

文章编号: 1001-4322(2009)11-1745-05

纳秒脉冲下微堆层绝缘子的真空沿面闪络特性*

任成燕, 张东东, 袁伟群, 王 珏, 严 萍, 张适昌

(中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘 要: 为满足脉冲功率系统高性能、小型化的应用需求,设计并制作了聚酰亚胺膜为介质层、黄铜为金属层及聚全氟乙丙烯膜为介质层、不锈钢膜为金属层 2 种方案的微堆层绝缘子。基于 Marx 发生器及单同轴脉冲形成线的纳秒脉冲真空实验平台,对微堆层绝缘子的真空沿面闪络性能进行了测试。为了精确标定测量系统,利用输出脉冲幅值约 20 kV 的磁脉冲压缩电源对测量系统进行了标定,得到的分压比为 25 133 : 1。对 2 种方案微堆层试样的测试结果表明,闪络发生在电压上升期间,最大真空沿面闪络场强接近 180 kV/cm。

关键词: 脉冲功率; 微堆层绝缘子; 真空沿面闪络; 表面形态

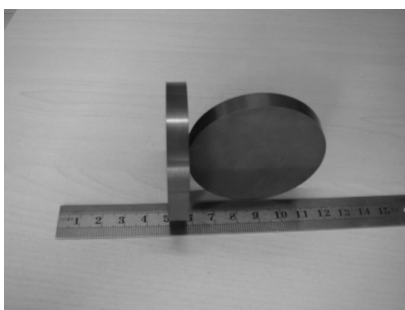
中图分类号: TM854; TN78 **文献标志码:** A

20 世纪 90 年代,美国 Tetra 公司的 J. M. Elizondo 等人基于真空沿面闪络的小间隙效应,从控制绝缘材料表面电荷和抑制二次电子崩角度出发,研制出膜片堆叠固化形成的高梯度绝缘材料,也称微堆层材料。它由小尺寸的导电材料层与绝缘材料层交替堆叠而成。美国 Lawrence Livermore 国家实验室在 20 世纪 90 年代后期改进制作工艺,获得实用的微堆层材料,使微堆层绝缘理论和工艺取得了突破性进展^[1-5]。

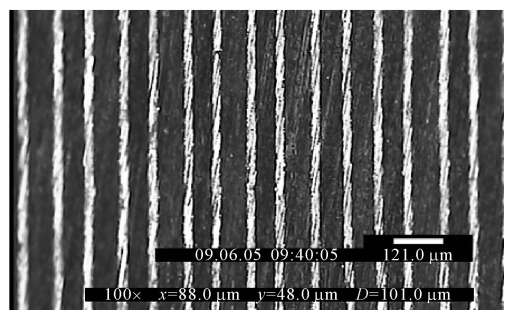
近几年, Lawrence Livermore 实验室围绕研制的以聚苯乙烯或聚酰亚胺为绝缘层、不锈钢为金属层的微堆层材料开展了大量的实验研究和理论分析。微堆试样的真空沿面闪络场强从 100 kV/cm 至 300 kV/cm 不等,微堆层中绝缘层的厚度、绝缘层与金属层的比率、试样总厚度及锻炼条件等均对闪络场强有直接影响^[6-8]。以色列 J. G. Leopold 等人与美国新墨西哥州的研究人员联合研制出氧化铝陶瓷膜片与铁镍钴合金(Kovar)膜片堆叠形成的微堆层材料,获得约 90 kV/cm 的真空沿面闪络性能^[9-10]。本文采用高温层压的方法制作了聚酰亚胺膜为介质层、黄铜为金属层及聚全氟乙丙烯膜为介质层、不锈钢膜为金属层 2 种方案的微堆层绝缘试样,并利用纳秒脉冲真空实验平台开展了 2 种方案微堆层绝缘子的真空沿面闪络实验。

1 微堆层绝缘试样

实验中用到的微堆层绝缘试样由 2 种方案研制而成。一种是利用聚酰亚胺(PI)膜为绝缘层、黄铜为金属层,经镀膜、粘结、层压工艺后研制出的 8 mm 厚的微堆层绝缘材料,利用高速水流切割成 $\phi 58 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的微堆层试样。试样的后加工利用高精度数控车削机床完成,加工精度可达 $0.05 \mu\text{m}$,精加工后的 PI 方案微堆层试样及其表面形态如图 1 所示,表面形态为经光学显微镜放大 100 倍后微堆层的切割面形态。



(a) PI micro-stacked insulator



(b) cutting surface

Fig. 1 PI micro-stacked insulator and its magnified surface

图 1 PI 方案微堆层试样及其表面形态

* 收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607019, 50677066)

作者简介: 任成燕(1979—), 女, 硕士, 助研, 主要从事脉冲功率中新型绝缘技术的研究; rcy@mail. iee. ac. cn.

由图中可看出,微堆层试样经后加工、超声清洗、真空干燥后,聚酰亚胺膜与铜膜均匀交替分布,金属层和绝缘层相互平行,微堆层截面上没有加工后留下的金属屑^[11]。

第 2 种方案利用聚全氟乙丙烯(FEP)膜为绝缘层、不锈钢膜为金属层,经高温热压研制而成。为获得较好的表面形态,经水刀切割后的试样在做真空实验前需经抛光处理。由于微堆试样为复合材料且试样最外层的不锈钢材质较硬,很难在现有条件下进行高精度数控车削加工。在实验室分别利用 300,500,800,1 000,1 500,2 000 目的砂纸对其进行抛光处理,然后进行超声清洗,真空干燥,处理后的试样及其表面形态如图 2 所示。由图中可看出,抛光后金属层边缘光滑,金属层和绝缘层分布均匀。

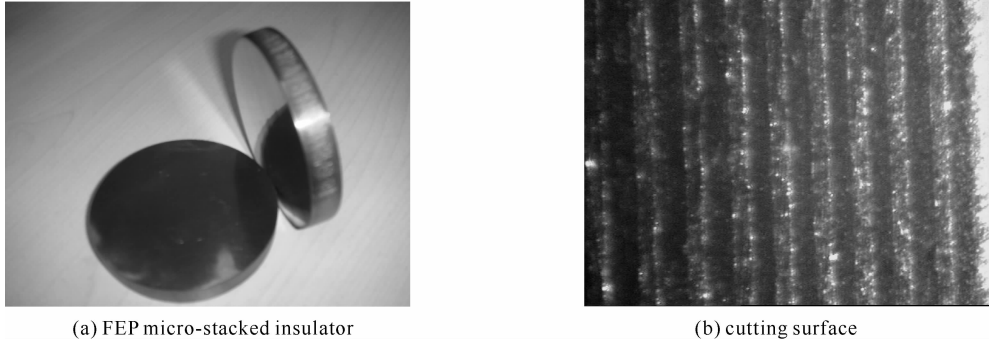


Fig. 2 FEP micro-stacked insulator and its magnified surface

图 2 FEP 方案微堆层试样及其表面形态

2 微堆层试样的真空沿面闪络实验

2.1 实验系统及其标定

图 3(a)为纳秒脉冲真空沿面闪络特性研究的实验装置原理图,整个系统主要由以下几部分构成:高压纳秒脉冲源、真空系统、试样与电极系统、屏蔽与接地系统和电气测量系统。脉冲源的输出参数 60~300 kV 可调,脉冲宽度 30~40 ns,上升沿约 10 ns。实验所用的真空腔如图 3(b)所示。

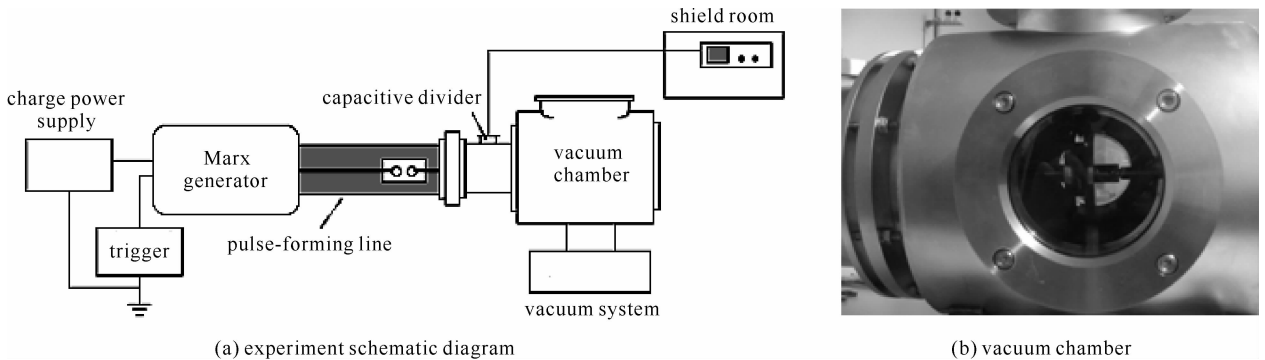


Fig. 3 Experiment schematic diagram of vacuum surface flashover under nanosecond pulse

图 3 纳秒脉冲真空沿面闪络研究的实验装置原理图

实验装置中,电压测量采用结构型电容分压器,属分布参数传输线型高压分压器,与集中参数分压器相比具有更宽的频率响应能力,带宽可达 1.5 GHz,并且结构简单,输入阻抗高,分压比在一个较大频率范围内可保持为恒定值。

分压器标定采用直接校准方法,标定系统主要由纳秒脉冲发生器、电容分压器、示波器等组成,系统标定接线如图 4(a)所示。标定用脉冲发生器为基于磁脉冲压缩系统的纳秒脉冲发生器 MPC-20^[12],脉冲发生器产生脉冲前沿 40 ns、脉宽 70 ns、5~20 kV 的可调信号,用于信号测量的是力科公司生产的 240Xi/2 GHz 采样率示波器。MPC-20 发生器产生的高压信号进入末端 50 Ω 匹配脉冲形成线,电容分压器上的感应信号通过信号电缆和末端匹配阻抗(50 Ω)引入示波器通道 2,试样两端电压信号通过泰克公司的 P6015A 高压探头引入示波器通道 1。电容分压器标定波形如图 4(b)所示,逐级改变脉冲发生器输出电压幅值,测得电容分压器的分压比为 25 133 : 1。为保证标定结果的可靠性,同时用 SMP-2020A 型纳秒脉冲发生器进行标定,其可输出上升沿小于 1 ns、脉宽 5~50 ns、幅值 0~1 kV 的可调方波信号,两者标定结果基本一致。

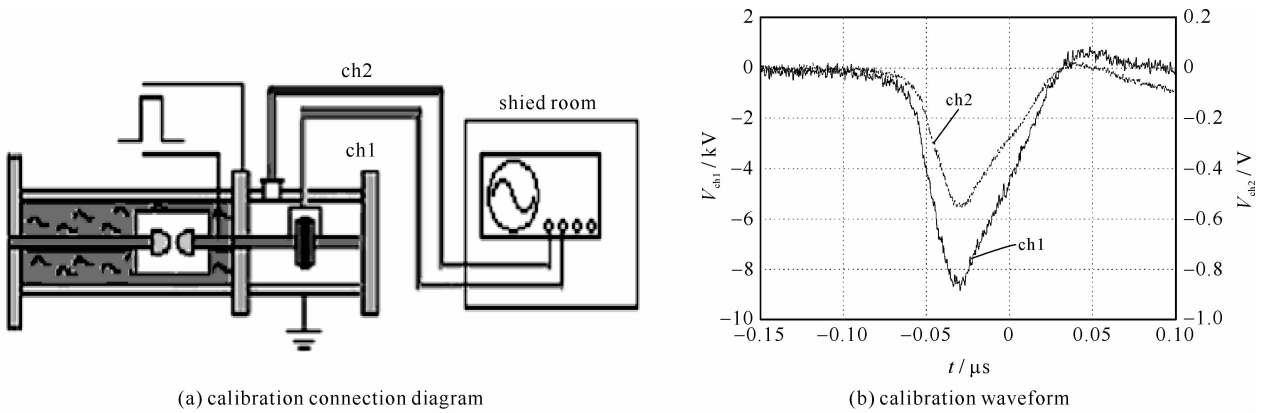


Fig. 4 Connection diagram and waveform of capacitive divider

图 4 电容分压器标定接线图及标定波形

2.2 实验结果

实验对象为 PI 方案和 FEP 方案的微堆层试样,PI 方案试样的几何参数为 $\phi 58 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,FEP 方案试样的几何参数为 $\phi 58 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$,实验前试样经去油污处理,超声清洗,真空干燥。实验条件为室温环境,实验真空度为 $3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。图 5 为微堆层试样发生闪络时的典型电压波形与脉冲源空载电压波形,闪络电压波形上升沿约为 8 ns,脉宽 10 ns,闪络发生在电压上升期间,为上升沿闪络。由于实验条件为高真空范围,根据巴申曲线^[13],发生气体击穿的场强远高于本实验的闪络场强,因此,放电属于微堆层的沿面闪络放电而非真空气体击穿。实验中每个试样放电约 50 次,试样放电次数与闪络电压的关系如图 6 所示。由图中可看出,试样发生初次闪络的电压较低,随后逐渐上升,并在一定值附近浮动。取各次闪络电压峰值的平均值为试样闪络电压,3 个 PI 方案微堆层试样的闪络电压如图 7(a)所示。由试样的闪络电压可知其闪络场强,如图 7(b)所示。

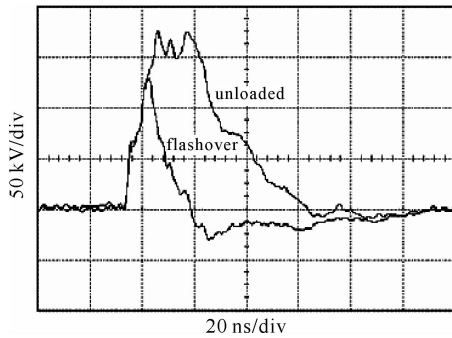


Fig. 5 Unloaded and flashover voltage waveforms

图 5 空载及放电电压波形

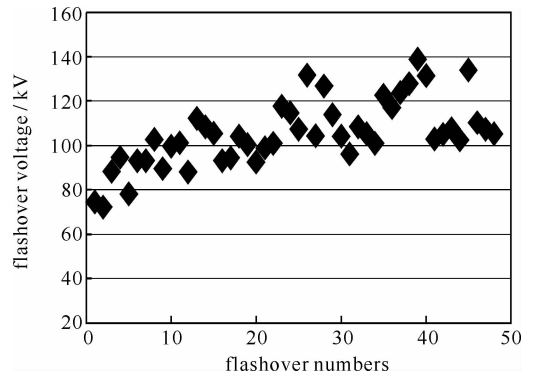


Fig. 6 Flashover voltage and flashover numbers

图 6 放电次数与放电电压的对应关系

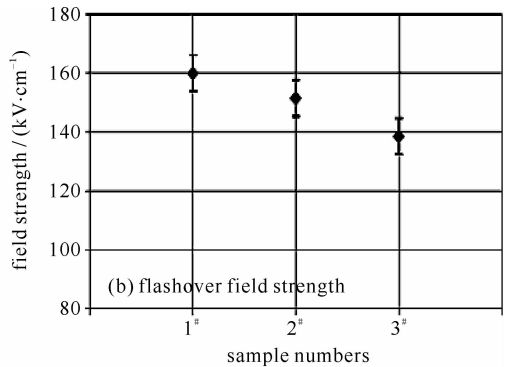
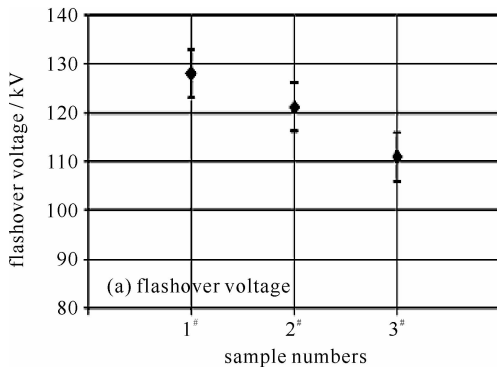


Fig. 7 Average flashover voltage and field intensity of PI micro-stacked samples

图 7 PI 方案微堆层试样的平均闪络电压及闪络场强

从实验结果可看出,3 个 PI 方案微堆试样中,有 2 个闪络性能较好,闪络场强高于 150 kV/cm ,而 3[#] 试样的闪络场强较低。由于这 3 件试样表面是经过高精度车削车床精加工而成的,加工过程中需利用真空吸盘来固定试样,3[#] 试样的局部表面在加工中受到了破坏,这可能是导致其闪络性能较差的主要原因。

同样实验条件下,3个FEP方案微堆层试样的平均闪络电压及闪络场强如图8所示。从图中可看出,2[#]、3[#]试样的闪络场强高于150 kV/cm,其中2[#]试样的场强高达177 kV/cm,而1[#]试样的闪络场强较低。实验中,1[#]、2[#]为经过砂纸抛光处理后的试样,而3[#]试样未经抛光处理,为水刀切割后未处理的试样。由实验结果可看出,微堆层试样的表面后处理对其闪络性能有很大的影响,表面处理好的试样其闪络性能有较大的提高,而如果处理不好,其闪络性能甚至不如处理前的试样。

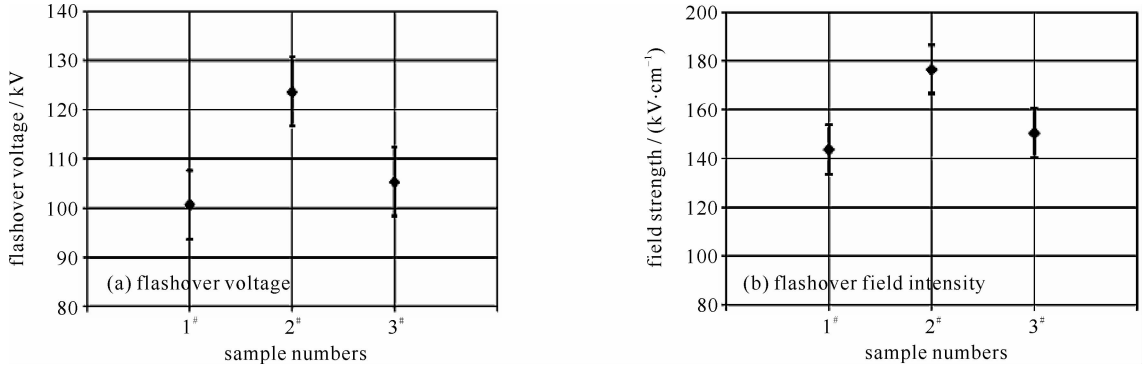


Fig. 8 Average flashover voltage and field intensity of FEP micro-stacked samples

图 8 FEP 方案微堆层试样的平均闪络电压及闪络场强

从2种微堆层试样的实验结果也可看出,FEP微堆试样的分散性较大,这与试样的表面状况有关。由于材料的特殊性,FEP微堆试样很难用现有设备进行表面精加工,手工打磨抛光虽能显著提高试样的真空沿面闪络性能,但抛光精度及重复性很难保证。从目前的实验结果也可看出,FEP微堆试样的闪络性能仍有较大的升高空间,其表面的精加工及适合加工的结构改进将是后期研究工作的重点。

3 结 论

本文介绍了实验室研制的以聚酰亚胺膜为介质层、黄铜为金属层及聚全氟乙丙烯膜为介质层、不锈钢膜为金属层2种方案的微堆层绝缘子,并开展了纳秒脉冲下微堆层绝缘子的真空沿面闪络实验,初步获得了微堆层绝缘子的真空沿面闪络特性。研究表明微堆层绝缘子具有较高的真空沿面闪络性能,在10 ns/30 ns脉冲条件下微堆试样的最高闪络场强接近180 kV/cm;微堆层试样的表面加工形态对其闪络特性有直接的影响。后续将开展更多有关微堆试样表面精加工、适合加工的结构优化及多参数的实验研究工作。

参 考 文 献:

- [1] Elizondo J M. Novel high voltage vacuum surface flashover insulator technology[C]//Proc of PPC. 1993:257-260.
- [2] Gray E W. Vacuum surface flashover: a high pressure phenomenon[J]. *Appl Phys*, 1985, **58**(1):132-141.
- [3] Sampayan S E, Caporaso G, Carder B, et al. High gradient insulator technology for the dielectric wall accelerator[C]//Proc of PAC. 1995: 1269-1271.
- [4] Sampayan S E, Vitelio P A, Krogh M L, et al. Multilayer high gradient insulator technology[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, **7**(3):334-339.
- [5] 严萍,王珏,张适昌. 新概念介质壁加速器[J]. 电工电能新技术, 2005, **24**(4):43-46. (Yan Ping, Wang Jue, Zhang Shichang. Dielectric wall accelerator. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2005, **24**(4):43-46)
- [6] Harris J R, Anaya R M, Blackfield D, et al. High-gradient insulators[C]//Proc of PMC. 2006:55-60.
- [7] Harris J R, Anaya R M, Blackfield D, et al. Multilayer high-gradient insulators[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, **14**(4):796-802.
- [8] Harris J R, Blackfield D, Caporaso G J, et al. Vacuum insulator development for the dielectric wall accelerator[J]. *J Appl Phys*, 2008, **104**:023301.
- [9] Leopold J G, Dai U, Finkelstein Y, et al. Optimizing the performance of flat-surface, high-gradient vacuum insulators[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, **12**(3):530-536.
- [10] Leopold J G, Dai U, Finkelstein Y, et al. More on high-gradient insulators[C]//Proc of PPC. 2005:509-512.
- [11] 张东东,严萍,王珏. 纳秒脉冲下微堆层绝缘材料的真空沿面闪络实验研究[C]//第十一届高功率粒子束学术交流会论文集. 2008:81-83. (Zhang Dongdong, Yan Ping, Wang Jue. Experiment study on vacuum surface flashover of high gradient insulator under nanosecond pulse power//Proc of the 11th High Power Particle Beams. 2008:81-83)
- [12] 张东东,严萍,王珏. 磁脉冲压缩系统的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(3):497-500. (Zhang Dongdong, Yan Ping, Wang Jue.

Simulation on a magnetic pulse compression system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3):497-500

[13] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (Yang Jinji. Gas discharge. Beijing: Science Press, 1983)

Surface flashover characteristics of micro-stacked insulators in vacuum under nanosecond pulse

Ren Chengyan, Zhang Dongdong, Yuan Weiqun, Wang Jue, Yan Ping, Zhang Shichang
(*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: In order to satisfy application demand for high performance and miniaturization of pulsed power system, two types of micro-stacked insulators were designed and fabricated. One was fabricated from interleaved layers of brass and PI (polyimide), the other was fabricated from stainless steel and FEP (fluorinated ethylene propylene). Based on the nanosecond (10 ns/30 ns) pulsed power vacuum experimental facility with Marx generator and single coaxial pulse-forming line, the vacuum surface flashover characteristics of the micro-stacked insulators were tested. To get a precise calibration of the measurement system, a magnetic pulse compression power supply with a relatively high pulse amplitude output of about 20 kV was used, and a voltage-dividing ratio of 25 133 : 1 was acquired. Two types of micro-stacked insulator samples were tested respectively. The results show that flashover takes place in the rising period of voltage, and the maximal vacuum flashover field intensity of six samples is close to 180 kV/cm.

Key words: pulsed power; micro-stacked insulator; vacuum surface flashover; surface state