

圆形平板电极与薄膜层叠结构的沿面闪络性能*

陈志强^{1,2}, 贾伟², 谢霖燊², 郭帆^{1,2}, 王程程¹, 何小平², 吴伟², 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学 电气绝缘与电力设备国家重点实验室, 西安 710049;
2. 西北核技术研究院 强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

摘要: 强电磁脉冲模拟装置中用于脉冲压缩的陡化电容器常采用电极与薄膜介质层叠的结构, 其主要绝缘失效模式为沿面闪络。采用圆形平板电极, 在 SF₆ 绝缘环境中加载电压为前沿约 30 ns 的纳秒脉冲电压的条件下, 实验研究了陡化电容器关键结构参数和气压对沿面闪络性能的影响。结果表明: (1) 电极厚度、间隙和表面涂覆均不能明显改变层叠结构的沿面闪络电压; (2) 气压可以提高层叠结构的沿面闪络性能, 但是存在饱和趋势; (3) 薄膜介质层数与沿面闪络电压近似线性比例关系; (4) 增长薄膜介质伸出长度能显著提高沿面闪络电压。基于流注理论对上述结果进行了探讨, 认为极不均匀场中, 闪络起始主要由高场强区域决定, 但是闪络通道的形成和发展主要由闪络路径上的背景电场决定, 因此减小层叠结构三结合点处电场对闪络性能影响不大, 但减小闪络通道发展路径上的背景电场, 可以有效提高层叠结构的沿面闪络电压。

关键词: 电磁脉冲模拟装置; 陡化电容器; 层叠结构; 沿面闪络; 流注

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190311

Flashover characteristics of laminate structure composed of round parallel-plate electrodes and polymer film dielectrics

Chen Zhiqiang^{1,2}, Jia Wei², Xie Linshen², Guo Fan^{1,2}, Wang Chengcheng¹, He Xiaoping², Wu Wei², Ji Shengchang¹

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

Abstract: The peaking capacitor used for pulse compression in electromagnetic pulse (EMP) simulator often uses the laminate structure of electrodes and thin film dielectrics to achieve insulation at high voltage, and the surface flashover is the main insulation failure mode of the peaking capacitor. In this paper, the effect of key structural parameters of the peaking capacitor and the gas pressure on its surface flashover performance were experimentally studied under the condition that the insulation gas was SF₆ and the risetime of the applied voltage was approximately 30 ns. The experimental results show that: (1) the electrode thickness, the interspace around the electrodes and the surface coating could not significantly change the surface flashover voltage of the laminated structure; (2) increasing the gas pressure could improve the flashover performance at low gas pressure; (3) the flashover voltage is nearly proportional to the number of polymer film layers; (4) the flashover voltage could be increased remarkably by increasing the extension length of the polymer film dielectrics. Based on the streamer theory, the above results are analyzed and discussed. It is considered that in inhomogeneous field the flashover initiates in the strengthened field region but the formation and development of the flashover channel is mainly determined by the background field on the flashover path. Therefore, reducing the electrical field at the triple point has little effect on the flashover performance but reducing the field on the flashover path can improve the flashover voltage of the laminated structure significantly.

Key words: electromagnetic pulse generator; peaking capacitor; laminate structure; flashover; streamer

电磁脉冲模拟装置是强电磁脉冲试验不可或缺的设备, 尤其是在全面禁止核试验的现在, 检验电子系统的核电磁脉冲防护能力主要依赖于模拟试验。模拟装置按照特定的用途来设计, 为试验对象提供特定的电磁脉冲环

* 收稿日期: 2019-08-23; 修订日期: 2019-12-04

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金项目 (SKLIPR1602)

作者简介: 陈志强 (1987—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为电磁脉冲环境模拟生成; chen_zhiqiang@nint.ac.cn。

境,其产生的电磁场幅度、均匀性、波阻抗、入射方向、极化方向等必须符合特定的要求,通过模拟试验获得受试对象在特定电磁脉冲环境下的响应^[1-2]。MV级电磁脉冲模拟装置常采用两级脉冲压缩的技术方案,其中作为第二级抖化回路储能器件的陡化电容器是决定整个模拟装置性能的关键器件之一^[3-7]。陡化电容器主要包括平板型和同轴型两类,一般采用基于金属电极和聚合物薄膜介质的层叠结构,薄膜介质材料由于薄层强化效应具有优越的体绝缘性能,金属电极和薄膜介质依次层叠,薄膜介质伸出电极边缘一定距离以提高耐受沿面电压的能力。陡化电容器常采用SF₆气体进行绝缘,其结构简单,易于设计和制作,和陡化开关配合对脉冲源前级波形进行调整和压缩。金属电极与薄膜介质层叠结构的绝缘性能是设计陡化电容器的基础,SF₆气体中不同结构绝缘子在不同形式加载电压、不同气压和不同电极结构条件下的沿面闪络特性得到了广泛的研究,但是对于纳秒脉冲下层叠结构的闪络性能研究鲜见报道。本文基于400 kV纳秒脉冲实验平台,研究了圆形平板电极与聚丙烯薄膜材料层叠结构的沿面闪络性能,获得了其闪络特性的基本规律。

1 实验平台和实验方法

实验平台如图1(a)所示,在文献[8]和文献[9]中已做详细介绍。实验平台由2 MPa实验腔体、400 kV紧凑型Marx发生器、触发器、自动控制系统、测量及其他附属系统组成。Marx发生器的典型输出波形如图1(b)所示,稳定建立范围70~400 kV,前沿约为30 ns,后沿振荡为Marx发生器输出端分布电容所致,Marx发生器输出电缆与Marx外壳,以及实验腔体输入电缆与腔体之间存在分布电容,该分布电容容值小于Marx建立电容,与电阻分压器负载并联后作为Marx发生器的输出负载,导致Marx发生器的输出波形后沿发生振荡。

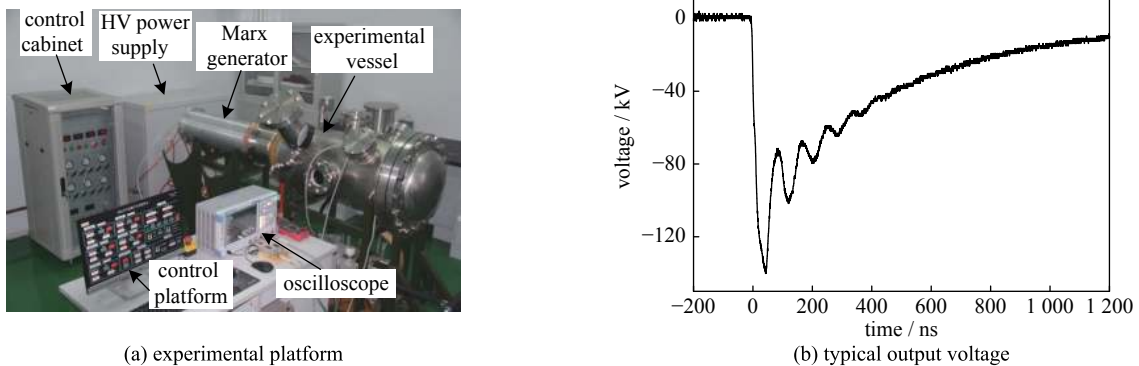


Fig. 1 Experimental platform and its output voltage

图1 沿面闪络试验平台和输出波形

实验电极采用图2所示平行板圆形电极,电极材质为黄铜,直径60 mm,厚度4 mm,边缘倒角R2,中介质为75层15 μm厚聚丙烯薄膜叠加而成,直径具有多个规格。无特别说明时实验绝缘环境为0.1 MPa的SF₆气体,温度约为25℃。

实验方法为前沿闪络法。调节Marx充电电压,使其输出一足以让所有沿面闪络发生在前沿的高幅值脉冲,并固定该状态,在该状态下开展所有的沿面闪络实验。每个条件下重复20次实验,之后计算该条件下的平均值和均方差。实验间隔在1 min以上。实验考查的影响因素包括:电极厚度、电极与介质之间是否存在气隙、硅橡胶喷涂电极、SF₆气压、介质层数和介质伸出长度。

2 实验结果

2.1 改变三结合点处电场分布的影响

本文中采用了改变电极厚度、增加气隙和涂覆有机硅等方法改变三结合点处电场分布。

采用图2所示电极结构,改变电极的厚度,开展了不同电极厚度下平行板电极结构的沿面闪络特性实验,介质的直径为80 mm。由图3(a)的电场仿真结果(加载电压1 kV,电场数据均为离气固分界面0.01 mm气体侧的电场



Fig. 2 Experimental electrodes

图2 实验电极布置

数据,不同计算模型的电场数据均在同一剖分参数下求得,下同)可知,电极厚度增加后,由于曲率半径的变化,三结合点处薄膜介质表面电场略微下降,但是离三结合点处较远距离的电场变化不大。从图3的实验结果来看,改变电极厚度对该层叠结构的沿面闪络电压影响不大,其闪络电压均在170 kV左右。

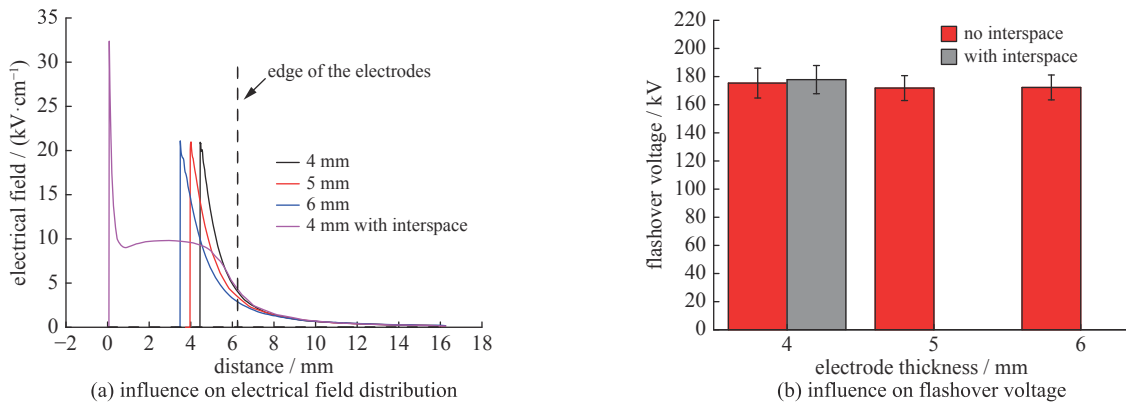


Fig. 3 Influence of the electrodes thickness and the interspace on the field distribution and the flashover performance

图3 电极厚度和气隙对层叠结构电场和闪络性能影响(图(a)中虚线表示电极的边缘,横坐标表示与电极边缘的相对位置)

气隙的引入也可以改变三结合点处电场分布,从图3(a)中可以看出,气隙的引入,改变了介质表面局部电场分布,大大降低电极边缘处电场,但是和改变电极厚度对电场的影响一样,对介质其他位置的电场分布影响不大。因此,从图3所示的实验结果中可以看出,有无气隙对层叠结构的沿面闪络性能影响不大。

采用小型喷枪,在层叠结构的三结合点处喷涂了厚度约为1 mm的硅橡胶材料,以降低三结合点处电场。从图4(a)可以看出,增加三结合点处介质的介电常数后,大幅降低了三结合点处局部电场,但是仍然处于一个较高的幅值,喷涂硅橡胶对闪络路径上的电场影响并不大。闪络性能测试的实验结果如图4(b)所示,层叠结构中介质直径为80 mm, SF₆ 气压为0.1 MPa。从图中可以看到喷涂硅橡胶并没有明显改善其闪络性能。

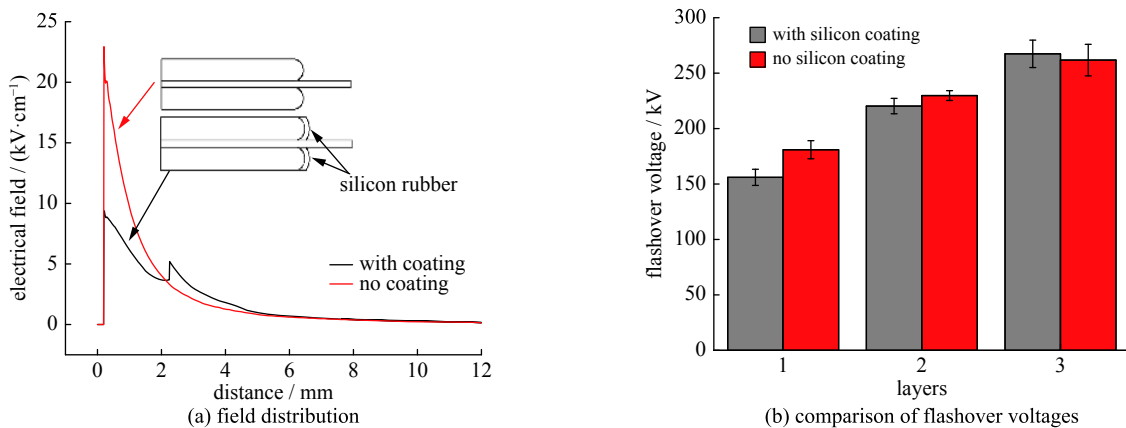


Fig. 4 Influence of the silicon coating on the flashover performance

图4 硅橡胶涂层对层叠结构沿面闪络性能的影响

2.2 SF₆ 气体气压的影响

气压是影响绝缘结构绝缘性能的一个重要因素,气压升高后,电子的平均自由程减小,电子在引发碰撞电离前累积的能量需要在更高的电场条件下才能实现,从而提高了耐压。然而, SF₆ 气体是一种对电场强度极为敏感的电负性气体,当电场强度增加,电子能量较大时,很难形成稳定的负离子,因此 SF₆ 在极不均匀场下其绝缘性能相对空气并没有提高很多,图5是采用指形电极在相同条件下(指形电极半球头半径10 mm,间隙5 mm,气压0.1 MPa)获得的空气和 SF₆ 环境中沿面闪络电压的对比,从中可以看出该实验条件下 SF₆ 气体闪络电压仅提高了16.62%左右。此外,对于聚丙烯薄膜这种半结晶态的聚合物,由于分子链的退化,微孔的存在,以及晶态和非晶区域界面的存在,在薄膜表面引入了大量的陷阱中心,电荷在陷阱中心的入陷和脱陷可能是影响高压下层叠结构绝缘性能的一个重要因素^[9-11]。图6给出了层叠结构沿面闪络性能与气压的关系,从图中可以看出,在0.3 MPa时,气压对沿面闪络性能的提升便已经显示出一定的饱和趋势,到0.4 MPa时对绝缘效果的提升几乎可以忽略不计。

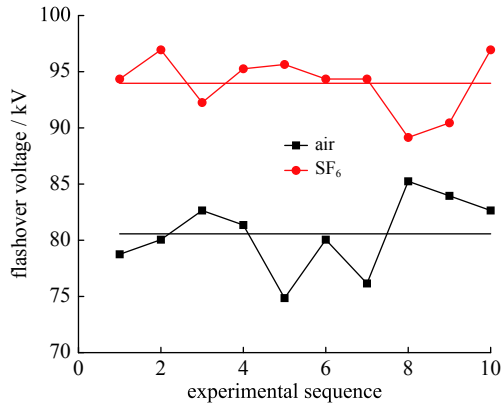


Fig. 5 Flashover performance comparison of air and SF₆ under inhomogeneous field

图5 极不均匀场中空气和SF₆气体绝缘性能对比

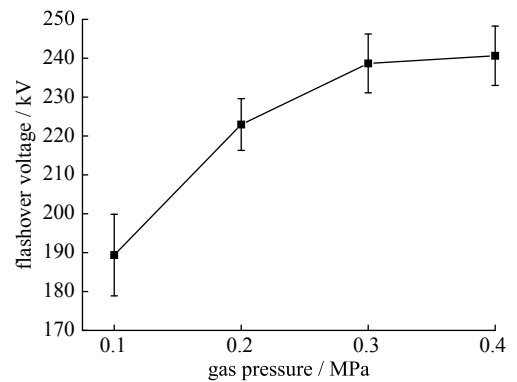


Fig. 6 Flashover voltage under different pressures

图6 不同气压下的沿面闪络性能

2.3 介质层数的影响

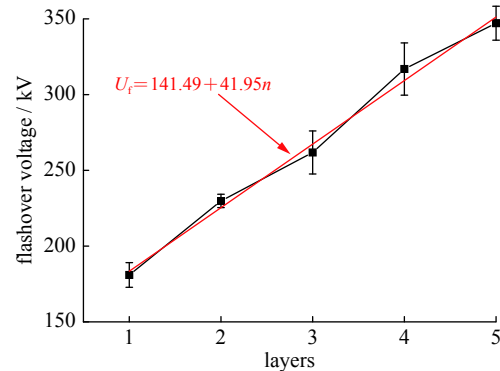
圆形平板电极和薄膜层叠结构与绝缘堆^[12]的结构非常类似,金属电极的引入,通过容性分压方式提高了正负电极之间电场分布的均匀性,降低了场不均匀系数,从而提高了单位长度的绝缘性能。本文对不同介质层数的层叠结构开展了闪络实验,实验结果如图7所示,5层介质以内,沿面闪络电压与介质层数基本上呈线性关系,闪络电压

$$U_f = 141.49 + 41.95n$$

其中 n 为介质层数。



(a) the sample with 4-layer dielectrics



(b) experimental results

Fig. 7 Influence of the number of the dielectric layers

图7 介质层数对沿面闪络性能的影响

单层介质的沿面闪络电压约为 181 kV,增加一层介质后沿面闪络电压提高约 42 kV,占单层的比例约为 23.2%。需要特别说明的是,增加介质层数后,层叠结构作为负载,其等效电容会减小,导致加载脉冲前沿的 dU/dt 增加,而对于同一个绝缘结构,当加载脉冲的前沿变陡后,其沿面闪络电压一般会提升。因此,对于同一个纳秒脉冲,增加一层介质后层叠结构闪络电压提高的比例可能会小于 23.2%。

2.4 介质伸出长度的影响

调整薄膜介质伸出长度不会影响三结合点处电场,但是如果流注通道要在相邻两个电极之间贯通,必须击穿薄膜介质或者沿薄膜介质外表面发展,由图8(a)的电场计算结果可知,薄膜介质伸长后,靠近电极边缘的介质表面电场基本上变化不大,但介质末端的表面电场将大幅减小。由于前面实验中采用的薄膜介质仅为 1.125 mm 厚度,当加载电压较高时,出现了介质的体击穿,而且由于薄膜介质属于柔性材料,伸长距离加长后,材料本身的刚度不足以支持其自重,在薄膜介质边缘区域发生了变形,薄膜出现了下垂现象。因此本实验中同时采用了 4 mm 厚的有机玻璃介质。实验结果如图8所示。对于聚丙烯薄膜介质和有机玻璃介质,延长介质伸出长度均能有效提高沿面闪络性能,受到 Marx 发生器最高输出电压限制,有机玻璃伸出长度为 20 mm 和 25 mm 时,在介质表面观察到了滑闪通道,但是没有形成贯穿性通道,该滑闪通道对于层叠结构的等效电容具有一定的影响^[8]。

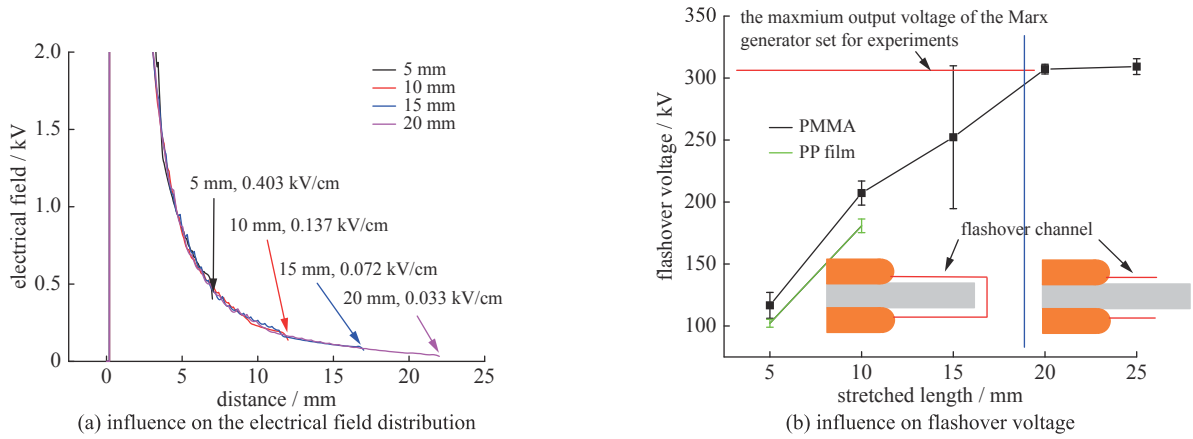


Fig. 8 Influence of the stretched length of the dielectrics

图 8 介质伸出长度对介质表面电场分布与沿面闪络性能的影响(图(a)中箭头表示介质边缘的电场)

3 分析和讨论

气体氛围中绝缘介质表面的沿面闪络情况跟真空中不同,介质表面被气体覆盖,气体分子参与了绝缘介质闪络的起始、发展和贯穿的整个过程,闪络的发生一般被认为是绝缘介质表面气体的击穿,介质的表面特性在放电过程中起着促进或者抑制的作用。本文研究的纳秒脉冲放电,其放电持续时间在 30 ns 甚至数 ns 以内,质量相对较大的离子和分子在闪络发展过程中可以认为是静止的,闪络发展的过程基本上可以认为是一个电子过程,可以从流注理论的角度来解释该现象。

经典的流注理论认为,有效初始电子产生后,通过碰撞电离形成初始电子崩,并持续发展,当初始电子崩头部电荷数量大于一临界值时,在电子崩头部空间电荷形成电场和背景电场的共同作用下,电子崩可以自持发展,流注形成,此时起主导作用的电离方式是光电离。流注形成后,即认为间隙发生了击穿。上述结论是在均匀场条件下建立的,假设在文中条件下,流注形成判据的一般形式仍和均匀场一致^[13],为

$$\int_0^{\chi_c} \alpha(E) dx = K \quad (1)$$

式中: χ_c 为电子崩的临界长度; K 值和实验条件有关,在不同的场合和不同的研究工作中有不同的值,基本上在 9~20 之间^[13-14]; E 为电子崩发展路径上电场; $\alpha(E)$ 为随电场强度变化的有效电离系数,从文献 [9] 的实验结果可知,当闪络电压未进入饱和区域时,介质表面对闪络电压的影响较小,所以此处的有效电离系数仍采用气体介质中的有效电离系数^[15]

$$\alpha(E) = 27.7 \left(\frac{E}{p} - 885 \right) p \quad (2)$$

其中 p 为气体介质的气压。

电子崩的发展和电子漂移速度 v_e 有关^[16]

$$\chi = \int_{t_0}^{t_d} v_e dt \quad (3)$$

$$v_e = 1.6 \times 10^6 \left(\frac{E}{7.6p} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (4)$$

其中 t_0 对应有效电离系数等于 0 的时刻。

层叠结构的电场分布是极不均匀场,其表面的电场分布可以通过电场仿真软件计算获得。以图 4(a) 中未喷涂有机硅的结构为例,加载电压 1 kV 时,从三结合点处开始向外的 4 mm 以内区域,介质的表面电场可以拟合为

$$E(x) = e^{14.80 - 0.1095(x+0.02000) + 0.008115(x+0.02000)^2} \times 10^{-5}$$

加载电压为纳秒脉冲,闪络方式为前沿闪络,假设加载电压

$$U = 10^{10} t$$

则不同时刻不同位置层叠结构薄膜表面电场可以表示为

$$E(x, t) = e^{14.80 - 0.1095(x+0.02000) + 0.008115(x+0.02000)^2} \times 10^5 t \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3),可以得到表征电子崩发展距离和时间的关系式

$$t = \left[\frac{8.482 \times 10^{-10} x}{e^{(0.004869x^2 - 0.06374x + 8.878)}} + 4.264 \times 10^{-16} \right]^{\frac{5}{8}} \quad (6)$$

其关系如图9所示,曲线前段电子崩位于场增强区域,随着加载电压的升高,电子漂移速度加快,漂移距离增长加快,但是随着距离的增加,电子崩逐渐发展进入低电场区域,外加电压增加的同时,电子崩所处位置的电场也逐渐减小,漂移距离基本上与时间成线性关系。

将式(2)、式(5)和式(6)同时代入式(1),可以得到电子崩临界长度和 K 值的关系,以及发展到临界长度时对应的脉冲电压,如图10所示。从图10中可以看到,在极不均匀场下,即使 K 值取到20,电子崩发展的临界状态仍然是比较容易达到的,因此在极不均匀场的沿面闪络现象中,三结合点处常常在较低的电压下即出现放电现象。但是该放电不一定会导致正负电极的贯穿,仅是一个滑闪现象,流注从高场强区域起始后,在向外发展的过程中,由于背景电场减小^[17],流注延伸到局部场强低于稳定发展场强的区域时,流注不会再向前发展,渐至熄灭^[8]。所以极不均匀场中,闪络起始主要由高场强区域决定,但是闪络通道的形成和发展主要由闪络路径上的背景电场决定。

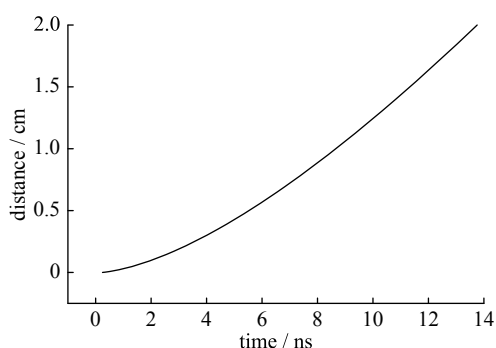


Fig. 9 Relationship between time and drift distance

图9 电子崩发展距离和时间的关系

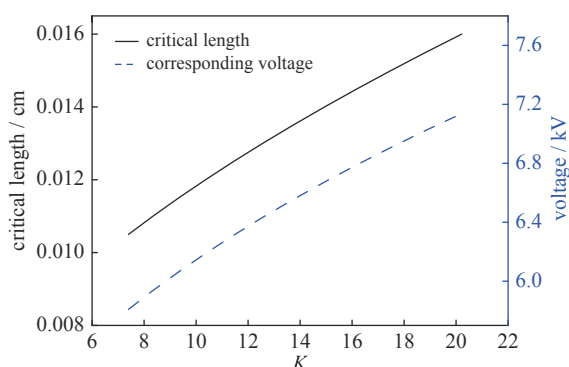


Fig. 10 Critical length and its corresponding voltage under different K

图10 不同 K 值下的临界电子崩长度和对应的电压幅值

文献[17]给出的流注维持电场在40~50 kV/cm·atm之间,按照图8中电场计算结果和闪络电压数据进行估算,介质伸出距离在5, 10和15 mm时介质边缘电场分别为47.01, 28.39和18.16 kV/cm,其中只有第一个数据落在参考文献给出的区间内,且伸出距离越长,层叠结构闪络时介质边缘对应的电场越来越低。因此,流注维持电场可能受到多种因素的影响,有待进一步研究。

综上,本文研究的圆形平板电极与薄膜层叠结构,其电场是典型的极不均匀场,由电场计算可知,闪络发生时,三结合点处电场可能是绝缘气体在稍不均匀场条件下击穿场强的几十甚至上百倍,因此,在较低的电压下即出现滑闪现象。同时,采用增厚电极、增加气隙、涂覆有机硅材料等方法虽然能有效降低三结合点处电场,减小高场强区域的范围,但三结合点处电场仍然处在一个很高的幅值,并且这些方法对三结合点之外的介质表面电场分布影响很小,所以不能有效提高层叠结构的沿面闪络电压。增加介质层数和增长介质伸出长度,可以显著降低流注发展路径上的背景电场,流注发展过程中因背景电场过低而熄灭,所以能有效提升层叠结构的闪络电压。

4 结 论

采用了前沿闪络的方法,在 SF_6 气体氛围中开展了圆形平板电极与薄膜介质层叠结构的沿面闪络性能研究,得到了以下结论:

(1)改变圆形平板电极厚度、电极边缘是否存在气隙和在电极边缘硅橡胶涂覆均不能明显改变层叠结构的沿面闪络性能;

(2)改变 SF_6 气压能提高层叠结构的沿面闪络电压,但是存在一个饱和趋势,气压提高到一定程度便无法再提高其沿面闪络电压;

(3)增加介质层数和延长介质伸出长度均能有效提高层叠结构的沿面闪络性能,该方法可作为提高此类电容器沿面闪络性能的重要途径。

(4)对于拥有极不均匀场的绝缘结构,降低闪络过程中流注发展路径上的背景电场可以有效提高其沿面闪络性能。

参考文献:

- [1] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Application of the pulse power technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016)
- [2] 毛从光, 程引会, 谢彦召. 高空电磁脉冲技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (Mao Congguang, Cheng Yinwei, Xie Yanzhao. Technological base of HEMP. Beijing: Science Press, 2018)
- [3] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2010, 38(10): 2554-2558.
- [4] Charles G, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999: 1437-1440.
- [5] Schilling H, Schluter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[C]//10th IEEE International Pulsed Power Conference. 1995: 1359-1364.
- [6] 陈维青, 何小平, 贾伟, 等. 2.5 MV快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会. 北京: 中国电子学会核电子学与核探测技术分会, 2008: 689-693. (Chen Weiqing, He Xiaoping, Jia Wei, et al. Development of a 2.5 MV fast pulse generator for EMP simulation//14th National Conference on Nuclear Electronics & Detection Technology. Beijing: Nuclear Electronics and Detection Technology Branch, China Electronic Academy, 2008: 689-693)
- [7] 陈志强, 贾伟, 汤俊萍, 等. 同轴薄膜电容器结构参数的优化设计[J]. 现代应用物理, 2019, 10: 010502. (Chen Zhiqiang, Jia Wei, Tang Junping, et al. An optimal design method for structural parameters of coaxial film capacitors[J]. *Modern Applied Physics*, 2019, 10: 010502)
- [8] 陈志强, 贾伟, 何小平, 等. 平行板电极边缘滑闪引起加载电压的“双峰”现象[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 070005. (Chen Zhiqiang, Jia Wei, He Xiaoping, et al. The double peak phenomenon of applied pulse voltage induced by the flashover around the parallel-plate electrodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 070005)
- [9] Chen Zhiqiang, Jia Wei, Guo Fan, et al. Variation and saturated phenomena of polypropylene film flashover voltage under different SF₆ pressures[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2019, 47(10): 4553-4559.
- [10] Atushi B, Kazuo I. Drawing and annealing effects on thermally stimulated currents in polypropylene films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(1): 2057-2059.
- [11] 徐航, 杜伯学, 苏金刚. 拉伸状态下聚丙烯/聚烯烃弹性体共混物的空间电荷和陷阱分布特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 453-459. (Xu Hang, Du Boxue, Su Jingang. Space charge behaviors and trap distributions of polypropylene/polyolefin elastomer blend under different elongation ratios[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 453-459)
- [12] 马勋, 邓建军, 姜莘, 等. 高压径向均压绝缘堆设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 105004. (Ma Xun, Deng Jianjun, Jiang Ping, et al. Design of high-voltage hold-off radial insulator stack with grading rings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 105004)
- [13] Jane L, Pralhad R. Foundations of pulsed power technology[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2017: 410-413.
- [14] 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 T, Yan P, Zhang Shichang, et al. Review on nanosecond-pulse discharge mechanism in gases[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(11): 1928-1932)
- [15] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 151-152. (Yan Zhang, Zhu Deheng. Technology of high voltage insulation. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 151-152)
- [16] Gennady A M. Pulsed power[M]. New York: Springer, 2005: 56-57.
- [17] Pinnekamp F, Niemeyer L. Qualitative model of breakdown in SF₆ in inhomogeneous gaps[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 16(7): 1293-1320.