

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.07.021

高压直流电缆系统交联聚乙烯/三元乙丙橡胶界面的匹配特性研究

戴明浩, 赵铜鑫, 赵 薇, 高景晖, 钟力生

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 高压直流电缆绝缘与附件绝缘构成了双层复合绝缘结构, 绝缘材料界面的匹配特性是直流输电系统安全稳定运行的重要基础。文中研究了交联聚乙烯(XLPE)和三元乙丙橡胶(EPDM)的电导率性能和材料显微结构对绝缘界面匹配特性的影响, 然后研究了复合界面的空间电荷分布特性和电场分布特性, 以及材料改性对绝缘匹配特性的影响。实验结果表明, XLPE和EPDM电导率特征参数(材料系数 A , 电场依赖系数 B , 活化能 φ)的差异是绝缘匹配特性不理想的重要因素, 复合XLPE/EPDM界面电场畸变率最高可达209.49%。通过纳米掺杂改性的EPDM具有更低的电导率和更少的空间电荷积聚, 并且与XLPE绝缘配合特性更良好。文中的研究对高压直流附件的材料开发、性能优化和结构设计提供理论和试验基础。

关键词: 直流电缆附件; 交联聚乙烯; 三元乙丙橡胶; 绝缘匹配特性

Study on Matching Characteristic of XLPE/EPDM Interface in HVDC Cable System

DAI Minghao, ZHAO Tongxin, ZHAO Wei, GAO Jinghui, ZHONG Lisheng

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The high voltage DC cable insulation and accessory insulation form a double-layer composite insulation structure, and its matching characteristics are an important basis for the safe and stable operation of the DC transmission system. In this paper, the effects of conductivity properties and material microstructure of cross-linked polyethylene (XLPE) and ethylene propylene diene monomer (EPDM) on insulation interface matching characteristics were studied. Then the space charge distribution characteristics and electric field distribution characteristics of the composite interface and the influence of material modification on the insulation matching characteristics are studied. The experimental results show that the conductivity characteristic parameters of XLPE and EPDM (material coefficient A , electric field dependence coefficient B , activation energy φ). The difference is an important factor for the unsatisfactory insulation matching characteristics. The maximum electric field distortion rate of composite XLPE/EPDM interface can reach 209.49%. EPDM modified by nano doping has lower conductivity and less space charge accumulation, and has better insulation coordination with XLPE. The research of this paper provides a theoretical and experimental basis for the material development, performance optimization and structural design of HVDC cables and accessories.

Key words: HVDC cable accessory; cross-linked polyethylene (XLPE); ethylene propylene diene monomer (EPDM); insulation matching characteristic

0 引言

高压直流电缆附件作为电力电缆系统中重要

的组成部分, 其绝缘设计是一项涉及多学科应用的复杂过程, 同时也是电缆系统的故障多发点, 对高压直流电缆系统的安全稳定运行起到了重要的影

响作用^[1-7]。由于电缆系统附件使用处的恶劣使用环境^[8],电缆附件在电、热、氧等因素的作用下容易相互促进老化,导致附件的绝缘性能恶化。在231个失效案例的统计中,发现在不考虑外力损伤的情况下,电缆附件的损坏率高达85.5%^[9-11]。此外,在直流电缆附件中,空间电荷对电场分布有显著影响,会造成绝缘介质内部电场的严重畸变,局部电场强度甚至可以达到原来外加电场的8~10倍^[12]。另一方面,空间电荷的积累也会加剧绝缘材料的电老化,从而降低绝缘材料的使用寿命^[13-14]。当异极性空间电荷积累到一定程度时绝缘介质将发生击穿,致使绝缘遭受不可恢复性破坏。电缆附件的电气性能依赖于附件绝缘橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)与交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)之间的配合,其界面绝缘状态将直接影响电缆附件的绝缘性能^[15-16]因此研究在直流电缆系统中电缆绝缘材料XLPE和附件绝缘材料三元乙丙橡胶界面的匹配特性具有十分重要的工程意义。

文中通过表征XLPE和EPDM的显微结构及元素分布,研究微观结构对绝缘匹配特性的影响并且计算不同温度以及场强下的两种绝缘材料的绝缘匹配度,分析电导率对绝缘匹配特性的影响,以及通过场强畸变率,分析界面空间电荷对绝缘匹配特性的影响,从而揭示匹配机制,并通过纳米颗粒填充改善了电缆附件绝缘匹配特性。

1 试样制备和实验方法

1.1 试样制备

1.1.1 XLPE制备

文中选用国内某电缆企业制造的 ± 320 kV 直流海底电缆的绝缘层制备XLPE试样,电缆截面结构见图1。图1中从内到外依次为铜导体、导体屏蔽、XLPE绝缘、绝缘屏蔽、合金护套、PE护套和铠装层。

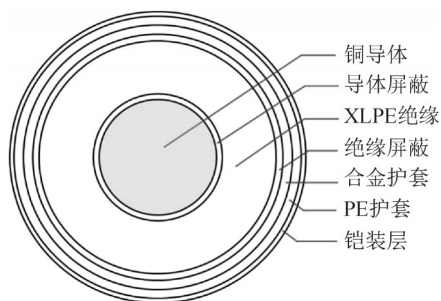


图1 XLPE绝缘电缆截面实物及结构示意图

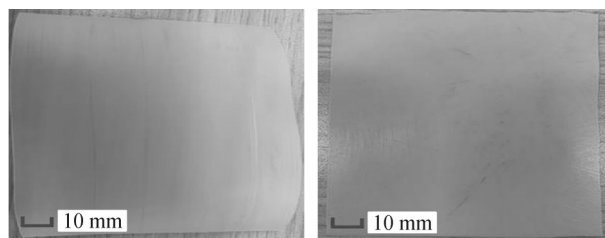
Fig. 1 Physical and structural diagram of XLPE insulated cable section

为了研究XLPE绝缘材料的电气性能,需将电缆绝缘层制成薄片状试样进行相应的试验。选择

长度约为150 mm的直流电缆段,将其固定在数控机床的旋转轴上使其顺时针匀速旋转,使刀具方向与电缆轴向相同,并控制刀具按照相同的速度缓缓向电缆线芯进刀,将整个电缆绝缘层环切成厚度约为0.2 mm,宽度约为100 mm的成卷薄片,然后裁剪成100 mm×100 mm的方形试样,得到的XLPE试样见图2(a)。

1.1.2 EPDM试样制备

EPDM试样通过在平板硫化仪中使用相应模具并配合聚酯薄膜压制而成,将添加硫化剂、补强剂、活化剂等添加剂的EPDM粒料及相应模具置于平板硫化仪中,在120℃的温度下预热20 min,然后设置温度为160℃,压力为15 MPa,在相应模具中压制30 min,并在该压力下自然冷却至室温。压制出的试样表面应比较平滑没有明显的缺陷,然后将压制好的试样也裁剪成100 mm×100 mm的方形试样。得到的EPDM试样见图2(b)。



(a) XLPE薄片试样

(b) EPDM薄片试样

图2 薄片试样

Fig. 2 XLPE and EPDM sheet sample

1.1.3 复合XLPE/EPDM试样制备

在制备好的XLPE和EPDM试样表面涂上适量硅油,将两个薄片试样粘合为一个复合试样,其中XLPE薄片试样厚度约为0.2 mm,EPDM薄片试样的厚度约为0.3 mm,两种试样中心重合压制。得到的复合试样用于测试XLPE/EPDM复合绝缘介质的界面空间电荷分布特性。

1.1.4 纳米掺杂EPDM试样制备

在EPDM制备过程中加入含量1%的纳米SiO₂(平均粒径为12 nm,比表面积约为200 m²/g),采用和EPDM相同的制备参数压制成型,然后将试样裁剪成100 mm×100 mm的方形试样。

1.2 实验方法

1.2.1 介电常数测量

使用型号为Concept 80宽带介电谱测试系统对两种试样的介电谱进行测试。将XLPE和EPDM试样裁剪成直径大小为40 mm的圆形薄片,并用无水乙醇擦拭试样保证试样两侧无杂质附着,等待晾干后在试样两面喷溅直径为38 mm的金电极。该试验

的测量频率范围为 $10^{-2} \sim 10^6$ Hz, 温度为室温。将预处理好的试样固定在试样架上, 放入宽带介电谱测试系统的低频试样腔中, 在相应软件中填写试样参数及测试条件, 即可测试试样的相对介电常数及损耗角正切值。

1.2.2 电导率测量

采用外加电压测电流的方法得到 XLPE 和 EPDM 试样在不同温度和电场强度下的直流电导率。直流电导率测试系统主要包括直流高压源、电流表、电极系统、温度控制装置和数据采集系统 5 个部分, 见图 3。高压源选用 SL40PN300/220 型高压直流电源, 最高输出电压为 40 kV, 纹波系数为 0.1%。电流表选用 6517B 静电计, 用于测量流过试样的电导电流, 该静电计可测量的最小电流为 10 mA, 最大电流为 21 mA。电极系统采用三电极, 试样置于高压极和测量极之间, 高压极的直径为 45 mm, 测量极的直径为 26 mm, 测量极与保护极之间的间隙距离为 3 mm, 三电极系统外的屏蔽装置可以屏蔽电磁干扰的影响。温度控制通过恒温温箱实现。数据采集通过计算机中已经编译好的 LabView 程序实现, 计算机与电流表连接, 通过计算机程序控制实现数据记录和电流表量程选择。

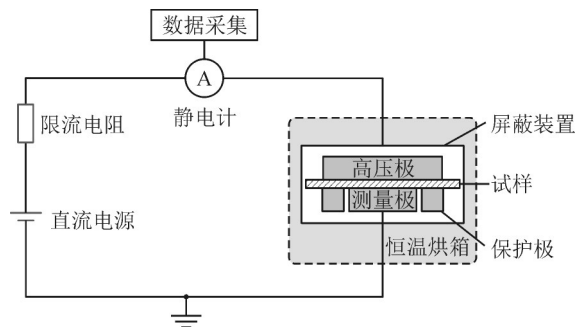


图 3 直流电导率测试系统

Fig. 3 DC conductivity test system

XLPE 试样和 EPDM 试样的测试场强为 10、20、30 kV/mm, 测试温度均为 30、40、50、60、70 °C, 测试时间为 600 s。每种试样在某一场强某一温度点下, 测试两次, 取最后 60 s 的数据的平均数作为最终结果。

1.2.3 空间电荷测量

电声脉冲法空间电荷测试系统包括直流电压源、脉冲信号发生器、测试系统和数据采集系统等, 见图 4。

高压源采用 SL130PN600/220 型高压直流电源, 最高输出电压为 130 kV, 纹波系数为 0.1%。高压脉冲源的最高输出电压为 600 V, 输出脉冲为 20 ns, 输出频率为 400 Hz。测试系统主要包括测试电极、传感器、放大器等, 柱—板电极两电极系统的上电极

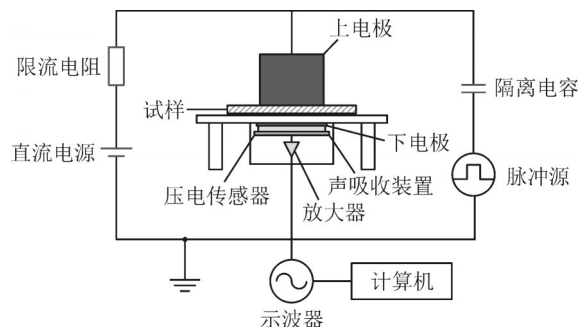


图 4 电声脉冲法空间电荷测试系统

Fig. 4 Space charge test system by electroacoustic pulse method

为半导体材料, 下电极为铝, 直径均为 8 mm。数据采集系统通过 DPO3054 型示波器显示压电传感器转换的电压波形, 并传输至计算机中, 通过编译好的 LabView 程序实现空间电荷信号的采集与数据处理。

为了保证试样与电极之间的紧密耦合, 测试时应在被测试样与上、下电极之间接触位置涂抹适量的硅油, 并在电场强度为 10 kV/mm 时对试样进行测试标定。XLPE 试样和 EPDM 试样的测试场强为 20、30、40 kV/mm, 由于复合 XLPE/EPDM 试样的样品厚度和高压源幅值的限制, 复合试样的测试场强为 15、20、25 kV/mm。加压极化 15、30、60 min, 记录下不同极化时间下各种试样的空间电荷积累程度。由于聚合物绝缘介质中的空间电荷在温度较高时不易积累, 因此文中仅考虑室温环境下试样的空间电荷积聚情况。

2 实验结果与讨论

2.1 电导率对绝缘匹配特性的影响

根据 Maxwell-Wagner 界面极化理论^[17], 以电缆主绝缘 XLPE 与附件绝缘 EPDM 材料构成的双层绝缘介质界面建立极化模型, 见图 5。

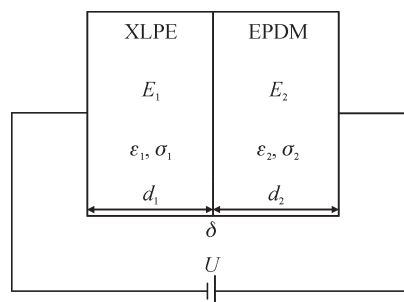


图 5 电缆主绝缘与附件绝缘的双层界面极化模型

Fig. 5 Double-layer interface polarization model of main insulation and accessory insulation of cable

在双层绝缘界面中, 根据麦克斯韦方程有得到复合绝缘介质界面处的电荷面密度表达式为

$$\delta = \frac{\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1}{\sigma_2 d_2 + \sigma_1 d_1} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,当 $\varepsilon_1 \sigma_2 = \varepsilon_2 \sigma_1$ 时,即双层绝缘介质的相对介电常数与直流电导率的比值相等时,界面处没有空间电荷产生。当 $\varepsilon_1 \sigma_2$ 与 $\varepsilon_2 \sigma_1$ 不相等时,界面处就会有空间电荷积聚,并且比值差距越大时,积累的空间电荷越多,从而导致界面匹配特性越差。

XLPE和EPDM的相对介电常数随电场频率变化的关系曲线见图6。XLPE的相对介电常数约为2.3,EPDM的相对介电常数约为2.8,两种绝缘材料的介电常数维持在一个稳定值,几乎不随着频率的变化而变化。而在直流电场情况下两种绝缘材料的介电常数几乎不随着温度和电场的变化而变化。所以界面匹配特性由XLPE以及EPDM的电导率所决定。

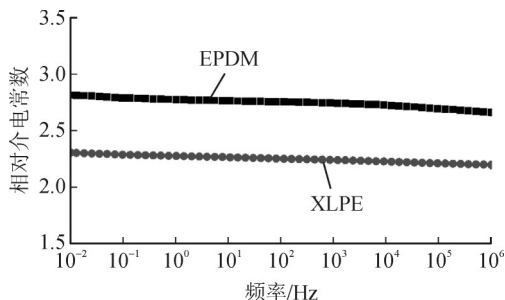


图6 XLPE和EPDM的介电频谱

Fig. 6 Dielectric spectrum of XLPE and EPDM

XLPE和EPDM的电导率见图7。两种材料的电导率均随着温度以及场强的增加而增加,并且在相同场强与温度场强下,EPDM电导率均大于XLPE电导率大约高一个数量级,二者电导率差异较为明显。

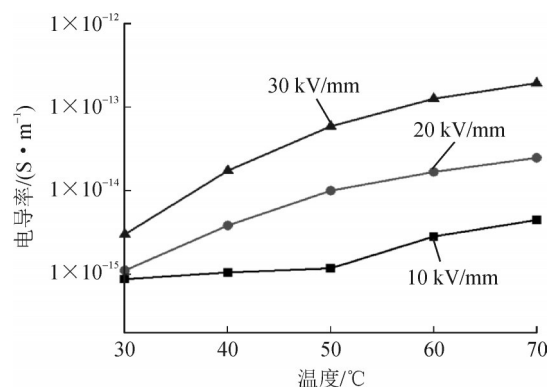
为了更加直观的描述绝缘材料电导率,通过式(2)拟合EPDM以及XLPE的电导率结果^[18]

$$\gamma = A \exp\left(\frac{-\varphi q}{k_b T}\right) \frac{\sinh(10^6 B |E|)}{10^6 |E|} \quad (2)$$

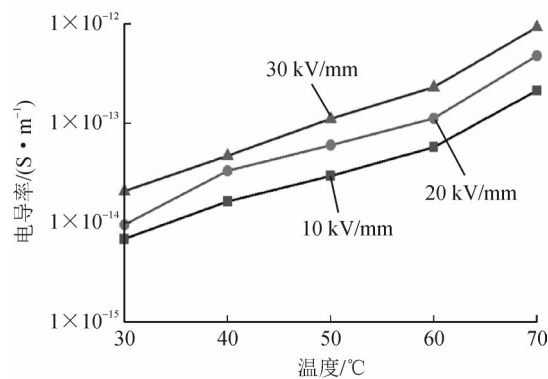
式(2)中: A 为与材料相关的常数; φ 为活化能, kJ/mol; q 为电子电荷量, C; k_b 为玻尔兹曼常数; T 为材料温度, K; B 为电场系数; E 为场强, kV/mm。由式(2)可知绝缘材料的电导率主要由其电导率特征参数值 A 、 B 、 φ 所决定,材料系数 A 影响电导率的起始值,电场依赖系数 B 影响对电导率变化的电场梯度,活化能 φ 影响对电导率变化的温度梯度。

对式(2)拟合的结果见表1。绝缘界面的匹配特性受绝缘材料电导率特征参数值所决定,二者电导率特征参数存在较大区别,EPDM不仅起始电导率值较高,并且EPDM电导率相比XLPE电导率更易受电场,温度的影响,从而导致了界面绝缘匹配特

性较差的情况。



(a) XLPE



(b) EPDM

图7 XLPE和EPDM材料电导率随温度的变化图

Fig. 7 Variation of XLPE and EPDM conductivity with temperature

表1 电导率拟合参数

Table 1 Conductivity fitting parameters

参数	$A/[V \cdot (\Omega \cdot \text{mm}^2)^{-1}]$	$B/(\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	φ/eV
XLPE(本体绝缘)	1.5×10^6	6.1×10^{-8}	0.69
EPDM(接头绝缘)	9.8×10^7	7.2×10^{-8}	0.94

式(2)代表的跳跃电导模型,外施场强与电流密度符合关系为^[19]

$$j = 2ndve \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right) \sinh\left(\frac{eEd}{2kT}\right) \quad (3)$$

式(2)中: j 为电流密度, A/m^2 ; n 为载流子密度, 单位 m^{-3} ; d 为完成跃迁跳跃距离, nm; v 为逃逸频率, s^{-1} ; e 为电子电量, C; E 为电场强度, kV/mm; T 为热力学温度, K。

结合式(2)、(3)可以看出,绝缘材料电导率特征参数值 A 由载流子密度与跳跃距离决定, B 由载流子跳跃距离决定, φ 由跳跃需要的活化能所决定。

EPDM材料加工成应力锥形状,加入绝缘性能较差的硫化剂、促进剂、活化剂等添加物以改善其力学、物理性能,这些添加剂的加入造成了载流子浓度以及其活跃性的增加,从而使得EPDM材料特征参数值的 A 和 B 的增加,并且使得EPDM材料的

活化能较高,绝缘性能较差。

2.2 微观结构对绝缘匹配特性的影响

电介质的微观结构决定着它的电学、热学等多种宏观性能,对于高分子聚合物介质来说,其微观结构对材料性能的影响更加直接。尽管组成元素相同,但聚合物介质的微观和相态结构可以有很大的差别,性能也会有很大的差异。因此对XLPE和EPDM试样的显微结构和结晶形态的研究有助于观察其对匹配特性的影响。

使用型号为VE-9800S扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察XLPE和EPDM试样断面的表面形貌,评估材料内部的均匀性和含杂质情况。XLPE试样的SEM图像见图8。在放大倍数为10 μm 时,可以看到XLPE断面基本平整,并零星分布着几个比较明显的颗粒状物质,推测为XLPE在交联时引入的交联剂DCP,颗粒分布较为均匀,没有明显团聚。中间区域再放大后得到图8(b),可看出XLPE试样的表面基本平滑,呈现出均匀大小的凹坑,且基本不含其他杂质。

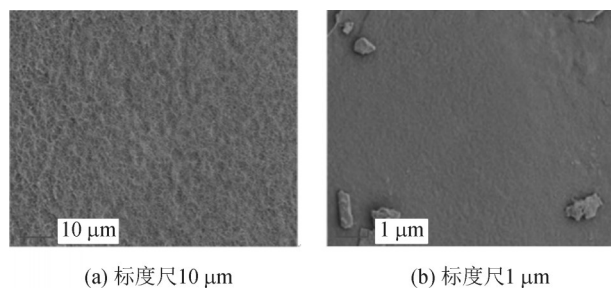


图8 XLPE试样断面显微观测图像

Fig. 8 Microscopic observation image of XLPE specimen section

PDM试样的SEM图像见图9。由图9可看出,材料内部有比较明显的颗粒状物质分布,大小不一,且分布不均匀,有的颗粒约为几 μm ,有的呈点状。大小颗粒可能是EPDM材料中含有多种大小不一的杂质,也有可能是由小颗粒团聚形成的大颗粒。同时可以看到,放大倍数为1 000倍时,XLPE试样的显微图像表面呈现沟壑状,可能是EPDM在生产制备过程中添加剂混料和材料厚度不均匀,各种填料在材料的凹坑处聚集形成的。

为了进一步研究EPDM试样中多种添加剂的种类和含量,使用X射线能谱分析(energy dispersive spectrometer, EDS)和SEM图像结合分析EPDM试样中的元素分布及其含量。在EPDM试样表面喷溅铂电极,使用EDS扫描EPDM试样表面持续30 min,以不同颜色的圆点的方式记录各种元素分布见图10。

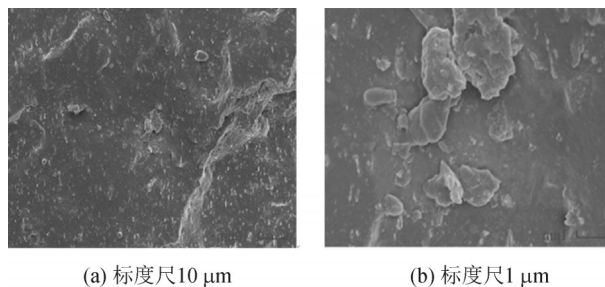


图9 EPDM试样断面显微观测图像

Fig. 9 Microscopic observation image of EPDM specimen section

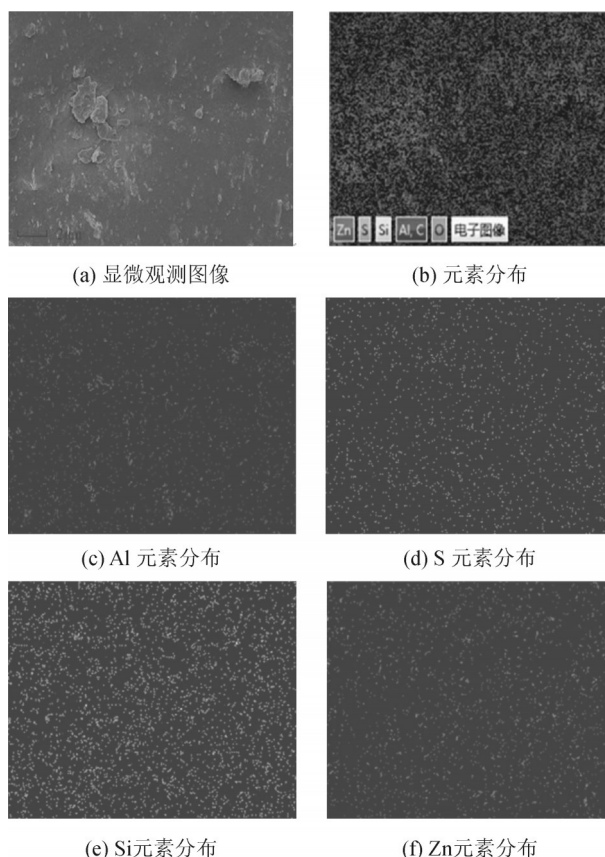


图10 EPDM试样断面的SEM-EDS图像

Fig. 10 SEM-EDS image of EPDM specimen section

从元素分布图可以看出,除纯净的EPDM中含有的C、H、O元素外,EPDM试样中Al、S、Si、Zn元素的含量较高。从图10(c)-(f)中,各种元素分布在整个EPDM试样中,其中S、Si、Zn元素均匀分布,而Al元素出现较明显的团聚,元素在大颗粒处较为聚集,而在其他区域含量较少,说明试样中的大颗粒与其他位置元素分布和含量差异较大,并不是小颗粒团聚形成。

通过能谱分析各元素的含量见表2。

在进行试样的断面观察时,需导电胶带将断面试样固定在电镜自带的承载容器,容器的制备材料主要为Pt元素,因此在进行元素分析时不可避免会带上试样所处的背景,反应在表2中Pt元素的浓度

表2 EPDM试样中各元素质量分数表

Table 2 Content table of each element in EPDM sample

元素类型	表观浓度/%	比值 K	质量分数/%
C	44.57	0.445 72	34.79
O	6.39	0.055 95	4.49
Na	0.66	0.005 68	0.37
Al	1.99	0.018 06	1.07
Si	6.54	0.060 01	3.30
S	2.60	0.027 60	1.69
Zn	1.14	0.011 39	0.91
Pt	55.07	0.550 73	0.65

和质量分数较高,分析EPDM试样的元素组成和质量分数时可忽略Pt元素的影响。EPDM以乙烯、丙烯为主要单体,纯净的EPDM只含有C、H元素,因此能谱分析中发现的O、Na、Al、Si、S、Zn元素都可以视为杂质。在EPDM材料的工业化生产制备过程中,为了提高其加工性能,往往需加入各种添加剂,如硫化剂、促进剂、补强剂、活化剂等。结合常用添加剂的种类和作用和EPDM试样中的元素含量,推断EPDM材料中主要使用的硫化剂为硫,补强剂主要为陶土和水合二氧化硅,活化剂主要为氧化锌。

2.3 空间电荷对绝缘匹配特性的影响

当高压直流电缆系统绝缘界面处积聚大量空间电荷时,界面处的电场强度会出现增强。当局部电场强度超过绝缘材料本身所能承受的最大场强时,就会引发界面处沿面闪络甚至绝缘击穿^[20~22]。因此可以通过测试两种绝缘材料界面处的空间电荷来评价XLPE和EPDM的绝缘匹配特性,当界面处空间电荷积聚较少时,说明绝缘匹配较好。反之,若界面处积聚较多的空间电荷时,两种材料的匹配性较差,电导率与介电常数之间的绝缘配合较差。

由式(2)可知由于XLPE/EPDM界面二者电导率的差异会导致界面会积聚一定空间电荷,而根据式(3)由于空间电荷的积聚造成的场强畸变会进一步拉大两者的电导率差值从而使积聚的空间电荷增加,如此恶性循环,导致局部大量空间电荷积聚,匹配性能劣化,并且场强和加压时间会更加促进空间电荷的积聚过程。

采用电声脉冲法测试了XLPE/EPDM试样的空间电荷和电场强度分布特性,由空间电荷积聚导致的电场强度畸变率 δ_{E0} 可表示为^[23~24]

$$\delta_{E0} = \left| \frac{E_{\max} - E_0}{E_0} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中: $E_{\max}$ 为试样内电场强度的最大值; E_0 为试样的外加电场强度,可由外加电压与试样厚度的比值求得。

不同电场强度不同极化时间下复合试样的空间电荷和电场强度在厚度上的分布见图11(a)-(f)。场强畸变率见图11(g)所示。复合XLPE/EPDM试样由空间电荷积聚导致的电场强度畸变率与外加场强和极化时间有关,随着外加场强和极化时间的增加而增大,极化15 min、外加电场为15 kV/mm时场强畸变率有最小值为115.18%,在极化时间为60 min、外加场强为25 kV/mm时,由空间电荷积聚引起的电场强度畸变程度最大为209.49%。随着极化时间和外加电场的增加,复合试样内空间电荷的积聚效应增加,内部场强畸变更严重,场强畸变率不断增加。可见,XLPE/EPDM复合介质界面处的空间电荷积聚导致了约100%~200%的电场畸变率,可能为界面不匹配的主要因素^[25~26]。根据上述绝缘匹配系数分析,通过EPDM纳米掺杂改性等手段,以降低EPDM的电导率从而降低空间电荷积聚效应^[27~28]。

2.4 纳米填料掺杂改善绝缘匹配特性的研究

为了达到更优良的绝缘匹配特性,在EPDM制备过程中加入质量分数为1%的纳米填料,测试了改性后EPDM的电导率特性以及改性后XLPE/EPDM复合材料的空间电荷和电场强度分布特性,对比改性前后空间电荷积聚和场强畸变程度,以探讨纳米改性EPDM应用于国产高压直流电缆附件的可行性。

填充纳米颗粒后的EPDM的电导率分布特性见图12。改性后的EPDM在10 kV/mm、30℃时的电导率有最小值 1.65×10^{-15} S/m,在30 kV/mm、70℃时出现最大值 1.29×10^{-13} S/m。对比第2节中测试的改性前EPDM的电导率,改性后EPDM的电导率较改性前有一定幅度的下降,电导率更接近同一场强同一温度下XLPE的电导率,XLPE与改性后EPDM的绝缘配合较好。

改性后的EPDM材料的空间电荷和电场强度分布特性见图13。改性后的EPDM的空间电荷主要集中在试样与下电极接触位置,为同极性空间电荷,主要来自于下电极的电荷注入。在厚度为0~300 μm 的范围内,改性后EPDM材料内部基本没有电荷积聚。可能是纳米填料的引入抑制了材料内部的空间电荷积聚,掺杂的纳米颗粒具有的界面效应在聚合物绝缘介质内部引入了深陷阱,这些陷阱能起到束缚电荷的作用,减小材料内部载流子的迁移速率,从而降低载流子在外加电场下的定向迁移较少电荷的积聚。改性后的EPDM材料内部的电场强度分布见图14(b)。可以看到在EPDM内部,电场强度基本与外加电场相同,呈现出电场强度的平台,基本不产生畸变。

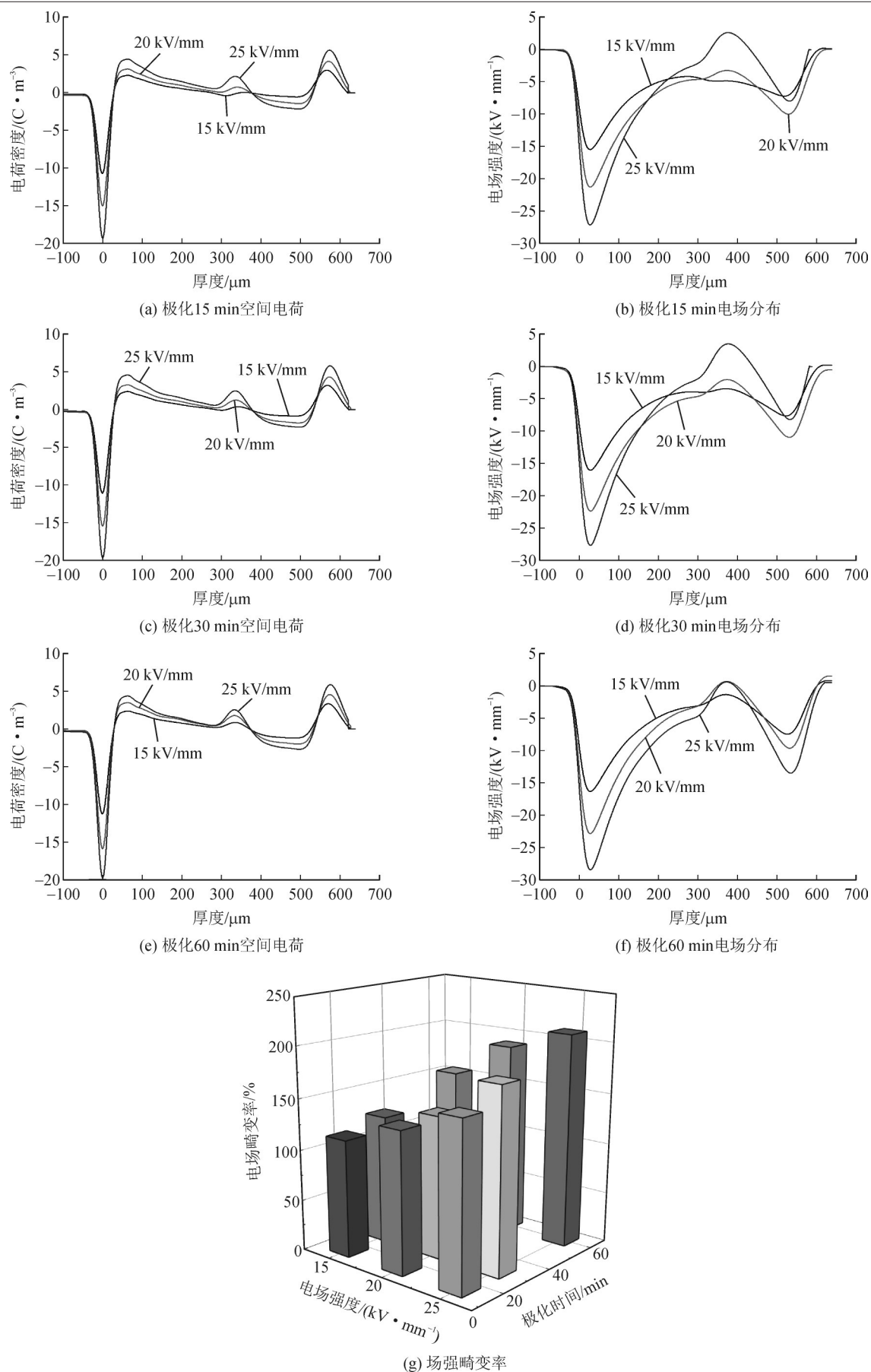


图 11 复合 XLPE-EPDM 试样电场强度分布与场强畸变率

Fig. 11 Electric field intensity distribution and distortion rate of composite XLPE-EPDM samples

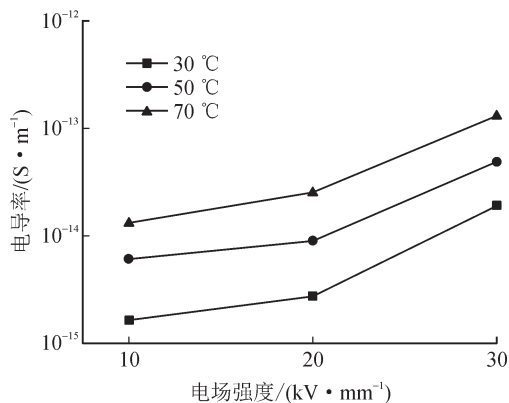
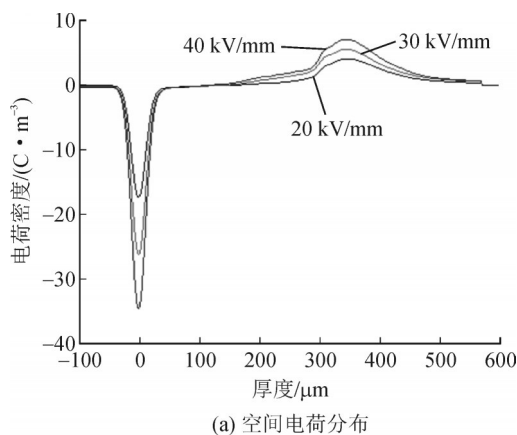
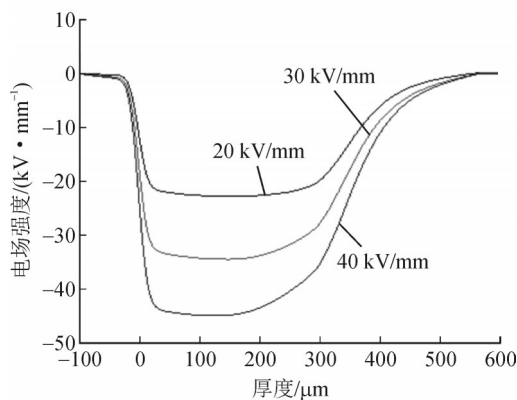


图 12 改性后 EPDM 的电导率分布图

Fig. 12 Conductivity profile of modified EPDM



(a) 空间电荷分布



(b) 电场强度分布

图 13 改性后 EPDM 的空间电荷和电场强度分布图

Fig. 13 Distribution of space charge and electric field intensity of modified EPDM

改性前后的复合 XLPE/EPDM 试样极化 30 min 的空间电荷和电场分布特性见图 14。改性后复合试样积聚的空间电荷远小于改性前,改性前的空间电荷主要集中在复合试样与电极接触位置和两种试样的交界面处,电荷极性为异性性,主要来自材料内部的添加剂电离。改性前电场在复合试样与上电极接触位置即厚度约为 0 时达到最大值,最大电场强度约等于外加场强大小,但随着厚度增加,电场畸变严重,在复合试样内部先增大再较小最后增大并在复合试样与下电极接触位置趋于 0。电场

强度在试样内部出现 3 个极值峰,对应空间电荷分布图中的 3 个峰值。

改性后复合试样的厚度约为 300 μm 处出现异性电荷,此厚度对应于复合试样中 XLPE 与 EPDM 的界面,异性电荷峰值的电荷密度较小,空间电荷积聚程度较低。与改性前的复合试样的空间电荷分布特性相比,改性后的空间电荷只出现一个异性电荷峰,电荷密度远小于改性前,说明纳米填料的加入降低了材料内部载流子的迁移,从而有效抑制了 XLPE/EPDM 复合试样中的空间电荷积聚。从电场强度分布图也可以看出,材料内部的场强基本维持在同一水平,仅在两种绝缘材料界面处有电场强度的突变,对应界面处的电荷积聚。

通过式(4)计算了改性后的复合 XLPE/EPDM 试样不同电场强度下的电场畸变率,见图 15。随着电场强度的增大,复合试样的场强畸变率增大。改性后的复合 XLPE/EPDM 试样在电场强度为 15 kV/mm 时的场强畸变率为 6.73%, 20 kV/mm 时的场强畸变率为 13.23%, 25 kV/mm 时的场强畸变率为 19.77%。改性前的复合试样的场强畸变率均在 120% 以上,改性后的畸变率远远小于改性前。材料的场强畸变率反映了材料内部空间电荷的积聚程度,纳米填料的引入,会有效抑制绝缘材料内部载流子的定向迁移。材料中的空间电荷正是来自于载流子的迁移过程中被缺陷捕获形成的,载流子的定向迁移减少从而减少了迁移过程中产生的空间电荷,电场畸变程度下降。随着外加电场强度的提高,载流子振动能量增大,纳米颗粒的界面效应引入的深陷阱束缚电荷的能力变弱,载流子迁移率增加,材料内部积聚的空间电荷增多,电场畸变严重。

3 结论

1)通过对 XLPE 和 EPDM 的电导率测试分析,结果表明 EPDM 具有更高的材料系数、电场系数和活化能,这使得 EPDM 表现出更高的电导率。

2)EPDM 材料内有明显的颗粒状物质分布,主要为 Al、S、Si、Zn,可能是 EPDM 中含有硫、陶土、氧化锌等添加剂。EPDM 硫化剂、促进剂、活化剂等添加剂造成了 EPDM 与 XLPE 电导率特征参数的巨大差异,从而影响了绝缘界面匹配特性。

3)XLPE 和 EPDM 界面处主要积聚异性空间电荷,随着极化时间和外加电场的增加,复合试样内空间电荷的积聚效应增加,内部场强畸变更严重,场强畸变率不断增加,导致匹配性能下降。

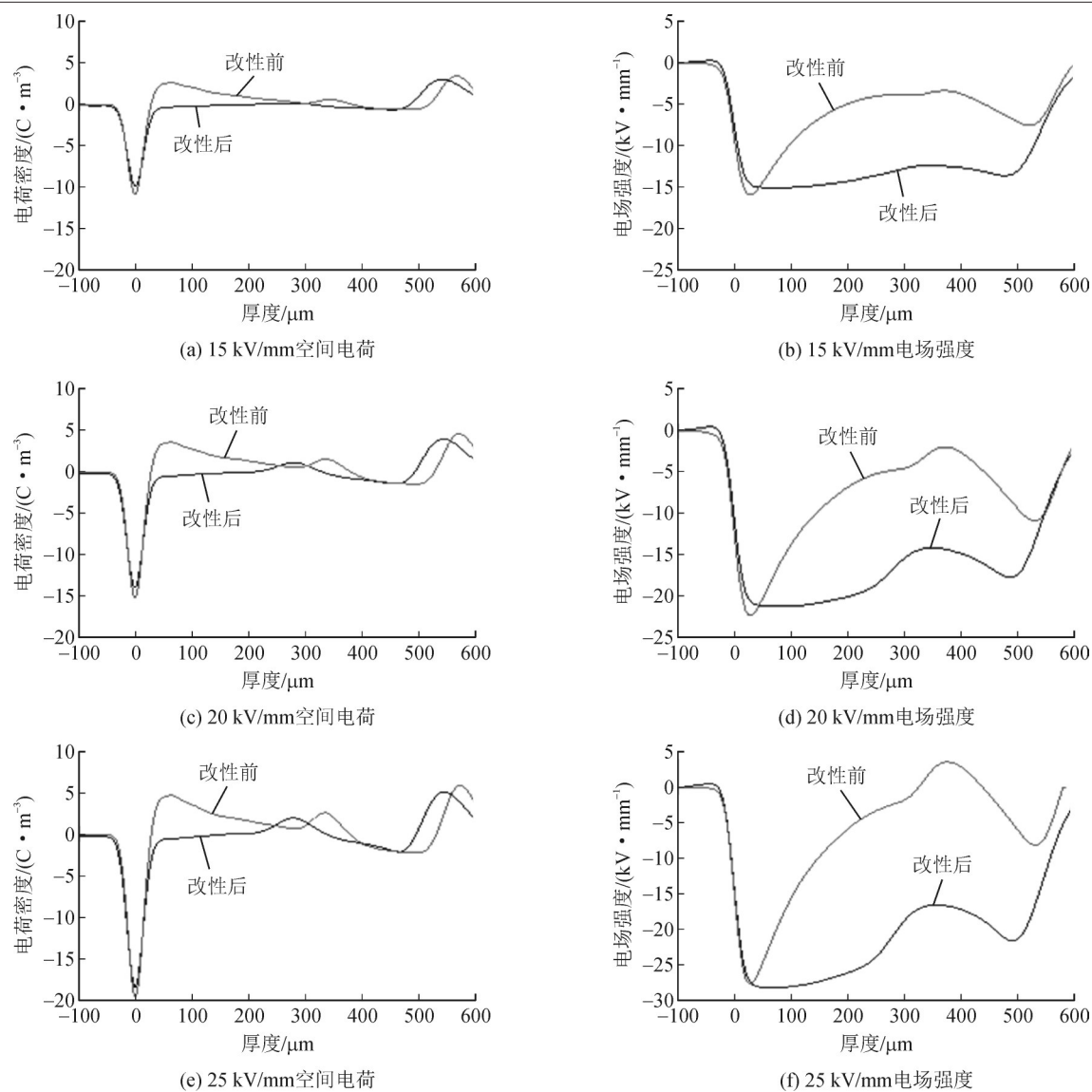


图 14 改性前后复合 XLPE/EPDM 试样的空间电荷和电场强度分布图

Fig. 14 Space charge and electric field intensity distributions of composite XLPE-EPDM samples before and after modification

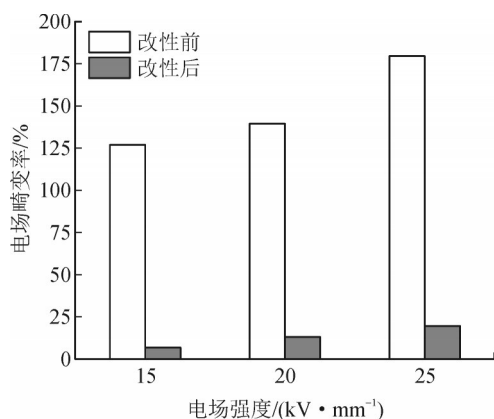


图 15 改性前后复合试样的场强畸变率对比图

Fig. 15 Comparison of field strength distortion rates of composite samples before and after modification

4)通过对 EPDM 材料进行纳米掺杂改性,有效抑制了材料内部载流子的迁移,减少了 EPDM 的电导

率和空间电荷。改性后 EPDM 的电导率与 XLPE 更接近,复合 XLPE/EPDM 绝缘界面空间电荷的积聚程度减少,电场畸变降低,绝缘匹配特性得到改善。

参考文献:

- [1] ROSS R. Dealing with interface problems in polymer cable terminations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1999, 15(4): 5-9.
- [2] DU B X, ZHU X H, GU L, et al. Effect of surface smoothness on tracking mechanism in XLPE-Si-rubber interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(1): 176-181.
- [3] DANG C, FOURNIER D. Dielectric performance of interfaces in premolded cable joints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 29-32.
- [4] ZHU Bin, JIA Zhidong, HU Hao, et al. Relationship between the interfacial ramped DC breakdown voltage and the morphology of the XLPE/SiR interface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 689-697.

- [5] LI Chunyang, ZHANG Chengcheng, ZHAO Hui, et al. Grafted UV absorber as voltage stabilizer against electrical degradation and breakdown in cross-linked polyethylene for high voltage cable insulation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2021(4): 109498.
- [6] 王子健, 周凯, 朱光亚, 等. 基于时频域转换法的配网电缆冷缩中间接头受潮诊断[J]. *高电压技术*, 2022, 48(6): 2178-2186.
WANG Zijian, ZHOU Kai, ZHU Guangya, et al. Moisture diagnosis method for cold-shrinkable intermediate joints of distribution cables based on time-frequency domain conversion[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(6): 2178-2186.
- [7] 李新海, 陈昱, 刘均裕, 等. 考虑轴向散热的10 kV三芯电缆中间接头稳态热路模型分析[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(10): 56-62.
LI Xinhai, CHEN Yu, LIU Junyu, et al. A steady state thermal circuit model analysis of the 10 kV 3-core cable joint considering axial heat dissipation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(10): 56-62.
- [8] 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.
FEI Yijun, ZHANG Yunxiao, ZHOU Yuanxiang. Thermo characteristics of silicone rubber and its effects on operational reliability of extra-high voltage cable accessories[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2014, 33(12): 30-34.
- [9] 张静, 李忠群, 王伟. 高电压电缆附件局部放电检测技术分析[C]//全国第九次电力电缆运行经验交流会. 上海: 中国电力科学研究院有限公司, 2012: 455-456.
ZHANG Jing, LI Zhongqun, WANG Wei. Analysis of partial discharge detection technology for high voltage cable accessories [C]//China Electric Power Research Institute. Shanghai: China Electric Power Research Institute, 2012: 455-456.
- [10] 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): 44-50.
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): 44-50.
- [11] 魏文青, 淡淑恒. 基于有限元和神经网络的电缆输送新能源极限能力评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 191-200.
WEI Wenqing, DAN Shuheng. Evaluation of ultimate capacity of cable transmission new energy based on finite element and neural network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 191-200.
- [12] 王霞, 余栋, 段胜杰, 等. 高压电缆附件设计环节中几个关键问题探讨[J]. *高电压技术*, 2018, 44(8): 2710-2716.
WANG Xia, YU Dong, DUAN Shengjie, et al. Dealing with some key design problems in HV cable accessory[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(8): 2710-2716.
- [13] 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): 47-51.
LYU 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): 47-51.
- [14] CHOI W C, YOON J Y, PARK K S, et al. Electrical characteristics of the XLPE/EPDM double layered interface at the power cable joint[C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington: IEEE, 1998: 704678.
- [15] 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): 518-526.
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): 518-526.
- [16] DANG C. Effect of the interfacial pressure and electrode gap on the breakdown strength of various dielectric interfaces[C]//Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Montreal: IEEE, 1996: 695-698.
- [17] 陈庆国, 秦艳军, 尚南强, 等. 温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2619-2626.
CHEN Qingguo, QIN Yanjun, SHANG Nanqiang, et al. Influence analysis of temperature on electric-field distribution in HVDC cable joint[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2619-2626.
- [18] 聂永杰, 王威望, 李盛涛, 等. 基于电流积分技术的XLPE绝缘动态电荷行为和高场电导特性[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2971-2980.
NIE Yongjie, WANG Weiwang, LI Shengtao, et al. Dynamic charges behavior and high-field conduction characteristics of XLPE insulation based on current integrated charge technique[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2971-2980.
- [19] 谢坤, 张伟, 张杰, 等. 高压电缆附件绝缘理化性能与电气特性研究[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(1): 8-16.
XIE Kun, ZHANG Wei, ZHANG Jie, et al. Research on physico-chemical performance and electrical characteristics of insulating materials for high voltage cable accessories[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(1): 8-16.
- [20] 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): 2168-2177.
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): 2168-2177.
- [21] 沙浩源, 郭涛, 赵兴华, 等. 基于空间矢量复合判断指标的变电站动力电缆漏电检测算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 168-176.
SHA Haoyuan, GUO Tao, ZHAO Xuehua, et al. Leakage detection algorithm for long-section power cables in substations based on a composite judgment index of space vector[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 168-176.
- [22] 黄烜城, 封建宝, 吴木木, 等. 高压直流挤包绝缘海陆复合电缆温度场及空间电荷分析[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(2): 118-127.
HUANG Xuancheng, FENG Jianbao, WU Mumu, et al. Analysis on temperature field and space charge of high-voltage DC extruded insulated submarine-land composite cable[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(2): 118-127.
- [23] 额定电压500 kV及以下直流输电用挤包绝缘电力电缆系统第1部分: 试验方法和要求: GB/T 31489.1—2015[S]. 2015.
Technical specification of DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV—Part 1: Test methods and requirements: GB/T 31489.1—2015[S]. 2015.
- [24] WU Kai, CHENG Chuanhui. Interface charges between insulating materials[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(4): 2633-2642.
- [25] DOEDENS E, JARVID E M, GUFFOND R, et al. Space charge accumulation at material interfaces in HVDC cable insulation part I—experimental study and charge injection hypothesis[J]. *Energies*, 2020, 13(8): 2005.
- [26] AKRAM S, YANG Yan, ZHONG Xin, et al. Influence of nano layer

- [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 179-187.
- [23] 孟晓承, 车仁飞, 高 师. 基于改进灰色关联分析模型的输电线路停运率估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 86-91.
MENG Xiaocheng, CHE Renfei, GAO Shi. Outage rate estimation for transmission lines based on improved gray relational analysis model[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(11): 86-91.
- [24] 陈 力, 汤 霖, 左中秋, 等. 基于变异系数法和灰色关联度的高压并联电容器综合评价研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 27-32.
CHEN Li, TANG Lin, ZUO Zhongqiu, et al. Research on comprehensive evaluation of high voltage shunt capacitor based on coefficient of variation method and grey correlation degree[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 27-32.
- [25] 李龙腾, 景 博, 胡家兴, 等. 基于PCMD健康指数的QFP封装互联结构退化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(12): 100-108.
LI Longteng, JING Bo, HU Jiaying, et al. Degradation law analysis of QFP package interconnection structure based on PCMD health index[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(12): 100-108.
- [26] 孙黎霞, 王中一, 戴 洪, 等. 计及网络结构的配电网健康状态评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 64-74.
SUN Lixia, WANG Zhongyi, DAI Hong, et al. The health state assessment method of a smart distribution network considering network structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 64-74.
- [27] 郑业爽, 李世春, 鲁 玲. 基于多策略ISOA优化SVM的变压器故障诊断研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 38-44.
ZHENG Yeshuang, LI Shichun, LU Ling. Transformer fault diagnosis based on multi-strategy ISOA optimized SVM[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 38-44.
- [28] 王 建, 朱文兵, 辜 超, 等. 基于健康指数的电力变压器状态评估[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 248-253.
WANG Jian, ZHU Wenbing, GU Chao, et al. Condition assessment of power transformer based on health index[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 248-253.
- [29] IEEE standard framework for reliability prediction of hardware: IEEE Std 1413: 2010[S], 2010.
- [30] 刘 翌, 潘小辉, 胡浚惠. 基于脆弱性的电力系统可靠性评估及其算例分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 20-23.
LIU Yi, PAN Xiaohui, HU Xunhui. Reliability evaluation of power system based on vulnerability and its example analysis[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 20-23.
- [31] HUGHES D, DENNIS G, WALKER J, et al. Condition based risk management(CBRM)—enabling asset condition information to be central to corporate decision making[C]//CIRED 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Turin, Italy: IET, 2005: 1212-1217.
- [32] 汪惟源, 程锦闽. 海水浸入作用对交流三芯海缆工频过电压计算影响[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 175-180.
WANG Weiyuan, CHENG Jinmin. Calculation of power frequency overvoltage of AC three-core submarine cable considering laying environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 175-180.
- [33] 程 林, 何 剑. 电力系统可靠性原理与应用[M]. 第二版. 成都: 西南交通大学出版社, 2015.
CHENG Lin, HE Jian. Principles and applications of power system reliability second edition[M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.
- [34] 任 岷. 并网海岛微电网容量优化配置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
REN Min. Research on capacity optimal configuration of grid-connected island microgrid[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- 张安安(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合能源系统(通信作者)(E-mail: 2564764@qq.com)。
- 袁海云(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态评估与检修(E-mail: 1067459575@qq.com)。
- 王艳红(1986—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋石油工程电气设备(E-mail: wangyh88@cnooc.com.cn)。
- 李 茜(1988—), 女, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网、综合能源系统和电气设备智能监测控制(E-mail: swpuliqian@163.com)。

(上接第188页)

- structure of polyimide film on space charge behavior and trap levels [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1461-1469.
- [27] YANG Pei, HE Meng, REN Xiancheng, et al. Effect of Carbon nanotube on space charge suppression in PP/EPDM/CNT nanocomposites[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27(5): 132.
- [28] BAFERANI M A, LI Chuanyang, TEFFERI M, et al. Large improvement in DC electrical properties of EPDM with 2D platelet nanoclay[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(47): 475304.
- 戴明浩(1998—), 男, 助理工程师, 主要从事继电保护工作(E-mail: absoluedmh@126.com)。
- 高景晖(1984—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压绝缘技术和功能电介质方面的研究工作(通信作者)(E-mail: gaojinghui@xjtu.edu.cn)。
- 钟力生(1961—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电介质与电气绝缘的研究工作(E-mail: lszhong@xjtu.edu.cn)。