

基于 PDC 支路参数时变特征的电缆局部老化类型 诊断方法

李康乐¹, 霍文博¹, 王杰¹, 张元涛¹, 周凯², 朱亮³

(1. 兰州理工大学自动化与电气工程学院, 兰州 730050; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065;
3. 甘肃省电力科学研究所, 兰州 730071)

摘要: 为了进一步研究极化去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)对电缆局部老化类型的诊断方法, 分析了不同局部老化类型电缆 PDC 第 3 支路参数特征及其原因。制备 8 组电缆样本, 对其中 4 组样本在 140 °C 下分别进行 108、216、324 和 432 h 的热老化。对另外 4 组样本在 7.5 kV、400 Hz 电压下分别进行 20、40、60、80 d 的加速水树老化。对老化样本进行 PDC 测试及扫描电镜观测。PDC 支路分析结果表明, 热老化样本第 3 支路时间常数随时间增大, 而水树样本第 3 支路时间常数随时间减小。另外, 老化样本第 3 支路时间常数不对称系数 τ_{as} 均高于 1 且随时间增大。扫描电镜观测结果表明, 热老化样本中存在大量孤立微孔, 而水树样本微孔之间存在微裂纹。分析认为, 热老化主要生成孤立微孔, 导致样本局部电容增大而电阻下降较小, 因而第 3 支路时间常数随时间增大。而水树样本将生成水树通道, 导致样本局部电阻显著减小, 因而第 3 支路时间常数随时间减小。根据 PDC 第 3 支路时间常数时变特征可识别局部老化类型, 而结合 τ_{as} 数值可进一步判断局部老化状态。若电缆中仅存在热老化或水树老化单一老化形态, 初步认为 $\tau_{as}=1.3$ 可作为区分热老化及水树老化的标准。

关键词: XLPE 电缆; 局部老化; PDC 支路参数; 时变特征; 不对称系数; 微观结构

Diagnosis Method of the Local Aging Type of Cables Based on Time-varying Characteristics of PDC Branch Parameters

LI Kangle¹, HUO Wenbo¹, WANG Jie¹, ZHANG Yuantao¹, ZHOU Kai², ZHU Liang³

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. College of Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730071, China)

Abstract: In order to further investigate the diagnostic method of the local aging type of cables by polarization and depolarization current method (PDC), this paper analyzes the characteristics and the reasons of the PDC third branch parameters of cables with different local aging types. Eight groups of cable samples were prepared, and four of them were subjected to a thermal aging at 140 °C for 108 h, 216 h, 324 h and 432 h, respectively. The other four groups of samples were subjected to an accelerated water tree aging for 20 days, 40 days, 60 days, and 80 days at 7.5 kV and 400 Hz, respectively. PDC tests and scanning electron microscope observation were performed on the aged samples. PDC branch analysis results show that the time constant of the third branch of the thermal aged samples increases with time, while the time constant of the third branch of the water tree samples decreases with time. In addition, the asymmetry coefficient τ_{as} of the third branch time constant of the aged samples is higher than 1 and increases with time. The results of scanning electron microscopy show that there are a large number of isolated micropores in the thermal aged samples, and there are microcracks between the micropores of the water tree samples. The analysis shows that the thermal aging mainly generates isolated micropores, resulting in an increase in the local capacitance of the sample and a small decrease in the resistance, so the time constant of the third branch increases with time. The water tree sample can generate water tree channels, resulting in a significant decrease in the local resistance of the sample, so the time constant of the third branch decreases with time. According to the time-varying characteristics of the time constant of the third branch of PDC, differ-

ent local aging types can be identified, and the local aging condition can be further judged combined with the τ_{as} value. If there is only a single aging form of thermal aging or water tree aging in the cable, it is preliminarily considered that $\tau_{as}=1.3$ can be used as a standard to distinguish thermal aging and water tree aging.

Key words: XLPE cable; local aging; PDC branch parameter; time-varying characteristics; dissymmetry coefficient; microstructure

0 引言

交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)电缆因其优良的综合性能在我国城市配网得到大量应用。然而随着投运时间增加, 电缆逐渐进入“老龄期”, 电缆故障逐渐增加, 对电网安全运行造成潜在威胁^[1]。准确诊断电缆老化类型并判断老化程度对于提高电网运行稳定性具有重要意义^[2-3]。

极化去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)是目前广泛应用的电缆绝缘状态介电响应检测方法。国内外学者陆续提出直流电导率、低频介损、非线性系数、 I/t (I 为极化电流, t 为极化时间)等参数判断电缆绝缘老化状态^[4-8]。然而, 上述这些参数更多反映的是电缆整体老化状态, 不能很好识别电缆的局部老化。为诊断电缆局部老化状态, 研究者对水树老化电缆进行 Debye 模型三支路辨识, 并尝试利用老化因子(陷阱参数 A 、极化电荷量参数 Q 等)、第 3 支路极化去极化时间常数不对称系数等对电缆局部老化状态进行诊断^[7-9]。研究结果表明这些参数对于诊断电缆局部老化状态是有效的。然而上述支路参数仅能对电缆局部老化程度进行诊断, 无法判断局部老化类型。运行电缆存在热老化、水树老化等多种局部老化形式^[10-12], 如何利用支路参数以判断电缆局部老化类型值得进一步研究。

本文对热老化及水树老化电缆样本进行 PDC 测试, 研究了老化样本不同老化时期 PDC 支路参数特征及微观结构特征, 提出了基于 PDC 支路参数时变特征的电缆局部老化类型诊断方法。

1 实验设置

1.1 样本制作及老化

1) 加速热老化

在型号为 YJLV₂₂₃×95 型 8.7/10 kV XLPE 电缆上截取 12 根长度为 50 cm 的单相短电缆样本, 并将样本分为 A、B、C、D 4 组, 每组包括 3 根单相样本。对于每根单相样本, 去除样本外护套和铜屏蔽层, 剥除样本两端各 15 cm 的半导体层露出绝缘层

外表面, 如图 1 所示。之后将样本放置在烘箱中, 设置热老化温度为 140 °C, A—D 4 组样本热老化时间分别为 108、216、324 和 432 h。

2) 加速水树老化

在型号为 YJLV₂₂₃×95 型 8.7/10 kV XLPE 电缆上截取 20 根 50 cm 长的短电缆样本, 将样本分为 E、F、G、H 4 组, 每组包括 5 根单相样本。利用文献[11]所述方法制作水树老化样本。样本中部 25 cm 处是加速水树老化区, 该区域上下两侧制作约 50 个 3 mm 深的针孔缺陷。将 NaCl 溶液加入样本中部老化区的热缩管中, 溶液浓度为 1.8 mol/L, 进而对样本进行加速水树老化实验, 老化温度为 25 °C, 如图 2 所示。

老化电压有效值为 7.5 kV, 频率为 400 Hz。E-H4 组样本老化时间分别为 20、40、60、80 d。由后文分析可知, 本文加速热老化及加速水树老化等效老化时间接近, 两种老化 PDC 测试结果具有可比性。通过相近等效老化时间下热老化及水树老化 PDC 支路参数变化特征及规律, 提出 XLPE 电缆热老化及水树老化状况(老化类型及程度)PDC 支路参数诊断判据。



图1 热老化样本示意图

Fig.1 Schematic diagram of thermal aging samples

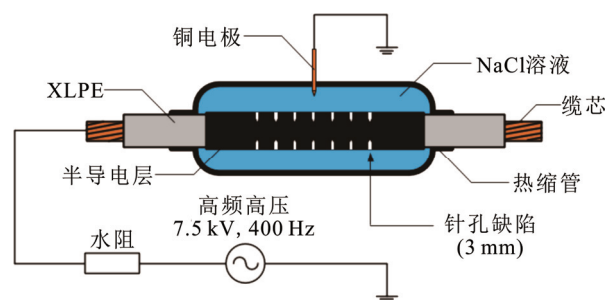


图2 样本加速水树老化原理图

Fig.2 Schematic diagram of accelerated water tree aging of the samples

3) 加速热老化及加速水树老化等效老化时间分析

为了比较加速热老化及加速水树老化等效老化时间, 将加速热老化及加速水树老化时间归结为 25 °C 下的老化时间。根据阿伦尼乌斯方程:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (1)$$

式中: k 为化学反应速率常数; R 为摩尔气体常量, 数值为 $8.3 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度; E_a 为表观活化能($100 \text{ kJ}/\text{mol}$)^[13]; A 为指前因子。计算得到 140 °C(413 K)及 25 °C(298 K)下的化学反应速率常数 k_1 与 k_2 之比约为 22 026。即在 140 °C 下 XLPE 化学反应速率约为 25 °C 下的 22 026 倍, 可以认为 140 °C 下 XLPE 等效热老化时间约为 25 °C 下热老化时间的 22 026 倍。

相比于运行电缆中的水树老化, 本文通过制作人工针孔缺陷(缺陷深度为 3 mm, 运行电缆中无针孔缺陷)及提高老化频率实现加速水树老化。根据已有研究, 水树生长速率 V 近似与电场幅值平方 E^2 和频率 f 之积成正比($V \propto E^2 f$)^[14]。本文加速水树老化频率为 400 Hz, 为 8 倍工频。另外, 制作针孔缺陷将导致水树尖端电场及生长速率增大。为搞清加速老化及运行条件下水树尖端场强, 建立水树电场仿真模型, 设置针孔缺陷模拟本文加速水树老化条件(仿真模型缆芯电压: 7.5 kV/400 Hz), 去除针孔缺陷模拟运行条件(仿真模型缆芯电压: 7.5 kV/50 Hz), 水树枝用“珍珠串”模型模拟, 见图 3。仿真模型几何及电气参数如表 1 及表 2, 水树尖端电场仿真结果见图 4。

由图 4 仿真结果可知(MN 为水树尖端沿电缆绝缘径向方向), 加速老化条件下水树尖端场强约为运行条件下的 25 倍^[15-17], 得到加速水树老化水树生长速率约为工况下水树生长速率的 5 000 倍(8×25^2)。统计加速热老化及加速水树老化 25 °C 下的等效老化时间, 如表 3 所示。由表 3 统计结果可知, 加速热老化和加速水树老化等效老化时间相近。

1.2 样本测试

1) PDC 检测

对热老化及水树老化样本进行 PDC 测试(在屏蔽室测量以排除电磁干扰), 测试温度为 25 °C, 如图 5 所示。对未老化样本同样进行 PDC 测试以作对比分析。

PDC 测试前将 PDC 高压端接在样本缆芯, 在样本含外半导体层的中部及两端缠绕铜屏蔽带并将

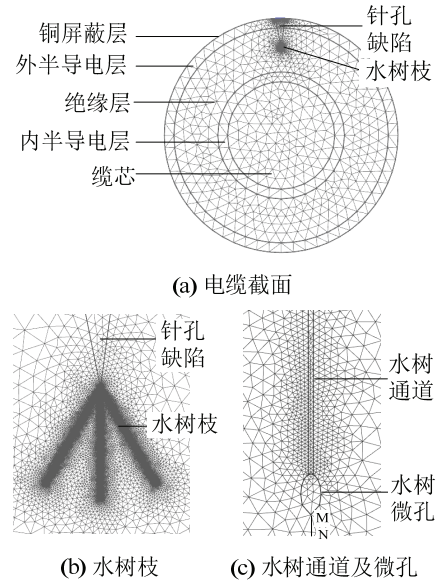


图 3 水树电场仿真模型

Fig.3 Electrical simulation model of water tree

表 1 仿真模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of simulation model

模型部件	尺寸/ μm
缆芯半径	5 500
内外半导体层厚度	1 000
绝缘层厚度	45 000
针孔缺陷	深度: 3 000, 直径: 900
水树主体(扇形)长度	153
水树通道(有针孔)	长度: 45, 宽度: 0.1
水树通道(无针孔)	长度: 45, 宽度: 0.05
水树微孔(有针孔)	长轴: 6, 短轴: 4
水树微孔(无针孔)	长轴: 3, 短轴: 2

表 2 仿真模型电气参数

Table 2 Electrical parameters of simulation model

仿真参数	电导率 $\gamma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	相对介电常数 ϵ_r
缆芯	3.82×10^7	10
绝缘层	1×10^{-14}	2.3
V 型缺陷	0.02	81
水树微孔	0.01	81
水树通道(有针孔)	0.001	20
水树通道(无针孔)	1×10^{-9}	10

其接地(两端铜屏蔽带接地以屏蔽表面泄漏电流)。PDC 测试电压设置为 1 kV, 通过切换开关 S 进行极化去极化电流测试(切换至 a 对应极化过程, 切换至 b 对应去极化过程)。极化时间和去极化时间均设置为 90 s^[11]。

10 kV 电缆通常是三芯电缆(图 6(a))。运行电缆通过金属护套接地(图 6(a)中为经小电阻接地)。而

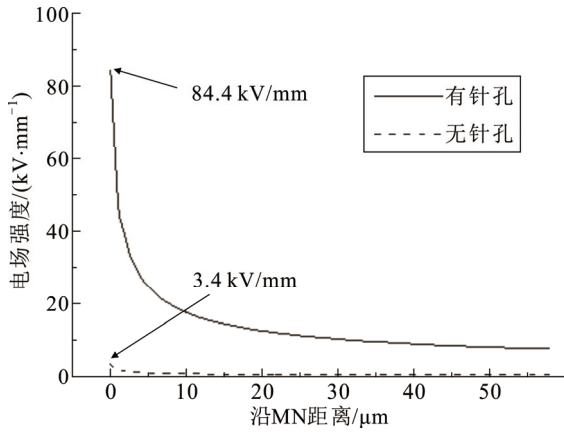


图4 水树尖端场强

Fig.4 Electric field strength at the water tree tip

表3 加速热老化及加速水树老化等效老化时间

Table 3 Equivalent aging time of the accelerated thermal aging and accelerated water tree aging

老化类型	老化时间/d	等效老化时间/d
加速热老化	4.5	99 117
	9	198 234
	13.5	297 351
	18	396 468
加速水树老化	20	100 000
	40	200 000
	60	300 000
	80	400 000

目前的 PDC 测试通常为(分相)离线测试。测试电压施加在单相缆芯及该相金属屏蔽层上(见图 6(b)), 测试结果主要反映单相绝缘老化状况, 与电缆整体接地方式无关。对于同一根相同老化状况电缆, 电缆接地方式对 PDC 等效电路及支路参数无影响。

2) 扫描电镜观测

将待测电缆样本老化(热老化或水树老化)部分绝缘截为 5 cm 长小段, 沿电缆轴向将小段电缆切成扇形柱状, 并在老化部位制作 V 形小口。将样本在液氮中浸泡 15 min, 之后在老化部位脆断, 对断面老化区域进行扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)观测, SEM 仪器型号为 JSM-7500F。

2 实验结果

2.1 PDC 测试结果

1) 极化去极化电流

热老化样本及水树老化样本 PDC 曲线见图 7—图 8。根据测试结果计算样本直流电导率 σ_0 及 0.1 Hz 介损, 计算结果如图 9—图 10 所示。

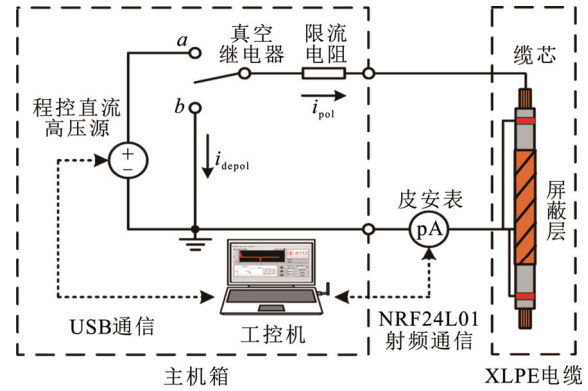


图5 老化样本 PDC 检测原理图

Fig.5 Schematic diagram of PDC detection of the aged samples

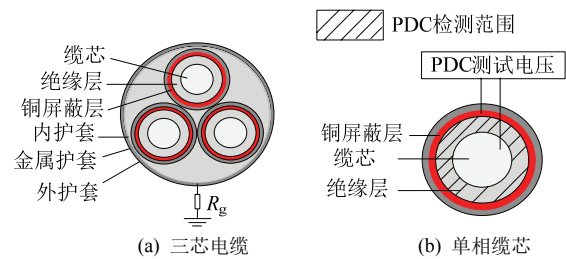


图6 10 kV 电缆结构及单相 PDC 测试接线

Fig.6 10 kV cable structure and single-phase PDC test wiring

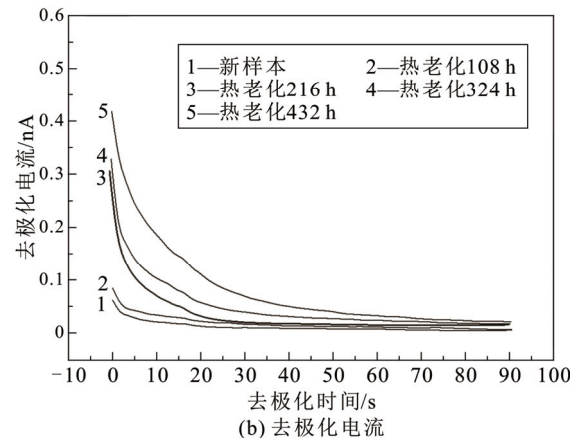
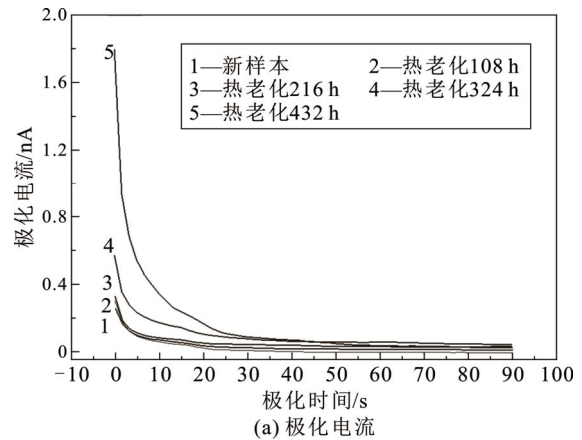


图7 热老化样本极化去极化电流

Fig.7 Polarization and depolarization currents of the thermal aged samples

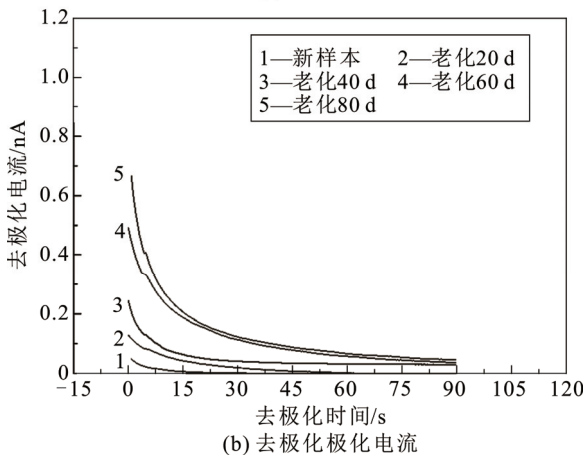
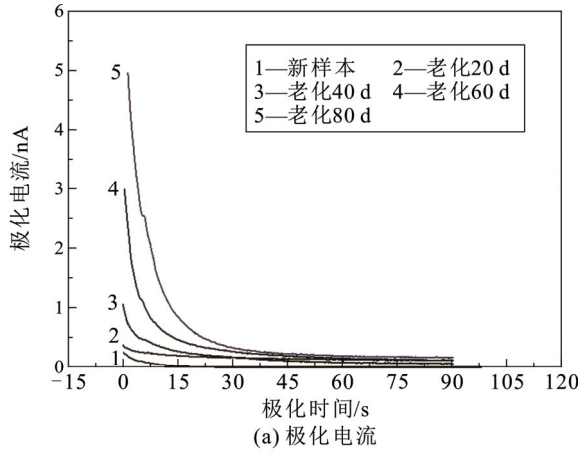


图 8 水树样本极化去极化电流

Fig.8 Polarization and depolarization currents of the water tree samples

由图9及图10可见, 热老化样本直流电导率 σ 及 0.1 Hz 介损远小于水树样本。热老化样本直流电导率先减小后增大, 其在老化初期的减小主要是由于重结晶所致。热老化432 h 样本 σ 为 4.4×10^{-16} S/m, 和未老化样本 σ 在同一数量级。而水树老化20 d 样本 σ 为 6.2×10^{-15} S/m, 比未老化样本增大一个数量级。老化80 d 水树样本 σ 为 4.0×10^{-14} S/m, 比未老化样本增大两个数量级。此外, 热老化432 h 样本 0.1 Hz 介损为0.48%, 而水树老化20 d 样本0.1 Hz 介损为0.67%, 此后显著增大, 至老化80 d 时0.1 Hz 介损增大至7.85%。由于水树样本中存在大量水树通道, 其和水树微孔相互连通, 导致样本直流电导率显著增大^[17]。而热老化样本中多为孤立微孔, 因此直流电导率增加幅度不大。由后文微观观测结果可知, 水树样本中微孔密度及尺寸远高于热老化样本, 因此其0.1 Hz 介损远高于热老化样本。

2) 支路参数

老化电缆样本极化去极化电流可用 Debye 模型

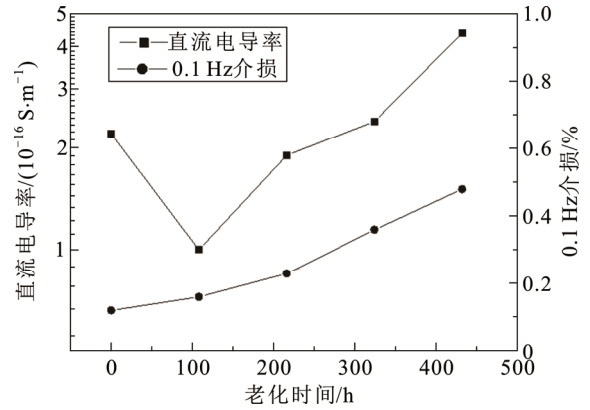


图 9 热老化样本电气参数

Fig.9 Electrical parameters of the thermal aged samples

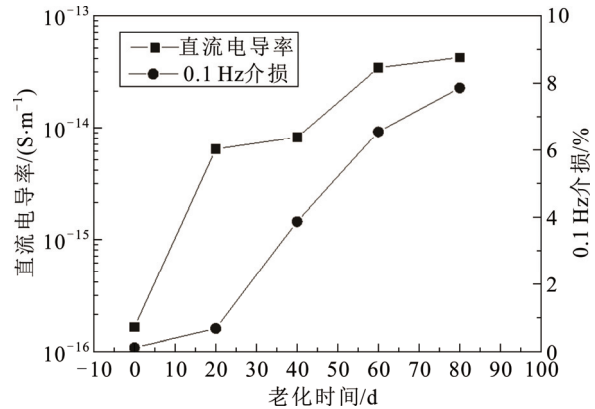


图 10 水树样本电气参数

Fig.10 Electrical parameters of the water tree samples

等效为并联的 RC 3 支路, 其中第 1、2 支路主要反映的是未老化的 XLPE 分子链端基的偶极极化, XLPE-半导体层界面极化及晶区-非晶区界面极化, 而第 3 支路主要反映的是因老化而导致的断裂分子链段偶极极化、气隙-XLPE 或水分-XLPE 界面极化过程^[11,18-19]。基于 Debye 模型对老化样本进行 3 支路参数辨识^[11,18]。根据辨识结果计算第 3 支路 PDC 时间常数(包括极化时间常数 τ_{p3} 及去极化时间常数 τ_{d3})及其不对称系数 τ_{as} , 统计结果如表 4 及表 5 所示。 τ_{as} 表达式为:

$$\tau_{as} = \frac{\tau_{d3}}{\tau_{p3}} \tag{2}$$

2.2 微观观测

热老化及水树老化样本 SEM 观测结果分别如图 11 及图 12 所示。

由图 11 及图 12 可知, 老化样本中存在老化微孔, 热老化样本微孔密度较小, 热老化 108 h 样本

表 4 热老化样本第 3 支路时间常数及不对称系数

Table 4 Time constants of the third branch of the thermal aged samples and their dissymmetry coefficients

老化时间/h	τ_{d3}	τ_{p3}	τ_{as}
0	93.76	92.83	1.01
108	129.23	123.08	1.05
216	141.38	126.23	1.12
324	167.08	144.03	1.16
432	182.32	147.03	1.24

表 5 水树老化样本第 3 支路时间常数及不对称系数

Table 5 Time constants of the third branch of the water tree aged samples and their dissymmetry coefficients

老化时间/d	τ_{d3}	τ_{p3}	τ_{as}
0	93.76	92.83	1.01
20	67.83	50.24	1.35
40	42.29	25.63	1.65
60	40.62	21.84	1.86
80	36.33	16.82	2.27

微孔尺寸约 1.3 μm ，热老化 432 h 后微孔尺寸增至约 2.1 μm 。水树老化样本微孔密度较大。水树老化 20 d 样本最大微孔尺寸为 0.3~0.4 μm ，此时尚观测不到水树通道。水树老化 40 d 样本水树区域最大微孔尺寸约 0.5 μm ，在靠近针孔处可观测到直径约 0.15 μm 的水树通道^[20]。老化 60 d 样本水树区域最大微孔尺寸增至约 1 μm ，且靠近针孔处可观测到直径约 0.3 μm 的水树通道。老化 80 d 时水树区域最大微孔尺寸增至约 2 μm ，且靠近针孔处可观测到直径约 0.4 μm 的水树通道。

3 讨论

3.1 基于 PDC 第 3 支路时间常数时变特征的 XLPE 电缆局部老化类型诊断方法

一般认为 Debye 模型各条 RC 串联支路分别对应一类极化类型。本文采用前述 Debye 支路辨识方法对热老化电缆及水树老化电缆的极化过程进行计算，发现两种老化均对应 3 条 Debye 电容电阻串联支路，如图 13 所示。

图中 R_0 为电缆绝缘电阻， C_0 为电缆几何电容， R_i 为支路电阻， C_i 为支路电容。3 条 R - C 支路分别代表不同极化时间的极化类型。由于第 3 支路时间常数随电缆老化程度增幅最大，判断该条支路对应老化电缆主要极化过程^[11]。

由表 4 及表 5 统计结果可知，热老化样本第 3 支路时间常数随时间增大，而水树老化样本第 3 支

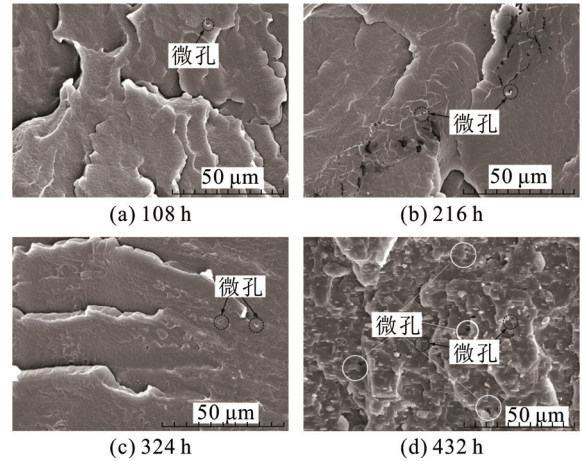


图 11 热老化样本微观形貌

Fig. 11 Microscopic morphologies of the thermal aged samples

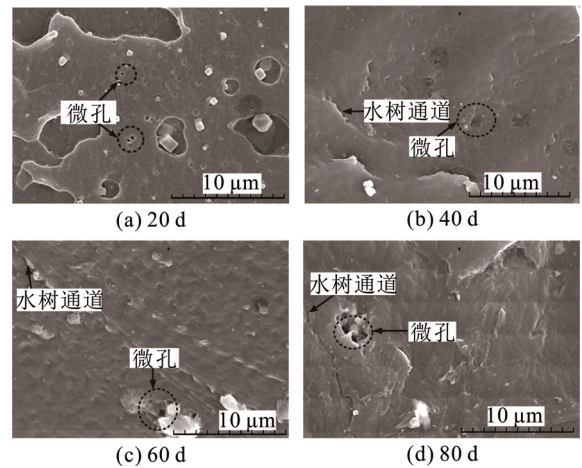


图 12 水树老化样本微观形貌

Fig. 12 Microscopic morphologies of the water tree aged samples

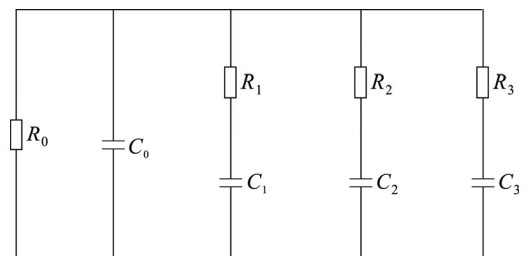


图 13 老化电缆三支路 Debye 模型

Fig. 13 Three-branch Debye model of aged cable

路时间常数随时间减小。第 3 支路时间常数 $\tau_3(R_3C_3)$ 主要取决于局部老化区域电阻及电容之积。

在不同老化形式下，样本绝缘微观结构将存在不同破坏特征，导致局部老化区域电阻及电容呈现

不同变化特征^[11,20]。热老化样本绝缘发生热氧化而导致晶区熔融、分子链段断裂并形成孤立微孔, 由于热老化微孔之间相互孤立, 因而热老化不会显著减小样本直流电导率^[11]。在热老化过程中, 断裂分子链段末端氧化生成羰基等极性基团, 导致热老化区域电容显著增大, 因此热老化样本第 3 支路时间常数随老化时间增大。

而对于水树老化样本, 在水树老化过程中将生成水树微孔及水树通道, 其将导致样本水树区域电容增大、电阻减小^[11]。为了研究水树微观结构对第 3 支路时间常数影响, 建立 Comsol 有限元仿真模型对水树区域电阻及电容进行仿真, 仿真模型同图 3, 几何及电气参数同有针孔缺陷时的水树模型参数。水树不同生长阶段的电阻电容变化主要体现为水树微孔的增加及水树通道的形成, 为此在不同老化阶段设置不同结构及串数的水树枝。初始阶段大量水树微孔彼此孤立, 随着老化时间增长, 水树微孔逐渐桥接连通。在不同阶段设置不同(微孔)桥接比例的水树枝进行仿真研究。仿真结果如表 6 所示。

由表 6 仿真结果可知, 随着老化时间增加, 水树区域电阻减小、电容增大, 且二者乘积呈减小趋势, 说明水树区域电阻减小幅度超过了电容增大幅度, 其根本原因是水树生长中将生成大量水树通道, 导致水树区域电阻显著下降^[17]。由此可见, 热老化将导致电缆第 3 支路时间常数随时间增大, 而水树老化将导致电缆第 3 支路时间常数随时间减小。

由此可知, 利用第 3 支路时间常数时变特征可以判断电缆老化类型。对于仅存在热老化或水树老化的单一老化类型电缆, 若电缆第 3 支路时间常数随时间增大, 可判断老化类型为热老化, 而若电缆第 3 支路时间常数随时间减小, 可判断老化类型为水树老化。此外, 由于本文水树为通风型水树且进行了加速老化, 水树老化程度较高, 因而上述结论对于水树老化较为严重的电缆是适用的。

3.2 XLPE 电缆微观结构破坏对 PDC 支路参数的作用

当样本中存在热老化、水树老化等局部缺陷时, 局部缺陷周围材料分子链段不同部位将发生老化或因分子链段断裂而产生极性基团, 这些分子链段在极化过程中将发生取向极化^[20]。XLPE 分子链段取向极化与分子主链单键内旋转有关。XLPE 的主链由 C—C 单键组成, 单键由 σ 电子组成, 电子云分布是轴对称的, 因此高分子在运动时 C—C 单键

可以绕轴旋转, 称为内旋转^[21](内旋转过程中各个键之间的键角保持不变, 为 $109^{\circ}28'$), 从而导致 XLPE 构象发生变化, 如图 14 所示, 图中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 均为 C—C 单键(均由 σ 电子组成), C 为碳原子, 圆锥体底面为 C 原子内旋转轨迹。

XLPE 局部分子链段取向能力与温度有关, 在玻璃化温度 T_g (约为 -5°C) 以上, XLPE 中自由体积增加使得局部分子链段具有足够的能量和空间以发生运动取向或解取向^[22]。无电场作用时, 在分子热运动作用下, XLPE 分子通过单键内旋转呈不规则的蜷曲构象^[21]。而在电场作用下, 电场力将克服局部分子链段热运动动能而使得局部分子链段向电场力的方向运动取向, 局部分子链段将沿电场定向排列。此外, 由于碳链上还有 H 原子或其他极性基团, 当这些原子或基团充分接近时, 原子的外层电子云之间将产生排斥力, 使之不能接近。这样, 单键内旋转受到阻碍, 旋转需要消耗一定的能量。即 C—C 键的内旋转具有位阻效应, 在旋转过程中会损耗能量。

由于高分子的结构比低分子复杂得多, 无法直接计算或测定不同构象相互跃迁的位垒 ΔE 、位垒差 $\Delta \varepsilon$ 及分子链段取向所需克服的活化能^[21]。有研究表明, 高分子在电场强度为 $0.1\sim 10\text{ MV/m}$ 的电场作用下, 即可发生取向行为^[22]。介电谱测试实验表明

表 6 不同阶段水树电路参数仿真结果

Table 6 Simulation results of the circuit parameters indifferent periods

老化时间/d	水树枝数/串	桥接比例/%	电阻/ Ω	电容/pF	τ /s
20	3	5	9.64×10^{12}	2.52	24.29
40	5	10	4.25×10^{12}	3.28	13.94
60	8	20	4.15×10^{11}	5.64	2.34
80	12	35	2.15×10^{10}	7.12	0.15

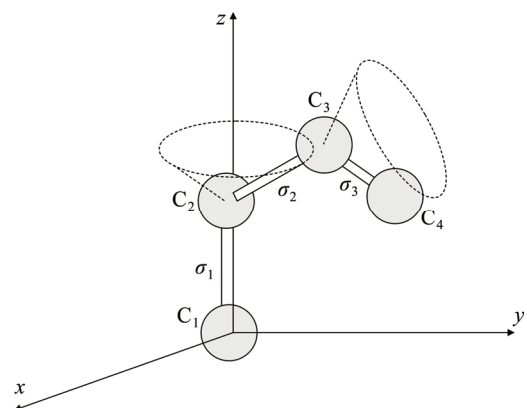


图 14 XLPE 的内旋转构象

Fig.14 Internal rotation conformation of XLPE

(测试电压通常为数伏), 在常温较低电压下 XLPE 即可发生介电弛豫^[20]。本文 PDC 测试极化电压为 1 kV, 远高于介电谱测试电压, 且其在电缆绝缘局部缺陷处的场强可达 0.6 MV/m(热老化气隙)或 11.3 MV/m(水树微孔), 因而在极化过程中 XLPE 分子链段能够在电场作用下发生取向。在去极化过程中, 局部取向分子链段将在分子热运动作用下解取向而回复蜷曲构象。

如图 15(a)所示, 假设一段断裂分子链段两端存在极性基团并等效为偶极子 A 和 B, 由于局部缺陷端部存在较高电场且偶极子 A(左端)受到的电场力更强, 偶极子 A 将牵引分子链段向局部缺陷端部运动, 从而导致分子链段发生取向^[23]。另一方面, 局部缺陷周围材料在老化过程中将在局部缺陷界面处产生自由基、离子等载流子, 在极化过程中这些载流子将发生界面极化, 如图 15(b)所示。在去极化过程中取向分子链段在分子热运动作用下逐渐解取向, 而界面极化载流子也在残余电场作用下逐渐消散。

由上述分析可知, 局部老化电缆样本第 3 支路极化(去极化)电流主要是由电缆绝缘局部缺陷周围 XLPE 断裂分子链段的取向极化(解取向去极化)、界面极化(界面去极化, 即界面电荷消散)等构成。第 3 支路极化是在局部缺陷处较高畸变电场作用下产生, 而去极化是在分子热运动或内部残余电场(远小于极化电场)作用下产生的, 由于测试温度较低(25 °C), 局部高电场对极化的作用强于分子热运动及残余电场对去极化的作用, 导致极化时间及去极化时间产生不对称性, 即第 3 支路去极化时间高于极化时间。对于存在局部老化的电缆, 其第 3 支路时间常数不对称系数 τ_{as} 将高于 1。

随着老化时间增长及老化程度增大, 断裂分子链段及载流子增加, 此时局部缺陷处的极化时间及去极化时间均将增加, 而由于极化过程是在较高畸变电场作用下产生的, 极化容易发生, 而去极化过程是在分子热运动或内部参与电场下产生的, 去极化相对于极化更难完成, 对应更长的去极化时间。因此随着老化程度增大, 去极化及极化过程的不对称性将增强, 去极化时间和极化时间之间的差别将增大, 导致 τ_{as} 增大。此外, 由于水树老化对材料的破坏远高于热老化, 将导致更多分子链段断裂及生成更多载流子, 因此水树老化电缆样本 τ_{as} 显著高于热老化电缆样本。根据 PDC 支路分析结果, 若电缆中仅存在热老化或水树老化单一老化形态, 初步认

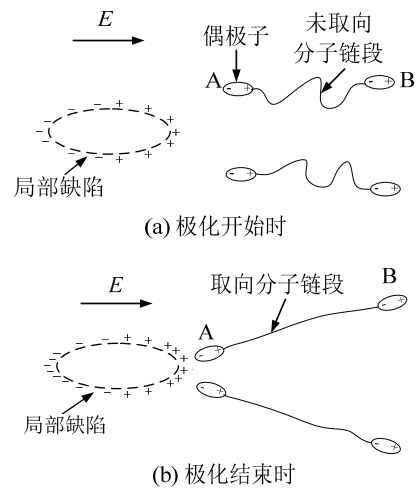


图 15 局部缺陷处取向极化及界面极化

Fig.15 Orientation polarization and interfacial polarization in local defects

为 $\tau_{as}=1.3$ 可作为区分热老化及水树老化的标准。 $\tau_{as}<1.3$ 时为热老化, 而 $\tau_{as}>1.3$ 时为水树老化。

4 结论

1) 根据 PDC 第 3 支路时间常数 τ_3 时变特征可判断电缆局部老化类型。对于仅存在热老化或(较严重)水树老化的电缆, 若 τ_3 随时间增大, 判断为热老化, 若 τ_3 随时间减小, 则判断为水树老化。

2) 老化样本 PDC 第 3 支路时间常数 τ_3 时变特征与材料局部微观结构破坏紧密相关。热老化主要生成孤立微孔并导致电容增大, 导致 τ_3 随时间增大。水树老化将同时生成水树微孔及通道, 样本电导显著减小, 导致 τ_3 随时间减小。

3) 热老化样本及水树老化样本第 3 支路时间常数不对称系数 τ_{as} 均高于 1 且随时间增大。根据 τ_{as} 可进一步判断样本局部老化程度。若电缆中仅存在热老化或水树老化单一老化形态, 初步认为 $\tau_{as}=1.3$ 可作为区分热老化及水树老化的标准。

参考文献 References

- [1] 单秉亮, 李舒宁, 杨霄, 等. XLPE 配电电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4809-4819. SHAN Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, et al. Key problems faced by defect diagnosis and location technologies for XLPE distribution cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4809-4819.
- [2] 王伟, 郑健康, 王光明, 等. 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆技术基础[M]. 3版. 西安: 西北工业大学出版社, 2011. WANG Wei, ZHENG Jiankang, WANG Guangming, et al. Base of XLPE insulation for electric cable technology[M]. 3rd ed. Xi'an, China: Northwest Polytechnical University Press, 2011.

- [3] OYEGOKO B, BIRWHISTLE D, LYALL J. Condition assessment of XLPE cable insulation using short-time polarisation and depolarisation current measurements[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2008, 2(1): 25-31.
- [4] 赵艾萱, 陈 曦, 徐 龙, 等. 时域/频域介电响应在 XLPE 电缆绝缘诊断的应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 292-302. ZHAO Aixuan, CHEN Xi, XU Long, et al. Application of dielectric response in diagnoses of time and frequency domain on XLPE cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 292-302.
- [5] 王昊月, 孙茂伦, 赵凯杰, 等. 电缆绝缘老化的高压频域介电谱诊断评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3630-3641. WANG Haoyue, SUN Maolun, ZHAO Kaijie, et al. High voltage FDS diagnosis and evaluation method for cable insulation aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3630-3641.
- [6] 叶 刚, 姚星辰, 李 涛, 等. XLPE 电缆绝缘老化的时频域介电特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3713-3719. YE Gang, YAO Xingchen, LI Tao, et al. Time/frequency domain dielectric characteristics of XLPE cable insulation aging[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3713-3719.
- [7] 赵艾萱, 刘 健, 徐 龙, 等. 基于 PDC 法的在运 XLPE 电缆绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1542-1550. ZHAO Aixuan, LIU Jian, XU Long, et al. Insulation status evaluation of in-service cables based on polarization and depolarization current[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1542-1550.
- [8] 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. YANG Fan, SHEN Yu, WANG Yanbo, et al. Thermal aging status diagnosis of XLPE cable using polarization/depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 496-503.
- [9] 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. MA Xiao, LI Kangle, ZHOU Kai, et al. PDC branch parameter characteristics of water tree aged cables based on the microstructural characteristics of water trees[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 716-723.
- [10] 李康乐, 周 凯, 张宏亮, 等. 基于 XLPE 粘弹特性的水树生长非线性损伤特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4207-4215. LI Kangle, ZHOU Kai, ZHANG Hongliang, et al. Non-linear damage characteristics of water tree propagation based on viscoelasticity characteristics of XLPE[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4207-4215.
- [11] 李康乐, 周 凯, 张桥峰, 等. 水树生长中 XLPE 晶区破坏现象及其对水树生长速率的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 4095-4103. LI Kangle, ZHOU Kai, ZHANG Qiaofeng, et al. Phenomenon of XLPE crystalline region damage in water tree propagation and its influence on propagation rate of water trees[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4095-4103.
- [12] 陈伟林, 周 凯, 林思衍, 等. 短时高温运行对 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.
- [13] 章 彬, 徐 曙, 巩俊强, 等. 国产与进口高压电缆交联聚乙烯绝缘耐热老化性能对比分析[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 32-39. ZHANG Bin, XU Shu, GONG Junqiang, et al. Comparative analysis on heat ageing resistance of domestic and imported XLPE insulation for high voltage cables[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 32-39.
- [14] CRINE J P, JOW J. A water treeing model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 801-808.
- [15] STANCU C, NOTINGHER P V, CIUPRINA F, et al. Computation of the electric field in cable insulation in the presence of water trees and space charge[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 30-43.
- [16] RADU I. Electric field calculation and the influence of water trees on insulation breakdown in needle-plane geometry[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 60(1): 49-67.
- [17] LI Kangle, ZHOU Kai, ZHU Guangya. Toward understanding the relationship between the microstructure and propagation behavior of water trees[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1116-1124.
- [18] 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): 971-979.
- [19] 朱 博, 朱亚琦, 王天宇, 等. 基于宏观参数结合的 XLPE 电缆水树诊断研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 74-81. ZHU Bo, ZHU Yaqi, WANG Tianyu, et al. Water tree diagnosis of XLPE cable based on combination of macro and micro parameters[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 74-81.
- [20] 李康乐, 周 凯, 黄 明, 等. XLPE 在电场作用下的取向对温度变化条件下水树生长的促进作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 956-964. LI Kangle, ZHOU Kai, HUANG Ming, et al. Mechanism of XLPE orientation under the effect of electric field on promoting water tree propagation under the condition of temperature transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 956-964.
- [21] 何曼君. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990. HE Manjun. High polymers[M]. Shanghai, China: Fudan University Press, 1990.
- [22] 余 翔, 韩 铭, 杨小震. 分子动力学模拟研究线性聚乙烯链在强电场中的取向行为[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(1): 180-184. YU Xiang, HAN Ming, YANG Xiaozhen. Molecular dynamics simulation study on the reorientation behavior of linear polyethylene under high electric field[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2011, 32(1): 180-184.
- [23] THUE W A. 电力电缆工程[M]. 孙建生, 徐晓峰, 译. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2014. THUE W A. Electrical power cable engineering[M]. SUN Jiansheng, XU Xiaofeng, trans. 3rd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2014.



LI Kangle

Ph.D.

Associate professor



HUO Wenbo



ZHOU Kai

Ph.D., Professor

Corresponding author

李康乐

1990—, 男, 博士, 副教授, 硕导

主要研究方向为电缆老化机理、电缆缺陷定位及老化状态诊断、新型电缆绝缘材料研发等

E-mail: likangle109@126.com

霍文博

1999—, 男, 硕士生

主要研究电缆老化及状态诊断

周 凯(通信作者)

1975—, 男, 博士, 教授, 博导

主要研究电缆绝缘状态检测与修复等

E-mail: zhokai_scu@163.com