

doi:10.3969/j.issn.0253-2417.2020.02.002

木棉纤维表面改性 with 高附加值利用研究进展



BAI Xiaojie

白小杰, 邓秀春, 卓祖优, 陈燕丹*

(福建农林大学 材料工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 概述了木棉纤维的天然特性, 如质轻、中空度极高(可达80%~90%), 表面呈超疏水性等; 同时介绍了可普遍用以提升木棉纤维应用特性的物理和化学改性方法。重点梳理总结了近年来木棉纤维及其改性处理后作为环保型吸油材料、在锂-硫电池正极材料和超级电容器电极材料的应用, 以及与聚酯材料复合制备吸声材料的研究进展。针对国内外木棉纤维综合开发利用的研究

现状, 指出木棉纤维未来在拓展新用途以及高附加值利用方面所面临的机遇和挑战。

关键词: 木棉纤维; 表面改性; 吸油材料; 电化学储能; 吸声材料

中图分类号: TQ35; TS102.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-2417(2020)02-0016-09

引文格式: 白小杰, 邓秀春, 卓祖优, 等. 木棉纤维表面改性 with 高附加值利用研究进展[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(2): 16-24.

Recent Progress on Surface Modification and High Value-added Utilization of Kapok Fiber

BAI Xiaojie, DENG Xiuchun, ZHUO Zuyou, CHEN Yandan

(College of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The inherent properties of kapok fiber were summarized, such as light weight, high degree of hollowness up to 80% - 90%, and super-hydrophobic surface, etc. Meanwhile, physical and chemical modification methods which could be widely used to improve the application characteristics of kapok fiber were introduced. The recent research progress focused on the application of kapok fiber and/or its modified treatment as eco-friendly oil-absorbing material, lithium-sulfur battery anode material and supercapacitor electrode material as well as the development of kapok fiber/polyester composite for sound absorbing material was presented. Based on the comprehensive research status of kapok fiber at home and abroad, the current challenges and future prospects on kapok fiber exploitation with respect to expanding new uses and high value-added utilization were highlighted.

Key word: kapok fiber; surface modification; oil adsorption materials; electrochemical energy storage; sound adsorption materials

自然界中可供开发利用的天然植物纤维资源丰富多样, 实现其高效充分利用, 是缓解当前备受关注的全球性资源短缺和环境污染危机的重要手段。木棉纤维是木棉植物的果实纤维, 因其独特的形态特征和化学组成, 呈现出质轻、吸水快、隔音、亲油、保暖、抑菌等多种性能优势, 享有“植物软黄金”的美誉, 成为一种极具应用潜力的新型生态纤维材料^[1-2]。随着科技的发展, 木棉纤维的诸多优良性能正逐步被开发利用, 在保暖填充材料、浮力材料、吸油材料、隔热吸声材料、功能型生态织物等领域显示出广阔的应用前景^[3-4]。作者基于木棉纤维独特的形态特征和主要性能特点, 结合国内外已有的文献报道, 重点对木棉纤维高附加值开发利用的研究进展进行介绍, 以期为促进木棉纤维资源的高效增值利用提供有益参考。

收稿日期: 2019-08-13

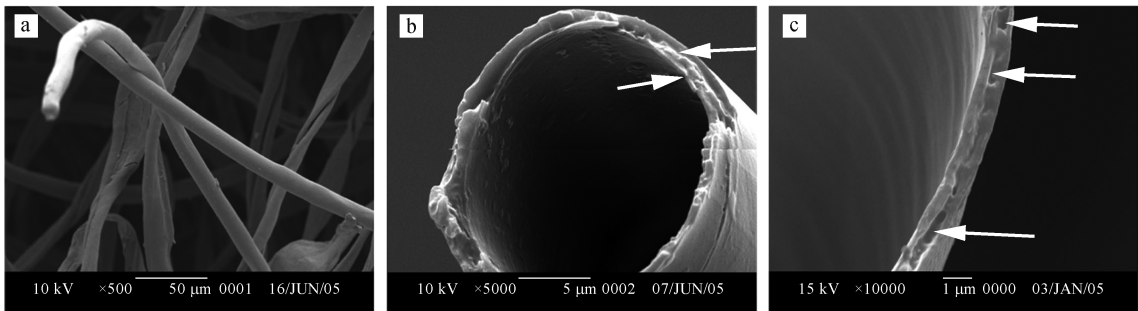
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31870561); 福建农林大学科技发展基金资助项目(KF2015004, KFA17006A)

作者简介: 白小杰(1995—), 女, 河南南阳人, 硕士生, 研究方向为生物质炭材料; **E-mail:** m18814665621@163.com

* 通讯作者: 陈燕丹, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究领域为生物质材料与化学品; **E-mail:** fjaucyd@163.com。

1 木棉纤维的天然特性

木棉纤维(KF)是一种中空度极高(可达 80% ~ 90%)且高度木质化的天然单细胞果实纤维,主要源自攀枝花树、英雄树和烽火树等木棉属植物果实内的绵毛。已有的大量研究表明^[2-5];KF 的诸多应用特性与其比较特异的 结构形态特征和化学组成密切相关。KF 的纵向外观呈圆柱状,截面呈圆形或椭圆形,表面光滑无显著卷褶;单根纤维末端封闭,内部充满空气而呈气囊结构,表面破裂后的纤维则呈扁带状^[6-8],其微观结构形态如图 1 所示。Yang 等^[9]用氮气吸附法对 KF 的孔结构进行研究,测得 KF 比表面积为 2.99 m²/g,发现其细胞壁上有裂隙状气孔存在(图 1),孔径分布主要集中在 3 ~ 4 nm,直径为 2 ~ 40 nm 的孔约占纤维总体积的 80%。



a. ×500; b. ×5 000; c. ×10 000

图 1 木棉纤维的微观结构形态^[9]

Fig. 1 Microstructure image of kapok fiber^[9]

木棉虽然称为棉,但跟常规的棉类纤维在化学组成和可纺性上存在明显差异。天然棉类(常用白棉和各种彩棉)几乎不含木质素而纤维素质量分数则高达 90% 左右;而 KF 含有较高的木质素(15% ~ 22%)和半纤维素(22% ~ 45%),纤维素质量分数低于 50% 且结晶度低。KF 表面还富含 2% ~ 3% 的蜡质,表面自由能仅 49.65 mN/m,单根 KF 与水的接触角为 151°,呈现出超疏水性^[10-11]。另外,木棉纤维长度短(约 8 ~ 34 mm),细度仅为棉纤维的 1/2,但因其木质素含量高,故扭转刚度较大(可达 7.15 × 10⁻³ cN·cm²/tex²),加之表面光滑,致使 KF 的可纺性和染色性均较差,强度亦较低^[12-13]。利用 KF 中空且壁薄等特点,将其作为天然高分子基材或生物模板,在设计制备结构与性能独特的功能复合材料方面具备一些天然优势^[14]。

2 木棉纤维的表面改性

原生 KF 的蜡质外壁光滑,不利于其它组分的有效复合。为了对 KF 固有的应用特性加以提升或拓展,可以通过化学或物理的方法对其表面特性进行改性处理。

2.1 化学改性

采用化学方法对天然纤维进行改性,是实现天然纤维和基体材料之间产生有效结合位点的有效手段之一。利用化学碱处理 KF,可以有效去除覆盖在纤维表面的木质素、半纤维素、蜡质和油脂等成分,从而达到改变 KF 的表面理化特性以及力学性能的目的。Abdullah 等^[15]研究表明:用 NaOH 预处理 KF 的丝光整理效果显著,并导致纤维素组分的晶型、结晶度和纤维的表面形貌发生明显变化;与未处理纤维相比,碱预处理后的 KF 表面会产生微纳米级的凹凸褶皱结构并伴有孔洞或浅坑存在,这种微纳米级的粗糙表面可以增加 KF 与液体试剂的接触面积,提高流体在纤维外表面的附着力,使其更易渗入 KF 的内腔表面。此外,酸、碱预处理对 KF 的微观堆积结构也有很大影响。例如,NaOH 预处理后的 KF,纤维素的结晶度下降,且晶相结构由 I 型向 II 型转变;同时伴随着显著的脱酯效应,纤维表面大量亲水性的羟基官能团得以更有效地暴露,这一方面有利于提升 KF 之间的抱合强度和表面反应性,增强木棉纤维与基体树脂或染料分子的结合力;另一方面,碱处理也会引起 KF 刚性的中空结构产生坍塌,降低其

吸油容量^[16]。但 Wang 等^[16]研究指出, KF 的吸油能力与 NaOH 的浓度、预处理温度和处理时间有关, 在合适的条件下对其进行碱处理(见图2), 增加了表面粗糙度及纤维的非晶区比例, 促进化学溶剂的渗透, 有助于改善 KF 的吸油性能。预处理试剂不同, 木棉纤维的吸附性能也不同, 经 HCl、NaOH、NaClO₂ 和氯仿预处理过的 KF 吸附甲苯、氯仿、正己烷的实验结果表明: NaClO₂ 预处理 KF 对几种模型吸附质均呈现出更好的吸附性能。

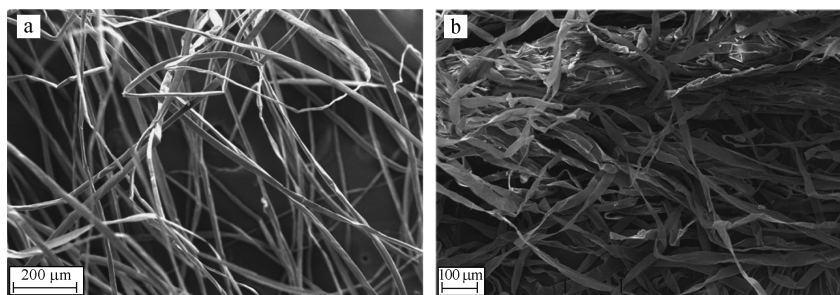


图2 未处理(a)与碱处理(b)木棉纤维扫描电镜图^[15]

Fig. 2 SEM image of untreated (a) and alkali-treated (b) kapok^[15]

除此之外, 为了去除 KF 表面的蜡质, 也可以利用氯仿、乙醇、苯-乙醇等有机溶剂体系对其进行预处理。Lim 等^[17]研究表明: 采用氯仿、乙醇、苯-乙醇预处理木棉纤维, 会破坏 KF 的疏水亲油特性, 从而使其在油水过滤分离应用中的穿透时间提前。Tye 等^[18]则考察了酸、碱预处理对 KF 酶解制备还原糖的影响, 结果表明: 原生 KF 的酶解还原糖得率仅有 0.8%, 而酸预处理后 KF 的酶解还原糖得率可大幅提升至 85.2%; 尤其是碱预处理, 可以更加有效脱除 KF 中的木质素, 使酶解还原糖得率接近 100%。因而, 碱预处理被认为是酶解木棉纤维素制备葡萄糖, 进而生产第二代生物乙醇燃料的有效途径。

利用 NaClO₂ 对 KF 进行氧化预处理也是调控其亲油亲水性和表面特性的常用方法之一。已有的研究结果显示, NaClO₂ 预处理可以强效脱除 KF 中的木质素, 从而增强 KF 的亲水性^[19]。另外, NaClO₂ 预处理还会引起 KF 聚集态结构发生明显变化, 扩大纤维的非晶区, 从而比原生 KF 具有更好的浮油回收性能和可重复使用性^[20]。Chung 等^[21]将 KF 依次用 NaClO₂-NaIO₄-NaClO₂ 进行一系列的化学氧化改性处理后, KF 的管状中空形貌得以保持, 同时在纤维表面生成大量的 -COOH 官能团, 对 Pb²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 的吸附率均可达 91% 以上。唐爱民等^[22]研究指出 TEMPO 氧化预处理可以选择性地将木棉纤维素分子链 C6 位的羟基氧化为羧基, 以此 KF 为基材和模板制备有机/无机纳米复合材料, 可使纳米粒子粒径更均一且分布更均匀。相反地, 对 KF 表面进行乙酰化改性则是为了增强其疏水性, 由此提升 KF 和高分子树脂的界面结合作用和吸油性能^[23-24]。

2.2 物理改性

Chung 等^[25]研究发现, 利用 γ 射线对 KF 进行辐照处理, 一方面可以有效去除 KF 中的可燃性组分, 另一方面可以大大破坏木质素上的甲氧基官能团, 从而达到抑制 KF 易燃的目的, 而且 KF 的阻燃性能随着 γ 射线剂量的增大而逐步提升。唐爱民等^[22, 26]研究发现, 经超声波处理后的 KF 仍存在中空结构, 但纤维表面会产生微褶皱和一些断裂, 比表面积有所增加, 从而可以使更多的 γ -Fe₂O₃ 或 CdS 纳米粒子通过原位反应复合到 KF 表面。从已有的研究结果来看, 利用超声波或辐照技术对 KF 进行预处理, 不会对其微观形态和中空结构产生显著影响。

3 木棉纤维的应用

3.1 木棉纤维用作吸油材料

随着全球石油开采量的持续增长, 油品在运输和加工过程中突发性溢油事故频发, 对水资源、海洋环境和土壤等造成严重破坏。为了经济高效地回收溢油和减少危害, 高性能吸油材料在含油水体处置、污水资源化等领域发挥着越来越重要的作用。合成高分子吸油材料虽然有诸多优点, 但通常制备工艺

复杂且不易降解,易造成二次污染。因此,近年来基于天然廉价材料的环保型吸油材料的开发和应用受到高度重视。

KF 由于它的中空内腔和表面蜡质,不仅浮力大还可以存储大量油脂,实现油水分离并悬浮在油水混合物中,凸显其作为一种天然疏水亲油吸附材料的优势和潜力^[3]。KF 对不同油脂的吸附能力可达 30 ~ 40 g/g,油水吸附质量比最高可达 201.53,因而在含油污水处理或油水分离等领域受到了广泛关注^[27-28]。Dong 等^[29]定量评估了 KF 对不同油脂的吸附性能和黏附能力,在油水分离实验中,KF 对乳化状态和分散状态下不同粒径的油滴均有较好的吸附作用,其中对植物油的吸附和附着能力最为优异,与废机车油的吸附量(58.5 g/g)相比,其对植物油的吸附量达 63 g/g。此外,通过接枝和表面涂覆等方法对 KF 进行改性,可以进一步提高亲油性、持油能力和循环使用性,从而开发出性能更加优异的木棉基吸油材料。

Wang 等^[30]和岳新霞等^[31]将表面乙酰化改性的 KF 用于吸附分离油水混合物中的大豆油或柴油,结果表明:乙酰化 KF 对柴油的吸附量为原 KF 的 2.5 倍,快速达到吸附平衡(10 min)后将其静置 120 min,测得改性 KF 对柴油的保油率为 84.8%,并可以重复利用。此外,Wang 等^[32]结合运用溶胶凝胶-表面疏水改性法,制备了具有纳米级粗糙表面结构和低表面能的纳米 SiO₂/KF 超疏水亲油材料,合成过程如图 3 所示。该低密度吸油材料能够快速吸附柴油和大豆油,吸油倍率分别在 46.9 和 58.8 g/g 以上,通过简单的真空过滤方法可以去除 90% 以上的吸附油,循环使用 8 次后吸油容量下降不到 20%,适用于大规模含油污水的高效净化处理。

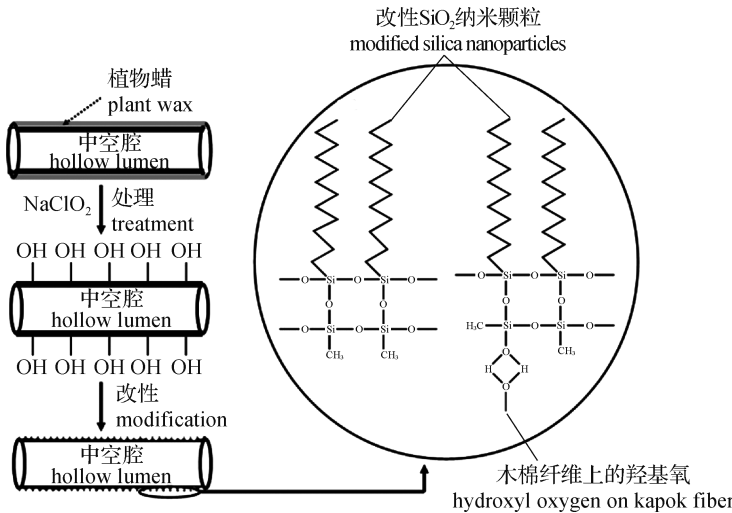


图 3 纳米 SiO₂/KF 超疏水亲油材料的制备过程及结构示意图^[32]

Fig. 3 Schematic representation of transition from raw kapok fiber to superhydrophobic kapok fiber^[32]

Zheng 等^[33]探究了用十八烷基三氯硅烷(OTS)处理过的 KF 对机器润滑油、发动机油和大豆油的吸附能力,结果表明:OTS 处理后的 KF(OTS-KF)表面变得粗糙,OTS-KF 与水的接触角明显增加,短时间内就可以达到吸附平衡,说明附着在纤维表面的 OTS 能够提高纤维的吸油能力。不仅如此,通过将 KF 光滑表面改造成具有多尺度微-纳结构的粗糙表面,也可以有效提升原生 KF 的吸油性能。例如,将疏水改性的纳米 SiO₂均匀分散在聚甲基丙烯酸丁酯(PBMA)溶液中,随后用该混合溶液对 KF 进行浸渍处理,便可制备获得表面涂覆有 SiO₂@PBMA 纳米级粗糙涂层的杂化 KF 优质吸油材料^[34]。最近,Wang 等^[35]首先在预改性 KF 上均匀负载 Fe₃O₄纳米粒子,然后进一步利用气相沉积法在其表面沉积低表面能的十二烷基三甲氧基硅烷(DTMS),制备了具有磁响应性的超疏水杂化 KF,其在选择性吸附和持续分离含浮油污水方面表现出巨大的应用潜力。类似地,Wang 等^[36]还通过一步水热法和十二硫醇表面疏水改性法,制备了具有针状纳米 ZnO 涂层的超疏水/超亲油杂化 KF,对一系列油脂和有机溶剂的吸附倍率为 40.8 ~ 70 g/g,不仅具有高效的水包油型乳液分离性能,而且其吸油容量和疏水性在重复循环使用 80 次之后也不会明显下降。

除通过表面改性用以提高 KF 的亲油性外,近来研究发现将 KF 与一些高分子聚合物进行复合,利用组分间产生的协同效应,可以制得综合应用性能更加优异的木棉基吸附材料。Kang 等^[37]利用 γ 射线辐照的方法,诱导甲基丙烯酸缩水甘油酯在经氧化预处理过的 KF 表面进行接枝聚合,考察了接枝量、单体浓度、温度和反应时间对接枝程度的影响,发现接枝率随温度、时间和辐照剂量增加而增加。王锦涛等^[38]以预处理 KF 为基材,通过接枝反应制备了 KF 接枝聚苯乙烯吸油材料,该材料显示出更高效的吸附性能,对氯仿和甲苯的吸油倍率分别达 65.4 和 43.2 g/g,同时具有吸油速度快和较好的重复利

用性能。Wang 等^[39] 还以聚甲基丙烯酸正丁酯和聚苯乙烯为表面改性剂,采用简易的溶液浸渍法制备了表面包覆型木棉基复合吸油材料,得益于聚合物表面涂层在 KF 表面形成的波纹状粗糙的微观形貌,该复合吸附剂对汽油、柴油、大豆油和石蜡油的吸油倍率高达 62.3 ~ 83.3 g/g,同时表现出优良的持油性和可重复使用性能,在溢油清除回收领域极具应用潜力。Thilagavathi 等^[40] 将一种木棉/聚丙烯(质量比 80:20)针刺无纺布用于油脂清理,其对高密度油和柴油的最大吸油倍率分别为 40.8 和 29.0 g/g,明显高于商业聚丙烯基吸油垫且更加生态环保。近年来,东华大学徐广标研究团队在 KF 油液吸附特性和油水分离应用研究领域也取得了一些重要成果^[41]。该团队从单纤维微油液吸附研究着手,结合 Washburn 的毛细芯吸理论,首次从纤维中腔和纤维间两个层面,展示了 KF 中腔和纤维间孔隙双尺度油液吸附能力,并建立了 KF 集合体双尺度孔隙特征的吸油预测模型,量化论述了纤维中腔结构对纤维吸油量的重要影响^[42]。基于此,相关人员积极探索各种制备高孔隙率纤维吸油絮片方法,发现采用气流操控纤维具有突出优势,可以有效避免对纤维中腔的破坏。由此,通过引入 10% ~ 20% 的聚丙烯/聚乙烯皮芯型复合纤维,以气流-成网-热黏合方法,成功制备了具有高油液吸附和拦截特性的各类三维结构化的 KF 吸油体^[43]。其中所制备的木棉/中空聚对苯二甲酸乙醇二酯(PET)吸油絮片具有高达 98.02% 的平均孔隙率,对不同油液的吸油倍率可达 43 ~ 63 g/g,并在悬挂静置 24 h 后,对吸收油液的保留率在 80% 以上^[44]。该研究团队的系列成果对今后 KF 吸油材料的制备及其油水分离应用将发挥重要作用。

3.2 木棉纤维用作电化学储能材料

3.2.1 锂硫电池正极材料 锂硫电池能量密度是目前锂离子电池的 3 ~ 5 倍,是极具发展前景的新一代高比能化学电源。然而,目前锂硫电池商业化应用的一大挑战是硫的导电性差而且很容易溶解到电解质中,导致两侧电极在仅仅循环几个周期后就急剧下降。以炭作为导电骨架的硫炭复合正极材料能在不同程度上解决上述问题,从而有效提高了锂硫电池的放电容量和循环性能^[45-46]。

近几年,纳米炭在锂硫电池中的应用得到了广泛关注。利用纳米炭材料的独特孔结构,可以调变多硫化物的溶解、迁移和穿梭,减少活性材料的流失^[47]。受仿生材料设计启发,Tao 等^[48] 首次以 KF 为原料,经高温炭化获得了鱼鳞状的炭材料,并以此作为硫的载体制备锂硫电池正极材料。木棉基炭材料独特的纳米瓦片状微结构,对于抑制多硫化物的穿梭效应、提升硫颗粒导电性以及调节硫在充放电过程中的体积变化具有重要作用。由木棉基炭纳米瓦片载硫正极材料构筑的锂硫电池呈现了高且稳定的体积容量(504 mA·h/cm³),在 0.4 A/g 电流密度下循环使用 90 次后,体积容量保留率为 95.4%。利用 KF 的大空腔结构为生物模板,用于制备空心微管状炭材料具有天然优势。然而,KF 的薄壁结构在制备过程的多种因素影响下,其中空管状结构往往难以为继。为此,Mu 等^[49] 通过氧化聚合反应使苯胺单体在 KF 表面聚合形成聚苯胺(PANI)保护层,再将此 KF@PANI 进行高温炭化,制备获得保留有中空管状结构的木棉炭材料。该木棉炭材料进一步与高锰酸钾溶液在一定条件下进行氧化还原反应,成功制备了中空管状结构的 C@MnO₂ 杂化复合材料(图 4)。以 C@MnO₂ 为工作电极,当电流密度为 0.5 A/g 时,在三电极体系中测得最大比电容为 321 F/g,而且测得的比电容具有正的温度效应。C@MnO₂ 复合电极的优良电化学性能,主要归因于 KF 衍生炭的多尺度介孔管状结构与 MnO₂ 超薄纳米片相互贯穿的多孔结构之间产生的协同效应。

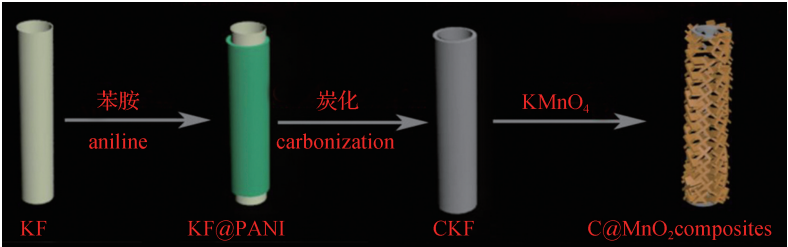


图 4 中空管状结构木棉炭/二氧化锰(C@MnO₂) 杂化复合材料的制备过程及结构演变示意图^[49]

Fig. 4 Synthetic route of the hollowed-out tubular C@MnO₂ hybrid composites^[49]

3.2.2 超级电容器电极材料 超级电容器(SCs)是一类新型的储能器件,与传统的电池和电解电容器相比,拥有高功率密度、长循环寿命、快速充放电速率以及优良的安全性,使之在电化学储能领域受到越来越多的关注^[50-53]。电极材料是构成 SCs 的核心部件,可用于制作 SCs 电极的材料主要有炭材料、导电聚合物和过渡金属化合物等。其中,利用天然可再生的生物质制备获得结构与性能优化的多孔炭电极材料正日益受到广泛关注^[54]。近年来,基于具有高中空度独特管腔结构的 KF,设计制备综合性能优良的木棉基多孔炭材料在 SCs 电极材料应用方面也取得了一些新进展。与传统呈不规则形态的活性炭相比,木棉基炭材料的一维中空结构可以为离子和电子的传输提供更快速的通道,并且易于储存电解液进行电化学反应,有望表现出优异的储能效率。

Wang 等^[55]研究了热解温度对 KF 为原料的自掺杂氮多孔炭材料结构和电化学性能的影响,在 750 °C 热解温度下获得的多孔炭材料比表面积最大,制备成超级电容器电极材料后,在电流密度为 1 A/g 时,比电容可达 283 F/g,且电化学循环稳定性优异。Cao 等^[56]以 KF 为模板和前驱体,以 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 为致孔剂、化学交联剂和氮/磷掺杂剂,进行原位炭化-活化反应,得到具有中空微管结构的氮掺杂炭材料,用作超级电容器电极材料时,在有机电解质中表现出良好的电化学性能。由此可见,以 KF 为前驱体制备的炭材料在电化学应用方面的巨大潜力。另外,基于 KF 与金属氧化物构筑的炭微管/金属氧化物先进复合电极,在电化学性能方面较纯 KF 衍生炭材料更为优异,因此也更具有商业实用性。Xu 等^[57]制备得到炭化木棉纤维/氧化镍(CKF/NiO)复合电极,在电流密度为 0.5 A/g 时,所组装的对称超级电容器的比电容可达 575.7 F/g;进一步将 CKF/NiO 复合电极与商业活性炭分别作为正极和负极,构成不对称超级电容器装置进行电化学测试,结果显示其功率密度为 64.6 W/kg,能量密度可达 7.5 Wh/kg;在经过 4 000 次循环充放电后,初始比电容未发生明显退化,表现出了良好的循环稳定性。在此基础上,Xu 等^[58]进一步通过简单的水热-炭化方法制得 CKF/CoNiO_x 复合电极,在 6 mol/L KOH 电解液中进行电化学性能测试,结果表明:在电流密度为 0.25 A/g 时,所组装的对称超级电容器比容量可达 502.4 C/g,在循环充放电 5 000 次后,电容保留率为 97.5%。高比电容和良好的循环稳定性体现出 KF/金属氧化物复合物作为高性能电极材料的显著优势。Xu 等^[59]又以 KF 为基体,制备了 KF@MoS₂/rGO 气凝胶胶作为复合电极的阴极,KF/MnO₂ 作为阳极,在聚乙烯醇(PVA)/Na₂SO₄ 凝胶电解质中组装成全固态高性能非对称电容器,测得的比电容可达 347 F/g;在功率密度为 0.25 kW/kg 时,其最大能量密度可达 63.4 Wh/kg。已有的研究结果认为,KF 独特的中空微管结构与杂化的电话性组分之间会产生协同增效作用,可在提高电极材料比表面积的同时,促进电解质溶液的渗透并缩短电子的传输距离,从而大大提高了电极材料的利用率,体现出以木棉纤维为前驱体研制超级电容器高性能电极材料的诱人前景^[57-59]。

3.3 木棉纤维用作吸声材料

随着现代工业和运输业的发展,噪声污染已经成为威胁人类生命健康的重要因素之一,这一现象也促使人们加快对吸声材料的开发与利用。使用天然纤维生产吸声材料,倡导环保性是当今社会的发展趋势。具有独特空心薄壁结构的木棉纤维在吸声方面有一定的优势,这种天然构造可以增加声波与纤维之间的摩擦,削弱声波强度。KF 集合体的吸声性能跟它们的体积密度、厚度及其取向性密切相关,但受纤维长度的影响较小。在相同厚度条件下,尽管 KF 的体积密度比商用的玻璃绒或脱脂棉纤维要小得多,但它们的吸声系数却基本相当。因此,对 KF 的吸声性能加以充分开发利用具有现实意义^[60]。

Liu 等^[61-62]对 KF/中空聚酯纤维(质量比 90:10)、聚丙烯纤维和中空聚酯纤维所制备的无纺布材料在 100 ~ 500 Hz 低频区的吸声性能进行研究,结果表明:天然 KF 在低频声波段比聚丙烯纤维和中空聚酯纤维具有更优异的吸声特性。目前开发的 KF 吸声无纺布材料多是与高分子聚合物纤维共组的复合材料,在环境友好性方面仍有所欠缺。为此,Ganesan 等^[63]将木棉纤维与乳草纤维按照一定比例混合制成无纺布,研究发现质量比为 40:60 时,吸声效果最佳。Kaamin 等^[64]将 KF 与蛋托进行简单组合制成吸声板,研究结果表明:该组合吸声板可以很好地吸收低频区的声音,同时具有工艺简单、成本低廉的优点。

4 结 语

木棉纤维(KF)作为一种来源丰富的可再生天然植物纤维,以其独特的结构和优越的性能,近年来在学术研究和工业应用领域受到了越来越多的关注。但总体而言,KF 的研究仍然存在较大的局限性,KF 的社会认知度也还不够。目前,KF 的开发利用研究主要集中在染色、絮填材料、纺织和浮力救生材料等方面。除此以外,基于 KF 的高中空及疏水亲油特性,经过表面改性或复合的手段研制高性能吸油材料也取得了一系列阶段性的成果。虽然改性 KF 及其复合物具有较高的吸油倍率,但如何进一步改善和提高其持油率和重复使用性,仍将是 KF 作为吸油材料需关注和解决的重要问题。另一方面,KF 在可持续能源材料和吸声材料的开发利用研究尚属起步阶段。以 KF 为生物模板和碳源,进一步构筑具有中空管状结构的炭/过渡金属氧化物先进复合电极,在高性能超级电容器的潜在应用让人耳目一新。当今,构筑具有高柔性、可编织、体积小、大能量储存的能源材料为可穿戴器件供能,是穿戴电子器件得以商业化应用的关键性挑战,成为国内外众多科研工作者的研究热点之一。在众多储能材料中,一维线性结构的柔性纤维状微型超级电容器,被认为是最具潜力实现为柔性穿戴器件供能的选择。因此,如何最大限度地保留和利用 KF 与生俱来的一维中空结构特性,研制出柔性纤维状先进电极用于微型超级电容器值得期待。综上,在追求绿色环保的时代大背景下,随着科学技术的持续创新发展及其对 KF 研究的不断深入,进一步发挥木棉纤维的结构与性能优势,拓宽其在吸油、储能、传感材料等高附加值新领域的应用,将是今后研究的重点和方向。

参考文献:

- [1] ZHENG Y A, WANG A Q. Kapok Fiber: Applications[M]//HAKEEM K, JAWAOD M, RASHID U. Biomass & Bioenergy. [S. l.]: Springer, 2014: 252–263.
- [2] 李会改, 楚久英, 张振方, 等. 木棉絮填料睡袋的成型设计及性能测试[J]. 上海纺织科技, 2018, 46(12): 46–48, 68.
LI H G, CHU J Y, ZHANG Z F, et al. Molding design and performance of kapok-filled sleeping bag[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2018, 46(12): 46–48, 68.
- [3] ZHENG Y A, WANG J T, ZHU Y F, et al. Research and application of kapok fiber as an absorbing material: A mini review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 27(1): 21–32.
- [4] 石煜, 沈兰萍, 阳智. 木棉纤维性能及其功能织物开发研究新进展[J]. 合成纤维, 2019, 48(1): 42–45.
SHI Y, SHEN L P, YANG Z. New progress in the development of kapok fiber properties and its functional fabrics[J]. Synthetic Fiber in China, 2019, 48(1): 42–45.
- [5] LI S Y, ZHANG H, ZANG C F. The study on properties of kapok nonwoven material[J]. Advanced Materials Research, 2012, 535/537: 1487–1490.
- [6] ZHENG Y A, WANG A Q. Kapok Fiber: Structure and Properties[M]//HAKEEM K, JAWAOD M, RASHID U. Biomass & Bioenergy. [S. l.]: Springer, 2014: 101–110.
- [7] 张振方, 王梅珍, 林玲, 等. 木棉纤维基本性能研究[J]. 针织工业, 2015(8): 25–28.
ZHANG Z F, WANG M Z, LIN L, et al. Study of basic properties of kapok fiber[J]. Knitting Industries, 2015(8): 25–28.
- [8] JIANG T, DING Y, SHEN Y. Plasma modification of kapok fiber and its properties[J]. Advanced Materials Research, 2013, 821/822: 18–22.
- [9] YANG Z L, YAN J J, WANG F M. Pore structure of kapok fiber[J]. Cellulose, 2018, 25(6): 3219–3227.
- [10] DONG T, WANG F M, XU G B. Sorption kinetics and mechanism of various oils into kapok assembly[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1): 230–237.
- [11] ZHANG X Y, FU W Y, DUAN C T, et al. Superhydrophobicity determines the buoyancy performance of kapok fiber aggregates[J]. Applied Surface Science, 2013, 266: 225–229.
- [12] 楚久英, 廖师琴, 李会改. 木棉纤维性能及其应用进展[J]. 产业用纺, 2018, 36(11): 6–10.
CHU J Y, LIAO S Q, LI H G. Performance and application progress of kapok fiber[J]. Technical Textiles, 2018, 36(11): 6–10.
- [13] 张振方, 王梅珍, 林玲, 等. 木棉纤维及其絮料性能研究进展[J]. 纺织科技进展, 2015(2): 7–10.
ZHANG Z F, WANG M Z, LIN L, et al. Research progress on the performance of kapok fiber and its wadding[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2015(2): 7–10.
- [14] ZHANG X Y, DUAN C T, ZHAO N, et al. Facile fabrication of large scale microtubes with a natural template—Kapok fiber[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2010, 28(5): 841–847.
- [15] ABDULLAH M A, RAHMAH A U, MAN Z. Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1/2/3): 683–691.

- [16] WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency[J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 40: 178–184.
- [17] LIM T T, HUANG X. Evaluation of hydrophobicity/oleophilicity of kapok and its performance in oily water filtration; Comparison of raw and solvent-treated fibers[J]. *Industrial Crops & Products*, 2007, 26(2): 125–134.
- [18] TYE Y Y, LEE K T, ABDULLAH W N W, et al. Potential of *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (kapok fiber) as a resource for second generation bioethanol; Effect of various simple pretreatment methods on sugar production[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 536–539.
- [19] LIU Y, WANG J T, ZHENG Y A, et al. Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 184: 248–255.
- [20] WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Superhydrophobic kapok fiber oil-absorbent; Preparation and high oil absorbency[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 213: 1–7.
- [21] CHUNG B Y, CHO J Y, LEE M H, et al. Adsorption of heavy metal ions onto chemically oxidized *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (kapok) fibers[J]. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 2008, 51(1): 28–35.
- [22] 唐爱民, 胡婷婷, 苏霞. 利用原子力显微镜研究预处理对木棉纤维/CdS 纳米复合材料形貌结构的影响[J]. *功能材料*, 2012, 43(24): 3437–3441.
- TANG A M, HU T T, SU X. The influence of pretreatment on kapok fiber/CdS nanocomposites morphology structure by AFM[J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(24): 3437–3441.
- [23] MWAIKAMBO L Y, BISANDA E T N. The performance of cotton-kapok fabric-polyester composites[J]. *Polymer Testing*, 1999, 18(3): 181–198.
- [24] WANG J T, WANG A Q. Acetylated modification of kapok fiber and application for oil absorption[J]. *Fibers and Polymers*, 2013, 14(11): 1834–1840.
- [25] CHUNG B Y, HYEONG M H, AN B C, et al. Flame-resistant kapok fiber manufactured using gamma ray[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2009, 78(7/8): 513–515.
- [26] 唐爱民, 王鑫, 陈港, 等. 天然木棉纤维/磁性纳米粒子原位复合反应特性研究[J]. *材料工程*, 2008(10): 80–84.
- TANG A M, WANG X, CHEN G, et al. Study on characteristics of in-situ composition of nature kapok fibers/magnetic nano-particles[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(10): 80–84.
- [27] DONG T, XU G B, WANG F M. Adsorption and adhesiveness of kapok fiber to different oils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 296: 101–111.
- [28] ALI N, EL-HARBAWI M, JABAL A A, et al. Characteristics and oil sorption effectiveness of kapok fibre, sugarcane bagasse and rice husks: Oil removal suitability matrix[J]. *Environmental Technology*, 2012, 33(4): 481–486.
- [29] DONG T, CAO S B, XU G B. Highly porous oil sorbent based on hollow fibers as the interceptor for oil on static and running water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 305: 1–7.
- [30] WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Investigation of acetylated kapok fibers on the sorption of oil in water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(2): 246–253.
- [31] 岳新霞, 宁晚娥, 蒋芳, 等. 木棉纤维改性及吸油性能研究[J]. *上海纺织科技*, 2017, 45(12): 57–61.
- YUE X X, NING W E, JIANG F, et al. Modification and oil adsorption property of kapok fibers[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2017, 45(12): 57–61.
- [32] WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Superhydrophobic kapok fiber oil-absorbent; Preparation and high oil absorbency[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 213: 1–7.
- [33] ZHENG Y A, CAO E J, TU L X, et al. A comparative study for oil-absorbing performance of octadecyltrichlorosilane treated *Calotropis gigantea* fiber and kapok fiber[J]. *Cellulose*, 2017, 24(2): 989–1000.
- [34] WANG J T, ZHENG Y A, KANG Y R, et al. Investigation of oil sorption capability of PBMA/SiO₂ coated kapok fiber[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 223: 632–637.
- [35] WANG J, GENG G, LIU X, et al. Magnetically superhydrophobic kapok fiber for selective sorption and continuous separation of oil from water[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 115: 122–130.
- [36] WANG J T, WANG W B, WANG A Q. Robustly superhydrophobic/superoleophilic kapok fiber with ZnO nanoneedles coating: Highly efficient separation of oil layer in water and capture of oil droplets in oil-in-water emulsions[J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 108: 303–311.
- [37] KANG P H, JEUN J P, CHUNG B Y, et al. Preparation and characterization of glycidyl methacrylate (GMA) grafted kapok fiber by using radiation induced-grafting technique[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2007, 13(6): 956–958.
- [38] 王锦涛, 郑易安, 王爱勤. 木棉纤维接枝聚苯乙烯吸油材料的制备及性能[J]. *功能高分子学报*, 2012(1): 28–33.
- WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Preparation and properties of kapok-g-polystyrene oil absorbent[J]. *Journal of Functional Polymers*, 2012(1): 28–33.
- [39] WANG J T, ZHENG Y A, WANG A Q. Coated kapok fiber for removal of spilled oil[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 69(1/2): 91–96.
- [40] THILAGAVATHI G, PRABA KARAN C, THENMOZHI R. Development and investigations of kapok fiber based needle punched nonwoven as eco-friendly oil sorbent[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2020, 17(1): 18–27.

- [41] DONG T, WANG F M, XU G B. Sorption kinetics and mechanism of various oils into kapok assembly[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1): 230–237.
- [42] DONG T, WANG F M, XU G B. Theoretical and experimental study on the oil sorption behavior of kapok assemblies[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 61: 325–330.
- [43] DONG T, CAO S B, XU G B. Highly efficient and recyclable depth filtering system using structured kapok filters for oil removal and recovery from wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 859–867.
- [44] DONG T, CAO S B, XU G B. Highly porous oil sorbent based on hollow fibers as the interceptor for oil on static and running water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 305: 1–7.
- [45] 王圣平, 周权, 周成冈, 等. 锂硫电池硫电极的研究现状[J]. 电池, 2010, 40(4): 232–235.
WANG S P, ZHOU Q, ZHOU C G, et al. Research status quo of sulfur electrode for lithium/sulfur battery [J]. Battery Bimonthly, 2010, 40(4): 232–235.
- [46] 杨果, 马壮, 杨绍斌, 等. 锂硫电池硫基碳正极材料的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(增刊1): 311–318.
YANG G, MA Z, YANG S B, et al. Research progress of sulfur-based carbon cathode materials in lithium-sulfur batteries [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(S1): 311–318.
- [47] XI K, KIDAMBI P R, CHEN R J, et al. Binder free three-dimensional sulphur/few-layer graphene foam cathode with enhanced high-rate capability for rechargeable lithium sulphur batteries[J]. Nanoscale, 2014, 6(11): 5746–5753.
- [48] TAO X Y, ZHANG J T, XIA Y, et al. Bio-inspired fabrication of carbon nanotiles for high performance cathode of Li-S batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(7): 2290–2296.
- [49] MU B, ZHANG W B, XU W B, et al. Hollowed-out tubular carbon@MnO₂ hybrid composites with controlled morphology derived from kapok fibers for supercapacitor electrode materials[J]. Electrochimica Acta, 2015, 178: 709–720.
- [50] LU X F, WANG A L, XU H, et al. High-performance supercapacitors based on MnO₂ tube-in-tube arrays[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(32): 16560–16566.
- [51] ZHANG J, LIU F, CHENG J P, et al. Binary Nickel-cobalt oxides electrode materials for high-performance supercapacitors; Influence of its composition and porous nature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(32): 17630–17640.
- [52] WU M S, ZHENG Z B, LAI Y S, et al. Nickel cobaltite nanograss grown around porous carbon nanotube-wrapped stainless steel wire mesh as a flexible electrode for high-performance supercapacitor application[J]. Electrochimica Acta, 2015, 182: 31–38.
- [53] WANG Z L, ZHU Z L, QIU J H, et al. High performance flexible solid-state asymmetric supercapacitors from MnO₂/ZnO core-shell nanorods// specially reduced graphene oxide[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(7): 1331–1336.
- [54] BI Z H, KONG Q Q, CAO Y F, et al. Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes; A review [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(27): 16028–16045.
- [55] WANG J R, WAN F, LÜ Q F, et al. Self-nitrogen-doped porous biochar derived from kapok (*Ceiba insignis*) fibers; Effect of pyrolysis temperature and high electrochemical performance[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(10): 1959–1968.
- [56] CAO Y F, XIE L J, SUN G H, et al. Hollow carbon microtubes from kapok fiber; Structural evolution and energy storage performance[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2018, 2(2): 455–465.
- [57] XU W B, MU B, WANG A Q. Facile fabrication of well-defined microtubular carbonized kapok fiber/NiO composites as electrode material for supercapacitor[J]. Electrochimica Acta, 2016, 194: 84–94.
- [58] XU W B, MU B, WANG A Q. Three-dimensional hollow microtubular carbonized kapok fiber/cobalt-nickel binary oxide composites for high-performance electrode materials of supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2017, 224: 113–124.
- [59] XU W B, MU B, WANG A Q. All-solid-state high-energy asymmetric supercapacitor based on natural tubular fibers[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(16): 11659–11670.
- [60] XIANG H F, WANG D, LIUA H C, et al. Investigation on sound absorption properties of kapok fibers[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2013, 31(3): 521–529.
- [61] LIU X T, LI L, YAN X, et al. Sound-absorbing properties of kapok fiber nonwoven composite at low-frequency[J]. Advanced Materials Research, 2013, 821/822: 329–332.
- [62] LIU X T, YAN X, LI L, et al. Sound-absorption properties of kapok fiber nonwoven fabrics at low frequency[J]. Journal of Natural Fibers, 2015, 12(4): 311–322.
- [63] GANESAN P, KARTHIK T. Development of acoustic nonwoven materials from kapok and milkweed fibres[J]. The Journal of The Textile Institute, 2016, 107(4): 477–482.
- [64] KAAMIN M, MAHIR N S M, KADIR A A, et al. Sound absorption study on acoustic panel from kapok fiber and egg tray[J/OL]// AIP Conference Proceedings, 2017, 1901: 130012-1–130012-7[2019-01-13]. <http://doi.org/10.1063/1.5010572>.