

# 聚酰亚胺/纳米 ZnO 耐电晕杂化膜的绝缘特性

查俊伟<sup>1</sup>, 党智敏<sup>2</sup>

- (1. 化工资源有效利用国家重点实验室(北京化工大学), 北京市 朝阳区 100029;
2. 北京市新型高分子材料制备及工艺重点实验室(北京化工大学), 北京市 朝阳区 100029)

## Insulation Properties of Polyimide/Nano-ZnO Hybrid Films With Good Corona Resistance

ZHA Jun-wei<sup>1</sup>, DANG Zhi-min<sup>2</sup>

- (1. State Key Lab of Chemical Resources Engineering (Beijing University of Chemical Technology), Chaoyang District, Beijing 100029, China; 2. Key Lab of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials (Beijing University of Chemical Technology), Chaoyang District, Beijing 100029, China)

**ABSTRACT:** Polyimide/ZnO (PI/ZnO) nanohybrid films with good corona resistance were obtained by using in-situ dispersive polymerization. It was explored how the concentration of nano-ZnO fillers and the corona aging time influenced dielectric properties of the films. These nanoparticle hybrid films were also studied through thermogravimetric analysis (TGA) and scanning electron microscopy (SEM). Results show that the corona resistance of the hybrid films can be improved as the concentration of ZnO fillers increasing. When the concentration of nano-ZnO is 7%, the dielectric permittivity of the hybrid film is about 4.5, and the dielectric loss is below 0.02. All the breakdown strengths of hybrid films decrease as the content of nano-ZnO loading, but they can still meet requirements in practice. The mechanism of the corona resistance is also discussed by analyzing the change of electric field and the trapping action of ZnO fillers.

**KEY WORDS:** polyimide; nano-ZnO; dielectric properties; corona resistance; nanohybrid films

**摘要:** 通过原位聚合方法制得了纳米粒子分散均匀的聚酰亚胺/纳米 ZnO 杂化膜。在实验的基础上研究了不同掺杂含量和老化时间对杂化膜的介电特性的影响,同时通过热失重分析仪研究其热稳定性以及用扫描电镜分析纳米粒子在聚酰亚胺基体中的分散状态。结果表明,随着 ZnO 含量的提高,耐电晕性能得到了较大幅度的提高。当纳米 ZnO 含量为 7% 时介电常数为 4.5 左右,介电损耗在 0.02 以下,且随频率变化不大,击穿场强虽有所下降但仍满足实际需要。通过对电场和纳米 ZnO 粒子的分析初步讨论了耐电晕性能的老化机制。

**关键词:** 聚酰亚胺; 纳米 ZnO; 介电性能; 耐电晕; 纳米杂化膜

## 0 引言

电晕放电在工程技术领域中有多种影响。电力系统中的高压及超高压输电线路导线上发生电晕,会引起电晕功率损失、无线电干扰等。对于高压电气设备,电晕放电会逐渐破坏设备绝缘性能<sup>[1-7]</sup>。近几年来,在国内外都出现了大批变频电机绝缘过早破坏的现象,这些均对电气绝缘技术带来了巨大的挑战,虽然传统绝缘材料具有良好的性能,但在实际应用中受到长期的电晕放电时却不能提供持久的保护,最终导致击穿破坏,因此亟需改善电机绝缘材料的绝缘强度,降低介电损耗、提高耐电晕腐蚀能力、提高耐热等级等以满足现代高压技术的特殊要求<sup>[8-13]</sup>。

纳米科技的发展给纳米材料科学带来了广阔的空间,其中有机/无机纳米杂化材料的研究受到很大重视。有机/无机纳米复合材料既可作为结构材料,又可作为功能材料,是纳米科技领域内一项很有应用研究价值的重要课题。与传统的聚合物相比,纳米材料不但能全面改善聚合物的综合性能,还能赋予其奇特的性能<sup>[14-15]</sup>;然而纳米无机粒子在聚合物高性能改性中的研究、开发与应用还处在起步阶段,有待于进一步对该领域理论和实际问题进行研究。国内外研究显示通过在聚合物基体中分散一定的纳米粒子可大幅提高耐电晕老化特性。目前研究主要集中在聚酰亚胺(PI)中添加一定量的无机纳米粒子如TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、AlN等,可以使有机和无

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677002).

机杂化材料达到非常优异的性能, 例如热稳定性、介电性能等<sup>[16-21]</sup>。Li等<sup>[22]</sup>报道了一种PI/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>杂化膜, 并对其耐电晕老化寿命进行了研究, 指出纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的引入提高了杂化膜的耐电晕性能。T. Tanaka等<sup>[23]</sup>揭示了纳米复合物的许多有趣现象, 并有望在介电、绝缘材料中得到应用。徐庆玉等<sup>[24]</sup>综述了聚酰亚胺/无机物杂化材料的介电性能因所含无机物的介电性能、在PI中的分散情况以及取向的不同而不同的现象。

本文在综合国内外文献的基础上, 采用原位聚合法制备了聚酰胺酸(PAA)/纳米 ZnO 前驱体, 并按一定成膜工艺制备出了 PI/nano-ZnO 纳米杂化膜; 对其介电和物理性能等进行了试验研究, 解决了纳米无机粒子的团聚问题以及纳米无机粒子在 PI 基体中的分散问题, 并建立了耐电晕模型。

## 1 试验部分

### 1.1 PI/nano-ZnO 杂化膜的制备

将无机纳米粒子直接分散于高分子基体来制备高分子基纳米复合材料的优点是通过控制条件获得高分散、小微粒的纳米复合材料; 缺点是粒子易发生团聚, 难以均匀分散。通常在纳米粒子的表面覆盖一层单分子层活性剂, 可防止纳米粒子本身的凝聚。实验中, 首先对纳米 ZnO 进行硅烷偶联剂改性, 然后采用原位聚合法制备了聚酰胺酸/纳米 ZnO 前驱体, 通过梯度升温亚胺化制得了纳米杂化膜。

根据复合比例准确称取一定量的经过表面改性的纳米ZnO, 加入N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)溶剂, 超声 1 h, 然后将一定量 4,4'-二氨基二苯醚(ODA)加入分散液中, 搅拌至二胺完全溶解后, 再分批加入与二胺有配方比的二酐(PMDA), 并搅拌数小时, 得到粘度合适的 PAA/纳米粒子浆液。涂敷在玻璃板上的浆液在静置一段时间后, 放入真空烘箱抽真空, 以排除气泡, 最后放入鼓风烘箱, 通过梯度升温实现亚胺化, 制得PI/nano-ZnO复合杂化薄膜。

### 1.2 试样的表征

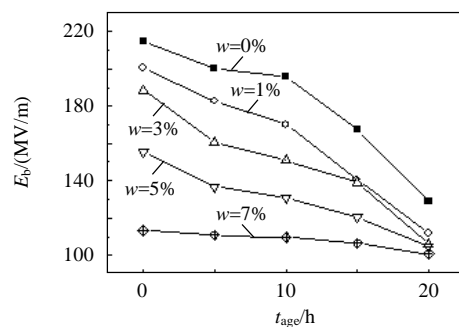
样品的形貌使用 Hitachi S-4700 扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)观测; 采用德国 NETZSCH 公司的 TA 449C 热重分析仪(thermogravimetric analysis, TGA)测定薄膜热损失的变化; 使用 Agilent-4294A 精密阻抗分析仪测定薄膜的介电常数和介电损耗; 采用 CS2674A 型耐压测试仪检测薄膜的击穿场强; 耐电晕性能测试采

用自制的装置。

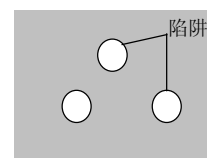
## 2 PI/nano-ZnO 杂化膜的介电性能

### 2.1 耐电晕特性

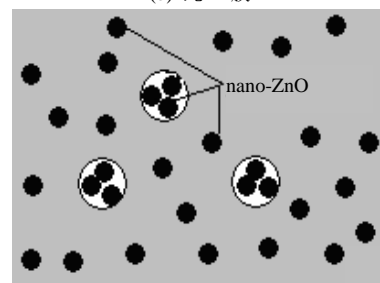
图 1(a)为不同老化时间下PI/nano-ZnO杂化膜的击穿场强, 其中 $t_{\text{age}}$ 为老化时间,  $E_b$ 为击穿场强。整个测试过程采取自制的老化装置, 对不同含量ZnO的PI/nano-ZnO杂化膜分别做不同时间的老化处理, 处理时间分别为 5、10、15 和 20 h。在老化处理之前, 纯PI薄膜的击穿场强明显高于掺杂后的复合薄膜, 且随着填料含量的增加击穿场强都呈下降的趋势。当纳米ZnO含量 $w$ 达到 7%时, 击穿场强下降至 110 MV/m, 但仍在实际应用的范围之内。对比经过 20 h老化处理后的杂化膜发现, 纯PI膜的击穿场强从 210 MV/m下降到 130 MV/m, 而当ZnO的含量为 7%时, PI/nano-ZnO杂化膜的击穿场强只从 113 MV/m下降到 100 MV/m, 从击穿场强的下降率就可以看出, 在相同的老化时间下, ZnO含量为 7%时的PI/nano-ZnO杂化膜的击穿场强下



(a) 不同老化时间下的击穿场强



(b) 纯 PI 膜



(c) PI/nano-ZnO 杂化膜

图 1 老化时间与不同含量的纳米粒子对 PI/nano-ZnO 杂化膜耐电晕性能的影响

Fig. 1 Corona resistance of PI/nano-ZnO hybrid films with different aging time and concentration of nano-ZnO

降的速率明显低于纯PI膜。

## 2.2 介电常数

介电常数是描述介电材料对外电场作用的响应能力。PI/nano-ZnO杂化薄膜的介电常数 $\epsilon$ 通过Agilent-4294A精密阻抗分析仪测定。测试频率 $f$ 的范围选取 $10^2$  Hz~ $10^6$  Hz,如图2所示。可以看出,纯PI膜的介电常数 $\epsilon$ 约为3.2,随着纳米ZnO含量(质量分数)的增加,杂化膜的介电常数有不同程度的增加,当纳米ZnO含量 $w$ 达到7%时,杂化膜的介电常数达到4.2;而当纳米ZnO含量为3%时,杂化膜的介电常数却有所下降,原因可能是无机粒子的加入,产生两相界面而引入空气隙<sup>[25-26]</sup>,而空气的介电常数为1,从而使得杂化膜介电常数降低。

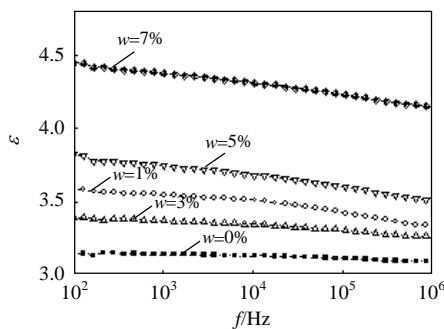


图2 PI/nano-ZnO杂化膜的介电常数与频率的关系

Fig. 2 Dielectric permittivity of PI/nano-ZnO hybrid films v.s. frequency

## 2.3 介电损耗

介电损耗是偶极距弛豫发热而消耗的热能,对绝缘材料的绝缘特性研究显得尤为重要。PI/nano-ZnO杂化薄膜的介电损耗也是通过Agilent-4294A精密阻抗分析仪测定,测试频率的范围仍选取 $10^2$ ~ $10^6$  Hz,如图3所示,图中 $\tan\delta$ 为介电损耗,PI/nano-ZnO杂化膜的介电损耗随纳米ZnO含量的增加而有所变化。

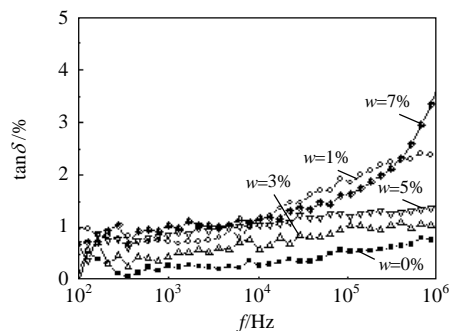


图3 PI/nano-ZnO杂化膜的介电损耗与频率的关系

Fig. 3 Dielectric loss of PI/nano-ZnO hybrid films v.s. frequency

## 2.4 体积电阻率

图4为PI/nano-ZnO杂化膜的体积电阻率随纳米ZnO含量的变化关系,图中 $\rho_v$ 为体积电阻率,可以看出,纯PI具有很高的体积电阻率,随着纳米ZnO粒子的加入体积电阻率有所下降,但都在 $10^{12}$   $\Omega\cdot m$ 以上,仍满足绝缘材料的应用需要。PI/nano-ZnO杂化材料的体积电阻率与聚酰亚胺、纳米ZnO以及它们之间的界面都有关系。

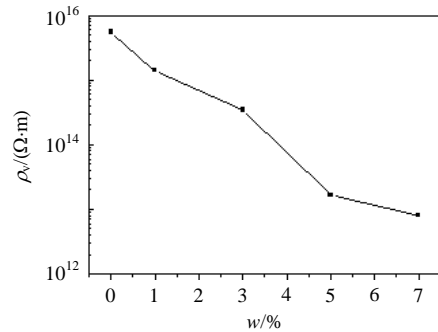


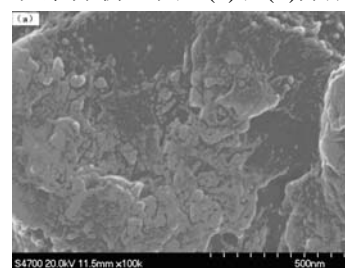
图4 PI/nano-ZnO杂化膜的体积电阻率

Fig. 4 Volume resistivity of PI/nano-ZnO hybrid films

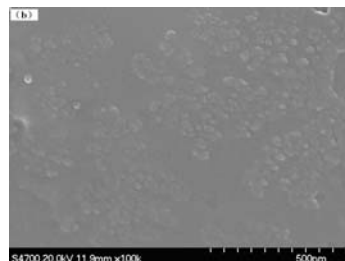
## 3 PI/nano-ZnO杂化膜的物理性能

### 3.1 扫描电镜分析

纳米无机粒子与聚合物基体间形成的界面,其结构及黏结强度最终影响着复合材料的性能,因此,如何形成良好的界面及达到纳米级分散成为关键之处。通过表面改性(表面物理改性和表面化学改性)可解决该问题。利用扫描电子显微镜对复合膜的形貌(表面、断面)、无机组分的分散情况以及粒径大小进行了观察分析。图5(a)和(b)分别为PI/nano-



(a) 横断面的SEM电镜照片



(b) 表面的SEM电镜照片

图5 PI/nano-ZnO杂化膜的断面、表面扫描图

Fig. 5 SEM photographs of the PI/nano-ZnO hybrid film

ZnO杂化膜的断面及表面扫描图,可以看出,纳米ZnO在PI基体中分散良好,粒子的平均粒径在 50 nm左右。由于改性纳米ZnO粒子在强极性溶剂DMAc中与PI分子链形成良好的化学结合,增强了两相间的结合力,保证一定的分散稳定性,避免了两相间的相分离。

### 3.2 热稳定性分析

PI分子结构中含有大量芳杂环,因而其热稳定性很好,长期使用温度可达到 250 °C,短期使用温度可达到 450 °C,主要应用于要求耐高温的电机绝缘膜等高新技术领域,如宇航,采油机械等。为研究ZnO的引入对于薄膜的热分解温度的变化规律,实验中通过TGA来研究纯PI膜和PI/ZnO-7%杂化膜的热分解过程,在氩气保护下,试验温度范围选取为 30~800 °C,升温速率为 10 °C/min。比较图 6(a)和(b)2张图谱(图中 $\theta$ 为温度, $w_m$ 为加热过程中样品失重率, $H$ 为样品与参比物间温差为零所需供给的热量),发现差别不是很大,特别是热分解温度,大约都在 550 °C,这表明纳米ZnO的引入并没有影响杂化膜的耐热等级。

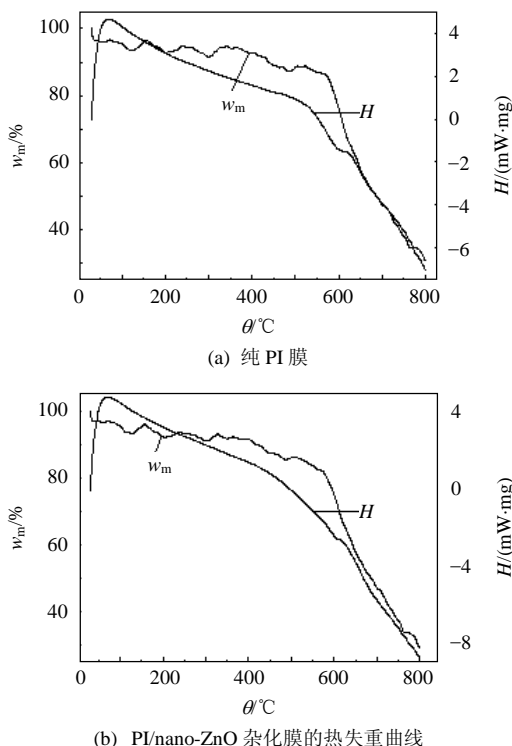


图 6 纯 PI 膜和 PI/nano-ZnO 杂化膜的热失重曲线  
Fig. 6 Curves of TGA of the pure PI and PI/nano-ZnO hybrid film

## 4 试验结果讨论

聚合物表面发生电晕放电时,产生的一定量带

电粒子等会直接撞击聚合物表面而产生老化现象,采用纳米无机颗粒填充法提高聚合物的耐电晕性能的研究凸显其重要性。材料的耐电晕特性与其本身的介电性能(介电常数、损耗、体积电阻率、击穿场强)具有一定的联系,通过分析老化处理前后的样品的介电性能就可从机制上进一步分析纳米杂化膜的耐电晕特性。

首先,本文给出了一种模型用以解释纳米ZnO提高耐电晕特性的原理(见图 1(b)和(c))。纯PI膜中存在大量的深陷阱,纳米ZnO粒子的引入,会占据原来材料中的自由体积部分和大尺寸的缺陷,这样就会减少自由体积的数目,以及将深陷阱转化为更多的浅陷阱,增强了捕获电子的能力,且随着含量的增加这种现象更明显。同时联系介电常数的递变规律分析,较高 $\epsilon$ 的介电材料在电晕老化过程中由于ZnO的引入其界面极化增强,极化容易产生一个反电场 $E'$ ,与施加在材料上的电场 $E_0$ 反向,能够抵消一部分内部电场,这样作用在材料上的有效电场 $E=E'-E_0$ 就降低了,因此高 $\epsilon$ 的PI/nano-ZnO杂化膜可以提高材料的耐电晕性能。ZnO对于提高薄膜的介电常数效果较明显,这是因为ZnO是极性分子,在高频外电场的作用下发生偶极极化,分子偶极距增大,极性更加显著<sup>[27-30]</sup>;同时由于纳米粒子的特殊效应,自由体积分数降低,从而复合薄膜的介电常数比基体大得多。从图中还可以看出,介电常数随频率的变化不大,表现出Debye-like松弛过程。

其次,在进行击穿试验分析时发现在外部电场的作用下,随着老化时间的增加纳米杂化膜的击穿场强都会有不同程度的下降。在击穿试验中,电压超过某一临界值时,电子从电场中获得的能量超过损耗能量,材料就会发生击穿<sup>[31]</sup>;而损耗越大,发生击穿所需电子获得的能量就越小。从图 3 可以看出,复合膜的损耗高于纯PI膜,这是因为引入无机组分带来了大量的极性基团,产生极化损耗,当外加电场的频率升高到偶极距的极化过程不能同步时,极化损耗随着频率的提高而增大,高含量的ZnO带来的极化效应比较大;同时有可能由于内部结构的不均一而产生结构损耗,结构损耗的结果也会随着频率的升高而升高。因此随着ZnO含量的增加,杂质离子的浓度也随之增大,在材料内部造成大量缺陷,无机组分的含量增加,复合膜的损耗也增大。这种高含量带来的高损耗使得复合膜的击穿场强就比纯PI膜的击穿强度低得多。

绝缘电阻是表征绝缘体阻止电流流通的能力,

体积电阻率也是表征绝缘材料的一个很直观的参数, 纳米填料对聚合物体积电阻率的影响主要与纳米填料自身的绝缘电阻、散射、陷阱等因素有关。从图4可以看出, 纯PI薄膜本身具有很高的体积电阻率, 但由于ZnO的引入带来杂质离子, 形成输运载流子, 而载流子的密度、迁移率都会影响材料的电导, 随着纳米ZnO含量的增加, 载流子的密度增大, 界面的形成使得载流子的迁移率加大, 载流子迁移所需要克服的势垒降低, 电导率得到提高, 因此体积电阻率呈现下降的趋势, 抑制击穿的能力增强。

从绝缘老化的机制出发, 分别对PI/nano-ZnO杂化膜的介电性能、击穿场强、体积电阻率加以分析, 纳米粒子(ZnO)在提高聚合物(PI)的耐电晕特性方面具有良好的协同效应。

## 5 结论

本文通过对聚酰亚胺/纳米ZnO耐电晕杂化膜的绝缘特性研究得出以下结论:

1) 通过老化试验研究发现, PI/nano-ZnO杂化膜的耐电晕性能明显高于纯PI膜, 在此基础上建立了纳米ZnO对提高杂化膜的耐电晕特性的解释模型, 并考察了介电常数与耐电晕特性之间的关系, 对研究纳米杂化材料的耐电晕性能具有一定的意义;

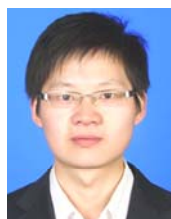
2) 随着纳米ZnO含量的增加, 介电常数和介电损耗都有不同程度的增加, 击穿场强呈现不同程度的劣化, 体积电阻率呈现下降的趋势;

3) 通过原位聚合的方法制得了PI/nano-ZnO杂化膜, 采用扫描电镜观察发现经过化学表面改性的无机纳米粒子(ZnO)在PI基体中分散较好, 热失重分析表明PI杂化膜具有较高的耐热等级。

## 参考文献

- [1] 李震宇, 梁曦东, 周远翔. 直流电晕对硅橡胶材料憎水性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 30-34.  
Li Zhenyu, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang. Influences of DC Corona on hydrophobicity of silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 30-34(in Chinese).
- [2] 舒立春, 赖向平, 余德芬, 等. 气压对直流正极性下冰柱-冰板间隙电晕放电的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 116-120.  
Shu Lichun, Lai Xiangping, Yu Defen, et al. Influence of atmospheric pressure on DC positive corona discharge in icicle to iced plate electrode system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 116-120(in Chinese).
- [3] 范建斌, 谷琛, 殷禹, 等.  $\pm 800$  kV 母线的电晕起始特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 47-52.  
Fan Jianbin, Gu Chen, Yin Yu, et al. Research on corona onset performance of  $\pm 800$  kV busbar[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 47-52(in Chinese).
- [4] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正直流电晕特性随气压和湿度变化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 53-58.  
Hui Jianfeng, Guan Zhicheng, Wang Liming, et al. Research on variation of positive DC corona characteristics with air pressure and humidity[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 53-58(in Chinese).
- [5] 曾庆禹. 特高压输电线路电气和电晕特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 1-8.  
Zeng Qingyu. Study on electric characteristic and corona performance of UHV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 1-8(in Chinese).
- [6] 安冰, 丁燕生, 王伟, 等. 湿度对电晕笼中导线直流电晕特性的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 98-100, 104.  
An Bing, Ding Yansheng, Wang Wei, et al. Influence of humidity on corona performance of DC conductor in corona cage[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 98-100, 104(in Chinese).
- [7] 赖向平, 舒立春, 蒋兴良, 等. 冰凌针-板间隙直流正极性下起始电晕特性的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 32-36.  
Lai Xiangping, Shu Lichun, Jiang Xingliang, et al. Research on initial corona characteristics of icicle to ice-covered plane model under positive polarity[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 32-36(in Chinese).
- [8] 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研究[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).
- [9] 郑晓泉, Chen G, Davies A E. 交联聚乙烯电缆绝缘中的双结构电树枝特性及其形态发展规律[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 79-85.  
Zheng Xiaoquan, Chen G, Davies A E. Characteristic and developing law of a double structure electrical tree in XLPE cable insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 79-85(in Chinese).
- [10] 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.
- [11] Kaufhold M, Auinger H, Berth M, et al. Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low voltage induction on motors[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 396-402.
- [12] Kaufhold M, Borner G, Eberhardt M, et al. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1996, 12(5): 9-16.
- [13] Yin W, Bultemeier K, Barta D, et al. Critical factors for early failure of magnet wires in inverter-fed motors[C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, USA, 1995.
- [14] Wen J Y, Wilkes G L. Organic/inorganic hybrid network materials by the ol-gel approach[J]. Chemical Materials, 1996, 8(8): 1667-1681.
- [15] Tanaka T. Dielectric nanocomposites with insulating properties

- [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 914-928.
- [16] Chiang P C, Whang W T, Tsai M H, et al. Physical and mechanical properties of polyimide/titania hybrid films[J]. Thin Solid Films, 2004(447-448): 359-364.
- [17] Xie S H, Zhu B K, Li J B, et al. Preparation and properties of polyimide/aluminum nitride composites[J]. Polymer Testing, 2004(23): 797-801.
- [18] Chang C C, Chen W C. Synthesis and optical properties of polyimide-silica hybrid thin films[J]. Chemical Materials, 2002(14): 4242-4248.
- [19] Bae T H, Tak T M. Preparation of TiO<sub>2</sub> self-assembled polymeric nanocomposite membranes and examination of their fouling mitigation effects in a membrane bioreactor system[J]. Journal of Membrane Science, 2005(266): 1-5.
- [20] 查俊伟, 党智敏. 无机纳米/聚酰亚胺复合杂化膜的绝缘特性研究[J]. 绝缘材料, 2008, 41(6): 4-7.  
Zha Junwei, Dang Zhimin. Insulation properties of nanoparticles/polyimide nanohybrid films[J]. Insulation Materials, 2008, 41(6): 4-7(in Chinese).
- [21] 查俊伟, 宋红涛, 党智敏. 聚酰亚胺/无机纳米复合耐电晕杂化膜的制备及性能研究[C]. 第十届绝缘材料与绝缘技术学术交流会, 北京, 2008.
- [22] Li H Y, Liu G, Liu B, et al. Dielectric properties of polyimide/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hybrids synthesized by in-situ polymerization[J]. Materials Letter, 2007(61): 1507-1511.
- [23] Tanaka T, Montanari G C, Mulhaupt R. Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications[J]. IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, 2004, 11(5): 763-784.
- [24] 徐庆玉, 范和平, 井强山, 等. 聚酰亚胺纳米杂化材料的制备、结构和性能[J]. 功能高分子学报, 2002, 15(2): 207-212.  
Xu Qingyu, Fan Heping, Jing Qiangshan, et al. Preparation, structure and properties of polyimides hybrid materials[J]. Journal of Functional Polymers, 2002, 15(2): 207-212(in Chinese).
- [25] Yang R, Li Y, Yu J. Photo-stabilization of linear low density polyethylene by inorganic nano-particles[J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(2): 168-174.
- [26] Roy M, Nelson J K, Maccrone 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.
- [27] Dang Z M, Fan L Z, Zhao S J, et al. Dielectric properties and morphologies of composites filled with whisker and nanosized zinc oxide[J]. Materials Research Bulletin, 2003(38): 499-507.
- [28] Dang Z M, Wang H Y, Xu H P. Influence of silane coupling agent on morphology and dielectric property in BaTiO<sub>3</sub>/polyvinylidene fluoride composites[J]. Applied Physics Letter, 2006(89): 112902-112904.
- [29] Dang Z M, Fan L Z, Zhao S J, et al. Preparation of nanosized ZnO and dielectric properties of composites filled with nanosized ZnO [J]. Materials Science and Engineering B, 2003(99): 386-389.
- [30] Fan L Z, Dang Z M, Wei G D, et al. Effect of nanosized ZnO on the electrical properties of (PEO)16LiClO<sub>4</sub> electrolyts[J]. Materials Science and Engineering B, 2003(99): 340-343.
- [31] Guastavino 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, 2005.



查俊伟

收稿日期: 2009-02-27。

作者简介:

查俊伟(1982—), 男, 汉族, 安徽马鞍山人, 博士研究生, 研究方向为聚合物基电介质功能复合材料, cwzjw710@163.com;

党智敏(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电气功能材料的研究, dangzm@mail.buct.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)