

# 复合绝缘子芯棒电热力协同老化与断裂失效机理

谢从珍, 杨 畅, 徐华松, 苟 彬, 李 煜

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

**摘 要:**复合绝缘子被广泛应用于输电线路中,但其老化与断裂问题不容忽视。为研究复合绝缘子断裂故障成因和电热力老化机理,设计了电热力老化试验平台,对复合绝缘子芯棒短样进行多场耦合老化试验。结果表明:老化绝缘子芯棒样品出现了断裂现象。芯棒断裂过程中,宏观特征表现为裂纹和断裂面的扩大、高压电极附近出现放电痕迹等;微观特征表现为环氧分解、玻纤出现微裂纹并断裂、玻纤-环氧界面失效等。同时,依据单元断开率建立了电热力多场耦合断裂失效评估模型,揭示了单元断开率与能量势垒的反比关系。在给定的电、热和机械应力条件下,该模型可根据断裂面积比率实现复合绝缘子芯棒老化程度评估,能够为多应力协同作用下的复合绝缘子芯棒老化失效分析提供参考。

**关键词:**复合绝缘子;玻璃钢芯棒;断裂;协同效应;多场老化;老化机制

## Mechanical-electro-thermal coupling ageing and fracture failure mechanism of composite insulator rods

XIE Congzhen, YANG Chang, XU Huasong, GOU Bin, LI Yu

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Composite insulators are widely used in transmission lines, but their ageing and fracture problems cannot be ignored. In order to study the cause of fracture of composite insulators and the mechanism of mechanical-electro-thermal ageing, a mechanical-electro-thermal ageing experiment platform was designed to carry out multi-field coupling ageing tests on short rod samples of composite insulators. The results show that the ageing insulator rod sample has fracture phenomenon. During the process of rod fracture, the macroscopic characteristics are the expansion of crack and fracture surface, and there are discharge marks near the high-voltage electrode. The microscopic characteristics are epoxy decomposition, glass fiber microcrack and fracture, and fiber-epoxy interface failure. At the same time, a multi-field fracture failure evaluation model of mechanical-electro-thermal coupling is established based on the unit break rate, and the inverse relationship between the unit break rate and the energy barrier is revealed. Under the given electrical, thermal, and mechanical stress conditions, the model can evaluate the ageing degree of composite insulator rod according to the ratio of fracture area, and can provide a reference for the ageing failure analysis of composite insulator rod under the synergistic action of multiple stresses.

**Key words:** composite insulator; FRP rod; fracture; synergistic effect; multi-field ageing; ageing mechanism

## 0 引言

复合绝缘子因具有质量轻、抗污闪性能优异和机械强度高优点,被广泛应用于高压输电线路中<sup>[1-3]</sup>。截止 2021 年 5 月,国网 66 kV 及以上交直流线路中复合绝缘子用量已多达 1 005 万支<sup>[4]</sup>。但复合绝缘子在长期运行过程中,受电场、温度、湿度等多种老化因素影响,电气性能和力学性能会下降,严重时性能会失效引发线路故障。其中,由复合绝

缘子芯棒断裂引发的故障,是最严重的故障形式之一。2018 年 3 月 4 日,浙江 220 kV 输电线路中棒形悬式复合绝缘子发生芯棒断裂事故<sup>[5]</sup>;2018 年 6 月 21 日,广东 500 kV 架空输电线路双联绝缘子串发生单侧芯棒断裂事故<sup>[6]</sup>。复合绝缘子芯棒断裂事故严重影响电力系统的安全稳定运行。

复合绝缘子芯棒断裂类型主要分为机械断裂、脆性断裂和酥朽断裂 3 种类型。机械断裂的成因是芯棒受到超出机械强度的拉力,其断裂面呈阶梯状或扫帚状<sup>[7]</sup>。脆性断裂成因是芯棒在承担运行负荷

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977084)。

时,受到电晕放电、臭氧和水分形成的硝酸腐蚀<sup>[8]</sup>,采用耐酸芯棒可抑制脆性断裂事故的发生<sup>[9]</sup>。酥朽断裂是指在受潮、酸性介质、局部放电、泄漏电流及机械拉力等共同作用下芯棒产生的异常断裂现象<sup>[10]</sup>。芯棒酥朽劣化的复现研究包括受潮条件下电蚀的方法<sup>[11]</sup>和高温、酸浸条件下电蚀的方法<sup>[12]</sup>。此外,有学者还分析了芯棒的疲劳断裂特性<sup>[13]</sup>。

目前的热老化试验、电老化试验和湿热老化试验结果表明<sup>[13-15]</sup>,芯棒老化导致环氧树脂分解和玻璃纤维劣化。电老化后芯棒的电导电流数值增大。随着湿热老化时间的增加,芯棒复介电常数实部 $\epsilon'$ 和介质损耗因数 $\tan\delta$ 逐渐增大。但实际运行中芯棒受到的老化应力种类远多于现有的老化模拟试验,王有元等<sup>[17]</sup>研究指出,绝缘材料多应力老化具有协同效应,多应力同时作用时的老化速度显著快于多个单应力的代数叠加。目前关于多应力老化协同效应的研究较少,芯棒正常运行时主要承受电应力、热应力和机械应力作用。因此,探究电热力老化因素的协同效应,有助于掌握芯棒老化规律及评估运行状态。

为探究复合绝缘子芯棒的多应力老化机理,本文对芯棒样品开展热老化、电热老化和电热力加速老化试验,并对样品进行扫描电子显微镜测试、热失重分析和红外光谱分析,对比老化前后样品宏观和微观测试结果,研究电、热、机械应力协同效应,提出电热力断裂失效评估模型。

## 1 试验

### 1.1 样品制备

本文选用的复合绝缘子芯棒以双酚A型环氧树脂为基体,玻璃纤维为增强材料,并添加少量的固化剂和偶联剂拉挤成型,其中玻璃纤维质量分数为80%~85%,环氧树脂质量分数为15%~20%。将芯棒切割制成哑铃型样品,样品中间直径为3.5 mm、长度为50 mm,两端直径为9 mm,样品总长为300 mm。

将相同的芯棒切割成直径为3.5 mm、长度为50 mm的圆柱状样品,作为热老化和电热老化样品。电热力老化样品的中间段可与热老化、电热老化样品进行对比分析,如图1所示。

### 1.2 老化试验

#### 1.2.1 老化试验平台

电热力老化试验平台示意图和实物图如图2所

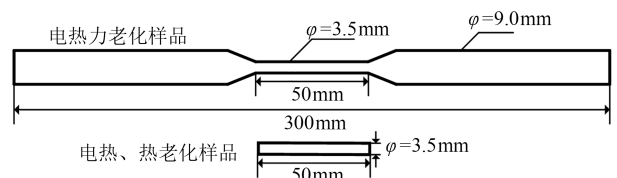
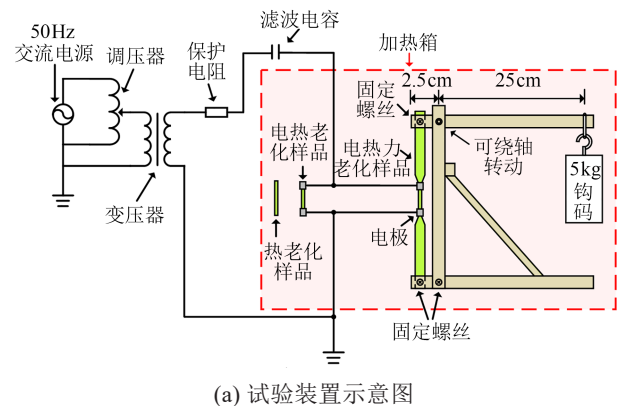


图1 老化样品示意图

Fig.1 Diagram of ageing sample



(a) 试验装置示意图



(b) 老化箱实物图

图2 老化试验平台

Fig.2 Ageing test platform

示。电热力老化试验平台由烘箱、50 Hz交流电源、调压器、变压器、机械加载装置和钩码组成,烘箱内壁为绝缘垫。老化试验平台内同时放置热老化、电热老化和电热力老化样品。为实现电应力、热应力和机械应力的同步施加,本文在已有的电热老化试验平台基础上,加入机械装置,机械装置放在烘箱内部。由于复合绝缘子芯棒的机械强度高,采用杠杆结构放大机械力。为了避免样品滑脱,也为了在不改变老化方式的同时尽可能加快老化速度,本文将样品设计成哑铃型,使样品较小的截面能受到最大的压强。哑铃状样品的中间段两端固定电极,样品位于电极中间的部分即受电、热和机械应力的共

同作用。

### 1.2.2 老化试验方案

老化试验平台烘箱温度设置为 $180^{\circ}\text{C}$ ，样品两端施加电压为 $7.5\text{ kV}$ ，所用钩码质量为 $5\text{ kg}$ ，机械装置左右力臂比为 $1:10$ 。将样品放入老化试验平台中，定期取出电热力老化样品观察其劣化程度并记录。在电热力老化样品完全断裂时，同时取出热老化和电热老化样品。在试验中发现，芯棒试样在电热力老化 $240\text{ h}$ 后断裂，因此热老化和电热老化样品取样时间同样是 $240\text{ h}$ 。

为探究芯棒电热力老化程度随时间的变化规律，用相同的条件重复上述试验，间隔 $80\text{ h}$ 取样，得到电热力老化 $0\text{ h}$ （新试样）、 $80\text{ h}$ 和 $160\text{ h}$ 的样品。

介质热老化速率与温度的关系可以用 Arrhenius 方程描述<sup>[18]</sup>，如式(1)所示。

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

式(1)中： $k$ 为降解速率； $E_a$ 为材料的活化能； $R$ 为摩尔气体常数( $R=8.314\text{ mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )； $T$ 为温度； $A$ 为常数，与介质材料有关。

较高的试验温度，可在不改变老化机理的同时加快老化速度，更高效地探究复合绝缘子芯棒运行年限内的老化过程。

拉伸强度 $\sigma$ 可以由试验条件计算得到。设 $F$ 为施加的机械应力， $S$ 为样品截面面积， $m$ 为钩码质量， $g=9.8\text{ N/kg}$ ， $l$ 为机械装置力臂比， $r$ 为样品截面半径，则 $\sigma = F/S = mgl/\pi r^2 = 5.09 \times 10^7\text{ Pa}$ 。

为计算电热力老化试验中样品所受的电场强度，本文在 Comsol 中建立电热力老化样品的有限元仿真模型，材料介电常数设定为 $6.6^{[16]}$ 。为模拟电场的无界域，建立的人工边界到样品间的距离远大于样品本身长度。样品电场强度仿真结果如图3所示，距离低压端越远，电场强度越大，在高压电极附近（距离低压端约为 $50\text{ mm}$ ）电场畸变严重，电场强度达到最大值，为 $3.892\text{ kV/mm}$ ，这是因为样品在高压电极周围的形状不规则所致。

### 1.3 老化特性测试

#### 1.3.1 微观形貌(SEM)分析

为分析不同老化条件下样品的微观形貌，采用 Merlin 型场发射扫描电子显微镜进行测试。

#### 1.3.2 热失重(TG)分析

为分析老化样品的热稳定性，在图4位置取约 $50\text{ mg}$ 粉末，采用 TG209F1 型热重分析仪进行热失

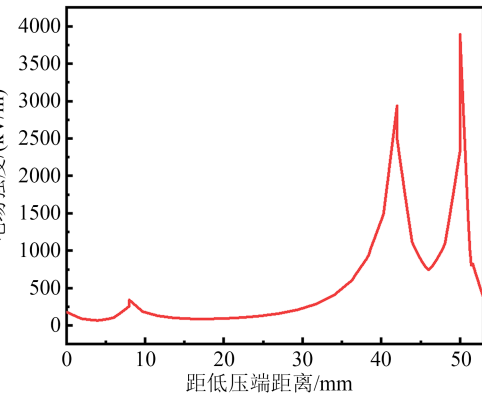
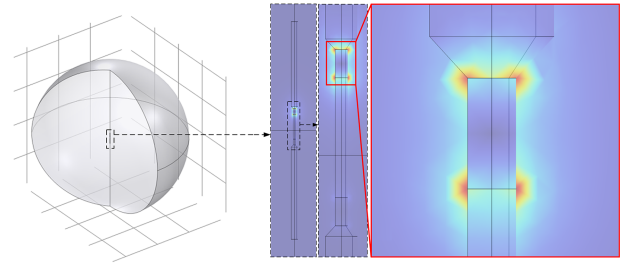


图3 电热力老化样品端部电场仿真结果

Fig.3 Electric field simulation results of sample end in the mechanical-electro-thermal ageing test

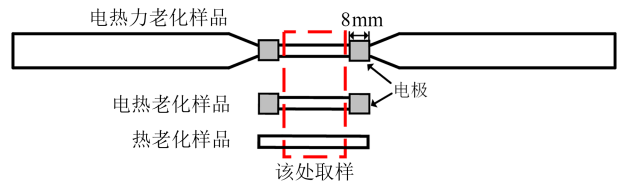


图4 取样位置示意图

Fig.4 Diagram of sampling location

重测试，升温速率为 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，介质气氛为氮气，测试温度为 $40\sim 900^{\circ}\text{C}$ 。

#### 1.3.3 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

为分析老化样品官能团含量，在图4位置取约 $30\text{ mg}$ 粉末，采用 Nicolet IS50-Nicolet Continuum 型傅里叶变换红外光谱仪进行测试，波数为 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 外观形貌分析

电热力老化样品的外观形貌如图5所示。从图5可以看出，随着老化时间的增加，芯棒表面颜色逐渐加深。对比低压侧，高压电极附近出现褐黄色放电痕迹(图5(c)、5(d)、5(e)蓝色框位置)，说明由于高压电极周围的放电现象，放电处成为多种应力腐蚀的薄弱点而发生明显的劣化现象。而低压端电极周围电蚀现象不明显。

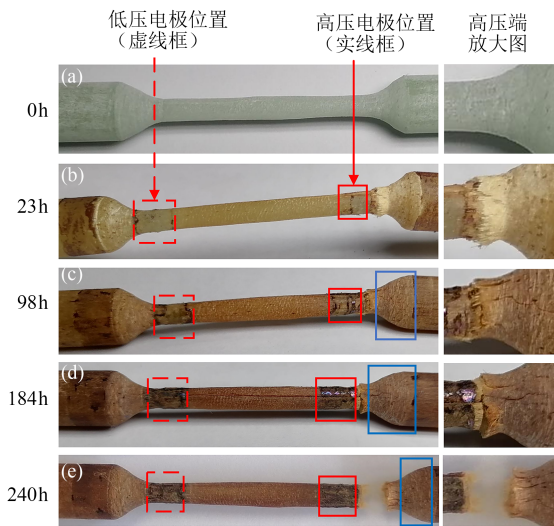


图5 电热力老化样品外观形貌图

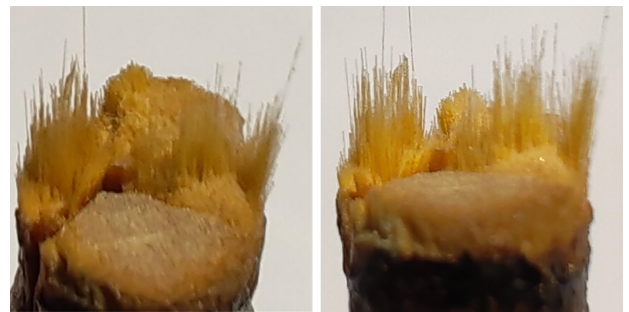
Fig.5 Appearance morphology of mechanical-electro-thermal ageing samples

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,机械应力更集中,且易发生电场畸变。随着老化应力的持续作用,芯棒起毛区域扩大,表面出现横向和纵向的细小裂纹,且出现尚未完全断裂的平面。这是因为环氧分解、玻纤断裂的过程逐渐向芯棒内部发展。当截面被完全破坏时,芯棒断裂。

图6(a)为电热力老化样品的断裂面外观图,图(b)为复合绝缘子运行断裂截面图<sup>[19]</sup>。由图6可知,老化后的芯棒断裂面可观察到明显的纵向裂纹,断口分为较平整的区域和不平整的区域。由于芯棒中的玻纤统一沿纵向排布,因此纵向裂纹的形成是由于玻纤环氧相互分离,玻纤-环氧界面被严重破坏。芯棒断口平整与否的差异是由于形成原因不同:若断面仅发生玻纤和环氧的破坏,裂纹仅横向扩大,形成的断口平整;若发生了玻纤-环氧界面的失效,裂纹沿纵向发展后再沿横向扩大,形成的断口则不平整<sup>[1]</sup>。老化样品断口的特征和文献[19]中的复合绝缘子运行断裂截面相似,说明电热力老化试验模拟了复合绝缘子芯棒断裂现象。

### 2.2 微观形貌(SEM)分析

对芯棒断裂面进行SEM测试,结果如图7所示。从图7(a)可以看出,老化前的样品,玻纤被包裹在环氧基体内,玻纤-环氧界面良好,样品中无明显裂纹。从图7(b)~(d)可以看出,电热力老化断裂的样品,出现玻纤脱粘、拔出和断裂现象,玻纤-环氧



(a) 电热力老化样品的断裂面外观



(b) 复合绝缘子运行断裂截面图<sup>[19]</sup>

图6 电热力老化样品断裂和运行断裂截面图

Fig.6 Fracture surface of mechanical-electro-thermal ageing samples and operating fracture section

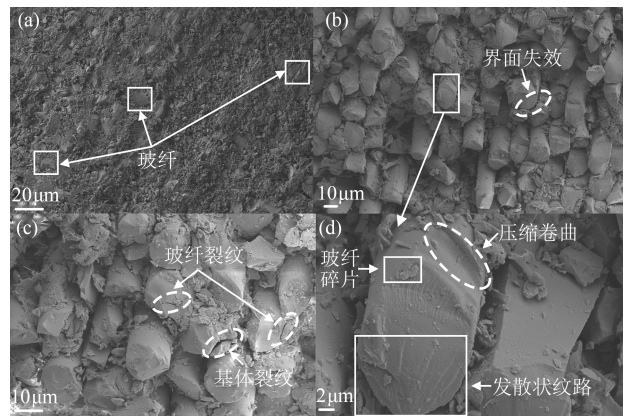


图7 老化前(a)及电热力老化断裂后样品(b)~(d)的截面SEM图

Fig.7 Fracture SEM images of samples before ageing(a) and after mechanical-electro-thermal ageing((b)~(d))

界面失效,环氧基体断裂分解,玻纤上附着大量基体碎片。同时,在玻纤和环氧基体处可观察到大量微裂纹,部分玻纤断面处可观察到压缩卷曲现象(如图7(d)所示),表明裂纹发展、玻纤断裂的过程中存在弯曲现象。玻璃纤维的断面无规律、不平整,说明玻纤主要是因为拉伸和弯曲的应力导致断裂。部分玻纤断面观察到发散状的纹路(如图7(d)所示),纹路起源于玻璃纤维断口边缘,说明单根玻璃纤维的断裂源于玻纤表面而非内部。

从图4取样处截取小块样品,观察其侧面的

SEM图如图8所示。从图8可以看出,老化前的样品,相邻玻纤中有环氧基体填充,玻纤-环氧界面良好。电热力老化断裂的样品,环氧基体断裂分解,出现碎片和裂纹,玻纤-环氧界面失效,玻纤表面出现裂纹(如图8(d)所示)和断裂现象。相同时间下的热老化和电热老化芯棒试样劣化现象表现为环氧劣化和玻纤-环氧界面脱粘,这是因为热应力和电热应力联合作用均能使环氧分解<sup>[17]</sup>。但热老化和电热老化样品仅有少量玻纤断裂,与电热力老化样品相比劣化程度较轻。

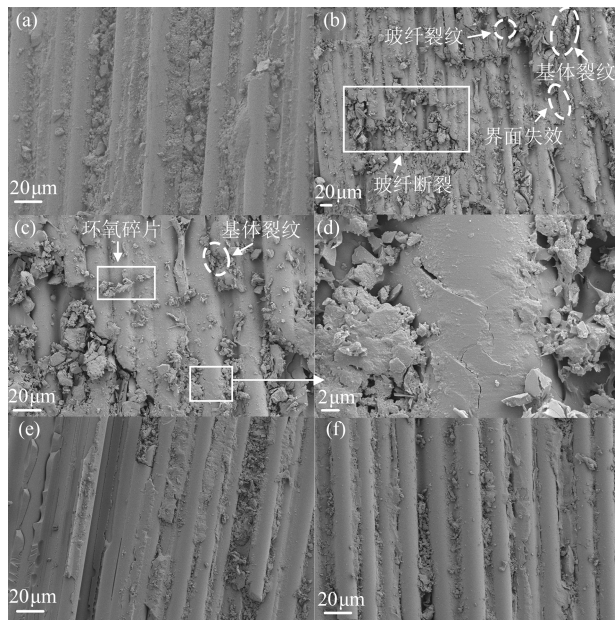


图8 老化前(a)、电热力老化断裂后(b)~(d)、电热老化(e)、热老化(f)的样品侧面SEM图

Fig.8 SEM images of sample before ageing(a), mechanical-electro-thermal aging after fracture(b)~(d), electrothermal ageing(e), and thermal ageing(f)

### 2.3 热失重(TG)分析

老化样品的热失重分析结果如图9所示,样品的最终残留率标记在曲线上方。从图9可以看出,在温度为40~900℃的热失重分析中,芯棒中的环氧树脂逐步分解,最终残留率为玻璃纤维在样品中的含量<sup>[10]</sup>。对比老化前样品,老化样品的环氧树脂含量均有不同程度的下降。这是因为在老化过程中部分环氧树脂分解,主要产物为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等<sup>[19]</sup>。随着老化时间的增加,环氧树脂分解量逐步增加。在相同老化时间下,热老化、电热老化和电热力老化后样品的环氧含量分别下降了2.96%、3.99%和5.74%,说明随着老化应力种类的增加,样品劣化速率加快。

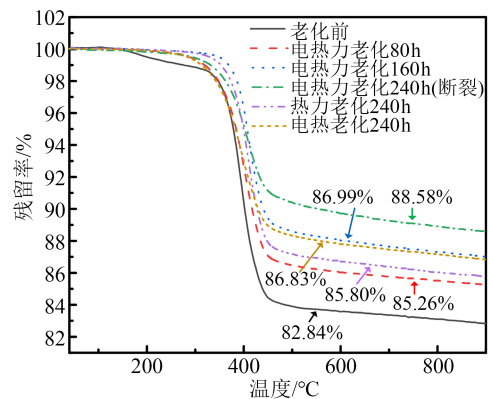


图9 老化样品的热失重分析曲线

Fig.9 TGA curves of ageing samples

### 2.4 红外光谱(FTIR)分析

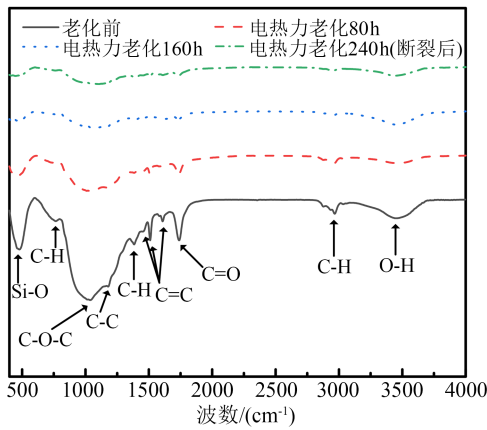
老化样品的红外光谱分析结果如图10所示,各特征峰对应的基团如表1所示。对比老化前样品,老化后的样品除羟基以外的基团特征峰强度均有不同程度的下降,说明老化样品出现特征基团的分解现象。随着电热力老化时间的增加,样品劣化程度逐渐加重。在老化时间相同时,随着老化应力种类增加,样品除羟基以外的基团特征峰强度逐渐下降,样品劣化速度逐渐增加。电热力老化机理分析如下:

(1)与未老化样品相比,电热力老化后的样品在位于1 380 cm<sup>-1</sup>处的C-H弯曲振动峰和位于2 850~3 000 cm<sup>-1</sup>处的C-H伸缩振动峰强度下降。这是因为饱和C-H键在氧气的作用下发生反应,产生大量醛类、酮类和酸类等易挥发性物质,造成C-H键数量减少<sup>[21]</sup>。

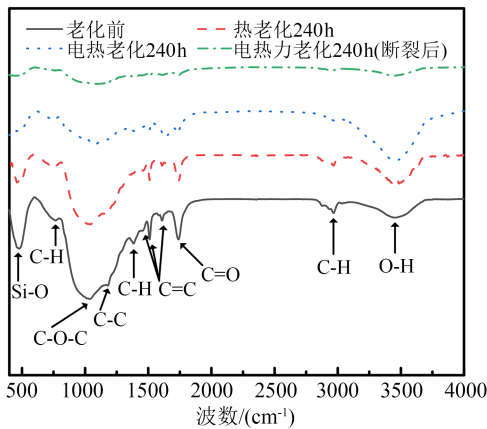
(2)电热力老化后,样品位于1 740 cm<sup>-1</sup>处的酯基中的C=O特征峰强度下降,表明芯棒在老化过程中酯基发生水解反应,生成羧酸和羟基<sup>[15]</sup>。环氧树脂固化过程中,酯基交联形成体型网状结构,说明电热力老化使环氧树脂的交联网络逐渐瓦解。

(3)电热力老化后,样品位于1 041 cm<sup>-1</sup>、1 182 cm<sup>-1</sup>处的特征峰强度下降,这是因为C-O-C和C-C键在热应力的作用下断裂,产生苯酚<sup>[21]</sup>。由于苯酚具有挥发性,造成基体内部苯环数量大幅减少,因此样品位于714、1 450、1 500、1 600 cm<sup>-1</sup>处的特征峰强度下降。C-O-C和C-C键构成环氧树脂主链,说明在老化过程中聚合物大分子逐渐降解。

(4)电热力老化后,样品位于480 cm<sup>-1</sup>处的Si-O特征峰强度下降,说明电热力老化使Si-O键断裂。Si-O键主要存在于芯棒的玻璃纤维中,说明电热力



(a) 电热力老化不同时间下



(b) 相同时间内不同老化应力下

图10 老化样品的红外光谱图

Fig.10 FTIR spectra of ageing samples

表1 老化样品特征峰对应的基团

Table 1 Characteristic FTIR absorption bands of ageing samples

特征基团	波数/(cm <sup>-1</sup> )
Si-O	480
芳香族中的C-H	714
芳香族(苯环)中的C=C	1 450, 1 500, 1 600
脂肪族中的C-O-C	1 041
脂肪族中的C-C	1 182
饱和C-H弯曲振动	1 380
酯基中的C=O	1 740
饱和C-H伸缩振动	2 850~3 000
O-H	3 200~3 700

老化使玻璃纤维受损,环氧基体与玻璃纤维界面结构出现劣化。

(5)电热力老化后,样品位于3 200~3 700 cm<sup>-1</sup>处的羟基特征峰强度上下波动。这是因为一方面,羟基氧化生成醛类、酮类和酸类,该反应会使羟基数量减少;另一方面,C-O-C和C-C键断裂生成的

对异丙基苯酚中包含羟基<sup>[21]</sup>,酯基水解的产物也包含羟基<sup>[15]</sup>,导致羟基数量增加。

### 3 电热力协同效应与断裂机理分析

芯棒仅受热应力作用时,羟基发生氧化反应,环氧主链断裂,产生大量陷阱和自由基。芯棒仅受电应力场作用时,电子由电极注入聚合物,陷阱俘获电子,入陷的电子与空穴复合释放大能量,其他电子吸收热量形成热电子,热电子破坏聚合物形成自由基。芯棒仅受机械应力作用时,拉力由同一方向的氢键、范德华力和化学键承担,聚合物内发生分子链的滑脱和化学键的断裂<sup>[22]</sup>,化学键的断裂产生自由基<sup>[23]</sup>。在电热联合老化过程中,热电子和自由基会破坏分子链,陷阱数量增加促使热电子数量进一步增加,加速破坏过程<sup>[17]</sup>。在电热老化的基础上增加机械应力时,自由基反应因机械应力的作用而加剧,电热力老化会在电热老化的基础上加速。

假设聚合物的老化过程都是单一反应,由老化前状态转化为老化后状态。老化前后状态的吉布斯自由能分别为 $G_1$ 和 $G_2$ ,聚合物的老化反应需要克服一定的能量势垒 $\Delta G$ ,如图11所示。当聚合物仅受热应力作用时,老化过程的转化速率加快,但 $G_1$ 和 $G_2$ 的值不发生变化。当聚合物被施加电应力和机械应力后,电能 $W_{em}$ 和机械能 $W_m$ 存储在聚合物内,使老化前状态的自由能由 $G_1$ 上升为 $G_1'$ <sup>[24]</sup>。此时,能量势垒的高度降低为 $(\Delta G - W_m - W_{em})$ 。

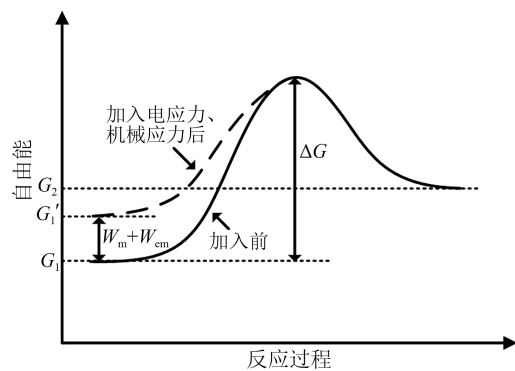


图11 老化过程自由能图

Fig.11 Free energy diagram during ageing process

电、热应力使分子链间距增加,分子间和分子内作用力下降,氢键、范德华力和化学键更容易遭受机械应力的破坏。相比单独机械应力作用,电热力老化中的机械应力对分子链的破坏作用更强。施加机械应力使部分机械能储存在分子链中,电热

老化产生的热电子和自由基只需更少的能量就能破坏化学键。相比电热老化,电热力老化中的电、热应力对化学键的破坏作用更强。因此,机械应力和电、热应力起相互促进的作用,电热力联合老化速度大于单独应力的代数叠加。

为分析电热力老化协同断裂机理,本文引入断裂失效评估模型,假设芯棒截面由若干个微小单元构成。在模型中认为一个单元仅具有两种不同的状态:完好和断开。在电热力老化过程中,每一单元从完好转变为断开状态,如图12所示。当截面所有单元均转化为断开状态时,芯棒断裂。

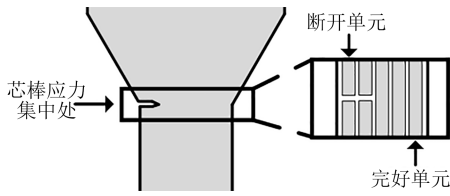


图12 单元的两状态

Fig.12 Two states of elements

每个单元老化前都是完好状态,老化后都是断开状态,老化反应的自由能变化同图11。存储在每个单元的电能和机械能表达式如式(2)~(3)所示<sup>[24]</sup>。

$$W_m = \frac{1}{2} \sigma_m \delta V_{cl} \quad (2)$$

$$W_{em} = \frac{1}{2} \sigma_{em} \delta V_{cl} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $\sigma_m$ 为单元受到的机械应力; $\sigma_{em}$ 为单元受到的电应力; $\delta$ 为转化过程的体积变化率; $V_{cl}$ 为转化过程中完好单元总体积。

老化开始时,芯棒因受多应力作用,存在极少数断开单元。随着老化时间增加,断开单元形成的裂纹扩大,裂纹周围的完好单元转化为断开单元。假设完好单元的转化只发生在断开单元的附近,一个断开单元可影响周边 $h$ 个完好单元,当前时刻断开单元总数为 $L$ ,每单元体积为 $v$ ,则 $V_{cl}$ 的计算如式(4)所示。

$$V_{cl} = hLv \quad (4)$$

老化反应的能量势垒高度越低,单元转化速率(断开速率)越高。假设单位时间内完好单元转化为断开单元的比率为断开率 $P$ ,在温度一定且其他因素不变时,断开率与能量势垒的高度成反比,如式(5)所示。

$$P = \frac{a}{\Delta G - W_m - W_{em}} \quad (5)$$

式(5)中, $a$ 为常数。

假设同一断开单元周围的完好单元,受到的机械应力和电应力均一致。在老化初期,当断开单元数量较少时,裂纹周围的完好单元断开率为 $P$ 。在老化后期,当断开单元数量很多时,一个完好单元将同时受到多个断开单元的影响,断开率将逐渐变小。因此将 $P$ 乘以一个修正系数,该系数随着 $L$ 增大而减小,在 $L=0$ 时该系数为1,在 $L=L_\infty$ 时该系数为0,同时这个系数对于 $L$ 连续可导。修正后的断开率 $P'$ 表达式如式(6)所示。

$$P' = \frac{a}{\Delta G - W_m - W_{em}} \frac{L_\infty - L}{L_\infty} \quad (6)$$

式(6)中, $L_\infty$ 为芯棒截面单元总数。

则断开单元的增长速率表达式如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= P' \cdot hL \\ &= \frac{a}{\Delta G - \frac{1}{2} \times \sigma_m \delta V_{cl} - \frac{1}{2} \times \sigma_{em} \delta V_{cl}} \frac{L_\infty - L}{L_\infty} hL \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中, $t$ 为老化时间。

$\sigma_m$ 与 $\sigma_{em}$ 随老化时间的增加而线性上升,即如式(8)~(9)所示。

$$\sigma_m = b_1 t + b_2 \quad (8)$$

$$\sigma_{em} = b_3 t + b_4 \quad (9)$$

式(8)~(9)中, $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 和 $b_4$ 均为大于零的参数。

采用分离变量法求解式(7),可得到断开单元数量随时间的变化关系。假设反映芯棒断裂程度的指标 $Y(t)$ 与断开单元比率成线性关系,则有式(10)~(13)。

$$Y(t) = K \frac{L(t)}{L_\infty} + B = \frac{K}{(C_1 t + C_2)^{C_3} + 1} + B \quad (10)$$

$$C_1 = -\frac{1}{2} \delta V_{cl} L_\infty (b_1 + b_3) \quad (11)$$

$$C_2 = L_\infty \Delta G - \frac{1}{2} \delta V_{cl} L_\infty (b_2 + b_4) \quad (12)$$

$$C_3 = \frac{a L_\infty h}{\frac{1}{2} \delta V_{cl} L_\infty (b_1 + b_3)} \quad (13)$$

式(10)~(13)中, $K$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 是表征芯棒断裂过程的参数,其中 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 均与老化过程相关, $C_1$ 和 $C_3$ 代表了断开单元增长速率。 $C_1 < 0$ ,  $C_2 > 0$ ,  $C_3 > 0$ ,  $K > 0$ 。

为求得模型拟合参数,本文将电热力老化0、80、160 h样品拉伸至断裂,并对比240 h断裂样品,如图13所示。

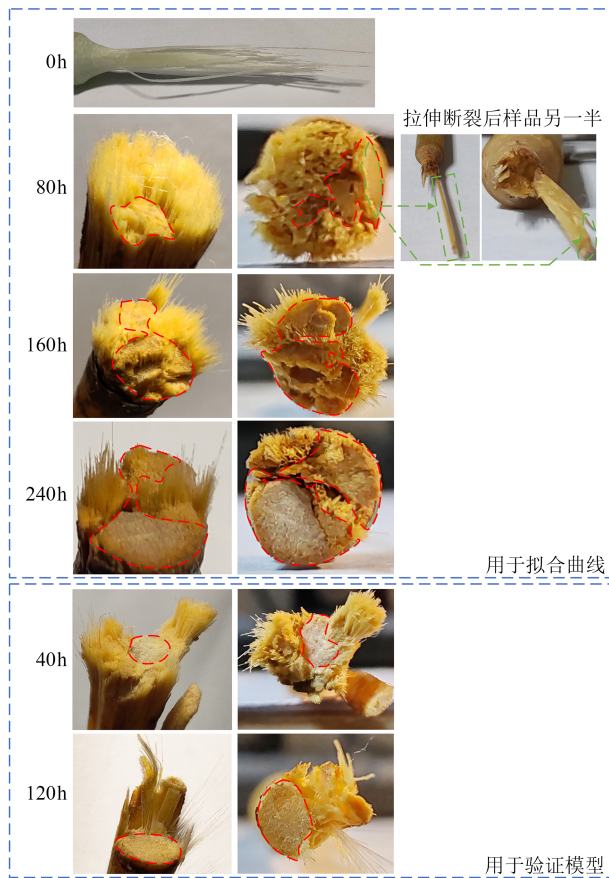


图13 拉伸至断裂后样品图(红圈内为老化断裂部分)  
Fig.13 Fracture surface of the sample after tensile failure  
(The red circle indicates the area where the material has aged and fractured)

从图13可以看出,老化0 h的样品仅因拉力断裂,截面呈扫帚状,有大量细丝。老化80 h和160 h的样品部分断裂,随后因拉力而完全断裂,断裂面部分区域呈扫帚状,和拉伸断裂特征相同;另一区域较平整,基本在同一水平面或呈阶梯状,可判断因老化断裂。老化240 h的样品截面平整部分因多应力老化断裂;出现扫帚状细丝的区域并非因长期老化断裂,而是被试验中的机械装置拉断。根据截面区域呈现的不同特征,利用图像分析软件,求出老化断裂面积所占比率,结果总结于表2,作为反映芯棒断裂程度的指标  $Y(t)$ 。以芯棒完全断裂为寿命终结标志,绘出老化时间标幺值(老化时间标幺值为老化时间除以总断裂时长240 h)与老化断裂面积比率的关系,如图14中黑色方形点所示。用模型推导式(10)并拟合,拟合结果为图14中红色曲线,拟合参数  $K=121, C_1=-1.45, C_2=1.4, C_3=2.4, B=-37.94$ 。为验证该模型,进行相同条件的电热力老化试验,老化时间为40 h和120 h,样品见图13,求出老化断

裂面积所占比率,并与拟合曲线对比,结果如图14中蓝色圆点所示,拟合曲线和验证数据相符,验证了该模型的正确性。本文构建了断裂失效评估模型,经验证符合实际老化样品的断裂面积数据,该模型可在给定的电、热和机械应力条件下,根据芯棒断裂面积比率评估寿命。

表2 老化样品断裂面积所占比率  
Table 2 Ratio of fracture area of ageing sample

项目	老化时间/h	断裂面积所占比率/%
	0	0
拟合数据	80	27.11
	160	69.63
	240	83.06
验证数据	40	15.85
	120	43.75

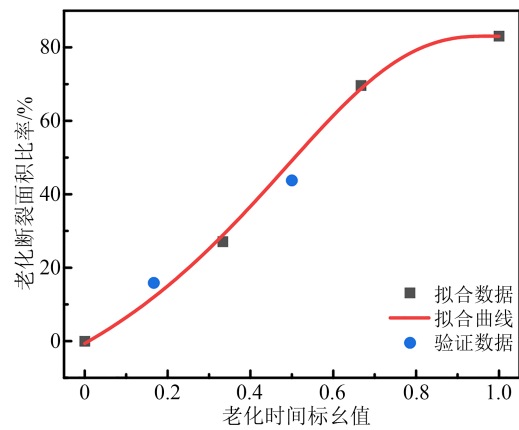


图14 断裂面积比率与老化时间标幺值拟合图  
Fig.14 Fracture area and ageing time per unit fitting diagram

#### 4 结论

针对复合绝缘子芯棒在严酷条件下发生断裂的问题,本文设计了人工加速电热力多场耦合老化试验平台,对芯棒试样开展了热老化、电热老化和电热力老化试验并进行分析,主要得到如下结论:

(1)设计并搭建了电热力老化试验平台,在已有的电热老化平台基础上,加入机械装置,将样品形状设计为哑铃状,通过机械装置的杠杆结构放大机械力,可以实现电、热和机械应力的同步施加。

(2)对复合绝缘子芯棒短样开展电、热和机械应力耦合的多场老化试验,老化的绝缘子芯棒样品出现了断裂现象。在芯棒断裂过程中,宏观表现是样品由外至内出现不断扩大的裂痕,裂痕扩展速度非线性增加,直至芯棒完全断裂;微观表现是环氧和玻纤特征化学键断裂,环氧基体分解,玻纤出现

裂纹和断裂现象,玻纤-环氧界面劣化。

(3)提出了基于单元断开率的电热协同断裂失效评估模型。电、热和机械应力同时作用时,电能和机械能减少了老化反应的能量势垒,据此建立了断开率与能量势垒的反比关系。在给定的电、热和机械应力条件下,该模型可根据芯棒断裂面积比率实现复合绝缘子芯棒老化程度评估。

## 参考文献 References

- [1] GAO Yanfeng, LIANG Xidong, LU Yi, 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] 韩红卫,伍弘,房子祎,等.宁夏地区运行复合绝缘子自然老化特性及其影响因素分析[J].绝缘材料,2021,54(6):116-124.  
HAN Hongwei, WU Hong, FANG Ziyi, et al. Analysis on natural ageing characteristics and influencing factors of composite insulator in operation in Ningxia[J]. Insulating Materials, 2021, 54(6): 116-124.
- [3] 侯思祖,钟正,张思敏,等.不同湿度和观测距离下酥朽复合绝缘子的温升特性研究[J].绝缘材料,2022,55(5):102-107.  
HOU Sizu, ZHONG Zheng, ZHANG Simin, et al. Temperature rise characteristics of decay-like composite insulator under different ambient humidity and observation distance[J]. Insulating Materials,2022,55(5):102-107.
- [4] 陈原,薛文祥,刘云鹏,等.伞套硅橡胶含量对复合绝缘子运行寿命的影响[J].高电压技术,2022,48(2):736-752.  
CHEN Yuan, XUE Wenxiang, LIU Yunpeng, et al. Influence of silicone rubber content of shed and sheath on composite insulator lifespan[J]. High Voltage Engineering,2022,48(2):736-752.
- [5] 吴旭翔,王少华,李特,等.一起220 kV复合绝缘子芯棒断裂事故分析[J].电工电气,2019,255(3):55-58.  
WU Xuxiang, WANG Shaohua, LI Te, et al. Analysis of a core rod fracture accident of 220 kV composite insulators[J]. Electro-technics Electric,2019,255(3):55-58.
- [6] 魏彤照.500 kV输电线路复合绝缘子断裂事故分析[J].门窗,2019,164(8):123-124.  
WEI Tongzhao. Analysis of composite insulator breakage accident of 500 kV transmission line[J]. Doors and Windows,2019, 164(8):123-124.
- [7] 李超红.复合绝缘子芯棒断裂研究现状[J].绝缘材料,2018,51(6):7-11.  
LI Chaohong. Research status on mandrel fracture of composite insulator[J]. Insulating Materials,2018,51(6):7-11.
- [8] KUMOSA M, KUMOSA L, ARMENTROUT D. Failure analyses of nonceramic insulators: part II - the brittle fracture model and failure prevention[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2005, 21(4):28-41.
- [9] GAO Yanfeng, LIANG Xidong, LU Yi, et al. Comparative investigation on fracture of suspension high voltage composite insulators: a review-part II: chemical properties and criteria system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2021,37(4):18-30.
- [10] 梁曦东,高岩峰.复合绝缘子酥朽断裂研究(一):酥朽断裂的主要特征、定义及判据[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4778-4786.  
LIANG Xidong, GAO Yanfeng. Study on decay-like fracture of composite insulator: part I- the principal character, definition and criterion of decay-like fracture[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(17):4778-4786.
- [11] 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):5070-5077,5132.  
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):5070-5077,5132.
- [12] XU Huasong, XIE Congzhen, GOU Bin, 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.
- [13] 赵新泽,习森明,王磊,等.复合绝缘子芯棒疲劳断裂特性分析[J].机械强度,2018,40(6):1315-1320.  
ZHAO Xinze, XI Senming, WANG Lei, et al. Analysis on the fatigue fracture characteristics of composite insulator core rod[J]. Journal of Mechanical Strength,2018,40(6):1315-1320.
- [14] 甘永叶.复合绝缘子运行发热及热老化机理研究[D].广州:华南理工大学,2017.  
GAN Yongye. Study on mechanism of abnormal temperature rise and thermal aging of composite insulator[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2017.
- [15] 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: South China University of Technology,2018.
- [16] 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: South China University of Technology,2019.
- [17] 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.
- [18] NAN Jingjing, ZHI Chao, MENG Jiaguang, et al. Seawater aging effect on fiber-reinforced polymer composites: mechanical properties, aging mechanism, and life prediction[J]. Textile Research Journal,2023,93(13-14):3393-3413.
- [19] LUTZ B, CHENG L, GUAN Z, et al. Analysis of a fractured 500 kV composite insulator - identification of aging mecha-

- nisms and their causes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(5):1723-1731.
- [20] 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 decomposition 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.
- [21] 谢伟,杨征,程显,等. 环氧树脂材料热氧化特性研究[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.
- [22] 何曼君,张红东. 高分子物理[M]. 上海:复旦大学出版社,2011:196-218.
- HE Manjun, ZHANG Hongdong. Polymer Physics[M]. Shanghai: Fudan University Press,2011:196-218.
- [23] 严雨涵,吴丹明,丁承强,等. 机械力诱导聚合反应的研究进展[J]. 高分子学报,2023,54(9):1290-1302.
- YAN Yuhan, WU Danming, DING Chengqiang, et al. The progress of force induced polymerization[J]. Acta Polymerica Sinica,2023,54(9):1290-1302.
- [24] CRINE J P. The compensation law revisited-application to dielectric aging[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991,26(4):811-818.

收稿日期:2024-02-04;修回日期:2024-03-19。

作者简介:

谢从珍(1973-),女(汉族),陕西石泉人,教授,博士,研究方向为输电线路绝缘材料及缺陷诊断、输变电设备在线监测及大数据;

杨畅(1999-),女(汉族),福建福州人,硕士生,研究方向为绝缘材料老化检测与评估。