

# Study on Space Charge Characteristics between XLPE and SR for HVDC Cable Insulation and Accessory Insulation under Temperature Gradient Field

Jiale Qi, Yifan Zhou, Wei Wang, Tailong Guo

Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing  
Email: [jjiale\\_qi1995@163.com](mailto:jjiale_qi1995@163.com), [yfzhou@ncepu.edu.cn](mailto:yfzhou@ncepu.edu.cn)

Received: Nov. 12<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 27<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 4<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

During the operation of the DC cable, the space charge is easily accumulated at the composite insulation interface composed of the DC cable and the accessory. The cable load operation causes the insulation layer to form a high temperature gradient inside and outside, and the existence of the temperature gradient affects the space charge behavior of double-layered insulation. Space charge characteristics in Double-layered Insulation of flat specimens between XLPE and SR are studied under different DC electric fields and different temperature gradients. Space charge and electric field distribution under temperature gradient in double-layered insulation were simulated based on Maxwell-Wagner polarization model. The results show that the polarity of the interface charge is the same as that of the SR side electrode, and as the temperature gradient increases, the accumulated charge increases at the interface, the charge on the XLPE side increases, the charge on the SR side decreases. At the same time, the internal electric field of the SR medium is gradually weakened, and the electric field distortion at the interface is more serious. The maximum electric field strength of the double-layered insulation appears at the lower electrode interface of the XLPE. Based on the M-W polarization model, the internal space charge characteristics of the double-layered insulation under DC field of the temperature gradient field can be effectively described.

## Keywords

DC Cable, Cable Accessory, Space Charge, Interface, Temperature Gradient, M-W Polarization Model

---

# 温度梯度场下高压直流电缆绝缘与附件绝缘 XLPE/SR 双层介质空间电荷特性研究

齐佳乐, 周一帆, 王伟, 郭泰龙

文章引用: 齐佳乐, 周一帆, 王伟, 郭泰龙. 温度梯度场下高压直流电缆绝缘与附件绝缘 XLPE/SR 双层介质空间电荷特性研究[J]. 智能电网, 2019, 9(6): 263-273. DOI: [10.12677/sg.2019.96029](https://doi.org/10.12677/sg.2019.96029)

华北电力大学, 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京  
Email: jiale\_qi1995@163.com, yfzhou@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2019年11月12日; 录用日期: 2019年11月27日; 发布日期: 2019年12月4日

## 摘要

直流电缆在运行过程中, 直流电缆及附件组成的复合绝缘界面处易积聚空间电荷。电缆负载运行引起绝缘层形成内高外低的温度梯度, 温度梯度的存在会影响双层介质空间电荷行为特性。为此, 研究了电缆主绝缘交联聚乙烯(Cross-linked Polyethylene, XLPE)和附件应力锥绝缘硅橡胶(Silicone Rubber, SR)组成的双层介质平板试样在不同直流电场和不同温度梯度下的空间电荷特性, 基于Maxwell-Wagner极化模型模拟了温度梯度下双层介质内部空间电荷和电场分布。结果表明: 界面电荷极性与SR侧电极处的电荷极性相同, 且随着温度梯度的增加, 界面处积聚电荷增多, XLPE侧电荷增加, SR侧电荷减少, 同时SR介质内部电场逐渐削弱, 界面处电场畸变更加严重, 双层介质内部电场强度最大值出现在XLPE下电极界面处; 基于M-W极化模型可以有效表征温度梯度场下直流低电场作用的双层介质内部空间电荷特性。

## 关键词

直流电缆, 电缆附件, 空间电荷, 界面, 温度梯度, M-W极化模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前高压直流输电技术的快速发展对直流电缆附件性能提出了更高要求, 高压直流电缆及附件的发展起步较晚, 电缆及附件的发展已经成为我国高压直流输电系统中的关键环节[1]。高压直流电缆系统内部存在电缆主绝缘与附件绝缘所构成的界面结构。绝缘交界面处容易导致电荷的局部积聚, 成为直流输电系统的绝缘薄弱环节和出现故障的典型部位[2]。直流电缆及附件的空间电荷效应容易造成内部电场畸变, 加速绝缘老化, 甚至引起绝缘击穿[3][4]。直流电缆在运行时的温升效应导致绝缘内部温度由内向外呈现梯度分布, 即绝缘层内部的温度梯度效应, 直接影响绝缘内部空间电荷积聚和电场分布[5]。

当前已有研究表明空间电荷是导致电介质劣化的重要因素之一[6]。直流电压下的空间电荷效应严重影响直流电缆及附件绝缘的发展, 直接影响电缆运行的可靠性。近年来已有国内外学者开展直流电压下空间电荷特性的研究, 但目前的研究大部分针对单层介质中空间电荷的分布特性[7][8][9], 对双层绝缘介质中界面电荷的研究较少[10][11][12], 尤其在直流电压作用下考虑温度梯度效应的影响。国内外虽已有学者开展温度对界面电荷分布特性影响的研究, 但温度均设置为单一温度[13][14][15], 无法直接等效绝缘层内部温度梯度效应, 温度梯度效应对直流电缆及附件绝缘界面空间电荷特性及电场畸变特性的研究非常有限, 双层介质内部空间电荷和电场分布的影响规律和作用机理仍需详细研究。

本文以 XLPE 和 SR 组成的双层介质为研究对象, 基于 PEA 空间电荷测量系统, 研究了外施直流电场作用不同温度梯度作用下双层绝缘介质中空间电荷分布特性, 并基于 M-W 极化模型, 利用有限元仿真软件模拟了温度梯度场下界面电荷和电场分布情况, 研究了温度梯度效应对界面电荷和电场畸变的影响, 为直流电缆及附件绝缘设计提供了理论和应用价值。

## 2. 温度梯度下双层介质的界面空间电荷实验测量

### 2.1. 空间电荷实验测量平台

在众多空间电荷无损测量方法中，20 世纪 80 年代日本学者 T. Takada 发明电声脉冲(PEA)法并于 90 年代逐渐发展成熟，该方法成为国际上应用最为广泛的空间电荷测量方法之一[16]。本实验所采用测量系统为本实验室开发的基于 PEA 原理的可实现温度梯度调节的实验测量平台，该实验测量平台在传统的空间电荷测量装置的基础上，添加了如图 1 所示的上下电极循环油浴系统以实现不同温度梯度的功能。测量系统主要由直流高压电源、高压脉冲源、测量电极系统、高/低温恒温循环浴、示波器等部分组成。上电极采用铜电极，下电极采用铝电极，上下电极处的温度均采用循环油浴进行调节，上电极为高温侧，下电极为低温侧。

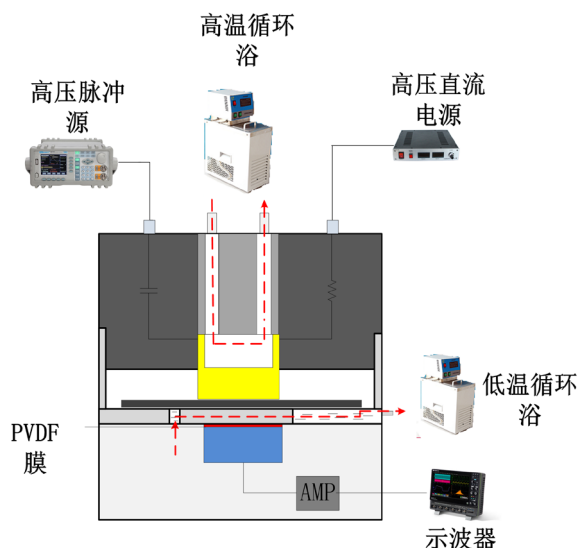


Figure 1. Schematic diagram of PEA that can achieve temperature gradient  
图 1. 可实现温度梯度的 PEA 示意图

### 2.2. 试样的制备

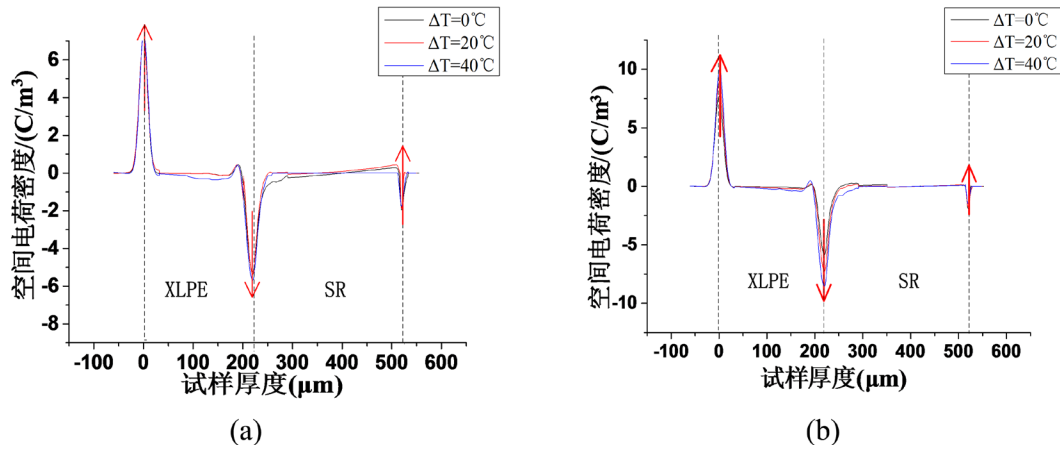
交联聚乙烯试样：交联聚乙烯粒料为北欧化工生产的进口直流电缆绝缘所用的原料，放在平板硫化机中，先在 140℃，15 MPa 压力下预交联 10 min，再在 180℃，15 MPa 下交联 15 min 得到交联好的试样，最后放入真空干燥箱中静置 48 h。尺寸为 13 cm \* 13 cm \* 0.22 mm。硅橡胶试样：硅橡胶料使用青岛汉缆公司提供的液体硅橡胶 A、B 两组份，等比例混合均匀后，经过脱气后，用 110℃ 的平板硫化机热压 5 min，最后在入真空干燥箱中静置 48 h。尺寸为 13 cm \* 13 cm \* 0.3 mm。将两种试样都裁剪为 4 cm \* 4 cm 大小的尺寸，并用高真空硅脂使两层试样紧密地粘合在一起，得到测量所需要的双层介质试样。

### 2.3. 实验结果

将制备好的试样放置在如图 1 所示的空间电荷测量装置，调节直流电压使试样内直流平均电场强度为 5 kV/mm 和 8 kV/mm。下电极设置循环油浴温度为 25℃(与室温相同)，改变上电极循环油浴温度，以实现双层介质试样两侧的温差。

如图 2 所示为温度梯度为 0℃、20℃ 和 40℃ 作用的 XLPE 和 SR 组成的双层介质在直流电场 5 kV/mm 和 8 kV/mm 下加压 1 h 时体内和界面空间电荷分布。图 2 可以明显的看出随温度梯度的增加，下电极 XLPE

侧和界面电荷量都有所增加，而上电极 SR 侧的空间电荷量则有所减少，XLPE/SR 界面电荷极性与 SR 侧的电荷极性相同，且随外施直流电场的增加，上述现象愈加明显。

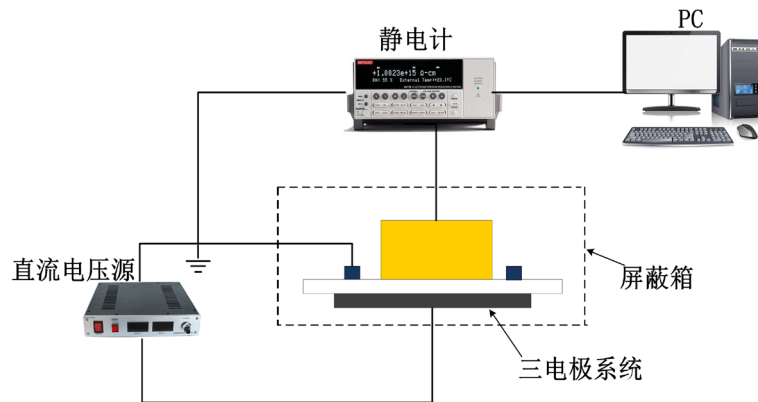


**Figure 2.** Space charge characteristics of double layer media under different temperature gradients with DC electric field 5 kv/mm and 8 kv/mm. (a) 5 kV/mm DC field; (b) 8 kV/mm DC field

**图 2.** 不同温度梯度作用下外施直流电场 5 kV/mm 和 8 kV/mm 时双层介质的空间电荷特性。(a) 5 kV/mm 直流电场; (b) 8 kV/mm 直流电场

### 3. 直流电导率的测量

本文基于 M-W 极化模型模拟双层介质内部空间电荷分布特性，需采用如公式(1)所示的电导率模型，基于图 3 所示的三电极系统测量 XLPE 和 SR 试样的电导率，分别完成电导率模型的拟合。测量系统由高压直流电源、静电计、测量电极系统、屏蔽箱组成。外加直流电压为 1~10 kV，测量温度范围为 25℃~65℃，测量电极直径为 30 mm，记录加压 20 min 后的传导电流值，根据已知条件计算可得测试试样的电导率值。



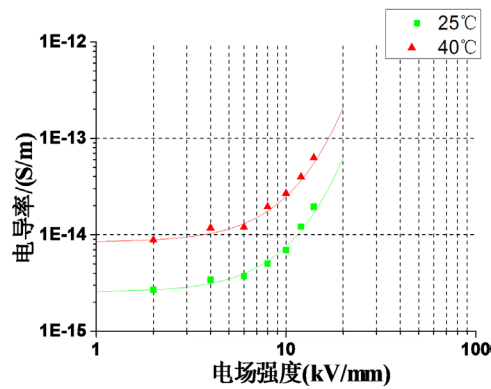
**Figure 3.** Conductivity measurement system

**图 3.** 电导率测量系统

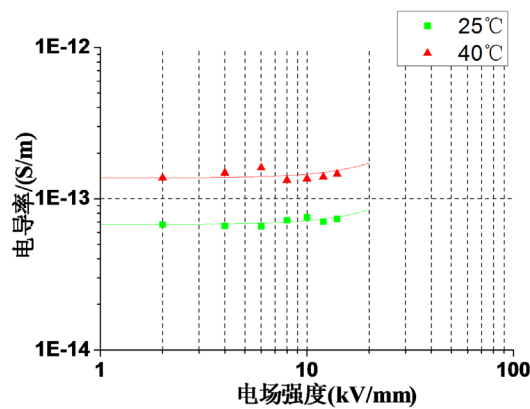
聚合物固体介质的电导率公式可由公式(1)表示[17]，

$$\epsilon_B \cdot E_B - \epsilon_A \cdot E_A = \rho \tag{1}$$

其中 A 和 B 为常数，φ 为热活化能，单位为 eV，k 为玻尔兹曼常数，T 为温度，E 为电场强度。



**Figure 4.** The conductivity of XLPE varies with electric field strength at different temperatures  
**图 4.** XLPE 的电导率在不同温度下随电场的变化



**Figure 5.** The conductivity of SR varies with electric field strength at different temperatures  
**图 5.** SR 的电导率在不同温度下随电场的变化

将不同直流电场和不同温度下的电导率测量值代入公式(1), 得到表 1 所示的 XLPE 和 SR 电导率模型参数, 从而可以拟合出图 4、图 5 中两种介质电导率的变化情况。

**Table 1.** XLPE and SR conductivity model parameters  
**表 1.** XLPE 和 SR 电导率模型参数

参数	XLPE	SR
$A$ ( $A/m^2$ )	3.68	3.02
$B$ (m/V)	$1.15 \times 10^{-7}$	$0.6 \times 10^{-7}$
$\varphi$ (eV)	0.92	0.38

#### 4. 基于 M-W 极化模型模拟界面电荷

为模拟温度梯度场下双层介质内部空间电荷分布特性, 基于 M-W 极化理论模型, 采用有限元仿真软件进行电热物理场耦合下双层介质内部空间电荷的仿真计算。

##### 4.1. M-W 极化理论

根据 M-W 极化理论[18], 若两种介质的介电常数和电导率比值不匹配, 在界面处会产生极化电荷。

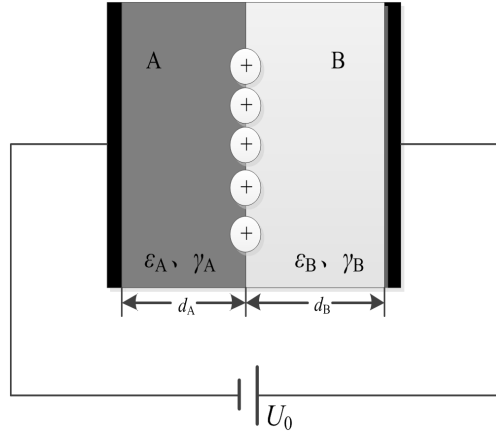
对如图 6 所示的平板试样，则在稳态下存在下列方程：

$$E_A \cdot d_A + E_B \cdot d_B = U_0 \quad (2)$$

$$\gamma_B \cdot E_B - \gamma_A \cdot E_A = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_B \cdot E_B - \varepsilon_A \cdot E_A = \rho \quad (4)$$

其中， $E_A$  和  $E_B$  分别是介质 A 和 B 中的电场强度， $d_A$  和  $d_B$  是介质的厚度， $U_0$  是外施电压， $\gamma_A$  和  $\gamma_B$  是电导率， $\varepsilon_A$  和  $\varepsilon_B$  是介电常数， $\rho$  是界面电荷密度。



**Figure 6.** Schematic diagram of interface polarization model of two-layer medium  
**图 6.** 双层介质的界面极化模型示意图

考虑电压施加的瞬态过程，M-W 极化理论给出了随时间变化的界面电荷密度表达式[13]：

$$\rho(t) = \frac{\varepsilon_A \cdot \gamma_B(t) - \varepsilon_B \cdot \gamma_A(t)}{d_A \cdot \gamma_B(t) + d_B \cdot \gamma_A(t)} \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-t/\tau_{MW}(t)}) \quad (5)$$

其中：

$$\tau_{MW}(t) = \frac{\varepsilon_B \cdot d_A + \varepsilon_A \cdot d_B}{d_A \cdot \gamma_B(t) + d_B \cdot \gamma_A(t)} \quad (6)$$

由式(5)可知，若已知介质的介电常数和电导率，可获得随时间变化的界面电荷密度。且界面电荷的极性由  $\varepsilon_A \cdot \gamma_B - \varepsilon_B \cdot \gamma_A$  确定。若  $\varepsilon_A \cdot \gamma_B = \varepsilon_B \cdot \gamma_A$  时，即  $\rho(t) = 0$ ，表明在双层介质形成界面处无电荷积聚。结合式(2)和(4)可知，获取界面电荷量后，两种介质内部电场分布为：

$$E_A(t) = \frac{U_0 \cdot \varepsilon_B}{\varepsilon_A \cdot d_B + \varepsilon_B \cdot d_A} - \frac{\rho(t) \cdot d_B}{\varepsilon_A \cdot d_B + \varepsilon_B \cdot d_A} \quad (7)$$

$$E_B(t) = \frac{U_0 \cdot \varepsilon_A}{\varepsilon_A \cdot d_B + \varepsilon_B \cdot d_A} + \frac{\rho(t) \cdot d_A}{\varepsilon_A \cdot d_B + \varepsilon_B \cdot d_A} \quad (8)$$

式(7)和(8)中的第一项代表介电常数不连续引起的容性电场分布，第二项代表界面电荷引起的电场畸变。由式(7)和(8)可看出，界面电荷的积聚过程，双层介质内部电场分布随时间发生变化，同时电导率为温度和电场的函数，因此介质的电导率随界面电荷密度的变化而变化。

双层介质的界面电荷和电场分布仿真计算，可根据第 2 节中对不同外施电场和温度下的电导特性测试结果，拟合不同介质的电导率模型，用以描述电导率与电场和温度的关系，进而将获取的电导率模型代入式(5)、(6)、(7)和(8)中，即可模拟双层介质在不同电场和温度梯度条件下的界面电荷和电场分布。

## 4.2. 仿真模型建立

基于 M-W 极化理论,利用有限元仿真软件模拟不同场强和温度梯度下的双层介质内部的空间电荷分布,根据试样的实际尺寸设置模型的几何形状(如图 7),建立二维平面模型中的各种材料的参数如表 2 所示:

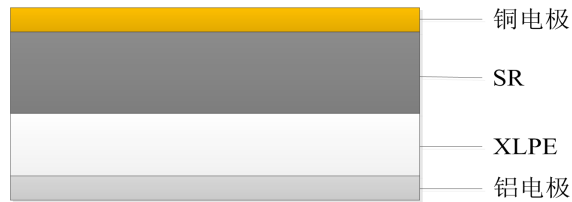


Figure 7. Model of double-layer flat specimen  
图 7. 双层平板试样模型图

Table 2. Material physical parameters in the simulation model  
表 2. 仿真模型中材料物理参数

参数	XLPE	SR	铜	铝
介电常数	2.3	2.8	-	-
密度(kg/m <sup>3</sup> )	922	1150	8700	2700
导热系数(W/(m·K))	0.285	0.27	400	238
恒压热容(J/(kg·K))	2603	1700	385	900

两种介质采用式(1)所示的电导率模型,参数如表 1 所示。图(7)中的铝电极处接地,铜电极处施加直流电压。

## 4.3. 仿真结果

改变仿真模型中铜电极处的电势和温度,可实现不同直流电场和温度梯度场的施加。在 XLPE/SR 组成的双层平板试样模型中,施加的直流电场强度为 5 kV/mm 和 8 kV/mm;高温侧铜电极处分别设置温度为 25℃、45℃和 65℃,铝电极处设置温度为 25℃,实现上下电极处温差分别为 0℃、20℃和 40℃。

5 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部空间电荷、电场分布和电导率分布随温度梯度变化的仿真结果如图 8、图 9 和图 10 所示。

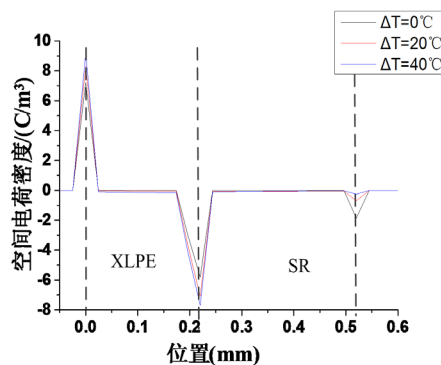
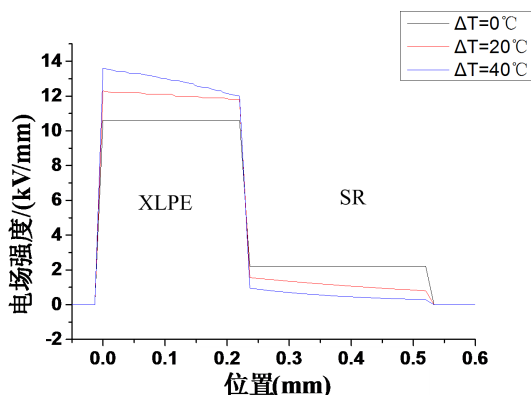


Figure 8. Simulation diagram of internal space charge of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 5 kV/mm DC electric field

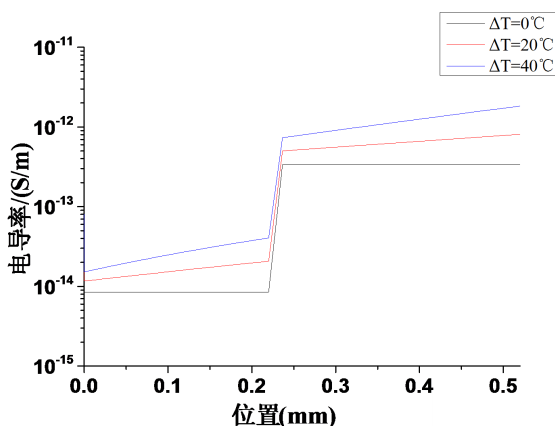
图 8. 5 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部空间电荷随温度梯度变化的仿真图





**Figure 9.** Simulation diagram of internal electric field distribution of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 5 kV/mm DC electric field

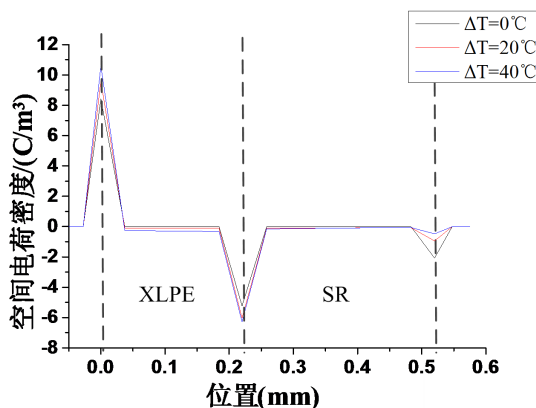
**图 9.** 5 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部电场分布随温度梯度变化的仿真图



**Figure 10.** Simulation diagram of internal conductivity distribution of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 5 kV/mm DC electric field

**图 10.** 5 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部电导率分布随温度梯度变化的仿真图

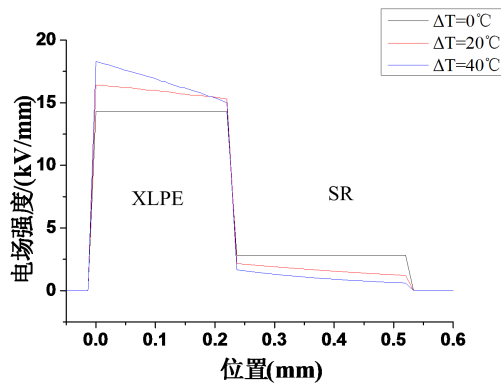
8 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部空间电荷、电场分布和电导率分布随温度梯度变化的仿真结果如图 11~13 所示。



**Figure 11.** Simulation diagram of internal space charge of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 8 kV/mm DC electric field

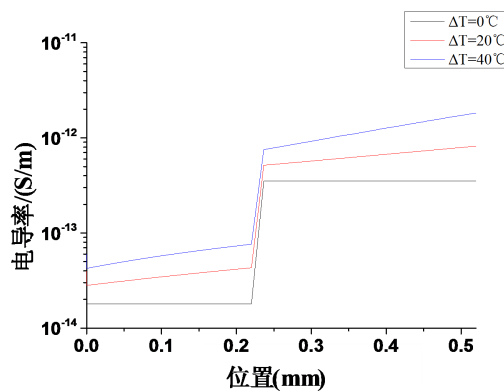
**图 11.** 8 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部空间电荷随温度梯度变化的仿真图





**Figure 12.** Simulation diagram of internal electric field distribution of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 8 kV/mm DC electric field

**图 12.** 8 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部电场分布随温度梯度变化的仿真图



**Figure 13.** Simulation diagram of internal conductivity distribution of double-layer dielectric XLPE/SR with temperature gradient under 8 kV/mm DC electric field

**图 13.** 8 kV/mm 直流电场下双层介质 XLPE/SR 内部电导率分布随温度梯度变化的仿真图

如图 8、图 11 所示,随着温度梯度的增加,下电极 XLPE 侧电极处(位置 0 mm)积聚的电荷量增加, XLPE/SR 交界处(位置 0.22 mm)积聚的界面电荷量也在增加,而上电极 SR 处(位置 0.52 mm)的空间电荷在减少;双层介质 XLPE/SR 形成的界面电荷极性与 SR 侧的电荷极性相同。

如图 9、图 10、图 12 和图 13 所示,界面电荷的积聚加剧了双层介质内部的电场畸变, XLPE 内的场强增加,而 SR 内的场强减少。随着温度梯度的增加,界面处电场逐渐增加,电场分布的畸变程度更加明显, SR 侧体内的电场分布与界面处电场分布表现出不同的变化趋势,体内电荷的积聚削弱了 SR 侧介质内部电场强度。同时随着温度梯度的增加,双层介质内部的电导率不断增加,表明了温度梯度下的电场畸变直接导致了双层介质内部电导率的不均匀分布。

#### 4.4. 结果分析

与相同直流电场 5 kV/mm、8 kV/mm 和温度梯度 0°C、20°C 和 40°C 条件下的实验结果相比(图 2),基于 M-W 极化模型模拟 XLPE/SR 双层介质内部空间电荷分布的仿真结果(图 8 和图 11)具有相同的变化趋势和极性。界面电荷极性与 SR 侧积聚电荷的极性相同,其原因由式(5)可知,界面电荷值主要取决于介质的电导率和介电常数,其中介电常数随温度和电场的变化不大,界面电荷的极性由  $\epsilon_A \cdot \gamma_B - \epsilon_B \cdot \gamma_A$  确定, SR 电导率大于 XLPE,导致界面电荷极性与 SR 侧的电荷极性相同。

同时实验和仿真结果中描述界面电荷与两侧电极处电荷变化趋势相同,即随着温度梯度的增加,界

面电荷逐渐增加, XLPE 侧电荷逐渐增加, SR 侧电荷逐渐减少。正因为 SR 侧电极处位于高温侧, 载流子迁移率较高, 导致高温侧积聚的负电荷能较快地迁移到界面处, 且温度梯度越高, 积聚更加明显。

温度梯度下空间电荷的积聚会影响电场畸变, 而电场畸变反过来又会影响电荷的积聚。XLPE/SR 双层介质内部空间电荷的积聚导致介质内部电场畸变更加, SR 侧体内的电场高于 XLPE 侧体内的电场, 加速了 SR 附近的负电荷向界面处的迁移, 导致界面处逐渐积聚负极性电荷, 且随着温度梯度的增加, 界面处负极性空间电荷积聚量增加, 界面位置的电场强度逐渐增加, SR 体内电荷的迁移削弱了该侧电场强度(图 9 和图 12), 双层介质内部电场强度最大值出现在 XLPE 与下电极界面(位置 0.02 mm), 以温度梯度为 40℃, 外施直流电场为 8kV/mm 的条件为例, 最大畸变场强达到 18.3kV/mm, 比外施直流场强增加了 2.29 倍。

## 5. 结论

本文基于 PEA 空间电荷测量系统, 研究了 5 kV/mm、8 kV/mm 外施直流电场和 0℃、20℃和 40℃温度梯度场作用下 XLPE/SR 双层介质中空间电荷分布特性, 并基于 M-W 极化模型模拟了相同电场和温度梯度条件下的 XLPE/SR 双层介质中空间电荷和电场分布情况, 对比仿真和实验结果研究了温度梯度效应对界面电荷和电场畸变的影响规律, 得出以下结论:

1) XLPE/SR 双层介质中界面电荷极性与 SR 侧电荷极性相同, 且双层介质中空间电荷积聚明显受温度梯度影响, 随着温度梯度的增加, 造成了 XLPE 侧和界面处更多空间电荷的积聚, 而减少了 SR 侧空间电荷的积聚。

2) 基于 M-W 极化模型可较为准确地模拟出温度梯度场下直流低电场作用的双层介质内部空间电荷和电场分布, 并可成功预测出界面电荷极性。

3) 双层介质中电场分布明显受温度梯度影响, 温度梯度越高, SR 介质内部电场逐渐削弱, 界面处电场强度增加, 电场畸变更加严重, 双层介质内部电场强度最大值出现在 XLPE 下电极界面处。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51377056)。

## 参考文献

- [1] 杜伯学, 李忠磊, 杨卓然, 等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 14-24.
- [2] 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): 126-132.
- [3] Ieda, M. (1987) Carroer Injection, Space Charge and Electrical Breakdown in Insulating Polymers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-22**, 261-267. <https://doi.org/10.1109/TEI.1987.298988>
- [4] Zhang, Y., Lewiner, J., Alquie, C. and Hampton, N. (1996) Evidence of Strong Correlation between Space-Charge Buildup and Breakdown in Cable Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **3**, 778-783. <https://doi.org/10.1109/94.556559>
- [5] Fabiani, D., Montanari, G.C., Laurent, C., et al. (2008) HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation, Part 3: Effect of Temperature Gradient. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **24**, 5-14. <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4473049>
- [6] Montanari, G.C. (2011) Bringing an Insulation to Failure: The Role of Space Charge. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, **18**, 339-364. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5739438>
- [7] Hozumi, N., Takeda, T., Suzuki, H. and Okamoto, T. (1998) Space Charge Behavior in XLPE Cable Insulation under 0.2-1.2 MV/cm de Fields. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **5**, 82-90. <https://doi.org/10.1109/94.660776>
- [8] 吕亮, 方亮, 王霞, 等. 硅橡胶中空间电荷的形成机理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 139-144.
- [9] See, A., Dissado, L.A. and Fothergill, J.C. (2001) Electric Field Criteria for Charge Packet Formation and Movement

- in XLPE. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **8**, 859-866. <https://doi.org/10.1109/94.971438>
- [10] Chen, G., Tanaka, Y., Takada, T. and Zhong, L. (2004) Effect of Polyethyleneinterface on Space Charge Formation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **11**, 113-121. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2004.1266324>
- [11] Delpino, S., Fabiani, D., Montanari, G.C., *et al.* (2008) Feature Article-Polymeric HVDC Cable Design and Space Charge Accumulation. Part 2: Insulation Interfaces. *Electrical Insulation Magazine IEEE*, **24**, 14-24. <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4455499>
- [12] 王霞, 朱有玉, 王陈诚, 等. 空间电荷效应对直流电缆及附件绝缘界面电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 214-221.
- [13] N. Vu, T., Teyssedre, G., Vissouvanadin, B., Le Roy, S. and Laurent, C. (2015) Correlating Conductivity and Space Charge Measurements in Multi-Dielectrics under Various Electrical and Thermal Stresses. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **22**, 117-127. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004507>
- [14] 兰莉, 吴建东, 王雅妮, 等. 低密度聚乙烯/乙丙橡胶双层介质的界面空间电荷特性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1266-1272.
- [15] 郭高飞, 李文鹏, 王亚林, 等. 不同涂层对 XLPE 和 EPDM 双层绝缘介质空间电荷特性的影响[J]. 绝缘材料, 2019(7): 80-85.
- [16] Takada, T. and Sakai, T. (1983) Measurement of Electric Fields at a Dielectric/Electrode Interface Using an Acoustic Transducer Technique. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-18**, 619-628. <https://doi.org/10.1109/TEI.1983.298700>
- [17] Boggs, S., Damon, D.H., Hjerrild, J., Holboll, J.T. and Henriksen, M. (2001) Effect of Insulation Properties on the Field Grading of Solid Dielectric DC Cable. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, 456-461. <https://doi.org/10.1109/61.956720>
- [18] Montanari, G.C. and Morshuis, P.H.F. (2005) Space Charge Phenomenology in Polymeric Insulating Materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **12**, 754-767. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1511101>