

氮化硼晶须/环氧复合电介质的性能提升研究

宋 阳¹, 张豪峰², 肖 微², 罗 兵², 滕富莉³, 郝予涛⁴, 任俊文³

(1. 南方电网超高压输电公司柳州局, 广西 柳州 545006; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510670; 3. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 4. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要:环氧树脂内部原子的“热胀冷缩”行为及固有的低热导率问题, 严重制约环氧树脂在干式直流套管绝缘中的应用。为此, 本研究向环氧树脂中引入低热膨胀系数的氮化硼晶须, 制备了新型氮化硼晶须/环氧(BNw/EP)复合电介质, 并对复合电介质的微观结构、热膨胀系数、导热性能、电气性能、热稳定性、力学性能进行测试分析。结果表明: 在 20~100℃ 的温度范围内, 氮化硼晶须质量分数为 10% 的复合电介质的热膨胀系数比纯环氧树脂降低了 15%, 同时热导率提升至 0.28 W/(m·K), 高于纯环氧树脂 33.33%。此外, 其介电常数在 10²~10⁶ Hz 频段内低于 5.28, 介质损耗因数低于 0.02, 且体积电阻率为 10¹⁴ Ω·cm, 拉伸强度保持在 49.5 MPa 左右。本研究证明了在环氧树脂基体中填充氮化硼晶须, 可以保证复合电介质的绝缘、介电以及力学性能不受破坏的基础上, 有效降低材料热膨胀系数, 提高导热性能。

关键词: 环氧树脂; 氮化硼晶须; 热膨胀系数; 热导率; 介电性能

Study on performance improvement of boron nitride whisker/epoxy composite dielectric

SONG Yang¹, ZHANG Haofeng², XIAO Wei², LUO Bing², TENG Fuli³, HAO Yutao⁴, REN Junwen³

(1. Liuzhou Bureau of EHV Power Transmission Company, Liuzhou 545006, China;
2. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510670, China;
3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The "thermal expansion and contraction" behavior of the internal atoms in epoxy resin and the intrinsic issue of low thermal conductivity seriously restrict the application of epoxy resin in dry-type DC sleeve insulation. To address this, we introduced boron nitride whiskers with low thermal expansion coefficient into epoxy resin to prepare a new boron nitride whisker/epoxy (BNw/EP) composite dielectric, and its microstructure, thermal expansion coefficient, thermal conductivity, electrical properties, thermal stability, and mechanical properties were tested and analyzed. The results show that within the temperature range of 20–100℃, the thermal expansion coefficient of the composite dielectric with 10% mass fraction of boron nitride whisker is reduced by 15% compared to pure epoxy resin, while the thermal conductivity increases to 0.28 W/(m·K), which is 33.33% higher than that of pure epoxy resin. In addition, its dielectric constant is below 5.28 and the dielectric loss is below 0.02 in the frequency range of 10²–10⁶ Hz, the volume resistivity is 10¹⁴ Ω·cm, and the tensile strength is maintained at about 49.5 MPa. This study proves that on the basis of ensuring the insulation, dielectric and mechanical properties of the composite dielectric be not damaged, filling the epoxy resin matrix with boron nitride whiskers can effectively reduce the thermal expansion coefficient of the material and improve the thermal conductivity.

Key words: epoxy resin; boron nitride whisker; thermal expansion property; thermal conductivity; dielectric property

0 引言

环氧树脂(EP)作为一种低分子量热固性聚合

物, 因具有优异的绝缘性能、力学性能、易加工特性, 被广泛应用于电气设备中的绝缘材料^[1-3]。然而, 不同电气设备对所用的环氧树脂材料有着不同的性能要求。譬如, 在干式直流套管芯体采用的环氧树脂/绝缘纸复合绝缘中要求环氧树脂具有较低的热膨胀系数与优异的导热特性。但在实际应用

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U23B20132); 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)。

中,环氧树脂具有明显高于绝缘纸的热膨胀系数 α (环氧树脂的 α 为 $60\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,绝缘纸的 α 为 $5\times 10^{-6}\sim 20\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$),这极易导致复合绝缘在高低温循环过程中出现界面分层、整体开裂的现象,且环氧树脂热导率过低($0.21\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)^[4],难以及时消散芯体所产生的高密度热流,这将严重影响干式直流套管的安全稳定运行^[5-6]。因此,为提高干式直流套管运行的可靠性,优化环氧树脂热膨胀系数与导热性能是十分有必要的。

在大量研究中通常采用改变环氧树脂化学与网络结构或掺入无机纳米颗粒来优化环氧树脂的性能。杨浩^[7]发现在环氧树脂单体结构中引入联苯基团可以降低环氧树脂的热膨胀系数。然而,通过改变环氧树脂的化学与网络结构虽能在一定程度上降低其热膨胀系数,但由于环氧树脂本身稳定性较好,其热膨胀系数的降低效果有限,且环氧树脂结构的改变会导致其他性能发生不可控的变化。相反,通过掺杂无机纳米颗粒改性环氧树脂的方式因操作简单、条件可控而被广泛采用。LIU M X等^[8]利用氰酸酯功能化的埃洛石纳米管(HNTs)作为填料制备了HNTs/环氧复合电介质。当HNTs的质量分数为12%时,复合材料的热膨胀系数比纯环氧树脂降低19.6%。然而,难以实现在降低热膨胀系数的同时提高其热导率。作为无机纳米颗粒的氮化硼(BN)因具有低的热膨胀系数($3.5\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$)以及高的热导率($300\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)^[9],成为同时改善环氧树脂热膨胀系数和导热性能的理想填料。张艺子涵等^[10]利用超支化聚合物改性的不同粒径氮化硼微球(GBN)作为导热填料制备了环氧树脂复合电介质。结果表明当GBN的质量分数为60%时,复合电介质的热膨胀系数相比于纯环氧材料降低了44.3%,同时热导率显著提高。HUANG X Y等^[11]在环氧树脂中引入了多面体低聚倍半硅氧烷修饰的氮化硼纳米管(BNNTs),所制备的复合电介质的热膨胀系数与导热性能同样得到显著改善。

不同结构类型的氮化硼在优化环氧树脂性能方面发挥不同的作用。氮化硼晶须(BNw)作为一种单晶形态的高长径比纤维物质,同样具有低热膨胀性、高热导率、高强度、高绝缘等优异性能^[12-13],但现有的研究中鲜有提及氮化硼晶须对环氧树脂性能的影响。因此,在本研究中选用氮化硼晶须作为纳米填料来改善环氧树脂的性能,并通过性能表征

系统分析氮化硼晶须的引入对复合电介质性能的影响。

1 实验

1.1 原材料

双酚A型环氧树脂E-51,环氧当量为192,南通星辰合成材料有限公司;氮化硼晶须:平均直径为 $1\ \mu\text{m}$,秦皇岛一诺高新材料开发有限公司;甲基四氢邻苯二甲酸酐固化剂,南通星辰合成材料有限公司;2,4,6-三(二甲胺基甲基)苯酚促进剂,无锡市明日化工科技有限公司;丙酮、无水乙醇、异丙醇,均为分析纯,中国国药集团化学试剂北京有限公司。

1.2 BNw/EP复合电介质的制备

采用超声波剥离器对氮化硼晶须进行预处理。将 0.5 g 氮化硼晶须分散在 100 mL 异丙醇中,在 40 kHz 、 200 W 的条件下超声处理 5 h 。然后将混合物离心并收集沉淀,即得到预处理的氮化硼晶须。最终将其置于 60°C 的真空烘箱中干燥 72 h 。

称取一定量已预处理的氮化硼晶须分散于 50 mL 的丙酮中,在 40 kHz 、 100 W 的条件下超声分散 0.5 h ,然后搅拌 0.5 h 获得分散均匀的混合物。再依次加入 5 g 环氧树脂、 4 g 固化剂和 0.08 g 促进剂,置于恒温加热磁力搅拌仪上在 60°C 条件下搅拌 2 h ,保证填料与基体充分混合,同时除去残留的丙酮。

将环氧混合体系倒入钢模中进行浇注,放入真空干燥箱中。在 70°C 下持续真空脱气 1 h , 80°C 继续真空脱气 1 h ,以除去体系中的气泡。最后,将真空烘箱恢复至标准大气压,按 $120^\circ\text{C}/2\text{ h}+130^\circ\text{C}/2\text{ h}$ 程序固化,待自然冷却后得到BNw/EP复合电介质。通过改变氮化硼晶须的含量,制备BNw质量分数分别为2.5%、5.0%、7.5%、10.0%的BNw/EP复合电介质,分别标记为BN-2.5%、BN-5.0%、BN-7.5%、BN-10.0%。其制备过程如图1所示。

1.3 性能测试与结构表征

采用JSM-7500F型场发射扫描电镜(SEM)对氮化硼晶须的微观形貌以及BNw/EP复合电介质的断面结构进行观察,观察前将复合电介质置于低温液氮中脆断。采用日本理学公司的Rigaku Ultima IV型X射线衍射仪(XRD)对预处理后的氮化硼晶须微观结构进行表征。测试条件为Cu-K α 辐射($\lambda=0.154\text{ nm}$),扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。利用瞬态平面热源法(TPS),采用TPS-2500s型热常数分析仪测量环氧

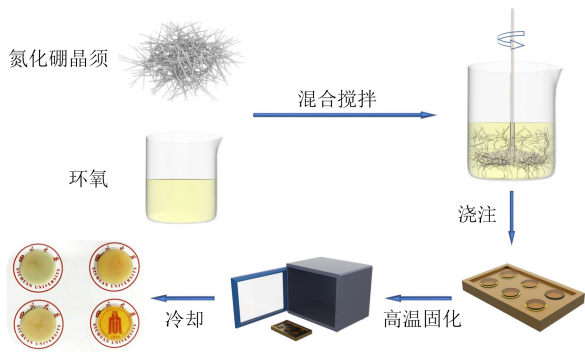


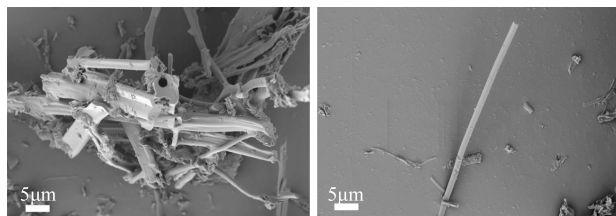
图1 氮化硼晶须/环氧复合电介质的制备过程
Fig.1 Preparation process of boron nitride whisker/epoxy composite dielectric

树脂、BNw/EP复合电介质的热导率。采用HP4194 A型阻抗分析仪测量环氧树脂、BNw/EP复合电介质在 $10^2 \sim 10^6$ Hz频率范围内的介电响应谱,测试温度为 25°C 。采用Keithley 6517B型静电计测量环氧树脂、BNw/EP复合电介质的体积电阻率。采用DIL402C型热膨胀仪测量环氧树脂、BNw/EP复合电介质在 N_2 气氛下、 $20 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内的热膨胀系数。采用TGA5500型高分辨率热重分析仪对环氧树脂、氮化硼晶须、BNw/EP复合电介质进行热失重测试,氮气气氛流速为 20 mL/min ,升温速率为 10°C/min 。采用TA Q2000型差示扫描量热仪测量环氧树脂、BNw/EP复合电介质的玻璃化转变温度。利用电子万能试验机测试环氧树脂、BNw/EP复合电介质的力学性能。按照ISO 527-4-1997的规定,将样品制作成总长度为 150 mm 、宽度为 20 mm 、厚度为 3 mm 的哑铃形状,拉伸速率为 1 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 氮化硼晶须的形貌及结构分析

图2(a)为剥离前的氮化硼晶须SEM图,可以明显观察到未剥离的氮化硼晶须团聚严重,团聚的氮化硼晶须引入到环氧树脂中将不利于发挥氮化硼晶须性能的优势,需要对其进行进一步处理。图2



(a) 剥离前 (b) 剥离后

图2 氮化硼晶须在剥离前后的SEM图

Fig.2 SEM images of boron nitride whiskers before and after exfoliation

(b)为超声处理后的氮化硼晶须SEM图,可以发现剥离后的氮化硼晶须团聚现象减弱,同时依旧保持其晶须状的结构。

预处理后的氮化硼晶须XRD图谱如图3所示,从图3可以看出,在 26.7° 处出现氮化硼特征峰(002),与文献[14]中所报道的相符,表明预处理后的氮化硼晶须在超声作用下其晶型结构没有遭到明显破坏,仍保持完好。

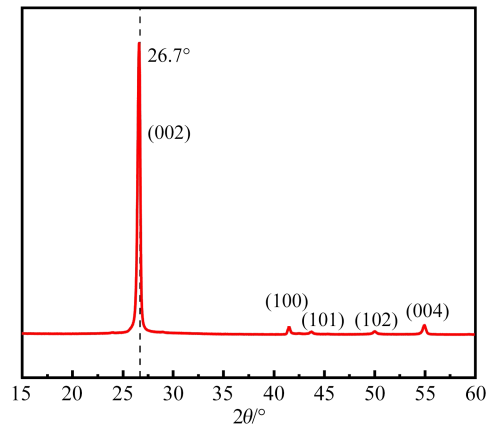


图3 氮化硼晶须的XRD图谱
Fig.3 XRD pattern of boron nitride whiskers

氮化硼晶须的热失重分析曲线如图4所示。从图4可以看出,随着温度从 30°C 升至 600°C ,氮化硼晶须的失重率仅约为3%,说明其具有优异的热稳定性。

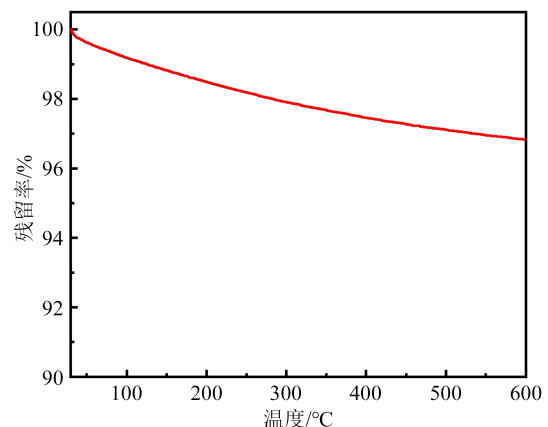


图4 氮化硼晶须的热重分析曲线
Fig.4 Thermogravimetric analysis of boron nitride whiskers

2.2 BNw/EP复合电介质的微观形貌

图5为纯环氧树脂的断面SEM图,从图5可以看出,环氧树脂的断面较为光滑,表现出脆性断裂的特征。图6为不同氮化硼晶须含量下BNw/EP复合电介质的断面SEM图。相比于环氧树脂,其断面

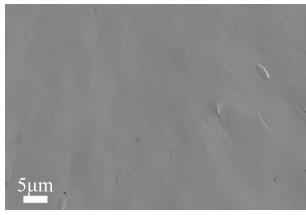
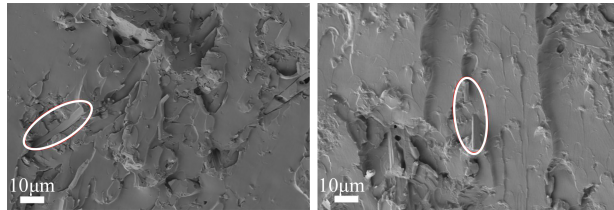


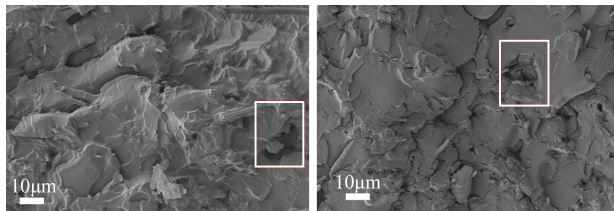
图5 环氧树脂的断面SEM图

Fig.5 SEM of the section of epoxy resin



(a) 2.5%

(b) 5.0%



(c) 7.5%

(d) 10.0%

图6 不同氮化硼晶须含量下BNw/EP复合电介质的断面SEM图

Fig.6 Cross section SEM images of BNw/EP composite dielectrics with different boron nitride whisker contents

较为粗糙,呈现出韧性断裂的特征。从图6(a)~(b)中标注处可以明显看到氮化硼晶须很好地嵌入到环氧树脂基体中,无明显团聚现象,表现出良好的界面兼容性。但随着氮化硼晶须含量的进一步提高,如图6(c)~(d)中标注处所示,复合电介质内部出现部分结构上的缺陷,这主要是由高填充含量下氮化硼晶须团聚造成的。

2.3 BNw/EP复合电介质的热膨胀系数

图7显示了不同氮化硼晶须含量下BNw/EP复合电介质的热膨胀特性。从图7可以看出,复合电介质的热膨胀程度随着温度的升高不断提升。引入氮化硼晶须后,复合电介质的热膨胀程度随氮化硼晶须含量的增加得到一定程度的抑制。

图8为不同BNw/EP复合电介质的平均热膨胀系数,从图8可以清晰地看到,随着氮化硼晶须含量的增多,复合电介质的热膨胀系数出现明显的下降趋势。纯环氧树脂的热膨胀系数为 $60.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,当氮化硼晶须含量达到10%时,复合电介质的热膨胀系数为 $51.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,降低了约15%。这归功于氮化硼晶须具有低的热膨胀性,且与环氧树脂的结合较

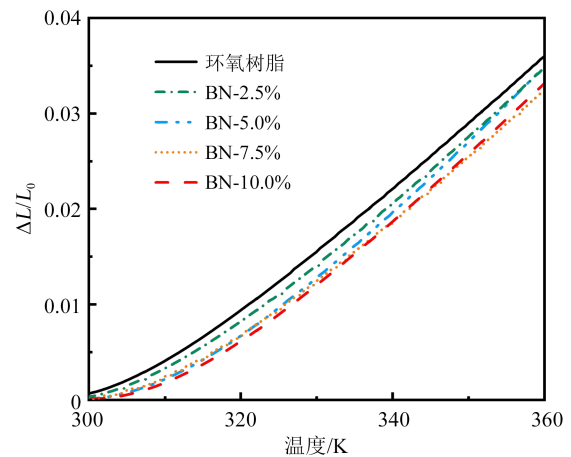


图7 不同氮化硼晶须含量下BNw/EP复合电介质的热膨胀特性

Fig.7 Thermal expansion characteristic of BNw/EP composite dielectrics with different boron nitride whisker contents

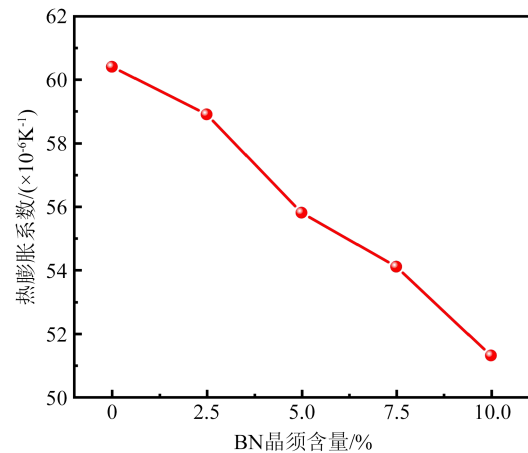


图8 不同氮化硼晶须含量下BNw/EP复合电介质的热膨胀系数

Fig.8 Thermal expansion coefficient of BNw/EP composite dielectrics with different boron nitride whisker contents

好,能够限制环氧树脂内部分子链的热膨胀运动,从而有效降低复合电介质的热膨胀系数^[15-16]。

2.4 BNw/EP复合电介质的导热性能

BNw/EP复合电介质的热导率及其热导率增长率测试结果如表1所示。纯环氧树脂因其结晶度低,声子散射严重,故热导率仅为 $0.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。当加入高热导率的氮化硼晶须后,随着其含量的增加,BNw/EP复合电介质的导热能力呈现出显著的增长。当氮化硼晶须含量达到10%时,复合电介质的热导率达到 $0.28 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相比于环氧树脂提高了33.33%。这主要源于高热且高长径比的氮化硼晶须能够在环氧树脂内部搭建起良好的导热通道^[17],其导热机理如图9所示。

表1 不同BNw/EP复合电介质的热导率及其增长率
Table 1 Thermal conductivity and growth rate of various BNw/EP composite dielectrics

样品	热导率/(W/(m·K))	热导率增长率/%
EP	0.21	0
BN-2.5%	0.23	9.52
BN-5.0%	0.25	19.04
BN-7.5%	0.26	23.81
BN-10.0%	0.28	33.33

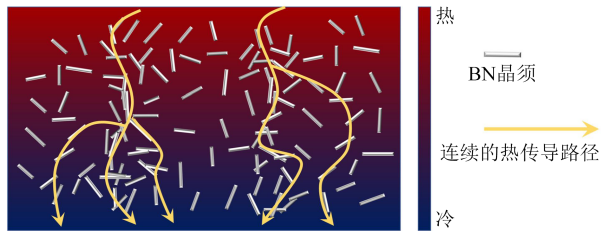


图9 BNw/EP复合电介质的传热机理图

Fig.9 Heat transfer mechanism diagram of BNw/EP composite dielectrics

2.5 BNw/EP复合电介质的电气特性

图10为不同BNw/EP复合电介质的介电常数频谱图。从图10可以看出,在 $10^2 \sim 10^6$ Hz频率范围内,纯环氧树脂的介电常数最大值约为5.06,随着氮化硼晶须含量的增加,复合电介质的介电常数也随之升高。这源于氮化硼晶须的掺杂使复合电介质内部形成有机-无机相界面,界面处易累积电荷而出现界面极化,导致介电常数升高^[18]。然而,由于环氧基体与氮化硼晶须界面兼容性较强,两者之间的介电常数相近,故界面累积的电荷数有限,介电常数提升不多。当氮化硼晶须的质量分数为10%时,在整个频率范围内复合电介质的介电常数低于

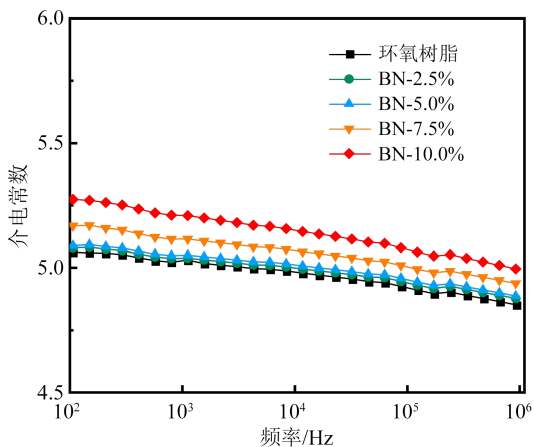


图10 不同BNw/EP复合电介质的介电常数

Fig.10 Dielectric constant of various BNw/EP composite dielectrics

5.28,相比环氧树脂提高约4.2%,仍旧保持较低的介电常数。

图11为不同BNw/EP复合电介质的介质损耗频谱图。从图11可以发现,由于界面极化的引入,不同BNw/EP复合电介质的介质损耗因数在 $10^2 \sim 10^6$ Hz测试范围内出现一定增长。同时,由于氮化硼晶须和环氧树脂均具有优异绝缘性能,能够有效阻挡载流子的传输,电导损耗可忽略不计^[19]。即使当氮化硼晶须含量达到最高10%时,复合电介质在整个频率范围内的介质损耗因数仍均小于0.02,处于极低的水平。

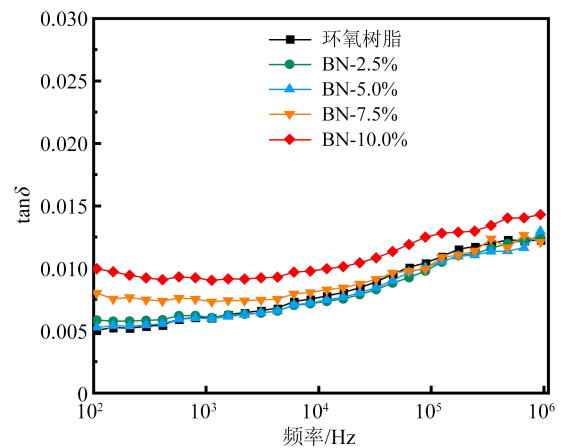


图11 不同BNw/EP复合电介质的介质损耗因数

Fig.11 Dielectric loss factor of various BNw/EP composite dielectrics

图12为不同BNw/EP复合电介质的体积电阻率测试结果。从图12可以看出,不同氮化硼晶须含量下复合电介质的体积电阻率均高于 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$,显示出优异的绝缘性能。这主要源于氮化硼晶须自身是宽能级间隙的陶瓷材料,是载流子传输的有效

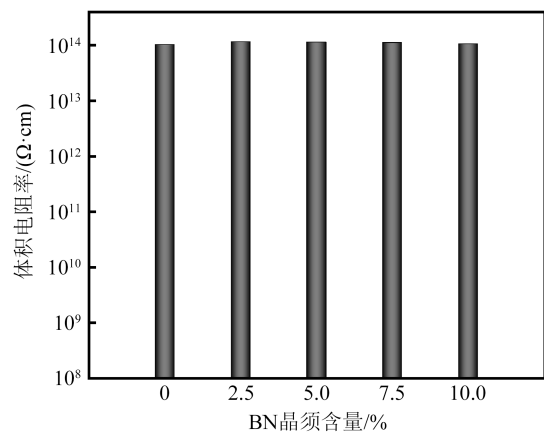


图12 不同BNw/EP复合电介质的体积电阻率

Fig.12 Volume resistivity of various BNw/EP composite dielectrics

屏障。因此,氮化硼晶须的引入不会改变环氧树脂本身的优异绝缘性能。

2.6 BNw/EP复合电介质的热稳定性

图13为不同BNw/EP复合电介质的热失重曲线。

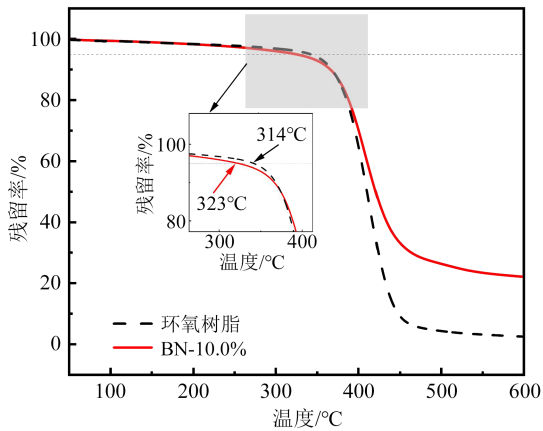


图13 不同BNw/EP复合电介质的热失重曲线
Fig.13 Thermogravimetric curves of various BNw/EP composite dielectrics

从图13可以看出,在350~500°C区间内,由于交联的环氧分子网络发生降解,环氧树脂出现明显的热失重。随着氮化硼晶须的引入,初始分解温度(热失重为5%时对应的分解温度)出现一定程度的下降,表明氮化硼晶须的引入对环氧树脂自身的热稳定性有一定的影响,但由于氮化硼晶须具有高的比热容和热导率,能够及时耗散更多的热量,复合电介质整体依旧保持着较高的热稳定性^[20]。这一结论也可以从玻璃化转变温度(T_g)的测试结果得出,如表2所示,纯环氧树脂的玻璃化转变温度约为105.1°C,不同氮化硼晶须含量的复合电介质与环氧树脂的玻璃化转变温度相差不大,表明BNw/EP复合电介质具有与环氧树脂相当的热稳定性。

表2 纯环氧与不同复合电介质的玻璃化转变温度
Table 2 Glass transition temperature of pure epoxy and various composite dielectrics

样品	$T_g/^\circ\text{C}$
EP	105.1
BN-2.5%	97.6
BN-5.0%	109.4
BN-7.5%	105.6
BN-10.0%	104.2

2.7 BNw/EP复合电介质的力学性能

图14为不同BNw/EP复合电介质的拉伸强度测试结果。从图14可以发现,随着氮化硼晶须的引

入,BNw/EP复合电介质的拉伸强度呈现先增大后减小的趋势。当氮化硼晶须含量为5%时,BNw/EP复合电介质的拉伸强度最高,达到65.8 MPa,高于纯环氧树脂的拉伸强度(52.5 MPa)。这主要源于氮化硼晶须自身具有的高强度以及高长径比特点,可在复合电介质断裂时有效吸收应力能量,提高复合电介质的拉伸强度。但随着氮化硼晶须含量的增加,氮化硼晶须自身的团聚会在复合电介质内部形成结构上的缺陷,如图6(c)~(d)所示。作为力学上的薄弱点,缺陷的产生导致复合电介质的力学性能出现劣化^[21]。但在本研究中,当氮化硼晶须含量为10%时,BNw/EP复合电介质的拉伸强度为49.5 MPa,虽与环氧树脂相比略有下降,但仍具有良好的力学性能。

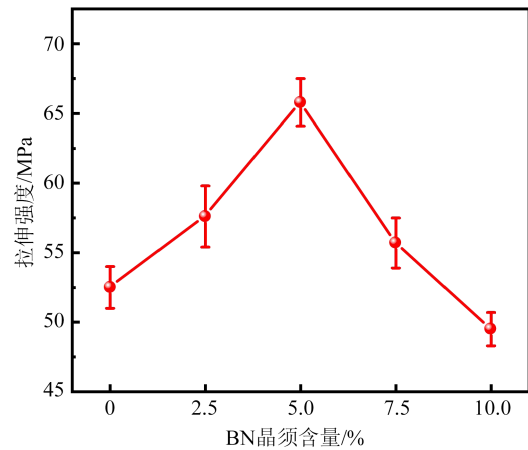


图14 不同BNw/EP复合电介质的拉伸强度
Fig.14 Tensile strength of various BNw/EP composite dielectrics

3 结论

(1)超声处理后氮化硼晶须能够在环氧树脂基体中均匀分散,且具有较为良好的有机-无机界面兼容性。

(2)氮化硼晶须可有效提高复合电介质的导热性能。当氮化硼晶须含量为10%时,环氧复合电介质的热导率达到0.28 W/(m·K),较纯环氧提升了约33.33%。同时,氮化硼晶须的引入对环氧树脂原有的优异热稳定性没有较大影响。

(3)宽能级间隙的氮化硼晶须未对复合电介质的介电和绝缘性能产生不利的影响。当氮化硼晶须含量为10%时,BNw/EP复合电介质的介电常数在 $10^2\sim 10^6$ Hz下始终低于5.28,介质损耗因数低于0.02,体积电阻率高于 10^{14} $\Omega\cdot\text{cm}$ 。

(4)氮化硼晶须的引入能够有效抑制环氧树脂高热膨胀行为。当氮化硼晶须含量为10%时,复合

电介质的热膨胀系数为 $51.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,与环氧树脂相比,降低了约15%。

(5)高强度与高长径比的氮化硼晶须在一定程度上可提高环氧树脂的力学性能。但高含量的引入,可造成缺陷的产生,进而会劣化复合电介质的力学性能。但在本研究中,当氮化硼晶须含量为10%时,BNw/EP复合电介质的拉伸强度为49.5 MPa,依旧保持较高的力学性能水平。

参考文献 References

- [1] JIN F L, LI X, PARK S J. Synthesis and application of epoxy resins: a review[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015,29:1-11.
- [2] DU F P, YANG W, ZHANG F, et al. Enhancing the heat transfer efficiency in graphene-epoxy nanocomposites using a magnesium oxide-graphene hybrid structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015,7(26):14397-14403.
- [3] GU J W, ZHANG Q Y, JING D, et al. Thermal conductivity epoxy resin composites filled with boron nitride[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2012,23(6):1025-1028.
- [4] SUN W, WANG L D, YANG Z Q, et al. Tuning the oxidation degree of graphite toward highly thermally conductive graphite/epoxy composites[J]. *Chemistry of Materials*, 2018,30(21):7473-7483.
- [5] MONROE J A, GEHRING D, KARAMAN I, et al. Tailored thermal expansion alloys[J]. *Acta Materialia*, 2016,102:333-341.
- [6] 杨松,赫玉欣,冯孟婷,等. 改性氧化石墨烯对环氧树脂基复合材料热膨胀系数影响的研究[J]. *化工新型材料*, 2019,47(1):74-78.
YANG S, HE Y X, FENG M T, et al. Influence of modified graphene oxide on the coefficient of thermal expansion of epoxy composite[J]. *New Chemical Materials*, 2019,47(1):74-78.
- [7] 杨浩. 联苯型液晶聚氨酯的合成及其对环氧树脂的增韧改性[D]. 太原:中北大学, 2019.
YANG H. Synthesis of biphenyl liquid crystalline polyurethane and toughening modification of epoxy resin[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [8] LIU M X, GUO B C, DU M L, et al. Properties of halloysite nanotube-epoxy resin hybrids and the interfacial reactions in the systems[J]. *Nanotechnology*, 2007,18(45):455703-455713.
- [9] FANG H M, BAI S L, WONG C P. "White graphene"- hexagonal boron nitride based polymeric composites and their application in thermal management[J]. *Composites Communications*, 2016, 2: 19-24.
- [10] 张艺子涵,安美霖,甘剑羽,等. 超支化聚合物修饰氮化硼微球/环氧树脂导热复合材料的制备及性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023,39(7):145-156.
ZHANG Y Z H, AN M L, GAN J Y, et al. Preparation and properties of thermally conductive epoxy composites based on hyperbranched polymer-modified boron nitride microspheres[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2023,39(7):145-156.
- [11] HUANG X Y, ZHI C, JIANG P K Y, 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.
- [12] DUCLAUX L, NYSTEN B, ISSI J P, et al. Structure and low-temperature thermal conductivity of pyrolytic boron nitride[J]. *Physical Review B*, 1992,46(6):3362-3367.
- [13] 李连月,石泽耀,高智芳,等. 纳米氮化硼晶须的制备及散热应用[J]. *化工新型材料*, 2019,47:99-106.
LI L Y, SHI Z Y, GAO Z F, et al. Preparation of nano BN whisker and application in heat dissipation [J]. *New Chemical Materials*, 2019,47:99-106.
- [14] REN J W, LI Q H, YAN L, et al. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites by introducing graphene@boron nitride nanosheets hybrid nanoparticles[J]. *Materials & Design*, 2020, 191:108663-108672.
- [15] ZHOU Z R, HUANG R J, LIU H M, et al. Fabrication of thermal conductivity enhanced polymer composites with three-dimensional networks based on natural cotton[J]. *Polymer Composites*, 2022,43(3):1832-1843.
- [16] GUO Q, LI G, ZHU P L, et al. Interfacial engineering of epoxy/silica nanocomposites by amino-rich polyethyleneimine towards simultaneously enhanced rheological and thermal-mechanical performance for electronic packaging application[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2022,245:110214.
- [17] 白泽钊,杨柳青,冯阳等. 氮化硼表面改性基团对氮化硼/聚酰亚胺复合材料导热特性的影响[J]. *绝缘材料*, 2023,56(2):63-67.
BAI Z Z, YANG L Q, FENG Y, et al. Effect of boron nitride surface modification groups on thermal conductivity of boron nitride/polyimide composites[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(2): 63-67.
- [18] LEE D, LEE S, BYUN S, et al. Novel dielectric BN/epoxy nanocomposites with enhanced heat dissipation performance for electronic packaging[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018,107:217-223.
- [19] 李志辉,解曾祺,李庆民,等. 多巴胺接枝的纳米氮化硼改性环氧树脂绝缘表面电荷高频消散特性[J]. *电工技术学报*, 2023,38(5):1116-1128.
LI Z H, XIE Z Q, LI Q M, et al. Study on the surface charge dissipation characteristics of epoxy resin modified by dopamine grafted nano boron nitride under high frequency electric stress [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1116-1128.
- [20] 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.
XIA Y W, PANG X H, WEI C M, et al. Preparation and properties of epoxy resin/functionalized boron nitride nanosheets composite dielectric[J]. *Insulating Materials*, 2022,55(7):27-33.
- [21] ZHAO L H, LIAO C J, LIU Y, et al. A combination of aramid nanofiber and silver nanoparticle decorated boron nitride for the preparation of a composite film with superior thermally conductive performance[J]. *Composite Interfaces*, 2021,29(4):447-463.

收稿日期:2023-12-25;修回日期:2024-03-11。

作者简介:

宋阳(1985-),男(汉族),北京人,高级工程师,主要从事电力系统及继电保护方面的研究;

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。