

DOI: 10.7652/xjtuxb201404008

直流电压下交联聚乙烯电缆绝缘中 电树枝的生长特性研究

刘英, 曹晓珑

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究交联聚乙烯电缆绝缘材料中直流电树枝的生长速率、形态特征及通道特性,利用树枝化试验及显微观察系统,在针尖半径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、针-板电极间距为 2 mm 、周期性施加的间断直流电压下,对试样进行了分组试验。试验结果显示:电树枝由细单枝逐渐发展为稀疏丛状结构,树枝通道为非导电型;电树枝生长缓慢,生长速率不超过 $1.0\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$;树枝长度主要取决于加压周期数及直流电压幅值,电压持续时间在高压下影响增大;针极意外接地情况下,电树枝将瞬间引发或快速生长。理论分析表明,电树枝生长规律可以由文中所建立的非导电树枝模型及等效电路进行合理解释,而空间电荷效应是产生直流接地树现象的根本原因。

关键词: 交联聚乙烯电缆绝缘;直流电树枝;生长速率;形态特征;通道特性

中图分类号: TM215.1;TM247 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)04-0041-06

Growth Characteristics of Electrical Trees in XLPE Cable Insulation under DC Voltage

LIU Ying, CAO Xiaolong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The growth, shape and channel characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation under DC voltages are investigated by combination of treeing test with microscopic observation system. In the experiment, the tip radius of the needle electrode is taken as $5\text{ }\mu\text{m}$, the pin-plane distance as 2 mm , and the intermittent DC voltages are applied on grouped samples periodically. The experiments show that the electrical trees develop gradually from a single slender branch to a sparse bush-like structure, and the tree channels are non-conductive. The trees grow very slowly, with a growth rate no more than $1.0\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$. The tree length increases with the increasing number of cycles and amplitude of DC voltage, and it is also proportional to the voltage duration in each cycle at 60 kV . Under the condition of an unexpected grounding of the needle electrode, a new tree initiates instantly from the needle tip, while an existing tree grow very rapidly. The tree growth pattern can be theoretically explained by the equivalent circuit according to a non-conductive tree model, and the space charge effect is the essential reason for grounded DC tree.

Keywords: XLPE cable insulation; DC electrical tree; growth rate; shape feature; channel characteristics

收稿日期: 2013-08-13。 作者简介: 刘英(1976—),女,博士,讲师;曹晓珑(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307131)。

网络出版时间: 2013-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131225.1701.001.html>

交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆由于具有一系列显著优点,近年来发展十分迅速,尤其在长距离海底电力传输领域,XLPE 电缆几乎是目前挤出绝缘电缆的唯一形式^[1]。研究发现,对高压、超高压 XLPE 电缆,电树枝化是导致绝缘失效的主要因素^[2-3]。针对固体绝缘在交流电压下电树枝特性的研究开展较广,主要涉及温度、电压幅值、升压速率、频率、残余机械应力等对电树枝引发概率、生长速度、结构形态等的影响,各种电树枝通道的痕量分析,以及电树枝劣化状态与局部放电量的对应关系等^[4-7]。直流电压下 XLPE 绝缘的老化特性与交流下显著不同,直流电树枝引发困难,生长速度慢,这可能是导致该领域研究报道不多的原因。

近年来,对固体绝缘材料中直流电树枝的研究包括直流树、直流感地树、直流电压极性反转树、直流叠加冲击树以及直流预压冲击树等,主要针对树枝的引发特性展开,这些试验获得的结论包括:直流电压下针电极处发生了同极性电荷注入,这些电荷在微秒级时间内达到稳态分布,有效改善了针极附近的极不均匀电场,使得直流树枝引发电压远高于交流和冲击,针极处的视在最大场强可达到材料本征击穿场强的数倍^[8-11]。Masahiro 以低密度聚乙烯(LDPE)为对象,利用热刺激电流法测量电荷透入针电极的深度,发现电树枝通道的长度近似等于空间电荷的透入深度^[12]。Kitani 对直流感地树的研究表明,负极性下引发的电树枝多而细,正极性下少而粗^[13]。Fujii 对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中直流树的测试显示,低压下正针引发电树的分形维数为 1.0,高压下无论针极正负,电树枝分形维数均为约 1.5^[14]。

目前,关于 XLPE 绝缘材料中直流电树枝生长特性的报道还很少,除上述几篇涉及电树枝形态以外,对直流电树枝生长速率、通道特性的研究尚属空白,未见公开发表的资料。本文采用显微观察及拍照系统,详细记录外加周期性间断直流电压下 XLPE 电缆绝缘中电树枝的生长过程,研究其形态变化和通道特性,重点讨论电树枝长度生长规律及其主要影响因素,并对其生长机理进行探索。

1 试验

1.1 试样

110 kV 交流 XLPE 成品电缆绝缘线芯,绝缘厚度为 15.5 mm,内屏蔽厚度为 0.5 mm,将缆芯抽出后,切割成 5 mm 厚的空心圆盘或半圆试样。以人

为插入的钢针和电缆自身内半导体层构成典型针-板电极系统,制得树枝化测试试样。针电极表面光滑,直径 $\Phi=1$ mm,针尖曲率半径 $r=(5\pm1)$ μm ,圆锥角度 $\theta=30^\circ$,用特制模具扎入 XLPE 电缆绝缘试样中距平板电极 (2 ± 0.2) mm 处。制样过程采取针电极清洗及表面预涂 LDPE、温度控制、退火处理等措施,以避免针极插入后形成气隙或残留机械应力。试样与电极的结构尺寸见图 1。

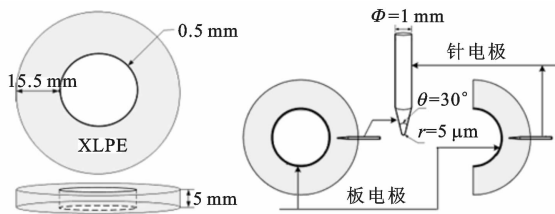


图1 试样与电极的结构与尺寸示意图

1.2 试验系统

试验系统如图 2 所示,试样固定在测试容器内并浸于硅油中,防止高压沿面闪络并增加试样透明度。针电极上施加高压,平板电极接地。显微观察及拍照系统用于对加压后试样中电树枝引发及生长特性的实时观察和拍照记录。透射光从试样底部射入,可增加电树枝图像的清晰度,反射光用于对电树枝通道颜色的观察。本试验中使用的高压直流发生装置最高可输出 190 kV 的电压,升降压速率为 1 kV/s,并带有自断电保护功能,当电流过大时,控制箱将自动切断电源。

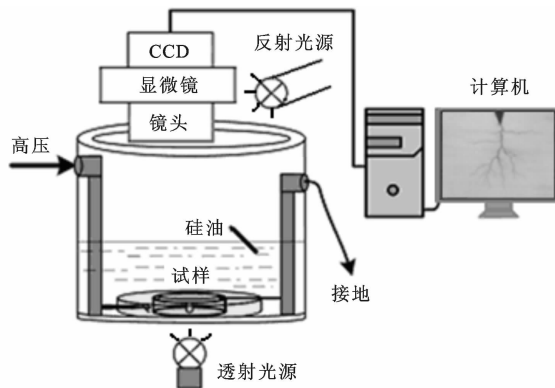


图2 电树枝试验的显微观察及拍照系统

1.3 试验方案

本试验旨在研究 XLPE 电缆绝缘材料中的电树枝在直流电压下的生长特性。为了避免引发条件不同可能导致的生长差异,试样在统一条件(1.2/50 μs , 50 kV 单次标准雷电冲击)下进行电树枝引发,并在引发后集中放置两个星期,消除残余电荷的影响。

试探性试验发现,当直流电压低于 50 kV 时,电树枝生长极其缓慢,当电压为 70 kV 或以上时,电树枝生长很快,在几分钟之内就会由针电极生长至对面电极而导致试样击穿。基于以上观察,本试验设置测试电压为 50 kV 和 60 kV。

在工频电压下试验时,硅油液面相对静止,可对试样进行实时观察和 1 s 间隔的定时拍照。但是,在直流电压下,电泳效应极为显著,硅油分子沿电场方向运动并与容器壁碰撞,导致液面剧烈晃动,无法在加压时对试样进行实时观察或清晰拍照。因此,试验中采用周期性间断加压的方式,在每次电压降为 0、液面平静后对试样进行观察和拍照。

试验在室温、常压下进行,电压施加方式如图 3 所示,电压升高到预设值 U_d 并持续时间 t_d ,之后降到 0 并保持时间 t_r ,此为一个加压周期 T 。重复若干个加压周期,直到设定时间,试验终止。在每个 t_r 时间内,对试样进行观察和拍照,此时试样处于开路状态。根据所加直流电压的幅值及持续时间将试样分组,如表 1 所示,每组 3 个试样。

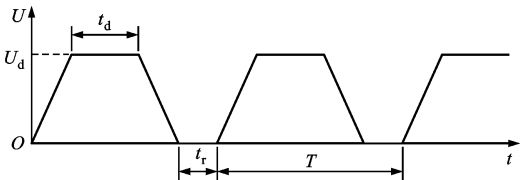


图 3 直流电压的周期性间断加压方式示意图

表 1 试样按照加压方式的分组

组别	U_d/kV	t_d/min	t_r/min	加压周期数	$\sum t_d/\text{min}$
A	50	15	10	49	735
B	50	60	10	19	1 140
C	60	15	10	49	735
D	60	60	10	19	1 140

在外加电压作用下,记录试样中电树枝的生长特性,观察其形态变化,并测量电树枝长度。电树枝长度为从针尖到电树枝尖端沿电场方向的最长距离。

2 试验结果

2.1 直流电树枝的形态特性

电树枝生长过程的形态变化如图 4 所示,刚引发时通常为颜色较浅、通道较细的单枝,在外加直流电压的作用下,逐渐向纵、横方向发展,长度及密度增加,整体呈现为稀疏丛状,树枝通道很细。

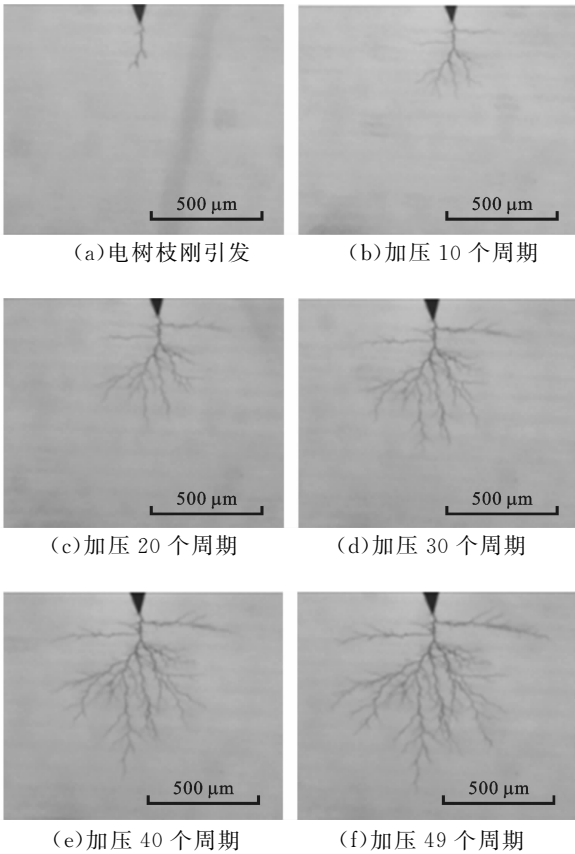


图 4 直流电压下不同阶段的电树枝形态

2.2 直流电树枝的长度特性

按照表 1 中的加压方式,在试验终止时,各组试样中电树枝形态基本相同,只是在长度及密度上有所差异。以 3 个试样中电树枝长度平均值作为该组的电树枝长度,则电树枝长度随累计加压时间的变化关系如图 5 所示。

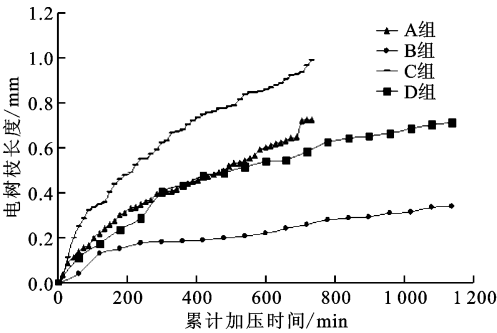


图 5 各组试样中电树枝长度随累计加压时间的变化

由图 5 可见,电树枝生长均为先快后慢,在慢速生长期内,其速度基本恒定在 $0.2\sim1.0\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ 之间。在相同的加压方式下,电压越高,电树枝生长越快,即 C 组快于 A 组,D 组快于 B 组。在相同的电压幅值下比较时,虽然 B 组试样在 19 个周期内累计耐压 1 140 min,大于 A 组在 49 个周期内累计的

735 min,其电树枝长度反而较短,类似的有D组小于C组。这说明决定电树枝生长速率的因素除直流电压幅值外,加压周期数也是一个重要因素。

以加压周期数为变量时,电树枝长度的变化规律如图6所示,电树枝长度随加压周期数单调增加。在相同周期数的外加电压下,50 kV下的A、B两组试样中电树枝长度接近,60 kV下电树枝生长速度显著高于50 kV,且D组试样电树枝生长快于C组。

2.3 直流电树枝的通道特性

根据文献[15-16]的研究结果:导电型电树枝通道内存在导电性碳化物质,故在反射光下观察时,电树枝通道呈黑色;非导电型电树枝通道由于没有或者仅有少量的导电性物质,在反射光下呈白色。本试验所得电树枝的反射光照片如图7所示,电树枝通道为白色,属于非导电树。

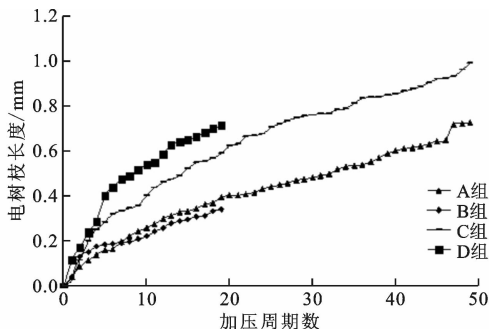


图6 各组试样中电树枝长度随加压周期数的变化

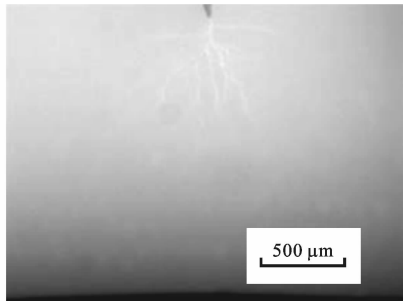


图7 直流电树枝的反射光照片

3 直流电树枝的生长机理分析

3.1 电树枝引发

在本文试验条件下,雷电冲击50%的电树枝引发电压为35 kV,而持续10 h的70 kV和-60 kV直流电压,以及累计加压时间达10 h的70 kV间断直流电压,均未能在试样中引发电树枝。

不考虑空间电荷,利用Mason公式对35 kV电压下针尖处视在最大场强 $E_{\max}$ 进行估算,如下所示

$$E_{\max} = \frac{2U}{R \ln(1 + 4d/r)} \quad (1)$$

式中: U 为外加电压,35 kV; r 为针尖曲率半径,5 μm ; d 为针-板电极间距,2 mm。由此确定的针电极尖端视在最大场强最大值约为 $1.9 \times 10^6 \text{ V/mm}$,这与文献中相同条件下 $2 \times 10^6 \text{ V/mm}$ 的试验数据基本一致^[17]。

文献[18-19]显示,XLPE绝缘材料的本征击穿场强约为 $5 \times 10^5 \text{ V/mm}$ 。本试验中,35 kV雷电冲击电压下 $1.9 \times 10^6 \text{ V/mm}$ 的电树枝引发场强接近该值的4倍,而70 kV直流电压在针尖处形成的场强理论上比这还要高,但仍未观察到电树枝引发的现象。

XLPE材料中发生空间电荷注入的临界场强为 $1 \times 10^5 \text{ V/mm}$ ^[20-21]。本文中冲击和直流电压在针尖处所产生的场强均显著高于 $1 \times 10^5 \text{ V/mm}$,因此可以推测,针尖电极处必然发生了电荷注入,这些注入的同极性电荷逐渐远离电极,在针尖前端的介质中入陷并达到稳态分布,极大地改善了不均匀电场,使电树枝起始电压大大提高。在本文试验条件下,进行电树枝引发需要施加35 kV雷电冲击电压,而相同条件下,9 kV交流电压即足以在试样中引发电树枝^[6,16]。

空间电荷的累积与分布是需要时间的,文献[8]显示,该空间电荷形成过程所需要的时间约为30~80 μs 。对上升速率为1 kV/s的直流电压,有足够的时间形成空间电荷,继而能最大程度地均匀针尖周围的电场。然而,对1.2 μs 上升沿的雷电冲击电压,因为电压上升快,注入电荷来不及远离电极并达到稳态分布,在极不均匀场中,空间电荷使电场均匀化的程度较直流电压下的低,这就是雷电冲击下电树枝能在35 kV引发,而直流下70 kV仍不能引发的原因。

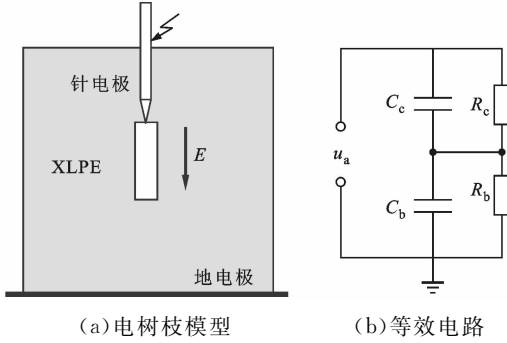
3.2 电树枝生长

文献[22]研究指出,电树枝生长总是比引发容易,这是由于缺陷尖端所产生的空洞在沿电场方向必须达到一个最小长度,以维持足够能量的局部放电,使树枝向前发展。本试验中,在外加70 kV直流电压下,不能引发电树枝,但已引发的电树枝却能在几分钟内就生长至对面电极,击穿试样。

直流电压下的电树枝通道是非导电型的,其生长特性可以利用介质内部的局部放电机理来解释,将树枝通道看作充满气体的小气隙,如图8a所示,图中 E 及箭头给出了介质中的电场及其方向。模型的等效电路如图8b所示,其中 u_a 为外加电压, C_c 、 R_c 为通道气隙的等效电容和电阻, C_b 、 R_b 为与

气隙串联部分介质的等效电容和电阻。

气隙两端的电压 $u_c(t)$ 在开始升压时按电容分配,有 $u_c(0) = u_a C_b / (C_b + C_c)$, 当达到稳定状态时按电阻分配,有 $u_c(\infty) = u_a R_c / (R_b + R_c)$ 。由于 $u_c(\infty)$ 大于 $u_c(0)$, 所以 $u_c(t)$ 随着时间 t 是逐渐上升的。



(a) 电树枝模型 (b) 等效电路
图8 直流电树枝生长的分析模型

在升压阶段,气隙两端的电压 $u_c(t)$ 随着外加电压的升高而线性上升,一旦 $u_c(t)$ 达到气隙的击穿电压 u_{CB} , 气隙中将发生放电,使大量中性气体分子电离,由此形成的空间电荷在外加电场作用下迁移到气隙壁上,形成与外加电压方向相反的内部电压 $-\Delta u_c$, 气隙上的实际电压变为 u_r ($u_r = u_{CB} - \Delta u_c$), 于是放电暂停。气隙上的电压又随外加电压而上升,直到再次达到 u_{CB} , 出现第二次放电。两次放电的时间间隔估算如下。

在一次放电后,气隙上的电压降为 u_r , 此后气隙上的电压按时间常数 $\tau (\tau = \frac{R_b R_c}{R_b + R_c} (C_b + C_c))$ 向稳态值 $u_c(\infty)$ 上升,经过 t_B 时间后,如果 $u_c(t)$ 达到气隙的击穿电压 u_{CB} , 则放电再次发生。此时满足

$$u_{CB} = u_c(\infty) - [u_c(\infty) - u_r] e^{-t_B/\tau} \quad (2)$$

通常情况下 $u_c(\infty) \gg u_r$, 在 $u_c(\infty) \gg u_{CB}$ 条件下,由式(2)可推出

$$t_B \approx \tau \frac{u_{CB}}{u_c(\infty)} \quad (3)$$

外加电压 u_a 升高(对应的 $u_c(\infty)$ 增大),气隙的击穿电压 u_{CB} 降低,都会使放电的时间间隔 t_B 减小,放电重复率增加。另外,所有影响时间常数 τ 的因素都会影响放电重复率,如电压升高、温度升高都会使材料电导率增加, τ 变小,放电重复率增加。

由于在试样上施加的直流电压非常高,因此升压过程就会发生多次放电。假定放电产生的电荷不泄漏,当放电 n 次后,如果满足 $u_c(\infty) - n \Delta u_c < u_{CB}$, 则气隙中就不会再发生放电。如果电压 u_a 很高,电荷又容易泄漏,那么放电就会持久、重复出现。在外

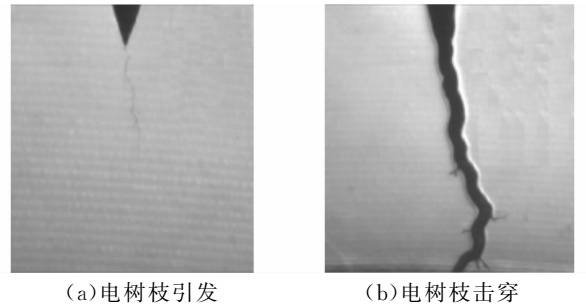
加电压下降的过程中,由气隙中累积的放电电荷所建立的电场,仍有可能发生放电。

本试验中,直流电压下电树枝的生长动力主要来自于通道中发生的放电。由图6可见,50 kV 下两组试样虽然每周期内承受电压的时间不同,但在加压19个周期时电树枝长度基本相等,表明放电主要在升、降压过程中发生,而在电压持续时间内几乎没有或仅有微弱放电。60 kV 下两组试样的电树枝明显长于50 kV 的,这是由于更高的电压导致了更多、更强烈的放电,促进了电树枝的向前生长。一方面,在60 kV 电压下,由于高电压、局部温升使材料电导率增加,时间常数 τ 减小,放电重复率增加,同时高电压下试样对电荷的吸收、电荷的耗散及电荷沿气隙通道的复合变得更强,使得电荷更容易泄漏。因此,在电压达到稳态后仍会发生放电,且每周期内电压持续的时间越长放电次数越多,这是D组试样中电树枝比C组长原因。

目前,局部放电测试已经被成功应用于交流电树枝特性的研究,为探索其引发及生长机理提供了大量有用信息^[6,16]。由于直流电树枝试验要求的精度更高,以及数据采集及处理模式的差异,现有交流局部放电测试系统不能直接用于直流电压下的测量,相关研究工作已在进行。

3.3 电树枝击穿

在电树枝试验中,由于硅油中漂浮的纤维击穿引发试验用变压器保护动作而瞬间接地,将会使完好试样针电极尖端瞬间引发出细长的电树枝,而已有的电树枝则会迅速生长,甚至贯穿两电极导致试样击穿。由此产生的电树枝引发及树枝击穿通道如图9所示。



(a) 电树枝引发 (b) 电树枝击穿
图9 针极意外接地导致的电树枝引发和击穿

这种瞬间接地造成的电树枝生长速度远高于正常情况,其原因可能是在外加直流电压下,试样中积累了大量的空间电荷,这些电荷引起材料内部电场畸变,局部电场可达原外加电场的数倍^[23]。在发生针极突然接地时,电荷瞬间释放产生大量的电机械

能量,使得 XLPE 材料中分子链断裂,引发电树枝,并使已有的电树枝通道快速向对面电极发展,电树枝形态为细长的单枝,侧枝很少。在电树枝通道生长至对面电极后,瞬间有大电流从中通过,严重的烧蚀效应使得击穿通道中碳化程度很高,通道壁表面光滑,并有大量气体和碳化颗粒析出。

文献[24]对 PMMA 的试验发现,电子束辐照过程虽然在试样中引入了大量空间电荷,但并没有对样品造成明显破坏。当陷阱电荷在接地针尖的刺激下被诱发脱陷时,样品中呈现出树枝状的破坏痕迹,即空间电荷脱陷导致的树枝引发。文献[9,13]所进行的直流接地树研究均证明直流电压下针电极处发生了电荷注入,以及电荷快速释放将导致的材料破坏。本试验中针极意外接地所产生的电树枝引发及击穿现象与上述试验结果一致,显示了空间电荷对直流电压下的材料破坏作用。

4 结 论

本文利用自行搭建的电树枝化试验系统,在间断施加的直流电压下,对 XLPE 电缆绝缘材料中的电树枝进行观察,获得了电树枝生长不同阶段的清晰照片,确定了其结构特征和通道特性。研究表明,电树枝生长的主要动力是通道中发生的局部放电,因此电压变换将促进直流电树枝的生长,极性反转对于直流 XLPE 绝缘更是一项严酷考验。材料中发生的电荷注入现象,导致了直流接地树的快速引发和生长,显示瞬间接地对直流绝缘具有致命性的破坏作用。

本文对直流电树枝生长特性的观察及其生长机理的分析,为高压直流 XLPE 电缆绝缘的破坏机理研究提供了重要的理论支持。

参考文献:

- [1] CIGRE WG B1.32. Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV[R]. Paris, France: CIGRE, 2012.
- [2] ISHIBASHI A, KAWAI T, NAKAGAWA S, et al. A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500 kV XLPE cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 695-706.
- [3] DENSLEY J. Aging mechanisms and diagnostics for power cables-an overview [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(1): 14-22.
- [4] STEPHANIE R, YOSHIMICHI O, TAKAHIRO I, et al. Tree initiation characteristics of epoxy resin and epoxy/clay nanocomposite [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(5): 1473-1480.
- [5] ZHENG X Q, CHEN G. Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigation a double electrical tree structure [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 800-807.
- [6] CHEN X R, XU Y, CAO X L, 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.
- [7] DISSADO L A. Understanding electrical trees in solid: from experiment to theory [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(4): 483-497.
- [8] NOTO F, YOSHIMURA N, OHTA T. Tree initiation in polyethylene by application of DC and impulse voltage [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1977, 12(1): 26-30.
- [9] YASUO S, HIROSHI K, MITSUGU S, et al. DC tree and grounded DC tree in XLPE [C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville, Tennessee, USA: IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2005: 523-526.
- [10] FU M, CHEN G, DISSADO L A, et al. Influence of thermal treatment and residues on space charge accumulation in XLPE for DC power cable application [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 53-64.
- [11] MILDRED S, ERLING I. Electrical treeing caused by rapid DC-voltage grounding of XLPE cable insulation [C]// Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 502-505.
- [12] MASAHIRO F, MITSUMASA I. Study of the relationship between space charge field and electrical treeing in low density polyethylene under a needle-plane electrode system [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1998, 37(7): 4016-4020.
- [13] KITANI I, ARII K. DC tree associated with space charge in PMMA [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, 22(3): 303-307.
- [14] FUJII M, WATANABE M, KITANI I, et al. Fractal

(下转第 126 页)