

交联聚乙烯电缆绝缘材料中电树枝的导电特性研究*

陈向荣¹⁾²⁾ 徐阳^{1)†} 刘英¹⁾ 曹晓珑¹⁾

1) (西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) (查尔姆斯理工大学材料与制造技术系, 瑞典哥德堡 41296)

(2011年6月14日收到; 2012年2月9日收到修改稿)

利用光学显微观察、局部放电测量和共聚焦 Raman 光谱分析相结合的方法, 研究了交联聚乙烯 (XLPE) 电缆绝缘材料中两种典型电树枝的导电特性. 尽管具有相似的培养条件, 两种电树枝却呈现出完全不同的形态, 其中 9 kV 下典型电树枝为枝-松枝状, 11 kV 下为枝状, 而且电树枝生长及局部放电规律呈现出明显的差异. 枝-松枝状电树枝主干通道内存在无序石墨碳的沉积, 根据石墨碳 G 带与 D 带的相对强度, 估算碳层厚度约为 8 nm, 树枝通道单位长度电阻小于 $10 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 足以抑制电树枝内局部放电的发展, 电树枝呈现出导电型电树枝特征. 枝状电树枝通道内观察到荧光背景, 存在材料劣化的产物, 但不存在无序石墨碳的聚集, 通道具有明显的非导电特性而不足以抑制电树枝内局部放电的连续作用. 最后提出了 XLPE 电缆绝缘材料中导电型和非导电型电树枝的单通道生长模型, 利用等效电路理论对 XLPE 电缆绝缘材料中两种不同导电特性电树枝的生长机理进行了探讨.

关键词: 交联聚乙烯电缆, 电树枝, 导电特性, 共聚焦 Raman 光谱

PACS: 77.22.Jp, 77.84.Jd, 78.30.-j

1 引言

交联聚乙烯 (XLPE) 由于其优越的电性能、机械性能和热稳定性而广泛应用于现代高压挤出电力电缆绝缘. 但在电力电缆的实际运行中, 由于电缆中杂质或缺陷等局部电场强度集中区域的存在有引发电树枝的可能. 此外, XLPE 电缆在电应力、热应力等的长期老化作用下, 也会出现树枝化的现象. 目前电树枝化已成为电缆绝缘失效的重要因素^[1,2], 在其他存在缺陷导致的局部高场强区域并超过局部的击穿场强的聚合物材料中, 也存在有电树枝生长的现象. 电缆绝缘材料中的电树枝一般是在杂质、微孔和半导体层突起等电场集中区域起始^[3,4]或由水树枝直接引发^[5]. 近年来, 110 kV 及以上电压等级的 XLPE 电缆绝缘材料中电树枝化对电缆运行可靠性的影响受到了日益关注, 研究发现 XLPE 电缆绝缘材料中电树枝的引发、生长形态和局部放电特性受到材料的聚集形态^[6]、外施电压频率^[7,8]、残存机械应力^[9]以及外施电压幅值^[10]等诸多因素的影响.

随着聚合物绝缘材料应用经验的积累和现代检测技术的发展, 人们对电树枝的研究得到了不断深入. Champion 和 Dodd^[11] 研究表明, 在玻璃态或高弹态的环氧树脂混合物中存在两种电气性能完全不同的电树枝, 即导电型电树枝和非导电型电树枝. Vaughan 等^[12,13] 通过对丙烯/乙烯共聚物和低密度聚乙烯 (LDPE) 中电树枝结构的研究, 发现在外施工频电压 15 kV 下丙烯/乙烯共聚物中的电树枝呈现出明显的导电特性, 而 LDPE 中的电树枝在外施工频电压 13.5 kV 下, 当实验温度稍有差异时却呈现出化学特性完全不同的两种电树枝结构. 文献^[14] 利用电树枝在透射光下的颜色和生长速率为间接判据, 对 XLPE 电缆绝缘材料中的电树枝种类及其导电性进行了初步探讨. 目前, 针对 XLPE 电缆绝缘材料中电树枝结构导电特性的相关研究报道还较少, 尤其是对电树枝导电特性直接判据的研究尚处于空白. 本文采用实时显微数字摄像技术和局部放电连续测量相结合的实验方法, 针对 XLPE 电缆绝缘材料中两种典型电树枝生长过程及其局部放电特性的相异性进行分析. 结合电树

* 国家自然科学基金 (批准号: 50877057) 资助的课题.

† E-mail: xuyang@mail.xjtu.edu.cn

枝反射光观察和共聚焦 Raman 光谱对树枝通道化学成分分析的实验结果发现: 枝-松枝状双结构电树枝的主干通道在反射光作用下呈黑色, 通道内存在无序石墨碳的聚集, 且存在材料劣化分解的产物, 碳层厚度的估算值约为 8 nm, 具有导电型电树枝的典型电气和化学特性; 而 11 kV 下枝状电树枝在反射光下呈白色, 通道内不存在无序石墨碳的聚集, 但存在材料劣化分解的产物. 根据电树枝生长过程的阶段特性, 结合反射光观察和共聚焦 Raman 光谱分析结果, 提出了 XLPE 电缆绝缘材料中导电型和非导电型电树枝的单通道生长模型, 对 XLPE 电缆绝缘材料中不同导电特性的电树枝形成机理进行了分析.

2 实验

2.1 试样

本研究所用试样直接取自国产 64/110 kV 级高压 XLPE 电缆样段, 抽出缆芯后, 利用高速车床切削加工成厚度为 5 mm 的空心圆盘状或半圆状试样. 采用典型针-板电极结构, 电极间距控制在 (2 ± 0.2) mm, 针电极直径为 1 mm, 针尖圆锥角 $\theta = 30^\circ$, 曲率半径 r 为 (5 ± 1) μm . 试样和针电极结构如图 1 所示. 为保证针电极与 XLPE 绝缘材料之间的紧密结合, 在经过酒精清洗处理并烘干的针电极表面预涂一层聚乙烯. 在加压实验之前, 每个试样都用偏光显微镜进行观察, 所有试样的针尖区域均无残存

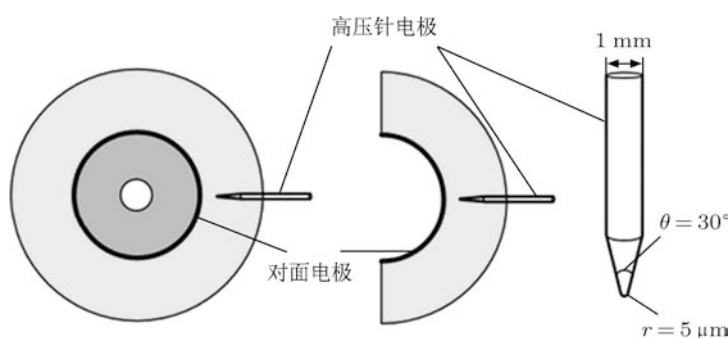


图 1 试样与电极结构示意图

机械应力, 而且针电极与 XLPE 绝缘材料紧密结合, 无气隙存在. 实验表明, 对于针电极与 XLPE 绝缘材料之间有气隙存在的试样, 当外施工频电压有效值为 2 kV 时, 就可以测得明显的局部放电信号.

2.2 实验系统

实验中电树枝实时观察和局部放电是在连续测量系统中进行, 该系统由工频高压试验变压器、分压器、保护电阻、局部放电连续测量系统和一套实时显微数字摄像系统等构成 [10,15]. 局部放电测量系统按照 IEC60270 标准设计, 灵敏度为 2 pC, 实验时阈值设定为 10 pC, 整个实验在屏蔽室中进行. 实时显微数字摄像系统如图 2 所示, 器皿中的硅油用于防止试样之外的其他部件的放电和试样的沿面闪络, 增强试样的透明度, 便于实验过程中获取清晰图像, 反射光可以实现电树枝通道颜色的对比观察.

2.3 共聚焦 Raman 光谱分析

共聚焦 Raman 光谱在材料表面化学成分分析 [12,13] 和聚合物绝缘材料残余应力评估 [16] 等领域具有广泛的应用. 在对电树枝通道进行共聚焦 Raman 光谱分析之前, 需要对试样进行如下处理: 为了尽量减少对树枝通道表面的破坏, 首先利

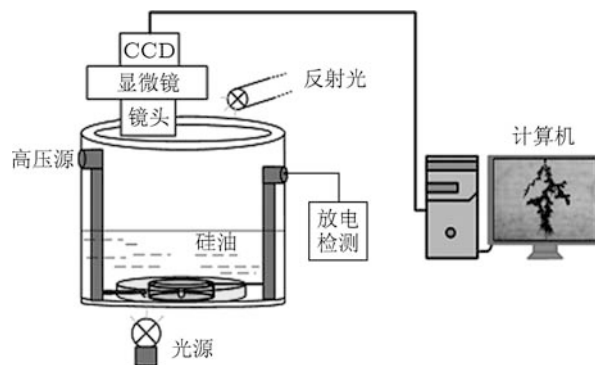


图 2 实时显微数字摄像系统示意图

用超薄切片机在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下对电树枝区域切片, 试样切片厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$; 然后采用 HR800 型显微共焦 Raman 光谱仪对电树枝通道表面进行化学特性分析, 该仪器由 LAS-HN633/17 型半导体二极管激光源 (激光波长为 633 nm , 最大输出功率为 17 mW)、Synapse 电荷耦合器件 (CCD) 探测器、Olympus 显微镜构成, 系统采用 LabSpec 5.0 软件, 空间分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$. 实验时选取激光功率为 1.7 mW (激光最大输出功率的 10%), 测量时采用 1 s 连续 10 次扫描的模式, 在实验前利用氦光源进行标准硅校准.

3 结果及讨论

本文主要研究有效值分别为 9 和 11 kV 的外施工频电压作用下 XLPE 电缆绝缘材料中两种典型电树枝的导电特性, 实验在室温 ($25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 条件下进行, 每个电压下各培养电树枝 20 个. 实验时实时显微数字摄像观察和局部放电连续测量同时进行, 记录电树枝的生长长度 l (l 为针尖到树枝尖端的最长距离), 同时还记录局部放电的最大放电量 Q_{\max} 、放电频次 N 和放电功率 P 等局部放电

特征参数.

3.1 电树枝生长及局部放电特性

在 9 kV 下典型枝-松枝状双结构电树枝 [6,8-10] (占 80%) 如图 3(a) 所示, 所对应的生长曲线和局部放电特征参数曲线如图 3(b), (c) 所示. 根据电树枝的生长曲线, 其生长过程可按图 3(b) 中分为 A, B 和 C 三个阶段. 在 A 阶段中, 电树枝引发后呈枝状结构迅速生长, 平均生长速率为 $70\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, 局部放电参量随着树枝生长而增加, 当树枝生长进入 B 阶段后, 在松枝状结构出现之前树枝生长几乎停滞, 局部放电参量也随之减小, 当松枝状结构刚出现时, 局部放电最大放电量 $Q_{\max} < 10\text{ pC}$, 直到松枝状结构接近对面电极时, 局部放电量再次大于 10 pC . 在 C 阶段树枝的生长主要表现为松枝状结构向对面电极生长的模式, 期间树枝平均生长速率为 $18\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. 11 kV 下的电树枝全部为枝状 [10,15] (图 4(a)), 所对应的生长曲线和局部放电特征参数曲线如图 4(b), (c) 所示. 电树枝引发后呈枝状迅速向对面电极生长, 平均生长速率为 $78\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, 局部放电参量随着树枝的生长而增加.

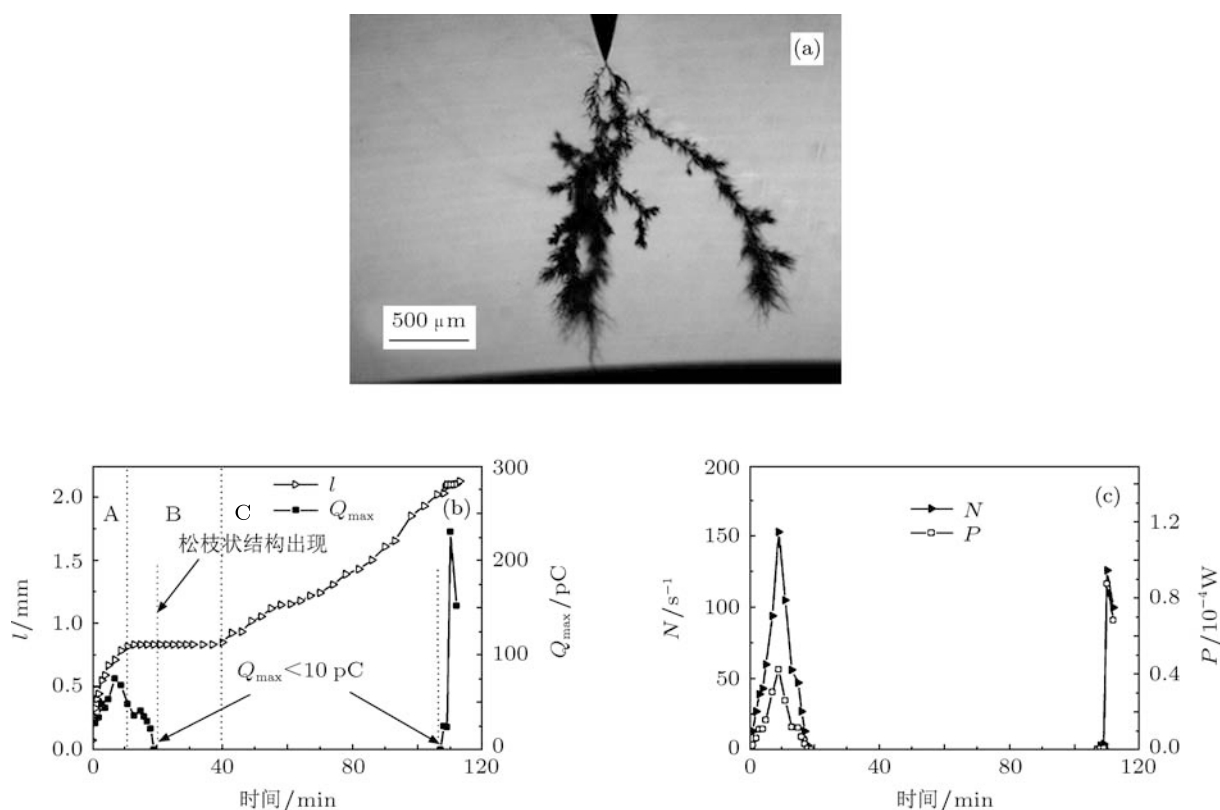


图 3 9 kV 下的枝-松枝状电树枝及其生长曲线和局部放电特征参数曲线 (a) 枝-松枝状电树枝; (b) 时间与电树枝生长和局部放电最大放电量 Q_{\max} 的关系; (c) 时间与放电功率 P 和放电频次 N 的关系

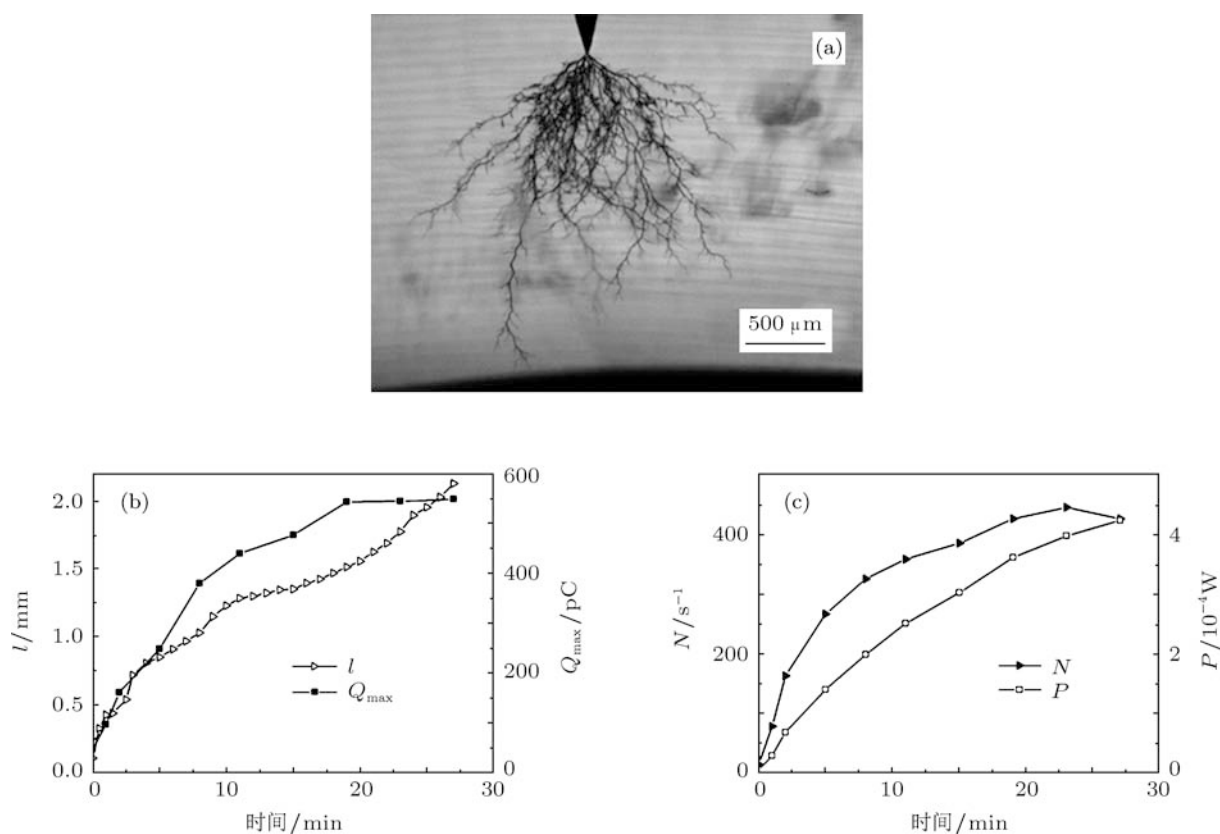


图4 11 kV 下的枝状电树枝及其生长曲线和局部放电特征参数曲线 (a) 枝状电树枝; (b) 时间与电树枝生长和局部放电最大放电量 Q_{\max} 的关系; (c) 时间与放电功率 P 和放电频次 N 的关系

对于 XLPE 电缆绝缘材料而言, 在相似的实验条件下却得到了两种完全不同形态的电树枝, 所对应的生长特点和局部放电特性存在明显的差异. 利用反射光对图 3(a) 所示枝-松枝状电树枝进行了观察, 发现树枝主干通道呈黑色 (图 5), 可能存在导电

性物质的聚集, 电树枝生长过程中局部放电活动受到明显抑制 (图 3(b)), 具有导电型电树枝的典型电气特征^[11-13]. 而 11 kV 下枝状电树枝在反射光下呈白色 (图 6), 电树枝生长过程中局部放电作用明显, 具有非导电型电树枝的典型电气特征^[11,13].

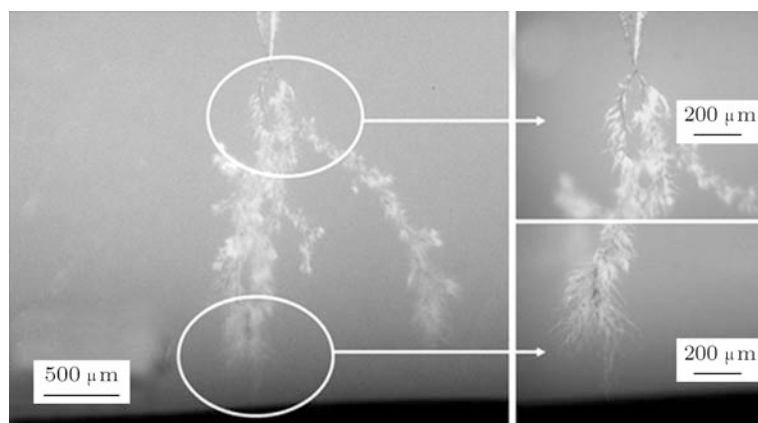


图5 枝-松枝状电树枝的反射光观察

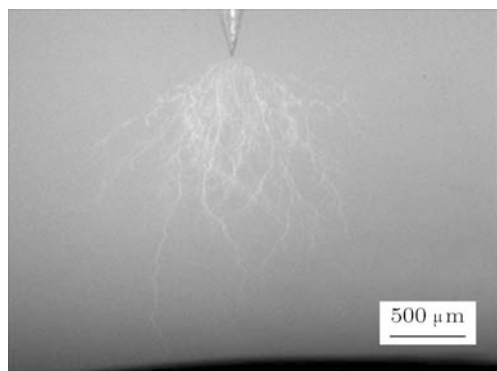


图6 枝状电树枝的反射光观察

3.2 共聚焦 Raman 光谱分析

为了证实 XLPE 电缆绝缘材料中导电型和非导电型电树枝的存在及其形成机理, 采用共聚焦 Raman 光谱对电树枝通道的化学成分进行分析. 为了验证共聚焦 Raman 光谱对树枝通道化学成分分析的有效性, 对 1.2/50 μs 幅值为 36 kV 标准雷电冲击下的击穿试样进行分析, 在图 7 所示击穿通道超薄切片表面 P_1 , P_2 和 P_3 点得到对应位置的 Raman 光谱如图 8 所示. 将测得的 Raman 光谱与 LabSpec 5.0 软件标准数据库进行对比, 同时参照表 1 给出的 Raman 光谱特征峰对应的化学成分, 发现在距离击穿通道 P_3 点约 200 μm 处 P_1 点的 Raman 光谱具有低密度聚乙烯 (LDPE) 的所有特征峰, 而 LDPE 也正是 XLPE 电缆绝缘材料的基本原料, 因此将 P_1 点对应 Raman 光谱作为基准, 简称为基带. 距离击穿通道 P_3 点约 40 μm 处 P_2 点的 Raman 光谱与基带特征峰位置完全一致, 但不同的是, P_2 点的 Raman 光谱具有明显的斜度, 说明在 P_2 点的 Raman 光谱上叠加了在绝缘材料老化过程中经常出现的荧光背景, 这也是材料劣化的重要标志 [13]. 击穿通道 P_3 点的 Raman 光谱, 在 1000—1500 cm^{-1} 之间的 LDPE 特征峰消失, 在 1310 和 1580 cm^{-1} 附近位置出现了两个非常明显的特征峰, 分别对应 sp^2 碳的 D 带和 G 带, 说明在击穿通道内存在无序石墨碳的聚集. 以上分析结果表明, 利用共聚焦 Raman 光谱可以对电树枝通道的化学成分进行有效表征.

对图 5 所示枝-松枝状双结构电树枝进行超薄切片, 得到电树枝主干通道部分切片如图 9 (a) 所示. 利用共聚焦 Raman 光谱对树枝通道切口区域 (图 9 (b)) 以 O 点为起始位置沿箭头所示方向的不同距离进行测试, 得到距 O 点不同距离处的 Raman 光谱如图 10 所示. 从图 10 可以看出,

电树枝通道内 (在 0 μm 位置和 1 μm 位置) 材料的 Raman 光谱在 1360 和 1580 cm^{-1} 附近呈现出两个明显的特征峰, 分别对应 sp^2 碳的 D 带和 G 带, 同时叠加了明显的荧光背景, 表明电树枝通道内存在无序石墨碳的聚集, 而且具有明显的劣化痕迹. 而对于距 O 点 12 μm 处的 Raman 光谱, 其在 1360 和 1580 cm^{-1} 附近的特征峰与叠加的荧光背景消失, 而呈现的是 XLPE 电缆绝缘材料的基本

表 1 Raman 光谱特征峰对应的化学成分

Raman 位移/ cm^{-1}	材料	化学成分	名称
1061	聚乙烯	骨架键	—
1127	聚乙烯	骨架键	—
1296	聚乙烯	CH_2	—
1439	聚乙烯	CH_2	—
2848	聚乙烯	CH_2	—
2882	聚乙烯	CH_2	—
1310	sp^2 碳	芳香环	D 带
1580	sp^2 碳	芳香环	G 带

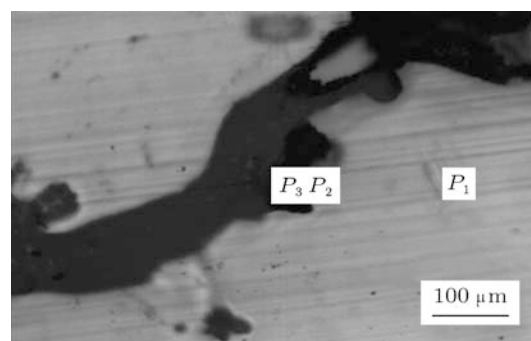
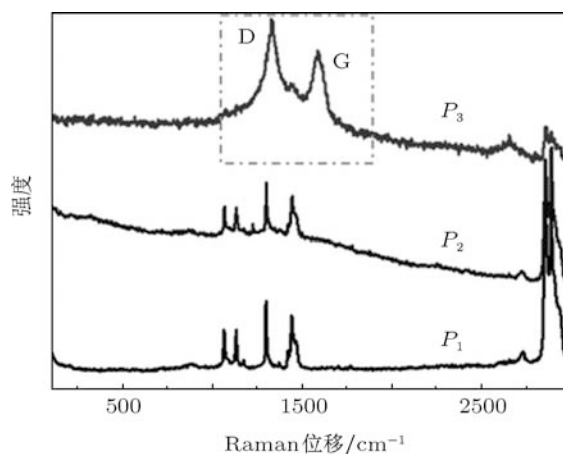


图7 击穿试样的超薄切片显微照片

图8 击穿试样 P_1 , P_2 和 P_3 处的 Raman 光谱

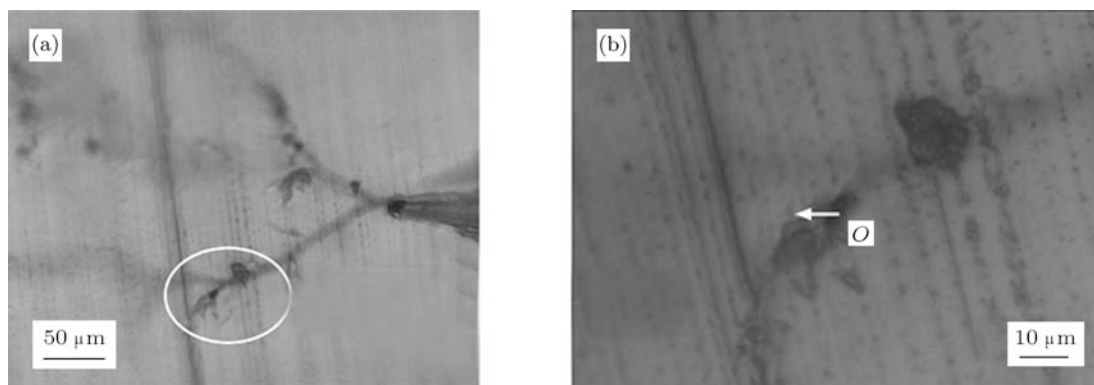


图9 枝-松枝状电树枝通道的显微照片 (a) 切片显微照片; (b) 树枝通道的放大显微照片

原料 LDPE 的特征峰, 与基带特征峰位置完全一致, 表明在距离通道较远处绝缘材料的劣化并不明显, 电树枝对材料的劣化作用主要集中在树枝通道附近.

根据 D 带和 G 带碳峰的强度可以对树枝通道内的碳层厚度 L_a 进行估算. 由 Matthews 等^[17] 提出的改进估算方法, 有

$$L_a = (C_0 + \lambda_L C_1) \frac{I_G}{I_D}, \quad (1)$$

其中, $C_0 = -12.6 \text{ nm}$, $C_1 = 0.033$, λ_L 为激光波长 ($\lambda_L = 633 \text{ nm}$), I_G 和 I_D 分别为 G 带和 D 带碳峰的相对强度. 根据 (1) 式可得, 树枝通道内 O 点的碳层厚度 L_a 约为 8 nm. Vaughan 等^[13] 利用 LDPE 中电树枝黑色通道内测得 Raman 光谱的 D 带和 G 带特征峰强度估算出碳层厚度 $L_a \approx 4 \text{ nm}$, 估计电树枝通道在室温下的电阻率在 $10^{-3} \Omega\text{cm}$ 数量级, 从而得到导电型电树枝通道单位长度的最小电阻为 $1\text{--}10 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$. 文献 [11] 在对导电型和非导电型电树枝的局部放电进行数值仿真时发现, 当设定电树枝通道单位长度的电阻为 $2 \times 10^6 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时, 电树枝通道内的局部放电现象得到明显抑制, 呈现出明显的导电特性, 针电极的电场强度转移至导电通道的前端, 因此局部放电只发生在电树枝前端新形成的通道内, 其单位长度的电阻为 $2 \times 10^{10} \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$. 相比于文献 [12] 的研究结果, XLPE 电缆绝缘材料中枝-松枝状电树枝通道内的碳层厚度约为 LDPE 中导电通道内碳层厚度的 2 倍, 单位长度的最小电阻小于 $10 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 远小于导电型电树枝局部放电仿真时设定的 $2 \times 10^6 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 因此足以抑制枝-松枝状电树枝通道内局部放电的发展. 而松枝状结构几乎出现在局部放电的最大放电量 $Q_{\max} < 10 \text{ pC}$ 的同一时间内 (图 3(b)). 这种枝-松枝状双结构电

树枝的形成是由于在枝状结构生长期间局部放电的碳化腐蚀作用, 树枝通道电阻率减小, 使得针尖场强发生转移并在靠近针电极附近的树枝通道内形成局部场强集中, 在电-机械力的作用下^[18,19] 产生局部微击穿而呈现出松枝状的树枝结构, 其局部放电主要是集中在松枝状结构的尖端区域的微放电^[11,20]. 因此, 当松枝状结构出现后局部放电量开始小于 10 pC.

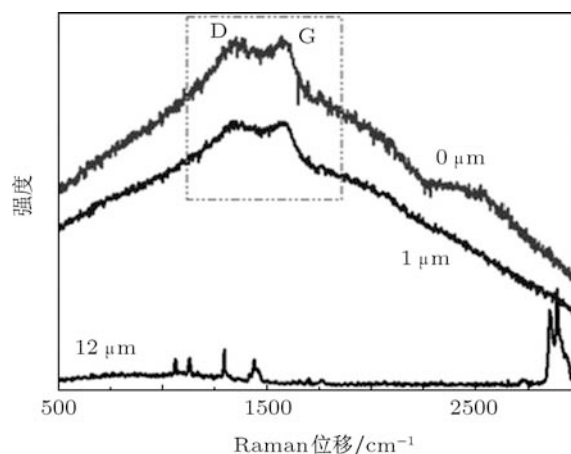


图10 自 O 点沿箭头方向不同距离处的 Raman 光谱

对图 6 所示枝状结构电树枝进行超薄切片, 得到靠近针电极的树枝通道切片如图 11 (a) 所示. 利用共聚焦 Raman 光谱对树枝通道切口区域 (图 11 (b)) 以 S 点为起始位置沿箭头所示方向的不同距离进行测试, 得到距 S 点不同距离处的 Raman 光谱如图 12 所示. 从图 12 可以看出, 在 11 kV 下枝状电树枝通道内 (在 0 μm 位置和 1 μm 位置) 材料的 Raman 光谱呈现出 LDPE 的特征峰, 同时叠加了明显的荧光背景, 随着 Raman 光谱扫描点与电树枝通道中心位置距离的增加, 荧光背景逐渐减小, 当扫描点离开树枝通道后, 在距 S 点 15 μm 处 Ra-

man 光谱所叠加的荧光背景明显减弱. 电树枝通道内外的 Raman 光谱没有呈现出 D 带和 G 带的特征峰, 表明枝状电树枝通道内不存在无序石墨碳的聚集, 但由于树枝通道内荧光背景的存在, 说明通道内材料有明显的劣化分解产物. 在反射光下呈白色的枝状电树枝生长过程中由于局部放电

的连续作用, 在 高能电子的 撞 击 作 用 下 聚 合 物 发 生 裂 解 而 形 成 荧 光 劣 化 产 物, 但 并 未 形 成 无 序 石 墨 碳 的 沉 积, 而 且 树 枝 通 道 直 径 不 断 扩 大, 更 加 有 利 于 局 部 放 电 的 连 续 作 用. 因 此, 在 枝 状 电 树 枝 生 长 过 程 中 局 部 放 电 参 量 随 着 树 枝 的 生 长 而 增 加.

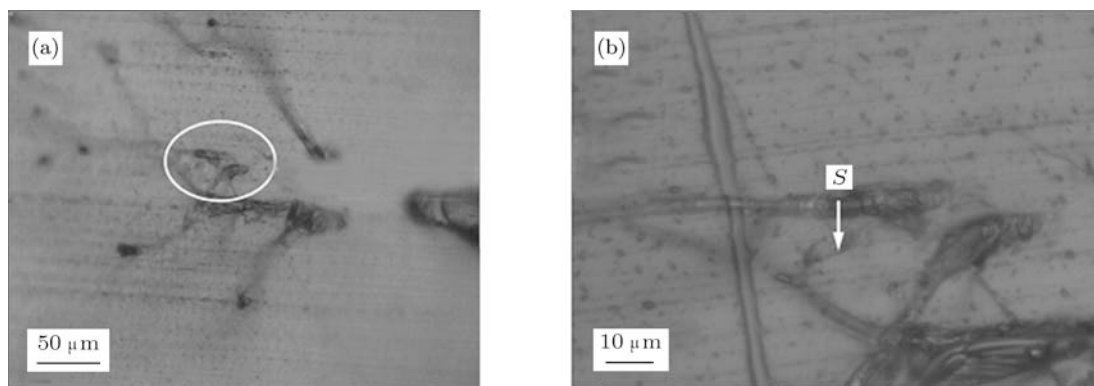


图 11 枝状电树枝通道的显微照片 (a) 切片显微照片; (b) 树枝通道放大显微照片

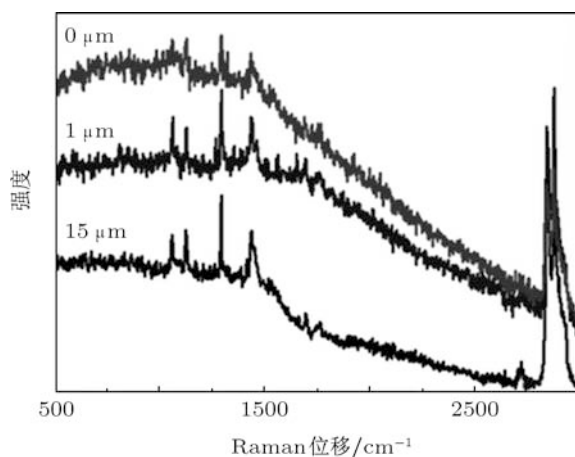


图 12 自 S 点沿箭头方向不同距离处的 Raman 光谱

3.3 机理分析

根据电树枝生长及其局部放电特性, 结合反射光观察与共聚焦 Raman 光谱对树枝通道化学成分分析的实验结果, 提出 XLPE 电缆绝缘材料中非导电型和导电型电树枝生长模型. 为了简化, 采用单通道模式来代替电树枝的分形结构.

3.3.1 非导电型电树枝生长机理

对于非导电型 (枝状) 电树枝, 其生长模型如图 13 (a) 所示. 根据局部放电研究领域普遍采用的将介质等效为三个电容即介质内缺气隙的缺陷电容 C_c 、与气隙串联部分电容 C_b 以及与 C_c 和 C_b

串联部分整体相并联的其余部分电容 C 的等效电路理论 [21], 可得到电树枝生长模型的等效电路如图 13 (b) 所示, 其中 C_c 为气管通道的等效电容, C_b 为单通道串联介质的等效电容. 依据文献 [21] 中对三电容模型下局部放电量 Q 的推导, 可得出 C_b 与单通道气管长度 l 之间存在如下关系:

$$Q = C_b \Delta U_c = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{L-l} E_b l, \quad (2)$$

其中, ΔU_c 为放电产生的电压降, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为 XLPE 的相对介电常数, S 为气管截面积, L 为针-板间距, E_b 为树枝通道内气体击穿场强. (2) 式两边对时间取微分, 有

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{K}{(L-l)^2} \frac{dl}{dt}, \quad (3)$$

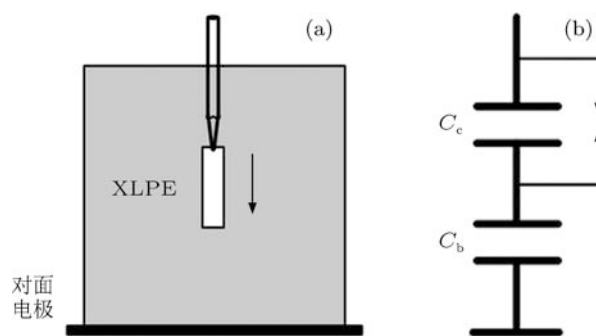


图 13 非导电型电树枝生长模型及其等效电路 (a) 生长模型; (b) 模型等效电路

其中 $K = \epsilon_0 \epsilon_r L S E_b$. 由 (3) 式可知, 非导电型电树枝局部放电量增长率与电树枝生长率成正比, 在电树枝生长过程中, 有 $dl/dt > 0$, 其局部放电量 Q 随通道气管长度 l 的增加而增加.

3.3.2 导电型电树枝生长机理

对于导电型 (枝-松枝状) 电树枝, 由于其生长过程具有明显的阶段性, 需要针对电树枝生长的不同阶段建立生长模型. 首先对于 A 阶段 (图 3 (b)), 电树枝呈枝状结构快速生长, 局部放电量随树枝生长而增加, 表明树枝生长还处于非导电树枝阶段, 其生长模型与非导电型电树枝一致. 当树枝生长进入 B 阶段 (图 3 (b)) 后, 树枝主干通道生长停滞, 只在靠近针电极附近的主干通道周围生长出少量新枝, 局部放电量逐渐减小直至低于 10 pC , 结合文献 [12] 对导电型电树枝生长过程中光测量的结果可知, 靠近针电极附近的树枝通道在局部放电的碳化腐蚀作用下形成了导电型树枝通道. 因此利用图 14(a) 所示模型对其等效, 其等效电路如图 14 (b) 所示, 其中 R 为通道导电部分的等效电阻. 随着电树枝的生长, 树枝通道碳化部分逐渐增加, 气管长度 l 减小, 有 $dl/dt < 0$, 由 (3) 式可知, 在 B 阶段, 电树枝局部放电量 Q 将逐渐减小, 甚至低于 10 pC .

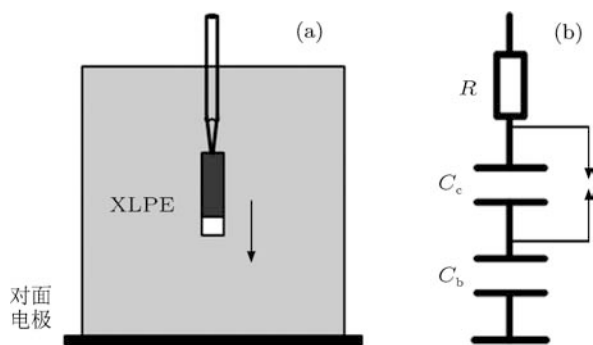


图 14 导电型电树枝在 B 阶段的生长模型及其等效电路 (a) 生长模型; (b) 模型等效电路

当树枝在 C 阶段靠近对面电极时, 局部放电量再次大于 10 pC , 利用图 15 (a) 所示模型对其等效, 其等效电路如图 15 (b) 所示. 根据电路理论, 有

$$Q = C_c \Delta U_c = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{l} E_{\text{tip}} l, \quad (4)$$

其中 E_{tip} 为松枝状结构通道尖端的场强. (4) 式两边对时间取微分, 有

$$\frac{dQ}{dt} = \epsilon_0 S \frac{dE_{\text{tip}}}{dt}. \quad (5)$$

由 (5) 式可知, 当树枝接近对面电极时, 枝-松枝状电树枝局部放电量增长率与树枝尖端场强变化率成正比. 根据 Champion 等 [22] 提出的场驱动电树枝生长模型, 得到任意外施电压下电树枝尖端场强 E_{tip} 与树枝长度 l 的关系曲线如图 16 所示, 该曲线呈典型的“U”型. 由此可知, 当树枝接近对面电极时, 有 $dE_{\text{tip}}/dt > 0$, 因此当松枝状结构接近对面电极时局部放电量 Q 随电树枝生长而明显增加.

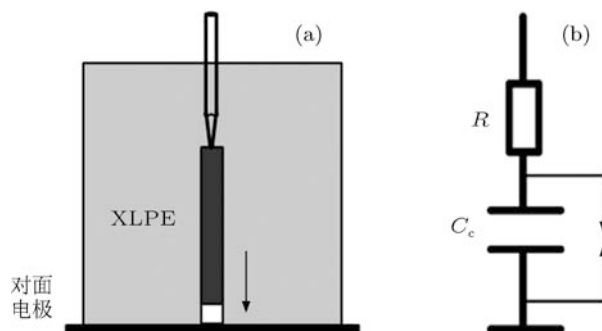


图 15 导电型电树枝在靠近对面电极时的生长模型及其等效电路 (a) 生长模型; (b) 模型等效电路

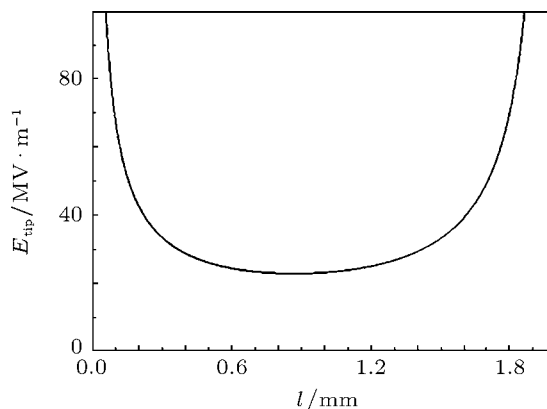


图 16 电树枝尖端场强 E_{tip} 与树枝长度 l 的关系

4 结论

利用电树枝实时观察和局部放电连续测量系统, 结合反射光观察和共聚焦 Raman 光谱分析的方法, 研究了 XLPE 电缆绝缘材料中两种典型电树枝的导电特性. 结果表明, 在 XLPE 电缆绝缘材料中存在两种电气特性和化学特性完全不同的电树枝. 对于枝-松枝状电树枝, 电树枝生长具有明显的阶段特性, 电树枝主干通道在反射光下呈黑色, 通道内存在碳化产物聚集, 通道电导率的增加抑制了通道内局部放电作用, Raman 光谱分析表明通道内无序石墨碳的厚度约为 8 nm , 具有导电型电树枝典型

的电气特性和化学特性. 对于枝状电树枝, 电树枝主干通道在反射光下呈白色, 通道内存在材料劣化的痕迹, 但不存在无序石墨碳的沉积, 这对电树枝通道电导率无明显影响, 具有非导电型电树枝的典型特征. 提出了 XLPE 电缆绝缘材料中导电型和非导电型电树枝的单通道生长模型, 对 XLPE 电缆绝缘材料中两种典型电树枝的生长机理进行了分析,

为 XLPE 电缆绝缘材料中不同导电特性的电树枝劣化导致电缆预击穿的早期监测提供了理论依据.

感谢英国 Leicester 大学 L. A. Dissado 教授和 S. J. Dodd 教授在电力设备电气绝缘国家重点实验室工作和访问期间对本文工作的指导和讨论.

- [1] Dissado L A, Fothergill J C 1992 *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* (London: Peter Peregrinus)
- [2] Li S T, Zheng X Q 2006 *Electrical Treeing in Polymer* (Beijing: Mechanical Industry Press) (in Chinese) [李盛涛, 郑晓泉 2006 聚合物电树枝化 (北京: 机械工业出版社)]
- [3] Ishibashi A, Kawai T, Nakagawa S, Muto H, Katakai S, Hirotsu K, Nakatsula T 1998 *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* **5** 695
- [4] Markey L, Stevens G C 2003 *J. Phys. D* **36** 2569
- [5] Boggs S, Densley J, Kuang J 1998 *IEEE Trans. Power Delivery* **13** 310
- [6] Zheng X Q, Xie A S, Li S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5494 (in Chinese) [郑晓泉, 谢安生, 李盛涛 2007 物理学报 **56** 5494]
- [7] Xie A S, Li S T, Zheng X Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3828 (in Chinese) [谢安生, 李盛涛, 郑晓泉 2008 物理学报 **57** 3828]
- [8] Chen G, Tham C H 2009 *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* **16** 179
- [9] Zheng X Q, Chen G 2008 *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* **15** 800
- [10] Chen X R, Xu Y, Xu J, Shi W, Yang W H, Liu Y, Cao X L 2010 *High Voltage Eng.* **36** 2436 (in Chinese) [陈向荣, 徐阳, 徐杰, 史文, 杨文虎, 刘英, 曹晓珑 2010 高电压技术 **36** 2436]
- [11] Champion J V, Dodd S J 2001 *J. Phys. D* **34** 1235
- [12] Vaughan A S, Dodd S J, Macdonald A M 2005 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Nashville: IEEE) p548
- [13] Vaughan A S, Hosier I L, Dodd S J, Sutton S J 2006 *J. Phys. D* **39** 962
- [14] Zheng X Q, Chen G, Davies A E 2004 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **24** 140 (in Chinese) [郑晓泉, Chen G, Davies A E 2004 中国电机工程学报 **24** 140]
- [15] Chen X R, Xu Y, Cao X L, Dodd S J, Dissado L A 2011 *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* **18** 847
- [16] Ding H Z, Varlow B R 2004 *IEEE Electr. Insul. Mag.* **20** 5
- [17] Matthews M J, Pimenta M A, Dresselhaus G, Dresselhaus M S, Endo M 1999 *Phys. Rev. B* **59** R6585
- [18] Fothergill J C 1991 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **26** 1124
- [19] Dissado L A 2002 *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.* **9** 483
- [20] Wu K, Suzuoki Y, Mizutani T, Xie H K 2000 *J. Phys. D* **33** 1209
- [21] Qiu C R, Cao X L 2001 *Electrical Insulation Test Technology* (Beijing: Mechanical Industry Press) (in Chinese) [邱昌容, 曹晓珑 2001 电气绝缘测试技术 (北京: 机械工业出版社)]
- [22] Champion J V, Dodd S J, Stevens G C 1994 *J. Phys. D* **27** 1020

Study on conducting characteristics of electrical trees in cross-linked polyethylene cable insulation*

Chen Xiang-Rong¹⁾²⁾ Xu Yang^{1)†} Liu Ying¹⁾ Cao Xiao-Long¹⁾

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

2) (Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg 41296, Sweden)

(Received 14 June 2011; revised manuscript received 9 February 2012)

Abstract

The conducting characteristics of two typical electrical trees in cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation are studied by a combination of optical microscopy observation, partial discharge measurement and con-focal Raman spectroscopy analysis. Although they are grown under similar conditions, these two trees display very different shapes. One is a typical branch-pine tree grown at 9 kV, and the other is a branch tree grown at 11 kV. The growth and the partial discharge regularities show obvious differences. The disordered graphitic carbon is condensed in the main tree channels of the branch-pine tree. From the relative intensity of the graphitic carbon G band to D band, the graphitic domain is estimated to be about 8 nm in size. The tree channel resistance per unit length is less than $10 \Omega \cdot \mu\text{m}^{-1}$, which is sufficient to prevent the partial discharge from developing within the tree structure. The branch-pine tree shows the features of the conducting tree. The fluorescence background is observed in the channels of branch tree, which shows the existence of the products of the material degradation, but no disordered graphitic carbon is observed in these tree channels. These tree channels display obvious non-conducting characteristics, which is not sufficient to prevent the continuous effect of the partial discharges. Finally, a single channel growth model is proposed for the conducting and non-conducting trees grown in XLPE cable insulation. Based on the equivalent circuit theory, the growth mechanisms of the two trees with different conducting characteristics in XLPE cable insulation are discussed.

Keywords: cross-linked polyethylene cable, electrical tree, conducting characteristics, con-focal Raman spectroscopy

PACS: 77.22.Jp, 77.84.Jd, 78.30.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50877057).

† E-mail: xuyang@mail.xjtu.edu.cn