科学通报
悦读科学
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

室温制备高性能石墨烯基碳纤维

李鹏[1], 蔡刚峰[1], 许震[1], 刘英军[1], 徐志平[2], 高超[1*]

1. 浙江大学高分子科学与工程学系, 杭州 310027
2. 清华大学工程力学系, 北京 100084
* 联系人, E-mail: chaogao@zju.edu.cn

Room-temperature preparation of high-performance graphene-based carbon fibers

Peng Li[1], Gangfeng Cai[1], Zhen Xu[1], Yingjun Liu[1], Zhiping Xu[2] & Chao Gao[1*]

[1] *Department of Polymer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*
[2] *Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
* Corresponding author, E-mail: chaogao@zju.edu.cn

doi: 10.1360/CSB-2026-0574

碳纤维是一类含碳量90%以上的高性能纤维材料, 具有高比强度、高比模量、低密度及良好的化学稳定性, 在航空航天、高端装备和新能源汽车等领域具有重要应用价值. 传统碳纤维通常以聚丙烯腈、沥青等石油基或天然高分子如粘胶等有机前驱体为原料, 经由预氧化、碳化和石墨化等高温热处理路线制备, 处理温度通常超过1300℃, 部分阶段甚至可达3000℃[1]. 尽管该技术路线可获得性能优异的碳纤维材料, 但其高温热处理过程能耗较高, 相关能源和惰性气体消耗约占碳纤维总成本的40%[2]. 因此, 发展节能、高效的碳纤维制备方法成为该领域的重要研究方向.

石墨烯纤维是由石墨烯有序组装排列而成的新型碳质纤维材料. 2011年, 浙江大学高超团队采用氧化石墨烯水相液晶分散液经湿法纺丝及化学还原制得石墨烯纤维, 提出一条由石墨经氧化石墨烯组装还原来制备高性能碳纤维的全新路线[3]. 一般通过塑化拉伸后高温碳化及石墨化来提升强度、模量等力学性能[4–6]. 理论上, 若能在较低温度下有效脱除氧化石墨烯的含氧官能团, 有望直接制备碳纤维. 然而, 在实际纺丝过程中, 由于纺丝液浓度较低, 凝固干燥时纤维的径向会大幅收缩, 导致片层发生无序折叠和堆积, 形成微纳孔等缺陷, 使得化学还原后的石墨烯纤维力学性能尚不理想.

针对这一问题, 我们提出了一种“分域剪切多流场”湿法纺丝方法. 通过在毫米级纺丝流道中引入多孔微格栅(孔的大小可调, 最小为12 μm×12 μm), 将氧化石墨烯液晶纺丝液分割为数千超细微纤亚单元, 进而原位逐步融合为一根具有多级组装结构的凝胶丝. 进入凝固浴后, 氧化石墨烯基元进一步发生限域折叠和细晶化, 从而大幅减少并减小微孔缺陷, 常温化学还原后成功制备出高性能石墨烯基碳纤维(图1). 该成果发表于*Nature Materials*[7].

本工作在分子尺度上控制了氧化石墨烯在纤维受限空间内的特征排列, 实现了氧化石墨烯二维基元的微纤液晶织构及其可控限域折叠. 统计结果表明, 限域折叠的石墨烯纤维中, 组装晶区的平均面积比传统自由折叠石墨烯纤维减少约80%, 且晶区尺寸更加均匀(图1(d~g)). 采用三维聚焦离子束切割断层扫描研究纤维内的孔洞缺陷特征, 发现限域折叠与自由折叠两种方法导致的孔缺陷存在本质差异, 包括孔缺陷的含量、尺寸、形状与分布等. 在限域折叠纤维中, 均匀且细小组装晶区之间形成的孔缺陷显著减少, 孔隙率低至8.7%; 孔尺寸大幅减小, 平均体积降低一个数量级; 孔形状由自由折叠纤维中常见的扁平大孔变为针状细孔; 同时孔洞缺陷在纤维基体中分布也更为均匀. 也就是说, 与自由折叠纤维相比, 限域折叠纤维中的孔隙率更低、孔缺陷更小, 因此其拉伸强度及杨氏模量更高.

采用氢碘酸与三氟乙酸在25℃室温条件下对限域折叠氧化石墨烯纤维进行催化还原, 高效脱除含氧官能团并恢复

引用格式: 李鹏, 蔡刚峰, 许震, 等. 室温制备高性能石墨烯基碳纤维. 科学通报
Li P, Cai G, Xu Z, et al. Room-temperature preparation of high-performance graphene-based carbon fibers (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2026-0574

© 2026《中国科学》杂志社

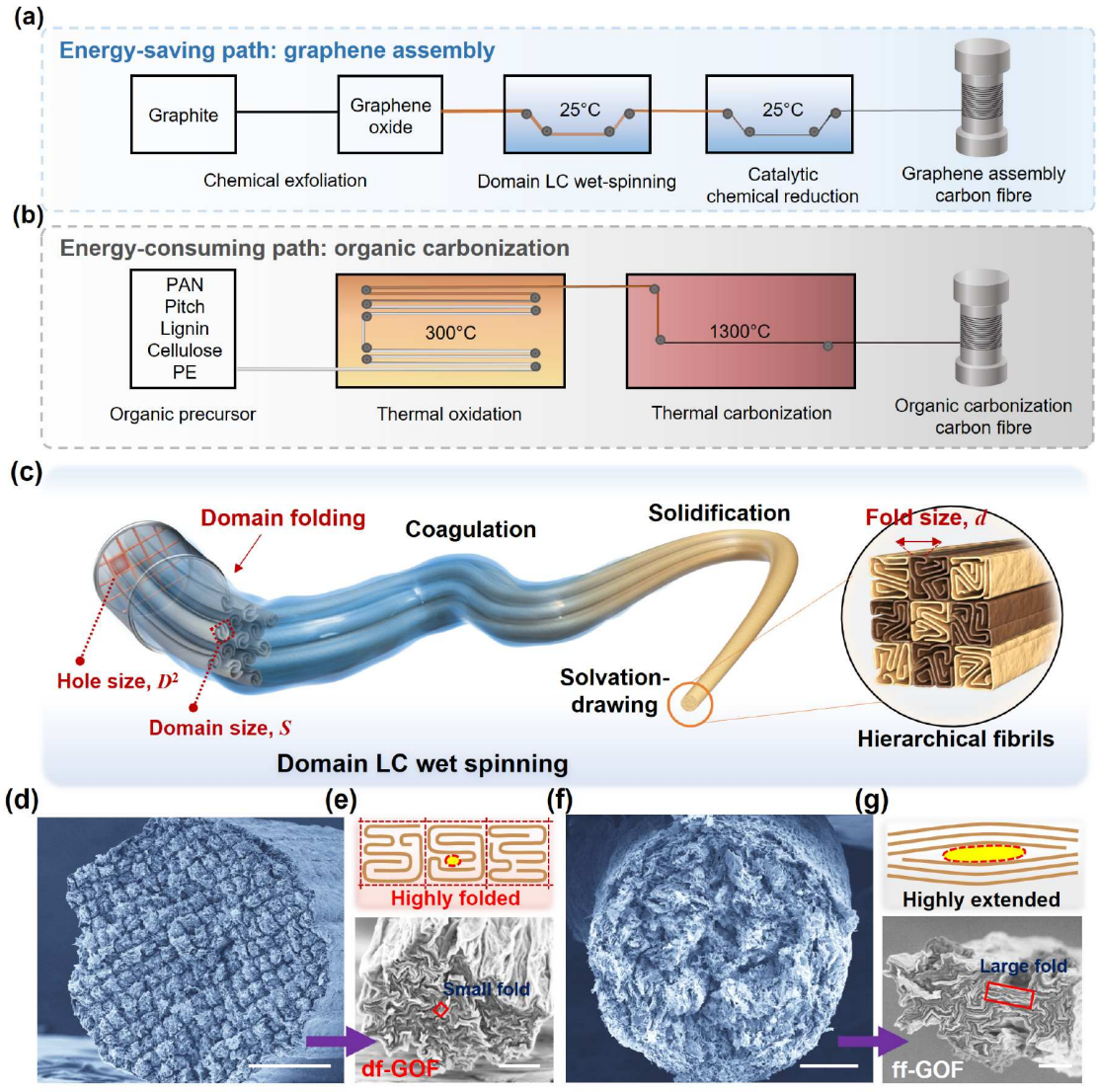

图 1 (网络版彩色)室温制备高性能石墨烯基碳纤维[7]. (a) 石墨烯组装制备高性能碳纤维的节能路线. (b) 传统有机高分子前驱体热解碳化制备碳纤维的耗能路线. (c) 分域剪切多流场湿法纺丝制备限域折叠石墨烯纤维的示意图. 限域折叠氧化石墨烯凝胶纤维(d)、固态纤维(e)与自由折叠氧化石墨烯凝胶纤维(f)、固态纤维(g)的对比

Figure 1 (Color online) Room-temperature preparation of high-performance graphene-based carbon fibers[7]. (a) Energy-saving path for preparing carbon fibers by graphene assembly. (b) Energy-consuming path for producing carbon fibers by carbonization of traditional organics. (c) Schematic illustration of the domain-folded graphene fibers by domain multi-flow spinning. Comparison between domain-folded graphene oxide gel fibers (d), solid fibers (e) and free-folded graphene oxide gel fibers (f), solid fibers (g)

sp^2碳网络, 含碳量在室温催化还原下达到了92%. 限域折叠石墨烯纤维表现出优异的综合性能: 拉伸强度5.19 GPa、杨氏模量529 GPa, 导热率232 W/(m K), 导电率120 S/cm, 成为一种室温制备的高性能石墨烯基碳纤维(图1(a)).

本工作跳出传统石油及天然高分子制备碳纤维路线, 即有机前驱体热解碳化工艺, 以氧化石墨烯为前驱体, 在室温条件下直接制备出高含碳量高性能石墨烯基碳纤维, 证实了一条石墨烯组装制备高性能碳纤维的高效节能路线. 综合十五年的研究结果, 石墨烯纤维的多尺度微纳结构模型及其与性能关系愈发清晰[3~9]: (1) 改善石墨烯片层的有序堆积形成大晶畴, 有利于制备高模量、高导热石墨烯纤维[4,6]; (2) 控制石墨烯片层的有序折叠形成细晶结构, 有利于获得高强度石墨烯纤维[7]. 本工作是石墨烯片层有序折叠制备高性能石墨烯基碳纤维的典型案例, 其组装方法与结构设计理念为二维基元定向组装、材料缺陷控制及高性能化提供了新的科学研究视角.

致谢 感谢国家自然科学基金(52090030, 52403051)资助.

推荐阅读文献

1 Zhang W, Liu J, Wu G. Evolution of structure and properties of PAN precursors during their conversion to carbon fibers. Carbon, 2003, 41: 2805–2812

2 Frank E, Steudle L M, Ingildeev D, et al. Carbon fibers: precursor systems, processing, structure, and properties. Angew Chem Int Ed, 2014, 53: 5262–5298

3 Xu Z, Gao C. Graphene chiral liquid crystals and macroscopic assembled fibres. Nat Commun, 2011, 2: 571

4 Li P, Liu Y, Shi S, et al. Highly crystalline graphene fibers with superior strength and conductivities by plasticization spinning. Adv Funct Mater, 2020, 30: 2006584

5 Fang B, Chang D, Xu Z, et al. A review on graphene fibers: expectations, advances, and prospects. Adv Mater, 2020, 32: e1902664

6 Li P, Wang Z, Qi Y, et al. Bidirectionally promoting assembly order for ultrastiff and highly thermally conductive graphene fibres. Nat Commun, 2024, 15: 409

7 Li P, Wang Z, Cai G, et al. High-performance graphene-based carbon fibres prepared at room temperature via domain folding. Nat Mater, 2026, 25: 191–198

8 Chang D, Liu J, Fang B, et al. Reversible fusion and fission of graphene oxide–based fibers. Science, 2021, 372: 614–617

9 Cai G, Wang Z, Li P, et al. Simultaneously enhancing plasticity and load-bearing capacity by ionic crosslink for strong and conductive wet-spun graphene fibers. Matter, 2026, 9: 102517