹丸成型影响的高精度仿真分析[J]. 兵工学报, 2025, 46(01): 90–100.
- LIU Z X, JIANG J W, LI M, et al. High precision simulation of the influence of pressing ring on EFP forming properties [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(1): 90–100. (in Chinese)
- [10] LIU J Q J, GU W B, LU M, et al. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics [J]. Defence Technology, 2014, 10(2): 119–123.
- [11] 李渊博, 王金相, 赵瑶瑶, 等. EFP构型对其气动特性和侵彻性能影响分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(08): 259–265.
- LI Y B, WANG J X, ZHAO Y Y, et al. Analysis of the influence of EFP configuration on its aero dynamic characteristics and penetration performance [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(8): 259–265. (in Chinese)
- [12] Li Y B, Wang J X, Liu Z T, et al. Orthogonal optimization design and experiments on explosively formed projectiles with fins [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023.
- [13] 李元, 谢佳良, 张浩宇, 等. 基于非等壁厚药型罩的半球形爆炸成型弹丸成型因素研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(05): 471–478.
- LI Y., XIE J L, ZHANG H Y, et al. Formation factors of quasi-spherical EFP with unequal-thickness liner [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(5): 471–478. (in Chinese)
- [14] YANG D, LIN J. Numerical Investigation on the Formation and Penetration Behavior of Explosively Formed Projectile (EFP) with Variable Thickness Liner[J]. Symmetry, 2021, 13(8): 1342
- [15] 李裕辛, 陈嘉琳, 王瑞琪, 等. CoCrFeNiCu_x高熵合金爆炸成型弹丸药型罩结构的优化与毁伤效能[J/OL]. 爆炸与冲击, 2025, 1–21.
- LI R X, CHEN J L, WANG R Q, et al. Optimatnon of structural design and damage efficacy for CoCrFeNiCu_x high-entropy alloy liners in explosively formed projectiles [J/OL]. Explosion and Shock Waves, 2025, 1–21. (in Chinese)
- [16] LIU J, LONG Y, JI C, et al. The influence of liner material on the dynamic response of the finite steel target subjected to high velocity impact by explosively formed projectile [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 264–275.
- [17] 丁力, 蒋建伟, 王树有, 等. 钽爆炸成型弹丸成型及断裂特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(S1): 53–58.
- DING L, JIANG J W, WANG S Y, et al. Tantalum EFP's forming and fracture characteristics [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(S1): 53–58. (in Chinese)
- [18] 朱志鹏, 门建兵, 蒋建伟, 等. 大长径比钽爆炸成型弹丸控制研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 29–36.
- ZHU Z P, MEN J B, JIANG J W, et al. Forming control of tantalum EFP with large aspect ratio [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(S1): 29–36. (in Chinese)
- [19] 樊雪飞, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 爆轰驱动钽药型罩形成双模毁伤元仿真与试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(10): 1918–1925.
- FANG X F, LI W B, WANG X M, et al. Simulation and Experimental Study of Tantalum Liner to Form Dual-mode Damage Element by Detonation [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(10): 1918–1925. (in Chinese)
- [20] 付恒, 蒋建伟, 王树有, 等. 爆炸成型弹丸药型罩用高密度合金选取准则[J]. 兵工学报, 2022, 43(09): 2330–2338.
- FU H, JIANG J W, WANG S Y, et al. High-density alloy selection criteria for liners of explosively formed projectiles [J].

- Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2330–2338. (in Chinese)
- [21] 别海远, 张鸿宇, 马红兵, 等. 包覆式活性 EFP 成型机理与规律研究[J]. 兵工学报, 2025, 46(01): 81–89.
- BIE H Y, ZHANG H Y, MA H B, et al. Formation mechanism and principle research of coated reactive explosively formed projectile [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(1): 81–89. (in Chinese)
- [22] 张佳玉, 赵太勇, 付建平, 等. 钨柱破片对装甲钢的侵彻研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(03): 297–303.
- ZHANG J Y, ZHAO T Y, FU J P, et al. Research on penetration of tungsten column fragments into armor steel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(3): 297–303. (in Chinese)
- [23] HAO L K, GU W B, ZHANG Y D, et al. Damage of a large-scale reinforced concrete wall caused by an explosively formed projectile (EFP)[J]. Defence Technology, 2023, 28280–297.
- [24] LI Y B, WANG J X, LI Z T, et al. Orthogonal optimization design and experiments on explosively formed projectiles with fins [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173.
- [25] 任芮池, 王树有, 蒋建伟, 等. 串联爆炸成型弹丸飞行气动特性的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(S1): 8–14.
- REN R C, WANG S Y, JIANG J W, et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of double-layer liners EFP [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(S1): 8–14. (in Chinese)
- [26] 郑元枫, 马红兵, 肖艳文, 等. 三层串联 EFP 成型与分离行为[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(02): 143–150.
- ZHENG Y F, MA H B, XIAO Y W, et al. Formation and Separation Behavior of the Triple-Layer EFP[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(02): 143–150. (in Chinese)
- [27] 王金涛, 余文力, 王涛. 长杆弹侵彻多层间隔靶的破片云研究[J]. 固体力学学报, 2013, 33(S1): 84–90.
- WANG J T, YU W L, WANG T. Study on debris cloud of long-rod projectile penetrating into multi-layer spaced targets [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013, 33(S1): 84–90. (in Chinese)
- [28] 位国旭, 徐宏伟, 郭锐, 等. 铝合金 EFP 靶后破片的空间散布特性[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(5): 120–135.
- Spatial dispersion characteristics of behind-armor debris generated during the penetration of tantalum alloy explosively-formed projectile [J]. Acta Armamentarii, 2026, 46(5): 120–135. (in Chinese)
- [29] 王圣芳, 常慧, 焦志明, 等. 高熵合金活性破片的毁伤效应与碎片云特性[J]. 兵工学报, 2025, 46(10): 214–226.
- WANG S F, CHANG H, JIAO Z M, et al. Study on the damage effect and debris cloud characteristics of reactive fragments of high-entropy alloys [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(10): 214–226. (in Chinese)
- [30] 王哲. PELE/EFP 双模毁伤元成型控制及终点效应研究[D]. 北京理工大学, 2018.
- WANG Z. Research on formation control and terminal effect of PELE/EFP dual-mode warhead [D]. Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [31] 李睿. EFP 侵彻穿透靶板靶后破片研究[D]. 南京理工大学, 2018.
- LI R. Study on behind-target fragments from EFP penetrating target plates [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [32] 黄炫宁, 李伟兵, 李文彬, 等. 爆炸成型弹丸侵彻不同材料靶板后效破片特性试验研究[J]. 兵工学报, 2024, 45(01): 58–68.
- HUANG X N, LI W B, LI W B, et al. Experimental research on the characteristics of Behind-armor Debris from explosively formed projectile penetrating targets of different materials [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(01): 58–68. (in Chinese)
- [33] 王昕. EFP 靶后破片形成机理与终点效应研究[D]. 北京理工大学, 2019.
- WANG X. Study on formation mechanism and terminal effect of EFP behind-target fragments [D]. Beijing Institute of Technology, 2019. (in Chinese)