

# 纳米 ZnO/低密度聚乙烯复合材料的介电特性

王霞, 成霞, 陈少卿, 郑晓泉, 屠德民

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

## Dielectric Properties of the Composites of Nano-ZnO/Low-density Polyethylene

WANG Xia, CHENG Xia, CHEN Shao-qing, ZHENG Xiao-quan, TU De-min

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),  
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Nanocomposite has been applied widely in dielectrics and electrical insulation due to its extraordinary properties in mechanics, dielectric properties, and so on. Polyethylene is widely used as an insulation material, the modification of polyethylene by nano-filler will has great researching value and engineering significance. Dielectric properties were studied in samples of low density polyethylene (LDPE) to which nano-sized ZnO particles and a dispersant had been added. It is found that nano-filler can effectively improve the volume resistivity and AC breakdown strength, especially in the 5% ZnO composite. At the same time, the nano-filler increased the remaining charges but effectively restricted the homocharge injection from electrode. Due to the interfacial specificity, the permittivity decreased firstly and then increased with the increase of ZnO content; whereas the loss tangent increased linearly. The improvement in dielectric properties is attributed to the interface or interaction zone between ZnO nanoparticle and LDPE molecule, which acts as deep traps in bulk.

**KEY WORDS:** polyethylene; nano-ZnO; space charge; dielectric properties

**摘要:** 聚合物纳米复合材料因其优良的介电、机械等性能在电介质领域得到广泛的应用。纳米粒子改性聚乙烯基绝缘材料具有很好的研究价值及工程意义。该文主要研究了表面经分散剂处理的纳米 ZnO 粒子添加剂与低密度聚乙烯(LDPE)共混物的介电特性。结果表明 5% 含量的纳米 ZnO 添加剂能有效提高聚乙烯基复合材料的体积电阻率和交流击穿强度。同时纳米添加剂虽增加了体内的残余电荷,但能有效抑制电极同极性电荷的注入。另外由于聚合物纳米复合材料的界面特异性,使得介电常数随着纳米 ZnO 含量的增加呈先减小后增大趋势,而损耗值却线性增加。纳米 ZnO/聚乙烯复合材料介电性能提高归因于纳米粒子与聚乙烯分子间类同于深陷阱的界面效应。

**关键词:** 聚乙烯; 纳米 ZnO; 空间电荷; 介电特性

## 0 引言

国内外电力设备正朝着电压高、体积小、重量轻和高可靠性的方向发展,但其运行过程中的绝缘老化现象一直困扰着电气绝缘工程人员。实验已证明,当绝缘聚合物的工作电场强度达到击穿电场强度的十分之一时,长时间工作的电力设备绝缘中会引起树枝化,最后导致绝缘击穿<sup>[1]</sup>。另外,随着超高压、特高压输变电系统的发展,我国开发与研制 500 kV 超高压交联聚乙烯(XLPE)电缆是必然的选择。因此,寻找高效、耐久的抗老化添加剂,以便进一步减薄电缆的绝缘厚度,提高聚合物绝缘的击穿强度和延长电缆使用寿命,对降低电缆的制造成本具有明显的经济效益和实用价值。

为了能够延长聚合物绝缘的使用寿命和提高电力设备运行的可靠性,国内外学者做了大量的研究工作,并提出了许多理论。主要的研究工作都集中在往聚烯烃基体中添加某种添加剂,来减少聚合物体内陷阱深度、改变结晶形态或增加电导以提高载流子的迁移率<sup>[2-4]</sup>。其目的都是降低聚合物中电子或空穴在入陷和复合过程中产生的破坏聚合物分子链的热电子的概率,从而提高聚合物的使用寿命。但电气绝缘强度或寿命的提高是建立在损失某些材料性能(绝缘电阻、热稳定性和机械性能等)基础之上。同时添加剂与基体形成的微观界面使得添加剂易于向基体表面渗透和分离,其长期工作稳定性值得怀疑。随着纳米技术的出现,这方面的矛盾有望得到解决。目前,纳米技术在电介质领域的应用已得到了初步的研究。研究表明:添加少量的无机纳米粒子,不仅能提高聚合物的力学性能,而且

还可以改善聚合物的介电性能,或者获取某些其他特殊性能。如纳米 $MgO$ <sup>[5]</sup>、纳米蒙脱土<sup>[6]</sup>、纳米 $SiO_2$ <sup>[7]</sup>、纳米 $SiO_x$ <sup>[8]</sup>等与低密度聚乙烯(LDPE)复合来提高LDPE的介电特性(体积电阻率和击穿强度等)。对于纳米粒子在聚合物基体的作用机理,美国学者提出纳米/聚合物复合体系的界面特异性<sup>[9]</sup>及日本学者提出的多壳模型<sup>[10]</sup>,对纳米技术在电介质学科的应用具有一定的指导意义。

纳米ZnO的尺寸介于1~100 nm,具有小尺寸效应,表面效应,宏观量子隧道效应,久保效应等许多宏观颗粒所不具备的奇特性质。常用作抗菌剂、紫外线屏蔽剂、光催化剂、传感器、导电材料、压电材料、信息存储材料、隐身材料、节能材料等。由于质量轻、颜色浅、性能好、可塑性较强,它的应用研究渐渐引起了大家的关注。已有学者用纳米ZnO粒子与聚乙烯共混来研究聚乙烯基塑料的抗光老化性能<sup>[11]</sup>,或机械性能<sup>[12]</sup>,或其介电频谱的变化<sup>[13]</sup>,但由于其大剂量的加入,并不适用于聚合物绝缘学科的应用。本文作者着重研究了少量(0.5%~8%)粒径约50~60 nm的纳米ZnO与LDPE共混物的介电特性(体电荷分布特性、体积电阻率、介电频谱特性及击穿强度),以探讨纳米ZnO粒子改性聚乙烯电缆料介电特性的可行性及作用机理。

## 1 试验方法

### 1.1 偶联剂的选用及作用机理

DZ-1型单烷氧基型钛酸酯偶联剂适于处理表面带有羟基、羧基的无机填料,如ZnO。DZ-1与弱极性材料相容性好,与聚乙烯本体具有很好的亲和力。通过它的烷氧基直接和填料表面所吸附的羟基进行化学作用而偶联。作用机理如图1<sup>[14]</sup>所示。

图2所示为钛酸酯偶联剂处理的纯LDPE、纳米ZnO粒子和纳米ZnO/LDPE复合材料的傅里叶红外光谱图。由图中可见,纳米ZnO粒子经钛酸酯偶联剂表面处理后,在 $1559\text{ cm}^{-1}$ 和 $2855\text{ cm}^{-1}$ 出现有机钛酸酯基 $Ti-O$ 特征吸收峰,在 $1385$ 、

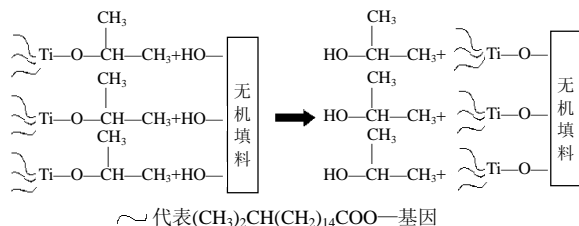


图1 钛酸酯偶联剂与纳米ZnO作用示意图

Fig. 1 Summary of the chemical-route for the attachment of titanate coupling agent to the surface of nano-ZnO

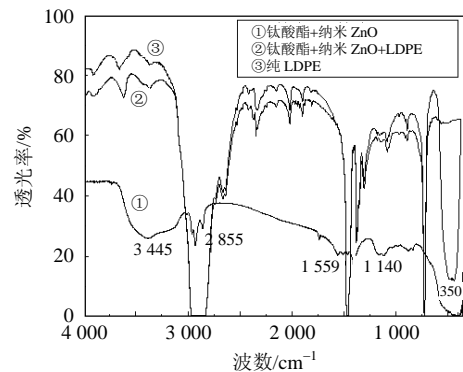


图2 纯LDPE、纳米ZnO及纳米ZnO/LDPE复合材料的傅里叶红外光谱图  
Fig. 2 FTIR spectra of nano-ZnO/LDPE composite, nano-ZnO particle and pure LDPE

$1463$ 、 $1516\text{ cm}^{-1}$ 出现 $C-H$ 特征吸收峰,在 $2860\sim 2960\text{ cm}^{-1}$ 出现 $-CH_2-CH_2-$ 特征吸收峰,它们是钛酸酯偶联剂所特有的吸收峰。 $1140\text{ cm}^{-1}$ 酯类特征吸收峰的出现,表明纳米ZnO粒子表面连接上钛酸酯偶联剂。表面改性过的纳米ZnO粒子与LDPE的复合材料试样的光谱中,可见3个明显的聚乙烯(PE)特征吸收谱带: $720\text{ cm}^{-1}$ ,  $1378\sim 1463\text{ cm}^{-1}$ ,  $2860\sim 2970\text{ cm}^{-1}$ 。与纯LDPE吸收光谱相比,除 $350\text{ cm}^{-1}$ 出现较大的ZnO特征吸收峰外,基本相同。

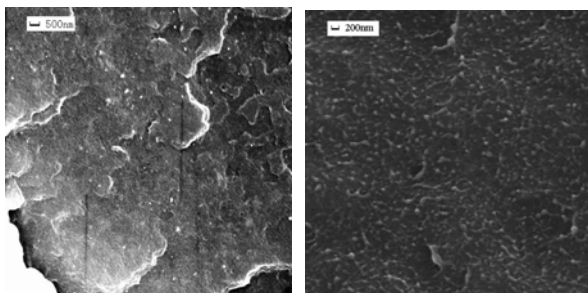
钛酸酯偶联剂具有长链结构的一端与聚乙烯基团相同,相容性较好,可与聚乙烯分子化学交联或物理缠结,从而使无机填料与有机高聚物的结合得到改善。另外, $3445\text{ cm}^{-1}$ 处明显的羟基吸收特征峰基本消失了,这说明复合材料的制备过程中,纳米ZnO表面的羟基和氢原子形成了水分子,从复合材料中挥发出去。

### 1.2 试样的制备

基料选取。基料为大庆产18D低密度聚乙烯(LDPE),密度分布为 $0.910\sim 0.925\text{ g/cm}^3$ 。纳米添加剂选用浙江鸿晟纳米有限公司生产的粒径约为50 nm的纳米ZnO粉末。

钛酸酯偶联剂表面改性纳米ZnO粒子。首先将纳米ZnO粉体置于真空烘箱中干燥2 h;其次取干燥后30 g纳米ZnO粉体溶于环己烷溶液中,并加入少量去离子水以促进纳米ZnO的水解。同时将约1.2 g单烷氧基型钛酸酯偶联剂溶于环己烷溶液中,搅拌均匀后加入纳米ZnO/环己烷混合溶液中。将此混合溶液用电力搅拌机333 K温度下搅拌2 h,再用超声波分散仪分散2 h,然后置于真空烘箱中393 K下抽真空干燥24 h,最后碾磨得到经钛酸酯偶联剂表面处理过的粒径约为50 nm的纳米ZnO粒子。

母料熔体混合法。取 24 g 的 LDPE 于 353 K 温度下溶于对二甲苯溶液中, 然后将 6 g 表面处理过的纳米 ZnO 粒子加入到 LDPE/对二甲苯溶液中, 温度保持 353 K 下, 用电力搅拌机搅拌 2 h, 使得纳米 ZnO 粒子在聚乙烯中分散均匀。随后将制备的混合液置于烘箱中(10<sup>2</sup> Pa, 393 K)脱溶剂, 从而制得纳米 ZnO 粒子浓度为 20% 的纳米 ZnO/LDPE 复合材料。以此作为母料, 再加入一定量的 LDPE 稀释 ZnO (最终得到浓度分别为 0.5%, 1%, 3%, 5%, 8% 的纳米 ZnO/聚乙烯复合材料), 在 383 K 的流变仪混炼均匀, 最后在 393 K 的平板硫化机, 压力为 10 MPa 下热压成 10 cm × 10 cm × 0.4 mm 和 10 cm × 10 cm × 0.1 mm 的薄片及薄膜试样, 压制时间为 10 min。最后将各种试样置于烘箱中于 353 K 温度下热处理 8 h, 消除试样压制过程中压力和冷却速度不同对结晶形态的影响。图 3 所示分别为 3% 和 8% 含量的纳米 ZnO/LDPE 复合材料的扫描电镜照片。由图中可以看出, 纳米 ZnO 粒子均匀分散于聚乙烯体内, 在 3% 复合材料中纳米 ZnO 粒径约为 50 nm 左右, 并隐约可见少量大粒径(100 nm 左右)的 ZnO



(a) LDPE+3% 纳米-ZnO

(b) LDPE+8% 纳米-ZnO

图 3 纳米 ZnO/LDPE 复合材料的扫描电镜(SEM)照片

Fig. 3 SEM photograph of LDPE/ZnO nanocomposite

粒子。而高含量 8% 复合材料中大粒径 ZnO 粒子较多。这表明纳米含量的增多, 纳米粒子的团聚作用越明显。

### 1.3 空间电荷测量

采用电声脉冲法(PEA)<sup>[15]</sup>测量薄片试样中空间电荷分布。直流电源 0~30 kV, 脉冲宽度 20 ns, 幅值 0~1 kV。压电传感器(PVDF)薄膜厚度为 30 μm。以金属铝作为测量系统上、下电极, 声耦合剂是硅油。试验采用阶梯升压方式, 即分别在 10、30、50 kV/mm 场强下, 测量加压 30 min 及短路 30 s, 1、10 及 20 min 后的空间电荷分布。

### 1.4 介电特性

工频交流击穿场强。把试样厚度约 0.1 mm 的试样夹在直径 16 mm 球-球电极中, 为防止空气击穿,

将试样和电极浸入硅油中, 工频交流电压以 2 kV/s 速度升压至试样击穿。试验结果取 10 个试样击穿场强的平均值并计算标准偏差。

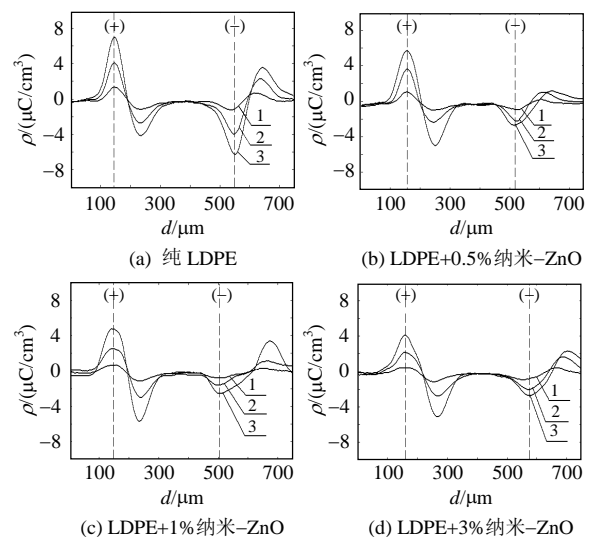
体积电阻率。体积电阻率的测量采用 Keithley Model 6517 A 高阻计, 试样置于两导电橡胶电极间, 电极直径 50 mm, 外施场强 1 kV/mm。记录短路 20 min 后体积电阻率的测量值。

介电频谱: 介电频谱测量采用德国产 Concept 80 宽带介电频谱测试仪, 本试验频率测试范围为 1 Hz~1 MHz。

## 2 试验结果

图 4 为纯聚乙烯试样及纳米 ZnO/LDPE 复合试样在不同场强(10, 30, 50 kV/mm)作用 30 min 后的空间电荷分布图。图中虚线处为电极位置, 左侧为正电极, 右侧为负电极。从图中可见: 随着外施电压等级的上升, 各试样电极界面及试样体内的空间电荷量均增大, 正电极附近的异性空间电荷逐渐增多, 且靠近正电极处的负极性电荷随纳米 ZnO 粒子含量的增加逐渐增多。

图 5 为各试样在不同电压等级下预压 30 min 后短路不同时间(30 s, 1、10、20 min)的空间电荷分布曲线。图中虚线仍代表电极位置, 左侧为正, 右侧为负。由图中可见在低场强(10, 30 kV/mm)预压短路后残余电荷较少, 而在 50 kV/mm 预压短路后各试样体内有较多的残余电荷分布。同时随着短路时间的增加各试样残余空间电荷量逐渐减少; 另外, 随着 ZnO 粒子含量的增加残余电荷增多且衰减速度逐渐降低, 在 5% ZnO 含量时残余电荷最多。这说明纳米粒子表面效应使得 ZnO 粒子和 LDPE 分子链之间的界面形成的易于捕获载流子的



(a) 纯 LDPE

(b) LDPE+0.5% 纳米-ZnO

(c) LDPE+1% 纳米-ZnO

(d) LDPE+3% 纳米-ZnO

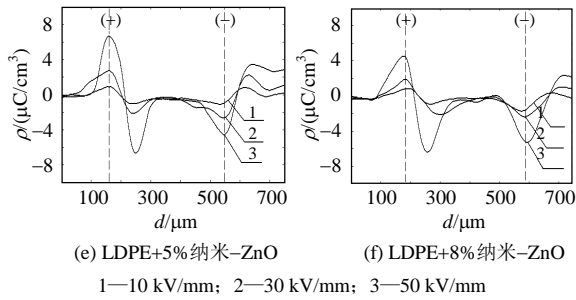


图4 不同含量纳米 ZnO 的聚乙烯加压的空间电荷分布  
Fig. 4 Space charge distribution of LDPE with different ZnO content under different stresses

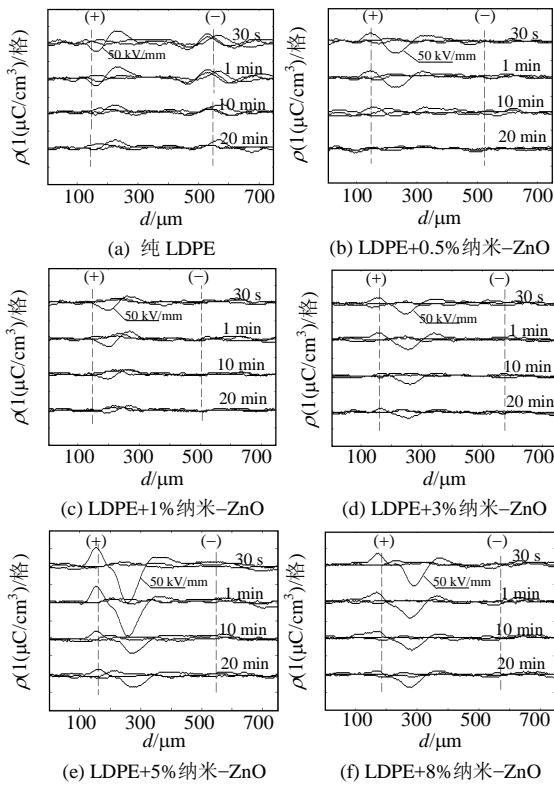


图5 不同含量纳米 ZnO 的聚乙烯预压短路后空间电荷分布  
Fig. 5 Space charge distribution of LDPE with different ZnO content after short circuit

深陷阱随着纳米ZnO含量的增加而逐渐增多<sup>[8]</sup>；而高浓度ZnO含量(8%)残余电荷的减少，可能是由于纳米粒子的团聚效应降低了复合界面部分陷阱深度，从而有利于载流子的传输。对比各试样50 kV/mm预压短路1 min后的残余空间电荷分布，纯聚乙烯试样的短路图中发现了明显的同极性空穴和电子注入现象。另外，含纳米ZnO粒子的试样的短路空间电荷分布与纯聚乙烯相比发生了很大变化，即正电极附近变为负电荷，而负电极附近几乎没有残余电荷存在。且当纳米ZnO粒子含量为0.5%时，短路后残余电荷随时间衰减最快，短路20 min后试样体内几乎无残余电荷存在。

图6所示为纳米ZnO/LDPE复合材料的工频交

流击穿强度图。从图4可以看出，纯LDPE的交流击穿约为126 kV/mm，加入纳米ZnO粒子后聚乙烯的击穿强度呈先降低后增大又降低趋势。当纳米ZnO粒子含量约为0.5%时击穿强度最低，含量约为5%时击穿强度达到最大值，约为145 kV/mm。

图7所示为纳米ZnO/LDPE复合材料的体积电阻率变化图。从图中可以看出，加入纳米ZnO后聚乙烯的体积电阻率逐渐增大，当纳米ZnO粒子含量约为5%时体积电阻率出现最大值，而当纳米ZnO粒子含量进一步增多时，纳米ZnO/LDPE复合材料的体积电阻率又逐渐下降。

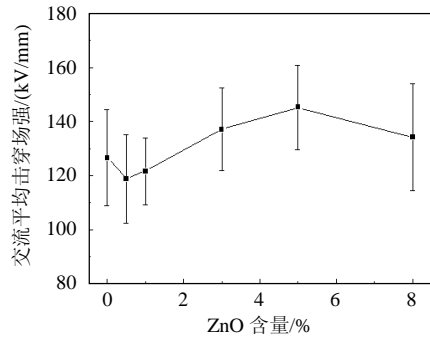


图6 纳米 ZnO/LDPE 复合材料的交流击穿强度  
Fig. 6 AC breakdown strength of LDPE/ZnO nanocomposite

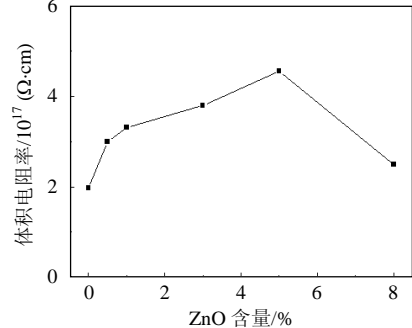
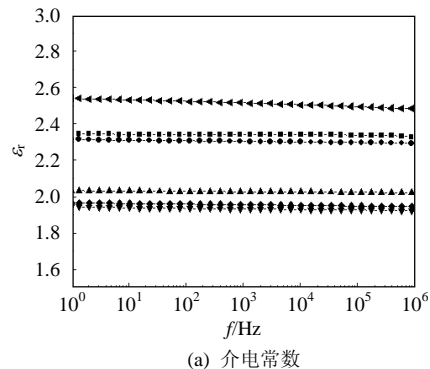


图7 纳米 ZnO/LDPE 复合材料的体积电阻率  
Fig. 7 Volume resistivity of LDPE/ZnO nanocomposite

图8所示为纳米ZnO/LDPE复合材料的介电频谱变化图。从图中可以看出，纳米ZnO/LDPE复合材料的介电常数随纳米ZnO粒子含量的增加



(a) 介电常数

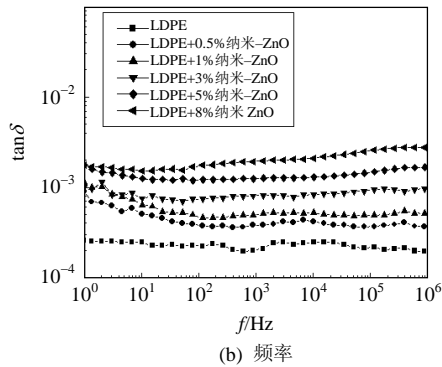


图 8 纳米 ZnO/LDPE 复合材料的介电频谱图  
Fig. 8 Dielectric frequency spectra  
of LDPE/ZnO nanocomposite

呈先减小后增大趋势。而损耗角正切值随纳米 ZnO 粒子含量的增加逐渐增大, 且在整个频段内保持不变。

### 3 讨论

无机纳米粒子的添加在聚合物中起到了如下 2 个作用: ①增加了聚合物材料中的杂质粒子; ②纳米粒子的表面效应和小尺寸效应, 在纳米粒子和聚合物之间的界面形成了大量的陷阱, 并且能级较深<sup>[8]</sup>。

一般来讲, 空间电荷的形成是由于电极上同极性电荷的注入, 或存在于聚合物体内的杂质或离子性添加物等形成的异极性电荷<sup>[16]</sup>。在本文中, 纳米 ZnO 添加剂是体内异极性电荷的主要来源, 另外, 用于 ZnO 分散的表面处理剂——钛酸酯偶联剂, 在电场下易发生电离成为离子性杂质, 也将贡献于体内的异极性电荷的形成。复合材料体内偶联剂含量、深陷阱密度均随着纳米 ZnO 含量的增加而增加。另外, 电子的迁移率远高于空穴, 因此图 4 中靠近正电极出现较多负电荷, 而且这些负电荷随着纳米 ZnO 含量的增加逐渐增多。

目前, 已有研究表明电极上同极性电荷注入开始于较低场强, 对聚乙烯材料大约在  $10 \text{ kV/mm}$ <sup>[17]</sup>。因此, 本文纯聚乙烯试样预压短路后观察到明显的同极性电荷注入(图 5(a)), 而在添加纳米的复合材料中并未发现此现象。这可能是由于靠近电极处的纳米粒子赋予电极局部阻挡能力, 从而只显出靠近电极处杂质粒子引起的异极性电荷<sup>[18]</sup>。另外, 纳米复合材料体内较多的负电荷残余而正电荷相对很少, 这或许表明此纳米复合材料存在某种极性效应。纳米 ZnO 和 LDPE 之间的界面形成了深陷阱, 深陷阱越多入陷的电荷也就越多<sup>[19]</sup>。因此残余的空间

电荷量随着纳米 ZnO 含量的增加而增加。而当纳米 ZnO 含量较高时(8%), 纳米 ZnO 的团聚降低了陷阱深度从而减少了残余电荷量<sup>[19]</sup>。纳米 ZnO 含量的提高类同于增加了体内的深陷阱密度, 使得更多的电荷入陷或难以脱陷, 因此残余电荷的衰减率随着纳米 ZnO 粒子含量的增多而逐渐降低。

聚乙烯具有负电子亲和力, 其导带的底部能级高于真空带能级<sup>[20]</sup>。因此电子在半结晶聚乙烯中的传输主要限制在无定型区。而纳米 ZnO 含量的提高势必增加无定型区的杂质粒子含量, 这些杂质粒子作为深陷阱, 阻止电子的传输。纳米 ZnO 粒子和聚乙烯界面能级深度与纳米粒子的含量密切相关。纳米粒子含量越高, 聚合物体内形成越多的表面态和深陷阱。而 8% 含量时纳米粒子的团聚作用导致其平均尺寸增大, 纳米颗粒间距离减小, 这削弱了聚乙烯与纳米粒子之间的相互作用, 部分陷阱深度变浅, 载流子迁移率增加<sup>[19]</sup>。另外, 也有研究表明电极电荷注入的降低会导致电导率的降低<sup>[18]</sup>。因此图 7 中体积电阻率随 ZnO 含量的增加呈先增大, 后减小之势。

聚合物的击穿特性受以下几个因素的影响, 如结晶度、体电荷集聚、界面区、交联类型、温度和自由体积<sup>[9]</sup>。已有研究表明<sup>[8]</sup>: 无机纳米添加剂在一定程度上可作为成核剂来提高聚合物本体的结晶度, 但结晶度并不是介电强度的决定因素。纳米粒子与聚合物本体的界面区对聚合物纳米复合材料的击穿特性起着决定性的作用。另外, 聚合物在结晶时, 主要把杂质和缺陷排斥于球晶边界或无定型区<sup>[18]</sup>。因此纳米 ZnO 粒子作为一种杂质粒子或电荷捕获陷阱位, 只存在于聚合物球晶边界或无定型区。当载流子沿球晶边界或无定型区传输时, 易被无定形相的陷阱中心所捕获。如前所述, 纳米 ZnO 在聚合物中有 2 种作用, 一方面增加了体内的杂质粒子, 另一方面也增加了体内的陷阱分布。当纳米 ZnO 粒子含量较低时(0.5%), 少量的杂质粒子增加了体内电荷的迁移率(这点可从图 5(b)中 0.5% 含量复合材料电荷衰减速率最快得以验证), 有利于电荷传输, 从而使得击穿强度降低。当纳米 ZnO 含量进一步增加(小于 5%), 杂质粒子增多的同时, 由于纳米 ZnO 大的比表面积大幅度增加了体内的深陷阱分布, 电子在复合体内传输时通过与杂质粒子碰撞或入陷于深陷阱中而减速, 使得其平均自由程变短, 从而提高了击穿强度<sup>[10]</sup>。T.Tanaka<sup>[10]</sup>认为纳米粒子

与聚合物的相互作用区包括以下几个部分:无机颗粒、高密度区(聚合物与无机颗粒相互作用界面)、低密度区(松弛区,即分子链运动引起)和聚合物本体。纳米颗粒周围重叠的松弛区是“准导电”区,这些“准导电”区有利于电荷消散,从而提高介质击穿强度和电压耐受特性<sup>[9]</sup>。当纳米ZnO粒子含量(8%)较多时,纳米颗粒的团聚消弱了聚乙烯与纳米间的相互作用,陷阱深度变浅,电荷易于在无定型区传输,从而降低了击穿强度。

由于纳米粒子的表面效应和小尺寸效应,纳米ZnO粒子在LDPE分子链之间起到了“交联点”的作用,在LDPE分子链之间形成了很强的相互作用,使材料的结构更加紧密,限制了松弛区分子链段的运动。从而降低了介电常数。随着纳米ZnO粒子含量的进一步增加,纳米复合材料比表面积增大,纳米ZnO粒子和聚乙烯间束缚链的倍增会限制松弛区聚合物链段运动,从而进一步降低了介电常数<sup>[9]</sup>。而当纳米ZnO粒子含量(8%)较高时发生团聚现象形成类似微米级填充物。当聚合物中加入微米级填充物时介电常数一般增加,这是由于填充物本身具有较高的介电常数,并引起麦克斯韦尔(Maxwell-Wagner)界面极化<sup>[10]</sup>。所以图8中介电常数随纳米ZnO粒子含量的增加呈先减小后增加趋势。由于纳米ZnO/LDPE界面形成能级较深的陷阱,根据T.Tanaka<sup>[10]</sup>的多壳模型,在电场作用下聚合物纳米复合体内界面发生极化形成偶极矩,这将会提高损耗角正切值。所以图8中损耗角正切值随纳米ZnO粒子含量的增加逐渐增加。

#### 4 结论

本文通过对纳米ZnO/聚乙烯复合材料介电特性的研究,可得出如下结论:

(1) 纳米ZnO粒子与LDPE的界面作为深陷阱,增加了聚乙烯体内残余电荷量,但有效抑制了电极上同极性电荷的注入。

(2) 当少量纳米ZnO粒子(小于5%)添加入LDPE中,在一定程度上能提高聚乙烯本体的击穿强度和体积电阻率。

(3) 纳米ZnO/聚乙烯复合材料的界面效应,使得介电常数随纳米ZnO粒子含量的增加先减小后增大,而损耗值呈逐渐增加之势。

(4) 当纳米粒子含量较大时,纳米粒子的团聚会影响纳米效应的体现。

#### 参考文献

- [1] Ishibashi A, Kawai T, Nakagawa S, et al. A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500kV XLPE cables [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 695-706.
- [2] Tanaka Y, Chen G, Zhao Y, et al. Effect of additives on morphology and space charge accumulation in low density polyethylene [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(1): 148-154.
- [3] 尹毅, 肖登明, 屠德民. 空间电荷在评估绝缘聚合物电老化程度中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 43-48.  
Yin Yi, Xiao Dengming, Tu Demin. An application of space charge in valuing the electric ageing degree of insulating polymer [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 43-48(in Chinese).
- [4] 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理的研究[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).
- [5] Murata Y, Murakami Y, Nemoto M, et al. Effects of nano-sized MgO-filler on electrical phenomena under DC voltage application in LDPE [C]. Proceedings of 2005 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA, 2005, 6: 158-161.
- [6] Guastavino F, Dardano A, Ratto A, et al. Electrical characterization of polymer-layered silicate nanocomposites [C]. Proceedings of 2005 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA, 2005, 6: 175-178.
- [7] Roy M, Nelson J K, Schadler L S, et al. The influence of physical and chemical linkage on the properties of nanocomposites[C]. Proceedings of 2005 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA, 2005, 6: 183-186.
- [8] 陈炯, 尹毅, 李喆, 等. 纳米SiO<sub>2</sub>/聚乙烯复合介质强场电导的预电应力效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 146-151.  
Chen Jiong, Yin Yi, Li Zhe, et al. The effect of electrically prestressing of high field conduction in the nanocomposite of polyethylene and nano-SiO<sub>2</sub>[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 146-151(in Chinese).
- [9] Roy M, Nelson J K, Macrone R K, et al. Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 629-642.
- [10] Tanaka T. Dielectric Nanocomposites with insulating properties [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 914-928.
- [11] Yang Rui, Li Ying, Yu Jian. Photo-stabilization of linear low density polyethylene by inorganic nano-particles[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(2): 168-174.
- [12] 张学茜, 刘敏江, 李国立. 纳米氧化锌改性聚乙烯的研究[J]. 塑料, 2004, 33(1): 9-15.  
Zhang Xueqian, Liu Minjiang, Li Guoli. Nano-ZnO modified PE[J]. Plastic, 2004, 33(1): 9-15 (in Chinese).
- [13] Tjong S C, Liang G D. Electrical properties of low-density polyethylene/ZnO nanocomposites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 100(1): 1-5.
- [14] 陈立庄, 高延敏, 缪文桦. 偶联剂在涂料中的作用机理及其应用[J]. 全面腐蚀控制, 2005, 19(4): 24-27.  
Chen Lizhuang, Gao Yanmin, Miao Wenhua. The reaction mechanism

- of coupling agent and its application in the coatings[J]. Total Corrosion Control, 2005, 19(4): 24-27(in Chinese).
- [15] 尹毅, 韩社教, 屠德民. 固体绝缘中空间电荷测量装置的研制和应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 1-5.  
Yin Yi, Han Shejiao, Tu Demin. Developing and application of apparatus of space charge measurement in solid insulating materials [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 1-5 (in Chinese).
- [16] Salah Khalil M, Cherfi A, Toureille A, et al. Influence of BaTiO<sub>3</sub> additive and electrode material on space-charge formation in polyethylene[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(6): 743-746.
- [17] Chen G, Tanaka Y, Takada T, et al. Effect of polyethylene interface on space charge formation[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 113-121.
- [18] Fleming R J, Pawlowski T, Ammala A, et al. Electrical conductivity and space charges in LDPE containing TiO<sub>2</sub> nanoparticles [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 745-753.
- [19] Chen Jiong, Yin Yi, Li Zhe, et al. Study the percolation phenomenon of high field volt-ampere characteristic in the composite of low-density polyethylene/nano-SiO<sub>2</sub>[C]. Proc. of 2005 International Symposium EIM, Kitakyushu, Japan, 2005.
- [20] Lewis T J. Nanometric dielectrics[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 812-825.



王 霞

收稿日期: 2007-07-02。

作者简介:

王 霞(1976—), 女, 在职博士研究生, 讲师, 从事聚合物绝缘材料改性和测试方法的研究, wxflying@mail.xjtu.edu.cn;

屠德民(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 从事聚合物绝缘材料改性和测试方法的研究。

(责任编辑 车德竞)

## 《中国电机工程学报》关于“电力设施抗震防灾”征文通知

地震是可能造成电力系统遭受严重破坏的自然灾害。2008年5月12日,四川汶川地区发生了8.0级特大地震,给当地人民生命财产安全带来严重威胁和损失,同时也使电力设施遭受了严重损坏。四川电网共造成500 kV变电站停运1座,220 kV变电站停运13座,500 kV线路停运4条,220 kV线路停运59条,220 kV及以上主变38台跳闸,靠近震源的110 kV变电站2台主变倾斜下陷,川西地区许多电厂和水电群与系统解列,全网共损失负荷3 978 MW。全省有470座水电站不同程度受损,涉及装机容量3300 MW,直接经济损失高达53.9亿元,输电线路和电网设施的损失也在19亿元以上。

鉴于电力系统遭受震害的严重性,为今后减少电力设施在地震中损坏、缩短抢修时间,提出积极的电力设施防震减灾建议,为电网恢复和发展提供坚实的技术支撑,我们期望广大电力工作者积极开展电力系统抗震减灾研究并发表成果,依靠科技手段提高电力系统抗御自然灾害的能力,为电力系统安全稳定、可靠有序运行做出新的贡献。为此,《中国电机工程学报》征文如下:

### 一 征文范围

1. 电力系统的震害特点、相关注意问题,国内外电力系统抗震性能的研究现状、研究方向。
2. 电力系统地震灾害的特点分析、研究,电力系统抗震可靠性的研究现状及发展趋势。
3. 地震对电网设施的影响,提高电网设施抗震防灾能力的应对措施;变电站在地震作用下的可靠运行,高压电气设备的隔震技术、抗震可靠性等。
4. 主要高压电气设备、高压变电站电气主接线系统、变电站系统以及电力网络系统的抗震可靠性等的分析计算,为提高电力系统抗震可靠性提出措施和建议等。
5. 供电可靠性和输变电设施的耐受性。
6. 震灾损害调查、工程设计、标准等。

### 二 论文格式及投稿方式

1. 论文可用中文或英文撰写。具体要求请登陆《中国电机工程学报》网站查询。
2. 每篇论文篇幅一般不超过6页。
3. 专家评审通过后立即刊登。
4. 投稿邮箱: csee@epri.ac.cn; 网上投稿: www.dwjs.com.cn