

# 糠醛渣纤维素气凝胶的制备及其油水分离性能研究

赵美箐, 朱春山\*, 孙万鹏, 张宾朋, 张妙楠, 黄 帅  
(河南工业大学化学化工学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**以糠醛渣中提取的纤维素(Cel)为原料,与聚乙烯醇(PVA)和海藻酸钠(SA)混合,采用冻融法和Ca<sup>2+</sup>交联法,冷冻干燥得到Cel/PVA/SA气凝胶,进一步用甲基三氯硅烷(MTCS)疏水改性得到Cel/PVA/SA@MTCS材料。Cel/PVA/SA@MTCS材料的密度为0.035 g/cm<sup>3</sup>,孔隙率高达97.1%,与水的接触角可达154.5°。该材料对各种油和有机溶剂的吸收量达到36~65 g/g;经过10次循环使用后,对大豆油和真空泵油的吸油量分别为最初吸油量的79%、74%,并且在1000 r/min转速下离心10 min后,其对大豆油和真空泵油的保油率分别达到76%、80%。该材料优异的吸油性能、良好的油水分离效果和漂浮性,为开发高性能、低成本、可循环利用的油水分离材料提供了一种极富潜力的新路线。

**关键词:**糠醛渣;纤维素;气凝胶;疏水改性;油水分离

中图分类号:TQ427.26

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0321-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.058

## Fabrication of furfural residue cellulose-based aerogel for oil/water separation

ZHAO Mei-qing, ZHU Chun-shan\*, SUN Wan-peng, ZHANG Bin-peng,  
ZHANG Miao-nan, HUANG Shuai

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Cellulose (Cel) extracted from furfural residue is used as raw material to mix with polyvinyl alcohol (PVA) and sodium alginate (SA) to obtain Cel/PVA/SA aerogel through freezing-drying by means of freezing-thawing method and Ca<sup>2+</sup> cross-linking method. The obtained aerogel is further hydrophobically modified with methyl trichlorosilane (MTCS) to prepare Cel/PVA/SA@MTCS material that has a density of 0.035 g·cm<sup>-3</sup>, a porosity as high as 97.1%, and a 154.5° contact angle with water. The material's absorption amount to various kinds of oil and organic solvent reaches 36–65 g·g<sup>-1</sup>. After it has been used for 10 cycles, the absorption amount of the material to soybean oil and vacuum pump oil is still 79% and 74%, respectively of the initial absorption amount. After it has been centrifuged at 1000 r·min<sup>-1</sup> for 10 min, the material's oil retention rates reach 76% and 80% for soybean oil and vacuum pump oil, respectively. Therefore, based on the excellent oil absorption performance, good oil-water separation effect, and floatability of the material, it provides a highly potential new route for developing high-performance, low-cost, recyclable oil-water separation materials.

**Key words:** furfural residue; cellulose; aerogel; hydrophobic modification; oil-water separation

近年来,石油开采运输和石化行业生产中排放的含油废水频繁发生溢油事件,给人类社会和生态环境造成了极大的危害<sup>[1]</sup>。当前对溢油的处理方法主要有:物理法、原位燃烧、化学法、生物法<sup>[2]</sup>。原位燃烧和化学法分离效率低,且容易造成二次污染<sup>[3]</sup>。生物法耗时长,易受pH、温度、有机物种类等因素的影响,而且成本高,经济效益低<sup>[4]</sup>。目前,利用多孔材料对油水混合物进行物理吸附是最有效的油水分离方法之一。其中,具有高孔隙率、低密度和大比表面积的气凝胶在油水分离领域有很好的应用前景,其不仅具有较大吸附量和高循环稳定性,而且其吸附饱和后仍可漂浮于水面上,有利于后续回

收<sup>[5-6]</sup>。近年来以纤维素、壳聚糖、海藻酸钠、木质素等天然生物质为原料制备的气凝胶,具有原料来源广泛、成本低廉、无毒无害的特点,表现出分离效率高、操作简单、化学性质可调、可生物降解等优异性能,成为当前油水分离领域的研究热点<sup>[7-8]</sup>。

糠醛渣作为用玉米芯等生产糠醛后的废弃物,含有丰富的纤维素和木质素,其中纤维素约占40%。我国糠醛渣年产量可达300万t<sup>[9]</sup>。因此,从糠醛渣中提取纤维素为原料,制备纤维素气凝胶用于油水分离,具有成本低、吸附量高和稳定性好的特点,为生物质废弃物的高值化利用提供了一种极具前景的新思路。纤维素气凝胶表面含有大量羟基,

收稿日期:2025-01-15;修回日期:2025-03-20

作者简介:赵美箐(1999-),女,硕士生,研究方向为生物质材料,3105095941@qq.com;朱春山(1968-),男,硕士,教授,研究方向为天然产物基功能高分子,通讯联系人,zhuchunshan@haut.edu.cn。

呈现两亲性。为提高其油水分离效率,需进一步疏水改性,其中硅烷试剂改性是提高气凝胶疏水性最常用的改性方法<sup>[10]</sup>。Chen 等<sup>[11]</sup>以麦秸为原料制得纳米纤维素,结合甲基三甲氧基硅烷(MTMS)疏水改性制备了木质素气凝胶,其水接触角可达  $146 \pm 2^\circ$ ,吸油倍率达 42~106 g/g。Ye 等<sup>[12]</sup>从甘蔗渣制得纤维素纳米纤维(CNF),以 CNF、SA 为原料结合 MTMS 硅烷化改性得到疏水气凝胶,其吸油量达自身重量的 89~126 倍。

本研究将糠醛渣中提取的纤维素与 PVA、SA 溶液进行混合制成水凝胶,经过冻融、 $\text{Ca}^{2+}$  交联、冷冻干燥得到轻质、多孔的 Cel/PVA/SA 气凝胶,通过硅烷试剂 MTCS 对 Cel/PVA/SA 进行疏水改性,得到高疏水性 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶,探究其油/有机溶剂吸附能力、油水分离性能、循环使用性等。

## 1 试剂与仪器

### 1.1 试剂

糠醛渣,宏业生物科技有限公司生产;氢氧化钠、冰乙酸,分析纯,天津市天力化学试剂有限公司生产;海藻酸钠(SA),分析纯,天津市光复精细化工研究所生产;亚氯酸钠,分析纯,天津市大茂化学试剂厂生产;无水氯化钙,分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司生产;聚乙烯醇(PVA),分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;99% 正己烷,分析纯,上海麦克林生化科技有限公司生产。甲基三氯硅烷(MTCS),99%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产。

### 1.2 仪器

常压微波合成/萃取反应工作站(MAS-II),上海新仪微波化学科技有限公司生产;扫描电子显微镜(Apreo 2S+),美国赛默飞世尔科技公司生产;X-射线衍射仪(Nano STAR),德国 Bruker-AXS 公司生产;热重分析仪(TG209F3),德国耐驰仪器公司生产;傅里叶变换红外光谱仪(WQF-530),北京北分瑞利分析仪器公司生产;接触角测量仪(CA-100),上海盈诺精密仪器有限公司生产;真空冷冻干燥机(FD-1-50),北京博医康实验仪器有限公司生产。

## 2 实验方法

### 2.1 糠醛渣纤维素的制备

将糠醛渣与含有尿素和硫脲的 10% 的 NaOH 溶液,按固液比 1:10(g/mL)加入微波反应器中,在

400 w、60℃ 条件下反应 30 min,抽滤并洗涤至中性,得到粗制纤维素。将粗制纤维素加入 400 mL 5 wt%  $\text{CH}_3\text{COOH}$ 、10 wt%  $\text{NaClO}_2$  的混合溶液中,70℃ 下加热 6 h,抽滤并洗涤至中性,干燥后得到漂白纤维素(Cel)<sup>[13]</sup>。

### 2.2 疏水纤维素气凝胶的制备

将 PVA 和 SA 溶液按比例混合后,加入 Cel 粉末并搅拌均匀,冻融循环三次后,得到 Cel/PVA/SA 水凝胶,将其在  $\text{Ca}^{2+}$  溶液中交联后,用去离子水洗涤,再冷冻干燥得到 Cel/PVA/SA 气凝胶。将 Cel/PVA/SA 气凝胶在含有 1% MTCS 的正己烷溶液中浸渍沉积 12 h 后干燥,得到疏水改性后的 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶。

### 2.3 油水分离性能测试

#### 2.3.1 油液吸附性能

在油类或有机溶剂中放入质量为  $m_1$  的 Cel/PVA/SA@MTCS,吸附饱和后静置 1 min,再次称量材料质量,记为  $m_2$ 。利用公式(1)计算 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶的吸油倍率  $Y$ (g/g)。

$$Y = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (1)$$

其中: $Y$  为气凝胶的吸油倍率,g/g; $m_1$  为气凝胶的质重,g; $m_2$  为气凝胶吸附饱和的质量,g。

#### 2.3.2 循环吸油性

为了验证气凝胶的循环使用性能,以大豆油和真空泵油为测试油品。在室温下,将 Cel/PVA/SA@MTCS 浸入大豆油或真空泵油中吸附饱和后称量,再洗去气凝胶中的残油后,干燥至恒重,以便进行下一次循环。整个循环使用公式(1)计算吸油倍率。

#### 2.3.3 保油性

以大豆油和真空泵油为例,称取一定质量的 Cel/PVA/SA@MTCS 放入油中,吸附饱和后,测得其质量为  $m_0$ ,随后以 1 000 r/min 转速离心  $i$  分钟,测得其质量为  $m_i$ ,将其再次吸附饱和后,重复上述操作。根据公式(2)计算保油率。

$$Q_i = (m_i / m_0) \times 100\% \quad (2)$$

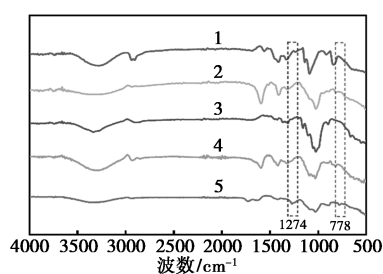
其中: $Q$  为保油率,%; $m_0$  为气凝胶吸附饱和的质量,g; $m_i$  为离心  $i$  分钟后的质量,g; $i$  为离心的时间,min( $i=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 FT-IR、TG、XPS 以及机械性能分析

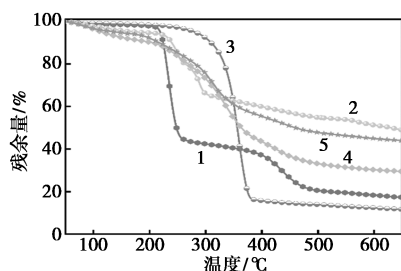
图 1 为 Cel、SA、PVA、Cel/PVA/SA、Cel/PVA/SA@MTCS 的红外光谱、TG 图谱和 Cel/PVA/SA、

Cel/PVA/SA@MTCS 的 XPS 图谱和机械性能。从图 1(a)可以看出,属于 Cel、SA、PVA 的特征吸收峰在 Cel/PVA/SA 的红外谱图中均有出现<sup>[14]</sup>;在 Cel/PVA/SA@MTCS 的红外谱图中可以看出在  $783\text{ cm}^{-1}$  和  $1273\text{ cm}^{-1}$  处有新峰出现,是 C—Si—O 单元中存在的 Si—O—Si 和 C—Si 不对称拉伸的特



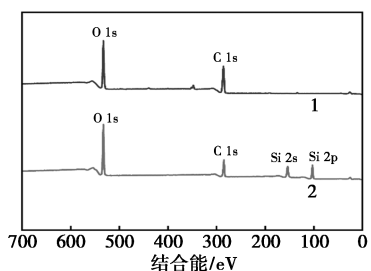
1—PVA;2—SA;3—Cel;4—Cel/PVA/SA;  
5—Cel/PVA/SA@MTCS

(a) 红外光谱



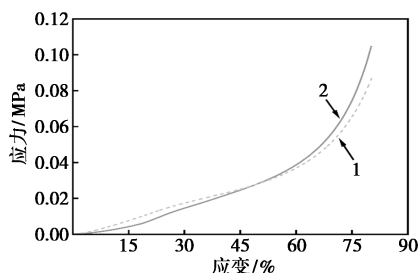
1—PVA;2—SA;3—Cel;4—Cel/PVA/SA;  
5—Cel/PVA/SA@MTCS

(b) TG 图谱



1—Cel/PVA/SA;2—Cel/PVA/SA@MTCS

(c) XPS 图谱



1—Cel/PVA/SA;2—Cel/PVA/SA@MTCS

(d) 应力-应变曲线图

图 1 材料的红外光谱、TG 图谱、XPS 图谱和应力-应变曲线图

征振动峰<sup>[15-16]</sup>,表明 MTCS 已经包覆在气凝胶骨架上。从图 1(b)可以看出,在热重图谱中,可以看到改性后气凝胶的热稳定性有所提高,可能是 Cel/PVA/SA@MTCS 表面形成的硅烷层提高了气凝胶的结构热稳定性<sup>[17]</sup>。从图 1(c)的 Cel/PVA/SA 和 Cel/PVA/SA@MTCS 的 XPS 图谱可以看出,气凝胶经疏水改性后,在  $154.2\text{ eV}$  和  $103.1\text{ eV}$  处出现了属于 Si 2s 和 Si 2p 的新峰<sup>[18]</sup>,这表明气凝胶成功进行了疏水改性。从图 1(d)可以看出,当最大应变为 80%时,Cel/PVA/SA 的抗压强度为  $0.086\text{ MPa}$ ,而 Cel/PVA/SA@MTCS 的抗压强度可达  $0.1\text{ MPa}$ ,二者在高压应变下均表现出良好的力学性能,这是因为气凝胶的多孔网状结构使应力通过相互连接的孔壁分散,应变由众多孔洞的变形吸收<sup>[19]</sup>。

### 3.2 形貌分析

图 2、图 3 分别为采用扫描电子显微镜 (SEM) 获得的 Cel/PVA/SA 和 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶的表面形貌。可以看出,气凝胶具有类似 3D 网络骨架的蜂窝孔状,这可以归因于冷冻干燥过程中

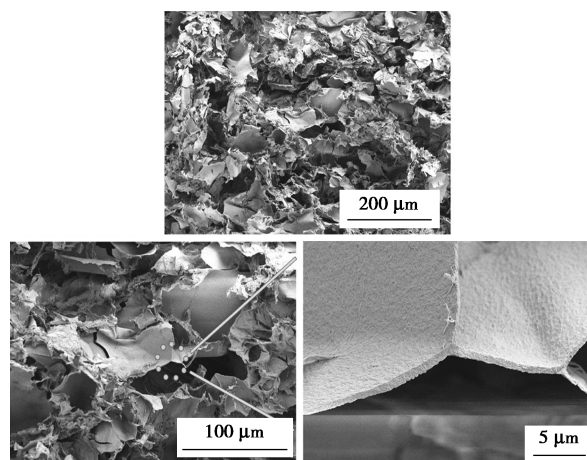


图 2 Cel/PVA/SA 的 SEM 图

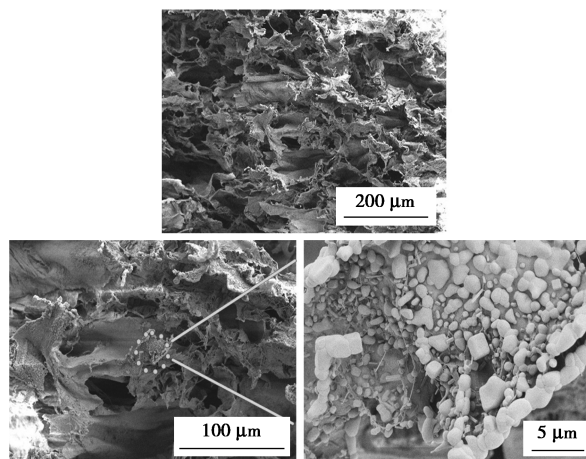


图 3 Cel/PVA/SA@MTCS 的 SEM 图

大量水分子的去除。此外,混合溶液在冻结阶段,固体成核随机发生,也可能导致气凝胶结构的无序化<sup>[20]</sup>。可以看到未改性的气凝胶的骨架及孔壁表面结构都相对光滑。经疏水改性后,气凝胶层状结构表面覆盖一层聚硅氧烷涂层,具有明显的聚硅氧烷颗粒,这显著增加了气凝胶表面的粗糙度,进而提高了气凝胶的疏水性能。

### 3.3 疏水角分析

通过将 Cel/PVA/SA@MTCS 浸泡在不同 pH、不同 NaCl 浓度的溶液,以及用砂纸摩擦气凝胶表面,探究气凝胶疏水层的稳定性。如图 4 所示,气凝胶在强酸强碱 (pH=2、12) 溶液、1 mol/L NaCl 溶液中浸泡 24 h 后,以及在气凝胶表面摩擦 20 次后,其接触角仍分别达到 146.5°、147.3°、138.3° 和 134.6°,表明气凝胶表面的硅烷层具有良好的化学稳定性。如图 5 所示,用苏丹 III 和亚甲基蓝分别对油相和水相进行染色,可以看到,改性前气凝胶接触水后,其形状会被破坏,而改性后气凝胶有良好的疏水性。如图 6 所示,将 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶

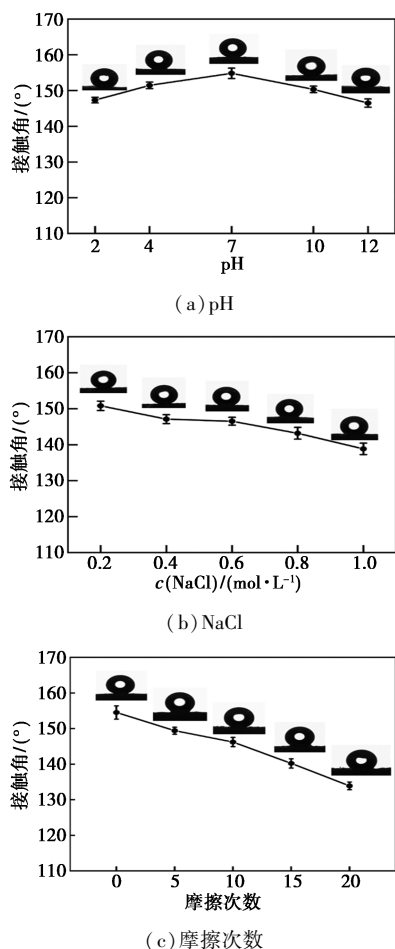


图 4 Cel/PVA/SA@MTCS 接触角与 pH、NaCl 溶液浓度和摩擦次数的关系

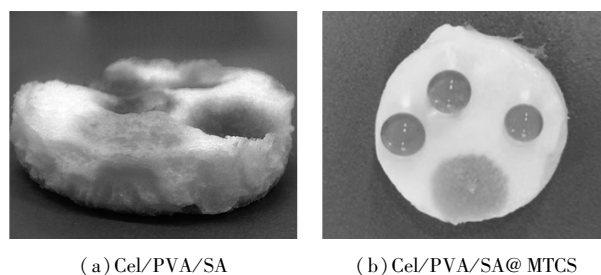


图 5 气凝胶的油水浸润性



图 6 Cel/PVA/SA@MTCS 吸油后的漂浮性

吸油后放置在水面上 48 h,其仍在水面上漂浮,这表明气凝胶具有良好的悬浮性,为其在水上处理油污后的便捷回收过程提供了支持。

### 3.4 油水分离性能

将四氯化碳/水混合溶液、大豆油/水混合溶液分别倒入含有 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶为滤膜的油水分离装置中(四氯化碳和大豆油由苏丹 III 染色,呈红色;水由亚甲基蓝染色,呈蓝色),可以看到红色的四氯化碳和大豆油都透过气凝胶流入下方的烧杯;当分离结束后,可以看到在分离装置下方的两个烧杯中都未能观察到水(蓝色),说明水相未能穿过气凝胶,都被阻拦在气凝胶上方,这表明 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶具有良好的疏水性和油水分离性能。

### 3.5 吸油性能

为了测试 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶的吸油性能,选取 10 种不同的油品进行吸附实验,如图 7 所示。从图 7 可以看出,四氯化碳的密度最大,气凝胶对其的吸油倍率为 64.78 g/g;而各食用油的粘度和密度都很相近,因此气凝胶对他们的吸油倍率范

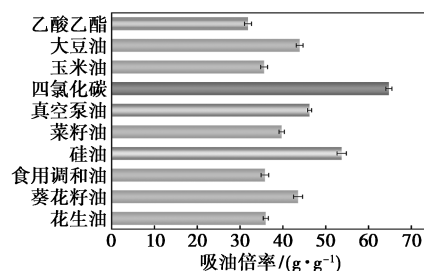


图 7 气凝胶的吸油性能及各油品的密度与黏度

围为 35.82~43.77 g/g;气凝胶对粘度较大的真空泵油和硅油的吸油倍率分别为 46.24、53.75 g/g。

### 3.6 循环使用性和保油性

以真空泵油和大豆油为例,探究 Cel/PVA/SA@MTCS 的保油性以及循环使用性。如图 8 所示,当气凝胶经过 10 次循环吸附后,气凝胶对真空泵油和大豆油的吸油倍率分别为初始吸油量的 74% 和 79%;而 Liao 等<sup>[21]</sup>制备的纤维素气凝胶在循环吸附 10 次真空泵油后,吸油量仅为初始的 65.5%。如图 8 所示,当气凝胶在 1 000 r/min 下离心 10 min 后,气凝胶对真空泵油和大豆油的保油率分别达到

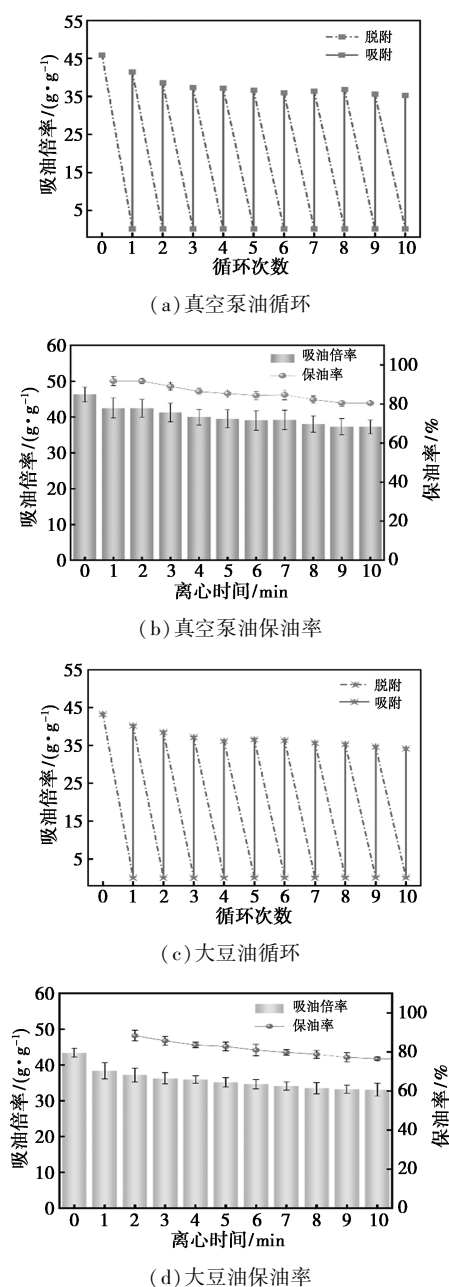


图8 气凝胶对真空泵油和大豆油的吸附循环和保油率

80%和 76%。这表明 Cel/PVA/SA@MTCS 具有良好的重复使用性和保油率,显示了该材料在油污处理领域应用的潜力。

## 4 结论

以糠醛渣纤维素为原料,通过冻融循环、Ca<sup>2+</sup> 交联及 MTCS 疏水改性,制备了超疏水的 Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶。该气凝胶在最大应变为 80% 时,抗压强度可达 0.1 MPa,具有良好的抗压能力。其对各类油和有机溶剂的吸收量为其自重的 36~65 倍。耐用性测试表明,该气凝胶展现出良好的循环使用性、保油性和不同使用环境的稳定性。Cel/PVA/SA@MTCS 气凝胶还具有良好的油水分离能力,是一种环保、高效的吸油材料,可应用于石油泄漏应急处理、工业含油废水净化及生活含油污水的有效分离等场景中,不仅能促进木质纤维素废弃物的资源化利用,也可以为环境保护贡献重要力量。

## 参考文献

- [1] Kang L, Wang B, Zeng J S, *et al.* Degradable dual superlyophobic lignocellulosic fibers for high-efficiency oil/water separation [J]. *Green Chem*, 2019, 22(2): 504-512.
- [2] Xiang B, Sun Q, Zhong Q, *et al.* Current research situation and future prospect of superwetting smart oil/water separation materials [J]. *J Mater Chem A*, 2022, 10(38): 20190-20217.
- [3] Yang W J, Yuen A C Y, Li A, *et al.* Recent progress in bio-based aerogel absorbents for oil/water separation [J]. *Cellulose*, 2019, 26(11): 6449-6476.
- [4] Azin E, Moghimi H, Heidarytabar R. Petroleum degradation, biosurfactant and laccase production by *Fusarium neocosmosporiellum* RH-10: A microcosm study [J]. *Soil Sediment Contam*, 2018, 27(4): 329-342.
- [5] Zhang Y, Sam E K, Liu J, *et al.* Biomass-based/derived value-added porous absorbents for oil/water separation [J]. *Waste Biomass Valorization*, 2023, 14(10): 3147-3168.
- [6] Zhang N, Qi Y F, Zhang Y N, *et al.* A review on oil/water mixture separation material [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59(33): 14546-14568.
- [7] Bai X G, Yuan Z C, Lu C G, *et al.* Recent advances in superwetting materials for separation of oil/water mixtures [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(11): 5139-5157.
- [8] Fu Y, Guo Z G. Natural polysaccharide-based aerogels and their applications in oil-water separations: A review [J]. *J Mater Chem A*, 2022, 10(15): 8129-8158.
- [9] Bi S X, Liu W Y, Wang C H, *et al.* A versatile approach to the synthesis of biomass derived from furfural residues as a potential adsorbent [J]. *J Environ Chem Eng*, 2018, 6(4): 5049-5052.
- [10] Firtauer S, Hassan M, Elsherbiny A, *et al.* Current status of cellulosic and nanocellulosic materials for oil spill cleanup [J]. *Polymers*, 2021, 13(16): 2739.

(下转第 330 页)

- [11] Das D, Sarkar D, Nagarajan S, *et al.* Cobalt phosphide (Co<sub>2</sub>P) encapsulated in nitrogen-rich hollow carbon nanocages with fast rate potassium ion storage [J]. *Chemical Communications*, 2020, 56(94): 14889–14892.
- [12] Tu J, Tong H, Wang P, *et al.* Octahedral/Tetrahedral vacancies in Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as k-storage sites: A case of anti-spinel structure material serving as high-performance anodes for PIBs [J]. *Small*, 2023, 19(34): 2301606.
- [13] Xu Y, Zhang H, Ding T, *et al.* Synthesis of yolk-shell Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@TiO<sub>2</sub> submicrospheres with enhanced potassium storage [J]. *Science China Chemistry*, 2022, 65(9): 1807–1816.
- [14] Ling L, Wang X, Zhou M, *et al.* Carbon-coated flower-like TiO<sub>2</sub> nanosphere as an ultrastable anode material for potassium-ion batteries; Structure design and mechanism study [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5(12): 15586–15596.
- [15] Zhang Y, Mu Z, Yang C, *et al.* Rational design of MXene/1T-2H MoS<sub>2</sub>-C nanohybrids for high-performance lithium-sulfur batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(38): 1707578.
- [16] Fang W Q, Zhou J Z, Liu J, *et al.* Hierarchical structures of single-crystalline anatase TiO<sub>2</sub> nanosheets dominated by {001} facets [J]. *Chemistry-A European Journal*, 2011, 17(5): 1423.
- [17] Krishnan J, Mohamad E N, Sikirman A. Effect of calcination temperature of carbon doped TiO<sub>2</sub> (C-TiO<sub>2</sub>) on photocatalytic activity under visible light [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 997: 292–296.
- [18] Xu X, Zhang Y, Sun H, *et al.* Orthorhombic cobalt ditelluride with Te vacancy defects anchoring on elastic MXene enables efficient potassium-ion Storage [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(31): 2100272.
- [19] Oliveira C, Galindo R E, Palacio C, *et al.* Surface characterization of Ti-Si-C-ON coatings for orthopedic devices: XPS and Raman spectroscopy [J]. *Solid State Sciences*, 2011, 13(1): 95–100.
- [20] Shen Q, Huang L, Chen G, *et al.* One-step synthesis of titanium nitride/nitrogen-doped graphene nanocomposite as separator modifying material for advanced lithium-sulfur batteries [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 845: 155543.
- [21] Zhang W, Luo N, Huang S, *et al.* Sulfur-doped anatase TiO<sub>2</sub> as an anode for high-performance sodium-ion batteries [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2019, 2(5): 3791–3797.
- [22] Rao J, Lv Z, Yan X, *et al.* Nacre-inspired mechanically robust films for osmotic energy conversion [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(2): 2309869.
- [23] Hou S, Pang F, Liu T, *et al.* Oxygen defect and strong interface effect triggered ZnO @ C with enhanced electrochemical performance [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 30: 101876.
- [24] Li L, Jiang G, An C, *et al.* Hierarchical Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> MXene hybrids with tunable interlayer distance for highly durable lithium-ion batteries [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(18): 10369–10379.
- [25] Wu B, Zhang Y, Wang Z, *et al.* A high-rate and ultrastable Re<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>/MXene anode for potassium storage enabled by amorphous/crystalline heterointerface engineering [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(44): 2407134.
- [26] Tan Y, Lin H, Chen Z, *et al.* Regulating the coordination microenvironment of atomic bismuth sites in nitrogen-rich carbon nanosheets as anode for superior potassium-ion batteries [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 99: 365–374. ■
- .....
- (上接第 325 页)
- [11] Chen X Y, Yang M Y, Cai X D, *et al.* Fabrication of wheat straw-based lignin containing nanofibril aerogels as recyclable absorbents for oil-water separation [J]. *Cellulose*, 2024, 31(1): 497–514.
- [12] Ye R C, Long J Y, Peng D, *et al.* Oil/water separation using elastic bio-aerogels derived from bagasse: Role of fabrication steps [J]. *J Hazard Mater*, 2022, 438: 129529.
- [13] 朱春山, 毛正鑫, 简凤梅, 等. 糠醛渣纤维素/丙烯酸/丙烯酰胺吸水树脂的制备研究 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(1): 175–179, 189.
- [14] De la Cruz L G, Abt T, León N, *et al.* Ice-template crosslinked PVA aerogels modified with tannic acid and sodium alginate [J]. *Gels*, 2022, 8(7): 419.
- [15] Zheng Q F, Cai Z Y, Gong S Q. Green synthesis of polyvinyl alcohol (PVA)-cellulose nanofibril (CNF) hybrid aerogels and their use as superabsorbents [J]. *J Mater Chem A*, 2014, 2(9): 3110–3118.
- [16] Mulyadi A, Zhang Z, Deng Y L. Fluorine-free oil absorbents made from cellulose nanofibril aerogels [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(4): 2732–2740.
- [17] Zhang Z, Sèbe G, Rentsch D, *et al.* Ultralightweight and flexible silylated nanocellulose sponges for the selective removal of oil from water [J]. *Chem Mat*, 2014, 26(8): 2659–2668.
- [18] Wan W B, Yang Z, Tan T, *et al.* Three-dimensional hydrophobic melamine@ methyl trichlorosilane/polydimethylsiloxane sponge for consecutive and long-term oil/water separation [J]. *Chem Eng J*, 2023, 476: 146824.
- [19] Zhang X X, Wang H K, Cai Z Y, *et al.* Highly compressible and hydrophobic anisotropic aerogels for selective oil/organic solvent absorption [J]. *ACS Sustain Chem Eng*, 2019, 7(1): 332–340.
- [20] Zhang X X, Liu M H, Wang H K, *et al.* Ultralight, hydrophobic, anisotropic bamboo-derived cellulose nanofibrils aerogels with excellent shape recovery via freeze-casting [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 208: 232–240.
- [21] Liao Q, Su X P, Zhu W J, *et al.* Flexible and durable cellulose aerogels for highly effective oil/water separation [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(68): 63773–63781. ■