

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.019

同轴式多罩体 EFP 战斗部成型与侵彻的仿真分析

窦成彪, 尹建平, 徐全振, 陈 杰
(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 为提高爆炸成型弹丸 (explosively formed penetrators, EFP) 战斗部侵彻钢靶目标的深度, 设计多层药型罩 EFP 战斗部装药结构。利用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 对 5 种药型罩层数的 EFP 战斗部成型和侵彻间隔靶板进行数值模拟, 分析不同层药型罩的 EFP 战斗部对炸药能量利用率及穿深能力。结果表明: 多层同材料的球缺型药型罩堆叠、贴合放置可形成多个分离的同轴 EFP, 与单层药型罩结构相比, 多层药型罩结构形成串联 EFP 对炸药能量利用率更高, 具有更大的穿深能力, 对靶板侵彻后效更强, 其中 3 层和 5 层结构侵彻深度提高 63.4%。

关键词: 多层药型罩; EFP; 成型装药; 数值模拟

中图分类号: TJ413 **文献标志码:** A

Simulation Analysis on Shaping and Penetration of Coaxial Multiple Layer Liner EFP Warhead

Dou Chengbiao, Yin Jianpin, Xu Quanzhen, Chen Jie
(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Shaped charge with multiple liner structure was designed to improve the depth of EFP penetrate armored steel target. The numerical simulation of forming of EFP warhead and the process of penetrating armored steel for 5 shaped charge structures was carried out by ANSYS/LS-DYNA software. Explosive energy utilization rate and depth penetration ability with different layers liner were analyzed. The results show that the coaxial series EFP can be formed by laminating multiple layer hemispherical liners with the same material. Compared with the single-layer structure, the multi-layer structure can deliver higher energy utilization and greater penetration ability. The depth penetrated by 3 and 5 series EFP was increased by 63.4%.

Keywords: multiple layer liners; EFP; shaped charge; numerical simulation

0 引言

爆炸成型弹丸战斗部技术在近二三十年来得到飞速发展, 并逐渐在诸多军事领域尤其是灵巧弹药领域内获得了广泛应用。然而近年来, 随着坦克装甲车辆防护技术的综合发展, 给 EFP 战斗部从顶部侵彻坦克装甲车辆带来了一定困难。开发侵彻能力更强、威力更大的 EFP 战斗部成为当务之急。

同轴式多罩体 EFP 战斗部是将药型罩由单一材料设计改变为由 2 种或多种材料设计的药型罩同轴放置, 单次起爆后在同一轴线连续形成多个 EFP, 以形成接力穿孔侵彻的效果。多罩体结构成型的 EFP 等效长径比大大增加, 侵彻装甲能力更强。由于该战斗部装药结构简单、能量利用率高和侵彻性能高等优点, 不少学者针对多层串联 EFP 进行了研究。美国学者 K. Weiman 等^[1]研究不同材料的双层药型罩形成钽-铁分离射弹。R Fong^[2]在 K. Weiman 的研究基础上对钢质 2 层和 3 层球缺罩战斗部进行

成型实验, 获得等效长径比很大的 EFP。国内诸多学者^[3-8]对双层药型罩形成串联 EFP 进行研究, 在 2 层药型罩形成串联 EFP 的成型机理、材料及结构参数对成型影响的研究上取得了很大成果。

笔者以单层药型罩战斗部为基本型结构, 通过增加药型罩数量设计多层药型罩战斗部。采用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 分析多层串联毁伤元的成型过程, 研究多罩体 EFP 战斗部结构能量利用率以及形成的多层串联 EFP 侵彻性能。

1 同轴式 EFP 战斗部的结构设计

笔者所设计的基本型 EFP 战斗部主要由药型罩、炸药和固定环组成。基型单罩体结构的装药直径 $D=60$ mm, 药型罩外半径 $R_1=0.9D$, 装药高度 $H=1.2D$, 药型罩厚度 6 mm, 药型罩为次口径球缺型结构。设计的 4 种 (2 层、3 层、4 层、5 层) 多罩体战斗部药型罩总厚度与基本型相同, 都由同心圆等壁厚药型罩堆叠, 即每层药型罩厚度分别为 3、2、

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(11572291)

作者简介: 窦成彪(1990—), 男, 江苏人, 硕士, 从事冲击动力学及仿真研究。

1.5 和 1.2 mm。多罩体战斗部中互相接触的药型罩之间存在自由表面，可以自由滑动和碰撞^[9]。为了方便起见，笔者以内径最小的药性罩为第 1 层药型罩(外罩)，战斗部结构简图、药型罩简图如图 1。

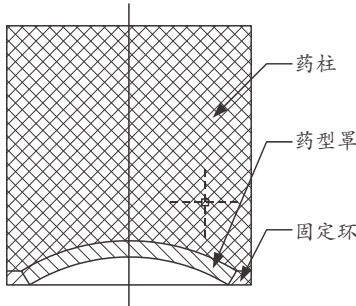


图 1 基型战斗部结构

数值计算模型采用前处理工具 Hypermesh 划分 8 节点六面体单元，如图 2 所示。考虑到多层药型罩成型、侵彻靶板复杂，故对其采用全模型建模。对数值计算的网格单元使用 Lagrange 算法描述。该算法能够清楚地描述物质运动，真实地看到多层药型罩形成串联 EFP 的过程^[9]。由于紫铜材料具有塑性较好，密度和声速较高，且熔点适中的优点，具有良好的综合性能，是聚能装药战斗部药型罩应用最为广泛的材料^[10]，在本文的数值模拟中，所有药型罩均使用紫铜材料，并使用 J-C 材料本构模型以及 Gruneisen 状态方程。战斗部装药中炸药选用 8701 炸药，对其采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 JWL 状态方程。所用材料模型如表 1 所示，仿真采用装药端面中心点起爆。

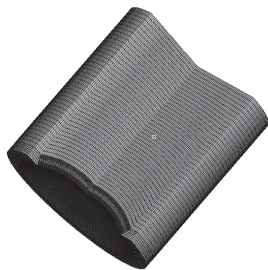


图 2 计算模型

表 1 所选材料模型

名称	材料	状态方程	本构模型
装药	8701	JWL	—
各药型罩	紫铜	Gruneisen	Johnson Cook
固定环	紫铜	Gruneisen	Johnson Cook
靶板	装甲钢	Gruneisen	Johnson Cook

同轴式 EFP 战斗部在单次起爆后形成多个串联 EFP 射弹，在打击装甲车辆时可以极大地提高毁伤能力。为了比较同结构下各多罩体战斗部对装甲的毁伤效果，建立同轴放置的 3 个模型尺寸为 100

mm×100 mm×20 mm 装甲钢间隔靶板。每个靶板间距 20 mm。炸高都相同地选取 6 倍的装药口径。有限元前处理软件划分的靶板网格模型如图 3 所示。计算过程中通过完全重启动方法将靶板添加到计算模型中。计算中对靶板采用等效失效应变方法删除失效单元，以模拟靶板被侵彻的效果。

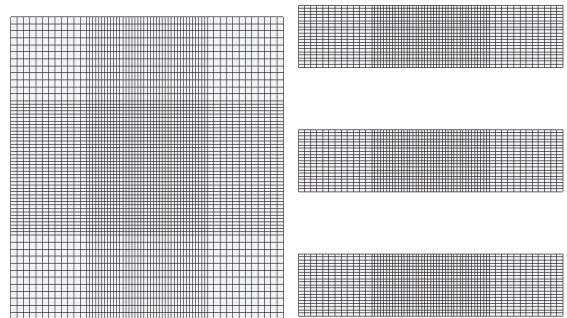


图 3 靶板网格

2 同轴式 EFP 成型数值模拟

以 4 层药型罩的多罩体结构说明同轴式 EFP 成型过程。炸药起爆后不同时刻的 4 层药型罩形成的串联毁伤元物理过程如图 4 所示。由图可以看出：炸药起爆后，爆轰波首先到达药型罩中间部分，相互接触的药型罩之间产生碰撞，此时各个药型罩顶部微元的轴向速度分量 v_x 大于尾部，每个药型罩都向后翻转，由于相互接触的药型罩之间存在自由表面，在尾部首先产生间隙。此时药型罩顶部轴向速度均大于底部轴向速度，各药型罩向后翻转。药型罩底部由于径向速度低，相互接触而未发生分离。最后由于药型罩碰撞微元和翻转微元之间的相互牵连作用，尾部速度提高，各接触的药型罩在翻转过程中逐渐分离。150 μ s 后 EFP 不再互相接触，分离后的药型罩成型与单层药型罩形成 EFP 类似。200 μ s 时成型的 4 个 EFP 具有稳定的速度差，形成同轴的 4 层串联翻转型 EFP。

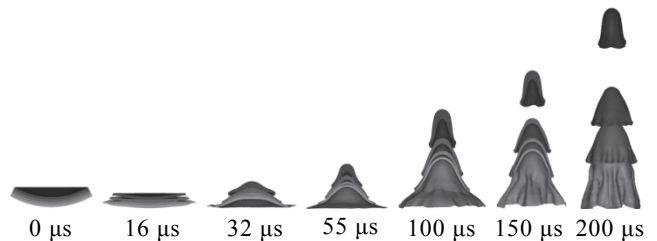


图 4 四罩体结构毁伤元形成过程

200 μ s 时，4 层药型罩形成具有恒定速度差的同串联 EFP。此时所具有的动能变化曲线如图 5 所示。

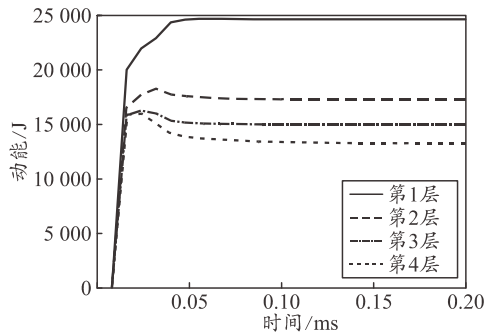


图 5 EFP 动能变化

为了比较多罩体 EFP 对炸药的能量利用率，对前面建立的 5 种装药结构进行数值模拟。起爆 200 μs 后，各多罩体成型的串联 EFP 如图 6 所示。4 种不同的多罩体战斗部均形成了具有不同速度差的分离式射弹。

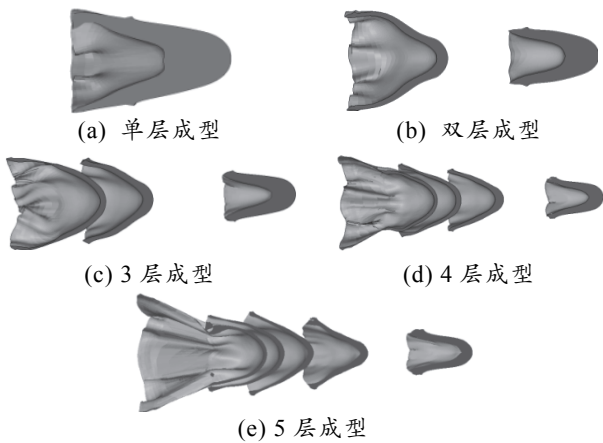


图 6 5 种结构 EFP 成型

计算出各 EFP 的动能，得到每层药型罩获得的能量比例如图 7 所示。显然，对于多罩体串联 EFP，最外层药型罩获得的能量总是最大，其余药型罩获得能量从外往内梯度减小，这也从能量角度解释了多罩体药型罩分离成型 EFP 的原因。

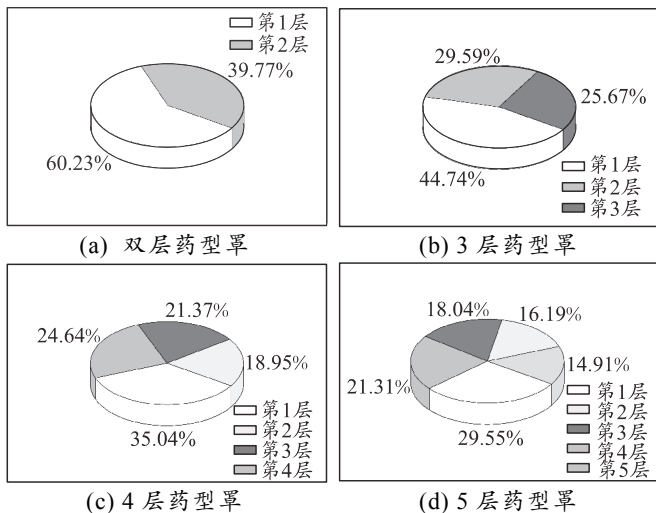


图 7 每层药型罩动能比例

由于各个药型罩总壁厚相同，计算 200 μs 成型后的 EFP 获得总动能，比较单层药型罩结构到 5 层药型罩结构形成同轴 EFP 的总动能，如图 8 所示。由图可以看出：多罩体结构都比单罩体能量利用率更高。能量利用率最大的为 3 层药型罩结构，比单层药型罩结构提高 6.3%；但增加药型罩数量并不能持续增加能量利用率，5 层药型罩结构增加的动能仅为 3 层结构的 59%。

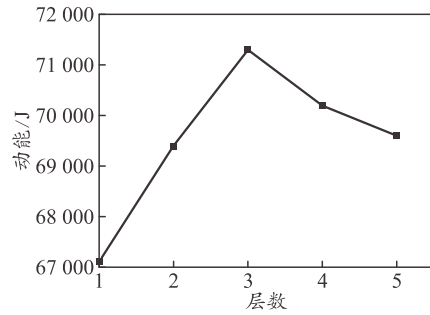
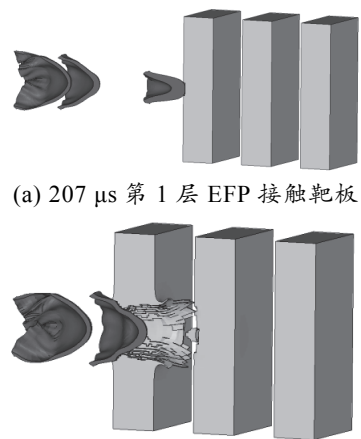


图 8 5 种结构下药型罩总动能

3 同轴式 EFP 侵彻能力分析

笔者通过仿真说明同轴式 EFP 侵彻间隔靶板的过程，比较相同结构的各个同轴式 EFP 的侵彻特性。以 3 层药型罩的多罩体结构说明同轴式 EFP 侵彻间隔靶板过程：第 1 层 EFP 头部首先与靶板碰撞，50 μs 内分别经过接触瞬间、开坑、稳定侵彻、形成冲塞 4 个典型 EFP 侵彻过程，第 1 层靶板形成直径 24.5 mm 弹孔；第 2 层 EFP 尾翼在 280 μs 对第 1 层靶板进行扩孔侵彻，20 μs 后第 1 层靶板扩孔深度达到 10 mm，之后第 2 层 EFP 头部开始侵彻第 2 层靶板；第 3 层 EFP 继续对第 1 层靶板扩孔，395 μs 时第 3 层 EFP 贯穿第 2 层靶板，形成 17.9 mm 弹孔，在扩孔过程中破碎被挤压成密实弹丸，90 μs 后第 3 层 EFP 完全贯穿第 3 层靶板。200~500 μs 3 层串联 EFP 侵彻装甲钢靶的物理过程如图 9 所示。



(a) 207 μs 第 1 层 EFP 接触靶板
(b) 280 μs 第 2 层 EFP 对第 1 层靶板扩孔侵彻

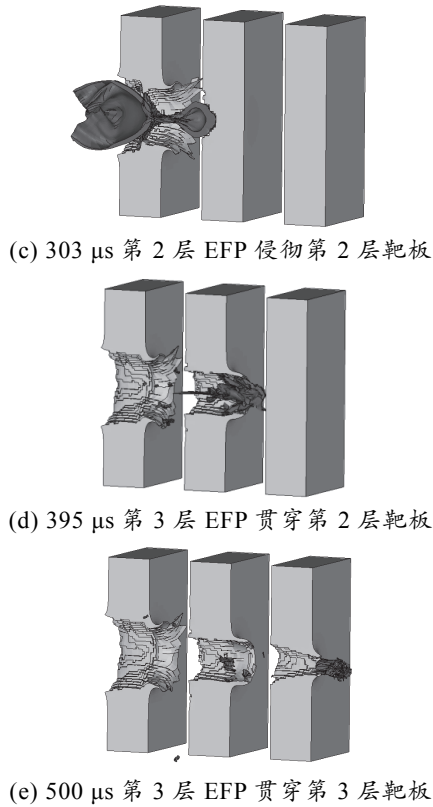


图 9 3 层串联 EFP 侵彻装甲钢靶的过程

3 层 EFP 在接力穿孔侵彻过程中总动能降低约 99%。由于 EFP 侵彻速度逐渐降低，扩孔能力逐渐减弱，故整体侵彻孔呈“V”型。图 10 中曲线显示了每层 EFP 侵彻靶板时动能的变化。

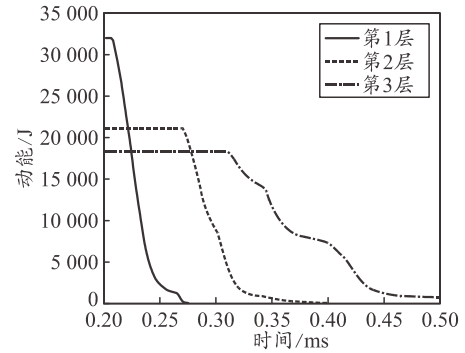


图 10 每层 EFP 动能变化

对于单层 EFP，长径比增加可以有效地增加侵彻深度。多罩体结构形成的串联 EFP 等效长径比大大增加，5 层药型罩形成的串联 EFP 等效长径比是单层结构的 6 倍。为了讨论多罩体结构形成的串联 EFP 侵彻性能，分别对单层结构到 5 层结构形成的 EFP 进行侵彻间隔靶板仿真。5 种结构的 EFP 侵彻间隔靶板的过程如表 2 所示。

表 2 5 种 EFP 侵彻靶板

	层数	侵彻过程			
单层					
双层					
3 层					
4 层					
5 层					

表 2 中可以直观地看出 500 μs 时侵彻结果：单层 EFP 未穿透第 2 层靶板；双层 EFP 在第 2 层靶板处处于临界贯穿状态；3 层和 5 层 EFP 均穿透 3 层靶板；4 层 EFP 在第 3 层靶板形成弹坑，未穿透第 3 层靶板。图 11 显示了各 EFP 侵彻靶板的总深度。由图 11 可见，多罩体结构形成的多层 EFP 均比单层 EFP 具有更大的穿深能力，对靶板侵彻后效更强，其中 3 层和 5 层结构形成的串联 EFP 侵彻深度比单层结构增加 63.4%。

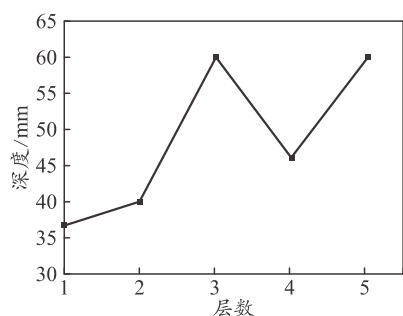


图 11 侵彻深度

基于以上分析结果，多罩体结构形成的串联 EFP 可以对目标进行接力侵彻，达到大穿深的效果，对于爆炸反应装甲 (explosive reactive armor, ERA)，可以合理设计多罩体药型罩的结构，使成型的 EFP 之间保持合适距离，利用第 1 层 EFP 侵彻反应装甲，后面多层 EFP 用于主装甲侵彻。由于多层串联 EFP 数量增多，第 1 层药型罩获得的动能比例减少，利用第 1 层 EFP 应对反应装甲的爆轰反应，将更多的动能转移到后面多层 EFP。多层 EFP 结构与单层或双层串联 EFP 相比，可以大大提高对主装甲的侵彻毁伤效果。在设计多层串联药型罩时，应根据不同的需求取不同的串联药型罩层数。文中未对串联 EFP 侵彻爆炸反应装甲进行仿真分析，将在之后的研究中继续完善。

4 结论

1) 多层相同材料的球缺型药型罩堆叠、贴合放置可形成多个分离的同轴 EFP。5 层药型罩形成串联 EFP 的等效长径比是单层的 6 倍，大幅度增加

EFP 的长径比。

2) 与单层结构相比，多罩体结构形成串联 EFP 具有更高的能量利用率，其中 3 层罩结构能量利用率最大，形成的串联 EFP 动能比单层结构提高 6.3%。

3) 多罩体结构形成的具有一定能量梯度多个连续的 EFP 射弹对目标进行接力侵彻，有效提高了侵彻性能。其中，3 层和 5 层结构形成的串联 EFP 侵彻间隔靶板的深度比单层结构增加 63.4%。

参考文献：

- [1] WEIMAN K, BLACHE A. Explosively formed projectile with tantalum penetration and steel stabilization base[C]// 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio. MSA: International Ballistics Committee, 1999: 603-608.
- [2] FONG R, NG W, WEIMAN K. Testing and analysis of multi-liner EFP warheads[C]//20th International Symposium of Ballistics. Orlando, USA: International Ballistics Committee, 2002: 578-582.
- [3] 龙源, 毛振兴, 刘健峰, 等. 曲率半径对双层药型罩 EFP 战斗部成形及侵彻的影响[J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 5-10.
- [4] 蒋建伟, 杨军, 门建兵, 等. 结构参数对 EFP 成型影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(11): 939-942.
- [5] 王义磊, 吴越. 几种结构的圆弧杆式战斗部的数值模拟[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3): 77-80.
- [6] 郑宇. 双层药型罩毁伤元形成机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 68-75.
- [7] 孙华, 王志军. 新型双层药型罩形成毁伤元数值模拟与分析[J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(1): 70-72.
- [8] 刘健峰, 龙源, 纪冲, 等. 双层药型罩 EFP 战斗部性能参数的灰色系统理论分析及实验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(8): 728-734.
- [9] 窦成彪, 尹建平, 徐全振, 等. 次口径三层球缺药型罩形成串联 EFP 数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(4): 63-67.
- [10] CHANG B H, YIN J P, CUI Z Q, et al. Improved Dynamic Mechanical Properties of Modified PTFE Jet Penetrating Charge with Shell[J]. Strength of Materials, 2016, 48(1): 82-89.