

# 交联聚乙烯电缆绝缘中的双结构电树枝特性及其形态发展规律

郑晓泉<sup>1</sup>, G Chen<sup>2</sup>, A E Davies<sup>2</sup>

- (1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西省 西安市 710049;
2. 英国南安普敦大学电子与计算机工程系, 英国)

## Characteristic and Developing Law of a Double Structure Electrical Tree in XLPE Cable Insulation

ZHENG Xiao-quan<sup>1</sup>, G Chen<sup>2</sup>, A E Davies<sup>2</sup>

- (1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
2. University of Southampton, Southampton SO17 1BJ UK)

**ABSTRACT:** According to experiment photographs and the growing characteristic datum that got from the growth process of the electrical tree, the relationship between electrical tree propagation characteristic and the material morphology in XLPE cable insulation are mainly studied. It is found that, as the influence of uneven congregating state, uneven crystal and survival stress in semi-crystalline polymer, there would be five kinds of electrical tree structures, which are branch, bush, bine-branch, pine-branch and mix configurations, developed in XLPE cable insulation. It is also found that there are three basic treeing propagation phases, which are initiation, stagnation, and rapid developing phases, presented in electrical tree developing process. If initiation phase is very violent, the pure branch tree will develop, but if this phase is faint, it is more easy to get a bush tree. There are would be a clear double structure of electrical tree when it grows at terribly uneven region. We introduce a new parameter, the expanding-coefficient to describe electrical tree propagation characteristic. Besides expanding-coefficient, another two coefficients: the dynamic fractal dimension and growing rate of the electrical tree are also used for analysis of the experiment phenomenon.

**KEY WORDS:** XLPE cable insulation; Electrical tree structure; Morphology; Phase; Developing low

**摘要:** 根据从电树枝动态生长过程中所拍摄的大量实验照片和生长特性数据,探讨了在XLPE电缆绝缘中的电树枝发展

特征与材料聚集态结构的关系。研究表明,由于半结晶高聚物不均匀聚集态、不均匀结晶和残存应力的影响,会在XLPE电缆绝缘中生成枝状、丛林状、藤枝状、松枝状和混合结构电树枝。并且在电树枝发展过程会呈现非常清晰的三个基本阶段,即引发阶段、滞长阶段和迅速发展阶段。引发阶段猛烈时生成迅速生长的纯枝状电树枝,引发阶段较弱或材料均匀时易导致丛林状电树枝产生,发展于极不均匀区的电树枝多为鲜明的双结构;另外,引入一种新的参数,电树枝扩展系数来描述电树枝生长特性,并综合电树枝生长过程分形维数的变化规律和速度关系对产生这种实验现象的机理进行了分析。

**关键词:** 交联聚乙烯电缆绝缘;电树枝结构;聚集态;阶段;发展规律

## 1 引言

电树枝是一种发生在高分子材料中的电致裂纹现象,因其形状与树枝相似而得名。电树枝一旦产生,便以极快的速度发展,是一种严重威胁以高聚物为主要绝缘材料的电力设备(如高压塑料电缆)运行安全的电老化现象。因此,高电压设备绝缘中绝不容许电树枝的存在。

自从20世纪50年代末首次在高聚物绝缘介质中发现电树枝以来,人们对电树枝现象进行了广泛持久的研究工作,对电树枝现象的认识也逐渐从表面走向深入。但研究工作远没有结束<sup>[1-5]</sup>,基于以下几个因素:①电树枝是一种及其复杂的电腐蚀现象,包括电荷注入—抽出、碰撞电离、氧化分解、

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577052)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577052).

局部放电、局部气压、局部高温、电—机械力、物理变形、化学分解等在内的综合过程<sup>[1-12]</sup>。对其研究的透彻程度不仅取决于对其认识的深入，而且依赖于研究手段的不断先进。比如电树枝与材料入陷空间电荷的关系，只有当现代空间电荷检测技术发展之后，才被人们所认识<sup>[6-9]</sup>。②电树枝生长的随机性是第二个显著特征，类似于气体放电和液体放电，完全相同的试样和实验条件却获得完全不同形状的放电通道。由于电树枝的不可恢复性，材料亚微观物理结构的差异，固体介质中的树枝化过程远比气体和液体中的放电过程复杂，同等试样和实验条件下放电通道特征的巨大差异更增加了研究的难度，有时只能得到统计性的结果。③以往对电树枝现象的研究多把材料当作均匀介质处理，对于初步研究和单纯对材料进行研究是可以的，但对于应用于高压电气设备中的聚合物绝缘介质，情况要复杂得多，如微孔、填料、杂质、复合介质、厚层材料、机械应力、结晶状态、运行环境等都对电树枝现象都有或多或少的影响<sup>[1-4,10-11]</sup>。④介质种类的不同、物理状态的不同，其电树枝引发与发展的机理不同，电树枝的结构特征也不同。其中以半结晶高聚物（如聚乙烯或交联聚乙烯）中的电树枝过程最为复杂，业已得知，大球晶的晶界弱区是电树枝的优先发展通道<sup>[2-4,10-11]</sup>。

分析发现<sup>[3-4]</sup>，导致单一高聚物中电树枝形状及生长特性变化的综合因素大致为：脆性材料中的微孔和残存应力；半结晶材料中的大球晶界面、结晶排渣效应残渣、残存应力及微孔；柔性材料（无定型材料）中的杂质和微孔等三类。本文根据大量的电树枝培养实验，以及在 XLPE 电缆绝缘中的双结构电树枝特征，探讨了电树枝发展特征与材料聚集态结构的关系。表明 XLPE 电缆绝缘内侧材料的不均匀结晶、高度微孔集中和应力状态对于电力电缆的抗电树枝老化能力具有至关重要的影响。

## 2 实验系统

### 2.1 试样

本研究实验部分在英国南安普顿大学的 Toney 高压实验室进行，所用试样是由英国 National Grid 所提供的 66kV 级高压 XLPE 电缆样品，抽出缆芯后，切削加工成 5mm 厚度空心圆盘状试样。电极采用针板结构并采用了两种针电极，一为曲率半径为  $5\pm 1\mu\text{m}$  的钢针，另一为曲率半径为  $3\pm 1\mu\text{m}$  的钨针。高压针电极与圆盘状接地电极之间的距离控制

为 3mm。为保持针电极与 XLPE 介质之间的密和性，先在清洁的针电极的表面预涂一层聚乙烯，然后将针电极插入使用专用模具加热软化的试样。为了产生残余机械应力，在加热过程中对试样施加机械压力并保持，然后用强风使试样和模具冷却。试样中产生机械应力的标志是在其边缘出现了挤压变形（如图 1(b)）。使用偏振光显微镜观测试样中的残余机械应力分布状况，发现当有挤压变形存在时，在两电极间的试样中出现了彩色应力衍射纹波。

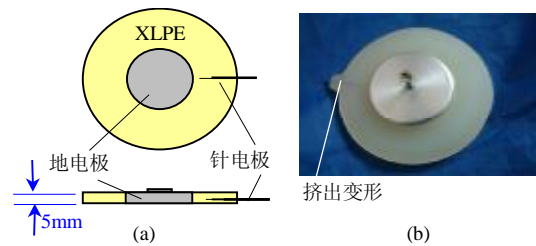


图 1 XLPE 电缆绝缘试样

Fig.1 Sample of XLPE cable insulation

### 2.2 实验系统

试验系统如图 2 所示，其中关键设备为变频高压电压发生器（由函数信号发生器和变频高压电压放大器组成，其中放大器增益为 10000 倍，无衰减放大频率范围为 0~3500Hz，输出最大电压峰—峰值为 20000V），适时长焦距显微镜数字摄像与计算机系统和用来调整试样与显微镜镜头的水平相对位置的二维定位系统。本实验系统的特点是在电树枝的不断生长过程中连续拍照和记录电树枝长度。

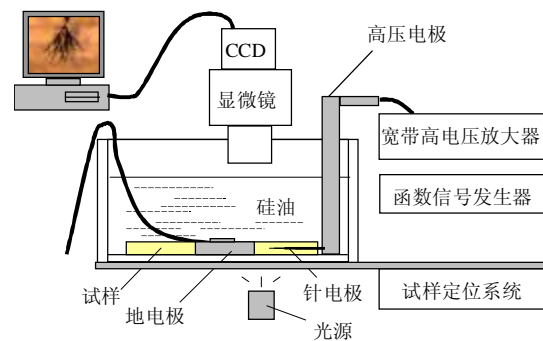


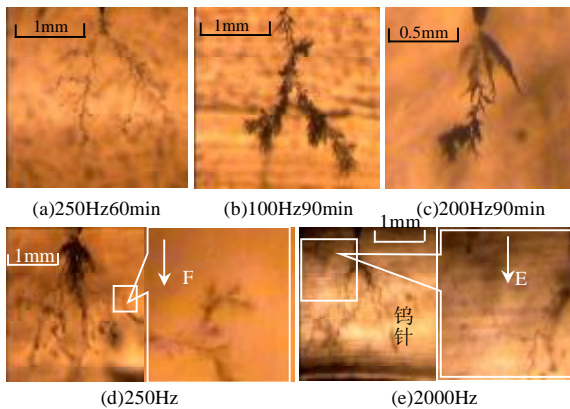
图 2 试样与在线适时显微摄像系统

Fig.2 Sample and online microscope CCD system

## 3 实验结果

实验条件：室温 15~25℃；所有试样来自同一段电缆，实验电压均维持正弦 20000V 峰—峰值。

从实验所获 400 余幅照片中挑选出同一批试样中具有代表性的 5 幅照片及其细致结构照片如图 3 所示。除图 3(e)试样采用钨针外，其余均为钢针电极。从 50Hz 到 2000Hz 实验电压频率范围，采用钢



注：(a)、(d)、(e)藤枝状；(b)松枝状；(c)局部丛林状

图 3 三种双结构电树枝及其第二种结构的局部特征  
Fig.3 Three kinds of double structure electrical tree and partial characteristic of second structure

针电极只在 250Hz 及以下实验频率获得了第二部分分别为松枝、藤枝和局部丛林的双结构电树枝。采用钨针电极只有一个试样在 2000Hz 下获得了双结构电树枝，且第二部分电树枝结构为藤枝状。

四百余幅电树枝照片摘自 40 余个试样，各树枝起始结构无一例外为枝状结构，显示相似的电树枝引发机理。双结构电树枝的针电极针尖附近的第一部分均为深色枝状或稠密枝状，而第二部分呈现三种基本机构（图 3(a)、(b)、(c)）：藤枝状、松枝状和丛林状。其中松枝状和藤枝状电树枝不仅向广泛的区域发展，而且均出现了背离宏观外加电场方向的单枝结构（图 3(d)、(e)），其中又以藤枝状最为显著：个别单枝长度远远超过主枝长度（图 3(e)）。与藤枝状电树枝相比，松枝状电树枝色度较黑、扩展程度较小，表明二者扩展机理有所不同。

## 4 分析与讨论

### 4.1 生长特点及规律归纳

根据实验，用在发展形态上的多样性、发展过程的阶段性来描述 XLPE 电缆绝缘中的电树枝发展规律：

#### (1) 电树枝发展的多样性和随机性

发展在 XLPE 电缆绝缘中的电树枝归纳为枝状、丛林状和混合状三类（如图 4(a)、(c)、(b)所示），其中混合状可分为深色枝状—松枝状、深色枝状—藤枝状和深色枝状—丛林状三种（如图 3(a)、(b)、(c)、(d)和(e)所示）。由图 4 同时可以看出，三类电树枝的炭化程度（或电树枝密度：可由分形维数  $d_f$  值的大小看出）依次为：丛林状>混合状>纯枝状。

同种试样和实验条件却获得了多种电树枝结构，这是由于 XLPE 的不均匀聚集态（不均匀结晶）

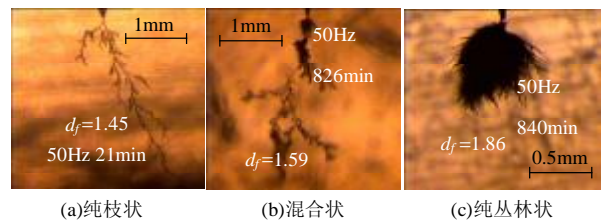
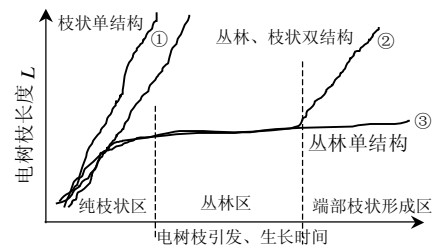


图 4 交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝  
Fig.4 Three kinds of electrical tree in XLPE

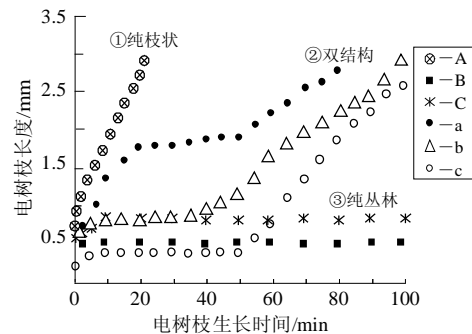
以及作为厚层挤出绝缘，出现微孔和应力在电缆绝缘内侧集中，导致各针尖电极周围的绝缘聚集状态和缺陷集中情况不一致，从而使得 XLPE 电缆绝缘中电树枝生长在形态和生长规律上具有多样性和随机性。

#### (2) 电树枝发展过程的阶段性

电树枝发展过程的阶段性可用速度 ( $L-t$ ,  $L$  为电树枝长度) 特性（图 5）和结构形态发展历程（表 1）来描述。其中，图 5(a)为归纳实验规律（即所有 40 余只试样中电树枝的生长均符合这种规律：纯枝状电树枝一般迅速连续生长，生长速度曲线光滑；丛林状电树枝生长过程一般存在极长时间的“停滞”期；而双结构电树枝的“停滞”期相对较短），图 5(b)为几种实验电树枝的真实生长曲线。图 5(b)特性曲线 A、B、C 分别对应于图 4(a)、(b)和(c)电树枝的速度发展规律：图 5(b)实验曲线 B 对应于图 3(b)“枝—松枝状”双结构电树枝，图 5(b)实验



(a)归纳电树枝速度—结构特性









(b)实验电树枝速度—结构特性

注：图 5(b)曲线 B 第三生长阶段远超出了图示时间坐标

图 5 电树枝发展特性与电树枝结构关系图  
Fig.5 Relation between growing character and structure of electrical trees

表1 双结构电树枝发展历程  
Tab.1 Developing course of the double structure electrical tree

| 阶段   | 电树枝结构变化   |   | 描述   |
|------|---|---|--|
|      | 过程  | 最终形状  |  |
| 第一阶段 |  |  | (1) 针尖向绝缘注入与抽出电荷, 电树枝引发<br>(2) 纯枝状电树枝①形成       |
| 第二阶段 |  |  | (1) 导电树枝向完整绝缘区注入与抽出电荷<br>(2) 稠密深色枝状②或丛林状电树枝③形成 |
| 第三阶段 |  |  | (1) 松枝状结构形成, 藤枝状树冠④形成并迅速发展<br>(2) 绝缘即将击穿       |

曲线 a 和 c 则分别对应于一种“枝状—松枝状”和“枝状—藤枝状”双结构电树枝。可以看出, 图 5 速度发展上的阶段性特征与表 1 电树枝发展历程有清晰的对应关系。双结构电树枝在相对较短时间便会呈现清晰的全部三个发展阶段。但对于第二部分为丛林或部分丛林状的双结构电树枝, 其第二生长阶段相对较长, 介于藤枝或松枝状与纯丛林状电树枝之间。

在所有实验样本中, 几乎是所有电树枝的起始结构均为枝状或近似枝状结构, 在其缓慢发展过程中会逐步转化为深色结构, 快速发展时则维持浅色不变, 显示这两种情况树枝通道的不同导电特征和发展机理。图 6 为图 4 几种电树枝初始枝状结构的放大图 (标记与图 4 相同), 其中图 6(b) 电树枝生长期较长已出现明显局部放电 (PD) 腐蚀炭化, 但仍可看出最初的枝状; 同时各电树枝的初始生长速度近似 (图 5), 表明树枝引发和初始发展阶段的近似机理。即电极注入—抽出电荷, 碰撞电离, 局部氧化裂解, 电荷复合作用及树枝引发后的局部放电机理<sup>[1-2]</sup>。当此过程强烈或得到延续时, 即生成如图 4(a) 示完整的枝状电树枝。当此过程较弱时, 在较长的生长停滞期间, 初始枝状结构上会产生许多更细的毛细根状分枝 (图 4(b)、(c)) 其后的生长特征



图 6 图 4 电树枝初始结构

Fig.6 The early structure of electrical tree on Fig.4

和电树枝结构与电树枝发展方向上材料的聚集态、应力状态和微孔分布密切相关。

#### 4.2 电树枝参数的动态特性

(1) 分形维数  $d_f$  变化规律与树枝结构发展关系

近年来, 人们纷纷引入所谓“分形维数 (fractal dimension)”描述电树枝的发展特征, 它事实上描述的是电树枝在发展空间的填充系数, 对于二维照片, 该值位于 1~2 之间, 接近 1 时为枝状电树枝, 接近 2 时为丛林状电树枝。采用数盒法 (或覆盖法)<sup>[13-14]</sup> 计算二维投影图形的分形维数, 得出了图 4 示三种枝状、混合状和丛林状电树枝的分形维数分别为:  $d_{f枝}=1.46$ ;  $d_{f混合}=1.59$ ;  $d_{f丛林}=1.86$ 。

根据电树枝发展过程分形维数变化规律, 得到了如下电树枝形态与分形维数变化规律的关系 (图 7), 发现分形维数发展的三个阶段分别对应于枝状引发区、丛林状形成区和端部枝状扩展区。在引发区  $d_f$  值接近于 1 且电树枝形状变化不大为枝状, 如  $d_f$  在电树枝生长过程一直变化不大则生成纯枝状树 (见曲线①); 当  $d_f$  持续上升时为丛林状电树枝特征 (丛林区, 见曲线④); 当丛林树的端部长出枝状时,  $d_f$  值迅速下降 (端部枝状区, 见曲线②), 特别值得一提的是, 单独描述端部藤枝结构时, 其  $d_f$  值将降到极低水平 (曲线②')。

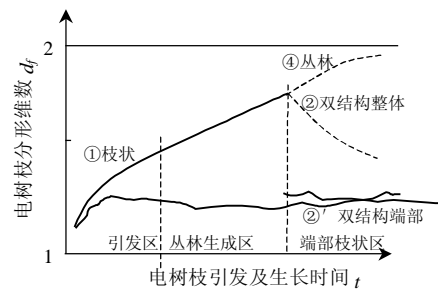


图 7 电树枝结构分形维数与电树枝结构关系示意图

Fig.7 Relation between fractal dimension and structure of electrical tree

(2) 扩展系数  $D/L$  的提出

研究发现, 用单一参数描述电树枝生长规律有一定局限性, 如生长速度只能描述电树枝沿外加宏观电场的发展而无法描述电树枝的横向扩展程度; 而分形维数在描述混合电树枝和扩展程度方面遇到困难, 为此, 引入一个新的参数: 电树枝扩展系数  $D/L$  ( $D$  为电树枝宽度,  $L$  为电树枝长度), 发现在描述双结构电树枝的扩展程度方面有独到优势, 是前两个参数的极好补充。图 8 即为扩展系数的综合发展规律特征, 图 9 为本研究的实际扩展系数实

验曲线；其中图 9(a)对应于图 4 三种电树枝（标记同图 4，图 3(c)为图 4 中 B 电树枝的阶段发展图），图 9(b)对应于图 3 中的电树枝(a)、(b)、(d)和(e)（标记与图 9 同）。可看出电树枝结构、特别是双结构电树枝与三个发展阶段的清晰对应关系。由图 9(b)同时可以看出，施压频率会加速双结构电树枝第二部分的生长速度（对于本例，生长斜率： $K_{2000\text{Hz}} > K_{250\text{Hz}} > K_{100\text{Hz}}$ ；斜率比值： $K_{2000} : K_{250} : K_{100} = 0.03 : 0.012 : 0.0067$ ），但对双结构电树枝的阶段生长特征及停滞时间并无显著影响。

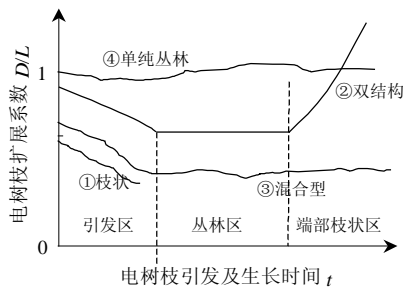
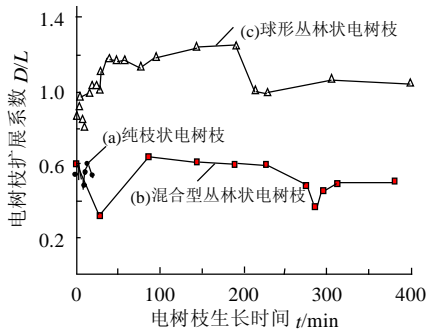
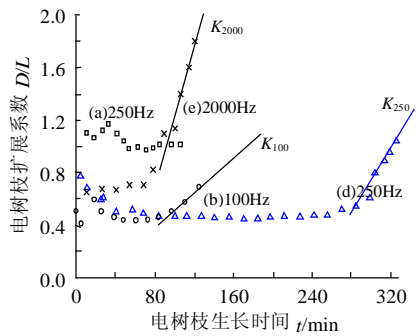


图 8 电树枝扩展系数与电树枝结构关系归纳  
Fig.8 Relation between expanding coefficient and structure of electrical tree



(a)三种电树枝扩展规律



(b)扩展系数与频率关系

图 9 电树枝结构与电树枝扩展系数关系  
Fig.9 Relation between expanding coefficient and structure of electrical tree

### 4.3 机理分析

用表 2 结合表 1 分三个阶段来重点分析双结构电树枝的发展机理。为清晰起见，将电树枝引发、电树枝停滞，藤、松枝状形成三个阶段的参数变化、

电树枝形态和电树枝通道导电特性综合用表 2 表示。值得说明的是，由于针尖电荷向绝缘注入、抽出程度取决于针尖处绝缘聚集态或弱点集中程度，因此电树枝引发阶段强弱也各不相同。在实验过程中，发现发展最快的单枝电树枝至接地级仅 7min（从 50Hz~1000Hz 均获得了迅速发展的单枝电树枝，至接地电极时间分别为 9min（1kHz）、7min（100Hz）、14min（50Hz）和 21min（50Hz）），表明这时电树枝的生长实际上可以看作引发过程的延续，是电树枝引发能量相对集中的一种必然结果，对应于同一机理。而当针尖初始电荷注入深度较浅，介质较均匀时，引发初期的枝状电树枝即会在 PD 和电腐蚀、氧化局部分解过程中逐步由绝缘态枝状转化为深色导电性枝状或丛林状电树枝。第三阶段藤枝状向广泛区域扩展的初始原因是半导电的稠密枝状或丛林尖端向完好材料注入和抽出电荷，导致亚微观弱区绝缘进一步劣化，继而引发新一轮 PD，所产生的局部高温和气压的“软化”和“爆破”作用导致成串微孔连成一线<sup>[3]</sup>，这是解释图 3(e)电树枝单枝沿非外加电场方向发展的唯一可能原因。

表 2 电树枝发展阶段中的参数特征、形态特征与机理分析  
Tab.2 Analysis on coefficient character, structure character and mechanism in the course of electrical tree developing

| 电树枝发展阶段 | 参数    |     |     | 机理   | 电树枝特征            |
|---------|-------|-----|-----|--|------------------|
|         | $d_f$ | D/L | L/t |  |                  |
| 枝状引发阶段  | 较小    | 下降  | 较大  | 电子注入与抽出导致针尖周围介质生成低密度区，电树枝沿最弱区以 PD、电荷复合，光致电离作用引发与发展。电树枝为绝缘特征。         | 绝缘特性<br>枝状电树枝发展  |
| 电树枝停滞阶段 | 上升    | 上升  | 下降  | PD 减小，电腐蚀与局部分解导致树枝密度增加，电树枝通道逐步转化为半导电特征，电荷向树枝周围更大范围注入与抽出，逐步形成更大范围的弱区。 | 转化为半导电丛林状        |
| 双结构形成阶段 | 下降    | 上升  | 上升  | PD 加强，局部高温、高压导致电树枝沿大球晶晶界微孔发展。藤枝状为绝缘特征；松枝状为半导电特征。                     | 绝缘态藤枝扩展，半导电态松枝发展 |

PE 的热膨胀系数是常用聚合物介质中最大的<sup>[15]</sup>，为定量分析 PE 中的微孔状况，可作如下简单计算：

假定电缆绝缘外径为  $2R$ ，内径为  $2r$ ，XLPE 的热膨胀系数为  $\alpha$ ，则当电缆绝缘外层交联固化后体积固定，内层绝缘固化收缩导致的微孔体积含量  $\Delta V$  为

$$\Delta V = l \cdot \pi \{ (R^2 - r^2) - [R^2(1 - a \cdot \Delta t)^2 - r^2] \} = l \cdot \pi R^2 a \cdot \Delta t (2 - a \cdot \Delta t) \quad (1)$$

式中  $l$  为单位电缆长度,  $\Delta t$  为温度差值。因  $a \cdot \Delta t \ll 1$ , 故式(1)可以简化为

$$\Delta V \approx 2l \cdot \pi R^2 a \cdot \Delta t \quad (2)$$

以沈阳电缆厂生产的 YJAY110kVXLPE 电缆绝缘为例, 内半导电屏蔽层外径  $r=11.3 \text{ mm}$ , 绝缘外径  $R=19.8 \text{ mm}$ <sup>[16]</sup>。XLPE 的线膨胀系数  $a$  为  $10 \sim 20 \times 10^{-5}/\text{K}$ , 在此取  $a=15 \times 10^{-5}/\text{K}$ , (因电缆绝缘不可能沿纵向收缩, 因此取用径向线膨胀系数), 取绝缘挤出温度为  $160^\circ\text{C}$ , 冷却后温度为室温  $20^\circ\text{C}$ , 则获得在  $10 \text{ mm}$  长度电缆绝缘中的微孔总体积为

$$2l\pi R^2 a \cdot \Delta t = 2 \times 10 \pi 19.8^2 \times 15 \times 10^{-5} \cdot (160 - 20) = 517.3 \text{ mm}^3 \quad (3)$$

微孔总体积占绝缘体积的百分比为

$$n = \frac{\Delta V}{V} = \frac{2l\pi R^2 a \Delta t}{l\pi(R^2 - r^2)} = \frac{2R^2 a \cdot \Delta t}{R^2 - r^2} = \frac{2 \times 19.8^2 \times 15 \times 10^{-5} \times 140}{19.8^2 - 11.3^2} \approx 6.23\% \quad (4)$$

计算结果可见, 个别较大尺寸微孔是高压 XLPE 电缆绝缘不完善的主要因素之一。不仅如此, 由于电缆绝缘挤出后是由外向里逐渐冷却的, 微孔、不均匀结晶和残存应力都将集中在工作电场强度最大的缆芯附近的绝缘中。为证明应力和大球晶对电树枝的影响, 用偏振光显微镜拍出电树枝沿应力边界生长和藤枝状树枝结构区存在大块结晶照片如图 10 示, 由于在单一结构电树枝中并未发现应力集中和大块结晶现象, 表明应力、不均匀结晶对 XLPE 中的电树枝生长特性有显著影响, 是导致电树枝横向扩展的主要因素。而晶界的微孔集中和较大尺寸微孔的存在, 必然对电树枝的生长方向产生显著影响, 是藤枝状电树枝生长方向出现“拐点”(见图 3(e)) 的最可能原因。显而易见,  $220 \text{ kV}$  以上的超厚绝缘 XLPE 电缆中的微孔、不均匀结晶和残存应力集中现象将更加严重, 必须予以充分重

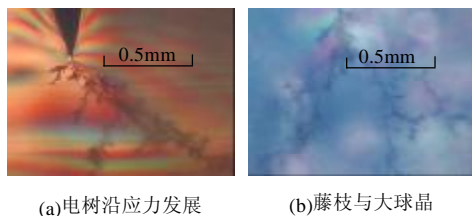


图 10 试样中的应力与不均匀结晶(试样结构同图 1)

Fig.10 The mechanical stress and uneven crystalline in sample

视, 并从材料物理、化学结构和电缆生产工艺研究出发, 积极采取相应措施。

## 5 结论

(1) XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构可归纳为三类五种。三类分别为枝状、丛林状和混合状, 其中混合状分为枝—丛林, 枝—藤枝和枝—松枝状三种; 后两种混合状双结构电树枝是电缆内侧绝缘结构不均匀, 缺陷集中的必然结果。

(2) XLPE 电缆绝缘中的电树枝生长规律可用三种动态参数描述, 分别为生长速度 ( $L-t$ )、分形维数 ( $d_f-t$ ) 和新引入参数—扩展系数 ( $D/L-t$ ) 描述, 其中扩展系数在描述双结构电树枝方面具有独到优势。

(3) 电极电荷注入与抽出导致绝缘先期劣化。所有电树枝引发均为枝状且与纯枝状电树枝生长机理相同。PD 腐蚀、氧化、化学分解导致绝缘特征的枝状电树逐渐转化为半导体稠密枝状或丛林状, 电荷由稠密枝状或丛林状树枝尖端向广大区域注入与抽出, 导致微孔集中的大晶界表面绝缘进一步不均匀恶化, 藤枝状和松枝状电树枝沿不均匀劣化区迅速发展, 驱动力为主枝的 PD 和电荷复合发光—光致电离及氧化分解等所产生的局部高温、高压沿成串微孔逐一爆破状发展。

(4) 集中于电缆绝缘内侧的微孔、不均匀结晶和残存应力使得电缆内侧绝缘结构严重恶化。这是厚绝缘超高压 XLPE 电缆的发展所必须解决的首要问题。

## 参考文献

- [1] Dissado L A. Understanding electrical trees in solid: from experiment to theory[J]. IEEE Trans. on dielectrics and electrical insulation, 2002, 9(4): 483-497.
- [2] Zhao Y, Aughan A S, Champion J V, et al. The structure of electrical trees in semi-crystalline polymers. Dielectric[C]. Materials, Measurements and Applications Conference Edinburgh, UK, 2000, 314-319.
- [3] 王以田, 郑晓泉, G Chen, 等. 聚合物聚集态和残存应力对交联聚乙烯中电树枝的影响[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 44-48. Wang Yitian, Zheng Xiaoquan, G Chen, et al. Influence of polymer congregating state and survival mechanical stress to electrical treeing in XLPE[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 44-48.
- [4] 郑晓泉, G Chen, A E Davies. 交联聚乙烯中的导电和非导电型电树枝[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 140-144. Zheng Xiaoquan, G Chen, A E Davies. Conducting and non-conducting electrical trees in XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 140-144.

- [5] 贺景亮. 交联聚乙烯绝缘中树状放电的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(1): 46-49.  
He Jingliang. An experimental study of electrical treeing in polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(1): 46-49.
- [6] Mammeric M, Laurent C, Salon J. Influence of space charge build up on the transition to electrical treeing in PE under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(1): 27-35.
- [7] 党智敏, 亢婕, 屠德民. EAA 改性 XLPE 中空间电荷和电树、水树的关系[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 5-8.  
Dang Zhimin, Kang Jie, Tu Demin. Relationship of space space charge accumulation with electrical and water treeing in XLPE modified by EAA[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 5-8.
- [8] 尹毅, 韩社教, 屠德民. 固体绝缘中空间电荷测量装置的研制和应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 1-5.  
Yin Yi, Han Shejiao, Tu Demin. Developing and application of apparatus of space charge measurement in solid insulating materials [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 1-5.
- [9] 尹毅, 肖登明, 屠德民. 空间电荷在评估绝缘聚合物电老化程度中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 43-48.  
Yin Yi, Xiao Dengming, Tu Demin. An application of space charge in valuing the electica geing degree of insulating polymer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 43-48.
- [10] Ding H Z, Varlow B R. Thermodynamic model for electrical tree propagation kinetics in combined electrical and mechanical tresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 81-69.
- [11] Champion J V, Dodd S J. Morphology and growth of electrical trees in a propylene/ethylene copolymer[J]. IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 2001, 8(2): 284-292.
- [12] 王志钧, 吴炯. 500kV XLPE 电缆绝缘中树枝化现象的述评[J]. 电线电缆, 2001, (2): 16-19.  
Wang Zhijun, Wu Jong. Review of the treeing phenomenon in insulation of 500kV XLPE cables[J]. Electric Wire&Cable, 2001, (2): 16-19.
- [13] Kudo K. Fractal analysis of electrical trees[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 713-727.
- [14] Naoe M, Ehara Y, Kishida H, et al. The fractal analysis of the treeing process[C]. 1996 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and dielectric Phenomena, San Francisco, 1996: 779-782.
- [15] 谢大荣, 巫松祯. 电工高分子物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.
- [16] 刘子玉, 王惠明. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

收稿日期: 2005-11-02。

作者简介:

郑晓泉 (1954-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备现场检测、绝缘结构研究与教学工作。

(责任编辑 韩 蕾)