

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.022

# 退役高压 XLPE 电缆绝缘空间电荷行为研究

赵一枫<sup>1</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 谢月<sup>1</sup>, 黄嘉盛<sup>2</sup>, 朱宁西<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510310)

**摘要:**文中对两回 110 kV 退役高压交联电缆进行 180 a 预鉴定试验, 目的在于研究不同运行年限的退役高压交联电缆老化前后的空间电荷行为差异, 并评估电缆重新投入实际运行的可靠性。通过电声脉冲 (PEA) 法测量试验前后绝缘层交联聚乙烯 (XLPE) 试样的空间电荷分布, 结合傅里叶红外光谱 (FTIR) 实验、X 射线衍射 (XRD) 实验揭示试样的微观结构、聚集态结构状态变化与空间电荷的迁移、积聚和消散过程的潜在关系。实验结果表明: 实际运行 16 a 的电缆绝缘由于存在大量杂质使得空间电荷的积聚严重, 老化试验后, 杂质的减少和淬灭反应使得空间电荷的积聚降低且消散过程加快; 实际运行 32 a 的电缆绝缘空间电荷的积聚和消散过程缓和, 老化试验后, 由于绝缘降解作用和晶态结构的破坏使得空间电荷的积聚加剧且消散过程变得缓慢。

**关键词:** 电缆; 交联聚乙烯 (XLPE); 空间电荷; 傅里叶红外光谱 (FTIR); X 射线衍射 (XRD); 陷阱

**中图分类号:** TM247

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)03-0151-07

## 0 引言

交联聚乙烯 (cross-linked polyethylene, XLPE) 是晶相和非晶相共存的高分子聚合物, 由于其优异的电、热和机械性能, 被广泛用作电缆绝缘材料<sup>[1-4]</sup>。XLPE 晶态结构与无定型态结构在形态、导电率和介电常数上存在较大差异, 使得 XLPE 绝缘能带结构异于整体连续晶体的能带结构, 主要表现为 XLPE 绝缘的禁带较宽, 达到 8~10 eV; XLPE 绝缘的导带与价带较窄且极其不连续; 能带结构中存在大量的局域态。由于导带与价带的不连续性以及局域态的存在, 载流子在能带上的位置分布形成了深浅陷阱组成的局域态密度分布。在电缆长期运行过程中, 电、热、机械应力和环境因素综合作用会引起 XLPE 微观结构和聚集态结构的变化, 形成不同能级的“陷阱”<sup>[5]</sup>。陷阱根据能级的深度可具体分为深陷阱和浅陷阱, 深、浅陷阱数量的多少直接影响载流子的迁移速率以及空间电荷的积聚、消散过程<sup>[6]</sup>。一般认为, XLPE 绝缘中的深陷阱多由结晶区中的化学陷阱提供<sup>[7-8]</sup>, 而浅陷阱多由无定形区中存在的羰基 (C=O)、碳碳双键 (C=C)、羟基 (-OH) 等化学缺陷以及 XLPE 短链、链的分支、交叉结合点等物理缺陷提供<sup>[9]</sup>。载流子在迁移过程中很容易被陷阱俘获形成空间电荷, 空间电荷的积聚和消散过程会使得绝缘中的局部电场发生畸

变, 文献[10]发现低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE) 的击穿场强与绝缘内部的异极性电荷运动、老化过程会使得异极性电荷密度增大, 且电荷的快速迁移会导致局部电场突然增强, 严重影响电缆绝缘的寿命。文献[11-12]研究发现, 当 XLPE 绝缘空间电荷积聚量使得电场畸变达 50% 时, 电缆的寿命将减小至初始寿命的 1/6。文献[13-14]发现电缆在实际运行过程中会使得 XLPE 绝缘发生不同程度的劣化, 绝缘内部的微观结构和聚集态结构的差异直接影响到绝缘的外特性, 如拉伸强度、电导率、介质损耗、变色等, 最终决定了电缆的使用寿命。因此, 研究 XLPE 绝缘微观分子链结构和聚集态晶体结构差异对空间电荷行为的影响, 对保障电缆长期可靠运行至关重要。

预鉴定试验是为了考察交流电缆长期运行安全可靠性问题而提出的试验验证体系, 广泛应用于额定电压 150~500 kV 挤出绝缘及附件中。文中将预鉴定试验方法应用于实际运行 16 a 和 32 a 的 110 kV 高压交联电缆中, 目的在于观察退役电缆在严苛的试验条件下 XLPE 绝缘性能变化状况, 通过试验前后绝缘的微观结构和聚集态结构变化研究直流电场下绝缘内部空间电荷的行为变化, 进而确定绝缘内部的绝缘状态, 最终全面评估两回退役电缆重新投入运行的可行性。

## 1 实验条件及方法

### 1.1 试样准备

采用 2 根退役的高压 XLPE 电缆作为试验对

收稿日期: 2019-11-03; 修回日期: 2019-12-15

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (GZM2015-1-0012)

象,实际运行时间分别为 16 a 和 32 a,具体情况如表 1 所示。其中, $S_{16-0}$ 、 $S_{32-0}$ 分别为实际运行 16 a 和 32 a 的电缆试样; $V_L$ 为电压等级; $S_C$ 为导体横截面积; $d_1$ 为绝缘厚度; $O_p$ 为运行年限。在电热循环老化试验前,观察发现 2 根电缆回路的外护套和绝缘层无破损,未有进水现象。

表 1 试验电缆情况  
Table 1 Testing cable sample

试样	$V_L/kV$	$S_C/mm^2$	$d_1/mm$	$O_p$
$S_{16-0}$	110	630	18.5	1999—2015 年
$S_{32-0}$	110	700	19.8	1985—2016 年

对上述 2 根退役电缆进行截取,获得各 15 m 长的试验电缆,进行为期 180 d 电热循环加速老化试验,试验的电压设置为  $1.7U_0$  即 108.8 kV(其中, $U_0=64$  kV),每 24 h 为一轮热循环,加热时间至少 8 h,冷却时间 16 h,并且保证导体温度在  $90\sim 95$  °C 保持至少 2 h。在试验过程中未出现绝缘击穿状况,试样  $S_{16-0}$  和  $S_{32-0}$  在加速老化试验后的电缆试样分别命名为  $S_{16-180}$  和  $S_{32-180}$ 。

将加速老化试验前后 4 根电缆的绝缘沿轴向切片,获得厚度为 0.5 mm 的片状试样。通过观察加速老化试验前后 XLPE 试样的空间电荷行为特性,结合傅里叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)实验,探讨绝缘内部微观结构、聚集态结构变化与空间电荷行为的潜在关系。在进行各项实验前,为消除绝缘切片过程中机械应力对实验结果的影响,将所有切片试样放置 80 °C 真空烘箱内抽真空干燥 8 h。

### 1.2 实验方法

**FTIR 实验:**采用德国 Bruker 公司生产的 VERTEX 70 红外光谱仪对  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 0.5\text{ mm}$  的各个 XLPE 试样进行扫描,实验波数范围设置为  $600\sim 3\ 600\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ 。

**XRD 实验:**采用德国 Bruker D8 ADVANCE 型号的 X 射线多晶衍射仪对  $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}\times 0.5\text{ mm}$  的各个 XLPE 试样进行扫描,实验测量角度范围设置为  $5^\circ\sim 90^\circ$ ,扫描步长为  $0.131^\circ$ 。

**电声脉冲(pulse electro acoustic, PEA)实验:**采用的 PEA 测试系统上下电极分别为半导体材料和铝电极,声耦合剂为硅油,实验试样尺寸为  $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 。实验设置高压脉冲值为 1 kV,脉冲宽度为 10 ns。先对试样施加直流电场  $6\text{ kV}\cdot\text{mm}$  得到参考波形,再施加 20 min 的  $30\text{ kV}\cdot\text{mm}$  的直流电场得到极化阶段的空间电荷分布图,撤去电场后

得到 5 min 的去极化阶段空间电荷分布图。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 FTIR 实验结果与分析

XLPE 主要是由 C—H 键组成的高分子聚合物,亚甲基( $-\text{CH}_2$ )是 XLPE 最具特征的基团,在红外吸收光谱中亚甲基的吸收峰出现在波数为  $720\text{ cm}^{-1}$ ,波数  $1\ 471\text{ cm}^{-1}$ ,  $2\ 856\text{ cm}^{-1}$ ,  $2\ 937\text{ cm}^{-1}$  为对应亚甲基摇摆震动所产生的吸收峰<sup>[15]</sup>。XLPE 在交联过程中一般采用过氧化二异丙苯作为交联剂,其主要分解为苯乙酮、枯基醇和  $\alpha$ -甲基苯乙烯,这 3 种化合物的特征官能团分别是苯乙烯基( $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}-$ ), C—O, —OH, 对应的红外光谱的特征吸收峰波数分别在  $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ ,  $1\ 680\text{ cm}^{-1}$ ,  $3\ 371\text{ cm}^{-1}$  处<sup>[16]</sup>。在电缆长期运行过程中在热氧降解的作用下会产生相关的热氧副产物,主要为醛基( $-\text{C}=\text{O}$ )、酮基( $\text{R}_1-\text{C}=\text{O}$ )和羧基( $-\text{COOH}$ ),分别对应红外吸收光谱中波数  $1\ 701\text{ cm}^{-1}$ ,  $1\ 718\text{ cm}^{-1}$ ,  $1\ 741\text{ cm}^{-1}$  的吸收峰。而波数  $1\ 635\text{ cm}^{-1}$  对应着不饱和基团乙烯基,也用于表征羰基的含量以及衡量绝缘降解的程度<sup>[17]</sup>。

图 1 为电热循环加速老化试验前后各试样的 FTIR,图中发现实际运行 16 a 的电缆试样  $S_{16-0}$  在波数  $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ ,  $1\ 680\text{ cm}^{-1}$ ,  $3\ 371\text{ cm}^{-1}$  处存在很高的吸收峰,表明绝缘内部残留大量的交联副产物。

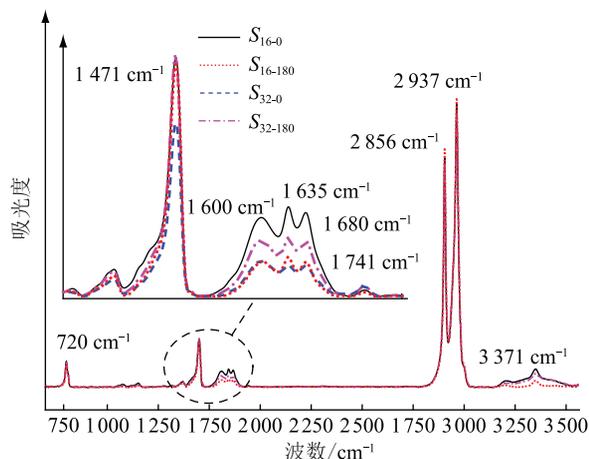


图 1 加速老化试验前后各试样 FTIR  
Fig.1 FTIR of each sample before and after accelerated aging test

表 2 为羰基指数和不饱和基指数,由表 2 可知该电缆绝缘的热氧化程度较低;在电热循环加速老化试验后,绝缘内部的交联副产物挥发减少,同时在热刺激的作用下发生一定交联二次反应,温度效应起到的积极作用高于介质的热降解反应,使得氧化基团减少。

表 2 羰基指数和不饱和基指数

Table 2 Carbonyl index and unsaturated band index

试样	羰基指数 ( $I_{1741}/I_{1471}$ )	不饱和基指数 ( $I_{1635}/I_{1471}$ )
$S_{16-0}$	0.026	0.37
$S_{16-180}$	0.018	0.17
$S_{32-0}$	0.059	0.18
$S_{32-180}$	0.044	0.28

实际运行 32 a 的电缆试样  $S_{32-0}$  在长期实际运行过程中基本不存在交联副产物,故图 1 中  $1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ ,  $1\ 680\ \text{cm}^{-1}$ ,  $3\ 371\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰较弱。从表 2 中发现羰基含量较高,表明绝缘出现一定的热氧化降解,大分子链已遭到一定的破坏;在电热循环加速老化试验后,热降解的作用使得介质内部的大分子链进一步破坏,导致小分子链和氧化基团进一步增加。

## 2.2 XRD 实验结果与分析

采用 X 射线衍射仪分析电热循环加速老化试验前后各个试样的聚集态结构变化,观察各试样在特定试验条件下的结晶相变化。

图 2 为加速老化试验前后电缆绝缘各层 XRD 谱图,  $I$  为衍射强度。可以发现,各个试样的 2 个主要结晶峰均出现在  $2\theta=21.22^\circ$  和  $2\theta=23.63^\circ$  处,分别表示 (110) 和 (200) 晶格面。试验前后各个试样在结晶峰的位置上并没有过大的移动,但峰值的强度和吸收峰的形态有所差异,这表明加速老化试验的过程几乎不会对试样的聚集结构产生任何新的结晶相,但会使各个试样的结晶度和晶粒尺寸发生变化。

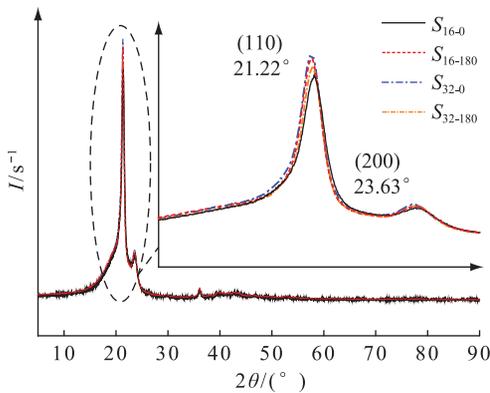


图 2 加速老化试验前后各试样的 XRD 谱图

Fig.2 XRD spectrum of each sample before and after accelerated aging test

试样的结晶度可采用 Hinrichsen 方法<sup>[18]</sup>得到,对各个试样的 XRD 谱图进行高斯分峰拟合,得到图 3 的 3 个拟合峰。

结晶度的具体计算为:

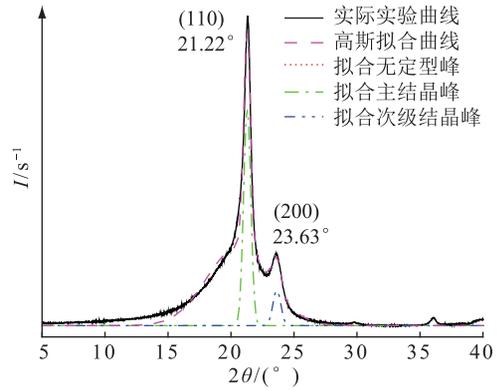


图 3 基于 Hinrichsen 方法的高斯拟合分峰示意

Fig.3 Gaussian fitting of crystalline peaks and amorphous halo by Hinrichsen method

$$\chi = \frac{(S_2 + S_3)}{(S_1 + S_2 + S_3)} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\chi$  为结晶度;  $S_1$  为无定型峰的面积;  $S_2$  为主结晶峰  $2\theta=21.22^\circ$  的面积;  $S_3$  为次级结晶峰  $2\theta=23.63^\circ$  的面积。

另外,计算出绝缘对应衍射峰下的晶粒尺寸<sup>[19]</sup>,具体如下:

$$D_{(hkl)} = \frac{K \lambda_x}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

式中:  $D_{(hkl)}$  为垂直于 (hkl) 晶面方向的晶粒尺寸, nm;  $\lambda_x$  为 X 射线波长, nm, 此处实验波长为 0.154 nm;  $\beta$  为由于晶粒细化引起的衍射峰的宽化, 又称本征增宽度, rad, 此处采用强度分布曲线最大峰值高度一半处的宽度;  $K$  为一系数, 若  $\beta$  为衍射峰的半高宽,  $K$  取 0.89。

对加速老化试验前后的各个试样通过式 (1) 和式 (2) 得到对应的结晶度  $\chi$ 、主结晶的晶粒尺寸  $D_{(110)}$  和次级结晶的晶粒尺寸  $D_{(200)}$ , 如表 3 所示。可以发现, 加速老化试验前后绝缘各层的聚集态结构变化差异明显。

表 3 结晶度、主结晶和次级结晶晶粒尺寸参数

Table 3 Crystallinity and grain size of main and secondary crystals

试样	$\chi/\%$	$D_{(110)}/\text{nm}$	$D_{(200)}/\text{nm}$
$S_{16-0}$	27.48	13.54	14.58
$S_{16-180}$	28.84	14.26	13.37
$S_{32-0}$	29.08	11.67	13.78
$S_{32-180}$	28.52	12.89	13.49

加速老化试验前, 试样  $S_{16-0}$  结晶度较低, 主结晶和次级结晶的晶粒尺寸较大, 表明绝缘内部晶体结构间距较大, 晶体结构排列分散性较大。对于试样  $S_{32-0}$ , 绝缘内部的结晶度较高且主结晶的晶粒尺寸

较大,说明绝缘内部形成结晶结构较好。前者由于绝缘内部存在大量的交联副产物,破坏了绝缘内分子链的规整性和对称性,这些支化的杂质分子抑制分子链规则排列形成高度有序的晶格;后者由于长期的实际运行使得绝缘内的可挥发杂质减少,低负荷环境对绝缘的分子链破坏并不严重,大分子链相对完善规整,所以形成高度有序的晶体结构。

加速老化试验后,试样  $S_{16-180}$  在热的激发下可挥发杂质减少,淬火效应有助于分子链的运动,结晶度上升且主结晶的晶粒尺寸增大,表明晶体结构更加均匀稳定。对于试样  $S_{32-180}$ ,在长期运行过程中绝缘的劣化使得耐热性能下降,在严苛的试验条件下,分子链的破坏使得大量不完善部分显现,最终导致结晶度下降,主结晶和次级结晶的尺寸增大也表明绝缘内部的结晶结构分散性变大,小分子链或游离基团的存在导致次级结晶增多。

### 2.3 空间电荷实验结果与分析

#### 2.3.1 空间电荷的积聚特性

图 4 为加速老化试验前后各试样极化阶段空间电荷分布,图中可以看出:在极化阶段 1 200 s 时间段内,电荷逐渐在两极内侧积聚,只有试样  $S_{32-0}$  的异极性电荷峰值在 800 s 达到饱和,其他试样均未达到饱和;试样  $S_{16-0}$  和试样  $S_{32-0}$  的异极性电荷积聚量在加速老化试验前后表现出相反的结果。其中,试样  $S_{16-0}$  在直流电场下,出现大量的异极性电荷,在加速老化试验后,试样  $S_{16-180}$  异极性电荷的积累减少;试样  $S_{32-0}$  在直流电场下的异极性电荷较少,在加速老化试验后,试样  $S_{32-180}$  异极性电荷的积累突增。

图 4(a) 在加压过程中,试样  $S_{16-0}$  靠近电极附近处出现异极性电荷积累,随着加压时间增加,积累量逐渐增大,与此同时,电极处感应的电荷量也逐渐递增。对比图 4(a)、图 4(b) 可以发现,加速老化后的试样  $S_{16-180}$  在两极附近的异极性电荷量下降,试样内部出现较为明显的正、负电荷,表明试样内部的深陷阱有所减少,载流子迁移率提高。由图 4(c) 可以发现,试样  $S_{32-0}$  在直流电压下电极附近并没有出现明显的异极性电荷积聚,电极处感应的同极性电荷量变化也相对微弱,试样内部基本没有空间电荷积聚。

在电热循环加速老化试验后,图 4(d) 中电极附近积聚明显的异极性电荷,且电荷量随着加压时间的增加不断扩大,试样内部出现较多的正、负电荷,表明试验后的试样内部浅陷阱增多,加快了内部的载流子迁移,使得内部出现一定量的空间电荷。

为了表征极化阶段下绝缘内部空间电荷的积

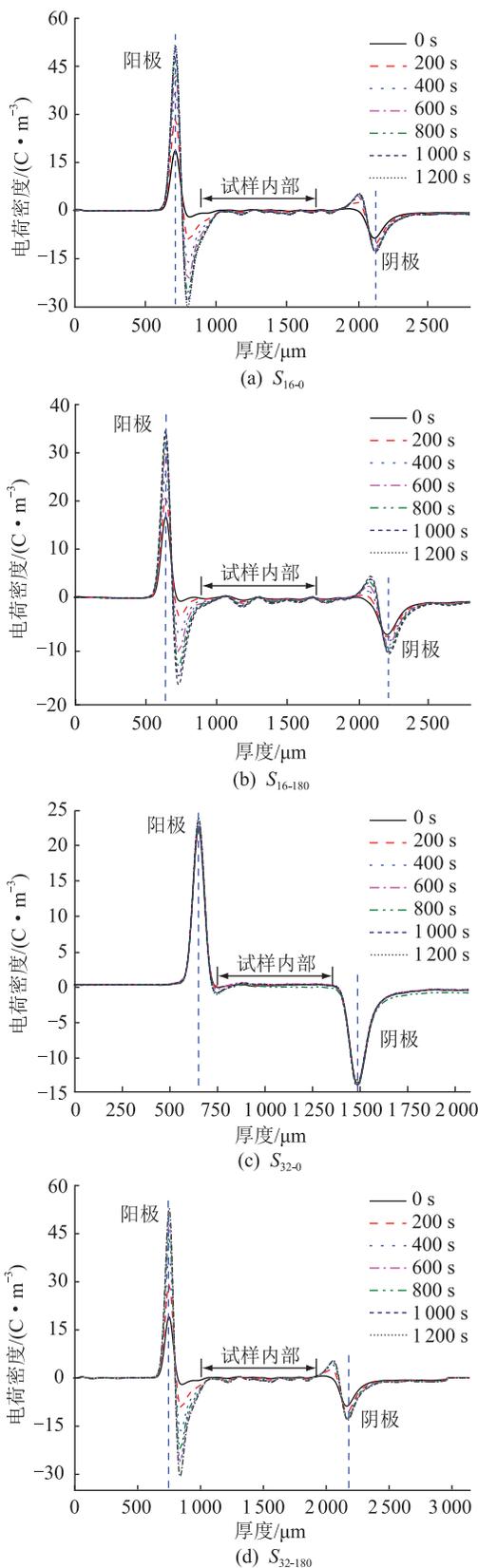


图 4 加速老化试验前后各试样极化阶段空间电荷分布

Fig.4 Distribution of space charge in different times during polarized phase before and after the accelerated aging test

聚特性,用单位体积电荷积聚量随时间的变化关系研究各试样的空间电荷积聚速率和饱和状态。各

个试样绝缘内部的极化阶段下单位体积电荷量可由空间电荷的电荷分布图得出,计算公式如下:

$$q(t, E_p) = \frac{\int_0^d |\rho(x, t, E_p)| dx}{d} \quad (3)$$

式中: $q(t, E_p)$ 为单位体积电荷量; $t$ 为极化的时间; $E_p$ 为极化场强; $d$ 为试样的厚度; $\rho(x, t, E_p)$ 为在极化场强 $E_p$ 下 $t$ 时刻试样内部空间电荷的密度。

根据式(3)可得到电热循环加速老化试验前后各个试样在极化阶段下单位体积电荷积聚量随时间的变化关系,如图5所示。

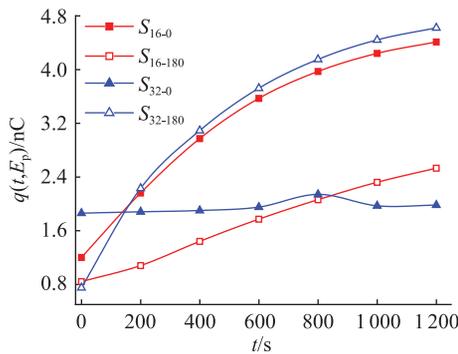


图5 极化阶段单位体积电荷量变化

Fig.5 Change of unit volume charge in polarized phase

根据图5可以发现,试样 $S_{16-0}$ 和试样 $S_{32-0}$ 的单位体积电荷量变化差异较大,试样 $S_{16-0}$ 的电荷积聚量随加压时间快速增长,且电荷量的积聚在1200s后仍未达饱和;相反地,试样 $S_{32-0}$ 的电荷积聚量随加压时间变化不大,在800s后电荷的积聚基本趋于饱和。加速试验后,试样 $S_{16-180}$ 的电荷积聚量大大减少,但随加压时间增加仍呈现快速增长的态势,空间电荷的积聚达到饱和的时间有所缩短;而试样 $S_{32-180}$ 的电荷积聚量随加压时间的增加而快速增长,在1200s内未能达到饱和。

结合 FTIR 实验和 XRD 实验结果可知:试样 $S_{16-0}$ 由于内部残留大量的交联副产物,一方面,这些化学缺陷在一定程度上阻碍了晶态结构向更好的方面发展;另一方面,在电场极化作用下使得杂质发生电离,导致在极化过程中在电极处电离出较多的异极性电荷,并且在1200s内异极性电荷远不能达到饱和。在加速老化试验后,可挥发杂质在减少的同时,淬灭反应和交联剂的二次反应使得试样 $S_{16-180}$ 的晶体结构得以改善,与无定形区相比,结晶区具有更加致密的结构,不利于氧气( $O_2$ )的侵入<sup>[7]</sup>。因此,羰基指数和不饱和基指数的降低使得试样内部陷阱的数目大幅下降,异极性电荷的积聚过程较试样 $S_{16-0}$ 平缓。对于试样 $S_{32-0}$ ,长期实际运

行条件使得试样内部基本不存在交联副产物或抗氧化剂等,绝缘大分子链的破坏并不严重,因此不饱和基指数相对较低,晶态结构相对完善均匀,结晶度较高,所以试样内空间电荷的积聚并不明显。在加速老化试验后,由于试样内部的缺乏交联剂和抗氧化剂,在严苛的试验条件下加速了绝缘中晶态结构破坏,无定形区的扩大使得 $O_2$ 更容易侵袭,形成大量的断链、小分子链、极性基团等缺陷和晶体中不完善的地方为空间电荷的积聚提供场所,最终使得试样 $S_{32-180}$ 在1200s内单位体积电荷积聚量远达不到饱和。

### 2.3.2 空间电荷的消散特性

撤去直流电场后,各个试样内部的空间电荷逐渐脱陷消散,通过式(3)和去极化阶段的空间电荷分布测试结果,可绘制如图6的去极化阶段单位体积电荷量变化曲线。

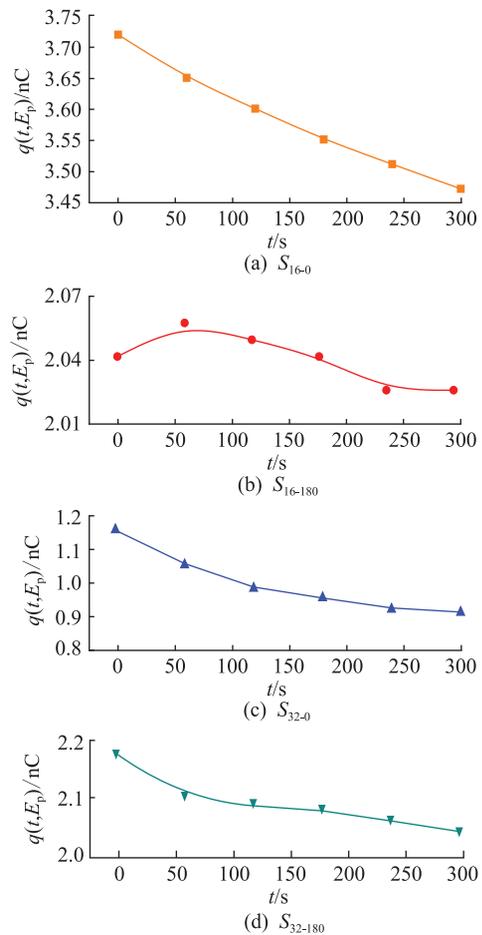


图6 去极化阶段单位体积电荷量变化

Fig.6 Change of unit volume charge in depolarized phase

根据陷阱能级理论<sup>[20-21]</sup>,陷阱俘获的电荷完全脱陷时间与陷阱能级深度成指数关系:

$$t_D = \frac{1}{\nu e^{\Delta U/(kT)}} \quad (4)$$

式中： $t_D$  为电荷消散殆尽的时间，s； $v = kT/h$  为电荷脱陷频率，Hz； $k$  为玻尔兹曼常数； $T$  为实验温度，K； $h$  为普朗克常量； $\Delta U$  为陷阱最高能级。

因此，由式(4)可得到陷阱的深度与消散时间的关系如下：

$$\Delta U = kT \ln(v t_D) \quad (5)$$

由图 6 可知，试样  $S_{16-0}$  内部存在较多的空间电荷，在去极化 300 s 后仍没有达到稳态的趋势，此时，电荷消散殆尽的时间  $t_D$  漫长，由式(5)可知陷阱能级深度较深。在电热循环加速老化试验后， $S_{16-180}$  内部的空间电荷大大减少，且电荷消散过程在 240 s 处开始达到稳定，电荷消散殆尽的时间  $t_D$  较试验前大大缩短，试样内的陷阱能级深度变浅。对于  $S_{32-0}$ ，绝缘内部在极化阶段积聚的空间电荷并不明显，空间电荷的消散过程在去极化阶段 200 s 后基本达到平稳， $t_D$  较小，试样内部的陷阱能级深度浅。在电热循环加速老化试验后， $S_{32-180}$  内部空间电荷的积聚量提高，且消散过程稍有缓慢， $t_D$  增大使得陷阱深度变深。

结合 FTIR 实验和 XRD 实验结果有以下分析：试样  $S_{16-0}$  内部残留大量的交联副产物形成大量的化学深陷阱<sup>[22-25]</sup>，使得空间电荷的消散过程缓慢，在电热循环加速老化试验后，由 FTIR 实验可知交联副产物在热刺激的作用下挥发，深陷阱密度下降，另外，试样二次交联作用和淬火反应带来的绝缘晶态结构改善、物理缺陷减少也加快了电荷消散过程。对于试样  $S_{32-0}$ ，其内部的陷阱多由浅陷阱组成，一般为无定形区中存在的羰基(C=O)、碳碳双键(C=C)、羟基(-OH)等化学缺陷以及 XLPE 短链、链的分支、交叉结合点等物理缺陷提供。在加速老化试验后，严苛的试验条件使得试样的结晶区域减少、无定型区扩大、大分子链加速断裂，因此试样  $S_{32-180}$  内部的化学和物理缺陷增多，形成的浅陷阱增多，空间电荷的消散过程延长。

### 3 结论

文中通过对实际运行 16 a 和 32 a 的电缆进行长达 180 d 电热循环加速老化试验，研究对比试验前后电缆绝缘内部微观结构变化、聚集态结构变化与空间电荷行为规律的关系，结论如下：

(1) 试样  $S_{16-0}$  由于残留大量的交联副产物作为深陷阱存在于试样中，在俘获大量空间电荷的同时，阻碍晶态结构的进一步发展，导致异极性电荷积聚明显，空间电荷的积聚和消散达到稳态的过程延长；

(2) 试样  $S_{16-180}$  由于淬火效应和交联剂的二次反应使得可挥发杂质减少，促进了绝缘内部结晶形态均一化，异极性电荷的积聚大大减少，空间电荷的积聚和消散达到稳态的过程加快；

(3) 试样  $S_{32-0}$  在长期的投入过程中基本不存在可挥发的杂质，内部积聚的空间电荷主要为老化降解造成的少量断链和极化基团等浅陷阱俘获导致，空间电荷的积聚和消散过程很快达到稳态；

(4) 试样  $S_{32-180}$  在严苛的试验条件下使得大分子链进一步破坏，结晶度下降和无定型区的扩大使得绝缘内部的断链、自由基团等不完善部分增多，从而引入大量陷阱，使得空间电荷的积聚量突增，电荷消散过程缓慢。

对于该实际运行 16 a 的退役电缆，在实际运维中可适当增加负荷量以达到减少绝缘中的可挥发杂质，从而改善绝缘内部的微观结构和晶态结构；而对于实际运行 32 a 的退役电缆，其他回路依然具有长期投入运行的潜力，但应避免长时间的过载运行。

### 参考文献：

- [1] 李亚莎,代亚平,花旭,等. 杂质对交联聚乙烯电缆内部电场和空间电荷分布影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4365-4371.  
LI Yasha, DAI Yaping, HUA Xu, et al. The influence of impurities on electric field and space charge distribution in XLPE cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4365-4371.
- [2] 张梦甜, 玉林威, 陈向荣, 等. 高压直流 XLPE 电缆绝缘的介电性能研究[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 12-18.  
ZHANG Mengtian, YU Linwei, CHEN Xiangrong, et al. Study on dielectric properties of HVDC XLPE cables[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 12-18.
- [3] 李珊珊, 严有祥, 陈丽安, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电, 2018, 36(1): 87-92.  
LI Shanshan, YAN Youxiang, CHEN Li'an, et al. Influence of high-voltage cable buffer layer structure on current carrying capacity[J]. Distribution & Utilization, 2018, 36(1): 87-92.
- [4] 赵法强, 肖艳霞, 陆林. XLPE 电缆中间接头局部放电特征气体及光特性检测技术研究[J]. 广东电力, 2019, 32(12): 130-136.  
ZHAO Faqiang, XIAO Yanxia, LU Lin. Investigation on partial discharge characteristic gas in XLPE cable intermediate joint and detection technology of light-level[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 130-136.
- [5] 李欢, 李建英, 欧阳本红. 热老化对 XLPE 电缆绝缘空间电荷分布特性的影响研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(11): 27-33.  
LI Huan, LI Jianying, OUYANG Benhong. Effect of thermal aging on space charge distribution of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2017, 50(11): 27-33.

- [6] 谢月,刘刚,李歆蔚,等. 电缆运行老化过程对其空间电荷行为的影响[J]. 高电压技术,2017,43(5):1693-1699.  
XIE Yue,LIU Gang,LI Xinwei, et al. Influence of cable operation-aging on its space charge behavior[J]. High Voltage Engineering,2017,43(5):1693-1699.
- [7] 付一峰,陈俊岐,赵洪,等. 交联聚乙烯接枝氯乙酸烯丙酯直流介电性能[J]. 电工技术学报,2018,33(18):4372-4381.  
FU Yifeng,CHEN Junqi,ZHAO Hong, et al. DC dielectric properties of crosslinking polyethylene grafted chloroacetic acid allyl ester[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(18):4372-4381.
- [8] LI J Y,ZHOU F S,MIN D M, et al. The energy distribution of trapped charges in polymers based on isothermal surface potential decay model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(3):1723-1732.
- [9] TEYSSÉDRE G,LAURENT C,MONTANARI G C, et al. From LDPE to XLPE; investigating the change of electrical properties, part II: luminescence [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(3):447-454.
- [10] WANG V,WU J,YI Y, et al. Nanostructures and space charge characteristics of MgO/LDPE nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(4):2390-2399.
- [11] YOSHIOKA H,KADOWAKI K,KITANI I. Transient phenomena of current and field distortion due to dynamics of packet-like charges in LDPE films[J]. Electrical Engineering in Japan,2012,179(4):10-17.
- [12] 欧阳本红,赵健康,周福升,等. 基于等温表面电位衰减法的直流电缆用低密度聚乙烯和交联聚乙烯陷阱电荷分布特性[J]. 高电压技术,2015,41(8):2689-2696.  
OUYANG Benhong,ZHAO Jiankang,ZHOU Fusheng, et al. Characteristics of trapped charge distribution in LDPE and XLPE used in DC cables based on isothermal surface potential decay method [J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2689-2696.
- [13] XIE Y,LIU G,ZHAO Y, et al. Rejuvenation of retired power cables by heat treatment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(2):668-670.
- [14] PAN L,YANG X,XIAO G, et al. Thermal and mechanical properties analysis for EHV XLPE cables with different operating years[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE,2013:47-51.
- [15] ZHU W,ZHAO Y,HAN Z, et al. Thermal effect of different laying modes on cross-linked polyethylene (XLPE) insulation and a new estimation on cable ampacity[J]. Energies,2019,12(15):2994-3016.
- [16] ZHAO Y,HAN Z,XIE Y, et al. Correlation between thermal parameters and morphology of cross-linked polyethylene [J]. IEEE Access,2020(8):19726-19736.
- [17] SUGIMOTOS,FUJIMURAY,NAGAHARAS, et al. Analysis of ion in water tree by micro-FTIR, and evaluation of harmfulness of water tree[J]. IEEE Transactions on Power and Energy,2011,131(1):52-57.
- [18] OUYANG B H,LI H,ZHANG X, et al. The role of micro-structure changes on space charge distribution of XLPE during thermo-oxidative ageing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(6):3849-3859.
- [19] HE K,CHEN N F,WANG C J, et al. Method for determining crystal grain size by X-ray diffraction[J]. Crystal Research & Technology,2018,53(2):1700157.
- [20] 刘刚,谢月,杨婉琪,等. 高压退役电缆空间电荷特[J]. 高电压技术,2016,42(11):3607-3615.  
LIU Gang,XIE Yue,YANG Wanqi, et al. Space charge characteristics of high voltage retired cable[J]. High Voltage Engineering,2016,42(11):3607-3615.
- [21] 欧阳本红,赵健康,陈铮铮,等. 老化方式对交流交联聚乙烯电缆空间电荷分布的影响[J]. 高电压技术,2012,38(8):2123-2128.  
OUYANG Benhong,ZHAO Jiankang,CHEN Zhengzheng, et al. Influence of aging mode on space chargedistribution of AC XLPE cables [J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):2123-2128.
- [22] XU Y,LUO P,XU M, et al. Investigation on insulation material morphological structure of 110 and 220 kV XLPE retired cables for reusing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(4):1687-1696.
- [23] 于是乎,余欣,聂章翔. 110 kV 电缆终端缺陷导致 XLPE 绝缘变色的性能分析[J]. 广东电力,2019,32(12):81-88.  
YU Shihu,YU Xin,NIE Zhangxiang. Performance analysis of XLPE discoloration caused by 110 kV cable terminal defects [J]. Guangdong Electric Power,2019,32(12):81-88.
- [24] 邱伟豪,阳林,郝艳捧,等. XLPE 电缆内置分布式光纤的温度监测试验[J]. 广东电力,2018,31(8):175-181.  
QIU Weihao,YANG Lin,HAO Yanpeng, et al. Temperature monitoring experiment for XLPE built-in distributed optical fiber[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(8):175-181.
- [25] 王瓊珺,周平,韩宇泽. 基于耦合场计算的击穿电弧对电缆温度及应力影响研究[J]. 供用电,2019,36(7):83-90.  
WANG Fujue,ZHOU Ping,HAN Yuze. Study on influence of insulation breakdown arc on thermal-stress characteristics of cable joints based on coupled field calculation[J]. Distribution & Utilization,2019,36(7):83-90.

#### 作者简介:



赵一帆

赵一帆(1994),男,硕士在读,研究方向为高电压绝缘材料(E-mail:18202729711@163.com);

刘刚(1969),男,硕士在读,研究方向为智能高电压电网、高电压绝缘材料;

谢月(1990),男,博士在读,研究方向为高电压绝缘材料。

## Monthly electricity consumption forecasting method based on elastic network model

HU Chunfeng, TIAN Shiming, SU Hang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192)

**Abstract:** Since the existing monthly electricity consumption forecast has fewer influencing factors, and it is unable to comprehensively reflect the factors associated with strong electricity consumption. An elastic network electricity consumption forecasting model for high-dimensional data variable screening and high-precision prediction is proposed. The volume prediction model analyzes the monthly data of 340 variables and 96 time points for electricity consumption, economy, transportation, and meteorology. By using elastic network to screening for high-dimensional variables, and Granger causality analysis to find out the dependence of electricity consumption data and other data, the monthly electricity consumption of the whole society in a year is predicted. And the mean absolute percentage error of the prediction results is 3.07%. Compared with the VAR model, BP model and Lasso, the feasibility and effectiveness of the method are verified.

**Keywords:** elastic network; least absolute shrinkage and selection operator (Lasso); Granger causality; factor screening; electricity consumption forecasting

(编辑 陈静)

(上接第 157 页)

## Space charge behavior of retired high-voltage XLPE cables

ZHAO Yifeng<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, XIE Yue<sup>1</sup>, HUANG Jiasheng<sup>2</sup>, ZHU Ningxi<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** Two retired high-voltage cross-linked cables with service years of 16 and 32 are chosen to conduct a 180-day prequalification test to research the diversity of space charge behavior and evaluate the reliability of reusing these cables for practical operation. Space charge behavior in cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of the samples before and after aging test is tested by the pulse electro acoustic (PEA) method, and space charge characteristics of the samples is investigated. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) experiments are used to observe changes on microstructure and aggregation structure of each sample. Experiments reveal the potential relationship between the structural changes and space charge behavior, including the characteristic of migration, accumulation and dissipation of space charge. The results show that the impurities causing severe accumulation of space charge inside the samples of the cable with 16 service years. After the accelerated aging test, reduction of impurities and annealing effect decreases the accumulation of space charge and speeds up dissipation process. On the contrary, the accumulation and dissipation of space charge inside the cable with 32 service years is moderate. After the accelerated aging test, the oxidative degradation and destruction of crystalline structure result in aggravation of space charge accumulation and more moderate dissipation process of space charge.

**Keywords:** cable; cross-linked polyethylene (XLPE); space charge; Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR); X-ray diffraction (XRD); trap

(编辑 吴楠)