

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0017

周向多线性爆炸成型弹丸技术研究现状与发展*

蒋建伟, 彭嘉诚

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 传统的破片式防空反导战斗部爆炸后产生的破片杀伤元数量虽多, 却不能有效击毁来袭的不敏感弹药, 存在威力不足问题, 因而限制了其发展。周向多线性爆炸成型弹丸 (multiple linear explosively-formed projectile, MLEFP) 战斗部爆炸后在周向产生多个高速、大质量、大长径比的折型线性爆炸成型弹丸 (linear explosively-formed projectile, LEFP), 具备击穿、击爆厚壁壳体不敏感弹药的能力, 因此在中近程防空反导作战中具备广阔的应用前景。从线性毁伤元的发展和对折型 LEFP 的成型技术出发, 重点分析了炸药装药、药型罩等关键部件影响线性毁伤元成型的研究成果, 对比了 3 种毁伤元初速工程计算模型的理论依据、优缺点等, 概括了近年来对折型 LEFP 侵彻试验结果, 最后总结了周向 MLEFP 战斗部及其毁伤元未来的发展方向。

关键词: 周向多线性爆炸成型弹丸战斗部; 线性毁伤元; 炸药装药; 药型罩; 初速模型; 侵彻威力

中图分类号: O381; T3302

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

Research advances in circumferential multiple linear explosively-formed projectile technology

JIANG Jianwei, PENG Jiacheng

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The traditional fragmental warhead used in air defense and antimissile can not effectively destroy the incoming insensitive ammunition due to the weak fragmentations, which limits its development. After explosion of the circumferential multiple linear explosively-formed projectile (MLEFP) warhead, a number of folded linear explosively formed projectiles (LEFP) are produced in the circumferential direction with high speed, large mass and large length to diameter ratio. These projectiles can penetrate thick cases and ignite insensitive ammunitions, so the MLEFP warhead has a great application prospect in the medium-short range air defense and anti-missile system. Based on the development of linear projectile and the forming method of new LEFPs, the influences of charge and liner are focused on. Theories, merits and demerits of three initial velocity models are compared. The results of penetration tests using folded LEFPs in recent years are summarized. Finally, the future development direction of circumferential MLEFP warhead and linear projectile is analyzed.

Keywords: circumferential multiple linear explosively formed projectile warhead; linear projectile; charge; liner; initial velocity model; penetrating performance

随着近年来制导控制与高效毁伤技术的飞速发展, 精确制导与不敏感弹药的组合在军事强国各军种中装备的比例正在快速提升, 具备精度高、体积小、速度快、威力大、抗打击能力强等特点, 对军事堡垒、大型舰艇、防御工事等高价值目标产生极大威胁。传统防空反导弹药常使用的预制破片、杆条类等杀伤战斗部已研制、应用多年, 对其爆炸驱动、毁伤元杀伤效应^[1-5]等物理机制的研究虽然较为完善, 但其对来袭的厚壁壳体不敏感弹药往往只能造成部分解体或偏航, 不能完全解除威胁。苗润源等^[6]提出了一种新型周向多线性爆炸成型弹丸 (multiple linear explosively-formed projectile, MLEFP) 战斗部, 模型如图 1 所示。

* 收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-04-20

第一作者: 蒋建伟(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, bitjw@bit.edu.cn

与传统的破片、杆条类杀伤战斗部和周向多爆炸成型弹丸(multiple explosively-formed projectile, MEFP)战斗部相比,其具备的特点有:

(1)爆炸后在周向产生多个均匀分布的大质量侵彻体,有效提高毁伤能力;

(2)药型罩既是毁伤元的来源,又作为壳体支撑战斗部强度,无效质量低;

(3)药型罩可采用轴向多层交错、周向多段结构;

(4)圆柱壳体表面利用率达 90% 以上,且仍具有一定强度。

通过采用该新型周向 MLEFP 战斗部既可解决传统杀伤类战斗部威力不足问题,又能兼顾空间分布密度和弹体结构强度,大大降低引战匹配与弹药总体设计的难度。

本文中,针对周向 MLEFP 战斗部及其线性毁伤元近年来的研究成果,首先梳理线性毁伤元的发展和新型 LEFP 的成型技术,重点分析炸药装药与药型罩等关键部件对毁伤元成型影响的规律,并比较 3 种毁伤元初速工程计算模型的理论依据与优缺点等,概括近年来对折型 LEFP 侵彻试验结果,探讨周向 MLEFP 战斗部及其毁伤元未来的发展方向。

1 线性聚能毁伤元发展

能量在给定方向上或给定地点处聚集的效应,称为聚能,广泛研究的聚能装药一般有两种形式^[7]:轴向往向聚能装药和线性聚能装药。

轴向往向聚能装药利用带有锥形、球缺形等药型罩的一端空穴产生具有极强局部侵彻与破坏能力的聚能射流(jet)或爆炸成型弹丸(explosively-formed projectile, EFP)等毁伤元,在反装甲作战中有极广泛的应用,其成型机理与毁伤效应在过去得到了深入探索^[8-9]。

线性聚能装药为平面对称结构,聚能凹穴和药型罩横截面可以为三角形、抛物线、半圆形等,在爆炸后可形成片状聚能“切割刀”,即线性射流毁伤元(linear jet, L-jet),能够切开靶板,其中应用较广泛的 V 形成型装药^[10-18]与线性射流成型 X 射线照片见图 2,主要研究成果包括:(1)射流“切割刀”成型形态、飞行速度梯度、有利炸高与切割特性;(2)不同起爆条件、药型罩结构和材料及试验方法影响研究;(3)线性射流成型准定常理论和射流速度、切割深度等计算模型。

陶钢等^[19]分析认为,V 形药型罩在爆炸加载的压垮过程中,头部压缩大,尾部压缩小,速度梯度小,产生的弹丸形状和长径比不理想。圆缺形线性药型罩在爆炸时可产生线性爆炸成型弹丸

(linear explosively-formed projectile, LEFP),有效弥补线性射流对炸高敏感,易破裂飞散导致侵深小的缺点。

苟瑞君^[20]、杜忠华等^[21]、段卫毅^[22]、高接东^[23]对 LEFP 毁伤元的成型与侵彻威力开展了大量研究工作,研究的影响因素包括:(1)装药结构(装药长度、高度等);(2)药型罩结构(壁厚及变化率、内外曲率半径等);(3)起爆条件(端面、棱中心点,多棱和单棱线等)。通过正交优化,最终利用线性圆缺罩在大炸高条件下产生了能稳定飞行、形状优良的 LEFP,并得到试验验证。

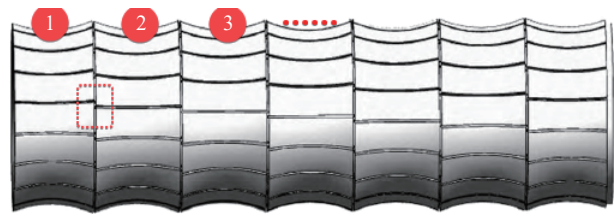


图 1 周向 MLEFP 战斗部模型^[6]

Fig. 1 A circumferential MLEFP warhead model^[6]

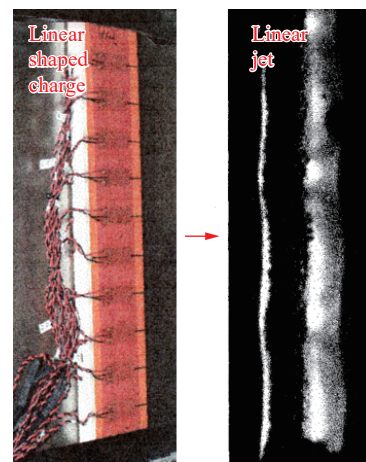


图 2 线性成型装药及线性射流^[13]

Fig. 2 Linear shaped charge and linear jet^[13]

Joo 等^[24-25] 利用数值模拟方法结合试验, 研究了 LEFP 对长杆钨芯穿甲弹的拦截毁伤及剩余穿甲弹对装甲钢靶的侵彻深度。Li 等^[26] 研究了多序列 LEFP 在不同间距和角度条件下切割不同速度和长径比钨合金长杆的现象, 采用高速摄像机记录长杆的变形、断裂及断裂部分的运动规律, 试验中线性圆弧形药型罩和爆炸产生的 LEFP 毁伤元如图 3 所示。

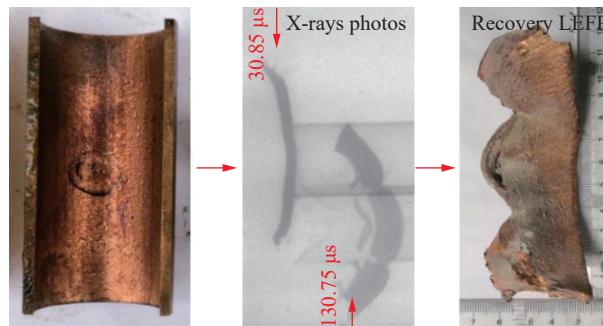


图 3 线性圆弧形药型罩与 LEFP^[26]

Fig. 3 Linear arc liner and LEFP^[26]

一般而言, LEFP 毁伤元为片状或刀状, 对目标切割面积大, 利于拦截高速长杆穿甲弹, 但侵彻能力相对较差, 对于击穿厚壁壳体并击爆内部装药仍有困难。为探索线性成型装药爆炸产生更大侵彻威力的新型毁伤元, 周涛等^[27] 首先开展不同起爆方式影响 LEFP 成型的理论与试验研究, 起爆机构、线性成型装药和侵彻钢靶试验结果如图 4 所示, 并对 LEFP 毁伤元分类: (1) 端面起爆形成偏向 LEFP; (2) 上端面中心点起爆和线起爆形成正向 LEFP; (3) 上端面两棱多点起爆可形成散点 EFP; (4) 两端同时起爆形成大威力 EFP。

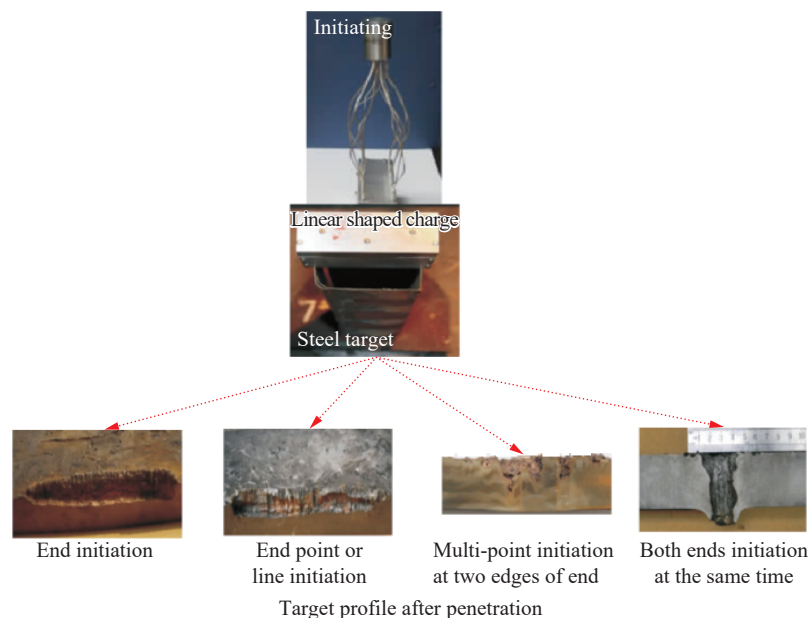


图 4 起爆机理、线性成型装药和侵彻钢靶试验结果^[27]

Fig. 4 Test results of initiation mechanism, linear shaped charge and penetration of steel target^[27]

针对两端同时起爆条件下产生的大威力 EFP, 刘杰等^[28] 进行的数值模拟与侵彻试验研究表明: 在大炸高条件下, 两端同时起爆线性成型装药可形成高速、大质量、大长径比 LEFP, 斜侵彻时仍可穿透 40 mm 厚的 A3 钢靶。该 LEFP 毁伤元形状特征明显, 可称之为对折型 LEFP, 侵彻威力大, 具备完全击毁厚壁壳体不敏感弹药的潜力, 对折型 LEFP 成型过程与侵彻钢靶试验结果见图 5。

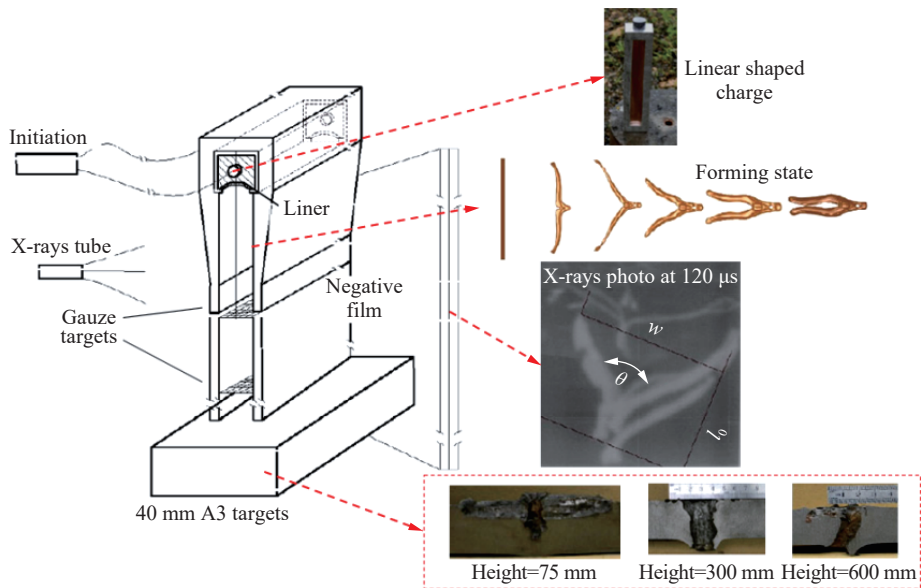


图 5 对折型 LEFP 成型过程及侵彻钢靶结果^[28]

Fig. 5 The Process of forming LEFP and results of penetration on steel target^[28]

成型装药在不同装药结构、药型罩及起爆条件下可产生完全不同的聚能毁伤元,如图 6 所示,而周向 MLEFP 战斗部正是通过对折型 LEFP 毁伤元实现对来袭厚壁壳体不敏感弹药的完全毁伤。

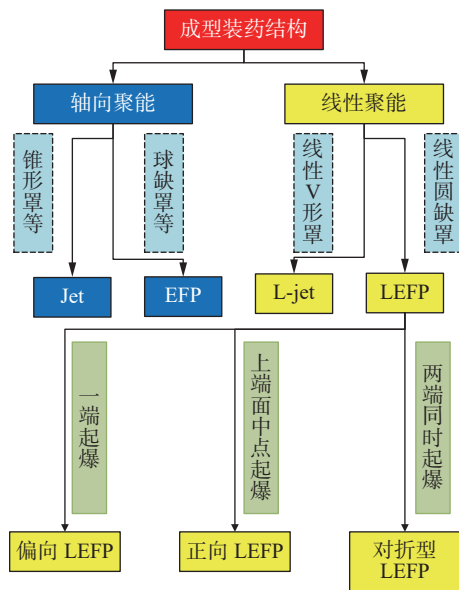


图 6 不同成型装药形成不同毁伤元分类

Fig. 6 Classification of types of projectiles by different shaped charges

2 周向 MLEFP 战斗部设计

时至今日,研究新结构聚能装药的基本方法仍然是试验研究方法—大量应用 X 射线闪光照相技术和实弹射击试验。但随着计算机软硬件技术的飞速发展,数值模拟技术在描述聚能装药爆炸成型、飞行、侵彻过程发挥着越来越重要的作用,可用于事先考察研制新聚能装药的可能性及其成型、作用规律,给出关于装药结构参数合理性的大量先验性信息,大幅减少试验工作量,将试验研究导向对计算设计的校核型试验^[7],这一研制流程也成功应用在 MLEFP 战斗部设计中。

周向 MLEFP 战斗部同样存在较多影响毁伤元形态与速度的因素, 包括: (1)起爆方式; (2)炸药装药的爆轰性能; (3)炸药装药的结构尺寸; (4)药型罩材料和结构等。

但周向 MLEFP 战斗部的药型罩同时也充当支撑战斗部强度的壳体, 因此在设计中不涉及壳体约束。在弹药总体要求的形状、质心、质量和体积等约束下开展战斗部设计, 从上述四个方面进行结构设计和参数调整, 以期爆炸后在周向产生多个形状良好、大长径比的高速 LEFP 毁伤元。

2.1 起爆方式对成型的影响

起爆方式对线性毁伤元成型具有极大影响, 而利用线性成型装药爆炸产生对折型 LEFP 需要足够大的头尾速度梯度, 采用两端同时起爆方式, 利用爆轰对碰原理, 在药型罩中部产生远高于 C-J 爆压的超高爆轰压力(约为 2.39 倍 C-J 爆压^[28-29]), 增大药型罩中部与边缘部分的速度梯度, 实现药型罩完全对折。

Cao 等^[30] 在研究起爆方式对线性毁伤元成型质量及威力的影响后, 认为利用两端起爆方式产生对折型 LEFP 的机理与单条线性成型装药类同。在此基础上, 刘杰等^[28]、王锋^[29] 利用两端同时起爆单条线性装药, 形成了大质量、大长径比的高速对折型 LEFP。张明丛等^[31-32] 进一步完成了周向 MLEFP 战斗部样机设计, 如图 7 所示。

需要指出的是, 采用在战斗部两端同时起爆形成对折型 LEFP 的方式虽然无需改变原战斗部结构, 加工工艺性好, 但目前起爆时间误差控制难度大, 且同步起爆装置生产一致性仍有偏差, 起爆后爆轰波并不总能在长度方向中心处对碰, 易造成 LEFP 成型不对称(见图 5), 飞行稳定性较差, 造成 LEFP 着靶攻角大, 削弱了侵彻威力。

2.2 炸药装药对成型的影响

炸药装药一直是成型装药结构设计的关键, 往往从周向 MLEFP 战斗部中单独取某个线性成型装药结构开展研究。相对于轴向聚能装药, 线性装药的结构参数不仅有装药高度 H , 还包括装药宽度 W 和长度 L , 如图 8 所示。

王康康^[33] 研究了在采用 8701 炸药、无氧紫铜药型罩的条件下装药长度 L 和装药高度 H 对对折型 LEFP 的成型影响, 而装药宽度 W 受战斗部口径限制, 采用次口径装药时 W 取定值为 26 mm。图 9 给出了对折型 LEFP 成型速度 v_0 与装药长度与宽度之比 (L/W) 和装药高度与装药宽度之比 (H/W) 的关系曲线及 LEFP 成型形态。

图 9 中曲线表明随着装药长度和高度增加, 对折型 LEFP 完全成型后的稳定速度(即成型速度)均有所增加, 且成型速度随装药高度增加得更快, 呈线性增长趋势。LEFP 尾部随着装药长度和高度增加, 成型时更加闭合, 这是由于边界稀疏波的影响, 药型罩中间部分运动速度的增大量会超过两端, 首尾速度梯度变大, 能够有效拉动尾部两侧向中心闭合。

为了增大头尾速度差以形成形状良好的对折型 LEFP, 李鹏等^[34-35] 设计了一种直径达 127 mm 的分层复合装药周向 MLEFP 战斗部, 战斗部前、后端盖均为 4 mm 厚铝合金, 药型罩材料为纯铁, 罩顶处为



图 7 周向 MLEFP 战斗部样机^[31]

Fig. 7 A prototype for a circumferential MLEFP warhead^[31]

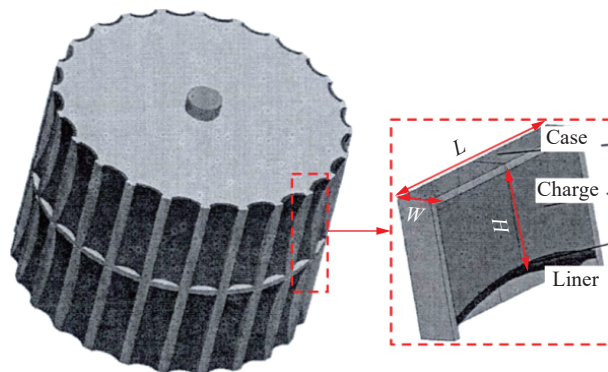


图 8 周向 MLEFP 战斗部和单条线性成型装药模型^[33]

Fig. 8 A circumferential MLEFP warhead and the single linear shaped charge model^[33]

高爆速 RDX 基含铝炸药, 两端处为低爆速 TNT 炸药, 模型见图 10。

假设在爆炸加载下药型罩中部发生塑性变形, 其余位置只翻转而未有塑性变形, 能量损失较小, 应用 Gurney 方法^[36] 建立复合装药 MLEFP 战斗部 LEFP 毁伤元初速工程计算模型^[34]。定义 EFP 的成型速度为药型罩在爆炸驱动下完全成型后的稳定初速。

Gurney 方法^[36] 作为一种经典的半理论半经验处理方法, 从能量守恒角度出发, 在建立破片初速理论模型上得到广泛应用^[37], 可获得令人满意的计算精度, 其一般形式为:

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \quad (1)$$

式中: v_0 为毁伤元初速, m/s; $\sqrt{2E}$ 为炸药 Gurney 常数, m/s; β 为战斗部装填比, $\beta = m_e/m_s$; m_e 为炸药装药质量, kg; m_s 为药型罩壳体质量, kg。

由于不同炸药的 Gurney 常数不同, 需分别计算每部分装药对应药型罩质量、装填比及速度, 再根据对称轴方向上动量守恒关系获得 LEFP 初速模型:

$$v_0 \cdot \sum_{i=1}^k m_s^{(i)} = \sum_{i=1}^k m_s^{(i)} \cdot v_0^{(i)} \quad (2)$$

式中: v_0 为 LEFP 完全成型后初速, m/s; k 代表复合装药结构共 k 个不同装药部分; i 代表复合装药结构第 i 个装药部分; $m_s^{(i)}$ 为第 i 个装药部分药型罩质量, kg; $v_0^{(i)}$ 为第 i 个装药部分按式(1)计算的毁伤元初速, m/s。

利用数值模拟计算该战斗部形成的对折型 LEFP 成型后长径比可达 4, 并在完成战斗部样机设计后开展了静爆外场试验, 利用通断靶测试 LEFP 速度, 采用 40 mm 厚的钢靶获取毁伤元的侵彻能力。图 11 显示的是静爆试验测试现场布置, 表 1 给出了不同方法获取的 LEFP 成型速度^[34]。

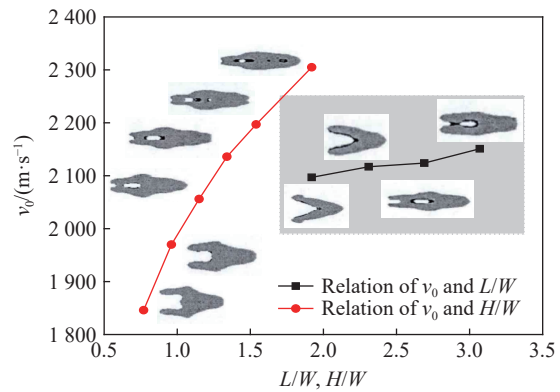


图 9 对折型 LEFP 成型速度与装药长度与宽度之比和装药高度与装药宽度之比的关系曲线以及 LEFP 成型形态^[33]

Fig. 9 Relations of forming velocity of folded LEFPs with the length-to-width and height-to-width ratios of the charges as well as the shapes of the LEFPs^[33]

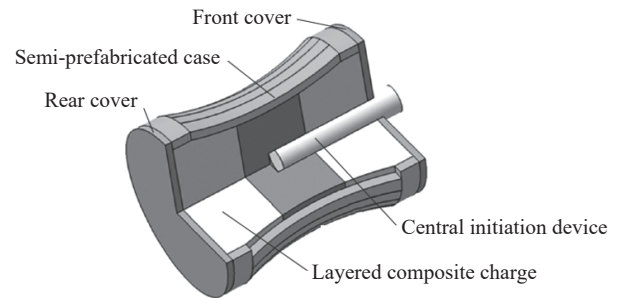


图 10 分层装药周向 MLEFP 战斗部模型^[34]

Fig. 10 The model for a circumferential MLEFP warhead with composite charge^[34]

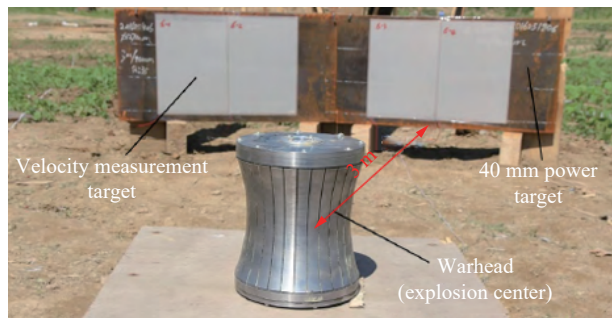


图 11 试验现场布置^[34]

Fig. 11 Test site layout^[34]

表 1 LEFPs 成型速度^[34]

Table 1 Forming velocity of LEFPs^[34]

方法	LEFP成型速度/(m·s ⁻¹)	误差/%
Gurney理论	1 303	9
数值模拟	1 490	1.6
静爆试验	1 433	/

2.3 药型罩对成型的影响

线性药型罩在炸药爆炸驱动过程中同样要经历压垮、翻转等大变形过程。通常的单方向曲率线性圆缺形药型罩长度 L_1 受装药长度 L 约束, 药型罩结构参数变量主要包括药型罩最大壁厚 B 、壁厚梯度 $G(G=B-C, C$ 为药型罩中心厚度) 及曲率半径 R , 如图 12 所示。

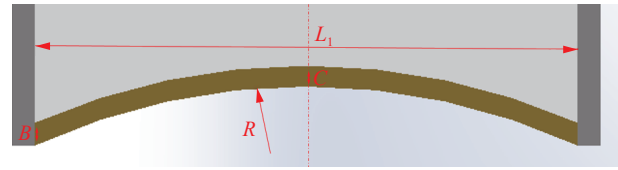


图 12 单方向曲率线性圆缺药型罩示意图

Fig. 12 Schematic diagram of a linear circular charge liner with unidirectional curvature

在张明从等的研究中周向 MLEFP 战斗部直径为 85 mm, 采用 8701 炸药和紫铜药型罩^[31-32], 通过数值模拟获取如图 13 所示的对折型 LEFP 成型速度 v_0 和药型罩壁厚梯度、最大壁厚与长度之比 ($G/L_1, B/L_1$) 的关系曲线及成型形态。

随着药型罩壁厚梯度增大(即药型罩中心厚度减小), LEFP 成型速度以线性快速提高, 尾部闭合变好, 但断裂可能性增大; 随着最大壁厚增加, LEFP 成型速度线性降低, 尾部越难闭合。因此减小药型罩中心厚度或最大厚度均会使 LEFP 速度增加, 尾部收拢闭合, 但存在 LEFP 头尾速度梯度过大导致断裂现象的临界厚度值。

图 14 给出了对折型 LEFP 成型速度 v_0 和药型罩曲率半径与长度之比 (R/L_1) 的关系曲线及成型形态, 其中曲线 1 数据来自文献^[31], 曲线 2 数据来自文献^[33]。

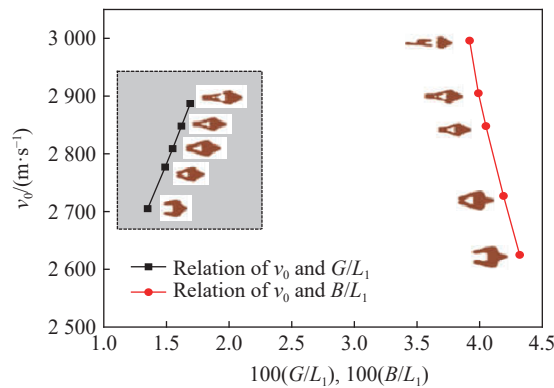


图 13 对折型 LEFP 成型速度和药型罩壁厚梯度、最大壁厚与长度之比的关系曲线以及成型形态^[31-32]

Fig. 13 Relations of forming velocity of folded LEFPs with the wall thickness gradient-to-length and the maximum wall thickness-to-length ratios of the liner as well as the shapes of the LEFPs^[31-32]

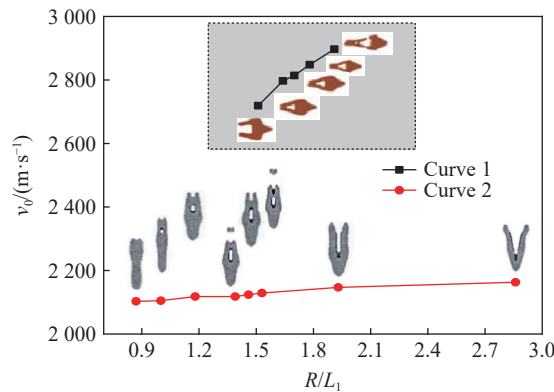


图 14 对折型 LEFP 成型速度和药型罩曲率半径与长度之比的关系曲线及成型形态^[31-33]

Fig. 14 Relations of forming velocity of folded LEFPs with the curvature radius-to-length ratio of the liner as well as the shapes of the LEFPs^[31-33]

不同于轴向聚能装药, 随着药型罩曲率半径 R 的增大, LEFP 成型速度反而有所增加, 这是由于装药量随 R 增大快速增加, 按 Gurney 方法^[36], 随装填比增大, LEFP 被炸药驱动的速度增大。但在不同成型装药结构下装填比随曲率半径 R 增大的速率不同, 导致 LEFP 成型时尾部闭合规律也截然不同, 在文献 [31] 中线性成型装药结构下, LEFP 速度随 R 增大急剧升高, 头尾速度梯度提高, 可以有效拉动 LEFP 尾部闭合, 而在文献 [33] 中的结构下, LEFP 速度随 R 增大变化较小, 但曲率半径却增大很快, 在长度方向上药型罩曲率较大, 导致径向速度较低, LEFP 尾部难以有效闭合。

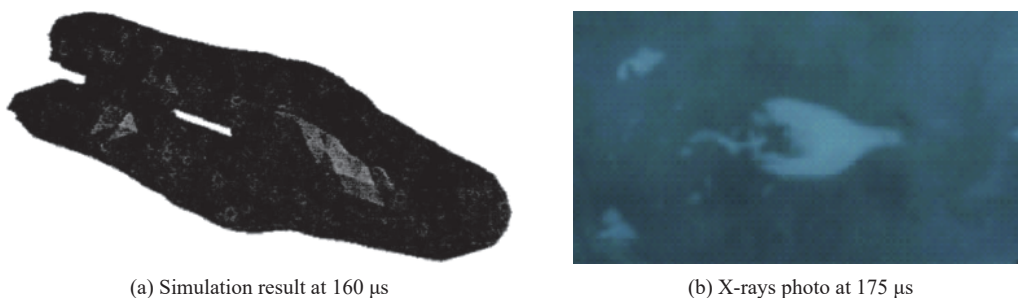
将周向 MLEFP 战斗部按中心对称结构简化为二维平面问题, 见图 15。通过 C-J 瞬时爆轰假设^[38], 结合药型罩轴线方向的动量守恒建立周向 MLEFP 战斗部单条 LEFP 初速计算模型^[31]:

$$v_0 = \frac{\rho_0 D \int_0^b (L/2 - y) \sqrt{(1+y^2)/(k^2 - 1)} \sin \arctan y \, dx}{\rho \int_0^b \delta(x) \sqrt{1+y^2} \, dx} \quad (3)$$

式中: ρ_0 为炸药装药密度, kg/m^3 ; D 为炸药爆速, m/s ; b 为图 15 中药型罩最右侧点在 x 轴上投影离原点的距离, m ; L 为药型罩长度, m ; $y = f(x)$ 为药型罩母线方程; k 为与炸药相关的常数, 一般近似取 3; ρ 为药型罩密度, kg/m^3 ; $\delta(x)$ 为药型罩壁厚函数。变量 x 、 y 均处于图 15 坐标系中。

苗润源等^[39-40] 数值计算了不同厚度和曲率半径的变壁厚药型罩成型过程, 证明了药型罩顶点与边缘的轴向速度差是 LEFP 成型的主要影响因素, 但利用单方向曲率线性药型罩产生的 LEFP 头尾速度梯度还难以成型形态良好的大质量对折型 LEFP。

除选用两端同时起爆方式外, 在药型罩结构设计上也有所创新。王康康^[33]、陈曦等^[41] 设计了一种新型双向(长度和宽度方向)曲率线性药型罩, 在爆炸加载下通过长度方向曲率结合两端起爆产生的对碰爆轰压力, 在药型罩中部高速形成凸起, 长度方向产生较大速度梯度, 实现长度方向完全闭合, 同时利用另一曲率产生宽度方向上的速度梯度, 在该方向也同时闭合, 获取类似“筷子”的对折型 LEFP, 数值模拟和 X 光摄影试验获得成型状态如图 16 所示, 头部速度可达 2100 m/s , 药型罩利用率约 87%。



(a) Simulation result at 160 μs

(b) X-rays photo at 175 μs

图 16 双曲率线性罩成型 LEFP 图像^[41]

Fig. 16 The image of an LEFP formed from a double-curved liner^[41]

虽然数值模拟获取的三维对折型 LEFP 形态良好, 但成型试验中 X 光摄影获得的 LEFP 尾部闭合状态较差, 且 LEFP 头尾都发生了断裂, 长径比减小, 极大影响了侵彻能力。主要是由于现阶段药型罩材料性能不足以支持线性罩在爆炸加载下完成双向压垮、翻转等大变形, 表明需要结合药型罩材料性能基础

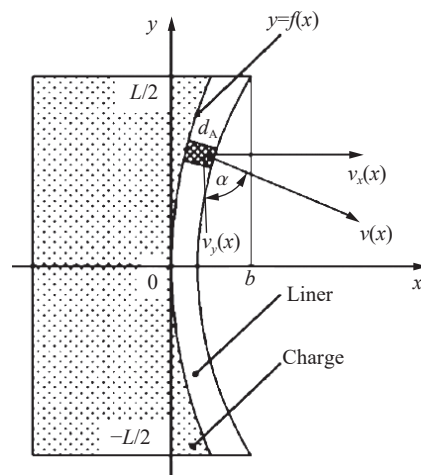


图 15 单条线性成型装药二维模型^[31]

Fig. 15 A two-dimensional model of the single linear-shaped charge^[31]

研究, 配合大量数值模拟, 并开展匹配炸药毁伤元成型观测试验才能获取较好的对折型 LEFP。

除控制药型罩结构外, 李鹏等^[42-43]设计了一种带外衬药型罩周向 MLEFP 战斗部, 如图 17 所示。通过在原药型罩外侧增加衬层, 并设计外衬结构以控制爆轰波在药型罩上的作用力分布, 从而控制 LEFP 成型时速度梯度, 以得到形态良好的大质量、高速对折型 LEFP。首先通过数值模拟验证相比无外衬结构, 增加外衬后 LEFP 尾部闭合较好, 长径比更大, 结构更为密实, 再加工装配无/有外衬周向 MLEFP 战斗部样机以进行外场静爆、侵彻钢靶试验, 利用试验结果对比两种结构爆炸产生的对折型 LEFP 侵彻能力, 同时证明外侧衬层的有效性和数值模拟结果的正确性, 数值模拟获得的 LEFP 成型状态与侵彻钢靶试验结果见表 2。

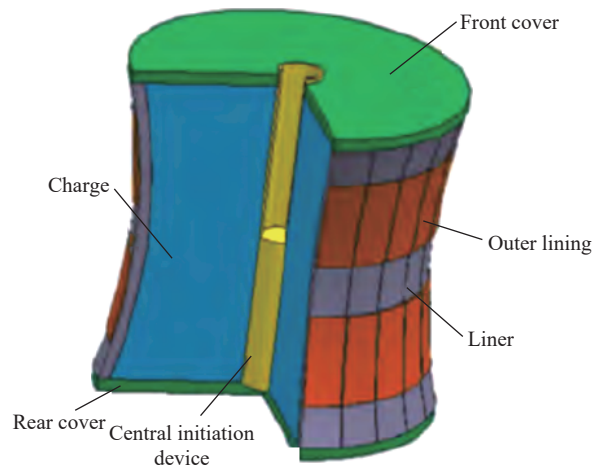


图 17 带外衬药型罩 MLEFP 战斗部模型^[42]

Fig. 17 An MLEFP warhead model with liners and outer linings^[42]

表 2 数值模拟与侵彻试验结果^[42]

Table 2 Results of numerical simulation and penetration tests^[42]

周向MLEFP战斗部	成型形态	侵彻后钢靶剖面
无外衬		
有外衬		

对于带特殊结构的周向 MLEFP 战斗部, 仅仅依靠假设条件和理论推导建立的如式 (2)~(3) 的 LEFP 毁伤元初速工程计算模型在精度上已不能满足要求。李鹏等^[44]利用有效装药理论结合数值模拟方法得到一种适用范围较广的初速模型建立方法, 首先利用 AUTODYN-3D 等有限元软件计算不同口径、跨度、曲率的药型罩在爆炸加载下成型对折型 LEFP 过程, 获得大量 LEFP 初速分布数据, 拟合后获得距端盖不同距离处的有效装药半径关于战斗部口径以及跨度的函数:

$$y_1 = \frac{f(x_1, d_1)}{g(x_1, d_1)} \quad (4)$$

式中: y_1 为有效装药半径, m; x_1 为药型罩各点距最近一侧端盖的距离, m; d_1 为战斗部口径, m; L_1 为战斗部跨度, m。

通过式(4)可以在柱形战斗部端盖处去除一部分锥形装药(锥高由起爆方式和战斗部长度决定), 建立周向 MLEFP 战斗部有效装药模型。

通过修正 Gurney 方法^[36] 建立 LEFP 初速模型:

$$v = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{c_1/m}{1+0.5c/m}} \tag{5}$$

$$c_1 = 2 \int_{L_1}^{\frac{L}{2}} \pi y_1^2 \rho_0 dx_1 \tag{6}$$

式中: c 为单位长度炸药装药量, kg/m ; m 为单位长度药型罩质量, kg/m ; c_1 为代替实际装药量的单位长度有效装药量, kg/m 。

表 3 对比了 3 种 LEFP 初速工程计算模型, 其中最大误差源于与试验结果的比对。

表 3 3 种 LEFP 初速模型对比

Table 3 Comparison among the three models for calculating the initial velocity of an LEFP

初速模型	基础理论	最大误差/%	优点	缺点
公式(2)	Gurney方法, 动量守恒	12.6	形式简单, 使用方便	简单合计不同组分误差大, 需增加修正系数
公式(3)	C-J爆轰理论, 动量守恒	4	形式简洁, 精度高	适用范围窄
公式(5)	有效装药理论, Gurney方法	6	精度较好, 适用范围广	需计算获取大量初速数据, 使用不便

3 侵彻钢靶威力

周向 MLEFP 战斗部爆炸后对钢靶的侵彻威力是爆炸驱动对折型 LEFP 毁伤元成型状态、飞行稳定性、穿甲能力等的综合体现, 直接关系对厚壁不敏感弹药的毁伤能力, 只有通过外场战斗部静爆、钢靶侵彻试验才能准确衡量。线性毁伤元形态从片状 LEFP 发展到对折型 LEFP, 对钢靶的侵彻能力也大大提升, 如史云鹏等^[45] 以纯铁、黄铜、紫铜作为罩材进行侵彻试验, 除黄铜 LEFP 成型时破碎, 其他均可穿透距爆心 2 m 处 25 mm 厚钢板。张明丛^[31] 以 85 mm 口径 MLEFP 战斗部为样机开展的侵彻威力试验结果表明所设计的 LEFP 毁伤元可穿透距爆心 1 m 处 40 mm 厚 45 钢靶, 且入口形状规则, 毁伤元成型时闭合较好。李鹏等^[34] 开展 127 mm 口径复合装药周向 MLEFP 战斗部的侵彻威力研究, 4 发样机静爆试验结果表明对折型 LEFP 贯穿 3 m 处 40 mm 厚 Q235 钢板, 孔形圆整, 未穿孔形状椭圆, 平均侵彻深度为 30 mm, 表明 LEFP 毁伤元在斜碰靶板时威力会大幅下降。因此在复合装药基础上通过调整半预制药型罩斜置角度^[46], 控制毁伤元旋转速度以提高飞行稳定性和毁伤威力, 侵彻试验结果表明, 药型罩斜置角度为 1.5° 时, LEFP 着靶姿态最好, 对钢靶侵彻深度最大。图 18 总结了近年来侵彻钢靶试验结果^[31-35, 39-47], 图中标识了发表年份、战斗部装药口径与类型以及横纵坐标之积, 纵坐标为侵彻深度 (depth of penetration, DOP) 与战斗部装药口径 (charge diameter, CD) 的之比, 横坐标为靶板到装药中心的距离 S 。

LEFP 侵彻钢靶威力的提升是通过起爆方式、

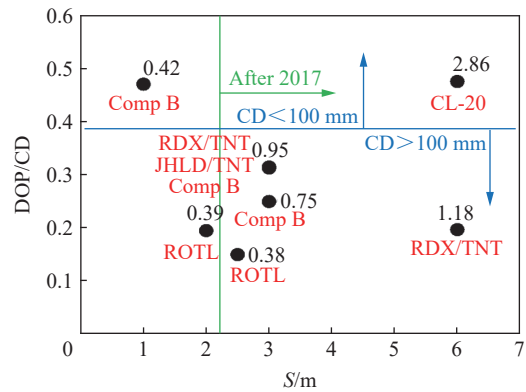


图 18 对折型 LEFP 对钢靶侵彻能力

Fig. 18 Penetration ability of folded LEFPs to steel targets

装药结构、药型罩形状、外衬结构等设计,优化材料性能,并仔细地调整结构参数来实现的。图 18 中对钢靶的侵彻试验并非为获取对折型 LEFP 的极限侵彻深度,而是验证设计条件下已具备的穿透某厚度钢靶的能力。就单纯穿甲威力而言,对折型 LEFP 毁伤元已完全具备穿透 40 mm 厚钢靶的能力,在预设的防空反导作战背景下,实际不敏感导弹的等效壳体壁厚也较少能达到这样的厚度,因此研究更深的侵彻能力现阶段还缺少现实意义。

另一方面,对折型 LEFP 毁伤元类似长杆式 EFP,在大攻角、斜撞击条件下对钢靶的侵彻能力将大幅降低,因此要求其具备较高的飞行稳定性。所以外场试验测试时靶板距战斗部爆心的距离也是衡量 LEFP 综合侵彻能力的重要指标,以图 18 中横、纵坐标的乘积可以反映对折型 LEFP 对钢靶的综合毁伤威力。

4 结论与展望

周向多线性爆炸成型弹丸 (multiple linear explosively-formed projectile, MLEFP) 战斗部爆炸产生的对折型线性爆炸成型弹丸 (linear explosively-formed projectile, LEFP) 显然无法达到轴向聚能射流对装甲钢靶的大穿深毁伤,但与传统的轴向聚能战斗部不同,面对的不再是地面上的厚装甲目标,击穿、击爆厚壁壳体与不敏感弹药的组合是其主要的作战使命,而不应一味追求穿深而导致过毁伤,在防空反导作战中的应用前景广阔,近年来相关研究主要是在弹药总体约束下调整周向 MLEFP 战斗部炸药装药、药型罩等关键部件的结构参数,研究爆炸产生线性毁伤元的成型规律、飞行速度等,试图找到总体约束下的最优结构,同时尝试从起爆方式、附加衬层等方面进一步优化线性毁伤元的成型形态,并建立多个初速工程计算模型,开展大量战斗部静爆后毁伤元对有限厚钢靶的侵彻试验,以在当前防空反导作战的需求下初步探索周向 MLEFP 战斗部的可行性,而在未来的重点研究方向有以下 4 个方面。

- (1) 基础研究: 兼顾毁伤元威力与结构强度的药型罩罩材制备工艺与应用技术(含匹配技术)研究。
- (2) 高适应性: 毁伤元飞行规律及稳定性设计,以满足不同弹道条件。
- (3) 真实目标: 毁伤元对屏蔽装药的击穿引爆规律,以确保完全毁伤。
- (4) 毁伤效能: 周向 MLEFP 战斗部静动态威力场研究,以开展防空反导弹药引战匹配与总体设计。

参考文献:

- [1] ROSLUND L A. Initiation of warhead fragments I: Normal impacts: NOLTR 73-124 [R]. White Oak, MD: Naval Surface Weapons Center, 1973.
- [2] HELD M. Initiation criteria of high explosives at different projectile or jet densities [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21(5): 235–237. DOI: 10.1002/prop.19960210505.
- [3] 童宗保,王金相,彭楚才,等. 预制破片对屏蔽炸药冲击引爆研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(7): 173–177. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.07.038.
TONG Z B, WANG J X, PENG C C, et al. Study on the initiation of shielded explosive impacted by prefabricated fragment [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(7): 173–177. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.07.038.
- [4] 魏继锋,魏锦,王树山. 离散杆战斗部技术研究 [J]. *战术导弹技术*, 2015(2): 101–105. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2015.02.18.
WEI J F, WEI J, WANG S S. Research on technology of discrete rod warhead [J]. *Tactical Missile Technology*, 2015(2): 101–105. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2015.02.18.
- [5] CEDER R, LEUS V, DAVID I. Exploring the v^2d initiation criterion within the Lee-Tarver model [C]// Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics. Long Beach, 2017: 1887–1896. DOI:10.12783/ballistics2017/16966.
- [6] 苗润源,梁争峰. 防空反导用多爆炸成型弹丸技术现状与发展 [J]. *飞航导弹*, 2017(7): 89–93. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2017.07.19.
MIAO R Y, LIANG Z F. Current situation and development of multiple explosive shaped projectile technology for air defense and antimissile [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2017(7): 89–93. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2017.07.19.
- [7] 奥尔连科. 爆炸物理学 [M]. 孙承纬,译. 北京: 科学出版社, 2011

- [8] AHMED M, MALIK A Q. A review of works on shaped charges [J]. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 2017, 7(5): 2098–2103. DOI: 10.48084/etasr.1532.
- [9] WEIMANN K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, 18(5): 294–298. DOI: 10.1002/prop.19930180511.
- [10] 松全才, 金韶华, 李文. 俄罗斯切割索的现状 [J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(4): 382–388.
SONG Q C, JIN S H, LI W. Manufacture of cutting explosives in Russia [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(4): 382–388.
- [11] HAYES G A. Linear shaped-charge (LSC) collapse model [J]. *Journal of Materials Science*, 1984, 19(9): 3049–3058. DOI: 10.1007/BF01026984.
- [12] SEOKBIN L, PAUL W. An investigation of the characteristics of linear shaped charges used in demolition [C]// *Proceedings of the 29th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, 2003: 297–306.
- [13] CHASE J B, KUKLO R M, SHAW L L, et al. High resolution diagnostics of a linear shaped charge jet [C]// *18th International Symposium and Exhibition on Ballistics*. San Antonio: Lawrence Livermore National Lab, 1999, 1: 442–448.
- [14] 曾新吾, 薛鸿陆. 线型聚能装药的理论研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1988, 8(2): 97–105.
ZENG X W, XUE H L. A theoretical study on linear shaped charge [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1988, 8(2): 97–105.
- [15] 李彬峰, 潘国斌. 聚能罩壁厚对切割深度的影响 [J]. *爆破器材*, 1999, 28(6): 16–19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.1999.06.005.
LI B F, PAN G B. A study of the influence of wall thickness of shaped charge liner on the depth of cutting [J]. *Explosive Materials*, 1999, 28(6): 16–19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.1999.06.005.
- [16] 祝逢春, 邓振礼, 胡瑜. 线性聚能装药切割航空炸弹可靠性评估 [J]. *火工品*, 2000, 11(2): 24–26. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2000.02.007.
ZHU F C, DENG Z L, HU Y. Reliability assessment on cutting aerial bombs using linear shaped charge [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2000, 11(2): 24–26. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2000.02.007.
- [17] 苟瑞君, 赵国志, 杜忠华, 等. 线性成型装药的威力研究 [J]. *爆破器材*, 2005, 34(5): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.05.009.
GOU R J, ZHAO G Z, DU Z H, et al. Study on the power of linear shaped charge [J]. *Explosive Materials*, 2005, 34(5): 25–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.05.009.
- [18] 苟瑞君, 赵国志. 线性成型装药起爆方式的比较 [J]. *火工品*, 2006(1): 42–45. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2006.01.013.
GOU R J, ZHAO G Z. Comparison of linear shaped charge initiation manners [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2006(1): 42–45. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2006.01.013.
- [19] 陶钢, 朱鹤荣, 石连捷, 等. 爆炸成型弹丸药型罩结构分析 [J]. *弹道学报*, 1995, 7(3): 84–86,93.
TAO G, ZHU H R, SHI L J, et al. On the analysis of the shape for the EFP's liner [J]. *Journal of Ballistics*, 1995, 7(3): 84–86,93.
- [20] 苟瑞君. 线性爆炸成型侵彻体形成机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2006
GOU R J. Forming mechanism of linear explosively formed penetrator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [21] 杜忠华, 段卫毅. 起爆方式对 LEFP 成型及侵彻影响的数值模拟研究 [J]. *南京理工大学学报 (自然科学版)*, 2009, 33(6): 756–759. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2009.06.009.
DU Z H, DUAN W Y. Numerical simulation on formation and penetration effect of LEFP by blast ways [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 33(6): 756–759. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9830.2009.06.009.
- [22] 段卫毅. 线性爆炸成型侵彻体成型机理与侵彻研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009
DUAN W Y. Study on the formation mechanism and penetration of linear explosively formed penetrators [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [23] 高接东. 基于变壁厚药型罩的 LEFP 成型机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013
GAO J D. Study on LEFP forming mechanism based on variable wall thickness liner [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [24] JOO J, CHOI J, KOO M, et al. Numerical analysis of penetration reduction of a long rod penetrator impacted by a linear

- explosively formed penetrator [C]// Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics. Long Beach: Destech, 2017: 1887–1896.
- [25] JOO J, CHOI J, KOO M, et al. Numerical analysis on penetration reduction of a WHA penetrator by an impact of linear explosively formed penetrator (LEFP) [J]. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 2017, 20(3): 384–392.
- [26] LI Y S, HUANG Z H, SHI A S, et al. Deformation and fracture failure of a high-speed long rod intercepted by linear explosively formed penetrators sequence [J]. *Materials*, 2020, 13(22): 5086. DOI: 10.3390/ma13225086.
- [27] 周涛, 王康康, 杜忠华, 等. 起爆方式对线性成型装药爆炸威力的影响 [J]. *火炸药学报*, 2014, 37(2): 37–42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2014.02.008.
- ZHOU T, WANG K K, DU Z H, et al. Effect of initiation way on the blasting power of linear shaped charge [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2014, 37(2): 37–42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2014.02.008.
- [28] 刘杰, 杜忠华, 王锋, 等. 基于爆轰波碰撞形成 LEFP 的研究 [J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 235–242. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0198.
- LIU J, DU Z H, WANG F, et al. Linear explosively-formed penetrators based on detonation wave collision [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 235–242. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0198.
- [29] 王锋. 基于爆轰波对撞原理的新型 EFP 研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012
- WANG F. Research on new EFP based on detonation wave collision principle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012
- [30] CAO Y W, SUN X Y, YUAN B H, et al. Study on design and performance of linear EFP warhead [C]// Proceedings of the 28th International Symposium on Ballistics. Atlanta Georgia: DEStech Publishing, 2014: 173–178.
- [31] 张明丛. 周向 MLEFP 成型机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015
- ZHANG M C. Study on forming mechanism of circumferential MLEFP [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [32] 张明丛, 杜忠华, 周涛, 等. 药型罩结构参数对周向多线性爆炸成型弹丸成型及侵彻能力的影响 [J]. *火炸药学报*, 2016, 39(1): 60–65, 69. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.01.011.
- ZHANG M C, DU Z H, ZHOU T, et al. Influence of liner structural parameters on formation and penetration of the circumferential multiple linear explosive formation penetration [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(1): 60–65, 69. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.01.011.
- [33] 王康康. 基于线性装药的大威力 EFP 研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015
- WANG K K. Research on EFP based on linear charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [34] 李鹏, 袁宝慧, 李刚, 等. 一种杆式周向多爆炸成型弹丸战斗部仿真及实验研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2017, 41(6): 681–685. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2017.41.06.003.
- LI P, YUAN B H, LI G, et al. Simulation and experimental study on warhead of rod-shaped circumferential multiple explosively formed penetrator [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2017, 41(6): 681–685. DOI: 10.14177/j.cnki.32-1397n.2017.41.06.003.
- [35] 李鹏, 袁宝慧. 爆炸成型杆式弹丸战斗部技术研究 [C]// 第 15 届全国战斗部与毁伤技术学术交流会论文集. 北京, 2017, 11: 305–307
- LI P, YUAN B H. Research on the warhead numerical simulation of a rod type circumferential multiple explosively formed projectile [C]// Proceedings of the 15th National Symposium on Warhead and Damage Technology. Beijing, 2017, 11: 305–307.
- [36] 威廉·普·沃尔特斯, 乔纳斯·埃·朱卡斯. 成型装药原理及其应用 [M]. 王树魁, 贝静芬, 译. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- WALTERS, ZUKAS. Fundamentals of shaped charges [M]. WANG S K, BEI J F, trans. Beijing: Weapons Industry Press, 1992.
- [37] 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- WANG S S. Terminal effects [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [38] 张守中. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
- [39] 苗润源, 李有仓, 梁争峰. 药型罩曲率半径对周向线性多爆炸成型弹丸成型性能及毁伤效应的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(31): 235–238. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.31.038.

- MIAO R Y, LI Y C, LIANG Z F. Liner radius' influence on circumferential linear multiple explosively formed projectiles' forming performance and damage effects [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(31): 235–238. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.31.038.
- [40] 苗润源, 梁争峰, 程淑杰. 速度梯度对周向 MLEFP 的成型性能影响分析 [C]// 第十六届战斗部与毁伤技术学术交流会议论文集. 昆明, 2019: 276–278.
- MIAO R Y, LIANG Z F, CHENG S J. Analysis of the influence of velocity gradient on the forming performance of circumferential MLEFP [C]// Proceedings of the 16th Academic Conference on Warhead and Damage Technology. Kunming, 2019: 276–278.
- [41] 陈曦, 刘杰, 杜忠华, 等. 两端起爆下曲率药型罩线性装药的成型特性 [J]. *火炸药学报*, 2018, 41(5): 441–446. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.05.003.
- CHEN X, LIU J, DU Z H, et al. Forming characteristics of linear charge with curved liner under two-end initiation [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(5): 441–446. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2018.05.003.
- [42] 李鹏, 袁宝慧, 李刚, 等. 一种杆式周向多爆炸成型弹丸战斗部数值模拟研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2017, 37(1): 69–72. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2017.01.016.
- LI P, YUAN B H, LI G, et al. Research on the warhead numerical simulation of a rod type circumferential multiple explosively formed projectile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2017, 37(1): 69–72. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2017.01.016.
- [43] 李鹏, 李刚, 袁宝慧, 等. 一种杆式多爆炸成型侵彻体战斗部 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 883–890. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0356.
- LI P, LI G, YUAN B H, et al. A rod-shaped explosively formed penetrator warhead [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 883–890. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0356.
- [44] 李鹏, 袁宝慧, 丁刚, 等. LEFP 战斗部毁伤元成型及初速分析研究 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(10): 188–191. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.10.032.
- LI P, YUAN B H, DING G, et al. The study of linear explosively formed penetrators warhead kill element on forming and initial velocity [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(10): 188–191. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.10.032.
- [45] 史云鹏, 袁宝慧, 梁争峰, 等. 线形 EFP 药型罩设计 [J]. *火炸药学报*, 2007, 30(3): 37–40, 44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2007.03.010.
- SHI Y P, YUAN B H, LIANG Z F, et al. The design of linear EFP liner [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(3): 37–40, 44. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2007.03.010.
- [46] 李鹏, 李刚, 袁宝慧, 等. 旋转对爆炸成型杆式侵彻体毁伤威力的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 616–621. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0263.
- LI P, LI G, YUAN B H, et al. Influence of rotation on damage power of an explosively-formed rod-like penetrator [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 616–621. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0263.
- [47] 李鹏, 袁宝慧, 李刚, 等. 新型多线形爆炸成型弹丸战斗部的弹丸成型及毁伤研究 [J]. *火炸药学报*, 2017, 40(1): 65–68, 80. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2017.01.013.
- LI P, YUAN B H, LI G, et al. Study on the formation of penetrators and damage of a new type of multiple linear explosively formed penetrator warhead [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2017, 40(1): 65–68, 80. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2017.01.013.

(责任编辑 张凌云)