

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.018

110 kV 电缆附件EPDM绝缘的理化性能及电荷特性研究

万子剑^{1,2}, 张伟³, 谭笑³, 陈朝阳⁴, 谢坤², 谢庆^{1,5}, 任成燕²

(1. 华北电力大学输变电设备安全防御重点实验室, 河北保定 071000; 2. 中国科学院电工研究所等离子体科学和能源转化北京市国际科技合作基地, 北京 100190; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 4. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司, 江苏常州 213004; 5. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 电缆附件是输电线路运行中易发生故障的薄弱环节, 为探究不同运行年限高压电缆附件绝缘老化状态的变化, 对三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)绝缘 110 kV 高压电缆附件微观结构、化学组成、电气性能和表面电荷特性进行观测和分析。结果表明: 随运行年限增加, 附件在多种因素作用下发生老化, EPDM 绝缘击穿场强整体呈下降趋势, 陷阱能级向浅陷阱偏移, 浅陷阱电荷密度增大。附件绝缘在老化过程中引入 C=O、-OH 等极性基团, 同时和硅油反应引入含 Si 基团, 使 EPDM 介电常数增加; 另一方面, 绝缘电热老化后期产生的强极性基团等化学缺陷可使 EPDM 陷阱能级加深, 同时深陷阱密度增加, 而老化过程中出现的重结晶现象有利于击穿场强的保持和提升。EPDM 绝缘的击穿场强和陷阱参数受附件类型和材料制备工艺影响较小, 能较好地反映高压电缆附件的绝缘老化状态。

关键词: 电缆附件; 三元乙丙橡胶; 理化性能; 表面电荷特性; 绝缘老化

Study on Physicochemical and Charge Characteristics of EPDM Insulation for 110 kV Cable Accessories

WAN Zijian^{1,2}, ZHANG Wei³, TAN Xiao³, CHEN Zhaoyang⁴, XIE Kun², XIE Qing^{1,5},
REN Chengyan²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China; 2. Beijing International S&T Cooperation Base for Plasma Science and Energy Conversion, Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Nanjing 211103, China; 4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou Power Supply Company, Jiangsu Changzhou 213004, China; 5. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Cable accessories are weak links with frequent failure in the operation of transmission line. For exploring the variation of insulation aging status of high-voltage cable accessories with different service years, the microstructure, chemical composition, electrical performance and surface charge characteristics of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) insulated 110 kV high-voltage cable accessories are measured and analyzed. The results show that with the increase of service years, the aging of the accessories is occurred under multiple factors. The breakdown field strength of EPDM insulation shows a downward trend as a whole, the trap energy level shifts towards shallow trap, and the charge density of shallow trap increases. During the aging process, polar groups such as C=O and -OH are introduced into the accessories insulation. At the same time, reactions with silicone oil introduces Si-containing groups collectively leading to an increase in the dielectric constant of EPDM. On the other hand, such chemical defect as extremely strong functional group which has occurred at the later stage of insulation electrical heating keeps

收稿日期: 2025-07-25; 修回日期: 2025-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477166); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52477166), Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (J2022009).

the EPDM trap energy level deepen and, at the same time, the deep trap density increases. However, the recrystallization phenomenon in the aging process is beneficial for maintaining and enhancing the breakdown field strength. The breakdown field strength and trap parameters of EPDM are less affected by the type of cable accessories and material preparation technology, which can better reflect the aging status of high-voltage cable accessories.

Key words: cable accessories; EPDM; physicochemical properties; surface charge characteristics; insulation aging

0 引言

随着我国经济和工业的高速发展,对电能产量和供电可靠性的要求也日益提高,而电力电缆在传输电能方面有着不可或缺的作用^[1-3]。电力输送网络由电缆及其附件构成,附件包括中间接头与电缆终端,在电缆系统中有连接与过渡的关键功能。电缆附件用来缓和金属套与电缆外半导体层分开处的电场畸变和轴向应力^[4]。与电缆本体相比,电缆附件因结构复杂、施工质量及界面问题等容易发生故障,输电线路发生故障时大多是电缆附件的问题^[5-6],因此为保证电网安全可靠运行,对电缆附件的研究是十分必要的。

电缆附件常用的绝缘材料有两种:分别为硅橡胶(SIR)和三元乙丙橡胶(EPDM)^[7],文中研究的是以 EPDM 为绝缘的电缆附件。EPDM 电气性能十分优异,同时其耐电晕性、耐臭氧性和耐热老化性也很突出^[8]。电缆运行中受电、热、环境、机械应力、负荷等各种作用,复杂的运行环境和工况使得电缆绝缘的老化状态和机制仍不清晰^[9]。因此研究 EPDM 绝缘材料的微观形貌、理化性能、电气特性及其关联性,对提取电缆绝缘老化关键指标以及电缆健康状态评估具有重要意义。

通常从电缆附件的电气、机械性能、防水密封性以及加工工艺等对其进行可靠性评价,而对电缆附件绝缘特性,测试方法较为丰富,其中介电参数表征是基础且关键的测试手段。陈杰等^[10]以 EPDM 和 SIR 为绝缘的两种退役高压电缆附件进行研究,分析发现电缆附件经历严重故障,其介损和相对介电常数会明显增大,体电阻率减小;胡丽斌等^[11]研究了退役电缆附件的化学组成、微观形貌和空间电荷等,得出在 EPDM 绝缘电缆附件中,电缆中间接头绝缘陷阱中心能级比电缆终端能级高,但其陷阱密度小于电缆终端;Wang 等^[12]经实验表明,光交联 EPDM 的表面光氧化和热氧化降解随着老化时间的增加而增加,在光氧化和热降解过程中形成氢过氧化物和羰基作为主要降解产物;Tefferi 等^[13]指出由于乙丙橡胶较低的结晶度和填充性质,导致其体内不易

积聚空间电荷,并且脱气处理对其改善作用不大;范星辉等^[14]测试了 3 条不同运行年限电缆绝缘层不同位置在不同实验温度下的介电频谱,发现随电缆运行年限的增大,电缆绝缘层不同位置的电导率、松弛峰峰值频率均表现为先减小后增大的现象;张运周等^[15]通过对比不同运行年限退役 110 kV 交联聚乙烯电缆发现,羰基指数和交联度等参数能很好体现电缆绝缘老化状态。

因此,为确保输电线路供电可靠与安全平稳运行,须监测电缆附件的理化性能和长时间运行的老化情况^[16]。国内外对电缆本体绝缘状态及其理化性能研究较多,但针对不同运行年限电缆附件绝缘的电荷特性及理化性能研究还比较少,且对附件绝缘老化机制的分析还不充分。文中测试不同运行年限电缆附件 EPDM 绝缘的微观结构、化学组成和电气性能等参数,通过等温表面电位衰减法研究 EPDM 绝缘的电荷和陷阱特性,分析附件绝缘理化特性和电气性能之间的关联性,可为电缆附件绝缘监测及老化状态评估提供参考。

1 实验方法

1.1 样品信息

试样来自不同输电线路退役电缆附件,电压等级均为 110 kV,电缆本体材料是 XLPE,附件材料是 EPDM。对试样进行编号,分别为 E-1、E-2、E-3、E-4、E-5、E-6。表 1 为样本基本信息。

表 1 试样基本信息

Table 1 Basic information of the samples

编号	来源	运行年限/a	运行状态
E-1	110 kV 电缆接头	1	放电击穿/外形良好
E-2	110 kV 电缆终端	2	应力锥烧蚀
E-3	110 kV 电缆终端	4	铅封不良/外形良好
E-4	110 kV 电缆终端	4	击穿故障
E-5	110 kV 电缆终端	9	外形完好
E-6	110 kV 电缆终端	10	局部放电/接地不良

E-1 取自电缆中间接头,其余样本来自 110 kV 运行线路中的电缆终端,退役前电缆附件发生过故障或者有铅封不良、接地和工艺不良等问题。样本

具体情况如下: E-1 试样从中间接头取下, 运行中因均压套处出现悬浮电位, 进而出现局部放电, 导致绝缘局部击穿; E-2 取自自故障相终端, 发生过击穿事故, 导致应力锥烧蚀; E-3 电缆终端运行中存在铅封不良问题, 但整体外形保持完整; E-4 为故障相电缆终端, 和 E-3 来自同一线路, 其表面损毁严重, 电缆尾管铅封部位整体断裂, 复合套管密封不良; E-5 与 E-6 来自同一运行线路, 外形完好; E-6 在运行中因导体均压套连接不良, 造成局部放电, 且有接地不良的问题。以上试样均取自附件应力锥附近和电缆本体绝缘搭接的绝缘部位, 对于有明显故障点的电缆附件, 其取样部位为故障点附近绝缘, 以反映运行状态对电缆附件绝缘的影响。文中电缆附件的故障部位主要在应力锥附近, 因此, 外形完好附件和故障附件绝缘的取样部位基本一致。同时, 为保证样品的切割均匀性, 采用橡胶类绝缘专用切片对附件绝缘进行切片制样; 为保证测试结果的可靠性, 每种测试均采用多个样品进行测试和分析。

实验准备阶段, 将试样切成 45 mm×45 mm 厚薄均匀的正方形片, 厚度在 1 mm 左右, 每个附件准备 10 片试样, 使用无水乙醇清洗表面污秽, 自然条件下风干备用。

1.2 表面形貌和成分表征

采用扫描电镜(SEM)观测样本表面微观形貌, 观测所得图像放大倍数为 12~10⁶。

通过红外光谱仪(FTIR)表征试样表面官能团和化学键, 本实验通过 FTIR-650 进行分析。机器设置为反射模式, 测量范围为 450~4 000 cm⁻¹, 分辨率设置为 2 cm⁻¹, 实验时取 16 次测试的平均值; 选用 D8 ADVANCE 设备进行 X 射线衍射(XRD)观测, 衍射角 10°~90°, 扫描速率设定为 0.2 %/s。

1.3 介电参数测试

通过介电参数测试表征附件绝缘试样的电气性能。击穿场强测试利用介电强度测试仪完成, 输出电压为 0~80 kV。采用球冠-板电极开展实验, 升压速率设置为 2 kV/s, 每次测试间隔 1 min, 每组击穿实验做 10 次, 击穿场强取其平均值; 介电常数和介质损耗利用 Agilent E4 890 A 阻抗分析仪完成, 频率范围为 50 Hz 到 2 MHz。绝缘试样电阻率测试通过吉利 6 517B 静电计完成, 为减小测量误差, 取 10 次测试平均值为最后结果。

1.4 电荷特性表征

基于等温表面电位衰减(isothermal surface potential decay, ISPD)理论来表征试样表面陷阱参数, 根据式(1)、(2)来计算^[17-18]:

$$E_T = k_B T \ln(v_{ATE} t) \quad (1)$$

$$Q_s(t) = t \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{q_c L} \frac{d\phi_s(t)}{dt} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: E_T 为陷阱能级; Q_s 为陷阱电荷密度; k_B 为玻尔茨曼常数; T 为样品温度; v_{ATE} 为陷阱电荷试图逃逸频率(数值为 $4.17 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$); t 为衰减时间; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为样品相对介电常数; q_c 为电子电荷量; L 为样品厚度; $\phi_s(t)$ 为表面电位值^[19]。

采用实验室自主搭建的表面电位测试系统进行表面电位衰减的测试^[18], 充电方式采用电晕充电。充电电极为负极, 电压为 -3 kV, 针尖距试样上表面为 5 mm, 充电时间为 60 s, 充电完毕把被测试样移动到静电探头下, 试样和探头间距离控制在 2 mm, 控制实验温度在 25 °C 左右, 相对湿度在 40% 以内。

2 实验结果

2.1 微观形貌观测

电缆附件实际运行过程中发生局部放电、绝缘击穿和应力锥烧蚀等情况会导致其绝缘表面形貌发生变化, SEM 测试能更好观察试样表面微观形貌。为了提高电缆附件绝缘的机械强度和耐热性能, EPDM 绝缘中常填充大量微纳米无机填料, 电缆附件在运行中填充物的聚集状态会直接影响其介电性能^[11, 20-21]。试样放大 2 千倍后的 SEM 图像见图 1。

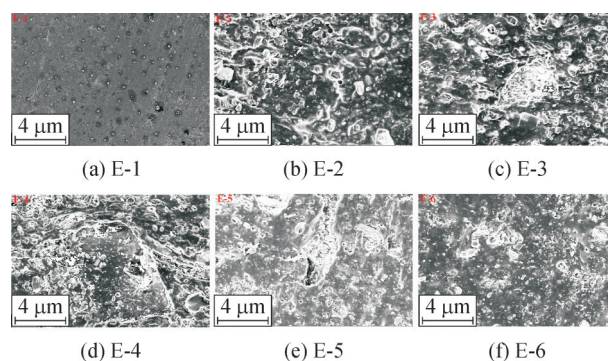


图1 退役电缆附件表面微观形貌图

Fig. 1 Surface microscopic topography of decommissioned cable accessories

如图 1 可见, 试样均有微纳米填充颗粒, 但填充物的尺寸和分布状态均不相同, 这会影响绝缘界面电场及其老化状态。从 E-1 表面形貌图中可以看出, 微纳米填充颗粒小且分布较为均匀, 试样 1 取自中接头, 其运行年限较短, 仅为 1 年, 运行导致的内部掺杂颗粒团聚现象不明显, 而作为中接头需要更强的耐压性能, 小粒径的微纳米填充颗粒在增强材料机械性能和耐热性的同时, 对材料介电性能

有一定影响,无机颗粒的均匀分布有利于改善周围电场分布,从而提升耐压性能。相关研究表明,电缆中间接头 EPDM 绝缘中掺杂物以纳米 SiO_2 为主,而电缆终端绝缘中以微纳米 Al_2O_3 为主,同时有少量的 SiO_2 和 MoO_3 [11]。

SEM 结果表明,电缆终端绝缘填充颗粒整体较大,且随运行年限增大有不同程度的团聚现象,其中运行年限较长的 E-3 至 E-6 试样其填充物聚集更为明显, E-2 颗粒分布相对较为均匀。运行年限最长的 E-6 试样其填充颗粒尺寸在终端绝缘中相对较小,整体分布较为均匀,但仍有颗粒团聚现象。

2.2 FTIR 及 XRD 测试

电缆附件运行过程中,由于受到光、氧、热、水、微生物和环境等因素的影响,其表面结构和化学组成可能会发生变化,为表征电缆附件发生的变化,通过 FTIR 和 XRD 测试分析物质组成和微观结构,进而表征电缆附件的老化状态 [21]。

附件绝缘 FTIR 谱图见图 2。从图 2 试样 FTIR 光谱来看,EPDM 的主特征峰波数为 $2\ 920$ 、 $2\ 850$ 、 $1\ 461$ 、 $1\ 078$ 、 $798\ \text{cm}^{-1}$ 。其中, $2\ 920$ 、 $2\ 850\ \text{cm}^{-1}$ 为烷烃 CH_2 的伸缩振动吸收峰;波数 $1\ 461\ \text{cm}^{-1}$ 为 CH_3 不对称变角振动,为 CH_3-C 化学键;波数 $1\ 696\ \text{cm}^{-1}$ 处出现 $\text{C}=\text{O}$, $1\ 078\ \text{cm}^{-1}$ 处有明显的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键,可能是乙丙橡胶热氧老化产生的;而在 $798\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰为 $\text{Si}-\text{C}$ 吸收峰,该吸收峰比较弱,可能是附件填充的硅油放电时和绝缘发生反应产生;在 $461\ \text{cm}^{-1}$ 处,特别是 E-6 有较强吸收峰,为 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 振动峰,同样考虑为填充硅油及老化分解有关。E-2 在 $3\ 694\ \text{cm}^{-1}$ 处出现尖锐的 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动吸收峰,这与有机物分子间氢键空间位阻有关。

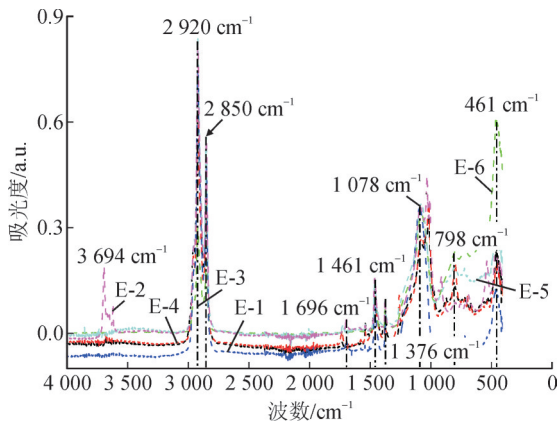


图2 附件绝缘 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of accessory insulation

试样的 XRD 光谱见图 3。由图 3 可知, EPDM 试样的主特征峰出现在 20° 附近,为变化平缓的非衍射峰,表明 EPDM 以无定形态为主。其他出现在 28° 、 30° 、 32° 、 48° 、 57° 、 63° 、 69° 附近的尖锐衍射峰与

附件绝缘填充的氧化物有关。从整体 XRD 光谱来看, E-6 与其他几个试样有较大的不同,原因可能是 E-6 试样因局部放电导致绝缘劣化,且 E-6 运行年限为 10 年,其绝缘可能发生较为严重的老化。试样发生过放电故障,材料在电、热老化作用下分子主链发生断裂,形成许多小分子,导致聚集态结构发生变化,因此 E-6 的主要特征峰发生衰减,部分尖锐的结晶峰发生偏移。E-2 在 20° 附近出现新的结晶峰,且其他结晶峰有一定程度的偏移,推测和材料重结晶有关。已有研究表明,电缆绝缘在运行初期容易出现重结晶及结晶态增加现象。张伟等 [23] 认为电缆运行年限较短时,绝缘结晶度有增大趋势;李欢等 [24]。将热老化分成两个阶段,老化初期时重结晶占据主导,能小幅提升结晶度。E-2 电缆终端在运行中经历应力锥烧蚀,绝缘老化中部分分子链断裂,形成小分子,小分子间相互接触,出现重结晶现象,因此 XRD 中衍射峰及其位置发生变化 [25]。运行 4 年的 E-3 终端也有一定的重结晶现象。

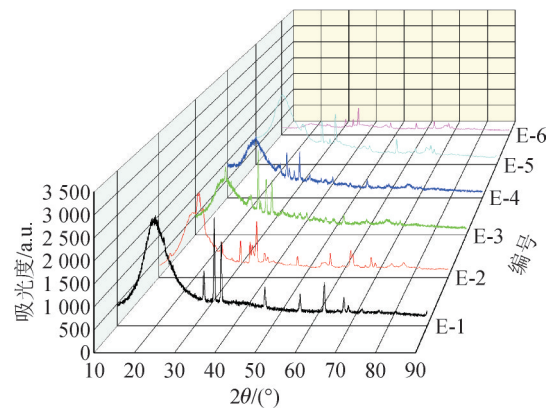


图3 附件绝缘 XRD 谱图

Fig. 3 XRD spectrum of accessory insulation

2.3 电气性能测试

EPDM 性能优于传统 SIR,已广泛应用于电缆附件作为绝缘材料,而电缆附件失效的主要原因是绝缘产生了老化或发生击穿故障 [26-28]。最能体现电缆附件材料绝缘性能的参数是击穿场强。由于故障处试样绝缘已被破坏,为了辨别附件残留部位的绝缘失效状态,用于测试击穿场强的样品在靠近故障部位取样。试样击穿场强见图 4。由图 4 可知,击穿场强均超过 $25\ \text{kV}/\text{mm}$,根据 GB/T 11017.3—2002 要求,EPDM 短时工频击穿电场强度 $\geq 25\ \text{kV}/\text{mm}$,试样虽经历过不同程度的故障损伤和老化,但其电气绝缘性能仍较好。

E-1 为中间接头,运行年限最短,击穿场强最高,从 SEM 测试也能看出其内部掺杂的微纳米颗粒尺寸较小,且分布均匀,有利于改善内部电场分布,

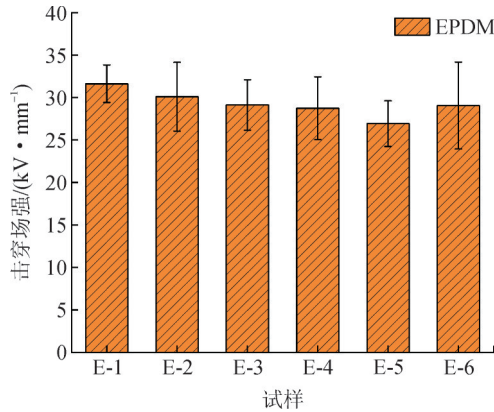


图4 附件绝缘击穿场强

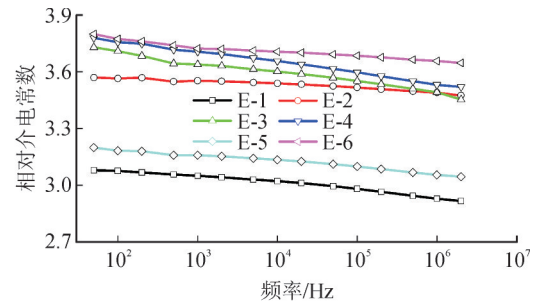
Fig. 4 Breakdown field strength of accessory insulation

并且微纳米粒子引入的深陷阱对电荷有更强的捕获能力。因此,中间接头E-1虽经历过放电击穿,但其外形完好,且电缆中间接头出厂时的耐压性能较强,故击穿场强仍然较高。E-2运行2年,虽经历应力锥烧蚀故障,但从XRD结果可看出,EPDM分子间出现重结晶现象,部分材料由无定型态转变为结晶态,致使分子链排列整齐,故击穿场强仍较高。E-3和E-4、E-5和E-6分别来自同一线路不同相的电缆终端,运行年限较高,击穿场强整体低于前两个试样。其中E-3击穿场强略高于E-4,而E-4发生过击穿故障,其绝缘性能发生较严重劣化,故击穿场强较低;运行年限更长、来自同一线路的E-5、E-6试样击穿场强进一步降低,其中E-6经历过局部放电,但击穿场强仍高于同一线路的E-5,而E-6击穿场强误差棒较大,说明局部放电对绝缘的破坏是有指向性的,不同部位绝缘性能受损不尽相同,导致不同试样之间击穿场强波动大,即老化程度差别较大。

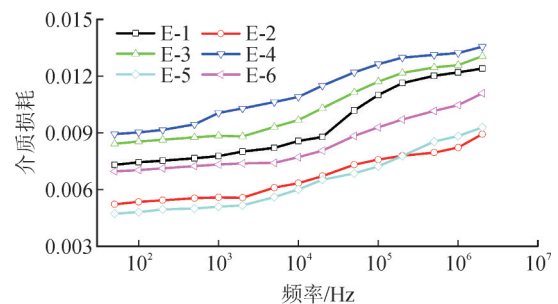
电缆附件由于复杂的绝缘结构,一直是高压电缆中最薄弱的环节,极易发生故障,附件的电场分布取决于复合绝缘的介电参数和界面空间电荷^[29]。因此,绝缘材料介电参数和电荷测试对其电气性能和老化状态评价有重要意义。

不同运行年限附件绝缘在50 Hz~2 MHz下的相对介电常数和介质损耗角正切值见图5。由图5可知,随频率增加,绝缘试样的介电常数逐渐降低,但整体降幅较小,介电常数最小的是取自中间接头的试样E-1,约为3.1,其次为电缆终端E-5试样,约为3.2;E-3、E-4、E-6的介电常数相差不多,其中E-6略高。试样E-6经历了局部放电且运行年限最长,其绝缘内部产生较多的极性基团,导致介电常数偏大。运行年限相同且来自同一运行线路的E-4介电常数略高于E-3,其中E-3外形良好而E-4经历过击穿故障,故E-4绝缘老化程度较高,导致E-4介电常

数高于E-3。根据GB/T 11017.3—2002附录A要求,EPDM介电常数应在2.5~3.5之间,只有E-1和E-5满足要求,其余试样介电常数均偏高。试样介质损耗随频率升高,整体呈上升趋势,其中来自同一线路的E-3、E-4介质损耗最高,工频下介损约为0.009,经历过击穿故障的E-4介损略高于E-3。同样来自同一运行线路的E-5、E-6介损在0.006附近,其中运行年限更长且经历局部放电的E-6介损高于E-5。E-2介损较低,E-1介损居中。



(a) 试样相对介电常数



(b) 试样介质损耗

图5 附件绝缘介电频谱

Fig. 5 Dielectric spectrum of accessory insulation

电缆附件EPDM绝缘中掺杂比例较高,且不同类型及线路的绝缘材料制备工艺可能不同,造成不同附件间的相对介电常数和介质损耗差异较大。E-1是电缆中间接头,相比于电缆终端,中间接头需要长期过盈配合,承受的机械应力较大,故对中接头绝缘性能要求更高,其介电常数相比电缆终端更低。E-3和E-4来自同一线路,但E-4取自故障相电缆终端,发生过击穿故障,外表损毁严重,材料因热氧化分解等产生了较多的C-O和Si-C结构,增强了试样的极化性能,因此介电常数变大。同样,来自同一线路的E-5和E-6,经历局部放电的E-6试样介电常数也大于E-5。从FTIR测试结果来看,E-2由于放电老化引入-OH等强极性基团,增强了分子极性,导致介电常数增大。介质损耗的变化规律基本和介电常数相似,同一线路的附件绝缘介损较为接近,但不同类型、不同线路的EPDM绝缘其介损和运行年限并没有很强的关联性。

表面电场和电位分布受表面电阻率影响较大,

为抑制沿面放电的发生,可以在一定程度上减小表面电阻率^[30]。同样,体电阻率对绝缘内部电场分布及击穿性能有较大影响。试样表面电阻率和体电阻率测试结果见图6。E-3表面电阻率最大,E-5表面电阻率最小;而体电阻率有所不同,其中,E-1体电阻率最大,E-5体电阻率最小,仅为 $0.28 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

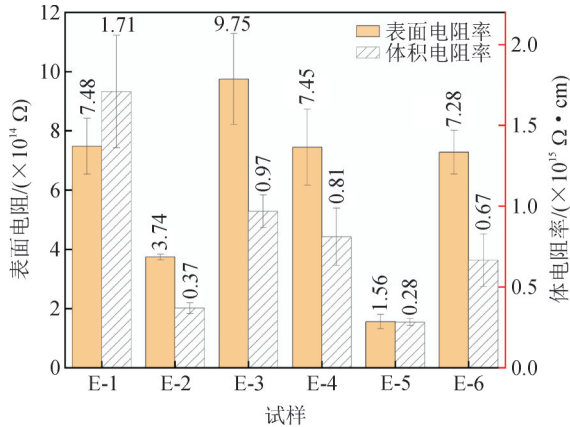


图6 附件绝缘表面电阻率和体电阻率

Fig. 6 Accessories insulation surface resistivity and volume resistivity

考虑电缆附件退役前状态,E-3未发生击穿等故障,且外形保持完好,而其余试样均有不同程度的放电或击穿等故障,故其表面及体电阻率相对较高。虽然E-5外形保持完好,但已服役9年,而E-3仅服役4年,推测E-5服役期间附件在铅封不良等因素作用下发生了较为严重的老化,因此其表面电阻率和体电阻率均最低。

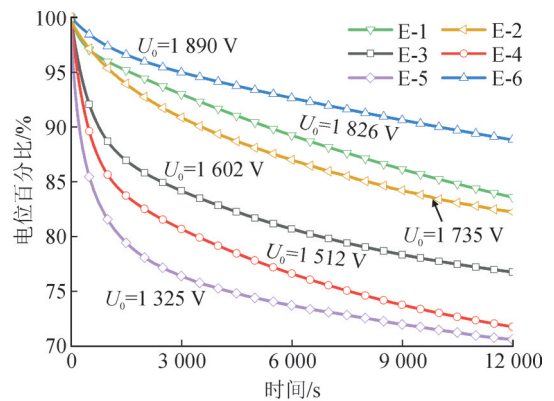
GB/T 11017.3—2002要求橡胶材料体电阻率 $\geq 1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$,只有E-1达到国标要求。E-2虽运行年限较短,但经历了应力锥烧蚀事故使电阻率下降明显,运行年限较长的E-3至E-6试样,其体积电阻率也明显低于E-1。对于来自同一线路的E-3和E-4,经历击穿故障的E-4体电阻率低于E-3;而同样来自同一线路的E-5和E-6,经历局放的E-6体电阻率仍高于E-5,表明电缆终端的局放对附件绝缘没有明显影响,E-5、E-6的体电阻率结果和其击穿场强变化基本一致。

2.4 表面电荷特性研究

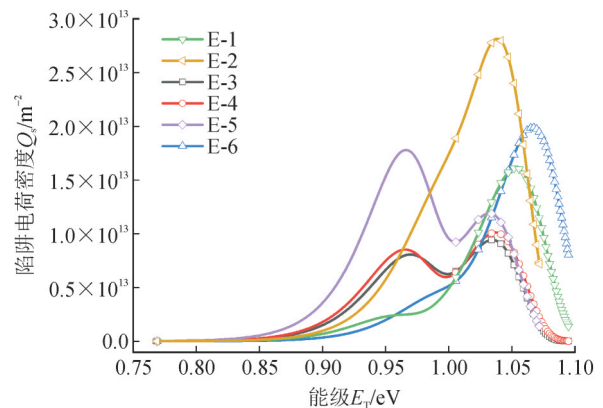
表面电位衰减测试虽然主要用于表征试样表面参数,但该方法对被测试样厚度没有明确的要求,具有实验系统简单、测量方便等优点,且通过ISPD法测量可获得反映同一空间电荷输运过程的陷阱能级分布、载流子迁移率和体电导率等参数^[31],是表征电荷输运和陷阱分布的重要手段。

试样表面电位衰减和陷阱能级分布测试结果见图7。数据均采用归一化处理, U_0 为试样充电后

表面初始电位。由图7(a)可知,E-6表面初始电位最高,E-5最低。表面初始电位对表面电位衰减速率影响很大,一般而言,试样初始电位高,绝缘表面更易积聚电荷,表面电荷衰减速率越慢^[32]。这与测试结果较为一致。EPDM试样整体电荷衰减速率均较慢,3 h测量时间内衰减率不到30%;其中前1 000 s衰减速率较快,后面趋于平缓。附件绝缘样品中,E-5衰减速率最快,其次为E-4和E-3,E-6衰减最慢,测试时间内,衰减率不到12%,其次为E-1和E-2。来自同一线路的E-3、E-4电位衰减较为接近,经历击穿故障的E-4电位衰减快于E-3;而同样来自同一线路的E-5、E-6电位衰减相差较大,E-6电位衰减最慢,和其较高的电阻率和击穿场强也是一致的。



(a) 表面电位衰减



(b) 陷阱能级分布

图7 附件绝缘电位衰减和陷阱参数分布

Fig. 7 Accessories insulation potential decay and trap parameter distribution

H. Fukuda等^[33]研究在不同幅值外施冲击电压下,具有不同介电常数、表面电阻率和体电阻率的 Al_2O_3 陶瓷绝缘子表面电荷分布情况,结果表明体电阻率小的试样表面电荷少。E-5体电阻率最小,表面电荷衰减速度最快,绝缘发生一定程度的老化。E-1体电阻率最大,表面初始电位较高,故电荷衰减速率较慢。

图7(b)为试样陷阱能级分布曲线图。其中,E-1和E-6的陷阱能级较深,约为1.05 eV和1.07 eV。E-6运行年限为10年,表面电荷衰减最慢,陷阱能级最深,可能是老化过程中引入了强极性基团等化学缺陷,导致陷阱能级变深,电荷衰减变慢。E-2以单陷阱中心为主,陷阱能级为1.04 eV,陷阱电荷密度最高。其余试样均为双陷阱中心,E-3和E-4的陷阱能级和陷阱电荷密度基本接近,经历故障的E-4试样陷阱密度略高于E-3;运行年限较长的E-5试样陷阱密度进一步增加,其浅陷阱电荷密度约为深陷阱电荷密度的1.5倍,而来自同一线路的E-6陷阱能级最深,且深陷阱密度较高,和老化过程中引入较多的极性基团导致化学缺陷增多有关。

3 讨论

电缆线路运行时,在电、热和周围环境等因素作用下绝缘逐渐老化,化学组成和微观形貌可能发生改变,宏观上表现为电气性能的变化。文中主要从电、热两方面分析运行老化对EPDM性能的影响。

电缆附件在长期带电运行中,附件绝缘会发生一定程度老化,进而影响其电气性能,而电气性能的好坏是评判电缆附件品质的首要原则,从试样电气性能测试结果来看,随附件运行年限增加,击穿场强整体呈下降趋势,其中中接头击穿场强最高,且介电常数最小。电缆附件中接头需要承受较大机械应力,同时在高压电场下承受沿电场方向挤压的机械应力和正交于电场方向拉伸的机械应力,对其长期受力和耐压性能要求较高,故击穿场强高。从微观形貌图看,附件绝缘表面有不同程度的颗粒团聚现象,而中接头绝缘内部均匀分布着小粒径的微纳米颗粒,基本没有团聚现象,这有利于改善电场分布,从而保持其较高的耐压性能,且其较高的体电阻率也证实了其整体绝缘性能良好。从电缆终端试样来看,经历应力锥烧蚀但运行年限最短的终端击穿场强最高,结合XRD光谱结果,该终端绝缘在运行及故障中出现重结晶现象,结晶态的增加使载流子迁移更困难,故击穿场强高于其余电缆终端。而来自同一线路且运行年限相同的两个终端试样,其介电性能较为接近,其中经历击穿故障的终端体电阻率和击穿场强低于外形完好的试样,且其介电常数较高。

在电晕充电过程中,样品表面陷阱持续捕获带电粒子,样品与带电粒子之间发生电荷转移过程,带电粒子从离子态转变为电子态,而表面陷阱特性

与电位衰减密切相关^[31]。根据表面电位衰减及陷阱能级分布图,随着运行年限的增加,附件绝缘电位衰减逐渐加快,其中运行年限为9年的终端表面电位衰减速率最快,其初始表面电位最低。同时,研究表明^[32],材料的表面电荷衰减速率和体电阻率密切相关,体电阻率越小,电荷衰减越快,表面积聚电荷越少,体电阻率最低的终端初始表面电位最小,表面电荷衰减速率最快。从陷阱能级分布来看,随着运行年限的增加,附件绝缘的陷阱能级整体向浅陷阱偏移,且浅陷阱电荷密度逐渐增加。不同运行年限下,附件绝缘的电位衰减及陷阱参数和其填充物聚集状态及引入杂质有关。随着运行年限的增加,EPDM中高添加量的无机纳米颗粒出现不同程度的团聚现象,有利于载流子的输运^[33];同时材料在放电老化中产生的杂质在介质体内形成更多物理缺陷,使EPDM浅陷阱电荷密度升高,电荷消散速度加快。由SEM图像也能明显看出运行老化后有微纳米颗粒团聚现象,导致陷阱能级向浅陷阱偏移。

电缆附件在长期热老化中使绝缘材料发生不同程度的热降解和热氧降解^[34],分子链和化学键发生断裂,产生自由基并生成许多小分子,加速绝缘材料的性能劣化。在热与氧气作用下,材料发生氧化反应,使含氧官能团增加,引发材料的降解反应。绝缘材料的热老化可使其聚集态结构及表面形貌和成分发生改变,进而影响附件的绝缘性能。

由SEM结果来看,中接头填充的微纳米颗粒粒径小,分布均匀,有利于改善电场分布,其整体绝缘性能良好。其余试样在运行故障及热老化影响下均有不同程度的颗粒团聚现象,不但影响绝缘内部的电场分布,降低击穿场强,同时影响陷阱参数分布,使陷阱能级变浅,浅陷阱电荷密度增加^[35]。电缆附件服役期间在高温影响下绝缘发生热老化,材料在高热量作用下发生热降解,同时与空气中的氧气反应生成一些含氧基团。由FTIR测试可知,EPDM试样均存在烷烃CH₂的伸缩振动吸收峰、CH₃不对称变角振动、C-O-C吸收峰和Si-C吸收峰,而运行年限最长终端的Si-C吸收峰和Si-O-Si振动峰明显增强,这和该终端的运行年限及运行经历有关。电缆终端运行年限长,服役期间在长期热作用下材料发生降解,EPDM内部大分子断裂形成小分子,聚集态结构发生改变,且在长期热氧老化及和硅油反应中引入了较多的含氧和含硅极性基团。试样XRD光谱中较大范围内未出现主特征峰从侧面印证了这一观点。另一方面,E-6虽然经历了长期的电热老化,但其仍保持较高的击穿场强和体电

阻率, 这和其绝缘内部较小尺寸的无机填充及相对均匀的颗粒分布有关。同时, E-6 老化中引入了较多的极性基团, 导致介电常数增加, 同时极性基团产生的化学缺陷使材料陷阱能级和陷阱密度增加。较深的陷阱能级有利于介质内部载流子的捕获, 这也是 E-6 击穿场强和体电阻率较高的原因之一。

4 结论

文中对 110 kV EPDM 绝缘不同运行年限电缆附件的微观形貌、理化特性、电气性能与表面电荷特性进行分析和研究, 主要结论有:

1) 附件绝缘在长期运行及局部放电作用下发生电热老化, 引入 C=O、-OH 等极性基团, 同时绝缘和填充的硅油发生热氧反应引入含 Si 基团, 宏观上表现为介电常数上升; 但 EPDM 绝缘的介电常数受附件类型和材料制备工艺影响较大, 不利于电缆附件老化状态的定量评估。

2) 随运行年限增加, 附件绝缘击穿场强整体呈下降趋势; 随着老化的发展, EPDM 绝缘内部引入新的缺陷, 导致陷阱能级中心发生偏移, 陷阱电荷密度增加, 老化初期, 以浅陷阱为主, 老化后期, 材料内部引入较多的强极性基团等化学缺陷, 使陷阱能级加深; EPDM 绝缘的击穿场强和陷阱参数能较好地反映电缆附件的老化状态。

参考文献:

- [1] 杜伯学, 韩晨磊, 李进, 等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 179-191.
DU Boxue, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Research status of polyethylene insulation for high voltage direct current cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 179-191.
- [2] 黄兴溢, 张军, 江平开. 热塑性电力电缆绝缘材料: 历史与发展[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1377-1398.
HUANG Xingyi, ZHANG Jun, JIANG Pingkai. Thermoplastic insulation materials for power cables: History and progress[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1377-1398.
- [3] 王伟, 何东欣, 宋鹏先, 等. 电热联合老化对电缆附件应力锥处空间电荷积聚特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1737-1744.
WANG Wei, HE Dongxin, SONG Pengxian, et al. Effects of electrical-thermal aging on space charge accumulation characteristics at the position of the stress cone in the accessory[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1737-1744.
- [4] 王俏华, 顾金, 吴建东, 等. 预处理温度对高压直流电缆附件绝缘材料空间电荷的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 122-126.
WANG Qiaohua, GU Jin, WU Jiandong, et al. Influence of pretreating temperature on space charge of insulation materials for cable accessories used in HVDC transmission projects[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 122-126.
- [5] 谢强, 何轶聪, 庄严. 110 kV 电缆终端连续故障原因及防范分析[J]. 电线电缆, 2019(6): 31-33.
XIE Qiang, HE Yicong, ZHUANG Yan. Causes of continuous failure of 110 kV cable terminal and its prevention[J]. Electric Wire & Cable, 2019(6): 31-33.
- [6] 黄光磊, 李喆, 杨丰源, 等. 直流交联聚乙烯电缆泄漏电流试验特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 192-201.
HUANG Guanglei, LI Zhe, YANG Fengyuan, et al. Experimental research on leakage current of DC cross linked polyethylene cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 192-201.
- [7] 钟力生, 任海洋, 曹亮, 等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3473-3489.
ZHONG Lisheng, REN Haiyang, CAO Liang, et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3473-3489.
- [8] 吕亮, 王霞, 何华琴, 等. 硅橡胶/三元乙丙橡胶界面上空间电荷的形成[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 106-109.
LYU Liang, WANG Xia, HE Huaqin, et al. Formation of space charges at interface between ethylene propylene diene terpolymer and silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 106-109.
- [9] 白龙雷, 周利军, 邢立勳, 等. 高寒环境下低温对乙丙橡胶电缆终端界面放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 646-658.
BAI Longlei, ZHOU Lijun, XING Limeng, et al. Effect of low temperature on interface discharge characteristics of ethylene-propylene rubber cable termination in high-cold environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 646-658.
- [10] 陈杰, 吴世林, 胡丽斌, 等. 退役高压电缆附件绝缘状态及理化性能分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2650-2658.
CHEN Jie, WU Shilin, HU Libin, et al. Analysis of insulation state and physicochemical property of retired high-voltage cable accessories[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2650-2658.
- [11] 胡丽斌, 张传升, 谭笑, 等. 退役电缆附件微观结构与电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 770-780.
HU Libin, ZHANG Chuansheng, TAN Xiao, et al. Research on microstructure and charge characteristics of cable accessories out of service[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 770-780.
- [12] WANG Weizhi, QU Baolun. Photo- and thermo-oxidative degradation of photocrosslinked ethylene-propylene-dieneterpolymer[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 81(3): 531-537.
- [13] TEFFERI M, LI Zongze, CAO Yang, et al. Novel EPR-insulated DC cables for future multi-terminal MVDC integration[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2019, 35(5): 20-27.
- [14] 范星辉, 谢月, 刘刚, 等. 不同温度下退役高压电缆绝缘介电特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 60-66.
FAN Xinghui, XIE Yue, LIU Gang, et al. Insulation dielectric properties of retired high voltage cables at different temperatures[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2021, 40(4): 60-66.
- [15] 张运周, 冯冰, 李明, 等. 退役 110 kV XLPE 电缆绝缘材料聚集态结构分析[J]. 绝缘材料, 2016, 49(7): 20-26.
ZHANG Yunzhou, FENG Bing, LI Ming, et al. Analysis on aggregation structure of retired 110 kV XLPE cables insulation[J]. Insulating Materials, 2016, 49(7): 20-26.
- [16] 罗潘, 任志刚, 徐阳, 等. 退役高压交联聚乙烯电缆绝缘老化

- 状态分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10):41-46.
- LUO Pan, REN Zhigang, XU Yang, et al. Aging condition analysis of high voltage XLPE cables out of service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10):41-46.
- [17] 刘孟佳, 周福升, 陈铮铮, 等. 采用等温表面电位衰减法表征 LDPE 与 HDPE 内陷阱的分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1):285-291.
- LIU Mengjia, ZHOU Fusheng, CHEN Zhengzheng, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE based on isothermal surface potential decay measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):285-291.
- [18] REN Chengyan, ZHANG Chuansheng, HU Duo, et al. Trap distribution of polymeric materials and its effect on surface flashover in vacuum[J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22(4):10-16.
- [19] 陈祖祥, 田志强, 张梦楠, 等. 热老化对 EPDM 电树枝局放特性的影响研究[J]. 电工技术, 2021(19):141-146.
- CHEN Zuxiang, TIAN Zhiqiang, ZHANG Mengnan, et al. Study on the effect of thermal aging on partial discharge characteristics of EPDM electrical tree[J]. Electric Engineering, 2021(19):141-146.
- [20] ZHU Mingxiao, GAO Ying, CHEN Jiming, et al. Effect of XLPE/EPDM interface on space charge behavior in cable accessory[J]. IEEE Access, 2019(7):183554-183564.
- [21] 周凯, 吴科, 万利, 等. 无机纳米颗粒抑制中压电缆终端气隙缺陷局部放电的有效性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22):230-238.
- ZHOU Kai, WU Ke, WAN Li, et al. Validity of inorganic nanoparticles on the suppression of partial discharge in air gap defects for medium voltage cable terminations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22):230-238.
- [22] 李维康, 张翀, 闫轰达, 等. 高压直流电缆用交联聚乙烯绝缘材料交联特性及机理[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3599-3606.
- LI Weikang, ZHANG Chong, YAN Hongda, et al. Crosslinking characteristic and mechanism of cross-linked polyethylene insulating materials used for high voltage direct current cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3599-3606.
- [23] 张伟, 胡修翠, 高超, 等. 长期服役 XLPE 电缆绝缘的空间电荷与热性能[J]. 高电压技术, 2022, 48(9):3533-3541.
- ZHANG Wei, HU Xiucui, GAO Chao, et al. Space charge and thermal characteristics of long-service crosslinked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9):3533-3541.
- [24] 李欢, 李建英, 马永翔, 等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22):6740-6748.
- LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22):6740-6748.
- [25] 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 physicochemical 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.
- [26] 杨帆, 杨旗, 程鹏, 等. 电缆接头内部气隙放电缺陷下的绝缘劣化程度表征方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2):24-32.
- YANG Fan, YANG Qi, CHENG Peng, et al. Study of cracking extent for gap discharge in insulating material of power cable joint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2):24-32.
- [27] LI Jin, DU Boxue, SU Jingang, et al. Surface layer fluorination-modulated space charge behaviors in HVDC cable accessory[J]. Polymers, 2018, 10(5):500.
- [28] 史济康, 曹家, 袁检, 等. XLPE 电力电缆中间接头复合介质沿面放电研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(4):52-53.
- SHI Jikang, CAO Jia, YUAN Jian, et al. Study on surface discharge of composite dielectric in XLPE power cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):52-53.
- [29] WANG X, NELSON J K, SCHADLER L S, et al. Mechanisms leading to nonlinear electrical response of a nano-p-SiC/silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6):1687-1696.
- [30] 戴征宇, 姜芸, 罗俊华. 预制型电缆附件沿面放电试验研究[J]. 高电压技术, 2002(9):7-8.
- DAI Zhengyu, JIANG Yun, LUO Junhua. Test and research of surface discharge in pre-moulded power cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2002(9):7-8.
- [31] 高宇, 杜伯学. 采用表面电位衰减法表征高压交联聚乙烯电缆绝缘中空间电荷的输运特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(8):2097-2103.
- GAO Yu, DU Boxue. Characterizing space charge transportation in HV XLPE cable insulation based on surface potential decay measurement[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):2097-2103.
- [32] 林添堤, 张成, 刘皓, 等. 基于等温松弛电流的 110 kV 电缆绝缘状态评估[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(4):43-52.
- LIN Tiandi, ZHANG Cheng, LIU Hao, et al. Insulation state evaluation of 110 kV cable based on isothermal relaxation current[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(4):43-52.
- [33] FUKUDA H, YAMANO Y, KOBAYASHI S, et al. Relationship between vacuum surface flashover and charging characteristics for alumina ceramics of lowered resistivity[C]//2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). Matsue-city, Japan; IEEE, 2013:1-4.
- [34] 张成, 李洪飞, 杨延滨, 等. 交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7):1-11.
- ZHANG Cheng, LI Hongfei, YANG Yanbin, et al. Research progress in ageing, evaluation, and rejuvenation of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2020, 53(7):1-11.
- 万子剑(1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为高压电力电缆绝缘状态监测和老化状态评(E-mail: wanzhijian@mail.iee.ac.cn).
- 任成燕(1979—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高电压与绝缘技术、气体放电与等离子体应用(通信作者)(E-mail: rcy@mail.iee.ac.cn)。