

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.007

HTV硅橡胶复合绝缘子伞裙的热老化特性分析

程 洋¹, 吕 栋², 夏令志¹, 黄鸿飞², 郭凯航², 任成燕^{2,3}

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601; 2. 中国科学院电工研究所等离子体科学和能源转化北京市国际科技合作基地, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高温硫化(HTV)硅橡胶复合绝缘子作为架空输电线路的重要组成部分,其在长时间的户外运行中出现的异常发热状态会加剧伞裙的老化,严重时威胁到输电线路的安全运行。通过对HTV硅橡胶复合绝缘伞裙样品进行480 h的人工热空气老化试验,对样品进行邵氏硬度、水接触角、红外光谱、微观形貌及沿面闪络电压等多项性能参数的测量,分析伞裙样品的热老化特性。研究表明,长时间的热老化作用,会加剧伞裙的硬化,降低材料的憎水性。随着热老化时间增加,伞裙样品的老化程度增加,沿面闪络电压先增加后减小。

关键词: 硅橡胶; 复合绝缘子; 热空气老化; 憎水性; 沿面闪络

Thermal Aging Characteristics Analysis of HTV Silicone Rubber Composite Insulator Shed

CHENG Yang¹, LYU Li², XIA Lingzhi¹, HUANG Hongfei², GUO Kaihang², REN Chengyan^{2,3}

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. Beijing International S & T Cooperation Base for Plasma Science and Energy Conversion, Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: HTV silicone rubber composite insulator is an important part of the overhead transmission line, its abnormal febrile state will aggravate the aging of the shed in the long-term outdoor operation, which will, in case of serious condition, threaten the safe operation of the transmission line. Through 480 h artificially thermal aging test on the shed samples of the HTV silicone rubber composite insulator and measurement of such multiple performance parameters as Shore hardness, WCA, FTIR, micro topography and surface flashover voltage, the thermal aging characteristics of the sample are analyzed. The study results show that the hardening of the shed can be intensified and the hydrophobicity of the material is reduced after long-term thermal aging. With the increase of thermal aging time, the aging degree of the shed sample increases, and the surface flashover voltage increases first and then decreases.

Key words: Silicone rubber; composite insulator; thermal aging; hydrophobicity; surface flashover

0 引言

绝缘子作为架空输电线路的重要组成部分,承担导线与塔杆的连接、支撑和电气绝缘作用,对电网的安全运行具有重要意义^[1-7]。高温硫化(high temperature vulcanization, HTV)硅橡胶是一种性能优良的聚合物材料,质量轻、疏水性好、表面电场分布均匀、抗震和耐污闪性优异等优点^[8-9]推动了HTV硅

橡胶复合绝缘子在国内外架空线路中的发展,并正逐步取代陶瓷绝缘子和玻璃绝缘子^[10]。但是,相比传统的陶瓷和玻璃绝缘子,HTV硅橡胶复合绝缘子的老化问题更加严重。老化是一个持续的过程,随着复合绝缘子伞裙老化程度加深会逐渐威胁到架空线路的安全稳定运行。

在长期的带电户外运行过程中,HTV硅橡胶复合绝缘子需要面对复杂的工作环境,如高压、高温、

收稿日期:2023-11-21; 修回日期:2024-01-25

基金项目:安徽省自然科学基金能源互联网联合基金(2108085UD14);国家自然科学基金项目(52177163, 51977202)。

Project Supported by Anhui Natural Science Foundation Energy Internet Joint Fund(2108085UD14), National Natural Science Foundation of China(52177163, 51977202).

潮湿、寒冷等,不可避免的出现老化现象。影响因素不同,绝缘子的老化机理也存在差异^[11-12]。其中,热老化是HTV硅橡胶复合绝缘子老化中最普遍的现象^[13]。太阳紫外辐射、电弧放电以及异常加热是伞裙表面产生高温现象的主要原因,高温会改变伞裙和护套的化学结构,影响材料性能^[14-15]。通常,为了提高伞裙的耐高温性能,一般会添加一定比例的炭黑和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料。

通过开展单因素老化实验,针对性分析温度对HTV硅橡胶复合绝缘子的影响,能够深入研究绝缘子的热老化机理。HTV硅橡胶复合绝缘子的热解主要分为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的脱水分解和聚二甲基硅氧烷(PDMS)的分子裂解两个阶段^[16]。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料主要分解生成 Al_2O_3 和结晶水(H_2O),结晶水的生成会导致 $-\text{OH}$ 基团的增多^[17]。通常,随着热老化时间的延长,硅橡胶复合绝缘子伞裙的硬度会不断增大。主要原因有两点:一是,增塑剂从内部迁移至表面,增塑效果减弱,导致材料硬化;二是,发生热降解反应,自由基与不饱和键及侧链 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 反应,增加交联密度,导致硬度增加。同时,雷超平等^[18]还发现,随着热老化程度的加剧,主链 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 和侧链 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 会发生严重断裂, $-\text{OH}$ 基团的峰值也会随着 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的分解不断变化。在持续的高温环境下,主链 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键的断裂和重排反应生成小分子环状硅氧烷,迁移至伞裙表面移动,使得材料憎水性逐渐恢复。憎水性的恢复速度与程度取决于小分子的迁移情况,但是,在持续的热老化作用下,当绝缘子伞裙老化到一定程度后,会造成材料憎水性降低且无法恢复^[19]。HTV硅橡胶复合绝缘子伞裙的热老化通常还伴随着表面结构的变化,会使得表面出现大量颗粒物,表面粗糙度进一步增大,产生大量微米级别的裂纹。

现阶段,HTV硅橡胶复合绝缘子热老化试验主要针对实验室自制的绝缘样品,缺乏对实际应用于高压线路中的复合绝缘子伞裙的热老化研究。为了完善硅橡胶复合绝缘子的热老化机理,文中选择运行时间超过10年的HTV硅橡胶复合绝缘子伞裙作为研究对象,在恒温箱中通过热空气作用对其进行加速热老化试验。采用邵氏硬度、静态水接触角 $\text{WCA}(\text{water contact angle})$ 、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)、扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)和能量色谱(energy dispersive spectroscopy, EDS),以及表面闪络电压等方法对热空气老化后的伞裙样品进行分析,通过物理性质、化学成分、电学性能的变化深入探

究HTV硅橡胶复合绝缘子伞裙的热老化机理,并比较了同一绝缘子串高压端、中部、低压端的热老化变化。

1 试验部分

1.1 样品选择及试验方案

选择某110 kV线路的HTV硅橡胶复合绝缘子串作为研究对象,已运行17年,从绝缘子串的高压端、中部、低压端的伞裙取样,制备为尺寸 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的试验样品。

试验前,进行伞裙样品的预处理。使用浓度95%的无水乙醇清洗去除伞裙样品表面的污秽,清洗直到表面无明显污秽为止;之后,放置在101型电热恒温干燥箱中 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温干燥4 h,自然冷却至室温,完成预处理。热老化试验方法参考国标GB/T 3512—2014^[20],热老化温度的选择综合国标的温度以及硅橡胶复合绝缘子的热解温度确定^[21]。采用精密鼓风干燥箱进行热空气老化试验,试验温度采用 $130\text{ }^\circ\text{C}$,老化时间为0、120、240、360、480 h。每隔120 h将所有HTV硅橡胶复合绝缘子样品取出,自然冷却4 h后开始进行多项测量试验。取出24 h后重新放回干燥箱中继续热老化试验,放入前已保证干燥箱温度达到 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 测试仪器

样品硬度采用邵氏硬度计(LX-A-Y0-100HA 0.5HA)测定,测量每个HTV硅橡胶复合绝缘子伞裙外表面对角线上等距的3个点的邵氏硬度,并计算平均值。采用接触角测试仪(JGW-360A)测量样品中心区域的静态水接触角,每个样品测量3次,并计算平均值。硅橡胶复合绝缘子样品的吸收峰采用傅里叶变换红外光谱仪(iS50R FTIR, Thermo Scientific, 美国)测量,扫描次数20次,分辨率 2 cm^{-1} ,扫描范围 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,主要关注主链 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、侧链 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 和 $-\text{OH}$ 基团的峰值大小。采用SEM(Sigma, Carl Zeiss, 德国)对绝缘子伞裙表面形貌进行观察,记录500倍和5 000倍条件下的微观形貌结果,并采用能谱仪(EDS)测试表面元素的含量。采用指形电极进行伞裙样品的沿面闪络电压试验,电源采用交流源,每个样品测量10次。

2 结果分析

2.1 邵氏硬度测试结果

硬度是HTV硅橡胶复合绝缘子的基本特性,不同比例的炭黑和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 填料会导致出厂硬度存在

差异。为了承担导线与塔杆之间的连接,通常要求邵氏硬度不小于 50 HA。长时间的户外运行,复合绝缘子伞裙会出现一系列老化现象,其中老化会导致伞裙的物理交联密度增加,邵氏硬度增大^[22]。不同位置伞裙样品邵氏硬度随老化时间的变化见图 1,不同位置伞裙样品在初始状态都保持较高的邵氏硬度。随着热空气的作用,伞裙样品的邵氏硬度在 80 HA 附近上下波动,说明热老化会加剧伞裙表面的硬化,但这一作用并不能一直持续。在热老化初期,试验样品表面不同部位的硬度差距较小,数据波动性小。随着热老化时间的增长,试验样品的边缘与中心的邵氏硬度差距增大,样品边缘硬化更显著,因此数据的波动性整体加大。对老化后试验样品的观察发现,热老化作用会导致样品表面发白,发白和干燥程度从边缘向中心逐渐减小,对应样品的硬度从边缘向中心减小,说明热空气作用导致的硬化,从样品的边缘向中心逐渐发展。对不同位置的伞裙样品来说,伞裙中部的样品硬度在热老化前后均小于高压端和低压端样品。

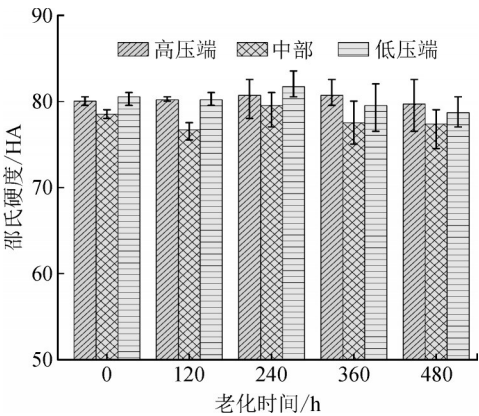


图1 不同位置伞裙样品邵氏硬度随老化时间的变化
Fig. 1 Shore hardness changes with thermal aging time of shed samples at different positions

2.2 WCA 测试结果

硅橡胶复合绝缘子伞裙优异的电气绝缘性能,是其成为架空输电线路重要组成部分的主要原因。硅橡胶复合绝缘子伞裙具有良好的憎水性和憎水迁移性,表面很难形成连续的水膜,从而降低污闪事故的概率^[23]。参照行业标准,将 HTV 硅橡胶复合绝缘子伞裙表面的憎水性等级分为 7 级,其中等级越小憎水性越强,当处于 HC5~HC7 等级时伞裙表面已成为亲水状态,见表 1^[24-25]。

不同位置伞裙样品水接触角随老化时间的变化见图 2,由图中可看出,高压端样品初始水接触角在 115°左右,中部在 95°左右,低压端在 100°左右,憎水性都达到 HC1 等级。随着热老化作用,高压端

表 1 HC 等级对应绝缘子表面水滴状态

Table 1 Water drop state of insulator surface based on HC grade

HC 等级	表面水滴状态
1	仅形成分离的水珠,大部分水珠 $\phi_r \geq 80^\circ$
2	仅形成分离的水珠,大部分水珠 $50^\circ < \phi_r < 80^\circ$
3	仅形成分离的水珠,水珠一般不再是圆的,大部分水珠 $20^\circ < \phi_r < 50^\circ$
4	同时存在分离的水珠和水膜,总的水膜覆盖面积<被测面积的 90%,最大水膜面积<2 cm ²
5	总的水膜覆盖面积<被测面积的 90%,最大水膜面积>2 cm ²
6	总的水膜覆盖面积<被测面积的 90%,有少量的干燥区域(点或狭窄带)
7	全部试验面积上覆盖了连续的水膜

的伞裙样品首先发生较大的变化,在 240 h 内 WCA 从 115°左右直接降低到了 90°左右。在热老化 240 h 后,中部的伞裙样品 WCA 骤降至 70°左右,憎水性等级从 HC1 降低到 HC2。低压端的伞裙样品的 WCA 出现明显下降发生在 360 h 之后。在热老化的过程中,伞裙样品的憎水性没有持续下降,高温加速了小分子硅氧烷向表面迁移,会出现憎水性恢复现象^[26],但是,持续的高温引起小分子硅氧烷挥发,导致憎水性最终下降。

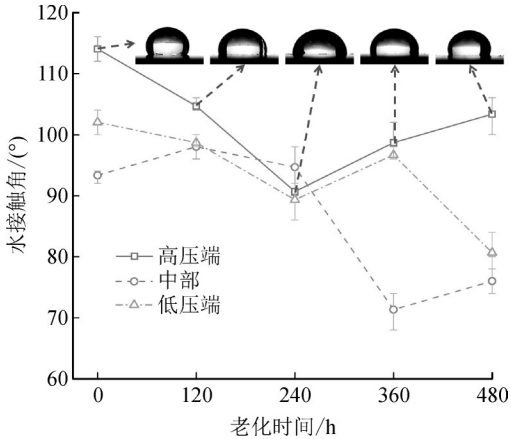


图2 不同位置伞裙样品水接触角随老化时间的变化
Fig. 2 WCA changes with thermal aging time of shed samples at different positions

随着热老化时间的增加,WCA 整体上呈下降趋势,虽然在过程中存在憎水性恢复的现象,能够在一定程度上改善憎水性,但是总体上热老化带来的下降的幅度更大。

2.3 FTIR 测试结果

不同位置 HTV 硅橡胶复合绝缘子样品随老化时间变化的 FTIR 谱线结果见图 3,在热老化作用下,没有产生新的的基团。其中典型特征峰:O-Si(CH₃)₂-O 对应 790 cm⁻¹ 处的特征峰;Si-O-Si 对应 1 000 cm⁻¹ 处的特征峰;2 960 cm⁻¹ 的特征峰对应-CH₃基

团, -OH基团为 $3\ 200\sim 3\ 700\text{ cm}^{-1}$ 波数范围的特征峰。

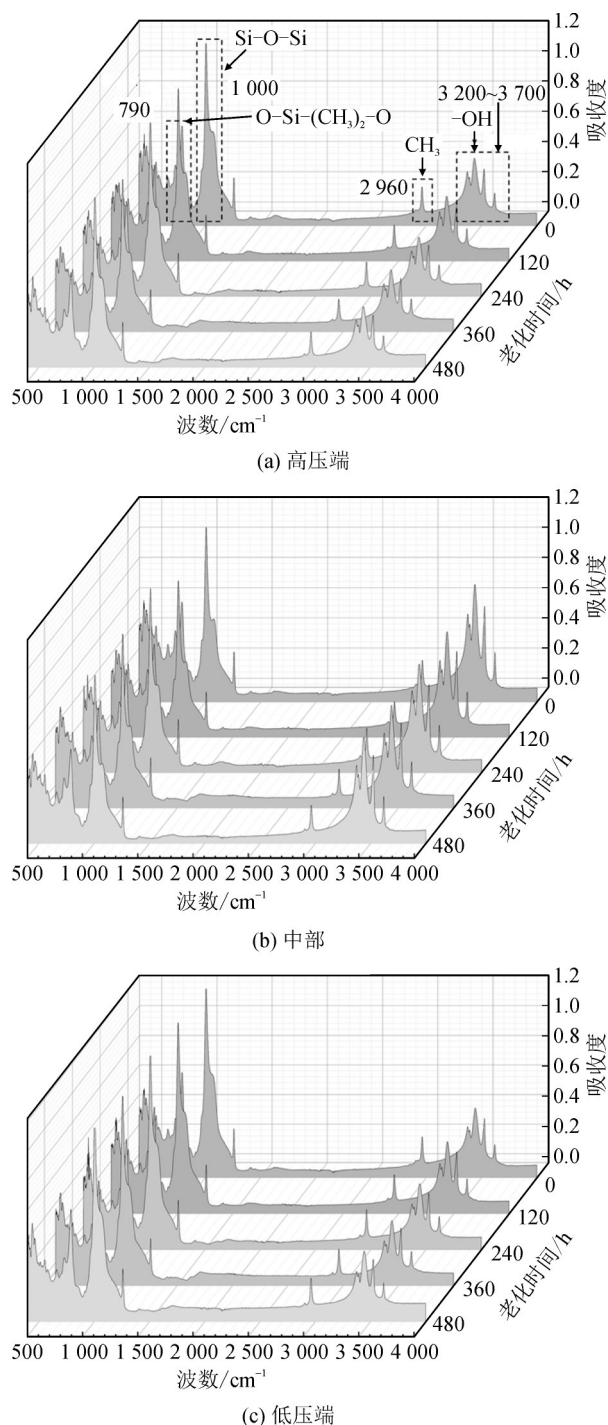


图3 不同位置伞裙样品FTIR随老化时间的变化

Fig. 3 FTIR changes with thermal aging time of shed samples at different positions

HTV 硅橡胶复合绝缘子的主链 Si-O-Si 和侧链 Si-CH₃ 会随着不断的老化而减小^[27], 因此常被作为衡量硅橡胶材料老化的一个重要指标^[28]。随着热老化时间的增加, 主链 Si-O-Si 和侧链 Si-CH₃ 的含量并没有发生明显的变化。可能是 PDMS 分子同时发生多种反应, 导致两者的含量在分解和产生之间达成平衡。对比 3 个位置的 -OH 峰值能够发现, 中部

的 -OH 峰值明显高于高压端和低压端。伞裙样品中 -OH 基团主要与 Al(OH)₃ 填料有关, 说明高压端和低压端的 Al(OH)₃ 填料已经在长时间的老化中分解, 其老化程度比中部严重^[29]。

从文中的 FTIR 的测试结果中可以发现, 在长时间的户外运行过程中, 高压端和低压端的老化程度比中部更严重。480 h 的热老化并未对伞裙表面的 FTIR 测量结果产生明显的变化。

2.4 SEM 测试结果

通常, 在户外运行过程中, HTV 硅橡胶复合绝缘子伞裙表面受到各种因素的影响, 首先开始老化, 因此表面的老化程度通常比内部更加严重。随着伞裙的老化, 在扫描电镜下能够观察到表面呈颗粒状分布, 表面存在明显的微米级别的裂纹, 且裂纹的宽度和深度随老化程度的增加而增大。长时间的热老化作用会加剧上述现象的出现, 但是是否会影响内部结构的变化需要进一步探索。

因此文中选择不同位置伞裙样品的横断面作为研究对象, 分析热老化对其内部的影响, SEM 结果见图 4。从图 4(a)-(c) 可以发现, 在 480 h 的热老化作用下, 高压端样品的内部出现了明显的裂纹, 中部和低压端的伞裙样品中未发现裂纹, 说明高压端伞裙样品的老化更加严重。接着以高压端伞裙样品作为研究对象, 分析在不同热老化时间下其横断面表面的结构变化, 见图 4(d)-(h)。在热老化开始阶段, 高压端伞裙样品横断面表面存在明显的团聚现象。随着热老化时间的增加, 硅橡胶基体的团聚状态有所缓解, 填充物和聚合物小分子不断向表面析出, 材料内部结构逐渐趋于均匀。老化后期, 伞裙样品表面存在粉化现象, 横断面表面呈颗粒状离散分布, 直至内部裂纹的产生, 在这段时间内材料的粉化空隙有利于小分子向表面的迁移, 进而使高压端样品表面憎水性出现短暂的恢复^[30]。与表面状态相比, 内部结构没有受到外界环境的影响, 老化初期没有明显的裂纹和沟壑, 随着热老化时间的增加, 最终会导致在内部出现裂纹等老化现象。

2.5 沿面闪络电压测试结果

HTV 硅橡胶复合绝缘子伞裙表面持续的电晕放电和沿面闪络会加速伞裙的老化, 因此在长时间的挂网运行中需要避免长时间的电晕放电和沿面闪络现象。采用指形电极和交流源对高压端、中部、低压端的伞裙样品进行沿面闪络实验, 每个样品测量 10 次。对测量结果通过韦布尔分布曲线拟合, 以失效概率为 63.2% 时的闪络电压作为测量结果, 绘制了闪络电压测试结果见图 5。

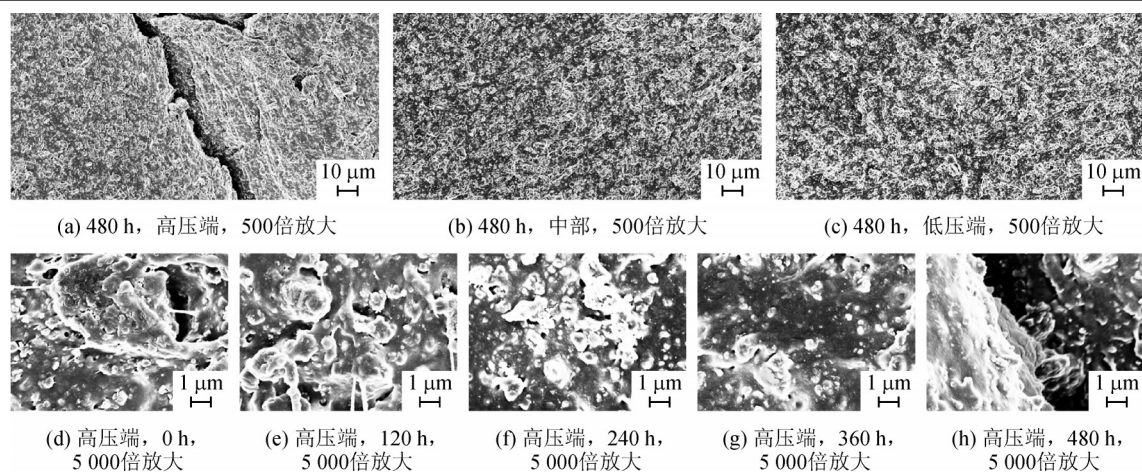


图4 不同位置伞裙样品横断面的微观形貌

Fig. 4 Micromorphology of cross-section of shed samples at different positions

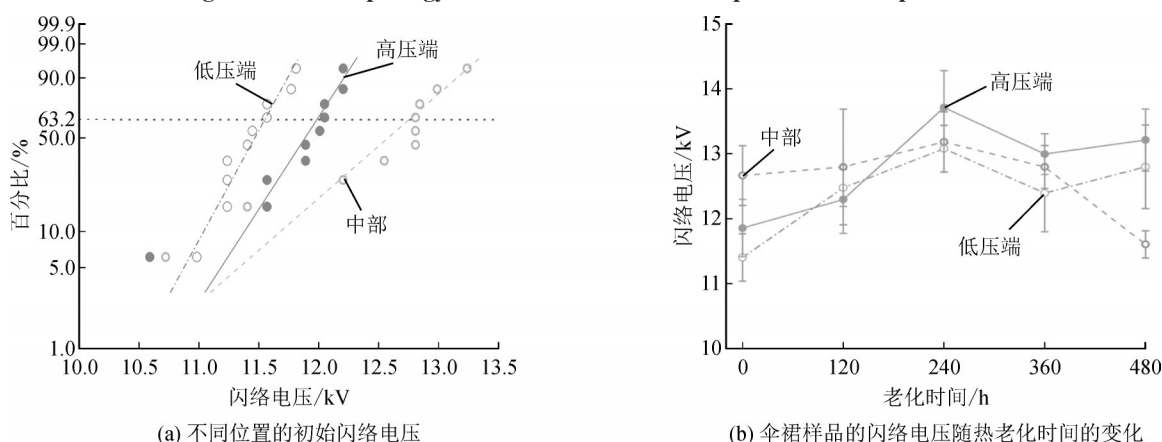


图5 闪络电压测试结果

Fig. 5 Test results of flashover voltage

如图5(a)所示,在进行热老化试验前,对高压端、中部、低压端3个位置进行了沿面闪络试验。从图中可以发现,当失效概率为63.2%时,中部的闪络电压明显高于高压端和低压端。说明在长时间的户外运行过程中,高压端和低压端的老化程度明显高于中部。图5(b)展示了随着热老化时间的延长,不同位置复合绝缘子样品的平均闪络电压。高压端和低压端的伞裙样品在热老化初期,随着内部填料不断析出,导致表面粗糙度增大,伞裙的表面闪络电压整体呈上升趋势^[31-32]。尤其是高压端样品在240 h老化后的闪络电压最高,和填充物团聚引起的表面粗糙度变化有关。随着热老化时间的延长,填充物团聚现象缓和,但是伞裙表面的老化加剧,表面会出现粉化层、裂纹等老化现象,伞裙性能下降,导致闪络电压出现明显的下降趋势。在0~360 h的热老化时间内,中部伞裙样品的闪络电压在13 kV附近波动,在360 h后闪络电压显著下降。

另外,热老化作用下复合绝缘子的闪络特性变化和样品的初始状态有关。高压端和低压端样品的初始闪络电压较低,随着热老化的进行,闪络电

压先上升后下降;而中部样品的初始闪络电压较高,热老化过程中由于粗糙度变化带来的闪络性能提升不明显。热老化后期,绝缘子粉化、亲水性增加等因素对闪络的影响加剧,导致闪络性能整体下降。因此,热老化后 HTV 硅橡胶复合绝缘子的闪络电压变化受表面形貌、亲水性等因素综合影响,同时需结合样品老化前的初始状态进行分析。

3 结论

通过对 HTV 硅橡胶复合绝缘伞裙样品进行人工热空气老化试验,对样品进行邵氏硬度、水接触角、红外光谱、微观形貌及沿面闪络电压等多项性能参数的测量,分析了伞裙样品的热老化特性。主要结论如下:

1) HTV 硅橡胶复合绝缘伞裙在长时间的户外运行中,高压端和低压端伞裙的老化程度大于中部,主要表现在高压端和低压端样品硬度较高, -OH 峰值较低,初始表面闪络电压较小。

2) 在480 h热空气老化作用下,伞裙样品的硬度

维持在80 HA附近,其中伞裙高压端和低压端样品的硬化现象比中心区域更明显;随着热老化时间的增加,伞裙样品的憎水性整体下降。

3)在热空气老化作用下,硅橡胶特征基团没有显著的变化,但持续的热老化加剧硅氧烷的热解,导致局部裂纹的出现。随着热老化时间的增加,样品表面闪络电压先增大后减小,闪络电压的变化和样品表面形貌、亲水性及样品初始老化状态有关。

参考文献:

- [1] 曾向君,王婷婷,张福增,等. 新型脂环族环氧树脂和硅橡胶材料性能对比研究[J]. 电瓷避雷器,2022(2):146-152.
ZENG Xiangjun, WANG Tingting, ZHANG Fuzeng, et al. Comparison of properties of new alicyclic epoxy resin and silicone rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 146-152.
- [2] 梁曦东,高岩峰,王家福,等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, WANG Jiafu, et al. Rapid development of Silicone rubber composite insulator in China[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2888 - 2896.
- [3] 周学明,尹骏刚,胡丹晖,等. 超一特高压长串瓷绝缘子温度分布曲线拼接方法[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):199-205.
ZHOU Xueming, YIN Jungang, HU Danhui, et al. Temperature distribution curve splicing method for EHV-UHV long string porcelain insulators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 199-205.
- [4] 赵园喜,邱志斌,朱 轩,等. 基于SSIM-Sobel与多特征融合的绝缘子缺陷识别方法[J]. 智慧电力,2023,51(12):74-79.
ZHAO Yuanxi, QIU Zhibin, ZHU Xuan, et al. Insulator defect recognition method based on SSIM-Sobel and multi-feature fusion[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 74-79.
- [5] 陈晓芸,李任展,冯 帆. 基于振荡水滴法和放电特性的复合绝缘子老化研究[J]. 电瓷避雷器,2023(6):234-242.
CHEN Xiaoyun, LI Renzhan, FENG Fan, et al. Aging of composite insulators based on oscillating water droplet and discharge characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 234-242.
- [6] 陶风波,毕晓甜,陈 杰,等. 沿海工业地区复合绝缘子老化寿命预测研究[J]. 电瓷避雷器,2022(1):182-188.
TAO Fengbo, BI Xiaotian, CHEN Jie, et al. Aging life-span prediction of composite insulators in coastal industry area [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 182-188.
- [7] 曾磊磊,张 宇,李唐兵,等. 复合绝缘子芯棒发热的热传导特性研究[J]. 电瓷避雷器,2022(1):219-224.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, LI Tangbing, et al. Study on heat conduction characteristics of FRP rod heating of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 219-224.
- [8] 汪从敏,李明磊,张 平,等. 基于灰色模型GM(1,N)的运行复合绝缘子硅橡胶材料剩余寿命研究[J]. 电瓷避雷器,2023(5):137-144.
WANG Congmin, LI Minglei, ZHANG Ping, et al. Remaining lifespan of Silicone rubber material of operating composite insulators based on GM(1, N) model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(5): 137-144.
- [9] BI Maoqiang, DENG Runkun, JIANG Tianyan, et al. Study on corona aging characteristics of silicone rubber material under different environmental conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 534-542.
- [10] MAHMOODI J, MIRZAIIE M, SHAYEGANI-AKMAL A A. Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, (105): 283-296.
- [11] 夏 兵,杨晓砚,李晓飞,等. 室温硫化硅橡胶老化程度定量表征方法研究[J]. 电瓷避雷器,2023(5):207-215.
XIA Bing, YANG Xiaoyan, LI Xiaofei, et al. Evaluation of the aging process of room temperature vulcanized Silicone rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(5): 207-215.
- [12] 夏彦卫,贾伯岩,刘 杰,等. 复合绝缘子高温硅橡胶老化现象分析及评估方法研究[J]. 高压电器,2019,55(9):163-170.
XIA Yanwei, JIA Boyan, LIU Jie, et al. Analysis and evaluation method of aging of high temperature Silicon rubber composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 163-170.
- [13] 曾磊磊,张 宇,曾 鑫,等. 复合绝缘子硅橡胶伞裙老化状态评估方法综述[J]. 电瓷避雷器,2022(2):139-145.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, ZENG Xin, et al. Aging state evaluation methods for Silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 139-145.
- [14] 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.
- [15] 宿志一,陈 刚,李庆峰,等. 硅橡胶复合绝缘子伞裙护套的老化及其判据研究[J]. 电网技术,2006,30(12):53-57.
SU Zhiyi, CHEN Gang, LI Qingfeng, et al. Study on aging and criterion of sheds and housing of Silicon rubber composite insulator[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 53-57.

- [16] ZENG L, ZHANG Y, RAO Z, et al. Study on thermal aging characteristics of HTV Silicone rubber sheds of composite insulators[J]. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2020(782):022076.
- [17] 彭向阳, 李子健, 黄振, 等. 基于TG-DSC法的复合绝缘子硅橡胶主组分含量研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(1):36-44.
PENG Xiangyang, LI Zijian, HUANG Zhen, et al. TG-DSC coupling techniques based investigation on main component content of Silicone rubber composite insulators[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1):36-44.
- [18] 雷超平, 莫文雄, 栾乐, 等. 复合绝缘子硅橡胶伞裙热老化特性研究[J]. 电工技术, 2018(22):20-22.
LEI Chaoping, MO Wenxiong, LUAN Le, et al. Study on thermal aging characteristics of Silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Electric Engineering, 2018(22):20-22.
- [19] 张冠军, 赵林, 周润东, 等. 硅橡胶复合绝缘子老化表征评估研究的现状与进展[J]. 高压电器, 2016, 52(4):1-15.
ZHANG Guanjun, ZHAO Lin, ZHOU Rundong, et al. Review on aging characterization and evaluation of Silicon rubber composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4):1-15.
- [20] 硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验: GB/T 3512—2014[S]. 2014.
Rubber, vulcanized or thermoplastic—accelerated ageing and heat resistance tests—air-over method: GB/T 3512—2014[S]. 2014.
- [21] LIU Y, CHENG Y, LYU L, et al. Evaluation of aging and degradation for silicone rubber composite insulator based on machine learning[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(42):424001.
- [22] 张振泉, 付豪, 李耀中, 等. 复合绝缘子伞裙硬化机理研究[J]. 环境技术, 2015, 33(2):54-58.
ZHANG Zhenquan, FU Hao, LI Yaozhong, et al. Study on the hardening mechanism of composite insulators[J]. Environmental Technology, 2015, 33(2):54-58.
- [23] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠的局部放电对表面特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6):113-118.
SIMA Wenxia, LIU Zhenyao, JIANG Xingliang, et al. Effects on surface performance of partial discharges due to discrete water droplets on the Silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6):113-118.
- [24] ± 500 kV 及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件: DL/T 810—2012[S]. 2012.
Technical specification for long road composite insulators with a nominal voltage of ± 500 kV DC and above: DL/T 810—2012[S]. 2012.
- [25] 标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则: DL/T 864—2004[S]. 2004.
Application guide of composite for insulators for AC overhead lines with a nominal voltage above 1 000 V: DL/T 864—2004[S]. 2004.
- [26] 李光茂, 杜钢, 杨杰, 等. 复合绝缘子用高温硫化硅橡胶老化图谱绘制方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3):117-123.
LI Guangmao, DU Gang, YANG Jie, et al. Approach to draw the aging map of high temperature vulcanized Silicone rubber for composite insulator[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3):117-123.
- [27] 董平平, 田毅, 高丽娟, 等. 基于 FTIR 的不同运行条件对复合绝缘子老化特性的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2):110-117.
DONG Pingping, TIAN Yi, GAO Lijuan, et al. Influence of different operating conditions on aging characteristics of composite insulators based on FTIR[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2):110-117.
- [28] 梁英, 崔春艳, 易春芳, 等. 复合绝缘子老化状态精细评估中的取样方法[J]. 电网技术, 2015, 39(2):530-535.
LIANG Ying, CUI Chunyan, YI Chunfang, et al. Sampling method for aging state fine-estimation of composite insulators[J]. Power System Technology, 2015, 39(2):530-535.
- [29] 孙进, 董翠翠, 时振堂, 等. 硅橡胶复合绝缘子的老化特性[J]. 石油化工, 2022, 51(2):169-174.
SUN Jin, DONG Cuicui, SHI Zhentang, et al. Aging characteristics of Silicone rubber composite insulator[J]. Petrochemical Technology, 2022, 51(2):169-174.
- [30] 周军, 方泳皓, 邓禹, 等. 东南沿海地区复合绝缘子用硅橡胶老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(3):14-21.
ZHOU Jun, FANG Yonghao, DENG Yu, et al. Ageing characteristics of Silicone rubber for composite insulator in southeast coastal area[J]. Insulating Materials, 2020, 53(3):14-21.
- [31] AHMADI-JONEIDI I, MAJZOobi A, SHAYEGANI-AK-MAL A A, et al. Aging evaluation of Silicone rubber insulators using leakage current and flashover voltage analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1):212-220.
- [32] MOHAMMADI SAVADKOOHI E, MIRZAI E M, SEYYED-BARZEGAR S M, et al. Experimental investigation on composite insulators AC flashover performance with fan-shaped non-uniform pollution under electro-thermal stress[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(121):106142.

程洋(1991—),男,硕士,工程师,主要从事架空输电线路运维等工作(E-mail:310258226@qq.com)。

任成燕(1979—),女,博士,副研究员,主要从事高电压与绝缘技术、气体放电与等离子体应用研究(通信作者)(E-mail:rcy@mail.iece.ac.cn)。