

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.022

热历史过程对 XLPE 电缆热历史温度的影响研究

李欢^{1,2}, 翟双¹, 陈杰³, 胡丽斌³

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:文中采用差式量热扫描(DSC)法对实际服役的交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘的热历史过程进行研究,发现不同 XLPE 试样的 DSC 一次升温曲线存在着明显差异,具体表现为不同试样热历史峰的位置、大小及形状存在着较大差异,甚至有些试样观察不到热历史峰。为了研究上述差异产生的原因,对不同温度不同热老化时间的 XLPE 试样进行了 DSC 测试,当 XLPE 电缆绝缘所经历的热历史温度高于熔融温度时,DSC 一次升温曲线上不会有热历史峰出现,此时 DSC 曲线的变化主要由热氧降解对 XLPE 晶体结构的破坏所引发。当 XLPE 电缆绝缘所经历的热历史温度低于熔融温度时,在 DSC 一次升温曲线上就会观察到热历史峰,XLPE 电缆绝缘处于该热历史温度的时间越长,则热历史峰的面积越大,热历史峰的峰值温度越高,甚至有可能高于实际的热历史温度。

关键词:交联聚乙烯;热历史;差式量热扫描;热老化

中图分类号:TM852

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0157-07

0 引言

交联聚乙烯(XLPE)电力电缆由于电气性能、理化性能优良,传输容量大,结构轻便,附件接头制作相对简单,安装敷设方便,不受高度落差限制等优点,正逐渐替代架空线、充油电缆和乙丙橡胶(EPR)电缆,得到日益广泛的应用^[1-3]。

XLPE 是一种半结晶聚合物,在常温下由结晶区和无定形区共同组成^[4-5]。在结晶区中,XLPE 的晶相以球状多晶体(球晶)的形式存在,球晶的直径一般约为 10~30 μm ^[6-7]。在 XLPE 结晶的过程中,为了降低表面能,XLPE 分子链在几乎不改变链长和键角的情况下规则地反复折叠进晶格,从而形成厚度约为 10 μm 的片晶^[8]。片晶以晶核为中心紧密堆叠后形成球晶^[9]。球晶之外及片晶之间的区域为无定形区,无定形区中的 XLPE 分子链采取无规线团构象,线团分子之间无规缠结,任意贯穿^[10]。

在 XLPE 电缆的运行过程中,由于电、热等因素的影响,XLPE 聚集态结构会发生变化,进而引发 XLPE 宏观性能的劣化。统计结构表明,XLPE 电缆的故障率与服役时间的关系符合浴盆曲线^[11],即:投运 1~5 a 的电缆故障率较高,故障的主要原因是生产过程及敷设过程中引入的电缆及附件质量缺陷;服役 5~25 a,电力电缆线路的故障率大幅度下

降;服役 25 a 以上为老化失效期,此阶段中,电力电缆的故障率较高,由热老化、电老化等引发的 XLPE 电缆绝缘性能劣化是电缆失效的主要诱因。之前的研究表明热老化温度对 XLPE 电缆绝缘的热老化行为有着非常重要的影响^[12]:(1)热老化温度越高,XLPE 绝缘劣化速率越高;(2)热老化温度低于 XLPE 晶体熔融温度(T_m)时,热老化主要破坏 XLPE 无定形区,对晶区的影响非常有限。即热老化温度不同,热老化机理及对绝缘材料产生的破坏可能存在着明显的差异。因此,了解故障电缆之前所经历的热历史温度对于分析故障产生的原因有着非常重要的意义。

现有的研究表明,差式量热扫描(DSC)法可以对服役电缆绝缘的热历史温度进行表征^[13],但采用 DSC 法表征热历史温度有何规律可循、是否存在局限性还缺乏相应的研究。文中基于服役不同年限的 XLPE 电缆,采用 DSC 法测得了这些 XLPE 电缆绝缘的热历史峰以及相应的热历史温度,然后比较不同电缆绝缘的热历史峰存在何种差异。最后,通过对实验室中加速热老化的 XLPE 试样进行 DSC 测量,系统研究了热历史峰存在差异的原因及 DSC 法表征热历史温度的局限性。

1 试样制备及热历史温度表征方法

1.1 试样制备

选用服役不同时间的 4 根 XLPE 电力电缆,采用 J/Q sliver XLPE 电缆绝缘切片机沿着电缆轴向制备厚度约为 0.4 mm 的 XLPE 试样。其中服役 3 a

收稿日期:2019-03-21;修回日期:2019-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877016);陕西省教育厅重点实验室项目(18JS019)

和 8 a 的 XLPE 电缆的电压等级为 10 kV;服役 10 a 和 12 a 的 XLPE 电缆的电压等级为 35 kV。除了服役 12 a 的 XLPE 电缆的敷设方式为排管敷设之外,其余 3 根 XLPE 电缆的敷设方式均为直埋敷设。

采用同样的方法将未服役的商用 XLPE 电缆(电压等级 35 kV)绝缘制备成厚度约为 0.4 mm 的 XLPE 试样。将这些样品置于 401B 型空气老化试验箱中分别在 100 °C 和 160 °C 的温度条件下进行加速热老化实验,老化温度及老化时间如表 1 所示。

表 1 试样的热老化条件

Table 1 Aging conditions of different XLPE samples

试样编号	老化温度/°C	老化时间/h
F	未老化	0
L1	100	720
L2		1 440
L3		2 160
L4		2 880
H1	160	48
H2		96
H3		144
H4		192

1.2 实验方法

DSC 测量的是与材料内部热转变相关的温度、热流的关系,主要应用于高分子材料的固化反应温度和热效应、物质的相变温度及其热效应测定、高聚物材料的结晶、熔融温度及其热效应测定、高聚物材料的玻璃化转变温度、聚合物的氧化诱导期测定等。采用 DSC 来研究服役不同时间的 XLPE 试样和加速热老化不同时间的 XLPE 试样的热历史过程,具体的试验流程如下:采用差式扫描量热仪对 XLPE 试样进行测量,选用试样重量约为 5~10 mg;将样品置于 N₂ 中,从 20 °C 加热至 140 °C,得到试样的一次升温 DSC 曲线,升温速率为 10 °C/min;记录升温过程中的试验数据并绘制 DSC 曲线。

扫描电子显微镜(SEM)是介于透射电镜和光学显微镜之间的一种微观形貌观察手段,利用二次电子信号成像来观察试样的表面形貌。文中采用扫描电子显微镜对不同温度热老化试样中的球晶进行观测,为了更清晰地观察 XLPE 试样中球晶的大小及形态,观察之前先用 98% 浓硫酸和高锰酸钾(质量比为 20:1)的混合溶液对试样的无定形区进行腐蚀处理。腐蚀过程中每隔半小时用玻璃棒搅拌一次,腐蚀时长视不同 XLPE 试样的老化时间及老化程度。腐蚀完毕取出试样,用超声波清洗仪清洗后并烘干,最后采用离子溅射仪在 XLPE 试样的待测面上溅射金电极。

2 服役及热老化试样的热历史温度

2.1 不同服役时间的 XLPE 电缆绝缘的一次 DSC 曲线

图 1 所示为未服役电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线。可以看出,随着实验温度的增加,DSC 曲线从 80 °C 开始出现一个明显的熔融峰,该峰的峰值温度约为 110 °C,结束于约 120 °C。该峰为 XLPE 试样的主熔融峰,对应着未服役电缆绝缘中晶体的熔融过程,表明 XLPE 晶体从 80 °C 开始发生熔融,到 120 °C 熔融完毕。

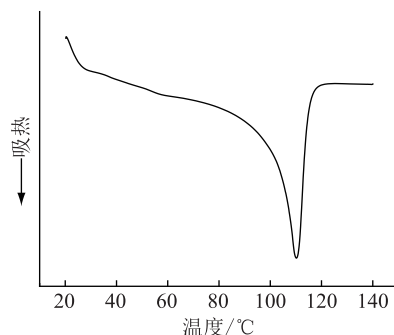


图 1 未服役 XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线

Fig.1 1st DSC heating curve of unaged XLPE cable insulation

图 2 为服役 3 a 的 XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线。可以看出,DSC 曲线在 106 °C 附近存在一个强度较大的晶体主熔融峰 peak 1,该峰起始于 90 °C,终止于 120 °C 附近。与此同时,在 85 °C 附近还存在着一个强度较小,峰形比较尖锐的晶体熔融峰 peak 2,该峰起始于 83 °C,终止于约 90 °C。一般而言,XLPE 试样所处的温度较高时其中较为完善的晶体才会发生熔融,而完善度较低的晶体在较低的温度下即可发生熔融。因此,peak 2 温度范围之内熔融的晶体的完善性低于 peak 1 温度范围之内熔融的晶体的完善性。考虑到 peak 1 的峰值温度 T_m 约为 106 °C,并未明显低于未老化 XLPE 试样的晶体熔融峰值温度($T_m = 110$ °C),因此可以判断,peak 2 的出现并非热氧老化对 XLPE 试样中晶体的破坏导致,而是一个热历史峰,对应的热历史温度约为 85 °C,由电缆在所经历的热历史过程所导致。

图 3 所示为服役 10 a 的 XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线。从图 3 可以看出,在 106 °C 附近存在一个强度较大的晶体主熔融峰 peak 1,该峰起始于 90 °C,终止于 120 °C 附近。相比图 2,图 3 中的 DSC 曲线上只存在 peak 1 一个熔融峰,在较低的温度范围内并无明显的熔融峰出现,这与未服役电缆绝缘的 DSC 曲线类似。表明这根服役 10 a 的 XLPE

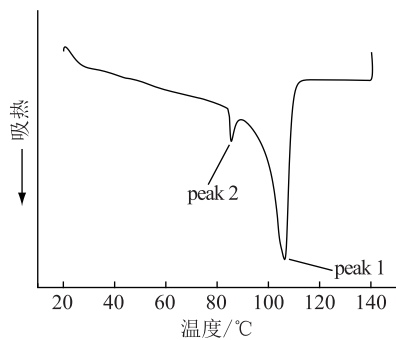


图2 服役3 a XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线

Fig.2 1st DSC heating curve of XLPE cable insulation served for 3 years

电缆绝缘的 DSC 曲线上并无明显的热历史峰出现,因此无法得到热历史温度。

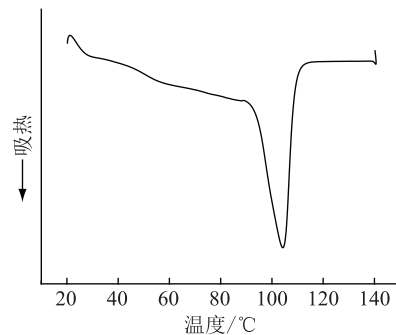


图3 服役10 a XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线

Fig.3 1st DSC heating curve of XLPE cable insulation served for 10 years

图4所示为服役12 a的XLPE电缆绝缘的DSC一次升温曲线。可以看出,在106 °C附近同样存在一个强度较大的晶体熔融峰 peak 1, peak 1 起始于90 °C,终止于110 °C附近。在85 °C附近还存在着一个强度较小,峰形比较平缓的晶体熔融峰 peak 2,该峰起始于85 °C,终止于90 °C附近。此峰也是一个热历史峰,对应的热历史温度约为87 °C。

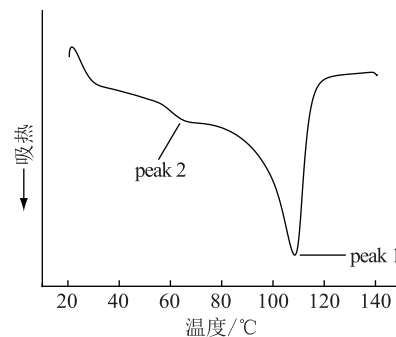


图4 服役12 a XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线

Fig.4 1st DSC heating curve of XLPE cable insulation served for 12 years

对比图2和图4中的 peak 2 可以发现,文中选用的服役3 a的10 kV XLPE 电缆绝缘和服役12 a

的35 kV XLPE 电缆绝缘的热历史峰存在着一定的区别:图2中的 peak 2 峰形较尖锐,峰的面积较小,而图4中的 peak 2 峰形较弥散,峰的面积较大。

图5为服役8 a的XLPE电缆绝缘的DSC一次升温曲线。可以看出,在106 °C附近存在一个强度较大的晶体主熔融峰 peak 1。与此同时,在63 °C附近还存在着一个强度较小,峰形比较平缓的晶体熔融峰 peak 2,该峰起始于58 °C,终止于71 °C附近。由前面的分析结果可知,该峰也是一个热历史峰,对应的热历史温度约为65 °C。对比图4和图5可以发现,相比文中选用服役12 a的35 kV XLPE 电缆绝缘的热历史温度,服役8 a的10 kV XLPE 电缆绝缘的热历史温度更低。

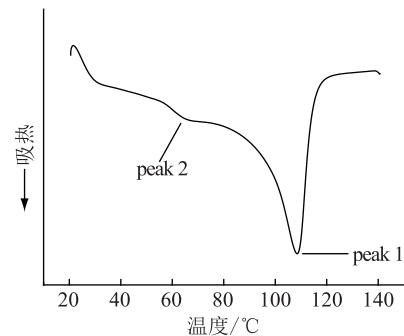


图5 服役8 a XLPE 电缆绝缘的 DSC 一次升温曲线

Fig.5 1st DSC heating curve of XLPE cable insulation served for 8 years

综上可知,服役不同时间的XLPE电缆绝缘的热历史峰及热历史温度存在明显的差异。其中,未服役的XLPE试样DSC曲线上仅存在晶体的主熔融峰,并无热历史峰出现,而并非所有的服役电缆的DSC曲线上均可观察到热历史峰(服役10 a的XLPE试样的DSC曲线上就难以观察到明显的热历史峰)。服役时间不同,热历史峰的位置、大小、形状均存在着明显的差异,由此得到的热历史温度也大相径庭。

2.2 不同温度热老化电缆绝缘的 DSC 曲线

为了研究DSC法表征XLPE试样的热历史峰及由此得到的热历史温度存在何种差异,文中对加速热老化的XLPE试样进行了DSC测试,所得结果如图6所示。

图2的结果表明,未老化试样的主熔融峰出现在110 °C附近,终止于117 °C附近。因此,当老化温度为100 °C时,未老化试样中仅有部分不完善的晶体发生了熔融,而当老化温度为160 °C时,未老化试样中的晶体均处于熔融状态。

100 °C热老化后,XLPE试样的晶体熔融峰出现了分峰现象,除了 peak 1 之外,在100 °C附近还出

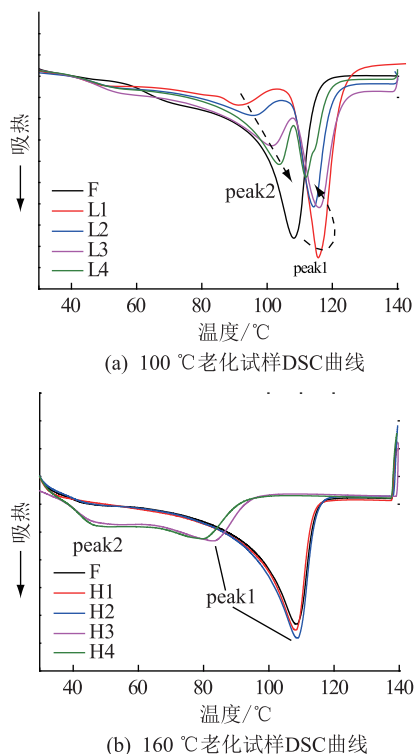


图6 不同温度热老化过程中 XLPE 试样的 DSC 一次升温曲线

Fig.6 1st DSC heating curves of XLPE samples during the thermal aging under different temperatures

现了一个面积较小的熔融 peak 2。随着老化时间的增加,peak 2 向着高温方向移动且 peak 2 的面积逐渐增大。考虑到 XLPE 试样在老化过程中所经历的热过程,peak 2 应该为 DSC 热历史峰。而 peak 1 先随着老化时间的增加向着高温方向移动,峰面积增大,后又向着低温方向移动,峰面积减小。

160 °C 热老化过程中,96 h 之前,试样的 DSC 曲线形状基本保持不变,DSC 曲线上均只有单一晶体熔融 peak1,peak 1 的位置及大小并未发生明显变化。96 h 之后,试样的晶体熔融峰也出现了分峰现象,在 50 °C 附近出现了新的熔融峰 peak 3,随着老化时间的增加,peak 3 向着低温方向移动(与热历史峰 peak 2 的移动方向截然相反),peak 3 的强度出现小幅增大。与此同时,伴随着老化时间的增加,peak 1 也向着低温方向移动,peak 1 的强度逐渐降低。

通过图 6 中的 DSC 曲线,采用公式(1)可以计算热氧老化过程中 XLPE 试样结晶度的变化规律^[14]。如图 7 所示。

$$X = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m0}^*} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为 XLPE 试样的熔融热焓,对应图 6 中的晶体熔融峰的面积; ΔH_{m0}^* 为 100% 结晶的 XLPE 的

熔融热焓,在数值上等于 273.1 kJ/mol。

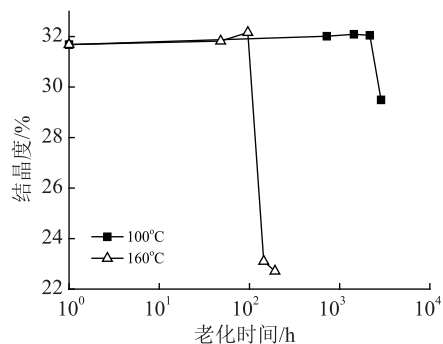


图7 热老化过程中 XLPE 试样结晶度的变化规律
Fig.7 Changes in crystallinity of XLPE samples during the thermal aging

从图 7 可以看出,对于不同温度的热老化过程,XLPE 试样结晶度随老化时间的变化规律类似:老化初始阶段,XLPE 试样的结晶度缓慢升高,XLPE 试样结晶度的升高可以归结于重结晶过程^[15],重结晶过程使得部分结晶不完善的晶体趋于完善,结晶度升高。老化后期,XLPE 试样的结晶度开始快速下降。差别在于老化温度越高,结晶度的下降速率越快,下降幅度越大。表明 160 °C 的热氧老化过程对 XLPE 的晶体造成了更严重的破坏。

3 结果分析

图 6 中不同温度热老化试样 DSC 曲线的差异除了因不同老化温度下氧化反应的速度不同之外,还与不同老化温度下 XLPE 晶体状态的差异有关。100 °C 热氧老化过程中,由于老化温度低于晶体熔融温度(110 °C),所以此时 XLPE 晶体中大部分的晶体处于未熔融的状态,由于结晶区具有比无定形区更为紧密的结构。相比无定形区,空气中的氧气更加难以侵入结晶区,因此氧化反应对结晶区的破坏非常有限,主要破坏无定形区,所以结晶度的下降幅度有限。在 160 °C 时,XLPE 电缆绝缘中所有的晶体均已经处于熔融状态,此时,氧化反应对无定形区以及熔融后的结晶区进行相同地破坏,因此 XLPE 的晶体结构受到了严重的破坏,所以结晶度会出现较大幅度的下降。

如图 8 所示为不同温度热老化试样中球晶的扫描电子显微镜(SEM)照片。

由图 8(a)可以看出,试样 F 中 XLPE 球晶由片晶规则紧密堆叠而成,球晶的直径约为 10~20 μm,球晶之间的区域为腐蚀过后的无定形区。在 100 °C 老化 2 880 h 之后,试样 L4 中的球晶结构仍基本保持完整,仅部分球晶上出现了“花瓣状”缺陷,如图 8(b)所示。图 8(c)为试样 H3 的 SEM 照片,可以发

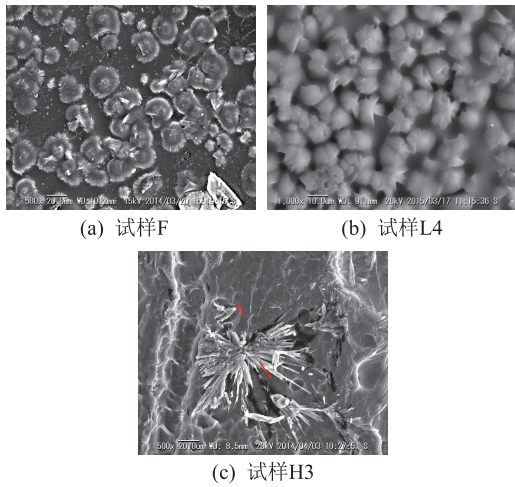


图 8 不同老化试样的 SEM 照片

Fig.8 SEM pictures of different aged sample

现,在 160 °C 老化 144 h 后,球晶的数目减少,组成球晶的片晶数量减少,片晶之间的间距增大,球晶结构的完整性遭到破坏。图 8 的结果很好地支持了上述推断。

各试样的 T_m 和晶体单位面积的表面能(σ_e)等参数如表 2 所示。其中 T_m 为 DSC 曲线中熔融峰的峰值温度,晶体单位面积的表面能通过 Thompson-Gibbs 方程计算可得^[16-17]:

$$T_m = T_{m0} \left(1 - \frac{2\sigma_e}{\Delta H_{m0} L_B} \right) \quad (2)$$

式中: T_{m0} 为厚度无限大的晶体平衡熔融温度, $T_{m0} = 414.6 \text{ K}$; ΔH_{m0} 为单位体积 XLPE 晶体熔融热焓, $\Delta H_{m0} = 2.88 \times 10^8 \text{ J/m}^3$; L_B 为片晶厚度,一般约为 10 nm ^[18]。对式(1)进行变形后得到 σ_e 的表达式:

$$\sigma_e = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_m}{T_{m0}} \right) \Delta H_{m0} L_B \quad (3)$$

表 2 不同热老化条件的晶体熔融温度

 T_m 和单位面积表面能 σ_e Table 2 T_m and σ_e of different aged samples

试样	$T_{m1}/^\circ\text{C}$	$T_{m2}/^\circ\text{C}$	$T_{m3}/^\circ\text{C}$	$\sigma_e \times 10^{-3} / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$
F	108.14			115.69
L1	115.73	91.47		89.33
L2	114.37	96.00		94.05
L3	116.07	101.25		88.15
L4	111.69	103.61		103.36
H1	107.86			116.67
H2	108.04			116.04
H3	83.38		49.94	201.69
H4	80.01		48.68	213.40

由表 2 可以看出,100 °C 热老化后,XLPE 试样

的表面能 σ_e 先减少后增大,160 °C 热老化后,试样的 σ_e 先缓慢减小再增大,在 96 h 后 σ_e 迅速增大。在聚合物的结晶过程中,大分子链的规则排列,趋向于减小晶体的表面能 σ_e ,而 σ_e 的大小反映了结晶的完善程度。若 σ_e 越小,则晶体的完善程度越好,稳定性越高,熔融温度也越高;若 σ_e 越大,则晶体的完善程度越差,稳定性越低,熔融温度也越小。因此,DSC 的测试结果表明在 100 °C 热老化过程中,XLPE 晶体的完善性先提高再缓慢降低,晶体完善性的提高源自于重结晶过程使得晶体中排列不规则的分子链趋于规则排列。而在 160 °C 热老化过程中,XLPE 晶体的完善性先基本不变再迅速下降。

上述结果还表明,XLPE 中完善性较差的晶体总是在较低的温度下发生熔融,而完善性较高的晶体总是在较高的温度下发生熔融。在 XLPE 电缆的生产过程中,由于 XLPE 绝缘的厚度较大,且 XLPE 为热的不良导体,因此 XLPE 电缆中不同位置的绝缘所经历的散热过程存在着差异^[19-20],所以形成的晶体在完善程度上难免存在一定差异。当 XLPE 电缆在服役过程中经历热历史过程时,当热历史温度低于晶体熔融峰值温度 T_m 时,虽然大部分晶体处于未熔融的状态,但少数完善性较差的晶体却处于熔融状态。当热历史过程结束之后,这部分熔融的晶体又会经历新的结晶过程。这部分晶体的结晶温度与 XLPE 电缆生产过程中大部分晶体所经受的结晶温度存在着差异,所形成的晶体在形态上可能与大部分晶体存在着差异,所以便将热历史过程“记忆”了下来。当热历史温度高于晶体熔融峰值温度 T_m 时,所有的晶体均处于熔融状态,当热历史过程结束,所有熔融的晶体经历新的结晶过程。此时所有晶体所经历的结晶过程相同,所以热历史过程无法被“记忆”下来,图 6 中无热历史峰出现。

综上所述,服役 3 a 的 XLPE 电缆试样的 DSC 曲线上出现的面积较小、峰形较尖锐的热历史峰表明该电缆绝缘可能在服役过程中经历了时间较短的热历史过程,可能由短时故障所导致;服役 10 a 的 XLPE 电缆绝缘试样的 DSC 曲线上未出现热历史峰,表明该电缆绝缘可能经历了温度高于 XLPE 晶体熔融峰值温度的热历史过程;服役 12 a 和服役 8 a 的 XLPE 电缆试样的 DSC 曲线上出现的面积较大的热历史峰表明该电缆绝缘可能长期工作于该热历史温度之下。

4 结论

文中基于服役 3 a、8 a、10 a、12 a 的 4 根 XLPE

电缆绝缘以及在实验室中加速热氧老化不同时间的 XLPE 电缆绝缘,采用 DSC 法系统研究了热历史过程对热历史温度的影响,得到了以下几点结论:

(1) 在老化温度高于 T_m 的热氧老化过程中,相比无定形区,空气中的氧气更难以侵入结构更加致密的结晶区,因此氧化反应对结晶区的破坏非常有限,主要破坏无定形区,结晶度的下降幅度有限。在老化温度高于 T_m 的热氧老化过程中,氧化反应对无定形区以及熔融后的结晶区进行破坏,因此 XLPE 的晶体结构受到了严重的破坏,具体表现为球晶数量减小、片晶间距增大、结晶度大幅下降。

(2) 当 XLPE 电缆绝缘所经历的热历史温度低于 T_m 时,在 DSC 一次升温曲线上会观察到热历史峰。经历热历史温度的时间越长,热历史峰向着高温方向移动,峰的面积越大,且热历史峰的峰值温度就越高。

(3) 当 XLPE 电缆绝缘所经历的热历史温度高于 T_m 时,在 DSC 一次升温曲线上并无法观察到热历史峰。此时,在 DSC 一次升温曲线的低温范围内出现的小的晶体熔融峰可能源自于热氧老化对 XLPE 晶体结构的破坏。随着老化时间的增加,该峰向着低温方向移动,与热历史峰的变化规律截然相反。

本文得到国网江苏省电力有限公司电力科学研究院科技项目(SGJSDK00ZPJS1800362)和中国电力科学研究院有限公司武汉分院科技项目(CYW5-1201800194)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):61-66.
LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 61-66.
- [3] 鲁宁. 高压 XLPE 电缆击穿的制造因素分析及有效控制[J]. 电力工程技术,2017,36(5):43-47.
LU Ning. Manufacture factor analysis and effective control of high voltage XLPE cable breakdown[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 43-47.
- [4] WANG Shihang, CHEN Peixing, LI Huan, et al. Improved DC performance of crosslinked polyethylene insulation depending on a higher purity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1809-1817.
- [5] LI Jianying, ZHAO Xuetong, YIN Guilai, 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.
- [6] 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.
- [7] LI Jianying, LI Huan, WANG Qimeng, et al. Accelerated inhomogeneous degradation of XLPE insulation caused by copper-rich impurities at elevated temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1789-1797.
- [8] 何平笙. 新编高聚物的结构和性能[M]. 北京:科学出版社,2009:198-200.
HE Pingsheng. Structure and properties of polymers[M]. Beijing: Science Press, 2009: 198-200.
- [9] JONES J P, LLEWELLYN J P, LEWIS T J. The contribution of field-induced morphological change to the electrical aging and breakdown of polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 951-966.
- [10] FLORY P J. The configuration of real polymer chains [J]. Journal of Chemical Physics, 1949, 17(3): 303-310.
- [11] 罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术,2003,29(6):14-16
LUO Junhua, QIU Yuchang, YANG Liming. Operating fault analysis of XLPE power cable above 10 kV [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 14-16.
- [12] LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. The role of thermo-oxidative aging at different temperatures on the crystal structure of crosslinked polyethylene [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2018(29): 3696-3703.
- [13] BILLING J W. Thermal history of cable insulation revealed by DSC examination[C] // International Conference on Dielectric Materials, 1988, 121(23): 309-312.
- [14] 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.
- [15] LI Jianying, LI Huan, ZHOU Fusheng, et al. Copper-catalyzed oxidation caused by copper-rich impurities in cross-linked polyethylene cable insulation[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, 27: 806-810.
- [16] CONTAT-RODRIGO L, GREUS A R. Biodegradation studies of LDPE filled with biodegradable additives: Morphological changes. I [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 83(8): 1683-1691.
- [17] RABELLO M S, WHITE J R. The role of physical structure and morphology in the photodegradation behaviour of polypro-

- pylene[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1997, 56(1): 55-73.
- [18] OUYANG Benhong, LI Huan, ZHANG Xu, et al. The role of micro-structure changes on space charge distribution of XLPE during thermo-oxidative aging[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(6): 3849-3859.
- [19] 黄振, 聂诗超, 王锐, 等. 110 kV XLPE 电缆绝缘层内应力的测试方法与分析[J]. *绝缘材料*, 2017, 50(6): 64-68.
HUANG Zhen, NIE Shichao, WANG Rui, et al. Test methods and analysis of internal stress in insulating layer of 110 kV XLPE cable[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(6): 64-68.
- [20] 朱爱荣, 曹晓珑. 110 kV 交联电缆绝缘层晶体结构研究[J]. *绝缘材料*, 2005, 38(2): 39-41.

ZHU Airong, CAO Xiaolong. Research on the crystalline structure of the cross-linked polyethylene insulation of 110 kV power cable[J]. *Insulating Materials*, 2005, 38(2): 39-41.

作者简介:



李欢

李欢(1988),男,博士,讲师,研究方向为聚合物材料破坏机理(E-mail: lihuan@snut.edu.cn);

翟双(1995),女,硕士在读,研究方向为高压技术;

陈杰(1984),男,博士,高级工程师,从事输电线路相关研究工作。

Influence of thermal history process on the thermal history temperature of XLPE cable

LI Huan^{1,2}, ZHAI Shuang¹, CHEN Jie³, HU Libin³

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Differential Scanning Calorimeter (DSC) was used to test the thermal history temperature of the insulation of XLPE cables in service. It was found that there were significant differences in the DSC 1st heating curves of different XLPE samples. On the most of the DSC curve of XLPE samples, thermal history peaks were found, and there were differences in the position, size and shape of these peaks. However, no thermal history peak could be observed on the DSC curve of the other samples. In order to investigate the reasons for the above differences, we performed DSC tests on XLPE samples at different temperatures for different temperatures. It was found that when the thermal history temperature experienced by XLPE cable insulation is higher than the crystal melting temperature of XLPE, there is no thermal history peak on the DSC primary heating curve. At this time, the change of DSC curve is mainly caused by the destruction of XLPE crystal structure by thermal oxygen degradation. When the thermal history temperature experienced by XLPE cable insulation is lower than the crystal melting temperature of XLPE, a thermal history peak can be observed on the DSC primary heating curve. The longer the XLPE cable insulation is at this thermal history temperature, the larger the area of the thermal history peak and the higher the peak temperature of the thermal history peak, and may even be higher than the actual thermal history temperature.

Keywords: XLPE; thermal history temperature; DSC; thermal aging

(编辑 杨卫星)