

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.019

电—热—力多场老化对500 kV直流XLPE电缆绝缘特性的影响

刘嘉浩¹, 彭维龙², 于锦程², 张磊², 宋家乐¹, 张添胤¹, 陈向荣¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为了研究电、热、力多物理场老化对500 kV直流交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆绝缘特性的影响,文中建立电—热—力联合老化实验平台,采用500 kV直流XLPE电缆绝缘环切试样,在110 ℃条件下,分别施加30、50、80 N拉伸应力,根据不同实验条件分组对XLPE绝缘试样进行7天的加速老化,采用差示扫描量热法、宽频介电谱仪和直流击穿测试对试样进行实验,研究XLPE试样在高温、电场和拉伸应力协同老化作用下的绝缘性能。结果表明:在电—热—力多场老化作用下,XLPE试样的结晶度老化7天后降至24.47%,片晶厚度增加到5.94 nm,施加更大的拉伸应力使结晶度进一步下降,片晶厚度增加。老化作用下试样的相对介电常数和介质损耗角正切随老化时间以及拉伸应力的增加而增大,老化7天后均达到最大值;施加80 N拉伸应力时,相对介电常数增加到3.54,介质损耗角正切增加了250.28%。XLPE试样的直流击穿强度随老化时间增加而降低,施加80 N的拉伸应力时XLPE试样击穿强度降低了45.64%。研究作为500 kV直流XLPE电缆的可靠运行提供了实验数据和参考。

关键词: 电—热—力多场老化; 交联聚乙烯; 绝缘特性

Effect of Electro-thermal-mechanical Multi-physics Aging on the Insulation Performance of 500 kV DC XLPE Cables

LIU Jiahao¹, PENG Weilong², YU Jincheng², ZHANG Lei², SONG Jiale¹,
ZHANG Tianyin¹, CHEN Xiangrong¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhoushan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhejiang Zhoushan 316000, China)

Abstract: To investigate the effects of electro-thermal-mechanical multi-physics aging on the insulation characteristics of 500 kV DC cross-linked polyethylene (XLPE) cables, in this paper a combined electro-thermal-mechanical aging experimental platform is established. Ring-cut specimens of 500 kV DC XLPE cables are adopted and the tensile stress of 30 N, 50 N, and 80 N are applied respectively at 110 ℃. The XLPE insulation specimens are divided into different groups in accordance with the experimental conditions and underwent aging for 7 days. The insulation performance of the XLPE specimens under synergistic aging effects of high temperature, electric field, and tensile stress is evaluated using differential scanning calorimetry (DSC), broadband dielectric spectroscopy, and DC breakdown testing. The results show that under the action of electro-thermal-mechanical multi-field aging, the crystallinity of XLPE specimens decreased to 24.47% after 7 days of aging, while the lamellar thickness is increased to 5.94 nm. The crystallinity is reduced and the lamellar thickness is increased further by the application of higher tensile stress. The relative dielectric constant and dielectric loss tangent of the specimens is increased with aging time

and tensile stress, reaching the maximum values after 7 days of aging. In case of applying a tensile stress of 80 N, the relative dielectric constant is increased to 3.54 and dielectric loss tangent is increased by 250.28%. The DC breakdown strength of XLPE samples is decreased with increasing aging time and, in case of applying a tensile stress of 80 N, the breakdown strength of XLPE samples is decreased by 45.64%. The research work provides experimental data and reference for the reliable operation of 500 kV DC XLPE cables.

Key words: electro-thermal-mechanical multi-field aging; cross-linked polyethylene; insulation performance

0 引言

近年来,电力系统远距离、高负荷的输电需求逐渐增加,高压直流电缆得到了广泛应用^[1~4]。直流电缆作为电力系统中的重要组成部分,其稳定运行直接关系到整个电力系统的可靠性。然而,直流电缆在实际服役环境中受到多种外界因素的同时作用,加速电缆绝缘材料的老化,降低了电缆的可靠性^[5]。500 kV 直流 XLPE 电缆因较大载流量与复杂的敷设环境,同时受到高温、拉伸应力以及电场多种因素的共同作用^[6]。因此,针对在实际工程应用中所遇到的问题,深入研究电—热—力多场老化对 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘特性的影响,对保障输电线路的安全运行和直流电缆的优化提供了实验依据。

目前,关于电老化、热老化以及应力作用下电缆用 XLPE 绝缘性能影响的研究已有一些报道。东南大学 Zhang Yi^[7]等指出热老化过程中材料的重结晶使起树电压升高,且结晶度与电树枝生长速率相关。国网北京电科院周士贻^[8]等提出热老化过程为前期片晶和无定形区增大,阈值场强与直流击穿强度同步提升;后期片晶变薄、无定形区扩展,载流子迁移增强并导致击穿强度下降。陕西理工大学赵李望^[9]等进一步将热老化过程分为重结晶增强和热氧降解两个阶段,前者提升结晶度和深陷阱密度,后者则导致结晶度下降,陷阱能级减弱,载流子迁移增强。在电老化方面,重庆大学张杰^[10]等发现在电老化过程中浅陷阱密度与电老化速率正相关,且深陷阱在释放高能电荷后趋于饱和,削弱电场畸变与注入从而延缓绝缘劣化。新疆大学周远翔^[11]等通过低频加速老化实验,发现频率降低使 XLPE 结晶度下降、空间电荷和电导率增加,击穿场强降低。在机械应力作用方面,国网河北电科院 Su Jian^[12]等结合实验与分子动力学模拟发现,拉伸应力会降低 XLPE 绝缘的结晶度和击穿场强,同时提高电导率,机理上涉及链段解扭取向与空穴形成对陷阱谱和载流子迁移的影响。曼切斯特大学 Frances Hu^[13]等

实验显示外施压缩会使电树在应力方向变宽并延迟起树,而拉伸则使电树更窄但寿命缩短。河北工业大学 Xing Yuqi^[14]等提出通过引入金属茂聚乙烯成核剂,可使晶体形态更均匀、陷阱密度下降,从而在拉伸应力下减轻晶区损伤、抑制电树劣化。此外,在电缆附件界面问题上,福州大学 Zhang Tianfeng^[15]等对 XLPE/SiR 界面开展了热—机械耦合老化研究,发现耦合老化相较纯热老化使界面击穿电压的峰值出现滞后,但最终均随降解而劣化。这些研究多为老化过程中 XLPE 的变化对其宏观性能的影响,但其实验条件多为单一应力场,缺乏对复杂服役环境的全面模拟。并且,现有的老化模型主要为电老化的 $E-t$ 模型,热老化的 Arrhenius 方程以及电—热老化的 Simoni 和 Ramu 模型等,缺少多物理场作用下的实验基础和依据^[16]。

尽管对于 XLPE 的电老化、热老化以及电—热联合老化的研究已经相当丰富,但对电、热、力多物理场同时作用下 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘特性的影响研究还较少。文中搭建了电—热—力联合老化实验平台,采用从 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘本体上环切下的 XLPE 试样进行电—热—力多场联合老化实验。通过差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC)、宽频介电谱仪和直流击穿实验,研究了电—热—力多场联合老化对 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘特性的影响,以期对直流 XLPE 电缆绝缘的可靠运行提供实验数据和应用参考。

1 实验方法

1.1 试样制备

文中选取宁波东方电缆股份有限公司生产的 500 kV 直流 XLPE 电缆样段,利用数控车床和特制刀具沿电缆样段轴向进行环切,切取厚度为 180~220 μm ,尺寸大小为宽 65 mm、长 300 mm 的薄片 XLPE 试样,并将其放置于超声波清洗机中清洗 10 min 去除表面的脏污,随后在 50 $^{\circ}\text{C}$ 的真空烘箱内干燥 2 h。

1.2 电—热—力联合老化实验

电热力联合老化实验通过自制的多物理场老化实验平台进行,其主要结构见图1。

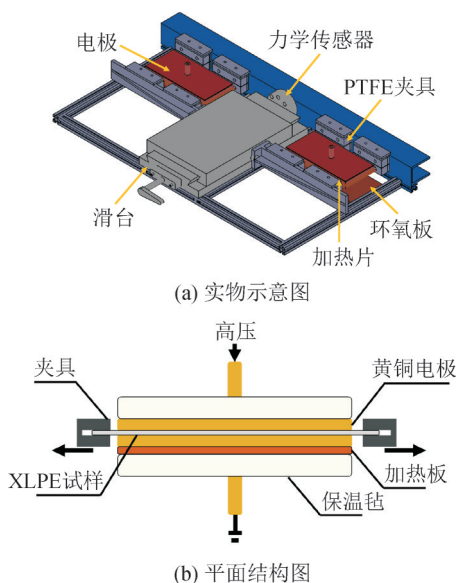


图1 多场老化装置

Fig. 1 Multi-field ageing setup

在老化实验前使用无水乙醇清洁试样两侧及上下电极的接触面,以防老化过程中杂质的影响。随后将试样放置在上下电极中间,其两端适当伸出黄铜电极之外,使用聚四氟乙烯夹具固定试样两端,夹具通过力学传感器固定在滑台上,可沿图1(b)中箭头所示方向移动,从而对试样施加不同水平的拉伸应力。力学传感器采用轮辐式拉力传感器,设置于滑台与夹具底座之间,并与试样中轴线对齐,以保证受力均匀。具体操作时,先通过调节旋钮推动滑台,使固定在其上的传感器带动夹具移动,最终实现对XLPE试样的拉伸。通过硅橡胶加热板加热黄铜电极,并在上下电极外侧贴有隔热气凝胶毡以保持温度。实验使用带有内置电流表的高压电源对试样施加电压,老化过程中可以通过观察电流数值来判断试样是否发生击穿。

实验分为两组,A组实验温度为110℃,拉伸应力分为30、50、80 N,对试样施加的电场为16.67 kV/mm,老化周期为7天。B组实验以同样的温度和电场条件进行,对每个试样施加30 N的拉伸应力并保持不变,每隔24 h取样一次,老化总时长为7天。

1.3 测试方法

1.3.1 差示扫描量热法

采用TA Q200差示扫描量热仪对XLPE试样进行测量,得到其相比于参照物加热所吸收的热量。试样从30℃加热至150℃,并在该温度下保持3 min至试样在较高温度下达到热平衡状态。随后冷却至

30℃并再次升温至150℃。加热和冷却速率设定为10℃/min。测试气氛为氮气,流速为20 mL/min。材料的结晶特性通过第二次加热曲线进行分析。

1.3.2 宽频介电谱仪测试

采用德国Novocontrol Concept 40宽频宽介电谱仪对XLPE试样的相对介电常数与介质损耗角正切进行测量。测试前通过磁控溅射仪,在试样两侧进行喷金形成均匀、光滑的导电层,避免测量过程中表面不平整或电极不贴合的影响。喷金电流为20 mA,持续时间为60 s,测试频率范围为10⁰ Hz至10⁶ Hz,测试环境温度为30℃。

1.3.3 直流击穿测试

采用直径为25 mm的球形电极建立球—板电极系统。测试前将XLPE试样和电极系统完全浸没于变压器油中,以减少空气对击穿路径的影响。用温度控制装置保持30℃的油温。所施电压以1 kV/s的速率升高直至发生击穿。测试所得到的直流击穿场强通过双参数Weibull分布进行分析,尺度参数 α 表示XLPE试样在63.2%击穿概率下的直流击穿场强,形状参数 β 表示所得直流击穿场强的分散性。

2 实验结果

2.1 结晶特性

试样的结晶度 χ 可计算为^[17]

$$\chi = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: ΔH_m 为测试中得到的试样的熔融焓; ΔH_0 为聚乙烯在结晶度为100%时的熔融焓。

根据Thomson-Gibbs方程^[18],XLPE试样的晶层厚度 L_c 可表示为

$$L_c = \frac{2\sigma_e}{\Delta H_0} \times \frac{T_{m0}}{T_{m0} - T_m} \quad (2)$$

式(2)中: σ_e 为晶体单位面积的表面自由能, $\sigma_e = 60.9 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$; T_{m0} 为平均熔融温度, $T_{m0} = 414.6 \text{ K}$; T_m 为测试过程中获得的熔融峰温度; ΔH_0 为单位体积聚乙烯晶体的熔融焓, $\Delta H_0 = 2.88 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ 。

XLPE试样在不同拉伸应力老化条件下的DSC曲线见图2(a)。由图2(a)可知,3个老化组试样的熔点均低于未老化试样,但3个老化组之间的熔点差异较小。试样的结晶度和片晶厚度的变化趋势见图2(b),随着拉伸应力的增加,XLPE试样的结晶度逐渐降低。具体而言,当拉伸应力从0 N增至30 N时,结晶度从30.24%下降至24.47%,片晶厚度增至5.94 nm。当拉伸应力达到80 N时,结晶度进一步降至23.42%,而片晶厚度增至6.12 nm,片晶厚度较未

老化试样的初始值增加 25.2%。

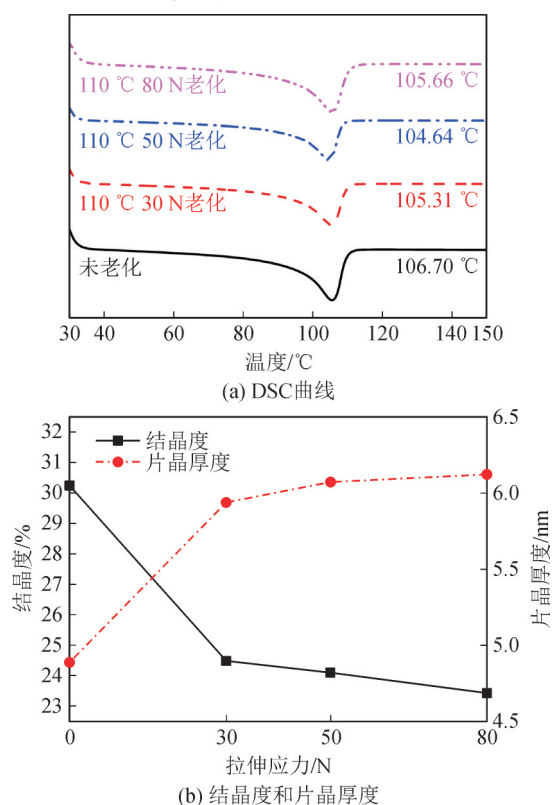


图2 A组实验DSC测试结果

Fig. 2 DSC results of group A

B组老化实验的结果见图3(a)。由图3(a)可知,在老化初期(第1~3天),熔融温度略有下降,但相对稳定,仍保持在接近未老化状态的范围,熔融焓开始明显下降,表明结晶度有所降低;在老化中期(第4~5天),熔融温度有所回升,熔融焓下降,表明结晶度进一步降低;熔融温度在后期继续上升,熔融焓显著下降,表明结晶度继续下降。结晶度和片晶厚度随老化时间的变化关系见图3(b)。经历首个24 h老化后,结晶度降低至28.47%,片晶厚度则增至5.52 nm,后者较初始值提升12.9%。随着老化的进行,结晶度在第2天回升至29.33%,随后第3天开始单调下降直至老化结束。片晶厚度在老化第2天至第4天内在小范围内波动。老化至第7天时,结晶度降低至最低值24.47%,片晶厚度增长至5.94 nm,达到老化周期内的最大值。

2.2 介电特性

在室温30 °C条件下测试的4种不同XLPE试样的相对介电常数和介质损耗角正切见图4。由图4(a)可知,未老化XLPE试样的相对介电常数在不同频率范围内基本保持稳定,仅表现出轻微下降趋势。经过老化后,试样的相对介电常数有所增加,出现随频率升高而下降的趋势,并随着拉伸应力的增加进一步升高。在低频段范围内,未老化试样的

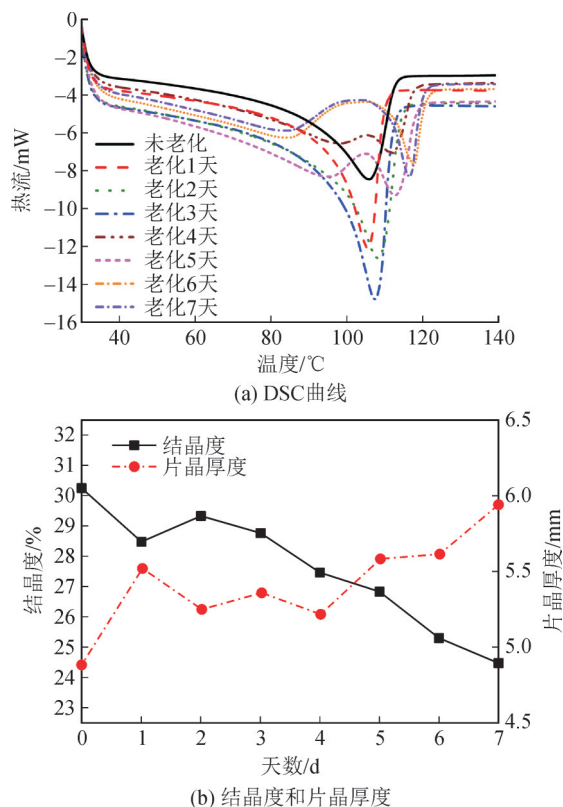
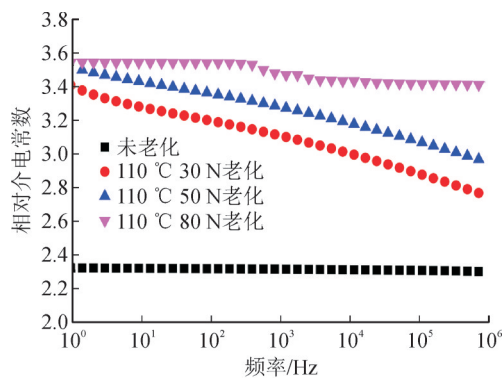


图3 B组实验DSC测试结果

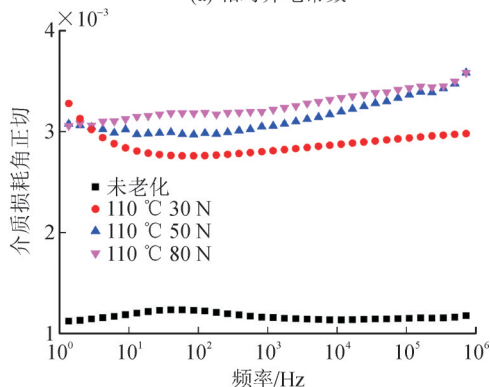
Fig. 3 DSC results of group B

相对介电常数在1 Hz时为2.363,10 Hz时为2.355,基本保持不变;当拉伸应力为30 N时,其值在1 Hz达到3.418,频率提高至10 Hz时下降为3.286;在50 N拉伸应力下,其值在1 Hz时为3.516,10 Hz时为3.508;在80 N拉伸应力下,其值在1 Hz为3.571,10 Hz为3.572。由图4(b)可知,未老化的试样的介质损耗角正切在低频段内呈略微上升。在30 N拉伸应力下老化的试样,介质损耗角正切随频率从1~10 Hz逐渐下降,频率升高后趋于稳定,其在1 Hz时比未老化试样上升了207.3%,在10 Hz时上升了146.1%。施加了50 N和80 N拉伸应力下老化的试样其介质损耗角正切在低频段均相对稳定,其中50 N条件下在1 Hz和10 Hz时的介质损耗角正切差异很小,比未老化试样上升约170%。80 N条件下10 Hz时略有上升,比未老化试样上升了190.1%。

热力联合老化试样的结果见图5。如图5(a)所示,XLPE试样的相对介电常数在第5天开始出现显著上升,第6~7天上升最为剧烈,低频范围内尤为明显,其中在1 Hz时,老化第7天的试样,其值上升至3.396,上升约46.6%。频率上升至10 Hz时,老化4~7天的试样均出现下降的趋势。这些变化表明在高温和拉伸应力的作用下,XLPE的极化能力得到了显著增强。介质损耗角正切的结果见图5(b)。介质损耗角正切在老化初期变化并不明显,到老化中期



(a) 相对介电常数



(b) 介质损耗角正切

图4 A组实验介电谱仪结果

Fig. 4 Broadband dielectric spectrometer results of group A

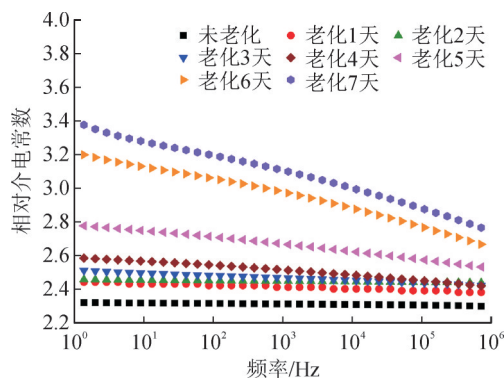
出现了可观的增长,而在经过第6天时出现了激增,1 Hz下达到了 3.014×10^{-3} 。老化第7天的介质损耗角正切上升至 3.487×10^{-3} 。从老化第3~7天的试样均在1~10 Hz范围内出现了下降,并在后续频率升高时有一定的回升并保持相对稳定,其中老化第6~7天的试样回升较为明显。

2.3 直流击穿特性

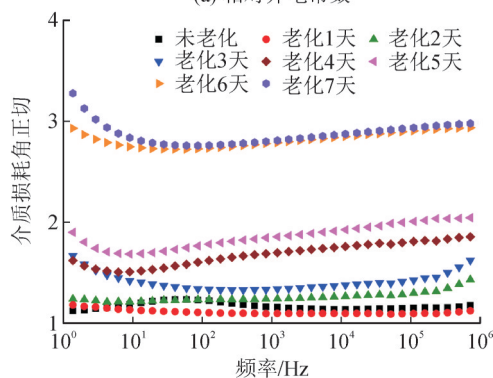
室温30 °C条件下XLPE试样的直流击穿强度结果见图6。XLPE试样在经过不同拉伸应力老化过程后的直流击穿强度见图6(a)。由图6(a)可知,随着施加的拉伸应力逐渐增加,老化XLPE试样的交流击穿强度相应降低。当拉伸应力从50 N增加到80 N时,直流击穿强度下降最为显著,下降了11.1%。

3 分析与讨论

结晶特性方面,试样的结晶度随多场老化时间的增加显著降低,其片晶厚度随多场老化时间的增加而增加,表明老化过程中XLPE试样的分子链出现断裂,试样内部无定形区出现扩大,这使XLPE试样的力学稳定性出现下降^[19]。在XLPE内部,由于热氧反应所出现的交联程度变化和分子链的断裂,试样



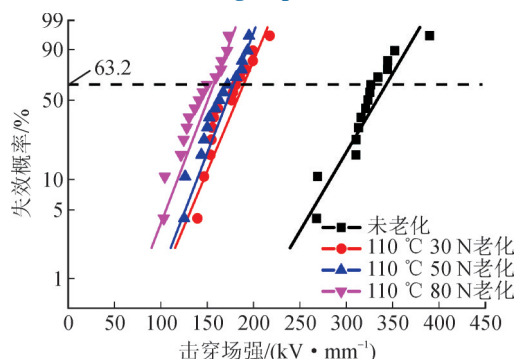
(a) 相对介电常数



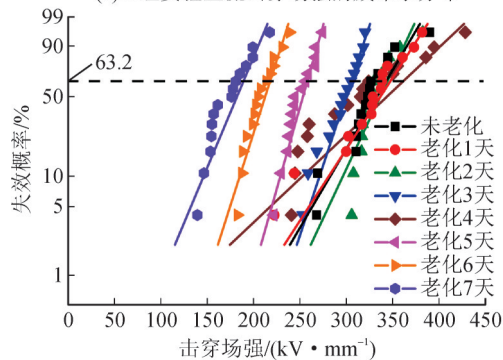
(b) 介质损耗角正切

图5 B组实验宽频宽温介电谱仪结果

Fig. 5 Broadband dielectric spectrometer results of group B



(a) A组实验直流击穿场强的威布尔分布



(b) B组实验直流击穿场强的威布尔分布

图6 XLPE试样的直流击穿场强实验结果

Fig. 6 DC breakdown strength of XLPE samples

的力学性能和电气性能会出现一定程度的降低^[20]。XLPE试样内部分子链排列因为部分分子链断裂和

无定形区的占比增大,变得较为松散,所以载流子的运动路径相较于未老化的试样增多。由于断裂后产生的短链段会出现部分重排现象,XLPE 试样的片晶厚度在多场老化后增加,而重排短链段的随机性使其分布不均匀,使外施拉伸应力在不同位置出现局部的应力集中,导致 XLPE 试样的内部出现如微小气泡、微裂纹等微小物理缺陷。这些物理缺陷的存在使 XLPE 试样在外加电场的作用下更易形成放电通道,加速其电学性能的降低和绝缘的击穿。当应力集中在界面时,会导致局部形成陷阱和电荷积聚,使局部电场强度增强,加速该位置的老化过程。同时,当片晶厚度上升至一定程度时,试样内部的不均匀性会影响 XLPE 试样整体的电场分布和电荷输运特性^[21]。这说明在电—热—力多场老化的作用下,XLPE 试样内部结构的不均匀性是影响其绝缘性能的关键因素。

XLPE 试样在老化过程中的微观结构变化,使试样的介电常数和介质损耗角正切值随外施拉伸应力的增加以及老化时间的延长而上升,且介质损耗角正切的增加在低频范围内更明显,表明材料内部陷阱的形成和无定形区扩展导致极化能力增强,同时电荷积累现象加剧^[22-23]。XLPE 试样的直流击穿场强呈现随外施拉伸应力与老化时间增加而降低的趋势。在多物理场老化后期阶段,直流击穿强度下降超过 45%。其原因在于高温下的热氧反应破坏 XLPE 试样内部的结晶结构、无定形区扩大以及局部电场畸变。XLPE 试样在这些因素的相互作用下,应力集中区域出现缺陷,进一步降低了试样的绝缘性能。因此,XLPE 试样的电气性能,在电—热—力多场老化的作用下出现的劣化,主要由试样在老化过程中发生的热氧反应所导致的分子链断裂、短链段重排产生的不均匀性,结合外施的拉伸应力局部集中而导致的。

4 结论

文中建立了电—热—力联合老化实验平台,采用 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘环切试样,通过差示扫描量热法、宽频介电谱和直流击穿测试,研究了电—热—力多场老化对 500 kV 直流 XLPE 电缆绝缘特性的影响,得到以下结论:

1)电—热—力多场老化作用下,XLPE 试样的结晶度先保持相对稳定后显著降低,老化 7 天后试样的结晶度降至 24.47%。老化后试样的片晶厚度明显上升,老化 7 天后增加至 5.94 nm,材料分子链断裂、重排和重结晶对 XLPE 试样结晶性能具有明显

影响。随着施加拉伸应力的增大,XLPE 试样的结晶度下降,且片晶厚度增加。

2)电—热—力多场老化过程中,XLPE 试样的相对介电常数和介质损耗角正切均随着老化时间和拉伸应力的增加而明显增大。老化 7 天后,XLPE 试样的相对介电常数和介质损耗角正切均达到最大值。对比老化过程中施加 30 N 的 XLPE 试样,施加 80 N 拉伸应力 XLPE 试样的相对介电常数增加到 3.54,且介质损耗角正切增加了 250.28%。

3)电—热—力多场老化作用下,XLPE 试样的直流击穿强度随老化时间的增加而降低。老化前 3 天,XLPE 试样的直流击穿场强下降均未超过 10%。随着老化时间的增加,老化第 7 天 XLPE 试样的直流击穿场强下降到最小值。在施加不同拉伸应力的条件下,老化过程中施加 80 N 拉伸应力的 XLPE 试样在电—热—力多场老化后,其直流击穿场强下降了 45.64%。

致谢

感谢浙江大学电气工程学院高电压实验室对本文提供的帮助和支持,并祝贺浙江大学电气工程学院高电压实验室创建 70 周年。

参考文献:

- [1] 刘 耀,赵小令,吴佳玮,等.高压直流海缆工程应用现状及展望[J].高压电器,2022,58(2):1-8.
Liu Yao, Zhao Xiaoling, Wu Jiawei, et al. Application status and prospect of HVDC submarine cable projects[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 1-8.
- [2] 刘 刚,李 瑞,张圆明,等.循环老化下电缆绝缘介损特征及在线监测修正方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):274-280.
Liu Gang, Li Rui, Zhang Yuanming, et al. Dielectric loss characteristics and online monitoring correction methods of cable insulation under cyclic aging[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 274-280.
- [3] 斯 捷,陈 植,赵 建,等.基于阻抗谱的电力电缆绝缘缺陷诊断函数故障定位与状态评估方法研究[J].电测与仪表,2025,62(7):217-224.
Si Jie, Chen Zhi, Zhao Jian, et al. Research on fault location and state evaluation method of diagnostic function for power cable insulation defects based on the impedance spectrum[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 217-224.
- [4] 蒋浩月,常凯颖,伊德伦,等.老旧 XLPE 电缆绝缘状态评估方法及其应用[J].电力工程技术,2026,45(3):20-27.
Jiang Haoyue, Chang Kaiying, Yi Delun, et al. Condition assessment method of old XLPE cable insulation and its application [J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(3): 20-27.
- [5] 汤广福,庞 辉,贺之渊.先进交直流输电技术在中国的发展与

- 应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
- Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [6] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 344-354.
- Du Boxue, Li Zhonglei, Yang Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.
- [7] Zhang Yi, Wu Zaijun, He Jiahong, et al. Electrical treeing behaviours in cross-linked polyethylene cables after thermal ageing[J]. High Voltage, 2023, 8(4): 749-759.
- [8] 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.
- [9] 赵李望, 惠卓斌, 单 聪, 等. 热老化下聚乙烯绝缘微观结构与电荷输运特性的关联性研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(1): 38-48.
- ZHAO Liwang, HUI Zhuobin, SHAN Cong, et al. Correlation between micro - structure and charge transport properties of polyethylene insulation under thermal ageing[J]. Insulating Materials, 2025, 58(1): 38-48.
- [10] 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): 2991-3000.
- 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): 2991-3000.
- [11] 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.
- [12] Su Jian, Wei Lei, Zheng Jun, et al. Effects of mechanical stress on insulation structure and performance of HV cable[J]. Polymers, 2022, 14(2927): 1-13.
- [13] Hu F, Emersic C, Smith D, et al. The effect of mechanical strain on electrical tree development in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 313-321.
- [14] Xing Yuqi, Liu Jiahao, Su Jian, et al. Effect of nucleating agents on the electrical properties of cross-linked polyethylene under tensile stress[J]. High Voltage, 2024, 9(2): 429-439.
- [15] Zhang Tianfeng, Lin Wenxin, Zhang Yunxiao, et al. Mechanistic insights into the thermal - mechanical ageing of the interface of cross - linked polyethylene/silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(12): e55140.
- [16] 王江琼, 李维康, 张文业, 等. 电缆绝缘材料交联聚乙烯的老化及寿命调控[J]. 物理学报, 2024, 73(7): 28-39.
- Wang Jiangqiong, Li Weikang, Zhang Wenye, et al. Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(7): 28-39.
- [17] 张添胤, 陈向荣, 王恩哲, 等. 硫化压力对 500 kV 超高压直流 XLPE 电缆工厂接头恢复绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2931-2943.
- Zhang Tianyin, Chen Xiangrong, Wang Enzhe, et al. Effect of vulcanization pressure on the return insulation performance of 500 kV EHVDC XLPE cable factory joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2931-2943.
- [18] 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.
- [19] Sahoo R, Karmakar S. Impact of accelerated thermal aging on electrical tree structure and physicochemical characteristics of XLPE insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 429-438.
- [20] 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.
- [21] 石逸雯, 周国伟, 孟繁博, 等. 热老化对交流配电 XLPE 电缆改为直流运行后电缆绝缘性能的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 4104-4112.
- Shi Yiwen, Zhou Guowei, Meng Fanbo, et al. Effect of thermal aging on the cable insulation properties of AC distribution XLPE cables under DC operation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4104-4112.
- [22] Wu Chao, Arab M, Ronzello J A, et al. Charge transport dynamics and space charge accumulation in XLPE composites with 2D platelet fillers for HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 3-10.
- [23] 许庆重, 李秀峰, 孙光华, 等. 热老化对 XLPE/OMMT 纳米复合材料微观结构和力学性能的影响[J]. 绝缘材料, 2022, 55(10): 25-32.
- Xu Qingchong, Li Xiufeng, Sun Guanghua, et al. Effect of thermal ageing on microstructure and mechanical properties of XLPE/OMMT nanocomposites[J]. Insulating Materials, 2022, 55(10): 25-32.
- 刘嘉浩(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电缆绝缘测试和可靠性分析等(通信作者)(E-mail: jiahaoliu@zju. edu. cn).
- 陈向荣(1982—), 男, 教授, 博导, 研究方向为先进电气材料与高压绝缘测试技术、先进电力装备与新型电力系统、高电压新技术等(E-mail: chenxiangrongxh@zju. edu. cn).