

低温环境下 XLPE 材料中水树生长特性的研究

冯杰¹ 濮峻嵩¹ 刘曦¹ 周凯² 李康乐² 张春硕²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究低温条件下水树的生长特性,研究了 XLPE 薄片样本在 0 °C 下不同老化时期的水树生长速率变化。在 XLPE 薄片样本中制造针孔缺陷,之后将样本分为 3 组,并对其在 0 °C 下分别进行为期 14 d、21 d、28 d 的加速水树老化。利用光学显微镜观测样本中的水树微观形貌和水树长度,并结合电场仿真分析水树在低温下生长速率变化原因。实验结果表明,在低温条件下,样本中的水树明显呈枝状。此外,水树生长速率随着老化时间的增加逐渐增加。电场仿真结果表明,水树长度越长,水树尖端的电场越强。根据水树生长的电机械老化理论,电场越大,水树尖端处的 XLPE 分子链受到的麦克斯韦应力越大,分子链越容易发生疲劳断裂,导致水树生长速率越大。

关键词: XLPE; 电缆; 水树; 低温; 生长速率; 电场; 麦克斯韦应力

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)06-0028-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.007

Research on Characteristics of Water Tree Growth in XLPE under Low Temperature Environment

Feng Jie¹, Pu Junsong¹, Liu Xi¹, Zhou Kai², Li Kangle², Zhang Chunshuo²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of water tree growth under low temperature, the propagation rates of water trees in XLPE sheet samples are researched in different aging periods. Pinhole defects are made in XLPE sheet samples, then the samples are divided into three groups, and they are subjected to an accelerated water tree aging for 14, 21 and 28 days respectively. The morphology of water trees is observed by an optical microscope, and the length of water trees are measured. Combining with the electric field simulation, the reasons for the changes of the propagation rates of water trees under low temperature are analyzed. The results show that the growth rate of water trees increases with time under low temperature. The experimental results show that under low temperature, the water trees are in dendritic shape. In addition, with the increase in aging time, the propagation rate of water trees increases. The electric field simulation shows that the electric field strength at the water tree tips becomes greater with the increase in water tree length. According to the electrical mechanical damage theory of water trees, the stronger the field strength, the greater the Maxwell forces at the water tree tips, and the molecular chains of XLPE can fracture easier under the effect of the Maxwell forces. As a result, the propagation rate of water trees can become larger.

Key words: XLPE; cable; water tree; low temperature; propagation rate; electric field; Maxwell forces

0 引言

中国在城市化建设过程中,在城市配电网中敷设了大量交联聚乙烯(XLPE)电缆。然而由于早期

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477106)

敷设的电缆制造工艺落后,并且由于敷设过程中存在不规范操作等,在电缆绝缘层中不可避免地存在一些微观的缺陷,如微孔、裂缝等。当环境中的水分侵入电缆绝缘层后,在绝缘中的微观缺陷处将形成应力集中区,在电压长期作用下容易在缺陷部位引发水树^[1-6],甚至电树(过电压作用),并导致电缆

发生击穿事故^[7-8]。由于中国幅员辽阔,东北、西北等局部地区的冬季平均气温接近甚至低于0℃。此外,由于负荷波动等原因,电缆绝缘将受到低温的作用,在低温条件下的水树生长特征值得研究。

不同温度下水树的生长特性是国内外研究者关注的重点。然而对于在不同的温度下XLPE电缆中水树生长的规律,目前的研究尚未得到统一的结论。有研究认为在高温下水树生长速率提高,但同时也有研究认为随着温度升高,水树生长速率将下降。另有研究表明低温下水树生长速率将增加^[9-11]。以往的研究大多集中在研究不同温度下水树形态、生长速率等方面,尚未关注在一个较长的老化时期内低温下的水树生长特征,例如水树生长速率随着老化时间的变化及其原因分析。有关此方面的研究有助于进一步探索水树在低温下的生长规律,此外对于提高局部寒冷地区XLPE电缆的绝缘状态监测及运维管理水平亦有现实的指导价值。

在低温(0℃)条件下将3组XLPE样本分别进行为期14 d、21 d、28 d(d为天数)的加速水树老化,观测了老化XLPE样本中水树的微观形貌和水树长度,并通过电场仿真分析低温下水树生长速率变化的原因。

1 样本制作及加速老化实验

在3 mm厚的XLPE薄片上截取6片边长50 mm、厚度3 mm的正方形XLPE薄片,将6片样本分为A、B、C三组。其中样本1、2属于A组,样本3、4属于B组,样本5、6属于C组。之后选取3组样本正中间的圆形区域(直径25 mm)作为水树老化区,采用注射器针头在此区域制作3行平行的针孔缺陷(针孔深度1.5 mm)。注射器针头的参数如下:

1) 斜面长度3 mm; 2) 针尖倒角(17±2)°; 3) 针尖曲率半径(2.5±0.5) μm。XLPE水树老化样本如图1所示。

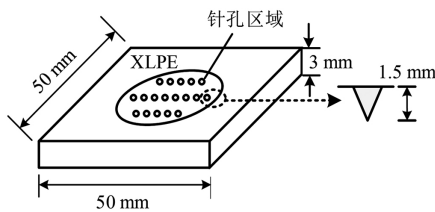


图1 XLPE薄片样本

将A、B、C3组薄片样本放置于IEC/TS 61956推荐的杯状试验装置,杯状实验装置中装有质量分数为20%的氯化钠溶液。将杯状实验装置放置于恒温箱中,将恒温箱的温度设置为0℃。将杯状实验装置下电极接地,上电极施加高频高压(有效值7.5 kV,频率400 Hz),在0℃恒温条件下进行加速水树老化^[11-12],如图2所示。A、B、C3组薄片样本的老化时间分别为14 d、21 d、28 d。

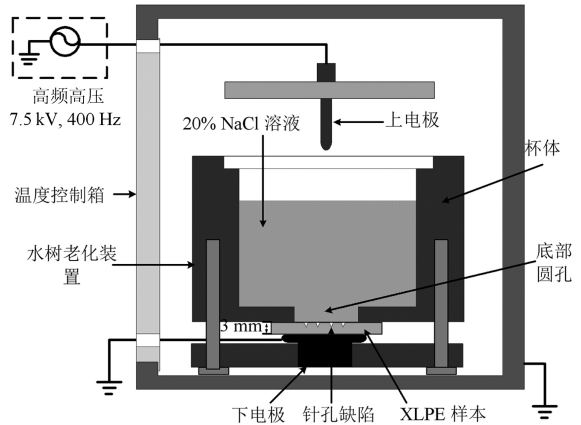


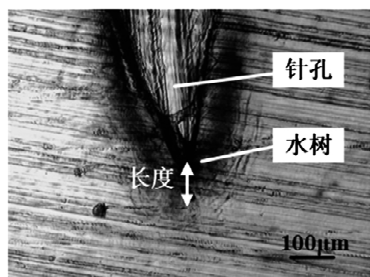
图2 加速水树老化实验装置

2 实验结果

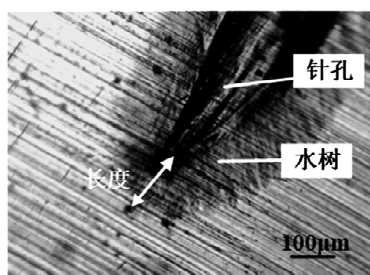
为了观测XLPE薄片样本中水树的生长情况,加速水树老化结束后,将A、B、C3组样本切片进行水树观测。在垂直于样本表面方向上,利用切片刀沿针孔边缘切出厚度为100±10 μm的切片。之后利用亚甲基蓝溶液在90℃时将切片染色,通过光学显微镜观察水树形态(显微镜放大倍数为64倍和160倍)。低温下不同老化时间的水树形态如图3所示。

由图3可以看到,在低温环境下,水树从缺陷处引发,沿电场方向向前生长。老化14 d时水树形态呈片状,即水树枝相互连接,水树的枝状特征并不明显。而老化21 d后,水树的枝状特征已经较为明显,在针孔周围均存在枝状的水树枝。而老化28 d后,水树的枝状特征更为明显,且越靠近水树尖端,水树枝越尖。另外,随着老化时间增长,水树染色逐渐加深。由图3(c)可见,老化28 d以后,针孔尖端的水树染色明显加深。

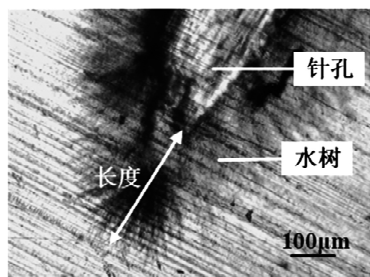
为了进一步研究低温下水树的生长速率变化,统计3组样本中的水树平均长度。测量水树长度时是以针尖为起点,以针尖正前方最长水树枝末端为终点。水树长度统计结果如图4所示。



(a) A组样本 (老化 14d)



(a) B组样本 (老化 21d)



(a) C组样本 (老化 28d)

图3 3组样本中的水树形态

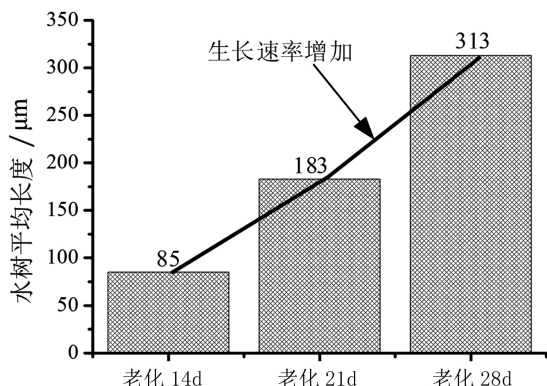


图4 3组样本中的平均水树长度

由图4可以看到,老化14d后水树的平均长度为85 μm,21d后水树平均长度为183 μm,28d后水树平均长度为313 μm。老化时间越长,水树生长速率增大:老化0~14d,水树平均生长速率为6 μm/d;15~21d,水树的平均生长速率为14 μm/d;22~28d,水树的平均生长速率为18 μm/d。22~28d,水树增加的长度是15~21d增加的水树长度的1.3倍。

3 讨论

水树枝的产生和发展是电场和水分共同作用的结果。绝缘层中的缺陷和导电层的凸起会成为局部电场应力集中点,在外加交流电场作用下,XLPE分子链将受到周期性麦克斯韦应力作用并发生疲劳断裂,进而形成水树枝^[13]。麦克斯韦应力公式为^[14]

$$F = (\epsilon_0/2)\nabla(\epsilon_r - 1)E^2 \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空的介电常数; ϵ_r 为电介质的相对介电常数; E 为电场强度。式(1)表明,电场越强,XLPE分子链受到的麦克斯韦应力越大,越容易发生疲劳断裂,导致水分扩散速率及水树生长速率越大。值得注意的是,由于在水树生长过程中,水树生长速率主要是由水树尖端电场强度所决定的,因此有必要研究低温下不同水树长度时水树尖端的电场强度。

为此,根据图3水树枝观测结果,利用多物理场有限元仿真软件建立如图5所示的XLPE薄片水树仿真模型。依据0℃不同老化时间下的水树长度,设置水树长度(沿针孔方向从针孔缺陷尖端到水树尖端的距离)分别为100 μm、200 μm、300 μm,计算沿着针孔方向AB水树尖端的电场强度,如图5所示。仿真分析中,薄片及水树区域的电场参数如表1所示^[1-5]。电场仿真结果如图6所示。

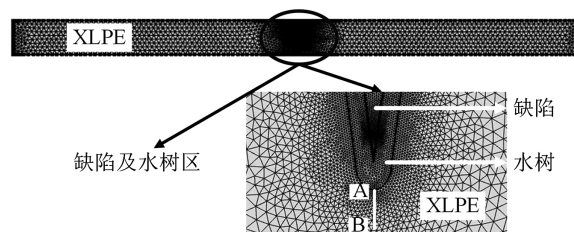


图5 水树仿真模型

表1 水树模型电场参数设置

部位	电导率 $\gamma/(S \cdot m^{-1})$	相对介电常数 ϵ_r
充水针孔	2	81
水树区域	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-7}$	2.7~16
XLPE 绝缘层	1×10^{-17}	2.3
半导体层	2×10^{-3}	100
缆芯(铝)	3.82×10^7	—

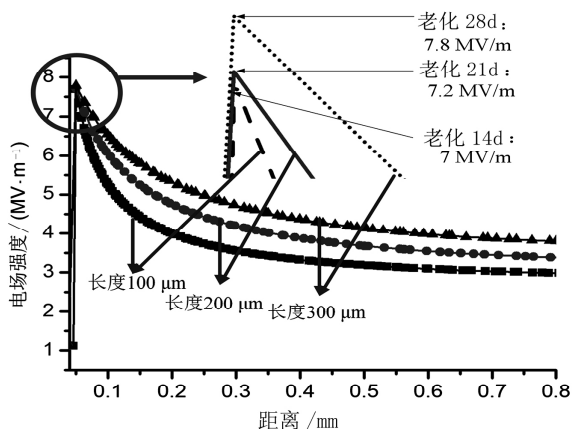


图6 不同老化时期水树尖端电场仿真结果

由图6可知,在水树尖端存在严重的电场畸变。水树老化14 d时,水树尖端电场为7 MV/m;老化21 d时,水树尖端电场为7.2 MV/m;老化28 d时,水树尖端电场为7.8 MV/m。由此可见,当水树长度增加时,水树尖端电场逐渐增强。事实上,在低温下进行水树老化时,由于此时XLPE材料的弹性模量较高,相对于高温,材料受同样的应力作用时形变量较小,水树空洞在电场作用下更容易被“拉长”,导致水树枝尖端电场强度增强。同时由于XLPE材料本身结构的不均匀性,在材料局部存在一些更大的缺陷(例如微裂纹等),在这些地方水树枝更容易沿着电场方向向前生长,从而造成在这些区域的水树生长速率高于临近区域,进而导致水树逐渐出现分枝状特征,并且随着老化时间增长这种分枝状特征更为明显,水树尖端电场亦随之增强(如图3所示)。

由此可知,随着老化时间的增长,水树尖端电场增强,XLPE分子链受到的麦克斯韦应力越大,分子链更容易发生疲劳断裂,进而导致水树生长速率升高。仿真结果与实验所得结果一致,图4与图6结果均表明:老化时间越长,水树枝生长速率越快。因此,当水树桥接绝缘的大部分时,应该引起足够的重视,进一步采取措施,否则在过电压(操作或雷电过电压)作用下,水树尖端容易引发电树,导致发生电缆击穿事故。

4 结 语

在0℃下进行水树老化实验,通过光学显微镜观察了水树形态,统计了各个老化阶段的水树长度,并通过电场仿真分析了低温环境下水树的生长速率提升的现象。得出以下结论:

1) 在低温条件下,随着老化时间的增长,水树的生长速率逐渐增加。

2) 在低温下进行水树老化时,随着老化时间的增长,水树尖端电场逐渐增强,导致水树生长速率逐渐增加。

3) 水树在低温下的生长速率变化与XLPE材料在低温下的力学特性密切相关。在低温下材料的弹性模量更高,水树空洞被拉长,从而形成分枝状特征并导致水树尖端电场增强。

参考文献

- [1] Crine J P, Jow J. A Water Treeing Mode [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 801-808.
- [2] 王金锋,刘志民,李彦雄,等. 化学交联方式对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2477-2484.
- [3] 周凯,赵威,陶文彪,等. XLPE电缆绝缘水树老化的无机修复机理及试验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 67-73.
- [4] 周凯,陶霁韬,杨滴,等. XLPE电缆水树老化过程中半导体层缺陷的形成机理[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 124-130.
- [5] 周凯,李康乐,杨明亮,等. 由异常水树形态洞察力学取向对水树生长的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5373-5381.
- [6] 李康乐,周凯,黄明,等. XLPE在电场作用下的取向对温度变化条件下水树生长的促进作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 956-964.
- [7] Chen X, Xu Y, Cao X, et al. Effect of Tree Channel Conductivity on Electrical Tree Shape and Breakdown in XLPE Cable Insulation Samples [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 847-860.
- [8] 郑晓泉,王金锋,李彦雄. 交联聚乙烯中水树枝向电树枝的转化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 166-174.
- [9] 高小庆,罗俊华. XLPE电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 62-64.
- [10] Al-Arainy A A, Ahaideb A A, Qureshi M I, et al. Statistical Evaluation of Water Tree Lengths in XLPE Cables at Different Temperatures [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 995-1006.

(下转第46页)

[6] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 93-101.

[7] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.

[8] M. F. Alves, T. N. Ribeiro. Voltage Sag: An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria[C]. Transmission and Distribution Conference, 1999(2): 585-589.

[9] 刘云潺. 电压暂降检测方法的分析与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

[10] 常学飞. 电力系统故障引起的电压暂降分析方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

[11] 吕伟. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.

[12] 陈瑞. 电压暂降在配电网中的传播规律及仿真评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

[13] 魏荣进. 电压暂降检测与扰动源辨识方法的分析与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[14] 高琳. 电压骤降评估方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[15] 赵贤. 电压闪变和暂降对电能计量的影响[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.

[16] 王效孟. 电压暂降在线检测装置的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

[17] M. H. J. Bollen. Characterisation of Voltage Sags Experienced by Three-phase Adjustable-speed Drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1666-1671.

[18] Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems: BS EN 50160[S], 2010.

[19] N. G. Hingorani. Introducing Custom Power[J]. IEEE Spectrum, 1995, 32(6): 41-48.

[20] 王金丽, 盛万兴, 宋祺鹏, 等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 515-519.

[21] 何维国, 董瑞安, 张孝银, 等. 配电网中电压暂降源定位方法比较[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8): 53-58.

[22] 刘应梅, 白晓民, 王文平, 等. 基于Dyn测度的电压暂降检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 45-49.

[23] 任伟. 交-直-交变频调速系统仿真研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.

[24] 易杨, 张尧, 钟庆. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 57-60.

[25] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[26] 王玲, 高倩倩, 陶顺, 等. 基于暂降类型判断的短路故障类型识别研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(6): 8-13.

[27] 奚珣. 电能质量的更高要求及对策[J]. 供用电, 2002, 19(1): 40-41.

[28] D. J. Won, S. J. Ahn, S. I. Moon. A Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2638-2643.

[29] 刘伟波. 固态开关关键技术仿真研究[J]. 市场周刊(理论研究), 2013(3): 142-144.

[30] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报, 2015(51): 518-520.

[31] Z. Wang, S. Wang, J. Qiu, et al. Induced Voltage Analysis of Superconducting Fault Current Limiter[J]. Compel International Journal for Computation & Mathematics in Electrical & Electronic Engineering, 2014, 33(1/2): 38-46.

作者简介:

李 训 (1975), 工程师, 主要从事电网电压及谐波管理工作;

许 可 (1981), 高级工程师, 主要从事变电运行及配电网管理工作;

肖 丽 (1977), 高级经济师, 主要从事电压管理工作。

(收稿日期: 2018-09-28)

=====
(上接第31页)

[11] 周凯, 陶文彪, 赵威, 等. 以分子取向理论理解交联聚乙烯中水树在不同温度下的生长特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3665-3673.

[12] 黄明, 周凯, 杨滴, 等. 在线注入有机硅修复液对交联聚乙烯电缆中水树生长的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 176-182.

[13] Abderrazzaq M H. Development of Water Tree Structure in Polyester Resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 158-165.

[14] Wang Z, Marcolongo P, Lemberg J A, et al. Mechanical Fatigue as A Mechanism of Water Tree Propagation in

TR-XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 321-330.

[15] A. Thomas, T. Saha. A New Dielectric Response Model for Water Tree Degraded XLPE Insulation - Part A: Model Development with Small Sample Verification[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1131-1143.

作者简介:

冯 杰 (1984), 硕士、高级工程师, 从事电力物资检测和研究工作;

李康乐 (1990), 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2018-07-25)