

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.025

## 不同直流场强下乙丙橡胶的空间电荷特性

徐晓晓<sup>1,2</sup>, 雷志鹏<sup>1,2</sup>, 宋建成<sup>1,2</sup>, 吝伶俐<sup>1,2</sup>, 李媛媛<sup>1,2</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, 太原 030024; 2. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024)

**摘要:** 乙丙橡胶在电缆绝缘中的应用日益广泛, 空间电荷积聚成为影响其绝缘性能的关键因素之一。为了明确乙丙橡胶中空间电荷的行为特性及形成机制, 文中基于PEA法对乙丙橡胶在直流场强下的空间电荷分布进行了研究, 分析并讨论了不同场强下乙丙橡胶内空间电荷的分布规律以及其消散特性。实验结果表明: 乙丙橡胶的电荷注入的阈值场强为2.5~5 kV/mm。根据不同场强下乙丙橡胶内空间电荷的行为特性, 可将其分为4个阶段, 分别为无电极注入阶段、双电极注入阶段、注入电荷迁移复合阶段、阳极注入主导阶段。此外, 不同场强下陷阱密度及深度的差异会影响乙丙橡胶内部空间电荷的消散特性。在较高场强下, 正极性空间电荷包的形成引起乙丙橡胶内部电场畸变, 这可能会影响其介电强度, 并使绝缘老化。

**关键词:** 乙丙橡胶; 空间电荷; 电声脉冲法; 陷阱分布; 介电强度

## Space Charge Characteristics of Ethylene Propylene Rubber Under Different DC Electric Field

XU Xiaoxiao<sup>1,2</sup>, LEI Zhipeng<sup>1,2</sup>, SONG Jiancheng<sup>1,2</sup>, LIN Lingyan<sup>1,2</sup>, LI Yuanyuan<sup>1,2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. National & Province Joint Engineering Laboratory and Intelligent Electrical Apparatus, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** It has been known that the ethylene propylene rubber (EPR) is widely used in MV/HV power cables which are strongly affected by the formation and movement of space charge in their insulation layer. In this paper, the space charge distribution of EPR under different DC electric field is measured by using pulsed electro-acoustic (PEA) method for revealing the formation mechanism and characteristics of space charge in EPR. The results show that the homo-charge injection occurs under the electrical field strength more than 2.5 kV/mm. The total charge quantity is increased with the rise of electric field. The formation process of the space charge in EPR during polarization can be divided into four stages: (I) no charge injection, (II) bipolar injection, (III) charge transformation and recombination, and (IV) anode injection. When the DC voltage is removed, the dissipation of the space charge is affected by the depth and density of traps in EPR. The electric field inside EPR samples is distorted by the positive space charge packet under high electric field strength, which may affect the insulation aging and the breakdown voltage.

**Key words:** ethylene propylene rubber (EPR); space charge; pulsed electro-acoustic (PEA) method; trap distribution; dielectric strength

## 0 引言

乙丙橡胶(ethylene propylene rubber, EPR)具有

优异的耐湿、耐电晕和耐热性能以及高抗拉伸强度和不可溶解的特性。在二元乙丙橡胶中填加入少量第三单体(如: 非共轭二烯烃、双环戊二烯、乙叉降冰

收稿日期: 2018-12-11; 修回日期: 2019-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51377113, 51577123); 山西省应用基础研究计划项目(201601D021092); 太原理工大学青年基金(1205-04020202)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51377113, 51577123), Natural Science Foundation of Shanxi Province (201601D021092), Youth Foundation of Taiyuan University of Technology(1205-04020202).

片烯等),使其硫化后在耐腐蚀性、柔软性及介电性能等方面有较大的提升<sup>[1]</sup>。因此,乙丙橡胶已经在中高压电缆及其附件绝缘中有广泛的应用<sup>[2]</sup>。然而,受制作工艺、工作环境以及人为损伤等原因的影响,乙丙橡胶绝缘中会形成深浅不一的物理陷阱或者化学陷阱。在电场的长期作用下,由于电极注入、杂质电离、电荷脱陷等原因,载流子易被陷阱捕获而形成空间电荷<sup>[3-4]</sup>。空间电荷的积聚、迁移、衰减等特性会使绝缘内电场发生畸变,甚至导致局部电场强度高达外加电场的8~10倍<sup>[5]</sup>。空间电荷不仅会畸变电场,影响绝缘材料的介电强度,还与介质树枝化以及击穿机理密切相关。

国内外学者结合理论和实验研究,从热老化、介电性能、沿面放电、电痕形成机理等方面展开对乙丙橡胶电气性能的研究<sup>[6-10]</sup>。随着乙丙橡胶在绝缘方面应用的不断增多,空间电荷效应所带来的影响日益被人们所关注并展开相关研究。目前,结合乙丙橡胶当下的应用对其空间电荷的研究多集中于其本身与交联聚乙烯、硅橡胶、低密度聚乙烯等形成的双层介质中界面电荷的行为特性以及定性地说明温度对其界面空间电荷分布的影响<sup>[11-16]</sup>。而明确乙丙橡胶本体内部空间电荷的形成、输运及消散规律将有利于其在直流电场应用中故障机理的分析以及进一步开发乙丙橡胶的用途范围。文[17]对比研究了高场强下乙丙橡胶与交联聚乙烯内部异极性空间电荷的消散特性,推测乙丙橡胶的非晶特性是其异极性电荷消散速率高于交联聚乙烯的原因。文[18]从机械特性方面入手,研究表明,在乙丙橡胶的弹性形变范围内的拉伸可以抑制乙丙橡胶内空间电荷的积累。文[19]研究了高场强下乙丙橡胶的空间电荷分布,指出60 kV/mm场强下Al电极更易发生电荷注入;文[20]则通过在乙丙橡胶中加入不同比例的纳米ZnO颗粒,并验证添加少量纳米ZnO颗粒可以有效抑制空间电荷的积聚并改善其介电性能。

文中基于电声脉冲法(pulsed electro-acoustic method, PEA),测量了乙丙橡胶在不同直流场强下的空间电荷密度,研究了乙丙橡胶内空间电荷特性,分析并总结出不同直流场强下乙丙橡胶内空间电荷形成、迁移、积聚及消散特性,对乙丙橡胶在直流电场中的应用及理解其空间电荷输运特性具有一定的意义。

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

根据标准《GB 7594.8—87 电线电缆橡皮绝缘和

橡皮护套第8部分:90℃橡皮绝缘》使用DCJ30M型商用10 kV乙丙橡胶胶片制作试样。该橡胶已经过密炼和滤橡,还需在试验前进行硫化和预处理。硫化时,首先将模具置于平板硫化机上预热至120℃;然后将未被硫化的乙丙橡胶胶片置于模具上预热约1 min;最后将乙丙橡胶片夹于模具中,在14 MPa压力和160℃下硫化15 min后取出试样。将硫化完成的试样置于真空干燥箱中,在80℃下真空脱气处理24 h,以消除硫化过程中可能产生的副产物及机械应力。预处理完成后将试样裁成直径为60 mm,厚度为250 μm的乙丙橡胶圆片。

### 1.2 试验装置及测量

文中使用基于电声脉冲法的空间电荷测量仪(Peanuts, Five Lab)测量乙丙橡胶试样中的空间电荷分布,其测量原理图见图1。对试样同时施加直流电压和脉冲电压,脉冲会与介质内部空间电荷相互作用而产生压力波。压力波被压电传感器(聚偏氟乙烯, PVDF)接收并转换为电信号再经放大显示在示波器上,最后经数据处理转换为电荷密度。试验装置上下电极分别为半导体与铝,文中简称为SC和Al。

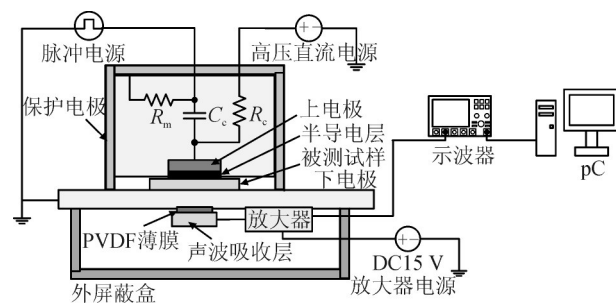


图1 PEA法测量原理图

Fig. 1 Experimental schematic of PEA method

试验时,Al为阳极,SC为阴极,分别测量幅值为2.5、5、10、20、40 kV/mm场强下持续作用120 min以及撤去高压后60 min的空间电荷分布。试验中采用的脉冲电压频率为400 Hz,脉宽为5 ns,脉冲电压幅值为200 V。

## 2 试验结果

乙丙橡胶在2.5 kV/mm下持续作用120 min的空间电荷分布以及短路处理60 min的空间电荷消散曲线见图2。图2中左右两虚线分别表示两电极与试样的界面(后文同)。由图2可见,在2.5 kV/mm下乙丙橡胶试样内部未出现明显电荷积累,两电极界面处电荷密度随时间有小幅度增加,撤去电压后界面电荷迅速消散,试样内滞留电荷密度小于0.25 C/m<sup>3</sup>。

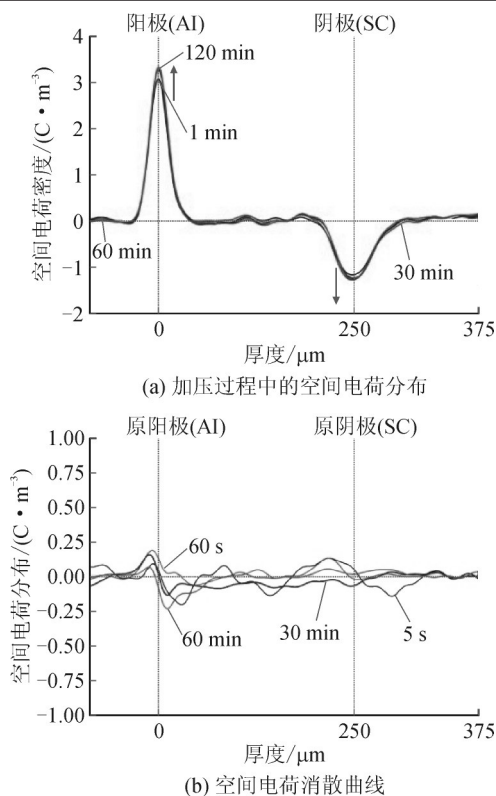


图2 2.5 kV/mm 下乙丙橡胶的空间电荷分布

Fig. 2 Space charge distribution of EPR under 2.5 kV/mm

5、10、20、40 kV/mm 下持续作用 120 min 的空间电荷分布以及对应各场强短路处理 60 min 的空间电荷消散曲线见图 3、4。由图 3 可以看出,在 5~40 kV/mm 作用下,阳极与试样界面处电荷密度均随时间减小,图 3(a)、(b)中阳极处波峰中下部呈向试样内部展宽的趋势;图 3(c)中阳极波峰向试样内部展宽趋势不明显,但在试样中部出现了峰值约为  $1.060 \text{ C/m}^3$  的正电荷包(图 3(c)中 A 处所示);图 3(d)中阳极波峰展宽趋势更明显并且试样内正电荷的分布范围更广。结合图 4 中各消散曲线,可以看出,在阳极附近出现了同极性电荷积累,并且在阳极处产生了负极性感应电荷。

对于阴极,其界面电荷密度较阳极低,由于界面极化所感应的电荷与其附近所积累的空间电荷相叠加,故表现为整个波峰沿试样方向的展宽或回缩。由图 3 可以看出,在 10 kV/mm 以下时,其波峰向试样内部方向轻微展宽。场强上升至 20 kV/mm 时,阴极附近出现异极性电荷的积累并随时间逐渐增加,阴极波峰呈沿试样内部方向回缩状。从图 4 消散曲线可以更清楚地看到,图 4(a)中原阴极附近有少量负电荷滞留,撤压 5 s 时最大电荷密度约为  $0.797 \text{ C/m}^3$ ;图 4(b)处在电荷极性转变期,阴极附近及界面电荷密度均接近零(约为  $0.2 \text{ C/m}^3$ );图 4(c)、(d)中则在阴极附近有明显的正电荷积累,撤压 5 s 时最

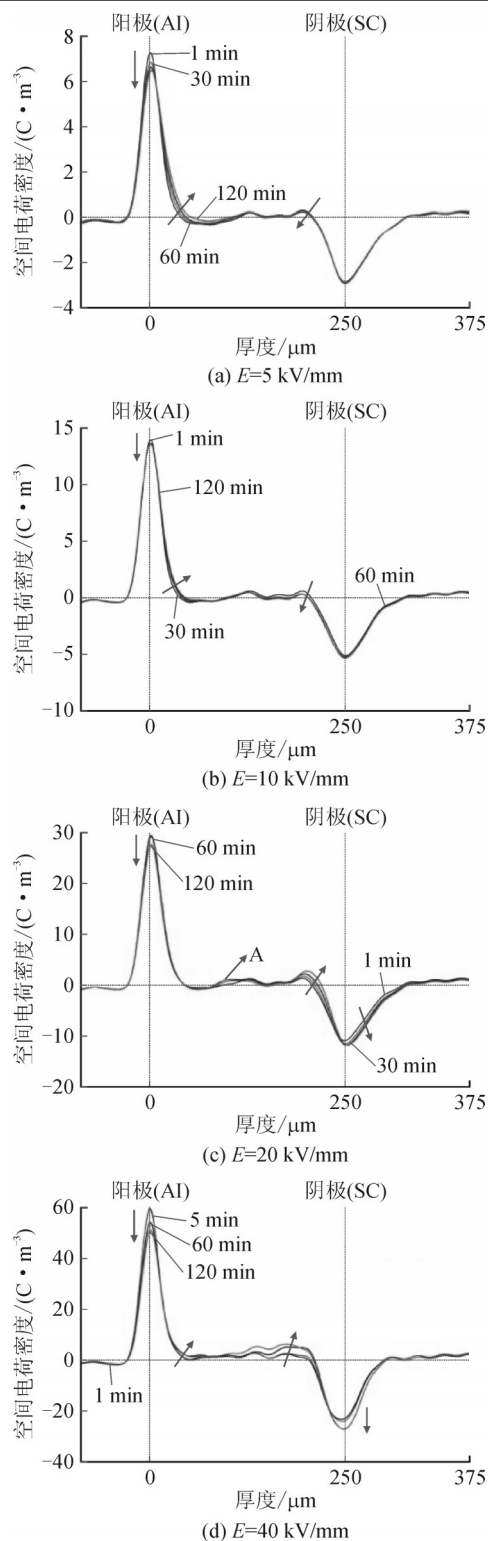


图3 不同直流场强下乙丙橡胶中空间电荷分布

Fig. 3 Space charge distribution of EPR under different DC electric field

大电荷密度分别约为  $2.728$ 、 $3.404 \text{ C/m}^3$ ,并且在界面处产生了负极性的感应电荷。

### 3 讨论

通常将同靠近的电极极性相同的介质内空间

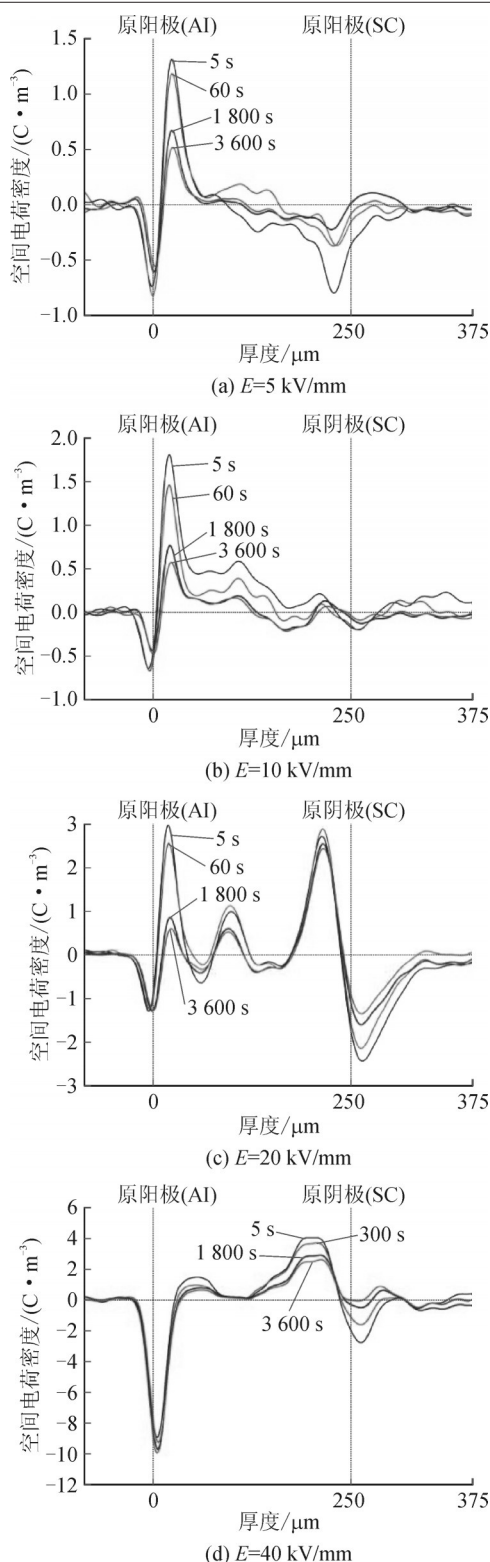


图4 不同场强作用后短路条件下乙丙橡胶的空间电荷消散特性曲线

Fig. 4 Space charge dissipation of EPR by different electric field in case of short circuit condition

电荷称为同极性电荷;反之称为异极性电荷。研究表明,当直流电压施加到试样两端时,介质内的同极性电荷主要是由于电荷注入产生<sup>[17]</sup>。外施场强的极性决定了电极的极性,即正负电极分别向介质内

注入空穴和电子。

界面电荷密度公式可以表示为

$$\sigma = \epsilon_r \epsilon_0 E_{av} - \int_0^d \rho(z) dz \quad (1)$$

式(1)中: $\epsilon_r$ 、 $\epsilon_0$ 分别表示介质的相对介电常数及真空介电常数; $E_{av}$ 表示施加的平均场强; $\rho(z)$ 表示介质内与阳极相距 $z$ 处的空间电荷密度。可见,若电极附近介质内同极性电荷的增加会使 $\sigma$ 减少,相反会使其增加。结合图3、4试验结果中各界面电荷密度的变化情况,可以确定2.5 kV/mm下两电极未发生电极注入,两电极与试样界面电荷密度的增加是由于在相对较低场强下,介质内的杂质及偶极基团在电场作用下极化为载流子并向与之极性相反的电极端迁移、积累所致<sup>[21]</sup>;而在5~40 kV/mm下两电极处发生了电荷注入,注入到介质中的电子和空穴是通过不断入陷、脱陷、再入陷、再脱陷的过程而不断向介质深处迁移的,从能带角度看,其入陷脱陷表现为在乙丙橡胶中各局域态之间的跃迁以及自局域态被激发至导带上,故一旦达到其阈值场强,便会存在这一动态过程,场强的不同使得载流子获得的能量不同,故表现出行为特性的不同。为此结合试验所得波形,可以推断在所施场强下乙丙橡胶内空间电荷行为主要分为以下4阶段,示意图见图5。

1)无电荷注入阶段。所施场强未达到阈值场强(2.5~5 kV/mm)时,两电极处未发生电荷注入,仅存在试样内部的杂质离子的迁移、中和、积累(该过程仅在阶段I、II中画出,但存在于每个阶段),使得两电极界面处电荷密度随时间增大,试样内部几乎没有空间电荷积累。

2)电荷双注入阶段。所施场强在5~10 kV/mm之间时,两电极处均出现同极性电荷注入,但是受场强幅值限制,注入的电荷在靠近两电极的位置被捕获、积累,并未向介质深处迁移。

3)注入电荷迁移、复合阶段。场强达到10~20 kV/mm时,电极注入加剧,并开始向对侧电极方向迁移,由于阳极注入更为“活跃”,以及场强升高促进杂质电离并向与其极性相反的电极迁移,整体表现为试样内部正电荷分布范围逐渐拓宽,使得阴极注入的电子最终被完全中和<sup>[22]</sup>。

4)阳极电荷注入主导阶段。场强高于20 kV/mm时,乙丙橡胶内完全以正极性电荷为主,使得阴极附近电荷极性反转并且出现正极性空间电荷包。

对于其在各场强下注入、迁移的特点将结合总电荷量及陷阱分布进行进一步说明。空间电荷总量可以按照式(2)计算得到

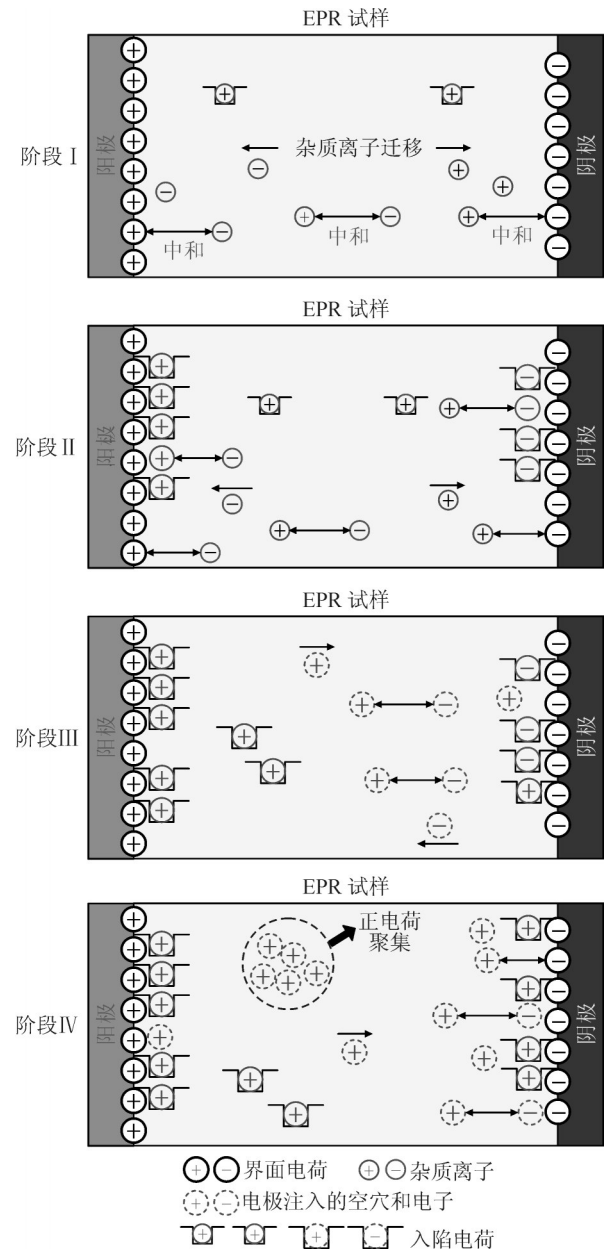


图5 不同场强下乙丙橡胶内空间电荷行为特性示意图

Fig. 5 Diagram of the space charge behavior in EPR under different electric field

$$Q(t) = \int_0^d |\rho(x,t)| S dx \tag{2}$$

式(2)中： $Q(t)$ 表示试样中空间电荷总量； $d$ 表示试样厚度； $\rho(x,t)$ 表示某一时刻 $t$ 某一厚度 $x$ 处的空间电荷密度； $S$ 表示电极面积。由此可以得到不同场强下极化与去极化过程中总电荷量的变化曲线分别见图6、7。图6中,加压过程中各场强下乙丙橡胶试样内的电荷量随时间整体呈增大的趋势,增大幅值随场强的升高而增大。这说明在5~40 kV/mm范围内,乙丙橡胶内始终存在电荷注入但并未达到饱和状态,使得总电荷量逐渐增加。图7中,在撤去电压后,电荷量在瞬间(约10 s内)下降,之后趋于一个稳定值,5 kV/mm和10 kV/mm下试样内最终滞

留的电荷量相差无几,场强高于10 kV/mm时,试样内最终滞留的电荷量与极化过程中所施场强增大而增大。由此可以推断,各场强下电荷消散特性有所不同,这与不同场强下试样内部陷阱分布相关。

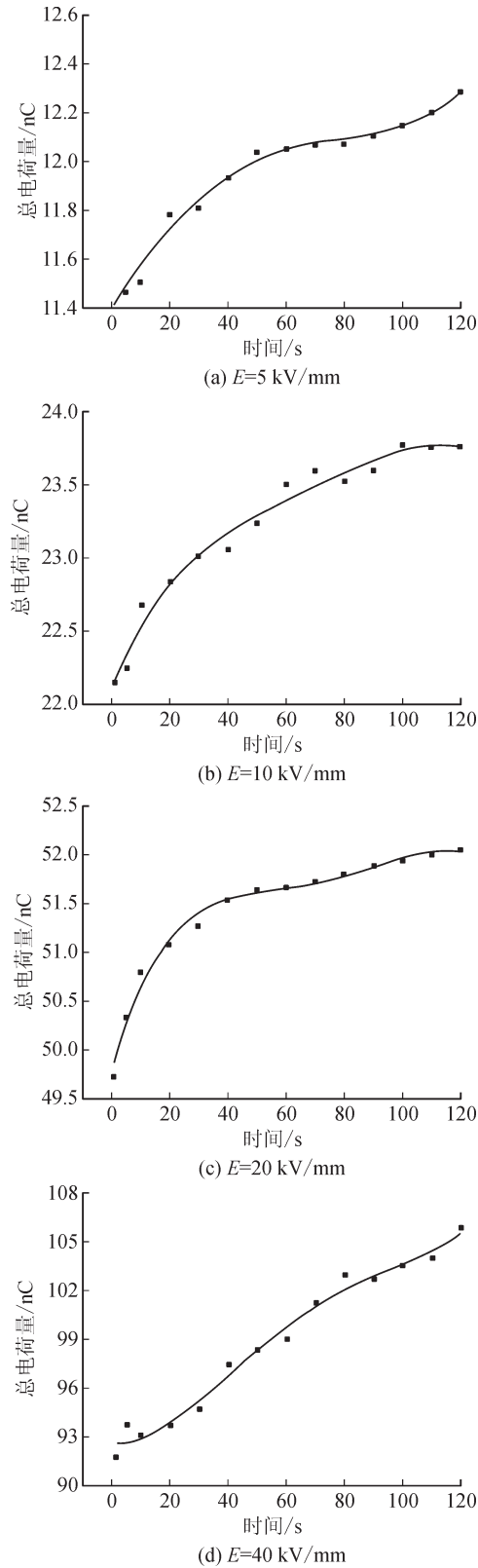


图6 不同场强作用120 min总电荷量的变化曲线  
Fig. 6 Total charge quantity of EPR polarized for 120 min under different electric field

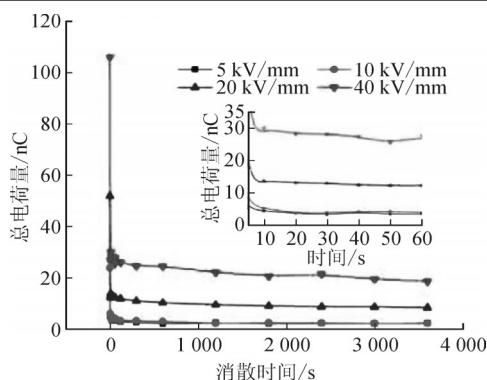


图7 不同场强作用后短路条件下的总电荷量变化曲线

Fig. 7 Total charge quantity of EPR polarized by different electric field in case of short circuit condition

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。将快速电荷  $Q_{\text{fast}}$  和慢速电荷  $Q_{\text{slow}}$  分别定义为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} Q_{\text{fast}} = Q_{\text{volt-on120min}} - Q_{\text{volt-off5s}} \\ Q_{\text{slow}} = Q_{\text{volt-off5s}} \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)、(3),可以得到不同场强持续作用120 min后快慢速电荷量见图8。从图8可以看出,各个场强下,乙丙橡胶试样内的快速电荷量均大于慢速电荷量,且其差值随场强增大而增加;快速电荷的增长基本与所施场强的增加成正比,而慢速电荷量在5 kV/mm和10 kV/mm下较为接近,在20 kV/mm及以上时出现明显增加。这说明在所施场强下乙丙橡胶内始终有不断被激发产生的浅陷阱,这也解释了为什么在所施场强下乙丙橡胶试样内总电荷量呈增加的趋势;场强在20 kV/mm及以上时,慢速电荷量出现明显增加,说明此时试样内深陷阱增多。对此,根据文[23-25],假设脱陷的载流子不再被陷阱所捕获,根据其提供的计算公式,可得到陷阱能级分布见图9。由图9可见在所施场强下,乙丙橡胶内的陷阱能级主要分布在0.69~0.85 eV。场强在10 kV/mm以下时,陷阱密度有小幅增加而陷阱深度没有明显加深,说明此阶段乙丙橡胶内主要是浅陷阱。场强在20 kV/mm及以上时,相较于10 kV/mm时的陷阱能级分布其陷阱深度及陷阱密度均明显增加,说明在此场强范围下乙丙橡胶中的陷阱数量明显增多。对比20 kV/mm与40 kV/mm下的陷阱能级分布,陷阱密度大大增加,而陷阱深度增大幅度相对较小,这说明随场强的进一步增大,乙丙橡胶试样内陷阱能级的加深影响了电荷注入与迁移速率,这一定程度上会削弱正负电荷的复合进而使得空间电荷聚集量增加<sup>[23]</sup>。

由此可知,由于陷阱分布的差异以及深浅陷阱对电荷束缚能力的不同,从空间电荷角度来看不同

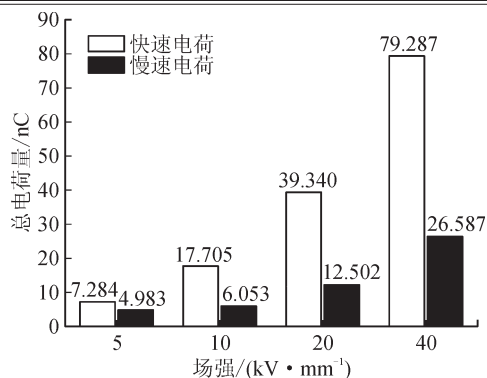


图8 不同场强下乙丙橡胶内快速电荷与慢速电荷量

Fig. 8 Fast and slow charge quantity of EPR under different electric field

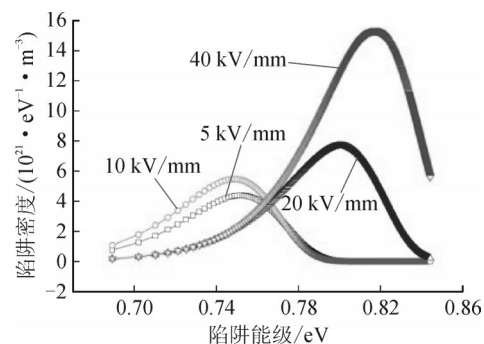


图9 不同场强作用下乙丙橡胶试样的陷阱能级分布

Fig. 9 Trap energy distribution of EPR samples under different electric field

场强下对电介质绝缘性能的影响方式也会有所不同。浅陷阱的大量存在,一方面会使得电介质内部自由载流子及热电子数目增加,场强较高时,易于诱发电树枝,从而影响材料的绝缘性能。另一方面,由于浅陷阱对载流子束缚能力相对较弱,使得电荷相对容易消散。对于文中5 kV/mm及10 kV/mm下试验,乙丙橡胶试样中陷阱深度及密度均较小,故在撤去直流电压后消散迅速,且最终直流电荷量相差无几。深陷阱的存在一方面会使自由载流子的数目减少,同时使电子的有效平均自由行程变短,使其在电场下不易积累能量成为热电子,一定程度上会抑制电树枝的引发与生长;另一方面易在介质内形成空间电荷包,使得局部场强畸变进而加速介质老化并影响其介电强度。同时深陷阱的增加使得空间电荷更难消散,对于文中20 kV/mm及40 kV/mm下试验,由于深陷阱对电荷的束缚使得阴极附近及介质内形成电荷包的位置消散较慢,滞留电荷量有明显增加。

乙丙橡胶试样在40 kV/mm下加压120 min过程中内部场强分布见图10。由图10可见,阴极附近大量异极性电荷的积累使其靠近阴极的局部场强明显增大,最大值达到50.043 kV/mm,约为施加场强

的125%。局部场强的增大一方面会使得试样相应位置的Maxwell应力增强,促使电介质中放电通道的形成,加速电树枝发展并进一步引发击穿;另一方面,可能会促使产生新陷阱,形成退陷阱化与新陷阱产生的恶性循环,有研究表明,空间电荷在脱陷过程中释放的机械能会加速电介质的老化及击穿<sup>[26]</sup>,同时,在此期间碰撞电离的反复与加剧容易产生大电流进而影响电介质的介电强度<sup>[27-28]</sup>。

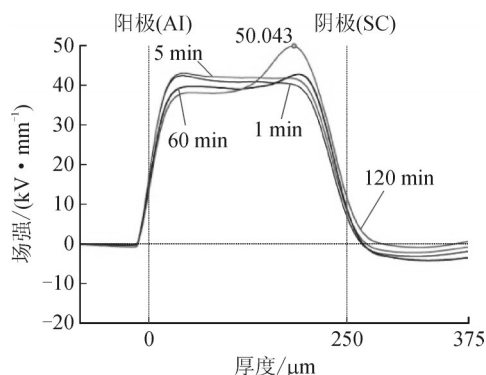


图10 40 kV/mm下乙丙橡胶内场强分布

Fig. 10 The electric field distribution in EPR under 40 kV/mm

#### 4 结论

文中以电缆用乙丙橡胶绝缘为研究对象,通过测量其在不同直流场强下的空间电荷分布,分析了其内部空间电荷行为特性与形成机理,得到如下结论:

1)乙丙橡胶的起始注入场强较低(2.5~5 kV/mm)。在低场强2.5 kV/mm下,乙丙橡胶内主要分布由杂质电离所产生的少量异极性电荷。

2)随场强的升高,乙丙橡胶内积聚的电荷量越大,乙丙橡胶的注入行为在所施场强范围内(2.5~40 kV/mm)可分为无电极注入、双电极注入、注入电荷迁移与复合、阳极注入主导4个阶段。

3)不同场强作用下陷阱深度与密度的不同直接影响空间电荷的消散特性。在5 kV/mm、10 kV/mm作用下,试样内部以浅陷阱为主,故空间电荷消散较快,滞留电荷量近似相等且较少;在20、40 kV/mm作用下,试样内部深陷阱被激发,使得电荷消散较慢,滞留电荷量明显增加。

4)在相对较高场强下,乙丙橡胶内产生的正极性空间电荷包会使得介质内部场强畸变,这会影响其介电强度。

#### 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] 茅雁,程江,杨昌平.中高压电力电缆用乙丙橡胶绝缘材料的研究[J].电线电缆,2008(5):28-29.

MAO Yan, CHENG Jiang, YANG Changping. Investigation of EPR insulation compound for the MV/HV power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2008(5):28-29.

[3] 陈少卿,成霞,王霞,等.聚合物中空间电荷的研究[J].绝缘材料,2007,40(4):48-52.

CHEN Shaoqing, CHENG Xia, WANG Xia, et al. Research of space charge in polymer[J]. Insulating Materials, 2007, 40(4):48-52.

[4] MONTANARI G C. Bringing an insulation to failure: the role of space charge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2):339-364.

[5] HAMMER F, KUCHLER A. Insulating systems for HVDC power apparatus[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(3):601-609.

[6] ZHIEN Z, YEWEN Z, ZHENLIAN A, et al. Comparison between thermally stimulated discharge method and photo-stimulated discharge method for measuring space charge traps energy[J]. High Voltage Energies, 2013, 39(8): 1845-1851.

[7] CAO L, GRZYBOWSKI S. Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses[C]// International Conference on Solid Dielectrics IEEE.[S.l.]: IEEE, 2013:632-635.

[8] CHANG F, LI T. Thermally stimulated discharge current and DC resistivity of ethylene propylene rubber with various PB concentrations[J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(2): 377-382.

[9] LEI Z, SONG J, TIAN M, et al. Partial discharges of cavities in ethylene propylene rubber insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1647-1659.

[10] 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.

LEI Zhipeng. Dielectric properties of EPR and partial discharge mechanism occurring in cavities and along surface of EPR[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.

[11] 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 charge at interface between ethylene propylene diene terpolymer and silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15):106-109.

[12] 兰莉,尹毅,钟琼霞,等.高压直流塑料电缆与附件双层绝缘界面空间电荷特性的研究[C]//中国电工技术

- 学会电线电缆专业委员会学术年会.兰州,中国:[s.n.], 2012:294-299.
- LAN Li, YIN Yi, ZHONG Qionxia, et al.Space charge property at the interface between the insulation of extruded HVDC cable and its accessory[C]//Annual Meeting of Wire and Cable Committee China Electrotechnical Society. Lanzhou, China:[s.n.], 2012:294-299.
- [13] 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.
- LAN Li, WU Jiandong, WANG Yani, et al.Space charge property at the interface in low density polyethylene/ethylene propylene rubber double-layered insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1266-1272.
- [14] BODEGA R, MORSHUIS P H F, NILSSON U H, et al.Charging and Polarization phenomena in XLPE-EPR coaxial interfaces[C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials.Kitakyushu,JAPAN:[s.n.],2005:107-110.
- [15] STANCU C, NOTINGER P V, LUNGULESCU M. Space charge and electric field in thermally aged multilayer joints model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2):633-644.
- [16] UEHARA H, CHEN Q, MONTANARI G C, et al.Comparison of charge behavior in XLPE and EPR with thermal gradient[C]//IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France:IEEE, 2016:143-146.
- [17] SEKII Y, MAENO T.Generation and dissipation of negative heterocharges in XLPE and EPR[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(3):668-675.
- [18] 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.
- HE Huaqin, WANG Xia, LIU Shengjun, et al.Space charge in EPR insulation in different elongations[J]. Insulating Materials, 2006, 39(5):40-44.
- [19] WANG Weiwang, YASUHHIRO T, TOSHIYUKI F, et al. Study on conduction current and space charge accumulation simultaneously in ethylene propylene diene monomer film[C]//1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Xi'an, China: [s.n.], 2016.
- [20] DANG B, ZHOU Y, HE J L, et al.Relationship between space charge behaviors and trap level distribution in polypropylene/propylene ethylene rubber/ZnO nanocomposites [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.Toronto, Canada:IEEE, 2016:595-598.
- [21] 陈枫,田付强,张颖,等.聚合物绝缘电介质中的空间电荷[M].哈尔滨:东北林业大学出版社, 2008:7-9.
- CHEN Feng, TIAN Fuqiang, ZHANG Ying, et al.Space charge in polymer dielectric[M]. Harbin:Northeast Forestry University Press, 2008:7-9.
- [22] MASUZAKI Y, SUZUKI Y, OHKI Y.Superior high-temperature dielectric properties of dicyclopentadiene resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5):3078-3085.
- [23] 周远翔,戴超,黄猛,等.电老化过程中直流电场对油纸绝缘空间电荷特性的影响[J].高电压技术, 2016, 42(12):3861-3867.
- ZHOU Yuanxiang, DAI Chao, HUANG Meng, et al.Effect of DC electric field on space charge characteristics of oil-paper insulation in electrical aging process[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12):3861-3867.
- [24] 宋伟,申文伟,王国利,等.电晕放电老化对高温硫化硅橡胶材料陷阱特性的影响[J].高电压技术, 2013, 39(4):979-986.
- SONG Wei, SHEN Wenwei, WANG Guoli, et al.Influence of corona discharge aging on trap characteristics of high temperature vulcanized silicon rubber material[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4):979-986.
- [25] 唐超.油纸绝缘介质的直流空间电荷特性研究[D].重庆:重庆大学, 2010.
- TANG Chao.Studies on the DC space charge characteristics of oil-paper insulation materials[D]. Chongqing:Chongqing University, 2010.
- [26] 李吉晓,张治文,夏钟福,等.空间电荷在聚合物老化和击穿过程中的作用[J].科学通报, 2000, 45(23):2469-2475.
- LI Jixiao, ZHANG Yewen, XIA Zhongfu, et al.The role of space charge in the process of aging and breakdown of polymers[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(23):2469-2475.
- [27] 刘付德,杨百屯,屠德民,等.固体电介质的电老化与击穿新理论和实验[J].物理学报, 1992, 41(2):333-341.
- LIU Fude, YANG Baitun, TU Demin, et al. A new theory and experiment on electrical aging and breakdown of solid dielectrics[J]. Chinese Journal of Physics, 1992, 41(2):333-341.
- [28] WANG Weiwang, MIN Daomin, LI Shengtao. Understanding the conduction and breakdown properties of polyethylene nanodielectrics: Effect of deep traps[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1):564-572.
- 徐晓晓(1991—),女,硕士研究生,主要从事乙丙橡胶空间电荷特性及其介电强度影响的研究。
- 雷志鹏(1983—),男,讲师,主要从事高压电缆故障的状态评估及其局部放电特性及乙丙橡胶空间电荷特性的研究。
- 宋建成(1957—),男,教授,博士生导师,长期致力于电气工程学科矿用智能电器、电力设备寿命评估、电力系统继电保护、煤矿安全监测监控等领域的科学研究。