

# 基于PDC法的核级中压电缆老化状态研究

孙宇飞<sup>1</sup>, 张青雨<sup>2</sup>, 云浩<sup>1</sup>, 张益舟<sup>1</sup>, 王雷<sup>1</sup>, 汪亮<sup>1</sup>, 桂春<sup>1</sup>

(1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430223;

2. 华能山东石岛湾核电有限公司, 山东 威海 264300)

**摘要:**对核级中压电缆开展热-水树和辐照-水树老化试验,基于PDC法对不同老化时间的核级中压电缆进行测试,得到不同电压下的电导率,并通过电导率得出不同老化条件下的非线性系数。结果表明:随着老化时间的增加,两种老化条件下电缆试样的非线性系数均呈逐渐增大的趋势。在热-水树联合老化条件下,随着老化时间的增加,O-H键的吸收峰强度增强,说明电缆试样水树老化越严重;在辐照-水树老化试验中,O-H键的吸收峰强度略有增强,说明水树老化程度有所增加。同时,水树老化电缆试样的红外光谱虽然在 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现了O-H键的特征峰,但该峰值随着辐照剂量的增加变化较小。因此,红外光谱测试中O-H键吸收峰的结果不能很好地反映电缆的辐照老化状态,而只能反映水树老化状态。

**关键词:**核级中压电缆;水树;PDC;老化状态

中图分类号:TM215;TM247 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)05-0061-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.05.009

## Study on Ageing State of Nuclear Grade Medium Voltage Cable Based on PDC Method

SUN Yufei<sup>1</sup>, ZHANG Qingyu<sup>2</sup>, YUN Hao<sup>1</sup>, ZHANG Yizhou<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, GUI Chun<sup>1</sup>

(1. China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan 430223, China;

2. Huaneng Shandong Shidaowan Nuclear Power Co., Ltd., Weihai 264300, China)

**Abstract:** Nuclear grade medium voltage cables were conducted thermal-water tree and irradiation-water tree ageing tests. The nuclear grade medium voltage cables with different ageing time were tested by PDC method to obtain the conductivity under different voltages, and the nonlinear coefficients under different ageing conditions were obtained through the conductivity. The results show that with the increase of ageing time, the nonlinear coefficients of the cable samples under two ageing conditions increase gradually. Under the condition of heat-water tree combined ageing, with the increase of ageing time, the absorption peak intensity of O-H bond increases, indicating that the cable samples are water tree aged more seriously. In the irradiation-water tree ageing test, the absorption peak intensity of O-H bond increases slightly, indicating that the ageing degree of water tree increases. At the same time, although the characteristic peak of O-H bond appears near  $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$  in the infrared spectra of water tree aged cable sample, the peak value changes little with the increase of irradiation dose. Therefore, the results of O-H bond absorption peak in infrared spectrum test can not well reflect the radiation ageing state of cable, but can only reflect the ageing state of water tree.

**Key words:** nuclear grade medium voltage cable; water tree; PDC; ageing state

## 0 引言

核级中压电缆作为核电厂重要的电力设备之一,其绝缘状态直接关系到机组的安全运行。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)由于其具有优良的电气性能、力学性能和抗辐照等特性,是目前使用最广泛的核电厂中压电缆绝缘材料<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2021-05-26 修回日期:2021-07-12

基金项目:华能集团总部科技项目(HNKJ18-H44HTR-PM)

作者简介:孙宇飞(1993-),男(汉族),黑龙江七台河人,工程师,主要从事核电厂电仪设备状态监测与老化状态管理方面的研究;张益舟(1986-),男(汉族),湖北黄冈人,高级工程师,主要从事核电厂设备状态监测与诊断的研究。

电缆在运行过程中,会受到电、热、水分<sup>[3]</sup>、辐照等因素的作用,导致绝缘发生老化降质甚至绝缘失效,影响核电厂的安全稳定运行,因此对核电厂中核级中压电缆的绝缘状态监测势在必行。

周凯等<sup>[4]</sup>对4种不同极性整流电压下XLPE材料的水树生长特性进行了对比分析。李康乐等<sup>[5]</sup>利用极化-去极化电流法测量不同老化阶段的电缆试样,发现老化电缆的电气性能和水树长度不呈正相关的关系。陶文彪等<sup>[6]</sup>采用水针电极、高频高压的方法分析了电缆中水树生长与电-机械应力的关系。AN JAHROMI等<sup>[7]</sup>对中压电缆的频域介电特性进行分析,研究了不同电压下中压电缆的频域介质损耗的变化规律。综合国内外现有报道,主要集中在单一老化条件下对电缆进行研究,而对联合老化条件下的研究鲜有报道。

本研究对核级中压电缆进行热-水树<sup>[8]</sup>联合老化以及辐照-水树联合老化试验,并对老化后的电缆试样进行一系列的性能测试(包括理化性能和电气性能),研究核级中压电缆在不同联合老化条件下的绝缘特性,并基于PDC测试方法<sup>[9-10]</sup>根据测试数据提取相应参数,对核级中压电缆的老化状态进行分析。

## 1 试验

### 1.1 老化试验

采用四川明星电缆厂生产的核级中压电缆为研究对象,型号为HDYJLE,规格为1×95 mm<sup>2</sup>,电压等级为8.7/10 kV,导体材料为铝,绝缘材料为XLPE。

从电缆上截取30根长度为35 cm的试样进行热-水树老化(先热老化再水树老化)、辐照-水树老化(先辐照老化再水树老化)。其中,热-水树联合老化试样的热老化时间分别设定为30、60、90 d,热老化温度为135℃。辐照-水树联合老化试样的辐照老化累计剂量为360、1 080、1 800 kGy。进行水树老化时,剥除电缆外护套、铜屏蔽层等,并剥除一端绝缘层,露出长度约为2 cm的缆芯。随后分别在电缆两端剥掉8 cm的外半导体层,用于保持足够的绝缘距离。取中部17 cm处为水树老化区,选用一次性注射器钢针(针尖曲率半径为(2.5±0.5)μm)在老化区域的外半导体层上等间距(3~5 mm)地扎出深度约为3 mm的针孔缺陷。在试样中间位置套上热缩管,用热风枪加热端部,使其收缩套在电缆半

导电层两端,在热缩管中央开一个小孔,注入浓度为1 mol/L的NaCl溶液作为导电溶液。采用图1所示水树老化试验平台对电缆试样进行水树老化,施加电压为7.5 kV,频率为400 Hz,老化时间共90 d,每隔15 d取样1次。

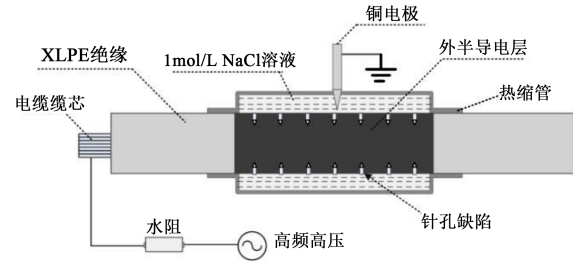


图1 水树老化试验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of water tree ageing test platform

## 1.2 PDC测试

### 1.2.1 PDC法原理

极化-去极化是介质在外加电场作用下的一种介质响应,现阶段主要为通过实时监测介质中极化-去极化电流的变化来观测整个极化-去极化过程。极化电流包括瞬时充电电流、吸收电流和稳态泄漏电流3个部分,其中瞬时充电电流是由电子极化、离子极化和偶极子极化3个过程产生,吸收电流则主要由界面极化和空间电荷移动产生。

根据麦克斯韦方程,理想电缆XLPE绝缘层中的全电流密度满足式(1)。

$$\vec{J}(t) = \sigma_0 \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma_0 \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: $\sigma_0$ 为XLPE绝缘层的电导率; $\vec{E}$ 为各项同向介质所施加的电场强度; $\vec{D}$ 为电位移矢量, $t$ 为时间; $\epsilon_0$ 是真空介电常数, $\epsilon_0=8.842 \times 10^{-12}$  F/m; $\vec{P}$ 为极化强度。等式右边的第一项为感应电流,第二项为真空位移电流,第三项为包含了快极化和慢极化过程的极化电流。

展开式(1),可得到全电流表达式为式(2)。

$$\vec{J}(t) = \sigma_0 \vec{E} + \epsilon_0 \epsilon_\infty \frac{d\vec{E}(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(\tau) \vec{E}(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

式(2)中: $\epsilon_\infty$ 为光频介电常数; $\tau$ 为松弛时间。

极化电流表示为式(3)。

$$i_{\text{pol}} = C_0 U_0 \left[ \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (3)$$

式(3)中: $U_0$ 为极化电压; $C_0$ 为电缆的几何电容; $f(t)$ 是反映绝缘电介质慢极化行为的响应函数。

当  $t=t_c$  ( $t_c$  为充电时间) 时, 被测电缆对地短接, 根据叠加定理可以等效为从  $t=t_c$  时刻起, 对 XLPE 绝缘施加电压  $U_c$ , 可得到去极化电流表达式如式(4) 所示。

$$i_{\text{depol}} = -C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_c)] \quad (4)$$

式(4)中, 由于  $f(t)$  是单调递减函数, 当  $t_c$  较大时, 等式右边第2项可以忽略。

电缆水树老化通常从内、外半导体层与绝缘层的交界面处引发, 随着老化时间的增加, 水树区域的电导率会突然增大, 由式(3)和式(4)可得电导率公式如式(5)所示。

$$\sigma_0 \approx \frac{\epsilon_0}{C_0 U_0} [i_{\text{pol}}(t) + i_{\text{depol}}(t)] \quad (5)$$

由于核电厂中压电缆所处的环境受湿度因素影响较大, 当湿度较大时, 由极化-去极化电流得到的电导率会受到一定的影响, 需要进一步引入非线性因子(DONL)来评估电缆的非线性程度, 其定义如式(6)所示。

$$\text{DONL} = \frac{\sigma_{2\text{kV}}}{\sigma_{1\text{kV}}} \quad (6)$$

式(6)中,  $\sigma_{2\text{kV}}$  和  $\sigma_{1\text{kV}}$  分别是极化电压为2 kV 和1 kV 时的电导率。正常情况下, 非线性系数取值约为1。

### 1.2.2 PDC 测试步骤

对每个时间点取样的水树老化电缆进行极化-去极化电流(PDC)测试, 先使用1 kV 的极化电压对被测电缆进行PDC测试, 采集极化-去极化电流, 极化与去极化时间均为90 s, 得到1 kV 极化电压下被测电缆的直流电导率。升高极化电压至2 kV, 进行2 kV 极化电压下的PDC测试, 并计算2 kV 极化电压下被测电缆的直流电导率, 然后计算电缆绝缘的非线性系数。

为了减小表面泄漏电流对测试的影响, 使用无水酒精擦拭电缆表面后, 在电缆两端加装屏蔽环。短接待测电缆的缆芯与屏蔽接地线一段时间后, 将电缆试样置于接地的金属屏蔽箱中, 以尽量减小外部电磁干扰对测试的影响, 整个测试过程保持在同一温度与湿度环境下。此外, 考虑到开关切换状态时可能对PDC测试造成影响, 因此在开关切换1 s 后再使用皮安表采集电流数据。

### 1.3 傅里叶红外光谱测试

选用美国热电公司 Nicolet 6700 型傅里叶红外光谱仪进行测试, 波数为  $4\ 000 \sim 400\ \text{cm}^{-1}$ , 波数精度为  $0.01\ \text{cm}^{-1}$ , 分辨率为  $0.09\ \text{cm}^{-1}$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 热-水树联合老化

#### 2.1.1 极化-去极化测试结果

对热-水树联合老化电缆进行PDC测试, 并对其结果进行数据处理得到直流电导率以及非线性系数。以1 kV 测试电压为例, 水树老化不同时间试样的极化/去极化电流变化曲线如图2~4所示。

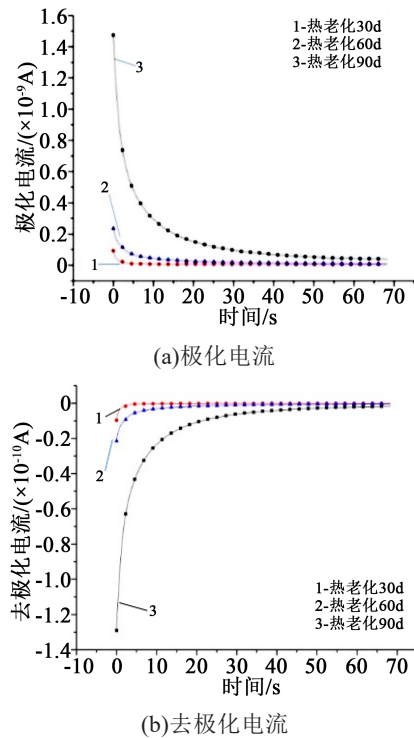
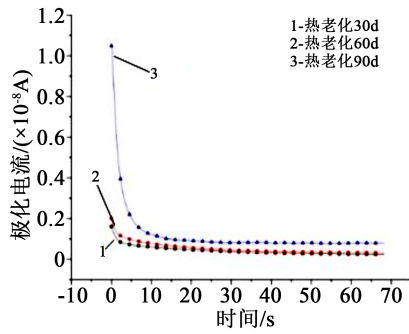


图2 水树老化30 d时不同热老化时间试样的PDC测试曲线

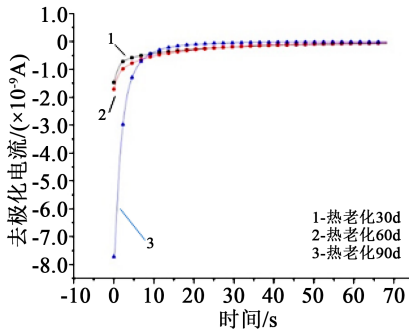
Fig.2 PDC test curves of samples under different time of thermal ageing and 30 d of water tree ageing

从图2~4可以看出, 水树老化30 d和水树老化60 d的试样, 基本保持了热老化时间越长, 其极化电流幅值越大的变化趋势, 说明逐渐被破坏的绝缘结构导致其Debye模型中时间常数不断变化。对于水树老化90 d的试样, 其去极化电流的波形基本相同, 而极化电流末端的电导电流分量显著增大, 使其直流电导率迅速上升, 说明其内部可能有大量的水树通道完成了桥接, 使得绝缘性能大幅下降, 而失去外电场作用后, 又恢复原状, 使得去极化电流的波形基本不变。

热-水树联合老化电缆试样在1 kV 和2 kV 下的直流电导率如图5所示。从图5可以看出, 直流电导率在热-水树联合老化初期有所上升, 并且随着



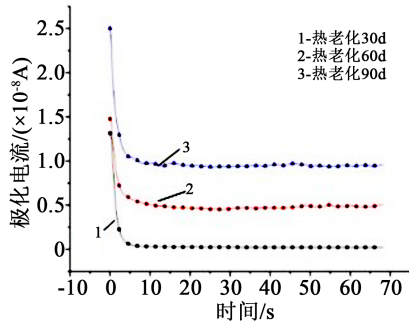
(a)极化电流



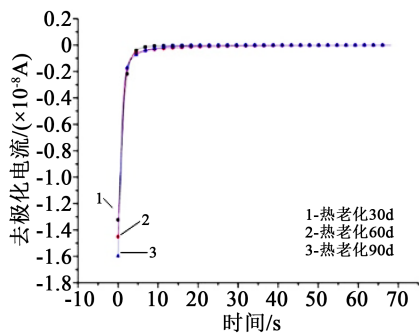
(b)去极化电流

图3 水树老化 60 d时不同热老化时间试样的 PDC 测试曲线

Fig.3 PDC test curves of samples under different time of thermal ageing and 60 d of water tree ageing



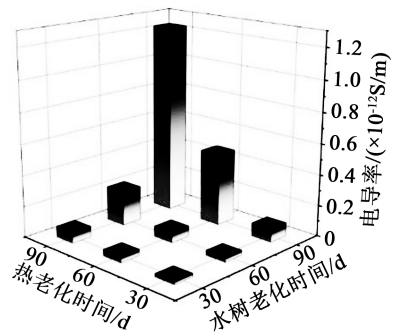
(a)极化电流



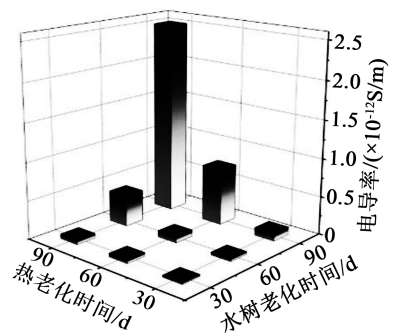
(b)去极化电流

图4 水树老化 90 d时不同热老化时间试样的 PDC 测试曲线

Fig.4 PDC test curves of samples under different time of thermal ageing and 90 d of water tree ageing



(a)1 kV



(b)2 kV

图5 不同电压下热-水树联合老化试样直流电导率

Fig.5 DC conductivity of heat-water tree combined ageing samples under different voltages

老化时间的增加,热老化对绝缘结构中分子链段的破坏使得原本较为紧密的高分子聚乙烯结构产生了缺陷,因而促进了水树的生长,进而使得大量水分通过水树通道进入绝缘层内部,使得直流电导率剧烈上升,在老化最为严重的热老化 90 d-水树老化 90 d 试样中,其直流电导率的平均值已经超过  $10^{-12}$  数量级,属于严重老化情况。

热-水树联合老化不同时间试样的非线性系数如表 1 所示。从表 1 可以看出,在水树老化 30 d 的试样中,热老化时间对于电缆试样的非线性系数影响不大;而随着水树老化时间的增加,电缆整体的非线性特性逐渐显现。

表1 热-水树联合老化不同时间试样的非线性系数

Tab.1 Nonlinear coefficient of heat-water tree combined ageing samples with different ageing time

试验条件	水树老化 30 d	水树老化 60 d	水树老化 90 d
热老化 30 d	1.07	1.12	1.14
热老化 60 d	1.12	1.21	1.75
热老化 90 d	1.09	1.82	2.04

2.1.2 傅里叶红外光谱测试结果

热-水树联合老化试样的傅里叶红外光谱测试结果如图6所示。

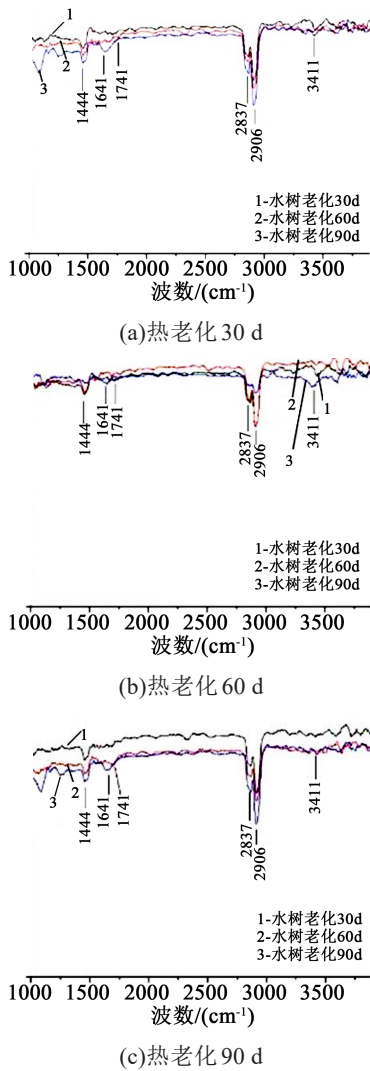


图6 热-水树联合老化试样的IR图  
Fig.6 IR spectra of heat-water tree combined ageing samples

由图6可知,老化电缆的红外光谱在 $1641\text{ cm}^{-1}$ 和 $3411\text{ cm}^{-1}$ 处均存在特征吸收峰,对应为水分子的伸缩振动峰,随着热老化时间的增加,O-H键吸收峰的强度增强,表明热老化对水树老化有促进作用。

2.2 辐照-水树联合老化

2.2.1 极化-去极化测试结果

对辐照-水树联合老化电缆进行PDC测试,并对其结果进行数据处理得到直流电导率以及非线性系数。以 $1\text{ kV}$ 测试电压为例,水树老化不同时间试

样的极化/去极化电流的变化曲线如图7~9所示。

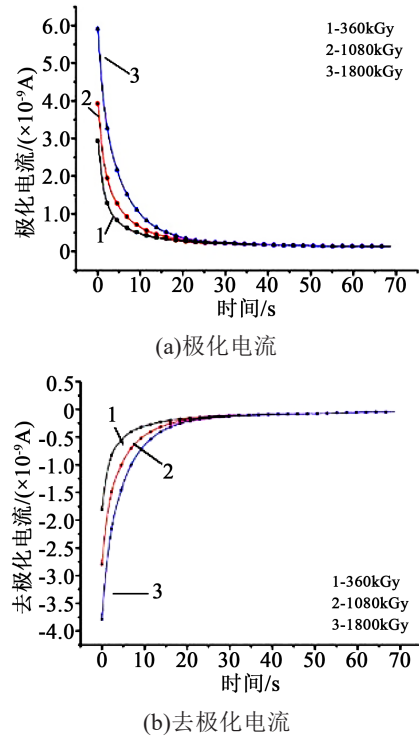
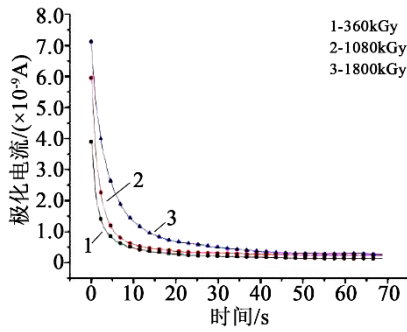


图7 水树老化30 d时不同辐照剂量下试样的PDC测试曲线

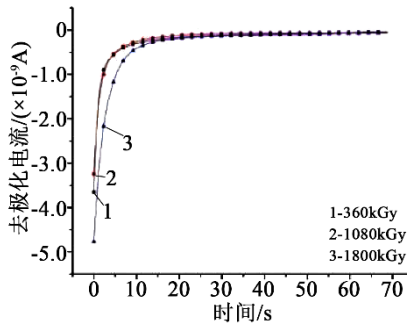
Fig.7 PDC test curves of samples under different irradiation doses and 30 d of water tree ageing

从图7~9可以看出,对于水树老化30 d和60 d的试样,随着辐照剂量的增加,极化电流的幅值逐渐增大,在水树老化90 d的试样中,极化电流末端的电导电流分量随着辐照剂量的增加而显著增大,在失去外电场作用后,又恢复原状,使得去极化电流的波形基本不变,这与热-水树联合老化试样的变化趋势相同。

辐照-水树联合老化试样在 $1\text{ kV}$ 和 $2\text{ kV}$ 下的直流电导率如图10所示。从图10可以看出,对于同一水树老化时间的试样,随着辐照剂量增大,直流电导率表现出迅速增大的趋势;对于相同辐照剂量的试样,随着水树老化时间的增加直流电导率也表现出迅速增大的趋势,这是由于辐照的高能射线轰击长链聚合物分子导致其断链逐渐增加,大量极性基团在直流电场的作用下发生移动,聚合物晶区与无定形区之间的结构紧密程度差距逐渐减小,水树在其中快速生长,并且由于水树通道中含有较多的可移动离子,因此在极化-去极化测试中表现为电导率的快速增大。



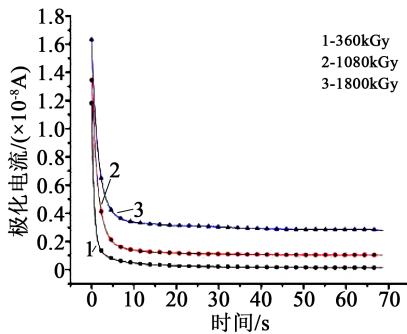
(a)极化电流



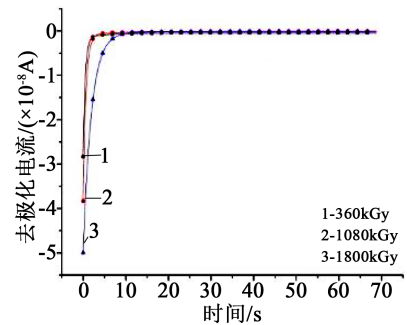
(b)去极化电流

图8 水树老化60d时不同辐照剂量下试样的PDC测试曲线

Fig.8 PDC test curves of samples under different irradiation doses and 60 d of water tree ageing



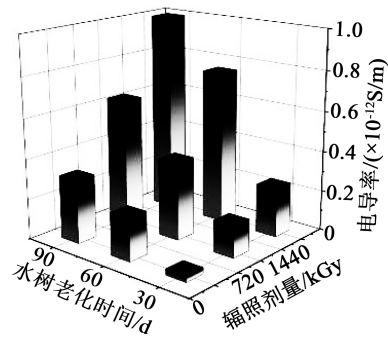
(a)极化电流



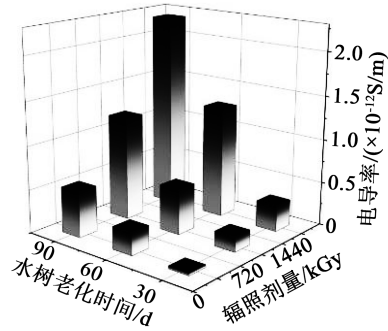
(b)去极化电流

图9 水树老化90d时不同辐照剂量下试样的PCD测试曲线

Fig.9 PDC test curves of samples under different irradiation doses and 90 d of water tree ageing



(a)1 kV



(b)2 kV

图10 不同电压下辐照-水树联合老化试样直流电导率

Fig.10 DC conductivity of irradiation-water tree combined ageing samples under different voltages

表2为辐照-水树联合老化不同时间试样的非线性系数。从表2可以看出,在相同辐照剂量下,随着水树老化时间的增加,非线性系数逐渐增大;而随着辐照剂量的增加,电缆整体的非线性特性逐渐显现。

表2 辐照-水树联合老化不同时间试样的非线性系数

Tab.2 Nonlinear coefficient of irradiation-water tree combined ageing samples with different ageing time

试验条件	辐照 360 kGy	辐照 1080 kGy	辐照 1800 kGy
水树老化 30 d	1.04	1.14	1.51
水树老化 60 d	1.23	1.25	1.68
水树老化 90 d	1.67	1.89	2.24

2.2.2 傅里叶红外光谱测试结果

不同老化时间下辐照-水树联合老化试样的傅里叶红外光谱测试结果如图11所示。从图11可以看出,辐照-水树老化试样的红外光谱中719、1468、2851、2915  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征峰分别对应- $\text{CH}_2$ -面外变形振动、对称和不对称伸缩振动峰。老化试样的红外光谱在1640  $\text{cm}^{-1}$ 和3432  $\text{cm}^{-1}$ 处出现了特征吸收峰,对应水分子的伸缩振动峰,随着水树老化时间

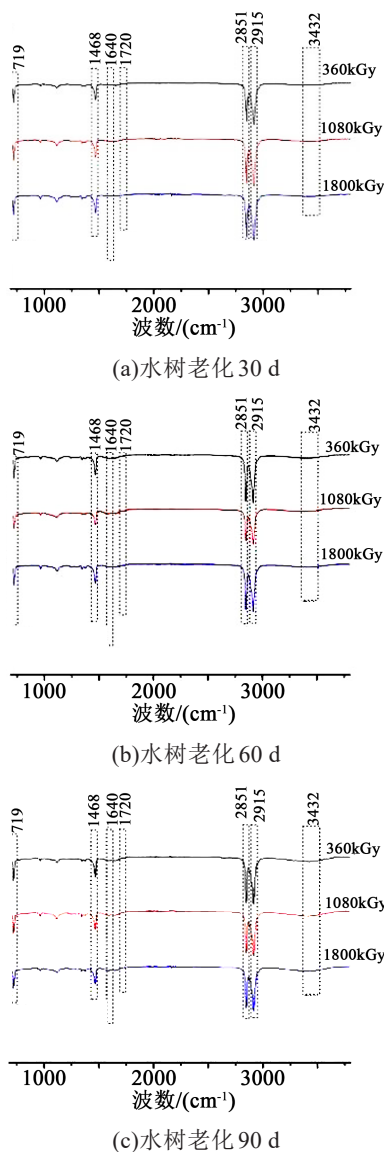


图11 辐照-水树联合老化试样的IR图  
Fig.11 IR spectra of irradiation-water tree combined ageing samples

的增加,O-H键吸收峰强度略有增强,说明水树老化越严重。同时可以看出,老化试样的红外光谱虽然在 $1640\text{ cm}^{-1}$ 附近出现了O-H键的特征峰,但该峰值随着辐照剂量的增加变化较小。因此,红外光谱测试中O-H键吸收峰的结果不能良好地反映电缆的辐照老化状态,而只能反映水树老化状态。

### 3 结论

(1)在热-水树联合老化过程中,在老化初期和老化中期阶段,随着老化时间的增加,电缆试样的极化/去极化电流幅值逐渐增大。热老化时间对电

缆试样的非线性系数影响不大;而随着水树老化时间的增加,电缆整体逐渐显现非线性特性。

(2)在热-水树联合老化过程中,随着老化时间的增加,O-H键的吸收峰强度明显增强,表明热老化对水树老化有促进作用。

(3)在辐照-水树联合老化过程中,电缆试样的极化/去极化电流变化趋势与热-水树联合老化过程的变化趋势相同;随着水树老化时间的增加,非线性系数逐渐增大,辐照剂量为 $1800\text{ kGy}$ 的水树老化试样非线性系数与相同水树老化时间的试样相比明显增大。

(4)在辐照-水树联合老化过程中,随着水树老化时间的增加,O-H键的吸收峰强度略有增强。同时,水树老化试样的红外光谱虽然在 $1640\text{ cm}^{-1}$ 附近出现了O-H键的特征峰,但该峰值随着辐照剂量的增加变化较小。因此,红外光谱测试中O-H键吸收峰的结果不能良好地反映电缆的辐照老化状态,而只能反映水树老化状态。

### 参考文献:

- [1] 朱晓辉,孟峥峥,王浩鸣,等.运行高压交联聚乙烯电力电缆的介电性能[J].高电压技术,2015,41(4):1090-1095.
- [2] 王亚,吕泽鹏,吴锴,等.高压直流XLPE电缆研究现状[J].绝缘材料,2014,47(1):22-25.
- [3] ANELLI P, DONAZZ F, LAWSON W G. The fatigue life of leadalloy E as a sheathing material for submarine power cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(1):69-75.
- [4] 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.
- [5] 李康乐,周凯.交联聚乙烯水树老化电缆电气性能与水树区域含水量的关系[J].四川电力技术,2019,42(6):62-65.
- [6] 陶文彪,马振国,宋述勇,等.有限元法分析交联聚乙烯电缆水树生长机理[J].绝缘材料,2016,49(12):70-75.
- [7] JAHROMI A N, PATTABI P, DENSELY J, et al. Medium voltage XLPE cable condition assessment using frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Electrical insulation magazine,2020,36(5):9-18.
- [8] MCDERMID W, PARTYKA M, BLACK T. Water tree detection in medium voltage XLPE cables[C]//2019 IEEE Electrical Insulation Conference. Calgary, Canada:IEEE,2019:217-220.
- [9] SULAIMAN S, MOHD A A, KIEN D T. Comparing simulation modelling and measurement results of polarization/depolarization current analysis on various underground cable insulation systems [C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE,2013:137-140.
- [10] LEIBFRIED T, KACHLER A J. Insulation diagnostics on power transformers using the polarization and depolarization current (PDC) analysis[C]//IEEE International Symposium on Electric Insulation. Boston, USA: IEEE,2002:170-173.