文章编号: 1001-4322(2013)05-1205-06

刻槽绝缘子真空表面闪络光学特性

程国新, 程新兵, 杨杰, 刘列

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

摘 要: 利用超高速相机 Hsfc-Pro 对绝缘子真空表面闪络光学特性进行了研究,重点分析了平板和刻 槽结构圆盘形介质样品在指状电极下闪络通道的差异以及刻槽结构对材料绝缘强度的提升。实验结果表明: 槽纹的引入改变了闪络通道的形成位置,平板结构介质样品的表面闪络一般是沿两电极中心连线发展,而刻槽 结构介质样品的表面闪络则是沿介质边缘发展。这导致后者的闪络时延至少是前者的 π/2 倍,证明了刻槽结 构可以在不增加器件尺寸的前提下有效提高介质材料的绝缘强度。

关键词: 刻槽绝缘子; 表面闪络; 光学诊断; 长脉冲 中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **doi**:10.3788/HPLPB20132505.1205

真空表面闪络是限制脉冲功率器件性能提升的一个重要因素^[1-7]。如何采取有效措施以提升介质材料的 绝缘强度对于高功率器件功率容量的提升和器件的小型化设计至关重要。为此,学术界发展了一系列提升真 空表面闪络阈值的方法^[1,6-13]。例如采用具有一定角度的绝缘结构^[1,6],磁绝缘^[7,8],金属屏蔽环绝缘^[1,6],金属 化绝缘子^[9],高梯度绝缘子^[10-11]以及所谓的 A-B-A 结构式绝缘子^[12-13]。采用复杂绝缘结构也是其中一种可有 效提升介质材料绝缘强度的方法^[1]。而在真空表面闪络的机理研究方面,目前还缺乏对闪络过程充分的认识。 一般认为闪络起始于特定部位(例如:三结合点)的场致电子发射以及其相继的次级电子倍增^[14-15]。正是由于 该倍增的存在,致使介质表面吸附气体的释放并最终引发在解吸附气体层中的等离子体击穿。因此,要抑制表 面闪络的发生必须尽可能地抑制次级电子倍增的发展。刻槽绝缘子是一种已被证实可有效抑制介质表面次级 电子倍增的结构^[7,16],但有关其闪络光学特性的研究却鲜有报导。为此,本文借助于一部超高速相机和一长脉 冲低阻抗强流相对论电子束加速器,在真空百 ns 高压脉冲下,对几种常用有机材料的真空表面闪络特性进行 了综合的光学和电学诊断,获得了平板和刻槽结构下绝缘子表面闪络的光学图像和典型的击穿波形,并据此对 不同绝缘结构真空表面闪络所形成等离子体通道的差异进行了对比分析。

1 实验装置与测量方法

用于测量介质材料绝缘性能的装置为一台长脉冲低阻抗强流相对论电子束加速器。该加速器的稳定工作 电压为 100~500 kV,上升沿 30 ns,脉冲半高宽 180 ns,阻抗 10 Ω 左右。它主要包括初级储能电容器,场畸变 开关,Tesla 变压器,主开关,螺旋线型 Blumlein 线以及场发射二极管^[17-18]。其运行过程为:初级储能电容器充 电至一定值时,场畸变开关导通。初级储能电容给 Tesla 变压器充电,Blumlein 脉冲形成线随之被充以高压。 当 Blumlein 线的充电电压达到主开关的击穿阈值时,Blumlein 线向负载放电,并在负载上输出一个准方波脉 冲。为研究闪络的发展过程,该加速器的真空二极管被改造成了一个真空表面闪络实验腔,其结构如图 1 所 示。为确保真空室内无样品或样品不发生闪络时二极管输出的波形为较为标准的方波,真空室内配置了一个 高功率水电阻匹配负载。测试样品夹持于两指状电极上。指状电极间的场呈非均匀分布,两电极中心连线上 的场最大,线两侧的场逐渐减小。这有利于避免闪络发生位置的多样性,降低闪络时延的分散性^[19],从而更有 利于闪络的光学诊断和测量。该装置侧边有一个光学窗以用于诊断闪络的发展过程。样品表面闪络的电压、 电流波形分别由绝缘支撑壁上的电阻分压器和真空室后盖板上的自积分型罗氏线圈测量得到;时间分辨光学 图像则由德国 PRO AG 公司生产的超高速相机 Hsfc-Pro 拍摄得到。该相机有四通道,各通道之间的时延任 意可调。相机实测固有时延为(100±5) ns。

为保证相机信号与介质表面闪络信号的同步,Hsfc-Pro相机的触发方法如图1所示:加速器主开关产生

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:程国新(1983一),男,博士,从事介质高压绝缘和射频击穿的研究;chenguoxin322@163.com。

的光信号经光纤传输后馈入雪崩光电二极管(APD)转化为一个电平为 0.8 mV、上升沿约 4 ns 的低电平信号。 该电信号经高速电压比较器升压为一个电平为 5 V、上升沿小于 20 ns 的 TTL 数字信号,最后以该数字信号作 为相机的触发信号。实验测量发现^[20]:在该触发方案下,二极管电压波形起始点大概领先相机输入电信号波 形起始点 35 ns,其抖动在 1 ns 左右。



Fig. 1 Diagram of accelerator platform and diagnostic system for characterizing surface flashover properties of dielectrics 图 1 用于介质样品真空表面闪络测量的加速器平台及光学诊断系统

2 刻槽绝缘子结构设计

利用以上实验平台,对聚四氟乙烯(PTFE)、高密度聚乙烯 (HDPE)、聚碳酸酯(PC)三种有机材料的绝缘性能进行了测量。每 种材料分别测试了两种绝缘结构,一是平板结构,另一种是刻有周期 矩形条的结构。图 2 给出了周期刻槽结构 PTFE 样品的实物照片。 样品为圆盘状,外径 180 mm,露置于阴阳极间的距离为 100 mm。槽 纹均匀分布在两电极之间,槽纹方向和两电极中心连线上电场方向互 相垂直。槽纹宽 2 mm,深 2 mm,周期 4 mm。槽纹尺寸的选择具体 考虑了以下两个因素:第一,电子从一个槽纹渡越到另一槽纹时不可 产生倍增现象。这要求槽纹的宽度必须大于 W₂/(*eE*_p),其中 *e* 是基 本电荷,W₂是介质材料次级电子产生率曲线上第二交叉点的能量,*E*_p



Fig. 2 Dielectric sample and its holding method 图 2 介质样品及其装配方法

是施加在介质样品表面的电场强度。这里并不考虑第一能量交叉点是因为由第一交叉点的能量所决定的槽纹 尺度将小到无法加工的程度。第二,介质表面不可产生分段放电现象,也即是槽纹宽度必须足够小。由 J. C. Martin 公式 *E*_pt^{1/6}*A*^{1/10} = *k* (其中 *A* 为工作区域内介质-真空接触面的面积,*t* 是工作电压在 89%峰值处对应的 时间宽度,*k* 是 J. C. Martin 常数)可知:绝缘长度越短,表面闪络的阈值越高。综合考虑第一点,槽纹宽度选 在了 *W*₂/(*eE*_p)。对于大多数的有机材料,其第二交叉点能量一般为 2 keV^[21-22],当所施加的电场强度为 15 kV/cm 时,要求槽纹宽度在 2 mm 左右。为此,实际加工的槽纹宽度选择在了 2 mm。另外,槽纹深度也选择 在了 2 mm,这是为了把槽纹内的电子尽可能地限制在槽纹内以防止介质顶壁和槽纹底部的电子形成连通区 域,从而在一定程度上增强贯穿性等离子体通道形成的难度。介质样品在二极管中的装配方法如图 2 所示,它 相对于光学窗口法向有一大约 15°的倾角,这是为了便于区别闪络轨迹是沿着介质板边缘还是沿着两电极中 心连线发展。

实验时,二极管通过机械泵和分子泵的联合抽气其真空度保持在1.0×10⁻² Pa。已有研究表明:在气压低于10⁻¹ Pa时,闪络场强几乎是不随气压变化的^[4]。因此,上述真空度足以满足真空表面闪络的实验需求。

3 实验结果与分析

图 3 给出了刻槽和平板 PTFE 材料表面闪络时典型的电压、电流波形以及其对应的时间分辨光学图像,其中 τ_d为相机的固有启动时延,τ 为样品的表面闪络时延,U_d为二极管电压,I_s为闪络电流,R 为闪络通道阻抗,U_t为高速相机触发电压。从图 3(a)和 3(c)可以看出,平板和刻槽结构闪络现象的差异主要是在于二者的闪络

时延。平板结构下,二极管电压为160 kV,其闪络时延只有82 ns;而在刻槽结构下,二极管电压上升到了210 kV,其闪络时延却增加到了110 ns。根据图3(b)和3(d)二者在光学图像上的差异可以进一步得知:平板结构下介质样品的表面闪络几乎是沿两电极中心连线发展,而当引入槽纹结构后,闪络几乎是沿介质板边缘发展,其轨迹呈一弧线。这相当于闪络路径得到了有效延伸,因此直观地反映在闪络波形上是其闪络时延得到了明显提升。刻槽前后闪络轨迹的改变证明了刻槽结构可以有效地抑制介质表面闪络的发展,从而促使介质板边缘成为刻槽结构下最为脆弱的部位,进而导致闪络沿边缘发展。如果可以去除边缘效应的影响,那么在相同的电压水平下,刻槽结构对表面闪络的延时作用将比该实验测量更明显。





(b) flashover images for plane PTFE



(d) flashover images for grooved PTFE



为验证上述结构下介质样品表面闪络发生的确 切位置,图4给出了平板和刻槽PTFE样品闪络后 表面形貌的实物照片。从图可以看出:无论是平板 结构还是刻槽结构,阴阳极三结合点附近均有明显 的爬电痕迹。这是由于此结合处存在场增强,电子 在该区域的发射和轰击较为严重(见图3(b)和3 (d))。对于平板PTFE,其闪络主要是发生在平板端 面,绝缘子侧边几乎看不到烧蚀痕迹;而对于刻槽结 构 PTFE,经过数次闪络之后,其平板端面略显发黄, 但槽纹区域没有明显的闪络痕迹,其闪络痕迹多见 于绝缘子侧边,见图4(b)。当闪络次数较少时,绝缘

time/ns

(c) flashover waveforms for grooved PTFE at voltage of 201 kV



Fig. 4 Flashover tracks left on PTFE samples 图 4 PTFE 样品闪络后的表面形貌

子侧边发黄明显,而当闪络次数增多时,原本发黄部位又变得洁净亮白。因此,刻槽结构的闪络位置是绝缘子侧边而非绝缘子平板端面,其平板端面略显发黄的原因可能是绝缘子的老化。

HDPE 表面闪络的光学图像与图 3(b)和 3(d)所示 PTFE 表面闪络的光学过程极为相似,它们在时间发展上均经历了等离子体产生、发展和消亡过程。在表面闪络的初期,介质表面的物理过程主要是电子发射和次

级电子倍增,闪络通道尚未形成,阴阳极之间维持高阻抗,光信号甚为微弱,故在此阶段并没有明显可观察的光 信号(见图 3(d) Ⅰ)。随着次级电子倍增的发展,介质表面伴随有气体释放,碰撞电离产生,等离子体通道开始 建立,阳极首先出现可观察的等离子体光信号(见图 3(b) Ⅰ和图 3(d) Ⅱ)。等离子体通道的发展一方面使光信 号加强,另一方面使二极管电压减小并反向,反向电压降低了等离子体通道中电子的运动速度,使其碰撞电离 截面增大,碰撞电离效应加剧,故光信号不降反增(见图 3(b) Ⅴ和图 3(d) Ⅴ)。这是光信号的发展过程。之后, 二极管电压信号逐渐消失,介质表面所形成的等离子体由于得不到能量,而只能以热电离的形式维持其通道的 存在。随着等离子体能量越来越小,通道的光亮度也越来越暗,直至最后消失。等离子体消亡时间的长短与闪 络电流的大小有关,闪络电流越大,等离子体复合所需的时间越长(见图 3(b) Ⅷ~ Ⅳ和图 3(d) Ⅲ~ Ⅳ)。

图 5 给出的是平板和刻槽 PC 材料表面闪络时典型的电压、电流波形及其对应的光学图像。两种结构下 所用二极管测试电压均为 215 kV。平板结构 PC 样品在二极管脉冲尾沿出现了击穿,其闪络时延为 143 ns。 它的光学过程与 HDPE,PTFE 基本一致,不同在于平板 PC 的闪络通道相对于同结构的 HDPE 和 PTFE 弧度 较大,但其通道依然是在介质平板端面,而不是在介质平板侧面。另一方面,由于闪络发生在脉冲尾沿,其闪络 电流较小。闪络通道光信号集中于阴阳极三结合点,中间部位光信号较弱。对于刻槽结构 PC,它在上述电压 水平下几无闪络发生(见图 5(c))。图 5(d)的光学图像验证了在 220 ns 时,阴阳极三结合点处虽有等离子体 出现,但该等离子体却未能发展形成导电通道,没有产生沿面击穿。故此时流经二极管的总电流 I,和流过匹配 水负载的电流几无二致。













为形象地反映刻槽结构对平板绝缘子闪络时延的提升能力,表1总结了以上三种料在不同电压下闪络时延的测量结果。样品直径均为180 mm,阴阳极间隙均为100 mm,刻槽结构均为矩形条,宽2 mm,深2 mm, 周期4 mm。从表1可以看出:在足够大的同一电压下,刻槽结构的闪络时延几乎是平板结构的 π/2 倍,甚至 更大。这是由于平板结构的闪络在两电极间隙沿直线发展,而刻槽结构的闪络则是沿介质板边缘发展。另外, 对比几乎相同闪络时延下同一材料的耐受电压可以发现:PTFE 闪络时延为 80 ns 时,其在平板结构下耐受电 压为160 kV,而在刻槽结构下的耐受电压为258 kV;HDPE 闪络时延为95 ns 时,其在平板结构下耐受电压为 186 kV,而在刻槽结构下的耐受电压为259 kV。说明刻槽结构的引入可以有效增强绝缘子的耐压强度。此 外,在同一电压(260 kV)下的测量结果也可以看出:PC 材料是三种测试有机材料中绝缘性能较为优越的一种。无论是在平板结构还是刻槽结构下,其闪络时延均大于 PTFE 和 HDPE。但值得指出的是,PC 材料需要的老化时间较长,经过长时间老化处理其闪络时延有明显地提升。

表 1	不同电压下不同绝缘材料表面闪络的时间延迟

Table 1	Flashover o	lelav tin	ie for	different	dielectric	materials	under	different	operating	voltages
				*******				*******	or er	

	flat p	late	convexly grooved plate			
materiai	diode voltage/kV	delay time/ns	diode voltage /kV	delay time/ns		
DTEE	160 ± 4	82 ± 5	210 ± 8	110 ± 6		
PIFE	258 ± 5	45 ± 3	258 ± 5	78 ± 3		
HDPE	186 ± 7	95 ± 5	234 ± 6	136 ± 6		
	259 ± 8	67 ± 9	259 ± 8	98 ± 9		
PC	215 ± 6	145 ± 6	215 ± 6	no flashover		
	267 ± 9	93 ± 5	267 ± 9	177 ± 9		

4 结 论

本文对介质材料在真空百 ns 高压脉冲下表面闪络的光学特性进行了研究。利用超高速相机 Hsfc-Pro 直 观地获得了平板和刻槽结构圆盘形介质样品在指状电极下表面闪络的时空分辨光学图像,得到了平板介质样 品的表面闪络几乎是沿两电极中心连线发展,而刻槽结构介质样品的表面闪络则是沿介质边缘发展。这致使 刻槽结构介质样品的闪络时延至少是其同条件下平板型介质样品的 π/2 倍。若对应于相同的闪络时延,刻槽 结构介质样品的耐受电压有明显的提升,验证了刻槽绝缘子可以在不增加器件尺寸的前提下有效增强其绝缘 强度。

参考文献:

- [1] Miller H C. Flashover of insulators in vacuum: Review of the phenomena and techniques to improve holdoff voltage[J]. *IEEE Trans on Di*electr Electr Insul, 1993, 28(4): 512-527.
- [2] 荀涛,杨汉武,张建德,等.一种陶瓷径向绝缘强流二极管耐压结构设计[J].强激光与粒子束,2007,19(6):1019-1022.(Xun Tao, Yang Hanwu, Zhang Jiande, et al. Design of a ceramic radial insulation structure for a high current diode. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 1019-1022)
- [3] Okubo H. Enhancement of electrical insulation performance in power equipment based on dielectric material properties[J]. *IEEE Trans on Dielectr Electr Insul*, 2012, **19**(3): 733-754.
- [4] Yan Ping, Shao Tao, Wang Jue, et al. Experimental investigation of surface flashover in vacuum using nanosecond pulses[J]. *IEEE Trans* on Dielectr Electr Insul, 2007, 14(3): 634-642.
- [5] Tang Junping, Qiu Aici, Yang Li, et al. Process of surface flashover in vacuum under nanosecond pulse[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 2010, **38**(1): 53-58.
- [6] Stygar W A, Lott J A, Wagoner T C, et al. Improved design of a high-voltage vacuum-insulator interface[J]. Phy Rev ST Accel Beams, 2005, 8: 050401.
- [7] Chang Chao, Liu Guozhi, Tang Chuanxiang, et al. Review of recent theories and experiments for improving high-power microwave window breakdown thresholds[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 055702.
- [8] Korzekwa R, Lehr F M, Krompholz H G, et al. The influence of magnetic fields on dielectric surface flashover[J]. IEEE Trans on Electr Dev, 1991, 38(4): 745-749.
- [9] Miller H C. Improving the voltage holdoff performance of alumina insulators in vacuum through quasimetallizing[J]. *IEEE Trans on Dielectr Electr Insul*, 1980, **EI-15**(5): 419-428.
- [10] Harris J R, Anaya R M, Blackfield D, et al. Multilayer high-gradient insulators[J]. IEEE Trans on Dielectr Electr Insul, 2007, 14(4): 796-802.
- [11] Leopold J G, Dai U, Finkelstein Y, E, et al. Optimizing the performance of flat-surface, high-gradient vacuum insulators[J]. *IEEE Trans* on Dielectr Electr Insul, 2005, **12**(3): 530-536.
- Li Shaotao, Huang Qifeng, Zhang Tuo, et al. New organic insulation system to improve the surface-flashover characteristics in vacuum
 [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2010, 38(12): 3434-3441.
- [13] Li Shaotao, Zhang Tuo, Huang Qifeng, et al. Improvement of surface flashover performance in vacuum of A-B-A insulator by adopting ZnO varistor ceramics as layer A[J]. IEEE Trans on Plasma Sci., 2010, 38(7): 1656-1661.
- [14] Neuber A, Butcher M, Hatfield L L, et al. Electric current in dc surface flashover in vacuum[J]. J Appl Phys, 1999, 85(6): 3084-3091.

- [15] Anderson R A, Brainard J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. J Appl Phys, 1980, 51 (3): 1414-1421.
- [16] 程国新,程新兵,刘列,等. 刻槽绝缘子真空表面闪络特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 801-805. (Cheng Guoxin, Cheng Xinbing, Liu Lie, et al. Vacuum surface flashover of grooved dielectrics. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(4): 801-805)
- [17] Liu Jinliang, Cheng Xinbing, Qian Baoliang, et al. Study on strip spiral Blumlein line for the pulsed forming line of intense electron-beam accelerators[J]. Laser Part Beams, 2009, 27: 95-102.
- [18] Liu Jinliang, Yin Yi, Ge Bin et al. A compact high power pulsed modulator based on spiral Blumlein line[J]. Rev Sci Instrum, 2007, 78: 103302.
- [19] Krile J T, Neuber A A, Dickens J C, et al. DC flashover of a dielectric surface in atmospheric conditions[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2004, 32(5): 1828-1834.
- [20] Cheng Xinbing, Liu Jinliang, Hong Zhiqiang, et al. Synchronization of high speed framing camera and intense electron-beam accelerator [J]. Rev Sci Instrum, 2012, 86: 065104.
- [21] Cazaux J. A new model of dependence of secondary electron emission yield on primary electron energy for application to polymers[J]. J Phys D: Appl Phys, 2005, **38**: 2433-2441.
- [22] Joy D C. A data base on electron-solid interactions[J]. Scanning, 1995, 17(4): 270-275.

Optical characteristic of vacuum surface flashover of grooved dielectrics

Cheng Guoxin, Cheng Xinbing, Yang Jie, Liu Lie

(College of Opto-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Using an ultra high-speed framing camera Hsfc-Pro, the development of vacuum surface flashover of grooved dielectrics is investigated. Variations in flashover images between the plane and grooved dielectric samples are compared. Then the capability of grooved dielectrics in strengthening the insulation strength is discussed. It is found that the introduction of periodical grooves alters obviously the flashover channel. With respect to the plane samples, their flashover channel develops along a straight line across the A-K gap, while for the grooved dielectrics, their flashover channel locates at the circular edge of the samples. Such a bended path increases obviously the flashover distance, therefore, the flashover time delay of grooved dielectrics is at least $\pi/2$ times that of plane ones. This certifies that grooved dielectrics can increase promisingly the insulation strength without increasing their physical dimension.

Key words: grooved dielectric; surface flashover; optical diagnostic; long pulse