

# 高介碳酸钡陶瓷沿面闪络伪火花开关的研究

姚学玲<sup>1,2</sup>, 陈景亮<sup>2</sup>, 曾正中<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了满足脉冲功率技术和脉冲电流试验技术对放电开关的要求, 笔者设计了 BaTiO<sub>3</sub> 高介电常数的电介质沿面闪络伪火花开关的触发装置。通过对表面放电触发器的实验发现: 在伪火花开关的工作气压范围内, 高介沿面闪络触发器显示出很强的电荷发射能力和快速的电荷注入能力, 在气压为 7 Pa 时, 触发器能够在 30 ns 内释放 1.5 μC, 触发电流的上升陡度为 1.2 × 10<sup>11</sup> A/s, 发射的电子数达到 9.4 × 10<sup>12</sup>。对自放电电压为 28 kV 的伪火花开关, 可靠工作的最低电压可降低到 130 V, 放电时延为 35 ~ 100 ns, 最小抖动为 6 ~ 25 ns。

关键词: 触发型伪火花开关; 高介电材料; 触发特性; 沿面闪络

中图分类号: TN134.4; TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0047-03

## BaTiO<sub>3</sub> Dielectric Surface Flashover Triggering Device of Pseudospark Switch

YAO Xue-ling<sup>1,2</sup>, CHEN Jing-liang<sup>2</sup>, ZENG Zheng-zhong<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi 'an 710024, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the pulsed power technology and pulse test technology to the switchers, a triggered device of BaTiO<sub>3</sub> high dielectric surface flashover pseudospark switch(PSS) was designed and its triggering characteristics were investigated. The test results indicate that the high-dielectric triggered device shows excellent electric performances of higher electron emitting capability and fast charge injection within the limits of adjusted parameters like gas pressure and applied voltage. At the pressure 7 Pa, the emitted charge is 1.5 μC within 30 nanosecond, the rise time of injection current is about ten nanosecond, the current injection rate reaches to 1.2 × 10<sup>11</sup> A/s and the number of emitted electrons up to 9.4 × 10<sup>12</sup>, these make PSS have small delay time and delay jitter. For the hold-off voltage of PSS 28 kV, the lowest voltage of trigger switch drops to 130 V, the corresponding maximum discharging delay time and delay jitter are respectively 100 ns and 25 ns when the gas pressure is 7 Pa. The minimum discharging delay time and delay jitter are less than 35 ns and 6 ns, respectively when the switch voltage is 28 kV.

Key Words: triggered pseudospark switch; high dielectric material; trigger characteristics; surface flashover discharge

## 0 引言

伪火花开关(PSS)是一种电流上升快的低气压气体开关,工作在巴申曲线的左支<sup>[1-4]</sup>,放电发生在一个特殊的空心电极腔体中,在空心电极腔中经历几个连续的放电阶段,各个阶段的放电过程可用不同的放电机理表述<sup>[1-6]</sup>。在脉冲功率技术和脉冲电流试验技术中,要求放电开关具有很宽的放电范围(如 1%~99%)、很小的放电时延和抖动。为满足以上要求,相继出现了各种伪火花开关的触发技术<sup>[6-9]</sup>,如脉冲辉光放电、电子注入、沿面闪络、紫外线照射等,其中沿面闪络触发技术因其结构简单、性能优良而

获得广泛应用。

笔者采用高介电常数的 BaTiO<sub>3</sub> 系介质材料,设计了 PSS 沿面闪络触发器,实验表明:采用相对介电常数为 3 500 的材料制作 PSS 触发器,其放电时延和抖动分别小于 35.6 ns。对于自击穿电压 28 kV 的 PSS,其最低触发的开关电压可降低至 130 V。

## 1 沿面闪络的原理及高介陶瓷沿面触发 PSS 的设计

PSS 自击穿时,初始电荷来自自由小孔进入的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 PSS 放电提供必须的高浓度带电粒子团,带电粒子团中的大量

收稿日期: 2007-09-19; 修回日期: 2007-12-25

作者简介: 姚学玲(1966-),女,博士后,副教授,主要从事脉冲功率技术研究。

电子在空心阴极中的特殊电场作用下穿过阴极小孔而进入开关主间隙,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<sup>[5,6]</sup>。

当脉冲高压施加到真空绝缘体系上时,由于电极-真空-介质材料 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。发射出的部分电子在电场作用下被加速,获得能量并撞击材料表面,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材料表面,产生 3 次电子,这个过程持续就发展成为二次电子雪崩。电子雪崩在电场作用下向阳极移动,在材料表面积累大量正电荷。电子对材料表面的不断撞击还使被吸附在表面附近的部分气体分子获得能量而释放出来或电离,形成脱附气体,并随电子雪崩向阳极运动。靠近阴极的材料表面大量正电荷的存在,使局部区域的电场增强,从而加强了初次电子发射、二次电子发射和气体的脱附电离等,使整个过程不断持续,最终形成沿面闪络<sup>[10-12]</sup>。

由此得出:沿面触发器主要是依赖于 MVD 三者交接处的电场畸变而形成场致发射引起,而电场畸变的程度与闪络材料的相对介电常数  $\epsilon_r$  有关,  $\epsilon_r$  越大,场畸变越严重。早期 PSS 沿面闪络触发器大都选用聚酯薄膜一类的有机绝缘材料,由于绝缘材料的  $\epsilon_r$  较小,因而要求触发电极间距离非常小,经过不多的脉冲触发放电后,在绝缘材料表面就会出现明显的炭痕烧蚀,一方面污染空心电极,另一方面改变了空心阴极内的气压而导致开关性能发生变化。文[4, 13- 15]用  $\epsilon_r$  较大的陶瓷材料和半导体材料代替原有的有机绝缘材料,文[14]中的半导体氧化锌触发材料由晶粒和晶界组成,其中晶粒呈现电阻特性,晶界呈现电容特性,当触发脉冲经过氧化锌半导体表面多次放电后,在半导体氧化锌表面会形成一永久的导电通道,从而影响 PSS 的触发性能;文[15]研究了  $Al_2O_3$  陶瓷管作为沿面触发材料,其  $\epsilon_r$  只有几十,在触发器的 MVD 三者交接处的电场畸变程度不高,对 PSS 的触发性能的改变有限;陶瓷材料在多次脉冲放电后,能自行恢复其绝缘性能,对稳定 PSS 的触发性能及延长使用寿命非常有益。

PSS 的沿面闪络触发器由沿面闪络材料及两触发电极构成,安置在空心阴极内部。笔者设计了由  $BaTiO_3$  系高介陶瓷(相对介电常数  $\epsilon_r=3500$ )制作的沿面闪络触发器以及由外绝缘、空心电极组成的 PSS,见图 1。空心电极由

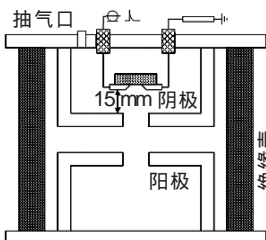


图 1 伪火花开关的结构

黄铜材料制作,其内径 32 mm、深 38 mm、电极厚度 5 mm、小孔直径 6 mm、电极间距 4 mm,沿面闪络触发器为圆柱形,绝缘外壳为尼龙材料且用“O”型圈与电极密封。它的工作气压范围为 1~100 Pa,工作时,其中一个空心电极接高压,另一空心电极接地,高压信号通过高压探头 Tektronix P6015 监测。

## 2 伪火花开关触发器的实验

### 2.1 触发器的触发电路

减少触发脉冲的上升时间、增加触发脉冲的输出能量,触发器注入电子的能力都会得到提高,PSS 的放电时延和抖动就会相应减小。沿面闪络触发器的触发脉冲的发生电路见图 2。图中, D 为整流二极管, C 为储能电容, Tr 为调压器, T 为脉冲变压器,触发电路输出 8 kV 的脉冲电压。

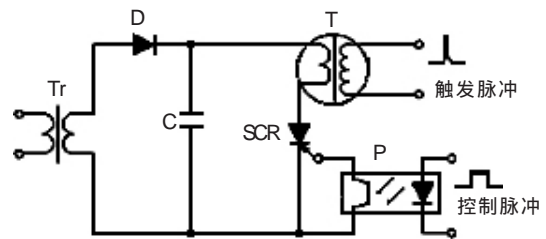


图 2 沿面闪络触发器的触发电路和触发脉冲

### 2.2 触发器的触发性能

高介电常数的  $BaTiO_3$  系介质材料沿面闪络触发器电荷注入量的实验电路见图 3。图 3 中,闪络材料直径为 10 mm,长度为 0.2~4.0 mm;触发脉冲用 Tektronix P6015A 高压探头测量;  $R_s$  为电流传感器,通过示波器测量并将数据传入计算机,通过电流对时间的积分可以计算出触发器的电荷注入量  $Q$ ,也可计算出触发器发射的电子数  $N_e$ 。其中

$$Q = \int i dt \tag{1}$$

$$N_e = Q/e \tag{2}$$

式中  $i$  为触发器的触发电流,通过图 3 中的  $R_s$  测得,  $e$  为电子的电荷量。

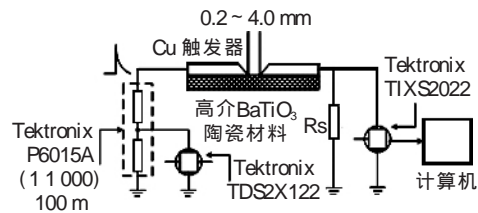


图 3 触发器电荷注入量实验电路

在 PSS 工作的粗真空环境中,沿面闪络材料对触发器性能有很大影响,触发器的功能就是向 PSS 提供导通的足够的载流子,因此在触发脉冲的作用下,沿面闪络触发器提供载流子数量的多少就可以表征触发器性能的优劣,图 4 为触发脉冲下,高介  $BaTiO_3$  系沿面闪络触发器( $\epsilon_r=3500$ )产生的触发电

流(触发材料长度 0.4 mm)。

从图 4 可得出:用高介 BaTiO<sub>3</sub> 制作的触发器具有很强的电荷注入能力,其触发电流的上升速率达到  $1.2 \times 10^{11}$  A/s;在大约 30 ns 内,触发器释放的电荷量按照式(1)计算为 1.5  $\mu$ C 左右,再由式(2)算得发射电子数达到  $9.4 \times 10^{12}$ ,这就为开关的导通时延和抖动提供了保障。

### 3 伪火花开关的特性

#### 3.1 静态特性

PSS 的静态特性主要指开关的自放电电压与气压间的关系,图 5 为 PSS 自放电电压与气压间的关系曲线,当气压高于 24 Pa,开始出现辉光放电现象,而当气压低于 2 Pa,开关的自放电电压基本稳定在 40 kV 左右。

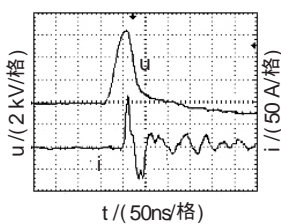


图 4 沿面闪络触发器的触发电压和电流

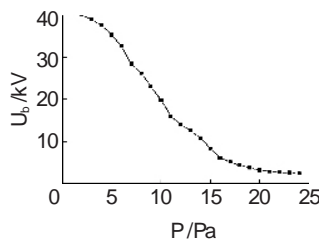


图 5 开关自放电电压  $U_0$  与气压  $P$  的关系

PSS 的另一个重要的特征是电极间电压的快速跌落,如果定义从电压开始跌落到电压为零之间的时间为 PSS 的跌落时间  $t_f$ ,跌落时间  $t_f$  与气压  $P$  和工作电压  $U$  的关系见图 6。

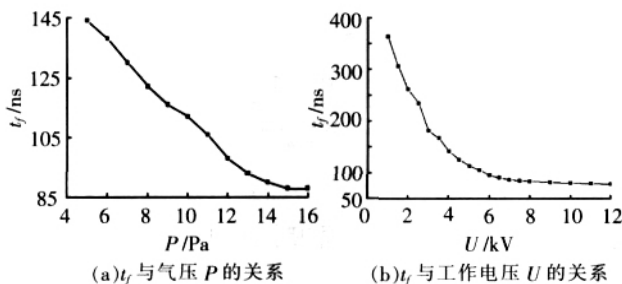


图 6 开关跌落时间与气压和工作电压的关系曲线

从图 6 中得出:由于 PSS 的空心阴极效应,使得其具有 GV/s 的电压跌落速度。随着气压的降低,气体浓度的减小,空心阴极阶段电子的碰撞电离相对减弱,需要较长时间的运动碰撞才能获得所需的动能并从空心阴极腔体中逃逸出来奔向阳极,因此随着气压的降低,开关电压跌落速度减慢;随着工作电压的增加,空心阴极腔体中的电场及电极间电场的增强,开关的跌落速度随之增加。

#### 3.2 动态特性

伪火花开关的动态特性主要指开关在触发器的作用下的特性,包括可靠触发的电压工作范围、触发时延和抖动等。

#### 3.2.1 PSS 的工作电压范围

笔者实验研究表明,基于高介陶瓷沿面闪络触发器的伪火花具有非常宽的工作电压范围,在气压为 7 Pa 时,PSS 的自放电电压为 28 kV,保持气压不变,将工作电压从零开始逐步上升,测得从 130 V 直至 28 kV,该沿面闪络触发器都能可靠地触发 PSS,因此,PSS 的工作电压范围为 0.46%~99%。图 7 为最低工作电压下触发电压和脉冲电流的波形,从图中看出,沿面闪络放电后,大约经过 100 ns 的时延,主回路电流开始上升。

#### 3.2.2 触发时延和抖动

当触发器发生沿面闪络时,触发脉冲开始陡降,沿面闪络形成的电子崩使得 PSS 放电,主回路电流开始上升。定义触发电压降落点到主回路电流上升点之间的时间间隔为 PSS 的触发时延  $t_d$ ,见图 7,而 PSS 放电的稳定性用抖动  $j$  表示。图 8 为高介沿面闪络伪火花开关的放电时延和抖动随施加工作电压间的关系(实验条件同上)。从图中可以看出:PSS 的最小放电时延和抖动分别小于 35 ns 和 6 ns,明显优于文[14, 15]报道的指标。

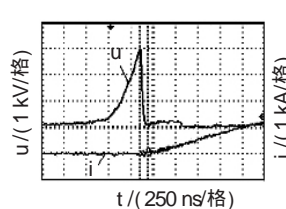


图 7 触发脉冲和主回路电流的波形

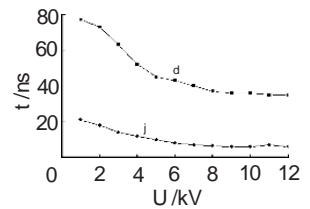


图 8 PSS 的放电时延和抖动

### 4 结语

采用介电常数为 3 500 的 BaTiO<sub>3</sub> 陶瓷材料制作 PSS 的沿面闪络触发器,触发电流的上升陡度达  $1.2 \times 10^{11}$  A/s,发射的电子数达到  $9.4 \times 10^{12}$ ,为伪火花开关放电时延和抖动的减少提供了基础。对自放电电压 28 kV 的伪火花开关,可靠工作的最低电压可降低到 130 V,放电的范围可从小于 1%~99%,放电时延和抖动分别为 35、6 ns,是性能优良的脉冲功率开关,也可作为脉冲电流放电技术中的 Crowbar 换能开关。

#### 参考文献:

- [1] GORTLER A, CHRISTIANSEN J, DOTZER R. Investigation of Pulsed Surface Flashover for the Triggering of Pseudospark High-power Switches [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1989, 17(5): 762-765.
- [2] GORTLER A, CHRISTIANSEN J, DOTZER R, et al. Scientific and Technological Progress of Pseudospark Devices [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1999, 27(4): 1008-1020.
- [3] TKOTZ R, GORTLER A, CHRISTIANSEN J, et al. Pseudospark Switc-technological Aspects and Applications[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1995, (下转第 52 页)

