

木基功能复合材料的研究进展及其在包装领域的应用

姚令华^{1,2}, 孙德林², 王张恒^{2*}, 姜夏旺³

(1.信阳农林学院, 河南 信阳 464000; 2.中南林业科技大学, 长沙 410004;

3.湖南工业大学, 湖南 株洲 412007)

摘要: **目的** 旨在综述木基功能复合材料的研究进展, 主要包括超疏木材、透明木材、超级木材及金属化木材等功能木材的制备方法与特性, 为新型包装材料的创新设计提供借鉴。**方法** 通过文献研究, 系统梳理木基功能复合材料的主要类型, 详细阐述各类功能木材的制备工艺和独特优势, 并探讨其在包装领域的潜在应用价值, 进而指出木基功能复合材料研究中存在的问题和未来研究的主要方向。**结果** 木基功能复合材料在力学、防护、尺寸稳定、导电、导热、阻燃、电磁屏蔽等性能方面表现优异, 且能满足包装材料对强度、耐久性、环保性等方面的要求。**结论** 得益于其独特的性能优势和广泛的应用前景, 木基功能复合材料在包装领域展现出巨大的发展潜力。

关键词: 木材; 功能复合材料; 包装领域; 应用

中图分类号: TB48

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)23-0029-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.004

Research Progress of Wood-based Functional Composites and Their Application in Packaging

YAO Linghua^{1,2}, SUN Delin², WANG Zhangheng^{2*}, JIANG Xiawang³

(1. Xinyang Agriculture and Forestry University, Henan Xinyang 464000, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. Hunan University of Technology, Hunan Zhuzhou 412007, China)

ABSTRACT: The work aims to review the latest research progress of wood-based functional composite materials, focusing on the preparation technology and characteristics of functional wood such as superphobic wood, transparent wood, super wood and metallized wood. Through deep literature research, the main categories of wood-based functional composites were systematically sorted out, and the preparation process and unique performance advantages of each functional wood were described in detail. On this basis, the potential application value of these functional woods in the field of packaging was further discussed, aiming at providing a useful reference for the innovative design of new packaging materials. The wood-based functional composite materials had excellent performance in mechanical strength, protective properties, dimensional stability, electrical conductivity, thermal conductivity, flame resistance and electromagnetic shielding, and they could meet the requirements of modern packaging materials on strength, durability and environmental protection. Therefore, wood-based functional composite materials, with their unique performance advantages, have shown great development potential and market space in the field of packaging.

KEY WORDS: wood; functional composite materials; packaging; application

收稿日期: 2024-10-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0601104); 河南省教育厅教育教学改革研究与实践项目 (2024CYS037)

*通信作者

木基功能复合材料是一种以天然木材为基材,通过特定的物理或化学方法,将功能改性物质直接或通过介质引入到木材表面和内部,从而赋予木材新功能的复合材料,近年来在材料科学领域备受关注^[1-2]。木材虽然拥有天然材料优势,但其固有的缺陷,如易吸水、易发霉、易腐朽及易变色等,严重制约了其使用性能和应用范围。因此,通过改变木材的物理、化学性质及结构特征,实现其功能化改性,已成为木材科学的重要研究方向^[3]。为了解决这些难题,研究人员不断探索木材功能改性的新工艺、新方法和新技术,如热处理^[4]、表面覆膜^[5]、浸渍处理^[6]等,以改善木材的物理力学性能,且具有防腐、耐磨、阻燃等特性,从而提升了木材的附加值,扩大了其应用范围。

随着对木材性能要求的日益提高,材料的功能化已成为拓宽其适用范围、提高产品附加值的关键途径。木材受天然定向微纤丝和管胞结构的影响,具有多尺度、各向异性取向的复杂孔道结构^[7-8];同时,木质素、半纤维素和纤维素等主要化学成分,使木材表面富含丰富的活性官能团^[3,9]。基于此,木材的多孔结构和反应活性为制备功能复合材料提供了前提条件。近年来,通过现代前沿改性技术,木材的功能化改性取得了许多新进展和显著成果,如超级木材、超疏水木材等新型功能木材的涌现,充分显示出木材在功能化改性方面的内在潜力。

鉴于功能化木材在力学性能、表面防护、尺寸稳定性、弹性、装饰性等方面的独特优势,其在包装领域展现出广阔的应用前景。这些新型功能化木材不仅能满足包装材料对强度、耐久性、环保性等方面的要求,还能提供独特的视觉艺术效果与用户体验。对此,本文综述了近年来以木材为基础的功能复合材料的研究进展,阐述了超疏木材、超强木材、超柔木材、透明木材、金属木材等新型功能木材的制备方法、性能特点及其在包装领域的潜在应用。

1 超疏木材

1.1 超疏木材的制备方法

通过木材超疏改性技术,可降低木材表面的湿润

性和吸湿性,进而提高其尺寸稳定性及防腐防腐能力,同时赋予木材自清洁、耐老化等附加性能。木材能够实现超疏特性,主要归因于2个方面:一是低表面能物质使液滴在木材表面难以铺开;二是微-纳多级粗糙结构可以在木材表面形成“气垫效应”,有效减少固-液两相的接触面积^[10]。表面能和粗糙度是决定木材超疏性的主要因素。据此,制备木材超疏结构的路径可归纳为2类,一类是利用低表面能物质构建粗糙结构;另一类是利用低表面能物质修饰粗糙结构^[11]。目前,溶胶-凝胶法^[12]、层层自组合法^[13]以及喷涂法^[14]等是制备超疏木材的主要方法。基于这些方法,国内外学者成功研发了超疏水木材、超疏水自修复木材以及超双疏木材等多种功能化产品。

1.2 超疏水木材及应用

基于超疏水木材的自洁、防腐、抗菌和防潮特性,它在食品包装等行业展现出较为广阔的应用前景。它通过有效降低食品的氧气和湿气透过率,保持食品的原有口感与风味,为食品保鲜包装领域提供创新性的解决方案。Tang 等^[15]采用溶胶-凝胶一步法,在木材表面生成了低表面能的微/纳米级结构,改性后的木材在低氟浓度条件下表现出优异的超疏水性。这些特性能够有效阻止空气中的水分在包装材料表面的渗透和附着,保护产品免受水分侵蚀。Zhao 等^[16-18]则通过水热法、真空浸渍法等技术制备了整体/深度超疏水木材,不仅使木材整个结构具有超疏水性,还表现出良好的耐磨性,其制备工艺流程如图1所示。这类超疏水木材可有效提升木质包装材料的耐久性和物理力学性能。另外,超疏水木材的制备技术趋于成熟,可使用不同的木基制备出性能优异的超疏水木材,并通过对超疏水性能的进一步拓展,赋予其电磁屏蔽、温感变色等多元化功能。这些技术的融合应用,为超疏水木材在智能化包装领域的应用提供了新机遇。如 Hao 等^[19]通过脱木质素、浸渍、热压和表面涂层等工艺流程,成功制备了一种超疏水、力学性能优异且能有效屏蔽电磁干扰的木基复合材料,其水接触角达到 155.1° ,

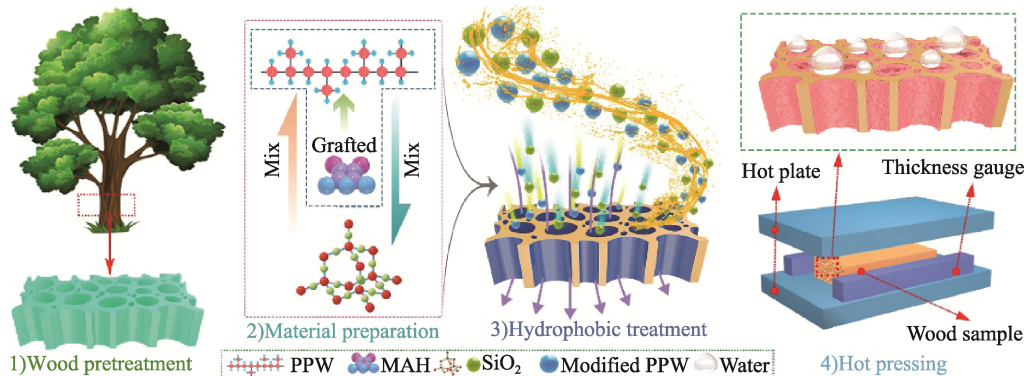


图1 超疏水木材的制备工艺流程示意图^[18]

Fig.1 Schematic diagram of the preparation process of superhydrophobic wood^[18]

改善了木材在高湿环境中的耐久性。Yang 等^[20]以脱木素木材为基材, 在木材表面喷涂超疏水涂层, 制备出了形态稳定的超疏水复合相变材料, 其水接触角达到 155°。这种超疏水木材不仅具备良好的热可靠性和稳定性, 还兼具高效的光热转换和自清洁性能, 为其在多元化场景中的应用提供了技术支撑。

1.3 超疏水自修复木材及应用

包装材料在使用过程中, 往往会受到各种冲击和碰撞, 限制了其持续保护能力。超疏水木材所具有的自修复特性, 能赋予包装材料在受损后的自动恢复功能, 降低因包装损坏增加的更换频率, 为被包装产品提供持久有效的防护。因此, 研发具有自修复功能的涂层, 成为超疏水涂层损坏后功能修复的关键。Tu 等^[21]通过在木材表面预先涂布聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 再喷洒水性全氟烷基甲基丙烯酸共聚物 (PMC) 与 TiO_2 的混合处理液, 成功在木材表面构建了自修复超疏水涂层。这种木材在紫外线下发生破坏时, PDMS 可迁移到木材表面恢复木材的超疏水性, 确保了超疏水木材的自修复能力。Wang 等^[22]则利用木材的粗糙微观结构, 以 PDMS 为低表面能助剂构建超疏水木材, 并通过表面碳化处理, 赋予木材自修复、自清洁及光催化等多重性能, 拓展了超疏水木材的功能性。Wang 等^[23]通过在木材表面涂饰氟烷基硅烷/二氧化硅复合悬浮液的方法, 对木材进行超疏水处理, 结果表明, 损伤后的超疏水表面可在室温下通过自愈机制恢复其超疏水性。这一研究成果与自然界中超疏水植物叶片在受到损伤后再生超疏水外表皮蜡层的现象相符, 为超疏水自修复木材在包装领域的应用提供了新的灵感。

1.4 超双疏木材及应用

木材表面超疏水涂层受表面张力的影响, 在面对极性较强的液体时疏水性较差, 极易导致超疏水表面的有机污染和疏水功能的丧失。因此, 开发既持久又具备超疏水、超疏油特性的超双疏木材, 对提高包装材料的综合性能具有重要的前瞻意义。超双疏材料是一种兼具疏水和疏油性能的功能材料, 其表面对水与油均具有特殊的排斥性, 赋予材料表面自清洁、抗污染和超级防护等功能。Yao 等^[24]通过一步溶热法在木基材料上制备了具有大规模纤锌矿型结构的氧化锌纳米棒阵列 (ZnAs)。经过处理的木材表现出良好的疏水、疏油性能, 并在外力冲击、液体腐蚀、水喷雾等恶劣条件下, 均能保持较为稳定的超双疏性能。Jian 等^[25]采用化学气相沉积法, 在木材表面涂覆甲基三氯硅烷 (MTCS) 和 1H,1H,2H,2H-全氟癸基三甲氧基硅烷 (PFDMs) 制备了超双疏木材, 其表面具有良好的超疏水性和疏油性。经过测试, 其水接触角为 157.7°, 油接触角为 141.30°, 涂层对液态水、油甚至气态水具有极强排斥性。此外, 这种超疏水涂层还具有较高

的化学稳定性和力学强度, 能在极端环境中长期使用。值得一提的是, 高丽坤等^[26]采用两步水热合成法将含有 Cu_2O 粒子的锐钛矿 TiO_2 粒子掺杂在木质基底上, 并对其进行修饰处理, 使木材具有超双疏水性。这种木材不仅能有效抵抗大肠杆菌的滋生与繁殖, 还能在紫外光照射作用下产生负氧离子, 达到“净化空气”的效果。这些研究成果为超双疏木材在食品、化妆品、医疗器械等包装领域的应用提供了广阔空间。

未来, 超疏木材的研究应致力于探索其微纳结构与疏水性能之间的基础理论, 优化绿色高效的木材改性技术, 以提高其疏水性能的稳定性。在此基础上, 应注重拓展超疏木材的多功能化集成创新, 如融合抗菌特性、温感变色效应、电磁屏蔽等新型功能, 拓宽其在包装领域的应用范围, 使之成为传统包装材料的绿色替代品, 满足市场对于高性能且环境友好的包装材料的需求。

2 超强木材

2.1 超强木材的制备方法

超强材料因具有高强度和耐久性, 可满足建筑行业中的重型包装需求, 其在运输中作为保护性包装材料时, 表现出一定的市场应用潜力和价值。木材作为一种天然高分子生物聚合材料, 具有不同尺度孔隙结构和湿热响应下的弹塑特性, 这为其在湿热条件下实现低密度向密实化状态的转变提供了基础^[27]。此转变不仅提升了木材的强度、韧性、尺寸稳定性及表面加工性能, 还拓宽了其应用场景。传统工艺下, 木材的密实化主要通过直接压缩成型实现, 而目前则是通过部分脱木质素处理, 使木材中的纤维素纳米纤维有序排列, 紧密度显著增强, 从而实现完全致密化^[28]。通过此技术制备而成的超强包装材料, 能有效抵御产品在运输过程中因碰撞、挤压和摔落等造成的损坏, 为特定包装领域的产品提供可靠的防护屏障。

密实化超强木材的制备主要包括 2 个步骤: 首先对木材进行脱木质素处理, 然后对木材进行热压或填充树脂后热压。Huang 等^[29]采用 NaOH 和 Na_2SO_3 处理木材, 去除天然木材中的部分半纤维素和木质素; 然后进行高压蒸汽与热压处理, 促使纤维素纳米纤维致密化; 进而成功将天然木材制备成高强度材料。与天然木材相比, 该木材的抗拉强度提升至 420 MPa, 是天然木材的 6.5 倍, 具备在包装等领域替代金属或聚合物的潜力。Gondaliya 等^[30]则采用深度共晶溶剂 (DES) 对木质素进行溶解处理, 通过原位再生法和热处理技术制备致密超强木材, 其抗压强度和硬度分别提升了 50% 和 100%, 且回弹率低。此外, Frey 等^[31]通过脱木质素处理, 采用环氧树脂作为连接基体填充去纤维骨架, 再经过压缩致密化处理, 制备出高纤维

体积含量的增强复合材料,其制备工艺流程如图2所示。这种新型材料通过细胞之间的机械互锁、基质增强和高纤维体积分数的综合作用,使拉伸刚度和强度分别提升到 70 GPa 和 600 MPa。

2.2 超强木材的功能化及应用

超强木材的出现,有效弥补了木材在力学强度上的不足,为其在包装领域的广泛应用奠定了坚实基础。为进一步促进超级木材的应用,Gan 等^[32]通过脱木质素与增密等技术,制备出超高密度木材,并发现在增密的同时显著提高了木材的阻燃性能。这一特性使得致密化超强木材在包装领域展现出巨大的应用潜力,能有效提高包装材料的阻燃性能和稳定性,防止产品在搬运和运输过程中发生损坏。Li 等^[33]则通过对木材进行完全脱木质素与致密化处理,开发出一种强度为天然木材 8 倍的工程致密化“冷却木材”。该超强木材的纤维素能有效反射可见光,具有较好的“辐射制冷”效应,用作生鲜产品的包装材料可吸收产品运输过程中产生的热量,减少损耗,确保产品的新鲜度。

超强材料凭借其高强度、高密度及优异的耐久性等特性,在替代传统材料方面展现出发展潜力。未来科学研究应进一步优化其制备工艺,提升材料在硬度、阻燃等方

面的性能优势,并积极探索其在包装领域的创新应用,开发出既具有高性能又可生物降解的绿色环保材料。

3 超柔木材

3.1 超柔木材的制备方法

玻璃制品、陶瓷器皿及精密设备的包装行业,对包装材料的缓冲性能提出了更为严格的要求。基于木材的自然属性,其在常规条件下难以进行弯曲和折叠,然而作为多孔性材料的代表,木材内部存在压缩和弯曲的空间,且木质素的存在赋予了其优异的生物降解性和生物相容性。通过调控分子之间氢键及纤维素晶体结构,在一定的湿热条件下,木质素可以软化,这为超柔木材的制备提供了研究基础^[27,34]。超柔木材可进一步加工成缓冲垫片、缓冲条等形式,有效吸收并分散运输过程中的冲击力和振动作用。

制备超柔木材的关键在于对木材实施选择性的脱木质素处理。Song 等^[35]通过去除天然木材中的部分半纤维素和木质素,使用去离子水将其洗涤干净并干燥,成功制备出具有 3D 多孔结构的超柔木材(图3),并从化学结构变化、微观形貌等方面揭示了其柔

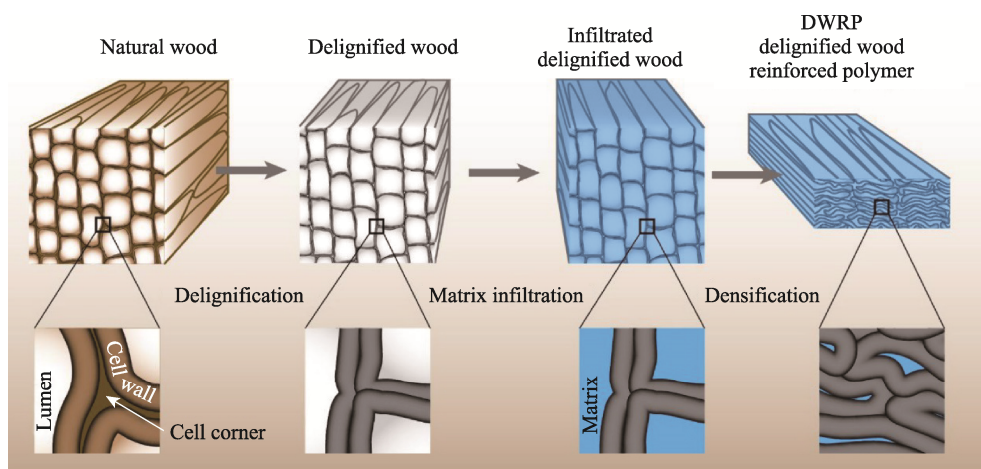


图2 脱木质素木材增强聚合物复合材料的制备流程图^[31]
Fig.2 Schematic diagram of the preparation process of delignified wood reinforced polymer (DWRP) composites^[31]

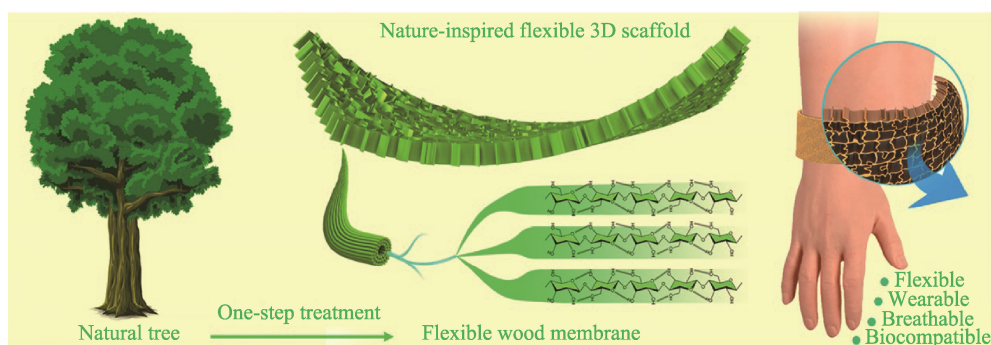


图3 3D 超柔木材的制备及应用^[35]
Fig.3 Preparation and application of 3D super-flexible wood^[35]

性机理。相较于天然木材, 这种超柔木材的拉伸强度和韧性得到了极大程度的提高。Rao 等^[36]则在脱木质素处理的基础上, 引入生物可降解聚合物聚乙烯 (PVA) 进行浸渍处理, 所制备的柔性木材不仅具有高达 80% 的透光率和 90% 的雾度, 还兼具优异的柔韧性、光学和力学性能。Chen 等^[37]受螺旋弹簧的启发, 将经过脱木质素处理的木材进行冷冻干燥并碳化处理, 研发出具有独特层状结构的木材海绵, 该材料具有较好的柔韧性、抗疲劳性以及压敏响应特性。

3.2 超柔木材的功能化及应用

超柔木材凭借优良的柔韧性与弹性, 能为产品提供全方位的缓冲保护, 降低运输与搬运过程中的潜在风险。例如, Guan 等^[38]通过化学处理技术剥离木材中的木质素和半纤维素, 保留纤维素骨架, 制备出木材海绵, 并采用气相沉积法在纤维素骨架表面沉积聚硅氧烷涂层, 从而赋予材料良好的疏水性能, 既能为产品包装运输提供良好的缓冲性能, 又可有效防止水分对产品的损害。之后, Guan 等^[39]又以低密度轻木为原料, 在脱除木质素和半纤维素的基础上, 经冷冻干燥制备出具有“波浪形”层状结构的木材海绵, 该材料在垂直于层状骨架方向具有高压压缩弹性, 表现出卓越的压缩及抗疲劳性能。Chen 等^[40]采用水热法去除木材单板中大部分木质素和半纤维素, 随后进行化学镀镍与压制处理, 所制备的镀镍木材单板具有良好的柔性与可弯曲性。Xiao 等^[41]则通过创新的细胞壁褶皱改性技术, 构筑了一种能选择性打开管胞的褶皱细胞壁结构, 这种结构赋予木材优异的可弯曲性及模压成型能力。此类功能化的超柔木材能实现弯曲、折叠、裁剪等加工操作, 可根据产品特性定制包装结构部件, 在提供稳定支撑和保护的同时, 便于包装的组装与拆卸。

在包装设计中, 超柔木材能紧密贴合产品的形态轮廓, 提供安全的缓冲保护机制, 抵御运输过程中的冲击与损害。同时, 超柔木材所展现出的柔软性, 使产品包装设计不仅具有较强的功能性, 还体现出独特的设计美感。随着木材制备工艺和技术的革新, 将进

一步拓展超柔木材的柔韧性、压缩性、光学等性能, 从而为绿色包装材料的创新发展提供技术支撑。

4 透明木材

4.1 透明木材的制备方法

木材固有的天然组分和多孔结构特性, 使光线在穿越其表面时易发生散射现象, 从而使木材呈现出不透明的状态, 该特性限制了其在特定领域的应用^[42-43]。研究揭示, 通过去除木材中的木质素, 以折射率相匹配的树脂进行孔隙填充, 可制备出兼具光学与力学性能的透明木材, 并将成为玻璃、塑料等传统包装材料的绿色替代品, 适用于对透明度有一定要求的包装场景。

透明木材的制备流程主要分为 2 个关键步骤。第 1 步为脱色处理, 主要目的是去除木材中的木质素等吸光物质, 并适度增大其孔隙率^[44]。在此过程中, 次氯酸盐法、亚硫酸盐法和碱性亚硫酸法等是常用的脱木质素方法^[45]。第 2 步是填充折射率相匹配的树脂, 主要包括环氧树脂、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚氨酯 (PU) 等^[46-47]。Zhu 等^[48]采用亚氯酸钠 (NaClO_2) 进行脱木质素处理, 并利用环氧树脂对木材进行填充, 制备的透明木材透光率和雾度分别达到 80% 和 93%, 且具备良好的紫外线防护性能和力学性能; Zou 等^[49]采用氢氧化钾与去离子水处理杨木, 脱木质素后填充聚氨酯并固化, 所制备的木材透光率和雾度分别达到 85% 和 83%, 并具有各向异性的光衍射效果。Yang 等^[50]利用 NaClO_2 脱木质素法去除天然木材中的吸光发色团, 然后采用可聚合的深共晶溶剂渗透至木材中, 并通过光引发聚合作用制备成透明木材, 其制备流程如图 4 所示。这种材料不仅达到 72% 的透光率, 而且具有较强的柔韧性和拉伸回弹性。

4.2 透明木材的功能化及应用

透明木材作为一种新兴的功能性材料, 突破了传统木材在透明度方面的局限, 为包装材料的革新应用提供了新思路。研究表明, 透明木材不仅具备出色的

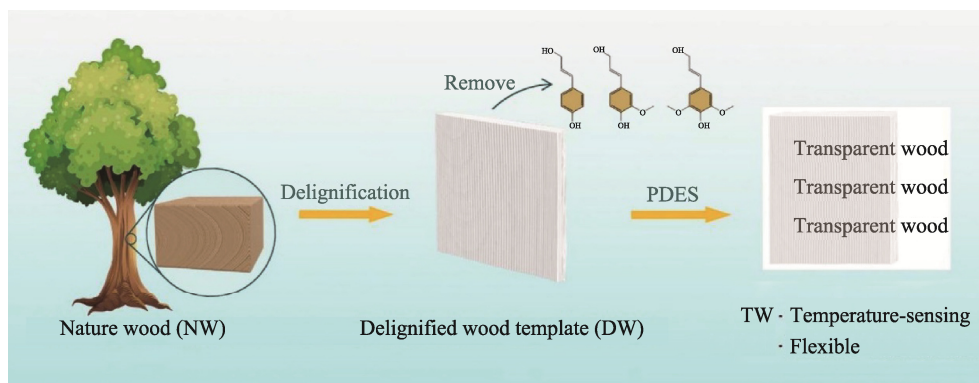


图 4 透明木材的制备流程示意图^[50]

Fig.4 Schematic diagram of the preparation process of transparent wood^[50]

光学透明性,还具有独特的热学和磁性调控功能^[51]。这些功能赋予透明木材在包装领域更大的应用潜力,例如,光学透明性可优化包装材料的透光率和折射性能,热学特性有助于提升包装材料的保温效能,磁性性能可实现包装材料的智能化设计。Montanari等^[52]在热能存储领域进行了研究,将基于聚乙二醇的形状稳定的相变材料封装在脱木质素木材中,开发出木基热能存储系统(TW-TES),所制备的木基复合材料表现出良好的储热和隔热性能,体现了透明木材在热能管理方面的优势。Zou等^[53]聚焦于太阳能光的采集,通过对旋切的杨木板进行脱木质素处理,并填充环氧树脂(ER),制备出折射率均匀分布的透明木材,用于太阳能电池的光采集,显著提高了太阳能的转换效率。Yu等^[54]通过将铯钨青铜(CsxWO_3)纳米粒子分散于预聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中,并填充于纳米孔隙中,所制备的木基透明复合材料不仅具备优异的近红外屏蔽能力与高可见光透明度,还具有良好的力学性能。

综上所述,透明木材不仅保持了传统木材的环保属性和力学性能,更因其透明度的特性赋予了包装材料较强的视觉表现力与审美价值。在研究中,通过调控木材的化学组分与微观结构形态,可制备出既具有一定透明度,又兼具阻隔性能、热学特性乃至磁性等多功能性能的木基复合材料,这为电子、食品等产品包装提供了个性化的解决方案。

5 金属化木材

5.1 金属化木材的制备方法

金属化木材是以木材为基质,利用其多孔结构作为载体,通过一定的工艺技术手段,将一种或多种低熔点合金在熔融状态渗透至木材细胞内部,并经冷却固化形成的复合材料^[55]。这种新型木基复合材料不仅保留了木材原有的可再生性、生物相容性和环境友好性,还具备导电性、导热性、电磁屏蔽等性能,为金属化木材在电磁防护、热管理、能量转换等方面提供了发展空间。

目前,在金属化木材的制备工艺中,根据功能复合形式的不同,主要包括电磁屏蔽木材、金属化木材和磁性木材^[56]。郭文义等^[57]以杨木旋切单板为基材,利用化学镀技术,在经过预处理的木材表面成功沉积金属铜单质,通过工艺优化制备的镀铜杨木具有优异的电磁屏蔽性能。Pan等^[58]也以杨木为基材,采用化学镀镍的方法,深入研究了木材表面镍的沉积量、热处理温度等工艺条件对金属化木材电磁屏蔽性能的影响,揭示了制备工艺参数与材料性能之间的内在关系。Wan等^[59]采用熔融浸渍法,选择Sn/Bi合金作为填充材料浸渍到木材细胞壁中,固化后可以使木材形成连续的导电/导热通道,制备出的金属化木材具有

各向异性的电热性能。Li等^[60]为了提高木材表面的力学性能,探索木材单板表面金属化处理的力学效应,在实验中以樟子松为研究对象,采用磁控溅射法在木材表面沉积铜层,实现木材金属化,结果表明木材的硬度和弹性模量得到明显提升。

5.2 金属化木材的功能化及应用

金属化木材巧妙地融合了木材的自然属性与金属的优异特性,显著拓展了其性能边界及应用范围。此创新融合效果得益于前沿的功能化改性技术,通过调控木材的微观结构,实现了材料的结构优化,提升了力学性能,还赋予了木材前所未有的导热性、导电性、阻燃性等。同时,金属化木材表面还具有一定的金属光泽,可为包装设计带来新的灵感和创意来源。王汉伟等^[61]利用生物分子诱导剂天冬氨酸,通过低温溶剂热法将 MnFe_2O_4 晶体沉积在木材表面,制备出超磁性的金属化木材。实验结果表明,超磁性的金属化木材具有较强的微波吸收能力,在微波防护包装、电磁兼容包装等场景中具有一定的应用价值。Zhao等^[62]提出了一种基于高低温交替循环处理和木材含水率控制的自驱动渗入方法,成功制备了金属化木材。此种金属化木材的密度与抗压强度分别提升至木材的5.85倍和3倍,热导率高达10倍,充分体现了改性后的金属化木材在力学与热学性能上的独特优势。该研究成果,可在需要高强度、高热导率及特殊电磁性能的包装解决方案中发挥潜能。Wang等^[63]通过低熔点Sn-Bi合金与木材进行复合,制备了具有复合功能的金属化木材。首先利用氨水对木材进行处理,以有效去除木质素,并进行干燥处理;随后将预处理木材浸渍到熔融的Sn-Bi合金液体中;最后通过真空浸渍的方法制备成金属化木材。经改性,该金属化木材的电磁干扰屏蔽效能显著提升,可以达到对屏蔽材料的要求。该特性使其在包装行业,特别是需要高电磁屏蔽效能的电子产品包装、装备包装等特定领域,具有较大的应用潜力。

6 结语

木基功能复合材料利用木材固有的自然结构为功能承载基质,实现了材料结构与功能性的深度融合,极大地拓展了木材的应用范围,提高了其使用价值。在后续的研究中,为了更好地挖掘木材的固有优势,开发出具备更高附加值的木基功能复合材料,还需从以下几个方面进行深入研究:

1) 制备工艺的优化与革新。从产业化角度来看,当前木基功能材料的制备工艺较为繁琐,且局限于小型试样的制备,制约了市场的开发与推广。因此,亟须对现有制备工艺进行深度优化,探索一种工艺流程简单,且适用于大尺寸试样的材料制备技术,以实现木基功能复合材料的市场化生产。

2) 材料耐久性能的提升。受制备工艺、使用环境及木材自身结构特性等因素影响, 现有木基功能复合材料的力学稳定性和耐久性仍有待提升。为了延长材料使用寿命, 需通过制备方法和工艺的创新, 如优化界面结合、改善表面处理技术等, 显著提升其力学稳定性和耐久性。

3) 基材选择范围的扩展。目前, 功能复合材料的制备基材多局限于松木、杨木、椴木等种类, 这些木材种类虽然具有一定的加工性和适用性, 但在性能提升方面局限较大。因此, 应积极探索更多种类的基质木材, 评估其适配性和功能化潜力。

参考文献:

- [1] 卢芸, 王凯, 付宗营, 等. 木材孔隙结构的调控与利用研究进展[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(6): 1-11, 60.
LU Y, WANG K, FU Z Y, et al. Research Progress on the Regulation and Utilization of Wood Pore Structure[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(6): 1-11, 60.
- [2] 毕小茜, 张源, 李萍, 等. 杨木浸渍改性及在家具应用中的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(21): 235-245.
BI X (Q /X), ZHANG Y, LI P, et al. Research Progress of Poplar Impregnation Modification and Its Application in Furniture[J]. Materials Reports, 2022, 36(21): 235-245.
- [3] 周静, 王露臻, 徐朝阳, 等. 致密化木材膜的制备及其功能化应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6488-6499.
ZHOU J, WANG L Z, XU C Y, et al. Research Progress on Preparation and Functional Application of Densified Wood Films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6488-6499.
- [4] FU Z Y, ZHOU Y D, GAO X, et al. Changes of Water Related Properties in Radiata Pine Wood Due to Heat Treatment[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116692.
- [5] FANG S Y, HU Y H. Emerging Approaches of Utilizing Trees to Produce Advanced Structural and Functional Materials[J]. Chemical Communications, 2024, 60(60): 7663-7671.
- [6] 李坚, 甘文涛, 王立娟. 木材仿生智能材料研究进展[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(4): 1-14.
LI J, GAN W T, WANG L J. Research Progress on Wood Biomimetic Intelligent Materials[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(4): 1-14.
- [7] CHEN Y P, DANG B K, WANG C, et al. Intelligent Designs from Nature: Biomimetic Applications in Wood Technology[J]. Progress in Materials Science, 2023, 139: 101164.
- [8] WANG Z G, ZHANG X F, KONG X J, et al. Top-down Fabrication of Wood Hydrogels: From Preparation to Application[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 490: 151518.
- [9] BERGLUND L A, BURGERT I. Bioinspired Wood Nanotechnology for Functional Materials[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2018, 30(19): e1704285.
- [10] WANG Z H, JIAN H Y, SUN Z Y, et al. Improvement of Decorative Texture Effects, Thermal Stability, and Mechanical Properties of Pinus Massoniana Using a Combined Dyeing and Superhydrophobic Modification Method[J]. Cellulose, 2023, 30(15): 9861-9875.
- [11] ZHANG C, CAO M, MA H, et al. Morphology-control Strategy of the Superhydrophobic Poly(Methyl Methacrylate) Surface for Efficient Bubble Adhesion and Wastewater Remediation[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(43): 1702020.
- [12] WANG Y, GE-ZHANG S, MU P, et al. Advances in Sol-Gel-Based Superhydrophobic Coatings for Wood: A Review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(11): 9675.
- [13] SUN W L, LI J, QIU J, et al. Biomimetic Nano/Microfabrication Techniques in Multi-Bioinspired Superhydrophobic Wood: New Insight on Theory, Design and Applications[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 48: 104217.
- [14] JIAN Y L, HUANG M K, XU T L, et al. Preparation of Superhydrophobic/Oleophobic Wood Coating with Fluorinated Silica Sol by a Simple Spraying Method[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 703: 135379.
- [15] TANG W, ZHANG H Y, HESS D W, et al. Endowing Three-Dimensional Porous Wood with Hydrophobicity/Superhydrophobicity Based on Binary Silanization[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(33): 44077-44093.
- [16] ZHAO Y P, QU D M, YU T, et al. Frost-Resistant High-Performance Wood via Synergetic Building of Omni-Surface Hydrophobicity[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123860.
- [17] TAN Y, WANG K L, DONG Y M, et al. Bulk Superhydrophobicity of Wood via In-Situ Deposition of ZnO Rods in Wood Structure[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 383: 125240.
- [18] WANG Z H, ZOU W H, SUN D L, et al. Fabrication and Performance of In-Depth Hydrophobic Wood Modified by a Silica/Wax Complex Emulsion Combined with Thermal Treatment[J]. Wood Science and Technology, 2020, 54(5): 1223-1239.
- [19] HAO X X, XING L D, LI D, et al. Superhydrophobic, Mechanically Robust and Self-Cleaning MXene/Wood

- Composite for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 199: 116744.
- [20] YANG H Y, WANG S Y, WANG X, et al. Wood-Based Composite Phase Change Materials with Self-Cleaning Superhydrophobic Surface for Thermal Energy Storage[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114481.
- [21] TU K K, WANG X Q, KONG L Z, et al. Facile Preparation of Mechanically Durable, Self-Healing and Multifunctional Superhydrophobic Surfaces on Solid Wood[J]. *Materials & Design*, 2018, 140: 30-36.
- [22] WANG Z H, SUN Z Y, SUN D L, et al. Thermally Induced Response Self-Healing Superhydrophobic Wood with Self-Cleaning and Photocatalytic Performance[J]. *Cellulose*, 2022, 29(17): 9407-9420.
- [23] WANG J, LU Y, CHU Q, et al. Facile Construction of Superhydrophobic Surfaces by Coating Fluoroalkylsilane/Silica Composite on a Modified Hierarchical Structure of Wood[J]. *Polymers (Basel)*, 2020, 12(4): E813.
- [24] YAO Q F, WANG C, FAN B T, et al. One-Step Solvothermal Deposition of ZnO Nanorod Arrays on a Wood Surface for Robust Superamphiphobic Performance and Superior Ultraviolet Resistance[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35505.
- [25] JIAN Y L, TANG W, XU T L, et al. Imparting Durable Superhydrophobic/Oleophobic Properties to Wood Surfaces by Means of PFDMS@MTCS Vapor Deposition[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 185: 107926.
- [26] 高丽坤. 生物质基多元复合半导体材料的制备及其多功能特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020: 96-98.
- GAO L K. Study on Preparation and Multifunctional Characteristics of Biomass-based Multielement Composite Semiconductor Materials[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020: 96-98.
- [27] 黄荣凤. 实木层状压缩技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 1-10.
- HUANG R F. Study on Laminated Compression Technology of Solid Wood[M]. Beijing: Science Press, 2023: 1-10.
- [28] MANIA P, KUPFERNAGEL C, CURLING S. Densification of Delignified Wood: Influence of Chemical Composition on Wood Density, Compressive Strength, and Hardness of Eurasian Aspen and Scots Pine[J]. *Forests*, 2024, 15: 892.
- [29] HUANG W, JIN Y, GUO Y, et al. Fabrication of High-Performance Densified Wood via High-Pressure Steam Treatment and Hot-Pressing[J]. *Polymers (Basel)*, 2024, 16(7): 939.
- [30] GONDALIYA A M, HOQUE M, RAGHUNATH S, et al. Green and Sustainable Fabrication of DES-Pretreated High-Strength Densified Wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2024, 58(5): 1901-1923.
- [31] FREY M, SCHNEIDER L, MASANIA K, et al. Delignified Wood-Polymer Interpenetrating Composites Exceeding the Rule of Mixtures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(38): 35305-35311.
- [32] GAN W, CHEN C, WANG Z, et al. Dense, Self-formed Char Layer Enables a Fire-retardant Wood Structural Material[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(14): 1807444.
- [33] LI T, ZHAI Y, HE S, et al. A Radiative Cooling Structural Material[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 760-763.
- [34] TAN Y, WANG K, GONG S, et al. Flexible, Shape-Editable Wood-Based Functional Materials with Acetal Linkages[J]. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2024, 60(87): 12702-12705.
- [35] SONG J, CHEN C, WANG C, et al. Superflexible Wood[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 9(28): 23520-23527.
- [36] SUBBA RAO A N, NAGARAJAPPA G B, NAIR S, et al. Flexible Transparent Wood Prepared from Poplar Veneer and Polyvinyl Alcohol[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 182: 107719.
- [37] CHEN C J, SONG J W, ZHU S Z, et al. Scalable and Sustainable Approach Toward Highly Compressible, Anisotropic, Lamellar Carbon Sponge[J]. *Chem*, 2018, 4(3): 544-554.
- [38] GUAN H, CHENG Z Y, WANG X Q. Highly Compressible Wood Sponges with a Spring-Like Lamellar Structure as Effective and Reusable Oil Absorbents[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(10): 10365-10373.
- [39] GUAN H, ZHANG C, TU K K, et al. Wet-Stable Lamellar Wood Sponge with High Elasticity and Fatigue Resistance Enabled by Chemical Cross-Linking[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(14): 18173-18183.
- [40] CHEN M, ZHOU W, CHEN J, et al. Rendering Wood Veneers Flexible and Electrically Conductive through Delignification and Electroless Ni Plating[J]. *Materials (Basel)*, 2019, 12(19): E3198.
- [41] XIAO S, CHEN C, XIA Q, et al. Lightweight, Strong, Moldable Wood via Cell Wall Engineering as a Sustainable Structural Material[J]. *Science*, 2021, 374(6566): 465-471.
- [42] 赵宇飞, 王喜明. 透明木材合成机理及其应用研究进展[J]. *林产工业*, 2023, 60(4): 57-62.
- ZHAO Y F, WANG X M. Research Progress on Synthesis Mechanism and Application of Transparent Wood[J]. *China Forest Products Industry*, 2023, 60(4): 57-62.
- [43] 贾里童, 郭明辉, 杜文鑫, 等. 光响应型发光透明木材研究进展[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(3): 51-57.
- JIA L T, GUO M H, DU W X, et al. Research Progress in Photo-Responsive Luminescent Transparent Wood[J].

- World Forestry Research, 2023, 36(3): 51-57.
- [44] 唐启恒, 邹森, 张镭, 等. 米级透明木单板的制备及性能[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(5): 47-52.
- TANG Q H, ZOU M, ZHANG L, et al. Preparation and Performance of Meter-Scale Transparent Wood Veneer[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(5): 47-52.
- [45] 唐启恒, 张镭, 邹森, 等. 透明木、竹材的研究进展及产业化应用面临的难题[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(6): 1-12.
- TANG Q H, ZHANG L, ZHOU M, et al. Research Progress and Difficulties in Industrialized Application Transparent Wood and Transparent Bamboo[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(6): 1-12.
- [46] WAN C, LIU X, HUANG Q, et al. A Brief Review of Transparent Wood: Synthetic Strategy, Functionalization and Applications[J]. Current Organic Synthesis, 2021, 18(7): 615-623.
- [47] LIU Y, ZHANG Y, GUO J, et al. Preparation and Properties of Soft-/Hard-Switchable Transparent Wood with 0 °C as a Boundary[J]. Forests, 2024, 15: 384.
- [48] MI R Y, CHEN C J, KEPLINGER T, et al. Scalable Aesthetic Transparent Wood for Energy Efficient Buildings[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3836.
- [49] ZOU W, SUN D, WANG Z, et al. Eco-Friendly Transparent Poplar-Based Composites that are Stable and Flexible at High Temperature[J]. RSC Advances, 2019, 9(37): 21566-21571.
- [50] YANG L, WU Y, YANG F, et al. Study on the Preparation Process and Performance of a Conductive, Flexible, and Transparent Wood[J]. Journal of Materials Research and Technology. 2021, 15: 5396-5404.
- [51] JELE T B, ANDREW J, JOHN M, et al. Engineered Transparent Wood Composites: A Review[J]. Cellulose, 2023, 30(9): 5447-5471.
- [52] MONTANARI C, LI Y, CHEN H, et al. Transparent Wood for Thermal Energy Storage and Reversible Optical Transmittance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(22): 20465-20472.
- [53] ZOU W H, WANG Z H, SUN D L, et al. Transparent Cellulose Nanofibrils Composites with Two-Layer Delignified Rotary-Cutting Poplar Veneers (0°-Layer and 90°-Layer) for Light Acquisition of Solar Cell[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 1947.
- [54] YU Z Y, YAO Y J, YAO J N, et al. Transparent Wood Containing Cs_xWO_3 Nanoparticles for Heat-Shielding Window Applications[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(13): 6019-6024.
- [55] 孙永平, 于新栋, 柴希娟, 等. 低熔点合金高低温循环浸渍杨木的性能及机理研究[J]. 林产工业, 2024, 61(4): 1-6.
- SUN Y P, YU X D, CHAI X J, et al. Mechanism and Performance Analysis of Poplar Impregnated with Low Melting Point Alloy at High and Low Temperatures[J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(4): 1-6.
- [56] 刘仁玲, 郭强, 黄金田, 等. 木基金属复合材料的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3): 223-230.
- LIU R L, GUO Q, HUANG J T, et al. Progress of the Development of Wood-Based Composite Materials[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 223-230.
- [57] 郭文义, 郭同诚, 苏日嘎啦, 等. 杨木单板/铜复合电磁屏蔽材料的制备及性能研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 70-75.
- GUO W Y, GUO T C, SU R, et al. Preparation and Properties of Poplar Veneer/Metallic Copper Electromagnetic Shielding Effect Composite[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 70-75.
- [58] PAN Y F, LI L X, DONG J, et al. Effect of Heat Treatment on Electromagnetic Shielding Performance of Electroless Copper-Nickel on Wood[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 703: 135168.
- [59] WAN J, SONG J, Yang Z, et al. Highly Anisotropic Conductors[J]. Advanced Materials, 2017, 29(41): 1703331.
- [60] LI J, WANG R, TIAN H, et al. Research on the Gradual Process of the Metallization Structures and Mechanical Properties of Wood Veneer[J]. Symmetry, 2018, 10(11): 550.
- [61] 王汉伟, 孙庆丰, 盛成皿, 等. 木材趋磁性仿生矿化形成及微波吸收性能[J]. 科技导报, 2017, 35(22): 71-76.
- WANG H W, SUN Q F, SHENG C M, et al. Preparation of the Magnetotactic Wood through the Biomimetic Mineralization for Application in Electromagnetic Wave Absorption[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(22): 71-76.
- [62] ZHAO X Y, HE L X, ZHANG T F, et al. Development of Metallic Wood with Enhanced Physical, Mechanical, and Thermal Conduction Properties Based on a Self-Driven Penetration Mechanism[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 183: 114960.
- [63] WANG Z L, BAO Y P, WANG M, et al. Highly Anisotropic Metallized Wood Obtained by Filling Basswood Channels with Low-Melting-Point Sn-Bi Alloy[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189: 115864.