

# 拉伸比对乙丙橡胶极化-去极化电流和陷阱分布的影响

何庆辉<sup>1</sup>, 李蔚<sup>1</sup>, 门汝佳<sup>1</sup>, 程瑞<sup>1</sup>, 雷志鹏<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030012)

**摘要:**针对移动电缆用EPDM绝缘在实际使用中经常受到拉伸力的作用,造成绝缘劣化的问题,本文从极化-去极化电流出发,主要研究不同拉伸程度对EPDM绝缘性能的影响。首先设计了拉伸装置用于测量拉伸状态下EPDM的极化-去极化电流和表面电位,然后从直流电导率和陷阱能级分布角度分析了拉伸比对EPDM性能的影响,最后从微观层面上解释了不同拉伸状态下EPDM绝缘性能变化的原因。结果表明:拉伸比对EPDM极化-去极化电流的影响存在阈值。当拉伸比小于1.4时,极化-去极化电流随拉伸比的增加而减小;当拉伸比大于1.4时,极化-去极化电流随拉伸比的增加而增大。当拉伸比从1.0增加到1.4时,陷阱数量减少导致表面电位衰减速率减小;当拉伸比从1.4增加到1.8时,浅陷阱的增加促进了电荷的消散和迁移过程,导致表面电位衰减速率增大。拉伸应力对EPDM绝缘性能的影响可分为无负荷状态、弹性形变状态、非弹性形变状态3个阶段。

**关键词:**EPDM; 拉伸应力; 极化-去极化电流; 表面电位衰减率; 直流电导率

**中图分类号:**TM215 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.06.005

## Influence of tensile ratio on PDC and trap distribution of EPDM

HE Qinghui<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, MEN Rujia<sup>1</sup>, CHENG Rui<sup>1</sup>, LEI Zhipeng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030012, China)

**Abstract:** Aimed at the insulation deterioration of movable cables caused by the tensile force in practical use, we mainly study the effect of the different tensile degree on the insulating properties of ethylene propylene diene monomer (EPDM) insulation based on polarization and depolarization current (PDC). A tension device was designed to measure the PDC and surface potential decay of EPDM under the tensile state, and the influence of tensile ratio on the insulating properties of EPDM was analyzed from the perspective of DC conductivity and trap energy level distribution. The reason for the change of insulating properties of EPDM under tensile state was explained on a micro level. The results show that there is a threshold value of the effect of tensile ratio. When the tensile ratio is lower than 1.4, the PDC decreases with the increase of the tensile ratio. When the tensile ratio is higher than 1.4, the PDC increases with the increase of the tensile ratio. When the tensile ratio increases from 1.0 to 1.4, the decrease of trap numbers leads to the decrease of surface potential decay rate. When the tensile ratio increases from 1.4 to 1.8, the increase of shallow trap numbers promotes the dissipation and migration process of charge, which increases the surface potential decay rate. The influence of tensile stresses on EPDM insulation can be divided into three stages: the amorphous state, elastic deformation stage, and inelastic deformation stage.

**Key words:** EPDM; tensile stress; PDC; surface potential decay rate; DC conductivity

## 0 引言

三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)是乙烯、丙烯和少量非共轭二烯烃的共聚物,具有优异的耐候性、耐热性、耐臭氧性、耐化学性以及卓越的电绝缘性能<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用于煤矿电缆、船用电缆、电力电缆等领域<sup>[3]</sup>。对于采煤机拖

拽电缆,其在实际工作中会受到电、热、机械应力和其他环境因素的影响,尤其是电缆随采煤机往复行走而承受拖拽、磨损、过度弯曲、落煤和矸石的冲击等形成的拉伸应力、弯曲应力和挤压应力等机械应力。

近年来,国内外学者针对机械应力对绝缘材料的影响问题进行了大量的研究。C H PARK等<sup>[4-5]</sup>研究了室温和液氮温度下聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)和环氧玻璃布(ep-

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51977137);山西省重点研发计划项目(202102040201001、202003D111008)

oxy glass cloth, FRP)纤维增强复合材料在机械应力作用下的击穿特性,结果显示温度恒定时,随挤压应力的增大,PET和FRP的介电强度先上升后下降,而拉伸应力则与其介电强度呈负相关性,即随拉伸应力的增大,其介电强度下降。A BULINSKI等<sup>[9]</sup>证明了静态拉伸应力下有利于水树的生长。何华琴等<sup>[7]</sup>从机械特性方面入手,通过测量不同拉伸强度乙丙橡胶的空间电荷分布,证明了在乙丙橡胶弹性形变范围内,拉伸可以减少乙丙橡胶中的空间电荷量,当超过乙丙橡胶弹性形变范围时空间电荷增加。王思宇等<sup>[8]</sup>测量了不同温度、挤压力和场强下乙丙橡胶的极化电流,发现载流子迁移率随着挤压力的升高先减小后增大,导致乙丙橡胶的绝缘性能发生变化。惠宝军等<sup>[9]</sup>研究了机械应力拉伸状态和拉伸后回缩状态作用下硅橡胶材料的击穿特性,结果表明材料在拉伸情况下的电气强度升高,但是撤掉应力后再测试,其电气强度反而比未拉伸时低。徐航等<sup>[10]</sup>采用电声脉冲法和表面电位衰减方法测试并分析了不同拉伸比下聚丙烯/聚烯烃弹性体(PP/POE)共混物的空间电荷分布特性和陷阱能级分布,研究表明拉伸力比较小时,试样的陷阱深度变浅,随着拉伸比的进一步增大,在试样内部引入更多的陷阱,陷阱深度变大,其根本原因是材料内部结构被破坏。杜伯学等<sup>[11]</sup>研究了拉伸和挤压应力作用下,硅橡胶电树枝的生长特性,结果表明拉伸力导致电树枝的引发概率升高,而挤压力对电树枝的生长有相反的作用。SU J G等<sup>[12]</sup>用分子动力学模拟的方法研究了EPDM屈服于机械拉伸时,聚合物链重排到平衡状态时自由体积分布的变化,结果表明,当拉伸比从0增加到30%时,乙丙橡胶的自由体积分数从15.4%增加到37.23%,表明分子链的运动空间增大。

从上述研究可以看出,拉伸或挤压应力对绝缘材料性能的影响并不呈现单一的变化趋势,为了明确不同拉伸程度对乙丙橡胶绝缘的影响,本研究测量常温时不同拉伸比下EPDM的极化-去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)和表面电位(surface potential decay, SPD)。通过极化电流分析不同拉伸比下的电子电导机制;通过去极化电流和表面电位衰减速率分析不同拉伸比下的陷阱能级分布状态,从微观层面上分析应力变化时乙丙橡胶内部陷阱的变化。最后对不同拉伸比下乙丙橡胶微观结构的变化进行分类。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

实验前首先对已经混炼好的XJ-30A型EPDM胶片(尺寸为180 mm×70 mm×1.1 mm)进行硫化处理,即将胶片在120℃下预热1 min后,在温度为165℃和压力为14 MPa的条件下硫化15 min。待硫化完成后,取出EPDM试样,置于温度为80℃的真空干燥箱中预处理24 h,消除硫化过程产生的副产物和机械应力。

### 1.2 拉伸装置和电极夹具

图1为极化-去极化电流测量实验中所用拉伸装置和电极夹具。拉伸装置由燕尾槽位移滑轨和对位聚苯酚(PPL)滑块组成。通过旋转驱动螺丝可以控制滑块的位置,从而对试样进行不同程度的拉伸。实验中将试样拉伸至不同的拉伸比,其定义为试样拉伸后的长度与未拉伸时长度的比值。电极夹具由三电极结构和绝缘支架组成,电极均为黄铜电极,绝缘支架由胶木板制成。

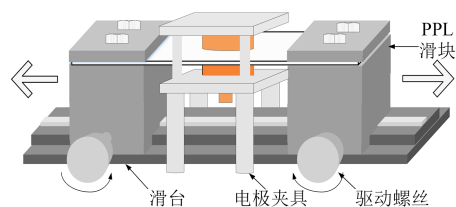


图1 拉伸装置和电极夹具

Fig.1 Tensile devices and electrode fixtures

极化-去极化电流测量开始前,首先将酒精擦拭后的EPDM样片固定在PPL滑台上,然后将样片拉伸至所设定拉伸比对应的长度,并用绝缘支架将电极固定在试样两侧。最后,维持所设置的拉伸比约12 h后,在保持拉伸状态下测试各项性能。

### 1.3 极化-去极化电流测量方法

极化-去极化电流测量系统如图2所示。在测量过程中,将拉伸装置和电极夹具置于壳体接地的电热鼓风干燥箱中,以屏蔽外界的电磁干扰,保证测量结果的精确性。

在测量开始时,首先闭合 $S_1$ 和 $S_2$ ,断开 $S_3$ 。经过约5 s后,保持 $S_1$ 闭合同时断开 $S_2$ ,电流表开始测量极化电流 $i_p(t)$ ,极化时间为1 000 s;极化电流测量完毕后立即断开 $S_1$ ,闭合 $S_2$ ,约5 s后闭合 $S_3$ ,断开 $S_2$ ,电流表开始测量去极化电流 $i_{dp}(t)$ ,去极化时间为1 000 s。为避免场强过高或温度过高造成EPDM绝缘受损,极化时电场强度为3 kV/mm,温度设置为30℃。

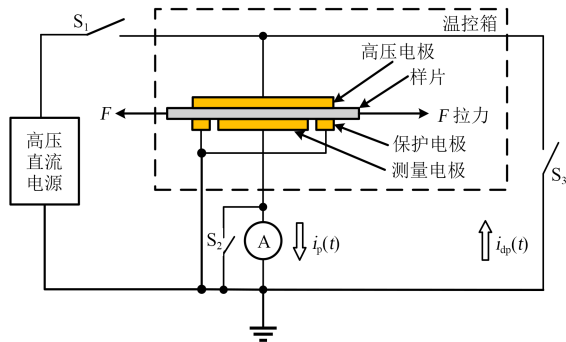


图2 极化-去极化电流测量系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of PDC measurement system

### 1.4 表面电位衰减测量方法

表面电位衰减测量系统如图3所示,系统包含电晕充电装置和表面电位测量装置两部分。采用针-板电极形成电晕充电,针尖与试样的距离约为5 mm,充电电压为10 kV,充电时间为5 min。之后撤去电压,迅速将试样移动至表面电位测量仪的探头下方约2 mm处,测量时间为40 000 s。实验在室温25℃下进行。

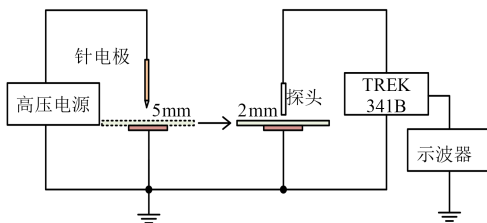


图3 表面电位测量系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of SPD measurement system

## 2 测量结果及分析

### 2.1 不同拉伸比下的极化-去极化电流曲线

分别采用三阶指数模型对极化电流和去极化电流原始数据进行拟合处理,拟合表达式为式(1)和式(2)。

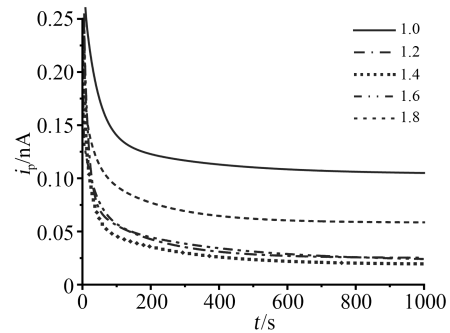
$$I_p(t) = I_1 + \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (1)$$

$$I_{dp}(t) = I_2 + \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (2)$$

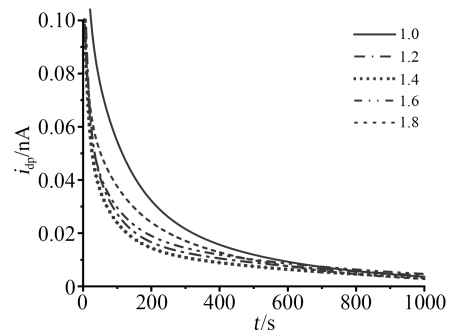
式(1)~(2)中: $i$ 代表3种极化类型, $i=1$ 代表绝缘材料的体极化, $i=2$ 代表晶态与非晶态之间的界面极化, $i=3$ 代表绝缘劣化后各类离子、基团之间的界面极化; $I_1$ 为泄漏电流; $I_2$ 为短路电流稳态值; $A_i$ 为3种极化类型的拟合系数; $t$ 为时间; $\tau_i$ 为3种极化的拟合时间常数。

图4为拉伸比分别为1.0、1.2、1.4、1.6和1.8时测得的EPDM的极化、去极化电流,其中去极化电流取绝对值。从图4可以看出,极化电流在0~200

s迅速减小,之后缓慢衰减并逐渐趋于稳定;去极化电流达到稳定的时间明显长于极化电流达到稳定的时间,在0~600 s下降趋势明显,之后缓慢衰减并趋于稳定。



(a)极化电流



(b)去极化电流

图4 EPDM在不同拉伸比下的极化-去极化电流

Fig.4 PDC of EPDM at different tensile ratios

从图4(a)可以看出,当拉伸比从1.0增加到1.4时,极化电流随拉伸比的增大而减小。这是由于EPDM处于弹性范围内,拉伸应力使得蜷缩的分子链沿拉伸方向横向伸展,分子链从无序状态变得排列有序同时承受横向的拉伸力,导致分子链活动能力减弱。在垂直方向的电场作用下,极性分子的转向能力较未拉伸时减弱,从而导致极化作用减弱,极化电流呈现减小的趋势。当拉伸比从1.4增加到1.8时,极化电流随之增大,但拉伸比增加到1.8时,极化电流仍小于未拉伸时的极化电流。当拉伸比逐渐增加导致EPDM处于非弹性状态时,拉伸力会导致分子链断裂,相互之间受到的束缚减小,使得在电场作用下,极化过程更容易建立,最终导致极化电流增大。

从图4(b)可以看出,去极化电流曲线随拉伸比的变化规律与极化电流曲线的变化规律一致,但是去极化电流不包含电导电流,由极化产生,只反映相关极化情况。

### 2.2 不同拉伸比下的电导率

由极化电流中的稳态电导电流可以计算出相

应的准稳态电导电流密度  $J_s$ , 如式(3)所示。

$$J_s = \frac{i_\infty(t)}{A_m} \quad (3)$$

式(3)中:  $i_\infty(t)$  为加压 1 000 s 时的稳态电导电流值;  $A_m$  为测量电极的面积。

由  $J_s$  可以计算出电介质的电导率  $\gamma$ , 如式(4)所示。

$$\gamma = \frac{J_s}{E} \quad (4)$$

式(4)中:  $E$  为极化电场强度。

图5为EPDM在不同拉伸比时的电导率。从图5可以看出,随着拉伸比的增加,电导率先减小后增大,在拉伸比为1.4时,EPDM的电导率最小,约为  $1.31 \times 10^{-14}$  S/m,这与极化电流随拉伸比的变化趋势一致。

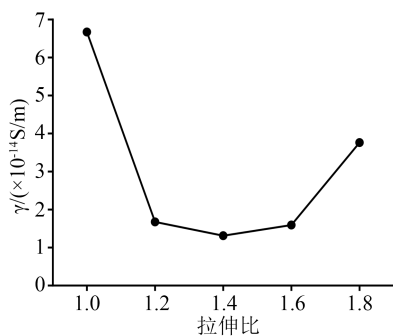


图5 EPDM在不同拉伸比时的电导率

Fig.5 Conductivity of EPDM at different tensile ratios

电导率取决于绝缘内部载流子浓度和载流子迁移率,载流子主要包括电子、空穴和正、负离子。离子迁移的难易程度与绝缘内部自由体积的大小密切相关,自由体积越大,离子迁移越容易进行。电子、空穴的迁移则相反,分子链排列紧密,有利于电子的“跳跃”通过,造成电子的直接通道<sup>[13]</sup>。当拉伸比小于1.4时,拉伸导致分子链间距增大,从而阻碍了电子的迁移,宏观上表现为电导率的减小;当拉伸比大于1.4时,拉伸力导致分子链被破坏,生成小分子链和自由基,促进了电子的迁移,导致电导率随拉伸比的增加而增大。

### 2.3 不同拉伸比下的表面电位

首先对测得的表面电位数据进行一阶指数拟合,然后对其进行归一化处理(表面电势  $V$  与初始时刻表面电势  $V_0$  的比值),从而得到如图6所示的表面电位曲线。从图6可以看出,随着时间的增加,表面电位先快速减小,然后逐渐趋于稳定。这是因为撤去外施电压后,一方面被浅陷阱捕获的电荷在热激发的作用下向地电极迁移,另一方面一部分电荷沿试样表面消散,所以在初始衰减阶段,电荷衰减较快。随着时间的延长,被深陷阱捕获的电荷逐渐脱

陷,衰减速率减慢,最终趋于稳定。

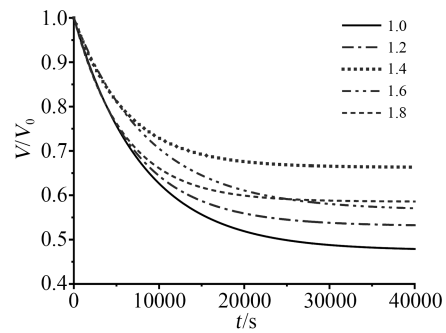


图6 EPDM在不同拉伸比下的归一化表面电位

Fig.6 Normalized surface potential of EPDM at different tensile ratios

表面电位的衰减情况主要与电荷的脱陷相关,利用表面电位衰减速率可计算相应的陷阱能级深度  $E_t$  和陷阱密度  $N(E_t)$ <sup>[14]</sup>,分别如式(5)~(6)所示。

$$E_t = kT \ln(vt) \quad (5)$$

$$N(E_t) = \frac{4\epsilon_0\epsilon_r}{qL^2kT} \left| \frac{td(V/V_0)}{dt} \right| \quad (6)$$

式(5)~(6)中:  $k$  为玻尔兹曼常数,  $8.568 \times 10^{-5}$ ;  $T$  为绝对温度;  $v$  为电子的振动频率,  $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ ;  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_0$  分别为试样的相对介电常数和真空介电常数;  $q$  为电子电量,  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $L$  是试样的厚度。

图7为基于表面电位衰减曲线得到的EPDM在不同拉伸比下的陷阱分布情况。从图7可以看出,当拉伸比从1.0增加到1.4时,陷阱密度呈现减小的趋势,陷阱数量减少导致表面电位衰减速率减慢;当拉伸比从1.4增加到1.8时,陷阱密度随之增加。1.8拉伸比下陷阱深度变低,即相对较浅的陷阱数目增多,将促进电荷的消散和迁移过程,导致表面电位衰减速率增加。

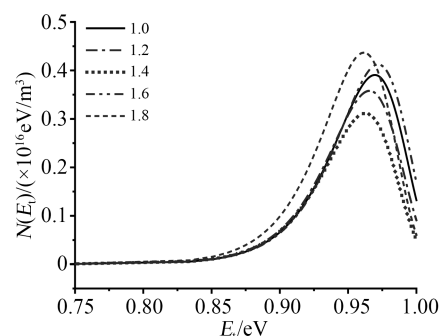


图7 EPDM在不同拉伸比下的陷阱分布情况

Fig.7 Trap distributions of the EPDM at different tensile ratios

## 3 讨论

### 3.1 快速电荷量和慢速电荷量

根据陷阱理论,快速电荷量与慢速电荷量可以

一定程度上表征绝缘介质内浅陷阱与深陷阱的多少<sup>[15]</sup>。快速电荷量  $Q_{fast}$  和慢速电荷量  $Q_{slow}$  定义如式(7)所示。

$$\begin{cases} Q_{fast} = Q_{volt-on1000s} - Q_{volt-off5s} \\ Q_{slow} = Q_{volt-off5s} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中： $Q_{volt-on1000s}$ 表示极化1000 s后，试样内部的总电荷量； $Q_{volt-off5s}$ 表示去极化5 s后，试样消散的电荷量。

图8为不同拉伸比时EPDM中的快速电荷量和慢速电荷量，分别可以表征浅陷阱和深陷阱的数量。从图8可以看出，试样内部浅陷阱的数量大于深陷阱的数量，而且随着拉伸比的增加，深陷阱变化幅度较小，浅陷阱变化幅度较大，说明拉伸应力的变化主要对EPDM内部浅陷阱产生影响，从而影响导电机制。

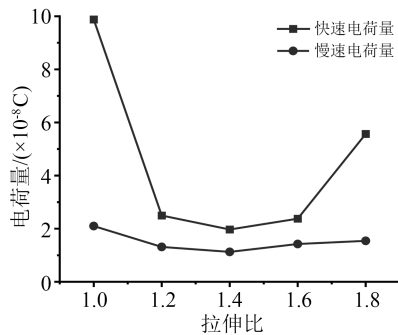


图8 EPDM在不同拉伸比下的快速电荷量和慢速电荷量  
Fig.8 Fast and slow charge quantities of EPDM at different tensile ratios

### 3.2 不同拉伸比下的陷阱能级分布

去极化电流是绝缘内部缺陷状态的宏观表征，本文基于等温松弛电流理论，采用式(2)的3阶指数模型对去极化电流数据进行了拟合。

由于  $A_3$ 、 $\tau_3$  对EPDM绝缘状态更为敏感，可以由第3种极化类型的数据来反映绝缘内部的缺陷状态<sup>[16-17]</sup>，由  $\tau_3$  测定的陷阱能级密度  $N'(E_i)$  可表示为式(8)。

$$N'(E_i) = \frac{2t}{kTf_0(E_i)Lq} \cdot A_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (8)$$

图9是不同拉伸比下EPDM的陷阱能级和陷阱密度的关系。从图9可以看出，EPDM的陷阱能级深度分布在0.75~0.93 eV，在0.90 eV左右存在陷阱能级中心。在电介质研究领域，定义能级在1.10 eV以下的为浅陷阱，能级在1.10 eV以上的为深陷阱<sup>[18]</sup>。因此在30℃环境下，不同拉伸应力主要影响EPDM绝缘内部浅陷阱的数量和密度，这一点与图7和图8所反映的规律相同。

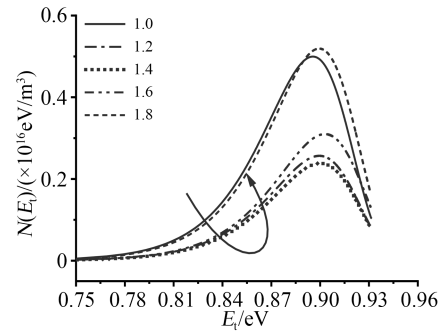


图9 EPDM在不同拉伸比下的陷阱分布情况

Fig.9 Trap distributions of EPDM at different tensile ratios

从图9还可以看出，当拉伸比从1.0增加到1.4时，绝缘内部陷阱能级密度减小。拉伸比为1.4时，陷阱能级密度减小到未拉伸时的一半。这是由于拉伸导致自由体积增大，单位面积内陷阱数量减少，陷阱密度减小。当拉伸比从1.4增加到1.8时，绝缘内部陷阱密度不断增加。拉伸比为1.8时，陷阱能级密度大于未拉伸时的能级密度。这种趋势说明随着拉伸力的增加，绝缘内部生成了更多的陷阱。这种新增的陷阱主要由两方面原因产生：一方面是由于绝缘内部的微孔在拉伸力的作用下逐渐增大，多个微孔结合在一起形成空隙，形成物理缺陷；另一方面是在拉伸力作用下，EPDM绝缘内部会有越来越多的分子链被拉断生成小分子链，形成化学陷阱。

### 3.3 拉伸力对EPDM微观结构的影响

EPDM的绝缘状态与拉伸比密切相关，其本质原因是拉力造成了EPDM绝缘微观结构的改变。不同拉伸比下，EPDM的微观结构可以简要分为：常温无负荷状态、弹性形变状态和非弹性形变状态，如图10所示，不同微观状态下，EPDM的绝缘性能情况如下：

(1)如图10(a)所示，EPDM属于无定形聚合物，

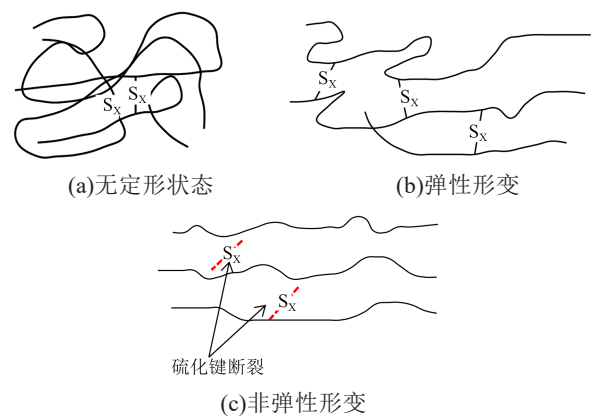


图10 EPDM在不同拉伸比下的微观结构

Fig.10 Microstructure of EPDM at different tensile ratios

常温无负荷时处于无定形状态,分子链蜷缩且相互靠近,分子链间距较小,有利于电子的“跳跃”通过,形成电子的直接通道;

(2)如图10(b)所示,拉伸比较小时,EPDM发生弹性形变,分子链主要是链段取向,分子链从蜷缩状态变为沿拉伸方向的伸展状态。一方面,自由体积增大导致单位面积内陷阱数量减少;另一方面,电子和空穴的迁移受限导致导电电流减小。这两方面的因素从宏观上直接表现为极化-去极化电流随拉伸比的增加而减小。前述实验表明弹性范围内的拉伸可以改善EPDM的绝缘性能。

(3)如图10(c)所示,拉伸比较大时,EPDM发生非弹性形变,应力导致多硫键等弱键部位断裂。绝缘内部产生了更多的陷阱,促进了载流子的迁移。宏观上直接表现为极化-去极化电流随拉伸比的增加而增大。因此,非弹性形变范围内的拉伸会导致绝缘损坏,性能下降。

## 4 结论

(1)随着拉伸比的增加,极化-去极化电流曲线和表面电位衰减曲线呈现出相同的变化趋势,即先减小再增大,拉伸应力的阈值为1.4。

(2)拉伸比小于1.4时,拉伸应力的增加导致EPDM的陷阱密度降低,使得表面电位衰减速率降低;拉伸应力持续增加,陷阱密度反而增加,同时表面电位衰减速率也随之增加。

(3)去极化电流中 $A_3$ 、 $\tau_3$ 对应的第3类松弛可以准确地反映EPDM绝缘内部陷阱状态。EPDM发生弹性形变时,陷阱能级密度降低,不会在绝缘中生成新的陷阱,可以一定程度上改善EPDM的绝缘性能;EPDM发生非弹性形变时,会造成分子链的断裂,陷阱能级变浅,陷阱密度增加,绝缘性能变差。

## 参考文献:

- [1] HANLEY T L, BURFORD R P, FLEMING R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(1):13-24.
- [2] 孔德忠.三元乙丙橡胶配方设计研究进展[J].绝缘材料,2016,49(2):10-13.
- [3] METWALLY I A. The evolution of medium voltage power cables [J]. IEEE Potentials,2012,31(3):20-25.
- [4] PARK C H, KANEKO T, AKAZAKI M. Effects of mechanical stresses on the dielectric breakdown strengths of PET and FRP [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, EI-17(3): 234-240.
- [5] PARK C H, HARA M, AKAZAKI M. Effects of temperature and voltage on dielectric breakdown strengths of PET and FRP under mechanical stresses[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1982,EI-17(6):546-553.
- [6] BULINSKI A, BAMJI S S, BRAUN J M, et al. Water treeing degradation under combined mechanical and electrical stresses[C]// 1992 Annual Report: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada: IEEE,1992.
- [7] 何华琴,王霞,刘胜军,等.不同拉伸率的乙丙橡胶中空间电荷分布的研究[J].绝缘材料,2006,39(5):40-44,49.
- [8] 王思宇,刘洋,雷志鹏,等.基于极化电流的挤压力和热应力作用下电缆用乙丙橡胶绝缘性能的研究[J].绝缘材料,2022,55(4): 56-61.
- [9] 惠宝军,彭阳涛,傅明利,等.机械应力作用下硅橡胶材料的击穿特性研究[J].绝缘材料,2019,52(7):29-35.
- [10] 徐航,杜伯学,苏金刚.拉伸状态下聚丙烯/聚烯烃弹性体共混物的空间电荷和陷阱分布特性[J].高电压技术,2017,43(2): 453-459.
- [11] 杜伯学,苏金刚,徐航,等.机械应力下高温硫化硅橡胶树枝生长特性[J].中国电机工程学报,2016,36(24):6627-6634.
- [12] SU J G, DU B X, LI J, et al. Mechanical stretching dependence of electrical treeing phenomenon in EPDM[C]//2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics. Budapest, Hungary: IEEE,2018.
- [13] 赵华山.高分子物理学[M].北京:纺织工业出版社,1982.
- [14] LEI Z, LI C, MEN R, et al. Mechanism of bulk charging behavior of ethylene propylene rubber subjected to surface charge accumulation[J]. Journal of Applied Physics,2018,124(24):244103.
- [15] 罗文波,杨挺青,王霞瑜.高聚物自由体积与温度和应力水平的相关性[J].高分子材料科学与工程,2005,21(3):11-15.
- [16] 朱永华,高小庆,杨娟娟,等.等温松弛电流法在高压交联聚乙烯绝缘交流电缆状态评估中的应用[J].高电压技术,2016,42(2):513-521.
- [17] LIU Y, LIU H, YU L, et al. Effect of thermal stress on the space charge distribution of 160 kV HVDC cable insulation material [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(3):1355-1364.
- [18] 王霞,陈少卿,屠德民.空间电荷测量表征聚乙烯中电荷输运特性[J].绝缘材料,2007,30(1):61-63,68.

收稿日期:2022-06-25 修回日期:2022-08-08

作者简介:何庆辉(1996-),女(汉族),山西大同人,硕士生,主要从事乙丙橡胶电缆绝缘老化状态评估的研究;通信作者:雷志鹏(1983-),男(汉族),山西太原人,副教授,博士,主要从事高电压与绝缘,矿用智能与新型电器方向的研究。