

氮化物对增强线性酚醛树脂导热性能的对比研究

理莎莎¹, 刘乃亮², 方长青¹

(1.西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 西安 710048; 2.西安理工大学 理学院, 西安 710054)

摘要: **目的** 对比探讨氮化物陶瓷颗粒 AlN 和 BN 对热塑性酚醛树脂复合材料导热率的影响, 制备高导热复合材料, 并将其应用于电子塑封领域。 **方法** 首先, 采用硅烷偶联剂对 AlN 和 BN 进行表面改性, 以增强其在有机聚合物中的分散性。然后通过在线性酚醛树脂中添加不同粒径的陶瓷颗粒, 对比粒径及填料含量对线性酚醛树脂复合材料导热率的影响, 从声子角度分析, 获取适合作为提高复合材料导热性能的填料。 **结果** 经过硅烷偶联剂表面改性后, 陶瓷颗粒 AlN、BN 与水的接触角变大, 与树脂的接触角变小, 能够更好地分散在线性酚醛树脂中。在线性酚醛树脂中添加不同粒径、不同含量的 AlN 和 BN, 发现在不同含量范围内, 填料粒径对复合材料导热率的影响不同。根据声子传递热量理论分析, BN 较 AlN 在与 C 形成的界面上更容易传输热量, 从而实现了较高的导热率。 **结论** 氮化物陶瓷颗粒能够很好地增强复合材料的导热率, 尤其是 BN, 其态密度和 C 的态密度重叠率极高, 更适合在 BN 与 C 的界面快速传递热量。

关键词: 导热复合材料; 氮化物陶瓷; 声子; 态密度; 导热率

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)05-0137-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.019

Comparative Study on Effect of Nitrides on Thermal Conductivity of Reinforced Linear Phenolic Resin Composite

LI Sha-sha¹, LIU Nai-liang², FANG Chang-qing¹

(1.Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: The paper aims to discuss and compare the effects of nitride ceramic particles AlN and BN on the thermal conductivity of thermoplastic phenolic resin composites, prepare high-thermal composite materials and apply them to electronic plastic packaging. Firstly, AlN and BN were surface-modified with a silane coupling agent to enhance the dispersibility in the organic polymer. Then, by adding the ceramic particles different size to the linear phenolic resin, the effects of particle of sizes, the effects of particle size and filler content on the thermal conductivity of the linear phenolic resin composite were compared to obtain filler for improving the thermal conductivity of the composite from the phonon point of view. The experimental results showed that after surface modification, the contact angles of the ceramic particles AlN and BN with water became large; while those angles with resin became small. So the silane coupling agent made the filler dispersed better in the novolac resin than in water. AlN and BN with different particle sizes were filled with linear

收稿日期: 2019-05-23

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项 (18JK0584); 陕西省重点研发计划-国际科技合作项目 (2018KW-054)

作者简介: 理莎莎 (1982—), 女, 西安理工大学讲师, 主要研究方向为高导热复合材料及导电油墨。

通信作者: 方长青 (1978—), 男, 西安理工大学教授、博导, 主要研究方向为绿色包装新材料的开发及柔性包装废弃物的回收再利用。

phenolic resin at different contents. The effect of filler particle size on the thermal conductivity of the composite was different with different contents. According to the heat transfer analysis of phonon, BN transferred heat easier than AlN at the interface formed with C, achieving high thermal conductivity. Nitride ceramic particles can well enhance the thermal conductivity of the composite, especially BN. The overlap of density of states (DOS) of BN and C are extremely high, which is more suitable for rapid heat transferring at BN and C interfaces.

KEY WORDS: thermal conductive composite; nitride ceramic; phonon; density of states; thermal conductivity

电子封装材料用于承载、连接电子元器件,具有机械支持、散失电子元件的热量等作用,并具有良好的电绝缘性,是集成电路的密封体。由于填充聚合物具有高导热率、质轻、电气绝缘性好、介电性能高、原材料便宜、易加工、化学稳定性好等优点,因此,在电子塑封领域发挥着越来越重要的作用^[1-2]。许多金属和陶瓷作为填料添加到聚合物中,可增强复合材料的导热率。金属铜、镍、铝和银由于具有高导热率最先被用来增强复合材料的导热率。陶瓷材料如氮化硼(BN)、氮化铝(AlN)、碳化硅(SiC)和氮化硅(Si₃N₄)等逐渐被列为增强导热率的潜在填料^[2-8]。填充环氧树脂的陶瓷材料,如二氧化硅(SiO₂)、氧化铝(Al₂O₃)、氮化铝,由于自身具有高导热率,作为高导热电子塑封材料首先被科研人员作了相关研究^[9]。鉴于聚合物自身导热能力不强,寻找配合性好的树脂基体和填料是科研工作者力争突破的内容之一。除了环氧树脂,科研人员还将聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、高密度聚乙烯(HDPE)和低密度聚乙烯(LLDPE)等作为树脂基体进行了研究^[4-17]。虽有研究发现热固性酚醛树脂可通过 Al₂O₃ 和 Kevlar 纤维、氮化硼微片、石墨和短切纤维及镀银碳纤维改善其导热能力^[18-20],但对非热固性线性酚醛树脂导热性能的开发研究不够深入。

氮化物陶瓷具有良好的力学、化学、电学、热学及高温物理性能,是重要的结构与功能材料,对高导热绝缘复合材料的研发具有重要的理论意义和实践价值。BN 不仅具有质轻、热稳定性和耐磨性良好等优点,且还具有高达 33 W/(m·K)的导热率,是酚醛树脂的 300 倍。AlN 具有高导热率(70 W/(m·K))和热稳定性、低热膨胀系数和介电常数、易于加工等特点,是高导热率复合材料的理想填料。文中拟通过添加 BN 和 AlN 增强线性酚醛树脂的导热性能,旨在对比 BN 和 AlN 增强线性酚醛树脂导热性的能力及影响 2 种粒子增强线性酚醛树脂导热性能的因素。

1 实验

1.1 原料

主要原料有线型酚醛树脂,自制;苯酚,分析纯,

天津市河东区红岩试剂厂;甲醛,分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;草酸,分析纯,天津市北辰方正试剂厂;BN,工业级,山东青州迈特科创新材料有限公司;AlN,工业级,山东青州迈特科创新材料有限公司;3-氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550),化学纯,南京立派化工有限公司。

1.2 设备及仪器

主要设备及仪器有扫描电子显微镜,JEOL JSM-6360LV,日本株式会社;傅里叶红外光谱测量仪,FTIR-8400S,北京瑞利公司;光接触角测量仪,DSA100,深圳东仪精工设备有限公司;导热仪,LAF457,德国 NETZSCH 公司;平板硫化机,FR-1418,上海发瑞仪器科技有限公司。

1.3 试样制备

BN 粒子和 AlN 粒子经鼓风干燥箱在 100 °C 下干燥 24 h,去除表面物理吸附,然后放入三口烧瓶,同时添加 90% (体积分数)的乙醇溶液和 1% (质量分数)的 KH550 对粒子表面进行预处理^[21]。在 60 °C 下处理 4 h 后,于 70 °C 下干燥 24 h。对预处理前、后的 BN, AlN 粒子和完全干燥的溴化钾混合后压片进行红外图谱测试。同时,预处理前、后的 BN 和 AlN 粒子经压片机压制成试样,随后对试样进行表面接触角测量。随后往 250 mL 三口烧瓶内添加物质的量比为 1:1 的苯酚和甲醛溶液,在 85 °C、酸性条件下制备热塑性酚醛树脂基体,然后根据填料含量(质量分数分别为 5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%)分别将经 KH550 处理后的 BN 和 AlN 添加到线性酚醛树脂粉中,使用平板硫化机,在 160 °C, 20~40 MPa 条件下模压 10 min,制得直径为 1 cm、厚为 1 mm 的试样,测试其导热率。对试样进行机械力破坏,随后寻找断面进行 SEM 观测。

1.4 性能测试与结构表征

BN 粒子和 AlN 粒子在 KH550 预处理前后压片并通过 FT-IR 测量仪进行分析。表面能由光接触角测量仪通过手动单滴水或树脂到 BN 和 AlN 压片进行观测、读数;粒子在复合材料中的分布情况通过 SEM 观察;复合材料导热率由 LFA457 在室温状态下进行测试。

2 结果分析

2.1 陶瓷粒子表面接触角测定

硅烷偶联剂中乙氧基通常先生成硅醇 (Si(OH)₃)，然后与无机物质结合形成硅氧烷。通过使用硅烷偶联剂可用在无机物质和有机物质的界面间架起“分子桥”，把 2 种性质悬殊的材料连接在一起，进而提高复合材料的性能。

为了确保预处理后陶瓷粒子表面变得更加疏水，且与亲油性的酚醛树脂浸润性更好，对粒子表面分别进行了水和树脂基体的接触角测量。结果显示，处理前，H₂O 能够轻易的浸润陶瓷粒子表面（水与 BN，ALN 的接触角分别为 55°和 53°）；处理后，陶瓷粒子与酚醛树脂的接触角有了明显下降，说明处理后粒子表面被有机化（见表 1）。BN 与酚醛树脂接触角由 78°下降到 67°，ALN 与酚醛树脂接触角由 77°下降到 64°，因此，处理后的陶瓷粒子可以更均匀地分散于树脂基体。

表 1 陶瓷粒子处理前后接触角
Tab.1 Contact angle of treated and untreated ceramic particles (°)

接触材料	BN	改性 BN	ALN	改性 ALN
水	55	71	53	72
线性酚醛树脂	78	67	77	64

2.2 陶瓷粒子改性前后的红外图谱分析

BN 粒子表面没有电荷，B 和 N 以共价键相连接。其中 B 原子的核外电子排布为 1s²2s²2p¹，N 原子的核外电子排布为 1s²2s²2p³。B 原子 p 轨道处于缺电子状态，KH550 的氨基（—NH₂）可以提供孤对电子，当偶联剂 KH550 添加到体系中时，氨基（—NH₂）吸附 BN，为其提供孤对电子。BN 粒子经过 KH550 处理前后的红外图谱见图 1。从图 1 中可以看出，吸收峰 792 cm⁻¹ 和 1382 cm⁻¹ 是 BN 的特征峰^[22-23]，吸收峰强度大，峰形明显，基本不存在杂质吸收峰。3400 cm⁻¹ 左右范围较宽的峰为羟基（—OH）吸收峰，经过 KH550 处理后，此吸收峰变强，说明—OH 有所增加，增加的这部分—OH 归因于 BN 吸附的 KH550 分子，因为水解之后的 KH550 分子能够提供 Si—OH。1129 cm⁻¹ 和 1636 cm⁻¹ 谱带分别是 Si—O 和 NH₂ 的弯曲振动吸收峰，表明 KH550 已经被 BN 吸附。

ALN 粉末在经 KH550 处理前后的红外图谱见图 2。从图 2 中可以看出，纯氮化铝的 Al—N 键特征吸收峰为 689 cm⁻¹。氮化铝粉末易水解，水解后产生的特征吸收峰有位于 3740 cm⁻¹ 的 Al—OH 峰和 1543 cm⁻¹ 处的 Al—NH₂ 吸收峰^[24]等。红外图谱显示，未经 KH550 处理的 ALN 粉末在这些位置没有明显的吸收峰，表明氮化铝没有发生明显的水解过程。经过

KH550 处理后，除了有明显的 ALN 特征吸收峰外，在 1646 cm⁻¹ 和 1567 cm⁻¹ 处出现了 NH₂ 面内弯曲振动吸收峰，在 1323 cm⁻¹ 处出现了的 Si—O 吸收峰。由图 1b 可知，经过 KH550 处理的 ALN 粉末表面变得有机化，这有利于在酚醛树脂中进行分散与粘合，不仅提高了树脂的导热性能，还能提高其强度。

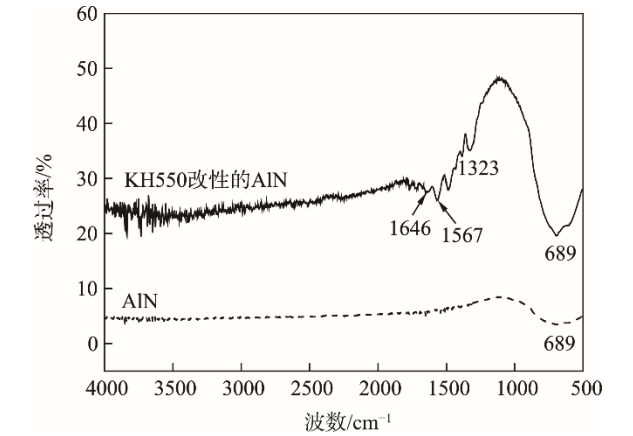


图 1 ALN 粒子表面处理前后的红外图谱
Fig.1 FT-IR spectra of the treated and non-treated ALN

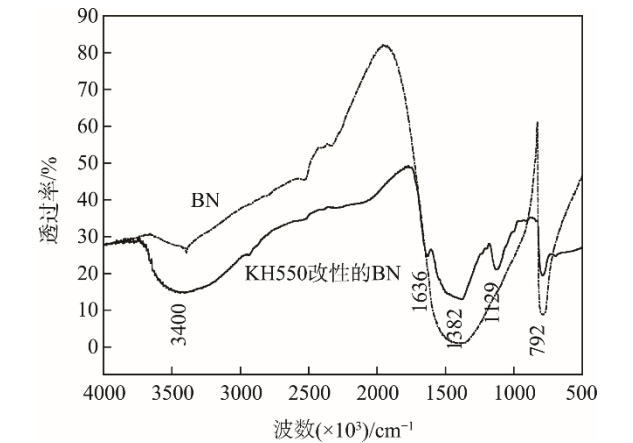


图 2 BN 粒子表面处理前后的红外图谱
Fig.2 FT-IR spectra of the treated and non-treated BN

2.3 表面处理后复合材料的微观形貌

有机相和无机相的相容性在很大程度上影响了复合材料的导热率。由于 BN 和 ALN 均是六方结构，以 BN 为例，通过扫描电子显微镜观察了处理前后 BN 粒子在树脂基体中分散的情况（见图 3）。由图 3 可以看出，未预处理时，很多 BN 粒子聚集在一起形成了大的聚集体，与树脂的浸润性不理想，说明 BN 粒子在树脂基体中的分散还不够均匀。经 KH550 预处理后，BN 表面更加有机化，BN 粒子在基体中分散均一（见图 3b），很少有团聚的大粒子存在；此外，酚醛树脂包裹着 BN 粒子，几乎所有的粒子都比未处理时小。综上，经过处理的 BN 粒子比未处理的分散更均匀。

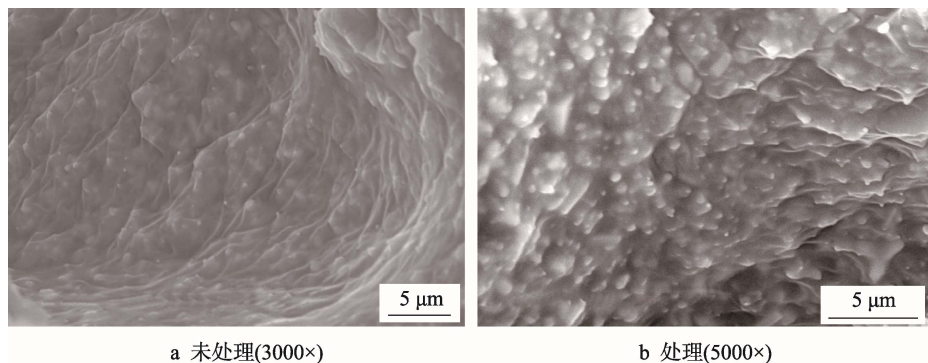


图3 陶瓷BN粒子的分散
Fig.3 Dispersion of ceramic BN

2.4 复合材料导热率

BN 粒子大小对复合材料的导热率有一定影响^[4]。复合材料导热率随 BN 粒径、填充量增加的变化趋势见图 4。整体而言,复合材料导热率受粒径影响不大,呈现的增长趋势很接近。随着填充量的增长,导热率先缓慢增长,随后在质量分数为 30%~50% 时迅速增长,质量分数超 50% 后又回到缓慢增长的状态。在第 1 阶段,0.5 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>1 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>5 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>15 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度。随着含量的增加,第 2 阶段中大粒径 BN 对导热率的增强作用较为明显,15 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>5 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>1 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度>0.5 μm 的 BN 粒子对复合材料导热率的影响程度。当质量分数在 20% 以下时,小粒径 BN 对导热率的提高作用较为明显,这是粒子数量增多导致的:当含量较低时,由于小粒径 BN 有较大比表面积,因此,在相同填充量时小粒径拥有较多的相互接触机会去形成导热通路。大粒径 BN 的质量分数在 40% 以上时,具有较强的导热率增强作用,这是因为在高含量时,过多的小粒子会增加传递过程中界面的损耗,因此,小粒子增加导热率的作用小于大粒子。综上所述,当质量分数低于 20% 时,小粒径(0.5 μm) BN 的效果好;相反,在填充量较大时,大粒子(15 μm) BN 的效果好,导热率最大值达到了 0.497 W/(m·K)。

AlN 粒子的大小对复合材料的导热率也有一定影响。为了研究 AlN 粒子在树脂基体中对导热率的影响,添加了 4 种粒径(0.5, 1, 5, 15 μm) 的 AlN 粒子,见图 5。由图 5 可知,在填充量较低的情况下,粒径对复合材料导热率的影响较为复杂。在 AlN 质量分数为 30% 以下时,小粒径对复合材料导热率的效果显著。当 AlN 质量分数为 5% 时,0.5 μm 的 AlN

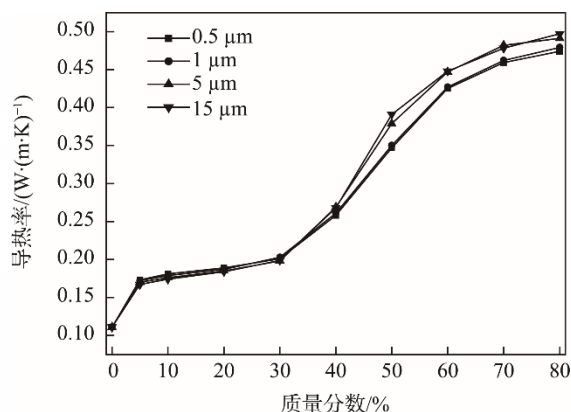


图4 不同粒径、不同含量的 BN 对材料导热率的影响
Fig.4 Effect of different BN particles sizes and filler content on the thermal conductivity of the filled composites

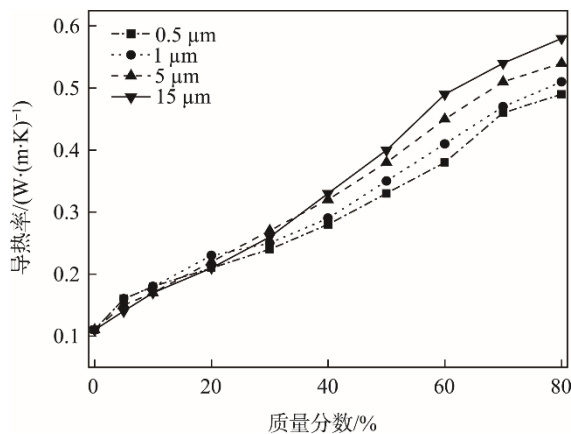


图5 不同粒径、不同含量的 AlN 对材料导热率的影响
Fig.5 Effect of different AlN particles sizes and filler content on the thermal conductivity of the filled composites

粒子对复合材料导热率的影响程度=1 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度>5 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度>15 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度;当质量分数为 10% 时,大粒径 AlN 对导热率的作用较强,0.5 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度=1 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度>5 μm 的 AlN 粒子对

复合材料导热率的影响程度=15 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度；当质量分数达到 20% 时，1 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度>5 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度>0.5 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度=15 μm 的 AlN 粒子对复合材料导热率的影响程度。这是由于小粒径拥有大的比表面积，因此在填充量较小时，小粒径具有比大粒径更多的相互接触机会，进而形成导热通路。当填充质量分数大于 30% 时，大粒子对导热率的增强效果比小粒径的大，导热率最大值达到了 0.497 W/(m·K)。

2.5 声子传递在导热过程中的作用

导热绝缘体的导热过程依赖声子将热量从一个颗粒传导到相邻的粒子，使热量从声子密度高的区域向低的区域扩散。由于声子是能量子，声子的“定向流动”为能量输运，因此会形成热传导。声子行为在研究中具有重要的材料特性，声子跨越 2 种材料界面的运输可以通过声子态密度 (Phonon Density of States, PDOS) 的重叠率确定^[25]，PDOS 成为一种理解界面热传输行为的有效方法^[26—29]。计算碳、硼和氮的声子态密度，进一步比较发现，相较于硼原子，氮原子与碳原子的声子态密度有较大的重叠区域，表明 C—N 键具有更高效的热传递，声子可在材料界面处顺利传导热量。综上所述，C—N 比 C—B 键在全温度范围内界面方向的界面导热性能更强，归因于界面所形成化学键的更强结合力。

使用 Material Studio 软件计算出的 2 种陶瓷颗粒 (AlN\BN 与 C) 的态密度图谱见图 6。从图 6 中可以清楚地看到，BN 和 C 的态密度图有很多重叠区域，即声子在跨越 BN 和 C 材料界面时可以顺利运输热量；AlN 与 BN、C 有着截然不同的态密度图。从结构上看，C 元素和 BN 有类似的六方结构，更利于声子携带能量传输。态密度图谱从理论上表明 BN 更适

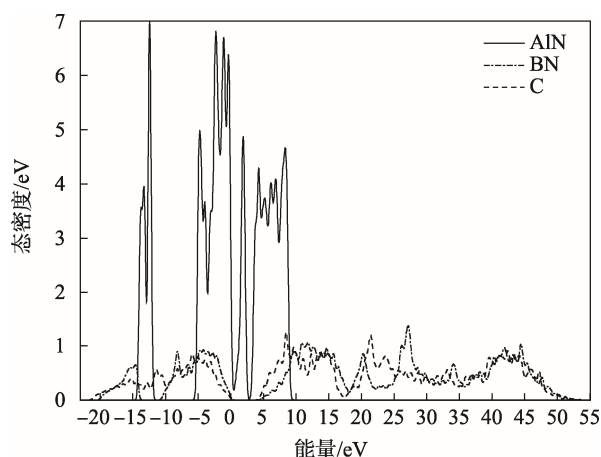


图 6 陶瓷粒子和碳的态密度

Fig.6 Density of states of ceramic particles and C

合作为增强有机材料导热率的填料，虽然 BN 自身的导热率不如 AlN，但由于和有机材料的配合性优于 AlN，因此能够发挥出 1+1>2 的效果。

3 结语

为了制备高导热复合材料，并将其应用于电子封装领域，文中对比探讨了氮化物陶瓷颗粒 AlN 和 BN 对热塑性酚醛树脂复合材料导热率的影响。实验结果表明，经过硅烷偶联剂表面改性后，陶瓷颗粒 AlN、BN 与水的接触角均有所增大，与树脂的接触角变小，证明 2 种粒子均能够更好地分散于线性酚醛树脂中。在线性酚醛树脂中填充不同粒径、不同含量的 AlN 和 BN 后发现，在不同含量范围内，填料粒径对复合材料导热率的影响不同。虽然 AlN 的导热率高于 BN，但根据声子传递热量理论分析，BN 较 AlN 更容易在和 C 形成的界面上传输热量，BN 更适合作为增强复合材料导热率的填料。

参考文献：

- [1] WONG C P, BOLLAMPALLY R S. Thermal Conductivity, Elastic Modulus and Coefficient of Thermal Expansion of Polymer Composites Filled with Ceramic Particles for Electronic Packaging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(14): 3396—3403.
- [2] 何洪, 傅仁利, 沈源, 等. 高导热聚合物基复合封装材料及其应用[J]. 电子与封装, 2007, 7(2): 7—10. HE Hong, FU Ren-li, SHEN Yuan, et al. Electronic Packaging Technology and Polymer-based Composite Packaging Materials[J]. Electronics & Packaging, 2007, 7(2): 7—10.
- [3] DEUL K, ARTAVAZD K, JAE W L, et al. Flexible h-BN Foam Sheets for Multifunctional Electronic Packaging Materials with Ultrahigh Thermostability[J]. Soft Matter, 2018, 14: 4204—4212.
- [4] LEE G, PARK M, KIM J, et al. Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Hybrid Filler[J]. Composites: Part A, 2006, 37(5): 727—734.
- [5] ZHOU W Y, QI S H, LI H D, et al. Study on Insulating Thermal Conductive BN/HDPE Composites[J]. Thermochimica Acta, 2007, 452(1): 36—42.
- [6] 汪蔚, 曹万荣, 陈婷婷. BN 表面改性对 BN/环氧树脂复合材料导热性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 275—281. WANG Wei, CAO Wan-rong, CHEN Ting-ting. Effects of BN Surface Modification on Thermal Conductivity of BN/Epoxy Composites[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2018, 35(2): 275—281.
- [7] 张峰, 李秋影, 吴驰飞, 等. 碳纤维对聚碳酸酯/氮化硼复合材料导热性能和力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(2): 49—53. ZHANG Feng, LI Qiu-ying, WU Chi-fei, et al. Effects

- of Carbon Fiber on the Thermal Conductivity and Mechanical Property of Polycarbonate/BN Composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(2): 49—53.
- [8] 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.
XU Fang, XUE Jie, LI Xiang, et al. SiC-BN Hybrid Highly Elastic and Electrical Insulated Thermal Conductive Material[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(9): 156—159.
- [9] ZHOU W Y, QI S H, AN Q L, et al. Thermal Conductivity of Boron Nitride Reinforced Polyethylene Composites[J]. Materials Research Bulletin, 2007, 42(10): 1863—1873.
- [10] AN Q L, QI S H, ZHOU W Y. Thermal, Electrical and Mechanical Properties of Si₃N₄ Filled LLDPE Composite[J]. Polymer Composites, 2008, 30(7): 3396—3403.
- [11] ZHOU W Y, WANG C F, AI T, et al. A Novel Fiber-reinforced Polyethylene Composite with Added Silicon Nitride Particles for Enhanced Thermal Conductivity[J]. Composites: Part A, 2009, 40(6/7): 830—836.
- [12] WATTANAKUL K, MANUSPIYA H, YANUMET N. The Adsorption of Cationic Surfactants on BN Surface: Its Effects on the Thermal Conductivity and Mechanical Properties of BN-epoxy Composite[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering, 2010, 369(1/2/3): 203—210.
- [13] PEZZOTTI G, KAMADA I, MIKI S. Thermal Conductivity of AlN/Polystyrene Interpenetrating Networks[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20(8): 1197—1203.
- [14] 田志红, 范华乐, 张浩, 等. AlN 填充有机灌封硅橡胶导热性能的数值模拟[J]. 复合材料学报, 2011, 28(3): 217—222.
TIAN Zhi-hong, FAN Hua-le, ZHANG Hao, et al. Numerical Simulation of the Thermal Property of AlN Filled Silicone Encapsulant[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(3): 217—222.
- [15] MAMUNYA Y P, DAVYDENKO V V, PISSIS P, et al. Electrical and Thermal Conductivity of Polymers Filled with Metal Powders[J]. European Polymer Journal, 2002, 38(9): 1887—1897.
- [16] SUNDSTROM D W, LEE Y. Thermal Conductivity of Polymers Filled with Particulate Solids[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1972, 16(12): 3159—3167.
- [17] CHOY C L, WONG Y W, YANG G W, et al. Elastic Modulus and Thermal Conductivity of Ultradrawn Polyethylene[J]. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 1999, 37(23): 3359—3367.
- [18] KALAPRASAD G, PRADEEP P, MATHEW G, et al. Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Analyses of Low-density Polyethylene Composites Reinforced with Sisal, Glass and Intimately Mixed Sisal/Glass Fibers[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(16): 2967—2977.
- [19] 王登武, 王芳. 酚醛树脂/镀银碳纤维导热复合材料的制备与性能[J]. 中国塑料, 2015, 29(11): 61—65.
WANG Deng-wu, WANG Fang. Preparation and Properties of Phenolic Resin/Silver Nanoparticles Plating Carbon Fiber Thermal Conductive Composites[J]. China Plastics, 2015, 29(11): 61—65.
- [20] 宇云峰. 高填充热固性酚醛树脂复合材料的导热及增韧研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 29—41.
YU Yun-feng. Toughening of Thermally Conductive Phenol Formaldehyde/Alumina/Fiber Composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016: 29—41.
- [21] 王崇杰. 酚醛树脂复合材料导热及力学性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 27—83.
WANG Chong-jie. Study on Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Phenolic Resin Composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016: 27—83.
- [22] 张玉清, 彭义波, 张旭浩, 等. 偶联剂对 PA6/h-BN 复合材料导热性能的影响及复合材料制备工艺优化[J]. 中国塑料, 2017, 31(4): 11—15.
ZHANG Yu-qing, PENG Yi-bo, ZHANG Xu-hao, et al. Influence of Coupling Agents on Thermally Conductive Properties of Polyamide6/Born Nitride Composites and Optimization for Their Preparation Technology[J]. China Plastics, 2017, 31(4): 11—15.
- [23] 李春华, 齐暑华, 莫军连. 氮化硼杂化环保型酚醛树脂的研究[J]. 中国胶粘剂, 2009, 18(7): 12—16.
LI Chun-hua, QI Shu-hua, MO Jun-lian. Study on Environment-friendly BN Hybrid Phenolic Resin[J]. China Adhesives, 2009, 18(7): 12—16.
- [24] 匡加才, 张长瑞. AlN 陶瓷热导率影响因素的研究[J]. 材料导报, 2003, 17(4): 28—31.
KUANG Jia-cai, ZHANG Chang-rui. Factors Influencing Thermal Conductivity of AlN Ceramics[J]. Materials Review, 2003, 17(4): 28—31.
- [25] LI M Y, ZHENG B, DUAN K, et al. Effect of Defects on the Thermal Transport across the Graphene/Hexagonal Boron Nitride Interface[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(26): 14945—14953.
- [26] WU F C, MACDONALD A H, MARTIN I. Theory of Phonon-mediated Superconductivity in Twisted Bilayer Graphene[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(25): 257001.
- [27] LEMONDE M A, MEESALA S, SIPAHIGILA, et al. Phonon Networks with Silicon-vacancy Centers in Diamond Waveguides[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(21): 213603.
- [28] TIELROOIJ K J, HESP N C H, PRINCIPI A, et al. Out-of-plane Heat Transfer in Van Der Waals Stacks through Electron-hyperbolic Phonon Coupling[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13: 41—46.
- [29] AUTORE M, LI P N, DOLADO I, et al. Boron Nitride Nanoresonators for Phonon-enhanced Molecular Vibrational Spectroscopy at the Strong Coupling Limit [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(4): 17172.