

# 低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料的电树枝生长特性

章华中, 李剑, 梁勇, 杨丽君, 廖瑞金, 赵玉顺

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044)

## Growth Properties of the Electrical Trees in LDPE-MMT Nano-composites

ZHANG Huazhong, LI Jian, LIANG Yong, YANG Lijun, LIAO Ruijin, ZHAO Yushun

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Analysis on growth properties of electrical trees in insulation material is an important approach to evaluate its performances. This paper presents a type of low-density polyethylene (LDPE)-montmorillonite (MMT) nano-composite prepared by a melting intercalation process. A testing system and specimens of electrical trees growing in the nano-composite were designed and made. Growth process and morphology of electrical trees in these specimens were observed in the experiments under a constant voltage stress. Growth rates and expansion coefficients of the electrical trees in the specimens were measured and statistical characteristics of partial discharges (PDs) in electrical trees were analyzed. The mechanism of electrical trees in the LDPE-MMT nano-composites restrained by MMT nano-particles was illustrated through analysis of crystallization behavior of the nano-composites. Experiments and analysis results showed that MMT nano-particles improve the crystallinity degrees and decrease the grain sizes of LDPE. Meanwhile, MMT nano-particles are helpful to reduce quantities and repetition rates of PDs in electrical trees of the nano-composite and to postpone inception and growth of the electrical trees.

**KEY WORDS:** low-density polyethylene (LDPE); montmorillonite (MMT); nano-composite; electrical tree; partial discharge; high voltage insulation technology

**摘要:** 绝缘材料的电树枝生长特性分析是评估其绝缘性能的重要方法之一。采用熔融插层复合法制备了一种低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料, 设计制作了纳米复合材料的电树

枝生长试样及实验系统, 在实验中观测了恒定电压下试样中电树枝生长过程及电树枝形态, 测量了试样中电树枝的生长速度与扩散系数, 分析了电树枝的局部放电统计特性。通过分析低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料的结晶行为, 说明了纳米蒙脱土对该纳米复合材料中电树枝的抑制机制。实验与分析结果表明: 纳米蒙脱土粒子有效提高了低密度聚乙烯的结晶度并减小了晶粒尺寸。同时, 纳米蒙脱土粒子有利于降低纳米复合材料电树枝局部放电量与放电重复率, 延缓了电树枝的引发与生长。

**关键词:** 低密度聚乙烯; 蒙脱土; 纳米复合材料; 电树枝; 局部放电; 高电压绝缘技术

## 0 引言

低密度聚乙烯(low-density polyethylene, LDPE)以其优良的介电和耐热性能被广泛应用于高压与超高压电力电缆中。随着电网电压等级的提高, LDPE 电缆的电树枝老化问题愈显突出。目前对电缆绝缘中电树枝化的抑制途径主要有<sup>[1]</sup>: 1) 改进电缆结构设计, 如采用半导体聚合物层来代替浸渍半导体带等; 2) 改进电缆制造工艺, 如采用 3 层共挤工艺以减少半导体屏蔽层和绝缘层间界面处的缺陷, 以及采用超净化技术减少杂质和微孔等; 3) 改进电缆材料配方, 如在聚乙烯中加入电压稳定剂以抑制电树枝引发等。

目前, 进行 LDPE 的纳米粒子改性研究, 研发具有树枝老化抑制能力的交联聚乙烯, 已成为国内外研究的热点<sup>[2-6]</sup>。由于纳米材料表面非配对原子多, 通过精细控制纳米粒子在聚合物基体中的分散和复合, 可提高聚合物的机械强度与韧性<sup>[7-9]</sup>、热稳定

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(50807054)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50807054).

性<sup>[10]</sup>、阻燃性<sup>[9-10]</sup>、介电强度<sup>[4,11]</sup>、耐受局部放电<sup>[12]</sup>等性能。

虽然 LDPE 纳米复合材料有诸多优点,但从 30 年前第 1 次制备出低密度聚乙烯-蒙脱土(montmorillonite, MMT)纳米复合材料<sup>[13-14]</sup>至今,相对于其他纳米粒子改性 LDPE 复合材料的研究,LDPE-MMT 纳米复合材料的研究始终鲜见报道<sup>[15]</sup>。且有限的 LDPE-MMT 纳米复合材料研究多集中于交流电场下复合材料的介电强度与空间电荷行为<sup>[2]</sup>以及其击穿特性与电导特性<sup>[16]</sup>,有关纳米 MMT 对复合材料的电树枝化生长特性影响机制的研究却非常少。

本文作者通过熔融插层复合法制备出 LDPE-MMT 纳米复合材料,采用针-板电极模型制作出 LDPE 试样与 LDPE-MMT 纳米复合材料试样,在工频交流电压下对纳米改性前后的试样进行电树枝生长实验,通过实时数字显微摄像系统观测电树枝生长过程,并对 LDPE 与 LDPE-MMT 试样的结晶状态、微观结构以及电树枝生长过程中的局部放电统计图谱作了对比分析,说明了 LDPE 与 LDPE-MMT 纳米复合材料的电树枝老化特性的差异,解释了 MMT 纳米粒子加入后对 LDPE 电树枝生长的抑制机制。

## 1 LDPE-MMT 纳米复合材料的制备

LDPE-MMT 纳米复合材料试样制备过程主要分为以下 3 个步骤:

1) 有机化蒙脱土的制备。将一定量的钠基蒙脱土与蒸馏水加入三口瓶中,在强力电动搅拌机下剧烈搅拌。十六烷基三甲基溴化铵与摩尔比为 1:1 的盐酸乙醇混合液充分混合,并取一定量于 70 °C 时滴入钠基蒙脱土悬浮液,搅拌 4~5 h 后取出溶液,沉淀 24 h,再将上层悬浮液在循环水式真空泵中过滤、洗涤至无 Br<sup>-</sup> 离子(采用 0.1 mol/L 的 AgNO<sub>3</sub> 溶液检验,至无白色沉淀物为止),放入真空干燥箱中干燥至恒重。干燥后研磨,用 200 目分样筛筛选出所需的有机化蒙脱土。

2) LDPE-MMT 纳米复合材料的制备。将密度为 0.924 g/cm<sup>3</sup> 的 LDPE 与有机化蒙脱土按比例在高混机充分混合后,混合料经双螺杆挤出机熔融剪切与切粒,获得粒状的 LDPE-MMT 纳米复合材料。将粒料在硫化温度为 150 °C,硫化压力为 15 MPa 的条件下用平板硫化机压制 35 min。分别得到 2 mm 与 4 mm 厚的平板试样。

将 4 mm 厚的平板试样在液氮中脆断,对脆断表面喷金处理,采用扫描式电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观测脆断表面微观形貌,图 1 为观测到的放大 50 000 倍的 LDPE-MMT 纳米复合材料的表面形貌。图中的亮区代表分散在聚乙烯中的蒙脱土粒子,暗区代表连续相中的聚乙烯基体。可以看出,有机化蒙脱土粒子以纳米尺度(100 nm 左右)较为均匀地分散在聚乙烯基体中,可认为通过熔融插层复合法制备的复合体系形成了 LDPE 基纳米复合材料。

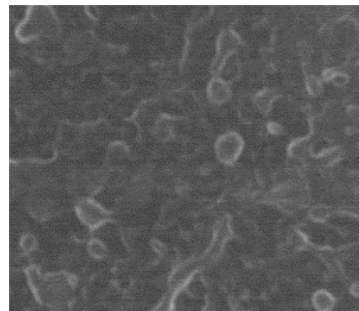


图 1 LDPE-MMT 纳米复合材料的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of LDPE-MMT nano-composite

3) 电树枝样品的制备。将 2 mm 厚的平板试样放置于恒温加热台加热至 170 °C,在橡胶态下采用能控制插针长度的插针机将不锈钢针电极缓慢插入试样,钢针需在试样制备前用丙酮清洗。为消除插针时产生的空气间隙和残存应力,试样在 120 °C 恒温保持 30 min 后,室温冷却后即即为所需试样。制备好的 LDPE-MMT 纳米复合材料的电树枝生长试样如图 2 所示。试样尺寸为 10 mm × 8 mm × 2 mm,针电极尖端曲率半径为 5 μm,针电极尖端距试样底面的距离为 3 mm,试样底面均匀涂有导电银浆,以保证铜板电极与试样底面的良好接触。实验前,同时制备出 LDPE 试样,其尺寸和电极布置与图 2 相同。

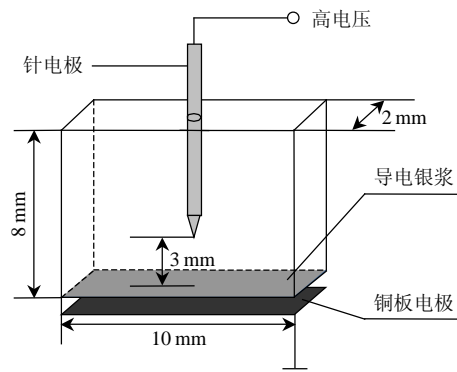


图 2 LDPE-MMT 纳米复合材料试样的结构与尺寸

Fig. 2 Structure and size of LDPE-MMT nano-composite specimen

## 2 电树枝生长实验

### 2.1 实验系统及方法

LDPE-MMT 纳米复合材料电树枝生长实验系统如图 3 所示<sup>[17]</sup>。实验系统采用显微数字摄像机与计算机构成电树枝实时显微观测单元，采用脉冲电流传感器与 LeCory 7100 数字示波器构成局部放电测量单元，脉冲电流传感器检测频带为 10 kHz~20 MHz，局部放电测量系统的灵敏度为 20 pC。为防止试样沿面闪络，试样浸于硅油中。实验中，施加工频交流电压，升压速度为 1 kV/30 s，升至 8 kV 保持，待电树枝引发。

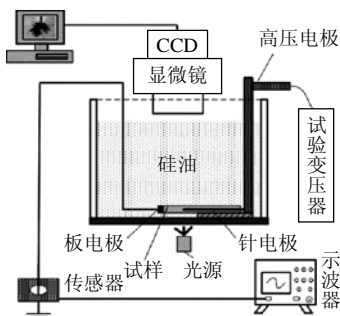


图 3 电树枝生长实验装置

Fig. 3 Experiment setup of electrical tree growth

### 2.2 实验结果

#### 2.2.1 电树枝生长形态

由于电树枝生长具有随机性与分散性，实验中选择了 10 组试样进行实验，并对电树枝生长过程进行观测和统计分析。图 4 为实验时间 180 min 内 1 组 LDPE 和 LDPE-MMT 试样的电树枝生长过程。图 4(a)显示，LDPE 试样中的电树枝在加压 6 min 后引发，且电树枝的发展由引发初期的稀疏枝状，逐步发展为纯枝状、细枝状、松枝状或较为稠密的枝状结构，树枝颜色较浅。图 4(b)显示，LDPE-MMT 试样中的电树枝加压 17 min 后引发，且随实

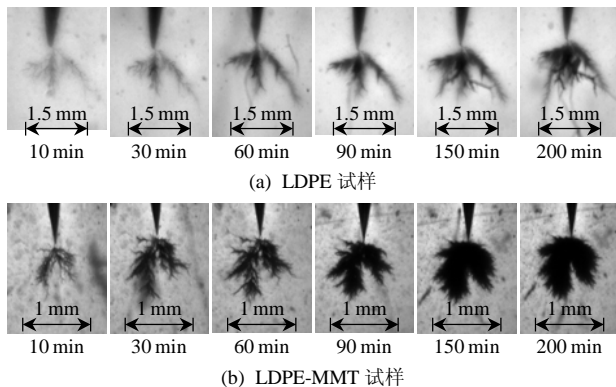


图 4 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样中的电树枝生长过程  
Fig. 4 Growth of electrical trees in the LDPE specimen and LDPE-MMT specimen

验时间增加，电树枝由枝状向丛林状逐步发展，发展后期电树枝通道碳沉积量大，树枝颜色深。通过实验观测统计，LDPE 试样的电树枝平均引发时间短于后者。

#### 2.2.2 电树枝生长长度与扩散系数

通过对比 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样的电树枝生长速度曲线(图 5)可以看出，在实验时间 180 min 内，LDPE-MMT 纳米复合材料的电树枝经过相同的生长时间沿电场方向的生长长度  $L$  明显小于 LDPE，且在这种纳米复合材料中的电树枝快速生长约 50 min 后较 LDPE 提前进入了滞长期(即生长过程中的生长停滞期)；而 LDPE 中电树枝引发后在经过 70 min 的快速生长后，生长的速度逐渐减缓，直到基本停滞生长约 80 min 后又开始了第 2 次较为快速的生长，但这时 LDPE-MMT 纳米复合材料的电树枝生长仍处于停滞状态，说明其电树枝的滞长期得到了有效延长。

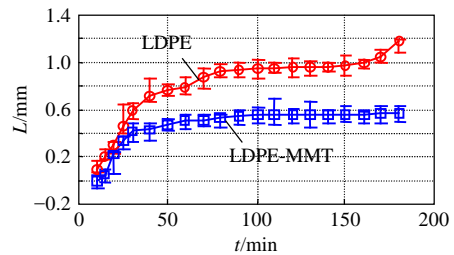


图 5 工频电压下 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样的电树枝生长速度

Fig. 5 Growth rate of electrical trees in the LDPE specimen and LDPE-MMT specimen under power frequency voltage

电树枝在引发起始阶段首先沿电场方向生长，然后产生侧枝，使电树枝密度增加。本文采用扩散系数  $K$  描述电树枝发展的稠密状态， $K$  定义为沿电场方向的电树枝长度  $L$  与沿电场法向的电树枝长度  $W$  之比。图 6 为 LDPE 与 LDPE-MMT 各 10 个试样的电树枝扩散系数测量结果的分布区间(最小值、最大值与平均值)。可以看出，LDPE-MMT 试样中电树枝的扩散系数始终显著低于 LDPE 试样中电树枝

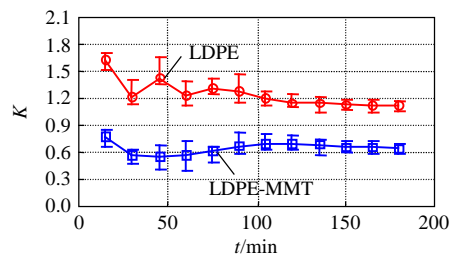


图 6 电树枝扩散系数  
Fig. 6 Expansion coefficients of electrical trees

的扩散系数,且 LDPE-MMT 试样中电树枝的扩散系数小于 1,结合图 4 可以得知,这是因为添加了有机化纳米 MMT 粒子后,LDPE-MMT 纳米复合材料中电树枝比 LDPE 材料中的电树枝更趋于发展为丛林状电树枝,其沿电场法向的生长速度超过了沿电场方向的生长速度。

### 2.2.3 电树枝生长过程中的局部放电发展规律

电树枝的引发及生长过程伴随着局部放电的发生,局部放电的剧烈程度又会影响电树枝的生长与结构<sup>[18-19]</sup>。图 7 为 2 种试样的电树枝放电的统计图谱。可以看出,LDPE 试样中电树枝放电的最大放电量  $q_{\max}$  达到 2000 pC,而 LDPE-MMT 试样中电树枝放电的最大放电量  $q_{\max}$  未超过 1000 pC;LDPE-MMT 试样中电树枝的平均放电量  $q_{\text{ave}}$  和放电重复次数  $n$  也显著低于 LDPE 试样中电树枝的平均放电量与放电次数。图 7 所示结果说明,由于有机化纳米 MMT 粒子的加入,削弱了电树枝放电的

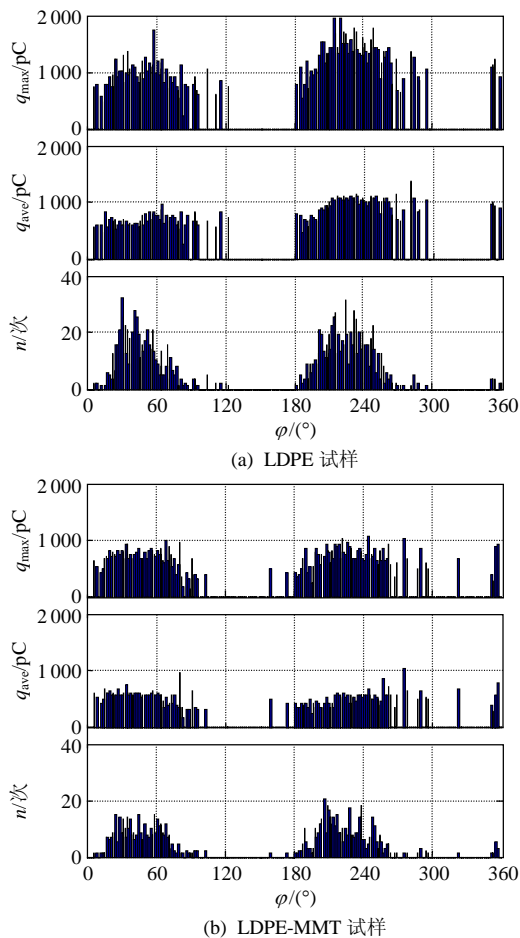


图 7 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样中电树枝局部放电统计图谱

Fig. 7 Statistical spectrum of partial discharges of electrical trees in the LDPE specimen and LDPE-MMT specimen

强度与放电重复率,从而降低了电树枝放电的放电能量,对抑制电树枝在 LDPE 中的生长具有积极作用。

## 3 分析与讨论

### 3.1 结晶状态对改性前后 LDPE 电树枝生长的影响

聚乙烯是由结晶区与无定型区构成的两相共存体,其结晶状态与电树枝的发展密切相关。由于纳米 MMT 粒子的加入可以改变 LDPE 的结晶状态,本文取称 8 mg 试样在升温速率为 7 °C/min,气流量为 50 mL/min 的条件下通过差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry, DSC) 对改性前后的 LDPE 结晶状态进行分析。

LDPE 和 LDPE-MMT 试样的 DSC 熔融曲线如图 8 所示,其中点 B 对应起始温度  $t_i$ ; 点 D 对应外推起始温度  $t_{e0}$ ; 点 A 对应峰顶温度  $t_p$ ; 点 C 对应中止温度  $t_f$ 。根据国际热分析及量热学联合会推荐的标准测定 2 种试样的熔融吸收峰。

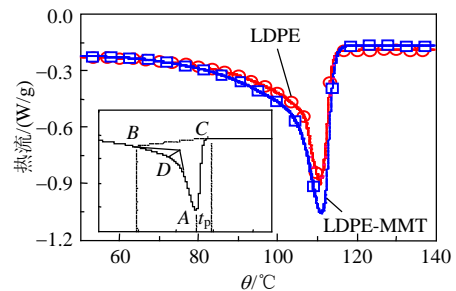


图 8 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样的 DSC 熔融曲线  
Fig. 8 DSC thermograms of the LDPE specimen and LDPE-MMT specimen (melting)

2 种试样的结晶度  $X_c$  计算式为

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_o} \quad (1)$$

式中:  $\Delta H_m$  为试样所测的熔融焓, J/g;  $\Delta H_o$  为完全结晶的试样熔融焓, 取 280 J/g。

2 种试样的 DSC 结晶曲线如图 9 所示,图中点 A 对应结晶峰  $\theta_p$  值,  $\Delta W$  为结晶峰的半高宽,点 B

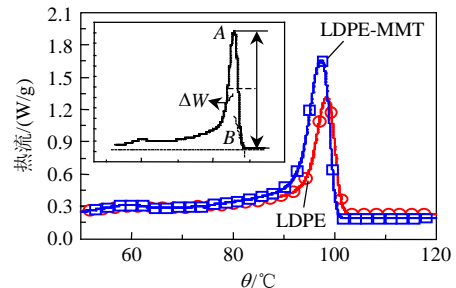


图 9 LDPE 试样和 LDPE-MMT 试样的 DSC 结晶曲线

Fig. 9 DSC thermograms of the LDPE specimen and LDPE-MMT specimen (crystallization)

对应结晶峰起始温度  $\theta_0$  (结晶峰高温侧和基线切线的交点)。

根据图 8 与图 9 计算得到改性前后 LDPE 的结晶参数如表 1 所示。由表 1 可知：1) LDPE-MMT 纳米复合材料的熔融热高于 LDPE，其结晶度高于 LDPE；2) LDPE-MMT 纳米复合材料的半高宽  $\Delta W$  以及  $\theta_0$  与  $\theta_p$  的差值小于 LDPE，即与 LDPE 相比，LDPE-MMT 中的晶粒尺寸较小且更加均匀。

表 1 2 种试样的结晶参数

Tab. 1 Crystallization parameters of the two specimens

结晶参数	LDPE 试样	LDPE-MMT 试样
熔融热/(J/g)	74.32	85.25
结晶度/%	26.54	30.44
$\theta_0/^\circ\text{C}$	102.71	100.81
$\theta_p/^\circ\text{C}$	98.47	97.40
$(\theta_0 - \theta_p)/^\circ\text{C}$	4.24	3.41
$\Delta W/^\circ\text{C}$	5.50	4.90

2 种试样在结晶参数上的差异会对电树枝的生长过程产生影响<sup>[17]</sup>，具体分析如下：

1) 由于 LDPE 无定形区与晶界区的场强比结晶区较高，电树枝易于在此区域生长。蒙脱土为无机纳米颗粒，在一定程度上可作为成核剂来提高 LDPE 本体结晶度。结晶度的提高，降低了无定型区所占的比例，导致电树枝易于生长的无定型区域的减少。同时，结晶度的提高，减小了分子间的自由体积<sup>[20-21]</sup>，使其自由行程变短，导致载流子的动能降低，载流子对 LDPE 分子链的轰击减弱，从而延缓了电树枝的引发与生长。

2) 由于 LDPE 的晶粒形态与微孔和缺陷有关，而微孔和缺陷易导致电树枝生长。LDPE-MMT 比 LDPE 试样的  $\Delta W$  较小，且其  $\theta_0 - \theta_p$  值也较低，说明纳米 MMT 粒子在 LDPE 分子链之间形成了很强的相互作用，导致材料的结晶更加完善，晶粒平均尺寸较小且晶粒尺寸分散性较低，可减少由大球晶排渣效应引起的微孔和缺陷数量，从而减少了引发电树枝的因素，延迟了电树枝的生长。

### 3.2 纳米 MMT 粒子片层形态对电树枝的影响

纳米 MMT 粒子在纳米尺度上呈片层形态，对 LDPE-MMT 纳米复合材料的电树枝具有阻隔效应。有机化纳米 MMT 粒子与聚乙烯熔体复合后的微观结构如图 10 所示，纳米 MMT 粒子以片层形态分散在 LDPE 基体中。当电树枝通道发展至片状纳米 MMT 粒子处时，电树枝继续生长受到纳米 MMT 粒子的阻隔，导致电树枝沿电场方向生长困难，生长路径沿片层 MMT 平行方向发展。因此，LDPE-

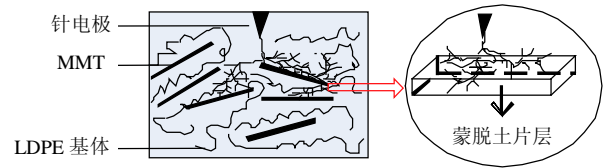


图 10 纳米 MMT 粒子对电树枝发展通道的影响  
Fig. 10 Influence of nano-MMT on growth path of electrical trees

MMT 中电树枝易于发展为丛林状结构。

## 4 结论

1) 通过熔融插层复合法制备出低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料，有机化蒙脱土纳米粒子较为均匀地分散在聚乙烯基体中，提高了纳米复合材料的结晶度，纳米复合材料的晶粒平均尺寸与晶粒尺寸分散性都低于低密度聚乙烯的值。

2) 与聚乙烯相比，低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料中的电树枝长度增长速度较慢，扩散系数降低，且较早进入滞长期，滞长期持续时间较长。

3) 与聚乙烯相比，低密度聚乙烯-蒙脱土纳米复合材料中的电树枝放电量及放电重复率均较小，纳米 MMT 粒子可抑制电树枝沿电场方向生长，导致电树枝易于向丛林状结构发展。

## 参考文献

- 李盛涛, 郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 11-12.  
Li Shengtao, Zheng Xiaoquan. Electrical trees in polymer[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 11-12(in Chinese).
- 党智敏, 亢婕, 屠德民. EAA 改性 XLPE 中空间电荷和电树、水树的关系[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 5-8.  
Dang Zhimin, Kang Jie, Tu Demin. Relationships of space charge accumulation with electrical and water treeing in XLPE modified by EAA[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 5-8(in Chinese).
- 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷机制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 158-162.  
Wang Xia, Wu Chaoyi, He Huaqin, et al. Study on mechanism of space charge in low density polyethylene modified by metallocene catalyzed polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 158-162(in Chinese).
- Guastavinol F, Dardano A, Ratto A, et al. Electrical characterization of polymer-layered silicate nanocomposites[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville, Tennessee, USA: IEEE, 2005: 175-178.
- Lauer J L, Shohet J L, Albrecht R M, et al. Control of uniformity of plasma-surface modification inside of small-diameter polyethylene tubing using microplasma diagnostics[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2005, 33(2): 791-798.
- Suh K S, Lee C R, Zhu Y T. Electrical properties of chemically modified polyethylenes[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(6): 681-687.

- [7] 赵世奇, 云会明. 刚性粒子增韧环氧树脂的研究[J]. 中国塑料, 1999, 13(9): 35-39.  
Zhao Shiqi, Yun Huiming. Study on rigid particle toughened epoxy resin[J]. China Plastics, 1999, 13(9): 35-39(in Chinese).
- [8] Gopakumar T G, Lee J A, Kontopoulou M. et al. Influence of clay exfoliation on the physical properties of montmorillonite/Polyethylene composites[J]. Polymer, 2002, 43(20): 5483-5491.
- [9] Jin Huaqian, Cun Yueguo, Hang Wang, et al. Fabrication and characterization of PE/MMT nanocomposites via copolymerization of ethylene and in situ formed  $\alpha$ -olefins[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(12): 4350-4355.
- [10] Zanetti M, Costa L. Preparation and combustion behaviour of polymer/layered silicate nanocomposites based upon PE and EVA[J]. Polymer, 2004, 45(13): 4367-4373.
- [11] Murata Y, Murakami Y, Nemoto M, et al. Effects of nano-sized MgO-filler on electrical phenomena under DC voltage application in LDPE[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville, Tennessee, USA: IEEE, 2005: 158-161.
- [12] 张晓虹, 高俊国, 张金梅, 等. PE/MMT 纳米复合材料的电击穿与耐局放性能[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2124-2128.  
Zhang Xiaohong, Gao Junguo, Zhang Jinmei, et al. Characteristics of electrical breakdown and partial discharge of polyethylene/montmorillonite nano-composites[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2124-2128(in Chinese).
- [13] Gaylord N G. Compatibilization of hydroxyl-containing fillers and thermoplastic polymers: USA, 3956230[P]. 1976-05-11.
- [14] Gaylord N G. Compatibilization of hydroxyl-containing fillers and thermoplastic polymers: USA, 4071494[P]. 1978-01-31.
- [15] Bergaya F, Mandalia T, Amigoue P. A brief survey on clay pen and nano-composites based on unmodified PE and organo-pillared clays [J]. Colloid & Polymer Science, 2005, 2005(7): 773-782.
- [16] 张晓虹, 高俊国, 郭宁, 等. 纳米蒙脱土对聚乙烯击穿和电导特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 129-134.  
Zhang Xiaohong, Gao Junguo, Guo Ning, et al. Influences of nano-montmorillonite on breakdown and electrical conductivity of polyethylene[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 129-134(in Chinese).
- [17] 李剑, 梁勇, 杨丽君, 等. 冷却介质对低密度聚乙烯电树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 32-37.  
Li Jian, Liang Yong, Yang Lijun, et al. Influence of cooling medium on electrical tree growing properties of LDPE[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 32-37(in Chinese).
- [18] Kaneiwa H, Suzuoki Y, Mizutani T. Partial discharge characteristics and tree inception in artificial simulated tree channels[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(6): 843-848.
- [19] Suwarno, Suzuoki Y, Mizutani T, et al. Partial discharge pattern changes due to electrical tree growth in polyethylene[J]. Trans. IEE of Japan, 1995, 115(11): 1121-1129.
- [20] Tanaka Y, Ohnuma N, Katsunami K, et al. Effects of crystallinity and electron mean-free-path on dielectric strength of low-density polyethylene[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1991, 26(2): 258.
- [21] Kolesov S N. The influence of morphology on the electric strength of polymer insulation[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1980, 15(5): 382.



章华中

收稿日期: 2010-03-15。

作者简介:

章华中(1982), 男, 博士研究生, 从事电工绝缘材料与高电压试验技术的研究, zhz102121@163.com;

李剑(1971), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高压电气设备状态监测、故障诊断、绝缘老化及新型电工绝缘材料研究, lijian@cqu.edu.cn;

梁勇(1983), 男, 硕士研究生, 从事电工绝缘材料及高电压测试技术研究, liangyong616@yahoo.com.cn。

(责任编辑 马晓华)