

文章编号: 1006-9941(2016)05-0479-06

## 爆炸桥箔加速贮存前后的电爆特性

都振华<sup>1</sup>, 孙新申<sup>2</sup>, 张蕊<sup>1</sup>, 李芳<sup>1</sup>, 付东晓<sup>1</sup>, 麻宏亮<sup>1</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所, 应用物理化学国家级重点实验室, 陕西西安 710061; 2. 火箭军装备研究院, 北京 100085)

**摘要:** 为了获得爆炸桥箔贮存后的电爆特性, 对爆炸桥箔开展了高温(90 °C)和高温高湿(80 °C, RH95%)条件下的加速寿命试验。利用照相、扫描电镜分析、发火试验和光子多普勒测速(PDV)方法, 研究了加速贮存试验前后爆炸桥箔的形貌、电爆特性和飞片速度。结果表明, 加速贮存后桥箔的表面均发生了氧化, 高温高湿条件下, 杂质元素污染及湿度造成桥箔的颜色变化显著, 电阻均值由贮存前的 30.3 mΩ 上升至 66.8 mΩ。高温对桥箔的爆发电流、爆发电压和爆发时间没有显著影响。高温高湿贮存后桥箔的爆发电压显著降低。加速贮存后爆炸桥箔在聚酰亚胺基底的附着能力变差。PDV 测速结果表明, 随着加速贮存时间的延长, 飞片速度由 3600 m·s<sup>-1</sup> 降至 2100 m·s<sup>-1</sup> (高温) 和 1200 m·s<sup>-1</sup> (高温高湿), 加速贮存会影响桥箔驱动飞片的能力, 高温高湿条件对飞片速度影响更严重。

**关键词:** 火工品; 爆炸桥箔; 加速贮存; 电爆特性; 飞片速度中图分类号: TJ45<sup>+</sup> 2; O59

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.009

## 1 引言

爆炸箔起爆器的本质安全性高, 是国内外火工品技术的研究热点。国外爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI) 经历了高能<sup>[1]</sup> (EFI)、低能化小型化<sup>[2]</sup> (Low Energy EFI, LEEFI)、集成化<sup>[3]</sup> (Microchip EFI, McEFI) 等阶段, 并且 EFI 和 LEEFI 已经大量装备应用。爆炸桥箔作为爆炸箔火工品的核心换能部件之一, 国内对其材料、形状、厚度及桥区尺寸对爆炸箔火工品性能的影响开展大量研究<sup>[4-6]</sup>。近年来, 国内对爆炸箔起爆器的集成技术开展了相关研究<sup>[7-9]</sup>, 并且已经逐步得到应用。

随着国内爆炸箔起爆器的大量使用和装备, 必然涉及到其贮存寿命的问题, 而爆炸箔起爆器贮存后的性能是否满足装备要求国内外并没有相关文献报道, 作为爆炸箔起爆器的核心器件——爆炸桥箔, 其贮存后的性能也鲜有研究。文献[10]对爆炸桥箔开展了 71 °C 加速老化试验, 但是仅研究了桥箔电阻和外观, 并没有研究爆炸桥箔的电爆特性和驱动飞片的能力。爆炸桥箔作为爆炸箔起爆器的核心换能器件, 其贮存后的电爆特性应受到关注, 因此对爆炸桥箔开展贮存

后的电爆特性分析, 对爆炸箔起爆器的设计、工艺改进和实际应用具有重要意义。

基于此, 本研究针对某型爆炸桥箔设计了其在温度单因素(90 °C)和温湿度双因素(80 °C, RH 95%) 下的加速寿命试验, 利用不同贮存时间下桥箔的形貌分析、电爆特性和飞片速度研究, 获得了不同贮存时间下, 桥箔电阻、爆发电流/电压和飞片速度的变化情况, 为爆炸箔火工品的贮存失效分析、设计改进提供基础数据。

## 2 试验

### 2.1 试验样品

以 Ni 为粘附层电镀于聚酰亚胺薄膜的 Cu 箔, 采用湿法刻蚀形成 X 型爆炸桥箔。设计参数为: 聚酰亚胺基层厚为 50 μm, Ni 粘附层厚度为 100 nm, Cu 箔厚度 4.5 μm, 桥区尺寸 0.5 mm×0.5 mm。

### 2.2 贮存试验

根据 GJB736.8-1990 71 °C 试验法开展爆炸桥箔单因素条件下的加速寿命试验, 其中试验程序和方法与标准要求一致, 但是为了保证失效机理不变并且缩短试验时间, 试验温度选择为 90 °C, 从第 2 个月开始每月取样, 共计 6 个月。根据企业标准 Q/AH0180-1993 火工品加速寿命试验高温高湿试验法, 开展温湿度双因素加速寿命试验, 试验条件为 80 °C 和 95% 的相对湿度, 从第 2 个月开始每月取样, 共计 4 个月。

收稿日期: 2015-07-04; 修回日期: 2015-09-24

作者简介: 都振华(1985-), 男, 工程师, 主要从事火工品安全性和可靠性研究。e-mail: duzh213@163.com

### 2.3 形貌分析

利用佳能 EOS 700D 相机、ZVEGA TS5136XM 型扫描电镜 (SEM) 和 INKA-300 型能谱分析仪 (EDS), 分析贮存前后桥箔的形貌。

### 2.4 电爆性能试验

分析加速贮存前后桥箔在 1500 V 的充电电压和 0.22  $\mu\text{F}$  电容下的爆发电流、爆发电压和爆发时间的变化情况。通过测试电阻、电爆电流、电压特性, 分析贮存前后桥箔电爆性能参数, 试验装置原理如图 1 所示。采用罗果夫斯基线圈记录电流波形, 桥箔两端并联分压器记录电压波形。通过示波器记录二者的波形, 并且读出桥箔的爆发时间。

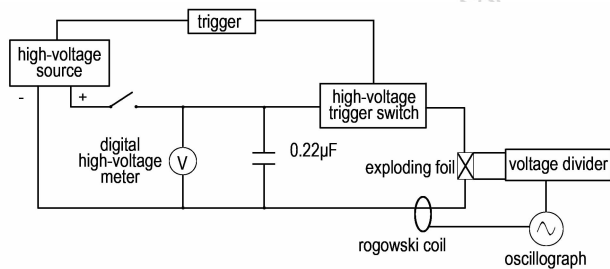
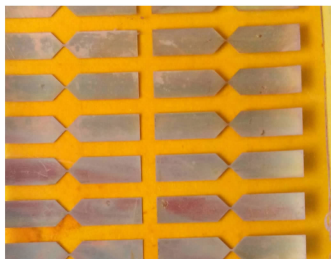


图 1 桥箔发火试验装置示意图

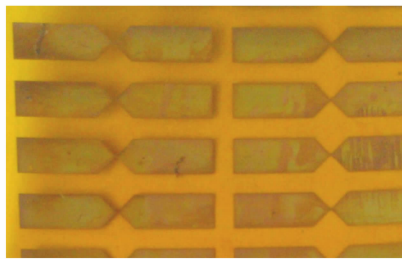
Fig.1 Sketch of foil ignition device

### 2.5 飞片测速试验

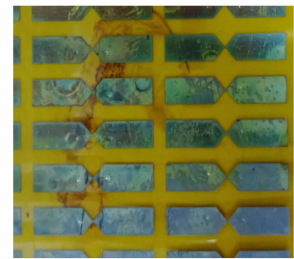
利用南京理工大学研制的光子多普勒测速系统 (PDV) 测试贮存前后爆炸桥箔的飞片速度。试验原理、装置、测试方法和数据处理方法见文献 [11]。



a. before aging



b. aging at 90 °C



c. aging at 80 °C, RH 95%

图 3 桥箔加速贮存前后的照片

Fig.3 Foil pictures before and after aging

图 4 为桥箔的 SEM 和能谱分析结果。由图 4 可知, 加速贮存前, 桥箔表面光洁, 能谱谱图中铜元素在特征能量处出现特征峰 (图 4a), 没有其他杂质元素。高温贮存后, 桥箔的能谱分析发现氧元素 (图 4b), 表明桥箔表面发生了氧化。高温高湿贮存后, SEM 下桥箔表面出现多处暗点, 能谱分析发现暗点中存在除氧

试验样品是将加速贮存后的爆炸桥箔桥区上热压厚度为 12.5  $\mu\text{m}$  的聚酰亚胺飞片层, 粘附于陶瓷电极塞上, 桥区上粘附内孔径为  $\Phi 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的不锈钢加速膛, 桥区正对加速膛内孔, 图 2 为试验样品设计图和实物图。

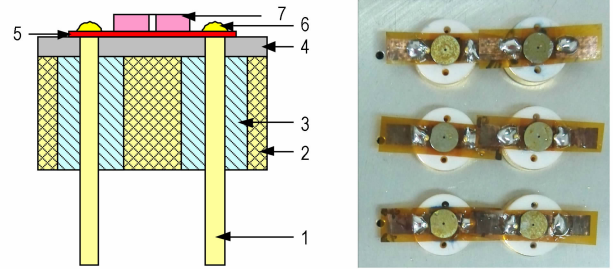


图 2 试验样品设计图及实物照片

1—脚线, 2—电极塞壳体, 3—玻璃, 4—陶瓷背板, 5—桥箔, 6—焊点, 7—加速膛

Fig.2 Design sketch and physical photo for test sample  
1—pin, 2—shell of electrode plug, 3—glass, 4—ceramic wafer, 5—exploding foil, 6—welding spot, 7—barrel

## 3 结果与讨论

### 3.1 桥箔的形貌分析

图 3 为高温 (90 °C) 和高温高湿 (80 °C, RH 95%) 条件下加速贮存前后的桥箔照片。从图 3 可以看出, 桥箔经高温贮存后的桥箔表面并没有发现显著变化, 但高温高湿条件下的桥箔表面显著变色, 湿度加速了桥箔的氧化。

元素外, 还存在大量的氯元素, 少量的 S、K 等元素 (图 4c), 桥箔上其他暗点均含有氯元素, 而且, 氯元素含量较高的暗点中氧元素的含量也高。由于氯元素的存在, 加剧了桥箔的氧化。分析认为, 氯元素对桥箔造成的污染存在几方面的可能原因, 一是桥箔利用  $\text{FeCl}_3$  湿法刻蚀时, 沾染了杂质; 二是桥箔制备过程中操作

不当被汗液污染,因此在桥箔的制备和测试中,应避免工艺和人为因素对桥箔质量一致性的影响。

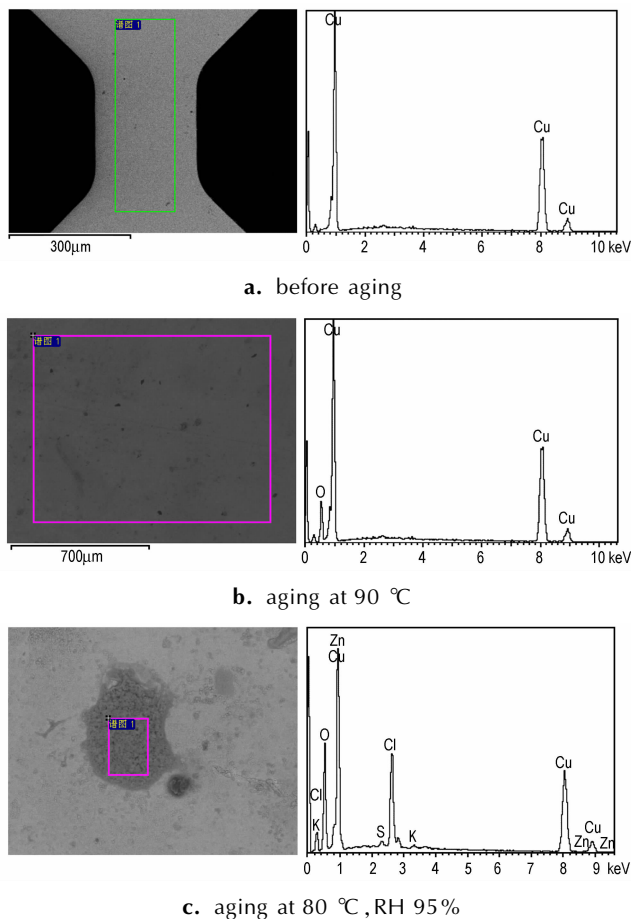


图4 加速贮存前后桥箔的SEM和能谱分析  
Fig.4 SEM pictures and energy spectrum analysis for foil before and after aging

图5为加速贮存后桥箔断面的SEM图和能谱图。从图5可以看出,桥箔表面氧元素的含量较内部的高,进一步证明了桥箔表面发生了氧化。

### 3.2 电爆特性研究

桥箔的爆发特性主要包括爆发电流、爆发时间、峰值电流和爆发电压,通常能量利用率较高的桥箔发火电路中,爆发电流和峰值电流是重合的,这些特征量影响着爆炸箔起爆器的性能。

图6为5发桥箔电爆参数均值随加速贮存时间的关系。由图6a可知,桥箔在高温(90 °C)和高温高湿(80 °C, RH 95%)条件下,桥电阻随贮存时间的增大电阻呈增大趋势,而且高温高湿贮存后增大更多,电阻均值由贮存前的30.3 mΩ上升至66.8 mΩ,这是因为湿度环境加速了桥箔的氧化,导致电阻增大。图6b为爆发电流峰值,其中爆发电流分布于1590 ~ 1700A,未

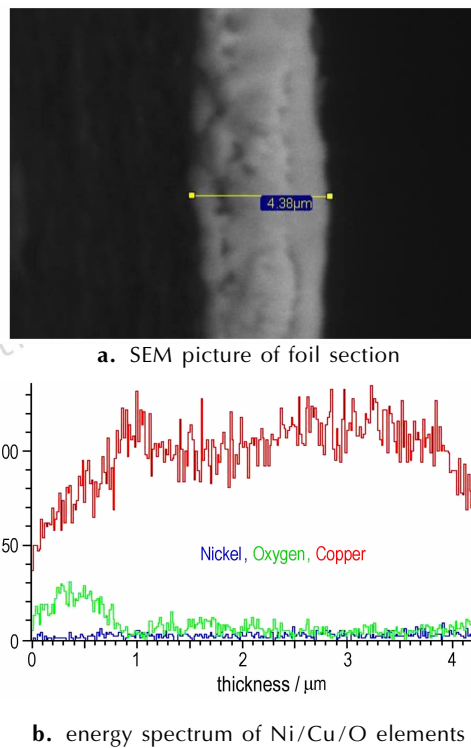


图5 桥箔断面的SEM图和能谱图  
Fig.5 SEM picture and energy spectrum analysis of foil section

发生明显的变化,高温高湿条件下,桥箔的爆发电流稍低于高温条件下。图6c为爆发电压峰值,爆发电压利用分压器测得,除了本身的测量误差外,爆发电压的变化范围较宽,高温高湿贮存后桥箔的爆发电压显著低于高温贮存的结果。图6d为爆发时间,分布于180 ~ 220 ns,加速老化试验前后未发生显著变化。这主要是因为同一发火装置中,电感基本相同,周期不变,因此爆发时间基本相同。从高温和高温高湿贮存后的爆发数据来看,除了电阻显著增大,爆发电压显著降低外,其他参数并未发生显著变化。

图7为发火试验中的典型爆发电流/电压波形和温湿度贮存后桥箔爆发的异常电流/电压波形。对比图7a和图7b可知,图7b爆发电流曲线上无法分辨峰值电流和爆发电流,爆发电压曲线未出现爆发时的尖峰。说明高温高湿贮存后,桥箔的爆发受到了显著影响。由于桥箔在高温高湿条件下的加速贮存,导致桥箔表面发生了不同程度的氧化,氧化层深浅不一,导致桥箔电爆曲线异常,电流曲线未出现爆发时的小拐点,并且未测得爆发电压。图8为加速贮存前后桥箔爆发后桥区的SEM图片。从图8a中可以看出,未经贮存的桥箔爆发后,桥气化区的两端形成了较小的外翻,聚酰亚胺的基层层因桥箔爆发形成了孔洞。高温贮

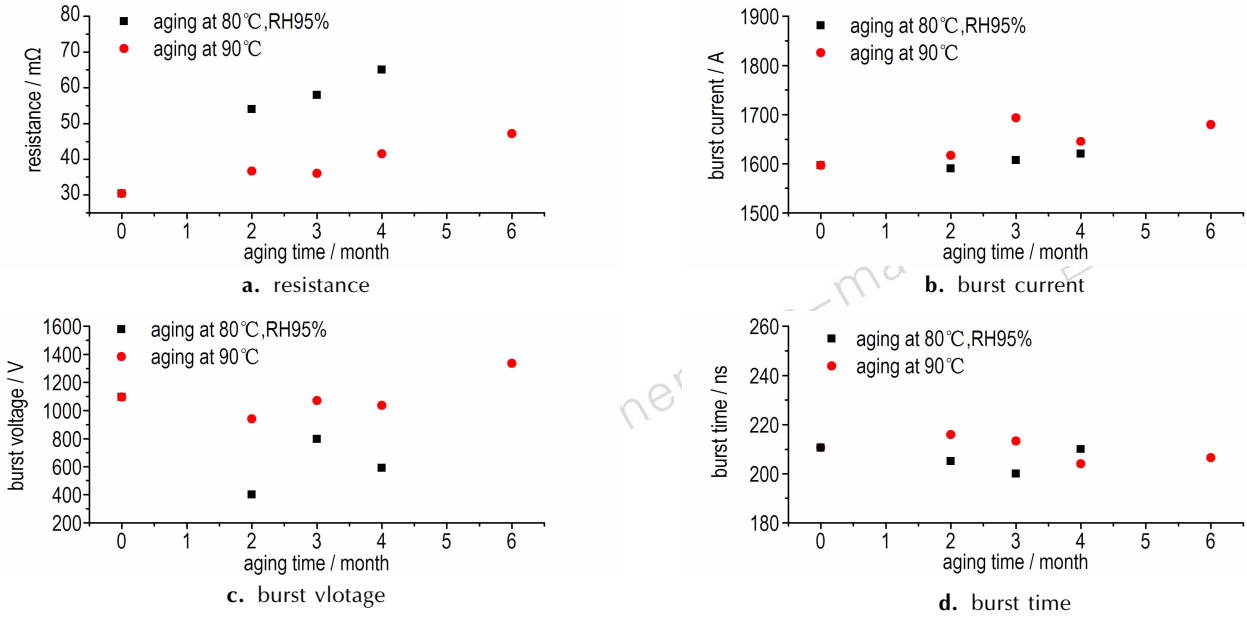


图 6 不同加速条件下桥箔电爆参数随加速贮存时间的关系

Fig.6 Burst performance vs aging time under different aging condition

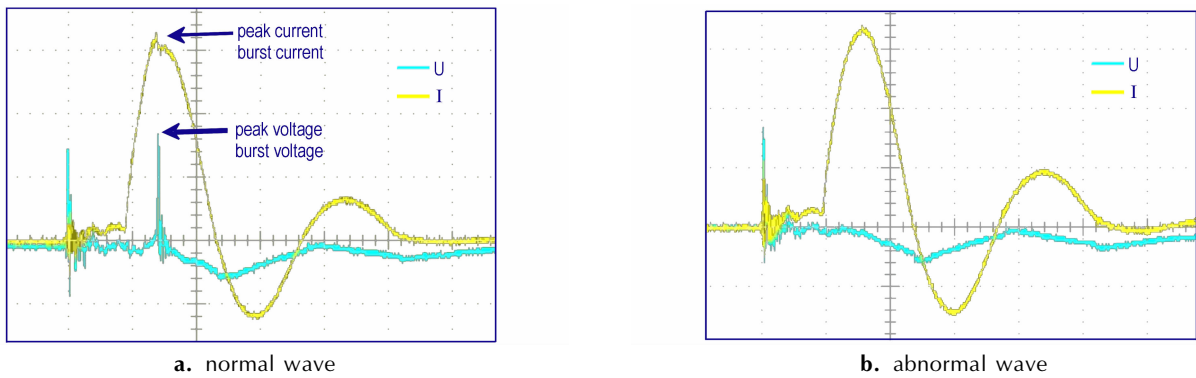


图 7 桥箔爆发电流和电压波形

Fig.7 Current and voltage wave of Cu foil performance

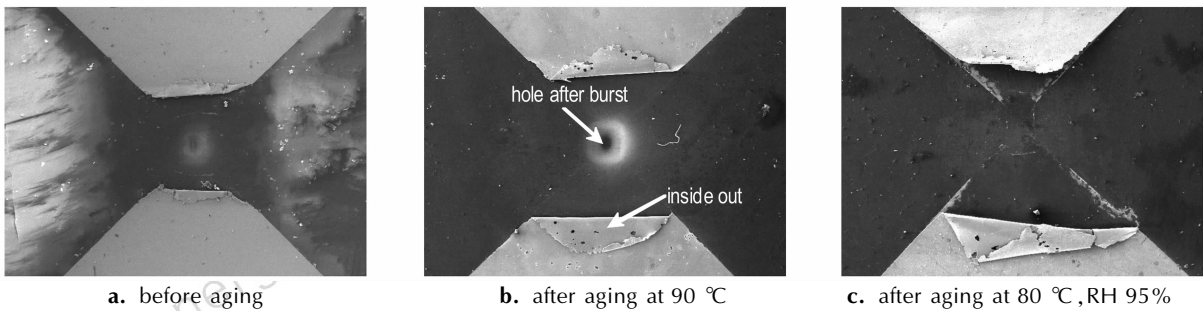


图 8 桥箔加速贮存前后的照片

Fig.8 Foil pictures before and after aging

存后,气化区两端外翻增大,说明桥箔的附着力稍有降低,但是仍不影响桥箔的正常爆发,基底被打穿。高温高湿贮存后,桥区爆发后的一端桥箔严重外翻且显著翘起,桥箔在聚酰亚胺层上的附着力降低,在基底层上未

形成孔洞,进一步证明了桥箔的爆发能力显著降低。

### 3.3 飞片速度研究

利用 PDV 飞片测速系统对贮存后的桥箔进行了飞片测速研究。图 9 给出了典型的测速波形,图 10 是

不同贮存时间和贮存条件下3发样品的飞片测速均值结果的对比图。从图10可以看出,无论高温贮存或高温高湿贮存后,飞片速度均出现了下降的趋势,飞片速度由加速贮存前的  $3600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  降至  $2100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $90^\circ\text{C}$ ) 和  $1200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $80^\circ\text{C}$ , RH 95%)。这可能是因为贮存对桥箔的氧化和 Cu 在基底附着能力的降低影响了桥箔驱动飞片的能力,另外,由于桥箔的氧化,爆发时用于产生等离子体的 Cu 元素减少,可能导致等离子体浓度降低,这也是飞片速度降低的可能原因之一。高温高湿贮存后的桥箔飞片速度下降更为显著,说明温湿度环境对飞片速度的影响更大。

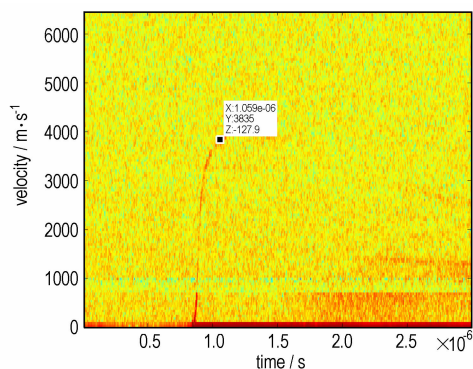


图9 典型飞片速度波形

Fig.9 Typical wave of foil velocity

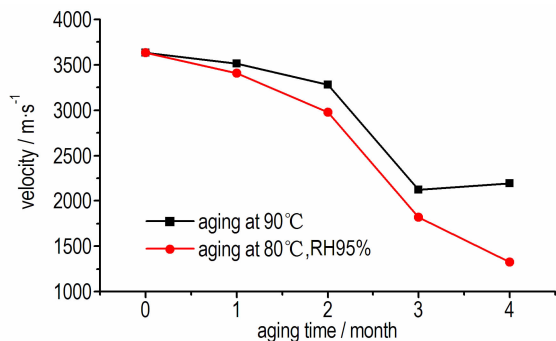


图10 不同贮存条件和贮存时间下飞片速度均值对比图

Fig.10 Comparison chart of foil velocity of different time and aging condition

## 4 结论

(1) 桥箔贮存后,因表面氧化,桥区电阻显著增大,杂质元素例如氯元素的引入会加速桥箔的氧化。

(2) 贮存前后桥箔的爆发特性研究表明温度对桥箔的爆发参数影响不大,但温、湿度导致桥箔的爆发电压显著降低。

(3) 爆发后桥箔的形貌分析表明,贮存后,桥箔在聚酰亚胺基底的附着力降低,温湿度对其附着力影响显著。

(4) 飞片测速结果表明,经加速贮存后的桥箔飞片速度均显著降低,温湿度贮存条件对飞片速度降低的影响更为显著。

致谢: 感谢南京理工大学化工学院的朱朋博士等对飞片测速提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] Tom N, George H, John C, et al. Highly integrated firing module[C]//43rd Annual Fuze Conference and Munitions Technology Symposium VI, Downtown Tampa, Florida, 1999.
- [2] Tom N. ESAD technology benefits in-line ISD Designs[C]//49th Annual Fuze Conference, Seattle, WA, 2005.
- [3] Wim P. A development platform for a microchip EFI[C]//52nd Annual Fuze Conference, Sparks, NV, 2008.
- [4] 周密, 钱勇, 刘燕, 等. 爆炸箔起爆器桥箔夹角优化设计[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 109-112.  
ZHOU Mi, QIAN Yong, LIU Yan, et al. Optimal design of foil bridge included angle of exploding foil initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 109-112.
- [5] 黄娜, 唐洪佩, 黄寅生, 等. 冲击片雷管爆炸箔的制备与电爆性能[J]. 含能材料, 2014, 22(4): 514-520.  
HUANG Na, TANG Hong-pei, HUANG Yin-sheng, et al. Preparation and electrical performance of exploding foil in slapper detonator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4): 514-520.
- [6] 韩克华, 周俊, 任西, 等. 高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 828-833.  
HAN Ke-hua, ZHOU Jun, REN Xi, et al. Effect of high voltage pulse power source wquivalent parameter on exploding performance of foil bridge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 828-833.
- [7] 周密, 孟庆英, 韩克华, 等. 爆炸平面开关的设计及研究[J]. 火工品, 2012, 20(6): 12-14.  
ZHOU Mi, MENG Qing-ying, HAN Ke-hua, et al. Design and research on exploding plane switch[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012, 20(6): 12-14.
- [8] 周密, 同红海, 任西, 等. 集成高压平面开关的冲击片雷管设计研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 626-630.  
ZHOU Mi, TONG Hong-hai, REN Xi, et al. Design of integrated high voltage planar switch of exploding foil initiators[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(4): 626-630.
- [9] 曾庆轩, 郑志猛, 李明愉, 等. 冲击片雷管集成制造方法研究[J]. 火工品, 2012(5): 1-3.  
ZENG Qing-xuan, ZHENG Zhi-meng, LI Ming-yu, et al. Research on integrated manufacturing method of slapper detonator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(5): 1-3.
- [10] ZHU Ming-shui, JIANG Xiao-hua, ZHI Yong-fa, et al. An assembly of exploding foil and flyer[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(4): 397-399.
- [11] 陈清畴, 陈朗, 覃文志, 等. PDV方法测量电爆炸驱动小飞片速度[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 413-416.  
CHEN Qing-chou, CHEN Lang, QIN Wen-zhi, et al. Photonic doppler velocimetry of mini flyers driven by electrically exploded foils[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 413-416.

## Electric Burst Characteristic of Exploding Foil before and after Aging

DU Zhen-hua<sup>1</sup>, SUN Xin-shen<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, LI Fang<sup>1</sup>, FU Dong-xiao<sup>1</sup>, MA Hong-liang<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China;

2. The Rocket Force Equipment Academy, Beijing 100085, China)

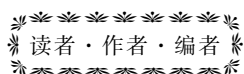
**Abstract:** In order to study the storage characteristic of exploding foils, the accelerated life test at high temperature of 90 °C and high temperature and humidity of 80 °C, RH 95% were carried out. The appearance, morphology, burst characteristic and flyer velocity were studied by photograph, SEM, fire test and photonic doppler velocimetry (PDV) method. Results show that after aging at 80 °C, RH 95%, the surface of exploding foil is oxidized, and the surface color changes significantly due to the Cl element and humidity, and the average resistance obviously increases from 30.3 mΩ (before aging) to 66.8 mΩ (after aging). There is no remarkable influences of high temperature (90 °C) on burst current, burst voltage and explosion time of exploding foil. While the burst voltage and explosion time significantly decrease after aging at 80 °C, RH 95%. The performance of exploding foil adhesion to polyimide film becomes poor after aging. The PDV test results show that with the increasing of acceleration time, the flyer velocity decreases from 3600 m · s<sup>-1</sup> to 2100 m · s<sup>-1</sup> at 90 °C and 1200 m · s<sup>-1</sup> at 80 °C, RH 95%. The ability to drive slapper decreases after aging. The storage condition of high temperature and humidity has a stronger effect on flyer velocity than that of high temperature.

**Key words:** initiator; exploding foil; aging; electric burst characteristic; flyer velocity

**CLC number:** TJ45<sup>+</sup> 2; O59

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.009



## 2016年(第七届)含能材料与钝感弹药技术研讨会 会议通知(第一轮)

“2016年(第七届)含能材料与钝感弹药技术研讨会”定于2016年11月中下旬在海口市召开。

### 一、征文范围

- 含能材料、钝感弹药和安全弹药发展新趋势;
- 单质炸药的理論设计、合成、改性与绿色制备技术;
- 混合炸药、烟火剂、推进剂的设计、制备与应用技术;
- 含能材料理化分析新方法;
- 弹药安全性、可靠性、环境适应性评价;
- 钝感弹药与安全弹药的试验与评估技术;
- 新型点火器件的设计技术;
- 含能材料与弹药的处置与循环利用技术;
- 其他相关理论、实验、仿真技术及其应用。

二、截稿日期 2016年8月15日

三、联系人 0816-2486915 张翠娟

0816-2485362 张桂弘 高毅

详情请登录会议官方网站 [www.emim.org.cn](http://www.emim.org.cn) 了解。

“含能材料与钝感弹药技术研讨会”组委会

二〇一六年二月二十四日