

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.024

温度对环氧树脂沿面闪络特性的影响研究

吴延宇¹, 张 蕾¹, 黄 猛¹, 周 秀², 汤 浩³, 覃林生¹, 李秀芬¹

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750001;
3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 特高压穿墙套管的绝缘问题是特高压输电技术研究的重点, 在实际的工况中, 由于内部及外部环境的影响, 穿墙套管时常处于室温以上的环境温度中, 导致绝缘性能受到一定程度的影响。为了研究交流和直流电压下环氧树脂闪络电压随温度的变化规律以及温度的影响机制, 搭建了环氧树脂沿面闪络试验平台, 测量在恒定气压的SF₆氛围中, 环氧树脂在不同温度下的闪络电压, 仿真分析了闪络电压的变化原因。结果表明: 在25~70℃范围内, 随着温度升高, 环氧树脂的闪络电压出现先小幅下降后上升的现象, 存在闪络电压的最小值。该现象是由气—固界面电场分布、SF₆气体临界场强和环氧树脂表面陷阱能级的共同作用导致。研究成果可以为特高压直流穿墙套管绝缘优化配置提供实验依据。

关键词: 穿墙套管; 环氧树脂; 沿面闪络; 温度

Research on Influence of Temperature on Surface Flashover Characteristics of Epoxy Resin

WU Yanyu¹, ZHANG Lei¹, HUANG Meng¹, ZHOU Xiu², TANG Hao³, TAN Linsheng¹, LI Xiufen¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electrical Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The insulation problem of Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) wall bushing is the research focus of UHVDC transmission technology. In actual working conditions, the wall bushing is often at ambient temperatures above room temperature due to the influence of internal and external environment, which causes the insulation performance to be affected to a certain extent. For studying the variation of flashover voltage of epoxy resin under AC and DC voltage and the mechanism of temperature influence, an epoxy resin flashover test platform is set up to measure flashover voltage of the epoxy resin under different temperature within the constant SF₆ gas pressure, and the reason of flashover voltage variation is analyzed by simulation. The results show that the flashover voltage of epoxy resin first decreases slightly and then increases with the increase of temperature in the range of 25℃ to 70℃. It shows that there is a minimum flashover voltage in this temperature range. This phenomenon is caused by the joint action of the electric field distribution at the gas-solid interface, the critical electric field strength of SF₆ gas and the energy level of surface-trap of epoxy resin. The study results can provide experimental basis for optimizing the insulation configuration of UHVDC wall bushing.

Key words: wall bushing; epoxy resin; surface flashover; temperature

0 引言

特高压直流穿墙套管作为换流站中连接阀厅

和直流场的唯一通道, 是承载系统全电压、全电流的核心设备。一旦发生闪络将造成线路单极停运, 损坏本体以及周边精密设备, 后果十分严重^[1-4]。由

收稿日期: 2023-02-11; 修回日期: 2023-04-15

基金项目: 国家电网科学技术项目(GY71-18-022); 国家自然科学基金(51807062)。

Project Supported by Science & Technology Project of State Grid Corporation of China(GY71-18-022), National Natural Science Foundation of China(51807062).

于特高压穿墙套管所处的环境较为复杂,为了了解特高压直流穿墙套管发生放电时的放电机理和它的绝缘性能,不同的运行工况和环境条件下的绝缘特性成为研究的热点^[5-8]。

国内外的学者主要从影响绝缘材料沿面闪络特性的气体成分和气压^[9-11]、表面是否存在导电金属微粒^[12-14]、试样承受的电场类型^[15-16]等方面对试样沿面闪络放电展开研究。翟芷萱进行环氧树脂在SF₆/CF₄混合气体中的直流沿面闪络实验,探究直流闪络电压与SF₆混合比和气体压强的关系,发现在不同混合比下直流闪络电压均随气压升高而增大^[17]。肖淞等人发现自由导电金属颗粒的存在会使SF₆气体的工频耐压水平出现显著的下降,而且伴随着微粒数目的增多,SF₆击穿电压的下降趋势开始慢慢变得平缓并最终逐渐趋向稳定,且不同类型的金属微粒对SF₆的击穿电压的影响程度也存在明显的差异^[18]。谢庆等人发现在真空和空气中,极不均匀电场下环氧树脂材料的直流闪络电压要低于稍不均匀电场,此外闪络电压在不对称电场中还具有极其明显的极性效应^[19]。

穿墙套管在实际运行的工况中,由于内部回路产生的焦耳热、外界环境温度、光照等条件的影响,时常处于较高的温度环境中,这将对绝缘材料的绝缘性能产生一定的影响。Guillermin等人的研究结果表明,温度是影响环氧树脂电导率与绝缘老化的主要因素之一^[20]。但是较少关注交流或直流电压下温度对环氧树脂在SF₆气体中沿面闪络特性的影响。Maria Hering等人对常压下的SF₆气体不同温度的击穿电压进行了仿真计算,结果表明,在恒容的情况下,100℃的正极性直流击穿电压相较于20℃时下降了16%,负极性直流击穿电压下降了12%^[21]。路士杰等人在常压下进行工频沿面闪络试验,保持上电极温度不变,改变下电极的温度分别为20、40、60、80℃,形成了温度梯度,并进行了仿真验证,结果表明在此温度梯度下工频闪络电压随温度升高而降低^[22]。刘文斌等人对环氧树脂在-70~20℃下进行了工频沿面闪络试验,发现在此温度区间内,闪络电压随温度的上升呈降低的趋势^[23]。根据气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程^[24],采用SF₆气体作为介质的封闭开关设备,在常温下充入SF₆气体后密封,气体密度保持不变,因此现有研究大多在恒容条件下考虑温度的影响。恒容条件下,温度升高的过程中气压也随之增大,导致实际运行气压高于充气时的气压。但是目前较少考虑在高温时适当降低气体密度以维持内部气压不变条件

下,环氧树脂交流和直流沿面闪络电压的变化规律。

针对上述的问题,文中搭建了交流和直流电压下环氧树脂沿面闪络试验平台,在0.4 MPa气压下,开展不同温度(25、40、55、70℃)的环氧树脂试样沿面闪络试验,探究闪络电压的变化规律以及温度的影响机制。

1 试验装置和方法

1.1 沿面闪络试验装置

整个试验装置由试验腔体、电压发生器(交流和直流,交流发生器未画出)、SF₆充气装置等组成。圆柱形试验腔体采用不锈钢材料制成,外径为462 mm,内径为360 mm。在腔体侧方设有两个观察口,方便观察试样发生闪络时的现象。腔体顶端与电压发生器连接,底端接地。腔体两侧接入SF₆充气装置,通过压力表和阀门,用来控制腔体内SF₆的气压保持恒定,试验电路图见图1。

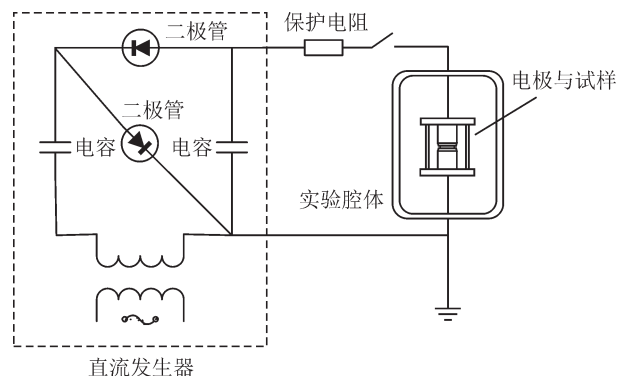


图1 试验电路图

Fig. 1 Diagram of the experimental circuit

试验腔体内含有电极与试样,腔壁上均匀铺上加热带,用于给内部环境加热。试验电极的材质为黄铜,电极相对的两个面加工成圆柱形的内凹型结构,内凹圆柱的高度为3 mm、直径为25 mm,且这两个面的外边缘均采用半径8 mm的圆弧过渡,边缘处均经过打磨处理,避免电极表面存在场强过于集中的区域,同时可以固定试样。试验中使用的环氧树脂试样整体外观为扁平圆柱状,直径25.0 mm、高度10.0 mm,沿面放电试验模型见图2。

根据图2所示的电极与试样建立电场分布计算模型,在高压端分别施加40 kV的交流和直流电压,低压端接地,使用有限元软件计算电场分布,交流和直流下环氧树脂和SF₆气体中及环氧树脂表面的电场分布见图3(a)、(b)。可以看出,环氧树脂内部大部分区域的电场分布比较均匀,在两电极所夹的SF₆气体中电场分布也相对比较均匀。交流电压下的

最大场强大于直流电压下的最大场强。

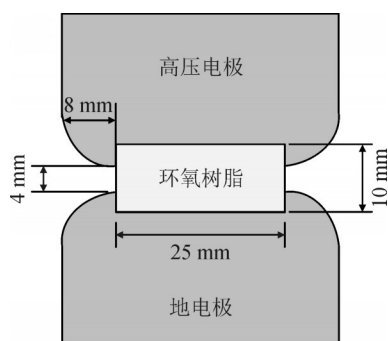


图2 沿面放电试验模型

Fig. 2 Surface discharge experimental model

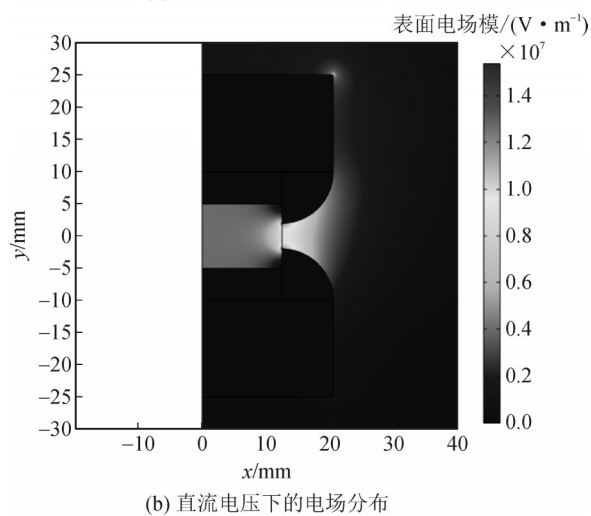
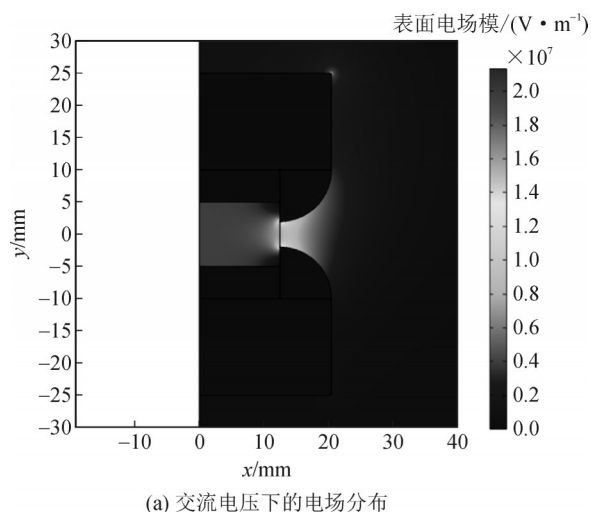


图3 电场分布仿真结果

Fig. 3 Simulation results of electric field distribution

1.2 试验方法

首先测量环氧树脂在不同温度下的电阻率和介电常数。将试验的环氧树脂切成0.5 mm高的薄片,通过半径为10 mm圆形镀金的铜给环氧树脂薄片加1.5 kV的电压,通过智能温度控制器加热腔体,分别记录25、40、55、70 ℃下环氧树脂切片的泄漏电流。

使用有效直径为20 mm,厚度为0.93 mm的环

氧树脂切片,通过宽频介电谱仪,通入频率为50.2 Hz,电源电压有效值为1 V的电源,记录25、40、55、70 ℃下环氧树脂的相对介电常数。

进行沿面闪络试验之前,用无水乙醇清洗电极,将干燥过的环氧树脂试样放入电极对的凹槽并固定,密封试验腔体。连接试验电路,将腔体外壳接地,电压发生器接高压端,中间串联一个电阻较大的保护电阻。将腔体抽至真空后充入SF₆气体,直至气压为0.4 MPa,关闭阀门。

采用智能温度控制器给腔体升温,在加热过程中,气压随之升高,将气阀门微松,缓慢放出气体以保持气体压力不变。当温度控制器上显示的腔内实际温度达到设定的温度后,保持该温度30 min以上,保证环氧试样和SF₆气体受热均匀。分别使用工频电压发生器和正极性直流电源以1 kV/s的速度升高电压,待环氧树脂发生沿面闪络,记录闪络电压。为保证试验结果的准确性,每组进行多次重复试验,共进行25、40、55、70 ℃温度下的4组试验。

2 试验结果

2.1 环氧树脂的电阻率和介电常数

环氧树脂在不同温度下的电阻率以及介电常数的测量结果分别见图4、5。

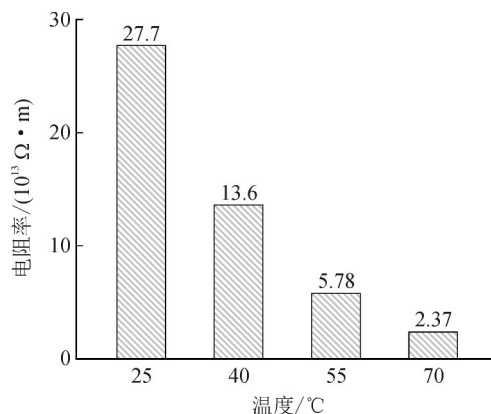


图4 不同温度下环氧树脂的电阻率

Fig. 4 Resistivity of epoxy resin at different temperatures

由图4、5可以看出,在此温度区间内,环氧树脂的电阻率随温度的升高而降低,呈指数衰减的趋势,而环氧树脂的相对介电常数与温度呈正相关,随温度的上升而逐渐增大,但变化范围较小。

2.2 闪络电压随温度的变化规律

对25、40、55、70 ℃下的试验数据求平均值和标准差,见图6、7。

试验数据表明:相同温度下,交流闪络电压峰值与直流闪络电压接近;交流和直流电压下,在25~40 ℃下,闪络电压下降;在40~70 ℃下,随温度的上

升,沿面闪络电压升高。

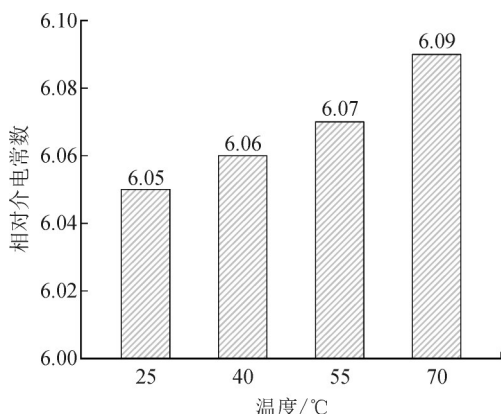


图5 不同温度下环氧树脂的介电常数

Fig. 5 Dielectric constant of epoxy resin at different temperatures

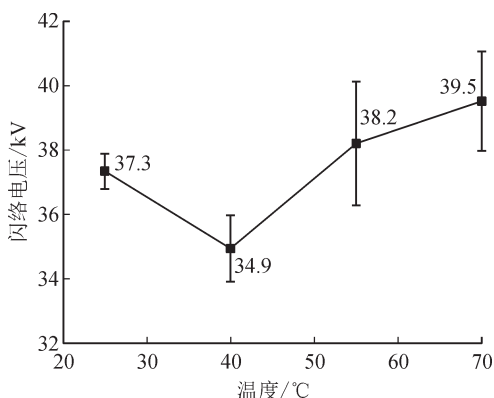


图6 交流电压下闪络电压与温度的关系

Fig. 6 Relationship between flashover voltage and temperature under AC voltage

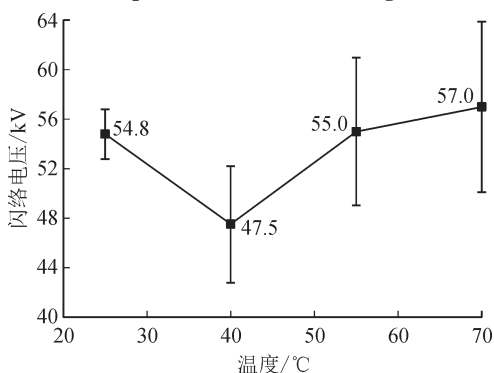


图7 直流电压下闪络电压与温度的关系

Fig. 7 Relationship between flashover voltage and temperature under DC voltage

3 结果分析讨论

3.1 工频沿面闪络电压的计算

根据SF₆在工频电压下沿面闪络电压的工程估算公式^[22], 20℃下的闪络场强为

$$E_f = 45(10p)^{0.64} \quad (1)$$

式(1)中, p 为气压。当气压为 0.4 MPa 时, E_f 的

计算结果为 109.3 kV/cm, 沿面闪络电压为

$$U_f = \eta E_f d \quad (2)$$

式(2)中: η 为绝缘利用系数, 等于气体间隙中平均场强与最大场强之比; d 为 SF₆ 气隙距离。

由有限元仿真软件计算可得在 40 kV 静电场下环氧树脂表面的电场分布见图 8。本试验中间隙为 4 mm, 根据图 8 结果计算可得

$$\eta = \frac{E_{av}}{E_{max}} = 0.769 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到 20℃时 SF₆ 的工频沿面闪络电压为 33.6 kV, 比 25℃下实际测量的沿面闪络电压略低。

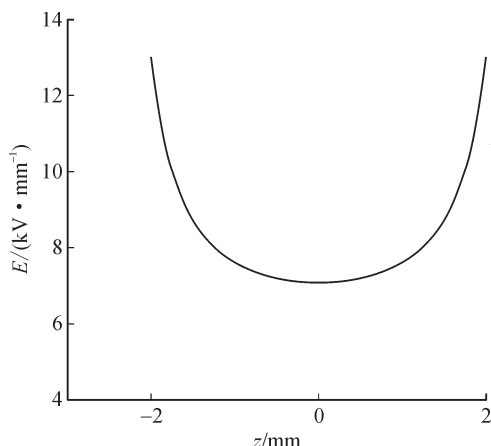


图8 40 kV 下环氧树脂表面的电场强度分布

Fig. 8 Electric field strength distribution on the epoxy surface at 40 kV

3.2 温度对临界场强的影响

SF₆ 气体放电时, 一方面电子在电场的作用下碰撞电离不断产生新的带电质点; 另一方面, 具有强烈电负性的 SF₆ 分子吸附电子阻碍放电的发展, 可以通过电子电离系数 α 和电子吸附系数 γ 来判断放电是否发展。

以 20℃ 的 SF₆ 为例, 仅当 E/p 大于临界值 $E_{cr}/p = 885 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{MPa})$ 时, 电子电离系数大于电子附着系数, 放电才有可能发展^[25]。

根据气体的电离系数与附着系数随温度的变化关系, 以及常温常压下 SF₆ 气体的电离系数和附着系数与电场强度的表达式, 推算出在 0.4 MPa 的压力下, SF₆ 气体电离系数与附着系数随温度与电场强度变化的关系式^[25-26], 见表 1。

表1 电离系数和附着系数计算公式

Table 1 Calculation formula of ionization coefficient and attachment coefficient

系数	表达式
α/cm^{-1}	$\frac{1.393 \times 10^7}{T} \exp[-2.828 \times 10^5/(E \times T)] \quad 240 < E < 480$
γ/cm^{-1}	$3.404 \times 10^3 (E \times T)^2 \quad 240 < E < 480$

电离系数与附着系数相等时的电场强度为临界场强 E_{cr} , 将温度代入上述表达式绘制曲线, 即可根据交点得到不同温度下的临界场强, 以 25 °C 为例, 结果见图 9。在 0.4 MPa 气压下, 不同温度的临界场强见表 2。

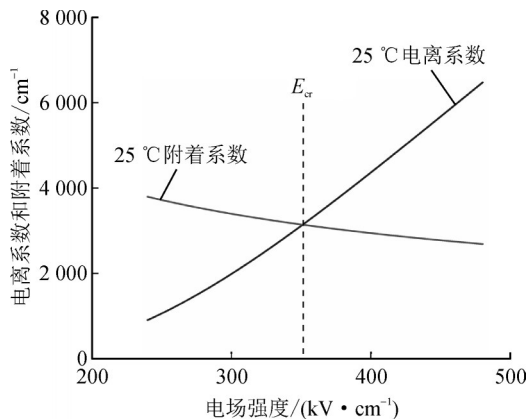


图 9 25 °C 下的临界场强

Fig. 9 Critical field strength at 25 °C

表 2 不同温度的临界场强

Table 2 Critical field strength at different temperatures

参数	数值			
$T/^\circ\text{C}$	25	40	55	70
$E_{cr}/(\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1})$	351.14	344.87	339.26	334.24

由表 2 结果可得, 在气体压力恒为 0.4 MPa 的情况下, 25~70 °C 范围内, 临界场强随温度的升高而逐渐下降, 70 °C 的临界场强与 25 °C 相比下降了 4.8%。与取 SF_6 的临界折合场强 $(E/N)_{cr}=361 \text{ Td}$ 时 ($1 \text{ Td}=10^{-21} \text{ V} \cdot \text{m}^2$), 恒压情况下温度升高引起分子数密度减小而导致临界场强 E_{cr} 减小的结果一致, 其中 N 为 SF_6 气体的分子数密度。

3.3 温度对电场分布的影响

沿面闪络试验过程中, 气—固界面的电场分布情况将影响闪络电压的大小。交流下电场分布主要受介电常数的影响, 直流下电场分布主要受电阻率的影响。

因为在气压恒定的情况下, 理论上 SF_6 单位体积的气体分子数随温度的升高而减小, 介电常数也会发生变化。对于非极性气体电介质, 气压不变且不太大的情况下, 介电常数和温度的关系可以近似用式(4)表示^[25]

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = -\frac{\varepsilon - 1}{T} \quad (4)$$

式(4)中: ε 为气体的介电常数; T 为温度。

解得介电常数随温度变化的关系式为

$$\varepsilon = 1 + \frac{C}{T} \quad (5)$$

式(5)中, C 为常数。

经计算可知, 恒压条件下, 在 25 °C 至 70 °C 范围内, SF_6 气体介电常数变化非常小, 可以忽略不计。

而气体的电阻率受温度、气压、气体密度等多方面因素影响, 根据文[27]的结果, SF_6 气体的电阻率随温度呈指数减小。但是仅考虑温度的影响, 在温度变化不大的情况下, SF_6 气体的电阻率也可近似认为不变。

根据图 4、5 的结果, 不同温度下环氧树脂的电阻率与介电常数发生了变化, 分别将 25、40、55、70 °C 下环氧树脂的电阻率以及介电常数代入前述电场分布计算模型中, 得到环氧树脂表面的电场分布。交流和直流电压下环氧表面电场的绝缘利用系数见表 3。因为介电常数变化很小, 交流电压下绝缘利用系数几乎不随温度变化; 直流电压下绝缘利用系数逐渐减小。

表 3 交流和直流电压下的绝缘利用系数

Table 3 Insulation utilization factor under AC and

DC voltage

参数	数值			
温度/°C	25	40	55	70
η (交流)	0.769	0.769	0.769	0.769
η (直流)	0.862	0.825	0.746	0.690

3.4 温度对闪络电压的影响计算

根据文[28]中的计算方法, 不同温度下的沿面闪络电压计算式为

$$U_f = K_h K_f K_g \eta E_{cr} d \quad (6)$$

式(6)中: K_h 为电极曲率系数; K_f 为电极表面粗糙度系数; K_g 为固体介质表面粗糙度系数; η 为绝缘利用系数; E_{cr} 为临界场强; d 为气隙间距。

电极曲率系数 K_h 由 E_{max} 和 E_{cr} 决定, 因为加入绝缘子对场强的变化影响比较小, 所以采用气隙击穿条件近似代替, 用击穿场强 E_b 近似代替最大场强 E_{max} ^[28]:

$$K_h = \frac{E_{max}}{E_{cr}} = \frac{E_b}{E_{cr}} \quad (7)$$

$$E_b/p = (E_{cr}/p) + \frac{K}{\beta p d} \quad (8)$$

在 K 的取值范围内, K/β 近似取值为 0.5 kV, 将 $p=0.4 \text{ MPa}$, $d=4 \text{ mm}$ 代入式(8), 可计算不同温度下的电极曲率系数 K_h 。

查阅文[28]可得本试验所用的环氧树脂试样在 0.4 MPa 气压下的表面粗糙度系数 K_g 约为 0.82, 铜电极的表面粗糙度系数 K_f 约为 0.6。 K_g 和 K_f 均与腔体内的气压相关, 而本试验在整个升温过程中始终保持气压恒定, 可认为在改变温度的过程中, K_g 和 K_f 不

受影响。

将表3的结果代入式(6),得到不同温度下的沿面闪络电压计算值,并与实测值进行比较,因为工频下的闪络电压取有效值而非峰值,所以计算交流电压下的计算结果均除以 $\sqrt{2}$ 再与实测结果进行比较,结果分别见表4、5。

表4 交流电压下闪络电压的测量值与计算值

Table 4 Measured and calculated values of flashover voltage under AC voltage				
参数	数值			
温度/℃	25	40	55	70
测量值/kV	37.3	34.9	38.2	39.5
计算值/kV	37.7	37.0	36.4	35.9
相对误差/%	1.1	6.0	-4.7	-9.1

表5 直流电压下闪络电压的测量值与计算值

Table 5 Measured and calculated values of flashover voltage under DC voltage				
参数	数值			
温度/℃	25	40	55	70
测量值/kV	54.8	47.5	55.0	56.0
计算值/kV	59.8	56.2	50.0	45.6
相对误差/%	9.1	18.3	-9.1	-18.6

可以看出,交流和直流电压下,沿面闪络电压计算值均随温度升高而降低。闪络电压的变化规律与文[22]中一致,但是与实验结果有一定差别,这是由于电场仿真的参数仅考虑温度对试样电阻率和介电常数以及电离系数与附着系数的影响,但是并未考虑温度对沿面闪络发展过程中电荷注入和迁移特性的影响。

3.5 温度对沿面闪络发展过程的影响

SF₆氛围中,环氧树脂表面的沿面闪络发展过程见图10^[29-30]。当在两个电极上施加电压后,电极、SF₆气体和环氧树脂的三结合部位处电场发生畸变,形成电场集中区域,引发场致发射,在三结合部处环氧树脂表面积聚同极性电荷,即电荷极性与附近电极极性相同,导致电场分布发生畸变,削弱电极附近的电场^[28],相当于改善了三结合部附近的电场分布,提高了绝缘利用系数。根据电荷注入理论^[28],温度升高,电荷注入增大,积聚的电荷量增加,有利于提高沿面闪络电压。

电极注入产生的一次电子除了在环氧树脂表面形成空间电荷外,另一部分在电场作用下与SF₆气体分子发生碰撞电离,还有一部分电子碰撞聚合物表面形成二次电子发射。二次电子引起SF₆气体分子的碰撞电离以及与聚合物表面的碰撞不断加

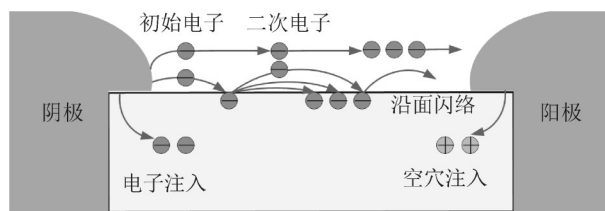


图10 环氧树脂沿面闪络过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of surface flashover of the epoxy resin

剧,连续的二次电子发射引发SF₆气体中的电子雪崩并最终导致闪络发生^[30]。由此可见,二次电子数量对沿面闪络电压具有重要影响。

由二次电子的形成过程可知,除了SF₆气体的温度和密度以外,二次电子发射受环氧树脂表面陷阱能级的影响。根据电介质陷阱理论,浅陷阱能级俘获的电子容易逃逸,有利于二次电子发射;而深陷阱俘获的电子需要更高的能量才能逃逸出来,削弱了二次电子发射。温度的升高使得陷阱的捕获作用加强。因此,提高环氧树脂表面的深陷阱能级有利于提高沿面闪络电压^[31]。环氧树脂在25~70℃范围内,表面电导率随表面电位的衰减速度随着温度的升高逐渐降低^[32],说明温度升高以后环氧树脂的表面陷阱能级变深,不利于电荷的迁移,因此有利于增大沿面闪络电压。

综上所述,电场分布、临界场强和陷阱能级是导致环氧树脂沿面闪络电压变化的主要因素。在交流电场中,不同温度下环氧树脂的介电常数也几乎不变,因此介电常数变化对闪络电压的影响可以忽略,临界场强、电荷积聚和陷阱能级的变化是导致闪络电压变化的主要原因:随着温度升高,一方面临界场强降低,闪络电压减小;另一方面电荷积聚和陷阱能级增大,闪络电压提高。在25~40℃下,SF₆气体临界场强降低的影响占主导作用,闪络电压减小;在40~70℃下,电极附近同极性电荷积聚和环氧树脂表面陷阱能级增大的影响占主导作用,闪络电压略微增大。

在直流电场中,环氧试样的电阻率发生了明显的变化,气-固界面的电场分布也随之发生了变化。温度对闪络电压的影响由临界场强、电阻率、电荷积聚以及陷阱能级的变化共同决定:在25~40℃下,SF₆气体的临界场强和环氧树脂电阻率降低的影响占主导作用,闪络电压减小,并且降低程度大于交流电压;在40~70℃下,和交流电场一样,电极附近电场削弱和环氧树脂表面陷阱能级增大的影响占主导作用,闪络电压略微增大。

4 结论

1)当气压恒为0.4 MPa时,随着温度的升高,SF₆气体放电的阈值场强减小。

2)恒定气压下,在25~70 ℃范围内,交流和直流闪络电压先减小后增大,存在闪络电压的最低点。

3)气—固界面电场分布、SF₆气体临界场强和环氧树脂表面陷阱能级三者的共同作用决定了闪络电压随温度的变化规律。

参考文献:

- [1] 胡长猛,程林,张川,等. 电力设备SF₆气体状态检测典型案例[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 228-232.
HU Changmeng, CHENG Lin, ZHANG Chuan, et al. Typical case analysis of SF₆ gas state detection for power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 228-232.
- [2] 费焯,刘云鹏,陈江波,等. 特高压GIL壳体升温测试分析及工程运维措施建议[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 292-296.
FEI Ye, LIU Yunpeng, CHEN Jiangbo, et al. Test and analysis of UHV GIL case temperature rise and suggestions for project operation and maintenance measures[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 292-296.
- [3] 柴影辉,钟建英,谭盛武,等. 基于有限元分析的特高压直流穿墙套管结构优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 47-52.
CHAI Yinghui, ZHONG Jianying, TAN Shengwu, et al. Structural optimization design of UHVDC wall bushing based on finite element analysis[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 47-52.
- [4] 王井飞,张强,李祥斌,等. 特高压直流输电工程GIL三支柱绝缘子故障分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 246-252.
WANG Jingfei, ZHANG Qiang, LI Xiangbin, et al. Fault analysis and improvement measures of GIL three - pillar insulator in UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 246-252.
- [5] 谢志成,张晋寅,潘志城,等. 800 kV对接式直流穿墙套管缺陷分析及应对策略研究[J]. 变压器, 2022, 59(1): 22-27.
XIE Zhicheng, ZHANG Jinyin, PAN Zhicheng, et al. Research on defect analysis and optimal measure of 800 kV butt-type DC wall bushing[J]. Transformer, 2022, 59(1): 22-27.
- [6] 赵文强,侍乔明,王永平,等. MMC桥臂电抗器穿墙套管故障特性及保护策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 205-212.
ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, WANG Yongping, et al. Fault characteristics and protection strategy of MMC bridge arm reactor wall bushing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 205-212.
- [7] 林翔,刘凯,吴子豪,等. 换流变阀侧高压套管缺陷动态热特性模型与温度预测研究[J]. 变压器, 2022, 59(10): 48-54.
LIN Xiang, LIU Kai, WU Zihao, et al. Study on defect dynamic thermal characteristic model and temperature of converter transformer valve - side high voltage bushing[J]. Transformer, 2022, 59(10): 48-54.
- [8] 许广虎,金铭,张陵,等. 500 kV变压器高压套管闪络事故模拟试验分析与预防[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 178-185.
XU Guanghu, JIN Ming, ZHANG Ling, et al. Simulation test analysis and prevention of high voltage bushing flashover accident of 500 kV transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 178-185.
- [9] 翟芷萱,林莘,温苗,等. 极不均匀场下SF₆/CF₄混合气体中环氧树脂绝缘子沿面闪络特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 150-155.
ZHAI Zhixuan, LIN Xin, WEN Miao, et al. Study on surface flashover characteristics of epoxy resin insulator in SF₆/CF₄ mixture under uneven field[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 150-155.
- [10] LI X, ZHAO H, JIA S, et al. Study of the dielectric breakdown properties of hot SF₆-CF₄ mixtures at 0.01~1.6 MPa[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(5): 053302.
- [11] 孟晓波,梅红伟,陈昌龙,等. 气压与湿度对绝缘介质表面流注发展特性影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1938-1947.
MENG Xiaobo, MEI Hongwei, CHEN Changlong, et al. Experimental research on influences of air pressure and humidity on characteristics of streamer propagation along insulation surfaces[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1938-1947.
- [12] METWALLY I A, A - RAHIM A A. Dynamic analysis of motion of spherical metallic particles in non - uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 282-293.
- [13] 李松,李金忠,汤浩,等. 直流套管中自由金属微粒运动特性分析[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 162-170.
LI Song, LI Jinzhong, TANG Hao, et al. Motion characteristics analysis of free metal particles in DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 162-170.
- [14] 许渊,刘卫东,陈维江,等. 运行工况下交流GIS绝缘子表面微金属颗粒运动诱发沿面闪络的研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1596-1602.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Study on the development of surface flashover induced by the motion of micro-metal particle on the surface of AC GIS spacers under operation condition[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1596-1602.
- [15] ZHANG Lu, ZHANG Qiaogen, LIU Shi, et al. Insulation characteristics of 1 100 kV GIS under very fast transient

- overvoltage and lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1029-1036.
- [16] 何 聪, 张 芊, 曹铎耀, 等. 交流与操作冲击叠加电压下 SF_6 气体中沿面局部放电特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1807-1817.
- HE Cong, ZHANG Qian, CAO Duoyao, et al. Surface partial discharge characteristics in SF_6 under AC and switching impulse superimposed voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1807-1817.
- [17] 翟芷萱. SF_6/CF_4 混合气体中绝缘子沿面闪络特性及表面形貌分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- ZHAI Zhixuan. Analysis of surface flashover characteristics and surface topography of insulators in SF_6/CF_4 mixed gas [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [18] 肖 淞, 张晓星, 周 倩, 等. 不同类型自由金属微粒对 SF_6 绝缘特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1582-1591.
- XIAO Song, ZHANG Xiaoxing, ZHOU Qian, et al. Influence of different types of free metal particles on the properties of SF_6 insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1582-1591.
- [19] 谢 庆, 梁少栋, 阴 凯, 等. 不同电场下环氧树脂直流沿面闪络特性及其闪络电压分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1757-1765.
- XIE Qing, LIANG Shaodong, YIN Kai, et al. Characteristics on DC surface flashover of epoxy resin and analysis of flashover voltage under different electric field [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1757-1765.
- [20] GUILLERMIN C, RAIN P, ROWE S W. Characterization of electro-thermal aging of a filled epoxy resin[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. ICSD 2004. France: IEEE, 2004: 351-354.
- [21] HERING M, SPECK J, GROßMANN S, et al. Influence of gas temperature on the breakdown voltage in gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 401-408.
- [22] 路士杰, 张连根, 周宏扬, 等. 温度对工频下环氧支柱沿面闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2774-2781.
- LU Shijie, ZHANG Liangen, ZHOU Hongyang, et al. Effect of temperature on flashover voltage of epoxy column at power frequency[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2774-2781.
- [23] 刘文斌. 低温环境下环氧树脂绝缘材料的电气特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- LIU Wenbin. Study on the electrical properties of epoxy resin insulation materials in low temperature environment [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [24] 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程: DL/T 618—2011[S]. 2011.
- Guide for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed switchgear on site: DL/T 618—2011[S]. 2011.
- [25] 梁曦东. 高电压工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- LIANG Xidong. High voltage engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [26] 张钊棋, 宋 辉, 代杰杰, 等. 大气压下温度对针板空气间隙流注放电影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2929-2939.
- ZHANG Zhaoqi, SONG Hui, DAI Jiejie, et al. Simulation research on the influences of temperature on streamer discharge of the needle plate air gap at atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2929-2939.
- [27] MAZLI A D A, JAMAIL N A M, OTHMAN N A. Electric field and current density performance analysis of SF_6 , C_4F_8 and CO_2 gases as an insulation[C]//International Research and Innovation Summit. Bristol: Iop Publishing Ltd., 2017: 1075-1086.
- [28] 贾志杰. SF_6 沿面绝缘的工程计算[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 48-52.
- JIA Zhijie. Engineering calculation of surface insulation in SF_6 gas[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 48-52.
- [29] 秦司晨, 屠幼萍, 金 花, 等. 不同温度下环氧树脂空间电荷特性仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 144-149.
- QIN Sichen, TU Youping, JIN Hua, et al. Simulation of space charge characteristics of epoxy resin at different temperatures[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 144-149.
- [30] 李盛涛, 裴永杰, 闵道敏, 等. 固体电介质真空沿面闪络研究进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 1-9.
- LI Shengtao, NIE Yongjie, MIN Daomin, et al. Research progress on vacuum surface flashover of solid dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 1-9.
- [31] 李 群, 赵宇民, 陈天恒, 等. 环氧树脂/ SiO_2 纳米复合材料陷阱分布及直流闪络特性[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 57-63.
- LI Qun, ZHAO Yumin, CHEN Tianheng, et al. Trap distribution and DC flashover characteristics of epoxy resin/ SiO_2 nanocomposites[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 57-63.
- [32] 陈 可, 梁曦东, 刘 杉. 空气中不同温度下环氧树脂绝缘子表面电荷消散过程的实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1723-1728.
- CHEN Ke, LIANG Xidong, LIU Shan. Experimental study on the decay process of surface charges on epoxy insulators under different temperature in air[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1723-1728.
- 吴延宇(1997—), 男, 工学硕士, 助理工程师, 主要研究方向为气体绝缘输电设备绝缘、油纸绝缘(E-mail: wuyyu1997@163.com)。
- 黄 猛(1988—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为主要研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: huang_m2011@163.com)。