

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021183

木基多孔油水分离材料研究进展

管浩, 戴鑫建, 王鑫, 王小青

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 随着水体油类污染造成的环境和健康危害问题日益严重, 开发高效、低成本且绿色环保的油水分离材料受到越来越多的关注。木材作为一种可持续、可再生、可生物降解的环境友好型天然材料, 具有多尺度分级结构、高度各向异性、丰富的孔隙构造以及结构可调控等特点。

直接利用木材的层级多孔结构, 通过“自上而下”策略对木材的化学组成、孔隙结构以及表面润湿性进行调控, 可为开发高性能油水分离材料提供新思路和新方法。本文从过滤和吸附两种主要的油水分离方式出发, 介绍近年来基于天然木材的多孔过滤膜和吸油材料的构建策略, 并综述这两类木基功能材料用于分离不混溶油水混合物、油水乳液和水面高黏度原油的最新研究进展, 讨论存在的问题以及未来潜在的研究方向。

关键词: 木材; 孔隙结构; 润湿性; 油水分离; 过滤膜; 吸油材料

中图分类号: S781; TB34; X703

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 01-0001-08

Research Review of Wood-Based Porous Materials for Oil/Water Separation

GUAN Hao, DAI Xin-jian, WANG Xin, WANG Xiao-qing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: With the increasingly serious environmental pollution and health hazards caused by oil contaminated water, the development of high-efficiency, low-cost, and green oil/water separation materials has attracted more and more attention. As a sustainable, renewable, and biodegradable environment-friendly natural material, wood possesses many advantageous features such as multi-scale hierarchical structure, high anisotropy, abundant pore structure, and diverse tunability. Taking advantage of its hierarchical porous structure directly, wood can be deliberately tuned in terms of its chemical composition, pore structure, and surface wettability through the "top-down" strategy, which can provide new ideas and methods for the development of high-performance oil/water separation materials. In this review, based on the two main oil-water separation methods of filtration and adsorption, the strategies for constructing wood-derived porous filter membranes and oil-absorbing materials in recent years are introduced. The latest research progress is summarized in using these two kinds of wood-based functional materials for separating immiscible oil/water mixtures, oil-water emulsions, and high-viscosity crude oils on water surface. In addition, the existing problems in the research of the wood-based porous oil/water separation materials and the perspectives of the future research direction are also discussed.

Key words: wood; pore structure; wettability; oil/water separation; filter membranes; oil-absorbing materials

收稿日期: 2021-12-28; 修改日期: 2022-01-03

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金“木材细胞壁骨架结构的精准调控与功能化应用”(CAFYBB2020QA004)。

作者简介: 管浩 (1993—), 男, 博士研究生。

通讯作者: 王小青, 男, 研究员。Email: wangxq@caf.ac.cn

随着生产生活中含油废水的大量排放以及海上原油泄漏事故的频发,水体油污染问题日益严重,已严重威胁生态环境和人类健康,因此有效解决油污染问题迫在眉睫。传统的油水分离方法如重力沉降法、离心法、化学法,普遍存在能耗高、分离效率低等问题^[1]。与传统的分离技术相比,具有特殊表面润湿性(疏水/亲油、亲水/疏油)的多孔材料因其分离效率高、操作简便等优点,成为油水分离领域的研究热点^[2-3]。目前,文献报道的油水分离材料主要分为过滤和吸附两大类。过滤材料主要包括金属滤网、聚合物膜等各类膜材料,吸附材料主要包括合成高分子海绵(聚氨酯、聚苯乙烯等)、碳基气凝胶(石墨烯、碳纳米管等)以及纤维素气凝胶等^[4-9]。以上材料虽然能有效实现油水分离,但尚存在原材料昂贵、制备工艺复杂、生物降解性差等缺点。因此,发展高效、低成本、绿色环保型油水分离材料实现含油废水的处理成为当前的研究热点。

木材作为一种可持续、可再生、可生物降解的环境友好型天然材料,具有多尺度分级结构、高度各向异性和非均质特性。此外,木材具有丰富的孔隙结构(如导管、管胞、纹孔、细胞壁微孔等),这些微/纳米级孔隙为水分在木材内的纵向和横向运输提供了主要通道。从化学组成来看,木材细胞壁是以纤维素微纤丝为增强相,木质素/半纤维素为基质的天然高分子复合材料,可以通过物理、化学或生物手段调控其结构与组成^[10-11]。木材独特的层级多孔结构及其可调控性为开发油水分离材料创造了良好的基础。近年来,基于木材的层级多孔结构,通过“自上而下”策略调控木材的化学组成、孔隙结构以及表面润湿性,制备高性能木基油水分离材料的研究备受关注^[12-14]。与传统分离材料相比,木基油水分离材料具有原料来源丰富、成本低廉、制备工艺简单、环境友好性等诸多优势,在废水处理领域展现出良好的应用前景。

本文针对过滤和吸附这两种目前常用的油水分离方式,介绍近年来基于天然木材的多孔过滤膜和吸油材料的构建策略,综述这两类木基功能材料用于分离不混溶油水混合物、油水乳液和高黏度原油的最新研究进展,讨论木基多孔油水分离

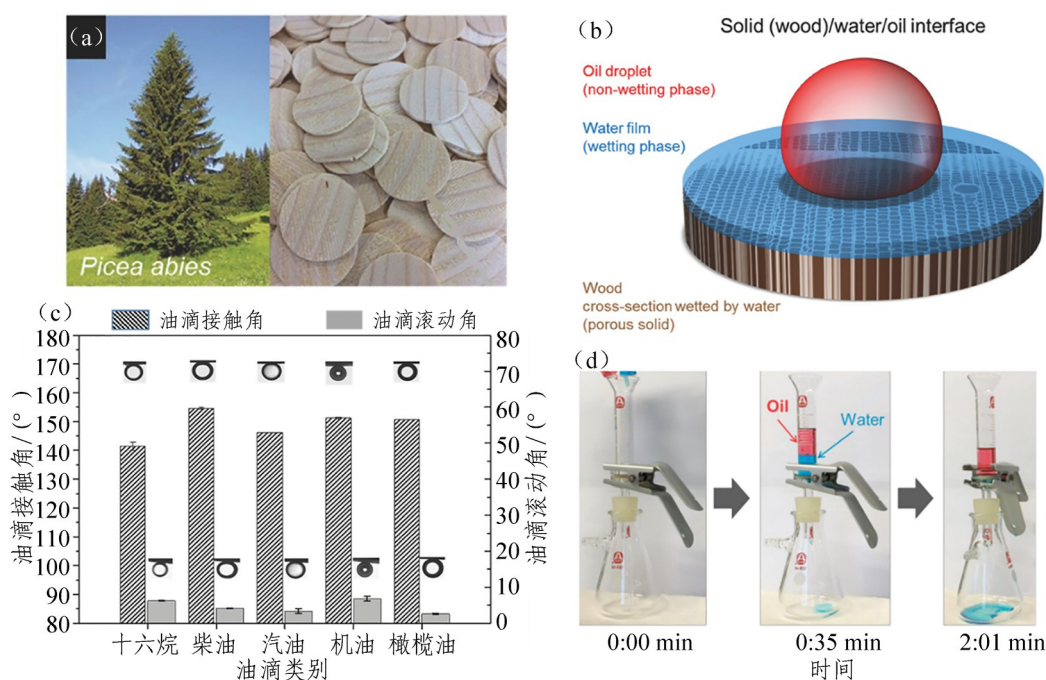
材料研究中存在的问题,并展望其未来发展趋势。

1 木质多孔过滤膜

木材主要由沿树干方向紧密排列的管状细胞(管胞、木纤维和导管等)构成,其横截面呈蜂窝状多孔结构。这些高度取向的孔道为木材中水分的纵向传输提供主要通道,而细胞壁上的纹孔是相邻细胞间水分横向移动的通道^[15]。直接利用或调控木材的层级多孔结构及其润湿性能,可以设计和构建木质多孔过滤膜,使得油水混合物中的水相或油相选择性通过,从而实现高效油水分离。

1.1 不混溶油水混合物的分离

不混溶油水混合物中油相与水相存在明显的分界线,其油滴粒径一般大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ ^[3]。若油滴密度比水小,静置后会上浮至水面形成连续油膜或油层,即浮油;如果油滴密度比水大,会在水底聚集形成大油滴。Blanco等^[16]直接采用 1 mm 厚欧洲云杉(*Picea abies*)木材横切片为过滤膜,利用木材细胞腔的流体定向传输特性以及细胞壁组分的亲水性和水下超疏油特性,实现了不混溶油水混合物的高效分离(图1)。木材在预先润湿的情况下表面会形成一层连续的水膜,阻止油相与木材表面的接触,因此木质过滤膜在重力驱动下能使水相选择性通过而截留油相,其油水分离效率高达99%,水通量达 $3\text{ }500\text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ 。此外,作者对比了欧洲水青冈(*Fagus sylvatica*)和云杉木材过滤膜的油水分离性能。与云杉木材不同,山毛榉木材具有丰富的导管组织,孔隙结构发达,其过滤膜具有更高的水通量($6\text{ }500\text{ L/m}^2\cdot\text{h}$),但其油相的突破压力相对较低,使得油相易随水相透过水膜,从而导致油水分离失效。木质过滤膜利用木材天然的孔隙构造和润湿特性即可实现高效油水分离,无需任何化学改性或功能化修饰。为了进一步提升木质过滤膜的水通量,实现油水混合物的快速分离,YONG等^[17]利用计算机辅助人工钻孔技术在轻木纵切面上构建了直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙阵列。人工造孔能显著提高木材过滤膜的水通量,且随着单位面积孔隙数量的增加,过滤膜的水通量急剧提升,最高可达 $1.77\times 10^4\text{ L/m}^2\cdot\text{h}$,造孔的密集程度基本不影响过滤膜对油相的突破压力。



a 欧洲云杉木材; b 木材/水/油三相界面; c 水下各类油滴的接触角与滚动角; d 油水混合物的选择性分离。

图1 木质过滤膜的润湿性能及其对油水混合物的选择性分离^[16]

Fig.1 Wettability of the wood-based porous filter membrane and its selective separation of oil/water mixtures

然而，工业废水和生活污水中除了含有不溶于水的油类，还伴有水溶性有机染料、重金属离子等污染物，同时实现油水分离和水溶性有机染料的去除是当前废水处理面临的挑战之一。CHENG 等^[18]以轻木 (*Ochroma spp.*) 为原料，采用银氨溶液原位还原法在木材细胞孔道内壁负载金属银 (Ag) 纳米催化剂，构建 Ag/木材复合过滤膜，可以同时实现油水分离和亚甲基蓝的催化降解。得益于木材天然的孔道结构及其超亲水/水下超疏油特性，该木质复合过滤膜能够仅在重力驱动下有效分离甲苯、正己烷、橄榄油等各类油水混合物，分离效率高达 99%；利用 Ag 纳米粒子的催化活性，木质复合过滤膜能够有效催化降解水中亚甲基蓝，降解效率高达 94%。

1.2 油水乳液分离

工业废水和生活污水中很多油性污染物是以乳液的形式存在的，油滴作为分散相分散到水相中，乳化油尺寸较小且分布较广（几十纳米到几微米）^[19]。当混合液中含有表面活性剂时，油水间的界面张力将显著降低，形成更加稳定的油水乳液。与不混溶油水混合物相比，油水乳液的分离难度更大。根据水相与油相的比例，油水乳液可分为“水包

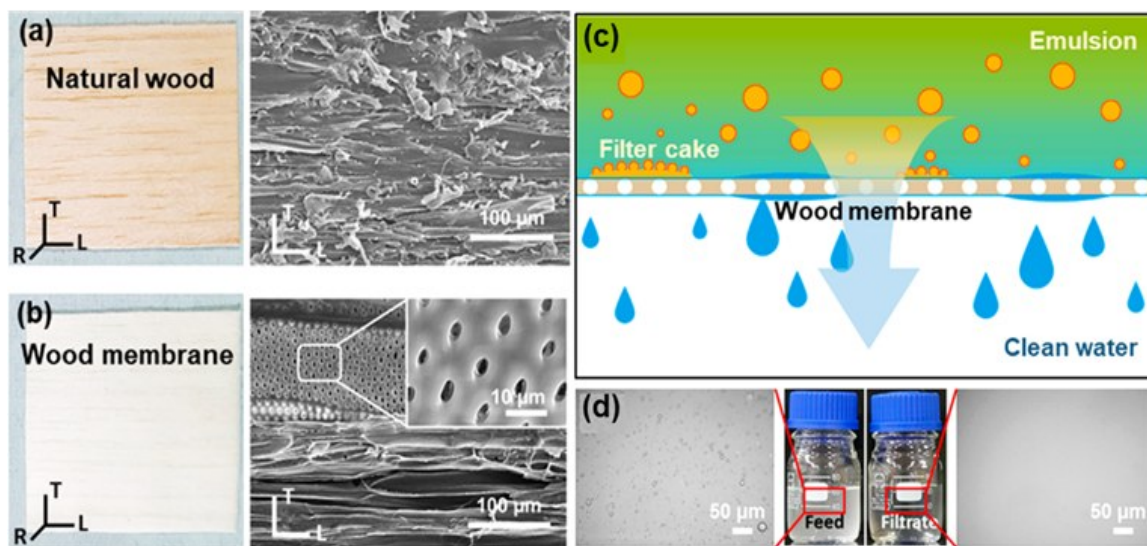
油”或“油包水”乳液。当水相比比例高于油相，油以小液滴的形式分散在水中，形成“水包油”乳液；反之，当水相比比例低于油相，形成“油包水”乳液^[20]。

分离油水乳液最重要的是先破乳，而过滤膜的孔径是实现破乳的关键^[21]。只有当过滤膜的孔径小于乳液中油滴或水滴的粒径时，才能够阻挡乳液中油滴或水滴透过，从而实现油水乳液分离。木材的细胞孔径分布在几十至上百微米范围内，远大于乳液中油滴或水滴的粒径，因此很难实现破乳。通过调控木材的润湿性能，制备超疏水/超亲油型木质过滤膜，利用材料的“尺寸筛分”效应可以实现“油包水”乳液的分离。BAI 等^[22]在松木 (*Pinus spp.*) 横切片表面构建具有微/纳米级粗糙结构的氢氧化铜涂层，并利用十二烷基硫醇刻蚀微观结构，同时赋予其低表面能，构建超疏水木质过滤膜。当过滤膜被油预润湿时，油立即扩散并渗透到木膜中，在木膜表面形成稳定的油-固复合界面，从而阻止水滴与木材表面的直接接触。在重力和毛细管力驱动下，木质过滤膜利用“尺寸筛分”效应有效拦截“油包水”乳液中的水滴而使油相顺利通过，从而实现油水乳液的分离，其分离效率高达 98%。

另外,通过在木材细胞腔中负载纳米材料,调节细胞孔径至恰当尺寸,构建超亲水/超疏油型木质过滤材料,可用来分离“水包油”乳液。受植物蒸腾作用的启发,WANG等^[23]以多孔轻木为原料,通过在细胞腔内填充多孔聚乙烯醇,调控木材孔隙范围至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内,并将碳纳米管负载于材料表面,构建了具有均一孔隙结构且孔径较小的木基太阳能蒸汽发生装置,用于油水乳液分离。该装置以填充聚乙烯醇的多孔轻木为水传输层,碳纳米管为光热转化层,在太阳能驱动下,蒸发水分的同时截留“水包油”乳液中的油滴,从而实现油水乳液的连续分离,分离效率高达99.7%。该木质过滤材料还具有较高的机械稳定性、耐酸碱性及重复使用性。这种以太阳能为唯一能量输入源的木基油水乳液分离策略,为实现绿色高效油水分离提供了新思路。

木材细胞壁上的纹孔是相邻细胞间水分和营养物质横向传输的主要通道,其尺寸通常在 $10\text{ }\mu\text{m}$

以下。此外,纹孔膜上还存在大量纳米级孔隙。KIM等^[24]以轻木纵向薄片为原料,通过简单的化学处理部分脱除木质素和半纤维素成分,制备了具有超亲水/水下超疏油性的木质过滤膜。化学处理基本保留了木材蜂窝状细胞结构和纹孔结构,并且材料的亲水性增强,柔韧性得到改善。木质过滤膜的微孔及其润湿特性赋予其渗透选择性。当“水包油”乳液在重力驱动下通过木质过滤膜时,木膜上的纹孔能够使得油水乳液破乳,并且选择性让水分通过而截留油滴,从而实现油水乳液分离(图2)。尺寸大于纹孔的油滴不能透过木膜,只能在木膜表面形成“滤饼”,而水则很容易通过木膜。此外,即使油滴尺寸比木膜孔隙小,所形成的“滤饼”也能防止油滴通过。该木质过滤膜在 $460.8\text{ L/m}^2\cdot\text{h}$ 水通量下,其油水乳液分离效率高达99.43%,且木膜经过10次循环利用,分离效率和水通量基本保持不变。木材纹孔微纳孔隙结构为“水包油”乳液的分离提供了新途径。



a 轻木纵向薄片及其微观形貌;b 化学处理轻木纵向薄片及其微观形貌;c 纹孔破乳示意图;d 乳液分离效果。

图2 木质过滤膜用于油水乳液分离^[24]

Fig.2 Wood-based porous filter membrane for oil/water emulsion separation

2 木基多孔吸油材料

除了过滤,吸附是另外一种行之有效的油水分离方式。具有特殊表面润湿性(疏水亲油)的多孔吸附材料能够选择性吸附油水混合物中的油污,从而实现油水分离。木材具有多尺度孔隙构造,因而可以被视为一种天然的吸附材料。然而,

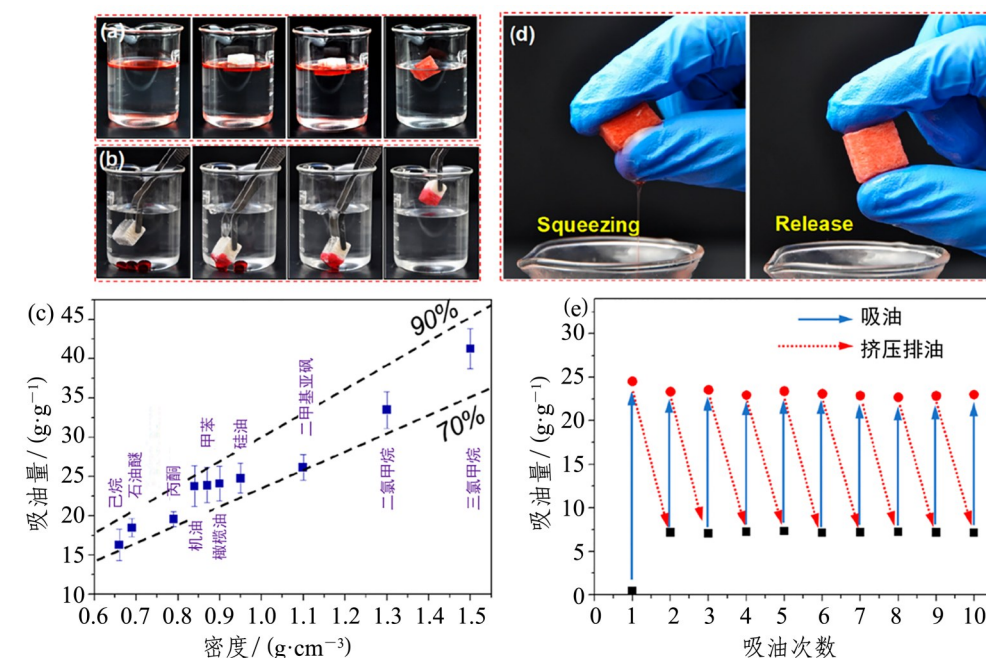
由于木材的孔隙度有限,渗透性较差,不适合直接用作吸油材料。选择性脱除木质素可以在保留木材细胞结构的基础上,在木材细胞壁中产生大量纳米级孔隙,提高其孔隙率和比表面积,从而极大提升材料的吸油量^[25-29]。目前文献报道的木基多孔吸油材料主要用于吸附低黏度油和高黏度原油。

2.1 低黏度油吸附

常见的油类或有机溶剂, 如硅油、植物油、己烷、丙酮等黏度低, 流动性好, 可在毛细管力作用下渗透并填充到木基多孔材料的孔隙中, 实现对低黏度油的吸附。

FU等^[30]通过亚氯酸钠/醋酸溶液体系对轻木进行选择脱木素处理, 然后灌注环氧树脂, 构建了木材/环氧树脂复合材料。环氧树脂灌注提升了复合材料的抗压强度和弹性模量, 同时也赋予材料疏水亲油性能。轻木脱木素后产生大量微/纳米级孔隙, 孔隙度从88.9%提升至93.3%, 比表面积从1.3 m²/g提升至21 m²/g, 因此该复合材料对硅油、二氯甲烷、甲苯等多种油类均有良好的吸附效果, 吸附量最高可达15 g/g。木质素的脱除虽然提升了木材孔隙度, 但是环氧树脂灌注在一定程度上降低了材料的孔隙度, 导致其吸油量较低。此外, 环氧树脂灌注也限制了该木质吸油材料的

重复利用(只能通过萃取、蒸馏方式回收吸附的油)。GUAN等^[31]通过化学处理有序剥离出木材细胞壁中木质素和半纤维素, 经冷冻干燥制备得到密度低、孔隙度高、具有“波浪形”层状结构的木材海绵, 并采用化学气相沉积法在木材海绵纤维素骨架表面构建聚硅氧烷超疏水涂层, 获得具有高压压缩弹性的木材海绵吸油材料。硅烷化木材海绵能选择性吸附水面浮油和水底重油, 且对各类油及有机溶剂均有良好的吸附性能, 吸油量为16~41 g/g(图3)。硅烷化木材海绵具有良好的压缩回弹性, 可以通过挤压排油的方法回收吸附的油, 且经过多次挤压吸油量基本保持不变, 展现出良好的回收性能和重复使用性能。利用该材料的液体传输各向异性特性, 研究者以硅烷化木材海绵为过滤膜设计了连续吸油装置, 实现水面浮油的连续、高效收集。该研究为开发新型生物基吸油材料提供了新思路。



a 浮油吸附; b 水底重油吸附; c 木材海绵对各种油和有机溶剂的吸附量; d 挤压排油; e 重复使用性能。

图3 木材海绵的吸油性能^[31]

Fig.3 Absorbing performance of wood sponges for oil

2.2 高黏度原油吸附

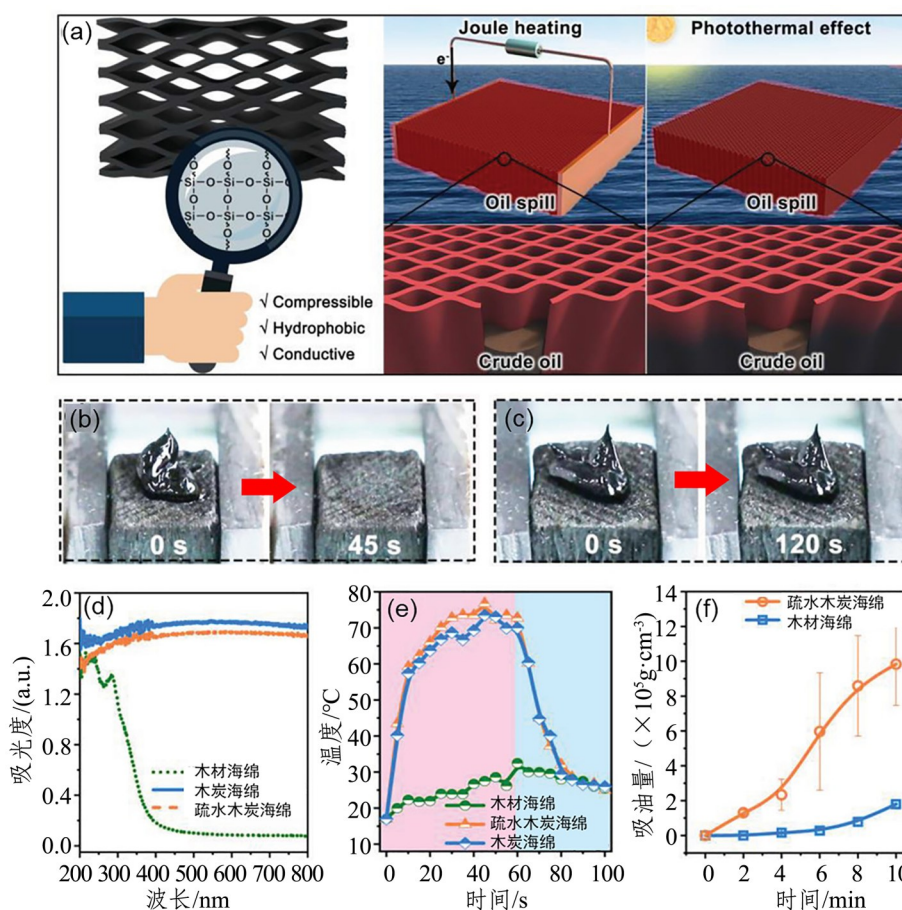
多孔疏水亲油材料仅对低黏度油品具有良好的吸附效果, 而对原油的吸附比较困难。与低黏度油的吸附相比, 原油在常温下具有高黏度特点(10³~10⁵ mPa·s)而导致其流动性较差, 不能快速

渗入吸附材料的内部, 极大限制了材料对原油的吸附效率^[32]。因此, 需要采取有效措施解决高黏度原油在多孔疏水亲油材料内部扩散慢的难题。通过对原油进行加热升温可以有效降低其黏度, 增加其流动性, 从而提升材料对原油的吸附效率。

目前,原油加热升温的策略主要有电热法和光热法。HUANG等^[33]在多孔木材海绵骨架上负载还原氧化石墨烯(rGO),随后用氟硅烷进行疏水改性,利用导电石墨烯的焦耳热效应,制备出具有原位加热功能的疏水亲油木材海绵,实现了对高黏度原油的高效吸附回收。在导电木材海绵两端加载电压即可产生大量焦耳热,快速加热高黏度原油,改善原油的流动性,使其快速扩散至多孔木材海绵内部,从而加速对原油的吸附。然而,这种电热转化的策略需要外接电源,消耗大量电能,增加了原油回收成本。此外,由于施加额外电压,这种直接接触式加热方式存在一定的危险。

作为一种非接触式加热方式,太阳光诱导的光热效应也可用于原油加热降粘。木材海绵多孔骨架通过负载rGO^[34]、MXene^[35]等光热转化材料,

可以实现原油的高效吸附。CHAO等^[34]在多孔木材海绵骨架上负载rGO,利用rGO优良的光热转化能力,使木材海绵的表面温度在短短100 s内迅速提高到88 °C。高黏度原油在此温度下黏度明显降低,流动性增加,迅速渗入木材海绵内部,其饱和吸附量达7.28 g/g。而且,由于木材海绵的压缩弹性,吸附的原油可通过简单的机械挤压法回收,实现吸油材料的重复利用。然而,太阳能光热加热装置无法在夜晚或光照不足的地区运行。因此,同时赋予木基吸油材料电热转换和光热转换功能,对实现原油的高效吸附具有现实意义。WU等^[36]通过高温碳化和聚二甲基硅氧烷(PDMS)修饰制备了集电热转化和光热转化功能为一体的疏水木炭海绵(PDMS@WCS),用于原油的快速吸附(图4)。



a基于焦耳热和光热效应的原油高效吸附;b加载电压时木炭海绵对原油的吸附;c未加载电压时木炭海绵对原油的吸附;d不同材料的紫外-可见光吸收光谱;e模拟太阳光照下材料表面的升温过程;f模拟太阳光照下材料的吸油量随时间变化。

图4 疏水木炭海绵的原油吸附性能^[36]

Fig.4 Adsorption performance of PDMS@WCS for crude oil

该木炭海绵在4 V工作电压下可快速升温至70 °C, 显著降低原油的黏度, 从而提高木炭海绵对原油的吸附效率。此外, 木炭海绵具有较高的光热转化效率, 当暴露在模拟日光下(光照强度1.5 kW/m²), 其表面温度可快速升至75 °C, 实现原油的加热降粘和高效吸附。木炭海绵的层状孔道结构通过毛细管效应为原油吸附提供了必要的驱动力, 同时有效降低了吸附过程中的传质阻力。这种新型木炭海绵为全天候高效油水分离和快速原油吸附提供了崭新的思路。

3 展望

木质过滤膜和木基多孔吸油材料能够有效分离各种油水混合物, 同时具有原料来源丰富、成本低廉、制备工艺简单、环境友好性等优点, 在含油废水处理领域具有广阔的应用前景。然而, 当前木材基油水分离材料仍然存在诸多问题需要深入研究, 未来的研究重点在于:

1) 改善木质过滤膜的抗污性能和耐久性。木质过滤膜在实际油水分离应用中容易受各种污染物(无机盐、油污、表面活性剂和染料等)的影响, 造成木材孔隙堵塞, 破坏材料表面润湿性, 使得水通量下降, 油水分离效率降低。此外, 木材作为一种生物质材料, 在实际应用过程中容易受高温、强酸强碱、微生物等环境因素的影响发生老化、腐朽和降解。因此, 开发具有抗污能力和耐久性的木质过滤膜材料十分必要。

2) 提高木基多孔吸油材料的吸油性能。目前文献报道的木基多孔吸油材料的吸油量总体较低(小于50 g/g), 远低于纳米纤维素气凝胶、碳基气凝胶等吸附材料的吸油量(一般大于100 g/g)。因此, 需要通过物理、化学或生物手段精确调控木材的微观形貌、化学组成及孔隙结构, 创制具有更低密度、更高孔隙度和比表面积的木材气凝胶或海绵, 进一步提升材料的吸油性能。

3) 发展高效的原油加热降黏方法。目前对高黏度原油进行加热降黏的策略主要有电热法和光热法。电热法需要外接电源, 消耗大量电能, 增加了原油回收成本, 且这种直接接触式加热方式存在一定的危险; 利用光热效应虽然能实现原油

加热, 但由于光热转化效率总体较低, 且木基吸油材料的加热升温主要限于表面, 导致对材料整体的加热效果一般。因此, 需要发展更加高效的非接触式原油加热方法(如磁加热), 以实现高黏度原油的连续有效清理。

4) 开发多功能木基油水分离材料。目前木基油水分离材料功能相对单一, 主要处理纯的油水混合物。而实际生产生活中含油废水的成分相当复杂, 除了油水混合物, 还存在有机染料、重金属离子、蛋白质和细菌等各种污染物。开发多功能木基油水分离材料, 同时实现多种污染物的有效去除, 对于实际生产生活中含油废水的处理具有很大优势。

5) 开发智能响应型木基油水分离材料。智能响应型油水分离材料具有特殊界面润湿特性, 当外界条件(pH值、温湿度、光照条件、磁场等)变化时, 材料对油/水润湿特性交替转换, 可实现连续、自动化吸油/排油。发展智能响应型木基油水分离材料对于提升油水分离效率、降低分离过程中的能耗具有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨蕊, 曹清华, 洪枢, 等. 纤维素基油水分离材料的研究现状[J]. 林业工程学报, 2020, 5(5): 13-20.
YANG R, CAO Q H, HONG S, et al. Review of oil-water separation materials based on cellulose[J]. Journal of Forestry Engineering, 2020, 5(5): 13-20.
- [2] GE J, ZHAO H Y, ZHU H W, et al. Advanced sorbents for oil-spill cleanup: recent advances and future perspectives[J]. Advanced Materials, 2016, 28(47): 10459-10490.
- [3] 王延华. 功能吸附材料的制备及其在油水分离中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2021.
- [4] ZHU Q, CHU Y, WANG Z K, et al. Robust superhydrophobic polyurethane sponge as a highly reusable oil-absorption material[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(17): 5386-5393.
- [5] Karatum O, Steiner S A III, Griffin J S, et al. Flexible, mechanically durable aerogel composites for oil capture and recovery[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(1): 215-224.
- [6] Bi H C, Xie X, Yin K B, et al. Spongy graphene as a highly efficient and recyclable sorbent for oils and organic solvents[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(21): 4421-4425.
- [7] GUI X C, WEI J Q, WANG K L, et al. Carbon nanotube sponges[J]. Advanced Materials, 2010, 22(5): 617-621.
- [8] Mulyadi A, Zhang Z, Deng Y L. Fluorine-free oil absorbents made from cellulose nanofibril aerogels[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(4): 2732-2740.
- [9] ZHOU S K, LIU P P, WANG M, et al. Sustainable, reusable, and superhydrophobic aerogels from microfibrillated cellulose for highly effective oil/water separation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4(12): 6409-6416.

- [10] 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.
- [11] CHEN C J, HU L B. Nanoscale ion regulation in wood-based structures and their device applications[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(28): e2002890.
- [12] Berglund L A, Burgert I. Bioinspired wood nanotechnology for functional materials[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(19): e1704285.
- [13] CHEN X, ZHU X B, HE S M, et al. Advanced nanowood materials for the WATER-Energy Nexus[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(28): e2001240.
- [14] FANG Y, JING C Y, LI G L, et al. Wood-derived systems for sustainable oil/water separation[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2021, 5(7): 2100039.
- [15] 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.
- [16] Vidiella del Blanco M, Fischer E J, Cabane E. Underwater superoleophobic wood cross sections for efficient oil/water separation [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(21): 1700584.
- [17] YONG J L, CHEN F, HUO J L, et al. Green, biodegradable, wnderwater superoleophobic wood sheet for efficient oil/water separation[J]. *ACS Omega*, 2018, 3(2): 1395-1402.
- [18] CHENG Z Y, GUAN H, MENG J W, et al. Dual-functional porous wood filter for simultaneous oil/water separation and organic pollutant removal[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(23): 14096-14103.
- [19] 左继浩, 陈嘉慧, 文秀芳, 等. 用于分离油水乳液的先进材料[J]. *化学进展*, 2019, 31(10): 1440-1458.
- ZUO J H, CHEN J H, WEN X F, et al. Advanced materials for separation of oil/water emulsion[J]. *Progress in Chemistry*, 2019, 31(10): 1440-1458.
- [20] ZHANG W F, LIU N, CAO Y Z, et al. Superwetting porous materials for wastewater treatment: from immiscible oil/water mixture to emulsion separation[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(10): 1600029.
- [21] 戴国琛, 张泽天, 高文伟, 等. 油水乳液分离吸附材料的分离原理、构建方法和分离性能[J]. *化工进展*, 2019, 38(4): 1785-1793.
- DAI G C, ZHANG Z T, GAO W W, et al. Separation principle, fabrication strategies and performance of sorbents for oil-water emulsions[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(4): 1785-1793.
- [22] BAI X G, SHEN Y Q, TIAN H F, et al. Facile fabrication of superhydrophobic wood slice for effective water-in-oil emulsion separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 210: 402-408.
- [23] WANG Z B, GUO P, HENG L P, et al. Nano/submicrometer-emulsion oily wastewater treatment inspired by plant transpiration[J]. *Matter*, 2021, 4(4): 1274-1286.
- [24] Kim S, Kim K, Jun G, et al. Wood-nanotechnology-based membrane for the efficient purification of oil-in-water emulsions[J]. *ACS Nano*, 2020: 2020Dec3.
- [25] LIU Y, HUANG Y H, HUANG Q F, et al. Liquid-phase deposition functionalized wood sponges for oil/water separation[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(34): 19075-19092.
- [26] WANG K L, LIU X R, TAN Y, et al. Two-dimensional membrane and three-dimensional bulk aerogel materials via top-down wood nanotechnology for multibehavioral and reusable oil/water separation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 371: 769-780.
- [27] WU M B, HONG Y M, LIU C, et al. Delignified wood with unprecedented anti-oil properties for the highly efficient separation of crude oil/water mixtures[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(28): 16735-16741.
- [28] YANG R, CAO Q H, LIANG Y Y, et al. High capacity oil absorbent wood prepared through eco-friendly deep eutectic solvent delignification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 401: 126150.
- [29] ZHU Z D, FU S Y, LUCIA L A. A fiber-aligned thermal-managed wood-based superhydrophobic aerogel for efficient oil recovery[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(19): 16428-16439.
- [30] FU Q L, ANSARI F, ZHOU Q, et al. Wood nanotechnology for strong, mesoporous, and hydrophobic biocomposites for selective separation of oil/water mixtures[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(3): 2222-2230.
- [31] 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.
- [32] GE J, SHI L, WANG Y C, et al. Joule-heated graphene-wrapped sponge enables fast clean-up of viscous crude-oil spill[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(5): 434-440.
- [33] HUANG W, ZHANG L, LAI X J, et al. Highly hydrophobic F-rGO@wood sponge for efficient clean-up of viscous crude oil[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 386: 123994.
- [34] CHAO W X, WANG S B, LI Y D, et al. Natural sponge-like wood-derived aerogel for solar-assisted adsorption and recovery of high-viscous crude oil[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 400: 125865.
- [35] WANG P L, MA C, YUAN Q, et al. Novel Ti3C2Tx MXene wrapped wood sponges for fast cleanup of crude oil spills by outstanding Joule heating and photothermal effect[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 606: 971-982.
- [36] WU M B, HUANG S, LIU T Y, et al. Compressible carbon sponges from delignified wood for fast cleanup and enhanced recovery of crude oil spills by joule heat and photothermal effect[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(3): 2006806.

(本文编校 向 琴)