

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240904

电热协同老化应力下环氧树脂复合材料 沿面闪络特性与数值模拟

李思庚¹ 李庆民¹ 王伟² 金虎³ 李锐海³

1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学) 北京 102206
2. 北京市高电压与电磁兼容重点实验室(华北电力大学) 北京 102206
3. 南方电网科学研究院 广州 510080

摘要 干式变压器正在向高电压等级、高功率密度方向发展,长期运行于电热协同等多应力复杂工况下的环氧树脂浇注绝缘更易诱发沿面闪络故障。为研究电热协同老化应力下环氧树脂的沿面闪络特性,该文搭建了交流沿面闪络实验平台,实验发现当老化温度为160℃时,老化80天的环氧树脂试样闪络场强为2.11 kV/mm,下降了25.7%。进一步地,结合带电粒子连续性方程、平均电子能量方程和界面反应表征式建立了环氧树脂沿面闪络等离子体模型,实现了工频下沿面闪络的动态模拟。根据老化实验结果引入随机函数改变介质表面粗糙度,并结合老化后的介电常数模拟环氧树脂准确的电热老化行为,得到了老化前后环氧树脂闪络过程中切向电场强度、电子密度和表面电荷密度的时空演化规律。仿真结果表明,老化环氧树脂闪络发展过程中电子密度和表面电荷密度均增大,12 ns时流注头部电场强度达到1.183 kV/mm,增加近10.87%,且老化会引起闪络演化速度更快。最后,通过表面电荷消散实验对其进行机理解释,发现老化试样表面电荷消散速率明显减弱,深陷阱能级和密度均增大,分别达到1.06 eV和 $2.56 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$,导致材料表面电荷大量积聚,最终造成闪络场强下降。上述研究结果可为干式变压器故障运维及寿命预测提供理论和方法基础。

关键词: 环氧树脂 电热联合老化 沿面闪络 等离子体 表面陷阱

中图分类号: TM855

0 引言

干式变压器因其抗短路能力强、运行效率高等优点,在电力输送过程中得到了广泛的应用^[1]。如今干式变压器正在向高电压等级、高功率密度方向发展,这对电力设备绝缘的可靠性提出了更高的要求,若气-固表面发生沿面闪络将会直接导致设备故障^[2-4]。在实际运行中,干式变压器长期工作在复杂的电热协同应力下,容易导致材料的绝缘性能逐渐降低,并诱发沿面闪络击穿,因此对干式变压器沿面闪络特性的研究具有重要意义。

目前,部分学者已对干式变压器等高压设备绝

缘材料的沿面闪络特性进行了大量的研究工作。相关研究表明,影响沿面闪络的重要因素包括绝缘材料的介电性能^[5]和介质缺陷^[6-7]。M. M. Bordeori等通过场发射扫描电子显微镜(Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)、X射线光电子能谱(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)和傅里叶变换红外(Fourier Transform Infrared, FTIR)光谱对热老化环氧树脂进行理化分析,发现羧基和空隙的形成促进了电荷的积累,导致局部电场增强^[8]。李国倡等研究了热老化对环氧树脂捕集能级分布的影响,以及电子陷阱能级分布对直流闪络特性的影响,实验表明,随着热老化时间的延长,闪络电压先升高后降低,且闪络电压的变化与电介质表面陷阱能级分布的变化有关^[9]。黄炎光等开展了三种不同温度下干式变压器环氧树脂的热老化实验,得到了绝缘介电性能随老化时长和老化温度的

国家自然科学基金(52177147, 52127812)、北京市自然科学基金(3232053)、国家重点研发计划(2021YFB2601404)和中央高校基本科研业务费专项资金(2023JC005)资助项目。

收稿日期 2024-05-28 改稿日期 2024-08-14

变化规律,总结了热老化对环氧树脂浇注绝缘的影响^[10]。Bian Bo 等通过加速电热老化实验,研究了不同老化阶段环氧树脂表面绝缘性能和介电性能的变化,用深浅陷阱转化和导电通道减少解释了表面电荷耗散速率降低和闪络电压下降的原因^[11]。梁英等开展了电晕老化后介质表面电荷分布的研究,并通过陷阱效应对不同老化阶段材料表面电荷和沿面闪络电压的变化进行解释^[12]。由此可见,长期的电热老化显著增加了干式变压器环氧树脂浇注绝缘发生沿面闪络的故障概率。

然而,受到以上实验手段的限制,干式变压器环氧浇注绝缘沿面闪络过程中表面带电粒子的分布与局部电场畸变情况难以观测,由电热联合老化引起的环氧浇注绝缘界面电荷时空动态演化机制尚不明确。因此,借助计算机强大的数值模拟运算能力,可从微观层面定量研究表面电荷等特征参量的变化规律,以此解释宏观沿面放电过程。

为此,本文首先搭建了交流沿面闪络实验平台,分析不同老化周期的沿面闪络场强;其次,进一步创建了用于模拟不同老化时长的等离子体沿面闪络仿真模型,并分析了绝缘电热协同老化后局部场强和电荷等微观参量的时空分布规律;最后,通过数值模拟与实验相结合的方法,研究了不同老化周期下环氧树脂的沿面闪络特性,进而厘清了环氧树脂在交流应力下的沿面闪络机理,为环氧树脂绝缘电力设备故障运维与寿命预测提供理论与方法基础。

1 实验平台

1.1 电-热联合老化实验平台

电-热联合老化实验平台如图 1 所示。电-热联合老化箱的温度控制范围为室温至 200℃,精确度控制在±5℃,内置气体流量控制模块使箱内受热均匀,并通过温度传感器实时监测箱体内部受热情况。箱外配备高压试验电源,施加的电压为工频交流电压。利用电压控制台进行升压和降压操作,电信号采集系统读取电压的大小,以确保实验电路的安全。箱内设有 6 组板-板电极组成的二电极系统,其中板电极为直径为 5 cm 的圆形电极片,实验电源接线从上方的高压绝缘套管引入,并通过实验电极对环氧树脂试样施压,实验过程中电场强度设置为 2 kV/mm^[13]。实验箱体设有观察窗口,可实时观测环氧树脂试样老化过程。试样为山东泰开变压器有限公司提供的浇注干式变压器用环氧树脂。该公司的环氧树脂以双酚 A 二缩水甘油醚 (F-DGEBA) 含

氟环氧树脂作为基体材料,单甲基苯基丙烯酸 (MTHPA) 作为固化剂,2,4,6-(二甲基氨基甲基)苯酚作为促进剂。试样的直径为 10 cm,厚度为 1 mm。实验前将试样放入超声波清洗机,依次用无水乙醇、去离子水清洗,并放置在 40℃ 的恒温箱中 48 h 使其充分干燥,保证样本初始状态一致。老化期间定期变换试样在老化箱中的摆放位置,保证试样老化程度均匀。

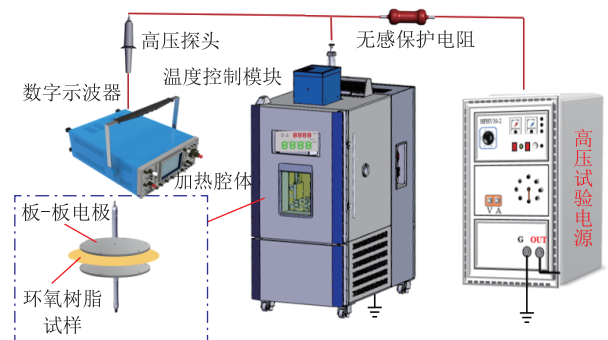


图 1 电-热联合老化实验平台

Fig.1 Electro-thermal combined aging experimental platform

1.2 沿面闪络平台

为研究沿面闪络特性,搭建交流沿面闪络实验平台如图 2 所示。测试系统主要由以下几部分组成:① 50 Hz 交流电压源;② 针-板电极,包括聚四氟乙烯底座、高压针电极以及低压板电极,聚四氟乙烯底座长为 20 cm,中间可固定直径为 10 cm 的圆形环氧树脂试样,其中左侧针电极处可以通过旋钮调节针-板电极间距,且针电极前段针尖部分直接焊接在电极板上,角度始终为 45°;③ 恒温恒湿实验腔体,腔内温度在 25~150℃ 可调节,最高可耐受 50 kV 交直流电压,腔体上方设有高压绝缘套管,高压源接线从套管接入,连接针-板电极;④ 闪络电压测量系统主要包括 Tektronix P6015A 型高压

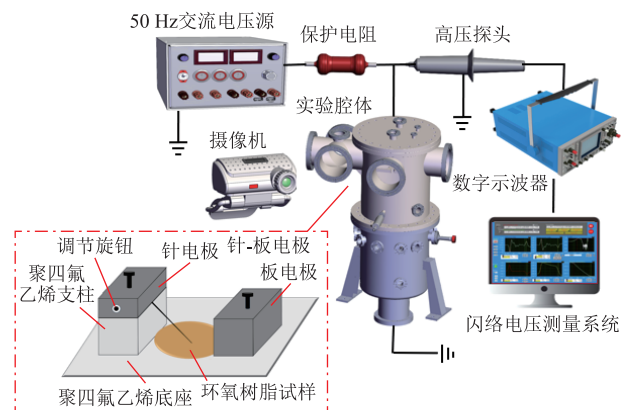


图 2 交流沿面闪络实验平台

Fig.2 AC along surface flashover experimental platform

探头（衰减比为 1 000 : 1）、YOKOGAWA DL6154 型高速数字示波器以及自行研制的闪络电压测量系统。测试时腔内温度稳定在 25℃，闪络环境为空气。为确保测量结果的准确性，每种试样以 0.2 kV/s 的速率提升电压幅值，直至环氧树脂试样发生沿面闪络，记录闪络时刻的电压最大值，每组实验重复 10 次^[14]取其平均值。

1.3 表面电荷消散测试

表面电位测量平台如图 3 所示，由电晕充电装置、电位测量平台和数据采集系统组成。其中电晕充电装置由高压电源提供 0~80 kV 的交流电压。电位测量平台由试样放置平台、针电极、电荷探头和数字静电计（Trek Model 347）构成，针电极距离试样 10 mm，电荷探头距离待测试样 2 mm。数据采集系统用于实时记录表面电位变化。利用针电极对试样充电后立即撤去高压，并用旋转机械臂将充电试样快速移动到电荷探头下方进行电位采集。实验前用无水乙醇擦拭环氧树脂试样表面，去除其表面的杂散电荷，并在空气中放置 6 h。在 10 kV 电压下对试样电晕充电 10 min，并测量 10 min 内试样表面电荷电位。

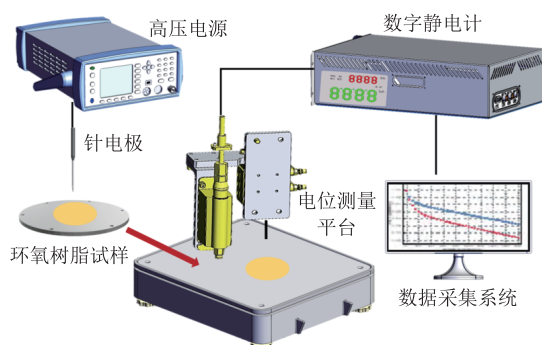


图 3 表面电位测量平台

Fig.3 Surface potential measurement platform

2 电热协同老化后环氧树脂试样沿面闪络实验

2.1 环氧树脂试样电热联合老化

通过差示扫描量热法（Differential Scanning Calorimetry, DSC）得到样品的玻璃化转变温度，如图 4 所示，可见试样的玻璃化转变温度约为 130℃（128.89℃）。由于在高聚物玻璃化转变温度两侧，材料的许多性能都会发生急剧变化，因此选取 100、130、160℃作为老化温度^[15]。同时，根据国际标准 IEC 60811-1 的规定，采用等差级数将老化时间设定为 0、20、40、60 和 80 天。老化后的试样如图 5 所示。随着老化时间的增加，样品表面颜色不断加

深。以 130℃为例，其表面颜色历经白-浅黄-黄-黄棕过程，并且随着老化温度的升高，颜色变化更加明显。

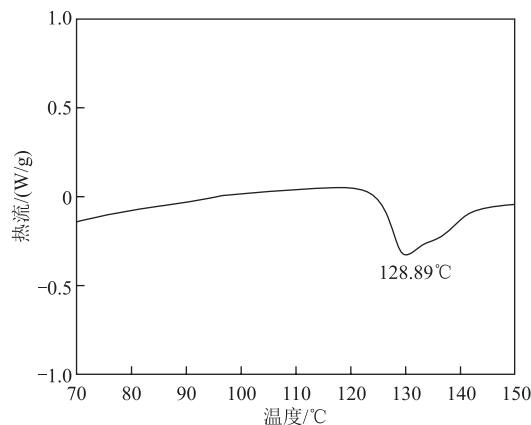


图 4 DSC 测量结果

Fig.4 DSC measurement results

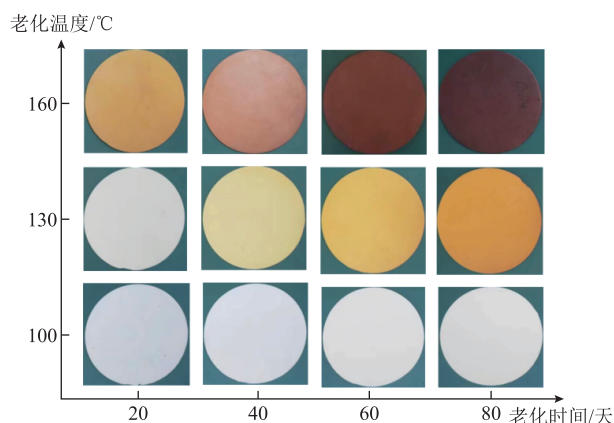


图 5 环氧树脂老化试样

Fig.5 Epoxy resin aging sample

2.2 不同老化时间环氧树脂沿面闪络实验分析

实验前将针-板电极距离调整为 3 mm，针电极与环氧树脂表面夹角为 45°。高压电源接线经腔体绝缘套管连接针电极，板电极接地。分别选取未老化和 100、130、160℃老化温度下不同老化阶段的环氧树脂试样，测量试样在交流应力下的沿面闪络场强并对其特性进行分析研究。图 6 为 100、130、160℃老化温度下试样的沿面闪络场强，其中未老化试样的沿面闪络场强为 2.84 kV/mm。由图 6 可知，随着老化时间的增加，沿面闪络场强呈下降趋势，老化时间 0~40 天的下降梯度最大。在后文 3.1.4 节中可知，0~40 天试样表面粗糙度迅速增大，导致环氧树脂表面电场均匀度下降，局部电场畸变会对空间电荷平衡状态产生扰动。对于老化 40~80 天的环氧树脂试样，其沿面闪络场强下降趋势明显减弱，160℃下老化 80 天的环氧树脂试样闪络场强为 2.11 kV/mm，

下降了 25.7%。在相同的老化时间下,随着老化温度的升高,其沿面闪络场强逐渐降低。以老化 20 天为例,当老化温度为 160℃时,试样沿面闪络场强为 2.32 kV/mm,相比 100℃时,试样沿面闪络场强下降了 8.66%。其原因是老化温度越高,热应力将对环氧树脂试样表面结构产生越严重的破坏。另一方面,当老化温度达到 130℃和 160℃时,其温度超过玻璃化转变温度,分子热运动进一步加剧并发生松弛极化,进而引起介电常数变化,从而会改变试样的表面电场分布,更容易引发沿面闪络^[16]。

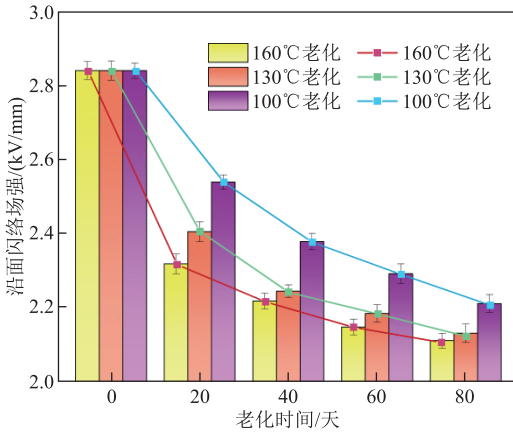


图6 老化试样沿面闪络场强

Fig.6 Flicker field strength along the surface of the aging specimen

3 沿面闪络动态演化过程仿真

3.1 环氧树脂沿面闪络等离子体模型搭建

3.1.1 粒子流体-动力学模型

通过结合沿面闪络过程中的电子密度、平均运动速度、反应平均能量来描述等离子体产生、输送和消失的过程^[17]。使用 Boltzmann 方程提取的连续性方程描述电子传输过程,即

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e + S_e \quad (1)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e E) n_e - \nabla \cdot (D_e n_e) \quad (2)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (3)$$

式中, R_e 为气-固界面电子冲击电离的速率; S_e 为气体光解离产生电子-离子对的速率^[18]; n_e 和 Γ_e 分别为电子密度和电子数通量; E 为电场强度; μ_e 为电子迁移率^[19], $\mu_e = 3.74 \times 10^{24} (10^{21} E)^{-0.22} (\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})^{-1}$; D_e 为电子扩散系数; T_e 为电子温度; t 为时间。

假设在整个反应过程中,电子密度的增加或衰减与 M 个反应有关,其中 $M = M_1 + M_2$,则有

$$R_e = \sum_{g=1}^{M_1} x_g k_g N_n n_e + \sum_{h=1}^{M_2} x_h \alpha_h N_n |\Gamma_e| \quad (4)$$

式中, x_g 、 k_g 分别为反应 g 中目标物质的摩尔分数和速率系数; x_h 、 α_h 为反应 h 中目标物质的摩尔分数和汤森系数; N_n 为中性粒子数密度。

平均电子能量方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + E \cdot \Gamma_e = S_{en} \quad (5)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e E) n_e - \nabla \cdot (D_e n_e) \quad (6)$$

$$D_e = \mu_e T_e \quad (7)$$

式中, S_{en} 为反应中电子迁移和碰撞中产生或损失的能量; n_e 和 Γ_e 分别为电子能量密度和电子能量通量; μ_e 为电子能量迁移率; D_e 为电子能量扩散系数。

3.1.2 等离子体模型边界条件

沿面闪络过程中电荷在绝缘介质表面积聚,使电场发生畸变^[20-21]。其电荷积聚的条件为

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \\ \frac{d\rho_s}{dt} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_i + \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_e \end{cases} \quad (8)$$

式中, \mathbf{D}_1 、 \mathbf{D}_2 为边界电位移通量; \mathbf{n} 为绝缘边界法向量,除施加电势的边界外, $\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0$; ρ_s 为表面电荷密度; \mathbf{J}_i 、 \mathbf{J}_e 分别为表面离子密度和表面电子密度。

沿面闪络过程中存在电子热运动以及场致发射电子在外施电场作用下的迁移运动,这些运动电子与绝缘介质表面发生碰撞,并引发二次电子发射^[22]。其电子通量的边界公式为

$$\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = \frac{v_{e,th} n_e}{2} + \alpha_e \mathbf{n} \cdot (\mu_e \cdot \mathbf{E}) n_e - \sum \gamma (\Gamma \cdot \mathbf{n}) \quad (9)$$

$$v_{e,th} = \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \quad (10)$$

式中, $v_{e,th}$ 为电子热速度; α_e 为电场系数; $\sum \gamma (\Gamma \cdot \mathbf{n})$ 为二次电子发射引起的电子增益; γ 为高能粒子撞击绝缘界面引发的二次电子发射系数, $\gamma = 0.004$ ^[23]; k_b 为玻耳兹曼常数; m_e 为电子质量。

3.1.3 等离子体演变的化学反应

以空气作为气-固界面测试系统的反应气体,需要充分考虑等离子体化学反应的类型,但实际上沿面闪络过程中的等离子体反应十分复杂,其中包含数十种粒子的交叉反应^[24],以传统方法依次分析计算每种反应难以实现。本文参考文献[25],将 O_2 与 N_2 间的多种反应设为反应集,降低了等离子体化学

反应的复杂程度,使模型建立及求解难度大幅降低。

将 O_2 与 N_2 的混合气体用物质 A 表示,放电中总反应可认为是物质 A 电离的过程,产生正离子 p 和负离子 n,具体反应见表 1。表中,二体反应的速率系数单位为 m^3/s ,三体反应的速率系数单位为 m^6/s ; N_A 为阿伏伽德罗常数;激发电离和弹性碰撞速率利用 N_2 、 O_2 横截面数据^[26],通过 BOLSIG+(电子玻耳兹曼方程求解器)计算汤森系数获取,得到的汤森系数如图 7、图 8 所示。

表 1 等离子体化学反应

Tab.1 Plasma chemical reactions

反应	反应式	反应类型	反应速率系数
1	$e+A \rightarrow p+2e$	激发电离	—
2	$e+A \rightarrow n$	弹性碰撞	—
3	$e+2A \rightarrow n+A$	附着	$2 \times 10^{-41}(300/T_e) N_A^2$
4	$e+p \rightarrow A$	复合	5×10^{-14}
5	$n+p \rightarrow 2A$	复合	5×10^{-12}

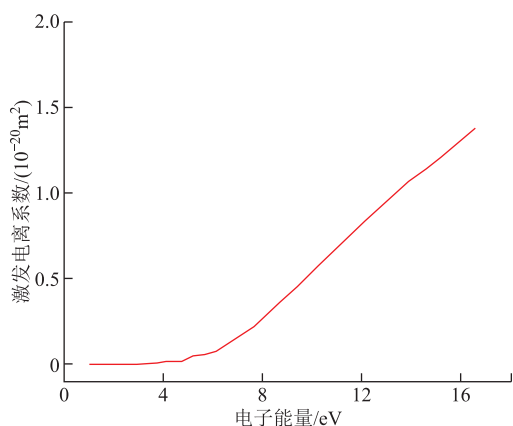


图 7 激发电离汤森系数

Fig.7 Townsend coefficients for excited ionization

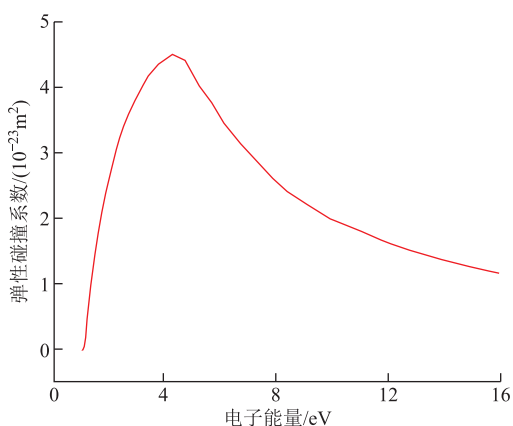


图 8 弹性碰撞汤森系数

Fig.8 Townsend coefficients for elastic collisions

3.1.4 老化后环氧树脂表面形貌微观建模

为确保老化后试样表面微观形貌建模的准确

性,需测量不同老化条件下环氧树脂的表面粗糙度,取不同周期的老化试样进行原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 测试^[27],以 100℃ 老化温度为例,其测试结果如图 9 所示。其中未老化试样表面相对平整且分布着较多尺寸较小的毛刺,高度为 120.2 nm。当老化达到 40 天时,在电应力和热应力的影响下,带电粒子不断撞击试样表面,使表面形貌发生巨大变化,表面毛刺基本消失,呈山峰状凸起,高度达到 369.7 nm。当老化达到 80 天时,表面凸起增长缓慢,高度达到 442.7 nm。

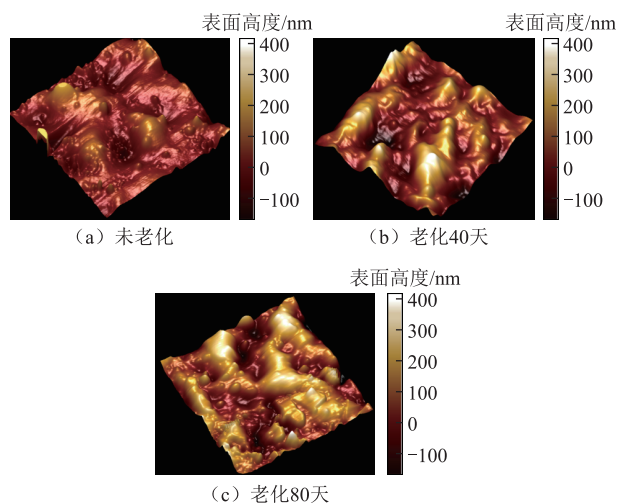


图 9 老化试样 AFM 图像

Fig.9 Aging specimen AFM images

目前用于模拟工频交流下绝缘切向电应力的沿面闪络模型主要有针-板电极和针-棒电极^[28-29]两种形式。本文选取针-板电极模拟环氧树脂的沿面放电行为。为使仿真结果更有对比性,本文选取 100℃ 下老化 80 天的环氧树脂介电常数与未老化环氧树脂进行对比,使用 FDS-PDC+ 系列介电绝缘分析仪测量介电常数,并取其工频下的介电常数作为参考数据。介电常数测试结果如图 10 所示,未老化试样

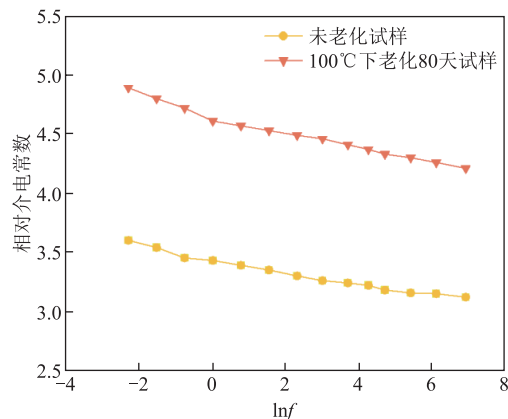


图 10 介电常数测量结果

Fig.10 Dielectric constant measurement results

相对介电常数为 3.2, 老化 80 天试样相对介电常数为 4.4。

结合实际测得的试样表面粗糙度, 在 COMSOL Multiphysics 仿真中引入随机函数生成环氧树脂老化表面。通过改变空间频率含量的方式表征表面粗糙度, 其内核是通过傅里叶级数拓展的三角函数之和合成表面数据, 总和中的每项都表示空间中的某个振荡频率。考虑环氧树脂试样表面结构和物质掺杂不均匀等影响, 设置 10% 的数值波动区间。 x 轴和 y 轴的随机函数为

$$x = s \quad (11)$$

$$y = Am^{-b}g_1(m)\cos[2\pi ms + u_1(m)] \quad -N \leq m \leq N \quad (12)$$

式中, s 为常数, 表示随机曲线的长度; A 为峰值系数; m 为空间频率; N 为空间频率分辨率; b 为频谱指数; $g_1(\cdot)$ 和 $u_1(\cdot)$ 为一维随机函数。设置 $N=60$, $b=0.8$ 。最终的随机生成曲线取值范围见表 2。

表 2 随机生成曲线取值范围

Tab.2 Randomly generated curve value range

坐标轴	最大值/mm	最小值/mm
x 轴	10	20
y 轴	4.0952×10^{-4}	-3.5039×10^{-4}

为了在保证拥有较高计算精度的前提下, 又能有良好的收敛性和较快的计算速度, 本文采用非均匀网格划分, 即针电极和发生沿面闪络的介质表面区域网格划分较密, 其余闪络影响较小的区域采用常规大小的网格。

在电热老化过程中最直观的物理特性就是表面形貌的改变, 通过 AFM 测试发现, 电热联合老化前后试样的表面粗糙度发生了明显变化 (增大了将近 3 倍)。一方面, 沿面闪络的发展过程中电场的畸变程度会受到表面粗糙度的影响^[30]; 另一方面, 老化同样会影响材料的介电性能^[31]。因此通过改变介电常数和表面粗糙度来表征环氧树脂的老化具有一定的可行性。

3.2 沿面闪络动态演变过程

通过数值模拟仿真可以直观地展示沿面闪络过程中反应界面电子密度和电场强度的变化, 对厘清沿面闪络的机理和揭示不同老化周期环氧树脂的沿面闪络特性具有重要意义。

沿面闪络动态演变过程如图 11 所示。图 11 中, 左图为等离子体动态演变过程, 右图为与其对应的

电场强度模值变化。如图 11a 所示, 由于针电极的特殊结构, 其尖端附近容易发生电场畸变, 随着畸变电场的增强, 空气介质发生电离反应并产生大量自由电子和正负离子, 此时电子密度增加到 10^{14} m^{-3} 数量级。图 11b 中自由电子在电场的作用下向板电极迁移, 与空气介质发生碰撞电离引起电子崩, 导致电子密度增加到 10^{17} m^{-3} 数量级。大量电荷集中在电子崩头部容易形成空间电场, 空间电场和外施电场的共同作用进一步加强了流注的头部电场, 因此在流注头部形成高电场强度区域。而正离子电离区不断积聚使电场畸变继续增强, 保证沿面闪络持续稳定的进行。当电子崩发展到 4.5 ns 时, 电子密度峰值为 $8.15 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 电子密度接近电子崩转化为流注的临界值, 这与文献[32]中提到的沿面闪络过程中电子密度的变化趋势和数量级相同, 因此验证了本文仿真结果的准确性。如图 11c 所示, 随着电子崩的持续发展, 电子密度最高到达 $1.18 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 电子崩形成流注并持续向板电极移动, 头部电场强度持续增加最高达到 1.65 kV/mm。由图 11d 可知, 流注最终沿绝缘表面贯穿空气介质, 形成放电通道。

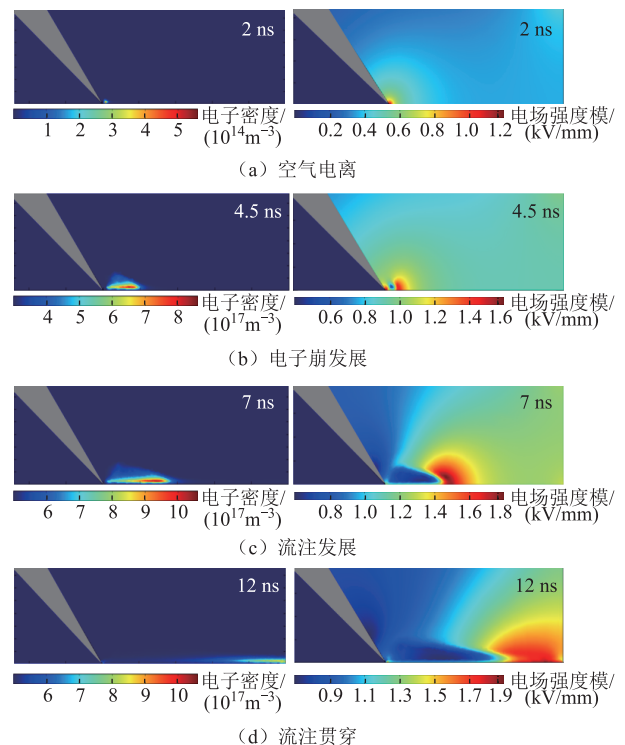


图 11 沿面闪络动态演变过程

Fig.11 Evolution of flashover along the surface

3.3 老化前后切向电场强度对比

为更好地观察材料表面粗糙度对沿面闪络的影响, 取绝缘材料表面上方 0.02 mm 处平行截线进行数据分析。交流下环氧树脂沿面闪络演变大致进行

了 12 ns, 通过记录截线上每个时刻数据的变化来研究老化引起的闪络特性。由于截线位置不同, 所获得的数据不同于 3.2 节中的数据。

老化前后环氧树脂表面电场强度时空分布如图 12 和图 13 所示。两者电场强度均呈增大趋势, 且畸变电场主要分布于针电极和流注头部。较强的畸变电场使空气电离并产生更多的电子和正负离子, 因此老化后环氧树脂的沿面电场强度比未老化环氧树脂的大。以 12 ns 为例, 未老化的绝缘材料流注头部电场强度为 1.067 kV/mm, 老化后流注头部电场强度为 1.183 kV/mm, 增加了近 10.87%。同样老化后的环氧树脂沿面电场强度增长速率也会提高, 从图 12 中可明显看出未老化环氧树脂的沿面电场强度增长趋势相对缓慢, 6~12 ns 内未老化环氧树脂沿面电场强度从 0.908 kV/mm 增加到 1.067 kV/mm, 增大了 17.51%, 而老化后环氧树脂的沿面电场强度从 0.936 kV/mm 增加到 1.183 kV/mm, 增大了 26.39%。相比于未老化环氧树脂, 老化环氧树脂表

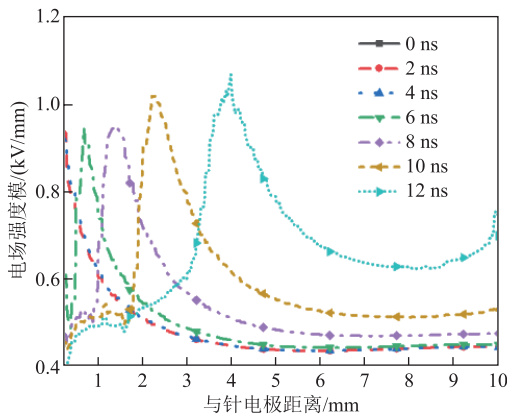


图 12 未老化环氧树脂表面电场强度分布
Fig.12 Distribution of electric field strength on the surface of unaged epoxy resin

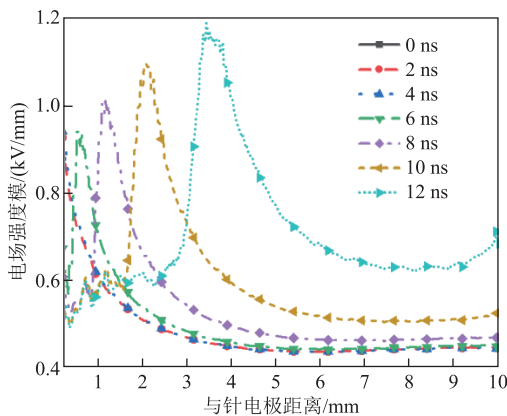


图 13 100°C 下老化 80 天环氧树脂表面电场强度分布
Fig.13 Distribution of electric field strength on the surface of epoxy resin aged at 100°C for 80 days

面的原有结构在电热应力的作用下被破坏, 表面粗糙度变大, 因此针电极处的电场畸变更加严重。老化行为不止改变了环氧树脂的物理结构, 随着老化时间的增加, 绝缘材料的相对介电常数也会增大, 介质表面电场畸变现象更加严重^[33], 最终引起闪络电压的下降。

3.4 老化前后电子密度对比

老化前后环氧树脂表面电子密度时空分布如图 14 和图 15 所示。电子密度和电场强度具有很好的对应性, 即电子密度最大值同样出现在流注头部, 随着沿面闪络的发展, 环氧树脂表面电子密度不断增大。未老化环氧树脂在 6、8、10、12 ns 时表面的电子密度分别为 4.22×10^{16} 、 4.63×10^{16} 、 5.55×10^{16} 、 $5.91 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 老化后环氧树脂表面的电子密度分别为 6.07×10^{16} 、 6.75×10^{16} 、 7.72×10^{16} 、 $9.86 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 。可明显看出, 同一时刻老化后环氧树脂表面电子密度增大, 且老化后环氧树脂表面电子密度的增长速率整体呈增大趋势, 这是因为老化模型的电场畸变更严重, 导致空气电离更剧烈。图 14 和图 15 中电子密度的波峰位置可表征沿面闪络电子崩头部的移动位置, 以 10 ns 为例, 老化后电子密度峰值位置约为 2 mm, 而未老化时的峰值位置为 2.4 mm, 由此可看出老化后的闪络发展速度要比未老化的快。这是由于电场强度增大, 空气电离更加剧烈, 电子崩发展更加迅速, 电子密度能够更迅速地达到电子崩转化为流注的临界值。并且随着老化引起的环氧树脂介电常数增大, 气-固表面空间电荷分布发生变化, 电荷消散速度减弱, 导致电荷积累。当空气介质和环氧树脂的介电常数相差较大时也会对流注的运动产生影响, 表面电荷的积聚使流注受到的电应力的挤压增强, 导致头部的电荷密度增大, 进而增

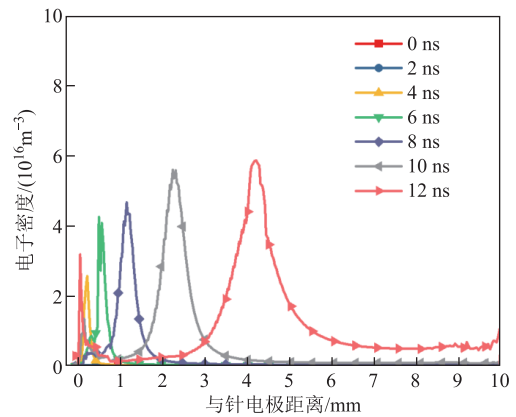


图 14 未老化环氧树脂表面电子密度分布
Fig.14 Electron density distribution on the surface of unaged epoxy resin

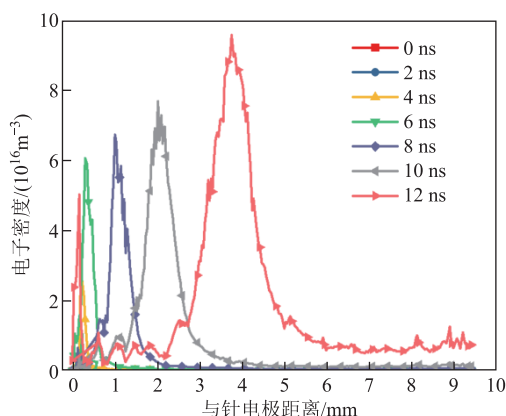


图 15 100℃下老化 80 天环氧树脂表面电子密度分布

Fig.15 Surface electron density distribution of epoxy resin aged at 100℃ for 80 days

强了介质表面流注前端的电场强度，最终导致流注发展速度变快^[34]。

3.5 老化前后表面电荷对比

老化前后环氧树脂表面电荷时空分布如图 16 和图 17 所示。由于正离子在电场的作用下在绝缘材料表面积聚负极性电荷，随着沿面闪络的发展，绝缘材料表面负电荷积累量不断增加，且高密度电荷区域逐渐由针电极向地电极发展。4 ns 电子崩发展时期，环氧树脂表面电荷密度缓慢增长。当闪络发展到流注时期时，表面电荷密度激增，激增初期未老化环氧树脂表面电荷密度为 $-1.37 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ，而老化后环氧树脂表面电荷密度为 $-2.16 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ，可明显看出老化后环氧树脂表面电荷激增更加严重。老化后环氧树脂整体表面电荷密度会增加，11 ns 时，未老化环氧树脂表面电荷密度最大值为 $-6.28 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ，而老化后环氧树脂表面电荷密度为 $-6.98 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ ，老化后环氧树脂的表面电荷积聚更加严重。

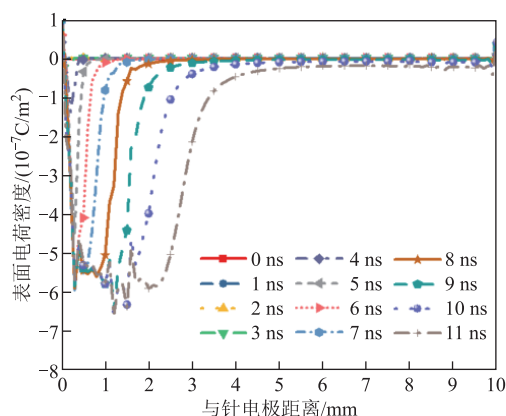


图 16 未老化环氧树脂表面电荷分布

Fig.16 Surface charge distribution of unaged epoxy resin

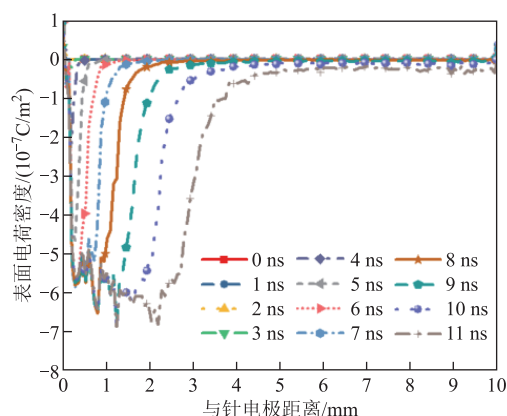


图 17 100℃下老化 80 天环氧树脂表面电荷分布

Fig.17 Surface charge distribution of epoxy resin aged at 100℃ for 80 days

4 电热老化对闪络电压的影响机制

选取 100℃下老化试样和未老化试样，测量 10 min 内表面电荷消散情况并将采集的数据进行归一化处理，如图 18 所示。老化前后试样表面电荷消散速率随时间均呈现衰减趋势，即起始电位下降较快，随着消散时间的推移最终趋于平缓。未老化环氧树脂的表面电荷消散速率约为 40.12%，而随老化时间的增加，表面电荷消散速率减弱。当老化时间为 20 天时表面电荷消散速率达到 34.09%；老化时间为 40 天时表面电荷消散速率达到 32.17%。这归因于电热联合老化破坏了环氧树脂试样表面形貌，使其表面粗糙度增大，增强了捕获电荷的能力^[35]，进而导致表面电荷消散速率下降。

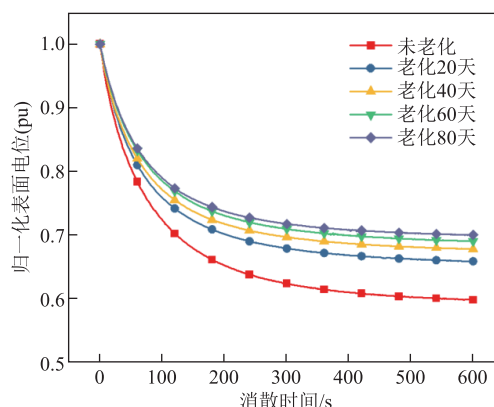


图 18 归一化表面电荷衰减曲线

Fig.18 Normalized surface charge decay curves

采用等温表面电位衰减法 (Isothermal Surface Potential Decay, ISPD) 可以计算老化前后环氧树脂试样的表面陷阱能级，其表达式为

$$E_t = k_b T \ln(vt) \quad (13)$$

$$N(E_t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r t}{k_b T f_0(E_t) \delta dq} \cdot \frac{dV_s}{dt} \quad (14)$$

式中, E_t 为表面陷阱能级; T 为环境温度; ν 为捕获的电子或空穴从陷阱逸出的频率; $N(E_t)$ 为表面陷阱密度; ϵ_r 为样品的相对介电常数; $f_0(E_t)$ 为初始电子占据率, 为简化模型, 通常设 $f_0(E_t)=1$; δ 为表面电荷积聚的深度; d 为试样厚度; q 为电子电荷; V_s 为样品表面电位。

老化前后环氧树脂试样表面陷阱密度和能级分布如图 19 所示。图 19 中老化前后试样陷阱分布曲线均为双峰, 即都存在深陷阱和浅陷阱, 但未老化环氧树脂表面的浅陷阱密度较大, 陷阱密度为 $1.14 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于电热联合老化过程中环氧树脂试样发生电热裂解, 内部分子链断链、重组、弯曲、折叠^[36], 浅陷阱逐渐转化为能级更大的深陷阱, 致使老化后环氧树脂表面深陷阱密度均明显增加。当外加电场一定时, 试样势垒高度与介电常数成正比, 老化后环氧树脂试样介电常数增大, 导致深陷阱能级也会增大。未老化试样的深陷阱密度为 $2.15 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, 深陷阱能级为 1.01 eV ; 当老化时间到达 80 天时, 深陷阱密度为 $2.56 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, 深陷阱能级为 1.06 eV , 随着老化时间的增加, 深陷阱的能级和密度均呈增大趋势。

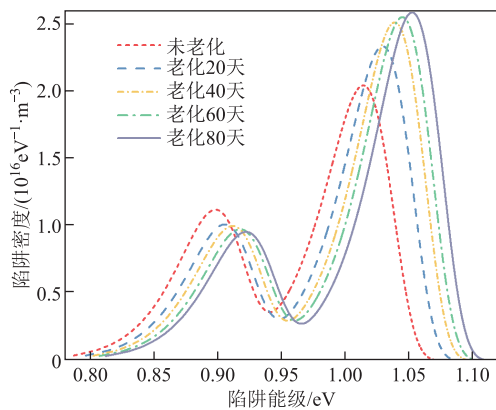


图 19 表面陷阱密度曲线

Fig.19 Surface trap density profile

老化对表面陷阱的影响如图 20 所示。老化后环氧树脂试样深陷阱密度的增加, 提高了材料表面自由电荷的入陷概率 P_{in} , 且陷阱能级的增大使电荷需要克服的势垒大大提高, 即脱陷概率 P_{out} 降低, 试样表面积聚大量的电荷, 促进了畸变电场的形成, 更易导致沿面闪络的发生。这也是老化后环氧树脂试样沿面闪络电压下降的重要原因。

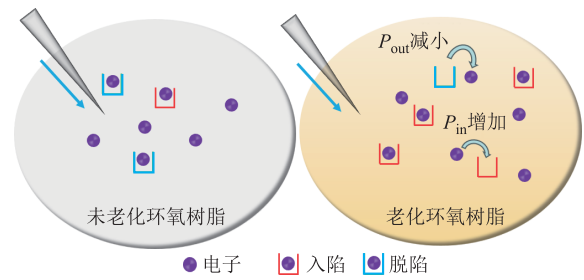


图 20 老化对表面陷阱的影响

Fig.20 Effect of aging on surface traps

5 结论

本文利用等离子体动态演变模型研究了电热联合老化前后环氧树脂闪络过程中电子密度、表面电荷密度、切向电场强度的时空变化规律。并通过对老化试样表面电荷消散和陷阱效应的研究, 进一步揭示了闪络电压下降的原因。得到结论如下:

1) 通过对电热联合老化试样进行 AFM 测试和沿面闪络实验, 发现在老化时间 0~80 天内, 160°C 老化温度下环氧树脂试样闪络场强降低了 25.7%, 而 0~40 天内试样沿面闪络场强下降陡度最大, 这与 0~40 天试样表面粗糙度迅速增大有关。同一老化时间下, 随着老化温度升高, 沿面闪络场强下降趋势加快。

2) 通过引入随机函数表征介质表面粗糙度, 建立了环氧树脂电热老化试样的沿面闪络仿真模型, 获得了老化前后环氧树脂闪络过程中的切向场强、电子密度和表面电荷密度的时空演化特性。老化试样因表面粗糙度和介电常数增大, 其表面电荷密度会发生激增现象, 较老化前试样增大了 57.66%, 使得电子密度很快到达电子崩转化为流注的阈值, 流注头部电场强度增大约 10.87%, 导致闪络发展速度变快。

3) 由陷阱效应解释了电热联合老化对环氧树脂试样表面电荷的影响机制, 厘清了试样沿面闪络场强下降的原因。老化后试样的表面电荷消散速率明显减缓, 在长期电热应力作用下, 表面浅陷阱会逐渐转化为深陷阱。针对老化时间为 80 天的试样, 其深陷阱密度和能级分别增加到 $2.56 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 1.06 eV , 造成电荷入陷概率增大, 导致表面电荷大量积聚, 电场畸变更加严重, 从而降低了沿面闪络场强。

参考文献

[1] 李庆民, 刘伟杰, 韩帅, 等. 环氧树脂绝缘高频电热联合老化中局部放电特性分析[J]. 高电压技术,

- 2015, 41(2): 389-395.
- Li Qingmin, Liu Weijie, Han Shuai, et al. Analysis on partial discharge characteristics of epoxy resin insulation during high-frequency electrical-thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 389-395.
- [2] 谢珂, 卢森微, 邵春, 等. 等离子体梯度氟化提升非均匀电场下环氧树脂沿面闪络性能的研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(10): 75-83.
- Xie Ke, Lu Senwei, Shao Chun, et al. Study on surface flashover performance of epoxy resin improved by plasma gradient fluorination under non-uniform electric fields[J]. Insulating Materials, 2023, 56(10): 75-83.
- [3] 李泳霖, 黄世龙, 刘云鹏, 等. 考虑湿度气压影响的瓷绝缘子沿面类辉光放电仿真及其紫外光谱特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1956-1969.
- Li Yonglin, Huang Shilong, Liu Yunpeng, et al. Simulation and ultraviolet spectral characteristics of glow-like discharge along the surface of porcelain insulators considering the influences of the humidity and atmospheric pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1956-1969.
- [4] 解曾祺, 韩耀萱, 李志辉, 等. 高导热氮化铝/环氧树脂复合材料的高频沿面放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5374-5386.
- Xie Zengqi, Han Yaoyuan, Li Zhihui, et al. High frequency surface discharge characteristics of aluminum nitride/epoxy resin composites with high thermal conductivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5374-5386.
- [5] 段玉兵, 韩明明, 王兆琛, 等. 不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 45-54.
- Duan Yubing, Han Mingming, Wang Zhaochen, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high-voltage cables under different thermal aging temperatures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 45-54.
- [6] 徐洋, 刘卫东, 高文胜. GIS绝缘子内部缝隙的局部放电特性和机理研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 116-122.
- Xu Yang, Liu Weidong, Gao Wensheng. Research on the characteristics and mechanism of partial discharge of internal crevice in GIS insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 116-122.
- [7] 常亚楠, 李庆民, 王健, 等. 交流 GIS 提上式微粒陷阱优化设计方法[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 14-21.
- Chang Yanan, Li Qingmin, Wang Jian, et al. Optimal design method of lifting particle trap in AC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 14-21.
- [8] Bordeori M M, Gupta N. Electrochemical changes in epoxy resin due to thermal aging and their effect on electrical tree growth[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1940-1947.
- [9] Li Guochang, Hu Kai, Sun Weixin, et al. The influence of thermal aging on the surface trap characteristics and surface flashover of epoxy resin [J]. Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12(10): 103017.
- [10] 黄炎光, 易鹭. 热老化对干式变压器环氧树脂介电性能的影响[J]. 绝缘材料, 2016, 49(9): 53-56, 60.
- Huang Yanguang, Yi Lu. Effect of thermal ageing on dielectric property of epoxy resin for dry-type transformer[J]. Insulating Materials, 2016, 49(9): 53-56, 60.
- [11] Bian Bo, Xia Guowei, Li Jingwei, et al. Thermal-aging characteristics of epoxy/glass fiber composite materials for dry-type pair-core reactors[J]. Polymer Composites, 2021, 42(8): 3773-3785.
- [12] 梁英, 靳哲, 张君成. 硅橡胶在不同电晕老化阶段下的表面电荷对沿面闪络的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6294-6302.
- Liang Ying, Jin Zhe, Zhang Juncheng. Influence of surface charge on surface flashover of silicone rubber at different corona aging time[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6294-6302.
- [13] 王有元, 刘玉, 王施又, 等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3906-3916.
- Wang Youyuan, Liu Yu, Wang Shiyu, et al. The effect of electrothermal aging on the properties of epoxy resin in dry-type transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3906-3916.
- [14] 梁虎成, 王雨帆, 杜伯学, 等. 表层非线性电导盆式绝缘子表面电荷分布与沿面放电特性[J]. 中国

- 电机工程学报, 2022, 42(2): 835-844.
- Liang Hucheng, Wang Yufan, Du Boxue, et al. Surface charge distribution and discharge behaviors of basin spacer with surface nonlinear conductivity [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 835-844.
- [15] 俞天波, 徐林峰, 潘必超. 干式变压器环氧树脂热老化特性分析[J]. 机械管理开发, 2023, 38(12): 56-57. Yu Tianbo, Xu Linfeng, Pan Bichao. Analysis of thermal aging characteristics of epoxy resin for dry-type transformers[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(12): 56-57.
- [16] Yuan Ruijun, Li Han, Zhou Wenjun, et al. Study of compatibility between epoxy resin and C₄F₇N/CO₂ based on thermal ageing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 119544-119553.
- [17] Song Xinxin, Tan Zhenyu, Chen Bo. Study on the characteristics of atmospheric dielectric barrier discharges in He-N₂ admixture[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(12): 3471-3475.
- [18] Bourdon A, Pasko V P, Liu N Y, et al. Efficient models for photoionization produced by non-thermal gas discharges in air based on radiative transfer and the Helmholtz equations[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16(3): 656-678.
- [19] Kulikovskiy A A. Positive streamer between parallel plate electrodes in atmospheric pressure air[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1997, 30(3): 441-450.
- [20] Fang Zhu, Fouracre R A, Farish O. Investigations of surface charging of DC insulator spacers[C]// Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Millbrae, CA, USA, 1996: 149-152.
- [21] Kumara S, Alam S, Hoque I R, et al. DC flashover characteristics of a polymeric insulator in presence of surface charges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1084-1090.
- [22] Blaise G, Le Gressus C. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(9): 6334-6339.
- [23] Lu B X, Sun H Y. The role of photoionization in negative corona discharge[J]. AIP Advances, 2016, 6(9): 095111.
- [24] Pillai A S, Hackam R. Surface flashover of solid dielectric in vacuum[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(4): 2983-2987.
- [25] Bilal Iqbal Ayubi, 张黎, 徐黄宽, 等. 高频电应力下聚酰亚胺沿面放电演化特性[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1177-1189. Ayubi B I, Zhang Li, Xu Huangkuan, et al. Evolution characteristics of surface discharge along polyimide under high-frequency electric stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1177-1189.
- [26] Plasma data exchange project[DB/OL]. (2019-01-23) [2024-04-30]. <http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr>.
- [27] Piquemal F, Kaja K, Chrétien P, et al. A multi-resistance wide-range calibration sample for conductive probe atomic force microscopy measurements[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2023, 14: 1141-1148.
- [28] Dervos C, Bourkas P D, Kayafas E A, et al. Enhanced partial discharges due to temperature increase in the combined system of a solid-liquid dielectric[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(3): 469-474.
- [29] 刘凯, 张鹏鹏, 高波, 等. ZnO@PS 粒子分散特性及改性乙丙橡胶绝缘性能研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2265-2276. Liu Kai, Zhang Pengpeng, Gao Bo, et al. Research on the dispersion characteristics of ZnO@PS particles and the insulation characteristics of modified ethylene propylene rubber[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2265-2276.
- [30] 宋岩泽, 梁贵书, 冉慧娟, 等. 等离子体处理调控表面电导率提高环氧树脂绝缘性能的研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3984-3998. Song Yanze, Liang Guishu, Ran Huijuan, et al. Study on improving insulation properties of epoxy resin by regulating surface conductivity by plasma treatment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3984-3998.
- [31] 李光茂, 杜钢, 周鸿铃, 等. 环氧树脂在湿热环境中的老化特性与失效机理[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 87-92. Li Guangmao, Du Gang, Zhou Hongling, et al. Aging characteristics and failure mechanism of epoxy resin in humid and hot environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 87-92.

- [32] 郑殿春. 气体放电数值仿真方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [33] 张懿议, 赵梓炜, 刘捷丰, 等. 耐电晕聚酰亚胺薄膜研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1190-1205.
Zhang Yiyi, Zhao Ziwei, Liu Jiefeng, et al. Research progress of corona resistant polyimide films[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1190-1205.
- [34] 陈刚, 黄正勇, 段瑜, 等. 基于不同油纸介电常数配比的油纸沿面放电仿真[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 2): 620-628.
Chen Gang, Huang Zhengyong, Duan Yu, et al. Simulation of surface discharge based on the different ratio of dielectric constants of oil and papers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 620-628.
- [35] 马云飞, 章程, 李传扬, 等. 重频脉冲放电等离子体处理聚合物材料加快表面电荷消散的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1731-1738.
Ma Yunfei, Zhang Cheng, Li Chuanyang, et al. Experimental study of accelerating surface charge dissipation on polymer treated by repetitively pulsed discharge plasmas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1731-1738.
- [36] 高宇, 王小芳, 李楠, 等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2219-2230.
Gao Yu, Wang Xiaofang, Li Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: a review[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2219-2230.

作者简介

李思庚 男, 1997 年生, 硕士研究生, 研究方向为绝缘设备寿命预测与老化状态评估。

E-mail: 1476624240@qq.com

李庆民 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术、放电物理等。

E-mail: lqmee@ncepu.edu.cn (通信作者)

Characterization and Numerical Simulation of Epoxy Resin Composites Flashed along the Surface under Electro-Thermal Co-Aging Stresses

Li Sigeng¹ Li Qingmin¹ Wang Wei² Jin Hu³ Li Ruihai³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

North China Electric Power University Beijing 102206 China

2. Beijing Key Lab of HV and EMC North China Electric Power University Beijing 102206 China

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Guangzhou 510080 China)

Abstract Dry-type transformer is to high voltage level, high power density direction, long-term operation in the electro-thermal cooperative multi-stress complex working conditions such as epoxy resin casting insulation is more likely to induce along the surface flashover failure. In order to study the characteristics of epoxy resin along the surface flashover under the stress of electro-thermal cooperative aging, this paper builds a platform for flashover along the surface under AC stress, and it is found that when the aging temperature is 160°C, the flashover field strength of the epoxy resin specimen aged for 80 days is 2.11 kV/mm, which is a decrease of 25.7%. The steepest decrease in the field strength along the surface is found from 0 to 40 days, which is related to the rapid increase in the surface roughness of the specimen from 0 to 40 days.

A plasma model of epoxy resin flashover along the surface is established by combining the continuity equation of charged particles, the average electron energy equation and the interfacial reaction characterization equation, and the dynamic simulation of flashover along the surface at the working frequency is realized. According to the results of the aging experiment, a random function is introduced to change the surface roughness of the medium, and the dielectric constant after aging is combined to simulate the accurate electro-thermal aging behavior of the epoxy resin, and the temporal and spatial evolution laws of the tangential electric field strength, electron density and surface charge density of the epoxy resin in the process of flashover before and after aging are obtained. The simulation results show that the electron density and surface charge density increase during the flashover

development of the aging epoxy resin, and the electric field strength at the head of the flow injection reaches 1.183 kV/mm at 12 ns, an increase of nearly 10.87%. With the aging specimen due to the roughness and dielectric constant increase, its surface charge density will occur surge phenomenon, compared with the aging specimen before the increase of 57.66%, so that the electron density quickly reached the threshold value of the electron collapse to flow injection, resulting in the development of the flashover becomes faster.

The mechanism of combined electro-thermal aging on the surface charge of epoxy resin specimens is explained by the trap effect, and the reason for the decrease in the flash field strength of the specimens is clarified. For the specimen aged for 80 days, the deep trap density and energy level increase to $2.56 \times 10^{16} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ and 1.06 eV, respectively, resulting in an increase in the probability of charge entry trapping, which leads to a large amount of surface charge accumulation, and the electric field distortion becomes more serious, thus decreasing the flash-coincidence field strength along the surface. The above findings provide theoretical and methodological basis for the fault operation and maintenance and life prediction of dry-type transformers.

Keywords: Epoxy resin, electrothermal joint aging, flashover along the surface, plasma, surface traps

(编辑 李冰)