

同轴双层罩 EFP 战斗部的成形及侵彻特性

赵长啸^{1,*}, 纪冲¹, 张琨¹, 王昕¹, 刘凯², 薛雪东³, 范磊¹

(1.陆军工程大学 野战工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 陆军装备部驻西安地区军事代表局 驻南阳地区第一代表室, 河南 南阳 710032; 3.陆军工程大学 军械士官学校, 湖北 武汉 430075)

摘要: 为提高爆炸反应装甲与主装甲的复合防护体系毁伤效能, 解决传统同轴爆炸成形弹丸战斗部前后级毁伤元动能匹配不佳的难题, 提出了一种具有“外薄内厚”非对称结构的同轴双层罩 EFP 战斗部。通过理论定性分析、数值模拟与试验验证, 系统研究了其成形机理及侵彻特性, 揭示了厚度比对前随进 EFP 动能的影响规律。研究表明, 该战斗部一次起爆可形成两枚具有显著速度差且均具备侵彻能力的前后分离 EFP, 实现了前级触发爆炸反应装甲、后级侵彻主装甲的序列打击功能; 在保持药型罩总厚度不变的约束下, 通过调整内外罩厚度比可实现前级 EFP 与随进 EFP 速度差在 78~357m/s 范围内的连续调控, 前级 EFP 与随进 EFP 的动能比可在 1:5.5 至 4.2:1 之间灵活配置, 并通过战斗部静爆试验验证了设计的可行性。

关键词: 爆炸成形弹丸; 双层药型罩; 数值模拟; 动能调控; 厚度比

中图分类号: TJ410.33 **文献标志码:** A

Research on the forming and penetration characteristics of collinear EFP warhead with double-layer liners

ZHAO Changxiao^{1,*}, JI Chong¹, ZHANG Kun¹, WANG Xi¹, LIU Kai², XUE Xuedong³, FAN Lei¹

1. School of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210001, Jiangsu, China; 2. The Ground Force Equipment Department No. 1 Military Representative Office in Nanyang, Nanyang, 710032, Henan, China; 3. Ordnance NCO Academy, Army Engineering University of PLA, Wuhan, 430075, Hubei, China)

Abstract: To enhance the damage efficiency against composite protection systems comprising Explosive Reactive Armor (ERA) and main armor, and to resolve the kinetic energy mismatch between the leading and trailing penetrators in conventional Collinear Explosively Formed Projectile (CEFP) warheads, a double-layer liner CEFP warhead with an “externally thin, internally thick” asymmetric structure was proposed. The formation mechanism and penetration performance were systematically investigated via theoretical analysis, numerical simulation and experimental validation, and the influences of liner thickness ratio on the velocity and kinetic energy characteristics of the leading and trailing explosively formed projectiles were obtained.

Theoretical analysis revealed a three-stage formation process of the double-layer liners, including initial deformation at the liner apex, superposition of reflected unloading waves and interface separation, and continuous collapse to form two independent projectiles. The separation was caused by the velocity difference induced by the superposition of detonation waves and reflected unloading waves at the outer liner free surface. Numerical simulations were carried out using the LS-DYNA finite element code

日期: 2026-01-26; 2026-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (12572243、12102479);

第一作者 (通信作者): 赵长啸 (1986—), 男, 博士, 副教授. E-mail: blastingzhao@163.com

with a half axisymmetric model. The Johnson-Cook constitutive model and Grüneisen equation of state were adopted for copper liners and steel targets, while the High-Explosive-Burn model and JWL equation of state were used for passivated hexogen. Local mesh refinement was applied in key impact regions to ensure computational accuracy. Parametric studies were performed with different inner-outer liner thickness ratios under a fixed total liner thickness. Results show that the warhead generates two axially separated projectiles with a significant velocity difference and favorable penetration capability through a single detonation, thus realizing the sequential attack function: the leading projectile initiates ERA and the trailing projectile penetrates main armor. With the total liner thickness kept constant, the velocity difference can be continuously adjusted from 78 m/s to 357 m/s, and the kinetic energy ratio can be flexibly allocated from 1:5.5 to 4.2:1 by changing the thickness ratio. Static detonation tests were conducted to measure projectile velocities and penetration performance. Test data are in good agreement with numerical results, which confirms the feasibility of the proposed structure. This design provides important technical support and theoretical reference for high-performance anti-armor warheads against ERA-main armor composite protection systems.

Keywords: explosively formed projectile (EFP); double-layer liners; numerical simulation; kinetic energy distribution; thickness ratio

坦克等装甲车辆因其强大的火力配备、坚硬的装甲防护、高速的机动性能，依然是现代地面突击作战行动中的中坚力量，如何有效毁伤装甲目标以迟滞地面装甲车辆进攻，一直是弹药工程研究领域重点关注的问题。传统的爆炸成形弹丸（Explosively Formed Projectile，简称 EFP）因具有炸高敏感性小和毁伤后效大等优点，被用作反装甲弹药实现远距离攻击目标的重要技术手段。然而随着爆炸反应装甲（Explosive Reactive Armor，简称 ERA）的广泛应用，使得现代主战坦克及重型步兵战车的战场生存能力实现质的飞跃。近十年来，ERA 快速发展并叠加纳米钢/陶瓷/钛合金/负泊松比蜂窝背板等梯度主装甲^[1-6]，使的传统爆炸成形弹丸（Explosively Formed Projectile，简称 EFP）战斗部形成的单个毁伤无法有效击毁披挂 ERA 的装甲目标，导致现有反装甲体系面临严峻效能缺口。如何有效提高“ERA+主装甲”的复合防护体系毁伤效能，已成为当前弹药工程领域亟需解决的重大瓶颈问题，直接关系地面作战成败关键，因此，亟需研究相应的新构型战斗部。

同轴多层罩 EFP（Collinear Explosively Formed Projectiles，下文简称 CEFP）战斗部正是满足上述需求的新型高效毁伤战斗部。CEFP 战斗部采用多层药型罩结构，一次起爆后可形成前后分离且具有侵彻能力的多个 EFP^[7-9]，如图 1 所示。其中，前级 EFP 用于击穿前置装甲或引爆爆炸反应装甲，随后进 EFP 则可对主装甲进行接续侵彻。CEFP 战斗部通过“前级触发 ERA+后级侵彻主装甲”的串联机制，可将穿透概率理论上提升 3-5 倍，已成为国内外战斗部技术研究热点。

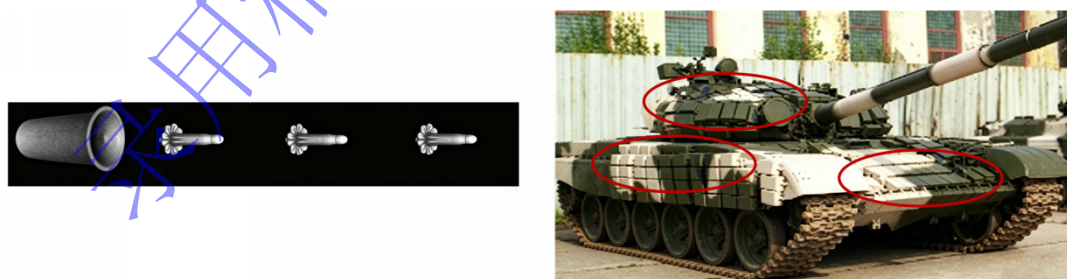


图 1 CEFP 攻击爆炸反应装甲示意图

Fig.1 Schematic diagram of CEFP attacking explosive reactive armor

国内外学者围绕 CEFP 的材料与结构开展了广泛研究：在材料创新方面，Faibish 等^[10]采用外铜内钼的双层罩实现了稳定结合界面；Wang 等^[11]研究了内罩为铜、外罩为 PTFE/Al 反应材料的双层药型罩（RM-DLL），提升了对钢靶的侵彻能力；黄炳瑜等^[12]设计的 Al/Ni 含能材料双层罩，对钢靶和混凝土靶的侵彻深度与体积均有显著提升；Tang 等^[13]发现 Al/PTFE 反应材料能粘附于 W/Cu 射流杆体协同运动，耦合了穿透与爆燃效应；Hong 等^[14]的研究则表明，铜基非晶合金、铝/铜及铝/PTFE 等

组合能结合高密度材料穿透力与活性材料后效爆燃，但存在射流稳定性不足、反应阈值与力学性能难以协同优化等缺陷。在结构优化方面，杨贵涛等^[15]提出的组合药型罩结构利用速度差实现了 EFP 稳定分离；赵富裕等^[16]设计的紫铜与高熵合金双锥药型罩，提升了有效侵彻质量及侵彻深度；周方毅等^[17]对设计的全尺寸圆锥-球缺组合罩战斗部水下近程毁伤效果进行了研究；蒋文灿等^[18]对“偏心亚半球缺罩+偏心亚半球形罩”组合药型罩的成型及侵彻过程进行数值模拟与试验研究，验证了异构双层罩在水下聚能毁伤中的创新性与工程可行性。Yin 等^[19]对三层串联 EFP 的成形过程进行了数值模拟研究；孙韬等^[20]、郑元枫等^[21]与何佳全等^[22]则系统揭示了药型罩结构、罩材匹配等对三层 EFP 成形与分离行为的影响规律；孙贺等^[23]通过正交试验指出“材料>壁厚>厚度比>锥角>装药高度”的参数敏感性；徐粲等^[24]发现罩间隙存在最佳调控区间；赵志杰等^[25]进一步指出隔板厚度与装药高度可驱动侵彻体向“杆式”转换。

尽管上述研究在材料与结构优化上取得了进展，但现有 CEF 战斗部通常采用“内外同构”药型罩结构设计，导致前级 EFP 动能过剩（其用途仅用于引爆反应装甲）而随进 EFP 动能不足（用于侵彻厚重装甲）的能量错配问题，严重制约毁伤效能最大化，难以兼顾“前级可靠触发”与“后级高效侵彻”双重需求。基于此，本文提出了一种具有“外薄内厚”非对称结构的同轴双层罩 EFP 战斗部，从而实现前级 EFP 与随进 EFP 的动能梯度配置。在战斗部整体结构、装药总量及药型罩总厚度保持不变的条件下，仅通过调整内外罩厚度比这一核心参数，即可实现动能的可控分配。通过理论定性分析、数值模拟及试验验证相结合的方法，研究该战斗部的成形机理及侵彻靶板特性，得到内、外罩厚度比对前、随进 EFP 速度和动能的影响规律，从而为实现同轴双层罩 EFP 战斗部动能分配的“定制化毁伤”工程设计提供理论依据，为突破“ERA+主装甲”复合防护体系提供技术支持参考。

1 同轴双层罩 EFP 成形理论定性分析

1.1 同轴双层罩 EFP 战斗部结构

文中以同轴双层罩 EFP 战斗部典型装药结构为研究对象，如图 1 所示。该结构战斗部爆炸后形成前后两个弹丸，前级用于引爆反应装甲，后级用于侵彻主装甲，相较于多层罩（如三层罩）战斗部其结构更简单，易于加工，且动能利用率更高，也更容易进行前后调控。因此，文中以此结构作为研究对象。该战斗部由药型罩、炸药、起爆装置组成。其中，炸药为圆柱形装药，2 枚药型罩叠加放置在装药顶端。药型罩为球缺罩，直径为 D ，其中外层药型罩为等壁厚药型罩，内层药型罩为变壁厚药型罩，内、外罩罩顶厚分别为 δ_1 、 δ_2 ，曲率半径 R_0 、 R_1 、 R_2 ，外层药型罩外曲率半径与内层药型罩内曲率半径相同，从而实现前后紧密贴合。战斗部药柱直径与药型罩相同为 D 、装药高度为 H ，采用底部中心起爆。

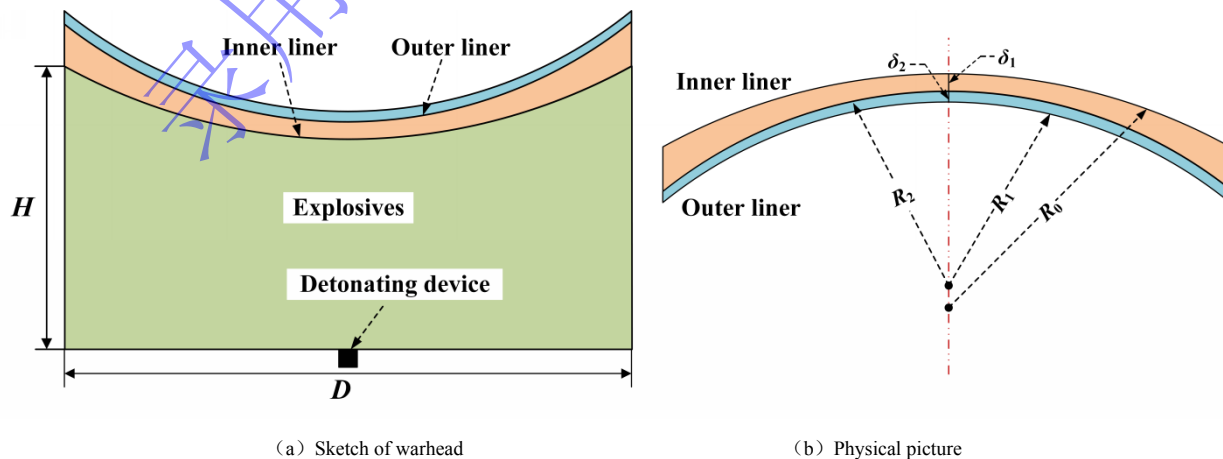


图 2 同轴双层罩 EFP 战斗部

Fig.2 CEFP warhead with double-layer liners

1.2 同轴双层罩 EFP 成形过程

图 3 为双层药型罩在冲击波作用下成形过程，根据药型罩压垮理论^[26]，同轴双层罩 EFP 成形过程内外罩主要呈现出 3 个阶段：

(1) 双层药型罩顶部的初始变形流动。炸药在图示位置点起爆，内层药型罩顶部首先受到爆轰波冲击作用，在药型罩介质中产生爆炸冲击波，如图 3 (a) 所示。在冲击波作用下，内层药型罩罩顶部单元变形并向右运动，沿装药轴线的药型罩单元依次变形流动，在双层罩材料相同初始致密贴合（接触贴合）的情形下，冲击波无反射传入外罩介质，导致外罩单元依次变形流动。

(2) 反射卸载波叠加与分离起始。当冲击波传至外罩顶部右侧界面时，由于外罩右侧与空气介质相接，即向外层药型罩介质产生反射卸载波，如图 3 (b) 所示。在反射卸载波作用下，外层药型罩罩顶部最右侧单元向右运动的速度随增，其左侧单元向右运动的速度也依次增大。由于内、外罩只是接触贴合在一起，相接触微元只能承受挤压不能承受拉伸作用，当外罩的最左侧单元速度增大后，其运动速度将大于内罩的最右侧单元速度，界面接触压力降为零并形成间隙，双层药型罩顶部首先发生分离。

(3) 双层药型罩继续压垮翻转形成分离的 EFP。随着爆轰波的继续传播，内罩母线处单元依次受爆轰波作用，在罩介质中产生爆炸冲击波，冲击波传至外罩外表面时发生卸载，由于内外罩相接触单元只能承受挤压作用，使得外、内罩几乎独自成形并分离运动，如图 3 (c) 所示。

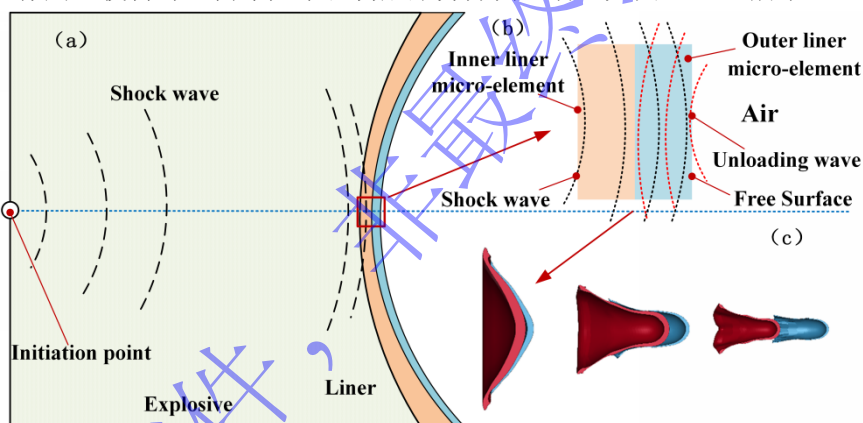


图 3 双层药型罩在冲击波作用下成形过程

Fig.3 The compression motion process of the cover element under the impact of the charge

2 同轴双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻靶板数值模拟

2.1 仿真模型的建立

为进一步描述同轴双层罩 EFP 成形及侵彻靶板过程，采用 Truegrid 软件建立了同轴双层罩 EFP 战斗部成形及侵彻靶板的数值分析模型，并利用 LS-DYNA 有限元分析软件对其成形及侵彻过程进行数值仿真研究。计算模型中药型罩为紫铜球缺罩，直径 $D=100\text{mm}$ ，其曲率半径 $R_0=104\text{mm}$ ， $R_1=78\text{mm}$ ， $R_2=80\text{mm}$ 。装药为钝化黑索今药柱，其直径 $D=100\text{mm}$ 、战斗部高度为 $0.5D$ ，采用底部中心起爆。靶板采用两层间隔靶板，材料为 45#钢，尺寸为 $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 2.0\text{cm}$ 。

由于所研究目标结构具有对称性，为简化计算，建立 1/2 有限元模型，通过施加对称约束限制对称面上的单元（节点）运动（单位 $\text{cm-g-}\mu\text{s-K}$ ）。所有计算模型均采用 Lagrange 网格划分方法，同时选定含有 8 个节点的多面体单元（SOLID164）建立。药型罩中心部位和靶板着弹中心区域作为触靶核心区域，对其进行网格加密处理，其余部位适当放大网格减少计算时间。通过网格敏感性确定药

型罩核心区域（半径 1.3cm 范围）模型网格尺度为 0.7mm，其余为 1.5mm；靶板核心区域范围（4cm×4cm），模型网格尺度为 1mm，其余为 4mm，具体数值仿真计算模型如图 4 所示。

计算中为保证精度未采用质量缩放，设置时间步长 TSSFAC=0.6。炸药与药型罩之间采用滑动罚函数算法（sliding only penalty）。对药型罩内部定义了自动单面接触，从而有效模拟了药型罩翻转后自身外表面的接触，避免了网格之间发生穿透，畸形。为了详细描述两药型罩间相互碰撞过程及形成的弹丸侵彻靶板时的结构损伤响应，两药型罩之间以及弹丸与靶板间均采用基于罚函数的面与面侵蚀接触，使用关键字*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 描述^[27]。

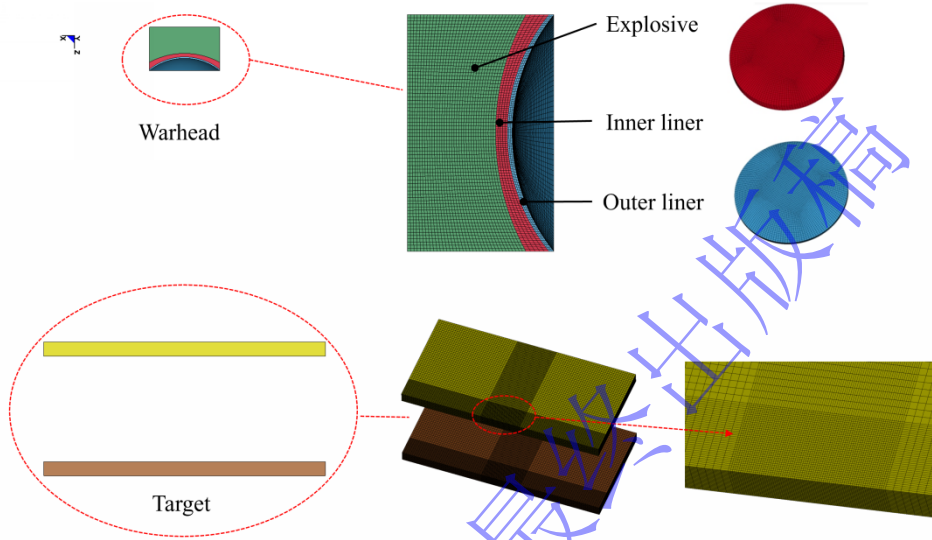


图 4 同轴双层罩 EFP 战斗部侵彻靶板数值仿真计算模型

Fig.4 Numerical simulation model of CEEP warhead with double-layer liners penetrating target

2.2 材料模型与参数选取

药型罩和靶板材料分别为紫铜和 45#钢，两种材料在高速冲击和大变形条件下均采用 Johnson-Cook 本构模型描述其力学行为，采用 Grüneisen 状态方程描述其在不同冲击状态下的压力-体积响应。

Johnson-Cook 本构模型，适用于描述金属材料在大变形、高应变率、高温条件下的力学响应，已被国内外大量文献验证适用于 EFP 侵彻金属靶板的数值模拟，其形式为：

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{pn})(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中： $\bar{\epsilon}^p$ ：等效塑性应变； $\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon}^{p*} / \epsilon_0^*$ ， $\epsilon_0^* = 1s^{-1}$ 时的有效塑性应变率； A 、 B 、 C 、 n 、 m 是和材料性质有关的常数。

Grüneisen 状态方程用于描述材料在冲击载荷下的体积响应和压力-密度关系，与 Johnson-Cook 本构模型形成良好互补，其形式为：

$$p = \frac{\rho_0 C_1^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

定义膨胀材料的压力为：

$$p = \rho_0 C_1^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (3)$$

式中 $\mu = \frac{1}{V} - 1$, V 为当前相对体积; C_I 是 u_s-u_p (冲击波速度-质点速度) 曲线的截距; S_1 、 S_2 和 S_3 是 u_s-u_p 曲线斜率的系数; γ_0 是 Grüneisen 系数; α 是对 γ_0 的一阶体积修正; E 为材料内能。

当药型罩形成的 EFP 开始侵彻靶板时, 采用 Johnson-Cook 失效模型描述材料损伤累积和断裂过程。当损伤因子 $D=1$ 时, 单元失效, 罩材料和靶板材料开始断裂。断裂判据^[27]为

当损伤参数:

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^P}{\epsilon^f} \quad (4)$$

值达到 1 时, 发生断裂。

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \epsilon^*] [1 + D_5 T^*] \quad (5)$$

式中: $D_1 \sim D_5$ 因材料不同, 数值不同, 具体参数详见表 1。

炸药采用 High-Explosive-Burn 高速燃爆材料模型, 使用 EOS_JWL 状态方程描述炸药。EOS_JWL 其常用于定义炸药起爆产生的压力。方程表达式如下所示:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

其中, A , B 和 E 为与炸药种类相关的系数; V 为相对体积。本次采用的钝化 RDX 炸药各系数取值如表 1 所示。

表 1 材料模型参数^{[28][29]}

Table 1 Parameters of each material model

名称	材料	参数								
药型罩	紫铜	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	C	n	m	T_m/K	T_r/K	
		8.96	1540	477	0.0	0.16	1.00	1356	300.15	
		$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5			
		383	-0.54	4.89	-3.03	0.014	1.12			
靶板	45#钢	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/MPa	B/MPa	C	n	m	T_m/K	T_r/K	
		7.85	507	320	0.064	0.28	1.06	1795	300	
		$C_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5			
		469	0.10	0.76	1.57	0.005	-0.84			
装药	钝化 RDX	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	CJ/Gpa	E_0/Gpa	A/Gpa	B/Gpa	R_1	R_2	ω
		1.65	6.93	21	7	371.2	3.2	4.2	0.95	0.3

3 仿真结果及分析

3.1 同轴双层罩 EFP 成形过程分析

为验证前述理论定性分析, 对同轴双层罩 EFP 成形过程进行数值模拟, 重点揭示冲击波传播、卸载波反射及双罩分离的动态细节。图 5 为同轴双层罩 EFP 成形过程。同时选取药型罩轴线 A、B、C、D、E 位置分析其轴向速度变化规律, 如图 6 所示。5 个位置分别对应 2992、3570、4148、16592 和 1710 单元, 结合图 5、图 6 可知, 同轴双层罩 EFP 成形过程主要分为 3 个阶段:

第一阶段：整体受载与冲击波传播。炸药起爆后，冲击波首先作用于内层药型罩顶部（如图 5 中 $t=4.7\mu\text{s}$ 所示），此时由于双层药型罩初始致密贴合，内外罩表现为整体运动。爆炸冲击波在两层罩内部传播，两罩微元沿轴向依次受到轴向和径向的爆轰驱动，如图 6 所示， $t=0\sim 6\mu\text{s}$ 时刻，A、B、C、D、E 五个轴向微元由内到外依次产生轴向速度，表明冲击波在双层药型罩内连续传播；

第二阶段：自由面反射引发速度跃升与分离起始。当冲击波传播至外层药型罩与空气交接面（如图 5 中 $t=6.5\mu\text{s}$ 所示），冲击波在自由面产生反射，并形成卸载波重新传播至药型罩内，冲击波与反射卸载波产生叠加，使得外层药型罩靠近自由面微元首先产生速度跃升，如图 6 所示， $t=6.5\mu\text{s}$ 时外层药型罩靠近自由面的 E 微元，速度产生跃升，较于前面 4 个微元，速度产生倍增。表明反射卸载波与冲击波产生叠加效应，同时该效应使得内外罩接触面微元轴向速度出现差异，为内外罩分离创造了初始条件。

第三阶段：持续压垮翻转并最终形成独立 EFP。由于反射卸载波的继续传播，导致内外罩的速度差逐渐增大。由于内外罩相接触微元只能承受挤压作用，使得内外罩几乎独自成形并分离运动，进而逐渐分离成两个独立的 EFP（如图 5 中 $t=57\sim 560\mu\text{s}$ 所示）与理论定性分析结论相吻合。

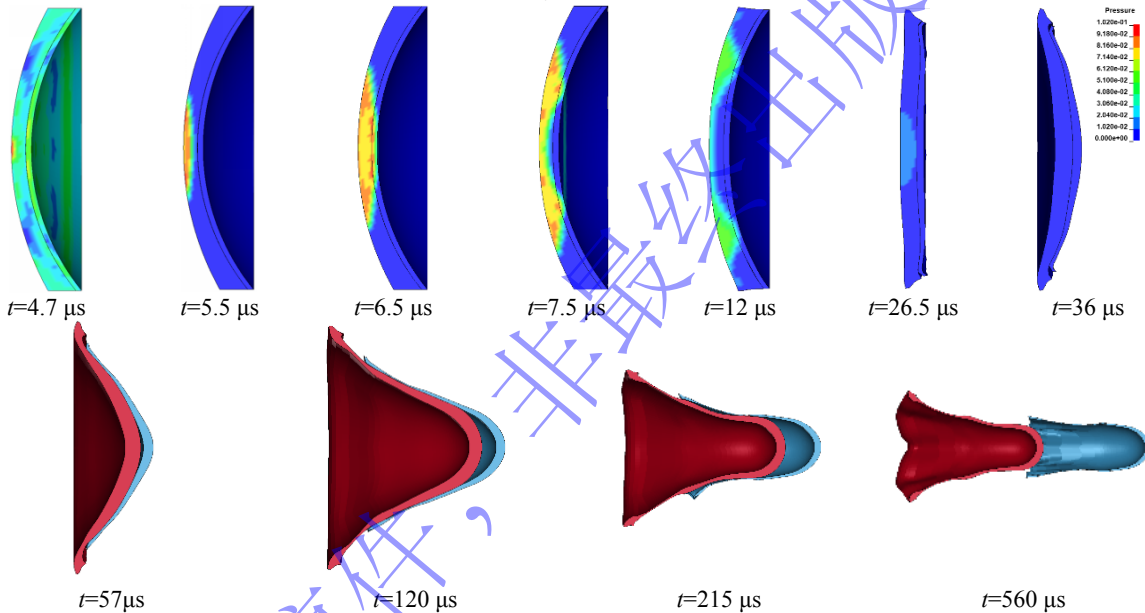


图 5 同轴双层罩 EFP 成形过程图

Fig.5 Forming Process of CEFP with double-layer liners

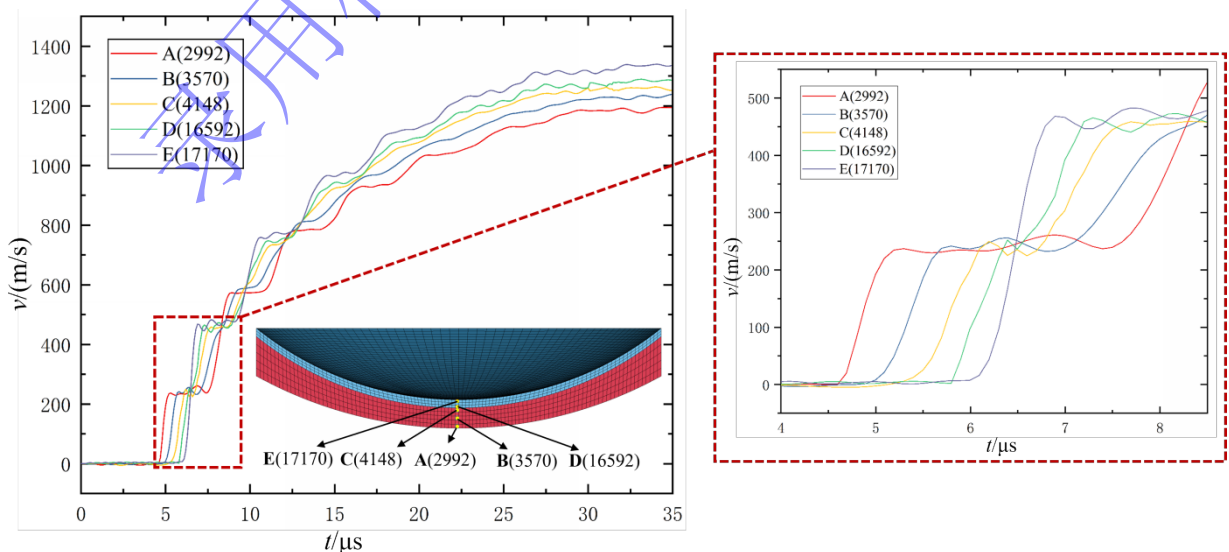


图6 同轴双层罩 EFP 成形速度曲线 (0~35 μ s)

Fig 6 Velocity variations curves of CEFP with double-layer liners

图7为0~240 μ s同轴双层罩EFP成形过程速度曲线。该速度为全弹丸质心速度，包含药型罩压垮形成过程中的破碎微元，不含达到阈值已被删除的单元。由图7可知，在50 μ s时前后两级EFP完成加速过程，其中，内层罩形成的随进EFP加速早于外层罩形成的前级EFP。 $t=12\mu$ s时，前级EFP速度超越随进EFP，且当 $t=40\mu$ s时，随进EFP速度不再变化，50 μ s之后两级EFP速度保持不变，分别前级EFP速度为918 m/s，随进EFP速度为695 m/s，与图5中展示的形成过程相吻合。

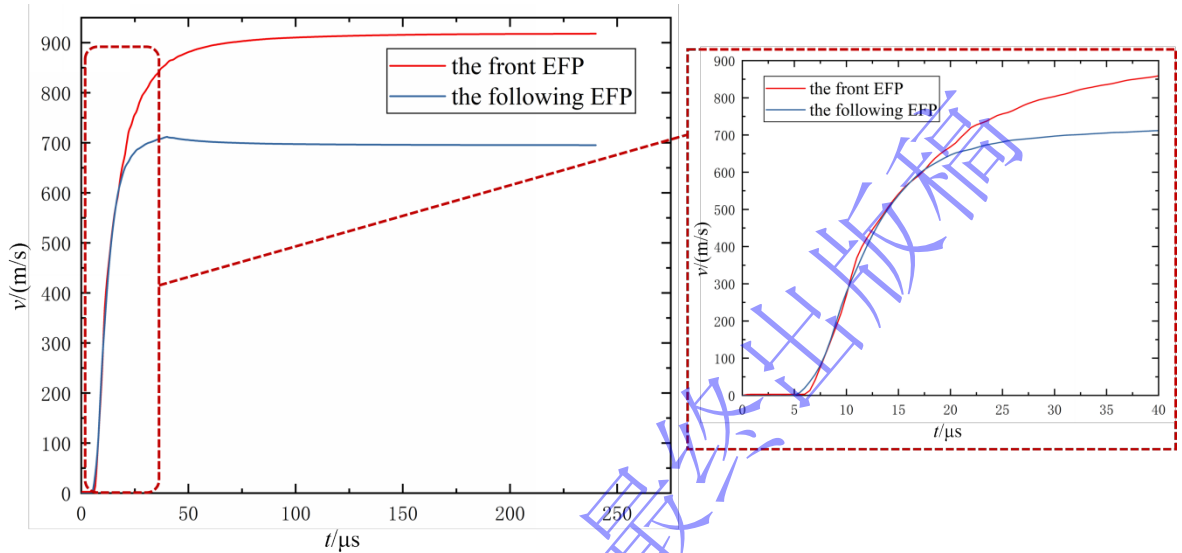
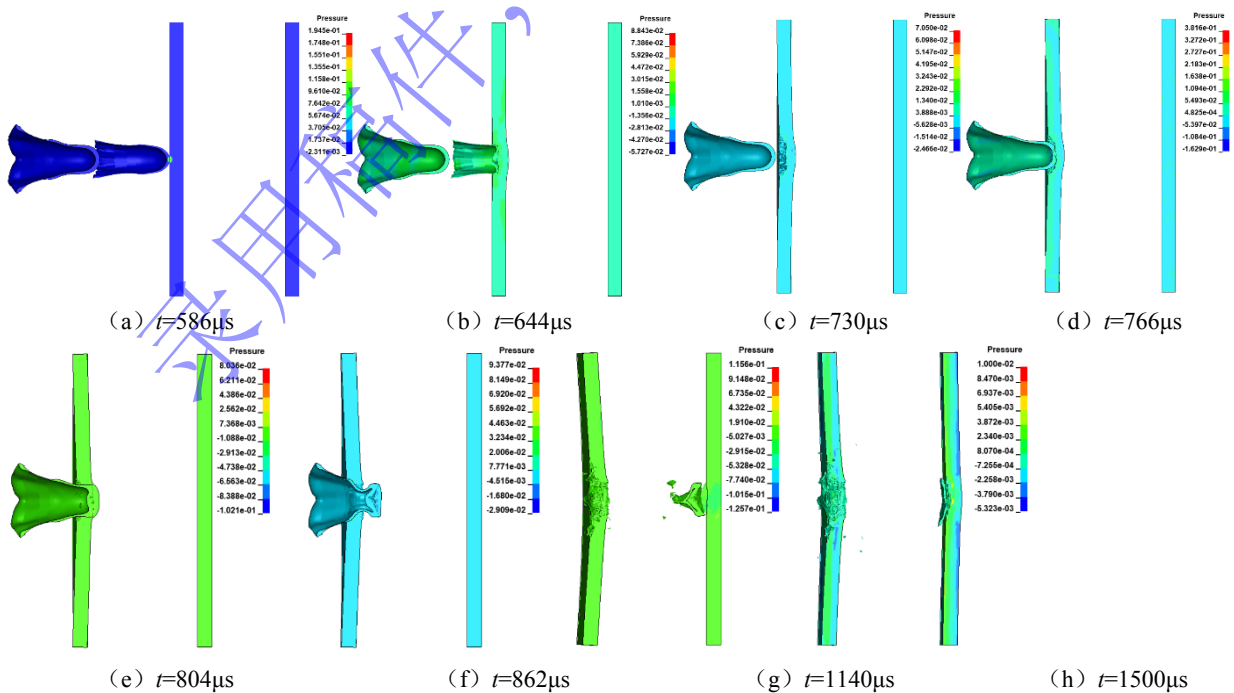
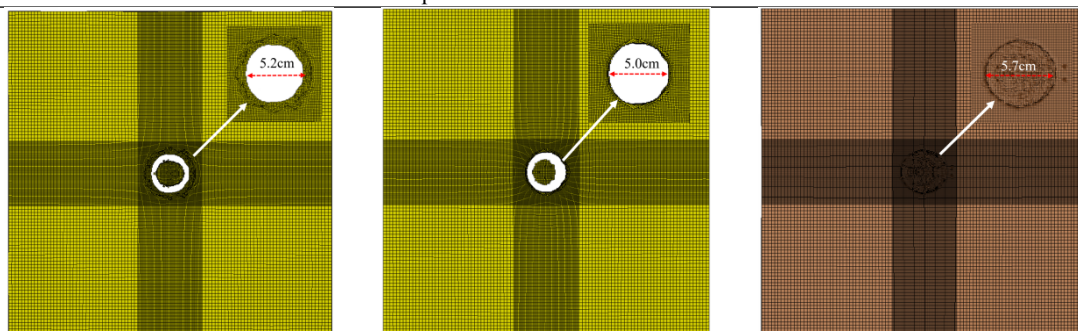


图7 同轴双层罩 EFP 成形过程速度曲线

Fig 7 Velocity variations curves of CEFP with double-layer liners

3.2 同轴双层罩 EFP 侵彻靶板过程分析





(i) 第一层靶板侵彻效果 (正面) (j) 第一层靶板侵彻效果 (背面) (k) 第二层靶板侵彻效果效果 (正面)

图 8 同轴双层罩 EFP 侵彻 45#钢靶过程图

Fig.8 Process of CEFP with double-layer liners penetrating 45# steel target

图 8 为同轴双层罩 EFP 侵彻双层靶板过程，由图 8 可知，其侵彻过程主要分为以下五个阶段：

第一阶段：前级 EFP 开坑阶段。前级 EFP 头部高速撞击第一层靶板，在其周围迅速形成塑性变形区和高温区，并在头部产生较强的压缩波。由于头部面积较小，在钢靶表面开出一小坑，此时前级 EFP 头部开始变形，靶板进入开坑阶段，如图 8 (a)、图 8 (b) 所示。

第二阶段：持续侵彻阶段。前级 EFP 继续侵彻靶板，并逐渐增大侵彻深度，靶板开始出现轴线挠度。伴随着侵彻的继续，前级 EFP 单元达到删除阈值，单元被逐渐消失。

第三阶段：稳定侵彻阶段。在开坑阶段完成之后，前级 EFP 继续冲击第一层靶板，冲击速度明显低于飞行速度。随着 EFP 的继续侵彻，头部受到高温和磨蚀作用其质量不断减少，动能降低。同时前级 EFP 头部由于塑性变形，其截面积不断增大，靶板内部侵彻直径也逐渐增大，直至前级 EFP 质量消耗完，如图 8 (c) 所示。

第四阶段：接力侵彻阶段。由于速度差，随进 EFP 随后撞击第一层靶板，在前级 EFP 侵彻开坑的基础上继续侵彻第一层靶板并进一步扩大侵彻深度和直径，直至穿透第一层靶板，形成一个圆孔，如图 8 (d) ~图 8 (f) 所示；圆孔正面直径为 5.2cm，背面为 5.0cm，如图 8 (i)、图 8 (j) 所示。

第五阶段：冲塞阶段。穿透第一层靶板后剩余的随进 EFP 和靶板的冲塞块一起飞向第二层靶板。当 $t=1140 \mu\text{s}$ 时，到达靶板，但动能已不足穿透靶板，仅在靶板形成一个长度为 5.7cm 的浅坑，如图 8 (g)、图 8 (h) 和图 8 (k) 所示。

3.3 药型罩厚度对同轴双层罩 EFP 动能的影响

由前文分析可知，内、外层药型罩交界面位置为卸载波叠加位置也是前、后药型罩分离位置，而壁厚不同，导致形成的前、后两级 EFP 速度和动能的不同。因此，为实现战斗部速度和动能的“定制化毁伤”设计，文中在保持内、外罩总罩顶厚一致的情况下，对内、外层药型罩壁厚比对同轴双层罩 EFP 成形的影响规律开展数值模拟研究。设内层罩厚度占比为 k ， $k=\delta_1/(\delta_1+\delta_2)$ ， δ_1 、 δ_2 分别为内、外层药型罩罩顶厚，取 k 为 6/7、5/7、4/7、3/7、2/7、1/7，分计为工况 1 至工况 6，相应 R_2 取值分别为 80mm、82mm、84mm、86mm、88mm、90mm。不同工况下同轴双层罩 EFP 速度和动能结果如图 9 所示。

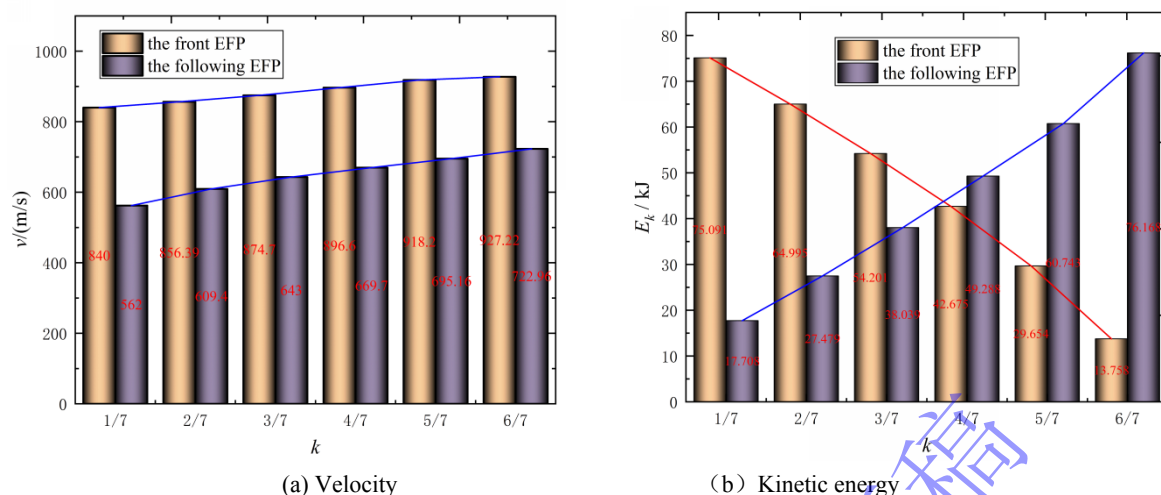


图9 同轴双层罩 EFP 速度与动能随内层罩厚度占比变化图

Fig.9 Variation of CEFP velocity and kinetic energy with thickness ratio of inner liner

由图 9 (a) 可知, 随着内层罩厚度占比 k 从 $6/7$ 减小至 $1/7$ (即外层罩逐渐增厚), 前级 EFP 的速度均呈现线性减少, 前级 EFP 速度由 927 m/s 降至 840 m/s , 随进 EFP 速度则由 723 m/s 降至 562 m/s 。其主要原因: 爆轰能量分配的转变导致速度的变化。当外层罩较薄时 (k 值大, 如 $6/7$), 其自身质量小, 能被快速加速到高速; 同时对内层罩的能量衰减也较小, 故内、外罩形成的 EFP 速度均较高。反之, 当外层罩增厚 (k 值减小, 如 $1/7$), 其自身质量增大, 在同等能量下获得的速度降低; 同时, 其自身成形需更多能量并减少了传入内层罩的能量, 导致内层罩形成的随进 EFP 速度显著下降, 随进 EFP 的速度降幅 (161 m/s) 远大于前级 EFP (87 m/s), 致使两者速度差从 204 m/s 扩大至 278 m/s 。因此, 可通过调整内、外罩厚度, 实现调控前随进 EFP 的速度差, 从而控制其命中目标的时间间隔, 减少随进 EFP 受到前级 EFP 引爆反应装甲而生成的爆轰产物的影响。

由图 9 (b) 可知, 与速度的单一下降趋势不同, 前、随进 EFP 的动能变化呈现截然相反的规律。随着内层罩厚度占比 k 从 $6/7$ 减小至 $1/7$, 前级 EFP 动能从 13.76 kJ 增加至 75.09 kJ , 而随进 EFP 动能则从 76.17 kJ 下降至 17.71 kJ , 前级与随进 EFP 的动能主次关系发生了反转。其主要原因: 速度虽然降低, 但外层药型罩厚度的增加使其质量大幅增加, 质量对动能的影响超过了速度下降的影响, 因此, 前级 EFP 动能随 k 值减小而上升。相反, 内层罩变薄导致其质量减小, 即便速度变化相对平缓, 也使得随进 EFP 动能的显著降低。

另由图 9 (b) 可知, 虽然前、随进 EFP 动能随着 k 在不断变化, 但其总动能则变化较小。在内、外药型罩厚度不变的约束下, 爆轰总能量相对恒定, 调整厚度比实质上是对前、后级毁伤元进行动能的再分配。通过调整内、外罩厚度比可使该战斗部前、后级毁伤元动能在 $1:5.5$ 至 $4.2:1$ 之间灵活配置, 从而实现根据不同装甲目标调整动能分配, 实现毁伤效果的提升。

4 战斗部结构设计验证试验

4.1 战斗部结构

为检验上述研究战斗部结构设计的可行性并验证数值模拟模型及参数选取是否合理, 结合前文分析, 开展内层药型罩厚度比 $k=5/7$ 的战斗部静爆试验。战斗部采用球缺罩, 材料为紫铜, 密度为 8.96 g/cm^3 , 直径 $D=100 \text{ mm}$, $\delta_1=5 \text{ mm}$, $\delta_2=2 \text{ mm}$, 其曲率半径 $R_0=104 \text{ mm}$, $R_1=78 \text{ mm}$, $R_2=80 \text{ mm}$ 。装药为钝化黑索今药柱, 直径 $D=100 \text{ mm}$ 、装药高度 $H=50 \text{ mm}$ 、压药密度为 1.65 g/cm^3 , 具体如图 10 所示。

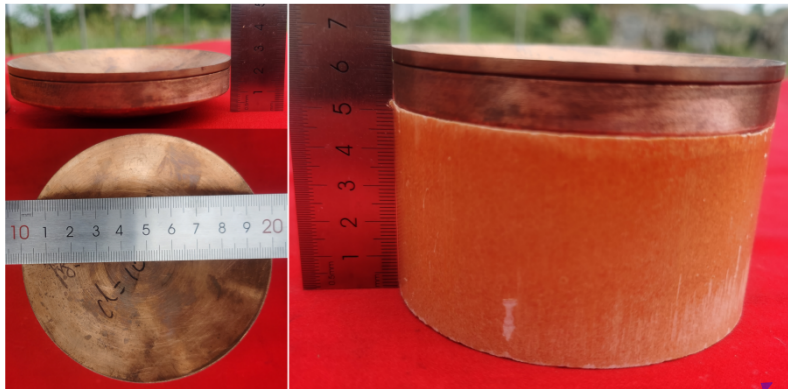


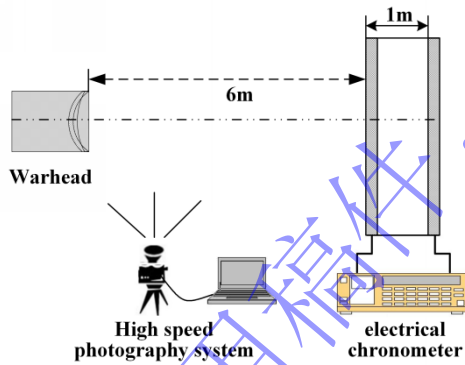
图 10 同轴双层罩 EFP 战斗部实物图

Fig.10 Photograph of the CEFP warhead with double-layer liners test article

4.2 试验设置

4.2.1 毁伤元成形试验

该试验设置如图 11 所示，具体由战斗部、锡箔靶、高速摄影系统及测时仪等组成。高速摄影系统设置在距离战斗部 30 m 处，利用高速摄像系统记录战斗部爆炸和毁伤元成形及飞形具体过程。拍摄时的高速摄影帧率设置为 30000 帧/秒，拍摄时长为 3 s。采用锡纸靶板进行测速，其中，战斗部与测速靶距离 6m，两靶板前后距离 1m。试验前，将两块锡箔纸中间加上一薄层绝缘纸以组成锡箔靶。采用整张白纸绝缘纸，然后将锡箔纸贴与绝缘纸两面，同时将其固定在硬纸板上。锡箔靶垂直设置在战斗部成形侵彻体预计的飞行弹道上，前、后锡箔靶的端线分别与测时仪相连。前级 EFP 通过两个锡箔靶之间距离所用的时间即可被记录下来，即可求得前级 EFP 在此段距离过程中的平均速度。



(a) Schematic diagram



(b) Experimental layout



(c) Testing Equipment

图 11 同轴双层罩 EFP 战斗部飞行试验图

Fig. 11 Flight test diagram of CEFP warhead with double-layer liners

4.2.2 侵彻威力试验

通过侵彻、贯穿钢靶验证同轴双层罩 EFP 的攻击装甲的威力。试验中设计了三层靶板结构，其中 1、2 层为主靶板，第 3 层为后效靶。靶板材料为 45#钢，尺寸均为 40 cm×40 cm×2 cm，靶板间隔 15cm，采用螺纹进行固定。战斗部放置于 PVC 管上，防止掉落 PVC 和炸药中间放置一薄硬纸板，PVC 管长 50cm 即距离第一层靶板高度为 50 cm，如图 12 所示。

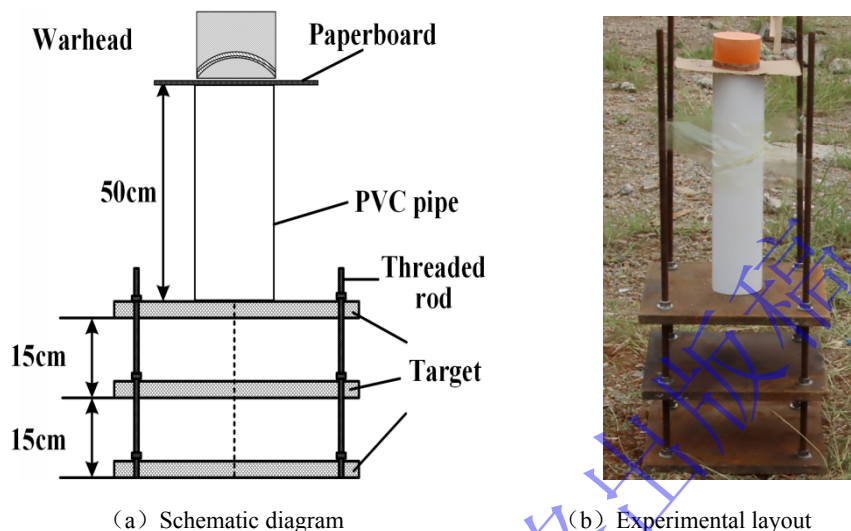


图 12 同轴双层罩 EFP 战斗部侵彻靶板图

Fig.12 Penetration of CEFP warhead into target with double-layer liners

4.3 试验结果分析

4.3.1 毁伤元成形试验结果分析

图 13 为同轴双层罩 EFP 战斗部毁伤元成形过程高速摄影图。通过高速摄像机捕捉到的画面可知，战斗部爆炸后形成两枚前后分离的 EFP，且随着时间的推移，前级 EFP 和随进 EFP 之间距离逐渐增大，说明两枚 EFP 之间存在速度差。随着两枚 EFP 间距持续增大，前级 EFP 引爆反应装甲后产生的冲击波及爆轰产物等后效作用将对随进 EFP 的影响相应降低，说明设计的战斗部结构具备“前级触发爆炸反应装甲、后级侵彻主装甲”的序列打击功能可行性。通过测速系统获得前级 EFP 速度为 934 m/s，如图 14 所示。综合长度标定物及高速摄影图像记录时间计算得到随进 EFP 速度为 708 m/s。

由图 13 可知，试验中同轴双层罩 EFP 战斗部爆炸后形成两个分离的前后 EFP。其中，随进 EFP 因罩材的均匀性、高速摄影时的光线散射效应以及受飞行过程中空气阻力、罩材微小飞溅的影响，其尾部出现轻微气流扰动痕迹，导致其与图 5 所示成形形态存在一定差异，但其前后分离形态与运动轨迹仍与图 5 所示结果相匹配。

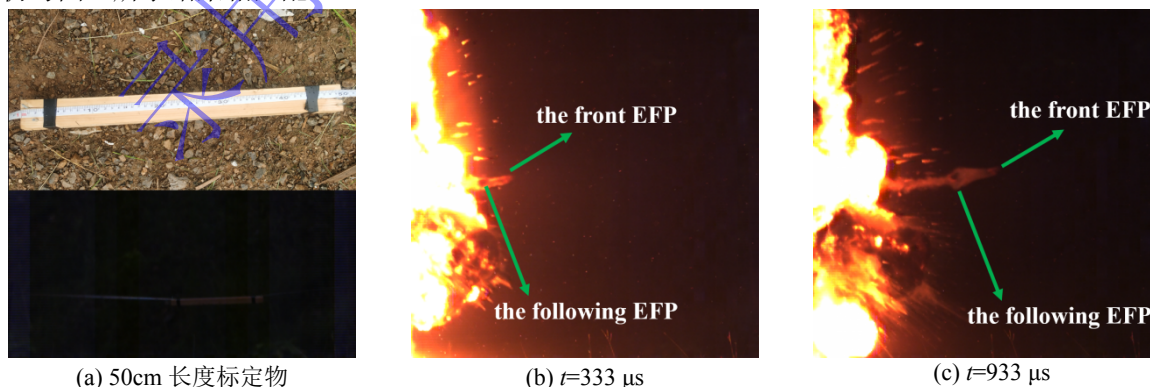


图 13 同轴双层罩 EFP 成形过程高速摄影图像

Fig.13 High speed photographic image of CEFP warhead with double-layer liners forming process

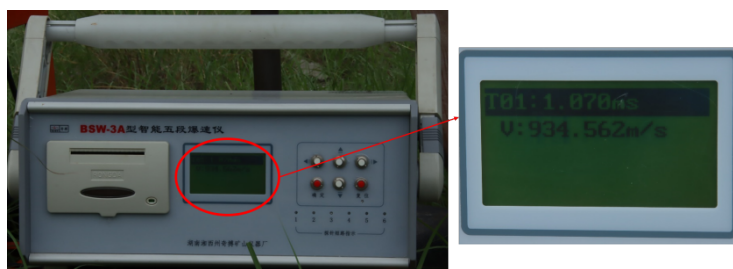


图 14 前级 EFP 速度测试结果

Fig.14 The front EFP speed test results

表 2 为同轴双层罩 EFP 速度结果对比。由表 2 可知，试验测试得到前级 EFP 和随进 EFP 速度分别为 934 m/s 和 708 m/s，与数值模拟结果 918 m/s 和 695 m/s，误差分别为 1.7%和 1.9%，表明数值模拟和试验结果具有较好一致性。

表 2 同轴双层罩 EFP 速度结果对比

Table 2 Comparison of CEFP speed

前级 EFP 速度(m/s)			随进 EFP 速度(m/s)		
试验值	数值模拟值	误差	试验值	数值模拟值	误差
934	918	1.7%	708	695	1.9%

4.3.2 侵彻靶板试验结果分析

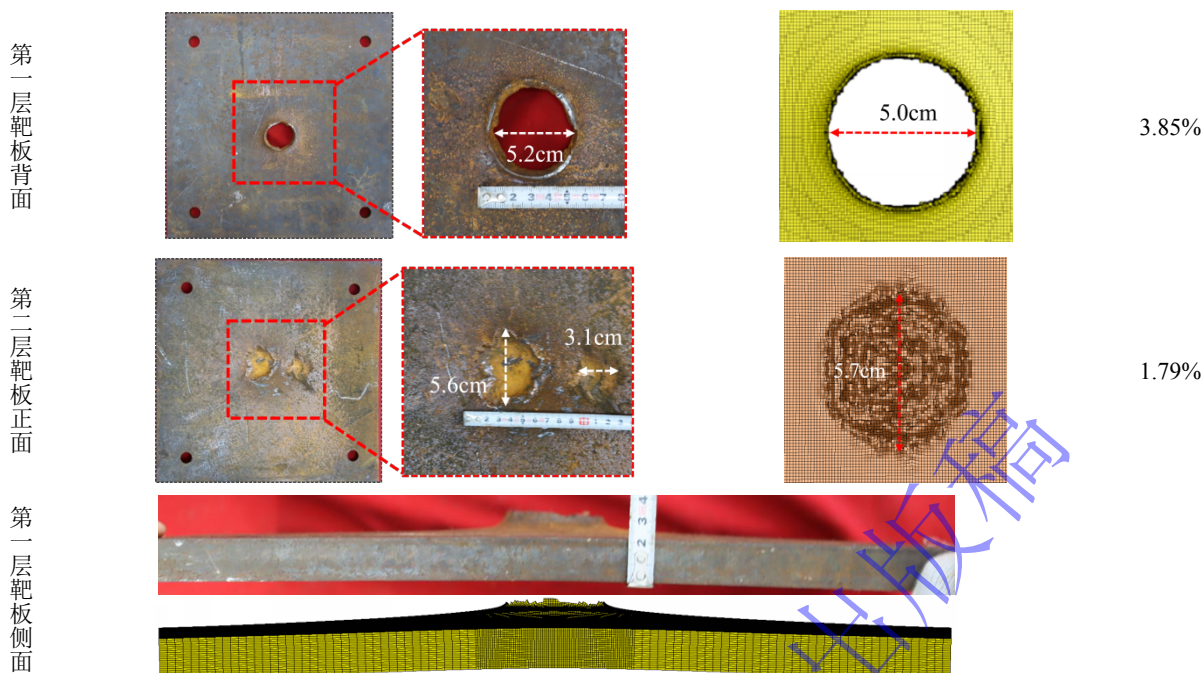
表 3 为同轴双层罩 EFP 战斗部侵彻靶板试验结果与数值模拟对比。由表 3 可知，设计的同轴双层罩 EFP 战斗部生成的两枚 EFP 有效穿透了第一层靶板，并在第一层靶板上形成正面孔径为 5.3 cm，背面孔径约为 5.2 cm 的较为正规的圆孔，且穿孔较为光滑且靶板背面形成塑性变形。同时由第一层靶板侧面可以看出，靶板在弹丸冲击下产生了挠度变形。侵彻第一层靶板后弹丸变形较大且剩余速度不足，导致没有穿透第二层靶板。在其正面形成一个长度为 5.6 cm 的不规则浅坑，主要是穿透上层靶板后侵彻的冲塞块下层靶板的侵彻造成的，说明弹丸穿透第一层靶板后仍具有一定的动能。验证了“外薄内厚”非对称同轴双层罩 EFP 战斗部设计的可行性。同时由于战斗部加工和设置精度问题，使得剩余 EFP 和冲塞块并没有在同一轴线，因此，旁边出现一个长 3.1cm 的浅坑。

同时由表 3 可知，战斗部侵彻靶板试验与数值计算结果吻合较好，进一步说明了本文数值模拟参数及模型选取合理，可用于开展同轴双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻靶板过程分析。

表 3 同轴双层罩 EFP 侵彻靶板试验结果与数值模拟结果对比

Table 3 Comparison between Experimental Results and Numerical Simulation Results for CEFP penetrating target

位置	试验结果	数值模拟结果	穿孔直径误差
第一层靶板正面			1.89%



5 结论

综合分析以上同轴双层罩 EFP 成形及侵彻钢靶过程数值模拟及试验研究结果, 得到如下结论:

(1) 设计的“外薄内厚”非对称同轴双层罩 EFP 战斗部, 一次起爆可形成两枚具有显著速度差且均具备侵彻能力的前后分离 EFP, 具备“前级触发爆炸反应装甲、后级侵彻主装甲”的序列打击功能可行性, 为突破“ERA+主装甲”复合防护体系提供重要技术支持。

(2) 通过研究得到同轴双层罩 EFP 成形主要分为: 双层药型罩顶部的初始变形流动、反射卸载波叠加与分离起始和双层药型罩继续压垮翻转形成分离的 EFP 三个阶段, 其中反射卸载波的叠加效应导致了内外层药型罩产生了分离, 理论定性分析、数值模拟和试验结果三者吻合较好, 验证了研究方法的可行性。

(3) 在保持药型罩总厚度不变的约束下, 通过调整内外罩厚度比可实现前级 EFP 与随进 EFP 速度差在 78~357 m/s 范围内的连续调控, 前级 EFP 与随进 EFP 动能分配比可在 1:5.5 至 4.2:1 之间灵活配置, 实现了同轴双层罩 EFP 战斗部速度及动能分配的“定制化毁伤”设计, 并通过静爆试验验证了设计的可行性。因此, 在实际应用中可根据装甲目标的配置选择合适的内外罩厚度比以提高毁伤效果。

参考文献 (References)

- [1] GAO B, LAI Q, CAO Y, et al. Ultrastrong low-carbon nanosteel produced by heterostructure and interstitial mediated warm rolling[J]. Science Advances, 2020, 6(36): eaba8169. DOI: 10.1126/sciadv.aba816
- [2] XIA H, ZHAO G, ZHANG Y, et al. Nanosecond laser-induced controllable oxidation of TiB₂-TiC ceramic composites for subsequent micro milling[J]. Ceramics International, 2022, 48(2): 2470-2481. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.10.028.
- [3] GONG X B, REN C W, LIU Y H, et al. Impact response of the honeycomb sandwich structure with different poisson's ratios[J]. Materials, 2022, 15(19): 6982. DOI: 10.3390/ma15196982.
- [4] SUN X, ZHANG X Y, YAN H, et al. Penetration resistance of ceramic composite structures with a double arrowhead honeycombs interlayer against projectile impact[J]. Ceramics International, 2025, 51(9): 11649-11664. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.01.019.
- [5] 武一丁, 王晓东, 余毅磊, 等. 纤维背板结构对 B4C 陶瓷复合装甲抗侵彻破碎特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(09):181-193. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0133
WU Y D, WANG X D, YU Y L, et al. Affection of fiber backboard structure on the penetration and crushing resistance of B4C ceramic composite armor [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(09): 181-193. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0133.

- [6] 马铭辉, 武一丁, 王晓东, 等. 多孔钛合金夹芯层陶瓷/UHMWPE 复合结构的抗侵彻性能[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(04):3-16. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0375.
MA M H, WU Y D, WANG X D, et al. Penetration resistance of ceramic/UHMWPE composite structures with porous titanium alloy sandwich layer [J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(04):3-16. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0375.
- [7] TOSELLO R, VIVES M, TRONCHE A. Twin EFPs for underwater applications[C]// Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, USA: International Ballistics Committee, 1999: 357–372.
- [8] FONG R, NG W, WEIMAN K. Testing and analysis of multi-liner EFP warheads[C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, USA: International Ballistics Committee, 2002: 465–472.
- [9] Ma H B, Zheng Y F, Wang H F, et al. Formation and impact-induced separation of tandem EFPs[J]. Defence Technology, 2020, 16(3): 668-677. DOI: 10.1016/j.dt.2019.09.003
- [10] FAIBISH E, MAYSELESS M. A double-layered conical liner manufactured by explosive welding[C]// Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel: International Ballistics Committee, 1995: 59–67.
- [11] WANG H F, GUO H G, GENG B Q, et al. Application of PTFE/Al reactive materials for double-layered liner shaped charge[J]. Materials, 2019, 12(17): 2768. DOI: 10.3390/ma12172768.
- [12] 黄炳瑜, 熊玮, 张先锋, 等. 双层含能药型罩 K 装药射流成型及侵彻性能试验[J]. 含能材料, 2021, 29(02): 149 – 156. DOI: 10.11943/CJEM2020231
HUANG B Y, XIONG W, ZHANG X F, et al. Experimental study on jet formation and penetration performance of double-layered reactive liners with K-charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 149-156. DOI: 10.11943/CJEM2020231
- [13] TANG E L, LIU P, WANG R Z, et al. Jet forming of Al/PTFE-W/Cu double-layer liner considering reactivity and damage to medium-thick concrete target[J]. Polymer Testing, 2025, 146: 108792. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2025.108792.
- [14] HONG B H, LI W B, LI Y M, et al. Jet formation and penetration performance of a double-layer charge liner with chemically-deposited tungsten as the inner liner[J]. Defence Technology, 2024, 33: 374-385. DOI: 10.1016/j.dt.2023.08.016.
- [15] 杨贵涛, 郭锐, 宋浦, 等. 形成串联爆炸成型弹丸的组合药型罩结构参数研究[J]. 兵工学报, 2024, 45(09): 3056 – 3070. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0911.
YANG G T, GUO R, SONG P, et al. The structural parameters of combined liner for tandem explosively formed projectile[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(09): 3056–3070. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0911.
- [16] 赵富裕, 王成, 王泽宇, 等. 双锥药型罩聚能射流侵彻钢板靶试验与高精度仿真[J]. 振动与冲击, 2025, 44(3): 150 – 162+181. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.03.018.
ZHAO F Y, WANG C, WANG Z Y, et al. Tests and high-precision simulation of biconical shaped charge jet penetrating steel target plate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(03): 150–162+181. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.03.018.
- [17] 周方毅, 詹发民, 黄雪峰, 等. 全尺寸圆锥-球缺组合药型罩聚能战斗部毁伤试验[J]. 兵工学报, 2024, 45(S2): 251 – 258. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0084.
ZHOU F Y, ZHAN F M, HUANG X F, et al. Test research on damage effect of full-size shaped charge warhead with conical-spherical combined liner[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(S2): 251–258. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0084.
- [18] 蒋文灿, 程祥珍, 梁斌, 等. 一种组合药型罩聚能装药战斗部对含水复合结构毁伤的数值模拟及试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(08): 93-107. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
JIANG W C, CHENG X Z, LIANG B, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage of water partitioned structure by a shaped charge warhead with a combined charge liner [J]. Explosion and Shock Waves, 2022,42(08):93-107. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
- [19] YIN J P, CHEN J, HAN Y Y, et al. Numerical simulation on formation of triple-layer tandem EFP[C]// Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics. California, USA: International Ballistics Committee, 2019: 1427-1434.
- [20] 孙韬, 袁盈, 郑元枫, 等. 药型罩形状对活性聚能侵彻体成型的影响[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(4): 327-335. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.088.
SUN T, YUAN Y, ZHENG Y F, et al. The influences of liner shape on the formation of reactive shaped charge penetrator[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(04): 327–335. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.088.
- [21] 郑元枫, 马红兵, 肖艳文, 等. 三层串联 EFP 成形与分离行为[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 143-150. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.012.
[22] 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. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.012.
- [23] 何佳全, 刘博文, 兰添, 等. 药型罩结构与材料对串联 EFP 成形影响的数值模拟[J]. 装备制造技术, 2019, (11): 131-133.
HE G Q, LIU B W, LAN T, et al. Numerical simulation of the effect of liner structure and material on series EFP molding[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019, (11): 131–133.
- [24] 孙贺, 焦志刚, 梁德刚, 等. 基于正交设计的双层药型罩多参数结构优化[J]. 沈阳理工大学学报, 2020, 39(6): 82 – 87. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2020.06.017.
SUN H, CUI J G, LIANG D G, et al. Multi-parameter structural optimization of double-layer liners based on orthogonal design[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2020, 39(6): 82-87. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2020.06.017.
- [25] 徐粲, 尹建平, 张雪朋, 等. 罩间隙对 3 层串联 EFP 成型影响数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 74-78. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.06.010.
XU C, YIN J P, ZHANG X P, et al. Numerical simulation of the influence of a liner gap on three-layer tandem EFP

- forming[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 74-78. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.06.010.
- [26] 赵志杰, 李伟兵, 李文彬, 等. 带隔板复合装药结构对双层罩毁伤元成型的影响研究[J]. 火炸药学报, 2024, 47(4): 344-353. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202307004.
ZHAO Z J, LI W B, LI W B, et al. Effects of composite shaped charge with wave shaper on formation of double-layer liner penetrator[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2024, 47(4): 344-353. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202307004.
- [27] 夏杰. 双层药型罩射流形成的理论与数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012: 20-40.
- [28] LS-DYNA970 theoretical manual [M]. US: Uvermore Software Corp, 1998.
- [29] 赵长啸, 龙源, 余道强, 等. 切割式多爆炸成形弹丸成形及对钢靶的穿甲效应[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 186-193. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0186-08
ZHAO C X, LONG Y, YU D Q, et al. Formation of incised multiple explosively-formed projectiles and their armor-piercing effect against steel target [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 186-193. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)02-0186-08
- [30] ZHAO C X, CHENG Y F, LI D Y, et al. Study of the dynamic processes of multi-point initiation of co-axial explosively formed projectiles with tail wings using high speed image processing technologies[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2024, 21(3): 255-281. DOI 10.22211/cejem/193816.