

DOI : 10.11985/2019.03.005

纳米炭黑/XLPE 复合绝缘热老化特性试验研究*

秦 瑶^{1,2} 李忠华¹ 孙云龙¹

(1. 哈尔滨理工大学工程电介质及其应用技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080 ;
2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司 青岛 266031)

摘要 :采用纳米炭黑对交联聚乙烯进行纳米改性是制备低活化能、高电场依赖性高压直流电缆绝缘材料的一种可能技术途径,纳米炭黑/交联聚乙烯(nano-CB/XLPE)复合材料的热老化性能是关系到高压直流电缆长期运行可靠性的关键因素之一。为此,对 nano-CB/XLPE 复合材料进行加速热老化,研究老化时间对其电导率与介电参数的影响规律。为了表征复合材料的老化程度采用傅里叶红外光谱观察了老化过程材料内部特征官能团变化,并使用扫描电子显微镜(SEM)和差示扫描量热分析仪(DSC)探究了老化过程中材料微观结构变化。试验结果表明,nano-CB/XLPE 复合材料随老化时间可分为两个老化阶段,在老化初始阶段,试样的羰基指数增长缓慢,结晶度较大,电导率随老化时间增加而减小,电导活化能随老化时间增加而增大,电场依赖系数变化较小,介电常数和介质损耗因数基本不变;在老化后期,试样的羰基指数增长迅速,结晶度减小,电导率随老化时间增加而增大,电导活化能和电场依赖系数降低,介电常数和介质损耗因数随老化时间增加而增大。

关键词 : XLPE 复合绝缘;热老化;介电性能;微观结构

中图分类号: TM215

Study on Thermal Aging Properties of Nano-CB/XLPE Composite Insulating Materials

QIN Yao^{1,2} LI Zhonghua¹ SUN Yunlong¹

(1. Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application of Ministry of Education,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080 China;
2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266031 China)

Abstract : Adopting nano-carbon black to cross-linked polyethylene is a possible technical approach to prepare insulation materials for HVDC cables with low activation energy and high electric field dependence coefficient. And the thermal aging performance of composites combined with the nano-carbon black and the cross-linked polyethylene (nano-CB/XLPE) is one of critical factors which are related to the long-term operation reliability of the HVDC Cable. Therefore, the regularity about the effect of aging time on the conductivity and dielectric constant is studied, by accelerating heat the nano-CB/XLPE composites. In order to characterize the aging degree of composites, the changes of internal characteristic functional groups in the aging process are observed by using the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and the microstructure changes of composites during aging are investigated by using the scanning electron microscope (SEM) and differential scanning calorimeter (DSC). The experimental results show that nano-CB/XLPE composites can be divided into two aging stages with aging time. In the initial stage of aging, the carbonyl index of the sample increases slowly, the crystallinity is large, and the conductivity decreases with the increase of aging time, while the activation energy of conductivity increases with the increase of aging time. At the same time, the electric field dependence coefficient changes little, and the dielectric constant and dielectric loss factor are basically unchanged. However, in the later stage of aging, the carbonyl index of the sample increases rapidly, the crystallinity decreases, the conductivity increases with the increase of aging time, the activation energy of the conductivity as well as the electric field dependence coefficient decreases, and the dielectric constant and dielectric loss factor increase with the increase of aging time.

Key words : XLPE composite ; thermal aging ; dielectric properties ; micro-structure

1 引言

交联聚乙烯(XLPE)因其优异的机械性能和介

电性能已被广泛应用于电缆绝缘材料中^[1-3]。由于电缆多敷设于地下,在运行期间容易受到不良散热条件、密集敷设等不利因素的影响,电缆绝缘会受到长期的热应力影响,造成绝缘损坏,严重影响电缆的正常使用。国内外专家学者对 XLPE 热老化后的化学结构和力学性能进行了大量研究^[4-7],取得了

收稿日期: 2019-05-08

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2014CB239504)。

丰硕成果。

在直流电缆的运行过程中,电缆绝缘会出现空间电荷积聚、电压极性反转和较高的温度梯度导致的电场畸变等问题,严重威胁直流电缆的运行安全。为了解决此问题,人们向 XLPE 中加入 MgO、SiC、ZnO 等无机填料^[8-14],使其能够在非均匀电场下自适应均化电场。闫志雨等研究了低含量 CB/LDPE 复合介质,发现其具有较低的电导率和电导率温度依赖特性,能有效抑制空间电荷^[15],证实了纳米炭黑对交联聚乙烯进行纳米改性是制备高压直流电缆绝缘材料的一种可能技术途径。

课题组前期研究发现,绝缘材料的电导活化能和电场依赖系数对直流电缆的电场分布具有重要影响^[16],通过纳米炭黑改性可以制得低电导活化能、高电场依赖系数的 XLPE 绝缘材料^[17-18]。因此,本文将 nano-CB/XLPE 非线性复合材料放入 140 的空气老化箱中进行人工加速热氧老化,测量了不同老化时间复合材料的电导率,并对电导率进行非线性函数拟合得到电导活化能和电场依赖系数随老化时间的变化规律,研究了热老化对 XLPE 复合材料非线性电导特性的影响。同时,测量了不同老化时间复合材料的介电常数和介质损耗因数。通过红外光谱、扫描电子显微镜以及差示扫描量热分析试验,从复合材料微观角度对介电性能的变化机理进行了分析。

2 试样制备与相关试验方法

2.1 试样制备

制样前将导电炭黑放入 80 烘箱中烘干处理 48 h,称重后放入无水乙醇中进行超声处理使炭黑颗粒均匀分散。以中国石油化工股份有限公司生产的牌号为 LD200 的 LDPE 为基料,在 110 开放式混炼机中加入 0.1 phr(每 100 g 聚乙烯中添加 0.1 g 炭黑)的导电炭黑、2 phr 的 DCP 和 0.3 phr 的抗氧剂 1 035 混炼 30 min 制成坯料。取适量坯料放入 110 平板硫化机中热压成 100 mm×100 mm×0.2 mm 的片状试样,然后将试样置于 175 下 30 min 进行交联,自然降至室温后取出试样。所制备的 CB/XLPE 复合材料的微观扫描电镜照片如图 1 所示。

通过图 1 可知所制备 CB/XLPE 复合材料实现了炭黑在聚合物基体中的纳米尺度的分散。将制备好的试样放入 80 烘箱真空处理 48 h,以便消除在试样制备过程中产生的残余应力和交联副产物。

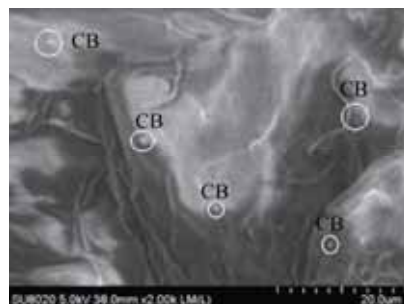


图 1 纳米 CB/XLPE 复合材料的 SEM 照片

2.2 热老化条件

根据绝缘材料热老化试验标准 IEC60216-1-2001,设定热老化温度为 140,每两周为一个老化周期,共计老化 7 个周期。每个老化周期结束后取出 5 个试样,并按标准规定进行正常化处理,而后进行相关性能的测试。

2.3 电导率测量及数据处理

按照标准三电极系统的尺寸要求在试样上蒸镀铝电极,然后放入 60 烘箱中放电 24 h。将试样和电极系统放置在温度可控的烘箱实现不同温度下伏安特性的测试。测试系统电源采用 HB-Z103-2AC(10 kV)直流高压电源,电流测试采用 EST122 型皮安表。为了克服复合材料介电特性分散性的影响,每个试验条件取 4 个试样,取平均值作为最终试验结果。对电导率半经验公式(1)^[19]两端取对数得到式(2),将电导率平均值代入式(2)进行非线性函数拟合处理。

$$\gamma(E, T) = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\phi \cdot q}{k_b T}\right) \frac{\sin h(B|E|)}{|E|} \quad (1)$$

$$Z = A - \frac{C}{X} + \ln[\sin h(BY)] - \ln Y \quad (2)$$

式中, γ 为电导率, S/m; γ_0 为与材料有关的常数, $V/\Omega \cdot m^2$; ϕ 为电导活化能, eV; q 为电子电荷量, C; k_b 为玻尔兹曼常数, J/k; T 为绝对温度, K; B 为电场依赖系数, m/V; E 为场强, V/m; $Z = \ln \gamma(E, T)$, $A = \ln \gamma_0$, $C = \frac{\phi \cdot q}{k_b}$, $X = T$, $Y = |E|$ 。

2.4 介电频谱测量

使用德国 Novocontrol 公司生产的 Alpha-A 宽频介电谱分析仪,频率范围为 $10^{-2} \sim 10^7$ Hz,室温测试。在不同老化时间试样的中心部位真空蒸镀直径为 25 mm 的圆形铝电极,然后放入 60 烘箱中放电 24 h。

2.5 傅里叶红外光谱(FTIR)测量

使用 JASCO 公司生产的 FT/IR-6100 傅里叶红外光谱测量仪,扫描范围 $4\,000 \sim 400\text{ cm}^{-1}$,分辨率 2 cm^{-1} 。取初始和不同老化周期的交联聚乙烯试样,

在厚度为 0.2 mm 试样上不同部位测试 5 个点。

2.6 扫描电子显微镜(SEM)测试

使用浓硫酸和高锰酸钾(质量比 20 :1)混合溶液对不同老化时间的复合材料进行表面处理, 然后采用离子溅射仪在材料待测面溅射金电极, 通过 FEI Sirion 200 型热场发射扫描电子显微镜观测复合材料的微观形貌。

2.7 差示扫描量热分析(DSC)

使用梅特勒·托利多公司生产的 DSC-1 型差示扫描量热分析仪测试不同老化时间复合材料的熔融过程, 每个试样重量 5 ~ 10 mg, 升温范围 20 ~ 140 , 升降温速率 10 /min。

3 热老化对介电性能的影响

3.1 老化时间对复合材料的电导率及直流电缆电场分布的影响

高压直流电缆稳态电场分布取决于绝缘材料的电导率, 而电导率是电场和温度的非线性函数^[20], 因此电缆运行时的电场和热应力对绝缘材料的电导率会产生一定影响, 从而改变电缆的稳态电场分布。本文测得不同老化时间复合材料分别在 45 、 60 、 70 、 80 和 90 下从 5 kV/mm 到 40 kV/mm 之间 8 个场强下稳态时的电导率, 取各场强下加压 10 min 后的电导率为稳态电导率, 如图 2 所示为不同温度下各老化时间复合材料电导率的典型变化图。

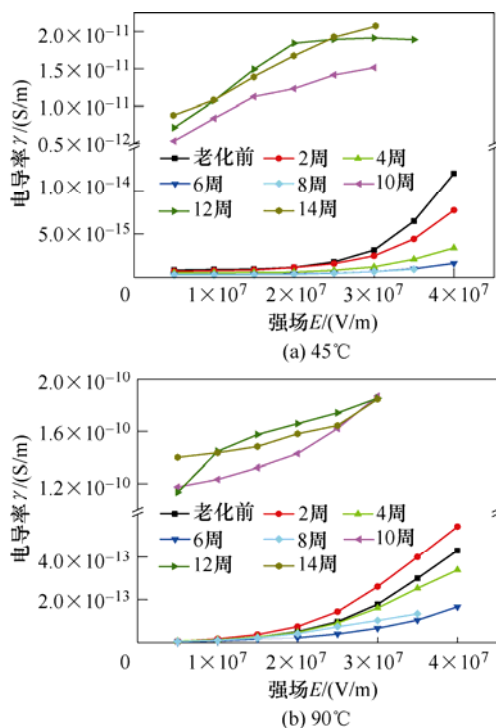


图2 不同老化时间复合材料在 45 和 90 下的电导率

由图 2 可见, 老化前 8 周, 复合材料的电导率随老化时间的增加而减小。老化 10 周之后, 电导率随老化时间的增加而迅速增大, 相较于前 8 周电导率增大约 3 个数量级。这可能是由于长期的热氧老化导致复合材料内部结构发生改变, 使材料导电性增强。

由课题组前期工作得知, 绝缘材料的电导活化能和电场依赖系数是影响 HVDC 电缆电场分布的两个重要参数^[16], 通过对电导率进行非线性函数拟合, 得到了两个参数在老化过程中的变化规律, 如图 3、4 所示。

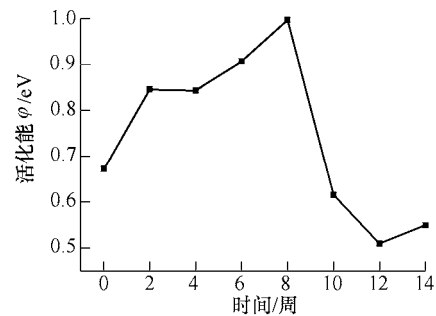


图3 电导活化能与老化时间关系图

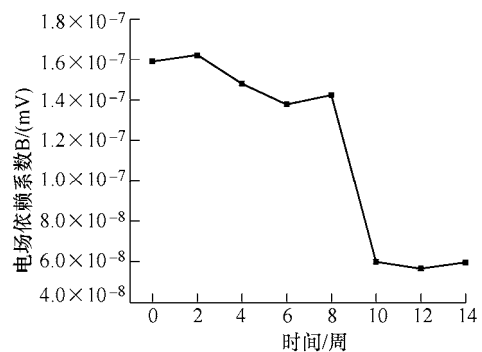


图4 电场依赖系数与老化时间关系图

由图 3、4 可见, 老化前 8 周, 电导活化能随老化时间增加而增大, 电场依赖系数随老化时间增加而略有减小, 但变化幅值不大。老化 10 周之后, 电导活化能和电场依赖系数发生突变, 均急剧减小并趋于稳定。

为研究热老化对 HVDC 电缆稳态电场分布的影响, 采用图 5 所示电缆模型^[16]进行电场仿真。电缆运行电压 320 kV, 功率 500 MW, 绝缘材料为 XLPE, 绝缘层内侧温度 90 , 外侧温度 40 。

将拟合得到的活化能和电场依赖系数代入图 5 模型中进行电场仿真, 得到不同老化时间 XLPE 绝缘稳态电场分布规律, 如图 6 所示。

由图 6 可见, 老化前 8 周, 随着老化时间增加, XLPE 绝缘内外层的电场差异越来越大, 说明绝缘

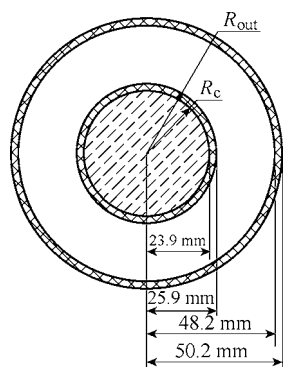


图5 320 kV 直流电缆典型结构

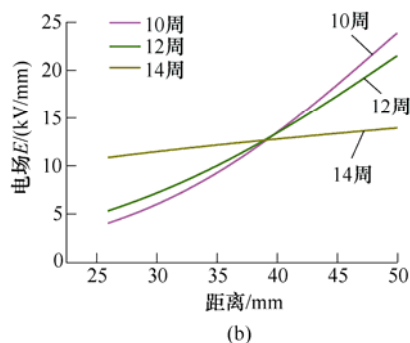
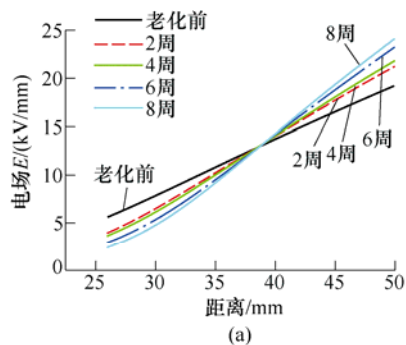


图6 不同老化时间绝缘层电场分布图

材料的电场均化能力随老化时间的增加而逐渐减弱。老化10周后，随着老化时间增加，XLPE绝缘内外层的电场差异越来越小，说明绝缘材料的电场均化能力随老化时间增加而逐渐增强。

3.2 老化时间对复合材料介电性能的影响

绝缘材料的介电常数直接影响直流电缆的暂态电场分布^[21]，因此研究直流电缆绝缘材料的介电性能在热老化过程中的变化 also 具有重要意义。图7和图8分别为不同老化时间复合材料介电常数和介质损耗因数的频谱。

如图7和图8所示，老化前8周，复合材料的介电常数和介质损耗因数均较小，而老化10周之后，二者数值都迅速变大。介电性能突变时间与前述电导率突变时间相同，这说明复合材料的电导率和介电性能在一定的老化时间会发生明显改变，可能是由于复合材料微观结构或成分发生了变化，导致材料宏观电导率和介电性能改变。

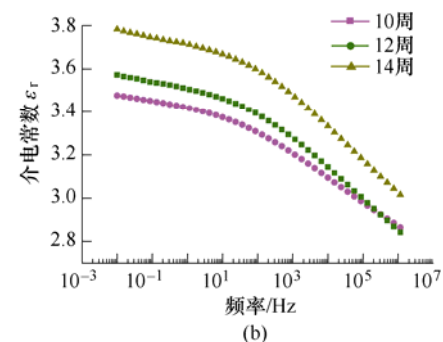
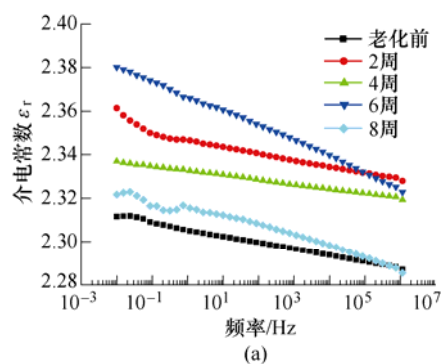


图7 不同老化时间试样介电常数频谱图

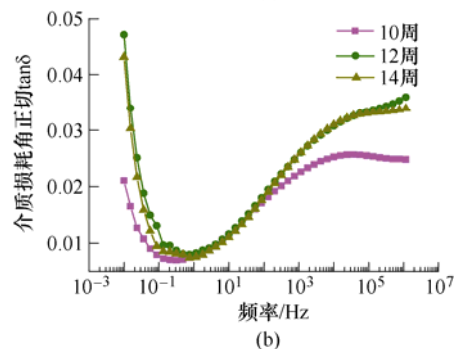
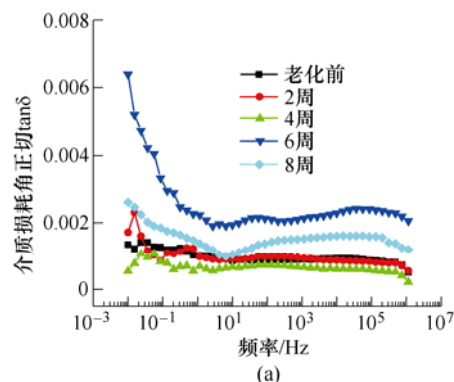


图8 不同老化时间试样介质损耗因数频谱图

由图7a可见，老化前8周复合材料的介电常数较小，随着老化时间增加，介电常数的大小并没有严格按照时间规律改变，且最大与最小介电常数数值相差仅3%左右，基本不变。老化6周和8周后，材料松弛极化略微增强，引起的介质损耗也略有增大，但变化幅度都很小。由于测量误差的存在，因此可认为复合材料的介电常数在老化前8周基本不变。

老化 10 周之后, 复合材料的介电常数随老化时间增加而迅速增大, 随频率增加而显著减小, 这说明复合材料内部极化强度增大, 松弛极化现象明显。此时由极化造成的介质损耗因数也迅速增大, 由于极化在低频时完全建立而高频时越来越来不及建立, 所以介质损耗因数随频率的增加先减小后增大。

4 热老化过程化学成分和微结构分析

4.1 热老化过程化学成分分析

前述试验结果表明, 复合材料的电导特性和介电性能在相同的老化时间都发生了改变, 这可能是由材料内部组成成分或结构变化所致, 因此, 通过红外光谱得到了不同老化时间材料内部化学组分的变化情况, 如图 9 所示。

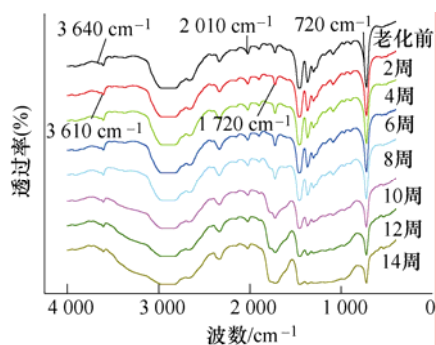


图 9 不同老化时间复合材料典型红外光谱图

图 9 中羰基在热氧老化过程中变化明显, 利用羰基指数可以表示材料的老化程度。定义羰基指数为 1720 cm^{-1} 处吸光度与 2010 cm^{-1} 处吸水度的比值^[22], 羰基指数随老化时间的变化规律如图 10 所示。

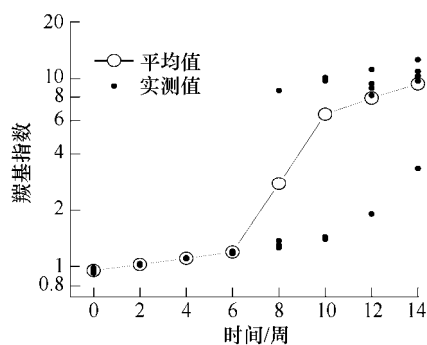


图 10 羰基指数与老化时间关系图

由图 10 可见, 在老化前 8 周, 羰基指数随老化时间增长缓慢, 而老化 10 周后, 羰基指数迅速变大但数据波动较大。这说明复合材料发生了两个明显不同的老化过程, 且与电导特性和介电性能突变的时间相吻合。因此, 可将复合材料的老化过程分为

两个阶段, 即老化初期和老化后期。

然而材料的老化进程与抗氧化剂密切相关, 通过计算抗氧化剂在 3610 cm^{-1} 处特征基团酚基吸收峰的强度变化, 得到抗氧化剂含量随老化时间的变化规律如图 11 所示, 计算方法同羰基指数。

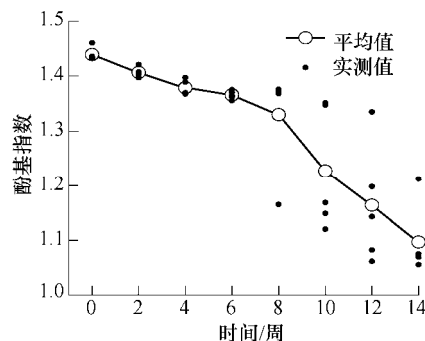


图 11 酚基指数与老化时间关系图

由图 11 可见, 酚基指数随老化时间增加而逐渐降低, 说明试样中抗氧化剂含量不断减少。同时, XLPE 在交联过程中产生的枯基醇等交联副产物^[23]会对材料介电性能产生影响, 通过计算枯基醇在 3640 cm^{-1} 处特征基团羟基吸收峰的强度变化, 得到枯基醇含量随老化时间的变化规律如图 12 所示。

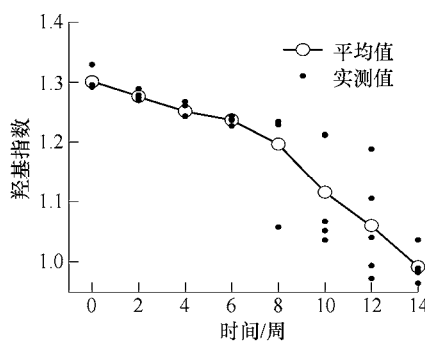


图 12 羟基指数与老化时间关系图

由图 12 可见, 羟基指数随老化时间增加而一直减小, 说明试样中枯基醇含量也不断减少。

由此可知, 老化初期抗氧化剂含量较多, 大部分氧和热应力作用于抗氧化剂^[24], 复合材料大分子链氧化反应受到抑制, 生成的羰基等氧化产物很少, 同时交联副产物挥发, 导致材料内部载流子数量减少, 所以电导率随老化时间的增加而减小, 如图 2 所示。由于此时产生的羰基等极性基团很少, 材料极化强度小, 松弛极化不明显, 所以介电常数较小且变化不明显, 产生的损耗也较小, 如图 7、8 所示。

老化后期抗氧化剂逐渐耗尽, 复合材料大分子链发生自氧化游离基连锁反应^[5], 产生大量羰基等含氧基团, 而且复合材料大分子链断裂为许多小分子

量产物,所以材料内部载流子数量增加,使得电导率随老化时间增加而急剧增大。此时由于极性基团数量增多,材料极化强度增强,所以介电常数变大,由极化产生的损耗也变大。该老化阶段中,松弛极化增强,低频时,各种极化均来得及建立,因此介电常数较大,此时介质损耗主要为电导损耗,损耗因数较大。随频率增加,介电常数逐渐减小,介质损耗在 100 Hz 左右达到最小值。随频率继续增加,松弛极化的建立越来越跟不上外施电场频率的变化,介电常数显著减小,介质损耗因数随频率增加而增大。

4.2 热老化过程复合材料微结构分析

为了直观了解复合材料内部形态结构的变化情况,对不同老化时间的复合材料进行了 SEM 观察,如图 13 所示。由图可见,未老化复合材料结构完整均匀,内部球晶尺寸较大。老化 6 周之后,复合材料结构依然完整均匀,不过内部球晶尺寸减小,数量增加。材料结构完整使内部缺陷较少,所以陷阱深度和密度较小^[25]。陷阱深度小使载流子跳跃距离 δ 较大^[26],所以电场依赖系数较大^[27]。而老化 14 周之后,复合材料结构被氧化降解并出现劣化不均匀现象,内部晶体数量减少,缺陷增多,大量缺陷使材料内部的陷阱深度和密度都增大。深陷阱使离子

跳跃距离变小,从而电场依赖系数减小。同时复合材料结构的氧化不均也导致了图 10 中羰基指数在老化后期分散性较大。

4.3 热老化过程复合材料 DSC 分析

通过 DSC 测试,对不同老化时间复合材料的结晶情况进行了量化表征,如图 14、15 所示。

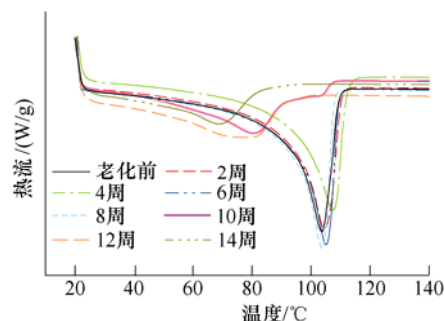


图 14 不同老化时间复合材料 DSC 升温曲线

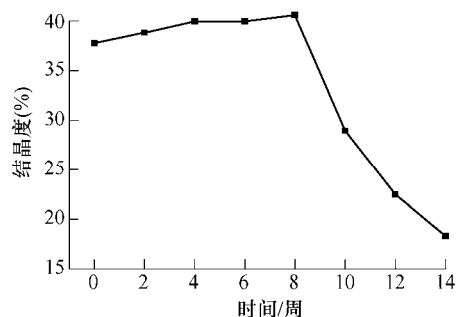


图 15 结晶度与老化时间关系图

由图 14 和图 15 可见,在老化前 8 周,复合材料的熔融峰温度和熔融峰面积都较大,结晶度较高且随老化时间增加而略有增大,这说明老化初期材料内部晶体结构完善,晶体数量较多,因此晶体熔融所需的温度和热量较高,与图 13 观察结果相同。结晶度的提高使得无定形区面积减少,晶区与无定形区界面增加,而载流子主要在无定形区或晶区表面迁移,高结晶度使载流子输运变的困难^[7,28],因此电导率减小,如图 2 所示,同时载流子需要克服更大的势垒才能跃迁到另一平衡位置,因此电导活化能增大,如图 3 所示。

但是,老化 10 周之后,复合材料的熔融峰温度和熔融峰面积急剧减小,结晶度也迅速下降,这说明老化后期复合材料部分晶体结构被破坏,因此晶体熔融所需温度和热量降低。由于结晶度减小,XLPE 大分子链断裂,使得载流子迁移变的容易,所以电导率增大,电导活化能减小。

5 结论

通过对纳米炭黑/交联聚乙烯复合绝缘材料进

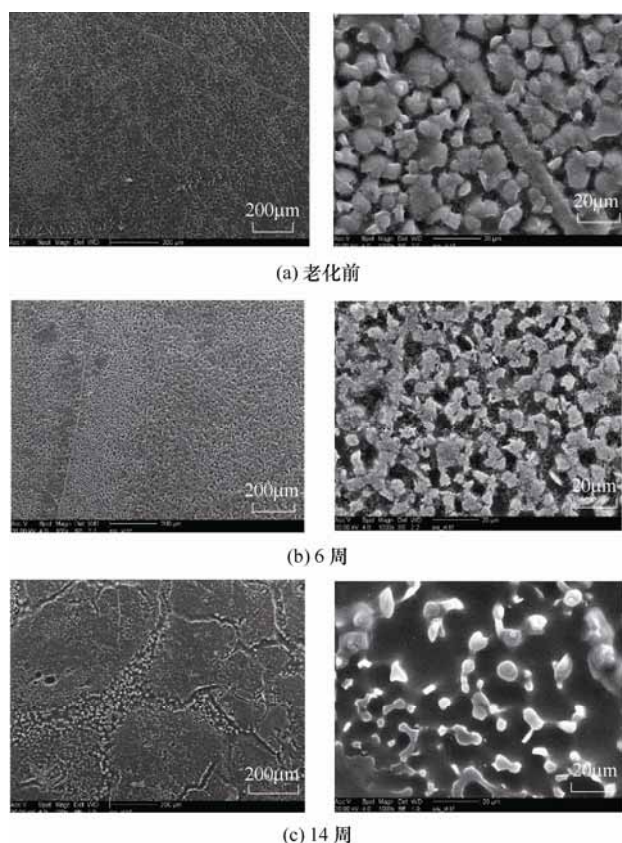


图 13 不同老化时间复合材料典型 SEM 图

行热氧老化, 得出以下结论。

(1) 纳米炭黑/交联聚乙烯复合材料在 140 °C 下老化过程分为初期老化和后期老化: 老化初期复合材料的羰基指数增长缓慢, 材料轻度老化, 老化后期羰基指数增长迅速, 材料老化严重。

(2) 老化初期, 复合材料的电场均化能力随老化时间增加而逐渐减弱; 老化后期, 复合材料的电场均化能力随老化时间增加而逐渐增强。

(3) 老化初期, 复合材料内部结构完善, 载流子减少, 使电导率随老化时间增加而减小; 老化后期, 复合材料氧化降解严重, 载流子增多, 使电导率随老化时间增加而迅速增大。

(4) 老化初期, 复合材料内部多为浅陷阱, 且密度小, 因此电场依赖系数较大; 老化后期复合材料内部陷阱变深, 密度增大, 所以电场依赖系数减小。

(5) 老化初期, 复合材料的结晶度较大, 载流子迁移困难, 所以电导活化能较大; 老化后期材料大分子链断裂, 结晶度减小, 载流子容易迁移, 所以电导活化能急剧减小。

(6) 老化初期, 复合材料的介电常数和介质损耗因数较小, 且随老化时间变化不明显; 老化后期, 复合材料内部极性基团增多, 介电常数和介质损耗因数随老化时间增加而迅速增大, 表现出明显的松弛极化行为。

参 考 文 献

- [1] Kaminaga K, Ichihara M, Jinno M, et al. Development of 500-kV XLPE cables and accessories for long-distance underground transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1185-1194.
- [2] Hanley T L, Burford R P, Fleming R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(1): 13-24.
- [3] 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.
Wang Ya, Lü Zepeng, Wu Kai, et al. Research status of HVDC XLPE cable[J]. Insulating Materials, 2014, 47(1): 22-25.
- [4] Motori A, Sandrolini F, Montanari G C. Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models[J]. IEEE Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. 1988(2): 764-768.
- [5] Boukezzi L, Nedjar M, Mokhnache L, et al. Thermal aging of cross-linked polyethylene[J]. Annales De Chimie Science Des Matériaux, 2006, 31(5): 561-569.
- [6] 徐俊, 王晓东, 欧阳本红, 等. 热老化对交联聚乙烯电缆绝缘理化结构的影响[J]. 绝缘材料, 2013, 46(2): 33-37.
Xu Jun, Wang Xiaodong, Ouyang Benhong, et al. Effect of thermal aging on the physicochemical structure of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2013, 46(2): 33-37.
- [7] 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(22): 299-307, 346.
Li Huan, Li Jianying, Ma Yongxiang, et al. Effect of thermal aging at different temperatures on the crystal structures of XLPE cable insulating material[J]. Proceedings of the CSEE, 2017(22): 299-307, 346.
- [8] Yu-Min Kim, Yong-Kwng Cha, Kee-Joe Lim, et al. Electrical insulation evaluation of crosslinked polyethylene nanocomposite blended with ZnO[C]// 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2012: 1242-1245.
- [9] Murata Y, Goshowaki M, Reddy C C, et al. Investigation of space charge distribution and volume resistivity of XLPE/MgO nanocomposite material under DC voltage application[C]// 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2008: 502-505.
- [10] Youyuan Wang, Can Wang. Effect of nanoparticles on space charge behavior of XLPE/SiC nanocomposites[C]// 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2015: 491-494.
- [11] 郑煜, 吴建东, 王俏华, 等. 空间电荷与直流电导联合测试技术用于纳米 MgO 抑制 XLPE 中空间电荷的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 126-131.
Zheng Yu, Wu Jiandong, Wang Qiaohua, et al. Research on the space charge suppressing mechanism of nano-MgO in XLPE with a joint measuring technology of DC conduction and space charge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 126-131.
- [12] 韩宝忠, 郭文敏, 李忠华. 碳化硅/低密度聚乙烯复合材料的直流伏安特性[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 19-24.
Han Baozhong, Guo Wenmin, Li Zhonghua. DC current-voltage characteristic of silicon carbide/low density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(5): 19-24.
- [13] 王思蛟, 巫运辉, 查俊伟, 等. 纳米 MgO/低密度聚乙烯高压直流电缆复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2016, 6(33): 1179-1185.
Wang Sijiao, Wu Yunhui, Zha Junwei, et al. Preparation and properties of nanoMgO/low density polyethylene composites for high-voltage direct current cables[J]. Acta

- Materiae Compositae Sinica, 2016, 6(33): 1179-1185.
- [14] 郑昌佶, 时海涛, 杨佳明, 等. 纳米 SiC/低密度聚乙烯复合材料的空间电荷与电导特性[J]. 复合材料学报, 2016, 10(33): 2166-2173.
- Zheng Changji, Shi Haitao, Yang Jiaming, et al. Space charge and conductive characteristics of nano-SiC/low density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 10(33): 2166-2173.
- [15] 闫志雨, 赵洪, 韩宝忠, 等. CB/LDPE 复合介质抑制空间电荷机制及电导特性对电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4254-4265.
- Yan Zhiyu, Zhao Hong, Han Baozhong, et al. Suppression mechanism of space charge in CB/LDPE composite and the influence of conduction characteristic on electrical field distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4254-4265.
- [16] 李忠华, 刘乐乐, 郑欢, 等. HVDC 电缆电场分布影响因素的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2563-2571.
- Li Zhonghua, Liu Lele, Zheng Huan, et al. Simulation on the influence factors of electric field distribution in HVDC cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2563-2571.
- [17] 陈思. 纳米炭黑/聚乙烯复合材料电导及空间电荷特性实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [18] 薛露. 聚合物基复合绝缘材料电导特性的表征及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [19] Boggs S, Damon D H, Holboll J T, et al. Effect of insulation properties on the field grading of solid dielectric DC cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 456-461.
- [20] Hjerrild J, Boggs S, Holboll J T, et al. DC-field in solid dielectric cables under transient thermal conditions[C]. 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001: 58-61.
- [21] 郑欢, 刘乐乐, 李忠华. 直流叠加冲击电压下 HVDC 电缆暂态电场分布特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6682-6693.
- Zheng Huan, Liu Lele, Li Zhonghua. Research on the transient electric field distribution in HVDC cable under DC voltage superimposed impulse voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6682-6693.
- [22] 杨颖, 游蛟, 贾志东, 等. 10 kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1684-1692.
- Yang Ying, You Jiao, Jia Zhidong, et al. Evaluation analysis of 10 kV XLPE cable's operation condition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1684-1692.
- [23] Sekii Y, Maeno T. Generation and dissipation of negative heterocharges in XLPE and EPR[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(3): 668-675.
- [24] 王刚, 王鉴, 王立娟, 等. 抗氧化剂作用机理及研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2006, 2(11): 38-42.
- Wang Gang, Wang Jian, Wang Lijuan, et al. Mechanism and research on antioxidant[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2006, 2(11): 38-42.
- [25] 申作家, 罗智奕, 詹威鹏, 等. 基于介质体内陷阱参数与松弛过程的 XLPE 电缆绝缘热老化行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5382-5389.
- Shen Zuoja, Luo Zhiyi, Zhan Weipeng, et al. Analysis on thermal aging behaviors of XLPE cable insulation based on trap parameters and relaxation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5382-5389.
- [26] 王霞, 王陈诚, 孙晓彤, 等. 高温高场强下 XLPE 及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 2008-2017.
- Wang Xia, Wang Chencheng, Sun Xiaotong, et al. Experimental study on the transference of conduction mechanisms of XLPE and its nano-composite under high temperature and high electrical stress[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 2008-2017.
- [27] 尹毅, 陈炯, 李喆, 等. 纳米 SiOx/聚乙烯复合材料强场电导特性的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 22-26.
- Yin Yi, Chen Jiong, Li Zhe, et al. High field conduction of the composites of low-density polyethylene/nano-SiOx[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 22-26.
- [28] 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): 4770-4778.
- Zhan Weipeng, Chu Xuelai, Shen Zuoja. Study on aggregation structure and dielectric strength of XLPE cable insulation in accelerated thermal-oxidative aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4770-4778.

作者简介: 秦瑶, 男, 1991 年生, 硕士, 助理工程师。主要研究方向为高电压与绝缘技术。

E-mail: mr_qinyao@163.com

李忠华(通信作者), 男, 1962 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为非线性绝缘电介质基础理论与相关测试技术、电缆绝缘与诊断技术等。

E-mail: drzhhl@hrbust.edu.cn