

# 影响空气式静电放电特性的相关因素分析

原青云, 张希军, 刘尚合, 武占成

(军械工程学院静电与电磁防护研究所, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了提高静电放电特别是空气式静电放电试验结果的重复性, 从理论和试验两方面对影响空气式静电放电(ESD)特性的相关因素进行了研究, 结果表明: 电弧长度是影响空气式 ESD 特性的一个最直接因素, 不同电弧长度会得到差别很大的空气式 ESD 事件, 相同放电条件下, 电弧长度越短, 峰值电流越大, 上升时间越小; 其它条件一定的情况下, 电极的接近速度会影响到电弧长度而引入时间相关效应, 进而影响空气式 ESD 特性, 比如当放电电压一定时, 接近速度越快, 峰值电流越大, 上升时间越小; 不同的放电电极极性将产生空间极性效应或空间电荷效应, 从而影响空气式 ESD 特性; 不同的环境条件尤其是空气成分与空气湿度对空气式 ESD 的影响很大。这些研究成果将为空气式 ESD 的试验规律研究提供理论依据。

**关键词:** 静电放电 (ESD); 空气放电; 电弧长度; 接近速度; 极性; 湿度; 放电电流; 上升时间; 耦合电压  
**中图分类号:** O441      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-6520(2010)10-2500-07

## Analysis on the Relative Factors Affecting the Characteristics of Air Electrostatic Discharge

YUAN Qing-yun, ZHANG Xi-jun, LIU Shang-he, WU Zhan-cheng

(Electrostatic & Electromagnetic Protection Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to improve the repeatability of electrostatic discharge(ESD), the factors that affect the characteristics of air discharge were studied. Results show that the arc length is the most immediate factor, different arc length could cause different air discharge events; under the same discharge condition, the shorter the arc length is, the larger the peak current and the shorter the rise time will be; when other experimental conditions are constant, the electrode approaching speed will affect the arc length, and then affect the characteristics of air discharge, e. g., when the discharge voltage is constant, the faster the approaching speed is, the larger the peak current and the shorter the rise time will be; different discharge polarity will cause space polarity effect or space charge effect, and the characteristics of air discharge are affected; different environment conditions especially the air component and humidity will greatly affect the characteristics of air discharge. Those results can provide a certain theoretical base for studying the experimental rules of air discharge.

**Key words:** electrostatic discharge(ESD); air discharge; arc length; approaching speed; polarity; humidity; discharge current; rise time; induced voltage

## 0 引言

空气式静电放电(ESD)是指在使用 ESD 模拟器对被测物体进行测试时, 使模拟器的放电电极逐渐接近被测物体, 直到电极和被测物体之间形成击穿通道导致放电发生为止。由于空气式 ESD 涉及到外部火花通道的形成过程, 温度、湿度、放电电压的大小与极性、模拟器放电电极接近被测物体的速度等因素都会引起放电过程的显著变化, 因此, 这种方式的放电重复性极差。所以早在 20 世纪 90 年

代, 标准规定的试验方式就从空气式放电方式改为接触式放电方式以避免空气式放电时电弧长度对试验结果的影响<sup>[1]</sup>, 从而提高测试结果的重复性。但是, 空气式 ESD 是实际工程技术和生活环境中出现概率最大的放电现象, 也是对电子器件和设备造成损伤或干扰的最主要方式之一, 是电子工业迫切需要解决的一个重要问题。因此, 对影响空气式 ESD 特性的相关因素的研究将为空气式 ESD 的试验规律研究提供理论依据。而后者的研究对于建立 ESD 抗扰度试验新方法、新试验平台具有非常重要的意义。本文通过仿真和试验对影响空气式静电放电特性的相关因素, 比如电弧长度、电极接近速度、环境温、湿度及电极极性等进行了分析, 目的是为探索具有重复性好的空气式静电放电抗扰度试验方法提供理论指导。

基金资助项目: 国家自然科学基金(10927506; 60971042; 60871066)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(10927506, 60971042, 60871066).

## 1 空气式 ESD 击穿规律

根据帕邢定律,均匀场中空气静态击穿电压  $U$  与放电弧长  $d$  的关系可表示为<sup>[2]</sup>

$$U = 25.4d + 6.64\sqrt{d} \quad (1)$$

式中,  $U$  的单位为 kV;  $d$  的单位为 cm。

相应的击穿场强  $E$ (单位为 kV/cm)为

$$E = U/d \quad (2)$$

研究表明:当带电体接近接地导体时,随着二者之间距离的缩短,它们之间的场强也逐渐增强。根据式(1)和(2)可得,当间隙上的电压或场强达到静态击穿电压或场强时,击穿就会发生。但是,对于大多数空气式放电来说,由于能够参与电离碰撞的自由电子少,间隙击穿并不是发生当场强达到静态击穿场强这一时刻,而是在一段时间延迟后才会发生。因此,间隙击穿可以分为(至少)两个阶段:初始阶段和击穿阶段。与之相对应的延迟时间可分为统计时间延迟和击穿形成时间延迟<sup>[2,3]</sup>。统计时间延迟是指带电体与接地导体之间的场强达到静态击穿场强时刻与实际击穿发生时刻二者之间的时间间隔,它主要受空气湿度、光电效应、阴极效应和场致发射等因素的影响。击穿形成时间延迟是指击穿开始时刻与间隙击穿完成时刻二者之间的时间间隔,其主要受放电电压和电弧长度等因素的影响。对于多数 ESD 结构来说,统计时间延迟可长达数百个 ms 甚至数 s<sup>[2,4,5]</sup>,而击穿时间延迟一般要比统计时间延迟小几个数量级<sup>[3]</sup>。

多数情况下的 ESD 事件可用“针-板”电极来模拟。“针-板”电极以带电人体手持头部为圆型金属工具(以下简称针电极)与金属板之间的 ESD 事件为例来说明气体间隙被击穿过程中电场的变化情况。图 1 给出了在接近速度一定的情况下,针电极接近金属板时发生 ESD 的示意图。图 2 给出了针电极接近金属板过程中间隙击穿场强随时间的变化示意图。

从图 2 可以看出,击穿场强随时间的变化分为 3 个区段:

在区域 a,随着针电极的移动,针电极与金属板之间的气体间隙逐渐缩短,场强逐渐增大。但由于间隙击穿场强仍小于帕邢击穿场强值,因此放电没有发生。

在区域 a 和 b 的过渡段,间隙击穿场强达到了帕邢击穿场强值,这是放电可能会发生。

在区域 b,气体间隙进一步减小,此时,间隙击穿场强大于帕邢击穿场强值,放电应该发生。但由于缺少足够的能够触发击穿的自由电子,因此放电

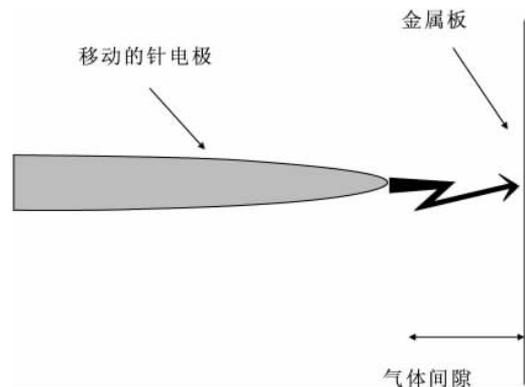


图 1 针电极与金属板之间火花击穿示意图

Fig. 1 Sketch of spark breakdown between the electrode and metallic surface

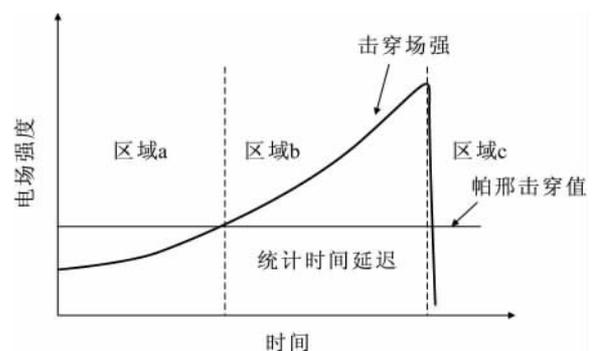


图 2 “针-板”电极间击穿电场随时间的变化曲线

Fig. 2 Change of breakdown  $E$  field between “needle-plate” with time

并没有发生,针电极继续向金属板移动,直到放电发生。这段时间称为“时间延迟”或“统计时间延迟”。在这段时间内,随着针电极逐渐靠近金属板,两电极之间的间隙距离进一步缩短,场强进一步增强。

在区域 b 和 c 的过渡段,放电就会发生。

在区域 c,针电极继续靠近金属板,但放电已经发生。

如果“统计时间延迟”比较大的话,那么在放电发生之前针电极会进一步靠近金属板,所以放电发生时,气体间隙变得更小、场强变得更大;当间隙被击穿时,场强越大,则放电电流越大,上升时间越小。

## 2 电弧长度对空气式 ESD 的影响

空气式 ESD 的电弧结构与放电电压的大小和极性、电极接近速度和环境条件等因素有关,这些因素对空气式 ESD 特性的共同作用通过电弧结构得以反映。

研究表明:在试验条件几乎相同的条件下,对于同一种带电体,即使在相同放电电压下进行静电放电,可能得到差别很大的 ESD 事件,这种差别主要

是由电弧长度造成的<sup>[3]</sup>。但是无论哪种 ESD 事件,其电弧长度与 ESD 电流峰值和上升时间都存在着一定的函数关系,即电弧长度越短,上升时间越短,峰值电流越大;电弧长度越长,上升时间越长,峰值电流越小。文献[6]中给出了 5 kV 时,采用人体—金属模型得到的空气式 ESD 电流的上升时间和峰值电流与电弧长度的关系,即上升时间与电弧长度基本满足正比线性关系,峰值电流与电弧长度基本满足反比线性关系。

电弧长度与统计时间延迟有关。由于环境湿度、光电效应、场致效应、接近速度等因素都会影响到统计时间延迟,从而影响到电弧长度。由于统计时间延迟主要与空气环境湿度有关,不同湿度条件下的空气式 ESD 其时间延迟的变化范围可以达到几个数量级<sup>[3]</sup>。在潮湿的空气中,电子贴附到极性水分子上并在电极表面产生一个电子层,当间隙距离一达到帕邢值时击穿就被激发,时间延迟非常短,因此电弧长度较长;而在干燥的空气中,由于种子电子的延迟使得击穿间隙小于帕邢值,因此统计时间延迟较长,从而使得电弧长度较短。通过其他像紫外光辐照这样的方法也可以减少统计时间延迟,使电弧长度变长。

对空气式 ESD 电弧的深刻认识可以通过对电弧结构的建模来实现,同时利用电弧结构的模型可以对空气式 ESD 进行有效地模拟。在构建电弧模型时应该考虑以下两点标准<sup>[7]</sup>:一是多数 ESD 发生在相互靠近的物体之间,ESD 的电弧模型必须能够预测由电弧缩短引起的电流导数的巨大增加;二是模型应该对所有 ESD 电压和电弧长度有效,并且不采用任何在大多数电弧模型中使用的经验常数。目前已经有了很多的关于空气式 ESD 的电弧模型,如 Braginski 模型<sup>[8]</sup>、Renninger 有限扩散模型<sup>[9]</sup>、Rompe 和 Weizel 模型<sup>[2,9,10]</sup>、Toepler 模型<sup>[2,11]</sup>、 $t^3$ —模型<sup>[11-13]</sup>和电子雪崩模型<sup>[10,14]</sup>等。在所有的模型中,电流的上升时间都依赖于击穿场强值,即电弧长度和充电电压。只是每个模型中这种依赖程度是不同的<sup>[9]</sup>。根据以上标准通过比较利用这些模型得到的峰值电流和电流导数随电弧长度的变化曲线发现,只有 Rompe 和 Weizel 模型与电子雪崩模型能够对空气式 ESD 进行较好地模拟,其他模型的模拟效果较差<sup>[7]</sup>。

目前国际上普遍采用 Rompe 和 Weizel 模型(根据能量守恒理论)来计算瞬时电弧阻抗。假设通道导电率与耗散的欧姆能量成正比,则电弧阻抗为<sup>[2]</sup>

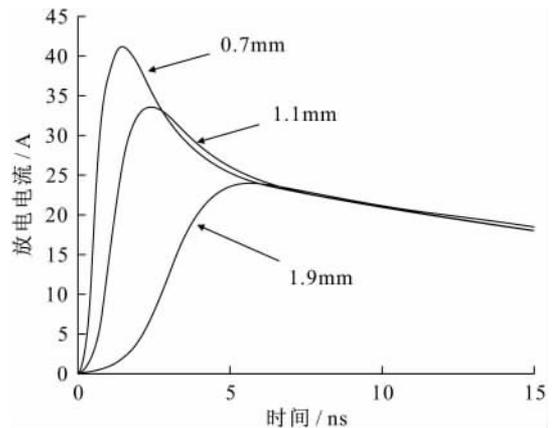


图3 不同电弧长度下的放电电流波形  
Fig. 3 Waveforms of discharge current measured under different arc lengths

$$R(t) = \frac{d}{\sqrt{2a \int_0^t i(\xi)^2 d\xi}} \quad (3)$$

式中, $R$ 为电弧阻抗, $\Omega$ ; $d$ 为电弧长度,cm; $a$ 为经验常数; $i$ 为放电电流,A。

基于 Rompe 和 Weizel 电弧阻抗模型编写了用于计算 ESD 放电电流的 PSPICE 文件程序,图 3 是利用此 PSPICE 文件程序得到的 8 kV 电压下,电弧长度分别为 1.9、1.1 和 0.7 mm 时前 15 ns 放电电流波形。从图中看出,不同电弧长度下得到的放电电流波形差别很大,电弧长度为 0.7 mm 时得到的放电电流峰值约是 1.1 mm 时电流峰值的 1.3 倍,是 0.9 mm 时电流峰值的 1.7 倍;0.7 mm 时放电电流的上升时间与 1.1 mm 时放电电流的上升时间之比约为 1:2,与 1.9 mm 时放电电流的上升时间之比约为 1:10。从这一点可以看出,电弧长度对 ESD 事件影响很大,所以在进行 ESD 抗扰度测试时,必须考虑到电弧长度对测试结果产生的影响。

### 3 电极接近速度对空气式 ESD 的影响

由于接近速度会影响到统计时间延迟,进而会影响到电弧长度。由于电弧长度与 ESD 事件密切相关,因此接近速度的改变也会对 ESD 事件产生重要的影响。比如,在均匀场中,当空气间隙  $d$  为 1.8 mm 时,由式(1)可得,当充电电压  $U$  达到 7.39 kV 时空气式放电就会发生。但由于缺少能够使空气击穿发生的自由电子,因此,放电可能被延迟一个统计时间延迟才会发生。假设统计时间延迟为 1.4 ms,带电体以接近速度 0.5 m/s 前进,当放电发生时,带电体在这段时间内移动的距离  $l$  为

$$l = 1.4 \text{ ms} \times 0.5 \text{ m/s} = 0.7 \text{ mm}. \quad (4)$$

此时,放电弧长  $d'$  为

$$d' = d - l = 1.8 \text{ mm} - 0.7 \text{ mm} = 1.1 \text{ mm}。 (5)$$

场强由原来的  $E$

$$E = 7.39 \text{ kV} \div 0.18 \text{ cm} = 41.1 \text{ kV/cm}。 (6)$$

变为  $E'$

$$E' = 7.39 \text{ kV} \div 0.11 \text{ cm} = 67.2 \text{ kV/cm}。 (7)$$

当接近速度为  $1.0 \text{ m/s}$  时,放电弧长  $d'$  为

$$d' = d - l = 1.8 \text{ mm} - 1.4 \text{ ms} \times 1.0 \text{ m/s} = 0.4 \text{ mm}。 (8)$$

场强由  $E = 41.1 \text{ kV/cm}$  变为

$$E' = 7.39 \text{ kV} \div 0.04 \text{ cm} = 184.8 \text{ kV/cm}。 (9)$$

由上例得出,带电体接近速度越快,电弧长度越短,放电能量越集中释放,从而得到上升时间更快的放电电流。因此,在其它条件一定的情况下,电极的接近速度会影响到电弧长度而引入时间相关效应,进而影响空气式 ESD 特性。

试验装置如图 4 所示。其中,示波器采用 Tektronix TDS7154B(带宽为  $1.5 \text{ GHz}$ ,采样频率为  $20 \text{ GHz}$ )数字存储示波器,ESD 模拟器采用日本生产的 ESS-200AX 型 ESD 模拟器,接近速度分别为  $0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  和  $1.0 \text{ m/s}$ ,室温控制在  $(26 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(33 \pm 2)\%$ ,半圆环天线距离电流靶的距离为  $36 \text{ cm}$ 。对每一个接近速度和放电电压的组合重复 20 次试验,然后求平均值。

图 5 和图 6 分别给出了不同放电电压下峰值电流和上升时间随接近速度的变化曲线。从图 5 和图 6 中看出,在放电电压一定的情况下,峰值电流和上升时间与接近速度呈现出很好的线性关系。由图 5 可得,峰值电流与接近速度成正变关系,即峰值电流随着接近速度的增大而增大。由图 6 可得,上升时间与接近速度成反变关系,即上升时间随着接近速度的增大而减小。由于上升时间直接反映了放电波形前沿的陡峭程度,而 EUT 特别是现代高速微电子器件对波形前沿最敏感,上升沿小的 ESD 干扰比峰值相同的上升沿大的 ESD 干扰对敏感设备造成的危害更大或更明显。提高电极接近速度能够有效地减少上升沿比较缓慢的电晕放电而更多地发生上升沿比较陡峭的火花放电,因此,对于空气式 ESD 来说,在放电电压一定的情况下,接近速度越快,上升时间就越短,对敏感设备造成的干扰就越强。

通过上述分析得出,电极接近速度对空气式 ESD 的影响对于实际的 ESD 抗扰度试验和防静电措施具有重要的意义。当带有静电特别是具有很高静电电位的人体手持金属工具接近敏感设备时,不同的接近速度可能会带来不同的结果。这暗示着在进行空气式 ESD 抗扰度试验时应选取合适的电极

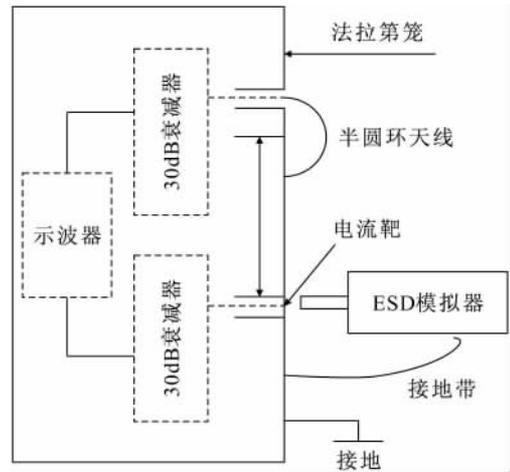


图 4 试验装置

Fig. 4 Experimental set-up

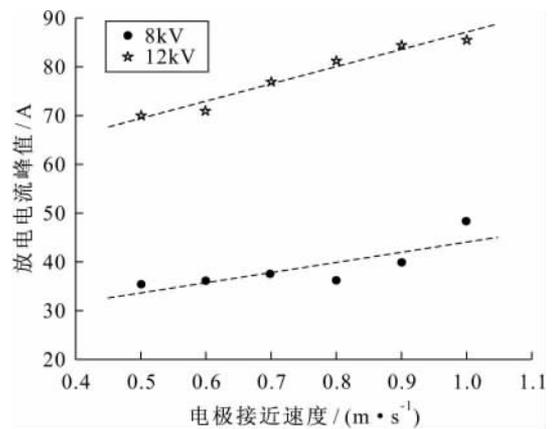


图 5 电流峰值随接近速度的变化

Fig. 5 Change of the peak currents along with the approaching speeds

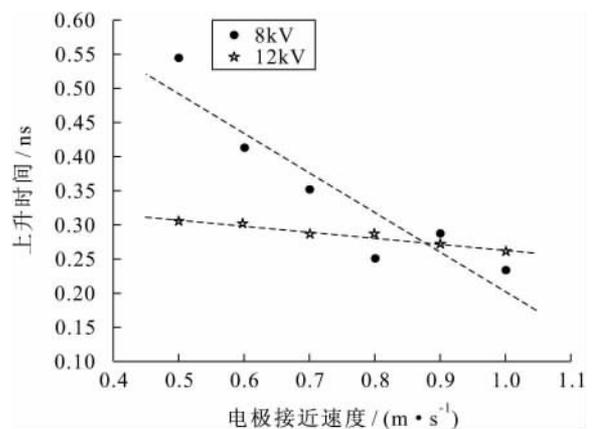


图 6 上升时间随接近速度的变化

Fig. 6 Change of the rise time along with the approaching speeds

接近速度以最大程度地模拟人体接近敏感设备的情况,并确定敏感设备最严酷环境时的接近速度。

### 4 空气式 ESD 与环境条件的关系

对于空气式 ESD, 电离系数与气体压强成反比关系, 在标准所规定的气压范围(86~106 kPa)内, 由于气压变化幅度不是很大, 所以在这个范围内气压对空气式 ESD 的放电特性影响不大。但是温度能够影响空气中分子、原子和离子的热运动, 从而影响粒子间的相互碰撞, 导致空气式 ESD 特性的变化, 在标准所规定的试验温度范围(室温 15~35 °C)内, 不同的温度对空气式 ESD 的影响是很大的。所以在试验过程当中, 要严格地控制试验环境温度<sup>[15]</sup>。

影响空气式 ESD 抗扰度试验的环境条件还有空气湿度和空气的成分。不同的空气成分导致空气式 ESD 放电特性的改变。空气湿度的大小决定了空气式 ESD 是否容易形成和发生, 在空气湿度很高的情况下, 静电很难集聚而造成敏感设备失效(损伤)的 ESD 事件。另外, 空气湿度影响空气击穿的时间延迟, 不同湿度的空气环境会产生不同的空气击穿机制, 湿度很高时空气中水分子的成分很大, 不容易产生电子电离, 即使产生了少量电子和离子, 也可能很快被水分子“中和”掉; 湿度低时空气中水分子的成分低, 空气电离产生的电子或离子受到水分子附着的几率降低, 水分子影响电子或离子的迁移速度的作用减小。也就是说, 湿度低时更利于空气的电离与击穿。

对于接触式 ESD 抗扰度试验来说, 空气湿度对 ESD 放电参数的影响不大。但对于空气式 ESD 抗扰度试验来说, 必须充分考虑 EUT 可能遭遇的严酷 ESD 环境, 因为在其他条件一定的情况下, 不同的空气湿度下其对 EUT 所产生的骚扰有很大的差别, 从而得到差别很大的 ESD 抗扰度试验结果, 如图 7 所示(接近速度为 0.8 m/s), 试验装置如图 4 所示。所以在进行空气式 ESD 抗扰度试验时要严格控制空气相对湿度的变化范围。

### 5 电极极性对空气式 ESD 的影响

试验研究结果表明: 恒定场中气体的击穿阈值与运动电极的极性有很大的关系<sup>[16]</sup>。从图 8 可以看出, 在相同大小的放电电压和不同电极极性下得到的半圆环天线上耦合电压峰—峰值差别很大(这里用半圆环天线上的耦合电压来表征 ESD 辐射场, 由于环上的耦合电压与受试设备的失效电平具有很好的相关性<sup>[6,17]</sup>, 通过这个耦合电压可以更加直观地了解辐射场在电路板走线上的耦合<sup>[18]</sup>), 这种差别是由于运动电极极性不同其雪崩和流柱发展条件

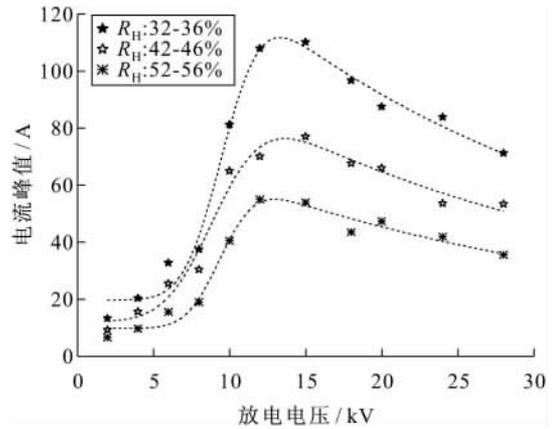
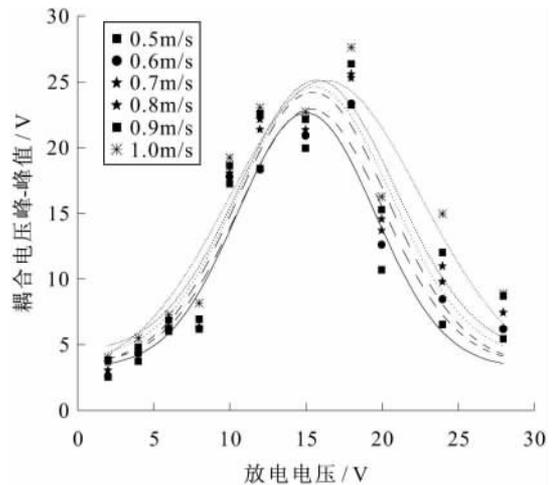
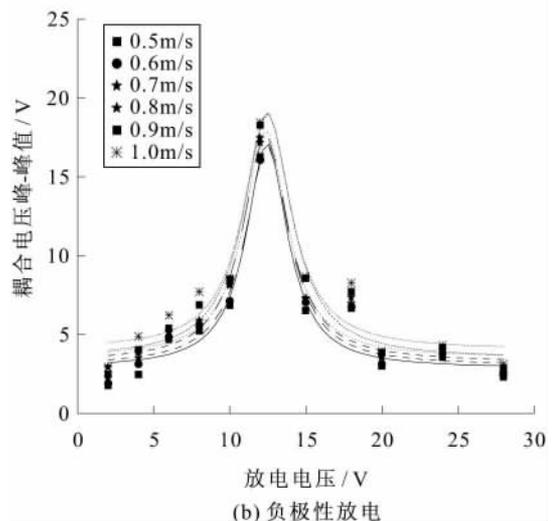


图 7 不同相对湿度下放电电流峰值的比较

Fig. 7 Comparisons of the peak currents under different relative humidity



(a) 正极性放电



(b) 负极性放电

图 8 不同极性下耦合电压峰—峰值随放电电压的变化

Fig. 8 Change of the induced voltages and the discharge voltages under different polarity

不同造成的(由于电子碰撞电离产生的电子数以  $e^{ax}$  的形式急剧地宛如雪崩似地增大, 所以称其为电子

雪崩。Meek、Loeb 等提出了电子雪崩发展为下一阶段的光条,最后变成火花的称为桥接的理论。如果说光条是电晕的话,那么由于它相当于线状电晕,所以广泛使用流柱这一名称,称它的机构为流柱理论<sup>[19]</sup>。运动电极为正极性时,雪崩从外部向其传播,雪崩在距离运动电极较近的地方进入场强增强区域,促进电子的倍增并激发雪崩一流柱的过渡;运动电极为负极性时,增殖的电子更快地从电极运动到场强减弱的区域,不利于电子的倍增和雪崩一流柱的激发过程。

无论放电电极的极性如何,在电极尖端附近都可能产生电晕,极性效应与放电电极尖端附近的电晕密切相关。当电极为正极性时,尖端附近场强很高,气体电离产生电晕,电子立即进入放电电极,在电极的前方留下迁移率相对较慢的正电荷,这些正电荷将加强与平面导体面之间的电场,有利于流柱向平面导体面的发展。而当电极为负极性时,在电极尖端附近首先产生电离,电子将向平面导体面方向扩散,附着形成负离子,正电荷在电极尖端附近。虽然电极尖端附近场强被增强,但电极与平面导体面之间的电场却被削弱,因此流柱的发展受到抑制,要使流柱进一步发展必须提高外加电场。对于同样的空气间隙,电极为正极性时的击穿电压比电极为负极性时的击穿电压要低;放电电压相同时,电极为正极性时的击穿时延比电极为负极性时的击穿时延要长。

虽然电极为正极性时的击穿电压小于电极为负极性时的击穿电压,但正极性时的电极尖端的起晕电压要高于负极性时电极尖端的起晕电压。因为电极为正极性时,其电极表面附近的电子被吸入电极中,而大量的正离子停留在电极表面附近,形成一个空间电荷产生的附加电场,削弱了电极表面附近的总电场,阻碍了电极附近流柱的形成。而当电极为负极性时,其电极表面附近将停留大量的正离子,而电子将向平面导体面扩散,电极附近的电场进一步增强,电晕发展更强烈。由此可以看到电极极性不同时,间隙间空间电荷所产生的场对外部电场的影响不一样,这就产生了放电电极的极性效应。

由于电极极性效应的存在,在进行具体 ESD 抗扰度试验时,在其他条件相同的情况下,可能正负电极极性产生的试验结果不一样,所以试验时,要注意电极极性的选择。

## 6 结论

通过对影响空气式(ESD)特性的相关因素的研究得出:

a)电弧长度是影响空气式 ESD 特性的一个最直接因素,不同电弧长度会得到差别很大的空气式 ESD 事件。

b)其它条件一定的情况下,电极的接近速度会影响到电弧长度而引入时间相关效应,进而影响空气式 ESD 特性。

c)不同的放电电极极性将产生空间极性效应或空间电荷效应,从而影响空气式 ESD 特性。

d)不同的环境条件尤其是空气成分与空气湿度对空气式 ESD 的影响很大。

由于电弧长度难于控制和测量,因此在实际测试中应选取容易控制且重要的因素代替电弧长度来研究空气式 ESD 的试验规律及重复性。由于电极接近速度、放电电压、环境温湿度等因素都会影响到电弧长度,因此在实际测试中,当环境温湿度等其它条件一定时,电极接近速度和放电电压就决定了电弧长度而成为影响空气式 ESD 特性的关键因素。

## 参 考 文 献

- [1] Pommerenke D. ESD-transient fields, arc simulation and rise time limit[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 36(1): 31-54.
- [2] Meek J M. *Electric breakdown of gases*[M]. New York, USA: Wiley, 1978.
- [3] Pommerenke D. On the influence of the speed of approach, humidity and arc length on ESD breakdown[C]//ESD. Grainau, Germany: ESD Forum, 1993: 103-111.
- [4] Got Y, Sake M. Role of water vapour in the breakdown of atmospheric air gaps[C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference of Gas Discharge and their Applications. Oxford, UK: IEEE, 1985: 161-162.
- [5] Goshio Y. Anomalous increase in prebreakdown currents in non-uniform gaps by adding water vapour[C]//3rd IEEE International Conference on Gas Discharges. [S. l.]: IEEE, 1974: 284-287.
- [6] Wang Kai. System level ESD failure mechanisms, analysis and test method[D]. Rolla: Missouri University of Science and Technology, 2005.
- [7] Pommerenke D. ESD-transient fields, arc simulation and rise time limit[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 36(1): 31-54.
- [8] Braginski S I. Theory of the development of spark discharges [J]. *Sov Phys JETP*, 1958, 7: 1068-1074.
- [9] Renninger R G. Mechanisms of charged-device electrostatic discharges[C]//International Symposium on Electrical Overstress/Electrostatic Discharge. Las Vegas, Nevada, USA: [s. n.], 1991: 45-53.
- [10] Mesays. *Physics of pulse breakdown in gases*[M]. Russia: Nauka Publishers, 1991.
- [11] Lin D L, Welsher T L. From lightning to charged-device model electrostatic discharges[C]//International Symposium on Electrical Overstress/Electrostatic Discharge. [S. l.]: [s. n.], 1992: 68-75.
- [12] Ristic V M, Dubois G R. Time dependent spark-gap resistance in short duration arcs with semi-metallic cathodes[J]. *IEEE*

- Transactions on Plasma Science, 1978, 6(4): 124-131.
- [13] Hyatt H M. The resistive phase of an air discharge and the formation of fast rise time ESD pulses[C]//International Symposium on Electrical Overstress /Electrostatic Discharge. [S. l.]: [s. n. ], 1992: 235-241.
- [14] Mesyats G A, Kremnev V V, Korshunov G S, et al. Spark current and voltage in nanosecond of a gas gap[J]. Sov Phys Tech Phys, 1969, 14(1): 49-53.
- [15] 吴 勇. ESD 抗扰度试验平台的局限性及其改进研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008.  
WU Yong. Study on the limitation of ESD immunity testing platform and its improvement[D]. Shijiazhuang, China: Ordnance Engineering College, 2008.
- [16] Yuri P R. Gas discharge physics[M]. New York, USA: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 1991.
- [17] Romachandran C, Pommerenke D, Wang Kai, et al. Characterization of human metal ESD reference discharge event and correlation of generator parameters to failure levels, part I: reference event[J]. IEEE Transactions on EMC, 2004, 46(4): 505-511.
- [18] IEC 61000-4-2 Electromagnetic compatibility (EMC), part 4: testing and measurement techniques, section 2: electromagnetic discharge immunity test[S], 2008.
- [19] Meek Craggs. Electric breakdown of gases[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1953.



原青云  
1979—,男,博士,讲师  
研究方向为电磁防护理论与技术,主要从事  
静电放电测试及防护研究  
电话: (0311)87994376  
E-mail: qingyun@163.com

YUAN Qing-yun  
Ph. D.



张希军  
1969—,女,硕士,副教授  
研究方向为电磁防护理论与技术,主要从事  
静电理论与防护,电磁脉冲效应评估和瞬态  
场测试等方面的研究工作  
电话: (0311)87994359

ZHANG Xi-jun  
Associate professor



刘尚合  
1937—,男,教授,博导,中国工程院院士  
研究方向为兵器防电磁危害理论与技术,主  
要从事静电放电和电磁兼容测试研究  
电话: (0311)87994981

LIU Shang-he  
Professor  
CAE member



武占成  
1963—,男,博士,教授,博导  
研究方向为电磁防护理论与技术,主要从事  
静电放电和电磁兼容测试研究  
电话: (0311)87994357

WU Zhan-cheng  
Ph. D., Professor

收稿日期 2010-04-19 修回日期 2010-08-19 编辑 任 明