



·脉冲功率技术·

一种基于吸气电极的新型真空触发开关*

卢彪, 彭太平, 言杰, 邱瑞, 柯建林, 龙天骏

(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: 针对真空触发开关触发时延和抖动大、使用寿命不长的难题, 设计了一种基于吸气电极的新型真空触发开关, 开展工作寿命测试实验和不同触发极性、主间隙电压和触发能量下的导通特性实验。实验结果表明: 与纯金属电极开关相比, 吸气电极开关的触发时延和抖动更小, 工作寿命更长。负极性触发时的触发时延和抖动均远低于正极性触发。正极性触发的触发时延为 1.7~3 μs , 抖动为 300~700 ns, 而负极性触发的触发时延为 400~600 ns, 抖动为 30~70 ns。触发时延和抖动都随着触发能量的增大而减小, 但当能量高于一定值后, 触发能量对导通特性的影响趋于饱和。

关键词: 吸气电极; 触发真空开关; 触发时延; 触发极性; 触发能量; 工作寿命

中图分类号: TM564

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210014

New type of triggered vacuum switch based on gas-breathing electrode

Lu Biao, Peng Taiping, Yan Jie, Qiu Rui, Ke Jianlin, Long Tianjun

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Aiming at the difficult problems of trigger delay, jitter and short life of triggered vacuum switch, A new type of triggered vacuum switch based on a gas-breathing electrode was designed to carry out life test and conduction characteristic experiment under different trigger polarity, main gap voltage and trigger energy. The experimental results show that compared with the pure metal electrode switch, the gas-breathing electrode switch has shorter trigger delay, shorter jitter and longer working life. The trigger delay and jitter of negative polarity trigger are lower than that of positive polarity trigger. The trigger delay of positive polarity trigger is 1.7–3.0 μs , and the delay jitter is 300–700 ns. The trigger delay of negative polarity trigger is 400–600 ns, and the jitter is 30–70 ns. The trigger delay and jitter decrease with the increase of trigger energy, but when the energy is higher than a certain value, the influence of trigger energy on the conduction characteristics tends to be saturated.

Key words: gas-breathing electrode; triggered vacuum switch; trigger delay; trigger polarity; trigger energy; working life

真空触发开关(TVS)是脉冲功率技术中一种十分重要的开关器件。它将真空开关技术和三电极火花间隙技术相结合, 利用真空作为主电极之间的绝缘介质和灭弧介质, 采用特殊设计的触发极来控制开关快速关合, 具有结构紧凑、介质恢复迅速、操作无噪声、工作可靠性高、无污染、环境适应性强等特点, 相比于气体触发开关, 内部的真空绝缘介质使真空触发开关具备很强的抗电磁干扰及抗辐照能力, 广泛应用于高功率脉冲技术领域^[1-2]。

真空触发开关的研究始于 20 世纪 60 年代, 美国通用电气公司的 Lafferty 等^[3]对真空触发开关, 特别是涂敷氢化物作触发材料的真空开关进行了大量的研究, 提出了真空触发开关的基本理论, 为真空触发开关研究奠定了基础。20 世纪 70 年代, 国外印度科学家 S. Kamakshaiiah 和 G. R. Govinda Raju 等^[4-5]对采用绝缘介质和半导体材料涂层作为触发材料的 TVS 进行了实验, 研究了 TVS 在不同涂层材料下的导通特性, 认为触发时涂层材料内部气体逸出并进一步引发电子崩是造成间隙最后击穿的原因。国内中国科学院、华中科技大学、武汉大学、大连理工大学等都有广泛的研究基础^[6-9]。20 世纪 70 年代至今, 国内外学者对真空触发开关的应用进行了大量的研究, 发现真空触发开关应用于高压脉冲领域时, 触发时延和抖动大、使用寿命不长是制约其发展的难点问题。目前国内真空

* 收稿日期: 2021-01-14; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(11575162)

作者简介: 卢彪(1988—), 男, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术研究。

触发开关的触发时延普遍在数 μs 量级,抖动在 μs 量级^[10-12]。

为了解决真空触发开关触发时延和抖动大、使用寿命不长的难题,本文提出一种基于吸气电极的新型真空触发开关设计,与使用氢化物涂覆在绝缘表面释气不同,采用吸气电极作为触发极,触发时受热释放所吸气体以改善真空开关工作性能,并且可在释气后将气体回吸,恢复开关真空状态。

1 触发开关结构与工作原理

本文设计的吸气电极真空触发开关结构如图 1 所示,实物样品如图 2 所示。触发阴极和阳极为主电极,两者之间的真空间隙为主间隙,长度为 2 mm。触发极采用非蒸散吸气剂材料,以钛作为基体,加入钼粉混合烧结在触发端陶瓷筒内壁,具备对活性气体的较强的吸收和释放能力。触发极与触发阴极之间为 0.3 mm 的陶瓷绝缘沿面。图 3 为触发极与阴极表面结构。

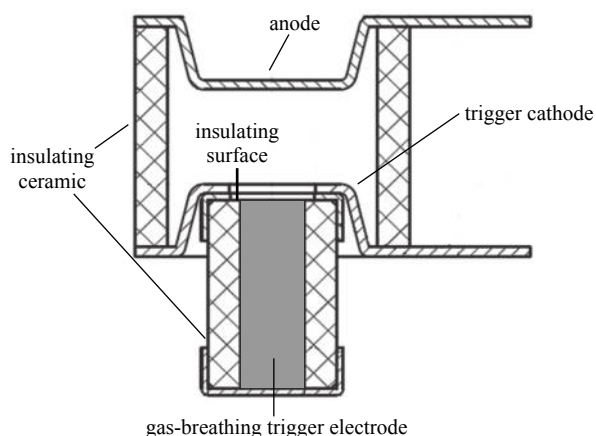


Fig. 1 Structure of gas-breathing triggered vacuum switch

图 1 吸气电极真空触发开关结构示意图



Fig. 2 Sample of gas-breathing triggered vacuum switch

图 2 吸气电极真空触发开关样品

目前常见的真空触发开关一般采用纯金属触发电极,触发极通过外触发系统与主电极构成放电电路。外触发电路提供触发脉冲,在电场作用下触发极与阴极间产生初始等离子体,并加速喷射到主间隙。在主间隙电场的作用下,带电粒子相互碰撞或轰击相对的主电极激起二次电离,产生二次粒子,二次粒子重复上述的过程,带电粒子的数量迅速增大,随着电流密度上升,初始等离子体转变为弧光放电,在间隙中建立起金属等离子体电弧,完成主间隙的击穿放电导通过程,整个过程所需时间大致为数 μs 。而本文设计的吸气电极开关不再完全依靠电极表面上金属蒸气电离产生的等离子体来完成导通过程,而是通过吸气触发极释气引入新的气体导通介质。大致过程为:在脉冲电场作用下吸气触发极周围形成阴极斑,通过阴极斑的加热作用,吸气电极瞬间释放所吸气体,在电场作用下,初始电子于气体中完成电子雪崩,并形成迅速向阳极扩展的流注,导致主间隙导通,这个过程所需时间最短可至几 ns,可大幅缩短触发时延,同时减轻对电极的烧蚀,延长工作寿命和提高导通性能。

2 实验主电路与测量

实验主电路如图 4 所示。主电容 C 典型电容值为 $10\ \mu\text{F}$,通过设置不同高低的充电电压可输出不同的能量,负载电阻 $R=0.2\ \Omega$ 。PD₁ 和 PD₂ 为高压探头,PD₁ 测量主间隙阳极与阴极之间的电压,PD₂ 测量 TVS 触发极与阴极之间的电压;

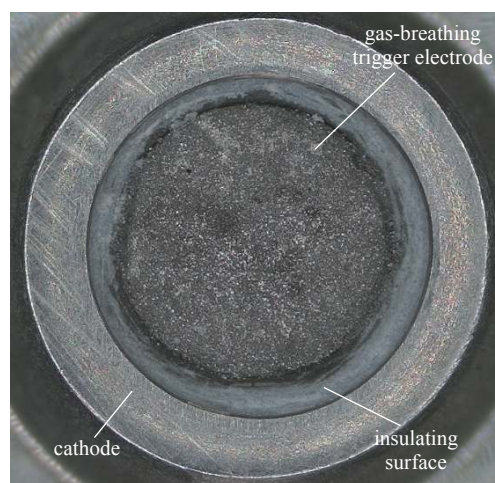


Fig. 3 Structure of trigger electrode and cathode surface

图 3 触发极与阴极表面结构

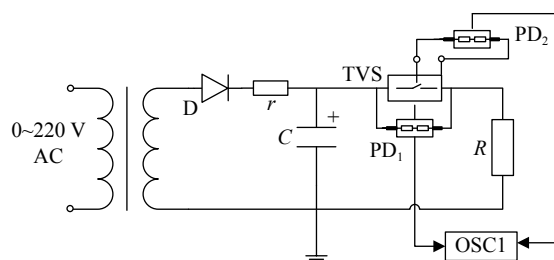


Fig. 4 Main circuit

图 4 主电路

触发极-阴极外接触回路,控制 TVS 的触发导通; OSC1 为 TEK 示波器,用于观测电压波形。实验中分别通过改变电容充电电压和触发电源连接极性等手段,研究各变量对触发开关触发性能的影响。

图 5 是真空触发开关的典型触发电路,220 V 的交流电压由变压器升压,通过二极管 D_1 整流后经电阻 r_1 对电容 C_1 充电,当开关 K 合上,电容 C_1 将放电,在脉冲变压器 T_1 一次侧形成一个低压脉冲,经脉冲变压器的二次侧形成高压脉冲施加到真空开关触发极上,脉冲变压器 T_1 变比为 1 : 33。图 6 为实验中典型的波形图,其中触发电压的触发前沿约为 500 ns。

3 触发时延

触发时延是触发开关的关键参数,与触发源密切相关,它包括两个部分,分别对应于触发过程的两个阶段,即动作时延 t_{d1} 和导通时延 t_{d2} 。图 7 为触发时延示意图。 t_{d1} 为从触发脉冲峰值到主间隙电压开始下降所经历的时间, t_{d2} 为从主间隙电压峰值降到零点之间的时间。动作时延与初始等离子体的产生有关,对于利用沿面放电产生初始等离子体的触发放电,其触发参数与触发动作特性之间有一定的关系,动作时延的理论公式为^[13]

$$t_{d1} = \frac{\pi\lambda\gamma_d c_d}{4J^2 U^2} (T_{cd} - T_0)^2 \quad (1)$$

式中: t_{d1} 为动作时延; λ , γ_d , c_d 和 T_{cd} 分别为触发介质的导热系数、密度、比热和临界温度; T_0 为环境温度; J , U 分别为触发电流密度和触发电压。

导通时延与初始等离子体的扩散有关。定义 d 为主电极之间开距, h 为触发极到阴极表面的距离。当触发极安装在阴极时,可推出主间隙导通时延为^[14]

$$t_{d2} = kd \left(1 + \frac{h}{d} \right) I_f^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: k 是一个依赖于触发系统设计的结构参数; $\alpha = (0.2 \sim 0.6)$; I_f 为触发电流。

4 实验结果与讨论

4.1 触发极性对开关导通特性的影响

根据主间隙电压 U_c 与触发电压 U_t 极性的不同,真空触发开关有 4 种不同的极性模式,对应的极性模式如图 8 所示。

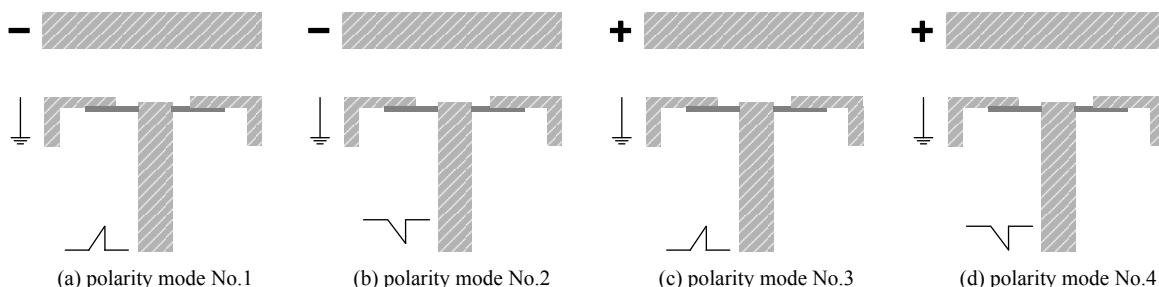


Fig. 8 Diagram of polarity modes

图 8 极性模式示意图

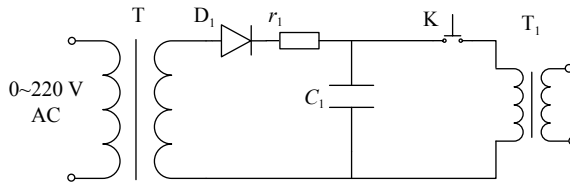


Fig. 5 Trigger circuit

图 5 触发电路

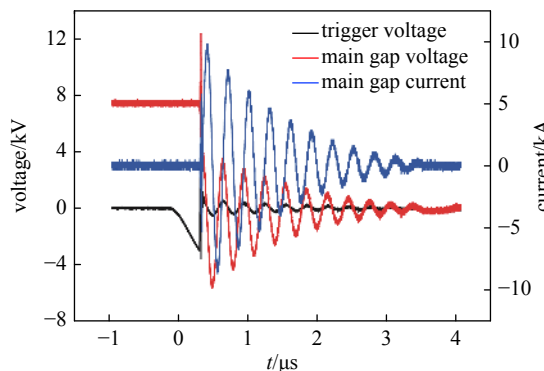


Fig. 6 Typical waveform of trigger voltage and main gap voltage

图 6 典型触发电压、主间隙电压和主间隙电流波形图

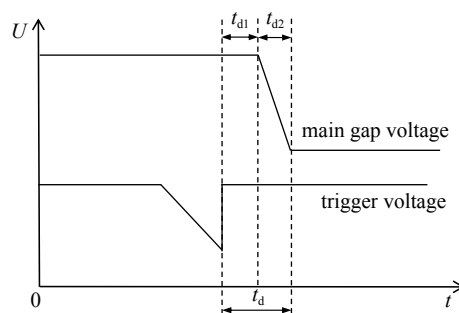


Fig. 7 Diagram of trigger delay

图 7 触发时延示意图

在 3, 4 极性配置情况下, 主间隙电压为正极性, 扩散到间隙的主要是电子; 在 1, 2 极性配置情况下, 主间隙电压为负极性, 扩散到间隙的主要是正离子, 正离子的质量大, 且需要穿过整个间隙才能到达主电极表面, 所以主间隙电压为负极性时, 开关更难导通, 且需要的时间更长。

本文主要研究主间隙电压为正极性时, 在不同触发电压极性条件下, 触发时延及抖动随主间隙电压的变化规律。实验中, 主间隙电压选用 1~15 kV, 每 2 kV 作为一个等级。每种极性模式, 在每个电压等级下做 10 次实验, 取平均值为时延值, 利用实验数据点描述触发时延值和抖动(时延分散性)。

在图 8 的 3, 4 极性配置情况下, 选取电容 $C=10\ \mu\text{F}$, 触发电压 $U_t=6\ \text{kV}$, 触发能量为 0.17 J, 测量触发时延 t_d 及抖动在不同触发极性下随主间隙电压 U_c 的变化, 结果如图 9 所示。

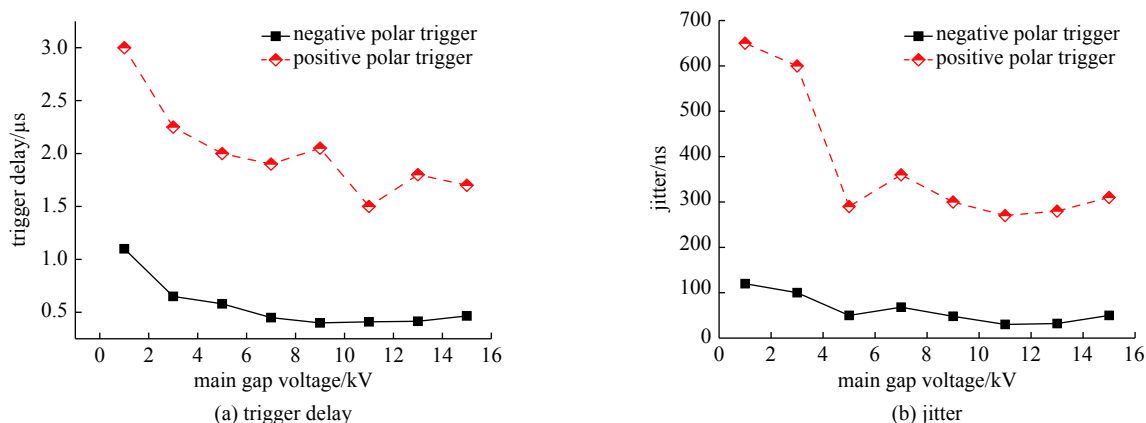


Fig. 9 Influence of trigger polarity on trigger delay and jitter

图 9 触发极性对触发时延及抖动的影响

由图 9 可以看出, 负极性触发的触发时延最长不超过 1 μs , 大部分在 400~600 ns 之间, 时延抖动最大不超过 100 ns, 大部分在 30~70 ns 之间, 而正极性触发的触发时延范围为 1.7~3 μs , 时延抖动范围为 300~700 ns, 负极性触发时延和抖动远远小于正极性触发导通。分析原因是, 本文采用的触发极材料为吸气材料, 当施加正极性脉冲时, 阴极斑产生于触发阴极, 距离吸气触发极较远, 加热吸气触发极产生气体释放的效果较差, 导通过程和常用的金属电极触发开关相近, 通过金属电极表面蒸发的金属蒸气电离所产生的等离子体完成导通, 整个导通过程所需时间较长, 大致在数 μs 。而当在触发极上施加负极性脉冲时, 阴极斑产生于吸气触发极周围, 在阴极斑的加热作用下, 吸气电极瞬间释放所吸气体, 在电场作用下, 初始电子于气体中完成电子雪崩, 并形成迅速向阳极扩展的流注, 这个过程所需时间最短可至几 ns, 整个导通过程不再只依靠金属蒸发, 且所需时间远小于前者。

4.2 触发能量对开关导通特性的影响

在图 8 的 4 极性配置情况下, 电容容量不变, 提高触发电压以增加触发能量, 不计脉冲变压器的损耗, 认为触发电源输出至触发极的能量等于触发电容储能。在电容容量为 10 μF , 主间隙电压为 10 kV 时, 触发电压选用 6~20 kV, 对应的触发能量范围为 0.17~1.8 J。每 2 kV 作为一个等级进行试验, 每个电压等级下做 10 次试验, 取平均值为时延值, 观测触发能量对触发特性的影响, 触发时延和抖动随触发能量的变化规律如图 10 所示。

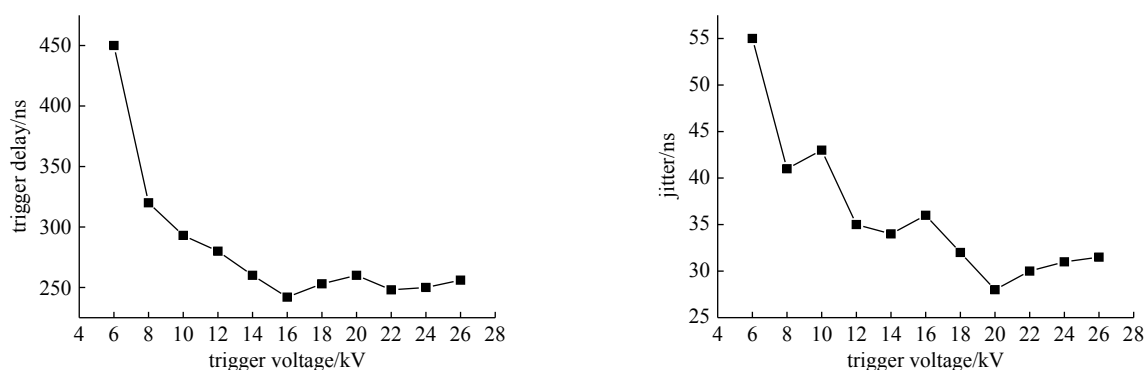


Fig. 10 Influence of trigger energy (increase with trigger voltage increase) on trigger delay and jitter

图 10 触发能量对触发时延及抖动的影响

由图 10 可以看出,随着触发能量的增加,触发时延和抖动都会有所减小。这是由于触发时延和初始等离子体的产生密切相关,在触发能量较低时,产生的初始等离子体较少,能量较低,达到阳极的时间就会比较长;随着触发能量的增加,初始等离子体的数量随之增加,触发极与阴极间间隙容易击穿,初始等离子体获得较大的能量,进入主间隙之后会更容易使主间隙击穿,等离子体的速度随着触发能量增加而增大,扩散时间便随之减小。但当能量高于一定值后($U_t > 20$ kV),初始等离子体的密度及其能量对触发导通的影响趋于饱和,对触发开关的导通延时影响变小,这可能是由于在触发能量过大时,阴极由于热蒸发可能产生大量的阴极蒸气,从而消耗很多能量,这些高能金属蒸气可能迅速扩散到电极周围以及陶瓷绝缘筒内壁上,使产生的有效导电等离子体减少。因此虽然触发能量增大可以提升开关性能,减小触发时延,但从开关寿命角度考虑,触发能量不宜过大。

4.3 工作寿命及稳定性

对于器件本身来说,工作寿命是一个重要的性能参数,它表征了额定工作电压和电流下的高触发可靠性所能持续的时间或者操作的次数。为了验证吸气触发电极对于提升开关工作寿命的效果,在图 8 的 4 极性配置情况下开展了吸气电极开关和金属电极开关的寿命比对试验。图 11 为吸气触发阴极与纯金属触发阴极的对比,其中金属电极开关的触发极材料选用纯钨,其他结构材料参数与吸气电极开关相同。实验条件为:电容容量 $C = 10 \mu\text{F}$,主间隙电压 $U_c = 10$ kV,触发电压 $U_t = 6$ kV,测量两种触发开关在连续 300 次工作过程中的触发沿面击穿电压和导通成功率,工作间隔 5 s,以连续 50 放电发次为一个统计区间,统计结果如表 1 和表 2 所示。

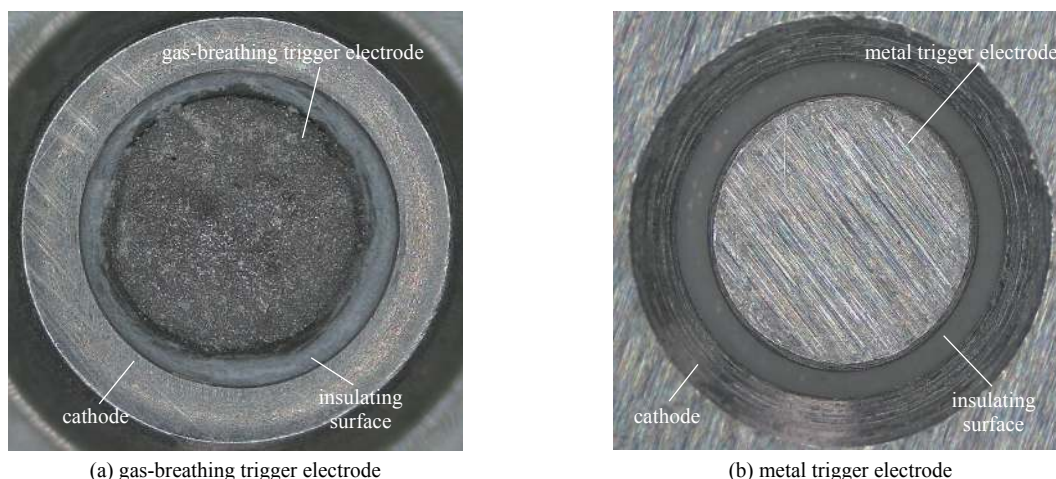


Fig. 11 Comparison diagram of gas-breathing trigger electrode and metal trigger electrode

图 11 吸气触发极与纯金属触发极对比图

表 1 吸气触发极开关统计结果

Table 1 Statistical results of gas-breathing trigger electrode switch

No.	average trigger breakdown voltage/kV	average trigger delay/ns	success rate of conduction/%
0~50	3.85	390	100
51~100	3.54	453	100
101~150	3.61	385	100
151~200	3.27	480	100
201~250	3.31	430	100
251~300	3.22	498	98

从表 1 和表 2 可以看出,吸气电极触发开关具有比纯金属电极触发开关更长的工作寿命和更短的触发时延。触发极击穿电压关系到产生的初始等离子体强度,当触发极击穿电压较高时,初始等离子体强度高,开关主间隙易于导通,反之则导通成功率降低。实验开始时,吸气触发极的平均触发击穿电压为 3.85 kV,经过 300 次实验后,平均触发击穿电压降至 3.22 kV,降幅为 16%,300 次触发只有 1 发没有正常导通,触发时延范围为 390~498 ns。而纯金属触发极的平均触发击穿电压由开始的 4.02 kV 降至 1.32 kV,降幅高达 67%,导通成功率随放电发次的增加递减,由初始阶段的 100% 降至 24%,触发性能严重恶化,开关很难正常导通,而且触发时延则由开始的 1850 ns 增至 3460 ns,远远高于吸气触发极的触发时延。

表 2 金属触发极开关统计结果
Table 2 Statistical results of metal trigger electrode switch

No.	average trigger breakdown voltage/kV	average trigger delay/ns	success rate of conduction/%
0~50	4.02	1850	100
51~100	3.21	2270	94
101~150	2.65	2460	80
151~200	2.13	2750	68
201~250	1.67	3100	44
251~300	1.32	3460	24

结合前文分析,造成这种差别的原因在于,纯金属电极触发开关导通时,主电极放电主要靠电极材料电离产生的金属蒸气,这些金属蒸气会向四周喷射,不可避免地会喷射并冷凝沉积到绝缘沿面的表面上。主电路电流越大,脉宽越大,电极的烧蚀越严重,在绝缘沿面沉积的金属就会越多,相当于在开关的绝缘介质表面附着一层金属层,使得整个绝缘极电阻减少,触发极和阴极在陶瓷表面产生沿面击穿放电的击穿电压随之降低,产生的等离子体强度变弱,主间隙导通难度增大,导通时间变长,放电次数过多时,沉积金属层甚至会使触发极与阴极短接,导致触发开关不能正常触发而失效。吸气电极触发开关导通时,吸气电极会在阴极斑加热作用下瞬间释放所吸气体,为开关提供新的气体导通介质,使开关导通不再单纯依靠烧蚀电极产生金属蒸气,而且电子在气体中倍增雪崩产生流注的时间也远远低于金属蒸发溅射,因此相比于金属电极开关,吸气电极开关的电极烧蚀程度弱,触发时延短。图 12 为 300 次放电实验后吸气电极开关和金属电极开关的电极烧蚀对比图。可以看到,纯金属电极开关的触发

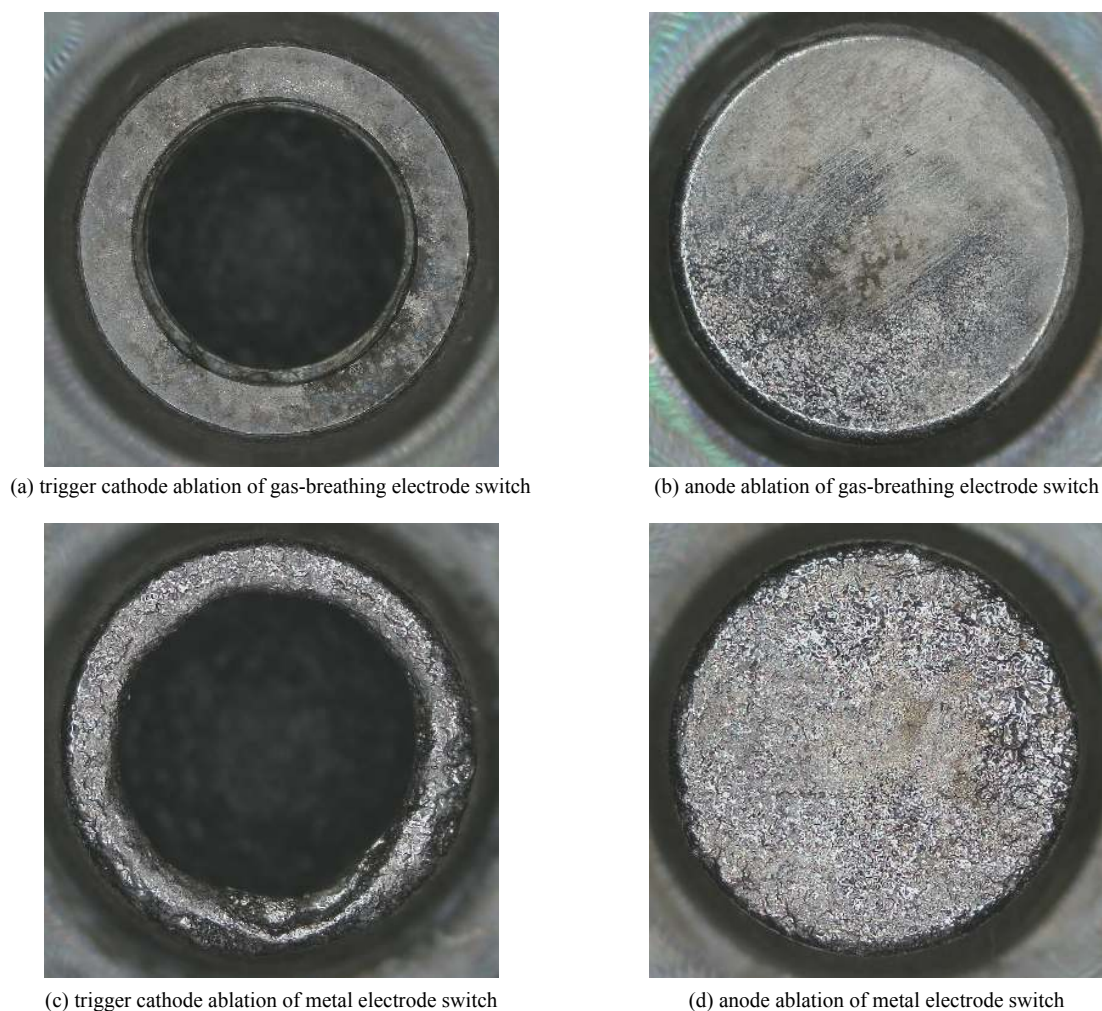


Fig. 12 Comparison of electrode ablation between gas-breathing electrode switch and metal electrode switch

图 12 吸气电极开关和金属电极开关的电极烧蚀对比图

阴极与阳极的烧蚀程度均远大于吸气电极开关。

5 结 论

本文设计了一种基于吸气电极的新型真空触发开关,研究了触发极性、主间隙电压和触发能量对开关工作性能的影响,分析了不同电参数下开关导通性能的差异及原因,通过试验对比了吸气电极触发开关与常见的纯金属电极触发开关的导通特性及工作寿命,得到如下结论:

(1)吸气电极真空触发开关导通特性受触发极性的影响较大,在负极性触发条件下的触发时延和抖动远小于正极性触发导通,负极性触发时延典型值为 400 ns,抖动典型值为 50 ns。

(2)触发时延和抖动随着触发能量的增大而减小,但当触发能量高于一定值后,这种趋势不再明显,若要兼顾导通性能和工作寿命,须选择合适的触发能量。

(3)吸气电极触发开关具备比纯金属电极触发开关更长的工作寿命和更短的触发时延,在高压脉冲领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 何俊佳, 邹积岩, 王海, 等. 高性能大功率触发真空开关的研究[J]. 电工电能新技术, 1997, 16(2): 28-32. (He Junjia, Zou Jiyan, Wang Hai, et al. Review of development in high quality, high power triggered vacuum switches[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 1997, 16(2): 28-32)
- [2] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 高性能真空触发开关技术的研究综述[J]. *高压电器*, 2006, 42(1): 51-54. (Liao Minfu, Zou Jiyan, Duan Xiongying, et al. Overview on techniques of high-performance triggered vacuum switch[J]. *High Voltage Apparatus*, 2006, 42(1): 51-54)
- [3] Lafferty J M. Triggered vacuum gaps[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(1): 23-32.
- [4] Kamakshiah S, Rau R S N. Delay characteristics of a simple triggered vacuum gap[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1975, 8(12): 1426-1495.
- [5] Raju G R G, Hackam R, Benson F A. Breakdown mechanisms and electrical properties of triggered vacuum gaps[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(4): 1310-1317.
- [6] 吴汉基, 安世明, 冯学章, 等. 触发真空开关的触发寿命[J]. *高压电器*, 1987, 29(6): 37-43. (Wu Hanji, An Shiming, Feng Xuezhong, et al. The triggered lifetime of triggered vacuum switches[J]. *High Voltage Apparatus*, 1987, 29(6): 37-43)
- [7] 夏胜国, 董曼玲, 何俊佳, 等. 场击穿式TVS时延特性的测量与分析[J]. *高电压技术*, 2007, 33(9): 167-170, 178. (Xia Shengguo, Dong Manling, He Junjia, et al. Measurement and analysis of time delay characteristics of a field-breakdown triggered vacuum switches[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(9): 167-170, 178)
- [8] 胡国威, 夏长征, 陈仕修, 等. 真空触发开关导通瞬间高频脉冲电压的测量[J]. *高压电器*, 2004, 40(5): 364-365, 369. (Hu Guowei, Xia Changzheng, Chen Shixiu, et al. Measurement of the high frequency pulse when the triggered vacuum switch turns on[J]. *High Voltage Apparatus*, 2004, 40(5): 364-365, 369)
- [9] 邹积岩, 段雄英, 扈志宏. 真空触发开关通断特性实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(S1): 20-23. (Zou Jiyan, Duan Xiongying, Hu Zhihong. Experimental investigations on operation capacity of triggered vacuum switches[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, 40(S1): 20-23)
- [10] 盖斐, 陈仕修, 陈堃, 等. 长间隙真空触发开关导通特性[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(4): 847-850. (Gai Fei, Chen Shixiu, Chen Kun, et al. Conduction characteristics of long-gap triggered vacuum switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 847-850)
- [11] 王延召, 戴玲, 周正阳, 等. 多棒极型触发真空开关极性效应[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 587-591. (Wang Yanzhao, Dai Ling, Zhou Zhengyang, et al. Polarity effect on triggered vacuum switch with multi-rod system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 587-591)
- [12] 张亚丽, 冯卫刚. 真空触发开关的触发极结构研究[J]. *真空电子技术*, 2017(1): 73-75. (Zhang Yali, Feng Weigang. Research on trigger electrode structures of triggered vacuum switches[J]. *Vacuum Electronics*, 2017(1): 73-75)
- [13] 魏荣华, 吴汉荃, 史长龙, 等. 触发真空开关[J]. *高压电器*, 1983, 25(6): 50-56. (Wei Ronghua, Wu Hanquan, Shi Changlong, et al. Triggered vacuum switch[J]. *High Voltage Apparatus*, 1983, 25(6): 50-56)
- [14] Vozdvijensky V A, Sidorov V A. Initial stage of discharge current growth in a triggered vacuum gap[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, 19(5): 778-781.