

环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性

陈玉, 成永红, 阴玮, 李维康, 孟国栋, 王增彬, 周稼斌, 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: 设计了用于气固界面闪络的实验装置, 可以安装指形电极(曲率半径为 10 mm)和平板电极. 该设备可输出峰值为 125 kV、上升沿和半高宽为 20 ns/5 μ s 的快脉冲. 研究了无试样时指形电极系统在不同气压下的击穿特性, 在空气和 SF₆ 气体中不同气压下纯环氧的脉冲闪络特性, 以及不同质量分数的 Al₂O₃ · 3H₂O 环氧复合材料在 0.4 MPa 空气中的沿面闪络特性. 结果表明, SF₆ 气体中绝缘介质的闪络电压较空气中有更大的分散度, 环氧复合材料质量分数为 20% 时闪络电压最低.

关键词: 环氧; 环氧复合材料; 气固界面; 空气; SF₆; 脉冲闪络

中图分类号: TM213; TM215.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0703-05

Flashover Property of Pure Epoxy and Composites along the Gas-Solid Interface under Fast Pulse

CHEN Yu, CHENG Yonghong, YIN Wei, LI Weikang, MENG Guodong,
WANG Zengbin, ZHOU Jiabin, WU Kai

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

Abstract: An experimental device is designed for surface flashover test along gas-solid interface, where the finger electrodes or flat electrodes are alternatively installed, and the stainless steel finger type electrodes with 10 mm curvature radius are selected. The peak output voltage of pulse power reaches to 135 kV with 20 ns rise time and 5 μ s full width at half maximum. The experimental properties of pure epoxy and epoxy composite samples are discussed under nanosecond pulse in air and SF₆. The breakdown properties of air and SF₆ under different pressure are investigated by using finger electrodes. Moreover, the surface flashover properties of pure epoxy samples under different air and SF₆ gas pressure and the flashover properties of epoxy/Al₂O₃ · 3H₂O composites filled with different filler concentration in 0.4 MPa are also analyzed. The experimental results show that the dispersion of surface flashover voltage of epoxy in SF₆ gets higher than that in air, and the surface flashover voltage of the composite approaches the lowest while the filler concentration reaches to 20%.

Keywords: pure epoxy; epoxy composite; gas-solid interface; air; SF₆; pulse flashover

气体中的沿面闪络现象是高功率开关中的一个重要问题, 开关绝缘筒外侧一般为绝缘油, 沿面放电耐压较高, 内表面为绝缘气体, 沿面放电问题决定了开关绝缘筒长度的设计. 多数学者认为气体中沿面放电为: 三结合点电子的产生和倍增效应导致的沿

介质表面的闪络放电; 由介质表面的材料特性和表面状况引起的沿介质表面的闪络放电^[1-3]. 气体中沿介质表面的放电现象在高功率脉冲技术中有重要的应用价值, 如利用介质表面放电, 可以做成表面放电开关, 还可以做成引燃电子源等^[2-3]. 由于干燥的压

压缩空气制备简单且价格低廉,使用无污染,因此在性能要求不高的设计中得到了广泛的应用。 SF_6 是已知化学稳定性最好的物质之一,其惰性与氮气相似,具有极好的热稳定性,纯态下即使在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上也不分解。 SF_6 具有卓越的电绝缘性和灭弧特性,相同条件下,其绝缘能力为空气、氮气的2.5倍以上,灭弧能力为空气的100倍^[4-5]。一些学者研究了长脉冲和重复频率脉冲下的气体击穿特性^[6-7],但是研究快脉冲作用下的气体击穿的较少^[8]。环氧及其复合材料作为电介质材料表面改性用涂层,用于提高脉冲功率二极管真空支撑绝缘的耐电树枝化、耐烧蚀性能,已在美国PI公司得到了很好的应用。研究气体(如空气和 SF_6)中环氧及其复合材料的沿面闪络特性也具有重要的意义。实验主要针对环氧及其复合材料(环氧基体EPON828/MeTHPA,填料为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (ATH))在空气、 SF_6 中的闪络特性开展研究。研究了不同气压下纯环氧在空气和 SF_6 中快脉冲沿面闪络特性,对比了不同气体间闪络特性的差异。研究了不同质量分数的 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 环氧复合材料在空气中的沿面闪络特性,描述了其闪络电压变化趋势。

1 实验准备

1.1 气固界面闪络实验装置的设计

为研究在不同气压下空气和 SF_6 中的闪络特性,必须首先对实验装置进行设计,既要满足电气设计要求,保证装置的绝缘性能,又要符合实验中气压要求,同时装置在使用过程中要尽量方便。本文参考高功率脉冲技术中的两极气体开关,实现了如下设计需求:

(1)装置的电气设计要实现在实验最大作用电压时不会发生沿腔体外壁闪络现象;

(2)腔体设计破坏压力为 5 MPa ,实验时气体最大压力为 0.8 MPa ;

(3)为了便于实验观察,筒壁采用透明的有机玻璃材料;

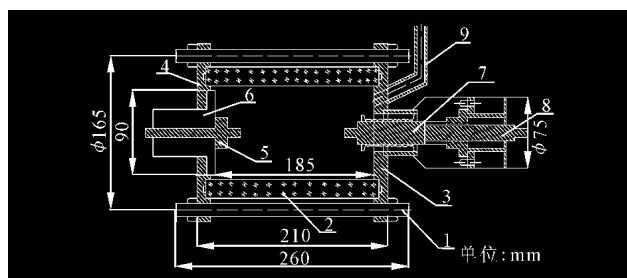
(4)装置的体积和重量要尽量小。

设计好的气固界面闪络实验装置结构和实物如图1所示。实验用指形电极和平板电极系统可以放在中心位置,进行片状试样及圆柱形试样的沿面闪络实验。

1.2 快脉冲源

由八级Marx输出得到 $20\text{ ns}/5\text{ }\mu\text{s}$ 快前沿脉冲波形,如图2所示。快脉冲闪络实验系统限流电阻为

$400\text{ }\Omega$,脉冲电压测量采用咸阳秦华特种电子元件厂生产的金属氧化物膜电阻分压器,阻值为 $11.5\text{ k}\Omega$,分压比为 $11\text{ }500:1$,响应时间小于 2 ns 。



1:玻璃钢拉杆; 2:有机玻璃筒; 3、4:顶部和底部不锈钢法兰盘; 5:高压电极; 6:聚四氟乙烯绝缘套管; 7:波纹管动密封装置; 8:接地端子; 9:气体出入口(外接三通和气压计)

(a)实验装置结构



(b)实验装置实物

图1 气固界面闪络实验装置

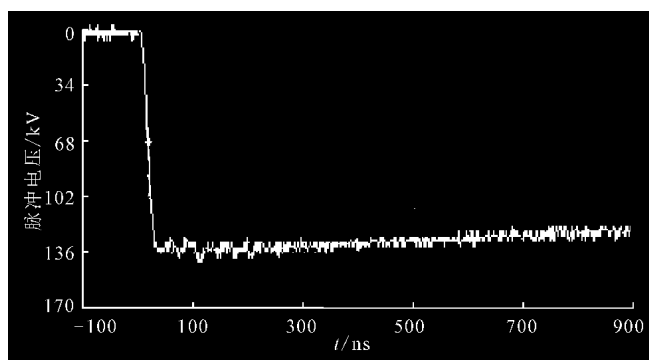


图2 $20\text{ ns}/5\text{ }\mu\text{s}$ 脉冲源实测波形

1.3 试样准备

实验采用双酚A环氧树脂(EPON-828)为基体材料,甲基四氢苯酐(MeTHPA)为酸酐类的环氧树脂固化剂,N-N-二甲基苄胺(BDMA)为固化剂的促进剂, $120\text{ }^\circ\text{C}$ 固化制备获得环氧试样。制备微米复合材料时, $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 中心粒径为 $1\text{ }\mu\text{m}$,用硅烷类偶联剂- γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)进行偶联

处理,采用气相白炭黑触变剂(Degussa 公司的 Aerosil380,平均基本粒径为 7 nm),制备出质量分数分别为 5%、10%、20%、30%、40%、50%的 ATH 环氧基复合材料备用。偶联剂用量为填料的 3%,触变剂的用量为填料的 0.5%(均为质量分数)。由于偶联剂和触变剂的使用,在高速分散机 IKA T25 的高剪切力作用下,微米填料在环氧体系中得到了均一分散。

1.4 电极系统

采用不锈钢(304)电极,电极加工为指形状,曲率半径为 10 mm,电极间距为 10 mm,机械抛光至镜面。试样直径为 60 mm,厚为 1 mm,试样和电极借助聚四氟乙烯(PTFE)绝缘托架装配,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,电极系统见图 3。实验前电极先后用四氯化碳和去离子水超声清洗,在 300 °C 下高温烘烤处理 12 h。试样先后用无水乙醇和去离子水超声清洗后,100 °C 鼓风干燥 6 h 后使用。



图3 指形电极系统实物图

1.5 指形电极结构的最大电场强度 ANSOFT 仿真

ANSOFT Maxwell 3D 仿真软件是一个用于分析三维结构电磁场的可交互式软件。使用该软件,我们可以计算静电场、力场、力矩和电容等。软件基于场求解器产生的有限元来模拟虚拟结构的电磁场,我们只需要绘制器件的结构并配置相关的材料属性、边界条件和源,需要的特殊参量都可以计算出来。基于该软件,建立了指形电极系统的简化仿真模型如图 4 所示,电极材料为不锈钢,电极间距为 10 mm,电极曲率半径为 10 mm,试样直径为 60 mm,厚度为 1 mm,介电常数为 3.6。仿真模型中电极前端为 1/4 球,其尖角处未进行倒角处理,为一理想尖端。仿真得到的有、无试样时指形电极结构的最大电场强度结果如表 1 所示,其中 $E_{avg}=U/d$, U 为施加在电极两端的电压, d 为电极间距。从表中可以看出,在有、无试样时,阴极与阳极三结合点最大电场强度并不一致,阴极最大电场强度要高于阳极,且保

持不变。这是因为模型中给阴极施加的为负高压,阳极接地,电势为零,仿真时零电势面边界在有限的闭合空间里,所以电场并不对称。

表1 指形电极结构三结合点的最大电场强度

试样	电极三结合点	最大电场强度
无试样	阳极	$3.21E_{avg}$
	阴极	$3.80E_{avg}$
有试样	阳极	$2.94E_{avg}$
	阴极	$3.80E_{avg}$

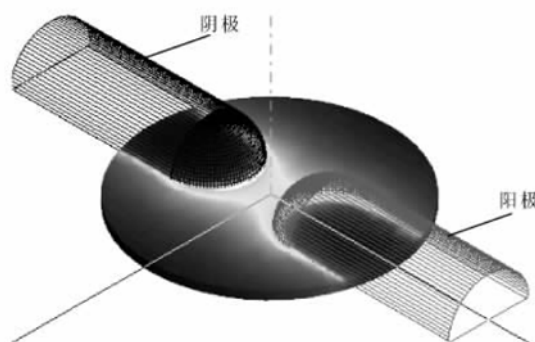


图4 指形电极系统的 Maxwell 3D 仿真模型

2 不同气压下的纯环氧快脉冲闪络特性

采用上述气固界面闪络实验装置,研究了不同气压下的纯环氧在空气和 SF_6 气体中的快脉冲击穿和沿面闪络特性,实验结果如图 5 所示。在实验中通过调节充入腔体中气体的气压,分别在不同气压下进行 20 次击穿或闪络实验,两次击穿或闪络时间间隔为 2 min,指形电极间距为 5 mm。

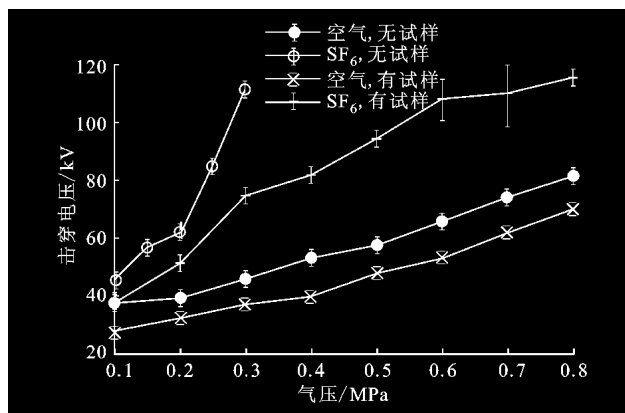


图5 SF_6 和空气在不同气压下气体击穿特性

2.1 不同空气气压下环氧的快脉冲闪络特性

由图 5 可以看出,在空气环境中,气压不断增大时,试样沿面闪络电压也随之增大,其闪络电压低于

无试样时的气体击穿电压,并与击穿曲线有相似的变化趋势。如前所述,气体沿面放电过程中,三结合点电子的产生和倍增效应引发沿介质表面的闪络放电,介质表面的材料特性和表面状况也会影响闪络过程的发展。表1表明有、无试样时,电极结构的阴极最大电场强度基本保持不变,说明初始电子的来源并不会明显受到引入试样的影响,因此后续有、无试样时的气体击穿或沿面闪络实验能够反映气固界面的作用。实验时通过眼睛观察,发现闪络全部是由阴极起始,流注发展至阳极,直至闪络放电结束。可见试样的加入、三结合点的形成、气固界面的形成、试样表面特性及状况对气体沿面闪络电压有很大影响,导致有试样时的闪络电压较无试样时低。另外,气压的升高将会影响气体分子的运动自由度。经典汤逊理论在解释气体击穿的过程中,说明了气体电离系数对击穿的影响:空气中气压的升高,会使得气体的电离系数下降,从而使沿面闪络电压提高。

2.2 不同SF₆气压下环氧的快脉冲闪络特性

由图5可以看出,无试样时,由于实验源的限制,实验只研究到了0.3 MPa下的击穿特性。SF₆气体在随气压增大的过程中,其气体击穿电压也得到了很大提高,在低气压范围内,SF₆对气压的变化很敏感,增幅也特别快。有试样时的闪络电压随着气压的进一步提高,在0.6~0.8 MPa范围内的增幅变得很缓慢。提高SF₆气体的压力,可以提高击穿场强,这是因为气体的压力增高以后,电子的附着过程越显著,电子的平均自由程减小,使电子在二次碰撞之间所积累的动能减少,有效电离系数减小,同时电极附近的电荷对电极电场有一定的削弱及屏蔽作用,所以击穿电压高。但是,当压力增高到一定程度时,由于空间电荷不易扩散到最佳位置,对尖电极电场的屏蔽作用大大削弱,所以击穿电压出现了饱和现象。

2.3 不同气体中环氧的快脉冲闪络特性

由图5可以看出,空气和SF₆两种气体随气压变化沿面闪络特性是相似的,都是随着气压的升高闪络电压也随之升高。空气在0.1~0.4 MPa范围内闪络电压近似线性增长,在0.4~0.8 MPa范围内闪络电压也线性增长,由变化曲线斜率可以看出,其增长速率较低气压范围内要快。SF₆气体在0.1~0.6 MPa范围内闪络电压近似线性增长,在0.6~0.8 MPa范围内闪络电压也线性增长,但增长速率较低气压范围内要低。在低气压范围内,空气和SF₆的闪络电压差距较小,0.1 MPa时,SF₆气体比

空气闪络电压要高约10 kV。在高气压范围内,差距有所增大,0.8 MPa时,SF₆气体比空气闪络电压要高40 kV。空气和SF₆气体主要有以下不同:SF₆是一种最好的电负性气体,它的某些分子能很快吸引自由电子而结成带负电的离子,这些离子使导电作用变弱,电导降低,放电时延变长^[6];由于电极尖端带负电的离子形成的空间电荷对电场有很好的屏蔽作用,削弱了电极处的最大场强,所以SF₆气体的快脉冲闪络电压要明显高于空气;空气中试样闪络电压分散度小,SF₆气体中试样闪络电压分散度大,且随着气压的增大而变大。

3 环氧复合材料的空气中快脉冲闪络特性

实验研究了1 μm的Al₂O₃·3H₂O填料质量分数为5%、10%、20%、30%、40%、50%的环氧复合材料在0.4 MPa干燥空气中的闪络特性,分析了不同填充量对于环氧材料闪络特性的影响。闪络特性实验,每个试样取20次闪络电压值,不同填料填充量环氧复合材料的闪络电压随闪络次数的变化趋势如图6所示,初次闪络电压 U_f 及多次闪络电压 U_{avg} 的变化曲线如图7所示。

从图6可以看出,除填料质量分数为30%的复合材料有较长时间的上升外,其他配方的材料很快就达到闪络电压平均水平。填料质量分数为30%和50%的复合材料表现出较大的闪络电压数据分散度,其他材料不明显。结合图7可以看出,不同Al₂O₃·3H₂O微米颗粒的填充量对闪络特性的影响显著,随着Al₂O₃·3H₂O微米颗粒填充量的增加,闪络电压呈现了先下降再上升的趋势。纯环氧闪络电压值为44.42 kV,填充量为20%时,闪络电压出现最低值29.57 kV。当添加量达到50%时,闪络电压值已经回升到36.98 kV,低于纯环氧。初次闪络电压变化曲线与多次闪络电压变化差曲线一致。

复合材料中的界面会成为电荷的束缚中心,就其中的一种组分来看,由于其化学性质和物理结构的原因,也会对电荷产生束缚作用。所有这些电荷的束缚中心都可以成为陷阱,按其极性可以分为电子陷阱与空穴陷阱,按其形成机理可分成物理陷阱和化学陷阱,按其能量水平又可分为浅陷阱和深层陷阱。由于陷阱可以俘获和释放电荷,所以很可能对沿面闪络现象产生作用^[9-11]。文[9]采用表面电位衰减和等温电流理论,获得了上述复合材料在0.84~1 eV区间内、2 μm深度的表面陷阱分布参数。图7

中闪络电压的变化趋势与文[9]中测量得到的电子陷阱变化趋势比较类似,并且在填料质量分数为20%时达到了谷值。深能级电子陷阱可以明显抑制闪络发展,提高沿面闪络电压,所以深陷阱电子浓度小时,闪络电压低,浓度大时,闪络电压就高。

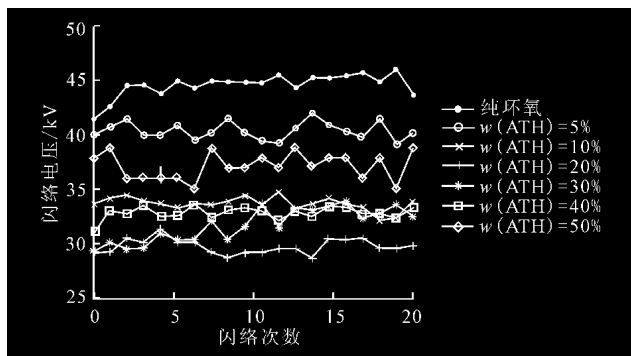


图6 闪络电压与闪络次数的关系

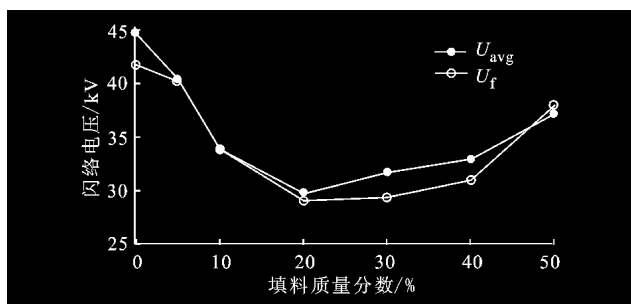


图7 闪络电压与填充量的关系

4 结 论

SF_6 气体中闪络电压高于空气,且随着气压的升高,两种气体的闪络电压都会有所提高。 SF_6 气体中绝缘材料的闪络电压较空气中有更大的分散度,填料的填充量对其在空气中的闪络特性影响显著,在填料质量分数为20%时,闪络电压达到最低值。目前,研制的环氧复合材料耐闪络性能均低于纯环氧体系,其原因有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] MARTIN T H, GUENTHER A H, KRISTIANSEN M. J C Martin on pulse power [M]. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [2] PAI S T, ZHANG Qi. Introduction to high power pulse technology [M]. Singapore: World Scientific, 1995.
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [4] 邱毓昌, 施围, 张文元. 高电压工程[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1997.
- [5] 杨津基. 气体放电[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [6] 张乔根. 陡波前冲击电压下 SF_6 气体间隙及绝缘子沿面放电特性[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院, 1996.
- [7] 邵涛. 重复频率纳秒脉冲气体击穿研究[D]. 北京:中国科学院电工研究院, 2006.
- [8] MARTIN T H. Pulse charged gas breakdown[C]// 5th IEEE Pulsed Power Conference. Piscataway, N J, USA: IEEE 1985: 74-83.
- [9] 陈琪. $\text{Al}(\text{OH})_3$ /环氧树脂复合真空绝缘材料研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院, 2007.
- [10] LI Chengrong, DING Lijian, LÜ Jinzhuang, et al. The relation of trap distribution of alumina with surface flashover performance in vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 79-84.
- [11] ZHAO Wenbin, ZHANG Guanjun, YANG Yun, et al. Correlation between trapping parameters and surface insulation strength of solid dielectric under pulse voltage in vacuum [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 170-178.

(编辑 杜秀杰)