第 52 卷 第 2 期：768-778 高电压技术 Vol.52, No.2: 768-778
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241882

复合绝缘子芯棒电-热-力多场老化寿命模型及高导热改性

谢从珍，钟　安，杨　畅，张道铭，周建港，徐华松
（华南理工大学电力学院，广州 510641）

摘　要：复合绝缘子实际运行过程中芯棒异常发热问题不容忽视，电-热-力多应力作用将显著加速芯棒老化进程并可能发展为断裂故障。该文对复合绝缘子芯棒开展电-热-力多场老化实验，基于微观孔洞电荷能量提出多场老化寿命模型，并制备了高导热改性芯棒有效提升耐老化性能。研究结果表明，电-热-力作用使微观孔洞产生应变，据此建立了基于微观孔洞电荷能量的寿命模型，定义寿命终结时最大孔洞电荷能量为 0.21 eV，并构建了电-热-力老化芯棒试样与挂网运行试样使用寿命的映射关系。最后，利用碳纳米管和氮化硼纳米片联合改性提升芯棒热管理能力，改性芯棒老化断裂时间相较于普通芯棒延长约 30%。该研究结果可为在运复合绝缘子断裂失效预测和寿命评估提供理论参考，并为提升复合绝缘子耐老化性能提供改性方法。

关键词：复合绝缘子芯棒；多场老化；寿命模型；孔洞电荷能量；高导热改性

Electro-thermal-mechanical Multi-field Aging Life Model of Composite Insulator Rods and the High Thermal Conductivity Modification

XIE Congzhen, ZHONG An, YANG Chang, ZHANG Daoming, ZHOU Jiangang, XU Huasong
(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The problems of abnormal heating of composite insulator rods should not be ignored during actual operation. The electro-thermal-mechanical stresses will significantly accelerate the aging process of rods and may develop into fracture failure. We carried out electro-thermal-mechanical multi-field aging experiments on composite insulator rods. Based on the microscopic hole charge energy, the multi-field aging life model was proposed. The modified rod with high thermal conductivity was prepared to effectively improve the aging resistance. The results show that the strain of the hole will be continuously expanded. A life model based on the microscopic hole charge energy is established, and the maximum hole charge energy (0.21 eV) at the end of life is defined. The mapping relationship between the service life of artificially accelerated mechanical-electro-thermal aging rod sample and the actual aging rod sample was established by comparing the hole charge energy of the composite insulator rod sample with that of the actual operating sample. Finally, the combined modification of multi-wall carbon nanotubes and boron nitride nanosheets can effectively improve the thermal management ability of rods. The aging fracture time of modified rod is about 30% longer than that of conventional rods. The above research results can provide theoretical reference for fracture failure prediction and life evaluation, as well as the modification methods for improving the aging resistance of composite insulators.

Key words: composite insulator rod; multi-field aging; life model; hole charge energy; high thermal conductivity modification

0　引言

复合绝缘子具有质量轻、抗污闪性能优异和机械强度高等优点[1-2]，被广泛应用于高压输电线路中。但在高温潮湿等严酷运行条件下，复合绝缘子芯棒易出现局部异常发热[3-7]，严重时引发击穿和断裂事故[8]，严重威胁电力系统安全运行[9-13]。红外检测结果表明，复合绝缘子运行时存在不同程度发热现象，温升幅值为 4.7~27.3 ℃不等，并伴随着芯棒酥朽劣化现象[3-4,9]，绝缘子酥朽劣化可能进一步发展为断裂故障[8]。由于复合绝缘子芯棒正常运行时长期承受多应力作用，加速芯棒老化，严重时引发异常发热和断裂事故。因此亟需厘清多场老化机理，

基金资助项目：国家自然科学基金(51977084)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977084).

预测和评估复合绝缘子使用寿命。

国内外已有众多学者开展复合绝缘子芯棒的人工加速老化实验，以研究热应力为主的单场和多场老化特性。芯棒热老化试验结果表明[14-15]，热应力使环氧树脂分解，玻璃纤维劣化，玻纤-环氧界面脱粘。电老化后，芯棒电导电流数值增大。随着湿热老化时间增加，芯棒复介电常数实部 ε'和介质损耗因素 $\tan\delta$ 逐渐增大[16]。芯棒酸蚀实验结果表明，老化后试样质地酥朽，环氧树脂中酯基水解，生成羧酸和醇，硅烷偶联剂和酸酐固化剂分解，环氧树脂被硝酸腐蚀溶解[17]。在湿热环境下，芯棒老化速率加快，环氧树脂分解，玻璃纤维逐渐失去环氧包裹，玻璃纤维被水和局部放电产生的硝酸水解。随着老化时间增加，芯棒介电常数和介质损耗增大，电导和局部放电量增大，吸湿率增加，拉伸和弯曲强度不断下降，下降速度逐渐减小。湿热老化使芯棒样品加压后温度升高[18-20]。芯棒湿-电老化实验模拟了酥朽劣化特征，在湿-电老化后，玻纤-环氧界面失效，环氧基体降解，出现水解通道，水解通道处电流快速增大后出现碳化通道，最后沿碳化通道出现闪络，芯棒失效[21]。芯棒湿-电-交变机械载荷实验模拟了酥朽劣化特征，芯棒在多应力老化后，表面损伤，并在机械载荷作用下疲劳变酥，最后由局部蚀损发展为酥朽劣化，环氧基体溶胀后界面脱粘，环氧被酸性物质腐蚀溶解[22]。芯棒电-热-酸老化实验利用片状样品模拟了酥朽劣化中电蚀孔和碳化通道产生，在老化 24 h 后，试样被击穿[23]。复合绝缘子芯棒正常运行时长期承受电、热和机械应力作用，电、热和机械应力加速芯棒老化，芯棒抗拉性能下降，严重时在机械载荷作用下断裂。但截止目前，尚无研究探索在长期受到电、热和机械应力条件下，多应力联合作用对芯棒老化进程的影响。因此，本文首创电-热-力老化平台，开展电-热-力老化实验，探究老化机理，评估服役特性和老化寿命。

为探究电-热-力老化机理和寿命模型，本文利用商用复合绝缘子芯棒，开展电-热-力老化实验，通过扫描电子显微镜、热失重、红外光谱和动态热机械分析，研究多场老化机理。此外，基于微观孔洞电荷能量密度提出了芯棒电-热-力多场老化寿命模型，并利用运行复合绝缘子芯棒进行了对比验证，有助于指导评估在运传统复合绝缘子理论剩余寿命。最后利用 MWCNTs 和 BNNSs 制备了高导热改性芯棒，量化评估了改性芯棒耐老化性能提升效果和剩余服役寿命。

1　样品制备与老化实验方案

1.1　样品制备

本文和国内某复合绝缘子芯棒厂家合作，将商用环氧树脂按照传统复合绝缘子芯棒制作工艺，拉挤、引拔为直径 24 mm 的芯棒试样，加工制成哑铃型作为电-热-力老化样品，形状和尺寸如图 1(a)所示。样品中间直径为 3.5 mm、长度为 50 mm，两端直径为 9 mm，样品总长 300 mm。

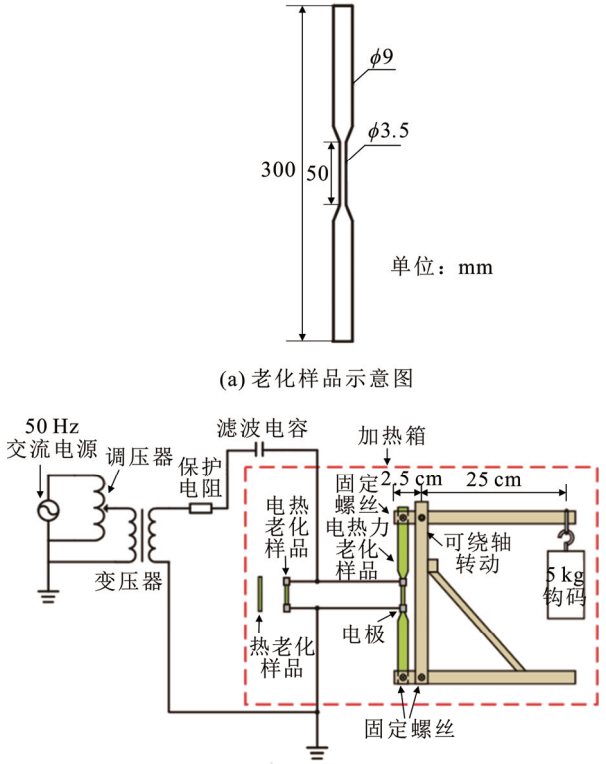
1.2　电-热-力老化实验平台

电-热-力老化平台示意图如图 1 所示。老化平台由加热箱、50 Hz 交流电源、调压器、变压器、机械加载装置和钩码组成。考虑在已有电热老化平台基础上，加入机械装置，并放置于加热箱内部，实现电、热和机械应力同步施加，机械装置原材料是电木板，可耐 250 ℃高温。由于复合绝缘子芯棒机械强度高，采用杠杆结构放大机械力，机械装置左右力臂比为 1:10。将样品设计成哑铃型，使样品较小截面承受较高压强，在不改变老化方式的同时尽可能加快老化速度。哑铃状样品中间段两端固定电极，样品电极中间部分即受电、热和机械应力共同作用。

加热箱采用 DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱(控温精度为 0.1 ℃)和 202 型电热恒温干燥箱(控温精度为 0.1 ℃)。加热箱内壁为绝缘垫，顶部开孔，导线采用耐温 200 ℃、耐压 50 kV 且截面积为 4 mm^2 的高压线，一端采用冷压端子与变压器相连，另一端利用冷压方式连接鳄鱼夹，经过加热箱顶部孔，连接试样上下电极。试样中间段上下端粘贴铜箔胶带，铜箔胶带耐高温 250 ℃，并在铜箔外缠绕直径为 0.75 mm 镀锌铁丝，导线上鳄鱼夹可夹紧铁丝。加热箱内金属裸露部分，例如鳄鱼夹和机械装置上的螺丝螺母，用耐温 250 ℃绝缘胶带粘贴覆盖。

1.3　老化实验方案

芯棒老化实验温度设定为 180 ℃，施加电压为 10.5 kV，所用钩码质量均为 5 kg，机械装置左右力臂比为 1:10。将芯棒放入电-热-力老化实验平台中，试样在实验进行 110 h 后断裂。为探究芯棒电-热-力老化程度随时间的变化规律，设置电-热-力老化实验取样间隔时间为 18 h，采用相同条件重复上述实验，得到电-热-力老化 0 h(新试样)和 18、36、54、72、90 h 样品。



(a) 老化样品示意图

(b) 实验示意图

图 1 电-热-力老化样品与实验平台示意图

Fig.1 Diagram of mechanical-electro-thermal aging test platform

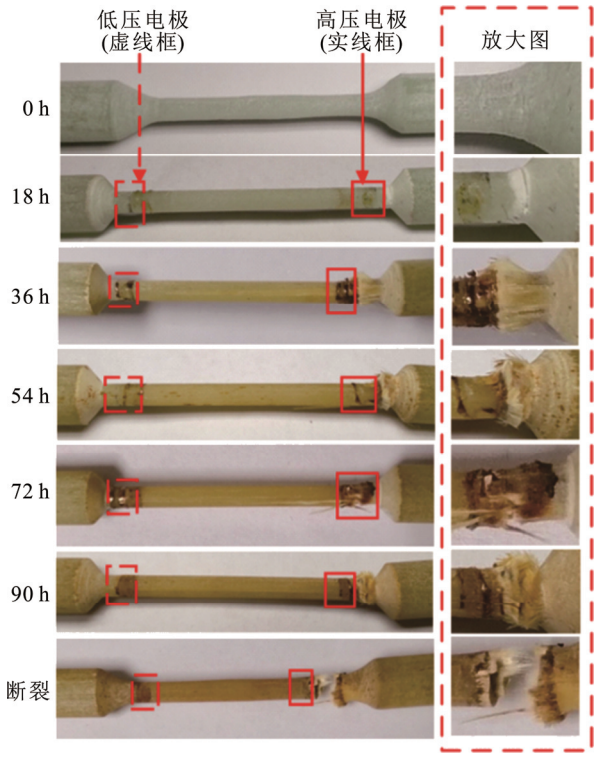


图 2 老化样品外观形貌图

Fig.2 Appearance topography of aged sample

1.4 测试方法

为观察分析不同老化条件下试样微观形貌，本次实验选择 Merlin 型场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)进行扫描电镜测试。

为分析老化样品热稳定性，本次实验选择 TG209F1 型热重分析仪进行热失重(thermal gravimetric，TG)分析，升温速率 20 ℃/min，介质气氛为氮气，温度测试范围为 40~900 ℃。

为分析老化样品官能团含量，本次实验采用 Nicolet IS50 - Nicolet Continuum 型傅里叶变换红外光谱仪进行红外光谱(Fourier transform infrared，FTIR)测试，每样品波数检测范围是 400~4 000 cm^{-1}。

为分析试样动态热力学性能，采用德国 Netzsch 公司生产的 DMA 242E 型动态热机械分析仪进行测试，测试采用拉伸模式，测试温度范围为 30~200 ℃，升温速率为 5 ℃/min，测试频率为 1 Hz。

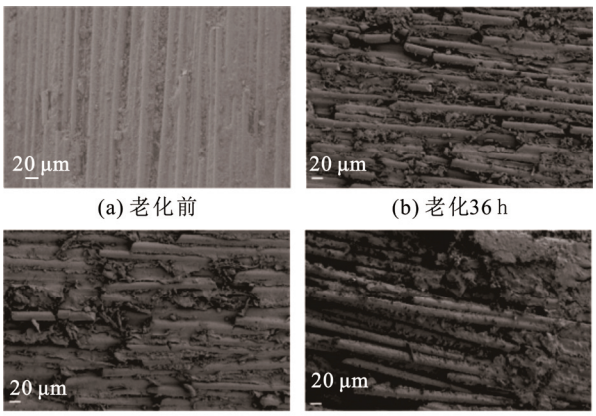
2 老化实验结果与分析

2.1 外观形貌分析

芯棒的电-热-力老化样品外观图如图 2 所示。芯棒老化前呈浅绿色。随着老化时间增加，芯棒表面颜色逐渐变深。图中右端高压电极附近出现褐黄色放电痕迹，样品高压端电极周围放电，放电处成为多种应力腐蚀薄弱点，发生明显劣化现象。低压端电极周围电蚀现象不明显。老化前，芯棒呈浅绿色。老化初始时，芯棒出现白色玻纤裸露、起毛现象。这是因为外层环氧快速分解使玻纤表面变得光滑裸露，成为机械应力集中处、电场畸变处，玻纤受更大老化应力断裂，形成毛刺。随着老化应力持续作用，芯棒起毛区域扩大，表面出现横向和纵向细小裂纹，出现尚未完全断裂平面。纵向裂纹的形成主要由于玻纤环氧界面被严重破坏，玻纤-环氧树脂基体相互分离。横向裂纹的形成主要为同一水平面上的玻纤和环氧基体被破坏，但玻纤和环氧仍紧密粘结。裂纹沿横向、纵向扩大为同一平面或呈阶梯状多个面，这是因为环氧树脂分解和玻纤断裂过程逐渐向芯棒内部发展。当裂纹扩大到整个截面后，芯棒宏观上表现为断裂。

2.2 微观形貌分析

电-热-力老化样品截面 SEM 图如图 3 所示。老化前芯棒相邻玻纤中有环氧基体填充，玻纤环氧界面良好。随着老化时间增加，环氧基体被破坏，出



(a) 老化前　(b) 老化36 h

(c) 老化72 h　(d) 老化断裂后

图 3　芯棒不同老化时间微观形貌图

Fig.3　The microstructure of rod with different ageing time

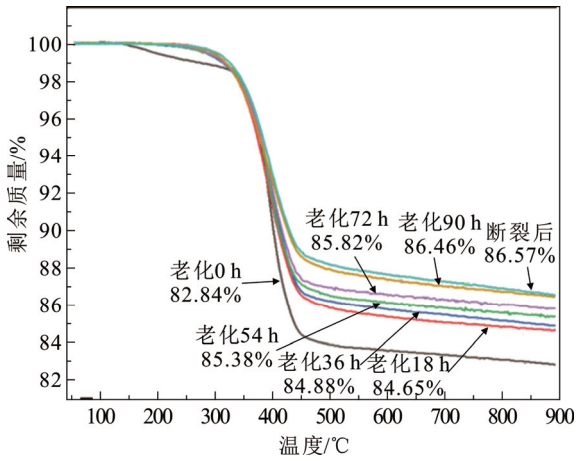


图 4　芯棒热失重测试图

Fig.4　Thermogravimetric test diagram of rod

现碎片和裂纹，玻纤环氧界面失效。玻纤表面出现裂纹，并出现大量断裂现象。

2.3　热失重分析

电-热-力老化样品热失重分析结果如图 4 所示，样品最终剩余质量标记在曲线上方。温度范围在 40~900 ℃热失重分析中，芯棒中环氧树脂逐步分解，最终剩余质量为玻璃纤维在样品中的含量。芯棒老化断裂后，由于部分环氧树脂老化降解，环氧树脂含量下降 3.73%。对比未老化样品，老化后样品环氧树脂含量均有不同程度下降。这是因为老化过程中部分环氧树脂分解，主要产物是 H_2O、CO_2、CH_4 等[24]。在电-热-力老化 18、36、54、72 和 90 h 后，芯棒环氧含量分别降为 15.35%、15.12%、14.62%、14.18%和 13.54%。说明随着老化应力种类增加，样品劣化速率加快。

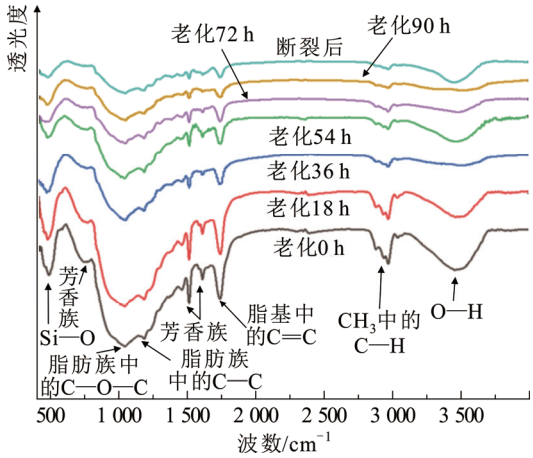


图 5　芯棒红外光谱图

Fig.5　Infrared spectrum of rod

2.4　红外光谱分析

电-热-力老化实验红外光谱分析结果如图 5 所示。对比未老化样品，电-热-力老化芯棒位于 2 920~2 970 cm^{-1} 的甲基，1 739 cm^{-1} 的酯基，832、1 510、1 611 cm^{-1} 的芳香族基团，1 041、1 182 cm^{-1} 的脂肪族基团，482 cm^{-1} 的 Si—O 键含量减少。其中，甲基、酯基、芳香族和脂肪族基团均是环氧树脂基体中官能团，电-热-力老化使芯棒环氧树脂基体降解，主链 C—O—C 和 C—C 断裂并产生苯酚，由于苯酚具有挥发性，造成基体内部苯环数量大量减少，老化过程中聚合物大分子逐渐降解。而饱和 C—H 在氧气作用下会发生分解反应，产生大量含羰基(C=O)的醛类、酮类、酸类挥发性小分子物质[25]。酯基是芯棒制作时添加固化剂和偶联剂中官能团，电热老化使酯基水解，生成羧酸和羟基，并使固化后的环氧树脂交联网络逐渐瓦解，环氧基体与玻璃纤维界面结构出现劣化。Si—O 键主要来源于芯棒玻璃纤维，电-热-力老化使玻璃纤维发生损伤，环氧基体与玻璃纤维界面结构出现劣化，与 SEM 结果一致。

2.5　动态热机械分析

样品储能模量曲线如图 6 所示。随着测试温度增加，样品储能模量曲线不断下降，这是因为温度越高，高分子链段运动松弛时间越短，因弹性形变储存能量越少。随着电-热-力老化时间增加，芯棒储能模量均呈现下降趋势，这是因为芯棒中基体破坏和玻纤-环氧界面失效，聚合物内发生分子链滑脱和化学键断裂，主链断裂成大量小分子结构，分子链段在外力作用下储存弹性能更少，芯棒储能模量降低。

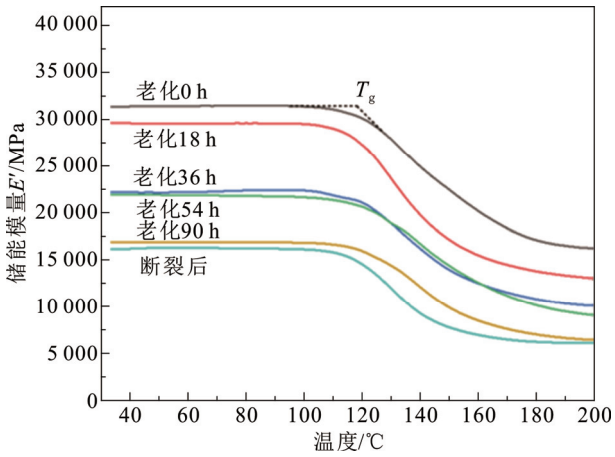


图 6 芯棒储能模量曲线

Fig.6 Energy storage modulus curve of rod

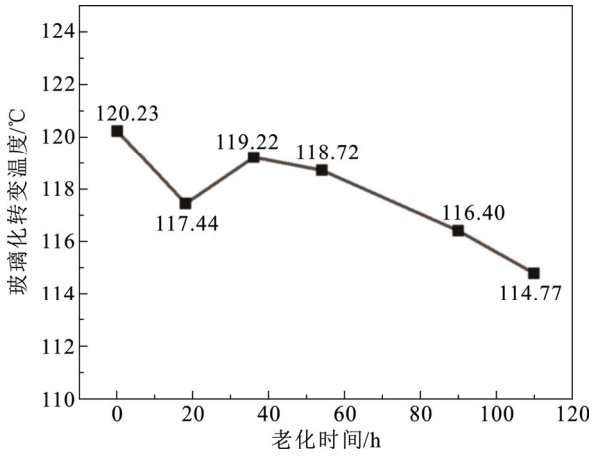


图 7 试样玻璃化转变温度 T_g 随老化时间变化曲线

Fig.7 Curve of glass transition temperature T_g with aging time

在储能模量曲线上作平稳段和下降段切线，切线交点处温度即为试样玻璃化转变温度 T_g [26]，样品玻璃化转变温度 T_g 随老化时间变化如图 7 所示。随着老化时间增加，两种试样玻璃化转变温度呈降低趋势。这是因为芯棒中环氧基体破坏和玻纤-环氧界面失效，聚合物内发生分子链滑脱和化学键断裂，分子链受到束缚减少，聚合物仅需更低温度就能完成从玻璃态到高弹态的松弛过程。

3 电-热-力老化寿命模型

3.1 模型建立

考虑到电-热-力多老化应力对芯棒协同作用下聚合物的微观应变状态与微观形貌下观察到的对应环氧劣化损伤，本文提出将芯棒材料内部微孔洞在电-热-力老化应力下内部电荷能量变化作为评估依据，推导构建复合绝缘子芯棒电-热-力老化寿命模型。假设老化过程是一个氧化化学反应，包含老化前状态和老化后状态，两种状态对应吉布斯自由能分别为 G_1 和 G_2[27]。热应力作用下，绝缘材料内部孔洞扩大，在电热联合作用时，电荷能量和热能同时存储在孔洞中，同样使孔洞扩大。热应力作用下孔洞应变 δ_T、孔洞电荷能量密度 w_{em} 和每基团电荷能量 W_{em} 表达式分别如式(1)、(2)和(3)所示[27]。

$$\delta_T=\sqrt{\frac{2kTN_m}{KB\exp(\frac{\Delta}{kT})N_c}}\frac{1+\exp(\frac{\Delta}{kT})}{4\pi r_0^2\lambda} \tag{1}$$

$$w_{em}=\frac{1}{2}\sigma_{em}\delta_T \tag{2}$$

$$W_{em}=\frac{\alpha\delta_T\lambda\pi r_0^2E_l^2}{N_m} \tag{3}$$

式中：N_c 是立方米孔洞数量；N_m 是每孔洞中基团数量；r_0 为孔洞半径；λ 为孔洞壳层厚度；K 是体积模量；B 是比例系数；Δ 是反应物和生成物自由能之差，$\Delta=G_2-G_1$；k 是玻耳兹曼常数，$k=1.38\times10^{-23}$ J/K；T 是温度，K；σ_{em} 为局部电荷应力；E_l 为孔洞局部电场；α 是电致伸缩系数。

在电热老化基础上增加机械应力时，电-热-力协同作用使孔洞扩大，电-热-力联合老化示意图如图 8 所示。

热应力作用下孔洞扩大，孔洞半径与孔洞应变关系有[27]：

$$R_T=r_0(1+\delta_T) \tag{4}$$

式中：R_T 是热应力作用下孔洞半径；δ_T 是热应力作用下孔洞应变。在机械应力单独作用时，孔洞被拉伸为椭圆形，孔洞半径与孔洞应变关系有：

$$R_F=r_0(1+\delta_F) \tag{5}$$

式中：R_F 是机械应力作用下孔洞半径；δ_F 是机械应力作用下孔洞应变。热力联合作用下，孔洞半径和应变有如下关系式：

$$R_{T,F}=r_0(1+\delta_T)(1+\delta_F) \tag{6}$$

$$\delta_0(F,T)=\frac{R_{T,F}}{r_0}-1=\delta_F+\delta_T+\delta_F\delta_T \tag{7}$$

材料在机械力作用下，应力和应变具有如下关系式[28]：

$$\delta_F=\frac{\sigma}{Y} \tag{8}$$

式中：σ 是孔洞应力；Y 为材料拉伸模量。孔洞应力 σ 和样品所受机械力与截面面积有关，拉伸模量

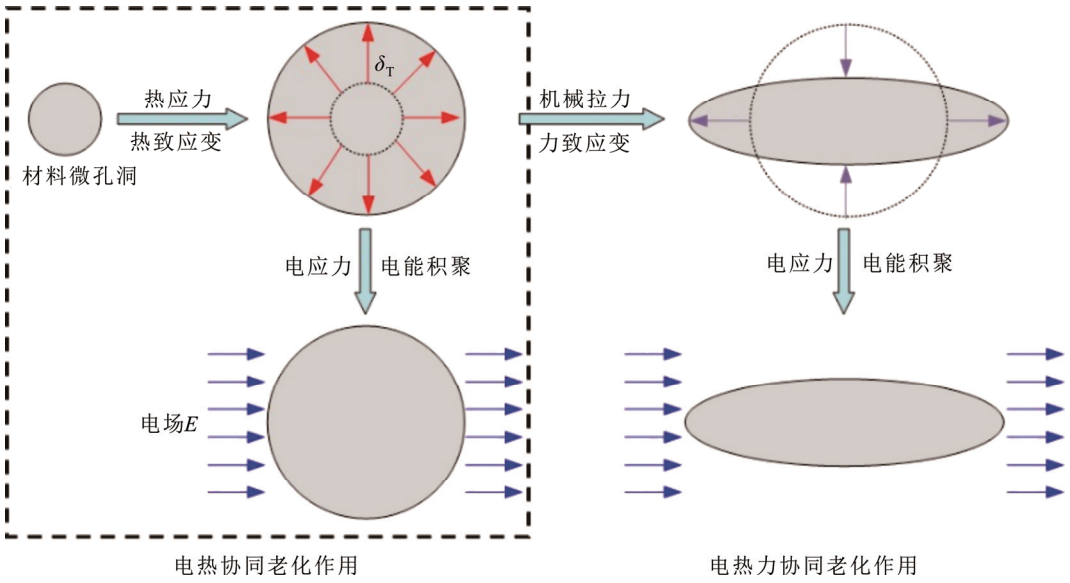


图 8　电-热-力联合老化孔洞扩大示意图

Fig.8　Schematic diagram of hole expansion of mechanical-electro-thermal combined aging

Y 是和温度相关物性参数，通过 DMA 直接测量不同温度下材料拉伸模量，因此 δ_F 和外加机械力、截面面积和温度有关。由式(1)可知，热应力作用下孔洞应变和体积模量 K 相关。δ_0 反映了外加热场和力场耦合关系，孔洞总应变包含基于体积模量的热应变和基于杨氏模量的拉伸应变。

在热力耦合基础上，施加与机械力相同方向电场，电场作用下孔洞应变很小，可忽略不计。基于孔洞总应变的材料内部电荷能量可以表示为：

$$W_{\mathrm{em}}(F,E,T)=\frac{\alpha\lambda\pi r_0^2}{N_{\mathrm{m}}}\cdot\delta_0(F,T)\cdot E_{\mathrm{l}}^2 \tag{9}$$

式中：E_{l} 为单个孔洞平均场强；α 是电致伸缩系数，取 9.8×10^{-8} N/(m·V^2)[29]。以芯棒完全断裂为寿命终结标志，可得到孔洞电荷能量 W_{em} 与老化时间的关系。

通过电-热-力老化样品 DMA 拉伸模式测试，得到实验温度(180 ℃)储能模量，作为拉伸模量 Y，根据下式计算样品体积弹性模量 K[28]，式中 μ 为泊松比。

$$K=\frac{Y}{3(1-2\mu)} \tag{10}$$

为计算单个孔洞内壁电场分布，在 COMSOL 中建立有限元仿真模型。首先，计算孔洞机械应变 δ_F 和单个孔洞平均场强 E_{l}。力场仿真中，材料泊松比设置为 0.26，密度设置为 1.7 g/cm^3。计算得到的机械应力作为材料所受力场边界条件，得到孔洞机械应变 δ_F。在电场仿真中，材料介电常数设置为 6.6，为模拟电场无界域，建立人工边界到样品间距离远大于样品本身长度。将样品所加电压作为边界条件，得到样品劣化严重处的电场强度分布；最后，建立材料和内部球形孔洞模型，孔洞半径为 10 nm，样品劣化严重处的电场强度为材料所受电场边界条件，计算得到单个孔洞内壁电场分布。

为得到样品孔隙率，对电-热-力老化试样开展吸湿试验，试验前样品放入加热箱 80 ℃干燥 24 h，取出冷却至室温，在去离子水中充分浸泡后取出试样，擦干称量并记录吸水样品质量。利用密度计测量样品密度，孔隙率 F_{h} 可由下式给出：

$$F_{\mathrm{h}}=\frac{m_{\mathrm{x}}-m_{\mathrm{c}}}{m_{\mathrm{c}}/\rho} \tag{11}$$

式中：m_{x} 为吸水样品质量；m_{c} 为除水样品质量；ρ 为样品密度。将孔洞看作球体，假设每立方米孔洞数量为 N_{c}，根据下式计算孔洞半径。

$$r_0=\sqrt[3]{\frac{3F_{\mathrm{h}}}{4\pi N_{\mathrm{c}}}} \tag{12}$$

根据式(1)、(7)和(9)，计算热应力下孔洞应变 δ_T、热力作用下孔洞应变 δ_0 和孔洞电荷能量 W_{em}。根据文献[27]，反应物和生成物自由能之差 Δ 取 3.2×10^{-21} J，每立方米孔洞数量 N_{c} 取 2.39×10^{21}，假设孔洞中基团数量 N_{m} 为 1，孔洞壳层厚度 λ 取 0.1 nm，比例系数 B 取 1，计算结果如表 1 所示。芯棒完全断裂作为寿命终结标志，绘出孔洞电荷能量 W_{em} 与老化时间的关系，如图 9 所示。随着老化时间增加，芯棒内孔隙不断增多，储存电荷增加，孔洞电荷能量随之增大。

表 1 样品 Y、K、F_h、r_0、δ_T、δ_0、W_{em} 值

Table 1 Value of Y, K, F_h, r_0, δ_T, δ_0, W_{em} for the sample

样品	Y/MPa	K/MPa	F_h	r_0/nm	δ_T	δ_0	W_{em}/eV
老化 0 h	1 7037.48	14 197.90	0.003 5	7.04	0.64	0.65	0.125
老化 18 h	1 3734.11	11 445.09	0.004 0	7.38	0.65	0.66	0.14
老化 36 h	1 0755.33	8 962.78	0.010 0	10.03	0.39	0.41	0.16
老化 54 h	1 0101.40	8 417.83	0.005 4	8.16	0.61	0.63	0.164
老化 90 h	6 987.04	5 822.53	0.006 6	8.71	0.65	0.68	0.20
断裂(110 h)	6 206.92	5 172.43	0.007 4	9.05	0.64	0.67	0.21

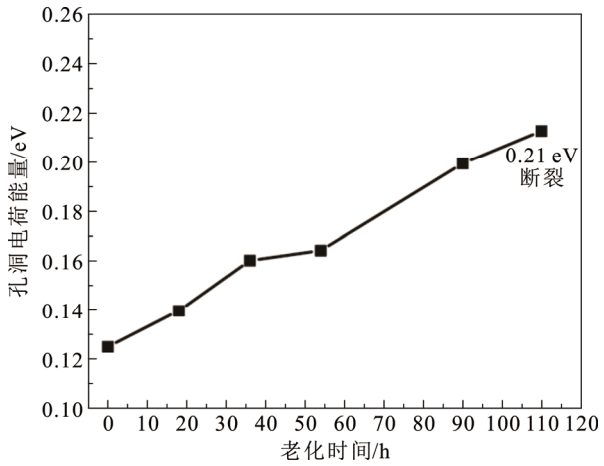


图 9 孔洞电荷能量与老化时间关系图

Fig.9 Relationship between charge energy of hole and aging time

3.2 实际运行样品对比分析

南方某电网公司提供了不同运行年限下复合绝缘子试样，详细信息列于表 2。其中编号 D 绝缘子在运行 17 年后出现酥朽断裂现象，如图 10 所示，芯棒表面可观察到明显电蚀痕迹和碳化通道。

基于上述电-热-力老化模型，同样计算了实际运行复合绝缘子芯棒的孔洞应变和电荷能量密度，结果如图 11 所示。A—E 试样孔洞电荷能量基本符合老化样品曲线变化规律，F 试样孔洞电荷能量远高于人工加速老化试样，这是因为酥朽劣化过程中，芯棒中环氧树脂受电蚀影响，出现了“气孔”和“气泡”现象，使得材料内部陷阱密度增加，电荷积聚从而引发孔洞电荷能量上升。在对实际运行复合绝缘子进行寿命评估时，建议将电-热-力老化断裂时的孔洞电荷能量(约为 0.21 eV)作为寿命终结判据。当孔洞电荷能量超过 0.21 eV 后，芯棒极易发生放电击穿而失效，F 试样击穿失效即为验证该情况的典型案例。

利用分段线性插值曲线建立芯棒孔洞电荷能量 W_{em} 随老化时间 t_1 的函数关系，$W_{em}=f(t_1)$，需建立老化时间 t_1 与实际运行时间 t_2 等效关系，确定参数使运行样品数据与曲线偏差最低。假设电-热-力老化时间 t_1 与实际运行时间 t_2 存在线性变换关系。

$$t_1 = a_t t_2 + b_t \tag{13}$$

式中：a_t 和 b_t 是待定参数。利用分段线性插值曲线建立芯棒孔洞电荷能量 W_{em} 随老化时间 t_1 的函数关系，则有：

$$W_{em} = f(t_1) = f(a_t t_2 + b_t) \tag{14}$$

将 A、B 和 C 试样数据代入关系式，求解线性方程组的最小二乘解，a_t=5.07，b_t= −4，计算得芯棒电-热-力老化断裂时间(110 h)等效为实际运行 22.5 年。这意味着 500 kV 复合绝缘子在不发生酥朽劣化、放电击穿等异常情况下，理论计算寿命为 22.5 年。

芯棒孔洞电荷能量作为自变量，老化时间作为因变量，作分段线性插值曲线，实际运行样品孔洞电荷能量代入插值曲线，如图 12 所示。A、B、C、D、E 试样等效电-热-力老化时间分别为 35.82、44.73、63.79、70.02 和 100.68 h，分别对应于 7.85 年、9.61 年、13.37 年、14.59 年和 20.65 年，同时计算出理论剩余寿命为 14.65 年、12.89 年、9.13 年、7.91 年和 1.85 年，计算结果见表 3。而对于 D 试样，由于酥朽劣化过程中孔洞电荷能量大于 0.21 eV，因此未达到理论寿命即发生放电击穿失效。本研究构建了电-热-力老化寿命模型，经验证符合实际运行复合绝缘子芯棒孔洞电荷能量数据，且可通过计算孔洞电荷能量，评估复合绝缘子芯棒理论剩余寿命。

表 2 实际运行复合绝缘子芯棒详细信息

Table 2 Actual operation of composite insulator rod details

试样编号	额定机械拉伸负荷/kN	额定电压/kV	服役时间/年	备注
A	160	500	8	
B	160	500	10	
C	160	500	13	
D	160	500	14	
E	160	500	19	
F	160	500	17	酥朽断裂

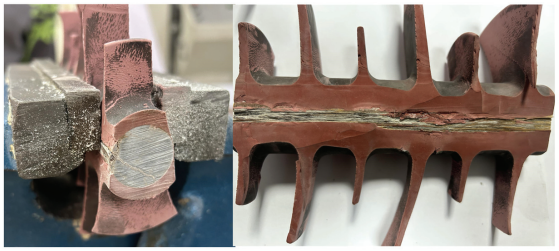


图 10 酥朽断裂复合绝缘子外观图

Fig.10 Appearance of decay-like fracture composite insulator

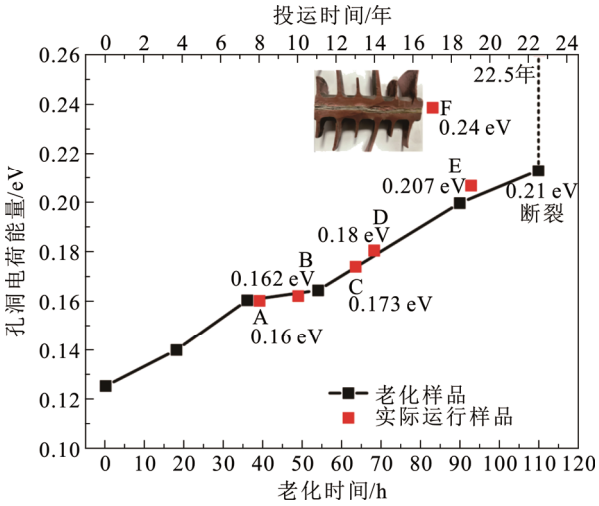


图 11　老化样品与实际运行样品孔洞电荷能量对比图

Fig.11　Comparison of hole charge and energy between aged sample and actual sample

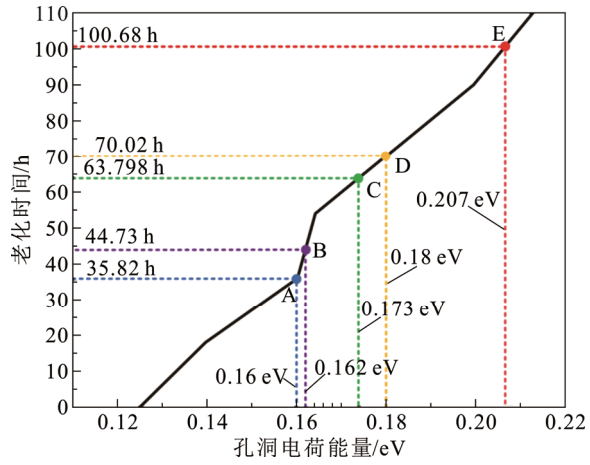


图 12　实际运行样品 A—E 理论剩余寿命计算图

Fig.12　Theoretical remaining life calculation diagram of actual running samples A—E

表 3　实际运行复合绝缘子芯棒理论剩余寿命计算值

Table 3　Theoretical remaining life of rod of composite insulator in actual operation

样品	W_{em}/eV	服役时间/年	等效电-热-力老化时间/h	计算运行时间/年	相对偏差率/%	理论剩余寿命/年
A	0.16	8	35.82	7.85	1.88	14.65
B	0.162	10	44.73	9.61	3.9	12.89
C	0.173	13	63.79	13.37	2.85	9.13
D	0.18	14	70.02	14.59	4.21	7.91
F	0.207	19	100.68	20.65	8.68	1.85

注：相对偏差率=|投入运行时间−计算运行时间|/计算运行时间×100%

4　高导热改性芯棒对比

本文和国内某复合绝缘子芯棒生产厂家合作制作了商用芯棒，并在文献[30]基础上，用相同的环氧/固化剂配方体系制作了多壁碳纳米管(MWCNTs)和氮化硼纳米片(BNNSs)改性芯棒。为对比复合绝缘子改性芯棒和传统芯棒的热管理性能，将直径 24 mm 芯棒切割为高 50 mm 柱状试样和厚 2 mm 片状试样，放置于加热台上，温度设置为 130 ℃，并利用红外热成像仪观察和记录试样表面温度。图 13 分别是柱状样品加热 2 min 和片状样品加热 30 s 及以内的红外热像图。加热开始时，试样底部温度接近 130 ℃，顶部温度接近室温，热量自下向上传导。随着加热时间增加，改性芯棒柱状试样相比传统芯棒展现出更高的导热速率。片状试样在加热 30 s 后，改性芯棒片状样品上表面温度已接近加热温度，而传统芯棒片状样品上表面和加热台仍有较大温差。这是因为 MWCNTs 和 BNNSs 在环氧树脂基体中形成了良好的导热网络并提高了声子传输效率，实现热量的快速传递，有效提升了芯棒导热系数。

针对传统芯棒和改性芯棒，开展电-热-力老化对比试验，计算了微观孔洞电荷能量(见图 4)。传统芯棒在实验进行 110 h 后断裂，改性芯棒在 143 h 后断裂，改性后样品断裂时间延长约 30%。随着老化时间增加，改性芯棒孔洞电荷能量始终小于传统芯棒，且改性试样曲线增长速率低于传统芯棒。相比于传统芯棒，改性芯棒断裂时间延长了 30%，断裂时电荷能量下降了 9.6%。这是由于高导热纳米改性芯棒具有更高的热扩散效率，出现异常发热时相较于普通芯棒实际稳态发热温度更低，将会导致更小的热应变和更低的孔洞电荷能量(见表 4)，有助于延长芯棒的老化寿命。

5　结论

1）构建了基于微观孔洞电荷能量的电-热-力老化寿命模型，通过计算电-热-力作用下孔洞总应变和电荷能量，量化评估了复合绝缘子芯棒的理论剩余服役寿命，其中芯棒断裂时的孔洞电荷能量(约为 0.21 eV)可作为寿命终结判据。

2）基于老化寿命模型计算不同年限的在运复合绝缘子芯棒孔洞电荷能量数据，建立了电-热-力人工加速老化试样和实际运行试样理论寿命的映射

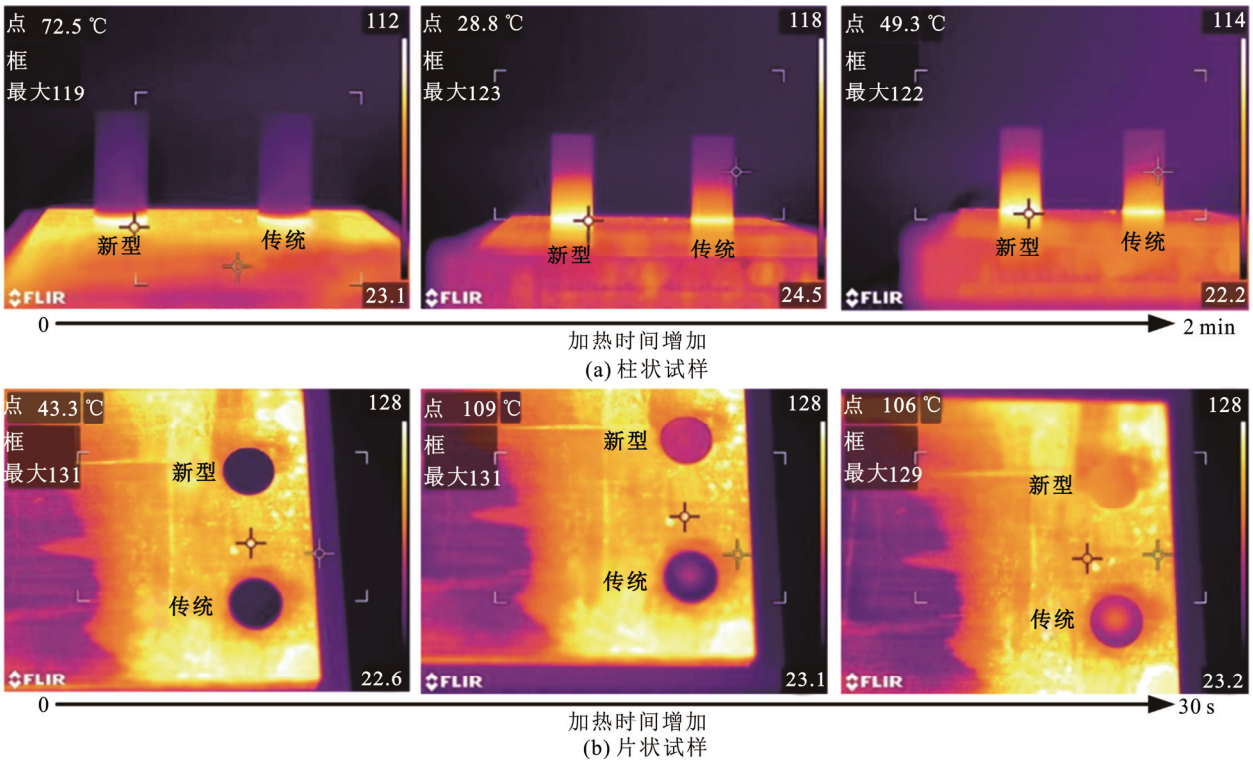


图 13 试样红外热成像图

Fig.13 Infrared thermal imaging of sample

表 4 改性芯棒样品 Y、K、F_h、r_0、δ_T、δ_0、W_{em} 值

Table 4 Value of Y, K, F_h, r_0, δ_T, δ_0, and W_{em} of modified rod sample

样品	Y/MPa	K/MPa	F_h	r_0/nm	δ_T	δ_0	W_{em}/eV
老化 0 h	21 084.39	17 570.33	0.005 070	7.97	0.437 8	0.445 2	0.110
老化 18 h	17 048.13	14 206.78	0.005 119	8.00	0.483 8	0.493 2	0.123
老化 36 h	15 408.29	12 840.24	0.005 226	8.05	0.501 9	0.512 4	0.130
老化 54 h	12 692.56	10 577.13	0.004 587	7.71	0.603 2	0.616 9	0.143
老化 90 h	9 527.92	7 939.93	0.007 517	9.09	0.500 9	0.517 9	0.167
断裂(143 h)	7 370.10	6 141.75	0.011 660	10.52	0.425 0	0.445 9	0.192

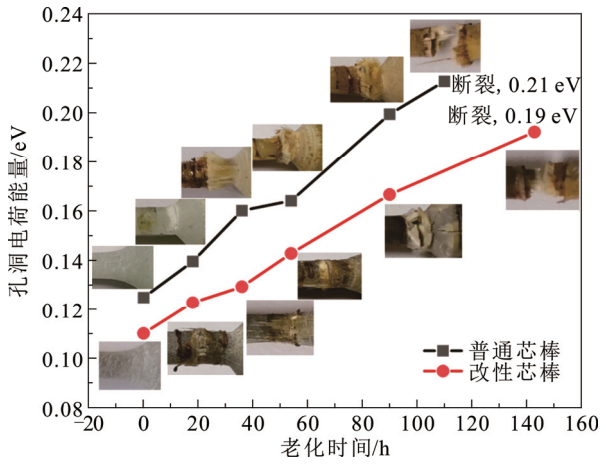


图 14 孔洞电荷能量对比图

Fig.14 Comparison diagram of hole charge energy

关系，理论寿命和实际运行寿命相对偏差在 8.68%以内，模型可以有效评估在运复合绝缘子理论剩余寿命与断裂失效预测。

3）相较于传统芯棒，通过 MWCNTs 和 BNNSs 纳米填料填充改性的高导热芯棒在相同电-热-力老化时间下热应变更低，微观结构破坏程度更弱，断裂失效时间延长约 30%，且断裂时孔洞电荷能量下降了 9.6%。

参考文献 References

[1] GAO Y F, LIANG X D, LU Y, et al. Comparative investigation on fracture of suspension high voltage composite insulators: a review—part I: fracture morphology characteristics[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2021, 37(3): 7-17.

[2] 张文亮，于永清，李光范，等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报，2007，27(22)：1-7.
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.

[3] 赵浩然，李　特，韦立富，等. 一起 500 kV 沿海线路复合绝缘子异常发热原因分析[J]. 电瓷避雷器，2023(2)：172-179.
ZHAO Haoran, LI Te, WEI Lifu, et al. Abnormal heating of composite insulators in a 500 kV coastal transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 172-179.

[4] 郑武略，苏国磊，陈　艺，等. ±800 kV 楚穗直流线路复合绝缘子局部温升与缺陷等级研究[J]. 电瓷避雷器，2021(1)：226-233.
ZHENG Wulue, SU Guolei, CHEN Yi, et al. Local temperature rise and defect grade of composite insulators for ±800 kV Chusui DC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 226-233.

[5] 文　龙，李　特，赵浩然，等. 220 kV 沿海线路复合绝缘子异常发热问题原因分析[J]. 电工技术，2023(21)：210-213.
WEN Long, LI Te, ZHAO Haoran, et al. Analysis of abnormal temperature rise of 220 kV composite insulators occurred in coastal transmission line[J]. Electric Engineering, 2023(21): 210-213.

[6] YUAN Z K, TU Y P, JIANG H, et al. Study on heating mechanism of GRP rod in a composite insulator[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(1): 108-113.

[7] 卢　明，刘泽辉，张中浩，等. 复合绝缘子异常发热实验室模拟及机理研究[J]. 智慧电力，2019，47(1)：66-71.
LU Ming, LIU Zehui, ZHANG Zhonghao, et al. Laboratory simulation and mechanism study on abnormal heating of composite insulator[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 66-71.

[8] 卢　明，高　超，张世尧，等. 复合绝缘子早期酥朽故障诊断及异常发热机理研究[J]. 电瓷避雷器，2022(2)：205-212.
LU Ming, GAO Chao, ZHANG Shiyao, et al. Early decay-like aging diagnosis and mechanism of abnormal temperature rise of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 205-212.

[9] 吴旭翔，朱其杰，李　特，等. 一起 500 kV 线路复合绝缘子发热缺陷分析[J]. 电工电气，2023(10)：36-41.
WU Xuxiang, ZHU Qijie, LI Te, et al. Analysis of the composite insulator heating of 500 kV line[J]. Electrotechnics Electric, 2023(10): 36-41.

[10] 董冰冰，宋家乐，李　特，等. 强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性[J]. 高电压技术，2023，49(2)：525-535.
DONG Bingbing, SONG Jiale, LI Te, et al. Lightning impulse arc development process and flashover characteristics of 110 kV SIR insulators under heavy rainstorms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 525-535.

[11] 谢从珍，苟　彬，李　煜，等. 界面缺陷加速高温硫化硅橡胶在酸热环境下的老化开裂研究[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1907-1916.
XIE Congzhen, GOU Bin, LI Yu, et al. Research on aging and cracking of high temperature vulcanized silicone rubber accelerated by interfacial defects in acid-heat environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1907-1916.

[12] 刘智鹏，魏　来，李庆民，等. GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制[J]. 高电压技术，2024，50(1)：359-369.
LIU Zhipeng, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Defects evolution process and mechanism of discharge embrittlement of GIL post insulator inserts and epoxy interface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 359-369.

[13] 彭雅楠，李文栋，曾世胤，等. 界面湿放电下护套 ATH 填料析出对绝缘子芯棒酥朽老化的影响[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1673-1683.
PENG Yanan, LI Wendong, ZENG Shiyin, et al. Effect of HTV housing ATH filler precipitation on decay-like aging of FRP core rod under interfacial wet discharge condition[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1673-1683.

[14] 冯昌辉. 玻璃纤维增强环氧树脂绝缘材料老化特性及影响因素研究[D]. 保定：华北电力大学，2021.
FENG Changhui. Study on the aging characteristics and influencing factors of glass fiber reinforced epoxy resin insulation materials[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2021.

[15] 布新月. 复合绝缘子酥朽断裂中芯棒的热老化研究[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
BU Xinyue. Study on the thermal aging of the core rod in the rotten and fractured composite insulator[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[16] 贲　成. 基于多维联合分析的环氧树脂材料电老化特性研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
BEN Cheng. Study on the electrical aging properties of epoxy resin based on multidimensional joint analysis[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.

[17] 沈　浩. 复合绝缘子酥朽断裂中芯棒环氧树脂降解机理探究[D]. 济南：山东大学，2020.
SHEN Hao. Study on the decay-like degradation mechanism of epoxy resin in the core rod of composite insulator[D]. Jinan, China: Shandong University, 2020.

[18] 曾磊磊. 复合绝缘子异常发热及湿热老化特性研究[D]. 广州：华南理工大学，2019.
ZENG Leilei. Study on abnormal heating and hygrothermal aging characteristics of composite insulators[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2019.

[19] 袁之康. 高湿环境下复合绝缘子材料劣化特性及机理[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2019.
YUAN Zhikang. Deterioration characteristics and mechanism of materials in composite insulator under high humidity[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.

[20] 赵永飞. 湿热条件下复合绝缘子芯棒劣化特性研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2018.
ZHAO Yongfei. Study on the degradation characteristics of the core of composite insulators under hygrothermal environment[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2018.

[21] 高岩峰，梁曦东. 复合绝缘子酥朽断裂研究(二)：酥朽断裂的试验模拟及预防措施讨论[J]. 中国电机工程学报，2016，36(18)：5070-5077.
GAO Yanfeng, LIANG Xidong. Study on decay-like fracture of composite insulator, part Ⅱ: experimental simulation and preventive method discussion of decay-like fracture[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 5070-5077.

[22] 钟　正. 高湿环境下复合绝缘子芯棒酥朽劣化机制及温升特性研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2022.
ZHONG Zheng. Research on decay-like deterioration mechanism and temperature rise characteristics of composite insulator rod under high humidity[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022.

[23] XU H S, XIE C Z, GOU B, et al. Reappearance of typical characteristics of FRP core rods in the decay-like fracture insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1449-1456.

[24] 刁智俊，赵跃民，陈　博，等. 印刷电路板中环氧树脂热解的 ReaxFF 反应动力学模拟[J]. 化学学报，2012，70(19)：2037-2044.
DIAO Zhijun, ZHAO Yuemin, CHEN Bo, et al. Thermal decomposi-

tion of epoxy resin contained in printed circuit boards from reactive dynamics using the ReaxFF reactive force field[J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70(19): 2037-2044.

[25] 谢 伟，杨 征，程 显，等. 环氧树脂材料热氧老化特性研究[J]. 电工技术学报，2020，35(20)：4397-4404.
XIE Wei, YANG Zheng, CHENG Xian, et al. Study on thermo-oxygen aging characteristics of epoxy resin material[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4397-4404.

[26] 思代春，李 佳，王海峰，等. 高聚物玻璃化转变温度的测量技术[J]. 计量技术，2019(7)：76-79.
SI Daichun, LI Jia, WANG Haifeng, et al. Glass transition temperature measurement of polymers[J]. Measurement Technique, 2019(7): 76-79.

[27] MAZZANTI G, MONTANARI G C, DISSADO L A. Elemental strain and trapped space charge in thermoelectrical aging of insulating materials: life modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 966-971.

[28] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京：高等教育出版社，2009.
LIU Hongwen. Mechanics of materials[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2009.

[29] 朱治文. 聚偏氟乙烯基聚合物的电致伸缩和压电机理及其结构与性能的关系研究[D]. 广州：华南理工大学，2021.
ZHU Zhiwen. Study on the electrostrictive and piezoelectric mechanisms and structure-properties relationship in poly(vinylidene fluoride)-based polymers[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2021.

[30] WANG R, XIE C Z, LUO S K, et al. Preparation and properties of MWCNTs-BNNSs/epoxy composites with high thermal conductivity and low dielectric loss[J]. Materials Today Communications, 2020, 24: 100985.



谢从珍(通信作者)
1973—，女，博士，教授，博导
主要从事输电线路绝缘材料开发及缺陷诊断、输变电设备在线监测及大数据方面的研究工作
E-mail: congzhen168@163.com

XIE Congzhen
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2024-11-26 在线出版日期 2025-04-23 编辑 曹昭君