

# 改性氮化硼/芳纶纳米纤维复合薄膜的制备及其性能研究

顾臻<sup>1</sup>, 卢宇<sup>2</sup>, 周磊<sup>1</sup>, 张静月<sup>1</sup>, 李芸<sup>2</sup>

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200051; 2. 深圳市科陆电子科技股份有限公司, 广东 深圳 518132)

**摘要:**随着现代电气设备的飞速发展,对具有较高电气强度和力学性能的纳米复合薄膜提出了更高的要求。为此,本文采用3-氨丙基三羟基硅烷修饰氮化硼纳米片(BNN)得到改性BNN(aBNN),然后与芳纶纳米纤维(ANF)混合,通过高温热压法制备了致密的ANF/aBNN纳米复合薄膜,并对其热稳定性、力学性能和电绝缘性能进行了表征。结果表明:随着aBNN含量的增加,纳米复合膜的热失重率明显减小。当aBNN质量分数为10%时,ANF/10%aBNN纳米复合薄膜的抗拉强度、断裂伸长率和韧性均达到最大,分别为235 MPa、14.0%和32.4 MPa·m<sup>1/2</sup>,比ANF/10%BNN分别提高了25%、9.4%和75.1%;电气强度高达154 kV/mm,比纯ANF和ANF/10%BNN分别提高了约15%和11.6%;体积电阻率(测试温度为60℃)达到最大值7.94×10<sup>17</sup> Ω·cm,比纯ANF和ANF/10%BNN分别提高了893%和694%。

**关键词:**改性氮化硼;芳纶纳米纤维;复合薄膜;力学性能;电气性能

## Research on preparation and properties of modified boron nitride/aramid nanofiber composite films

GU Zhen<sup>1</sup>, LU Yu<sup>2</sup>, ZHOU Lei<sup>1</sup>, ZHANG Jingyue<sup>1</sup>, LI Yun<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200051, China;  
2. Shenzhen Clou Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518132, China)

**Abstract:** With the rapid development of modern electrical equipment, higher requirements have been put forward for nanocomposite films with higher dielectric strength and mechanical properties. Therefore, we modified boron nitride nanosheets (BNN) with 3-aminopropyltrihydroxysilane to obtain modified BNN (aBNN), and then mixed aBNN with aramid nanofiber (ANF) to prepare dense ANF/aBNN nanocomposite films by high-temperature hot-pressing method. The thermal stability, mechanical properties and electrical insulating properties of films were characterized. The results show that with the increase of aBNN content, the thermal weight loss rate of the nanocomposite film decreases significantly. When the mass fraction of aBNN is 10%, the tensile strength, elongation at break, and toughness of the ANF/10%aBNN nanocomposite film reach the maximum value, which is 235 MPa, 14.0%, and 32.4 MPa·m<sup>1/2</sup>, respectively, it is 25%, 9.4%, and 75.1% higher than that of ANF/10%BNN, respectively. The electrical strength of ANF/10%aBNN is as high as 154 kV/mm, which is about 15% and 11.6% higher than that of pure ANF and ANF/10%BNN, respectively. And the volume resistivity reaches the maximum value of 7.94×10<sup>17</sup> Ω·cm (tested at 60℃), which is 893% and 694% higher than that of pure ANF and ANF/10%BNN, respectively.

**Key words:** modified boron nitride; aramid nanofibers; composite film; mechanical properties; electrical performance

## 0 引言

绝缘纳米材料由于具有质量轻、易加工和柔韧性好的特点,已广泛应用于先进的电子和电力设备,如绝缘栅双极晶体管、电动汽车、电力变压器和牵引电动机等<sup>[1]</sup>。其中,氮化硼具有较高的介电常数和面内导热系数,是绝缘和导热应用中的理想材

料。氮化硼纳米片(BNN)是一种结构类似石墨烯的二维纳米填料,但其电绝缘性却远高于石墨烯,是构建高介电聚合物复合材料的理想填料<sup>[2-4]</sup>。HUANG X Y等<sup>[5]</sup>以多面体低聚硅氧烷功能化氮化硼纳米管为填料,制备了具有较好介电和导热性能的环氧纳米复合材料。K SATO等<sup>[6]</sup>以5种不同等级的片状六方氮化硼和芳香族聚酰亚胺为原料,成功制备了一系列无机/有机复合薄膜,该复合薄膜具有较高的热稳定性和热扩散率。然而,由于BNN表

面光滑,化学惰性高,其与聚合物基体的相容性较差,导致制备的复合材料力学性能较差<sup>[7-13]</sup>。芳纶纤维(AF)因其高的电绝缘性、热稳定性和机械强度而成为商用绝缘纸的常用材料<sup>[14-16]</sup>。近年来的研究表明,AF可以化学劈裂成具有高长宽比、大比表面积和优异力学性能的芳纶纳米纤维(ANF)<sup>[17-19]</sup>。此外,由于纳米纤维表面具有丰富的极性基团,易于与无机纳米材料结合,是制备绝缘纳米复合薄膜的理想材料。许多研究人员致力于通过将ANF与无机填料(如蒙脱土和云母)结合来提高复合材料的绝缘性能<sup>[20-24]</sup>。目前,关于将改性BNN与ANF有机结合制备具有良好电绝缘性能和力学性能的复合纳米材料的报道仍较少。

本文采用3-氨丙基三羟基硅烷修饰BNN,并与ANF混合形成均匀的悬浮液,通过热压法制备致密的ANF/aBNN纳米复合薄膜,并对其热稳定性、力学性能和电绝缘性能进行表征,希望所制备的纳米复合膜能在现代电气设备、绝缘纸等领域推广使用。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

芳纶纳米纤维(ANF),山东聚芳新材料股份有限公司;六方氮化硼(h-BN)粉末(直径<150 nm,纯度为99.8%)、3-氨丙基三羟基硅烷(APS),上海阿拉丁生化科技有限公司;氢氧化钾(KOH,纯度为95%)、二甲亚砜(DMSO,纯度为99.5%)、乙醇(纯度为99.7%)、异丙醇(IPA,纯度为99.7%),天津凯瑞思精细化工有限公司。

### 1.2 主要设备及仪器

AXIS SUPRA+型能谱仪,深圳市科时达电子科技有限公司;AL-Y3500型X射线衍射仪(XRD),丹东奥龙射线仪器集团有限公司;JEM-7401型扫描电子显微镜(SEM),日本电子株式会社;IRTracer-100型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),日本岛津公司;NETZSCH DSC-200F3型差示扫描量热仪(DSC),德国耐施仪器公司;TFW-11型电子万能试验机,上海拓丰仪器科技有限公司;GEST-121A型全自动绝缘高电阻测量仪,北京冠测精电仪器设备有限公司;AHDZ-10/100型电气强度测试仪,中山市嘉仕电子科技有限公司;JEM-120i型透射电镜,日本电子株式会社;HS-TGA-101型热重分析仪,上海和晟仪器科技有限公司。

### 1.3 BNNs的表面改性

将100 mg BNN均匀分散于100 mL乙醇和0.1 mL APS的混合溶液中,在60℃下搅拌24 h后,真空过滤得到颗粒状产物。然后用乙醇洗涤产物5次,去除未反应的APS。最后,将改性后的BNN分散于DMSO溶液中,超声处理3 h,得到均匀的改性BNN(aBNN)悬浮液。

### 1.4 芳纶纳米纤维分散体的制备

参考YANG M等<sup>[25]</sup>的方法制备芳纶纳米纤维分散体:将20 mL去离子水、1.0 g ANF和1.5 g KOH加入500 mL DMSO中,在室温下磁力搅拌10 h,得到暗红色的ANF悬浮液,质量分数为2 mg/mL。

### 1.5 ANF/aBNN纳米复合膜的制备

首先,将一定量的aBNN用超声仪均匀分散在DMSO溶剂中。然后缓慢滴入一定量的ANFs悬浮液,辅助机械搅拌4 h。制备的ANF/aBNN分散体经过直径为47 mm、孔径为0.2 μm的多孔尼龙膜,真空过滤得到ANF/aBNN复合薄膜。将复合膜浸泡在大量去离子水中24 h,去除DMSO溶剂。然后将ANF/aBNN纳米复合膜在130℃、-0.01 MPa压力下真空干燥20 min。最后在25 MPa、230℃下压制5 min,得到ANF/aBNN纳米复合膜。其中,aBNN的质量分数分别为5%、10%、20%、30%时的纳米复合膜分别命名为ANF/5% aBNN、ANF/10%aBNN、ANF/20%aBNN、ANF/30% aBNN。另外制备含10%BNN的样品命名为ANF/10%BNN,进行对比研究。

### 1.6 性能测试与结构表征

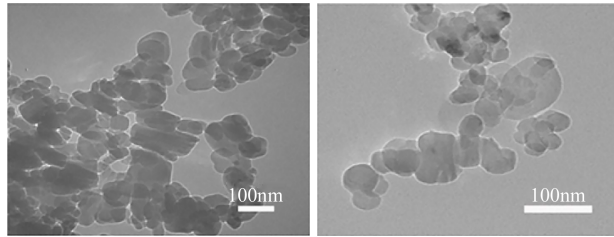
采用扫描电镜和透射电镜对样品进行形貌观察;采用X射线衍射仪和傅里叶变换红外仪对ANF/aBNN纳米复合膜的结构进行分析;采用热重分析仪分析薄膜的热性能,氮气气氛,温度为20~800℃,升温速率为10℃/min;采用电子万能试验机对ANF/aBNN纳米复合膜进行拉伸试验,拉伸速率为1 mm/min;采用电气强度测试仪测试ANF/aBNN纳米复合膜的电气强度;采用全自动绝缘高电阻测量仪测试ANF/aBNN纳米复合膜的绝缘电阻,电阻仪测试范围为100 kΩ~10 TΩ。所有样品被裁剪为长20 mm,宽10 mm的矩形条。

## 2 结果与讨论

### 2.1 FTIR结构分析

为了使BNN均匀分散,采用3-氨丙基三羟基硅烷对其表面进行改性,得到带正电的aBNN,BNN

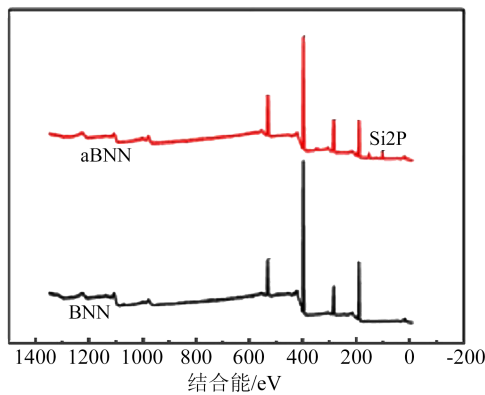
改性前后的透射电镜图像如图1所示。从图1可以看出,改性前的BNN出现了明显的团聚现象,改性后的aBNN分散更为均匀。用XPS和FTIR测定了BNNs和aBNN的化学结构,结果如图2所示。



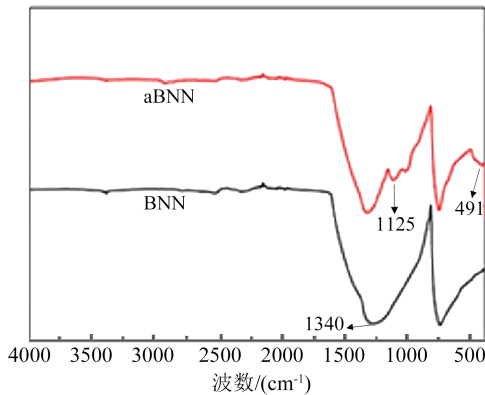
(a) BNN (b) aBNN

图1 BNN和aBNN的TEM图像

Fig.1 TEM images of BNN and aBNN



(a) XPS 图谱



(b) FTIR 图谱

图2 BNNs和aBNNs的XPS和FTIR图谱

Fig.2 XPS and FTIR spectra of BNNs and aBNNs

从图2(a)可以看出,aBNN中出现了Si2p的结合能;从图2(b)可以看出,aBNN在 $1125\text{ cm}^{-1}$ 、 $491\text{ cm}^{-1}$ 处分别出现了Si-O-Si的拉伸对称吸收峰和Si-O吸收峰,在 $1340\text{ cm}^{-1}$ 处出现了一个强峰,对应B-N键的面内拉伸振动。以上结果表明,BNN被APS成功改性为aBNN。

为了进一步研究aBNN与ANF之间的相互作用类型,对不同aBNN含量的ANF/aBNN纳米复合膜进行了FTIR分析,结果如图3所示。从图3可以看出,随着aBNN含量的增加, $1399\text{ cm}^{-1}$ 处的单峰向 $1393\text{ cm}^{-1}$ 较低波数移动, $826\text{ cm}^{-1}$ 处的单峰向 $824\text{ cm}^{-1}$ 较低波数移动,这是由aBNN的B-N键面内、面外弯曲振动与ANF上芳香环共振引起的,结果表明在纳米复合膜中,aBNN与ANF之间存在很强的相互作用。

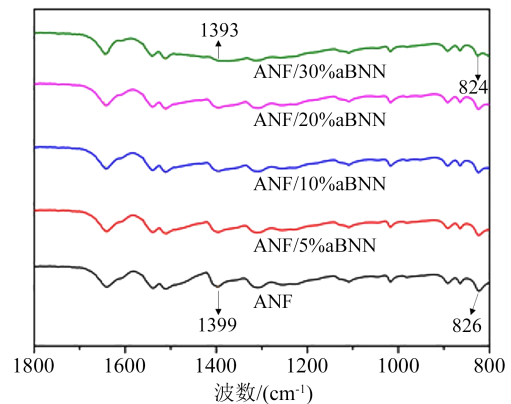


图3 不同aBNN含量下ANF/aBNN纳米复合膜的FTIR图谱

Fig.3 FTIR spectra of ANF/aBNN nanocomposite films with different aBNN content

## 2.2 ANF/aBNN纳米复合膜的形貌观察

图4为热压前后ANF/aBNN纳米复合膜的表面和截面形貌。从图4(a)、(c)可以看到,热压前的复合膜表面结构不致密,截面图显示复合膜具有明显间隙的多层结构。复合膜经热压后,表面的芳纶纳米纤维紧密结合,增强了界面结合力(图4(b)),同时层与层之间紧密结合,薄膜内部分层得到改善(图4(d))。致密的结构有助于提高纳米复合膜的力学性能和电气绝缘性能。

## 2.3 ANF/aBNN纳米复合膜的XRD分析

图5为不同aBNN含量下ANF/aBNN纳米复合膜的XRD图谱。从图5可以看出,纯ANF在(110)、(200)和(004)晶面处出现了衍射峰,而复合纳米材料的衍射峰和晶面与纯ANF相似,这表明aBNN的引入不会破坏ANF的取向结晶度。在 $26.8^\circ$ 和 $41.7^\circ$ 处的衍射峰对应aBNN纳米片的(002)和(100)晶面。当向ANF基体中添加aBNN时,随着aBNN含量的增加,复合材料在 $26.7^\circ\sim 60.0^\circ$ 的 $2\theta$ 范围内出现的特征衍射峰强度明显增强。其原因

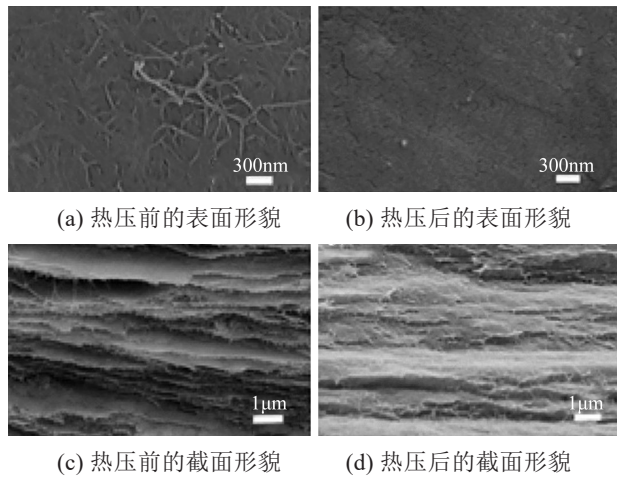


图4 ANF/aBNN 纳米复合膜热压前后的表面和截面形貌  
Fig.4 Surface and cross-sectional morphology of ANF/aBNN nanocomposite films before and after hot pressing

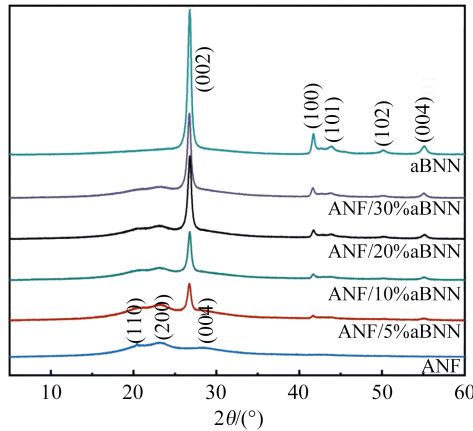


图5 不同 aBNN 含量下 ANF/aBNN 纳米复合膜的 XRD 图谱

Fig.5 XRD spectra of ANF/aBNN nanocomposite films with different aBNN content

是硅烷键在复合材料中起着分子桥的作用,无机填料通过共价键与有机聚合物基体紧密结合。

2.4 ANF/aBNN 纳米复合膜的热稳定性

图 6 为不同 aBNN 含量下 ANF/aBNN 纳米复合膜的 TGA 曲线。从图 6 可以看出,纳米复合膜的初始质量损失出现在 100~120℃ 处,此时纳米复合膜的降解率约为 2%。在此阶段,纳米复合膜释放分子间结合水,造成较小的质量损失。纳米复合膜的热解温度主要在 538~600℃。800℃ 时,aBNN 质量分数分别为 0% 和 30% 的纳米复合膜残留率分别约为 45% 和 64%,随着 aBNN 含量的增加,纳米复合膜的残留率增大,质量损失明显减小,说明 aBNN 的添加可以增强复合材料的热稳定性。

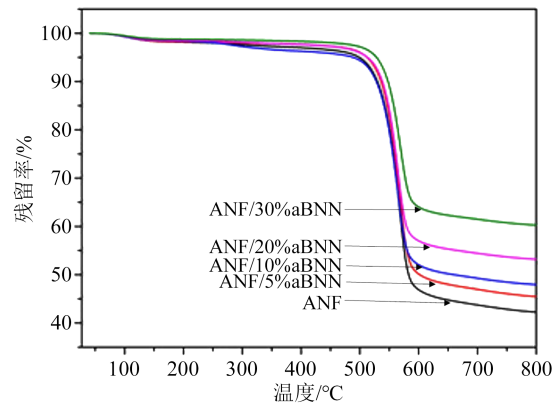


图6 不同 aBNN 含量下 ANF/aBNN 纳米复合膜的 TGA 曲线

Fig.6 TGA curves of ANF/aBNN nanocomposite films with different aBNN content

2.5 ANF/aBNN 纳米复合膜的力学性能

图 7 为 ANF/aBNN 和 ANF/BNN 纳米复合膜的应力-应变曲线,表 1 为本文及其他文献中纳米复合膜的抗拉强度、断裂伸长率和韧性。由于 ANF 之间的范德华力、氢键以及分子链上的共价键作用,ANF 表现出良好的机械强度和韧性,从表 1 可以看出,其抗拉强度、断裂伸长率和韧性分别为 236 MPa、12.7% 和 25.0 MPa·m<sup>1/2</sup>。当薄膜中 BNN 的质量分数为 10% 时,ANF/10%BNN 纳米复合膜变脆,抗拉强度和韧性分别降低至 188 MPa、12.8% 和 18.5 MPa·m<sup>1/2</sup>,这可能是因为 BNN 相对于 ANF 具有脆性,BNN 易使 ANF 发生滑移。对于 ANF/aBNN 纳米复合膜,当 aBNN 质量分数为 10% 时,ANF/10%aBNN 纳米复合膜的抗拉强度、断裂伸长率和韧性均达到最大,分别为 235 MPa、14.0% 和 32.4 MPa·m<sup>1/2</sup>,比 ANF/10%BNN 纳米薄膜分别提高了 25%、9.4% 和 75.1%,表现出更

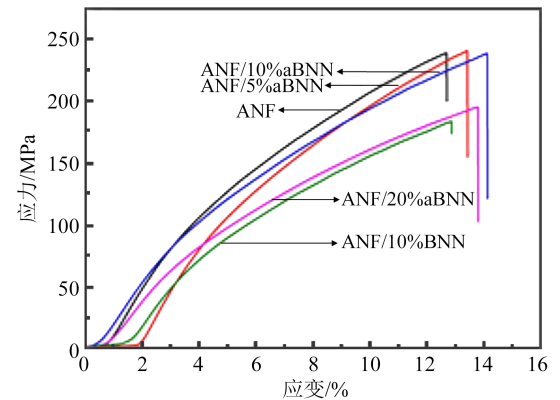


图7 不同 aBNN 含量下纳米复合膜的应力-应变曲线  
Fig.7 Stress-strain curves of nanocomposite films with different aBNN content

高的机械强度。这是因为与BNN相比,改性后的aBNN带正电荷,可以更好地与带负电荷的ANF结合,有助于提高复合膜的强度。另外,由表1可以看到,本文制备的ANF/10%aBNN纳米复合薄膜与其他文献相比,也具有更优的机械强度。

表1 本文及其他文献中纳米复合膜的抗拉强度、断裂伸长率和韧性

Table 1 Tensile strength, elongation at break and toughness of nanocomposite films prepared in this paper and other literatures

样品名称	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )
纯ANF	236	12.7	25.0
ANF/5%aBNN	238	13.3	28.2
ANF/10%aBNN	235	14.0	32.4
ANF/20%aBNN	202	13.6	24.3
ANF/10%BNN	188	12.8	18.5
文献[26]	319.8	13.5	26.7
文献[27]	329.6	14.9	31.0
文献[28]	184.0	11.75	14.9

## 2.6 ANF/aBNN纳米复合膜的绝缘性能

图8为纳米复合膜的电气强度随温度的变化曲线。从图8可以看到,随着温度的升高,纳米复合膜的电气强度均呈现先增大后减小的趋势。当测试温度为100℃时,所有样品的电气强度均达到最大值,其中纯ANF、ANF/10%BNN、ANF/10%aBNN的电气强度分别为134、138、154 kV/mm。与纯ANF和ANF/10%BNN相比,ANF/10%aBNN的电气强度分别提高了约14.9%和11.6%,说明将BNN改性为aBNN后,有助于提高纳米复合材料的电气强度。

图9为纳米复合膜的体积电阻率随温度的变化曲线。由图9可知,随着温度的升高,纳米复合膜的

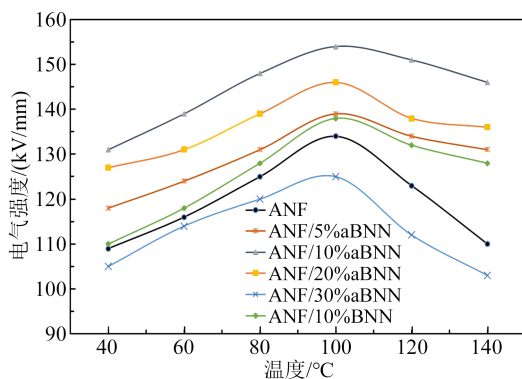


图8 纳米复合膜的电气强度随温度的变化

Fig.8 Variation of electric strength of nanocomposite films with temperature

体积电阻率均先升高后降低。当测试温度为60℃时,所有样品的体积电阻率均达到最大值。此温度下,纯ANF、ANF/10%BNN、ANF/10%aBNN的体积电阻率分别为 $8.00 \times 10^{16}$ 、 $1.00 \times 10^{17}$ 、 $7.94 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ , ANF/10%aBNN的体积电阻率比纯ANF、ANF/10%BNN分别提高了893%和694%,说明将BNN改性为aBNN后,有助于提高纳米复合材料的体积电阻率。这是由于aBNN本身具有二维结构和较高的电气强度,可以填补分子链之间的空隙,并与ANF形成氢键,使得整个体系的结构结合更加紧密,减少了自由体积,有效削弱了分子链的运动,从而防止纳米复合膜在强电场作用下被击穿,提高了纳米复合膜的绝缘性能。

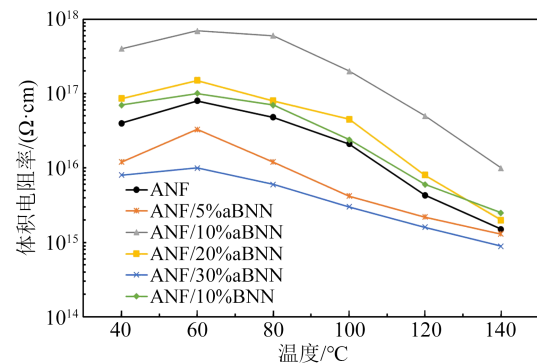


图9 纳米复合膜的体积电阻率随温度的变化

Fig.9 Variation of volume resistivity of nanocomposite films with temperature

## 3 结论

本文用3-氨丙基三羟基硅烷修饰BNN得到改性aBNN,然后与ANF混合,采用高温热压法制备致密的ANF/aBNN纳米复合薄膜,得到以下结论:

(1)aBNN的添加可以增强复合薄膜的热稳定性,随着aBNN含量的增加,纳米复合膜的热失重率明显减小。

(2)aBNN的添加有助于提高复合膜的机械强度,随着aBNN含量的增加,抗拉强度、断裂伸长率和韧性均先增大后减小。当aBNN质量分数为10%时复合薄膜具有最优的力学性能,抗拉强度、断裂伸长率和韧性分别达到235 MPa、14.0%和32.4 MPa·m<sup>1/2</sup>。

(3)复合薄膜的绝缘性能良好,随着温度的升高,纳米复合膜的电气强度均呈现先增大后减小的趋势。当测试温度为60℃时,电气强度和体积电阻率分别达到154 kV/mm和 $7.94 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

## 参考文献 References

- [1] 王鑫,赵莹,李妮. 聚丙烯腈纳米纤维增强聚氨酯复合膜的制备及其力学性能的研究[J]. 现代纺织技术,2019,27(2):1-6.  
WANG Xin, ZHAO Ying, LI Ni. Preparation and mechanical properties of polyurethane based composite films reinforced by polyacrylonitrile nanofibers[J]. Modern Textile Technology,2019, 27(2):1-6.
- [2] 熊宥皓,刘溪瑞,张天旭,等. 芳纶纳米纤维基夹芯结构耐高温复合电介质薄膜的制备及性能研究[J]. 绝缘材料,2023,56(9): 23-28.  
XIONG Youhao, LIU Xirui, ZHANG Tianxu, et al. Preparation and properties of high temperature resistant composite dielectric films with aramid nanofiber wiki sandwich structure[J]. Insulating Materials,2023,56(9):23-28.
- [3] PAN B L, LI N, HUANG R L, et al. Study on tribological properties of carbon/aramid fabric coatings modified by boron nitride of single layer[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2015,54(6):625-631.
- [4] TING Z, YA W H, YI S, et al. Improved mechanical, thermal properties and ideal dielectric properties of polyimide composite films by incorporation of boron nitride nanosheets and aramid nanofibers[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2022, 33(7): 2123-2136.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] WENG L, WANG H B, ZHANG X R, et al. Preparation and properties of boron nitride/epoxy composites with high thermal conductivity and electrical insulation[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics,2018,29(16):14267-14276.
- [8] 刘莉,王克强,陈昊,等. 耐电晕纳米有机硅氧化物杂化聚酰胺酰亚胺复合薄膜的制备及其介电性能[J]. 绝缘材料,2021,54(9): 1-6.  
LIU Li, WANG Keqiang, CHEN Hao, et al. Preparation and dielectric properties of corona resistant nano organosilicon oxide hybrid polyamide imide composite films[J]. Insulating Materials, 2021,54(9):1-6.
- [9] XING Z, FANG H Y, XIAO P S, et al. Effects of modified hexagonal boron nitride on electrical insulating properties of LLDPE/EAA nanocomposites[J]. Polymer International,2022,71(8):950-958.
- [10] 魏文涛,王全龙,武美萍,等. 氮化硼纳米材料功能化改性及对聚合物基材性能调控研究进展[J]. 功能材料,2023,54(8):8044-8053.  
WEI Wentao, WANG Quanlong, WU Meiping, et al. Research progress in functional modification of boron nitride nanomaterials and regulation of properties of polymer substrates[J]. Journal of Functional Materials,2023,54(8):8044-8053.
- [11] 杨薛明,胡宗杰,王炜晨,等. 利用蔗糖改性氮化硼提高环氧树脂复合材料的导热性能[J]. 材料导报,2023,37(2):186-191.  
YANG Xueming, HU Zongjie, WANG Weichen, et al. Improving thermal conductivity of epoxy resin composites by modified boron nitride with sucrose[J]. Materials Review, 2023, 37(2): 186-191.
- [12] RAHMAN M M, PUTHIRATH A B, ADUMBUMKULATH A, et al. Fiber reinforced layered dielectric nanocomposite[J]. Advanced Functional Materials,2019,29(28):1-8.
- [13] 徐随春,赵春宝. 环氧树脂/改性氮化硼导热复合材料的制备与性能研究[J]. 绝缘材料,2017,50(5):1-5.  
XU Suichun, ZHAO Chunbao. Preparation and properties of epoxy resin/modified boron nitride thermal conductivity composites[J]. Insulating Materials,2017,50(5):1-5.
- [14] 唐敢,柯雪,董姗,等. 氨基甲基吡啶改性氮化硼/线型低密度聚乙烯复合材料的热性能及力学性能[J]. 高分子材料科学与工程,2023,39(2):43-50.  
TANG Gan, KE Xue, DONG Shan, et al. Thermal and mechanical properties of aminomethylpyridine modified boron nitride/linear low density polyethylene composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering,2023,39(2):43-50.
- [15] KE Z, SI Y W, MING C, et al. Dielectric polyimide composites with enhanced thermal conductivity and excellent electrical insulation properties by constructing 3D oriented heat transfer network[J].Composites Science and Technology,2024,245:110323.
- [16] 黄鹏,裴克梅. 改性氮化硼/水性环氧导热绝缘涂层的制备及性能研究[J]. 中国胶粘剂,2023,32(10):16-22,47.  
HUANG Peng, PEI Kemei. Preparation and properties of modified boron nitride/water-based epoxy thermal insulation coating [J]. China Adhesives,2019,32(10):16-22,47.
- [17] 曾繁展,陈宪宏,王建锋. 连续制备柔性导热的氮化铝/芳纶纳米纤维复合薄膜[J]. 复合材料学报,2020,37(12):3043-3051.  
ZENG Fanzhan, CHEN Xianhong, WANG Jianfeng. Continuous preparation of flexible thermal conductive aluminum nitride/aramid nanofiber composite films[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2020,37(12):3043-3051.
- [18] 陈昊,黄紫薇,赵伟等. 改性BN-Si-B/环氧树脂复合材料的制备及绝缘性能[J]. 复合材料学报,2024,41(5):2477-2486.  
CHEN Hao, HUANG Ziwei, ZHAO Wei, et al. Preparation and insulating properties of modified BN-Si-B/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica,2024,41(5):2477-2486.
- [19] 杨超,姚青云,唐双美,等. 氟化石墨烯/聚酰亚胺复合膜的导热和电绝缘性能[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(3):663-673.  
YANG Chao, YAO Qingyun, TANG Shuangmei, et al. Thermal conductivity and electrical insulating properties of fluoro-fossil ink/polyimide composite films[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2024,54(3):663-673.
- [20] LU Z Q, SI L M, DANG W B, et al. Transparent and mechanically robust poly ( para-phenylene terephthamide) PPTA nanopaper toward electrical insulation based on nanoscale fibrillated aramid-fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manu-

- facturing,2018,115:321-330.
- [21] MA T B, ZHAO Y S, RUAN K, 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*,2019,12(1):1677-1686.
- [22] 邢伟义,陈亮,周慕天,等. 氮化硼/石墨烯复合导热填料的制备及其环氧树脂复合材料阻燃导热绝缘性能的研究[J]. *中国科学:化学*,2023,53(2):207-216.
- XING Weiyi, CHEN Liang, ZHOU Mutian, et al. Preparation of boron nitride/graphene composite thermal conductive filler and study on flame retardant thermal insulating properties of epoxy resin composite[J]. *Science in China: Chemistry*, 2019, 53(2): 207-216.
- [23] 陈佳亮,焦力敏,吴志豪,等. 甲基丙烯酸缩水甘油酯改性氮化硼纳米片掺杂环氧树脂及其耐辐射性能[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*,2022,40(4):3-11.
- CHEN Jialiang, JIAO Limin, WU Zhihao, et al. Glycidyl methacrylate modified boron nitride nanosheets doped with epoxy resin and its radiation resistance[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Technology*,2002,40(4):3-11.
- [24] 宋万诚,李雪雨,陆少杰,等. 改性氮化硼纳米片对羧基丁腈橡胶物理机械性能和导热性能的影响(英文)[J]. *合成橡胶工业*, 2021,44(5):393-399.
- SONG Wancheng, LI Xueyu, LU Shaojie, et al. Effect of modified boron nitride nanosheets on physical mechanical properties and thermal conductivity of carboxyl nitrile butadiene rubber[J]. *Synthetic Rubber Industry*,2021,44(5):393-399.
- [25] YANG M, CAO K Q, SUI L, et al. Dispersions of aramid nanofibers: a new nanoscale building block[J]. *ACS Nano Journal*, 2011:6945-6954.
- [26] ZHAO L H, WEI C M, LI Z H, et al. High-temperature dielectric paper with high thermal conductivity and mechanical strength by engineering the aramid nanofibers and boron nitride nanotubes[J]. *Materials & Design*,2021,210:110124-110129.
- [27] ZHAO L H, WEI C M, REN J W, et al. Biomimetic nacreous composite films toward multipurpose application structured by aramid nanofibers and edge-hydroxylated boron nitride nanosheets[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022,4(25):56-61.
- [28] REN J W, JIANG G Q, WANG Z, et al. Highly thermoconductive and mechanically robust boron nitride/aramid composite dielectric films from non-covalent interfacial engineering[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*,2023,7(1):14-21.

收稿日期:2024-03-21;修回日期:2024-06-12。

作者简介:

顾臻(1989-),男(汉族),上海人,高级工程师,主要从事电力工程、绝缘技术、电能计量等工作;

卢宇(1981-),男(汉族),广东深圳人,高级工程师,主要从事电力工程、绝缘技术、电能计量等工作。