



·脉冲功率技术·

纳秒脉冲电压下两种自触发开关的设计与实验研究

崔光曦¹, 李俊娜¹, 王海洋², 陈旭良¹, 王永亮¹,
刘 建¹, 李楚男¹, 李奇胜¹, 石 凌²

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 降低纳秒脉冲电压下气体开关的抖动对电磁脉冲模拟装置输出稳定性具有重要意义。特别在受条件约束、外触发不便的条件下, 自触发开关抖动的降低值得关注。设计了两种自触发开关, 包含阴极刻槽开关和预电离开关, 并搭建了纳秒脉冲实验平台, 分别在 40 ns、70 ns 与 120 ns 三种脉冲前沿下测量了两种开关的击穿电压、时延等参数, 通过数据统计与处理, 获得了两种开关的击穿电压及时间抖动。实验结果表明: 通过阴极刻槽控制发射或者阴极预电离注入的方式均可有效降低开关的击穿抖动; 在三种前沿的脉冲电压下两种开关的击穿抖动均在 1~1.8 ns 之间; 在 40 ns 和 70 ns 前沿脉冲作用下, 阴极刻槽的开关击穿抖动更低, 可小于 1.2 ns, 击穿电压分散性小于 1.29%; 在 120 ns 前沿脉冲作用下, 阴极预电离开关击穿抖动更低, 可小于 1.6 ns。

关键词: 纳秒脉冲; 自触发开关; 低抖动; 预电离; 刻槽电极

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220415

Design and experimental study of two types of low jitter self-triggered switches under nanosecond pulse voltage

Cui Guangxi¹, Li Junna¹, Wang Haiyang², Chen Xuliang¹, Wang Yongliang¹,
Liu Jian¹, Li Chunan¹, Li Qisheng¹, Shi Ling²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Simulation and Effects of Intense Pulse Radiation, Xi'an 710024, China)

Abstract: It is important to reduce the jitter of gas switch under nanosecond pulse voltage for the output stability of electromagnetic pulse simulator. Especially under the condition that external triggering is inconvenient, the reduction of the jitter of self-triggered switch is worth paying attention to. In this paper, two types of self-triggered switches are designed, including the cathode grooved switch and the preionization switch. A nanosecond pulse experimental platform was built and the breakdown voltage, time delay and other parameters of the two types of switches are measured at three different pulse rise time of 40 ns, 70 ns and 120 ns respectively. With the use of data statistics and processing, the breakdown voltage and time jitter of the two switches are obtained. The experimental results show that the breakdown jitter of the switch can be effectively reduced by cathode grooved control emission or cathode preionization injection; The jitters of the two switches are between 1~1.8 ns under three rise time pulse voltages; Under the rise time of 40 ns and 70 ns pulses, the jitter of cathode grooved switch is shorter, which can be less than 1.2 ns, and the breakdown voltage dispersion is less than 1.29%; Under rise time of 120 ns pulse, the jitter of preionization switch is shorter than 1.6 ns.

Key words: nanosecond pulse, self-triggered switch, low jitter, preionization, grooved electrode

气体火花开关在电磁脉冲模拟装置中得到了普遍应用。尤其是数十 ns 至百 ns 阶段的气体开关, 连接着脉冲发生装置与负载, 要能够传输 TW 级功率且时间抖动要控制在纳秒范围。同时为保证能量的有效传输还要求开关具有低电感、低电阻的特点^[1-3], 其击穿抖动很大程度上决定了装置输出电压的稳定性。气体开关在直流、工频、

* 收稿日期: 2022-12-21; 修订日期: 2023-03-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(52177157)
联系方式: 崔光曦, 1308279743@qq.com。
通信作者: 李俊娜, uvlina@126.com。

操作冲击及雷电冲击下的击穿特性与放电机理已经得到了深入的研究,并在耐压试验中得到了广泛的实践^[4-5],然而在几十至百纳秒脉冲下的实验数据较少。受限于低电感的电路要求,在电磁脉冲模拟装置中输出开关的外触发引入受到限制,由此推动了自触发开关技术的发展。早在20世纪90年代,美国MPI公司便研制出2.6 MV串级紫外预电离开关^[6],在国内西北核技术研究所对紫外预电离及火花放电预电离开关也已有深入研究^[7-8],以上开关均应用于前沿300 ns以上的脉冲,在数十至百纳秒脉冲下,前人研究认为:气体开关的击穿特性与阴极表面粗糙度、脉冲电压上升斜率、场型结构等因素均有密切关系^[9-12]。从前人研究成果出发,为深入研究数十纳秒至百纳秒自触发开关的特性,本文设计了两种自触发开关,包含阴极刻槽开关和预电离开关。分别采用阴极加强场致发射和等离子体注入的方式,降低开关击穿过程中的统计时延,达到降低抖动的目的。通过搭建纳秒实验平台,研究了几十纳秒至百纳秒前沿脉冲作用下开关的击穿特性。通过数据处理和统计,初步获得了规律性认识。

1 开关结构

本文设计了两种自触发开关,一种为阴极表面刻槽开关,另一种为预电离开关,两种开关结构如图1所示,两种电极材料均为不锈钢,两种开关主间隙均为6 mm。其中阴极刻槽开关由主间隙、有机玻璃绝缘外壳及尼龙拉杆紧固件组成,电极直径为40 mm,开关外径为192 mm,高度为110 mm。阴极表面刻有两圈1 mm宽的槽,两槽之间的最短距离也为1 mm。预电离自触发开关除上述结构外还有阴极与触发电极构成的触发间隙、分压电容与其支撑件,电极直径为80 mm,开关外径为225 mm,高度为290 mm。阳极电极盘上开有两个气孔用以调节腔内气体压力,根据力学承受能力计算,气压可调范围为1.5 MPa以内。在绝缘子设计上,经仿真计算,满足在SF₆气体中闪络概率约为0.3%时,允许的绝缘体沿面最大电场强度公式为^[13]

$$E/p < 25 \quad (1)$$

式中: p 为SF₆气压,单位为0.1 MPa; E 为绝缘体沿面最大电场强度,单位为kV·cm⁻¹。

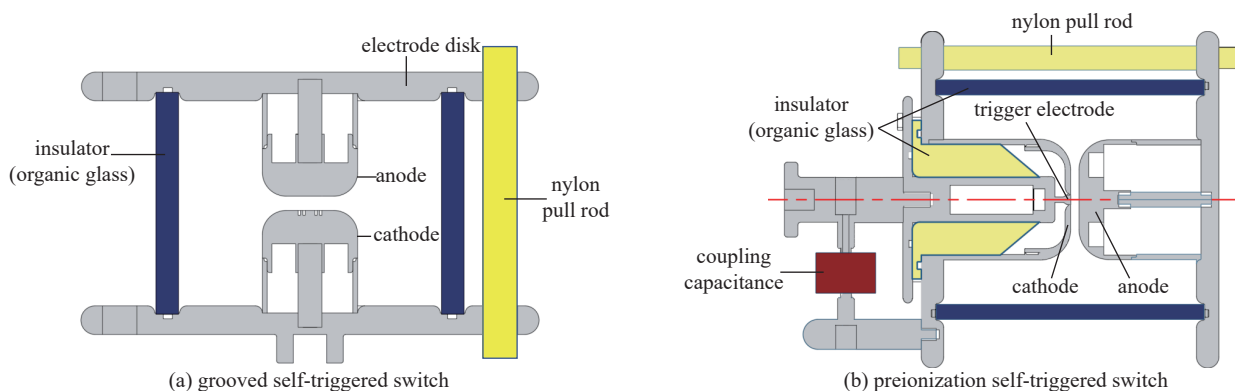


Fig. 1 Structure diagram of grooved self-triggered switch and preionization self-triggered switch

图1 刻槽自触发开关与预电离自触发开关结构图

开关置于与Marx发生器同轴连接的腔体内部,为保证较高的击穿电压并提高表面绝缘的利用率,腔体与开关内均充有纯净的SF₆气体。开关可以工作在800 kV以下的电压下,开关电流在2 kA以下。

对两种开关的间隙分布进行计算,对于阴极刻槽的开关,设置主间隙电压为600 kV;对于预电离开关,设置主间隙电压600 kV,触发电极电压580 kV。开关电场分布如图2所示。由图可见,刻槽自触发开关的 $E_{\max}=3217.4 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均场 E_{ave} 为 $1000 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$,场不均匀系数 $f=3.2$;预电离自触发开关的 $E_{\max}=3080.5 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, E_{ave} 均为 $1000 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$,场不均匀系数 $f=3.1$ 。受网格剖分的限制,实际场不均匀系数应高于计算值,间隙电场为极不均匀场。

2 开关工作原理及抖动分析

本文开关设计思路基于纳秒放电理论,在纳秒前沿脉冲的气体放电中,气体击穿主要由有效电子获取时间、电子崩及流注发展贯穿部分组成^[14-15],有效电子在高场强、快前沿、高气压的环境下主要靠场致发射产生。对于刻槽自触发开关来说,为使得电极表面存在高场强区域以促进场致发射,在电极表面刻环形槽来研究表面刻槽对击穿时延及抖动的影响。在刻槽边缘处的高场强部位有效初始电子更易产生,使得击穿过程能更早进入电子崩发展阶段,促进放电通道的贯穿,减小开关击穿的放电时延进而减小抖动。同时由于高场强部位均集中在槽形边缘,这会使得自阴极起始的放电通道更为集中。

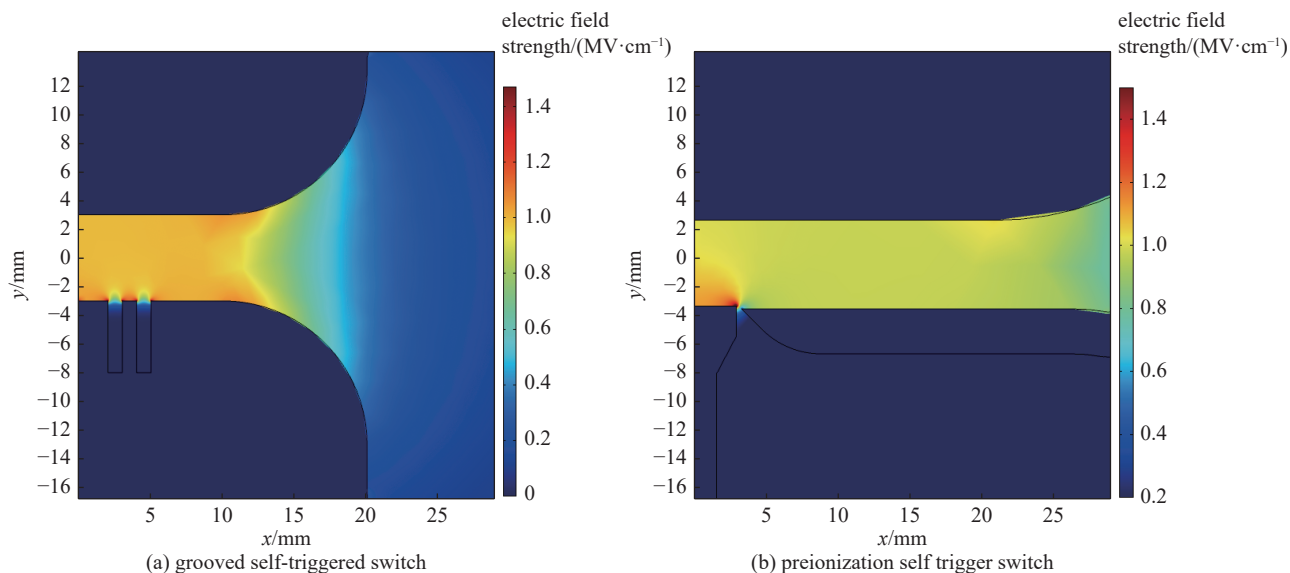


Fig. 2 Electric field distribution diagram of two switches

图2 两种开关的电场分布图

对于预电离自触发开关，触发间隙通过电容分压从主间隙中获得触发脉冲，并先于主间隙击穿以促进主间隙的放电击穿。由于触发间隙的击穿发生在触发电极与阴极间，故对于主间隙的击穿有多重影响因素的叠加，首先触发间隙在放电过程中电子崩及流注的发展，均会直接为阴极注入电子，这会直接促进初始有效电子的产生；其次，在流注的发展过程中，会产生大量光子对阴极表面进行照射，从而引起阴极表面气体电离。在此理论上，触发间隙设计为极不均匀电场，极间最短距离为 0.2 mm，为主间隙距离的 1/30。为保证预电离的有效注入，将触发电极较阴极抬高 0.1 mm，使得触发间隙击穿的电子能够充分参与到主间隙的击穿过程中。预电离自触发开关主间隙结构电容经软件计算为 7.74 pF，采用 200 pF 的耦合电容可以使触发间隙在该分压比下获得大于主间隙电压 1/30 的电压，使得击穿先于主间隙击穿，为主间隙的击穿提供预电离的注入以达到减小抖动的目的，其等效电路如图 3 所示^[16]。其中 C_t 为触发电极与阴极间的耦合电容，大小为 200 pF， C_s 为主间隙结构电容，大小为 7.74 pF， C_0 为开关高压臂对地等效电容， R_D 为限流电阻。在开关设计中，控制触发间隙距离使触发间隙在脉冲前沿击穿，促使开关主间隙在脉冲峰值附近击穿。

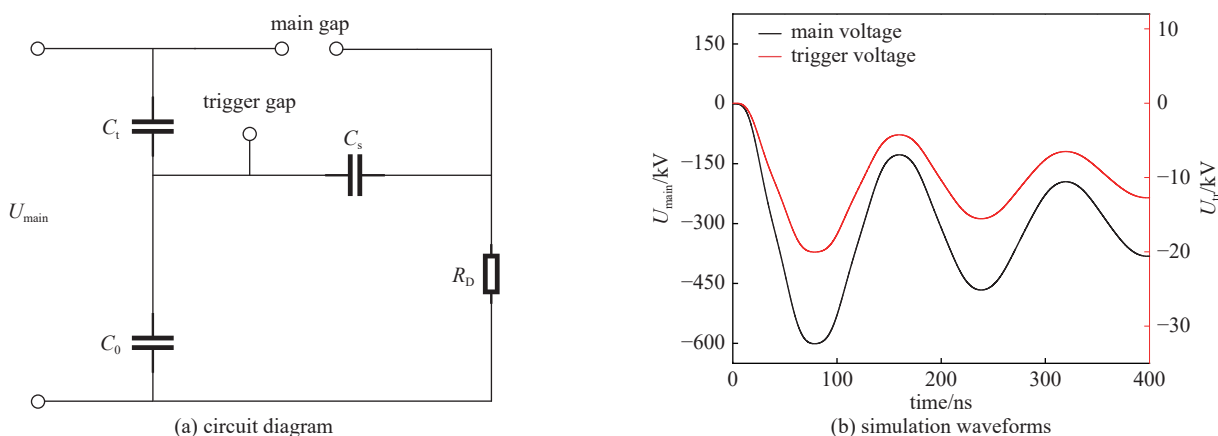


Fig. 3 Equivalent circuit and simulation waveforms of the preionization self-triggered switch

图3 预电离自触发开关等效电路及仿真波形

阴极刻槽开关的主要优点是结构简单，仅对开关阴极进行处理便能有效降低抖动与击穿电压分散性，能促进初始有效电子的产生，缺点是该类开关过于依赖阴极表面结构对场的畸变，若场不均匀系数变低则会降低该类开关性能。预电离开关的主要优点是性能稳定，通过电容分压能够灵活控制预电离注入时间，且注入能量大，不仅能够提供大量初始有效电子，对后续电子崩及流注的发展也有部分促进作用，缺点是结构较为复杂，质量较重，体积较大，且触发间隙的加工工艺较为复杂。

3 实验平台与方法

3.1 实验平台

该开关实验在 Marx 实验平台上进行,实验平台由 Marx 发生器、负载电阻、调波电感与输出开关构成,如图 4 所示。发生器为一个 6 级的双边充电回路,其等效电容为 1 nF,等效电感 L_1 约为 3 μH ,等效电阻 R_1 约为 1 Ω 。Marx 输出端与实验腔体间采用盆型绝缘子转接,将 Marx 输出转换为同轴输出,经计算该输出转接的同轴结构对地电容较大不可忽略,约为 35 pF,可以起到提升输出电压的作用。两组并联的电阻分别用来测量 Marx 输出端电压与开关输出电压,分压比均约为 2890:1,连接二者的是一调波电感,通过改变该电感值的大小可以较大程度地改变脉冲电压的斜率,还可以调整输出电压的幅值。该平台输出电压为 200~750 kV。

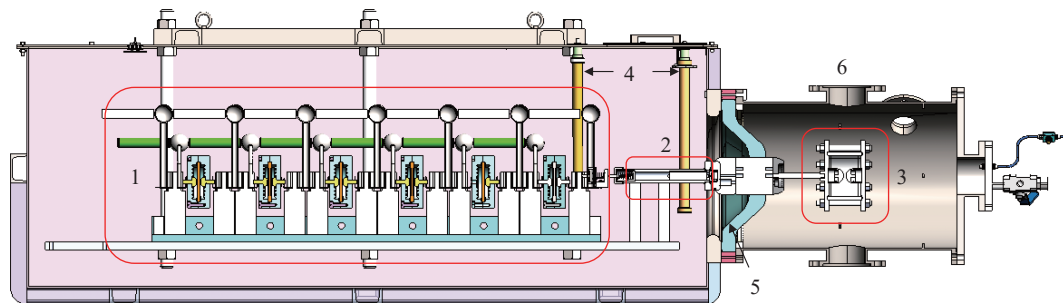


Fig. 4 Schematic diagram of experimental platform (1: 6-stage Marx generator, 2: wave regulating inductance, 3: self breaking gas switch, 4: resistance voltage divider, 5: spacing basin insulator, 6: experimental chamber)

图 4 实验平台示意图 (1:6 级 Marx 发生器, 2:调波电感, 3:自击穿气体开关, 4:电阻分压器, 5:间隔盆形绝缘子, 6:实验腔体)

实验平台等效电路如图 5(a) 所示, C_1 为 12 个电容串联的等效电容, 电容值为 1 nF, 回路等效电感 L_1 为 3 μH , 回路等效电阻 R_1 为 2 Ω , 电阻 R_2 与 r_1 、 R_3 与 r_2 是图 4 中 4 表示的两对电阻分压器, 分别用于测量 Marx 的输出电压及开关的电压波形, R_5 和 R_6 也为一组分压比为 400:1 的电阻分压器, 用于限流以及测量开关电流(分压器测得电压与电阻之比)。经电路仿真, 通过改变调波电感 L_2 可以对脉冲前沿时间进行调整, 图 5(b) 为不同调波电感下开关电压波形。通过电感的调节, 开关承受脉冲电压前沿时间(定义为峰值电压 10% 至峰值电压 90% 的时间)可调节范围为 40~150 ns。

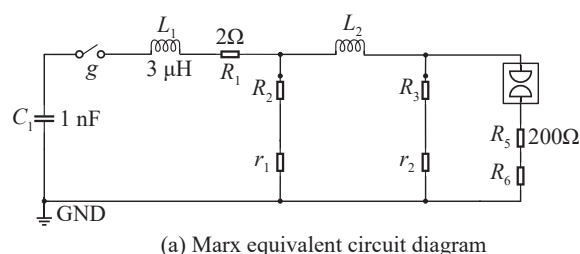
3.2 实验方法

实验中在改变 Marx 输出电压的同时调节气压使得开关在其脉冲峰值处发生击穿。实验前首先用无水乙醇擦拭电极表面, 进行正式击穿实验前先进行开关的老练。由于 Marx 发生器存在一定的过压击穿同步误差, 波形起始处会产生一定的尖刺信号, 为尽可能消除波形起始震荡的影响, 实验大多在 250 kV 以上的电压下进行, 在 Marx 平台的电压控制台逐级加压, 在相同实验条件下进行 20 发次的击穿, 调整开关气压至峰值击穿后通过示波器记录下各发次击穿时延 t_d 与开关击穿电压峰值 U_b (电阻分压器 R_3 - r_2 测得的波形), 每种电极进行约五至六组的击穿, 然后更换电极进行下一轮实验。考虑到输出电压起始端波形不易判读, 定义该自击穿开关的击穿时延 t_d 为输出电压的 10% 至输出电流波形 10% 的时间区间, 实验平台的典型开关测试时域波形如图 6 所示。

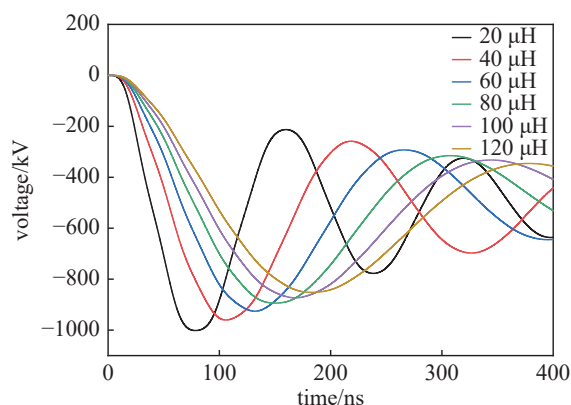
4 实验结果及分析

4.1 刻槽自触发开关

图 7 给出了刻槽电极自触发开关在 40 ns、70 ns 及 120 ns 前沿下击穿时延与击穿电压峰值的变化规律, 在每



(a) Marx equivalent circuit diagram



(b) voltage waveforms of the switch

Fig. 5 Marx equivalent circuit and switching voltage simulation waveforms

图 5 Marx 等效电路及开关电压仿真波形

种前沿下击穿电压与气压成近似线性关系, 实验的击穿电压均在峰值的 90% 以上, 因此击穿时延并未出现太大区别。通过对各组前沿下抖动的统计, 得到了脉冲前沿时间越长的实验组抖动越大的结论, 该刻槽开关在 40 ns 前沿下抖动小于 1.11 ns, 在 70 ns 前沿下抖动低于 1.18 ns, 在 120 ns 前沿下抖动低于 1.84 ns。由于均控制在脉冲峰值处击穿, 击穿电压分散性较小, 在 40 ns 前沿下低于 1.29%, 在 70 ns 前沿下低于 1.06%, 在 120 ns 前沿下低于 1.22%, 击穿时延抖动及电压分散性数据如表 1 所示。在本实验中击穿电流为 2 kA 以下, 在进行千余次击穿后, 性能表现仍旧良好。

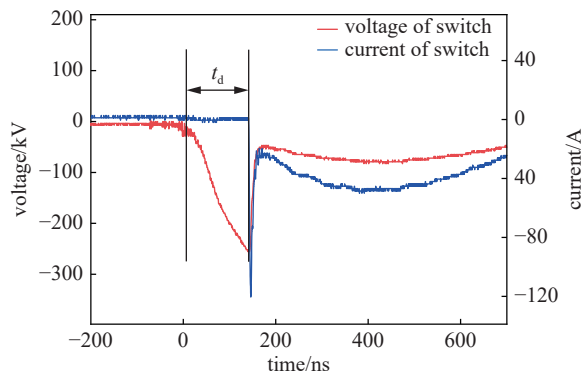


Fig. 6 Typical time-domain waveforms of switch breakdown

图 6 开关击穿典型时域波形

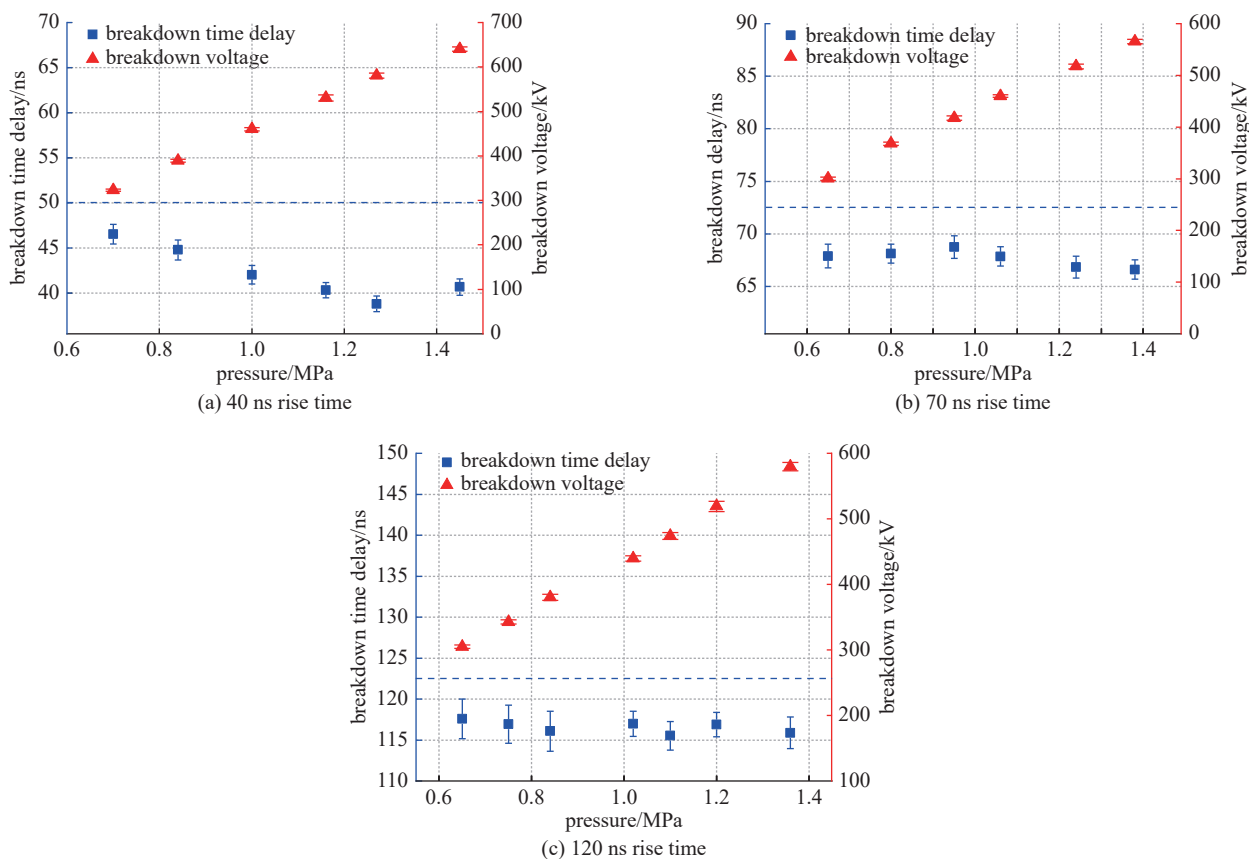


Fig. 7 Breakdown delay and voltage of the cathode grooved switch at 40 ns, 70 ns and 120 ns rise time

图 7 40 ns, 70 ns 与 120 ns 前沿下刻槽开关的击穿时延与电压

表 1 刻槽开关击穿特性数据 (抖动与电压分散性)

Table 1 Cathode grooved switch breakdown characteristic data (voltage dispersion and jitter)

p/MPa	voltage	breakdown time	p/MPa	voltage	breakdown time	p/MPa	voltage	breakdown time
	dispersion/%	delay jitter/ns		dispersion/%	delay jitter/ns		dispersion/%	delay jitter/ns
$t_r \sim 40 \text{ ns}$			$t_r \sim 70 \text{ ns}$			$t_r \sim 120 \text{ ns}$		
0.70	0.85	1.08	0.65	1.06	1.18	0.64	1.22	1.84
0.84	0.93	1.11	0.80	0.82	0.90	0.80	0.89	1.76
1.00	0.83	1.03	0.95	0.99	1.07	0.98	1.02	1.75
1.16	1.29	0.86	1.06	0.75	0.91	1.22	1.18	1.77
1.27	1.01	0.87	1.24	0.88	1.05	1.38	1.03	1.47

4.2 预电离自触发开关

图 8 给出了三种脉冲前沿时间下预电离自触发开关的击穿时延及其抖动与击穿电压峰值及其分散性。可以

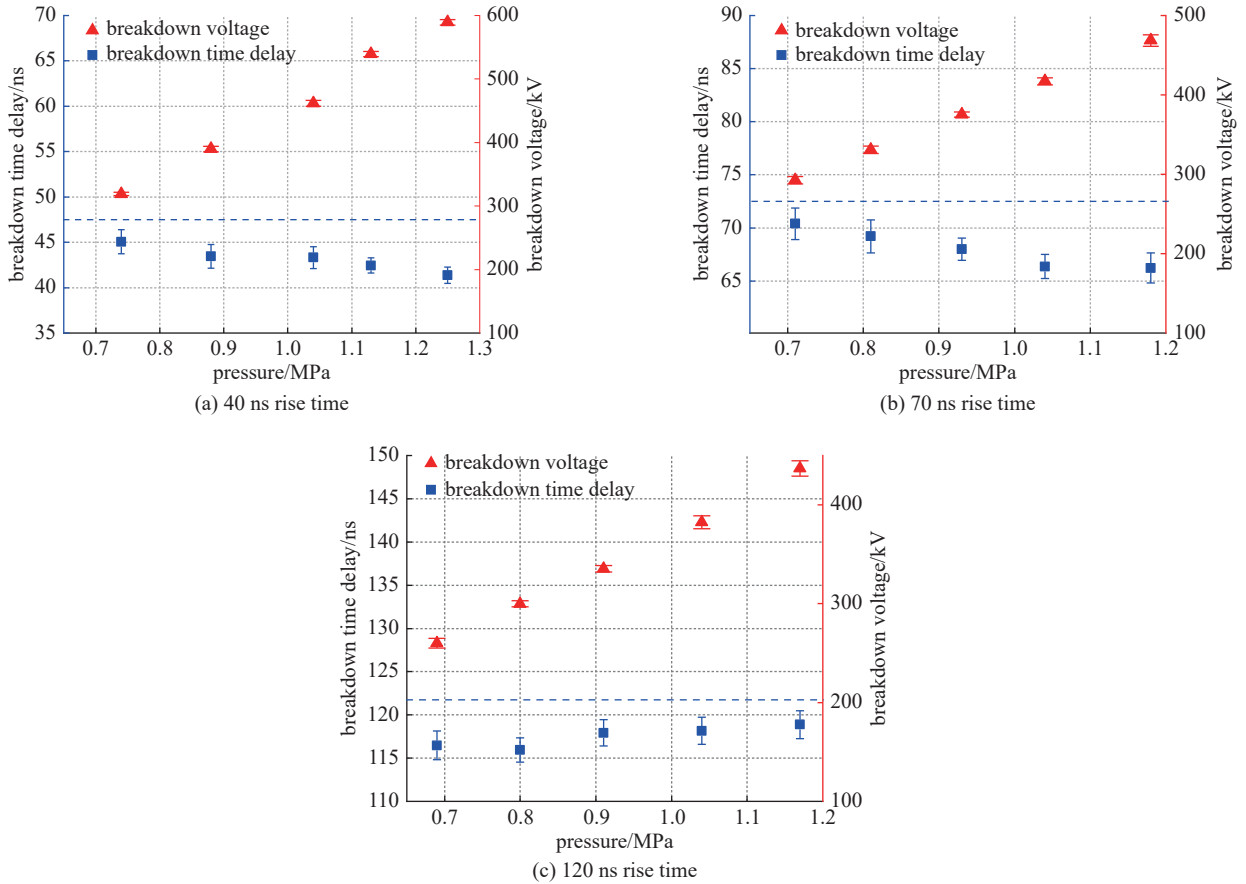


Fig. 8 Breakdown delay and voltage of the preionization switch at 40 ns, 70 ns and 120 ns rise time

图 8 40 ns, 70 ns 与 120ns 前沿下预电离开关的击穿时延与电压

看出三种前沿时间下击穿电压与气压仍呈近似线性关系。在三种前沿下，自触发开关的抖动均低于 1.6 ns，抖动受脉冲前沿时间影响较小，击穿电压分散性也较低，输出电压较为稳定。在 40 ns 前沿下击穿电压分散性低于 1.08%，在 70 ns 前沿下低于 1.27%，在 120 ns 前沿下低于 1.37%，击穿时延抖动及电压分散性数据如表 2 所示。整体来说该自触发开关的设计达到了预期目的，预电离较为有效。但该开关结构较为复杂，且为保证触发间隙的电压差，对绝缘与结构要求较高，开关性能很大程度取决于主间隙与触发间隙的配合关系。

表 2 预电离开关击穿特性数据 (抖动与电压分散性)

Table 2 Preionization switch breakdown characteristic data (voltage dispersion and jitter)

p/MPa	voltage dispersion/%	breakdown time delay jitter/ns	p/MPa	voltage dispersion/%	breakdown time delay jitter/ns	p/MPa	voltage dispersion/%	breakdown time delay jitter/ns
	$t_r \sim 40$ ns			$t_r \sim 70$ ns			$t_r \sim 120$ ns	
0.74	0.79	1.34	0.71	1.27	1.48	0.69	1.37	1.60
0.88	1.08	1.32	0.81	1.26	1.56	0.80	1.00	1.39
1.04	1.02	1.21	0.93	0.84	1.04	0.91	0.97	1.52
1.13	0.74	0.84	1.04	1.04	1.12	1.04	1.35	1.57
1.25	0.77	0.89	1.18	1.25	1.40	1.17	1.26	1.59

4.3 开关抖动特性对比

为验证两种自触发开关降低抖动的效果，将间隙同为 6 mm 的半球型电极的自击穿开关进行实验对照，40 ns 前沿下的抖动特性与 70 ns 前沿下的抖动特性较为类似，故不再单独给出。图 9 给出了 70 ns 和 120 ns 前沿下自击穿开关与两种自触发开关的抖动对比图，两种前沿下预电离自触发开关抖动在 1~1.6 ns 之间，刻槽自触发开关抖动在 0.8~1.8 ns 之间，相比于相同间隙结构自击穿开关的 1.5~3.3 ns 有显著的降低，在较低气压下的作用尤为明显。开关抖动主要取决于有效电子的形成时间与位置，同时电子崩与流注的发展路线有时也会出现收缩分叉现象，均会对抖动的大小产生影响。对于半球型自击穿开关，在较低气压下，电极表面微凸起分布的差异使得放电产

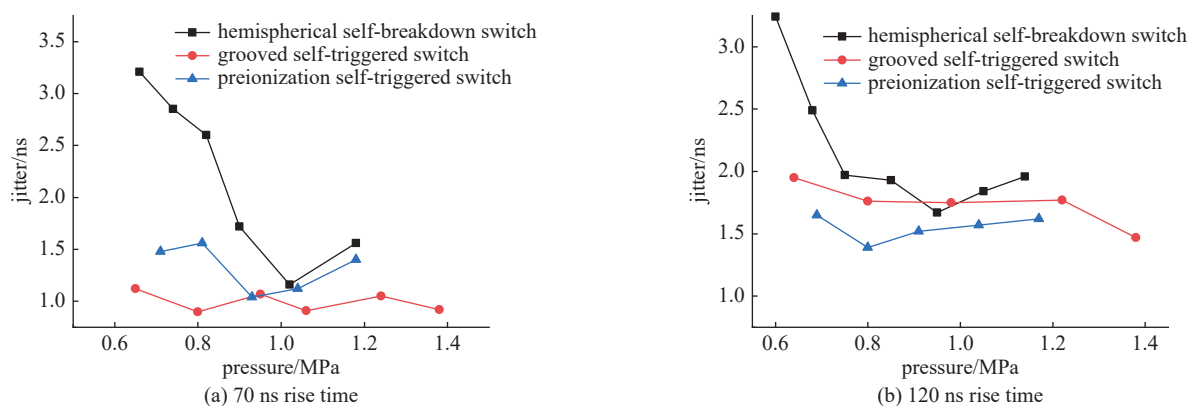


Fig. 9 Comparison of three kinds of switch jitter at the rise time of 70 ns and 120 ns

图9 70 ns与120 ns前沿的三种开关抖动对比

生于电极表面不同的高场强位置,从而使得抖动偏大,而在阴极刻槽自触发开关中由于人为制造了高场强区域,使得放电产生位置较为固定,从而减小了抖动。对于预电离开关则是通过触发间隙放电,为距其最近的阴极区域的放电提供了大量初始电子,阴极放电位置也较为固定,并且对电子崩与流注发展有促进作用,因而减小了抖动。而在较高气压下,由于电子自由程的减小,半球型自击穿开关的放电起始位置也集中在场强最高的位置,其放电随机性得到了减小,因而在高压下抖动降低效果不明显。

将两种自触发开关进行对比,在40与70 ns前沿时间下刻槽开关性能高于预电离开关,这是由于触发间隙的存在,其在极不均匀场中击穿也存在较大的抖动,这将对预电离注入的时间产生较大影响,继而影响主间隙的抖动大小,而在较短前沿时间下,阴极刻槽开关对场的畸变能够有效减小统计时延。而在120 ns前沿下预电离自触发开关的抖动相对更低,这是由于在较长的前沿时间下,触发间隙仍能先于主间隙击穿并稳定为主间隙提供预电离能量的注入,结果是不仅能减少统计时延,而且较大预电离能量的注入也能够促进电子崩与流注的发展,进一步减小放电形成时延,触发间隙的抖动影响将会变小。这表明了该预电离自触发开关在百纳秒前沿有较好的应用前景。若以从轻从简的角度考虑,且在较快前沿时间下对抖动有较高要求,则刻槽型开关更优。但考虑到开关的使用对场型结构产生影响的问题,预电离自触发开关的实用性要高于刻槽型开关,而且也基本能满足抖动与击穿电压的要求。

5 结论

本文设计了两种自触发开关,包含阴极刻槽开关和预电离开关,并搭建了纳秒脉冲实验平台,分别在40 ns、70 ns与120 ns三种前沿下测定了二者的击穿特性,二者降低抖动的能力均得以验证,表明通过阴极刻槽控制发射或者阴极预电离注入的方式均可有效降低开关的击穿抖动。在0.5 MPa以上的气压纳秒脉冲下,抖动均可以控制在1~1.8 ns之间,击穿电压分散性小于1.37%。其中阴极刻槽自触发开关在40 ns与70 ns前沿下表现更为优异,能使抖动控制在1.2 ns以内,开关性能取决于刻槽结构对阴极表面电场的畸变。预电离自触发开关受脉冲前沿时间影响较小,在120 ns前沿有更优秀的表现,抖动基本稳定维持在1~1.6 ns之间,但质量较重,且开关性能较大程度取决于主间隙与触发间隙间的配合,对绝缘及设计结构要求较高。整体来说,两种自触发开关在纳秒脉冲电压下有良好的应用效果。

参考文献:

- [1] 邵涛,孙广生,严萍,等.纳秒脉冲气体放电机理研究现状[J].*高压技术*,2004,30(7):40-42.(Shao Tao,Sun Guangsheng,Yan Ping,et al.Overview of nanosecond-pulse gas breakdown mechanics[J].*High Voltage Engineering*,2004,30(7):40-42)
- [2] 邵涛,严萍,张适昌,等.纳秒脉冲气体放电机理探讨[J].*强激光与粒子束*,2008,20(11):1928-1932.(Shao Tao,Yan Ping,Zhang Shichang,et al.Review on nanosecond-pulse discharge mechanism in gases[J].*High Power Laser and Particle Beams*,2008,20(11):1928-1932)
- [3] 刘锡三.高功率脉冲技术[M].北京:国防工业出版社,2005.(Liu Xisan.High pulsed power technology[M].Beijing:National Defense Industry Press,2005)
- [4] 赵智大.高压技术[M].3版.北京:中国电力出版社,2013.(Zhao Zhida.High voltage technique[M].3rd ed.Beijing:China Electric Power Press,2013)
- [5] 丁培,丁健刚,姚晓飞,等.雷电冲击电压下串联空气球隙击穿特性[J].*高压技术*,2021,47(11):4072-4077.(Ding Pei,Ding Jian'gang,Yao Xiaofei,et al.Breakdown characteristics of series connected ball air gaps under lightning impulse voltage[J].*High Voltage Engineering*,2021,47(11):4072-4077)
- [6] Gilman C,Lam S K,Naff J T,et al.Design and performance of the FEMP-2000:a fast risetime,2 MV EMP pulser[C]//Proceedings of the 12th IEEE

- International Pulsed Power Conference. 1999: 1437-1440.
- [7] Wang Tianchi, Du Yingchao, Chen Wei, et al. A low-jitter self-triggered spark-discharge pre-ionization switch: primary research on its breakdown characteristics and working mechanisms[J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23: 115508.
- [8] 李俊娜, 邱爱慈, 蒯斌, 等. 自耦式紫外预电离开关特性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(6): 994-998. (Li Junna, Qiu Aici, Kuai Bin, et al. Characteristics of capacitance-resistance coupling UV illumination switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(6): 994-998)
- [9] Ramirez J J. Effect of electrode surface conditions on the self-breakdown strength and jitter of a high-pressure pulsed gas switch[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(5): 1925-1928.
- [10] Levinson S J, Kunhardt E E. Investigation of the statistical and formative time lags associated with the breakdown of a gas in a gap at high overvoltage[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1982, 10(4): 266-270.
- [11] 程新兵, 刘金亮, 陈蒸, 等. 高电压长寿命型气体火花开关的设计及初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(10): 1753-1756. (Cheng Xinbing, Liu Jinliang, Chen Zheng, et al. Design and primary experiment of high voltage long-life gas spark switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(10): 1753-1756)
- [12] 李黎, 鲍超斌, 冯希波, 等. 纳秒快脉冲下气体开关的过电压击穿[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(7): 185-191. (Li Li, Bao Chaobin, Feng Xibo, et al. Overvoltage breakdown of air-insulated gap under fast nanosecond-pulse[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(7): 185-191)
- [13] Martin T H. Pulsed charged gas breakdown[C]//Proceedings of the 5th IEEE Pulsed Power Conference. 1985: 74-83.
- [14] Martin T H. An empirical formula for gas switch breakdown delay[C]//Proceedings of the 7th Pulsed Power Conference. 1989: 73-79.
- [15] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2015. (Yan Zhang, Zhu Deheng. High voltage insulation technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015)
- [16] 李俊娜, 何石, 邱爱慈, 等. 自触发开关在不同脉冲前沿下的击穿特性[J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1590-1596. (Li Junna, He Shi, Qiu Aici, et al. Breakdown characteristics of self-triggered switches under different voltage rise-time[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1590-1596)