

# 碳化硅/有机化蒙脱土/环氧树脂微纳米复合防电晕材料性能研究

黄浩<sup>1</sup>, 胡春秀<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨大电机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**制备了碳化硅/有机化蒙脱土/环氧树脂微纳米复合非线性防电晕材料,实验分析了复合材料中碳化硅和有机化蒙脱土的含量对材料介电性能的影响,并对应用该复合防电晕材料的线棒进行试验,测试了线棒的耐电晕性能以及防晕区表面温度。结果表明:一定含量的纳米有机化蒙脱土的加入能有效提高SiC防电晕复合材料的非线性特性,降低线棒防晕区域表面温度,提高耐电晕性能。

**关键词:**碳化硅;环氧树脂;有机化蒙脱土;定子线棒;防电晕特性

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)02-0087-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.02.015

## Properties of Silicon Carbide/Organic Montmorillonite/Epoxy Resin Micro-Nano Composite Corona Resistant Material

HUANG Hao<sup>1</sup>, HU Chunxiu<sup>1,2</sup>

(1. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China;

2. Harbin Institute of Large Electrical Machinery, Harbin 150040, China)

**Abstract:** A silicon carbide/organic montmorillonite/epoxy resin micro-nano non-linear corona resistant composite material was prepared. The influence of silicon carbide and organic montmorillonite content on the dielectric properties of the corona resistant material was studied. Bars were prepared using the corona resistant material, and their corona resistance and surface temperature were tested. The results show that the addition of a certain amount of nano organic montmorillonite could effectively improve the non-linear characteristic of the corona resistant composite, reduce the surface temperature of anti-corona area, and improve the corona resistance of bars.

**Key words:** silicon carbide; epoxy resin; organic montmorillonite; stator bar; corona resistance

### 0 引言

高压电机定子绕组端部用防电晕漆主要由碳化硅微粉、胶黏剂以及分散剂等组成。其中碳化硅为一种非线性半导体材料,有着电阻随外施电场强度增加而下降的特性。碳化硅应用在电场分布不均匀的发电机定子绕组端部,在高电场作用下碳化硅涂层表面的电阻可以根据所承受电场强度的大小进行自动调节,使绕组端部表面电压分布变得均

匀,从而有效消除端部电晕。文献[1-4]对碳化硅的非线性导电机理进行了详尽的研究,但国内外对不同胶黏剂防电晕漆特性的研究却很少,主要集中在单组份聚酯漆和环氧酯漆作为胶黏剂的复合材料防电晕漆的特性研究<sup>[5-6]</sup>。

研究表明,环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料的耐磨性、耐热性、粘接强度以及冲击强度比纯环氧树脂更加优异<sup>[7-10]</sup>。若以碳化硅微粉作为填料,环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料作为胶黏剂制备防电晕材料,将会提高防电晕材料的附着性、耐热性等性能,同时,纳米粒子的加入将可能对复合材料的非线性特性产生一定的影响。本研究以环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料作为胶黏剂,与碳化硅一起制备成一

收稿日期:2020-03-24 修回日期:2020-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577045)

作者简介:黄浩(1982-),男(汉族),安徽淮北人,高级工程师,主要从事发电机技术的研究。

种新型微/纳米复合防电晕材料,对其性能进行研究,并与纯环氧树脂作为胶黏剂制备的防电晕漆性能进行对比分析。

## 1 实验

### 1.1 原材料

双酚A型环氧树脂(EP),无锡树脂厂;低黏度聚酰胺树脂固化剂,北京香山联合助剂厂;600目和1200目碳化硅(SiC),日本FUJIMI INCORPORATED公司;甲苯、丙酮、无水乙醇,哈尔滨试剂化工厂;硅烷偶联剂A-1100,深圳市海城兴业科技有限公司;过200目筛的有机化蒙脱土(OMMT),自制。

### 1.2 主要测试设备

扫描电子显微镜,FEI Sirion 200型,美国FEI电子光学公司;电子偏光显微镜,DM2500P型,德国徕卡公司;紫外成像仪,UVOLLE型,以色列OFIL公司;红外热像仪,Ti10型,FLUKE公司。

### 1.3 试样制备

#### 1.3.1 防电晕漆胶黏剂试样的制备

用高速搅拌器将一定配比的甲苯、丙酮、无水乙醇和EP的混合溶液搅拌成透明状液体,之后分成6等份,根据EP的质量比,按照0%、2%、3%、4%、5%、6%的比例称取OMMT,分多次加入到各EP与溶剂的混合溶液中,高速搅拌均匀后<sup>[11]</sup>,加入定量的固化剂,再次搅拌成没有明显絮状的溶液,防电晕漆胶黏剂制备完成。

#### 1.3.2 防电晕漆试样的制备

按照EP的质量比,分别称取一定质量的600目和1200目SiC微粉,向SiC微粉中加入无水乙醇和丙酮的混合溶液进行浸润处理。由于SiC粒子比表面积大,易吸附水分,在浸润之前,SiC微粉需在120℃进行干燥处理5h以去除粒子表面附着的水分。经过浸润处理后的SiC粒子更易与EP胶黏剂融和在一起,不易产生团聚现象<sup>[12]</sup>。

将1.3.1中制备的胶黏剂试样加入到经过浸润处理后的SiC微粉中,在用搅拌器进行高速搅拌的同时,加入一定量的硅烷偶联剂A-1100以降低SiC颗粒和EP分子之间的结合能,使SiC颗粒在胶黏剂试样中分散更加均匀。待混合溶液搅拌均匀后,防电晕漆试样制备完成。

使用毛刷将防电晕漆试样均匀地涂刷在环氧玻璃布板上,为防止在防电晕漆固化过程中SiC粒子发生沉降,影响测试结果,涂刷时漆膜要尽可能

薄,并且在第1遍固化后再涂刷第2遍<sup>[13]</sup>。最终漆膜厚度控制在0.10~0.20mm。为消除环境因素的影响,涂刷试样在室温固化48h后,在80℃的烘箱中保持5h后再进行测试。

#### 1.3.3 线棒试样的制备

为验证微纳米复合防电晕材料的实际应用效果,按照1.3.1胶黏剂试样的制备方法,制备出不同纳米OMMT含量的胶黏剂。然后根据1.3.2防电晕漆的制备方法,分别选用600目和1200目SiC,按照胶黏剂与SiC质量比为1:1.8的比例,分别配制了OMMT含量为0%、3%、5%的防电晕漆复合材料试样,并将试样在实验线棒上进行应用。

实验线棒采用铝导体,导体尺寸为13mm×51mm,导体圆角半径为2mm,线棒主绝缘长度为1200mm,厚度为3.5mm。线棒中部涂刷长度为400mm的低电阻漆作为测量电极,两侧分别涂刷作为中阻漆的以600目SiC为填料的复合材料和作为高阻漆的以1200目SiC为填料的复合材料<sup>[6]</sup>,涂刷长度分别为150mm和180mm。涂刷时,为保证3段防晕漆交接部分过渡良好,中阻漆和高阻漆都分别向前搭接20mm,即中阻部分与低阻部分、高阻部分与中阻部分分别重合20mm。为保证涂刷效果,每种防电晕漆都涂刷两遍。

### 1.4 测试方法

防电晕漆试样表面电阻率和非线性特性的测试采用两电极系统。在固化后的试样表面贴覆铝箔作为电极。电极长度为40mm,宽度为10mm,间距为10mm。由于电极和试样的接触状态对测试结果有极大的影响,为使测试结果准确,每次测试时在电极上均施加2kg重物使电极与试样表面充分接触<sup>[14]</sup>。测量线路图如图1所示,其中A是数字检流计,B是高压变压器,Z是整流计,C是滤波电容器, $R_0$ 是保护电阻,D是电阻分压器,V是静电电压表, $R_x$ 是试样,F是分流计。

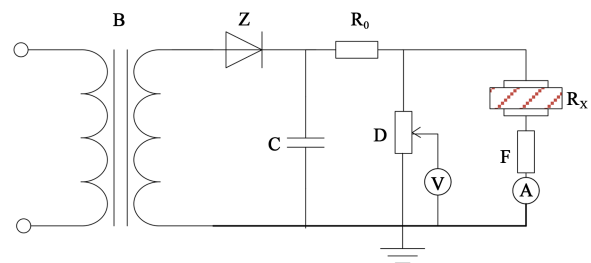


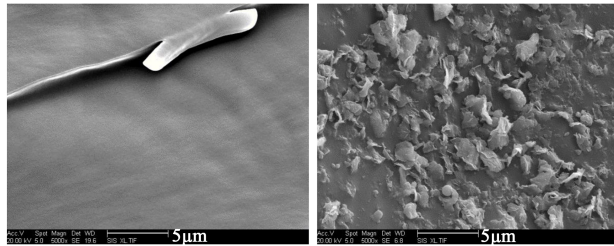
图1 非线性特性参量测量线路图

Fig.1 Nonlinear characteristic measurement circuit

## 2 实验结果与分析

### 2.1 EP与EP/OMMT纳米复合材料的结构表征

为研究纯EP和EP/OMMT纳米复合材料的微观结构,对两种胶黏剂在扫描电子显微镜(SEM)下进行了观测,结果如图2所示。在SEM测试前,用氢氟酸腐蚀材料试样断面后表面溅射镀碳,再进行测试。从图2可以看出,OMMT以片层结构的形态均匀地分散在EP基体中形成纳米复合材料。



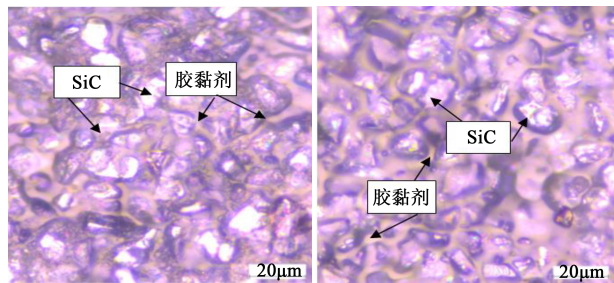
(a)纯EP胶黏剂 (b)EP/OMMT纳米复合材料  
胶黏剂

图2 胶黏剂断面SEM图

Fig.2 SEM images of the fracture surface of adhesive

### 2.2 防电晕漆的结构表征

使用高倍偏光显微镜(PLM)对防电晕漆试样的表面状态进行了观测,结果如图3所示。从图3可以看出,纯EP作为胶黏剂的防电晕漆和EP/OMMT纳米复合材料作为胶黏剂的防电晕漆表面都十分平整,SiC粒子在两种胶黏剂中分散比较均匀。



(a)纯EP胶黏剂防电晕漆 (b)EP/OMMT胶黏剂防电晕漆  
图3 防电晕漆表面PLM微观图像

Fig.3 PLM images of the anti-corona varnish surface

### 2.3 SiC及OMMT含量对防电晕漆性能的影响

#### 2.3.1 防电晕漆初始表面电阻率

分别以600目SiC和1200目SiC作为填料,不同OMMT含量胶黏剂的防电晕漆表面电阻率随SiC含量的变化关系如图4所示。从图4可以看出,所有材料的初始表面电阻率 $\rho_0$ 随着SiC含量的增加均呈现下降趋势,随着SiC占比的不断增加,下降趋势逐渐趋于平缓,当SiC与胶黏剂的质量比超过3.0

时, $\rho_0$ 几乎不再变化。测试结果中,600目SiC防电晕漆初始表面电阻率低于1200目SiC防电晕漆,胶黏剂中OMMT的含量变化对防电晕漆的初始表面电阻率 $\rho_0$ 影响不大。

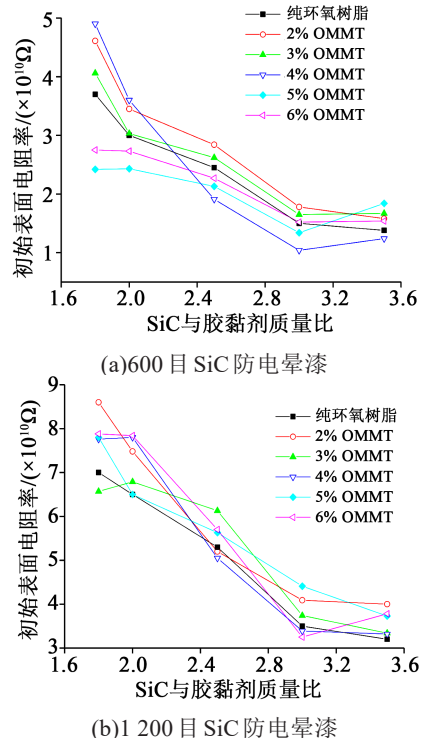


图4 不同OMMT含量复合材料初始表面电阻率随SiC含量的变化

Fig.4 Variation of surface resistivity with SiC content for composites with various OMMT content

这主要是因为防电晕漆复合材料的主要成分为胶黏剂和SiC,胶黏剂是绝缘材料,体积电阻率很高,约为 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ,SiC是非线性半导体材料,体积电阻率约为 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ,胶黏剂的体积电阻率要远高于SiC材料。随着SiC含量增加,防电晕漆中的SiC颗粒占比增加,胶黏剂占比降低,材料的表面电阻率下降。但当SiC含量达到一定范围时,胶黏剂的特性不再对复合材料产生大的影响,复合材料表现出的特性更接近于SiC粒子的本征性能,随着SiC含量的增加,不再对复合材料的初始表面电阻率 $\rho_0$ 产生大的影响,所以当SiC含量达到一定范围后, $\rho_0$ 不再随着SiC含量的增加产生变化<sup>[9-10]</sup>。

研究结果表明,对于SiC粒子来讲,其外表面有一层 $\text{SiO}_2$ 薄膜<sup>[15]</sup>,随着SiC粒子表面 $\text{SiO}_2$ 含量的变化,表现出的非线性系数和电阻率有很大不同<sup>[12]</sup>。根据SiC导电机理的表面氧化理论,SiC颗粒本身的

体积电阻率远小于其表面  $\text{SiO}_2$  薄膜的体积电阻率,所以当有外施电压时,电压主要作用在  $\text{SiO}_2$  薄膜上, $\text{SiC}$  颗粒越小,单位长度上的  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度越厚,电阻率就越高<sup>[6]</sup>,因此 600 目  $\text{SiC}$  防电晕漆的表面电阻率低于 1 200 目  $\text{SiC}$  防电晕漆。

$\rho_0$  作为反映低电压下防电晕材料本征特性的主要参数,没有随着 OMMT 含量的增加而产生明显变化,其原因主要是:一定含量范围的 OMMT 的加入没有改变材料的导电性能,材料的导电通路仍以  $\text{SiC}$  颗粒本身以及颗粒间  $\text{SiO}_2$  薄膜接触电阻为主,与纯 EP 作为胶黏剂的材料并无太大差异。

### 2.3.2 防电晕漆非线性系数

不同 OMMT 含量的防电晕漆非线性系数  $\beta$  随 600 目  $\text{SiC}$  和 1 200 目  $\text{SiC}$  含量的变化如图 5 所示。

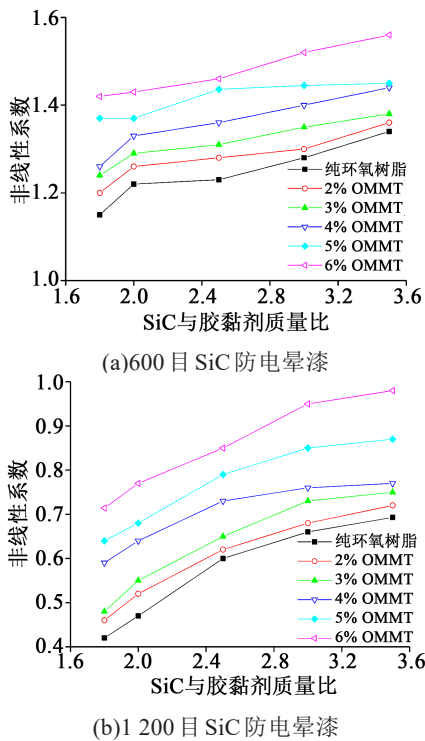


图5 不同 OMMT 含量复合材料非线性系数随  $\text{SiC}$  含量的变化

Fig.5 Variation of nonlinear coefficient with  $\text{SiC}$  content for composites with OMMT content

从图 5 可以看出,随着  $\text{SiC}$  含量的增加,所有材料的非线性系数  $\beta$  均不同程度增加;同时,材料的非线性系数  $\beta$  随着 OMMT 含量的增加均出现升高趋势。填料为 600 目  $\text{SiC}$  的防电晕漆试样非线性系数  $\beta$  高于填料为 1 200 目的  $\text{SiC}$  防电晕漆试样。

对于  $\text{SiC}$  材料,决定其非线性特性的最主要因

素在于  $\text{SiC}$  颗粒间的接触性。根据  $\text{SiC}$  导电机理的表面氧化理论,在电场作用下,绝大部分电压都作用在  $\text{SiC}$  粒子外面的  $\text{SiO}_2$  薄膜上,粒子越大, $\text{SiO}_2$  薄膜上的电压降越大。随着外施电压的增加, $\text{SiO}_2$  薄膜所承受的场强增加,载流子穿过  $\text{SiO}_2$  薄膜的隧道效应、载流子的场发射效应和绝缘层内部中心碰撞电离效应增强,载流子数目增加<sup>[2]</sup>,非线性特性增强。因此填料为 600 目  $\text{SiC}$  的防电晕漆试样非线性系数  $\beta$  高于填料为 1 200 目的  $\text{SiC}$  防电晕漆试样。随着  $\text{SiC}$  含量的增加,复合材料的非线性系数升高,主要是因为随着复合材料中  $\text{SiC}$  含量的增加, $\text{SiC}$  颗粒间的胶黏剂厚度减小,对复合材料的非线性导电特性影响降低, $\text{SiC}$  颗粒对材料的非线性导电特性作用增强,复合材料的非线性导电特性更加接近于  $\text{SiC}$  本身的非线性导电特性。

OMMT 在复合材料中一方面起到防沉剂的作用,防止  $\text{SiC}$  颗粒的沉降,改善  $\text{SiC}$  颗粒的分散性,使  $\text{SiC}$  颗粒在胶黏剂中分散更加均匀;另一方面,纳米级的 OMMT 均匀分散在复合材料中,作为分散介质,可以有效地改善  $\text{SiC}$  颗粒间的接触性,因此,随着 OMMT 含量的增加,材料的非线性系数提高。

### 2.4 实验线棒防电晕性能的研究

按照 1.3.3 中的方法,共制备了 3 根试样线棒,其中 1# 线棒试样端部防电晕漆胶黏剂为纯 EP,2# 线棒试样端部防电晕漆胶黏剂中 OMMT 含量为 3%,3# 线棒试样端部防电晕漆胶黏剂中 OMMT 含量为 5%。

对 3 根实验线棒分别施加 45 kV 的交流电压,在施加电压 1 min 后使用红外热像仪和紫外成像仪测试线棒端部防晕区域表面温度及放电光子数。线棒防晕区域表面温度测试结果如图 6 所示,放电光子数如图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出,3 个试样在施加 45 kV 电压 1 min 后防晕区表面最高温度分别为 79.1、68.9、67.9 $^{\circ}\text{C}$ ,放电光子数分别为 32 760、2 440、1 080,防晕区表面温度和放电光子数都随着胶黏剂中 OMMT 含量的增加逐渐降低。这主要是由于 OMMT 含量的增加,提高了材料的非线性特性<sup>[8]</sup>,改善了电晕放电现象,提高了起晕电压水平。因此,当 OMMT 含量在 5% 以下时,随着 OMMT 含量的增加, $\text{SiC}$  复合材料的防电晕效果提高。同时,由于纳米粒子的存在增加了复合材料的热辐射率,在一定范围内,随着 OMMT 含量的增加,防晕层表面温度降低。

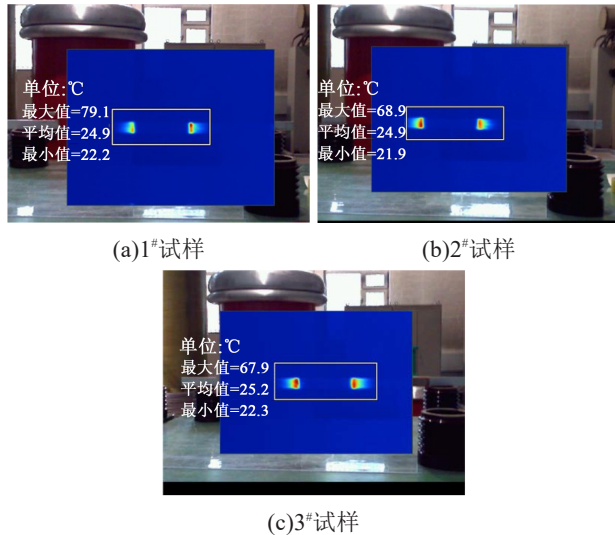


图6 施加45 kV交流电压1 min后  
线棒防晕区表面温度分布图

Fig.6 Infrared temperature of anti-corona region surface  
for test bars under 45 kV AC after 1 min

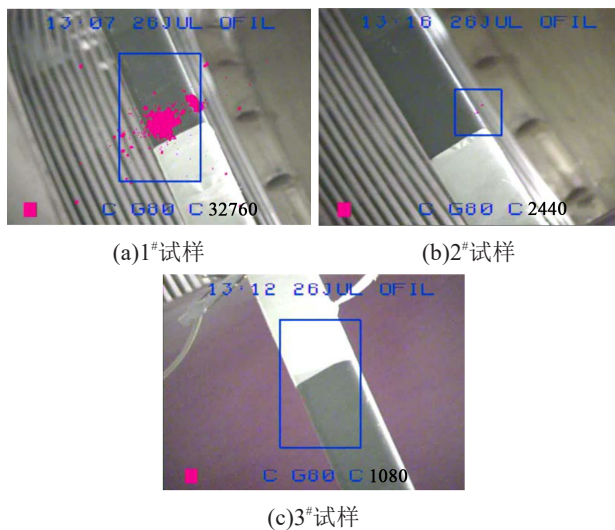


图7 施加45 kV交流电压1 min后线棒防晕区放电光子数  
Fig.7 Number of discharge photons of the anti-corona  
region surface for test bars under 45 kV AC after 1 min

### 3 结论

(1)当OMMT含量 $\leq 5\%$ 时,OMMT的加入有效

提高了SiC防电晕材料的非线性特性。

(2)将EP/OMMT/SiC微纳米复合防电晕漆应用在实验线棒端部,当OMMT含量 $\leq 5\%$ 时,随着其含量的增加,线棒防晕区表面温度降低,线棒起晕电压水平提高。

### 参考文献:

- [1] 宁叔帆,于开坤,徐明,等.  $\beta$ -SiC非线性导电特性影响因素及机理的研究[J]. 西安交通大学学报,2005,39(10):1126-1130.
- [2] 贺西民. 碳化硅非线性电阻导电机理[J]. 电瓷避雷器,1992(6):47-49.
- [3] 何恩广,王晓刚,陈寿田. 单相 $\beta$ -SiC改性大电机防晕材料研究[J]. 电工电能新技术,2001,20(1):67-71.
- [4] 于开坤,宁叔帆,赵丽华,等. 改进 $\alpha$ -碳化硅防晕体系防晕性能研究[J]. 绝缘材料,2004,37(4):20-22.
- [5] 四川德阳东方电机厂绝缘组,西安交通大学绝缘专业. 大电机定子线圈端部碳化硅防晕结构与工艺研究[J]. 西安交通大学学报,1976(1):44-86.
- [6] 迟万基. 防晕漆的评定[J]. 绝缘材料通讯,1993,26(2):11-14.
- [7] 骆幅逵,严辉,张雪平,等. 硅微粉/气相SiO<sub>2</sub>/环氧树脂复合材料的制备与力学性能研究[J]. 绝缘材料,2015,48(10):21-25.
- [8] TANAKA T. Dielectric nanocomposites with insulating properties [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005,12(5):914-928.
- [9] 彭勃,陈健聪,陈健明. 纳米材料改性环氧树脂结构胶粘接强度研究[J]. 湖南大学学报,2007,34(8):11-15.
- [10] DISSADO L A, FOTHERGILL J C. Dielectrics and nanotechnology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(5):737-738.
- [11] 宋军,汪丽,黄福堂. 环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料的制备和性能[J]. 热固性树脂,2005,20(4):14-16.
- [12] 侯海波. 大电机主绝缘端部防晕结构优化的试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.
- [13] 胡春秀,赵英男,高俊国,等. 蒙脱土/碳化硅微纳米复合防电晕漆性能研究[J]. 电机与控制学报,2015(10):45-49.
- [14] 孙永鑫,张大鹏,郑伟. 防晕材料的表面电阻率测试技术研究及参数的提取[J]. 绝缘材料,2012,45(6):56-59.
- [15] MARTENSSON E, GAFVERT U, ONNEBY C. Alternate current characteristics of SiC powders[J]. Journal of Applied Physics,2001,90(6):2870-2878.
- [16] 宁叔帆,于开坤,李鸿岩,等. 碳化硅非线性性质与表面二氧化硅含量关系的研究[J]. 绝缘材料,2004,37(6):38-40.