

文章编号: 1003-1480 (2021) 06-0018-05

典型桥丝式电火工品静电危害影响分析

姚洪志^{1,2}, 李 瑞¹, 赵 团¹, 纪向飞¹, 任小明¹

(1. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061; 2. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安, 710071)

摘 要: 为开展典型桥丝式电火工品静电放电危害分析, 对基于人体-火工品静电放电模型进行分析, 通过数值计算方法探讨了电火工品脚-脚模式静电放电产生的桥丝热响应规律, 并通过试验获得典型桥丝式电火工品静电放电阈值边界; 利用电火工品简化结构模型以及 Ansoft Maxwell 软件, 仿真获得脚-壳模式下静电场分布规律, 并开展试验研究探索电火工品静电击穿特性。此外, 针对脚-脚及脚-壳两种危害模式提出了典型桥丝式电火工品静电放电作用机制。

关键词: 电火工品; 静电放电; 模型; 危害模式

中图分类号: TJ450.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.06.005

Analysis of the Electrostatic Hazards of Typical Bridge Wire Electro-Explosive Devices

YAO Hong-zhi^{1,2}, LI Rui¹, ZHAO Tuan¹, JI Xiang-fei¹, REN Xiao-ming¹

(1. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, 710071)

Abstract: To carry out the electrostatic hazards analysis of typical bridge wire electro-explosive devices (EEDs), the electrostatic discharge model of human body to electro-explosive devices was analyzed, the thermal response law of bridge wire generated from pin to pin mode electrostatic discharge of EEDs was discussed through numerical calculation method, and the electrostatic discharge threshold boundary of typical bridge wire EEDs was obtained by experiments. Meanwhile, using the simplified structural model of EEDs and Ansoft Maxwell software, the distribution law of electrostatic field under the pin to case mode of EEDs was simulated, and experimental research was also carried out to explore the electrostatic breakdown characteristics of EEDs. In addition, the electrostatic discharge mechanism of typical EEDs under two hazard modes of pin to pin and pin to case was proposed.

Key words: Electro-explosive devices; Electrostatic discharge; Model; Hazard mode

在火工品的生产、储存、运输、装配、使用等过程中, 人体静电是最常遇到的危险源。在民用、军事领域通常用人体-火工品静电放电实验系统, 模拟研究人体静电放电对火工品的损伤机理、失效模式、作用过程以及危害分析^[1]。其目的是为了检验火工品在经受某一给定能量刺激水平的模拟静电放电作用后是否会发火或者性能降低, 以评价火工品的静电安全性, 为电火工品的生产、使用中的静电防护安全设计

提供数据。

关于火工品人体静电放电试验的方法国内外均有相关工业标准和军用标准, 其中包括国军标 GJB 5309.14-2004 火工品静电感度试验^[2]、美军标 MIL-DTL-23659F 2010 电起爆器通用设计规范, 以及国家标准 GBT 8031-2005 工业电雷管^[3]等, 但有关危害分析方法的研究涉及较少。本文针对电火工品脚-脚模式以及脚-壳模式的静电放电, 开展火工品静电放电

收稿日期: 2021-08-05

作者简介: 姚洪志 (1982-), 男, 研究员, 从事先进火工品电磁环境效应研究。

危害分析研究,为火工品静电防护设计和静电危害分析提供理论支撑和基础数据。

1 人体-火工品静电放电模型

1.1 人体-火工品静电放电系统

人在运动行走、操作或与其它物体紧密接触又分离(摩擦)时,人体(包括衣服)会带上静电。如果穿着电阻率较高的绝缘底鞋,则静电在人身上将保持较长时间,这时的人体与大地之间就相当于一个充电的电容器,人体与大地之间的电压就被称为人体静电电压,既以大地电位为参考点,将人体对大地的电位称为人体静电电位。当带电的人体与大地之间构成放电回路时,人体如同储能电容器一样,将释放静电能量。

人体-火工品静电放电模型可采用RLC电路来表示,在火工品人体静电放电相关标准中对人体-火工品静电放电模型进行了规定:其中人体等效电容500pF,等效电阻5kΩ,等效电感不大于5μH,人体静电电位极限值为25kV。其等效电路原理图如图1所示。

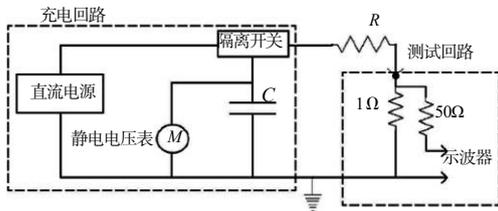


图1 人体静电放电电路原理图

Fig.1 Principle diagram of the human body electrostatic discharge circuit

图2为典型人体-火工品模型静电放电电流,其对静电放电系统输出电流进行限定。

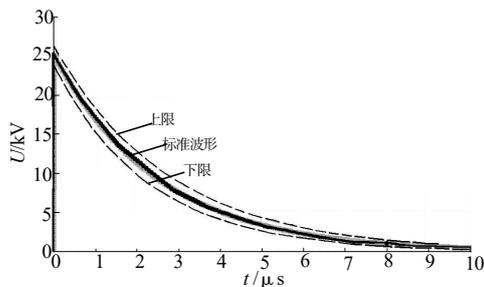


图2 典型人体-火工品模型放电电流

Fig.2 Typical discharge current of human-EED model

图2中当1Ω校准电阻上获得的电压在限定曲线之内时,说明静电放电系统满足检测基本要求。当1Ω校准电阻上获得电压曲线超出限制范围时,则该测试系统需要进行重新调校。

1.2 火工品静电放电模式

典型电火工品结构如图3所示,当静电电位足够高或静电能量足够大时,静电可以通过以下危害模式造成火工品的作用失效或意外发火。以桥丝式电火工品为例,静电放电(ESD)对桥丝式电火工品的危害作用模式主要有2种:(1)脚线与脚线间危害模式,如图4(a)所示,静电能量通过桥丝式电火工品两根脚线和桥丝构成的放电回路发生电热转换,导致药剂发生可燃剂氧化、溶解、热分解或发火;能量小时会使桥丝发生氧化、熔化、颈缩和熔断;能量大时会使火工品发火。该模式下静电产生的电流流经火工品桥丝,因此脚线与脚线危害模式的分析更多基于电路理论以及电热转换理论。(2)脚线与外壳间危害模式,如图4(b)所示,静电能量通过火工品脚线与金属壳体之间绝缘强度薄弱环节形成放电通道,发生电击穿,导致药剂的热分解或发火,此种模式下静电产生电流主要部分不流经火工品换能元,因此不会产生热效应。这种模式的危害分析主要基于电磁场理论。

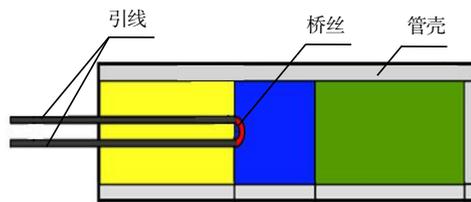


图3 电火工品简化模型

Fig.3 Simplified model of EED

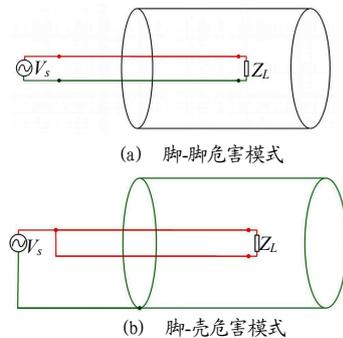


图4 电火工品静电危害模式

Fig.4 Electrostatic hazard model of EED

2 脚-脚危害模式

当静电能量作用于电火工品时，静电放电电流流经桥丝，将电能转化为桥丝热能，桥丝温度升高，致使药剂被加热。根据能量大小的不同，药剂会发生不同的变化，从而对电火工品的性能产生影响^[4]。

在脚-脚模式静电放电过程中，放电回路参数对电火工品获得的能量影响很大，静电放电等效电路如图5所示。

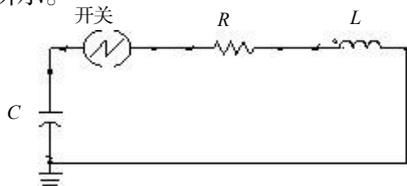


图5 静电放电回路等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of ESD circuit

当放电回路开关导通时，整个回路可用基尔霍夫电压定律来进行分析，则此时的回路方程为：

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_0 \quad (1)$$

式(1)中： i 为回路电流； u_0 为电容初始电压； R 为放电回路串联电阻和负载电阻之和， Ω ； L 为放电回路电感与负载电感之和， H ； C 为放电回路与负载电容之和， F 。

求解上述二阶微分方程可获得静电放电回路中的电流，或者通过PSPICE软件获得静电放电火工品获得的静电放电电流。

人体-火工品模型静电电流作用时间短，一般约为 $10\mu s$ ，远小于火工品的热响应时间，因此可以看作绝热响应进行研究，进而获得桥丝温升与静电放电电流的对应关系^[5]：

$$\Delta T = \frac{\rho(1 + \tau \Delta T)}{cDS^2} \int_0^t I^2 dt \quad (2)$$

式(2)中： ΔT 为温升数值， $^{\circ}C$ ； I 为电流， A ； t 为作用时间， s ； c 为比热容， $J \cdot g^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ； D 为桥丝密度， $g \cdot cm^{-3}$ ； ρ 为桥丝电阻率， $\Omega \cdot m$ ； S 为桥丝横截面积， m^2 ； τ 为桥丝材料温度系数， $^{\circ}C^{-1}$ 。

根据公式(2)，在典型火工品脚-脚模式下，25kV静电电压时火工品桥丝上的温度随时间的变化规律

如图6所示。由图6可以看出，在脚-脚模式静电放电情况下，火工品桥丝温度快速达到最大值，这个时间小于火工品自身的热响应时间，在热力学响应上属于绝热响应。对火工品脚-脚模式进行静电放电试验，试验结果见表1，由表1可以看出在静电电位17.8kV时，实验用火工品就出现了发火，同时其消耗能量远小于直流发火所需电能，也间接验证了其绝热响应的作用机理。对于典型火工品，脚-脚模式静电放电可以获得足以触发火工品作用的静电能量。

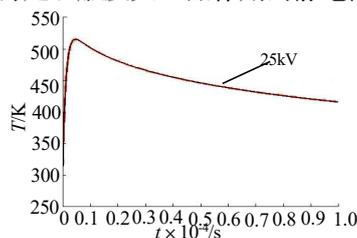


图6 脚-脚模式静电放电桥丝温度变化规律

Fig.6 Temperature variation of bridge wire for ESD under pin to pin mode

表1 典型火工品脚-脚静电放电试验数据

Tab.1 Test data of typical EED(pin to pin mode)

序号	静电电位/kV	发火	桥丝消耗能量 $\times 10^{-4}J$
1	18.5	1	1.56
2	17.8	1	1.47
3	17.4	0	1.06
4	17.6	0	1.28
5	18.0	1	2.03

注：1表示发火；0表示未发火。

对于满足1A1W的火工品，脚-脚静电放电桥丝上获得的静电能量通常不会导致其发火或爆炸。但脚-脚模式静电放电作用后，其桥丝会发生细微的变化。图7为经20kV静电多次作用前后桥丝的变化情况，通过分析发现桥丝局部发生了氧化反应，同时桥丝由弯曲状态转化为拉直状态。

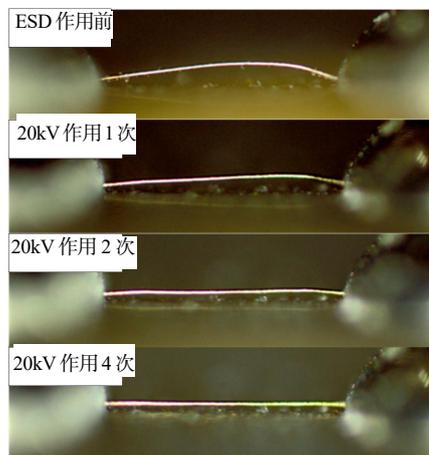


图7 静电作用前后桥丝变化情况

Fig.7 Changes of bridge wire after electrostatic discharge

由2种火工品静电放电试验,可以看出火工品脚-脚模式静电放电危害分为两种:一种是当脚-脚输入静电能量足够大时,电火工品意外发火,与之相对应,可以用在电容值和回路电阻都不变的条件下的静电临界发火电压来表征使电火工品发火所需的静电放电能量刺激水平,该表征参量可以用来定量评价火工品在脚-脚静电放电下的安全性;另一种脚-脚静电危害是脚-脚输入的静电能量不足以使电火工品发火,但静电能量使桥丝电阻发生变化,或者使桥丝药剂接触状态发生变化,进而导致火工品发火性能发生变化,因此,可以通过监测静电放电前后电阻变化以及桥丝、药剂外观形貌变化来表征和研究这种危害。

3 脚-壳危害模式

当静电作用于火工品脚-壳之间时,会在脚-壳之间产生较强的电场,当电场强度大于介质的击穿强度时,就会发生击穿,被击穿的介质可能是空气、药剂或者脚-壳间的绝缘介质。火工品装药一般都混有少量空气,对于不同装药(击穿强度不同)以及装药密度(空气隙数量、大小不同)有两种危害形式:(1)静电沿炸药表面的空气击穿后形成电火花,只要火花能量足够就能使炸药表面击穿或直接引爆炸药;(2)炸药表面的空气首先击穿后炸药击穿,形成高能量火花通道引爆炸药。

3.1 气体击穿

在大气中总是有少数正负电子,在空气隙两端施加小电压时空气中会出现很小的电流。当电压达到一定的数值时,将引起电流的骤然增大,空气隙突然地失掉绝缘性能而被击穿。这种击穿一般发生于火工品底部,也就是火工品引线进入电极塞部分处,因为此处为空气与电极塞介质交界处,另外,多数火工品此处引线与管壳间的距离较短。

3.2 电介质击穿

对于火工品来说电介质主要由火工药剂组成,静电作用时电场将能量传给火工药剂,使其内部发生变化,从而失去介电特性。多数情况下,当管壳与桥丝

焊点间的电场强度超过了介质的极限值,则电击穿发生;在强电场作用下,电极塞或者火工药剂中的自由电子高速碰撞游离,造成电子束数剧增,进而使火工药剂晶格结构被破坏,导致火工药剂发生化学反应。

由于火工品脚-壳间静电场分布的研究属于特定结构体内的静电场分析,因此,本文采用 Ansoft Maxwell 软件作为火工品脚-壳静电场研究的手段,建立的典型火工品脚-壳仿真模型如图8所示。图8中管壳上电势为0kV,引线端电势为25kV,脚壳间的主要介质为典型火工药剂。通过仿真分析获得电场强度分布,如图9所示,可见电场主要集中于引线与管壳直线距离最近处。

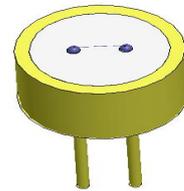


图8 火工品脚-壳模式仿真分析模型

Fig.8 Simulation analysis model of EEDs under pin to case mode

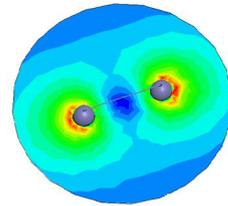


图9 脚-壳间火工药剂电场强度分布图

Fig.9 Electric field intensity distribution of EEDs under pin to case mode

对典型火工品脚-壳模式进行试验,试验结果表明:静电击穿位置具有随机性,对于同一个样品,同一放电电压下火花在电极塞的正面、背面的脚壳间随机出现。放电电压较高时,击穿位置一致性较好。火花有的较大,呈团状、白蓝色;有的呈黄白色、也呈团状;有的是细窄直线状。试验过程中静电放电过程的高速摄影影像如图10所示。

脚-壳模式静电放电对电火工品的危害是由于静电放电使脚-壳间介质发生击穿而造成的。当静电击穿发生于含有药剂的危险通道且能量足够高时将有可能使药剂发火。因此,可以用脚-壳间危险通道和泄放通道的击穿电压,以及介电常数作为脚-壳静电

危害以及防护的表征量。脚-壳间进行静电放电试验得到火工品发火的静电电压，称之为脚-壳静电放电临界发火电压，结合脚-壳间材料的特征介电常数是否变化，可表征火工品由于脚壳间静电放电而发火的难易程度。



图 10 脚-壳静电放电产生的电弧
Fig.10 Arc of ESD (pin to case mode)

4 结论

针对桥丝式电火工品进行了脚-脚、脚-壳两种模式静电放电危害分析方法研究，获得如下结论：

(1) 脚-脚模式静电放电危害分析方法主要基于电路理论，该模式下火工品静电响应与流经桥丝的静电电流、桥丝材料、火工药剂等因素相关。明确了从静电放电电流、桥丝电热响应到火工药剂化学作用的

危害过程，为火工品脚-脚模式的静电防护方法研究提供了依据。

(2) 脚-壳模式静电放电危害分析方法基于 Ansoft Maxwell 仿真软件，其电场主要分布于桥丝焊点与管壳直线距离最小的区域内。桥丝焊点与管壳最小距离以及火工药剂的介质耐压 2 个因素决定了脚-壳静电放电特性，为火工品脚-壳模式静电防护设计提供了依据。

参考文献：

- [1] 刘尚合,宋学君.静电及其研究发展[J].自然杂志,2007,29(2): 63-69.
- [2] GJB 5309.14-2004 火工品试验方法第 14 部分:静电放电试验[S].国防科技技术工业委员会,2004.
- [3] GB/T 8031-2005 工业电雷管[S]. 中国国家标准化管理委员会,2005.
- [4] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M].北京:北京理工大学出版社, 1999.
- [5] 于鸿源,严楠,陈树肖,王洪波.基于电路仿真的桥丝式电火工品静电危害预测[J].含能材料,2015,23(7):682-687.