

# 不同老化因素对互感器伞套老化影响的研究

周锡球<sup>1</sup>, 吕伟桃<sup>2</sup>, 王 斌<sup>2</sup>, 邓海辉<sup>2</sup>, 吴 轲<sup>1</sup>, 曾宪文<sup>1</sup>, 叶伟标<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司东莞供电局变电管理二所, 广东 东莞 523000;

2. 广东冠能电力科技发展有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要:**通过扫描电子显微镜(SEM)和傅氏转换红外线光谱分析仪(FTIR)分析了硅橡胶伞套老化前后宏观表面结构变化和微观官能团变化,通过氙灯老化、湿热老化、电晕老化、户外自然老化和室内自然老化试验,研究互感器表面硅橡胶材料在不同因素影响下的理化、电气性能变化。结果表明:氙灯老化对硅橡胶硬度的影响最显著,硬度从37.0 HA增加到45.40 HA;湿热老化对硅橡胶镜像光泽度的影响最显著,镜像光泽度从75下降至40;自然户外老化对硅橡胶憎水性的影响最显著,静态接触角从115.4°下降至102.1°。通过测试老化硅橡胶的硬度、镜像光泽度、憎水性和表面电阻来评价各因素对硅橡胶伞套老化的影响大小,研究结果有助于对运行中的互感器老化程度进行监测。

**关键词:**互感器;硅橡胶;氙灯老化;湿热老化;电晕老化

**中图分类号:**TM215.2;TM201.44 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9239(2014)03-0070-05

## Effect of Various Aging Factors on the Aging Characteristic of Umbrella Cover of Instrument Transformer

Zhou Xiqiu<sup>1</sup>, Lv Weitao<sup>2</sup>, Wang Bin<sup>2</sup>, Deng Haihui<sup>2</sup>, Wu Ke<sup>1</sup>, Zeng Xianwen<sup>1</sup>, Ye Weibiao<sup>1</sup>

(1. Guangdong Power Grid Corp Dongguan Power Supply Bureau, Dongguan 523000, China;

2. Guangdong Crown Power Electricity Technology Development Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract:** The changes of macroscopic surface structure and microscopic functional groups of silicone rubber umbrella cover before and after aging were analyzed by SEM and FTIR, and the changes of physical and chemical properties and electrical properties of the silicone rubber surface material of instrument transformer after artificial accelerated xenon lamp aging, hydrothermal aging, corona aging, outdoor natural aging and indoor natural aging were studied. The results show that the xenon lamp aging has the most significant influence on the hardness of silicone rubber, and the hardness increases from 37.0 HA to 45.4 HA. Heat aging has the most significant influence on the glossiness of silicone rubber, and the glossiness decreases from 75 to 40. Outdoor natural aging has the most significant influence on the hydrophobicity of silicone rubber, and the static contact angle decreases from 115.4° to 102.1°. The effects of various factors on the aging of silicone rubber umbrella cover are evaluated by testing the hardness, glossiness, hydrophobicity and surface resistivity, and the results are helpful to monitor the aging degree of instrument transformer in operation.

**Key words:** instrument transformer; silicon rubber; xenon lamp aging; hydrothermal aging; corona aging

### 0 引言

在电力行业中,电压互感器、电流互感器、复合绝缘子、干式互感器、高压开关、穿墙套管、增爬伞

裙等设备均使用硅橡胶作为外绝缘材料<sup>[1]</sup>,其中以电压互感器、电流互感器的使用量最大。互感器在投入运行数年后,表面的硅橡胶伞套在自然环境、高电场及其它因素作用下会出现表面粉化脆化、表面电阻下降、憎水性下降、闪络电压下降、泄漏电流增大等老化问题<sup>[2-4]</sup>。不同运行环境、不同运行年限的互感器老化程度差异较大。在多因素影响下,引起老化的最本质因素难以查出。通过试验研究,将最有可能导致互感器护套老化加速的因素单独进

收稿日期:2013-09-17

**作者简介:**周锡球(1975-),男(汉族),广东东莞人,工程师,主要从事电网调度与自动化改装的研究方向;王斌(1981-)男(汉族),陕西西安人,工程师,主要从事硅橡胶材料、高分子材料、特种涂料在电力行业的应用研究;通讯作者:吕伟桃(1983-),男(汉族),硕士研究生,主要从事电力新材料、新技术的应用研究。

行老化试验,分析每一种因素对硅橡胶老化的影响程度,并通过多种评价方法对每一种老化现象进行了量化评价。

## 1 伞套老化现象分析

### 1.1 伞套存在的老化现象

硅橡胶伞套的老化表现为:伞裙表面粉化、丧失弹性、颜色变白、硬度上升;在受到外力作用的情况下会产生不可恢复的龟裂裂纹。硅橡胶伞裙的老化伴随着材料本身材质的变化,发生严重老化时,其表面电阻、表面憎水性均下降。

### 1.2 SEM 电镜分析硅橡胶护套老化

图1、图2分别为新制硅橡胶和从运行9年后的互感器上切割下来的存在老化现象的硅橡胶材料表面SEM照片。

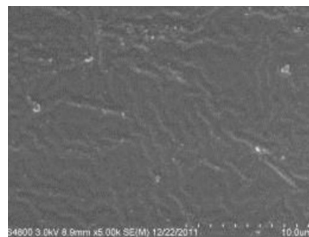


图1 新制硅橡胶的SEM照片

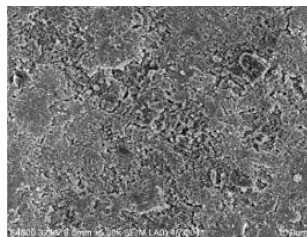


图2 运行9年硅橡胶的SEM照片

从图1、图2可以看出,在5 000倍放大情况下,新制硅橡胶表面致密,未有明显缺陷,而运行9年的硅橡胶伞套表面相对粗糙,颗粒感严重,出现明显的疏松、缝隙和多孔结构。运行9年的互感器伞裙表面疏松多孔的结构为脆性,开裂后不可再恢复至原有结构。

图3为运行9年的硅橡胶伞裙横切图,从图3可以看出,伞裙内部的硅橡胶材料依然致密,有弹性,有镜像光泽,老化只发生在表面,测量得知上表面老化层厚度大于下表面的老化层厚度,伞裙边沿的老化层厚度大于伞裙根部与伞间连接处的厚度。

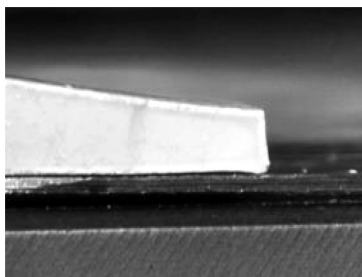


图3 硅橡胶老化伞裙横切面SEM照片

### 1.3 FTIR 分析互感器硅橡胶伞套老化

老化前后硅橡胶FTIR如图4所示,其中未老化样品为新制硅橡胶,严重老化样品是从运行9年的互感器上取下的老化样品。

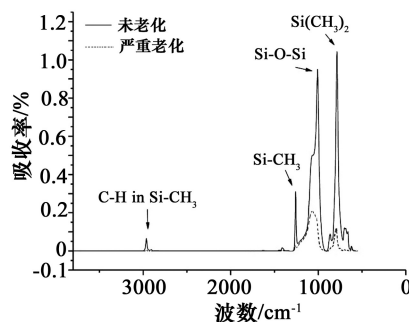


图4 老化前后硅橡胶的FTIR

由图4可以看出,严重老化硅橡胶Si-O键的吸收峰较宽且位置发生了变化,其原因可能是硅橡胶交联体系发生改变,硅氧烷分子的过度交联或者降解导致其主链结构发生变化。另外,严重老化的硅橡胶试样的吸收峰明显下降,其Si-C、Si-O特征峰的比值约为1.787~2.436,而未老化的试样此比值为0.912。这是自然老化的硅橡胶试样一个明显的特点,即:Si-C吸收峰的下降速度远大于Si-O吸收峰的下降速率。其原因可能是在自然条件下,支链的有机基团首先受到紫外、氧气、水分等外部因素影响发生降解断链,主链无机结构的Si-O键能较高,结构相对支链有机基团稳定,需要更高的活化能才能使其降解断链,因此可认为硅橡胶老化龟裂现象主要是硅氧烷侧链上有机基团断裂造成的。

## 2 老化试验

### 2.1 氙灯老化试验

复合绝缘护套为有机材料,引起其老化的主要因素包括紫外线、氧、臭氧、水分、温度变化及工业污秽等,而太阳光中的紫外线是引起高分子有机材料老化的最主要因素<sup>[5-6]</sup>。氙灯灯管具有辐照功率强、与太阳光的光谱分布相近的特点,因此适合用于模拟太阳光照射下的硅橡胶材料的老化过程。

试验采用合肥赛帆试验设备有限公司制造的水冷型氙灯老化箱,氙灯功率6 kW,最大辐照强度1.8 kW/m<sup>2</sup>。以200 h为一组试验进行氙灯老化,辐照总量约为1 152 MJ/m<sup>2</sup>,根据GB/T 3511—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶耐候性》的规定,该辐照值约为华

南地区4个月接受到的阳光辐射总量。

## 2.2 湿热老化试验

我国南方大部分地区都处在高温高湿的亚热带地区,这种气候条件也有可能是造成硅橡胶老化的因素之一<sup>[7-8]</sup>。试验模拟南方地区高温高湿环境,采用生化培养箱使温度保持在40℃,利用饱和盐溶液控制环境湿度,具体的做法是在密封的容器中加入一定量的饱和盐溶液,然后通过支架将自制的硅橡胶样品放在饱和盐溶液的上方。试验中分别使用饱和NaCl溶液和饱和K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液使样品始终处于(74.7±0.2)%和(96.4±0.4)%的相对湿度下,进行为期4 000 h的恒温恒湿老化试验。

## 2.3 电晕老化试验

互感器长期处于高电场环境下运行,局部放电加速其老化<sup>[9-10]</sup>。使用多极尖-板电极产生电晕进行电晕老化试验,样品尺寸为150 mm×150 mm×2 mm,共进行两组试验,时间分别为120 h和240 h,试验电压为6 kV。

## 2.4 自然环境户外老化试验

自然环境户外老化试验<sup>[11-17]</sup>能真实反映互感器在户外运行的老化情况,户外自然老化是光照、温度、湿度、氧气流速等因素综合作用的结果。将实验室新制的硅橡胶样品露天放置于楼顶的平台上,使之暴露于自然环境中,每2 000 h对样品进行一次性能检测。深圳市位于北纬22°27′~22°52′,为了使样品达到最佳的老化效果,样品架面向东南的位置摆放,倾角约22°。

## 2.5 自然环境室内老化试验

将自制的硅橡胶样品直接放在室内阴凉处,避免阳光直射,每2000h进行一次性能检测。

## 3 老化试验结果与分析

新硅橡胶样品按照道康宁公司HVI 1541/10P双组份加成型液体硅橡胶自制。

### 3.1 硬度

对每组老化试验都取5片样品,在每片样品的不同位置进行6次测量,取6次测量结果的平均值作为每片样品的表面硬度,试验结果见表1。从表1可以看出,新制造硅橡胶的邵氏硬度为37.7 HA,与新投入运行的互感器伞套硬度37.0 HA接近。氙灯老化400 h后样品的硬度(45.40 HA)接近自然老化6 000 h的硬度(45.92 HA),说明光照是硅橡胶老化的重要原因,湿热老化4 000 h样品的硬度(44.78 HA)比自然户外老化4 000 h样品的硬度(44.16

HA)略高但不显著,说明湿热有加速样品老化的作用,而在75%湿度和96%湿度下样品的硬度几乎无区别。电晕老化时间从120 h增加到240 h,样品的硬度从41.68 HA增至43.70 HA,说明电晕老化对硅橡胶产生一定影响,其硬度较接近户外老化4 000 h样品的硬度(44.16 HA),也说明电晕对硅橡胶老化产生影响。自然户外老化环境下老化样品的硬度高于室内温和环境下老化样品的硬度,说明光照、雨水、氧气流速等因素会加速硅橡胶老化。

表1 7组样品硬度测试结果

| 老化样品     |                    | 平均硬度/HA |
|----------|--------------------|---------|
| 氙灯老化样品   | 氙灯老化200h           | 42.68   |
|          | 氙灯老化400h           | 45.40   |
| 湿热老化样品   | 40℃, 75%湿度, 4 000h | 44.74   |
|          | 40℃, 96%湿度, 4 000h | 44.78   |
| 电晕老化样品   | 电晕老化120h           | 41.68   |
|          | 电晕老化240h           | 43.70   |
| 自然户外老化样品 | 户外老化4 000h         | 44.16   |
|          | 户外老化6 000h         | 45.92   |
| 自然室内老化样品 | 室内老化2 000h         | 39.04   |
|          | 室内老化4 000h         | 40.84   |
|          | 室内老化6 000h         | 42.30   |
| 新制样品     |                    | 37.70   |
| 运行老化9年样品 |                    | 53.42   |

### 3.2 镜向光泽度

硅橡胶材料的表面状况也能反映硅橡胶老化情况,因为老化硅橡胶样品表面会出现细小的裂痕,导致样品表面粗糙度上升,表面光泽度下降。使用型号为WGG60-E的表面光泽度计对老化样品进行测试,测试结果见表2。从表2可以看出,新制硅橡胶的镜像光泽度最高,湿热老化对镜像光泽度的影响最大,96%湿度下老化4 000 h后样品的镜像光泽度从75下降至40。随老化时间的持续,氙灯紫外老化因素对硅橡胶镜像光泽度影响不明显,自然户外老化时样品的镜像光泽度持续下降。



表2 7组样品镜像光泽度测试结果

| 老化样品     |                    | 镜向光泽度 |
|----------|--------------------|-------|
| 氙灯老化样品   | 氙灯老化200h           | 60~65 |
|          | 氙灯老化400h           | 50~70 |
| 湿热老化样品   | 40℃, 75%湿度, 4 000h | 55~65 |
|          | 40℃, 96%湿度, 4 000h | 40~45 |
| 电晕老化样品   | 电晕老化120h           | 60~70 |
|          | 电晕老化240h           | 60~70 |
| 自然户外老化样品 | 户外老化2 000h         | 55~65 |
|          | 户外老化4 000h         | 50~60 |
|          | 户外老化6 000h         | 40~45 |
| 自然室内老化样品 | 室内老化2 000h         | 60~70 |
|          | 室内老化4 000h         | 65~70 |
|          | 室内老化6 000h         | 60~65 |
| 新制样品     |                    | 60~75 |
| 运行老化9年样品 |                    | 20~30 |

镜像光泽度表征样品表面的老化程度,可较好的区分且操作方便。但当被测试样品表面未出现粉化层时,测量结果差异不大。

3.3 憎水性接触角

优异的憎水性是硅橡胶被应用于互感器外绝缘护套的重要原因。憎水性可提高护套的污闪电压,降低护套的表面泄漏电流,用憎水性评价互感器的运行老化情况是非常有效的方法<sup>[19-24]</sup>。7组样品的憎水性测试结果如表3所示。从表3可看出,在老化初期硅橡胶的憎水性不但未降低,反而升高,这也与运行中的互感器、绝缘子等硅橡胶制品情况一致,其原因可能与硅橡胶材料特有的憎水性迁移特性有关。随着老化时间增加,憎水性均有逐渐下降,湿热老化与自然户外老化憎水性下降最为明显,静态接触角分别下降至104.3°和102.1°。湿热环境下样品憎水角下降是因为硅橡胶材料在此环境下憎水性会部分丧失,但在重新置于干燥环境下16 h后,憎水性即可回复,考虑到互感器实际运行环境极少会连续出现超过4 000 h(167 d)的高湿

环境,因此湿热环境不会严重影响材料的憎水性。自然户外环境下憎水性下降明显,说明多种老化因素共同作用对其影响较大,此外自然户外环境下样品表面污秽累积也是导致憎水性下降的一个原因。

表3 7组样品憎水性测试结果

| 老化样品     |                    | 静态接触角<br>平均值/°         |
|----------|--------------------|------------------------|
| 氙灯老化样品   | 氙灯老化200h           | 118.5                  |
|          | 氙灯老化400h           | 114.5                  |
| 湿热老化样品   | 40℃, 75%湿度, 4 000h | 121.1                  |
|          | 40℃, 96%湿度, 4 000h | 104.3                  |
| 电晕老化样品   | 电晕老化120h           | 116.3                  |
|          | 电晕老化240h           | 115.2                  |
| 自然户外老化样品 | 自然老化2 000h         | 120.1                  |
|          | 自然老化4 000h         | 102.1                  |
|          | 自然老化6 000h         | 104.4                  |
| 自然室内老化样品 | 室内放置2 000h         | 119.7                  |
|          | 室内放置4 000h         | 114.4                  |
|          | 室内放置6 000h         | 114.5                  |
| 新制样品     |                    | 115.4                  |
| 运行老化9年样品 |                    | 97.1(上表面)<br>95.0(下表面) |

3.4 表面电阻

采用测量表面电阻的方法来测定硅橡胶的绝缘电阻。使用直径约2.5 cm的圆形模具,紧压在硅橡胶伞裙表面,沿圆周在伞裙表面涂抹导电胶,直至形成环形导电带。将一个测量电极置于圆环正中央,另一个测量电极置于圆环导电胶上,加压进行测量,测量结果见表4。通过表4可以看出,5种不同老化因素引起的老化均导致硅橡胶材料的表面电阻大幅下降,氙灯老化与湿热老化后表面电阻降低尤为显著,而运行老化9年的互感器伞群的表面电阻较新制硅橡胶已经下降80%。

表4 7组样品表面电阻测量结果

| 老化样品     |                  | 表面电阻值<br>范围/MΩ |
|----------|------------------|----------------|
| 氙灯老化样品   | 氙灯老化200h         | 1 400~1 800    |
|          | 氙灯老化400h         | 1 100~1 600    |
| 湿热老化样品   | 40℃,75%湿度,4 000h | 1 200~1 500    |
|          | 40℃,96%湿度,4 000h | 1 200~1 500    |
| 电晕老化样品   | 电晕老化120 h        | 1 600~1 700    |
|          | 电晕老化240 h        | 1 300~1 500    |
| 自然户外老化样品 | 户外老化2 000h       | 1 700~2 000    |
|          | 户外老化4 000h       | 1 700~2 000    |
|          | 户外老化6 000h       | 1 600~2 000    |
| 自然室内老化样品 | 室内老化2 000h       | >2 000         |
|          | 室内老化4 000h       | >2 000         |
|          | 室内老化6 000h       | >2 000         |
| 新制样品     |                  | >2 000         |
| 运行老化9年样品 |                  | 400~700        |

#### 4 结 论

(1)互感器硅橡胶伞套发生老化时,材料由致密变得疏松多孔,硅橡胶分子的各种官能团红外吸收峰均降低,侧链有机基团降解速度快于主链无机基团,护套的老化主要由侧链有机基团断裂引起。

(2)氙灯老化条件对硅橡胶的硬度影响最显著,硬度从37.0 HA增加到45.40 HA;湿热老化条件对硅橡胶的镜像光泽度影响最显著,镜像光泽度从75下降至40;自然户外老化条件对硅橡胶的憎水性影响最显著,静态接触角从115.4°下降至102.1°;氙灯与湿热老化条件对硅橡胶的表面电阻影响最为显著,此外,电晕老化对各项理化性能也有较大的影响。

#### 参考文献:

- [1] 林修勇. 硅橡胶在电气绝缘方面的应用进展[J]. 特种橡胶制品,2003,24(5):7-9.
- [2] 李敬雄. 浅谈合成绝缘子[J]. 四川电力技术,2003(4):45-46.
- [3] 梁英,李成榕,丁立健,等. 电晕对HTV硅橡胶热刺激电流的影响[C]//中国电机工程学会高压专委会学术年会论文集,2007:63-71.
- [4] 王秋莎,律方成,刘云鹏,等. 电晕对室温硫化硅橡胶憎水性的影

响研究[J]. 华北电力大学学报,2010,37(4):15-17.

- [5] 徐其迎. 硅橡胶合成绝缘子耐老化性能试验研究[J]. 绝缘材料,2009,42(3):49-50.
- [6] 刘云鹏,王秋莎,律方成,等. 紫外辐射对高温硫化硅橡胶性能影响初探[J]. 高电压技术,2010,36(11):2634-2637.
- [7] 屠幼萍,佟宇梁,王倩,等. 湿度对HTV硅橡胶臭氧老化特性的影响[J]. 高电压技术,2011(4):21-24.
- [8] 何业明,张银华,苏少军. 高强度耐湿热老化室温硫化硅橡胶的研制[J]. 现代硅橡胶,2012,26(4):242-247.
- [9] 屠幼萍,罗梅馨,应高峰,等. 硅橡胶电晕老化热刺激电流特性的正交试验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):139-144.
- [10] 蓝磊,王汉良,文习山,等. 高温硫化硅橡胶加速电晕老化试验分析及其寿命预测[J]. 高电压技术,2012,38(4):782-789.
- [11] 李昂. 橡胶的老化现象及其老化机理[J]. 特种橡胶制品,2009(5):60-71.
- [11] 王秋莎. 硅橡胶合成绝缘子外绝缘老化性能研究[J]. 陕西电力,2010(9):34-37.
- [12] 万军,张刚,高乃奎,等. 自然老化硅橡胶材料表面憎水性及耐受特性的研究[J]. 高压电器,2009,45(5):16-19.
- [13] 王韵然,罗廷纲,夏志伟,等. 硅橡胶老化性能的研究进展[J]. 现代有机硅,2011,25(1):58-61.
- [14] Reynden S M, Reynders J R, Jandrell I R. Recovery of Corona Aged Silicone Rubber Insulation[C]//CIGRE Regional Meeting for the African Continent,Cairo,1997:102.
- [15] Phillips A J, Childs D J, Schneider H M. Aging of Non-ceramic Insulators due to Corona from Water Drops[J]. IEEE Transactions on Power Dielectrics,1999,14(3):1081-1089.
- [16] Reynders J R, Jandrell I R. Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outdoor Use[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999,6(5):627.
- [17] 幸松民,来国桥. 有机硅产品合成工艺及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [18] 赵阳,惠华,李娟绒,等. 复合绝缘子憎水性测量及影响因素分析[J]. 陕西电力,2011(6):76-79.
- [19] 魏远航,武利会,王成华. 大气环境对合成绝缘子的憎水性影响分析[J]. 高电压技术,2006,32(25):31-34.
- [20] 刘建权,龚浩,史鸿威,等. 复合绝缘子用硅橡胶憎水性影响因素的探讨[J]. 创新技术导报,2013(11):41.
- [21] GAO Song-hua, ZHOU Ke-sheng, WEN Li-shi. Improvement of Surface Hydrophobicity on Silicone Rubber Modified by CF<sub>4</sub> Radio Frequency Capacitively Coupled Plasma [J]. Journal of Central South University of Technology,2009(3):365-370.
- [22] ZHENG Zhi-min,XU Cai-hong,Jiang Jian,et al.Hydrophobicity of Contaminated Silicone Rubber Surfaces[J]. Chinese Journal of Polymer Science,2002,20(6):559-564.
- [23] 徐志钊. RTV涂层憎水性及对绝缘子电场和污闪特性影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.