

无外界干预下硅橡胶电树枝自恢复特性的研究

任志刚¹, 孙致远¹, 祝秀山¹, 李华春², 严智民³, 高建³, 李建英²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031;
3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要:为深入理解硅橡胶(SiR)电树枝的自恢复机理,本文对SiR电树枝自恢复特性进行研究,观测SiR电树枝自恢复过程中的形貌变化,表征SiR试样在电树枝自恢复过程中弹性模量和交联密度的变化,并对SiR电树枝自恢复机理进行分析。结果表明:在没有外电场以及修复填料等外界干预下,SiR电树枝表现出自恢复特性,其部分分支会逐渐退化并最终消失,分形维数逐渐降低,自恢复速率呈现先快后慢的阶段特征。在电树枝自恢复过程中,SiR试样的弹性模量略有增加,由0.964 MPa增大至0.977 MPa;交联密度略有减小,由 1.886×10^{-4} mol/g减小为 1.883×10^{-4} mol/g。自恢复后电树枝劣化区域的物理交联密度略有提升,由 0.55×10^{-4} mol/g提升至 0.58×10^{-4} mol/g。结合SiR电树枝生长机理,分析认为SiR电树枝的自恢复过程本质是树枝通道的弹性收缩过程,受控于通道内的气体流动,并伴随着氢键的重建过程。

关键词:硅橡胶;电树枝;自恢复;交联密度

中图分类号:TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.04.007

Study on self-recovery characteristics of silicon rubber electrical tree without external interventions

REN Zhigang¹, SUN Zhiyuan¹, ZHU Xiushan¹, LI Huachun², YAN Zhimin³, GAO Jian³, LI Jianying²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To deeply understand the self-recovery mechanism of electrical tree in silicone rubber (SiR), the self-recovery characteristics of SiR electrical tree were studied in this paper. The morphology variation during the self-recovery process of electrical tree in SiR were observed, the elastic modulus and crosslinking density of SiR during the self-recovery process of electrical tree were tested, and the self-recovery mechanism of SiR electrical tree was analyzed. The results show that the electrical trees in SiR exhibit self-recovery characteristics without external interventions including external electrical field and healing fillers, wherein some branches of electrical tree gradually degrade and eventually disappear, meanwhile the fractal dimension gradually decreases, and the rate of self-recovery exhibits the stage characteristics of fast at first and then slow. During the self-recovery process, the elastic modulus of SiR sample increases slightly from 0.964 MPa to 0.977 MPa, and the crosslinking density decreases slightly from 1.886×10^{-4} mol/g to 1.883×10^{-4} mol/g. After recovery, the physical crosslinking density of electrical tree deteriorated area increases slightly from 0.55×10^{-4} mol/g to 0.58×10^{-4} mol/g. Combined with the growing mechanism of SiR electrical trees, it is analyzed that the self-recovery process of SiR electrical tree is essentially the elastic contraction of tree channel, which is controlled by the gas flow in the channel and accompanied by the reconstruction of hydrogen bond.

Key words: silicone rubber; electrical tree; self-recovery; crosslinking density

0 引言

硅橡胶(silicon rubber, SiR)电树枝老化是导致SiR电缆附件绝缘性能下降甚至过早失效的主要原因之一。实际运行经验表明,110 kV电压等级以上的电缆系统中超过70%的故障是由于SiR电缆附件设备故障引起的^[1]。对故障相SiR电缆附件进行解体后发现其内部存在大量电树枝^[2],这可能是击穿

发生的重要原因。深入研究SiR电树枝老化特性对于实际电缆线路的运维具有重要的意义,目前国内外在SiR电树枝老化特性方面已展开了大量的研究^[3-9]。

普遍认为,电树枝是聚合物材料的一种不可逆损伤。而目前已有许多学者通过对聚合物材料施加外界干预,成功实现了电树枝的自修复,极大提

升了材料的电树枝耐受能力。C LESAIN T 等^[10]通过在环氧树脂中添加二环戊二烯修复液、Grubbs 催化剂以及脲醛胶囊,构建微胶囊自修复体系,实现了电树枝局部的自恢复;BIAN W C 等^[11]通过对环氧树脂添加氢键自修复材料,实现了电树枝的局部自修复;GAO L 等^[12]通过对环氧树脂基体添加包覆修复液的微胶囊,并利用电树枝生长过程中伴随的电致发光来引发修复液固化,实现了电树枝的自修复;YANG Y 等^[13]通过在热塑性聚丙烯材料中添加超顺磁纳米颗粒,并施加外部振荡磁场使其产生高温,对聚丙烯电树枝劣化部位进行熔融重塑,实现了电树枝的自修复,同时保留了原始聚丙烯基体的电气绝缘性能。硅凝胶^[14]等聚合物在无需任何外部干预的情况下具有自恢复能力,硅凝胶的自恢复能力主要源于其中的液相组分,其电树枝的自恢复过程与汽化的液相小分子重新凝结、液相小分子的静水压力以及聚合物网络结构的力学模量密切相关^[14]。SiR 与硅凝胶具有相似的分子结构,并且在 SiR 内部也观察到了无外界干预下的电树枝自恢复现象。但 SiR 不含液相组分,因此其电树枝的自恢复机理与硅凝胶有所差异。目前 SiR 电树枝的自恢复特性仅停留在观察到的阶段,其自恢复的具体过程尚不明确,仍需进一步研究。

本文针对 SiR 电树枝在没有外界干预下的自恢复特性展开研究。对自恢复过程中 SiR 电树枝进行监测,采用分形维数对其自恢复过程进行定量表征,并对自恢复后的 SiR 试样进行电树枝再生长实验,结合力学性能与微观结构表征,解释 SiR 电树枝的自恢复过程。

1 实验

1.1 试样制备

SiR 试样采用商用 R629 型双组分高温硫化硅橡胶(中蓝晨光化工研究设计院有限公司),原料中包含纳米二氧化硅等功能性填料。制备两种不同厚度的试样,厚度为 3 mm 的块状试样用于电树枝实验测试,而厚度为 1 mm 的薄膜试样用于力学性能测试。

块状试样的制备流程如下:首先按质量比为 1:1 称取 A、B 两相原料(A 相为硅胶,B 相为固化剂、铂金催化剂及其他助剂),在高速离心机中均匀混合 20 min;接着将原料放入真空烘箱中处理 10 min 以去除原料中的气泡;最后将原料注入预埋有针电极的模具中,放在平板硫化机上于 120℃ 条件下硫化 30 min 获得电树枝实验试样,其中针电极曲率半径

为 3 μm,针尖距地电极 3 mm。

薄膜试样采用热压法制备,将混合均匀的原料倒入厚度为 1 mm 的模具中,在硫化过程中采用平板硫化机施加 15 MPa 的压力,其余硫化条件与块状试样相同。

1.2 电树枝生长与自恢复实验

电树枝实验平台由工频交流电源、显微成像系统、可控光源以及 PC 端构成。采用相同的实验条件对所有 SiR 试样进行电树枝生长实验,在实验过程中,对针电极施加幅值为 10 kV 的工频高压,背电极经铜板接地,在 30℃ 下加压 10 min 后撤去电压,记录电树枝形貌。接着将生长有电树枝的 SiR 试样放置于 30℃ 烘箱中进行电树枝的自恢复实验。设置 10 个试样,定期取样观测并记录其内部电树枝的形貌变化。当电树枝形貌不再发生变化时,将 SiR 试样取出,在 30℃ 下对其施加相同的实验条件(AC-10 kV/10 min)进行电树枝的再生长实验,并记录其形貌变化。

1.3 力学性能测试

采用 5KNCMT-4503 型万能拉伸机对 SiR 试样进行拉伸实验获得材料的弹性模量,将试样加工为标准哑铃形,颈部长度为 20 mm,宽度为 4 mm,试样厚度为 1 mm,设置拉伸速率为 200 mm/min,共测试 5 个试样。

1.4 交联密度测试

采用平衡溶胀法测试 SiR 试样的交联密度。首先将初始质量为 m_0 的 SiR 试样放入甲苯溶剂中,密闭并在室温下静置,定期取样称量 SiR 试样的质量,直到其质量不再发生变化,得到试样达到溶胀平衡时的质量 m_1 ,最后通过式(1)~(3)计算试样的交联密度 D_{total} ^[15]。

$$D_{\text{total}} = \frac{1}{2M_c} \quad (1)$$

$$M_c = -\frac{\rho_0 V_m \varphi^{1/3}}{\ln(1-\varphi) + \varphi + X\varphi^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\rho_0}{\rho_1} \left(\frac{m_1}{m_0} - 1 \right) \frac{1}{\varphi_0}} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: M_c 为相邻交联点间的平均分子量; ρ_0 为 SiR 试样溶胀前的密度; ρ_1 为甲苯溶剂的密度; V_m 为甲苯溶剂的摩尔体积,约为 107 mL/mol; X 为表征 SiR 材料与溶剂之间相互作用的常数,此处 X 为 0.465; φ_0 为溶胀前 SiR 中橡胶相的体积分数; φ 为溶胀后 SiR 中橡胶相的体积分数。

SiR 中的交联网络通常由化学交联结构和物理交联结构组成^[16],其中化学交联结构是经由共价键

所形成的交联结构,而物理交联结构则包括分子链间的缠结以及纳米 SiO_2 与分子链间的氢键键合。通过上述方法获得的是 SiR 试样总的交联密度 D_{total} , 可以采用甲苯氨溶剂替换甲苯溶剂进行平衡溶胀测试获得试样的化学交联密度 D_{chem} [16], 进一步通过 D_{total} 与 D_{chem} 之间的差值获得物理交联密度 D_{phys} , 如式(4)所示。

$$D_{\text{total}} = D_{\text{phys}} + D_{\text{chem}} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 SiR 电树枝自恢复现象

图 1 所示为撤去电压后,不同时间下 SiR 试样典型电树枝形貌的变化规律,图中还给出了对应电树枝形貌的分形维数。从图 1 可以看出,随着时间的增加, SiR 电树枝部分分支逐渐退化并最终消失,主通道变化不明显,分形维数逐渐减小,从约 1.55 降低至约 1.43。说明 SiR 电树枝在没有任何外部电压激励的情况下发生了明显的自恢复,这种现象称为 SiR 电树枝的本征自恢复现象。

为了定量描述 SiR 电树枝的本征自恢复过程,对自恢复过程中 SiR 电树枝的分形维数进行统计并

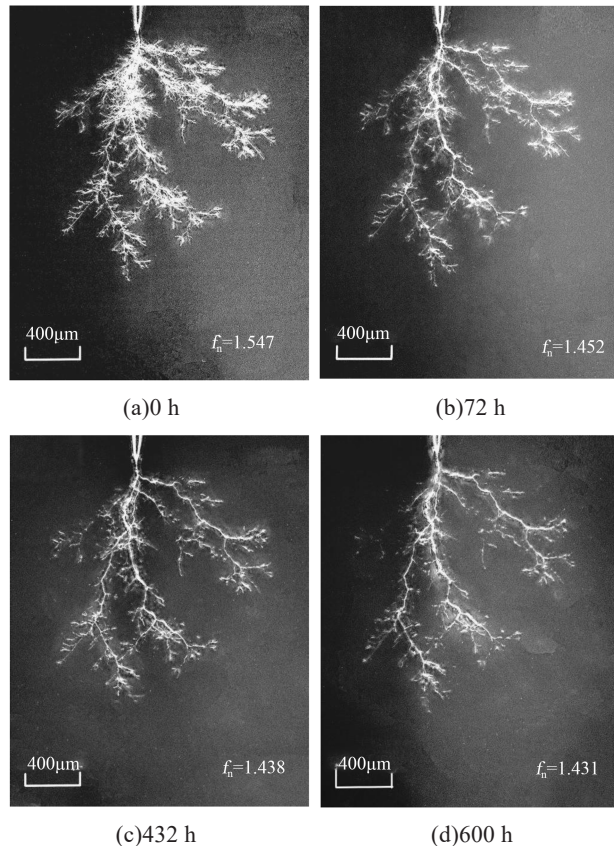


图 1 不同时间下 SiR 电树枝形貌变化

Fig.1 Changes of electrical tree morphology of SiR at different time

作归一化处理,由于二维图形的分形维数位于 1 至 2 之间,采用式(5)计算归一后的分形维数。

$$f_{\text{norm}} = \frac{f_t - 1}{f_0 - 1} \quad (5)$$

式(5)中: f_{norm} 为任意自恢复时刻归一化后的分形维数; f_t 为任意自恢复时刻电树枝的分形维数; f_0 为刚撤去电压时电树枝初始形貌的分形维数。

f_{norm} 随自恢复时间的变化关系如图 2 所示。从图 2 可以看出, SiR 电树枝的 f_{norm} 随着时间的增加逐渐减小。

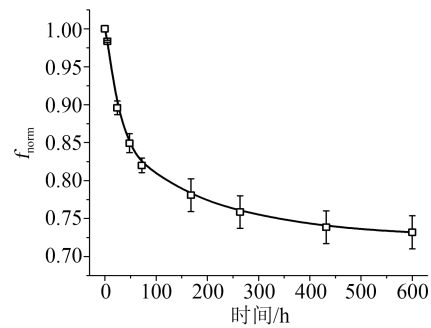


图 2 归一化分形维数 f_{norm} 在自恢复过程的变化

Fig.2 Variation of normalized fractal dimension f_{norm} in the self-recovery process

对 f_{norm} 衰减曲线进行一阶微分后获得其衰减速率曲线,如图 3 所示,衰减速率反映了电树枝自恢复过程的快慢程度。从图 3 可以看出, f_{norm} 衰减速率逐渐降低,并呈现阶段性的变化。第 1 阶段(0~72 h),衰减速率较大;第 2 阶段(72~432 h),衰减速率相对较低;第 3 阶段(432~600 h),衰减速率接近于 0,说明自恢复过程在此阶段基本停止。

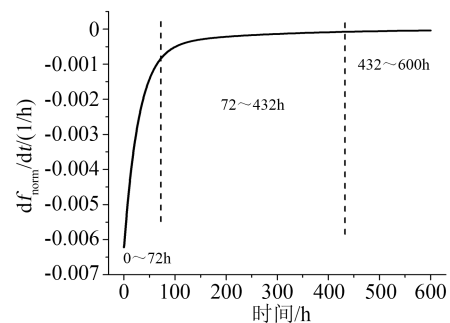


图 3 自恢复过程中 f_{norm} 的衰减速率的变化

Fig.3 Variation in decay rate of f_{norm} in the self-recovery process

图 4 为 SiR 试样自恢复后电树枝再生长的典型形貌。从图 4 可以看出,再生长后的电树枝分形维数并未发生大幅度提升,这是由于再生长后的电树枝形貌中存在部分奇异区域(如图 4(c)中圆圈所示),这部分区域是在初次生长时产生的电树枝通

道,经自恢复后这部分通道消失,并且在再生长过程中没有再次形成电树枝通道。

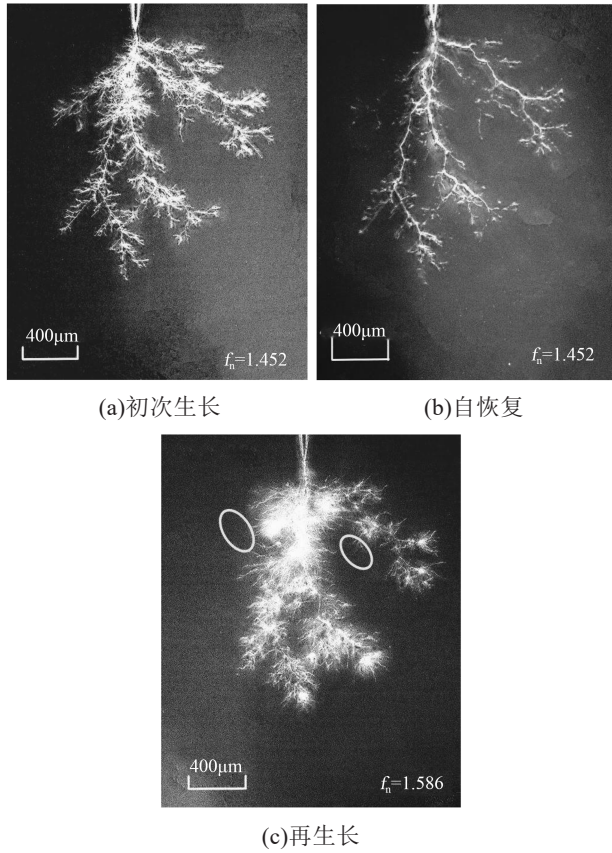


图4 SiR电树枝初次生长、自恢复后及再生长形貌
Fig.4 Morphology of initial growth, self-recover, and re-growth of SiR electrical tree

2.2 自恢复过程中SiR的力学性能

长时间的高温处理可能会影响SiR的力学性能,为了获得SiR试样在自恢复过程中力学性能的变化规律,采用拉伸实验获得了SiR试样的弹性模量随自恢复时间的变化规律,结果如图5所示。从图5可以看出,SiR试样的弹性模量在整个自恢复过程中略有增加,30℃下放置600 h后SiR试样的弹性模量由0.964 MPa增大至0.977 MPa。

2.3 自恢复过程中SiR的交联密度

SiR的力学性能与其交联结构密切相关,图6为SiR试样的交联密度与电树枝自恢复时间的关系。从图6可以看出,SiR试样的交联密度在整个自恢复过程中略有减小,在30℃下放置600 h后SiR交联密度由 1.886×10^{-4} mol/g减小为 1.883×10^{-4} mol/g。

对自恢复前后的电树枝劣化区域进行物理交联密度测试。取30℃下进行自恢复的SiR试样作为待测试样,将针尖前端边长为2 mm的立方体区域切下进行测试。为了提高实验结果的准确性,尽量选取电树枝分支较为密集的试样进行测试,并且电

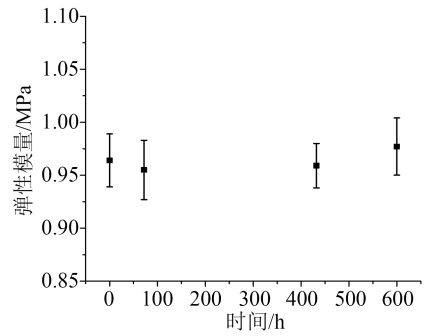


图5 SiR试样的弹性模量与自恢复时间的关系
Fig.5 Relationship between elastic modulus and self-recovery time of SiR samples

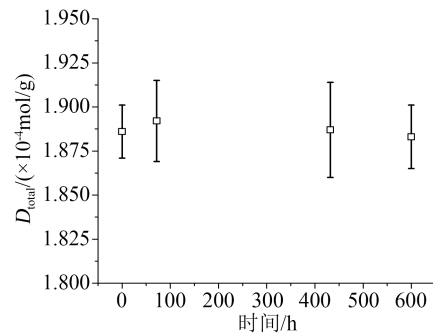


图6 SiR试样交联密度随自恢复时间的变化
Fig.6 Variation of crosslinking density with self-recovery time of SiR samples

树枝的长度均大于2 mm,以保证切下的立方体试样中含有尽可能多的电树枝通道。同一类型的试样设置10个测试试样,对测试结果取平均值并计算标准差,结果如图7所示。

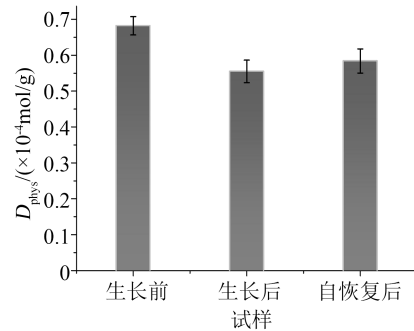


图7 电树枝生长前、生长后和自恢复后SiR试样的物理交联密度

Fig.7 Physical crosslinking density of SiR samples before growing after growing and after self-recovery of electrical tree

从图7可以看出,相比于生长前的试样,电树枝生长后,SiR电树枝区域的物理交联密度减小,表明电树枝主要沿着SiR交联区域进行生长。而电树枝自恢复后, D_{phys} 有轻微的提升,由 0.55×10^{-4} mol/g提升至 0.58×10^{-4} mol/g。硅橡胶中纳米 SiO_2 粒子与硅

橡胶主链之间的氢键构成了硅橡胶的物理交联网络^[17],因此电树枝区域物理交联密度的提升表明电树枝的自恢复过程可能伴随着氢键的重建。

2.4 SiR 电树枝自恢复特性的机理分析

SiR 电树枝的自恢复与其生长机理相关。在电树枝生长过程中,其分子链段在高温无氧的条件下会裂解生成具有挥发性的硅氧烷气体^[9],局部放电产生的高温会促进硅氧烷气体受热膨胀,电树枝通道内壁受到挤压。当挤压程度超过分子链段的伸缩极限时,会导致部分分子链断裂,撕裂硅橡胶并使得电树枝向前发展。因此, SiR 电树枝的本质是高能电子造成分子链段破坏,同时分子链段热裂解生成的气体在受热膨胀后撕裂硅橡胶并撑起电树枝通道。 SiR 电树枝生长前、后分子链结构示意图如图 8 所示。从图 8 可以看出,在电树枝生长前, SiR 中的分子链段呈蜷曲状,并通过缠结以及化学交联键构成网状结构;电树枝生长后,部分分子链段断裂,相邻的分子链由于气体的膨胀而受到挤压变形,从而形成中空的树形通道。因此, SiR 电树枝的自恢复过程可能主要源于树枝通道的弹性收缩,并与通道周围分子链运动以及通道内气体的流动密切相关。

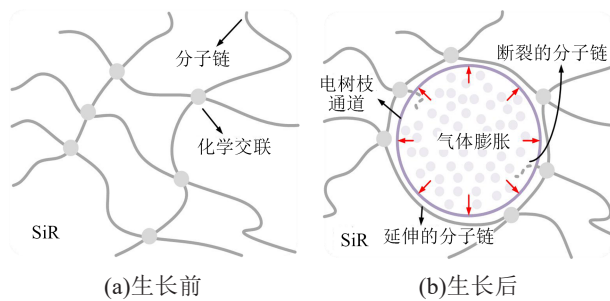


图 8 电树枝生长前、后 SiR 分子链段示意图

Fig.8 Schematic diagram of SiR molecule segments before and after electrical tree growth

根据自恢复速率结果,可以将 SiR 电树枝的自恢复过程大致划分为 3 个阶段:第 1 阶段,电树枝自恢复速率较快;第 2 阶段,电树枝自恢复速率减缓;第 3 阶段,电树枝的自恢复速率接近于 0,自恢复过程基本停止。自恢复速率的差异可能是由于在不同阶段内主导自恢复的驱动力不同。从图 1 可以看出,自恢复主要发生于电树枝的分支,而电树枝主通道在整个自恢复过程中基本不发生变化。这是由于在电树枝生长过程中,主通道是产生局部放电最为剧烈的区域,局部放电产生的能量严重地破坏了主通道周围的分子链段,使得主通道基本丧失了弹性回复力。

在第 1 阶段,撤去电压后, SiR 树枝通道内的小分子气体会迅速冷却收缩。气体冷却收缩后,对通道内壁的挤压减弱,电树枝通道缓慢收缩。由于主通道破坏严重,气体收缩后在主通道中会留下一定的空间,分支中的气体在通道壁的弹性回复力作用下逐渐被挤出,并向主通道流动。因此,在第 1 阶段,分支快速收缩,电树枝表现出较高的自恢复速率。

当主通道中的剩余空间被分支气体占据后,通道内气体压力与通道壁的弹性回复力趋于平衡,此时,电树枝的自恢复速率逐渐减缓,自恢复过程进入第 2 阶段。此外,通道内的气体在通道弹性回复力的挤压下,同时沿着针电极处以及 SiR 内部逐渐向外扩散。由于扩散过程相对缓慢,因此在第 2 阶段,电树枝的自恢复速率大幅降低。此阶段驱动电树枝自恢复的因素可能是 SiR 的弹性回复力以及气体的扩散过程。

当通道内的气体基本扩散完全后,树枝通道的收缩也基本停止,整个自恢复过程结束,因此在第 3 阶段,电树枝的形貌基本不再发生变化。

另外,部分电树枝自恢复区域在再生长时未重新形成电树枝通道,原因可能有两点。一方面,大量的分支生长后形成了密集的局部丛状电树枝,会在树枝末端形成电荷屏蔽层,从而抑制电树枝的进一步生长。另一方面,可能与自恢复过程中这些区域微观结构的变化有关。电树枝自恢复前, SiR 分子链段及物理交联结构在高能电子的作用下发生断裂,电树枝通道的形成使得这些断裂的分子链段相互分离。同时,由于物理交联结构被破坏,由氢键相连的纳米 SiO₂ 粒子与 SiR 分子主链也被通道隔开。电树枝在自恢复后,电树枝通道发生弹性收缩,原被电树枝通道隔开的纳米 SiO₂ 粒子与 SiR 分子主链重新靠拢。已有研究指出 SiR 中的氢键结合位点是一个不断形成与解离的动态系统,并非稳定不变的刚性晶格^[18]。因此,当通道收缩使得纳米 SiO₂ 粒子与 SiR 分子主链相互接近后,氢键会在二者之间重新形成。氢键的重建可能会使得这些区域的电气强度增强,而局部放电产生的大部分能量在主通道中被耗散,因此,电树枝在这些区域不会再次生长。

综上, SiR 电树枝的自恢复过程本质上是电树枝通道的弹性收缩,受控于通道内气体流动及通道周围分子链构象转变等过程,并伴随着氢键的重建。

3 结论

(1) SiR 电树枝具有明显的自恢复特性。在没有任何外部电场以及修复填料的情况下, SiR 电树枝的部分分支逐渐退化并最终消失在视野中,分形维数由 1.55 下降至 1.43。自恢复速率分为 3 个阶段:第 1 阶段(0~72 h),自恢复过程较快;第 2 阶段(72~432 h),自恢复过程较慢;第 3 阶段(432~600 h),自恢复过程基本停止,自恢复速率接近于 0。

(2) 在电树枝自恢复过程中, SiR 试样整体的弹性模量略有增加,由 0.964 MPa 增大至 0.977 MPa。交联密度略有减小,由 1.886×10^{-4} mol/g 变减小为 1.883×10^{-4} mol/g。自恢复后 SiR 电树枝劣化区域的物理交联密度略有提升,由 0.55×10^{-4} mol/g 提升至 0.58×10^{-4} mol/g,表明电树枝自恢复包含氢键的重建过程。

(3) 电树枝自恢复本质上是电树枝通道的弹性收缩,受控于通道内的气体运动,伴随着氢键重建。自恢复速率的差异可能是由于在不同阶段内主导自恢复的驱动力不同。第 1 阶段内自恢复可能主要受控于气体的冷却收缩,第 2 阶段内自恢复可能主要受控于 SiR 的弹性回复力以及气体的扩散过程,第 3 阶段内自恢复过程基本停止。

参考文献:

- [1] JIANG Y, MIN H, LUO J H, et al. Partial discharge pattern characteristic of HV cable joints with typical artificial defect[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE,2010.
- [2] 刘畅. 电缆接头运行历史对硅橡胶预制件材料性能的影响[D]. 西安:西安交通大学,2017.
- [3] 赵鑫,韩涛,马婷婷,等. 交直流叠加电压下硅橡胶内电树枝特性[J]. 高电压技术,2021,47(9):3173-3180.
- [4] 陈杰,周立,周远翔,等. 硅橡胶电树枝生长过程局部放电特性研究[J]. 绝缘材料,2017,50(3):70-74.
- [5] 周远翔,张云霄,陈铮铮,等. 机械应力对硅橡胶电树枝起始性能的影响[J]. 绝缘材料,2017,50(2):53-57.
- [6] YAN Z M, YANG K, WANG S H, et al. Electrical tree in silicone rubber: roles of silicone grease and switching impulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(3): 829-836.
- [7] 马宗乐,梅迪,杨广忠,等. SiO₂ 纳米颗粒对硅橡胶中电树枝特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2014,47(1):81-84.
- [8] ZHANG Y X, ZHANG L, ZHOU Y, et al. Temperature dependence of DC electrical tree initiation in silicone rubber considering defect type and polarity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(5):2694-2702.
- [9] 严智民,杨凯,王诗航,等. 硅脂对硅橡胶电树枝劣化特性的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):604-611.
- [10] LESAIN C, RISINGGÅRD V, HØLTO J, et al. Self-healing high voltage electrical insulation materials[C]//2014 IEEE Electrical Insulation Conference. Philadelphia, USA:IEEE,2014.
- [11] BIAN W C, WANG W X, YANG Y. A self-healing and electrical-tree-inhibiting epoxy composite with hydrogen-bonds and SiO₂ particles[J]. Polymers,2017,9(9):431.
- [12] GAO L, YANG Y, XIE J Y, et al. Autonomous self-healing of electrical degradation in dielectric polymers using in situ electroluminescence[J]. Matter,2020,2(2):451-463.
- [13] YANG Y, HE J L, LI Q, et al. Self-healing of electrical damage in polymers using superparamagnetic nanoparticles[J]. Nature Nanotechnology,2019,14(2):151-155.
- [14] DODD S J, SALVATIERRA L, DISSADO L A, et al. Electrical trees in silicone gel: A combination of liquid and solid behaviour patterns[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen, China:IEEE,2013.
- [15] FLORY P J, REHNER J. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks I rubberlike elasticity[J]. Journal of Chemical Physics,1943,11(11):512-520.
- [16] CHEN C, JIA Z D, YE W A, et al. Thermo-oxidative aging analysis of HTV silicone rubber used for outdoor insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3): 1761-1772.
- [17] 周远翔,刘睿,张云霄,等. 硅橡胶电树枝的引发与生长过程[J]. 高电压技术,2014,40(12):3656-3664.
- [18] COHEN-ADDAD J P, ROBY C, SAUVIAT M. Characterization of chain binding to filler in silicone-silica systems[J]. Polymer, 1985,26(8):1231-1233.

收稿日期:2022-04-06 修回日期:2022-05-24

作者简介:任志刚(1983-),男(汉族),北京人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。