

氮化硼纳米管与芳纶纳米纤维复合制备高导热复合绝缘纸

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

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510623)

摘要:随着现代电气设备向小型化、高度集成化和多功能化方向发展,大量的热量积累导致电气设备的绝缘失效。为了开发一种在低含量填料下(质量分数<50%)仍能实现高导热性能的复合材料,满足当前电气设备对散热的严格要求,本文合成了一种由芳纶纳米纤维和羟基化氮化硼纳米管(BNNT-OH)组成的复合绝缘纸,并研究了BNNT-OH含量对复合绝缘纸性能的影响。结果表明:当氮化硼纳米管质量分数为20%时,复合绝缘纸的热导率高达15.92 W/(m·K)。优异的导热性能归因于氮化硼纳米管固有的高热导率,以及羟基化氮化硼纳米管与芳纶纳米纤维之间的强相互作用降低了界面热阻。

关键词:氮化硼纳米管;芳纶纳米纤维;绝缘纸;热导率;界面热阻

High thermal conductive composite insulating paper prepared by boron nitride nanotubes and aramid nanofibers

REN Junwen¹, QING Qiuwanyu¹, WEI Jia¹, ZHUO Ran², TENG Fuli¹,
GAO Meng², BIAN Chao¹, JIA Shenli¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510623, China)

Abstract: With the development of modern electrical equipment toward miniaturization, high-degree integration, and multi-functionalization, a large amount of heat accumulation will lead to insulation failure of electrical equipment. In order to develop a composite that can achieve high thermal conductivity even with low filler content (mass fraction<50%) and meet the strict requirement of current electrical equipment for heat dissipation, a composite insulating paper composed of aramid nanofibers and hydroxylated boron nitride nanotubes (BNNT-OH) was synthesized in this paper, and the effects of BNNT-OH content on the properties of composite insulating paper were studied. The results show that when the mass fraction of boron nitride nanotubes is 20%, the thermal conductivity of composite insulating paper is as high as 15.92 W/(m·K). The excellent thermal conductivity is due to the high intrinsic thermal conductivity of boron nitride nanotubes, and that the strong interaction between hydroxylated boron nitride nanotubes and aramid nanofibers reduces the interfacial thermal resistance.

Key words: boron nitride nanotubes; aramid nanofibers; insulating paper; thermal conductivity; interfacial thermal resistance

0 引言

随着现代电气设备朝着高电压、高功率和小型化发展,热量的积累可能导致设备的热失效^[1]。因此,热管理对电气设备的稳定运行变得至关重要^[2]。聚合物基电介质材料已被证明是解决热量积累问

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107020,52377028);四川省重点研发项目(2023YFG0236);电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金资助项目(EIPE23210)。

题的有效热管理材料^[3]。由于聚合物的热导率较低(0.1~0.5 W/(m·K)),通常将聚合物与具有高热导率的纳米颗粒复合来提高其导热性能。

近年来,陶瓷填料凭借其高导热、电绝缘和热稳定等特性,在聚合物基复合电介质领域被广泛应用^[3-6]。然而,这些复合电介质材料需要高负载填料(质量分数>50%),并且热导率仅为1~10 W/(m·K)^[3-4]。此外,填料超载也会导致复合电介质的力学性能发生劣化。因此,在实现复合电介

质材料高导热性能的同时最小化填料的添加量仍然是一个艰巨的挑战^[7]。有研究表明,具有高散射比的填料,如一维纳米填料(纳米纤维^[8]、纳米线^[9-10]和纳米管^[11]),有望克服这一挑战。因此,金属纳米线和碳纳米管(CNT)^[12]常被用于制备高导热复合电介质材料。但是,金属纳米线和CNT的加入会导致复合电介质材料的电导率增大,从而限制这类复合电介质材料在电气绝缘领域的应用。

氮化硼纳米管(BNNT)是一种与CNT结构相似的一维高导热纳米材料,具有优异的电绝缘性能。BNNT凭借其高导热性、高热稳定性和高弹性模量^[13-15],在导热复合电介质材料中得到广泛应用。ZHI C Y^[16-17]等制备了具有高热导率的聚合物/BNNT复合材料,然而该复合材料的热导率低于5 W/(m·K),这是由于BNNT和聚合物之间的相互作用差,产生了高界面热阻^[18-19]。尽管对BNNT进行表面功能化可改善其与基体间的相互作用,但往往伴随着BNNT晶体结构的退化^[20]。XU Y S等^[21]研究表明,对氮化硼(BN)进行表面处理能够增加环氧/BN复合材料的导热性能,然而只有填料含量较高时,复合材料的各项性能才显著提升。如何在破坏BNNT晶体结构的前提下,添加低含量的填料来改善BNNT与聚合物的相互作用,获得更高的导热性能,仍然是一个具有挑战性的问题。

本研究通过水热反应接枝羟基修饰BNNT(BNNT-OH),从而在不破坏BNNT晶体结构的情况下加强其与聚合物基体间的相互作用,选用具有出色耐高温、绝缘性能和力学性能的芳纶纳米纤维(ANF)为基体,然后通过真空辅助抽滤制备ANF/BNNT-OH复合绝缘纸,研究BNNT-OH的添加量对复合绝缘纸性能的影响。

1 实验

1.1 主要原材料

凯夫拉纤维(AF,黄色,400D,东莞市索维特特殊线带有限公司)、二甲基亚砜(DMSO,纯度≥99.55%,成都市科龙化工试剂厂)、丙酮(纯度≥99.8%,成都市科龙化工试剂厂)、氢氧化钾(KOH,纯度为95%,上海阿拉丁试剂有限公司)、氮化硼纳米管(BNNT,纯度>85%,密度为1.38 g/cm³,直径为30~50 nm,长度>10 μm,南京先锋纳米材料科技有限公司)。

1.2 ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的制备

1.2.1 ANF的制备

本研究采用去质子化法制备ANF,具体步骤如下:

(1)将凯夫拉纤维剪成长度为0.5 cm左右的短纤维,然后浸泡在丙酮中辅以超声清洗,除去凯夫拉纤维表面杂质,同时疏松纤维结构。

(2)将超声处理后的凯夫拉纤维利用布氏漏斗滤出,置于60℃真空烘箱中干燥48 h。

(3)将1.6 g干燥的凯夫拉纤维和2.4 g KOH加入到500 mL的DMSO中。然后,将混合物在30℃、800 r/min的条件下避光磁力搅拌1周,得到透明的暗红色ANF/DMSO分散液。

1.2.2 羟基化BNNT(BNNT-OH)的制备

BNNT-OH采用水热反应法制备。首先,将1 g BNNT分散在100 mL的H₂O中,在180℃下进行水热反应6 h,使BNNT表面成功附着羟基。然后,将得到的BNNT-OH水溶液过滤,并置于60℃真空烘箱中干燥48 h,最终收集BNNT-OH粉末,以备后续实验使用。

1.2.3 ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的制备

(1)取25 mg的BNNT-OH粉末置于50 g的DMSO溶液中以500 W的功率超声分散20 min,加入用DMSO稀释3倍且部分质子化后的ANF/DMSO溶液,再超声10 min,以800 r/min的转速充分搅拌,得到均匀分散的ANF/BNNT-OH/DMSO溶液。

(2)将ANF/BNNT-OH/DMSO溶液快速注入500 mL的H₂O中,得到ANF/BNNT-OH絮凝物,采用布氏漏斗反复过滤以除去金属离子和DMSO溶剂。

(3)将ANF/BNNT-OH絮凝物分散在400 mL H₂O中以12 000 r/min的转速进行乳化剪切,获得分散稳定的ANF/BNNT-OH浆液,然后用PTFE膜(直径为50 mm,孔径为0.22 μm)真空抽滤8 h,再在15 MPa/100℃条件下压制5 min,得到柔性ANF/BNNT-OH复合绝缘纸。调整BNNT-OH的含量,制备出质量分数分别为0%、5%、10%、15%、20%的ANF/BNNT复合绝缘纸。

1.3 表征与性能测试

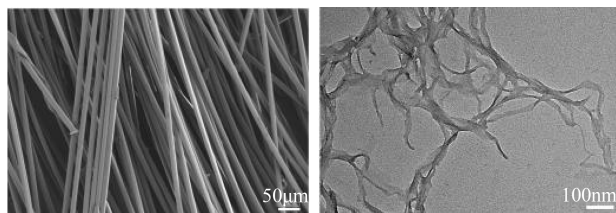
采用日本电子株式会社生产的JEM2100F型透射电镜(TEM)和美国FEI公司生产的Quanta 250 FEG型扫描电镜(SEM)对ANF、BNNT和ANF/

BNNT-OH 复合绝缘纸的微观结构和形貌进行表征;采用香港岛津-KRATOS 公司生产的 Kratos AXIS Ultra DLD 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)表征改性前后 BNNT 的 X 射线光电子能谱;采用美国 Thermo Fisher 公司生产的 Nicolet is50 型傅里叶红外光谱仪(FT-IR)分析 ANF 与 BNNT-OH 之间的界面相互作用,测试波数为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$;采用德国耐驰公司生产的 LFA 467 型导热系数测试仪测定复合绝缘纸在室温下(25°C)的热扩散系数;采用美国 TA 公司生产的 Q2000 型差示扫描量热仪进行 DSC 测试,氮气气氛,流速为 20 mL/min ,升温速率为 10°C/min ,测试温度为 $30\sim 400^{\circ}\text{C}$;采用美国 Instron 公司生产的 Instron 5967 型万能材料试验机对复合绝缘纸进行室温力学性能测试;采用北京科朗测量仪器有限公司生产的 DDJ-50 kV 型电击穿测试仪在直流高压下测试复合绝缘纸的电击穿性能,升压速率为 500 V/s 。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

图 1 为 AF 和 ANF 的微观形貌图。从图 1 可以看出,AF 单根纤维直径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$,且表面光滑无破损;ANF 整体粗细均匀,长度为微米级,径向尺寸约为 30 nm ,表现出较高的长径比,表明本实验成功制备了结构完整的 ANF。



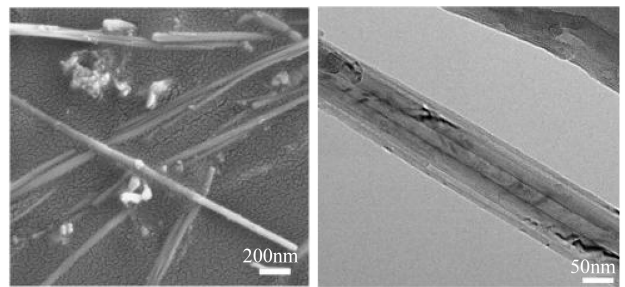
(a) AF 的 SEM 图 (b) ANF 的 TEM 图

图 1 AF 和 ANF 的微观形貌图

Fig.1 Microscopic morphology of AF and ANF

图 2 为 BNNT 和 BNNT-OH 的微观形貌图。从图 2 可以看出,BNNT 长度为 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,直径为 $30\sim 50\text{ nm}$,具有高长径比,并含有少量杂质;经高温高压水热反应和过滤处理后 BNNT-OH 仍然保持着完整的管状结构,且表面杂质明显减少。

图 3 为 BNNT 和 BNNT-OH 的 XPS 扫描光谱。从图 3 可以看到,BNNT 和 BNNT-OH 在 190 eV 和 398 eV 均出现 B1s 和 N1s 两个强烈的特征峰。BNNT-OH 的氧原子分数强度从 1.69% 提高到



(a) BNNT 的 SEM 图 (b) BNNT-OH 的 TEM 图

图 2 BNNT 和 BNNT-OH 的微观形貌图

Fig.2 Microscopic morphology of BNNT and BNNT-OH

2.56% ,表明 BNNT 成功接枝羟基^[22-23]。这为界面氢键的形成提供了反应位点,为 BNNT-OH 与 ANF 之间强界面相互作用奠定了基础。

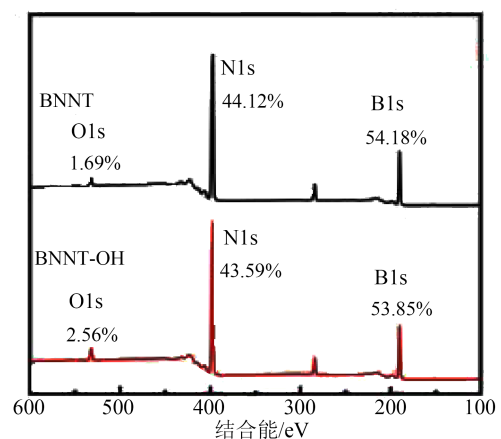


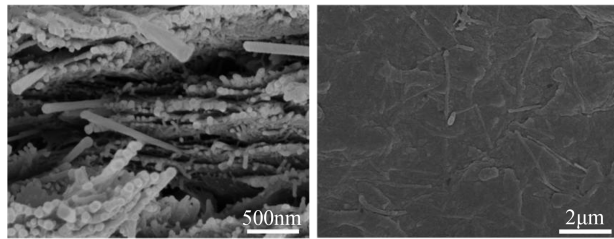
图 3 BNNT-OH 的 XPS 扫描光谱

Fig.3 XPS scan spectra of BNNT-OH

图 4 为 ANF/BNNT-OH-20% 复合绝缘纸的断面和平面 SEM 图像。从图 4(a)可以看出,BNNT-OH 沿平面方向排列,复合绝缘纸显示出有序的层状结构,这种有序结构是由真空辅助过滤过程以及一维 BNNT-OH 的剪切力作用形成的。从图 4(b)可以看出,BNNT-OH 均匀分散在 ANF 中,表明 BNNT-OH 具有较强的力学性能,这是由于 BNNT-OH 的高机械强度和 BNNT-OH 与 ANF 之间的强界面相互作用所决定的^[24]。在质量分数为 20% 时,BNNT-OH 与 ANF 紧密搭接,并填补了部分原始芳纶骨架中的孔隙,使声子通路得到了明显改善。

2.2 热学性能

将 ANF/BNNT-OH 复合绝缘纸与纯 ANF 纸和 ANF/BNNT 复合绝缘纸的热导率进行对比,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,纯 ANF 纸的热导率为 $1.98\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。当分别添加质量分数为 5% 的未功能化 BNNT 和 BNNT-OH 时,其复合绝缘纸的热导



(a) 断面形貌图 (b) 平面形貌图

图4 ANF/BNNT-OH-20%复合绝缘纸断面及平面的微观形貌图

Fig.4 Microscopic morphology of ANF/BNNT-OH-20% composite insulating paper in cross-section and in plane

率分别为 2.45 W/(m·K) 和 4.68 W/(m·K), 表明羟基化 BNNT 对复合绝缘纸的导热性能提升较为明显。

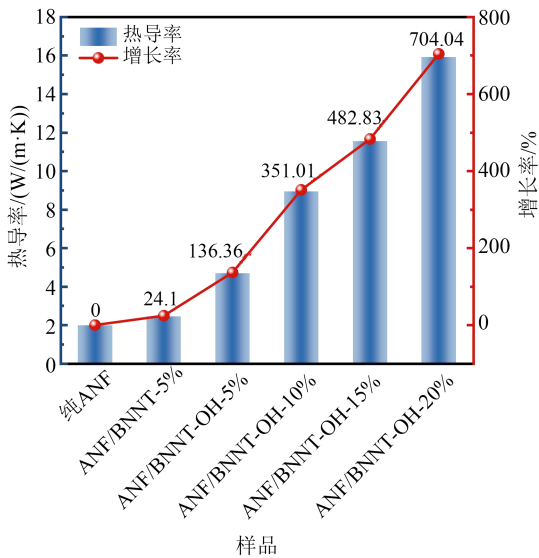


图5 ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的热导率及热导率增量

Fig.5 Thermal conductivity and thermal conductivity increment of ANF/BNNT-OH composite insulating paper

随着 BNNT-OH 含量的增加, 复合绝缘纸的热导率不断增大。当 BNNT-OH 质量分数为 5% 时, 复合绝缘纸的热导率相较于纯 ANF 纸提升了 136.36%, 可见少量的 BNNT-OH 就能实现对 ANF 绝缘纸导热性能的优化。图 6 为 ANF/BNNT-OH-5% 复合绝缘纸的平面 SEM 图像, 从图中可以看出此时 BNNT-OH 数量非常有限, 在 ANF 中各自独立存在, 彼此之间不重叠, 因此难以搭接出连贯的导热通路, 对复合绝缘纸的导热性能贡献有限。

随着 BNNT-OH 含量的不断增加, ANF/BNNT-OH 复合绝缘纸的热导率持续增大。当 BNNT-OH 质量分数为 20% 时, 复合绝缘纸的热导率达到了 15.92 W/(m·K), 相较于纯 ANF 纸的热导率提高了

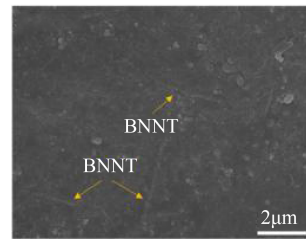


图6 ANF/BNNT-OH-5%复合绝缘纸的平面形貌图

Fig.6 Plane morphology of ANF/BNNT-OH-5% composite insulating paper

704.04%。一方面, BNNT 自身具有相当高的热导率, 其热导率可达到 350 W/(m·K); 另一方面, BNNT 经过羟基化改性后, 与 ANF 之间形成了强烈的界面相互作用, 降低了界面热阻效应, 促使热流在复合绝缘纸内部可以连续运输, 这一结果与 ZENG X 等^[25]和 FU C 等^[26]的研究结果一致。当 BNNT-OH 质量分数达到 20% 时, BNNT-OH 的数量显著增多, 尤其在平面 SEM 图像 (如图 3(b) 所示) 中可以观察到 BNNT-OH 之间发生重叠。此时 BNNT-OH 的含量足够使 BNNT-OH 之间达到真正意义上的接触和相互作用, 实现管与管之间首尾相接, 在 ANF 网络中形成多条导热链 (如图 7 所示), 大部分热量通过热导率较高的 BNNT-OH 进行传输, 因此 ANF/BNNT-OH 复合绝缘纸的热导率得到显著提高。

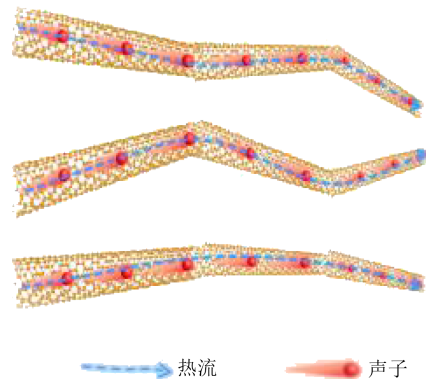


图7 ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的热流通道示意图

Fig.7 Heat flow channel diagram of ANF/BNNT-OH composite insulating paper

采用 DSC 测试评估了复合绝缘纸的热稳定性, 结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 纯 ANF 纸和 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸在 400℃ 以内均未出现明显的吸收峰, 表明所制备复合绝缘纸的玻璃化转变温度超过 400℃。DSC 结果证实了 ANF/BNNT-OH 复合绝缘纸优异的热稳定性, 这确保了复合绝缘纸能够在高温环境下保持其机械强度和

电气性能。

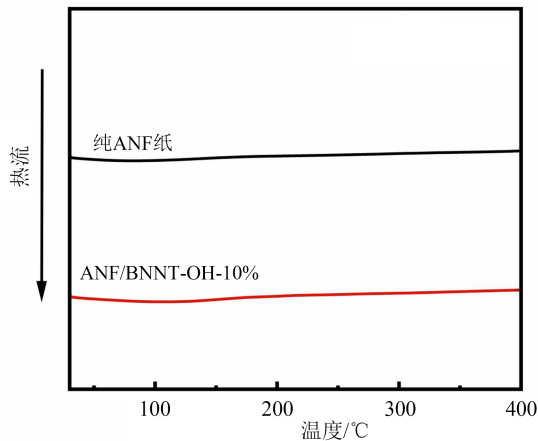


图8 ANF和ANF/BNNT-OH-10%复合绝缘纸的DSC曲线图

Fig.8 DSC curves of ANF and ANF/BNNT-OH-10% composite insulating papers

2.3 电气强度

电气设备的绝缘在运行中除受到长期工作电压作用外,还会受到电力系统中可能出现的各种过电压作用。为了分析ANF/BNNT-OH复合绝缘纸耐受高压的能力,对ANF/BNNT-OH复合绝缘纸进行了直流击穿测试。介质的电气强度满足Weibull概率分布,反映介质在一定电场下被击穿的概率。双参数的Weibull分布函数与介质电气强度关系式如式(1)所示。

$$P(E) = 1 - \exp[-(E_b/E_0)^\beta] \quad (1)$$

式(1)中: E_b 是材料的电气强度测试值,kV/mm; E_0 是尺度参数,即击穿概率为63.2%时的电气强度,kV/mm; β 为形状参数,表征实验结果的分散程度。

根据直流击穿实验结果,作出Weibull分布如图9所示。从图9可以看出,相较于纯ANF纸,ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的电气强度显著提升。

图10为纯ANF纸和ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的特征电气强度。从图10可以看出,纯ANF纸的特征电气强度为212.33 kV/mm,而ANF/BNNT-OH-10%纸的特征电气强度为353.55 kV/mm,相较纯ANF纸提升了66.41%。复合绝缘纸电气强度的提升可以归因于BNNT-OH填补了ANF网络中的孔隙,使复合绝缘纸内部结构更加致密,从而促进了电荷的横向耗散,降低了电荷注入的可能性。此外,BNNT-OH的加入有利于应力在聚合物链上的分布,避免了聚合物链中最弱键的快速断裂,同时为电树传播提供了曲折的路径最终增大了复合绝

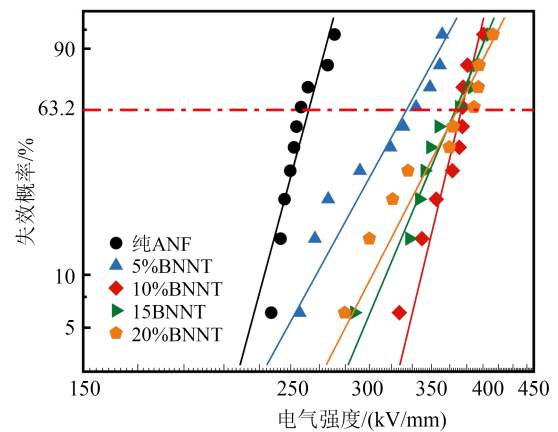


图9 复合绝缘纸直流电气强度的Weibull分布

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

缘纸的电气强度^[27-28]。其余各BNNT-OH含量的复合绝缘纸特征电气强度也均高于300 kV/mm,表明高含量BNNT-OH对复合绝缘纸的结构影响较轻。因此,本文制备的ANF/BNNT-OH复合绝缘纸在紧凑、轻量化电气设备中具有良好的应用前景。

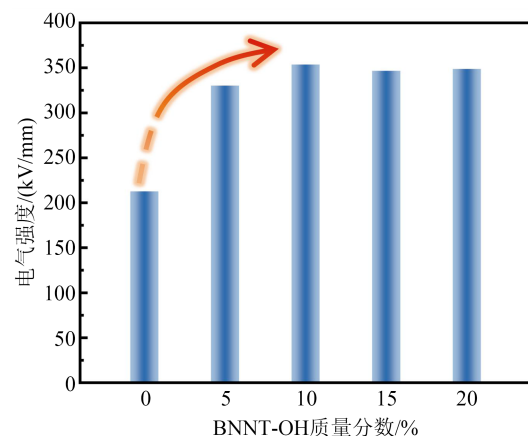


图10 复合绝缘纸的特征电气强度

Fig.10 Characteristic electric strength of composite insulating paper

2.4 力学性能

图11为纯ANF纸以及ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的力学性能测试结果。从图11可以看出,ANF/BNNT-OH复合绝缘纸表现出高抗张强度和高断裂伸长率。从图11(b)可以看出,纯ANF纸的抗张强度为152.6 MPa,断裂伸长率为8.53%。不同BNNT-OH含量的ANF/BNNT-OH复合绝缘纸的抗张强度均高于纯ANF纸。尤其是当BNNT-OH质量分数为10%时,ANF/BNNT-OH复合绝缘纸展现出优异的力学性能,其抗张强度和断裂伸长率分别达

到了 219.62 MPa 和 15.34%，相较于纯 ANF 绝缘纸分别提高了 43.92% 和 79.84%。

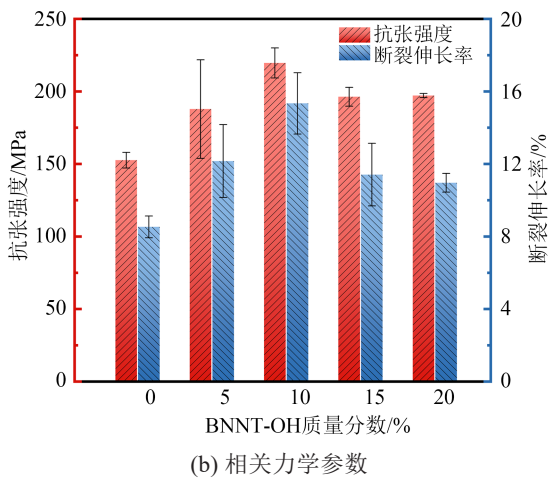
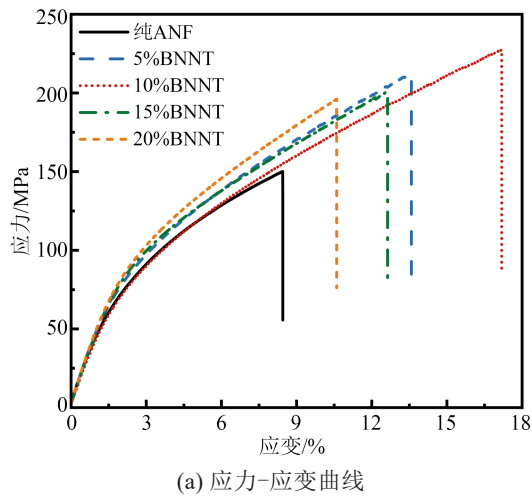


图 11 复合绝缘纸的力学性能

Fig.11 The mechanical properties of composite insulating papers

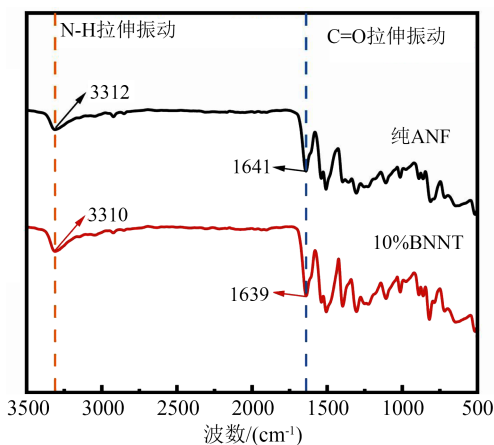


图 12 ANF 和 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸的 FT-IR 光谱图

Fig.12 FT-IR spectra of ANF and ANF/BNNT-OH-10% composite insulating papers

采用 FT-IR 光谱图对 ANF 和 BNNT-OH 之间的界面相互作用进行表征,结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,纯 ANF 纸和 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸呈现出相似的光谱。纯 ANF 纸在波数为 3 312 cm^{-1} 和 1 641 cm^{-1} 处表现出典型的吸收峰,分别对应 N-H 和 C=O 键的拉伸振动。而 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸 N-H 和 C=O 键的拉伸振动峰移动到较低的波数,分别为 3 310 cm^{-1} 和 1 639 cm^{-1} 。由于氢键的形成会降低 N-H 和 C=O 键的振动频率,因此这种明显的红移证实了 ANF 和 BNNT-OH 之间形成了强界面氢键相互作用。

由于未经处理的 BNNT 表面缺乏活性官能团,其难以与聚合物基体产生良好的界面接触与化学键合。通过在 BNNT 表面接枝羟基,使得 BNNT-OH 与 ANF 之间产生了强大的界面氢键相互作用,能够有效将外部载荷从 ANF 转移到坚固的 BNNT-OH 上,进而提高复合绝缘纸的力学性能^[29]。P NAUITYAL 等^[15]的研究同样证实在外力拉伸作用下,BNNT 的缠结使得裂纹发生偏转和桥接,从而可以有效防止局部应力集中,提高材料的抗失效性。尽管随着 BNNT-OH 含量的进一步增加,复合绝缘纸的力学性能相较于 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸出现劣化,但凭借良好的界面氢键作用,抗张强度仍高于 190 MPa,杨氏模量仍高于 4 800 MPa。

3 结论

(1)通过去质子化法剥离得到的 ANF 粗细均匀,表现出高长径比。

(2)通过水热反应成功在 BNNT 边缘接枝羟基,BNNT-OH 保持完整的管状结构,且表面杂质明显减少。

(3)ANF/BNNT-OH-20% 复合绝缘纸的热导率为 15.92 W/(m·K),相较于纯 ANF 纸的热导率提高了 704.04%。

(4)ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸的直流电气强度为 353.55 kV/mm,相较于纯 ANF 纸提升了 66.41%。

(5)ANF/BNNT-OH 复合绝缘纸的力学性能相较于纯 ANF 纸也有所提升,其中 ANF/BNNT-OH-10% 复合绝缘纸的抗张强度达到了 219.62 MPa,相较纯 ANF 纸提高了 43.92%。

参考文献 References

- [1] WALDROP M M. The chips are down for Moore's law[J]. *Nature*, 2016,530:144-147.
- [2] MOORE A L, SHI L. Emerging challenges and materials for thermal management of electronics[J]. *Materials Today*, 2014, 17(4): 163-174.
- [3] 熊平, 吴睿, 马超, 等. P(VDF-CTFE)/DA@BTO层叠式结构复合薄膜的介电与储能特性研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(7): 28-35.
- XIONG P, WU R, MA C, et al. Study on dielectric and energy storage characteristics of P(VDF-CTFE)/DA@BTO laminated composite film[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(7): 28-35.
- [4] 吴银财. 无规氧化铝/环氧复合材料导热绝缘性能的研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(6): 18-22.
- WU Y C. Research of thermal conductivity and insulating properties of irregular alumina/epoxy composites[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(6): 18-22.
- [5] LU H B, YAO Y T, HUANG W M, et al. Significantly improving infrared light-induced shape recovery behavior of shape memory polymeric nanocomposite via a synergistic effect of carbon nanotube and boron nitride[J]. *Composites Part B*, 2014, 62: 256-261.
- [6] LU H B, HUANG W M, LENG J S. Functionally graded and self assembled carbon nanofiber and boron nitride in nanopaper for electrical actuation of shape memory nanocomposites[J]. *Composites Part B*, 2014, 62: 1-4.
- [7] KUSUNOSE T, YAGI T, FIROZ S H, et al. Fabrication of epoxy/silicon nitride nanowire composites and evaluation of their thermal conductivity[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 10, 3440-3445.
- [8] XU J, MUNARI A, DALTON E, et al. Silver nanowire array-polymer composite as thermal interface material[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(12): 124310.
- [9] WANG S L, CHENG Y, WANG R R, et al. Highly thermal conductive copper nanowire composites with ultralow loading: toward applications as thermal interface materials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(9): 6481-6486.
- [10] BARAKO M T, PANZER S R, ENGLISH T S, et al. Thermal conduction in vertically aligned copper nanowire arrays and composites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(34): 19251-19259.
- [11] BALACHANDER N, SESHADRI I, MEHTA R J, et al. nanowire-filled polymer composites with ultrahigh thermal conductivity[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(9): 093117.
- [12] HAN Z D, FINA A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review[J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(7): 914-944.
- [13] PATEL A, LOUFAKIS D, FLOUDA P, et al. Carbon nanotube/reduced graphene oxide/aramid nanofiber structural supercapacitors[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(12): 11763-11771.
- [14] PASQUALE D D, MARINO A, TAPEINOS C, et al. Homotypic targeting and drug delivery in glioblastoma cells through cell membrane-coated boron nitride nanotubes[J]. *Materials Design*, 2020, 192: 108742.
- [15] NAUTIYAL P, ZHANG C, LOGANATHAN A, et al. High-temperature mechanics of boron nitride nanotube "buckypaper" for engineering advanced structural materials[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(7): 4402-4416.
- [16] HUANG X Y, ZHI C Y, JIANG P K, et al. Polyhedral oligosilsesquioxane-modified boron nitride nanotube based epoxy nanocomposites: an ideal dielectric material with high thermal conductivity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(14): 1824-1831.
- [17] ZHI C Y, BANDO Y, TERAO T, et al. Towards thermoconductive, electrically insulating polymeric composites with boron nitride nanotubes as fillers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(12): 1857-1862.
- [18] SHENOGIN S, XUE L P, OZISIK R, et al. Role of thermal boundary resistance on the heat flow in carbon-nanotube composites[J]. *Journal of Applied Physics* 2004, 95(12): 8136-8144.
- [19] PAK A J, HWANG G S. Theoretical analysis of thermal transport in graphene supported on hexagonal boron nitride: the importance of strong adhesion due to π -bond polarization[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(3): 034015.
- [20] AGUIAR C, CAMPS M, DATTANI N, et al. Functionalized boron-nitride nanotubes: first-principles calculations[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 611: 155358.
- [21] XU Y S, CHUNG D D L. Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments[J]. *Composite Interfaces*, 2000, 7(4): 243-256.
- [22] KIM K, KIM J. Exfoliated boron nitride nanosheet/MWCNT hybrid composite for thermal conductive material via epoxy wetting[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 140: 9-15.
- [23] JING L, LI H, TAY R Y, et al. Biocompatible hydroxylated boron nitride nanosheets/poly(vinyl alcohol) interpenetrating hydrogels with enhanced mechanical and thermal responses[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(4): 3742-3751.
- [24] CAI W, MU X, PAN Y, et al. Facile fabrication of organically modified boron nitride nanosheets and its effect on the thermal stability, flame retardant, and mechanical properties of thermoplastic polyurethane[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, 29(9): 2545-2552.
- [25] ZENG X, SUN J, YAO Y, et al. A Combination of boron nitride nanotubes and cellulose nanofibers for the preparation of a nanocomposite with high thermal conductivity[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 5167-5178.
- [26] FU C, LI Q, LU J, et al. Improving thermal conductivity of poly-

- mer composites by reducing interfacial thermal resistance between boron nitride nanotubes[J]. *Composites Science and Technology*,2018,165:322-330.
- [27] YANG B, ZHANG M, LU Z, et al. From poly(p-phenylene terephthalamide) broken paper: high-performance aramid nanofibers and their application in electrical insulating nanomaterials with enhanced properties[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*,2018,6(7):8954-8963.
- [28] LI B, SALCEDO-GALAN F, XIDAS P I, et al. Improving electrical breakdown strength of polymer nanocomposites by tailoring hybrid-filler structure for high-voltage dielectric applications [J]. *ACS Applied Nano Materials*,2018,1(9):4401-4407.
- [29] CAI W, MU, X, PAN Y, et al. Facile fabrication of organically modified boron nitride nanosheets and its effect on the thermal stability, flame retardant, and mechanical properties of thermoplastic polyurethane[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018,29(9):2545-2552.

收稿日期:2024-06-13;修回日期:2024-08-02。

作者简介:

任俊文(1987-),男(汉族),四川成都人,副研究员,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,主要从事电力设备、电弧放电和电气绝缘的研究。