

文章编号: 2095-2163(2020)07-0067-04

中图分类号: O441.1

文献标志码: A

# 非接触式静电放电中电极极性的影响分析

梁梦玉<sup>1</sup>, 阮方明<sup>1,2</sup>, 尹 蓝<sup>2</sup>, 翟立东<sup>2</sup>, 刘 峰<sup>2</sup>

(1 贵州大学 大数据与信息工程学院; 2 贵州师范大学 大数据与计算机科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 在自行研制的电极对放电靶运动速度效应探测器的基础上, 通过改变电极运动速度和电极极性, 进行了多次重复实验。在分析实验数据的基础上, 探讨了峰值放电电流参数、上升时间和上升速率与电极极性的关系。结果表明, 在充电电压为 $\pm 3$  kV 或 $\pm 4$  kV 时, 正极放电电流峰值电压明显高于负极放电电流峰值电压。负极放电电流脉冲的上升速度明显小于正极放电电流脉冲的上升速度。本文的工作有助于促进非接触式静电放电测试标准的研究。

**关键词:** 静电放电; 电极极性; 电极运动速度; 电流峰值;

## Impact analysis of electrode polarity in contactless electrostatic discharge

LIANG Mengyu<sup>1</sup>, RUAN Fangming<sup>1,2</sup>, YIN Lan<sup>2</sup>, ZHAI Lidong<sup>2</sup>, LIU Feng<sup>2</sup>

(1 College of big data and information engineering, Guizhou University, Guiyang 550025;

2 College big data and computer science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** On the basis of the self-developed electrode-to-discharge target movement velocity effect detector, repeated experiments are carried out by changing the electrode movement velocity and electrode polarity. Based on the analysis of experimental data, the relationship between peak discharge current parameters, rise time and rise rate and electrode polarity are discussed. The results show that when the charging voltage is plus or minus 3 kV or plus or minus 4 kV, the peak voltage of the positive discharge current is significantly higher than the peak voltage of the negative discharge current. The rising speed of the negative discharge current pulse is significantly slower than that of the positive discharge current pulse. The work in this paper helps to promote the research of non-contact electrostatic discharge testing standards.

**[Key words]** electrostatic discharge; electrode polarity; electrode movement speed; current peak value; rise time

## 0 引言

非接触式静电放电又称空气放电, 主要发生在两个物体之间, 当两个物体相互靠近且达到击穿电压时, 间隙中的介质就会被击穿从而形成放电通道<sup>[1]</sup>。由于非接触式静电放电过程复杂, 温度、湿度、压力、放电电压的大小和极性以及两物体之间的接近速度, 都会引起放电过程的显著变化, 导致非接触式静电放电的重复性很低<sup>[2]</sup>。因此, 国际标准的实验方法由非接触式静电放电改为接触式静电放电, 以避免弧长对放电实验结果的影响<sup>[3]</sup>。然而, 在工业生产和生活中, 静电放电(ESD)是普遍存在的。一般情况下, 非接触式静电放电伴随着很宽频带的瞬时放电脉冲, 这是造成电子设备损坏和干扰的主要途径之一<sup>[4-5]</sup>。因此, 研究影响非接触式ESD的相关因素, 将有助于提高仪器设备的ESD危害防护水平, 提高电子电气系统的ESD灵敏度测试

标准, 具有一定的参考价值和现实意义<sup>[6-8]</sup>。本文基于团队自行研制的ESD测试系统, 对电极移动速度和放电电压的大小和极性进行了实验和分析, 旨在促进非接触式静电放电测试标准的研究。

## 1 测试系统

本实验采用的实验仪器主要有抽压泵、实验箱、静电放电发生器和数字示波器。在密封箱体中, 采用步进电机驱动曲轴连杆, 控制放电枪在水平光轨上的运动, 步进电机的速度可由控制器手动控制。电极的最大速度可达到2m/s, 示波器记录放电电流数据和波形。该装置可以控制放电枪的移动速度。其结构如图1所示, 水平步进电机的工作原理如图2所示。

根据汤生放电原理, 空气放电的过程和等效电路如图3和图4所示。

**基金项目:** 贵州省静电与电磁防护创新人才队伍建设项目(黔政发[2016]5653号); 刘尚和院士静电防护研究基金(boimtlshjd2016104)。

**作者简介:** 梁梦玉(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电磁兼容与静电放电; 阮方明(1958-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 信息对抗与大数据安全、电磁兼容与静电放电、电磁环境效应。

**通讯作者:** 阮方明 Email: 921151601@qq.com

收稿日期: 2020-05-28

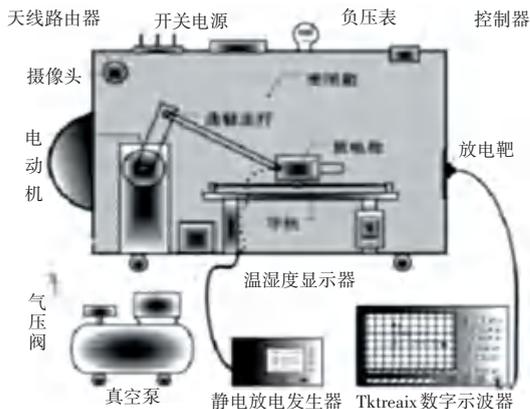


图1 实验箱的结构图

Fig. 1 Structure of the test box

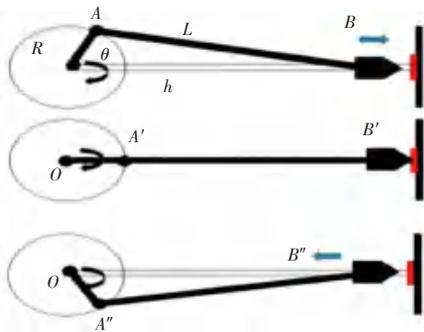


图2 水平步进电机的工作原理

Fig. 2 Principle of horizontal stepping motor

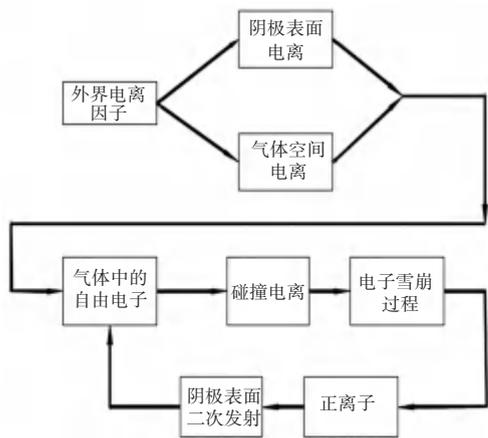


图3 空气放电的基本过程

Fig. 3 Basic process of air discharge

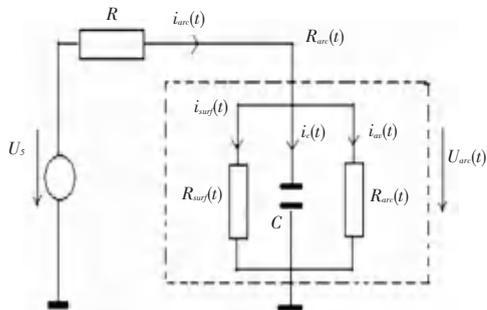


图4 空气放电的等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of air discharge

## 2 理论分析

电极在向目标运动时,一定会受其周围空气的干扰,这种干扰非常复杂,根据空气动力学原理和伯努利方程可知,在放电电极向目标运动时,电极中心的压强应小于外部的压强<sup>[9]</sup>。

根据 Townsend 的理论公式(1):

$$i = i_0 e^{\alpha d}, \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  是单位长度上电离的载流子,  $d$  是放电弧的长度。 $\alpha$  与气压的关系如公式(2)<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left\{ \frac{B \phi}{E} + \frac{C}{p} \right\}, \quad (2)$$

其中,  $a, b$  为气体实验常数,在标准空气环境中,  $A = 11.0 (\text{m} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ,  $B = 273.8 \text{ V} \cdot (\text{m} \cdot \text{Pa})^{-1}$ ;  $p$  为气体压力;  $e$  为板间均匀电场强度,取值范围为  $1.13 \times 10^7 - 4.56 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。假设均匀电场强度为公式(3):

$$E = U/d = 1.2 \times 10^7 \text{ V/m}. \quad (3)$$

通过对式(2)的模拟分析,得到电离系数  $\alpha$  与气压  $p$  的曲线关系,如图5所示。

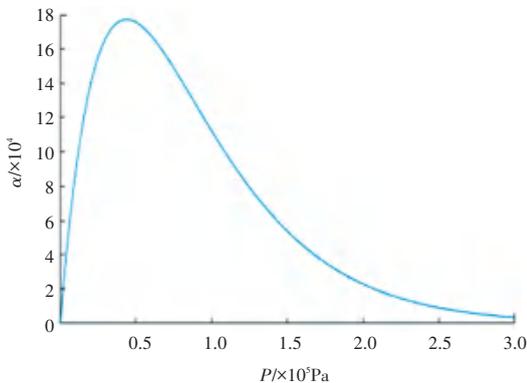


图5 电离系数  $\alpha$  与气压的关系

Fig. 5 The relationship between ionization coefficient  $\alpha$  and pressure P

当环境压强不低于临界值时,电极向靶移动的放电过程,随着压力的降低,空气密度减小,电子平均自由程增大,有效电离增大,电离系数增大,雪崩时放电电流增大过程。电极向目标移动越快,电极周围的压力越低,电离系数  $\alpha$  越高。结果表明,在电子雪崩和表面发射过程中,电极向目标运动的有限速度下,压力的减小不仅有利于雪崩过程中有效电离的产生,而且有利于电子的加速,漂移。随着电子漂移速度的增加,电子撞击电极表面时的动能增加,更有利于电子在电极表面的逸出,促进电极表面的发射过程。随着电极向目标的移动,电极间的距离迅速减小,使得电极间的电场强度迅速增大,同时

也促进了静电放电的发生。

### 3 实验结果及分析

为了探讨静电放电参数与影响因素之间的关系, 本文利用研制的电极移动速度效应检测仪进行了多次实验, 利用带宽 2.5 Ghz、采样率 40 的 tektronic 数字示波器记录静电放电电流。在电极移动速度分别为 0.2 m/s 和 0.4 m/s, 放电电压分比 ±3 kV 和 ±4 kV 时放电电流波形数据。通过对静电放电实验数据的观察, 发现电极向目标移动的速度和电极极性对静电放电参数有明显的影晌。

如图 6 和图 7 所示, 当电极电压为 +3 kV 时, 放电电流的平均峰值为 4.479 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.755 ns。当电极电压为 -3 kV 时, 放电电流的平均峰值为 3.778 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.716 ns。

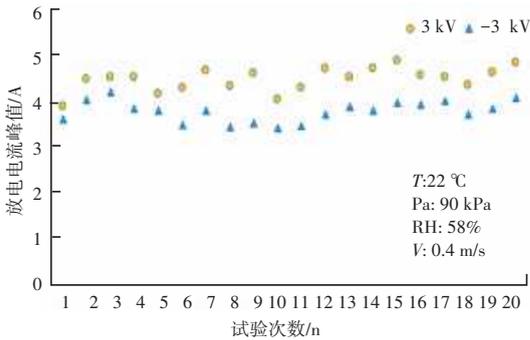


图 6 放电电压 ±3 kV 电极移动速度为 0.4 m/s 时放电电流峰值的大小

Fig. 6 The peak value of discharge current when the discharge voltage is ±3 kV and the electrode moving speed is 0.4 m/s

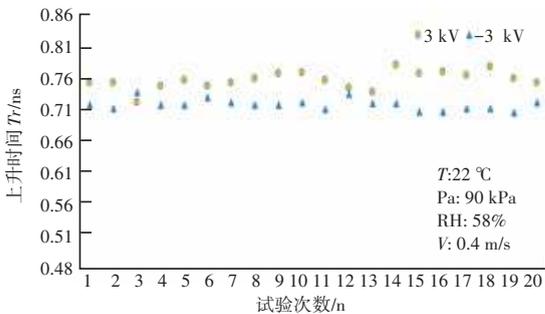


图 7 放电电压 ±3 kV 电极移动速度为 0.4 m/s 时放电电流峰值的上升时间

Fig. 7 The rising time of discharge current when the discharge voltage is ±3 kV and the electrode moving speed is 0.4 m/s

如图 8 和图 9 所示, 当电极电压为 +3 kV 时, 放电电流的平均峰值为 3.936 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.778 ns。当电极电压为 -3 kV 时, 放电电流的平均峰值为 3.354 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.739 ns。

如图 10 和图 11 所示, 当电极电压为 +4 kV 时,

放电电流的平均峰值为 4.934 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.824 ns。当电极电压为 -4 kV 时, 放电电流的平均峰值为 4.417 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.772 ns。

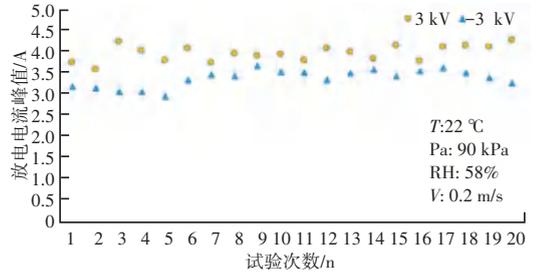


图 8 放电电压 ±3 kV 电极移动速度为 0.2 m/s 时放电电流峰值的大小

Fig. 8 The peak value of discharge current when the discharge voltage is ±3 kV and the electrode moving speed is 0.2 m/s

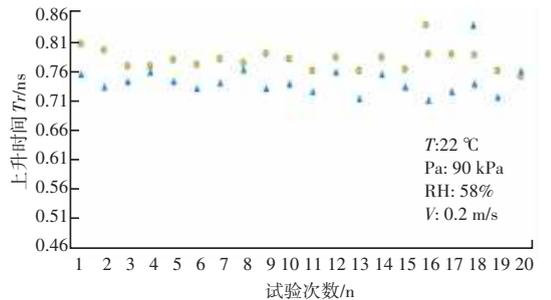


图 9 放电电压 ±3 kV 电极移动速度为 0.2 m/s 时放电电流峰值的上升时间

Fig. 9 The rising time of discharge current when the discharge voltage is ±3 kV and the electrode moving speed is 0.2 m/s

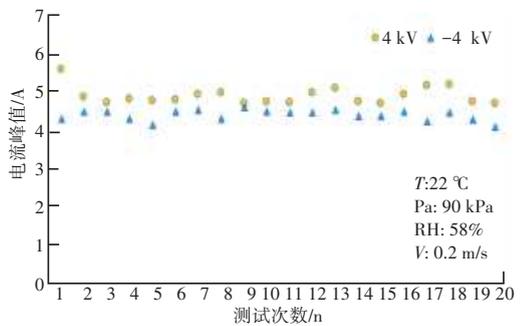


图 10 放电电压 ±4 kV 电极移动速度为 0.2 m/s 时放电电流峰值的大小

Fig. 10 The peak value of discharge current when the discharge voltage is ±4 kV and the electrode moving speed is 0.2 m/s

如图 12 和图 13 所示, 当电极电压为 +4 kV 时, 放电电流的平均峰值为 8.105 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.782 ns。当电极电压为 -4 kV 时, 放电电流的平均峰值为 7.304 A, 平均上升时间  $T_r$  为 0.772 ns。

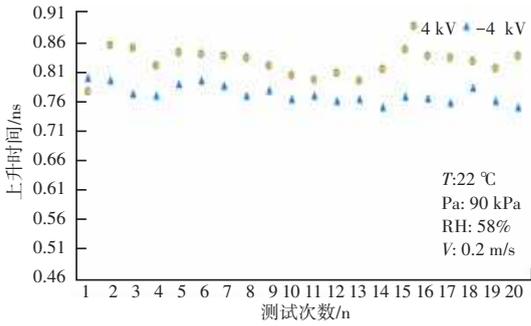


图 11 放电电压 $\pm 4$  kV 电极移动速度为 0.2 m/s 时放电电流峰值的上升时间

Fig. 11 The rising time of discharge current when the discharge voltage is  $\pm 4$  kV and the electrode moving speed is 0.2 m/s

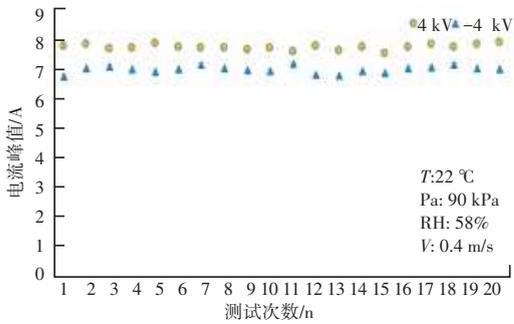


图 12 放电电压 $\pm 4$  kV 电极移动速度为 0.4 m/s 时放电电流峰值的大小

Fig. 12 The peak value of discharge current when the discharge voltage is  $\pm 4$  kV and the electrode moving speed is 0.4 m/s

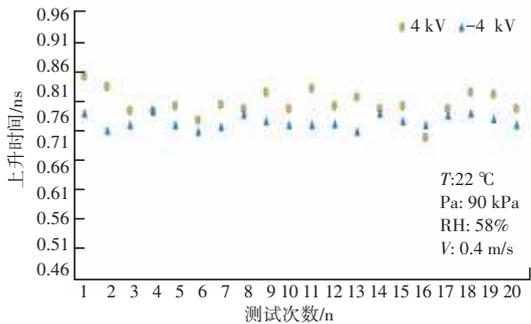


图 13 放电电压 $\pm 4$  kV 电极移动速度为 0.4 m/s 时放电电流峰值的上升时间

Fig. 13 The rising time of discharge current when the discharge voltage is  $\pm 4$  kV and the electrode moving speed is 0.4 m/s

#### 4 结束语

本文通过静电放电实验系统的应用,探讨了放

电条件与相关后果的关系。在电极移动速度分别为 0.2 m/s 和 0.4 m/s,放电电压分别为 $\pm 3$  kV 和 $\pm 4$  kV 时电极极性和电极向放电靶的移动速度对放电参数的电流峰值、上升时间有显著影响,见表 1。对于相同的间隙,正极的击穿电压低于负极。负极放电电流上升速度小于正极。

表 1 放电极性与放电参数之间的关系

Tab. 1 The relationship between discharge properties and discharge parameters

	放电电流 峰值/A	上升时间 $t_r$ / ns	上升速率/ (A/ns)
3 kv 0.4 m/s	4.479 2	0.754 7	4.783
-3 kv 0.4 m/s	3.778 3	0.715 9	4.223
3 kv 0.2 m/s	3.936 1	0.777 9	4.053
-3 kv 0.2 m/s	3.354 2	0.739 3	3.634
4 kv 0.4 m/s	8.105 0	0.782 2	10.362
-4 kv 0.4 m/s	7.304 3	0.749 1	9.750
4 kv 0.2 m/s	4.934 1	0.824 0	5.988
-4 kv 0.2 m/s	4.416 6	0.772 3	5.719

#### 参考文献

- [1] 原青云,张希军,刘尚合,等. 影响空气式静电放电特性的相关因素分析[J]. 高电压技术,2010,36(10):2500-2506.
- [2] 原青云,刘尚合,张希军,等. 空气静电放电若干特性分析[J]. 高电压技术,2009,35(8):1951-1956.
- [3] 吴勇,刘尚合,原青云. 固定间隙的空气式静电放电[J]. 高电压技术,2009,35(4):909-913.
- [4] 阮方鸣,高攸纲,石丹,等. 静电放电参数对电极速度的相关性机理分析[J]. 电波科学学报,2008,23(5):977-981.
- [5] 阮方鸣,石丹,高攸纲,等. 在小间隙放电中用 Bernoulli 定理分析电极移动速度效应[J]. 电波科学学报,2009,24(3):551-555.
- [6] 阮方鸣,石丹,杨乘,等. 人体静电放电参数对带电电压的依赖关系研究[J]. 电波科学学报,2009,24(5):979-982.
- [7] 阮方鸣,章俊华,陈辉林,等. 非接触静电放电测试低重复特性分析研究[J]. 电波科学学报,2014,29(5):940-944,1007.
- [8] 阮方鸣,董墨,吴亮,王义,等. 微小间隙静电放电中两种放电模式的影响研究[J]. 电波科学学报,2012,27(5):1030-1034,1042.
- [9] 周奎,阮方鸣,张景,等. 电极移动速度效应的空气动力学分析[J]. 电波科学学报,2016,31(6):1060-1066.
- [10] RUAN F M, DLUGOSZ T. Analysis of partial vacuum formation and effect on discharge parameter in short gap ESD[J]. Electrical review,2011, 87(2), .291-293.