

加速热老化对 500 kV 超高压直流交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性的影响

刘嘉浩¹, 陈向荣¹, 张添胤¹, 宋家乐¹, 彭维龙², 于锦程²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000)

摘 要:为了研究加速热老化对 500 kV 超高压直流(EHVDC)交联聚乙烯(XLPE)电缆电树枝生长及局部放电特性的影响,制备了横切和环切试样,通过电树枝实时显微观测及局部放电测量系统,研究3种温度下XLPE试样的电树枝引发和生长及局部放电特性,并结合差示扫描量热法、电导率测试和分子动力学计算分析了加速热老化的影响。加速热老化显著降低了XLPE试样的起树电压和电树枝引发时间,提升了电树枝的生长速度,增大了局部放电量和脉冲重复率。加速热老化后试样的氧化诱导期和结晶度均降低,表明抗氧化剂含量的下降导致试样内部分子链在热氧环境下断裂,无定形区增大,且试样的电导率在加速热老化后增加、活化能降低。分子动力学计算结果表明,老化后试样的自由体积增加。无定形区的扩展和链间空隙的增大导致试样内部的载流子迁移通道增多,降低了载流子迁移势垒,进而出现活化能的降低和电导率的升高,从而导致试样局部电场强度升高,电树枝加速引发,出现更多分支结构。

关键词:加速热老化;超高压直流电缆;交联聚乙烯;电树枝;局部放电;自由体积

DOI:10.15938/j.emc.2026.02.001

中图分类号:TM247

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2026)02-0001-09

Effect of accelerated thermal ageing on propagation and partial discharge characteristics of electrical trees of 500 kV EHVDC XLPE cable

LIU Jiahao¹, CHEN Xiangrong¹, ZHANG Tianyin¹, SONG Jiale¹,
PENG Weilong², YU Jincheng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhoushan 316000, China)

Abstract:To study the effect of accelerated thermal ageing on the propagation and partial discharge characteristics of electrical trees of 500 kV extra high voltage direct current (EHVDC) cross-linked polyethylene (XLPE) cable, cross-cut and ring-cut samples were prepared. Electrical tree initiation and growth experiments were conducted at three temperatures, using a real-time electrical tree observation system and partial discharge measurement setup. Combined with differential scanning calorimetry, conductivity tests and molecular dynamics simulations to analyze the effect of accelerated thermal ageing. Accelerated ther-

收稿日期: 2025-09-04

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211ZS24000P)

作者简介: 刘嘉浩(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电力电缆绝缘测试技术和可靠性分析;

陈向荣(1982—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为先进电气材料与高压绝缘测试技术、先进电力装备与新型电力系统、高压新技术等先进高压输电新技术的前沿基础和应用研究;

张添胤(2000—),男,博士研究生,研究方向为高压直流海缆绝缘测试技术;

宋家乐(1998—),男,博士研究生,研究方向为高压绝缘测试技术、绝缘结构优化和多物理场仿真;

彭维龙(1988—),男,学士,研究方向为高压直流海缆绝缘状态评估与接头可靠性;

于锦程(2000—),男,学士,研究方向为高压海缆系统试验评价技术、海底电缆水下状态监测技术。

通信作者: 陈向荣

mal ageing significantly reduces the tree initiation voltage, shortens initiation time, increases tree growth rate, and elevates both partial discharge magnitude and pulse repetition rate. The oxidation induction time and crystallinity decrease after ageing, indicating molecular chain scission and enlarged amorphous regions due to antioxidant depletion, led to conductivity increase and activation energy decrease. Molecular dynamics simulations show an increase in the fraction of free volume. The expansion of amorphous region and enlarged inter-chain gaps enhance charge transport channels and reduce energy barriers, leading to higher partial electrical field strength, faster tree initiation, and more complex electrical tree branching structure.

Keywords: accelerated thermal ageing; extra high voltage direct current cable; cross-linked polyethylene; electrical tree; partial discharges; free volume

0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)因其优异的绝缘性能、耐温性能和力学性能,成为500 kV超高压直流(extra high voltage direct current, EHVDC)电缆的主流绝缘材料。随着近年来海上风电、跨海能源互联及海洋资源开发的快速发展,在大容量、长距离的高压直流输电中,XLPE 挤出绝缘电缆逐步成为海洋输电系统的核心^[1]。工况条件下,由于谐波、负载波动等干扰,直流电缆实际承受交直流复合电场。交流电压下电极极性以一定频率交替反转,导致空穴与电子在缺陷区域发生周期性的注入和抽出,高能载流子快速迁移同时产生物理冲击和能量释放,因此相较于直流,谐波作用下电缆内部更容易产生电树枝^[2]。较高的电压等级和载流量,以及长期运行过程中电缆所处的复杂服役环境都会导致 XLPE 的热老化,严重威胁运行安全。因此,研究加速热老化对 500 kV EHVDC XLPE 电缆内电树枝生长及局部放电特性的影响,对于我国大容量深远海超高压直流电缆输电工程的安全运行有着重要意义。

热老化是电缆服役中常见的老化之一,目前国内外学者在热老化对 XLPE 材料、低电压等级的电缆 XLPE 绝缘的理化性能以及电学性能的影响方面已开展大量研究^[3-4]。陈伟林等^[5]研究发现高温运行引起材料结晶区和无定形区比例变化,导致介电常数升高和击穿场强下降。朱梦瑶等^[6]指出热老化会加剧 XLPE 内部缺陷处的电场畸变效应,提高局部放电风险。闫群民等^[7]提出高温热老化导致晶粒边界无序度提升,从而调节陷阱深度和载流子跃迁速率。此外,部分学者对应力、频率以及不同材料混合等因素对电树枝以及局部放电特性的影响进

行了一定的研究。Hu 等^[8]发现机械应变对 XLPE 中电树枝的最终形貌有显著影响,压缩应变会使电树枝宽度呈线性增长。彭苏蔓等^[9]提出纳米粒子可有效延缓电树枝扩展、抑制局部放电强度,增强热电稳定作用。可以看出,目前现有研究中针对已投入生产和使用的成品 XLPE 电缆绝缘中电树枝的引发、生长及其局部放电特性的研究较少,因此亟待开展加速热老化对成品 XLPE 电缆内电树枝生长及局部放电特性的影响研究,将为实际应用中电缆的运维和状态评估提供实验依据和参考。

本文选择 500 kV EHVDC XLPE 电缆作为研究对象,通过车床横切和环切电缆得到环形和薄片试样,随后取部分同批试样在 110 ℃ 条件下进行为期 20 天的加速热老化,得到老化前后的 XLPE 试样。通过自主设计的高温循环电树枝实时观测及局部放电测量系统,研究老化前后 XLPE 试样在不同温度下电树枝生长及局部放电特性。通过差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测试、电导率测试结合分子动力学仿真计算,得到加速热老化前后 XLPE 试样的结晶度、氧化诱导期(oxidation induction time, OIT)、电导率、活化能和自由体积的变化,研究 XLPE 试样电学、理化特性对其电树枝生长及局部放电特性的影响。

1 实验方法

1.1 试样制备

选取 500 kV EHVDC XLPE 电缆样段,抽出缆芯后,利用卷料切削车床对电缆样段进行横切和环切,经清洗、干燥后获得两类试样:厚度 5 mm 的空心圆环状横切试样与厚度 0.20 mm 的环切试样。横切试样用于进行电树枝实验与 DSC 测试,环切试样用于电导率测试。取同批次部分试样置于真空烘箱

110 ℃加速热老化 20 天。试样和电极的结构尺寸如图 1 所示,电树枝实验以典型针-板电极系统,针电极的直径 $\Phi = 1\text{ mm}$,针尖圆锥角 $\theta = 30^\circ$,针尖曲率半径 $r = (5 \pm 1)\text{ }\mu\text{m}$ 。使用特制模具将处理好的不锈钢针插入 XLPE 试样中,控制电极间距为 $(2 \pm 0.2)\text{ mm}$ 。将试样在模具中保持 5 min 以释放残留应力。

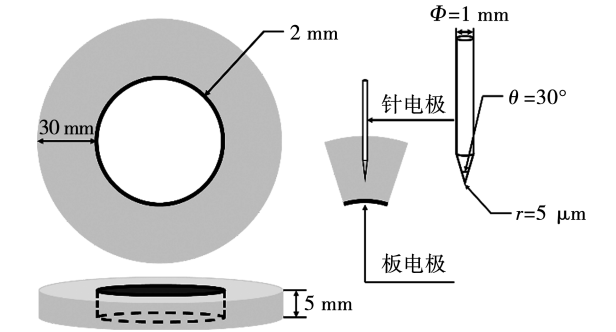


图 1 试样和电极的结构尺寸

Fig. 1 Structure and size of the sample and electrode

1.2 实验系统

本文使用由高温循环电树枝实时观测系统和局部放电测量系统组成的实验系统。局部放电测量系统电路拓扑如图 2 所示。高压供电采用两级结构,调压器 T_1 和工频升压变压器 T_2 串联。测量回路以 C_1 和 C_2 构成电容式分压器,经耦合电容 C_c 捕获试样的局放脉冲电流,串联保护电阻 R_0 ,检测阻抗 Z 作为 MPD 600 局放测量系统的信号输入,上位机完成最后的数据采集。

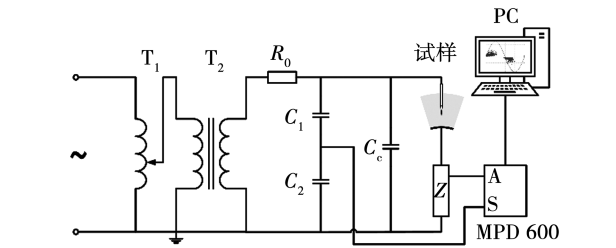


图 2 局部放电测量系统

Fig. 2 Partial discharge test system

图 3 为高温循环电树枝实时观测系统,温控由高温循环装置及耐高温软管实现,循环泵驱动热硅油在器皿外敷管道内连续流动以保证温度均匀。本实验设定 30、50 和 70 ℃三种不同的环境温度,当器皿内温度计达到目标值并稳定 30 min 后开始实验。实验时试样置于环形器皿并完全浸没于硅油中,通过显微镜实时观测电树枝生长过程。

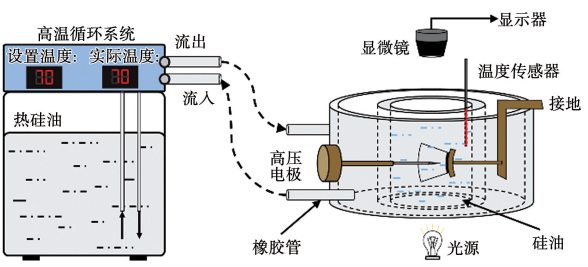


图 3 高温循环电树枝实时观测系统

Fig. 3 High temperature cycled electrical tree real-time observation system

1.3 实验方法

电树枝观测及局部放电测量:本文在实验前均对局部放电信号进行标准化校准去噪,以 50 V/s 升压至有效值 10 kV 后停止,环境为 0.1 MPa、60% RH。当局放量 $> 20\text{ pC}$ 且显微镜观察到针尖电树枝长度 $\geq 10\text{ }\mu\text{m}$,此时电压记为起树电压并记入一次放电行为。其中,电树枝的长度定义为电树枝三维结构中电树枝最远端和针尖的距离。每组取 10 个有效样本并以双参数威布尔分布统计。随后在 30、50、70 ℃下进行生长实验,均外加 10 kV,观测时间和次数分别为 16 min (4 min/次)、6 min (3 min/次)、3 min (1.5 min/次)。实验设定在局部放电电量阈值大于等于 20 pC 时视为一次放电行为。每个温度条件至少重复 10 次,共累计超过 60 组有效实验。

氧化诱导期:将约 10 mg 试样置于流速为 50 mL/min 的氮气氛围中,从室温以 10 ℃/min 加热至 200 ℃并计时为 T_1 。随后恒温 5 min,气氛换为氧气,流速不变,DSC 曲线上出现显著氧化放热峰时记为氧化诱导终点。OIT 定义曲线中氧化放热峰最大斜率切线和曲线水平段延长线交点 T_2 和 T_1 的差值。

差示扫描量热法:在氮气氛围以 10 ℃/min 速率将 10 mg 试样从 30 ℃升温至 150 ℃并保持 3 min,随后冷却至 30 ℃后再次升温至 150 ℃,通过第二次加热曲线进行分析得到结晶度。试样的结晶度^[10]表达式为

$$\chi = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\%。$$

(1)

式中: ΔH_m 为测试中得到的试样的熔融焓; ΔH_0 为聚乙烯在结晶度为 100% 时的熔融焓。

电导率测量:将三电极装置和 XLPE 试样均置于恒温烘箱中以抑制环境噪声干扰。实验在 30、50 和 70 ℃的温度下依次进行电场强度为 10、20、30 及

40 kV/mm 的测试。试样极化时间均为 30 min, 去极化时间均为 20 min, 取极化最后 30 s 的平均值计算试样的电导率。

2 实验结果

2.1 电树枝引发

30、50 与 70 °C 下老化前后的试样的电树枝起始电压分布和起始电压概率威布尔分布如图 4 所示。由图可知, 不同温度下老化后试样的起树电压均低于未老化的试样。未老化试样在 30 °C 下的起树电压为 7.45 kV, 当温度升高至 50 °C 时试样的起树电压降至 6.35 kV, 70 °C 时起树电压降至 5.82 kV。老化后的试样在 30 °C 下的起树电压为 5.63 kV, 50 °C 时降至 4.84 kV, 70 °C 时降至 4.45 kV。通过对比分析两种试样在不同温度下的起树电压可知, 老化后试样的起树电压在 30 °C 时降低了 24.4%, 50 °C 时降低了 23.8%, 70 °C 时降低了 23.5%。可见, 加速热老化降低了试样的起树电压, 并且随着环境温度的升高, 加速热老化对起树电压影响有所减小。

2.2 电树枝生长

不同温度下的老化前后电树枝生长过程如图 5 所示。由图可知, 30、50 和 70 °C 下老化前后试样内的电树枝均呈枝状结构。分析可知, 温度的升高对于电树枝生长有明显的促进作用, 50 °C 和 70 °C 时, 电树枝生长的速度较 30 °C 时加快。相较 30 °C 下, 50 °C 下的电树枝针尖周围的分支更多, 但通道直径较小, 最长分支集中在电场方向上的一个主干通道。在 30 °C 下, 老化后试样的电树枝主干通道上的分支更多, 且主干通道更长。随着生长时间的增加, 老化后试样的电树枝生长速度和其长度都显著大于未老化试样, 但未老化试样的主干通道上的分支相对更粗, 且主要集中在少数较长的主干通道上。50 °C 时, 在同等生长时间下老化后试样的电树枝分布面积更大且主干通道的生长更快。70 °C 时老化后试样的电树枝分支比未老化试样更多, 在距离针尖约 100 μm 的 45° 范围内更加密集, 由于电树枝的三维立体结构, 局部呈略微阴影状。未老化的试样在同等生长时间下极少出现单独的较长通道, 而老化后的试样在电场方向上出现了多支较长的单独的电树枝。

电树枝生长的分时段统计结果如表 1 所示。可知在各个温度下, 老化后试样的电树枝长度整体大

于未老化的试样。在 30 °C 条件下, 4 min 时老化前后电树枝长度差 9.80 μm, 随时间延长至 16 min 时差值扩大至 69.76 μm, 老化后试样的平均生长速度较未老化提高 9.3%; 50 °C 时, 3 min 老化后试样的电树枝长度较未老化试样大 72.16 μm, 6 min 时差值增至 98.86 μm, 老化后试样内电树枝的生长速度较未老化试样提高 13.9%; 70 °C 下, 1.5 min 时老化前后电树枝长度差 19.20 μm, 3 min 时老化前后的电树枝长度差值有所缩小, 为 10.71 μm, 对应老化后试样生长速度较未老化仅提升 1.3%。这表明, 随着温度的升高, 加速热老化对电树枝长度的影响有所减弱。

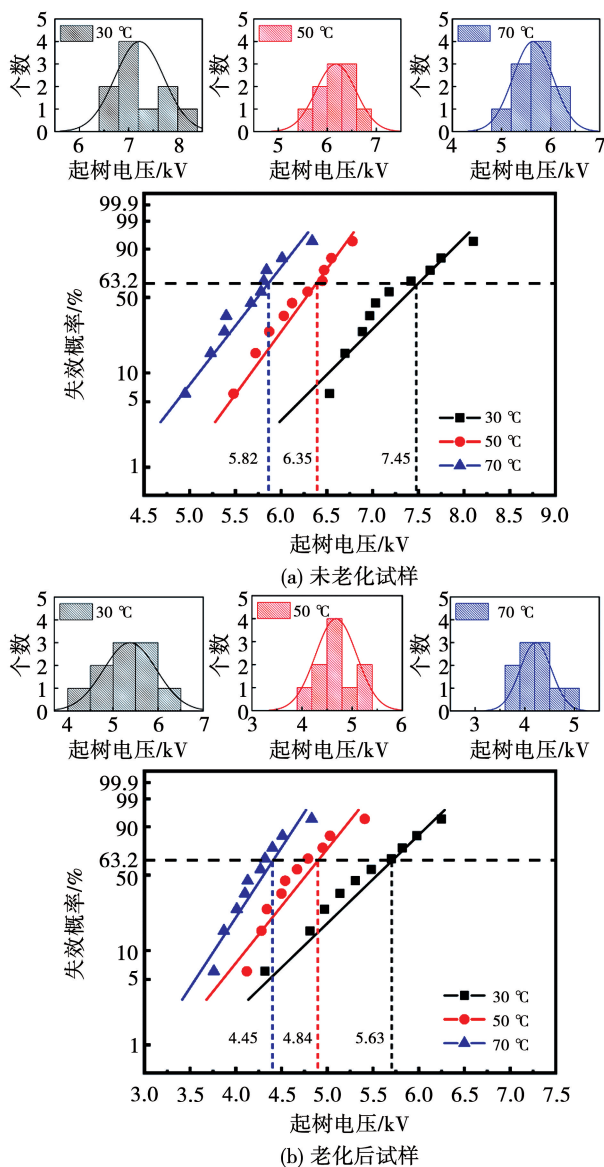


图 4 不同温度下的起树电压概率威布尔分布图

Fig. 4 Weibull distribution of electrical tree initiation voltage at different temperatures

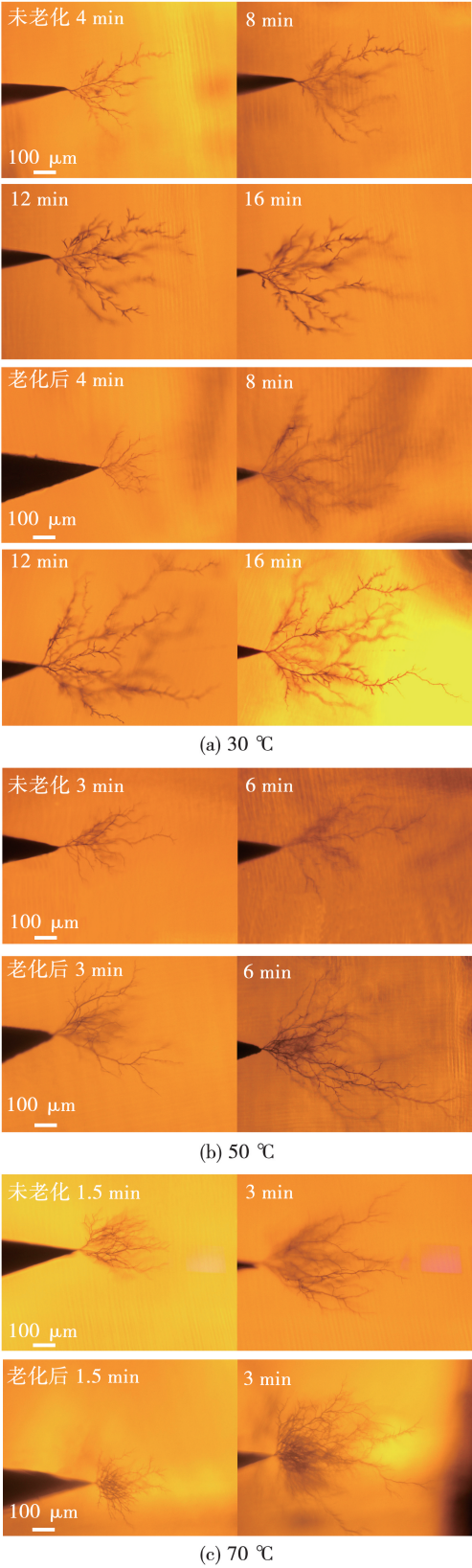


图 5 不同温度下的老化前后电树枝生长过程

Fig.5 Growth process of electrical trees under different temperatures before and after ageing

2.3 局部放电

不同温度下局部放电电量平均值 Q 和脉冲重复

率 n 随生长时间的变化曲线如图 6 所示。

表 1 不同温度下电树枝生长统计结果

Table 1 Statistical results of electrical tree growth at different temperatures

温度/ ℃	时间/ min	平均电树枝 长度/ μm		平均生长速度/ ($\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	
		未老化	老化后	未老化	老化后
30	4	387.74	397.54	96.94	99.39
	8	625.31	687.82	78.16	85.98
	12	698.38	721.26	57.37	60.11
	16	747.11	816.87	46.07	51.05
50	3	548.03	650.19	182.68	216.73
	6	712.81	841.67	118.80	140.28
70	1.5	425.68	444.88	425.68	444.88
	3	843.09	853.80	421.55	426.90

根据不同的温度环境,分别取合适的时段统计试样的放电行为,在 30 °C 下每 2 min 统计一次,50 °C 每 1 min 统计一次,70 °C 每 0.5 min 统计一次,每个时段统计试样在该时段内的局部放电电量平均值 Q 和脉冲重复率 n ,得到两者随时间变化的规律曲线。由图 6 可知,试样的局部放电特性同时受生长时间和温度影响。老化前后试样的平均局部放电电量均随电树枝生长时间的延长而增加,且随温度的升高其增长速率也随之升高。30 °C 下老化后试样的平均局部放电电量在 16 min 内从 175.87 pC 增至 511.39 pC,50 °C 时在 6 min 内从 220.73 pC 增至 674.43 pC,而 70 °C 时仅 3 min 从 452.73 pC 增至 794.34 pC。同时,老化后试样的平均局部放电电量始终高于未老化试样,但二者之间的差异随温度升高而减小,表明高温环境对热老化的效果有一定减弱。其中 30 °C 时未老化试样的平均放电电量在 12 ~ 16 min 期间出现显著上升,和老化后试样几乎相同,对应上述中未老化试样放电通道更粗的结果。老化后试样的脉冲重复率在各温度下均高于未老化试样,且随生长时间的增加逐步上升,其中 30 °C 时老化前后试样的脉冲重复率在最后一个时段中增幅为 24.3%,而 70 °C 时仅为 1.3%。50 °C 时脉冲重复率随生长时间的增长相对其他两个温度时较为平缓,但老化前后的差值更大,一定程度上导致了老化后试样中电树枝分支更多的结果。70 °C 时,出现短时间内的显著上升,和电树枝生长中分支更加密集的结果相符。

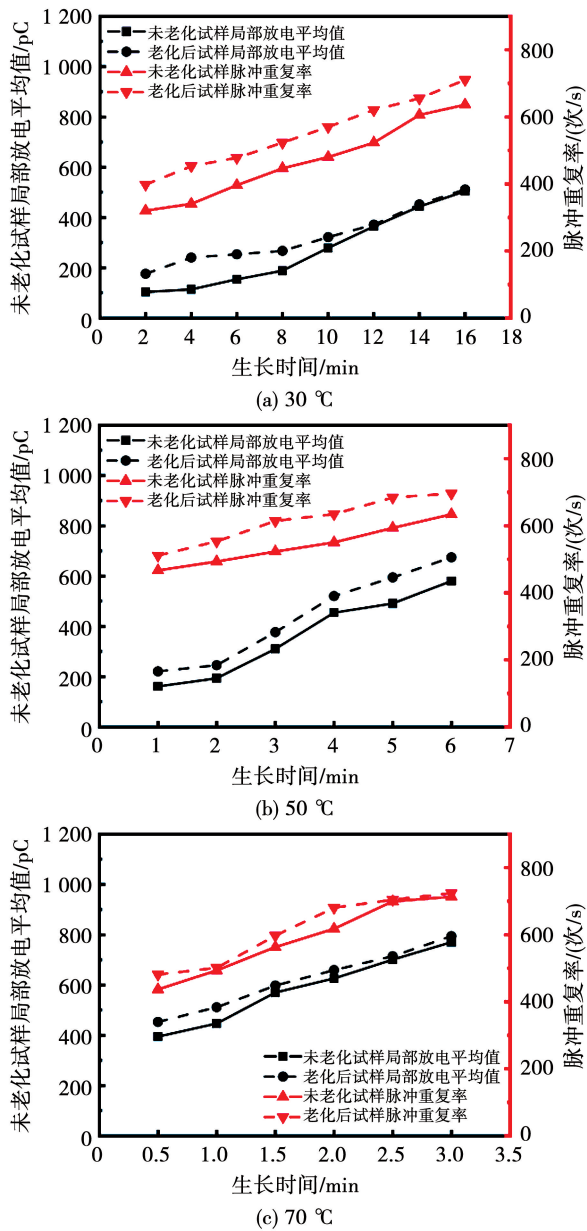


图 6 不同温度下试样平均局部放电量和脉冲重复率的时间变化规律

Fig. 6 Average partial discharge and pulse repetition rate at different temperatures

2.4 氧化诱导期与结晶特性

为了表征 XLPE 试样中的抗氧化剂在加速热老化过程中的消耗过程,通过 DSC 法测量了老化前后试样的 OIT,其结果如表 2 所示。由表可知,加速热老化后 XLPE 试样的 OIT 下降了 52.97%,出现显著下降但并未降至 0,说明抗氧化剂在老化过程中发生快速分解,且老化后的 XLPE 试样中仍有抗氧化剂残留。

表 2 老化前后 XLPE 的 OIT

Table 2 OIT of XLPE samples before and after ageing

试样类型	OIT/s
未老化	773.4
老化后	363.7

为得到老化前后 XLPE 试样的结晶特性,对其进行 DSC 测试,结果如图 7 所示。由 DSC 曲线可知,老化前后的 XLPE 试样仅有一个晶体熔融峰,均未出现分峰现象。老化后试样的熔融峰朝低温方向移动,即其熔融温度略有降低。老化后试样的熔融峰面积相较未老化时有所减小,试样的结晶度从未老化的 33.8%降低至老化后的 29.7%,这表明抗氧化剂含量的下降导致试样的抗氧化能力减弱,其内部分子链更易发生断裂导致无定形区占比增加。

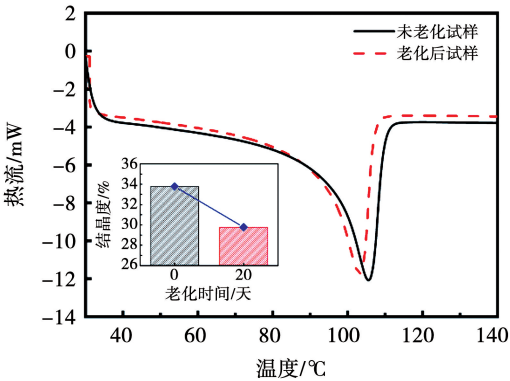


图 7 老化前后 XLPE 试样的 DSC 曲线

Fig. 7 DSC curve of XLPE samples before and after ageing

2.5 电导率和活化能

电导率和电场强度与单位面积内的载流子数量和有关。为表征热老化对 XLPE 试样导电性能改变的影响,进行了电导率测试,其结果如图 8 所示。由图可知,老化前后 XLPE 试样的电导率均随测试场强和温度的升高而增大,同时不同温度和电场强度下老化后试样的电导率均大于未老化试样。在 40 kV/mm 下,电导率在 30 °C 时由未老化的 2.21×10^{-15} S/m 增至老化后的 5.91×10^{-15} S/m,在温度升高至 70 °C 时,由 1.30×10^{-13} S/m 增至 2.40×10^{-13} S/m,可知其高温高场下变化更为明显。

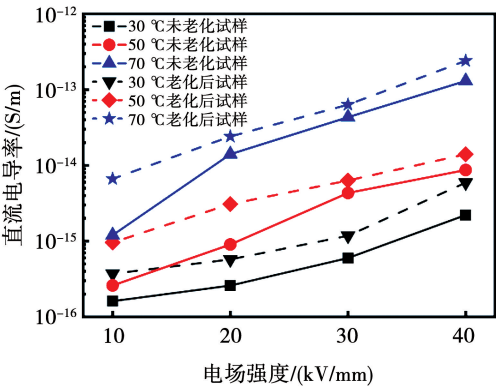


图 8 不同温度下老化前后的电导率

Fig. 8 Conductivity under different temperatures before and after ageing

活化能可定量表征电树枝在 XLPE 中引发和生长所需克服的能量势垒,反映其内部分子的稳定性。基于化学动力学原理,通过测量不同温度下的电导电流,由 Arrhenius 方程计算得到老化前后 XLPE 试样活化能 E_a 的变化^[11]为

$$\ln \sigma = -\frac{E_a}{RT} + \ln A. \tag{2}$$

式中: σ 为电导率; R 为摩尔气体常数; T 为绝对温度; A 为指前因子,为常数。

表 3 为老化前后 XLPE 在 30、50 和 70 °C 下,不同电场强度作用的活化能计算结果。由表可得,活化能均随着电场强度的升高而降低,而老化后 XLPE 试样在高场强下的活化能降低更为明显,且老化后 XLPE 试样的活化能全部低于未老化试样。其中,未老化试样在 40 kV/mm 下的活化能和 10 kV/mm 下的活化能差值为 0.17,大于老化后试样的差值 0.14,表明在高场强下老化后试样内部的势垒降低更为明显。

表 3 老化前后 XLPE 试样活化能

Table 3 Activation energy of XLPE samples before and after ageing

试样 类型	活化能/eV			
	10 kV/mm	20 kV/mm	30 kV/mm	40 kV/mm
未老化	0.88	0.86	0.78	0.71
老化后	0.78	0.73	0.67	0.64

3 分析与讨论

XLPE 在加速热老化下主要存在两种化学反

应,一种为老化初期在抗氧化剂充足的情况下,分子链因高温的作用发生断裂而产生自由基,抗氧化剂通过主动和自由基发生反应来抑制其发展,从而在此过程中被持续消耗;另一种为抗氧化剂消耗后,热氧降解引发 XLPE 分子链断裂,导致其内部结晶区被破坏^[12]。DSC 结果显示老化后试样的结晶度相较未老化试样下降 4.1%,同时试样的 OIT 在老化后减少了 409.7 s。当抗氧化剂含量减少,其在高温环境下更易发生热氧反应,促使聚合物主链断裂或产生不规则交联结构。这种氧化引起的链段破坏和结构紊乱削弱了分子链在冷却过程中有序排列形成晶体的能力,从而造成结晶度下降^[13-14]。这两个结果共同表明,该温度下的加速热老化对于 XLPE 试样主要作用为造成其内部分子链断裂,结晶区被破坏引起无定形区比例扩大。

加速热老化对 XLPE 绝缘的影响是微观和宏观共同作用的结果,聚合物中自由体积的大小及其分数作为连接宏观与微观表征间的关联,具有重要的意义。电缆中的 XLPE 绝缘通过聚乙烯分子的交联形成网状立体结构,利用软件对其进行简化,使分子系统总能量达到较低水平,构建了 H 型 XLPE 分子模型。基于量子力学基础,采用分子动力学模拟方法,通过硬球探针法对自由体积进行定量计算^[15-17]。构建的 XLPE 晶胞结构如图 9 所示,自由体积分数定义为自由体积和总体积之比。结果表明,自由体积由未老化的 2 432.72 Å³ 上升至老化后的 2 632.21 Å³,自由体积分数由 11.21% 增加至 12.13%,说明加速热老化的过程使分子间相互作用力减弱,进而使得分子链的排列趋于松散,相互之间自由空间增大。

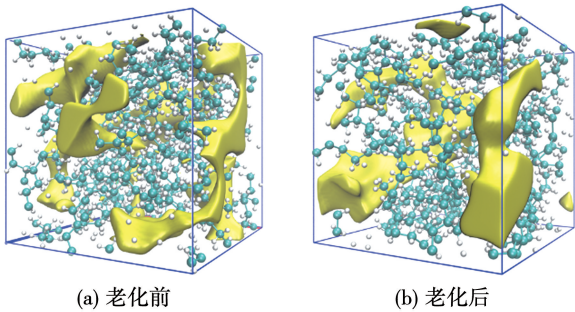


图 9 老化前后的 XLPE 晶胞结构

Fig. 9 Unit cell structure of XLPE before and after ageing

自由体积的增大会显著影响载流子在试样内部的迁移行为,较大的自由体积为其运动提供了更多可行路径^[18]。因此,载流子的运动阻力降低,部分载流子在强电场作用下获得更高动能,可能对分子链造成冲击和破坏,从而形成更多可供其迁移的连续通道,宏观上表现为电导率显著升高^[19]。电导率的升高实质上反映了电荷迁移所需克服的势垒,即活化能的降低。由实验结果可知,各个条件下老化后 XLPE 试样的电导率均大于未老化试样,活化能在各个电场强度下均有所降低,这一变化使试样内部更容易产生空间电荷,引发局部电场畸变,进而促进电树枝的引发和生长以及局部放电。此外,自由体积增大和结构松弛使得电场更容易集中于针尖模拟的凸起缺陷区,从而降低电树枝引发的电压阈值。随着电树枝通道的扩展,载流子迁移路径进一步增多,局部放电行为在通道尖端和分支处重复。同时,局部放电产生的热量也在相应的区域进一步加速高温对试样本身绝缘性能的影响。

电树枝的引发本质上源于针电极尖端导致的局部电场畸变,对于 XLPE 空间电荷注入的临界场强为 285 kV/mm,根据 Mason 公式计算针电极尖端的最大场强^[20]为

$$E_{\max} = \frac{2U_p}{r \ln \left(1 + \frac{4d}{r} \right)} \quad (3)$$

式中: U_p 为交流电压的峰值; r 为针尖曲率半径, $r = 5 \mu\text{m}$; d 为针板电极间距, $d = 2 \text{ mm}$ 。

电树枝引发实验中起树电压结果普遍在有效值 4.45 ~ 7.45 kV 区间内,由式(3)计算得到最大场强区间为 341.17 ~ 571.18 kV/mm,远超上述临界场强,验证了实验的准确性。此外,老化后的试样在相同生长时间下普遍呈现出更长的电树枝长度和更多的分支通道,50 °C 时老化后试样的电树枝分支通道更多但间距变化不明显,脉冲重复率随时间增长较少但老化前后的差值更大。这种现象也印证了加速热老化使 XLPE 试样内部形成了更多载流子迁移路径,从而加快电树枝更多分支的发展过程。电树枝在 70 °C 下出现分支更密集,间距更小,脉冲重复率短时间内上升,这和自由体积计算得到的结果中分子链之间的空隙变大的结论相符。此外,在 70 °C 下,老化前后试样在电树枝引发、生长上的差异均相较 30、50 °C 有所缩小,这可能是由于高温本身所引起热效应增强,使未老化试样中的载流子也能获

得足够动能而克服势垒,引发电树枝结构的发展。同时,高温下 XLPE 分子链的热运动增强、链间作用力减弱,一定程度上模拟了老化后结构松弛的效果,从而出现老化前后宏观表现上的趋同。

4 结 论

本文通过电树枝引发和生长实验、局部放电测量、DSC 测试、电导率测试等方法,研究了加速热老化对 500 kV 超高压直流交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性的影响,得到以下结论:

1) 电树枝生长和局部放电实验表明,各温度下加速热老化均导致 XLPE 试样起树电压下降、局部放电量和脉冲重复率上升。实验中电树枝均为枝状,电树枝生长速度随温度和老化时间呈正相关。和 30 °C 下相比,50 °C 下电树枝形态上分支数量更多,但直径较小,局部放电量和脉冲重复率提升最大。70 °C 下老化后试样电树枝分支更密集,但生长速度仅提升 1.3%,老化前后的平均局部放电量和脉冲重复率差异均减小。说明在高温环境下,加速热老化对电树枝生长的促进作用有所减弱。

2) 加速热老化后试样的 OIT 和结晶度均下降,抗氧化剂被大量消耗,对热氧反应的抑制效果减弱,导致分子链发生断裂,结晶区破坏,无定形区扩大。加速热老化后 XLPE 试样的电导率在高温高场下增加更明显。在各温度下的活化能均低于未老化试样,且在高场强下降幅更大。分子动力学仿真结果表明,加热后 XLPE 分子的自由体积分数增大,链间空隙增大,分子链间相互作用力减弱,揭示了加速热老化过程中,微观化学变化对产生宏观电学性能影响的原因。

因此,加速热老化促进了 500 kV EHVDC XLPE 电缆电树枝的引发和生长,增加了局部放电的电荷量和频率,其理化特性和电导特性的变化不利于电缆长期的安全运行。

致 谢

感谢浙江大学电气工程学院高电压实验室对本文提供的帮助和支持,并祝贺浙江大学电气工程学院高电压实验室创建 70 周年。

参 考 文 献:

- [1] 李盛涛,王诗航,杨柳青,等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42

- (11): 4247.
LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4247.
- [2] DU B, ZHU L. Electrical tree characteristics of XLPE under repetitive pulse voltage in low temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1801.
- [3] DAI X, HAO J, LIAO R, et al. Multi-dimensional analysis and correlation mechanism of thermal degradation characteristics of XLPE Insulation for extra high voltage submarine cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1488.
- [4] 侯帅, 傅明利, 黎小林, 等. 220 kV 电缆 XLPE 绝缘材料热氧化老化性能对比[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 120.
HOU Shuai, FU Mingli, LI Xiaolin, et al. Comparison of thermal-oxidative aging properties of 220 kV cable XLPE insulation materials[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 120.
- [5] 陈伟林, 周凯, 林思衍, 等. 短时高温运行对 XLPE 电缆绝缘聚集态结构及介电性能的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 588.
CHEN Yilin, ZHOU Kai, LIN Siyan, et al. Effect of short-term high-temperature operation on the aggregate structure and dielectric properties of XLPE cables insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 588.
- [6] 朱梦瑶, 李欢, 张瑞祥. 热老化对 XLPE 电缆本体中典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 9076.
ZHU Mengyao, LI Huan, ZHANG Ruixiang. Influence of thermal aging on electric field distortion caused by typical defects in XLPE cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 9076.
- [7] 闫群民, 李欢, 翟双, 等. 不同温度热老化对高压配网交联聚乙烯电缆绝缘表面陷阱参数的影响[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 692.
YAN Qunmin, LI Huan, ZHAI Shuang, et al. Effect of thermal aging at different temperatures on the surface trap parameters of HV-XLPE distribution cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 692.
- [8] HU F, EMERSIC C, SMITH D, et al. The effect of mechanical strain on electrical tree development in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 313.
- [9] 彭苏蔓, 祝曦, 吴建东, 等. 温度和电场对 XLPE 与纳米 MgO/XLPE 电树枝生长过程中局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 4033.
PENG Suman, ZHU Xi, WU Jiandong, et al. Effect of temperature and electric field on partial discharge characteristics in XLPE and nano-MgO/XLPE during electrical tree growth[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 4033.
- [10] 陶霁韬, 李化, 方田, 等. 基于片晶滑移的水树结晶破坏机理[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2640.
TAO Xiantao, LI Hua, FANG Tian, et al. Crystalline destruction mechanism caused by water tree based on lamella slip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2640.
- [11] 石逸雯, 周国伟, 孟繁博, 等. 10 kV 交流 XLPE 电缆加速热老化后交直流绝缘特性分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 10.
SHI Yiwen, ZHOU Guowei, MENG Fanbo, et al. Effect of thermal aging on AC and DC insulation characteristics of 10 kV AC XLPE cables[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 10.
- [12] 孙建宇, 陈绍平, 沙菁洁, 等. 电缆用交联聚乙烯热老化寿命评估和预测[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 31.
SUN Jianyu, CHEN Shaoping, SHA Jingjie, et al. Evaluation and prediction of thermal aging life of XLPE for cables[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 31.
- [13] SAHOO R, KARMAKAR S. Impact of accelerated thermal aging on electrical tree structure and physicochemical characteristics of XLPE insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 429.
- [14] SURACI S V, XU A, COLIN X, et al. Electrical and chemical characterization of the antioxidant effects on thermal aging of crosslinked polyethylene (XLPE)[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 1890.
- [15] 段玉兵, 韩明明, 王兆琛, 等. 不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 45.
DUAN Yubing, HAN Mingming, WANG Zhaochen, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high-voltage cables under different thermal aging temperatures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 45.
- [16] ZHENG Y, LONG Y, YI D, et al. Correlation between antioxidant depletion kinetic model and ageing behaviour of cross-linked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage, 2023, 8(2): 231.
- [17] 侯世英, 梁家鸣, 杨帆, 等. 交联程度对 XLPE 性能影响的分子模拟[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3062.
HOU Shiyong, LIANG Jiaming, YANG Fan, et al. Molecular simulation on the effect of crosslinking degree on the properties of XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3062.
- [18] 李欢, 李建英, 马永翔, 等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6740.
LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6740.
- [19] LIU Y, YU J, MA M. Performance evolution and aging mechanism of XLPE insulation for HVDC cables after different accelerated aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(2): 1074.
- [20] 徐庆文, 周凯, 伍亚萍, 等. 脱气时间对 XLPE 电树引发和生长特性的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1685.
XU Qingwen, ZHOU Kai, WU Yaping, et al. Effect of degassing time on initiation and growth characteristics of electrical tree in XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1685.

(编辑:邱赫男)