

电缆XLPE绝缘温度梯度对电树枝老化的影响研究

鄂士平¹, 刘东超², 熊慕文², 高 森²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 交联聚乙烯 (XLPE) 电力电缆是城市供电网络的重要环节, 绝缘劣化导致的故障是威胁电缆长期稳定运行的重要因素。在运行工况下, 电缆绝缘内会存在径向温度梯度, 并可能影响绝缘内的电树枝老化过程。研究 XLPE 温度梯度对电树枝生长的影响规律及机理, 对提高电缆运行可靠性具有重要意义。选取 XLPE 试样及工频交流电压, 研究了多个温度梯度下的电树枝生长趋势。结果表明, 温度梯度的存在会促进电树枝的生长, 而树枝形态也将随着温度梯度的存在而发生变化, 由温度导致的电导率差异及电荷能量的变化是导致电树枝形态及生长速度差异的主要原因。

关键词: XLPE; 电力电缆; 电树枝; 温度梯度; 树枝形态; 树枝长度

Study on influence of temperature gradient of XLPE insulation on electrical tree

E Shiping¹, LIU Dongchao², XIONG Muwen², GAO Sen²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

2. Nanjing NARI Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Cross-linked polyethylene (XLPE) power cable is an important part of the power supply network in the city, and the failure caused by the insulation degradation is an important factor that threatens the long-term stable operation of cables. Under operating conditions, there is a radial temperature gradient within the cable insulation, which may affect the growth process of electrical tree. For XLPE, it is of great significance to study the influence mechanism of temperature gradient on the growth of electrical trees, and to improve the reliability of cable operation. The XLPE sample and AC voltage are selected to study the growth trend of electric trees under multiple temperature gradients. The results show that the presence of temperature gradients will promote the growth of electrical trees, and the morphology of trees will change with the presence of temperature gradients. The difference in electrical conductivity and the change in charge energy caused by temperature are the main reasons for the difference in morphology and growth rate of electrical trees.

Key words: XLPE; power cable; electrical tree; temperature gradient; tree morphology; tree length

0 引言

随着城市规模的不断扩大和供电需求的提高, 交联聚乙烯 (XLPE) 电缆逐渐成为城市供电的主要线路类型。目前我国投运电缆的运行电

压等级越来越高, 在北京、上海等地的电力电缆最高运行等级已达到500 kV以上^[1]。至2020年, 我国6 kV及以上电缆敷设长度已达61 km, 电缆线路年平均增长率达到10%以上^[2]。随着电缆输

电的快速发展, 由于电缆绝缘劣化导致的故障也成为不可忽视的重要问题。

电树枝是绝缘劣化的重要形式之一, 也是造成聚合物绝缘失效的重要原因。电树枝实际上是一种放电老化现象, 它是由于杂质、气泡等缺陷造成局部电场集中所导致的局部击穿, 从而形成树枝样放电破坏通道^[3-5]。电树枝一旦产生, 便可能以极快的速度发展, 严重威胁电缆的安全运行。而实际运行的电缆线路由于较高的载流量会使导体产生较大热量, 从而形成绝缘内的径向温度梯度, 影响电树枝老化过程。以往的电树枝研究绝大部分局限于某一特定温度下的老化机理, 而真实运行工况下的树枝生长分布于不同的多个温度区间, 其生长特性及机理尚不明晰^[6-10]。因此, 研究温度梯度对XLPE绝缘电树枝的影响规律具有重要意义。

本文以实际工程为出发点, 实验过程中以XLPE电树枝为研究对象, 采用典型的针-板结构电极及工频交流电压, 并采用图像采集系统记录电树枝生长全过程。本文分析了不同温度梯度下的电树枝形态、生长特征及影响因素, 为高压电缆的稳定运行提供了实验数据及理论支撑。

1 实验设置

1.1 试样制备

为防止XLPE颗粒之间在压制试样时出现界面分层, 对实验结果产生影响, 先将颗粒放入转矩流变仪中混炼10 min。之后将混炼后的颗粒放入特制金属模具中, 在设定温度为110 ℃的平板硫化机中在不同压强条件下充分熔融。在熔融、热压成型后, 在175 ℃、15 MPa的条件下进行30 min充分交联, 之后保证压力不变, 自然冷却至室温。将制备好的XLPE板切割为长28mm、宽5mm及高40 mm的块状试样。为模拟不均匀电场, 将试样在100 ℃的加热箱中加热10 min, 同时垂直插入钢针。选取针电极的直径为300 μm, 曲率半径为3 μm, 针尖与试样底面的距离为4 mm, 在插入针电极后取出试样, 在其底面均匀涂抹一层导电银漆, 作为实验中的

平板地电极。之后将试样放入80 ℃真空干燥箱中烘烤48 h, 消除试样内部产生的应力, 之后取出。干燥箱保证真空的目的是将XLPE中针尖附近可能存在的气泡抽出, 防止试样因为存在气泡缺陷影响实验观测。以上过程结束后, 使用显微镜观察试样, 挑选出针尖轮廓清晰, 不存在气泡和裂纹的试样, 在试样的一面贴上盖玻片使试样侧面光滑, 保证可清晰地观察电树枝形态。

1.2 实验步骤

试样结构及电极设置如图1所示。首先, 将试样放置平台(玻璃材质)放于光学显微镜的载物台上, 将交流高压生成部分的电压输出端用导线与试样放置平台上的高压针电极相连, 用导线将试样放置平台上的铜板与整个实验设备的公共地相连。将试样前后两个侧面分别与一对长30 mm、宽2 mm的加热片相贴, 使加热片下边缘与针尖相近, 但须保证针电极可被观测到。用高温胶带将其缠绕固定。将对应铂电阻(Pt100)贴于加热片上作为针尖温度控制。将另一对边长为10 mm的正方形加热片分别贴于地电极上, 对应温度控制器的铂电阻同时贴于地电极上用作地电极温度控制。将贴有加热片及铂电阻的试样悬空固定于玻璃平面, 试样底部与地电极相贴。向温度控制器中分别输入针尖及地电极设定温度, 加热片开始加热, 30 min后向试样施加8 kV交流电压, 同时录制电树枝生长情况。

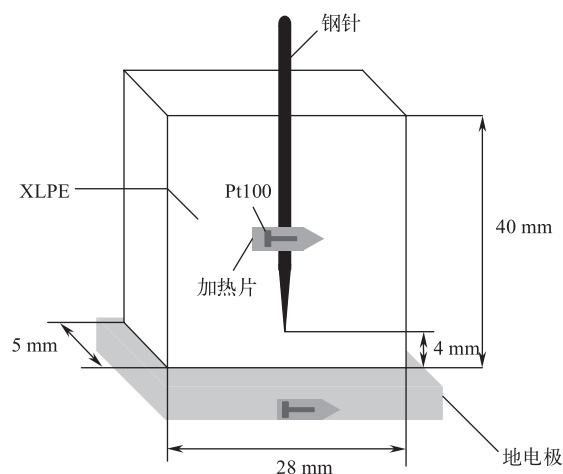


图1 试样及电极设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample and electrode setting

本实验中, 为了产生局部恒定均匀温度梯度场, 针尖处的加热片长度应大于试样长度。而地电极由于使用导热性良好的铜块, 可认为整个铜块温度恒为地电极加热片温度。

本文定义针尖处加热片温度为 T_n , 定义地电极处温度为 T_g , 定义温度梯度 $\Delta T = T_n - T_g$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 $\Delta T > 0$ 时电树枝生长特征

固定 T_n 为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, T_g 分别设置为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行三组实验。 ΔT 分别为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分别记录各实验条件下不同时间的电树枝形态。120 min时各温度梯度下电树枝形态如图2所示。

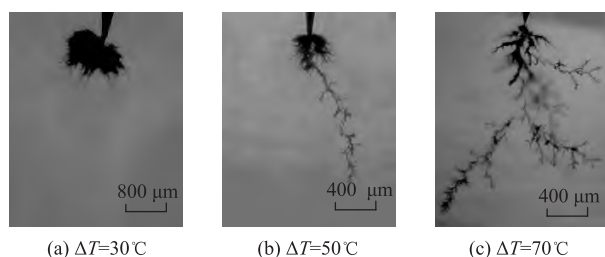


图2 电树枝形态 ($\Delta T > 0$)

Fig. 2 Electrical tree shape ($\Delta T > 0$)

图2a为 ΔT 为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电树枝形态, 可知当电树枝生长120 min后, 电树枝形态呈现密集的丛林状分布, 大量微小的树枝通道交错分布, 呈现较深的黑色, 树枝长度约为1 mm。随着温度梯度的变化, 树枝形态与长度也发生明显变化。由图2b可知, ΔT 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的树枝形态为丛林-树枝混合状。在温度较高的针尖附近, 电树枝仍呈现浓密的丛林状, 而当XLPE绝缘内的温度逐渐降低时, 丛林区域的边缘出现较长的树枝状通道, 该通道生长至120 min时, 长度可达约1.7 mm。图2c中, ΔT 为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 电树枝区域无丛林状分区, 整个区域呈现明显的树枝状特征, 各通道之间间距较大, 树枝区域横向跨度可达约1.5 mm。

本节通过电树枝生长长度和生长速度两个参数进行电树枝生长的动态分析。根据以往理

论分析, 一般树枝状电树枝生长速度较快, 丛林状电树枝生长速度比较慢。电树枝的生长主要分为三个阶段, 即起始阶段、滞长阶段和二次生长阶段。

图3为 $\Delta T > 0$ 时的电树枝长度生长趋势。在生长前期, 三组树枝生长速度相近, 树枝生长均处于起始阶段。在200 s左右, 三组电树枝同时进入短暂滞长阶段, 树枝生长速率大幅降低。在900 s左右, ΔT 为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 电树枝生长速度加快, 进入二次生长阶段, 另外两组保持滞长阶段。在1800 s左右, ΔT 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 电树枝进入二次生长阶段。而在生长后期(5400 s以后), ΔT 为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 电树枝生长再次停滞, 而此时 ΔT 为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的电树枝开始进入二次生长阶段。总体而言, 正温度梯度越大, 电树枝的生长速度越快, 且更快进入下一阶段, 对应时间的电树枝长度也越长。

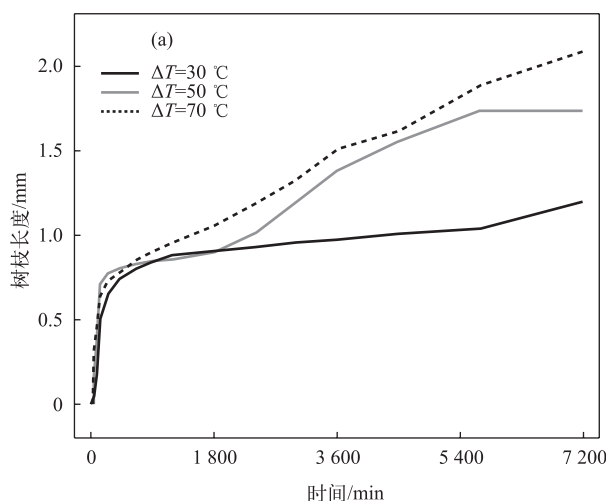


图3 电树枝长度生长趋势 ($\Delta T > 0$)

Fig. 3 Growth trend of electric tree length ($\Delta T > 0$)

正温度梯度下电树枝生长机理如图4所示。在不同组之间的对比中可发现: 保证针电极为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温时, 针电极附近必定会出现分布较密集的电树枝。这是由于Schottky-Richardson效应使高温下发射的热电子增多, 聚合物分子链断裂加快, 出现明显的低密度区, 从而易出现丛林状树枝。温度梯度大的试样树枝向地电极的发展会更快, 原因是丛林状区域会使针尖附近的低密度区扩大, 这相当于增大了针尖的等效曲率半

径,从而使电场均匀,削弱电树枝生长的尖端效应,生长趋向于横向丛林状,不容易向地电极生长。而温度梯度较大的试样中,在针尖附近出现低密度区,随着电树枝向地电极方向生长,电子获得的热量越少,其携带的能量也随之降低,因此低密度区的生长停留在针尖附近,其对不均匀场的屏蔽作用也比较小。对于 ΔT 为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组在地电极处容易呈现接近松枝状的形态,这是由于地电极附近温度比较低导致介质电导率较低,使得该处电场强度增加,从而促进了更多细小电树枝通道的形成。

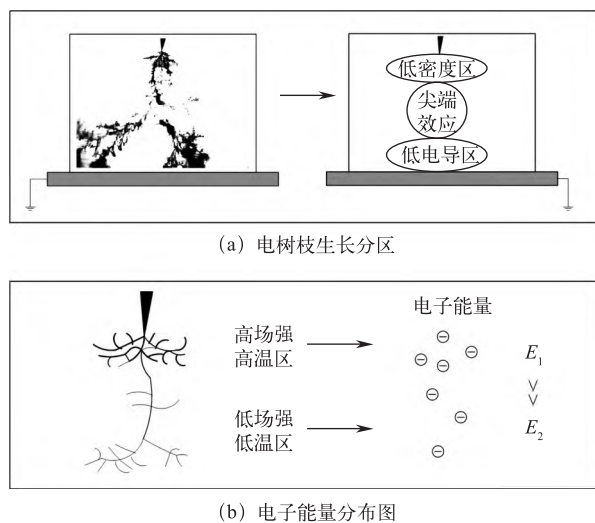


图4 电树枝生长原理示意图 ($\Delta T > 0$)

Fig. 4 Schematic diagram of electrical tree growth principle ($\Delta T > 0$)

2.2 $\Delta T < 0$ 时电树枝生长特征

ΔT 分别为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下记录不同时间的电树枝形态。120 min时各温度梯度下电树枝形态如图5所示。

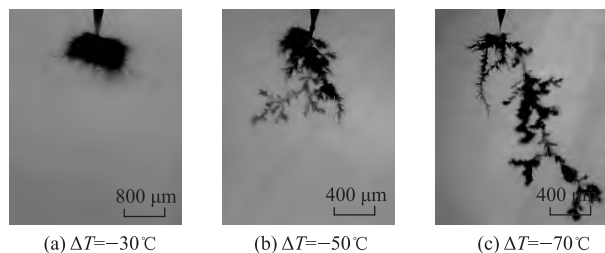


图5 电树枝形态 ($\Delta T < 0$)

Fig. 5 Electrical tree shape ($\Delta T < 0$)

ΔT 为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,树枝形态呈现丛林状,结合前述分析可知,两种 ΔT 较小的情况下,树枝形态均为丛林状。同样,随着温度差的增大,树枝形态不再呈现单一的丛林状,其边缘开始出现大量的松枝状分支,如图5b所示。这一趋势在 ΔT 为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 更为明显,树枝区域中的丛林区消失,整体呈现松枝状分布。

图6为 $\Delta T < 0$ 时的电树枝长度生长趋势。在电树枝生长前期(60 s),三组电树枝生长速度相近,生长均处于起始阶段。在200 s左右, ΔT 为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的组进入滞长阶段。在400 s左右,温度梯度为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的组进入滞长阶段。在树枝生长中期(1 800 s), ΔT 为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的组进入二次生长阶段并在5 400 s时生长又开始停滞。 ΔT 比较小的两组生长基本保持在滞长阶段,且生长速度基本同步。任一生长阶段, ΔT 为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的组生长速度都明显快于另外两组。总体而言,对于负温度梯度,生长速度和树枝长度对于温度梯度大小依然呈现正相关。

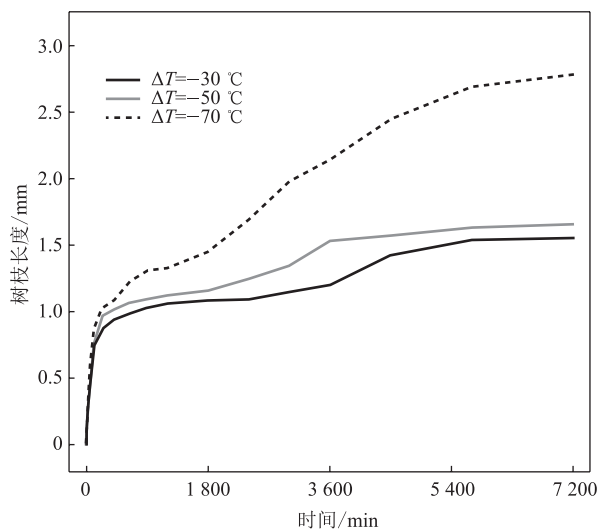


图6 电树枝长度生长趋势 ($\Delta T < 0$)

Fig. 6 Growth trend of electric tree length ($\Delta T < 0$)

负温度梯度下的电树枝生长机理如图7所示。当 ΔT 为负时,对比不同组电树枝的生长,发现在 ΔT 为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组电树枝生长速度较快。而温度梯度比较小的两组,发展速度比较慢,而且在针尖附近会出现明显的丛林状结构。根据之前

的分析,电树枝附近的结构主要由针电极温度决定, ΔT 为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组针电极温度比较低,热电子的Schottky-Richardson效应不明显,针尖附近的材料劣化不明显,因此树枝不会在针尖附近呈现明显的丛林化。除此之外,由于针电极附近为较低温度,因材料劣化带来的电场畸变比较小,电场强度比较高。当电树枝生长至温度较高的试样中间区域时,材料自身电导率的增加以及各电树枝通道尖端电场畸变使得其作用近似为多个针电极,从而在这些电极附近会形成大量的微小树枝通道,并形成较粗的松枝状电树枝。

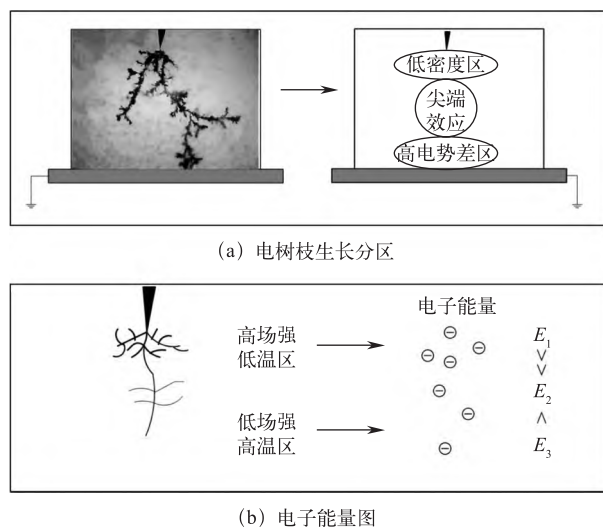


图7 电树枝生长原理示意图 ($\Delta T < 0$)

Fig. 7 Schematic diagram of electrical tree growth principle ($\Delta T < 0$)

3 结束语

本文研究了不同温度梯度下的XLPE电树枝生长规律,分析了温度梯度影响电树枝生长的机理。主要结论为:

1) 电树枝形态随温度梯度的变化而呈现不同的分布,正温度梯度下为丛林状及丛林-树枝混合状,负温度梯度下为丛林状、丛林-松枝混合状及松枝状。

2) 温度梯度下电树枝生长趋势可分为几个不同阶段,大温度梯度可明显加速电树枝生长。这一作用与不同区域电场变化及电荷能量相关。

参考文献

- [1] 田野,郭金明,傅明利,等.超高压交流XLPE电缆输电工程应用现状综述[J].南方电网技术,2016,10(9):30-36,48.
- [2] 赵健康.国家电网公司电力电缆运行情况报告[J].中国电工技术学会工程电介质专业委员会:中国电工技术学会年会,2011:44.
- [3] TANAKA T. Charge transfer and tree initiation in polyethylene subjected to AC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 424-431.
- [4] 周远翔,陈明,张云霄,等.直流场下温度对硅橡胶电树枝起始特性的影响[J].高电压技术,2018,44(12):3784-3790.
- [5] 马一力,丛祥旭,李忠华.0~ $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 交联聚乙烯材料的电树枝生长特性[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(3):111-116.
- [6] 胡珍,任双赞,毛辰,等.温度对交联聚乙烯电缆运行可靠性的影响[J].陕西电力,2015,43(9):80-82,87.
- [7] 朱乐为,杜伯学,韩涛,等.低温环境下交联聚乙烯电树枝生长特性[J].高电压技术,2016,42(8):2434-2441.
- [8] 郭洋,王雅妮,乐彦杰,等.XLPE与MgO/XLPE纳米复合材料周期性直流接地电树枝与交流电树枝的温度特性[J].高电压技术,2018,44(5):1459-1466.
- [9] 杜伯学,张苗苗,姜惠兰,等.环氧树脂在低温环境下的电树枝生长特性[J].高电压技术,2016,42(2):478-484.
- [10] 周利军,仇祺沛,成睿,等.高温高气压下XLPE电缆电树枝生长规律及局放特性[J].高电压技术,2018,44(5):1421-1427.

作者简介

鄂士平(1949—),高级工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究工作。

(收稿日期:2020-06-04)