

发展在 XLPE 电缆绝缘内外侧的电树枝*

郑晓泉^{1)†} 谢安生^{1)‡} 李盛涛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) 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064)

(2006 年 12 月 20 日收到, 2007 年 2 月 6 日收到修改稿)

以 XLPE 高压电力电缆内外侧绝缘中的电树枝特性为研究对象, 通过分析电树枝引发与生长的统计实验规律和采用扫描电子显微镜分析发现, 由于不同结晶状态的影响, 电缆绝缘内外侧的电树枝特性存在很大的差异. 引发于绝缘内侧电树枝引发时间短、生长速度快、电树枝形状具有多样性, 起始于绝缘外侧的电树枝不仅引发时间长、生长速度极慢, 而且电树枝形状(结构)比较单一. 并对这两个位置电树枝的引发和生长机理进行了探讨.

关键词: 电树枝, 结晶状态, 统计规律, 内侧和外侧绝缘层

PACC: 7750, 7790, 7850

1. 引 言

电树枝是一种复杂的电致裂纹现象, 其直接原因是绝缘材料中的局部电场超过了材料的电气强度, 而局部高电场与材料中的各种缺陷、导电杂质密切相关. 高压聚合物绝缘电气设备绝缘中的设计场强远低于纯净材料的电气强度, 但电树枝现象仍然严重制约高压设备的可靠性与寿命, 因为电树枝会起始于在生产中所形成的疤结、凸出物、较大微孔以及材料污染等. 工艺不合理、绝缘厚度过大, 会导致极不利于绝缘抗电树枝性能的聚集态.

交联聚乙烯(XLPE)电缆发展已逾 40 年, 近年来, 伴随 XLPE 电缆电压等级迅速提高, 厚绝缘所带来的材料不合理聚集态对电缆运行可靠性的影响正日益突出. 而对高压 XLPE 电缆绝缘中电树枝的影响因素及电树枝抑制技术研究远远滞后于电缆电压等级的发展. 虽然有关聚合物中电树枝研究的报道已达非常可观的数量^[1-7], 但专门针对高压 XLPE 电缆绝缘中的电树枝研究论文还较少, 也没有检索到任何其他有关 XLPE 电缆内外侧绝缘中电树枝的对比实验研究报道. 经过多年研究, 我们已获得了一批有关高压 XLPE 电缆绝缘中电树枝特性及其有价值的研究成果^[8-16], 包括高压 XLPE 电缆绝缘中电树

枝形状类别, 以及施压频率、残存机械应力、不均匀结晶、杂质、微孔对电树枝结构及生长特性对电树枝的影响等. 本文研究发现, 生长于高压 XLPE 电缆绝缘内外侧的电树枝特性存在很大差异, 引发和生长于绝缘外侧的电树枝无论是电树枝形状还是引发时间及生长规律与均匀材料相似; 而引发和生长于电缆绝缘内侧的电树枝结构呈现多样化, 且引发时间短, 生长速度快. 通过扫描电子显微镜(SEM)结晶度分析和偏振光照片分析了导致这种结果的根本原因.

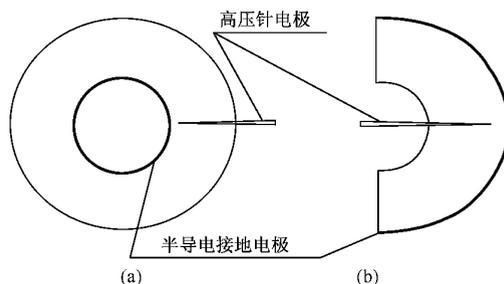


图 1 试样结构

2. 试样及实验设备

2.1. 试样

试样为由英国 National Grid 提供的 66 kV 级

* 国家自然科学基金(批准号 50577052)资助的课题.

† E-mail: xqzheng@mail.xjtu.edu.cn

XLPE 电缆. 将电缆样品抽去缆芯, 切削加工成图 1 试样. 为了电极与绝缘的密合性, 用作绝缘内侧电树枝实验的保留内半导电层(如图 1(a)), 用作外层绝缘电树枝实验的保留外半导电层(图 1(b)). 统一采用曲率半径为 $5 \pm 1 \mu\text{m}$ 的钢针电极. 为保证钢针电极与 XLPE 的良好接触, 专门设计了两种试样电极加工夹具, 分别用以由外向内插入针电极和由内向外插入针电极. 在插入针电极前对钢针电极进行了表面清洗和预涂聚乙烯(PE)处理. 实验表明, 这样处理的试样与电极间不会出现气隙. 针电极与地电极间的绝缘间隙统一保持为 3 mm.

2.2. 实验系统

实验采用实时电树枝培养分析系统进行, 该系统由一台高压实验变压器(或可变频高压放大器加函数信号发生器)和一套长焦距显微镜数字摄像计算机系统构成^[8]. 培养电树枝时将试样电极放置在硅油中并采用强底光照明以获得较为清晰的照片.

2.3. 实验方法

为对比分析, 实验研究统一采用 50 Hz, 10 kV 峰值正弦电压. 在同一试样上先做内侧绝缘层电树枝培养, 获得电树枝照片和生长数据后, 将试样切割成

半圆形, 再培养绝缘外层电树枝.

3. 实验结果

根据对 71 个电树枝的形状、色度和生长引发特性的统计规律分析发现, 该 XLPE 电缆内外侧绝缘中的电树枝存在巨大差异, 生长在绝缘内侧的电树枝的形状具有多样性, 而生长在绝缘外侧的电树枝形状比较单一. 绝缘内侧的电树枝统计生长时间小于外侧电树枝, 生长于绝缘内侧的电树枝通道具有绝缘与半导电两种特征^[8], 而生长于绝缘外侧的电树枝均为导电树.

3.1. XLPE 电缆绝缘内外侧电树枝形状对比

根据大量实验结果, 我们将生长于 XLPE 电缆绝缘内侧电树枝按形状分为枝状(图 2(a)), 丛林状(图 2(b)), 枝-膝枝状(图 2(c)), 枝-松枝状(图 2(d))(e)和枝-丛林状(图 2(f))五种^[8-14]. 图 2 为我们从大量的电树枝照片中所选出的具有代表性的几个电树枝, 其中膝枝状和纯枝状电树枝色度最浅, 树枝通道具有绝缘特征. 而生长于绝缘外侧的电树枝仅有丛林状和丛林-枝状两种(见图 3), 且电树枝呈现深黑色, 显示具有半导电特性.

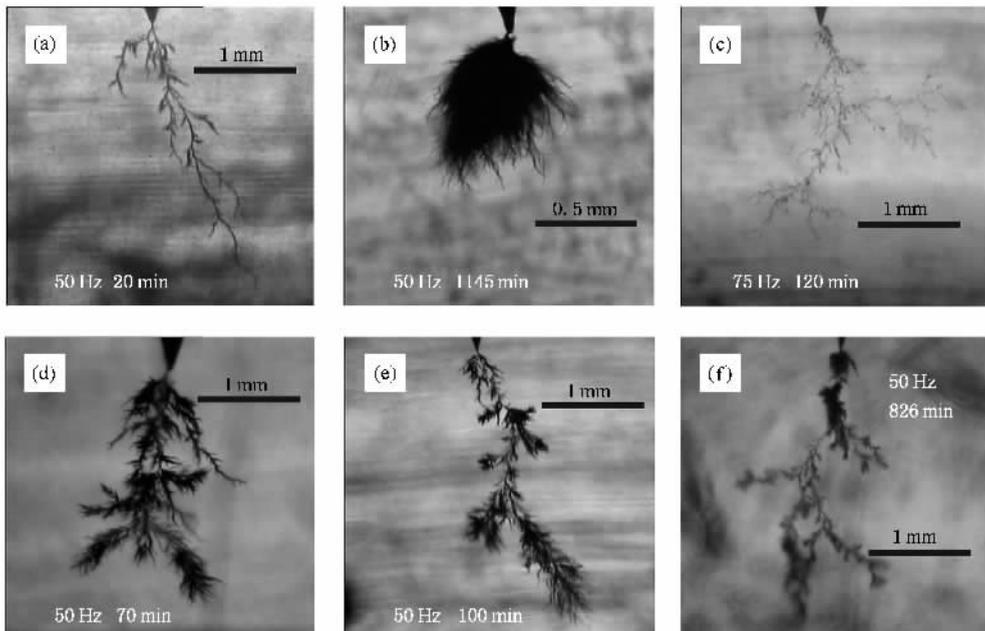


图 2 生长于 XLPE 电缆绝缘内侧的五种电树枝

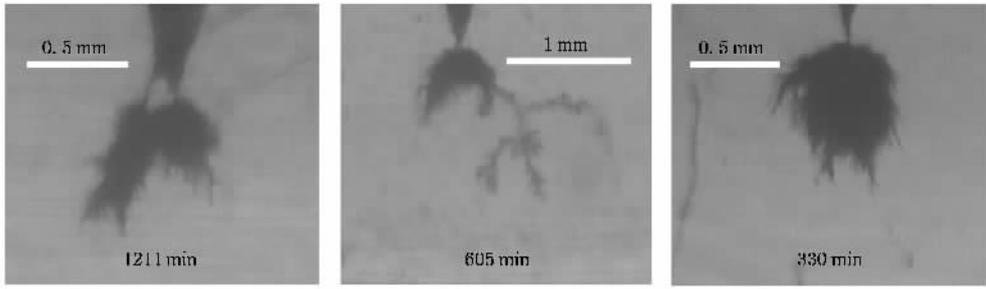


图 3 XLPE 电缆绝缘外侧的电树枝

3.2. 电缆绝缘试样中内外侧电树枝生长特性对比

图 4 为生长于 XLPE 电缆绝缘内外侧电树枝的生长特性对比,其中图 4(a)为图 2 各电树枝的生长特性,图 4(b)为随机挑出生长于绝缘外侧的 6 个电树枝的生长特性.不难看出,两个位置电树枝在生长特性上存在巨大差异,除丛林状和枝-丛林状结构电树枝生长较为缓慢外,内侧绝缘中的其他电树枝在

100 min 左右就已生长至地电极附近,而外侧绝缘中的电树枝除一只电树枝在 600 min 以后呈现快速生长至 2.4 mm 处外,其他电树枝即使时间超过 1000 min,仍看不到明显的加速生长过程.

3.3. 统计实验规律

由于电树枝引发与生长存在分散性,特别是对 XLPE 电缆绝缘中的电树枝而言,其影响因素更多,

表 1 内外侧绝缘中各种电树枝比例

位置	形状	混合状		丛林		
		枝-膝	枝-松	纯丛林	混合丛林	
内侧	数量	5	4	8	2	1
	%	25	20	40	10	5
外侧	数量	0	0	0	4	1
	%	0	0	0	80	20

在这种情况下,往往统计规律更能揭示事物发展的本质.表 1 为我们对实验研究中所得到的无残存应力情况下绝缘内侧 20 只电树枝和外侧五只电树枝结构特性的统计实验规律,由此知,枝状、枝-松枝状、枝-膝枝状在内侧电树枝中占 85%,而外侧电树枝以丛林状为主(占 80%).由于丛林状电树枝生长最慢,可知内侧绝缘的电树枝对 XLPE 电缆的安全运行具有更大威胁.由表 2 数据知,内外侧电树枝引发时间存在较大分散性,尚未发现显著差异,而内侧电树枝平均生长速度则远大于外侧,考虑到外侧电树枝仅引用了平均生长长度为 1.18 mm 的数据,而该长度的丛林状电树枝会维持很长时间不再明显增

表 2 内外侧电树枝的统计引发与生长特征

项目	位置	外侧	内侧
平均引发时间/min		125	121.6
平均生长时间/min		> 505	292.3
平均生长长度/mm		1.18	2.85
平均生长速度/mm·h ⁻¹		< 0.14	0.65

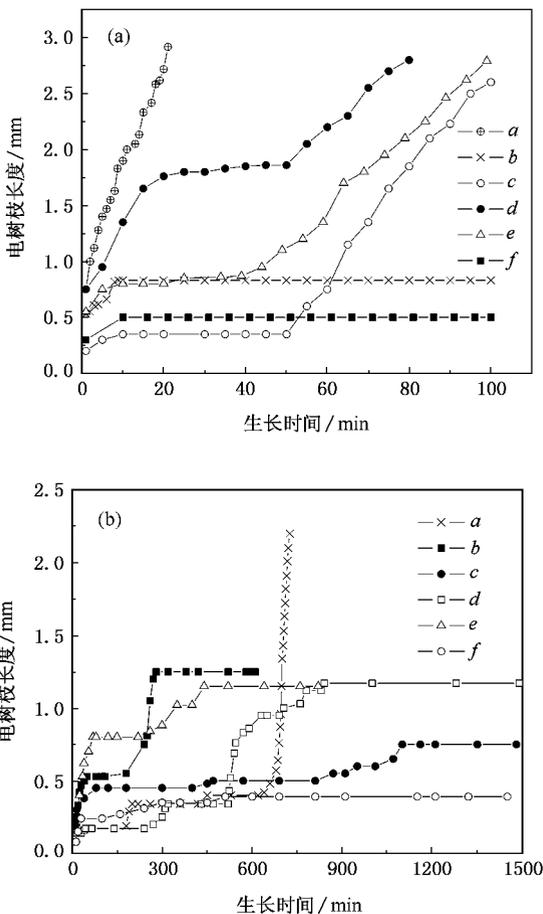


图 4 XLPE 电缆内外侧绝缘中电树枝的生长特性

长,因此内侧电树枝平均生长速度与外侧的电树枝相比实际是非常大的。

4. 机理分析

为推断 XLPE 电缆绝缘内外侧电树枝特性存在巨大差异的原因和电树枝引发与生长机理,对内外侧绝缘微观结构进行了 SEM 分析和偏振光显微镜观测,根据微观分析结果提出了电树枝生长与材料聚集态结构的关系。

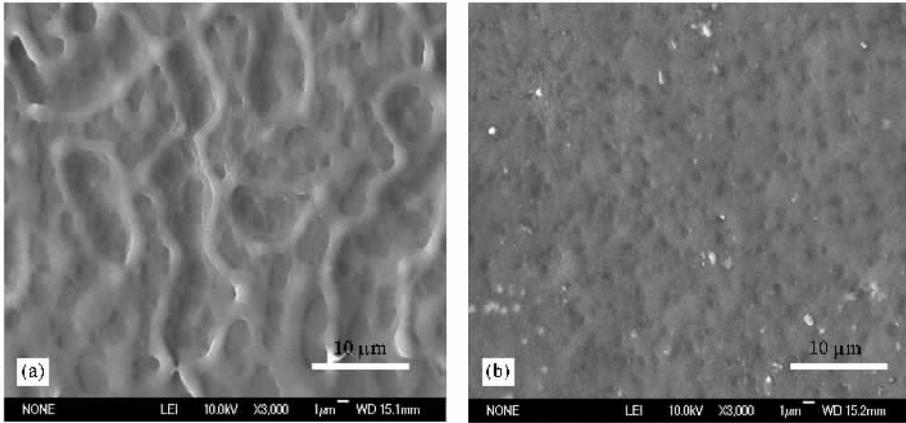


图 5 XLPE 电缆绝缘内外侧结晶状态的 SEM 照片 (a)内侧 (b)外侧

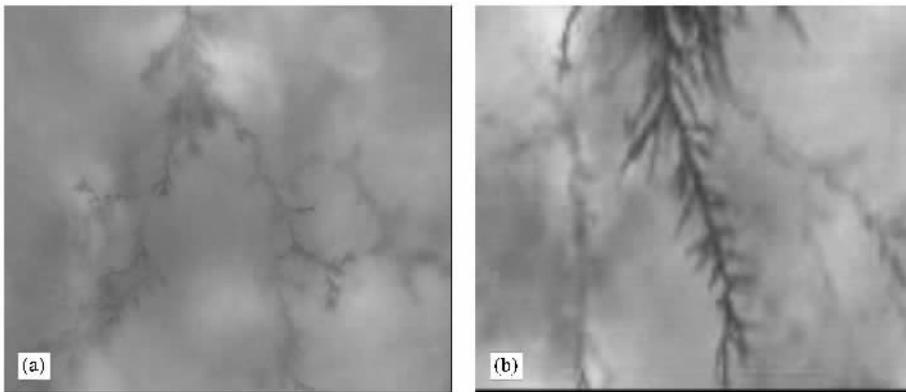


图 6 XLPE 电缆绝缘内侧的大晶块与电树枝

4.2. 结晶度对 XLPE 电缆绝缘试样内外侧电树枝的影响

采用 X 射线衍射仪测定了该样品内外侧的结晶度分别为 38.49% 和 40.29%。内外侧结晶度近似,表明电树枝形状和生长特性与结晶度关系不大。

4.1. XLPE 电缆绝缘试样内外侧结晶状态对比

将试样在 -190°C 液氮下速冷,然后脆断,在断裂表面喷镀金电极,用 SEM 测到的试样断面结晶状态如图 5 所示,可知该 XLPE 电缆绝缘内外侧聚集态存在巨大差异,内侧存在大晶块且结晶不均匀,而外侧只有十分均匀的小晶块。对比图 6 示绝缘内侧藤枝状电树枝区域存在大晶块的偏振光显微照片知,不均匀结晶与大晶块是导致藤枝状电树枝迅速发展的主要原因之一。

4.3. 机理分析

对于半结晶聚合物材料而言,结晶状态对材料电树枝老化特性的影响,已得到许多学者的实验证实,图 7 为 Zhao 等采用乙烯-丙烯共聚物,在 125°C 下结晶,然后在室温和 15 kV 工频电压下,使用针-板电极所得出电树枝沿大晶块边界生长的实验照片。他们还发现电树枝的生长并不是随机的: 124°C

结晶时,观察到有 12% 的电树枝位于晶块表面层; 20% 在低结晶材料之中, 68% 的电树枝与晶块边界有关^[1]. Champion 和 Dodd 的研究发现,聚合物的结构会影响电树枝化特性,特别是在高温下,添加线性聚乙烯(20%) 到支链型聚乙烯(80%) 中会减小电树枝的生长速率,表明增加共混物的结构不规整性,即减小聚合物材料中大晶块的生成概率会减小树枝的生长速率^[2]. Tanaka 等作者的研究证实,退火温度对绝缘中的晶块尺寸具有直接影响,大晶块导致聚合物的电气强度降低^[3]. Ali Harlin 和 Michail Shuvalov 等人的研究则发现,采用共混结构不仅可以大大减小材料电树枝化的概率,而且交联聚乙烯中不存在真正意义上的球晶,但会形成更致密和粗糙的结晶层结构^[4]. 在本文中我们将其称之为晶块(由晶层和层间无定形构成的近似球状). 众所周知, XLPE 电缆的绝缘形态取决于交联和冷却条件,特别是取决于挤出特性,以链状方式沿平行于电场方向的结晶更适于电树枝引发和生长. 这是因为交联副产物集中于片晶之间的无定形区,自然会形成有利于电树枝生长的绝缘弱区.



图 7 乙烯-丙烯共聚物中沿大晶块间隙生长的电树枝^[1]

本文分析表明,不同作者得到半结晶聚合物的聚集态对电树枝老化性能的影响这种实验事实的另一个原因在于半结晶材料中的晶区结构致密(密度 $\rho = 1.05$) 具有纯净和脆性特征,而无定形区密度较小($\rho = 0.84-0.85$) 存在微孔和具有柔性特

征,特别是大晶块在结晶过程中的排渣效应,导致杂质主要集中在晶块表面附近,这种脆-柔界面、两种聚集态介电常数和密度的差异以及挤出绝缘在不均匀冷却过程中形成的微孔在晶块表面附近的集中,自然会在晶体和非晶体界面形成网状的绝缘弱区,成为电树枝优先发展的通道.

显而易见,由于 XLPE 电缆外侧绝缘在挤出后首先冷却,因此结晶均匀且晶块很小,绝缘结构较为理想,只生成了丛林或半丛林状电树枝的实验现象表明,外层绝缘无明显的杂质和较大微孔生成及集中,并不存在显著的绝缘弱区. 但对于 XLPE 电缆的内侧绝缘而言,多样化电树枝的生成和电树枝快速生长的特性以及大晶块存在的实验结果表明,杂质与微孔在大晶块表面附近集中是导致电缆绝缘抗电树枝能力下降的首要原因. 以下分两个方面分析.

4.3.1. 内侧绝缘中生成大量微孔的计算分析

众所周知, PE 的热膨胀系数是常用聚合物介质中最大的,为定量分析 PE 中的微孔状况,可作如下简单计算:

设电缆绝缘外径为 $2R$, 内径为 $2r$, XLPE 的线膨胀系数为 α ; 假定电缆绝缘不会沿电缆长度方向收缩,且绝缘内半径尺寸不变,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 ΔV 为

$$\begin{aligned} \Delta V &= l \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot \pi \{ (R^2 - r^2) \\ &\quad - [R^2(1 - \alpha \cdot \Delta t)^2 - r^2] \} \\ &= l \cdot \pi R^2 \alpha^2 \cdot \Delta t^2 (2 - \alpha \cdot \Delta t), \quad (1) \end{aligned}$$

式中 l 为单位电缆长度, Δt 为冷却温度差值. 因 $\alpha \cdot \Delta t \ll 1$, 故上式可以简化为

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

以沈阳电缆厂生产的 YJAY110kV XLPE 电缆绝缘为例,内半导电屏蔽层外径 $r = 11.3$ mm, 绝缘外径 $R = 29.8$ mm. XLPE 的线膨胀系数 α 为 $(10-20) \times 10^{-5}/K$, 在此取 $\alpha = 15 \times 10^{-5}/K$; 取绝缘挤出温度为 $160^\circ C$, 冷却后温度为 $20^\circ C$, 则获得单位体积电缆绝缘 V 中的微孔总体积 ΔV 的百分含量为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} \times 100\% &= \frac{2l\pi(R\alpha\Delta t)^2}{l\pi(R^2 - r^2)} \\ &= \frac{2R\alpha\Delta t}{R^2 - r^2} = 0.103\%. \quad (3) \end{aligned}$$

假定微孔平均尺寸为半径 $b = 10 \mu m$ 圆球, 则一个微孔的体积为 $\Delta v = (4/3)\pi b^3$, 在单位体积 ($V = 1 \text{ cm}^3$) 电缆绝缘中的微孔数 n 达

$$\begin{aligned}
 n/V &= \frac{\Delta V/\Delta v}{V} = \frac{2l\pi(R\alpha\Delta t)^2}{\frac{4}{3}\pi b^3 \cdot l\pi(R^2 - r^2)} \\
 &= \frac{3(R\alpha \cdot \Delta t)^2}{2\pi b^3(R^2 - r^2)} \\
 &= \frac{3 \times (2.98 \times 15 \times 10^{-5} \times 140)^2}{2\pi \times (1 \times 10^{-3})^3 (2.98^2 - 1.13^2)} \\
 &\approx 2.46 \times 10^5 (\text{个}/\text{cm}^3). \quad (4)
 \end{aligned}$$

计算结果之大出乎意料. 由于真实电缆绝缘在电缆长度方向不可能没有收缩, 在径向也不是一点儿回缩都没有, 因此实际的微孔数可能要小于此计算结果. 但即使比(4)式小 1 个数量级, 结果也同样让人吃惊, 表明微孔是高压 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在工作电场强度最大的缆芯附近的绝缘中. 考虑到大晶块的存在, 这些微孔会更密集地集中在围绕晶块的网状区域内, 而且电压等级越高, 绝缘越厚的 XLPE 电缆, 这种情况越严重.

4.3.2. 针与晶块相对位置对电树枝形状的影响

内侧绝缘所生成的五种电树枝在很大程度上取决于针尖电极与大晶块的相对位置, 用图 8 说明: (1) 当针尖正好位于晶块之间时(如图 8(a)), 电树枝将沿由微孔和杂质集中所形成的网状弱区发展(如图 8(d)), 最终生成如图 2(a)所示快速发展的枝状电树枝; (2) 当针尖正好插入到大晶块内部时(如图 8(c)), 较为完善的晶体结构导致电树枝只能以尖端微击穿的形式缓慢向前发展. 由于树枝尖端电场的相互屏蔽作用以及晶块周围绝缘弱区陷阱中空间电荷的屏蔽作用^[15], 最终形成如图 2(b)所示丛林状电树枝; (3) 当枝状电树枝伸入晶块时(如图 2(f)), 由于如 2) 所示相同原因, 电树枝在晶块内逐渐转化为局部丛林状, 并出现较长时间的滞长现象. 一旦电树枝穿出晶块, 又以较快速度生长. 图 8 同时给出了电树枝沿大晶块边界成串微孔、杂质集中方向的可能发展方向.

4.3.3. 关于电树枝引发机理

高压 XLPE 电缆内、外侧绝缘中电树枝平均引发时间并无显著差异的实验结果表明, 电树枝的引发与介质的结晶状态、微孔和杂质集中情况并无显著相关性, 符合在针尖电极附近的强电场微击穿引发机理. 对于本研究, 针尖曲率 $r_1 = 5 \mu\text{m}$, 电极间隙 $r_2 = 3 \text{mm}$, 则可估算出针尖处的局部电场强度

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{U}{r_1^2 - \frac{r_1^2}{r_2}} = \frac{7 \times 10^3}{5 \times 10^{-6} - \left(\frac{5 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-3}}\right)^2} \\
 &\approx 3.14 \times 10^9 \text{ V/m}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

根据陷阱理论与刘付德等人提出的介质击穿理论, 当固体介质中电场强度 $E > 1 \times 10^8 \text{ V/m}$, 电极向介质中注入的电子会被陷阱俘获, 高能电子则会使介质产生新的陷阱, 同时有碰撞电离产生^[17]. 事实上, 在交流电场下, 存在电子由电极向介质中注入和从介质抽出双向过程. 由于陷阱电荷密度随时间逐渐增加, 单位时间抽出的电子必然少于注入的电子, 该陷阱密度和陷阱电荷的积累过程便形成了电树枝引发时间. 当陷阱密度增加到一定程度, 针尖附近的局域态能级产生连通, 最终导致该区域介质的击穿强度下降, 即产生局部电老化, 从而引发电树枝.

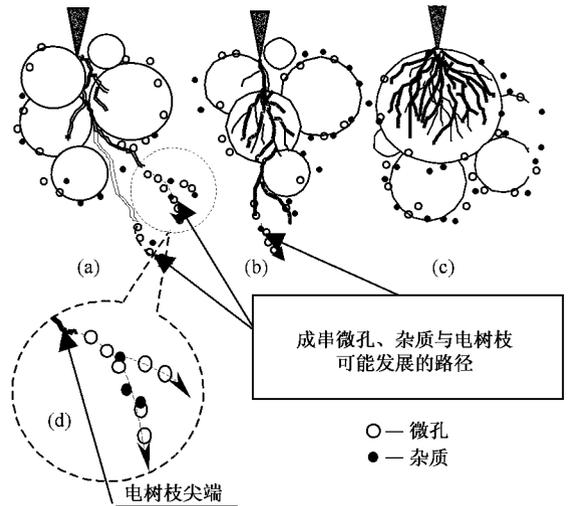


图 8 XLPE 电缆绝缘内侧电树枝起因 (a) 针尖位于大晶块间隙; (b) 枝状电树枝进入与穿出晶块; (c) 针尖位于大晶块之内; (d) 电树枝沿成串微孔、杂质集中方向的可能发展路径

5. 结 论

1. 在同等实验条件下, 高压 XLPE 电缆内侧绝缘中会生成 5 种电树枝, 即枝状、丛林状、枝-松枝混合状、枝-藤枝混合状和枝-局部丛林混合状. 统计生成率以枝状和混合状电树枝为大多数. 其中枝状电树枝生长最快, 枝-藤枝状其次, 第三位为枝-松枝状, 而以丛林状为最慢. 而在 XLPE 电缆绝缘外侧只生成了生长速度极慢的丛林状和局部丛林状两种.

2. 导致高压 XLPE 电缆内外侧绝缘差异的主要原因是挤出绝缘由外向内冷却时, 外侧绝缘只生成

结构较为均匀的小结晶,且杂质和微孔无明显集中现象,而内侧绝缘中会形成大量微孔和大晶块并导致微孔和杂质沿大晶块周围形成网状绝缘弱区。

3. XLPE 电缆内侧绝缘的平均生长时间远小于外侧绝缘;内外侧绝缘的聚集态差异不会对电树枝

引发时间造成显著影响.内外侧绝缘中电树枝引发机理相似,但生长机理不同。

4. 高压 XLPE 电缆内侧绝缘中的电树枝形状与针电极和大晶块的相对位置有关。

- [1] Zhao Y ,Vaughan A S ,Champion J V *et al* 2000 *Dielectric Materials Measurements and Applications Conference* No. 473. © IEE 2000 , 314—319
- [2] Champion J V ,Dodd S J 2000 *Dielectric Materials Measurement and Applications Conference Publication* No. 473 ,© IEE 30—34
- [3] Tanaka Y ,Ohnuma N ,Katsunami K *et al* 1991 *Trans. on Electrical insulation* **26** 258
- [4] Harlin A ,Shuvalov M ,Ovsienko V 2002 *IEEE Trans. Dielectr. and Elect. Insul.* **9** 401
- [5] Dissado L A 2002 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul* **9** 483
- [6] Hosier I L ,Dodd S J ,Sutton S J 2006 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **39** 962
- [7] Champion J V ,Dodd S J ,Zhao Y *et al* 2001 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **8** 284
- [8] Zheng X Q ,Chen G ,Davies A E 2003 *Proceedings of CSEE* **24** 140 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G ,Davies A E 2003 中国电机工程学报 **24** 140]
- [9] Zheng X Q ,Chen G ,Davies A E 2006 *Proceedings of CSEE* **26** 79 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G ,Davies A E 2006 中国电机工程学报 **26** 79]
- [10] Wang Y T ,Zheng X Q ,Chen G ,Davies A E 2004 *Transactions of China Electrotechnical Society* **7** 44 (in Chinese)[王以田、郑晓泉、Chen G ,Davies A E 2004 电工技术学报 **7** 44]
- [11] Zheng X Q ,Chen G ,Davies A E ,Davies A E 2006 *Transactions of China Electrotechnical Society* **21** 28 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G ,Davies A E 2006 电工技术学报 **21** 28]
- [12] Zheng X Q ,Chen G ,Davies A E 2003 *High Voltage Engineering* **29** 5 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G ,Davies A E 2003 高电压技术 **29** 5]
- [13] Zheng X Q ,Chen G 2003 *High Voltage Engineering* **29** 6 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G 2003 高电压技术 **29** 6]
- [14] Zheng X ,Chen G ,Davies A E *et al* 2002 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* 955
- [15] Zheng X Q ,Chen G 2003 *Insulation Material* **3** 25 (in Chinese)[郑晓泉、Chen G 2003 绝缘材料 **3** 25]
- [16] Li S T ,Zheng X Q 2006 *Electrical Treeing in Polymer* (Beijing : Machine Industry Press) (in Chinese)[李盛涛、郑晓泉著 2006 聚合物电树枝化(北京 机械工业出版社)
- [17] Liu F D ,Yang B T ,Tu D M ,Liu Y N 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 333 (in Chinese)[刘付德、杨百屯、屠德民、刘耀南 1992 物理学报 **41** 333]

The electrical trees that developed in inner and outer layer of XLPE cable insulation *

Zheng Xiao-Quan^{1)†} Xie An-Sheng¹⁾²⁾ Li Sheng-Tao¹⁾

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

2) *School of Environment Science and Engineering ,Chang 'an University ,Xi 'an 710064 ,China)*

(Received 20 December 2006 ; revised manuscript received 6 February 2007)

Abstract

Due to the limitations of specific insulation structures and the influence of technical process ,the growth of electrical trees in high-voltage power equipments with polymer as main insulation materials is more complicated than those in uniform materials , especially in equipment employing semi-crystalline polymer ,so it is difficult to characterize by mathematical means. The experiment reported in this paper is the first attempt to focus on the electrical treeing rules in both inner and outer insulation layers of high-voltage XLPE power cable. Through statistical experiments and the SEM observation ,large difference in treeing character between the inner and outer layers of cable insulation due to the different crystalline status are found. Electrical trees initiating in the inner layer of insulation has shorter initiation time ,higher growth rate and greater variety of shapes compared than in the outer layers. The initiation and propagation mechanisms are also discussed.

Keywords : electrical tree , crystal states , statistical regularity , inner and outer insulation layers

PACC :7750 ,7790 ,7850

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50577052).

† E-mail : xqzheng@mail.xjtu.edu.cn