

# 电缆附件 EPDM 增强绝缘老化特性及其界面电学性能

王庆利<sup>1</sup>, 李春阳<sup>1</sup>, 纪多<sup>1</sup>, 陈先胜<sup>2</sup>, 杨旭<sup>1</sup>, 谭汝淮<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 高效能特种电缆技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司, 山东 泰安 271219)

**摘要:**为了探究不同老化形式对三元乙丙橡胶(EPDM)界面特性的影响,对热氧老化与溶胀老化前后 EPDM 试样的分子结构、微观形貌、交联度、力学性能、界面电学性能和陷阱分布特性做测试分析。结果表明,热氧老化会导致 EPDM 材料交联度上升,同时使其力学性能、EPDM/交联聚乙烯(XLPE)界面击穿强度和表面电导率下降。而溶胀老化会导致硅脂中的硅氧烷分子会渗入材料内部,导致溶胀和表面形貌劣化,进而引起交联度降低、深陷阱增多,并导致 EPDM 材料的力学性能和表面电导率大幅度下降;同时,EPDM/XLPE 界面击穿强度相较于热氧老化试样进一步降低。分析表明,硅氧烷渗入造成的表面形貌劣化是 EPDM 材料力学性能和界面击穿强度下降的主要原因。得出考察电缆附件增强绝缘用橡胶材料老化特性时,宜优先采用涂覆硅脂的老化方式,并以力学特性作为敏感判据的结论。

**关键词:**电缆附件;三元乙丙橡胶;绝缘界面;热氧老化;溶胀老化;陷阱分布

**DOI:**10.15938/j.emc.2025.10.004

中图分类号:TM215

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)10-0036-12

## Aging characteristics and interfacial electrical properties of EPDM reinforced insulation in cable accessories

WANG Qingli<sup>1</sup>, LI Chunyang<sup>1</sup>, JI Duo<sup>1</sup>, CHEN Xiansheng<sup>2</sup>, YANG Xu<sup>1</sup>, TAN Ruhuai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High-Efficiency Special Cable Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. TBEA Shandong Luneng Taishan Cable Co., Ltd., Taian 271219, China)

**Abstract:** To explore the influence of different aging forms on the interface characteristics of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM), the molecular structure, microstructure, crosslinking degree, mechanical properties, interface electrical properties and trap distribution characteristics of EPDM samples before and after thermal oxidation aging and swelling aging were tested and analyzed. The results show that thermal oxidation aging can lead to an increase in the crosslinking degree of EPDM materials, while reducing its mechanical properties, EPDM/cross-linked polyethylene (XLPE) interface breakdown strength and surface conductivity. Swelling aging causes the siloxane molecules in the silicone grease to penetrate into the material, resulting in swelling and deterioration of the surface morphology, which in turn leads to a decrease in the crosslinking degree, an increase in deep traps, and a significant reduction in the mechan-

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(52107015)

作者简介: 王庆利(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压电缆附件绝缘材料改性;

李春阳(1991—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高压电缆及其附件;

纪多(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压电缆附件绝缘材料改性;

陈先胜(1996—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压电缆及其附件;

杨旭(1996—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为高压电缆聚合物绝缘材料改性;

谭汝淮(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压海底电缆绝缘材料。

通信作者: 李春阳

ical properties and surface conductivity of EPDM materials; at the same time, the EPDM/XLPE interface breakdown strength is further reduced compared to the samples after thermal oxidation aging. The analysis indicates that the deterioration of the surface morphology caused by the penetration of siloxane is the main reason for the decline in the mechanical properties and interface breakdown strength of EPDM materials. It is concluded that when investigating the aging characteristics of rubber materials used for enhancing insulation in cable accessories, it is advisable to prioritize the aging method of coating with silicone grease and use mechanical properties as a sensitive criterion.

**Keywords:** cable accessory; ethylene-propylene-diene monomer; insulation interface; thermo-oxidative aging; swelling aging; trap distribution

## 0 引言

电缆附件是用于接续电缆或将电缆可靠接入其他电力设备的配套设施,在电力电缆线路中不可或缺,同时也是电缆系统中最薄弱的部分。在电缆系统运行故障中,由电缆附件所引起的故障约占 85% 以上<sup>[1]</sup>。电缆附件增强绝缘通常采用三元乙丙橡胶(ethylene-propylene-diene monomer, EPDM)或硅橡胶(silicone rubber, SiR)制成。在电缆附件安装处,增强绝缘与电缆交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)本体绝缘界面上存在轴向电场分量,由于该界面设计场强较低,通常仅为材料本体设计场强的数十分之一,故该界面处极易发生沿面放电和闪络,损伤的累积最终会造成增强绝缘击穿<sup>[2-3]</sup>。统计表明:60% 以上电缆接头的故障主要源于橡胶和 XLPE 界面的放电<sup>[1]</sup>。电缆附件的橡胶增强绝缘与电缆本体绝缘界面是决定电缆附件可靠性和寿命的关键因素。

电缆附件增强绝缘长期处于高温环境下,电缆线芯正常运行温度达到 70 °C 以上,一旦发生过载或短路,短时间内线芯温度可达 250 °C,且电缆附件内部材料存在微量的氧,增强绝缘在高温和氧气共同作用下会加速老化。周远翔等<sup>[4]</sup>研究发现 SiR 长期在正常运行温度下会对其绝缘性能造成破坏,影响电缆附件运行的可靠性。吕鸿等<sup>[5]</sup>发现在热老化过程中 SiR 试样的相对介电常数逐渐增大,且电气强度随着老化时间延长而降低。陶玲等<sup>[6]</sup>研究了热氧老化对 EPDM 物理力学性能和分子结构的影响,发现高温会引起交联密度增大和分子链断裂,且压缩应力松弛和压缩永久变形两个特征量受热氧老化影响最严重。目前关于橡胶增强绝缘热氧老化的研究主要关注材料本体性能,对其界面性能受热氧老化的影响关注较少。

现阶段对于电缆附件增强绝缘的研究主要集中在两个方面:一是通过材料改性改善橡胶增强绝缘的电学特性,使其具备更优的耐电性能<sup>[7-8]</sup>或电场均化能力<sup>[9-10]</sup>;另一方面,鉴于界面处的电输运行更为复杂,且绝缘能力又远弱于材料本体,更多的学者开始关注增强绝缘与 XLPE 构成的复合界面,并主要研究了过盈配合界面压力设计<sup>[11]</sup>、界面电荷积累<sup>[10,12-13]</sup>、界面电阻率<sup>[14]</sup>及界面放电特性<sup>[15-17]</sup>。此外,预制式电缆附件安装时,为了便于增强绝缘套装与防潮,常使用硅脂进行橡胶增强绝缘与电缆本体绝缘界面的润滑与密封,且界面涂覆的硅脂填补了气隙,短时间内对于增强绝缘界面耐电能力有明显提升效果<sup>[18-19]</sup>,同时也对界面电输运行产生显著影响。王霞等<sup>[17]</sup>研究了不同硅脂对于 SiR/XLPE 界面电荷积聚和界面击穿电压的影响,发现界面涂覆氟化硅脂试样的界面击穿电压均低于涂覆普通硅脂试样,且涂覆氟化硅脂试样的界面电荷量更高。值得强调的是,在界面抱紧压力和温度等多种因素长期影响下,硅脂分子会渗透进入橡胶材料内部,导致界面处增强绝缘发生溶胀,使附件力学性能与电学性能大幅度下降<sup>[18,20]</sup>。朱光亚等<sup>[19]</sup>发现涂覆硅脂对 SiR/XLPE 界面局部放电起始电压有短时提升作用,但溶胀后起始电压迅速下降,甚至低于未涂覆硅脂的界面。王霞等<sup>[20-21]</sup>又进一步研究了热老化、电晕及臭氧气氛对硅脂在 SiR 表面溶胀过程的影响,发现热老化、臭氧气氛和电晕老化都加速了硅脂的溶胀,且促进作用依次减小。

电缆附件运行寿命和可靠性不仅依赖于电缆附件增强绝缘界面的电学特性,也取决于该界面抗热氧老化和硅脂溶胀老化的能力。然而,目前关于增强绝缘热氧老化特性往往仅关注了橡胶材料的本体特性;对于增强绝缘溶胀老化特性,目前的研究也仅关注了 SiR 绝缘材料。但 SiR 界面处在高温高压下

容易导致绝缘结构损伤而造成绝缘失效<sup>[22]</sup>,而 EPDM 绝缘材料机械强度更高,界面改性等方面优势更大<sup>[23]</sup>。由于 EPDM 和 SiR 大分子结构有显著区别,EPDM 是由碳碳键(约 335 ~ 355 kJ/mol)构成大分子主链,而 SiR 的大分子主链由键能更高(约 443.5 ~ 460 kJ/mol)、柔顺性更好的硅氧键构成,两种材料在机械性能劣化程度、电学性能稳定性和交联度变化等方面存在显著差异<sup>[24]</sup>,EPDM 经受硅脂溶胀和热氧老化后的界面性能演变规律尚不明确。因此,通过对 EPDM 试样分别进行热氧老化和溶胀老化处理,研究热氧老化和溶胀老化对 EPDM 试样的力学性能、交联度和界面电学性能的影响,为 EPDM 增强绝缘材料的研发和电力电缆附件的运行维护提供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料与试样制备

#### 1.1.1 EPDM 试样制备

原料:EPDM 选用美国埃克森公司 1703P 型 EPDM 颗粒,该材料由丙烯、乙烯和含量为 0.9 wt% 乙叉降冰片烯第三单体共聚反应制得;抗氧化剂采用德国巴斯夫公司生产的 1010;交联剂采用纯度为 99% 的过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)。制备过程:将 40 g EPDM 颗粒加入温度 110 °C、转速 50 r/min 的密炼机中,混炼 3 min 至完全熔融,再加入 0.5 phr 抗氧化剂 1010 混炼 3 min,随后加入 1.6 phr DCP 混炼 3 min,得到未交联共混物。将混合物放入不同厚度的模具,在 110 °C、15 MPa 的平板硫化机中热压成型,然后在 160 °C、15 MPa 条件下交联 15 min,再经 80 °C 真空脱气 24 h 得到交联 EPDM 试样。清洁处理:测试前,试样表面经酒精超声清洗 1 min,经高压风枪干燥后在室温条件下静置 24 h。

#### 1.1.2 XLPE 试样制备

原料:XLPE 选用青岛汉河电缆股份有限公司生产的 220 kV 电缆用成品可交联绝缘材料颗粒(MFR:2.0 g/10 min,密度:0.922 g/cm<sup>3</sup>)。制备过程:为消除颗粒的不均匀性,先将颗粒在 110 °C 的密炼机中混炼 3 min,混合物随后按 EPDM 试样的制备方法(热压成型、交联、脱气)制成 XLPE 试样。

### 1.2 老化实验

#### 1.2.1 热氧老化实验

参考标准 GB 7594.3—1987 进行加速热氧老化,老化条件为:温度 100 °C,时长 168 h(实际运行的电缆附件中 EPDM/XLPE 界面最高温度处于 58 ~

64 °C 之间,根据范特霍夫规则<sup>[25]</sup>,温度每升高 10 °C,反应速率通常变为原来的 3 至 5 倍,由此估算在此老化条件下相当于实际电缆附件累积运行 2.8 ~ 6.5 年)。将试样悬挂在带有空气循环的热老化试验箱中,保持恒定温度并使悬挂试样的基片旋转。老化完成后对试样进行上述清洁处理。标记:未老化试样记为 EPDM,热氧老化处理后试样记为 EPDM-TO。

#### 1.2.2 溶胀老化实验

在 EPDM 试样表面均匀涂覆 GZ-I 型高真空绝缘硅脂,具体步骤:使用精密电子秤分别称取两张相同规格的 EPDM 试样的重量,用胶头滴管配合玻璃棒在试样表面均匀涂覆硅脂并水平放置,盖上另一试样使硅脂夹在两试样中间,将两张试样对齐后夹在两块平整不锈钢板间,并放入平板压力机中,施加 0.4 MPa 的压强挤压试样,使硅脂在压力作用下均匀铺开,根据增加的硅脂质量即可得到硅脂的涂覆用量(约 10 mg/cm<sup>2</sup>)。老化条件:将试样悬挂在带有空气循环的热老化试验箱中,并使悬挂试样的基片匀速旋转,老化温度为 100 °C,时长为 168 h。老化完成后,清除试样表面硅脂,并进行上述清洁处理。标记:溶胀老化处理后试样记为 EPDM-Si。

### 1.3 化学成分及微观结构表征

#### 1.3.1 傅里叶变换红外光谱分析

仪器:JASCO FT/IR-6100 型傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)。目的:分析热氧老化前后 EPDM 试样整体化学成分变化。条件:测试波段 500 ~ 4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率 2 cm<sup>-1</sup>。

#### 1.3.2 全反射红外光谱分析

仪器:Perkin Elmer Spectrum two FTIR 型红外光谱仪(attenuated total reflection, ATR)。目的:表征溶胀老化前后 EPDM 试样浅表层化学成分变化。条件:测试波段 500 ~ 4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率 2 cm<sup>-1</sup>。

#### 1.3.3 X 射线能谱分析

仪器:日立 SU8020 型 X 射线扫描电子显微镜(energy dispersive spectrometer, EDS)。目的:分析溶胀老化后试样表面的元素成分及含量。方法:通过特征 X 射线与数据库/标准谱图比对进行识别。

#### 1.3.4 凝胶含量测试

参考标准 ASTM D2765—16,对老化前后试样交联程度及其他宏观性能进行评估。使用二甲苯(沸点 138 ~ 141 °C)作为萃取剂对试样进行萃取,萃取时间 12 h,每种试样测试 3 次,结果取平均值。

### 1.3.5 微观形貌观测

仪器: 日立 SU8020 型微观形貌扫描电子显微镜 (scanning electronic microscopy, SEM)。目的: 观察溶胀老化对 EPDM 试样表面微观形貌的影响。样品处理: 观测面进行喷金处理以避免电荷在试样表面积聚。观测条件: 电子束加速电压 5 kV, 放大倍数 5k。

## 1.4 力学性能测试

### 1.4.1 邵氏 A 硬度测试

参考标准 GB/T 531.1—2008, 使用 LX-A 型橡胶硬度计对老化前后试样硬度进行测量。方法: 将 3 个 2 mm 厚的试样置于测试平台上, 在试样表面与压针接触后 3 s 内完成读数, 在每片试样表面间隔大于 6 mm 的不同位置测试 5 次, 结果取平均值。

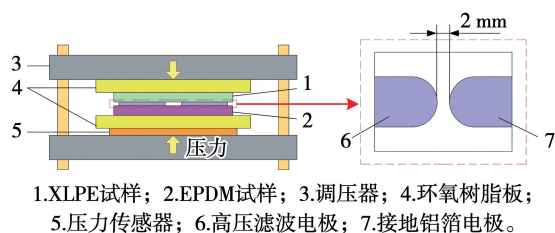
### 1.4.2 应力-应变特性测试

参考标准 GB/T 528—2009, 采用 WDW-10C 电子万能试验机对试样进行应力-应变特性测试, 方法: 将试样裁成 1 mm 厚的哑铃状薄片, 确保裁切边缘光滑且表面无可见划痕、气泡等缺陷; 将试验机参数设置为夹具间距 20 mm, 拉伸速率 250 mm/min, 对每种试样分别进行 5 次测试, 取重复性最高的曲线作为实验结果。

## 1.5 电学性能测试

### 1.5.1 EPDM/XLPE 界面击穿性能测试

界面击穿实验装置如图 1 所示, 测试系统主要由高压电源、调压器、液压机、铝箔电极、环氧树脂垫板等组成。将成 EPDM 与 XLPE 试样层叠放置于装置内, 界面处夹置厚度 50  $\mu\text{m}$ 、间距 2 mm 的铝箔电极。鉴于电缆附件界面设计压力通常在 0.1 ~ 0.3 MPa 范围 (避免“竹节”现象<sup>[11]</sup>), 测试在 0.1、0.2、0.3 MPa 3 个压力点下分别进行。测试温度为室温  $23 \pm 3$   $^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $45 \pm 3\%$ 。升压速率约 0.5 kV/s。每组试样至少重复测试 15 次, 采用 Weibull 分布函数对击穿电压数据进行统计分析<sup>[15]</sup>。



1. XLPE 试样; 2. EPDM 试样; 3. 调压器; 4. 环氧树脂板;  
5. 压力传感器; 6. 高压滤波电极; 7. 接地铝箔电极。

图 1 EPDM/XLPE 界面击穿测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EPDM/XLPE interface breakdown test device

### 1.5.2 表面电导率测试

表面电导率实验电极装置如图 2 所示, 采用三电极系统, 测量极直径为 50 mm, 高压极内、外径分别为 63 mm 和 70 mm。将试样和电极置于恒温箱中的屏蔽盒内, 测试温度为室温 ( $24 \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ ), 测试电压范围为 3 ~ 7 kV, 以每 0.5 kV 为间隔共计在 9 个阶梯电压下开展测试, 每个阶梯下保持 15 min 使试样充分极化后, 使用 EST122 型皮安表测量表面电导电流。根据测量电流计算表面电导率  $\gamma_s$ , 并绘制表面电导率特性曲线。

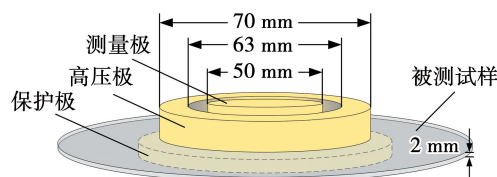


图 2 表面电导率测量电极示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surface conductivity measurement electrodes

### 1.5.3 等温表面电位衰减测试

为进一步研究老化对 EPDM 试样陷阱分布的影响, 对老化前后试样分别进行等温表面电位衰减 (isothermal surface potential decay, ISPD) 测试。实验装置主要包括样品台、表面电位测试仪 (型号为 Trek0809, 采用非接触式测试探头)、针电极、栅电极、高压直流源。针电极电压为 -10 kV (距离试样 30 mm), 栅电极电压为 -5 kV (距试样 15 mm)。对试样充电 10 min, 结束后通过滑轨将试样从高压电极一侧转移至电位探头下方 (探头对准中心, 间距 5 mm), 记录表面电位随时间衰减曲线。

## 2 实验结果

### 2.1 老化形式对 EPDM 化学成分及微观结构影响

#### 2.1.1 热氧老化后试样化学成分变化

图 3 为试样热氧老化前后 FTIR 测试结果, 可以看出:  $1748 \text{ cm}^{-1}$  附近吸收峰对应 EPDM 分子链状饱和酮羰基 (C=O) 键的伸缩振动, 从图 3 能够看到热氧老化后试样 C=O 的特征吸收峰明显增强, 说明热氧老化已经发生。在高温和有氧环境中, EPDM 的分子结构会发生氧化、断裂和降解, 羰基是此类聚烯烃绝缘材料老化进程中最常见的反应产物分子基团, 其含量可以通过 FTIR 测量得到的羰基指数 (carbonyl index, CI) 来评估<sup>[6,26]</sup>, 可以用于判断材

料老化程度。EPDM 中的 C=O ( $1\,748\text{ cm}^{-1}$ ) 与亚甲基-CH<sub>2</sub>- ( $2\,019\text{ cm}^{-1}$ ) 的红外吸收峰强度计算  $CI$ , 计算方法如下式所示<sup>[26]</sup>:

$$CI = \frac{A_{1\,748}}{A_{2\,019}} \quad (1)$$

式中:  $CI$  为羰基指数;  $A_{1\,748}$  为羰基吸收峰的面积, 位置在  $1\,748\text{ cm}^{-1}$  附近;  $A_{2\,019}$  为不随氧化而变化的吸收峰的面积, 位置在  $2\,019\text{ cm}^{-1}$  附近。热氧老化前后试样的  $CI$  变化如图 3 所示。

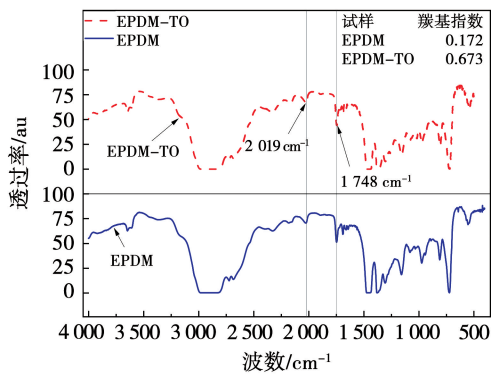


图3 热氧老化前后 FTIR 测试结果

Fig.3 FTIR results before and after thermal oxidative aging

### 2.1.2 溶胀老化后试样的化学成分变化

图 4 为溶胀老化前后试样 ATR 测试结果, 老化后试样在波数  $1\,100 \sim 1\,000\text{ cm}^{-1}$  之间明显出现了新的红外吸收峰, 该吸收峰来自 Si-O-Si 键的伸缩振动。此外, 在波数  $801\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,262\text{ cm}^{-1}$  处的红外吸收峰强度也均有明显增强, 其中  $801\text{ cm}^{-1}$  吸收峰源于 Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 基团,  $1\,262\text{ cm}^{-1}$  处吸收峰源于 Si-CH<sub>3</sub> 基团, 此测试结果说明在此设计的老化条件下, 硅脂中的硅氧烷分子大量渗入了 EPDM 试样浅表层。

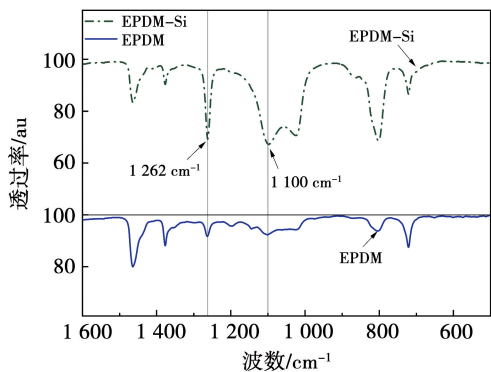


图4 硅脂溶胀老化前后 ATR 测试结果

Fig.4 ATR test results before and after swelling aging

对溶胀老化后试样进行 EDS 能谱测试, 测试结果见图 5。老化后的试样在  $1.74\text{ keV}$  处出现了 Si 元素的特征能谱峰, C 元素特征能谱峰的积分面积为  $782.11$ , Si 元素特征能谱峰的积分面积为  $7.78$ , C 元素与 Si 元素的比值为  $0.995\%$ 。由于 EPDM 试样中仅含碳元素和氢元素, 不含有硅元素, 而溶胀老化后的试样表面硅元素较多, 也可以证明硅脂中的硅氧烷分子已大量渗入试样浅表层。

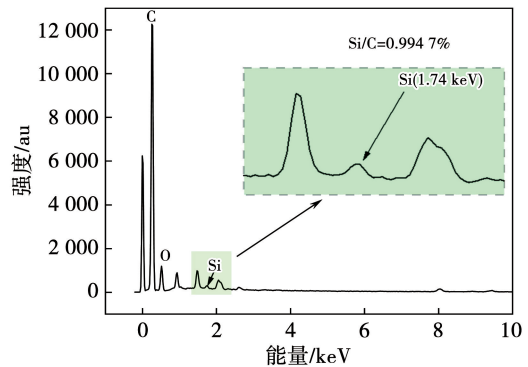


图5 EPDM-Si 试样的 EDS 测试曲线

Fig.5 EDS test curve of EPDM-Si sample

### 2.1.3 凝胶含量结果分析

老化前后试样的凝胶含量如表 1 所示, 热氧老化后试样的凝胶含量较老化前明显升高, 而硅脂溶胀老化后的试样较老化前有所降低。

表1 凝胶含量及邵氏 A 硬度测试结果

Table 1 Gel content and Shore A hardness test results

试样	凝胶含量/%	凝胶含量标准差/%	邵氏 A 硬度/HA
EPDM	90.73	2.49	55
EPDM-TO	93.14	2.79	58
EPDM-Si	88.52	2.16	52

### 2.1.4 扫描电镜结果分析

采用扫描电镜对老化前后试样表面形貌进行观测, 结果如图 6 所示。为了更准确地辨识不同试样的表面微观结构, 对测试 EPDM 与 EPDM-TO 采用的扫描电镜发射电压与放大倍数高于 EPDM-Si。可以看出, 即便采用更高的放大倍数, 未老化试样及热氧老化试样表面都呈光滑平整状态; 而溶胀老化后, 试样表面出现显著褶皱, 并伴随有局部裂纹出现, 这种微观形貌变化是由于试样涂覆硅脂并发生老化后, 硅脂分子渗入试样的浅表层并造成试样表层体

积发生膨胀而导致的, 膨胀过程中, 表面局部应力集中还会进一步引发局部裂纹。

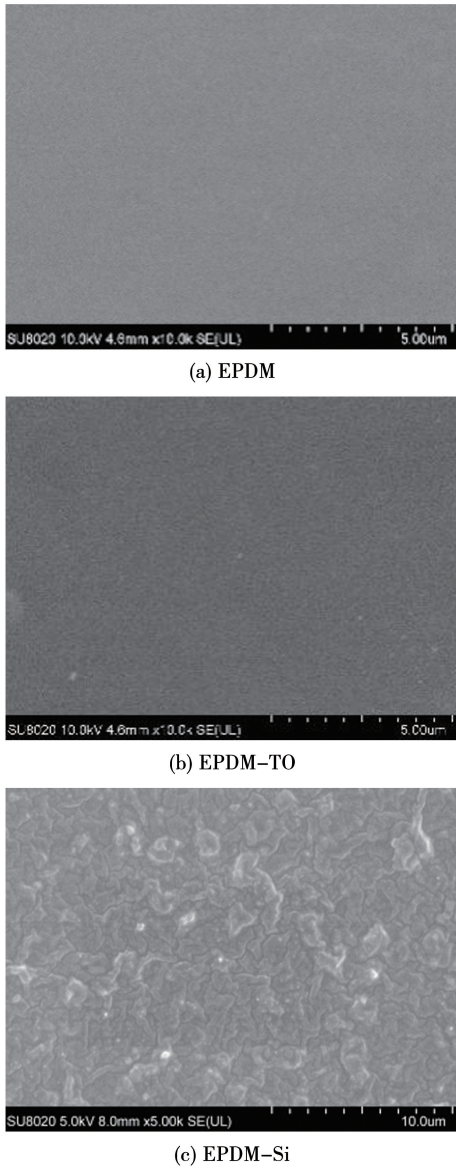


图 6 老化前后试样表面 SEM 形貌图

Fig. 6 SEM images of the sample surface before and after aging

### 2.2 力学性能测试结果

邵氏 A 硬度测试结果如表 1 所示, 可见热氧老化使试样硬度提高, 从 55 上升到了 58, 而溶胀老化则使试样硬度降低, 从 55 下降至 52。

应力 - 应变曲线测试结果如图 7 所示, 热氧老化后, 试样的拉伸强度与断裂伸长率均有所下降, 断裂伸长率从 740.93% 降低到 681.15%, 拉伸强度从 11.38 MPa 降低到 9.5 MPa, 仅损失 16.5%。相比之下, 硅脂溶胀老化后, 试样的拉伸强度与断裂伸长

率出现更大幅度的下降, 断裂伸长率降至 413.13%, 拉伸强度降低至 3.88 MPa, 强度损失 65.9%。

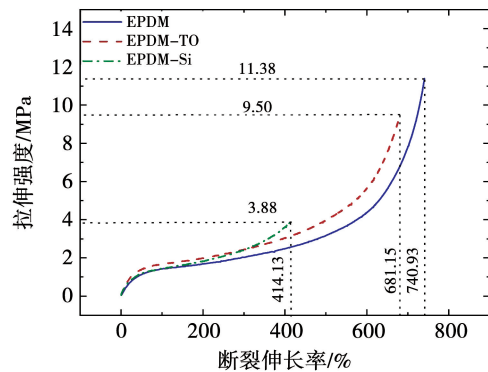


图 7 老化前后试样的应力 - 应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of the samples before and after aging

### 2.3 电学性能测试结果

#### 2.3.1 界面击穿测试结果

3 种试样的 EPDM/XLPE 界面交流击穿电压 Weibull 分布如图 8 所示, 在交流电压下, 界面压力为 0.1、0.2 和 0.3 MPa 时, 两种老化后的试样的界面击穿电压较老化前均有下降, 不同界面压力下, 热氧老化后试样的界面击穿电压分别下降了 8.8%、11.4% 和 3%, 溶胀老化后试样的界面击穿电压分别下降了 9.8%、12% 和 5.6%。

图 9 为 3 种试样的 EPDM/XLPE 界面直流击穿电压 Weibull 分布, 老化后试样的界面直流击穿电压也都出现显著下降。在直流电压下, 界面压力为 0.1、0.2 和 0.3 MPa 时, 热氧老化后试样界面击穿电压分别下降了 11.2%、4.2% 和 11.5%, 溶胀老化后试样的界面击穿电压分别下降了 11%、11.9% 和 17.2%。

#### 2.3.2 表面电导率测试结果

表面电导率(单位:S)计算公式为

$$\gamma_s = \frac{I_s \ln D_2 - \ln D_1}{U \cdot 2\pi} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_s$  为表面电导率, S;  $U$  为测试电压, V;  $I_s$  为表面电导电流, A;  $D_2$  为高压极内径, mm;  $D_1$  为测量极外径, mm。

老化前后试样表面电导率测试结果如图 10 所示。可见, 热氧老化后 EPDM 试样的表面电导率出现明显下降, 热氧老化前后的试样表面电导率随着测试电压升高整体上呈现上升趋势; 相比之下, 溶胀

老化后试样的表面电导率出现了更大幅度的下降, 且其表面电导率随着测试电压升高变化不大, 仅在同一数量级内波动。

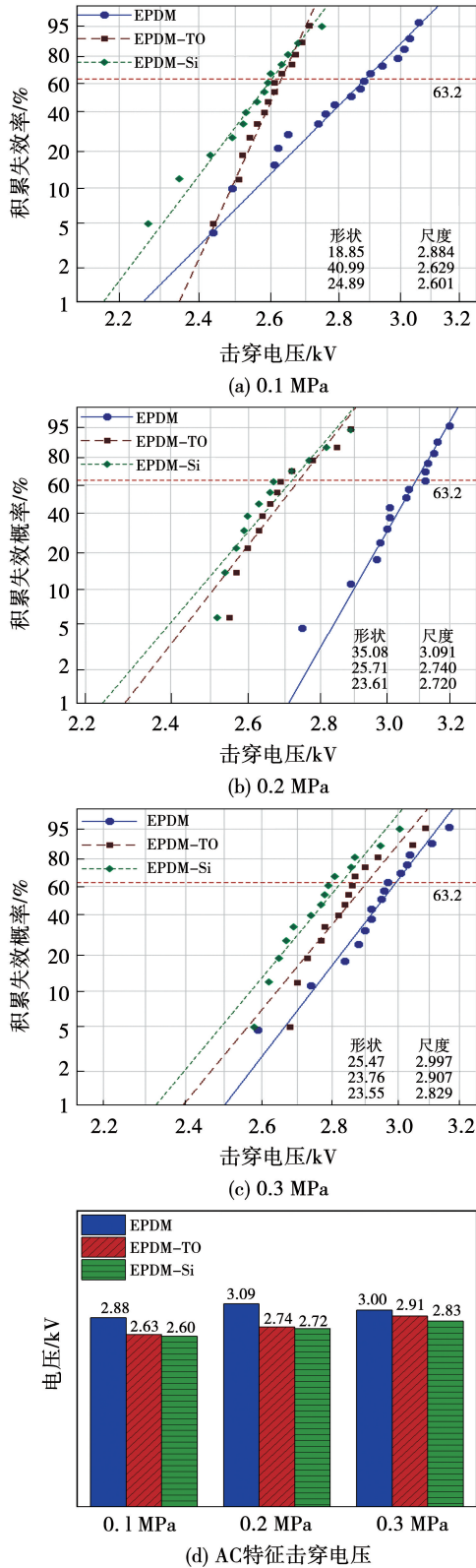


图 8 EPDM/XLPE 界面交流击穿电压 Weibull 分布  
Fig. 8 Weibull distribution of AC breakdown voltage at EPDM/XLPE interface

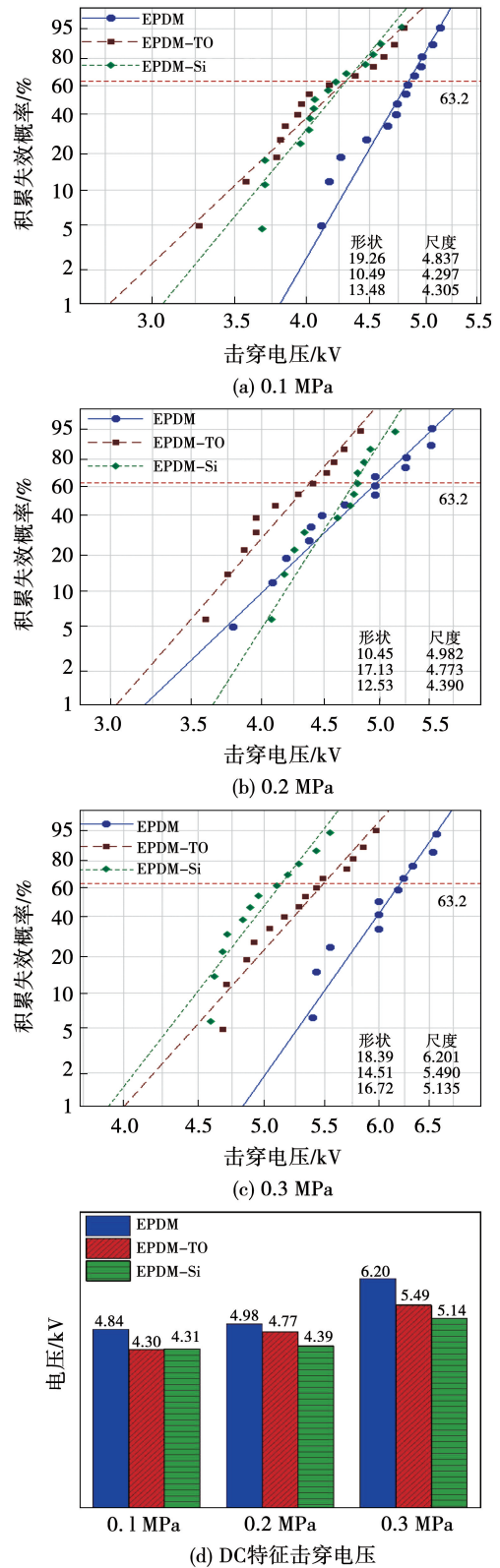


图 9 EPDM/XLPE 界面直流击穿电压 Weibull 分布  
Fig. 9 Weibull distribution of DC breakdown voltage at EPDM/XLPE interface

2.3.3 表面电位衰减测试结果

ISPD 测试结果可用 Simmons 理论分析<sup>[27-28]</sup>,

其表面电位衰减时间与陷阱能级的关系为

$$E_{ST} = k_B T \ln(v_{ATE} t) \quad (3)$$

式中:  $E_{ST}$  为表面陷阱能级, eV;  $k_B$  为玻尔兹曼常数  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为开氏温度, K;  $v_{ATE}$  为逃逸频率,  $s^{-1}$ ; 以  $k_B \cdot T/h$  计算, 其中  $h$  为普朗克常数,  $6.63 \times 10^{-34}$  J · s;  $t$  为表面电位衰减时间, s。

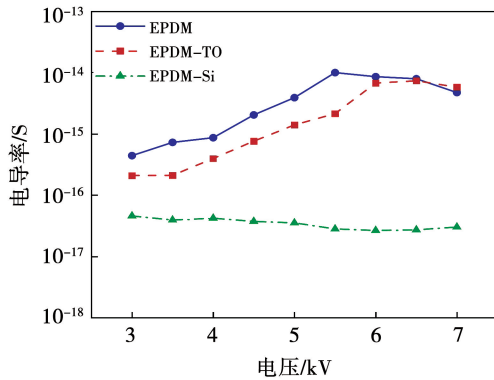


图 10 不同电压下的表面电导率特性曲线

Fig. 10 Different voltages of surface conductivity characteristic curve

此外, 表面陷阱密度与表面电位衰减速率间的关系为

$$N_{ST}(E_{ST}) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e l L} t \frac{\partial \phi_s(t)}{\partial t} \quad (4)$$

其中:  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m;  $\varepsilon_r$  为相对介电常数;  $e$  为电子电量,  $1.60 \times 10^{-19}$  C;  $l$  为厚度, m;  $\phi_s(t)$  为表面电位, V。

将试样进行 ISPD 实验测试, 并对电位衰减数据进行曲线拟合, 即可获取  $V_s(t)$  的拟合函数, 随后采用式(3)和式(4)计算, 即可获知理论推算的陷阱能级分布特性, 对 ISPD 曲线进行拟合时采用下式所示的双指数函数表达式, 即

$$V_s(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (5)$$

其中:  $A_1$ 、 $\tau_1$  和  $A_2$ 、 $\tau_2$  均可通过曲线拟合获知, 随后, 利用式(3)和式(4)分别对陷阱能级分布进行计算, 可得到两个陷阱中心对应的能级(定义为较浅陷阱和较深陷阱)及其中心能级密度。

热氧老化和溶胀老化前后 EPDM 试样表面电位衰减曲线如图 11 所示。随着时间的增加, 所有试样的表面电位衰减速度都呈现先快后慢的趋势。这是因为衰减前期试样表面电位与电极产生感应电

场, 造成大量电荷的迁移与消散, 同时由于浅陷阱中的电荷吸收较小的能量即可脱陷, 因此衰减前期就有大量的浅陷阱电荷脱陷加剧电荷的迁移与消散; 而衰减后期主要是由深陷阱中的电荷脱陷引发, 由于深陷阱中的电荷需要吸收较大的能量才能脱陷, 所以衰减较为缓慢<sup>[29]</sup>。由图 11 可知试样初始表面电位为 EPDM-TO > EPDM-Si > EPDM, 这是因为聚合物的陷阱能级和密度分布不仅取决于材料自身性质<sup>[30]</sup>, 老化过程中也会产生的新的内部缺陷, 且溶胀老化后硅脂分子填补了试样表面的部分陷阱, 所以 EPDM-Si 表面电位低于 EPDM-TO。图中衰减前期试样的衰减表面速率为 EPDM-TO > EPDM > EPDM-Si, 衰减后期试样的表面衰减速率为 EPDM-Si > EPDM-TO > EPDM, 此现象可结合式(3)~式(5)做进一步解释。

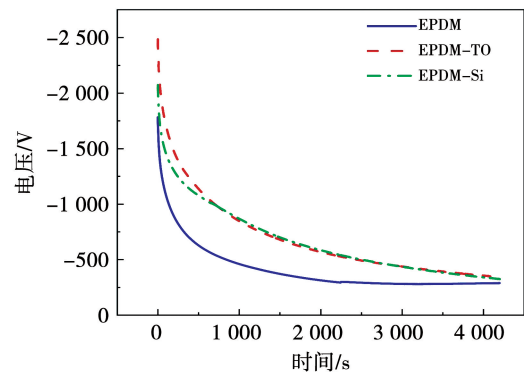


图 11 ISPD 测试曲线

Fig. 11 ISPD test curves

由式(3)~式(5), 推算了 EPDM、EPDM-TO 与 EPDM-Si 3 种试样的陷阱能级及陷阱密度分布, 结合双陷阱假设对表面电位衰减曲线拟合计算<sup>[31]</sup>, 得到陷阱分布曲线图如图 12 所示。试样经过热氧老化后, 浅陷阱中心能级几乎不变, 密度由  $2.33 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$  提高到  $3.01 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$ ; 深陷阱能级略有下降, 由 1.07 eV 下降到 1.05 eV, 但密度提高, 由  $1.03 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$  上升到  $2.45 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$ 。试样在经过溶胀老化后, 浅陷阱能级和密度均有所下降, 陷阱能级由 0.99 eV 下降到 0.97 eV, 陷阱密度由  $2.33 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$  下降到  $1.90 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$ ; 深陷阱能级略有下降, 由 1.07 eV 下降到 1.04 eV, 但深陷阱密度大幅提高, 由  $1.03 \times 10^{20}$   $eV^{-1} \cdot m^{-3}$  上升

到  $2.82 \times 10^{20} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

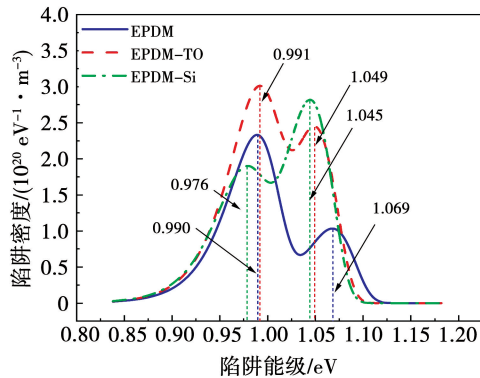


图 12 根据 ISPD 曲线得出的陷阱分布特性

Fig. 12 Trap distribution characteristics derived from ISPD curves

### 3 讨论与分析

#### 3.1 老化对 EPDM 力学性能的影响

热氧老化进程中, EPDM 大分子的氧化断链和二次交联同时发生, 两种作用相互对抗, 并共同影响材料的交联网络结构。由于选取的热氧老化条件温度相对较低 ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 氧化降解作用弱于二次交联作用, 根据凝胶含量的测试结果, 热氧老化进程的二次交联最终使得交联三维网络结构的密度增加, 从而使 EPDM 的形变更加困难, 硬度变大。此外, 热氧老化过程中产生的 RO 和 ROOR 等氧化大分子基团具有相对更强的极性<sup>[19]</sup>, 其分子之间的相互作用增大, 也会导致材料硬度的增加。同时, 交联密度的增加还会导致大分子的缠结和相互作用增强, 橡胶的延展性和弯曲性变差, 使橡胶材料硬化和脆化程度升高, 这就导致了热氧老化后 EPDM 试样的拉伸强度和断裂伸长率有所下降。

在热氧老化和溶胀老化后, EPDM 试样邵氏 A 硬度出现了相反的变化。溶胀老化后的 EPDM 试样硬度下降, 这是由于老化过程中硅脂的硅氧烷分子渗入了试样浅表层, 分子间隙部分被硅氧烷分子填充, 破坏了 EPDM 大分子间的作用力, 使其发生膨胀, 自由体积变大, 橡胶分子间的相互作用变弱, 分子链变的更为柔软, 导致试样硬度下降<sup>[18-19]</sup>。

此外, 在溶胀老化过程中, EPDM 同时发生热氧老化, 在硅氧烷分子的膨胀作用协同影响下, 大分子间距增大, 氧分子更容易渗入, EPDM 大分子更容易

发生氧化连锁反应并导致大量断链。如图 13 所示, 此时的氧化降解作用大于二次交联作用, 导致其凝胶含量降低。由于硅脂的渗透仅发生在试样的表面有限的厚度范围内, 通常为十几微米至几十微米<sup>[20-21]</sup>, 材料的老化降解也优先从其表面发生, EPDM 的交联网络破坏大量发生于试样浅表层, 在应力-应变曲线测试过程中, 由于材料表面的硬度、交联网络、分子结构与试样内部及非涂覆侧差异显著, 导致试样拉伸过程中应力分配不均匀, 试样表层由于交联网络破坏以及表面沟壑和微裂纹的存在, 其强度显著更低, 拉伸导致表层破坏后, 裂纹迅速向试样内部发展, 最终导致溶胀老化后的试样断裂伸长率和拉伸强度大幅度降低。

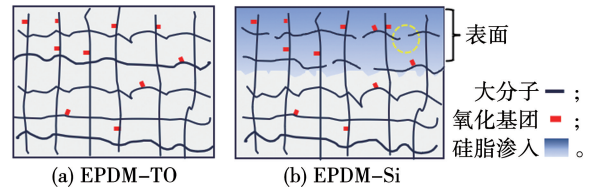


图 13 老化对 EPDM 分子结构影响示意图

Fig. 13 Schematic diagram of influence of aging on molecular structure of EPDM

#### 3.2 老化对 EPDM/XLPE 界面电学性能的影响

图 14 所示为老化对于 EPDM 表面和界面电学性能的影响机理示意图。表面电导率是反映物质表面相对较低电场下对于电流的传导能力的物理量, 由于绝缘材料制造的工艺水平有限, 以及电缆附件实际使用中受外界因素的影响, 不可避免会在 EPDM 增强绝缘材料表层留下一定缺陷, 同时, 聚合物的表面与内部分子结构上有所区别, 可能存在多种不同于分子本征结构的断键或链段, 形成不同深度的物理陷阱和化学陷阱, 导致表面电荷积聚和局部电场畸变, 进而对表面电荷输运行为造成影响。测试表明, 热氧老化后试样表面形貌未发生可见变化, 但深陷阱密度大幅增涨, 深陷阱对材料表面电子输运的影响表现为俘获电子能力增强、更多的电子被陷阱所捕获, 抑制了电子的定向迁移, 从而导致热氧老化后表面电导率下降。其次, 试样内残留的未反应的 DCP 以及低分子副产物在热氧老化后会进一步反应或挥发消失, 这也会导致试样表面电导率下降。

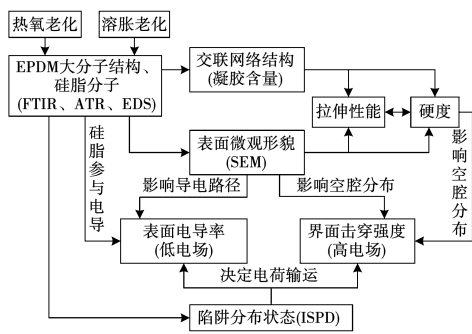


图 14 老化对 EPDM 性能影响机理示意图

Fig. 14 Schematic diagram of mechanism of aging effects on EPDM properties

溶胀老化较热氧老化后试样的表面电导率下降幅度更大。一方面,这是因为试样在溶胀老化后,虽然陷阱能级略微减少,但浅陷阱密度减小,并且深陷阱密度大幅增多,深陷阱俘获传导电荷的能力增强,因而溶胀老化后试样的表面电导率出现更大幅度的下降;另一方面,表面电导率测量过程中,由于气体侧在未发生游离放电的较低场强下具有显著更高的绝缘电阻率<sup>[14]</sup>,气体侧对于表面电导电流的贡献很小,又结合 SEM 测试结果可知,溶胀老化后试样的表面形貌发生变化,出现大量微褶皱,这会使试样表面的缺陷增多,粗糙度增大,表面粗糙度会增加导电材料表面的不规则性,导致电子沿材料表面的迁移路径增长,穿越不规则表面时会遇到更多的碰撞,从而导致电子迁移难度增加,最终导致试样的表面电导率会下降。值得说明的是,硅脂渗入后,硅脂分子填充在浅表层大分子间隙中,其分子本身也会参与电荷运输,且通常硅脂具有相对 EPDM 稍低的体积电阻率<sup>[13]</sup>,但相比之下,硅脂分子导致表面电导率增大的作用远远弱于溶胀老化导致深陷阱和表面形貌对于表面电导的抑制作用,以上 3 种作用共同影响下,最终使 EPDM 材料表面电导率显著降低。EPDM-Si 表面电导率随着测试电压升高变化不大,这可能是因为渗入的硅油分子填充了 EPDM 表层分子链间的自由体积,起到了增塑作用,增加了分子链段的局部活动性,进而减少了材料介电参数的非线性,降低了界面极化对表面电导率测量的影响,因此表面电导率仅在同一数量级内波动。

从界面击穿实验可以看出,相同界面压力下,热氧老化后所有 EPDM 试样的界面交、直流击穿电压较老化前均有下降,这是因为界面击穿实际发生在界面贴合的气隙中。双层绝缘介质构成的界面微观

形貌如图 15 所示,在理想状态下,该界面均匀、平整、光滑,界面的绝缘强度仅取决于两侧绝缘介质的表面绝缘性能。但实际上由于两侧介质表面状态并不理想,绝缘界面存在着大量空腔,整个界面是由紧密接触点与界面空腔共同构成的。当界面发生击穿时,击穿起始于高能电子与两侧介质碰撞产生的碰撞电离引起的电子崩,电子崩进一步发展,形成了贯通多个紧密接触点与界面空腔的击穿通道。在热氧老化过程中,EPDM 试样中羰基含量增大,凝胶含量增多,硬度变大且试样变脆,所以结构稳定性下降,试样表面容易产生裂痕,相同界面压力下,由于试样硬度增大,微形变困难,还会进一步导致气隙相对增多,虽然气隙在低场强下具有较高的电阻率,但是在较高电场下非常容易引发游离放电,最终使得 EPDM/XLPE 界面击穿电压降低。

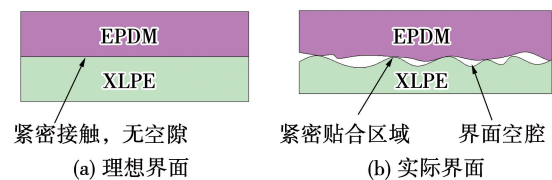


图 15 EPDM/XLPE 双层介质界面的微观形貌

Fig. 15 Microscopic morphology of EPDM/XLPE double-layer dielectric interface

溶胀老化后试样界面击穿强度受 EPDM 试样硬度、表面陷阱分布状态、表面形貌三者共同影响。硬度方面,溶胀老化后试样表面硬度降低,有利于表面发生形变填补界面气隙,这一作用会使界面气隙减少,界面击穿强度提高;表面陷阱分布方面,溶胀老化后 EPDM 表面浅陷阱减少,引入了大量深陷阱,深陷阱对于聚合物材料的击穿性能有提高作用,且相比浅陷阱,通常深陷阱的作用占据主导地位<sup>[30]</sup>,由此推测,溶胀老化也应使界面击穿电压提高。然而,表面形貌对于界面击穿电压的影响更为显著,根据图 6 的 SEM 观测结果,溶胀老化后试样表面出现致密分布的微褶皱和局部凸起,其与 XLPE 试样构成界面时,将会导致气隙尺寸和数量均增大,虽然其表面硬度降低有利于通过形变减小气隙数量,然而材料力学强度相比老化前下降了 65.9%,在界面压力作用下会加速表面微裂纹的产生和气隙缺陷的扩大。最终,虽然深陷阱增多对聚合物的击穿强度有一定的提高,但影响较小,表面形

貌发生变化后对界面击穿强度的影响起决定性作用,并导致溶胀老化后试样界面击穿电压进一步下降。

## 4 结 论

通过对电缆附件增强绝缘用 EPDM 试样分别进行热氧老化和溶胀老化处理,使用多种表征方法分析了材料理化特性的变化,探究了两种老化形式对 EPDM 材料力学性能和界面电学特性的影响和机理,得出如下结论:

1) 热氧老化后,EPDM 材料交联度上升,硬度增加,拉伸强度和断裂伸长率有所下降,拉伸强度下降 16.5%。

2) 硅脂溶胀老化后,硅氧烷分子渗入 EPDM 浅表层,导致 EPDM 浅表层交联网络破坏,表面出现褶皱,表面硬度下降,拉伸强度和断裂伸长率较热氧老化试样出现更显著劣化,拉伸强度下降 65.9%。

3) 两种老化形式均会导致 EPDM 表面电导率和 EPDM/XLPE 界面击穿强度降低,其中溶胀老化对于电学性能影响更为严重,其决定性因素在于硅脂溶胀老化的作用使试样表面产生了更多微褶皱缺陷。

4) EPDM 绝缘材料在硅脂涂覆条件下老化机理存在显著差异,且短时内即会对力学、电学性能造成负面影响,考察电缆附件增强绝缘用橡胶材料老化特性时,宜采用涂覆硅脂加速老化方式,并以力学特性作为老化的敏感判据。

### 参 考 文 献:

- [1] 惠宝军,傅明利,刘通,等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44.  
HUI Baojun, FU Mingli, LIU Tong, et al. Statistical analysis on failures of 110 kV and above power cable system[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(12): 44.
- [2] 刘昌,惠宝军,傅明利,等. 机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 518.  
LIU Chang, HUI Baojun, FU Mingli, et al. Influence of mechanical stress on the operation reliability of silicone rubber high voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 518.
- [3] SUH K S, NAM J H, KIM J H, et al. Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 216.
- [4] 周远翔,张云霄,张旭,等. 热老化时间对硅橡胶电树枝起始特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 979.  
ZHOU Yuanxiang, ZHANG Yunxiao, ZHANG Xu, et al. Influence of thermal aging time on electrical tree initiation of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 979.
- [5] 吕鸿,马佳炜,杨贤,等. 热老化对 220 kV 硅橡胶电缆接头绝缘材料介电性能的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(2): 47.  
LÜ Hong, MA Jiawei, YANG Xian, et al. Influence of thermal ageing on dielectric properties of insulating materials in 220 kV silicone rubber cable joint [J]. Insulating Materials, 2019, 52(2): 47.
- [6] 陶玲,刘国钧,程璐,等. 三元乙丙橡胶的热氧老化及寿命预测[J]. 特种橡胶制品, 2022, 43(6): 60.  
TAO Ling, LIU Guojun, CHENG Lu, et al. Thermal oxygen aging and life prediction of EPDM[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(6): 60.
- [7] DU B, SU J, TIAN M, et al. Understanding trap effects on electrical treeing phenomena in EPDM/POSS composites[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8481.
- [8] LI C, JIN Y, SUN Y, et al. Improved body and interface properties of EPDM insulation for HVDC cable accessory by grafted voltage stabilizer[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 54: 105214.
- [9] 迟庆国,杨蒙,张天栋,等. 钛酸铜钙-氮化硼掺杂 EPDM 复合介质的电学和力学性能研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 223.  
CHI Qingguo, YANG Meng, ZHANG Tiandong, et al. Study on electrical and mechanical properties of calcium copper titanate-boron nitride doped EPDM composites[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 223.
- [10] LI J, DU B X, KONG X X, et al. Nonlinear conductivity and interface charge behaviors between LDPE and EPDM/SiC composite for HVDC cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1566.
- [11] 谢强,王晓游,傅明利,等. 高压电缆接头过盈配合及硅橡胶附件力学性能计算[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 498.  
XIE Qiang, WANG Xiaoyou, FU Mingli, et al. Interference fit and mechanical property computation of silicone rubber accessory in HV cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 498.
- [12] 王霞,崔伯男,刘帅,等. 直流叠加冲击电压下 XLPE/EPDM 界面的空间电荷特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2168.  
WANG Xia, CUI Bonan, LIU Shuai, et al. Space charge characteristics of XLPE/EPDM interface under DC superimposed impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2168.
- [13] WANG Y, WANG Y, YANG X, 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.
- [14] ZHU B, JIA Z, HU H, et al. Interface resistivity and interfacial DC breakdown voltage of double-layer dielectrics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1181.

- [15] LI C, JI D, WAN Y, et al. Grafting of voltage stabilizer onto EPDM surface and its inhibition effect on the breakdown of EPDM/XLPE interface [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, 225: 110761.
- [16] 李春阳, 陈先胜, 胡巍, 等. 电压稳定剂对电缆附件三元乙丙橡胶本体与绝缘界面耐电性能影响[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5281.  
LI Chunyang, CHEN Xiansheng, HU Wei, et al. Effects of voltage stabilizers on the body and interface electrical strengths of EPDM for cable accessory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(13): 5281.
- [17] 王霞, 余栋, 张宇巍, 等. 硅脂涂覆料对 XLPE/EPDM 复合介质界面电荷积聚和击穿特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4281.  
WANG Xia, YU Dong, ZHANG Yuwei, et al. Effect of coating silicone grease on charge accumulation and breakdown strength at XLPE/EPDM interface[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4281.
- [18] 严智民, 杨凯, 王诗航, 等. 硅脂对硅橡胶电树枝劣化特性的影响机制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 604.  
YAN Zhimin, YANG Kai, WANG Shihang, et al. Study on the mechanism of silicone grease on electrical tree degradation of silicone rubber[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 604.
- [19] 王子康, 周凯, 朱光亚, 等. 硅脂溶胀对 XLPE-SiR 复合界面气隙缺陷局部放电的影响及作用机理[J]. *高电压技术*, 2021, 47(12): 4245,  
WANG Zikang, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Effect and mechanism of silicone grease swelling on partial discharge at air-gap defects of XLPE-SiR interface[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(12): 4245.
- [20] 王霞, 王华楠, 陈飞鹏, 等. 电晕放电加速硅脂劣化对硅橡胶绝缘表面性能的影响[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 3977.  
WANG Xia, WANG Huanan, CHEN Feipeng, et al. Effect of corona-discharge-accelerated deterioration of silicone grease on the surface properties of silicone rubber insulation [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 3977.
- [21] 王霞, 王华楠, 陈飞鹏, 等. 涂覆硅脂对电缆附件绝缘溶胀机理及影响因素[J]. *高电压技术*, 2020, 46(9): 3177.  
WANG Xia, WANG Huanan, CHEN Feipeng, et al. Insulation swelling mechanism and influencing factors of silicone grease coated in cable accessories [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(9): 3177.
- [22] 刘培焱, 杨皓翔, 宋彦博, 等. 硅橡胶热老化对电连接器插合界面特性的影响[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(4): 23.  
LIU Peiyan, YANG Haoxiang, SONG Yanbo, et al. Effect of thermal aging on interface characteristics of silicone rubber in electrical connector[J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(4): 23.
- [23] 纪多, 李春阳, 杨旭, 等. 表面接枝电压稳定剂改善三元乙丙橡胶界面绝缘性能[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(15): 4941.  
JI Duo, LI Chunyang, YANG Xu, et al. Enhanced interface insulation performance of EPDM by surface grafting of voltage stabilizer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(15): 4941.
- [24] LIU Y, WANG X. Research on property variation of silicone rubber and EPDM rubber under interfacial multi-stresses [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(6): 2027.
- [25] 吴丝竹, 易军, 刘海露, 等. 基于加速老化实验的 EPDM 橡胶贮存寿命预测方法[C]//2008 年橡胶(密封)新技术交流暨信息发布会, 2008, 10 月 26 日 - 30 日, 中国, 无锡. 2008: 236.
- [26] 周城, 陈夏, 樊亚勤, 等. 热氧老化对辐照三元乙丙橡胶密封材料性能影响及寿命评估[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(1): 23.  
ZHOU Cheng, CHEN Xia, FAN Yaqin, et al. Effects of thermal oxygen ageing on properties of irradiated EPDM sealing materials and life assessment[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(1): 23.
- [27] MOLINIE P. A review of mechanisms and models accounting for surface potential decay [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 40(2): 167.
- [28] LLOVERA P, MOLINIE P. New methodology for surface potential decay measurements: application to study charge injection dynamics on polypropylene films [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 11(6): 1049.
- [29] 乌江, 李帅强, 何敏恒, 等. 不同温度下聚酰亚胺薄膜陷阱特性对其绝缘性能的影响[J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 4873.  
WU Jiang, LI Shuaiqiang, HE Minheng, et al. Effect of trap characteristics on insulation performance of polyimide film at different temperatures [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(12): 4873.
- [30] 高宇, 王小芳, 李楠, 等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2219.  
GAO Yu, WANG Xiaofang, LI Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: a review [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2219.
- [31] SHAO T, LIU F, HAI B, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(3): 1557.