

环氧及其复合材料在变压器油中的快脉冲闪络特性

卢为, 成永红, 王增彬, 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: 研究了纳秒级高压脉冲作用下环氧及其复合材料在变压器油中的沿面闪络特性,发现由于多次闪络引起材料表面的破坏和杂质的积累,致使环氧树脂的闪络电压随着闪络次数的增加显著降低,并且随着液压的增加,液体中的气泡运动受到阻碍,闪络电压有明显的升高. 对脉冲陡度和沿面闪络电压的关系进行了拟合和外推,发现采用肖特基效应方程的倒数形式可得到较好的拟合效果. 不同填料含量的微米 TiO_2 /环氧复合材料的闪络电压随着 $w(\text{TiO}_2)$ 的增加呈现“V”形变化趋势,并在 $w(\text{TiO}_2)$ 约为 20% 时出现最低值.

关键词: 闪络;纳秒脉冲;变压器油;环氧

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0083-05

Flashover Property of Epoxy Resin and Epoxy Composites under Fast Pulse in Transformer Oil

LU Wei, CHENG Yonghong, WANG Zengbin, CHEN Yu, WU Kai

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

Abstract: The flashover characters under nanosecond pulsed voltage in transformer oil of epoxy resin and epoxy composites are reported. It is indicated that the flashover voltage of epoxy resin decreases while flashover times increase, and the surface damage and impurities caused by multiple flashovers are considered to be the reason. The movement of bubbles is restricted when liquid pressure increases, so the flashover voltage increases evidently. The relationship between pulse steepness and the flashover voltage is fit and extrapolated, and the fit result based on the reciprocal form of Schottky effect equation is preferable. In addition, the research of Micro TiO_2 /epoxy composite samples with different filler weight percent demonstrates that while the weight percent of TiO_2 increases the flashover voltage varies as a ‘V’ style, and the lowest voltage value is obtained when the filler weight gets about 20%.

Keywords: flashover; nanosecond pulse; transformer oil; epoxy

绝缘材料的沿面闪络电压远低于相同厚度的体击穿电压,严重限制了绝缘系统的电气强度^[1]. 根据绝缘子所处的介质环境的不同,固体绝缘材料的沿面闪络现象可分为真空中的沿面闪络、空气或其他气体中的闪络、液体绝缘介质中的闪络、染污或覆雪覆冰绝缘子的闪络等多种类型^[2-6]. 不同条件下绝缘材料的闪络机理和闪络过程有着很大的区别(比如

在液体介质中带电质点的平均自由程远小于在空气和真空中),散热效果等也有很大的差异,导致液体介质中的闪络机理与真空和空气中的闪络机理有着本质的区别.

变压器油具有良好的绝缘性能,在脉冲功率设备中有着广泛的应用. 变压器油-固体绝缘复合结构在电力系统和脉冲功率领域也应用广泛^[7]. 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,已得到了很好的应用^[8].

文献[9]研究了在变压器油中固体材料的绝缘结构、施加脉冲的上升速率和脉宽等对闪络特性的影响. 总的来说,目前关于液体介质在纳秒脉冲下闪络击穿的数据比较缺乏,相应的击穿模型和机理假说也很少. 本课题组已对纳秒脉冲电压作用下环氧及其复合材料气固界面^[10]和在真空中^[11-12]的沿面闪络特性进行了一定的研究. 本文主要针对环氧及其复合材料在变压器油中的闪络特性,从闪络次数、液压、脉冲陡度和复合材料的填料比例等多种角度进行研究.

1 实验准备

1.1 脉冲闪络实验系统

图1为脉冲闪络实验系统图. 脉冲波形由8级Marx输出得到,上升时间为50 ns,半高宽为2.5 μ s,空载时波形见图2. 快脉冲闪络实验系统限流电阻为400 Ω ,采用金属氧化物膜电阻分压器测量脉冲电压,分压比为11 500:1,响应时间小于2 ns.

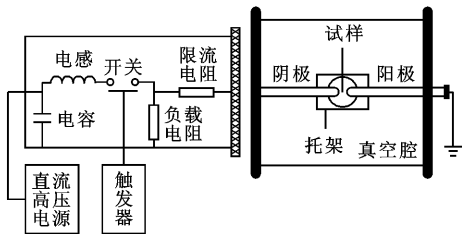


图1 脉冲闪络实验系统示意图

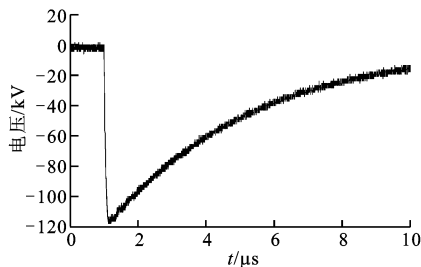
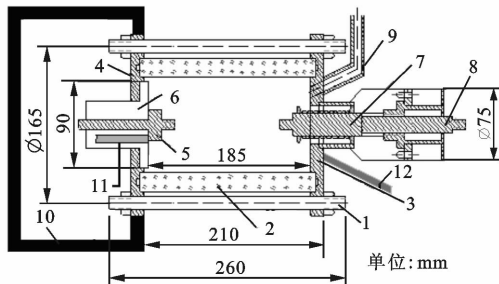


图2 脉冲电压波形

1.2 液-固界面闪络实验装置

液-固界面闪络实验装置结构如图3所示. 该装置可以充气、油、水,腔体破坏压力为5 MPa,实验时腔内最大压力为0.8 MPa. 电极系统可放置于内部中心位置来进行片状试样及圆柱形试样的沿面闪络研究.



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:液体出入口; 10:支架; 11:油出口; 12:油入口

图3 液-固界面闪络实验装置示意图

1.3 试样

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,在120 $^{\circ}$ C下固化制备获得纯环氧试样.

制备微米复合材料时,添加中心粒径为1 μ m的TiO₂颗粒,用硅烷类偶联剂- γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)进行偶联,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 $w(\text{TiO}_2)$ 分别为5%、10%、20%、30%、40%、50%的环氧基复合材料备用. 由于偶联剂和触变剂的使用,在高速分散机IKAT25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

采用不锈钢指形电极,机械抛光至镜面. 试样装配时采用聚四氟乙烯(PTFE)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4. 实验前电极先后用四氯化碳和去离子水超声清洗,在300 $^{\circ}$ 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 $^{\circ}$ C鼓风干燥6 h后使用.

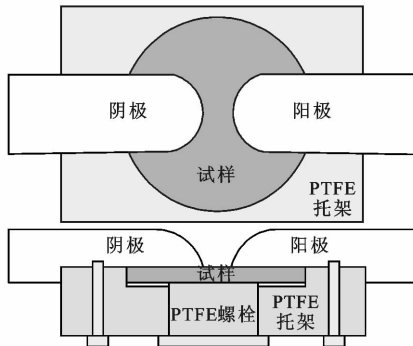


图4 指形电极系统示意图

2 实验结果和分析

文中的闪络现象均为脉冲前沿闪络,图 5 为典型的脉冲闪络电压波形.以闪络电压波形的峰值作为试样的闪络电压值.

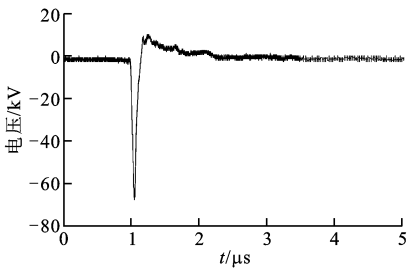


图 5 闪络电压波形

2.1 闪络次数和闪络电压的关系

在变压器油中,对纯环氧试样施加 50 ns/2.5 μs 的脉冲高电压,使其发生沿面闪络现象,实验中连续进行 50 次的闪络电压的测量,图 6 给出了变压器油中环氧试样闪络电压和闪络次数的关系.

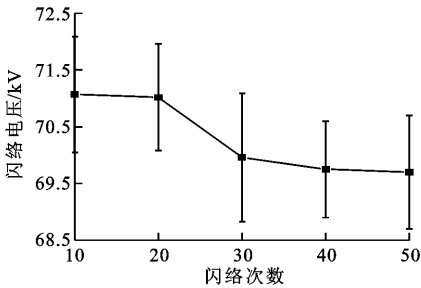


图 6 闪络电压随闪络次数的变化关系

图 6 表明,前 10 次的闪络电压最高,平均为 71.07 kV,之后闪络电压随着闪络次数的增加不断降低.这与文献[10]在气体环境中得到的闪络电压随闪络次数增加而逐渐升高并趋于稳定的现象不同.经过对闪络后试样的观察,发现其表面出现明显的烧蚀破坏痕迹,分析认为:这是由于闪络发生之后,试样表面有很大的电流通过,尽管时间较短,但是在变压器油中热量不容易散去,导致材料表面发生破坏;另外,闪络过程中形成的杂质在油中不易扩散,并随着闪络次数增加而逐渐积累.因此,随着闪络次数的增加闪络电压会不断降低.

2.2 液压和闪络电压的关系

由文献[10]可知,气体压力对气体中沿面闪络电压有重要的影响,这是气体密度增加带来的一系列效应所产生的.但是,液压升高时液体的密度改变量很小,所以闪络电压和液压的关系应该有不同的

表现形式.针对不同的液压,在上述脉冲源作用下,测量了纯环氧试样的闪络电压.为了消除试样表面破坏对实验数据的影响,选取前 20 次闪络电压取均值进行比较,结果如图 7 所示.

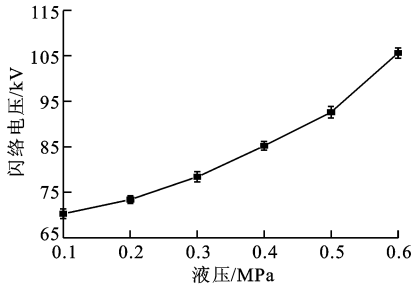


图 7 闪络电压和液压的关系

图 7 表明,随着液压的升高,环氧在变压器油中的闪络电压有明显的升高.本文认为,液体介质中闪络电压受液压显著影响的这一现象有力地证明了击穿过程中气体或气液混合形态的存在,是液体气泡击穿机理的主要依据.液压升高对液体介质体积变化的影响非常有限,变压器油介质在闪络过程中可能因各种原因而出现气泡等低密度区,并在该区域发生类似于气体中的电子碰撞电离、数目激增引发电子崩而发生的闪络.根据电子流体运动模型,当液体中的溶解气或蒸汽的内部压力明显升高时,将阻碍气泡形成涡流,这样在固-液界面上所得到的电子数目将大大减少,因而抑制了闪络的发生.

2.3 脉冲陡度和闪络电压的关系

本文在 50 ns/2.5 μs 脉冲源下,通过不同的充电电压得到了 8 种不同脉冲陡度的脉冲波形,借用冲击电压标准波对波形陡度的定义,取电压峰值的 30% 和 90% 之差与相应时间差的比值作为闪络电压的陡度,其单位为 kV/ns.测试相应的纯环氧试样的闪络电压,结果如表 1 所示,发现闪络电压随着脉冲陡度的增加而增高.

根据电场变化,初始电子按照统计规律进行发射,经历统计时延后,有效初始电子出现,再经历闪络形成时延后,闪络发生.马丁公式及其相应的修正公式主要考虑了脉冲峰值的有效作用时间、试样的侧面积,并通过拟合得到的时间和面积的依赖因子,粗略确定了沿面击穿场强同二者的关系^[2].脉冲陡度包含了电场的变化程度和时间两个信息,可能会更真实地反应闪络特性.

闪络电压和陡度的关系可以采用多种形式来进行拟合,这里采用常用的一阶多项式线性方程

$$f(x) = ax + b$$

(1)

表 1 不同脉冲陡度下的闪络电压

脉冲陡度/ $V \cdot ns^{-1}$	闪络电压/kV	标准差/kV
2 450	63.02	0.95
2 460	65.78	1.26
2 720	67.76	1.15
2 980	70.30	0.88
3 040	70.38	1.08
3 120	71.37	1.16
3 550	72.22	1.31
3 730	75.90	1.20

肖特基效应方程的倒数形式

$$f(x) = 1/(ae^{bx^{1/2}})$$
 (2)

和场发射效应方程的倒数形式

$$f(x) = 1/(ax^2e^{-b/x})$$
 (3)

分别对不同陡度下的散点闪络电压数据进行拟合,得到的拟合结果如图 8 所示.

3 种拟合的适合度见表 2,可见采用式(2)的拟合效果较好.根据式(2),可以通过插值和外推的方法得到环氧材料在不同脉冲前沿陡度下的闪络电压,如表 3 所示,具有一定的预测作用.

表 2 3 种拟合的适合度对比

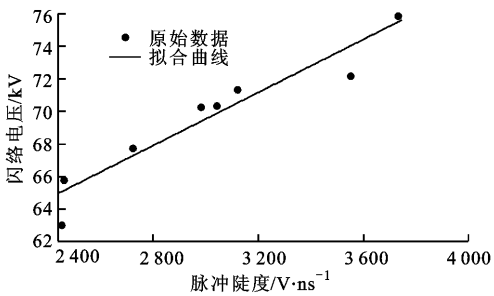
拟合形式	误差平方和	复判定系数	调整判定系数	均方根误差
式(1)	10.070	0.910 1	0.895 1	1.296
式(2)	9.785	0.912 7	0.898 1	1.277
式(3)	18.190	0.837 7	0.810 7	1.741

表 3 式(2)拟合得到的闪络电压

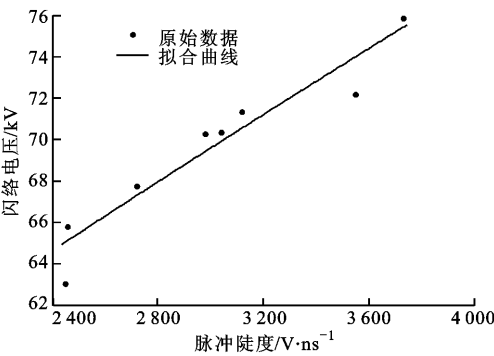
脉冲陡度/ $V \cdot ns^{-1}$	闪络电压/kV
趋近 0	34.38
1 000	51.65
2 000	61.14
3 000	69.58
4 000	77.59
5 000	85.42

2.4 典型环氧复合材料的闪络特性

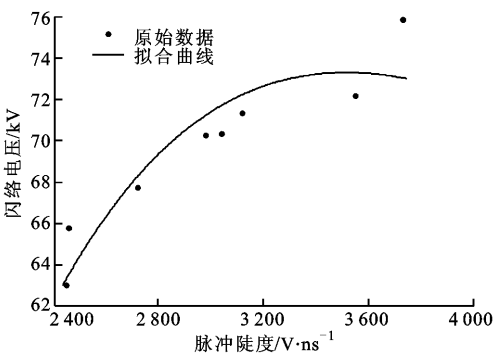
本文重点研究了添加不同量的微米 TiO_2 的环氧复合材料在相同脉冲源下的闪络特性,结果如图 9 所示.当 $w(TiO_2)$ 为 10% 时,闪络电压为 67.62 kV,小于纯环氧的闪络电压;当 $w(TiO_2)$ 为 20%



(a)线性拟合



(b)肖特基效应方程倒数的拟合



(c)场发射效应方程倒数的拟合

图 8 闪络电压和脉冲陡度的拟合结果

时,闪络电压降到最低点;而后随着 TiO_2 添加量的增加,闪络电压也不断地上升.总体来看,环氧复合材料的闪络电压随着 $w(TiO_2)$ 的增加呈现“V”形的变化趋势.

与文献[12]获得的真空中的结果相比,闪络电压都出现了最低值,且都在 20% 附近.当 TiO_2 添加量较低时,闪络电压都低于纯环氧的闪络,但是当添加量 $w(TiO_2)$ 大于 40% 时,变压器油中闪络电压高于纯环氧电压,这一点与真空中不同.可见,无论是在变压器油中还是在真空中,影响闪络电压和添加物质量分数关系的因素应该基本相同,只是所占的比重不同.与真空中相比,油中的带电粒子较多,空

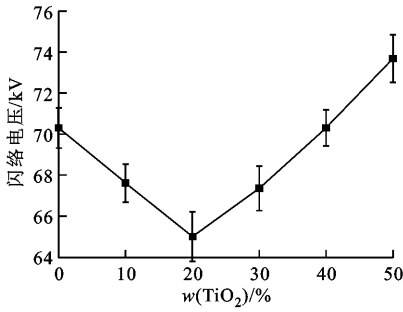


图 9 环氧复合材料闪络电压随 TiO_2 添加量的变化

间电荷的积聚更加容易,在油中加速电荷的释放和迁移对于提高闪络性能就显得更加重要.文献[12]指出, $w(\text{TiO}_2)$ 为 50%的复合材料与其他配方相比拥有最大的电导率和浅陷阱密度,因此能够很好地抑制空间电荷的影响,不利于沿面闪络现象的发生.在油中此种影响应当大于深陷阱对于闪络的影响.因此,在 $w(\text{TiO}_2)$ 为 50%时,油中的闪络电压并没有再次降低,且高于纯环氧的闪络电压,这不同于真空中的情况.

3 结 论

(1)纳秒级脉冲作用下环氧树脂在变压器油中的闪络电压随闪络次数的增加逐渐降低,这是由多次闪络所引起的材料表面破坏和杂质引起的.

(2)闪络电压随液压的升高而显著提高,表明油中存在气泡等低密度区,液压的升高阻碍了气泡的运动,不利于闪络的发生.

(3)闪络电压随脉冲陡度的增加显著提高,两者的关系可以用肖特基效应方程的倒数形式得到较好的拟合.

(4)随着填料 TiO_2 质量分数的增加,环氧复合材料的闪络电压呈现“V”形的变化趋势,在变压器油中和在真空中,影响闪络电压和添加物质量分数关系的因素基本相同,但在油中电导率和浅陷阱密度对于闪络电压的影响大于深陷阱密度的影响.

参考文献:

- [1] MILLER H C. Surface flashover of insulators[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24 (5):765-786.
- [2] STYGAR W A, IVES H C, WAGONER T C, et al. Flashover of a vacuum-insulator interface: a statistical model[J/OL]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2004,7(7) [2010-01-12]. <http://prst-ab.aps.org/abstract/PRSTAB/v7/i7/e070401>.

- [3] KRILE J T, NEUBER A A, DICKENS J C, et al. DC and pulsed dielectric surface flashover at atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005,33(4):1149-1154.
- [4] KRILE J T, VELA R, NEUBER A A, et al. Pulsed dielectric-surface flashover in an SF_6 environment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007,35(5):1580-1587.
- [5] CHERNEY E A, CROSS J D. Electrical breakdown at solid-liquid interfaces[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1977,12(3):214-218.
- [6] CHENG T C, WU C Y, NOUR H. DC interfacial breakdown on contaminated electrolyte surfaces[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984,19 (6):536-542.
- [7] NAKAO Y, NARUSE M, SUZUKI Y, et al. Influence of insulating barrier on the creepage discharge in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1997,4(6):775-779.
- [8] ROTH I, SINCERNY P, MANDELCORN L, et al. Vacuum insulator coating development[C]//Proceedings of the 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland, USA: IEEE, 1997:537-542.
- [9] WANG J, ZHOU Y X, YAN P, et al. Study on dielectric surface discharge in transformer oil under high voltage nanosecond pulse[J]. Journal of Electrostatics,2005,63(6/10):665-671.
- [10] 陈玉,成永红,阴玮,等. 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42 (6):703-707.
- CHEN Yu, CHENG Yonghong, YIN Wei, et al. Flashover property of pure epoxy and composites along the gas-solid interface under fast pulse[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6):703-707.
- [11] CHEN Yu, CHENG Yonghong, WANG Zengbin, et al. Influence of pulse steepness on vacuum flashover of casting epoxy resin[J]. Plasma Science and Technology, 2009,11(1):89-93.
- [12] WANG Z B, CHENG Y H, CHEN Y, et al. Study on the vacuum surface flashover characteristics of epoxy composites with micro- TiO_2 fillers under steep high-voltage impulse[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:667-670.

(编辑 杜秀杰)