

# 兼具乳液分离和染料吸附性能的复合海绵的制备及性能研究

余芳, 廖腾飞, 张芝蕾, 彭冬梅, 肖倩, 江南, 吕中, 杨浩\*  
(武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北 武汉 430205)

**摘要:**通过两步浸渍法制备了具有水下超疏油和抗油污性能的 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 海绵, 该海绵仅通过重力作用就能分离含油废水, 对多种油水混合物和含表面活性剂乳液的分离效率分别在 99.0% 和 99.1% 以上, 通量分别在 60 000 L/(m<sup>2</sup>·h) 和 1 694 L/(m<sup>2</sup>·h) 以上。此外, 该海绵还可同时分离含刚果红染料的乳液, 经 4 次循环之后乳液分离效率仍达 99.0% 以上, 对染料吸附率达 94.5% 以上。因此, 这种环境友好型的海绵材料可以促进功能界面材料的发展, 在含染料的乳液分离领域具有潜在的应用前景。

**关键词:**水下超疏油; 壳聚糖; 海藻酸钠; 乳液分离; 染料吸附

**中图分类号:** O636.9; TB34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2022)08-0155-06

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.08.031

## Preparation of composite sponge with both emulsion separation and dye adsorption properties

YU Fang, LIAO Teng-fei, ZHANG Zhi-lei, PENG Dong-mei, XIAO Qian, JIANG Nan, LV Zhong, YANG Hao\*

(School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** SiO<sub>2</sub>-CS/SA sponges with underwater super-oleophobic property and oil pollution resistance are prepared by a two-step impregnation method, which can separate oily wastewater under gravity only. The separation efficiencies of the sponges for various oil-water mixtures and surfactant-containing emulsions are above 99.0% and 99.1%, respectively; and the flux is above 60 000 L/(m<sup>2</sup>·h) and 1 694 L/(m<sup>2</sup>·h), respectively. Moreover, the sponges can simultaneously separate the emulsion containing Congo red. After four cycles of separation, the separation efficiencies of the emulsion are still more than 99.2% and the adsorption efficiencies for Congo red exceed 94.5%. Therefore, this environment-friendly sponge can promote the development of functional interface materials, and has potential application in the field of dye-containing emulsion separation.

**Key words:** underwater super-oleophobic; chitosan; sodium alginate; emulsion separation; dye adsorption

石油化工行业和原油泄漏事故导致大量石油污水排放, 含有各种油性有机溶剂和水溶性染料的废水正逐渐威胁海洋生态系统和人类健康<sup>[1]</sup>。快速有效处理水污染已成为世界公认挑战<sup>[2]</sup>。燃烧、吸附、化学絮凝、气浮等传统技术可用于分离分层油/水混合物, 但不能分离乳化油/水混合物<sup>[3]</sup>, 近年来, 超润湿材料已被成功用于分离乳液<sup>[4]</sup>。超润湿材料由于其特殊润湿性、绿色和低成本被用于乳液分离<sup>[5-6]</sup>, 如黄土<sup>[7]</sup>、砂层<sup>[8]</sup>等成功实现了油/水乳液分离。但他们需在特定条件下使用, 限制了其应用<sup>[9]</sup>。此外, 实际含油废水中还存在水溶性染料等污染物。从废水中同时分离乳液和染料仍是棘手问

题。因此, 设计一种能够分离水包油乳液和水溶性染料的多功能分离材料迫在眉睫<sup>[10]</sup>。

壳聚糖(CS)具有荷正电、低成本、亲水性高和生物相容性好等优点<sup>[11]</sup>, 同时富含氨基和羟基, 可作为活性位点广泛用于污染物吸附<sup>[12]</sup>。Yuan<sup>[13]</sup>制备了一种具有良好的油水分离及染料吸附性能的纤维素/CS基复合海绵。为增强材料性能, 常采用无机材料对其进行改性, 如CS-纤维素、CS-氧化石墨烯都能增强吸附能力<sup>[14]</sup>。Priya Saharan等<sup>[15]</sup>制备了CS-二氧化硅复合材料, 30 min内对染料最大去除率达97.2%。同时, 海藻酸钠(SA)能与CS形成聚电解质复合涂层, 实现阴阳离子共存, 有利于处理

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20201511); 大学生创新创业训练计划项目(2021110490004, S2021110490010); 武汉工程大学大学生校长基金项目(XZJJ2021103)

作者简介: 余芳(2000-), 女, 本科生, 研究方向为油水及乳液分离材料, 1735629074@qq.com; 杨浩(1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向为功能界面材料, 通讯联系人, hyang@wit.edu.cn。

含不同电荷表面活性剂的油水乳液<sup>[16]</sup>。

因此,笔者采用 CS 和 SA 制备得到聚电解质复合涂层,并添加二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)增强复合材料的乳液分离和吸附性能。研究 CS 与 SA 质量比对涂层油水分离性能的影响,并在最佳条件下研究涂层同时分离乳液及刚果红染料的性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

壳聚糖(CS),上海凇恩科技发展有限公司生产;海藻酸钠(SA)、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、戊二醛,上海国药生产;无水氯化钙(CaCl<sub>2</sub>),天津市大茂化学试剂厂生产;乙酸,太仓沪试试剂有限公司生产;有机溶剂、表面活性剂和刚果红(分析纯),阿拉丁生产;三聚氰胺海绵(MS)购自淘宝店。

### 1.2 表征

利用扫描电子显微镜(日本 JSW-5510LV)观察样品表面形貌;利用傅里叶红外光谱仪(美国 Thermo Nicolet Nicolet nexus 470)分析样品化学组成;利用视频光学接触角测量仪(德国 Dataphysics OCA 20)测量样品水下油接触角;利用光学显微镜(深圳博视达光学仪器 NE620)观察乳液中油滴数量和尺寸。

### 1.3 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 海绵的制备

将 MS 置于乙醇中超声清洗并烘干后裁剪成 2 cm×2 cm×2 cm 大小,备用。将 CS 分别溶解在 1% 乙酸溶液中得质量分数分别为 0.125%、0.25% 和 0.5% 的 CS 溶液,然后加 200 μL(质量分数 25%)戊二醛和 0.25 g SiO<sub>2</sub>,超声 2 h,再加 MS 浸泡 12 h。将 MS 取出浸入质量分数 0.25% 的 SA 溶液中 30 min,实现自组装。再将上述 MS 取出浸入 2% 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液中 10 min,完成离子交联。最后将 MS 置于 60℃ 烘箱中烘干得 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 海绵。其中,原始 MS 命名为 M0, *m*(CS):*m*(SA) 为 1:2、1:1 和 2:1 所制备的 MS 分别命名为 M1、M2 和 M3。

### 1.4 油水及乳液分离性能测试

#### 1.4.1 油水分离试验

采用多种有机溶剂对制备的 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 海绵进行油水分离性能测试,具体操作:将水(20 g)和有机溶剂(10 g)混合,有机溶剂用油红染色。采用自制装置进行分离实验,即样品被 2 个中间开有 2 cm 直径圆孔的聚四氟乙烯夹具固定,夹具上下两边各固定玻璃管。将油水混合物倒入上方玻璃管,采用死端过滤方式进行分离,滤液用烧杯收集。待油水

完全分离,取出油样,测定分离效率( $\beta$ ,%):

$$\beta = (m_1/m_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_0$ 、 $m_1$  分别为分离前、后油质量, g。

分层油水分离通量 [ $Flux$ , L/(m<sup>2</sup>·h)] 计算式为:

$$Flux = V/(A\Delta T) \quad (2)$$

式中: $V$  为 MS 分离出水的体积, L;  $A$  为 MS 面积;  $\Delta T$  为分离时间, h。

#### 1.4.2 乳液分离试验

不含表面活性剂乳液配制:将 1 mL 油加入 99 mL 去离子水中,超声 30 min 即可。

含表面活性剂乳液配制:在 1 000 r/min 的搅拌下,将 0.05 g 表面活性剂加入甲苯/水(体积比为 1:9)中,搅拌 30 min 即可。

用直径 0.8 cm 的漏斗分离 O/W 乳液。将乳液倒入过滤装置中,通过重力分离。用光学显微镜观察分离前后乳液变化。用软件 Nano Measurer 测量乳液和滤液中油滴粒径。用紫外-可见分光光度计(日本岛津 UV2600)测量乳液及滤液吸光度。

通量按式(2)计算,分离效率计算式为:

$$\beta = (1 - I_f/I_o) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $I_o$  和  $I_f$  分别为乳液或滤液中油(296 nm 处)或染料(499 nm 处)的吸光度。

#### 1.4.3 同时分离含水溶性染料的水包油乳液

为研究 MS 同时对乳液和染料的分离性能,将 0.01 g 刚果红染料加入 100 mL 不含表面活性剂的水包甲苯乳液中,制得含染料甲苯乳液。采用 1.4.2 中所述方法进行分离试验,并用分光光度计测量乳液及滤液吸光度。海绵稳定性通过循环试验验证,每次分离后无需进行处理即进行下一次乳液分离。乳液分离效率和染料去除率通过式(3)进行评估。

## 2 结果与分析

### 2.1 结构表征

M0 和 M3 的 FT-IR 光谱图如图 1 所示。由图 1 中可以看出,3 325 cm<sup>-1</sup> 和 1 548 cm<sup>-1</sup> 的峰分别归属于 N—H 和 C=N 拉伸振动,对应 MS 化学成分<sup>[17]</sup>。与 M0 相比,M3 在 3 400~3 200 cm<sup>-1</sup> 处峰变宽,归因于 CS 的 O—H 吸收峰增加。同时 1 630 cm<sup>-1</sup> 出现新峰,是因为 CS 和戊二醛发生交联反应,生成 C=N 的吸收峰<sup>[18]</sup>。1 024 cm<sup>-1</sup> 处的峰显著增强归因于 O—Si—O 的拉伸振动<sup>[18]</sup>,表明 SiO<sub>2</sub> 成功改性到 MS 表面。1 158 cm<sup>-1</sup> 处 NH<sub>2</sub> 峰消失,这是由于

SA带负电羧基( $-\text{COOH}$ )和CS带正电氨基( $-\text{NH}_2$ )之间的静电相互作用<sup>[16]</sup>。 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 与 $\text{CaCl}_2$ 交联后,  $1548\text{ cm}^{-1}$ 处酰胺特征峰增强, 归因于2个相邻SA的残余 $-\text{COOH}$ 相互作用形成网络基质<sup>[19]</sup>, 同时证明经 $\text{CaCl}_2$ 交联后 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 聚合物粘附在MS表面。

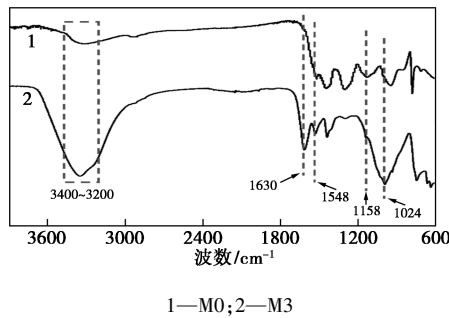


图1 M0和M3的FT-IR光谱图

材料表面形貌对润湿性和分离性能有重要影响<sup>[18]</sup>。M0和M3的SEM图如图2所示。由图2(a)、图2(b)中可以看出, M0显示出三维网络和多孔结构, 且骨架表面光滑。由图2(c)、图2(d)中可以看出, M3结构与M0相似, 但骨架上出现片状和颗粒物质, 片状是CS和SA形成的膜, 颗粒则是 $\text{SiO}_2$ 在表面的随机分布。 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵通过范德华力使CS、SA和 $\text{SiO}_2$ 附着在MS上, 导致MS表面粗糙度增加, 但不影响内部孔隙率。粗糙表面和三维网络有利于MS超润湿性的形成, 从而实现油水分离; 高孔隙率有助于吸附水溶性污染物。

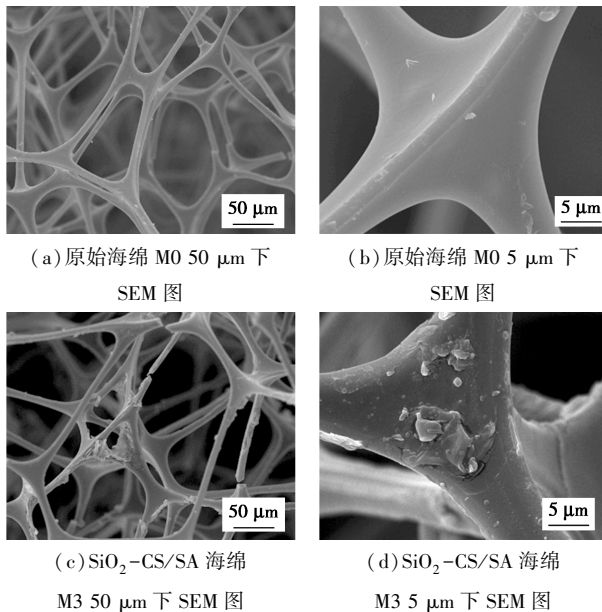


图2 M0和M3的SEM图

## 2.2 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵的润湿性

为筛选得到最佳海绵, 研究了CS与SA质量比

对水下疏油性能的影响, 结果如表1所示。由表1可知, CS质量分数增加, 样品水下油接触角增大, 归因于CS负载量增大导致粗糙度增加。固体表面粗糙度增大会增强其水下油接触角<sup>[19]</sup>, 因此, 增加CS质量分数可促进其水下疏油性。M3水下油接触角为 $157.1^\circ$ , 达到水下超疏油性能。M3对不同有机溶剂的水下油接触角如表2所示。由表2可知, M3对多种油水下接触角均在 $150^\circ$ 以上, 表明M3对多种油具有水下超疏油性。二氯甲烷在水下对 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵几乎无黏性, 说明样品具有良好的抗油污和自清洁性能, 这得益于样品亲水基团形成的强水合层<sup>[20]</sup>。

表1 不同CS浓度条件下制备的海绵样品的水下油接触角

样品	M0	M1	M2	M3
水中油接触角/ $^\circ$	132.4	145.7	151.7	157.1

表2 M3对不同有机溶剂的水下油接触角

有机溶剂	甲苯	正己烷	石油醚	环己烷	正庚烷	二氯甲烷
水中油接触角/ $^\circ$	155.6	158.1	155.0	151.7	151.2	152.6

## 2.3 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵油水分离性能测试

将M1、M2、M3进行油(正己烷)水分离测试, 结果如表3所示。由表3可知, 随着CS质量分数的增大, 油水分离效率及通量上升, M3油水分离效率为99.24%, 分离通量为 $78269\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ , 归功于MS水下油接触角增大<sup>[21]</sup>。M3分离效率和通量最佳, 因此选用M3进行系列分离实验, 结果如表4所示。由表4可知, 其对多种油水混合物分离效率在99.0%以上, 通量在 $60000\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 以上。

表3 不同CS浓度条件下制备的海绵样品对分层油水混合物的分离性能

样品	M1	M2	M3
分离效率/%	97.11	97.98	99.24
通量/ $(\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	64044	67026	78269

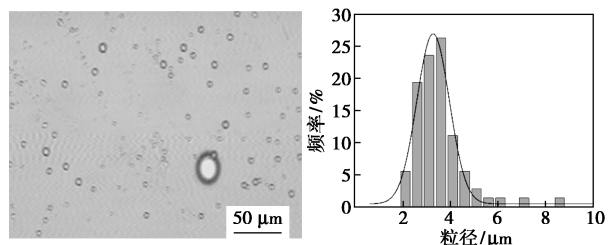
表4 样品M3对不同分层油水混合物的分离性能

样品	甲苯	正己烷	石油醚
分离效率/%	99.21	99.34	98.56
通量/ $(\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	60370	78269	70452

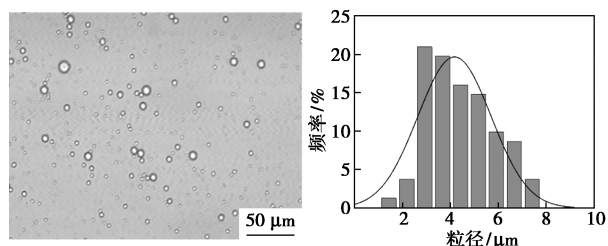
## 2.4 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵乳液分离性能测试

首先, 对不含表面活性剂乳液进行了分离测试,

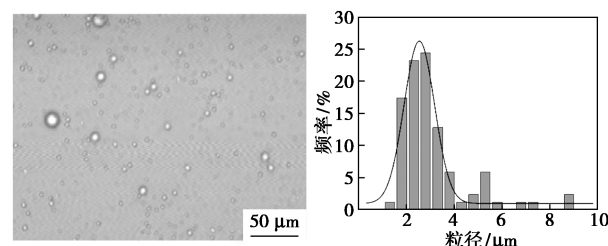
结果如图 3 所示。从图 3 可知,分离前 3 种乳液油滴平均尺寸分别为 3.512、4.490  $\mu\text{m}$  和 3.109  $\mu\text{m}$ , 而滤液中无明显油滴,说明乳液已经完全分离。



(a) 分离水包甲苯乳液的图像和粒度分析



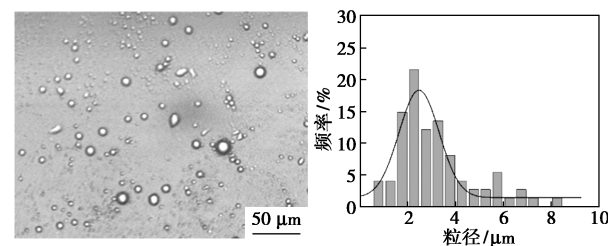
(b) 分离水包正己烷乳液的图像和粒度分析



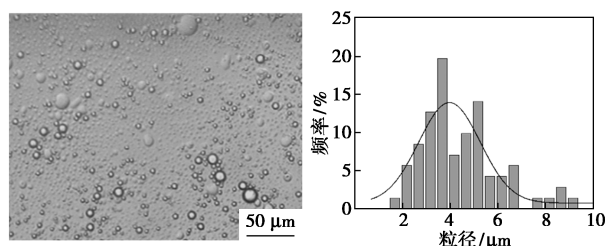
(c) 分离水包石油醚乳液的图像和粒度分析

图 3 分离不含表面活性剂乳液前后图像和粒度分析

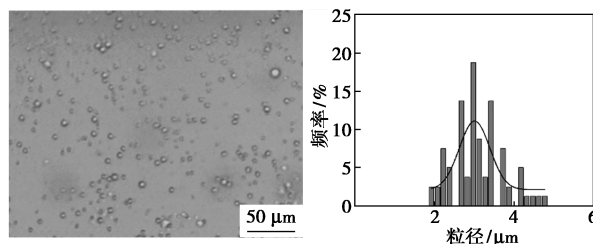
能否分离含表面活性剂的乳液才是衡量膜优劣的重要指标<sup>[22]</sup>。从光学显微照片发现,含表面活性剂乳液油滴数比不加表面活性剂的更多,如图 4 所示。通过粒径分析发现,含 SDS、CTAB 和 Tween 80 的甲苯/水乳液油滴平均尺寸分别为 2.506、3.510  $\mu\text{m}$  和 3.095  $\mu\text{m}$ , 相比于不含表面活性剂乳液,尺寸缩小,分离难度加大。但经样品分离后,滤液清晰透明,没有检测到明显油滴。因此,该海绵可以成功地从含表面活性剂的水包油乳液中除去油。



(a) 分离水包 SDS 甲苯乳液的图像和粒度分析



(b) 分离水包 CTAB 甲苯乳液的图像和粒度分析



(c) 分离水包 Tween 80 甲苯乳液的图像和粒度分析

图 4 分离含表面活性剂甲苯乳液前后图像和粒度分析

为定量分析 M3 对乳液的分离性能,测量了 M3 对乳液的分离效率和通量,结果如表 5、表 6 所示。由表 5、表 6 中可以看出,其不含表面活性剂和含表面活性剂乳液的分离通量最高分别可达  $(2\ 800 \pm 100) \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $(1\ 750 \pm 80) \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 分离效率分别高达 99.6% 和 99.1%, 进一步证实该海绵具有优良的乳液分离性能。

表 5 M3 对不含表面活性剂的不同乳液的分离性能

有机溶剂	甲苯	正己烷	石油醚
分离效率/%	99.41	99.60	99.54
分离通量/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	2420.8	2799.1	2714.2

表 6 M3 对含不同表面活性剂甲苯乳液分离性能

表面活性剂	SDS	Tween 80	CTAB
分离效率/%	99.10	99.08	99.01
分离通量/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	1694.3	1791.4	1694.3

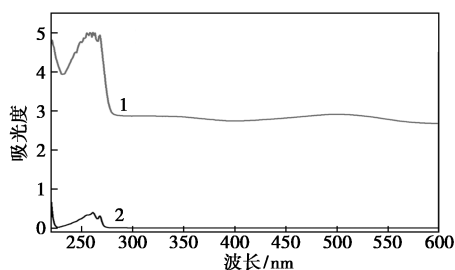
## 2.5 $\text{SiO}_2\text{-CS/SA}$ 海绵同时分离乳液和染料性能

M1、M2、M3 对含刚果红的水包甲苯溶液的乳液、染料分离效率及通量如表 7 所示。由表 7 中可以看出,CS 增加,MS 对乳液和染料的分离效率及通量提升,与 MS 对分层油水混合物结论一致,说明染料的加入不影响乳液分离。且 CS 富含氨基,其所带正电可与阴离子型染料刚果红通过静电作用实现对刚果红的去除<sup>[23]</sup>。M3 对乳液和染料的分离效率

分别为 99.14% 和 98.75%, 分离通量为 2 420.80 L/(m<sup>2</sup>·h)。M3 分离含刚果红的水包甲苯溶液的乳液的紫外-可见吸收光谱图如图 5 所示。从图 5 可知, 分离后乳液、刚果红分别在 296 nm 和 499 nm 处几乎没有峰出现<sup>[24-25]</sup>, 说明样品对乳液和刚果红染料具有优异的分离能力。

表 7 不同海绵对含刚果红的水包甲苯乳液分离性能图

样品	M1	M2	M3
乳液分离效率/%	99.02	99.05	99.14
染料分离效率/%	98.38	98.42	98.75
分离通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2071.2	2114.5	2420.8



1—分离前;2—分离后

图 5 M3 分离含刚果红的水包甲苯乳液前后紫外-可见光吸收光谱

为进一步探究 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 海绵对含刚果红的甲苯/水乳液分离稳定性, 进行了 4 次循环实验, 结果如表 8 所示。由表 8 中可以看出, 经 4 次循环之后 MS 对乳液分离通量从 2 584 L/(m<sup>2</sup>·h) 下降到 1 935 L/(m<sup>2</sup>·h), 分离效率均在 99.0% 以上; 对染料的分离效率逐渐下降, 但仍保持在 94.5% 以上。因此, 该海绵对含刚果红的水包甲苯乳液分离具有一定稳定性。

表 8 M3 对含刚果红的水包甲苯乳液的循环分离性能

循环次数	1	2	4
乳液分离效率/%	99.35	99.34	99.33
染料分离效率/%	98.24	97.62	94.50
分离通量/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2584	2417	1935

### 3 结论

采用两步浸渍法制备了 SiO<sub>2</sub>-CS/SA 复合海绵。通过多种表征、油水分离测试探究了不同 CS/SA 质量比的海绵 (M1、M2、M3) 对其润湿性、油水分

离性能等的影响, 确定 M3 为最佳样品。M3 对不同分层油水混合物分离效率均在 99.0% 以上, 通量在 60 000 L/(m<sup>2</sup>·h) 以上; 对不含以及含表面活性剂乳液分离通量最高分别可达 (2 800±100) L/(m<sup>2</sup>·h) 和 (1 750±80) L/(m<sup>2</sup>·h), 分离效率分别达 99.6% 和 99.1%; 对含染料乳液循环后分离效率均在 99.0% 以上, 对染料分离效率保持在 94.5% 以上。这种双功能材料具有处理复杂废水能力, 是含油废水处理的潜在候选材料。

### 参考文献

- [1] Burgos W D, Castillo-Meza L, Tasker T L, *et al.* Watershed-scale impacts from surface water disposal of oil and gas wastewater in western Pennsylvania [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(15): 8851-8860.
- [2] Wang X, Zhao Y T, Tian E L, *et al.* Graphene oxide-based polymeric membranes for water treatment [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(15): 1701427.
- [3] Wang C Q, Zhang X H, Ning P G, *et al.* Research advances and perspective on treatment processes for oily wastewater [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(1): 451-462.
- [4] Liu S, Wang J T. Eco-friendly and facile fabrication of polyimide mesh with underwater superoleophobicity for oil/water separation via polydopamine/starch hybrid decoration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 250: 117228.
- [5] Yun J, Khan F A, Baik S. Janus Graphene oxide sponges for high-purity fast separation of both water-in-oil and oil-in-water emulsions [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(19): 16694-16703.
- [6] Li J, Li D M, Yang Y, *et al.* A prewetting induced underwater superoleophobic or underoil (super) hydrophobic waste potato residue-coated mesh for selective efficient oil/water separation [J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(2): 541-549.
- [7] Wang X Y, Li M J, Shen Y Q, *et al.* Facile preparation of loess-coated membranes for multifunctional surfactant-stabilized oil-in-water emulsion separation [J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(11): 3190-3199.
- [8] Yong J L, Chen F, Yang Q, *et al.* Oil-water separation: A gift from the desert [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2016, 3(7): 1500650.
- [9] Shi G G, Shen Y Q, Mu P, *et al.* Effective separation of surfactant-stabilized crude oil-in-water emulsions by waste brick powder-coated membrane under corrosive conditions [J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(4): 1345-1352.
- [10] Zhu H Y, Chen D Y, Li N J, *et al.* Dual-layer copper mesh for integrated oil-water separation and water purification [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 200: 594-600.
- [11] Du Q C, Zhou Y, Pan X W, *et al.* A graphene-melamine-sponge for efficient and recyclable dye adsorption [J]. *RSC Advances*, 2016, 6

- (59):54589-54596.
- [12] Zhou W, Fang Y, Li P, *et al.* Ampholytic chitosan/alginate composite nanofibrous membranes with super anti-crude oil-fouling behavior and multifunctional oil/water separation properties [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(18):15463-15470.
- [13] Zhao S S, Tao Z, Chen L W, *et al.* An antifouling catechol/chitosan-modified polyvinylidene fluoride membrane for sustainable oil-in-water emulsions separation [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2021, 15(4):63.
- [14] Nghah W S W, Teong L C, *et al.* Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(4):1446-1456.
- [15] Priya S, Vinit K, Ashok K S, *et al.* Scalable fabrication of chitosan-grafted silica bionanocomposite for the superb sequestration of anionic dye from aqueous solution [J]. Emergent Materials, 2020, 3(6):871-879.
- [16] Li Y Q, Zhang H, Ma C, *et al.* Durable, cost-effective and superhydrophilic chitosan-alginate hydrogel-coated mesh for efficient oil/water separation [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 226:115279.
- [17] Jya B, Hwa B, Zta B, *et al.* 3D superhydrophobic sponge with a novel compression strategy for effective water-in-oil emulsion separation and its separation mechanism [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359:149-158.
- [18] Su C P, Yang H, Song S, *et al.* A magnetic superhydrophilic/oleophobic sponge for continuous oil-water separation [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 309:366-373.
- [19] Zhao X, Wang X J, Lou T. Preparation of fibrous chitosan/sodium alginate composite foams for the adsorption of cationic and anionic dyes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 403:124054.
- [20] Choe H C, Kim S H, Chollhuan O, *et al.* A numerical study on the underwater apparent contact angle of oil droplets on microstructure surface [J]. Surface Review and Letters, 2020, 27(1):1950095.
- [21] Wang Y Q, He Y, Fan Y, *et al.* A robust anti-fouling multifunctional aerogel inspired by seaweed for efficient water purification [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 259:118153.
- [22] Pan Z H, Cao S J, Li J F, *et al.* Anti-fouling TiO<sub>2</sub> nanowires membrane for oil/water separation; Synergetic effects of wettability and pore size [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 572:596-606.
- [23] Guselnikova O, Barras A, Addad A, *et al.* Magnetic polyurethane sponge for efficient oil adsorption and separation of oil from oil-in-water emulsions [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 240:116627.
- [24] Zhang J P, Wu L, Zhang Y J, *et al.* Mussel and fish scale-inspired underwater superoleophobic kapok membranes for continuous and simultaneous removal of insoluble oils and soluble dyes in water [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(36):18475-18482.
- [25] Wu X Y, Zhao L, Li L L, *et al.* Characterization of the effect of anion on the complex of oat beta-glucan and congo red with UV-Vis absorption spectroscopy [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(36):18475-18482. ■
- .....
- (上接第 154 页)
- [3] 杨超, 张东, 李秀强. 相变材料微胶囊研究现状及应用 [J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3):203-209.
- [4] 张兴祥, 王馨, 吴文健. 相变材料胶囊制备与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] 马艳红. 相变温度可调的储能微胶囊的制备及其性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [6] 张军强, 王花枝, 杨志涛, 等. 棕榈酸/SiO<sub>2</sub> 纳米胶囊的制备及其储热性能 [J]. 功能材料, 2019, 50(11):11065-11069.
- [7] 李清璠, 洪卫, 潘圣阳, 等. 相变储热微胶囊的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2014, 42(12):118-122.
- [8] 耿丽霞. 正十二醇/二氧化硅微胶囊相变材料的制备及热物性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [9] 谢望平, 汪南, 朱冬生, 等. 相变材料强化传热研究进展 [J]. 化工进展, 2008, (2):190-195.
- [10] Li B X, Liu T X, Hu L Y, *et al.* Fabrication and properties of micro-encapsulated paraffin@SiO<sub>2</sub> phase change composite for thermal energy storage [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 1:374-380.
- [11] 杨威, 徐本梁, 严顺洪, 等. 纳米二氧化硅粒径尺寸调控及其对表面化学修饰的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7):2321-2325.
- [12] Fang G Y, Li H, Chen Z, *et al.* Preparation and properties of palmitic acid/SiO<sub>2</sub> composites with flame retardant as thermal energy storage materials [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(7):1875-1881.
- [13] Yuan H M, Bai H, Zhang X, *et al.* Synthesis and characterization of stearic acid/silicon dioxide nano-encapsules for solar energy storage [J]. Solar Energy, 2018, 173(10):42-52.
- [14] Tang F, Liu L, Alva G, *et al.* Synthesis and properties of micro-encapsulated octadecane with silica shell as shape-stabilized thermal energy storage materials [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 160:1-6.
- [15] 尉菁华, 刘欢, 连慧琴, 等. 棕榈酸/二氧化硅相变微胶囊的制备及性能研究 [J]. 中国塑料, 2020, 34(2):1-8.
- [16] 童晓梅, 闫子英, 郝芹芹, 等. SiO<sub>2</sub> 包覆石蜡相变微胶囊的制备及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2016, 44(2):86-88.
- [17] 罗瑞涟. 二氧化硅壁材微胶囊相变储能材料制备与性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [18] 刘志红, 吴唯, 张雪薇. HCPs 基/棕榈酸复合相变材料的制备及其储热性能 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2020, (3):360-367.
- [19] 何芳. 基于硅酸钠的二氧化硅包覆高级脂肪族烷烃相变微胶囊的制备及性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
- [20] 吴潘明, 王继芬, 张凯. SiO<sub>2</sub>/棕榈酸材料的制备及其热分析 [J]. 上海第二工业大学学报, 2016, 33(3):188-191.
- [21] Li J R, He L H, Liu T Z, *et al.* Preparation and characterization of PEG/SiO<sub>2</sub> composites as shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 118(11):48-53. ■