

0 ~ -50℃交联聚乙烯材料的电树枝生长特性

马一力, 丛祥旭, 李忠华

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 交联聚乙烯材料在电力电缆中有着广泛的应用,且电树枝生长特性是绝缘可靠性研究的重要基础。针对交联聚乙烯电缆的轻负荷及低温运行条件,设计了一套可多试样同时进行电树枝实验的电极装置,研究了温度对电树枝引发和生长特性的影响。在0 ~ -50℃范围进行了不同温度下的电树枝实验并与+25℃时进行对照,结果表明:温度对电树枝的引发、生长速度和电树枝形貌有着重要影响。电树枝50%起始电压随温度的降低而升高,且温度越低其增加幅度越小;低温对电树枝生长速度有抑制作用,且温度越低越明显;低温环境下的电树枝存在两种典型形貌,且电树枝的起始位置也有别于+25℃。

关键词: 交联聚乙烯; 电树枝; 温度; 50%起始电压; 生长速度

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.019

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0111-06

Growth Behaviors of Electrical Tree in Cross-linked Polyethylene from 0℃ to -50℃

MA Yi-li, CONG Xiang-xu, LI Zhong-hua

(Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Institute of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Cross-linked polyethylene has been widely used in the power cable, and the growth of electrical tree is significant foundations in the researching of insulation reliability. Considering the situation that Cross-linked polyethylene cable worked in the condition of light load and low temperature in extreme weather, a set of electrode device that multiple samples can be tested at a time was used in the experimental system in order to research the initiation and the growing behaviors of electrical tree in cross-linked polyethylene under different temperatures. The experiments of electrical tree were carried out under different temperatures from 0℃ to -50℃, and used the one under +25℃ as the comparison, it showed that temperature had a significant impact on the initiation、growth speed and the typical morphology of electrical tree. As the falling of temperature, the 50% initiation voltage increased obviously, and the increasing range was getting smaller as the temperature getting lower. The low temperature had some inhibitory impacts on the growth speed of electrical tree, and the lower temperature, the more obvious effect. There were two particular types of morphology in low temperature environment, and the growth site of electrical tree was different from the one growing in +25℃.

Keywords: cross-linked polyethylene; electrical trees; temperature; 50% initiation voltage; growth speed

收稿日期: 2016-06-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2014CB239504)。

作者简介: 马一力(1992—),女,硕士研究生。

通信作者: 李忠华(1962—),男,教授,博士研究生导师, E-mail: drzhhl@hrbust.edu.cn.

0 引言

凭借着良好的电气性能和耐热性能^[1] 交联聚乙烯电缆在电网中有着越来越广泛的应用,同时电树枝生长特性对交联聚乙烯绝缘寿命有着重要的影响^[2-3],因此对交联聚乙烯电树枝生长特性研究具有重要的意义^[4-6]。

国内外学者对交联聚乙烯电树枝生长机理进行了很多研究,J. V. Champion 等将空间电荷和固体绝缘中的电树枝现象一并进行了研究^[7-9],实验证实空间电荷的抽出和注入对电树枝的形成有着及其重要的作用,然而部分学者认为低温下机械冷缩应力起主要作用^[10-11]。目前为止,国内外学者对室温及高温环境下^[14] 的不同试验条件如频率^[12]、绝缘缺陷^[13] 等对电树枝的影响进行了大量的研究,一些学者致力于研究纳米复合材料^[15-17] 的电树枝性能^[19] 和电导^[18],同时由于超导材料的发展和低温电工设备的应用,部分学者^[10,20] 探究了液氮温区下的聚合物电树枝现象,发现液氮温度下聚合物抗树枝状放电性能出现了大幅度提高。但是近年来,随着气候问题的日趋严重,我国区域性极端低温事件^[21] 频繁产生,因此交联聚乙烯电缆在室温与液氮温度间的低温轻负荷工作情况时有发生,然而尚未有学者进行此温区内的交联聚乙烯材料电树枝特性研究。因此研究室温与液氮温度区间内的交联聚乙烯材料电树枝生长特性有着重要的工程意义。

为了填补低温下交联聚乙烯材料电树枝生长特性研究的空缺,对 $0 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 不同温度及 $+25^{\circ}\text{C}$ 下交联聚乙烯试样进行实验,并对 50% 起始电压、电树枝生长速度、电树枝形貌和生长位置进行分析。结果表明, $0 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 范围的低温对电树枝的引发和生长存在抑制作用,且低温环境中的电树枝形貌和生长位置与室温条件下存在显著差异。

1 实验装置及方案

1.1 试样及电极装置

电极采用传统的针-板结构。针电极,选用直径为 0.6 mm 的钨丝在 NaOH 溶液中通以 5 V 直流电压控制电流约为 4 mA ,利用电化学腐蚀形成针尖,选取针尖曲率半径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的针用于试样制作。

交联聚乙烯材料,LDPE 粒料与 DCP 进行混炼,

在特制模具下经由平板硫化机通过 110°C 热压成型 175°C 进行交联,制成 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的交联聚乙烯片状材料,保持一定压力冷却至室温。随后在恒温箱中将热压制成的交联聚乙烯片状材料切割成尺寸为 $10\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的块状样品,在恒温箱中加热至交联聚乙烯材料呈完全透明状后将针匀速插入,用千分尺测量并控制针尖与块状样品底部间距为 $3\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$,在室温条件下自然冷却后在底部均匀涂抹上一层快干型导电银漆,试样结构详见图 1。

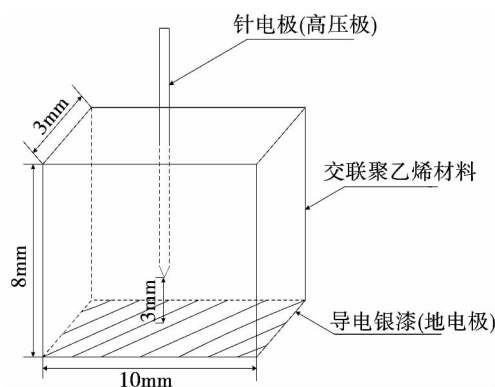


图1 电树枝实验用试样结构

此外,本文设计并采用一种可多试样同步加压的电树枝引发电极装置,此种装置的优点是:第一,电树枝实验往往需要同种条件下多次进行,而多试样同步加压进行实验可大大减小由于环境温度的变化、电网的波动和实验操作等造成的误差,减少实验时间提高实验效率;第二,此实验装置有利于获得一个对于绝缘寿命管理有着重要意义的参数,即电树枝 50% 起始电压。电树枝引发电极装置具体结构如图 2 所示。

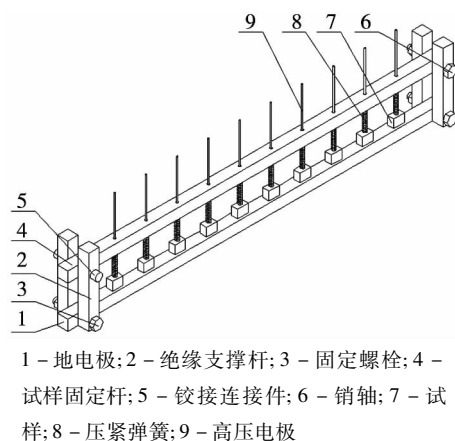


图2 多试样电极装置

在实验开始前,打开销轴 6 将试样固定杆 4 以

铰接连接件5为轴逆时针旋转抬高一定角度,在实验所用试样7的高压电极9上套上压紧弹簧8,后逐一装入试样固定杆4上的直径为1 mm的固定孔内,而后使试样固定杆4顺时针旋转相应角度恢复至原位并固定好销轴6,随后检查并调整压紧弹簧8使得涂抹过导电银漆的试样底部与地电极1紧密接触。最后,将电极装置的地电极1接地,高压端连接导线用分别与多个试样的高压电极9连接,最后将电极装置置于装有变压器油的实验箱中并放入低温冰箱内进行电树枝实验。

1.2 观测系统

加压结束后的交联聚乙烯试样,用带有摄像头的数码体式显微镜进行观测并拍照,同时利用软件对试样中产生的电树枝尺寸进行标定,电树枝观测系统如图3所示,主体由显微镜、接口相机、光源、PC机和处理软件组成。

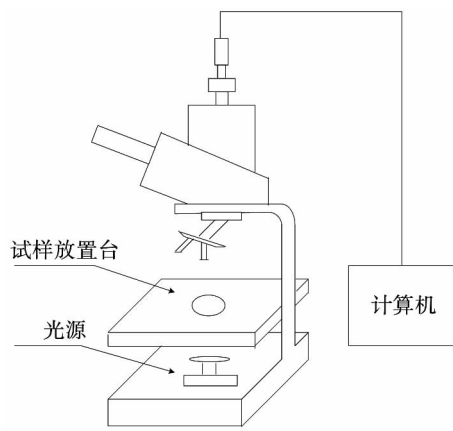


图3 电树枝观测系统

1.3 实验流程

根据图1所示的结构制作若干个交联聚乙烯试样,实验前置于90℃环境下干燥30 min待试样自然冷却后将其装入电极装置,用压紧弹簧控制试样底部与接地电极紧密接触。将注入适量变压器油的实验箱放入设置好温度的低温冰箱内,实验前放置24 h待油温和试样温度均达到设定温度后加压,以1 kV/s的速度均匀升至所需电压稳定加压1 h进行实验。考虑到实验系统的影响和实验的分散性,以每10个试样为一组,依次分别在0 ~ -50℃间6个不同温度及+25℃下,按照不同电压在每个温度下分别进行40至50组实验。当电树枝长度等于或大于20 μm时,称为出现电树枝;一组试样为10个,施加电压一个小时出现电树枝的试样个数与该组试样总数之比,称为电树枝引发率;而电树枝引发率为

50%时试样上所施加的电压,称为电树枝50%起始电压。实验结束后分析不同温度下的电树枝引发率与电压关系,并确定电树枝50%起始电压。加压结束后的试样在观测系统下观察电树枝形貌并就其尺寸进行标定,树枝长度为沿电极方向生长的距离。

2 实验结果与分析

2.1 温度对电树枝引发的影响

采用线性拟合利用Origin软件绘制出不同温度下的电树枝引发率和电压关系图,如图4所示。可以直观地看出,随着电压的升高,不同温度下的电树枝引发率均逐渐增大,且温度越低线性回归曲线的斜率越小。由此表明,随着温度的降低电树枝引发率呈现减小的趋势。

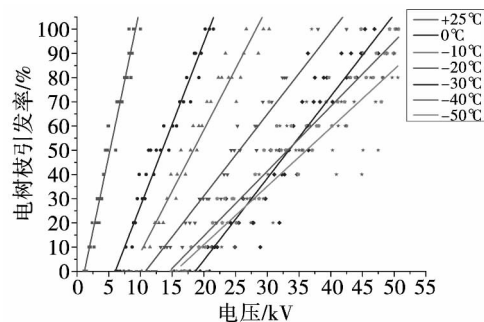


图4 不同温度下电压与电树枝引发率的关系

用SPSS软件对不同温度下的电压与电树枝引发率关系进行了Pearson相关性分析,结果显示:就单个温度而言,Pearson相关性系数均处于0.8~1.0之间,体现了极强的正相关,零假设成立的概率 $P=0.000$,可认为随着电压的升高电树枝引发率增大,这与图4所示规律一致。绘出不同温度下的Pearson相关性系数变化图,如图5所示。从图5可看到,随着温度的降低,Pearson相关性系数由0.980减小到0.876,且温度越低减小越快,尤其是-40降至-50℃时相关性系数出现了大幅度减小,表明随着温度的降低电压和电树枝引发率间的Pearson相关性减小。

由图4可获取不同温度下电树枝引发率为50%时交联聚乙烯试样上所施加的电压值,即电树枝50%起始电压。对温度与电树枝50%起始电压进行相关性分析,结果显示Pearson相关性系数为-0.933,零假设成立的概率 $P=0.000$,故可认为:温度和电树枝50%起始电压间存在极强的负相关。

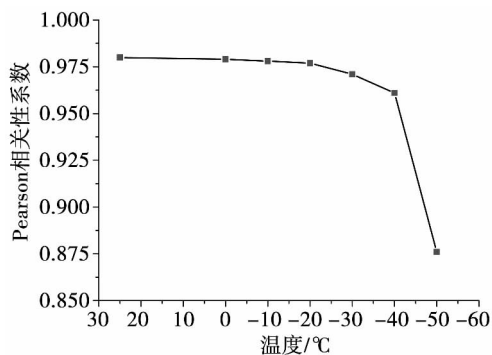


图5 不同温度下的 Pearson 相关性系数

这点也可以由图6清晰地看出:从0℃至-50℃,电树枝50%起始电压在15~35 kV内随着温度的降低呈增大趋势,但电压的变化速率逐渐减缓,即温度越低50%起始电压增加的幅值越小。

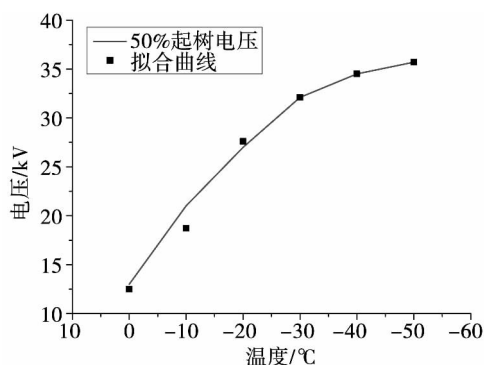


图6 不同温度下的电树枝50%起始电压

2.2 温度对电树枝生长速度的影响

在观测系统下利用处理软件对交联聚乙烯试样中的电树枝长度进行标定,并绘制出不同温度下电压与电树枝长度的关系图,如图7所示。本文规定实验时间一个小时,标定出实验结束后试样中电树枝的生长长度,以此来度量电树枝的生长速度。随后进行相关性分析,结果显示不同温度下电压与电树枝生长长度的 Pearson 相关性系数均在0.8~1.0之间,表现出了极强的正相关,这点在图7上表现为随着电压的增加电树枝长度的增大。比较低温环境0℃至-50℃这6个不同温度下的曲线可发现,电压增大相同的数值时温度越低电树枝长度增加的幅值越小,即在图7中表现为温度越低电树枝长度随电压增长变化的曲线越平稳,这表明:低温下电树枝的生长受到一定程度的抑制,且温度越低抑制作用越显著。究其原因可能是在较低的温度下,交联聚乙烯分子热运动的能量不足,从而使得反应速率减慢,体现为电树枝的生长速度的减慢。

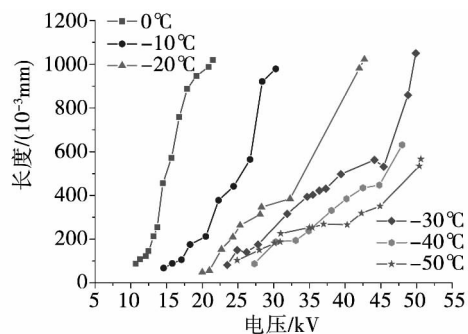


图7 不同温度下电压与电树枝长度的关系

2.3 温度对电树枝形貌和生长位置的影响

实验后交联聚乙烯试样经由观测系统观察后每个温度下获取约200~300张图片,表1就不同温度各列出4张共计28张采样图用以说明,电树枝引发率用 P 表示,其中 U_1 对应 $P \geq 85\%$ 的试样中的典型电树枝形貌、 U_2 对应 $P \in [65\%, 85\%)$ 的试样中的典型电树枝形貌、 U_3 对应 $P \in [45\%, 65\%)$ 的试样中的典型电树枝形貌、 U_4 对应 $P \in [45\%, 25\%)$ 的试样中的典型电树枝形貌。+25℃下的电树枝有五种典型形貌:枝状、丛林状、松枝状、藤枝状和混合状,而观察表1发现: +25℃下的 U_1 、 U_2 , 0℃、-10℃、-20℃时的 U_1 对应的典型电树枝形貌均为较为清晰的丛状,而-30℃时 U_1 对应的丛状电树枝尺寸明显小于前两个温度,同时观察-40℃和-50℃下全部采样图发现只有极个别样品出现丛状电树枝,这一现象表明低温条件下丛状电树枝不易产生。观察实验获取的全部图片并结合表1,发现-40℃和-50℃时无论电压等级的高低,最常见的两种典型形貌分别为树枝状和树枝-松枝状。+25℃和0℃时电树枝各个分枝都相对清晰分明,从-10℃开始低温环境下不同温度下的各枝干都趋于呈现“纤细状”, -50℃时最为明显,这表明低温下形成电树枝枝干的过程中需要的能量比+25℃时少,且温度越低越明显。

+25℃、0℃和-10℃时无论何种形貌的电树枝由于针尖处的高场强其生长的起始位置均为针尖处,而-20℃时 U_1 、 U_3 、 U_4 和-30℃时的 U_1 、 U_2 、 U_3 对应的典型电树枝形貌中电树枝的起始位置到针尖有一小段的距离,而温度更低时这种现象有减弱的趋势,推测原因认为是由于空间电荷的注入削弱了针尖电极尖端处的电场强度,而温度更低时空间电荷对针尖电场强度的削弱有一定程度的减小。与+25℃时不同, -30℃时 U_3 、 U_4 对应的典型电树枝

形貌和 -40℃ 的 4 张图, 包括 -50℃ 的 U_1 、 U_2 、 U_3 对应的典型电树枝形貌中都出现了电树枝在针尖侧面产生的现象, 结合全部采样图发现这种现象随着温度的降低出现的概率增大, 究其原因发现, 试样中针电极的插入在高温下进行而后在室温环境下自然冷却, 如此制作而成的试样存在弱机械应力, 然而实验

温度为低温环境下 -30℃、-40℃ 和 -50℃, 这种情况下交联聚乙烯产生的收缩应力大于金属针尖的收缩应力, 则形成的强抱紧力可能在针尖的侧面形成极其细小的微裂纹, 从而出现低温下电树枝在针尖侧面产生的现象。

表 1 不同温度下的典型电树枝形貌

温度/℃	$U_1 P \geq 85\%$	$U_2 P \in [65\%, 85\%)$	$U_3 P \in [45\%, 65\%)$	$U_4 P \in [45\%, 25\%)$
+25				
0				
-10				
-20				
-30				
-40				
-50				

3 结 论

本文通过 $0 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 范围内的交联聚乙烯材料中电树枝引发和生长实验,可以得出以下结论:

1) 随着温度的降低,电树枝引发率与电压的相关性减小;低温环境下,电树枝 50% 起始电压比 $+25^{\circ}\text{C}$ 时高得多,且温度越低其增加幅度越小。

2) 与 $+25^{\circ}\text{C}$ 时相比,低温下的电树枝长度和生长速度都显著减小,这表明低温环境能够抑制电树枝的生长,且温度越低越明显。

3) 低温下的电树枝存在两种典型形貌,且由于空间电荷和机械收缩应力的共同作用电树枝易在针尖的侧面产生,或电树枝起始位置到针尖有一小段的距离。

参 考 文 献:

- [1] 魏强,范玉军,夏荣,等. 聚乙烯及交联聚乙烯水树老化的特性研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(2): 82-84.
- [2] 屠德民. 从工程电介质进展看前沿课题[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 8-15.
- [3] 李盛涛,郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 机械工业出版社, 2006.
- [4] 马丽婵,郑晓泉,谢安生. 交联聚乙烯电缆中电树枝的研究现状[J]. 绝缘材料, 2007, 40(5): 49-52.
- [5] 陈向荣,徐阳,王猛,等. 高温下 110kV 交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 645-654.
- [6] 吴倩,刘毅刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘老化及其诊断技术述评[J]. 广东电力, 2003, 16(4): 1-6.
- [7] CHAMPION J V, DODD S J, ALISON J, et al. Electrical Tree Growth and Space Charge Behaviour of Epoxy Resin Blends [C] // IEEE, International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998: 321-324.
- [8] CHEN X, XU Y, CAO X, et al. Electrical Treeing Behavior at High Temperature in XLPE Cable Insulation Samples [J]. IEEE

Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2841-2851.

- [9] CHEN G, THAM C. Electrical Treeing Characteristics in XLPE Power Cable Insulation in Frequency Range between 20 and 500 Hz [J]. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on, 2009, 16(1): 179-188.
- [10] 梁志钰,姚建国. 低温下聚合物的树枝状放电[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1991(1): 20-25.
- [11] WU W, FENGNIAN H. Mechanical and Dielectric Assessment of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Insulation for Cryogenic Applications [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 504-512.
- [12] 谢安生,李盛涛,郑晓泉. 高频电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长的动力学模型[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3828-3833.
- [13] 郑晓泉, CHEN G, DAVIES A. E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝与绝缘结构亚微观缺陷[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 28-33.
- [14] 廖瑞金,郑升讯,杨丽君,等. 不同温度下 XLPE 电缆中电树枝的生长特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2398-2404.
- [15] 迟晓红. 纳米蒙脱土/聚烯烃复合材料结构形态与电树生长机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [16] 张金梅. PE/MMT 纳米复合材料结晶形态与树枝放电特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [17] 王颖剑. 纳米 MgO/LDPE 与 SiO₂/LDPE 电树枝生长特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [18] 韩宝忠,高思明,李春阳,等. 纳米石墨/聚乙烯复合材料电导特性模拟仿真[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(1): 90-94.
- [19] 王雅妮,李光道,吴建东,等. 添加纳米 MgO 对交联聚乙烯中直流接地电树枝的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(10): 26-30.
- [20] KOSAKI M, SHIMIZU N, HORII K. Treeing of Polyethylene at 77K [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1977, EI-12(1): 40-45.
- [21] 王晓娟,龚志强,任福民,等. 1960-2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(1): 8-15.

(编辑: 温泽宇)