

引用格式:刘亚茹,张雨若,郭子晗,等.热老化对XLPE电缆电树枝特性的影响研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):279-288.

Citation: LIU Yaru, ZHANG Yuruo, GUO Zihan, et al. Study on effect of thermal aging on electrical tree characteristics of XLPE cables[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 279-288.

## 热老化对 XLPE 电缆电树枝特性的影响研究

刘亚茹<sup>1</sup>, 张雨若<sup>2</sup>, 郭子晗<sup>1</sup>, 万武艺<sup>1</sup>, 程艺茹<sup>1</sup>, 张志劲<sup>3</sup>, 马 壮<sup>4</sup>, 张东东<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 国网江苏省电力有限公司扬州供电公司, 江苏 扬州 225000; 3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 4. 无锡江南电缆有限公司, 江苏 无锡 214251)

**摘要:** 交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)绝缘电缆受长期热老化的影响,其理化特性和介电性能会发生改变,影响电树枝的生长过程等电学行为。该文研究热老化对 XLPE 电缆绝缘电树枝生长特性的影响。对加速热老化样品进行电树枝生长试验,并利用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)、傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测试和宽频介电谱测试研究 XLPE 材料微观结构与介电性能的变化。研究表明:重结晶反应和热氧反应是导致结晶度 $J_c$ 和羰基指数 $Q$ 变化的主要原因,进而导致 XLPE 中的极性分子发生变化,使介电参数呈先缓慢下降,后迅速上升的趋势。研究还发现热老化评价指标 $J_c$ 、 $\epsilon_r$ 和 $\tan\delta$ 与电树枝生长速率 $G_{10}$ (10 kV 时电树枝的生长速率)、 $G_{12}$ (12 kV 电树枝的生长速率)之间具有显著性相关,通过多项式拟合分析,在 $G_{10}$ 、 $G_{12}$ 与热老化评价指标之间建立等效关系。该研究在已知 XLPE 材料理化特性和介电性能的前提下,可判断 XLPE 电缆材料电树枝老化程度,为电缆绝缘和寿命预测提供一定的参考。

**关键词:** 交联聚乙烯电缆;热老化;理化特性;介电性能;电树枝生长特性

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.028 中图分类号:TM215;TM247 文章编号:1673-9140(2024)05-0279-10

### Study on effect of thermal aging on electrical tree characteristics of XLPE cables

LIU Yaru<sup>1</sup>, ZHANG Yuruo<sup>2</sup>, GUO Zihan<sup>1</sup>, WAN Wuyi<sup>1</sup>, CHENG Yiru<sup>1</sup>,  
ZHANG Zhijin<sup>3</sup>, MA Zhuang<sup>4</sup>, ZHANG Dongdong<sup>1</sup>,

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Yangzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Wuxi Jiangnan Cable Co., Ltd., Wuxi 214251, China)

**Abstract:** The physicochemical properties and dielectric properties of cross-linked polyethylene (XLPE) insulated cables can change under long-term thermal aging, affecting their electrical behavior, such as the growth process of electrical trees. This paper investigates the impact of thermal aging on the growth characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation. Electrical tree growth tests were conducted on accelerated thermally aged samples, and differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and broadband dielectric spectroscopy tests were used to study changes in the microstructure and dielectric properties of XLPE materials. The results indicate that recrystallization reactions and thermal-oxidative reactions are the main causes of changes in crystallinity ( $J_c$ ) and carbonyl index ( $Q$ ), which subsequently lead to changes in polar molecules within XLPE. This results in a trend where dielectric parameters initially decrease slowly and then increase rapidly. The study also found significant correlations between the thermal aging evaluation indicators ( $J_c$ ,  $\epsilon_r$ , and  $\tan\delta$ ) and the growth rates of electrical trees at 10kV ( $G_{10}$ ) and 12kV ( $G_{12}$ ). Equivalent relationships between  $G_{10}$ ,  $G_{12}$ , and the thermal aging

收稿日期:2024-02-04;修回日期:2024-03-19

基金项目:国家自然科学基金(52077018);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023101);江苏高校“青蓝工程”(SJS202414)

通信作者:张东东(1991—),男,博士,副教授,主要从事高电压绝缘放电与劣化特性、电力设备状态检测与故障诊断等方面的研究;

E-mail: zhangdd@njit.edu.cn

evaluation indicators were established through polynomial fitting analysis. Given the known physicochemical properties and dielectric properties of XLPE materials, the degree of electrical tree aging in XLPE cable materials can be determined, providing a reference for cable insulation assessment and lifespan prediction.

**Key words:** cross-linked polyethylene cable; thermal aging; physical and chemical properties; dielectric properties; electrical tree growth characteristics

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电力电缆以其优越的绝缘性能、热性能与机械性能而广泛应用于高压电缆<sup>[1-2]</sup>。XLPE电缆由于长期暴露在高温下,其电气性能发生退化,给其电缆绝缘性造成了不可逆的损伤,增大了电树枝形成甚至绝缘失效的概率<sup>[3-5]</sup>。

近年来,人们对XLPE电缆绝缘的热老化问题进行了广泛的研究,在研究过程中提出了一些老化评价方法,对其电气特性与理化特性进行评价。文献[6]利用交流击穿实验对XLPE电缆绝缘的热老化性能进行研究,发现绝缘击穿强度随老化时间的延长而降低。文献[7]通过傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测试和差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)等方法,从微观层面对热老化后XLPE电缆的绝缘性能进行了机理分析。其研究结果表明:当XLPE电缆短时高热运行在XLPE熔融温度范围内时,由于重结晶效应,晶体结构趋于完善,绝缘性能会得到一定的改善。虽然人们对热老化后XLPE电缆绝缘的理化、机械和电学性能进行了大量研究,但鲜有将其与电缆绝缘的电树枝化进行关联分析的研究。

现有研究成果表明,电树枝化是导致XLPE绝缘层破坏的主要原因。一旦电树枝穿过绝缘层,就会发生电击穿<sup>[8-9]</sup>。目前,对电树枝的研究主要集中在短期特征,如高温<sup>[10]</sup>和各种频率等<sup>[11]</sup>。文献[10]研究了在高温下,XLPE电缆绝缘的电树枝化,发现温度对电树枝的形成有显著影响。文献[11]研究了XLPE电缆电树枝在不同频率下的引发特性,确定了电树枝化随频率变化的相关规律。然而,热老化后电缆绝缘相应的材料变化对电树枝化的影响的研究较为鲜见。本文将XLPE绝缘电缆热老化过程产生的理化特性、介电性能变化与电树枝特性进行关联性分析,以XLPE电缆切片作为研究对象,先在实验室对不同热老化程度的XLPE电缆样品进行了电树枝生长测试。再采用FTIR、DSC和宽频介电谱测试,对热老化后的XLPE绝缘材料理化特性

和介电性能变化进行表征。最后,基于实验结果,通过多元拟合方法,建立电树枝生长特性与热老化评价指标(结晶度 $J_c$ 、相对介电常数 $\epsilon_r$ 和介质损耗正切值 $\tan \delta$ )之间的关系。

## 1 实验设置与步骤

### 1.1 样品制备

本文从新出厂的某商用XLPE电缆中切取3 mm厚的XLPE电缆绝缘切片,将其作为样品进行实验。参考文献[12],将样品置于人工热老化箱150 °C的环境中,对其进行240 h的加热老化试验。此次热老化试验样品的详细情况见表1。

表1 热老化试验样品数据

Table 1 Detailed list of thermal aging test samples

样品	温度/°C	热老化时间/h
A <sub>1</sub>	—	0
A <sub>2</sub>	150	48
A <sub>3</sub>	150	96
A <sub>4</sub>	150	144
A <sub>5</sub>	150	192
A <sub>6</sub>	150	240

### 1.2 电树枝实验

实验前,将某商用XLPE电缆样品裁剪为6个30 mm×10 mm×3 mm的矩形板,分别记为A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub>,并在样品中插入直径为1 mm,半径为5 μm的钨针电极,该针尖与接地电极之间的距离为3.0±0.3 mm。钨针插入后,将样品放入60 °C的鼓风干燥箱中干燥10 min,以消除钨针针尖附近产生的机械应力。最后,将处理完成的试样用绝缘胶带固定在平整的接地电极上,该电极选用0.3 mm厚的铝片制成,形成针板电极,如图1所示。

本实验采用针板电极建立电树枝实验平台,如图2所示。本实验采用TQSB型3 kVA/50 kV交流变压器供电。为避免界面闪络,样品被浸在变压器油中。在测试过程中,由显示器、AO-HD 228S型电子显微镜及其附带的电荷耦合器件相机(charge coupled device, CCD)组成的实时显微镜数字图像

系统放置在测试容器后,并在容器下放置冷光灯,观察电树枝的生长情况。在图 2 中,T1为稳压器,T2为交流变压器,C1、C2均为电容分压器(500:1)。

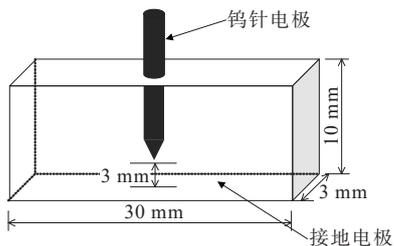


图 1 针板电极模型

Figure 1 Needle plate electrode model

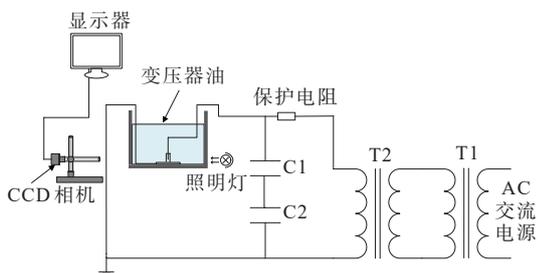


图 2 电树枝实验平台

Figure 2 Electrical treeing experimental platform

在进行电压加压时,以 0.1 kV/s 的速率升压,直到观察到 XLPE 电缆样品中电树枝被引发。电树枝引发实验结束后,将这些样品置于无尘环境中 7 d,释放残余电荷。利用图 2 所示的实时显微镜数字图像系统,分别在 10、12 kV 电压下进行电树枝生长实验,直至样品中电树枝长度(记为  $L$ )达到 2 000  $\mu\text{m}$ 。电树枝的长度  $L$  指的是其末端与针尖之间的最大平行距离。

### 1.3 理化特性测试

首先,通过 FTIR 测试,比较不同热老化程度 XLPE 电缆绝缘的理化性能,得到主要官能团在 500~1 000  $\text{cm}^{-1}$  范围的吸收峰高度。

其次,通过 DSC 实验,对样品的热稳定性进行测试。在不同热老化时间下,测试样品约为 10 mg,测试时保护气体为氮气(20 mol/min),升温速率为 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,直至加热到 160  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.4 宽频介电谱测试

本实验采用德国 Novo Control 公司生产的 Concept 80 宽频介电谱仪,实验温度为 25  $^{\circ}\text{C}$ ,测试频率范围为  $10^{-1}\sim 10^7$  Hz。先将 XLPE 样品裁剪为直径为 20 mm 的圆片状样品;再用乙醇清洗掉样品表面杂质;最后,测试 XLPE 电缆在老化过程中的相

对介电常数和介质损耗正切值频谱,研究 XLPE 电缆绝缘的老化程度。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 电树枝生长实验

在 XLPE 绝缘电缆样品的电树枝成功引发后,进行电树枝生长实验,每隔 5 min 观察并记录电树枝生长情况,研究在不同热老化程度下样品的电树枝生长过程。当电树枝长度达到约 2 000  $\mu\text{m}$  时,停止记录。

随着实验时间的延长,XLPE 电缆样品的电树枝长度不断增加。为定量评估电树枝的生长特性,本文提出了电树枝生长速率这一参数,即不同阶段电树枝长度( $L$ )与生长时间的比值,以此对不同热老化时间下样品的电树枝生长程度进行量化分析。在不同热老化时间下的 XLPE 电缆样品的电树枝生长速率如图 3 所示。在图 3 中,10 kV 电压下的电树枝的生长速率记为  $G_{10}$ ,12 kV 电压下的电树枝的生长速率记为  $G_{12}$ ,每个柱上方数字为该 XLPE 电缆样品在该热老化时间的电树枝生产速率。

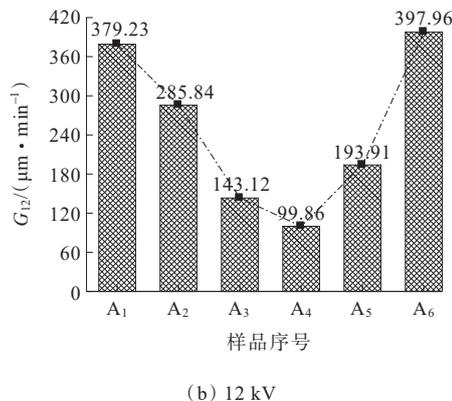
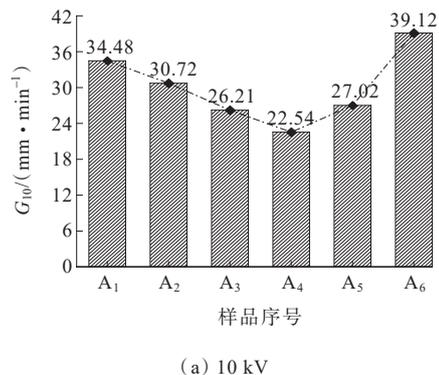


图 3 不同热老化时间的样品与电压下 XLPE 电缆样品的电树枝生长速率

Figure 3 Electrical tree growth rate of samples under different thermal aging times and voltages

从图3中可以看出,在不同电压下XLPE电缆样品的电树枝的生长速率变化趋势基本一致:0~144 h,电树枝生长速率逐渐减小,144~240 h,电树枝生长速率逐渐增加。在10 kV电压下,样品A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>的电树枝生长速率比样品A<sub>4</sub>的分别增加了52.97%、36.29%和16.28%,样品A<sub>5</sub>和A<sub>6</sub>的电树枝生长速率分别比样品A<sub>4</sub>的增加了19.88%和73.56%。在12 kV电压下,样品A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>和A<sub>3</sub>的电树枝生长速率相较于样品A<sub>4</sub>的分别增加了279.76%、186.24%、43.32%,且样品A<sub>5</sub>和A<sub>6</sub>的电树枝生产速率比A<sub>4</sub>的分别增加了94.19%、298.52%。

通过比较在10、12 kV电压下不同热老化程度XLPE电缆样品的电树枝生长速率发现,外施电压的增加对XLPE电缆样品电树枝生长速率的变化有显著影响。文献[13]指出:这主要是因为随着外施电压的增加,针尖周围的局部电场增大,导致XLPE电缆绝缘局部放电增加,电树枝劣化速率加快。

不同热老化时间的XLPE电缆样品分别在10、12 kV 2种电压下的电树枝生长形态概率如图4所示。在10 kV电压下,不同热老化时间下的XLPE电缆样品的电树枝典型形态如图5所示。

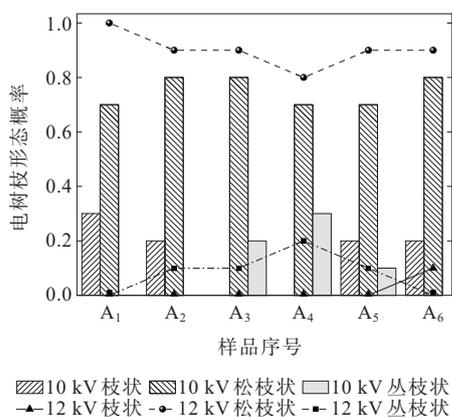


图4 不同热老化时间的样品对应的电树枝形态概率

Figure 4 Probability of electrical tree morphology corresponding to different thermal ageing times

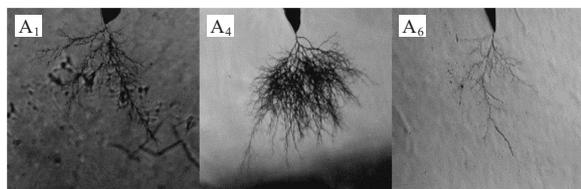


图5 10 kV电压下,不同热老化时间的电树枝典型形态

Figure 5 Typical morphology of electrical trees under 10 kV voltage with different thermal ageing times

在图5中,由于XLPE电缆样品加工状态和实验条件不同,形成的电树枝形状也各异。这些电树枝形状可分为3种典型的形状<sup>[14-15]</sup>:枝状(A<sub>1</sub>)、丛林状(A<sub>4</sub>)、松枝状(A<sub>6</sub>)。

从图4中可以看出,XLPE电缆样品在10、12 kV两种电压下,其电树枝形态的概率变化具有相同的规律:枝状电树枝整体出现的概率最小,变化规律不明显;而松枝状电树枝在热老化144 h时生长概率降到最小,之后生长概率回升;丛林状电树枝的生长概率呈先上升、后降低的变化趋势,在热老化144 h时,其生长概率达到最大。从图5中可以看出,A<sub>4</sub>典型电树枝形态以丛林状为主。因此,松枝状电树枝和丛林状电树枝受热老化影响较为明显。

## 2.2 理化特性试验

### 2.2.1 FTIR分析

FTIR测试是常用的研究材料聚物理化性质老化的评价方法。

在不同热老化时间下的XLPE绝缘电缆样品的FTIR光谱如图6所示。文献[16]指出,亚甲基(-CH<sub>2</sub>-)特征吸收峰的对应波数为720、1463和2914 cm<sup>-1</sup>。羰基(C=O)基团对应吸收峰波数为1720 cm<sup>-1</sup>,该吸收峰被广泛用于确定XLPE绝缘电缆热老化程度,FTIR光谱图中位于2010 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰基本不随XLPE热老化发生变化。因此,为清楚地反映XLPE在热老化过程中羰基含量的变化,将FTIR图谱中位于1720 cm<sup>-1</sup>处的吸收强度与位于2010 cm<sup>-1</sup>处的吸收强度之比定义为羰基指数Q,即

$$Q = \frac{A_{1720}}{A_{2010}} \quad (1)$$

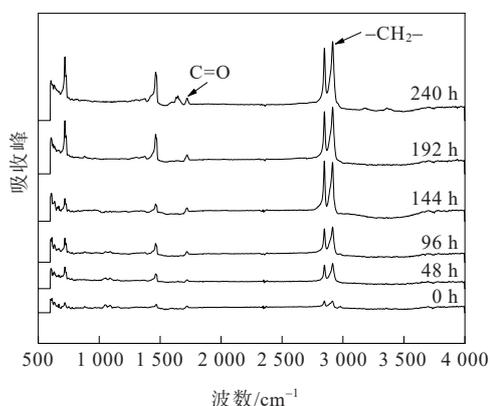


图6 不同热老化时间XLPE电缆样品的FTIR分析结果

Figure 6 FTIR analysis results of samples with different thermal ageing time

式中,  $A_{1720}$  为 FTIR 图谱中羰基的吸收强度位于 FTIR 图谱中  $1720\text{ cm}^{-1}$  处, 该参数对热老化敏感;  $A_{2010}$  为 FTIR 图谱中位于  $2010\text{ cm}^{-1}$  处的吸收强度, 该参数对热老化不敏感。

将 FTIR 图谱中位于  $2914\text{ cm}^{-1}$  附近的吸收强度  $A_{2914}$  与不被热氧老化影响的位于  $2010\text{ cm}^{-1}$  处吸收强度  $A_{2010}$  的比值定义为亚甲基指数  $N$ :

$$N = \frac{A_{2914}}{A_{2010}} \quad (2)$$

羰基指数常用于表征 XLPE 电缆样品的氧化程度, 亚甲基指数常用于表征样品的老化程度。热老化时间对羰基含量与亚甲基含量的影响见表 2。由表 2 可知, 随着热老化时间的增加, 羰基基团和亚甲基对应的特征吸收峰均不断上升。这说明氧化反应存在于整个老化过程中, 且氧化程度随时间延长逐渐增强, 老化程度也随时间延长逐渐加深。因此, 可以通过记录不同热老化时间下羰基指数和亚甲基指数的含量变化, 反映 XLPE 电缆样品的氧化程度和老化程度。

表 2 不同热老化时间下样品的羰基指数  $Q$  和亚甲基指数  $N$

Table 2 Carbonyl index  $Q$  and methylene index  $N$  of samples under different thermal aging times

样品	$A_{1720}$	$A_{1720}$	$A_{1720}$	$Q$	$N$
A <sub>1</sub>	0.006 3	0.010 9	0.005 3	1.197 3	2.072 2
A <sub>2</sub>	0.008 2	0.023 6	0.006 7	1.219 3	3.498 9
A <sub>3</sub>	0.010 0	0.033 0	0.008 1	1.228 8	4.068 6
A <sub>4</sub>	0.012 4	0.055 2	0.010 1	1.232 0	5.474 4
A <sub>5</sub>	0.017 8	0.062 5	0.013 6	1.308 6	4.596 4
A <sub>6</sub>	0.020 4	0.070 2	0.015 4	1.362 2	4.555 3

由表 2 还可知, 在整个热老化过程中, 羰基指数和亚甲基指数的变化过程可以分为 2 个不同的阶段。在热老化的最开始 144 h 内(即第一阶段), 羰基指数缓慢增加, 亚甲基指数迅速增加; 但在 144 h 后(即第二阶段), 羰基指数增长加快, 亚甲基指数开始降低。文献[17]指出: 这一现象是 XLPE 材料中存在的抗氧化剂抑制了其周围的一些热氧反应导致的。抗氧化剂特征吸收峰会随着热老化时间的延长逐渐变小。因此, 这一现象说明 XLPE 中的抗氧化剂在其热老化过程中逐渐被消耗。

在第一阶段中, 羰基指数增长率较小, 亚甲基含量相对较多, 样品 A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub> 和 A<sub>4</sub> 的亚甲基指数比 A<sub>1</sub> 的亚甲基指数分别增加了 68.85%、96.34% 和 164.18%。这说明在初期, XLPE 样品存在大量抗氧化剂, 氧化

反应被抑制, 氧气消耗的 C—H 键减少, 即 C—H 键断裂后的产物与氧的结合率下降<sup>[18]</sup>。在第二阶段中, 羰基含量增多表明抗氧化剂被大量消耗, 热氧反应加剧, 氧气消耗的 C—H 键增多, 导致亚甲基数量减少。

2.2.2 DSC 测试

在 DSC 实验中, XLPE 电缆绝缘样品在热老化过程中的晶体聚集结构的变化对其老化性能有很大的影响。样品 A<sub>1</sub>~A<sub>6</sub> 的 DSC 实验结果如图 7 所示。在不同热老化时间下 XLPE 电缆样品的 DSC 参数见表 3。在表 3 中,  $T_m$  为熔融温度;  $\Delta H_m$  为熔融热焓。

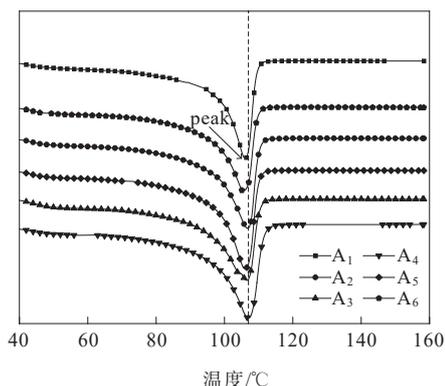


图 7 DSC 测试结果

Figure 7 DSC test results

表 3 不同热老化时间下 XLPE 样品的 DSC 参数

Table 3 DSC parameters of XLPE samples under different thermal aging times

样品	热老化时间/h	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
A <sub>1</sub>	0	106.23	81.23
A <sub>2</sub>	48	106.76	86.78
A <sub>3</sub>	96	106.71	89.23
A <sub>4</sub>	144	107.01	100.43
A <sub>5</sub>	192	106.04	88.02
A <sub>6</sub>	240	105.31	77.31

由图 7 和表 3 可知, 随着热老化时间的增加, 熔融峰 peak 点的变化过程可分为 2 个时期: 0~144 h, 随着热老化时间增加, 熔融峰面积不断扩大, 熔融温度逐渐升高; 当热老化时间超过 144 h 后, 熔融峰面积开始缩小, 熔融温度逐渐降低。

为对不同热老化时间下样品的结晶度进行定量, 本文引入了与焓聚变相关的结晶度指数, 即

$$J_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $J_c$  为样品结晶度;  $\Delta H_m$  为熔融热焓;  $\Delta H_0$  为 100% 样品的熔融热焓, 其值为 287.3 J/g。

为进一步判断聚合物的结晶状态, 引入了晶体单位面积的表面能  $\sigma_e$ <sup>[19]</sup>, 即

$$\sigma_e = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{T_m}{T_0} \right) \Delta H_{m0} L_B \quad (4)$$

式中,  $T_m$  为熔融温度;  $T_0$  为无限厚晶体的平衡熔融温度,  $T_0 = 414.6$  K;  $\Delta H_{m0}$  为理想聚乙烯晶体单位体积的聚变焓, 其值为  $2.88 \times 10^8$  J/m<sup>3</sup>;  $L_B$  为片层的厚度, 其值为 10 nm。XLPE 样品结晶度和晶体单位面积的表面能在不同热老化时间下的变化情况见表 4。

表 4 不同热老化时间下样品  $J_c$  和  $\sigma_e$  的变化

Table 4 Variation of  $J_c$  and  $\sigma_e$  of samples with different thermal aging times

样品	热老化时间/h	$J_c/\%$	$\sigma_e/(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$
A <sub>1</sub>	0	28.34	0.107 1
A <sub>2</sub>	48	30.13	0.106 9
A <sub>3</sub>	96	31.06	0.106 9
A <sub>4</sub>	144	34.87	0.106 8
A <sub>5</sub>	192	30.79	0.107 2
A <sub>6</sub>	240	26.91	0.107 4

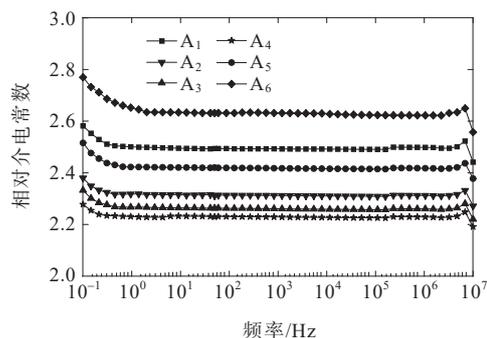
由表 4 可知, 随着热老化程度加深, 结晶度  $J_c$  呈先增加、后降低的趋势。热老化时间 144 h 为结晶度变化的转折点, 此时的结晶度为 34.87%, 样品 A<sub>4</sub> 的结晶度较样品 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 和 A<sub>3</sub> 的结晶度分别提高了 23.04%、15.73% 和 12.27%, 样品 A<sub>5</sub> 与 A<sub>6</sub> 的结晶度比 A<sub>4</sub> 的结晶度分别降低了 11.70% 和 22.83%。

在表 4 中,  $\sigma_e$  的变化规律可以分为两个阶段。在 0~144 h 内,  $\sigma_e$  随热老化时间的延长而减小, 而 144~240 h 内, 随热老化时间的延长而增大。文献[20]指出:  $\sigma_e$  可以反映样品内结晶的完善程度,  $\sigma_e$  值越小, 晶体结构越完善, 稳定性越高, 熔融温度也越高; 反之,  $\sigma_e$  值越大, 晶体结构被破坏程度越高, 稳定性越低, 熔融温度也越低。表 4 的  $\sigma_e$  数值变化规律与结晶度变化规律相符, 表明 XLPE 晶体含量的变化呈先升高、后下降的趋势。这主要是由于重结晶反应和热氧反应分别导致了晶体的增加与降解<sup>[21]</sup>。

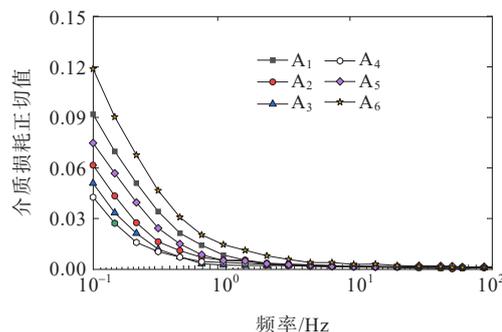
### 2.3 介电性能测试

为进一步评价 XLPE 电缆样品的热老化程度与绝缘性能, 采用宽频介电谱测试仪, 得到不同老化程度下的 XLPE 电缆样品的介电性能参数。不同老

化阶段中 XLPE 电缆样品相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗正切值  $\tan \delta$  随频率变化的曲线如图 8 所示。



(a) 相对介电常数  $\epsilon_r$



(b) 介质损耗正切值  $\tan \delta$

图 8 不同热老化时间下 XLPE 的介电参数

Figure 8 Dielectric parameters of XLPE under different thermal aging times

从图 8 中可以看出, 未老化与热老化后的 XLPE 电缆样品相对介电常数  $\epsilon_r$  与介质损耗的正切值  $\tan \delta$  均呈随频率的降低而逐渐增大的趋势。随着热老化程度加深,  $\epsilon_r$  和  $\tan \delta$  出现先下降、后上升的变化趋势。这与文献[22]中通过对 3 种热老化温度下的 XLPE 电缆试样进行扫频测试所得的结果相同, 即 XLPE 电缆样品在热老化过程中的介质损耗因数并非随着老化时间的延长而单调递增, 而是会在老化过程中出现先减小、再增大的趋势。低频区的介质损耗正切值  $\tan \delta$  可以作为 XLPE 电缆老化程度的特征指标<sup>[23]</sup>。因此, 可取在 0.1 Hz (低频) 下的  $\tan \delta$  与在频率 50.0 Hz 下的  $\epsilon_r$  作为主要研究对象, 分析其老化规律。频率为 0.1 Hz 时的  $\tan \delta$  与频率为 50.0 Hz 时的  $\epsilon_r$  随热老化时间变化的曲线如图 9 所示。

一般认为, 在 XLPE 绝缘材料的热老化过程中, 样品的聚集态结构和性能的劣化源于氧化反应所引发的热氧降解<sup>[24]</sup>。因此, 可从热老化程度对氧化反应的影响角度来分析该热老化过程。从图 9 中可以看出, 在整个加速热老化过程中, XLPE

电缆样品的介电性能参数变化与其结晶度的变化规律相似。在热老化前期(0~144 h),短暂的热老化使 XLPE 电缆样品的结晶区增加,晶体之间的结构更加紧密。且由于早期抗氧化剂并未消耗尽,在其抑制作用下,热氧反应较弱,发生的反应以重结晶反应为主,XLPE 电缆样品中极性基团较少,极化作用被减弱。结晶度的提升使得初步热老化后的 XLPE 电缆样品整体的介电性能得到改善<sup>[22]</sup>,其相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗正切值  $\tan \delta$  出现一定幅度的下降趋势;在热老化后期(144~240 h),抗氧化剂几乎耗尽,这导致热氧反应加剧,一些大分子链断裂成大量的小分子,进入自加速反应阶段。由氧化产生的含羰基基团极性产物(如酮、醛、酯和羧酸等)迅速增加,提高了极化强度,且主链的断裂使偶极子更容易反转,进一步加大了损耗<sup>[25-26]</sup>。因此,XLPE 电缆样品的相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗正切值  $\tan \delta$  出现显著上升,XLPE 电缆样品材料的绝缘性能急剧下降。

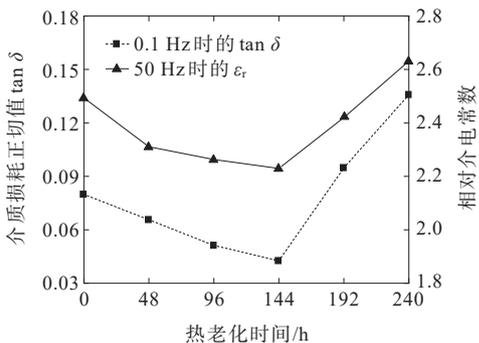


图 9 0.1 Hz 时的  $\tan \delta$  值及 50 Hz 时的  $\epsilon_r$  值随热老化变化的曲线

Figure 9 Curves of  $\tan \delta$  values at 0.1 Hz and  $\epsilon_r$  values at 50 Hz as a function of thermal aging

### 3 讨论

本文通过理化特性测试得到了 XLPE 电缆样品相关参数的变化规律。根据 FTIR 和 DSC 的结果分析可知,在前 144 h 内,由于热氧反应受抑制,在重结晶反应的作用下,一部分无定形区会转变为结晶区,材料中的低密度区也会越来越小(低密度区是引发击穿的主要区域),极性分子相继减少,相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗正切值  $\tan \delta$  开始下降。因此,XLPE 电缆样品中的电树枝不易引发生长, $G_{10}$ 、 $G_{12}$  均呈下降趋势。此外,由于绝缘弱区缩小,针尖附近将会生长出细小的放电通道,致使小区域的放

电可能性增加,在显微镜下更有可能观察到丛状电树枝。从图 4 中可以看出,丛状电树枝的出现概率上升了 30%。而在 144 h 后,XLPE 电缆样品中的抗氧化剂耗几乎耗尽,热氧反应对 XLPE 电缆样品中晶体的降解起着重要作用,极性分子大量增加,相对介电常数  $\epsilon_r$  和介质损耗正切值  $\tan \delta$  显著上升。实验表明:在此过程中,电树枝的生长速率会迅速增加,导致放电区域数量增加,低密度区扩大,进而在材料中形成更大的局部放电区,观察到更长的放电通道。因此,松枝状和枝状电树枝的生长概率会增加。从图 4 中还可以看出,在 12 kV 电压下,XLPE 电缆样品的松枝状电树枝的生长概率上升了 10%,枝状电树枝的生长概率上升了 20%。

为定量分析热老化过程对 XLPE 电缆样品电树枝生长速率的影响,将反映热老化程度的理化特性参数与介电性能参数(0.1 Hz 下的  $\tan \delta$  和 50 Hz 下的  $\epsilon_r$ ) 共同定义为热老化评价指标,并采用 Person 相关分析法<sup>[27-28]</sup> 进行相关性计算。Person 相关系数  $\rho$  可用来表征 2 个变量之间的相关程度与方向,  $|\rho|$  越接近 1,变量之间相关性越强。计算结果见表 5、6。

表 5 热老化评价指标与  $G_{10}$  的相关性计算结果

Table 5 Calculation results of correlation between thermal aging evaluation indicators and  $G_{10}$

热老化评价指标	相关系数 $\rho$	显著性水平	相关性
$J_c$	-0.951	0.004	负相关
$\sigma_e$	0.776	0.070	-
Q	0.419	0.408	-
N	-0.482	0.333	-
$\epsilon_r$	0.904	0.013	正相关
$\tan \delta$	0.935	0.006	正相关

表 6 热老化评价指标与  $G_{12}$  的相关性计算结果

Table 6 Calculation results of correlation between thermal aging evaluation indicators and  $G_{12}$

热老化评价指标	相关系数 $\rho$	显著性水平	相关性
$J_c$	-0.921	0.009	负相关
$\sigma_e$	0.700	0.122	-
Q	0.263	0.614	-
N	-0.618	0.191	-
$\epsilon_r$	0.863	0.027	正相关
$\tan \delta$	0.891	0.017	正相关

由表5、6可知,热老化评价指标与 $G_{10}$ 、 $G_{12}$ 的相关系数均在0.800以上,说明这2个指标之间强相关;且显著性水平低于0.050,说明它们之间相关性显著。为量化参数之间的具体关系,使用数据处理软件Origins进行多项式回归拟合分析,拟合结果图10所示。

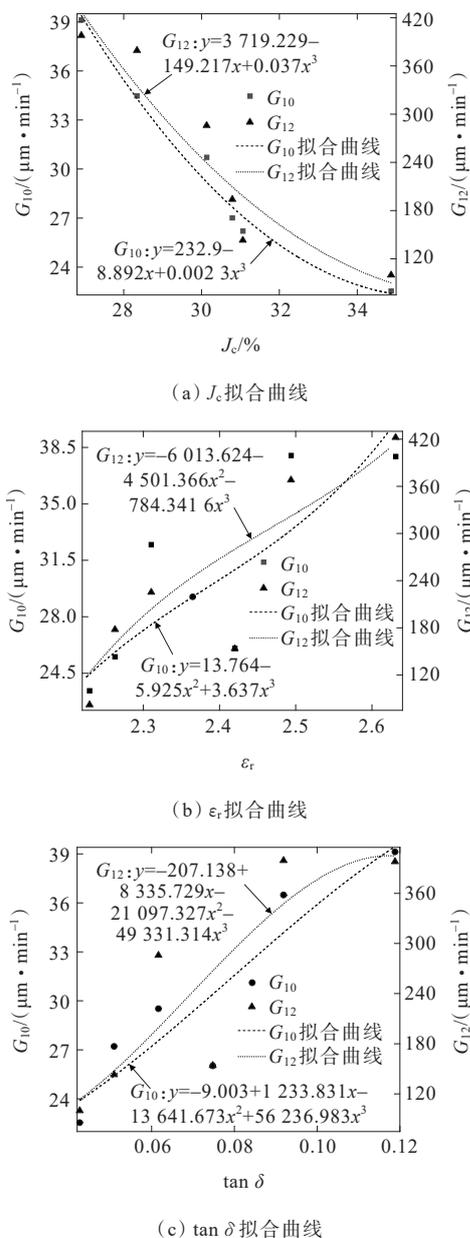


图10 热老化评价指标与电树枝生长速率的拟合分析  
Figure 10 Analysis of correlation between thermal aging evaluation parameters and growth rate of electrical trees

通过多项式回归拟合分析,得到热老化评价指标与电树枝生长速率之间的关系式。在图10中, $y$ 为电树枝生长速率, $x$ 为热老化评价指标。拟合优度情况见表7,该拟合效果较好。

综上所述,可分别得到 $J_c$ 、 $\epsilon_r$ 和 $\tan \delta$ 与电树枝生

长速率 $G_{10}$ 、 $G_{12}$ 的关系式。因此,在已知XPLE电缆样品绝缘热老化评价指标的前提下,这些指标可用来预测电树枝生长速率,评估XPLE电缆样品的老化程度与绝缘性能。

表7 拟合优度

Table 7 Goodness of fit table

热老化评价指标	$R^2$ 决定系数( $G_{10}$ )	$R^2$ 决定系数( $G_{12}$ )
$J_c$	0.981	0.894
$\epsilon_r$	0.820	0.756
$\tan \delta$	0.886	0.823

## 4 结语

本文对加速热老化的XLPE电缆样品开展了电树枝生长实验,并结合DSC、FTIR微观测试与宽频介电谱测试,研究了热老化过程对XLPE电缆样品的电树枝特性的影响,得出以下结论:

1) 在加速热老化过程中,XLPE电缆的理化特性变化整体分为2个阶段,即第一阶段(0~144 h):由于XLPE电缆样品中含大量抗氧化剂,老化初期以重结晶反应为主,结晶度不断增加;热氧反应虽较弱,但伴随抗氧化剂的消耗,一部分大分子重新出现在介质内部,进而羰基指数缓慢增加;第二阶段(144~240 h):抗氧化剂几乎耗尽,重结晶反应停止,热氧反应加速,样品晶体结构遭到严重破坏,结晶度迅速降低,羰基指数加速上升。

2) 在整个XLPE电缆样品的热老化过程中,电树枝生长速率和介电参数呈现先缓慢下降后急速升高的趋势:最初0~144 h内,XLPE电缆样品内抗氧化剂的抑制与重结晶反应使其晶体结构更加紧密,电树枝生长速率随之减小,其介电参数缓慢下降,且绝缘弱区范围缩小,丛状电树枝生长概率随之增加。而在144~240 h,XLPE电缆样品的重结晶反应停止,热氧化反应增强,晶体降解导致结晶度迅速下降,绝缘弱区范围扩大,XLPE电缆样品中松枝状电树枝生长概率增加,电树枝生长速率加速上升,其介电参数迅速上升,导致XLPE电缆样品的绝缘劣化加重。

3) 通过相关性分析,发现热老化评价指标 $J_c$ 、 $\epsilon_r$ 和 $\tan \delta$ 与电树枝生长速率的相关性较好,可用来评价XPLE电缆样品热老化程度。本文所建立 $G_{10}$ 、 $G_{12}$ 与相关热老化评价指标间的关系式可为XPLE电缆绝缘性能评估和其运行寿命预测提供参考与指导。

## 参考文献:

- [1] 王国栋,周凯,李原,等.基于失效时间统计特性的交联聚乙烯电寿命模型修正[J].电工技术学报,2023,38(4):1042-1050.  
WANG Guodong,ZHOU Kai,LI Yuan,et al.Modification of cross-linked polyethylene electrical life model based on statistical characteristics of failure time[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (4):1042-1050.
- [2] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):179-185.  
LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(2):179-185.
- [3] DRISSI-HABTI M, RAJ-JIYOTI D, VIJAYARAGHAVAN S, et al. Numerical simulation for void coalescence (water treeing) in XLPE insulation of submarine composite power cables[J]. Energies, 2020, 13(20):5472.
- [4] HE D X, GONG W J, ZHANG T, et al. Space charge accumulation mechanism near the stress cone of cable accessories under electrical-thermal aging[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(1): 443-448.
- [5] 王津宇,李哲,梁允,等.计及气象因素的输电线路安全性评估[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):210-217.  
WANG Jinyu, LI Zhe, LIANG Yun, et al. Safety evaluation of transmission lines considering meteorological factors [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023,38(1):210-217.
- [6] ZHANG Y, WU Z J, QIAN C, et al. Research on lifespan prediction of cross-linked polyethylene material for XLPE cables[J]. Applied Sciences, 2020, 10(15):5381.
- [7] 陈祎林,周凯,林思衍,等.短时高热运行对XLPE电缆绝缘聚集态结构及介电性能的影响[J].高电压技术,2023, 49(2):588-596.  
CHEN Yilin, ZHOU Kai, LIN Siyan, et al. Effect of short-term high-temperature operation on the aggregate structure and dielectric properties of XLPE cables insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 588-596.
- [8] 刘骥,闫爽,王守明,等.基于低频高压频域介电谱的XLPE电缆电树枝老化状态评估[J].电工技术学报, 2023,38(9):2510-2518.  
LIU Ji, YAN Shuang, WANG Shouming, et al. Evaluation of electrical tree aging state of XLPE cables based on low frequency and high voltage frequency domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2510-2518.
- [9] 吴晶晶,陈丽安,严有祥,等.±500 kV高压直流XLPE电缆温度分布及其影响因素研究[J].高压电器,2023,59 (2):113-119.  
WU Jingjing, CHEN Li'an, YAN Youxiang, et al. Study on temperature distribution of ±500 kV HVDC XLPE cable and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2):113-119.
- [10] 陈向荣,洪泽林,朱光宇,等.高温下电压稳定剂对交联聚乙烯电树枝化及局部放电特性的影响[J].电工技术学报,2023,38(3):577-586.  
CHEN Xiangrong, HONG Zelin, ZHU Guangyu, et al. Effect of voltage stabilizer on electrical treeing and partial discharge characteristics of crosslinked polyethylene at high temperature[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3):577-586.
- [11] 聂琼,周远翔,陈铮铮,等.频率对硅橡胶起树电压及电树枝形态的影响[J].高电压技术,2009,35(1):141-145.  
NIE Qiong, ZHOU Yuanxiang, CHEN Zhengzheng, et al. Influence of frequency on tree initiation voltage and electrical tree shape in silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1):141-145.
- [12] 孙建宇,陈绍平,沙菁斐,等.电缆用交联聚乙烯热老化寿命评估和预测[J].电机与控制学报,2022,26(6):31-39.  
SUN Jianyu, CHEN Shaoping, SHA Jingjie, et al. Evaluation and prediction of thermal aging life of XLPE for cables[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 31-39.
- [13] 彭苏蔓,祝曦,吴建东,等.温度和电场对XLPE与纳米MgO/XLPE电树枝生长过程中局部放电特性的影响[J].中国电机工程学报,2020,40(12):4033-4043.  
PENG Suman, ZHU Xi, WU Jiandong, et al. Effect of temperature and electric field on partial discharge characteristics in XLPE and nano-MgO/XLPE during electrical tree growth[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12):4033-4043.
- [14] 谢安生,郑晓泉,李盛涛,等.XLPE电缆绝缘中的电树枝结构及其生长特性[J].高电压技术,2007,33(6):168-173.  
XIE Ansheng, ZHENG Xiaoquan, LI Shengtao, et al. Structures and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6):168-173.
- [15] 郑晓泉, G Chen, AE Davies.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.  
ZHENG Xiaoquan, CHEN G, DAVIES A. Characteristic and developing law of a double structure electrical tree in XLPE cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):79-85.
- [16] BOGUEDAD D, MEKHALDI A, JBARA O, et al. Physico-chemical study of thermally aged EPDM used

- in power cables insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3207-3215.
- [17] LI H, LI J Y, MA Y X, et al. The role of thermo-oxidative aging at different temperatures on the crystal structure of crosslinked polyethylene[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(5): 3696-3703.
- [18] 许庆重, 李秀峰, 孙光华, 等. 热老化对 XLPE/OMMT 纳米复合材料微观结构和力学性能的影响[J]. 绝缘材料, 2022, 55(10): 25-32.
- XU Qingzhong, LI Xiufeng, SUN Guanghua, et al. Effect of thermal ageing on microstructure and mechanical properties of XLPE/OMMT nanocomposites[J]. Insulating Materials, 2022, 55(10): 25-32.
- [19] 邓红雷, 杨浩, 谢月, 等. 基于高温介电谱测量的 XLPE 老化状态评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 156-161+219.
- DENG Honglei, YANG Hao, XIE Yue, et al. Aging assessment of XLPE based on high temperature dielectric spectra[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 156-161+219.
- [20] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 198-200.
- HE Pingsheng. Structure and properties of new polymers [M]. Beijing: Science Press, 2009: 198-200.
- [21] WANG Q, LIU R, QIN S C, et al. Insulation properties and degradation mechanism for XLPE subjected to different aging periods[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(5): 1959-1967.
- [22] 秦榛. 基于变压介电响应 i-t 特性的 XLPE 电缆热老化及树枝缺陷识别方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- QIN Zhen. Thermal aging of XLPE cable and identification method of branch defects based on i-t characteristics of variable dielectric response[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [23] HE D X, GU J F, WANG W, et al. Research on mechanical and dielectric properties of XLPE cable under accelerated electrical-thermal aging[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28(8): 1020-1029.
- [24] 李欢, 李建英, 马永翔, 等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6740-6748+6787.
- LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6740-6748+6787.
- [25] 林涛, 翟璐, 孙浩飞, 等. 长距离 330 kV 交联聚乙烯电缆交接试验研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 28-36.
- LIN Tao, ZHAI Lu, SUN Haofei, et al. Study on commissioning test of long-distance 330 kV XLPE power cable[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 28-36.
- [26] 段玉兵, 韩明明, 王兆琛, 等. 不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 45-54.
- DUAN Yubing, HAN Mingming, WANG Zhaochen, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high-voltage cables under different thermal aging temperatures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 45-54.
- [27] LEE RODGERS J, NICEWANDER W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59-66.
- [28] 刘维功, 王昊展, 时振堂, 等. 基于改进 XGBoost 算法的 XLPE 电缆局部放电模式识别研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 98-106.
- LIU Weigong, WANG Haozhan, SHI Zhentang, et al. Research on partial discharge pattern recognition of XLPE cable based on improved XGBoost algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 98-106.