文章编号: 1007 - 4252(2023) 04 - 0004 - 238 DOI: 10.20027/j.gncq.2023.0034

六方片层氮化硼导热复合材料研究进展

匡枝俏,张文超,申 俊
(湖南机电职业技术学院,长沙 410100)

摘要: 近年来,随着电子技术领域朝着小型化,微型化发展,散热问题成了进一步提高其性能和可靠性的主要制约因素之一。六方氮化硼因为优异导热性、绝缘性、力学性能和结构稳定性,其复合材料在微电子领域发挥出巨大的优势。本文从六方氮化硼纳米片层的制备及提高六方氮化硼复合材料导热率两方面,介绍了目前相关领域的研究现状。

关键词: 六方氮化硼; 导热; 纳米复合材料
中图分类号: TB34 **文献标志码:** A

Research progress in hexagonal boron nitride thermal conductive composite materials

KUANG Zhi-qiao,ZHANG Wen-chao,SHEN Jun
(Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic College,Changsha 410100, China)

Abstract: In the ever-evolving landscape of electronic technology, the strides made in miniaturization have been monumental. However, this advancement has ushered in a new challenge that looms large on the horizon: heat dissipation.Hexagonal boron nitride composites emerge as a game-changer in microelectronics, boasting mechanical excellence, high thermal conductivity, stability, and insulation. This article delves into the current research status across two key aspects: the preparation of hexagonal boron nitride nanosheets and the enhancement of thermal conductivity in these composites.

Key words: hexagonal boron nitride; heat conduction; Nanocomposites

0 引言

近年来,高密度、高速集成电路和器件的有效散热已成为进一步提高其性能和可靠性的主要制约因素之一[1]。聚合物材料因质轻,绝缘,价格低廉,已经在电子器件中得到了广泛应用。然而,聚合物材料导热率低[2],其自身无法满足散热的需求,通常是通过添加一些导热填料来提高其导热性能,作为导热填料之一的氮化硼越来越受到关注。

六方氮化硼(h-BN) 是由氮原子和硼原子组成的六方层状结构,层内原子以 sp2 杂化相连接,层间以范德华力结合,其结构与石墨十分相似,外观上为松散、润滑、易吸潮、质轻等性状的白色粉末,因此有着“白色石墨”之称[3-4]。单层的六方氮化硼纳米片(BNNS) 的理论导热系数可达 1700-2000W/mK[5],除了优良的导热性能外,六方氮化硼的介电强度高

收稿日期: 2023-08-13; 修订日期: 2023-08-30
作者简介: 匡枝俏(1989-) ,女,硕士,工程师,主要研究方向为纳米材料,复合材料(E-mail: cherryqingjia@ 163.com) .

达 35 kV/mm[6]，这使得在同时需要散热性能和绝缘性能时，六方氮化硼比石墨烯更加具有优势。这些独特的性能使得六方氮化硼及其作为填料制备的聚合物复合材料被广泛应用于芯片散热，板桥封装等领域。

1　六方氮化硼纳米片层的制备

氮化硼纳米片（BNNS）的制备，主要包括“自下而上”的 CVD 法（化学气相沉积法）以及“自上而下”的 h-BN 片层的剥离。

1.1　自下而上制备 BNNS

Kim 等人[7]采用低压化学气相沉积方法在铂箔上生长高结晶单层氮化硼纳米片，以氨硼烷作为基板和前驱体制备出了面积为 $8\times25mm^2$ 的高结晶单层氮化硼纳米片，并采用基于电化学鼓泡的方法将生长的氮化硼纳米片从 Pt 箔转移到任意的衬底上，这可使得在此过程中没有消耗的铂箔被重复回收。所制备的单层氮化硼纳米片的紫外可见吸收光谱显示光学带隙为 6.06 eV，TEM 图像显示存在不同的 B 和 N 原子六方阵列，也表明了氮化硼纳米片的高度结晶性和单原子厚度。Nag 等人[8]使用硼酸与尿素在 900℃ 高温下反应制备纳米片层氮化硼，利用 AFM 图像表征发现，当硼酸/尿素混合摩尔比为 1∶12时，BN 的厚度可以达到 8-14 层。制备的少片层氮化硼可以使用路易斯碱溶解和功能化。Lei 等人[9]将三氧化二硼和盐酸胍的均匀混合物分别作为硼和氮源在管式炉中以 1100℃ 高温下，在 H_2/N_2（15 vol% H_2）气氛中制备纳米氮化硼，制备的氮化硼片层厚度约为 3 层左右，厚度约为 1.1nm。

1.2　自上而下制备 BNNS

由于原材料的浪费、昂贵的前驱体和需要专门设计的设备等因素，使得自下而上制备纳米氮化硼的实际应用相较于自下而上制备纳米氮化硼受限，目前，被广泛用于制备纳米氮化硼的方法主要是自上而下制备 BNNS。Wang 等人[10]通过将氮化硼晶体与生物分子（蛋白质、DNA 等）混合超声，生物分子可以与氮化硼晶体表面形成氢键或范德华力，从而在超声波的作用下将氮化硼晶体剥离成纳米片。该方法不需要使用有机溶剂或强酸碱等有害物质，具有环保的特点。Wang 等人[11]在氨水和异丙醇混合溶液中超声剥离氮化硼，获得了较大纵横比、较少缺陷和相对光滑表面的 BNNS，尺寸可达 8.3nm 左右，氨的使用可以实现氮化硼的有效剥离且不会对硼氮化物的二维结构造成重大损伤。Yan 等人[12]将氮化硼粉末与氢氧化钠混合，在 N_2 气氛下加热至 800℃，得到 BNNS 前驱体，然后将其与乙醇/水混合物（质量比为 1∶1）混合，并利用高压微射流设备产生的高剪切率的湍流流动，获得了纵横比达 1500 且低缺陷的 BNNS。该方案中利用高压微射流来制备 BNNS 具有环保高效的优势。

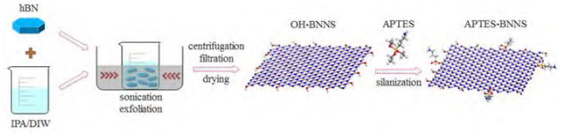

图 1　APTES-BNNS 制备工艺示意图[13]

Figure1 preparation of APTES-BNNS.[13]

此外，由于 BNNS 表面的官能团少，与聚合物复合时相容性差，因此，在化学剥离的基础上，许多研究人员在剥离 BNNS 的同时会对 BNNS 进行表面改性。如 Liu 等人[13]将氮化硼在异丙醇去离子水溶液中超声剥离，并使用（3-氨基丙基）三乙基硅烷（APTES）对羟基化的 BN 纳米片的功能进行表面改性（图 1），以增强其在环氧树脂中的分散性和界面兼容性。Wang 等人[14]利用糖（如葡萄糖、麦芽糖等）作为表面活性剂和氮化硼一起进行球磨并结合超声处理，使得氮化硼在不同程度上与糖类共价接枝，最终通过离心分离，得到的糖-g-BNNSs 具有优异的综合性能。Wu 等人[15]超声剥离 BNNSs 后，分别通过聚多巴胺（PDA）涂层进行非共价修饰（PDA-BNNSs）；通过硝酸（HNO_3）氧化进行基面羟基化（BOH-BNNSs）；通过球磨处理进行边缘羟基化（EOH-BNNSs），结果发现与其他非共价或共价键合的表面修饰方法相比，边缘羟基化虽然在改善 BNNSs 在聚合物基体中的分散性、界面相互作用和取向方面效果相当，但在提高击穿强度方面有着明显改善。

2　六方氮化硼纳米片层复合材料的制备

氮化硼纳米片作为改善聚合物基纳米复合材料导热性能的填料，其尺寸大小，二维取向，三维结构均会对复合材料的热传导性能产生影响，近年来，大量关于 BNNS 复合材料的研究报道在这些方面做出了贡献。

2.1 BNNS 尺寸的对导热率的影响

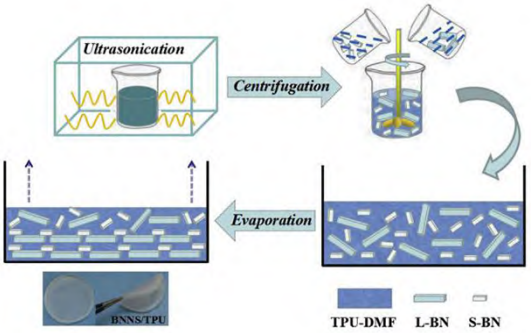

图 2 BNNS/TPU 纳米复合薄膜的合成工艺示意图[16]

Figure2 Schematic illustration for the synthesis processes of BNNS/TPU nanocomposite films.[16]

BNNS 作为导热填料，其尺寸大小会对复合材料的导热性能产生影响。Zhu 等人[16]采用超声波剥离制备得到的 BNNS 按照大小尺寸组成不同配比，制备得到 BNNS/TPU 纳米复合材料(图 2)用于电子元件的散热领域。结果表明在 10 wt% BNNS(S/L~1/9)/TPU 的配比下，复合材料的导热率最佳(14.7 W/mK)。Tanimoto 等人[17]采用五种不同等级的片状六方氮化硼(h-BN)和芳香族聚酰亚胺(PI)制备了一系列具有高热稳定性、高热扩散率的复合薄膜，研究发现当 h-BN/PI 薄膜填充大片状氮化硼时表现出更大的各向异性。该结果表明氮化硼填料的大纵横比可以减少界面数，从而减少声子散射，增加热传导的平均自由路径。Wu 等人[18]基于有效介质理论的理论分析模型，研究了六方氮化硼纳米片(h-BN)层数和尺寸对 h-BN/石蜡复合材料导热率的影响机理，实验结论得出为了获得较高的复合材料导热率，需要同时增加 h-BN 的层数和横向尺寸。Wang 等人[19]分析了 BN 形状，粒径对不同性能的影响。在相同形状的情况下，较小的 BN 粒径有利于提高复合材料的热稳定性和杨氏模量，而较大的粒径有利于提高导热率。此外，通过流变学结果表明，粒径较小的 BN 更有利于在熔体中形成网络结构。

2.2 BNNS 的二维取向对导热率的影响

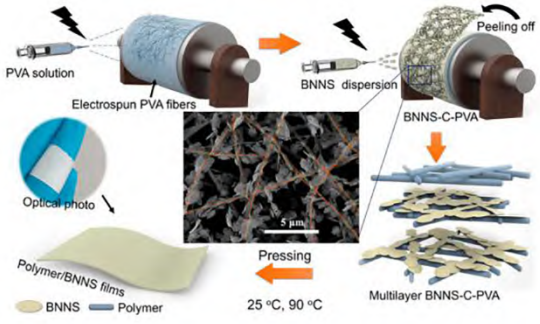

图 3 PVA/BNNS 纳米复合材料制备示意图[20]

Figure3 Schematic illustration of the preparation of PVA/BNNS composites.[20]

制备导热性能优异的复合材料的关键之一在于尽可能多地形成导热通路。BNNS 为二维片层材料，其沿平面方向的导热系数远远超过垂直于平面方向的导热系数，因此将其取向排列有利于提高复合材料的导热性能。Chen 等人[20]受千层饼结构和生产工艺的启发，通过构建多层 PVA/BNNS 纳米网络结构，将氮化硼纳米片(BNNSs)静电喷涂到静电纺聚乙烯醇(PVA)纳米纤维上(图 3)，形成重叠互连并沿着聚乙烯醇纳米纤维取向的 BNNS 热传导网络，所制备的 PVA/BNNS 纳米复合材料在 21.4 vol% BNNS 添加量下导热率可达 22.2 W/mK。Kuang 等人[21]将超声剥离的氮化硼纳米片分别与天然橡胶和硅橡胶混合，并利用双辊开炼机剪切力使 BNNSs 取向排列，最后利用硫化处理来固定取向结构。结果显示，当 BNNSs 超过 17.5vol%时，硅橡胶和天然橡胶复合材料的导热率均得到大幅改善，且 BNNSs 对硅橡胶复合材料的导热率提高更为显著，当 BNNSs 填充量约为 24.0 vol%时，BNNSs/SiR 复合材料的导热率达到了纯硅橡胶的 30 倍。Liu 等人[22]利用热压工艺，在 10 MPa，200℃，30s 的条件下，树脂沿着水平方向形成薄膜的过程中也实现了氮化硼的有效取向，同时热压工艺也促进了氮化硼与基体的互容性，制备得到的环氧树脂/氮化硼复合材料在平面方向上导热率显著提高，环氧树脂/氮化硼-40wt%薄膜，导热率为 3.85 W/mK，约为原始树脂(0.127 W/mK)的 30 倍。Tu 等人[23]结合化学物理双交联及拉伸取向法，获得了取向的纤维素纳米

纤维网络,该网络通过共价和氢键的相互作用诱导了边缘羟基化的 BNNS 的面内取向,后进一步应用空气干燥致密化工艺构建了紧密堆积结构,使得制备出的纤维素/氮化硼纳米片复合薄膜实现了高拉伸强度(226 MPa)和面内导热系数(20.41 W/mK)的优异性能。Yang 等人[24]采用球磨(BNNS/PVA-I)、定向冷冻干燥(BNNS/PVA-II)和静电纺丝技术(BNNS/PVA-III)制备了氮化硼纳米片/聚乙烯醇(BNNS/PVA)导热复合薄膜并进行了比较,实验结果其中采用静电纺丝和热压技术制备的复合材料,因 BNNS 沿 PVA 电纺丝纤维的方向进行定向排列,增加了导热路径的形成概率,制备的 BNNS/PVA-III(30 wt% BNNS)复合材料的在平面内的导热率达到 18.630 W/mK,相较于非取向的 BNNS/PVA-I 复合材料的导热率,提高了 3101.0% 。

2.3　BNNS 三维网络对导热率的影响

除了构建 BNNS 的二维取向的导热通路外,近年来的 BNNS 导热复合材料制备的热点是致力于构筑 BNNS 的三维导热网络以及降低界面热阻。

Lei 等人[25]通过重复层叠组装的方法将 BNNS 包裹在的三聚氰胺-甲醛树脂海绵(MS)骨架上获得三维氮化硼网络,而后将其完全浸泡在聚偏氟乙烯(PVDF)和 BNNS 的混合溶液中,采用真空干燥的方式获得了 BNNS@ MS/PVDF 复合材料,当 BNNS 含量约为 5 wt%时,BNNS@ MS/PVDF 的导热率增加到 1.43±0.2 W/mK,比未采用三维网络结构制备得到的 PVDF/BNNS 复合材料高出 51.1%。该方案不仅提高了复合材料的热导率,还保持了复合材料的弹性。

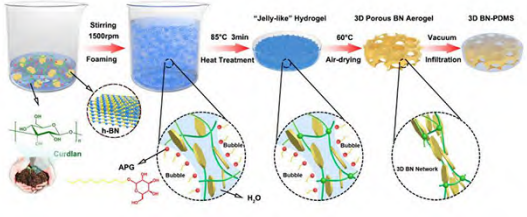

图 4　三维 BN-PDMS 复合材料的整体制作工艺示意图[26]

Figure 4 Schematic illustration of the overall fabrication procedure of 3D BN-PDMS composites.[26]

受到果冻的启发,Li 等人[26]采用发泡法,并使用肉质多糖用作凝胶剂来稳定和固定气泡模板,研究结果表明,在氮化硼含量为 25.4 wt%的条件下,含该三维 BN 导热网络的聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合材料的导热率达到 1.58 W/mK。此外,该复合材料的密度约为 1.27 g/cm^3,比导热率为 1.5 W/mK 的商用硅胶垫产品低 40%~50%。这种方案可以在常温下制备出具有高度互联结构的氮化硼网络以实现高效的导热和电绝缘性能。Han 等人[27]在环氧树脂基体中构建了类似珍珠的三维导热网络,利用双向冻结技术获得了高导热性的氮化硼/环氧复合材料,该复合材料在 15 vol%氮化硼负载下具有高导热性(6.07 W/mK),且具有优异的电阻率和热稳定性。

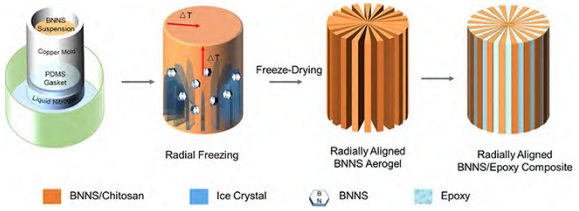

图 5　径向排列的 BNNS/环氧树脂复合材料的示意图[28]

Figure 5 Fabrication of the radially aligned BNNS/epoxy composite.[28]

Huang 等人[28]使用径向冷冻铸造法制备了径向取向的 3D 氮化硼纳米片(BNNS)/环氧树脂复合材料,通过在模具的径向和垂直方向上引入温度梯度,以冰晶作为模板,使得 BNNS 形成径向排列的 3D 网络结构,该 3D 网络结构被环氧树脂渗透后,制备出具有径向排列薄片结构的复合材料在平面方向和垂直平面方向上均呈现出高导热性。结果显示,在氮化硼 15vol%填充量的情况下,复合材料的导热率在平面内为 3.87 W/mK,在垂直氮化硼平面方向上为 4.02 W/mK。采用模板法制备三维网络导热网络的优势在于机理简单,并能够有效控制导热填料网络的形成。Chi 等人[29]利用水性发泡技术结合冷冻干燥工艺,使用食品级材料 curdlan 作为骨架,构建了三维多孔氮化硼导热网络,而后将环氧树脂加入制备了 3D-氮化硼/环氧树脂复合材料,其导热率在氮化硼含量为 29.67 wt%时达 1.63W/mK,比纯 EP(0.18W/mK)高出 9.1 倍。发泡法成本较低,但相较于模板法而言,会更难对导热网络的形成进行控制。Wang 等人[30]利用植酸辅助球磨氮化硼,将植酸的多羟基引入到 BNNS 中制得 f-BNNS(功能

化的氮化硼纳米片，并采用 KH560(硅烷偶联剂)改善 f-BNNS 与环氧树脂(EP)的相容性。最后，采用乳液聚合、粘结剂自组装和热压工艺制备了具有 f-BNNS@ KH560 框架的 EP 复合材料，且通过实验发现 EP 与水的比例越小框架结构更复杂，传热路径更多，当该比例为 1/40 时，所得到的复合材料在 30 wt%的负荷下具有更好的导热性能(2.4 W/mK)。

2 结论

在过去的几十年里，BNNS 纳米填料由于其优异的力学性能、导热性、结构稳定性和绝缘性，其复合材料在微电子领域发挥出巨大的优势，本文综述了 BNNS 及其复合材料的研究进展，BNNS 的加入且形成了有效的导热网络，为聚合物基体带来了大幅的导热率的提高，以氮化硼/环氧树脂复合材料为例，图 6 比较总结了本文涉及的氮化硼/环氧树脂复合材料的导热率和纯环氧树脂的导热率情况，课可见，在聚合物基体中加入 BNNS 填料是行之有效的改善聚合物导热性能的方法。

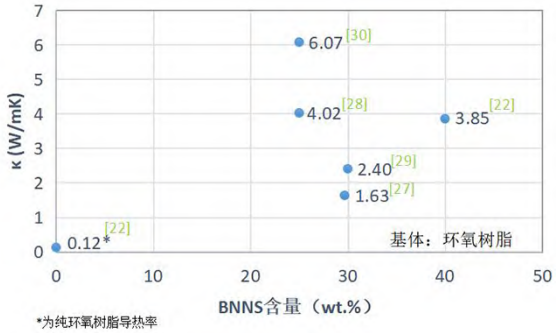

图 6 BNNS/环氧树脂复合材料的导热率比较

Figure 6 Thermal conductivity values for composites of BNNS/EP

但开发高性能高导热率的 BNNS-聚合物导热绝缘复合材料仍存在许多挑战，事实上，材料的热传导是一个复杂的过程，不仅仅取决于填料的尺寸，形貌，结晶度，均匀分散，排列取向等，也与填料和聚合物的相容性，加工工艺水平等很多因素相关，BNNS 聚合物基复合材料的研究还有许多创新和挑战在未来等着科研者们探索的步伐，如：(1) 开发出低成本、可扩量产的高质量 BN 纳米片及其聚合物纳米复合材料，以使得其能够应用于工业中，而不仅仅存在于实验室的研究数据里。(2) BNNS 填料与聚合物界的化学相容性研究也是获得高导热的关键。(3) BNNS 填料在聚合物中的均匀分散性研究，BNNS 能够均匀分散在聚合物基体中，但又必须相互连接形成网络从而实现最小化的界面热阻，并促进声子传导，提高导热率。

参考文献:

[1] Arden L. Moore, Li Shi. Emerging Challenges and Materials forThermal Management of Electronics [J]. Mater. Today 2014, 17: 163-174.

[2] Congliang Huang, Xin Qian, Ronggui Yang. Thermal Conductivity of Polymers and Polymer Nanocomposites [J]. Mater. Sci. Eng., R, 2018, 132: 1-22.

[3] Kim K K, Kim S M, Lee Y H. A new horizon for hexagonal boron nitride film [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2014, 64(10): 1605-1616.

[4] S. N. Perevislov. Structure, properties, and applications of graphite-like hexagonal boron nitride [J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2019, 60(3): 291-295.

[5] Tao Ouyang, Yuanping Chen, Yuee Xie, et al. Thermal Transport in Hexagonal Boron Nitride Nanoribbons [J]. Nanotechnology, 2010, 21(24): 245701.

[6] Ki Kang Kim, Allen Hsu, Xiaoting Jia, et al. Synthesis and Characterization of Hexagonal Boron Nitride Film as a Dielectric Layer for Graphene Devices [J]. ACS Nano, 2012, 6(10): 8583-8590.

[7] Gwangwoo Kim, Minsu Kim, Chohee Hyun, et al. Growth of High-Crystalline, Single-Layer Hexagonal Boron Nitride on Recyclable Platinum Foil [J]. ACS Nano, 2016, 10(12): 11156-11162.

[8] Angshuman Nag, Kalyan Raidongia, Kailash P. S. S. Hembram, et al. Graphene Analogues of BN: Novel Synthesis and Properties [J]. ACS Nano, 2010, 4(3): 1539-1544.

[9] Weiwei Lei, David Portehault, Dan Liu, et al. Porous boron nitride nanosheets for effective water cleaning [J]. Nat. Commun, 2013, 4, 1777.

[10] Zhi-Guo Wang, Wei Liu, Ya-Hui Liu, et al. Highly thermal conductive, anisotropically heat-transferred, mechanically flexible composite film by assembly of boron nitride nanosheets for thermal management [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 180, 1(1): 107569.

[11] Zhengdong Wang, a Paul Priego, a Mohammed J. Meziani, et al. Dispersion of High-Quality Boron Nitride Nanosheets in Polyethylene for Nanocomposites of Superior Thermal Transport Properties [J]. Nanoscale Adv, 2020, 2(6):

2507-2513.

[12] Qingwei Yan, Wen Dai, Jingyao Gao, et al. Ultrahigh-Aspect-Ratio Boron Nitride Nanosheets Leading to Superhigh In-Plane Thermal Conductivity of Foldable Heat Spreader [J]. ACS Nano, 2021, 15: 6489-6498.

[13] Zhan Liu, Junhui Li, Xiaohe Liu. Novel Functionalized BN Nanosheets/Epoxy Composites with Advanced Thermal Conductivity and Mechanical Properties [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 6503-6515.

[14] Zhi-Guo Wang, Xin Wei, Meng-Han Bai, et al. Green Production of Covalently Functionalized Boron Nitride Nanosheets via Saccharide-Assisted Mechanochemical Exfoliation [J]. ACS Sustainable Chem. Eng, 2021, 9: 11155-11162.

[15] Lingyu Wu, Kai Wu, Chuxin Lei. Surface Modifications of Boron Nitride Nanosheets for Poly(vinylidene Fluoride) Based Film Capacitor: Artful Virtue of Edge-Hydroxylation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 00, 1-3.

[16] Zezhou Zhu, Chaowei Li, Songfeng E, et al. Enhanced thermal conductivity of polyurethane composites via engineering small/large sizes interconnected boron nitride nanosheets [J]. Composites Science and Technology, 2019, 170: 93-100.

[17] Mizuka Tanimoto, Toshitaka Yamagata, Kenji Miyata, et al. Anisotropic Thermal Diffffusivity of Hexagonal Boron Nitride-Filled Polyimide Films: Effffects of Filler Particle Size, Aggregation, Orientation, and Polymer Chain Rigidity [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2013, 5(10): 4374-4382.

[18] Shuying Wu, Qiyan Chen, Dandan Chen, et al. Multiscale study of thermal conductivity of boron nitride nanosheets/paraffin thermal energy storage materials [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102931.

[19] Yiding Wang, Wenrui Zhang, Mingjie Feng, et al. The influence of boron nitride shape and size on thermal conductivity, rheological and passive cooling properties of polyethylene composites [J]. Composites Part A, 2022, 161(10): 107117.

[20] Jin Chen, Han Wei, Hua Bao, et al. Millefeuille-Inspired Thermally Conductive Polymer Nanocomposites with Overlapping BN Nanosheets for Thermal Management Applications. [J] ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11(34): 31402-31410.

[21] Zhiqiao Kuang, Yulong Chen, Yonglai Lu, et al. Fabrication of highly oriented hexagonal boron nitride nanosheet/elastomer nanocomposites with high thermal conductivity [J]. Small, 2015; 11: 1655-9.

[22] Jingkai Liu, Haoyang Feng, Jinyue Dai, et al. A Full-component recyclable Epoxy/BN thermal interface material with anisotropy high thermal conductivity and interface adaptability [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143963.

[23] Hu Tu, Kang Xie, Xinghuan Lin, et al. Superior strength and highly thermoconductive cellulose/ boron nitride film by stretch-induced alignment [J]. Journal of Materials Chemistry, 2021, 9: 10304.

[24] Xutong Yang, Yongqiang Guo, Yixin Han, et al. Significant improvement of thermal conductivities for BNNS/PVA composite films via electrospinning followed by hot-pressing technology [J]. Composites Part B, 2019, 175: 107070.

[25] Bowen Lei, Shuxin Bai, Gengyuan Liang, et al. Three-dimensional boron nitride reinforced thermal conductive composites with high elasticity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166046.

[26] Jingchao Li, Fanzhu Li, Xiuying Zhao, et al. Jelly-Inspired Construction of the Three-Dimensional Interconnected BN Network for Lightweight, Thermally Conductive, and Electrically Insulating Rubber Composites [J]. ACS Appl. Electron. Mater., 2020, 2(6): 1661-1669.

[27] Jingkai Han, Gaolai Du, Weiwei Gao, at al. An Anisotropically High Thermal Conductive Boron Nitride/Epoxy Composite Based on Nacre-Mimetic 3D Network [J]. Adv. Funct. Mater., 2019, 29(13): 1900412.

[28] Taoqing Huang, Yongwei Li, Min Chen, et al. Bi-directional high thermal conductive epoxy composites with radially aligned boron nitride nanosheets lamellae [J]. Composites Science and Technology, 2020, 198: 108322.

[29] Qingguo Chi, Xinle Zhang, Xubin Wang, et al. High thermal conductivity of epoxy-based composites utilizing 3D porousboron nitride framework [J]. Composites Communications, 2022, 33: 101195.

[30] Wei Wang, Yuan Liu, Qi Wang. Adjustable boron nitride segregated framework in epoxy resin for high performance thermal management and fame retardant applications [J]. Composites Science and Technology, 2023, 242: 110161.