文章编号：1001-1455(2012)01-0029-05

基于双层药型罩成型装药的串联 EFP*

郑 宇[1,2]，王晓鸣[1]，李文彬[1]，苗勤书[1,2]，李伟兵[1]
(1. 南京理工大学智能弹药技术重点实验室，江苏 南京 210094；
2. 中国人民解放军 63961 部队，北京 100012)

摘要：为了研究双层药型罩形成的串联 EFP，设计了 4 种不同材料组合的双层药型罩，利用 X 光获得了串联 EFP 形成过程的照片，并开展了相应的数值模拟。发现具有合适结构和药型罩材料的双层药型罩可以形成串联聚能侵彻体，药型罩材料组合和起爆位置对串联聚能侵彻体的形成具有较大的影响。

关键词：爆炸力学；串联聚能侵彻体；有限元；双层药型罩；聚能装药
中图分类号：O385；TJ410.333 **国标学科代码**：1303530 **文献标志码**：A

聚能装药战斗部被广泛应用于军事和民用领域。随着军事科技的日新月异，各种军事目标的防护能力不断加强，复合装甲、爆炸反应装甲等技术的出现，传统聚能装药面临着严峻的挑战。为了提高聚能装药战斗部的毁伤能力，设计者对高能炸药、爆轰机理、药型罩材料和结构进行了大量研究。串联爆炸成型弹丸(tandem explosively formed projectile，tandem EFP)是近几年提出的新概念战斗部。设计合理的多层药型罩在同一轴线上连续射出多个串联 EFP，不仅可以巧妙地解决爆炸反应装甲问题，而且可以提高聚能侵彻体的破甲威力。因此多层 EFP 技术成为了聚能战斗部研究的热点之一，已有学者开展了双层药型罩串联聚能侵彻体形成及侵彻过程的初步研究[1-4]。

本文中，对双层药型罩成型装药形成串联 EFP 的机理进行实验和数值模拟，研究影响双层药型罩成型装药侵彻体形成的主要因素。设计 4 种不同材料组合的实验样品，其中铜、软钢和铝被选做药型罩材料，并获得 X 光照片。拟为双层药型罩的深入研究和工程化应用提供参考。

1 实 验

为了获得串联 EFP 的具体形态和速度等特征量，首先对双层药型罩聚能装药的侵彻体形成过程开展了 X 光实验研究。图 1 为实验装置图，采用 450 kV 的 X 光设备。通过分析 X 光照片，可以得到串联 EFP 的速度、长度和直径等参数。

图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

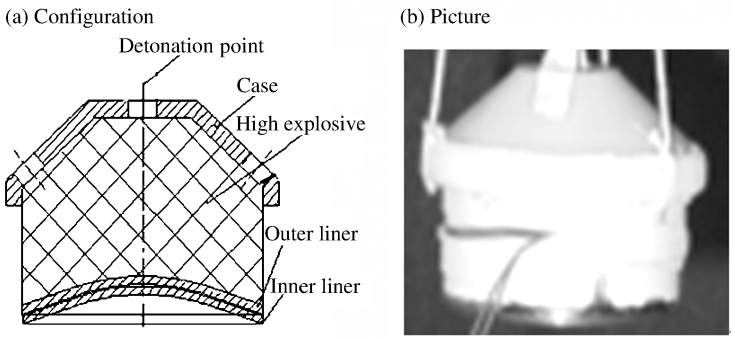

图 2 双层药型罩样品
Fig. 2 SCDLL experimental sample

* **收稿日期**：2010-10-19；**修回日期**：2011-03-22
基金项目：中国博士后科学基金项目(20100480686)；南京理工大学自主科研专项计划项目(2010GJPY040)
作者简介：郑 宇(1981—)，男，博士，讲师。

图 2 为双层药型罩成型装药的结构示意图和实物照片。试样直径 $D=60$ mm,装药高度 $h=48$ mm。作为比较,除紫铜外,还选择了软钢(20 钢)和铝合金作为药型罩材料。炸药材料为 JH-2。起爆方式都为中心点起爆。实验方案如表 1 所示,表中外罩表示靠近炸药的药型罩,质量为 m_1,内罩表示远离炸药的药型罩,质量为 m_2。

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

编号	外罩	内罩	m_1/g	m_2/g
S1	20 钢	紫铜	35.1	39.8
S2	紫铜	20 钢	39.9	34.9
S3	紫铜	紫铜	39.9	39.8
S4	铝合金	紫铜	12.1	39.8

2 数值模拟

为了获得关于串联 EFP 形成的更多数据,采用有限元程序 AUTODYN-2d 进行相应的数值模拟。算法的选择决定了双层药型罩数值模拟是否可行。对于串联 EFP 的形成,涉及到不同接触面的碰撞和滑移,本文中采用 Lagrange 形式的网格进行计算。与 Euler 算法相比,Lagrange 算法的优势在于可以清楚地刻画不同界面之间的相对运动,便于取出特定位置的物理量。难点在于,压垮及翻转过程中,药型罩变形剧烈,网格会产生相当大的变形甚至出现负面积。解决的办法:一是建模时,有意将药型罩网格建成细长形状。二是药型罩压垮过程中,适时使用 Remap 算法,重新划分网格,Remap 是 AUTODYN 软件所特有的一种算法。在 Lagrange 算法情况下,当网格严重变形以至于计算无法进行下去后,对网格进行规则划分,同时将节点的物理量进行重新分配。这样处理过后,计算可以继续下去,且计算精度可以保证。双层罩之间的接触采用 AUTODYN 自带的 Lagrange-Lagrange 自由接触算法,保证两个接触面可以发生相互碰撞和滑移。双层药型罩的有限元模型如图 3 所示,因为采用了轴对称算法,此处仅给出了半截面的形状。

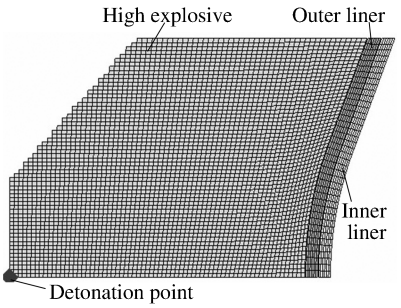

图 3 双层药型罩有限元模型(半截面)

Fig. 3 Simulation model of SCDLL (half section)

药型罩材料采用 Shock 状态方程,它是 Mie-Grüneisen 状态方程的一种,一般形式见文献[5]。使用 Johnson-Cook 动态屈服模型[6]描述药型罩的力学行为。JH-2 炸药采用 JWL 状态方程,药型罩和炸药材料的模型参数取自文献[5,7-9]。

3 结果及分析

3.1 串联 EFP 的形成过程

双层药型罩形成串联 EFP 的过程对于研究串联 EFP 的形成机理非常重要。下面首先对同种药型罩材料的串联 EFP 形成过程进行数值模拟。

从图 4 中可以看出,双层球缺罩侵彻体形成机理是:爆轰波扫过药型罩后,靠近轴线的微元(称为压垮微元)被压跨,因为压垮微元具有足够的径向速度,可以运动到轴线上,但刚运动到轴线的压垮微元并未发生分离(见图 4(b)),此后压垮微元在轴线发生碰撞,内外微元因具有速度差且相互之间没有牵连而首先产生分离(见图 4(c)~4(d))。

远离轴线的微元(称为翻转微元),没有足够的径向速度无法运动到轴线,因此开始阶段翻转微元的内外层速度相同,无法分离。当压垮微元在轴线上碰撞并分离后,内罩的压垮微元和翻转微元之间会产生牵连作用,使得翻转微元得到加速,并逐渐与外罩微元分离(见图 4(e))。这个阶段,内外罩之间会因为摩擦力而产生动量交换,但此时摩擦力很小且作用时间短暂,对两罩的速度影响不大。

双层球缺罩毁伤元的形成取决于很多因素,这些因素之间相互作用,影响着双层球缺罩的形成过程,这些因素包括内外罩材料、内外罩的结构、炸药和起爆方式等。郑宇等[4]讨论了药型罩结构对串联 EFP 形成的影响,本文中主要对药型罩的材料组合和起爆方式的影响进行研究。

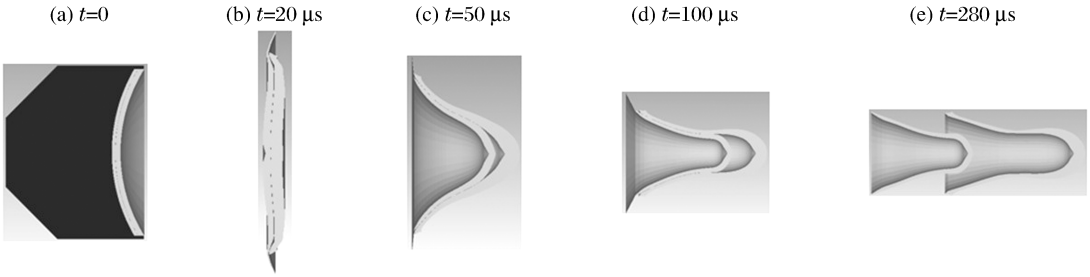

图 4　串联 EFP 的形成过程

Fig. 4　Formation process of tandem EFP

3.2　药型罩材料对串联 EFP 形成的影响

对实验得到 X 光照片进行分析，可得到串联侵彻体的速度、长径比等参数，同时与数值模拟结果进行对比。图 5 给出了 4 个实验方案得到的串联侵彻体的 X 光照片和相应的模拟结果。

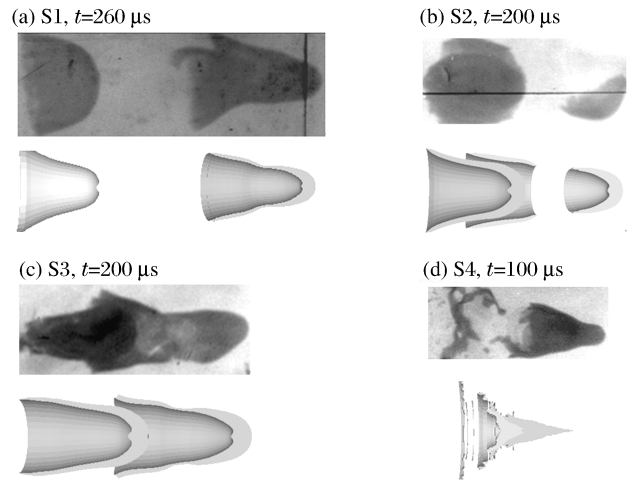

图 5　实验与数值模拟结果

Fig. 5　Experimental and numerical results

表 2 给出了串联侵彻体的速度、长度和长径比的实验结果，表中 v_1、v_2 分别表分别示外罩和内罩 EFP 的速度，l_1、l_2 分别表示外罩和内罩 EFP 的长度，d_1、d_2 分别表示外罩和内罩 EFP 的平均直径。

表 2　串联侵彻体的实验结果

Table 2　Parameters of tandem penetrators

方案	v_1/(km/s)	v_2/(km/s)	l_1/cm	l_2/cm	l_1/d_1	l_2/d_2
S1	1.672	1.354	4.48	2.43	3.50	0.92
S2	1.693	1.612	2.80+1.30	2.90	1.70	1.52
S3	1.609	1.500	5.30	3.80	3.31	2.11
S4	2.360		4.70		2.94	

由结果可以得出：

(1)除方案 S4，其他 3 个方案都形成了明显的 2 个侵彻体，但形成的侵彻体形状速度又各不相同。方案 S1 中，作为内罩的铜形成的 EFP 有一定的速度和长径比，具有较好的侵彻能力，但作为外罩的软钢形成了“馒头”状的 EFP，速度低、长径比小。方案 S2 与方案 S1 相比，只是将内外罩的材料对换，从结果看出，最终形成的侵彻体形状与方案 S1 相比差别很大。充分说明药型罩材料对于串联 EFP 的形成有着至关重要的影响。方案 S3 的药型罩是同种材料，但也可以形成前后分离的 EFP，证明材料特性并非影响串联 EFP 形成的唯一因素。

(2)除方案 S4，其他方案中前级 EFP 都出现了断裂现象或有明显的断裂趋势，模拟结果也可证明这一点。造成这种现象的原因可能有以下几个方面：一是串联 EFP 在形成过程当中，内外罩因为速度不同产生相互摩擦，内罩形成的前级 EFP 受到后级 EFP 的拖拽，从而造成了断裂。二是锥弧结合的设计不合理，锥弧结合部的过渡不够光滑，壁厚也太小，造成这个区域附近的药型罩速度变化剧烈，导致了最终的断裂。第三个原因是起爆方式造成的。采用雷管起爆时，仅靠胶布固定的方法保证雷管端面与药柱的重合，必然带来一定的误差，使爆轰波与药型罩作用时出现不对称的情况。这些因素都将导致侵彻体的不对称和断裂，从而降低了侵彻体的威力。在下一步的实验设计时将重点解决这些问题。

(3)铝铜结构的方案 S4 中,没有形成 2 个明显的侵彻体,造成这种现象的原因可能有:一是铝罩熔点很低,在高温高压的爆轰产物作用下,铝罩容易发生汽化,而本文中设计的结构不利于铝罩形成聚能侵彻体;二是铝罩虽然形成了 EFP,但并未和铜罩 EFP 发生分离。但方案 S4 形成的铜 EFP 形状完整,头部速度 2.360 km/s,为所有方案中最高。头部速度较高是因为铝铜方案的平均密度在所有方案中最低。采用熔点低密度小的金属(如铝、铅)和延展性好、密度高的金属(如铜)构成外罩和内罩结构,通过调整外罩的厚度和形状,可以使内罩 EFP 获得不同的形状和速度。

3.3 起爆点位置的影响

除药型罩材料外,起爆点位置对串联 EFP 的形成也具有一定影响。利用数值模拟进行研究,结构如图 2,起爆点位置和弹丸形状如图 6,结果见表 3。

由结果可以看出:当起爆环半径增大时,形成侵彻体的长径比增大,速度增大,形态从 EFP 向 JPC 过渡。

表 3 起爆点对串联 EFP 的影响

Table 3 The effects of ignition position on the formation of SCDLL

起爆点	v_1/(km/s)	v_2/(km/s)	l_1/d_1	l_2/d_2
A	1.648	1.476	2.52	1.33
B	1.700	1.521	3.84	1.82
C	1.915	1.546	5.42	2.12
D	2.210	1.920	15.40	4.52

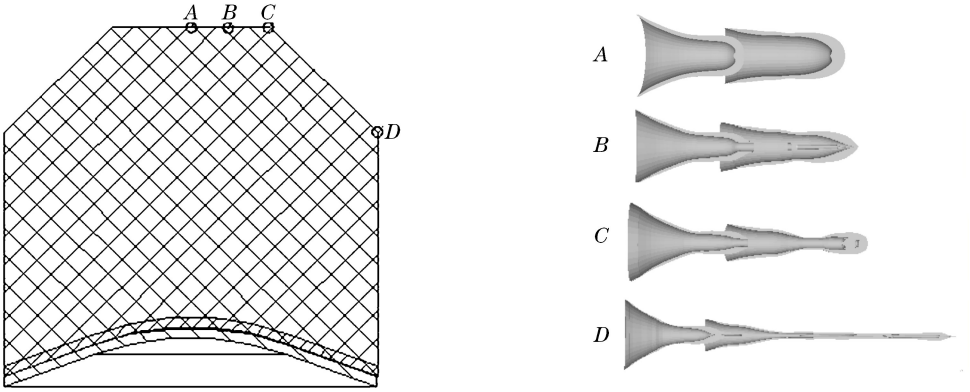

图 6 起爆点位置和弹丸形状

Fig. 6 Ignition positions and shape of projectiles

4 结 论

对双层药型罩成型装药的侵彻体形成进行了数值模拟,设计了 4 种不同材料组合的双层药型罩,进行了 X 光实验研究,得到了串联侵彻体的形状和速度等参数。得到结论:

(1)设计合理的双层药型罩成型装药可以形成串联 EFP。

(2)药型罩结构、材料和加工工艺对串联 EFP 的形成有较大影响。紫铜和软钢作为药型罩材料可以形成串联 EFP,从侵彻体的性能来看,紫铜比软钢好,而铝铜方案因为结构不够合理,并未形成串联 EFP,但铝作为内罩,有效提高了外罩的头部速度。

(3)起爆模式对串联侵彻体的速度和长径比有较大的影响。从模拟结果看出,当起爆环半径增大时,形成侵彻体的长径比增大,速度增大,形态从 EFP 向 JPC 过渡。为了得到飞行稳定性较好的串联 EFP,应该采用中心点起爆的方式;为了得到侵彻能力较强的串联 EFP,应该适当放大起爆环半径。

(4)为了得到侵彻能力和飞行稳定性较好的串联 EFP,除了对药型罩的材料选择和起爆点设置进行设计外,还需综合考虑药型罩和装药的结构以及装药材料。

参考文献:

[1] Tosello R, Vives M, Tronche A. Twin EFPs for underwater applications[C]// 16th International Symposium on Ballistics. San Francisco, USA: International Ballistics Committee, 1996:357-368.

[2] Weiman K, Blache A. Explosively formed projectile with tantalum penetration and steel stabilization base[C]// 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, USA: International Ballistics Committee, 1999: 603-608.

[3] Fong R, Ng W, Weiman K. Testing and analysis of multi-liner EFP warheads[C]// 20th International Symposium on Ballistics. Orlando, USA: International Ballistics Committee, 2002: 578-582.

[4] 郑宇,王晓鸣,李文彬,等.曲率半径对双层球缺罩形成串联爆炸成型弹丸的影响[J].高压物理学报,2009,23(3): 33-38.
ZHENG Yu, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Effects of liner curvature radius on formation of double-layered spherical segment charge liner into tandem explosively formed projectile[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(3): 33-38.

[5] Century Dynamics Ltd. Interactive non-linear dynamic analysis software user manual[Z]. Ramon, USA: Century Dynamics Incorporated, 2001: 86-102.

[6] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// 7th International Symposium on Ballistic. Netherlands: International Ballistics Committee, 1983: 41-57.

[7] Tham C Y. Reinforced concrete perforation and penetration simulation using AUTODYN-3D[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005,41(14): 1401-1410.

[8] Pappu S, Murr L E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators[J]. Journal of Materials Science, 2002,37: 233-248.

[9] Wu J, Liu J B, Du Y X. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34: 1147-1162.

Formation of shaped charge with double layer liners into tandem EFP*

ZHENG Yu[1,2], WANG Xiao-ming[1], LI Wen-bin[1], MIAO Qin-shu[1,2], LI Wei-bing[1]

(1. *ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Unit* 63961 *of PLA, Beijing* 100012, *China*)

Abstract: To explore the formation mechanism of tandem EFP, experimental and numerical studies on the formation process of shaped charge with double layer liners (SCDLL) into tandem EFP were presented. Four test samples with different materials were designed. The samples were experimentally tested to get X-ray images. Numerical simulations were then performed for the test samples using AUTODYN-2D. Based on the experimental and numerical investigations, analysis was made to find the key factors which influence the formation process of SCDLL. It is found that SCDLL can always be separated into two projectiles with certain configuration and liner materials. The combination of liner material and the ignition position have great influence on the formation of tandem EFP.

Key words: fluid mechanics; tandem EFP; finite element; double layer liners; shaped charge

* Received 19 October 2010; Revised 22 March 2011
Supported by the China Postdoctoral Science Foundation (20100480686)
Corresponding author: ZHENG Yu, yekun9989@yahoo.com.cn

(责任编辑　丁　峰)