

文章编号: 1001-1455(2008)03-0207-06

反钢筋混凝土串联聚能装药技术研究*

张先锋, 陈惠武, 何 勇, 黄正祥

(南京理工大学机械工程学院机电工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 根据钢筋混凝土目标的特点, 提出了一种高速杆流与低速杆流相结合的新型串联聚能装药结构。利用有限元软件分别对前级装药、后级装药的成型过程进行了数值仿真。在此基础上开展了系列串联聚能装药毁伤钢筋混凝土目标的静破甲实验。结果表明: 该串联装药可有效提高对钢筋混凝土目标的毁伤能力, 能起到对钢筋混凝土的扩孔作用。实验和数值仿真计算结果都表明该串联装药在对付钢筋混凝土、机场跑道、多层间隔靶等反硬目标串联型战斗部中有较好的应用前景。

关键词: 爆炸力学; 串联战斗部; 静破甲; 聚能装药; 聚能杆流

中图分类号: O385

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

1 引 言

在常规武器系统设计中, 聚能装药战斗部扮演了越来越重要的角色。各种结构形式的聚能装药得到了广泛的应用, 聚能射流以炸高低、大穿深为主要特点, 但穿孔孔径小、后效不明显, 且随着爆炸反应装甲的出现, 聚能射流受到了严峻的挑战。针对上述不足, 串联聚能装药技术开始出现, 并成为近年来研究的热点问题之一。周天胜^[1]、于世英^[2]对各种聚能装药技术进行了综述, 朗明君等^[3]、梁秀清等^[4]对串联聚能装药隔爆时间进行了分析计算。综合分析串联聚能装药的研究成果, 并根据应用对象不同, 串联聚能装药主要分为两类: 一类为用于对付反应装甲的串联装药, 另一类为用于增大穿深或破孔孔径的串联装药。图 1 为用于增大穿深的同口径典型串联聚能装药结构。

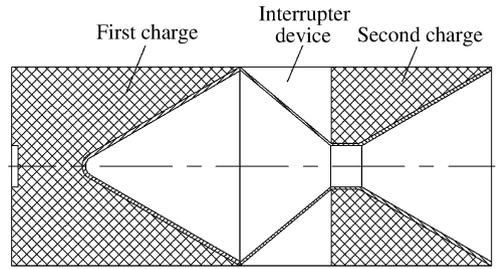


图 1 典型串联聚能装药结构

Fig. 1 Structural diagram of typical tandem shaped charges

与聚能射流侵彻钢质装甲片面地追求穿深效果不同, 反钢筋混凝土战斗部的目标是可靠地穿透目标并有足够的后效威力毁伤靶后的人员和装备。破爆型复式串联是达到上述目标的主用战斗部结构之一, 该种类型战斗部已被多次提及^[5-7]。前级装药的目的是获取大直径高速杆射流, 且使杆射流在侵彻过程中尽量不断裂, 达到大穿深大孔径, 以满足随进爆炸子弹的需求。但在很多情况下, 单级的前级聚能装药很难满足上述需求, 因此需要设计出串联聚能装药以满足反钢筋混凝土破爆型战斗部的需要。

本文中根据毁伤钢筋混凝土目标的需要, 提出一种高速杆流与低速杆流相结合的串联聚能装药结构。利用有限元程序 LS-DYNA3D 分别对前级装药、后级装药及成型过程进行对比数值仿真计算, 并开展串联聚能装药毁伤目标的系列实验研究。

2 总体方案

实现串联聚能装药的关键技术如下: 其一为两级装药合理的时序匹配; 其二为性能可靠的隔传爆机构; 其三为两级聚能侵彻体可以互不干扰地实现对目标的连续接力侵彻。如果采用图 1 所示的传统串

* 收稿日期: 2006-12-31; 修回日期: 2007-02-07

作者简介: 张先锋(1978—), 男, 博士, 讲师。

联聚能装药结构,利用电子延时引信可以很好地解决起爆时序匹配的问题。但在有限装药空间情况下,要实现两级聚能侵彻体互不干扰地实现接力侵彻及可靠地隔爆难度很大。利用空气间隔延迟仅能提供 $30\sim 50\ \mu\text{s}$ 延迟时间^[1],这对隔爆装置设计提出了过高的要求。传统的串联装药结构要求后置装药形成高速射流快速通过前置装药中心通道,以减小对隔爆时间的要求,且前置装药中心孔对装药的损失太大,所以不适用于毁伤反钢筋混凝土目标串联战斗部的需要。

针对上述传统串联聚能装药的不足,提出了如图 2 所示的顺序起爆模式的串联聚能装药。后置装药起爆形成低速杆流的同时,利用自身爆轰能量通过隔传爆机构起爆前置装药,实现前级高速杆流开孔形成穿深,后级低速杆流扩孔增大穿深的接力侵彻过程。实现这种类型串联聚能装药的关键技术是,前后级聚能侵彻体互不干涉地实现侵彻及后置低速杆流克服前级爆轰场的影响,即如何获取较高尾部速度的高速杆流技术及前后级装药的隔爆与泄爆技术。

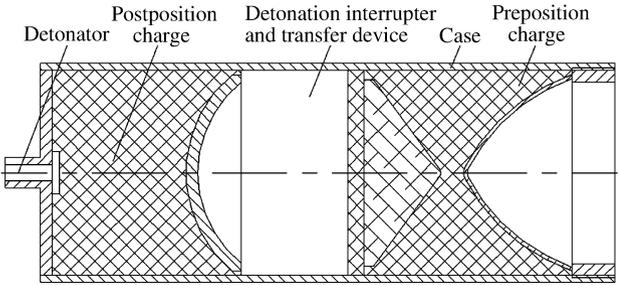


图 2 串联聚能装药方案示意图

Fig. 2 Structural diagram of order detonated tandem shaped charges

3 数值模拟

3.1 前级聚能装药数值模拟

为了尽可能在有限尺寸空间范围内实现上述顺序起爆串联聚能装药技术,前置聚能装药应尽可能采用小长径比装药结构,且能形成尾部速度较高的杆式射流。综合分析了文献[8]的研究成果,前置装药选用如图 3 所示的 K 型装药结构。图 4 为单锥药型罩。泡沫塑料隔板用于调整爆轰波形。为了充分验证 K 型装药射流的成型性能,利用 LS-DYNA3D 有限元计算程序分别对 K 型装药和同口径单锥药型罩装药射流成型过程进行了数值仿真计算。

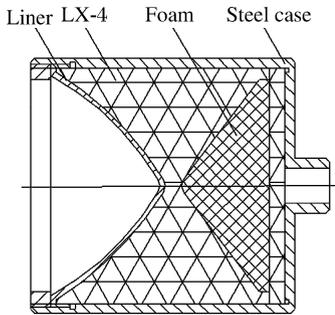


图 3 K 型装药示意图

Fig. 3 Sketch map of K charge

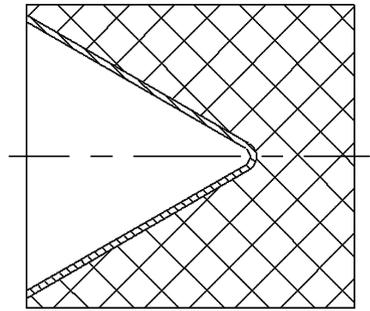


图 4 单锥药型罩装药

Fig. 4 Sketch map of the cone-shaped liner charge

炸药为 8701 炸药,选用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程。8701 炸药参数分别为^[9]: $\rho = 1.70\ \text{g/cm}^3$, $D = 8.4\ \text{km/s}$, $p_{\text{CJ}} = 30\ \text{GPa}$, $A = 56.4\ \text{GPa}$, $B = 6.8\ \text{GPa}$, $R_1 = 4.1$, $R_2 = 1.3$, $\omega = 0.36$ 。

药型罩材料为紫铜,使用 Steinberg 模型和 Gruneisen 状态方程来描述其在爆炸和冲击作用下的动态响应行为。紫铜材料参数为^[10]: $\rho = 8.96\ \text{g/cm}^3$, $G = 47.7\ \text{GPa}$, $Y = 450\ \text{MPa}$, $c = 3.94\ \text{km/s}$, $s_1 = 1.49$, $s_2 = 0.6$, $\gamma_0 = 1.99$, $\alpha = 0.47$ 。

计算参数及结果如表 1 所示。表中, D_0 为装药直径, L 为装药长度, Q 为装药量, v_t 为头部速度, v_r 为尾部速度, l 为射流长度。

表 1 前置聚能装药数值仿真结果

Table 1 Numerical simulation results of the prepositioned shaped charge

装药类型	D_0/mm	L/mm	Q/g	$v_t/(\text{km/s})$	$v_r/(\text{km/s})$	l/mm
单锥罩	90	97.5	830	6.805 84	0.758 43	224
K 型	90	100	750	6.795 98	1.623 50	155

图 5 为 50 μs 时刻,两种装药的射流形态。图 6 为射流速度分布。从计算结果可以看出:

(a) Cone-shaped liner charge

(b) K charge



图 5 聚能射流数值仿真结果

Fig. 5 Numerical simulation on the shaped-charge jets

(1)锥形罩射流由于具有较大的头尾速度差,其长度较长,射流直径变化较大;K 型装药射流形态比较特殊,基本为锥形结构。

(2)锥形罩射流及 K 型装药均有较高的射流头部速度,但锥形罩尾部速度很低,K 型装药尾部速度较高,可以预见 K 型装药射流侵彻结果将优于锥形罩射流。

(3)在侵彻靶板前两种射流速度沿轴线均成线性关系。锥形罩射流在杵体与射流分界面速度发生突变,可以看出在侵彻过程中射流将与杵体分离,造成射流有效侵彻长度减小。K 型装药形成一种无杵射流,其头尾速度差较小,可以预见其抗拉断能力较强,且其尾部速度较高,较适用于顺序起爆模式串联聚能装药前置装药的需求。

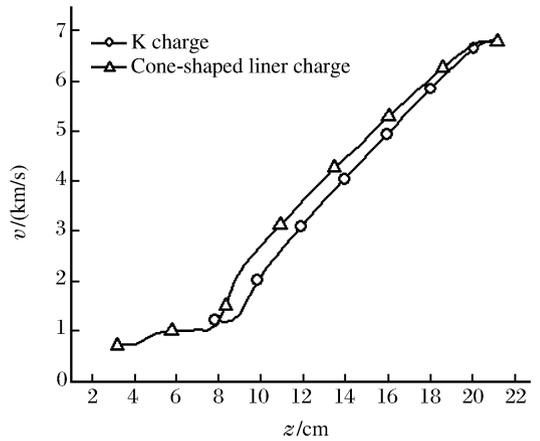


图 6 两种射流的速度分布

Fig. 6 Velocity distributions of the two jets

3.2 串联装药成型数值模拟

为了考核两级串联条件下两级射流的成型性能,同时深入研究后置装药射流抵抗前级爆轰场的能力,对两级射流形成过程进行了数值仿真。两级装药采用延时起爆的方式进行,延迟时间取为 35 μs,两级装药的隔爆距离为 40 mm。图 7 为不同情况下两级射流的形态。后置装药射流参数如表 2 所示。

(a) Free state

(b) Tandem state

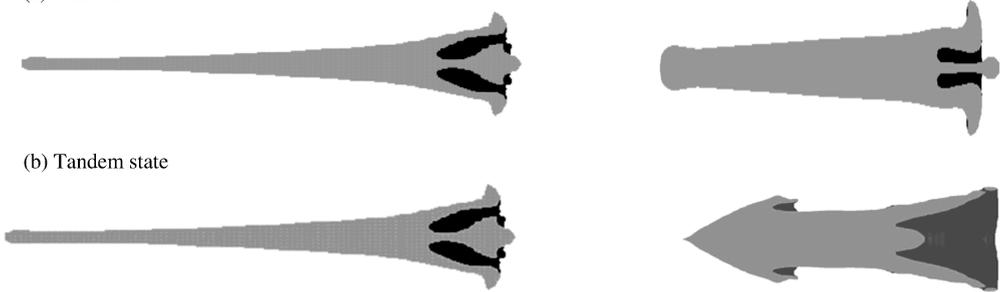


图 7 两级装药射流形态

Fig. 7 Jet diagrams in different states

从数值模拟结果可以看出,后置装药射流尽管受到前级爆轰场的影响,头部速度降低了 30%,射流形体也产生了变化。但其拥有的剩余速度仍然具有一定的侵彻能力,特别是对钢筋混凝土这样的低密度介质仍具有相当的侵彻能力。

表 2 不同状态下后置装药射流的成型性能

Table 2 Jet formation results of rear-mounted charge in different states

状态	v_t /(km/s)	v_r /(km/s)	l /mm
自由	2.452	1.623	78
串联	1.830	1.425	62

4 实验研究

从上述数值仿真计算结果可以看出,这种顺序起爆串联聚能装药在技术上是可行的。为进一步验证这种装药的侵彻性能,开展了该装药结构的前级装药和串联装药侵彻目标系列验证实验。

实验中主要针对 45 钢锭和 C48 钢筋混凝土典型目标进行侵彻。45 钢性能参数为: $\rho_0 = 7.83 \text{ g/cm}^3$, $G = 77 \text{ GPa}$, $\sigma_y = 352 \text{ MPa}$ 。C48 钢筋混凝土的厚度为 800 mm,力学参数为: $\rho_0 = 2.75 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_c = 46.5 \text{ MPa}$, $E = 30 \text{ GPa}$, $\nu = 0.18$ 。

4.1 前级装药毁伤目标实验

为了与串联聚能装药毁伤目标能力形成对比,首先利用静破甲实验方法在同等炸高($1.5D_0$)条件下开展了前置装药侵彻毁伤 45 钢及 C48 钢筋混凝土目标的实验研究。表 3 为静破甲实验结果,表中, d_1 为入口直径, d_2 为孔底或出口直径, h 为穿深或穿透厚度。图 8 为两种装药侵彻 45 钢锭实验结果照片。从单级装药的毁伤实验结果可以看出:K 型装药对目标的侵彻威力与单锥罩装药相当,但其侵彻成孔孔径大于单锥罩装药,说明 K 型装药尽管装药量低于单锥罩装药,但有较大的侵彻威力,是一种较理想串联战斗部的一级装药结构。

表 3 前级装药静破甲实验结果

Table 3 Experimental results of the prepositioned charge in the static armor-piercing test

装药	45 钢			C48 钢筋混凝土		
	d_1/mm	d_2/mm	h/mm	d_1/mm	d_2/mm	h/mm
单锥罩	35	12	406	35	10	800
K 型	45	15	420	38	20	800

(a) Cone-shaped liner charge



(b) K charge



图 8 两种前级装药侵彻钢锭实验照片

Fig. 8 Experimental pictures for the two prepositioned charges penetrating the 45 steel targets

4.2 串联装药毁伤钢筋混凝土实验

串联装药实验也采用静破甲的实验方法,两级装药采用军用导爆索传爆,传爆时间控制在 $25 \sim 30 \mu\text{s}$ 之间。隔爆材料为发泡塑料,密度控制在 $0.1 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ 之间。为了和单级装药形成对比,炸高仍

表 4 串联装药对靶板侵彻的实验结果

Table 4 Experimental results of new type tandem shaped charges

序号	入孔		出孔		h/mm	入口		h_1/mm	出口		h_2/mm
	a/mm	b/mm	a/mm	b/mm		a/mm	b/mm		a/mm	b/mm	
1	35	35	25	30	800	200	200	65	300	250	80
2 ¹⁾	55	60	28	30	800	230	240	50	400	260	85
3 ¹⁾	45	50	25	28	800	300	280	45	300	360	75
4	70	50	30	28	800	300	250	90	320	280	50
5	40	55	30	25	800	280	320	95	340	290	60
平均	49.5		27.9								

1) 实验中射流击中钢筋。

选择为 $1.5D_0$ 。表4为串联装药对钢筋混凝土靶板的实验结果,表中, a 、 b 为入孔、出孔、入口崩落、出口崩落在混凝土靶面上两个垂直方向的尺寸, h 为穿深, h_1 为入口坑下深度, h_2 为出口厚度。图9为典型实验结果照片,图10为在靶后回收的后置装药射流残体。

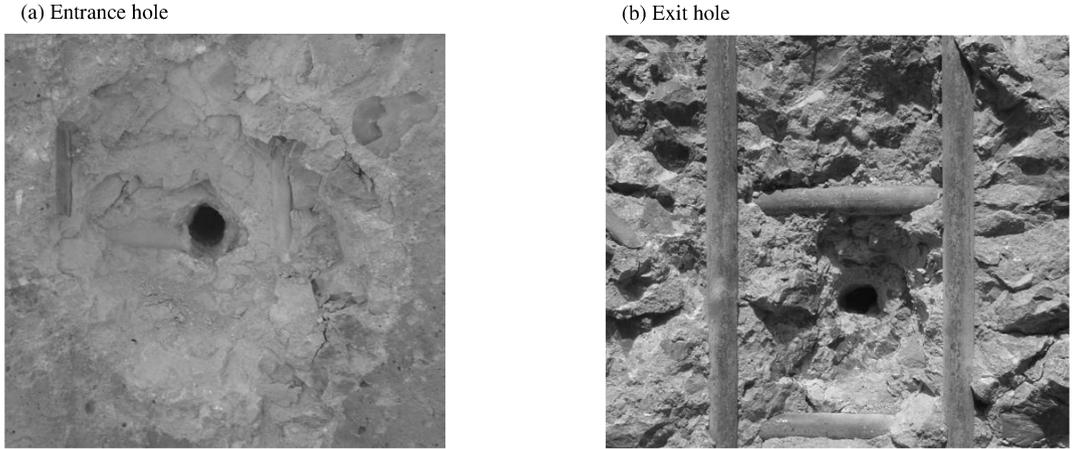


图9 串联装药侵彻钢筋混凝土实验结果照片

Fig. 9 Experimental photograph of reinforce concrete penetrated by tandem charge

从串联装药的实验结果可以有如下结论:

(1)5发实验中,穿深均能穿透800mm厚的C48钢筋混凝土。说明前置装药在被正常引爆前未产生破坏,能正常形成射流;用军用导爆索的传爆序列能可靠地实现串联聚能装药间的传爆功能,传爆延时时间能基本满足串联聚能装药的要求;利用发泡塑料作为串联装药间的隔爆材料能满足隔爆性能的要求。

(2)侵彻威力指标中,相对于单级前置装药的侵彻威力,入孔直径提高了30%,出孔直径提高了40%,说明串联聚能装药的破孔威力得到了大幅度的提高。

(3)在靶背面回收到后置装药侵彻体的残体,表明后置装药形成的杆式射流直径偏细,有必要进一步优化后置装药结构,以获取更好的扩孔效果。

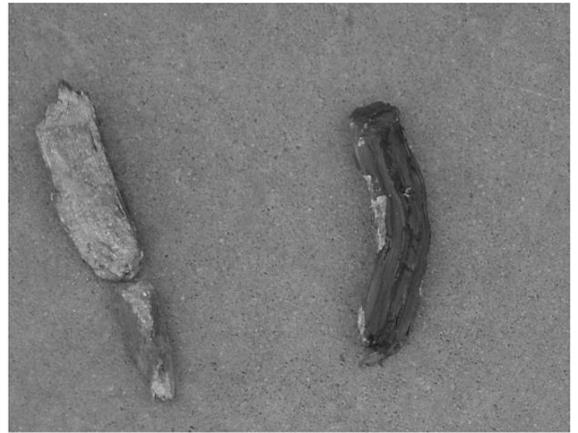


图10 靶后回收的射流残体

Fig. 10 Splinter of the rear-mounted charge jet behind target

5 结 论

(1)在已有研究成果的基础上,深入分析了传统模式的串联装药的不足。针对钢筋混凝土目标的特点,提出了一种顺序起爆模式串联聚能装药,该串联装药在技术上更容易实现。

(2)实验和数值模拟结果表明,前置K型装药射流参数与相同装药参数的单锥药型罩装药相比更适宜于反钢筋混凝土的需要;同时该装药结构更适用于串联聚能装药的需求。

(3)开展了串联聚能装药毁伤目标系列实验研究,与单级装药相比串联装药能显著提高对目标的侵彻能力;如果对该类型的串联装药进一步优化设计,可以取得更好的毁伤效果。

参考文献:

[1] 周天胜. 串联聚能装药战斗部技术综述[J]. 弹箭与制导学报, 1997, 6(1): 61-65.

ZHOU Tian-sheng. Summarization of tandem shaped charge warhead[J]. Journal of Projectile, Rockets Missiles and

Guidance, 1997,6(1):61-65.

- [2] 于世英. 串联装药战斗部设计理论的探讨[J]. 火箭技术, 1993,8(4):10-17.
YU Shi-ying. The discussion about theoretical design of the warhead of the tandem charge[J]. Projectile & Rocket Technology, 1993,8(4):10-17.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 涂侯杰, 挥寿榕, 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-yong, ZHAO Heng-yang. Blast effect on the follow-through charge of a tandem warhead [J]. Acta Armanebtarii, 1994(3):18-22.
- [6] 姜春兰, 邢郁丽, 王在成, 等. 串联反跑道子弹药随进级结构参数优化[J]. 北京理工大学学报, 2000,20(5):647-650.
JIANG Chun-lan, XING Yu-li, WANG Zai-cheng, et al. Optimizing structure parameters of following bomb of tandem anti-runway submunition[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2000,20(5):647-650.
- [7] 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]. 火箭与制导学报, 2006,26(2):66-68.
ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu. A computational study of blast effect on travelling projectile of tandem warhead[J]. Journal of Projectile, Rockets Missiles and Guidance, 2006,26(2):66-68.
- [8] Murphy M J. Shaped Charge Penetration in Concrete: A Unified Approach[R]. UCRL-53393, 1983.
- [9] 胡湘渝. 凝聚炸药二维冲击波起爆研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1989.
- [10] 张先锋. 聚能侵彻体引爆带壳炸药研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

Study on a tandem shaped charge technique to reinforce concrete

ZHANG Xian-feng^{*}, CHEN Hui-wu, HE Yong, HUANG Zheng-xiang
(School of Mechanics Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: A new type tandem shaped charge warhead, which produces a high-velocity jet and low-velocity jetting projectiles, was proposed based on the characteristics of a reinforce concrete target. The formation processes of the prepositioned charge and rear-mounted charge were simulated by the three-dimensional finite element dynamic code LS-DYNA3D. Series static armor-piercing tests were carried out to validate the performance of the proposed tandem shaped charge and in the experiment it penetrated a reinforce concrete target and a 45 steel target. Experimental results reveal that the proposed tandem shaped charge can do more damage to reinforce concrete target and drill a larger hole in it than the conventional tandem shaped charge. Experimental and simulated researches show that the new tandem shaped charge has promising applications to the tandem shaped charge warheads against hard objects such as reinforce concrete targets, airdrome runways, multi-plate spaced targets.

Key words: mechanics of explosion; new tandem warhead; static armor-piercing test; shaped charge; jetting projectile charge

* Corresponding author: ZHANG Xian-feng
E-mail address: lynx@mail.njust.edu.cn
Telephone: 86-25-84317853