

交联聚乙烯绝缘电缆低频老化特性研究

刘宗喜^{1,2}, 欧阳本红^{1,2}, 黄凯文^{1,2}, 毕建刚^{1,2}, 王昱力^{1,2}

(1. 电网环境保护全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 交联聚乙烯(XLPE)海底电缆是中远距离岛屿输电、海上风光新能源发电等柔性低频输电场景中的关键输电装备。本文在低频电压下对 XLPE 绝缘电缆进行电热联合老化试验, 研究老化电压频率对 XLPE 绝缘电气性能、力学性能和微观结构的影响。结果表明: 老化电压频率为 10~50 Hz 时, XLPE 老化试样的交流电气强度、体积电阻率、断裂伸长率随着老化电压频率的增大先升高后降低, 经频率为 20 Hz、30 Hz 电压老化的 XLPE 试样电气性能优于其他频率电压老化的试样。XLPE 老化试样的结晶度随老化电压频率的变化趋势与电气性能一致, 较低电压频率下的热老化有助于 XLPE 绝缘材料重结晶, 而较高电压频率下的热老化则会破坏材料的晶区结构, 增大材料非晶区的比例。研究结果可为低频输电技术中 XLPE 绝缘电缆的适用性提供参考。

关键词: 交联聚乙烯; 老化电压频率; 电气强度; 结晶度; 低频输电

Low frequency ageing characteristics of cross-linked polyethylene insulated cables

LIU Zongxi^{1,2}, OUYANG Benhong^{1,2}, HUANG Kaiwen^{1,2}, BI Jiangang^{1,2}, WANG Yuli^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430074, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Cross-linked polyethylene (XLPE) submarine cable is a key transmission equipment in flexible low-frequency transmission scenarios such as medium and long-distance island transmission and offshore wind-solar new energy power generation. In this paper, XLPE insulated cable was conducted electrothermal ageing tests under low frequency voltage, and the effects of ageing voltage frequency on the electrical properties, mechanical properties, and micro-structure of XLPE insulation were studied. The results show that when the ageing voltage frequency is 10–50 Hz, the AC electric strength, volume resistivity, and elongation at break of XLPE ageing samples increase at first and then decrease with the increase of ageing voltage frequency. The electrical properties of XLPE samples aged under 20 Hz and 30 Hz of voltages are better than those aged under other voltage frequencies. The change trend of crystallinity of XLPE ageing samples with ageing voltage frequency is consistent with the electrical properties. The thermal ageing at lower voltage frequency contributes to the recrystallization of XLPE insulating materials, while the thermal ageing at higher voltage frequency will damage the crystalline structure of the material and increase the proportion of amorphous regions. The research results can provide a reference for the applicability of XLPE insulated cables in low frequency transmission technology.

Key words: cross-linked polyethylene; ageing voltage frequency; electric strength; crystallinity; low frequency transmission

0 引言

柔性低频输电的频率为 10~40 Hz, 具有线路无功损耗小、输送能力强等优点。与直流输电相比, 柔性低频输电系统的电流可过零开断, 易组网, 运行灵活性高, 是工频交流与直流输电的有益补充, 在中远距离岛屿输电、海上风光新能源发电等场景独具优势^[1-8]。交联聚乙烯海底电缆是柔性低

频输电工程中的关键输电装备, 国内首条柔性低频输电电缆的低频系统频率为 20 Hz^[8]。

交联聚乙烯广泛应用于各种电压等级的交直流海陆电缆中, 电压频率对电缆及其附件的绝缘性能至关重要。关于电压频率对交联聚乙烯绝缘电气性能、老化性能等的影响研究已有大量报道, F NOTO 等^[9]首次研究了电压频率对聚合物中电树枝的影响; C LAURENT 等^[10]研究了多种因素对聚合

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401100)。

物中电树枝现象的影响,指出电压频率能够显著影响电树枝的生长;F GALLESII等^[11]研究表明,电压幅值和频率都会影响电树枝的形态,进而影响击穿时间;LI Weiwei等^[12]研究了插入针头的交联聚乙烯绝缘样品的击穿电压与施加电场频率的相关性,指出试样的最大击穿电压频率为240 Hz;WU Jiayang等^[13]研究表明,随着电压频率从50 Hz增大到2 500 Hz,交联聚乙烯的电气强度逐渐降低;E GOCKENBACH等^[14]研究表明,电缆交接试验频率下限延伸到20 Hz可使电缆绝缘的耐压水平提高;周远翔等^[15]研究了电压频率对交联聚乙烯样片电老化特性的影响规律,认为电压频率降低会加剧XLPE的劣化。国内外研究机构还研究了50 Hz到数千Hz电压对交联聚乙烯起树电压、电树枝形态、电树枝生长特性的影响^[16-22];刘云鹏等^[23]研究表明,在20~50 Hz范围内,随着频率的降低,XLPE的起树电压略有升高,但电树枝生长速度加快,损伤面积、局部放电量和放电次数增大。

国内外关于电压频率对交联聚乙烯等电缆绝缘材料的影响研究主要集中在较高电压频段下电缆绝缘试样的电树枝产生和发展规律上,研究对象多为聚乙烯粒料直接制备的试样,且不同研究机构对较低频段电压下交联聚乙烯电缆的击穿特性变化规律尚未取得一致结论。此外,低频运行条件下,电压频率改变对XLPE绝缘整体的影响尚无深入研究。

电热联合加速老化试验能够较好地模拟电缆的实际运行工况,体现系统运行条件下电应力和热应力对XLPE绝缘的协同作用^[24]。本文在柔性低频输电的频率范围内,采用低频电压源直接对交联聚乙烯绝缘电缆系统进行电热联合老化,分析不同老化电压频率对交联聚乙烯绝缘试样电气性能、力学性能和微观结构的影响规律,为低频运行条件下XLPE绝缘电缆的适用性提供试验和理论支撑。

1 老化试验及测试方法

1.1 老化试验

采用图1所示低频电压老化试验平台开展老化试验。试验电缆为单芯8.7/15 kV铝导体XLPE绝缘电缆,导体截面为400 mm²,绝缘厚度为4.5 mm。将试验电缆组成的电热联合老化回路和模拟回路进行试验,对组成电热联合老化回路的电缆试样同时施加老化电压和电流,对模拟回路施加相同的电

压和电流,用于两回路之间的温度对比和电流控制。试验电压为21.75 kV($2.5U_0$),老化电压频率为10、20、30、40、50 Hz,老化试验时间为720 h,每个循环试验周期为8 h。在每个循环试验周期内,首先对被测电缆导体施加工频感应电流,在前3 h内将导体温度由环境温度升至90~95℃,然后调节导体电流使导体温度保持在上述温度范围内2 h,最后切断试验电流并在至少3 h内使电缆温度自然冷却至环境温度。

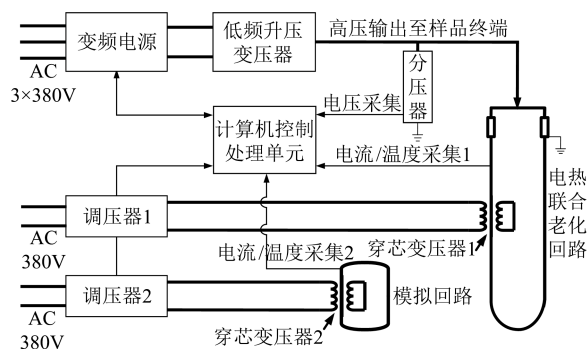
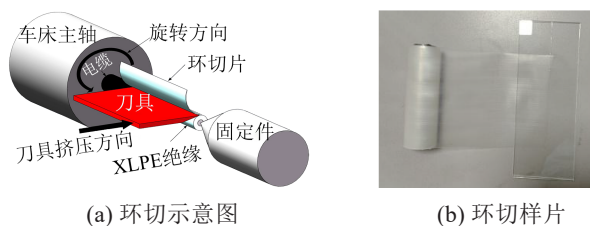


图1 低频电压老化试验平台示意图

Fig.1 Low frequency voltage ageing test platform diagram

1.2 样片制备

使用车床及特制刀具对电热联合老化试验后的10 kV电缆XLPE绝缘层进行环切,得到宽度为80 mm、厚度为0.2 mm的样片,用于电气性能测试和微观结构检查,环切示意图及环切样片如图2所示。使用冲片机在完整的绝缘层上沿轴向平切并制得厚度为1 mm的哑铃状试样,用于力学性能测试。



(a) 环切示意图

(b) 环切样片

图2 XLPE绝缘层环切取样示意图及环切样片

Fig.2 Schematic diagram of XLPE insulation layer ring-cutting sampling and ring-cutting samples

1.3 测试方法

电气强度测试电压频率为20 Hz和50 Hz,测试温度为30、50、70、90℃,击穿装置为浸没于可加热油浴箱中的球-板电极,球电极直径为14 mm;介电谱测试采用Concept 40型宽频介电谱仪,扫描频率为10~ 2×10^5 Hz,测试温度为30、50、70、90℃;体积

电阻率测试采用 KEITHLEY 6517B 型高阻计在常温下进行,测量电压为直流 400 V,测量时间为 60 s。

力学性能测试采用 ZBDW-10 kN 型万能试验机在常温下进行,拉伸速度为 250 mm/min。

FT-IR 测试采用 Nicolet iN10 型傅里叶红外光谱仪,波数为 $4\,000\sim 500\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 32 次。DSC 测试采用梅特勒 822e 型差示扫描量热仪,在氮气气氛中将 6 mg 试样从 30℃ 加热至 150℃,再将试样从 150℃ 降温至 30℃,升降温速率为 10℃/min; XRD 测试采用 XRD-7000 型衍射仪,扫描速率为 10°/min,步长为 0.02°,扫描范围为 15°~30°。

2 测试结果

2.1 电气强度

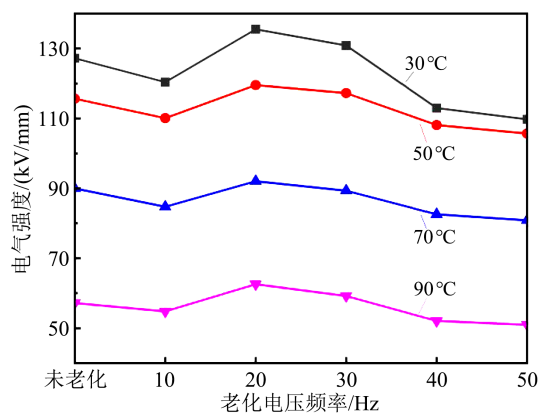
对未老化和电热联合老化 XLPE 试样的电气强度测试数据采用双参数威布尔分布概率累计函数进行处理,取击穿概率为 63.2% 时的击穿电压作为试样的击穿电压,得到不同老化电压频率 XLPE 试样在不同测试温度下的电气强度如图 3 所示。

结合图 3(a)和 3(b)可知,从整体上看,相同老化电压频率下 XLPE 试样的电气强度随测试温度升高而减小,测试电压频率为 20 Hz 的试样电气强度明显高于测试电压频率为 50 Hz 的试样,这主要是低频电压下 XLPE 绝缘的起树电压升高所致^[23]。老化电压频率对 XLPE 试样电气强度的影响是非线性的,随着老化电压频率的增大,试样的电气强度先升高后降低,经 10 Hz 电压老化的 XLPE 试样电气强度低于未老化试样,经 20 Hz、30 Hz 电压老化的 XLPE 试样电气强度明显高于其他频率电压老化的试样,且经 20 Hz 电压老化的试样电气强度最高,下文将进一步分析较低频率电压对 XLPE 绝缘老化特性的影响。

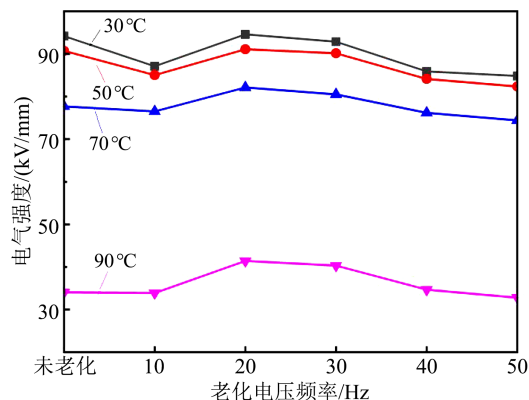
2.2 介电谱

不同老化电压频率 XLPE 试样在不同测试温度下的介质损耗因数($\tan\delta$)如图 4 所示。从图 4 可以看出,老化电压频率越高,XLPE 试样的介质损耗因数越大,但测试频率大于 10^3 Hz 时,不同老化电压频率 XLPE 试样的介质损耗因数差别很小。

随着测试频率的降低,在低频(10~50 Hz)区域,XLPE 试样的介质损耗因数迅速增大,这是由于 XLPE 的非晶区中存在自由体积,低频时分子链段或小分子极性副产物可在自由体积内缓慢迁移,形成松弛极化,促进极化损耗。此外,低频下电荷在



(a) 测试频率为 20 Hz



(b) 测试频率为 50 Hz

图 3 不同频率老化电压下 XLPE 试样的电气强度

Fig.3 Electric strength of XLPE samples under ageing voltage with different frequencies

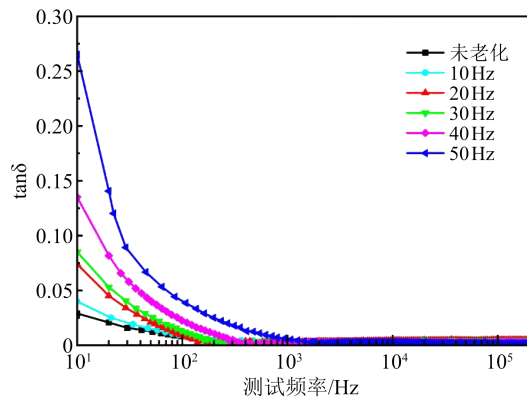
界面处的积累与释放过程滞后于电场变化,亦会导致能量损耗^[25-27]。

2.3 体积电阻率

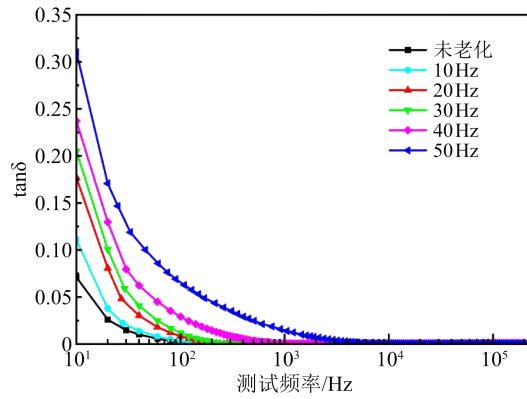
常温下测得未老化和电热联合老化 XLPE 试样的交流体积电阻率如图 5 所示。由图 5 可知,随着老化电压频率的增大,试样的体积电阻率并非一直降低,经 20 Hz、30 Hz 电压老化的 XLPE 试样体积电阻率明显高于其他频率电压老化的试样,与试样电气强度随老化电压频率变化的趋势一致。这是由于 XLPE 的体积电阻率和电气强度之间存在正相关关系^[28-29]。

2.4 力学性能

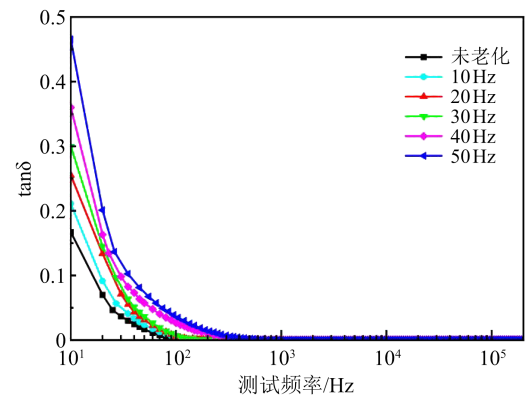
不同频率老化电压下 XLPE 试样的断裂伸长率如图 6 所示。由图 6 可知,随着老化电压频率由 10 Hz 增大到 50 Hz,XLPE 老化试样的断裂伸长率先增大后减小,经 20 Hz 电压老化的试样断裂伸长率最大。总体上,老化前后各试样的断裂伸长率及其分散性无显著变化。



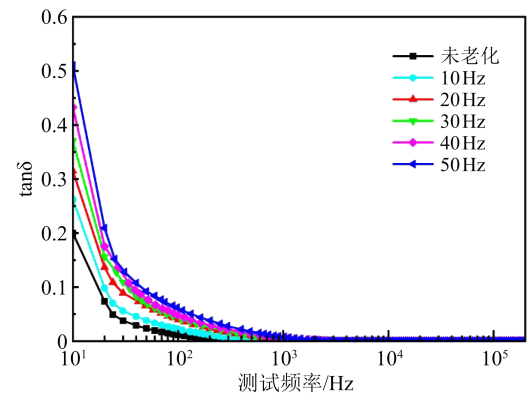
(a) 30°C



(b) 50°C



(c) 70°C



(d) 90°C

图4 不同测试温度下XLPE试样的介电谱
Fig.4 Dielectric spectra of XLPE samples at different test temperatures

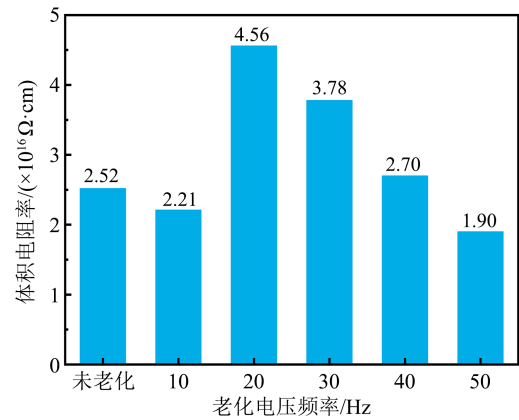


图5 XLPE试样的体积电阻率

Fig.5 Volume resistivity of XLPE samples

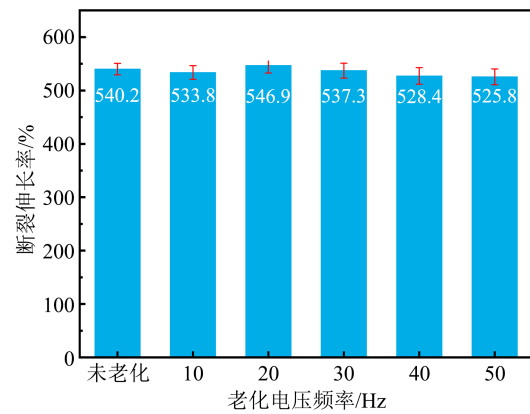


图6 XLPE试样的断裂伸长率

Fig.6 Elongation at break of XLPE samples

2.5 FTIR

XLPE 试样的红外光谱分析结果如图 7 所示。由图 7 可知,所有试样均存在 C-H 的伸缩振动峰 (2916.1 cm^{-1} 和 2848.1 cm^{-1}) 以及 CH_2 -的弯曲振动峰 (1467.3 cm^{-1} 和 719.2 cm^{-1}),验证了聚乙烯(PE)是 XLPE 材料的主要成分。

图 7 所示的光谱中在 3392.6 cm^{-1} 和 1645.2 cm^{-1} 处还分别出现羟基(O-H)伸缩振动峰和羰基(C=O)特征峰,表明试样的聚乙烯链中发生了氧化反应并生成羧基,羧基在氧化环境下衍生出醛类或酮类化合物等氧化分解产物^[30-31],相应产物的峰值随着 XLPE 试样老化电压频率的增大而增大,表明试样的氧化反应增强^[32],氧化产物的存在会导致试样中局部聚乙烯链微降解,进而使试样的宏观介电性能随老化电压频率的增大而下降。此外,经 30、40、50 Hz 电压老化的 XLPE 试样中 C-H 伸缩振动峰峰值也明显增大,这是由于在 XLPE 老化过程中,结构重组可能使原本被结晶区束缚的 C-H 键脱缚以及无定形区中分子链松散排列^[33-34]。

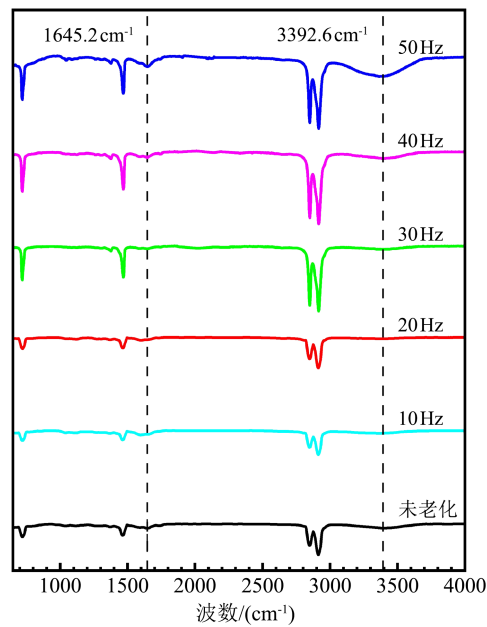


图7 XLPE 样品的红外光谱
Fig.7 Infrared spectra of XLPE samples

2.6 DSC

不同 XLPE 样品的 DSC 熔融、结晶曲线如图 8 所示，相应的熔融焓、结晶参数如表 1 所示。

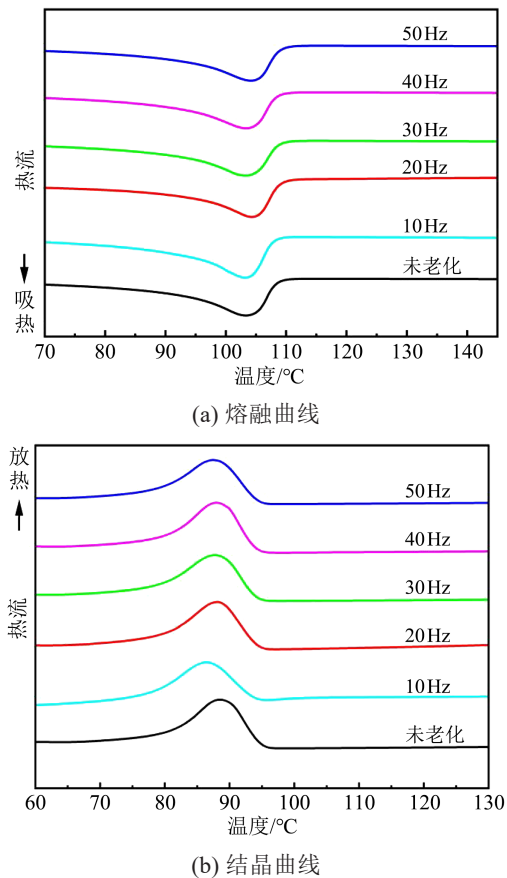


图8 XLPE 样品的 DSC 测试结果
Fig.8 DSC test results of XLPE samples

表 1 XLPE 样品的 DSC 熔融焓、结晶参数
Table 1 DSC melting enthalpy and crystallization parameters of XLPE samples

老化电压 频率/Hz	熔融焓(ΔH_m) /(J/g)	结晶度 /%	熔融温度(T_m) /°C	结晶温度(T_c) /°C
未老化	86.80	30.19	103.39	88.49
10	86.53	30.10	103.17	86.43
20	88.08	30.64	104.28	88.13
30	87.99	30.61	103.25	87.78
40	86.58	30.11	103.40	87.98
50	86.36	30.04	104.24	87.62

从图 8 和表 1 可以看出，XLPE 样品的熔融焓由未老化时的 86.80 J/g 下降至 10 Hz 电压老化后的 86.53 J/g，这与材料的微观结构变化有关。当老化电压频率为 20 Hz 和 30 Hz 时，熔融焓和熔融温度较高，在较高老化电压频率(40 Hz、50 Hz)下，材料的结晶度降低，50 Hz 时 XLPE 样品的熔融焓达到最低值，表明较高老化电压频率(50 Hz)下 XLPE 的老化效应比较低老化电压频率(20 Hz、30 Hz)下大。

从图 8 和表 1 还可以看出，XLPE 样品的结晶度、熔融温度随老化电压频率增大整体上呈先升高后降低的趋势。在低频电场下，分子链有更多时间进行缓慢运动与重排，导致分子链运动增加，而分子链运动的进一步增加会引入更多缺陷，从而降低了试样中分子结晶的有序度^[35]；此外，低频电场还可能引起 PE 的交联网络松弛。相比之下，在较高老化电压频率(如 40 Hz、50 Hz)下，分子没有充分时间进行重排，作用在材料上的物理因素(如电场、热累积等)变化太快，难以引起长期结构变化。同时电压频率的升高虽可促使 XLPE 分子链段形成部分取向，但结晶区可能被破坏。上述作用互相影响导致了 XLPE 样品的结晶度、熔融温度整体上随着老化电压频率增大而先升高后降低。

综上所述，电热联合老化对 XLPE 绝缘电缆的热性能有一定影响，老化电压频率为 20 Hz 时，熔融焓和熔融温度分别出现极高值，在较高频率条件(如 40 Hz、50 Hz)下，材料的结晶度降低。

2.7 XRD

不同 XLPE 样品的 XRD 谱图如图 9 所示，图中的两个主要衍射峰分别对应于聚乙烯晶体(110)晶面(21.575°)和(200)晶面(23.858°)的特征反射。通过 XRD 曲线上各衍射峰的面积总和与整个曲线面积的积分比值可以计算试样的结晶度^[36-37]，结果

如表2所示。

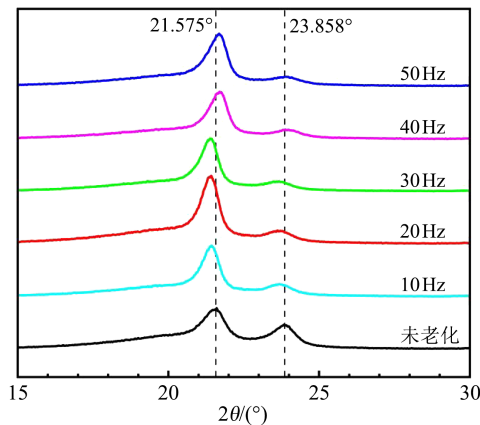


图9 XLPE 试样的XRD 谱图
Fig.9 XRD patterns of XLPE samples

表2 不同频率老化电压下 XLPE 试样的结晶度
Table 2 Crystallinity of XLPE samples under ageing voltage with different frequencies

老化电压 频率	未老化	10 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz	50 Hz
结晶度/%	34.74	39.37	41.86	42.99	41.17	38.30

由图9和表2可知,XLPE 材料的结晶度随老化电压频率的变化呈现出非线性变化规律,与 DSC 得到的结晶度变化趋势相一致。XLPE 试样的结晶度先由未老化时的 34.74% 升高至 10 Hz 电压老化后的 39.37%,表明一定频率的电压老化促进了分子链的移动并在晶区中重排。随着老化电压频率增大至 20 Hz 和 30 Hz,XLPE 试样的结晶度分别升高到 41.86% 和 42.99%,这是因为较低频率的电压提供了长周期电场作用时间,使得 XLPE 材料中空间电荷更充分扩散,减少了电场畸变,为分子链重排提供稳定环境,分子链段有足够时间克服能垒,在晶格中重新排列,形成更加完善的结晶区^[38-42]。当老化电压频率继续增大到 40 Hz 和 50 Hz 时,由于同一方向上电场维持时间变短,聚乙烯分子链在晶格中重排的时间不充分,难以引起材料结构变化,结晶可能被破坏,使得 XLPE 试样的结晶度相比较低频率时有所下降。

3 分析讨论

XLPE 电缆绝缘经不同频率电压电热联合老化后,从总体上看,老化试样的介质损耗因数随着老化电压频率的增大而增大。从频率相关性上看,XLPE 老化试样的电气强度并非随着老化电压频率

的增大而单调降低,经 20 Hz、30 Hz 电压老化的 XLPE 试样电气强度明显高于其他频率电压老化的试样,且经 20 Hz 电压老化的试样电气强度最高。

从微观上看,XLPE 老化试样的熔融焓、结晶度和熔融温度整体上随着老化电压频率的增大先升高后降低,经 20 Hz、30 Hz 电压老化的 XLPE 试样熔融焓和熔融温度高于 10 Hz 电压老化的试样,而经 50 Hz 电压老化的试样熔融焓和熔融温度小于较低电压频率老化的试样和未老化试样。这可能是由于较低老化电压频率(20 Hz、30 Hz)下,PE 分子链有更多时间缓慢运动,有足够时间在晶格中重新排列,形成较完善的结晶区。而在较高老化电压频率(50 Hz)下,分子链没有充分时间进行重排,电场、热累积等因素难以引起材料结构变化,同时晶区的破坏或分子链的交联程度增加,降低了试样中交联聚乙烯分子结晶的有序度,对进一步的结晶行为有所抑制。

这种非单调的结晶度变化规律反映了老化电压频率对 XLPE 绝缘材料晶体结构重排的双重作用机制:即老化电压频率较低时,电热联合老化过程有助于晶区的扩展和结晶度的提升;老化电压频率较高时(工频相对于低频)则会增大材料非晶区比例或破坏材料现有晶区结构。在这种双重作用机制下,经较低频率老化电压作用的 XLPE 材料中分子链结构得以重排,晶区得到扩展,结晶度、熔融焓、熔融温度、电气强度升高;当老化电压频率逐渐升高到接近工频时,交变电场引入的热振动加剧,分子链运动增强,分子链重排时间变短,结晶有序度下降,导致晶区破坏或形成非晶区,最终结晶度、熔融焓、熔融温度、电气强度降低。综上所述,可以认为在某些特定频段(例如 20~30 Hz)运行时,电缆的 XLPE 绝缘层长期处于热场和低频电场作用下,其内部 PE 分子结晶度的正向变化使其电气绝缘性能优于较高频段和较低频段。

上述双重作用机制下 XLPE 试样中 PE 分子的结晶度非单调变化规律亦体现在材料的拉伸性能上。在 XLPE 绝缘材料电热老化过程中,材料中的无定形区重排和结晶区形成相互制约着 XLPE 试样的整体力学性能,材料力学性能的劣化与增强现象同时发生。整体上材料的断裂伸长率随老化电压频率的变化趋势与材料电气性能的变化趋势相似。

在 XLPE 绝缘材料电热老化过程中,随着老化

电压频率的增大,试样中的氧化反应增强,聚乙烯链降解,羧基在氧化环境下衍生的醛类或酮类化合物等氧化分解产物的含量增加,进而导致试样的介电性能下降。

总体而言,XLPE绝缘电缆在720 h的电热联合加速老化过程中,电场频率和相应的热累积效应使XLPE绝缘材料的结晶度等微观参数发生了变化,较低频率电压下的热老化有助于XLPE绝缘材料重结晶,电压频率较高时则会破坏材料晶区结构,增加材料非晶区比例,因此XLPE材料的电气、力学性能并非随老化电压频率增大而单调变化。低频下长期运行XLPE电缆的绝缘性能变化仍需进一步研究。

4 结论

(1)XLPE试样的电气强度、体积电阻率随老化电压频率的变化趋势一致,整体上随着老化电压频率增大而先升高后降低,这与XLPE试样结晶度随老化电压频率的变化趋势一致。

(2)老化电压频率为10~50 Hz时,频率对XLPE材料晶体结构重排具有双重作用,频率较低时电热联合老化过程有助于晶区的扩展和结晶度的提升,频率较高时则会增大材料非晶区比例或破坏材料晶区结构。

(3)经频率为20 Hz、30 Hz电压老化的XLPE试样电气性能优于其他频率电压老化试样的电气性能。

参考文献 References

- [1] 胡超凡,王锡凡,曹成军,等. 柔性分频输电系统可行性研究[J]. 高电压技术,2002,28(3):16-18.
HU Chaofan, WANG Xifan, CAO Chengjun, et al. Feasibility research of flexible fractional frequency transmission system[J]. High Voltage Engineering,2002,28(3):6-18.
- [2] CHO Y, COKKINIDES G J, MELIOPOULOS A P. Advanced time domain method for remote wind farms with LFAC transmission systems: power transfer and harmonics[C]//2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Hong Kong,China:IEEE,2012.
- [3] ERICKSON R W, AL-NASEEM O A. A new family of matrix converters[C]//Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Denver,USA:IEEE,2001:1515-1520.
- [4] 王锡凡,王秀丽,滕予非. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):1-6.
WANG Xifan, WANG Xiuli, TENG Yufei. Fractional frequency transmission system and its applications[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):1-6.
- [5] 王秀丽,张小亮,宁联辉,等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战[J]. 电力工程技术,2017,36(1):15-19.
WANG Xiuli, ZHANG Xiaoliang, NING Lianhui, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):15-19.
- [6] 黄明煌,王秀丽,刘沈全,等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):167-174.
HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(5):167-174.
- [7] 王锡凡,刘沈全,宋卓彦,等. 分频海上风电系统的技术经济分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):43-50.
WANG Xifan, LIU Shenquan, SONG Zhuoyan, et al. Technical and economical analysis on offshore wind power system integrated via fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(3):43-50.
- [8] 赵国亮,陈维江,邓占锋,等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化,2022,46(15):1-10.
ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(15):1-10.
- [9] NOTO F, YOSHIMURA N. Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene[C]//Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena - Annual Report 1974. DOWNTOWN,USA:IEEE,1974:207-217.
- [10] LAURENT C, MAYOUC C. Analysis of the propagation of electrical treeing using optical and electrical methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1980,15(1):33-42.
- [11] GALLES F, GUASTAVINO F, TORELLO E, et al. Investigations of the electrical tree growth at different voltages and frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2023,30(6):2490-2497.
- [12] LI Weiwei, LI Jianying, YIN Guilai, et al. Frequency dependence of breakdown performance of XLPE with different artificial defects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(4):1351-1359.
- [13] WU Jiayang, JIN Huifei, RODRIGO M A, et al. The effect of frequency on the dielectric breakdown of insulation materials in HV cable systems[C]//2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Toyohashi,Japan:IEEE,2017:251-254.
- [14] GOCKENBACH E, HAUSCHILD W. The selection of the frequency range for high-voltage on-site testing of extruded insulation cable systems[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2000,16(4):11-16.
- [15] 周远翔,黄继宇,陈健宁,等. 低频电压下XLPE绝缘材料电老化性能研究[J]. 绝缘材料,2025,58(1):1-10.
ZHOU Yuanxiang, HUANG Jiyu, CHEN Jianning, et al. Study

- on electrical ageing performance of XLPE insulating material under low frequency voltage[J]. *Insulating Materials*,2025,58(1): 1-10.
- [16] 周远翔,聂琼,邢晓亮,等. 频率对高密度聚乙烯电树老化特性的影响[J]. *高电压技术*,2008,34(2):220-224.
ZHOU Yuanxiang, NIE Qiong, XING Xiaoliang, et al. Effect of frequency on electrical treeing characteristics of high-density polyethylene[J]. *High Voltage Engineering*,2008,34(2):220-224.
- [17] 周远翔,邢晓亮,聂琼,等. 高频下电树老化引起的高密度聚乙烯击穿现象[J]. *高电压技术*,2007,33(12):14-18.
ZHOU Yuanxiang, XING Xiaoliang, NIE Qiong, et al. Breakdown phenomena caused by electrical tree degradation in high density polyethylene under high frequency voltage[J]. *High Voltage Engineering*,2007,33(12):14-18.
- [18] 鲍明晖,尹小根,何俊佳. 高频电压下交联聚乙烯中电树枝的形态特性[J]. *中国电机工程学报*,2011,31(34):184-191.
BAO Minghui, YIN Xiaogen, HE Junjia. Electrical tree structure characteristics in XLPE power cable insulation under high-frequency voltages[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(34): 184-191.
- [19] 郑晓泉,CHEN G. 机械应力与电压频率对XLPE电缆电树的影响[J]. *高电压技术*,2003,29(4):6-8.
ZHENG Xiaoquan, CHEN G. The influence of residual mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE[J]. *High Voltage Engineering*,2003,29(4):6-8.
- [20] 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*,2009,34(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, 34 (1):141-145.
- [21] 马宗乐,梅迪,杨广忠,等. 电压频率对硅橡胶中电树枝生长特性的影响研究[J]. *绝缘材料*,2013,46(6):57-61.
MA Zongle, MEI Di, YANG Guangzhong, et al. Effect of voltage frequency on the propagation characteristic of electrical tree in silicone rubber[J]. *Insulating Materials*,2013,46(6):57-61.
- [22] 尹琪. 高温下电压频率对硅橡胶电树老化特性的影响[D]. 郑州:郑州大学,2016.
YIN Qi. Effect of voltage frequency on electrical treeing characteristics in silicone rubber at high temperature[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2016.
- [23] 刘云鹏,尹子澳,刘贺晨,等. 低频电压下XLPE电树枝生长及局部放电特性[J]. *绝缘材料*,2024,57(4):66-71.
LIU Yunpeng, YIN Ziao, LIU Hechen, et al. Propagation and partial discharge characteristics of electrical tree in XLPE cable insulation under low-frequency AC voltage[J]. *Insulating Materials*,2024,57(4):66-71.
- [24] 范星辉. 高压电缆主绝缘电热联合老化特性及状态评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
FAN Xinghui. Research on electro-thermal aging characteristics and state evaluation of insulation layer for high-voltage cable [D]. Guangzhou:South China University of Technology,2022.
- [25] CHENG X, YE G, SUN H F, et al. Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model[J]. *AIP Advances*,2021,11(8):085103.
- [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] 赵莉华,杨兰,李巍巍,等. 交联聚乙烯热老化与绝缘性能的相关关系[J]. *中国电力*,2020,53(9):118-124.
ZHAO Lihua, YANG Lan, LI Weiwei, et al. Relationship between thermal aging and insulation properties of XLPE[J]. *Electric Power*,2020,53(9):118-124.
- [28] 朱敏慧,闵道敏,高梓巍,等. 直流电缆用交联聚乙烯绝缘的击穿概率及其尺度效应仿真[J]. *电工技术学报*,2024,39(4):1172-1184.
ZHU Minhui, MIN Daomin, GAO Ziwei, et al. Breakdown probability and size effect simulation of XLPE insulation for DC power cables[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024,39(4):1172-1184.
- [29] LIU Yujia, LONG Yu, WANG Qingyui, et al. Effect of the cross-linking agent on the cross-linking degree and electrical properties of cross-linked polyethylene[J]. *Materials Research Express*, 2023,10(5):e53001.
- [30] 王彦峰,闫国兵,谢榕昌,等. 电热联合老化对XLPE电缆绝缘特性的影响[J]. *电力工程技术*,2021,40(5):128-135.
WANG Yanfeng, YAN Guobing, XIE Rongchang, et al. Effect of electro-thermal aging on characteristics of XLPE cable insulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(5): 128-135.
- [31] 周凯,李诗雨,尹游,等. 退运中压XLPE和EPR电缆老化特性分析[J]. *电工技术学报*,2020,35(24):5197-5206.
ZHOU Kai, LI Shiyu, YIN You, et al. Analysis of aging characteristics of medium voltage XLPE and EPR retired cables[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(24): 5197-5206.
- [32] TARIQ A, AHMAD N M, ABBAS M A, et al. Reactive extrusion of maleic-anhydride-grafted polypropylene by torque rheometer and its application as compatibilizer[J]. *Polymers*,2021, 13:495.
- [33] 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.
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.
- [34] 周士贻,门业堃,刘博,等. XLPE电缆绝缘片晶周期性结构演变及其对电性能的影响[J]. *中国电机工程学报*,2024,44(3):1205-1213.
ZHOU Shiyi, MEN Yekun, LIU Bo, et al. Lamellar periodic

- structure evolution of XLPE cable insulation and its influence on electrical properties[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1205-1213.
- [35] ZHAO A X, XU L, ZHANG X, et al. Research on aging parameters of XLPE cable based on isothermal relaxation current[J]. AIP Advances, 2018, 8(7): 075323.
- [36] 张东东, 张文博, 揭晓, 等. 海水腐蚀下的交联聚乙烯电缆老化特性及机理[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1993-2001.
- ZHANG Dongdong, ZHANG Wenbo, JIE Xiao, et al. The aging characteristics and mechanism of cross-linked polyethylene cables under seawater corrosion[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1993-2001.
- [37] ZHANG C B, LIU G M, JIANG Q H, et al. Correlation between the fracture toughness and β -crystal fraction in a β -nucleated propylene-based propylene-ethylene random copolymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(5): 42930.
- [38] 陈彦, 杨小震, 徐懋. 分子动力学方法研究单链聚乙烯的结晶过程[J]. 高分子学报, 1999(3): 257-265.
- CHEN Yan, YANG Xiaozhen, XU Mao. Molecular dynamics simulation on crystallization of fully extended single-chain polyethylene[J]. Acta Polymerica Sinica, 1999(3): 257-265.
- [39] 李丽丽, 张晓虹, 王玉龙, 等. 电场和温度对聚合物空间电荷陷阱性能的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 307-317.
- LI Lili, ZHANG Xiaohong, WANG Yulong, et al. Simulations of the effects of electric field and temperature on space charge traps in polymer[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 307-317.
- [40] 李丽丽, 张晓虹, 王玉龙, 等. 预电应力对聚合物微观结构和击穿性能的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2866-2874.
- LI Lili, ZHANG Xiaohong, WANG Yulong, et al. Influence of pre-electrical stress on microstructure and breakdown property of polymer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2866-2874.
- [41] LIU T, LI Q M, HUANG X W, et al. Partial discharge behavior and ground insulation life expectancy under different voltage frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 603-613.
- [42] 李丽丽, 张晓虹, 王玉龙, 等. 电场和温度对聚合物空间电荷陷阱性能的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(8): 316-325.
- LI Lili, ZHANG Xiaohong, WANG Yulong, et al. Simulations of the effects of electric field and temperature on space charge traps in polymer[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(8): 316-325.

收稿日期: 2025-03-12; 修回日期: 2025-05-07。

作者简介:

刘宗喜(1982-), 男(汉族), 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事交直流电力电缆绝缘性能、载流量和可靠性评价等方面的研究。