

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.016

环氧树脂纳米复合电介质制备方法及其绝缘性能的研究进展

李媛媛, 田慕琴, 雷志鹏

(太原理工大学电气与动力工程学院, 太原 030024)

摘要: 环氧树脂或树脂浸渍纤维板是电力设备中重要的绝缘材料,过去通过掺杂微米级的无机氧化物填料以提高材料的机械性能。近年,开始使用纳米颗粒掺杂环氧树脂,对于提高材料的绝缘性能,特别是对提高击穿场强、耐电晕性、耐电痕化、导热性、耐低温性、耐辐射性和耐候性等方面具有重要意义。文中以纳米复合电介质的绝缘性能为出发点,概述了纳米复合电介质的常用制备方法,给出了环氧树脂纳米复合电介质的制备流程,总结分析了环氧树脂纳米复合电介质的介电性、局部放电腐蚀、绝缘击穿强度及机械性能。综述了环氧树脂纳米复合电介质在电机绝缘系统中的应用和最新研究进展,为环氧树脂纳米复合电介质在电机主绝缘中的应用提供了思路。

关键词: 纳米电介质; 环氧树脂纳米复合电介质; 绝缘性能; 电气绝缘材料

Research Progress on Preparation Methods and Insulation Properties of Epoxy Nanocomposites

LI Yuanyuan, TIAN Muqin, LEI Zhipeng

(School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Epoxy resins or resin impregnated cellulose are the important insulation materials for power equipment. The nanoparticles-adulterated epoxy can enhance its insulation properties. In this paper, in view of on the insulation properties of nanocomposites, their preparation methods are introduced, and the properties of epoxy nanocomposites are briefly analyzed, including the dielectric property, the erosion due to partial discharge, the breakdown strength, and the thermal and mechanical performances. Moreover, the recent research progress and applications of epoxy nanocomposites as main insulation to high-voltage electric machines are summarized.

Key words: nanodielectrics; epoxy nanocomposite; insulation property; electrical insulation material

0 引言

纳米复合材料(nano-composites)最初由文[1]提出,指金属、树脂、橡胶等有机物基体为连续相,纳米级的无机粒子为分散相分散在基体材料中形成的一种复合材料。1994 年文[2]提出了纳米电介质(nanodielectrics)的概念,即将纳米尺度的无机物均匀分

散在玻璃、树脂及高分子聚合物等有机基体中形成的纳米电介质材料。20 世纪初文[3]的研究结果表明,与微米复合电介质材料相比,纳米复合电介质材料表现出独特的电性能,如降低介电常数、减少介质损耗、空间电荷水平低等。此后,文[4-5]发现添加了纳米颗粒的聚合物电介质与未添加纳米颗粒的材料相比其击穿强度及局部放电抵抗能力得到提高。随

收稿日期:2017-01-06; 修回日期:2017-03-04

基金项目:山西省自然科学基金(201601D202052);山西省研究生创新基金(800104-02100746);太原理工大学校青年基金(1205-04020102)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of Shanxi Province(201601D202052),Research Innovation Program for College Graduates Foundation of Shanxi Province(800104-02100746),Taiyuan University Foundation for Youths Foundation Items(1205-04020102).

着研究的深入,成功应用在电气绝缘中的纳米电介质也越来越多,如美国杜邦公司生产的聚酰亚胺薄膜(100CR型)^[6]、纳米改性电磁线^[7]都是利用纳米粉体改性聚合物基体,与传统材料相比提高了材料的耐电晕性能延长了使用寿命,由此可见纳米电介质正逐渐成为电气工程领域研究的焦点^[8-11]。

环氧树脂是电力行业中广泛应用的电气绝缘材料,作为浸渍树脂可以应用在高压电机中,浸渍电机各绝缘部件使绝缘各部分连续;作为覆盖树脂,可以应用在高压电器中,涂盖于绝缘部件形成绝缘保护层;作为灌封材料,可以应用在电子元件、线路器件内,提高元件、线路间的绝缘;作为环氧浇注,通过浇注绝缘电器提高电性能增强绝缘,可用于超高压、特高压中支撑绝缘子、绝缘拉杆以及GIS或GIL内部盆式绝缘子或支柱绝缘子等;作为绝缘胶黏剂,可以与云母等结合形成环氧云母带,应用在高压电机主绝缘及其他电机、电器线圈绝缘延长使用寿命。为了增强环氧树脂电性能、提高其耐热性及机械性,早期通过填充微米颗粒或纤维来增强其基本性能,发现微米无机氧化物颗粒掺杂后的环氧树脂复合材料在机械性能、热性能和电气性能方面均得到提高^[12]。然而,这类填料的局限在于它们会引起绝缘材料某些机械性能的下降,如延展性^[13]。近年来,研究发现通过填充纳米尺寸填料的绝缘材料,其增韧性增大,弹性模量及延展性均得到提高^[13-16]。环氧树脂纳米电介质的实验室研究表明,经过添加一定质量分数的纳米颗粒后,绝缘材料将会在耐局部放电、击穿强度、抗电树枝、水树枝等方面的性能得到显著提高,并延长了绝缘材料的寿命^[17-18],材料的机械性能、耐热性、热传导率均得到提高^[19-20]。但是,将环氧树脂纳米电介质成功应用在电气绝缘系统以前仍有许多要解决的问题^[21]。如由于纳米颗粒表面活性较高、易于聚集且纳米颗粒是亲水性环氧树脂是疏水性,因此不容易将纳米颗粒均匀分散到环氧基体中,纳米颗粒在环氧基体中的团聚和不均匀分散会影响复合材料的性能。因此,通过对纳米颗粒表面改性使其与环氧基体达到良好的相容性,从而提高纳米复合材料的物理及电气性能。

文中叙述了环氧树脂纳米电介质常用制备方法,给出实验室条件下最优制备法,确定了具体的制备流程,总结了环氧树脂纳米电介质材料电性能、局部放电腐蚀、绝缘击穿强度及机械性能的测试方法。最后总结了环氧树脂纳米电介质在电机主绝缘中的最新研究进展,以期给国内电气绝缘材料的发展及改良有所启发和促进。

1 纳米掺杂物

1.1 纳米颗粒种类

纳米颗粒在形态、种类方面非常多样。它们有许多不同的划分方式,最常见的有两种划分方法,按形状划分有:球形颗粒、晶须和棒状颗粒、片状颗粒;按材料划分有:二氧化硅、金属氧化物和氢氧化物(Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , ZnO , $\text{AlO}(\text{OH})$)、纳米粘土、碳纳米管和碳笼^[17]。

纳米颗粒在自然状态下是以微米簇进行团聚。因此,即使平均粒径小于50 nm的纳米颗粒,它们仍会形成微米级的颗粒团簇。在纳米电介质材料中,只有掺杂的纳米颗粒在聚合物基体中达到充分的分散和分布,才能发挥纳米电介质的全部潜能^[22]。纳米颗粒的分散和分布情况见图1。

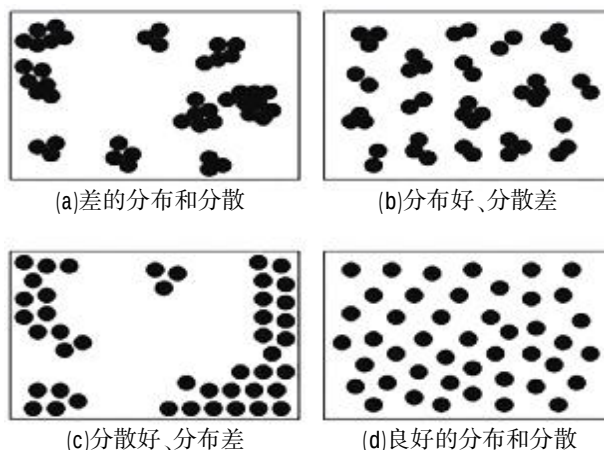


图1 纳米颗粒分布和分散情况图

Fig. 1 Illustration of distribution and dispersion

纳米复合材料生产过程中最关键的技术是使纳米颗粒在聚合物基体中达到均匀的分散和分布,这是材料可靠生产的一部分。但纳米复合材料中高分子聚合物通常都与纳米颗粒不兼容的,因此需要对纳米颗粒进行表面改性达到与聚合物基体相容性。

1.2 纳米颗粒表面处理

1.2.1 纳米颗粒表面改性

纳米颗粒表面活性较高、易于聚集,不容易分散到基体中,并且纳米颗粒是亲水性,高分子聚合物是疏水性,两者不相容。只有掺杂的纳米颗粒在基体中分散均匀时才能发挥纳米电介质的全部潜能^[22],因此需对纳米颗粒进行表面处理,使其与基体之间存在良好的相容性,以达到均匀分散、分布的目的。纳米颗粒的表面处理常用的有物理法和化学法,物理法一般通过使用低分子量的表面活性剂,当它添加到低浓度的液体中就会改变液体表面或界面的性质;化学法一般使用偶联剂对纳米颗粒进行表面改

性,以提高无机纳米颗粒与有机聚合物基体之间的粘附性^[22]。偶联剂通常由疏水链段和亲水链段构成,两者之间以同一个分子链接。偶联剂能够降低填充颗粒的表面效能及颗粒与聚合物基体间的界面张力,从而促进纳米颗粒的均匀分布,提高颗粒在基体中的分散性。如硅烷偶联剂其代表性通式为: $R(CH_2)_nSiX_3$,见图 2^[22]。图 2 中: X 为可水解的基团,能与纳米填料产生共价键; R 为有机官能基团能与基体兼容,这些基团由单独的硅原子链接。

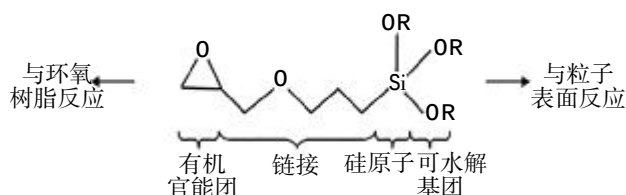


图 2 硅烷偶联剂

Fig. 2 Silane coupling agent

1.2.2 纳米颗粒真空干燥

电气绝缘材料中常用于改善电性能的纳米颗粒以金属氧化物为主,包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ZnO 、 MgO 和 TiO_2 等,这些纳米颗粒是亲水性的,在进行纳米颗粒的表面改性前很容易吸附水在其边缘成水壳,并存在于最终的复合材料中。由于纳米颗粒的具有较大的比表面积,这些水壳会形成贯穿复合物的导电通路,对纳米复合材料的介电特性产生显著影响^[23-24]。其中,具有高纵横比的纳米颗粒所形成的含有水壳的复合材料更容易形成渗透路径,降低了复合材料的击穿电压,见图 3^[22]。因此纳米颗粒使用前需要在 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中干燥 24 h。

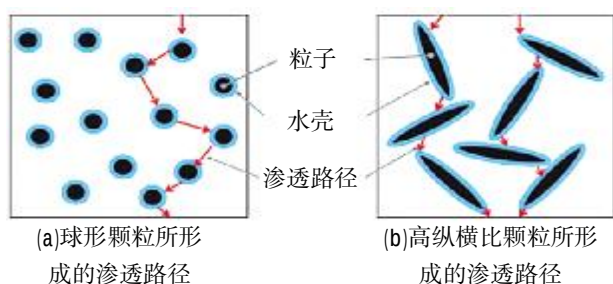


图 3 不同形状纳米颗粒形成的渗透路径

Fig. 3 Percolation paths in composites with hydrophilic fillers of different aspect ratio

2 环氧树脂纳米复合电介质的制备

2.1 常用制备方法

目前,绝缘型纳米颗粒常用的制备方法有以下 3 种方法。

2.1.1 共混法

共混法是指将所需的无机纳米颗粒直接分散在有机聚合物基体中,方法简单、容易操作,适用的纳

米颗粒种类广泛。但是,该方法的缺点在于纳米颗粒由于其表面效能高,极易团聚影响复合材料的性能。因此在纳米颗粒使用之前,通过使用表面改性的方法,来提高纳米颗粒在基体中的分散性及与基体的相容性。同时,常辅助使用机械搅拌和超声分散以使颗粒达到良好的分散效果。

2.1.2 溶胶—凝胶法

溶胶—凝胶法常用于制备无机或有机纳米复合材料。它是由可水解的纳米颗粒组成的前驱体溶液和聚合物相溶,通过水解和聚合反应形成所需的复合材料;或是把前驱体和聚合物同时溶解,水解和聚合同步发生,制得所需复合材料。该方法的优点是使有机聚合物在初始阶段引入,有利于纳米颗粒的均与分散,缺点是制作过程周期长,并且在凝胶过程存在大量微孔,干燥过程易收缩。

2.1.3 插层法

反应通常有两种方式:一是在外力作用下将层状无机物剥离成纳米尺度的结构微区,从而使其能够均匀分散到聚合物基体中形成纳米复合材料;二是把聚合物单体填充到无机纳米层状物的层间,让其在层间发生原位聚合反应。但是它的局限性在于只适合于有典型层状结构的无机物^[25]。

综上所述,基于环氧树脂等热固性材料,在实验室条件下一般采用共混复合法制得环氧树脂纳米复合材料^[17,26]。

2.2 试样制备流程

环氧树脂纳米复合材料使用共混法的制备流程如下:

- 1) 在 PH 为 7 的低矿化度水中清洗改性后的纳米颗粒,并对纳米颗粒进行真空干燥称重。
- 2) 把环氧树脂加入烧杯,再加入纳米颗粒进行机械高速搅拌(4 000 转/h),时间为 1 h,搅拌过程中温度需要保持在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。搅拌完成后室温再静置 24 h 使其充分混合得到第一混合液。
- 3) 在加固剂之前,先把不锈钢模具喷上脱模剂放入烘箱预热 30 min。
- 4) 加固剂到第一混合液,并控制温度在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下机械搅拌 10 min,再加入促进剂搅拌机械 5 min 后拿出放入真空干燥箱中进行真空抽气 20 min 得到第二混合液。
- 5) 将预热的模具取出再喷一遍脱模剂后,将上述第二混合溶液倒入不锈钢模具,并放入烘箱 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固化 2 h。
- 6) 移出模具室温条件下静置 4 h,制得试样。

实验方案示意图见图 4。

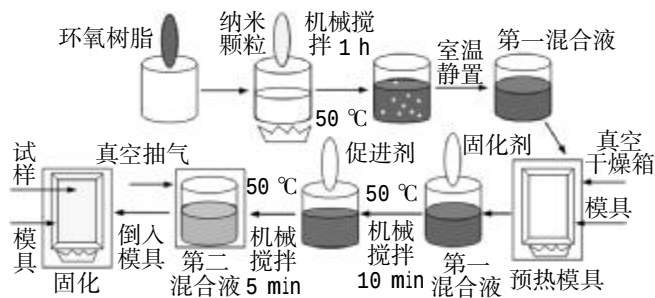


图4 环氧树脂纳米复合电介质制样过程图

Fig. 4 Sample-preparation process for epoxy resin nanodielectrics

3 环氧树脂纳米复合电介质的电性能

环氧树脂电介质绝缘材料在高压绝缘系统应用中占很大比重。目前,中国中高压电机定子绕组主要以环氧树脂浸渍带和环氧树脂粘合剂作为主绝缘材料,国内外气体绝缘变电站中的支撑绝缘子、盆式绝缘子,以及绝缘拉杆等也都以环氧树脂电介质复合绝缘材料为主^[27-28]。然而,环氧树脂在电气性能方面仍然存在的一些不足,如用于变频电机匝间绝缘的环氧树脂耐电晕性能较低,高压直流下未经处理的环氧树脂电介质绝缘子表面较易积累电荷等问题,制约了环氧树脂电介质材料工业化生产^[26-27]。

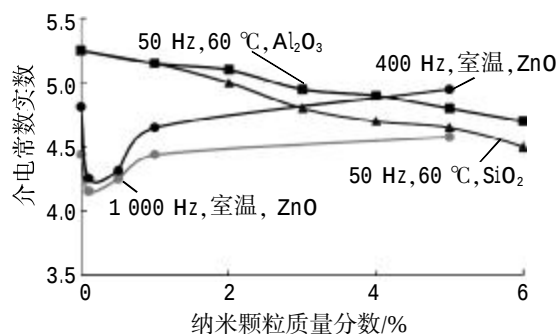
通过对环氧树脂电介质中添加不同类型的纳米颗粒,可以实现对电介质电学性能的有效改善和调控,主要包括对介电常数、介质损耗因数、耐局部放电和耐电强度等性能的调控。

3.1 介电常数和介质损耗因数

文[26,29]叙述了添加不同含量的纳米颗粒对环氧树脂介电常数和介质损耗因数调控方法及调控机理。掺杂不同纳米颗粒质量分数后,环氧树脂的介电常数相应变化规律见图5。由图5可以看出,对于ZnO复合环氧树脂,随着ZnO含量的变化,其介电常数先减小后增大,出现极小值。对比SiO₂和Al₂O₃复合环氧树脂,随着这两种纳米颗粒质量分数的增加,复合环氧树脂的介电常数逐渐减小。

3.2 局部放电

高压电气设备由于长期在高的电场强度下运行,在绝缘系统部分区域会产生局部导电通道,即发生局部放电。随着局部放电的频繁发生,将导致绝缘材料劣化速度加快、绝缘性能降低,最终引起高压设备绝缘失效。通过在电介质材料中适当添加纳米颗粒,可以调节电介质材料对局部放电耐受性能,有效抵抗局部放电腐蚀。环氧树脂在添加一定质量纳米颗粒后,表现出了较高的沿面放电耐受能力^[5,29-30],见图6。从图6中可以看出,相对于未添加纳米颗粒

图5 不同纳米颗粒质量分数下的环氧树脂/ZnO、SiO₂和Al₂O₃的介电常数对比图Fig. 5 Comparison of permittivity of epoxy resin /ZnO, SiO₂ and Al₂O₃ with different nano fillers degree

的环氧树脂来说,添加TiO₂、SiO₂后的环氧树脂复合材料在沿面放电腐蚀作用下,表面裂化程度大大降低。由此可以认为,环氧树脂纳米复合电介质的局部放电降解特性得到提高是由于,添加的纳米颗粒起到了抵抗局部放电的作用。

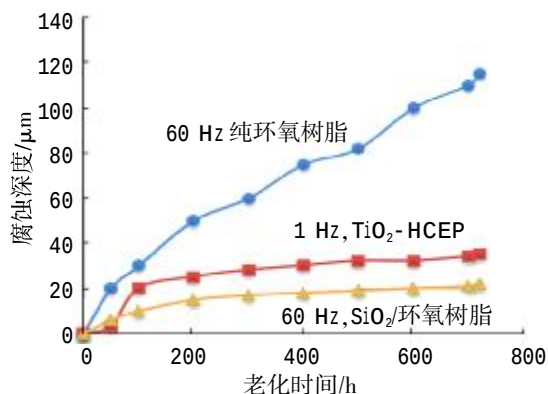


图6 不同纳米颗粒种类下环氧树脂纳米复合电介质沿面放电腐蚀深度随老化时间关系图

Fig. 6 Temporal change in erosion depth of area degraded of epoxy resin nanodielectrics as a function of different nano fillers

3.3 击穿强度

击穿强度可以表征电介质在强电场作用下的绝缘电耐受能力,对电介质进行击穿强度的测试,可直接获得电介质工作于高场下的绝缘性能。研究发现,通过调节基体中纳米颗粒的粒径及质量分数,可以显著提高电介质的击穿强度^[31-33]。文[5]将纳米颗粒用偶联剂处理后与环氧树脂混合,制得纳米颗粒质量分数为5wt%环氧树脂纳米复合电介质。对该材料选择针—板电极进行测试,即通过在针状电极和平板电极之间施加频率为50 Hz的持续上升的交流电压来测其绝缘击穿强度。测试结果表明,在击穿概率为50%时环氧树脂纳米复合材料的击穿强度是纯环氧树脂的1.5倍是微米复合环氧树脂的1.12倍;文[18]通过针—板电极对纯环氧树脂试样和含有纳米

填料(26wt%)的环氧树脂试样进行击穿试验,测试结果表明,含有纳米填料的环氧树脂寿命是纯环氧树脂的10倍以上。

3.4 导热性

文[18]按照 ISO8301 标准的静态热流方法测量环氧树脂纳米复合电介质的导热系数,试验结果表明含有纳米颗粒(26wt%)环氧树脂试样的导热系数与纯树脂试样的导热系数相比提高了15%,见图7。

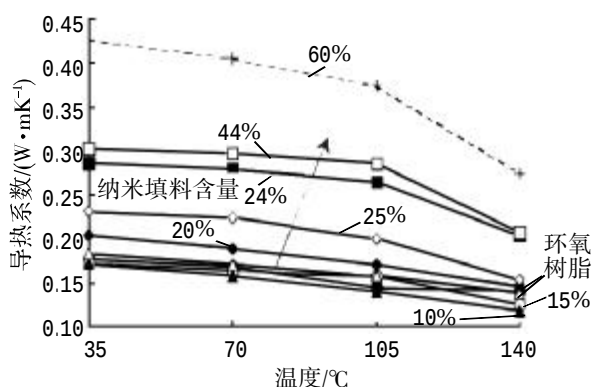


图7 不同纳米含量下环氧树脂纳米复合电介质导热系数与温度的关系

Fig. 7 Relationship between thermal conductivity and temperature of epoxy resin nanodielectrics with different nano-filler content

3.5 拉伸性

文[33]对环氧树脂纳米复合试样和纯环氧树脂试样进行拉伸和断裂应变测试。测试是在测力传感器为2 kg的MTS万能试验机上进行,对试样以应变速率为0.1 mm/min的低变形速度进行测试。实验结果表明,纳米颗粒在环氧树脂基体中得到均匀分散的试样与纯环氧树脂相比,其弹性模量提高了7%,断裂应变率提高了43%。

4 定子线棒的试验研究

各国绝缘试验室对环氧树脂纳米复合电介质进行材料的电、热、机械性能测试,实验结果表明环氧树脂纳米电介质有优良的电绝缘性、机械性和导热性^[5,18,26,29-33]。近期国外有实验室使用含有无机SiO₂纳米成分的新型环氧云母带包绕制成模绕定子线棒并对这种新型绝缘系统进行了试验。试验分别在在6.6 kV模拟定子线棒和13.8 kV真实尺寸定子线棒进行测试结果表明:在对地绝缘中由于添加了SiO₂纳米颗粒,材料的热性能和机械性能提高了15%至30%。因此,使用新型纳米绝缘系统设计定子绕组,可使绝缘厚度更薄、槽满率更高、热交换效果更好;同时,该新型绝缘系统能有效抵抗局部放电腐蚀和电树枝生长,使绝缘系统的电气寿命延长10倍^[17-18]。

5 结语

环氧树脂中加入经过偶联剂处理的纳米颗粒,并使其在环氧树脂基体中达到均匀的分散和分布,且保证纳米颗粒的含量在最适合添加量5%wt~26%wt之间,制得环氧树脂纳米复合电介质。通过材料实验证明,环氧树脂纳米复合电介质具有优异的局部放电抵抗能力,并显著提高了材料的击穿强度,且有效抵抗了电树枝形成延长了材料寿命。国外实验室真机线棒试验结果表明,使用纳米化合物绝缘材料提升了定子绕组环氧云母对地绝缘的性能。在未来,发展新型纳米绝缘系统,可以减小高压系统的设计尺寸,提高电场强度设计水平,大幅降低制造成本。

参考文献:

- [1] JARRETT R N, TIEN J K. Effect of cobalt on structure, microchemistry and properties of wrought nickel-base superalloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1982, 13(6):1021-1032
- [2] LEWIS T J. Nanometric dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 1994, 1(5): 812-825.
- [3] NELSON J K, FOTHERGILL J C, DISSADO L A, et al. Towards an understanding of nanometric dielectrics [C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2002: 295-298.
- [4] CAO Y, IRWIN P C, YOUNSI K. The future of nanodielectrics in the electrical power industry[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(5): 797-807.
- [5] IMAI T, SAWA F, OZAKI T, et al. Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale silica particles [C]// Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Takahiro Imai, Japan: IEEE, 2005: 239-242.
- [6] 何丽娟, 盖凌云. 无机纳米掺杂对聚酰亚胺薄膜电老化阈值的影响[J]. 绝缘材料, 2003, 39(2): 17-19.
HE Lijuan, GAI Lingyun. Influences of inorganic-nanoparticle to the electrical degradation threshold of polyimide film[J]. Insulating Materials, 2003, 39(2): 17-19.
- [7] 刘学忠. 纳米粉末填充绝缘在变频电机中的电场均匀化效应[J]. 电气技术, 2004(12): 7-13.
LIU Xuezhong. Electric field uniformity effect of nano powder doped insulation in frequency control motor[J]. Electrical Engineering, 2004(12): 7-13.
- [8] NELSON J K, HU Y. Nanocomposite dielectrics—properties and implications[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2005, 38(2): 213-222.
- [9] 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 Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2004, 11(5): 763-784.
- [10] ANDRITSCH T M. Epoxy based nanodielectrics for high voltage DC applications: Synthesis, dielectric properties and space charge dynamics[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
- [11] RAMU T S, NAGAMANI H N. Alumina and silica based epoxy nano-composites for electrical insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(1): 236-243.
- [12] NIELSEN L E, LANDEL R F. Mechanical properties of polymers and composites[J]. Wear, 1994, 2(1): 168-182.
- [13] XU Y, CHUNG D D L, MROZ C. Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2001, 32(12): 1749-1757.
- [14] LEE J H. Toughening structural adhesives via nano-and micro-phase inclusions[J]. Journal of Adhesion, 2003, 79(8-9): 867-873.
- [15] KINLOCH A J, MOHAMMED R D, TAYLOR A C, et al. The effect of silica nano particles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers [J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(18): 5083-5086.
- [16] JOHNSEN B B, KINLOCH A J, MOHAMMED R D, et al. Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers[J]. Polymer, 2007, 48(2): 530-541.
- [17] CHERNEY E A. Nanodielectrics applications-today and tomorrow[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(6): 59-65.
- [18] GRÖPPER P, HILDINGER T, POHLMANN F, et al. Nanotechnology high voltage insulation systems for large electrical machinery-first results[C]//CIGRE.Paris; [s.n.], 2012: 6-30.
- [19] MESSERSMITH P B, GIANNELIS E P. Synthesis and characterization of layered silicate-epoxy nanocomposites [J]. Chemistry of Materials, 1994, 6(10): 1719-1725.
- [20] BUTZLOFF P, D'SOUZA N A, GOLDEN T D, et al. Epoxy/montmorillonite nanocomposition of reaction kinetics[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41(10): 1794-1802.
- [21] FRECHETTE M F, VIJH A, UTRACKI L, et al. Nanodielectrics-a "universal" panacea for solving all electrical insulation problems[J]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE, 2010: 1-3.
- [22] ANDRITSCH T, FABIANID, VAZQUEZ I R. Nanodielectrics—examples of preparation and microstructure [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(6): 21-28.
- [23] FABIANI D, MONTANARI G C, TESTA L. Effect of aspect ratio and water contamination on the electric properties of nanostructured insulating materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 221-230.
- [24] ZOU C, FOTHERGILL J C, ROWE S W. A "water shell" model for the dielectric properties of hydrated silica-filled epoxy nano-composites[J]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2007, 10(4): 389-392.
- [25] 朱 军, 李毕忠. 聚合物/无机纳米复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2000, 28(10): 3-8.
- ZHU Jun, LI Bizhong. Research advancement in polymer/inorganic nanocomposite[J]. New Chemical Materials, 2000, 28(10): 3-8.
- [26] 张纪伟. 环氧树脂纳米复合介质表面电荷动态特性与电痕破坏研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHANG Jiwei. Dynamic behavior of surface charge and tracking failure of epoxy nanocomposite[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [27] 张冬海, 张 晖, 张 忠. 纳米技术在高性能电力复合绝缘材料中的工程应用[J]. 中国科学, 2013(6): 725-743.
- ZHANG Donghai, ZHANG Hui, ZHANG Zhong. Industry applications of nanotechnology in high performance insulation composites[J]. Scientia Sinica Chimica, 2013(6): 725-743.
- [28] 韦衍乐. 高压电机主绝缘用纳米复合多胶云母带[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2013.
- WEI Yanle. Nano composite rich-resin mica tape used for main insulation of high-voltage motors [D]. Guilin: College of Materials Science and Engineering Guilin University of Technology, 2013.
- [29] YAMAZAKI K, CHO H, IMAI T, et al. Improving partial discharge resistance of hydrophobic epoxy resins with nanofiller dispersion[D]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). [S.l.]: IEEE, 2011: 668-671.
- [30] HOFFMANN C, JENAU F. Dasteilentladungsbedingte alterungsverhalten von SiO₂-nanopartikeln in modell-anordnungen bei wechselfeldspannung [D]//TAE-Seminar. Esslingen; [s.n.], 2011: 262-271.
- [31] TANAKA T, MATSUNAWA A, OHKI Y, et al. Treeing phenomena in epoxy/alumina nanocomposite and interpretation by a multi-core model[J]. IEEE Transactions on Fundamentals & Materials, 2006, 126(126): 1128-1135.
- [32] DANIKAS M G, TANAKA T. Nanocomposites-A review of electrical treeing and breakdown[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(4): 19-25.
- [33] ZHAO S, HILLBORG H, E MARTENSSON, et al. Evaluation of epoxy nanocomposites for electrical insulation systems[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2010: 489-492.
- 李媛媛(1982—), 女, 工程师, 主要从事高压电机主绝缘材料的改性及电性能的研究。
- 田慕琴(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电器、煤矿安全监测监控技术与设备绝缘技术方面的研究。
- 雷志鹏(1983—), 男, 讲师, 主要从事高压电缆故障的状态评估及其局部放电特性分析的研究。