

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.017

电老化对 XLPE 海底电缆绝缘性能影响

黄剑平¹, 陈祎林², 彭向阳¹, 王国栋², 余欣¹, 周凯²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510062; 2. 四川大学电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 交联聚乙烯(XLPE)海底电缆的绝缘性在电场作用下会逐渐老化, 从而影响海上输电系统的稳定性。为深入理解 XLPE 海底电缆绝缘电老化特性, 分别在电场强度 $E=30\text{ kV/mm}$ 及 $E=28\text{ kV/mm}$ 下进行 1 000 h 的 XLPE 薄片电老化实验, 统计在交流电场作用下 XLPE 的击穿时间并对老化前后样本进行电气和理化性能测试。结果表明, 在电应力作用下, XLPE 内部绝缘薄弱处会产生微孔等缺陷, 随老化时间增加, 材料内部缺陷数目逐渐增多, 缺陷尺寸生长有所增大; 此外, 电老化前后 XLPE 击穿强度与内部晶体结构变化并不明显。不同 XLPE 样本击穿时间分散性较大而其击穿场强较为接近, 与击穿强度测试实验相比, 恒定电压幅值作用下的电压耐久性实验可更好地反映材料绝缘状态。

关键词: 交联聚乙烯; 电老化; 击穿特性; 海底电缆

中图分类号: TM251 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0111-08

Effect of Electric Ageing on Insulation Performance of Crosslinked Polyethylene Submarine Cable

Huang Jianping¹, Chen Yilin², Peng Xiangyang¹, Wang Guodong², Yu Xin¹, Zhou Kai²

(1. Guangdong Power Grid Company Limited Electricity Research Institute, Guangzhou 510062, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : The insulation of cross-linked polyethylene (XLPE) submarine cable will gradually age under the action of electric field, which affects the stability of offshore transmission systems. In order to deeply understand the electrical ageing characteristics of XLPE submarine cable, the electrical ageing experiments of XLPE for 1 000 hours were carried out under the electric field intensity of $E=30\text{ kV/mm}$ and $E=28\text{ kV/mm}$ respectively. The breakdown time of XLPE under AC electric field was calculated, and the dielectric and physic-chemical properties of the samples before and after ageing were tested. The results show that defects such as micropores occur in the weak insulation of XLPE under electrical stress, and the number and size of internal defects increase with the increase of ageing time. Moreover, the changes of breakdown strength and internal crystal structure of XLPE before and after electrical ageing are not obvious. The breakdown time of different XLPE samples is dispersed and the breakdown field strength is close. Compared with the breakdown strength test, the voltage endurance test under the action of constant voltage amplitude can better reflect the insulation state of the material.

Keywords : cross-linked polyethylene ; electrical ageing ; breakdown characteristics ; submarine cable

交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆因维护简便、可靠性高、环境友好等特点在城市电网与海洋输电中得到广泛应用^[1-4]。按功能划分, XLPE 电缆可分为缆芯、绝缘层、屏蔽层与护套四部分, 其中绝缘层主要起电气隔离作用, 在电缆运行过程中承担几乎全部电应力与主要热应力^[5]。随服役年限增加, XLPE 绝缘电缆易在外界应力的作用下逐渐老化, 影响供电系统稳定性^[6]。据统计, 由绝缘老化引起的电缆故

障在线路事故中占比高达 21.1%, 在各事故因素中排名第二^[7]。当前, 我国大部分电缆服役时间已超过 20 年, 电缆系统即将整体步入“老龄化”状态^[8-9]。因此, 研究 XLPE 海底电缆电老化特性, 理解海底电缆绝缘失效过程具有重要意义^[10]。

早期电缆多在较低电压等级下运行, 热应力是导致其绝缘失效的主要原因。随电缆输电电压等级不断提高, 电应力在 XLPE 绝缘老化过程中起的

通信作者: 余欣, 硕士, 研究方向为电力设备状态监测

收稿日期: 2023-03-01

引用格式: 黄剑平, 陈祎林, 彭向阳, 等. 电老化对 XLPE 海底电缆绝缘性能影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 111-118.

Huang Jianping, Chen Yilin, Peng Xiangyang, et al. Effect of electric ageing on insulation performance of crosslinked polyethylene submarine cable[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 111-118.

作用越来越大^[11]。强电场会破坏XLPE分子结构从而会影响其绝缘性能,若XLPE内含有气隙或微孔等缺陷,缺陷处还将产生电场畸变,严重威胁电缆安全运行^[12]。因此,XLPE在电场作用下老化特性的研究受到国内外学者的广泛关注^[13]。Parpal等^[14]研究表明XLPE在交流电场作用下会发生分子链变形,该过程本质上是一个疲劳过程,提高频率可降低材料的电寿命;陈智勇等^[15]指出,在低场强下XLPE老化主要是由于纳孔造成的,高场强下XLPE老化主要是由分子键断裂引起的;Lei等^[16]分别对XLPE及其纳米复合材料进行电寿命测试,结果表明纳米复合材料的添加对XLPE电寿命延长效果随外加场强减小而下降;刘云鹏等^[17]在高压直流电场下对XLPE绝缘切片进行电老化实验,结果表明电老化使绝缘内部同极性空间电荷注入现象增强但大部分XLPE分子保持完整;Bian等^[18]基于过渡态理论提出一种XLPE电寿命模型,该模型认为存在一个阈值场强 E_0 ,当外加场强小于 E_0 时,XLPE电老化以电热协同作用为主。

目前许多学者对电应力作用下XLPE绝缘失效理论及电寿命模型进行了大量研究,发现电应力对绝缘材料性能的影响呈概率性分布,即使在相同实验条件下,绝缘失效时间也存在较大分散性。为提高电缆绝缘材料电寿命评估的准确性,加强对失效时间统计特性的研究十分重要,而当前对该点的研究较少,需进一步探究XLPE海底电缆绝缘的电老化状态与老化时间的关联性。因此,笔者对XLPE薄片样本在交流电场作用下进行电老化实验,统计样本击穿时间并通过不同方式表征老化前后材料理化特性,研究交流电场作用下海底电缆绝缘微观结构变化情况。

1 实验设置

1.1 电老化实验平台与实验参数

(1)电老化实验平台设计。

电老化实验所用XLPE薄片来源于某电缆生产公司型号为HYJQ03 1*500的220 kV海底电缆,将海底电缆截取一段剥去外护套、铅套、阻水层以及外半导体层,将样本裁成55 mm×55 mm×1 mm大小并用无水乙醇擦拭其表面以消除表面杂质对实验结果的影响。电老化实验平台由变压器、调压器、水阻及高压油杯构成,其中变压器与调压器提供老化实验所需高压,水阻在样本击穿后起限制短路电

流的作用,由变压器产生的高压通过油杯施加至XLPE薄片样本上。油杯内为两圆盘形铜电极,电极直径为25 mm,厚度为4 mm,边缘倒圆成半径为2.5 mm的半圆。将XLPE薄片置于两电极之间并旋转油杯上的调距螺母夹紧样本。为避免老化过程中发生沿面闪络及局部放电,将电极与XLPE薄片样本浸入变压器油中,电老化实验平台如图1所示。

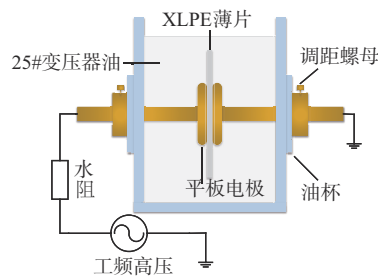


图1 电老化实验平台

(2)电老化实验参数选取。

据标准GB/T 29311-2012,电老化实验场强应低于材料击穿场强,使样本平均击穿时间在几十小时到几千小时之间。因此,电老化实验前取部分样本进行击穿强度测试,测试结果表明XLPE样本击穿强度为42.52 kV/mm,符合标准JB/T 10437-2004中关于XLPE绝缘击穿强度有关规定。为使XLPE击穿时间达到标准GB/T 29311-2012的要求,在不同场强下对XLPE薄片进行电压耐久性实验并记录不同场强作用下试样的平均击穿时间,最终确定电老化实验场强 $E=30$ kV/mm及28 kV/mm,老化时间设置为1 000 h。

1.2 样本性能测试方法

极化-去极化电流(PDC)测试:测试系统如图2所示。当开关连接1时对薄片样本施加电压进行极化过程;当开关连接2时,样本两端接地进行去极化过程。

击穿强度测试:根据标准GB/T 1408.1-2016,测试采用等直径电极,电极直径为25 mm且边缘倒圆成半径为2.5 mm的圆弧。被测样本尺寸为55

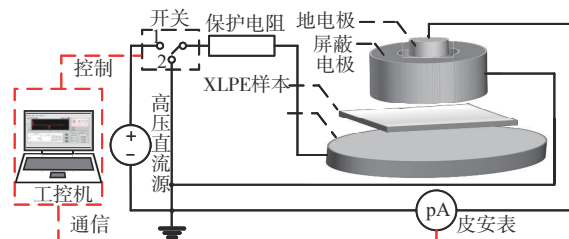


图2 PDC测试原理示意图

mm×55 mm×1 mm,测试过程中保持0.5 kV/s的升压速度连续升压直至试样击穿。为避免闪络,样本及电极均浸入昆仑25号变压器油中。

X射线衍射(XRD)测试:采用日本Rigaku公司Ultima IV型XRD仪对15 mm×15 mm×1 mm的XLPE薄片试样进行扫描,实验靶材为Cu靶波长为0.154 nm,管电压40 kV,管电流40 mA,扫描范围15°~30°。

微观形貌观测:采用日本电子公司(JEOL)JSM7500F型扫描电子显微镜(SEM)观察老化前后XLPE薄片样本断面的微观结构。设置加速电压为15 kV,放大倍数为1 000倍,测试前将XLPE置于液氮中冷却30 min后脆断并对断面进行喷金处理。

局部放电测试:局部放电采集装置为高频Rogowski线圈(HFCT)。测试用示波器型号为Rigol DS6104,测试时将HFCT套接在样本接地线上并通过高频信号线将局部放电信号实时传递到示波器中^[19]。设置测试电压为20 kV,测试时间为30 s。

2 实验结果与讨论

分别在场强 $E=30, 28$ kV/mm下进行1 000 h的XLPE电老化实验,部分样本在实验过程中击穿,统计已击穿样本的击穿时间并对未击穿样本进行击穿强度测试。在场强 $E=30$ kV/mm作用下对不同老化时间的样本进行理化测试,深入研究电应力对XLPE海底电缆绝缘老化特性的影响。

2.1 PDC测试结果

分别对未老化样本、场强 $E=30, 28$ kV/mm下老化1 000 h的样本进行PDC测试,测试时间为180 s,测试电压为1 kV^[20],测试结果如图3所示。

根据式(1)和式(2)分别计算出电缆薄片样本的直流电导率和0.1 Hz下的介质损耗因数,见表1。

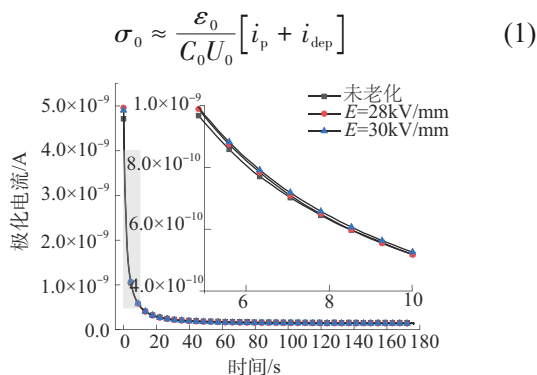


图3 PDC测试结果

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} + \frac{\chi''(\omega)}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} \quad (2)$$

式(1)中, σ_0 为直流电导率; C_0 为电缆的几何电容; U_0 为直流源; ε_0 为真空介电常数; $i_p(t)$ 为极化电流; $i_{dep}(t)$ 为去极化电流。

$$\text{式(2)中, } \frac{\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} \text{ 为电导损耗, } \frac{\chi''(\omega)}{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega)} \text{ 为}$$

极化损耗, $\tan \delta(\omega)$ 为总损耗。

由图3可以看出,未老化样本与场强 $E=30, 28$ kV/mm下老化1 000 h样本的极化电流并无明显差异,未老化样本略低于老化后的样本。表1可以看出老化后的直流电导率和0.1 Hz下的介质损耗因数略高于未老化样本,但与场强 $E=30, 28$ kV/mm下老化1 000 h的样本无明显差异。

表1 直流电导率和0.1 Hz介质损耗测试结果

样本	直流电导率/(S·m ⁻¹)	0.1 Hz介质损耗因数/%
未老化	4.631×10^{-15}	0.052
$E=28$ kV/mm 老化	5.131×10^{-15}	0.057
$E=30$ kV/mm 老化	4.821×10^{-15}	0.058

2.2 击穿时间统计结果

不同场强作用下XLPE击穿时间如图4所示,据标准GB/T 29310-2012,采用二参数韦伯分布对样本击穿数据进行分析。

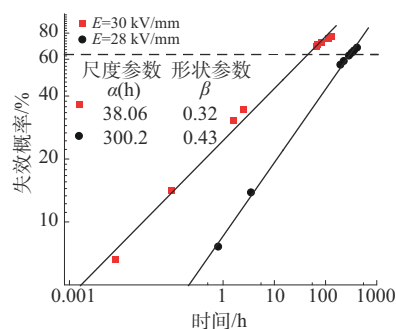


图4 XLPE击穿时间韦伯分布

韦伯分布表达式为:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

式(3)中, $F(x)$ 表示累积失效概率; x 为自变量,代表样本击穿时间或击穿场强; β 为形状参数, β 值越大,表示数据分散性越小; α 为尺度参数,当 x 代表恒定电应力下样本击穿时间时, α 表示样本累积失效概率为63.2%时所对应的击穿时间,当 x 代表样本短时击穿强度时, α 表示样本累积失效概率为

63.2%时所对应的电场强度,一般用 α 代表样本本征击穿时间或击穿强度^[21]。

由图4可知,交流场强 $E=30\text{ kV/mm}$ 时,样本击穿时间为38.06 h;交流场强 $E=28\text{ kV/mm}$ 时,样本击穿时间为300.2 h。形状参数 β 分别为0.32与0.43,二者均小于1,表明样本击穿时间存在较大分散性。

2.3 击穿强度测试结果

分别取未老化XLPE薄片样本(A组)及在电场强度 $E=28\text{ kV/mm}$ (B组)与 $E=30\text{ kV/mm}$ (C组)下老化1 000 h后仍未击穿的样本,在工频电压下进行击穿强度测试。其中A组含10个样本,B组及C组样本个数分别为4与3,通过韦伯分布对测试结果进行处理,测试结果如图5所示。

由于三组样本所含试样数量各不相同,难以对数据分散性进行比较,因此主要讨论尺度参数 α 的变化情况。 α 表示样本特征击穿场强,由图5可知,老化前后XLPE薄片样本击穿强度变化幅度较小,A组样本特征击穿场强为42.49 kV/mm,B组与C组样本特征击穿场强分别为41.63 kV/mm和41.99 kV/mm。与未老化样本相比,在场强 $E=28\text{ kV/mm}$ 与 $E=30\text{ kV/mm}$ 下老化1 000 h后XLPE薄片样本击穿场强分别下降了2.02%和1.18%。对比B组样本与C组样本,两组样本老化时间相同而B组样本承受场强低于C组样本承受场强。根据文献[22]可知,在老化时间相同的情况下,外施场强越高,材料内部“积累损伤”越多,样本击穿强度越低,因此理论上B组样本击穿强度应高于C组样本击穿强度,但实际情况却与之相反。

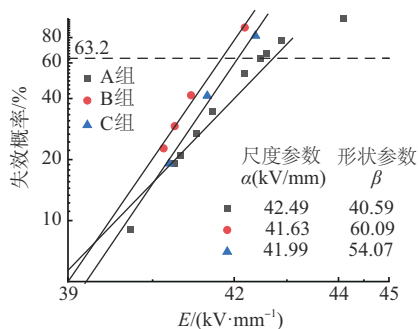


图5 XLPE击穿强度测试结果

根据击穿强度测试结果,电老化前后XLPE击穿强度变化较小,甚至出现了相同老化时间内,老化场强越高,材料击穿强度越高的现象。相关研究表明,XLPE绝缘性能在电与热联合作用时会逐渐下降,而单纯电应力对材料绝缘性能影响较小^[23]。

因此,上述实验结果可能的解释是在该研究条件下电应力对未击穿样本绝缘性能的破坏较轻,材料内部并未发生明显变化,因此三组击穿强度测试结果十分相近,老化前后样本击穿强度出现的不同更多是由样本间差异所导致的。XLPE击穿强度与材料内部聚集态结构有关,为进一步研究电应力对XLPE内部结构的影响,取不同老化阶段的样本进行XRD测试。

另一方面,对比样本击穿时间与击穿强度测试中形状参数 β 可知,击穿强度形状参数远大于击穿时间形状参数。XLPE击穿时间形状参数较小表明其击穿时间存在较大分散性,该现象可能是材料内部结构不同所导致的,而由击穿强度测试难以发现样本绝缘状态间的区别(相较于击穿时间,XLPE击穿强度测试结果十分接近)。因此,与击穿强度测试实验相比,恒定电压幅值作用下的电压耐久性实验可更好地反映材料绝缘性能。

2.4 XRD测试结果

为观测老化前后XLPE内部结构变化情况,对老化不同时间的XLPE薄片样本进行XRD测试,测试结果如图6所示。

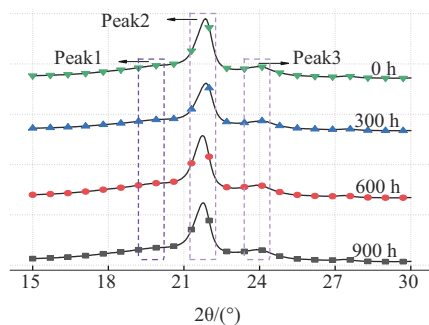


图6 样本XRD测试结果

由图6可知,XLPE的XRD测试曲线中存在三个较为明显的衍射峰。其中衍射角 20.5° 附近较为平缓的衍射峰Peak1为非结晶衍射峰,对应XLPE内部无定形区;衍射角 21.7° 与 24.0° 附近较为尖锐的衍射峰Peak2,Peak3为结晶衍射峰,分别对应XLPE内部(110)晶面及(200)晶面;同时衍射角 27° 附近存在较小衍射峰,可能对应XLPE内部(020)晶面,由于该衍射峰强度过小且在老化过程中并未发生明显变化,因此笔者不对其进行分析讨论。

为进一步研究XLPE衍射峰峰值及衍射角大小在老化过程中的变化情况,对不同老化时间样本的XRD曲线进行高斯分峰拟合^[24],提取出(110)晶面衍

射峰(Peak2)与(200)晶面衍射峰(Peak3)的衍射角(2θ)及衍射峰半峰宽(FWHM),计算结果见表2。由表2可知,不同老化时间下XLPE样本的衍射峰、衍射角及衍射峰半峰宽较为接近,似乎表明老化过程中电应力并未对XLPE晶区结构造成明显影响。

表2 不同老化时间样本衍射峰衍射角及衍射峰半峰宽

老化时间/h	Peak2		Peak3	
	$2\theta/(^\circ)$	FWHM/ $(^\circ)$	$2\theta/(^\circ)$	FWHM/ $(^\circ)$
0	21.80	0.71	24.07	1.02
300	21.82	0.72	24.14	1.00
600	21.70	0.70	24.03	0.99
900	21.71	0.71	24.03	1.00

为验证上述猜想,通过布拉格公式计算了不同老化阶段XLPE样本的晶面间距大小,布拉格公式表达式为:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4)$$

式(4)中, d 为晶面间距; θ 为布拉格角; n 为衍射级数,一般取 $n=1$; λ 为X射线的波长,本测试所用靶材为Cu靶, $\lambda=0.154 \text{ nm}$ 。

XLPE薄片样本(110)晶面与(200)晶面的晶面间距在电老化过程中变化情况如图7所示。XLPE晶面间距越大,晶面间作用力越小。晶面间作用力减小使材料XLPE内部晶体易在外力作用下产生位移、变形等现象,进而导致材料理化性能下降。由图7可知,无论是(110)晶面还是(200)晶面,老化前后样本晶面间距未发生明显变化,进一步证实在电应力单独作用下XLPE内部晶区结构并未发生明显变化。

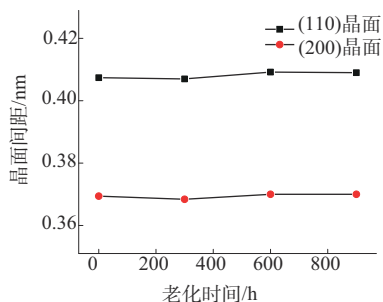
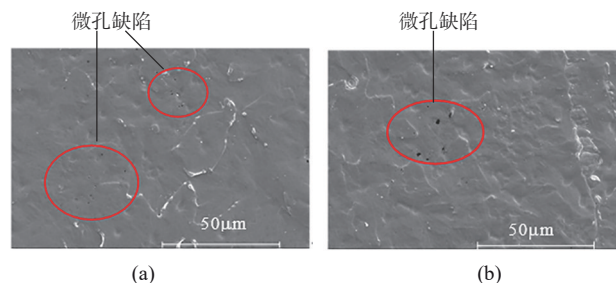


图7 晶面间距与老化时间的关系

2.5 SEM测试结果

图8为老化前后XLPE微观形貌图,图中凸起部分为脆断过程中产生的脆断裂纹。由图8可知,老化前后XLPE内部均存在微孔缺陷,老化前样本内微孔尺寸较小,而老化后样本内部微孔尺寸较大。未老化样本中的微孔缺陷可能是在XLPE制造过程中产生的,电老化过程中,电场在微孔处发生

畸变,微孔附近XLPE将承受更高电应力,加快材料老化速率。与图8a相比,图8b中微孔缺陷更加明显,表明在电应力作用下,XLPE内部缺陷逐渐发展,缺陷尺寸不断增大。老化后XLPE内同时存在较小的微孔,这些小微孔可能是在老化过程中材料内部绝缘弱点处生成的。可以推测,若老化时间足够长,XLPE内部缺陷将进一步发展直至样本发生击穿。



a—老化0 h;b—老化1 000 h

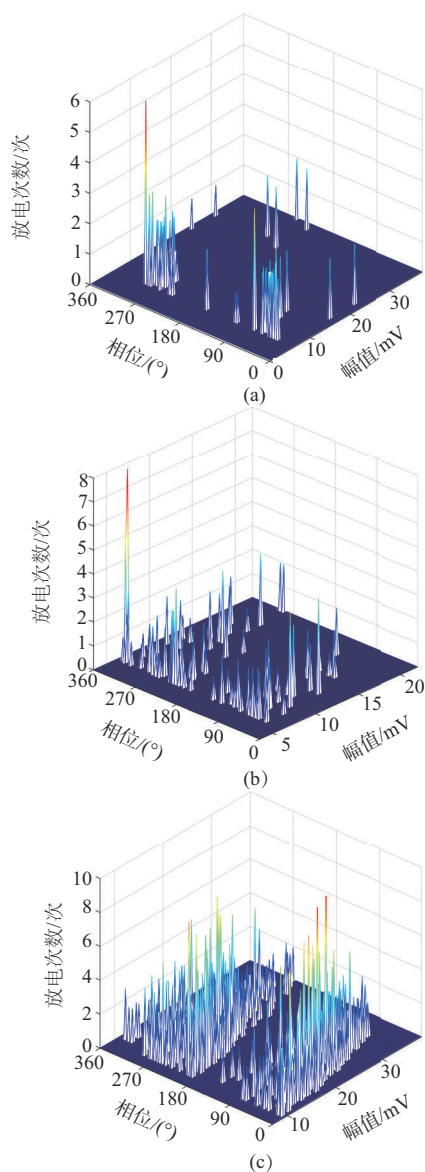
图8 XLPE微观形貌图

2.6 局部放电测试结果

为深入研究老化过程中材料内部缺陷发展情况,对不同老化时间样本进行局部放电测试。XLPE局部放电测试结果如图9所示,放电主要集中在一、三象限且大体对称,符合内部放电的基本特征。

由图9可知,随老化时间增加,XLPE局部放电次数与放电幅值逐渐增大。当XLPE结构完好时,样本内部场强分布均匀,测试时不会因某处场强畸变而产生局部放电。若XLPE内部含有裂纹或微孔等缺陷,在测试过程中将由于缺陷处电应力过高而产生局部放电,材料内部所含缺陷数目越多,局部放电次数越多,缺陷尺寸越大,放电幅值越大^[25]。因此,放电次数和放电幅值可以表征样本内缺陷数量及大小。分别统计不同老化时间下局部放电次数与放电幅值平均值,统计结果列于表3。

由表3可知,随老化时间增加,局部放电次数逐渐增多。在电老化初期(老化300 h),样本内部放电次数较少,说明此时样本内部并未生成较大缺陷;当老化时间达到600 h后,局部放电次数明显增加,放电次数的变化表明样本内缺陷数目的增加;老化900 h后放电次数进一步提高,此时样本内部缺陷更多。然而实验进行1 000 h后样本仍未击穿,可能的原因是老化过程中局部放电对材料造成的损伤较少,缺陷生长速率较低,因而此时样本内缺陷尺寸较小,而只有缺陷尺寸大于一定值时缺陷处引发的



a—老化 300 h; b—老化 600 h; c—老化 900 h

图9 XLPE局部放电测试结果

表3 放电次数及放电幅值平均值与老化时间的关系

老化时间/h	放电次数/次	放电幅值平均值/mV
300	27	12.67
600	136	14.47
900	680	17.08

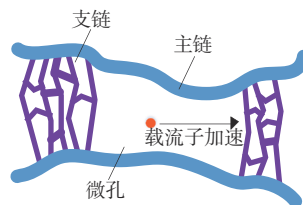
强烈局部放电才会显著加快XLPE电老化进程。

与放电次数变化趋势类似,放电幅值平均值也呈现出随老化时间增加而增加的变化规律。研究表明放电幅值与缺陷尺寸呈正相关,即放电幅值随缺陷尺寸增加而增大^[26]。上述分析表明,在交流电场作用下,XLPE内部缺陷尺寸随老化时间增加而增大。与放电次数变化相比,放电幅值变化幅度较小,该现象表明样本内部缺陷在老化过程中的生长

速率较低。

2.7 机理讨论

在电应力长期作用下,XLPE绝缘电缆内部薄弱处(如无定形区或晶区与无定形区交界处)会发生局部形变直至产生裂纹或微孔等缺陷,而在裂纹或微孔附近由于电场发生畸变,使缺陷处承受更高电应力,导致材料内缺陷进一步发展,如图10所示。当XLPE内部缺陷尺寸超过一定程度时,缺陷处电场强畸变更严重,材料内部发生严重局部放电现象。另一方面,缺陷尺寸的增加也意味着微孔或裂纹内电子运动行程的增大,电子能够从电场中获得足够的动能轰击XLPE分子致使分子链断裂^[18]。在剧烈局部放电以及电子轰击的作用下,XLPE分子链不断发生断链、支化等现象,内部结构遭到严重破坏,最终导致绝缘击穿。

图10 微孔中电子轰击XLPE分子链^[18]

由上述分析可知,在电老化过程中XLPE内部将生成缺陷,而缺陷处产生的畸变电场则会加快电老化速率,从而加速缺陷的发展,如此反复最终导致材料绝缘失效。在实际生产制造过程中,XLPE内部不可避免地存在气隙、微孔等缺陷。当材料内部缺陷大小超过一定尺寸时,缺陷处将产生强烈局部放电与电子轰击现象,导致样本迅速击穿,该过程对应老化实验中较短击穿时间样本;当材料内部缺陷较小时,缺陷将在电应力的作用下缓慢发展直至样本击穿,该过程对应老化过程中较长击穿时间样本;当样本内缺陷小至可忽略时,XLPE将表现出较长电寿命,该过程对应实验中未击穿样本。XLPE内部缺陷差异性是导致样本击穿时间出现较大分散性的原因之一。

3 结论

(1)在电应力作用下,XLPE内部绝缘薄弱处将产生微孔或裂纹等缺陷,随老化时间增加,材料内部缺陷数目与缺陷尺寸逐渐增加。与材料内部缺陷发展情况相比,电老化前后XLPE击穿强度与内部晶体结构变化并不明显。

(2)实验结果表明,不同XLPE样本间击穿强度

差异较小而相同场强作用下XLPE击穿时间差异较为显著,因此电压耐久性实验可更好地反映材料绝缘状态。

参考文献

- [1] 张桥峰,周凯,李康乐,等.交联度对交联聚乙烯时域介电特性的影响[J].绝缘材料,2020,53(12):27-31.
Zhang Qiaofeng, Zhou Kai, Li Kangle, et al. Effect of crosslinking degree on time domain dielectric properties of XLPE[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12):27-31.
- [2] 陈诗佳,周凯,李泽瑞,等.工频叠加冲击电压下XLPE绝缘中电树枝的生长特性研究[J].绝缘材料,2020,53(9):42-47.
Chen Shijia, Zhou Kai, Li Zerui, et al. Growth characteristics of electrical tree in XLPE insulation under power frequency voltage superimposed impulse voltage[J]. Insulating Materials, 2020, 53(9):42-47.
- [3] 周凯,陈泽龙,李天华,等.运行老化XLPE电缆导体屏蔽层侧绝缘缺陷分析[J].高电压技术,2020,46(1):187-194.
Zhou Kai, Chen Zelong, Li Tianhua, et al. Insulation defects at the side of conductor screen layer in service-aged XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):187-194.
- [4] 郝建,戴锡泽,高震,等.基于高压频域介电响应的交流500 kV交联聚乙烯海缆绝缘老化状态检测与分析[J].电网技术,2021,45(10):4 172-4 180.
Hao Jian, Dai Xize, Gao Zhen, et al. Detection and analysis of insulation aging state of AC 500 kV XLPE submarine cable based on high voltage frequency dielectric response[J]. Power System Technology, 2021, 45(10):4 172-4 180.
- [5] 刘涛,李欢,徐磊,等.热老化对XLPE微观结构及介电性能的影响机制综述[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2021,37(4):1-9,31.
Liu Tao, Li Huan, Xu Lei, et al. Effect of thermal aging on the microstructure and dielectric properties of XLPE: a survey of the mechanism of performance impact[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 37(4):1-9, 31.
- [6] 沈智飞,柳宝坤,王国栋,等.10 kV交联聚乙烯电缆加速电老化特性研究[J].绝缘材料,2021,54(8):60-66.
Shen Zhifei, Liu Baokun, Wang Guodong, et al. Accelerated electrical ageing characteristics of 10 kV XLPE cable[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8):60-66.
- [7] 吴明祥,欧阳本红,李文杰.交联电缆常见故障及原因分析[J].中国电力,2013,46(5):66-70.
Wu Mingxiang, Ouyang Benhong, Li Wenjie, et al. Analysis of common faults and causes of cross-linked cables[J]. Electric Power, 2013, 46(5):66-70.
- [8] 刘刚,刘斯亮,金尚儿,等.基于理、化、电特性的110kVXLPE绝缘电缆剩余寿命的综合评估[J].电工技术学报,2016,31(12):72-79,107.
Liu Gang, Liu Siliang, Jin Shang, et al. Comprehensive evaluation of remaining life of 110 kV XLPE insulated cable based on physical, chemical and electrical properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12):72-79, 107.
- [9] 项剑波,周凯,陈诗佳,等.压力注入电压稳定剂对热氧老化电缆绝缘性能的增强机理[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1 156-1 166.
Xiang Jianbo, Zhou Kai, Chen Shijia, et al. Enhancement mechanisms of voltage stabilizer injection on insulation performances of thermal-oxidative aged cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3):1 156-1 166.
- [10] 陈健涛,赵一帆,范星辉.电热联合老化对高压XLPE电缆绝缘介电频谱特性的影响[J].广东电力,2022,35(9):117-126.
Chen Jiantao, Zhao Yifeng, Fan Xinghui, et al. Effect of electrothermal combined aging on dielectric spectrum properties on high voltage AC XLPE insulation[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(9):117-126.
- [11] 胡一卓,董明,谢佳成,等.聚合物绝缘材料多因子老化的研究现状与发展[J].电网技术,2020,44(4):1 276-1 289.
Hu Yizhuo, Dong Ming, Xie Jiacheng, et al. Status and progress in multi-factor ageing research for polymer insulation materials[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1 276-1 289.
- [12] 王伟,何东欣,宋鹏先,等.电热联合老化对电缆附件应力锥处空间电荷积聚特性的影响[J].高电压技术,2019,45(6):1 737-1 744.
Wang Wei, He Dongxin, Song Pengxian, et al. Effects of electrical-thermal aging on space charge accumulation characteristics at the position of the stress cone in the accessory[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6):1 737-1 744.
- [13] 张杰,赵学童,边浩然,等.电荷陷阱对XLPE绝缘电老化特性的影响[J].高电压技术,2021,47(8):2 991-3 000.
Zhang Jie, Zhao Xuetong, Bian Haoran, et al. Effect of charge traps on electrical aging of xlpe insulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8):2 991-3 000.
- [14] Parpal J L, Crine J P, Dang C. Electrical aging of extruded dielectric cables. A physical model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1997, 4(2):197-209.
- [15] 陈智勇,罗传仙,张静,等.电老化与加速水树老化对交联聚乙烯绝缘理化特性的影响[J].西安交通大学学报,2015,49(4):32-39.
Chen Zhiyong, Luo Chuanxian, Zhang Jing, et al. Electrical aging test and accelerated water tree aging test for physicochemical properties of XLPE insulation[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2015, 49(4):32-39.
- [16] Lei W, Wu K, Wang Y, et al. Are nano-composites really better DC insulators? A study using silica nanoparticles in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4):2 268-2 270.

- [17] 刘云鹏,刘贺晨,钟平,等.直流电老化对160 kV直流电缆材料空间电荷分布特性的影响分析[J].绝缘材料,2017,50(3):37-42,48.
- Liu Yunpeng, Liu Hechen, Zhong Ping, et al. Study on impact of DC electrical ageing on space charge distribution of 160 kV DC cable materials[J]. Insulating Materials, 2017, 50(3):37-42, 48.
- [18] Bian H, Yang L, Ma Z, et al. Improved physical model of electrical lifetime estimation for crosslinked polyethylene AC cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2020, 27(1):132-139.
- [19] 周凯,黄永禄,谢敏,等.短时奇异值分解用于局放信号混合噪声抑制[J].电工技术学报,2019,34(11):2 435-2 443.
- Zhou Kai, Huang Yonglu, Xie Min, et al. Mixed noises suppression of partial discharge signal employing short-time singular value decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11):2 435-2 443.
- [20] 徐庆文,周凯,伍亚萍,等.脱气时间对XLPE电树引发和生长特性的影响[J/OL].高电压技术,2022: 1-10[2023-03-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220442>.
- Xu Qingwen, Zhou Kai, Wu Yaping, et al. Effect of degassing time on initiation and growth characteristics of electrical tree in XLPE[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-10[2023-03-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220442>.
- [21] 尹游,李诗雨,胡佳,等.基于抗老化剂含量分布的交联聚乙烯电缆绝缘层老化特性[J].工程塑料应用,2022,50(9):115-120.
- Yin You, Li Shiyu, Hu Jia, et al. Aging characteristics of cross-linked polyethylene cable insulation based on content distribution of anti-aging agent[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):115-120.
- [22] 杨丽君,李仲轩,姚人允,等.获取XLPE绝缘直流电压耐受指数的步进应力试验参数选取方法研究[J].电工技术学报,2019,34(24):5 244-5 251.
- Yang Lijun, Li Zhongxuan, Yao Renyun, et al. Selection of step-stress test parameters for obtaining dc voltage endurance coefficient of xlpe insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24):5 244-5 251.
- [23] Tzimas A, Rowland S, Dissado L A, et al. Effect of long-time electrical and thermal stresses upon the endurance capability of cable insulation material[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(5):1 436-1 443.
- [24] Han C, Du B X, Li J, et al. Investigation of charge transport and breakdown properties in XLPE/GO nanocomposites part 1: The role of functionalized GO quantum wells[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4):1 204-1 212.
- [25] Otake Y, Umemoto T, Suga K I, et al. Influence of defect size on insulation deterioration of epoxy resins with voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 52-57.
- [26] Montanari G C, Seri P, Dissado L A. Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2):634-641.