

微堆层绝缘子的研制与初步实验研究*

任成燕, 袁伟群, 张东东, 严 萍, 王 珏

(中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘 要: 为发展新型介质壁加速器技术, 研制了微堆层绝缘子并开展了初步的实验研究。利用有限元及粒子模拟方法, 理论计算了微堆层绝缘子的沿面电场分布及电子运动轨迹, 提出微堆层绝缘子的优化设计方案; 采用高温层压的方法, 研制出以聚全氟乙丙烯薄膜为介质层、不锈钢膜为金属层的微堆层绝缘子试样, 并初步开展了纳秒脉冲下微堆层绝缘子的真空沿面闪络实验。研究结果表明: 微堆层绝缘子具有良好的真空沿面闪络性能, 其闪络场强可达 180 kV/cm。

关键词: 微堆层绝缘子; 真空沿面闪络; 纳秒脉冲; 径向电场; 二次电子发射

中图分类号: TM854; TM21 **文献标志码:** A

20 世纪 90 年代美国科学家 S. E. Sampayan 等人提出一种新型加速器概念-介质壁加速器(DWA)^[1]。微堆层绝缘技术是随着新型加速器的发展而产生的新型绝缘技术, 它是一种基于真空沿面闪络二次电子崩理论研发的新型绝缘结构, 由小尺寸的导电材料与绝缘材料交替堆叠而成。这种新型绝缘材料在长脉冲、短脉冲及双极性脉冲下都有优于常规绝缘材料的真空沿面闪络性能, 同时, 该材料应用于新型直线感应加速器后, 能减小横向阻抗, 提高束流稳定性。微堆层绝缘材料的应用将给直线加速器系统的结构、性能及体积带来全面优化^[2-3]。目前, 美国 Lawrence Livermore 实验室和 Allied Signal 公司采用绝缘膜片、粘结片、金属膜片堆叠的方法, 获得实用的微堆层, 并围绕这种叠片式结构的微堆试样开展了大量的实验研究和理论分析^[4-6]。以色列 J. G. Leopold 等人将氧化铝陶瓷环表面金属化后, 利用铜焊技术, 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^[7]。国防科技大学对微堆层绝缘结构进行了初步的理论研究^[8]。本文计算了微堆层绝缘子的沿面电场分布及电子运动轨迹, 在此基础上研制了聚全氟乙丙烯(FEP)薄膜为介质层、不锈钢膜为金属层的微堆层绝缘子试样, 并在实验室窄脉冲源上开展了真空沿面闪络实验。

1 微堆层绝缘结构的理论计算

窄脉冲作用下, 真空固体沿面闪络的关键点为阴极三结合点场致电子发射和电子撞击绝缘子表面引发二次电子及气体解吸附。微堆层绝缘结构的基本原理是从控制自由电子漂移入手, 降低二次电子发射系数, 进而提高沿面闪络场强^[9]。在常规绝缘介质中嵌入金属层后, 绝缘子沿面的电场分布发生畸变, 产生径向电场。该径向电场将在局部区域吸引或排斥电子。通过调整绝缘层与金属层的比例结构, 可控制自由电子的撞击区域, 减少自由电子撞击引起的二次电子发射, 从而提高闪络场强^[10]。

利用有限元法, 首先计算了微堆层结构沿面的径向电场分布。计算中, 绝缘层(I)和金属层(M)的厚度均为 0.12 mm, 绝缘层的介电常数为 2.1, 金属片为不锈钢。半片金属层-1 片绝缘层-半片金属层为一个周期, 利用周期性边界条件, 一个微堆周期的径向电场分布如图 1(a)所示。图中, A 区域为半片金属层, B 和 C 区域对应绝缘层, D 区域为半片金属层。由图中可看出, A 和 B 区域的径向场强向上, C 和 D 区域的径向场强向下, 金属层和绝缘层交界处电场发生畸变, 此处场强最大。由于径向力周期性规律分布, 故只给出一个周期的电场分布。同时, 我们计算了 $d_1 : d_m = 3$ 时的径向场分布, 微堆层结构的总厚度不变, 计算条件不变, 结果如图 1(b)所示。由图中可看出, 当总厚度一定时, 绝缘层和金属层的厚度比例越大, 即金属层越薄, 微堆层沿面的径向电场越小, 而电场分布规律不变。

为进一步研究微堆层沿面的径向电场对绝缘子沿面自由电子的影响, 利用粒子模拟方法计算了微堆层沿面的电子运动轨迹。微堆层结构最外层为金属时, 初始能量为 0 的电子束从阴极三结合点附近发射的运动轨

* 收稿日期: 2008-12-22; 修订日期: 2009-05-13

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.

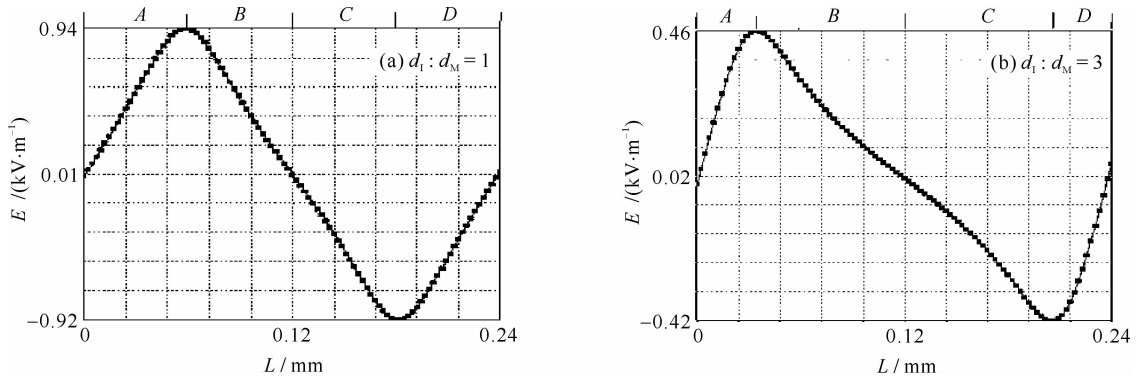


Fig. 1 Radial electric field of micro-stacked insulator

图 1 微堆层沿面的径向电场分布

迹如图 2(a)所示。图中黑色部分为金属层,灰色部分为绝缘层,试样下方为真空。初始电子发射后,受到向下的径向排斥力,电子运动轨迹偏离微堆层表面;距离微堆层表面较近的电子束受到的径向力较大,故偏离微堆层表面的距离较远。当微堆层结构最外层为绝缘时,初始能量为 0 的电子束从阴极附近发射的计算结果如图 2(b)所示。由图中可看出,当外层为绝缘时,电子束发射后由于受到向上的吸引力,因此电子束的运动轨迹趋向微堆层表面,并与试样表面发生碰撞,进而可能引发二次电子发射。因此,最外层为金属层的微堆结构更有利于抑制试样表面的二次电子发射。

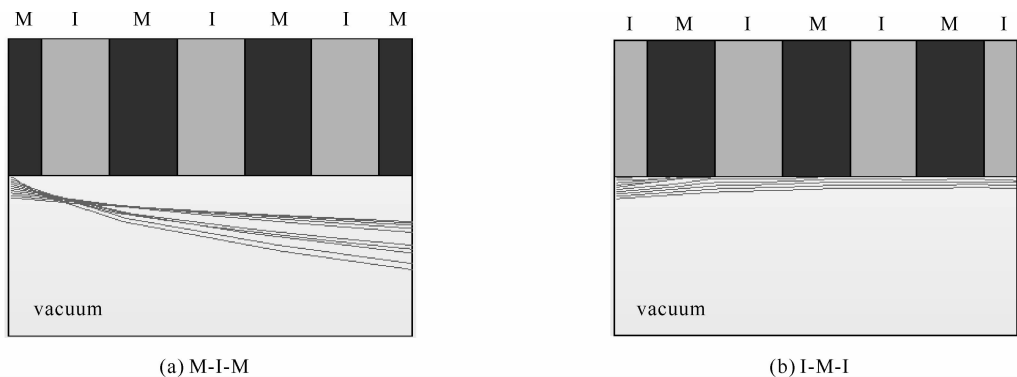


Fig. 2 Electron movement track of micro-stacked insulator

图 2 微堆层沿面的电子运动轨迹

金属层的引入为微堆层绝缘结构提供了周期性的径向电场,径向电场在对试样沿面的自由电子吸引或排斥的同时,也可能因场畸变引发电子发射。由于微堆层沿面的径向电场是周期性分布的,我们只分析一个周期内(A-B-C-D 区域)微堆沿面有电子发射时可能引发的二次电子发射情况。

由图 1 可知,当微堆层外层为金属时,A 和 B 区域受到向下的排斥力,在一定条件下可能发射电子,我们分别计算了两区域有电子发射时电子的运动轨迹。当 A 区域有电子发射时,由于受到径向排斥力作用,电子轨迹远离微堆层表面,因此不会撞击绝缘子表面引发二次电子发射;当 B 区域有电子发射时,靠近 C 区域的电子由于受到较大的径向吸引力,撞击到金属表面;由于 D 区域受径向吸引力,因此撞击到金属层表面的电子不会进一步引发二次电子。但是,如果 B 区域发射的电子撞击到下一个微堆周期的 B 区域,将再次引发二次电子发射,如此往复循环,将引发电子雪崩过程,并最终导致微堆层沿面发生闪络击穿。

合理地选择绝缘层和金属层的厚度比例,可有效地控制电子的运动轨迹,降低微堆层沿面的二次电子发射系数。利用上述电子轨迹模拟方法,我们计算了 $d_1 : d_M$ 为不同值时的电子运动轨迹,以期得到制备微堆层试样的理论参考。模拟结果表明,当 $d_1 : d_M = 3$ 时,靠近 C 区域的多束电子撞击到金属表面,不会引发二次电子发射;当 $d_1 : d_M = 7$ 时,靠近 C 区域的电子开始撞击到绝缘表面,可能引发二次电子发射。因此, $d_1 : d_M$ 应小于 7 为宜。结合以上计算结果与现有制备条件,我们确定实验室制备微堆层绝缘结构的初步设计方案,绝缘层与金属层的厚度比例选择为 3 左右。

2 微堆层绝缘试样的制备

聚全氟乙丙烯(FEP)是四氟乙烯-六氟丙烯的共聚物,它基本保持了聚四氟乙烯(PTFE)的优异性能,且加工性能较好。FEP的低温柔软性优于聚四氟乙烯,表面张力较小,熔融状态时与金属粘结性好,具有较好的抗撕裂性能。FEP的这些性能均满足微堆层绝缘结构中绝缘介质的要求,因此实验室制备微堆层试样时我们选用FEP作为绝缘介质层。

微堆层绝缘结构中选用不锈钢作为金属层,其硬度、延伸率和抗拉强度均能满足微堆层结构中金属层的要求。依据前面的计算结果,选用0.12 mm厚的FEP膜作为绝缘层,0.03 mm厚的不锈钢膜作为金属层。电子显微镜下可观察到不锈钢膜的表面有凹槽和突起,有利于绝缘层和金属层的粘接。

根据微堆层试样厚度的要求,计算出所需的绝缘层和金属层的个数,并根据设计结构将不锈钢膜和FEP膜相互堆叠,然后通过高温热压手段制备成所需厚度的微堆层材料。制备好的微堆层材料用高速水流进行切割,切割后的微堆层试样如图3(a)所示。图中,块状试样可用于试样表面形态观察,圆柱形试样可用于开展真空沿面闪络实验。

水刀切割后的微堆试样在真空实验前需经抛光处理,由于试样为复合材料,且表面的不锈钢材料较硬,很难进行高精度数控车削加工。实验室分别利用不同目数的砂纸对其进行抛光,然后进行超声清洗、真空干燥。利用显微镜观察了处理前后试样的表面形态,如图3所示。图3(b)为水刀切割后未抛光处理的试样表面,图3(c)为经砂纸抛光处理后试样的表面形态。由图可看出,抛光前金属层边缘毛刺较多,抛光后金属层边缘光滑,金属层和绝缘层均匀、平行分布。

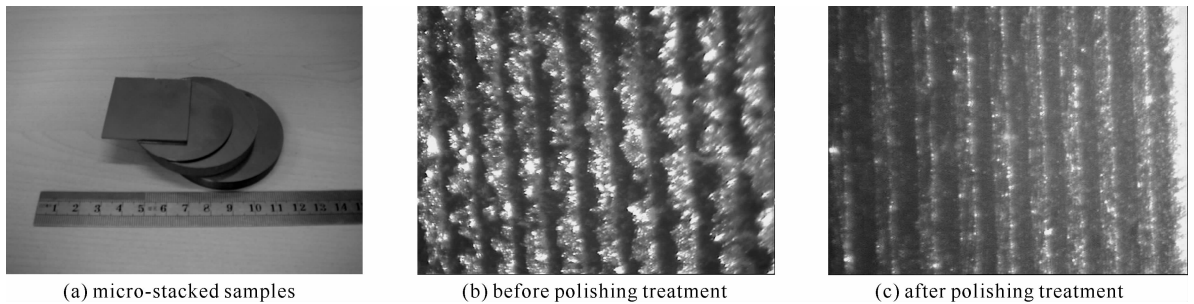


Fig. 3 Micro-stacked samples and surface texture

图 3 微堆层试样及其表面状态

3 微堆层试样的真空沿面闪络实验

利用实验室的纳秒脉冲源,初步开展了微堆层试样的纳秒脉冲真空沿面闪络实验。实验对象为 $\phi 58$ mm \times 7 mm的微堆层试样和相同尺寸的有机玻璃(PMMA)和聚四氟乙烯(PTFE)试样,实验前试样首先进行去油污清洗,然后用去离子水进行超声波清洗,时间为30 min,然后用真空干燥箱进行烘干处理。实验采用不锈钢平板电极,电极的预处理过程和试样相同,除此之外,还要进行辉光处理。经辉光放电处理后,电极表面没有尖锐的凸出物。

实验系统主要由高压纳秒脉冲源、真空系统、试样与电极系统、屏蔽与接地系统、电气测量系统等几部分组成。脉冲发生器的参数60~300 kV可调,脉冲宽度30 ns,上升沿约10 ns。实验中纳秒脉冲源空载和真空沿面闪络的典型电压波形如图4所示,对比两波形,可见施加在试样上的放电电压远大于试样闪络电压值,闪络过程发生在脉冲上升沿。

实验条件为室温环境,实验真空度为 5×10^{-3} Pa,每个试样分别放电60余次。最外层为金属的微堆层试样的闪络电压与闪络次数的关系,如图5所示。由图中可看出,初始放电时试样的闪络电压较低,随着放电次数的增多,闪络电压逐渐上升并在一定值附近浮动。本微堆层试样的平均闪络电压为125 kV,平均闪络场强179 kV/cm;在约30次放电后,试样的闪络场强在190 kV/cm处浮动。同样试验条件下,最外层为绝缘的微堆层试样的平均闪络场强为145 kV/cm,比外层为金属的微堆试样的闪络场强低20%左右。

FEP与PTFE的电绝缘性能相仿,耐热性能略低于PTFE。在以往的真空沿面闪络研究中,很少有FEP的试验数据。为了和微堆层的闪络特性相对比,同样试验条件下我们研究了常规绝缘PMMA和PTFE的闪

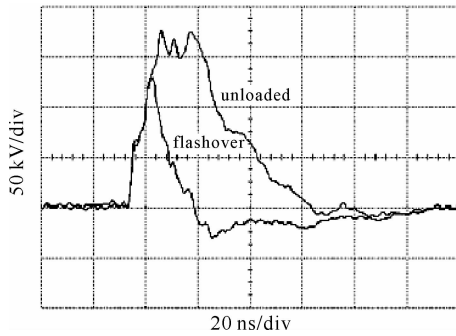


Fig. 4 Unloaded and flashover voltage wave of pulse source

图 4 纳秒脉冲源空载与闪络电压波形

络特性,结果如图 6 所示。图中曲线为文献[1]总结的常规 0° 绝缘子在不同脉宽下的击穿场强,本文试验中 PMMA 的真空闪络场强约为 160 kV/cm ,PTFE 的闪络场强为 180 kV/cm ,微堆层绝缘子(HGI)的平均闪络场强高于 PMMA,和 PTFE 相当,而稳定后(HGI-30)的场强略高于 PTFE。

由微堆层试样的闪络电压和放电次数的关系也可看出,闪络实验初期的老炼对微堆层试品的闪络性能有重要影响。这和微堆层中金属层的分布形成的小间隙串联结构有着直接的关系,多次闪络之后,试样中没有发现闪络场强急速下降的情况,反而随着老炼次数的增加,闪络场强有可能进一步提高。另外,微堆层的闪络性能和绝缘层与金属层的比值以及两者的厚度有直接的关系,美国和以色列的研究机构对微堆层的闪络性能和 $d_1 : d_M$ 的关系获得了不同的研究结果,后续我们将研制不同比例的微堆层样品并开展大量的实验工作。

4 结论

本文在理论计算的基础上,研制了以聚全氟乙丙烯薄膜为介质层、不锈钢膜为金属层的微堆层绝缘子试样,并在实验室纳秒脉冲源上开展了真空沿面闪络实验,主要得出以下结论:微堆层绝缘结构中介质层和金属层的厚度比例不但直接影响微堆层试样表面的径向场分布,而且直接影响试样表面电子的运动轨迹,选择合适的厚度比例可有效地抑制二次电子发射系数,进而提高其真空沿面闪络场强。纳秒脉冲下微堆层绝缘子试样的真空沿面闪络场强接近 180 kV/cm ,实验中随着放电次数的增加微堆层试样的闪络电压有逐渐上升的趋势。外层为金属的微堆层试品的闪络场强高于外层为绝缘的样品。不同厚度比例微堆层试品的真空沿面闪络特性有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Sampayan S E, Caporaso G J, Carder B, et al. High gradient insulator technology for the dielectric wall accelerator[C]//Proc of PAC. 1995: 1269-1271.
- [2] Elizondo J M. Novel high voltage vacuum surface flashover insulator technology[C]// Proc of PPC. 1993:257-260.
- [3] 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)
- [4] 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.
- [5] Sampayan S E, Vitello P A, Krogh M L, et al. Multilayer high gradient insulator technology[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, **7**(3):334-339.
- [6] 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.

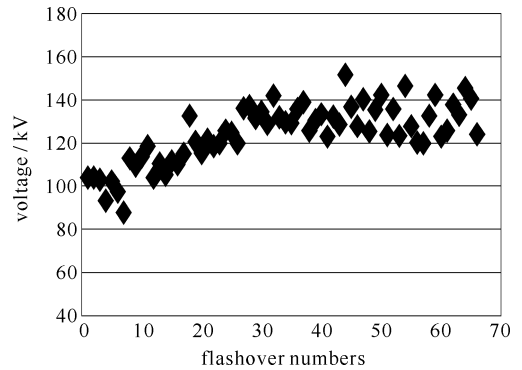


Fig. 5 Flashover voltage of micro-stacked sample

图 5 微堆层试品的真空沿面闪络电压

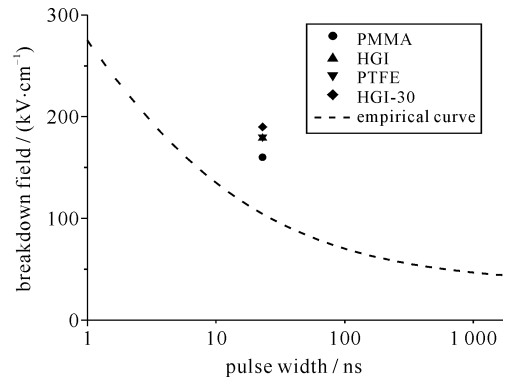


Fig. 6 Flashover characteristic contrast of high gradient insulator and conventional insulator

图 6 微堆层样品和常规绝缘的闪络特性对比

- [7] 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.
- [8] 屈立辉,刘列,徐启福,等. 高梯度绝缘子初步研究及 Kapton 绝缘性能分析[J]. 高压电器, 2007, **43**(4):253-259. (Qu Lihui, Liu Lie, Xu Qifu, et al. Preliminary research of high gradient insulator and analysis of the insulating properties of Kapton. *High Voltage Apparatus*, 2007, **43**(4):253-259)
- [9] 李光杰,严萍,高巍,等. 多层高梯度绝缘技术研究[J]. 高压电器, 2007, **43**(1):40-42. (Li Guangjie, Yan Ping, Gao Wei, et al. Study on multilayer high gradient insulator technology. *High Voltage Apparatus*, 2007, **43**(1):40-42)
- [10] Ren Chengyan, Yuan Weiqun, Yan Ping, et al. Calculation and analysis on electric field of high gradient insulator[C]//Proc of PPC. 2007: 1640-1643.

Development and preliminary experimental study on micro-stacked insulator

Ren Chengyan, Yuan Weiqun, Zhang Dongdong, Yan Ping, Wang Jue

(*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: High gradient insulating technology is one of the key technologies in new type dielectric wall accelerator(DWA). High gradient insulator, namely micro-stacked insulator, was developed and preliminary experimental study was done. Based on the finite element and particle simulating method, surface electric field distribution and electron movement track of micro-stacked insulator were numerated, and then the optimized design proposal was put forward. Using high temperature laminated method, we developed micro-stacked insulator samples which uses exhaustive fluorinated ethylene propylene(FEP) as dielectric layer and stainless steel as metal layer. Preliminary experiment of vacuum surface flashover in nanosecond pulse voltage was done and micro-stacked insulator exhibited favorable vacuum surface flashover performance with flashover field strength of near 180 kV/cm.

Key words: micro-stacked insulator; vacuum surface flashover; nanosecond pulse; radial electric field; secondary electron emission