文章编号：1008-1542（2026）00-0000-00

球磨和热处理协同制备小尺寸羟基化氮化硼

徐长安[1], 杨 漾[2], 刘群峰[3]

（1. 广东省科学院化工研究所，广东广州 510665；2. 华南农业大学材料与能源学院，广东广州 510642；
3. 佛山职业技术学院汽车工程学院，广东佛山 528137）

摘要：针对六方氮化硼表面含有较少的活性基团导致其应用受限的问题，利用球磨和高温加热 2 种方式制备小尺寸羟基化的六方氮化硼，采用红外光谱、拉曼光谱、扫描电子显微镜、热重分析仪、X 射线衍射仪、X 射线光电子能谱仪、导热仪和接触角仪对改性的六方氮化硼的结构、晶型、形貌、耐热性、元素含量、导热性和亲/疏水性进行表征。结果表明：球磨法可以降低六方氮化硼的尺寸和表面粗糙度，还能提高其导热性和疏水性，但是对其结构和晶型并未产生影响；随后继续采用高温加热方式，不仅可以有效地使六方氮化硼小尺寸化和羟基化，而且还能有效降低其表面粗糙度，使六方氮化硼的均方根表面粗糙度由 1.56 nm 降低到 0.27 nm，但是会导致羟基化的六方氮化硼的耐热性降低，在 800 ℃时，其失重率为 21.14%（质量分数），此外，高温处理不仅可以降低六方氮化硼的导热性，而且还能实现六方氮化硼从疏水性向亲水性材料的转变。探讨了制备小尺寸化六方氮化硼和羟基化六方氮化硼的新方法，为拓展改性六方氮化硼材料在其他领域的应用提供了参考。

关键词：无机非金属材料; 氮化硼; 球磨; 高温; 小尺寸; 形貌

中图分类号: TB321 文献标志码: A

Coordinated preparation of small-sized hydroxylated boron nitride by ball milling and heat treatment

XU Changan, YANG Yang, LIU Qunfeng

(1. Institute of Chemical Engineering, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510665, China;
2. School of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
3. School of Automotive Engineering, Foshan Vocational and Technical College, Foshan, Guangdong 528137, China)

Abstract: To address the issue of limited application of hexagonal boron nitride due to the low content of active groups on the surface, small-sized hydroxylated hexagonal boron nitride was prepared by using two methods: ball milling and high-temperature heating. The modified hexagonal boron nitride was characterized by infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscope, thermogravimetric analyzer, X-ray diffractometer, X-ray photoelectron spectrometer, thermal conductivity meter and contact angle meter to analyze its structure, crystal properties, morphology, thermal stability, elemental composition, thermal conductivity and hydrophilicity/hydrophobicity. The results indicate that ball milling effectively reduces particle size and surface roughness of hexagonal boron nitride, and also improves its thermal conductivity and hydrophobicity, but it has no effect on its structure and crystal properties. Conversely, the high-temperature heating method not only reduces

收稿日期：2025-06-20；修回日期：2025-07-25；责任编辑：冯民
基金项目：国家自然科学基金（22401099）；2024 年度广东省普通高校重点科研平台和项目(2024ZDZX3117)；佛山职业技术学院校级科研项目(KY2020G05)
第一作者：徐长安（1990—），男，河南濮阳人，博士，主要从事纳米材料、功能材料方面的研究。
通信作者：刘群峰，教授。E-mail: qunfengliu@163.com

particle size and achieves hydroxylation but also significantly lowers surface roughness, decreasing the root mean square roughness of hexagonal boron nitride from 1.56 nm to 0.27 nm. However, this method compromises thermal stability, resulting in a 21.14% weight loss (mass fraction) for hydroxylated hexagonal boron nitride at 800 ℃. In addition, high-temperature treatment not only reduces the thermal conductivity of hexagonal boron nitride, but also enables the transformation of hexagonal boron nitride from hydrophobic to hydrophilic materials. Overall, this study demonstrates new viable preparation routes for small-sized and hydroxylated hexagonal boron nitride, providing reference for expanding the application of modified hexagonal boron nitride materials in other fields.
Keywords: inorganic non-metallic materials; boron nitride; ball milling; high temperature; small size; morphology

氮化硼（BN）是一种类石墨烯结构的二维材料，其被称为“白色石墨烯”[1]。BN 最早是在 1842 年由 Balmain 用熔融的硼酸和氰化钾合成所得，其制备早于从石墨中分离出的石墨烯[2]。BN 具有较高的热导率、高的机械强度、出色的绝缘性以及优异的热稳定性和防腐性能[3-5]，其在能源储存、热管理和高性能复合材料等领域被广泛使用[6-9]。六方氮化硼（h-BN）是 BN 的一种同素异构体，是一种二维纳米层状结构[10-11]，其每一层是由硼原子和氮原子通过共价键键接而成的六元环结构[12-13]。然而，传统的大尺寸 h-BN 之间存在较强的范德华力，导致其团聚较为严重，导致其在基体中的分散性和界面相互作用较差，制约了其性能的发挥[14]。研究人员采用表面改性、羟基化改性和小尺寸改性等方法来解决 BN 存在的以上问题。XU 等[15]的研究中利用凝胶-溶胶方法，采用硅烷偶联剂对 h-BN 进行表面处理，改善了其与树脂的相容性，提高了复合涂层的导热系数。官燕燕等[16]的研究中以去离子水为溶剂，在碱性条件下制备了羟基化的 BN 纳米片，提高了其在水性聚氨酯中的分散性和相容性。尽管如此，目前对于 h-BN 的改性依然存在需要引入其它物质和制备、处理过程复杂等问题。

将 h-BN 剥离成小尺寸纳米片，并对其表面进行羟基化是解决上述 h-BN 瓶颈的一种有效策略。小尺寸利于提升 h-BN 在基体中的分散性和界面接触点；而羟基化则能显著改善 h-BN 的亲水性及与极性聚合物（如环氧树脂、聚酰亚胺、聚氨酯等）的界面相互作用和相容性，实现 h-BN 基复合材料性能的提升。目前，小尺寸羟基化 BN 的制备主要依赖强氧化性化学剥离（如浓硫酸/过氧化氢混合液处理）或长时间的液相超声剥离结合后续化学修饰。然而，此方法普遍存在工艺复杂、条件苛刻、能耗高、产率低、易引入大量缺陷等问题。因此，发展一种高效、绿色且能协同调控尺寸与表面化学状态的新策略，用于制备小尺寸且表面富含羟基的 h-BN，对推动其在高性能复合材料中的应用具有重要的科学价值。

基于此，本研究创新性地提出采用球磨预处理与后续高温处理相结合的协同策略，这不仅减小了 h-BN 的尺寸，而且还使其表面富含羟基基团。此工作有望克服传统单一方法的弊端，为规模化制备兼具小尺寸和高羟基化程度的功能化 BN 填料提供了新途径，助力国家“双碳”战略下 BN 的发展。

1 实验部分

1.1 实验材料

h-BN 来源于上海麦克林生化科技股份有限公司（中国），无水乙醇来自天津市北联精细化学品开发有限公司。

1.2 球磨六方氮化硼

步骤如下：将 10 g 的 h-BN、300 mL 无水乙醇和去离子水（V_e/V_d = 5:1）混合液加到玛瑙罐中，然后在行星球磨机上球磨 12 h。将球磨后的产物进行离心处理，最后经冷冻干燥获得球磨后的 h-BN，其产物命名为 BM-BN，制备过程如图 1 a）所示。

1.3 高温处理 BM-BN

步骤如下：将 8 g 的 BM-BN 放到陶瓷坩埚中，然后将其放到管式炉中。随后，以 10 ℃/min 的速度加热至 1 000 ℃，在此温度下保持 4 h。最后，将炉温自然降至室温，将其在热水中进行超声处理，经离心和干燥处理获得羟基化 h-BN，其产物命名为 BN-OH，制备过程如图 1 b）所示。

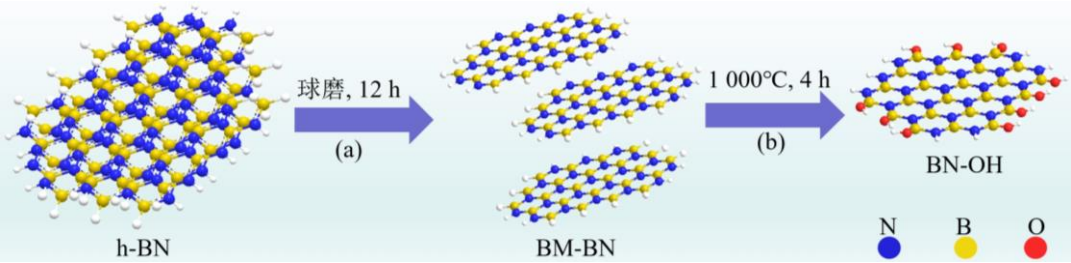


图 1 球磨和高温处理 h-BN 的过程

Fig. 1 Process of treating h-BN with ball milling and high temperature

1.4 样品表征

利用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR, NicoletiS10）对样品的结构进行表征，测试的波长范围为 4 000~500 cm^{-1}，测试过程中对样品进行 32 次扫描。采用扫描电子显微镜（SEM, SIGMA-300）对样品的表面形貌进行观察，此外，采用原子力显微镜（bruker dimension icon，AFM）对样品的表面形貌和表面粗糙度进行表征。采用 X 射线衍射仪（XRD，RigakuUl timaIV）对样品的晶体结构进行表征，测试中的扫描速度为 8 °/min，扫描角度范围为 20 °~90 °。采用 Raman 光谱仪（WiTechalpha300R）对样品的化学结构进行表征，仪器的激光波长为 532 nm。采用导热系数仪（Hot Disk TPS 2500S）对样品的整体导热性能进行测试，同一样品进行 3 次平行测试，取其平均值作为使用数值。采用接触角测量仪（Dataphysics OCA20）对样品表面的亲/疏水性进行测试，在同一样品表面进行 3 个不同位置的测试，取其平均值作为最终的数值。采用 X 射线光电子能谱仪（XPS，ThermoScientific）对样品表面的元素种类和元素含量进行表征。采用热重分析仪（TGA, NETZSCHSTA449F3）对样品的耐热性进行表征，测试过程在氮气氛围下进行，升温速度为 10 ℃/min。

2 结果与讨论

2.1 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的红外分析

h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的红外谱图如图 2 a）所示，对 h-BN 来说，在 3 411 cm^{-1} 处不明显的特征峰归属于其上的少量羟基特征峰，其峰是制备 h-BN 过程中不可避免的造成其少量氧化造成的，而 h-BN 的 B-N-B 和 B-N 特征峰分别出现在 815 cm^{-1} 和 1 378 cm^{-1} 附近[17-18]。对 BM-BN 和 BN-OH 来说，h-BN 上在 815 cm^{-1} 和 1 378 cm^{-1} 附近的特征峰被得到了较好保留。BM-BN 在 3 411 cm^{-1} 处的峰型与 h-BN 的保持一致，这是因为在球磨过程中不会导致 BM-BN 表面产生过多的羟基基团。但是，对 BN-OH 来说，其羟基峰降低到了 3 218 cm^{-1} 处，这是因为经过高温处理后，在 BN-OH 的表面氧化产生了较多的羟基基团，导致 BN-OH 的分子内和分子间容易形成氢键作用。

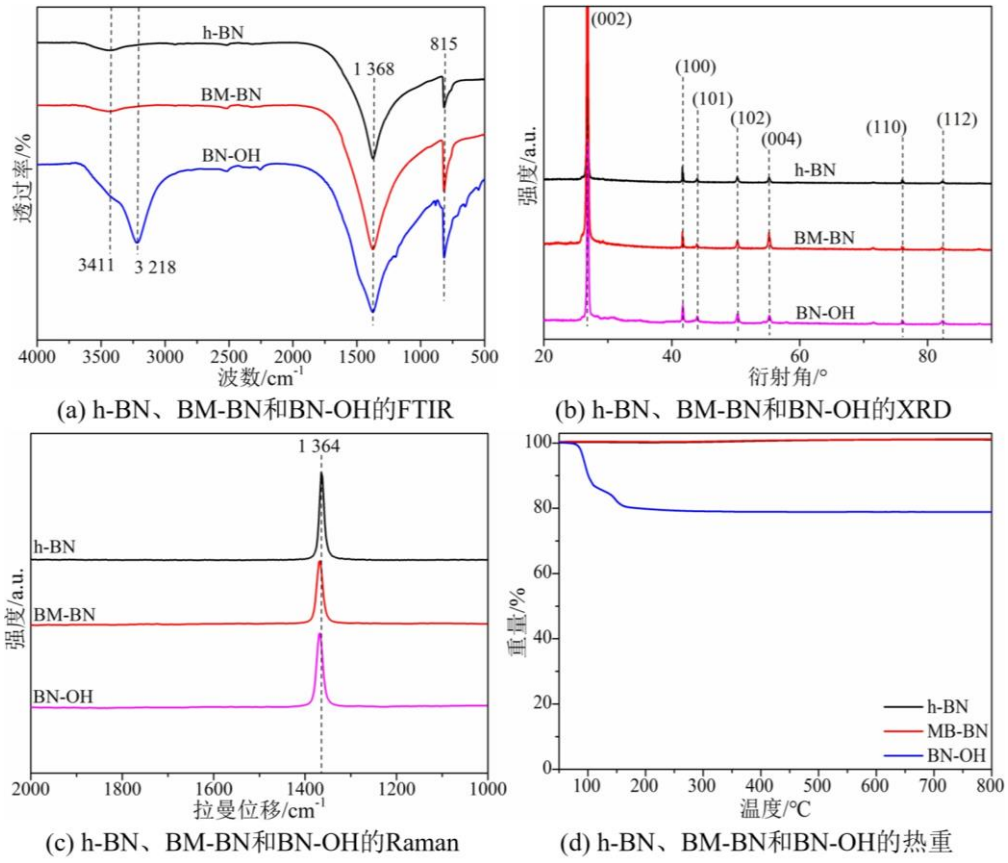


图 2 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的结构和热降解表征结果

Fig. 2 Structural and thermal degradation characterization results of h-BN, BM-BN and BN-OH

2.2 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 XRD 分析

h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 XRD 结果如图 2 b）所示，对 h-BN 来说，在 26.7°、41.7°、44.0°、50.2°、55.1°、76.1°和 82.3°处的衍射峰分别为（002）、（100）、（101）、（102）、（004）、（110）和（112）的平面特征峰，其结果与 PDF#34-0421 卡相对应[19-20]。从 BM-BN 和 BN-OH 的结果中可以发现，它们的衍射特征峰与 h-BN 的保持一致，这说明球磨和高温不会改变 h-BN 的晶体结构。

2.3 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 Raman 分析

h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 Raman 结果如图 2 c）所示，对 h-BN 来说，在 1 364 cm^{-1} 处出现了一个典型的拉曼特征峰[21-23]。h-BN 经过球磨和高温处理后，在 BM-BN 和 BN-OH 上依然仅出现一个较明显的特征峰，但是其波数稍微增大，BM-BN 和 BN-OH 的特征峰位置分别移到了 1 367 和 1 368 cm^{-1} 处，这是 h-BN 的尺寸发生了变化的结果。

2.4 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的热重分析

h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的热降解结果如图 2 d）所示。从结果来看，h-BN 和 MB-BN 表现出相似的热降解曲线，它们在 800 ℃内基本未发生任何质量损失，表明两者具有优异的耐热性。由此可以判断，虽然球磨能够改变 h-BN 的尺寸，但是对其热稳定性影响不大。对 BN-OH 来说，其在 200 ℃前具有较明显的失重行为，同时在 200~800 ℃之间具有较轻的失重。其结果差异与两方面因素有关：一方面是因为经过高温处理后，在 BN-OH 上氧化成了较多的羟基基团，其具有较强的吸水作用；另一方面是因为在 BN-OH 上氧化成的羟基的耐热性较差。

2.5 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 XPS 分析

采用 XPS 对 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的元素种类、含量和键接形式进行表征，结果如图 3、4 所示。由图 3 可知，在所有的氮化硼样品中都含有氧、氮、碳和硼 4 种元素，而且在球磨和高温处理过程中并未引入新的元素，在 531.9、397.7、284.4 和 190.7 eV 处的峰分别归属于 O1s、N1s、C1s 和 B1s 特征峰[24-25]。

从图 4 a）可知，对 h-BN 来说，其含有较多的硼元素（52.2%）和氮元素（39.8%），而含有较少的碳元素（6.6%）和氧元素（1.4%）。MB-BN 中的元素含量和 h-BN 相差不大，但是经过高温处理得到的 BN-OH 的元素含量却发生了较大变化，其氧元素含量增加到了 9.7%，相对于 h-BN 来说，其含量提升了 592.8%，这是 h-BN 被氧化产生了较多的羟基基团造成的。随后，对 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 中的硼元素进行分峰拟合，结果如图 4 b）—d）所示。对 h-BN 和 BM-BN 来说，在 190.5 eV 处只存在一个主要的 B-N 峰，而在 BN-OH 中，除了拟合出 B-N 峰之外，在 192.0 eV 处还分裂出一个 B-OH 小峰，这表明在 BN-OH 上存在羟基基团，这与 h-BN 的氧化有关。

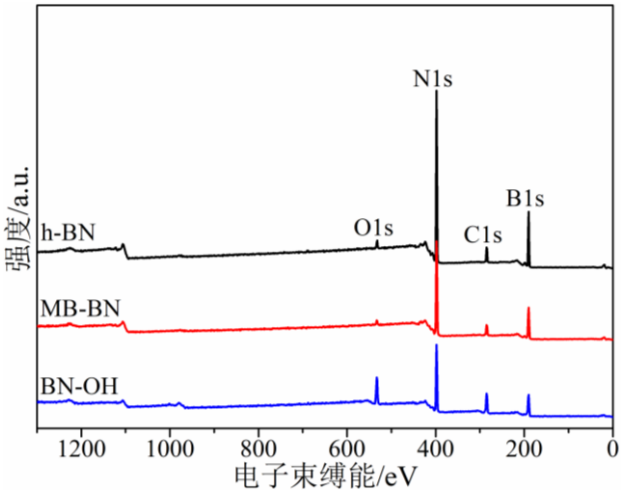


图 3 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的 XPS 图

Fig. 3 XPS plots of h-BN, BM-BN and BN-OH

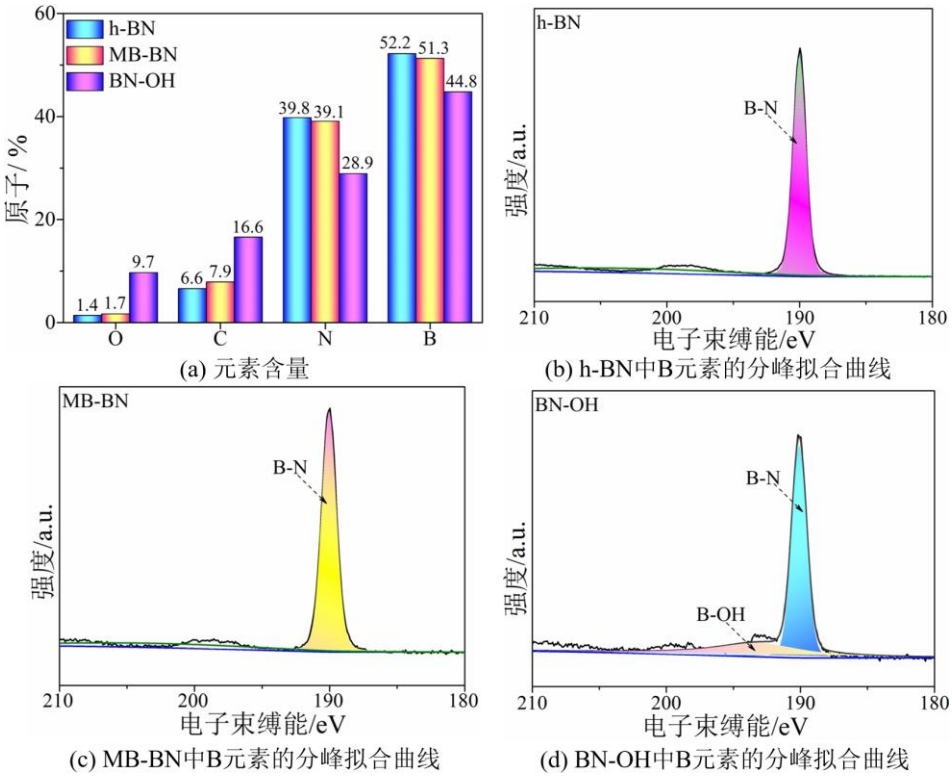


图 4 元素含量和 B 元素的分峰拟合曲线

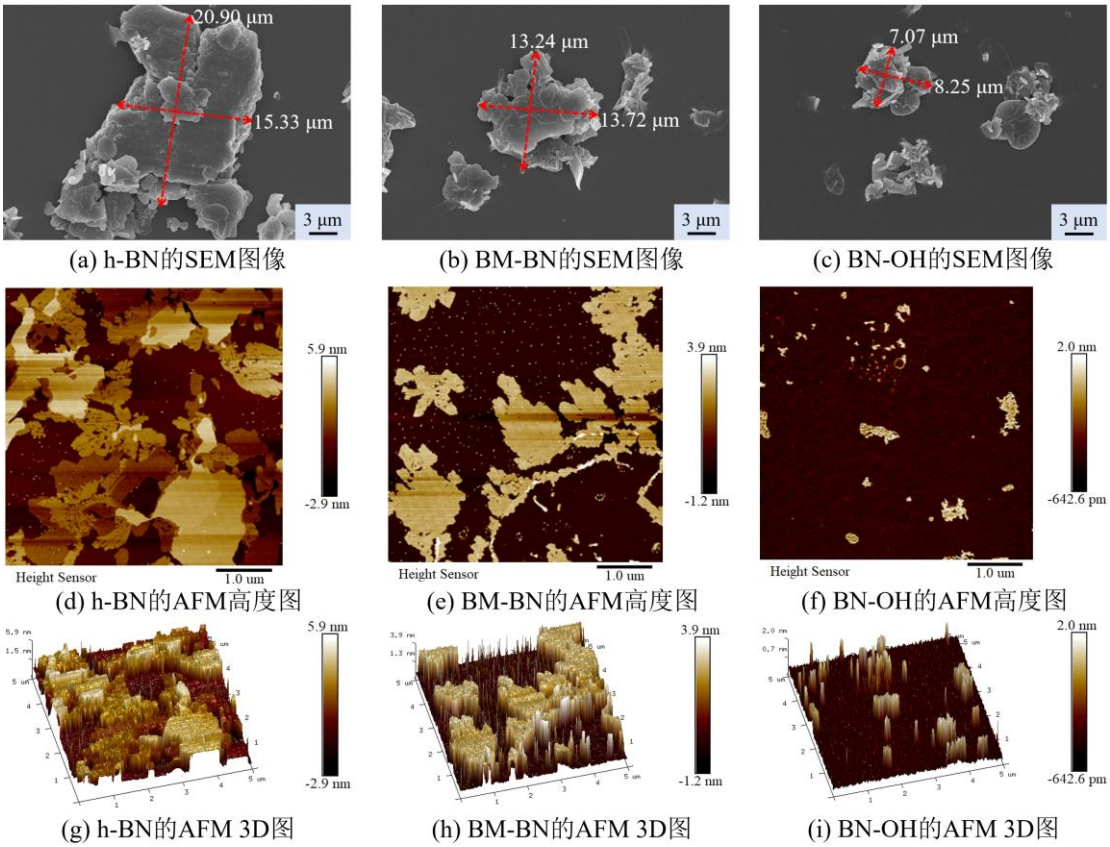
Fig. 4 Elemental contents and peak separation fitting curves of the B element

2.6 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的形貌分析

采用 SEM 获得的 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的图像如图 5 a）—c）所示。由图 5 a）可知，h-BN 中存

在较大的尺寸，其长宽高达 20.90 和 15.33 μm。经过球磨获得的 BM-BN 的尺寸得到了减小，其长宽降低到了 13.24 和 13.72 μm。经过高温处理获得的 BN-OH 的尺寸进一步减小，其长宽降低到了 7.07 和 8.25 μm，远低于 h-BN 的，这说明通过球磨和高温加热能够使 h-BN 小尺寸化。

随后，采用原子力显微镜对 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的尺寸做进一步表征，由图 5 d）—f）可知，它们都是以层状形式存在，而且它们的尺寸大小关系为 h-BN ＞ BM-BN ＞ BN-OH，其关系与 SEM 结果是一致的，这进一步表明通过球磨和高温加热使 h-BN 小尺寸化的策略是可行的。此外，获得的 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的均方根表面粗糙度值分别为 1.56、1.26 和 0.27 nm，可见，原始的 h-BN 表面较为粗糙，如图 5 g）所示。球磨和高温加热能够有效的降低六方氮化硼的表面粗糙度，如图 5 h）、i）所示。通过以上分析可得，高温加热对六方氮化硼表面性能的影响明显大于球磨的。



(a) h-BN的SEM图像 (b) BM-BN的SEM图像 (c) BN-OH的SEM图像

(d) h-BN的AFM高度图 (e) BM-BN的AFM高度图 (f) BN-OH的AFM高度图

(g) h-BN的AFM 3D图 (h) BM-BN的AFM 3D图 (i) BN-OH的AFM 3D图

图 5 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的形貌图像

Fig. 5 Morphological images of h-BN, BM-BN and BN-OH

2.7 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的导热性能分析

采用瞬态平板热源法，在 25 ℃条件下对 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的导热系数进行测试，结果如图 6 所示。h-BN 的导热系数为 14.41 W/（m ·k），经过球磨后 BM-BN 的导热系数得到了提高，其值为 16.45 W/（m ·k），这是因为球磨后 BM-BN 的尺寸得到降低，增大的比表面积降低了界面热阻，此外，BM-BN 尺寸的降低利于其形成较好的导热通路，进而提高了整体的导热系数。但是，经过高温处理获得的 BN-OH 的导热系数却得到了降低，其值为 7.95 W/（m ·k）。其结果与以下原因有关：高温处理使 BN-OH 表面富含较多的羟基基团，使 BN-OH 的化学结构发生了变化，这在其表面不可避免的引入了缺陷，导致声子散射增加和界面热阻增大。可见，对六方氮化硼进行小尺寸化对提高其导热性能是有利的，而羟基化会降低其整体的导热性能。

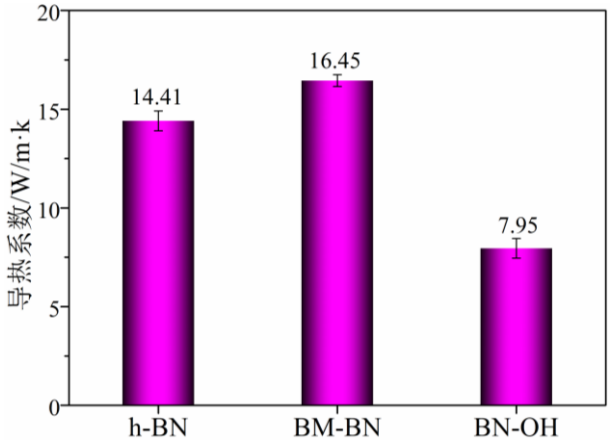


图 6 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的导热系数

Fig. 6 Thermal conductivity of h-BN, BM-BN and BN-OH

2.8 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的接触角分析

通过接触角测量仪获得的 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的静态接触角值如图 7 所示，从结果可知，h-BN 和 BM-BN 都属于疏水性材料（接触角值大于 90°），其值较为相近，分别为 105.0°和 110.4°。但是，对于 BN-OH 来说，其接触角值降低到了 78.3°，属于亲水性材料（接触角值小于 90°），这是因为经过高温处理后，在 BN-OH 的表面产生了较多的羟基基团，而羟基易与水分子形成氢键作用，利于水分子在 BN-OH 表面的润湿，进而降低了其接触角值。可见，通过高温羟基化过程可以使六方氮化硼从疏水材料转化为亲水材料。

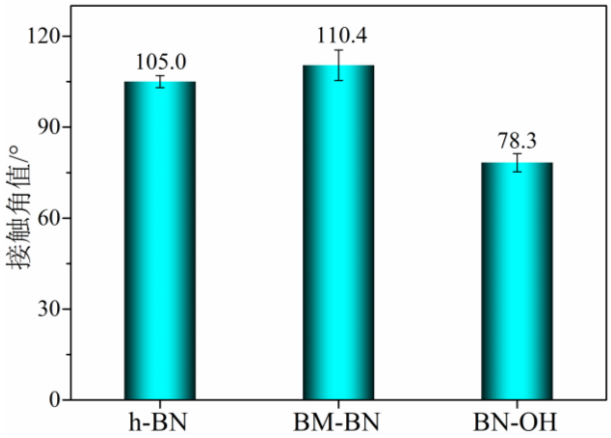


图 7 h-BN、BM-BN 和 BN-OH 的接触角值

Fig. 7 Contact angle values of h-BN, BM-BN and BN-OH

2.9 BN-OH 在不同溶剂中的分散稳定性分析

为了探究 BN-OH 在不同溶剂中的分散稳定性，将其配置成浓度为 2 mg/mL 的分散液，观察在不同时间内 BN-OH 在水、乙醇、甲苯和 N, N-二甲基甲酰胺（DMF）溶剂中的分散状态，结果如图 8 所示。开始阶段（0 h），BN-OH 在不同溶剂中都是呈牛奶状。在室温静止 0.5 h 后，BN-OH 在甲苯中基本完全沉积在瓶底，在 2 h 后，呈现透明状态，说明 BN-OH 在甲苯中的分散稳定性最差。BN-OH 在水、乙醇和 DMF 中的稳定性有所改善，但是经过静止 1 h 后，BN-OH 在 DMF 中逐渐析出，随着时间的推移，其溶液越来越透明，特别是静止 24 h 后，BN-OH 在 DMF 中完全沉积在瓶底。相对而言，BN-OH 在水和乙醇中具有较好的稳定性，这归因于 BN-OH 和水、乙醇形成的氢键作用。经过 24 h 静止后，大量的 BN-OH 在水中沉积在瓶底，但是其溶液并未透明，这说明部分 BN-OH 可以稳定分散在水中。BN-OH 之所以在水中存在沉淀是因为水分子起到粘合剂的作用，将 BN-OH 连接在一起，随着时间的推移，粘结的颗粒变大，在重力作用下沉积在瓶底。通过比较发现，BN-OH 在乙醇中具有最好的分散稳定性，即使在室温静止 24 h，大部分 BN-OH 能

够以分散状态存在，这说明乙醇和 BN-OH 之间的氢键作用适中，静止过程并未形成较大重力的连接体。由此可得，BN-OH 在不同溶剂中的分散稳定性顺序为：乙醇 > 水 > DMF > 甲苯。

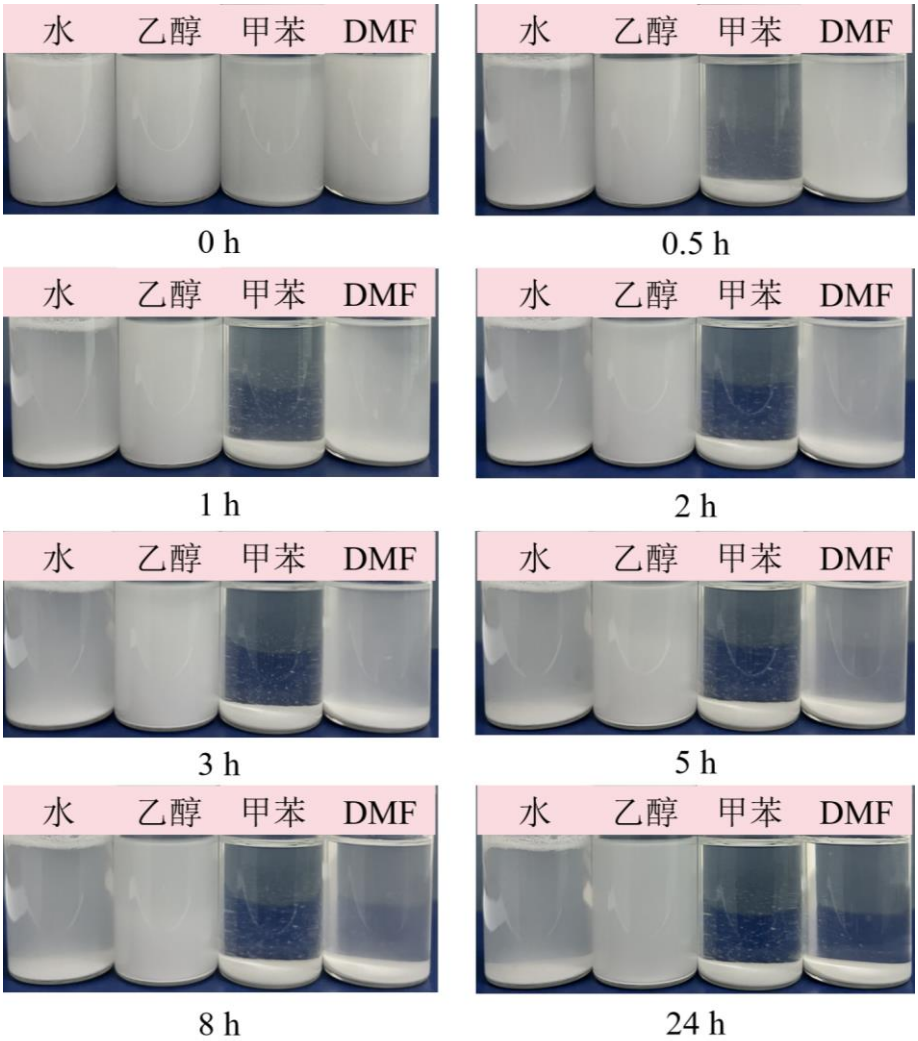


图 8 BN-OH 在不同溶剂中的分散性

Fig. 8 Dispersibility of BN-OH in different solvents

3 结 语

针对一般获得的六方氮化硼尺寸大和其表面缺乏活性基团的问题，本研究创新性的采用球磨和高温加热 2 种方式来对六方氮化硼进行小尺寸羟基化以解决以上问题，通过多种表征手段对球磨和高温处理的六方氮化硼进行表征分析。结果表明球磨利于减少六方氮化硼的尺寸，但是对其结构并未造成显著影响；高温加热不仅能够使六方氮化硼小尺寸化，还可在其表面氧化产生较多的羟基基团，但是其产生的羟基化六方氮化硼的耐热性却得到了降低。此外，球磨方法对于提高六方氮化硼的导热性和疏水性是有利的，但是高温处理却是相反的。本研究为共性二维纳米材料的小尺寸羟基化提供了新的制备方法，同时为改性六方氮化硼结构和性能表征手段提供了借鉴。

本研究缺乏对改性六方氮化硼在树脂基体中分散性和性能提升等方面的研究，这将是今后研究的重点，以拓展其在导热领域的应用。

参考文献/References:

[1] 夏雨,韦春贝,林松盛,等.化学复合镀 Ni-Mo-P/(h)BN 镀层的宽温域摩擦学性能研究[J].稀有金属材料与工程,2024,53(10):2860-2872.

XIA Yu,WEI Chunbei,LIN Songsheng,et al.Tribological properties of electroless Ni-Mo-P/(h)BN composite coatings in wide temperature range[J].Rare Metal Materials and Engineering,2024,53(10):2860-2872.

[2] 徐长安,胡洋,杨卓鸿.氧化温度对氧化石墨烯结构的影响[J].聊城大学学报(自然科学版),2024,37(4):57-63.
XU Chan' gan,HU Yang,YANG Zhuohong.Influence of oxidation temperature on the structure of graphene oxide[J].Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition),2024,37(4):57-63.

[3] 颜蜀雋,谭雅莉,庞忠荣,等.六方氮化硼负载纳米氧化铝复合填料的制备及改性环氧涂层的防腐性能研究[J].材料导报,2024,38(20):301-306.
YAN Shujun,TAN Yali,PANG Zhongrong,et al.Preparation of hexagonal boron nitride loaded nano-alumina composite fillers and the utility in modifying epoxy corrosion inhibition coatings[J].Materials Reports,2024,38(20):301-306.

[4] RAMEZANZADEH M,DASHAN A,NOROUZI F,et al.Integration of metal co-dopted cysteine builted in porous covalent organic framework (COF) decorated 2D hexagonal boron nitride (h-BN) for multi-functional smart coatings[J].Journal of Colloid and Interface Science,2025,680:311-331.

[5] LIU Zhijun,LI Shaochun,SUI Shiyu,et al.Preparation of hydroxylated hexagonal boron nitride/isobutyltriethoxysilane hybrid latices for improved waterproofing performance of cement coating[J].Construction and Building Materials,2023.DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.133232.

[6] MO Bingjie,YIN Jun,WU Ting,et al.Plasmonic optical manipulation in hybrid Al nanoprisms/h-BN structures for UV detection[J].Applied Surface Science,2025.DOI:10.1016/j.apsusc.2025.162529.

[7] LEE S J,CHOI J H,HWANG I,et al.Interfacial engineering with BN@cellulose separator to suppress dendrite growth and side reactions in aqueous zinc-ion batteries[J].Electrochemistry Communications,2025.DOI:10.1016/j.elecom.2025.107882.

[8] YANG Kaiming,WANG Feifei,SHI Bingrui,et al.Low-temperature curing epoxy self-lubricating anticorrosion coatings synergistically enhanced by hyperbranched polysiloxanes and MoS2/h-BN heterojunction particles[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2025.DOI:10.1016/j.compositesa.2025.108920.

[9] ZHANG Jihao,WANG Qi,WANG Chunfeng,et al.Integrated thermal conductive and charring effects of hexagonal Boron nitride and polycarbosilane on flame retardancy of polyolefin/magnesium hydroxide composites[J].Polymer Testing,2025.DOI:10.1016/j.polymertesting.2025.108801.

[10]陈雨洁,李俊生,李晨晓,等.h-BN 陶瓷烧结致密技术研究进展[J].硅酸盐通报,2025,44(2):651-665.
CHEN Yujie,LI Junsheng,LI Chenxiao,et al.Research progress on sintering densification technology of h-BN ceramics[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2025,44(2):651-665.

[11]刘振强,王匀,李瑞涛,等.纳米氮化硼增强金属基复合材料的研究进展[J].精密成形工程,2022,14(9):119-130.
LIU Zhenqiang,WANG Yun,LI Ruitao,et al.Research progress of nano-boron nitride reinforced metal matrix composites[J].Journal of Netshape Forming Engineering,2022,14(9):119-130.

[12]罗益欣,王杏,刘正龙,等.h-BN 对低碳 Al_2O_3-C 耐火材料性能的影响[J].耐火材料,2025,59(1):13-18.
LUO Yixin,WANG Xing,LIU Zhenglong,et al.Effect of h-BN on properties of low carbon Al_2O_3-C refractories[J].Refractories,2025,59(1):13-18.

[13]YAO Chengning,LEAHU G,HOLICKY M,et al.Thermally conductive hexagonal boron nitride/polymer composites for efficient heat transport[J].Advanced Functional Materials,2024.DOI:10.1002/adfm.202405235.

[14]刘妹,葛冰洁,戚安杰,等.氮化硼对丙烯酸酯导热结构胶的改性研究[J].中国胶粘剂,2025,34(5):18-22.
LIU Mei,GE Bingjie,QI Anjie,et al.Study on the modification of boron nitride to acrylate thermal conductive structural adhesive[J].China Adhesives,2025,34(5):18-22.

[15]XU Yunsheng,CHUNG D D L.Increasing the thermal conductivity of boron nitride and aluminum nitride

particle epoxy-matrix composites by particle surface treatments[J].Composite Interfaces,2000,7(4):243-256.
[16]官燕燕,叶义成,陈海生,等.羟基化氮化硼导热/阻燃水性涂料的研制[J].包装工程,2025,46(3):41-49.
GUAN Yanyan,YE Yicheng,CHEN Haisheng,et al.Development of hydroxylated boron nitride thermal conductive/flame-retardant water-based coating[J].Packaging Engineering,2025,46(3):41-49.
[17]CHEN Beibei,DONG Zhe,LI Jiaye,et al.ZnO nanowires-decorated h-BN hybrid for enhancing the tribological properties of epoxy resin[J].Progress in Organic Coatings,2021.DOI:10.1016/j.porgcoat.2021.106493.
[18]梁旭昀,黄国鹏,吴晴珊,等.基于氮化硼杂化填料的导热阻燃复合材料的制备与性能研究[J].材料工程,2025,53(5):197-204.
LIANG Xuyun,HUANG Guopeng,WU Qingshan,et al.Preparation and properties of thermally conductive flame resistant composites based on boron nitride hybrid filler[J].Journal of Materials Engineering,2025,53(5):197-204.
[19]GAO Xiaoyan,ALI N,ZHAO Meng,et al.Study of nacre-like h-BN/waterborne polyurethane nanocomposite with high-thermal,mechanical and water resistance properties[J].Journal of the Indian Chemical Society,2025.DOI:10.1016/j.jics.2025.101767.
[20]LI Shichen,LEE B K.Highly efficient dye adsorption and sunlight-driven photocatalytic degradation using electrospun Pan/CDs@BN fibrous membranes[J].Separation and Purification Technology,2025.DOI:10.1016/j.seppur.2025.132479.
[21]ZHAO Yue,LI Ruifeng,WU Mingfang,et al.Effect of c-BN on the microstructure and high temperature wear resistance of laser cladded Ni-based composite coating[J].Surface and Coatings Technology,2021.DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127466.
[22]JIA S,CHEN W,ZHANG J,et al.CVD growth of high-quality and large-area continuous h-BN thin films directly on stainless-steel as protective coatings[J].Materials Today Nano,2021.DOI:10.1016/j.mtnano.2021.100135.
[23]YANG Yujie,GAO Yang,PENG Haiyi,et al.High-oriented two-dimensional BN reinforced composites with high thermal conductivity via simple vertical method[J].Ceramics International,2025,51(19):29055-29063.
[24]KUMAR A,MALIK G,SHARMA S,et al.Precursors controlled morphologies of nanocrystalline h-BN and its growth mechanism[J].Ceramics International,2021,47(21):30985-30992.
[25]XIAO Zhonglin,LI Shaochun,LIU Zhijun,et al.Preparation and properties of the PDMS/h-BN/PDA composite anti-corrosion coating on a carbon steel surface[J].FlatChem,2025.DOI:10.1016/j.flatc.2025.100839.

收件人信息：徐长安，13560283795，广东省广州市天河区棠下车陂西路 318 号
普通快递到付。