

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.013

带电清洗剂对绝缘子用硅橡胶的溶胀效应及其影响研究

吴 田¹, 黄 帅¹, 黎 鹏¹, 普子恒¹, 刘 凯², 杨 东¹,
陈 聪¹, 赵理赞¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘要: 复合支柱绝缘子由于具有优异的防污性能,在直流换流站得到了广泛应用,但其在空间电荷和静电效应下积污严重而存在大面积污闪风险。为了评估复合支柱绝缘子带电绝缘清洗的可行性,对硅橡胶在新型绝缘清洗下的溶胀特性及其对硅橡胶的电气性能、力学性能以及憎水性的影响开展了试验分析。研究表明:硅橡胶溶胀随着溶胀时间的增加溶胀指数和直径增长率持续增大,浸泡时间 20 min 时圆形硅橡胶试样的直径增长率为 4.7%、溶胀指数为 6.8%。硅橡胶的复介电常数、复电容、介质损耗因素随着频率、溶胀指数增大而减小;在 10^{-2} ~ 10^3 Hz 频域范围内硅橡胶溶胀不会造成介电性能下降。硅橡胶溶胀对憎水性和憎水迁移性无明显影响,干燥洁净硅橡胶溶胀前后接触角 θ 平均值在 92° ~ 98° 范围内浮动,人工积污并经过憎水迁移后 θ 平均值在 119° ~ 128° 范围内浮动。硅橡胶在发生溶胀后其力学性能小幅度下降,溶胀 20 min 的其断裂拉伸强度下降 2%。试验结果表明硅橡胶在清洗剂中溶胀度受浸润时间影响较大,溶胀效应对憎水性、电气和力学性能影响较小,可通过采用易挥发配方或强对流措施控制清洗剂残留对硅橡胶的影响。

关键词: 复合绝缘子; 绝缘清洗剂; 频域介电谱; 憎水性; 溶胀; 带电作业

Study on Swelling Effect of Electrified Cleaning Agent on Silicone Rubber Used for Insulator and Its Influence

WU Tian¹, HUANG Shuai¹, LI Peng¹, PU Ziheng¹, LIU Kai², YANG Dong¹,
CHAN Cong¹, ZHAO Liyun¹

(1. College of Electricity and New Energy, China Three Gorges University, Hubei, Yichang, 443002, China; 2. China Electric Power Research Institute Ltd, Wuhan, 430074, China)

Abstract: The pollution of Composite Pillar insulators in DC converter station is serious, which leads to the acceleration of corrosion and aging of umbrella skirt materials, and even pollution flashover accidents. Electrified cleaning of composite insulators is an important means to restore insulation performance and operation reliability. Composite insulator umbrella skirt is made of silicone rubber, and the detergent will swell the silicone rubber. In order to study the relationship between the swelling index of silicone rubber for composite post insulators in substations and their electrical and mechanical properties, the frequency domain dielectric spectroscopy and mechanical tests are carried out. The results show that the diameter growth rate of silicone rubber is 4.7% and the swelling index is 6.8% after 20 minutes of swelling. The swelling index and the diameter growth rate continue to increase after further swelling, which indicates that the long time of live cleaning will lead to great changes in the shape and structure of composite insulators. The effect of frequency and swelling index on dielectric spectrum is consistent. The complex dielectric constant, complex capacitance and dielectric loss of silicone rubber decrease with the increase of frequency and swelling index. The molecular structure of silicone rubber will change greatly after swelling. The swelling of silicone rubber in the frequency range of 10^{-2} ~ 10^3 Hz will not cause the decrease of dielectric properties. The swelling of silicone rubber has no obvious effect on hydrophobicity and hydrophobicity migration. The average value of contact angle θ of dry and clean silicone rubber before and after swelling fluctuates in the range of 92° ~ 98° and the average value of θ fluctuates in the range of 119° ~ 128° after artificial fouling and hydrophobic migration. The mechanical proper-

收稿日期:2019-10-28; 修回日期:2019-12-17

ties of silicone rubber are weakened slightly by swelling. The breaking tensile strength of silicone rubber decreased by 2% after swelling for 20 minutes. The test results show that the swelling degree of silicone rubber in the cleaning agent is greatly affected by the impregnating time, and the swelling effect has little effect on hydrophobicity, electrical and mechanical properties, the influence of detergent residue on silicone rubber can be controlled by using volatile formula or strong convection measure.

Key words: composite insulator; insulation cleaning agent; frequency domain dielectric spectrum; hydrophobicity; swelling; live working

0 引言

由于中国能源资源和负荷中心的逆向分布且两者之间的距离都在数千公里以上,因而超特高压直流输电技术在大容量和远距离电能输送中发挥着重要作用。由于直流设备附近的静电场和离子流,空气中的灰尘微粒荷电后在直流电场的作用下发生定向运动,微粒更容易附着到绝缘子表面,导致绝缘子积污严重,已有研究和运行经验表明换流站内绝缘子积污的水平远高于交流变电站^[1-3],硅橡胶绝缘子在严重积污情况下可能憎水性丧失而导致污闪或不明闪络事故,对送端和受端电网的运行安全影响巨大。换流站的复合绝缘子的清扫需求越来越高,停电清扫计划安排越来越困难,因而直流换流站设备的带电清洗或清扫对确保其运行可靠性和电网的安全具有重要意义。

目前带电清污方法主要为:机器人带电清扫^[4]、带电清扫叉车^[5]、压缩空气清扫^[6]、带电清洗剂清扫^[7],上述清扫方法目前主要应用于交流设备,而在直流设备上应用较少。带电清洗剂因具有安全可靠、清洗能力强、效果好、易挥发等特点,已经在电力系统绝缘子污秽清洗中得到了应用。很多科研机构及学者已经对带电清洗剂及清洗方法开展了研究,包括清洗剂分子结构、去污机理、清洗效率,以及各种环境因素对清洗效果的影响。蒋琨^[8]将带电化学清洗与水冲洗做了对比;刘凯^[9]通过多种分析方法得到了绝缘子的污秽成分并分析了清洗剂的去污机理;蔡德华^[10]利用气质联用(GC-MS)技术分析得到了4种带电清洗剂主要组分和含量,对清洗剂组分的物理性质和化学性质进行了比较。汤振鹏^[11]试验测试了喷洒4种典型带电清洗剂不同污秽度等级下XP-70绝缘子的闪络电压,发现带电清洗剂对不同污秽度下绝缘子闪络电压几乎无影响。文^[12-15]探讨了绝缘清洗剂在110~500 kV变电站清扫中的应用。综上所述,目前研究主要针对清洗剂的清洗性能和绝缘性能,而未考虑到清洗剂清洗复合绝缘子而导致硅橡胶溶胀对电气、机械和憎水性能的

影响。

橡胶类材料在有机溶剂的作用下会发生溶胀,文^[16-19]研究表明,橡胶在海水、有机溶剂(烷烃类、芳香烃类、醚类脂类等)中都会溶胀,其中吴丹^[18]研究了二元填充剂溶胀行为的影响,刘广永^[17]从分子结构的角度研究了橡胶的溶胀行为,因此有必要研究复合绝缘子使用的硅橡胶在清洗剂中的溶胀特性及其对电气和机械性能影响。为了得到橡胶溶胀对分子结构、介电性能及力学性能的影响,文中研究了溶胀对换流站支柱绝缘子用硅橡胶的溶胀指数、频域介电谱分析(frequency domain spectroscopy, FDS)、力学试验和憎水性试验,系统评估绝缘清洗剂对复合绝缘子的电气和机械性能的影响,为在换流站开展绝缘带电清洗的可行性提供依据。

1 试验系统与试验方法

1.1 试样与试验设备

溶胀试验采用的硅橡胶由山东某公司提供,该硅橡胶材料结构与复合绝缘子伞裙相同,带电清洗剂EL99-110由某环保科技有限公司提供,该清洗剂耐高压、无色无味、挥发快、不易燃,且该清洗剂电阻率、击穿电压、燃点、闪点均符合国标GB/T 25098—2010《绝缘体带电清洗剂使用导则》^[20]的要求。

频域介电谱FDS试验系统由美国Megger公司生产的Megger IDAX300绝缘诊断分析仪、三电极油杯、恒温风箱组成。绝缘诊断分析仪接入工频交流电,输出140 V、频率范围为 10^{-2} ~ 10^3 Hz的交流电压,输出电压正负极导线连接三电极油杯的高压电极和低压电极。其中高压电极、低压电极、接地电极由高纯度的铜制成,杯壁及杯盖用亚克力材料制成,FDS试验系统结构见图1。

拉力试验选用济南试金集团公司生产的微控电液伺服万能机,该拉力试验机符合ISO5893且测量精度到B级。裁剪硅橡胶的裁刀符合标准GB/T2941—2006《橡胶试样环境调节和试验的标准温度、湿度及时间》^[23]的要求,哑铃裁刀及裁剪样品见图2。

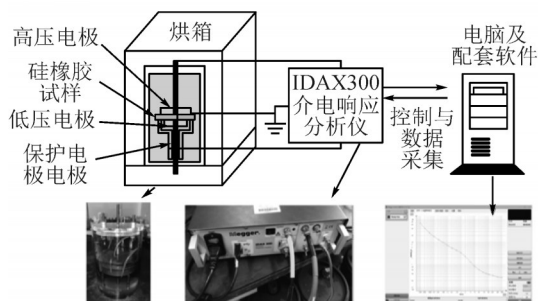


图1 FDS试验系统

Fig. 1 FDS test system

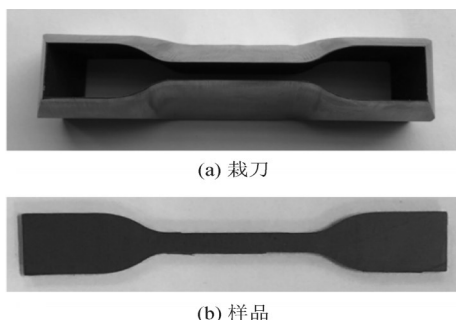


图2 哑铃状裁刀及样品

Fig. 2 Dumbbell cutter and sample

1.2 试验方法

硅橡胶的溶胀程度用溶胀指数 SI 来评价

$$SI = (M_2 - M_0) / M_1 \quad (1)$$

式(1)中: M_0 为称量瓶的质量; M_1 为溶胀前试样的质量; M_2 为溶胀后试样加称量瓶的质量。参照标准 HG/T 3870—2008《硫化橡胶溶胀指数测定方法》^[21-24], 将硅橡胶裁剪成直径 (135 ± 0.5) mm、厚度 (2 ± 0.2) mm 的圆片试样浸入清洗剂且温度控制在 (30 ± 1) °C, 浸润一段时间后取出试样并用过滤试纸吸干试样表面的清洗剂, 通过电子分析天平和游标卡尺测量其质量和直径。考虑到带电清洗剂冲洗过程一般不会超过 20 min, 且清洗剂挥发也需要一定的时间, 因此将溶胀时间设为 20 min~4 h。

憎水性及憎水迁移性测量试验参照 GB/T 24622—2009《绝缘子表面湿润性测量导则》^[25] 采用接触角法测量硅橡胶憎水性和憎水迁移性, 在洁净、溶胀、溶胀加积污的硅橡胶上缓慢连续滴加 30 μ L 去离子水, 高清摄像机水平拍摄水滴, 每组试验测量 5 滴水珠的 θ , 所测 θ 浮动不超过 5° 则为合格结果, 5 滴水珠的 θ 平均值为接触角。憎水迁移所涂污秽为 0.1 mg/cm² 的 NaCl 和 0.5 mg/cm² 的高岭土, 迁移时间为 96 h。

硅橡胶材料的断裂拉伸强度试验及测量方法参照标准 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》^[26], 标准的哑铃状硅橡胶试样见图 2。其狭窄部分厚度为 (2.0 ± 0.2) mm, 长度

为 (25.0 ± 1.0) mm, 宽度 (4.0 ± 0.1) mm, 拉伸速度 (500 ± 50) mm/min。力学性能测试有多种评价指标, 文中试验选取断裂拉伸强度 TS 分析硅橡胶溶胀对其力学性能的影响。在环境温度、压力下对硅橡胶以及在带电清洗中静置溶胀后的硅橡胶进行力学性能测试。

1.3 FDS原理简介

频域介电谱分析(FDS)用于检测绝缘介质的介电性能, 频域介电谱能反应电介质分子结构的变化。文中通过频域介电谱分析得到硅橡胶溶胀后清洗剂分子对橡胶分子结构影响的大小, 以及硅橡胶溶胀后介电性能的变化。

所用 FDS 试验系统如图 1 所示, 电极间的溶胀硅橡胶为极性电介质, 电偶极子在交变电场中转向极化过程会产生能量损耗, 因此引入复介电常数 ϵ_r^* 与复电容 ϵ_r' 来评价电偶极子极化时损耗的能量, 若在平板电极加入交变电压 U , 则流过的电流为

$$I = \omega C_0 U (\epsilon_r' + j\epsilon_r'') = j\omega C_0 U \epsilon_r^* \quad (2)$$

式(2)中: ω 为交变电压的角频率; ϵ_r' 为复介电常数实部; ϵ_r'' 为介电常数虚部; ϵ_r^* 为复介电常数; C_0 为电极间电容。其中 ϵ_r^* 可表示为 $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$, ϵ_r^* 与复电容 C^* 对应关系为

$$C^* = C' - jC'' = (\epsilon_0 \epsilon_r' s - j\epsilon_0 \epsilon_r'' s) / d = (s \epsilon_0 \epsilon_r^*) / d \quad (3)$$

式(3)中: C' 为复电容实部; C'' 为复电容虚部; s 为电极面积; d 为电极间距。试验系统通过分析外加交变电压后电极间电流变化得到电极复电容的大小, 复电容实部 C' 对应电极间电容, 电容随电介质极化强度 D 增大而增大, 其计算公式为

$$D = (1 + \chi) \epsilon_0 E \quad (4)$$

式(4)中: χ 表示极化率; E 表示电场强度。因此复电容实部可以反应硅橡胶溶胀后分子结构变化程度, 复电容 C'' 虚部对应电介质极化损耗, C'' 越小则材料的介电性能越好。

2 试验结果与分析

2.1 硅橡胶在清洗剂中的溶胀特性

硅橡胶的溶胀特性通过溶胀指数来评价, 体积变化通过橡胶圆片的直径来评价。溶胀指数和直径与溶胀时间的关系曲线见图 3、4。溶胀指数和硅橡胶材料的体积的变化规律基本一致, 随溶胀时间增加而增大, 但增长率逐渐减小, 表现出一定的饱和特性。

硅橡胶溶胀是清洗剂溶液的小分子渗入硅橡胶分子空隙的动态过程, 导致硅橡胶分子链和链段

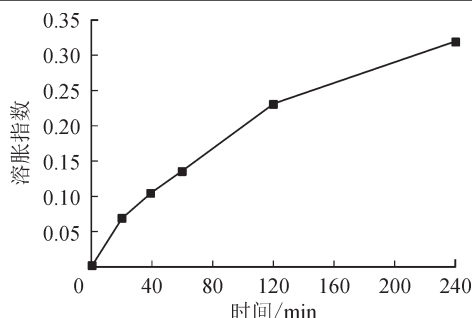


图3 硅橡胶溶胀指数与溶胀时间的关系

Fig. 3 The relationship between swelling index and swelling time

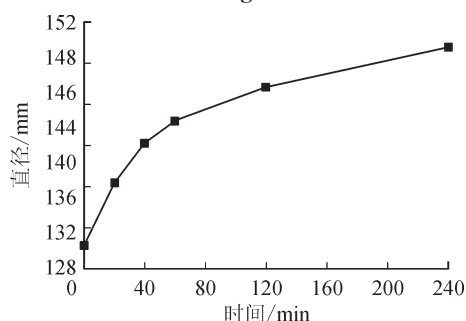


图4 硅橡胶圆形试样的直径与溶胀时间的关系

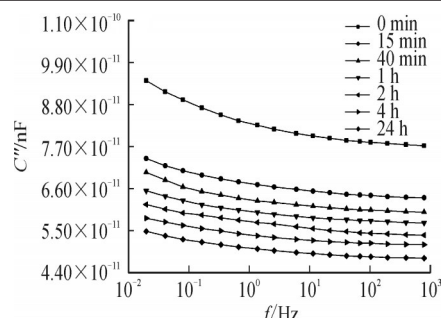
Fig. 4 The relationship between diameter and swelling time

之间的间距被扩展,从而导致更多的有机溶剂小分子更容易地渗入到硅橡胶内部。由于有机溶剂小分子的渗入和析出是一个动态过程,直至达到动态平衡,因此溶胀指数和直径都随时间增大,但增长的速率逐渐减小,并逐渐趋于饱和。

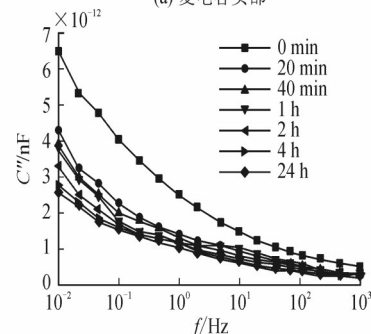
2.2 溶胀时间对硅橡胶FDS的影响

为了硅橡胶在新型清洗剂中不同溶胀时间下频域介质谱特性,通过频域介电谱分析得到了橡胶片不同溶胀时间的复电容实部 C' 、虚部 C'' 、介质损耗因素 $\tan\delta$,测试结果见图5、6,随溶胀时间的增加,试样的 C' 、 C'' 、 $\tan\delta$ 在频率 10^{-2} ~ 10^3 Hz 范围内逐渐减小,溶胀前后 $C'-f$ 曲线的变化规律基本一致,溶胀 20 min 后 C' 大幅下降,继续溶胀后,时间每增大一倍, $C'-f$ 曲线下降的幅度近似相等。溶胀 20 min 时 $\tan\delta-f$ 曲线有大幅下降,但继续溶胀后 $\tan\delta-f$ 的下降趋势并不明显。

试验电极的面积和间距不变,电容大小取决于相对介电常数 ϵ_r ,溶胀过程是清洗剂分子渗入到硅橡胶内部,分析极化强度时可将电极间介质视为硅橡胶和清洗剂的混合物,清洗剂的 ϵ_r 远低于硅橡胶,在体积相同的条件下,混合物的 ϵ_r 更小,因此溶胀指数越高电极间电容小。介质损耗因素 $\tan\delta$ 大小取决于介质中电偶极子转向极化时因分子碰撞而损失的能量,硅橡胶分子为链状三维空间结构,

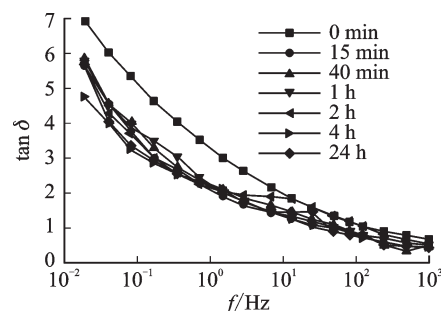


(a) 复电容实部



(b) 复电容虚部

图5 不同溶胀时间特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of $C''-f$ of different swelling time图6 不同溶胀时间 $\tan\delta-f$ 特性曲线Fig. 6 Characteristic curve of $\tan\delta-f$ of different swelling time

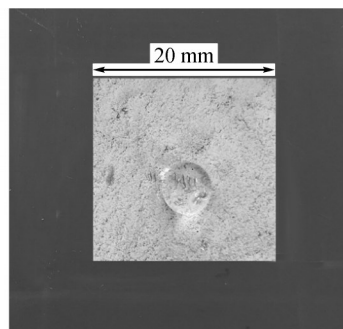
溶胀 20 min 的硅橡胶中分子间隙渗入了大量的清洗剂分子,此时转向极化分子间碰撞几率增大而损耗大量的能量,继续溶胀后分子链和段链之间的间距被扩展,可容纳更多的清洗剂分子,因此继续溶胀对电偶极子转向极化时与周围粒子的碰撞影响不大。

介质损耗因素 $\tan\delta$ 是评价电介质转向极化时的能量损耗,在电场中电偶极子的建立需要一定时间,频率非常低时大部分的电偶极子都能完成极化过程并随着交变电场一起转向,随着频率的增大,部分电偶极子已经跟不上交变电场的变化速度,频率再继续增大时,介质中就只有少部分的电偶极子能跟上电场的变化,此时电介质的极化率 χ 和极化强度 D 减低,电偶极子转向极化所损耗的能量也随之降低,因此 C' 与 $\tan\delta$ 随频率 f 增大而减小。复电容虚部是用于评价平板电极间电介质极化损耗能

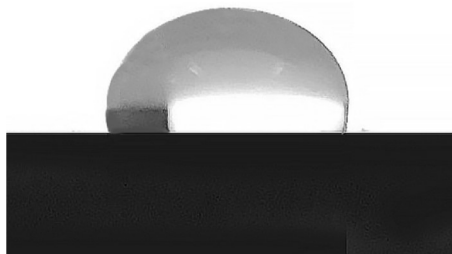
量的总和,而介质损耗因素 $\tan\delta$ 则是表示单位体积内能量损耗,因此两组数据曲线的移动趋势相同。

2.3 溶胀对憎水性及憎水迁移性的影响

试验得到硅橡胶溶胀时间对接触角 θ 的影响,以及溶胀后人工积污再经过 96 h 憎水迁移后的接触角,涂污效果以及 θ 测量见图 7。溶胀时间 t 与接触角 θ 的变化关系见图 8。干燥洁净和人工积污的硅橡胶与溶胀度之间无明显关系,干燥洁净硅橡胶溶胀前与溶胀后 θ 平均值在 $92^\circ \sim 98^\circ$ 范围浮动,洁净与溶胀并积污后的 θ 平均值均在 $119^\circ \sim 128^\circ$ 范围内浮动,硅橡胶积污后憎水性增强。



(a) 硅橡胶涂污效果



(b) θ 测量

图 7 人工积污效果与 θ 测量

Fig. 7 Artificial pollution effect and θ measurement

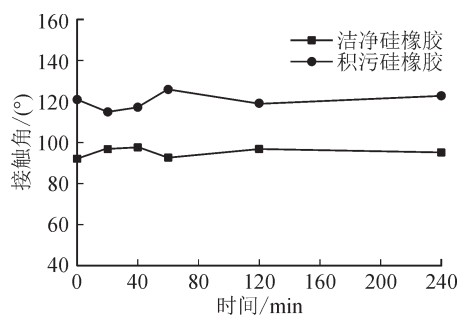


图 8 溶胀时间 $t - \theta$ 特性曲线

Fig. 8 Swelling time $t - \theta$ characteristic curve

硅橡胶溶胀是由于分子链和段链之间间距被扩展,憎水性基团并未遭到破坏,宏观上硅橡胶体均匀膨胀,表面光滑度没有发生明显变化,因此溶胀对硅橡胶憎水性无明显影响。积污硅橡胶内部硅氧烷小分子扩散到污秽层使表面具有憎水性,污秽层中含有的小分子数量越多憎水性越强,硅橡胶溶胀后内部含憎水集团小分子数量和结构未发生变化,

因此溶胀度对硅橡胶憎水迁移性没有明显影响。

2.4 溶胀对断裂拉伸强度的影响

哑铃状的硅橡胶经溶胀后其力学性能的变化见图 9。 TS_b 表示断裂拉伸强度,其计算公式为

$$TS_b = \frac{F_b}{WH} \quad (5)$$

式(5)中: F_b 表示拉伸至断裂过程中的最大拉力; W 、 H 分别为硅橡胶试样狭窄部分的宽度和平均厚度。

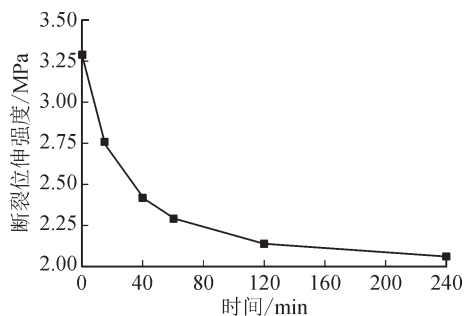


图 9 哑铃状硅橡胶 $TS_b - t$ 特性曲线

Fig. 9 Characteristic curve of $TS_b - t$ of dumbbell

silicone rubber

硅橡胶经过清洗剂溶胀后其机械性能下降规律与溶胀指数的增长规律一致,溶胀指数越大 TS_b 越小。未经溶胀的硅橡胶 TS_b 为 3.28 MPa,当溶胀时间为 20、40 min、24 h,断裂拉伸强度 TS_b 分别下降了 1.9%、6.34%、9.05%。硅橡胶吸收清洗剂使得分子链被扩张、分子链间距增加导致分子链断裂,从而影响其断裂拉伸强度,溶胀 20 min 硅橡胶分子间隙可容纳清洗剂分子,分子链断裂现象并不明显,溶胀 40 min 时分子出现大量分子链断裂,在后续溶胀中,硅橡胶吸收作用逐渐达到饱和,分子链不再断裂,因此经过 24 h 溶胀,硅橡胶 TS_b 仅下降了 9.05%。

根据试验得到的数据可知溶胀会导致力学性能下降,在实际工程采用清洗剂带电清洗复合绝缘子,为避免溶胀带来的绝缘子损坏问题,一方面有必要控制清洗的时间,另一方面需要对清洗剂加以改进,在后续制定清洗剂带电清洗复合绝缘子指导手册中,需要规定硅橡胶在清洗剂中的溶胀特性,以及溶胀对力学性能的影响。

3 结论

文中利用试验测量得到了硅橡胶溶胀后多项数据,为进一步研究带电清洗复合绝缘子的可行性提供参考,分析所得数据得到如下结论:

1) 化学清洗剂会使复合绝缘子的硅橡胶溶胀,

质量和直径都会增大,溶胀 20 min 后硅橡胶溶胀指数和直径的增长率分别达到了 6.8% 和 8%,溶胀的速率随溶胀时间逐渐变得缓慢,表现出一定的饱和效应。

2) 硅橡胶溶胀后力学性能会下降,但短时间溶胀导致力学性能的下降比较微弱,溶胀 20 min 的硅橡胶断裂拉伸强度 TS_b 仅仅下降了 1.9%。

3) 溶胀对硅橡胶的影响主要体现在体积和质量的变化,并且这种变化非常明显,所以在实际工程中选用复合绝缘子清洗剂时,可以首先通过其质量和直径的变化判断清洗剂是否可行,在复合绝缘子带电清洗的操作规则制定时,有必要将溶胀特性作为一组评判指标。

4) 硅橡胶与带电清洗剂发生溶胀效应后不会破坏内部憎水基团结构,硅橡胶表面光滑度也不会受到影响,即溶胀效应对硅橡胶憎水性和憎水迁移性无明显影响。

5) 利用频域介电谱分析溶胀硅橡胶时,其介电性能反而会提高,硅橡胶作为电极间的电介质时,溶胀会导致电偶极子极化强度 D 和极化率 χ 降低,即复电容实部 C' 和虚部 C'' 减小。

6) 清洗复合绝缘子时,将绝缘子拆卸下来测量溶胀特性非常麻烦,但频域介电谱对硅橡胶溶胀的溶胀特性非常敏感,并且做频谱分析可以在线测量,测量方式也非常简单,即实际工程中可以通过频谱分析得到复合绝缘子硅橡胶的溶胀指数。

参考文献:

- [1] 宿志一, 范建斌, 谷琛, 等. 高压直流换流站污秽水平预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 1-5.
SU Zhiyi, FAN Jianbin, GU Chen, et al. The research of pollution level prediction method of HVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 1-5.
- [2] 张楚岩, 关志成, 张福增, 等. 换流站支柱绝缘子在海拔地区的污秽外绝缘特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2568-2574.
ZHANG Chuyan, GUAN Zhicheng, ZHANG Fuzeng, et al. Pollution lashover performance of converter station post-insulators at high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2568-2574.
- [3] 郭贤珊, 宿志一, 乐波. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 1-6.
GUO Xianshan, SU Zhiyi, LE Bo. Design of post insulator for UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 1-6.
- [4] 顾毅, 翁新华, 杨汝清, 等. 关节式超高压带电清扫机器人 HVCR-III[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2173-2176.
GU Yi, WENG Xinhua, YANG Ruqing, et al. Articulated super high voltage hot-line cleaning robot "HVCR-III" [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(12): 2173-2176.
- [5] 喻华玉, 徐文澄. CZQ-50 叉车装配超高压带电自动清扫机[J]. 西北电力技术, 2001(5): 7-10.
YU Huayu, XU Wencheng. CZQ-50 forklift truck assembly UHV live automatic cleaner[J]. Northwest Electric Power Technology, 2001(5): 7-10.
- [6] 吴泽辉, 刘红太, 林睿, 等. Whqs-500 型 HVDC 换流站带电清扫装置性能试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 89-91.
WU Zehui, LIU Hongtai, LIN Rui, et al. Performance test of live cleaning device of whqs-500 HVDC converter station[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 89-91.
- [7] 林睿, 刘红太, 邵瑰玮. ± 500 kV 直流换流站污秽带电清扫装置研发[J]. 电工技术, 2007(12): 83-85.
LIN Rui, LIU Hongtai, SHAO Guiwei. Research and development of live cleaning device for contamination in ± 500 kV DC converter station[J]. Electric Engineering, 2007(12): 83-85.
- [8] 蒋琨. 电力设备的带电化学清洗[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 53-54.
JIANG Kun. On-line chemical cleaning of electric power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 53-54.
- [9] 刘凯, 朱天容, 刘庭, 等. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 892-898.
LIU Kai, ZHU Tianrong, LIU Ting, et al. Analysis of contamination components of insulators and study on decontamination mechanism of cleaner[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 892-898.
- [10] 蔡德华, 汤振鹏, 樊亚东, 等. 基于气质联用的带电清洗剂组分及挥发性测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1558-1563.
CAI Dehua, TANG Zhenpeng, FAN Yadong, et al. Components and volatility test of live-working washing agents by GC-MS technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1558-1563.
- [11] 汤振鹏, 樊亚东, 王建国, 等. 带电清洗剂对绝缘子工频闪络电压的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 181-186.
TANG Zhenpeng, FAN Yadong, WANG Jianguo, et al. Influence of live-working washing agents on power frequency flashover voltage of insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 181-186.
- [12] 朱正国, 钟建灵. 变电站绝缘子清洗试验数据分析[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 472-473.
ZHU Zhengguo, ZHONG Jianling. Data analysis of insulator cleaning test in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 472-473.
- [13] 孙阳盛, 华月申. 高分子带电清洗技术在 220 kV 变电站

- 中的应用[J]. 华东电力, 2013, 41(1): 238-240.
- SUN Yangsheng, HUA Yueshen. Application of polymer live cleaning technology in 220 kV substation[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 41(1): 238-240.
- [14] 张 涛, 毕睿华, 张云翔, 等. 基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电清扫技术的研究[J]. 四川电力技术, 2015, 38(3): 12-14.
- ZHANG Tao, BI Ruihua, ZHANG Yunxiang, et al. Research on live cleaning technology of insulator based on chemical cleaning agent and pneumatic cleaning machine [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2015, 38(3): 12-14.
- [15] 王 瑜, 张平安. 500 kV 高压带电绝缘清洗[J]. 清洗世界, 2013, 29(10): 22-26.
- WANG Yu, ZHANG Ping'an. On-line cleaning for 500 kV highvoltage electric net[J]. Cleaning World, 2013, 29(10): 22-26.
- [16] 聂 瑞, 王世杰, 宋淑媛. 不同丙烯腈含量丁腈橡胶在海水中的动静态溶胀行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 93-100.
- NIE Rui, WANG Shijie, SONG Shuyuan. Dynamic and static swelling behavior of nitrile rubber with different acrylonitrile content in seawater[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11): 93-100.
- [17] 刘广永. 氢化丁腈橡胶(HNBR)分子结构设计及其溶胀行为的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- LIU Guangyong. Study on the design of HNBR molecular structure and the swelling behavior[D]. Qingdao: Qingdao Science and Technology University, 2016.
- [18] 吴 丹. 二元促进剂对丁苯橡胶物理机械性能和介电行为的影响[J]. 橡胶参考资料, 2016, 46(4): 46-53.
- WU Dan. Effect of binary promoter on physical and mechanical properties and dielectric behavior of styrene butadiene rubber[J]. Rubber Reference Material, 2016, 46(4): 46-53.
- [19] 郝 敏, 李美华, 杨维成, 等. 甲醇汽油对橡胶材料的溶胀性和力学性能的影响[J]. 化学世界, 2014, 55(11): 646-649.
- HAO Min, LI Meihua, YANG Weicheng, et al. Swelling and mechanical performance of two types of rubber materials in methanol-asoline[J]. Chemical World, 2014, 55(11): 646-649.
- [20] 绝缘体带电清洗剂使用导则: GB/T 25098—2010 [S]. 2010.
- Live washing regulation of insulating live-working washing agent: GB/T 25098—2010[S]. 2010.
- [21] 标称电压高于1 000 V 的交流架空线路用复合绝缘子—定义、试验方法和验收标准: GB/T 19519—2004 [S]. 2004.
- Composite line post insulators for ac overhead lines with a nominal voltage greater than 1 000 V—Definitions, test methods and acceptance criteria: GB/T 19519—2004 [S]. 2004.
- [22] 绝缘体带电清洗剂: GB/T 25097—2010[S]. 2010.
- Insulating live-working washing agent: GB/T 25097—2010 [S]. 2010.
- [23] 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序: GB/T 2941—2006[S]. 2006.
- Conditioning test pieces for physical test methods: GB/T 2941—2006[S]. 2006.
- [24] 硫化橡胶溶胀指数测定方法: HG/T 3870—2008[S]. 2008.
- Rubber vulcanized—Determination method of swelling index: HG/T 3870—2008[S]. 2008.
- [25] 绝缘子表面湿润性测量导则: GB/T 24622—2009[S]. 2009.
- Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces: GB/T 24622—2009[S]. 2009.
- [26] 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 2009.
- Rubber vulcanized or thermoplastic determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528—2009[S]. 2009.

吴 田(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事带电作业、电网运行维护及外绝缘方面的工作。