

柳絮纤维的结构表征、改性机制与应用研究进展

胡忠帅 杨 勇 赵欣荣 郑少媛 李 燕 吕玉婷 王永康 徐希鹏

山东华宇工学院 能源与建筑工程学院, 山东 德州 253034

摘 要:作为一种季节性生物质废弃物,大量飘散的柳絮会造成资源浪费,还会引发环境与安全问题。但柳絮纤维具有的中空管状结构、高比表面积及丰富的羟基官能团等特征赋予了其高值化利用的潜力。本文介绍了柳絮纤维的结构表征方法、微观特征及改性方法,探讨了目前改性方法中的不足,最后介绍了改性柳絮材料在环境传感、能源存储、电磁吸波、柔性电子及生物医学等前沿领域的应用,并对未来柳絮纤维未来的高值化利用进行了展望。

关键词: 柳絮纤维;结构表征;改性机制;应用前景

中图分类号:TQ352.4

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)04-0001-09

Research progress on structural characterization, modification mechanisms, and application of willow catkin fibers

Hu Zhongshuai, Yang Yong, Zhao Xinrong, Zheng Shaoyuan, Li Yan, Lü Yuting,
Wang Yongkang, Xu Xipeng

School of Energy and Constructional Engineering, Shandong Huayu University of Technology, Dezhou 253034, Shandong, China

Abstract: As a seasonal biomass waste, the massive dispersion of willow catkins not only causes resource waste, but also poses environmental and safety hazards. However, the hollow tubular structure, high specific surface area, and abundant hydroxyl functional groups endow willow catkin fibers with significant potential for high-value utilization. This paper introduced the structural characterization methods, microstructural features, and modification methods for willow catkin fiber, and discussed the limitations of current modification methods. Finally, the application of modified willow catkin fiber materials in frontier fields such as environmental sensing, energy storage, electromagnetic wave absorption, flexible electronics, and biomedical were discussed, and the future for the high-value utilization of willow catkin fibers were prospected.

Keywords: willow catkin fiber; structural characterization; modification mechanism; application prospect

基金项目:德州市研发计划项目(DZSKJ202433)

收稿日期:2025-11-07

作者简介:胡忠帅,男,1996年生,助教,主要研究方向为固废基低碳建筑材料的应用,723547196@qq.com

柳絮是杨柳科植物种子上附着白色绒毛,可借助风力辅助种子传播,每年春末夏初大量飘飞,这一现象已成为我国许多城市面临的管理难题。柳絮属于天然纤维素纤维,具有质轻、可完全生物降解的环境友好特性。但当其过量且集中飘散时,会引发一系列环境与社会问题,飘扬的柳絮严重影响城市空气质量与公共环境卫生,堆积的柳絮不仅影响市容,还存在较大的安全隐患。柳絮因自身较干燥、蓬松多孔且比表面积大等特性,遇明火可瞬间爆燃,极易引发火灾,对公共安全构成威胁^[1-3]。它易携带花粉、灰尘和病原体,是强烈的过敏原载体,可引发皮肤瘙痒、呼吸道不适、过敏性鼻炎甚至哮喘等症状^[2-3]。

目前,针对柳絮飘散问题,传统治理方式主要包括树干注射药物、道路洒水、人工清扫收集或填埋处理等。但是这些处理方法不仅成本高昂,而且不能实现资源化利用^[4]。若对柳絮进行有效收集,并将其加工成具备高附加值的环保材料,不仅能从源头降低其带来的环境与安全风险,还能实现废物资源化

利用,从而产生显著的环境效益与潜在的经济价值。

1 柳絮纤维微观结构的常用表征方法及特征

1.1 形貌与表面性能表征

1.1.1 形貌表征

采用体视显微镜对柳絮纤维的宏观聚集状态与整体形态进行观测,可观察到柳絮纤维呈蓬松的絮状集合体结构,纤维之间相互交织形成网络,整体呈现出良好的分散性^[5]。纤维束整体呈半透明的乳白色,表面光泽度较低,质地轻盈,易于压缩与回弹。扫描电子显微镜(SEM)是观察柳絮纤维微观形貌最直接、最有效的手段之一^[6]。通过SEM图像(图1)可以清晰地观察到,柳絮纤维具有独特的中空管状结构^[4],该结构是其具备轻质特性的根本原因。相关研究结果表明,柳絮纤维的直径通常在10~20 μm ,纤维壁厚度为1~2 μm ^[6]。

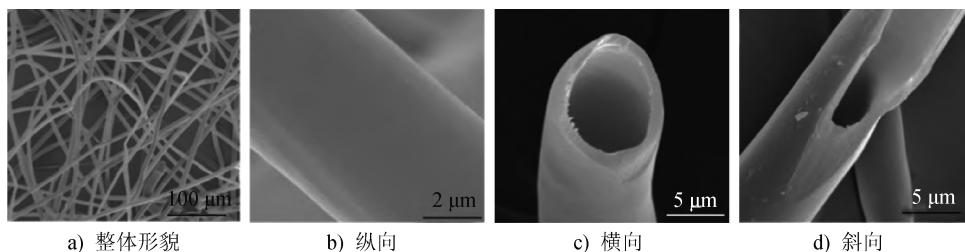


图1 柳絮纤维扫描电镜图

Fig. 1 Scanning electron microscope images of willow catkin fibers

1.1.2 表面性能表征

柳絮纤维的表面能及润湿性,对其与聚合物基体之间的界面结合效果至关重要。接触角测量仪可对纤维的疏水性进行量化表征。研究证实,柳絮纤维与水的接触角高达150.8°,表现出优异的超疏水性能^[6]。根据Young方程^[7],如此高的接触角表明柳絮纤维的表面能极低。这一特性主要归因于其表面化学组成与微观形貌的协同效应:一方面,纤维表面覆盖有疏水性蜡质层,其主要成分为长链烷烃和酯类化合物,这为纤维呈现低表面能特性奠定了化学基础;另一方面,纤维表面独特的微观凸起结构有效降低了固-液实际接触面积,进一步增强了疏水效果。该超疏水特性虽赋予纤维自清洁等功能,却也导致其与常见疏水性聚合物基体(如聚丙烯、聚乙

烯等)的界面相容性较差,难以形成有效的界面结合^[8]。这一矛盾为后续柳絮纤维的表面改性研究明确了重点方向。

1.2 官能团与化学组成表征方法

1.2.1 官能团表征

傅里叶变换红外光谱(FTIR)是表征柳絮纤维化学组成及官能团的核心技术。通过分析其特征吸收峰,可确定柳絮纤维的主要化学成分为纤维素,其特征峰包括醚键与羟基的伸缩振动^[9-10]。对比分析FTIR发现,与棉纤维相比,柳絮纤维中氢键结合的羟基伸缩振动吸收峰强度明显较低,这被认为是柳絮纤维拉伸性能较差的因素之一^[9]。此外,对柳絮纤维表面的化学组成与官能团信息的检测还可使用衰减全反射仪,该仪器无需对样品进行破坏制样,能

更真实地反映柳絮纤维表面的化学信息。二阶导数红外光谱和同步二维红外光谱等技术还能够有效区分结构极为相似的杨絮纤维和柳絮纤维,提供关于官能团对环境变化响应能力的更深层次信息^[10]。

1.2.2 元素组成与价态表征

X 射线光电子能谱(XPS)技术可用于分析柳絮纤维表面的元素组成及其化学价态。XPS 全谱分析结果表明,柳絮纤维表面主要含碳和氧元素,以及少量的硅元素。硅元素可能来源于柳絮纤维生长环境中的粉尘或土壤矿物质的附着,硅元素的存在可能对其表面性质产生一定影响。对碳元素进行高分辨精细谱扫描与分峰拟合,可以进一步分辨与碳元素相关的碳氢键、羟基、醚键、乙酰基及缩醛键等的化学态。该方法可用于定量评估改性效果。

1.3 晶体结构与超分子组装表征方法

1.3.1 结晶度表征

X 射线衍射仪是研究柳絮纤维超分子结构,特别是其结晶度的关键工具。研究表明,纤维素大分子在柳絮纤维中呈现部分结晶的形态,即包含规整排列的结晶区和无序排列的无定形区。其中无定形区是改性试剂更容易侵入和反应的区域,故结晶度是决定柳絮纤维韧化改性难易程度的一个重要参

数。基于衍射图谱分析,采用 Segal 结晶度指数法等经验公式可计算得到柳絮纤维的结晶度指数^[4]。该参数直接影响纤维的模量、尺寸稳定性和化学活性。

1.3.2 热稳定性表征

由于柳絮纤维的热分解行为与其组分(纤维素、半纤维素、木质素)含量和结晶度密切相关,可采用热重分析技术监测其在升温过程中的质量变化,并评估其热稳定性^[11],同时基于主要组分的分解温度推断组分含量。

综上,柳絮纤维的形貌主要依靠体视显微镜和扫描电子显微镜观测,可分别得到纤维的宏观聚集状态和微观结构。表面性能可通过接触角测量仪评估。官能团可采用傅里叶变换红外光谱仪及其附件衰减全反射仪鉴定,并结合二阶导数红外光谱和同步二维红外光谱等技术进行精细分析。元素组成与价态可使用 X 射线光电子能谱仪表征,可通过精细扫描确定元素化学价态。晶体结构研究基于 X 射线衍射仪,利用 Segal 结晶度指数法计算结晶度指数。热稳定性则通过热重分析进行评估,确定其热分解行为特征。柳絮纤维表征方法的归纳如表 1 所示。

表 1 柳絮纤维微观结构主要表征方法

Tab. 1 Main characterization methods for willow catkin fiber microstructure

表征方法	主要表征内容	在柳絮纤维研究中的具体表征内容
体视显微镜分析	观察宏观聚集状态、颜色、表面杂质分布	柳絮纤维的整体分散性、外观及质地特征
扫描电子显微镜分析	观察微观形貌	中空管状结构、表面光滑度、直径与壁厚
接触角测试	测量表面润湿性、表面能	接触角、滚动角度
傅里叶变换红外光谱分析	鉴定官能团、分子结构、化学键	纤维素主体结构,羟基等关键官能团强度
X 射线光电子能谱分析	分析表面元素组成、化学价态	表面 C、O 等元素含量
X 射线衍射分析	分析晶体结构、结晶度、晶粒尺寸	纤维结晶度
热重分析	研究热稳定性、组分热分解行为	柳絮纤维化学组分含量

基于上述表征方法,现有研究发现,柳絮纤维微观结构呈现出中空管状结构,且具备超疏水性能,以及低结晶度的核心特征。这些特征也是其性能短板的内在原因,为后续的改性指明了主要方向,即通过物理或化学手段调控其表面化学性质、增强结晶区之间的联系或重构无定形区,从而实现性能的有效提升。柳絮纤维的各种特征参数详见表 2。

2 柳絮纤维的改性方法、机制及效果对比

2.1 物理改性方法、机制及效果对比

物理改性是利用各种物理方法来改变纤维的表面形貌和物理结构,而不引入新的化学基团的一种方法。因其环境友好、操作简便而成为柳絮纤维预

表 2 柳絮纤维的各种特征

Tab. 2 Various characteristics of willow catkin fibers

特征参数	柳絮纤维特征	性能影响
主要形态	薄壁、中空管状结构	纤维质轻,但抗压性差
结晶度指数	较低(50%~60%)	纤维模量与强度较低,但更易改性
特征官能团	大量羟基(—OH)	为本体改性和复合提供了反应位点
表面润湿性	超疏水(物理效应主导)	纤维与聚合物基体界面黏结是难点

处理和初步韧化的重要手段。其主要目标是使柳絮纤维表面粗糙化、增加比表面积、增强与聚合物基体的界面结合作用。

蒸汽爆破法^[12-14]利用高温高压水蒸气渗透到柳絮纤维的内部空腔及无定形区,随后瞬间释放压力,产生强大的爆破力,破坏纤维的刚性结构,使其发生纤丝化,即暴露出更多的微纤丝,从而极大地增加纤维的比表面积和反应活性位点。这种方法对于后续可能进行的化学改性非常有利,能促进改性剂更深入地与柳絮纤维结合。

研磨法通过机械剪切力减小柳絮纤维长度、改变其长径比,但需注意过度研磨可能导致柳絮纤维结构损伤。

两种物理改性方法的效果对比如表 3 所示。值得注意的是,物理改性主要通过改变纤维表面形貌来改善界面附着力,未实现纤维本质性的改变,且改性效果的持久性与稳定性存在局限,特别是对于追求强界面结合的复合材料体系,物理改性提供的界面结合与物理吸附往往不足以满足要求。

表 3 物理改性方法的效果对比

Tab. 3 Effects comparison of physical modification methods

改性方法	作用机制	对纤维结构的关键改变
蒸汽爆破法	高温高压蒸汽瞬间泄压产生的物理撕裂	纤维部分纤丝化,比表面积增大
研磨法	机械剪切力与冲击力作用	纤维长度减小,长径比改变

2.2 化学改性方法、机制及效果对比

化学改性通过引入特定的化学基团或分子,改变柳絮纤维表面的化学组成和性质,从而显著增强其与聚合物基体的界面相容性,是实现柳絮纤维功能化的核心手段。其主要特点是通过共价键或强静电作用在柳絮纤维表面引入疏水基团或活性位点,从根本上改善其界面特性。常见的化学改性方法有碱处理与醚化反应、硅烷偶联剂改性、接枝共聚以及碳化处理等。

碱处理与醚化反应是最基础的化学活化方法。试验研究中,通常先将柳絮纤维浸泡在氢氧化钾等碱溶液中,通过剥蚀效应去除纤维表面的部分半纤维素、木质素等弱边界层,暴露出更多的羟基和反应位点,然后在此基础上进一步与氯乙酸钠等进行醚化反应,制备羧甲基纤维素,最后引入亲水性更好的羧甲基基团,这就为后续与丙烯酸等单体接枝共聚,制备高吸水性能树脂,奠定了基础^[15]。此方法能有效提高纤维的反应活性。

硅烷偶联剂改性是增强柳絮纤维与聚乳酸等可

生物降解聚酯界面黏结作用的有效策略。以 γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷为例,其分子一端的烷氧基水解生成硅醇,与柳絮纤维表面羟基发生缩合反应,另一端的环氧基团则能与聚乳酸基体的末端羧基或羟基反应,从而在纤维与基体间构建牢固的“分子桥”^[16]。这种改性显著改善了疏水性聚合物基体对纤维的润湿性及界面相容性,进而提升了复合材料的力学强度。

接枝共聚是通过引发剂在柳絮纤维表面产生自由基,然后引发丙烯酸、丙烯酰胺等烯烃单体发生接枝聚合,从而赋予柳絮纤维特定功能特性的改性技术。例如,在柳絮纤维表面接枝阳离子单体^[17]可制备具有优异脱色性能的絮凝剂。该方法具有显著的可设计性,是构建功能性柳絮纤维基材料的重要方法。

碳化处理柳絮纤维是当前制备高性能碳材料的研究热点。在适当的碳化条件下,柳絮纤维天然的中空管状结构能够被保留,且可通过活化处理得到分级多孔结构^[18],而这种结构能为电解液离子或污染物分子的高效传输构建理想通道。例如,高温下

KOH 与柳絮纤维碳化产物(碳骨架)发生氧化还原反应,生成的钾蒸气扩散至碳微晶层间产生插层效应,同时反应释放的气体对碳骨架形成刻蚀作用,从而在柳絮纤维表面构建出丰富的微孔和介孔结构,显著增加了碳骨架的比表面积和活性位点。此外,在柳絮纤维碳骨架的改性过程中引入氮、硫源等前驱体,高温下可使氮、硫活性基团与碳骨架中的缺陷或不饱和键结合,以吡啶氮、吡咯氮、噻吩硫等形态

共掺杂嵌入碳晶格中。这种氮硫共掺杂结构可协同调节材料的电子结构和表面化学性质,大幅提升材料的导电性与比容量^[19-21],其具体的改性过程如图 2 所示^[22]。此外,当磷酸作为催化剂时,可促使柳絮纤维中的纤维素、半纤维素发生水解、裂解和交联反应,从而形成稳定的、具有发达孔隙结构的碳骨架,而磷酸激发产生的孔结构往往以中孔为主,这有利于吸附较大分子的有机污染物^[21]。

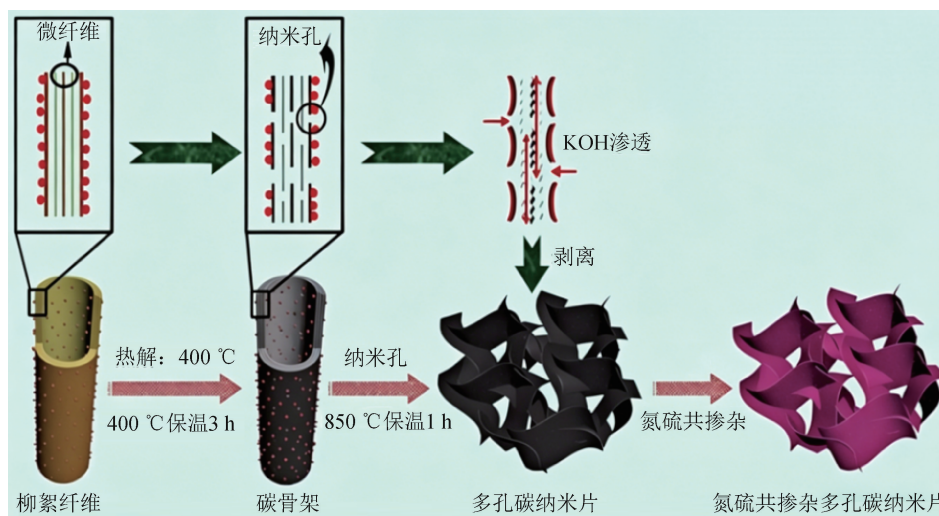


图 2 氮硫共掺杂多孔碳纳米片的合成工艺示意

Fig. 2 Schematic of synthesis process of nitrogen and sulfur co-doped porous carbon nanosheets

以上 4 种柳絮纤维的化学改性方法在改性机制、应用效果和技术成熟度方面存在显著差异。碱处理与醚化反应作为最基础的化学活化方法,其优势在于工艺相对简单、成本较低,能有效提高纤维的反应活性和亲水性,为后续功能化改性奠定了良好基础,然而该方法使用的强碱试剂可能对纤维本体结构造成一定损伤。硅烷偶联剂改性在增强柳絮纤维与聚合物基体界面黏结方面表现出高度专一性和有效性,其通过构建“分子桥”可显著提升复合材料的力学性能,但改性效果易受偶联剂种类和用量的影响,且成本相对较高。接枝共聚方法具有较强的功能可设计性,能够通过选择不同单体实现对柳絮纤维性能的精准调控,为柳絮纤维在高性能材料领域的应用提供了更多可能;不过该方法的工艺复杂度高,反应条件要求严格,过渡到大规模工业化生产可能会面临挑战。碳化处理及其衍生方法在能源和环境材料领域具有独特优势,能够较好地保留柳絮纤维的天然多孔结构,并通过活化造孔和杂原子掺

杂获得性能优异的功能碳材料,然而该过程能耗较高,反应机制复杂,且对设备要求严格。

总体而言,未来研究方向应着重于开发绿色环保的改性工艺、探索不同方法的协同效应,并根据最终应用场景的需求选择最优的改性策略,以推动柳絮纤维的高值化利用。表 4 对比了不同化学改性方法的效果。

2.3 物理-化学协同改性机制及其效果对比

物理-化学协同改性结合了物理方法和化学方法的优势,能够更全面、深入地对柳絮纤维进行改性处理,进一步提升其性能。这种协同改性方式通过物理作用改善纤维表面形貌,借助化学作用引入目标官能团,实现“形貌调控+化学修饰”的协同增效,使柳絮纤维性能显著提升,为其在更广泛的领域应用提供可能。

等离子体处理是一种高效的物理-化学协同改性方法。该方法通常是在高真空环境下引入氧气、氮气或氩气等气体,通过激发产生高活性粒子作用

表 4 化学改性方法的效果对比

Tab. 4 Comparison effects of chemical modification methods

改性方法	作用机制	关键改变/引入基团	主要优势	潜在局限
碱处理与醚化反应	剥蚀无定形区,醚化引入新基团	暴露出更多羟基,引入羧甲基	操作相对简单,有效提高反应活性	可能使用强碱,需控制条件以避免纤维过度损伤
硅烷偶联剂改性	形成“分子桥”连接纤维与基体	引入烷氧基、环氧基等	针对性极强,大幅改善界面黏结性	偶联剂成本较高,水解工艺需严格控制
接枝共聚	在纤维骨架上引发单体聚合	引入聚丙烯酸链等聚合物	功能可定制,实现性能多元化	过程可能较复杂,涉及激发剂的使用
碳化处理	提升比表面积和反应位点	引入含氧、含氮基团	实现了离子、分子的高效传输与吸附	工艺复杂,激发剂易造成腐蚀,成本较高

于纤维表面的。这些粒子对柳絮纤维表面产生两方面作用:一是通过物理刻蚀轰击纤维表面,去除弱边界层并形成微细凹坑,形成纳米级沟壑,显著增加表面粗糙度^[23];二是通过化学接枝在纤维表面引入含氧或含氮极性官能团,有效提高表面能^[24]。两者协同作用,既可增强纤维与聚合物基体的机械锚固能力,又可改善界面化学亲和性。该方法作用时间短、效果显著,且处理深度可控。

3 柳絮纤维的应用

柳絮纤维作为一种来源丰富、成本低廉的天然生物质材料,凭借其独特的中空管状结构、高比表面积及良好的化学可修饰性,已经在新型功能材料开发中展现出巨大潜力,其应用已拓展至环境传感、能源存储、电磁防护、医学等多个领域。

3.1 在高性能环境传感与检测中的应用

柳絮纤维作为理想的生物模板,可用于构建高灵敏度、高选择性的化学传感器与电化学传感器。在环境健康监测方面,研究者以柳絮纤维为生物模板,通过镍盐浸渍,并结合煅烧与硫化处理,成功制备出空心管状的硫化镍/氮硫共掺杂碳复合材料,进而开发出能同时检测药物污染物乙酰氨基酚和重金属离子铜的双功能电化学传感器。该传感器对乙酰氨基酚的检测限低至 1.33×10^{-12} mol/L,对重金属离子铜的检测限为 1.04×10^{-6} mol/L,同时该传感器表现出优异的抗干扰能力与重现性,已成功应用于血清及废水等样品的分析^[25]。在气体传感领域,基于柳絮纤维模板衍生的三氧化二锑/氧化锌($\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$)异质微米管传感器,能在 92 °C 温度下对 NO_2 表现出超高响应值和快速恢复特性^[26];而铁酸锌/

氧化锌($\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$)异质结构则实现了对强致癌物 *N*-亚硝基二丁胺的高灵敏度检测^[27],图 3 展示了基于柳絮纤维模板的 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ 异质纤维管合成流程及其应用^[11]。这些研究成果为发展低功耗、高灵敏度的环境监测器件提供了新思路。

3.2 在先进能源存储器件中的应用

在能源存储领域,碳材料因其优异的导电性和结构可调性,在超级电容器和钾离子电池^[28]等储能器件中均展现出广阔的应用前景。由柳絮纤维衍生的碳材料因其可调控的多级孔道结构和易与杂原子掺杂的特性,成为高性能电极材料的重要基体。通过热解与氢氧化钾活化,柳絮纤维可转化为互连多孔碳纳米片,再经氮硫共掺杂后,其在 0.5 A/g 电流密度下比容量高达 298 F/g,展现出优异的倍率性能和循环稳定性,组装的对称超级电容器实现了 21.0 Wh/kg 的能量密度^[22]。在电池应用方面,柳絮纤维基分层多孔碳微管作为锂硫电池正极载体,在硫负载量质量分数超过 75% 时,表现出高初始容量和卓越的循环稳定性^[29]。同时,其衍生的氮掺杂硬碳材料作为钠离子电池负极,在 1 A/g 的大电流密度下循环 1 600 次后仍保持 112 mAh/g 的可逆容量,显示出极好的长效稳定性^[30]。此外,通过原位聚合法制得的聚苯胺/柳絮复合纤维,电导率可达 10 S/m,且柔韧性佳,这为柔性可穿戴电子设备提供了潜在的电极材料^[31]。

3.3 在电磁波吸收与柔性电子领域的应用

柳絮纤维在功能复合材料领域同样具有重要价值。在电磁波吸收方面,研究者通过自聚合结合煅烧工艺,构建了由柳絮纤维与钴基金属有机框架衍生的钴/碳纳米颗粒复合材料。发现,当煅烧温度为 700 °C,钴/碳纳米颗粒的质量分数为 25%,该材料

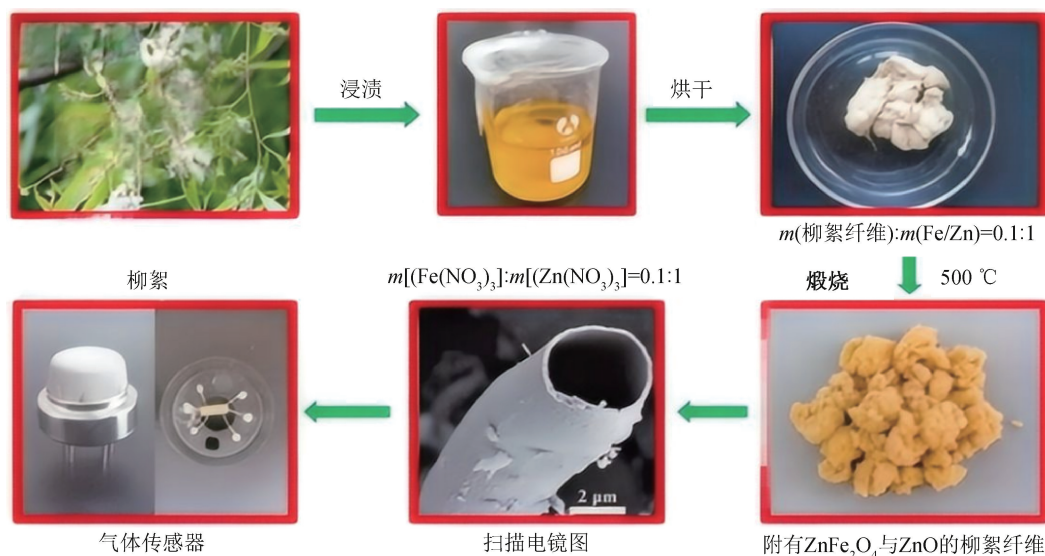


图 3 基于柳絮纤维模板的 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ 异质纤维管合成流程及其应用

Fig. 3 Synthetic process application of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ hetero-tube based on willow catkin fiber template

厚度为 1.7 mm 时,有效吸收带宽可达 5.44 GHz,优异的性能源于良好的阻抗匹配与衰减特性,为设计轻质、高效的生物质衍生吸波材料提供了新方案^[32]。在柔性电子方面,聚苯胺/柳絮复合纤维的成功制备证明了柳絮纤维在构筑柔性导电网络方面的潜力,其在可穿戴设备、软体机器人等新兴领域具有广阔的应用前景^[31]。

3.4 在能源转换与环境修复中的应用

当今柳絮纤维基材料的应用已经扩展到能源转换和环境修复领域。例如,在太阳能驱动的水处理技术中,以柳絮纤维为原料制备的亲水性生物炭复合膜,可通过模拟自然蒸腾过程构建树形蒸发器,在 1 kW/m^2 的光辐照度下实现了 $1.65\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的高蒸发速率,并能有效去除海水中 99.9% 的 Na^+ 及模拟废水中 99.5% 的重金属离子,说明生物炭复合膜在太阳能海水淡化与废水处理中具备应用潜力^[33]。此外,柳絮纤维在环境健康交叉领域也体现了其价值,如以其为模板构建的碳/铁基复合材料,可作为高效光芬顿催化剂用于水体净化,其易回收特性也符合绿色生物材料的理念^[34]。这类跨学科创新研究充分表明,柳絮纤维作为一种可持续的天然资源,在解决能源与环境挑战方面能够发挥独特作用。

3.5 在生物医学与健康领域的应用

柳絮纤维作为一种天然可降解的生物质材料,

凭借其独特的中空结构和良好的生物相容性,在生物医学领域展现出广阔的应用前景。在创面修复与护理方面,柳絮纤维通过与棉纤维混合(柳絮纤维质量分数 $\leq 50\%$)再经针刺工艺制成的非织造布敷料,表现出优异的止血、吸液和抗菌性能,适用于日常伤口护理与手术防护^[35];有研究人员还将柳絮纤维与黏胶纤维、壳聚糖复合,开发出具有生物可降解性、高吸水性及抗菌止血功能的医用敷料,成功应用于术后创面修复和感染性溃疡治疗^[36]。在更广泛的生物医用材料领域,柳絮纤维作为天然模板或增强组分显示出巨大潜力,其基材在舒适性、安全性和医疗保健方面具有广泛应用,特别在组织工程支架和柔性医疗器械开发中前景可观^[37]。这些应用表明,柳絮纤维正通过多种技术路径被整合到高端生物医学产品中,为其资源化高值利用开辟了多元化方向。

4 结束语

柳絮纤维作为一种可再生生物质资源,通过系统的材料科学与工程技术的研究,已展现出向高附加值功能材料转变的巨大潜力。

展望未来,柳絮纤维基功能材料的研究在迈向高值化利用的过程中,依然面临多重挑战并蕴含重要发展机遇。在改性策略上,需进一步探索和发展更绿色、高效且可控的改性技术,如参考孙芸云

等^[38]研发的激光改性技术,即通过精确控制激光参数对柳絮纤维表面进行刻蚀与化学重构,利用激光能量在纤维表面制造微纳结构,或利用激光诱导柳絮纤维素分子链断裂并引入羟基等极性基团,协同提升其亲水性能。但此过程中需重点优化激光能量密度,避免因过度热降解导致纤维力学性能严重受损。在应用方面,可向服装领域拓展。柳絮纤维作为天然生物质纤维,具备防紫外线与抑菌的潜力^[39],却因纤维长度过短而长期难以应用于纺织领域,可探索将柳絮纤维与长纤维混纺的工艺路径突破此瓶颈。总之,通过可持续发展理念的引导以及不断地技术创新,柳絮纤维在未来定能实现高值化利用。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 白夜,朱柄年,张学安. 杨柳絮火灾危险性及其预防措施[J]. 森林防火, 2018, 36(4): 31-33.
- [2] 张美英. 蒙城县杨树飞絮的危害及治理对策[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(15): 120.
- [3] 邹丽. 信阳市柳絮防治对策分析[J]. 河南农业, 2020(23): 23-24.
- [4] 鄂雷,何之洋,梁心羽,等. 柳絮纤维的结构分析及其吸油性能研究[J]. 森林工程, 2023, 39(5): 105-110.
- [5] 付玮康, OLIMOV K, 李炜, 等. 柳絮纤维的研究现状与展望[J]. 纺织科技进展, 2022, 44(4): 1-5.
- [6] 陈航,梅长彤,骆文,等. 杨/柳絮与其他天然纤维的微观结构比较研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 929-932.
- [7] BORMASHENKO E Y. Wetting of real surfaces[M]. Boston: De Gruyter, 2013.
- [8] RIUS-AYRA O, CARMONA-RUIZ M, LLORCA-ISERN N. Superhydrophobic cotton fabrics for effective removal of high-density polyethylene and polypropylene microplastics: insights from surface and colloidal analysis[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 646: 763-774.
- [9] 于宏伟,赵婷婷,杨晓雪,等. 杨絮纤维及柳絮纤维的三级红外光谱研究[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2017, 34(3): 17-24.
- [10] 郑泉兴,李巧灵,张柯,等. 植物纤维的热裂解过程[J]. 应用化学, 2022, 39(7): 1073-1082.
- [11] 吕明松. 柳絮模板合成 ZnO 基纤维管及其含氮化合物敏感性能[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2025.
- [12] 武威,马秋刚,朱选,等. 蒸汽爆破对木质纤维素高值化利用的研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(5): 23-37.
- [13] JACQUET N, MANIET G, VANDERGHEM C, et al. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: a review[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(10): 2593-2598.
- [14] 陈尚铎,勇强,徐勇,等. 蒸汽爆破预处理对玉米秸秆化学组成及纤维结构特性的影响[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(增刊1): 33-38.
- [15] 张效林,杨梦豪. 柳絮纤维改性及其增强聚乳酸基薄膜复合材料的制备方法: CN202211443076.2[P]. 2023-04-04.
- [16] 曹雨,田秀枝,蒋学,等. 阳离子化改性纳米纤维素的合成及其脱色性能[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(10): 104-108.
- [17] 杨开吉,姚春丽. 阳离子高分子聚合物絮凝机理及应用研究进展[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(5): 19-26.
- [18] 李慧明,桂瑶,李建法. 生物质基分级多孔碳材料的制备及新能源领域应用研究进展[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(3): 447-454.
- [19] 陈成猛,谢莉婧,孔庆强,等. 一种基于柳絮的活性炭制备方法: CN201510062117.7[P]. 2017-07-28.
- [20] 李炜,荆愈涵,陶凤仪,等. 柳絮纤维的研究应用及展望[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(6): 7-11.
- [21] 李敏. 用于糠醛吸附的碳材料研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.
- [22] LI Y J, WANG G L, WEI T, et al. Nitrogen and sulfur co-doped porous carbon nanosheets derived from willow catkin for supercapacitors[J]. Nano Energy, 2016, 19: 165-175.
- [23] 姚丽茹. 植物纤维用于提高主链液晶弹性体致动性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2023.
- [24] 赵鑫,汪殿龙,孙占英. 天然纤维表面改性及其在复合材料中的应用进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 167-171.
- [25] LI M H, XIN Y Y, SUN X H, et al. Willow catkin template synthesis of NiS@NSC hollow tubes for highly sensitive dual-function electrochemical detection of acetaminophen and Cu²⁺ [J]. Microchimica Acta, 2024, 191(11): 694.
- [26] LYU M S, LI Y N, CHEN G L, et al. Mesoporous

- $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ heterogeneous microtubes replicated from waste willow catkins for high response and rapid detection of NO_2 gas at low temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 400: 134880.
- [27] LYU M S, CHEN G L, WANG T T, et al. Willow catkins-assisted synthesis of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ hetero-tubes for chemiresistive dibutylamine sensors operated at 130°C [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 417: 136203.
- [28] AN Y L, FEI H F, ZENG G F, et al. Commercial expanded graphite as a low-cost, long-cycling life anode for potassium-ion batteries with conventional carbonate electrolyte[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 66-72.
- [29] WU J, ZHANG X X, ZHAO Z, et al. Hierarchical carbon microtubes from willow catkins for Li-S batteries [J]. Materials Letters, 2020, 261: 127079.
- [30] TENG Y Q, MO M S, LI Y. Microtubular hard carbon derived from willow catkins as an anode material with enhanced performance for sodium-ion batteries [J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2018, 15(4): 041010.
- [31] YUAN Y N, XIAO Y Y, JIA Z X, et al. Facile synthesis of flexible hollow conductive polyaniline composite fibers from willow catkins [J]. Journal of Natural Fibers, 2020, 17(10): 1479-1487.
- [32] GE C Q, WANG L Y, LIU G, et al. Willow catkins-derived Co/C nanoparticles anchored on porous carbon fibers with lightweight and enhanced microwave absorption performances [J]. Materials Letters, 2023, 331: 133529.
- [33] ZHANG S C, ZANG L L, DOU T W, et al. Willow catkins-derived porous carbon membrane with hydrophilic property for efficient solar steam generation [J]. ACS Omega, 2020, 5(6): 2878-2885.
- [34] 武汉轻工大学, 湖北三峡实验室. 一种基于杨/柳絮纤维的 C/铁基复合材料及其制备方法和应用: CN202411251226.9[P]. 2025-03-18.
- [35] 奚柏君, 郭筱洁, 金恩琪, 等. 一种针刺非织造布及其医用敷料的加工方法: CN201811118713.2[P]. 2020-07-24.
- [36] 杭州电子科技大学. 一种生物可降解医用敷料: CN201811140792.7[P]. 2021-06-15.
- [37] 文洪杰, 解希娜, 张磊, 等. 功能性生物纤维在大健康领域的应用[J]. 针织工业, 2025(1): 1-5.
- [38] 孙荟云, 胡珊珊, 孔凤英, 等. CO_2 激光对聚酰亚胺织物的表面改性研究[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(10): 44-51.
- [39] 李明曦, 李毓陵, 马颜雪, 等. 生物质新型纤维的研发综述[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(9): 20-27.

欢迎投稿 2026 年《国际纺织导报》

《国际纺织导报》(双月刊), 大 16 开, 全彩色印刷, 定价 12.00 元/册, 全年 72.00 元, 中国标准连续出版物号 $\text{ISSN } 1007-6867$, 邮发代号 4-245。
 $\text{CN } 31-1743/\text{TS}$

《国际纺织导报》由东华大学主办, 东华大学期刊中心编辑出版。期刊已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台及长江文库, 入选 CACJ 中国应用型入库期刊, 为第五届上海市高校科技期刊案例库特色科技期刊。

《国际纺织导报》报道国内外纺织、服装、设计以及其相关领域科研、生产和技术应用的最新成果, 介绍行业内的重要学术会议、展览及技术经济信息。依托东华大学纺织、服装、纤维材料等优势学科, 开设“工程科技”“时尚设计”“前沿动态”“产业服务”等栏目。

《国际纺织导报》将利用丰富的信息源架起中国与

世界纺织业间的桥梁, 推进中国纺织行业的进一步发展。

《国际纺织导报》承接相关广告, 并热忱为客户宣传, 欢迎有意者来电、来函或 E-mail 联系。

地址: 上海市延安西路 1882 号

东华大学第三教学楼 15 楼

电话: 021-62373227

E-mail: mc@dhu.edu.cn

采编平台: <https://gfzb.cbpt.cnki.net>

