

# 真空冲击电压下氧化铝陶瓷沿面闪络现象的发展过程

于开坤, 张冠军, 郑楠, 田杰, 刘国清

(西安交通大学电气工程学院电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 真空沿面闪络的发生与发展的过程是电气与电子领域众多学者长期以来所关注的问题, 这一复杂的放电现象至今还不能完全从机理上给予说明。本文采用电气、光学联合检测的方法, 利用增强型电荷耦合器件(ICCD)对真空冲击电压下氧化铝陶瓷沿面闪络现象的动态发展过程进行了研究, 考察了在试样表面溅射金属薄膜电极对闪络发光现象的影响。从闪络的电压、电流和发光波形看出, 闪络发生时的电流和发光峰值出现时间一致, 并滞后于电压截断点。从ICCD图像可以发现, 在试样表面发生完全闪络之前其表面已经出现预闪络发光通道, 而沿面闪络发光的最强阶段出现在闪络发生之后的几十纳秒, 此时电流出现最大值, 能够发现在电极的边缘位置发光最为强烈; 溅射电极之后试样的沿面闪络电压有所降低, 闪络发生时的发光强度提高, 在闪络发生时电极之间的材料内部可能出现体内的复合过程。

**关键词:** 真空; 氧化铝陶瓷; 沿面闪络; ICCD

中图分类号: TM85

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2009)02-0007-05

## 引言

真空中沿面闪络现象在电力以及电子装置中是一个非常重要的限制因素, 沿面闪络通常发生在绝缘材料的表面, 并且发生击穿的电压远低于绝缘材料本身以及相同长度下真空间隙的击穿电压<sup>[1,2]</sup>, 该现象的存在增大了设备体积和费用, 同时制约了设备性能的进一步提高。长期以来这一现象受到了高电压绝缘、脉冲功率技术、高功率微波、高能物理等很多领域的研究者的重视<sup>[3-6]</sup>。

早在上世纪70年代, 国外已经对影响真空中绝缘子沿面闪络现象的多种因素进行了很多研究<sup>[7]</sup>。目前一般认为闪络过程起始于阴极、真空和绝缘材料表面三结合处的场致电子发射, 从三结合处发射出的初始电子会轰击绝缘材料表面产生二次电子发射, 二次电子再次碰撞绝缘材料表面导致电子崩, 而最终引起绝缘材料表面吸附气体解吸附并电离而引发闪络<sup>[8-10]</sup>。其中, 对于闪络发展的中间过程的研究还不十分清楚。近年来有多位国内外研究学者利用先进的光电测量和表面分析技术探讨电极接触方

式、绝缘子表面状况等对闪络现象的影响<sup>[11-16]</sup>, 目前迫切需要对沿面闪络现象的发展过程进行更深一步的研究。

本文采用增强型电荷耦合器件(ICCD)系统拍摄了真空中氧化铝陶瓷试样的沿面闪络现象, 以深入分析沿面闪络现象的发展过程。同时采用两种不同的电极接触方式: 直接金属压接和溅射铬金属薄膜后的金属压接, 考察对比了两组不同试样闪络发展过程的异同。

## 1 试样准备与试验系统

### 1.1 试样准备与电极-试样模型

本实验中试样为纯度96%的氧化铝陶瓷基片, 试样的尺寸为 $67 \times 55 \times 1 \text{ mm}^3$ , 由厂家提供的材料的基本特性如表1所示。

表1 氧化铝基板的基本参数

Tab.1 Ceramic plate performance parameter

| 参数 | $\rho, (\Omega \cdot \text{cm})$ | $\epsilon_r (1 \text{ MHz})$ | 粗糙度 $R_a (\mu\text{m})$ |
|----|----------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 指标 | $10^{14}$                        | 9.0 ~ 10.5                   | 0.3 ~ 0.7               |

收稿日期: 2008-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50577054); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0943)

作者简介: 于开坤(1981-), 男, 陕西籍, 博士研究生, 从事电气放电机制与其应用方面的研究;

张冠军(1970-), 男, 山东籍, 教授/博导, 博士, 主攻高电压绝缘介电现象、等离子体技术、变电设备故障诊断等。

本文采用图 1 所示的平面结构的电极模型进行真空中的闪络实验。这种电极结构的最大优点是便于光学观察,适用于片形或板形的试样,对试样的厚度无要求。试样放置在有机玻璃底座上,聚四氟乙烯(PTFE)电极支架通过弹簧将电极紧压在试样上,从而进一步保证试样和电极间的良好接触。本文采用两种电极接触方式:一种是直接压接金属电极,另一种是首先在氧化铝陶瓷表面溅射铬金属薄膜电极,溅射电极的直径为 20mm,电极间距为 5mm,这些数值与所使用的金属电极的尺寸以及电极间距一致。

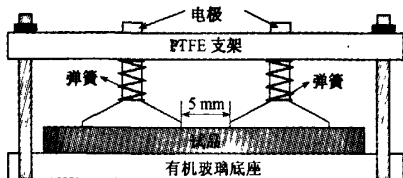


图 1 电极模型

Fig.1 Electrode-sample configuration

## 1.2 实验装置与实验程序

图 2 为实验中使用的实验装置示意图。图 1 中的电极放置在图 2 中的真空腔内,实验时真空腔内的气压保持在  $4 \times 10^{-4}$  Pa 以下。采用单级 Marx 发生器产生高压脉冲,其主电容的容量为  $0.0111 \mu\text{F}$ ,输出的冲击电压峰值最大可达到 100kV,波形为  $0.4/2.4 \mu\text{s}$  的双指数脉冲波。电压测量采用高压分压器测量,闪络电流通过  $70\text{m}\Omega$  的无感电阻获得,光强信号通过光电倍增管(PMT, GDB423)获得,电压、电流和发光的时域波形由 4 通道数字示波器进行记录。实验中使用增强型电荷耦合器件(ICCD, PI-MAX)系统捕捉沿面闪络发生时的图像。脉冲定时发生器(PTG)用于控制 ICCD 设备的触发,并由示波器提供外部触发信号。

实验前,所有样品都依次使用 95% 丙酮、酒精、去离子水进行超声波清洗,清洗时间均为 20 分钟,然后在  $150^\circ\text{C}$  的温度下持续烘干 2h,保证所使用的试样具有较好的清洁度以及表面状况的一致性。

## 2 实验结果

### 2.1 发生闪络时的典型电压、电流和发光波形

图 3 为示波器获得的闪络发生时试样上的电压、电流、发光的典型波形,其中时间刻度为每方格  $400\text{ns}$ 。图中电流 1、2 分别为采用小量程和大量程

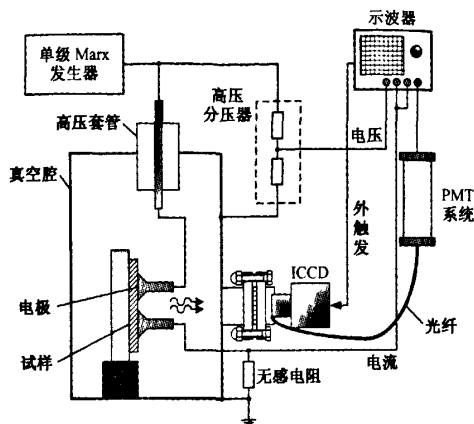


图 2 实验装置示意图

Fig.2 Sketch of experimental equipment

测到的电流曲线,未发生闪络时电流很小,采用曲线 1 表示,而闪络时用曲线 2 表示。

如图所示,实验中对应的闪络现象发生在施加电压的波头,在闪络前的电压上升阶段,从电流曲线 1 上可以看到一定的位移电流,光强信号略有变化,此时的电流峰值时刻为从电压上升时刻算起  $120\text{ns}$  处;当发生闪络时,电压波形迅速截断,同时电流和光强也迅速增大,存在高频振荡,闪络发生时刻为从电压上升时刻算起  $250\text{ns}$  处;电流以及光强最大值出现的时间滞后沿面闪络发生时刻约  $50\text{ns}$ ;随后电压、电流以及光强波形低频振荡衰减到零。

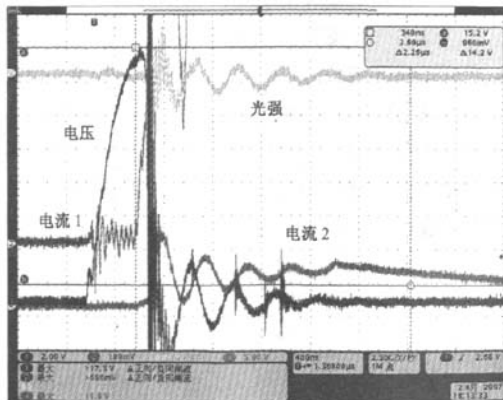


图 3 沿面闪络发生时的典型电压、电流和发光波形

Fig.3 Oscilloscope waveforms of surface flashover

### 2.2 直接压接金属电极的试样闪络时 ICCD 图像

本文利用 ICCD 系统拍摄氧化铝陶瓷试样在沿面闪络发生时电极之间发光过程的进展情况。使用示波器上显示的电压信号作为 ICCD 的外部触发

源,当示波器上显示的电压为 1 kV 时发出信号触发。

本组实验中所得到的闪络照片为从冲击电压起始点一直到 1400ns 后的一组图片。触发准备时间为 10ns,每次延迟 200ns,发光积分时间调节为 10ns,所使用的光强增益为 0。

由于该试样的沿面闪络电压相对较高,为保证每次冲击都能够在材料表面产生闪络现象,对该组试样所施加的冲击电压的峰值为 45kV,实验中闪络发生的时刻与图 3 中一致,为从电压上升时刻算起 250ns 处。图 4 给出了直接压接金属电极的试样发生沿面闪络时电极间的发光进程,以闪络发生时刻为时间零点。

图 4(a)为从正面看到的电极模型图像。从图 4 能够看出,当在闪络发生前约 50ns 时试样表面仍没有发光现象;在闪络发生之后约 150ns 时能够看到有明显的沿面闪络放电通道,图中在电极边缘区域的发光现象较为明显,并且阳极边缘的发光现象最为明显。当闪络发生后约 750ns 时发光强度达到最强,此时在电极边缘的区域甚至出现耀斑,之后沿面闪络的光强强度逐渐降低,在闪络后约 1150ns 之后闪络所发出的光通道逐渐熄灭。

### 2.3 溅射铬金属膜电极试样闪络时的 ICCD 图像

对于溅射铬金属膜电极的试样,沿面闪络拍摄的时刻仍为从冲击电压起始时刻一直到发光逐渐熄灭的时刻。此时使用的时间变化步长较短,为 10ns,图像从零时刻拍摄到 450ns,积分时间为 10ns,增益取为 0。图 5 给出了溅射金属膜电极的试样在沿面闪络发生时所拍摄的表面发光进展情况。实验中溅射铬金属电极之后,在同样外界条件下试样的沿面闪络电压低于直接压接金属电极的试样,这里所使用的冲击电压的峰值为 30kV。

实验中发现表面溅射铬金属膜电极后再金属压接的试样,沿面闪络发展过程与直接压接金属电极试样具有相似的情况。闪络发生时的光强均为从弱到强再到弱的阶段。但这两组试样在闪络发生时的发光情况有很多不同之处,从照片显示溅射金属膜电极之后的试样其发光初始时间要远早于直接压接金属电极的试样,并且其闪络发生时所采集的发光最高强度远高于直接压接金属电极的试样。

图 5(a)所示的图像为实验中溅射金属电极试样的最初发光图像,这一时间点为冲击电压上升时刻后 120ns;图 5(b)所对应的为沿面闪络发生时的

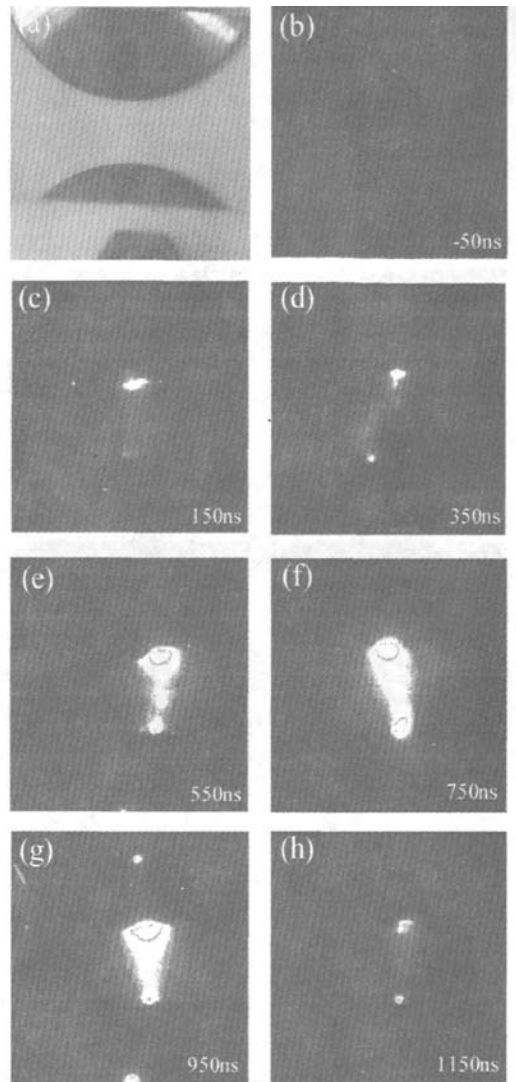


图 4 直接压接金属电极的氧化铝陶瓷试样闪络发光进程

Fig.4 Flashover development process of alumina ceramic with direct contact metal electrodes

表面发光图像,此时对应的时刻为 250ns;图 5(c)是实验中所拍摄到的发光强度最强时的发光情况,此时对应的时刻为 300ns。从上述可以看出在沿面闪络发生之前 130ns 时材料表面就已经观测到发光情况,表面发光的最强阶段并不是在沿面闪络发生时而是存在 50ns 的延迟,这一时刻与示波器上电流强度最大值出现的时刻相对应。实验中如果没有发生沿面闪络,ICCD 所拍摄的照片中不会出现发光通道;图 5(d)给出的图像中发光呈现出三部分,电极之间中部能够观察到一部分明显的发光,这一现象

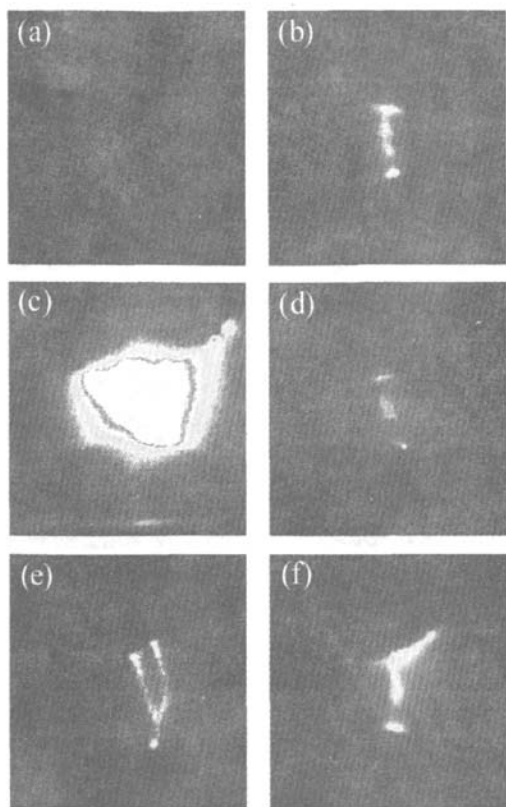


图5 溅射金属电极试样沿面闪络发光特性

Fig.5 Flashover lighting phenomena of sample with sputtered metal film electrodes

在拍摄溅射金属膜电极试样的闪络现象时很容易获得,但是对于直接压接金属电极的试样不能拍摄获得。图5(e)中的图像显示闪络在从阴极向阳极发展过程中存在分叉现象,图5(f)的图像为阳极边缘出现的较为明显的发光现象。

### 3 分析与讨论

利用 ICCD 系统能够拍摄到在沿面闪络发生时试样表面的发光进程的图像。对于实验中所使用的溅射金属电极的试样以及直接压接金属电极的试样,能够看到它们之间有相似的发光进程。其发光光强以时间为轴均为从弱到强再到弱,存在一个最强点并最终消失。

在实验中溅射金属薄膜电极的试样的闪络电压比直接压接金属电极试样的低。这很可能是由于溅射金属电极时在电极之间会出现微小的金属颗粒所造成的,并且溅射电极处有可能出现接触不牢固的金属颗粒,这些都能够造成试样表面出现缺陷。在

外施电压时接触不牢固区域易于脱落,而电极之间的金属颗粒会造成该处的电场集中,从而使得沿面闪络电压降低。溅射金属电极之后试样发生闪络时其发光出现的时间点比直接压接金属电极的试样的早,闪络发生时发光的最强点的光强比直接压接金属电极的试样所拍摄的强。这是由于溅射电极之后试样表面的电极接触更为紧密,电极周围的电场分布更为接近理论情况,从而使得发光过程更为接近理论情况,发光的时序与示波器上所采集的时序更为接近,光强的最大值对应的时刻为电流出现最大值的时刻。由于此时发光维持时间较短,在相同电容充电的情况之下,电流的最大值增大,发光强度的峰值增强。

分析图5(d)可以看出当对试样表面溅射金属电极时,施加电压之后在电极之间会出现更多的体内过程,从电极进入试样的电子和空穴会在试样的表面复合,复合的过程产生发光现象,从而能够看到三部分发光。

从图5(e)以及图5(f)能够初步看出电子在电极之间的运动过程。电子从阴极三结合处发射之后,在向阳极的运动过程中不断倍增,这一过程使得电子的运动范围提高,并有可能产生分叉现象以及阳极边缘的大范围发光现象。

### 4 结论

从实验中可以看出,溅射金属膜电极后压接金属电极的试样,沿面闪络发光的 ICCD 图像出现的时刻能够与示波器上显示的电压、电流以及光强信号出现的时刻对应。在沿面闪络发生之前 130 ns 试样表面会出现发光现象,试样发光的最强点出现在沿面闪络发生之后 50 ns,此时对应着试样上电流曲线的最大值。随着时间的推移试样表面的发光现象逐渐消失。

溅射金属薄膜电极试样的沿面闪络电压比直接压接金属电极试样的低,而其发光最强点的光强比直接压接金属电极试样的强,但是溅射金属膜电极之后试样表面的发光维持时间较短。

从 ICCD 系统所拍摄的照片可以看出,电子从阴极三结合处发出之后向阳极运动的过程中,电子不断倍增使得运动轨迹扩大,发光范围扩大,并且发光路径有可能出现分叉现象。

### 参考文献 (References):

- [1] Miller H C. Surface flashover of insulators [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1989, 24(5): 765-786.

- [2] H C Miller. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improve hold off voltage [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1993, 28(4): 512-527.
- [3] 张冠军 (Guanjun Zhang). 真空中沿面闪络现象的起始机理与发展过程 (Initiating mechanism and developing process of surface flashover phenomena in vacuum) [D]. 西安: 西安交通大学 (Xi'an: Xi'an Jiaotong Univ.), 2001.
- [4] 汤俊萍, 邱爱慈, 陈维青, 等 (Tang Junping, Qiu Aici, Chen Weiqing, et al.). 真空中聚乙烯膜在纳秒脉冲电压下的沿面闪络特性 (Surface flashover characteristics of polyethylene film under ns impulse voltage in vacuum) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2003, 15: 1019-1022.
- [5] 黄文力, 孙广生, 严萍, 等 (Huang Wenli, Sun Guangsheng, Yan Ping, et al.). 纳秒脉冲同轴结构固体绝缘介质尺寸优化分析 (Optimum analysis on solid dielectric insulation dimension in coaxial electrodes under nanosecond pulse voltage) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(2): 47-51.
- [6] 谢安生, 李盛涛, 郑晓泉, 等 (Xie Ansheng, Li Shengtao, Zheng Xiaoquan, et al.). 外施电压频率对 XLPE 电缆绝缘中电树枝生长特性的影响 (Influence of frequency of voltage applied on the propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2006, 25(3): 33-36.
- [7] R Hawley. Solid insulators in vacuum: a review [J]. Vacuum, 1968, 18: 383-390.
- [8] R A Anderson, J P Brainard. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption [J]. J. Appl. Phys., 1980, 51(3): 1414-1421.
- [9] Gao W, Sun G S, Pan Y, et al. Dependence of flashover voltage on gas pressure in vacuum [A]. 12th Asian Conf. on Electrical Discharge (ACED) [C]. Shenzhen, China, 2004. 385-388.
- [10] 雷杨俊, 肖定全 (Lei Yangjun, Xiao Dingquan). 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究 (Study on surface hold-off voltage test of alumina ceramics in vacuum) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2004, 37(3): 29-35.
- [11] 张冠军, 严璋, 刘源兴, 等 (Zhang Guanjun, Yan Zhang, Liu Yuanxing, et al.). 真空中冲击电压下硅半导体的泄漏电流及沿面闪络特性 (Characteristics of leakage current and surface flashover of silicon under impulse voltage in vacuum) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electrotechnical Society), 2000, 15(5): 53-57.
- [12] 吕金壮, 李成榕, 丁立健, 等 (Lü Jinzhang, Li Chengrong, Ding Lijian, et al.). 陷阱分布对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷介质在真空中沿面闪络特性的影响 (Influence of the trap distribution on surface flashover performance of alumina ceramic) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2003, 23(2): 77-81.
- [13] H C Miller. Improving the voltage hold-off performance of alumina insulators in vacuum through quasimetallizing [J]. IEEE Trans. Electr. Insul., 1980, 15(5): 419-428.
- [14] C R Li, L J Ding, J Z Lv, et al. The relation of trap distribution of alumina with surface flashover performance in vacuum [J]. IEEE Trans. Dielectr. and Electr. Insul., 2006, 13(1): 79-84.
- [15] T S Sudarshan, C R Li Dielectric surface flashover in vacuum experimental design issues [J]. IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., 1997, 4(5): 657-662.
- [16] O Yamamoto, T Takuma, M Fukuda, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum [J]. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2003, 10(4): 550-556.

## Vacuum flashover developing across alumina ceramic at pulsed voltage

YU Kai-kun, ZHANG Guan-jun, ZHENG Nan, TIAN Jie, LIU Guo-qing

(State Key Laboratory of Elec. Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Flashover phenomenon in vacuum has been an interesting issue in the fields of both electrical and electronic systems for more than half a century. However, this phenomenon is so complicated that up to now the related mechanisms have still not been understood clearly. In this paper the ICCD system was used to grasp the dynamic flashover images across the surface of alumina ceramic in vacuum under pulsed voltage excitation. The oscilloscope waveforms show that the peak value of current and lighting appear simultaneity with a little delay to the voltage truncation time. The results indicated that the flashover develops rapidly in less than 50ns and the electrodes edge shows the highest light intensity. The ICCD images show that, before flashover phenomenon appears the lighting channel already occurs on the sample surface, the strongest lighting appears in about tens of nanosecond after flashover phenomenon occurs. While the current reaches its largest value, the strongest lighting intensity appears at the electrode edge. After metal film electrodes sputtered on the sample the flashover voltage decreases, the lighting intensity increases, and there is recombination process between electrodes in the material.

**Key words:** vacuum; alumina ceramic; surface flashover; ICCD