

温度梯度下海底电缆交联聚乙烯绝缘电树枝特性研究

韦 敏, 周鲁川, 王柏森

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司海洋采油厂, 山东 东营 257000)

摘要: 由于交联聚乙烯(XLPE)主绝缘较低的导热系数与海水较低的温度, 极易在海底电缆绝缘内形成较大的温度梯度, 温度梯度的形成将导致 XLPE 聚集态及介电特性的径向差异, 从而影响电树枝劣化过程。为掌握温度梯度下 XLPE 的电树枝特性, 搭建了 10~90℃ 内的温度梯度电树枝实验平台, 测量了不同温度梯度下 XLPE 的电树枝起始及生长特性。结果表明: 不同温度梯度下的针尖电场变化及 XLPE 聚集态改变会影响电树枝的起始电压, 且随着温度梯度的增大, 电树枝的主形态呈现出藤枝状、丛林-藤枝混合状及丛林状之间的渐变特性。

关键词: 海底电缆; 温度梯度; 电树枝; 交联聚乙烯; 生长特性

中图分类号: TM215 **DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.011

Research on electrical tree characteristics of submarine cable XLPE insulation under temperature gradient

WEI Min, ZHOU Luchuan, WANG Baisen

(Marine Oil Production Plant of Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257000, China)

Abstract: Due to the low thermal conductivity of XLPE main insulation and low temperature of seawater, it is easy to form a large temperature gradient in submarine cable insulation. The formation of temperature gradient will cause a radial difference in the aggregation and dielectric properties of XLPE, so as to influence the electrical treeing deterioration process. In order to study the electrical tree characteristics of XLPE under temperature gradient, a temperature gradient electrical tree experimental platform in the range of 10~90℃ was built, and the initiation and growth characteristics of electrical tree under different temperature gradient were measured. The results show that the changes of needle tip electric field and XLPE aggregation under different temperature gradient will affect the initial voltage of electrical tree. With the increase of temperature gradient, the main structure of electrical trees presents gradual change characteristics of rattan-branch tree, bush-rattan tree, and bush tree.

Key words: submarine cables; temperature gradient; electrical tree; XLPE; growth characteristics

0 引言

近年来,随着大陆架海域石油与天然气开采量的不断增加,海洋资源开发和空间利用规模的不断扩大,海洋工程已成为解决当下能源危机的重要手段。其中,海洋石油与天然气的开发和利用对全球经济可持续发展起着至关重要的作用。据统计,海洋石油资源约占全球石油资源总量的 34%,而探明率只占到 30%;分布于大陆架的油气资源则约占全球海洋油气资源的 60%。在海洋油气的开采过程中,电力作为海上油气平台的主要动力能源,关系着海上平台生产生活的顺利进行,其稳定性、安全性和经济性成为近年来研究的重点和热点^[1-2]。

由于海上平台难以就近产生足够的电力,大部

分海上平台需依赖陆地电网的电力输送。而由于海上输电难以实现架空线等方式,为实现远距离的电力安全输送,海底电缆成为最有效的途径。随着绝缘材料技术的发展与电缆制造工艺水平的提升,海底电缆普遍采用交联聚乙烯(XLPE)作为主要绝缘材料。由于海底电缆为典型的容性结构,任何一处绝缘的破坏都将导致整个绝缘系统的失效,研究表明导致绝缘失效的主要原因为材料内产生的电树枝劣化^[3-4]。

电树枝劣化是指发生在绝缘内部,由于放电形成的树枝状放电通道,其主要由电缆绝缘内杂质、电缆外力破坏、水树枝缺陷等引发。电树枝是一种发展较缓慢的绝缘劣化,其形成后将极大地威胁整个电缆系统的安全运行^[5]。温度一直以来被认为是影响电树枝劣化的重要因素,温度的升高会使

XLPE 内电树枝起始电压降低并且会引发丛林状电树枝^[6-7],在较低的温度下($<0^{\circ}\text{C}$),电树枝的起始概率及生长速率将随着温度的降低而减小^[8]。而在实际的电缆运行状态下,其绝缘材料内并非均一的恒定温度场,而是存在由缆芯向外的径向温度梯度分布^[9-10],这一温度梯度在直流电缆中将会极大影响绝缘内电场分布,因此学者们对直流电缆绝缘在温度梯度下的特性开展了研究^[11-13]。研究表明 SiR 材料链段松弛以及低密度区电荷密度上升会导致针尖温度较高时电树枝的起始概率升高,且更容易形成密集、短小的枝干结构^[14];直流-冲击复合电场及直流谐波复合电场下的 XLPE 内电树枝生长特性均受温度梯度影响而呈现出不同的形态及生长速率,导致这一现象的主要原因是不同温度下的空间电荷动态特性不同^[15]。而交流电压下的电场分布与材料的介电常数变化相关,因此温度梯度也可能通过影响材料的介电常数而导致电场分布的差异,进而影响材料中的电树枝特性。已有研究发现在 $0\sim-196^{\circ}\text{C}$ 内的温度梯度会引起 XLPE 在不同温区内的电树枝形态发生改变^[16],而更高温度区间内的交流电树枝特性研究则较少。在海上平台供电系统中,海底电缆外部为恒温的海水,其内部导体温度则与电缆载流量呈正相关,由于平台产能的不断扩大大,电缆的载流量一般较大,使得电缆长时间处于接近最大负荷状态,从而使得其缆芯温度与护套温度存在较大差异,形成较大温度梯度,这一温度梯度将导致设计中均一的绝缘性能,例如介电常数、载流子迁移特性等发生改变,随着绝缘各区域温度的不同,对温度极为敏感的电树枝将在不同温差下呈现出较大差异的生长特性,而目前对于 10 kV 海底电缆绝缘在温度梯度下的电树枝特性研究较少。

本研究搭建大温度梯度下的 10 kV 海底电缆 XLPE 绝缘电树枝劣化实验平台,获得不同温度梯度下交流电树枝的生长特性,分析其起始电压、生长速度、形态与击穿概率等与温度梯度的关联性,并结合 XLPE 介电特性及聚集态特性的温度相关性分析电树枝生长机理。

1 实验

1.1 电树枝试样制备及电极设置

选取 10 kV 海底电缆作为实验样品。为清晰地观测到电树枝的生长过程,在实验开始前将电缆进行横向切片,切片厚度为 3 mm,切片后去除外部铅封及铜屏蔽层。在电力电缆运行过程中,电缆内部存在的绝缘缺陷可能导致电树枝的生成,其直接原

因为内部缺陷导致的电场畸变。为实现对于局部电场畸变的模拟,选用针电极作为高压电极,试样制作过程中将针电极由内半导体层扎入 XLPE 绝缘层,针尖位置距离外半导体层 2 mm,如图 1 所示。实验过程中针电极接高压,外半导体层接地。

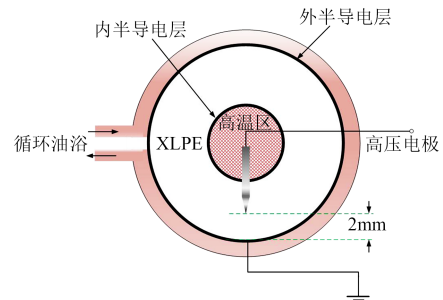


图1 电缆切片试样及电极设置

Fig.1 Cable slice sample and electrode setting

依据运行标准^[17],XLPE 绝缘电缆允许的短时最高运行温度约为 90°C ,而海水温度约保持为 4°C ,因此设置高温区温度最高为 90°C ,考虑铅封等作用,将绝缘外侧的低温区温度设置为 10°C 。为防止高压电源放电,实验中使用陶瓷加热片进行高温区的加热及温度控制,控制误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,使用循环油浴实现低温区的控制,油管为塑料管,温度控制误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,如图 1 所示。实验过程中整个试样置于显微镜下,以冷光源及工业 CCD 同步开展电树枝生长过程的录制。

1.2 温度梯度设置

为实现对温度梯度的模拟,分别对针电极和地电极温度实现单独控制,实验过程中保持高温区的温度为 $30\sim 90^{\circ}\text{C}$,间隔 10°C ,设置低温区温度为 10°C ,如表 1 所示。实验过程中由于针电极自身较高的热导率,加热 5 min 后针尖温度可上升至与高温区接近的温度。因此,实验中首先分别对高低温区加热,使其温度到达设定值,5 min 后开始对试样加压开展电树枝实验。为保证实验数据的重复性,每个温度梯度下进行 15 组电树枝生长实验。

1.3 电压设置

试验电压采用 50 Hz 工频电压,经升压器施加至针电极。在电树枝起始电压测试过程中,升压速率设置为 200 V/s ,连续升压至 6 kV 后以 200 V 梯度升压,每个梯度升压完成后等待 30 s 以观测是否有电树枝生成。当在显微镜内观测到长度大于 $20\ \mu\text{m}$ 的电树枝通道时,认为已有电树枝生成,以此时的电压作为电树枝的起始电压。

在电树枝生长实验中,将电压升压至 8 kV,同步记录电树枝生长过程。为掌握不同温度梯度下

表1 温度梯度设置

Tab.1 Temperature gradient setting

温度梯度	高温区温度	低温区温度
20	30	10
30	40	10
40	50	10
50	60	10
60	70	10
70	80	10
80	90	10

的电树枝特征,记录电树枝产生后 60 min 时的电树枝形态作为该温度梯度下的典型树枝形态。为分析 XLPE 在不同温度梯度下的击穿特性,以电树枝产生后 120 min 时的击穿概率作为击穿特征参数。

1.4 性能测试

1.4.1 电导率测试

为分析不同温度下 XLPE 的电导率特性,使用图 2 所示的三电极系统测量不同温度下 XLPE 切片的电导率,皮安表型号为 Keysight B2981A。被测试样直径为 8 mm,厚度为 500 μm ,测量过程中施加电场为 3 kV/mm,温度为 0~90 $^{\circ}\text{C}$,温度间隔为 10 $^{\circ}\text{C}$ 。

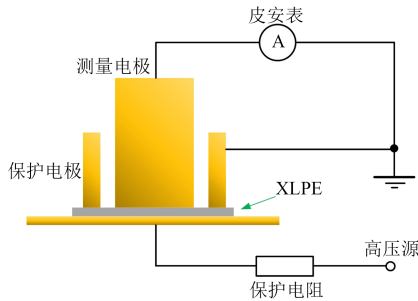


图2 电导率测试装置

Fig.2 Conductivity testing device

选取 3 000 s 时的稳定电流数据作为电导率计算的依据,并依据公式(1)计算出不同温度下 XLPE 的电导率。

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{\pi r^2} \quad (1)$$

式(1)中: U 为施加电压; I 为测试电流; l 为试样厚度; r 为测量电极半径。

1.4.2 宽频介电谱测试

为获得不同温度下 XLPE 的相对介电常数,采用 NOVOCONTROL Concept 80 型宽频介电阻谱测试系统测量 10~90 $^{\circ}\text{C}$ 下 XLPE 的相对介电常数,频率范围为 0.1 Hz~10 MHz。

1.4.3 差示扫描量热测试

采用梅特勒-托利多 822E 型差示扫描量热仪

(DSC)测试电缆 XLPE 绝缘的结晶及熔融特性。测试样品质量为 4.3 mg,温度范围为 10~140 $^{\circ}\text{C}$,变温速度设定为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。测试过程采用氮气保护,流速为 50 mL/min。

2 结果及分析

2.1 不同温度下 XLPE 材料特性

图 3 为不同温度下 XLPE 的电导率测试结果。由图 3 可知,当温度由 0 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 90 $^{\circ}\text{C}$ 时, XLPE 的电导率呈现单调递增特征,其数值跨度达 1 个数量级,这表明高温下 XLPE 内会激发出更多的载流子, XLPE 电导率的变化将影响温度梯度下的电荷迁移特性。

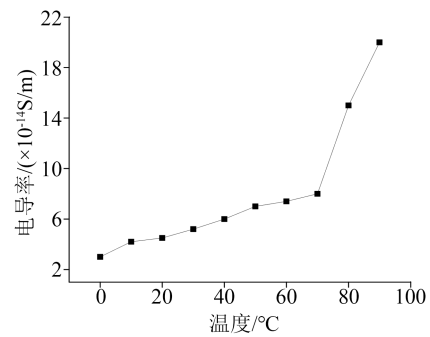


图3 不同温度下 XLPE 的电导率

Fig.3 Conductivity of XLPE at different temperatures

图 4 为不同温度下 XLPE 的相对介电常数。从图 4 可以看出,在 0.1 Hz~10 MHz 内, XLPE 的相对介电常数随温度升高而小幅增大,且在低频段(10 Hz 以下)增大趋势较为明显。该变化与高温下增多的载流子在低频下积聚所引发的电极极化及界面极化有关^[18-19]。

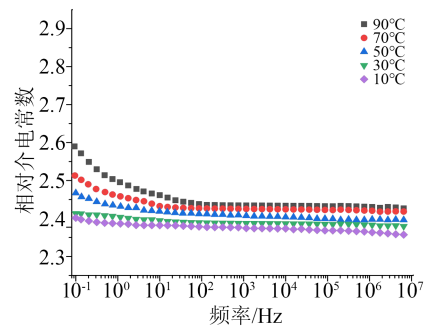


图4 不同温度下 XLPE 的相对介电常数

Fig.4 Relative permittivity of XLPE at different temperatures

图 5 为不同温度下 XLPE 的 DSC 测量结果。由图 5 中熔融曲线可知,当 XLPE 温度升高至 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, XLPE 的吸热曲线开始缓慢上升,在 76 $^{\circ}\text{C}$ 时出现第一个熔融峰,该峰值归因于工厂脱气工艺中形成的小尺寸晶粒的熔融^[20],当温度升高至 105 $^{\circ}\text{C}$ 时出现

最大峰值,这表明当温度逐渐升高到一定程度时,XLPE晶区开始出现较为剧烈的分子热运动,分子热运动的出现将逐渐破坏晶区的致密结构。

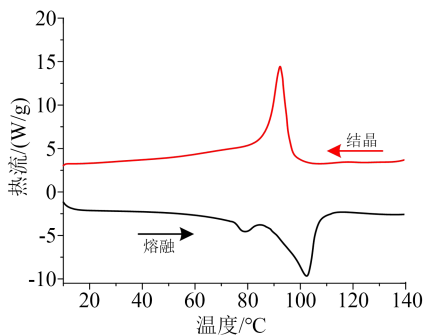


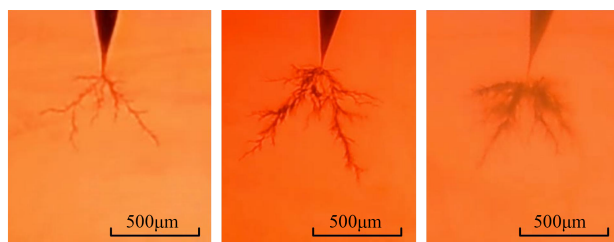
图5 DSC测量结果
Fig.5 DSC test results

2.2 不同温度梯度下的电树枝起始特性

根据第1节中实验方案开展电树枝起始特性研究,获得不同温度梯度下的电树枝起始形态及起始电压等特征。

2.2.1 电树枝起始形态

不同温度梯度下的电树枝生长60 s后的起始形态如图6所示。



(a)20°C (b)50°C (c)80°C

图6 不同温度梯度下的电树枝起始形态

Fig.6 Initial morphology of electrical tree under different temperature gradients

从图6可以看出,XLPE电树枝起始后60 s时刻的电树枝形态具有明显的差异。随着温度梯度的增大,起始电树枝分枝数呈现明显的增多趋势,其分枝由最初的树枝状发展至多枝状。导致这一形态变化的主要原因为不同温度下XLPE的结晶状态发生了改变。在温度梯度为20°C和50°C时,电树枝起始段均为树枝状,而随着温度梯度增大,晶区开始出现部分熔融,XLPE内的绝缘薄弱区增多^[6],初始电树枝生长过程中的新通道生成方向更加随机,因此出现了图6(c)所示的大量树枝通道交错的现象。

2.2.2 电树枝起始电压

图7为不同温度梯度下的电树枝起始电压。从图7可以看出,随着温度梯度的增大,电树枝的起始

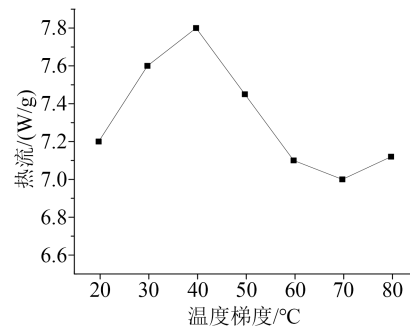


图7 不同温度梯度下的电树枝起始电压

Fig.7 Initial voltage of electrical tree under different temperature gradients

电压呈非线性变化特征。当温度梯度由20°C增大至40°C时,电树枝起始电压由7.2 kV升高至7.8 kV达到最高值。之后随着温度梯度的增大,电树枝起始电压开始呈现减小趋势。在电树枝起始机理中,电荷尤其是电子的注入与抽出是引发电树枝的主要原因^[21]。在交流电压的负半周,大量电子由针电极注入XLPE内,由于XLPE内存在深陷阱,部分电子入陷进而形成空间电荷,随着外施电压的极性变化,这些入陷的电子将在正半周电场的作用下获得足够能量从陷阱中脱出,并加速向针电极抽出。在注入-抽出过程中,具有较高动能的电子在运动过程中不断撞击XLPE分子链,导致其发生断裂并在针尖附近产生低密度区。随着低密度区的增大,外施高压将在此区域产生局部放电进而形成初始电树枝,完成电树枝的引起。电树枝起始电压的差异主要由针尖电场的改变及温升导致的XLPE分子聚集态变化引发。由于不同温度下XLPE的介电常数发生了变化,且在50 Hz频率下的10~50°C温度范围内略有升高,从而使得相同电压下针尖处的电场随温度升高而略有降低,而由这一温度区间内的DSC曲线可知,分子链热运动特性并未发生明显改变,因此电场的降低成为导致电树枝起始电压升高的主要原因。随着温度的进一步升高,XLPE分子链自身的热运动逐渐成为影响电树枝起始电压变化的主要因素,在60~90°C温度范围内,XLPE分子链段的热运动逐渐加剧,且晶区开始熔融^[22],在这一过程中自由体积将发生膨胀,从而导致在相同电场下电子获得更高的加速度,使分子链更容易被破坏,这也是温度梯度为50~80°C时电树枝起始电压降低的主要原因。

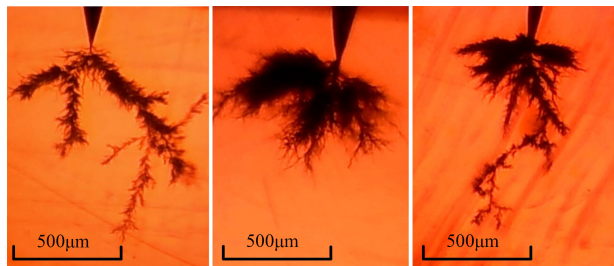
由上述分析可知,在电树枝起始的过程中,由于介电常数差异引起的电场分布不均与由于XLPE聚集态变化引起的自由体积变化共同影响了电树枝的起始电压特性,导致了其非线性变化特征。而

在上述两个原因中,聚集态变化是导致电树枝起始电压在高温区减小的主要原因。

2.3 不同温度梯度下的电树枝生长特性

2.3.1 电树枝形态分布

在本研究中主要出现了3种电树枝形态,分别为主干数量较少的藤枝状电树枝(如图8(a)所示)、树枝通道较细且较为密集的丛林状电树枝(如图8(b)所示)及丛林-藤枝混合状电树枝(如图8(c)所示)。其中藤枝状电树枝主要由几个较少的藤状主干构成,各枝干间距离较远,未出现彼此重叠;而在丛林状电树枝中,无法区分主干,各通道彼此重叠形成浓密的树枝区域;随着温度梯度的变化,某些电树枝并不是单一结构,很多温度梯度下出现了几种树枝形态的复合结构,针尖附近为丛林状,地电极附近为藤枝状。



(a)藤枝状 (b)丛林状 (c)丛林-藤枝混合状

图8 3种典型电树枝形态

Fig.8 Three typical electrical tree morphologies

随着温度梯度的变化,在60 min时刻试样内的电树枝形态出现变化,3种电树枝形态的占比随温度梯度的变化如表2所示。由表2可知,在温度梯度为20℃、30℃时,试样内的电树枝以藤枝状为主,占比90%以上。而随着温度梯度增大,单一藤枝状电树枝占比逐渐减小,同时出现了较多的丛林及丛林-藤枝混合状电树枝,可见针尖附近温度的升高明显改变了树枝形态,而地电极附近较低的温度则限制了低温区电树枝形态的变化。当针尖温度升高至70℃及以上时,藤枝状电树枝形态消失,电树枝以丛林-藤枝混合状为主。

以往研究表明,XLPE中的温度差异会导致不同类型电树枝的生成^[23]。在较低的温度下,XLPE中较常见的树枝类型为树枝状与藤枝状;在高温下的电树枝形态则具有明显差异,大多数呈现短而密集的丛林状形态。但在温度梯度条件下,随着电树枝的生长,其最前端树枝将穿越不同的温区,在这些温区内,XLPE由于温度的差异而处于不同的聚集态,使得树枝通道的形成规律不同。因此在XLPE整体温度都较低的温度梯度(20~30℃)内,

表2 不同温度梯度下的电树枝类型占比

Tab.2 Proportion of electrical tree types under different temperature gradients

温度梯度/℃	藤枝状	丛林状	丛林-藤枝混合状	%
20	100	0	0	
30	90	0	10	
40	50	30	20	
50	20	30	50	
60	20	30	50	
70	0	40	60	
80	0	40	60	

不同温区的跨度较小,XLPE具有接近的聚集态结构,电树枝的生长并不会随着温区的变化形成不同的形态,整体呈现出明显的均一藤枝状结构。随着针尖附近温度的升高,使得初始电树枝通道增多的同时,也会使后续的电树枝生长呈现出明显差异,温度的升高有利于通道内局部放电导致的新树枝通道的形成,这些树枝通道交叠呈现浓密的丛林状特征,开始在针尖附近出现丛林状电树枝区域。而随着丛林状电树枝生长,其树枝边缘将进入温度较低的区域,此时某些丛林状电树枝边缘将随机产生一个或多个藤枝状结构,且在较低温度区域持续生长,因此在温度梯度为40~80℃时,XLPE中出现了大量的丛林状电树枝及丛林-藤枝混合状电树枝。

2.3.2 电树枝生长特性

不同温度梯度下XLPE的电树枝生长趋势具有明显差异。本研究统计了60 min内各树枝形态的典型生长趋势,取其不同生长时间的垂直方向最长树枝为电树枝长度参数,得到如图9所示的各类型电树枝生长趋势。

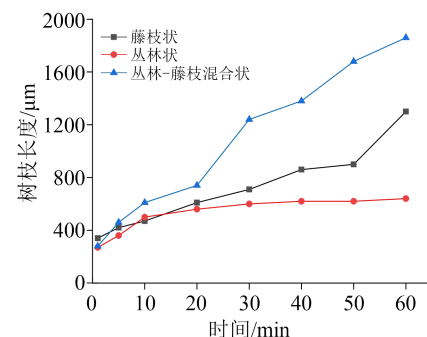


图9 各类型电树枝生长趋势

Fig.9 Growth trend of various types of electrical tree

从图9可以看出,丛林状电树枝在60 min时的电树枝长度最小,约为600 µm,在电树枝开始生长的10 min内,丛林状电树枝生长速度较快,之后电

树枝生长几乎停滞,进入滞长期。导致这一生长趋势的原因是丛林状树枝前端轮廓较整齐,各树枝前端电场较为均匀,这一均匀的电场将抑制通道内局部放电的产生,从而减缓电树枝长度的继续增长。此外,电树枝新通道的形成原因较多,大多数学者认为局部放电产生的高能电子及通道内气体、高温等是促进电树枝生长的主因,而丛林状电树枝内所有通道均与针尖位置互通,内部腔体空间较大,使得通道内无法形成较高的局部气压^[24-25]。因此,较为均匀的电场与内部较低的气压是丛林状电树枝生长缓慢的主要原因。在具有较高温度的针尖附近,初始电树枝呈现丛林状,其较为缓慢的生长速度使其前端无法进入温度较低的XLPE区域,无法形成新的藤枝状结构。

而在某些丛林状电树枝内,当其前端某一电树枝在形成过程中生成较长的树枝通道时,其尖端较高的场强将使其内部发生剧烈的局部放电,而这一部分区域处于较低的温区,新生成的电树枝将与温度梯度为20~30℃时的形态接近,呈现出明显的藤枝状结构,从而出现丛林-藤枝混合状电树枝。由于藤枝状部分是在丛林区域边缘开始生长,因此这一树枝形态并未出现明显的滞长期,在60 min内长度持续增长。丛林-藤枝混合状电树枝的生长趋势表明不同温区的聚集态及电场分布是引起电树枝生长速度变化的重要原因。在温度较为均一的温度梯度(20~30℃)内,试样内温度变化不大,电场分布差异较小,使得藤枝状电树枝最终长度明显短于丛林-藤枝混合状电树枝。

与丛林-藤枝混合状电树枝类似,单一的藤枝状结构电树枝生长无明显的滞长期,60 min时其长度约为1 400 μm,这与已有研究中的藤枝状结构电树枝生长趋势类似^[26-27]。

2.3.3 电树枝击穿特性

为进一步分析不同温度梯度下的电树枝击穿概率,本研究进行了120 min的电树枝实验,以观测这一时长内的电树枝击穿情况。图10为不同温度梯度下的电树枝击穿概率,每种温度梯度下的试样数量为10。从图10可以看出,随着试样内丛林状电树枝的增多,120 min时电树枝的击穿概率明显降低,而温度梯度为20~60℃时,电树枝击穿概率较高,这是由于藤枝状电树枝生长速度快,在120 min内较易生长至地电极而发生击穿。

3 结论

本研究搭建了不同温度梯度下XLPE的电树枝

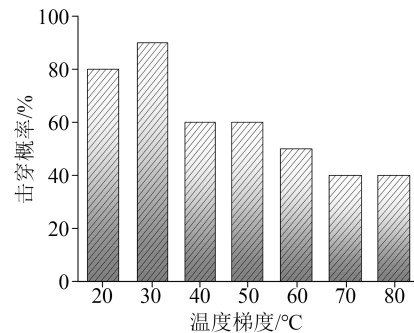


图10 各温度梯度下电树枝击穿概率

Fig.10 Breakdown probability of electrical tree under different temperature gradients

测试平台,获得了各温度梯度下的电树枝特征,并统计了电树枝类型,分析了电树枝生长趋势,得到以下主要结论:

(1)不同温度梯度下XLPE中电树枝的起始特征明显不同,较高的针尖温度将形成通道数量较多的初始电树枝。

(2)不同温度下的XLPE材料聚集态及介电特性差异使得电树枝起始电压不同,在本研究温度范围内,温度梯度为40℃时,XLPE具有最高的电树枝起始电压。

(3)在本研究温度范围内,实验中共出现3种电树枝类型,温度梯度为20~30℃时主要为藤枝状电树枝,随着针尖温度的升高逐渐出现丛林-藤枝混合状及丛林状电树枝,最终藤枝状电树枝消失。

参考文献:

- [1] 傅晓军,苏杰,马英新,等.海上平台电力组网中电网智能化升级研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(15):146-147.
- [2] 向光宇,司江舸.海上石油设施电力系统抗晃电技术研究[J].石化技术,2021,28(6):74-75.
- [3] 郑春生,埕岛油田.海底电缆故障原因与分布规律[J].电气应用,2017,36(10):28-32,92.
- [4] 刘鑫伟,刘娅.66 kV海上风电场用三芯XLPE绝缘海底电缆设计方案的可行性分析[J].电工技术,2020(22):63-65.
- [5] 赵鑫,韩涛,马婷婷,等.交直流叠加电压下硅橡胶内电树枝特性[J].高电压技术,2021,47(9):3173-3180.
- [6] 朱晓辉.交联工艺对交联聚乙烯绝缘特性的影响[D].天津:天津大学,2010.
- [7] DU B X, HAN T, GAO Y, et al. Dependence of electrical treeing behavior on cross-linking temperature of XLPE[C]//2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. West Lafayette, USA:IEEE,2010.
- [8] DU B X, HAN T, SU J G. Effect of low temperature on tree characteristics in silicone rubber with different power frequency[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014, 21(4):1880-1886.
- [9] 王霞,陈驰,郝佳琪,等.温度梯度场下同轴电缆中空间电荷测量

- 波形的算法矫正[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1873-1880, 1925.
- [10] 黄炬城, 封建宝, 吴木木, 等. 高压直流挤包绝缘海陆复合电缆温度场及空间电荷分析[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 118-127.
- [11] 李志坚, 张莹, 田猛, 等. 直流-温度复合场下环氧树脂内电树枝生长特性研究现状[J]. 绝缘材料, 2021, 54(3): 10-17.
- [12] 马婷婷, 杜伯学, 韩涛, 等. 温度梯度下 SIR/EVA 共混对电缆附件电树枝生长的抑制研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4229-4235.
- [13] DU B X, TIAN M, SU J G, et al. Temperature gradient dependence on electrical tree in epoxy resin with harmonic superimposed DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 270-278.
- [14] 张云霄, 周远翔, 张征辉, 等. 温度梯度叠加极性反转电压下硅橡胶电荷输运及电树枝特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4266-4276.
- [15] ZHU L, DU B, HOU K. Effects of temperature gradient on electrical tree initiation and breakdown phenomenon in XLPE under harmonic superimposed DC voltage[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7586-7596.
- [16] FANG S, HAN T, ZHU X. Effect of steep temperature gradient on electrical tree in XLPE[C]//2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Tianjin, China: IEEE, 2018: 1-2.
- [17] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 10 kV($U_m=12$ kV)至 110 kV($U_m=126$ kV)交联聚乙烯绝缘大长度交流海底电缆及附件 第一部分: 试验方法和要求: JB/T 11167.1—2011[S]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 12-13.
- [18] 耿蒲龙. 矿井电缆交流杂散电流产生机理及分布规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [19] 戴锡泽, 郝建, 刘智谦, 等. 交流 500 kV 交联聚乙烯海缆主绝缘介质的频域介电及击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(11): 50-58.
- [20] 乔同磊. 高压交流交联聚乙烯电缆绝缘的性能测试与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [21] SHIMIZU N, LAURENT C. Electrical tree initiation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 651-659.
- [22] 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): 47-53.
- [23] CHEN X, XU Y, CAO X, et al. Electrical treeing behavior at high temperature in XLPE cable insulation samples[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2841-2851.
- [24] 杨敏, 王新, 童小忠, 等. 环氧树脂/ Al_2O_3 纳米复合材料直流电树枝及局部放电特性研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(6): 49-55.
- [25] 苏金刚, 杜伯学, 李进, 等. 直流电场中高压电缆绝缘电树枝劣化研究现状[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 66-72.
- [26] 郑晓泉, CHEN G, DAVIES A E. 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[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 79-85.
- [27] 鲍明晖. 交联聚乙烯中电树枝的生长特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

收稿日期: 2021-12-20 修回日期: 2022-05-10

作者简介: 韦敏(1983-), 男(壮族), 广西宜州人, 高级工程师, 研究方向为油田开发及海上电网安全。