

基于六方氮化硼纳米片导热复合材料的研究进展

杨雪薇^{1,2}, 李 睿^{1,2}, 赵 宁¹, 徐 坚¹

(1. 中国科学院化学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:随着微电子行业的不断发展,高性能导热材料引起了人们的广泛关注。六方氮化硼(h-BN)是制备电绝缘、高导热复合材料的重要原料之一,而类似石墨烯结构的六方氮化硼纳米片(BNNS)具有比 h-BN 更加优异的性能。本文综述了 BNNS 的制备方法、表面修饰以及其聚合物基导热复合材料类型,并展望了基于 BNNS 导热复合材料的发展方向。

关键词:六方氮化硼纳米片; 导热; 复合材料; 表面修饰

引言

随着通信技术与电子科技等行业的迅猛发展,散热问题在集成电子器件、发光二极管、能量转换和存储、航空航天和军事等领域逐渐凸显^[3~5],高性能导热材料的也越来越引起人们的关注^[1,2]。为了满足更多领域的需求,材料在具备高导热能力的同时,往往还要求兼备易加工、电绝缘性以及机械性良好等特性^[6]。金属及碳材料具备很好的导热性,但由于其导热载体为电子,往往不能达到某些高精尖领域的使用要求。因为较高导电性往往容易使器件短路。此外,金属除了具备较差的电绝缘性能外,还具有较大的比重,与轻薄化发展趋势相悖。而部分以声子与光子为导热载体的金属氧化物及陶瓷也能具有相对高的导热能力,但是同样存在比重大及难加工等问题。高分子来源广泛,种类繁多,可根据具体使用要求选取化学稳定性、耐腐蚀性、耐高低温性能、溶解性能、机械强度的不同的高分子。然而,虽绝大多数聚合物具备良好的机械性、加工性及电绝缘等优良性能^[7],但由于其导热载流子主要是声子^[8],热导率通常很差(不超过 $0.5 \text{ W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)^[9]。因此本征高分子几乎不能用于散热领域。

复合材料不仅保持了各组分的性能优点,而且通过组分间的协同补强作用可以获得单一组成材料所不能达到的综合性能^[10]。因此,聚合物基导热材料的制备是获取各项性能优异的导热材料行之有效思路之一^[11~14]。按导电能力的不同,导热复合材料的填料可分为导电填料(如金属、碳材料等)与绝缘填料(如大部分陶瓷材料、金属氧化物等),课根据具体使用要求合理选取。导热填料与聚合物基体以分散复合、表面复合、层积复合和梯度复合等方式结合在一起,最终形成密集的导热通路,得到导热性能优异的复合材料。其中,聚合物基导热材料的热导率几乎完全来自于导热填料,但是为了提高材料整体的导热性能,选择取向性好、具备刚性结构、液晶单元、分子与分子之间能产生 π - π 作用、氢键、主客体作用等类型的高分子也是必要的。

理论上,填料填充率越高,材料整体的导热性能越好(如图 1 所示)^[12],通常情况下填充量高于 50%(vol)时,热导率才能明显提升。然而,如此高的填料添加量往往会导致材料易受热开裂和抗冲抗胀能力减弱等缺陷^[15],这将在很大程度上限制材料的应用。如何在低填料负载下提高材料的导热性仍具有极大的挑战。

BNNS 具有高介电强度^[16],低热膨胀系数,高热稳定性和高化学稳定性等诸多优异性质^[17,18]。单层

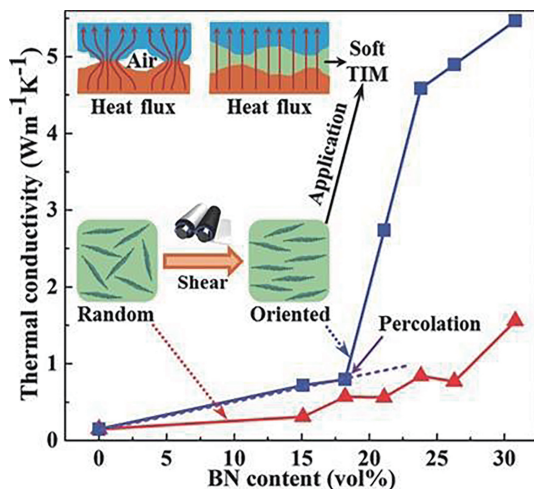


图1 热界面材料的热导率随 h-BN 填充量变化曲线^[12]

Figure 1 Thermal conductivity cures of thermal interface materials in different h-BN content^[12]

或少层 BNNS 的热导率是 h-BN 的数倍^[19],其面内热导率最高可达 $6000 \text{ W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ^[20]。使用高品质纳米级 BNNS 代替微米级 h-BN 粉体能有效降低填充量,解决高添加量带来的力学性能变差的问题。如 Li 等^[8]使用少层 BNNS 与聚酰胺 6(PA6)复合,与 BN/PA6 复合材料相比,BNNS/PA6 复合材料表现出优异的机械和导热性能。当填料含量为 40%(wt)时,BNNS/PA6 复合材料的热导率可达 $2.496 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,比相同填料负载浓度下 BN/PA6 复合材料的热导率提高了 21.8%。另外,PA6/BNNS 复合材料的拉伸强度高于纯 PA6,在填料质量分数为 30%时增加 6.23%^[21]。与 h-BN 相比,BNNS 具有更少的声子散射与更高的横纵比,是一种更为理想的导热填料。

基于聚合物基氮化硼纳米复合材料的发展现状,本文对 BNNS 的自上而下制备方法、表界面修饰、聚合物基氮化硼纳米导热复合材料制备方法的进行了总结,并对其未来发展进行了展望。

1 BNNS 的制备

BNNS 主要通过“自下而上”的化学气相沉积法、氮化硼纳米管解离以及“自上而下”的从 h-BN 微米片剥离等方法获得。由于散装氮化硼微米粉末易得且成本相对较低,目前已经实现工业生产。BNNS 制备成本高且实验难度大,很难实现产业化生产。以 h-BN 作为起始材料,自上而下剥离 h-BN 粉末被认为是相对简单和经济的方法。相比于微米级 h-BN,剥离后 BNNS 最显著的效果是增加了其可接触表面积,更有利于实现与其它组分的复合。其次,BNNS 能容易均匀分散于聚合物基体中,复合材料的强度和刚度随着平面填料的厚度减小而增加^[22]。另外,由于二维材料的电子被限制于 2D 波函数中改变了电子能带结构,使其电子特性产生明显变化,能表现出极高的载流子迁移率等其它特性^[16],使得最终得到的复合材料热导率得到明显的提升。

自上而下的 BNNS 制备手段又可分为以下五大类:(1)机械剥离:如微机械(透明胶带法)法^[16],球磨法^[23],高速剪切法^[24]等。机械剥离法是最早应用于制备二维材料的方法,其主要是通过材料表面上摩擦实现。这种方法也是高质量二维材料获取的途径之一。但此方法目前的产量仍不具备规模化生产的可能性;(2)液相剥离:主要包括氧化法、插层法、离子交换法与超声法^[25]。该类方法能够有效获取 BNNS,但是产率依然很低;(3)物理/化学表面改性辅助剥离(如图 2 所示)^[26,27]。该剥离方法所需的能量更低,能进一步降低成本,是目前较为通用的方法;(4)多步法组合剥离。如 Kim 等^[28]先在管式炉结烧使 BN 表面和边缘修饰羟基,再进行超声剥离;Mariko 等^[29]通过离子交换随后进行搅拌或回流的方法成功剥离了层状双金属氢氧化物;(5)其它新兴的剥离手段。例如,离子液体法^[30,31]、超临界流体法^[32]、四

极场辅助法^[33]、高温-冰浴法^[32]、蒸气处理法^[34]和水热反应等等。

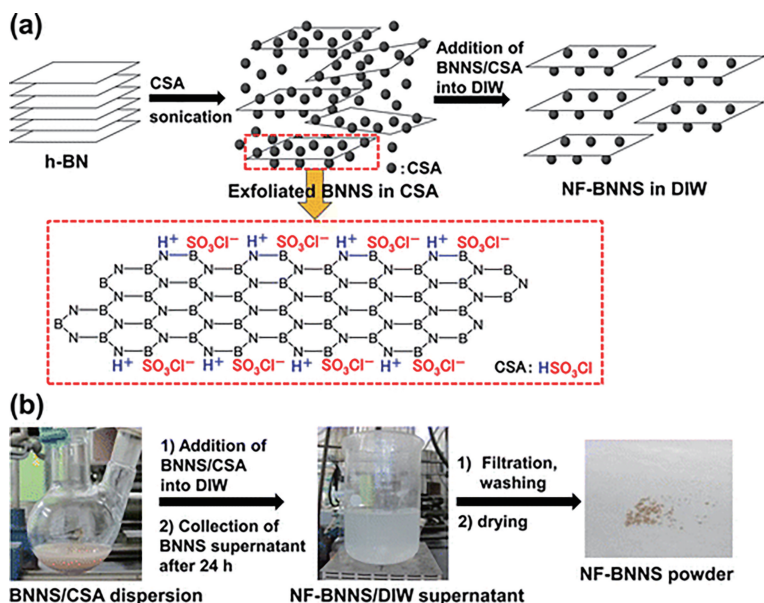


图 2 氯磺酸(CSA)辅助 h-BN 剥离为 NF-BNNS 的示意图^[27]

Figure 2 Schematic of CSA-promoted exfoliation of h-BN into NF-BNNS^[27]

与已实现大规模生产的石墨烯相比, BNNS 的制备方法相当有限, 剥离时长往往需要长达数十个小时, 产量也相当有限。所以 BNNS 的制备方法及其应用还有很大的空间。

2 表面修饰方法

BNNS 化学性质稳定, 表面几乎无活性官能团, 不易得到界面热阻低的聚合物复合材料。因此, 六方氮化硼的表面修饰具有重要意义。目前较为成熟的 BNNS 功能化方法可以大致分为非共价键法、路易斯酸碱(离子)法和共价键法^[35]。使用合理的表面改性方法能改善 BNNS 与聚合物基体间的浸润性^[36], 提高复合材料的稳定性及降低聚合物与填料间的界面热阻^[37], 提高宏观热导率^[38]。导热填料与聚合物基体之间相容性以及表面张力等各方面的差异使得导热填料在聚合物基体中容易团聚, 制造得到的材料易产生微裂纹^[39], 不仅影响力学性能, 还会降低材料的导热性。被修饰的 BNNS 与聚合物均匀复合, 有效改善上述问题。此外, 在剥离环节中, 对 h-BN 进行表面修饰有助于提高分散能力、辅助剥离^[40], 还可以防止剥离出来的 BNNS 由于范德华力、极大的表面积和表面张力等再次团聚^[41]。

3 聚合物基氮化硼纳米导热复合材料制备方法

聚合物基氮化硼纳米导热复合材料初期的制备方法主要是沿用传统的复合材料加工方法, 如熔融共混^[42]、溶液混合^[43]、塑炼、混炼和原位聚合等^[44]。传统技术具有稳定性好、易操作性、生产成本低、可预测等优点, 而且能够快速得到一些导热性能远高于高分子本征导热性能的材料。例如, Kuang 等^[43]对硅橡胶和 BNNS 塑炼, 通过强剪切作用力获得了高取向的 BNNS/硅橡胶复合材料。结果表明在 23%(vol) BNNS 负载下复合材料的导热率达 $4\text{ W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。Liu 等^[45]用于溶液流延法制备了聚甲基丙烯酸甲酯/氮化硼纳米片复合材料, 发现 BNNS 的引入提高了材料的导热系数和电容性能, 复合材料在 200mV 的电场下具有超过双轴取向聚丙烯 210% 的放电能量密度, 97% 的充放电效率。

通过简单复合所得到的导热材料已远远不能满足行业的需求, 一些新型技术逐渐面世。双逾渗法是以两种或者两种以上的高分子复合材料作为导热复合材料基体, 利用不同聚合物的差异在体系中产生微

相分离,而填料会选择性分布于某一高分子或分布于两相界面来构建一定的导热通路,从而有效提高导热性能的方法^[46]。Min 通过简单的旋涂方法将 BNNS 涂布于聚酰亚胺(PI)基底得到透明度与纯 PI 膜几乎相同但导热性、热稳定性、摩擦稳定性和柔韧性均优于原始材料的 BNNS/PI 复合膜^[47]。Jin 等^[48]报道了一种通过静电纺丝制备的聚乙烯醇 PVA 与 BNNS 的复合纤维膜。之后通过轧制复合纤维膜以形成圆柱体并在真空辅助下浸渍聚二甲基硅氧烷得到了多孔圆柱体柔性聚合物纳米复合材料。在 15.6%(vol)的 BNNS 负载下,纳米复合材料不仅显示超高热导率,而且还显示出优异的电绝缘性。

近年来的制备方法主要是致力于构筑三维网络以及降低界面热阻。其中原位聚合法、冰模板法、自组装法、减压抽滤法^[49]是几种较为热门的构筑三维网络的方法。这几种方法简单高效、得到的导热材料也比较稳定^[50,51]。如 Lee 等^[52]采用溶剂开环法将聚己内酯接枝到自由氧化修饰的 BNNS 上,当 BNNS 的负载量为 20%(wt)时,导热率为 $2\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。Zeng 等^[53]首先报道了使用冰模板方法构建氮化硼纳米片三维网络,然后与环氧树脂复合。在低填料负载(9.29%(vol))的情况下,得到了较高热导率($2.85\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$),较低热膨胀系数($24\sim 32\text{ppm}\cdot\text{K}^{-1}$)和较高玻璃化转变温度(T_g)的复合材料。Wang 等^[54]利用自组装得到 BNNS/PS 复合材料,然后利用冷压取向和热压取向最终制备出高导热系数($\geq 8\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)、低填充量($\leq 13.4\%(\text{vol})$),封装密度好、耐高低温、力学性能好且价格低廉的高性能导热封装材料。这种简便的方法为设计和制造高导热性复合材料提供了新的思路(见图 3)。Jin 等^[55]用自组装方法通过溶胶-凝胶和冷冻干燥等手段将 BNNS 负载到纤维素三维骨架上;然后浸渍环氧树脂从而制备高导热性复合材料。在 9.6%(vol)负载量下热导率达到 $3.13\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,并且可以通过调整交联 3D 网络中 BNNS 的负载量来调整热导率。同时此复合材料具有高度绝缘性和较高的玻璃化转变温度(T_g),在导热应用,特别是电子封装和电气绝缘材料,表现出强大的需求潜力^[56]。

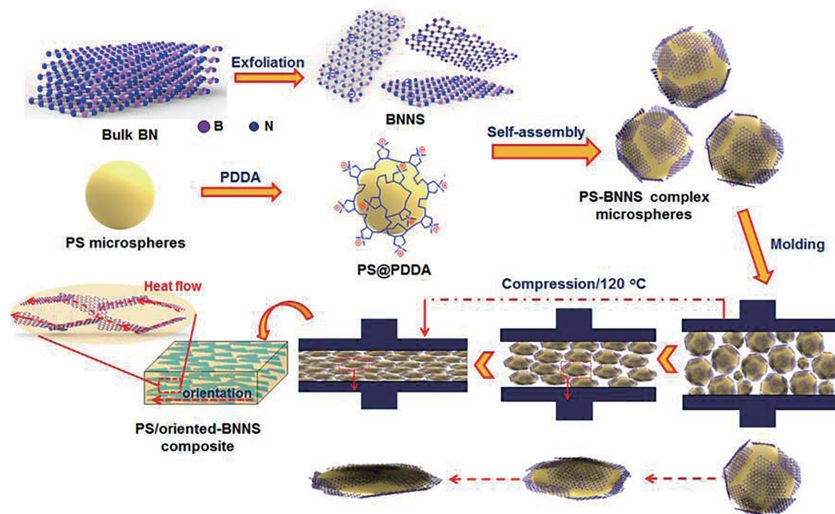


图 3 BNNS@PS 制备过程以及 BNNS 在复合材料中取向^[54]

Figure 3 Schematic illustration of the formation mechanism of ps-bnns complex microspheres and ps/oriented bnns composites^[54]

4 聚合物基氮化硼纳米导热复合材料类型

4.1 导热薄膜

小型化、集成化及多功能化发展趋势不可避免会面临散热困难问题。导热材料不仅能解决散热问题,还能与设备元件轻、薄、可折叠等发展趋势相匹配。聚合物基氮化硼纳米薄膜的导热能力强且密度较低(仅为铜的四分之一),在其它方面也有较大的突破。如 Wu 等^[57]发现功能化 BNNS/纤维素纳米管薄

膜的面内热导率随着厚度的减小而急剧增加,在厚度 $30\mu\text{m}$ 处达到 $30.25\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。受天然珍珠母的界面和取向的启发,Yao 等^[58]通过简单的真空辅助过滤工艺得到热导率达 $29.8\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 的 BNNS 与氧化石墨烯(GO)复合导热膜(如图 4 所示)。这种制造导热复合材料的方法为高性能材料的设计和制造提供了思路,这在下一代便携式电子产品中具有较好的应用前景。

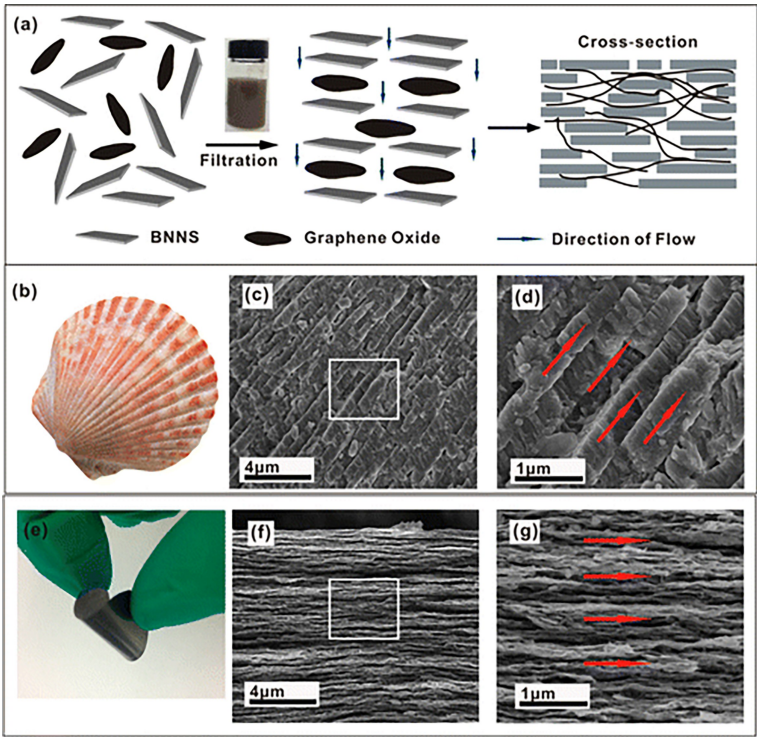


图 4 (a)通过真空辅助抽滤法制备得到 BNNS-GO 纸及 BNNS-GO 纸的结构^[58]

Figure 4 (a) Preparation process of bioinspired BNNS-GO paper through vacuum-assisted filtration process and the structure of BNNS-GO paper^[58]

4.2 导热橡胶(垫片)

在电子电器、军工及航空航天等领域精密要求导热材料还需具备缓冲、减震吸音、易安装可重复使用等特性^[59],因而制备低填料负载量的导热橡胶复合导热材料非常重要。Wu 等^[60]用双辊开炼机将乙醇/水/BNNS 浆料与苯乙烯-丁二烯橡胶配混形成 BNNS/橡胶复合材料,通过引入含硫硅烷改善了 BNNS 与橡胶的界面。结果表明,当掺入 10.5%(vol) Si-BNNS 时,材料不仅压缩性好,其复合材料的热导率也提高了 253%。

4.3 导热膏(硅脂)

导热膏是市面上应用最广泛的一种导热材料,膏状形式的自适应性较强,与各个基材均具有较好的润湿性,可以有效的填充高功率的发热元器件与散热器之间的各种缝隙。其耐高温、耐老化和防水特性良好,成本低,商业价值极高。但是长时间极限温度下使用容易造成硅油泄露,从而丧失表面润湿性,导致导热能力失效,甚至会引发器件的短路。

4.4 相变材料

相变材料的相变过程能将潜热进行贮存和释放,有效防止因热量的聚集和散失而发生的骤冷和过热现象,减缓器件的老化速率,石蜡基复合材料是相变材料中应用最广的一类,其中 BNNS/石蜡复合材料具有高导热性、价廉、无毒、高相变焓等优点。Qian 等^[61]通过将石蜡渗透到具有连续导热路径的 h-BN 多孔骨架中来制造相变材料。该相变材料的 h-BN 质量含量为 18%(wt);其熔化潜热为 $(165.4\pm1.7)\text{J/g}$;导

热率高达 $0.85\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 。与纯石蜡相比,热导率增加 600%,且是常规石蜡和 h-BN 混合制备得到的复合材料的两倍以上。此外,h-BN 骨架的毛细作用赋予该相变材料在熔融状态下的形态稳定性^[62],但目前仍存在能量转化效率低和容易泄漏等缺点。

4.5 导热气凝胶/泡沫骨架

气凝胶由于连续的骨架结构、高孔隙率及低孔隙尺寸而具备一系列独特的物理化学性质,其连续的导热骨架为低填料填充量下实现高热导率提供了新思路。Chen 等^[53]报道了一种制备环氧树脂增强 BNNS/3D 纤维素骨架气凝胶的方法,并成功制备出 9.6%(vol) BNNS 负载体积下热导率为 $3.13\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ 的环氧纳米复合材料。泡沫(如三聚氰胺泡沫,聚氨酯泡沫)因具有低密度和超高孔隙率已被广泛作为柔性电极材料和水处理材料。Wang 等^[63]用层层自组装的方法制造了三维 BNNS 包裹的三聚氰胺泡沫。灌注环氧后,在 BNNS 负载量为 1.1%(vol)时复合材料的热导率提高了 233%。

4.6 其它导热材料

除上述聚合物基氮化硼纳米导热复合材料类型外,基于 BNNS 的导热胶黏剂^[64]、导热涂料^[65]、导热硅胶布和导热泥等因也具有优异的导热性,对解决 5G 散热问题同样具有重要价值。

5 结语及展望

受益于半导体、显示面板、PCB 产业蓬勃发展的趋势,导热材料也随之进入了高速发展期。在各类电子设备小型化、大功率、多功能的趋势下,设备的散热能力成为衡量其好坏的重要指标之一。从整体来看,聚合物基氮化硼纳米复合材料的制备越发趋于成熟,发展也越来越多元化及多功能化。但是由于六方氮化硼的制备方法仅适合少量制备,昂贵的价格和低产量,聚合物/氮化硼纳米片复合材料的很难大规模生产。如何提高 BNNS 产率,实现规模化是解决氮化硼类导热材料进入实用阶段的关键。

致谢 感谢国家重点研发计划(2018YFB0406801),深圳市科创委项目(JSGG20170824112840518)的支持。

参考文献:

- [1] Suh D, Moon C M, Kim D, et al. *Mater Adv Mater*, 2016, 28(33): 7220~7227.
- [2] Wang F, Zeng X, Yao Y, et al. *Sci Rep*, 2016, 6(9): 19394.
- [3] Zeng X, Sun J, Yao Y, et al. *ACS Nano*, 2017, 11(5): 5167~5178.
- [4] Zhao B, Jiang L, Zeng X, et al. *J Mater Chem A*, 2016, 4(38): 14595~14604.
- [5] Li Q, Chen L, Gadinski M R, et al. *Nature*, 2015, 523(7562): 576~579.
- [6] Cho E C, Huang J H, Li C P, et al. *Carbon*, 2016, 102: 66~73.
- [7] Chu B, Zhou X, Ren K, et al. *Science*, 2006, 313(5785): 334~336.
- [8] Li S, et al. *High Perform Polym*, 2017, 29(3): 315~327.
- [9] Huang X, Zhi C, Jiang P, et al. *Adv Funct Mater*, 2012, 23(14): 1824~1831.
- [10] Shtein M, Nadiv R, Buzaglo M, et al. *Chem Mater*, 2015, 27(6): 2100~2106.
- [11] Li Q, Zhang G, Liu F, et al. *Energy Environ Sci*, 2015, 8(3): 922~931.
- [12] Kuang Z, Chen Y, Lu Y, et al. *Small*, 2015, 11(14): 1655~1659.
- [13] Burger N, Laachachi A, Ferriol M, et al. *Progrin Poly Sci*, 2016, 61: 1~28.
- [14] Zhao H, Yue Y, Zhang Y, et al. *Adv Mater*, 2016, 28(10): 2037~2042.
- [15] Zhang Y F, Han D, Zhao Y H, et al. *Carbon*, 2016, 109: 552~557.
- [16] Geim A K. *Science*, 2009, 324(5934): 1530~1534.
- [17] Young A F, Dean C R, Meric I, et al. *Phys Rev B Condens Matter*, 2012, 85(23): 5826~5831.
- [18] Pham T, Goldstein A P, Lewicki J P, et al. *Nanoscale*, 2015, 7(23): 10449~10458.
- [19] Xiao F, Naficy S, Casillas G, et al. *Adv Mater*, 2015, 27(44): 7247~7247.
- [20] Jo I, Pettes M T, Kim J, et al. *Nano Lett*, 2013, 13(2): 550~554.
- [21] Nicolosi V, Chhowalla M, Kanatzidis M G, et al. *Science*, 2013, 340(6139): 1420.

- [22] May P, Khan U, O'Neill A, et al. J Mater Chem, 2011, 22(4): 1278~1282.
- [23] Damm C, Körner J, Peukert W. J Nanopart Res, 2013, 15(4): 1561.
- [24] Liu J, Kuttly R G, Zheng Q, et al. Small, 2016, 13(2): 1602456.
- [25] Ye H, Lu T, Xu C, et al. Nanotechnol, 2018, 29(9): 095702.
- [26] Cai W, Hong N, Feng X, et al. Chem Eng J, 2017, 330: 309~321.
- [27] Morishita, T, Okamoto H. ACS Appl Mater Interfaces, 2016, 8(40): 27064~27073.
- [28] Kim K, Kim J. Compos Part B Eng, 2018,140: 9~15.
- [29] Adachi~Pagano M, et al. Chem Commun, 2000(1): 91~92.
- [30] Ravula S, Baker S N, Kamath G, et al. Nanoscale, 2015, 7(10): 4338~4353.
- [31] Morishita T, Okamoto H, Katagiri Y, et al. Chem Commun, 2015, 51(60): 12068~12071.
- [32] Thangasamy P, Sathish M. Cryst Eng Comm, 2015, 17(31): 5895~5899.
- [33] Lu H L,Rong M Z,Zhang M Q. Nanotechnol, 2018, 29(12): 12LT01.
- [34] Xiao F, Naficy S, Casillas G, et al. Adv Mater, 2015, 27(44): 7247~7247.
- [35] Lin Y, Connell J W. Nanoscale, 2012, 4(22): 6908~6939.
- [36] Dongju L, Sung H S, Jaewon H, et al. Small, 2013, 9(15): 2602~2610.
- [37] Hou J, Li G, Yang N, et al. RSC Adv, 2014, 4(83): 44282~44290.
- [38] Wu X, Yang Z, Kuang W, et al. Compos Part A Appl Sci Manufact, 2017, 94: 77~85.
- [39] Abadi R, Uma R P, Izadifar M, et al. Comput Mater Sci, 2017, 131: 86~99.
- [40] Shen H, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(10): 5701~5708.
- [41] Mansukhani N D, Guiney L M, Kim P J, et al. Small, 2016, 12(3): 294.
- [42] Xie S, Istrate O M, May P, et al. Nanoscale, 2015, 7(10): 4443~4450.
- [43] Kuang Z, Chen Y, Lu Y, et al. Small, 2015, 11(14): 1655.
- [44] Huang X, Wang S, Zhu M, et al. Nanotechnol, 2015, 26(1): 015705.
- [45] Liu F, Li Q, Li Z, et al. Compos Sci Technol, 2017, 142: 139~144.
- [46] Meincke O, Kaempfer D, Weickmann H, et al. Polymer, 2004, 45(3): 739~748.
- [47] Min Y J, Kang K H, Kim D E. Nano Res, 11(5): 2366~2378.
- [48] Chen J, Huang X, Sun B, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(36): 30909.
- [49] Li P, et al. J Mater Sci, 2018, 53(6): 4189~4198.
- [50] Li Q, et al. Nature, 2016, 536(7614): 112.
- [51] Golberg D, Bando Y, Huang Y, et al. ACS Nano, 2010,4(6): 2979.
- [52] Lee J, Jung H, Yu S, et al. Chem An Asian J, 2016, 11(13): 1921.
- [53] Zeng X, et al. Small, 2015, 11(46): 6205~6213.
- [54] Wang X, Wu P. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(23): 19934~19944.
- [55] Chen J, Huang X, Zhu Y, et al. Adv Funct Mater, 2017, 27(5): 1604754.
- [56] Moore A L, Shi L. Mater Today, 2014, 17: 163~174.
- [57] Kai W, Fang J, Ma J, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(35): 30035.
- [58] Yao Y, Zeng X, Wang F, et al. Chem Mater, 2016, 80(10): 1357~1359.
- [59] Hu J, Yun H, Yao Y, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9(15): 13544~13553.
- [60] Wu X, Liu H, Tang Z, et al. Compos Sci Technol, 2016, 123: 179~186.
- [61] Shen H, Cai C, Guo J, et al. RSC Adv, 2016, 6:16489~16494.
- [62] Qian Z, et al. Energy Buildings, 2018, 158: 1184~1188.
- [63] Wang X, Wu P. Chem Eng J, 2018, 348: 723~731.
- [64] Fu J, et al. Polym Eng Sci, 2010, 50(9): 1809~1819.
- [65] Leon O, et al. Surface Coatings Technol, 2003, 163: 578~584.

Progress in Thermal Conductive Composites Based on Boron Nitride Nanosheet

YANG Xue-wei^{1,2}, LI Rui^{1,2}, ZHAO Ning¹, XU Jian¹

(1. *Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: High-performance thermal conductive materials have played more and more important roles in the growing microelectronics industry and have attracted widespread attention. Hexagonal boron nitride (h-BN) is one of the most important fillers for the preparation of high thermal conductivity and multifunctional composite materials, while boron nitride nanosheets (BNNS) having similar structure to graphene show better performance than h-BN. We summarize the preparation of BNNS and the surface modification methods, and application in the fabrication of BNNS/polymer thermal conductive composites.

Key words: BNNS; Thermal conductivity; Composites; Surface modification