

环氧树脂与聚四氟乙烯表面性能的研究

王胜辉, 刘华琦, 耿辉, 马康, 孙凯旋, 律方成

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:为了研究不同材料绝缘子的表面性能,以环氧树脂和聚四氟乙烯(PTFE)为研究对象,首先通过表面能测试,获得不同材料绝缘子的粘附特性,然后通过试验研究不同粒径金属微粒在自然粘附状态下对绝缘子沿面闪络特性的影响。结果表明:PTFE绝缘子的表面能为 30.44 mJ/m^2 ,低于环氧树脂绝缘子的表面能,PTFE的黏度更小;随着附着在绝缘子表面的金属微粒粒径的减小,环氧树脂和PTFE绝缘子的沿面闪络电压逐渐增大,且两种材料的绝缘子沿面闪络性能相近;采用PTFE界面取代原有的环氧树脂界面,可以减少由金属微粒引起的绝缘故障。

关键词:气体绝缘金属封闭输电线路;聚四氟乙烯;环氧树脂;表面性能

中图分类号: TM214 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.07.003

Study on surface properties of epoxy resin and PTFE

WANG Shenghui, LIU Huaqi, GENG Hui, MA Kang, SUN Kaixuan, LÜ Fangcheng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to study the surface properties of different materials of insulators, epoxy resin and polytetrafluoroethylene (PTFE) were used as research objects. Firstly, the adhesion characteristics of insulators made of different materials were obtained through surface energy test. Then, the influence of different particle sizes of metal particles on the surface flashover characteristics of insulators under natural adhesion conditions was studied through test. The results show that the surface energy of PTFE insulators is 30.44 mJ/m^2 , which is lower than that of epoxy resin insulators, and the viscosity of PTFE is smaller. As the particle size of metal particles attached on the insulator surface decreases, the surface flashover voltage of epoxy resin and PTFE insulators increases gradually, and the surface flashover performance of the two materials of insulators is similar. The insulation failures caused by metal particles can be reduced by replacing the original epoxy resin interface with PTFE.

Key words: GIL; PTFE; epoxy resin; surface properties

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)具有输送容量大、电能损耗低、结构紧凑和可靠性高等优点,成为在特殊环境下(水电送出、穿山越江、地下管网等)替代电缆和架空线的首选方案^[1]。然而,在GIL的生产、运输、装备及运行等过程中,不可避免地会产生金属微粒污染物^[2]。由于金属微粒污染物的几何形状多样,易造成电场畸变,进而引发局部放电甚至发生绝缘事故^[3-4]。尤其当金属微粒污染物附着在盆式绝缘子表面时,会导致绝缘子表面电荷的积聚^[5-8],表面电荷的存在为绝缘子的沿面闪络提供了种子电荷,进而增加了沿面闪络发生的概率,对GIL的稳定运

行造成极大威胁^[9]。

在GIL中,常采用环氧树脂浇筑而成的绝缘子,研究人员关于金属微粒对环氧树脂绝缘子沿面性能的影响开展了大量研究。XIE J等^[10]研究了在 SF_6 气体中平板电极之间的金属微粒对绝缘子闪络性能的影响,结果表明受到金属微粒污染的绝缘子在 SF_6 冲击电压作用下,表面电荷的积累对冲击闪络强度有很大的影响。张立国^[11]指出随着金属微粒不断远离地电极,闪络电压先增大后减小;随着金属微粒尺寸的增加,闪络电压不断减小;当金属微粒的尺寸超过一定范围时,闪络电压下降速率减缓;随着金属微粒直径的增加,闪络电压不断减小。由上述分析可知,环氧树脂绝缘子的表面性能易受到金属微粒粘附的影响,因此选择表面性能更加优异的绝缘材料代替环氧树脂作为绝缘子界面可以有效抑制金属微粒污染GIL。除环氧树脂外,还有众多

复合材料可以作为绝缘子材料,其中聚四氟乙烯(PTFE)作为常用的绝缘材料之一,其具有较强的化学稳定性,有“塑料王”之称^[12]。此外,它还具有不粘性、无毒害、电绝缘性能极强的优点^[13]。高宇等^[14]通过电晕充电法研究了环氧树脂、硅橡胶、PTFE 3种材料的表面电荷积聚和衰减特性,结果表明PTFE在电荷积聚以及对闪络电压的影响等方面均表现出一定的优越性。

本文首先对比研究环氧树脂以及PTFE的表面能,然后基于表面性能测试获得环氧树脂和PTFE的表面粘附特性,最后通过试验研究的方法获得不同粒径金属微粒对环氧树脂和PTFE绝缘子沿面闪络特性的影响规律,进而为PTFE界面取代原有的环氧树脂界面提供依据。

1 绝缘子粘附特性研究

金属微粒与绝缘子表面间的粘附力是影响金属微粒附着绝缘子的关键因素,而粘附力的大小则取决于绝缘子材料的表面能参数。金属微粒与绝缘子表面的粘附力可以近似采用JKR模型计算^[15]。根据JKR模型,粘附力的计算公式如式(1)所示。

$$F_a = | - 1.5\pi wR | \tag{1}$$

式(1)中: R 为约化半径; w 为粘附功,其计算公式如式(2)所示。

$$w = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \tag{2}$$

式(2)中: γ_1 和 γ_2 分别是铝合金和绝缘材料的表面能; γ_{12} 是二者相互作用的自由能,其计算公式如式(3)所示。

$$\gamma_{12} = (\gamma_1^{LW} - \gamma_2^{LW})^2 + 2(\sqrt{\gamma_1^+ \gamma_1^-} + \sqrt{\gamma_2^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+}) \tag{3}$$

本节采用接触角法,获得两种材料绝缘子的表面能参数。表面能由Lifshitz van der Waals分量 γ^{LW} 和Lewis酸碱分量 γ^{AB} 组成。其中 γ^{AB} 包含Lewis酸分量 γ^+ 和Lewis碱分量 γ^- ^[16-17]。Young's方程描述了固/液/气三相体系中固体表面能 γ_s 、液体表面能(表面张力) γ_L 、固-液界面相互作用自由能 γ_{sL} 、固体表面膜压 π^0 以及平衡接触角 θ 之间的关系,如式(4)所示^[18]。

$$\gamma_s - \pi^0 - \gamma_{sL} = \gamma_L \cos \theta \tag{4}$$

对于低能表面,忽略膜压 π^0 ,并将固体表面能 γ_s 、液体表面能 γ_L 拆分成Lifshitz van der Waals分量 γ^{LW} 、Lewis酸分量 γ^+ 和Lewis碱分量 γ^- ,整理可得到固体表面能、液体表面能与二者之间平衡角的关系,如式(5)所示^[19]。

$$(\gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-})(1 - \cos \theta) = 2(\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_s^-}) \tag{5}$$

因此,只需测量固体表面与 γ^{LW} 、 γ^+ 和 γ^- 检测液体间的接触角,即可得到固体的表面能参数(γ_s^{LW} 、 γ_s^+ 和 γ_s^-)。本节以蒸馏水、乙二醇和二碘甲烷作为检测液体,其表面能参数如表1所示,得到环氧树脂绝缘子的表面能参数如表2所示^[15]。

表1 检测液体的表面能参数

Tab.1 Test surface energy parameters of the liquid

检测液体	γ_L^{LW}	γ_L^+	γ_L^-
蒸馏水	21.8	25.5	25.5
乙二醇	29.0	1.9	47.0
二碘甲烷	50.8	0	0

表2 环氧树脂绝缘子的表面能及其分量

Tab.2 Surface energy of an epoxy resin insulator and its component

γ	γ_L^{LW}	γ_L^+	γ_L^-
42.40	37.10	0.61	12.30

为了获得PTFE绝缘子的表面能,制备了尺寸为50 mm×50 mm×5 mm的试样,在接触角测试开始前,依次用无水乙醇和去离子水先后清洗样片,去除表面杂质,之后放入干燥箱内干燥24 h。干燥后用微量进样器(5 μ L)在样片上滴加检测液体,采用深圳市致佳设备有限公司生产的ZJ-6900型接触角测量仪分别测量不同检测液体在PTFE样片表面上的接触角。取5次接触角的平均值作为该检测液体在PTFE表面的接触角,测量均在室温(25 $^{\circ}$ C)下进行。不同检测液体在PTFE表面形成的接触角如图1所示,接触角的平均值如表3所示。

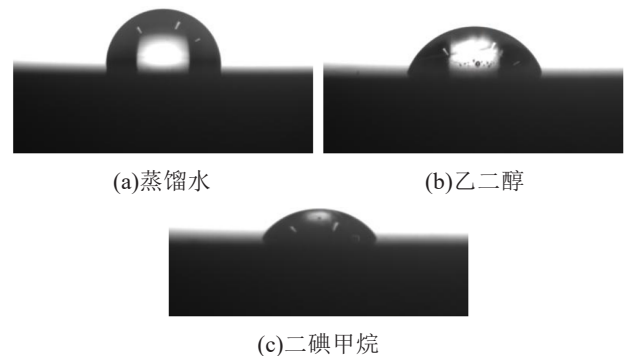


图1 不同检测液体在PTFE表面的接触角

Fig.1 Contact angle of different detection liquids on PTFE surface

表3 检测液体在PTFE表面的接触角平均值

Tab.3 The average contact angle of liquid on PTFE surface

样片	蒸馏水	乙二醇	二碘甲烷
PTFE	93.17°	67.13°	58.25°

根据表1中不同检测液体的表面能各分量参数,结合式(2)计算得出PTFE的表面能及表面能分量参数如表4所示。对比环氧树脂表面能可知,PTFE的表面能较小、黏度低,因此金属微粒不易附着于其表面。

表4 PTFE的表面能及其分量

Tab.4 Surface energy and component of PTFE

样片	γ	γ_L^{LW}	γ_L^+	γ_L^-
PTFE	30.44	29.58	0.08	2.23

2 沿面闪络特性

2.1 试验研究

在实际工况中,盆式绝缘子的绝缘损坏主要是由沿面闪络引起的^[20-21]。为了探究PTFE和环氧树脂绝缘子的沿面性能,搭建沿面闪络测试平台,如图2所示。平台电源系统由NRIGTB-5/50干式交流试验变压器和NRIRCF-50 kV电容分压器组成,选用指尖电极模拟实际工况。电极两极柱前端曲率半径为10 mm,试验时保持两电极水平方向的间距为8 mm。

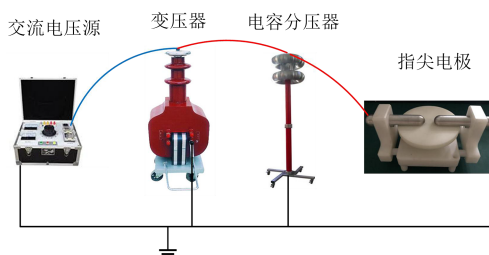
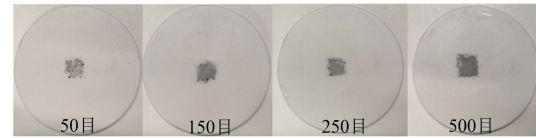


图2 沿面闪络测试平台

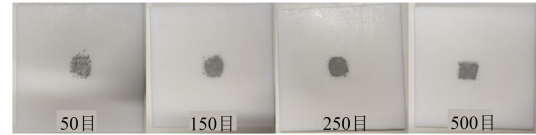
Fig.2 Test platform surface flashover

试验前,先分别制备环氧树脂和PTFE的附灰试样。选取环氧树脂圆形样片作为基础试样,直径和厚度都为5 cm,选取PTFE方形样片作为基础试样,尺寸为5 cm×5 cm×5 mm。为更好地还原实际工况,采用自然粘附的方法,分别选取50、150、250、500目的铝粉,均匀的附在样片正中6 mm×6 mm的区域内。不同粒径的附灰试样如图3所示。

将待测试的附灰试样放置在指尖电极托盘上,调整试样位置,保证附灰区域位于托盘中央,即两端电极距离附灰区域边缘均为1 mm;旋转调节托盘



(a)环氧树脂附灰试样



(b)PTFE附灰试样

图3 附灰试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of ash-attached samples

高度,使得附灰试样和电极底部无缝隙接触。试验开始,在指尖电极两端施加工频交流电压,控制加压速度为0.1~0.2 kV/s,持续加压到试样发生沿面闪络,然后停止加压并记录电压值。同一附灰试样重复进行5组试验,取5组数值的平均值作为该试样最终的沿面闪络电压,得到两种材料附灰粒径与沿面闪络电压的关系如图4所示。

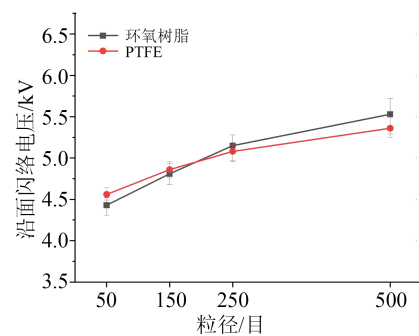


图4 沿面闪络电压平均值与粒径的关系

Fig.4 The relationship between the average value of flashover voltage along surface and particle size

从图4可以看出,不论是环氧树脂还是PTFE,附灰试样的沿面闪络电压都随着粒径的减小呈现增大的趋势。当铝粉的粒径较大时,PTFE的沿面闪络电压略大于环氧树脂;当铝粉的粒径逐渐变小时,PTFE的沿面闪络电压开始略小于环氧树脂,但环氧树脂与PTFE的沿面闪络电压数值始终相近。由此可知,PTFE的沿面闪络特性与环氧树脂相近。

2.2 结果与分析

由于绝缘试验中得到的数据存在一定的分散性,采用简便的算术平均值作为计算方法并不能更好地获取规律。自70年代以来,Weibull概率分布作为一种较确切的分布函数,可以利用概率值推出分布参数,故而被广泛应用于绝缘可靠性试验中^[22]。因此,为了更好地对比环氧树脂和PTFE的沿面闪络特性,本文采用Weibull概率分布的方法进一步对

试验数据进行分析。

设沿面闪络电压 U 为随机变量，二参数的 Weibull 分布密度概率函数的表达式如式(6)所示，其中 α 为 Weibull 概率分布的尺度参数， β 为 Weibull 概率分布的形状参数。在运用 Weibull 概率分布分析沿面闪络电压的数据时， α 可表示为累积概率最大时沿面闪络电压的特征值， β 可表示为沿面闪络电压数据的分散性，用于表征绝缘试样对施加电压的敏感性， β 的数值越大，说明数据整体的分散性越小^[23]。

$$F(U; \alpha, \beta) = 1 - \exp[-(\frac{U}{\alpha})^\beta] \quad (6)$$

因此，可以得到环氧树脂与 PTFE 附灰试样沿面闪络特性的二参数 Weibull 分布如图 5 所示。

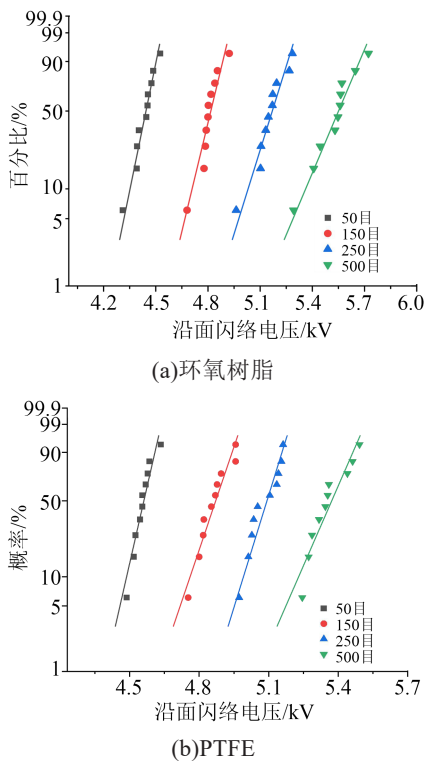


图5 沿面闪络特性的二参数 Weibull 分布
Fig.5 Two-parameter Weibull distribution of surface flashover characteristics

由图 5 可知，各附灰试样的沿面闪络电压大致分布在直线的两侧，说明沿面闪络电压试验数据服从 Weibull 概率分布，可以通过分析 Weibull 概率分布的尺度参数与形状参数获得其规律。

通过式(6)计算得到环氧树脂与 PTFE 附灰试样沿面闪络特性的 Weibull 概率分布拟合参数，分别如表 5 和表 6 所示。

从表 5~6 可以看出，在不同粒径下，PTFE 附灰试样的形状参数 β 均比环氧树脂附灰试样大，即 PT-

表 5 环氧树脂附灰试样沿面闪络特性的 Weibull 概率分布拟合参数

参数	50 目	150 目	250 目	500 目
α	4.46	4.84	5.19	5.58
β	90.74	83.61	69.21	54.56

表 6 PTFE 附灰试样沿面闪络特性的 Weibull 概率分布拟合参数

参数	50 目	150 目	250 目	500 目
α	4.57	4.89	5.11	5.39
β	114.45	84.03	93.55	70.01

FE 附灰试样通过试验得到的沿面闪络电压值数据分散性更小，表明环氧树脂附灰试样的沿面闪络现象出现的随机性更大。

由于附灰试样 Weibull 概率分布的尺度参数 α 可以表示累积概率最大时沿面闪络电压的特征值，因此将 α 的数值绘制成折线图，得到两种附灰试样沿面闪络电压的特征值与粒径的关系如图 6 所示。对比图 4 和图 6 可知，两种附灰试样沿面闪络电压的平均值和特征值与粒径之间的关系呈现同样的规律。因此，沿面闪络电压的平均值与 Weibull 概率分布的特征值均可以用来表征两种附灰试样的闪络电压与粒径的关系，结果一致，可以得到 PTFE 的沿面闪络特性与环氧树脂相近，两种材料的沿面闪络电压差距不超过 3%。

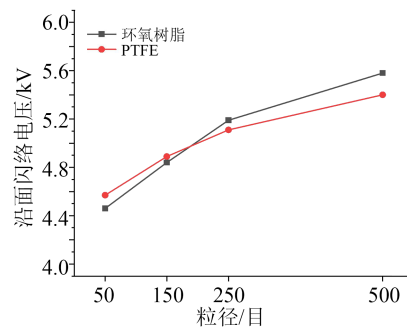


图 6 沿面闪络电压特征值与粒径的关系

Fig.6 The relationship between characteristic value of surface flashover voltage along surface and particle size

3 结论

(1) PTFE 的表面能为 30.44 mJ/m²，小于环氧树脂的表面能(42.40 mJ/m²)，即 PTFE 的黏度低。

(2) 不同粒径下，PTFE 附灰试样的形状参数 β 均比环氧树脂附灰试样的大，即环氧树脂附灰试样

的沿面闪络现象出现的随机性更大。

(3)环氧树脂与PTFE附灰试样的沿面闪络电压都随着粒径的减小呈现增大的趋势。当铝粉的粒径较大时,PTFE的沿面闪络电压略大于环氧树脂;当铝粉的粒径逐渐变小时,PTFE的沿面闪络电压开始略小于环氧树脂,且两种材料的绝缘子沿面闪络电压接近,其差距不超过3%。

综上,PTFE的黏度比环氧树脂黏度小,金属微粒污染物更难附着在PTFE表面,且二者的沿面闪络性能接近。因此采用PTFE界面取代原有的环氧树脂界面,可以减少由金属微粒引起的绝缘故障,为新型金属微粒的抑制方法提供参考。

参考文献:

- [1] 李庆民,常亚楠,王健,等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术,2020,46(12):4182-4193.
- [2] WANG S H, LIU H Q, MA K, et al. Effect of particle trap on motion characteristics of metal particles in AC GILs and parameter optimization[J]. Coatings,2022,12(7):981.
- [3] 律方成,马康,刘华琦,等. 直流GIL微粒陷阱的捕获机理分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报,2022,42(15):5751-5762.
- [4] 律方成,边亚琳,詹振宇,等. 环保气体下灰尘对环氧树脂闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2020,46(4):1319-1327.
- [5] 陈济群. 金属微粒在GIS中危害的实例分析[J]. 高压电器,1989(3):7-12.
- [6] 成俊奇.SF₆、N₂和合成空气中绝缘子沿面闪络性能的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [7] 赵慧存,高宇,王文渠,等. 不同温度下弹跳金属微粒对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 绝缘材料,2022,55(10):39-46.
- [8] 王文渠,高宇,赵慧存,等. 振动诱发金属微粒弹跳对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 绝缘材料,2022,55(11):63-70.
- [9] PAN C, CHEN G, TANG J, et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(3):981-1000.
- [10] XIE J, CHALMERS I D. The influence of surface charge upon flash-over of particle-contaminated insulators in under impulse-voltage conditions[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997,30(7):1055-1063.
- [11] 张立国. 环保输电管道中金属微粒对绝缘子沿面闪络特性的影响[D]. 北京:华北电力大学,2020.
- [12] 傅晓林. 聚四氟乙烯涂料在镀铬挂具绝缘处理中的应用[J]. 材料保护,2007,40(6):74.
- [13] 王邸博. 直流电压下聚四氟乙烯表面电荷的聚散及其对闪络特性的影响[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [14] 高宇,门业堃,杜伯学,等. 表面电荷对典型聚合物绝缘材料直流闪络电压的影响[J]. 高电压技术,2015,41(5):1474-1480.
- [15] MA K, LIU H Q, WANG Q, et al. Study on movement and distribution characteristics of metal particle dust in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(3):1208-1217.
- [16] OSS C J, CHAUDHURY M, GOOD R J. The mechanism of partition in aqueous media[J]. Separation Science and Technology, 1987,22(6):1515-1526.
- [17] OSS C J, GOOD R J, BUSSCHER R J. Estimation of the polar surface tension parameters of glycerol and formamide, for use in contact angle measurements on polar solids[J]. Journal of Dispersion Science and Technology,1990,11(1):75-81.
- [18] SHALEL L S, MARMUR A. Validity and accuracy in evaluating surface tension of solids by additive approaches[J]. Journal of Colloid & Interface Science,2003,262(2):489-499.
- [19] 王晖,顾帼华,邱冠周. 接触角法测量高分子材料的表面能[J]. 中南大学学报,2006,37(5):942-947.
- [20] 晏年平,于钦学,任文娥,等. 应用理化分析和机械性能分析方法探索HGIS故障原因[J]. 高压电器,2014,50(7):111-116.
- [21] 邵先军,何文林,徐华,等. 550 kV GIS现场交流耐压试验下放电故障的定位与分析研究[J]. 高压电器,2014,50(11):30-37.
- [22] 李升志. 威布尔分布函数在绝缘电性能试验中的应用[J]. 中小型电机,1988(2):22-26.
- [23] LI J, HE Z M, GRZYBOWSKI S. Electrical Aging lifetime model of oil-impregnated paper under pulsating DC voltage influenced by temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(6):1992-1997.

收稿日期:2022-07-16 修回日期:2022-08-15

作者简介:王胜辉(1977-),男(汉族),湖北黄冈人,副教授,主要从事电气设备在线监测与故障诊断、新型电工绝缘材料的研究;通信作者:刘华琦(1997-),女(汉族),黑龙江齐齐哈尔人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究。