

文章编号: 1006-9941(2016)08-0728-07

## 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

刘健峰<sup>1</sup>, 龙源<sup>1</sup>, 纪冲<sup>1</sup>, 钟明寿<sup>1</sup>, 李兴华<sup>1</sup>, 向东<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学野战工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035)

**摘要:** 通过 LS-DYNA 有限元软件计算得到不同装药结构的双层药型罩爆炸成型弹丸(EFP)战斗部成型侵彻体的特征参数, 利用灰色系统理论分析了药型罩材料密度、曲率半径、厚度比以及装药密度、装药长径比( $L/D$ )对成型侵彻体不同特征参数的影响规律。基于灰色系统理论分析结果设计了不同装药结构的双层药型罩 EFP 战斗部并进行了毁伤效应实验研究。实验结果表明当内外药型罩的厚度比为 1.33 时, 双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体的侵彻深度达到 0.67 倍装药口径, 是具有相同装药结构 EFP 战斗部成型侵彻体侵彻深度的两倍左右; 具有 Cu-Cu 或 Cu-Fe 药型罩组合方式的双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体在侵彻深度方面的能力大致相当, 但是 Cu-Cu 药型罩组合方式的战斗部成型侵彻体侵彻钢板的形状近似呈圆形。

**关键词:** 灰色系统理论; 双层药型罩; 爆炸成型弹丸(EFP)战斗部; 成型参数; 侵彻

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.001

### 1 引言

随着重装甲、复合装甲以及爆炸反应装甲的出现, 传统聚能装药面临着严峻的挑战。双层药型罩爆炸成型弹丸(Explosively Formed Penetrators, EFP)战斗部是近年来提出的新概念战斗部<sup>[1-4]</sup>。这种聚能战斗部在一个主装药基础上, 沿同一轴线设置两层药型罩, 一次起爆即可生成一个大长径比的侵彻体或两个随进的侵彻体: Tosello 等学者<sup>[5]</sup>研究了能够有效攻击舰船和潜艇的钽、镍组合双层药型罩战斗部; K. Weiman 等学者<sup>[6]</sup>通过调整药型罩的几何外形和接触面条件, 获得了前段材料为钽、尾端材料为铁的长径比约为 5.5 的侵彻体。然而, 目前双层药型罩 EFP 战斗部的研究多是基于大量实验、应用结果的分析, 针对战斗部各结构参数的优化设计, 缺乏系统而有效的评估方法。

战斗部参数优化设计研究是战斗部技术发展的重要环节<sup>[7-8]</sup>。但因双层药型罩 EFP 战斗部涉及到两层金属罩和装药等结构特征初始参数众多, 对其进行优化设计存在较大困难。将聚能战斗部系统视为一个灰

色模糊系统, 利用灰色系统理论分析<sup>[9-10]</sup>来确定聚能战斗部典型结构参数对成型侵彻体的性能参数的影响程度, 可为双层药型罩 EFP 战斗部结构优化设计提供一种有效途径。林加剑等<sup>[11]</sup>利用灰色系统理论研究了 EFP 战斗部各装药参数对成型弹丸速度的影响程度, 得到了影响 EFP 速度的主要因素依次为装药种类、炸药爆轰速度、药型罩锥角、药型罩直径、装药高度和药型罩壁厚; 刘记军<sup>[12]</sup>通过灰关联分析优化设计了 EFP 战斗部装药结构, 该战斗部在减小 14% 装药量条件下对成型弹丸性能参数的影响很小。灰色系统理论在阐明战斗部各结构参数对成型侵彻体特征参数的影响程度方面具有很高的应用价值, 但由于双层药型罩 EFP 的形成过程是一个炸药爆轰驱动双层药型罩成型的短暂复杂物理过程, 因此针对双层药型罩 EFP 战斗部的研究尚无先例。

基于此, 本研究以某双层药型罩 EFP 战斗部系统为研究对象, 将其等效为一个灰色模糊系统, 利用灰色系统理论分析方法, 确定聚能装药的多个几何特征因素(装药长径比、药型罩曲率半径、内外药型罩厚度比、药型罩材料等)对成型侵彻体性能参数(弹丸飞行速度、长径比、两药型罩分离程度等)的影响程度, 获取毁伤元成型性能参数与两层金属罩结构参数、装药参数等因素之间的相关性, 评价各影响因素对毁伤元成型参数的影响程度权重。针对影响成型侵彻体性能参数的重要因素开展研究, 并通过进一步实验研究检

收稿日期: 2015-07-22; 修回日期: 2015-10-27

基金项目: 解放军理工大学预先研究基金项目(201417); 解放军理工大学野战工程学院青年基金项目(2015-7)

作者简介: 刘健峰(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事战斗部高效毁伤研究。e-mail: ljfccc@163.com

通信联系人: 纪冲(1981-), 男, 硕士, 主要从事火炮、自动武器与弹药工程研究。e-mail: blastingcaptain@163.com

验灰色系统分析结果的准确性,考察了双层药型罩 EFP 战斗部终点毁伤效应。

## 2 数值计算模型及算例

### 2.1 有限元计算模型

设计了具有弧锥结合型药型罩的  $D=60\text{ mm}$  次口径双层药型罩 EFP 战斗部。结构示意图见图 1。该战斗部的两层药型罩紧密贴合在一起且两罩之间存在自由面,即可以自由滑动和碰撞。为了方便对战斗部结构参数的描述,规定<sup>[13]</sup>靠近炸药的药型罩为内罩,罩顶部厚度为  $\delta_1(\text{mm})$ ;远离炸药的药型罩为外罩,罩顶部厚度为  $\delta_2(\text{mm})$ 。同时定义内外药型罩厚度比为  $N$ ,即  $N=\delta_1/\delta_2$ 。

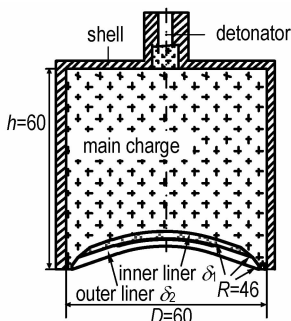


图 1 双层药型罩 EFP 战斗部结构(单位: mm)

Fig.1 Geometry of double layer liners EFP warhead(unit: mm)

根据战斗部结构,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了双层药型罩 EFP 战斗部的三维有限元计算模型,如图 2 所示。为了能清楚描述两药型罩的压垮成型过程,对于壳体、药型罩和炸药实体均采用 Lagrange 网格和 Solid 164 实体单元进行有限元化。因为聚能装药具有对称性,建立了 1/2 三维有限元实体模型。该战斗部装药为 8701 炸药,计算采用高能炸药材料模型<sup>[12]</sup>,其爆轰产物压力利用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程描述,金属药型罩的动力响应过程选取 Johnson-Cook 材料模型<sup>[15]</sup>和 Grüneisen 状态方程<sup>[15]</sup>

描述,具体材料参数参考文献[14,16,17]。炸药采用端部中心单点起爆方式。

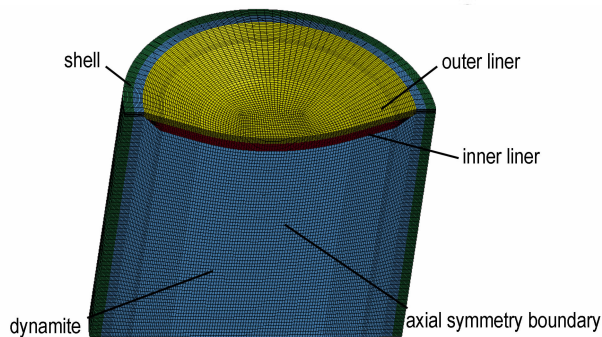


图 2 双层药型罩 EFP 战斗部有限元计算模型(1/2 模型)

Fig.2 Simulation model of double layer liners EFP warhead (1/2 model)

### 2.2 双层药型罩 EFP 战斗部成型算例

针对内、外药型罩的材料均为紫铜、内罩罩顶部厚度  $\delta_1=2.4\text{ mm}$ 、外罩罩顶部厚度  $\delta_2=1.1\text{ mm}$  的工况进行了数值计算。图 3 是双层药型罩 EFP 战斗部的成型过程。

从图 3 中可以看出,炸药起爆后药型罩被加速驱动、翻转成型,两层紧密贴合在一起的药型罩逐渐形成两个具有良好外形的侵彻体。在  $100\text{ }\mu\text{s}$  左右,两侵彻体紧密啮合在一起形成一个长径比的侵彻体。在  $160\text{ }\mu\text{s}$  左右,两侵彻体呈现分离趋势,最终形成前后分离的两个侵彻体。数值计算结果表明,前部侵彻体速度为  $1650\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,后部侵彻体的速度为  $1600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 3 双层药型罩 EFP 战斗部成型参数的灰色系统理论分析

### 3.1 设计方案及计算结果

为了全面考察装药结构、药型罩结构及材料特性对双层药型罩 EFP 战斗部成型参数的影响规律,分别选取药型罩材料密度( $\rho_1$ )、药型罩曲率半径( $R$ ) (弧锥结合罩弧段的曲率半径)、内外药型罩厚度比( $N$ )、装

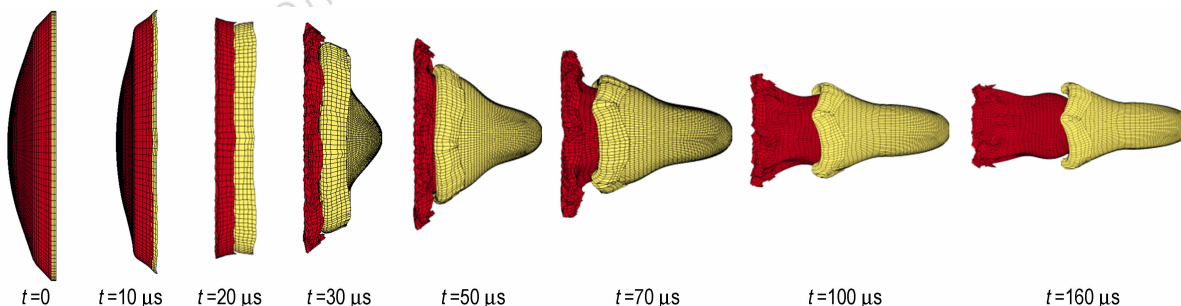


图 3 双层药型罩 EFP 战斗部成型过程

Fig.3 Formation process of double layer liners EFP warhead

表 1 双层药型罩 EFP 战斗部成型影响因素水平表

Table 1 Influence factors for the formation of double layer liners EFP warhead

factors	$\rho_1^{[17]}$ /g · cm <sup>-3</sup>	$R$ /cm	$N$	$\lambda$	$\rho_2$ /g · cm <sup>-3</sup>
1	2.70	4	0.75	0.8	1.26 <sup>[17]</sup>
2	7.83	4.6	1	1	1.46 <sup>[17]</sup>
3	8.97	5.6	1.25	1.2	1.59 <sup>[17]</sup>
4	16.67	6.4	1.5	1.4	1.72 <sup>[18]</sup>

Note:  $\rho_1$  is the density of liner material,  $R$  is the radius of liner curvature,  $N$  is the liner thickness ratio,  $\lambda$  is the aspect ratio of  $L/D$  (the length / diameter of charge),  $\rho_2$  is the density of explosive.

药长径比( $\lambda$ ) (装药高度  $L$  与装药直径  $D$  的比值)、装药密度( $\rho_2$ ) 五个典型装药特征参数开展数值计算研究。表 1 为双层药型罩 EFP 战斗部成型影响因素水平表。在各种计算工况中  $\delta_2 = 2$  mm、 $D = 6$  cm、两层药

型罩为同种材料。

基于 L(4X4) 正交优化设计方法, 设计了 16 种数值计算工况。方案设计及数值计算结果如表 2 所示。其中, 双层药型罩 EFP 特征参数为炸药爆炸后 160  $\mu$ s 时刻的特征参量。

### 3.2 求解过程

下面结合求解双层药型罩 EFP 战斗部各结构参数与特征参数灰色关联度的过程对灰色系统理论在战斗部优化设计中的应用予以说明。

应用灰色系统理论分析时, 将双层药型罩 EFP 战斗部结构参数( $\rho_1$ 、 $R$ 、 $N$ 、 $\lambda$ 、 $\rho_2$ ) 作为比较序列, 将双层药型罩 EFP 特征参数( $V_1$ 、 $V_2$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $s$ ) 作为参考序列, 采用初值化法可以得到无量纲化的比较序列和参考序列, 如表 3 所示。

表 2 不同设计方案及数值计算结果

Table 2 Different schemes and numerical simulation results

projects	$\rho_1$ /g · cm <sup>-3</sup>	$R$ /cm	$N$	$\lambda$	$\rho_2$ /g · cm <sup>-3</sup>	$v_1$ /m · s <sup>-1</sup>	$v_2$ /m · s <sup>-1</sup>	$K_1$	$K_2$	$s$ /cm
1	2.70	4.00	0.75	0.80	1.26	1956.73	2087.65	0.73	0.58	3.67
2	2.70	4.60	1.00	1.00	1.59	2223.92	2370.40	0.74	0.63	4.18
3	2.70	5.60	1.25	1.20	1.46	2161.47	2466.38	1.17	1.13	8.52
4	2.70	6.40	1.50	1.40	1.72	2414.56	3071.02	3.33	9.50	17.25
5	7.83	4.00	1.00	1.20	1.72	1430.10	1671.37	4.33	4.00	7.18
6	7.83	4.60	0.75	1.40	1.46	1355.21	1519.53	3.89	3.32	4.97
7	7.83	5.60	1.50	0.80	1.59	870.54	977.47	0.50	0.58	2.94
8	7.83	6.40	1.25	1.00	1.26	852.00	953.20	0.80	0.72	2.73
9	8.97	4.00	1.25	1.40	1.59	1158.56	1440.25	2.78	4.00	7.86
10	8.97	4.60	1.50	1.20	1.26	756.54	829.29	0.65	0.60	1.87
11	8.97	5.60	0.75	1.00	1.72	1391.16	1565.56	4.00	2.60	4.93
12	8.97	6.40	1.00	0.80	1.46	1170.71	1427.73	4.19	2.64	7.07
13	16.67	4.00	1.50	1.00	1.46	523.42	550.98	0.36	0.28	0.74
14	16.67	4.60	1.25	0.80	1.72	654.46	700.41	0.44	0.30	1.58
15	16.67	5.60	1.00	1.40	1.26	552.76	578.00	0.36	0.34	0.65
16	16.67	6.40	0.75	1.20	1.59	703.97	745.91	0.58	0.39	1.15

Note:  $v_1$  is the velocity of back penetrator,  $K_1$  is the aspect ratio of back penetrator,  $v_2$  is the velocity of front penetrator,  $K_2$  is the aspect ratio of front penetrator,  $s$  is the distance between front penetrator and back penetrator.

表 3 无量纲化的参考序列与比较序列

Table 3 Dimensionless reference sequence and comparison sequence

projects	$\rho_1$	$R$	$N$	$\lambda$	$\rho_2$	$v_1$	$v_2$	$K_1$	$K_2$	$s$
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1.20	1.33	1.25	1.19	1.14	1.14	1.02	1.09	1.14
3	1.00	1.40	1.67	1.50	1.29	1.10	1.18	1.61	1.95	2.32
4	1.00	1.60	2.00	1.75	1.40	1.23	1.47	4.58	16.38	4.70
5	2.90	1.00	1.33	1.50	1.40	0.73	0.80	5.96	6.90	1.95
6	2.90	1.20	1.00	1.75	1.29	0.69	0.73	5.35	5.72	1.35
7	2.90	1.40	2.00	1.00	1.19	0.44	0.47	0.69	1.00	0.80
8	2.90	1.60	1.67	1.25	1.00	0.44	0.46	1.10	1.24	0.74
9	3.32	1.00	1.67	1.75	1.19	0.59	0.69	3.82	6.90	2.14
10	3.32	1.20	2.00	1.50	1.00	0.39	0.40	0.89	1.03	0.51
11	3.32	1.40	1.00	1.25	1.40	0.71	0.75	5.50	4.48	1.34
12	3.32	1.60	1.33	1.00	1.29	0.60	0.68	5.76	4.56	1.92
13	6.17	1.00	2.00	1.25	1.29	0.27	0.26	0.49	0.48	0.20
14	6.17	1.20	1.67	1.00	1.40	0.33	0.34	0.61	0.52	0.43
15	6.17	1.40	1.33	1.75	1.00	0.28	0.28	0.49	0.58	0.18
16	6.17	1.60	1.00	1.50	1.19	0.36	0.36	0.79	0.67	0.31

在求得无量纲化的比较序列和参考序列后,进一步计算参考序列各无量纲值与比较序列各无量纲值的关联程度。关联程度值实质上可以理解为参考序列曲线与比较序列曲线间几何形状的差别程度,因此求得两曲线间差值大小,即可作为关联度值。但是参考序列各无量纲值与比较序列各无量纲值的关联度数据较多且信息过于分散,不便直接表示比较序列与关联序列之间的关系,因此须将信息集中处理,以灰色关联度表示,通过灰色系统理论分析最终可以求得双层药型罩 EFP 战斗部各结构参数与成型侵彻体特征参数的灰色关联度,如表 4 所示。

**表 4** 战斗部结构参数与成型侵彻体特征参数的灰色关联度  
**Table 4** Degree of grey incidence between structure and performance parameters

parameters	$\rho_1$	$R$	$N$	$\lambda$	$\rho_2$
$v_1$	0.59	0.83	0.79	0.81	0.84
$v_2$	0.59	0.84	0.80	0.82	0.85
$K_1$	0.58	0.70	0.68	0.71	0.72
$K_2$	0.73	0.81	0.80	0.82	0.82
$s$	0.60	0.81	0.83	0.82	0.83

由表 4 可以看出各结构参数对内罩所成型侵彻体速度( $v_1$ )的影响程度由大到小分别为: $\rho_2$ 、 $R$ 、 $\lambda$ 、 $N$ 、

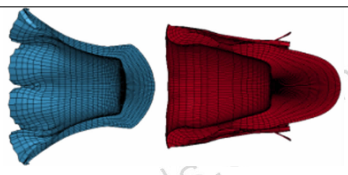
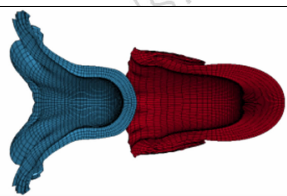
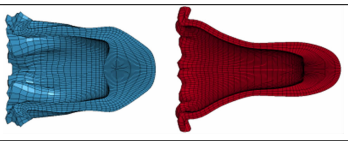
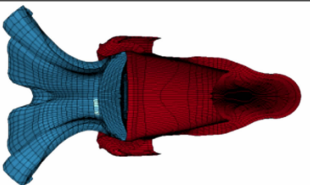
$\rho_1$ ; 各结构参数对外罩所成型侵彻体速度( $v_2$ )的影响程度由大到小分别为: $\rho_2$ 、 $R$ 、 $\lambda$ 、 $N$ 、 $\rho_1$ ; 各结构参数对内罩所成型侵彻体长径比( $K_1$ )的影响程度由大到小分别为: $\rho_2$ 、 $\lambda$ 、 $R$ 、 $N$ 、 $\rho_1$ ; 各结构参数对外罩所成型侵彻体长径比( $K_2$ )的影响程度由大到小分别为: $\rho_2$ 、 $\lambda$ 、 $R$ 、 $N$ 、 $\rho_1$ ; 各结构参数对内外罩成型侵彻体之间距离( $s$ )的影响程度由大到小分别为: $\rho_2$ 、 $N$ 、 $\lambda$ 、 $R$ 、 $\rho_1$ 。通过灰色关联分析可以看出,装药密度在影响成型侵彻体性能参数方面占主导地位而药型罩材料密度对战斗部成型侵彻体参数的影响最小。

**3.3 结果分析**

为了进一步验证灰色系统分析结果的准确性,着重考虑装药长径比、药型罩曲率半径及药型罩厚度比对双层药型罩 EFP 战斗部成型特性的影响。设计了 4 种数值计算方案并进行了计算求解,如表 5 所示。其中炸药选择 8701 炸药,装药直径为 6 cm,内、外药型罩材料均为紫铜。

由表 5 可知,随着药型罩曲率半径的增大,双层药型罩 EFP 战斗部所形成的两个侵彻体速度都在增加,而此时两侵彻体的长径比和质心距离基本保持不变(方案 a 和方案 b)。因此,药型罩曲率半径主要影响成型侵彻体的速度;比较方案 a 和方案 c 可以发现随

**表 5** 双层药型罩 EFP 战斗部设计方案及成型特征参数  
**Table 5** Design and numerical simulation results of double layer liners EFP

projects	$\lambda$	$N$	$R/cm$	Shape/160 $\mu s$ (1/2 model)	$v_1 / m \cdot s^{-1}$	$v_2 / m \cdot s^{-1}$	$K_1$	$K_2$	$s/cm$
a	1	0.75	4.6		1387.59	1593.67	2.67	3.64	2.90
b	1	0.75	5.6		1442.56	1652.98	2.00	3.91	2.79
c	1	2.50	4.6		1420.54	1692.52	3.15	5.59	3.96
d	1.2	0.75	4.6		1552.81	1566.79	2.90	6.23	2.36

着内外药型罩厚度比的增大,两药型罩所成型两侵彻体之间的分离程度迅速增大 36.6%,与此同时两侵彻体的长径比及速度差也逐渐增大。因此,药型罩厚度比的变化直接影响所成型两侵彻体的质心距离。比较方案 a 和方案 d 可以发现随着装药长径比的增大,两侵彻体的长径比( $K_1+K_2$ )增大了 44.7%,两侵彻体之间的速度差值迅速减小,两侵彻体之间的质心距离略有下降。因此,装药长径比的变化对两侵彻体长径比的变化有重要影响。进一步数值计算研究证明了灰色系统理论分析结果的准确性。

因此,针对不同打击目标,在 EFP 战斗部优化设计

中,可以着重考虑装药长径比、药型罩曲率半径及药型罩厚度比对双层药型罩 EFP 战斗部成型特性的影响,以有效增加对目标的毁伤效能。

## 4 实验研究

### 4.1 实验方案设计

为了检验灰色系统分析结果的准确性以及考察双层药型罩 EFP 战斗部终点毁伤效应,设计了如表 6 所示的不同结构的双层药型罩 EFP 战斗部,并开展了侵彻钢靶的静爆试验研究。单层药型罩 EFP 终点毁伤效应作为对照。

表 6 基于灰色系统理论分析设计的双层药型罩 EFP 战斗部结构

Table 6 Structural parameters of inner liner and outer liner in different design options based on grey system theory




projects	$M_1$ /inner liner	$\delta_1$ /mm	$M_2$ /outer liner	$\delta_2$ /mm	picture of liners
Matched group	copper	3.5			
p	copper	2	iron	1.5	
q	copper	2	copper	1.5	

图 4 是双层药型罩 EFP 战斗部静爆试验设置示意图。炸高均为 50 cm。目标靶选择厚度尺寸为 2 cm 厚的 2 块 45# 钢板。为了减少地面对双层药型罩 EFP 高速冲击钢板能量的吸收,两层钢板底部垫高度为 5 cm 支撑架。

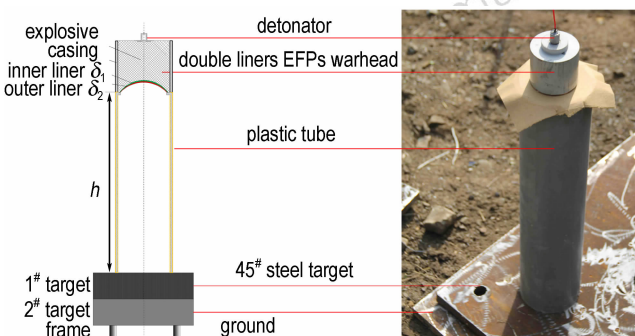


图 4 双层药型罩 EFP 战斗部静爆试验设置

Fig. 4 Experimental setup of terminal effects of double layer liners EFP warhead



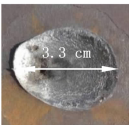
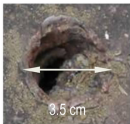







### 4.2 实验结果分析

表 7 是不同设计方案实验结果。从表 7 中可以看出,单层药型罩 EFP 及双层药型罩 EFP 高速冲击靶板的破坏模式相近:弹体穿过靶板,对靶板造成充塞式破坏。靶板被挤压和充塞,从靶板坑壁可明显观察到紫铜材质弹丸挤凿靶板留下的痕迹,在靶板背面还观察到拉伸撕裂破坏。与单层药型罩 EFP 战斗部相比,基于灰色系统理论设计的双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体基本能够击穿两层 2 cm 厚的 45# 钢靶,其侵彻能力达到了 0.67 倍装药口径,而 EFP 的侵彻能力仅为其一半左右,说明了灰色系统理论在战斗部设计中的必要性;就穿深而言,具有 Cu-Fe 药型罩组合方式的双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体与具有 Cu-Cu 药型罩组合方式的双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体都能有效击穿 4 cm 厚的 45# 钢靶,这与灰色系统理论分析中药型罩材料对双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻

体特征参数影响最弱相符合,说明了灰色系统理论在战斗部设计中的准确性。但是比较三种设计方案下靶板的开坑形状: EFP 的开坑直径较大且均匀; Cu-Fe 药型罩组合方式的战斗部成型侵彻体侵彻钢板的开口形状不规则,近似呈现椭圆形; Cu-Cu 药型罩组合方式的战斗部成型侵彻体侵彻钢板的开口形状近似呈现圆形。

表 7 不同设计方案实验结果

Table 7 Results of the penetration property test on different projects

projects	1# steel target		2# steel target		
	front view	back view	front view	back view	
matched group					no perforation
p					
q					

针对不同装药结构的双层药型罩 EFP 战斗部进行了侵彻 45# 钢板的实验验证,实验结果与双层药型罩 EFP 战斗部成型的数值计算结果具有良好的一致性,表明灰色系统理论可以应用于双层药型罩战斗部结构设计优化中。

### 5 结论

(1) 基于灰色系统理论分析发现聚能装药密度在影响战斗部成型侵彻体的不同特征参数中占主导地位而药型罩材料密度对成型侵彻体的特征参数影响程度相对较小;药型罩曲率半径对双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体的速度影响较大;成型两侵彻体之间的质心距离与药型罩厚度比密切相关;装药长径比的变化对两侵彻体长径比的变化有重要影响。

(2) 实验结果表明:当内外药型罩的厚度比为 1.33 时,双层药型罩 EFP 战斗部成型侵彻体的侵彻深度达到 0.67 倍装药口径,是具有相同装药结构 EFP 战斗部成型侵彻体侵彻深度的两倍左右;具有 Cu-Cu 或 Cu-Fe 药型罩组合方式的双层药型罩 EFP 战斗部成

型侵彻体在侵彻深度方面的能力大致相当,但是 Cu-Cu 药型罩组合方式的战斗部成型侵彻体侵彻钢板的形状近似呈现圆形。

(3) 将灰色系统理论应用于双层药型罩 EFP 战斗部结构设计中,研究结果为指导双层药型罩 EFP 战斗部结构设计提供了一种新的方法。

### 参考文献:

- [1] Weimann K. Producing explosive-formed projectiles [P]: US, 5792980. 1998-8-11.
- [2] Hung S C, Niu Y M. Numerical simulation of the multilayer explosively formed projectile [C] // Proceedings of the 15th international symposium on ballistics, Jerusalem, Israel, 1995:21-24.
- [3] 门建兵, 蒋建伟, 杨军. 串联 EFP 形成与侵彻的数值模拟及实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(3): 383-386. MEN Jian-bing, JIANG Jian-wei, YANG Jun. Numerical simulation and experiments of series EFP forming and penetration [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(4): 383-386.
- [4] U. S. army armament research development and engineering center. Warhead technology advancements [R]. 2010.
- [5] Tosello R, Michel M, Tronche A. Twin EFPs for underwater applications [C] // Proceedings of the 16th international symposium on ballistics, SAN Francisco, CA, 1996:23-28.
- [6] Weimann K, Blache A. Explosively formed projectile with tantalum penetrator and steel stabilization base [C] // Proceedings of the 18th international symposium on ballistics, San Antonio, TX, 1999: 15-19.
- [7] 刘建青, 顾文彬, 徐浩铭, 等. 多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的影响 [J]. 含能材料, 2014, 22(5): 594-599. LIU Jian-qing, GU Wen-bin, XU Hao-ming, et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2014, 22(5): 594-599.
- [8] 王树有, 蒋建伟, 门建兵. 准球形 EFP 成型影响因素的数值模拟 [J]. 含能材料, 2008, 16(6): 731-733. WANG Shu-you, JIANG Jian-wei, MEN Jian-bing. Numerical simulation of parameters on formation of quasi-spherical EFP [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2008, 16(6): 731-733.
- [9] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 武汉华中科技大学出版社, 1987. DENG Ju-long. The primary methods of grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong university of science and technology press, 1987.
- [10] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 44-52. LIU Si-feng, XIE Nai-ming. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2008: 44-52.
- [11] 林加剑, 任辉启, 沈兆武. 应用灰色系统理论研究爆炸成形弹丸速度的影响因素 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3): 112-116. LIN Jia-jian, REN Hui-qi, SHEN Zhao-wu. Study on primary influence factors for application of grey system theory to velocity of explosive forming projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 112-116.

- [12] 刘记军, 万全, 刘晓华, 等. 基于灰关联分析的 EFP 装药结构优化设计[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6): 106-108.  
LIU Ji-jun, WAN Quan, LIU Xiao-hua, et al. Optimal design of EFP charge structure based on grey relationship analysis[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 106-108.
- [13] 刘健峰, 龙源, 纪冲, 等. 不同药型罩壁厚组合影响同轴 EFP 成形规律研究[J]. 工程爆破, 2012, 18(4): 9-13.  
LIU Jian-feng, LONG Yuan, JI Chong, et al. Influence of different wall-thickness of arc-cone liner in collinear EFP forming performance[J]. *Engineering Blasting*, 2012, 18(4): 9-13.
- [14] 纪冲, 龙源, 余道强, 等. 切割式双模战斗部毁伤元成形及侵彻钢靶特性研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(10): 508-516.  
JI Chong, LONG Yuan, YU Dao-qiang, et al. Experimental and numerical study on the formation and penetration properties of dual-mode warhead[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(10): 508-516.
- [15] Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature[C] // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, Hague, Netherlands. 1983: 541-581.
- [16] 郑宇, 王晓鸣, 李文彬. 基于双层药型罩成形装药的串联 EFP[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 29-33.  
ZHENG Yu, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Formation of shaped charge with double layer liners into tandem EFP[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 29-33.
- [17] 赵长啸. 反超低空目标多爆炸成形毁伤元战斗部关键技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2013.  
ZHAO Chao-xiao. Technological researches on multiple explosive formed projectiles[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2013.
- [18] 周翔. 爆炸成形弹丸战斗部的相关技术研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2006.  
ZHOU Xiang. Technological researches on explosive formed projectiles[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2006.

## Theoretical and Experimental Study on Performance Parameters of Double Layer Liners EFP Warhead Based on Grey System Theory

LIU Jian-feng<sup>1,2</sup>, LONG Yuan<sup>1</sup>, JI Chong<sup>1</sup>, ZHONG Ming-shou<sup>1</sup>, LI Xing-hua<sup>1</sup>, XIANG Dong<sup>2</sup>

(1. College of Filed Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. The First Engineers Scientific Research Institute, the General Armaments Department, Wuxi 214035, China)

**Abstract:** The characteristic parameters of double layer liners explosively formed penetrators( EFP) warhead with different charge structures were obtained by using LS-DYNA software. Liner material density, radius of liner curvature, liner thickness ratio and aspect ratio of  $L/D$  (the length/diameter) and density of charge were also investigated by the grey system theory. Based on the results, double layer liners EFP warhead with different structures were designed and penetration experiments were also carried out. Results show that double layer liners EFP warhead can effectively break down about 0.67 times of the charge diameter with the liner thickness ratio of 1.33, which is about twice penetration depth compared with EFP in the same shape charge structure. Penetration depth of Cu-Cu double layer liners warhead and Cu-Fe double layer liners warhead is at roughly the same level but perforation shape made by Cu-Cu double layer liners warhead is approximate in circle shape.

**Key words:** grey system theory; double layer liners; explosively formed penetrators( EFP) warhead; formation parameter; penetration

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.001