

功能基元序构制备高性能类碳材料的研究进展

顾士甲^{1,2}, 曹 响^{1,2}, 孙金阳^{1,2}, 王君卓^{1,2}, 陆晓芳^{1,2}, 李建林³, 王连军^{1,2}, 江 莞^{1,2}(1. 东华大学先进纤维材料全国重点实验室, 上海 201620; 2. 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620;
3. 海南大学材料科学与工程学院, 海口 570228)

摘 要: 传统石墨与六方氮化硼材料等难烧结类碳材料存在制备工艺周期长、能耗高、性能提升受限等问题。功能基元序构策略通过将具有特定功能的基元在跨尺度上进行有序组装与结构调控, 为突破上述瓶颈提供了新范式。本文系统综述了基于该策略制备高性能类碳材料(石墨、六方氮化硼陶瓷及其复合材料等)的最新研究进展。文章首先阐述了功能基元序构的核心理念, 然后按照序构方式(如均匀分散序构、层状转角序构、一维序构、“榫卯结构”序构)进行分类阐述, 分析了不同策略下材料的微观结构演变和性能增强机制, 重点总结了洋葱碳、洋葱氮化硼等特征功能基元在提升材料力学性能等方面中的作用; 最后, 对该制备策略未来发展的趋势进行了展望。

关键词: 类碳材料; 功能基元序构; 力学性能; 新范式

中图分类号: TB321 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)07-2237-12

网络出版时间: 2026-06-02



材料是科技进步与产业变革的基石, 高性能材料的创制始终是材料科学研究的核心驱动力^[1-3]。传统材料研发模式多依赖于“试错法”与经验积累, 在应对能源、环境、信息等前沿领域对材料性能日益增长的多元化与极限化需求时, 往往面临周期长、成本高、性能瓶颈难以突破等挑战^[4-7]。因此, 发展具有前瞻性与可预测性的材料设计新范式, 实现材料性能的按需定制与跨越式提升, 是当前新材料研究的迫切任务之一。

2019 年 Chen 等^[8]总结并提出了通过功能基元序构可以显著改善或产生独特的光、电、磁、热和机械性能, 构建高性能新材料, 可以克服传统材料固有的缺点, 制备出超强新材料, 满足极端服役条件对材料性能的苛刻要求。功能基元序构材料的设计理念核心在于将材料视为由特定功能基元作为基本构造单元, 通过跨尺度(原子、分子、纳米、介观尺度)的精确“有序组装”与“结构调控”而构筑的整

体。这里的“功能基元”是指具有明确化学组成、特定结构并能贡献某种关键物理或化学性质(如光、电、磁、催化活性、机械强度等)的基本单元, 如特定的分子簇、纳米颗粒、一维纳米线、二维片层或特定缺陷结构^[9-12]。而序构则是对这些基元在空间排列、取向、连接方式以及层次结构上进行精心的设计与控制, 旨在通过基元间的协同、耦合与溢出效应, 衍生出远超单一组元或无序混合体系的优异性能^[13-17]。

通过功能基元序构策略, 研究者能够从微观源头调控材料的本征属性, 并在介观乃至宏观尺度上构建理想的结构, 从而系统性地优化乃至创造新的材料功能。例如, Song 等^[18]通过对纤维素纤维这一功能基元进行调控, 制备出强度达天然木材 11.5 倍的高性能结构木材。Wang 等^[19]以 LiMn_6 六元环为功能基元, 通过调控其原子组成、空间排布和晶畴结构, 实现对富锂层状氧化物正极材料电化学性

收稿日期: 2026-03-03。 修订日期: 2026-03-31。

基金项目: 国家自然科学基金(91963204); 上海市自然科学基金(24ZR1400800); 上海市“科技创新行动计划”启明星项目(扬帆专项)(23YF1400200)。

第一作者: 顾士甲(1986—), 男, 博士, 副教授;

曹 响(2002—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 江 莞(1961—), 男, 博士, 教授;

陆晓芳(1989—), 女, 博士, 讲师。

Received date: 2026-03-03. Revised date: 2026-03-31.

First author: GU Shijia (1986–), male, Ph.D., Associate Professor.

CAO Xiang (2002–), male, Master candidate.

E-mail: gusj@dhu.edu.cn; 18379607829@163.com

Correspondent author: JIANG Wan (1961–), male, Ph.D., Professor.

LU Xiaofang (1989–), female, Ph.D., Lecturer.

E-mail: wanjiang@dhu.edu.cn; xflu@dhu.edu.cn

能的系统优化,并阐释了 LiMn_6 六元环功能基元的完整性、对称性和空间排布方式对提升氧阴离子氧化还原可逆性和材料循环稳定性的作用机制。Ji 等^[20]则利用在结构和电子上具有强各向异性和强非简谐声子散射的线性三原子共振键(LTRB)为功能基元来筛选潜在的高性能热电材料,从 MatHub-3d 数据库中识别出 17 种含有 LTRB 的半导体候选材料,并以 K_5CuSb_2 为例阐明了 LTRB 与热电性能之间的关联,使其在 800 K 的热电优值高达 1.3。王子兴等^[21]阐述了功能基元序构策略在 Ag_2Se 基柔性热电薄膜中的应用,通过构建不同功能的结构单元并实现其有序组装与协同作用,成功提升了材料的热电性能和柔性。Pan 等^[22–23]基于基元序构的制备策略,通过在传统 304 奥氏体不锈钢中引入空间梯度序构位错胞结构,成功实现了高强度与优异抗循环蠕变性能的兼得,其屈服强度提升了 2.6 倍,同时较相同强度的不锈钢及其他合金,其棘轮应变速率降低了 2~4 个数量级,突破了结构材料抗棘轮损伤性能难以提升的瓶颈。同样,基于功能基元序构策略,Tian 等^[24]通过计算辅助筛选出日盲区紫外潜在功能基元 GeO_3 基团,设计并制备了 2 种优异的范德华层状日盲区紫外光学晶体——具有类黑磷结构的非线性光学晶体 GeHPO_3 和具有类石墨烯结构的双折射晶体 $\text{K}(\text{GeHPO}_3)_2\text{Br}$,其中 GeHPO_3 是首个报道的 $\text{Ge}(\text{II})$ 基氧化物非线性光学晶体,具有卓越的二次谐波响应、短的紫外吸收截止边和适中的双折射率。这些都为功能基元序构设计制备具有高性能的结构和功能材料提供了非常有价值的参考。

基于上述设计理念,本文将系统梳理功能基元序构策略在类碳材料制备中的最新进展,主要从均匀分散序构高强石墨和六方氮化硼(hBN),陶瓷、层状基元转角序构高性能氮化硼(BN),塑性陶瓷、一维序构制备高强石墨材料、三维“榫卯结构”序构制备高性能碳碳复合材料等方面进行阐述,重点分析该制备策略对材料微观结构与宏观性能的调控机制,并对该设计理念未来发展趋势进行展望。

1 传统类碳材料制备方法

1.1 石墨传统制备方法

传统石墨块体材料的制备工艺通常是通过原料混合、成型、焙烧、浸渍焙烧以及石墨化的过程进行制备,以石油焦、沥青焦或其他煅后焦炭作为骨料(填料),并以煤焦油沥青、石油沥青、酚醛树脂或环氧树脂等热固性树脂作为黏结剂^[25–26]。将骨料

与黏结剂在略高于黏结剂软化点的温度下进行均匀混合,随后采用挤压成型、模压成型或冷等静压成型等工艺制备生坯;所得生坯经低温碳化处理后,为提高材料致密度,通常需进行多次沥青浸渍–焙烧循环过程,最终在 2500 °C 以上的超高温条件下进行石墨化处理,从而获得块状石墨材料。该工艺虽已成熟,但存在明显的局限性,如生产周期长、能量消耗大、环境负荷较重、批次间产品质量稳定性难以精确控制,且最终制品通常表现出较高的开孔孔隙率和相对较低的力学性能指标等^[27–31]。

1.2 六方氮化硼陶瓷传统制备方法

六方氮化硼陶瓷的传统制备工艺通常是以高纯六方氮化硼粉末作为原料,并添加少量烧结助剂(如稀土氧化物)以促进其烧结致密,如 Al_2O_3 、 Y_2O_3 、 B_2O_3 等^[32–34]。如采用热压烧结技术制备 hBN 陶瓷,是将氮化硼粉体装入石墨模具中,在惰性气氛保护下,并加热至 1800~2200 °C 进行烧结,所得制品经冷却、脱模及必要的加工后,即得到最终的氮化硼陶瓷块体^[35]。虽然以 hBN 粉末添加烧结助剂的方法制备工艺相对简单,但 B_2O_3 等烧结助剂会严重影响 hBN 的高温性能,不添加烧结助剂即使在很高的烧结温度(>2000 °C)下也难以烧结致密,最终导致样品力学性能差。

2 功能基元均匀分散序构制备高强六方氮化硼陶瓷和石墨材料

2.1 均匀分散序构制备 hBN 陶瓷

针对六方氮化硼陶瓷传统方法难以烧结致密,而添加烧结助剂又会影响高温性能等问题。Yang 等^[36]利用功能基元序构的策略进行了 hBN 陶瓷制备,利用烧结过程中立方氮化硼(cBN)会相变成洋葱状氮化硼(oBN),以此基元作为一种特殊的烧结助剂来实现 hBN 陶瓷的致密化,其制备流程示意图如图 1 所示。首先,将 hBN 粉和 cBN 粉按比例混合后,采用放电等离子体烧结炉(SPS)在 1700 °C 进行烧结,得到高强六方氮化硼(HSHBN)陶瓷。由于 cBN 的密度高于 hBN,在烧结过程中 cBN 颗粒转化为 oBN 时会产生显著的体积膨胀,这种体积膨胀会填补了较大 hBN 颗粒之间的空隙,缩短了扩散距离,从而促进了烧结致密化。当添加 30%(质量分数) cBN 时,样品的相对密度最高可达 97.6%。引入 cBN 后, HSHBN 样品的力学性能显著提升,样品最高的力学性能是纯 hBN 陶瓷的 2~3 倍。

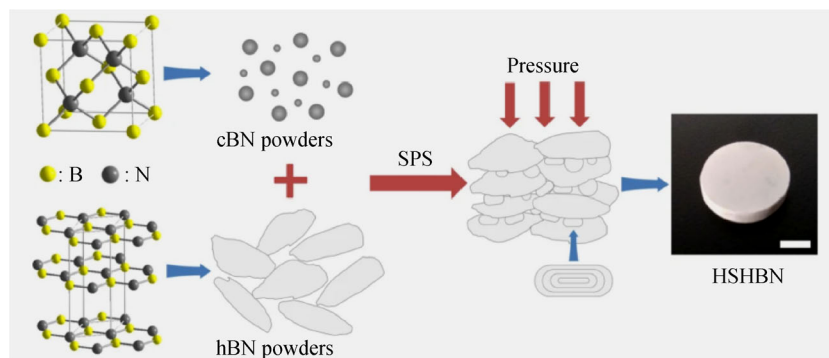
图 1 HSHBN 制备过程示意图^[36]Fig. 1 Schematic diagram of the HSHBN fabrication process^[36]

图 2 为 HSHBN 样品的 TEM 照片。从图 2a 中可以看出存在 2 种不同的形态, 其中一种为片层状结构的 hBN, 另一种为接近球状结构的 oBN。图 2b 和图 2c 清晰显示了 hBN 的平行晶格条纹和 oBN 的弯曲晶格条纹。图 2d 则显示了变形的 oBN, 可能是烧结过程中施加的压力所致, 洋葱的外层结构被挤压并缠绕在一起, 使得 oBN 和 hBN 片之间形成强的结合。

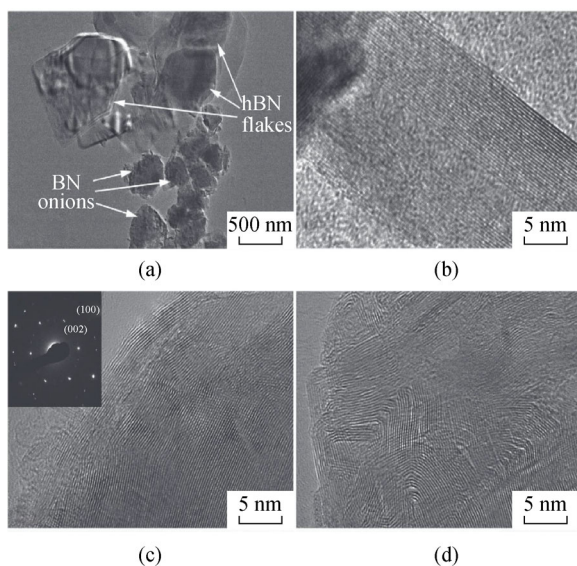


图 2 HSHBN-30 的 TEM 照片: (a) oBN 与 hBN 薄片的 TEM 照片; (b) hBN 薄片的 HRTEM 照片; (c) SAED 模式下的 oBN; (d) 变形缠绕的 oBN HRTEM 照片^[36]

Fig. 2 Microstructure images of HSHBN samples: (a) TEM image of squashed oBN and hBN flakes; (b) HRTEM image of hBN flakes; (c) oBN associated SAED pattern; (d) HRTEM images of deformed and entwined oBN^[36]

基于该方法制备 HSHBN 样品, 较传统方法所得 hBN 陶瓷具有更优异的力学性能, 主要归因于其

更高的致密化程度, 烧结致密化的原因主要有: 首先, 在 SPS 烧结压力的作用下, hBN 和 cBN 颗粒重排形成更致密的生坯, 接触更加紧密。其次, 当温度升高到 1400 °C 时, cBN 颗粒逐渐转变为 oBN, 并伴随约 50% 的相变诱导体积膨胀。因为该相变过程是从颗粒外部到内部逐步进行, 最大应力发生在颗粒外部, oBN 外层会被挤出到 hBN 片层之间的孔隙中, 进一步使样品致密化; 同时, 在这种膨胀产生的压力与 SPS 施加压力的作用下 oBN 发生形变, 亦有利于样品的致密化。此外, oBN 外层在烧结过程中与 hBN 的外层容易发生缠绕, 形成互锁结构在。cBN 原子在烧结过程中更易被活化, 与 hBN 外层原子可能形成键合作用, 从而有效提升样品的力学性能。在上述研究的基础上, 我们团队还开展了原位生长 SiC 纳米线增强 hBN 陶瓷的研究^[37], 取得了良好的效果。

2.2 均匀分散序构制备高强石墨材料

针对传统石墨制备工艺存在的周期长、制备温度高以及力学性能仍有待提升等问题, Lin 等^[38]以洋葱碳(OC)为功能基元, 开展了功能基元均匀分散序构制备碳材料的研究。Lin 等^[38]将天然石墨片(NFG)与纳米金刚石粉(NDP)混合后, 使用 SPS 在 1700 °C 进行烧结, 得到高性能块体石墨(HPBG)。图 3a 为 HPBG 制备流程示意图。在压力的作用下, 一些边缘尖锐的 NDP 被压入到石墨片中。随着温度升高, 这些纳米金刚石发生相变, 转变为石墨洋葱, 这些石墨洋葱牢固结合并嵌入石墨片中, 充当纳米疤痕, 图 3b 为 HPBG 结构的示意图。

图 4 为 HPBG 的 TEM 显微结构照片。从图 4a 中可以观察到 2 种不同的形态: 片状石墨的层状结构和球形 OC。在图 4b 中可以辨别出 2 种不同的晶格条纹, 一种是平行排列的晶格条纹, 对应石墨

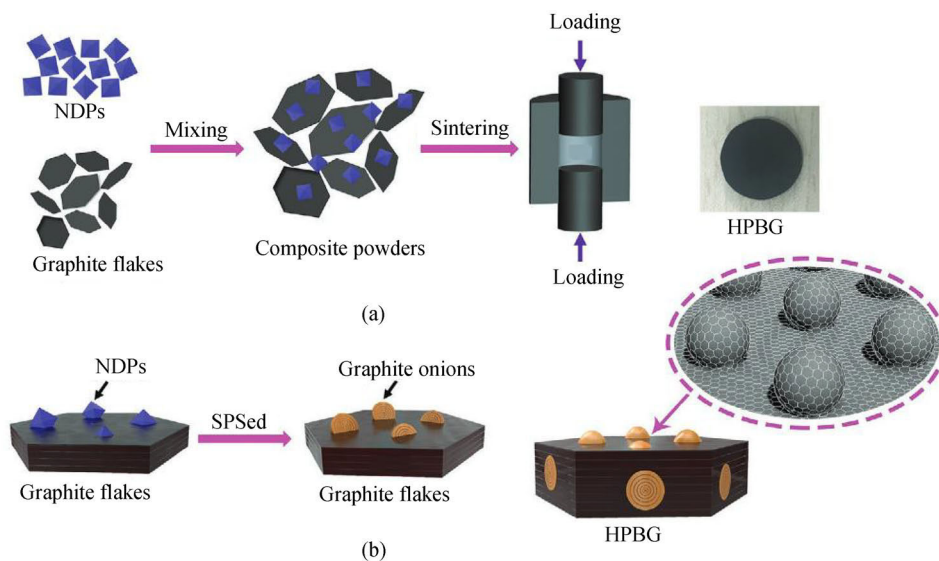


图3 HPBG 制备过程示意图: (a)HPBG 制造流程图; (b)HPBG 结构示意图^[38]

Fig. 3 Schematic diagram depicting the fabrication process of HPBG samples: (a) Production process diagram of HPBG samples; (b) Schematic diagram of HPBG structure^[38]

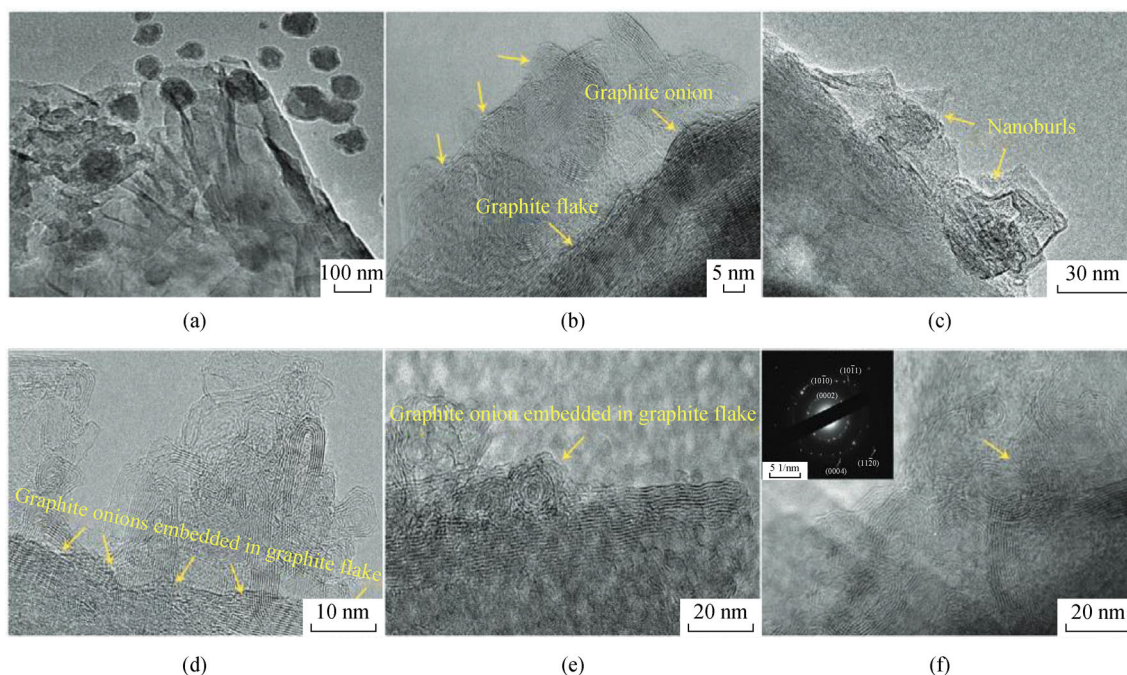


图4 HPBG 的微观结构照片: (a, c)NDP-10 HPBG 的 TEM 照片; (b, d~f)HRTEM 照片, (f)的插入图为相应的 SAED 模式^[38]

Fig. 4 Microstructure images of HPBG samples: (a, c) TEM images of NDP-10 HPBG; (b, d~f) HRTEM images with a corresponding SAED pattern that is shown as the inset of (f)^[38]

片状结构, 另一种是同心圆的晶格条纹, 对应 OC。但在图 4b 中, 还存在一些 OC 具有同轴多边形结构, 这种现象可能是因为在烧结过程中体积膨胀以及施加的压力产生的局部应力造成的变形。如图 4c 箭头所示, 纳米结疤结构在片状石墨边缘显现。图 4d 中对应的 HRTEM 照片显示了 OC 和片状石墨的晶格的边缘, 部分 OC 嵌入片状石墨层内

部。图 4e 给出了整个 OC 颗粒嵌入石墨晶格内的情形, 而图 4f 则描绘了 OC 部分嵌入石墨片中的情形。此外, 在 OC 与片状石墨的接触处, 可见一些凹坑结构, 且其对应的平行排列晶格条纹发生了弯曲, 如箭头所示。选区电子衍射(SAED)图(图 4f 内嵌)显示了石墨的(0002)、(1010)、(1011)、(0004)和(1120)晶面的衍射。

HPBG 样品的显微硬度、杨氏模量和三点弯曲强度随 NDP 含量的增加而增加。在 NDP 含量为 10% 时, HPBG 的弯曲强度为 69.6 MPa, 与 TTK-4 石墨相当, 且明显高于 IG-15 石墨。随着 NDP 含量提升至 20%, 其弯曲强度能达到 90 MPa 以上, 超过了美尔森的商业化 DS-4 石墨。NDP 的加入大大增强了 NFG 基块体石墨的力学性能。产生增强效应的前提是 NDP 向 OC 的相变并牢固地钉扎在 NFG 中, 形成强的键合作用。利用电子能量损失谱 (EELS) 结合密度泛函理论 (DFT) 计算揭示了这一过程中形成的强键合。研究发现对于 π^* 键的强度, 在界面处形成了一个谷, 这意味着 sp^3 杂化强度增加而 sp^2 杂化强度下降。通过计算得到石墨的 sp^2 杂化比例为 94%, 界面处的 sp^2 杂化比例为 42%, OC 的 sp^2 杂化比例为 91%, 界面结构密度由下式得到, 计算结果为 2.050 g/cm^3 , 高于 NFG 和 OC。

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1.92 + 1.37 \times (\text{sp}^3 \text{ fraction})$$

结合 EELS 和 DFT 结果分析可知, 烧结过程中原位引入功能基元洋葱碳实现了功能基元与基体的均匀序构, 在界面处形成了强的键合作用, 显著提升了石墨材料的性能。除了上述工作之外, 本团队还通过该策略系统研究了粉体石墨片尺寸、成型方式等对块体性能的影响^[39], 利用介孔碳制备了高强石墨材料^[40], 研究了高性能石墨材料的应力-应变性能^[41]以及考察了碳纳米管对石墨材料性能的影响^[42], 取得了较为理想的研究结果。

综上所述, 功能基元 (oBN、OC 等) 均匀序构策略实现了高性能 hBN 陶瓷和石墨材料的制备。该策略利用烧结过程中原位生成功能基元时产生的体

积膨胀, 有效填补基体颗粒间的孔隙, 缩短扩散距离, 在不添加传统烧结助剂的前提下实现难烧结材料的致密化; 另外, 通过功能基元与基体的均匀序构形成强的键合作用, 从而提升了材料的力学性能。该策略在氮化硼体系和碳材料体系都取得了很好的效果, 展现出良好的可扩展性和应用潜力。

3 层状基元转角序构策略制备高性能 BN 塑性陶瓷

Wu 等^[43]基于功能基元序构的策略利用层状基元转角序构开发了高性能 BN 塑性陶瓷。他们直接使用化学气相沉积法制备的以纳米 oBN 为原料在 $1600 \sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ 、50 MPa 烧结压力下利用 SPS 或热压烧结, 得到由转角纳米片构成的氮化硼陶瓷 (TS-BN), 图 5 为样品的微观结构。烧结的陶瓷由板片状颗粒组成, 平均晶粒尺寸随着烧结温度的升高而增加。对于在 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 烧结 5 min 的陶瓷, 板状晶粒的平均厚度约为 40 nm, 宽度约为 173 nm, 接近 oBN 纳米前驱体的尺寸。这些纳米片随机定向, 形成三维纳米结构 (图 5a)。侧立的纳米板的差分相位对比图像 (图 5b) 显示出平行的直带, 且颜色鲜明, 表明这是一个层状结构, 不同的层状结构相对绕着基面法线 (即层理面) 旋转。沿纳米板基面区域轴的高角度环形暗场 (HAADF)-STEM 观测也显示出不同 (原子层或条纹层) 分辨率下的狭窄平行区, 厚度从数层到数十层不等 (图 5c)。这些观测表明纳米板由多个纳米切片组成, 这些切片共享同一基底平面。HAADF-STEM 从同一区域采集的不同倾斜角度图

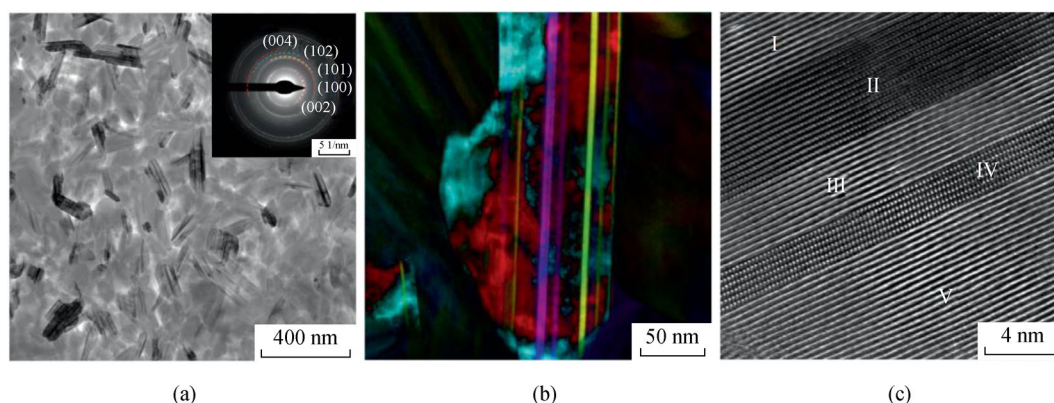


图 5 TS-BN 的微观结构照片: (a) 在 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 5 min 陶瓷的微观结构, 插入图为相应的 SAED 图; (b) 边缘朝向镜头的纳米板差分相位对比图像, 显示具有不同颜色的平行纳米片; (c) TS-BN 的 HAADF-STEM 照片^[43]

Fig. 5 Microstructure images of TS-BN samples: (a) Microstructure of the ceramic sintered at $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ for 5 min, inset shows the corresponding SAED pattern; (b) Differential phase contrast image of an edge-on nanoplate showing parallel nanoslices with different colours; (c) HAADF-STEM image of TS-BN^[43]

像表明, BN 纳米板由转角扭曲的纳米切片组成, 在块体陶瓷中无处不在, 证明了在陶瓷中存在层状基元转角序构制备的结构。综上表明, SPS 在 1600 °C 下制备的 BN 陶瓷具有层状微观结构; 相同取向的蜂窝结构 BN 原子层形成单个纳米片, 然后以不同的面内扭转角度堆叠形成纳米板; 随机定向的纳米板构成了块体陶瓷的三维纳米结构。

在 1600 °C 烧结 5 min 获得的样品 TS-BN-I 断裂应变高达 14%, 比传统方法制备的 hBN 陶瓷(约 1%) 高出一个数量级, 抗压强度最高能达到 626 MPa。一次循环压缩试验后的结果显示其轴向压缩强度为 619 MPa(应变为 13%), 在卸载后产生的永久塑性变形也能达到 8%。在多次循环测试后, 载荷–卸载循环的应力–应变曲线形成了闭合滞后环, 最大应力低于 300 MPa, 显示出显著的非弹性行为。TS-BN 陶瓷在非弹性变形阶段, 耗散能随应力线性增加, 在最大应力为 300 MPa 时达到约 1 MJ/m³, 在更高的压应力下, 耗散能还会继续增加, 最大可达 45 MJ/m³, 说明 TS-BN 陶瓷具有很好的抗冲击性能。

图 6 为样品 TS-BN 压缩断裂后的微观结构照片。图 6a 展示了断裂面的典型形态, 纳米板因严重压缩(白色箭头标记)而出现大量弯曲。暗场 TEM 观测显示纳米板出现了大量弯曲(图 6b 中白色箭头)和剥离分层(图 6b 中橙色箭头)。剥离分层仅局限于单个纳米板内部, 无法跨越相邻的纳米板扩展形成微裂纹。因此, 三维块体 TS-BN 是一种以互锁纳米板为特征的纳米结构材料, 其微观结构与压缩的六方氮化硼陶瓷形成鲜明对比, 后者的微裂纹容易沿着纳米层压板的基面扩展, 导致变形能力弱。在变形的 TS-BN 样品中, 缺陷主要存在于曲折的边界上(图 6c), 纳米板中观察到大量涟漪和位错(图 6d), 而这些在最初的 TS-BN 纳米板中均不存在(图 6c)。这些缺陷(即扭折、分层、涟漪、位错等)对 TS-BN 陶瓷中的塑性变形起到了重要作用。TS-BN 的力学性能提升可以归因于: 一是转角序构的引入, 使材料本征变形能力大幅提升; 二是样品中存在三维互锁的组织结构, 从而有效阻止了扭折、分层、涟漪、位错等缺陷的传播, 将变形局限在单个纳米片的内部。因此, TS-BN 陶瓷不仅具有高强度, 还具有很好的塑性变形能力。

该层状基元转角序构制备高塑性 BN 陶瓷的策略构建了“纳米片层内扭转堆叠”与“纳米板空间随机互锁”的多级结构, 将扭转角作为新的结构引入到块体材料; 通过激活扭折、位错、局域化分层等

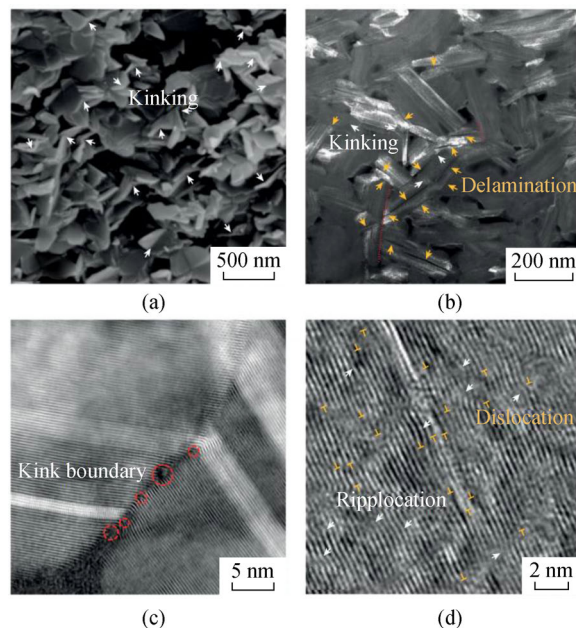


图 6 TS-BN 断裂后的微观结构照片: (a)破碎表面的 TEM 照片; (b)TS-BN 断裂后的 DF-STEM 照片; (c)带有局部缺陷的折结边界 HAADF-STEM 照片; (d)基底原子层间涟漪(箭头)和位错(⊥)的 TEM 照片^[43]

Fig. 6 Microstructure images of TS-BN samples after fracture: (a) TEM image of fractured surface; (b) DF-STEM image of TS-BN samples after fracture; (c) HAADF-STEM image of a kink boundary with local defects; (d) TEM image of ripple location (arrows) and dislocation (⊥) between basal atomic layers^[43]

多种本征变形方式, 并利用三维互锁作用将这些缺陷严格限制在单个纳米片内部, 实现能量耗散与损伤容限的提升。基于在 BN 陶瓷中验证成功的这一范式, 可系统拓展至石墨、三元层状碳/氮化物陶瓷(MAX)相等其他层状材料体系, 从而为研发兼具高强度韧性、高塑性的新型塑性陶瓷提供通用的方法和路径。

4 功能基元一维序构策略制备高强石墨材料

受纳米纤维的启发, Wang 等^[44]利用电纺丝技术将纳米金刚石(ND)引入聚丙烯腈基纳米纤维(PDNF)中, 烧结后使功能基元以一维阵列序构的方式制备高性能石墨材料。Wang 等^[44]将 ND 和聚丙烯腈(PAN)粉末混合并分散溶解在二甲基亚砷(DMSO)中。同时将均匀混合的 NFG 和聚乙烯吡咯烷酮(PVP), 粉末分散溶解在无水乙醇中。经过电纺和电喷后, 制备 PDNF/NFG 复合薄膜, 经碳化、粉碎后使用 SPS 在 1800 °C、50 MPa 压力下进行烧结。PDNF 增强型高性能石墨被命名为

O-HPG, 制备过程如图 7 所示。对照实验以金刚石和 PAN 纤维为原料采用了均匀序构制备的流程,

制备方法参照了之前的工作^[38], 这些样品被命名为 H-HPG。

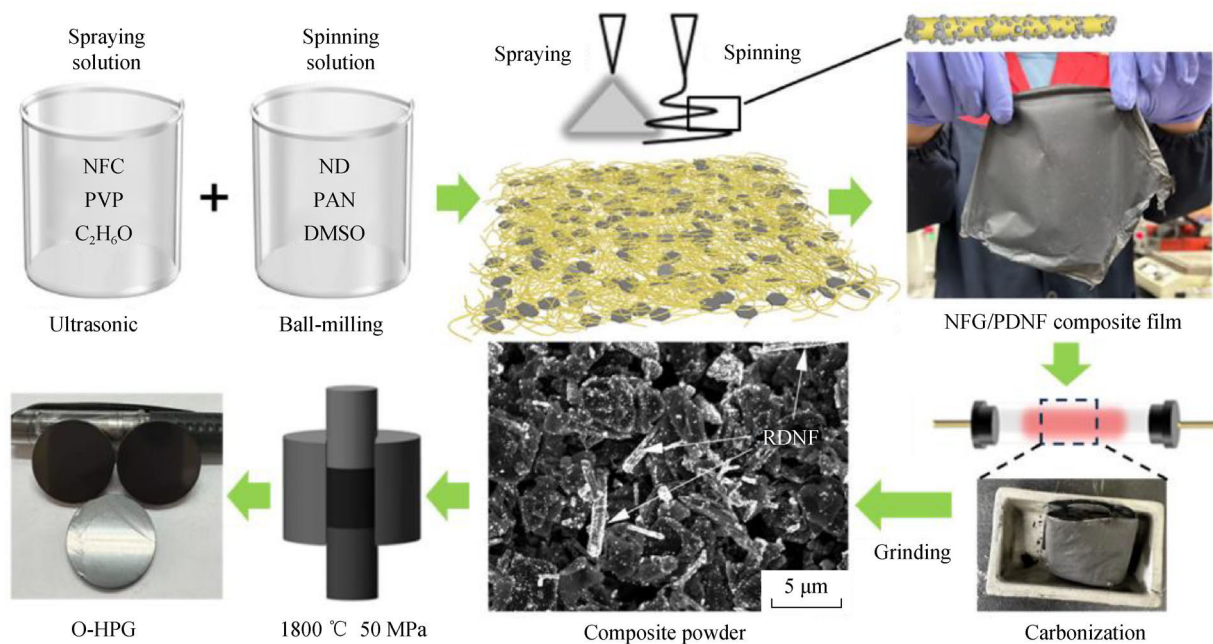


图 7 O-HPG 制备过程示意图^[44]

Fig. 7 Schematic image depicting the fabrication process of O-HPG samples^[44]

O-HPG 样品的三点弯曲强度随 PDNF 含量增加而增加, 当 PDNF 质量分数为 30% 时, O-HPG 的弯曲强度达到 119 MPa, PDNF 含量超过 30%, O-HPG 的强度进一步增至 145 MPa, 但增幅有所放缓。对比样品 H-HPG 的弯曲强度随着 NFG 基体中 ND 和 PAN 质量分数的增加呈先升后降的趋势, 在 30% 时达到峰值, 总体而言, PDNF 增强的 O-HPG 样品的弯曲强度较 H-HPG 平均提高了约 30%。探究其增强机理, 图 8 为 O-HPG 的裂纹扩展和微观结构图及增强机理示意图。分析图 8 可知, O-HPG 的强化机制主要是裂纹偏转和桥接效应。如图 8e 所示, 当主裂纹在基体中扩展时遇到 PDNF, 裂纹尖端产生的集中应力被 PDNF 吸引, 使其承受部分载荷, 迫使裂纹偏转。图 8a~图 8c 显示了样品 O-HPG-30 的裂纹发生了多次的偏转, 这种断裂行为源于 PDNF 与天然石墨之间显著的模量差异及其与基体之间的强界面键合作用。使用 TEM 可以清楚地观察到 PDNF 的桥接作用。如图 8d 和图 8g 所示, 裂纹在 PDNF 桥接处停止扩展, 一些微小的 PDNF 在裂纹通过后失效(图 8f), 证实了 PDNF 在 O-HPG 中的桥接作用。桥接效应产生的额外应变能耗散主要受桥接力和基质/增强体界面剥离临界长度的影响, 而一维 PDNF 与 NFG 间

的强界面键合确保了桥接力的作用。此外, 在样品 O-HPG 中 NFG 存在许多皱褶区域(图 8d), 这些皱褶可容纳微小应变, 产生额外的拉伸位移(图 8h), 并分散裂纹尖端附近的集中应力, 从而在整体增强中发挥协同作用。

该策略通过静电纺丝技术将纳米金刚石与聚丙烯腈构筑成一维纳米纤维, 实现了功能基元在一维方向的有序排列, 制备出了高性能的石墨材料。功能基元一维序构制备的石墨材料因一维 PDNF 与石墨基体间巨大的模量差异及强界面结合, 在材料断裂时引发了显著的裂纹偏转与桥接效应, 通过延长裂纹扩展路径并消耗额外应变能, 使材料的弯曲强度最高达到了 145 MPa, 较均匀序构的对照样平均提升了 30%。这一研究展示功能基元一维序在碳材料设计中的有效性, 证明了功能基元不同的序构化设计在提升材料性能方面具有重要影响, 这为其他高性能复合材料的设计与制备提供了借鉴。

5 功能基元三维“榫卯结构”序构制备高性能碳碳复合材料

碳纤维增强碳碳复合材料因具有密度低、机械性能优异等优势而获得广泛关注, Li 等^[45]利用洋葱碳为功能基元, 通过三维“榫卯结构”序构

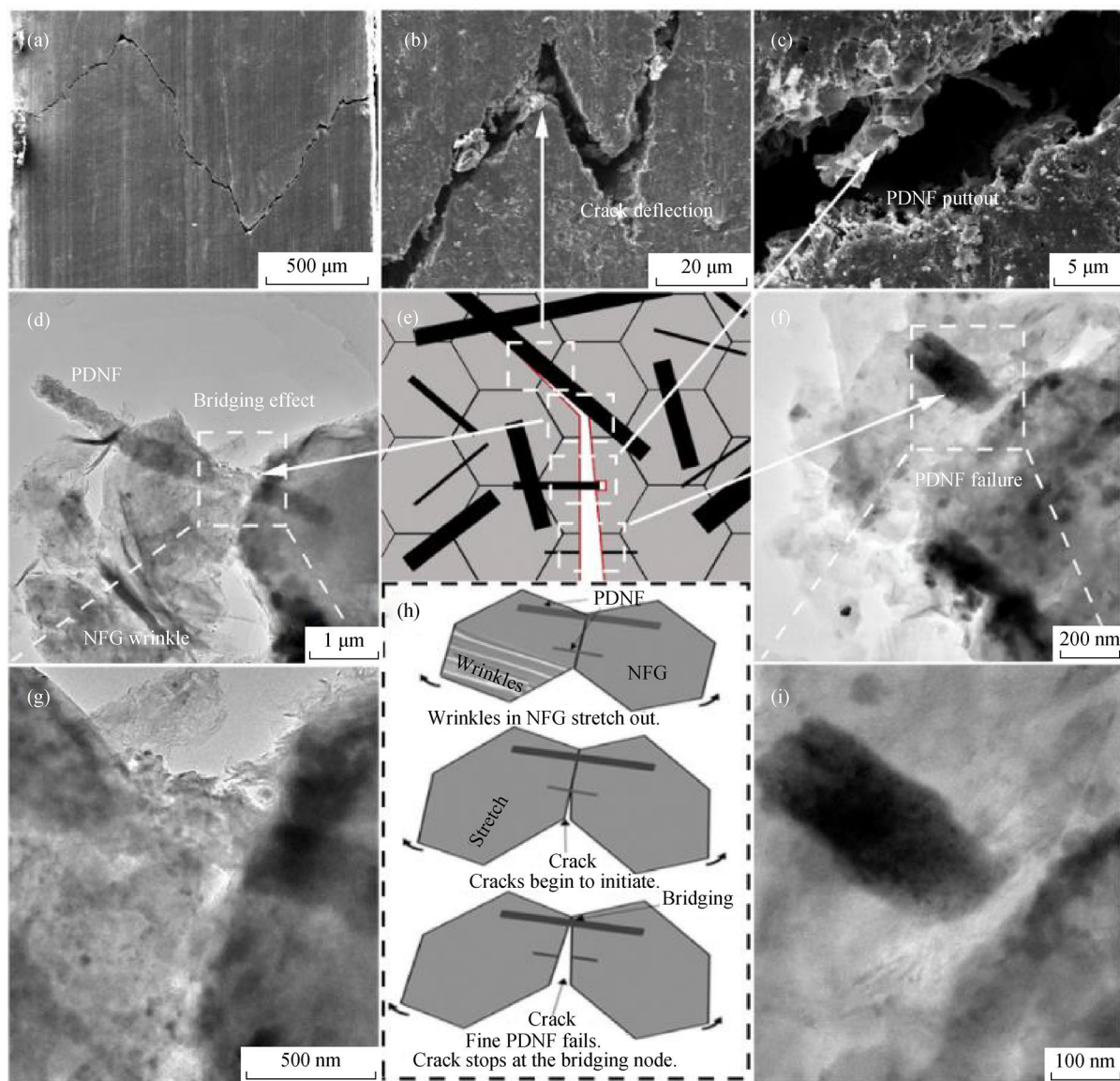


图8 O-HPG的微观结构和增强机理图: (a~c)O-HPG-40 裂纹的 SEM 照片; (d, g)PDNF 桥接处的 TEM 照片; (e)增强机理示意图; (f, i)PDNF 裂纹失效的 TEM 照片; (h)NFG 皱纹的拉伸效应^[44]

Fig. 8 Microstructure and enhancement mechanism images of O-HPG samples: (a~c) SEM image of O-HPG-40 cracks; (d, g) TEM images of bridging node of PDNF; (e) Schematic diagram of enhancement mechanism; (f, i) TEM images of fracture failure of PDNF; (h) Stretching effect of NFG wrinkles^[44]

制备了高性能碳碳复合材料。Li 等^[45]将预处理后的碳纤维布浸入到金刚石的分散液中,然后将浸有金刚石的纤维布层层叠放在一起,干燥后放入内径为 15 mm 的石墨模具,使用 SPS 在 1750 °C 进行烧结,得到超强层状碳碳复合材料块体(LB)。LBs 样品的三点弯曲强度在 LB-40 时达到峰值 1206.5 MPa,之后随着 ND 含量的增加而降低,最低弯曲强度(806 MPa)仍明显高于目前大多数类似材料(300~500 MPa)。在目前的研究中,LBs 具有与这种分层结构相关的各向异性。LBs 层间的粘合强度较弱,而 LBs 层内的强度却很高。因此,应在碳纤维布的

编织方向上纵向制作弯曲结构。

图 9 为 LBs 的微观断裂结构 SEM 照片。随着 ND 含量的增加,断裂模式从单一的碳纤维断裂逐渐转变为碳纤维和基体的整体断裂。对于样品 LB-35, OC 含量较低,未能覆盖碳纤维,导致界面结合不充分,不能有效地传递载荷,同时 OC 基体不连续,在应力作用下部分碳纤维会断裂,其余纤维仅承担少量载荷而得以保留,因此断裂后样品中仍存在未断裂碳纤维。当 ND 含量增至 40% (质量分数)时,烧结块体的抗弯强度显著提升至 1206.5 MPa,这归因于 OC 与碳纤维的牢固结合,

使碳纤维得以发挥其潜力, 其中相变产生的 sp^3 杂化起到了关键作用。随着 ND 含量进一步增加, LB 样品的抗弯强度呈下降趋势, 主要是由于纤维体积分数降低。与碳纤维相比, OC 基体的强度较低。样品 LB-35 中碳纤维布之间的 OC 较少, 形成的 OC 层间基质很薄, 很难发生分层。而样品 LB-50 的层间基质相对较厚, 受外部载荷时裂纹首先在较弱层间基质中萌生扩展, 首次断裂后样品仍具备一定承载能力, 载荷随后转移至碳纤维。从图 9d 可以看出, 90° 纤维基本完好无损, 表明大部分荷载由 0° 纤维分担, 0° 纤维和基体整体断裂。

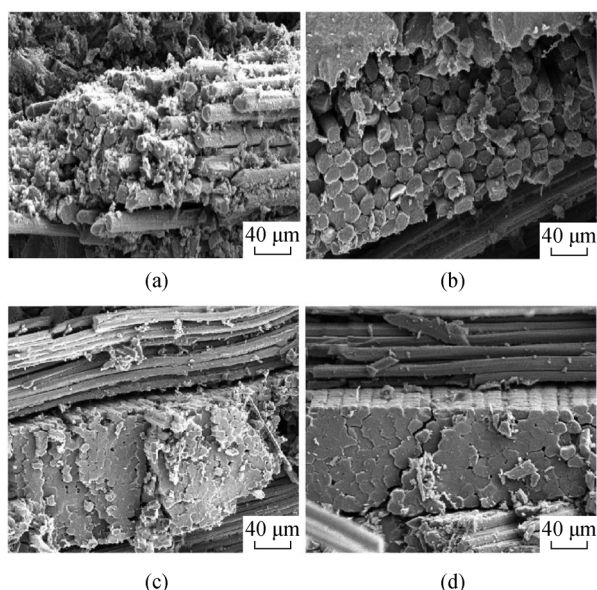


图 9 LB 断裂后的 FESEM 微观结构照片: (a)LB-35; (b)LB-40 (c)LB-45; (d)LB-50^[45]

Fig. 9 FESEM microstructure images of LB samples after fracture: (a) LB-35; (b) LB-40; (c) LB-45; (d) LB-50^[45]

力学性能提升的决定性贡献源于在碳纤维行交叉点原位生成的 OC 所形成的坚固“榫卯结构”。在原始碳纤维布中, 纤维束交叉处存在间隙, 这些间隙后来变成了“榫眼”, 而在浸渍过程中进入间隙的 ND 转变为 OC, 并烧结在一起, 成为“OC 榫”, 如图 10 所示。当添加 ND 较少时, 如样品 LB-35, OC 几乎无法完全覆盖碳纤维。随着 ND 的含量增加, 如样品 LB-40, 碳纤维的表面被 OC 覆盖。随着 ND 含量的进一步增加, OC 开始在纤维之间聚集。在烧结后原位生成的 OC 在位于碳纤维束的交叉位置形成了坚固的“榫眼和榫头结构”。这种特殊“榫卯结构”的密度与织物中碳纤维纤维束交叉处的间隙密度相同。在间隙大小不变的情况下, 增加“榫卯结构”的密度, 可以增加层间剪切强度, 从而提升样品的强度。

该工作以洋葱碳为功能基元, 利用“榫卯结构”序构制备了高性能碳碳复合材料。该结构通过强化界面结合与载荷传递, 使洋葱碳与碳纤维形成强界面, 将断裂模式由纤维拔出调控为纤维与基体整体断裂, 同时利用“榫卯”的机械锁合作用抑制层间分层, 最终实现 1206.5 MPa 的超高抗弯强度。这一“功能基元三维榫卯结构序构”的策略不仅为碳碳复合材料的强韧化提供了新路径, 也为纤维增强陶瓷基、金属基复合材料以及梯度界面材料等的制备提供了重要参考。

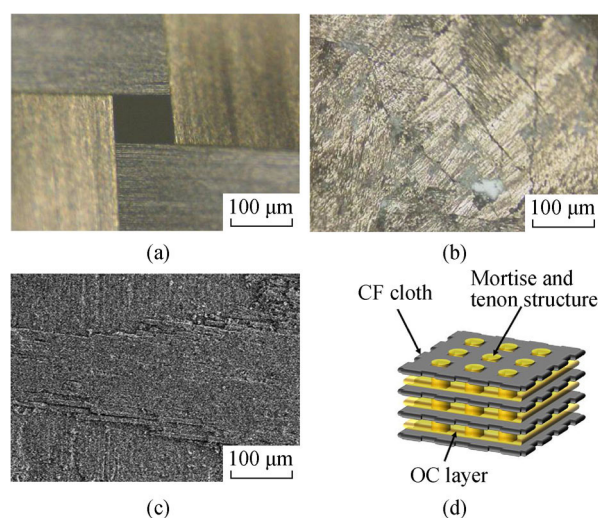


图 10 样品显微照片及“榫卯结构”示意图: (a)碳纤维布的光学照片; (b)LB-40 的光学照片; (c)LB-40 的 FESEM 照片; (d)样品中形成“榫卯结构”的示意图^[45]

Fig. 10 Microscopic images of the samples and schematic diagrams of “mortise and tenon structures”: (a) Optical photo of carbon fiber cloth; (b) Optical photo of LB-40; (c) FESEM image of LB-40; (d) Schematic diagram of the formation of “mortise and tenon structure” in the sample^[45]

表 1 给出了不同功能基元序构策略制备类碳材料的性能对照表。功能基元序构策略实现了难烧结类碳材料的性能提升, 该策略通过引入具有特定物理化学效应的“活性基元”(金刚石、立方氮化硼), 利用其在烧结过程中的原位演化, 转化为功能基元, 实现了在不添加其他杂质元素的前提下完成样品的致密化和性能强化。无论是均匀分散序构、层状转角序构、一维序构, 还是“榫卯”序构, 其核心均不再依赖于单一组分本征性能的简单叠加, 而是通过序构化设计激活特定的界面与结构效应, 将传统材料中随机、脆性的失效模式转变为可控、耗能的协同失效模式, 从而系统性地提升了材料的力学性能。

表 1 不同功能基元序构策略制备类碳材料的性能对照表

Ordering strategies	Functional unit	Material system	Performance improvement	Main performance improvement mechanism	Ref.
Uniformly dispersed ordered structure	Onion BN	hBN ceramic	Relative density reaches 97.6%; Mechanical properties are 2–3 times that of pure hBN ceramic	Phase transformation-induced volume expansion promotes densification; strong interfacial bonding effect	[36]
	Onion carbon	Graphite	Flexural strength>90 MPa		[38]
Layered twisted ordered structure	Layered BN	BN plastic ceramic	Fracture strain reaches 14%; compressive strength is 626.0 MPa; Energy dissipation reaches 45.0 MJ/m ³	Multiple defects (kink, delamination, dislocation) synergistically dissipate energy, with restricted defect propagation	[43]
One-dimensional ordered structure	Onion carbon	Graphite	Flexural strength 145.0 MPa	Strong interfacial bonding effect; crack deflection and fiber bridging effect	[44]
“Mortise and tenon” ordered structure	Onion carbon	C/C composite	Flexural strength 1206.5 MPa	Strong interfacial bonding; 3D mortise-tenon structure enables effective load transfer to fibers	[45]

6 结论和展望

本文综述了功能基元序构策略在制备高性能类碳材料(石墨、氮化硼及其复合材料)中的最新研究进展，系统介绍了多种功能基元序构方式制备的高性能类碳材料，该策略通过调控功能基元的空间排布方式，构建多级能量耗散与载荷传递网络，成功实现了性能上的大幅提升。该制备策略在氮化硼和石墨等类碳材料体系中得到了成功的验证，展现出良好的可行性与广阔的应用潜力，为开发下一代高强韧、高塑性结构材料提供了可靠且可扩展的新路径。

展望未来，功能基元序构策略为类碳材料的性能调控提供了全新范式，具有广阔的发展前景。后续研究可进一步探索：1) 多类型功能基元的协同序构，实现多功能一体化材料设计；2) 结合计算模拟与人工智能，高通量筛选与优化功能基元组合与序构方式；3) 拓展该策略在更多极端服役条件下的应用，如高温、高压、辐照等环境；4) 推进序构材料的可控制备与规模化应用，推动类碳材料在航空航天、电子器件、核能等高端领域的工程化应用。

参考文献:

[1] 林伟坚, 张博文, 汪卫华. 从全球气候变化、制造业产业升级、国家安全及材料基因工程维度探讨材料科学发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 336–342.
LIN Weijian, ZHANG Bowen, WANG Weihua. Bull Chin Acad Sci, 2022, 37(3): 336–342.

[2] 王静, 彭寿. 先进玻璃材料: 关键领域的透明基石[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(10): 2753–2754.
WANG Jing, PENG Shou. J Chin Ceram Soc, 2025, 53(10): 2753–2754.

[3] 曾昆, 李晓芃, 沈紫云, 等. 我国新材料产业集群发展战略研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 343–351.

ZENG Kun, LI Xiaopeng, SHEN Ziyun, et al. Bull Chin Acad Sci, 2022, 37(3): 343–351.

[4] CHENG M Y, FU C L, OKABE R, et al. Artificial intelligence-driven approaches for materials design and discovery[J]. Nat Mater, 2026, 25(2): 174–190.

[5] 孙宝德, 疏达, 付华栋, 等. 高端新材料智能制造的发展机遇与方向[J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 152–160.
SUN Baode, SHU Da, FU Huadong, et al. Strateg Study CAE, 2023, 25(3): 152–160.

[6] 刘加平, 元强, 胡张莉, 等. 探索水泥基材料基因本源, AI赋能材料设计新范式[J]. 硅酸盐学报, 2026, 54(3): 821–822.
LIU Jiaping, YUAN Qiang, HU Zhangli, et al. J Chin Ceram Soc, 2026, 54(3): 821–822.

[7] 曹志增, 王桂吉, 罗斌强. 基于机器学习的金属材料力学性能智能预测研究现状与展望[J]. 力学进展, 2026, 56(1): 123–168.
CAO Zhizeng, WANG Guiji, LUO Binqiang. Adv Mech, 2026, 56(1): 123–168.

[8] CHEN K X, LI L. Ordered structures with functional units as a paradigm of material design[J]. Adv Mater, 2019, 31(32): 1901115.

[9] YE C C, FENG T, LIU W S, et al. Functional unit: A new perspective on materials science research paradigms[J]. Acc Mater Res, 2025, 6(8): 914–920.

[10] CHENG Z, ZHOU H F, LU Q H, et al. Extra strengthening and work hardening in gradient nanotwinned metals[J]. Science, 2018, 362(6414): eaau1925.

[11] LEI Z F, LIU X J, WU Y, et al. Enhanced strength and ductility in a high-entropy alloy via ordered oxygen complexes[J]. Nature, 2018, 563(7732): 546–550.

[12] LI S, LOU X N, ZOU B, et al. Introducing PbSe quantum dots and manipulating lattice strain contributing to high thermoelectric performance in polycrystalline SnSe[J]. Mater Today Phys, 2021, 21: 100542.

[13] JIANG X M, DENG S Q, WHANGBO M H, et al. Material research from the viewpoint of functional motifs[J]. Natl Sci Rev, 2022, 9(7): nwac017.

[14] WEI Q P, LIU G S, ZHU C W, et al. Ordered structures with functional units (OSFU) enabled highly robust diamond anode for electrochemical decomposing of organic pollutants[J]. Chem Eng J, 2020, 397: 125465.

[15] ZHAO W L, JIAO J M, SHE Y H, et al. Tailored ordered structures with functional units of distorted [NbO₆] and antiparallel [GeO₄] for

- enhanced birefringence in germanate crystal[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, 10(22): 2201704.
- [16] LI Z M, GAO X Y, YANG J K, et al. Designing ordered structure with piezoceramic actuation units (OSPAU) for generating continual nanostep motion[J]. *Adv Sci*, 2020, 7(16): 2001155.
- [17] PENG G Y, HU L, QU W B, et al. Structural-functional unit ordering for high-performance electron-correlated materials[J]. *Interdiscip Mater*, 2023, 2(1): 30–52.
- [18] SONG J W, CHEN C J, ZHU S Z, et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material[J]. *Nature*, 2018, 554(7691): 224–228.
- [19] WANG B Y, ZHAO S, LIAO Q Y, et al. Advanced cathode design: Ordering LiMn₆ functional units in Li-rich layered oxides[J]. *Sci China Mater*, 2026, 69(6): 3183–3194.
- [20] JI J L, TANG Q H, YAO M J, et al. Functional-unit-based material design: Ultralow thermal conductivity in thermoelectrics with linear triatomic resonant bonds[J]. *J Am Chem Soc*, 2022, 144(40): 18552–18561.
- [21] 王子兴, 李佳佳, 刘莹, 等. 基于功能基元序构策略提升Ag₂Se基柔性热电薄膜的性能[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(1): 218–228.
WANG Zixing, LI Jiajia, LIU Ying, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(1): 218–228.
- [22] PAN Q S, DING K Q, GUO S, et al. Superior resistance to cyclic creep in a gradient structured steel[J]. *Science*, 2025, 388(6742): 82–88.
- [23] PAN Q S, LU L. Fatigue in metals and alloys[J]. *Nat Mater*, 2026, 25(3): 357–365.
- [24] TIAN Y, ZENG W, DONG X H, et al. Enhanced UV nonlinear optical properties in layered germanous phosphites through functional group sequential construction[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63(36): e202409093.
- [25] 夏立博, 陈建, 李春林, 等. 高强高密石墨材料的制备研究现状[J]. *炭素技术*, 2008, 27(6): 24–27.
XIA Libo, CHEN Jian, LI Chunlin, et al. *Carbon Tech*, 2008, 27(6): 24–27.
- [26] 杜爱芳, 张胜恩, 路培中, 等. 高强度各向同性石墨材料的制备与研究[J]. *炭素技术*, 2020, 39(3): 41–44.
DU Aifang, ZHANG Sheng'en, LU Peizhong, et al. *Carbon Tech*, 2020, 39(3): 41–44.
- [27] YANG H J, LUO R Y. Effect of coal tar pitch modified by sulfur as a binder on the mechanical and tribological properties of bronze-impregnated carbon-matrix composites[J]. *Mater Sci Eng A*, 2011, 528(6): 2929–2935.
- [28] FANG M D, TSENG W L, JOW J J, et al. Improving the self-sintering of mesocarbon-microbeads for the manufacture of high performance graphite-parts[J]. *Carbon*, 2012, 50(3): 906–913.
- [29] ZHAO H C, HE Z, GUO X H, et al. Effect of the average grain size of green pitch coke on the microstructure and properties of self-sintered graphite blocks[J]. *New Carbon Mater*, 2020, 35(2): 184–192.
- [30] LEE S H, HWANG Y M, BYUN T S, et al. Effect of heating rate, temperature, and residence time during graphitization on the mechanical and electrical properties of isotropic graphite blocks[J]. *Carbon*, 2023, 208: 443–451.
- [31] LI S W, WU H H, HUANG C H, et al. Waste into wealth: Plasticization treatment of waste graphite powder and efficient impregnation strategy for the preparation of graphite blocks[J]. *Mater Sci Eng B*, 2025, 314: 118071.
- [32] SUN M Y, BAI Y H, LI M X, et al. Structural design and energy absorption mechanism of laminated SiC/BN ceramics[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2018, 38(11): 3742–3751.
- [33] CHEN L, WANG Y J, SHEN H F, et al. Effect of SiC content on mechanical properties and thermal shock resistance of BN–ZrO₂–SiC composites[J]. *Mater Sci Eng A*, 2014, 590: 346–351.
- [34] SUN Q A, SONG J J, CHEN S N, et al. Tribological behavior and lubrication mechanism of h-BN/ceramic composites: Effects of h-BN platelet size and ceramic phase[J]. *Tribol Int*, 2023, 187: 108722.
- [35] 葛雷, 杨建, 丘泰. 六方氮化硼的制备方法研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2008, 27(6): 22–25.
GE Lei, YANG Jian, QIU Tai. *Electron Compon Mater*, 2008, 27(6): 22–25.
- [36] YANG H T, FANG H L, YU H, et al. Low temperature self-densification of high strength bulk hexagonal boron nitride[J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 854.
- [37] GU S J, YU H, WU X M, et al. *In situ* grown silicon carbide nanowires reinforced hexagonal boron nitride ceramics[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2025, 45(15): 117603.
- [38] LIN K P, FANG H L, GAO A, et al. Nanoburl graphites[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(17): 2007513.
- [39] WANG J Z, GU S J, YU H, et al. Universal high-performance bulk graphites from natural flake graphite by rapid sintering[J]. *Carbon*, 2024, 217: 118630.
- [40] MIAO B W, WANG J Z, LI J L, et al. Sintering and mechanical properties of carbon bulks from ordered mesoporous carbon and nano diamond[J]. *J Adv Ceram*, 2022, 11(11): 1815–1823.
- [41] GU S J, CHEN H L, WANG J Z, et al. Improving the fracture strain of graphite materials by *in-situ* porosity introduction by two-step sintering[J]. *New Carbon Mater*, 2025, 40(3): 703–716.
- [42] LIN K P, FANG H L, WEN F, et al. Ultra-strong nanographite bulks based on a unique carbon nanotube linked graphite Onions structure[J]. *Carbon*, 2019, 149: 436–444.
- [43] WU Y J, ZHANG Y, WANG X Y, et al. Twisted-layer boron nitride ceramic with high deformability and strength[J]. *Nature*, 2024, 626(8000): 779–784.
- [44] WANG J Z, GU S J, YU H, et al. Robust natural graphite-based bulk graphites with nanodiamond-containing fibrous nanofiller as reinforcement by electrohydrodynamic processing[J]. *Ceram Int*, 2024, 50(13): 24387–24396.
- [45] LI Z J, LIN K P, FANG H L, et al. The mortise and tenon structure enabling lamellar carbon composites of ultra-high bending strength[J]. *J Mater Sci Technol*, 2023, 133: 249–258.

作者贡献声明：

顾士甲：明确写作方向、设计论文框架、收集撰写资料、撰写论文
曹 响：绘制图表、参与数据分析与论文撰写
孙金阳：参与数据分析与论文撰写
王君卓：参与数据分析与论文撰写
陆晓芳：参与数据分析与论文撰写
李建林：论文撰写及修改
王连军：论文撰写及修改
江 堯：提出写作方向、论文撰写及修改

Research Progress on Preparation of High-Performance Carbon-Like Materials Based on Functional Units Ordering Strategy

GU Shijia^{1,2}, CAO Xiang^{1,2}, SUN Jinyang^{1,2}, WANG Junzhuo^{1,2}, LU Xiaofang^{1,2}, LI Jianlin³, WANG Lianjun^{1,2}, JIANG Wan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Extended Abstract

Conventional carbon materials such as graphite and hexagonal boron nitride, as well as other difficult-to-sinter carbon-based materials, suffer from some challenges such as lengthy preparation processes and high energy consumption. The existing strategy of assembling and structurally regulating functional building blocks across scales leads to significant improvements in the mechanical and thermal properties of these materials.

In the preparation of high-performance hexagonal boron nitride ceramics, using onion boron nitride (oBN) as functional building blocks, cubic boron nitride (cBN) is introduced and transformed into oBN during the sintering process. The volume expansion associated with this phase transformation promotes densification, resulting in high-strength hexagonal boron nitride (HSHBN) with improved mechanical properties. Also, BN plastic ceramics are fabricated by a twisted architecture approach with nano-oBN as a raw material. The ceramics composed of twisted nanosheets are formed *via* spark plasma sintering (SPS), achieving a fracture strain of up to 14% and a compressive strength of 626 MPa, and demonstrating the superior plastic deformation capacity and impact resistance.

In the preparation of graphite materials, high-strength graphite is fabricated through a uniformly dispersed architecture *via* mixing nano-diamond (ND) with natural graphite. After sintering, ND is converted into onion carbon (OC), forming a "nano-scar" structure that significantly enhances mechanical properties, with flexural strength of > 90 MPa. In a one-dimensional functional building block architecture, ND is introduced into polyacrylonitrile fibers *via* electrospinning, forming a one-dimensional nanofiber-reinforced structure that further increases flexural strength to 145 MPa. The strengthening mechanisms include crack deflection and bridging effects. Furthermore, a mortise-and-tenon structure architecture is employed to fabricate carbon-carbon composites *via* introducing ND into carbon fiber cloth, which transforms into an OC "mortise-and-tenon" structure after sintering. This significantly improves interlaminar bonding, achieving a flexural strength of 1206.5 MPa.

Summary and prospects The strategy of "functional building block architecture" has a promising potential in the preparation of high-performance carbon-like materials (such as graphite, boron nitride, and their composites). High-performance carbon-like materials are successfully fabricated *via* architecting various functional building blocks (such as onion carbon and onion boron nitride), achieving substantial improvements in the performance. This strategy provides an effective pathway for the development of next-generation high-performance carbon-like materials. The functional building block architecture strategy offers a novel paradigm for tailoring the properties of carbon-like materials, exhibiting broad prospects for development. Future research should involve: 1) the synergistic architecture of multiple types of functional building blocks to achieve multifunctional integrated material design; 2) combining computational simulations with artificial intelligence for high-throughput screening and optimization of functional building block combinations and architecture methods; 3) extending the application of this strategy to more extreme service conditions, such as high temperature, high pressure, and irradiation environments; and 4) advancing the controllable preparation and large-scale application of architected materials to promote the engineering application of carbon-like materials in high-tech fields such as aerospace, electronic devices, and nuclear energy.

Keywords carbon-like material; functional units ordering; mechanical properties; new paradigm