

# 高导热高强度 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸制备及性能分析

任俊文<sup>1</sup>, 卞超<sup>1</sup>, 魏佳<sup>1</sup>, 卓然<sup>2</sup>, 卿湫惋喻<sup>1</sup>,  
高萌<sup>2</sup>, 滕富莉<sup>1</sup>, 贾申利<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 南方电网公司电力科学研究院有限公司, 广东 广州 510623)

**摘要:** 将一维 ANF 与二维边缘羟基化 BNNS (BNNS-OH) 混合后利用真空抽滤技术, 制备出具有“砖-泥”结构的 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸, 并对复合绝缘纸的力学性能、导热性能、介电性能和击穿性能进行研究。结果表明: BNNS-OH 在 ANF 中有序排列, 结构致密, ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸具有优异的力学性能、导热性能和击穿性能。当 BNNS-OH 的质量分数为 10% 时, 复合绝缘纸的拉伸强度和电气强度分别为 242.4 MPa 和 312.9 kV/mm; 当 BNNS-OH 的质量分数为 40% 时, 复合绝缘纸的热导率达到了 6.76 W/(m·K), 比纯 ANF 绝缘纸提高了 158.02%; 同时复合绝缘纸具有优异的高温宽频介电稳定性。

**关键词:** 芳纶纳米纤维; 氮化硼纳米片; 热导率; 介电性能; 电气强度

## Preparation and performance analysis of ANF/BNNS-OH composite insulating paper with high thermal conductivity and high strength

REN Junwen<sup>1</sup>, BIAN Chao<sup>1</sup>, WEI Jia<sup>1</sup>, ZHUO Ran<sup>2</sup>, QING Qiuwanyu<sup>1</sup>,  
GAO Meng<sup>2</sup>, TENG Fuli<sup>1</sup>, JIA Shenli<sup>1</sup>

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

2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** The one-dimensional ANF and two-dimensional edge-hydroxylated BNNS (BNNS-OH) were mixed to prepare ANF/BNNS-OH composite insulating papers with “brick-mud” structure by vacuum filtration technology. The mechanical properties, thermal conductivity, dielectric properties, and breakdown properties of the composite insulating paper were studied. The results show that the BNNS-OH arranges in ANF orderly, and the structure is dense. The ANF/BNNS-OH composite insulating paper has excellent mechanical properties, thermal conductivity, and breakdown properties. When the mass fraction of BNNS-OH is 10%, the tensile strength and electric strength of the composite insulating paper are 242.4 MPa and 312.9 kV/mm, respectively. When the mass fraction of BNNS-OH is 40%, the thermal conductivity of the composite insulating paper reaches 6.76 W/(m·K), which is 158.02% higher than that of pure ANF insulating paper. At same time, the composite insulating paper has excellent high temperature wideband dielectric stability.

**Key words:** aramid nanofibers; boron nitride nanosheets; thermal conductivity; dielectric properties; electric strength

## 0 引言

近年来, 新能源汽车对高动力、快速充电的需求不断提升, 电机系统不断朝着高功率密度、高电压等级方向发展, 这对电机系统所使用的绝缘材料性能和可靠性提出了严苛的挑战。在电机系统中, 芳纶绝缘纸凭借突出的耐高温、绝缘性能以及力学性能被广泛应用于电机槽间绝缘。但是传统的芳

纶绝缘纸无法满足高电压等级、大功率新能源汽车电机系统的应用需求, 芳纶材料本身导热性能较差, 且芳纶纸材料内部具有的多孔结构, 导致芳纶纸基材料的热导率更低, 限制了其进一步发展。因此, 亟须开发出高导热<sup>[1-3]</sup>、高绝缘强度、高力学性能的绝缘纸<sup>[8-10]</sup>。

芳纶纤维具有优异的力学性能、良好的电绝缘性能和耐高温等特点<sup>[4]</sup>。但是芳纶纤维表面光滑, 缺乏活性基团, 表现出化学惰性。在先前的研究中发现, 纳米尺寸的微观材料具有高比表面积并且表

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52377028); 四川省重点研发项目(2023YFG0236)。

面更具活性<sup>[5-7]</sup>。2011年,YANG M等<sup>[4]</sup>利用氢氧化钾(KOH)和二甲基亚砷(DMSO)体系剥离宏观的Kevlar纤维,通过去质子化作用,削弱聚对苯二甲酰对苯二胺(PPTA)分子骨架之间氢键的相互作用,得到芳纶纳米纤维(ANF),ANF不仅保留了芳纶纤维优异的力学性能、模量和耐高温性能,并且拥有丰富的活性基团和超高的长径比,是一种新兴的纳米尺寸材料,在高性能材料设计中扮演着重要角色。

在聚合物基体中加入高导热填料<sup>[1]</sup>,如金属填料、碳基填料和陶瓷填料等是一种有效提升其热导率的方法。但是金属填料和碳基填料的引入会提高聚合物基复合材料的电导率,降低材料的绝缘性能,限制其在电力设备中的实际应用。氮化硼纳米片(BNNS)具有与石墨烯类的六边形蜂窝状晶格结构<sup>[11]</sup>,宽带隙,因此其具有良好的电绝缘性,同时具有较高的热导率,是一种理想的导热绝缘材料。BNNS作为导热填料,能在提升聚合物的导热性能的同时不损害其介电性能和电绝缘性能,非常适合电力设备中对材料散热要求很高同时需要高绝缘性能的场所。

除此之外,对绝缘纸进行结构设计,使填料在基体内有序排列,构筑连续的导热通路,也是提升绝缘纸导热性能的有效方法。天然珍珠层显示出卓越的力学性能,尤其是其高强度和高韧性,因此具有很高研究价值。在宏观层面,天然珍珠层的“砖和砂浆”结构赋予了其在经历线性弹性形变后的屈服能力,然后塑性伸长直至断裂,为近年来研究者们设计出具有更高力学性能的复合材料提供了宝贵的思路。ZENG X L等<sup>[12]</sup>通过真空辅助自组装技术,以非共价功能化BNNS和聚乙烯醇(PVA)为原料,制备了一种具有珍珠层的绝缘纸,实现了ANF-BNNS和PVA的有序排列,得到的纸张具有优异的拉伸强度和高导热特性。ZENG F Z等<sup>[13]</sup>受天然珍珠层结构的启发,通过溶胶-凝胶-薄膜转化过程,制备了以3D-ANF框架作为基质,取向云母为填料的复合绝缘纸,这种复合绝缘纸具有良好的机械强度和高介电强度。赵莉华等<sup>[14]</sup>将ANF与BNNS结合制备复合芳纶纳米纤维绝缘纸,有效提升了复合绝缘纸的热导率。

为了协同提升绝缘纸的电、热、力学性能,本研究将一维ANF与二维边缘羟基化BNNS(BNNS-OH)相结合,通过真空辅助抽滤和热压工艺制备具

有“砖-泥”结构的复合绝缘纸(ANF/BNNS-OH),并对复合绝缘纸的拉伸强度、导热特性、介电性能和击穿特性进行研究。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

六方氮化硼(h-BN,横向尺寸为10~15 μm),秦皇岛一诺高新技术材料开发公司;Kevlar 29<sup>®</sup>纱线,杜邦公司;氢氧化钠(NaOH),上海阿拉丁试剂有限公司;二甲基亚砷(DMSO)、丙酮、氢氧化钾(KOH)、柠檬酸锂、异丙醇(IPA)、乙醇,中国成都科隆化学试剂有限公司。

### 1.2 样品制备

#### 1.2.1 BNNS-OH的制备

称取1 g六方氮化硼(h-BN)粉末和1 g柠檬酸锂分散到100 mL的去离子水/异丙醇(体积比为3:1)混合溶剂中,用750 W探头超声处理15 min,随后置于550 W水浴超声6 h。将超声处理后的混合液转移到不锈钢高压反应釜中,在200℃下水热处理6 h。待混合液冷却后用离心机以8 000 r/min的转速离心15 min,用去离子水洗涤3次,除去残留的柠檬酸锂和异丙醇。将清洗后的材料分散在200 mL氢氧化钠水溶液中,水浴超声20 min,将超声后的混合液导入反应釜中,在200℃下水热处理6 h,得到剥离后的BNNS-OH分散液,用去离子水反复清洗后,在0℃下冷冻干燥36 h,得到BNNS-OH粉末,密封储存备用。

#### 1.2.2 ANF的制备

将Kevlar 29<sup>®</sup>裁切成长度为1 cm的小段,然后置于丙酮中浸泡并进行水浴超声处理48 h,用去离子水过滤清洗后,在45℃下真空干燥48 h。将处理好的纤维加入到KOH、DMSO和去离子水的混合溶液中,放置在磁力搅拌机上,在25℃下避光搅拌14 d,最终得到暗红色的ANF/DMSO分散液。量取适量的ANF/DMSO分散液,用3倍体积的DMSO溶剂进行稀释,对混合液进行磁力搅拌,与此同时加入ANF/DMSO混合液总质量4%的去离子水,少量多次加入,使得ANF上的酰胺基质子化。随后将BNNS-OH加入到50 mL的DMSO中超声分散,得到BNNS-OH/DMSO分散液,将质子化后的ANF/DMSO混合液与BNNS-OH/DMSO分散液共混进行超声3 h之后搅拌2 h,将分散好的混合液用去离子水反复清洗,并置于剪切机中进行均质得到分散稳

定的 ANF/BNNS-OH 浆液, 然后进行真空抽滤, 成膜后在 100℃/10 MPa 条件下热压 5 min 后在 45℃ 下真空干燥 48 h, 得到柔性的 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸。

### 1.3 表征及测试

采用扫描电子显微镜和透射电子显微镜对 h-BN、BNNS-OH、Kevlar 29<sup>®</sup> 纱线、ANF 和 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸的微观结构和微观形貌进行表征; 采用光谱仪测试样品的傅里叶变换红外光谱 (FT-IR), 波数为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>; 采用红外热像仪对纯 ANF 绝缘纸和复合绝缘纸的热管理性能进行表征; 采用万能试验机对样品进行力学性能测试, 拉伸速率为 1 mm/min; 采用高低温介电温谱仪测试绝缘纸的介电特性; 采用电击穿试验仪对样品进行电气强度测试, 升压速率为 500 V/s。

利用式(1)计算样品的面内热导率。

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho \quad (1)$$

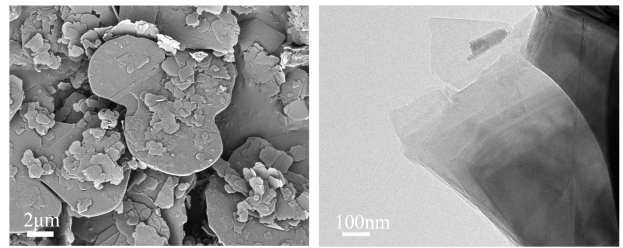
式(1)中:  $\alpha$  是绝缘纸平面中的热扩散速率, 使用耐驰公司的 LFA 467 型激光闪光测试仪在 25℃ 下测量得到;  $C_p$  是绝缘纸的比热容, 采用美国 TA 公司的 Q20 型差示扫描量热仪 (DSC) 通过蓝宝石法测得;  $\rho$  是绝缘纸的密度, 由质量 ( $m$ ) 和体积 ( $v$ ) 经过  $\rho = m/v$  计算得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观结构

图 1 为 h-BN 和剥离得到的 BNNS-OH 的微观形貌结构图。从图 1(a) 可以观察到 h-BN 堆叠形成多层块状; 从图 1(b) 可以看到经过锂离子辅助液相剥离和水热处理得到的 BNNS-OH 为单层或少层的片状结构, 而且 BNNS-OH 的透光度很高。与 h-BN 相比, BNNS-OH 的厚度显著减小, 部分边缘区域显现为黑色, 这是由于剥离后的 BNNS-OH 厚度太薄, 发生了褶皱现象。图 2 为 BNNS-OH 在去离子水中的分散液。从图 2(b) 可以观察到分散液具有显著的丁达尔效应, 这表明 BNNS-OH 在去离子水中有非常好的分散性。

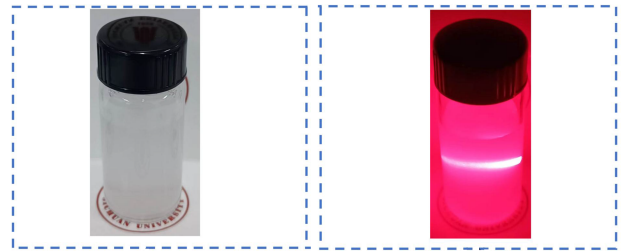
图 3 为 Kevlar 纤维的 SEM 图和 ANF 的 AFM 图。从图 3 可以看出, Kevlar 纤维单根直径为 10~20 nm, 粗细均匀, 表面光滑, 与聚合物基体难以形成良好的界面相互作用。利用 DMSO 和 KOH 通过去质子化法削弱芳纶纤维中的氢键, 成功制备了弯曲缠绕、网状结构的芳纶纳米纤维, 如图 3(b) 所示。



(a) h-BN 的 SEM (b) BNNS-OH 的 TEM

图 1 样品的微观形貌

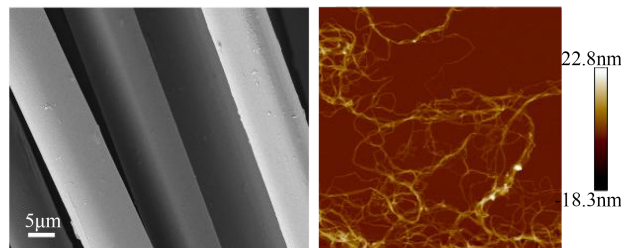
Fig.1 The micromorphology of samples



(a) 分散液 (b) 丁达尔效应

图 2 BNNS-OH 在溶剂中的分散状态

Fig.2 Dispersion of BNNS-OH in solvent

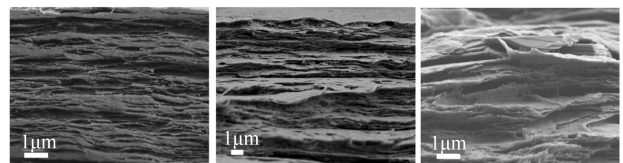


(a) 芳纶纤维 (b) 芳纶纳米纤维

图 3 Kevlar 纤维的 SEM 图和 ANF 的 AFM 图

Fig.3 SEM image of Kevlar fiber and AFM image of ANF

复合绝缘纸截面的 SEM 图如图 4 所示。由于经过真空抽滤, BNNS-OH 在此过程中受到负压的驱动沿水平方向层层堆积, 也得益于 ANF 的酰胺基与 BNNS-OH 的羟基之间形成的氢键, 填料与基体之间形成强相互作用, 使 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸呈现出典型的“砖-泥”结构。从图 4 可以看出, ANF 作为“砂浆”交替片列, BNNS-OH 作为“砖”水



(a) 0%BNNS-OH (b) 20%BNNS-OH (c) 40%BNNS-OH

图 4 不同 BNNS-OH 含量复合绝缘纸截面的 SEM 图

Fig.4 SEM images of the cross section of composite insulating paper with different contents of BNNS-OH

平排列在ANF层之间,随着BNNS-OH含量的不断增多,当BNNS-OH质量分数达到40%时,填料在ANF中出现团聚现象,“砖-泥”结构被破坏。

图5为h-BN和BNNS-OH的傅里叶变换红外光谱。从图5可以看出,h-BN和BNNS-OH在波数为 $800\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,370\text{ cm}^{-1}$ 处均有2个强烈的吸收峰,分别对应于B-N-B的面外弯曲振动和B-N的面内拉伸振动,其中BNNS-OH在波数为 $3\,400\text{ cm}^{-1}$ 处,也出现1个明显的特征峰,这归属于O-H伸缩振动,表明BNNS表面接枝了羟基。

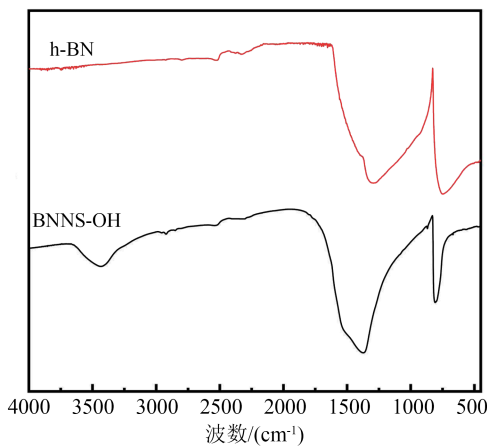


图5 h-BN和BNNS-OH的傅里叶变换红外光谱  
Fig.5 FT-IR spectra of h-BN and BNNS-OH

## 2.2 ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的热学性能

图6为不同BNNS-OH含量下复合绝缘纸的面内热导率及其增长率。面内热导率增长率TCE的计算公式如式(2)所示。

$$TCE = (\lambda_c - \lambda_m) / \lambda_m \quad (2)$$

式(2)中: $\lambda_c$ 为ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的面内热导率; $\lambda_m$ 为纯ANF绝缘纸的面内热导率。

从图6可以看出,ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的热导率随着BNNS-OH含量的增加而逐渐升高,当BNNS-OH质量分数为40%时,复合绝缘纸的热导率为 $6.76\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,相比纯ANF绝缘纸的热导率( $2.62\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )提升了158.02%。这是由于BNNS-OH的羟基与ANF的酰胺基之间形成氢键,其强度是范德华力的10~100倍,可以显著增强二者的界面相互作用,且在抽滤作用下,BNNS-OH受到负压的驱动沿水平方向层层堆积,实现了高导热的BNNS-OH在ANF基体内有序排列<sup>[4]</sup>,形成连续有效的声子传输路径,促进了有序的导热桥梁的构成。

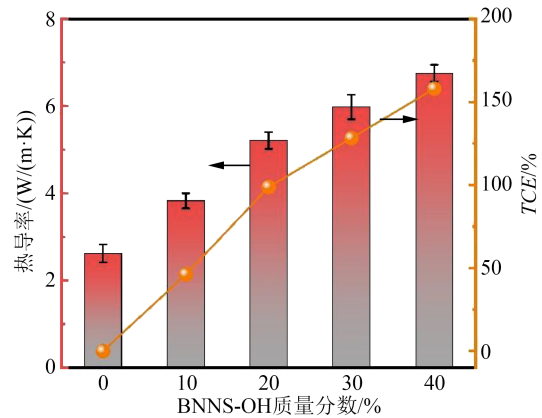


图6 不同BNNS-OH含量下复合绝缘纸的热导率及其增长率

Fig.6 Thermal conductivity and its growth rate of composite insulating paper with different BNNS-OH contents

为进一步分析ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的热管理能力,使用导热铜胶将发光二极管粘附于绝缘纸上,周围环境温度和绝缘纸的初始温度均为 $25^\circ\text{C}$ ,发光二极管在直流3V电源的支持下,通过照明成为产热中心,通过检测热点温度模拟绝缘纸在设备发热时的散热能力,红外热成像图如图7所示。从图7可以看出,在相同的环境条件下,发光二极管工作60s后,BNNS-OH质量分数为40%的复合绝缘纸的热点温度为 $60.2^\circ\text{C}$ ,而纯ANF绝缘纸的热点温度为 $69.0^\circ\text{C}$ 。这表明ANF/BNNS-OH复合绝缘纸可以作为热管理材料应用在电力设备中,降低设备的热点温度,提高设备的运行可靠性。

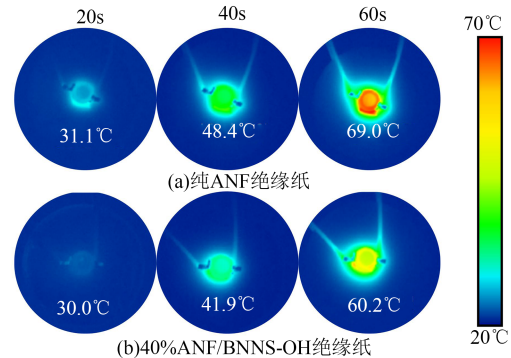


图7 绝缘纸的红外热图像

Fig.7 Infrared thermal images of insulating papers

## 2.3 ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的力学性能

ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的力学性能测试结果如图8所示。从图8可以看出,当BNNS-OH质量分数为10%时,复合绝缘纸的拉伸强度和断裂伸长率分别为 $242.4\text{ MPa}$ 和16.1%,相比纯ANF绝缘纸有了明显提升,这是由于ANF具有高长径比的网状

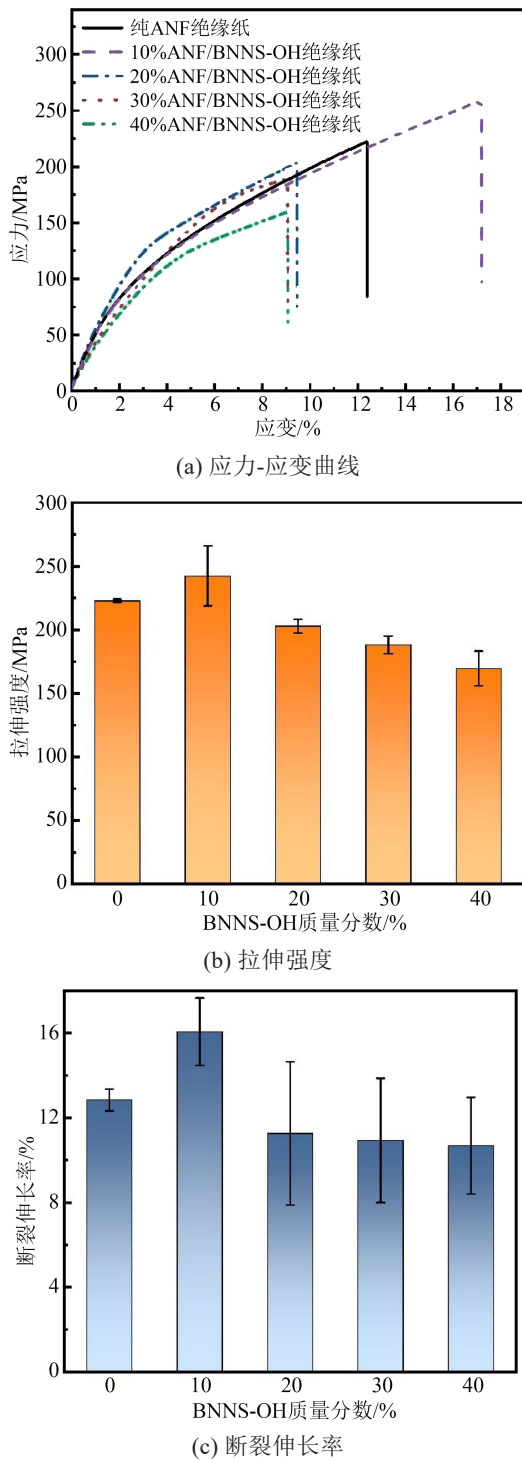


图8 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of ANF/BNNS-OH composite insulating paper

纤维结构,同时通过真空抽滤,ANF的酰胺基与BNNS-OH的羟基通过氢键相互作用,紧密缠结,进而提升复合绝缘纸的力学性能。然而随着BNNS-OH含量的增加,复合绝缘纸的力学性能逐渐劣化,这是因为高含量下,填料在ANF内出现聚集,产生

微小气隙,BNNS-OH与ANF之间界面结合减弱,会出现强烈的应力集中现象,因此,当BNNS-OH质量分数高于10%时,ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的拉伸强度和断裂伸长率均低于纯ANF绝缘纸,力学性能不佳。

表1为ANF/BNNS-OH复合绝缘纸与早前文献报道的纸基材料的力学性能对比结果。从表1可以看出,ANF/BNNS-OH复合绝缘纸在导热和力学性能方面显示出极强的竞争优势。本工作研究的复合绝缘纸在填料低填充量下,就可以实现导热和力学性能的协同提升,当BNNS-OH质量分数为20%时,ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的热导率达到了 $5.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,拉伸强度为 $202.90 \text{ MPa}$ ,意味着该复合绝缘纸在大容量变压器等电力设备中具有广阔的应用前景。

表1 ANF/BNNS-OH 绝缘纸与纸基材料导热性能和力学性能的比较

Table 1 Comparison of thermal conductivity and mechanical properties of ANF/BNNS-OH insulating paper and paper-based materials

复合材料	填料质量分数/%	热导率 $\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	拉伸强度 /MPa	来源
ANF/BNNS-OH	10	3.83	242.42	本工作
ANF/BNNS-OH	20	5.21	202.90	本工作
ANF/BNNS-OH	30	5.98	188.16	本工作
ANF/BNNS-OH	40	6.76	169.57	本工作
ANF/BNNS	50	3.94	27	[17]
CNF/BNNS	70	30.25	30	[18]
PVA/BNNS	30	4.41	—	[19]
PI/h-BN	60	7.00	—	[20]

#### 2.4 ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸的击穿性能

为分析ANF/BNNS-OH复合绝缘纸耐受高电压的能力,将样品夹在两电极中间,电极浸没在绝缘油中,以 $500 \text{ V/s}$ 的升压速率测定高直流电压下样品的电气强度,并将所得结果采用威布尔累积概率函数进行分析,公式如式(3)所示。

$$P(E) = 1 - \exp\left[-(E_0/E_c)^\beta\right] \quad (3)$$

式(3)中: $E_c$ 是复合绝缘纸的电气强度; $E_0$ 是失效概率为63.2%时的特征电气强度; $\beta$ 表示与威布尔质量分布宽度相关的形状参数。

复合绝缘纸的电气强度拟合结果如图9所示。从图9可以看出,纯ANF绝缘纸的电气强度为 $161.7 \text{ kV/mm}$ ,当BNNS-OH质量分数分别为10%、

20%、30%、40%时, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的电气强度分别为312.9、239.9、220.1、202.1 kV/mm。随着BNNS-OH含量的增加, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的电气强度先增大后减小。当BNNS-OH质量分数为10%时, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的电气强度较纯ANF绝缘纸提升了93.5%。电气强度提升的原因一方面BNNS-OH具有超高的电气强度(800 kV/mm), 且绝缘纸具有良好的“砖-泥”结构和强界面结合作用, 分散在绝缘纸中的BNNS-OH使得电树枝的发展路径更为曲折, 另一方面高导热的BNNS-OH搭接形成导热通路有助于热量的疏散, 降低发生热击穿的风险<sup>[16]</sup>。

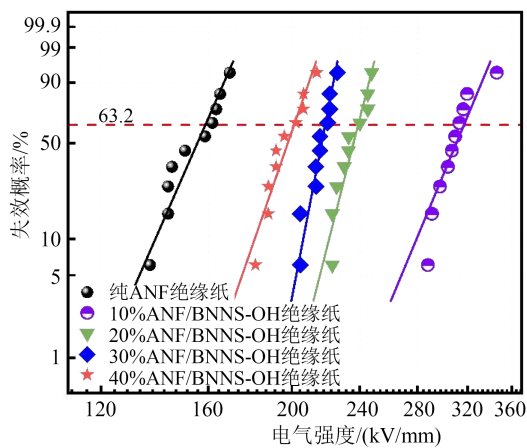
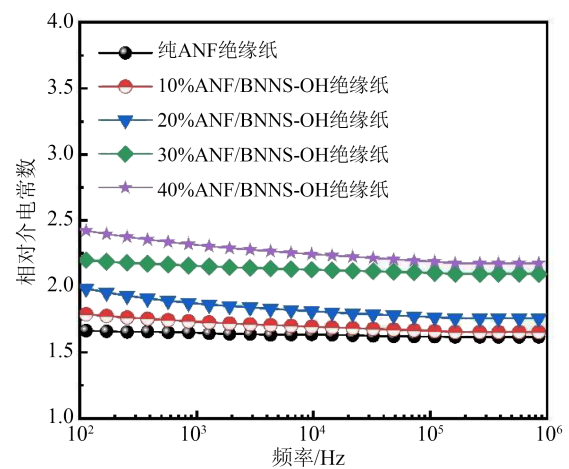


图9 复合绝缘纸电气强度的威布尔分布

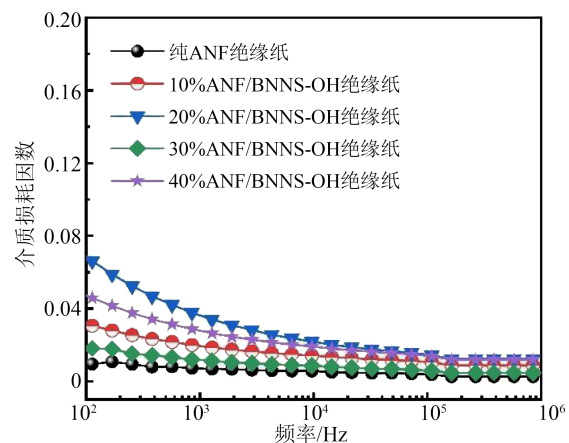
Fig.9 Weibull distribution of electric strength of composite insulating paper

### 2.5 ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的介电性能

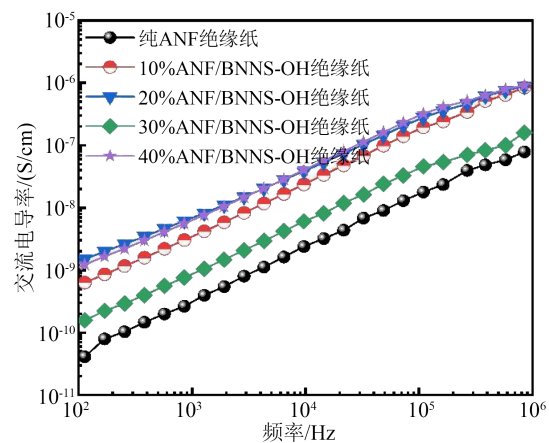
为研究BNNS-OH含量对ANF绝缘纸介电性能的影响, 对 $10^2 \sim 10^6$  Hz频率范围内ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的相对介电常数、介质损耗因数和交流电导率进行了测试, 结果如图10所示。从图10可以看出, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的介电常数在较宽频率范围内变化不大, 介质损耗因数均低于0.08。除此之外, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的介电常数随着BNNS-OH含量的增加呈现增大趋势。纯ANF绝缘纸在10 kHz下的介电常数为1.64, 当BNNS-OH质量分数为40%时, ANF/BNNS-OH复合绝缘纸在10 kHz下的介电常数为2.31, 相比之下有了显著的提升。这是因为BNNS-OH的介电常数约为3.9, 纯ANF绝缘纸的介电常数为1.5左右, 基体与填料之间介电常数不匹配, 局部界面区域容易积聚空间电荷, 产生界面极化, 导致复合绝缘纸的



(a) 相对介电常数



(b) 介质损耗因数



(c) 交流电导率

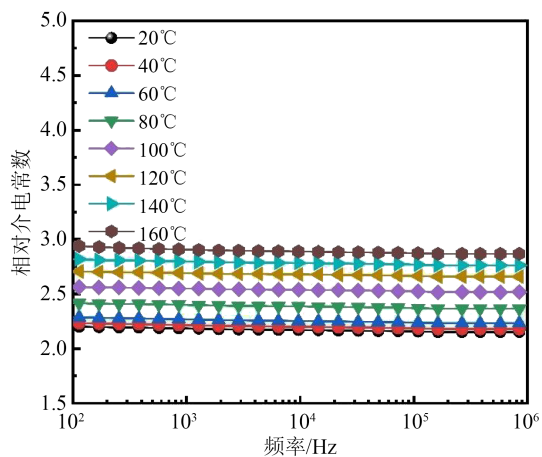
图10 ANF/BNNS-OH复合绝缘纸的介电性能

Fig.10 Dielectric properties of ANF/BNNS-OH composite insulating paper

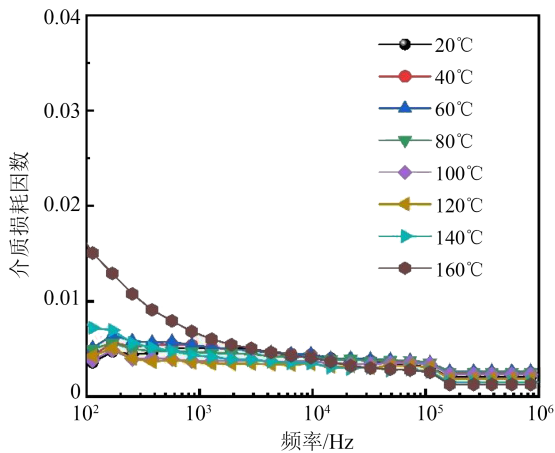
介电常数增大。交流电导率在很宽的频率范围内也保持在极低的值, 复合绝缘纸表现出优异的绝缘特性。

温度是影响绝缘纸寿命的重要因素, 图11展示了30%ANF/BNNS-OH复合绝缘纸在20~160℃温

度范围内的介电行为。从图 11 可以看出,随着温度的升高,复合绝缘纸的介电常数显著上升,在 160℃、10 kHz 条件下,其介电常数约为 2.9,然而相同频率下,温度为 20℃ 时,介电常数仅为 2.18。在低频段介质损耗因数随着温度的升高有上升趋势,高频段介质损耗因数保持稳定,在 180℃ 的高温下,复合绝缘纸的相对介电常数和介质损耗因数都维持在一个较低的水平。因此复合绝缘纸具有良好的高温介电稳定性。



(a) 相对介电常数



(b) 介质损耗因数

图 11 30%ANF/BNNS-OH 复合绝缘纸的介电温谱

Fig.11 Dielectric temperature spectrum of 30%ANF/BNNS-OH composite insulating paper

### 3 结论

(1)通过锂离子辅助液相剥离和水热处理相结合的方法,剥离 h-BN,得到羟基化的 BNNS(BNNS-OH)呈现出超薄少层结构,且分散良好;通过去质子化作用制备的 ANF 具有超高长径比,是非常好的纳米级构建块。

(2)导热基元 BNNS-OH 在 ANF 内有序排列,形成高效导热路径,复合绝缘纸的热导率提升效果明显。当 BNNS-OH 含量质量分数为 40% 时,复合绝缘纸的热导率为 6.76 W/(m·K),比纯 ANF 绝缘纸提升了 158.02%。

(3)BNNS-OH 的引入,提升了复合绝缘纸的电气强度,阻碍电树枝的发展,BNNS-OH 质量分数为 10% 的复合绝缘纸电气强度达到了 312.9 kV/mm,与纯 ANF 绝缘纸相比提升了 93.5%。

(4)BNNS-OH 质量分数为 10% 的复合绝缘纸拉伸强度和断裂伸长率分别为 242.4 MPa 和 16.1%,优于纯 ANF 绝缘纸。但是随着填料的增多,复合绝缘纸的力学性能逐渐劣化。

(5)复合绝缘纸的介电性能在  $10^2 \sim 10^6$  Hz 频率范围内表现出频率稳定性,在 20~160℃ 温度范围内,表现出高温介电稳定性。

### 参考文献 References

- [1] 陈珊珊. 氮化硼纳米片/芳纶纳米纤维导热绝缘纸基材料的制备及性能研究[D]. 陕西:陕西科技大学,2021.  
CHEN S S. Study on Preparation and properties of thermal conductive and insulating paper-based materials of boron nitride nanosheets/aramid nanofibers[D]. Shaanxi:Shaanxi University of Science and Technology,2021.
- [2] 杨如梦. 芳纶纳米纤维绝缘纸的制备及性能研究[D]. 天津:天津工业大学,2021.  
YANG R M. Preparation and properties of aramid nanofiber insulation paper[D]. Tianjin: Tiangong University,2021.
- [3] 于红梅. 油浸式变压器绝缘纸电气性能的影响因素研究[D]. 北京:中国制浆造纸研究院,2018.  
YU H M. Study on the influencing factors of electrical performance of oil-immersed transformer insulation paper[D]. Beijing: China National Pulp And Paper Research Institute,2018.
- [4] YANG M, CAO K Q, SUI L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: a new nanoscale building block[J]. ACS Nano, 2011, 5(9): 6945-6954.
- [5] 赵莉华,陈志杰,安建国,等. 芳纶纳米纤维绝缘纸在新型油纸绝缘中的热老化特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(3):19-25.  
ZHAO L H, CHEN Z J, AN J G, et al. Thermal aging characteristics of aramid nanofiber insulating paper in a new type of oil-paper insulation[J]. Insulating Materials,2023,56(3):19-25.
- [6] LIN M Y, LI Y H, OU Y H, et al. Thermally conductive nanostructured, aramid dielectric composite films with boron nitride nanosheets[J]. Composites Science and Technology, 2019, 175: 85-91.
- [7] 袁世波. 芳纶纤维/云母纸基复合绝缘材料的制备及界面强化机理研究[D]. 西安:陕西科技大学,2019.  
YUAN S B. Preparation and interfacial strengthening mechanism of

- aramid fiber-mica paper based insulation materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology,2019.
- [8] YANG B, WANG L, ZHANG M Y, et al. Fabrication, applications, and prospects of aramid nanofiber[J]. *Advanced Functional Materials*,2020,30(22):2000186.
- [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.
- DU B X, KONG X X, LI J, et al. Current status of research on high thermal conductivity epoxy composite dielectrics[J]. *Insulating Materials*,2017,50(8):1-8.
- [10] 黄孟孟,祖梦祎,齐胜利,等. 云母改性聚酰亚胺纤维纸的制备与性能研究[J]. *绝缘材料*,2018,51(8):12-20.
- HUANG M M, ZU M Y, QI S L, et al. Preparation and properties of mica-modified polyimide fiber paper[J]. *Insulating Materials*,2018,51(8):12-20.
- [11] GUERRA V, WAN C, MCNALLY T. Thermal conductivity of 2D nano-structured boron nitride (BN) and its composites with polymers[J]. *Progress in Materials Science*,2019,100:170-86.
- [12] ZENG X L, YE L, YU S H, et al. Artificial nacre-like papers based on noncovalent functionalized boron nitride nanosheets with excellent mechanical and thermally conductive properties [J]. *Nanoscale*,2015,7(15):6774-6781.
- [13] ZENG F Z, CHEN X H, XIAO G, et al. A bioinspired ultratough multifunctional mica-based nano paper with 3D aramid nanofiber framework as an electrical insulating material[J]. *ACS Nano*, 2020,14(1):611-619.
- [14] 赵莉华,滕富莉,卓然,等. 高导热BNNS/ANF复合绝缘纸的结构设计及性能分析[J]. *工程科学与技术*,2023,55(4):30-37.
- ZHAO L H, TENG F L, ZHUO R, et al. Structural design and performance analysis of high thermal conductivity BNNS/ANF composite insulating paper[J]. *Engineering Science and Technology*,2023,55(4):30-37.
- [15] 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.
- [16] 毕瀚文. 纳米氮化硼/间位芳纶导热型纸基绝缘材料的制备及性能研究[D]. 北京:华北电力大学,2023.
- BI H W. Preparation and performance study of nano boron nitride/meta aramid thermal conductive paper based insulation material[D]. Beijing: North China Electric Power University,2023.
- [17] MA T B, ZHAO Y S, RUAN K P, et al. Highly thermal conductivities, excellent mechanical robustness and flexibility, and outstanding thermal stabilities of aramid nanofiber composite papers with nacre-mimetic layered structures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*,2020,12(1):1677-1686.
- [18] WU K, FANG J C, MA J R, et al. Achieving a collapsible, strong, and highly thermally conductive film based on oriented functionalized boron nitride nanosheets and cellulose nanofiber [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(35): 30035-30045.
- [19] XIE B H, HUANG X, ZHANG G J. High thermal conductive polyvinyl alcohol composites with hexagonal boron nitride microplatelets as fillers[J]. *Composites Science and Technology*, 2013,85:98-103.
- [20] SATO K, HORIBE H, SHIRAI T, et al. Thermally conductive composite films of hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010,20(14):2749-2752.
- [21] 谢厉,瞿晓芬,彭博. 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘高温导线的研究[J]. *绝缘材料*,2024,57(2):47-52.
- XIE L, ZHAI X F, PENG B. Research on organosilicone-aluminum nanosol composite insulated high-temperature conductors[J]. *Insulating Materials*,2024,57(2):47-52.

收稿日期:2024-06-12;修回日期:2024-07-05。

作者简介:

任俊文(1987-),男(汉族),四川南充人,副研究员,博士,主要从事高电压与绝缘技术的研究;

通信作者:贾申利(1968-),男(汉族),陕西西安人,教授,博士,主要从事电力开关技术、放电等离子体、电工材料的研究。