

溅射金膜对氧化铝陶瓷纳秒脉冲 真空沿面闪络的影响

朱明远, 孟永鹏, 成永红, 王增彬, 卢为, 陈玉, 吴锴

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 研究了溅射金膜对氧化铝陶瓷在真空环境中、纳秒脉冲高电压作用下沿面闪络特性的影响规律. 通过对氧化铝陶瓷表面粗糙度、电极接触形式的研究, 并结合表面态陷阱、界面能带结构、电荷注入过程的分析, 探究了影响氧化铝陶瓷溅射金膜后沿面闪络电压的主要原因. 在 50 ns/1.2 μ s 脉冲下、电极间距 10 mm 时, 测量各试样的闪络电压 60 次, 取后 30 次平均值作为稳定的闪络电压. 研究结果发现, 氧化铝陶瓷在溅射金膜电极试样的闪络电压比直接压接电极试样的闪络电压低, 这是因为在不同电极接触方式下, 氧化铝陶瓷材料的表面态对真空中的电子发射和材料表层的电荷注入的影响不同所致.

关键词: 沿面闪络; 氧化铝陶瓷; 纳秒脉冲; 溅射金膜; 表面态

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0097-05

Influence of Sputtered Gold Electrode on Pulsed Vacuum Surface Flashover Characteristics of Alumina Ceramic

ZHU Mingyuan, MENG Yongpeng, CHENG Yonghong, WANG Zengbin,

LU Wei, CHEN Yu, WU Kai

(State Key Laboratory of Electric Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effect of sputtered gold electrode on surface flashover characteristics of Al_2O_3 (alumina) ceramic, under nanosecond pulsed high voltage in vacuum environment, is investigated. And the mechanism is clarified by the discussion for effects of surface roughness, surface traps, surface energy band structure and charge injection. Six kinds of 95 % Al_2O_3 ceramics with different surface roughness and electrode contacting types are prepared. The flashover voltage is measured under 50 ns (rise time)/1.2 μ s (half-height width time) unipolar pulse and 5×10^{-3} Pa vacuum degree. It is found that the flashover voltage for the samples with sputtered gold contact electrode gets lower than ones without gold contact electrode, because the surface state induced by sputtered gold-electrode can affect the electron emission and charge injection on the sample surface.

Keywords: surface flashover; alumina ceramic; nanosecond high voltage pulse; sputtered gold electrode; surface traps

固体绝缘材料沿面闪络电压远远低于材料本身的击穿电压及真空击穿电压, 这是制约高功率脉冲装置发展的重要因素^[1]. 同时, 高功率脉冲装置逐渐

趋于小型化和高能化, 且要求脉宽越来越窄(纳秒, 亚纳秒级), 因此研究纳秒脉冲作用下绝缘材料闪络特性对促进脉冲功率装置的发展有重要的意义^[2].

收稿日期: 2010-11-23. 作者简介: 朱明远(1986—), 男, 硕士生; 成永红(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50437030, 50577048).

网络出版时间: 2011-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110425.1642.001.html>

基于电子激励解吸附原理的二次电子崩理论(SEEA)能较好地用于分析纳秒脉冲真空沿面闪络^[3-4]. SEEA 理论最早由文献[5]提出,后又有进一步发展^[4,6-7],该模型强调从阴极电极、真空和绝缘材料表面 3 者结合处发射的初始电子与绝缘表面的碰撞引起二次电子发射,二次电子再次碰撞绝缘表面导致电子崩,进而引起表面吸附气体脱附并电离引发闪络,但对于材料表面态对闪络的影响未作研究.文献[2,8]对绝缘材料真空沿面闪络的发生机理进行了研究,但就影响闪络的因素未作深入研究.文献[9]通过在传统环氧绝缘材料中添加不同填料改变其陷阱参数,研究了陷阱参数对闪络电压的影响.

国外学者在研究绝缘材料沿面闪络问题时,采用过对材料与电极接触处溅射金属层的做法^[10-11].本课题组对环氧材料表面溅射钛副族氧化物膜后的闪络特性进行研究,针对应用较广的氧化铝陶瓷,研究了试样溅射金膜后闪络电压的特性,以及溅射金膜与表面粗糙度、表面态、能带结构等的关系及其对闪络电压的影响.

1 脉冲闪络实验系统

脉冲闪络实验系统如图 1 所示,由脉冲发生器、真空系统和测量系统 3 部分组成.脉冲波形由八级 Marx 输出得到,输出波形的上升时间为 50 ns,半高宽为 1.2 μ s,波形如图 2 所示.真空系统如图 3 所示,采用机械泵与扩散泵相结合的抽真空系统,系统真空最低可达 5×10^{-3} Pa.测量系统安放在电磁屏蔽室,由分压器和示波器组成,分压器为金属氧化物膜电阻分压器,分压比为 11 686.7 : 1,响应时间小于 2 ns.

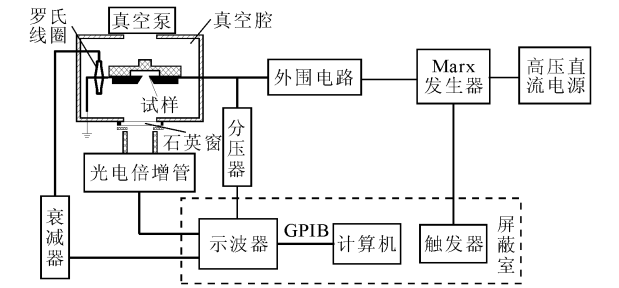


图 1 脉冲闪络实验系统示意图

实验使用的指形电极系统如图 4 所示,电极材料为不锈钢,机械抛光至镜面.试样装配时采用聚四氟乙烯螺栓将试样和电极前端顶紧,使其紧密接触无明显缝隙.实验前电极用四氯化碳和去离子水超声清洗,在 200 $^{\circ}$ C 下高温烘烤处理 2 h.

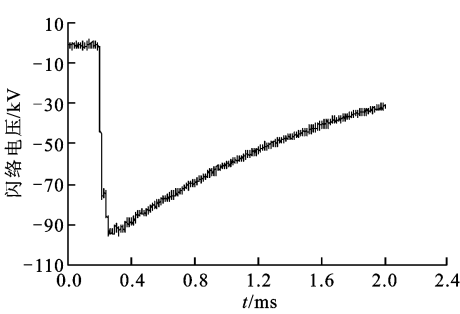
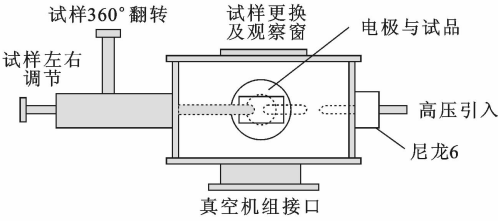
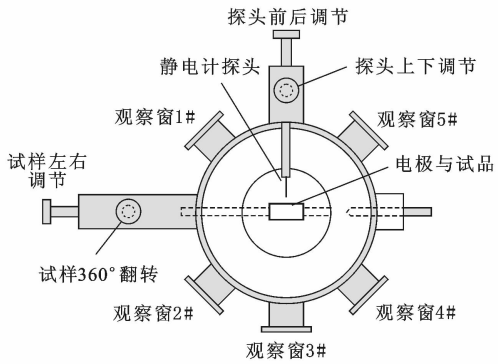


图 2 脉冲电压波形



(a)前视图



(b)俯视图

图 3 真空系统结构示意图

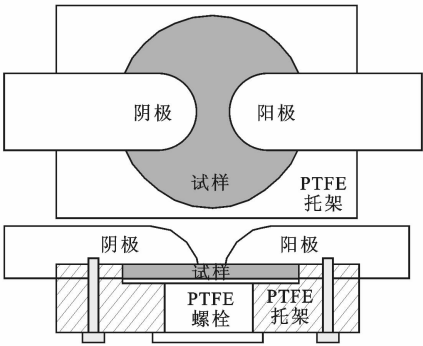


图 4 指形电极系统示意图

实验试样为常用于真空绝缘器件的 Al_2O_3 质量分数为 95% 的氧化铝陶瓷.试样为圆柱状,直径为 58 mm,厚度为 5 mm.为避免灰尘、杂质等对实验结果的影响,每次实验前,所有试样都依次使用无

水乙醇、丙酮、去离子水进行 5 min 的超声波清洗,最后在 90 ℃下持续烘干 2 h 备用。

2 纳秒脉冲真空闪络实验方法

每种试样至少取 3 片,在真空环境(5 mPa)中分别连续进行 60 次脉冲闪络实验,每两次闪络之间时间间隔为 30 s,以降低起始闪络放电存在的“老练”过程的影响(这一现象在其他真空沿面闪络研究中也有详细报道^[12-13])。借鉴有关脉冲陡度对环氧沿面闪络电压影响的研究成果^[13],通过实验确定脉冲陡度为 3.15 kV/ns,电极间距为 10 mm,闪络 60 次,取后 30 次闪络电压的平均值作为该试样的闪络电压。

本文中的闪络均为脉冲前沿闪络,图 5 为典型的脉冲闪络电压波形,以闪络电压波形的峰值点作为试样的闪络电压值。

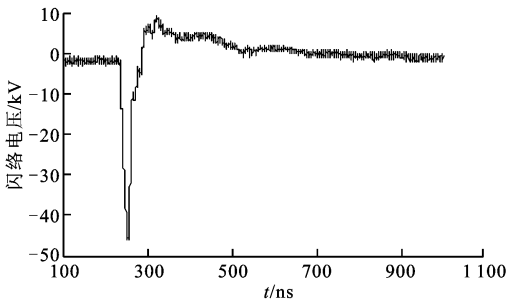
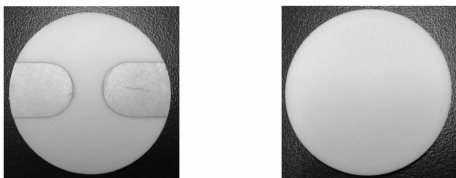


图 5 典型脉冲前沿闪络电压波形

3 溅射金膜对沿面闪络的影响

3.1 试样制备

实验采用了遮盖喷金法,对氧化铝陶瓷试样表面溅射出指形厚度约为 50 nm 的金膜,边界未作特殊处理,如图 6a 所示。共设计了 3 组试样,在镀膜前进行表面粗糙度加工,分别用 80 目、120 目、280 目金相砂纸进行随机方向打磨处理,然后进行表面清洗、干燥,送磁控溅射镀膜机进行镀膜加工。相应实验中还同步制备了 3 组经 80 目、120 目、280 目金相砂纸打磨处理的对比组试样,如图 6b 所示。



(a)溅射金膜后的试样
(b)用于直接压接的无镀膜试样

图 6 不同电极接触方式的试样实物图

3.2 真空闪络电压测试

采用第 2 节中所述实验方法对氧化铝陶瓷闪络电压进行测试,并对每个实验重复进行 4 次,每次实验间隔不小于 24 h,最终取 4 次闪络电压的平均值作为可靠的实验结果,见表 1 和图 7。

表 1 不同接触形式下的闪络电压值

试样	电极接触方式	最低闪络电压/kV	“老练”后的闪络电压/kV	标准差/kV
80 目打磨	直接压接	50.51	51.31	0.45
	溅射金膜	50.01	50.57	0.29
120 目打磨	直接压接	45.81	47.38	0.80
	溅射金膜	43.94	44.67	0.41
280 目打磨	直接压接	44.53	45.51	0.48
	溅射金膜	43.12	44.25	0.63

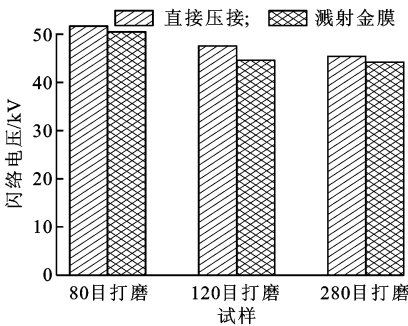


图 7 不同电极接触形式与闪络电压的关系

由表 1 和图 7 发现,随着打磨粗糙度的增加,闪络电压呈降低趋势,3 种不同处理方式的试样溅射金膜的闪络电压均低于直接压接情况下的闪络电压,且标准差较小,说明闪络电压的分散度较小。

3.3 溅射金膜对沿面闪络影响规律与机理分析

3.3.1 表面粗糙度的影响分析 对于直接压接方式,由于电极和固体介质表面都不可能绝对光滑,总有一定程度的粗糙,两者接触时会在电极和试样间存在薄层空隙,薄层气隙处的电场强度远大于其他部位,电子将首先由场强较大的部位发射,部分电子在介质表面跳跃式前进,为发生沿面闪络创造了起始条件。

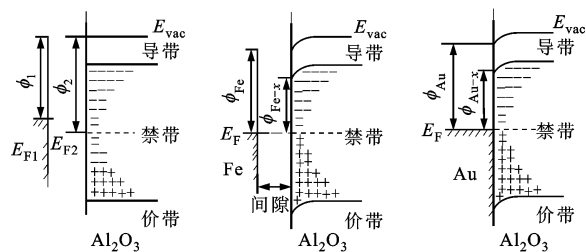
对于不同粗糙度打磨的实验,随着打磨粒度的增加(从 80 目增加到 280 目),砂纸越来越细,对表面造成的破坏更加细密,电极与试样之间的薄层空隙多,导致更多的电子向介质表面发射,促进闪络的发生。

另一方面,经过打磨的试样表面微观结构发生改变,根据文献[14]的研究结果,增加表面粗糙度能阻止试样表面充电,降低表面电荷形成的电场.同时,试样的表面突起能够阻挡二次电子的运动,使得二次电子在试样表层的产生和运动受到阻碍作用,阻碍了闪络的发展阶段,使得闪络电压升高.从280目砂纸到80目砂纸打磨,表面越来越粗,无论是直接压接方式还是溅射金膜后的压接方式,闪络电压都有所升高.

3.3.2 表面溅射电极对闪络电压影响的分析 通常人们认为电极溅射金膜后试样和电极之间可以视为理想接触,电场强度较均匀,可以有效减少电子向薄层空隙中发射,提高闪络电压,但实验结果却与此相反.

本文研究发现,电极与试样之间不同的接触方式除了会导致局部电场的变化,还会对于材料表层的电荷注入造成影响.固体材料表面因晶格结构的突然折断,存在不饱和键,因而表面非常活泼,易于吸附杂质和气体分子.材料表面的研磨、切割等操作也会在表面形成缺陷,它们表现为不同的能量水平,位于禁带范围,称为表面态.越靠近Fermi能级,状态密度越小,越靠近表面状态密度越大.

图8表征了氧化铝陶瓷与金属电极在接触前和不同接触方式下界面处的能带.



(a)电极与试样未接触 (b)电极与试样直接压接 (c)电极与溅射金膜后试样压接

E_{vac} 为真空能级; E_{F1} 为金属电极的Fermi能级; E_{F2} 为 Al_2O_3 的Fermi能级; ϕ_1 为金属电极的功函数; ϕ_2 为 Al_2O_3 的功函数; χ 为 Al_2O_3 的电子亲和能;+表示已占用;-表示未占用

图8 接触处的能带示意图

当直接压接金属电极时,电极与介质之间存在很薄的真空层或吸附气体层,表现为图8b中的势垒,这时载流子必须在较高的电场作用下才有可能注入导带和价带,或通过隧道效应穿过此势垒进入表面态.溅射金膜电极后,认为电极与介质之间为理想的接触,界面处的能带如图8c所示.由于金的功

函数小于氧化铝的功函数,电子会从电极侧向 Al_2O_3 侧流动,直至二者的Fermi能级达到一致,为了保持界面处整体的电中性,界面处的能带发生弯曲.由于界面存在表面态,电荷便可以在较低的电压下,通过肖特基效应从电极注入表面态,并在表面态之间通过跳跃机理而向介质内部移动.表面态陷阱中存在数量较多的电荷后,当介质表面受到一次电子的撞击时,表面态陷阱中的电荷易于逸出材料表面而发射出来,并在电场的作用下在材料表面做跳跃式前进,最终引发材料表层吸附气体的释放并在吸附气体层中发生碰撞电离而导致闪络的发生.

在不同电极接触方式下,同时存在真空中的电子发射和材料表层的电荷注入,这两种因素共同作用影响了最终的闪络电压.本实验中采用的电极系统,陶瓷材料大量的表面态促进了闪络过程的发生,因此此种情况下的闪络电压更低一些.真空中的电子发射存在一定的随机性,与之相比,电荷的注入和积累则是一个相对平稳的过程.由实验结果可知,溅射金膜电极情况下的闪络电压分散度较小,也验证了此种情况下电荷注入表面态这一因素对于闪络的发展起到了更大的作用.

4 结论

采用上升时间为50 ns、半高宽为1.2 μs 的纳秒高压脉冲,在真空环境下研究了氧化铝陶瓷的沿面闪络特性,发现表面粗糙度、电极接触形式对闪络电压有较大影响.

使用不同目数的砂纸打磨处理后的氧化铝陶瓷试样,其闪络电压随砂纸目数的增加而降低,原因是表面粗糙状况影响初始电子的注入和二次电子的运动过程.

氧化铝陶瓷在溅射金膜后的闪络电压比直接压接的闪络电压低,这是因为不同电极接触方式下氧化铝陶瓷材料的表面态对真空中的电子发射和材料表层的电荷注入的影响程度不同所致.

参考文献:

- [1] 张冠军, 赵文彬, 郑楠, 等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 30-35.
ZHANG Guanjun, ZHAO Wenbin, ZHENG Nan, et al. Research progress on surface flashover phenomena across solid insulation in vacuum[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 30-35.
- [2] 王志华, 高巍. 纳秒脉冲真空绝缘沿面闪络机理研究

- [J]. 绝缘材料, 2009, 42(1): 42-46.
- WANG Zhihua, GAO Wei. Discussion on the mechanism of flashover characteristics under nanosecond pulse in vacuum[J]. Insulating Materials, 2009, 42(1): 42-46.
- [3] HARRIS J R, CAPORASO G J, BLACKFIELD D, et al. Displacement current and surface flashover [J/OL]. Applied Physics Letters, 2007, 91(12): 121504 [2010-10-22]. <http://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/350049.pdf>.
- [4] ANDERSON R A, BRAINARD J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption [J]. J Appl Phys, 1980, 51(3): 1414-1421.
- [5] BOERSCH H, HAMISCH H, EHRLICH W. Surface discharges across insulators in vacuum [J]. Z Angew Phys, 1963, 15(6): 518-525.
- [6] DETOURREIL C H, SRIVASTAVA K D. Mechanism of surface charging of high-voltage insulators in vacuum [J]. IEEE Trans on Electr Insul, 1973, 8(1): 17-21.
- [7] CROSS J D. High speed photography of surface flashover in vacuum [J]. IEEE Trans on Electr Insul, 1978, 13(2): 145-148.
- [8] 高巍, 孙广生, 严萍, 等. 基于电子激励解吸附原理的二次电子崩假说[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 366-370.
- GAO Wei, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. Mechanism of secondary electron emission avalanche based on electron-stimulated desorption [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 366-370.
- [9] 赵文彬, 张冠军, 严璋. 复合材料的陷阱参数对其在真空中高压脉冲下沿面闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 11-17.
- ZHAO Wenbin, ZHANG Guanjuan, YAN Zhang. Effects of trapping parameters of composite materials on its surface flashover under high-voltage pulse in vacuum [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 11-17.
- [10] LI C R, SUDARSHAN T S. Dielectric surface pre-flashover processes in vacuum [J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(6): 3313-3320.
- [11] SUDARSHAN T S, LI C R. Dielectric surface flashover of solid dielectrics in vacuum [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(5): 657-662.
- [12] 郑楠, 于开坤, 刘国清, 等. 表面粗糙度对真空绝缘材料表面闪络特性的影响[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(2): 33-36.
- ZHENG Nan, YU Kaikun, LIU Guoqing, et al. Influence of surface roughness on flashover characteristics of insulating materials in vacuum [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(2): 33-36.
- [13] 卢为, 成永红, 王增斌, 等. 环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 83-87.
- LU Wei, CHENG Yonghong, WANG Zengbin, et al. Flashover property of epoxy resin and epoxy composites under fast pulse in transformer oil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 83-87.
- [14] YAMAMOTO O, TAKUMA T, FUKUDA M, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 550-556.

[本刊相关文献链接]

基于表面闪络放电的伪火花开关触发特性的研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 978-981.

直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 481-486.

真空中绝缘子闪络前表面电荷分布的二维仿真. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 476-480.

水中大体积放电产生方法的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 723-727.

局部放电脉冲群的实用快速分类技术及应用. 西安交通大学学报, 2008, 42(8): 1021-1025.

一种可用于绝缘子沿面放电状态识别的算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1269-1274.

油/纸绝缘沿面局部放电特性研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 108-112.

雷电冲击电压下油纸绝缘气隙模型的局部放电测量与分析. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 75-80.

正脉冲电压下水中流注放电特性的研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 96-100.

水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 111-115.

带电水蒸气冲洗污秽绝缘子时的交流闪络特性研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 96-100.

变压器油流动带电度的微静电测量方法及其影响因素. 西安交通大学学报, 2010, 44(8): 96-100.

(编辑 杜秀杰)