北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 柔性木质复合材料：从刚性到可扭转的制备策略与跨领域多功能应用

李秀英 张镭 孟源 常亮 唐启恒

# Flexible wood composites: from rigidity to twistability via advanced fabrication for multidisciplinary applications

Li Xiuying, Zhang Lei, Meng Yuan, Chang Liang, Tang Qiheng

引用本文:
李秀英, 张镭, 孟源, 常亮, 唐启恒. 柔性木质复合材料：从刚性到可扭转的制备策略与跨领域多功能应用[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):1–14. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250317
Li Xiuying, Zhang Lei, Meng Yuan, Chang Liang, Tang Qiheng. Flexible wood composites: from rigidity to twistability via advanced fabrication for multidisciplinary applications[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):1–14. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250317

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250317

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

以Cu颗粒强化导热的木质基复合相变储热材料性能研究
Properties of wood–based composite phase change heat storage materials with Cu particles to enhance heat conduction
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 132–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220228

异戊二烯共聚改性木质素补强橡胶复合材料
Isoprene copolymer–modified lignin to reinforce rubber composites
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 162–170. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240401

碳化汉麻秆纤维氮化硼三维导热网络构建高导热环氧树脂复合材料
Carbonized hemp fiber–boron nitride 3D thermal network for constructing high–thermal–conductivity epoxy composites
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 177–184. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240297

纤维素电纺纳米纤维柔性表皮电极制备与性能
Preparation and property of cellulose electrospun nanofibers–based flexible epidermal electrodes
北京林业大学学报, 2024, 46(9): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240161

纳米银/介孔氧化硅复合材料的制备及其抗菌性能
Preparation of nano–silver/mesoporous silica composite materials and its antibacterial properties
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 145–153. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230372

填缝型微波膨化木基金属复合材料制备及其性能表征
Preparation and property characterization of crack–filled type microwave puffed wood based metal composites
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 118–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210209

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250317

# 柔性木质复合材料: 从刚性到可扭转的制备策略与跨领域多功能应用

李秀英　张　镭　孟　源　常　亮　唐启恒
（中国林业科学研究院木材工业研究所，北京 100091）

**摘要:**石油基柔性复合材料虽具备优异弯折−变形能力，却面临不可降解、碳排放高、资源枯竭等瓶颈。木材因其分级多孔结构和可再生特性，成为替代石油基连续相的理想选择，但其跨尺度柔性化设计机制尚缺乏系统性梳理。本文聚焦柔性木质复合材料(FWC)这一新兴领域，系统综述其研究进展：从纤维素分子到薄木单板的跨尺度结构出发，分类评述两大柔化策略——木纤维路线(熔融共混、连续平压、增材制造)与薄木单板路线(木质素脱除、塑膜饰面)的工艺−结构−性能构效关系；总结 FWC 在绿色建材、智能传感、能量存储、环境修复及生物医学等跨场景应用的前沿突破；剖析其规模化应用面临的环保一致性、长效耐久性及功能集成度等挑战；并展望 FWC 在生物组织支架、形状记忆器件及具身智能系统等前沿方向的发展路径。本文旨在为不同应用场景下木材跨尺度柔性化设计提供技术参考，推动 FWC 对石油基功能材料的绿色替代，助力“双碳”目标下的木材高值化利用与可持续材料创新。

**关键词**：柔性木质复合材料；跨尺度柔性化；绿色建材；智能传感；能源存储；3D/4D 打印；生物医药；可持续材料
**中图分类号**：S781.7；S781.23；TB332　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000−1522(2026)02−0001−14
**引文格式**：李秀英，张镭，孟源，等. 柔性木质复合材料：从刚性到可扭转的制备策略与跨领域多功能应用［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：1−14. Li Xiuying, Zhang Lei, Meng Yuan, et al. Flexible wood composites: from rigidity to twistability via advanced fabrication for multidisciplinary applications［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 1−14.

# Flexible wood composites: from rigidity to twistability via advanced fabrication for multidisciplinary applications

Li Xiuying　Zhang Lei　Meng Yuan　Chang Liang　Tang Qiheng
(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Petroleum-based flexible composites face critical bottlenecks of non-degradability, high carbon footprint, and resource depletion, despite their excellent bendability. Wood, with its hierarchical porous architecture and renewable nature, offers an ideal substitute for petroleum-based matrices; however, cross-scale flexibilization mechanisms remain poorly systematized. This review systematically examines recent advances in the emerging field of flexible wood composites (FWCs). We begin with cross-scale structures from cellulose molecules to thin veneers, categorizing two primary flexibilization strategies: (i) the wood fiber route, encompassing melt compounding, continuous flat-pressing, and additive manufacturing; and (ii) the thin veneer route, involving lignin removal and polymer lamination. Their processing-structure-property relationships are critically evaluated. We further highlight state-of-the-art applications of FWCs in

**收稿日期:** 2025−08−20　**修回日期:** 2025−12−14
**基金项目:** 国家重点研发计划课题(2023YFD2201404)。
**第一作者:** 李秀英。主要研究方向：高强度柔性木质纤维复合材料。Email: lxy2001163@163.com　地址：100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院木材工业研究所。
**责任作者:** 唐启恒，研究员。主要研究方向：高强度木、竹质车用复合材料、木质防沙治沙材料、木材光电子学。Email: 20051671tang@sina.com　地址：同上。
**本刊网址:** https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

green construction, smart sensing, energy storage, environmental remediation, and biomedicine. Challenges for scalable implementation, such as environmental consistency, long-term durability, and functional integration, are also analyzed. Finally, future pathways are outlined for frontier applications including tissue scaffolds, shape-memory devices, and embodied intelligent systems. This review provides technical guidelines for cross-scale wood flexibilization across diverse scenarios, advances FWCs as a green alternative to petroleum-based functional materials, and supports high-value wood utilization toward carbon neutrality and sustainable material innovation.

**Key words:** flexible wood composites; cross-scale flexibilization; green building materials; smart sensing; energy storage; 3D/4D printing; biomedicine; sustainable materials

高柔性复合材料在外力作用下可发生弯曲、扭转与折叠，同时保持结构完整，已成为可穿戴器件、柔性传感器、异形能源器件及生物组织支架等前沿场景的核心载体。目前，该类材料仍以石油基高分子（如聚氨酯、聚酰亚胺、聚碳酸酯等）为连续相，通过物理共混或化学交联实现结构–功能一体化。然而，石化资源的衰竭风险以及不可降解塑料带来的环境负荷，使其大规模可持续应用受到限制。开发以可再生生物质为基材的绿色环保柔性复合材料，已成为替代石油基体系的必由之路。

木材作为储量最大、分布最广的天然可再生资源，具有分级多孔、各向异性及界面可修饰等本征特征，为柔性化设计提供了独特的结构模板[1]。通过“保留分级构造—精准拆解组分—界面工程重组”策略，可在维持木材微观骨架的基础上赋予其宏观可弯折性，从而构建柔性木质复合材料（flexible wood-based composites，FWC）。近五年来，FWC 的研究范式已从“简单共混填充”演变为“结构–界面协同柔化”，形成了熔融共混、化学改性、增材制造及原位聚合等多样化制备路线，并在建材装饰、柔性电子、储能器件及生物医药等领域实现了概念验证。然而，木材微观结构（如细胞壁层状构造、孔隙梯度及氢键网络）与宏观柔化行为之间的跨尺度关联机制尚未完全厘清，且缺乏对不同柔性木质复合材料的制备策略、应用场景、性能对比及产业化潜力的系统性总结。

鉴于此，本文从木材结构层级出发，系统梳理 FWC 的制备策略及其关键工艺，定量对比各策略在效率、能耗及性能等方面的差异；随后按照“材料–结构–功能”逻辑，归纳 FWC 在建材、信息、储能及生物医药四大应用场景中的最新进展与性能优化方法；最后，基于 FWC 的研究进展与应用现状，提出其面临的科学瓶颈与技术缺口，并展望其未来发展方向。本文旨在构建木材宏观–微观–分子跨尺度柔性化设计路径体系，为不同应用场景下柔性木质复合材料的设计提供技术参考，推动木材的高值化利用，并加速对石油基柔性材料的替代进程。

## 1 木材多尺度结构与柔化潜力

木材是一种由多种细胞构成的多孔性结构材料，其力学行为与其细胞排列分布、微纳尺度孔隙以及细胞壁的层次化多级结构等特征密切相关。这些结构特性在木材受力时可通过变形与自适应调整来分散应力，避免因应力集中而导致的脆性断裂[2]，从而为木材的柔韧性提供了物理基础。在细胞层面，孔隙结构能够通过变形、折叠或层间滑移等方式分散应力，使材料在压缩或弯曲载荷下表现出更高的可逆形变能力[3]；反之，孔隙受限或排列不均则可能导致局部应力集中与脆性破坏。在细胞壁层面，壁层结构从外到内可分为胞间层、初生壁和次生壁。各壁层的骨架由纤维素基本纤丝组成[4]，基本纤丝聚集形成纤维素微纤丝，微纤丝逐层堆积并相互缠绕，最终形成层状结构的细胞壁[5]（图 1）。这种层状结构增强了纤维层间的滑移与可压缩性，降低了细胞壁刚性的交联性，进一步赋予木材柔化潜力[6]。在分子层面，纤维素大分子具有结晶区和非结晶区，非结晶区中分子链以完全无序的卷曲方式堆砌和排列。此外，纤维素大分子无支链结构，在外力作用下有利于分子间氢键的断裂与重构，从而使非结晶区分子链在长度方向上具备可逆的伸展与回弹能力[6]，在分子尺度上为木材提供柔软性与可延展性。同时，非结晶区分子链结构疏松，易于水分渗透，增加分子链之间的距离，扩大自由体积并降低链段间的吸引力[2]，为分子链的相对伸展提供了更大的空间。进一步，木质素含有大量刚性芳香基团，限制了纤维素、半纤维素与木质素之间的相对滑移。通过选择性脱除木质素，可以降低细胞壁刚性基质的交联性，增强纤维间的滑移与可压缩性[7]，从而将原本硬质的细胞骨架转化为柔韧的多孔结构。正是这种多尺度的结构特性，为实现木材多级结构的精准设计与功能化重构奠定了理论基础，也为木材向柔性木质复合材料的转变及其高值化利用提供了重要支持。

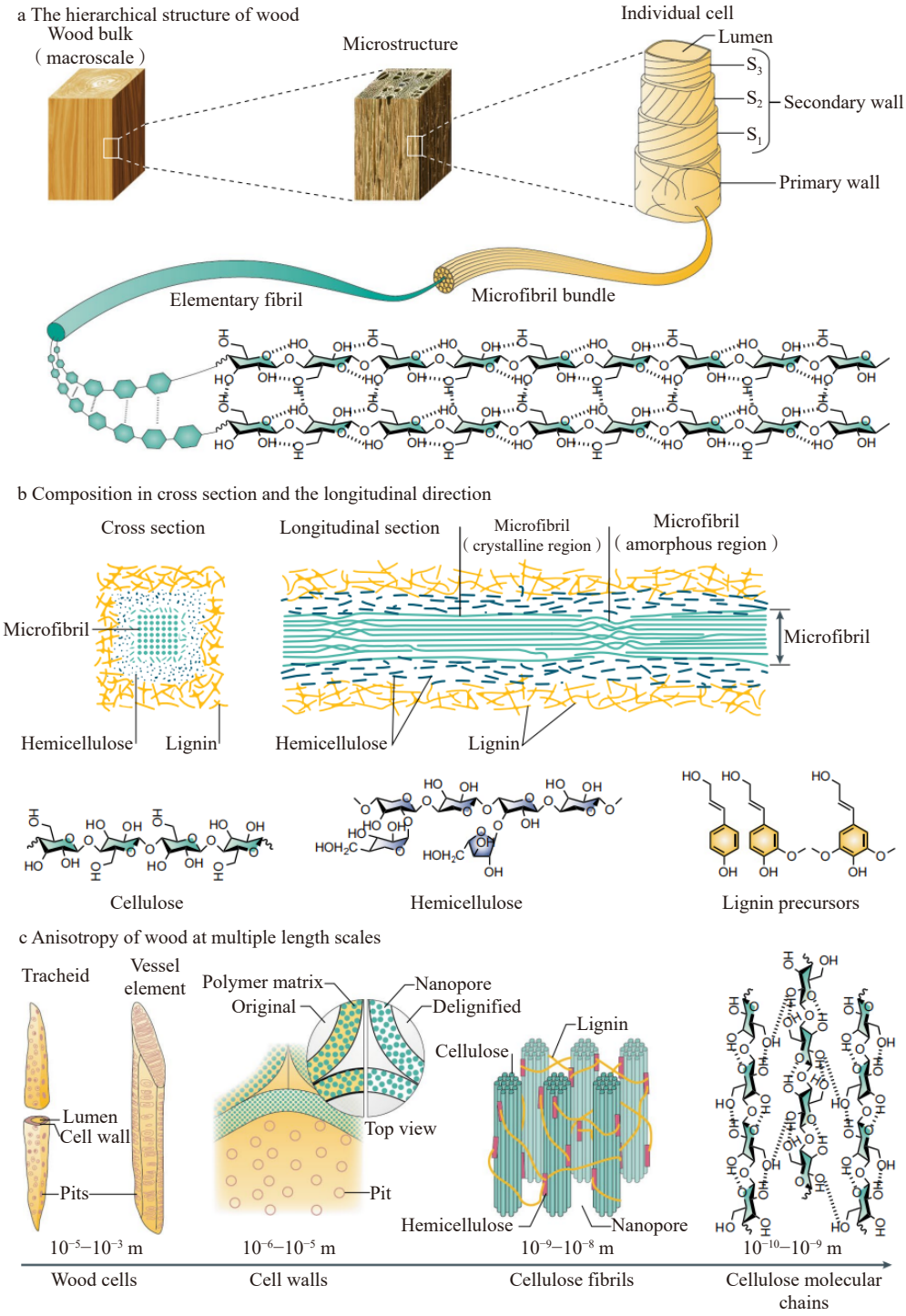



图 1　木材的多层级结构

Fig. 1　The multi-level structure of wood

注：此图引自参考文献 [8]。

## 2　柔性木质复合材料制备策略

天然实体木材因其高度有序且致密的细胞壁结构，具备优异的力学强度与尺寸稳定性，但其在宏观尺度上的可弯曲性与柔韧性受到显著限制。因此，直接利用实体木材制备柔性材料在理论与实践上均存在明显局限性。相比之下，将木材分解为更小尺度的结构单元（如木纤维或薄木单板），不仅能够保留木质组分的基本化学特性，还可提升结构设计性与界面调控能力。基于此，本研究从木材的结构层级出发，将柔性木质复合材料的结构单元划分为纤维类与薄木单板类两大类型。

### 2.1　基于木纤维的柔化路线

木纤维是微纳米级的细小纤维单元，主要通过热磨工艺制备。从物理形态来看，木纤维具有极大的长径比和高比表面积。在受力时，其内部产生的

应力不仅能够更有效地沿长度方向分散，还可以通过彼此间的相对滑动和重新排列实现多尺度重组。当木纤维与其他高分子材料复合时，通过界面相互作用可显著改变材料的物理特性。这种“集体行为”极大地提升了材料在宏观上的柔韧性和可塑性。针对木纤维类材料，目前具有代表性的制备策略包括熔融共混挤出法、连续平压法以及增材制造法。

#### 2.1.1 熔融共混挤出法

熔融共混挤出法是将木纤维与热塑性树脂、塑化剂及其他辅助试剂混合均匀后，通过螺杆挤出机在高温下挤出并冷却成型。哈娜·达伊等[9]采用 70% ~ 90% 的秸秆纤维和 10% ~ 30% 的乙烯−醋酸乙烯酯共聚物，通过熔融共混挤出法（挤出温度控制在 170 ~ 230 ℃ 之间）制备出具有良好柔性的高密度纤维板，适用于多种异形构件和家具。熔融共混挤出法具有低能耗、高产率、工艺成熟及质量稳定等优势，且其制备过程无醛添加，符合绿色环保的发展趋势，尤其适合以木粉与热塑性树脂为原料的柔性木质复合材料。然而，该方法可能导致木质纤维的长径比降低，从而影响复合材料的力学性能。因此，有必要优化挤出工艺参数，以实现木质材料柔性与力学性能之间的平衡。

#### 2.1.2 连续平压法

柔性超薄纤维板是我国通过连续平压法自主创制的一种新型纤维板。其核心工艺包括对木纤维进行施胶和干燥处理，随后利用大直径滚筒重型预压机进行楔角排气预压。最后，通过柔性入口技术将预压后的纤维板坯送入连续平压机中进行热压固化后得到纤维板，该板材厚度范围为 0.5 ~ 1.5 mm，具有优异的柔韧性。在热压过程中，纤维与胶黏剂之间通过非共价键或化学键等相互作用形成稳定的网络结构，从而实现了强度与柔性的平衡。连续平压法是现代纤维板生产的主流热压工艺，主要分为预压、连续平压固化和晾板等工段。该工艺不仅显著降低了能耗，还可结合无醛胶黏剂（如木质素胶、豆胶、异氰酸酯胶）生产环保型板材，减少甲醛释放，满足绿色家居的需求。

#### 2.1.3 增材制造法（3D/4D 打印）

增材制造是一种通过逐层堆积方式构建三维实体的技术，其核心原理为“分层制造，逐层叠加”。该技术通常包括数字化建模、材料选择、逐层加工（如熔融沉积、光固化等）以及后处理等关键步骤。3D 打印技术具有高精度、性能可控、设计自由度大及环保等优势，为柔性木质复合材料的制备提供了可行路径。Bi 等[10]以热塑性聚氨酯和木粉为原料，在 103 ℃ 烘箱中干燥 12 h 后，采用增材制造技术制备出柔性木粉/聚氨酯复合材料。该材料兼具良好的柔韧性和环保特性，适用于柔性装饰及功能性产品。Guo 等[11]则使用聚乳酸和木粉作为原料，将聚乳酸在 50 ℃ 下干燥 8 h，木粉在 103 ℃ 下干燥 12 h 后，通过增材制造技术制备出兼具柔性和导电性能的木质复合材料。这种材料不仅结合了聚乳酸的生物降解性和填料的导电性，还融合了木质纤维的天然特性与热塑性聚合物的可塑性，展现出优异的柔韧性与环保性能，适用于柔性电子器件、智能材料以及轻质可弯曲的装饰和家具部件。Keck 等[12]以液态甲基丙烯酸酯树脂为原料，通过增材制造技术制备出兼具柔韧性与可持续性的木质 3D 打印材料。该工艺通过调控孔隙结构，不仅降低了材料模量提升了柔韧性，还为功能填充（如电解液、药物分子）提供了空间。

### 2.2 基于薄木单板的柔化路线

薄木单板类结构单元主要通过旋切或刨切工艺制造，保留了木材的宏观纹理与连续纤维取向特征，其厚度通常为 100 μm 至 1 mm 之间。极致的厚度显著降低了木材内部的内应力和结构阻力，从根本上减少了弯曲所需的力，从而在一定程度上克服了木材的宏观刚性。此外，宏观木材的刚性还源于其坚硬的木质素和复杂的细胞壁结构，而化学解离木质素的方法可有效软化薄木单板。因此，在这些多重因素的共同作用下，利用薄木单板制备柔性复合材料展现出极大的潜力。代表性制备方法包括化学脱除木质素法和塑膜饰面法等。

#### 2.2.1 化学脱除木质素法

木材细胞壁主要由纤维素、半纤维素和木质素三大组分构成。在细胞壁结构中，木质素充当黏合剂的角色，使纤维结构更加紧密，从而降低了其形变能力，影响了纤维的整体柔韧性和可变形性[13]。化学脱除木质素法通过去除木材细胞壁中的木质素和/或半纤维素等基质组分，保留纤维素骨架，从而使木材结构变得疏松。随后，可通过原位浸渍或真空浸渍的方式将柔性聚合物填充到脱除木质素木材中，制备出柔性木质复合材料。目前，常用的脱除木质素方法包括亚硫酸钠（$Na_2SO_3$）法、亚氯酸钠（$NaClO_2$）法、过氧化氢（$H_2O_2$）改性法以及生物酶法等。Gao 等[14]利用碱性溶液处理轻木，部分脱除了其中的木质素和半纤维素，然后将季铵化明胶与丙烯酸/丙烯酰胺共聚物前驱液引入该木材结构中，通过原位聚合反应制备出复合材料。季铵化明胶的引入不仅使复合材料继承了木材骨架的力学支撑性能，还赋予其良好的柔性与优异的电化学综合性能。化学脱除木质素处理不仅能增加木材的孔隙率和比表面积（降低杨氏模量，提升柔性），还为功能分子或纳米组

分的引入提供了更多结合位点，从而赋予复合材料导电、储能或光学调控等功能特性。尽管脱除木质素的方法能够高效调控木材单元的微观结构，但高成本、高能耗以及废液污染等问题限制了其进一步工业化应用。因此，开发更加绿色环保的脱除木质素方法（如离子液体、低共熔溶剂和生物酶法）将是未来的研究方向。

为科学评估不同化学脱除木质素策略在木材结构调控与性能构建中的适用性，有必要从工艺可行性与结构效应两个层面进行系统比较。一方面，不同脱除木质素方法在脱除效率、试剂成本、工艺复杂度及环境影响等方面存在显著差异（表 1），这些因素直接决定了工艺的可实施性与规模化潜力；另一方面，关键工艺参数对木材孔隙结构的调控作用尤为关键（表 2），其不仅影响细胞壁的完整性与孔隙率演变，还进一步制约后续功能化组分的引入效率与材料整体性能表现。因此，本文分别对常用化学脱除木质素方法的综合工艺特征以及关键工艺条件对孔隙率变化的影响进行了对比分析，以揭示不同脱除木质素策略在“工艺–结构–性能”之间的内在关联，为后续制备工艺的合理选择与参数优化提供依据。

#### 2.2.2　塑膜饰面法

塑膜饰面法是将具有一定柔性的塑料薄膜（如聚氯乙烯 PVC、聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET 等）通过热压（热压温度通常为 120 ~ 180 ℃，施加压力一般为 0.5 ~ 1.5 MPa，热压时间通常为 30 s ~ 5 min）或黏合等工艺贴覆在材料表面。该方法主要通过热压实现聚合物薄膜与木材表面的紧密贴合，利用界面处形成的氢键、偶极作用或物理嵌合等作用，形成“木材–聚合物膜”的层状复合体，在保留木材骨架的同时赋予复合材料柔性。彭晓瑞等[29]利用马来酸酐接枝聚乙烯（PE）偶联剂改性塑料薄膜与木皮的界面，制备了用于木制品饰面的塑膜增强型柔性薄木复合材料。该材料具有环保性好、成本低、耐水性强以及工艺简单等优点，对于节省珍贵木材资源、提升产品综合性能和附加值具有重要的实践意义。

### 2.3　制备策略的比较

为系统比较不同柔性木质复合材料的制备策略，本文选取了当前研究中具有代表性的 5 种方法进行对比分析（表 3）。值得注意的是，不同制备策略在柔性提升效果、力学保持能力及工艺复杂度等方面表现出显著差异，这种差异并非源于工艺参数本身，而主要取决于其作用的结构层级及对木材细胞壁承载网络的调控方式。

## 3　跨领域多功能应用

自人类诞生以来，木材便在人类文明发展史中扮演重要角色，常作为建筑材料、家具原料、工具及燃料等使用。木材在生长过程中经历了复杂且独特的自组装过程，形成了天然多孔、结构复杂、层次分明的基本特性。近年来，随着纳米技术和材料科学的快速发展，研究人员对木材细胞的化学组分和壁层结构进行精准的功能化修饰，开发出一系列先进的多功能木质复合材料。这些材料在建材装修、传感器、离子导电水凝胶、电磁屏蔽、超级电容器、锂离子电池、太阳能海水淡化以及生物医药等领域实现了示范应用，并取得了丰富的研究成果。

### 3.1　绿色建材与装饰材料

随着全球可持续发展理念的不断深化，建筑领

**表 1　常用化学脱除木质素法的效率、成本、工艺难度及环境影响比较**

Tab. 1　Comparison of chemical delignification methods in efficiency, cost, process difficulty, and environmental impact

| 方法 | 脱除木质素效率 | 处理时间 | 试剂成本 | 工艺难度 | 环境影响 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Na_2SO_3$法 | 高（80% ~ 95%）[14] | 中（4 ~ 8 h）[15] | 低 | 中[16] | 中等污染[15] |
| $NaClO_2$法 | 很高（ > 95%）[17] | 中（3 ~ 6 h）[18] | 中[18] | 高（需酸性条件）[18] | 高污染（氯系废液）[17] |
| $H_2O_2$法 | 中高（75% ~ 90%）[19] | 短（2 ~ 4 h）[20] | 中 | 中 | 较环保[19] |
| 生物酶法 | 中（60% ~ 85%）[21] | 长（12 ~ 72 h） | 高[22]（酶制剂贵） | 低温操作 | 环保[21] |

**表 2　常用化学脱除木质素法的关键工艺对孔隙率的影响比较**

Tab. 2　Comparative effects of key process parameters on porosity in common chemical delignification

| 方法 | 试剂情况 | 处理温度/℃ | 处理时间/h | 孔隙率变化趋势 | 说明 |
|---|---|---|---|---|---|
| $Na_2SO_3$法 | $Na_2SO_3$质量分数5% ~ 15%[16] | 80 ~ 100 | 4 ~ 8[15] | 中等增加[23] | 温度升高可促进木质素溶出，但过高会导致纤维塌陷[15] |
| $NaClO_2$法 | $NaClO_2$质量分数1% ~ 3%（酸性条件）[24] | 70 ~ 90[24] | 3 ~ 6[18] | 显著增加[24] | 脱除彻底，纤维束分离度高 |
| $H_2O_2$法 | $H_2O_2$质量分数3% ~ 10%[25] | 60 ~ 80 | 2 ~ 4[20] | 保持或略增[26] | 氧化温和，对微孔结构保留较好[27] |
| 生物酶法 | 酶活性50 ~ 100 U/mL | 30 ~ 50[28] | 12 ~ 72 | 缓慢增加[28] | 孔结构完整性好，但效率低 |

表 3 柔性木质复合材料的制备策略与性能对比

Tab. 3 Preparation strategies and performance comparison of flexible wood-based composites

| 制备方法 | 效率 | 能耗 | 优势 | 不足 |
|---|---|---|---|---|
| 熔融共混挤出法 | 高(工业成熟，适合规模化生产) | 较高(需高温熔融与挤出) | 力学性能较优，均匀性好，适合热塑性材料复合 | 设备成本高，木粉/基体界面相容性差需改性[9] |
| 连续平压法 | 中(适合大面积压制，效率依赖设备) | 中等(热压工艺消耗) | 尺寸稳定性好，适合装饰和结构应用 | 柔韧性有限，多用于板材，难以实现高柔性 |
| 增材制造法 | 中等(可定制复杂结构，但成型速度较慢) | 中高(打印加热与逐层沉积) | 可实现复杂形状，功能材料可直接打印，适合个性化器件[10] | 成型速度慢，设备成本高，材料适配性有限 |
| 化学脱除木质素法 | 低(需化学处理，步骤多，周期长) | 较高(化学药液、加热、清洗) | 可赋予木材柔性、透明性和高离子传导性(如电化学器件)[14] | 处理过程耗时耗能，可能破坏木材力学性能 |
| 塑膜饰面法 | 高(热压 + 塑膜，周期短，工艺简单) | 低(低温热压或UV固化即可) | 工艺简便，表面装饰效果好，环保[29] | 主要改善装饰和柔韧性，对功能性提升有限 |

域对新型绿色建材的需求愈发迫切。传统木材虽具备天然环保的优势，但其柔韧性较差，限制了其在建筑装饰装修中复杂异形结构领域的应用。超薄纤维板是指厚度为 0.5 ~ 1.5 mm 的高密度纤维板材，其超薄特性赋予了可弯曲和可卷曲的性能，因此在异形结构家具、曲面建筑结构等领域得到了广泛应用[30](图 2)。张文治[31]采用连续平压法制造超薄高密度纤维板，该板材具有优异的平整度、硬度和弯曲性能，可替代天然木质单板、科技木单板及纸基装饰材料，在饰面人造板、实木复合地板、实木复合门以及家具板材与饰面材料之间充当缓冲层。周李俊等[32]通过连续平压法制备了超薄高密度纤维板，该材料可用于礼盒包装、电子线路印刷垫板及家装等领域。

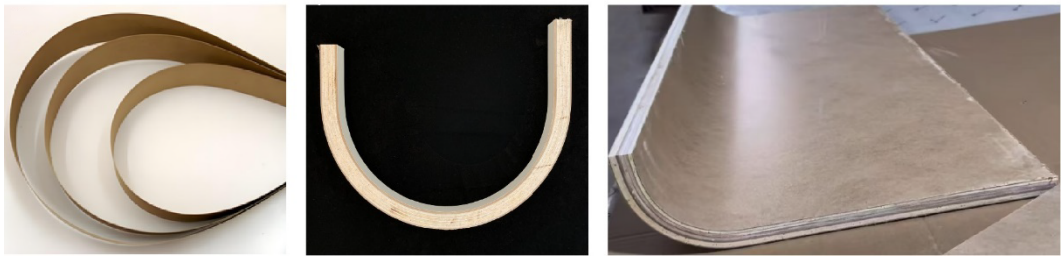
超薄高密度纤维板因其轻薄、高密度、可弯曲及可模压成型等特点，能够应用于室内装修中的弯曲造型设计，提升基材的装饰性和功能性，从而满足现代建筑对曲线和异形结构的需求。尽管目前超薄高密度纤维板主要作为胶合板、细木工板的表面覆贴层，但其卓越的性能与广阔的市场潜力预示着未来在建筑领域将涌现更多创新应用场景。

### 3.2 智能传感与电磁功能材料

#### 3.2.1 柔性传感器

传统电子传感器通常由坚硬的材料构成，其固定的工作模式难以满足灵活轻便的应用需求，因此在许多现代高科技领域的应用受到限制。柔性传感器作为可穿戴设备的核心组件，因其独特的柔韧性和可拉伸特性，能够方便地附着在人体皮肤或机器人表面，从而感知外界刺激(如压力、温度等)，在健康监测、电子皮肤、人机交互及运动追踪等领域受到学术界和工业界的广泛关注(图 3a)。天然木材因其原料丰富、成本低、生物相容性好、孔隙率高以及比表面积大等优势，在制备柔性传感器复合材料方面展现出巨大潜力[33]。

Tang 等[34]以脱除木质素的木皮与聚乙二醇二丙烯酸酯为原料，制备了一种超柔性且透明的木质薄膜。该薄膜在可见光范围内的透光率高达 91.2%，曲率半径仅为 2 mm，表现出优异的柔韧性和透明性，在电子皮肤、可穿戴设备及机器人领域具有广阔的应用前景(图 3b)。Fu 等[35]以脱除木质素的轻木为原料，通过压缩致密化方法制备了兼具优异柔性和光学透明性的木质薄膜(图 3c)，并利用含有碳纳米纤维的绿色导电墨水作为导电层，开发了一种全木质高性能应变传感器，在柔性电子、智能包装及可穿戴设备领域展现了潜在的应用价值。Zhang 等[36]以天然柳木为原料，经化学处理与自密实化工艺制备出高强度、可折叠的半透明木质衍生纸，并基于此构建了全木基柔性电子设备。该设备结构简单、无毒环保、机械耐弯折性优异且可生物降解，适用于可穿戴柔性压力传感器，在健康监测与人机交互领域具有重要应用潜力(图 3d)。Shi 等[37]以天然木材为基材，通过简易化学处理成功制备了高柔性、高灵敏度的柔性木基摩擦自供电传感器(wood-based triboelectric



a 柔性超薄纤维板 b 加工后的柔性超薄纤维板 c 应用案例

图 2 柔性超薄纤维板

Fig. 2 Flexible ultra-thin fiber board




a. 柔性传感器的形貌[33]；b. 假体表面的电子皮肤及其柔性示意图[34]；c. 柔性透明木质薄膜制备原理及过程[35]；
d. 全木质柔性电子器件的制造和降解过程[36]；e. 木基摩擦自供电传感器柔性示意图[37]

图 3　柔性传感器形貌及其具体应用示意图

Fig. 3　Schematic illustration of the morphology and specific applications of flexible sensors

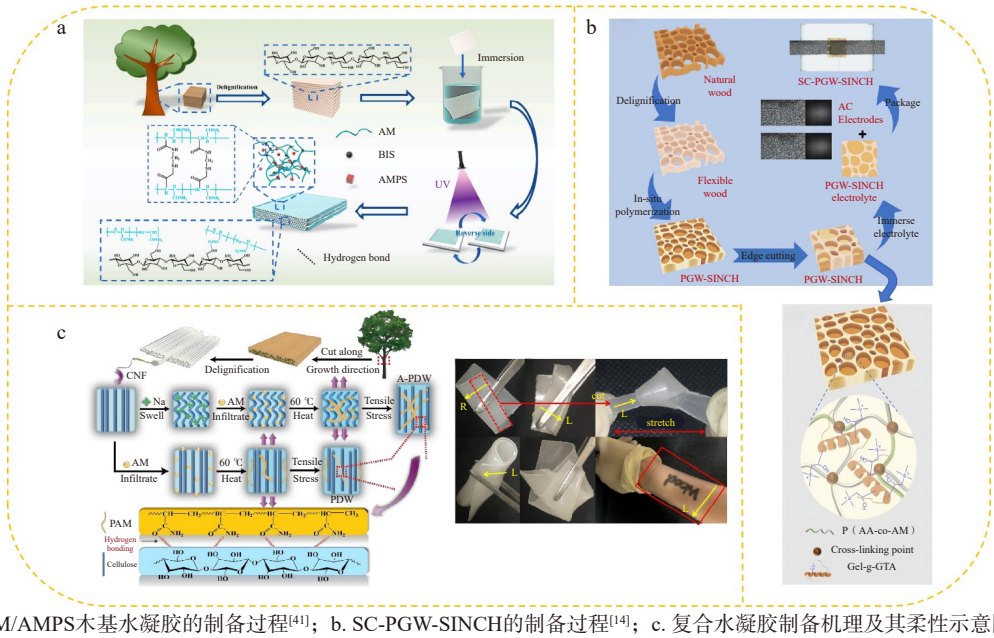
self-powered sensor，WTSS)，并基于 WTSS 开发出自供电智能家居控制系统，实现了对家电与软件的远程控制(图 3e)。在柔性木质复合材料制备的应变传感器中，物理与化学机制相辅相成，木材纤维骨架的可压缩性与可逆形变特性不仅赋予其良好的力学强度和柔韧性，还可通过碳化或添加导电材料(如纳米碳、导电聚合物)实现高灵敏度检测。

然而，木材的各向异性导致复合材料在机械性能和长期环境稳定性方面表现出各向异性。因此，未来可通过仿生方法开发新型仿生复合材料与动态自适应材料，结合多级结构优化策略平衡灵敏度与机械性能，从而提升器件在复杂环境中的稳定性和耐用性，以满足动态可穿戴场景的需求[38]。

### 3.2.2　离子导电水凝胶

水凝胶是一种由亲水性聚合物通过化学或物理交联形成的具有三维网络结构的复合材料[39]，因其良好的柔性和回弹性，被广泛应用于伤口敷料、柔性传感及环境保护等领域。木材独特的多尺度孔隙结构以及定向排列的纤维素纳米纤维特性，使其成为制备高强度、高模量水凝胶的理想材料[40]。

He 等[41]将丙烯酰胺(AM)、2-丙烯酰胺基-2-甲基-1-丙磺酸(AMPS)与脱除木质素的木材复合，制备出柔性 AM/AMPS 木质水凝胶(AWH)复合材料(图 4a)。该材料结合了木材细胞的定向排列结构与水凝胶的柔韧性，从而赋予其优异的力学强度和柔韧性，在可穿戴运动监测、能量收集及书写传感等领域展现出广阔的应用潜力。Gao 等[14]通过将季铵化明胶(Gel-g-GTA)与交联聚合物(丙烯酸−共丙烯酰胺)(P(AA-co-AM))构建半互穿网络纤维素支架，并将其浸入多孔木材骨架中进行原位凝胶化，成功制备了用于柔性超级电容器的复合水凝胶电解质(图 4b)。其中，纤维素骨架和明胶中的季铵基团有效提升了复合水凝胶电解质的离子电导率。该超级电容器在经历 180°弯曲 1 000 次后仍保持近 90% 的电容，表现出优异的循环稳定性，为高性能柔性超级电容器的设计提供了新思路。Chen 等[42]通过脱除木质素法从天然木材中提取保留各向异性结构的高度有序纤维素骨架，经碱处理软化纤维素骨架以提升其柔韧性，随后将其与聚丙烯酰胺水凝胶复合，形成高柔性、高强度的水凝胶复合材料(图 4c)。该水凝胶机械性能优异，可任意打结、折叠而不破裂，且在 600 nm 波长下的光学透过率达 69%，适用于检测手




a. AM/AMPS木基水凝胶的制备过程[41]；b. SC-PGW-SINCH的制备过程[14]；c. 复合水凝胶制备机理及其柔性示意图[42]

图 4 水凝胶制备过程及其柔性示意图

Fig. 4 Schematic illustration of the hydrogel preparation process and its flexibility

指、手腕、肘部弯曲等宏观尺度的人体运动。

脱除木质素后的木材形成了具有多孔结构特性的木质纤维素骨架，这为水分子和离子的存储与传输提供了通道，同时提升了水凝胶的含水率和离子导电性。此外，纤维素和木质素分子链上丰富的羟基能够与水凝胶基体中的羧基、酰胺基等官能团通过化学键、氢键、静电作用及 π–π 键相互作用形成稳定的交联网络。这种界面结合不仅增强了水凝胶的力学强度和柔性，还赋予其优异的可逆性与自修复能力。

### 3.2.3 电磁屏蔽膜

随着电子信息技术的快速发展，电话、计算机等电子设备的应用日益广泛，电磁辐射干扰与污染问题愈发严峻，已直接威胁到人体健康[43]。传统电磁屏蔽材料多为金属材料，虽然能够实现良好的屏蔽效果，但因其重量大、制造过程能耗高等缺点，研究者开始探索天然、轻质且可再生的木材等生物质材料作为替代品。

Jiang 等[44]以二维纳米材料 MXene（$Ti_3AlC_2$）和脱除木质素木材为原料，构建了一种具有三明治结构的柔性 MXene/木材复合材料（F-MWC）（图 5）。与天然木材相比，该材料展现出优异的柔韧性，可以弯曲成复杂形状而不会断裂，为电子设备和建筑材料的电磁屏蔽提供了绿色、轻量化的解决方案。Muhammad 等[45]通过化学处理和层压技术，将经过脱除木质素处理的木材与聚合物（PVA、明胶）及氧化物（$BaCO_3$）结合，制备出高透明度的柔性木质复合材料，用于 X 射线辐射屏蔽。研究表明，添加不同浓度的 $BaCO_3$ 能显著增强材料的辐射吸收能力，且随着浓度增加，吸收效率逐步提升，其最低半值层（HVL）值为 0.73 cm，表明该材料具有优异的电磁屏蔽性能。

木材的层级孔隙结构为导电填料的渗透与定向排列提供了天然通道，使得复合材料能够形成连续的导电网络。这种结构有效避免了填料在反复弯曲过程中发生脱落，从而使柔性木质复合材料在高频折叠环境下仍能保持稳定的电磁屏蔽效率。

## 3.3 能源存储与转换

### 3.3.1 超级电容器

超级电容器，又称电化学电容器，因其极长的循

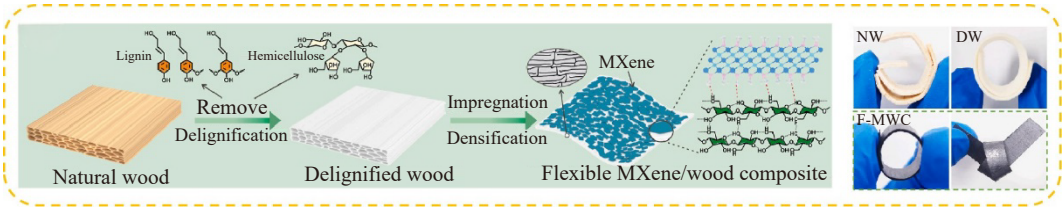



图 5 柔性 MXene/木材复合材料的制备过程及其柔性示意图

Fig. 5 The fabrication process of flexible MXene/wood composite materials and its flexible schematic diagram

注：此图引自参考文献 [44]。

环寿命和卓越的能量存储能力，已成为现代能源存储系统中的重要组成部分[46]。随着智能穿戴设备的快速发展，柔性超级电容器凭借高比电容、高功率密度、快速充放电能力以及良好的柔韧性等优势，逐渐成为该类电子产品的主要储能部件[47]。脱除木质素后的木材展现出丰富的微纳尺度孔隙和独特的微通道排列结构，这不仅有利于电解液的快速浸润与离子传输，还赋予木材优异的柔韧性和高导电性，为高效储能提供了有序路径。

Xiong 等[48]以经过脱除木质素和半纤维素处理的轻木（Balsa wood）为原料，通过真空灌注和原位聚合将聚苯胺（PANI）纳米纤维填充至脱除木质素的木材孔隙中，制备出具备一定柔性的木材@聚苯胺（LFW@PANI）复合材料（图 6）。基于该复合材料制备的电极在 5 000 次循环后仍保持约 96% 的容量稳定性，表现出优异的循环性能、较高的比电容（约 800 F/g）、能量密度（41 Wh/kg）以及高效的充放电能力。

张萱等[49]创新性地提出了一种“从厚到薄”的策略，通过致密化和低温处理将 MXene（$Ti_3C_2T_x$）负载到厚度为 500 μm 的木材厚电极上，并利用该电极制备了固态超级电容器。在 50 mV/s 扫速下，当电容器的弯曲角度从 0°变化至 90°时，其循环伏安法测试（CV）曲线基本保持一致。该超级电容器展现出高柔韧性、高比电容、优异的机械性能以及稳定的能量和功率密度，适用于可穿戴设备和绿色能源存储系统。

然而，在利用木材制造柔性超级电容器的研究中发现，木质电极材料的导电性及电容器各界面之间的电荷传输效率仍有待提高。未来研究应重点关注如何有效调控木质碳材料的孔隙结构以及系统设计界面结构，以进一步提升电容器电化学性能，从而推动柔性木质超级电容器的实际应用。

为了更清晰地展示木质复合材料在不同应用领域的独特优势，将其与常见生物质材料及传统材料进行了对比（表 4）。结果表明，木质材料在柔韧性、可加工性以及绿色可持续性方面具有显著优势。

### 3.3.2　锂离子电池

作为一种具备成本优势、长循环寿命和高能量密度的储能设备，锂离子电池在众多领域展现出显著优势，受到研究者的广泛关注。随着可穿戴电子设备（如智能手表、柔性显示屏等）的快速发展，传统刚性锂离子电池（LIBs）难以满足设备对柔性和可拉伸性的需求。因此，研究人员开始探索具有弯曲、可折叠特性和高性能的柔性锂离子电池。木材经过炭化与活化处理后，可形成多孔碳材料，这种材料不仅具备优异的导电性和机械强度，还可作为高效的电极材料。此外，木材丰富的孔隙结构和高比表面积有助于锂离子的存储与传输，降低界面阻抗，从而为锂离子提供充足的反应活性表面，有助于提升电池的能量密度和充放电效率。

Chen 等[50]利用天然木材层级孔隙结构能够调控锂沉积均匀性的特性，将天然木材用作锂金属电池中的三维多孔支撑材料，构建了一种由超薄柔性木膜/锂复合阳极、木材/硫阴极以及木材隔板组成的全纽扣电池。实验结果表明，木膜/锂复合阳极表现出更稳定的循环性能，不仅具有更高的库仑效率，而

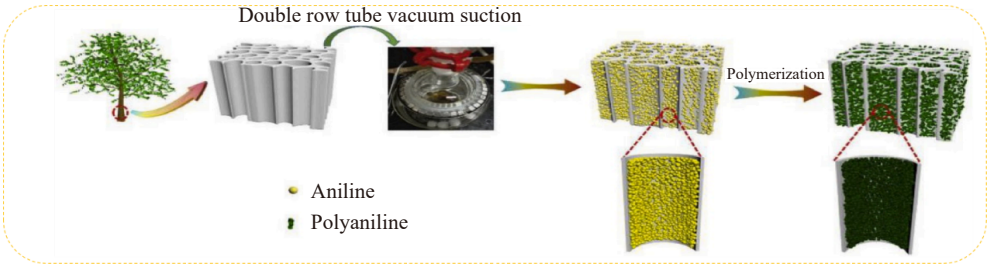



图 6　LFW@PANI 复合材料的制造过程

Fig. 6　The fabrication process of LWF@PANI composite materials

注：此图引自参考文献 [48]。

**表 4　木质复合材料与同类石油基柔性材料的关键性能对比**

Tab. 4　Comparison of key properties between wood-based composites and petroleum-based flexible materials

| 材料类型 | 导电率/(S·cm$^{-1}$) | 屏蔽效能/dB | 断裂伸长率/% | 灵敏度/比电容 | 特点与不足 |
|---|---|---|---|---|---|
| 木质复合材料 | 100 ~ 1 000（高）[43−44] | 40 ~ 60[43−44] | 5 ~ 15[44] | 比电容高[48] | 孔隙结构利于掺杂和改性[48]，性能均衡 |
| 竹质材料[51] | 10 ~ 100（中等） | 30 ~ 50 | 3 ~ 10 | 中等 | 力学强度高，电导率偏低 |
| PI复合膜 | 100 ~ 1 000（高） | 50 ~ 80 | 50 ~ 100[47] | 中等 | 高强度高柔性，但不可降解，成本高 |
| PET复合膜 | 10 ~ 200（中等） | 40 ~ 70 | 80 ~ 150[47] | 中等 | 柔韧性佳，但环保性差 |

且在 100 次循环后容量保持率高达 98.2%，较对照锂电池高出 26.8%。

### 3.3.3 太阳能驱动海水淡化

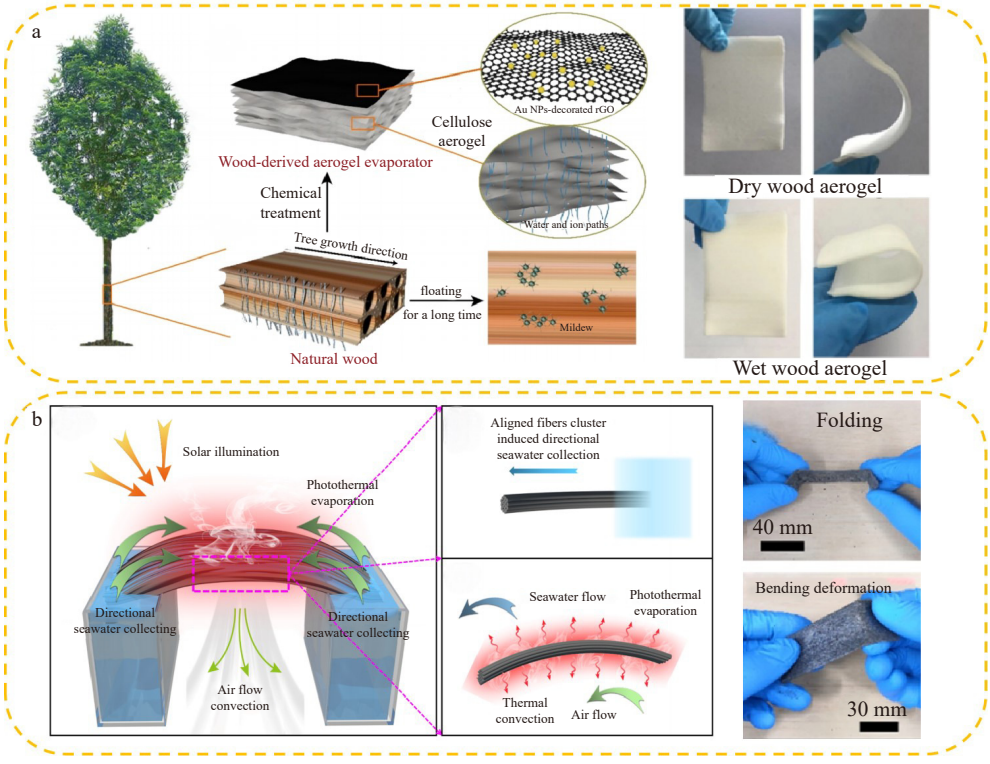
随着全球淡水资源日益紧缺，储量丰富且分布广泛的海水逐渐成为缓解水资源短缺的重要替代来源。为应对这一挑战，一种基于“空气–水界面太阳能加热”的绿色工艺被应用于海水淡化。该技术不仅能够满足饮用水、农业灌溉和工业生产的需求，还为缓解全球水资源压力、促进区域经济发展以及改善居民生活质量提供了新的解决方案。

Zhang 等[52]开发了一种基于木材衍生气凝胶的太阳能海水淡化蒸发器（图 7a）。通过结合金–还原氧化石墨烯（Au-rGO）光热层与木质气凝胶基底，该蒸发器实现了高效且稳定的太阳能驱动蒸发。由于化学处理过程中去除了霉菌生长所需的营养物质，木质气凝胶蒸发器在长期漂浮于水面时仍能保持结构完整性和高效的光吸收能力，展现出优异的长期稳定性。Chao 等[53]研发了一种新型的木材衍生间接接触式（悬挂式）光热蒸发系统，用于高效海水淡化。研究团队通过脱除天然木材中的木质素和部分半纤维素，制备了具有定向结构的木材气凝胶（wood-derived aerogel，WA），并在其表面沉积还原氧化石墨烯（reduced graphene oxide，rGO），形成具有一定柔性的还原氧化石墨烯–木材气凝胶（rGO-WA）复合材料（图 7b）。在 1 kW/m$^2$ 的光照条件下，该系统实现了 1.351 kg/(m$^2$·h)的蒸发速率和 90.89% 的蒸发效率，表明其能够高效去除海水中的离子。此外，柔性木质复合材料的多级孔道结构有效促进了毛细输水，其柔性特性确保了在弯折或曲面条件下仍能维持稳定的水分输运和光热转化性能，从而加速海水从主体传导至蒸发界面的过程。这项研究为利用木材资源开发高效、环保的海水淡化系统提供了新思路。

## 3.4 生物医药与组织界面

柔性木质复合材料不仅具有可弯曲、可折叠等力学适应性，还因其多孔结构、优良的透气性以及生物相容性，在组织工程支架和药物控释载体等生物医药领域展现出独特优势。因此，探索柔性木质复合材料在生物医药领域的应用，不仅有助于拓展材料的功能边界，也为绿色可持续医疗器械与健康监测技术的发展提供了新思路。

Kong 等[54]受肌肉组织高度有序微结构的启发，开发了一种具有优异各向异性及高强度的木质水凝胶。该材料结合了坚固的木质纤维与柔软的聚丙烯酰胺基质，实现了高达 36 MPa 的拉伸强度，并具备良好的光学透明性。其生物相容性优异，能够支持




a. Au-rGO涂层木质气凝胶（Au-rGO-coated wood-derived aerogel，AGWA）蒸发器设计和制造过程及气凝胶的柔性示意图[52]；b. 间接接触蒸发系统的示意图及rGO-WA的柔性示意图[53]

图 7 海水淡化蒸发器系统的制造过程及其柔性示意图

Fig. 7 Schematic illustration of the fabrication process of the seawater-desalination evaporator system and its flexibility

细胞黏附和生长，展现出一定的生物医用材料应用潜力。Huang 等[55]采用一种简单而高效的自上而下组装策略，制备了具有协同光动力疗法和水分管理功能的聚集诱导发射光敏剂（aggregation-induced emission photosensitizer，AIE-PS）功能化柔性木材（AIE-PS functionalized flexible wood，AIE/FW）敷料（图 8a），有效促进了感染伤口的愈合。Zhang 等[56]通过类似的自上而下组装策略，开发了一种基于天然木材的柔性水凝胶敷料（FW@PA-hydrogel）（图 8b）。该水凝胶敷料具有增强的机械性能、抗菌活性和抗氧化能力，保留了木材的定向多孔结构，模拟了皮肤中胶原纤维的排列方式。同时，通过引入植酸（phytic acid，PA），赋予其显著的抗菌和抗氧化特性，从而有效促进感染伤口的愈合、肉芽组织形成以及胶原沉积。

柔性木质复合材料在生物医药领域的应用与其化学组成、填料种类及性能调控密切相关。纤维素表面丰富的羟基能够促进细胞黏附和增殖，而木质素降解产物则表现出一定的抗氧化和抗菌作用，有助于改善细胞微环境。通过在复合材料体系中引入生物相容性组分（如明胶、壳聚糖），可进一步与纤维素形成氢键网络，从而调控支架的力学性能与降解速率。这使得柔性木质复合材料不仅能提供力学支撑，还能在分子水平上促进组织再生。

## 4　挑　　战

综合上述研究现状，尽管柔性木质复合材料的研究取得了显著进展，但其微观结构特性对宏观性能的影响机制仍不明确。此外，大多数柔性木质复合材料的研发仍处于实验室阶段，在产业化进程中面临多个关键技术瓶颈。因此，柔性木质复合材料目前面临的主要挑战包括构效关系缺失、规模化制造与环保性的矛盾、长效耐久性不足以及功能单一化等问题。

### 4.1　微观结构–宏观性能构效关系缺失

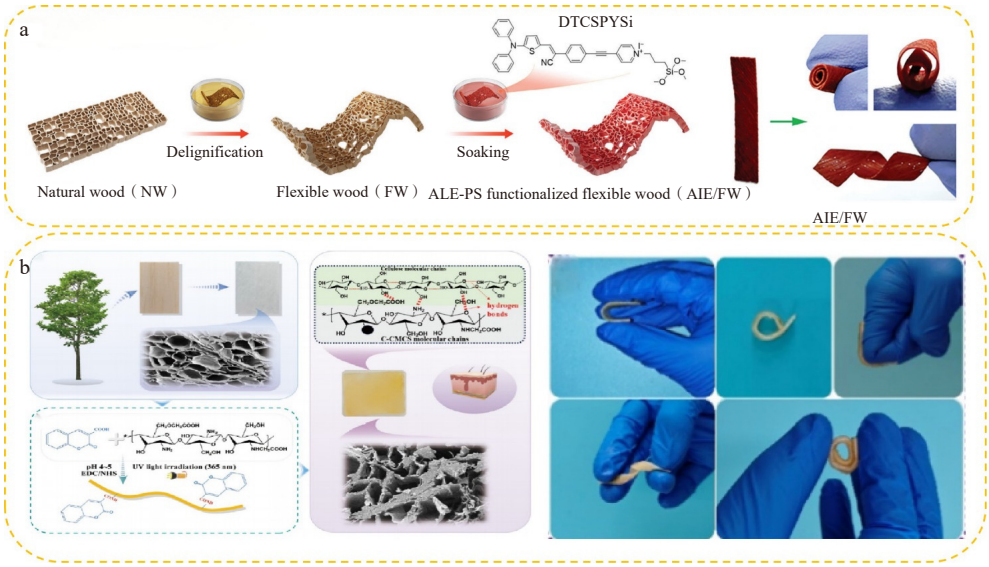
材料的微观结构与宏观性能之间的构效关系一直是复合材料研究的核心问题。柔性木质复合材料未来的发展面临柔性与多功能协同的难题，揭示木材在多尺度下与聚合物及功能纳米粒子之间的界面相互作用机制和结构演变规律成为亟待解决的关键问题。此外，通过调控材料的微观结构，可以实现对其性能的精准设计与协同优化。因此，亟需从微观层面深入理解并精确控制材料结构与性能之间的关联机制，从而揭示其物理和化学性质的本质。

### 4.2　规模化制造与环保一致性失衡

基于脱除木质素法制备的柔性木质复合材料，在化学处理过程中往往会产生一定量的废弃物，对环境造成污染。为实现工业化应用，亟需探索高效脱除木质素的方法，采用更加绿色环保的工艺，提高产率并简化流程，以实现规模化制造与环保性的平衡。

### 4.3　长效耐久性不足

在多雨、潮湿环境下，材料容易吸水膨胀、变形甚至腐烂，影响其结构稳定性和使用寿命；长时间暴露于阳光下，紫外线会导致材料降解、变色和脆化，进而引发裂纹和变形，影响整体性能；在化学腐蚀性




a.自上而下组装AIE/FW的过程及其柔性示意图[55]；b. 用于伤口愈合的柔性木基水凝胶的制备过程及其柔性示意图[56]

图 8　生物敷料的制备过程及其示意图

Fig. 8　Schematic illustration of the preparation process for biological dressings

介质中，材料易受腐蚀，限制了其在恶劣户外环境及海洋等复杂多变场景中的应用。

### 4.4 功能单一化瓶颈

多功能化和结构–功能一体化是当前复合材料领域发展的主流趋势。然而，现有的柔性木质复合材料设计通常局限于提供某一特定的孤立性能，未能有效整合或衍生出其他具有实用价值的附加功能，难以满足日益复杂的应用需求和高性能集成的要求。因此，必须通过精巧的结构设计和多基元材料的复配，推动功能多样化发展。

## 5 未来研究展望

目前，研究人员对柔性木质复合材料在建材、信息和能源等领域的研究已取得显著的基础科学成果。未来应继续聚焦关键核心技术的研发，推动新技术与新产品的大规模应用示范。同时，新兴产业代表了未来科技发展的新方向，是培育发展新动能、获取竞争优势的重要途径。在此基础上，还应打破学科壁垒，关注新质生产力，积极拓展柔性木质复合材料在高端领域的应用，充分发挥其独特优势。因此，未来的发展建议重点围绕以下几个方面展开。

### 5.1 生物组织适配材料

在柔性木质复合材料的未来发展中，生物组织领域展现出重要的应用潜力。例如，如何在保持力学柔性的同时，构建优异的细胞黏附与增殖环境；如何通过表面改性或功能化赋予材料更多生物活性等。未来可通过多尺度调控手段，使柔性木质复合材料在微纳米结构层面更好地匹配天然细胞外基质，从而推动其在生物组织材料领域的进一步发展。

### 5.2 柔性形状记忆材料

木质纤维素因其来源丰富、可再生及多尺度孔隙特征，为绿色形状记忆材料的构建提供了全新思路。通过多尺度界面工程、分子层面的交联设计以及功能高分子的复合，可以提升材料的形状固定率与回复效率，实现柔性木质复合材料在光、电、湿度等多重外场条件下的智能形状记忆效应。

### 5.3 具身智能材料

在具身智能快速发展的背景下，柔性木质复合材料不仅具备良好的力学柔韧性和可加工性，还兼具可再生、可降解等可持续特性，为智能系统提供了一条绿色发展路径。通过拓展材料层面的“自感知–自适应”功能，柔性木质复合材料可使机器人或智能设备的“身体”本身与环境进行动态交互，从而在软体机器人、人工皮肤、智能可穿戴设备及人机交互界面等领域发挥重要作用，推动具身智能系统向可持续化和高集成化方向迈进。

## 6 结 论

柔性木质复合材料作为一种环境友好且性能优异的新型材料，在绿色低碳背景下具有重要的战略意义。本文基于木材的多尺度结构，系统归纳了柔性木质复合材料的制备策略及其优劣势，并总结了多功能柔性木质复合材料在建材装修、信息、能源以及生物医药等跨领域的应用研究进展。最后，梳理了当前柔性木质复合材料在科学与技术方面面临的主要挑战，包括微观结构特性与宏观性能之间的构效关系不明确、大规模制造中效率与环保难以平衡、长效耐久性不足以及产品功能单一等问题。同时，对柔性木质复合材料未来在生物组织材料、柔性形状记忆材料及具身智能材料领域的应用前景进行了展望。尽管柔性木质复合材料在材料构效关系、制备工艺优化及规模化应用等方面仍面临技术难题，但随着基础研究的深入和产业技术的突破，以及全生命周期绿色评价体系的建立，柔性木质复合材料有望实现从实验室到产业化的跨越，为绿色工业、循环经济的发展以及全球“双碳”目标的实现提供创新思路。

## 参 考 文 献


[1] 徐金豪, 马洁茹, 周静, 等. 基于自上而下法木基复合凝胶的构筑及其功能化研究进展 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 647−663.
Xu J H, Ma J R, Zhou J, et al. Research progress in functionalization of wood-based composite hydrogels via top-down methods [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 647−663.

[2] Li Y, Fu Q, Yang X, et al. Transparent wood for functional and structural applications [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2018, 376: 20170182.

[3] Mariani A, Malucelli G. Transparent wood-based materials: a new step toward sustainability and circularity [J]. Next Materials, 2024, 5: 100255.

[4] 龙克莹, 王东, 林兰英, 等. 木材多尺度界面结构及其力学性能的研究进展 [J]. 中国造纸学报, 2021, 36(1): 88−94.
Long K Y, Wang D, Lin L Y, et al. Advances in multi-scale interfacial structure and mechanical properties of wood [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2021, 36(1): 88−94.

[5] 卿彦. “双碳”战略目标下木竹基先进功能材料研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 13−25.
Qing Y. Advanced functional materials derived from natural wood and bamboo resources under the double carbon strategy in China [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(12): 13−25.

[6] Delmer D, Dixon R A, Keegstra K, et al. The plant cell wall—dynamic, strong, and adaptable—is a natural shapeshifter

[J]. The Plant Cell, 2024, 36(5): 1257−1311.

[7] Kumar A, Jyske T, Petric M. Delignified wood from understanding the hierarchically aligned cellulosic structures to creating novel functional materials: a review [J]. Advanced Sustainable Systems, 2021, 5(5): 2000251.

[8] Chen C, Kuang Y, Zhu S, et al. Structure-property-function relationships of natural and engineered wood [J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5(9): 642−666.

[9] 哈娜·达伊, 扬·克尼佩尔斯. 柔性高密度纤维板及其制造方法: CN106604806A [P]. 2017−04−26.

Dai H, Knipperts J. Flexible high-density fiberboard and its manufacturing method: CN106604806A [P]. 2017−04−26.

[10] Bi H, Ren Z, Guo R, et al. Fabrication of flexible wood flour/thermoplastic polyurethane elastomer composites using fused deposition molding [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 122: 76−84.

[11] Guo R, Ren Z, Bi H, et al. Electrical and thermal conductivity of polylactic acid (PLA)-based biocomposites by incorporation of nano-graphite fabricated with fused deposition modeling [J]. Polymers, 2019, 11(3): 549.

[12] Keck S, Liske O, Seidler K, et al. Synthesis of a liquid lignin-based methacrylate resin and its application in 3D printing without any reactive diluents [J]. Biomacromolecules, 2023, 24(4): 1751−1762.

[13] 李志强, 张红杰. 木浆纤维形变性对其结合性能的响应机制研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2017.

Li Z Q, Zhang H J. Study on the response mechanism of deformation behavior of lignocellulosic fibers to their bonding properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.

[14] Gao C, Gao Z, Wei Y, et al. Flexible wood enhanced poly(acrylic acid-co-acrylamide)/quaternized gelatin hydrogel electrolytes for high-energy-density supercapacitors [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(2): 2951−2960.

[15] Li J, Chen C, Zhu J Y, et al. In situ wood delignification toward sustainable applications [J]. Accounts of Materials Research, 2021, 2(8): 606−620.

[16] Danielewicz D. Delignification, yield, defibreability, and brightness of pine wood (*Pinus sylvestris*) pulped using the alkaline sulphite method with the addition of DDA and ethylene glycol [J]. Bioresources, 2024, 19(4): 8124−8135.

[17] Mondal S, Neogi S, Chakraborty S. Experimental and kinetic analyses of delignification of lignocellulosic grass with minimal holocellulose loss during pretreatment [J]. Bioresource Technology Reports, 2023, 23: 101549.

[18] Ilyas R A, Sapuan S M, Ishak M R, et al. Effect of delignification on the physical, thermal, chemical, and structural properties of sugar palm fibre [J]. Bioresources, 2017, 12(4): 8734−8754.

[19] More A, Elder T, Jiang Z. A review of lignin hydrogen peroxide oxidation chemistry with emphasis on aromatic aldehydes and acids [J]. Holzforschung, 2021, 75(9): 806−823.

[20] Mun J S, Mun S P. Alkaline hydrogen peroxide delignification of three lignocellulosic biomass under atmospheric pressure [J]. Bioresources, 2023, 19(1): 998−1009.

[21] Haq I U, Saleem A, Chaudhary R, et al. Role of microbial laccases in valorization of lignocellulosic biomass to bioethanol [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2024, 12: 1441075.

[22] Liu Y, Luo G, Ngo H H, et al. Advances in thermostable laccase and its current application in lignin-first biorefinery: a review [J]. Bioresource Technology, 2020, 298: 122511.

[23] Huang W, Jin Y, Guo Y, et al. Fabrication of high-performance densified wood via high-pressure steam treatment and hot-pressing [J]. Polymers, 2024, 16(7): 939.

[24] Ma Q, Hirth K, Agarwal U P, et al. Oxidative delignification: the roles of lignin reactivity and accessibility [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132351.

[25] Ligero P, de Vega A, Garcia X. Development of combined organosolv-tempo oxidation treatment for obtaining cellulose nanofibers [J]. Cellulose Chemistry and Technology, 2023, 57(1−2): 49−60.

[26] Wu Y, Wu J, Yang F, et al. Effect of $H_2O_2$ bleaching treatment on the properties of finished transparent wood [J]. Polymers, 2019, 11(5): 776.

[27] Wu T, Lu Y, Tao X, et al. Superelastic wood-based nanogenerators magnifying the piezoelectric effect for sustainable energy conversion [J]. Carbon Energy, 2024, 6(11): e561.

[28] Singh R, Hu J, Regner M R, et al. Enhanced delignification of steam-pretreated poplar by a bacterial laccase [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 42121.

[29] 彭晓瑞, 张占宽. 塑膜增强柔性装饰薄木制备与饰面应用进展 [J]. 木材科学与技术, 2022, 36(4): 1−5.

Peng X R, Zhang Z K. Preparation and application of plastic film reinforced pliable decorative veneer [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(4): 1−5.

[30] 卢泽潭, 魏明, 刘亮先, 等. 浸渍胶膜纸覆贴超薄纤维板工艺对其表面胶合强度的影响 [J]. 木材科学与技术, 2024, 38(6): 15−22.

Lu Z T, Wei M, Liu L X, et al. Effect of pressing process of impregnated paper on surface bonding strength of ultra-thin fiberboard [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2024, 38(6): 15−22.

[31] 张文治. 浅析超薄高密度纤维板连续平压生产线关键技术和设备 [J]. 中国人造板, 2022, 29(2): 8−13.

Zhang W Z. Technology and equipment for continuous press of ultra-thin high density fiberboard [J]. China Wood-based Panels, 2022, 29(2): 8−13.

[32] 周李俊, 游国德, 李强, 等. 超薄高密度纤维板生产工艺及常见质量与设备问题解决方法探究 [J]. 中国人造板, 2025, 32(3): 7−11.

Zhou L J, You G D, Li Q, et al. Production technology and solution to common problems of ultra-thin high density fiberboard [J]. China Wood-based Panels, 2025, 32(3): 7−11.

[33] Guan H, Meng J, Cheng Z, et al. Processing natural wood into a

high-performance flexible pressure sensor [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(41): 46357−46365.

[34] Tang Q H, Zou M, Chang L, et al. A super-flexible and transparent wood film/silver nanowire electrode for optical and capacitive dual-mode sensing wood-based electronic skin [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132152.

[35] Fu Q, Chen Y, Sorieul M. Wood-based flexible electronics [J]. ACS Nano, 2020, 14(3): 3528−3538.

[36] Zhang W, Wang B, Dong H, et al. A strong, biodegradable, brush written all-wood-based flexible electronic device [J]. Cellulose, 2024, 31(4): 2571−2581.

[37] Shi X, Luo J, Luo J, et al. Flexible wood-based triboelectric self-powered smart home system [J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 3341−3350.

[38] 陈柏文, 黄继伟, 凌新龙. 智能可穿戴产品用柔性传感器的研究进展 [J]. 纺织科学与工程学报, 2025, 42(2): 63−76.
Chen B W, Huang J W, Ling X L. Advances in flexible sensors for smart wearable electronics [J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2025, 42(2): 63−76.

[39] 王石, 陈昱恺, 周新甲, 等. 导电高分子水凝胶及其应变传感性能研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(11): 247−257.
Wang S, Chen Y K, Zhou X J, et al. Research progress in conducting polymer hydrogels and their strain sensing properties [J]. Materials Reports, 2024, 38(11): 247−257.

[40] 陈佳星, 付宗营, 张永跃, 等. 基于木材与水分相互作用的木基水凝胶研究进展 [J]. 林业科学, 2025, 61(5): 1−11.
Chen J X, Fu Z Y, Zhang Y Y, et al. Progress in the research of wood-based hydrogels based on the interaction between wood and water [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(5): 1−11.

[41] He Y, Xiong J, Hu Y, et al. AM/AMPS delignified wood-based hydrogel with enhanced mechanical strength and fatigue resistance for wearable strain sensing and energy harvesting [J]. Polymer, 2025, 320: 128075.

[42] Chen C, Wang Y, Wu Q, et al. Highly strong and flexible composite hydrogel reinforced by aligned wood cellulose skeleton via alkali treatment for muscle-like sensors [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 400: 125876.

[43] Shi Y, Wu M, Ge S, et al. Advanced functional electromagnetic shielding materials: a review based on micro-nano structure interface control of biomass cell walls [J]. Nano-Micro Letters, 2025, 17(1): 106−142.

[44] Jiang Y, Ru X, Che W, et al. Flexible, mechanically robust and self-extinguishing MXene/wood composite for efficient electromagnetic interference shielding [J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 229: 109460.

[45] MuhammadD N A, Armynah B, Tahir D. High transparent wood composite for effective X-ray shielding applications [J]. Materials Research Bulletin, 2022, 154: 111930.

[46] 王彩霞, 程辉, 曾艳飞, 等. 生物质柔性超级电容器的研究进展 [J]. 化工技术与开发, 2024, 53(4): 41−45.
Wang C X, Cheng H, Zeng Y F, et al. Research progress in biomass-based flexible supercapacitors [J]. Chemical Technology and Development, 2024, 53(4): 41−45.

[47] Wang Y, Wu X, Han Y, et al. Flexible supercapacitor: overview and outlooks [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103053.

[48] Xiong C, Li M, Nie S, et al. Non-carbonized porous lignin-free wood as an effective scaffold to fabricate lignin-free wood@polyaniline supercapacitor material for renewable energy storage application [J]. Journal of Power Sources, 2020, 471: 228448.

[49] 张萱, 林琳, 张健, 等. 生物质基柔性超级电容器研究进展 [J]. 精细化工, 2024, 41(4): 719−729.
Zhang X, Lin L, Zhang J, et al. Research progress of biomass-based flexible supercapacitors [J]. Fine Chemicals, 2024, 41(4): 719−729.

[50] Chen W J, Yu S J, Sun Q, et al. Natural wood as a lithium metal host [J]. Green Chemistry, 2025, 27(6): 1696−1702.

[51] Zhang G X, Chen Y M, Chen Y J, et al. Activated biomass carbon made from bamboo as electrode material for supercapacitors [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 102: 391−398.

[52] Zhang Q, Li L, Jiang B, et al. Flexible and mildew-resistant wood-derived aerogel for stable and efficient solar desalination [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(25): 28179−28187.

[53] Chao W, Sun X, Li Y, et al. Enhanced directional seawater desalination using a structure-guided wood aerogel [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(19): 22387−22397.

[54] Kong W Q, Wang C W, Jia C, et al. Muscle-inspired highly anisotropic, strong, ion-conductive hydrogels. [J]. Advanced Materials, 2018, 30(39): 1801934.

[55] Huang S, Wang Z, Wu Q, et al. Top-down assembly of photosensitizable flexible wood dressing with synergistic effect of anti-infection and moisture management [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(26): 2423123.

[56] Zhang W, Zhai W, Xu M, et al. Constructing reinforced flexible wood-based hydrogels leveraging the ordered structure of wood for potential wound treatment [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, 13(15): 5689−5702.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 于志明）