

# 基于宏微观参数结合的 XLPE 电缆水树诊断研究

朱 博<sup>1</sup>, 朱亚琦<sup>1</sup>, 王天宇<sup>2</sup>, 张 涛<sup>1</sup>, 付伟强<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 国网山东省滨州市沾化区供电公司, 山东 滨州 256600)

**摘 要:**为解决交联聚乙烯电缆(XLPE)水树密度的预测问题,提出了将老化电缆的宏观检测数据与微观水树形貌相结合的分析方法,同时提出了两种新的参数(碳氧指数、含水指数)来定量描述水树区域的能谱分析(EDS)结果和红外光谱(FTIR)结果的变化。首先通过对不同实验条件下的水树老化电缆进行极化/去极化电流法(PDC)检测,得到电缆的老化因子、直流电导率以及0.1 Hz 介质损耗因数等一系列宏观参数,再将电缆切片进行微观观测,得到水树的微观参数,建立水树生长的模型计算电缆的水树密度,对 PDC 测试得到的电缆的宏观参数与微观水树密度进行相关性分析。结果表明:老化时间越长,碳氧指数和含水指数越大,且增大的速率越快。根据相关系数建立了一种新的预测 XLPE 电缆内部水树生长密度的数学模型,实现了电缆内部水树的微观结构与宏观测试参数的结合。

**关键词:** XLPE 电缆; 水树; 极化/去极化电流; 相关性分析; 宏观参数/微观结构

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.07.012

## Water tree diagnosis of XLPE cable based on combination of macro and micro parameters

ZHU Bo<sup>1</sup>, ZHU Yaqi<sup>1</sup>, WANG Tianyu<sup>2</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, FU Weiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. State Grid Shandong Binzhou Zhanhua District Power Supply Company, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** In order to solve the prediction problem of water tree density of XLPE cable, an analysis method combining the macro detection data with the micro water tree profile of aged cable was proposed. Two new parameters (carbon and oxygen index and water content index) were proposed to quantitatively describe the changes of EDS and FTIR results in the water tree region. Firstly, the polarization and depolarization current method (PDC) was used to detect the water-tree ageing cables under different experimental conditions. A series of macroscopic parameters such as cable ageing factor, DC conductivity, and 0.1 Hz dielectric loss factor were obtained. Then, the micro parameters of water tree were obtained by microscopic observation of cable slice. The water tree growth model was established to calculate the water tree density of cable, and the correlation between the macroscopic parameters of cable and the microscopic water tree density was analyzed. The results show that the longer the ageing time, the greater the carbon oxygen index and water content index, and the faster the rate of increase. Based on the correlation coefficient, a new mathematical model for predicting the growth density of water tree inside XLPE cable is established, which realize the combination of microstructure of water tree inside cable and macro test parameters.

**Key words:** XLPE cable; water tree; polarization/depolarization current; correlation analysis; macroscopic parameters/microstructure

## 0 引言

由于交联聚乙烯(XLPE)具有优异的电气性能和力学性能,被广泛应用于我国电网建造中<sup>[1-3]</sup>。我国最早投运的电缆运行年限已达50多年之久,这些 XLPE 电缆在运行过程中会受到电流过载引起的发热、敷设环境中水分的侵蚀以及 XLPE 绝缘层的氧化反应等老化因素的影响,在电缆中产生水树老

化、热老化等一系列威胁 XLPE 绝缘的问题,这些老化大多以缺陷的形式存在于电缆系统中,致使电缆绝缘性能劣化甚至发生击穿,从而严重威胁电网的安全运行<sup>[4-5]</sup>。在电网的实际运行过程中,电老化中的水树老化是导致 XLPE 电缆绝缘性能下降、寿命缩短的主要因素之一<sup>[6]</sup>。因此研究诊断水树生长的方法、诊断电缆内部水树生长的程度成为电缆老化

的关键问题。

极化/去极化电流法(PDC)是一种非破坏性的测试方法,以介质响应理论为基础,能反映有关极化和电导的基本现象,在诊断电缆水树老化方面具有良好效果<sup>[7-12]</sup>。S SULAIMAN等<sup>[13]</sup>研究发现可以优化并联RC支路的数量来模拟PDC分析,并证明了电缆绝缘的老化程度可以通过电导率和支路参数判断。黄明等<sup>[14]</sup>证明了极化/去极化电流的低频介质损耗谱及其不对称性能够较为准确地反映电缆绝缘不同类型的老化问题。李明志等<sup>[15]</sup>利用PDC法证明了不对称系数可以反映XLPE电缆的水树老化现象且灵敏度不受电缆长度的影响。周凯等<sup>[16]</sup>通过X射线能量色散谱结果发现电缆在进行水树老化后内外半导体层中的氧元素含量均有所减少,并推测是由于电缆样本发生水溶液电解反应引起的。在反映电缆老化程度的方法中,电缆内部水树长度是最直接比较方式,但目前国内外大多数针对电缆水树的研究都需将电缆切片进行微观水树长度计算,电缆整体性会遭受破坏,对于如何将电缆水树老化的宏观介电性能参数与微观水树参数相结合,利用宏观参数预测电缆内部水树密度的方法鲜有报道。

本文针对XLPE水树老化程度的问题,对4组XLPE电缆进行不同时间的水树老化实验,通过对比电缆样本的宏观参数与微观水树密度信息,提出一种可以用宏观实验得出电缆内部水树生长状态的数学表达式,建立起水树宏观参数与微观形貌之间的联系。同时提出了两种新的表达电缆水树老化程度的参数。

## 1 实验与PDC测试理论分析

用同一批次的电缆制作4组电缆样本,每组样本各包括A相、B相、C相3根电缆。其中有1组电缆作为对照组,不对其进行水树老化只进行微观宏观参数测试,另外3组电缆进行水树老化,实验以30 d为1个周期,共进行3个周期的水树老化,每隔30 d取出3根电缆,其余电缆继续并联加压老化。

### 1.1 加速水树老化实验

为了加快电缆的水树老化速率,本文采用水针电极法对电缆进行水树老化实验。实验选取WDZ-YJY-8.7/15 kV型电缆来制作加速水树老化样本。首先将三相电缆截成4段长为50 cm的短电缆样本,在电缆样本的两端各剥去5 cm的绝缘层,露出线芯,然后在电缆的两端各剥去10 cm的外半导体层,用于保证足够的绝缘距离。

选取电缆的剩余部分中部15 cm左右的区域作为水树老化区域,在此区域用钢针(曲率半径为 $(3.0\pm 0.2)\mu\text{m}$ )在电缆样本的上下两侧扎入两排间距为5 mm、深度为2.5 mm的针孔缺陷,并套上热缩管,热缩管内注射质量分数为20%左右的氯化钠溶液并插入铜电极接地。实验所用电源有效值为7.5 kV,频率为400 Hz,波形为正弦波。保护电阻阻值为16 k $\Omega$ 。图1为XLPE电缆水树老化实验的示意图。

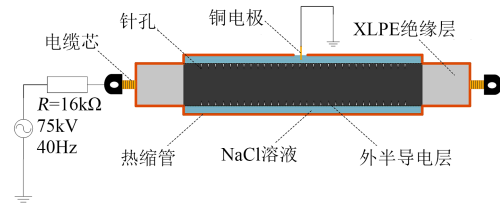


图1 水树老化实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of water tree ageing experiment

### 1.2 PDC测试电路的设计

PDC电路采用三电极系统,本文设计的PDC测试电路如图2所示。

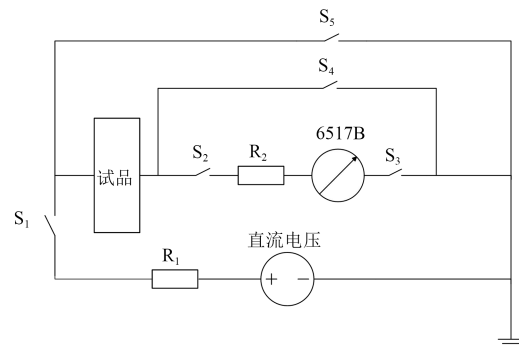


图2 PDC测试电路图

Fig.2 PDC test circuit diagram

其中 $R_1$ 和 $R_2$ 为限流电阻,阻值为1 M $\Omega$ 。 $R_1$ 是为了保护直流电源, $R_2$ 是防止试品短路时损坏电流表。电流表为Keithley6517B皮安表。测试时,为了防止电源的起始冲击电流损坏皮安表以及影响极化电流的读数,首先将 $S_1$ 与 $S_4$ 闭合, $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$ 断开(此过程是为了躲开电源接通时电路产生的冲击电流),5 s后再将 $S_4$ 断开, $S_2$ 与 $S_3$ 闭合给试品充电,在这个过程中试品介质内部会发生各种极化现象,此时流过皮安表的是电导电流与极化电流的总和。然后断开 $S_1$ ,闭合 $S_5$ ,持续一定时间,此时产生的放电电流主要为极化导致。通过记录电流随时间的变化关系,即可绘制出极化/去极化电流曲线。

### 1.3 宏观参数的计算

当电缆模型被视作无限大理想平板电极,由麦

克斯韦方程可知,对 XLPE 电缆施加电压  $U(t)$  时,流经电缆的电流可表达为式(1)。

$$i(t) = C_0 \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} U(t) + C_0 \varepsilon_\infty \frac{dU(t)}{dt} + C_0 \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t f(t) U(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

加压前将电缆接地使其内部电荷完全释放,然后接入直流电源  $U_0$ ,则通过电缆的极化电流可以表示为式(2)。

$$i_{\text{pol}}(t) = C_0 U_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \delta(t) + f(t) \right] \quad (2)$$

当  $t=t_a$  ( $t_a$  为充电时间) 时,电缆对地短接放电,此时流经电缆的去极化电流表达式为式(3)。

$$i_{\text{depol}}(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_a)] \quad (3)$$

在极化/去极化时间足够长的情况下,联立式(2)和式(3)可以得到电缆的直流电导率如式(4)所示。

$$\sigma_0 = \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} [i_{\text{pol}}(t) + i_{\text{depol}}(t)] \quad (4)$$

假设 XLPE 的介电响应函数  $f(t)$  服从 Curie-von Schweidler 模型,则能够用傅里叶变换将电缆的时域信息转换到频域<sup>[17]</sup>。对式(2)做傅里叶变换可得  $i(t)$  的频域表达式  $\dot{I}(\omega)$  为式(5)。

$$\dot{I}(\omega) = j\omega C_0 \dot{U}(\omega) \left[ \varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right) \right] = j\omega C_0 \varepsilon^* \dot{U}(\omega) \quad (5)$$

式(5)中:  $\chi'(\omega)$  为复极化率的实部;  $\chi''(\omega)$  为复极化率的虚部;  $\varepsilon^*$  为 XLPE 介质在交变电场中的复介电常数。

由此可得不同频率下电缆 XLPE 绝缘的介质损耗因数如式(6)所示。

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} + \frac{\chi''(\omega)}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} \quad (6)$$

电缆的极化过程可以分为 3 个过程,分别是 XLPE 绝缘极化、无定形与晶体界面的影响  $Q(\tau_2)$  以及老化造成的界面中金属盐和水合离子的影响  $Q(\tau_3)$ <sup>[18]</sup>, 电缆的老化因子  $A_f$  计算公式如式(7)~(9)所示。

$$Q(\tau_2) = a_1 \tau_1 + a_2 \tau_2 \left(1 - \frac{1}{e}\right) + a_3 \tau_3 \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{\tau_3}}\right) \quad (7)$$

$$Q(\tau_3) = a_1 \tau_1 + a_2 \tau_2 \left(1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau_2}}\right) + a_3 \tau_3 \left(1 - \frac{1}{e}\right) \quad (8)$$

$$A_f = \frac{Q(\tau_3)}{Q(\tau_2)} \quad (9)$$

式(7)~(9)中:  $a_i$  能够反映介质内的陷阱密度;  $\tau_i$  能够反映介质内的陷阱深度;  $A_f$  为电缆的老化因子。

本文老化因子的判据采用德国电缆老化因子判据,如表 1 所示<sup>[19]</sup>。

表 1 德国电缆老化因子判据  
Tab.1 Ageing factor criterion of German cable

老化判据	$A_f$
良好	$A_f < 1.75$
中等	$1.75 < A_f < 1.90$
老化明显	$1.90 < A_f < 2.10$
老化严重	$A_f > 2.10$

## 2 PDC 测试结果分析

### 2.1 老化时间对 XLPE 电缆去极化电流的影响

将处理好的未老化电缆、水树老化 30 d 电缆、水树老化 60 d 电缆、水树老化 90 d 电缆共 4 组电缆样本进行 PDC 测试,环境温度为室温(25℃),XLPE 电缆的极化电流在前 5 s 内波动较大,为了减小电缆去极化电流分析时的误差,实验选取去极化 5 s 之后的电流作为电缆的去极化电流。在不同的水树老化时间下,实验采集到 A、B、C 三相电缆的去极化电流如图 3 所示。从图 3 可以看出,老化电缆去极化电流的起始值与稳定值都要比未老化电缆的高,这是因为电缆在进行水树老化后,电缆内部陷阱增多、极化程度加深所致。在 XLPE 电缆的老化过程中,XLPE 主链和侧链发生断裂生成具有亲水性质的羟基和羧基,电缆内部形成具有较大电导率以及介电常数的水树,随着电缆老化程度的加深,XLPE 内部水树生长不断扩大,含水量不断增加,电缆内部较深能级中的陷阱密度逐渐增大,因此在 PDC 测试中老化电缆的去极化电流进一步增大,数值明显大于未老化电缆。

### 2.2 XLPE 电缆老化因子随老化时间的变化规律

本次实验在室温下选取 1 kV 的极化电压对 4 组样本电缆进行 1 200 s 的极化并计算出对应电缆的老化因子,通过对实验数据进行统计分析,三相电缆的老化因子均值与水树老化时间的关系如表 2 所示。从表 2 可以看出,电缆的老化因子均值随水树老化时间的增加而增大,说明老化因子在判断电缆水树老化方面有着较高的灵敏度。

### 2.3 XLPE 电缆直流电导率随老化时间的变化规律

使用 1 kV 电压下极化与去极化电流的稳态值来近似计算不同老化程度电缆的电导率。不同老化时间下三相电缆的直流电导率计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,随着老化时间的增加,电缆的电导率逐渐增加,在水树老化进行 90 d 时,电缆的电导率已经达到了  $10^{-12}$  S/m,此时的电缆已经遭到

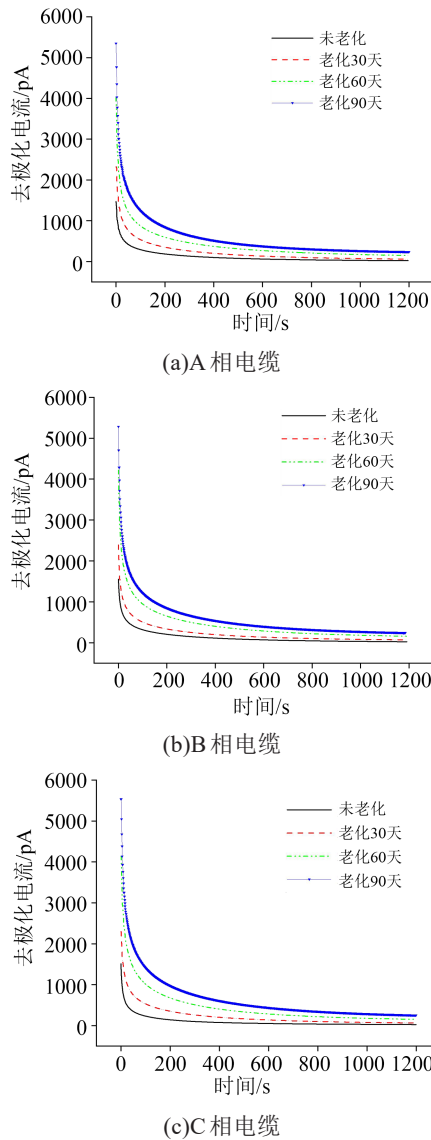


图3 三相电缆不同老化阶段的去极化电流  
Fig.3 Depolarization current of three-phase cable in different ageing stages

表2 电缆老化因子与水树老化时间的关系  
Tab.2 Relationship between cable ageing factor and ageing time of water tree

水树老化时间/d	老化因子均值
未老化	1.850
30	2.321
60	2.743
90	3.234

严重破坏,性能严重受损,说明电导率可以在一定程度上判断电缆内部水树的生长情况。

### 2.4 XLPE 电缆 0.1 Hz 介质损耗因数随老化时间的变化规律

用 1 kV 极化电压下测得的电导率以及去极化电流数据经过式(6)计算可得,A、B、C三相电缆不同老化时间的 0.1 Hz 介质损耗因数如图 4 所示。从

表3 不同老化时间下三相电缆的直流电导率计算结果  
Tab.3 The DC conductivity of three-phase cables with different ageing time

老化时间/d	直流电导率/( $\times 10^{-15}$ S/m)			
	A相	B相	C相	D相
未老化	2.8	4.9	3.6	3.8
30	98	270	190	190
60	540	820	880	750
90	980	1 100	1 200	1 100

图4可以看出,随着老化时间的增加,电缆的 0.1 Hz 介质损耗因数越来越大,当水树老化时间到达 90 d 时呈现出明显的非线性增大特征,说明 0.1 Hz 介质损耗因数可以在一定程度上判断电缆内部水树的生长情况。

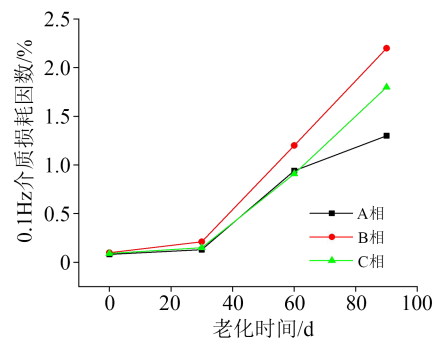


图4 不同老化时间三相电缆的 0.1 Hz 介质损耗因数  
Fig.4 Dielectric loss factor at 0.1 Hz of three-phase cables with different ageing time

## 3 XLPE 电缆水树的微观实验与分析

### 3.1 水树光学显微镜的观测

在电缆水树老化穿孔处切下厚度约为 100  $\mu\text{m}$  的薄片,然后将切片置于 90 $^{\circ}\text{C}$  的亚甲基蓝溶液中染色 30 min,用清水清洗电缆切片后再用显微镜观察水树枝的形貌,电缆试样中出现明显的水树,如图 5 所示,且水树从针尖部位呈发散性分布,绝缘层水树枝中充满水分。同时可以看出,水树在针尖下方的区域生长面积更大,染色颜色更深。

为了定量描述水树的生长状况,以水树针尖为中心,以水树生长的纵向与横向为椭圆的长轴与短轴,用针尖周围椭球的区域为模型来定量水树的生长情况,水树模型的体积公式如式(10)所示。

$$V_s = \frac{4\pi L_1 \times L_2^2}{3} \quad (10)$$

式(10)中: $L_1$ 为水树生长纵向长度,mm; $L_2$ 为水树生长横向长度,mm; $V_s$ 为水树模型体积, $\text{mm}^3$ 。

用三次多项式函数将不同老化时间下三相电缆内部水树的平均体积与老化天数的关系数据拟

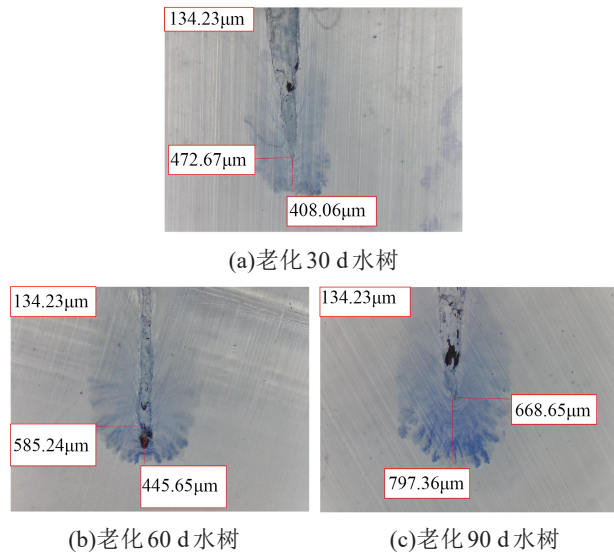


图5 电缆切片样本的水树观测

Fig.5 Water tree observation of sliced samples cables

合,得到水树模型体积与老化时间的数学关系如式(11)所示。

$$V_s = 0.0235T_d - 5.0389 \times 10^{-4}T_d^2 + 4.6975 \times 10^{-6}T_d^3 \quad (11)$$

式(11)中,  $T_d$  为老化时间,  $d$ 。

由于每根电缆试样的针尖缺陷为60个,根据图5中水树的体积,计算得到不同老化阶段电缆的水树密度如表4所示。从表4可以看出,随着老化时间的增加,水树密度明显增大,同时在水树生长初始阶段,水树生长速率较慢,在后续阶段,水树发展较为迅速,符合水树生长的理论机制。

表4 不同老化时间电缆内部水树的平均体积和密度

Tab.4 Average volume and density of water tree inside the cable at different ageing times

老化时间 /d	水树平均体积 /mm <sup>3</sup>			三相电缆水树平均体积 /mm <sup>3</sup>	水树生长速率 /(mm <sup>3</sup> /d)	水树密度 /%
	A相	B相	C相			
未老化	0	0	0	0	0	0
30	0.380	0.324	0.426	0.377	0.013	0.042 4
60	0.642	0.579	0.604	0.608	0.008	0.068 3
90	1.483	1.284	1.594	1.454	0.028	0.163 3

### 3.2 SEM观测与EDS分析

将处理好的电缆样本进行扫描电子显微镜(SEM)观察。以A相为例,将水树区域断面放大5 000倍观测到的微观形貌如图6所示。从图6可以看出,电缆经过老化后水树区域产生了一系列孔洞,这些微观孔洞的存在是水树产生的典型表现。在给电缆施加交流电压之后,在电场作用下不断变化的电应力使XLPE材料分子链断裂产生裂纹,随

着水分以及其他离子的侵袭,裂纹逐渐被填充并扩大成微观孔洞,一般来说这些孔洞以及裂纹会逐渐发展成“珍珠链”状,这些孔洞的直径一般为2~10 μm。老化30 d的电缆断面出现了几个较浅的孔洞,老化60 d的电缆孔洞较深,面积增大,老化90 d之后,孔洞直径明显增大。

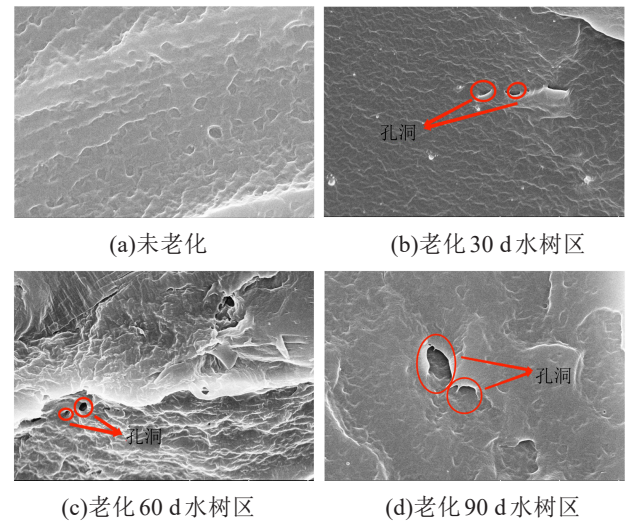


图6 XLPE 电缆水树区SEM观测结果

Fig.6 SEM observation results in water tree area of XLPE cable

对不同老化时间的电缆水树区域进行EDS分析,得到A相电缆C、O元素成分如表5所示。从表5可以看出,样本老化后O元素含量显著增加,一方面是因为电缆在老化过程中XLPE分子链断裂与周围环境中的氧气发生氧化反应,导致O元素含量增加;另一方面是因为形成的水树促进XLPE的氧化降解,XLPE在氧化降解过程中产生亲水基团,这些亲水基团不断地从周围吸收水分子,导致O元素含量增加。C元素存在XLPE基体中,随着老化的进行,C元素可能会参与反应,但这不会对其质量或者原子数量造成变化,因此在电缆未击穿的情况下可以视为C元素的数量保持不变,不同老化时间下电缆的C元素质量百分比以及原子百分比的变化是因为其余元素的改变引起的。为了进一步定量分析发生水树老化后水树区域元素的变化与水树生长程度的关系,本文用电缆老化水树区EDS能谱分析O元素与C元素的原子百分比比值来表示水树老化的程度,用碳氧指数 $K_{CO}$ 来定义,如式(12)所示。

$$K_{CO} = \frac{O_E}{C_E} \quad (12)$$

式(12)中: $K_{CO}$ 为碳氧指数; $O_E$ 为EDS能谱分析中O元素的原子百分比; $C_E$ 为EDS能谱分析中C元素的原子百分比。

表5 不同老化时间电缆EDS测试化学元素成分表  
Tab.5 Chemical element composition of cable EDS test at different ageing times

水树老化时间/d	化学元素	质量百分比/%	原子百分比/%
未老化	C	85.91	97.42
	O	2.04	1.74
30	C	86.37	96.68
	O	2.51	2.11
60	C	83.41	94.46
	O	4.30	3.66
90	C	82.69	92.28
	O	7.72	6.47

将A、B、C三相电缆样本EDS能谱中的 $K_{CO}$ 按式(12)求取之后,得到三相电缆不同老化阶段的碳氧指数 $K_{CO}$ 如表6所示。从表6可以看出,A、B、C三相电缆碳氧指数均随水树老化时间的增加而增大,且呈现出明显的非线性特征,水树老化时间越长, $K_{CO}$ 的增速越大。

表6 不同水树老化时间电缆EDS测试的碳氧指数表  
Tab.6 Carbon and oxygen index of cable EDS test with different water tree aging time

老化时间/d	碳氧指数		
	A相	B相	C相
未老化	1.79	1.92	2.05
30	2.18	2.31	2.22
60	3.87	3.66	4.04
90	7.01	7.13	7.55

### 3.3 红外光谱分析

对未老化、老化30 d、老化60 d、老化90 d的A、B、C三相XLPE电缆样本进行FTIR测试,其中A相电缆的红外光谱如图7所示。XLPE的构成分子式是 $[-CH_2-CH_2-]_n$ ,所以从图7能明显看到亚甲基的对称伸缩振动峰( $2700\text{ cm}^{-1}$ )、面内弯曲振动峰( $1480\text{ cm}^{-1}$ )、平面摇摆振动峰( $722\text{ cm}^{-1}$ )、甲基变形振动峰( $1370\text{ cm}^{-1}$ )。 $3370\text{ cm}^{-1}$ 处存在O-H键的伸

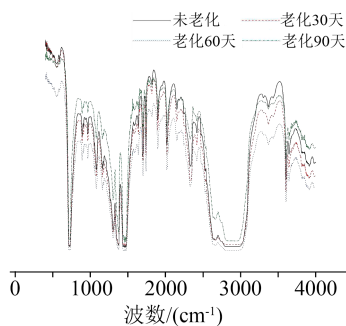


图7 A相电缆不同老化时间下的FTIR

Fig.7 FTIR of phase A cable with different ageing times

缩振动峰,在一定程度上可以反映水树区域含水量的多少,但由于不能保证每个试样的厚度均保持一致,导致不能直接根据O-H键伸缩振动峰的大小来判断水树老化程度。

本文选择波峰为 $2019\text{ cm}^{-1}$ 处的合频振动峰作为内标峰,采用内标法引入参数含水指数 $K_w$ 对水树老化进行定量分析,含水指数、吸光度和透光率的转换公式如式(13)~(14)所示。

$$K_w = \frac{A_1}{A_2} \tag{13}$$

$$A_i = \lg \frac{1}{T_i} \tag{14}$$

式(13)~(14)中: $A_1$ 为 $3370\text{ cm}^{-1}$ 处O-H键伸缩振动峰的吸光度,%; $A_2$ 为 $2019\text{ cm}^{-1}$ 处合频振动峰的吸光度,%; $A_i$ 为吸光度,%; $T_i$ 为透光率,%。

综合式(13)与式(14),分别计算A相、B相、C相切片电缆样本水树区域红外光谱的含水指数,得到三相电缆样本在不同老化时间下的含水指数如图8所示。

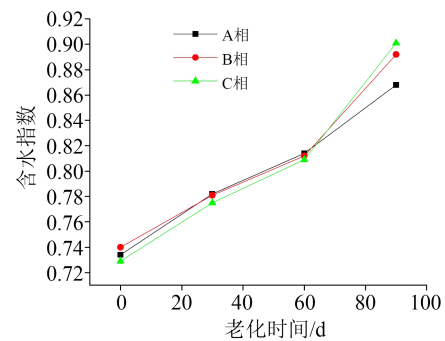


图8 三相电缆含水指数随老化时间的变化趋势

Fig.8 Variation trend of water content index of three-phase cable with ageing time

从图8可以看出,随着水树老化时间的增加,电缆样本水树区域红外光谱的含水指数越来越大,说明其内部水树生长的面积越来越大,孔洞越来越深,水树老化越来越严重,电缆绝缘性能遭到严重破坏。

## 4 基于宏观参数对XLPE电缆水树密度的预测

为了建立XLPE电缆内部水树微观结构与宏观参数的关联性,本文采用皮尔逊相关系数法将电缆PDC测试所得的老化因子、直流电导率、0.1 Hz介质损耗因数3个评价指标与水树密度进行相关性分析,衡量两组数据之间的关联程度<sup>[20]</sup>。皮尔逊相关系数的判别方法如表7所示。两个变量 $x$ 、 $y$ 之间皮

尔逊相关系数计算方法如式(15)所示。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

式(15)中: $r$ 为皮尔逊相关系数; $n$ 为样本数量。

表7 皮尔逊相关系数判别方法

水树老化时间/d	老化因子均值
0.8~1.0	极强相关
0.6~0.8	强相关
0.4~0.6	中等程度相关
0.2~0.4	较弱相关
0~0.2	极弱相关或无相关

因为数据存在偶然性,在讨论两个变量的相关性时需要引入两个变量相关程度的显著水平来判断。采用假设检验的方法来进行显著水平的确定,样本不存在关联性的零假设为 $H_0$ ;样本存在关联的假设为 $H_1$ ,并用 $t$ 分布来进行检验, $t$ 分布形式为 $t \sim t(n)$ ,如式(16)所示。

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \sim t(n-2) \quad (16)$$

计算得出两个变量不存在相关性的概率就称为显著水平,当两参数的显著水平小于设定值时才可以讨论两个变量的相关性,本文选择的显著水平为5%。根据式(15)以及表2、表3、表5和表6的相关数据,将水树密度与电缆的宏观参数(老化因子、直流电导率、0.1 Hz 介质损耗因数)进行相关性计算,结果如表8所示。

表8 宏观参数与水树密度的相关性计算结果

Tab.8 The results of correlation calculation between macro parameters and water tree density

参数	水树密度	
老化因子	皮尔逊相关系数	0.968
	显著性水平	0.032
直流电导率	皮尔逊相关系数	0.944
	显著性水平	0.056
0.1 Hz 介质损耗因数	皮尔逊相关系数	0.957
	显著性水平	0.043

从表8可以看出,水树密度与老化因子和0.1 Hz 介质损耗因数的显著水平均小于5%,而水树密度与直流电导率的显著水平略高于5%但低于6%,考虑到测量误差以及可供分析的数据点较少导致分析误差等因素,可以认为水树密度与三者均存在线性关联,水树密度与这三者的相关系数均在0.8~1.0之间,属于极强相关。

将水树密度与老化因子、直流电导率的三次多项式拟合,由于水树密度与0.1 Hz 介质损耗因数的三次多项式拟合后在定义域内并非单调递增函数,因此采用一次函数对其进行线性拟合,拟合后的关系式如式(17)~(19)所示。

$$\rho = -1.807 + 2.2336A_f - 0.9152A_f^2 + 0.1277A_f^3 \quad (17)$$

$$\rho = -0.0013 + 3.4022 \times 10^{-4}\sigma_0^2 - 6.6560 \times 10^{-7}\sigma_0^2 + 4.4757 \times 10^{-7}\sigma_0^3 \quad (18)$$

$$\rho = 0.0058 + 0.8218 \tan \delta_{62.8} \quad (19)$$

式(17)~(19)中: $A_f$ 为电缆的老化因子; $\rho$ 为XLPE 电缆内部水树密度,%; $\sigma_0$ 为XLPE 电缆的直流电导率, $10^{-15}$  S/m; $\tan \delta_{62.8}$ 为XLPE 电缆的0.1 Hz 介质损耗因数,%。

以老化因子、直流电导率以及0.1 Hz 介质损耗因数与水树密度的相关系数比值作为各项宏观参数对水树密度影响的权重,对式(17)~式(19)进行赋权处理,总权重因子为1。计算得到老化因子、直流电导率以及0.1 Hz 介质损耗因数获得的权重分别为0.34、0.33、0.33。用宏观介电性能参数计算得到XLPE 电缆水树密度,预测数学表达式如式(20)所示。

$$\rho = -0.6135 + 0.7594A_f + 1.1227 \times 10^{-4}\sigma_0 + 0.2712 \tan \delta_{62.8} - 0.3112A_f^2 + 2.1965 \times 10^{-7}\sigma_0^2 + 0.0468A_f^3 + 1.4770 \times 10^{-3}\sigma_0^3 \quad (20)$$

考虑到电缆在实际运行中受到的老化因素不止水树老化一种,而本文只考虑了水树老化的影响因素并没有考虑除水树老化外的其他因素,因此最终计算得到的XLPE 电缆水树密度应当大于等于实际电缆中的水树密度。

## 5 结论

(1)在不同老化时间下,电缆去极化电流的起始值与稳定值均随老化时间的增加而增大。电缆的老化因子、直流电导率以及0.1 Hz 介质损耗因数均随着水树老化时间的增加而增大,且以上参数并非呈线性增大。

(2)提出了一种新的数学模型来表示XLPE 电缆内部水树生长密度,成功将电缆内部水树的微观结构与宏观测试参数进行了结合,对XLPE 电缆水树生长密度的无损检测提供了一种新的方法。

(3)提出了一种新的参数(碳氧指数)来定量描述水树区域EDS结果的变化。通过对不同老化阶段电缆水树区域的EDS测试发现,老化时间越长,碳氧指数越大,且增速越快。

(4)提出了一种新的参数(含水指数)来定量描述水树区域FTIR结果的变化。通过对不同老化阶段电缆水树区域的FTIR测试发现,老化时间越长,

含水指数越大。

### 参考文献:

- [1] 周凯,陈泽龙,尹游,等.XLPE电缆水树老化及其诊断技术的研究进展[J].绝缘材料,2019,52(2):7-14.
- [2] KULICHIKHIN V, BORISENKOVA E, PLOTNIKOVA E, et al. Relationships between processing conditions and rheological behavior of polyethylenes[J]. Polymer Engineering and Science, 2010,44(4):615-624.
- [3] 李加才,刘红剑,王诗航,等.交联剂和抗氧剂对低密度聚乙烯绝缘料熔体黏弹特性的影响[J].中国电机工程学报,2023,43(1):368-379.
- [4] 罗阳帆,周凯,李康乐,等.基于电缆绝缘寿命扩展技术的现场退运电缆修复效果研究[J].绝缘材料,2021,54(5):54-60.
- [5] 张成,李洪飞,杨延滨,等.交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J].绝缘材料,2020,53(7):1-11.
- [6] 周宇通,张杰,赵洲峰,等.高压电缆用交联聚乙烯热老化状态评估[J].合成材料老化与应用,2020,49(6):35-37,134.
- [7] LEI Y, JIANG S, ZHOU K, et al. Non-destructive detection of XLPE cable insulation based on the method of polarization-depolarization current[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2643-2649.
- [8] 马骁,李康乐,周凯,等.基于水树微观结构特征的水树老化电缆PDC支路参数特征[J].高电压技术,2022,48(2):716-723.
- [9] 黄科荣,周凯,黄明,等.水树老化电缆的超低频介损不对称现象研究[J].绝缘材料,2018,51(9):36-40,47.
- [10] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part I: Theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(5):5-19.
- [11] 蔡钢,刘曦,濮峻嵩,等.基于PDC法的水树老化电缆绝缘诊断[J].绝缘材料,2016,49(7):61-64,71.
- [12] 杨帆,沈煜,王彦博,等.基于极化/去极化电流法的交联聚乙烯电缆热老化程度判定[J].高电压技术,2016,42(2):496-503.
- [13] SULAIMAN S, ARIFFIN A M, KIEN D T. Determining the number of parallel RC branches in polarization/depolarization current modeling for XLPE cable insulation[J]. International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology,2017,7(3):971.
- [14] 黄明,周凯,黄科荣,等.基于PDC法的绝缘老化电缆低频损耗特性分析[J].高电压技术,2019,45(3):959-967.
- [15] 李明志,周凯,黄科荣,等.基于极化-去极化电流测试的XLPE中陷阱电荷脱陷特性[J].高电压技术,2020,46(9):3194-3201.
- [16] 周凯,陶霁韬,杨滴,等.XLPE电缆水树老化过程中半导体层缺陷的形成机理[J].高电压技术,2014,40(1):124-130.
- [17] 张涛,李林多,王尧,等.基于复介电常数实部变化率的油纸绝缘受潮状态研究[J].电测与仪表,2019,56(16):45-49,60.
- [18] MAUR S, HAQUE N, POTTEKAT P, et al. Investigations on the effect of ageing on charge de-trapping processes of epoxy-alumina nanocomposites based on isothermal relaxation current measurements[J]. IET Nanodielectrics,2020,3(4):116-123.
- [19] 宋余来,王晓岩,吴海朋,等.基于等温松弛电流法的交联聚乙烯电缆绝缘老化研究[J].东北电力大学学报,2020,40(1):15-20.
- [20] RUNGSKUNROCH P, SHEN Z J, KAEWUNRUEN S. Benchmarking socio-economic impacts of high-speed rail networks using  $k$ -nearest neighbour and Pearson's correlation coefficient techniques through computational model-based analysis[J]. Applied Sciences,2022,12(3):1520.

收稿日期:2022-08-07 修回日期:2022-10-17

作者简介:朱博(1987-),男(汉族),陕西西安人,副教授,主要从事电气设备绝缘状态监测(检测)技术的研究。