

文章编号: 1001-1455(2013)03-0287-05

# 串联 EFP 装药结构参数优化实验研究<sup>\*</sup>

徐浩铭, 顾文彬, 唐 勇, 刘建青, 王振雄, 王 诤

(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为了在大块度障碍物上快速开孔且孔深和孔径符合要求, 提出了一种前后两级均为爆炸成形弹丸 (EFP) 装药的新型串联聚能装药结构。分析了装药结构参数对串联 EFP 侵彻威力的影响, 并在此基础上分别开展了串联 EFP 装药在不同装药间距与起爆延时条件下侵彻 45 钢靶实验。实验表明, 优化后的串联 EFP 装药结构使前后两级 EFP 装药的侵彻效率大大提高, 能对硬目标进行有效破孔。

**关键词:** 爆炸力学; 结构参数; 延时控制; 串联 EFP; 破甲

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

操作使用安全方便、适用于应急救援时大块度障碍物快速破除, 既可单具使用、又可多具分布组合使用的破障装备, 是应急工程保障中急需解决的。传统的机械钻孔法效率低, 而且在复杂地形难以有效使用, 考虑应急保障的高时效性, 采用聚能装药技术进行开孔更可行。而传统聚能战斗部在面对高强度目标时, 常常出现穿孔孔径小、后效不明显等情况。因此, 串联聚能装药技术随之出现, 并成为近年来战斗部研究的热点。前级聚能装药的开孔能力是影响串联战斗部综合性能的关键因素之一, 也是串联战斗部后级随进弹体结构设计和威力设计的重要依据。文献[1-5]中对串联战斗部前级爆轰对后级的影响进行了数值模拟与实验。与传统串联装药前级聚能射流侵彻片面地追求穿深不同, 反大块度障碍物目标串联战斗部的前级聚能装药必须在目标靶上侵彻不仅穿深足够且孔径满足要求的孔洞, 以便为后级高爆子弹的随进开辟有利通道。因此, 设计新型的串联聚能装药结构, 需满足反硬目标破-破-爆型多级战斗部前级装药开孔的要求。

本文中, 提出一种新型射孔弹, 结构为前后两级均为同口径 EFP 装药的破-破型串联 EFP, 对串联装药的结构进行分析与设计, 进行串联 EFP 装药侵彻 45 钢靶实验, 并对串联 EFP 两级装药间距与起爆延时的优化匹配及其对开孔效果的影响进行分析, 为今后破-破-爆型多级串联战斗部设计积累经验。

## 1 原理分析

### 1.1 关键技术

实现串联聚能装药的关键技术是两级装药合理的时序匹配, 可以互不干扰地实现对目标的连续接力侵彻<sup>[6]</sup>。因此, 破-破型串联战斗部的关键技术是主装药的延时起爆控制技术, 如通过延期药和电信号等方式对主装药的延迟起爆时间进行控制, 并对前后级装药的间隔距离进行精确确定, 使前级装药起爆形成 EFP 对目标进行侵彻后, 后置装药延时起爆形成 EFP 继续接力侵彻增大穿深。本文中, 选择文献[7]中设计的  $\varnothing 65$  mm 球缺型 EFP 战斗部, 如图 1 所示。

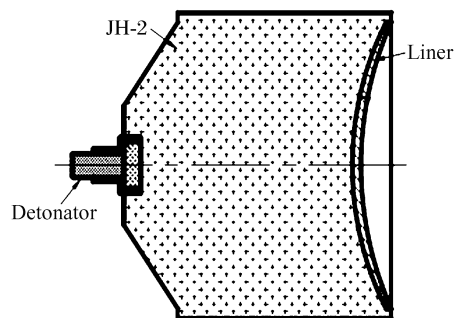


图 1 EFP 装药结构

Fig. 1 Structure of EFP charge

\* 收稿日期: 2012-01-16; 修回日期: 2012-05-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAK05B01)

作者简介: 徐浩铭(1985—), 男, 博士研究生。

## 1.2 装药间距

前级 EFP 装药与后级 EFP 装药的间距用  $D$  表示。若装药间距太小,则前级装药的爆轰产物与冲击波将对后级装药的成形造成严重影响,甚至殉爆;装药间距太大,则会使后级 EFP 炸高过大,飞行过程中造成动能损失。2 种情况均会造成侵彻能力下降。因此,合理的装药间距必须保证后级 EFP 在前级 EFP 侵彻结束后到达破孔孔底。

选择的 EFP 结构为装药量 300 g 的 JH-2 炸药。考虑前级装药爆炸产生的冲击波超压可能对后级装药结构的破坏,根据文献[8],J. Henrych 用实验方法提出了无限域空气中爆炸时,爆炸峰值压力(单位为 MPa)的经验计算公式为:

$$\Delta p_m = \begin{cases} 1.4072(\bar{r})^{-1} + 0.554(\bar{r})^{-2} + 0.0357(\bar{r})^{-3} + 0.000625(\bar{r})^{-4} & 0.05 \leq \bar{r} \leq 0.3 \\ 0.61938(\bar{r})^{-1} + 0.03262(\bar{r})^{-2} - 0.21324(\bar{r})^{-3} & 0.3 < \bar{r} \leq 1 \end{cases}$$

式中: $\bar{r}$  为比例距离, $\bar{r} = R/\sqrt[3]{W}$ , $W$  为炸药的 TNT 当量,kg, $R$  为观测点距离爆炸中心距离,m。当装药间距为 125 mm 时,计算得到后级装药处冲击波超压 12.6 MPa,根据数值模拟结果,不会对后级装药结构造成破坏,结合多级战斗部设计尺寸,可初步确定 125~250 mm 为装药间距范围。

## 1.3 起爆延时

起爆延时  $\Delta t$  对后级 EFP 的成形和稳定飞行的影响非常大。朗明君等<sup>[9]</sup>、梁秀清等<sup>[10]</sup>对串联聚能装药起爆延时进行了分析计算。综合分析可知:逆序起爆时,后级 EFP 的压垮成形不受影响,但 EFP 成形较稳定的时间为 150~200  $\mu\text{s}$ ,期间弹丸飞行距离太大,不适合将来多级战斗部装备应用的要求。顺序起爆时,若  $\Delta t$  较小,后级 EFP 会追上前级 EFP,相互干扰; $\Delta t$  较大,使后级药型罩还未被完全压垮,就与前级装药爆轰场相遇,将严重影响后级 EFP 的成形。需精确控制起爆延时时间  $\Delta t$ ,使后级 EFP 受前级装药爆轰场的影响降到最小。因此,起爆延时  $\Delta t$  精度要求很高,本文中使用的起爆雷管是微秒级精确雷管,精度为  $\pm 10 \mu\text{s}$ ;延时起爆控制器选用的是专门设计的精确延时起爆控制器,精度为  $\pm 0.1 \mu\text{s}$ 。

## 2 优化实验

### 2.1 不同装药间距下侵彻钢靶

如图 2 所示,前级装药炸高取 240 mm,对装药间距 125~250 mm 条件下,每 25 mm 分别进行 2 发实验取平均值,依次记录为 S1~S12。

### 2.2 装药间距 200 mm 下侵彻钢靶

#### 2.2.1 不同起爆延时

在 5 种起爆延时条件下分别进行 2 发实验取平均值,依次记录为 D1~D10。

#### 2.2.2 2 发弹丸分 2 次侵彻

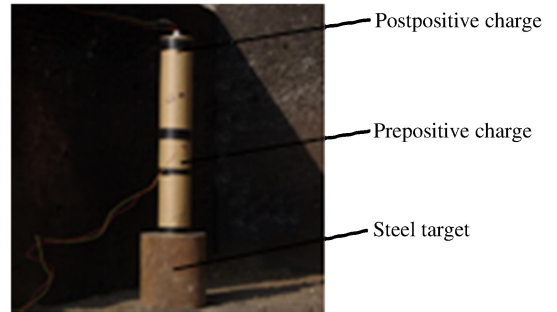


图 2 实验设置

Fig. 2 Experimental setup

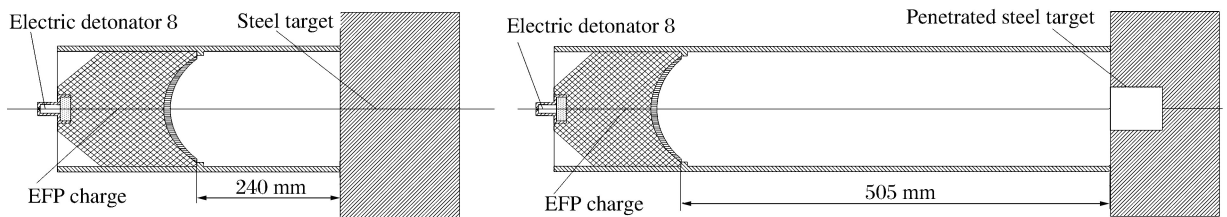


图 3 EFP 装药分 2 次侵彻钢靶实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the EFP charge penetrating steel target at twice

首先,将第 1 发 EFP 装药设置在钢靶正上方,采用中心起爆方式,使用 8 号电雷管引爆对钢靶进行侵彻;然后,将第 2 发 EFP 装药设置在同一块钢靶正上方,并且将装药中轴线对准第 1 发弹丸侵彻出的孔洞的中轴线,采用中心起爆方式起爆,使用 8 号电雷管引爆,在第 1 发装药侵彻的基础上进行第 2 次侵彻。实验设置如图 3 所示,分别进行 2 组实验取平均值,记为 T1 和 T2。

### 3 结果分析

#### 3.1 不同装药间距

图 4 为串联 EFP 不同装药间距条件下侵彻 45 钢靶结果,实验数据见表 1。从靶板剖面图看,侵彻出的孔洞形状大体一致,可以大致分辨前后两级 EFP 的侵彻区域。图 5 为后级 EFP 在 200  $\mu\text{s}$  时最大开孔深度和最小孔径随装药间距变化的关系曲线。分析发现,在不同前后级装药距离条件下,前级爆轰场对后级 EFP 速度和长径比的影响结果各不相同;在装药间距 125~200 mm 时,随着间距的增大,侵彻的深度和孔径都迅速增大;在装药间距 200~250 mm 时,当距离增加时最大侵彻深度增长变缓,但最小孔径迅速减小。考虑在进行串联 EFP 装药设计时,要既保证后级装药有足够的穿深,又使穿孔口径满足后级爆破装药随进的需求,还要兼顾制式器材的结构尺寸是否便捷易携带。因此,初步确定两级装药间距 200 mm 比较合适。



图 4 不同装药间距串联 EFP 装药侵彻钢靶实验结果

Fig. 4 Experimental results of the tandem EFP charges with different spacings penetrating the steel targets

表 1 串联 EFP 装药侵彻钢靶实验数据

Table 1 Experimental data of the tandem EFP charges penetrating the steel targets

No.	D/mm	P/mm	d/mm	No.	$\Delta t/\mu\text{s}$	P/mm	d/mm
S1	125	87	20	D1	10	83	27
S2	125	88	21	D2	10	85	26
S3	150	89	23	D3	20	99	25
S4	150	90	24	D4	20	100	26
S5	175	99	24	D5	25	102	23
S6	175	99	25	D6	25	103	22
S7	200	100	26	D7	30	90	27
S8	200	102	26	D8	30	92	27
S9	225	103	22	D9	40	83	28
S10	225	107	24	D10	40	82	27
S11	250	108	20	T1		108	21
S12	250	112	22	T2		110	19

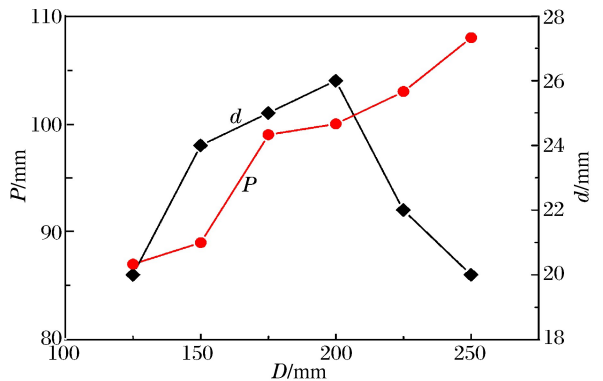


图 5 不同装药间距下的孔深和孔径

Fig. 5 Penetration depth and width under different spacings



### 3.2 不同起爆延时

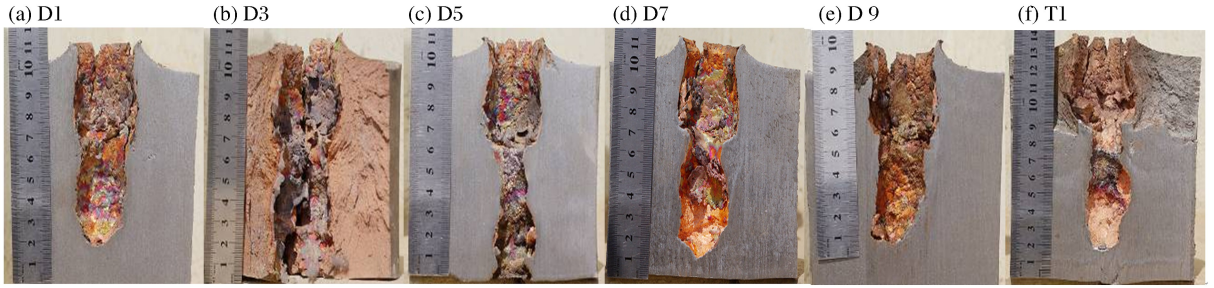


图6 不同起爆延时串联 EFP 装药侵彻钢靶实验结果

Fig. 6 Experimental results of the tandem EFP charges penetrating steel targets at different delay times

图6所示为串联 EFP 装药间距 200 mm 时,不同起爆延时条件下侵彻 45 钢靶结果,实验数据见表 1。从靶板剖面图看,后级 EFP 的侵彻区域较前级都小一些,这是由于后级 EFP 受到前级装药爆轰场的影响,速度和长径比都有所下降造成的。由图 7 可见,在不同起爆延时条件下,后级 EFP 侵彻效果各不相同。在起爆延时 25  $\mu\text{s}$  时,串联装药侵彻深度最大,达到单级装药分 2 次侵彻深度的 94.4%,但后级最小孔径太小,不利于后级跟进;在起爆延时 30  $\mu\text{s}$  时,装药侵彻深度为单级装药分 2 次侵彻深度的 85.2%,而且后级 EFP 侵彻的孔径明显增大,并与前级 EFP 侵彻的孔径匹配较好。考虑设计的多级战斗部能随进爆破子弹顺利到达孔底,后一方案结构参数更可行。

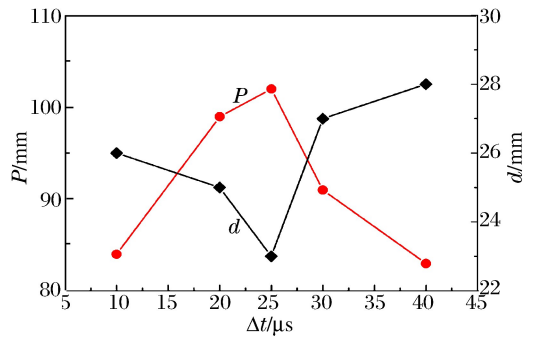


图7 不同起爆延时下的孔深和孔径

Fig. 7 Penetration depth and width at different delay times

## 4 结论

针对大块度障碍物的实际情况,深入分析了串联装药战斗部的特点,在已有 EFP 聚能装药研究基础上,提出了一种可精确延时起爆的串联 EFP 装药结构,为实现多级串联战斗部前级开孔装药设计提供技术指导。通过实验得到以下结论:

(1)由不同装药间距与延时起爆条件下,串联 EFP 侵彻 45 钢靶实验发现:在两级 EFP 装药间距 200 mm 时,如果不进行延时起爆,后级装药侵彻直径太小,单纯依靠两级 EFP 侵彻难以达到预期开孔效果。在延时起爆 30  $\mu\text{s}$  时,串联侵彻深度达到了分 2 次侵彻深度的 85.2%左右,侵彻孔径比分 2 次侵彻提高了 35%。

(2)通过实验对串联 EFP 装药结构的参数优化,既能保证两级聚能装药的侵彻深度,又具备匹配性较好的两级侵彻孔径,为后级跟进爆破子弹提供良好的通道。这说明结构参数优化对该串联 EFP 侵彻威力的影响很大。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [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. 串联攻坚战战斗部前级爆轰场对后级影响分析[J]. 火炸药学报, 2006, 29(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, 29(2): 4-6.
- [4] 曾必强, 姜春兰, 严翰新, 等. 串联攻坚战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] 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): 31-34.  
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.
- [6] 张先锋, 陈慧武, 何勇, 等. 反钢筋混凝土串联聚能装药技术研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 207-212.  
Zhang Xian-feng, Chen Hui-wu, He Yong, et al. Study on a tandem shaped charge technique to reinforce concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 207-212.
- [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: Nature Science, 2008, 32(2): 165-168.
- [8] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京: 解放军理工大学, 2001.
- [9] 朗明君, 徐学华. 多级串联聚能装药隔爆时间的计算与预测[J]. 南京理工大学报, 2002, 26(6): 625-627.  
Lang Ming-jun, Xu Xue-hua. Calculation and test on flame-proof time of multistage-series shaped charge[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(6): 625-627.
- [10] 梁秀清, 曾凡君, 李景云, 等. 串联装药战斗部的主装药起爆延时模型[J]. 兵工学报, 1994(3): 90-93.  
Liang Xiu-qing, Zeng Fan-jun, Li Jing-yun, et al. A computational model for the time delay of main charge ignition in a tandem warhead[J]. Acta Armamentarii, 1994(3): 90-93.

## Experimental study on structural parameter optimization of tandem explosively-formed projectile charges\*

Xu Hao-ming, Gu Wen-bin, Tang Yong, Liu Jian-qing, Wang Zhen-xiong, Wang Zeng  
(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** To realize that hunk fraises can be fast perforated and the perforated depth and width are enough, a new tandem shaped charge structure was proposed by using two same structures of explosively-formed projectile (EFP) shaped charges. And the effects of the structural parameters on the tandem EFP charge penetration power were analyzed. Based on the above analysis, experiments were conducted for tandem EFPs penetrating 45 steel targets under different charge spacings and different initiation delays, respectively. The results show that the tandem EFP charge structure can greatly improve the penetration efficiency of the two-stage tandem shaped charge and it can be used to effectively penetrate hard objects.

**Key words:** mechanics of explosion; structural parameter; delay control; tandem EFP; penetration

\* Received 16 January 2012; Revised 8 May 2012

Supported by the National Key Technology R&D Program (2012BAK05B01)

Corresponding author: Xu Hao-ming, xuhaoming2012@sina.com