

# 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的力学特性和老化特性

程圣, 张沛红\*, 邵琦

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院 电介质工程国家重点实验室培育基地, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 作为高压电机主绝缘的重要组成部分, 环氧桐马酸酐黏合剂的性能与电机安全稳定运行密切相关。为改善环氧桐马酸酐黏合剂的力学特性和耐老化特性, 制备了质量分数分别为 1 wt%、2 wt%、3 wt% 和 4 wt% 的纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂, 测试了其弯曲强度和冲击强度以及老化前后的击穿场强。结果表明: 1 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度提高 24.79%, 含 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 的黏合剂冲击强度提高 47.11%。老化前, 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的击穿场强随纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加先增加后减小, 2 wt% 含量时达到最大值, 提高 7.3%。电老化后和热老化初期, 含 1 wt% 和 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 的黏合剂击穿场强高于原始黏合剂, 28 天热老化后, 各含量黏合剂的击穿场强与原始黏合剂趋于一致。

**关键词:** 环氧桐马酸酐; SiO<sub>2</sub>; 黏合剂; 力学特性; 击穿场强; 热老化; 电老化

中图分类号: TM853

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2017)03-0582-06

## Mechanical and aging properties of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive

CHENG Sheng, ZHANG Peihong\*, SHAO Qi

(College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, State Key Laboratory Cultivation Base of Dielectrics Engineering, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Epoxy tung-maleic anhydride adhesive is an important part of high voltage electrical machine main insulation, and affects the stable and safe operation of electrical machine directly. In order to improve the mechanical and aging property of the epoxy tung-maleic anhydride adhesive, the nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive composites with the mass fraction of 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% and 4 wt% nano-SiO<sub>2</sub> were made respectively. The flexural strength and impact strength, and the breakdown strength before and after thermal aging and electrical aging of the composite were measured. The results indicate that flexural strength of 1 wt% nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive composite increases by 24.79%, and impact strength of 2 wt% nano-SiO<sub>2</sub> loading composite increases by 47.11%. Before the aging, the breakdown strength of the composites increases with the increasing of nano-SiO<sub>2</sub> loading first, and then decrease. When the nano-SiO<sub>2</sub> loading is 2 wt%, the breakdown strength of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive reaches the maximum and increases by 7.3%. After electrical aging as well as at early period of the thermal aging, the breakdown strength of 1 wt% and 2 wt% nano-SiO<sub>2</sub> loading composite are higher than that of the unfilled adhesive. But at the end of 28 days thermal aging, the breakdown strength of all the composites and unfilled epoxy tung-maleic anhydride adhesive tend to be same.

**Keywords:** epoxy tung-maleic anhydride; SiO<sub>2</sub>; adhesive; mechanical property; breakdown strength; thermal aging; electrical aging

收稿日期: 2016-04-08; 录用日期: 2016-06-08; 网络出版时间: 2016-06-12 13:27

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160612.1327.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(51277044)

通讯作者: 张沛红, 博士, 教授, 研究方向为工程电介质理论及应用 E-mail: zph@hrbust.edu.cn

引用格式: 程圣, 张沛红, 邵琦. 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的力学特性和老化特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(3): 582-587.

CHENG S. ZHANG P H. SHAO Q. Mechanical and aging properties of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(3): 582-587 (in Chinese).

电机是电能生产的关键设备,随着全球范围内对电能需求的增加以及对降低电能成本和提高运行可靠性的要求,依靠新技术提高高压电机的技术经济性能已成为迫切需要<sup>[1-2]</sup>。

高压电机主绝缘材料云母带由云母、补强材料和黏合剂组成,黏合剂起黏合云母和补强材料的作用,是决定云母带电、热、力学性能的关键材料,直接影响机组的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。纳米技术的发展为传统材料改性和新材料开发提供了有效途径。国外围绕纳米无机物改性复合材料在高压电机主绝缘上的应用开展了很多探索工作,以期提高主绝缘可靠性、减薄绝缘厚度、降低整机制造成本,并取得了一些重要进展<sup>[4]</sup>。研究表明,在提高电机主绝缘耐表面放电能力方面,含 5% 12 nm SiO<sub>2</sub> 的环氧树脂固化物的电腐蚀深度约为纯树脂的 1/6<sup>[5]</sup>,含 26% 纳米 SiO<sub>2</sub> 的复合物的电寿命是纯树脂的 20 倍以上<sup>[2]</sup>,上述试验结果证实了纳米粒子具有抑制聚合物发生电腐蚀降解的作用。与纯树脂相比,复合物的导热系数也有所提高<sup>[6]</sup>。国内关于纳米复合材料用于改善电机主绝缘的相关研究报道很少<sup>[4]</sup>。

目前,国内广泛使用环氧桐马酸酐作为云母带的黏合剂<sup>[3]</sup>。环氧桐马酸酐黏合剂是热固性材料,固化后具有很好的耐热性,耐热等级为 F 级。由环氧桐马酸酐云母带为主绝缘的电机线棒的击穿场强、介质损耗以及耐老化性能均达到并超过了国外同类产品的水平<sup>[6]</sup>。但是环氧桐马酸酐高的交联密度和固化后的三维网状结构使其脆性大,抗冲击性能差,尤其老化后,定子绕组绝缘容易出现起层、龟裂等,引发局部放电,危害电机的安全运行,降低电机的使用寿命<sup>[3,7]</sup>。因此,研究改善环氧桐马酸酐黏合剂的力学特性和老化特性具有重要意义。

本文在环氧桐马酸酐黏合剂中加入不同质量分数的纳米 SiO<sub>2</sub>,根据高压电机的实际运行条件和相关标准,研究纳米 SiO<sub>2</sub> 改性桐马酸酐黏合剂的力学特性以及不同含量纳米 SiO<sub>2</sub> 对环氧桐马酸酐黏合剂耐老化特性的影响。

## 1 实验方法

### 1.1 试样制备

选用阿拉丁生化科技股份有限公司生产的直径为 30 nm 的 SiO<sub>2</sub> 和哈尔滨绝缘材料厂生产的环氧桐马酸酐黏合剂制备试样。为使纳米 SiO<sub>2</sub> 在复合物中有良好的分散性,首先采用超声法将纳米 SiO<sub>2</sub>

分散到丙酮中并加入 3-氨丙基三甲氧基硅烷联剂制成分散液,然后将分散液加入环氧桐马酸酐黏合剂由高速搅拌器搅拌混合。在真空干燥箱中除去混合物中的丙酮和搅拌过程中产生的气泡后,将混合物倒入模具,170℃ 固化 10 小时,分别制得质量分数为 1 wt%、2 wt%、3 wt% 和 4 wt% 的纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂试样。试样如图 1 所示,棒形试样用于力学特性测试,圆形试样用于老化试验。

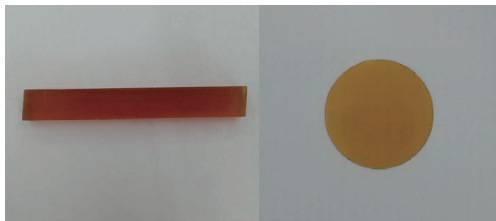


图 1 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂试样

Fig. 1 Sample of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive

2 wt% 含量的纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂试样的 SEM 图像如图 2 所示。可以看出纳米 SiO<sub>2</sub> 在制得的复合环氧桐马酸酐黏合剂中分散良好。

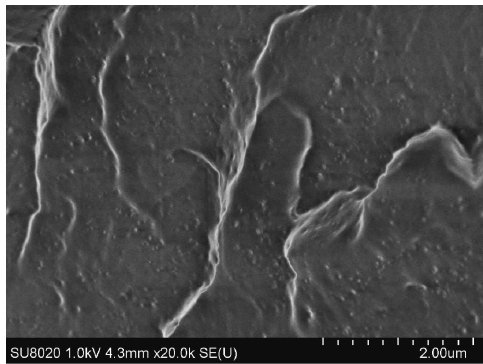


图 2 2 wt% 含量纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂试样的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of 2 wt% nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive

### 1.2 电老化

根据 NB/T 42004—2013 标准<sup>[8]</sup>并参考高压电机工作场强,选择 5 kV/mm 作为加速电老化试验场强。电老化电极按照 ASTM-D 149—09 标准<sup>[9]</sup>设计。每种纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的黏合剂分为两组,每组 8 个试样,老化时间分别为 10 天和 20 天,老化后测试试样的击穿场强。

### 1.3 热老化

根据 IEC 60216—8 标准<sup>[10]</sup>和电介质耐热等级评定标准<sup>[11]</sup>,选择 180℃ 作为 F 级绝缘加速热老化温度。每种纳米 SiO<sub>2</sub> 含量黏合剂分为四组,每组 8 个试样,分别老化 7 天、14 天、21 天和 28 天,老化后

测试每组试样的击穿场强。

1.4 力学特性测试

1.4.1 弯曲特性测试

根据 GB/T 2567—2008 标准<sup>[12]</sup>,采用 AGS-J10KN 型万能材料试验机测试试样的弯曲特性。弯曲强度由下式计算:

$$\sigma_f = 3FL/2bh^2$$
 (1)

式中: $\sigma_f$  为试样的弯曲强度, $F$  为最大载荷, $L$  为跨距, $b$  为试样宽度, $h$  为试样厚度。每组测试 5 个试样,计算平均弯曲强度。

1.4.2 冲击特性测试

根据 GB/T 2567—2008 标准<sup>[12]</sup>,采用 YK-5032 型悬臂梁冲击试验机测试试样的冲击特性。

冲击强度由下式计算:

$$\sigma_i = A/(b \times d)$$
 (2)

式中: $\sigma_i$  为试样的冲击强度, $A$  为冲断试样所消耗的功, $b$  为试样宽度, $d$  为试样厚度。每组测试 5 个试样,计算平均冲击强度。

1.5 老化前后击穿场强测试

根据 IEC 60243—1:1998 标准<sup>[13]</sup>测试老化前和各阶段电、热老化后的原始环氧桐马酸酐黏合剂以及每种纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的复合黏合剂的击穿场强。试验装置如图 3 所示。为消除边缘效应对试验结果的影响,将被测试样和电极置于变压器油中完成测试。每组 8 个试样,利用两参数 Weibull 分布统计分析测试结果。

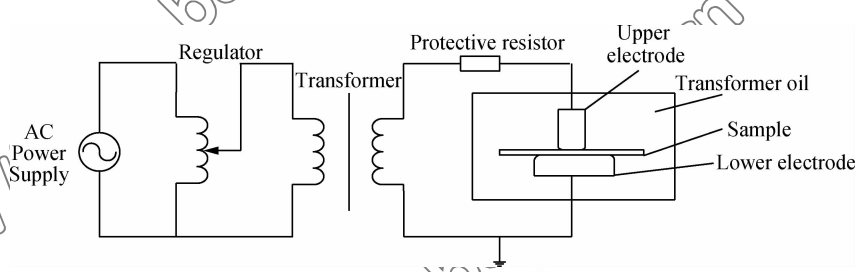


图 3 击穿试验装置示意图  
Fig. 3 The schematic diagram of breakdown test

2 结果与分析

2.1 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度和冲击强度

纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度和冲击强度测试结果如图 4 所示。可以看出,纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度和冲击强度随纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加先提高后降低,弯曲强度在 1 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量时达到最大值,从原始黏合剂的 52.89 MPa 提高到 66 MPa,随后下降,当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 4 wt% 时低于原始环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度;冲击强度在 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量时达到最大值,从原始黏合剂的 7.62 kJ/m<sup>2</sup> 提高到 11.21 kJ/m<sup>2</sup>,当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 4 wt% 时低于原始环氧桐马酸酐黏合剂的冲击强度。

加入少量的纳米 SiO<sub>2</sub> 可以提高环氧桐马酸酐黏合剂力学性能的原因可能是:一方面,纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒本身具有很高的强度<sup>[14]</sup>,SiO<sub>2</sub> 的加入,提高了基体黏合剂的强度和模量,增加了韧性;另一方面,纳米 SiO<sub>2</sub> 与基体间形成大量的界面,界面区域可以吸收能量,削弱应力集中,抑制裂纹发展,增强了材

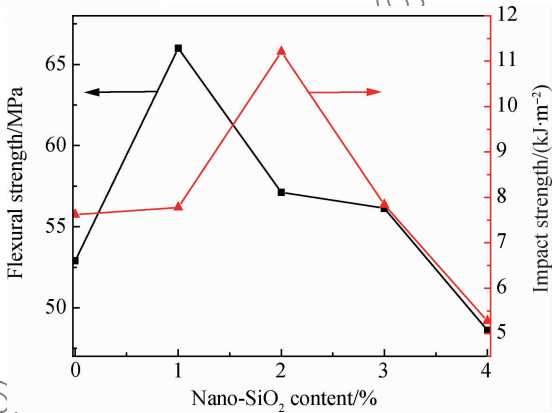


图 4 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲强度和冲击强度  
Fig. 4 Flexural and impact strength of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive

料的韧性<sup>[15-16]</sup>,因此,纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂较原始黏合剂更容易传递应力,不易发生脆性断裂。当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量继续增加时,界面区域会出现大量重叠,使材料受力时内部应力分布不均而降低了基体黏合剂的韧性。因此,当纳米 SiO<sub>2</sub> 的含量高于 1 wt% 和 2 wt% 时,试样的弯曲强度和冲击强度逐渐降低,甚至低于原始黏合剂的弯曲强度和冲击

强度。

2.2 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂老化前击穿场强

老化前,原始环氧桐马酸酐黏合剂和纳米 SiO<sub>2</sub> 含量分别为 1 wt%、2 wt%、3 wt%和 4 wt%的复合黏合剂的击穿场强的 Weibull 分布如图 5 所示,其中形状参数表示击穿场强的分散性,尺度参数对应累计击穿概率为 63.2%时的击穿场强。为便于分析纳米 SiO<sub>2</sub> 含量对黏合剂击穿场强的影响,图 6 给出了累计击穿概率为 63.2%时黏合剂击穿场强与纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的关系。可以看出,黏合剂的击穿场强随着纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加先增加,2 wt% 含量时达到最大值,由原始黏合剂的 33.62 kV/mm 提高到 36.15 kV/mm,提高了 7.3%,当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 3 wt%和 4 wt%时,击穿场强逐渐减小。

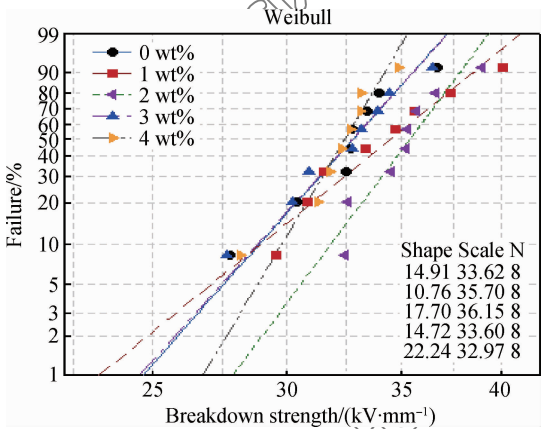


图 5 老化前试样击穿场强的 Weibull 分布

Fig. 5 Breakdown strength of sample in Weibull distribution before aging

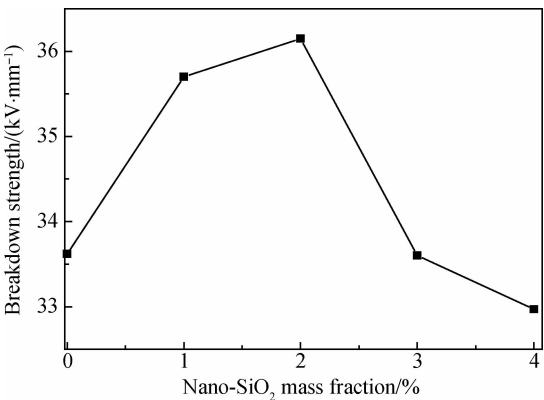


图 6 不同纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂的击穿场强

Fig. 6 Breakdown strength of nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive with different nano-SiO<sub>2</sub> content

2.3 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂热老化后的击穿特性

1 wt%和 2 wt%纳米 SiO<sub>2</sub> 可提高原始黏合剂的击穿场强是因为,当复合物中纳米 SiO<sub>2</sub> 含量较少时,纳米 SiO<sub>2</sub> 可以像障碍物一样阻碍放电发展,减小放电发展过程中电子的自由程,延缓电子雪崩的产生<sup>[17]</sup>,当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量继续增加时,纳米 SiO<sub>2</sub> 的界面区域逐渐重叠,形成导电通道,出现逾渗现象<sup>[18]</sup>,复合物的击穿场强下降,甚至低于基体材料的击穿场强。

不同纳米 SiO<sub>2</sub> 含量黏合剂分别经 180℃ 7 天、14 天、21 天和 28 天热老化后的 Weibull 累计击穿概率为 63.2%时的击穿场强如图 7 所示。热老化后,原始黏合剂和纳米 SiO<sub>2</sub> 含量分别为 1 wt%、2 wt%、3 wt%和 4 wt%的复合黏合剂的击穿场强均呈下降趋势,老化 7 天后,分别下降 6.63%、8.68%、5.56%、7.35%和 12.13%,但纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 1 wt%和 2 wt%的黏合剂的击穿场强仍高于原始黏合剂,老化 14 天和 21 天后,各试样的击穿场强差别不大,1 wt%和 2 wt%含量的黏合剂的击穿场强略高于原始黏合剂,老化 28 天后,原始黏合剂和 1 wt%、2 wt%纳米 SiO<sub>2</sub> 含量黏合剂的击穿场强趋于一致,但仍高于 3 wt%和 4 wt%含量的黏合剂。可见,加入 1 wt%和 2 wt%纳米 SiO<sub>2</sub> 可提高环氧桐马酸酐黏合剂热老化初期的击穿场强,继续增加纳米 SiO<sub>2</sub> 含量会使黏合剂老化特性下降。

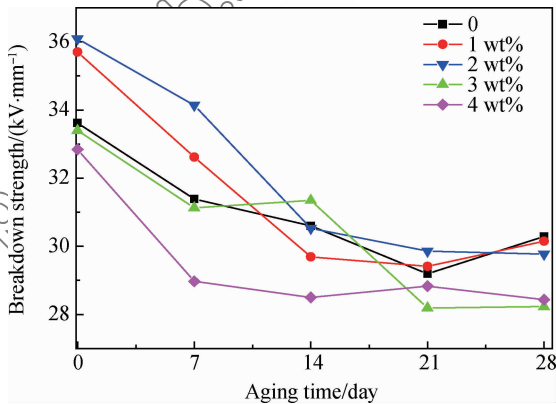


图 7 不同纳米 SiO<sub>2</sub> 含量复合黏合剂击穿场强与热老化时间的关系

Fig. 7 Relationship between the breakdown strength and thermal aging time of different nano-SiO<sub>2</sub> content composites

图 8 为含 2 wt%纳米 SiO<sub>2</sub> 的黏合剂老化 14 天后的 SEM 图像,可以看出,经 14 天热老化后黏合剂局部区域有分层现象,而纳米颗粒具有阻止分层



区域扩大的作用。当纳米 SiO<sub>2</sub> 含量继续增加时,一方面纳米颗粒容易出现团聚,形成大的无机物颗粒,引起应力集中,另一方面纳米颗粒与基体间的界面区域出现重合,导致破坏沿界面发展。

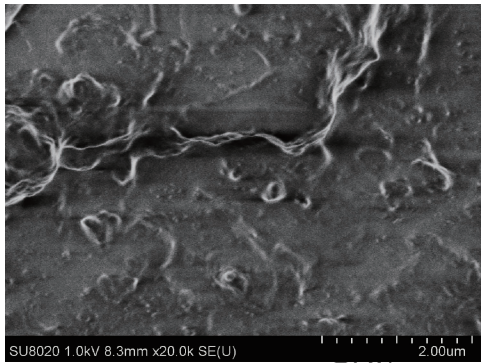


图 8 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂老化 14 天后的 SEM 图像

Fig. 8 SEM image of 2 wt% nano-SiO<sub>2</sub>/epoxy tung-maleic anhydride adhesive after 14 days aging

2.4 纳米 SiO<sub>2</sub>/环氧桐马酸酐黏合剂电老化后的击穿特性

原始环氧桐马酸酐黏合剂、含 1 wt% 和 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 黏合剂 5 kV/mm 电场下老化 10 天和 20 天后 Weibull 累计击穿概率为 63.2% 时的击穿场强如图 9 所示。电老化 10 天和 20 天后,三种试样的击穿场强均呈下降趋势,老化 20 天后分别下降 7.6%、7.34% 和 6.43%,但复合黏合剂的击穿场强始终高于原始黏合剂,说明 1 wt% 和 2 wt% 的纳米 SiO<sub>2</sub> 能够提高原始黏合剂的耐电老化特性。

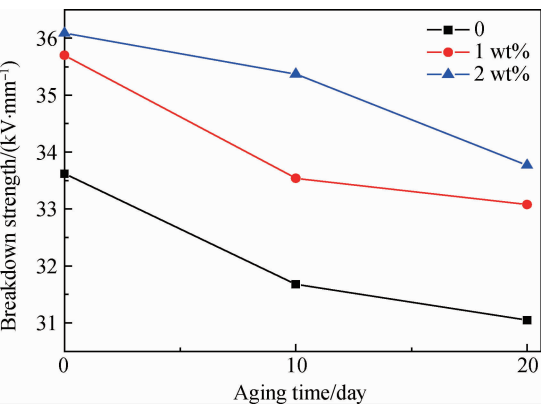


图 9 不同纳米 SiO<sub>2</sub> 含量黏合剂击穿场强与电老化时间的关系  
Fig. 9 Relationship between the breakdown strength and electrical aging time of different nano-SiO<sub>2</sub> content composites

电老化是在电场长期作用下材料特性逐步劣化最终导致击穿的过程,材料的老化寿命主要取决于

电极的载流子注入以及材料内部陷阱的类型和浓度<sup>[19]</sup>。材料在电场作用下的老化主要是由载流子的入陷和复合过程释放的能量引起,而释放能量的大小取决于陷阱的深度。纳米 SiO<sub>2</sub> 的加入,在复合物中引入大量的浅陷阱<sup>[20]</sup>,相同场强下注入的载流子大多被浅陷阱俘获,不会因陷入深陷阱而积聚更多的能量,导致材料内部贮存大量的机械能而引起断键、微孔和内部应力,最终导致材料击穿,所以浅陷阱有效地减少了载流子入陷和复合过程产生和释放的能量,减缓了材料的劣化进程,是材料耐老化的重要原因。

3 结 论

(1) 1 wt% 和 2 wt% 含量纳米 SiO<sub>2</sub> 可以提高环氧桐马酸酐黏合剂的弯曲特性和冲击特性,纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 1 wt% 时,黏合剂的弯曲强度提高 24.79%,纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 2 wt% 时,黏合剂冲击强度提高 47.11%。

(2) 纳米 SiO<sub>2</sub> 复合环氧桐马酸酐黏合剂的击穿场强随纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的增加先提高后降低,纳米 SiO<sub>2</sub> 含量为 2 wt% 时,黏合剂的击穿场强达到最大值,较原始黏合剂提高 7.3%。

(3) 热老化初期,1 wt% 和 2 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量的黏合剂的击穿场强高于原始黏合剂,老化 28 天后与原始黏合剂的击穿场强趋于一致,但仍高于 3 wt% 和 4 wt% 纳米 SiO<sub>2</sub> 含量黏合剂的击穿场强。

(4) 含量为 1 wt% 和 2 wt% 的纳米 SiO<sub>2</sub> 复合环氧桐马酸酐黏合剂比原始黏合剂具有更好的耐电老化特性。

参考文献:

[1] 满宇光. 大型高压发电机的绝缘材料发展[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 12-16.  
MAN Y G. Insulating materials develop summary of large high voltage generator[J]. Insulating Materials, 2014, 47 (1): 12-16 (in Chinese).  
[2] GROPPER P, HILDINGER T, POHLMANN F, et al. Nanotechnology in high voltage insulation systems for large electrical machinery-first results[C]. CIGRE 2012, Paris, 2012: 6-30.  
[3] 金英兰. 快速固化云母带[J]. 绝缘材料, 2007, 40(4): 1-8. JIN Y L. Fast curing mica paper tape[J]. Insulating Materials, 2007, 40(4): 1-8 (in Chinese).  
[4] 凌敏, 饶保林, 李静, 等. 高压电机纳米复合主绝缘的研究进展[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 1-5.

- LING M, RAO B L, LI J, et al. Research progress of nano-composite main insulation for high voltage electrical machinery [J]. *Insulating Materials*, 2014, 47(1): 1-5 (in Chinese).
- [5] IMAI T, SAWA F, OZAKI T, et al. Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale Silica particles [C]//2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan, 2005: 239-242.
- [6] 付岚贵, 金英兰. 云母带等主绝缘材料在发电机和高压大电机工业中的应用[J]. *绝缘材料*, 2000, 34(5): 7-17.
- FU L G, JIN Y L. Application of mica tape main insulation material in generation and large electrical machinery industry [J]. *Insulating Materials*, 2000, 34(5): 7-17 (in Chinese).
- [7] STONE G C, WU R. Example of stator winding insulation deterioration in new generators[C]. *ICPADM 2009*, Harbin, 2009: 180-185.
- [8] 国家能源局. NB/T 42004—2013. 高压交流电机定子线圈对地绝缘电老化试验方法[S]. 北京: 中华人民共和国能源行业标准, 2013.
- National Energy Administration. NB/T 42004—2013. Test method for voltage endurance test on groundwall insulation of stator coil of high voltage AC machines[S]. Beijing: Energy Industry Standards of China. 2013 (in Chinese).
- [9] American Society for Testing Materials. ASTM-D 149—09. Standard test method for dielectric breakdown voltage and dielectric strength of solid electrical insulating materials at commercial power frequencies[S]. Pennsylvania, America: American National Standard, 2010.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 60216—8. Electrical insulating materials-thermal endurance properties [S]. 2010.
- [11] 邱昌容, 曹晓珑. 电气绝缘测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 207-208.
- QIU C R, CAO X L. Testing techniques in electrical insulation[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 207-208 (in Chinese).
- [12] 国家技术监督局. GB/T 2567—2008. 树脂浇铸体性能试验方法[S]. 北京: 中华人民共和国标准, 2008.
- General Administration of Quality Supervision of China. GB/T 2567—2008. The general of test methods for properties of resin casting body[S]. Beijing: National Standards of China. 2008 (in Chinese).
- [13] International Electrotechnical Commission. IEC 60243—1: 1998. Electrical strength of insulating materials—Test methods—Part 1: Tests at power frequencies[S]. 1998.
- [14] 杨斌, 章继峰, 梁文彦, 周利民. 玻璃纤维表面纳米 SiO<sub>2</sub> 改性对 GF/PCBT 复合材料力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(03): 691-698.
- YANG B, ZHANG J F, LIANG W Y, et al. Effects of glass fiber surface modified by nano-SiO<sub>2</sub> on mechanical properties of GF/PCBT composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(03): 691-698 (in Chinese).
- [15] HSIEH T H, KINLOCH A J, MASANIA K. The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles[J]. *Polymer*, 2010, 51 (26): 6284-6294.
- [16] 杨晓明, 王锋, 田耕. 纳米 MgO/高密度聚乙烯复合材料的性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 32(2): 234-239.
- YANG X M, WANG D, TIAN G. Performance of nano-MgO/high density polyethylene composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2): 234-239 (in Chinese).
- [17] TANAKA T, MATSUNAWA A, OHKI Y, et al. Treeing phenomena in epoxy/alumina nano-composites and interpretation by a multi-core model[J]. *IEEE Transactions on Fundamental and Materials*, 2006, 126(11): 1128-1135.
- [18] LEWIS T J. Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(5): 739-753.
- [19] KWAN C K. Dielectric phenomena in solids[M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004: 515-526.
- [20] 张沛红. 无机纳米-聚酰亚胺复合薄膜介电性及耐电晕老化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2006.
- ZHANG P H. Study on the dielectric property and corona-resistant mechanism of nano-inorganic polyimide[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2006 (in Chinese).