

文章编号: 1006-9941(2010)04-0423-04

# 单桥双驱爆炸箔起爆技术研究

张玉若<sup>1</sup>, 李红旗<sup>1</sup>, 高艳<sup>1</sup>, 梁国英<sup>1</sup>, 杨振英<sup>1</sup>, 黄浩<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业第 213 研究所, 陕西 西安 710061; 2. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 对单桥双驱爆炸箔起爆技术的可行性及特点进行了初步分析与研究。利用爆炸箔电爆炸过程中双向驱动飞片的特性, 设计了一种爆炸箔双向起爆结构, 并对其起爆 HNS-IV 炸药的性能进行了试验研究。结果表明, 在可靠发火能量 1.2 J 的前提下, 双向起爆同步精度达到了纳秒级, 实测范围在 40 ~ 68 ns 之间。

**关键词:** 物理化学; 爆炸箔; 双向起爆; 同步性

**中图分类号:** TJ5; TJ450; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.015

## 1 引言

几十年来国内外研究者对爆炸箔冲击片起爆技术的机理性参数(如起爆阈值条件、箔桥材料、尺寸及电性能、飞片厚度及速度等)开展了大量的基础性研究工作<sup>[1-4]</sup>, 使得该项技术日趋成熟。在此基础上, 利用该项技术在作用时间同步性上所体现出的高精度, 衍生设计出了以桥箔串、并联为技术本质特征的多点阵列起爆技术。文献[5]中设计一种爆炸箔六点环形同步起爆装置, 并进行了地面威力联试, 取得了良好的效果; 文献[6]中美国从 2003 年财政年度开展了多点低能爆炸箔冲击片阵列技术研究, 用于空空导弹和防空导弹多毁伤战斗部。作为同步性衍生设计中的另外一种起爆方式, 单桥双驱起爆是指单个桥箔双向同时驱动飞片进而起爆炸药的过程。相对于多点起爆技术, 单桥双驱起爆在起爆方式上更具有空间性, 既可以满足诸如球形起爆<sup>[7]</sup>等特殊功能起爆的需求, 又可以通过输出方式的变化解决直列式许用药剂 HNS-IV 输出能量不足的问题<sup>[8]</sup>。

本试验针对爆炸箔电爆炸过程中双向驱动飞片这一特性, 设计了一种结构新颖的爆炸箔双向起爆结构, 并对其起爆 HNS-IV 炸药的殉爆可能性、发火特性及同步性进行了试验研究。

## 2 爆炸箔双向作用原理

### 2.1 起爆能量分析

在窄脉冲强电流作用桥箔到箔桥驱动飞片的过程中, 反射片的主要功能是通过与飞片组成的限制区间, 使得桥箔在吸收能量汽化后通过压缩波与稀疏波的多次反射、加速、降压进而推动飞片完成最后的加速。对比理论研究中将反射片视为固壁或刚体<sup>[9]</sup>, 实际上反射片本身要吸收相当的能量, 用于增加其内能和动能。因此, 爆炸箔用于驱动飞片的能量还是有相当一部分并没有被充分利用。取消反射片后, 利用该部分损耗的能量来驱动另一侧的飞片, 从理论上来看是可行的。

### 2.2 同步性分析

从整个爆炸箔起爆过程来看, 其作用时间包括箔桥电爆炸、飞片加速以及爆轰波在药柱中传播三个时间段<sup>[10]</sup>。基于此过程, 爆炸箔双面起爆技术正是由于其同源(同一桥箔)、同结构(对称式结构)以及 HNS-IV 类似与均质炸药冲击起爆的特性<sup>[11]</sup>(飞片在高密度药柱面上瞬间起爆不存在延迟)都保证了该结构的高精度同步性。

## 3 试验

### 3.1 试验方案

#### (1) 爆炸箔

爆炸箔设计尺寸如图 1 所示。图 1 中铜箔采用磁控溅射的方法直接溅射到 25  $\mu\text{m}$  的聚酰亚胺载体上, 该聚酰亚胺既做铜箔载体, 又做飞片。蚀刻桥箔后, 将

收稿日期: 2010-02-23; 修回日期: 2010-04-19

基金项目: 总装备部预研基金资助(编号: 9140A05080109BQ43)

作者简介: 张玉若(1977-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为爆炸箔起爆及点火技术。e-mail: daruo1977@126.com

另一飞片通过热压的方法覆在另一端桥箔面上。

### (2) 桥箔与加速膛匹配设计

该试验方案选用的桥箔与加速膛之间的配比关系为:  $0.35 \text{ mm}$ (长)  $\times 0.35 \text{ mm}$ (宽)  $\rightarrow \Phi 0.5 \text{ mm}$ (孔径)  $\times 0.5 \text{ mm}$ (厚度)。

### (3) 试验装置及装配

试验装置由双向起爆装置及发火装置组成。起爆装置装配的重点是加速膛孔与桥区的对中性,二者中心点偏差不大于  $0.1 \text{ mm}$ 。发火装置主要由火花开关管和储能电容组成,其中发火电容为  $0.22 \mu\text{F}$ ,起爆结构示意图,如图 2 所示。

### (4) 始发装药

基于直列式爆炸箔起爆的研究背景,在方案设计中药剂直接采用了直列式起爆许用药剂 HNS-IV,其粒度小于  $300 \text{ nm}$ ,晶体形貌如图 3 所示。

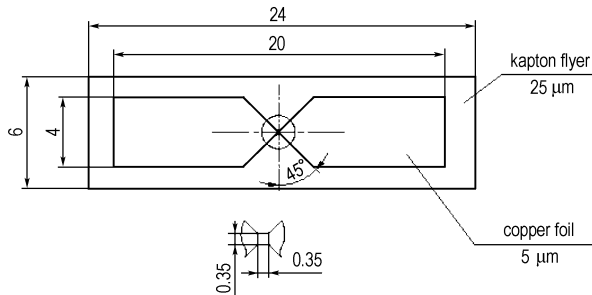


图 1 爆炸箔设计尺寸图

Fig. 1 Drawing of design dimension of exploding foil

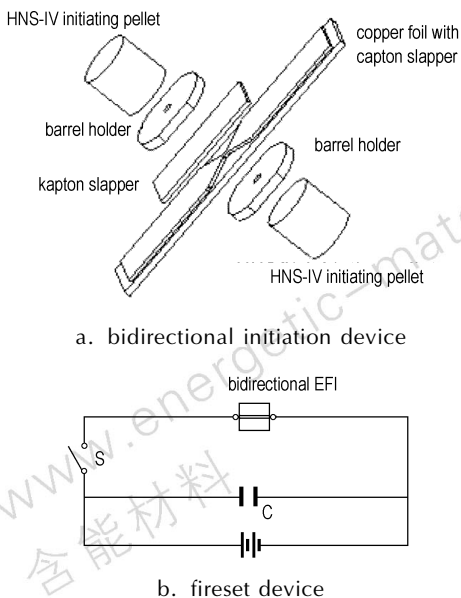


图 2 爆炸箔双向起爆结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of bi-directional initiation of exploding foil

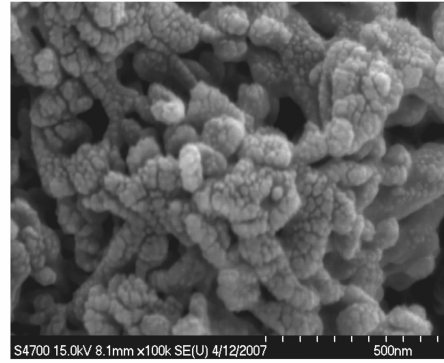


图 3 HNS-IV 晶体形貌

Fig. 3 SEM of HNS-IV crystal

## 3.2 殉爆验证试验

爆炸箔双向同时起爆始发药柱时,起爆两侧的加速膛、飞片等有一定的差异,在一端不能正常作用的情况下,始发药柱是否是只有一发起爆,另一发是殉爆,对此进行了验证试验。试验装配中,撤去一端飞片,保留另一端飞片,其它作用结构均不变;用铅板试验与探针法(导线)分析其输出特性。

## 3.3 发火感度试验

对爆炸箔双向起爆结构进行了 50% 发火感度摸底试验,试验采用升降法<sup>[12]</sup>。试验中,试验步长为  $100 \text{ V}$ , HNS-IV 药柱的压药密度为  $(1.60 \pm 0.02) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,发火电容为  $0.22 \mu\text{F}$ 。

## 3.4 同步性测试

使用适当长度的漆包铜线两端去漆层后对折,将其分别粘帖在输出端中心部位,并将对折处剪断。试验过程中,开关触发开始计时;输出端输出后,相应探针导通,经信号放大器分别输出停止计时信号。计算两路计时仪作用时间的极差,该极差值为双向起爆的同步性。

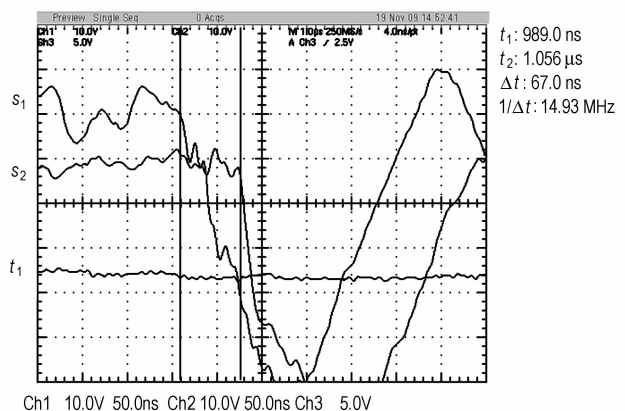
## 4 试验结果及分析

### 4.1 殉爆可能性分析

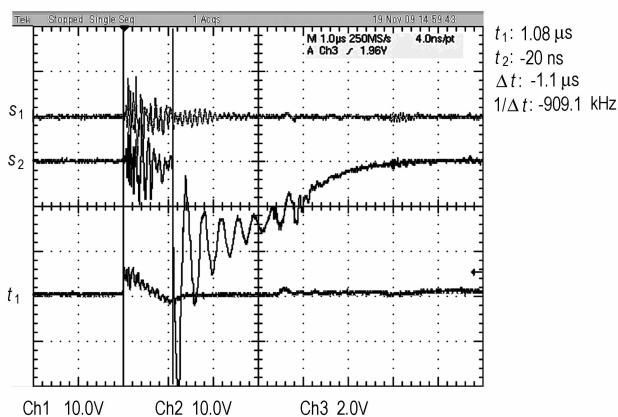
在爆炸箔双向起爆过程中,由于两药柱间距相距较近,是否产生殉爆现象(即一个药柱由飞片引爆并导致另一个药柱发生殉爆)成为双向起爆技术首要分析的问题。采用铅板试验与探针法进行了验证试验。试验结果如图 4、图 5 所示。

图 4 波形图中所采集的信号为双面起爆两端的输出信号( $s_1$ 、 $s_2$ )以及触发信号( $t_1$ )。从图中可见,在正常情况下示波器作用采集的两信号应当有明显的下降

沿,如图 4a 所示为作用时间相差 67 ns 双面输出。而图 4b 中,可以很明显地观测到只有  $s_2$  号靶线采集到了的信号存在明显的下降沿,而另一个靶线并没有输出信号,也就是说另一端并没有输出。铅板试验观测结果如图 5 所示,正常结构下铅板形成了大于试验件直径的炸孔,而在试验结构中未设置飞片输出端的铅板并没有形成炸孔。



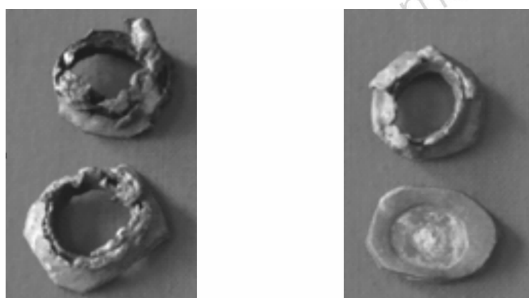
a. bidirectional configuration



b. Sympathetic Detonation configuration

图 4 作用时间波形图

Fig. 4 Waveform of functioning time



a. bidirectional configuration

b. Sympathetic Detonation configuration

图 5 铅板试验结果

Fig. 5 Test results of lead plate

从试验结果来看,在当前小药量(60 mg)情况下,起爆输出端所产生的爆轰能量由于两个加速膛的阻挡以及爆轰波前沿沿药柱快速的轴向输出,使得反向所形成的冲击波压力还不足以起爆另一侧药柱。相对于增加飞片厚度,桥箔在加速膛孔中没有对中两种殉爆可能性来说,试验中所设置的条件(撤去一侧飞片)的殉爆可能性应更高。这是由于铜箔直接裸露在加速膛孔中,一旦作用,殉爆假设端所受的反向冲击波压力应当高于其它两种情况。对于增大药量情况下的双向输出性能还有待进一步探讨。

### 4.2 发火特性分析

对单桥双驱结构进行了发火感度摸底测试,试验统计结果为,  $V_{50\%} = 3.13$  kV, 标准偏差为 0.117 kV, 全发火电压为  $V_{Af} = 3.4$  kV(能量为 1.2 J)。发火试验中的判定标准为: 只要有一端没有爆炸性输出(铅板法), 记为“0”, 两端同时作用, 记为“1”。

从起爆能量来看,其发火能量要高于单向输出的发火能量,但在工程应用可接受的范围内。除了利用反射片所耗损的能量之外,从试验过程及结果来看,两个加速膛在铜箔两侧共同组成了一个限制区域,在一定程度上起到了“反射片”的作用,因此加速膛的材料与表面光洁度也就成为了发火能量高低的关键因素之一。

从爆炸输出来看,在装配结构正常的情况下,并没有出现一端起爆另一端瞎火的现象。虽然发火试验的判定标准中包括了该现象,但实际试验中未发火的装置都是两端同时无作用。这与飞片在作用力与反作用力作用下,其速度应相等的原理是相符合的。也就是说一侧形成飞片出现问题时,另一侧的飞片即使完好在速度及运行状态上也会受到影响。

### 4.3 同步性

对双面起爆结构进行了爆炸同步性测试,试验结果如表 1 所示。

表 1 爆炸箔双面起爆结构爆炸同步性摸底试验结果

Table 1 Trial test results of synchronous explosion of bi-directional exploding foil

No.	firing voltage /kV	Pellet I $t_1 / \mu s$	Pellet II $t_2 / \mu s$	$\Delta t / \mu s$
1	3.4	1.056	0.989	0.067
2	3.4	1.035	0.983	0.052
3	3.4	1.023	0.977	0.046
4	3.4	1.065	0.997	0.068
5	3.4	1.036	0.977	0.059
6	3.4	1.021	0.981	0.040

从试验结果来看,在可靠发火的前提下其发火同步性作用时间差在 40 ~ 68 ns 之间,双向作用时间差均值为 55 ns。其典型的波形图如图 6 所示。排除试验测试误差,对比理论分析与试验结果之间在同步性上的差异,其影响因素可归纳为,输出药柱高度之间的差异以及桥箔与两侧加速膛匹配时中性之间的差异,而后者影响比重更多一些。

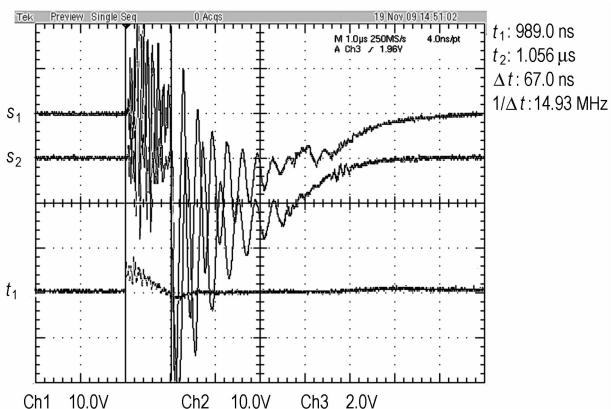


图 6 双向爆炸箔起爆典型波形图

Fig.6 Typical waveform of bi-directional exploding foil initiation

## 5 结 论

(1) 设计了一种具有纳秒级同步精度的爆炸箔双面起爆装置,其中发火同步性作用时间差为 40 ~ 68 ns。

(2) 摸底发火试验表明其 50% 发火电压为 3.13kV,并对其发火特性进行了初步探讨。

(3) 对小药量情况下双面起爆结构的殉爆可能性进行了试验验证及分析,研究表明该结构下并没有发生殉爆现象。

## 参考文献:

- [1] Olin K Mcdanie. Exploding foil initiators-an overview [C] // 14E&P. USA; Philadelphia. 1990.
- [2] Wasch J A, Hatt D J. Characterization of a smallscale exploding bridge foil flyer generator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14: 785 -789.
- [3] 赵彦, 曾庆轩, 梁琦. 电爆炸桥箔电导率模型研究 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(8): 902 -906.  
ZHAO Yan, ZENG Qing-xuan, LIANG Qi. Study of Theoretical Model for Conductivity of Electric Exploding Foil [J]. *Chinese Journal of Acta Aramentarii*, 2008, 29(8): 902 -906.
- [4] 杨振英, 马思孝, 褚恩义, 等. 爆炸箔起爆器的设计及影响因素试验 [J]. *火工品*, 1999(4): 18 -22.  
YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, CHU En-yi, et al. Design and influence factors of exploding foil initiators [J]. *Chinese Journal of Initiators&Pyrotechnics*, 1999(4): 18 -22.
- [5] 杨振英, 马思孝, 褚恩义, 等. 爆炸箔多点起爆装置研究 [J]. *火工品*, 2001(4): 9 -11.  
YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, CHU En-yi, et al. Study on the Exploding foil multi-point initiation device [J]. *Chinese Journal of Initiators&Pyrotechnics*, 2001(4): 9 -11.
- [6] Tim Tobik. Air force fuze technology overview [C] // 49th Annual Fuze Conference. Seattle, 2005. 4.
- [7] Robert N. McCormick, Melissa D. Boyd. Bidirectional slapper detonator. US 4471697 [P], 1984.
- [8] Campos J, Duncombe R, Erkol S, et al. Explosive initiation by microsapper [C] // 33th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2002.
- [9] Schmidt S C, Seitz W L, Jerry Wacherle. An empirical model to compute the velocity histories of flyers driven by electrically exploding foils [R], AD-A277 726, 1977.
- [10] 杨振英, 党瑞荣, 任玲, 等. 冲击片雷管作用时间的估算与测定 [J]. *火工品*, 2002(3): 18 -20.  
YANG Zhen-ying, DANG Rui-rong, REN Ling, et al. The functioning time estimation and measurement for slapper detonator [J]. *Chinese Journal of Initiators&Pyrotechnics*, 2002(3): 18 -20.
- [11] Klassen S E, Jungst R G. Production and characterization of fine particle hexanitrostilbene explosive for slapper detonator application [R]. Sandia National Laboratories Report SAND85-1471, 1985.
- [12] GJB/Z 377A-1994, 感度试验用数理统计方法 [S]. 1994.

## Initiation Technique of One Foil Bi-directional Exploding Foil

ZHANG Yu-ruo<sup>1</sup>, LI Hong-qi<sup>1</sup>, GAO Yan<sup>1</sup>, LIANG Guo-ying<sup>1</sup>, YANG Zhen-ying<sup>1</sup>, HUANG Hao<sup>2</sup>

(1. The 213 th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China; 2. School of mechatronic Engineering Beijing Institute of technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The feasibility of one foil with bi-directional exploding foil initiation technique was carried out. A novel bi-directional exploding foil initiation structure was designed by using the characteristics of bi-directional driving flyer in the sequence of electrical explosion. The performance to initiating HNS-IV was studied as well. Results show that the synchronous precision of bi-directional initiation has reached the level of nanoseconds with reliable firing energy of 1.2 J as a basis. Test range is between 40 -68 ns.

**Key words:** physical chemistry; exploding foil; bi-directional initiation; synchronization

**CLC number:** TJ5; TJ450; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.015