

大型发电机定子绕组用环氧树脂基复合电介质的制备及性能分析

赵莉华¹, 陈 钰¹, 魏华超¹, 杨 帅², 张 跃², 任俊文^{1*}

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘 要:针对大型发电机定子绕组用环氧树脂(EP)长期受电、热应力耦合劣化作用而绝缘失效的问题,亟需制备兼具良好导热能力和机械强度的环氧树脂复合电介质。本研究以环氧树脂为基体,利用碳化硅颗粒(SiCp)作为非线性电导特性基元,高长径比碳化硅纳米线(SiCn)作为网络骨架,制备了不同 SiCn、SiCp 含量的 SiCn@SiCp/EP 复合电介质。结果表明:SiCn 与 SiCp 互配桥接形成的多尺度三维功能网络,为外部应力和内部声子提供了传输通道,复合电介质的拉伸强度、韧性、导热系数分别达到 64.8 MPa、1.86 MJ/m³、0.326 W/(m·K);同时受逾渗网络影响,复合电介质在较低 SiC 含量下具备优异的非线性电导特性,非线性系数高达 7.79,阈值场强仅为 2.12 kV/mm。利用同种物质的不同形态互配避免了以往异质多元填料间因界面相互作用差异而带来的复杂问题。

关键词:环氧树脂;碳化硅颗粒;碳化硅纳米线;非线性电导;导热

Preparation and performance analysis of epoxy resin-based composite dielectrics for stator windings of large generators

ZHAO Lihua¹, CHEN Yu¹, WEI Huachao¹, YANG Shuai², ZHANG Yue², REN Junwen^{1*}

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

2. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: To address the insulation failure of epoxy resin (EP) used in stator windings of large generator caused by long-term coupling degradation effect of electrical and thermal stress, it is urgent to develop epoxy resin composite dielectrics with both excellent thermal conductivity and mechanical strength. In this study, SiCn@SiCp/EP composite dielectrics with varying SiCn and SiCp contents were prepared by using epoxy resin as the matrix, silicon carbide particles (SiCp) as the nonlinear conductivity base elements, and high aspect-ratio silicon carbide nanowires (SiCn) as the network skeleton. The results show that the multi-scale three-dimensional functional network formed by the mutual matching bridging of SiCn and SiCp provides transmission channels for external stress and internal phonons. The tensile strength, toughness, and thermal conductivity of composite dielectrics reach 64.8 MPa, 1.86 MJ/m³, and 0.326 W/(m·K), respectively. Meanwhile, affected by the percolation network, the composite dielectrics exhibit superior nonlinear conductive characteristics at relatively low SiC content, with a nonlinearity coefficient as high as 7.79 and a threshold field strength of only 2.12 kV/mm. The mutual matching of different morphologies of the same material avoids the complex issues arising from differences in interfacial interactions among multiple heterogeneous fillers in previous studies.

Key words: epoxy resin; silicon carbide particles; silicon carbide nanowires; nonlinear conductivity; thermal conductivity

0 引言

近年来,随着经济的快速发展,用电需求攀升,电力设备逐渐朝着超大功率密度、超高工作电压方向发展,致使电力设备长期承受较高的电、热应力,

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U24B2073);东方电气-四川大学联合创新院首批“揭榜挂帅”项目(23H0637)。

严重威胁其使用寿命^[1]。大型发电机作为电力系统的源头,长期运行在高负荷的工况下,受电、热应力耦合劣化作用的影响愈发明显^[2]。环氧树脂作为定子绕组的主要固体绝缘材料,韧性低,导热系数约为 0.2 W/(m·K),长期的热量积聚和机械振动易导致其产生微裂纹,造成电荷积聚;且由于其本身具有极性,在热场和高电场共同作用下电荷也不易消

散,从而加剧材料表面电场畸变,造成局部电应力劣化,甚至击穿失效^[3-6]。为了改善电荷积聚的影响,通常需要在环氧树脂中加入大量的半导体材料^[7],使其具备较高的非线性电导率,以促进电荷在高场强下的迁移,均化表面电场。但大量的无机填料易团聚而引入缺陷,造成环氧树脂电气强度和机械强度大幅下降^[8],同时由于基体和填料膨胀系数存在差异且环氧树脂导热能力极低,复合材料内部会进一步加速劣化。因此,亟需在保持环氧树脂复合材料优异非线性电导率的前提下,制备出兼具良好导热能力和机械强度的环氧树脂复合电介质。

碳化硅(SiC)作为一种半导体材料,熔点高、化学性质稳定,在高场强下具备明显的非线性特征,是制备非线性环氧树脂复合电介质的理想填料。梁玉等^[9]通过将微米SiC颗粒加入到环氧树脂中,制备得到SiC/环氧树脂绝缘涂层,由该涂层制得的封装器件的电场峰值较普通涂层降低了38.6%;陈向荣等^[10]制备了不同SiC含量的SiC晶须/环氧树脂复合材料,实现了环氧树脂非线性电导率的提升,同时发现环境温度和电场频率对复合材料的非线性性能有显著影响。这些研究表明,填料的含量、粒径和晶型均会影响复合材料的非线性电导特性,单一组分掺杂无法实现复合材料不同性能的协同提升。

为了弥补单一填料的不足,研究人员利用不同尺度、形态的填料协同改善材料的综合性能。HU H T等^[11]利用纳米SiC、纳米ZnO与微米ZnO填料相互组合,发现多元填料更能显著改善复合材料的非线性导电特性;HAN Yixin等^[12]通过共混浇注法制备了SiC-BNNS/环氧树脂复合材料,成功将SiC的高绝缘特性和六方氮化硼(BNNS)的高导热特性融入到环氧树脂基体中。然而由于不同填料的分子结构存在差异,对填料的处理方式各不相同,往往需要复杂的化学修饰使填料与填料之间、填料与基体之间都具备良好的界面相互作用^[13-14],限制了该方法的进一步应用。

利用同一种物质的不同形态,从微观尺度构建不同的功能网络,可避免复杂的化学处理过程,使综合性能提升效果更为显著。碳化硅具备多种尺寸形貌,其中碳化硅颗粒(SiCp)具备显著的非线性电导特性和良好的绝缘性能;高长径比的碳化硅纳米线(SiCn)可以在较低浓度下构建逾渗网络^[15],大

幅降低SiC的添加量;同时不同形态的填料相互交织形成三维网络,为载流子和声子传输提供通道。因此利用不同形貌SiC的差异组合制备兼具高导热、高绝缘特性的非线性复合电介质成为可能。

基于此,本研究以环氧树脂(EP)为基体,利用SiCp作为非线性电导特性基元,SiCn作为逾渗网络骨架,制备不同SiCp、SiCn含量的SiCn@SiCp/EP复合电介质,系统研究SiCn与SiCp多维度共掺杂对非线性电导复合电介质的电学、热学与力学性能的影响规律,以实现大型发电机定子绕组用环氧树脂性能的有效提升。

1 实验

1.1 原材料

双酚A型环氧树脂(E-51,环氧当量为192 g/eq)、甲基六氢苯酚固化剂(MHHPA)、2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚促进剂(DMP-30),南通星辰合成材料有限公司;碳化硅颗粒(SiCp, β 型,平均粒径为50 nm)、碳化硅纳米线(SiCn, β 型,直径为100~600 nm,长度为10~50 μ m),上海肴弋合金材料有限公司;丙酮、无水乙醇、异丙醇,分析纯,成都市科隆化学品有限公司。

1.2 SiCn@SiCp/EP复合电介质的制备

采用溶液共混和加热固化法制备SiCn@SiCp/EP复合电介质。首先分别称取一定质量的SiCp(质量分数分别为10%、14%,分别记为10p、14p)和SiCn(质量分数分别为1%、2%、3%、4%、14%,分别记为1n、2n、3n、4n、14n),在60℃下真空干燥12 h以除尽水分。随后分别置于含50 mL丙酮的烧杯中并对混合液进行超声(120 W,25 kHz)分散1 h。接着向分散液中加入EP,在70℃油浴中搅拌4 h以完全去除丙酮溶剂,然后关闭油浴加热继续搅拌至室温。保持搅拌的同时加入MHHPA和DMP-30,控制EP、MHHPA、DMP-30质量比为100:80:1.6。搅拌10 min后将混合液浇注到已预热至60℃的标准金属模具中,置于真空干燥箱中在60℃下真空脱气1 h,随后在常压下进行120℃/2 h+130℃/2 h的固化,冷却至室温后即可得到SiCn@SiCp/EP复合电介质。

1.3 表征及测试

采用场发射扫描电镜(SEM, ZEISS Gemini SEM 300型,德国卡尔蔡司公司)对2n@10p的微观结构和微观形貌进行表征;采用X射线衍射分析仪

(XRD, ULTIMA IV 型, 日本 Rigaku 理学株式会社) 测试不同填料含量复合电介质的 XRD 图谱; 采用绝缘诊断分析仪 (HuaceFE-2000 型, 北京华测检测仪器有限公司) 测量直流电导率, 测试参照 IEC 62631-3-1:2023 进行, 根据非线性系数方程进行计算, 如式 (1) 所示。

$$\lg \gamma = \lg \frac{\gamma}{E^\beta} + \beta \lg E \quad (1)$$

式 (1) 中: β 为非线性系数; E 为施加场强; γ 为电导率。

采用力学万能试验机 (INSTRON 型, 美国英斯特朗公司) 测定力学性能, 拉伸速率为 1 mm/min, 参照 ISO 527-4: 2021 制备试样; 采用导热测试仪 (DRL-III 型, 湘潭市仪器仪表有限公司) 测量导热系数, 测试过程参照 GB/T 29313—2012 进行; 采用动态热机械分析仪 (Q850 型, 美国 TA 公司) 测定动态热机械性能 (DMA), 测试方法为三点弯曲法, 试样尺寸为 30 mm×10 mm×5 mm, 应变幅值为 0.5%, 频率为 1 Hz, 振幅为 10 μ m, 温度范围为 30~200℃, 加热速率为 5℃/min; 采用宽频介电谱仪 (HDTs-600 型, 北京华测检测仪器有限公司) 测量介电性能; 采用电击穿测试仪 (DDJ-100kV 型, 北京冠测精电仪器设备有限公司) 测定复合电介质的工频电气强度, 数据经双参数 Weibull 分布函数处理, 用于考察复合电介质的实际电气强度, 如式 (2) 所示。

$$P(E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_b} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

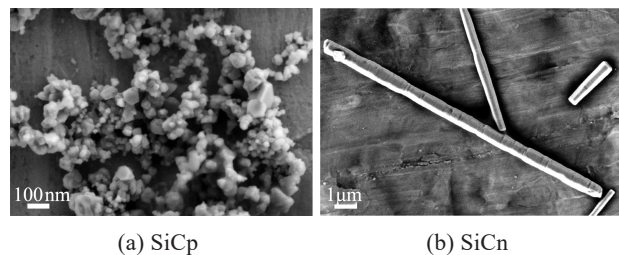
式 (2) 中: $P(E)$ 为绝缘累积击穿概率; E 为实验测得的电气强度, E_b 为经 Weibull 分布函数处理得到的特征电气强度, 即击穿概率为 63.2% 时的电气强度; β 为形状参数, 是拟合直线的斜率。

2 结果与讨论

2.1 复合电介质的微观形貌

图 1(a) 和 (b) 分别为 SiCp 和 SiCn 的微观形貌。从图 1 可以观察到, SiCp 近似为球形颗粒, 直径为 30~70 nm; 而 SiCn 的外形笔直呈棒状, 部分 SiCn 有“竹节”状凸起, 表面光滑, 互相堆叠, 长度为 14 μ m, 直径为 500 nm, 长径比高达 28。

图 2 为 2n@10p 断裂截面的 SEM 图和能谱图 (EDS), 以及不同复合电介质的 XRD 谱图。从图 2 (a) 可以看出, SiCn 在环氧基体中呈单根独立分布, 内部 SiCn 呈“拔出”状, SiCn 顶部残留有搭接的部分

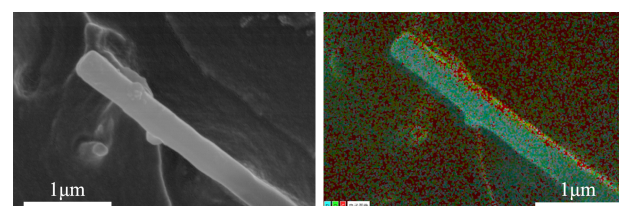


(a) SiCp (b) SiCn

图 1 SiCp 和 SiCn 的 SEM 图

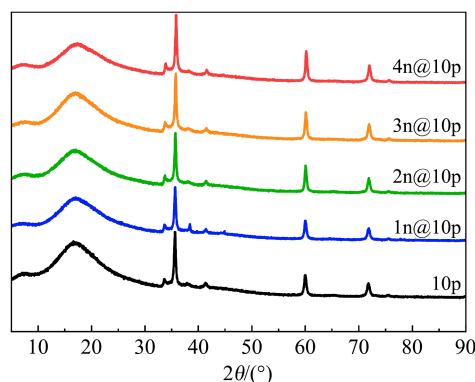
Fig.1 SEM images of SiCp and SiCn

SiCp, 说明 SiCn 和 SiCp 已在复合电介质内部搭接形成三维网络结构^[16-17]。从图 2(b) 可以看出, SiCn 表面存在残留的环氧树脂, 表明 SiCn 与环氧树脂基体的界面相互作用较强。从图 2(c) 可以看出, 随着 SiCn 含量的增加, 其特征衍射峰 (2θ 为 34°、35.6°、41.4°、60.0°、71.8°、75.5°) 强度有所增强, 非晶态环氧树脂的宽峰强度有所降低, 这是由于 SiCn 降低了环氧树脂的堆积密度^[18]。



(a) 2n@10p 的 SEM

(b) 2n@10p 的 EDS



(c) XRD

图 2 2n@10p 的断面 SEM、EDS 及各样品的 XRD 谱图

Fig.2 Cross-sectional SEM and EDS images of 2n@10p and XRD spectra of each sample

2.2 复合电介质的非线性电导特性

图 3 是 20℃ 下 SiCn@SiCp/EP 复合电介质的电导特性曲线。从图 3 可以看出, 纯环氧树脂的电导率随外施场强的增大略有升高, 总体维持在 5×10^{-14} S/cm 左右, 没有出现非线性电导特性。10p 的阈值场强为 4.82 kV/mm, 非线性系数为 4.84; 添加 SiCn 后复合电介质的阈值场强呈明显降低趋势, 其中

4n@10p 的阈值场强降低至 2.12 kV/mm, 非线性系数升高至 7.79, 相比于 10p 阈值场强降低了 56.02%, 非线性系数升高了 60.95%。

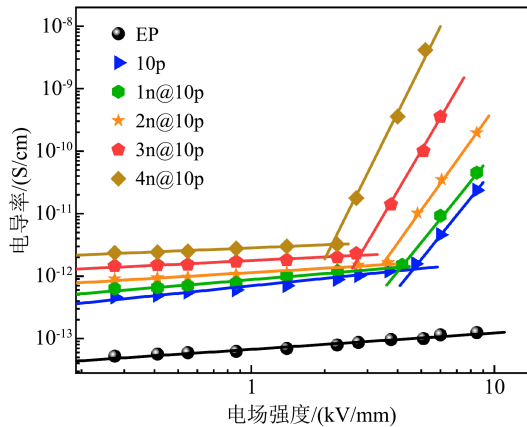


图3 复合电介质的电导特性曲线
Fig.3 Conductivity characteristic curves of composite dielectrics

图4进一步对该结果进行了解释:填料的掺杂含量会影响复合电介质的电导特性,进而影响其均化电场的效果。由于高长径比 SiCn 可作为“桥梁”连接附近的 SiCp 颗粒,从而在较低含量下形成大面积的三维导电网络。其中 SiCn 提供长程导电通路, SiCp 提供短程电荷传输,两者共同优化复合电介质的非线性电导特性^[19]。并且在外施高电场下,电场会诱导载流子在三维导电网络中动态调整路径,使得电导率非线性上升更加显著。此外, SiCn 的尖端曲率半径较小,在外电场作用下会形成局部电场集中,促进电子发射和载流子浓度升高,从而可以在更低的阈值场强下跨过势垒,参与非线性电导过程。

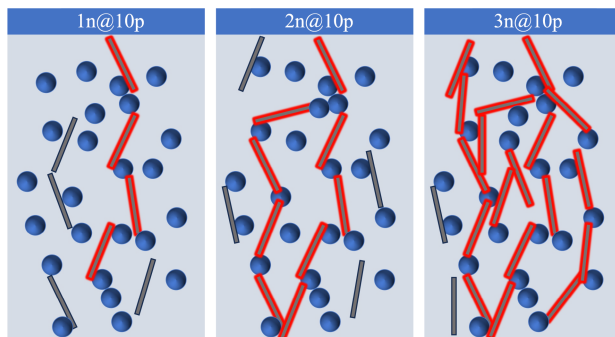
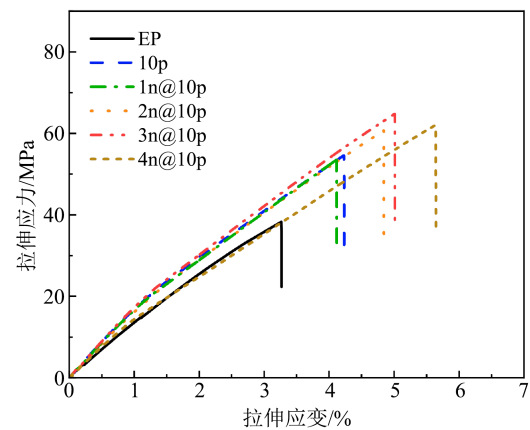


图4 SiCn和SiCp搭接形成的导电网络示意图
Fig.4 Schematic diagram of conductive networks by SiCn and SiCp overlap

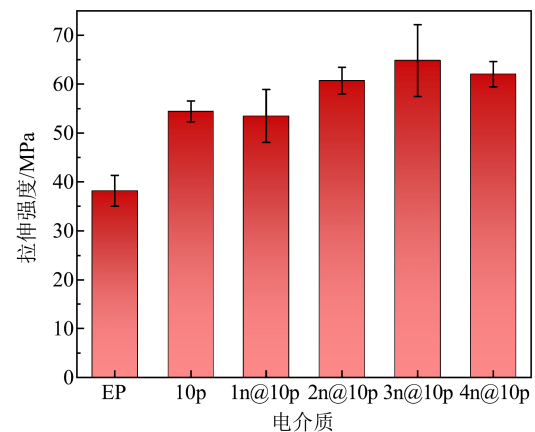
2.3 复合电介质的力学性能

图5是20℃下 SiCn@SiCp/EP 复合电介质的拉

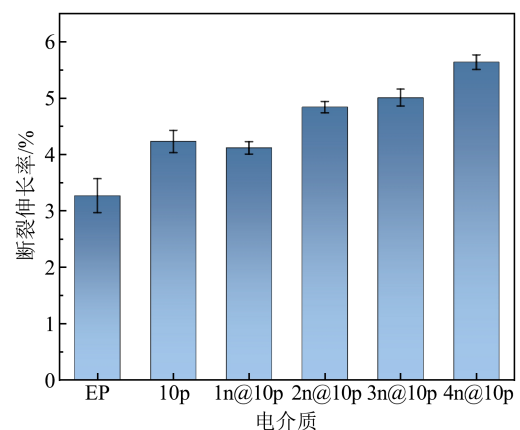
伸测试结果。从图5可以看出,随着 SiCn 含量的上升,复合电介质的拉伸强度、断裂伸长率和韧性均总体呈上升趋势。其中 3n@10p 复合电介质的拉伸强度最优,达到 64.81 MPa,是纯环氧树脂(38.17 MPa)的 1.70 倍。3n@10p 的断裂韧性为 1.86 MJ/m³,是纯环氧树脂(0.67 MJ/m³)的 2.78 倍。从图5还可以看出,4n@10p 的断裂伸长率最高,为 5.6%,断裂韧性也最大。这是源于 SiCn 的高机械强度、极大的比表面积大幅增强了与环氧基体的界面相互



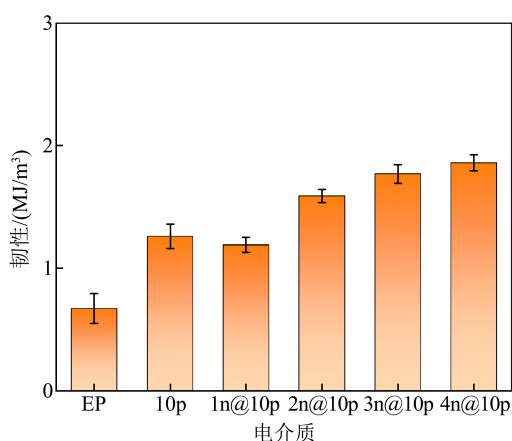
(a) 应力-应变曲线



(b) 拉伸强度



(c) 断裂伸长率



(d) 韧性

图5 复合电介质的力学性能

Fig.5 Mechanical properties of composite dielectrics

作用,从而承担了环氧树脂所承受的部分外部载荷,减少局部应力集中^[20]。正如2.1节所显示的结果,SiCn在环氧断裂时受力呈拔出状态,表明消耗了部分应力,从而提升了断裂伸长率。与10p相比,加入少量的SiCn后增强效果显著,证实了SiCn可以在较低浓度下构建逾渗网络,与SiCp配合形成三维网络,达到协同增强的效果。

2.4 复合电介质的热性能

图6是SiCn@SiCp/EP复合电介质的热导率。从图6可以看出,随着SiCn的加入,复合电介质的热导率逐渐升高,增长速率渐渐加快。其中1n@10p热导率(0.270 W/(m·K))较10p(0.260 W/(m·K))提升较小,4n@10p的热导率迅速提升至0.326 W/(m·K),较纯环氧树脂(0.206 W/(m·K))提升了58.25%,较10p增长了25.38%。以上说明,SiCp在低含量下不易形成长距离传热路径,此时SiCn的引入可以“桥接”SiCp间的空隙,完善复合电介质的填充结构,提高材料的热导率。

为进一步分析SiCn@SiCp/EP复合电介质的热管理能力,将复合电介质薄膜用导热胶粘附于发光二极管上方,通电保持发光二极管以恒定功率发光,使用红外热成像仪对整个发光加热过程进行监测,结果如图7所示。从图7可以看出,当加热时间为50 s时,纯环氧表面的最高温度为58.2℃,10p的表面最高温度为66.7℃,分别添加质量分数为2%与4%的SiCn后,最高温度分别升高到71.6℃与76.3℃,相比于纯环氧有显著升高,其中4n@10p复合电介质相比纯环氧升高了18.1℃。以上说明

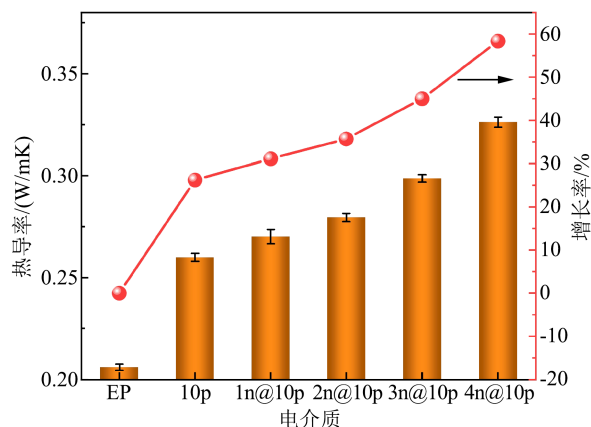


图6 复合电介质的热导率

Fig.6 Thermal conductivity of composite dielectrics

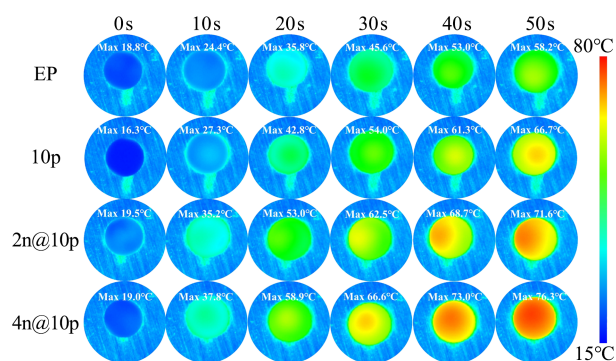


图7 复合电介质的温度红外图像

Fig.7 Infrared images of temperature of composite dielectrics

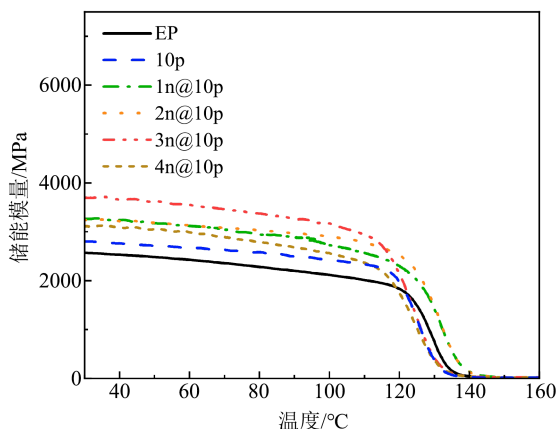
SiCn@SiCp/EP复合电介质具有更强的传热能力。

图8是SiCn@SiCp/EP复合电介质的储能模量及损耗因子曲线,其中损耗因子曲线峰值温度即为玻璃化转变温度。从图8可以看出,随着SiCn的引入,复合电介质的储能模量先升高后降低,其中3n@10p复合电介质的储能模量最高,达到3 660 MPa,相较于10p(2 803 MPa)提高了30.6%。玻璃化转变温度同样得到了提升,其中2n@10p的玻璃化转变温度最高(140.4℃)。这源于高长径比刚性填料SiCn与环氧树脂、SiCp相互交联,有效形成了应力传输网络,提高环氧树脂的储能模量;其次SiCn比表面积大,与环氧基体的界面结合强,限制了环氧分子链的自由运动,使玻璃化转变温度升高^[21];而当SiCn质量分数较高时,局部缺陷限制了储能模量和玻璃化转变温度的进一步提升。

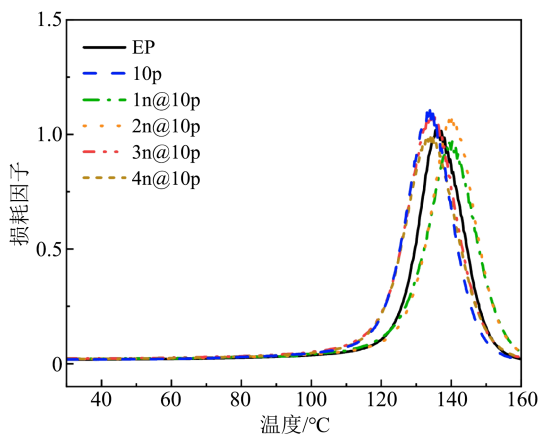
2.5 复合电介质的介电性能

2.5.1 常温介电性能

图9是20℃下SiCn@SiCp/EP复合电介质交流



(a) 储能模量



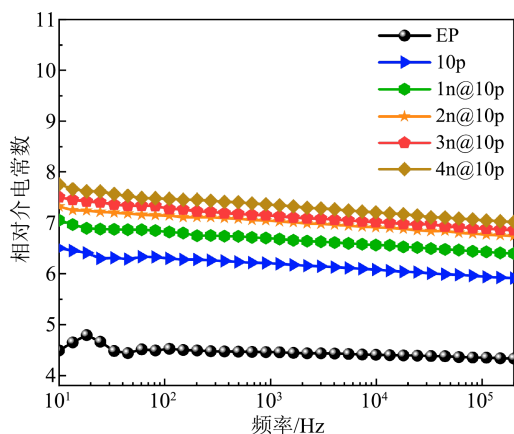
(b) 损耗因子

图8 复合电介质的动态热机械性能

Fig.8 Dynamic thermomechanical properties of composite dielectrics

介电响应特性曲线。从图9可以看出,复合电介质的相对介电常数与介质损耗因数($\tan\delta$)随SiCn含量增加呈上升趋势。其中4n@10p在工频下的相对介电常数为7.9,相比于纯环氧树脂(4.8)升高了64.58%。这源于高长径比SiCn半导体与高绝缘环氧树脂形成的Maxwell-Wagner界面极化作用^[22-23]。此外,SiCn与SiCp桥接形成连续导电网络,复合电介质泄漏电流增大,从而使电导损耗逐渐升高,但全频段的介质损耗因数始终维持在较低水平, $\tan\delta < 0.02$ 。

图10是20°C下SiCn@SiCp/EP复合电介质的交流电导率。从图10可以看出,添加SiCn后,交流电导率会一定程度升高。在10 Hz下,10p交流电导率为 3.2×10^{-13} S/cm,4n@10p的交流电导率为 6.0×10^{-13} S/cm,升高幅度较低,这源于SiCn的添加量较少,最高仅为4%。



(a) 相对介电常数

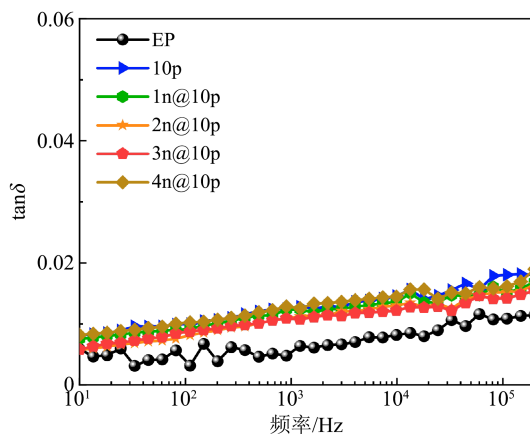
(b) $\tan\delta$

图9 复合电介质的交流介电响应频谱

Fig.9 AC dielectric response spectra of composite dielectrics

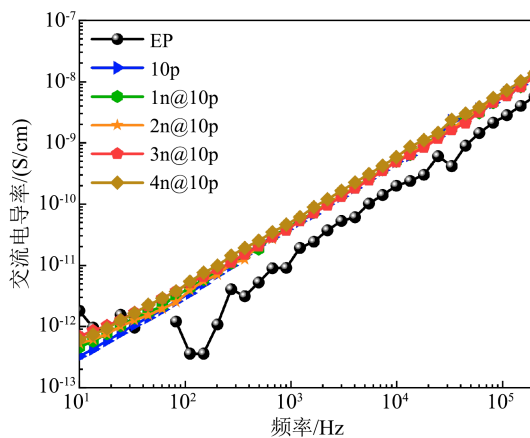


图10 复合电介质的交流电导率

Fig.10 AC conductivity of composite dielectrics

2.5.2 高温介电性能

图11是20~160°C下SiCn@SiCp/EP复合电介质的工频介电响应特性曲线。从图11可以看出,随着温度的升高,环氧树脂及其复合电介质的相对介电常数均呈上升趋势,在160°C时,其中纯环氧的相

对介电常数为7.52,变化幅度最小,4n@10p复合电介质的相对介电常数为12.36,是纯环氧的1.64倍。相对介电常数的升高源于环氧树脂内部分子链运动随温度升高而增强,偶极子更容易在电场作用下发生转向极化^[24-25]。而引入SiCn后,复合电介质在工频高温下的相对介电常数迅速升高,这是由于SiCn长径比较大,较低填充量便能在环氧基体中形成导电网络,这种结构有助于增强界面极化和偶极子转向极化。

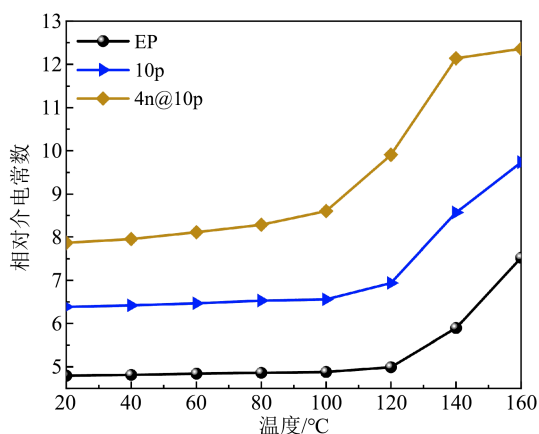


图11 复合电介质的工频高温介电常数

Fig.11 Power frequency high temperature dielectric constant of composite dielectrics

图12是20~160℃下SiCn@SiCp/EP复合电介质的工频 $\tan\delta$ 曲线。从图12可以看出, $\tan\delta$ 在100℃以下变化较小,当超过100℃后, $\tan\delta$ 迅速升高,160℃时达到峰值。纯环氧与10p在160℃下的 $\tan\delta$ 相差不大,这是由于半导体SiCp在低场下的泄漏电流始终较小,主导的电导损耗变化不大。添加质量分数为4%的SiCn后,由于SiCn与SiCp相互作用,在高场下两者协同形成导电网络, $\tan\delta$ 进一步上升,达到0.189,是纯环氧树脂(0.167)的1.13倍。总的来说,虽然高温下4n@10p复合电介质的 $\tan\delta$ 有所上升,但仍保持在较低的水平。

上述结果表明SiCn和SiCp的多尺度互配形成的高效三维网络,避免了大量添加填料对电介质介电性能的劣化,同时取得了较好的性能提升效果。

2.6 复合电介质的电气强度

图13是SiCn@SiCp/EP复合电介质的电气强度曲线。从图13可以看出,随着SiC的引入,复合电介质的工频电气强度出现不同程度的下降,这源于SiC本身较高的电导率。其中4n@10p由于高长径比的SiCn和纳米SiCp的多尺度配合形成的高效三

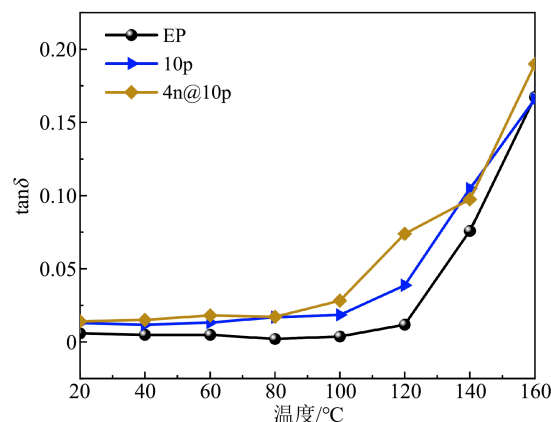


图12 复合电介质的工频高温介质损耗因数

Fig.12 Power frequency high temperature dielectric loss of composite dielectrics

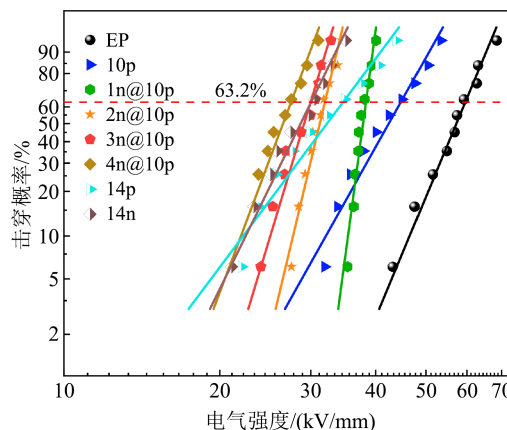


图13 复合电介质的电气强度

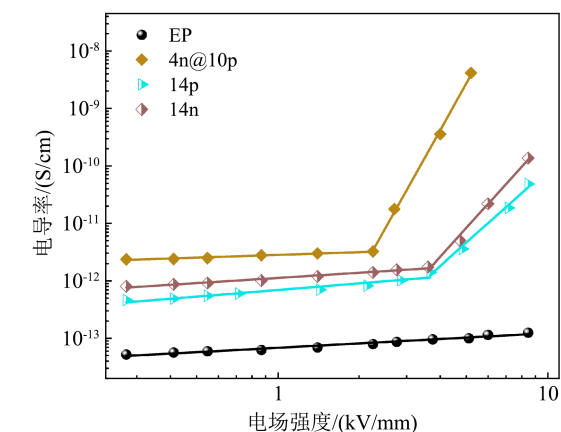
Fig.13 Electric strength of composite dielectrics

维导电网络,其电气强度(27.48 kV/mm)相较于纯环氧树脂电气强度(59.61 kV/mm)下降了53.90%。根据现有大型水轮发电机的制造规格,通常工作电压(U_n)为18 kV^[26-27],发电机定子线棒采用多级梯度绝缘,包含主绝缘和防晕层,厚度大于5 mm,按照最高5倍工作电压的耐压试验要求,防晕层至少需耐受18 kV/mm的冲击电压场强^[28]。因此,虽然SiC的引入劣化了环氧树脂的电气强度,但4n@10p仍满足实际应用要求。

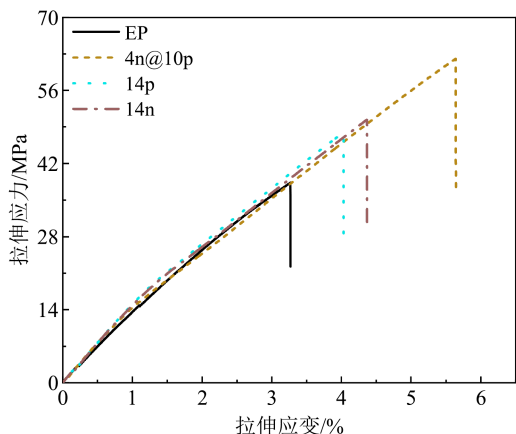
2.7 性能对照

为了进一步研究多尺度填料互配给复合电介质带来的影响,共制备了14p、14n两种复合电介质,系统测定了电导特性曲线、拉伸强度、热导率和工频电气强度,结果如图14所示。从图14(a)可以看出,14p和14n均表现出明显的非线性电导特性,两者阈值场强相差不大,但14n的非线性系数要略大于14p,这源于SiCn高长径比的特点,更容易相互搭

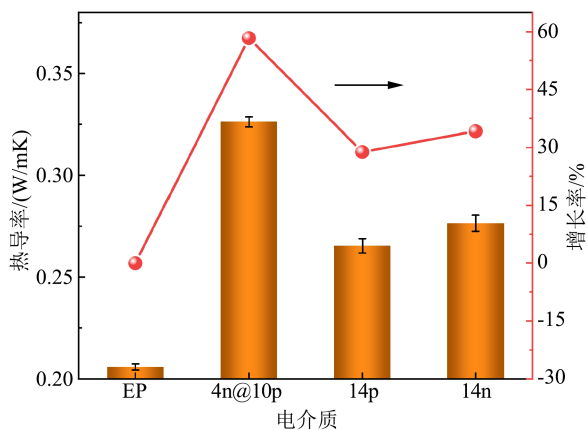
接形成导电网络。对比 14p、14n 与 4n@10p 可以看出, SiCn 和 SiCp 共同掺杂带来了更小的阈值场强和更大的非线性系数。从图 14(b)可以看出, 相同 SiC 含量的情况下, SiCn 和 SiCp 均能提高环氧树脂的机械强度和韧性, 高长径比的 SiCn 的增强效果更好, 但单一填料的高含量添加造成的负面效应导致提升效果远没有两者配合效果显著, 这是因为高含量填料更易团聚, 引入缺陷。从图 14(c)可以看出,



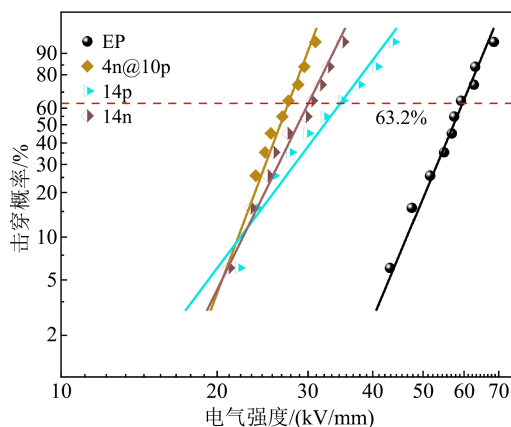
(a) 电导特性曲线



(b) 拉伸应力-应变



(c) 热导率



(d) 电气强度

图 14 不同电介质的性能对照

Fig.14 Performance comparison of different dielectrics

14p、14n 和 4n@10p 的热导率相较于纯环氧树脂分别提升了 28.64%、34.47% 和 58.25%, 虽然相同 SiC 含量下 14p 和 14n 对热导率均有提升效果, 且高长径比的 SiCn 提升效果更好, 但两者协同增强的效果更佳, 表明三维导热网络的构建对热导率的提升至关重要。从图 14(d)可以看出, 如 2.6 节所述, SiC 的引入劣化了环氧树脂的工频电气强度, 14n 的下降程度略大于 14p, 这体现了 SiCp 在构建导电通道方面的优势, 4n@10p 的下降程度最大。

3 结论

本研究利用多维形态的 SiC 在环氧树脂基体中构建三维交织功能网络, 在较低添加量的情况下获得了性能优异的 SiCn@SiCp/EP 复合电介质, 主要结论如下:

(1) 少量 SiCn 的引入显著降低了复合电介质的阈值场强 (2.12 kV/mm), 同时大幅提高了材料的非线性电导特性, 这源于高长径比 SiCn 与 SiCp 桥接互配形成的逾渗网络。

(2) 三维网络骨架为复合电介质内部提供了应力传输通道和声子传递路径, 明显改善复合电介质的力学和导热性能, 拉伸强度高达 64.8 MPa, 断裂韧性提升至 1.86 MJ/m³, 导热系数达到 0.326 W/(m·K)。

(3) SiCn 的引入增强了复合电介质的界面极化, SiCn 与 SiCp 构建的三维导电网络共同导致复合电介质的相对介电常数和介质损耗因数上升, 但全频段的介质损耗因数始终维持在较低水平。

(4) SiC 的引入劣化了环氧树脂的电气强度, $4n@10p$ 下降最为明显, 达到 53.90%, 但仍满足大型发电机的设计需求, 且在非线性电导性能、力学性能、导热系数上有显著提升效果, 较单一添加填料更好, 说明不同尺寸的填料配合在构建三维功能网络上具有协同增强复合电介质性能的潜在优势。

参考文献 References

- [1] 李帅兵, 李天耕, 淡嘉豪, 等. 电气设备复合绝缘结构的太赫兹无损检测综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 194-209.
LI Shuaibing, LI Tiangeng, DAN Jiahao, et al. Review of terahertz non-destructive testing of composite insulation structures for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 194-209.
- [2] 李寅伟, 李强, 李岩, 等. 大型水轮发电机绝缘参数对定子线棒端部电场和电位分布的影响[J]. 绝缘材料, 2022, 55(1): 73-79.
LI Yinwei, LI Qiang, LI Yan, et al. Influence of insulation parameters on electric field and potential distribution at stator bar end of large hydro-generator[J]. Insulating Materials, 2022, 55(1): 73-79.
- [3] JARRAR I M, CHERNEY E A, JAYARAM S H. Ageing and the life curve of type II turn-to-turn insulation under repetitive impulse energization: effect of switching frequency[C]//2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver, Canada: IEEE, 2021: 12-15.
- [4] CAVALLINI A. Reliability of low voltage inverter-fed motors: what have we learned, perspectives, open points[C]//2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 11-15.
- [5] 程显, 安永科, 贺永明, 等. 纳米 Al_2O_3/h -BN 复配改性对环氧树脂复合材料电热性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7): 131-138.
CHENG Xian, AN Yongke, HE Yongming, et al. Effect of nano Al_2O_3/h -BN hybrid modification on the electrothermal performance of epoxy resin composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2023, 39(7): 131-138.
- [6] 胡鹏, 李成钢, 陈大兵. 电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 102-105.
HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing. Cause analysis and countermeasure study of cracking accident of cable GIS terminal epoxy casing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 102-105.
- [7] 梁姣利, 贾雪娅, 伊尔夏提·地里夏提. 环氧树脂/改性 SiC 复合材料的制备及性能[J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(1): 35-38.
LIANG Jiaoli, JIA Xueya, IRSHATI Tishati. Preparation and properties of epoxy resin/modified SiC composite[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(1): 35-38.
- [8] 向小莲, 马忠雷, 石林, 等. 功能化碳化硅纳米线/液晶环氧复合材料的制备与导热性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 3747-3756.
XIANG Xiaolian, MA Zhonglei, SHI Lin, et al. Fabrication and thermally conductive properties of functionalized SiC nanowires/liquid crystal epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 3747-3756.
- [9] 梁玉, 陆国权, 梅云辉. 非线性电导调制 SiC/环氧树脂绝缘涂层热氧/湿热老化研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 207-215.
LIANG Yu, LU Guoquan, MEI Yunhui. Thermo-oxygen/hydrothermal aging of SiC/epoxy resin composite as an insulating coating with nonlinear conductivity[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(6): 207-215.
- [10] 陈向荣, 黄小凡, 王启隆, 等. 温度和频率对环氧树脂/碳化硅晶须复合材料交流非线性特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3897-3912.
CHEN Xiangrong, HUANG Xiaofan, WANG Qilong, et al. Effect of temperature and frequency on AC nonlinear properties of epoxy resin/silicon carbide whisker composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3897-3912.
- [11] HU H T, ZHANG X H, ZHANG D P, et al. Study on the nonlinear conductivity of SiC/ZnO/epoxy resin micro- and nanocomposite materials[J]. Materials, 2019, 12(5): 761-772.
- [12] HAN Yixin, SHI Xuetao, YANG Xutong, et al. Enhanced thermal conductivities of epoxy nanocomposites via incorporating in-situ fabricated hetero-structured SiC-BNNS fillers[J]. Composites Science and Technology, 2020, 187: 107944.
- [13] 周远翔, 王慧娟, 黄欣, 等. 多元共混改性绝缘纸的制备及绝缘性能[J]. 绝缘材料, 2023, 56(3): 1-8.
ZHOU Yuanxiang, WANG Huijuan, HUANG Xin, et al. Preparation and insulating properties of multiple mixed-modified insulating paper[J]. Insulating Materials, 2023, 56(3): 1-8.
- [14] 陈廷鑫, 乔汪洋, 吴媚, 等. 兼具高直流沿面闪络电压与超疏水性能的 $SiO_2/MWCNT/PDMS$ 复合绝缘涂层的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 51-57.
CHEN Tingxin, QIAO Wangyang, WU Mei, et al. Research on preparation and performance of $SiO_2/MWCNT/PDMS$ composite insulation coating with high DC surface flashover voltage and superhydrophobic performance[J]. Insulating Materials, 2024, 57(12): 51-57.
- [15] CHENG Lei, LIU Xiaopan, GAO Pengzhao, et al. Experimental and numerical investigation of the effective thermal conductivity of $MoSi_2$ -RSiC composites with a three-dimensional interpenetrating network structure[J]. Ceramics International, 2021, 47(7): 9534-9542.
- [16] 徐昉, 薛杰, 李响, 等. SiC-BN 填料杂化柔性电绝缘高导热材料[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(9): 156-159, 164.
XU Fang, XUE Jie, LI Xiang, et al. SiC-BN hybrid highly elastic and electrical insulated thermal conductive material[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(9): 156-159, 164.
- [17] 李淼, 赵俊博, 刘付, 等. 碳化汉麻秆纤维-氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 177-184.
LI Miao, ZHAO Junbo, LIU Fu, et al. Carbonized hemp fiber-boron nitride 3D thermal network for constructing high thermal-conductivity epoxy composites[J]. Journal of Beijing Forestry

- University,2025,47(4):177-184.
- [18] 迟庆国,崔爽,张天栋,等. 碳化硅晶须/环氧树脂复合介质非线性电导特性研究[J]. 电工技术学报,2020,35(20):4405-4414.
CHI Qingguo, CUI Shuang, ZHANG Tiandong, et al. Study on nonlinear characteristics on conductivity of silicon carbide whisker/epoxy resin composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(20):4405-4414.
- [19] LI Chuanchang, ZHAO Xinbo, CHEN Jian. Diversiform microstructure silicon carbides stabilized stearic acid as composite phase change materials[J]. Solar Energy,2020,201:92-101.
- [20] 杨雨轩,卢少微,李伟. 碳纤维增强碳纳米管/环氧多尺度复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技,2025,53(2):32-37.
YANG Yuxuan, LU Shaowei, LI Wei. Preparation and performance study of carbon fiber reinforced carbon nanotubes/epoxy multiscale composites[J]. Plastics Science and Technology, 2025,53(2):32-37.
- [21] 何恩健,田文迪,葛毓真,等. 基于树脂复配构筑抗蠕变性能与再加工性能兼备的动态绝缘环氧网络[J]. 高电压技术,2025,51(7):3306-3317.
HE Enjian, TIAN Wendi, GE Yuzhen, et al. Dynamic insulating epoxy networks with enhanced creep resistance and reprocessability via resin blending[J]. High Voltage Engineering,2025,51(7):3306-3317.
- [22] 韩永森,孙健,张昕,等. 微纳米 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.
HAN Yongsan, SUN Jian, ZHANG Xin, et al. Interface and nonlinear conduction characteristics of micro-nano SiC/epoxy composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1562-1570.
- [23] 范路,耿伊雯,王亚林,等. 沿面闪络用非介入式表面电位测量研究[J]. 电力工程技术,2022,41(2):143-148.
FAN Lu, GENG Yiwen, WANG Yalin, et al. Study on non-intrusive surface potential measurement for surface flashover[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):143-148.
- [24] 舒锐,宁晓秋,杨波. 基于介电响应的环氧树脂微米氧化铝复合电介质热性能研究[J]. 绝缘材料,2025,58(6):52-60.
SHU Rui, NING Xiaoqi, YANG Bo. Study on thermal properties of epoxy resin/micron-alumina composite dielectric based on dielectric response[J]. Insulating Materials,2025,58(6):52-60.
- [25] 杨佳,高志鹏,刘艺,等. 不同含量 Al_2O_3 微粒改性环氧树脂复合材料的导热和导电特性[J]. 机械工程材料,2022,46(8):8-14.
YANG Jia, GAO Zhipeng, LIU Yi, et al. Thermal and electrical conductivity of different content Al_2O_3 micro-particle modified epoxy composite[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022,46(8):8-14.
- [26] 李振海,张影,郑伟. 24kV、26kV 水电百万仿真定子线棒新型防晕结构的研究[J]. 绝缘材料,2011,44(1):25-29.
LI Zhenhai, ZHANG Ying, ZHENG Wei. Applications of new anti-corona material on HEC 24kV and 26kV/1000MW stator bars[J]. Insulating Materials,2011,44(1):25-29.
- [27] 黄程伟. 高压水轮发电机定子绕组端部电晕产生原因分析和电场计算[J]. 科技创新与应用,2016(19):57.
HUANG Chengwei. Analysis of the causes of corona discharge at the ends of high-pressure hydroelectric generator stator windings and electric field calculations[J]. Technology Innovation and Application,2016(19):57.
- [28] 李振海. 高压电机新型防晕材料和防晕结构及应用研究[J]. 绝缘材料,2004,37(6):12-15.
LI Zhenhai. Applying study of anti-corona structure and materials for HV-machine[J]. Insulating Materials,2004,37(6):12-15.

收稿日期:2025-06-16;修回日期:2025-08-07。

作者简介:

赵莉华(1968—),女(汉族),四川成都人,副教授,主要从事变压器绝缘及状态检测技术的研究。

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。