

饱和电抗器用环氧树脂性能提升研究

廖文龙¹, 杨玥坪¹, 魏华超², 闫志江³, 张榆¹, 任俊文²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610000; 2. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对饱和电抗器浇注用环氧树脂在受到电应力及机械振动时易出现老化开裂的问题,需要在保持其优良绝缘、抗腐蚀性能的基础上改善其力学性能及热学性能。本文以功能优化设计为原则,先通过热处理在碳化硅晶须(SiCw)表面形成二氧化硅介电层得到SiCw@SiO₂,然后利用掺杂改性的方法制备SiCw@SiO₂/EP复合电介质,并对其介电性能、力学性能以及导热性能进行测试。结果表明:SiCw@SiO₂/EP复合电介质兼具高介电常数及低介质损耗,韧性也得到改善,且由于SiCw相互接触形成了连续导热网络,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的导热系数相比纯环氧树脂提高了117%。

关键词:环氧树脂;碳化硅晶须;韧性;热导率;介电性能

中图分类号: TM215 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.05.006

Study on performance enhancement of epoxy resin for saturated reactor

LIAO Wenlong¹, YANG Yueping¹, WEI Huachao², YAN Zhijiang³, ZHANG Yu¹, REN Junwen²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610000, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The epoxy resin for casting in saturated reactors is prone to ageing and cracking when subjected to electrical stress and mechanical vibration, it is necessary to improve its mechanical and thermal properties on the basis of maintaining its excellent insulating properties and corrosion resistance. In this paper, taking the functional optimization design as principle, a silicon dioxide dielectric layer was formed on the surface of silicon carbide whiskers (SiCw) by heat treatment to obtain SiCw@SiO₂. Then a SiCw@SiO₂/EP composite dielectric was prepared by doping modification, and its dielectric properties, mechanical properties, and thermal properties were tested. The results show that the SiCw@SiO₂/EP composite dielectric has both high dielectric constant and low dielectric loss, and its toughness is also improved. Due to the continuous thermal conductivity network formed by the contact of SiCw, the thermal conductivity of the SiCw@SiO₂/EP composite dielectric increases by 117% than that of pure epoxy resin.

Key words: epoxy resin; silicon carbide whiskers; toughness; thermal conductivity; dielectric properties

0 引言

近年来,随着我国经济的持续稳定增长以及对电力、能源等资源需求的与日俱增,高压直流输电(HVDC)技术得到了多层次的发展和應用^[1-2]。与交流输电系统相比,直流输电系统对绝缘介质表现出更高的标准与要求。HVDC系统中换流阀为核心装备,而确保其内部晶闸管正常的导通与关断是饱和电抗器的主要功能^[3]。环氧树脂(EP)作为饱和电抗器的主要封装材料,起着机械支撑和绝缘的重要

作用^[4]。文献[5]研究表明,当换流阀处于高负载或过载工作时,饱和电抗器中的硅钢片会在短时间内产生大量热量。而EP的导热系数仅为0.204 W/(m·K),热量会短时间在设备内部堆积,严重影响着电气设备的使用寿命。此外,EP由于本身韧性低、脆性大,在导体电应力较大的结构处热膨胀及振动作用明显。文献[6]研究表明,EP在热应力及机械应力作用下老化易形成裂纹,造成电荷积聚现象。而积聚的电荷在超/特高直流电压下不易消散,导致固体绝缘表面电场严重畸变,表现为局部绝缘失效,对整个直流输电系统的平稳运行造成威胁^[7]。因此,未来的HVDC装备对饱和电抗器中封装绝缘材料的韧性及热管理能力提出了更高的要求。

基金项目:中国博士后科学基金项目(2018M643475);电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金(EIPE23210);四川省重点研发项目(2023YFG0236)。

为了满足小型化、高负载电气装备的使用特性需求,需要在确保EP优异电绝缘性、耐腐蚀性的基础上,对其力学性能及热学性能进行改善。而为了获得高性能环氧复合电介质,目前的研究主要集中在复合材料的本征改性和掺杂改性^[8]。前者通常由于工艺复杂、生产条件要求苛刻及成本高昂等问题,其推广使用受到限制,且EP本身具有极性,其本征介电常数相较于非极性电介质(聚四氟乙烯、聚苯乙烯等)高,非极性化处理难度较大^[9]。在掺杂改性的研究中,通过在EP基体中添加不同种类、含量、尺度的无机填料可以提高EP的电学、力学和热学性能,且掺杂改性工艺简单、成本较低,无需改变树脂基体原有的物理或化学结构,因此被广泛应用于提升环氧复合材料的性能。目前国内外普遍采用在树脂基体中添加功能填料的方法来对绝缘介质进行性能提升。

碳化硅(SiC)作为一种理化性质较为理想的半导体材料,具有机械强度高、热传导性好、耐化学腐蚀性强等优点^[10]。此外,其较高的介电常数有助于电场在绝缘封装中均匀分布,从而有效避免畸形电场的出现。文献[11]将SiC纳米颗粒进行高温热处理,在其表面形成了厚度可控的二氧化硅(SiO₂)层,有效调控了电子传导现象,改善了复合电介质的绝缘水平。SiC晶须(SiCw)作为一维SiC纳米材料,既具有SiC优良的热学性能、介电性能,又兼具一维纳米材料优异的抗拉强度、拉伸模量等力学性能,作为复合材料的增强增韧填料具有极大的应用潜力。文献[12]将SiCw作为功能填料采用光固化快速成型技术制备了树脂基复合材料,测试结果表明加入SiCw可大幅提高复合材料的力学性能,对固化工艺几乎无影响。文献[13]利用磁场控制SiCw在EP中定向排列,增强了复合材料的热学性能。

然而,上述研究为了使聚合物复合材料具有优异的力学性能,在聚合物基体中掺杂了大量的SiCw填料,这虽然可以显著改善聚合物基体的韧性,但SiCw在基体中含量过高,导致基体材料的绝缘性能显著下降,使其在高压电器中的应用受到限制,而由文献[11]可知,SiO₂作为优良的绝缘体,可以作为介电层有效抑制导电颗粒间的泄漏电流。

基于此,本研究以EP为基体,高温氧化处理后的碳化硅晶须为无机填料,制得不同填料含量的SiCw@SiO₂/EP复合电介质,研究不同功能填料含量下复合电介质的微观形貌、电学性能、力学性能以及热学性能,以实现饱和电抗器用EP性能的有效提升。

1 实验

1.1 实验原料

E-51环氧树脂(环氧当量为185~200 g/eq)、甲基六氢邻苯二甲酸酐(MHHPA)固化剂、2,4,6-三(二甲氨基甲基)-苯酚促进剂,南通星辰合成材料有限公司;碳化硅晶须,平均长度为40 μm,肯朴(厦门)新材料有限公司;丙酮,成都科隆化工有限公司。

1.2 试样制备

1.2.1 SiCw@SiO₂的制备

碳化硅晶须的烧结流程如图1所示。将碳化硅晶须(SiCw)置于坩埚中,放入箱式马弗炉,以10℃/min的升温速率对其进行加热,在600℃下烧结6 h,得到SiCw@SiO₂。

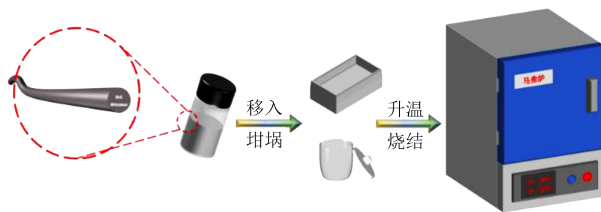


图1 碳化硅晶须烧结流程图

Fig.1 Sintering flow chart of silicon carbide whisker

1.2.2 SiCw@SiO₂/EP复合电介质的制备

为使SiCw@SiO₂在EP基体中均匀分散,采用超声辅助机械共混法制备复合电介质试样,SiCw@SiO₂/EP复合电介质具体的制备流程如图2所示。

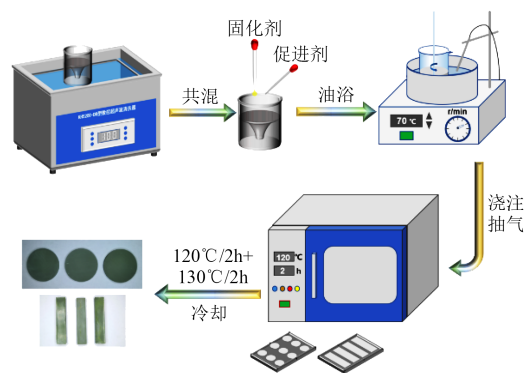


图2 复合电介质的制备流程图

Fig.2 Preparation flow chart of epoxy composite dielectrics

首先称取定量的SiCw@SiO₂填料在丙酮溶液中超声分散,将E-51环氧树脂、固化剂、促进剂按100:80:1.6的质量比添加到单独的烧杯中进行混合,随后将EP混合物与SiCw@SiO₂分散液在室温下混合。将混合体系在70℃油浴中以500 r/min的

速度搅拌 2 h, 以除去丙酮。然后将混合体系在 70℃ 下脱气 1 h, 再转移至不锈钢模具中进行固化, 获得 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质。研究表明, 两段固化已成为 EP 通用的固化方案^[14], 故本研究选择的固化工艺为 120℃/2 h+130℃/2 h。设定 SiCw@SiO₂ 的质量分数为 0%、5%、10%、15%、20%, 并将相应的复合电介质分别编号为 EP、5%SiCw@SiO₂/EP、10%SiCw@SiO₂/EP、15%SiCw@SiO₂/EP、20%SiCw@SiO₂/EP。

1.3 表征及测试

使用美国 FEI 公司的 Quanta 250 FEG 型场发射扫描电镜表征复合电介质的微观断面形貌; 使用湘潭市仪器仪表有限公司的 DRL-III 高精度材料导热系数测试仪采用热流法测试复合电介质的导热系数, 样品直径为 30 mm, 厚度为 3 mm; 使用美国威明顿 NC 公司的高分辨率 TGA2950 热重分析仪对复合电介质进行热失重分析 (TGA), 氮气氛围, 升温速率为 10℃/min, 温度为室温 ~600℃; 使用德国 NETZSCH 公司的 DMA 242E 型动态力学分析仪测量复合电介质的动态热力学性能, 1 Hz 的频率下以 5℃/min 的恒定加热速率运行, 试样尺寸为 50 mm×10 mm×5 mm; 使用德国 Novocontrol GmbH 公司的 Concept 50 型宽频介电阻抗松弛谱仪对复合电介质的介电性能进行测试, 频率为 10⁻¹~10⁷ Hz。使用美国 Instron 公司的 5967 型万能试验机对复合电介质的力学特性进行测试, 试样的宽度为 10 mm, 厚度为 3.75 mm, 拉伸速率为 1 mm/min, 标距长度为 110 mm, 每个试样测试 5 次, 结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 复合电介质的微观形貌

图 3 为 EP 及 5%SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的断面 SEM 图。从图 3(a) 可以看出, 纯 EP 断面光滑, 几乎没有杂质, 呈河流状, 为典型的脆性断裂特征^[15]。图 3(b) 中 SiCw@SiO₂ 填料随机分布, 复合电介质相比纯 EP 表现出更为粗糙的断裂截面。将图 3(b) 进行放大得到图 3(c), 可以明显看出 SiCw 表面成功氧化形成了 SiO₂ 层。

分析可知, SiCw@SiO₂ 均匀地分散在复合电介质内部, 没有出现明显的团聚现象, 且晶须结构在复合电介质的断面中得到了很好地保留。随着 SiCw@SiO₂ 的引入, SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的断裂面变得粗糙, 具有明显的剪切变形, 表现出高韧性材料的断裂特征。

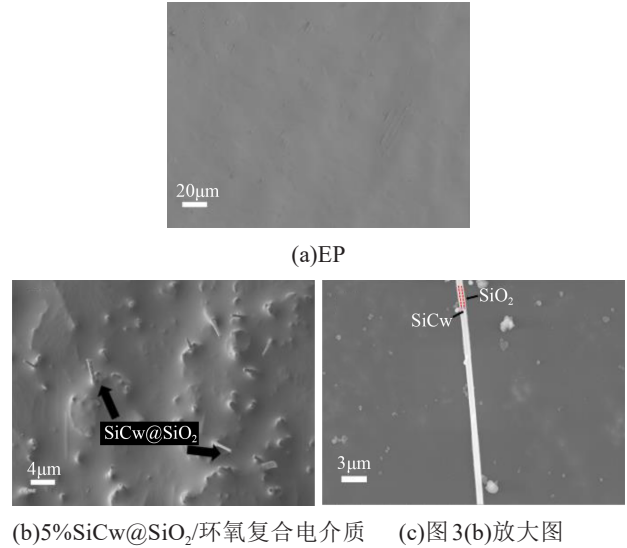


图 3 EP 及 5%SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的断面 SEM 图
Fig.3 Cross-sectional SEM images of EP and 5%SiCw@SiO₂/EP composite dielectric

2.2 复合电介质的热学性能

图 4 为 EP 及不同填料质量分数 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质导热系数的变化规律。

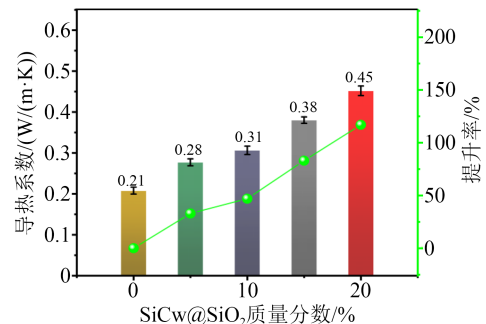


图 4 EP 及 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的导热系数
Fig.4 Thermal conductivity of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

从图 4 可以看出, 随着 SiCw@SiO₂ 填料含量增加, 复合电介质的导热系数随之增大。当 SiCw@SiO₂ 的质量分数为 5% 和 10% 时, 复合电介质的导热系数分别增大至 0.28 W/(m·K) 和 0.31 W/(m·K), 相比于纯 EP 的导热系数 (0.21 W/(m·K)) 提高了 33.3% 和 47.4%。在低填料含量下, 复合电介质的导热系数增大较为缓慢。继续提高 SiCw@SiO₂ 的含量, 复合电介质的导热系数增大较快, 在填料质量分数为 15% 和 20% 时, 复合电介质的导热系数分别为 0.38 W/(m·K) 和 0.45 W/(m·K), 分别比纯 EP 提高了 82.9% 和 117.4%。这是由于当 SiCw@SiO₂ 填充量较低时, 其被大量导热系数低的 EP 分隔, 填料彼此之间距离太远而未能相互接触, 不能形成有效的导热网络, 导热系数提高并不明显; 随着 SiCw@SiO₂ 填

充量的提升,其在EP中相互接触形成导热链,继而形成3D导热网络,声子可以在填料和基体之间自由转移,因此导热系数提升明显。

图5和图6分别为纯EP及不同填料质量分数SiCw@SiO₂/EP复合电介质的热失重(TGA)曲线和热失重微分(DTG)曲线。从图5~6可以看出,由于EP的降解,复合电介质的质量损失主要发生在350~500℃。此外,复合电介质的热分解温度随填料含量的增加而略有升高,如EP的初始热分解温度为341.34℃,而15%SiCw@SiO₂/EP复合电介质的初始热分解温度为355.61℃。

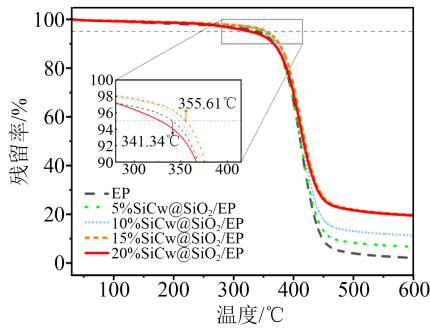


图5 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的热失重曲线

Fig.5 TGA curves of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

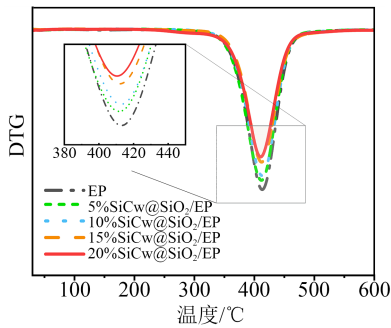


图6 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的DTG曲线

Fig.6 DTG curves of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

根据GB/T 11026.10—2019规定的耐热指数计算方法计算复合电介质的耐热指数(T_{HRI})^[6],计算公式如式(1)所示。

$$T_{HRI} = 0.49 \times [T_5 + 0.6 \times (T_{30} - T_5)] \quad (1)$$

式(1)中, T_5 和 T_{30} 分别是质量损失为5%和30%时对应的热分解温度。

根据式(1)计算得到15%SiCw@SiO₂/EP复合电介质的 T_{HRI} 为188.11℃,相比纯EP的 T_{HRI} (183.51℃)提升了4.6℃,说明SiCw@SiO₂的引入对环氧复合电介质的耐热性有一定程度的提升。

选择质量损失10%时对应的温度作为热分解温度(T_d)对复合电介质的热稳定性进行分析,具体数据如表1所示。从表1可以看出,EP的 T_d 为

368.26℃,随着SiCw@SiO₂含量的增加,复合电介质的 T_d 呈升高的趋势,相比于纯EP,15%SiC@SiO₂/EP的 T_d 从368.26℃提高到376.19℃,提高了7.93℃,这可归因于由“实体”结构引起的“曲折路径效应”。此外,DTG结果显示,添加了SiCw@SiO₂的复合电介质的最大热分解温度(T_{max})与纯EP相近,表明SiCw@SiO₂的引入对复合电介质的热稳定性影响不大。

表1 复合电介质热失重的相关数据

Tab.1 TGA relevant data of composite dielectric

材料类型	600℃残留率/%	T_d /℃	T_{max} /℃
EP	2.2	368.26	412.18
5%SiCw@SiO ₂ /EP	6.8	369.44	411.77
10%SiCw@SiO ₂ /EP	11.4	372.81	412.73
15%SiCw@SiO ₂ /EP	19.7	376.19	412.02
20%SiCw@SiO ₂ /EP	19.6	376.85	410.43

差示扫描量热法(DSC)是通过测定材料热力学性能的变化来表征其物理或化学变化过程,从DSC图中可以得到材料的玻璃化转变温度(T_g)等信息。电介质的 T_g 是指其由玻璃态过渡到高弹态所对应的温度,其与交联密度具有良好的相关性。

图7为EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的DSC曲线。

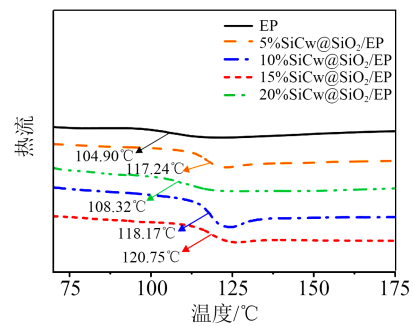


图7 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的DSC曲线

Fig.7 DSC curves of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

从图7可以看出,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的 T_g 随着填料含量的增加呈现先升高后降低的趋势,其中15%SiCw@SiO₂/EP的 T_g 最高为120.75℃,20%SiCw@SiO₂/EP的 T_g 降低至108.32℃,但仍明显高于EP的 T_g (104.90℃)。复合电介质的 T_g 主要与其分子流动性、自由体积和聚合物交联度有关。在填料含量较低时,SiCw@SiO₂的加入减小了复合电介质中的自由体积,并且限制了环氧链的链段运动,导致复合电介质的 T_g 升高。但当填料含量过高时,填料不易分散,在基体中形成较多团聚,进而导致 T_g 降低。

2.3 复合电介质的介电性能

图8为EP及不同填料质量分数SiCw@SiO₂/EP复合电介质介电常数的变化情况。从图8可以看出,由于SiCw@SiO₂本身的相对介电常数较高,在其与EP混合后,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的相对介电常数相比纯EP显著提高。引入少量的SiCw@SiO₂即可使复合电介质的相对介电常数发生较大改变。在频率为10³ Hz时,纯EP的介电常数为5.03,5%SiCw@SiO₂/EP复合电介质的相对介电常数增大到6.68,比纯EP增大了约33%。当填料质量分数增大到15%时,15%SiCw@SiO₂/EP复合电介质的相对介电常数显著增大至12.69,相比纯EP提高了152%。随着填料质量分数进一步增加,复合电介质的相对介电常数增速减缓,20%SiCw@SiO₂/EP复合电介质的相对介电常数相比纯EP仅增大了161%。

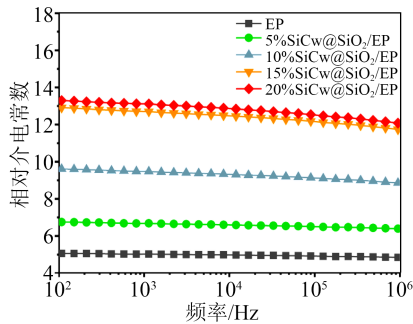


图8 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的介电常数谱图
Fig.8 Dielectric constant spectra of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

随着SiCw@SiO₂质量分数的增加,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的相对介电常数呈递增趋势,这一方面是由于掺入无机填料后产生了大量的界面极化;另一方面随着SiCw@SiO₂填充量的增加,由于填料颗粒之间的间距减小,材料中产生了许多以填料为电极、以EP基体为电介质的微型电容器^[17],导致复合电介质的相对介电常数显著增大。

图9为EP及不同填料质量分数下SiCw@SiO₂/EP复合电介质的复介电常数虚部(ϵ'')随频率(f)的变化关系。从图9可以看出,在低频区域,复合电介质的 ϵ'' - f 曲线的斜率绝对值远小于1,表明在低频时,复合电介质中不存在或极少存在直流电导行为,而以松弛极化为主。

图10为EP及不同填料质量分数下SiCw@SiO₂/EP复合电介质的介质损耗因数($\tan\delta$)随频率的变化规律。介质损耗的高低主要取决于电介质中松弛极化的建立以及直流电导的形成^[18]。从图10可以看出,复合电介质的介质损耗总体上随着SiCw@SiO₂含量的增加而略有提升。其主要原因

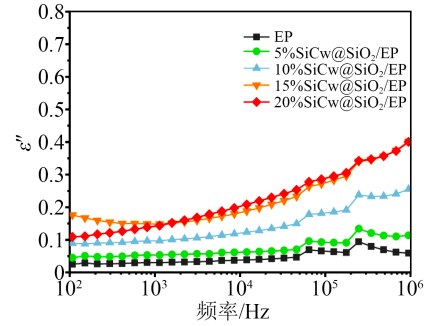


图9 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的介电常数虚部谱图
Fig.9 Imaginary part spectra of dielectric constant of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

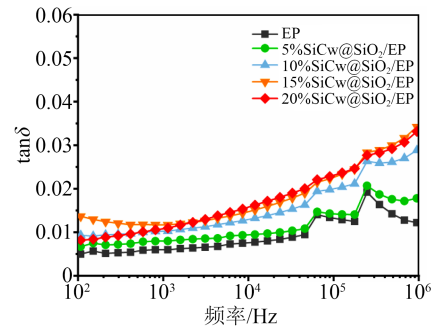


图10 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的tanδ谱图
Fig.10 Tanδ spectra of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

是,一方面随着SiCw@SiO₂含量的增加,复合电介质的电导率提升,使得电导损耗增加;另一方面SiCw@SiO₂含量的增加导致复合电介质中出现更多的转向极化和界面极化等松弛过程,极化损耗增加,介质损耗因数也随之增大。

从图10还可以看出,相比于纯EP,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的介质损耗因数的变化幅度并不明显,尤其是在低频区域($f < 10^3$ Hz)时,复合电介质的介质损耗因数仍接近0.01。结合图9和图10可知,添加SiCw@SiO₂可以增大复合电介质的相对介电常数,而对其介质损耗因数几乎无影响,这表明SiO₂介电层可以有效地阻碍SiCw之间的电连接。SiO₂层作为电屏障成功地阻止了复合电介质中导电网络的形成。相对较高的介电常数和较低的介质损耗对于复合电介质在热管理中的应用至关重要。

图11为EP及不同填料质量分数SiCw@SiO₂/EP复合电介质交流电导率随频率的变化趋势。从图11可以看出,SiCw@SiO₂/EP复合电介质的交流电导率随SiCw@SiO₂含量的增加而增大,但低频(10² Hz)下始终保持在较低水平(10⁻¹¹级)。这主要是因为界面极化相对较弱,且复合电介质内部微型电容器始终提供较大的介电常数和较低的介质损耗,同时SiO₂层有效抑制了自由电荷载流子的迁移率并削弱了界面极化。

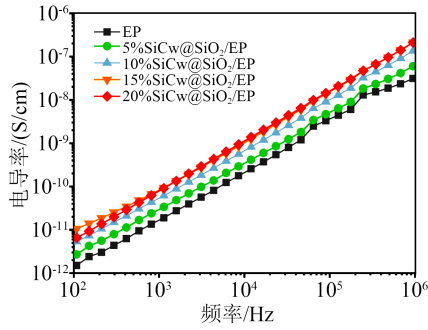


图 11 EP 及 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的交流电导率
Fig.11 AC conductivity of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

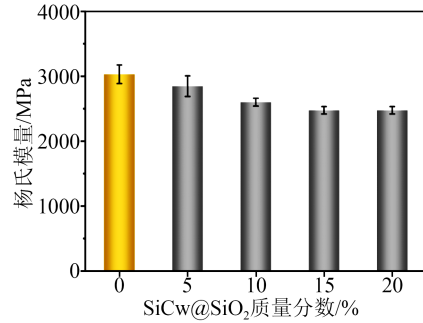


图 13 EP 及 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的杨氏模量
Fig.13 Young's modulus of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

2.4 复合电介质的力学性能

图 12 为 EP 及不同填料质量分数 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质典型的应力-应变曲线。从图 12 可以看出,随着 SiCw@SiO₂ 含量的增加, SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的断裂伸长率显著提高,表明 SiCw@SiO₂ 的加入提高了 EP 的延展性和韧性。而当 SiCw@SiO₂ 的质量分数为 20% 时, SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的拉伸应变与拉伸应力减小,这可能是由于填料含量较大,很难分散均匀,使其在环氧基体中出现较多团聚,界面应力集中,进而导致复合电介质的拉伸性能降低。

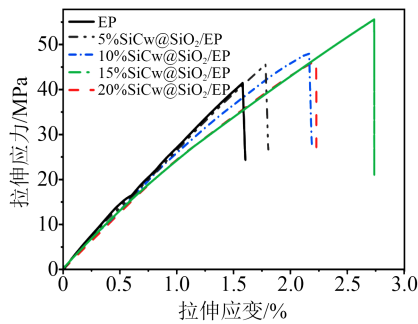


图 12 EP 及 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的应力-应变曲线
Fig.12 Stress-strain curves of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

图 13 为 EP 及不同填料质量分数 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的杨氏模量。从图 13 可以看出, SiCw@SiO₂ 的加入降低了复合电介质的杨氏模量,且加入量越大,降低效果越明显。杨氏模量越小,刚性越小,韧性相对较好。当 SiCw@SiO₂ 的质量分数为 20% 时,复合电介质的杨氏模量为 2 475.41 MPa,相比纯 EP 的 2 725.93 MPa 降低了 18.2%。

图 14 为 EP 及不同填料质量分数 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的拉伸强度,拉伸强度从代表性应力-应变曲线的最大应力点处收集。

从图 14 可以看出,加入 SiCw@SiO₂ 后复合电介质的拉伸强度明显升高,纯 EP 的拉伸强度为 38.46 MPa, SiCw@SiO₂ 质量分数为 15% 的复合电介质拉

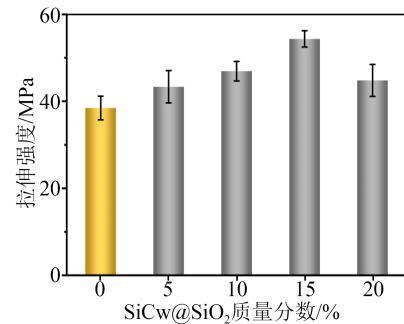
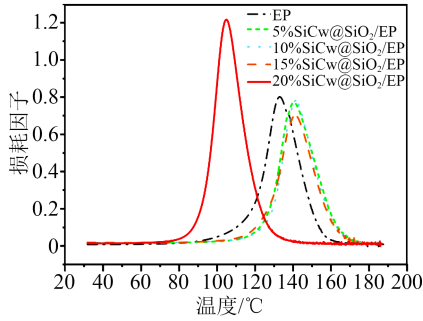
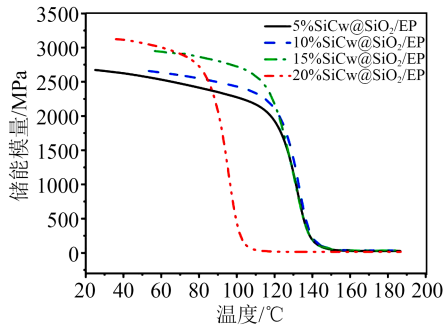


图 14 EP 及 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质的拉伸强度
Fig.14 Tensile strength of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

伸强度最大,为 54.36 MPa,比纯 EP 升高了 41.3%。分析原因如下:一方面 SiCw@SiO₂ 本身韧性好,具有较高的拉伸强度;另一方面由于 SiCw@SiO₂ 的定向结构,当复合电介质受到拉伸力作用时,其内部的 SiCw@SiO₂ 可以发挥分散载荷的作用,并且可以有效传递应力,阻止裂纹扩展^[9]。另外,经超声处理的 SiCw@SiO₂ 可以均匀地分散在基体中,使应力分布均匀,在外力作用下电介质形成的空位、裂纹等结构也会吸收一些能量,因此复合电介质的拉伸强度提高。

图 15 为复合电介质的 DMA 损耗因子随温度的变化关系,损耗因子最大时对应的温度即为复合电介质的 T_g。由图 15 可知,当填料质量分数低于 20% 时,复合电介质的 T_g 均高于纯 EP。这可归因于 SiCw@SiO₂ 的加入限制了环氧分子链段运动并且在一定程度上减小了自由体积。但当 SiCw@SiO₂ 的质量分数达到 20% 时,复合电介质的 T_g 显著降低,这可归因于填料含量太高,分散性变差,导致 EP 分子链所受束缚变小。

图 16 为 SiCw@SiO₂/EP 复合电介质储能模量与温度的关系。储能模量反映了复合电介质在接近 T_g 下存储弹性变形能量的能力。从图 16 可以看出,复合电介质的储能模量随着 SiCw@SiO₂ 质量分数的提高而增大,这是由于 SiCw@SiO₂ 本身韧性较大,可以

图 15 EP及SiCw@SiO₂/EP复合电介质的DMA损耗因子Fig.15 DMA loss factor of EP and SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics图 16 SiCw@SiO₂/EP复合电介质的储能模量Fig.16 Storage modulus of SiCw@SiO₂/EP composite dielectrics

限制聚合物链的运动,有效吸收应力,使应力分布更加均匀。当SiCw@SiO₂的质量分数为15%时,复合电介质的最大储能模量达到2 950 MPa,相比于纯EP的最大储能模量(2 324 MPa)增大了26.9%。

3 结论

为满足饱和电抗器用环氧树脂的性能需求,本研究使用溶液共混法将烧结处理后的碳化硅晶须作为填料填充到EP基体中,获得了性能优异的SiCw@SiO₂/EP复合电介质,得到如下结论:

(1)当SiCw@SiO₂质量分数为15%时,复合电介质的综合性能最优,其导热系数为0.38 W/(m·K),相比纯EP提升了82.9%;介电常数提高了152%,且介质损耗因数基本不发生变化。

(2)SiCw@SiO₂作为功能填料使环氧复合电介质的韧性和拉伸强度得到显著提升,当SiCw@SiO₂质量分数为15%时,环氧复合电介质的拉伸强度为54.36 MPa,与纯EP相比提升了41.3%。

(3)SiCw@SiO₂的引入可以极大地改善环氧复合电介质的综合特性,为制备具有优异导热性能和高韧性的复合电介质提供了一种简便的方法。

参考文献:

[1] 彭毅晖. 高压直流输电的发展与展望[J]. 湖南电力,2007,27(1):

52-57.

- [2] 朱添益,郑映斌. 高压直流系统过负荷能力优化措施[J]. 湖南电力,2018,38(5):62-67.
- [3] 袁佳歆,莫作权,李旭哲,等. 换流阀用阳极饱和电抗器研究综述[J]. 高电压技术,2022,48(12):4829-4841.
- [4] 何子海,虞锦洪,江南,等. 功能化氮化硼纳米片/环氧树脂复合材料的制备与热性能研究[J]. 绝缘材料,2015,48(4):8-13.
- [5] 郑力,张翔,赵赢峰,等. 基于参数拟合的饱和电抗器散热模型[J]. 高电压技术,2021,47(3):946-952.
- [6] 张杰,周宇通,罗宏建,等. 220kV GIS终端环氧套管开裂原因分析[J]. 高压电器,2021,57(6):240-245.
- [7] 凌超,唐炬,潘成,等. 碳化硅表面改性对固体绝缘介质表面电荷聚散特性的影响研究[J]. 绝缘材料,2018,51(9):29-35.
- [8] 祖立武,李纪东,刘嘉欣,等. 环氧树脂改性国内外研究现状[J]. 化工新型材料,2022,50(12):6-11.
- [9] 杜伯学,孔晓晓,李进,等. 高导热环氧树脂复合电介质研究现状[J]. 绝缘材料,2017,50(8):1-8.
- [10] 虞锦洪,沈典宇,王梦杰,等. 环氧/碳化硅复合材料的制备和导热性能研究[J]. 绝缘材料,2017,50(8):59-64,69.
- [11] 郭卫卫. 光固化快速成型中SiC晶须增强树脂基复合材料的研究[D]. 太原:中北大学,2009.
- [12] TOWNSEND J, BURTOVYY R, APRELEV P, et al. Enhancing mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites via alignment of magnetized SiC whiskers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2017,9(27):22927-22940.
- [13] ZHAO L, CHEN Z, REN J, et al. Synchronously improved thermal conductivity and dielectric constant for epoxy composites by introducing functionalized silicon carbide nanoparticles and boron nitride microspheres[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2022,627:205-214.
- [14] 李进,孔晓晓,杜伯学. 固化制度调控双酚A环氧树脂/酸酐体系绝缘性能的研究进展[J]. 电气工程学报,2024,19(1):358-370.
- [15] 夏彦卫,庞先海,魏成梅,等. 环氧树脂/功能化氮化硼纳米片复合电介质的制备及性能研究[J]. 绝缘材料,2022,55(7):27-33.
- [16] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会. 电气绝缘材料 耐热性 第10部分:利用分析试验方法加速确定相对耐热指数(RTEA)基于活化能计算的导则:GB/T 11026.10—2019[S]. 北京:中国标准化出版社,2019.
- [17] ZHAO L, YAN L, WEI C, et al. Synergistic enhanced thermal conductivity of epoxy composites with boron nitride nanosheets and microspheres[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2020, 124(23):12723-12733.
- [18] 韩永森,孙健,张昕,等. 微米SiC/环氧树脂复合材料的界面和非线性电导特性[J]. 复合材料学报. 2020,37(7):1562-1570.
- [19] 周一帆,王明明. 聚苯乙烯/纳米碳化硅晶须复合材料的制备[J]. 绝缘材料,2010,43(1):28-33.

收稿日期:2023-06-19;修回日期:2023-07-19.

作者简介:廖文龙(1989-),男(汉族),四川内江人,工程师,研究方向为高电压与绝缘技术;通信作者:任俊文(1987-),男(汉族),四川南充人,副研究员,研究方向为高电压与绝缘技术。