

# 纳米SiO<sub>2</sub>添加对乙丙橡胶相对介电常数和电导特性的影响

赵瑞雪<sup>1,2</sup>, 门汝佳<sup>1</sup>, 徐晓晓<sup>3</sup>, 雷志鹏<sup>1</sup>, 宋建成<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 王业<sup>1</sup>

- (1. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 陕西 西安 710048; 3. 国家电网河北省检修公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:**为了明确纳米SiO<sub>2</sub>添加对乙丙橡胶绝缘相对介电常数和电导特性的影响,使用熔融共混法制备了含不同质量分数纳米SiO<sub>2</sub>的乙丙橡胶复合电介质,分析了纳米颗粒在乙丙橡胶基体中的分散特性,以及纳米颗粒与乙丙橡胶基体的键合性质,测量了乙丙橡胶纳米复合电介质的相对介电常数以及不同温度和电场下的稳态电流,分析试样的电导特性。结果表明:当纳米SiO<sub>2</sub>质量分数为0.5%时,在乙丙橡胶中的分散性最好,低浓度掺杂形成的位阻作用,降低了乙丙橡胶分子链段及其侧基链段的活动能力,纳米复合电介质中的界面效应明显,介电常数、电导率降低,空间电荷注入的阈值场强提高,绝缘性能得到明显提升。随着质量分数提高,纳米颗粒与乙丙橡胶基体之间的界面效应减弱;当纳米SiO<sub>2</sub>质量分数为2.5%、5.0%时,掺杂形成的团聚使纳米复合电介质的介电常数增大,电导率提高,空间电荷注入的阈值场强降低。纳米SiO<sub>2</sub>添加带来的界面效应是影响乙丙橡胶纳米复合电介质性能的关键因素。

**关键词:**乙丙橡胶;纳米二氧化硅;电导特性;相对介电常数

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)01-0018-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.01.004

## Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> Addition on Relative Permittivity and Conduction Characteristic of Ethylene Propylene Diene Monomer

ZHAO Ruixue<sup>1,2</sup>, MEN Rujia<sup>1</sup>, XU Xiaoxiao<sup>3</sup>, LEI Zhipeng<sup>1</sup>, SONG Jiancheng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, WANG Ye<sup>1</sup>

- (1. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710048, China; 3. Hebei Maintenance Branch of State Grid, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to find out the effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> on the relative permittivity and conduction characteristic of ethylene propylene diene monomer (EPDM) insulation, we prepared EPDM composite dielectrics with different mass fractions of nano-SiO<sub>2</sub> by melt-blending method. The dispersion of nanoparticles in the EPDM matrix and the bonding properties between nanoparticles and EPDM matrix were analyzed. The relative permittivity and the steady-state current of the EPDM nanocomposite dielectrics at different temperatures and electric fields were measured, and the conductance characteristic were analyzed. The results show that when the mass fraction of nano-SiO<sub>2</sub> is 0.5%, the dispersion of nano-SiO<sub>2</sub> is the best in EPDM. The steric hindrance, which formed by doping of low content, reduces the mobility of the EPDM molecular segments and its side groups, and the interface ef-

收稿日期:2020-04-15 修回日期:2020-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977137)

作者简介:赵瑞雪(1995-),女(汉族),山西运城人,硕士生,研究方向为纳米复合电介质;雷志鹏(1983-),男(汉族),山西太原人,副教授,博士,研究方向为电气绝缘诊断方法、矿用智能电器。

fect is obvious in the nanocomposite dielectrics, making the relative permittivity and conductance decrease, the threshold electric field strength of space charge injection enhance, the insulating performance improve significantly. With the increase of the mass fraction, the interface effect between nanoparticles and EPDM matrix is weakened. When the mass fraction of nano-SiO<sub>2</sub> is 2.5% or 5.0%, the agglomeration caused by doping makes the relative permittivity and the conductance increase, and the threshold electric field strength of space charge injection decreases. The interface effect caused by the addition of nano-SiO<sub>2</sub> is a key factor affecting the properties of EPDM nanocomposite dielectrics.

**Key words:** ethylene propylene diene monomer; nano silica; conduction characteristic; relative permittivity

## 0 引言

乙丙橡胶(EPDM)以其优良的介电性能、力学性能和耐热耐腐蚀性能,被广泛应用于电线电缆等电气绝缘领域<sup>[1-3]</sup>。在实际运行中,电缆终端处电场分布极不均匀,容易引发局部放电,严重时甚至会失去绝缘特性。为了改善这种现象,现有研究一方面是从改造电极系统结构入手,如电缆终端处采用应力锥结构;另一方面则是更换新型绝缘材料,如使用具有非线性特性的电介质材料来调节电场。近年来,纳米颗粒以其特有的表面界面、小尺寸等特点被广泛应用于绝缘材料的改性。国内外学者在聚乙烯、聚丙烯、环氧树脂、硅橡胶等聚合物中,添加纳米二氧化硅、二氧化钛、氧化镁、碳化硅等填充物,改善聚合物的介电性能、空间电荷分布、热导率等性能,取得了一定的成果<sup>[4-6]</sup>。

郑煜等<sup>[7]</sup>研究了纳米 MgO 颗粒对 MgO/XLPE 在强电场下的电导和空间电荷注入阈值场强的影响,发现 MgO 纳米颗粒的引入会提高电子注入的阈值场强,有效改善了 XLPE 中的空间电荷积聚现象。闫志雨等<sup>[8]</sup>研究了低剂量的 CB/LDPE 复合介质的空间电荷和电导特性,发现其具有较低的电导率和电导率温度依赖特性,有效改善了 LDPE 的空间电荷特性。陈清朗<sup>[9]</sup>研究了纳米炭黑/纳米 SiO<sub>2</sub>/EPDM 的电导特性,并对 EPDM 复合介质制成的电缆附件中的电场分布进行仿真,发现纳米改性可以抑制界面处空间电荷的注入,改善电场分布。陈炯等<sup>[10]</sup>研究发现离子跳跃电导在纳米 SiO<sub>x</sub>/LDPE 复合物的电导过程中起主导作用,并且跳跃距离与温度成正比相关。

纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒无毒、无味、无污染,其表面配位不足和表面欠氧等特点使其具有很强的活性。因此,采用纳米 SiO<sub>2</sub> 对乙丙橡胶进行改性具有特殊的优势。为了研究纳米材料对乙丙橡胶绝缘电导特性的影响,本研究通过熔融共混法将不同质量分数

的纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒分散在乙丙橡胶中,制备 EPDM-SiO<sub>2</sub> 纳米复合介质,对其进行微观结构表征和键合性质分析,并在不同温度下测量相对介电常数和电导特性,通过分段线性拟合分析电导现象。

## 1 试验

### 1.1 原材料与设备

球形二氧化硅,粒径为 7~50 nm,上海阿拉丁生化科技有限公司;乙丙橡胶,牌号为 4725P,陶氏化学公司。

SBC-12 型小型离子溅射仪,北京中科科仪股份有限公司;VEGA3SB 型扫描电子显微镜,TESCAN;IRPrestige-21 型傅里叶变换光谱分析仪,SHIMADZU;Concept 80 型宽频介电阻抗谱测试系统,NOVOCONTROL;6517B 型皮安表,KEITHLEY。

### 1.2 试样制备

将纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒在 120℃ 下真空干燥 12 h。采用双辊开炼机分别将 0.1、0.2、0.5、1.0 g 纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒与 20 g EPDM 混合,薄通数遍之后下辊备用。然后将料片置于平板硫化机上,在 165℃ 和 14 MPa 下模压 10 min 后取出。最后将热压成型的试样置于真空干燥箱中,在 80℃ 下真空脱气 24 h,以消除硫化过程中可能产生的副产物及机械应力。

本研究分别制备了纳米 SiO<sub>2</sub> 质量分数为 0、0.5%、1.0%、2.5%、5.0% 的乙丙橡胶纳米复合电介质,分别记为 EPDM、EPDM-0.5SiO<sub>2</sub>、EPDM-1.0SiO<sub>2</sub>、EPDM-2.5SiO<sub>2</sub>、EPDM-5.0SiO<sub>2</sub>。

### 1.3 纳米颗粒分散性分析

纳米颗粒在基体中的分散性会直接影响纳米复合电介质的性能,特别是出现纳米颗粒团聚后,将在基体中引入新的缺陷。为了分析 EPDM-SiO<sub>2</sub> 纳米复合电介质中 SiO<sub>2</sub> 颗粒的分散性,首先将厚度为 0.2 mm 的条状试样在液氮中脆断,再用小型离子溅射仪对试样断面进行喷金处理,然后使用扫描电子显微镜(SEM)对处理后的试样断面进行观察,分

析纳米颗粒的分散性。

#### 1.4 红外光谱测量

采用傅里叶变换红外光谱仪测量 EPDM-SiO<sub>2</sub> 纳米复合电介质的红外吸收光谱,分析乙丙橡胶基体和纳米颗粒所形成的界面处的键合性质。

#### 1.5 介电谱测量

使用宽频介电阻抗谱测试系统测量温度分别为 30、50、80、100℃,频率在 10<sup>2</sup>~10<sup>7</sup> Hz 时乙丙橡胶纳米复合电介质的相对介电常数。

#### 1.6 电导特性测量

电导特性使用三电极系统和皮安表测量,实验电路如图 1 所示。实验中依次测量试样在不同外施电场(1、2、3、5、7、10、15、20 kV/mm)和不同温度(30、50、80、100℃)下的极化电流,取施加电压 90 min 时的稳态电流计算电导。完成一次测量后,先将试样在 80℃ 下短路放电 12 h,然后进行下一电压等级的测量。

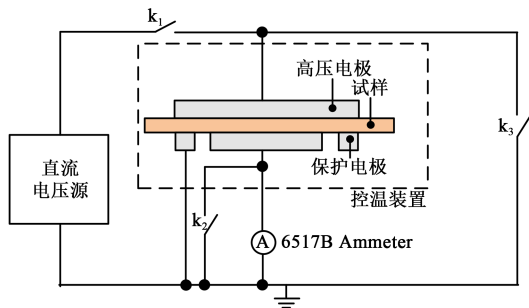


图1 极化电流测量原理图

Fig.1 Polarized current measurement schematic

## 2 结果与讨论

### 2.1 纳米颗粒分散性

图 2 为不同质量分数的纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒在乙丙橡胶基体中的 SEM 图像,图中的白色小亮点为纳米颗粒。从图 2 可以看出,在纳米颗粒质量分数较低(如 0.5% 和 1.0%)时,乙丙橡胶基体中的纳米颗粒数量较少,没有出现明显的团聚,分散比较均匀。随着纳米颗粒含量的进一步增加,在乙丙橡胶基体中出现了一定程度的团聚现象。说明纳米颗粒掺杂量增大会导致其在乙丙橡胶基体中的分散性变差。

### 2.2 傅里叶变换红外光谱分析

图 3 为乙丙橡胶纳米复合电介质的红外光谱图。从图 3 可以看出,除了乙丙橡胶基体的 5 个典型特征峰外,在 500、799、1 101 cm<sup>-1</sup> 处出现了 3 个纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒的典型特征峰,分别对应纳米颗粒中

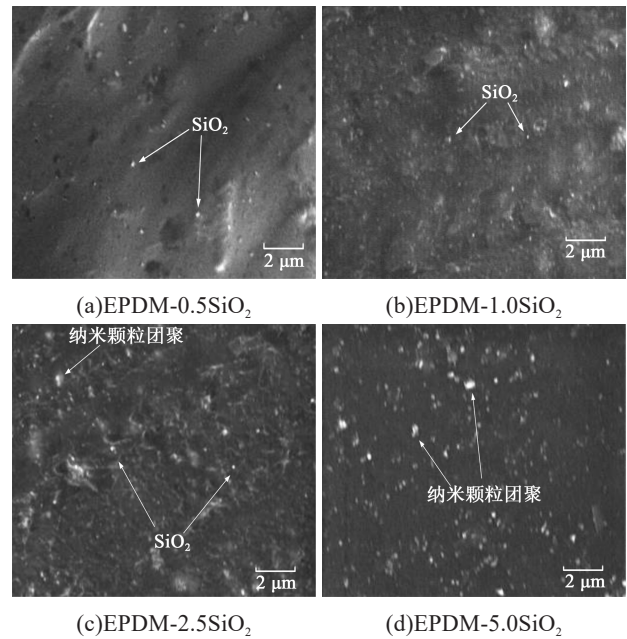


图2 EPDM-SiO<sub>2</sub>纳米复合电介质的断面SEM图

Fig.2 Cross-sectional SEM images of EPDM-SiO<sub>2</sub> nanocomposites

Si-O 的弯曲振动、Si-O 的对称伸缩振动以及 Si-O-Si 的反对称伸缩振动。纯乙丙橡胶和乙丙橡胶纳米复合电介质的红外光谱基本一致,其主要振动吸收峰的峰位没有改变,但峰值略有增加。不同含量的纳米复合电介质中也没有出现其他新的吸收峰,说明纳米颗粒未与乙丙橡胶基体发生化学反应,也未形成新的化学键。根据多作用区模型可知<sup>[1]</sup>,纳米颗粒与乙丙橡胶基体通过氢键在界面键合区键合,从而使得乙丙橡胶分子链牢固、紧密地结合在键合区,提高了键合程度。

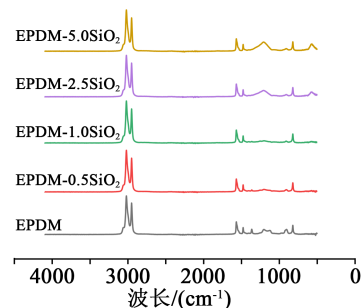


图3 EPDM-SiO<sub>2</sub>纳米复合电介质的红外光谱图

Fig.3 FTIR spectra of EPDM-SiO<sub>2</sub> nanocomposites

### 2.3 相对介电常数分析

不同温度下 EPDM-SiO<sub>2</sub> 纳米复合电介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  频谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,低频时,不同纳米含量试样的相对介电常数均随着频

率的降低和温度的升高而不断增大,这主要有两方面原因:一是温度的升高会促进 EPDM 介质中形成更多的载流子,载流子在低频时有足够的时间迁移并积聚在试样和电极的分界面,形成电极极化<sup>[12]</sup>;二是根据 Maxwell-Wagner 模型可知,部分载流子将在纳米 SiO<sub>2</sub>颗粒与 EPDM 基体间的界面处发生积聚,引起界面极化。因此,低频段的电极极化和界

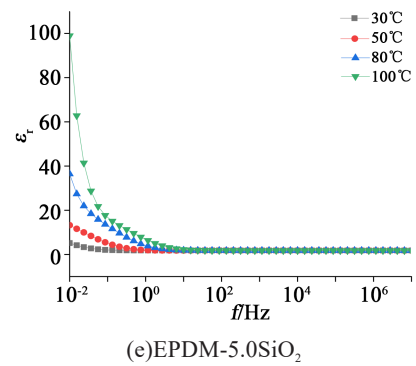
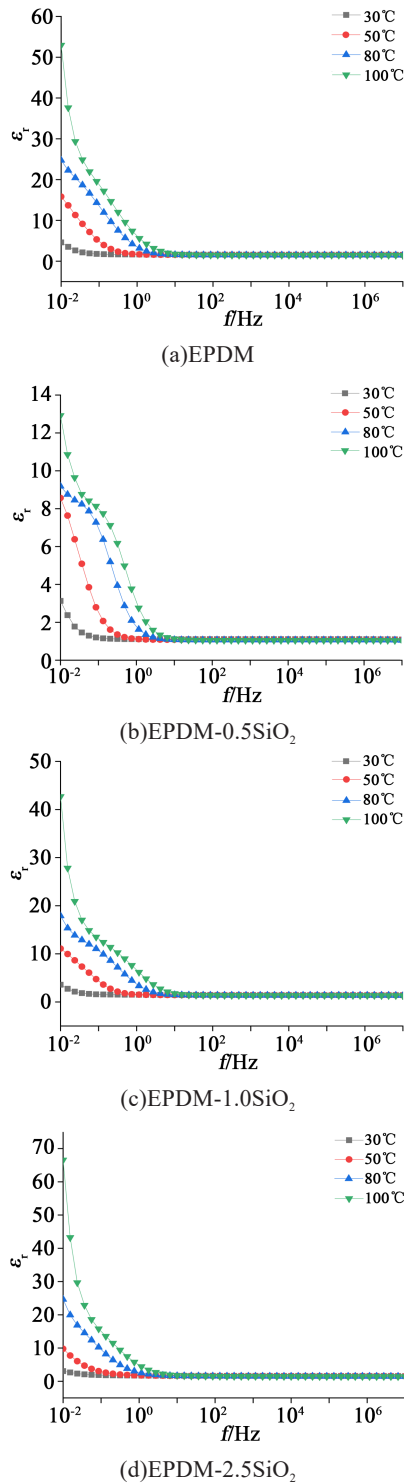


图4 EPDM-SiO<sub>2</sub>纳米复合电介质的相对介电常数  
Fig.4 Relative permittivity of EPDM-SiO<sub>2</sub> nanocomposites

面极化是导致试样低频相对介电常数增大的原因。高频时,载流子移动速度加快,难以产生额外的极化,试样的相对介电常数均保持稳定,不再随频率和温度的变化而变化。

为了进一步理解纳米颗粒对 EPDM 相对介电常数的影响,分别绘制了 EPDM 及其纳米复合电介质在低频 0.01 Hz 和 1 000 Hz 下的相对介电常数温谱图,如图 5 所示。从图 5 可以看出,不论是在低频还是高频,添加 0.5% 纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒可以有效降低纳米复合电介质的相对介电常数,但随着纳米颗粒的增加,纳米复合电介质的相对介电常数反而会

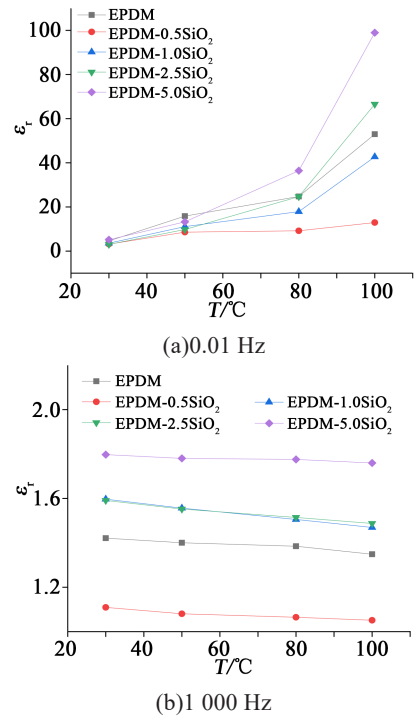


图5 EPDM-SiO<sub>2</sub>纳米复合电介质的相对介电常数温谱  
Fig.5 Temperature spectra of relative permittivity of EPDM-SiO<sub>2</sub> nanocomposites

逐渐增大。

EPDM 是非极性电介质, 其聚集态结构不会影响交变电场下的介电性能, 因此 EPDM 纳米复合电介质介电常数的变化必然是纳米颗粒与基体间键合造成的<sup>[13]</sup>。不同质量分数的纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒与 EPDM 基体间的界面区作用机理如图 6 所示。

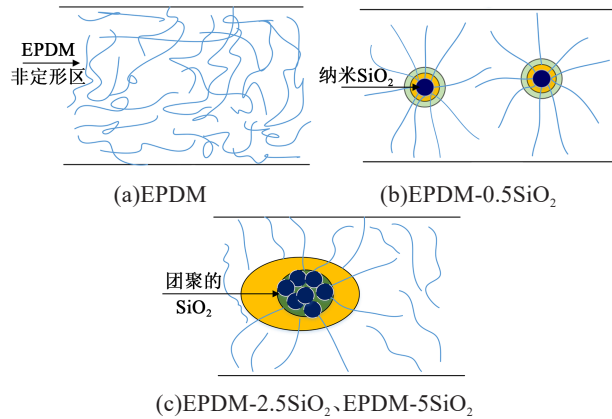


图 6 不同质量分数的纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒对 EPDM 基体间的界面区作用机理

Fig.6 Interaction mechanism of SiO<sub>2</sub> particles with different mass fractions on the interface region between EPDM matrix

EPDM 内存在大量的非定型区, 分子排列杂乱无序, 如图 6(a) 所示。从图 6(b) 可以看到, 当纳米颗粒质量分数为 0.5% 时, 纳米颗粒在 EPDM 基体中较为分散, 且分布均匀, 界面效应最明显。纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒在 EPDM 分子链间相当于“连结点”, 纳米颗粒的位阻作用会降低分子链段及其侧基链段的活动能力, 阻碍载流子的传输, 削弱试样的极化强度, 从而降低 EPDM 纳米复合电介质的相对介电常数。而当掺杂量进一步增大时, 纳米颗粒的分散性逐渐变差, 界面效应减小, 导致 EPDM 纳米复合电介质的相对介电常数有所增大。从图 6(c) 可以看出, 当纳米颗粒质量分数增加至 2.5% 和 5.0% 时, 纳米颗粒间团聚, 体积增加, 可以视为是微米级的粒子。微米粒子与 EPDM 聚合物间的界面结构松散, 且团聚的大颗粒与 EPDM 大分子链间仅存在较弱的分子间作用力, 大幅削弱了 EPDM-SiO<sub>2</sub> 微观界面区作用, 从而使得 EPDM 纳米复合电介质的相对介电常数进一步增大。另外, 纳米颗粒的增多也会引入更多的偶极基团, 增加偶极子极化特性, 使得低频下 EPDM 纳米复合电介质的相对介电常数随着掺杂量的增加而明显增大。因此, 界面效应和偶极基团是

影响 EPDM 纳米复合电介质相对介电常数的重要因素。

#### 2.4 电导特性分析

选用加压 90 min 时的稳态电流计算乙丙橡胶纳米复合电介质的准稳态电流密度和电导率。图 7 为乙丙橡胶纳米复合电介质在不同温度下的准稳态电流密度-电场 ( $\lg J_s - \lg E$ ) 和电导率-电场 ( $\lg \gamma - \lg E$ ) 曲线。其中准稳态电流密度  $J_s$  由式(1)计算。

$$J_s = \frac{i_\infty(t)}{A_{\text{meI}}} \quad (1)$$

式(1)中:  $i_\infty(t)$  为加压 90 min 时的稳态电流;  $A_{\text{meI}}$  为测量电极的面积。

试样的电导率  $\gamma$  由式(2)计算。

$$\gamma = \frac{J_s}{E} \quad (2)$$

式(2)中:  $E$  为外加电场值。

从图 7 可以看出, 纳米复合试样的电导率和准稳态电流密度均呈现出分区段变化的趋势, 且在低场强下变化缓慢。随着场强增大至某一阈值, 电导率和准稳态电流密度均迅速增大, 表明其导电机制发生了转变。图 7 中的曲线旁的数字分别为在低场强区和高场强区对实验数据进行线性拟合后得到的拟合线的斜率。可以看出, 低场强区拟合线的斜率约为 1, 说明此时准稳态电流密度与外施电场成线性关系, 符合欧姆电导机制。而高场强区的拟合线斜率均在 2 左右, 可知高场强区的电导特性满足空间电荷限制电流机制 (SCLC)<sup>[14]</sup>。这种随电场变化而出现非线性电导现象的主要原因有两方面: 一方面, 电场强度增加会降低电极和介质间势垒宽度, 使得载流子更加容易从电极向介质内部注入; 另一方面, 电场会增加陷阱中俘获的电子或空穴热激发, 导致载流子克服库仑势垒的约束而迅速增加。另外, 拟合线的斜率也反映了准稳态电流密度对电场和温度的依赖性。可以看出, 准稳态电流密度的依赖性随着电场、温度的变化呈正相关。

由图 7 可知, 乙丙橡胶纳米复合电介质的电流密度和电导率随着掺杂量的增加呈现出先减小后增大的趋势, 其中 EPDM-0.5SiO<sub>2</sub> 试样的准稳态电流密度和电导率最低。这是由纳米颗粒与乙丙橡胶基体间形成的界面区效应导致的, 由于纳米颗粒的小尺寸效应与表面界面效应, 其与聚合物基体间的界面区的结构特性会限制乙丙橡胶分子链的运动, 减弱载流子的传输。掺杂少量纳米颗粒时, 界面效

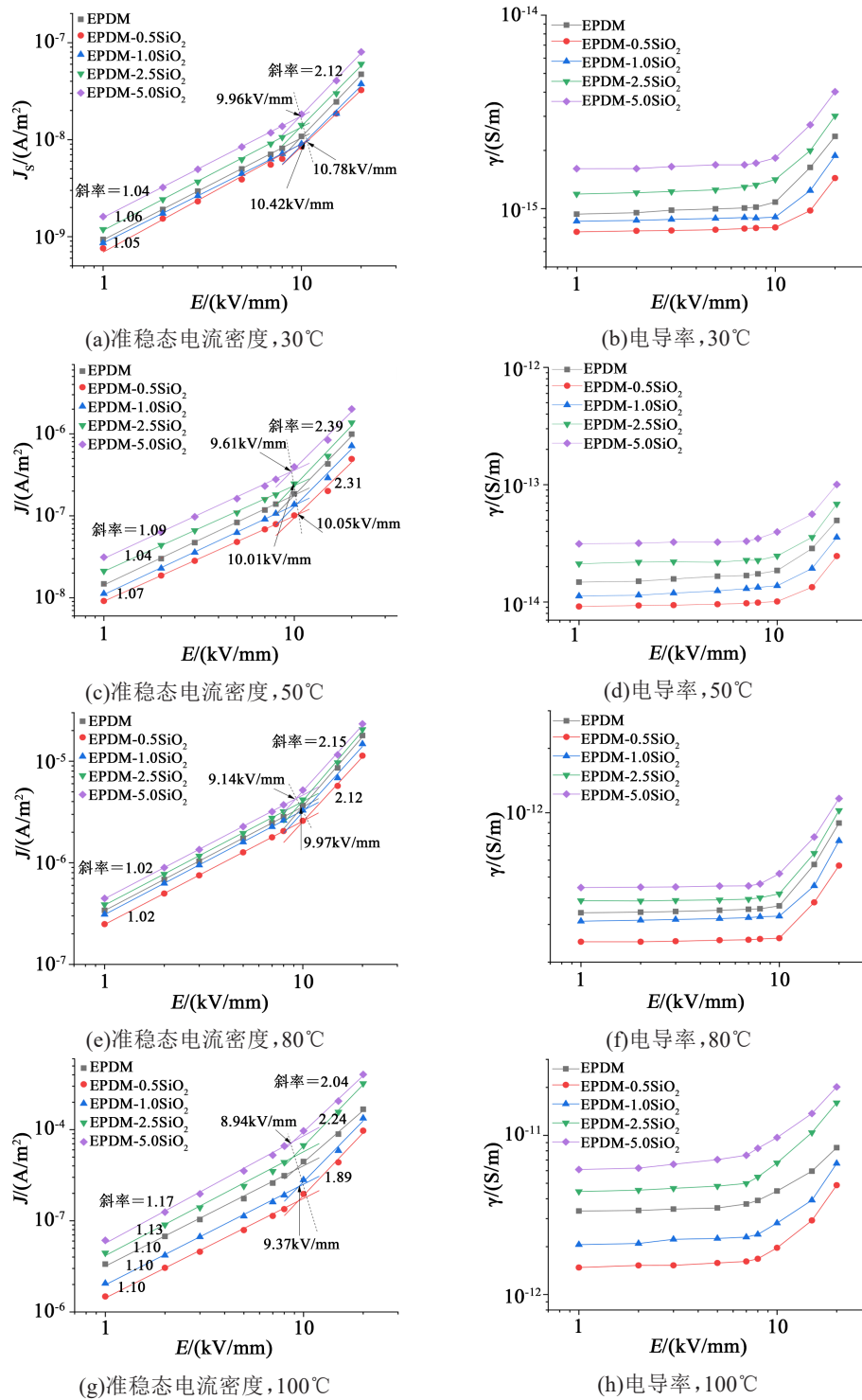


图7 不同温度下试样的准稳态电流密度和电导率

Fig.7 Quasi-steady-state current density and conductance of samples at different temperatures

应会降低载流子的数量和迁移率,使得电导率降低。随着掺杂量的进一步增加,纳米颗粒间距减小,发生团聚现象,削弱了界面效应的作用。添加的纳米颗粒也会作为载流子发射源,增加参与电导行为的载流子浓度,使得电导率升高。此外,温度

升高,载流子获得的热动能增加,更容易越过势垒参与电导行为,使得绝缘电导率升高。

低场强区与高场强区的两条拟合曲线的交点表示空间电荷开始注入的阈值场强<sup>[15]</sup>。从图7可以看出,随着掺杂量的增加,阈值场强呈现出先升高

后降低的趋势,在纳米颗粒质量分数为0.5%时达到最高。此时纳米颗粒分散均匀,界面区效应最大,限制了分子链运动,进而导致空间电荷注入量减小,阈值场强高。当掺杂量进一步增加,界面效应减小,且纳米颗粒也可以作为导电载流子,积聚的载流子提供了更多的导电通道,促进了电导,导致电场阈值降低。阈值场强随着温度的升高有所降低。这是因为随着温度的升高,载流子获得的热动能增加,更容易越过势垒,而且热电离的杂质离子也随之增多,参与电导行为的载流子浓度和迁移率大幅增加,使得电荷注入阈值降低。因此,较少的纳米掺杂和较低的温度有助于提高EPDM复合电介质中空间电荷的注入阈值场强。

### 3 结 论

(1)EPDM-0.5SiO<sub>2</sub>的相对介电常数最低,这是由纳米SiO<sub>2</sub>颗粒与EPDM基体间的微观界面区束缚偶极子的转向、削弱极化强度造成的。随着掺杂量的增加,纳米SiO<sub>2</sub>颗粒积聚形成大型偶极子,界面效应被削弱,极化强度增大,相对介电常数增大。

(2)EPDM-SiO<sub>2</sub>纳米复合介质具有非线性电导特性。相对于纯EPDM而言,EPDM-0.5SiO<sub>2</sub>的电导率最低,这是由于纳米颗粒通过界面效应有效削弱了载流子的输运过程,从而宏观上降低了试样的电导率。

(3)试样的准稳态电流密度曲线呈分段线性变化趋势,少量的纳米掺杂会提高电导机制转变对应的阈值场强,其中EPDM-0.5SiO<sub>2</sub>的阈值场强最高。

### 参考文献:

- [1] ZUIDEMA C, KEGERISE W, FLEMING R, et al. A short history of rubber cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4):45-50.
- [2] 王少飞,雷志鹏,宋建成,等. 温度对乙丙橡胶绝缘表面沿面放电特征的影响[J]. 绝缘材料, 2018, 51(7):41-48.
- [3] 林晨,吝艳艳,雷志鹏,等. 基于PDC的多应力老化乙丙橡胶电缆绝缘状态评估[J]. 绝缘材料, 2020, 53(1):70-75.
- [4] SINGHA S, THOMAS M J. Influence of filler loading on dielectric properties of epoxy-ZnO nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(2):531-542.
- [5] VU T T N, TEYSSÉDRE G, VISSOUVANADIN B, et al. Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 117-127.
- [6] 邹德晓,江平开,黄兴溢. 微纳多级氧化铝/环氧复合材料的性能研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(1):16-21.
- [7] 郑煜,吴建东,王俏华,等. 空间电荷与直流电导联合测试技术用于纳米MgO抑制XLPE中空间电荷的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5):126-131.
- [8] 闫志雨,赵洪,韩宝忠,等. CB/LDPE复合介质抑制空间电荷机制及电导特性对电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14):4254-4264, 4305.
- [9] 陈清朗. 非线性乙丙橡胶及其在直流电缆附件中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2016.
- [10] 陈炯,戴旭益,项佩中. 纳米SiO<sub>x</sub>掺杂对LDPE击穿强度的影响[J]. 华东电力, 2014, 42(8):1634-1637.
- [11] LI S T, YIN G L, CHEN G, et al. Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1523-1535.
- [12] 雷志鹏. 乙丙橡胶绝缘介电性能及其气隙和沿面放电机理的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
- [13] 栗艳. 聚偏氟乙烯/钛酸钡复合材料的制备及介电性能的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2011.
- [14] 李媛媛,田慕琴,雷志鹏,等. 添加二氧化硅纳米颗粒对环氧树脂介电和空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1870-1877.
- [15] 王霞,王陈诚,孙晓彤,等. 高温高场强下XLPE及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):2008-2017.