

文章编号: 1006-9941(2015)06-0578-005

# 爆炸桥丝火工品的高压静电放电响应

李志鹏<sup>1</sup>, 张攀军<sup>2</sup>, 吕子剑<sup>1</sup>, 龙新平<sup>2</sup>, 戴斌<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 采用高压静电放电模拟试验系统, 在 250 kV, 1000 pF, 1  $\Omega$  的条件下, 对某爆炸桥丝火工品脚-脚和脚-壳两种静电放电方式下的响应特性进行了试验研究。结果表明, 脚-脚方式静电放电条件下, 火工品桥丝随加载电压的升高出现熔融、断裂以及爆炸等反应, 其 50% 概率断裂电压为 56.33 kV, 但桥丝爆炸并未引起火工品发火。在脚-壳方式静电放电条件下, 火工品典型的响应特性为电极塞和壳体发生分离。分析认为, 爆炸桥丝火工品高压静电放电响应特性与静电放电的能量分布、火工品的结构组成及其起爆机理等有关。

**关键词:** 静电放电; 爆炸桥丝火工品; 响应特性**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.014

## 1 引言

桥丝火工品性能较为稳定, 易于控制, 在发动机点火、折叠翼的展开、自毁装置及爆炸螺栓等中都有应用<sup>[1]</sup>, 同时也是常规武器和核武器主要的初始引发能源。作为广泛使用的一种点火装置, 其静电安全性受到了普遍重视。人们根据桥丝火工品生产和使用过程可能遇到的一般静电危险源(如人体、机器、家具等), 对桥丝火工品经受较低电压(几万伏)静电放电刺激后的响应特性开展了研究工作。如白瑞祥等<sup>[2]</sup>采用人体静电放电模型, 研究了 5~30 kV 放电电压对桥丝的影响。李志鹏等<sup>[3-4]</sup>研究了 50 kV 人体静电放电对火工品装药的影响。Borovina 等<sup>[5]</sup>采用人体和家具复合模型, 研究了 25 kV 放电电压条件下几种类型桥丝火工品装药的响应情况。Michael 等<sup>[6]</sup>则通过计算分析了儿种静电放电模型条件下(最高电压 40 kV)火工品桥丝和药剂的响应情况。

然而, 随着武器弹药使用电磁环境的日益复杂化, 其在空中运输等过程中可能受到来自运载工具高压静电感应的威胁, 比如, 直升机在飞行过程中或战斗机在执行空中补给任务时, 由于与云团的摩擦等产生的静电电压高达几十万伏<sup>[7]</sup>。桥丝火工品作为武器弹药中的敏感元器件, 其遭受高电压(几十万伏)静电放电

刺激的可能性大增。因此, 仅研究较低电压静电放电刺激下火工品的安全性已不能满足实战需要。美国早在 20 世纪 90 年代就提出了模拟直升机空中补给的静电放电标准试验方法, 并在 2005 年进行了修订<sup>[8]</sup>, 试验条件为: 充电电压 50~300 kV, 放电电容 1000 pF, 放电电阻最大 1  $\Omega$ 。我国的封青梅等<sup>[7]</sup>参照美军标准也建立了相关的试验方法。但关于高压静电放电条件下火工品响应特性方面的研究工作尚未见文献报道。然而该方面的研究工作对于认识高压静电放电作用下火工品的响应特性, 以及评估其高压静电安全性等都是必不可少的工作。

本研究采用高压静电放电模拟试验系统, 在 250 kV, 1000 pF, 1  $\Omega$  的放电条件下, 对某爆炸桥丝火工品脚-脚和脚-壳两种静电放电方式下的响应特性进行了试验研究, 并对实验结果进行了分析, 以期对高压静电放电条件下火工品的安全性评估提供参考。

## 2 实验部分

静电放电试验装置采用高压静电放电模拟试验系统, 该系统由控制装置、充/放电装置、测试装置等组成。其中充/放电装置见图 1 所示, 由高压电源、储能电容器、充/放电电阻、球形放电开关等组成。高压静电放电模拟试验系统相关技术指标符合美军标 MIL-STD-331C<sup>[8]</sup>要求, 其输出电压为 0~300 kV、放电电容 1000 pF、放电电阻 1  $\Omega$ 、放电电感 16  $\mu$ H, 采用 100  $\Omega$  校准电阻检测得到负载能量消耗率约为电容储

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-07-24

作者简介: 李志鹏(1978-), 男, 副研究员, 主要从事炸药火工品静电安全性研究。e-mail: lzpsunny@sina.com

能的 92%, 放电极性为负极性。



图 1 高压静电放电模拟系统充放电装置

1—高压电源, 2—充电电阻, 3—储能电容, 4—球形放电开关, 5—放电电阻

Fig.1 Charge and discharge equipment of high-voltage electrostatic discharge system

1—high voltage power supply, 2—charge resistance, 3—capacitance, 4—globular discharge switch, 5—discharge resistance

试验采用的爆炸桥丝火工品结构示意图见图 2。其桥丝材料为金, 电阻为几十毫欧量级, 始发装药为低密度季戊四醇四硝酸酯 (PETN), 电极塞与管壳由密封胶灌封。根据被测火工品生产和使用过程中可能遇到的静电放电情形以及对其结构进行分析, 分别对火工品进行了脚-脚和脚-壳两种方式的静电放电刺激。其中脚-脚放电刺激为电流注入式放电, 脚-壳方式静电放电刺激时, 将火工品的两个脚线并联作为一个放电电极, 对火工品脚壳间药剂形成击穿放电。

参照美军标 MIL-STD-331C<sup>[8]</sup> 的要求, 爆炸桥丝火工品高压静电放电模拟试验采取的样品数量为 20 发, 其中脚-脚和脚-壳两种放电方式各为 10 发。

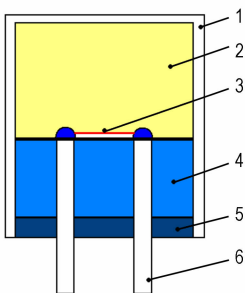


图 2 被测火工品结构示意图

1—管壳, 2—装药, 3—桥丝, 4—电极塞, 5—密封胶, 6—脚线

Fig.2 Sketch of detonator structure

1—shell, 2—primary explosive, 3—bridgewire, 4—electrode plug, 5—glue, 4—down-lead

### 3 结果与讨论

#### 3.1 脚-脚放电响应情况

为便于观察脚-脚方式静电放电时桥丝的响应情况, 首先采用与被测火工品状态相同的电极塞 (含桥丝) 进行了静电放电试验。图 3 所示为不同静电放电电压条件下火工品桥丝的几种典型响应状态, 由图 3 可见, 随着放电电压的逐渐升高, 桥丝出现了不同的响应状态, 当静电电压在 55 ~ 59 kV 时, 桥丝出现了不同程度的损伤, 但均为物理损伤。当电压增加到 100 kV 时, 可观察到明亮的火花, 同时从图 3d 中也可以看到电极塞表面的灼烧痕迹, 这可能是高压静电放电作用下, 桥丝熔融并且汽化形成高温高压的等离子体造成的, 由此可以判断桥丝发生了爆炸。为验证上述试验观测结果, 采用真实火工品在 57 kV 条件下进行了静电放电刺激试验, 并用 CT 观测了桥丝的断裂情况, 结果见图 4 所示, 由图 4 可见, 火工品中的桥丝发生了非常明显的断裂, 这和图 3b 中所显示的局部断裂一致, 由此也说明采用电极塞 (含桥丝) 试验可有效观测桥丝的响应状态。

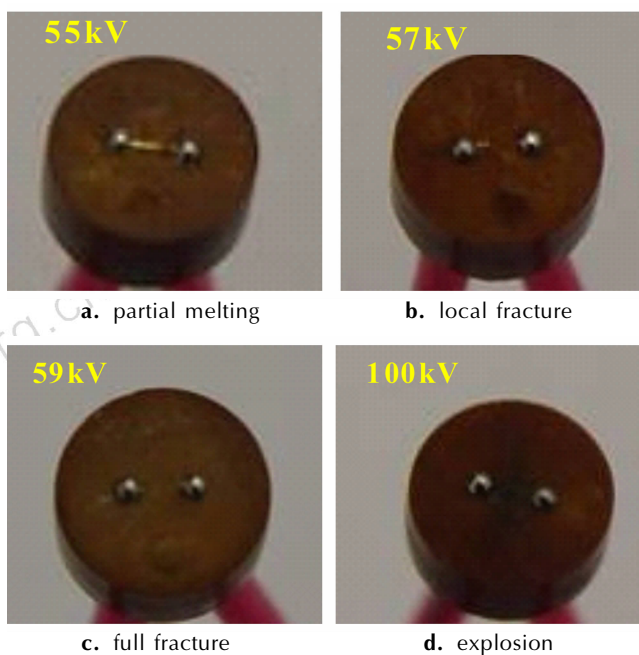


图 3 静电放电条件下桥丝的几种典型响应状态

Fig.3 Typical responses of bridge wire to electrostatic discharge (ESD)

为进一步研究桥丝静电放电作用下的响应规律, 对被测火工品桥丝发生 50% 概率断裂的电压进行了测试。试验采用 25 发含桥丝的电极塞, 根据 GJB/Z

377A-1994 进行了升降法试验并对数据进行了处理, 结果见表 1 所示。根据测试结果, 在本研究的试验条件下, 被测火工品桥丝发生 50% 概率断裂的电压为 56.33 kV, 这与图 3、图 4 所示的实验结果基本吻合。

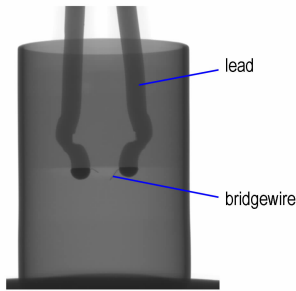


图 4 57 kV 静电放电条件下桥丝断裂的 CT 图

Fig. 4 CT picture of bridgewire after ESD with the voltage of 57 kV

表 1 被测火工品桥丝发生断裂的阈值电压

Table 1 Threshold voltage when bridgewire fracture occurs

circuit parameter	test condition	fracture voltage/kV		
		0.01%	50%	99.99%
1000pF, 1 $\Omega$	18 $^{\circ}$ C, 30% relative humidity	48.28	56.33	64.38

由图 3d 可知, 当静电放电电压为 100 kV 时, 被测火工品的桥丝就会发生爆炸反应, 极有可能使火工

品发生点火。然而, 本研究在 250 kV, 1000 pF, 1  $\Omega$  的放电条件下, 对 10 发被测火工品进行了脚-脚方式的静电放电刺激, 结果发现被测火工品均未点火。究其原因, 可从静电放电的能量分布以及爆炸桥丝火工品的点火机理等方面进行分析。首先, 本试验中采用的静电放电能量虽较大, 但主要是由于较高的充电电压引起的, 而电路中的储能电容和放电电阻均较小, 储能电容越小, 放电火花越易分散, 能量不易集中使用; 放电电阻越小, 放电火花越易出现振荡现象, 同样不易于能量的集中。此外, 由于试验中被测火工品的桥丝电阻非常小, 仅有几十毫欧, 根据静电放电的能量耦合模型以及分布规律, 大部分的能量都会消耗在电路中, 而作用在桥丝上的能量将十分有限。此外, 根据爆炸桥丝火工品的点火机理: 金属桥丝在强电流作用下迅速受热汽化, 产生高温高压等离子体, 并迅速膨胀形成冲击波, 以冲击波形式引爆炸药<sup>[9]</sup>。试验中桥丝虽在强电流作用下瞬间受热汽化, 但仅吸收了少部分的放电能量, 导致桥丝并未充分形成高温高压的等离子体, 产生的冲击波能量不足以引起火工品装药的反应或者局部发生了反应但反应难以持续而熄灭, 因此, 未引起被测火工品点火。

### 3.2 脚-壳放电响应情况

采用 250 kV, 1000 pF, 1  $\Omega$  的放电参数, 在相对湿度 (RH) 20% 的条件下, 对 10 发被测火工品进行了脚-壳方式的静电放电刺激测试, 试验结果照片见图 5 所示。

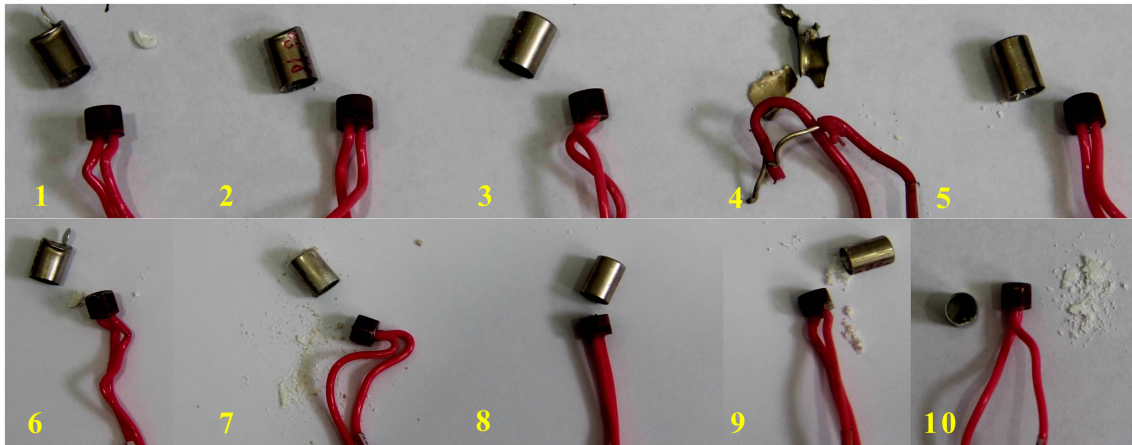


图 5 被测火工品脚-壳方式静电放电试验结果照片

Fig. 5 Detonators after ESD stimuli test through pin-shell

由图 5 可知, 10 发被测火工品中有 1 发 (图 5 所示第 4 发) 发生了较高级别的反应, 火工品壳体破裂, 未回收到火工品装药。其余被测火工品的电极塞和管壳分离, 但壳体基本保持完整, 能回收到少量装药。在

保持其他实验条件不变的情况下, 发现即使电压降低到 60 kV, 被测火工品仍可能发生电极塞和管壳分离现象, 但随着电压的降低, 可回收的火工品装药残余粉末增多。



图6所示为被测火工品脚-壳方式静电放电刺激后的典型响应结果,其中图6a为50 kV静电放电刺激后被测火工品内部药剂损伤情况的CT检测照片,图6b为被测火工品电极塞和管壳分离照片。由图6a可见,在对被测火工品进行脚-壳方式的静电放电时,火工品装药在高压静电作用下发生击穿并形成明显的放电通道,同时在电极塞表面形成了黑色的类似灼烧的反应痕迹(图6b)。

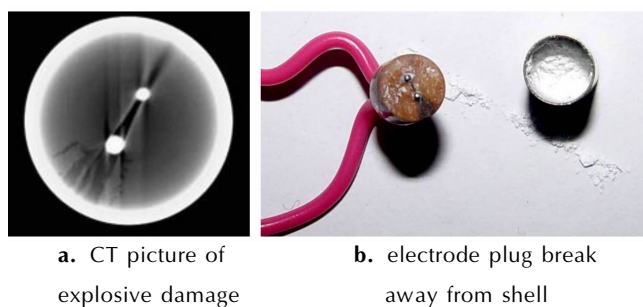


图6 被测火工品脚-壳方式静电放电刺激后的典型响应结果  
Fig.6 The typical response of detonators after ESD stimuli through pin-shell type

静电放电对炸药的引爆过程是一个非常复杂的过程,一般认为,这是由热主导,压力驱动的一个过程<sup>[10]</sup>。由于被测火工品的装药为低密度的太安(PETN),含有较多的空气,其击穿过程为空气先击穿,然后形成电火花,若电火花能量不足以引爆炸药,可能只把炸药吹散;若电火花能量足以引燃炸药,并有足够的约束,炸药则可能发生燃烧转爆轰(Deflagration-to-Detonation Transition, DDT)从而起爆。静电放电在火工品脚壳间击穿放电时,静电火花的电能转换成热能,一方面使装药内部的空气瞬时被加热到很高的温度并发生膨胀,压力突升;另一方面,静电放电的热效应使得药剂温度升高,从而导致部分药剂发生分解反应,产生气体急速膨胀,当两方面的压力大于电极塞和壳体间的密封强度时,电极塞和壳体分离,压力迅速衰减,反应终止。由于不同火工品密封性能不同,若电极塞和壳体间的密封强度足够强,使得炸药反应能维持高压并持续下去时,装药就会发生更高级别的爆燃或爆炸反应,这可能就是试验中有一发火工品发生较高级别反应的原因。

## 4 结论

(1) 在脚-脚方式静电放电条件下,火工品桥丝随着静电放电电压的升高出现熔融、断裂甚至是爆炸现

象,测试获得其发生50%概率断裂的电压约为56.33 kV。对10发被测爆炸桥丝火工品的试验结果表明,虽然桥丝发生了爆炸但未引起火工品发火。这主要是因为桥丝吸收的能量有限,未能充分形成高温高压的等离子体,产生的冲击波能量不足以引起火工品装药的反应或者局部发生了反应但反应难以持续而熄灭。

(2) 在脚-壳方式静电放电条件下,10发被测火工品中有1发火工品壳体破裂,未回收到火工品装药,其余火工品典型的响应特性为电极塞和壳体发生分离。这主要是因为静电放电热效应引起的空气膨胀以及药剂部分分解反应产生气体引起的压力突升,大于电极塞和壳体间密封强度,造成电极塞和壳体分离。

综合以上结果可知,在高电压静电刺激条件下,爆炸桥丝火工品的响应并不一定表现为发火,这可能使其造成危害的程度有所降低。但从桥丝以及药剂的响应特性来看,高压静电放电刺激下,火工品损伤严重,这一点值得关注。

## 参考文献:

- [1] 刘尚合,魏光辉,刘直承,等. 静电理论与防护[M]. 北京:兵器工业出版社,1999: 249-250.
- [2] 白瑞祥,严楠. 静电放电对电火工品桥丝影响的实验研究[J]. 火工品, 2012(3): 9-12.  
BAI Rui-xiang, YAN Nan. Experimental study on the effect of ESD on EED bridgewire[J]. *Initiators&Pyrotechnics*. 2012(3): 9-12.
- [3] LI Zhi-peng, LIU Lan, LV Zi-jian, et al. Study on the damage effects of primary explosive in some detonator caused by ESD[C] // Proceedings of the 2009 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Kunming, China, 2009: 94-96.
- [4] LI Zhi-peng, LIU Ying, ZHANG Pan-jun, et al. Effects of electrostatic discharge on the performance of exploding bridgewire detonators[C] // Journal of Physics: Conference Series 418, 2013:0120511-0120515.
- [5] Dan B, Douglas M H, Steven C. Electrostatic discharge sensitivity of detonators[C] // 13th International Symposium on Detonation. Norfolk, Virginia, 2006.
- [6] Michael J W. Projected response of typical detonators to electrostatic discharge (ESD) environments [R]. UCRL-ID-145642. 2002.
- [7] 封青梅,关翔云,刘红利,等. 电火工系统引信300 kV静电放电试验系统研究[J]. 火工品, 2007(1): 51-53.  
FENG Qing-mei, GUAN Xiang-yun, LIU Hong-li, et al. Research on 300 kV electrostatic sensitivity test system for EED and fuze[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(1): 51-53.
- [8] MIL-STD-331C. Fuze and fuze components, environmental and performance tests for[S], 2005.
- [9] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999: 247-248.
- [10] Asay B W. Shockwave science and technology reference library, Vol. 5: Non-shock initiation of explosives[M]. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2009: 583-584.

## Response to High Voltage Electrostatic Discharge for Exploding Bridgewire Detonators

LI Zhi-peng<sup>1</sup>, ZHANG Pan-jun<sup>2</sup>, Lü Zi-jian<sup>1</sup>, LONG Xin-ping<sup>2</sup>, DAI Bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The response of exploding bridgewire detonators with two different (pin-pin and pin-shell) discharge types to high voltage electrostatic discharge (ESD) was studied using a high voltage ESD test system at the circuit parameters of 250 kV, 1000 pF, 1  $\Omega$ . Results show that melting, fracture or explosion (without ignition) of bridgewire detonators can be observed when ESD was applied to pin-pin discharge. The 50% broken voltage of bridge wire is 56.33 kV. The typical response of detonators to ESD is electrode plug breaking away from shell when ESD applied to pin-shell. The response characteristic of detonator to high voltage ESD is found to be related with the ESD energy distribution, the structure and the ignition mechanism of detonator.

**Key words:** electrostatic discharge (ESD); exploding bridgewire detonator; response characteristic

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.06.014



### 《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于2015年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

### 更正

本刊2015年第3期205页《火工品集成技术的发展机遇与途径》中“3. 集成技术是非线性火工品高可靠性、小型化的必经技术途径”一节的全文应为:

非线性火工品由于作用机理的特殊性,其安全性可靠性得到了本质提高。但是,以电-爆换能机理和光-爆换能机理为主的爆炸箔火工品、激光火工品等典型非线性火工品的可靠性与发火源、发火能量传递损耗等因素的关系十分密切。通过系统集成能达到降低发火能量、缩小系统体积、减小系统成本、提高系统可靠性的目的。

特此更正。

《含能材料》编辑部

2015年4月