



·脉冲功率技术·

电触发真空沿面闪络开关工作特性初步研究^{*}

叶明天, 王 真, 龙天骏, 周 林, 李正宏

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为研究电脉冲触发真空沿面闪络开关在中、小通流条件下的适用性, 基于直接镀铜基板工艺制作了真空沿面闪络开关样件并搭建了开关工作特性测试实验平台。通过实验手段初步研究了开关耐压特性、触发工作特性(触发延时、抖动、工作范围)和寿命特性。实验结果表明: 有效间隙 7.2 mm 的真空沿面闪络开关直流耐压约 40 kV; 开关在 18 kV 工作电压下触发导通延时 89.9 ns, 抖动 13.1 ns, 开关在 1~18 kV 工作电压范围内均能可靠触发导通; 连续考核约 2300 次后开关各项特性无明显变化。

关键词: 真空沿面闪络开关; 耐压特性; 触发特性; 开关寿命

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210445

Primary research on the operating characteristics of electrically triggered vacuum surface flashover switch

Ye Mingtian, Wang Zhen, Long Tianjun, Zhou Lin, Li Zhenghong

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: To study the applicability of the electrically triggered vacuum surface flashover switch under medium and small current, vacuum surface flashover switch samples based on direct plated copper technology are designed and fabricated, an experimental platform for testing the switch operating characteristics is established. The voltage hold-off characteristics, trigger characteristics and life characteristics of the switch are preliminarily studied. The results show that: the DC withstand voltage of the vacuum surface flashover switch with an effective gap distance of 7.2 mm is about 40 kV; the conduction delay is 89.9 ns and the jitter is 13.1 ns under the working voltage of 18 kV, and the switch can be reliably triggered in the range of 1 kV to 18 kV; no obvious change in the characteristics of the switch is observed after being triggered for about 2300 times.

Key words: vacuum surface flashover switch, voltage hold-off, trigger characteristics, switch lifetime

真空固体绝缘技术在电力系统、脉冲功率技术等领域应用广泛, 如真空断路器、真空二极管、真空开关等^[1]。在上述应用中引入的绝缘支撑表面上存在远低于真空和绝缘材料本征击穿场强的真空沿面闪络问题, 针对真空沿面闪络已有大量文献做了广泛的研究工作。现有研究用于解释真空沿面闪络的模型主要有二次电子发射雪崩模型和电子触发极化松弛模型, 两种模型在不同条件下各有侧重, 能够对绝大多数真空沿面闪络现象作出基本合理的解释^[2-5]。某些特殊场景下希望获取可控的真空沿面闪络, 由此提出真空沿面闪络开关(VSFS)。通过激光触发能够控制真空沿面闪络, Sampayan、Nunnally、王珏等研究了激光波长、能量密度、介质形状等对开关时延、抖动的影响, 结果表明获取低时延、低抖动的开关需要短波长、高入射能量密度的激光^[6-8], 这对激光触发系统提出了较高要求。通过电脉冲触发也能获得可控真空沿面闪络, 中、小电流等级下开关转移电荷量小, 可采用金属薄膜电极系统^[9-11], 文献 [12] 研究了 15 μm 和 0.25 μm 两种厚度金属薄膜电极真空沿面闪络开关的基本特性, 但实验真空度控制不佳且开关工作电压低、通流小、寿命普遍不长。本文针对上述问题搭建了真空沿面闪络开关工作特性测试实验平台, 采用直接镀铜基板工艺制作了电触发真空沿面闪络开关, 并对开关的耐压特性、触发特性和寿命特性进行了初步研究。

^{*} 收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-04-28
基金项目: 中物院核物理与化学研究所发展项目
联系方式: 叶明天, 89760032@qq.com。

1 实验平台与真空沿面闪络开关结构

真空沿面闪络开关工作特性测试实验电路原理如图1所示,实验开始时高压直流电源 HV1、HV2 分别通过限流电阻 R_{L1} 、 R_{L2} 、 R_{L3} 给触发回路电容 C_T 与放电回路电容 C 充电,控制触发开关 S 导通后传输线 T 输入端产生入射波,入射电压波到达触发间隙后产生正反射,从而获得电压幅值近似为 2 倍触发电容 C_T 充电电压的高压方波脉冲,本文中触发脉冲脉宽控制为约 100 ns 不变,触发脉冲的幅值和极性可通过调节 C_T 上的充电电压与充电极性改变,实测空载(仅连接 Tektronix P6015A 电压测量探头)时触发脉冲幅值 12 kV,前沿 70 ns。开关电压 U_{sw} 和触发电压 U_{tr} 由泰克 P6015A 探头测量,回路电流 I_{sw} 由 Magnelab CT-E-0.1 电流传感器测量,测量信号送入示波器 LeCroy HDO4104。实验时将真空沿面闪络开关置于高真空腔室,真空腔室直连抽速 100 L/s 分子泵持续抽气维持真空。一般情况下环境真空度在 10^{-1} Pa 以下时电子平均自由程已大于间隙距离,真空度对沿面闪络电压几乎无影响^[13],故本文实验时控制腔室内真空度优于 5×10^{-3} Pa。

本文真空沿面闪络开关为平面片状凸式电极结构,其绝缘基板采用 AlN 陶瓷,AlN 陶瓷具有高热导率、低热膨胀系数和较好的力学性能,其电学特性与 Al_2O_3 陶瓷相近。开关电极材料为铜,表面覆银防止电极氧化。开关电极与绝缘基板采用直接镀铜基板(DPC)工艺进行结合,DPC 采用薄膜工艺,结合真空溅射、光刻等工艺在陶瓷基底上制作线路,具有线路加工精确、形成表面平整度高的优点,在功率电子、混合微电子、电子封装等领域有广泛应用。控制电极凸出陶瓷基板表面的总厚度约 40 μm 。电极与基板材料结合强度高,经实验样件在 500 $^{\circ}C$ 高温下经 8 h 除气处理后电极与基板材料仍紧密结合,图2为本文真空沿面闪络开关样件示意图。所有样品在实验前均置入无水乙醇中超声清洗 20 min,随后充分烘干。

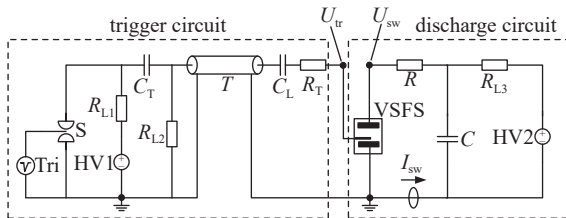


Fig. 1 Circuit schematic for vacuum surface flashover switch test platform

图1 真空沿面闪络开关工作特性测试实验电路原理图

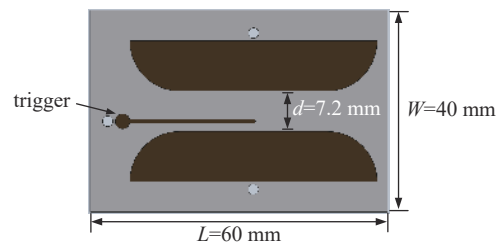


Fig. 2 Sketch map of vacuum surface flashover switch

图2 真空沿面闪络开关构型示意图

2 真空沿面闪络开关特性

2.1 真空沿面闪络开关耐压特性

本文在大气压和高真空条件下分别测定了图2真空沿面闪络开关的直流耐压特性,其结果如图3所示。由图可见大气压下真空沿面闪络开关的击穿电压在 9.5~9.9 kV 间波动,而真空下在外施电压达到峰值 40 kV 后维持数百 ms(此维持时间在数毫秒至数秒间波动)开关自击穿,体现了直流下真空沿面闪络的不确定性,真空下沿面直流耐压强度约为大气压下 4 倍。

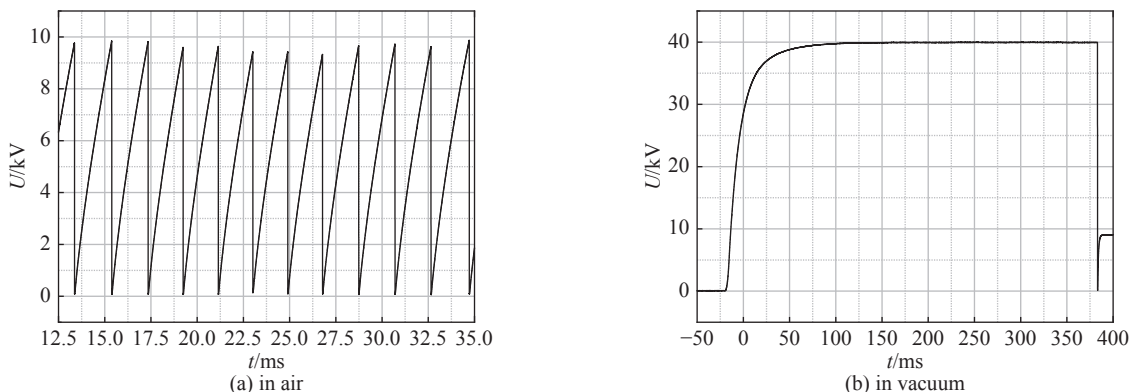


Fig. 3 DC voltage hold-off characteristic of vacuum surface flashover switch

图3 真空沿面闪络开关直流耐压特性

2.2 真空沿面闪络开关触发工作特性

2.2.1 开关延时、抖动测试结果

设置开关工作电压为直流 18 kV, 放电回路主电容 C 取 3 nF, 放电回路电阻 R 取 100 Ω , 触发隔离电阻 R_T 取 300 Ω , 图 4 为开关工作典型波形图。本文取开关延迟时间 t_d 为触发击穿电压值 10% 对应时刻至开关工作电压降至 90% 对应时刻之差, 取开关开通时间 t_{on} 为开关工作电压 90% 对应时刻至开关工作电压 10% 对应时刻之差。图 5 为以 0.1 Hz 频率对真空沿面闪络开关进行 500 次考核过程中的开关延迟时间变化规律。由图可见, 500 次考核中开关无误触发或失败触发现象, 前 200 次考核中开关延迟时间波动较大且考核中的 4 次自击穿(图 5 为便于观察将自击穿情况下的开关延时设为 -25 ns)均发生在前 200 次考核中, 此现象的可能原因为前 200 次放电中开关表面吸附气体脱附效应明显, 造成开关表面局部气压较高且气氛分布不均, 开关工作不稳定, 提升开关表面清洁度并对开关进行除气处理有助于缩短上述“老练”过程, 提升其工作稳定性。开关 500 次考核中的平均延迟时间为 89.9 ns, 以标准差定义的延迟时间抖动为 13.1 ns, 后 300 次稳定工作段延迟时间抖动小于 10 ns。由图 4 可见, 开关抖动 t_d 由触发脉冲开始施加至触发间隙击穿的时间 t_{d1} 与触发间隙击穿至主间隙电压开始跌落的时间 t_{d2} 两段构成, 其中 t_{d1} 占绝大部分, 表明通过合理设计触发间隙距离与电场分布, 优化触发脉冲输出前沿, 提高触发间隙击穿稳定性可以显著提升真空沿面闪络开关工作稳定性。

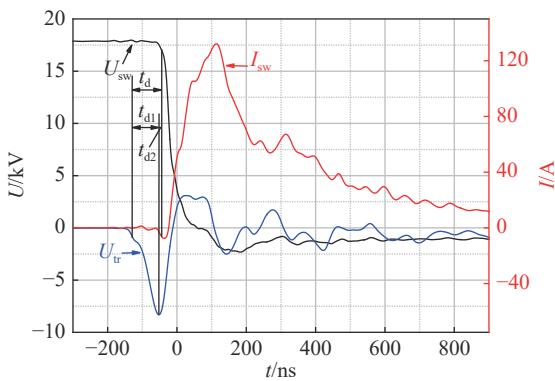


Fig. 4 Waveforms of vacuum surface flashover switch in operation

图 4 真空沿面闪络开关工作波形图

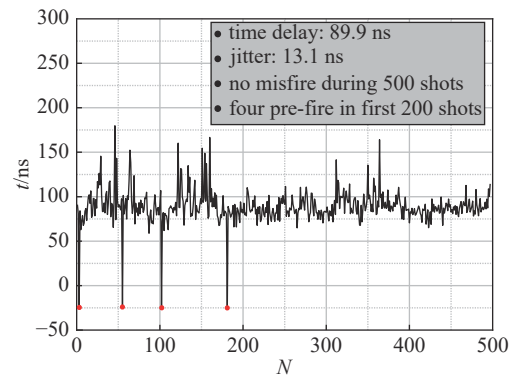


Fig. 5 Time delay of vacuum surface flashover switch in 500 shots

图 5 开关延迟时间 500 次考核中变化规律

2.2.2 开关工作范围测试结果

保持开关触发条件不变, 只改变开关工作电压得到的工作电压对开关开通时间、延迟时间与抖动的规律如图 6 所示, 其中每个开关工作电压点下取 100 次连续工作波形进行分析。由图可见工作电压的降低减弱了解吸附气体内的电荷倍增过程, 使得开关延迟时间和开通时间均增加, 其中开关开通时间的增幅较大, 从 18 kV 时的 67 ns 增至 6 kV 时的 117 ns。在 6~18 kV 的工作范围内开关抖动随时延的增大相应增大。需要注意的是, 保持开关触发条件不变, 开关工作电压在低至 1 kV 左右时仍能可靠触发导通, 但工作电压低于 6 kV 后开关时延、开通时间和抖动均急剧增大, 开关工作稳定性变差。宽广的工作范围表明影响真空沿面闪络开关导通的主要因素为触发间隙导通后产生的初始等离子体, 而非施加触发脉冲后主间隙间的电场畸变。不同于触发真空开关 (TVS) 在获取初始等离子体后依靠主间隙阴极表面产生阴极斑点提供带电粒子和金属蒸汽维持自持放电^[4], 真空沿面闪络开关初始等离子体在外电场作用下扩散进入主间隙后, 参与到主间隙解吸附气体层内的电荷倍增过程, 最终导致主间隙导通。因此, 真空沿面闪络开关兼具真空沿面耐压强度高和气体开关工作稳定的优点。

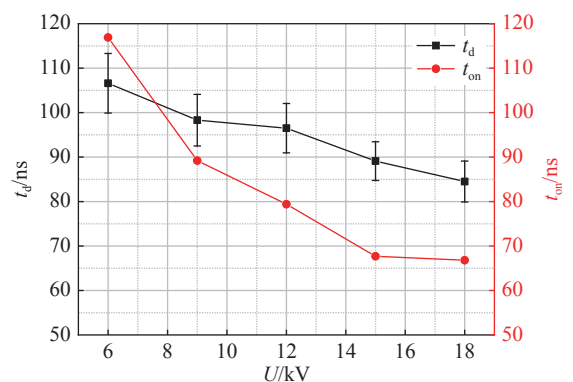


Fig. 6 Influence of switch operation voltage on open time t_{on} , delay t_d and jitter

图 6 工作电压对开关开通时间、延迟时间和抖动的的影响

2.2.3 开关多次工作后表面形貌

以 0.1 Hz 的重复频率对真空沿面闪络开关进行考核, 开关工作波形同图 4, 开关工作约 2300 次后的表面形貌如图 7 所示, 受触发电极端部电场畸变作用开关在触发电极端部电场强度最大, 触发间隙最容易在端部击穿, 实验中观察到超过 98% 的放电通道位于开关中部。约 2300 次考核过程中开关静态耐压、泄露电流、时延、抖动特性无显著变化。触发电极端部对应的开关阴极处有电子发射留下的痕迹, 阳极处有疑似高能量带电粒子撞击形成的凹坑, 由于 AlN 陶瓷的高沸点和高热导率, 未见明显沟槽形成, 但靠近放电通道的陶瓷表面颜色有所变化, 表明在放电通道高热、强辐射的反复作用下陶瓷材料成分或状态发生了改变^[15]。本文三电极基本构型的真空沿面闪络开关寿命显著优于文献 [12], 后续应考虑对其构型进行优化以应用于中、小电流等级场合。

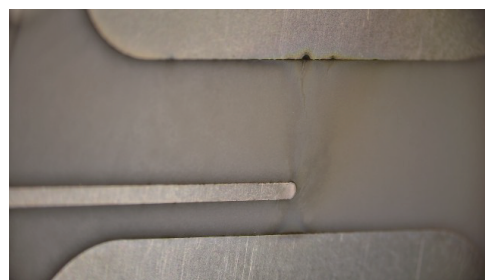


Fig. 7 Surface morphology of the switch after ~2300 shots

图 7 开关工作 ~2300 次后表面形貌

3 结 论

本文搭建了真空沿面闪络开关工作特性测试实验平台, 采用直接镀铜基板工艺制作了电触发真空沿面闪络开关, 并对开关的工作特性进行了初步研究, 得到的主要结论如下: (1)有效间隙 7.2 mm 的真空沿面闪络开关直流耐压约为大气压下 4 倍, 开关工作初期气体脱附效应明显, 经过“老练”后工作趋于稳定; (2)真空沿面闪络开关工作范围广, 在 1~18 kV 内均能可靠触发导通。随工作电压的降低其开通时间和导通时延显著变长, 抖动随之增大; (3)在放电通道高热、强辐射的反复作用下陶瓷材料成分或状态发生了改变, 靠近放电通道的陶瓷表面颜色有所变化, 开关阴阳极均有烧蚀痕迹。

参考文献:

- [1] Wetzler J M, Wouters P A A F. HV design of vacuum components[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995, 2(2): 202-209.
- [2] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1414-1421.
- [3] Blaise G, Le Gressus C. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(9): 6334-6339.
- [4] Le Gressus C, Blaise G. Breakdown phenomena related to trapping/detrapping processes in wide band gap insulators[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1992, 27(3): 472-481.
- [5] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(6): 3641-3657.
- [6] Sampayan S, Caporaso G, Carder B, et al. Optically induced surface flashover switching for the dielectric wall accelerator[C]//Proceedings of the Particle Accelerator Conference. IEEE, 2008: 2123-2125.
- [7] Nunnally W C, Neurath R, Holmes C, et al. Investigation of UV laser triggered, nanosecond, surface flashover switches[C]//IEEE International Pulsed Power Conference. IEEE, 2003: 1355-1358.
- [8] 王珏, 邵建设, 严萍, 等. 激光触发真空沿面闪络开关的初步实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(6): 1027-1030. (Wang Jue, Shao Jianshe, Yan Ping, et al. Experimental study on laser triggered surface flashover switch in vacuum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 1027-1030)
- [9] Sudarshan T S, Li C R. Dielectric surface flashover in vacuum. Experimental design issues[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4(5): 657-662.
- [10] Sudarshan T S. Electrode architecture related to surface flashover of solid dielectrics in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997, 4(4): 374-381.
- [11] 朱明远, 孟永鹏, 成永红, 等. 溅射金膜对氧化铝陶瓷纳秒脉冲真空沿面闪络的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(8): 97-101. (Zhu Mingyuan, Meng Yongpeng, Cheng Yonghong, et al. Influence of sputtered gold electrode on pulsed vacuum surface flashover characteristics of alumina ceramic[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(8): 97-101)
- [12] Carleton E J, Huebner W. Surface switching characteristics of variable permittivity dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(2): 253-262.
- [13] Pillai A S, Hackam R. Surface flashover of solid insulators in atmospheric air and in vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 58(1): 146-153.
- [14] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩. 沿面击穿型触发真空开关的热传导模型分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(15): 118-122. (Liao Minfu, Duan Xiongying, Zou Jiyuan. Analysis on heat conduction model of surface-flashover triggered vacuum switch[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(15): 118-122)
- [15] 曾博. 高压长寿命真空沿面闪络开关技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017: 89-94. (Zeng Bo. Study on the technology of high-voltage long-lifetime vacuum surface flashover switch[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 89-94)