

不同老化程度 XLPE/SIR 复合绝缘的电荷输运特性

王雅妮, 齐寅山, 王玉宁, 李煜晨, 杨兴武, 刘 春

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘 要: 交联聚乙烯(XLPE)与硅橡胶(SIR)是目前常用的高压直流电缆本体绝缘与附件增强绝缘材料,二者构成的复合绝缘在长期热应力作用下会发生老化。为探究不同老化程度 XLPE/SIR 复合绝缘的电荷输运特性,本研究制备了不同老化程度的 XLPE/SIR 试样,对其进行空间电荷与等温松弛电流联合测量。同时结合傅里叶红外光谱(FTIR)测试与量子化学计算(QCC),构建了老化前后 XLPE/SIR 体系的能带模型,基于此对 XLPE/SIR 的电荷输运行为进行探讨。结果表明:XLPE/SIR 中间界面始终积聚负电荷,且电荷量随老化时间延长而增多。阴极与阳极附近始终存在同极性电荷积聚,且分布范围随老化时间延长而减小。材料发生老化后,SIR 中的电荷陷阱深度变化不大,而 XLPE 中出现了更深的电荷陷阱。未老化 XLPE/SIR 中间界面处的负电荷积聚主要由 Maxwell-Wagner 极化导致,而老化后试样界面负电荷积聚增多主要与 SIR 中引入了电子浅陷阱以及 XLPE 中引入了电子深陷阱有关。

关键词: 复合绝缘;热老化;电荷输运;量子化学计算;能带模型

Charge transport characteristics of XLPE/SIR composite insulation under different ageing degree

WANG Yani, QI Yinshan, WANG Yuning, LI Yuchen, YANG Xingwu, LIU Chun

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Cross-linked polyethylene (XLPE) and silicone rubber (SIR) are commonly used insulation materials for high-voltage direct current cables and reinforced insulation materials for accessories at present. The composite insulation composed of the two will age under long-term thermal stress. To investigate the charge transport characteristics of XLPE/SIR composite insulation with different ageing degrees, XLPE/SIR samples with different ageing degrees were prepared and subjected to simultaneous measurement of space charge and isothermal relaxation current. At the same time, by combining Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) testing and quantum chemical computation (QCC), an energy band model of XLPE/SIR system before and after ageing was constructed, and the charge transport behavior of XLPE/SIR was explored. The results show that negative charges always accumulate at the XLPE/SIR interface, and the amount of charge increases with ageing time. There are always homopolar charges accumulating near the cathode and anode, and the distribution range decreases with ageing time. After ageing, the depth of charge traps in SIR does not change much, while deeper charge traps appear in XLPE. The negative charge accumulation at the interface between the unaged XLPE/SIR is mainly caused by Maxwell-Wagner polarization, while the increase of negative charge accumulation at the interface of the aged samples is mainly related to the introduction of shallow electron traps in SIR and deep electron traps in XLPE.

Key words: composite insulation; thermal ageing; charge transport; Quantum chemical computation; energy band models

0 引言

高压直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)由于具有输送容量大、输送距离长、线路损耗小等优势而被广泛应用于远距离输电、海底输电、新能源接入等关键领域, HVDC 电缆及其附件作为 HVDC 输电的重要载体,其绝缘性能的好坏对于直流输电可靠性具有重要影响^[1-2]。目前,交

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207025)。

联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)和硅橡胶(silicon rubber, SIR)由于具有优异的绝缘性能,分别被广泛用作 HVDC 电缆的主绝缘和附件增强绝缘^[3-5]。然而,在直流电场作用下, XLPE 与 SIR 内部极易积聚空间电荷,造成电场畸变,这一问题一直制约着 HVDC 电缆电压等级的进一步提升^[6-7]。在实际运行工况下,电缆本体绝缘 XLPE 及附件增强绝缘 SIR 不仅承受着直流电应力的作用,同时因

电缆线芯通流发热,还承受着热应力的作用。已有研究表明,长期热应力影响会促进绝缘材料分子发生氧化反应,导致分子链断裂形成新的基团与自由基,进而向材料内部引入更多电荷陷阱,在一定程度上加剧绝缘材料的空间电荷积聚问题^[8-10]。

目前,国内外学者针对 XLPE 热老化过程中的理化特性转变及其对材料绝缘性能的影响做了大量研究^[11-17],针对热老化对 SIR 的理化特性及绝缘性能的影响也有少量报道^[18-20]。CHEN X R 等^[11]研究了热老化对 320 kV 直流 XLPE 电缆绝缘空间电荷特性、直流电导率和陷阱分布的影响,发现热老化会使样品中的陷阱密度增加,空间电荷积累增多。WANG S C 等^[12]研究了热老化对不同交联剂含量 XLPE 中的空间电荷积累和耗散的影响,发现热老化会同时增加 XLPE 电荷深陷阱和浅陷阱的密度。严玉婷等^[20]针对 SIR 进行了加速热老化实验,发现在老化初期,SIR 分子链段进一步交联,随着老化程度加深,SIR 交联结构逐渐被破坏,交联密度减小,对电荷的束缚能力减弱,导致电荷迁移率增大,电气强度减小。然而,目前尚未见热老化对 XLPE/SIR 复合绝缘电荷输运特性影响的报道。

近年来,基于密度泛函理论(density functional theory, DFT)的量子化学计算(quantum chemical computation, QCC)被广泛应用于绝缘材料领域^[21]。通过 QCC 可得到材料的能带结构、最高占据分子轨道-最低未占有分子轨道(HOMO-LUMO)能级及其分布位置,进一步分析可得到材料的电子/空穴陷阱深度,可基于此对材料的电荷输运行为进行解释。

本文制备了不同老化程度的 XLPE/SIR 复合绝缘试样,对其进行空间电荷与等温松弛电流联合测量,获得其电荷输运特性。同时对不同老化程度的 XLPE 与 SIR 进行傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试,基于 FTIR 测试结果,构建老化前后 XLPE 与 SIR 的分子模型,并进行量子化学计算。基于 QCC 结果构建老化前后 XLPE/SIR 复合绝缘接触能带模型,在此基础上对不同老化程度的 XLPE/SIR 复合绝缘的电荷输运特性进行探讨。

1 实验

1.1 试样制备及老化方法

XLPE 试样选用某商用超净 XLPE 粒料制备。首先将粒料在 10^{-2} Pa、70℃ 下干燥 24 h,然后使用转矩流变仪在 120℃ 下对粒料进行混炼,之后用平板

硫化机将其逐渐加热至 180℃,加压至 20 MPa,热压 15 min 使其交联,最后自然冷却至室温,获得厚度为 200 μm、边长为 10 cm 的 XLPE 试样。

SIR 试样选用某商用双组分加成型 SIR 制备。首先将 A、B 两种成分以 1:1 的质量比混合并充分搅拌,然后用真空烘箱在室温下对其脱气 20 min,之后用平板硫化机在 20 MPa、140℃ 下热压 15 min,随后升温至 180℃ 并保持 2 h,最后自然冷却至室温,得到厚度为 200 μm、边长为 10 cm 的 SIR 试样。

将制得的 XLPE 与 SIR 试样置于恒温鼓风烘箱中,在 110℃ 下分别老化 0、6、12 d。将相同老化天数的 XLPE 和 SIR 紧密贴合在一起,形成用于进行空间电荷与等温松弛电流测量所需的 XLPE/SIR 复合绝缘试样。

1.2 FTIR 测试

FTIR 测试是进行聚合物官能团定性和结构分析的常用方法。采用美国 THERMO FISHER 公司生产的 Nicolet 6700 型红外光谱仪对不同老化时间的 XLPE 和 SIR 试样进行 FTIR 测试,扫描温度为室温,扫描波数范围为 500~4 000 cm^{-1} 。

1.3 空间电荷与等温松弛电流联合测量

空间电荷与等温松弛电流联合测量系统如图 1 所示。测试时,空间电荷测量和电流测量交替进行。测量空间电荷时,单刀双置开关接地,电荷信号经压电传感器和宽频放大器传输到示波器;测量电流时,单刀双置开关接电流表,电流可在无干扰的情况下被完整测量。测试数据最终由计算机记录。

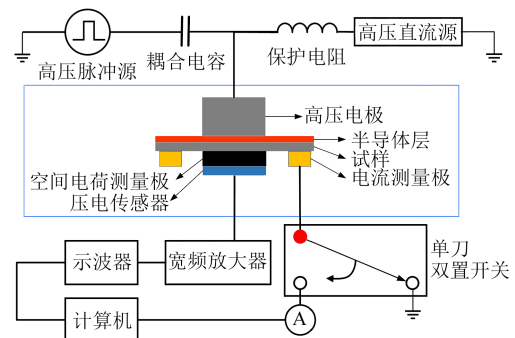


图1 空间电荷与等温松弛电流联合测量系统

Fig.1 Simultaneous measurement system of space charge and relaxation current

在室温下,对不同老化程度的 XLPE/SIR 复合绝缘试样进行空间电荷与等温松弛电流联合测量,测试时将 XLPE 侧接高压,SIR 侧接地。首先将试样

在 10 kV/mm 电场下极化 600 s, 然后提高电场至 20 kV/mm 后极化 1 800 s, 最后进行短路 1 800 s, 记录整个测试过程中的空间电荷与电流信号。

1.4 量子化学计算(QCC)

对热老化前后的 XLPE 与 SIR 分子进行建模, 使用量子化学计算软件基于密度泛函理论对其进行计算, 设置 B3LYP 为交换相关泛函, 6-31G(d) 为基组。计算后得到 XLPE 与 SIR 的最高占据分子轨道、最低未占据分子轨道、费米能级和带隙等参数。

2 结果与分析

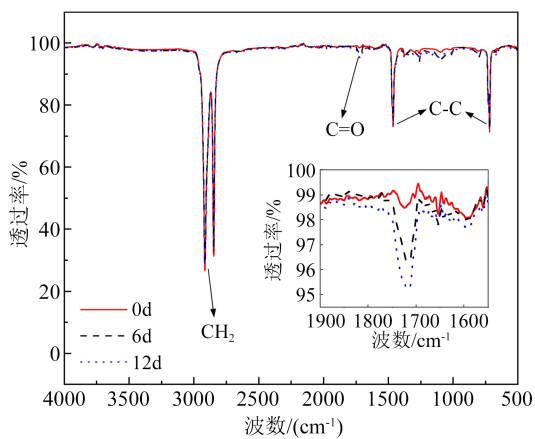
2.1 FTIR 测试结果

图 2 为 XLPE 和 SIR 的 FTIR 测试结果。由图 2 (a) 可知, 老化前后的 XLPE 在波数为 2 915、2 847、1 463、729 cm^{-1} 处均出现了特征吸收峰, 分别对应亚甲基的不对称伸缩振动、亚甲基的对称伸缩振动、碳-碳单键的骨架振动、碳-碳单键的伸缩振动。老

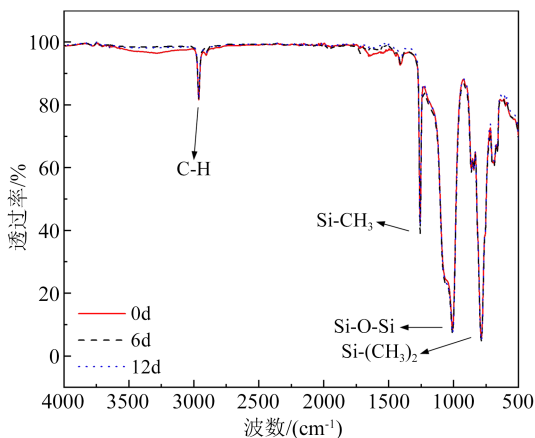
化后的 XLPE 试样在 1 720 cm^{-1} 处出现了明显的特征吸收峰, 对应的官能团为羰基, 且老化时间越长特征峰强度越大, 说明 XLPE 老化过程中产生羰基, 且其含量随老化时间延长而增加。由图 2(b) 可知, SIR 在老化后并未出现新的特征吸收峰, 这表明 SIR 在当前老化条件下没有产生新的官能团。

2.2 空间电荷测量结果

图 3 所示为不同老化时间下的 XLPE/SIR 的空间电荷分布。从图 3 可以看出, 3 组试样在极化过程中均存在空间电荷积累, 且电荷积累量均随外施电场的升高而增大。中间界面处都存在不同程度的负电荷积累, 老化后试样的界面电荷量要明显高于未老化试样, 且界面电荷量随着老化程度的增加而增加。除此之外, 在靠近电极附近的 XLPE 和 SIR 内部存在同极性电荷积累, 即在 XLPE 中靠近阳极侧存在正电荷积累, 在 SIR 中靠近阴极侧存在负电荷积累, 同时发现未老化试样中的同极性电荷分布

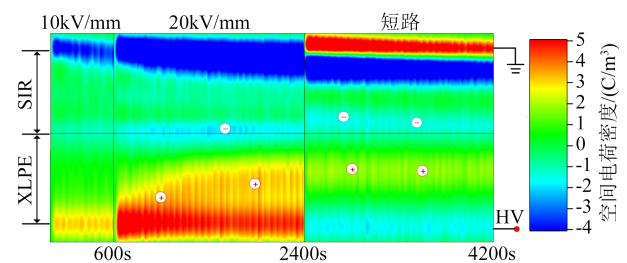


(a) XLPE

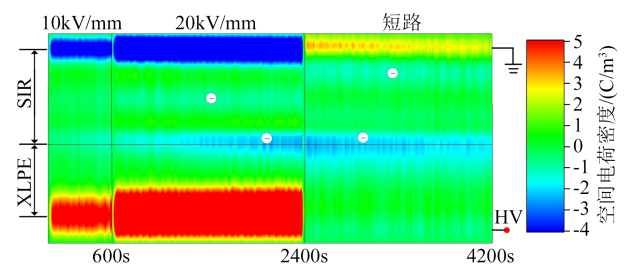


(b) SIR

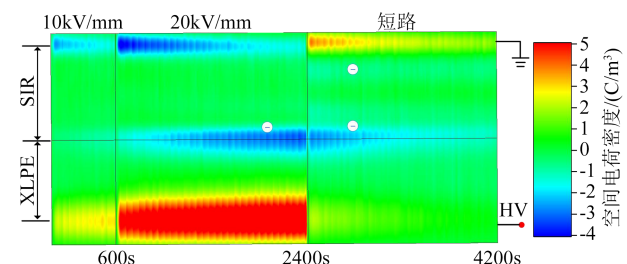
图2 XLPE与SIR的FTIR测试结果
Fig.2 FTIR test results of XLPE and SIR



(a) 0 d



(b) 6 d



(c) 12 d

图3 不同老化时间下 XLPE/SIR 空间电荷分布
Fig.3 Space charge distribution of XLPE/SIR with different ageing times

范围最广,随着试样老化程度加重,同极性电荷分布范围逐渐缩小。在去极化过程中,试样内部积累的电荷表现出不同程度的衰减。

为进一步反映去极化阶段电荷的衰减情况,图4给出了不同老化时间下 XLPE/SIR 在 20 kV/mm 极

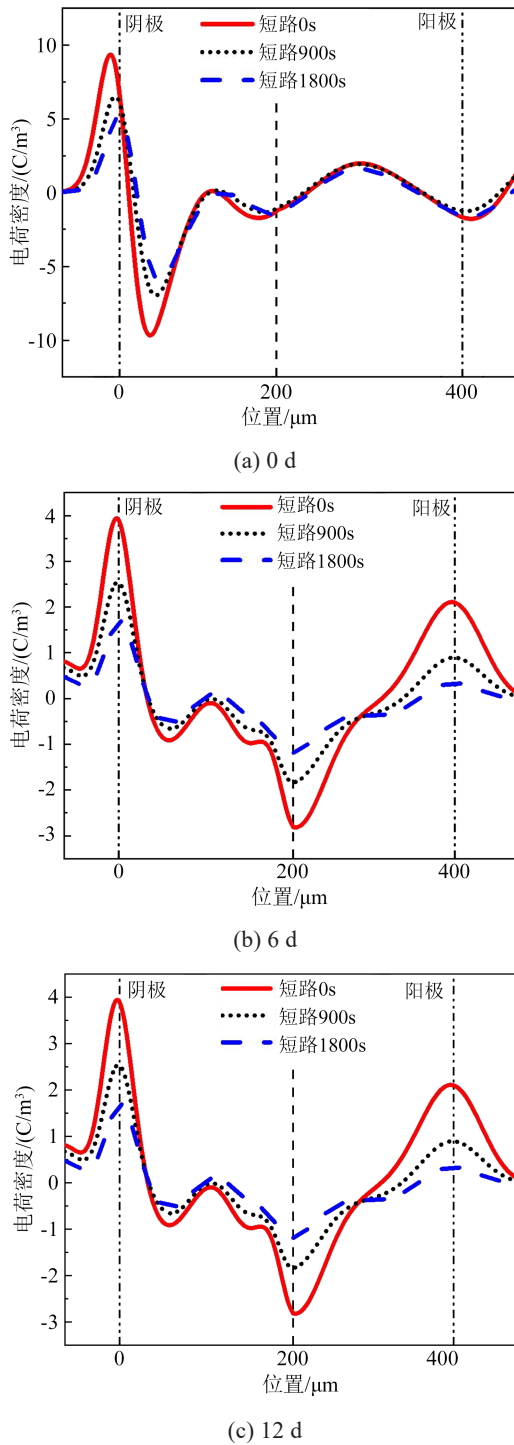


图4 不同老化时间下 XLPE/SIR 短路过程中的空间电荷分布

Fig.4 Space charge distribution during short-circuiting of XLPE/SIR with different ageing time

化后短路过程中的空间电荷分布,0 μm 处为阴极,400 μm 处为阳极,200 μm 处为 XLPE 与 SIR 界面。由图4可知,在短路0 s时未老化试样界面处积累的电荷量很少,电荷密度峰值仅为 1.29 C/m^3 ,老化6 d和12 d试样界面处积累的电荷明显增多,电荷密度峰值分别为 2.08 C/m^3 和 3.36 C/m^3 。当去极化阶段结束(短路1800 s)时,相较于去极化阶段最初时刻(短路0 s),图4(a)中未老化试样界面处在短路过程中的界面电荷密度峰值下降幅度很小,而图4(b)~(c)中老化6 d和12 d试样的界面电荷密度峰值下降幅度较大,其中老化12 d试样的界面电荷密度峰值下降幅度最大,意味着其界面电荷衰减速率最快。

2.3 复合电导率计算结果

基于联合测量记录的电流值得到不同老化时间的 XLPE/SIR 在 10 kV/mm 与 20 kV/mm 下的稳态电流密度,并进一步计算得到相应的复合电导率,具体结果如图5所示。由图5可知,未老化和老化6 d试样的复合电导率相差不大,而老化12 d试样的复合电导率明显增大。

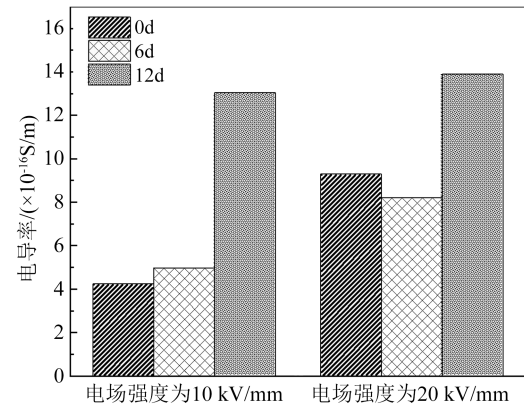


图5 不同外施电场下 XLPE/SIR 的电导率
Fig.5 Conductivity of XLPE/SIR under different electric fields

2.4 量子化学计算结果

2.4.1 老化前后 SIR 的能级分布

SIR 分子建模选择甲基乙烯基硅橡胶。未老化 SIR 分子模型由交替排列的 Si 原子和 O 原子、甲基 ($-\text{CH}_3$),以及分子链两端两个乙烯基 ($-\text{CH}=\text{CH}_2$) 组成,分子式为 $\text{C}_{32}\text{H}_{84}\text{Si}_{12}\text{O}_{10}$ 。通过 FTIR 测试发现,老化6 d和12 d的 SIR 并未产生新的官能团,意味着 SIR 老化并不严重,同时有学者研究发现 SIR 在老化初期会发生交联反应^[20]。因此,本研究将老化后的 SIR 分子设置为侧链上甲基被氧化并与相邻主链发生交联反应,交联点设置为两个,如图6所示。

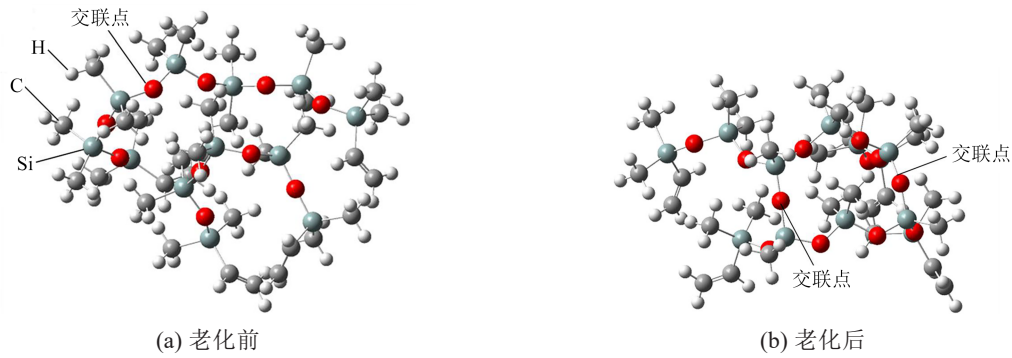


图6 SIR分子模型

Fig.6 Molecular modeling of SIR

经过量子化学计算得到老化前后SIR分子的电子能级分布,如图7所示。由图7可知,未老化SIR分子的LUMO能级 E_{LUMO} 为 -0.23 eV ,HOMO能级 E_{HOMO} 为 -6.76 eV ,导带底部能级 E_c 为 1.42 eV ,价带顶部能级 E_v 为 -7.07 eV 。老化后SIR分子的 E_{LUMO} 为 -0.28 eV , E_{HOMO} 为 -6.80 eV , E_c 为 1.38 eV , E_v 为 -7.01 eV 。计算费米能级 E_f 、带隙 ϕ_g 、电子亲和能 χ 由式(1)~(3)确定。具体计算结果如表1所示。

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (1)$$

$$\phi_g = E_c - E_v \quad (2)$$

$$\chi = E_{\text{VL}} - E_c \quad (3)$$

式(3)中, E_{VL} 为真空能级,取值 0 eV 。

由图7可知,未老化SIR的LUMO能级和导带底部能级之间存在离散的局域态能级,这些能级和

LUMO能级是电子陷阱,深度为 $0.45\sim 1.65\text{ eV}$;HOMO能级和价带顶部之间也存在离散的局域态能级,这些能级和HOMO能级是空穴陷阱,深度为 $0.11\sim 0.43\text{ eV}$ 。上述结果表明,未老化SIR分子的电子陷阱主要以深陷阱为主,空穴陷阱以浅陷阱为主,这意味着SIR中的正电荷更容易参与电荷传导,而由于电子深陷阱的作用负电荷在SIR中移动更为困难。老化后SIR的电子陷阱深度为 $0.13\sim 1.66\text{ eV}$,空穴陷阱的深度为 $0.21\sim 0.52\text{ eV}$ 。由此可见,老化后的SIR引入了更深的空穴陷阱和更浅的电子陷阱,但总体而言电荷陷阱深度变化很小。此外,未老化SIR分子的LUMO和HOMO主要分布在链两端的乙烯基及其相邻基团附近,而老化后SIR分子的LUMO和HOMO分布更集中于链端的乙烯基处。因此认为碳碳双键是SIR分子形成电子陷阱和

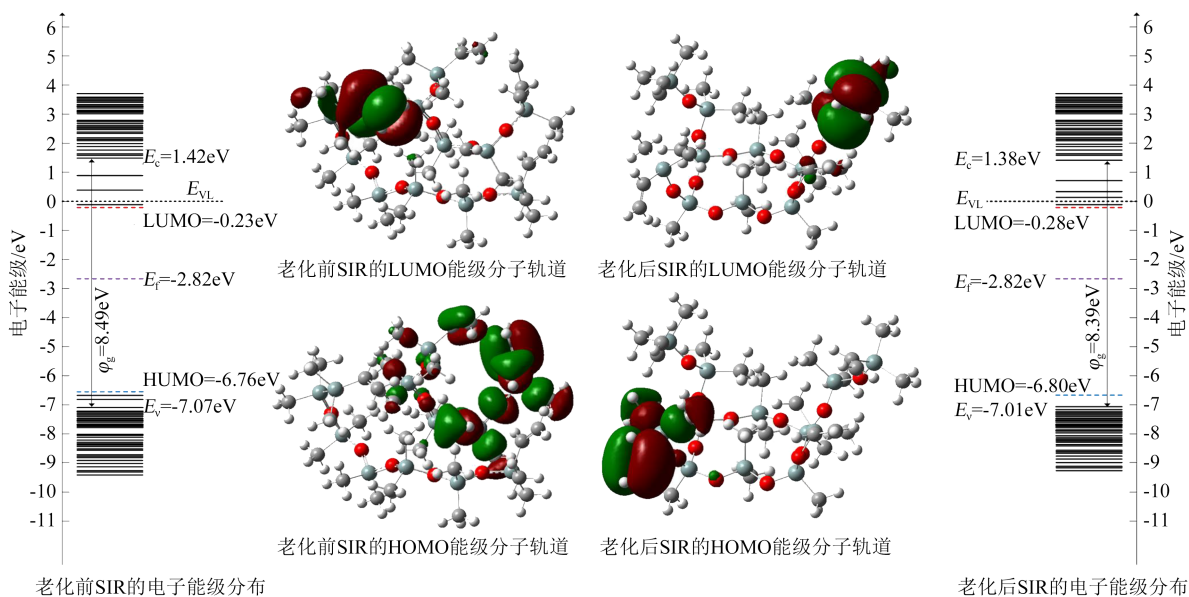


图7 老化前后SIR电子能级分布图

Fig.7 Electronic energy level distribution of SIR before and after ageing

表1 SIR老化前后的电子能级参数
Table 1 Electronic energy level parameters of SIR before and after ageing

参数	未老化	老化后
E_{LUMO}	-0.23	-0.28
E_{HOMO}	-6.76	-6.80
E_c	1.42	1.38
E_v	-7.07	-7.01
E_f	-2.82	-2.81
ϕ_g	8.49	8.39
χ	-1.42	-1.38

空穴陷阱的化学位置。

2.4.2 老化前后 XLPE 的能级分布

未老化的 XLPE 分子模型由 3 个 $-\text{[CH}_2\text{-CH}_2\text{]}_n\text{-}$ 长链和链间 3 个交联点组成。基于 FTIR 测试结果，老化后的 XLPE 分子模型在未老化 XLPE 分子的基础上，设置侧链被氧化形成 3 个羰基，如图 8 所示。

通过量子化学计算得到老化前后 XLPE 分子电子能级分布如图 9 所示，具体参数和计算结果如表 2 所示。

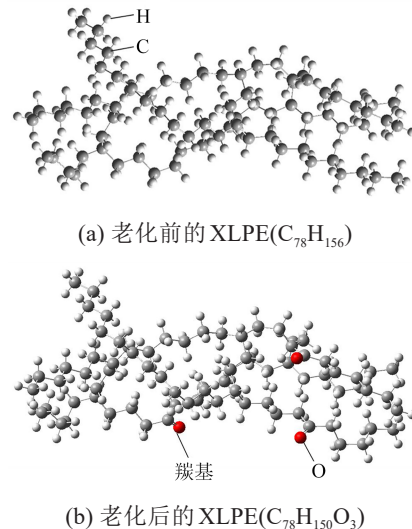


图8 XLPE老化前后的分子建模

Fig.8 Molecular modeling of XLPE before and after ageing

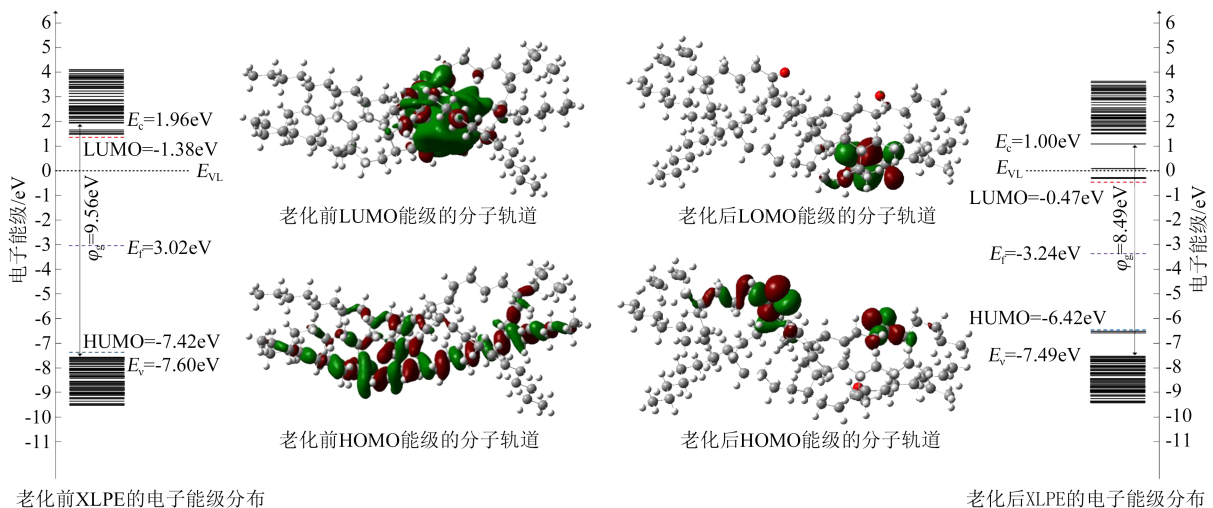


图9 老化前后 XLPE 电子能级分布图

Fig.9 Electronic energy level distribution of XLPE before and after ageing

未老化 XLPE 的电子陷阱深度为 0.17~0.58 eV，空穴陷阱深度为 0.18 eV，可见其电子陷阱和空穴陷阱都为浅陷阱。老化后 XLPE 的电子陷阱深度为 1.23~1.47 eV，空穴陷阱深度为 0.95~1.09 eV，表明老化后 XLPE 分子引入了更深的电子陷阱和空穴陷阱。此外，由图 9 可知，未老化 XLPE 分子的 LUMO 主要分布在交联点附近，而 HOMO 则沿分子链分布，因此推测分子链间形成新的化学键交联会形成电子浅陷阱，而链间相互作用会形成空穴浅陷阱。老化后 XLPE 分子的 LUMO 和 HOMO 分布在

羰基附近且分布更为集中，因此可认为碳氧双键是形成深陷阱的主要原因。

3 分析及讨论

本节基于上文 QCC 结果构建了老化前后 XLPE/SIR 与 Al 和 SC 电极在 20 kV/mm 电场下的能带模型，如图 10 所示。由图 10(a)可知，SIR 的电子陷阱主要为深陷阱 (0.45~1.65 eV)，XLPE 中空穴陷阱主要为浅陷阱 (0.18 eV)，这意味着空穴在 XLPE 中的迁移相较于电子在 SIR 中的迁移更为容

表2 XLPE老化前后的电子能级参数
Table 2 Electronic energy level parameters of XLPE before and after ageing

参数	未老化 XLPE	老化后 XLPE
E_{LUMO}	1.38	-0.47
E_{HOMO}	-7.42	-6.42
E_c	1.96	1.00
E_v	-7.60	-7.49
E_f	-3.02	-3.24
ϕ_g	9.56	8.49
χ	-1.96	-1.00

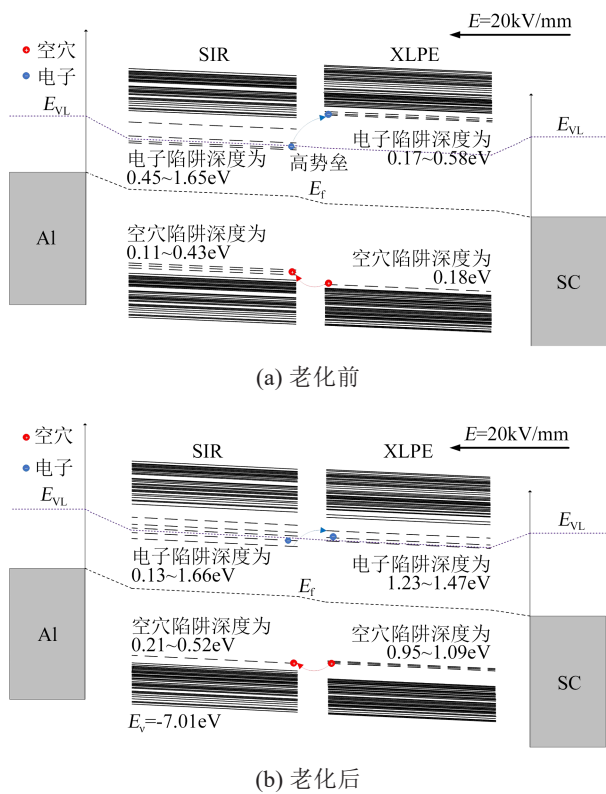


图10 20 kV/mm下老化前后 XLPE/SIR 复合绝缘的能带模型

Fig.10 Energy band modeling of XLPE/SIR composite insulation before and after ageing at 20 kV/mm

易。这解释了为什么在未老化 XLPE/SIR 中, XLPE 靠近阳极时附近积累了大量分布范围较广的正电荷, 而 SIR 靠近阴极侧时尽管也有负电荷积累, 但分布范围较窄。此时 XLPE/SIR 中间界面电荷的形成主要受 Maxwell-Wagner 极化影响^[23-25]。Maxwell-Wagner 界面极化描述了直流电场作用下, 双层介质界面电荷的极性和密度受两种介质介电常数和电导率的作用。图 11 为 XLPE/SIR 双层介质的 Maxwell-Wagner 极化示意图, 左侧为 SIR, 右侧为

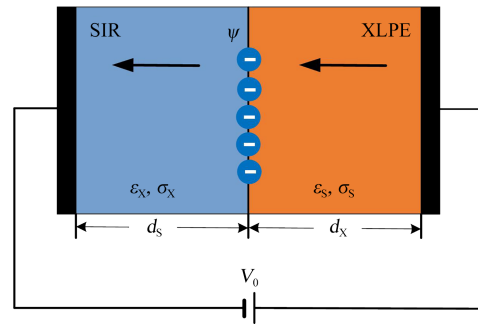


图 11 Maxwell-Wagner 极化示意图

Fig.11 Schematic diagram of Maxwell-Wagner polarization

XLPE, 界面电荷的极性和密度如式(4)计算可得。

$$\begin{cases} \psi(t) = \frac{\epsilon_s \sigma_x - \epsilon_x \sigma_s}{\sigma_x d_s + \sigma_s d_x} V_0 (1 - e^{-t/\tau}) \\ \tau = \frac{\epsilon_s d_x + \epsilon_x d_s}{\sigma_s d_x + \sigma_x d_s} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: V_0 为外加电压; ψ 为界面处的电荷密度; d_x 和 d_s 分别为 XLPE 和 SIR 的厚度; ϵ_x 、 ϵ_s 分别为 XLPE 和 SIR 的介电常数; σ_x 、 σ_s 分别为 XLPE 和 SIR 的电导率。界面电荷的极性由 XLPE 与 SIR 的介电常数和电导率决定, 本文中, ϵ_x 取值为 2.3, ϵ_s 为 2.7, 电导率取电场强度为 20 kV/mm 下的计算结果, 得到 σ_x 为 1.7×10^{-15} S/m, σ_s 为 1.26×10^{-14} S/m。经计算可得, XLPE/SIR 界面在极化 1 800 s 时的界面电荷为 -1.16 C/m³, 这与空间电荷的测量结果接近。

图 10(b) 为老化后 XLPE/SIR 的能带模型, 由前文 QCC 结果可知, 老化后 XLPE 中的空穴陷阱深度有了显著增加, 意味着空穴向 XLPE 内部的迁移变得困难, 因此图 3 中观察到老化后试样的阳极附近空穴分布范围有所减小。与此同时, 老化后的 SIR 中引入了电子浅陷阱, 这有助于电子在 SIR 内部的迁移, 降低了注入电子迁移至中间界面的难度。同时, 老化后的 XLPE 中电子陷阱的深度显著增加, 这对电子的输运产生了两方面的影响: 一方面, 此时 XLPE 中电子陷阱能级与 SIR 中电子陷阱能级的差距缩小, 使界面对电子由 SIR 向 XLPE 中转移的阻碍作用减弱, 可能导致 SIR 中迁移至界面的电子更易进入 XLPE 中; 另一方面, 进入 XLPE 中的电子容易被新产生的深陷阱捕获而难以脱陷, 从而在界面处形成负电荷积聚, 以上两方面因素共同导致 XLPE/SIR 界面处积聚的负电荷有所增加, 因此图 3 中观察到老化 6 d 和老化 12 d 试样界面处的负电荷量比未老化试样更大。

此外,由 QCC 结果可知,XLPE 中引入的电子深陷阱主要分布在羰基附近,而由 FTIR 可知,老化时间越长,XLPE 中羰基含量越多,因此可以推测,老化 12 d XLPE 中的电子深陷阱比老化 6 d 中的多,老化 12 d 的 XLPE/SIR 界面处积聚的负电荷量更大,这与图 3 中观察到的现象一致。

基于前文 2.3 节计算得到的 XLPE/SIR 复合电导率可以发现,未老化试样和老化 6 d 试样的电导率相对较小,而老化 12 d 试样的复合电导率显著增大。推测这是因为老化 12 d 的 SIR 试样引入的电子浅陷阱降低了 XLPE/SIR 的界面势垒,注入电子更容易穿越中间界面,从而在宏观上表现出更高的复合电导率。

4 结论

本文对不同老化程度的 XLPE/SIR 进行了空间电荷和松弛电流的联合测试,通过量子化学计算得到老化前后 XLPE 与 SIR 的能带结构,并基于此构建了老化前后 XLPE/SIR 体系的能带模型,在此基础上讨论了不同老化程度 XLPE/SIR 的电荷输运特性。主要结论如下:

(1)在本文测试条件下,XLPE/SIR 的中间界面处始终存在负电荷积聚,且电荷量随老化时间延长而逐渐增多。阴极与阳极附近始终存在同极性电荷积聚,且分布范围随老化时间延长逐渐减小。

(2)当材料发生老化后,SIR 中的电子及空穴陷阱深度变化不大,而 XLPE 中引入了更深的空穴陷阱和电子陷阱。碳碳双键是 SIR 分子形成电子陷阱和空穴陷阱的主要化学位置,而老化过程中引入的碳氧双键是 XLPE 分子形成深陷阱的主要化学位置。

(3)未老化 XLPE/SIR 中间界面处的负电荷积聚主要由 Maxwell-Wagner 极化导致,而老化后试样界面负电荷积聚增多主要与 SIR 中的电子浅陷阱以及 XLPE 中的电子深陷阱有关。

参考文献 References

- [1] KIM C, JIN Z J, HUANG X Y, et al. Investigation on water treeing behaviors of thermally aged XLPE cable insulation[J]. *Polymer degradation and stability*,2007,92(4):537-544.
- [2] BAMJI S S, BULINSKI A T, DENSLEY R J, et al. Degradation mechanism at XLPE/semicon interface subjected to high electrical stress[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*,1991,26(2):278-284.
- [3] YANG K, REN Y R, WU K N, et al. Enhancing electrical properties of impact polypropylene copolymer for eco-friendly power cable insulation by manipulating the multiphase structure through molten-state annealing[J]. *Composites Science and Technology*,2022,223:109422.
- [4] LI G C, ZHOU X G, LI X J, et al. DC breakdown characteristics of XLPE/BNNS nanocomposites considering BN nanosheet concentration, space charge and temperature[J]. *High Voltage*,2020,5(3):280-286.
- [5] SU J G, DU B X, LI J, et al. Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges[J]. *High Voltage*,2020,5(4):353-364.
- [6] 费益军,张云霄,周远翔. 硅橡胶热老化特性及其对电缆附件运行可靠性的影响[J]. *电工电能新技术*,2014,33(12):30-34.
- [7] FEI Y J, ZHANG Y X, ZHOU Y X. Thermal ageing characteristics of silicone rubber and its effect on the operational reliability of cable accessories[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*,2014,33(12):30-34.
- [8] SEGUCHI T, TAMURA K, KUDOH H, et al. Degradation of cable insulation material by accelerated thermal radiation combined ageing[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2015,22(6):3197-3206.
- [9] LIU Y P, LIU H C, YU L C, et al. Effect of thermal stress on the space charge distribution of 160 kV HVDC cable insulation material[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2017,24(3):1355-1364.
- [10] MONTANARI G C, MAZZANTI G, PALMIERI F, et al. Space-charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2001,34(18):2902.
- [11] YUAN C, XIE C Z, LI L C, et al. Space charge behavior in silicone rubber from in-service aged HVDC composite insulators [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2019,26(3):843-850.
- [12] CHEN X R, DAI C, YU L W, et al. Effect of thermal ageing on charge dynamics and material properties of 320 kV HVDC XLPE[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2019,26(6):1797-1804.
- [13] WANG S C, ZHOU Q, LI J, et al. Influence of thermal ageing on space charge accumulation and dissipation of cross-linked polyethylene with different cross-linking agent contents[J]. *IEEE Access*,2020,8:163541-163557.
- [14] MENG F B, CHEN X R, DAI C, et al. Effect of thermal ageing on physico-chemical and electrical properties of EHVDC XLPE cable insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2021,28(3):1012-1019.
- [15] ZHAO Y F, XIE Y, ZHAO Y, et al. Dynamic ageing research of cross-linked polyethylene cable insulation based on temporal-spatial dimension under combined electro-thermal effect[J]. *High Voltage*,2023,8(5):1067-1081.
- [16] ZHENG Y Y, LONG Y W, YI D L, et al. Correlation between antioxidant depletion kinetic model and ageing behaviour of cross-linked polyethylene cable insulation[J]. *High Voltage*,2023,8(2):

- 231-238.
- [16] DAI C, YU L W, JIANG C, et al. Effect of thermal ageing on space charge behavior of HVDC XLPE materials[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Guangzhou, China:IEEE,2019:61-64.
- [17] SUGIMOTO M, SHIMADA A, KUDOH H, et al. Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing [J]. Radiation Physics and Chemistry,2013,82:69-73.
- [18] SHIMADA A, SUGIMOTO M, KUDOH H, et al. Degradation mechanisms of silicone rubber (SIR) by accelerated ageing for cables of nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):16-23.
- [19] 景巍巍,谢坤,李鸿泽,等.硅橡胶绝缘高压电缆附件的老化特性研究[J].高压电器,2023,59(11):201-210,223.
JING W W, XIE K, LI H Z, et al. ageing characteristics of silicone rubber insulated high voltage cable accessories[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(11):201-210,223.
- [20] 严玉婷,吕启深,陈铮铮,等.加速热老化对硅橡胶击穿及电荷输运特性的影响[J].绝缘材料,2019,52(9):48-52.
YAN Y T, LÜ Q S, CHEN Z Z, et al. Effect of accelerated thermal ageing on breakdown and charge transport properties of silicone rubber[J]. Insulating Materials,2019,52(9):48-52.
- [21] TZIMAS A, ROWLAND S M, DISSADO L A, et al. The effect of DC poling duration on space charge relaxation in virgin XLPE cable peelings[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010,43(21):215401.
- [22] WANG W W, TAKADA T, TANAKA Y, et al. Space charge mechanism of polyethylene and polytetrafluoroethylene by electrode/dielectrics interface study using quantum chemical method [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(4):2599-2606.
- [23] 赵明伟,马天祥,李丹,等.硅橡胶绝缘材料温度及场强依赖特性对XLPE绝缘直流电缆预制接头内电场分布的影响[J].绝缘材料,2024,57(1):1-6.
ZHAO M W, MA T X, LI D, et al. Influence of temperature- and field-dependent properties of silicone rubber insulating materials on electric field distribution inside prefabricated joints of XLPE-insulated DC cables[J]. Insulating Materials,2024,57(1):1-6.
- [24] WANG Y N, WANG Y L, YANG X W, et al. Interfacial charge dynamics of XLPE/EPDM double layers by simultaneous measurement of space charge and relaxation current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 569-577.
- [25] 何宁辉,马波,沙伟燕,等.热老化对配电网绝缘等温松弛电流及阈值电场的影响[J].绝缘材料,2023,56(8):51-57.
HE N H, MA B, SHA W Y, et al. Effect of thermal ageing on isothermal relaxation current and threshold electric field of distribution cable insulation[J]. Insulating Materials,2023,56(8):51-57.

收稿日期:2023-11-29;修回日期:2024-03-27。

作者简介:

王雅妮(1991-),女(汉族),陕西西安人,副教授,主要研究方向为电工绝缘材料与绝缘技术;

通信作者:杨兴武(1981-),男(汉族),河南南阳人,教授,主要研究方向为功率变换器高性能控制及新能源并网技术。