

木质素衍生碳纤维的制备及其在储能中的应用

刘婧涵,王璐军,王若琪,谭凤芝*

(大连工业大学轻工与化学工程学院,辽宁 大连 116034)

摘要:针对木质素衍生碳纤维的形成条件与电化学、力学性能之间的潜在关联,全面比较了熔融纺丝、溶液纺丝、静电纺丝等主流纺丝技术的优劣及其对初生纤维形貌与结构的调控作用。详细阐述了木质素基碳纤维在超级电容器、锂/钠/锌离子电池及锂硫电池等新型储能系统中的创新应用与性能表现,论证了其作为高性能电极材料或功能组件的巨大潜力,旨在为实现木质素基碳纤维的定向设计与可持续储能技术的融合发展提供理论依据和技术参考。

关键词:木质素;碳纤维;电化学性能;储能器件

中图分类号:TM53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)09-0082-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.016

Preparation of lignin-derived carbon fibers and their application in energy storage

LIU Jing-han, WANG Lu-jun, WANG Ruo-Qi, TAN Feng-zhi*

(School of Light Industry and Chemical Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: This review provides a comprehensive comparison of mainstream spinning techniques—including melt spinning, solution spinning, and electrospinning—evaluating their respective advantages and limitations, with a specific focus on their regulatory effects on the morphology and structure of the as-spun fibers. This analysis is central to understanding the fundamental relationships between processing conditions and the resulting electrochemical and mechanical properties of lignin-derived carbon fibers (LCFs). Furthermore, the article elaborates on the innovative applications and performance of LCFs in various advanced energy storage systems, such as supercapacitors, lithium/sodium/zinc-ion batteries, and lithium-sulfur batteries, thereby demonstrating their significant potential as high-performance electrode materials or functional components. The overarching aim of this work is to provide a theoretical foundation and technical insights to guide the rational design of LCFs and to foster their synergistic integration with sustainable energy storage technologies.

Key words: lignin; carbon fiber; electrochemical properties; energy storage devices

在全球能源消费总量持续攀升与“双碳”战略深入实施背景下,能源结构正经历由传统化石能源向清洁低碳能源的根本性转变^[1]。作为可再生的天然芳香族聚合物,木质素的碳含量高(>30%)、储量丰富,被认为是制备高性能碳材料的理想前驱体^[2]。通过物理共混、化学改性(羟甲基化、酚化、胺化、接枝共聚等)及结构设计,可将其转化为具有生态可持续性、功能结构稳定的木质素衍生碳纤维(lignin derived carbon fibers, LCFs)。LCFs作为电极材料时表现出高比表面积、良好的导电性能与机械性能^[3],在超级电容器、锂/钠/锌离子电池、锂硫电池等储能系统中显示出重要的研究价值和应用潜力^[4]。本文中系统梳理了木质素衍生碳纤维在储能领域的最新研究进展,旨在该类材料的结构优化与储能应用提供理论依据与技术参考。

1 木质素衍生碳纤维(LCFs)的制备

木质素衍生碳纤维的制备通常包括原料预处理、纺丝成型、热稳定化、碳化及石墨化等步骤。其中,纺丝成型是调控纤维形貌与结构的关键环节,目前主流方法包括熔融纺丝、溶液纺丝、静电纺丝、熔喷纺丝及微流控纺丝等。

1.1 木质素的选择与预处理

木质素的性能因植物来源(硬木、软木、草本)与提取方法(Kraft法、磺酸盐法、有机溶剂法、酶解法)而异,这直接影响了其可纺性和最终碳纤维的质量。软木木质素分子质量大、支化度高,易于形成三维网络结构,有利于纺丝,但可能导致熔体黏度高。硬木木质素则含有更多的紫丁香基单元,反应活性有所不同。工业木质素(如Kraft木质素)通常

收稿日期:2025-10-29;修回日期:2026-06-29

基金项目:辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220893)

作者简介:刘婧涵(2000-),女,硕士生;谭凤芝(1975-),女,博士,教授,研究方向为生物质高值化利用,通讯联系人,tanfz@dlpu.edu.cn。

含有大量灰分和金属离子杂质,这些杂质在碳化过程中可能催化非均相反应,导致缺陷产生,严重劣化力学性能^[2]。因此,高效的纯化(如酸洗、透析、溶剂萃取)是制备高性能木质素基碳纤维的必要前提。

为了优化可纺性,常对木质素进行化学改性。如通过引入乙酰基团屏蔽木质素分子间的羟基,有效降低玻璃化转变温度(T_g)和熔体黏度,使熔融纺丝过程更为顺畅。脱甲基化反应则能增加酚羟基数量,提升木质素的反应活性,有助于在后续热稳定化过程中形成更稳定的交联结构。

1.2 纺丝与成型技术

1.2.1 熔融纺丝

熔融纺丝是将木质素原料加热熔融后直接挤出纺丝,具有无需溶剂、流程短、环境友好等优点。然而,木质素分子中丰富的酚羟基易引发分子间或分子内交联,降低熔体流动性,因此常需采用超滤、溶剂分级等手段获取热稳定性好、分子质量分布较窄的木质素组分。Nordström 等^[5]利用 LignoBoost 工艺结合超滤处理,成功地从工业黑液中分离出软木硫酸盐木质素,利用熔融纺丝工艺制得表面光滑、结构致密的碳纤维。木质素的软化能力与其结构密切相关,部分纯化的木质素仍无法满足熔融纺丝的要求,需要进行化学修饰。Steudle 等^[6]通过对木质素进行 O-乙酰基化改性,显著改善了其熔融加工性能,所得碳纤维拉伸强度高达 0.93 GPa。此外,将木质素与聚氧化乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚丙烯腈、聚乳酸、聚乙二醇等合成高分子共混^[3-4],也被证明是提升纤维可纺性与最终力学性能的有效策略。

1.2.2 溶液纺丝

溶液纺丝可在较低温度下进行,适用于热敏感型木质素。依据溶剂去除方式可分为干法、湿法、干喷湿纺和凝胶纺丝等。目前溶液纺丝原料多为工业级木质素,其水溶性良好却难溶于有机溶剂,需对其进行改性处理。Zhang 等^[7]采用乙酰化改性提升木质素在丙酮中的溶解性,经干法纺丝结合后续热处理制得直径约为 7 μm 、拉伸强度为 1.04 GPa 的 LCFs。干法纺丝所得初纺纤维外表面不均一、横截面不规则,所获碳纤维的比表面积大,有利于增加电荷存储容量。湿法纺丝通常需要线性的长链分子结构原料,但木质素呈三维网状结构且分子质量不均一,需进行分离提纯或改性后用于湿法纺丝。

如图 1 所示,Yang 等^[8]利用离子液体([DMBA][HSO₄])提取木质素,并与聚乙烯醇(PVA)共混,通过湿法纺丝成功制备木质素含量高达 90%的初

纺纤维,碳化后仍保持良好的纤维形态与较高的碳收率(35%~40%)。干喷湿纺结合了干法与湿法的优点,可有效调控纤维截面形态并减少结构缺陷,提高结构致密性。Le 等^[9]以离子液体为溶剂,纤维素作为木质素前驱体的增黏剂,利用干喷湿纺法制备出具有中空结构的木质素/纤维素复合碳纤维,其中空结构具有较高的比表面积,在电化学储能及催化剂载体等领域展现出良好的应用潜能。

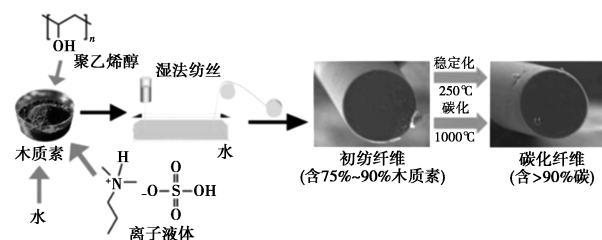


图 1 利用离子液体[DMBA][HSO₄]湿法纺丝制备高含量木质素衍生碳纤维

与上述 3 种方法相比,凝胶纺丝可以防止木质素扩散至凝固浴,减少甚至消除因木质素与其他聚合物相分离产生的空隙,有助于获得高取向度与机械强度的纤维。Liu 等^[10]利用凝胶纺丝工艺制备出表层为 PAN 基碳纤维,内芯为 PAN/木质素复合碳纤维的具有蜂窝状结构的低密度碳纤维材料,拉伸模量高达 274 GPa。但该方法对纺丝液固含量、黏度及凝固浴的温度要求严苛,实现难度较大。

1.2.3 静电纺丝

静电纺丝是制备纳米级纤维的重要技术,可通过调控溶液性质、工艺参数及环境条件实现对纤维形貌的精准调控。木质素常需与 PEO、PET、PAN、PVA 等聚合物共混而成,聚合物的添加有效改善了木质素的可纺性和初纺纤维的表面形貌及性能。Perera 等^[11]以木质素/PVA 为原料,经静电纺丝、碳化与活化处理,制得具有高比表面积(2 170 m^2/g)和中孔体积(0.365 cm^3/g)的自支撑柔性碳纳米纤维,组装成纽扣电池后展现出 87 F/g 的高比电容和 38 Wh/kg 的能量密度。引入石墨烯、金属氧化物(如 MnO_2 、 Fe_2O_3 、 ZnO 等)低维纳米材料或前驱体,能进一步改善 LCFs 性能。Ma 等^[12]以木质素/PVP 为碳源, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为模板剂,经静电纺丝、预氧化、碳化、酸洗制得木质素衍生超细多孔碳纳米纤维(纤维直径在 83~209 nm 之间可控),比表面积高达 1 363 m^2/g ,用作电极比电容可达 289 F/g。但目前静电纺丝制备出的 LCFs 的力学性能仍有待加强,需通过调节实际样品的温度程序以平衡木质素

初纺纤维的热分解特性,不断优化并设计出功能化结构稳定的高性能 LCFs。

1.2.4 其他纺丝方法

随着微流控、熔喷纺丝等新型纺丝技术的发展,木质素衍生碳纤维的制备途径不断拓展。微流控纺丝技术结合光刻、软刻蚀等微加工技术可在芯片上构建微米级通道^[4],制备具有可控形貌、尺寸和功能的微纳米纤维。Geng 等^[13]利用微流控纺丝结合原位界面络合策略,成功制备出兼具优异拉伸强度(1 648 MPa)与导电性(185.3 S/cm)的仿生木质素/纳米纤维素碳纤维。熔喷纺丝则以工艺简单、生产效率高的特点,适用于多孔木质素衍生碳纤维的宏量制备。Jia 等^[14]采用熔喷纺丝法制备出石墨化率为 0.54、电阻率为 0.02 Ω/cm 的多孔木质素衍生碳纤维。此外,乳液纺丝、离心纺丝、桶式纺丝、相转化挤出等工艺也可制备 LCFs。

总体而言,不同纺丝方法在纤维结构、性能及工艺成本方面各有优劣。熔融纺丝更适用于高力学性能 LCFs 的制备;溶液纺丝可实现纤维形貌与结构的有效调控;静电纺丝则在构建高比表面积纳米纤维方面独具优势。因此,应根据目标应用场景合理选择纺丝工艺,以实现 LCFs 结构与性能的协同优化。

1.3 碳纤维形成条件对电化学性能影响

LCFs 在储能器件中的电化学性能主要由导电性、孔隙结构和表面化学决定,而这些均受上述制备条件的精细调控。导电性主要取决于碳石墨化度。较高的碳化温度($>1\ 200^\circ\text{C}$)可促进 sp^2 碳域的增长和连接,从而显著降低纤维的电阻,这对于需要快速电子传输的倍率性能至关重要。

超级电容器的双电层电容直接正比于电极材料在电解液中可接触的比表面积,尤其是尺寸与电解液离子匹配的微孔。通过精确控制活化工艺(活化剂种类、温度、时间),可以构建具有分级孔隙(微孔-介孔-大孔)的碳纤维。微孔提供巨大的比表面积以储存电荷,而介孔和大孔则作为离子传输的“高速公路”,确保在高扫描速率下仍能保持高电容^[12]。

木质素本身含有氧和少量氮、硫杂原子。这些杂原子(如—OH、—COOH、—C=O、—N—)在碳化后部分保留,形成表面官能团。这些官能团能通过法拉第赝电容反应额外贡献电容。如含氧官能团在酸性电解质中和碱性电解质中均能发生可逆的氧化还原反应,显著提升材料的比电容。然而,过多的官能团可能会破坏碳骨架的完整性,导致导电性下降和循环稳定性变差。

2 木质素衍生碳纤维在储能领域中的应用

2.1 超级电容器

超级电容器是介于传统介电电容器和可充电电池之间的新型储能器件,具有充放电快速、功率密度高、循环性能优异等特点。根据储能机制的不同,可分为双电层电容器与赝电容电容器^[9]。LCFs 凭借高比表面积、可调控孔隙结构与良好导电性、高掺杂度以及热力学稳定性优异等优点,在作为超级电容器电极材料方面展现出良好应用前景。Singh 等^[15]采用静电纺丝工艺制备出木质素含量高达 90% 的 LCFs,作为全固态超级电容器的电极,电容器具有高功率密度(1.25 kW/kg)和能量密度(62.6 Wh/kg),充放电循环 10 000 次后表现出 99.5% 的电容保持率。通过引入模板剂[如 SiO_2 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 等]或杂原子掺杂,可在 LCFs 上构建分级多孔结构并引入赝电容效应,从而进一步提升电容性能与能量密度。Wang 等^[16]通过引入纳米 SiO_2 调控纤维孔隙结构,使熔融纺丝制得的木质素基碳纤维的比电容提升至 260.2 F/g。类似地, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NaNO_3 、聚乙二醇-聚丙二醇-聚乙二醇(PEG-PPG-PEG)三嵌段共聚物^[17],都能够一定程度上改变木质素基碳纤维的孔隙结构和电化学性能。Shen 等^[18]则在静电纺丝纤维中引入氧化铁,构建具有赝电容特性的复合电极。如图 2 所示,Butnoi 等^[19]以有机溶剂木质素与聚环氧乙烷为前驱体,硝酸铁为掺杂剂,通过静电纺丝工艺制备了嵌入纳米氧化铁颗粒的碳纤维 $\text{L-CNFs}@ \text{Fe}_x\text{O}_y$,组装的超级电容器能量密度可达 43 Wh/kg。此外,将杂原子(如 N、P、B、S 等)引入 LCFs 中,可调节电极理化性质并引入可逆氧化还原反应,在不影响电极倍率性能与循环稳定性的情况下显著提升超级电容器的电容性能。

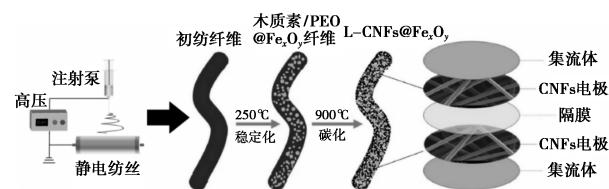


图 2 $\text{L-CNFs}@ \text{Fe}_x\text{O}_y$ 制备示意图

2.2 锂离子电池

在锂离子电池中,LCFs 作为负极材料可替代传统石墨,纤维状的结构与发达孔隙有利于锂离子的快速迁移,并缓解循环过程中的体积变化,从而增加电极的稳定性与导电性,降低锂离子电池的重量和

生产成本。Nowak 等^[20]将熔融纺丝制备的 LCFs 作为锂离子电池负极,比容量可达 335 mAh/g,且循环稳定性良好。Culebras 等^[21]通过硅掺杂改性进一步提高了 LCFs 的储锂容量,当 Si 前驱体添加量达到 15% 时,LCFs 的比容量可提升至 921 mAh/g。通过调控 LCFs 的孔隙结构可以提升电化学性能,Sun 等^[22]研究了木质素含量对 LCFs 的结构、形貌和电化学性能的影响,制得了比表面积达 468.3 m²/g 的木质素衍生碳纤维 LCNF-2,用作锂离子电池负极比容量达到 1 108.3 mAh/g,100 次循环后比容量保持率达 84.6%。此外,用氢气还原 LCFs 样品可改善表面缺陷位点与石墨化程度,有利于提高负极容量。

2.3 钠离子电池

钠离子电池与锂离子电池在结构和工作原理上相似,依靠钠离子(Na⁺)在正负极间的嵌入和脱出来实现能量的存储与释放。但石墨容量(<35 mAh/g)的层间距较窄,在充放电过程中 Na⁺无法有效地嵌入,且优先选择在具有高曲率的石墨烯碎片表面,而 LCFs 因适宜的层间距与孔结构,可作为钠离子电池的高性能负极材料。Jia 等^[23]通过构建木质素/醋酸纤维素衍生碳网络,实现了 340 mAh/g 的高可逆比容量。杂原子掺杂和结构优化的协同效应可有效提高 Na⁺传输和吸附能力,优化 LCFs 的电化学性能。如图 3 所示,Zou 等^[24]利用静电纺丝工艺制备了木质素衍生的磷掺杂碳纳米纤维(P-CNFs),通过磷掺杂调控了 P-CNFs 的碳层排列与电子结构。P-CNF 作为钠离子电池负极,在 0.2 A/g 时表现出 278 mAh/g 的可逆容量和 78.86% 的首次库伦效率,在 1 A/g 电流密度下循环 5 000 次后,表现出出色的倍率性能和循环稳定性。

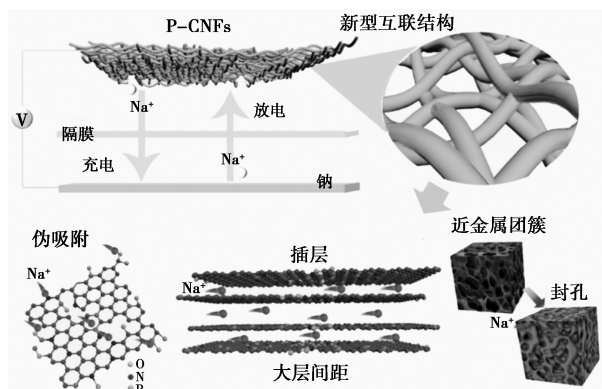


图 3 P-CNFs 的钠离子储存机制

2.4 锌离子电池

锌元素是地壳中较为丰富的元素之一,使用锌元素可有效降低对锂、钴等资源的依赖,目前锌离子

电池(ZIB)正在逐步替代传统锂离子电池成为新型储能器件。锌离子在氧化还原反应中进行双电子转移,表现出比单电子 LIB/SIB 更高的容量。Jaimes-Paez 等^[25]通过静电纺丝技术制备了直径为 0.5~1 μm 的 Pt/石墨烯掺杂 LCFs,用于可充电锌电池的电催化剂,容量高达 695 mAh/g,并且在电流密度为 50 mA/cm² 时依然保持高稳定性,优于商用 Pt/C 催化剂。如图 4 所示,Chen 等^[26]以木质素磺酸钠为碳源和钠源制备了钠预插层氧化钒/碳复合材料(VO/LSC),碳基体可以提高氧化钒的电子电导率,而木质素磺酸钠可以同时提供预插层到层状氧化钒中的钠离子,作为水性锌离子电池的阴极在 0.1 A/g 电流密度下具有 350 mAh/g 的高容量。尽管锌离子电池成本低廉、体积比容量高,但不可控的锌枝晶生长、钝化以及析氢过程(HER)等问题,严重阻碍了商业化进程与广泛应用。

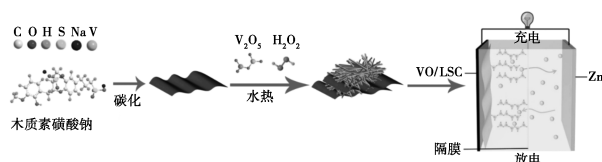


图 4 钠预插层 VO/LSC 复合材料作为 AZIB 阴极的制备策略

2.5 锂硫电池

锂硫电池(LSB)的理论能量密度高、成本低,被视作最具有前景的储能系统之一。在锂硫电池中,LCFs 可作硫载体或中间层,有效抑制多硫化物的穿梭效应,提升硫利用率和循环寿命。Zeng 等^[27]采用静电纺丝技术制备 CNFs/S 柔性自支撑阴极,用 KOH 在高温碳化中腐蚀碳壁形成多孔结构,为硫提供了存储空间和连续的电子传导路径,增强了材料的导电性。Wang 等^[28]以木质素磺酸钠为前驱体,通过静电纺丝工艺制备了原位生长的石墨烯接枝柔性薄膜(G/CNF),在 0.2 C 下循环 50 次后放电比容量达 1 015.3 mAh/g,且具有良好的循环稳定性(循环超过 600 次后比容量仍有 808.7 mAh/g)。

3 结语与展望

木质素基碳纤维(LCFs)作为生物质衍生功能材料,在结构调控性、可持续性与电化学性能方面展现出独特优势,展现出了极为重要的研究价值和应用潜力。然而,其实际应用仍面临一系列挑战:首先,木质结构异构性、分子质量分布不均匀以及杂质(挥发物 and 无机盐)残留问题制约了碳纤维结构的

均一性与性能稳定性;其次,现有纺丝工艺在纤维精细结构调控、性能重现性与规模化生产方面仍有待提升;此外,热处理过程中木质素的热解行为与结构演变机制尚不明确,制约了高性能产品的理性设计。

未来的研究方向应着重于开发高效、低成本的木质素预处理与改性方法,以提升纺丝适用性与碳纤维结构一致性;优化纺丝与热处理工艺,建立工艺-结构-性能之间的关联模型,指导木质素衍生碳纤维的定向设计;拓展木质素衍生碳纤维在多元储能系统中(钾离子、铝离子电池等)中的应用,并深入探索其储能机制,为材料设计提供理论指导;推进中试验证与连续化生产示范,促进该类材料从实验室研究向产业化应用转化。

参考文献

- [1] Wang S, Bai J, Innocent M T, *et al.* Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications[J]. *Green Energy & Environment*, 2022, 7(4): 578–605.
- [2] Zhe L, Sivasamy S, Dang W Q, *et al.* Lignin valorization through microbial production of polyhydroxyalkanoates: Recent trends, challenges and opportunities[J]. *Green Chemistry*, 2025, 27: 5920–5946.
- [3] Cao Q, Zhu H, Xu J, *et al.* Research progress in the preparation of lignin-based carbon nanofibers for supercapacitors using electrospinning technology: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 273: 133037.
- [4] 王敏, 王烟霞, 刘伟, 等. 低共熔溶剂用于生物质木质素提取的研究[J]. *现代化工*, 2025, 45(4): 58–63.
- [5] Nordström Y, Norberg I, Sjöholm E, *et al.* A new softening agent for melt spinning of softwood kraft lignin[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(3): 1274–1279.
- [6] Steudle L M, Frank E, Ota A, *et al.* Carbon fibers prepared from melt spun peracylated softwood lignin: An integrated approach[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, 302(4): 1600441.
- [7] Zhang M, Ogale A A. Effect of temperature and concentration of acetylated-lignin solutions on dry-spinning of carbon fiber precursors[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(45): 43663.
- [8] Yang S M, Shaffer M S P, Brandt-Talbot A. High lignin content carbon fiber precursors wet-spun from low-cost ionic liquid water mixtures[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(24): 8800–8811.
- [9] Le N D, Trogen M, Ma Y, *et al.* Cellulose-lignin composite fibers as precursors for carbon fibers: Part 2-The impact of precursor properties on carbon fibers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 250: 116918.
- [10] Liu H C, Luo J, Chang H, *et al.* Polyacrylonitrile sheath and polyacrylonitrile/lignin core bi-component carbon fibers[J]. *Carbon*, 2019, 149: 165–172.
- [11] Perera Jayawickramage R A, Ferraris J P. High performance supercapacitors using lignin based electrospun carbon nanofiber electrodes in ionic liquid electrolytes[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(15): 155402.
- [12] Ma C, Wu L, Dirican M, *et al.* ZnO-assisted synthesis of lignin-based ultra-fine microporous carbon nanofibers for supercapacitors[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 586: 412–422.
- [13] Geng L, Cai Y, Lu L, *et al.* Highly strong and conductive carbon fibers originated from bioinspired lignin/nanocellulose precursors obtained by glow-assisted alignment and in situ interfacial complexation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(6): 2591–2599.
- [14] Jia G, Zhou Z, Wang Q, *et al.* Effect of pre-oxidation temperature and heating rate on the microstructure of lignin carbon fibers[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216: 388–396.
- [15] Singh M, Gupta A, Sundriyal S, *et al.* Kraft lignin-derived free-standing carbon nanofibers mat for high-performance all-solid-state supercapacitor[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 264: 124454.
- [16] Wang Q, Ma W, Yin E, *et al.* Melt spinning of low-cost activated Carbon Fiber with a tunable Pore Structure for high-performance flexible Supercapacitors[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, 3(9): 9360–9368.
- [17] Yadav R, Zabihi O, Fakhrhoseini S, *et al.* Lignin derived carbon fiber and nanofiber: Manufacturing and applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 255: 110613.
- [18] Shen H, Gele A. Facile synthesis of N-doped lignin-based carbon nanofibers decorated with iron oxides for flexible supercapacitor electrodes[J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2021, 128: 108607.
- [19] Butnoi P, Pangon A, Berger R, *et al.* Electrospun nanocomposite fibers from lignin and iron oxide as supercapacitor material[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 12: 2153–2167.
- [20] Nowak A P, Hagberg J, Leijonmarck S, *et al.* Lignin-based carbon fibers for renewable and multifunctional lithium-ion battery electrodes[J]. *Holzforschung*, 2018, 72(2): 81–90.
- [21] Culebras M, Cillins G A, Beaucamp A, *et al.* Lignin/Si hybrid carbon nanofibers towards highly efficient sustainable Li-ion Anode Materials[J]. *Engineered Science*, 2022, 17: 195–203.
- [22] Sun Y, Peng S, Guo M, *et al.* Rice straw-derived lignin-based carbon nanofibers as self-supporting electrodes for supercapacitors and lithium-ion batteries[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 285: 138241.
- [23] Jia H, Sun N, Dirican M, *et al.* Electrospun Kraft Lignin/Cellulose acetate-derived Nanocarbon Network as an anode for high-performance Sodium-Ion Batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(51): 44368–44375.
- [24] Zou J, Xie X, Yang J, *et al.* A superior sodium-ion anode material from PAN/Lignin-derived carbon nanofibers with inter-connected structure prepared through phosphoric acid induced cross-linking[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 593: 233994.
- [25] Jaimes-Paez C D, Garcia-Mateos F J, Ruiz-Rosas R, *et al.* Sustainable electrocatalysts: Lignin-derived carbon fibers doped with few-layer graphene for high-performance zinc-air batteries[J]. *Carbon*, 2025, 244: 120715.
- [26] Chen J, Zhang W, Zhang X, *et al.* Sodium pre-intercalated carbon/V₂O₅ constructed by sustainable sodium lignosulfonate for stable cathodes in zinc-ion batteries: A comprehensive study[J]. *ChemSusChem*, 2022, 15(14): e202200732.
- [27] Zeng L, Pan F, Li W, *et al.* Free-standing porous carbon nanofibers-sulfur composite for flexible Li-S battery cathode[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(16): 9579–9587.
- [28] Wang X, Zhu Y, Wang X, *et al.* In-situ growth of graphene on carbon nanofiber from lignin[J]. *Carbon*, 2020, 169: 446–454. ■