

基于表面闪络放电的伪火花开关触发特性的研究

陈景亮, 姚学玲, 孙伟

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用不同介电常数的绝缘材料, 设计了基于表面闪络放电的触发型伪火花开关, 通过实验发现, 两种相对介电常数较高的材料(介电常数分别为 1 162 和 3 460)制作的沿面闪络触发器, 具有结构简单、体积小、触发特性稳定等特点, 用它们制作的触发型伪火花开关, 放电电压在 2~30 kV 范围内, 触发型伪火花开关的放电时延和时延抖动分别为 81~39 ns、25~8 ns 和 77~35 ns、21~6 ns. 对于耐受电压 30 kV 的伪火花开关, 其最低可靠工作电压可分别低至 134 V 和 128 V, 相应的动态工作电压范围分别为 0.48%~99% 和 0.46%~99%.

关键词: 触发型伪火花开关; 时延和抖动; 表面闪络放电

中图分类号: TN134.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0978-04

Investigation of Triggered Pseudospark Switch Based on Surface Flashover

Chen Jingliang, Yao Xueling, Sun Wei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The triggered pseudospark switches based on surface flashover discharge are designed, and the trigger devices made of the materials with different dielectric constants (relative permittivity equals to 1 162 and 3 460) are investigated. The experimental results indicate that these trigger devices are endowed with excellent trigger characteristics small PSS delay time and delay jitter. When the triggered pseudospark switch operates in the range of 2-30 kV, the delay time of the triggered pseudospark switch gets 81-39 ns and the jitter 25-8 ns for the trigger device made of the dielectric flashover material with relative permittivity 1 162, and 77-35 ns and 21-6 ns for the trigger device made of dielectric flashover material with relative permittivity 3 460. For the triggered pseudospark switch with 30 kV holdoff voltage, the emitted plasma electron density of the trigger devices is high enough to make the triggered pseudospark switches reliably operate at the work voltage down to 134 V and 128 V, the corresponding dynamic discharging voltage is ranged from 0.48% to 99% and 0.46% to 99% of the holdoff voltage respectively.

Keywords: triggered pseudospark switch; delay time and jitter; surface flashover discharge

伪火花开关(PSS)是一种高功率大电流开关, 其工作原理是利用了工作在 Paschen 曲线最低点左侧的伪火花放电现象. 这种放电现象属于低气压放电, 气压范围通常在 1~100 Pa 之间^[1]. 开关结构主要为两个相对放置的空心电极并且在相对的两个电极面中心处各开有一个小孔, 小孔的直径通常为 3~5 mm, 两电极间距为 2~6 mm. 开关放电时, 由于

其空心阴极效应, 电子在阴极内做类似于钟摆的运动, 这种运动大大增加了电子的发射率与电子动能, 并产生雪崩效应, 最终可以在阴极和阳极之间得到密度很高的强电流. 20 世纪 80 年代初, 欧洲核技术研究中心首次将这种 PSS 应用于强流陡脉冲开关技术中. 这种开关通流能力强(可达 100 kA 以上), 电流上升速度快(可达 10^{12} A/s), 触发动抖小(可短

至几纳秒),寿命长(小电流下超过 600 kC)^[1-2]. PSS 作为一种高重复率高压大电流快速开关,已在气体激光器等脉冲功率装置中成功使用,成为极具潜力的闭合开关^[1-4].

触发技术是开关技术研究中的一个重要内容,触发方案的选择不仅关系到开关的整体设计,而且对开关工作性能有很大影响,如开关的工作电压范围、开关的触发时延和抖动、工作频率、开关寿命等^[1-6].

本文采用不同介电常数的介质材料,设计了基于表面闪络放电的触发型 PSS,具有结构简单、寿命长、放电时延短及抖动小的特点.大量实验表明:对于两种表面闪络材料(触发材料的相对介电常数分别为 1 162 和 3 460)制作的触发型 PSS,其放电时延和抖动分别为 81~39 ns、25~8 ns 和 77~35 ns、21~6 ns;对于耐受电压 30 kV 的触发型 PSS,最低触发的开关工作电压可分别低至 134 V 和 128 V,其动态工作电压范围分别为 0.48%~99% 和 0.46%~99%.

1 表面闪络放电装置的设计及触发原理

真空环境下绝缘材料的表面闪络是危害电力系统正常工作的重要问题,而在 PSS 触发装置设计中,却利用表面闪络放电的特点来使触发装置工作. PSS 自击穿时,初始电荷由小孔进入空心阴极腔体外的特殊电场产生.触发放电时,初始电荷由外部直接注入.触发装置的作用在于为伪火花放电提供必须的高浓度带电粒子团,带电粒子团中的大量电子在空心阴极中的特殊电场作用下穿过阴极小孔进入开关主间隙,引起开关放电.研究表明,要使 PSS 可靠放电,向空心阴极注入的电子数目必须达到 $10^9 \sim 10^{10}$ 个.如果电子数目小于该值,放电时延和时延抖动就会增加,或者无法产生放电^[6-7].

本文采用 3 种不同介电常数的介质材料,设计了 PSS 的表面闪络放电触发器,介质材料的主要技术指标见表 1.

表 1 表面闪络介质材料的主要技术指标

介质材料	主要成分	ϵ_r
C1	BaTiO ₃	3 459.9
C2	BaTiO ₃	1 162.2
C3	Al ₂ O ₃	41.7

本文设计的表面闪络放电触发装置如图 1 所

示.放电装置选择薄片介质材料,在介质材料上紧贴其表面放置两个铜电极,电极间距可调.

触发装置的两个触发极安装在空心阴极的端盖上,并通过绝缘材料与端盖隔离,其位置距离空心阴极小孔 15 mm.触发型 PSS 的结构如图 2 所示.

图 2 中的金属电极-真空-绝缘材料(MVD)三者接触处,由于绝缘体和金属接触面不光滑,存在很多尖端和突起点(数量级为 μm),使两者不能完全接触形成了微间隙,如图 3 所示.

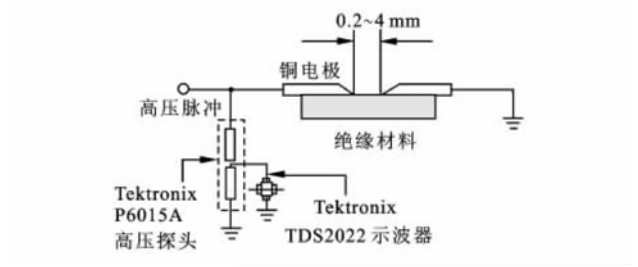


图 1 触发装置及测量结构示意图

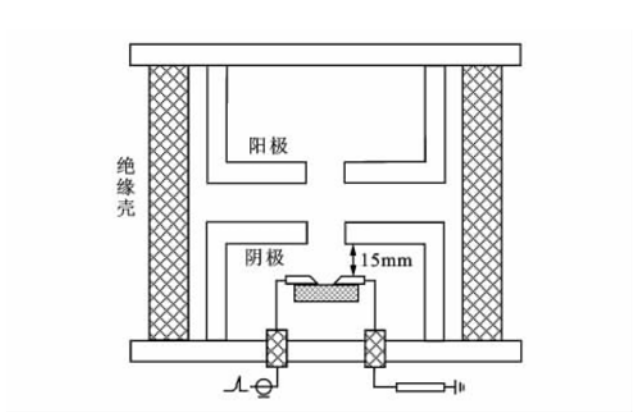


图 2 触发型 PSS 的结构示意图

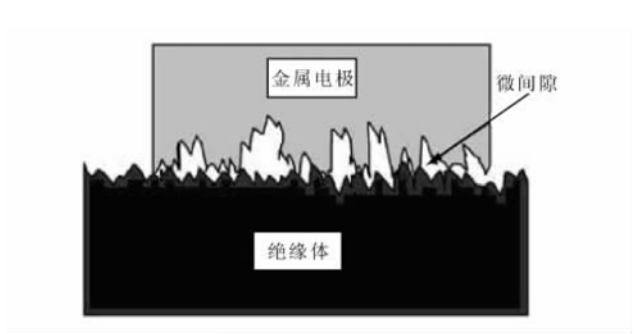
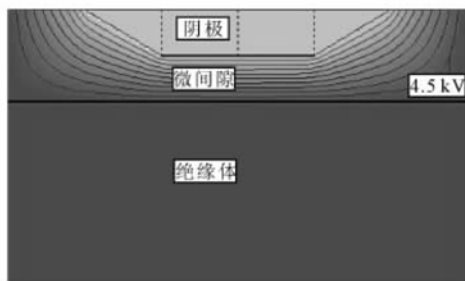


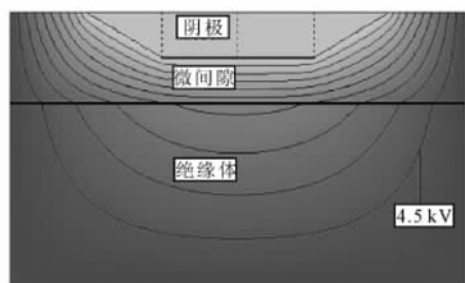
图 3 电极-绝缘体-真空微间隙接触点示意图

利用简化的静电场模型,用 Matlab 软件模拟了不同介电常数的材料在 MVD 三相接触点微间隙处的电位分布.介质材料的相对介电常数分别为 1 000 和 10,微间隙的大小取 $10 \mu\text{m}$,接触处的介电常数取真空下的标准值 $\epsilon_r=1$,脉冲电压幅度为 4.5 kV.图 4 为 MVD 三相接触点处的电位分布图,从图中可看出,随着介电常数的增加,MVD 三相接触点微

间隙内的电位线分布越来越密,产生了局部的高场强区.当金属电极上的施加脉冲电压达数千伏时,局部场强可达 10^6 V/mm 以上,足以产生场致发射,由此产生了高的电子发射率和发射动能.



(a) $\epsilon_r = 1000$



(b) $\epsilon_r = 10$

图4 MVD三相接触点处的电位分布

文献[8]描述了绝缘体表面击穿的过程,如图5所示.图5的介质材料沿面闪络击穿可分以下4个过程.①当脉冲高压施加到真空绝缘体上时,由于MVD三者交接处的局部电场强度较高,引起场致发射,形成初始电子,对应于图5a.②发射出的一部分电子在电场作用下被加速,获得能量并撞击绝缘子表面,通过二次电子发射产生额外的电子,同时电子发射后留下了正电荷,使绝缘体表面带正电.部分二次电子再次撞击绝缘体表面,产生3次电子,这个过程的持续进行就会发展成为二次电子崩.电子雪崩在电场作用下向阳极移动,同时在绝缘体表面积累大量正电荷,见图5b.③与此同时,电子对介质材料表面的不断撞击还使吸附在绝缘子表面的部分气体分子获得能量,在获得能量达到一定值时,这些气体分子可以克服介质材料表面分子的吸附力而被释放出来,如果能量足够大,其中一些气体分子甚至能够被电离,这些被释放的和被电离的气体分子就形成了脱附气体.脱附气体也随电子雪崩向阳极运动,在移动的同时,脱附的气体还可能被电离,见图5c.④当电子崩和脱附气体向阳极移动时,靠近阴

极的介质材料表面所积累的正电荷形成的空间电场使该区域的电场强度增强,结果使原先的场致发射效应加强,同样也加强了初次电子发射、二次电子发射和气体的脱附电离等过程,使前述过程得以维持,并且可能不断持续,最终形成沿面闪络,见图5d.

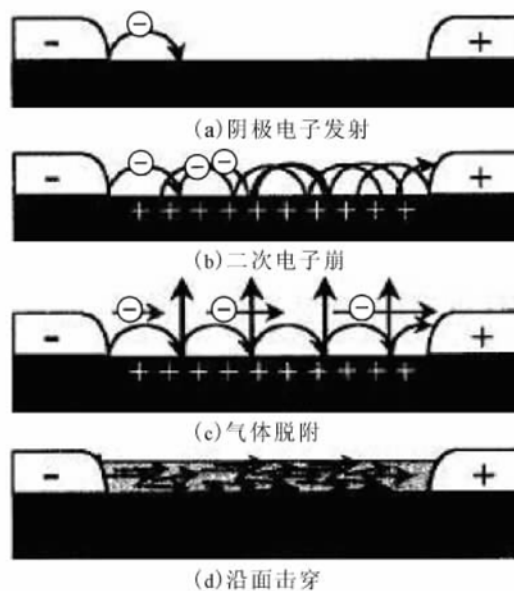


图5 介质材料沿面闪络击穿过程

2 触发装置的触发性能测试

2.1 触发电压与主间隙电流的关系

当触发脉冲在触发电极间引起闪络放电时,触发电压迅速跌落,闪络放电的电离作用引起了伪火花开关放电,经过大约 100 ns 后,主回路导通,电流开始迅速上升,见图6.

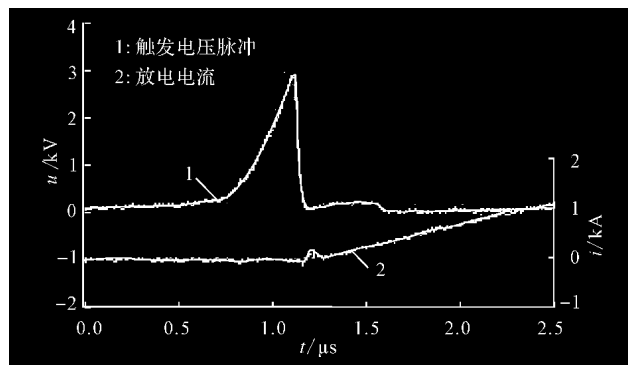


图6 触发电压脉冲与放电电流

2.2 PSS 的可靠工作电压范围

对于电极间距 $d=4$ mm、孔径 $\Phi=6$ mm、厚度 $h=5$ mm 的伪火花开关,气压为 5 Pa 时开关的耐受电压为 28 kV.对应 3 种不同介电常数的介质材料 C1、C2 和 C3 制作的 PSS 触发器,PSS 可靠工作的

放电电压最低值依次为 128 V、134 V 和 274 V,由此得出用上述 3 种介质材料制作的沿面闪络触发型 PSS 的最宽可靠工作电压范围为 0.46%~99%、0.48%~99%和 0.98%~99%。

2.3 PSS 的放电时延与抖动

沿面闪络放电装置是利用表面闪络引起的电子与光子发射而达到触发伪火花放电的目的。文中 PSS 的放电时延 t_d 定义为触发电压开始下降的时刻(即表面闪络放电起始)到主间隙电流开始上升时刻(即主间隙击穿)的时间间隔,开关放电时延的抖动为开关放电时延与其平均值差值的最大值,即 $\Delta t_d = |t_d - \bar{t}_d|_{\max}$ 。

保持开关内部的压力为 5 Pa,触发电极间距为 0.4 mm 时,在 1~12 kV 内,不同介电材料表面闪络触发型 PSS 的放电时延和时延抖动如图 7、图 8 所示。

从图 7、图 8 看出,随着相对介电常数增大,沿面闪络触发型 PSS 的放电时延和时延抖动减小。介质材料 C1 和 C2 的相对介电常数都在 10^3 数量级以上,两者制作的触发型 PSS 的放电时延和时延抖动都很小,且非常接近。

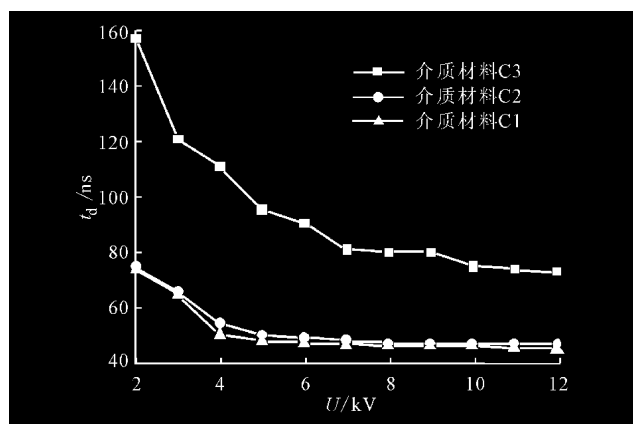


图 7 不同触发材料的放电时延

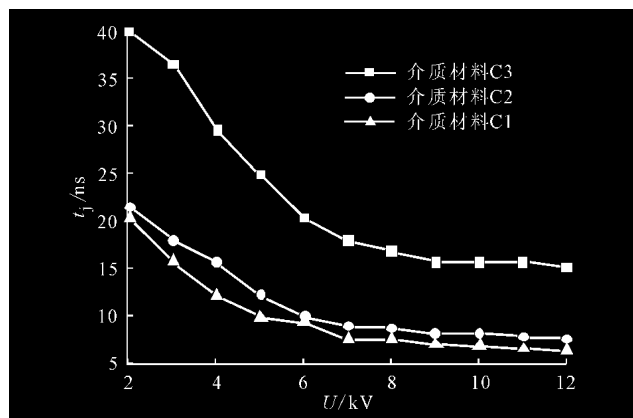


图 8 不同触发材料的时延抖动

3 结 论

使用不同绝缘材料制作了伪火花开关的表面闪络放电触发装置,对触发装置的性能进行了试验研究,结果如下。

(1) 绝缘材料的介电常数对触发型 PSS 的性能有很大影响。介电常数越高,触发型 PSS 的放电时延越小,时延抖动也越小。对于耐受电压 28 kV 的开关,在开关两端加压 2~12 kV,用相对介电常数分别 1 162 和 3 460 的材料制作的触发型 PSS,其放电时延范围分别为 81~39 ns 和 77~35 ns,时延抖动均小于 25 ns,最低可至 6 ns。

(2) 对于自击穿电压 30 kV 的 PSS,用相对介电常数分别 1 162 和 3 460 材料制作的触发型 PSS 的最低可靠工作电压分别为 134 V 和 128 V,对应的工作电压范围分别为 0.48%~99%和 0.46%~99%。

参考文献:

- [1] Frank K, Dewald E, Bickel P, et al. Scientific and technology progress of pseudospark devices[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1999, 27(4): 1008-1020.
- [2] Tkotz R, Gortler A, Christiansen J, et al. Pseudospark switch technological aspects and applications[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1995, 23(3): 309-317.
- [3] Frank K, Stark R, Christiansen J, et al. Spatial and time characteristics of high current, high voltage pseudospark switch[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1997, 25(4): 740-747.
- [4] Frank K, Bicker C, Ernst U, et al. Low-pressure pseudospark switches for ICF pulsed power[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1998, A415: 327-331.
- [5] Kozlik C, Frank K, Almen O, et al. Triggered low-pressure pseudospark based high power switch[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1989, 17(5): 758-761.
- [6] Mehr T, Arenz H, Bickel P, et al. Triggered devices for pseudospark switch[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1995, 23(3): 324-329.
- [7] Görtler A, Schwandner A, Christiansen J, et al. Investigations of two stage pseudospark switches for high-current applications[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1995, 42(11): 2121-2127.
- [8] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron stimulated desorption[J]. Appl Phys, 1980, 51(3): 1414-1421.

(编辑 杜秀杰)