第 49 卷 第 2 期：588-596 高电压技术 Vol.49, No.2: 588-596
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220924

短时高热运行对 XLPE 电缆绝缘聚集态结构及介电性能的影响

陈祎林，周　凯，林思衍，徐庆文，伍亚萍，王子康
（四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：为了研究交联聚乙烯(cross-linked polyethylene，XLPE)电缆经历短时高热运行后绝缘性能的变化，通过对短电缆样本进行短时高热老化来研究其聚集态结构与介电性能的变化及关联性。首先对 10 kV XLPE 电缆样本分别在 90、105、120、135 和 150 ℃下热老化 2 d，然后将所有样本在 90 ℃下热处理 90 d，最后采用极化–去极化电流测试、击穿电压测试对热处理前后的样本进行电气性能表征。为了解其聚集态结构变化，采用差示扫描量热测试、傅里叶红外光谱测试对热处理前后的样本进行理化性能表征。结果表明，当电缆经历短时高热运行后，若短时高热温度处于 XLPE 熔融温度范围内，绝缘的界面极化强度、抗氧化剂消耗速率会减小；而当短时高热温度超过 XLPE 熔融温度时，绝缘的界面极化强度、抗氧化剂消耗速率会增加。这一结果表明了当电缆短时高热运行温度处于 XLPE 熔融温度范围时，之后电缆热氧老化进程会因 XLPE 重结晶效应而被减缓；当温度高于 XLPE 熔融温度时，之后电缆热氧老化进程会由于 XLPE 发生热裂解而被促进。

关键词：XLPE 电缆；热老化；短时高热；抗氧化剂；界面极化

Effect of Short-term High-temperature Operation on the Aggregate Structure and Dielectric Properties of XLPE Cables Insulation

CHEN Yilin, ZHOU Kai, LIN Siyan, XU Qingwen, WU Yaping, WANG Zikang
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To understand the changes in insulation properties of cross-linked polyethylene(XLPE) cables after short-term high-temperature operation, we investigated the changes and correlation between the aggregated structure and dielectric properties of short cable samples subjected to short-term high-temperature aging. First, we carried out high-temperature aging for 2 days at 90, 105, 120, 35, and 150 ℃ for 10 kV XLPE cables, and then thermally treated at 90 ℃ for 90 days. Finally, the electrical properties of the samples before and after thermally treated were characterized by polarization and depolarization current test and breakdown voltage test, and the physical and chemical properties of the samples before and after thermally treated were characterized by differential scanning calorimetry and Fourier transform infrared spectroscopy. The results show that when the cable experiences short-term high-temperature operation, if the short-term high temperature is within the range of XLPE melting temperature, the interfacial polarization strength and antioxidant consumption rate of insulation will be reduced; while when the short-term high temperature exceeds the XLPE melting temperature, the interfacial polarization strength and antioxidant consumption rate of insulation will increase. The results show that when it is in the XLPE melting temperature range, the subsequent thermal oxygen aging process of the cable is slowed down by the recrystallization effect of the XLPE; when the short-term high-temperature operating temperature of the cable is above the XLPE melting temperature range, the subsequent thermal oxygen aging process of the cable is facilitated by the thermal cracking of the XLPE.

Key words: XLPE cables; thermal aging; short-term high temperature; antioxidant; interfacial polarization

0　引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene，XLPE)电缆因其优良的电气和机械性能，被广泛应用于城市的输配电网络中，电缆的运行温度对绝缘性能的影响一直是人们关心的问题[1-3]。通常 XLPE 电缆长期运行的最高温度为 90 ℃，但在实际运行中，XLPE 电缆时常因为负荷过大、共沟率高、通风不

基金资助项目：国家自然科学基金(51877142)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877142).

良或短路故障等问题，导致电缆在温度>90 ℃的情况下运行数小时甚至数天，这种短时高热时的温度甚至可能达到 150 ℃[4-5]。过高的运行温度可能会使 XLPE 电缆绝缘发生热老化而产生其力学性能变差、绝缘性能下降等多种后果，情况严重时可能引发击穿等事故，影响供电可靠性[6-8]。因此，研究这种短时高热运行是如何影响 XLPE 电缆绝缘的聚集态结构及介电性能，进而进行绝缘状态的评估，这无论对于科学研究还是工程应用都有较大意义。

对于温度对 XLPE 绝缘性能的影响，许多学者利用时温等效原则，使用加速热老化的方式来对 XLPE 电缆进行了实验室模拟，并取得了一些研究成果[9-11]。文献[12]通过研究固定温度下的加速热老化过程中 XLPE 电缆的抗氧化剂残留量来判断热老化程度，但在实际运行电缆的热老化过程中，电缆运行温度很可能发生变化，所发生的化学反应也可能存在机理上的区别，因此电缆在经受了短时高热运行后，抗氧化剂消耗速率是如何变化的，是否会受到重结晶效应的影响，这一问题尚不明确。文献[13-16]研究了不同热老化温度对 XLPE 晶体结构破坏机制的差异以及加速热老化条件下 XLPE 聚集态结构与介电强度之间的关系，但没有关注结晶度的变化是如何影响绝缘的界面特性，尤其是晶区与非晶区之间的界面特性。

从国内外学者的研究结果来看，即使是持续数天的短时高温热老化也会对 XLPE 的各项性能产生较大影响，导致抗氧化剂含量降低。在实际运行环境下，短时高热运行是否会引起 XLPE 结晶度发生改变，这是否会进一步影响电缆绝缘内的抗氧化剂消耗速率，进而影响电缆的热氧老化进程，这一问题尚不明确；短时高热运行后可能导致 XLPE 晶区和非晶区结构发生变化，电缆绝缘晶区与非晶区的界面极化特性是否会被晶区结构变化所影响，界面极化强度如何变化，这些问题尚未得到关注。研究这些问题有助于我们深入理解短时高热运行对 XLPE 电缆绝缘的聚集态结构与介电性能的影响。

为解决上述问题，本文主要针对 10 kV 电缆在短时高热条件下运行对 XLPE 电缆绝缘聚集态结构以及介电性能的影响进行研究。对电缆样本进行不同温度的短时高温热老化，随后在正常工作的极限温度 90 ℃下进行运行环境模拟，并结合电气性能与理化性能变化规律，对短时高热条件下的电缆绝缘性能变化情况进行研究。

1　实验部分

1.1　试样制备

本文选取型号为 YJLV−8.7/10 1×95 mm^2 的 10 kV 交流 XLPE 电缆作为试样，绝缘厚度为 4.5 mm，截取长度为 50 cm 的电缆共计 25 根，分为 A—E 共 5 组。剥去所有电缆外护套、阻水层以及铜屏蔽层，并分别去除电缆两端外半导电层各 15 cm，最后在端部切除 1~2 cm 绝缘层露出缆芯用于接线。将 A—E 组电缆放入型号为 RGDJ−500 的温湿度控制箱，分别进行为期 2 d 的 90、105、120、135 和 150 ℃热老化，冷却至室温，并进行相关测试[4-5,17]。然后将全部电缆试样在 90 ℃下热处理 90 d，每隔 30 d 取样进行测试，测试均在室温下进行，如表 1 所示。

1.2　实验方法

1.2.1　极化−去极化电流测试

极化−去极化电流(polarization and depolarization current，PDC)测试系统如图 1 所示，皮安表型号为 Kaithley-6485，高压直流电源输出电压为 0~5 kV。当开关连接 a 时，对电缆样本加压进行极化过程；当开关连接 b 时，电缆样本两端接地，进行去极化过程。本文中极化电压设置为 1 kV，极化时间为 70 s，皮安表在极化和去极化过程中测得的电流分别为极化电流 i_p 和去极化电流 i_{dep}[18-19]。在测试过程中，为防止沿面电流对测试结果的影响，在电缆样本裸露出的绝缘两端加上屏蔽环并接地，每根样本测 3 次。

表 1　电缆样本分组

Table 1　Grouping of cable samples

分组	实验描述
A	90 ℃热处理 92 d
B	105 ℃老化 2 d+90 ℃热处理 90 d
C	120 ℃老化 2 d+90 ℃热处理 90 d
D	135 ℃老化 2 d+90 ℃热处理 90 d
E	150 ℃老化 2 d+90 ℃热处理 90 d

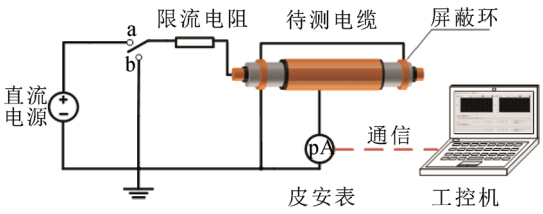


图 1　PDC 测试系统图

Fig.1　Test system diagram of PDC

1.2.2 傅里叶红外光谱测试

实验采用型号为 Nicolet 6700 的傅里叶红外光谱仪(Fourier-transform infrared spectrum，FTIR)，波数范围为 400~4000 cm^{-1}，精度为 0.01 cm^{-1}，分辨率为 0.009 cm^{-1}。测试时用 YD–2508A 轮转式切片机将样本切成(100±10) μm 厚的薄片进行观察，为避免不同位置取样带来的实验误差，取样位置均在电缆绝缘中间层，每组样本测 3 次。

1.2.3 氧化诱导期测试

定期取出样本进行氧化诱导期(oxidation induction time，OIT)测试，实验采用调制型差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry，DSC)。将样本制成 5~8 mg 小块放入坩埚内进行测试，先通入氮气使样本置于氮气环境中，再将样本升温到 200 ℃，升温速率为 20 ℃/min。恒温 10 min 后将氮气切换为氧气，切换点作为氧化诱导期的起始点，继续维持 200 ℃直到出现放热峰，采用切线法计算样本的氧化诱导时间，每组样本测 3 次。为避免不同位置取样带来的实验误差，取样位置在电缆绝缘中间层。

1.2.4 击穿电压测试

为评估样本电气性能变化情况，对热处理后的 XLPE 短电缆样本在如图 2 所示的工频击穿电压测试平台下进行击穿电压测试。

首先，从 XLPE 电缆绝缘层上切取厚度为 5 mm 的半圆环形样本，剥去外半导电层，将内半导电层用砂纸打磨光滑。然后将宽度为 5 mm 的铜条用绝缘扎带固定在内半导电层上，使两者紧密接触。最后，将直径为 500 μm，曲率半径为 10±1 μm 的钢针垂直于铜条扎入半圆环形样本中，深度为 3 mm，在针电极上施加工频交流电压，铜条接地[20]。实验采用匀速升压法，以 500 V/s 的升压速率先升至 5 kV，后以 1 kV/min 升压速率进行升压，记录样本击穿时的电压值，每组试样制作 10 个样本进行击穿电压测试。

2 实验结果与分析

2.1 PDC 测试结果

为了评估老化后电缆样本的绝缘状态，对各组样本进行 PDC 测试后分别计算其直流电导率和 0.1 Hz 下介质损耗因数，计算式[21]如式(1)、式(2)所示：

$$\sigma_0 \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0}\left(i_p + i_{dep}\right) \tag{1}$$

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

式中：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；tan$\delta(\omega)$为总损耗；$\varepsilon'(\omega)$和 $\varepsilon''(\omega)$分别为复介电常数的实部和虚部；$\chi'(\omega)$和反映的是介质束缚电荷的能力；$\chi''(\omega)$反映的是有损极化带来的损耗。

热处理 92 d 后各组样本的极化电流曲线如图 3 所示。由于相同时间节点各组样本的极化电流变化趋势一致，因此这里着重分析热处理 92 d 后各组样本的极化电流曲线。图 3 可以看出，经过不同温度短时高温热老化之后，电缆样本的极化电流幅值不同。B 组样本极化电流幅值最低；A 组与 C 组极化电流幅值差异不大，但 A 组略大于 C 组；D、E 两

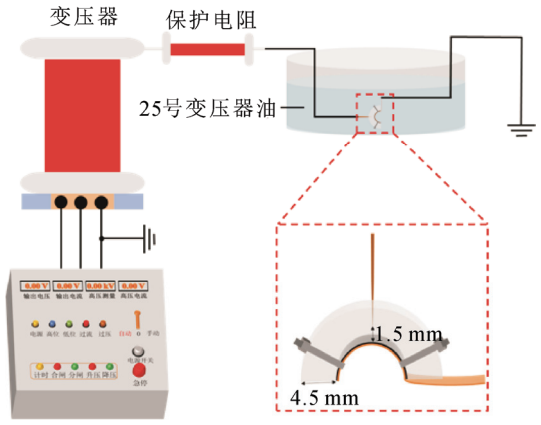


图 2 样本的工频击穿电压实验平台

Fig.2 Power frequency breakdown voltage test platform of the samples

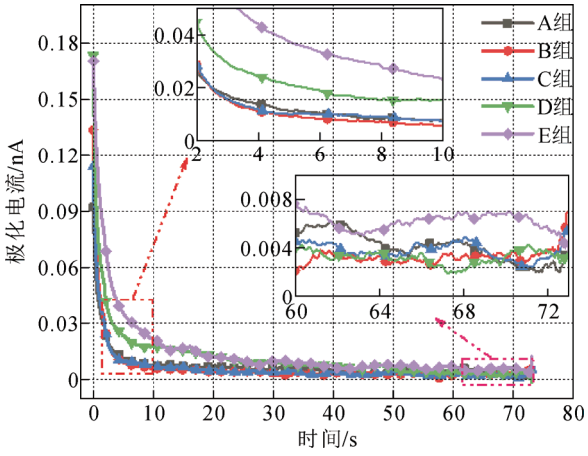


图 3 热处理 92 d 后各组样本的极化电流曲线

Fig.3 Polarization current curves for each group of samples after thermally treated for 92 days

组极化电流幅值显著大于其余 3 组，且 E 组最大。5 组样本的极化电流末端无明显差异，这说明短时高热对电缆电导电流影响较小。图 4 为通过极化和去极化电流计算出的各组样本在 0.1 Hz 下的介质损耗因数和直流电导率。B 组 0.1 Hz 下介质损耗因数损最低，为 0.065%；A 组与 C 组无明显差异，分别为 0.077%和 0.074%；D 组明显上升，为 0.092%；E 组出现较大幅度上升，为 0.15%，整体呈现出先减小后增加的趋势。直流电导率的变化也表现出相同的规律，A—E 组分别为 1.40×10^{-15}、8.80×10^{-16}、1.21×10^{-15}、1.24×10^{-15}、4.73×10^{-15} S/m。

经历不同温度短时高温热老化后的电缆样本的极化电流幅值整体呈现先减小后增大的变化趋势，这可能是由于短时高热温度处于 XLPE 熔融温度范围内时，XLPE 的重结晶效应使晶体结构趋于完善，绝缘性能得到提升，因此极化电流幅值减小；而温度高于 XLPE 熔融温度时，XLPE 发生了热裂解，化学结构发生了改变，产生了更多的小分子，电缆绝缘中的极性分子增多，电缆极化率增加，因此导致极化电流幅值增加[22]。同时，由于 XLPE 电缆绝缘内部极性基团数量呈现先减小后增加的趋势，故直流电导率和 0.1 Hz 下的介质损耗因数也呈现出先减小后增加的趋势。

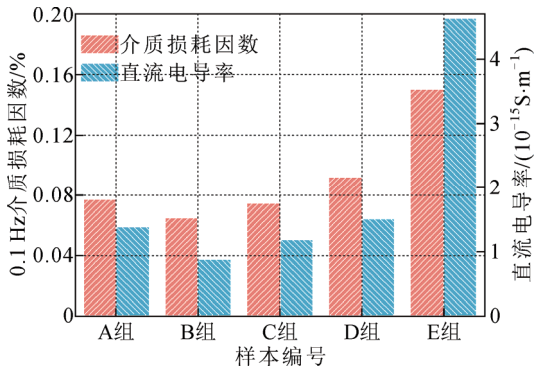


图 4　热处理 92 d 后各组样本的介质损耗因数和直流电导率

Fig.4　Dielectric loss factor and DC conductivity for each group of samples after thermally treated for 92 days

2.2　OIT 测试结果

图 5 为各组样本的 OIT 对比图，其中 0~2 d 为高温老化，2~92 d 为 90 ℃热处理。老化 2 d 后，A、B、C 这 3 组样本的氧化诱导时间由新电缆的 10.51 min 分别降到 10.31、10.39 和 10.38 min，分别下降了 1.84%、1.10%和 1.12%；而 D、E 2 组分别降到 8.41 和 8.24 min，下降了 19.95%和 21.57%。之后，样本在 90 ℃下进行为期 90 d 的热处理过程中，A—E 这 5 组样本的氧化诱导时间分别以不同的速率呈线性下降，下降速率分别为 0.07、0.02、0.03、0.06 和 0.10 min/d。可以看出，不同温度高温老化 2 d 后，A、B、C 这 3 组 OIT 无明显差异且下降较少，即抗氧化剂消耗量较少；而 D、E 2 组 OIT 明显降低，且 D 组大于 E 组。在 90 ℃下热处理 90 d 过程中，B 组与 C 组 OIT 下降速率较小且 B 组低于 C 组，A 组与 D 组下降速率接近，E 组下降速率最大且显著高于前 4 组。

短时高温老化期间，不同温度下抗氧化剂消耗速率不同，当电缆老化温度为 90 ℃时(处于 XLPE 熔融温度以下)，抗氧化剂的消耗速率维持不变；当

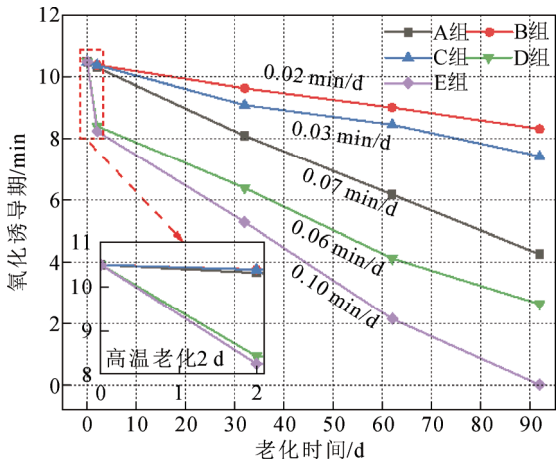


图 5　各组样本的 OIT

Fig.5　OIT with samples in each group

电缆老化温度高于 XLPE 熔融温度时，抗氧化剂消耗速率显著增大；而当老化温度处于 XLPE 熔融温度范围内时，抗氧化剂消耗速率略低于 90 ℃时的抗氧化剂消耗速率。高温老化后，当全部 XLPE 电缆样本长期在 90 ℃环境下热处理时，各组样本抗氧化剂消耗速率基本维持其各自的值不变，且均不同于高温老化前的消耗速率。因此，在实际运行过程中，由于短时过负荷或通风不良等运行条件导致电缆运行温度短时升高可能会影响绝缘内抗氧化剂的消耗速率，进而影响电缆绝缘性能。

2.3　击穿电压测试结果

由于在同一时间节点下各组样本的工频击穿电压变化趋势一致，这里着重分析了热处理 92 d 后各组样本的工频击穿电压。图 6 为不同老化样本热处理 92 d 后的击穿电压对比图。击穿实验具有一定的随机性与分散性，需要对其进行统计处理，击穿

电压概率分布服从 Weibull 分布[23]。由于样本数量较少，因此采用 Ross 函数计算 Weibull 分布数据点的概率值。将样本击穿电压从小到大排列，采用式(3)计算失效概率 $F(i, n)$。

$$F(i,n)\approx\frac{i-0.44}{n+0.25}\times100\% \tag{3}$$

式中：i 为样本序号；n 为样本总数。

本文选取失效概率为 63.2%的击穿电压为样本的特征击穿电压。A—E 组的特征击穿电压分别为 24.09、28.72、26.91、23.05、21.49 kV，整体呈现出先升高后降低的趋势。其中，B、C 组样本击穿电压显著高于其余 3 组；A 组与 D 组较为接近，且 A 组高于 D 组，E 组最低。

因此，当电缆样本在 XLPE 熔融温度附近经过短时热老化后，其特征击穿电压会显著增大；电缆样本长期处于 90 ℃环境下与样本经过短时 135 ℃老化+90 ℃长期热处理后，特征击穿电压差异不大，但前者略高于后者；电缆样本经过 150 ℃短时热老化+90 ℃长期热处理后，特征击穿电压减小。这表明，电缆经过短时高热运行，且温度在 XLPE 熔融温度范围时，电缆绝缘性能在一定程度上有所改善，特征击穿电压明显增大；当短时运行温度高于 XLPE 熔融温度时，其特征击穿电压会略微减小。

3 讨论

3.1 短时高温运行对 XLPE 电缆结晶度的影响

XLPE 电缆在运行时会由于短时过负荷或通风不良等运行条件而使其运行温度过高，短时高热运行会引起电缆绝缘的结晶度发生变化。由于在同一时间节点下各组样本的结晶度变化趋势一致，这里着重分析了热处理 92 d 后各组样本的结晶度变化趋势。由于所采用的 XLPE 电缆绝缘厚度为 4.5 mm，绝缘内外层温度差异不大，并且取样位置都一致，能避免取样位置不同带来的测试误差[24]。

图 7 为根据 DSC 曲线计算出的各组样本的结晶度。可以看出样本的结晶度首先由 A 组的 37.31%先升高到 B 组的 39.92%；然后开始下降，从 C 组的 37.94%到 D 组的 36.90%；最后 E 组的结晶度最低，为 35.16%，结晶度整体呈现出先升高后下降的趋势。不同温度的短时高温老化会对 XLPE 的结晶行为产生不同的影响，与 A 组样本相比，B 组样本结晶度增加了 6.99%；而 E 组样本结晶度下降了 5.78%。

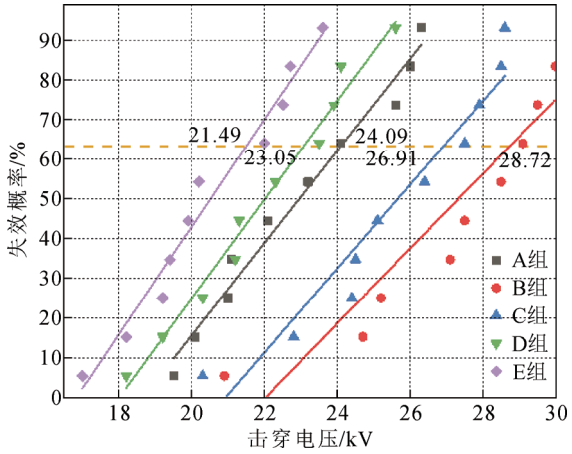


图 6 热处理 92 d 后各组样本的击穿电压

Fig.6 Breakdown voltage for each group of samples after thermally treated for 92 days

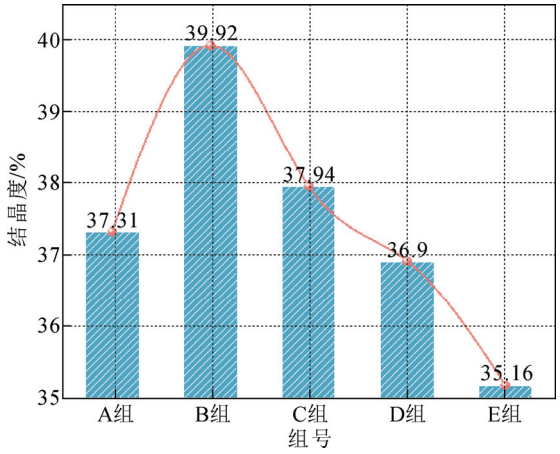


图 7 热处理 92 d 后各组样本的结晶度

Fig.7 Crystallinity of each group of samples after thermally treated for 92 days

经过短时高热运行后，XLPE 电缆的绝缘性能发生改变可能是由于结晶度发生了改变。当电缆短时运行温度在 XLPE 熔融温度(105~115 ℃)范围时，由于抗氧化剂的作用，XLPE 分子链的断链氧化过程被阻断。高温使得 XLPE 中不完全晶体熔融再结晶，晶体结构趋于完善，部分无定形区向结晶区转换，结晶度小幅度提高，从而提高电缆绝缘性能。当电缆短时运行温度高于 XLPE 熔融温度时，XLPE 晶区的完整性会被破坏，从而其结晶度会降低，绝缘劣化。因此，当 XLPE 电缆短时高热运行温度处于熔融温度范围时，一定程度上能提高其绝缘性能；当短时运行温度高于 XLPE 熔融温度时，其绝缘性能会下降，且温度越高绝缘劣化越严重。

3.2　热裂解对 XLPE 电缆短时高温运行后老化进程的影响

运行电缆短时过负荷或通风不良等问题引起短时高热会加快或延缓电缆的老化进程。当短时高热运行温度较低时电缆绝缘由于重结晶效应而使绝缘晶体结构更加完善，老化进程被减缓。当短时高热运行温度较高时，电缆绝缘晶体结构被破坏，从而加快了电缆的老化。如图 8 所示，XLPE 在较高温度下球晶发生熔融，分子链由规则排列状态变为无序排列，发生热裂解，分子链断裂并产生极性分子。当温度降低时，XLPE 重新结晶，此时片晶数量减少，晶体结构疏松[14-15]。

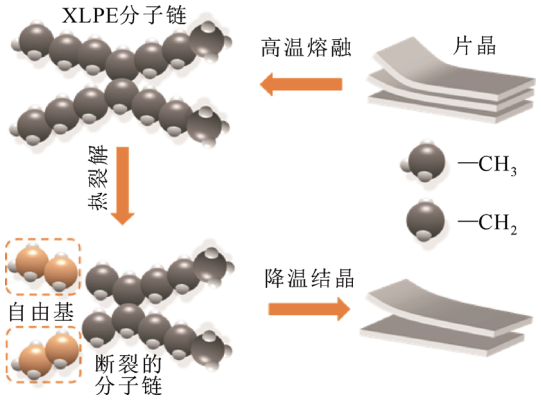


图 8　热裂解示意图

Fig.8　Schematic diagram of thermal cracking

XLPE 的热裂解会产生自由基 R•，R•与氧气发生反应生成过氧化自由基 ROO•。ROO•继续与 XLPE 分子链发生反应生成新的 R•和过氧化氢物 ROOH，ROOH 会分解产生 RO•和•OH，这些产物会继续与 XLPE 分子链发生反应产生新的自由基 R•，氧化反应进入自加速阶段[15,25]。如图 9 所示，由于抗氧化剂的存在，整个氧化过程被阻断，抗氧化剂与生成的自由基发生反应生成稳定的化合物，氧化反应无法进入自加速阶端。相比于未发生热裂解的 XLPE，热裂解产生了更多的自由基，加快了抗氧化剂的消耗，抗氧化剂消耗完毕后 XLPE 电缆热氧老化过程占主导地位。因此，热裂解通过产生更多的自由基来消耗电缆绝缘内的抗氧化剂，从而促进了电缆的热氧老化进程。反之，若短时高热运行使电缆绝缘发生重结晶现象，则电缆的热氧老化进程会被减缓。

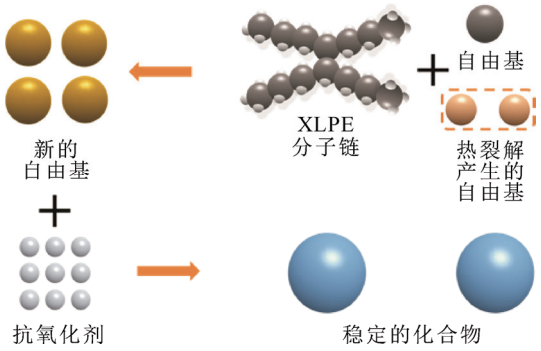


图 9　抗氧化剂消耗示意图

Fig.9　Schematic diagram of antioxidant consumption

本次实验剥除了电缆样本的屏蔽层，这与 XLPE 电缆实际运行情况存在一定差异，这会导致参与反应的氧气含量更充足，反应速率更快，热氧老化更严重；同时，由于本次实验采用的老化装置是温湿度控制箱，环境中存在鼓风设备，因此样本置于富氧环境中，此时反应物充足，化学反应速率较快，导致抗氧化剂消耗较快。实际运行电缆敷设于电缆沟道中，环境较为密闭，氧气含量较低，抗氧化剂消耗速率较低，与实验结果会存在一定差异，但整体规律将保持一致。

3.3　短时高温运行对 XLPE 电缆介电性能的影响

短时高热运行会影响 XLPE 电缆的理化性能，进而影响其介电性能。经过不同温度下短时高温老化后的电缆样本极化电流末端幅值没有明显差异，这部分电流主要是绝缘介质的本征电导电流，故短时高热对电缆电导电流无明显影响。极化电流初始段部分随着老化温度的增加呈现先减小后增大的趋势，这部分电流幅值的变化主要是由于介质中极化引起的电流。

为了体现结晶度变化对 XLPE 电缆绝缘晶区–非晶区界面极化的影响，对根据式(4)得到的界面极化电流进行拟合，并得到界面极化时间常数。如图 10 所示，随着短时高热温度的增加，界面极化电流整体呈现先减小后增加的趋势，时间常数也呈现出先减小后增加的趋势，这与绝缘层中的晶区与非晶区之间的界面极化现象有关。由于晶区与非晶区之间的介电参数不同，从而会产生界面极化现象[26-27]。如图 11 所示，当短时高热温度较低时(处于 XLPE 熔融温度范围)，电缆绝缘由于重结晶效应，部分非晶区向结晶区转换，结晶度小幅度提高，晶体结构趋于完善。此时，XLPE 的分子链排列更加规则，晶区与非晶区之间的界面减少，绝缘中载流子迁移率降低，界面处电荷更容易消散，界面极化的时间常数减小，界面极化现象减弱。而当短时高热温度高于 XLPE 熔融温度时，界面极化电流幅值明显增加，这说明界面极化效应增强，这是由于高温使

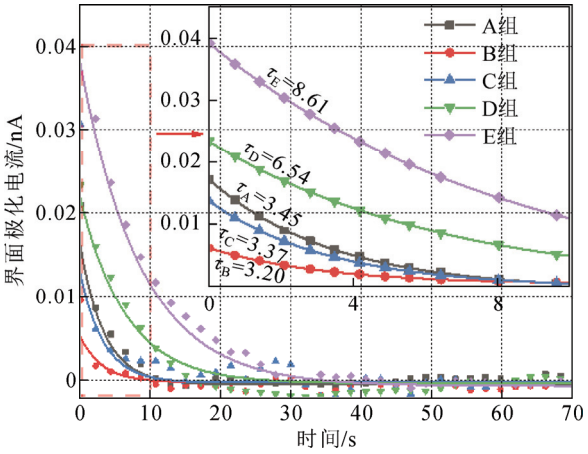


图 10 热处理 92 d 后各组样本的界面极化电流拟合曲线

Fig.10 Interfacial polarization current fitting curves for each group of samples after thermally treated for 92 days

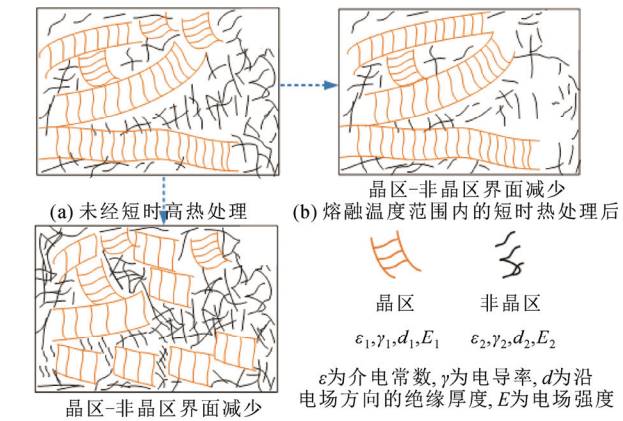


图 11 晶区–非晶区界面示意图

Fig.11 Schematic diagram of crystalline region-amorphous region interface

XLPE 发生热裂解，分子链断裂，晶体结构完整性被破坏，部分晶区转变为非晶区，结晶度下降，晶区与非晶区间的界面增加，电荷迁移更加容易，从而界面极化强度增加，界面极化的时间常数增大。

$$i_s = i_p - i_{dep} - i_c \tag{4}$$

式中：i_s为界面极化电流；i_c为电导电流。

当电缆在高于 XLPE 熔融温度条件下短时运行后，继续在较低温度下运行，此时由于热裂解使电缆绝缘内部产生了较多的极性基团，故此时抗氧化剂消耗速率显著大于未经过高热运行的电缆。如图 12 所示，图 12(a)为不同温度老化 2 d 后的 FTIR 谱图，图 12(b)为热处理 92 d 后各组样本的 FTIR 谱图。由图 12(a)可以看出，老化 2 d 后各组样本的 FTIR 谱图无明显差异，而图 12(b)中 E 组的样本出现了

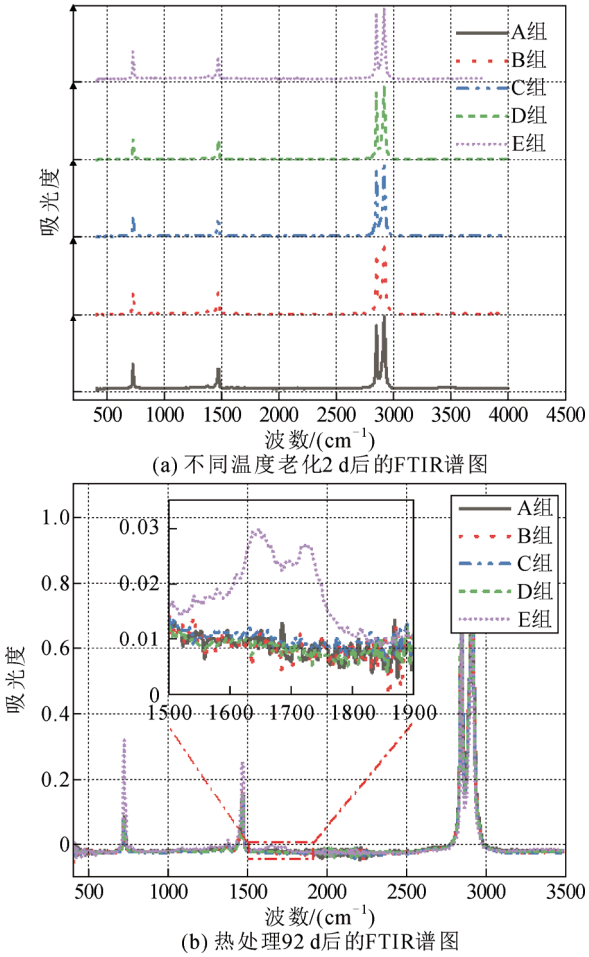


图 12 各组样本的 FTIR 谱图

Fig.12 FTIR spectra of samples in each group

羰基(C＝O)的特征吸收峰。图 12(b)中 E 组样本的抗氧化剂已经消耗完毕，此时，热氧老化占主导地位。

XLPE 分子链与氧气发生反应产生了自由基与过氧化物，自由基与氧气和 XLPE 分子链进一步发生反应，最后产生氧化物。XLPE 分子结构中只有 C＝C 和 H—C—H，都是非极性的共价键。当 XLPE 分子链出现 C＝O 时，表明其已经发生了氧化，而 C＝O 电子分布不对称，是极性基团[28-29]。因此，E 组样本内部极性基团增多。当抗氧化剂消耗完毕后，XLPE 进入热氧老化阶段，产生了 C＝O 等极性基团，绝缘中的电荷增加，迁移更加容易，偶极子极化强度增加。

因此，当电缆短时高热运行温度高于 XLPE 熔融温度时，电缆绝缘晶体结构的完整性被破坏，晶区–非晶区界面增多，以及其内部产生的极性物质增多，导致其在电压的作用下界面极化以及偶极子极化等极化产生的损耗增加。

4　结论

1）电缆短时高热运行也会使其绝缘的结晶度发生变化，当短时高热运行温度处于 XLPE 熔融温度范围时，电缆绝缘的结晶度会由于重结晶效应而升高；当短时高热运行温度高于 XLPE 熔融温度时，XLPE 晶体结构完整性被破坏，电缆绝缘的结晶度会下降。

2）当电缆短时高热运行温度处于 XLPE 熔融温度范围时，XLPE 由于重结晶效应，晶体结构趋于完善，晶区–非晶区界面减少，界面极化强度减弱；之后，电缆的热氧老化进程会由于重结晶效应而被减缓。

3）当电缆短时高热运行温度高于 XLPE 熔融温度时，XLPE 发生热裂解，晶体结构完整性被破坏，晶区–非晶区界面增多，界面极化强度增加；之后，由于热裂解产生了更多的自由基，加速了抗氧化剂的消耗，电缆的热氧老化进程被促进。

参考文献　References

[1] 李明志，周　凯，黄科荣，等. 基于极化–去极化电流测试的 XLPE 中陷阱电荷脱陷特性[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3194-3201.
LI Mingzhi, ZHOU Kai, HUANG Kerong, et al. Trapped charge de-trapping property of XLPE based on polarization and depolarization current test[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3194-3201.

[2] LI J Y, ZHAO X T, YIN G L, et al. The effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1562-1569.

[3] 陈向荣，王启隆，于竞哲，等. 10 kV 交流 XLPE 电缆在不同直流拓扑结构和敷设方式下的直流载流量仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4044-4054.
CHEN Xiangrong, WANG Qilong, YU Jingzhe, et al. Simulation research on DC ampacity of 10 kV AC XLPE cable under different DC operation topologies and laying modes[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4044-4054.

[4] ANDERS G J. Rating of cables on riser poles, in trays, in tunnels and shafts-a review[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 3-11.

[5] 孟　毓. 采用水冷却系统提高隧道内电缆输送容量的研究[D]. 上海：上海交通大学，2008.
MENG Yu. Research on using water cooling system to raise the cable capacity[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2008.

[6] NEDJAR M, BÉROUAL A, BOUBAKEUR A. Influence of thermal aging on the electrical properties of poly(vinyl chloride)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102(5): 4728-4733.

[7] KIM C, JIN Z J, JIANG P K, et al. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range[J]. Polymer Testing, 2006, 25(4): 553-561.

[8] 姜雄伟，刘　黎，王文浩，等. 热老化下双层聚酯薄膜的冲击击穿特性[J]. 高电压技术，2022，48(3)：892-901.
JIANG Xiongwei, LIU Li, WANG Wenhao, et al. Impulse breakdown characteristics of two-layer polyester films under thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 892-901.

[9] 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.

[10] 刘继平，王浩鸣，唐庆华，等. 热老化对直流 XLPE 绝缘性能的影响研究[J]. 电力系统及其自动化学报，2020，32(7)：80-85.
LIU Jiping, WANG Haoming, TANG Qinghua, et al. Study on effect of thermal aging on the insulation performance of DC XLPE[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 80-85.

[11] 霍瑞美. 交联聚乙烯热老化监测及快速热寿命评估[D]. 上海：上海交通大学，2014.
HUO Ruimei. Research on thermal aging monitoring and fast prediction on the life of XLPE[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[12] ZHANG Y Y, LI S T, GAO J, et al. Ageing assessment of XLPE cable insulation by residual antioxidant content[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 1795-1802.

[13] LI S T, YIN G L, CHEN G, et al. Short-term breakdown and bong-term failure in nanodielectrics: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1523-1535.

[14] 詹威鹏，褚学来，申作家，等. 加速热氧老化中交联聚乙烯电缆绝缘聚集态结构与介电强度关联性研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(17)：4770-4777.
ZHAN Weipeng, CHU Xuelai, SHEN Zuojia, et al. Study on aggregation structure and dielectric strength of XLPE cable insulation in accelerated thermal-oxidative aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4770-4777.

[15] 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.

[16] 闫群民，李　欢，翟　双，等. 不同温度热老化对高压配网交联聚乙烯电缆绝缘表面陷阱参数的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：692-700.
YAN Qunmin, LI Huan, ZHAI Shuang, et al. Effect of thermal aging at different temperatures on the surface trap parameters of HV-XLPE distribution cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 692-700.

[17] CHI X H, LI J X, JI M Z, et al. Thermal-oxidative aging effects on the dielectric properties of nuclear cable insulation[J]. Materials, 2020, 13(10): 2215.

[18] 林思衍，周　凯，尹　游，等. 基于连续 PDC 测试的 XLPE 电缆水树老化判别方法[J]. 中国电机工程学报，2020，40(20)：6764-6772.
LIN Siyan, ZHOU Kai, YIN You, et al. Diagnosing method for water tree aging on XLPE cable based on continuous PDC test method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6764-6772.

[19] 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.

[20] 伍亚萍，周　凯，李诗雨，等. 电场作用下含电压稳定剂修复液的扩散及对热氧老化电缆绝缘性能的影响[J/OL]. 中国电机工程学报， 2021-12-05[2023-02-06]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 212421.
WU Yaping, ZHOU Kai, LI Shiyu, et al. Diffusion of rejuvenation fluid containing voltage stabilizer under electric field and its effect on insulation performance of thermal-oxidative aged cables[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021-12-05[2022-02-06]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212421.

[21] 黄　明，周　凯，黄科荣，等. 基于 PDC 法的绝缘老化电缆低频损耗特性分析[J]. 高电压技术，2019，45(3)：959-967.
HUANG Ming, ZHOU Kai, HUANG Kerong, et al. Analysis of low-frequency dielectric loss characteristics of degradation cables based on polarization and depolarization current method[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 959-967.

[22] BOUKEZZI L, BOUBAKEUR A, LAURENT C, et al. Observations on structural changes under thermal ageing of cross-linked polyethylene used as power cables insulation[J]. Iranian Polymer Journal, 2008, 17(8): 611-624.

[23] DISSADO L A, FOTHERGILL J C, WOLFE S V, et al. Weibull statistics in dielectric breakdown; theoretical basis, applications and implications[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, EL-19(3): 227-233.

[24] 王铁军. 舰船电缆热老化寿命的研究[J]. 海军工程大学学报，2000(1)：76-79，90.
WANG Tiejun. Lifetime study of cable on vessels under thermal stress[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000(1): 76-79, 90.

[25] 钟世云. 聚合物降解与稳定化[M]. 北京：化学工业出版社，2002：26-27.
ZHONG Shiyun. Polymer degradation and stabilization[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2002: 26-27.

[26] ROGTI F, FERHAT M. Maxwell-Wagner polarization and interfacial charge at the multi-layers of thermoplastic polymers[J]. Journal of Electrostatics, 2014, 72(1): 91-97.

[27] 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.

[28] 陈铮铮，赵健康，欧阳本红，等. 直流与交流交联聚乙烯电缆料绝缘特性的差异及其机理分析[J]. 高电压技术，2014，40(9)：2644-2652.
CHEN Zhengzheng, ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, et al. Difference in insulation characteristics and mechanism between AC and DC XLPE cable's material[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2644-2652.

[29] 郭　蕾，曹伟东，白龙雷，等. 热氧老化 EPR 电缆绝缘局部放电特性及劣化机理[J]. 高电压技术，2021，47(1)：231-240.
GUO Lei, CAO Weidong, BAI Longlei, et al. Partial discharge characteristics and degradation mechanism of EPR cable insulation by thermo-oxygen aging[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 231-240.



陈祎林
1997—，男，硕士生
主要从事电缆状态监测及绝缘诊断方面的研究
E-mail: cyldyx66@163.com

CHEN Yilin



周　凯(通信作者)
1975—，男，博士，教授，博导
主要从事电缆状态监测及固体电介质方面的研究
E-mail: zhoukai_scu@163.com

ZHOU Kai
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-09　修回日期　2022-08-16　　编辑　曾文君