

# 多层介孔纳米 MgO/低密度聚乙烯复合材料的制备及其绝缘性能

巫运辉, 查俊伟, 王思蛟, 闫鑫达, 党智敏\*

(北京科技大学 高分子科学与工程系, 介电高分子材料与器件实验室, 北京 100083)

**摘要:** 塑料高压直流电缆在电力输运中, 绝缘层容易发生电子及空穴注入并局部积聚, 形成空间电荷包, 长期运行容易引发绝缘失效。为此, 抑制电子及空穴的注入、积聚, 防止空间电荷包的产生是制备塑料高压直流电缆的关键技术。通过制备多层介孔结构纳米 MgO, 采用低沸点溶剂法, 实现了纳米 MgO 在低密度聚乙烯 (LDPE) 中的均匀分散。研究了 1wt% 纳米 MgO/LDPE 复合材料的空间电荷行为、直流击穿强度、热刺激电流及介电特性。结果表明: 添加 1wt% 纳米 MgO 的 LDPE 在 70 kV/mm 电场下有效地抑制了空间电荷积聚, 提高了直流击穿强度, 降低了介电常数; 热刺激电流研究表明纳米 MgO 形成了新的陷阱, 有效捕获了载流子, 形成独立电场, 避免了局部有效电场, 形成新的势垒, 抑制了电极载流子的注入, 最终抑制了空间电荷积聚。

**关键词:** 多层介孔; 溶剂法; 空间电荷; 击穿强度; 介电性能

**中图分类号:** TM85 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)03-0503-07

高压直流输电因具有比交流输电传输容量大、损耗低、电缆附件结构简单和维护成本低等优点而备受重视。目前, 直流输电途径有 3 种: 充油电缆输电; 油浸纸电缆输电; 塑料直流电缆输电。充油电缆和油浸纸电缆由于成本高和维护难度大等缺点, 应用受到限制<sup>[1]</sup>。塑料直流电缆制备成本低、应用前景广, 在跨海输电和城市输电等领域。越来越多的国家, 尤其是发达国家, 如瑞典、意大利、德国、日本和美国等, 开始研发塑料高压直流电缆<sup>[2]</sup>。制备塑料高压直流电缆的关键难题之一为: 在直流输电过程中, 导体会向绝缘层注入电子和空穴, 而绝缘层极易发生电子或空穴积聚, 形成空间电荷包, 引发电场畸变, 严重时发生电击穿, 造成输电事故<sup>[3-6]</sup>。因此, 寻找有效途径抑制空间电荷积聚, 均化绝缘层电场分布, 抑制电树枝生长, 延长电缆的使用寿命, 是制备高性能塑料直流电缆亟待解决的技术瓶颈。

纳米复合技术的出现为制备高性能直流电缆带来了新的技术革命。纳米颗粒由于自身的介电特性、与基体形成的界面效应等, 可以改善复合材料

的绝缘电气性能。在此之前, 有机化学改性聚乙烯制备高压直流电缆是唯一实现商业化应用的直流电缆料<sup>[7-10]</sup>。其具有高的电气强度, 有效抑制了空间电荷积聚的能力并防止电树枝生长。但该技术为北欧化工一家所掌握, 处于技术和市场的双重垄断。中国是一个能源消耗大国, 能源安全, 尤其是电力安全至关重要。为此, 应该突破国外的技术封锁, 利用最新的纳米技术手段, 掌握制备高性能直流电缆料的核心技术。

大量研究证明, 交联聚乙烯 (XLPE) 中添加纳米颗粒可以有效抑制空间电荷积聚, 提高击穿强度和体积电阻率, 抑制电树枝生长, 从而改善绝缘材料电气性能<sup>[11-16]</sup>。这使得纳米颗粒/XLPE 复合材料越来越受关注, 人们称之为第 3 代绝缘材料<sup>[17-18]</sup>。目前, 日本科学家已成功通过在聚乙烯中添加少量的纳米 MgO, 制备出 250 kV/mm 及 500 kV/mm 的高压直流电缆, 正等待商业应用<sup>[19-20]</sup>。美国 DOW 公司也有商品化的纳米改性电缆料。但是, 对于纳米颗粒如何抑制空间电荷积聚的机理, 却还未有一致的结论。并且, 纳米颗粒本

收稿日期: 2015-04-07; 录用日期: 2015-05-11; 网络出版时间: 2015-05-28 10:48

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20150528.1048.006.html

基金项目: 国家自然科学基金(51207009); 国家“973”计划(2014CB239503); 北京市科技计划(Z13110300590000)

通讯作者: 党智敏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为介电高分子材料、高储能密度材料设计与制备。 E-mail: dangzm@ustb.edu.cn

**引用格式:** 巫运辉, 查俊伟, 王思蛟, 等. 多层介孔纳米 MgO/低密度聚乙烯复合材料的制备及其绝缘性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 503-509. WU Y H, ZHA J W, WANG S J, et al. Preparation and insulating electrical properties of multilayer mesoporous nano MgO/low density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 503-509 (in Chinese).

身结构特点对电场分布和电树枝生长等性能的影响,还有待进一步研究<sup>[21]</sup>。

目前,在研发纳米改性电缆料时,多数纳米颗粒是球形结构。但是,添加特殊结构的纳米颗粒,研究其对直流电缆料的电性能影响却很少。而特殊结构的纳米颗粒如何消散空间电荷、均化电场、抑制电树枝的生长等,是值得深入研究的问题。特殊结构的纳米颗粒复合聚乙烯产生的界面也不一样。例如:插层结构的蒙脱土与聚乙烯复合所形成的多层界面对于抑制电树枝发展有良好的效果。为此,研究特殊结构的纳米颗粒对聚乙烯的电性能影响,对于制备高性能直流电缆料有重要的研究价值。

本文通过水热反应,成功制备了具有多层介孔结构的纳米 MgO。使用低沸点溶剂法,将纳米 MgO 初步均匀黏附在低密度聚乙烯(LDPE)颗粒表面,然后通过哈克共混,最终制备出分散性较好的多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料。重点研究了多层介孔结构纳米 MgO 对 LDPE 在直流电场  $E_{DC} = 70 \text{ kV/mm}$  下的空间电荷行为,并运用热刺激电流(TSC)法研究了多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的陷阱特性,揭示多层介孔结构纳米 MgO 对空间电荷积聚的抑制特性。此外,还研究了多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的直流电气强度和介电特性。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验原料及药品

采用的实验原料及药品为:LDPE, LD200BW, 密度  $0.922 \text{ g/cm}^3$ , 熔体流动速率  $2.3 \text{ g/10 min}$  ( $190 \text{ }^\circ\text{C}/2.16 \text{ kg}$ ), 结晶度 64% (北京燕山石油化工公司); 硅烷偶联剂(KH550);  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、无水乙醇、NaOH(西陇化工)。

### 1.2 多层介孔纳米 MgO 的制备

以  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和无水乙醇为原料,采用水热反应法,按体积比为 1:4 的配比,调节溶液  $\text{pH} \approx 10$ ,置于水热反应釜中在  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  下反应 24 h,先合成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  纳米颗粒,然后分离、干燥。将得到的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  在 100、200、400  $^\circ\text{C}$  下分别煅烧 2 h 得到多层介孔纳米 MgO<sup>[22]</sup>。

### 1.3 多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的制备

LDPE 颗粒用乙醇清洗,并在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  下真空干燥 24 h,备用。纳米 MgO 用无水乙醇清洗,先在  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘干,然后在  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  下真空干燥 12 h,硅烷偶联剂 KH550 处理后,通过超声振荡,均匀分

散在甲苯溶剂中。然后将其与聚乙烯颗粒共混,  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  下干燥 12 h,这样纳米 MgO 均匀分散在聚乙烯颗粒表面。通过哈克 MINLAB 共混,温度为  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ,时间为 8 min,制备 MgO 含量为 1wt% 的多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料,共混工艺流程示意图如图 1 所示。使用平板硫化机制备测试薄膜样品,温度为  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ,压力为 15 MPa,保压时间为 6 min。

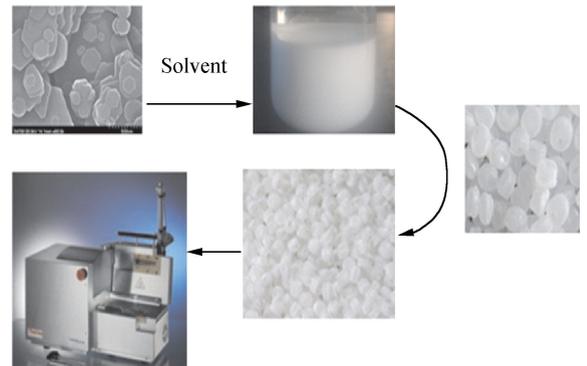


图 1 多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料共混工艺流程示意图

Fig.1 Schematic of blend technological process for multi-layer mesoporous nano MgO/LDPE composites

### 1.4 测试

多层介孔纳米 MgO 在 LDPE 中的分散程度通过扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S4700)获得。样品通过液氮淬断,观察其断面部位。

多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的空间电荷特性采用电声脉冲法(PEA)测量<sup>[22]</sup>。直流脉冲幅值为 0~1 kV,宽度为 15 ns;压电传感器为聚偏氟乙烯(PVDF),厚度为  $9 \mu\text{m}$ ;上电极为半导体电极,下电极为铝电极;空间电荷测试样品厚度为  $(250 \pm 6) \mu\text{m}$ ,在  $70 \text{ kV/mm}$  直流电场下加压 60 min。

采用球形电极测量样品的直流击穿性能。高压直流电源为 0~20 kV;加压速率为  $500 \text{ V/s}$ ;测试样品厚度为  $(30 \pm 8) \mu\text{m}$ 。为了防止空气气隙的击穿,测试夹具完全浸在硅油中。

热刺激电流测试:外加电场作用下,电子从负极向导带注入,这些电子被陷阱所捕获。当捕获的电子在外界给予足够的能量时,电子就会从陷阱中释放出来,再次激发到导带上,并在电场方向下迁移,在外部电路形成电流,这就是陷阱所捕获的载流子所引起的热刺激电流<sup>[23-24]</sup>。样品厚为 1 mm,在  $1 \text{ kV/mm}$  条件下极化 10 min,极化温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

测量范围为 $-80\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的介电性能分析采用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪测试, 频率范围为 $1\sim 10^5\text{ Hz}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 多层介孔纳米 MgO 的形貌

图 2 为采用水热法制备的多层介孔纳米 MgO 的 SEM 照片。可以看出, 所制得的 MgO 具有多层介孔结构, 粒径为 $200\sim 500\text{ nm}$ , 形貌为六边形。

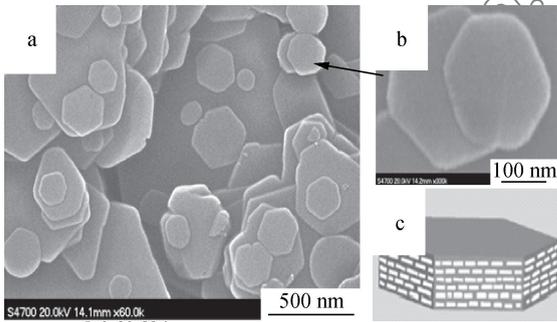


图 2 采用水热法制备的多层介孔纳米 MgO 的 SEM 照片 (粒径为 $200\sim 500\text{ nm}$ , 形貌为六边形)

Fig. 2 SEM photographs of multilayer mesoporous nano MgO by solvothermal method (particle diameter of $200\sim 500\text{ nm}$ , morphology of hexagon)

### 2.2 多层介孔纳米 MgO 在 LDPE 中的分散

图 3 为多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料 SEM 照片。可以看出, 纳米 MgO 在复合材料中分散均匀, 没有出现颗粒团聚现象。这表明使用低沸点溶剂法有效地使纳米 MgO 在 LDPE 中均匀分散, 有效地保证了后续的电性能测试。

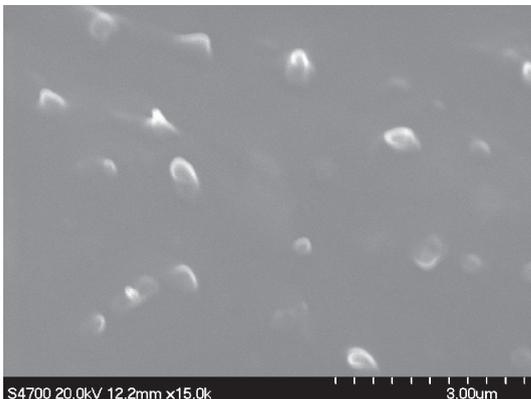
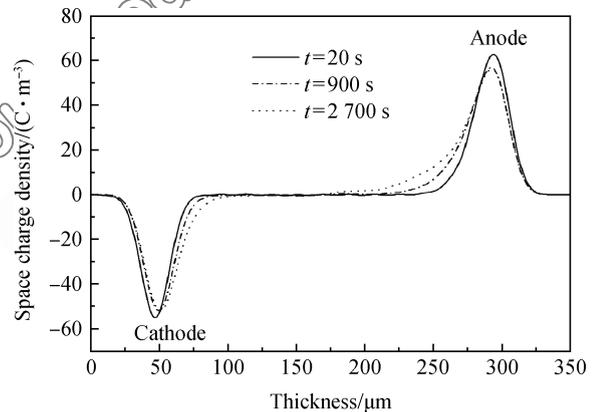


图 3 多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料 SEM 照片

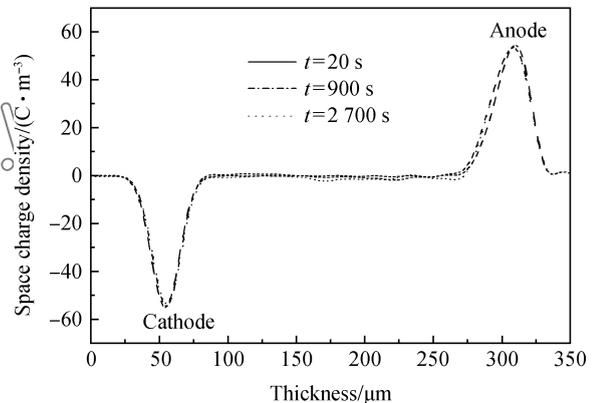
Fig. 3 SEM photograph of multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

### 2.3 空间电荷特性

图 4 为直流电场 $E_{\text{DC}} = 70\text{ kV}/\text{mm}$ 作用下 LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的空间电荷特性。图 4(a) 表明纯 LDPE 在 $70\text{ kV}/\text{mm}$ 直流电场下, 正极附近出现正极性空间电荷, 负极附近出现负极性空间电荷, 属于同极性注入。正极附近积聚的空间电荷主要是由电极注入的空穴积聚引起的, 并且随加压时间( $t$ )的延长, 空间电荷逐渐向材料内部积聚。而在负极附近出现的为负极性空间电荷, 由电极注入的电子积聚所引起, 并且注入的速度明显慢于正极的空穴注入。当载流子从电极注入到材料时, 便以跃迁或者隧道效应等方式向材料内部运输, 最终导致材料内部积聚大量空间电荷。结果是引发局部电场分布不均, 且随时间的延长, 电场畸变程度将更加严重, 产生电树枝的概率增大, 最终导致绝缘失效。



(a) LDPE



(b) Multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

图 4 直流电场 $E_{\text{DC}} = 70\text{ kV}/\text{mm}$ 作用下 LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的空间电荷特性

Fig. 4 Space charge characteristics of LDPE and multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites at direct current field $E_{\text{DC}} = 70\text{ kV}/\text{mm}$

然而,从图 4(b)中可以看出,添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 的复合材料在 70 kV/mm 直流电场下,正负电极附近没有发现电极注入的电子和空穴,可能是多层介孔纳米 MgO 改变了电极电子的逸出功,并有效地防止电子和空穴的注入。也可能是多层介孔 MgO 形成的陷阱,有效捕获了电子,使其失去向材料内部运输的能力。在材料内部,只出现少量因杂质电离引起的空间电荷,但随加压时间的延长,杂质离子并未发生迁移,说明纳米 MgO 形成的陷阱有效地捕获了杂质离子,使其失去迁移能力,从而抑制了异性空间电荷的产生。将进一步通过热刺激电流分析多层介孔纳米 MgO 抑制空间电荷积聚的机制。

### 2.4 击穿场强特性

通过 Weibull 分布来表征材料的击穿特性,累计失效概率为

$$P(E) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E}{E_0}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

式中: $E_0$  为特征电场; $E$  为实验值; $\beta$  为形状参数。

图 5 为 LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的直流击穿场强 Weibull 分布。可以看出,添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 的复合材料,击穿场强有明显的提高,说明多层介孔纳米 MgO 对 LDPE 提高直流击穿强度有一定效果。其原因可能是多层介孔纳米 MgO 与 LDPE 形成的界面层,有效地捕获了载流子,从而抑制其向材料内部的运输,并形成许多局部电场,防止有效电场的产生。并且,多层介孔结构有助于阻挡电树枝的生长,从

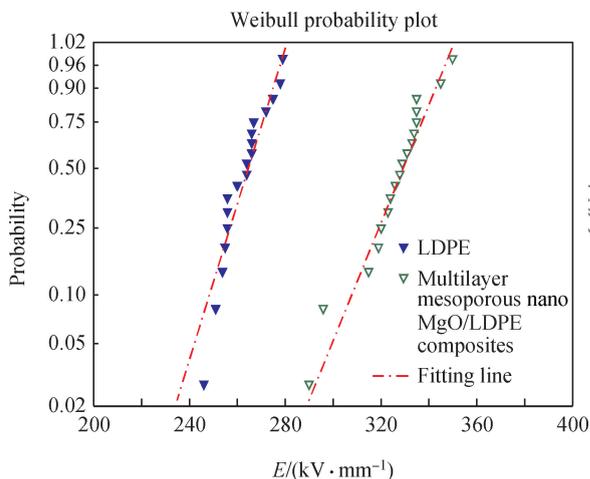


图 5 LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的直流击穿场强 Weibull 分布

Fig. 5 Weibull distribution of direct current breakdown strength for LDPE and multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

而提高其电击穿强度。表 1 为多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料直流击穿场强的 Weibull 参数。表 1 显示,添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 的复合材料特征击穿场强提高了 20%,而且多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的形状参数由纯 LDPE 的 9.5 提高到 11.4。

表 1 多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料直流击穿场强的 Weibull 参数

Table 1 Weibull parameters of direct current breakdown strength for multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

Sample	Weibull parameter	
	$E/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	$\beta$
LDPE	235	9.5
Multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites	285	11.4

### 2.5 热刺激电流

图 6 为 LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的热刺激电流。图 6(a)中显示纯 LDPE 在  $-80 \sim 80^\circ\text{C}$  温度范围内没有出现电流峰,此时电流峰始终出现在  $-0.025 \sim -0.050 \text{ pA}$  范围内。这可能是 LDPE 本身的陷阱所捕获的电子或者空穴。LDPE 本身的陷阱包括晶区缺陷、晶界缺陷和杂质引起的缺陷等。

在图 6(b)中,却有明显的电流峰存在,并且在  $10 \sim 60^\circ\text{C}$  出现了 1 个较大的电流峰,这说明添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 在 LDPE 中引发了新的陷阱,这些陷阱有效地捕获了载流子,并在热刺激下从陷阱中释放。这些陷阱是指由多层介孔纳米 MgO 与 LDPE 基体形成的大量界面区,以纳米颗粒为中心,依次为键合层、松散层,大量的载流子就束缚在该区域。在  $-80 \sim 10^\circ\text{C}$  区间,电流数值保持在  $-0.015 \sim -0.020 \text{ pA}$ ,说明在这个温度范围内不断有电子释放,最大电流峰也没有超过  $-0.035 \text{ pA}$ ,这说明添加多层介孔纳米 MgO 在一定程度上增加了 LDPE 本身缺陷捕获载流子的能力。综上,介孔结构纳米 MgO 在 LDPE 基体中形成了新的陷阱,可以有效地捕获载流子,通过式(2)计算其陷阱能级得到  $E_{\text{trap}} = 0.652 \text{ eV}$  为浅陷阱能级:

$$E_{\text{trap}} = \frac{2.47T_m^2 k}{\Delta T} \quad (2)$$

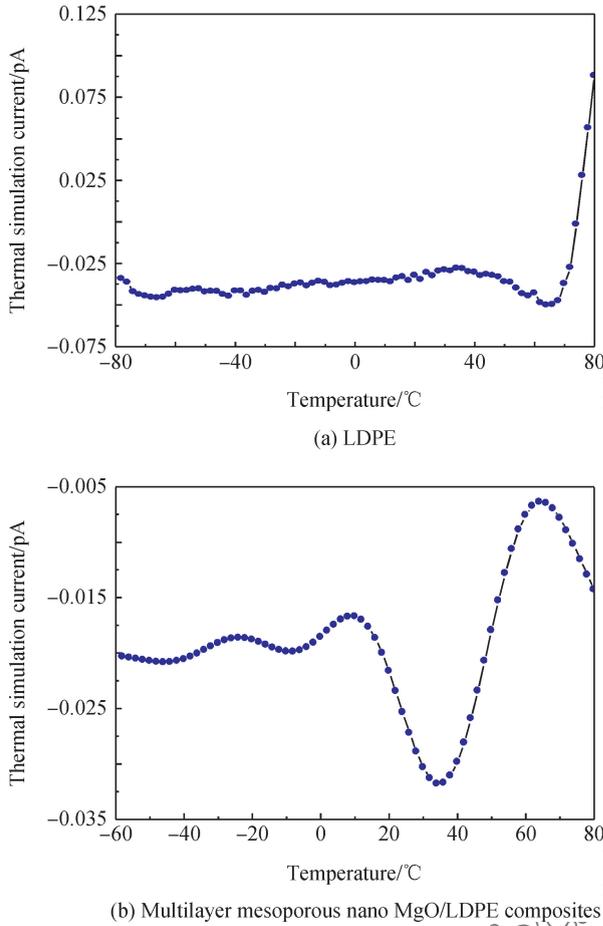


图6 LDPE和多层介孔纳米MgO/LDPE复合材料的热刺激电流

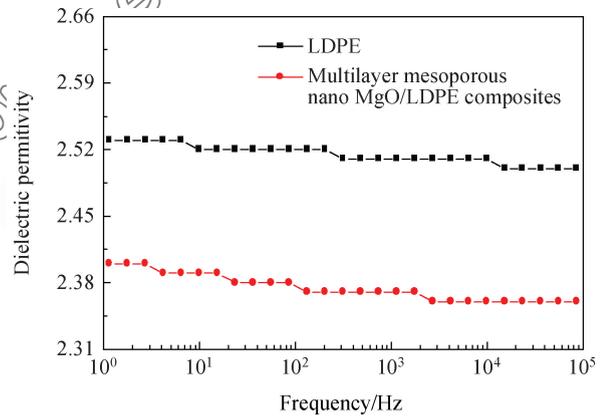
Fig. 6 Thermal stimulation currents of LDPE and multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

式中:  $E_{trap}$  为陷阱能级;  $T_m$  为电流峰处的温度;  $\Delta T$  为半峰宽温度;  $k$  为玻尔兹曼常数。

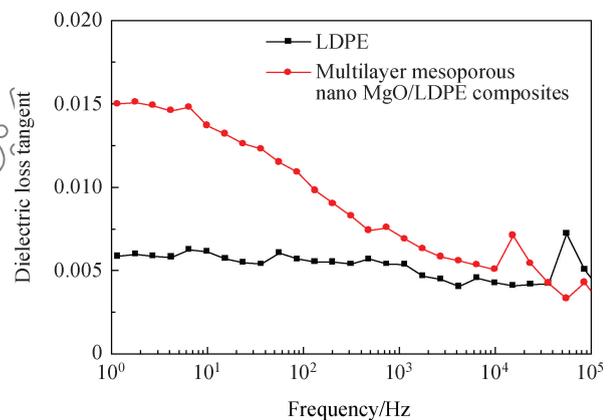
多层介孔纳米 MgO 与基体形成的大量界面区域内, 有效捕获电极注入的载流子和本身杂质离子。这样有效避免了载流子在材料某处缺陷大量积聚, 并与材料中没有载流子积聚的部位形成一个较大的电势, 形成一个具有破坏性的电场。多层介孔结构与普通的纳米颗粒相比, 其可以与 LDPE 基体形成更大的界面区域, 而这个界面区域越大, 其均化电场的能力就越大。最终, 通过多层介孔纳米 MgO 在材料中形成的无数个陷阱, 各个陷阱凭借多层介孔结构形成的强大界面区域捕获载流子, 在材料中形成无数个局部小电场, 起到均化电场的作用。同时, 这些局部小电场各自形成了势垒, 从而有效抑制了载流子的注入, 达到抑制空间电荷的目的。

## 2.6 介电性能

LDPE 和多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的介电性能如图 7 所示。图 7(a) 中, 添加 1wt% 多层介孔 MgO 降低了复合材料的介电常数, 这可能是因为多层介孔结构的特点, 导致复合材料的密度降低。也可能是多层介孔结构形成的界面区域, 影响了某些杂质离子的极化。此外, 添加了纳米颗粒的多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料和 LDPE 材料在低频和高频下非常稳定, 说明多层介孔纳米 MgO 没有影响其介电稳定性, 这可以满足其在宽频下的使用。对于绝缘材料, 低介电常数具有低的极化率, 在高电场下, 极化率越低, 其绝缘特性越好。图 7(b) 中, 添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 的复合材料在低频下的介电损耗偏高, 高频下没有明显变化。总体上, 多层介孔结构纳米 MgO 对 LDPE 介电损耗没有产生大的影响, 保证了其在高压运行下的安全性。



(a) Dielectric permittivity



(b) Dielectric loss tangent

图7 LDPE和多层介孔纳米MgO/LDPE复合材料的介电性能

Fig. 7 Dielectric properties of LDPE and multilayer mesoporous nano MgO/LDPE composites

### 3 结 论

(1) 通过水热法成功制备了具有多层介孔结构的纳米 MgO, 粒径为 200 ~ 500 nm, 形貌为六边形。

(2) 经低沸点溶剂法初次分散和哈克双螺杆挤出机再次分散, SEM 照片显示多层介孔纳米 MgO 均匀地分散在 LDPE 中。

(3) 添加 1wt% 多层介孔纳米 MgO 的复合材料在较高场强下有效抑制了电子及空穴注入, 阻止隧道效应的发生, 抑制了空间电荷的产生。

(4) 1wt% 多层介孔纳米 MgO 填充于 LDPE 后其直流击穿场强提高约 20%, Weibull 分布形状参数提高到 11.4。

(5) 多层介孔纳米 MgO 在 LDPE 中形成的陷阱能级为  $E_{\text{trap}} = 0.652 \text{ eV}$ , 陷阱凭借多层介孔结构形成的强大界面区域捕获载流子, 形成无数个以纳米颗粒为中心的独立电场, 防止了局部有效电场的出现, 同时各个独立电场形成势垒并阻塞通道, 从而抑制了空间电荷的形成。

(6) 1wt% 多层介孔纳米 MgO 降低了 LDPE 的介电常数, 其多层介孔纳米 MgO/LDPE 复合材料的介电特性满足作为高性能绝缘材料的使用条件。

### 参考文献:

- [1] 李伟. 两种油浸纸直流电缆热老化下的空间电荷特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
LI W. Space charge characteristics of two kinds of oil paper dc cables under different thermal aging time[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011 (in Chinese).
- [2] 陈铮铮, 赵健康, 欧阳本红, 等. 直流与交流交联聚乙烯电缆料绝缘特性的差异及其机理分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2644-2652.  
CHEN Z Z, ZHAO J K, OUYANG B H, et al. Difference in insulation characteristics and mechanism between AC and DC XLPE cables material[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2644-2652 (in Chinese).
- [3] 程羽佳, 郭宁, 王若石. 纳米 ZnO 和纳米 MMT 对低密度聚乙烯介电性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 94-100.  
CHENG Y J, GUO N, WANG R S. Effects of nano-ZnO and nano-montmorillonite properties of low density polyethylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 94-100 (in Chinese).
- [4] JU S, ZHANG H, CHEN M J, et al. Improved electrical insulating properties of LDPE based nanocomposite; Effect of surface modification of magnesia nanoparticles[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 66: 183-192.
- [5] TAKEKAWA T, HOZUMI N, SUZUKI H, et al. Space charge behavior in full-size 250 kV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 28-39.
- [6] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.  
ZHOU Y X, ZHAO J K, LIU R, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612 (in Chinese).
- [7] HOZUMI N, TAKADA T, SUZUKI H, et al. Space charge behavior in XLPE cable insulation under 0.2-1.2 MV/cm dc fields[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(1): 82-90.
- [8] NORIKAZU F, YOSHIMICHI O. Comparison of nano-structuring effects in polypropylene among four typical dielectric properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 671-677.
- [9] HUANG X Y, LIU F, JIANG P K. Effect of nanoparticle surface treatment on morphology, electrical and water treeing behavior of LLDPE composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1697-1704.
- [10] 吴振升, 叶青, 周远翔, 等. 表面修饰纳米 SiO<sub>2</sub>/XLPE 的导电电流和空间电荷特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3268-3275.  
WU Z S, YE Q, ZHOU Y X, et al. Conduction current and space charge characteristics of SiO<sub>2</sub>/XLPE nanocomposites with nanoparticle surface modification[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3268-3275.
- [11] YAMANAKA T, MARUYAMA S, TANAKA T. The development of 250 kV/±500 kV XLPE cable in consideration of the space charge accumulation[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya: [s. n.], 2003: 689-694.
- [12] KAZUKI T, HIROSHI S, MAKOTO H, et al. Research and development of ±250 kV DC XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 7-16.
- [13] ZHOU Y X, ZHANG L, SHA Y C, et al. Numerical analysis of space charge characteristics in low-density polyethylene nanocomposite under external DC electric field[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1813-1820.
- [14] ZHANG L, ZHOU Y X, TIAN J H, et al. Experiment and simulation of space charge suppression in LDPE/MgO nanocomposite under external DC electric field[J]. Journal of Electrostatics, 2014, 72(4): 252-260.
- [15] ZHANG L, ZHOU Y X, HUANG M, et al. Effect of nanoparticle surface modification on charge transport characteristics in XLPE/SiO<sub>2</sub> nanocomposites[J]. IEEE Transactions on

- Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 424-433.
- [16] MIZUTANI T. Electrical properties of polymers: Space-charge behaviour in insulating polymers under high-voltage direct current [J]. *Polymer International*, 2002, 51(11): 1164-1171.
- [17] YANG C, PATRICIA C I, KARIM Y. The future of nano-dielectrics in the electrical power industry [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(5): 797-807.
- [18] 吴锴, 陈曦, 王霞, 等. 纳米粒子改性聚乙烯直流电缆绝缘材料研究 [J]. *高电压技术*, 2013, 39(1): 8-16.  
WU K, CHEN X, WANG X, et al. Modified low density polyethylene by nano-fills as insulating material of DC cable [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(1): 8-16 (in Chinese).
- [19] 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的机理研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 158-162.  
WANG X, WU C Y, HE H Q, et al. The mechanism of space charge suppression in LDPE modified by metallocene [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 158-162 (in Chinese).
- [20] TASTUO T, YUJI H, YASUHIRO T, et al. Space charge trapping in electrical potential well caused by permanent and induced dipoles for LDPE/MgO nanocomposite [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(1): 152-160.
- [21] 周宏, 张玉霞, 范勇, 等. 片状纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/环氧树脂复合材料的制备及性能 [J]. *复合材料学报*, 2014, 31(5): 1142-1147.  
ZHONG H, ZHANG Y X, FAN Y, et al. Preparation and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosheets/epoxy composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(5): 1142-1147 (in Chinese).
- [22] LING Z X, ZHENG M B, DU Q L. Synthesis of mesoporous MgO nanoplate by an easy solvothermal-annealing method [J]. *Solid State Sciences*, 2011, 13(12): 2073-2079.
- [23] HOLE S. Behind space charge distribution measurements [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(4): 1208-1214.
- [24] TU Y P, WANG Q, HE J, et al. TSC characteristics of AC aged ZnO varistors [J]. *Technological Sciences*, 2013, 56(8): 677-682.

## Preparation and insulating electrical properties of multilayer mesoporous nano MgO/low density polyethylene composites

WU Yunhui, ZHA Junwei, WANG Sijiao, YAN Hongda, DANG Zhimin\*

(Laboratory of Dielectric Polymer Materials and Devices, Department of Polymer Science and Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Polymer high-voltage direct current cables accompany with the injection of electrons and holes of insulating layer which accumulated in local polymer will form space charge packet and trigger insulation breakdown in electric power transmission. Therefore, the key technology of preparing polymer high-voltage direct current cables is to suppress the injection and accumulation of electrons and holes, prevent the formation of space charge packet. By preparing the multi-layer mesoporous structure nano MgO, uniform dispersion of nano MgO in low density polyethylene (LDPE) was realized by using the low boiling point solvent method. The characteristics of space charge, direct current breakdown strength, thermally stimulated current and dielectric properties of 1wt% nano MgO/LDPE composites were studied. The results reveal that adding 1wt% nano MgO into LDPE can effectively suppress space charge accumulation under the 70 kV/mm electric field, improving direct current breakdown strength, decreasing the dielectric permittivity. Thermally stimulated current research shows that nano MgO induces new traps, effectively captures charge carriers and independent electrical field forms, avoids local effective electrical field, forms a new barrier, suppresses the injection of electrode carrier, and suppresses space charge accumulation eventually.

**Keywords:** multilayer mesoporous; solvent method; space charge; breakdown strength; dielectric properties