

交联聚乙烯/蒙脱土纳米复合物空间电荷特性研究^{*}

高俊国 张 豪 李丽丽 张 静 郭 宁 张晓虹^{**}

(工程电介质及其应用技术教育部重点实验室 哈尔滨理工大学 哈尔滨 150080)

摘 要 以十八烷基氯化铵处理的有机化蒙脱土(O-MMT)为无机纳米相,以低密度聚乙烯(LDPE)作为基体聚合物,以马来酸酐接枝聚乙烯(PEMA)为相容剂,以双叔丁基过氧化二异丙基苯BIPB为交联剂,通过熔融插层复合后再进行化学交联的“两步法”,制备了交联聚乙烯/有机化蒙脱土(XLPE/O-MMT)纳米复合物.利用电声脉冲法(PEA)试验研究了不同蒙脱土含量的XLPE/O-MMT纳米复合物的空间电荷特性.实验结果表明,与纯XLPE相比,含一定比例O-MMT的XLPE/O-MMT纳米复合物具有不同程度抑制空间电荷的能力.当O-MMT含量为0.5%~1%时,其纳米复合物的空间电荷量最小;在O-MMT含量为3%~7%的范围内,随O-MMT含量的增加,XLPE/O-MMT纳米复合物中空间电荷量逐渐增大,但仍低于纯XLPE中的空间电荷量.通过热激电流(TSC)实验证实,与XLPE相比,XLPE/O-MMT纳米复合物的TSC峰均不同程度地向高温方向偏移,说明纳米复合材料的陷阱深度增加.当O-MMT含量为1 wt%时,TSC曲线所包围的面积最小,相应地,其陷阱密度最小;而随着O-MMT含量的增加,XLPE/O-MMT纳米复合物的TSC曲线所包围面积逐渐增大,说明其陷阱密度有所增加.绝缘电导率的试验结果进一步支持了上述观点.

关键词 交联聚乙烯/有机化蒙脱土纳米复合物,空间电荷,热激电流,绝缘电导率

低密度聚乙烯(LDPE)作为一种具有良好电绝缘性、化学稳定性、较低的熔融温度和良好可加工性的非极性材料,被广泛用于电线电缆绝缘^[1].为了满足高压电力电缆大容量传输对绝缘材料耐高温等级和力学性能的要求,通常要通过化学交联而使线性聚乙烯分子变成为三维网状结构.因此,交联聚乙烯(XLPE)成为近年来发展迅猛的高压电缆用绝缘材料.但是,在高电场长期作用下,由金属导体向XLPE体内注入的载流子,可能会被XLPE中微观缺陷产生的陷阱所俘获并逐渐积聚而形成所谓空间电荷.空间电荷的存在将造成电缆绝缘中电场畸变,进而引发局部放电和电树生长,甚至会导致电缆绝缘的击穿事故,特别是在直流电场作用下,空间电荷的上述作用更为显著,已成为制约高压直流电缆发展的瓶颈问题^[2~5].因此,研究XLPE绝缘中空间电荷的形成机理,进而探讨其抑制方法,对于保障高压电力电缆的安全稳定运行具有重要的理论意义和实用价值.

XLPE中空间电荷的产生,不仅受电场强度、

导体材料、工作温度等参数的影响,还依赖于聚合物的结晶度、微观缺陷和添加剂种类等材料自身的物理、化学特性^[6,7].为了减小空间电荷的影响,人们尝试了采用不同的物理化学方法.在聚合物中加入无机纳米填料就是其中的方法之一.聚合物/层状硅酸盐纳米复合物以其优异的物理、化学及综合性能,成为近年来复合材料研究领域的热点^[8~11].本文以有机化蒙脱土(O-MMT)为无机纳米相,采用熔融插层法与化学交联法相结合的“两步法”,制备了交联聚乙烯/蒙脱土纳米复合物(XLPE/O-MMT),试验研究了不同蒙脱土含量的XLPE/O-MMT纳米复合物的空间电荷特性、热激电流特性和绝缘电导特性等.

1 实验部分

1.1 原材料及试样制备

本文所用低密度聚乙烯(LDPE),其熔融指数为 $MI = 1.5 \text{ g}/10\text{min}$;钠基蒙脱土(N-MMT)粒径为 $40 \sim 70 \mu\text{m}$,阳离子交换量 0.85 mol/kg ;相容剂选择马来酸酐接枝聚乙烯(PEMA);交联剂

^{*} 2012-06-01 收稿,2012-07-13 修稿;国家自然科学基金(基金号 51077029)、教育部博士点基金(基金号 20092303110003)和黑龙江省研究生创新基金(基金号 YJSCX2009-029HLJ)资助项目.

^{**} 通讯联系人, E-mail: x_hzhang2002@sina.com

doi:10.3724/SP.J.1105.2013.12109

采用双叔丁基过氧化二异丙基苯(BIPB);抗氧剂四[3-(3,5-二叔丁基-4-羟苯基)丙酸]季戊醇酯(1010).用十八烷基铵盐对蒙脱土进行预插层和有机化处理,制得有机化蒙脱土(O-MMT).

采用两步法制备 XLPE/O-MMT 纳米复合材料,即先将 LDPE,O-MMT,PEMA 和 1010 等按一定比例,在转矩流变仪上进行熔融插层,制得 LDPE/O-MMT 纳米复合物,再将 LDPE/O-MMT 与 BIPB 在开炼机上进行熔融共混,然后利用平板硫化机,将混好的复合物在一定的温度、压力下完成化学交联并同时热压成型,制得所需要的 XLPE/O-MMT 试样.

1.2 蒙脱土片层间距的测量

采用 X 射线连续衍射扫描谱,分别对 N-MMT 和 O-MMT 进行了测试.其测试条件为 Cu 靶,管电压 40 kV,管电流 30 mA,扫描速率 0.06 (°)/s,

扫描范围 2θ 在 $2^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 之间.利用式(1)的 Bragg 方程计算出有机化处理前后的蒙脱土片层间距.

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{1}$$

式中 d 为片层之间的平均距离, nm; θ 为半衍射角, $^{\circ}$; λ 为入射 X 射线的波长, $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$; n 为衍射级数,通常 $n = 1$.

1.3 空间电荷分布的测量

采用电声脉冲法 (PEA) 测量薄片试样中空间电荷分布的测试系统构成如图 1 所示^[12].直流电源 0 ~ 20 kV,脉冲宽度 30 ns,幅值 0 ~ 1 kV.试样厚度约 150 μm .分别对试样施加 10 kV/mm, 30 kV/mm 和 50 kV/mm 的直流场强;然后在不同加压时间以及接地短路后,测试不同试样中的空间电荷分布.施加场强与 PEA 测试时间的对应关系如表 1 所示.

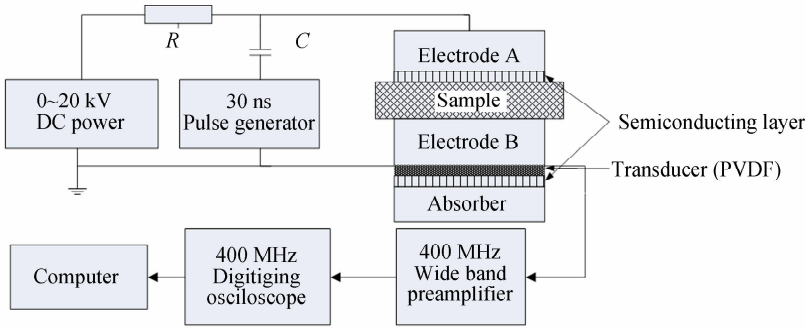


Fig. 1 Measurement system of space charge profile

Table 1 Time of space charge measurement under different electrical field strength

Electrical stress (kV·mm ⁻¹)	10	30	50	0 (short circuit)
Measurement duration (min)	30	30	60	60

1.4 热激电流 (TSC) 实验

将试样在室温下施加 25 kV/mm 的场强进行极化,极化时间为 0.5 h.然后去除极化电压并将试样短路,在室温下通过静电计观测其短路电流的等温衰减过程.当短路电流值衰减到 1 pA 以下时,开始线性升温进行热激退极化,升温速率为 3 K/min,升温上限值设定为 353 K (80 $^{\circ}$ C),记录并保存在升温过程中试样的热激退极化电流数据.

1.5 绝缘电导率实验

利用 ZC36 高阻计对部分 XLPE/O-MMT 纳米复合物试样进行绝缘电导率的测量.采用三电极测试系统,试样厚度约为 500 μm ,测试场强为 1 kV/mm.

2 结果与讨论

2.1 蒙脱土片层间距的 XRD 表征

图 2 分别示出了蒙脱土原土 (N-MMT) 及经过十八烷基氯化铵改性的有机化蒙脱土 (O-MMT) 的 XRD 谱图.

由图 2 中可以看出,蒙脱土原土 (N-MMT) 的衍射峰出现在约 6.50 $^{\circ}$ 的位置,有机化蒙脱土 (O-MMT) 的衍射峰则出现在约 3.86 $^{\circ}$ 的位置.利用式 (1) 的 Bragg 方程可以计算出 N-MMT 的层间距为 1.36 nm,而 O-MMT 的层间距增大到 2.29 nm.试验结果表明,用十八烷基氯化铵对 MMT 进行有机化改性的效果比较明显,其层间距扩大了 68.38%.说明十八烷基铵盐阳离子与 MMT 片层间吸附的阳离子发生了离子交换反应,从而使有机阳离子插入到了 MMT 的片层之间.

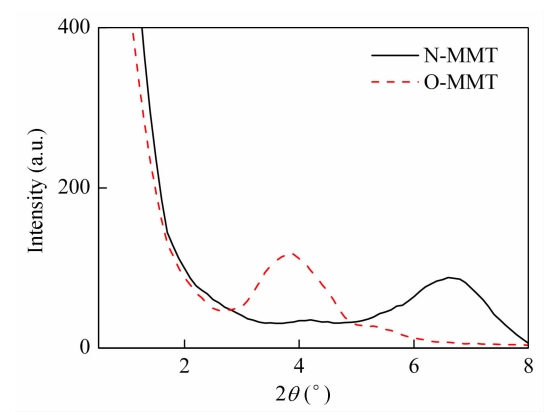


Fig. 2 XRD patterns of N-MMT and O-MMT

2.2 XLPE/O-MMT 纳米复合物的空间电荷特性

图 3 和图 4 分别示出了不同蒙脱土含量的 XLPE/O-MMT 纳米复合物试样空间电荷分布的测试结果.

由图 3(a)可见,纯 XLPE 试样在靠近阴极附近,存在着很少量的同极性电荷,且随场强升高变化不大;而阳极附近则出现了随场强的升高而明显增大的异极性空间电荷.空间电荷的形成与 XLPE 中分子的结构形态密切相关.聚乙烯通常是由晶相和无定形相两相构成,在进行化学交联

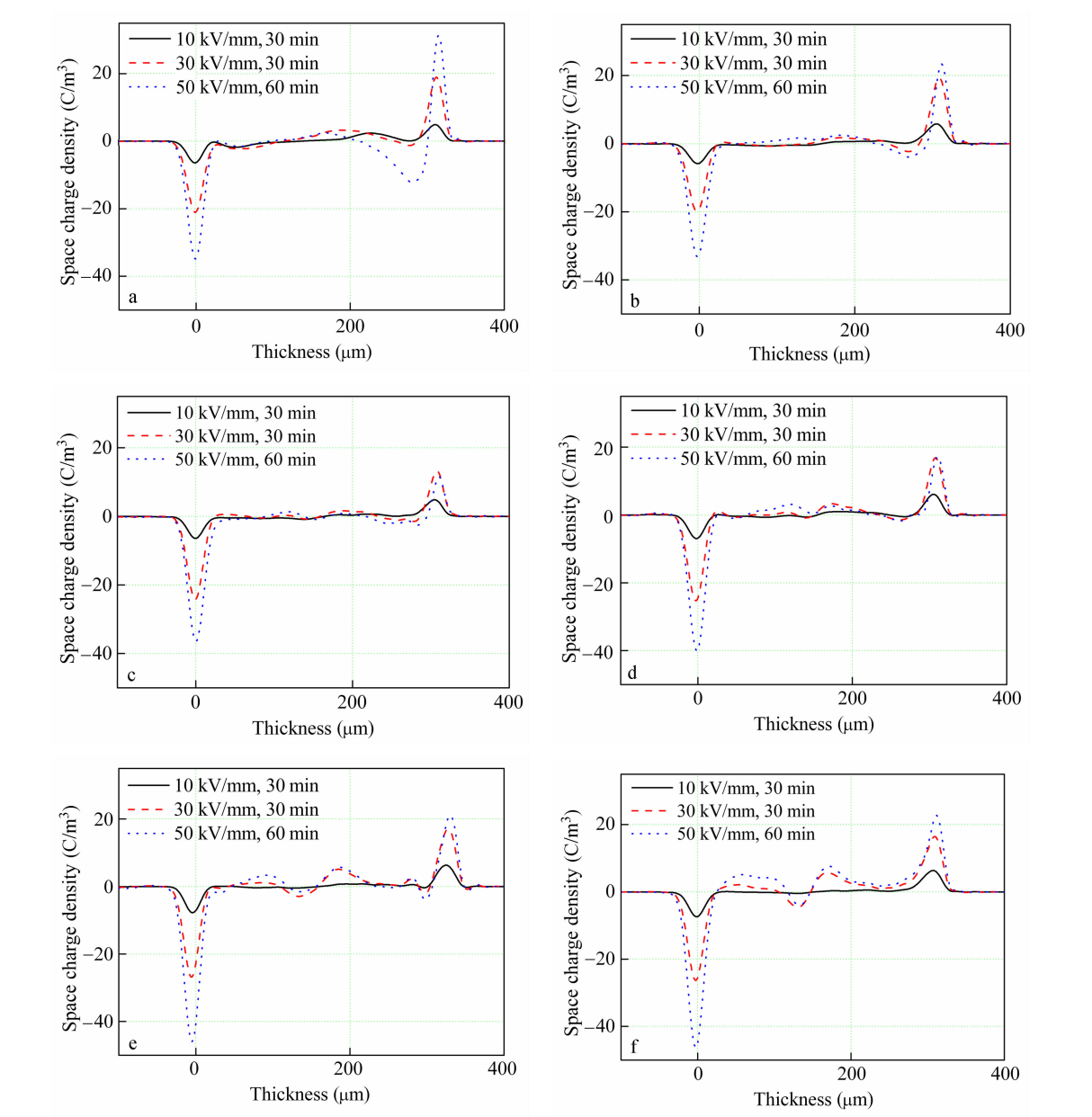


Fig. 3 Space charge distribution of XLPE/O-MMT with different percentages of O-MMT under electric field: (a) XLPE, (b) XLPE + 0.5% O-MMT, (c) XLPE + 1% O-MMT, (d) XLPE + 3% O-MMT, (e) XLPE + 5% O-MMT, (f) XLPE + 7% O-MMT

的过程中残余自由体积、双键、端基、晶相和无定形相间的界面等导致了局域态的增加,这些局域态可作为载流子陷阱而造成空间电荷积聚^[13]。另外 XLPE 中还包含各种各样的无机和有机杂质,如催化剂、抗氧剂、电压稳定剂、交联剂以及交联副产物等杂质,在高场强下杂质发生极化或电离,也可形成大量的异极性空间电荷。由图 3(b)和 3(c)可见,向 XLPE 添加少量的 O-MMT (0.5 wt% 和 1 wt%) 时,阴极附近的负电荷几乎消失,且阳极附近的异极性空间电荷明显减小,而且试样内部注入的空间电荷总量也有减少的趋势。由图 3(d)~3(f)可见,当 O-MMT 含量进一步增大(质量分数为 3 wt%, 5 wt% 和 7 wt%) 时,阴极附近则产生了异极性空间电荷,且随蒙脱土含量增大而逐渐增多;而在阳极附近的异极性空间电荷则明显减少,特别是蒙脱土含量为 7 wt% 时,阳极附近的异极性空间电荷几乎消失;在试样内部空间电荷呈正负极性交替分布,整体看来空间电荷以正极性为主,电荷量随蒙脱土含量增加而增大。蒙脱土作为一种层状硅酸盐,通过聚合物的熔融插层反应,使蒙脱土片层与聚合物基体之间形成了大而坚固的交联面,这不仅增加了交联点的数目,而且使聚合物链段排列更加规整、致密,因此,使得 XLPE/O-MMT 纳米复合物的活化能提高^[14];另一方面,相容剂 PEMA 的存在也改善了有机相与无机相的之间的界面相容性,使二者之间的界面区域通过化学键合,形成有机的结合状态,从而有利于改善纳米复合物的综合性能。

图 4 分别示出了上述 6 种试样经短路后其空间电荷的分布图。由图 4 可以看出,6 种试样的短路空间电荷分布情况与加压时空间电荷的分布情况相似,在加压时电荷积聚较多的位置,短路之后电荷残余量也较多。为了更加直观地了解短路时空间电荷的衰减情况,这里引入线均电荷密度 Q_{med} 和线均电荷密度衰减速率 $V_{Q_{\text{med}}}$ 的概念。

线均电荷密度 Q_{med} 可表征材料内部空间电荷密度绝对量的平均值,又称为平均电荷密度,如式(2)所示^[15]:

$$Q_{\text{med}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} |\rho(x)| dx \quad (2)$$

式中 x_1 和 x_2 是两个电极的位置, $\rho(x)$ 是经过不同场强分别预压一段时间(见表 1)后短路时的空间电荷密度。

引入线均空间电荷密度衰减速率 $V_{Q_{\text{med}}}$ 的目

的是更加直观的显示空间电荷在短路 60 min 内的衰减情况,又称为平均电荷密度衰减速率,其计算公式为:

$$V_{Q_{\text{med}}} = \Delta \overline{Q_l} / \Delta t = | \overline{Q_{l_2}} - \overline{Q_{l_1}} | / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

式中 $\overline{Q_{l_1}}$ 和 $\overline{Q_{l_2}}$ 分别是 t_1 和 t_2 时刻试样中的线均空间电荷密度。

将测试数据进行分析 and 处理之后,计算出不同 O-MMT 含量的 XLPE/O-MMT 复合物短路时的空间电荷密度的数据,并进一步计算得出短路时试样的平均电荷密度、平均电荷衰减速率以及平均电荷密度随时间的衰减曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知,纯 XLPE 的平均电荷密度和电荷衰减速率均为最大,这说明了 XLPE 在高场强下积聚了大量的空间电荷,其抑制空间电荷注入的能力较弱。由于空间电荷浓度较高,因此,其短路瞬间空间电荷释放的速度也较快,即空间电荷密度衰减速率较大;向 XLPE 中添加质量分数为 0.5 wt% 和 1 wt% 的 O-MMT 之后,复合材料试样的平均电荷密度大大减小,表现出较强的抑制空间电荷注入的能力。由于空间电荷浓度较低,因此,短路后其扩散衰减的速度也较小,即平均电荷衰减速率较小;当 O-MMT 含量达到 3 wt%, 5 wt% 和 7 wt% 时,平均电荷密度又随 O-MMT 含量的增加而逐渐增大,相应地,短路后试样内部残余空间电荷量的衰减速率也逐渐增加,即平均电荷衰减速率增加。整体看来, XLPE/O-MMT 复合物内部的平均电荷密度和平均电荷衰减速率都低于纯 XLPE 试样,且随着 O-MMT 含量的增加呈现出先减小后增大的勺型变化趋势。对于 O-MMT 含量为 0.5% ~ 1% 的 XLPE/O-MMT 复合材料抑制空间电荷性能最好的原因,可从无机相分散性和陷阱特点两个角度分析。有研究文献报道^[16], O-MMT 在聚合物体内的临界分散浓度可由公式 $\Phi_c = L^2 h / L^3 = h / L$ 计算得出,即临界体积分数值与薄片的径厚比的倒数相等,亦即形成有序结构的临界浓度值为体系中薄片分散相的径厚比的倒数。在实际的蒙脱土纳米复合材料中,作为分散相的蒙脱土片层因产品不同而具有不同的径厚比,一般蒙脱土片层的长、宽介于 20 ~ 500 nm 之间,片层厚度约几个纳米,本文选用 O-MMT 的径厚比 200 ~ 500 左右,由上式可容易地计算出能够形成有序结构的临界体积浓度约为 0.2% ~ 0.5%,换算为质量分数约为 0.5% ~ 1.2%。从陷阱特点

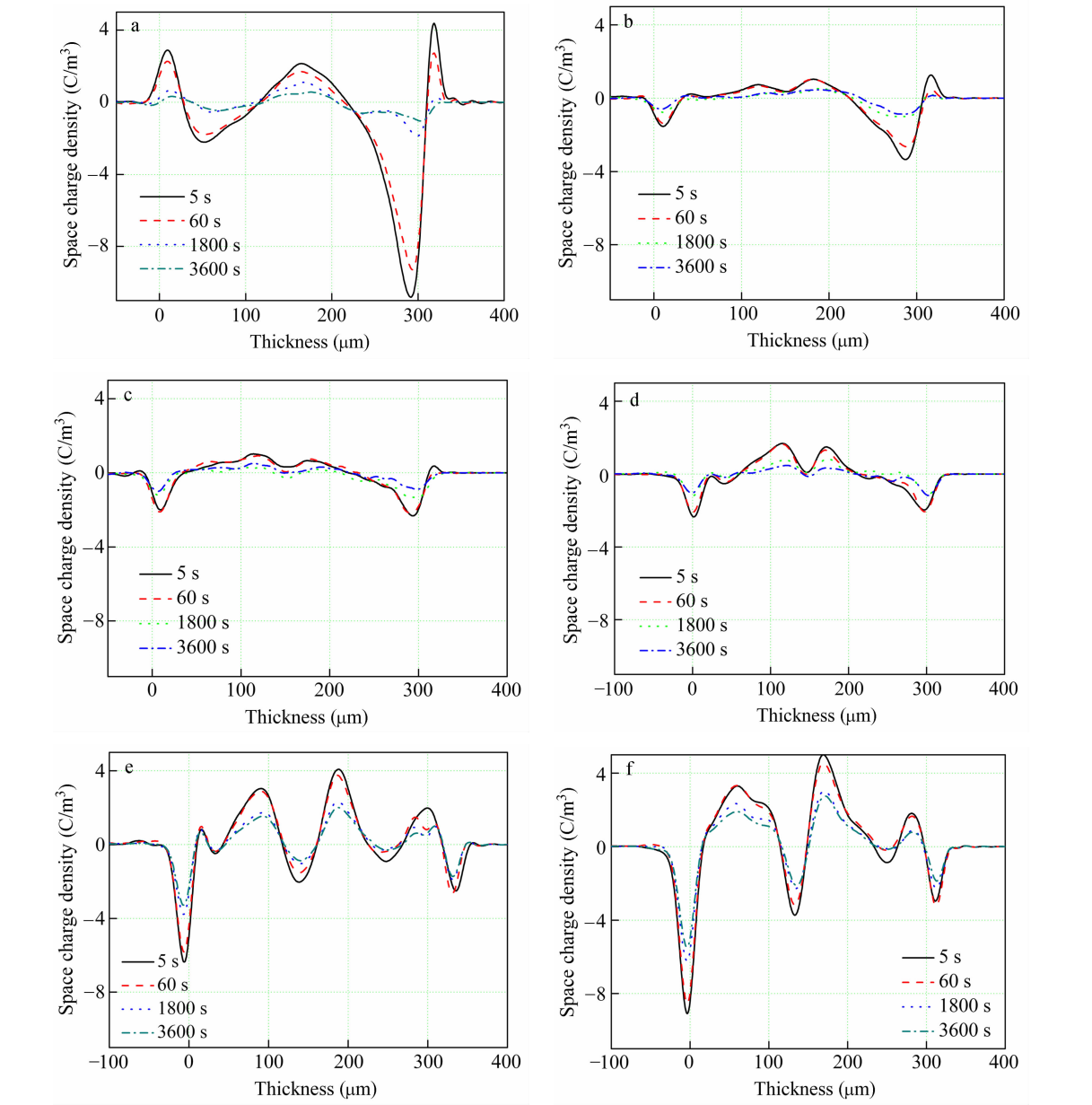


Fig. 4 Space charge distribution of XLPE/O-MMT from different percentage of O-MMT when short-circuited: (a) XLPE, (b) XLPE + 0.5% O-MMT, (c) XLPE + 1% O-MMT, (d) XLPE + 3% O-MMT, (e) XLPE + 5% O-MMT and (f) XLPE + 7% O-MMT

的角度分析,当 XLPE 内部 O-MMT 含量较低时,在 XLPE 体内引入了少量的载流子陷阱,这些陷阱作为载流子捕获中心,在电场作用下产生了对自由载流子迁移的调制作用,一方面,它们以均化电场的方式抑制空间电荷的注入,另一方面,以陷阱复合中心的方式减少了空间电荷的积聚^[17, 18];当 O-MMT 含量进一步增加时,由于陷阱密度随之而增大,则有可能通过局域态能级简并形成所谓陷阱捕获中心,从而有利于空间电荷在电场作用下的积聚,所以,O-MMT 含量较高时,复合材料试样的平均电荷密度和电荷衰减速率都有所增

加,但总体上仍低于纯 XLPE 试样. 只有当 O-MMT 含量达到 7 wt% 时,注入的空间电荷量比较接近 XLPE,但其短路时电荷衰减速率却远远小于 XLPE,这也说明当 O-MMT 含量较高时陷阱能级较深,所捕获的电荷不易释放.

2.3 XLPE/O-MMT 纳米复合物的热激电流特性

聚合物材料内部的陷阱密度以及陷阱能级深度在一定程度上决定了空间电荷的分布情况,而热刺激电流法是研究聚合物内部陷阱能级参数等微观特性的重要手段,因此,可以通过测量材料的

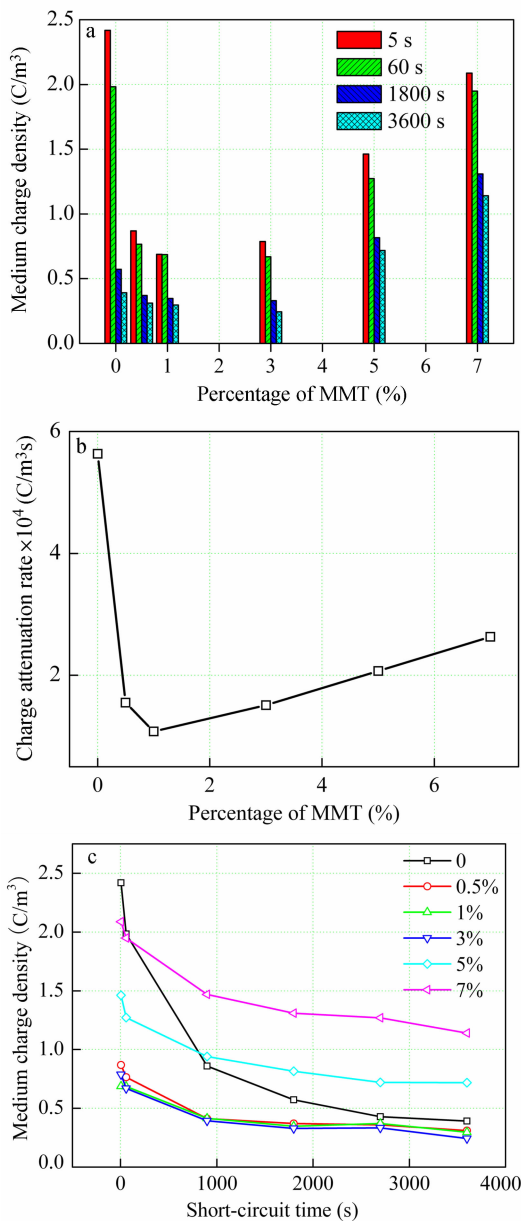


Fig. 5 Medium charge density and charge attenuation rate of XLPE/O-MMT with different percentages of O-MMT during short-circuit

热激电流 (TSC) 谱图^[19,20],进一步探讨纳米蒙脱土的引入对交联聚乙烯中空间电荷形成与分布影响的微观本质. 本文通过实验获得的不同蒙脱土含量的 XLPE/O-MMT 热激电流—温度曲线,如图 6 所示. 由图 6 可以看出,XLPE/O-MMT 纳米复合物的 TSC 峰值位置与 XLPE 相比都略微偏向于高温方向移动,在 O-MMT 含量为 0.5% 时峰温最高约为 52℃,之后随着 O-MMT 含量的增大而略微有所降低. 但 TSC 峰所包围的面积则是 O-MMT 含量为 1 wt% 时最小,而 O-MMT 含量为 3% 和 5% 时 TSC 峰的面积都比 XLPE 的大一些. 这说明

了与纯 XLPE 相比,XLPE/O-MMT 复合物的陷阱深度更深,且陷阱密度和陷阱的分散度都有所增加. 这个结果从陷阱能级的角度进一步验证了图 4 和图 5 中空间电荷的测试结果. 即当蒙脱土含量为 1 wt% 时,XLPE/O-MMT 试样的陷阱密度最小,因此,空间电荷的积累最少;当蒙脱土含量超过 1 wt% 时,陷阱总量随蒙脱土含量的增加而增加,所捕获的载流子形成了更多的空间电荷. 由于陷阱较多,其中既有较深的能级又有较浅的能级,在短路时浅陷阱中的空间电荷能够迅速被释放,而深陷阱内的空间电荷则不易释放,因此,表现出电荷衰减速率低于纯 XLPE 试样的特点.

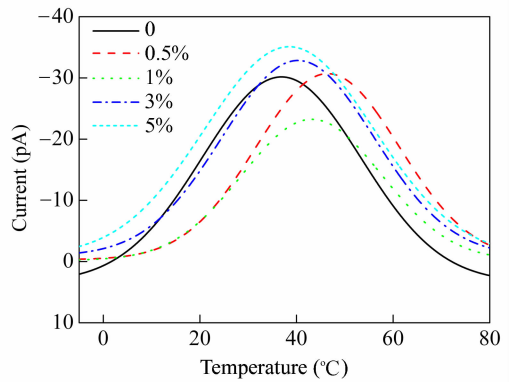


Fig. 6 The TSC spectrograms of XLPE/O-MMT made from different percentages of O-MMT

2.4 XLPE/O-MMT 纳米复合物的绝缘电导特性

电导率是表征电介质导电性能的重要参数之一,与其相对应的微观参数是载流子迁移率和载流子浓度^[21~23]. 而空间电荷的积聚、转移和衰减都与载流子迁移率密切相关. 图 7 示出了室温下不同蒙脱土含量的 XLPE/O-MMT 纳米复合物的

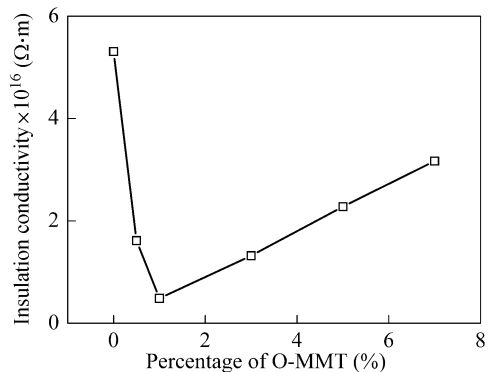


Fig. 7 The insulation conductivity of XLPE/O-MMT nanocomposites

绝缘电导率实验曲线.

从图 7 可以看出,不同 O-MMT 含量的 XLPE/O-MMT 纳米复合物的绝缘电导率试验结果与前述的 PEA 和 TSC 试验结果具有很好的一致性. O-MMT 含量为 1 wt% 时,由于陷阱浓度低,空间电荷积累得少,因此,相当于载流子浓度较低,所以,电导率也最小. 而随 O-MMT 含量的提高,陷阱浓度增大,空间电荷积累较多,因此,载流子浓度随之而增大,其绝缘电导率也相应提高.

3 结论

采用熔融插层之后再行化学交联的两步法制备了 XLPE/O-MMT 纳米复合物,采用电声脉冲法试验研究了不同 O-MMT 含量的 XLPE/O-MMT 纳米复合物的空间电荷性能,通过 TSC 试验和绝缘电导率试验,探讨了 XLPE/O-MMT 纳米复合物的空间电荷行为与陷阱特性、载流子迁移率的关系,得出以下结论:

(1)在较高场强下 XLPE 试样内部主要是异极性空间电荷,且主要为阳极附近的异号空间电荷. 空间电荷的产生主要有两方面原因:一是 XLPE 在化学交联过程中残余的自由体积、双键、端基、晶相和无定形相间的界面等导致的局域态一载流子陷阱的增加;二是 XLPE 中所包含的无机和有机杂质,如催化剂、抗氧剂、电压稳定剂、交联剂以及交联副产物等,在高场强下发生极化或电离而形成的异极性空间电荷.

(2)在 XLPE 中加入经过十八烷基氯化铵有机化处理过的 O-MMT,可以有效地抑制空间电荷在 XLPE 试样中的注入和积聚. 在相同的电场条件下, O-MMT 含量为 1 wt% 时 XLPE/O-MMT 纳米复合物抑制空间电荷的效果最好. 通过 O-MMT 在聚合物体内的临界分散浓度公式可算出 O-MMT 在聚合物内的质量分数为 0.5% ~ 1.2% 时,其分散性最好.

(3)经 TSC 试验证实,与 XLPE 试样相比,所有 XLPE/O-MMT 纳米复合物试样的 TSC 曲线峰都向高温方向偏移,说明 O-MMT 的添加引入了较深陷阱,因此, XLPE/O-MMT 试样的空间电荷衰减速率低于纯 XLPE 试样;当 O-MMT 含量为 1% 时, TSC 曲线所包围的面积减小,说明其陷阱密度降低,受陷载流子形成的空间电荷量随之而减小;而 O-MMT 含量超过 3% 时, TSC 曲线所包围的面积则明显增大,说明其陷阱的密度增大,受限载流子所形成的空间电荷量也较大. 因此,载流子陷阱密度是决定聚合物中空间电荷分布的主要因素之一.

(4)通过 XLPE/O-MMT 纳米复合物绝缘电导率特性的试验研究,获得了与前述 PEA 试验和 TSC 试验完全一致的结果. 因此,可以认为,利用无机纳米 O-MMT 对 XLPE 进行改性,可以调控其内部空间电荷的积聚和衰减速率,为 XLPE 在更高电压等级上的应用开辟了新的途径.

REFERENCES

- 1 Yang Hongmei(杨红梅), Zhang Xiaohu(张小虎), Zheng Qiang(郑强). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2011, (6): 694 ~ 700
- 2 Fu M, Dissado L A, Chen G. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2008, 15(3): 851 ~ 860
- 3 Chen G, Tham C H. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 2009, 16(1): 179 ~ 188
- 4 Hozumi N, Takeda T, Suzuki H, Okamoto T. IEEE Trans Dielectr Electr Insul, 1998, 5(1): 82 ~ 90
- 5 Vaughan A S, Zhao Y, Barre L L, Sutton S J, Swingle S G. Eur Polym J, 2003, 39: 355 ~ 365
- 6 Banford H M, Fouacre R A. Nuclear Technology and Ageing. IEEE Electr. Insul M, 1999, 15(5): 19 ~ 27
- 7 Zhu Xiaohui(朱晓辉), Du Boxue(杜伯学), Gao Yu(高宇), Ma Zongle(马宗乐). High Voltage Engineering(高电压技术), 2009, 35(12): 3154 ~ 3158
- 8 Lincoln D M, Vaia R A, Wang Z G, Hsiao B S. Polymer, 2001, 42(4): 1621 ~ 1631
- 9 Liu Xiaohui(刘晓辉), Fan Jiaqi(范家起), Li Qiang(李强), Zhu Xiaoguang(朱晓光), Qi Zongneng(漆宗能). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2000, (5): 563 ~ 567
- 10 Ma Xiaoyan(马晓燕), Lu Haijun(鹿海军), Liang Guozheng(梁国正), Yan Hongxia(颜红侠). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2004, (1): 88 ~ 92
- 11 Lu Chang(陆昶), Huang Xinhui(黄新辉), Xing Yanyan(邢艳艳), Chen Quan(陈权), Liu Jicun(刘继纯), Zhang Yuqing(张玉清). Acta Polymerica Sinica(高分子学报), 2010, (4): 401 ~ 407
- 12 Yin Yi(尹毅), Han Shejiao(韩社教), Tu Demin(屠德民). Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报), 2000, 20(8): 1 ~ 5

13 Dang Zhimin(党志敏),Kang Jie(亢婕),Tu Demin(屠德民). Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报),2001,21(7):5~8

14 Gao Naikui(高乃奎),Xie Hengkun(谢恒堃),Peng Zongren(彭宗仁). Transactions of China Electrotechnical Society(电工技术学报),1999,14(6):35~38

15 Boufayed F,Teyssdre G,Laurent C,Le R S,Dissado L A,Sgur P,Montanari G C. J Appl Phys,2006,100(10):104105~104115

16 Qi Zongneng(漆宗能),Shang Wenyu(尚文宇). The Theory and Practice of Polymer/Layered Silicate Nano-composites(聚合物/层状硅酸盐纳米复合材料理论与实践). Beijing(北京):Chemical Industry Press(北京化学工业出版社),2002:27~29

17 Chen G,Tay T Y G,Davies A E,Tanaka Y,Takada T. IEEE Trans Dielectr Electr Insul,2001,8(6):867~873

18 Chen G,Tanaka Y,Takada T,Zhong L. IEEE Trans Dielectr Electr Insul,2004,11(1):113~121

19 Montanari G C,Fabiani D. IEEE Trans Dielectr Electr Insul,2000,7(3):322~328

20 Zhang Xiaohong(张晓虹),Gao Junguo(高俊国),Zhang Jinmei(张金梅),Liu Jiayin(刘佳银),Ji Quanquan(吉泉泉). Transactions of China Electrotechnical Society(电工技术学报). 2009,24(12):1~5;31

21 Chen Jidan(陈季丹),Liu Ziyu(刘子玉). Dielectric Physics(电介质物理学),1st ed(第一版). Beijing(北京):China Machine Press(机械工业出版社),1982. 193~233

22 Zhang Xiaohong(张晓虹),Gao Junguo(高俊国),Guo Ning(郭宁),Zhang Jinmei(张金梅),Liu Yali(刘亚丽),Hu Haitao(胡海涛). High Voltage Engineering(高电压技术),2009,35(1):129~134

23 Tian Fuqiang(田付强),Yang Chun(杨春),He Lijuan(何丽娟),Han Bai(韩柏),Wang Yi(王毅),Lei Qingquan(雷清泉). Transactions of China Electrotechnical Society(电工技术学报),2011,26(3):1~12

STUDY ON SPACE CHARGE CHARACTERISTICS OF
XLPE/O-MMT NANOCOMPOSITES

Jun-guo Gao, Hao Zhang, Li-li Li, Jing Zhang, Ning Guo, Xiao-hong Zhang

(Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education,

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract In the present paper cross-linked polyethylene/organic montmorillonite (XLPE/O-MMT) nanocomposites, in which organic montmorillonite (O-MMT) treated by octadecyl ammonium chloride as the inorganic nanophase, low density polyethylene (LDPE) as the matrix polymer, maleic anhydride grafted polyethylene (PEMA) as the compatibilizer and bis(1-(*tert*-butylperoxy)-1-methylethyl)-benzene (BIPB) as the crosslinking agent, are prepared by means of the two-step method, *i. e.* after melting intercalation process the cross-linking reaction is carried out chemically. The space charge properties of XLPE/O-MMT nanocomposites with different proportions of O-MMT are investigated by the pulsed electro-acoustic (PEA) method. The test results indicate that XLPE/O-MMT nanocomposites with certain content of O-MMT reveal the ability inhibiting space charge in different degrees compared with XLPE. In XLPE/O-MMT nanocomposites there is the lowest space charge amount when O-MMT content is 0.5 wt% ~ 1 wt% and the space charge amount increases with O-MMT content in the range of 3 wt% ~ 7 wt%, but it is still lower than that of XLPE. It is proved by the thermally stimulated current (TSC) tests that the TSC peak of XLPE/O-MMT nanocomposites shifts to higher temperatures compared with that of XLPE, and it is suggested that the traps depth increases. The area under TSC curve of XLPE/O-MMT nanocomposite with 1 wt% O-MMT is the least, accordingly its traps density is also the lowest; and the areas under TSC curves of XLPE/O-MMT nanocomposites increase with O-MMT content increasing, it means traps density enhancing. The test results of insulation electrical conductivity support the above conceptions further.

Keywords Cross-linked polyethylene/organic montmorillonite (XLPE/O-MMT) nanocomposites, Space charge, Thermally stimulated current (TSC), Insulation electrical conductivity