

多层高梯度绝缘技术研究

李光杰^{1,2}, 严萍¹, 高巍^{1,2}, 袁伟群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)

Study on Multilayer High Gradient Insulator Technology

LI Guang-jie^{1,2}, YAN Pin¹, GAO Wei^{1,2}, YUAN Wei-qun¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

摘要: 真空中沿面闪络现象是制约真空设备耐压强度的一个重要因素, 采用多层高梯度绝缘技术, 比传统绝缘结构能显著提高击穿场强。介绍了该技术的研究现状, 并从真空沿面闪络的二次电子崩理论入手, 分析该结构对闪络过程的影响。同时, 从小间隙串联的模型以及对外加电场的影响两方面, 解释了多层高梯度绝缘结构可以提高绝缘性能的原因, 它与公开的实验现象和结论也比较符合。

关键词: 多层高梯度绝缘技术; 真空闪络;
二次电子崩; 小间隙; 电场畸变

中图分类号: TM854 文献标识码: A

Abstract: The electrical strength of vacuum insulation system is usually limited by the flashover phenomenon across the surface of insulator in vacuum. Multilayer high gradient insulator technology, a new insulator structure, is reported to perform higher breakdown electric field strength than conventional insulators. An investigation of this technology is presented, and an analysis from SEEA is explained. On the other hand, a model of small gap series and a simulation analysis are provided to account for the performance of improving insulator surface dielectric strength.

Key words: multilayer high gradient insulator technology;
surface flashover in vacuum;
secondary electron emission avalanche(SEEA);
small gap; electric field distortion

0 引言

真空作为一种特殊的电介质, 以其优良的绝缘特性被广泛应用于多种粒子加速器中。然而, 当设备内真空间隙中插入绝缘支撑后, 绝缘的耐压强度便会大大降低, 其根本原因是在绝缘支撑的表面出现沿面闪络, 该闪络场强远低于真空本身的耐电强

度和绝缘材料的体击穿场强。

多层高梯度绝缘技术是近几年随着新型加速器应用的发展而产生的新型绝缘技术。该绝缘结构相对于传统形式具有更加优良的体击穿特性和沿面闪络特性, 可大大提高绝缘支撑件的绝缘强度。其潜在优势已经得到人们的普遍重视。

1 研究进展

多层高梯度绝缘技术是一种基于真空中沿面闪络二次电子崩理论研发的新型绝缘结构, 于 20 世纪末被提出并展开实验研究。它的设计理念可以追溯到 1980 年前后, 文[1]和文 [2]提出绝缘厚度的减小可以增加沿面闪络电场强度, 绝缘支撑件中间夹入层状金属结构可以改善电场分布, 提高绝缘子闪络特性。这个观点当时并没有引起重视, 直到 20 世纪 80 年代中后期, 文[3]实验证明这种结构可以明显提高绝缘支撑件沿面特性。目前的研究已经历了原理性试验, 正从概念研究走向应用研究, 其中以美国利弗莫尔国家实验室的研究成果最为突出。

该技术主要通过有规律地嵌入小于 1 mm 的导电层, 从而形成一种嵌入式的高梯度绝缘结构(或称为微堆层绝缘结构)。图 1 是利弗莫尔国家实验室在实验中采用的一种多层高梯度绝缘结构的示意图^[4]。

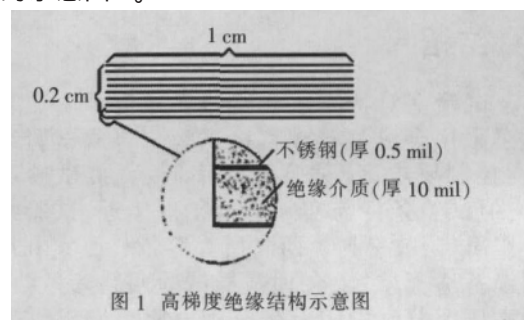


图 1 高梯度绝缘结构示意图

收稿日期: 2006-04-07

作者简介: 李光杰(1981-), 男, 硕士研究生, 从事高电压及脉冲功率的研究。

该绝缘结构无论在长脉冲、短脉冲和双极性脉冲下,绝缘特性都优于传统绝缘结构。文[1]表明,它的真空绝缘强度比常规绝缘结构高出1.5~4倍。图2列出了1972~1989年间文[5]通过实验得出的在不同的脉宽条件下(纳秒级别),多层高梯度绝缘结构和传统绝缘结构的沿面击穿电压的比较曲线。

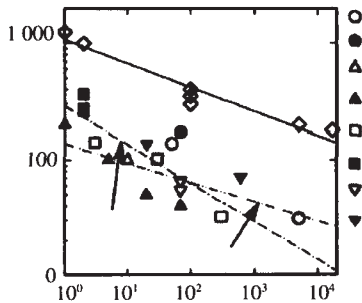


图2 HGI和传统绝缘结构的击穿电压的比较

通过对目前相关研究的检索和分析,发现许多数据都证明用多层高梯度绝缘结构可以明显提高沿面闪络特性,但是就多层高梯度绝缘结构本身的具体结构描述甚少,主要报道的是实验室得到的小模型样品的物理参数,材料、工艺和实际应用都没有明确报道。

2 原理探讨

2.1 对二次电子崩的抑制作用

绝缘体沿面闪络特性研究中的二次电子崩理论(SEEA)认为,当阴极3结合点处场致发射初始电子在外电场作用下向阳极跳跃式前行时,途中不断与绝缘体表面发生碰撞。撞击的结果一方面导致绝缘体二次电子的发射,另一方面,还会引发绝缘体表面的气体分子解吸附,解吸附气体分子受到高速运动电子的撞击后发生电离现象进而产生更多的电子。在上述两方面原因的共同作用下,绝缘体表面区域电子倍增过程很快形成并持续发展,二次电子崩形成。最终在解吸附气体中形成贯通的放电通道,从而导致沿面闪络的发生^[6]。

在这个击穿过程中,除了外加电场的作用外,空间电荷的积累和分布也起着非常重要的作用。电子撞击绝缘介质表面产生二次电子发射,介质表面局部会产生大量正电荷,此时介质表面受到合成场的作用——外加电场、介质极化场和空间电荷场,其中的空间电荷加强了介质表面的电场畸变,促进了沿面击穿的进一步发展。如图3所示,如果在放电路径上设置金属导电结构,分布在绝缘层间的导电层就能够及时地将正电荷分散开来,减少空间电荷的局部聚集,降低空间电荷场,进而抑制电子崩的形成以及沿面的击穿。

2.2 小间隙串联作用

文[2]提出,对于小间隙来讲,沿面击穿场强E

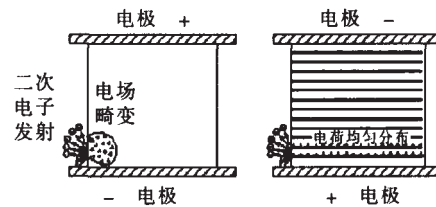


图3 多层高梯度结构对空间电荷场的弱化作用

与绝缘材料的厚度d的平方根成反比,即 $E=k/\sqrt{d}$,也就是说降低间隙距离可以提高闪络电场强度。多层高梯度绝缘结构可认为是将大绝缘间隙改为小间隙的串联,从而提高整个绝缘结构的电场击穿强度。

由于金属层对空间电荷的分散作用,以及金属层的嵌入对电位的钳位作用,在整个绝缘结构击穿前,串联的单个绝缘间隙的击穿是独立发展的,也可以看作是绝缘结构整体沿面的电子倍增过程受到了阻碍。如图4所示,文[4]通过显微镜观察高梯度绝缘结构试品的闪络面,发现其中的绝缘材料层有独立的闪络传导通道,并不是像传统绝缘结构那样是一个贯通的通道。对多层绝缘来说,通常的情况是:绝缘层数越多,闪络击穿场强越高,因为某一层击穿只引起其它层间场强的略微增加^[7]。

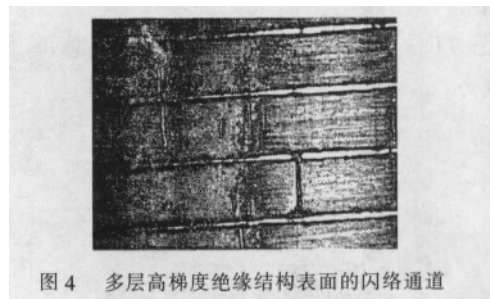


图4 多层高梯度绝缘结构表面的闪络通道

2.3 对外电场的影响

金属层的引入,不仅对空间电荷有影响,对外加电场在空间中的分布也有影响,而外电场的局部畸变对初始电子发射有着重要的影响。通过ANSYS软件对平行板电容间添加电介质和金属薄片之后的电场畸变进行了仿真分析。

图5为平行板电容器极板间区域剖面图,其中斜线填充部分为真空。在极板间放有另外一种电介质,在电介质正中间插有金属层,其截面宽度与电介质相等(设为l,图中只画出了一层)。

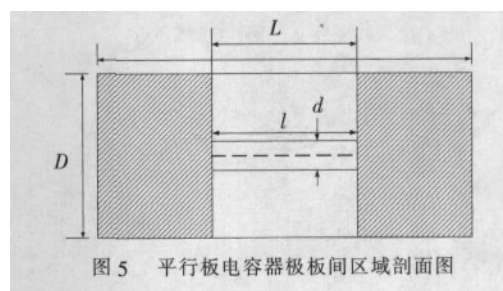
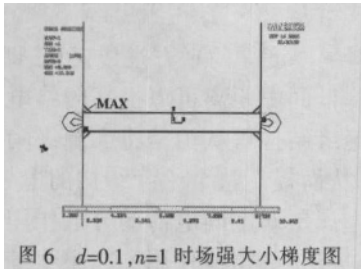


图5 平行板电容器极板间区域剖面图

计算所用参数:电介质剖面宽度 $l=1$ (注:单位取单位长度,下同);极板宽度 $L=4$;极板间距 $D=2$;

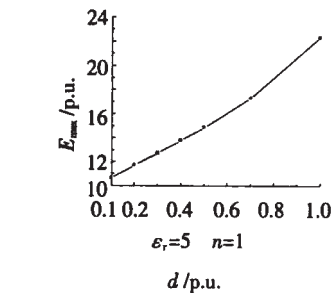
相对介电常数: 真空 $\epsilon_0=1$; 电介质 $\epsilon_r=5$; 上极板电压 $U_1=10$ (10 个数量单位); 下极板电压 $U_0=0$; 所加金属片的厚度为 d ; 金属片数量为 n 。考虑到上下极板间区域的电场情况, 金属极板只是作为区域的边界。

当加入 $d=0.1$ 的金属层后, 空间区域截面上的场强大小分布见图 6。

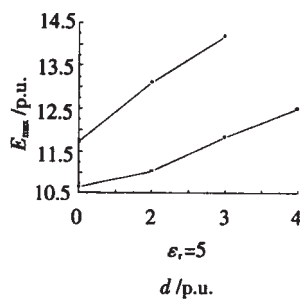


由于金属片的引入, 板间区域截面内的等位线已经不是直线, 在金属片界面附近的部分电场发生了畸变。如图 6 所示, 剖面中场强最大的点出现在金属区域的 4 个顶点, 即介质-金属-真空的 3 结合点处, 在实际电场中, 这也是最容易导致初始电子发射的位置。设该场强值为 E_{max} , 改变 n 和 d 的值, 由 ANSYS 计算相应的 E_{max} 值 (根据 U_1 和 D 来取相应的单位), 作出相应的曲线图见图 7。

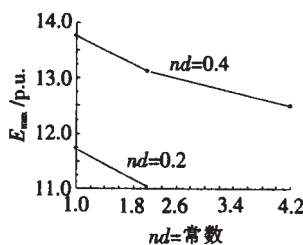
图 7(a), 7(b) 示出了随着金属层总厚度的增



(a) 插入单层金属片, 改变其厚度 d



(b) 金属片厚度 d 一定, 改变数量 n



(c) 金属片总厚度 nd 一定, 改变数量 n

图 7 E_{max} 随 n, d 变化的曲线

加, 场强畸变越严重, 越不利于增强该结构的绝缘性能。该规律和文[1]通过实验得到的结构中绝缘层厚度越大, 击穿电压越高的结论是一致的。

图 7(c) 显示的是在保持放进电介质中的金属层总厚度一定的情况下, 选用不同数量的金属片来实现时, 在 3 触点出现的极板间区域场强最大值的变化规律。该数值关系表明, 在金属层总厚度一定 (即绝缘层厚度一定) 的情况下, n 越大, 即插入的金属片越多, 场畸变越小, E_{max} 就越小, 越有利于提高极板间的击穿电压。

3 结语

多层高梯度绝缘结构的潜在优势和应用已经得到人们关注, 利用其高于常规绝缘材料的绝缘性能, 对绝缘设备的小型化有重要意义。预计基于多层高梯度绝缘结构的新概念电介质壁加速器 (DWA) 在相同传输能量的情况下, 其尺寸将比常规加速器小一个数量级。

目前有关多层高梯度绝缘结构的研究尚局限于实验室的小模型原理和机电特性研究, 实际中加工工艺复杂、造价不菲。同时, 该绝缘结构的制造工艺及加工工艺 (如切割等) 尚未完全公开。下一步的研究工作将是通过试验, 研制出能够实际应用的绝缘支撑件, 使之向着更高的绝缘特性、更好的机加工性能、更小的尺寸、更经济的方向发展, 以满足高压电器及脉冲功率相关元器件高性能、小型化的应用需求。

参考文献:

- [1] Sampayan S E, Vitello P A, Krogh M L, et al. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Tran. on DEI. 2000, 7(3): 334-339.
- [2] Pillai A S, Hackam R. Surface Flashover of Solid Dielectric in Vacuum [J]. J. Appl. Phys. 1982, 53(4): 2983-2987.
- [3] Elizondo J, Rodriguez A. Novel High Voltage Vacuum Surface Flashover Insulator Technology [C]// Proc. 15th Intern. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Berlin, 1992: 198-202.
- [4] Nunnally W C, Krogh M, Williams C, et al. Investigation of Vacuum Insulator Surface Dielectric Strength with Nanosecond Pulses [C]// 14th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. USA, 2003: 301-304.
- [5] Sampayan S, Caporaso G, Chen Y-J, et al. Development of a Compact Radiography Accelerator Using Dielectric Wall Accelerator Technology [C]// Proc. IEEE Part. Acc. Conf. 2005. USA, 2005: 716-718.
- [6] 高巍, 孙广生, 严萍. 高真空条件下绝缘闪络机理研究的评述 [J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 1-4.
- [7] 王勤, 丁伯南, 谢卫平. Z-pinch 装置轴向绝缘堆的设计和 分析方法 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(9): 1199-1203.