DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.015

高压直流电缆附件双层绝缘匹配与界面电荷行为研究

柳 杰[1]， 惠宝军[1]， 朱闻博[1]， 李艳飞[2]
（1. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510663；2. 中国南方电网有限责任公司，广州 510663）

摘要： 在高压直流电缆附件中，交联聚乙烯（XLPE）/三元乙丙橡胶（EPDM）界面电学参数不匹配会影响电场分布和绝缘可靠性。文中结合直流电导率、直流击穿强度、空间电荷测试和一维电场重构，研究XLPE/EPDM双层绝缘的匹配特性与界面电荷行为。引入电荷弛豫匹配系数，评价XLPE与EPDM在不同温度和电场下的界面电学参数匹配状态及潜在电场畸变风险；采用脉冲电声法获得双层试样的空间电荷分布，并基于泊松方程重构电场。结果表明，EPDM电导率随温度升高增长更明显，高温下XLPE/EPDM界面电学参数匹配状态趋于恶化。界面附近存在明显的空间电荷积聚并导致电场畸变；30 ℃时最大畸变率超过70%，50 ℃时降至20%~30%，说明升温提高了载流子迁移能力，并促进了空间电荷的重新分布。研究表明，XLPE/EPDM界面可靠性受电学参数匹配和空间电荷输运共同控制，应从电导率匹配和界面态调控两方面进行优化。

关键词： 电缆—GIS过渡终端；空间电荷；电场畸变；电导率匹配

Study on Insulation Matching and Interfacial Charge Behavior of Bilayer Insulation for HVDC Cable Accessories

LIU Jie[1], HUI Baojun[1], ZHU Wenbo[1], LI Yanfei[2]
（1. CSG Electric Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China）

Abstract: In high-voltage direct-current cable accessories, the mismatch of electrical parameters at the cross-linked polyethylene (XLPE)/ethylene propylene diene monomer (EPDM) interface can affect electric field distribution and insulation reliability. In this paper, the DC conductivity, DC breakdown strength, space-charge measurements, and one-dimensional electric field reconstruction are combined to investigate the matching characteristics and interfacial charge behavior of XLPE/EPDM bilayer insulation. A charge-relaxation matching coefficient is introduced to evaluate the matching state of the interfacial electrical-parameter between XLPE and EPDM under different temperatures and electric fields, as well as the potential risk of electric-field distortion. The space-charge distribution in the bilayer specimens is measured using the pulsed electro-acoustic method, and the electric field is reconstructed based on the Poisson equation. The results show that the conductivity of EPDM increases more significantly with the rising temperature, leading to a deterioration in the interfacial electrical-parameter matching state of XLPE/EPDM at elevated temperatures. Obvious space charge accumulation is observed near the interface, leading to electric field distortion.The maximum distortion ratio exceeds 70% at 30 ℃ and decreases to 20%~30% at 50 ℃, indicating that increased temperature enhances carrier mobility and promotes the redistribution of space charges. The research shows that the reliability of the XLPE/EPDM interface is jointly governed by electrical-parameter matching

收稿日期：2026-04-20； **修回日期：**2026-07-11
基金项目：中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20240001)。
Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(ZBKJXM20240001).

and space-charge transport, and should be improved through conductivity matching and interfacial-state regulation.
Key words: cable-GIS transition terminal; space charge; electric-field distortion; conductivity matching

0　引言

高压直流(HVDC)海底电缆—GIS过渡终端通常采用多材料复合绝缘系统，如交联聚乙烯(XLPE)主绝缘、三元乙丙橡胶(EPDM)应力锥、环氧套管和绝缘气体等。其运行可靠性不仅取决于材料本征绝缘强度，也受到界面处电学参数不连续性及其在运行应力下演化行为的影响[1-2]。在直流电压下，稳态电场分布主要由电导率而非介电常数决定。对于XLPE/EPDM界面，二者电导率及其温度、场强依赖性的差异会改变界面两侧电流连续条件下的电场分配，并诱发界面极化和空间电荷积累，从而造成电场重分布和局部增强，这类现象已在电缆附件及全尺寸高压直流电缆接头模型中得到报道[3-5]。同时，类似异质绝缘体系的研究表明，负载温升会显著影响动态电荷输运行为，因此温度因素也应作为评价XLPE/EPDM界面匹配状态的重要变量[6-7]。

已有研究从宏观和微观两个层面进一步阐明了该问题的形成机制。Wang等指出，XLPE/EPDM双层介质中的界面电荷不能仅用经典Maxwell-Wagner弛豫解释，电荷注入、陷阱、载流子转移以及聚合物界面的能级匹配也会影响单极性或双极性电荷行为[8]。Y. Wang等通过空间电荷与弛豫电流同步测量进一步表明，XLPE/EPDM双层界面电荷的极性和演化具有显著温度依赖性，并受实际界面状态影响，如界面硅脂状态，说明工程界面条件是控制电荷输运的重要因素[9]。

面向工程应用领域，Dai等针对高压直流电缆系统中的XLPE/EPDM界面开展了匹配特性研究，指出电导参数和活化能差异是绝缘匹配不良的重要原因，并表明通过EPDM改性可改善界面电荷积聚和电场分布[10]。在接头空间电荷测试方面，IEEE DEIS技术委员会关于HVDC电缆接头的研究指出，全尺寸接头的空间电荷测试有助于判断局部电场增强，但受多材料界面、声学反射、几何结构和信号重复性等因素影响，工程应用仍存在一定困难[11]。因此，在研究全尺寸附件的XLPE/EPDM匹配性之前，有必要采用结构更明确的双层试样，建立电导率不匹配、界面电荷积累与电场重分布之间的可控关系。

国内相关研究也从材料和附件两个层面印证了文中研究具备重要工程应用价值。谢坤等比较了高压电缆附件绝缘的理化性能和电气特性，王庆利等报道了电缆附件EPDM增强绝缘的老化特性及界面电学性能[12-13]。张瑞敏等表明，界面空间电荷会直接影响高压直流电缆终端的电场分布；王霞等研究了直流叠加冲击电压下XLPE/EPDM界面的空间电荷特性[14-15]。此外，钟海杰等提出了用于抑制界面空间电荷的直流电缆附件设计方法，进一步说明界面电学性能优化是工程需求，而不仅是材料本征性能问题[16]。

除直接改善XLPE/EPDM界面匹配外，电阻型与非线性场强均化技术也是缓解直流绝缘系统电场畸变的重要途径[17-18]。近年来，EPDM基非线性复合材料已被用于电缆附件绝缘性能调控，典型方法包括引入无机填料、复合纳米填料(如CNT和h-BN)或构建梯度结构配方，以调控材料的非线性电导率并改善附件中的电气协调性[19-21]。SiC填充弹性体体系虽然并非XLPE/EPDM界面结构，但其非线性电响应机制可为填料调控电导行为提供参考[22]。此外，直流GIS盆式绝缘子相关研究表明，温度梯度会影响绝缘表面或界面附近的电荷积累行为，进而改变局部电场分布[23-24]。这些研究说明，温度、电导率和电荷输运之间的耦合关系是直流绝缘系统电场调控中需要重点考虑的问题。与此同时，国内关于高压直流XLPE绝缘材料及电缆关键技术的综述也指出，材料电导、空间电荷效应和附件界面匹配仍是直流电缆系统可靠性提升的关键问题[25]。

然而，对于高压直流电缆附件中的实际XLPE/EPDM界面，目前仍缺少一种能够将体材料电导率不匹配、界面电荷积聚与直流热场条件下电场畸变定量关联起来的简明工程评价指标。基于上述存在的问题，文中开展了以下工作：①确定XLPE与EPDM在特定温度和场强范围内的直流电导率及击穿特性。②引入基于电导率—介电常数的匹配系数。③采用脉冲电声法(pulsed electro-acoustic，PEA)测试层压试样中的界面空间电荷，并评估由此产生的电场畸变。

1　研究对象与试验方法

本节介绍研究对象、试样制备流程，并总结直流电导率、直流击穿和PEA空间电荷测试的主要条件及数据处理方法。

1.1　研究对象及试样制备

选取XLPE(北欧化工LS4258DCE)和EPDM作

为研究对象，分别代表高压直流电缆中的主绝缘材料和电缆附件中的橡胶增强绝缘材料。已有关于110 kV电缆附件EPDM绝缘理化性能及电荷特性的研究表明，EPDM是电缆附件绝缘结构中的重要材料，其电荷行为和电气性能会影响附件绝缘可靠性[26]。因此，文中采用XLPE/EPDM双层结构作为简化模型，用于分析电缆主绝缘与附件橡胶绝缘之间的匹配特性和界面电荷行为。平板试样采用热压机和钢制模具压制成型。为提高表面均匀性并便于脱模，在模具表面与聚合物之间放置聚酯离型膜。

EPDM的成型过程为：在120 ℃下预热20 min，随后在160 ℃、15 MPa下热压30 min，保持压力并自然冷却至室温。XLPE的成型过程为：在120 ℃下预热5 min，随后在180 ℃、15 MPa下热压10 min，保持压力并水冷至室温。成型后，EPDM与XLPE试样置于真空烘箱中处理48 h，以去除交联副产物。

1.2 直流电导率测试

直流电导率测试参考XLPE/EPDM双层介质电导特性研究中的高场电导测试方法，采用带保护电极且具备温控条件的三电极系统[27]。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，测试温度分别设置为30、50、70、90 ℃，直流场强分别设置为10、20、30、40、50 kV/mm，共20组工况。每组测试开始前，试样先在目标温度下保持30 min，以达到热平衡；随后施加直流电压1 200 s并持续记录泄漏电流$I(t)$，每种试样在每组工况下开展两次测试，取最后60 s的泄漏电流平均数作为最终结果。体积电导率按式(1)计算

$$\sigma=\frac{J}{E}=\frac{I}{A}\cdot\frac{d}{U} \tag{1}$$

式(1)中：A为有效电极面积，m^2；d为试样厚度，m；U为外加电压，V；E为电场强度，V/m。

1.3 直流击穿强度测试

直流击穿强度在选定温度下测试。为抑制沿面闪络，试样浸没于恒温油浴中；电极采用平板—平板结构(电极直径25 mm，边缘倒圆)。直流电压以1 kV/s的恒定速率升高直至试样击穿。记录击穿电压U_0，并按$E=U_0/d$换算为击穿场强。每个温度下测试16个试样，评价数据分散性并比较温度影响，采用双参数Weibull分布对击穿数据进行拟合

$$P(E)=1-\exp\left[-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \tag{2}$$

式(2)中：α为尺度参数(对应63.2%失效概率的特征击穿强度)；β为形状参数，用于表征数据离散程度。各组击穿场强按从小到大的顺序排列，第i个数据点的经验累计失效概率采用Blom方法计算

$$P_i=\frac{i-0.375}{n+0.25} \tag{3}$$

式(3)中：i为击穿场强由小到大排序后的序号；n为该组有效试样数量，文中n=16。随后根据击穿场强E_i及其对应的经验累计失效概率P_i，对双参数Weibull分布进行拟合，得到尺度参数α和形状参数β。

1.4 PEA空间电荷测试

为表征直流电场作用下XLPE/EPDM层压试样的空间电荷行为及其引起的电场畸变，采用脉冲电声(PEA)法进行测试。试样由XLPE与EPDM层压组成。在等温条件下施加直流电压，测试时间为1 800 s，并记录不同测试条件下的空间电荷密度分布$\rho(x,t)$。测试温度为30 ℃和50 ℃，并设置多个直流场强，以支持后续电场评估和畸变分析。基于测得的电荷密度$\rho(x)$，采用一维泊松方程重构试样内部电场

$$\frac{\mathrm{d}E(x)}{\mathrm{d}x}=\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \tag{4}$$

式(4)中，$\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{eff}}$，为XLPE/EPDM双层试样沿厚度方向的等效绝对介电常数，$\varepsilon_{\mathrm{eff}}$为等效相对介电常数，按串联双层介质计算

$$\varepsilon_{\mathrm{eff}}=(d_1+d_2)/(d_1/\varepsilon_1+d_2/\varepsilon_2) \tag{5}$$

式(5)中，d_1和d_2分别为XLPE层和EPDM层的厚度；ε_1和ε_2分别为XLPE和EPDM的相对介电常数。沿厚度方向积分可得

$$E(x)=E(x_0)+\frac{1}{\varepsilon}\int_{x_0}^{x}\rho(\xi)\mathrm{d}\xi \tag{6}$$

式(6)中：$E(x)$为位置x处的电场强度；$E(x_0)$为积分起点处的电场强度，由外加电压边界条件确定；$\rho(\xi)$为空间电荷密度；ξ为厚度方向积分变量。该等效处理用于表征PEA空间分辨尺度下空间电荷引起的宏观电场重分布和电场畸变，不用于描述理想界面处由介电常数突变引起的局部场强跃变。为表征空间电荷导致的电场非均匀性，定义电场畸变率为

$$\delta=\frac{E_{\max}-E_0}{E_0}\times100\% \tag{7}$$

式(7)中：E_0为施加在双层试样两端的直流电压除以试样总厚度得到的外施电场；$E_{\max}$为最大场强。电场畸变率用于比较不同温度和外加直流场强下的场强畸变程度。

2 试验结果与讨论

基于第1节提出的方法，文中首先对比了XLPE与EPDM的直流电学特性，然后讨论参数不匹配对绝缘匹配和界面空间电荷/电场行为的影响。结果

讨论按照“材料性能→匹配指标→界面响应”的顺序展开。

2.1　直流电导率的温度和电场依赖性

不同温度(30~90 ℃)、不同电场强度(10~50 kV/mm)下XLPE与EPDM的直流电导率见图1、2。

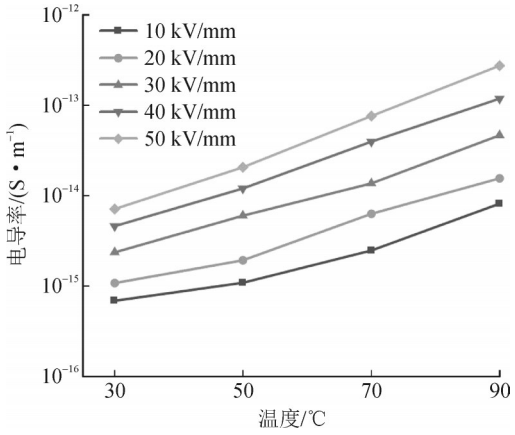


图1　XLPE在10~50 kV/mm电场下直流电导率随温度的变化

Fig. 1　Temperature dependence of DC conductivity of XLPE under electric fields of 10~50 kV/mm

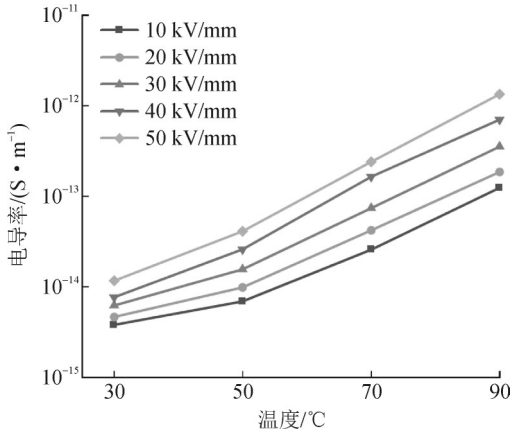


图2　EPDM在10~50 kV/mm电场下直流电导率随温度的变化

Fig. 2　Temperature dependence of DC conductivity of EPDM under electric fields of 10~50 kV/mm

总体上两种材料的直流电导率均随温度和场强升高而增加，但二者对温度和电场的敏感性存在明显差异。电导率行为是评价XLPE与EPDM在直流电压下电气匹配性的基础。对于双层绝缘系统，两种材料的电导率差异不仅反映各自的载流子输运能力，还决定加压后的电场再分配。因此，在讨论匹配系数和界面电荷之前，有必要比较两种材料电导率的温度和场强依赖性。

从温度影响看，在相同外加电场下，XLPE和EPDM的电导率均随温度升高而增大，但EPDM对温度的敏感性更强。以30 kV/mm为例，EPDM电导率由30 ℃时的6.19×10^{-15} S/m升高至90 ℃时的3.51×10^{-13} S/m，为30 ℃时的56.70倍；相比之下，XLPE电导率由2.35×10^{-15} S/m升高至4.62×10^{-14} S/m，为30 ℃时的19.66倍。这表明EPDM在升温过程中电导率更容易升高，在70~90 ℃范围内增长尤为明显，加剧了高温条件下XLPE/EPDM界面的电导率不匹配性。

从电场影响看，两种材料的电导率均随场强升高而增加，其中XLPE对场强变化表现出更明显的敏感性。以30 ℃为例，XLPE电导率由10 kV/mm下的6.83×10^{-16} S/m升高至50 kV/mm下的7.05×10^{-15} S/m，增加10.32倍；而EPDM电导率由3.78×10^{-15} S/m升高至约1.16×10^{-14} S/m，增加3.07倍。说明在低温条件下，场强升高会更明显地促进XLPE中的载流子输运，而EPDM的场强依赖性相对较弱。

从材料对比看，在全部测试温度和场强范围内，EPDM电导率整体高于XLPE，但二者差异随温度和场强变化而改变。30 ℃、10 kV/mm下，EPDM电导率为XLPE的5.53倍；当场强升高至50 kV/mm时，二者差距明显缩小，EPDM为XLPE的1.65倍。随着温度升高，EPDM电导率增长更快，90 ℃下二者差异再次扩大，尤其在低场强条件下更为明显。相对于XLPE，高温会显著提升EPDM的电导率，使界面处更容易出现电导率不连续，从而为直流电场重构分布和界面极化效应提供条件。

2.2　温度对直流击穿强度的影响

XLPE与EPDM在30、50、70 ℃下直流击穿强度的Weibull分布见图3、4。从图3、4可以看出，随着温度由30 ℃升高至70 ℃，两种材料的击穿概率曲线均向低场强区域移动，说明升温会导致直流击穿强度下降，即高温环境会导致绝缘材料的击穿性能退化。

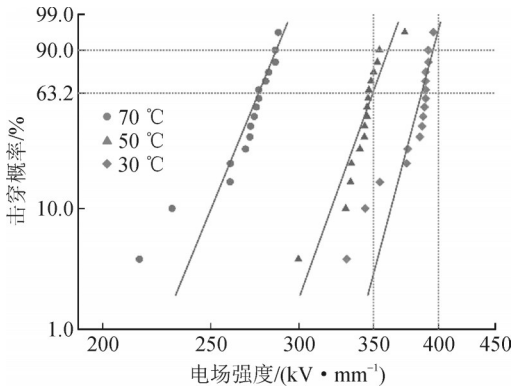


图3　XLPE不同温度下直流击穿强度的Weibull分布

Fig. 3　Weibull distribution of DC breakdown strength of XLPE at different temperatures

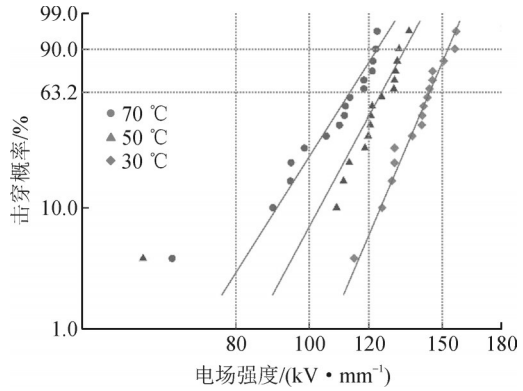


图4　EPDM不同温度下直流击穿强度的Weibull分布

Fig. 4　Weibull distribution of DC breakdown strength of EPDM at different temperatures

结合图5所示特征击穿强度(对应63.2%失效概率的尺度参数)可知,EPDM的特征击穿强度由30 ℃时的135.7 kV/mm降至50 ℃时的115.7 kV/mm,在70 ℃下进一步降至105.4 kV/mm,整体下降约22%。XLPE的特征击穿强度由30 ℃时的367.1 kV/mm降至50 ℃时的325.3 kV/mm,最终降至70 ℃时的255.9 kV/mm,总下降幅度约30%。在所有测试温度下,XLPE的特征击穿强度均显著高于EPDM,约为EPDM的2.4~2.8倍,表明其具有更高的电气安全裕度。

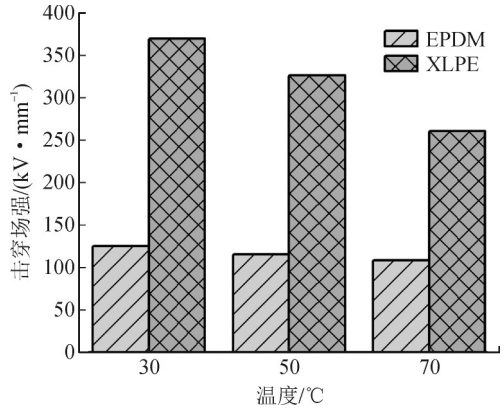


图5　XLPE和EPDM特征击穿强度随温度的变化

Fig. 5　Characteristic breakdown strength of XLPE and EPDM as a function of temperature

从Weibull拟合线的斜率和数据分散性看,XLPE数据点总体更加集中,拟合线更陡,说明形状参数β较高;而EPDM数据分散性相对较大。同时,在70 ℃下,两种材料均出现少量低击穿点,表明高温条件下材料对缺陷或局部薄弱点更加敏感。总体而言,温度升高会显著降低XLPE与EPDM的直流击穿水平,从而增加高温运行时的电气失效风险,击穿强度结果主要反映两种材料在热应力下的绝缘裕度差异,而界面可靠性仍需结合电导率匹配和空间电荷特性进一步分析。

2.3　电荷弛豫匹配特性

根据Maxwell-Wagner极化理论,XLPE与EPDM之间电学参数(电导率和介电常数)的不匹配会导致界面空间电荷积累。在直流稳态下,两层介质中的电流密度J保持连续,即$J=\sigma_1E_1=\sigma_2E_2$,根据界面法向电位移边界条件,由电导率和介电常数不匹配引起的自由界面电荷面密度可表示为

$$q_s=\varepsilon_1E_1-\varepsilon_2E_2=J\left(\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1}-\frac{\varepsilon_2}{\sigma_2}\right) \tag{8}$$

式(8)中:q_s为界面电荷面密度;J为稳态电流密度;下标1和2分别表示XLPE与EPDM。式(8)描述的是由载流子在异质界面处积聚形成的Maxwell-Wagner自由电荷,基于宏观电位移$D=\varepsilon E$的界面不连续性推导。材料极化产生的束缚电荷通过宏观介电常数ε包含在关系$D=\varepsilon E$中,因此不再单独引入束缚电荷项。

根据经典Maxwell-Wagner模型,当两种介质的ε/σ比值相等时,由宏观电学参数失配产生的自由界面电荷趋于零。等价地,其理想匹配条件为

$$\frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}=\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \tag{9}$$

式(9)中,σ和ε分别表示电导率和介电常数。为定量表征匹配程度,定义电荷弛豫匹配系数k为

$$k=\frac{\min\left(\sigma_1/\varepsilon_1,\sigma_2/\varepsilon_2\right)}{\max\left(\sigma_1/\varepsilon_1,\sigma_2/\varepsilon_2\right)} \tag{10}$$

k越接近1,表明XLPE与EPDM的电荷弛豫特性越接近,由宏观电学参数失配引起的Maxwell-Wagner界面极化和电场重分布趋势越弱;反之,较小的k值表明界面电荷积聚和局部电场畸变的潜在风险增大,并可能对界面绝缘可靠性产生不利影响。因此,文中将k作为评价XLPE/EPDM界面电学参数协调程度及潜在电场畸变风险的相对指标,而不作为界面绝缘失效的直接判据。

基于电导率数据计算得到的电荷弛豫匹配系数k见图6。可以看出,在30 ℃且高电场(如50 kV/mm)下,k值接近1,表明EPDM的电导率—介电常数比接近XLPE。在该条件下,界面电场分布相对均匀,空间电荷积聚较弱。

然而,当温度升高至90 ℃时,k值明显远小于1。这种不匹配主要归因于EPDM具有更高的热敏性,其在高温下电导率相较XLPE会更快增加。根据Maxwell-Wagner理论,这种严重的电导率不连续会诱发显著的界面极化和电场畸变,从而显著增加设备在高温、高场运行下的绝缘失效风险。

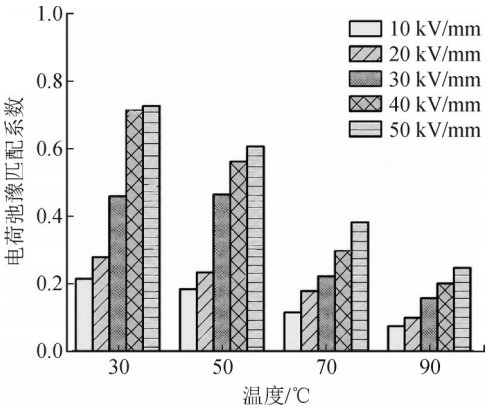


图6　不同温度和电场下的电荷弛豫匹配系数k

Fig. 6　Charge-relaxation matching coefficient(k) under different temperatures and electric fields

2.4　界面空间电荷与电场畸变

XLPE/EPDM双层试样在30 ℃和50 ℃条件下，分别施加20 kV/mm和30 kV/mm直流电场1 800 s后的空间电荷密度分布及对应的重构电场分布见图7、8。虚线分别标出了阴极和阳极位置，其中0 μm附近对应阴极，EPDM侧外电极附近对应阳极。

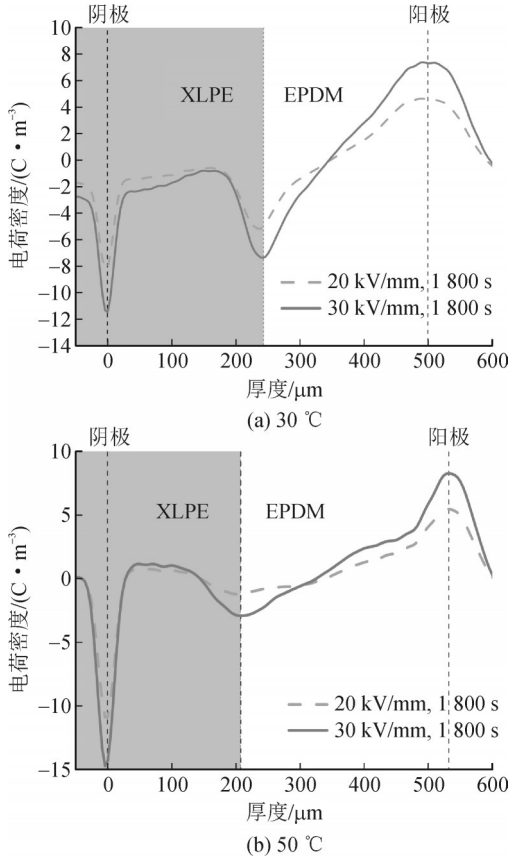


图7　不同温度下XLPE/EPDM层压介质中的空间电荷密度分布

Fig. 7　Space charge density distributions in XLPE/EPDM laminated dielectrics at different temperatures

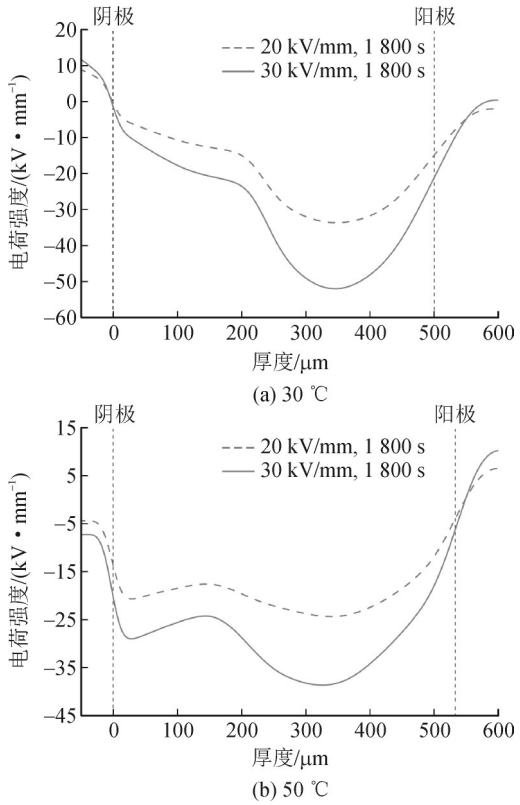


图8　不同温度下XLPE/EPDM层压介质中的电场分布

Fig. 8　Electric field distributions in XLPE/EPDM laminated dielectrics at different temperatures

由图7可知，两种温度下试样内部均出现明显的空间电荷积聚，且不同区域的电荷极性存在差异。30 ℃时，20 kV/mm和30 kV/mm下阴极附近的负极性电荷峰分别为−8.21 C/m³和−11.48 C/m³，阳极附近的正极性电荷峰分别为4.64 C/m³和7.37 C/m³，表明两侧电极注入的同极性电荷在电极邻近区域发生积聚。与此同时，XLPE/EPDM界面附近出现明显的负极性电荷峰，峰值分别为−5.18 C/m³和−7.38 C/m³。随着外加直流电场由20 kV/mm升高至30 kV/mm，阴极、界面和阳极附近电荷峰值的绝对值均增大，说明较高电场增强了电极电荷注入，并促进更多电荷向试样内部迁移和积聚。

当温度升高至50 ℃时，20 kV/mm和30 kV/mm下阴极附近的负极性电荷峰分别增大至−10.92 C/m³和−14.74 C/m³，阳极附近的正极性电荷峰分别为5.45 C/m³和8.26 C/m³，表明电极注入效应仍较为明显。相比之下，界面附近的负极性电荷峰分别降低至−1.24 C/m³和−2.94 C/m³，明显小于30 ℃时的对应值。该结果表明，升温提高了载流子的迁移和脱陷能力，使界面附近积聚的空间电荷更易发生弛豫、扩散和再分布，从而降低界面局部电荷峰值。

从界面电荷的极性及其形成过程看，在文中所采用的电压极性下，XLPE/EPDM界面附近主要表现

为负极性电荷积聚，说明电子在界面处的滞留占主导。阴极注入电子在外加直流电场作用下穿过XLPE并向阳极方向迁移，当其到达XLPE/EPDM界面附近时，由于两侧材料的电导率、介电常数及界面微观结构存在差异，电子跨界面输运可能受到界面陷阱或局部势垒的阻碍，导致部分电子在界面附近被捕获或滞留，从而形成负极性电荷峰。同时，XLPE与EPDM电荷弛豫特性的差异会引起Maxwell-Wagner界面极化，使界面成为电荷积聚的有利区域。尽管阳极附近存在正极性电荷峰，但正极性电荷未在界面区域占主导，因此界面电荷整体表现为负极性。

由图8可知，空间电荷积聚进一步导致XLPE/EPDM层压介质内部电场发生明显畸变。不同测试条件下电场分布具有一定相似性：20 kV/mm和30 kV/mm下的电场曲线均偏离均匀场分布，说明电极附近和界面附近的空间电荷均会引起局部电场重分布；同时，较高外加直流电场下的电场畸变更加明显，表明空间电荷积聚对场强分布的影响随外场升高而增强。其差异主要体现在温度作用上。30 ℃时，电场分布不均匀性更强，局部场强峰值较高，说明空间电荷在局部区域的积聚对电场集中作用更明显；而50 ℃时，电场曲线整体趋于平缓，局部场强峰值降低，说明升温提高了载流子迁移能力，使积聚空间电荷更易发生弛豫和扩散，从而削弱了局部电荷峰对电场分布的集中作用。然而，50 ℃下电场仍未恢复为均匀分布，说明界面极化、电极注入和空间电荷积聚效应仍然存在。

温度的影响可通过图9所示电场畸变率进一步量化。由空间电荷重构得到的电场分布表明，30 ℃时，20 kV/mm和30 kV/mm下最大局部场强分别为33.72 kV/mm和52.08 kV/mm，对应电场畸变率为68.62%和73.63%；50 ℃时，最大局部场强分别为24.37 kV/mm和38.68 kV/mm，对应电场畸变率为21.88%和28.95%。上述结果与图8中的电场曲线变化一致，即30 ℃下电场畸变更强，而50 ℃下局部场强集中有所缓解。

根据上述电场分布结果，XLPE/EPDM界面优化应同时关注电导率匹配和界面电荷调控。一方面，可通过调控EPDM的高温电导率及其场强依赖性，使其电导率—介电常数比值与XLPE更加接近，从源头减弱界面极化引起的电场重分布；另一方面，可通过界面处理、过渡层设计或填料改性等方式改善界面载流子输运状态，减少电荷在XLPE/EPDM界面附近滞留。对于实际电缆附件结构，还可结合非线性电阻场强均化材料或梯度结构设计，使电场由界面附近向两侧介质平滑过渡，从而降低高场运行条件下的局部电场集中风险。

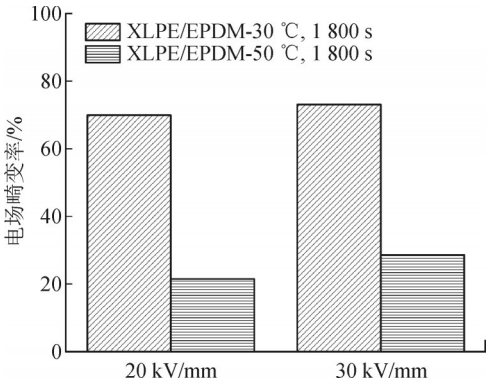


图9 不同电场和温度下XLPE/EPDM层压介质的电场畸变率

Fig. 9 Electric field distortion rates of XLPE/EPDM laminated dielectrics under different electric fields and temperatures

3 结论

文中针对高压直流电缆附件中典型XLPE/EPDM双层绝缘界面，研究了材料直流电导率、击穿强度、界面匹配特性及空间电荷引起的电场畸变行为，主要结论如下：

1)引入了基于σ/ε比值的电荷弛豫匹配系数k，实现了对XLPE/EPDM界面电学参数协调程度的定量评价。结果表明，EPDM电导率的温度敏感性高于XLPE，升温会扩大两种材料的σ/ε差异，使k值明显低于1，增加界面极化和电场重分布风险。

2)在30~70 ℃范围内，XLPE特征击穿强度由367.1 kV/mm降至255.9 kV/mm，EPDM由135.7 kV/mm降至105.4 kV/mm，说明高温会削弱两种绝缘材料的击穿裕度。

3)PEA测试与电场重构结果表明，XLPE/EPDM界面处存在明显空间电荷积聚，并导致局部电场畸变。30 ℃时，20、30 kV/mm下畸变率分别为68.62%、73.63%；50 ℃时分别降至21.88%和28.95%，说明升温可促进空间电荷弛豫和再分布，降低局部电场集中。

综合来看，温度对XLPE/EPDM界面可靠性具有双重影响：适度升温有助于空间电荷再分布，但同时会加剧电导率匹配恶化并降低击穿强度。因此，高压直流电缆附件的材料和界面优化应同时关注高温电导率匹配、空间电荷抑制和击穿强度变化。

参考文献：

[1] 李童欣，赵　隆，刘思雨，等. ±500 kV直流海底电缆J型管工程化设计与热管理优化[J]. 智慧电力，2025，53(6)：85-92.
Li Tongxin，Zhao Long，Liu Siyu，et al.Engineering design and thermal management optimization of ±500 kV DC submarine cable J-tube[J]. Smart Power，2025，53(6)：85-92.

[2] 蒋浩月，常凯颖，伊德伦，等.老旧XLPE电缆绝缘状态评估方法及其应用[J]. 电力工程技术，2026，45(3)：20-27.
Jiang Haoyue，Chang Kaiying，Yi Delun，et al. Condition assessment method of old XLPE cable insulation and its application [J]. Electric Power Engineering Technology，2026，45(3)：20-27.

[3] 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.

[4] 刘岑俐，狄啟飞，郑海涯，等.基于波速的电缆交联聚乙烯绝缘温度评估[J]. 电力电容器与无功补偿，2025，46(5)：37-44.
Liu Cenli，Di Qifei，Zheng Haiya，et al.Temperature assessment of cross - linked polyethylene insulation for cables based on wave velocity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2025，46(5)：37-44.

[5] 李柏雨，郑　喆，张洪亮，等. 脱气处理对XLPE材料直流电树枝引发及生长的影响规律[J]. 电力工程技术，2026，45(4)：94-100.
Li Baiyu，Zheng Zhe，Zhang Hongliang，et al. The influence of degassing treatment on the initiation and growth of DC electrical treeing in XLPE material[J]. Electric Power Engineering Technology，2026，45(4)：94-100.

[6] 刘亚茹，张雨若，郭子晗，等.热老化对XLPE电缆电树枝特性的影响研究[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(5)：279-288.
LIU Yaru，ZHANG Yuruo，GUO Zihan，et al.Study on effect of thermal aging on electrical tree characteristics of XLPE cables[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(5)：279-288.

[7] 李　岩，甄冠成，宋浩源，等.绝缘层温度对XLPE局部放电的影响特性[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(6)：260-268.
Li Yan，Zhen Guancheng，Song Haoyuan，et al. Influence characteristics of insulation layer temperature on partial discharge of XLPE[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(6)：260-268.

[8] Wang Weiwang，Li Shengtao，Tanaka Y，et al. Interfacial charge dynamics of cross-linked polyethylene/ethylene-propylene-diene dual dielectric polymer as revealed by energy band structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2019，26(6)：1755-1762.

[9] Wang Yani，Wang Yalin，Yang Xingwu，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.

[10] 戴明浩，赵铜鑫，赵　薇，等. 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[J]. 高压电器，2025，61(7)：179-188.
Dai Minghao，Zhao Tongxin，Zhao Wei，et al. Study on matching characteristic of XLPE/EPDM interface in HVDC cable system[J]. High Voltage Apparatus，2025，61(7)：179-188.

[11] Tzimas A，Diban B，Boyer L，et al. Feasibility of space charge measurements on HVDC cable joints：study group-IEEE DEIS technical committee “HVDC cable and systems”[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine，2022，38(5)：18-27.

[12] 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.

[13] 王庆利，李春阳，纪　多，等. 电缆附件EPDM增强绝缘老化特性及其界面电学性能[J]. 电机与控制学报，2025，29(10)：36-47.
Wang Qingli，Li Chunyang，Ji Duo，et al. Aging characteristics and interfacial electrical properties of EPDM reinforced insulation in cable accessories[J]. Electric Machines and Control，2025，29(10)：36-47.

[14] 张瑞敏，张沛红，宋淑伟，等. 界面空间电荷对高压直流电缆终端电场分布的影响[J]. 高电压技术，2019，45(6)：1762-1766.
Zhang Ruimin，Zhang Peihong，Song Shuwei，et al. Effect of interfacial space charge on electric field distribution of HVDC cable terminal[J]. High Voltage Engineering，2019，45(6)：1762-1766.

[15] 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 Bainan，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.

[16] 钟海杰，王佩龙，王锦明，等. 用于抑制界面空间电荷的直流电缆附件设计[J]. 高电压技术，2015，41(4)：1140-1146.
Zhong Haijie，Wang Peilong，Wang Jinming，et al. Design of DC cable accessories for suppressing interface space charge[J]. High Voltage Engineering，2015，41(4)：1140-1146.

[17] Tavernier K，Varlow B R，Auckland D W，et al. Improvement in electrical insulators by nonlinear fillers[J]. IEE Proceedings - Science，Measurement and Technology，1999，146(2)：88-94.

[18] Donzell，Greuter F，Christen T. Nonlinear resistive electric field grading part 2：materials and applications[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine，2011，27(2)：18-29.

[19] Zhang Tiandong，Li Hao，Zhang Changhai，et al. Non-linear electrical conductivity of ethylene-propylene-diene monomer-based composite dielectrics by tuning inorganic fillers[J]. High Voltage，2023，8(4)：781-790.

[20] Zhang Tiandong，Xu Huiduo，Dai Chuanxian，et al. Carbon nanotubes and hexagonal boron nitride nanosheets co-filled ethylene propylene diene monomer composites：improved electrical property for cable accessory applications[J]. High Voltage，2024，9(3)：546-555.

[21] Zhang Tiandong，Xu Huiduo，Liu Gang，et al. Non-linear electrical conductivity of compositionally gradient structured zinc oxide/ethylene propylene diene monomer composites for cable accessory application[J]. High Voltage，2025，10(3)：746-759.

[22] Wang X，Nelson J K，Schadler L S，et al. Mechanisms leading to

(下转第135页)

层电流传感系统的时滞控制方法[J]. 电工技术学报，2024，39(4)：1234-1244.
Zhou Shasha，Wang Hang，Yang Bin，et al. Time delay control method for distributed sheath current sensing system of underground cross-bonding high voltage cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(4)：1234-1244.

[16] Klement K，Dawson F，Thorpe S. Resonant converters for pulsed applications[C]//2009 13th IEEE European Conference on Power Electronics and Applications，2009：1-8.

[17] 刘　英，肖　阳，苏　宇，等. 单芯交流海缆不同接地方式下的损耗计算及对载流量的影响研究[J]. 高压电器，2018，54(10)：56-62.
Liu Ying，Xiao Yang，Su Yu，et al. Loss calculation and influence on ampacity of single-core AC submarine cable under different grounding modes[J]. High Voltage Apparatus，2018，54(10)：56-62.

[18] 齐明泽，庞　丹，于坤生，等. 单回路高压电缆金属护套最优分段比[J]. 东北电力大学学报(自然科学版)，2021，41(5)：119-125.
Qi Mingze，Pang Dan，Yu Kunsheng，et al. Optimal segmentation ratio of single-circuit high-voltage cable metal sheath[J]. Journal of Northeast Dianli University(Natural Science Edition)，2021，41(5)：119-125.

[19] 秦小安，冯　艳，万淑娟，等. 电缆金属护套环流计算分析[J]. 大众用电，2017(8)：44-45.
Qin Xiaoan，Feng Yan，Wan Shujuan，et al. Calculation and analysis of cable metal sheath circulation flow[J]. Popular Utilization of Electricity，2017(8)：44-45.

[20] Sheng H，Pei Y，Yang X，et al. Frequency tracking control for a capacitor-charging parallel resonant converter with phase-locked loop[C]//APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition，2007：1287-1292.

[21] 周　欣，夏向阳，夏君山，等. 基于护层电流构建新型判据的高压输电电缆在线监测[J]. 中国电力，2021，54(9)：45-54.
Zhou Xin，Xia Xiangyang，Xia Junshan，et al. On-line monitoring of HV transmission cables based on a new criterion established with sheath current[J]. Electric Power，2021，54(9)：45-54.

[22] 胡学良. 考虑中间井接地电阻的高压单芯电缆护套环流计算方法[J]. 电工技术，2008(6)：74-77.
Hu Xueliang. Calculation method of high-voltage single-core cable circulation considering the grounding resistance of intermediate wells[J]. Electric Engineering，2008(6)：74-77.

[23] Hanna M A，Chikhani A Y，Salama M M A. Thermal analysis of multi-layered soil-part 2：practical considerations[J]. IEEE Transactions on PowerDelivery，1993，8(3)：772-777.

[24] 杨健锐. 高压电缆金属护套环流分析[J]. 现代工业经济和信息化，2018，8(18)：134-135.
Yang Jianrui. Analysis of metal sheath circulation of high voltage cable[J]. Modern Industrial Economy and Informationization，2018，8(18)：134-135.

[25] 刘　博，郭　卫，及洪泉，等. 高压电缆外护层破损演进与护层环流相关性研究[J]. 电网与清洁能源，2025，41(5)：22-29.
Liu Bo，Guo Wei，Ji Hongquan，et al. A study on the correlation between damage evolution of outer protective layer and sheath circulation of high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy，2025，41(5)：22 -29.

[26] 杨玉新，王劲松，朱永利，等. 海上风电单芯海缆接地环流影响因素分析[J]. 南方电网技术，2024，18(3)：56-64.
Yang Yuxin，Wang Jinsong，Zhu Yongli，et al. Analysis of influence factors on grounding circulating current of singlecore submarine cable of offshore wind power[J]. Southern Power System Technology，2024，18(3)：56-64.

[27] Sukhi Y，Jeyashree Y，Analysis and implementation of series parallel resonant converters for regulated power supply[J]. Joural of the Institution of Engineers India，2010，90(4)：18-22.

王雪佳(1998—)，女，硕士，主要研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化(通信作者)(E-mail：1786266559@qq. com)。

(上接第127页)

nonlinear electrical response of a nano p - SiC/silicone rubber composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2010，17(6)：1687-1696.

[23] Ozawa K，Kumada A，Hidaka K，et al. Influence of temperature gradient on charge accumulation phenomena of GIS spacer under DC field[C]//2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics(ICD)，2018：1-4.

[24] Zhang Boya，Qi Zhe，Zhang Guixin. Thermal gradient effects on surface charge of HVDC spacer in gas insulated system[C]//2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP)，2016：703-706.

[25] 陈　新，李文鹏，李震宇，等. 高压直流XLPE绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1577-1585.
Chen Xin，Li Wenpeng，Li Zhenyu，et al. Prospect on key technology of the XLPE insulation materials and HVDC cables[J]. High Voltage Engineering，2020，46(5)：1577-1585.

[26] 万子剑，张　伟，谭　笑，等. 110 kV电缆附件EPDM绝缘的理化性能及电荷特性研究[J]. 高压电器，2026，62(3)：144-152.
Wan Zijian，Zhang Wei，Tan Xiao，et al. Study on physicochemical and charge characteristics of EPDM insulation for 110 kV cable accessories[J]. High Voltage Apparatus，2026，62(3)：144-152.

[27] 易姝慧，王亚林，吴建东，等. 不同界面状态的交联聚乙烯/三元乙丙橡胶双层介质电导特性研究[J]. 电气工程学报，2018，13(11)：71-78.
Yi Shuhui，Wang Yalin，Wu Jiandong，et al. Research on conduction characteristics of double - layered XLPE/EPDM with different interface states[J]. Journal of Electrical Engineering，2018，13(11)：71-78.

柳　杰(1995—)，男，博士，工程师，研究方向为电缆技术及新型电工材料(通信作者)(E-mail：372612677@qq.com)。

惠宝军(1988—)，男，博士，高级工程师，研究方向为电缆安全运行与诊断技术(E-mail：huibj@csg.cn)。