

文章编号: 1001-4322(2006)06-1031-06

极不均匀电场下重复频率纳秒脉冲 气体击穿实验研究*

邵 涛^{1,2}, 孙广生¹, 严 萍¹, 张适昌¹

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 实验研究了尖-板电极中,不同重复频率(10,100,500,1 000 Hz)、不同间隙(0.5,1 cm)、不同气压(0.1~0.4 MPa)等条件下空气的绝缘特性。得到了击穿时延、重复频率耐受时间、施加脉冲个数等与施加电压、重复频率的关系。研究发现:在该实验条件下击穿时延随着场强与气压的比值减小而增加,但重频耐受时间和脉冲击穿个数并没有明显变化;随着重复频率的提高,击穿时延和重频耐受时间会减小,但脉冲击穿个数可能会增加;且重复频率条件下击穿的极性效应不明显;重复施加的脉冲产生大量的亚稳态粒子和残余电荷影响放电的发展过程;负离子的脱负或正离子碰撞阴极的过程,及亚稳态粒子的去激励作用给击穿提供了有效初始电子。

关键词: 气体击穿; 纳秒脉冲; 尖-板电极; 重复频率; 极性效应

中图分类号: TM85 **文献标识码:** A

电介质在极端条件下的绝缘特性研究越来越受到关注。 ns 级脉冲高压下绝缘介质的击穿特性和放电机理均与通常的直流、交流及毫秒、微秒脉冲下的击穿有所不同^[1],随着重复频率(重频)脉冲功率技术的应用越来越广泛,高压纳秒脉冲作用下的绝缘特性研究也引起了重视。

与传统的气体击穿现象研究相比, ns 级脉冲下的击穿研究不多,而且相关文献多是在单次脉冲下的实验结果^[1]。一般采用平板电极或球状电极来模拟均匀场,对极不均匀场(如尖-板电极)下的研究更少。最早 Nesterikhin 等报道了常压下、 mm 级尖-板空气间隙在 ns 级负极性脉冲高压下的放电实验结果,即阴极被照射时,放电时延的分散性仍较大,而平板电极下时延分散性较小^[2]。Mankowski 等实验研究了在高气压、亚 ns 级脉冲下 mm 级尖-板空气间隙的极性效应,结果显示击穿极性效应依然存在,尖的极性为负时击穿场强比为正的情况下大 $30\% \sim 80\%$ ^[3]。最近 Kromholz 等通过实验得到了小于 15 kV 的亚 ns 级脉冲下氩气在尖-板间隙中的击穿特性,气压越低,击穿时延越长,尖为负的击穿时延比尖为正的击穿时延大 30% 左右,极性效应也存在^[4]。文献^[5]介绍了常压下平板电极在纳秒脉冲最高重频到 1 kHz 下的实验,结果表明重频越高,击穿场强越低,击穿与重复施加脉冲的累积效应有关。本文介绍极不均匀电场中纳秒脉冲击穿特性。对尖-板电极下的 cm 级空气间隙施加重频纳秒脉冲高压,研究重频脉冲下的极性效应,分析击穿的累积效应。

1 实验装置与测量

实验电源采用基于磁开关及半导体断路开关的重频脉冲源 SPG200^[6],其主要输出参数如表 1 所示。实验装置及测量原理如图 1 所示,其中触发脉冲发生器控制 SPG200 的输出脉冲频率。循环盐水电阻调节电源输出电压。大功率限流电阻防止间隙放电电流对脉冲源和电阻分流器的损坏。实验腔是圆柱结构有机玻璃腔,尖-板电极沿轴向放置,其中尖直径 2 mm ,板直径 6 cm 。采用分压比约 $4\ 780$ 的电容分压器测量施加的脉冲电压,约 $0.2\ \Omega$ 的高频氧化膜电阻分流器测量击穿脉冲电流。由于回路中串入了约 $200\ \Omega$ 的限流电阻,放电回路并联了水电阻,这样,电容分压器测量的电压实际上就是 SPG200 输出电压,与间隙上实际电压有些差距。重

表 1 SPG200 主要输出参数

Table 1 Main output parameters of SPG200

parameter	range
output voltage	$0 \sim -200\text{ kV}$
rise time	$\sim 10\text{ ns}$
pulse width at half peak	$20 \sim 30\text{ ns}$
repetition rate	single pulse $\sim 2\text{ kHz}$

* 收稿日期:2005-11-10; 修订日期:2006-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助课题(50207011);国家自然科学基金重点资助课题(50437020)

作者简介:邵 涛(1977—),男,博士研究生,从事脉冲功率、高电压技术的研究;st@mail.iee.ac.cn。

频下的击穿与重频施加的时间密切相关。用 TDS3054B 测量施加脉冲的时间(重频耐受时间 t_{RST})^[7], 触发脉冲发生器提供时间记录起始点。击穿时通过两根约 10 m 等长的电缆将电流电压信号分别送 TDS684A 记录, 同时, TDS684A 的一个 TTL 端口输出低电平信号作为中止记录点。根据施加频率及重频耐受时间也可以换算得到施加的脉冲个数^[7]。实验得到的典型波形如图 2(a), (b) 所示, 其中图 2(a) 中击穿时延定义为击穿电流波形的第一个小脉冲起始点至主脉冲起始点的时间。

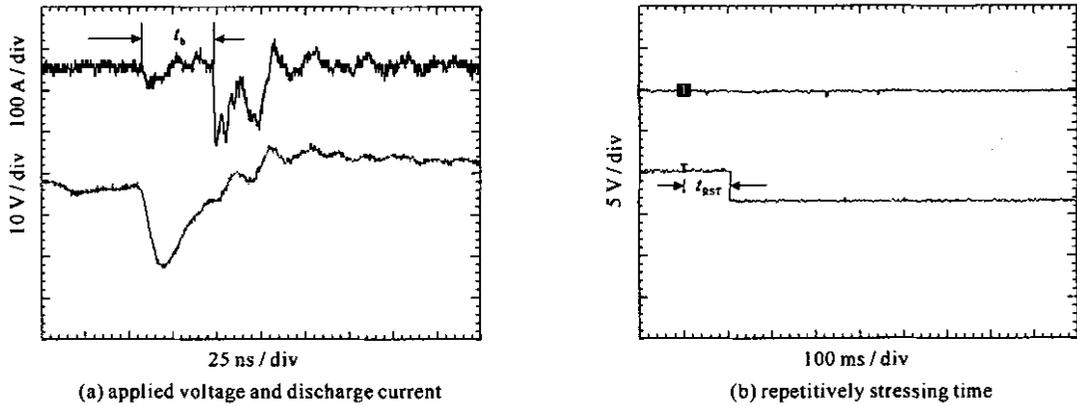


Fig. 2 Typical waveforms of applied voltage, discharge current and measurement of repetitively stressing time

图 2 实验中电信号及重复频率测量的典型波形

2 实验结果

SPG200 输出负极性脉冲高压, 通过更换电极位置分别得到尖接地(相当于尖的极性为正)和板接地(相当于尖的极性为负)两种条件下的实验结果。每个数据点实验次数均重复 10 次。图 3~6 为部分实验结果曲线。图中所有含误差带的曲线, 其误差带均为在平均值上下各一个标准方差。

在尖电极接负脉冲高压的条件下, 间距为 5 mm, 间隙气压分别为 0.2, 0.3, 0.4 MPa 时, 不同重复频率下击穿时延、重频耐受时间与平均击穿场强的关系如图 3 所示。图 3(a) 中随施加电压和气压的升高, 击穿时延增加, 100 Hz 时的时延最大, 1 kHz 的时延约为 100 Hz 时的 70%。图 3(b) 中重频耐受时间在不同气压及施加电压下比较接近, 100 Hz 时的重频耐受时间比 1 kHz 时的大 10 倍, 而且 0.5 kHz 与 1 kHz 时的结果接近。而图 3(c) 中, 在约 60 kV 时不同重复频率下的脉冲击穿个数相差很小, 与重复频率关系不大。

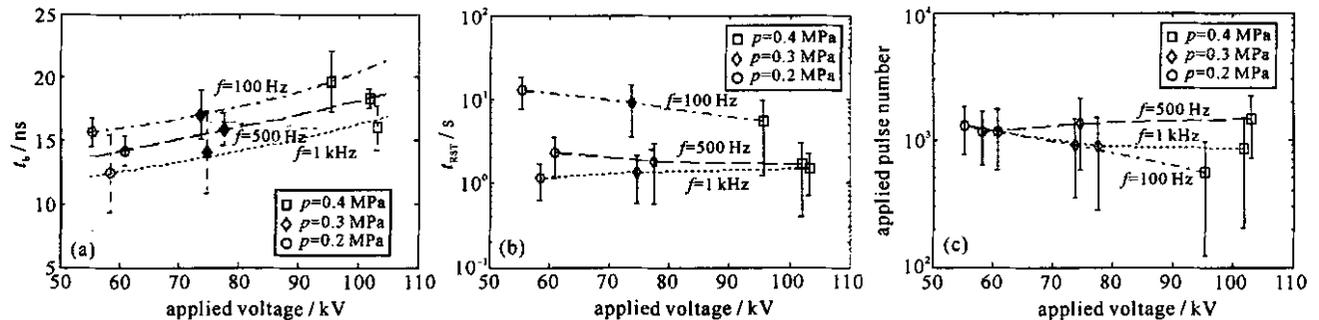


Fig. 3 Dependence of breakdown time lag, repetitively stressing time and applied pulse number on applied voltage under various gas pressures

图 3 不同气压下施加电压与击穿时延(a)、重频耐受时间(b)及击穿脉冲个数(c)的关系

固定施加电压时, 对气压、间隙分别为 5 mm 和 0.2 MPa, 10 mm 和 0.1 MPa 两种条件下的结果进行对比, 得到击穿时延、重频耐受时间、击穿脉冲个数与施加重复频率的关系如图 4~6 所示。施加电压峰值约 80 kV, 重复频率分别取 10, 100, 500, 1 000 Hz。图 4(a), (b) 分别为尖接地和板接地时击穿时延与施加的重复

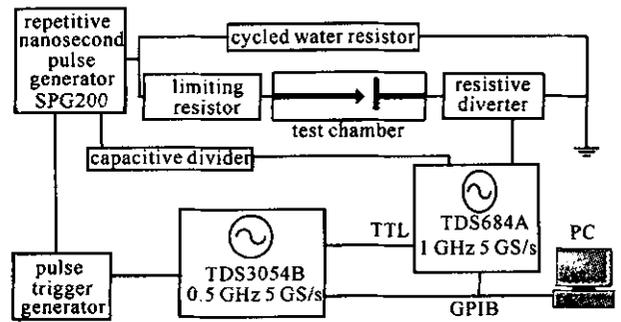


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup and measurement

图 1 实验装置及测量示意图

频率的关系,可以看出随着重复频率的提高,击穿时延会减小。图 5(a),(b)分别为尖接地和板接地时重频耐受时间与施加的重复频率的关系,同样可以发现重复频率越高,重频耐受时间越短。在较高重复频率(1 000 Hz)下,不同气隙条件下的重频耐受时间值相差无几。图 6(a),(b)是根据图 5 中重频耐受时间换算成间隙击穿所施加的脉冲个数(重频耐受时间和施加频率的乘积),得到实际施加的脉冲个数与频率的关系,可以看出多数情况下高重频时脉冲个数远大于低重频时的脉冲个数。

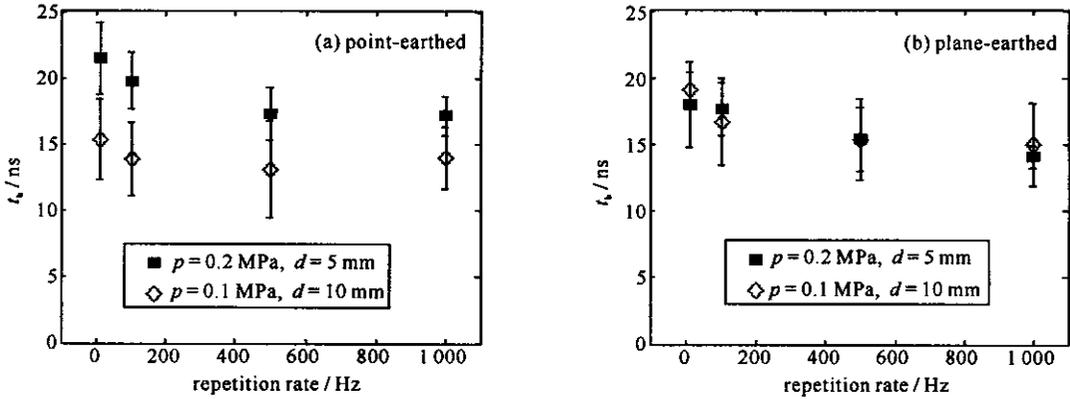


Fig. 4 Dependence of breakdown time lag on repetition rate

图 4 重复频率与击穿时延关系

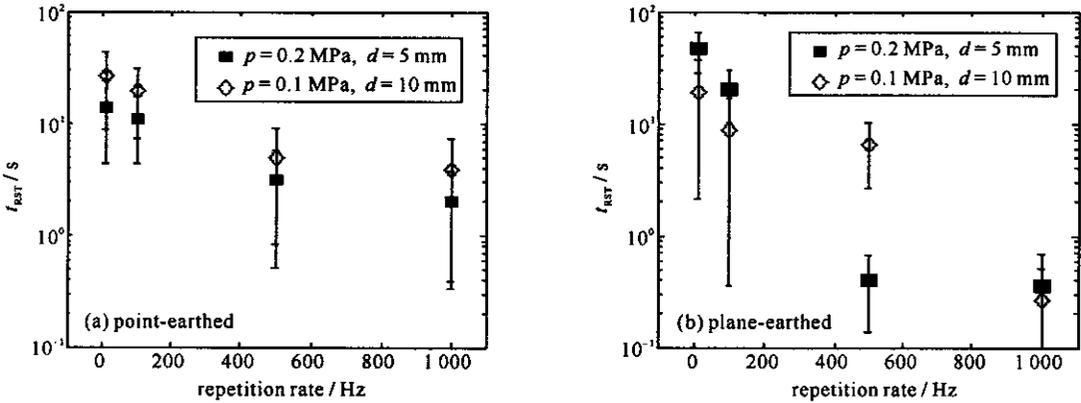


Fig. 5 Dependence of repetitively stressing time on repetition rate

图 5 重复频率耐受时间与频率关系

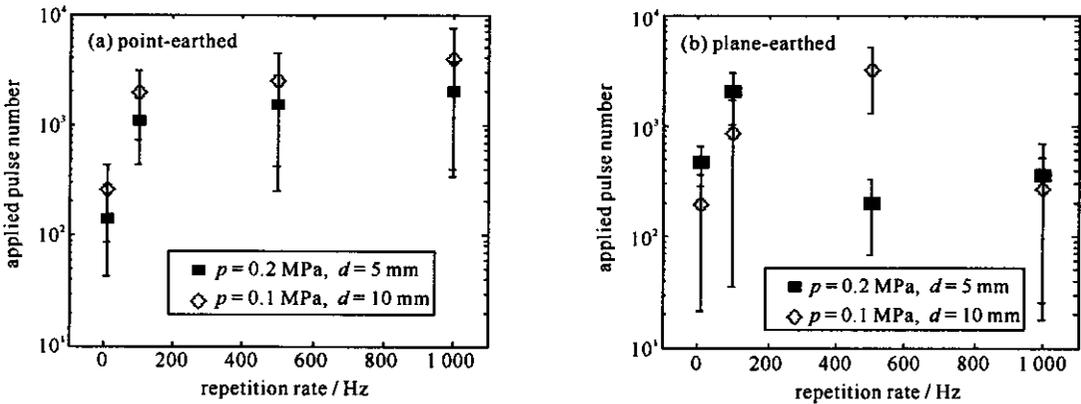


Fig. 6 Number of applied pulses vs repetition rate

图 6 重复频率与施加脉冲个数的关系

3 分析与讨论

在尖电极接负高压脉冲时,由不同气压及施加电压条件下的曲线关系可以看出:击穿时延与施加电压及气压均有密切关系,由于实际施加在间隙上的 E/p (场强/气压) 值减小(60, 80, 100 kV 对应的 E/p 值分别为 0.60, 0.53, 0.50 $V \cdot cm^{-1} \cdot Pa^{-1}$),因此击穿时延会随着 E/p 值的减小而增加。但这种条件下,重频耐受时间和脉冲击穿个数并没有明显变化,说明在 E/p 值相差不多时,不同重复频率下间隙击穿所需的重频耐受时

间相差不大,尤其是在大于 100 Hz 的重频下。虽然施加重复脉冲对击穿具有积累效应,但在 E/ρ 值较接近、重复频率较高时,这种积累效应可能饱和。

通常,在极不均匀电场中的击穿存在明显的极性效应,即正尖负板比负尖正板更容易击穿,同等条件下,击穿时延更小。从本实验结果来看,重复频率条件下极性效应并不明显,有时正尖负板的击穿时延更大。极性效应主要是由不同电极条件下尖端空间电荷引起的。在重复频率脉冲下,击穿脉冲未到来之前,间隙已经积累了大量的残余电荷及处于激励态的粒子,这些电荷及粒子可能会削弱极性效应,从而导致极性效应不明显。

对图 5 和图 6,虽然随着重复频率的提高,重频耐受时间逐渐减少,但施加的脉冲个数反而大大增加。残余电荷及亚稳态中性粒子对击穿的影响较复杂,高重频条件下它们在间隙中的浓度比低重频条件下上升更快,产生有效初始电子更迅速。高重频条件下需要的脉冲个数应该更少,但实际实验结果却相反。在重频脉冲下,尤其高重频脉冲下记忆效应的规律仍有待进一步研究。另一方面,气体放电实验中不可避免地存在电晕。已有研究表明,随着重复频率的提高,系统传输的电压幅值减小,功率损耗增加^[8],因此在高重频条件下的损耗会加剧,导致实际加在间隙上的实际电压、能量等减小。

在低气压条件下,重复脉冲放电在间隙中残留的大量电荷及亚稳态的粒子(正离子、亚稳态粒子)将产生“记忆效应”^[9]。这种记忆效应主要由正电荷及亚稳态的粒子撞击阴极表面而释放电子将给击穿发展提供大量的有效初始电子而实现,在某些极端条件下可以持续几个小时。空气中氮气和氧气的几种受激粒子的寿命如表 2 所示^[10],包括旋转态和电子态的亚稳态。几种重要的亚稳态的寿命一般都在 1 s 以上。本实验中最低的重叠频率是 10 Hz,因此残余电荷及亚稳态粒子会在间隙中积累。

表 2 常见受激粒子的寿命^[10]

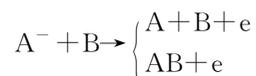
Table 2 Lifetime of several metastable particles

	N ₂	N ₂	N ₂	N ₂	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂
state	$x^1 \sum_{v=n}^+$	$A^3 \sum_u^+$	$w^3 \Delta_u$	$a'^1 \sum_u^-$	$x^3 \sum_{v=n}^+$	$a^1 \Delta_g$	$b^1 \sum_g^+$	$A^3 \sum_u^+$
lifetime/s	$>10^3$	2.1	—	1.4	$>10^3$	3×10^3	13.1	10^3
energy/eV	$n \times 0.29$	6.17	7.32	8.52	$n \times 0.29$	0.98	1.63	4.35

放电发展主要取决于初始有效电子和施加场强^[11],有效初始电子和足够的能量是电子雪崩发展的两个必备条件。但初始电子引起的电子雪崩不一定导致间隙击穿,初始电子的出现只是间隙击穿的一个必要条件。有效初始电子的出现直接影响到击穿的统计时延,且与新产生的初始电子比较,阴极附近已存在的电子对击穿的时延影响更小^[12]。随重复频率的提高,击穿时延的减小可能有以下 2 个方面的原因:(1)“记忆效应”导致有效初始电子出现,从而更迅速地减小击穿时延^[5]。通常条件下,初始电子由宇宙射线、地射线等直接电离产生,而在重复脉冲作用下,大量残余电荷及亚稳态的粒子出现在间隙中,这些电荷及粒子将直接为间隙的击穿提供大量初始电子。(2)在施加连续脉冲后,间隙的离子浓度将会升高。在下一个脉冲到来前,部分离子及亚稳态粒子以复合、扩散或去激化等方式消失,但间隙中会残余部分电荷及粒子,这些空间电荷会导致间隙上的电场产生畸变,从而影响流注的发展过程。

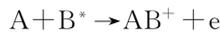
在连续重频脉冲作用下,空间残余电荷及亚稳态粒子、击穿的有效初始电子是由记忆效应产生的二次电子。这些二次电子的产生主要有以下几种情况:

(1)负离子的脱负作用。在重复频率较高时,间隙击穿所需要有效初始电子可能是由间隙中大量负离子的脱负作用产生的。文献^[13-14]也实验验证了负离子脱负能有效地提供击穿所需的初始电子源,这种脱负作用的主要对象是负离子与中性分子碰撞产生的自由电子:



(2)正离子与阴极碰撞作用。连续施加的重频脉冲也产生大量的残余正离子,这些正离子一般靠近阴极,撞击阴极同样也能释放二次电子。文献^[9]认为在低气压条件下,通过这种机理可以产生二次电子。

(3)亚稳态粒子的去激励作用。在重复频率较低时,击穿的初始电子主要由处于激励态的亚稳态中性粒子的去激励作用提供。处于激励态的分子、原子与没有被激励的分子、原子等碰撞电离并产生自由电子^[15],处于激励态的分子发出光子回到基态。亚稳态粒子的去激励也可以通过撞击阴极表面产生自由电子,方程式为



正离子对空间碰撞电离过程产生自由电子的影响明显不如负离子^[9]。负离子加很小的能量就可以发生脱负,产生新的有效电子,如 O_2^- 脱负产生电子只需要 0.5 eV 的能量^[11]。在高气压下,负离子通过碰撞脱负能提供大量的有效初始电子,而正离子与空间自由电子的复合会减小自由电子的数目,不利于放电发展。高气压条件下,正离子和亚稳态粒子撞击阴极(类似 Townsend 放电的 γ 过程)释放的二次电子不是主要的有效初始电子源。

4 结 论

得到不同气压条件下,施加电压与击穿时延、重频耐受时间、施加脉冲个数的关系。击穿时延会随着场强与气压的比值减小而增加,但重频耐受时间和脉冲击穿个数并没有明显增加或减少。得到击穿时延、重频耐受时间、施加脉冲个数与重复频率的关系。随着重复频率的提高,击穿时延和重频耐受时间均减小,但实际施加的脉冲个数变化规律较为复杂。本实验条件下,施加重频纳秒脉冲,尖-板电极下空气间隙击穿的极性效应不明显。重频脉冲下的击穿与残余电荷、激励态粒子积累的“记忆效应”有关,这种“记忆效应”产生的二次电子通过负离子的脱负或正离子碰撞阴极,及亚稳态粒子的去激励作用及空间电荷效应等来实现。

致 谢 感谢西北核技术研究所六室在实验中提供的帮助。

参考文献

- [1] 邵涛,孙广生,严萍,等. 高压纳秒脉冲气体放电实验研究进展[J]. 高压电器, 2004, **40**(4):279-282. (Shao T, Sun G S, Yan P, et al. Progress in the experiment and research of gas breakdown under HV nanosecond pulse. *High Voltage Apparatus*, 2004, **40**(4):279-282)
- [2] Nesterikhin Yu E, Komelkov V S, Meilikhov E Z. Pulsed breakdown of small gaps in the nanosecond range[J]. *Soviet Phys Tech Phys*, 1964, **9**(7):29-39.
- [3] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(3):874-881.
- [4] Kromholz H, Hatfield L L, Kristiansen M, et al. Gas breakdown in the subnanosecond regime with voltage below 15 kV[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2002, **30**(5):1916-1920.
- [5] 邵涛,袁伟群,孙广生,等. 常压下重频纳秒脉冲气体放电实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, **25**(8):161-166. (Shao T, Yuan W Q, Sun G S, et al. Experimental study of repetitively nanosecond-pulse breakdown in atmospheric air. *Proc of the CSEE*, 2005, **25**(8):161-166)
- [6] Su J C, Liu G Z, Ding Y Z, et al. Nanosecond SOS-based pulsed generator SPG200[C]//Proceedings of the Third International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications. Mianyang, China, 2002:258-261.
- [7] 邵涛,潘洋,王珏,等. 高压重复频率纳秒脉冲下电信号的测量与诊断[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(4):603-608. (Shao T, Pan Y, Wang J, et al. Measurement and diagnostics of electrical signals under high voltage repetitive nanosecond-pulses. *High Power Laser and Particles Beams*, 2005, **17**(4):603-608)
- [8] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M, et al. High voltage subnanosecond corona inception[C]//Proceeding of IEEE 12th Pulsed Power Conference. Monterey, USA, 1999:1392-1395.
- [9] Pejovic M M, Ristic G S, Karamarkovic J P. Electrical breakdown in low pressure gases[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2002, **35**(4):91-103.
- [10] Hartmann G, Gallimberti I. The influence of metastable molecules on the streamer progression[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1975, **8**:670-680.
- [11] 李劲,姚宗干,何正浩. 放电通道对离子背景的选择性[J]. 中国电机工程学报, 1994, **14**(5):45-49. (Li J, Yao Z G, He Z H. The choosing characteristic of the discharge path for the ion background. *Proc of the CSEE*, 1994, **14**(5):45-49)
- [12] Kondo Y, Miyoshi Y. The statistical distribution of sparking time-lag[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1977, **16**(6):1037-1041.
- [13] 周黎明,邱毓昌. 预电离对尖-板间隙冲击电压的影响[J]. 高压电器, 1994, **30**(6):9-12. (Zhou L M, Qiu Y C. Effect of pre-ionization to impulse breakdown in a rod-plane gap. *High Voltage Apparatus*, 1994, **30**(6):9-12)
- [14] Allen N L, Hashem A A R. The role of negative ions in the propagation of discharges across insulating surfaces[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2002, **35**:2551-2557.
- [15] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社,1983. (Yang J J. Gas discharge. Beijing: Science Press, 1983)

Experimental research of repetitively nanosecond-pulse breakdown in air under non-uniform electric field

SHAO Tao^{1,2}, SUN Guang-sheng¹, YAN Ping¹, ZHANG Shi-chang¹

(1. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2703, Beijing 100080, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Breakdown experiments of point-plane gas gaps were investigated with repetitive burst conditions under variant repetition rates (10, 100, 500 and 1 000 Hz), diverse gap distances (0.5 cm and 1.0 cm) and different gas pressures (0.1~0.4 MPa) respectively. Relations among breakdown delay time, repetitively stressing time, number of applied pulses, and repetition rates were presented. The results indicate that breakdown time lag increases with the decrease of the division between applied electric-field and gas pressure, but repetitively stressing time and applied pulse number change hardly with the division between applied electric-field and gas pressure in the experimental condition. Breakdown time lag and repetitively stressing time decrease with the increase of repetition rate, but applied pulse number increases. The experimental results also show that the polarity dependence is not distinct. Excited particles and residual charges formed during the consecutive nanosecond-pulses will present a memory effect and affect the development of gas breakdown. Detachment of negative ions, cathode collision of positive ions, or de-excitation of metastable species can provide the source of primary electrons.

Key words: Gas breakdown; Nanosecond-pulse; Point-plane gaps; Repetition rate; Polarity dependence