文章编号：1001-1455(2014)06-0723-07 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)06-0723-07

串联 EFP 装药隔爆结构和延时起爆控制*

徐浩铭[1,2]，顾文彬[1]，胡亚锋[1]，王振雄[1]，陈江海[1]
(1. 解放军理工大学，江苏 南京 210007；
2. 96172 部队，江西 景德镇 333000)

摘要：结合串联战斗部的特点，提出了一种两级爆炸成型弹丸(explosively formed projectile，EFP)装药的串联装药结构。利用 LS-DYNA 有限元软件分析了不同隔爆体及延时起爆对后级 EFP 成型的影响，进行了不同隔爆结构和延时匹配的串联 EFP 侵彻 45 钢靶实验。实验结果表明：优化后的串联 EFP 装药的侵彻深度，已经达到分 2 次单级连续侵彻之和的96.7%，后级装药的侵彻能力得到有效提高。

关键词：爆炸力学；隔爆体；延时控制；串联 EFP 装药；LS-DYNA
中图分类号：O381 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

在自然灾害救援和非战争行动中，经常面临对大块度障碍物快速破除的难题。普通民用爆破中通常采取先机械钻孔、后装药起爆的方法进行施工，但在缺少时间、机械设备、电力和人员等条件下，一般方法无法短时内快速清除这些大块度障碍，常常造成救援目标生命及财产的重大损失。考虑到应急保障的高时效性，采用串联装药技术更有效[1]。张先锋等[2]、王树有等[3]、曾必强等[4]和涂候杰等[5]分别对串联战斗部前级爆轰对后级的影响进行了数值模拟分析和实验研究，王成等[6]对同口径串联装药前后级成型关系进行了实验研究。传统的破-爆型串联战斗部前级聚能开孔装药能力有限，在大块度障碍物破除应用中效果不理想。因此，本文中根据在坚硬目标上开孔的需要，提出一种新式破-破型串联爆炸成型弹丸(explosively formed projectile，EFP)聚能装药结构作为多级串联战斗部的前级开孔装药，并对串联 EFP 装药隔爆结构和装药前后级延时匹配进行优化设计；利用有限元程序 LS-DYNA 对不同起爆延时条件下串联 EFP 装药侵彻进行数值计算，并进行实验验证。

1 串联装药结构

1.1 单级 EFP 装药选择

本文中选择前期优化设计[7]得到的∅65 mm球缺型变壁厚 EFP 装药结构方案。装药结构参数为：炸药采用 JH-2，其密度为1 700 kg/m^3，装药长径比为1.0；药型罩采用紫铜材料，罩顶厚2.1 mm，罩内表面曲率半径为 67 mm，外表面曲率半径为62 mm。

1.2 串联 EFP 关键技术

为确保精确控制两级 EFP 装药的起爆时间，采用本课题专门设计的精确延时起爆控制器，设定延时间隔精度为 0.1 μs，可通过专用的应用软件在 0～200 μs 区间任意设定延时，图 1 是 2 路起爆控制信号输出时示波器采集到的触发信号波形。

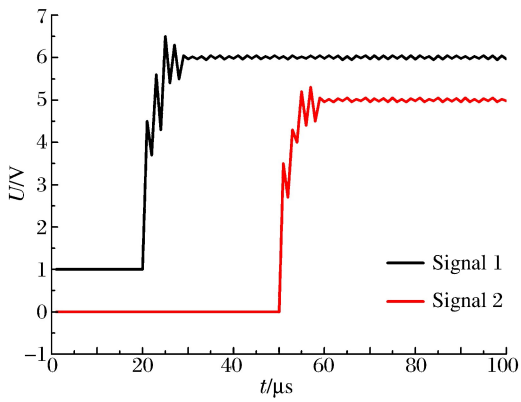

图 1 起爆控制电压波形

Fig. 1 Voltage wave of detonation controller

* **收稿日期**：2013-04-12；**修回日期**：2013-07-28
基金项目：国家科技支撑计划项目(2012BAK05B01)
作者简介：徐浩铭(1985—)，男，博士。

1.3 隔爆体设计原则

本研究串联 EFP 采用逆序起爆方式，前级装药爆炸后产生的爆轰产物和空气冲击波不可避免地作用在后级装药上，引起后级 EFP 形状和性能的改变，从而改变后级 EFP 的侵彻性能。因此要设计一种简单的隔爆结构，降低前后级之间的影响。本研究的隔爆结构中选用的聚氨酯泡沫材料是一种密度小、隔爆性能好的抗冲击波材料，广泛应用于国防、军事领域[8]。

2 数值模拟分析

2.1 串联 EFP 数值模型

为了分析隔爆体及起爆延时对串联 EFP 装药成型性能的影响，利用有限元软件 LS-DYNA3D 对其成型过程进行数值模拟，串联装药模型如图 2 所示。模型涉及聚能装药成型和侵彻 2 个部分，采用流-固耦合算法来分析此类情况更贴近实际。模型中，炸药、药型罩、隔爆体和空气等介质均采用 Euler 算法，靶板则采用 Lagrange 算法。串联 EFP 装药为 8701 炸药，采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述；药型罩材料为军用紫铜，用 Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型描述[9-10]；隔爆体为聚氨酯泡沫，用 Grüneisen 状态方程和 Elastic_Plastic_Hydro 本构模型描述，各材料状态方程参数[11-12]如表 1～3 所示，其中：ρ 为密度，v 为爆速，p_{CJ} 为炸药的 C-J 爆压，E_0 为材料的初始内能，A、B、R_1、R_2 和 ω 为炸药的材料常数，C 为材料的 u_s-u_p 截距，S_1、S_2 和 S_3 为斜度系数，γ_0 为材料的 Grüneisen 系数，a 为 γ_0 的一阶体积修正。

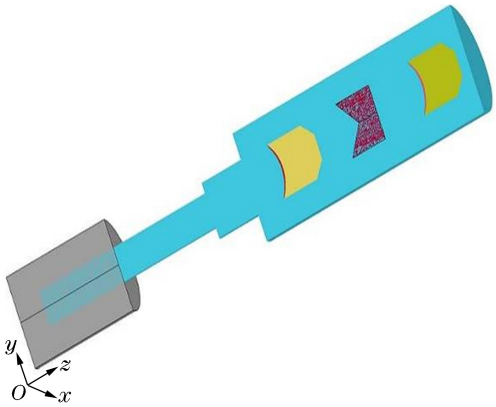

图 2 串联装药模型

Fig. 2 Tandem EFP model

表 1 JH-2 炸药计算参数

Table 1 Computational parameters for JH-2

ρ/(g·cm^{-3})	v/(m·s^{-1})	p_{CJ}/GPa	A/GPa	E_0/(J·m^{-3})	B	R_1	R_2	ω
1.70	8 400	30	56.4	10.0	6.801	4.1	1.3	0.36

表 2 紫铜和聚氨酯泡沫计算参数

Table 2 Computational parameters for copper liner

ρ/(g·cm^{-3})	C/(m·s^{-1})	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	E_0
8.96	4 750	3.8	2.74	0.125	1.346	0.34	0.0

表 3 聚氨酯泡沫计算参数

Table 3 Computational parameters for polyurethane foam

ρ/(g·cm^{-3})	C/(m·s^{-1})	S_1	S_2	S_3	γ_0	a	E_0
0.05	886	0.78	0.0	0.0	1.55	0.00	0.0

2.2 不同炸高条件下单级 EFP 侵彻过程分析

要充分发挥两级串联 EFP 装药的侵彻能力，首先需要确定装药的有利炸高。如果炸高太小，EFP 弹丸还未完全成型，其速度和长径比仍在快速变化中，侵彻深度和穿孔直径等侵彻效果随炸高变化而发生较大改变。但炸高达到一定程度后，EFP 成型性能已经基本稳定时，侵彻效果变化逐渐减小。文中选取了 6 种不同炸高进行了数值模拟和实验，结果如图 3 所示，其中：H 为炸高，D 为装药直径。

对比图 3 中 6 种炸高条件下钢靶剖面图得出：在炸高与装药直径比小于 2.8 时，EFP 侵彻钢靶孔径

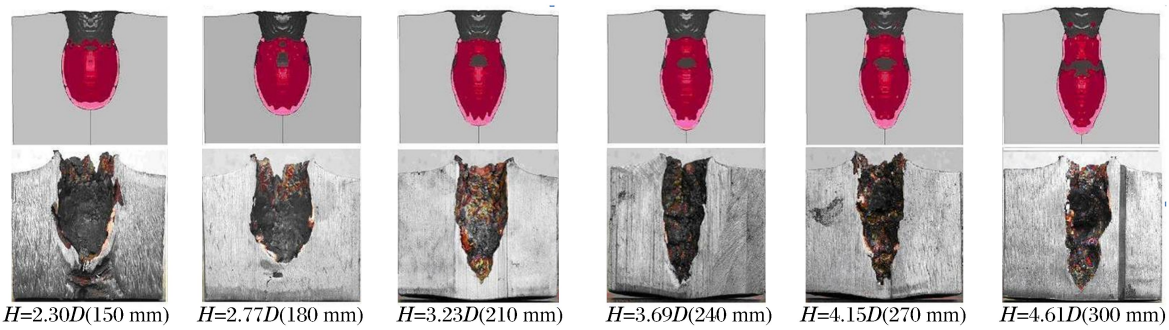

图 3 串联装药模型

Fig. 3 Tandem EFP charge model

较大，但 EFP 未得到有效拉伸，侵彻深度不大；随着炸高的增加，侵彻深度逐渐增加，同时孔径逐渐减小；在炸高与装药直径比大于 3.2 时，炸高增加，侵彻深度与孔径基本不变。表 4 为不同炸高下 EPF 侵彻钢靶的模拟和实验结果，其中 h 为侵彻深度，d 为侵彻孔径。分析表 4 中的数据发现，数值模拟与实验结果在侵彻深度和孔径大小上吻合较好，误差在 5% 以内，说明数值模拟结果较贴近实际，为后面串联装药模拟提供了一种可行的方法。

表 4 EFP 侵彻钢靶数值模拟与实验数据

Table 4 Simulational and experimental results of EFP penetrating steel targets

H/mm	h/D		d/D		H/mm	h/D		d/D	
	模拟值	实验值	模拟值	实验值		模拟值	实验值	模拟值	实验值
150	0.73	0.74	0.557	0.563	240	0.89	0.88	0.477	0.472
180	0.80	0.78	0.525	0.530	270	0.90	0.89	0.460	0.454
210	0.85	0.86	0.498	0.495	300	0.90	0.90	0.455	0.451

2.3 不同隔爆体形状串联 EFP 成型过程数值模拟

隔爆效果不仅与材料性能有关，隔爆体的形状对后级装药成型影的响也十分巨大。文中选取了 3 种不同结构的隔爆体进行分析。图 4 为圆柱形隔爆体、锥口向上隔爆体和锥口向下 3 种条件下串联 EFP 装药 200 μs 时刻后级 EFP 成型状态。通过对比图 4 中的 3 种后级 EFP 形态，发现隔爆体结构的不同对减少前级爆轰对后级成型的影响差异很大。采用圆柱形隔爆体时后级 EFP 基本成型，但头尾连续性差，EFP 侵彻能力大大降低；采用圆柱底部挖出一个锥形空腔且锥口向上的隔爆体，隔爆效果差，后级弹丸基本无翻转，后级装药侵彻能力基本消失；锥口向下的隔爆体，隔爆效果较理想，可作为串联 EFP 的隔爆结构基本形状，后级 EFP 成型较好，但在前级爆轰场影响下，EFP 长径比增大，需要进一步优化前后级起爆时间，来提高后级 EFP 的成型效果。

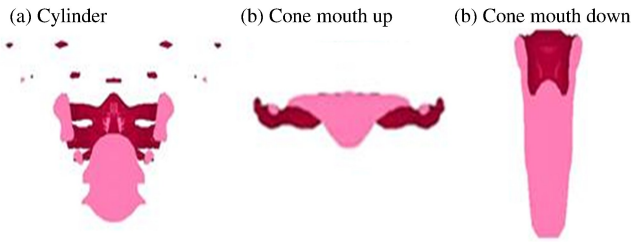

图 4 不同隔爆体 200 μs 时刻后级 EFP 形态

Fig. 4 Shapes of the postpositive EFP charge at 200 μs with different explosion-proof bodies

2.4 不同延时串联 EFP 侵彻过程数值模拟分析

串联 EFP 前后级延时起爆时间 Δt 对后级 EFP 的成型和侵彻性能影响很大[8]。在两级装药间距一定的情况下，合理控制延时起爆时间 Δt，使后级 EFP 受前级装药爆轰场影响最小，才能最大限度地保持后级 EFP 装药的成型性能。分别对 5 种不同延时条件下串联 EFP 侵彻靶板进行数值模拟，结果见表 5。

表 5 串联 EFP 装药侵彻数值模拟结果

Table 5 Simulation results of tandem EFP penetration

$\Delta t/\mu$s	h/mm	h/D	d/mm	d/D
0	92	1.415	22.2	0.341
10	103	1.584	21.6	0.332
20	115	1.769	21.4	0.329
25	104	1.600	21.7	0.327
30	98	1.507	21.3	0.334

图 5 给出了侵彻深度和侵彻孔径随起爆延时的变化关系。分析图 5 中孔径和孔深的变化规律可以发现，随着前后级延时起爆时间的增加，后级 EFP 的侵彻深度先增大后快速减小，说明前级爆轰场到达后级装药时，会严重影响后级 EFP 的成型。所以，该串联结构较为合理的延时为 20 μs。图 6 为同时起爆和延时 20 μs 的数值模拟侵彻结果。

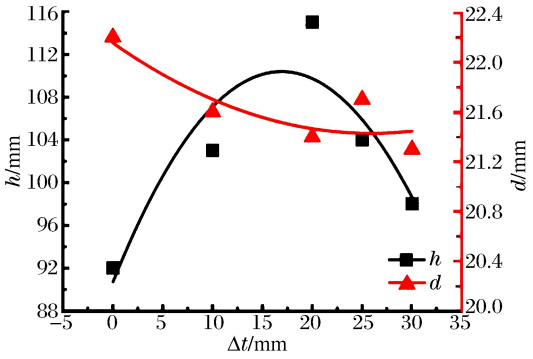

图 5 开孔深度和直径随起爆延时的变化

Fig. 5 Variation of penetration depth and aperture with delay time

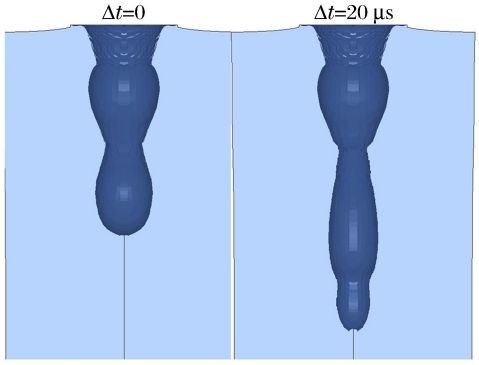

图 6 串联装药侵彻数值模拟结果

Fig. 6 Simulational results of tandem EFP penetration

3 串联 EFP 隔爆结构实验研究

3.1 不同隔爆形体状串联 EFP 侵彻实验

根据前期研究[1]得到的隔爆体形状对串联 EFP 装药侵彻性能的影响规律，进行 6 发串联 EFP 侵彻的验证性实验。实验分 3 组，分别采用圆柱形、锥口向上和锥口向下 3 种隔爆体，每组进行 2 发实验。图 7 为 3 种不同条件下EFP的侵彻性能实验结果。



图 7 不同隔爆体串联 EFP 侵彻结果

Fig. 7 Penetration results of tandem EFPs with different explosion-proof bodies

表 6 给出了串联装药对靶板的侵彻结果，通过对比可以发现，同时起爆条件下，锥口向下的隔爆体侵彻深度明显优于其他 2 种结构。但后级侵彻的开孔孔径较小，难以满足后级爆破子弹随进要求，需进一步优化。

表 6 串联 EFP 装药侵彻钢靶实验结果

Table 6 Experimental results of tandem EFPs penetrating steel targets

隔爆结构	h/mm	d/mm
圆柱形	82	15.2
锥口向上	60	16.6
锥口向下	98	16.3

3.2 不同延时条件下串联 EFP 侵彻钢靶实验

图 8 为实验设置图。前级装药炸高取 210 mm，装药间距 150 mm 条件下，采用中心起爆方式，使用 8＃电雷管同时起爆两级装药，分别对延时 0、10、20、25 和 30 μs 等 5 种情况进行侵彻靶板分别进行 2 发实验，结果依次记录为 A_1～A_{10}。为对比优化后的侵彻性能，同时进行 2 组分 2 次单独侵彻实验作为参照，结果记录为 B_1 和 B_2。侵彻结果显示串联 EFP 开孔形状前后基本一致。后级 EFP 受到前级装药爆轰场的影响，速度和长径比都不可避免有所下降，开孔直径比前级 EFP 小。

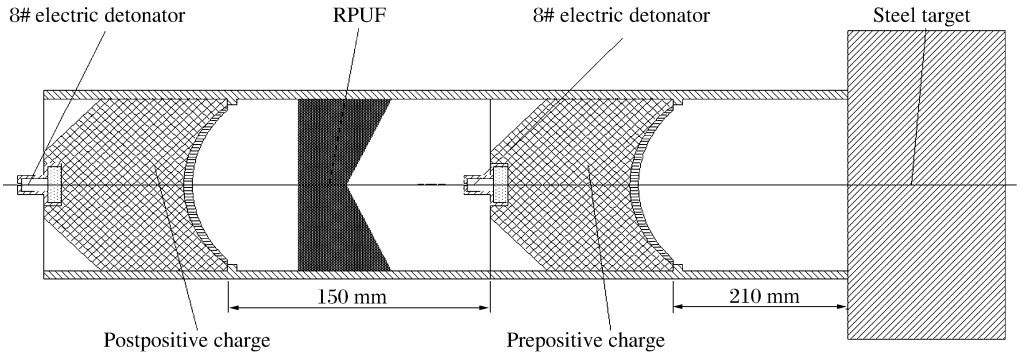

图 8 实验设置

Fig. 8 Experimental setup

表 7 给出了不同延时条件下的侵彻深度和最小侵彻孔径的实验结果。由表 7 可以看出：随着延时的增加，后级 EFP 受到前级爆轰场影响，形状变得更加细长，侵彻的孔径逐渐变小；而穿孔深度先逐渐增加，随后逐渐减小。这说明起爆时间间隔太大，前级爆轰场到达后级装药后，会严重影响后级 EFP 的成型，大大降低了后级 EFP 的速度。将表 7 与表 5 进行比较，可以看出两者最大仅相差 3.7%，可见实验结果与数值模拟结果吻合较好。

表 7 串联 EFP 装药侵彻钢靶结果

Table 7 Experimental results of tandem EFPs penetrating steel targets

编号	Δt/μs	h/mm	d/mm	编号	Δt/μs	h/mm	d/mm
A_1	0	94	21.4	A_7	25	107	20.4
A_2	0	95	21.3	A_8	25	108	20.3
A_3	10	105	21.0	A_9	30	100	20.3
A_4	10	102	21.2	A_{10}	30	102	20.2
A_5	20	117	20.6	B_1		121	21.6
A_6	20	115	20.8	B_2		119	21.8

图 9 所示靶板，依次为分 2 次侵彻、延时 0 和延时 20 μs 侵彻实验结果。可以看出：同时起爆（Δt＝0）时，后级 EFP 长径比和速度受影响较大，侵彻孔径较分 2 次侵彻时减小 0.4 mm，后级 EFP 侵彻深度只有分 2 次侵彻时第 2 次侵彻深度的 58.9%，侵彻效果大大降低。延时起爆 20 μs 时，侵彻孔径较分 2 次侵彻时减小 1 mm，两级整体侵彻深度为分 2 次侵彻时的 96.7%，这体现了延时起爆对后级 EFP 侵彻性能的重要性。

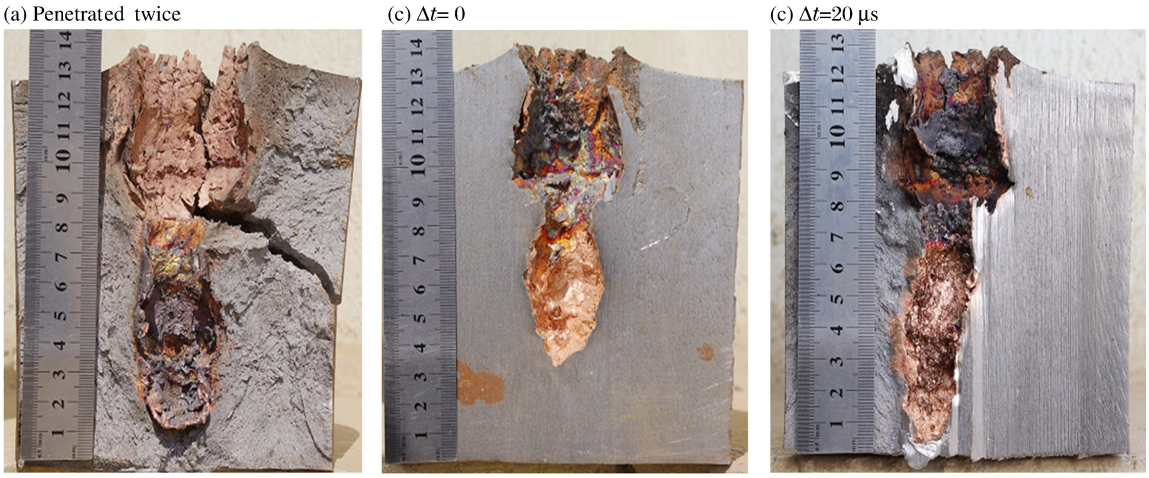

图 9 不同起爆延时下串联 EFP 装药侵彻钢靶实验结果

Fig. 9 Tandem EFP charge penetrating steel targets with different delay time

4 结 论

(1) 在已有的研究成果基础上,分析了隔爆体形状和前后级装药延时对串联 EFP 侵彻能力的影响,得到了较合理的串联装药结构。

(2) 通过数值模拟和实验研究,对串联 EFP 装药隔爆结构形状和延时匹配进行了比较分析,延时起爆 20 μs 时,串联侵彻深度为分 2 次侵彻的 96.7%,比同时起爆侵彻深度提高了约 22.8%,大大提高了后级装药的利用效率。这可为下一步多级串联装药研究提供依据。

参考文献:

[1] 徐浩铭,顾文彬,刘建青,等. 串联聚能装药隔爆结构设计数值模拟和实验研究[J]. 兵工学报,2014,35(2):170-175.
Xu Hao-ming, Gu Wen-bin, Liu Jian-qing, et al. Numerical simulation and experimental study on explosion-proof structure design of the tandem shaped charge[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(2):170-175.

[2] 张先锋,陈惠武. 破爆型串联战斗部前级对后级影响数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):66-68.
Zhang Xian-feng, Chen Hui-wu. A computational study of blast effect on traveling projectile of tandem warhead [J]. Journal of Projectile, Rockets Missiles and Guidance, 2006,26(2):66-68.

[3] 王树有,陈惠武,赵有守. 串联攻坚战斗部前级爆轰场对后级影响分析[J]. 火炸药学报,2006,19(2):4-6.
Wang Shu-you, Chen Hui-wu, Zhao You-shou. Analysis of following projectile effected by precursory charge of tandem warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006,19(2):4-6.

[4] 曾必强,姜春兰,严翰新,等. 串联攻坚战斗部前级爆轰场对随进弹随进影响分析[J]. 兵工学报,2010,31(1):162-166.
Zeng Bi-qiang, Jiang Chun-lan, Yan Han-xin, et al. Analysis for effects of precursory detonation field on projectile following course in tandem warhead[J]. Acta Armamentarii, 2010,31(1):162-166.

[5] 涂侯杰,恽寿榕,赵衡阳. 破爆型串联战斗部第一级爆炸对第二级影响的研究[J]. 兵工学报,1994(3):18-22.
Tu Hou-jie, Yun Shou-rong, Zhao Heng-yang. Blast effect on the follow-through charge of a tandem warhead[J]. Acta Armamentarii, 1994(3):18-22.

[6] 王成,恽寿榕,黄风雷. 同口径破-破型串联装药战斗部的试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2002,22(2):61-65.
Wang Cheng, Yun Shou-rong, Huang Feng-lei. Experiment study on the forward charge blast effect on the follow-through charge of tandem warhead[J]. Journal of Projectile, Rockets Missiles and Guidance, 2002,22(2):31-34.

[7] 顾文彬,刘建青,唐勇等. 球缺型 EFP 战斗部结构优化设计研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2008,32(2):165-168.
Gu Wen-bin, Liu Jian-qing, Tang Yong, et al. Optimizing design of EFP warhead with hemispherical liner[J].

Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008,32(2):165-168.
[8] 徐浩铭,顾文彬,刘建青,等. 隔爆体形状对串联战斗部后级影响研究[J]. 火工品,2013(6):23-26.
Xu Hao-ming, Gu Wen-bin, Liu Jian-qing, et al. Study on postpositive charge of tandem warhead effected by explosion-proof nody shape[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(6):23-26.
[9] 吴晗玲,段卓平,汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(4):328-332.
Wu Han-ling, Duan Zhuo-ping, Wang Yong-qing. Simulation investigation of rod-like jets[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(4):328-332.
[10] 桂毓林,于川,刘仓理,等. 带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):313-318.
Gui Yu-lin, Yu Chuan, Liu Cang-li, et al. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):313-318.
[11] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 科学出版社,2005:74.
[12] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 清华大学出版社,2005:250.

Explosion-proof structures and delay detonation control of tandem explosively formed projectile charges*

Xu Hao-ming[1,2], Gu Wen-bin[1], Hu Ya-feng[1], Wang Zhen-xiong[1], Chen Jiang-Hai[1]
(1. *PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. 76172 *Troops, Jingdezhen* 333000, *Jiangxi, China*)

Abstract: According to the analysis of the tandem warhead characteristics, we proposed a new tandem shaped charge structure composed of two explosively-formed projectile charges with the same structure. By using the finite element software LS-DYNA, the effect of different explosion-proof bodies and different delay control on the forming process of the postpositive EFP charge were analyzed. Based on the above results, we conducted experiments for tandem EFP penetration with different delay time. The experimental results show that the penetration depth of the optimized tandem EFP charge can reach 96.7 percent of the sum depth that penetrated by a single EFP charge at twice. The penetration ability of the postpositive EFP charge is greatly improved.

Key words: mechanics of explosion; explosion-proof body; delay control; tandem EFP charge; LS-DYNA

* Received 12 April 2013; Revised 28 July 2013
Supported by the National Key Technology R&D Program (2012BZK05B01)
Corresponding author: Xu Hao-ming, xuhaoming2012@sina.com

(责任编辑　王小飞)