

文章编号: 1006-9941(2015)05-0472-05

## 不同静电环境电爆管安全性

李志鹏<sup>1</sup>, 吕子剑<sup>1</sup>, 龙新平<sup>2</sup>, 文雯<sup>1</sup>, 李振峰<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:** 为评估某电爆管不同静电环境的安全性, 采用静电放电模拟器分别模拟人体、机器以及人体-金属复合放电情形, 在 25 kV 条件下对其脚-脚和脚-壳两种静电放电方式的安全性进行了研究。实验发现: 脚-脚放电引起的电爆管桥丝电阻值减小率小于 2.1%, 40 发试样均未发火; 脚-壳放电时, 机器模型放电功率理论计算值高达 104.17 MW, 导致 10 发试样中的 6 发发火。分析表明: 该电爆管的静电安全性主要取决于静电放电的电流和功率大小, 压敏电阻发生开路失效是导致其发火的主要原因。

**关键词:** 安全性; 静电; 电爆管; 静电放电模型**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.013

## 1 引言

电爆管是动力源火工品的一种, 其结构简单, 作用可靠, 广泛应用于航空航天等领域。随着电爆管使用电磁环境的日益复杂, 其静电安全性问题也越来越突出。目前, 人们更多关注了电爆管的人体静电安全性<sup>[1-3]</sup>。然而, 在电爆管的勤务处理和使用等过程中, 各种静电源普遍存在, 其可能遭受包括人体在内的多种静电放电电源的作用。不同的静电放电电源由于具有不同的静电放电 (ElectroStatic Discharge, ESD) 特点, 其对电爆管静电安全的影响也会不同。因此, 要全面评价电爆管的静电安全性, 仅进行人体静电放电安全性试验是不够的。

静电放电是一个复杂多变的过程, 人们对实际各种可能的静电危险源进行了研究, 并根据其主要的静电放电特点和规律模拟简化得到了 ESD 电路模型, 用来模拟不同的静电放电环境。现公开报道的 ESD 模型有人体模型、人体-金属模型 (场增强模型)、机器模型 (日本模型)、家具模型等 9 种<sup>[4]</sup>。目前, 关于不同 ESD 模型条件下火工品静电安全性的研究工作不多。魏光辉等<sup>[5]</sup>测试确定了人体和机器 ESD 模型对 5 种典型电火工品直接放电的安全电压阈值, 结果发现, 机器模型放电条件下被测火工品的安全电压值均小于人体模型的安全电压值。Michael<sup>[6]</sup>则通过计算分析

了人体和家具 ESD 模型条件下桥丝式火工品的不同响应情况。上述研究结果均表明, 不同 ESD 模型对火工品的安全性的影响不同。

为了评估某电爆管不同静电放电环境条件下的安全性, 本研究针对该电爆管勤务处理和实际使用过程可能遇到的三类主要静电危险源, 分别采用人体模型、人体-金属模型以及机器模型对其进行了静电安全性测试, 并通过计算对试验结果进行了分析。研究结果对于评估该电爆管不同静电环境条件下的安全性有参考意义。

## 2 实验部分

### 2.1 试验样品

试验采用的电爆管为一种灼热桥丝式动力源火工品, 其主要利用气体产物压力做功。由电极塞、桥丝、点火药、主装药和壳体等组成。桥丝材料为镍铬丝, 电阻约为 1  $\Omega$ 。点火药成分为 Al/Zr/KClO<sub>4</sub>。电爆管脚-壳间采用氧化锌压敏电阻作为静电泄放元件以提高其静电安全性, 压敏电压值约为 300 V。

### 2.2 仪器和 ESD 模型

试验采用的 ESD 模拟发生器见图 1 所示, 主要包括放电枪和控制单元两部分, 其输出电压在 0 ~ 30 kV 范围内连续可调, 具有接触式放电和空气式放电两种模式。ESD 模拟发生器的放电枪中包含有放电网络 (电容 C 和电阻 R), 可根据需模拟的 ESD 模型进行更换。试验采用的三种 ESD 模型分别为:

(1) 人体模型 (Human-Body Model, HBM): 主

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-07-17

作者简介: 李志鹏 (1978-), 男, 副研究员, 主要从事炸药及火工品爆轰安全性能研究。e-mail: lzpsunny@sina.com

要模拟人体带电后对物体产生放电的情形。人体静电是火工品最危险、最经常遇到的静电源。目前,国内外采用的人体模型放电参数种类较多,试验主要选取了两种具有代表性的人体模型。分别为:美国 sandia 实验室提出的标准人体模型(HBM, Sandia standard)<sup>[7]</sup>,其放电参数为: $C=600\text{ pF}$ , $R=500\ \Omega$ ;石家庄军械工程学院提出的火工人体模型(HBM, Electric Explosive Device)<sup>[5]</sup>,其放电参数为: $C=500\text{ pF}$ , $R=100\ \Omega$ 。



图1 静电放电模拟发生器

Fig.1 ESD simulator

(2) 人体-金属模型(Body-Machine Model, BMM):主要模拟带电人体通过手持的小金属物件(如扳手、螺丝刀等)对物体产生放电的情形,又称为场增强模型。根据 IEC61000-4-2 标准,试验中取  $C=150\text{ pF}$ , $R=330\ \Omega$ 。

(3) 机器模型(Machine Model, MM):主要模拟一些体积较大的静电带电体,如汽车、机械臂及一些大的绝缘导体的放电情形,又称为日本模型。根据文献[5],试验中取  $C=200\text{ pF}$ , $R=3\ \Omega$ 。

### 2.3 试验方法

参照美军标<sup>[8]</sup>中关于人体模型电压值的规定,试验时人体模型和人体-金属模型电压值均取为  $25\text{ kV}$ 。机器模型所模拟的静电危险源由于静电易于泄露,一般所带电压值较低,但在接地不良等情况下其仍有可能带有较高静电电压,考虑这些危险情况同时也为了便于实验对比,将机器模型放电时的电压也取为  $25\text{ kV}$ 。

试验时,首先选取一种 ESD 模型的放电网络,充电电压  $25\text{ kV}$ ,然后采用放电枪对试样分别进行脚-脚和脚-壳两种方式的接触式静电放电测试。其中脚-脚方式放电时两根脚线分别连接两个放电电极;脚-壳方式放电时先将两根脚线合并后连接一个放电电极,电爆管壳体连接另外一个放电电极。测试完成后,更换另外

一种 ESD 模型再进行试验。每一种 ESD 模型条件均采用 20 发发电爆管,其中脚-脚和脚-壳两种放电方式各 10 发。

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验结果

表 1 所示为采用不同 ESD 模型对电爆管进行静电安全性测试获得的实验结果,试验环境条件为:温度  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度 30%。

由表 1 可见,在不同 ESD 模型条件下,脚-脚(pin-pin)放电时 40 发电爆管试样均未发火;而在脚-壳(pin-shell)放电时,采用机器模型对被测电爆管试样进行静电放电刺激后,10 发中有 6 发发火,其余放电模型条件下电爆管均未发火。

表 1 不同静电放电模型电爆管安全性测试结果

Table 1 Safety test results of electric squib with different ESD models

ESD model	circuit parameters	ESD pattern	test number / fire number
HBM (Sandia standard)	25 kV, 600 pF, 500 $\Omega$	pin-pin pin-shell	10/0 10/0
HBM (Electric Explosive Device)	25 kV, 500 pF, 100 $\Omega$	pin-pin pin-shell	10/0 10/0
BMM	25 kV, 150 pF, 330 $\Omega$	pin-pin pin-shell	10/0 10/0
MM	25 kV, 200 pF, 3 $\Omega$	pin-pin pin-shell	10/0 10/6

### 3.2 脚-脚放电方式 ESD 结果分析

当静电放电作用于电爆管脚-脚之间时,可以简化为电容放电引燃电火工品的问题。由于静电放电时间极短,一般在几百纳秒到几个微秒,桥丝热量几乎来不及向外扩散,可以忽略热损失;同时,由于放电时间常数远小于发火时间,因此计算时可认为电容全部能量是按串联电阻与桥丝电阻的比值分配到桥丝中<sup>[4]</sup>。静电对电爆管脚-脚方式放电时的等效电路如图 2 所示。

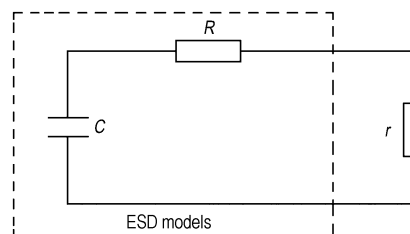


图 2 静电放电等效电路图

Fig.2 Electrical-equivalent circuit of ESD

则静电放电作用在桥丝上的能量  $E_w$  为<sup>[5]</sup>:

$$E_w = E_c \frac{r}{R+r} = \frac{1}{2} C U^2 \frac{r}{R+r} \quad (1)$$

式中,  $R$  为 ESD 模型采用的电阻值,  $\Omega$ ;  $C$  为 ESD 模型采用的电容值,  $F$ ;  $r$  为被测电爆管的桥丝电阻值,  $\Omega$ ;  $U$  为静电放电电压,  $V$ ;  $E_c$  为电容器贮存能量,  $J$ 。

作用在桥丝上的静电放电能量导致桥丝升温, 其温度升高值与能量关系式为<sup>[7,9]</sup>:

$$\Delta T = \frac{1 + \lambda \Delta T}{c \rho L A} E_w \quad (2)$$

式中,  $\Delta T$  表示桥丝从 20 °C 起始的温度升高值, °C;  $\lambda$  为桥丝电阻的温度系数, °C<sup>-1</sup>;  $c$  为桥丝比热容,  $J \cdot g \cdot ^\circ C^{-1}$ ;  $\rho$  表示桥丝材料密度,  $g \cdot mm^{-3}$ ;  $L$  为桥丝长度,  $mm$ ;  $A$  为桥丝横截面积,  $mm^2$ 。

由公式(1)、(2)可计算得到不同 ESD 模型作用在桥丝上的能量值以及由此引起的桥丝温度值。计算采用的参数见表 2<sup>[9]</sup>, 计算结果见表 3。

表 2 公式(1)与(2)的计算参数

Table 2 Calculation parameters for equation (1) and (2)

$\lambda/^\circ C^{-1}$	$c/J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	$\rho/g \cdot mm^{-3}$	$L/mm$	$A/mm^2$	$r/\Omega$
0.00013	0.12	0.0082	6.0	0.00503	1.0

表 3 不同静电放电模型条件桥丝温度计算结果

Table 3 Calculated temperature of bridge wire with different ESD models (pin-pin)

ESD model	$E_c/mj$	$R/\Omega$	$E_w/mj$	$T/^\circ C$
HBM(Sandia standard)	187.5	500	0.37	32.4
HBM(Electric Explosive Device)	156.3	100	1.55	71.8
BMM	46.9	330	0.14	24.7
MM	62.5	3	15.63	514.5

由表 3 可见, 虽然两种人体 ESD 模型作用时电容贮存能量最大, 但由于其放电电阻同样较大, 实际作用在电爆管桥丝上的能量并不大, 分别为 0.37 mJ 和 1.55 mJ, 由此引起的桥丝温度分别为 32.4 °C 和 71.8 °C。人体-金属 ESD 模型由于电容贮存能量最小而放电电阻又较大, 静电放电消耗在桥丝上的能量仅为 0.14 mJ, 桥丝温度值为 24.7 °C。而机器模型由于放电电阻最小, 静电放电消耗在桥丝上的能量也最大, 为 15.63 mJ, 桥丝温度可达到 514.5 °C。分别选取桥丝上作用能量最小的人体-金属模型和作用能量最大的机器模型对被测电爆管进行静电放电作用, 并对放电前后的桥丝电阻值进行对比, 结果如图 3 所示。由

图 3 可知, 人体-金属模型由于作用在桥丝上的能量最小, 桥丝温度很低, 静电放电作用几乎未对试样的桥丝电阻值产生影响。机器模型放电由于作用在桥丝上的能量大, 桥丝温度高, 高温作用导致桥丝电阻值减小<sup>[10]</sup>, 电爆管桥丝电阻值减小率均在 2.1% 以内。上述实验结果从一定程度上验证了计算结果。

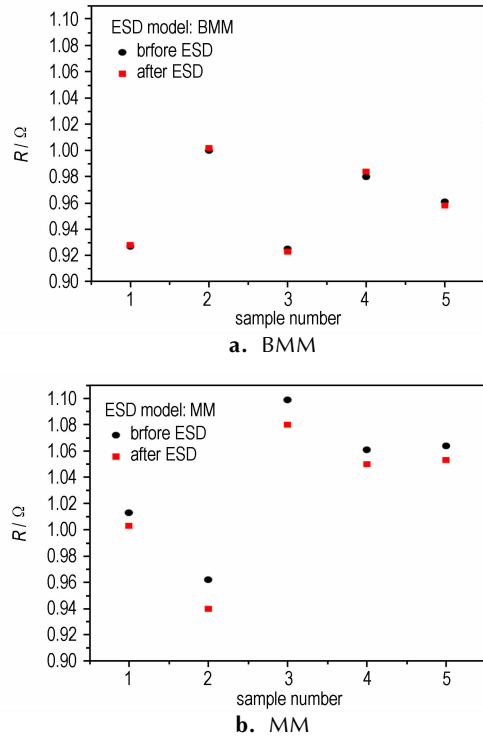


图 3 不同静电放电模型作用前后电爆管桥丝电阻值对比

Fig. 3 Contrast of bridge wire resistance before and after different ESD action

静电放电作用下被测电爆管发火过程一般为, 电流通过桥丝按焦耳-楞次定律产生热量, 桥丝在近似绝热条件下升温, 热量传给药剂, 使其发生化学反应, 炸药发生化学反应释放热量使药剂继续升温, 当药剂温度达到爆发点并能自持反应时电爆管发火。电爆管点火药中 Al 粉和 Zr 粉的发火点温度分别约为 780 °C 和 400 °C,  $KClO_4$  的分解温度为 610 °C<sup>[9]</sup>。与表 3 的数据对比可知, 人体以及人体-金属模型由于静电放电作用在桥丝上的能量值较小, 桥丝温度值很低, 几乎不会对药剂产生影响, 一般也难以对电爆管的安全性造成威胁。机器模型静电放电时桥丝温度值虽然高于点火药中 Zr 粉的发火点温度, 可能导致部分药剂发生化学反应放热, 但由于其放电时间极短, 药剂在未达爆发点时放电已结束, 桥丝开始冷却使得热损失增大, 药剂反应难以自持, 这可能是电爆管最终也未发火的主要

原因。图 4 所示为电爆管中点火药经机器模型放电刺激后的 CT 照片,从图中并未观察到静电放电对桥丝周围的药剂(图 4 圆圈内)产生可见影响,这和上述分析结果是一致的。

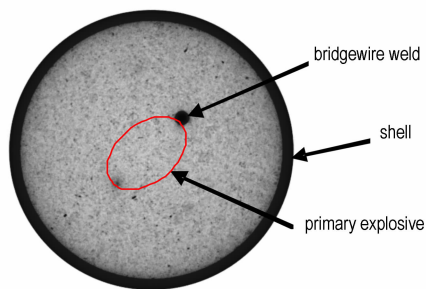


图 4 机器模型静电放电作用后电爆管点火药 CT 图

Fig. 4 CT picture of primary explosive in electric squib after machine model ESD

### 3.3 脚-壳方式 ESD 结果分析

被测电爆管压敏电阻工作原理为,在正常工作电压时,压敏电阻呈现高电阻状态,只能通过微安数量级的很小泄漏电流,以保证电爆管的可靠作用。当静电放电电压大于其压敏电压时(约 300 V),压敏电阻立即转变为低电阻状态,通过的电流急剧增大,此时静电放电的能量转化为电阻体的热能,静电放电的浪涌电压以放电电流的形式被压敏电阻所吸收,从而使电爆管脚壳间的电压远低于其击穿电压,起到分流和过压保护作用。因此,在压敏电阻有效的情况下,电爆管脚壳间静电放电不会造成其发火。然而根据表 1 的测试结果,采用机器模型对电爆管脚壳间进行放电作用时,10 发电爆管中有 6 发都发生了点火,原因分析如下。

由于静电放电过程中压敏电阻为低电阻导通状态,其电阻值与 ESD 模型的放电电阻相比可忽略不计,由此采用放电电阻  $R$  和电容  $C$  的乘积可估算得到不同静电放电模型的放电时间常数  $\tau$ ,并将电容贮存能量与放电时间常数相比,得到不同 ESD 模型的放电功率,结果见表 4。

表 4 不同静电放电模型放电功率计算结果

Table 4 Calculated power of different ESD models(pin-shell)

ESD model	$E_c$ / mJ	$\tau$ / ns	$P$ / MW
HBM(Sandia standard)	187.5	300	0.63
HBM(Electric Explosive Device)	156.3	50	3.13
BMM	46.9	49.5	0.95
MM	62.5	0.6	104.17

Note:  $E_c$  is capacitor stored energy;  $\tau$  is discharge time constant;  $P$  is discharge power.

根据表 4 结果,机器模型电容贮存能量值虽较小,但由于放电时间极短(0.6 ns),故其电路放电功率远大于其他 ESD 模型。此外,从测试获得的不同 ESD 模型的放电电流波形来看(图 5),相同放电电压条件下,机器模型的放电电流峰值比人体模型和人体-金属模型都要大。机器模型静电放电的电流和功率均超过了压敏电阻的额定使用范围,压敏电阻在短时间内经受较大的电流注入,并有较大的静电放电能量转化为电阻体的热能,这可能导致压敏电阻过热失效,甚至发生击穿或烧毁等情况。当压敏电阻的失效模式为开路时,静电放电在电爆管脚壳间产生电火花,引燃电爆管装药并导致其发火。当压敏电阻的失效模式为短路时,由于电爆管脚壳间不产生静电放电火花所以不会发火,这可能是部分电爆管未发火的原因,但其作用可靠性可能受到影响。

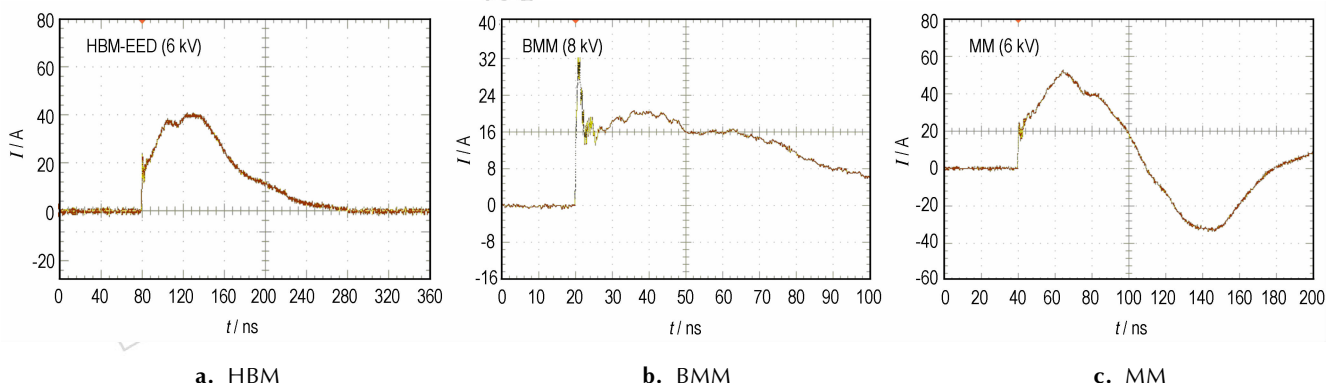


图 5 不同静电放电模型典型放电电流波形

Fig. 5 Typical current waveform of different ESD models

## 4 结 论

(1) 在 25 kV 条件下, 人体模型 (Sandia 标准人体模型、火工人体模型)、人体-金属模型和机器模型静电放电作用在电爆管桥丝上的能量值分别为 0.37, 1.55, 0.14 mJ 和 15.63 mJ, 由此引起的桥丝温度分别为 32.4, 71.8, 4.7, 514.5 °C。由于不同 ESD 模型作用在桥丝上的能量有限, 桥丝温升较小, 且放电时间较短, 难以引起点火药的自持反应, 被测电爆管脚-脚方式的静电放电一般比较安全。

(2) 计算结果表明, 脚壳静电放电时机器模型放电功率高达 104.17 MW, 更易造成电爆管发火。分析认为, 压敏电阻发生开路失效是导致被测电爆管发火的主要原因。

### 参考文献:

- [1] 齐杏林, 刘尚合. 电火工品人体静电放电实验进展研究[J]. 火工品, 1997(2): 40-43.  
QI Xing-lin, LIU Shang-he. Development of HBESD testing of EEDs[J]. *Initiators & Pyrotechnics*. 1997(2): 40-43.
- [2] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 83-98.  
WANG Kai-min, WEN Yu-quan. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems[M]. Beijing: National defense industry press, 2006: 83-98.
- [3] Asay B W. Shock wave science and technology reference library, Vol. 5: Non-shock initiation of explosives[M]. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2009: 595-596.
- [4] 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: 185-194.  
LIU Shang-he, WEI Guang-hui, LIU Zhi-cheng, et al. Theory and protection of ESD[M]. Beijing: Weapon industry publishing company, 1999: 185-194.
- [5] 魏光辉, 国海广, 孙永卫. 电火工品静电安全性评价方法研究[J]. 火工品, 2005(2): 21-24.  
WEI Guang-hui, GUO Hai-guang, SUN Yong-wei. Research on the evaluation method of electrostatic safety for electric explosive device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*. 2005(2): 21-24.
- [6] Michael J W. Projected response of typical detonators to electrostatic discharge (ESD) environments [R]. UCRL-ID-145642. 2002.
- [7] Fisher R J. A severe human model for safety and high reliability system qualification testing in sandia national laboratories [R]. SAND-89-0194C. 1989.
- [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: 219-224.  
CAI Rui-jiao. Design principle of detonators[M]. Beijing: BIT press, 1999: 219-224.
- [10] 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.

## Safety of Electric Squib in Different Electrostatic Discharge Environments

LI Zhi-peng<sup>1</sup>, Lü Zi-jian<sup>1</sup>, LONG Xin-ping<sup>2</sup>, WEN Wen<sup>1</sup>, LI Zhen-feng<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to assess the safety of a electric squib in different electrostatic discharge (ESD) environments, Human-Body model (HBM), Body-Machine model (BMM) and Machine model (MM) were used to study the safety of the electric squib using two discharge ways of pin-pin and pin-shell with 25 kV discharge voltage. Results show that the decrease of bridge wire resistance is less than 2.1% when ESD is applied to pin-pin, and none of the 40 electric squib samples is ignited. The calculated discharge power of MM model is 104.17 MW, and 6 of 10 samples are ignited when ESD is applied to pin-shell. The analysis indicates that the safety of electric squib in different ESD models is determined by the power and the electric current of ESD, and the open circuit of varistor is the main reason for electric squib samples igniting.

**Key words:** safety; electrostatic; electric squib; electrostatic discharge (ESD) model

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.05.013