

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021051

木材仿生智能材料研究进展

李 坚¹, 甘文涛^{1,2}, 王立娟¹

(1. 东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 东北林业大学木质新型材料教育部工程研究中心, 黑龙江哈尔滨 150040)



摘要: 木材是人类最先注意和最早利用的材料之一, 千百年来, 一直被用作建筑和家居耗材。面对日益严峻的环境污染和能源枯竭, 如何优质和高效利用木材已成为木材工业面向世界科技前沿、面向人民生命健康的“卡脖子”问题。向自然学习, 创生具有仿生结构的智能木材, 是实现木材的自增值性、自修复性、自诊断性和自适应性, 使木材从更高技术层面为社会进步服务的有效途径。本文针对近年来仿生构建先进木基功能材料在能源、环境和智能制造领域发展进程中出现的新理论、新技术和战略性作用开展论述, 梳理代表性功能木材开发研究的现状和发展趋势, 凝练木材仿生智能材料在加工技术和应用方面的问题, 提出木材仿生科学发展的重点方向。

关键词: 木材; 仿生; 智能; 低碳; 可持续发展

中图分类号: S781; TS6

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 04-0001-14

Research Progress on Wood Biomimetic Intelligent Materials

LI Jian¹, GAN Wen-tao^{1,2}, WANG Li-juan¹

(1. Key Laboratory of Bio-based Material Science & Technology (Northeast Forestry University), Ministry of Education, Harbin, 150040, Heilongjiang, China; 2. Engineering Research Center of Advanced Wooden Materials (Northeast Forestry University),

Ministry of Education, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Wood is one of the first noted and the oldest materials used in human history. Wood has been utilized as the building and home furnishing materials for thousands of years. With the intensifying of environment pollution and energy depletion, how to use wood in a high-quality and efficient way has become a bottleneck problem for the wood industry to achieve the goals of the scientific frontier and the human health. In order to increase the self-value, self-repair, self-diagnosis, and self-adaptability of natural wood, by learning from nature, we developed the intelligent wood products with bionic structures, which have proved to be an effective strategy to serve our society at a highly technical level. This review aims to highlight the significance of bionic constructed advanced functional wood products in the field of energy, environmental protection and intelligent manufacturing by discussing the basic theories, novel technologies and strategic impacts. We highlight the current literature in details including the development trends regarding the functional wood materials, and the challenges in manufacturing

收稿日期: 2021-04-27; 修改日期: 2021-06-16

基金项目: 中国工程院咨询项目“林业工程学科建设与木材行业绿色融合发展战略研究”(2019-XY-77); 国家自然科学基金项目“木材-磁性粒子纳米界面的构建及其磁热转换机制的研究”(32001256)。

作者简介: 李坚 (1943—), 男, 教授, 中国工程院院士。Email: nefulijian@163.com

甘文涛 (1993—), 教授。Email: wtgan@nefu.edu.cn

technologies and applications. In the conclusion, we provide suggestions for the future directions and opportunities of the wood bionic science.

Key words: wood; bionics; intelligence; low carbon; sustainable development

21 世纪人类世界面临诸多挑战, 人口激增、水资源缺乏、粮食短缺、土地荒漠化、温室效应、白色污染、生物多样性丧失等, 资源比以往时代更加稀缺^[1-3]。其中, 环境恶化与能源短缺是关乎人类生存和发展的核心问题。据 2020 年国民经济和社会发展统计公报显示, 2020 年我国一次能源生产总量 40.8 亿 t 标准煤, 比 2019 年增长 2.8%。煤炭消费量增长 1.4%, 原油消费量增长 1.6%, 天然气消费量增长 9.8%, 电力消费量增长 3.7%^[4]。虽然在国家节能减排、低碳经济政策的影响下, 这些不可再生资源的消耗速度趋缓, 但长期以来过度依赖化石能源带来的环境问题日益严重, 如温室气体的排放量达到了过去 80 万年以来的最高水平, 导致了全球变暖、极冷极暖气候、自然灾害频发等环境问题。石油、煤炭燃烧排放的污染物气体, 经过富集、碰撞和相互作用, 造成危害性更严重的酸雨、雾霾、光化学烟雾, 影响人类健康。同时, 不可降解塑料、合成橡胶等化石资源衍生产品的不合理使用, 不妥当处理和回收, 使全球每年约有千余万吨塑料垃圾流入海洋, 给地球带来了沉重的负担, 人类正面临巨大的可持续性发展挑战。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》等政策文件中明确了农林生物质资源综合开发利用的发展方向^[5]。实现可再生生物质资源的高值利用, 替代不可再生的化石资源, 实现“碳中和”已成为科学家竞相关注的前沿问题。促进绿色发展, 减少碳排放、增加碳封存是平衡社会整体碳排放, 实现“碳中和”的重要途径。森林是陆地上最大的碳材料储存库, 联合国粮食及农业组织(FAO)林业处及一些国家政府部门就气候变化和对策开展了广泛调研, 认为增加木质资源利用是减缓气候变化、维持地球大气层碳平衡简单易行的方式之一^[6]。在循环型社会的构建中, 可再生的木质资源包括木材、竹材、藤木、灌木等, 其中木材以其巨大的资源占有量和优异的生态效益, 利用率居木质资源之首。在木材的使用

期间和后续的循环利用过程在继续进行碳储存。因此, 前瞻性构建木质功能材料理论体系, 从宏观木材结构和微纳分子水平开发新型木质复合材料, 提高木材质量、提升木材利用效率、扩大木材和木基材料的使用范围, 不仅可以减轻人类对于有限化石资源的过分依赖, 而且能够为未来新材料、新能源、绿色生态、环境和健康领域发展提供木质新资源的科技支撑。

1 林木资源利用现状及趋势

1.1 林业资源概况

《中国森林资源报告(2014—2018)》显示我国森林资源总体上呈现数量持续增加、质量稳步提升、生态功能不断增强的良好发展态势, 形成了国有林以公益林为主、集体林以商品林为主、木材供给以人工林为主的合理格局^[7]。第九次全国森林资源清查结果显示, 我国森林面积高达 2.2 亿 hm^2 , 森林覆盖率为 22.96%, 蓄积量为 175.60 亿 m^3 。其中人工林面积 7 954 万 hm^2 , 继续保持世界首位。森林植被总生物量 188.02 亿 t, 总碳储量为 91.86 亿 t。年涵养水源量 6 289.50 亿 m^3 , 年固土量 87.48 亿 t, 年滞尘量 61.58 亿 t, 年吸收大气污染物质 0.40 亿 t, 年固碳量和年释氧量分别为 4.34 亿、10.29 亿 t。丰富的森林资源储备在推动社会发展、经济建设、乡村振兴和可持续发展方面都有举足轻重的作用^[8]。

1.2 社会发展需求

虽然我国地域辽阔, 森林资源总量丰富, 但相对于众多的人口, 我国依然是一个缺林少绿的国家。森林覆盖率低于 30.7% 的全球平均水平, 人均森林面积仅为 0.132 hm^2 , 不到世界平均水平的四分之一, 居世界第 134 位。人均森林蓄积为 9.421 m^3 , 不到世界平均水平的六分之一, 居世界第 122 位。森林资源人均占有量不足、森林分布不均和质量不高、森林生态系统脆弱的状况长期存在, 高附加值和高科技含量林木产品短缺是限制我国木材工业转型升级的突出问题。同时, 随着

社会经济的发展,不断减少的森林资源与日益增长的木材需求呈明显的不对等关系,木材供应紧张、供需矛盾突出和保障国家木材安全问题日益凸显。相比于天然林,我国人工林的单位面积蓄积量为 $52.8\text{ m}^3/\text{hm}^2$,仅相当于天然林的50%。自2016年全面停止天然林商业性采伐以来,全国年均木材生产量持续下降,预期到2023年,我国木材年产量将从2013年的8 438.5万 m^3 下降至5 859.8万 m^3 。而木材需求量到2020年将接近8亿 m^3 。随着世界各国对森林资源的保护和对出口木材的管控,天然木材的进口日益趋紧且不可持续,不可能长期依靠进口木材来解决我国木材的供需矛盾。未来很长一段时间内,提质增效、转型升级是以木材为基础林业资源高效利用的核心问题。

人工林木材生长迅速、成本较低,能有效提供工业用材,同时具有优异的生态和经济效益,是代替天然林木材的重要战略资源。经过国家发展和统筹管理,我国人工林产业发展迅速,截止2018年,全国人工造林面积7 954万 hm^2 ,排名世界第一^[8]。虽然拥有世界面积最大的人工林,但人工林木材存在材质低劣、易干缩变形、腐朽霉变等固有缺陷,且人工林木材中大量小径级木材,主要适用于纤维板、刨花板和胶合板,不能直接用于制作家具、建筑、室内装饰和工业产品,极大制约了人工林木材的使用。加强人工林木材深度加工技术和全质化综合利用技术研究,改善人工林木材的性能,扩大其应用范围,实现人工林木材高值化和多功能化利用,对缓解木材供需矛盾,促进我国木材工业转型升级,增强林业产品竞争力具有重要意义。

2021年也是我国乡村振兴战略的开局之年,木材工业是巩固国家脱贫攻坚成果和助力乡村振兴战略的一支重要力量。我国山区面积占全国总面积60%以上,山区人口约占全国人口60%以上。山区拥有丰富的森林资源和人力资源,具有转化资源优势为经济优势的巨大潜力。作为农村经济的重要组成部分,加强林业资源的培育和高值利用,完善从木材培育、采伐到高值加工利用的全产业链布局对推动山区的经济发展,促进农民增产增收,实现乡村振兴具有重要意义。

2 木材仿生智能科学

大自然经过数十亿年的进化,已形成了最优化的形态结构,最有效的物质代谢和再循环系统,最精准的控制和协调过程。在生命演化和协同进化过程中,生物体在宏观与微观结构、形态与功能,能量与物质转化、新陈代谢、运动方式和行为模式,感觉器官,信息传递、处理和行为调控能力,相互依存和协同进化能力方面蕴含着丰富的智慧,启发人类从工程技术角度,在材料、结构、功能和信息控制等不同层次上模仿生物体系,实现技术创新^[9-11]。

科学合理地对加工和利用现有的木材资源,如提高木材的耐久性、延长木材使用寿命、改良木材品质、提高木材附加值,是现代木材科学发展过程中有待解决的“卡脖子”问题。向大自然学习,通过研究自然界生物体系的结构、性状、行为和智能响应机制,为木材加工和利用提供新的理念、新的设计和新的方法,研究木材的功能性和智能性的科学,就是木材仿生智能科学^[12-16]。

2.1 木材的结构学基础

木材是一种天然复合材料,具有结构层次分明、构造复杂有序、天然多孔的基本特征,同时具有各向异性、轻质高强、电热绝缘和来源丰富、可再生的特点,为仿生奠定了坚实的科研基础^[17-20]。木材主要由不同形态的生物细胞和不同功能的组织构成。从宏观到微观,木材的多尺度分级结构可分为:米级的树干、厘米级的木纤维、毫米级的年轮、微米级的细胞和纳米级的纤维素微纤丝。单个木材细胞由薄的初生壁(约占细胞壁厚度1%)、厚的次生壁和细胞腔组成。其中,纤维素纤丝是组成木材细胞壁的基本单元。由纤维素分子链平行排列组成基元纤丝,基元纤丝组成微纤丝,微纤丝聚集成纤丝,再到粗纤丝,粗纤丝相互缠绕组成细胞壁薄层,许多薄层再聚集成细胞壁。在纤维素微纤丝聚集形成纤维素纤丝的过程中,木质素和半纤维素等物质聚集在微纤丝之间的空隙中,相互交联,形成木质纤维素纤丝。

在木材细胞壁中,次生壁是构成主体,主要由次生壁外层 S_1 、次生壁中层 S_2 和次生壁内层 S_3 组成。在次生壁 S_1 层,微纤丝有4~6个薄层,一般

为细胞壁厚度的9%~21%，微纤丝成规则网状，并与细胞长轴成50°~70°夹角。次生壁S₂层是次生壁中最厚的一层，在早材的细胞壁中，其微纤丝层数为30~40层；晚材细胞可达150个薄层以上，一般为细胞壁厚度的70%~90%，微纤丝近平行排列，与细胞长轴成10°~30°夹角。在次生壁S₃层，微纤丝有1~6个薄层，一般为细胞壁厚度的0~8%，微纤丝的排列成平坦螺旋状，与细胞长轴成60°~90°夹角^[12-14]。

除此之外，木材中的管孔形式也多种多样。就孔隙尺寸来说，阔叶树材中存在着孔径较小的木纤维和孔径较大的导管，而针叶树材的孔径尺寸分布较为均匀。木材细胞壁之间还存在着构造和排列方式各异的纹孔结构。形态各异、多种多样的木材管孔特征，为制备各向异性的多孔材料提供了广阔的结构设计思路。因此，在进化过程中，木材自然形成了层次分明、排列复杂有序的多尺度细胞壁结构和精妙的细胞孔隙结构。木材中以纤维素微纤丝为基础的化学组分为交联和键合其他功能物质，进而制造高性能、高附加值功能产品提供了无限可能。木材各向异性、分级多孔的构造学特征也有助于容纳其他纳米材料，使其在光控器件、力学结构、电磁传感、分离提取、选择性过滤、催化剂装载和木质传感器件方面有重要的研究价值^[21-29]。

2.2 木材仿生智能科学的现有理论

木材仿生智能科学综合了物理学、化学、材料科学、纳米科学、电磁学、工程技术、生物工程等多学科理论知识。以木材精妙的多尺度分级结构、多孔隙构造学特征，智能性调温、调湿、电热绝缘和天然美学的功能为基础，以自然界给予的各种现象为启发，运用纳米技术、界面化学和计算机模拟手段，对自然界生物体的结构、功能、行为和与环境的响应机制仿生，合理设计和改变木材结构，交联和嫁接功能性基团、纳米材料和高分子化合物，充分利用木材独特的物理和化学属性，制备出具有特定功能的仿生木基新材料。

木材的仿生学研究过程可以分为三个步骤：1) 发现过程：观察自然界生物体的结构多样性、功能特异性和环境响应性，发现不同生物的结构、

生存和行为模式；2) 研究过程：运用各种研究手段收集和了解生物实现其特殊功能的理论基础，发现生物材料、组织构效、系统集成和行为转换的科学机制；3) 仿生创造过程：在发现和研究生物结构和功能的基础上，多学科交叉融合，通过技术创新创造新型木基复合材料。

总而言之，木材仿生智能科学在现代木材科学发展史中具有里程碑的意义，其提出使木材研究由宏观复合向微观复合发展，由一元体系向二元甚至多元体系拓展，由木材单一传统应用向智能化、环境化和功能化利用发展，充实了新的内涵，为木材科学领域科研工作者从更深层次上揭开木材科学内幕，提供了通过认知事物、模拟过程、调控结构和优化性能的方法论，同时也为木材科学和其他学科之间的交叉融合构建桥梁，实现“他山之石，可以攻玉”。

2.3 仿生构筑高性能功能木材契合国家绿色发展的战略需求

树木经历了大自然亿万年的物竞天择，形成了其独特的生长方式、组织结构和优异属性，其主要产物——木材也是人类最早开发和利用的材料之一。由于木材来源广泛、易于加工、机械性能优良，一直被用作建筑结构和装饰耗材。同时，木材和木制品是天然的碳储库。树木在生长过程中通过光合作用，将大气中的CO₂固定在木材内，因此木材的整个生命周期能耗低，碳排放呈负值。

以木材作为原料，利用木材功能改良技术，解决速生林木材普遍存在的强度低、变形开裂、蓝变菌腐等材质低劣问题，延长木制品的使用期限、强化废旧木材的回收和资源化利用，可以缓解资源短缺，减轻森林负担，充分发挥木材的碳储功能。

基于木材独特的层级结构和精细的孔隙构造，利用表面工程技术、纳米制造技术、化学改性、热处理的先进加工方式，对木材的结构进行仿生设计，获得具有出色机械强度、光热吸收、能源转换、流体传质和离子传输的木基材料，使这些先进木基功能材料在结构建筑、能源存储、环境修复、智能制造等领域展示出独特的优势，对扩大木材和木基材料的使用范围，替代钢材、塑料

等高碳排放和高能耗工业原材料,减轻人类对于有限化石资源的过分依赖,降低大气污染物和温室气体排放,保障能源安全、保护环境,实现低碳发展和绿色经济具有重要的意义。

3 木材仿生功能材料的发展

2010年至今,由李坚课题组提出的木材仿生智能科学通过不断交叉外延、融合创新,研究内容从超疏水木材、木陶瓷、木材异质复合材料、全组分纤维素气凝胶发展到轻质高强特种木材、储能相变木材、光热管理木材、磁性木材、智能木材和木质碳量子点,有效地将木材科学与仿生学、材料学、能源学、纳米科学、电磁学和信息技术等学科交叉融合^[12-15]。利用木材天然的构造学属性和优异的物理力学特征,使木材的提质增效研究从宏观复合向微观复合发展,由木材的性能改良向工艺-结构-性能调控三位一体化发展,由一元体系木材向二元甚至多元复合体系发展,使木材的单一传统利用向可控化、智能化、环境化和一体化的开发利用发展,更深层次地阐述了木材内在结构和宏观性能的联系。

3.1 轻质高强特种木材

自然界中存在许多力学性能优异的天然生物材料,如骨骼、牙齿和贝壳等,经历了长期的进化过程,材料的微观结构和与之对应的物理特性趋于最优。以贝壳为例,最坚硬的珍珠层就是由有机基质和文石晶片相互增强形成的层状复合材料,其微结构就像建筑墙壁的砖块一样相互堆砌、层状排列,这种特殊的分布方式有效提高了贝壳整体的弹性模量、抗压强度和韧性,模仿贝壳珍珠层结构已成为当今世界材料仿生设计研究中的热点方向^[30-31]。近年来,贝壳的“砖-泥”式结构也为仿生开发高强度特种木材提供了指导方向。

天然木材具有较好的强度、低密度和易于加工的特点,长期以来一直被用作家具和建筑结构材料。自天然林区禁伐以来,进口木材成本较高,人工林木材材质低劣的现状长期存在,使用人造板作为主要木质工程材料符合现阶段我国基本国情。人造板充分利用了木质纤维、刨花、碎料等林产加工剩余物,能够极大提高木材利用率^[32]。目

前,我国人造板领域市场规模巨大,年产量超过3.25亿m³,市场规模近万亿元^[33]。但传统人造板如纤维板、刨花板和胶合板的机械性能(强度和韧性)较低,主要使用甲醛类胶黏剂,给室内居室带来甲醛释放等问题。开发新型、环保、轻质高强的人造板对传统人造板行业的转型升级,迈向绿色发展具有重要意义。

从木材的结构特征分析,其多孔层级结构决定了空气占据了其总体积的绝大部分。木材的机械强度和韧性主要依赖于细胞壁中的纤维素微纤维,而细胞壁中的木质素则起着胶黏剂的作用,将应力传递给硬度更高的纤维素,并将整个木材细胞牢固维系在一起。从结构调控的角度考虑,通过密实化处理,排除木材细胞腔内空气,增加木材细胞壁占比,是提高木材机械强度和综合性能的有效方法。另一方面,由于纤维素是木材细胞壁的骨架物质,细胞壁优异的机械强度源自于纤维素分子链之间相互交联的氢键,压缩木材细胞的空间,使木材细胞体积减小,意味着纤维素分子之间氢键连接的最大化,从而增加了承重单元的体积分数,增大其机械强度。热、蒸汽和碱处理通常是常见的软化细胞壁、实现木材致密化的手段^[34-35]。

浙江农林大学孙庆丰课题组通过仿生生物矿化作用,利用化学矿化和机械压缩的方法,开发了类似贝壳“砖-泥”结构的轻质高强纤维板^[36]。部分脱除天然木质纤维中的纤维素和半纤维素,使木质纤维具有了更好的柔韧性和化学反应活性,随后的密实化处理完全压缩了木材细胞体积,减小了木材细胞之间的间隙,增强了纤维质单体的力学性能。同时,利用化学矿化反应,木质纤维之间形成了优于氢键的化学键联。从形态结构上看,这种轻质高强的纤维板材料不仅具有贝壳的层级结构,纤维与纤维之间相互交联的化学键,还类似于贝壳结构中起粘接作用的有机基质层。当受到外力时,层积结构有利于吸收外部应力,让冲击能量沿着界面层传播。纤维层之间存在的强相互作用在吸收冲击能量的同时,在裂纹扩展路径上形成周期性阻力,防止材料被破坏,因此板材的韧性增大。进一步研究发现,利用有序组

装和化学矿化的方法,1 mm厚的纤维板可以达到与天然贝壳相当的力学强度,而总无机含量仅为天然贝壳的六分之一^[37]。综合机械性能和密度,纤维板的比强度和韧性甚至优于金属铜和铁。不仅如此,受到天然贻贝及其分泌的黏性蛋白启发,李坚课题组选择含有某些活性成分和催化剂的水溶性体系,仿生制备了无甲醛释放、胶接强度高的绿色胶黏剂。目前正以木材单板、木质纤维和木刨花为原料,在山东新港集团进行工厂规模化试验。

针对实体木材增强,马里兰大学胡良兵教授课题组从天然木材中先部分去除木质素和半纤维素,再进行热压,制备出了具有贝壳层级结构的超级木材^[38]。木质素和半纤维素从细胞壁上的部分脱除增加了木材的孔隙度,减小了木材的硬度。在致密化过程中,木材的细胞腔以及多孔的木材细胞壁发生积压变形,导致木材致密化后厚度减少为原始厚度的四分之一,强度和韧性增加10倍。因此,超级木材具有远远超过普通结构金属和合金的比强度。高强度和高韧性一方面来源于木材细胞壁存在的纤维素纳米纤维,另一方面也与被完全压缩、层层堆叠的细胞壁结构紧密相关。除了优异的机械性能,防火性和耐候性也是木材建筑应用需要考虑的两个关键性能。在致密化木材中,几乎坍塌的木材细胞壁极大增加了木材密度,减少了木材中空气含量,在燃烧后能够形成的致密炭化层阻碍空气和热量进入木材内部,延长着火时间,达到增强木材防火性能的效果^[39]。

中国科学技术大学俞书宏院士团队基于木材天然多孔的结构,提出了一种构建人工木材的生物物质矿化策略^[40-42]。利用农林加工剩余物木屑和纤维素纳米纤维,通过混合和冷冻干燥技术,构筑出一种新型的各向同性仿生木材。天然的纤维素纳米纤维暴露在木质颗粒表面,纳米纤维通过离子键、氢键、范德华力以及物理纠缠等相互作用结合在一起,无需任何粘结剂,即紧密结合为高强度的致密结构,从而构筑了无胶黏剂添加的各向同性的高性能人造板材,其抗弯强度高达170 MPa,弯曲模量约10 GPa,力学强度远超天然实木和传统人造板^[43]。

运用仿生学原理构筑的轻质高强实木建筑材料具有优异的断裂韧性、抗压强度、硬度、抗冲击性、尺寸稳定性以及优于天然木材的阻燃性。仿生超强的特种木材是一种全生物基的环保材料,不含任何甲醛胶黏剂,且制备尺寸不受限制,工艺流程能够较好对接目前人造板生产工艺,具有远超树脂基材料和传统塑料的力学性能,应用前景十分广泛,有望在许多场景下取代塑料、钢铁和传统板材。

3.2 光热管理木材

太阳能和水是地球上最丰富的两种资源。在自然界中存在的许多动植物比人类更早懂得利用太阳能和水。例如:植物的蒸腾作用,利用太阳能驱动,促进植物茎叶中水分流动和矿物质吸收,同时加速二氧化碳循环,提高光合作用效率。蓝藻的细胞质中存在许多含有叶绿素的光合膜,这种特殊的器官有利于充分吸收微弱的光源,更加高效地进行光合作用,合成养料,供细胞所需。玫瑰花瓣表面光滑,其表皮分布许多随机的微米级和纳米级凸起。这种微纳米结构不仅赋予了玫瑰花瓣超疏水性,而且有利于增加光的散射和折射,让花瓣吸收更多阳光而不是将光反射出去。红珠凤蝶的翅膀上分布着尺寸、形状各异的晶格结构。这些纳米级晶格的间距都小于1微米,能从不同角度进行光散射,提高对光的吸收效率。

天然木材具有多孔的结构和吸光的木质素,在可见光谱范围内存在强烈的光线吸收和散射,并不具备透过光和调控光的能力。通过合理设计木材的物理结构和改变木材化学组成,可以制备能够透过可见光的透明木材,赋予木材光管理能力。让木质材料透明化主要手段是除去具有强烈光吸收作用的化学成分消除光吸收,并填充与空气光学折射率匹配的透明材料消除光散射。瑞典皇家理工学院 Berglund 教授和李媛媛研究员在木材透明化方面做了大量的研究工作,先使用亚氯酸钠、双氧水对木材进行脱木质素处理,再真空浸渍高分子树脂,得到了具有极高透光率(>80%)的透明木材^[44-46]。胡良兵教授课题组基于木材直通的管孔结构,揭示了透明木材具有极高的光学雾度(>95%)的科学机理^[47-49]。相比于日常生活中

应用最广泛的玻璃,透明木材由于其极高的光学雾度,可在白天产生均匀一致的日光分布,且无眩光效果。更重要的是,透明木材继承了木材隔热性能良好(热导率远低于玻璃)、抗冲击能力高和质量轻的突出优点,具有降低高层建筑安全隐患等诸多优势,有望代替玻璃,成为构筑节能建筑、减少能量消耗的备选材料^[50]。在透明木材制备工艺的基础上,通过引入功能基团或纳米材料的功能化修饰手段,可以增强透明木材的光热管理能力,如制备荧光透明木材、层压透明木材、冷光木材、热屏蔽透明木材。利用仿生学原理,这些研究进一步丰富和发展了木材在光热管理领域的应用^[51-54]。

不止于透明木材,面对全球日益严峻的水资源短缺,许多专家和学者受树木蒸腾作用的启发,仿生构筑了光吸收木材,并将其应用于太阳能蒸发海水淡化装置的开发^[55-57]。太阳能蒸发产生洁净水代表了一种绿色和可持续发展的水生产方向,一系列新的发电、蒸汽灭菌和燃料生产技术逐渐兴起。从本质上来讲,要达到理想的太阳能蒸发效果需要三个关键的材料设计原则:1)需要有很强光吸收材料;2)需要具有水分传输和热绝缘的材料衬底;3)合理的结构设计,实现在宽波段的太阳光吸收^[58-60]。天然木材具有亲水性、分级多孔结构、导热系数低、力学强度高的优点,但并不具备光吸收特点。因此,采用表面碳化、石墨涂层、CNT涂层和等离子体纳米粒子涂层工艺技术,增强木材的光吸收能力已经被证明是用木材直接实现太阳能蒸发,即“人工蒸腾作用”的有效途径。胡良兵教授、周军教授和Singamaneni教授等团队都开创性地设计了具有双层木材结构的太阳能蒸发器^[61-63]。在典型的双层木材结构设计中,顶部为表面碳化木材形成的太阳能吸收层,底部为未碳化的天然木材。当双层木材置于海水中,并受太阳光照射,黑色顶部表面迅速吸热并产生蒸汽。木材独特的孔隙结构和亲水性让水分从底部通过毛细作用源源不断输送至表面并蒸发。未碳化的天然木材层由于其较低的导热率,可以阻止热量直接耗散在海水中,因此极大提高了木制太阳能蒸发器的能量利用效率。

除了光学吸收,在辐射制冷领域,木材也大放异彩。基于木材出色的视觉、触觉特性和隔热性能、低导热性,木材在家居和建筑行业中常被用作装饰、隔热和保温材料。在夏季,木材极低的导热性阻止大部分热量从炎热的户外传导到室内环境。充分利用木材优异的保温性能,可以大大减少建筑物围护结构的能量损失。

近年来,科学研究不断优化木材的隔热性能。去除木材细胞壁中具有导热性能的木质素,已被证明是降低木材导热性能的有效方法之一^[64-66]。木材脱木质素后,除去了纤维素微纤丝之间的胶黏组分,在细胞壁上产生了大量纳米孔,破坏了热量传输通道,因此,脱木质素后木材的隔热性能可以媲美二氧化硅、聚合物气凝胶和聚苯乙烯泡沫塑料等商用隔热材料^[67]。不仅如此,木材脱去木质素的同时也去除了细胞壁中的显色基团,使木材具有了明亮的白度,极大增加了对光的反射率。普渡大学李恬研究员通过密实化处理脱木质素木材,创造了制冷木材,并提出了利用制冷木材高的光反射率进行建筑结构被动式辐射制冷的技术^[68]。密实化压缩处理增加了冷却木材的机械强度和导热系数,高的光反射率降低了可见光波段太阳辐射的吸收,同时纤维素的分子振动和拉伸促进了红外区的光发射,因此制冷木材能够释放比吸收太阳光更多的热能,使其在白天和夜间的辐射冷却温度都低于环境温度,且无外部能量消耗,是一种新型的、绿色、清洁的制冷材料。浙江农林大学孙庆丰课题组以木质纤维为原料,通过木材脱木素和密实化处理工艺,仿生制备了被动式辐射制冷木质纤维板^[69]。

以木材天然的分级多孔结构和细胞壁化学组分为基础,利用仿生学原理构筑的光热管理木材在应对全球能源危机和水资源缺乏的挑战方面取得了部分成果,但距离推向市场,走向规模化和商业化还有很长的路。木材与水、细菌、真菌和污染物之间耐久性、稳定性问题,连续生产和制造成本问题,尚未被妥善解决。因此,将先进光热管理木材的生产制备过程与木材工业已有的设备和系统相匹配,降低成本、提高效率,仍是未来需要深入开发和合理设计的发展方向。

3.3 能量存储木材

获取能源是自然界生命体与身俱来的本能,任何活着的生物都必须通过进食获取能量,通过生命活动消耗能量。这种生物体同外界进行的物质和能量交换的过程,就是新陈代谢。以绿色植物为代表的生物,把从外界吸收进来的水和二氧化碳转化为葡萄糖,将能量储存起来。大自然的生存规则启发我们,能源的获取和高效利用是生存的必要条件,也是推动社会发展和进化的基础。天然树木在长期的进化过程中获得了卓越的化学合成和物质转化能力,在地球物质和能量循环中起着不可替代的关键作用。他们利用光合作用和物质转化改变着大气成分,通过树叶凋零等衍生物改变着水质和土壤生产力,通过大自然的代谢和分解维持着生物圈中物质循环的平衡。光合作用是地球上最大规模利用太阳能把二氧化碳和水等无机物转化为有机物,并进行碳存储的过程,几乎为所有的生命活动提供有机物、能量和氧气。同时,天然木材中化学组成的主要结构单元就是葡萄糖,如纤维素和半纤维素。以木材为基质,发掘和提高木材的能量储存能力,对提高能源生产和使用效率,增加低碳和非碳燃料的使用,减缓大气中二氧化碳的浓度增长具有重要意义。

李坚课题组以木材的多孔分级结构学特征为基础,将相变材料与木材复合,首次提出了仿生构建储能相变木材的设想,并将相变储能木材应用于节能建筑^[70-71]。其中,当相变材料融化时,产生从固态到液态的相变,并伴随着吸收储存大量的能量;反之,当相变材料冷却时,储存的热量要散发到周围环境中,进行从液态到固态的逆相变^[728-73]。木材细胞壁优良的力学性能和丰富的孔隙结构,可以为相变材料实现可逆转变提供力学支撑和存储空间。东北林业大学王成毓课题组采用真空浸渍的方法,将十四醇与热敏材料填充进入木材细胞腔,得到了一种可不借助外界工具直观判断当前环境温度的相变储能木材^[74]:当温度低于相变温度时,木材呈现深蓝色;随着周围环境温度的升高,木材逐渐变为浅蓝色;当周围环境温度高于相变温度时,木材近乎白色,在满足木材储能功能的同时,增加了木材的美观性。

不止于实体木材仿生,木炭是一种木材热解产生的固体衍生物,不仅继承了木材天然的三维孔隙结构,而且富含碳元素,具有优异的导电性、高吸附性、强反应活性。马里兰大学陈朝吉提出了全木质非对称超级电容器的概念,这种“绿色”的超级电容器直接取材于天然木材,以碳化后活性木炭作为导电负极,以横向切割木材薄片为隔膜,以电沉积活性电容材料的木炭为正极,自组装形成了超级电容器^[75]。“三明治”夹层的结构设计,利用了沿着树木生长方向直通的木材管道,使得电解液与活性纳米材料能够充分接触,并提供快速的离子传输功能。由于正负极材料和隔膜材料均来自于天然木材,极大降低了超级电容器的构造成本,增加了电容器件的环保性。利用木炭独特的结构和性能,许多先进的集流体、分离膜和锂电池电极材料也被相继开发利用,拥有巨大的发展潜力。中南林业科技大学吴义强教授以源于木材的木质纤维素为原料,仿生棉花“轻易飘柔”特性,发展了具有大比表面积、高孔隙率、低密度、高机械强度的再生纤维素气凝胶材料,通过化学改性、纳米晶掺杂技术,制备了多种可用于能源存储设备的正极材料、负极材料和隔膜材料,为使用天然可再生木质纤维素资源解决传统超级电容器中普遍存在能量密度小、寿命短、环保性差和安全性低的“卡脖子”问题提供了可参考的新思路^[76-78]。

3.4 智能木材

自然界中许多生物体具有“感知、驱动和控制”的智能性。变色龙体表的颜色可以根据周围环境改变,变化为绿色、黄色、米色和棕色等,具有感知环境刺激如光线、温度和情绪,驱动体表虹细胞内纳米晶体,从而达到控制光线的折射,改变体表颜色的功能。在视觉上,当变色龙状态平和时,体表纳米晶体变得密集,因此折射出蓝光。而当变色龙兴奋时,纳米晶体结构呈现出稀疏分布,折射的光线因此变为黄色或红色等。向日葵之所以向阳生长,主要是由于其茎干内存在着大量惧光的细胞生长素。当阳光直射时,惧光的生长素迁移到向日葵茎干背面,导致背光面茎干生长速度加快,从而产生“向阳”现象。松甲

虫具有探测 80 km 以外森林火灾的能力, 这种快速感应温度变化的功能与其表面存在的许多微纳米级、对红外线敏感的陷窝器紧密相关。其陷窝器能感受红外线刺激, 使松甲虫表皮变热、膨胀, 从而辨认出几十千米外的火灾源地。

木材同样具有智能性。由于木材的多孔结构, 大量空气填充在木材细胞腔中, 导致木材的导热性差。因此, 在炎热盛夏, 木质结构具有隔热性, 在寒冷冬季又具有保温性, 这种“冬暖夏凉”的特性, 正是木质结构建材备受关注 and 喜爱的原因之一。同时, 木材的孔隙结构丰富, 化学组成成分中含有大量亲水性基团, 使木材具有吸湿和解吸功能。当周围环境含水率大于木材含水率时, 木材从空气中吸收水分; 反之, 一部分水分自木材表面向周围环境扩散, 从而在一定程度上维持了室内湿度稳定。然而, 木材作为一种天然的生物物质材料, 受限于其生长规律和遗态结构, 利用其自身的响应功能仍然难以满足现代高性能的智能材料需求。以木质材料的化学性质为基础, 利用木材精妙结构和表面官能团, 通过一元或者多元复合, 拓展木材“感官”, 有助于木材更加灵敏地感受外界刺激, 获取信息、做出判断和处理, 使木材的结构和功能产生明显改变, 从而实现木材的自检测、自诊断、自调节和自修复等超越其本身固有属性和特征的特殊功能。

李坚课题组在木材表面原位涂覆了锐钛矿二氧化钛纳米材料, 在可见光驱动下, 可降解甲醛和苯酚等气体^[79]; 进一步引入银纳米颗粒, 可以显著增强其在可见光照射下的催化性能。研究发现, 这类新型的可见光响应木材对多种有机染料和室内污染气体, 如罗丹明 B、苯酚、甲醛等具有优良的光催化降解效率, 同时还表现出优异的综合性能, 如高灵敏性、抗菌性、超疏水性、耐久性, 极大地拓展了实体木材作为室内装饰材料的智能性和安全性^[80-81]。另一方面, 利用高分子树脂将温敏材料嫁接到木材表面可以制备得到温控变色智能木材。该类木材具有优异的正向可逆温度响应和快速变色的响应速率, 结合木材脱木素处理工艺, 有望替代传统玻璃, 用于智能窗户和节能建筑^[82]。苏黎世联邦理工学院 Ingo Burgert 教授基于

木材的微观孔道结构和细胞壁表面存在的大量羟基, 利用甲基丙烯酸酯的酯化反应在木材细胞腔内原位聚合成了木材-异丙基丙烯酸酯水凝胶, 赋予了木材感温特性^[83]。这种在木材细胞腔内设计和合成响应性高分子制备智能木材的方法, 能够可逆地通过外界刺激来改变木材的宏观物性, 且制备方法简单便捷、具有规模化生产的潜力, 为进一步赋予木材的多重刺激响应提供了可借鉴的方法论。

3.5 磁性木材

地球是一个大磁场, 人类和地球上的全部生物体的繁衍生息全处于地球磁场之中, 地磁场提供给生物体在地球生活所必须的安定性磁力。许多微生物和动物的感觉器官很敏锐, 能够感知微小的磁场变化, 并在动物定位、觅食和导航过程中起着重要作用。趋磁细菌能够吸收环境中的铁离子, 并利用体内自发进行的生物矿化作用形成磁性纳米颗粒—磁小体, 每个磁小体都有南北两极且定向排列。这种特殊的感磁器官可以用作生物指南针, 使趋磁性细菌沿着地球磁场移动。在水性环境中, 趋磁性细菌正是利用这种生物指南针判断方向, 从而选择适宜生存的环境。蜜蜂的筑巢和觅食也与地球磁场有紧密相关: 筑巢时, 蜜蜂可以根据地球磁场方向将巢穴筑成水平方向; 觅食时, 蜜蜂飞舞的方向和方式也受到磁场的影响。很早之前科学家就从蜜蜂的腹部提取了超顺磁性物质, 并发现这些物质周围被神经细胞包裹, 因此推测磁场方向发生改变时会刺激蜜蜂神经细胞, 从而传递信息给大脑, 起到辨认方位的作用^[84]。海龟和候鸟也内置有全球定位系统, 它们都可以探测地球磁场的强度和角度, 并利用他导航数千英里。鸽子的头骨和硬脑膜部分亦有磁性物质, 同时许多鸟类鸟喙的三叉神经树突中也存在磁性物质, 这为解开鸟类的磁感应奥秘提供了有力的实验支撑。然而, 自然界生物活动规律与磁场之间的联系, 生命细胞与磁场之间的相互作用和传递机制, 磁场对生物大分子的操纵和控制等诸多科学问题还有待进一步证明。

木材作为“木材-人类-环境”关系中的重要元素, 是一种与环境互动的友好材料。木材能够利用自身的结构特性来影响环境和对环境状况进行

调节,如木材对声、光的吸收和发射,对室内温度、湿度的调节,同时还具有调节“磁气”和减少辐射的功用。探索木材与磁场之间的相互作用,发掘木材生物磁学的科学内涵,有助于深化对“木材与环境”之间关系的理解,推动木材仿生科学向智能化方向发展。李坚课题组模仿趋磁细菌的生物矿化过程,将木材浸泡在钴铁金属离子溶液中,利用木材优良的吸湿性,汲取含铁矿物质溶液,随后在木材细胞腔内矿化合成磁性纳米晶,开发了一种在木材细胞壁内原位合成磁性纳米颗粒的普适方法^[85-87]。利用这种方法制备的磁性木材不仅保持了木材天然的纹理结构、高强重比、易加工和温湿度调控功能,而且在外界磁场作用下能够表现出较好的磁力。苏黎世联邦理工大学Keplinger团队提出了一种微波辅助合成策略,在木材细胞腔内快速合成了超顺磁性纳米材料,并使木材具有了显著的磁各向异性。进一步研究发现,在木材细胞壁内部形成的 Fe_3O_4 纳米晶可以形成相互连接的导电网络,使磁性木材在外界磁场作用下获得最大的介电损耗和磁损耗,从而导致磁性木材具有出色的电磁屏蔽性能^[88]。东北大学祝红丽教授利用木材脱木素过程,减少木材质量,开发出了一种轻质的磁性木材,且兼有出色的电磁波吸收性能^[89]。

尽管已经有部分学者开始关注木材的磁功能拓展,并研究了磁性纳米材料对木材尺寸稳定性、耐候性、阻燃性等性能的影响,但是对木材细胞结构与磁性纳米材料之间相互作用机制仍然缺乏科学的解释。磁性木材的应用往往也仅仅局限于电磁波吸收,鲜有研究关注木材的磁-光现象和磁-热效应^[90-91]。

作为物质的一项基本属性,磁性材料不仅可以以将电磁能转换为电能、声能和机械能,是基础的能源转换材料,而且对生物组织的结构和功能有不可替代的影响。目前,关于磁性木材的研究尚处于起步阶段,木材对磁场的感知还停留在被动刺激和接受状态,缺少对磁场的自主响应和控制。木材细胞结构单元与磁性纳米晶的相互作用和协同增效,木材化学组分对磁性纳米晶成核和生长的影响,木材界面与磁性纳米材料之间的相

容性等诸多科学问题有待深入研究。依托先进的表征检测手段,以构建木质材料与磁性纳米晶界面为突破口,发现木材结构之间的磁差异,阐述不同类型、不同结构的木材结构引发的磁响应行为,这不仅有助于开发磁性木材在智能响应领域的新应用,也为科学合理地解释木材磁效应提供理论基础。

3.6 木基荧光碳材料

木材是一种天然的富含碳质的材料,面对国家加速构建高固碳、低排碳的发展模式,推进资源节约型和环境友好型社会建设的发展需求,木材工业可以通过减少碳排放和碳封存方式,开发木材一体化利用技术,提高木质资源综合利用效率。仿生构建木质碳材料,延展木材固碳的方式和木材碳化方法,延长碳储存时间、增加碳吸存量、减少碳排放,是同时发挥木材碳库和碳源的双重作用,促进木材的高效和合理利用,保障国家生态安全、实现木材低碳加工和发展低碳经济的重要方式。

木材主要由纤维素、半纤维素、木质素和少量抽提物组成。纤维素和半纤维素的基本组成单元为葡萄糖,容易碳化^[92-93]。基于木材天然的层级结构,具有高糖含量的木材有利于开发具有规则形态的碳材料^[94]。木质素在生物质材料细胞壁中占比很大,也是地球上仅次于纤维素的第二大主要化学结构单元。由于木质素含有丰富的芳环结构、脂肪族和芳香族羟基以及醌基等活性基团,且具有自缔合和荧光特性,使其可以用作生物质基发光纳米材料。此外,多糖和木质素均有丰富的羟基官能团,使木材的衍生物易于化学修饰。成本低、原料来源广、功能优异、操作手段多样等这些木材的固有优势,使其可作为制造荧光碳量子点的原材料。

碳量子点是粒径小于10 nm的纳米碳材料,由于其优异的水溶性、低毒性、化学稳定性和荧光性,在生物医学、环境监测、传感器、能源转换方面具有广泛的应用前景^[95-97]。常用的碳量子点主要包括半导体量子点、上转化纳米材料和有机染料,以木材衍生物为碳源制备得到木质碳量子点,不仅可以有效降低制造成本,实现木质资源的高

效利用,而且具有良好的生物相容性、可操作性、荧光发射稳定性和可持续等诸多优点^[98]。东北林业大学刘守新教授团队以木质纤维素为原材料,通过一步水热制备了荧光含氮碳量子点。这种木质荧光碳量子点粒径小于10 nm,且表现出pH敏感性。以木质荧光碳量子点作为光敏剂,可以拓宽二氧化钛的激发波长,使其在可见光下能够高效降解罗丹明B和苯酚^[99]。同样利用低能耗的水热法可以制备得到生物质基功能材料,如碳量子点复合荧光纤维素水凝胶。水热处理能够引发纤维素分子交联,促进了水凝胶的形成。水热过程在纤维素分子链上原位生成了粒径为2~6 nm的荧光碳量子点^[100]。这种碳量子点修饰的水凝胶展示了宽的光谱效应和高荧光稳定性。除此之外,木质素由于天然具有荧光性,使用简单的分子聚合即可制备得到木质素碳量子点。从木质纤维素中提取木质素分子,在乙醇溶液中利用 π - π 堆集作用促进木质素分子自组装,从而制备得到了粒径尺寸在5~10 nm的荧光碳量子点,并揭示了这种木质素碳量子点在近红外光激发下出色的光子上转换发射效应^[101]。孙润仓教授课题组采用氧化裂解和芳香族化合物融合的方法,以木质素为原材料制备了单晶石墨烯碳量子点^[102]。经过研究发现,木质素碳量子具有蜂窝状石墨结构,且展示了优异的上转换荧光特性和光稳定性。虽然在过去一段时间的研究中,利用木质生物质材料制备荧光碳量子点方面取得了许多成就,但仍需要进一步证明木质荧光碳量子的发光机理,提高木质碳量子点的荧光量子产率。

4 展望

木材是一种结构形态复杂的天然生物质材料,自古以来,由于其优异的力学性能、电热绝缘和优美纹理,在家居装饰和结构建筑行业被广泛使用。新兴的纳米技术和信息技术能够进一步优化木材结构、拓展木材功能,是对传统木材物理和化学改性处理方法的革新。以木材仿生智能科学理论为基础,要实现先进功能木材的绿色制造,使木材能够在更高技术层面为人类社会进步服务的发展目标,仍然任重而道远。

从木材的精细结构解译出发,先进的表征手段和模拟方法阐释了在微米级尺度上木材结构和性能的关系。利用这些先进的分析方法,可以解释木材化学组成和微观物理性能的协同增效,在仿生构建先进功能木材的过程中可以控制材料的力学性能和对光、热、磁、水分、电子和离子的传输行为。但这仅仅是冰山一角,木材复杂的细胞壁结构、组分含量和生物分子合成途径,可以预期在纳米尺度和分子尺度仍然存在木材结构和性能的多层级应用化学,开展高分辨、高灵敏度原位探测和成像技术,对细胞壁进行分子和纳米级修饰,以及实现对木材单细胞腔内物理和化学改性过程的操作,能够从更精细层级调控木材结构、优化木材功能,为木材资源高效和深度利用提供重要理论基础。

在生产技术方面,大多数仿生功能化木基产品现阶段仅停留在实验室制备阶段,其合成过程涉及大量的化学物质、能量和水资源浪费,先进功能木材的整个生产周期中是否对环境无害和零碳排放,仍然需要被进一步评估。优化功能木基产品的中试生产,实现绿色和可持续制备过程仍需要工业界和学术界深入合作,协同攻关。同时,功能木基产品的商业化另一个重要需求是降低生产成本,在处理大型木块的过程中,化学溶液能否高效渗透木材内部,物理处理工艺如何优化,以达到药品用量、处理时间和产品质量的平衡,是未来研究必须解决的重点问题。

由于木材结构的复杂性,不同树种、不同生长条件下生产的木材材质和微观结构差异很大。以信息技术为基础,人工智能和大数据分析提供了一种确定不同树种结构和性质的方法,利用高通量数据分析和机器学习,存储大量图像、光谱、材质和其他数据,能够筛选出性能与结构相匹配的木材品种,并为构建产品的可视化模型和模拟仿生构建功能木材的物理和化学过程提供数据支撑,加快新型功能木材产品的设计和开发。

森林是地球中最丰富的可再生资源之一,既可以提供基本的生态服务,又可以支持工业、农业和能源生产。围绕国家绿色发展战略,基于木材多尺度仿生学原理,开发环境友好型木材制造

技术,加速构筑木材先进仿生智能材料,以木材资源代替不可再生资源,是木材工业走向清洁、低碳和绿色制造,实现碳中和、碳达峰目标的必经之路。

参考文献:

- [1] Phillips Fred. 联合国可持续发展目标——技术不确定性背景下的长期项目[J]. *Engineering*, 2020, 6(6): 681-685.
- Phillips Fred. The SDG Project: A long-term project under technological uncertainty [J]. *Engineering*, 2020, 6(6): 600-603. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.03.013>.
- [2] O'Neill Sean. 可持续发展的解决方案——2019年全球重大挑战峰会的第二天议程[J]. *Engineering*, 2020, 6(4): 422-424.
- O'Neill Sean. Sustainable solutions: Global grand challenges summit 2019, Day Two [J]. *Engineering*, 2020, 6(4): 376-378. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.02.001>.
- [3] Suaria G, Achtypi A, Perold V, et al. Microfibers in oceanic surface waters: A global characterization[J]. *Science Advances*, 2020, 6(23): eaay 8493. DOI: 10.1126/sciadv.aay8493.
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2021.
- [5] 国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要[M]. 北京: 中国法制出版社, 2006.
- [6] 郭明辉, 李坚, 关鑫. 木材碳学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [7] 国家林业局. 中国森林资源报告(2009—2013)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [8] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. *林业资源管理*, 2014(1): 1-2.
- [9] 江雷, 冯琳. 仿生智能纳米界面材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [10] Fortorre Y, Skotheim J M, Dumais J, et al. How the Venus flytrap snaps[J]. *Nature*, 2005, 433(7024): 421-425. DOI: 10.1038/nature03185.
- [11] Armon S, Efrati E, Kupferman R, et al. Geometry and mechanics in the opening of chiral seedpod. *science*[J]. *Science*, 2011, 333(6050): 1726-1730.
- [12] 李坚, 孙庆丰. 大自然给予的启发——木材仿生科学刍议[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(4): 4-12.
- LI J, SUN Q F. Inspirations from nature: Preliminary discussion of wood bionics [J]. *Strategic Study of CAE*, 2014, 16(4): 4-12.
- [13] 李坚. 大自然的启发——木材仿生与智能响应[J]. *科技导报*, 2016, 34(19): 1.
- [14] 李坚, 孙庆丰, 王成毓, 等. 木材仿生智能科学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [15] 李坚. 竹材仿生智能科学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] 陈碧琪, 朱剑刚. 基于环境友好型的木材仿生科学研究进展[J]. *林产工业*, 2021, 58(1): 33-37.
- CHEN B Q, ZHU J G. Research progress of wood bionics based on environment-friendly [J]. *Forest Products Industry*, 2021, 58(1): 33-37.
- [17] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [18] 李坚. 生物质复合材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 吕建雄, 蒋佳荔. 木材动态黏弹性基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [20] 张璧光. 木材科学与技术研究进展[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [21] CHEN C J, KUANG Y D, ZHU S Z, et al. Structure - property - function relationships of natural and engineered wood[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(9): 642-666.
- [22] LI T, CHEN C J, Brozena A H, et al. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material[J]. *Nature*, 2021, 590(7844): 47-56.
- [23] WANG J F, ZHANG D H, CHU F X. Wood-derived functional polymeric materials[J]. *Advanced Materials*, 2020: 2001135.
- [24] Berglund L A, Burgert I. Bioinspired wood nanotechnology for functional materials[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(19): e1704285. DOI: 10.1002/adma.201704285.
- [25] JIANG F, LI T, LI Y J, et al. Wood-based nanotechnologies toward sustainability[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(1): 1703453.
- [26] LUO J, WANG Z M, XU L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-powered sensing in athletic big data analytics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5147. DOI: 10.1038/s41467-019-13166-6.
- [27] CAI C C, MO J L, LU Y X, et al. Integration of a porous wood-based triboelectric nanogenerator and gas sensor for real-time wireless food-quality assessment[J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105833.
- [28] HUANG Y, CHEN Y, FAN X Y, et al. Wood derived composites for high sensitivity and wide linear-range pressure sensing[J]. *Small*, 2018, 14(31): 1801520.
- [29] CHEN Z, ZHUOH, HUY, et al. Wood-derived lightweight and elastic carbon aerogel for pressure sensing and energy storage [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 30(17), 1910292.
- [30] Luz G M, Mano J F. Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by the structure of nacre[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2009, 367 (1893): 1587-1605. DOI: 10.1098/rsta.2009.0007.
- [31] MAO L B, GAO H L, YAO H B, et al. Synthetic nacre by predesigned matrix-directed mineralization[J]. *Science*, 2016, 354(6308): 107-110.
- [32] 唐忠荣. 人造板制造学(上、下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [33] 中国林产工业协会, 国家林业局林业工业规划设计院. 中国人造板产业报告[R], 2020.
- [34] Fang C H, Mariotti N, Cloutier A, et al. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2012, 70(1): 155-163. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0524-4>.
- [35] Pařil P, Brabec M, Maňák O, et al. Comparison of selected physical and mechanical properties of densified beech wood plasticized by ammonia and saturated steam[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, 72(5): 583-591.
- [36] CHEN Y P, DANG B K, JIN C D, et al. Processing lignocellulose-based composites into an ultrastrong structural material[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(1): 371-376.
- [37] CHEN Y, FU J Z, DANG B KB, et al. Artificial wooden nacre: a high specific strength engineering material[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(2): 2036-2043.
- [38] 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.
- [39] GAN W, CHEN C J, WANG Z Y, et al. Dense, self-formed char layer enables a fire-retardant wood structural material[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(14): 1807444.
- [40] YU Z L, YANG N, ZHOU L C, et al. Bioinspired polymeric woods[J]. *Science Advances*, 2018, 4(8): eaat 7223. DOI: 10.1126/sciadv.aat7223.
- [41] YU Z L, QIN B, MA Z Y, et al. Emerging bioinspired artificial woods [J]. *Advanced Materials*, 2020: 2001686.
- [42] GUAN Q F, YANG H B, HAN Z M, et al. An all-natural bioinspired structural material for plastic replacement[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5401. DOI: 10.1038/s41467-020-19174-1.
- [43] GUAN Q F, HAN Z M, YANG H B, et al. Regenerated isotropic wood

- [J]. National Science Review, 2020:1-9. DOI:10.1093/nsr/nwaa230.
- [44] LI Y, FU Q, YU S, et al. Optically transparent wood from a nanoporous cellulosic template: combining functional and structural performance[J]. Biomacromolecules, 2016, 17(4): 1358-1364.
- [45] FU Q, YAN M, Jungstedt E, et al. Transparent plywood as a load-bearing and luminescent biocomposite[J]. Composites Science and Technology, 2018, 164: 296-303.
- [46] CHEN H, BAITENOV A, LI Y, et al. Thickness dependence of optical transmittance of transparent wood: chemical modification effects[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11(38): 35451-35457. doi: 10.1021/acsami.9b11816.
- [47] ZHU M W, SONG J W, LI T, et al. Highly anisotropic, highly transparent wood composites[J]. Advanced Materials, 2016, 28 (35): 7563. DOI: 10.1002/adma.201604084.
- [48] ZHU M W, LI T, DAVIS C S, et al. Transparent and haze wood composites for highly efficient broadband light management in solar cells[J]. Nano Energy, 2016, 26: 332-339.
- [49] MI R Y, CHEN C J, Keplinger T, et al. Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3836. DOI: 10.1038/s41467-020-17513-w.
- [50] LI T, ZHU M W, YANG Z, et al. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation[J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(22): 1601122.
- [51] YU Z Y, YAO Y J, YAO J N, et al. Transparent wood containing Cs₂WO₃ nanoparticles for heat-shielding window applications[J]. Journal of Materials Chemistry, A. Materials for energy and sustainability, 2017, 5(13):6019-6024.
- [52] GAN W T, XIAO S L, GAO L K, et al. Luminescent and transparent wood composites fabricated by poly(methyl methacrylate) and γ -Fe₂O₃@YVO₄: Eu³⁺ nanoparticle impregnation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(5): 3855-3862.
- [53] LANG A W, LI Y Y, De Keersmaecker M, et al. Transparent wood smart windows: polymer electrochromic devices based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) electrodes[J]. ChemSusChem, 2018, 11(5): 854-863.
- [54] Montanari C, LI Y 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.
- [55] JIA C, LI Y J, YANG Z, et al. Rich mesostructures derived from natural woods for solar steam generation[J]. Joule, 2017, 1(3): 588-599.
- [56] LIU H, CHEN C J, CHEN G, et al. High-performance solar steam device with layered channels: artificial tree with a reversed design[J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(8): 1701616.
- [57] CHEN C J, KUANG Y D, HU L B. Challenges and opportunities for solar evaporation[J]. Joule, 2019, 3(3): 683-718.
- [58] ZHOU J H, GU Y F, LIU P F, et al. Development and evolution of the system structure for highly efficient solar steam generation from zero to three dimensions[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(50): 1903225.
- [59] ZHOU L, LI X Q, NI G W, et al. The revival of thermal utilization from the sun: interfacial solar vapor generation[J]. National Science Review, 2019, 6(3): 562-578.
- [60] LI J L, WANG X Y, LIN Z H, et al. Over 10 kg·m⁻²·h⁻¹ evaporation rate enabled by a 3D interconnected porous carbon foam[J]. Joule, 2020, 4(4): 928-937.
- [61] ZHU M W, LI Y J, CHEN G, et al. Tree-Inspired design for high-efficiency water extraction[J]. Advanced Materials, 2017, 29(44): 1704107.
- [62] LIU K K, JIANG Q S, Tadepallifit S, et al. Wood-graphene oxide composite for highly efficient solar steam generation and desalination[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(8): 7675-7681.
- [63] XUE G B, LIU K, CHEN Q, et al. Robust and low-cost flame-treated wood for high-performance solar steam generation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(17): 15052-15057.
- [64] LI T, ZHANG X, Lacey S D, et al. Cellulose ionic conductors with high differential thermal voltage for low-grade heat harvesting[J]. Nature Materials, 2019, 18(6): 608-613.
- [65] HOU D X, LI T, CHEN X, et al. Hydrophobic nanostructured wood membrane for thermally efficient distillation[J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaaw3203.
- [66] FU Q L, Medinal, LI Y Y, et al. Nanostructured wood hybrids for fire-retardancy prepared by clay impregnation into the cell wall[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 36154-36163.
- [67] LI T, SONG J W, ZHAO X P, et al. Anisotropic, lightweight, strong, and super thermally insulating nanowood with naturally aligned nanocellulose[J]. Science Advances, 2018, 4(3): eaar3724. DOI: 10.1126/sciadv.aar3724.
- [68] LI T, ZHAI Y, HE S M, et al. A radiative cooling structural material[J]. Science, 2019, 364(6442): 760-763.
- [69] CHEN Y P, DANG B K, FU J Z, et al. Cellulose-based hybrid structural material for radiative cooling[J]. Nano Letters, 2021, 21(1): 397-404.
- [70] YANG H Y, CHAO W X, WANG S Y, et al. Self-luminous wood composite for both thermal and light energy storage[J]. Energy Storage Materials, 2019, 18: 15-22.
- [71] YANG H Y, LIU Y S, LI J, et al. Full-wood photoluminescent and photothermic materials for thermal energy storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126406.
- [72] Sharif M K A, Al-Abidi A A, Mat S, et al. Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 557-568.
- [73] SU W G, Darkwa J, Kokogiannakis G. Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 48: 373-391.
- [74] YANG H Y, WANG Y Z, YU Q Q, et al. Composite phase change materials with good reversible thermochromic ability in delignified wood substrate for thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 212: 455-464.
- [75] CHEN C, ZHANG Y, LI Y, et al. Zwitter ultra-high capacitance[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(2): 538-545.
- [76] 吴义强. 木材科学与技术研究新进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 1-28.
- WU Y Q. Newly advances in wood science and technology[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(1): 1-28.
- [77] WAN C C, JIAO Y, WEI S, et al. Functional nanocomposites from sustainable regenerated cellulose aerogels: A review[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 459-475.
- [78] WU Y Q, TAO X, QING Y, et al. Cr-Doped FeNi-P nanoparticles encapsulated into n-doped carbon nanotube as a robust bifunctional catalyst for efficient overall water splitting[J]. Advanced Materials, 2019, 31(15): e1900178.
- [79] GAO L K, GAN W T, CAO G L, et al. Visible-light activate Ag/WO₃ films based on wood with enhanced negative oxygen ions production properties[J]. Applied Surface Science, 2017, 425: 889-895.
- [80] GAO L K, LU Y, LI J, et al. Superhydrophobic conductive wood with oil repellency obtained by coating with silver nanoparticles modified by fluoroalkyl silane[J]. Holzforschung, 2016, 70(1): 63-68.
- [81] GAO L K, GAN W T, XIAO S L, et al. Enhancement of photocatalytic degradation of formaldehyde through loading anatase TiO₂

- and silver nanoparticle films on wood substrates[J]. RSC Advances, 2015, 5(65): 52985-52992.
- [82] LI Y Y, GAO L K, LI J. Photoresponsive wood-based composite fabricated by a simple drop-coating procedure[J]. Wood Science and Technology, 2019, 53(1): 211-226.
- [83] Keplinger T, Cabane E, Berg J K, et al. Smart hierarchical bio-based materials by formation of stimuli-responsive hydrogels inside the microporous structure of wood[J]. Advanced Materials Interfaces, 2016, 3(16): 1600233.
- [84] 陶清萍. 磁场生物学效应与生物样品磁学差异性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [85] 李坚, 甘文涛. 趋磁性木材的制备与多功能化修饰[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(3): 257-265.
- LI J, GAN W T. Preparation and multifunctional modification of magnetotactic wood[J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(3): 257-265.
- [86] GAN W T, LIU Y, GAO L K, et al. Growth of CoFe_2O_4 particles on wood template using controlled hydrothermal method at low temperature[J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 14876-14885.
- [87] GAN W T, GAO L K, SUN Q F, et al. Multifunctional wood materials with magnetic, superhydrophobic and anti-ultraviolet properties[J]. Applied Surface Science, 2015, 332: 565-572.
- [88] Segmehl J S, Laromaine A, Keplinger T, et al. Magnetic wood by in situ synthesis of iron oxide nanoparticles via a microwave-assisted route[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(13): 3395-3402.
- [89] CHENG Z, WEI Y Y, LIU C, et al. Lightweight and construable magnetic wood for electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(10): 202000257.
- [90] GAN W T, GAO L K, XIAO S L, et al. Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe_3O_4 nanoparticles into a delignified wood template[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(6): 3321-3329.
- [91] GAN W T, GAO L K, XIAO S L, et al. Magnetic wood as an effective induction heating material: magnetocaloric effect and thermal insulation[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(22): 1700777.
- [92] Sevilla M, Fuertes A B. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose[J]. Carbon, 2009, 47(9): 2281-2289.
- [93] Hayashi J, Kazehaya A, Muroyama K, et al. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation[J]. Carbon, 2000, 38(13): 1873-1878.
- [94] Danish M, Ahmad TT. A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 87: 1-21.
- [95] Yang S T, Cao L, Luo P G, et al. Carbon dots for optical imaging in vivo[J]. Journal of the American Chemical Society, 2009, 131(32): 11308-11309.
- [96] ZHU S J, SONG Y B, ZHAO X H, et al. The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective[J]. Nano Research, 2015, 8(2): 355-381.
- [97] XIA C L, ZHU S J, FENG T, et al. Evolution and synthesis of carbon dots: from carbon dots to carbonized polymer dots[J]. Advanced Science, 2019, 6(23): 1901316.
- [98] LI W, CHEN Z J, YU H P, et al. Wood-derived carbon materials and light-emitting materials[J]. Advanced Materials, 2020: 202000596.
- [99] WU Q, LI W, TAN J, et al. Hydrothermal carbonization of carboxymethylcellulose: One-pot preparation of conductive carbon microspheres and water-soluble fluorescent carbon nanodots[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 266: 112-120.
- [100] LI W, WANG S C, LI Y, et al. One-step hydrothermal synthesis of fluorescent nanocrystalline cellulose/carbon dot hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 7-17.
- [101] NIU N, MA Z M, HE F, et al. Preparation of carbon dots for cellular imaging by the molecular aggregation of cellulolytic enzyme lignin[J]. Langmuir, 2017, 33(23): 5786-5795.
- [102] DING Z Y, LI F F, WEN J L, et al. Gram-scale synthesis of single-crystalline graphene quantum dots derived from lignin biomass[J]. Green Chemistry, 2018, 20(6): 1383-1390. DOI: 10.1039/C7GC03218H.

(本文编校 向 琴)