

规整异质聚结材料的构建及其含油污水处理性能研究

刘黎颖¹, 王雪清², 张秀芳^{1*}, 谭向东², 马宁², 马传军²

(1.大连工业大学轻工与化学工程学院, 辽宁大连116034; 2.中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 工业废水资源化与无害化国家工程研究中心, 辽宁大连116045)

摘要:为提高聚四氟乙烯(PTFE)作为聚结材料时的除油效果,构建了脱脂棉(Cot)和超疏水PTFE分层叠卷(Cot+超疏水PTFE)的规整异质聚结材料。结果表明,PTFE作为聚结床层时,出水油浓度为220 mg/L,超疏水PTFE的出水油浓度为155 mg/L,PTFE的超疏水改性提高了其聚结性能;Cot+超疏水PTFE的出水油浓度为55 mg/L,进一步提升了除油效果;Cot+超疏水PTFE在最佳床层长度100 mm、孔隙率0.883时,品质因子可达39 kPa⁻¹,出水中几乎不存在粒径大于10 μm的油滴,床层有效处理了分散油及乳化油,且在12 h长周期运行中稳定保持94.5%的除油率。

关键词:聚结;超疏水;异质聚结材料;脱脂棉;含油污水

中图分类号:TQ317.9

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0207-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.037

Construction of structured heterogeneous coalescence materials and performance in oily wastewater treatment

LIU Li-ying¹, WANG Xue-qing², ZHANG Xiu-fang^{1*}, TAN Xiang-dong², MA Ning², MA Chuan-jun²

(1.School of Light Industry & Chemical Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2.National Engineering Research Center of Industrial Wastewater Detoxication and Resource Recovery, Sinopec Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Dalian 116045, China)

Abstract: In order to improve the oil removal efficiency of polytetrafluoroethylene (PTFE) as a coalescing material, a structured heterogeneous coalescing material with Cot and superhydrophobic PTFE layered rolls (Cot + superhydrophobic PTFE) is constructed. Results show that the oil concentration in the effluent is 220 mg·L⁻¹ when PTFE is served as the coalescence bed, and that is 155 mg·L⁻¹ when superhydrophobic PTFE is used as the coalescence bed. The oil concentration in the effluent is 55 mg·L⁻¹ when Cot+superhydrophobic PTFE is used, which further improving the oil removal efficiency. As the optimum bed length for Cot+superhydrophobic PTFE is 100 mm and the porosity is 0.883, the quality factor reaches 39 kPa⁻¹. There is almost no oil droplet with a diameter larger than 10 μm in the effluent. In addition, it can maintain 94.5% of oil removal rate during 12 h of long cycle operation.

Key words: coalescence; superhydrophobic; heterogeneous coalescence materials; absorbent cotton; oily wastewater

石油开采、加工过程中会产生大量含油污水^[1],水中油类污染物常以悬浮态(浮油和分散油;油滴粒径大于10 μm)、乳化态(乳化油;油滴粒径一般在0.1~10 μm)和溶解态(溶解油;油滴粒径非常小,在水中主要以化学式或分子态存在)等多种形式存在^[2-3]。其中浮油和分散油较容易处理,可通过气浮、旋流分离等将其去除;溶解油可随其他溶解性污染物进入后续生化等单元处理;乳化油粒径微小,易和水形成较为稳定的分散态,造成油水分离困难,是含油污水处理的重点和难点^[4-5]。

根据油水分离原理,乳化油的去除手段包括物理法、化学法和生物法^[6-7]。聚结除油技术作为一

种物理除油方式,可以有效除去乳化油^[8]。聚结除油又称粗粒化,其原理主要是利用油和水对聚结材料表面亲和力的不同,使油粒在材料表面润湿并形成油膜,油膜厚度增加到一定值时,在水力和浮力的作用下从材料表面脱落形成粒径较大的油滴^[9]。聚结技术具有设备占地面积小、运行成本低且无需频繁更换聚结介质等优点,同时,过程中不需要加入药剂,得到的油分可以重新利用,以达到资源的最大化利用^[10]。

本研究改性得到超疏水聚四氟乙烯(PTFE),并将其与亲水疏油的脱脂棉(Cot)混合构建了异质聚结材料(Cot+超疏水PTFE),通过调控纤维孔径、孔

收稿日期:2024-01-18;修回日期:2024-06-05

基金项目:石油化工环境污染防治技术国家地方联合工程研究中心和工业废水资源化与无害化国家工程研究中心开放课题(ZC0607-0115)

作者简介:刘黎颖(1998-),女,硕士生,研究方向为污染控制化学,784616058@qq.com;张秀芳(1973-),女,博士,教授,研究方向为污染控制化学,通讯联系人,zhangxf@dlpu.edu.cn。

隙率和长度等参数,调控油水分离性能,在保证更低压降及更长使用寿命的同时,实现更优异的油水分离效果。

1 材料与方 法

1.1 试剂与材料

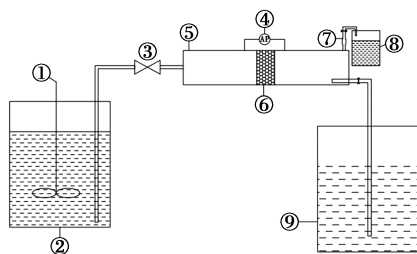
0#柴油:中国石化大连某加油站;石油磺酸盐:含量 30 wt%,山东优索化工科技有限公司;脱脂棉布:喀斯玛(北京)科技有限公司;PTFE 布:安平韵铃过滤材料有限公司;超疏水涂料(氟硅烷聚合物):东莞维晶纳米材料有限公司。

1.2 仪器与设备

HR-500 型高速剪切均质乳化机:上海沪仪实业有限公司;Astool DM-280 型便捷式差压计:日本 ASONE 株式会社;BT300-2J 型蠕动泵:保定兰格恒流泵有限公司;Biolin Theta Flex 型光学接触角测量仪:瑞典百欧林科技有限公司;JSM-7800F 热场发射扫描电镜系统:日本岛津有限公司;Nicolet iS20 傅里叶红外光谱:美国赛默飞世尔科技有限公司;OIL490 型红外分光测油仪:北京华夏科创仪器有限公司;Mastersizer 3000 型激光粒度仪:英国马尔文仪器有限公司。

1.3 实验装置

聚结反应器由玻璃制成,长度为 500 mm,直径为 60 mm。将聚结材料作为床层填充在反应器内,含油污水由进水槽经蠕动泵输送至聚结反应器,在床层内完成油滴的截留、聚结和分离过程。从床层脱离的油珠上浮,油层通过上方出口收集到出油槽中,水层通过下部的排水管排出。纤维聚结除油工艺流程如图 1 所示。



①机械搅拌器;②进水槽;③蠕动泵;④差压计;⑤聚结反应器;
⑥聚结材料床层;⑦油包;⑧收油箱;⑨出水槽

图 1 纤维聚结除油工艺流程示意图

1.4 含乳化油废水配制

实验室通过自行配制含油污水作为本研究的处理对象,以此来研究聚结床层的除油性能。将定量的 0#柴油(最终水量的 10%)置于少量水中,用高速

剪切机进行剪切搅拌 10 min 得到母液,再用定量的水将母液稀释到指定浓度,经高速剪切搅拌 10 min 得到乳化油^[11]。然后加入石油磺酸铵,使乳化油具有较好的稳定效果。

1.5 聚结材料

1.5.1 改性超疏水 PTFE

将 PTFE 布清洗干净并烘干(清除表面水及油类),将超疏水涂料均匀喷涂至上述 PTFE 布表面,放入 80℃烘箱中烘干 30 min;待超疏水涂层干燥后,取出常温放置 2 h,使得超疏水涂层更加牢固,得到超疏水 PTFE。

1.5.2 Cot+超疏水 PTFE 聚结材料

首先确定床层需要的长度,通过孔隙率公式计算所需要的质量,按照要求与计算结果裁剪脱脂棉布与超疏水 PTFE 布,然后将脱脂棉布平铺到超疏水 PTFE 布上,最后将其按照聚结反应器内径卷为柱状,装填至聚结反应器内。

1.6 评价指标

1.6.1 孔隙率

聚结床层的孔隙率是影响聚结除油的一个重要因素,孔隙率可根据填充材料的质量和密度来计算^[12],计算公式如(1)所示:

$$\varepsilon = [1 - 4m/(\pi l \rho d^2)] \times 100\% \quad (1)$$

式中: ε 为孔隙率; m 为聚结材料的质量,g; l 为聚结材料长度,cm; d 为聚结反应器的内径,cm; ρ 为聚结材料的密度,g/cm³。

1.6.2 品质因子

为了更直观的研究材料的聚结性能,确定聚结除油时床层的最佳参数,引入了品质因子(QF)^[13]。品质因子考虑了材料在聚结过程中压降和去除率共同作用的结果,品质因子由公式(2)计算:

$$QF = [-\ln(1 - E)]/\Delta P \quad (2)$$

式中:QF 为品质因子,kPa⁻¹;E 为去除率,%; ΔP 为在聚结过程中聚结床层两侧的压强差,kPa。

2 结果与讨论

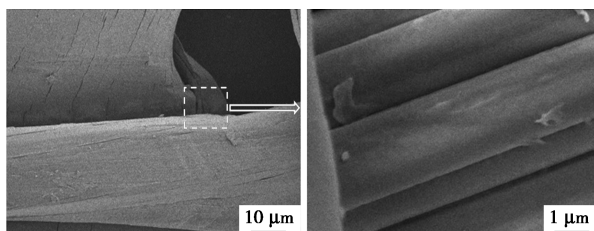
2.1 材料接触角测量

利用光学接触角测量仪测试改性前后两种材料与水的接触角,未改性的 PTFE 与水的接触角为 126.83°,改性后的 PTFE 与水的接触角为 157.22°。改性后的 PTFE 与水的接触角满足超疏水条件(接触角 $\geq 150^\circ$),表明超疏水 PTFE 已经成功制备。

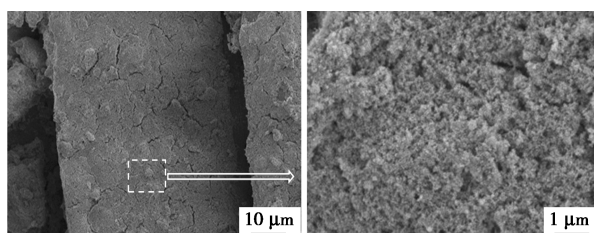
2.2 材料表征

PTFE 纤维形貌比较均匀,由纤维交织而成。

超疏水 PTFE 表面附着了超疏水涂料形成的涂层,且该涂层呈现较为均匀的微/纳结构。2 种材料扫描电镜图如图 2。



(a) 未改性 PTFE 的宏观和微观局部放大图



(b) 超疏水 PTFE 的宏观和微观局部放大图

图 2 两种 PTFE 材料扫描电镜图

图 3 为超疏水 PTFE 红外光谱图, 698 cm^{-1} 处的吸收峰是 PTFE 分子链中的 C—C 键伸缩振动峰, $1\ 202\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 PTFE 分子链中的 C—F 键伸缩振动, $2\ 920\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是分子链中 C—H 伸缩振动, $1\ 453\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 C—H 键的单键振动峰, $1\ 063\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是 C—F 弯曲振动, 452 cm^{-1} 处的吸收峰是 C=C 弯曲振动峰, 803 cm^{-1} 处的吸收峰是 C—Si 键的伸缩振动, 表明 PTFE 负载超疏水涂层已经成功制备。

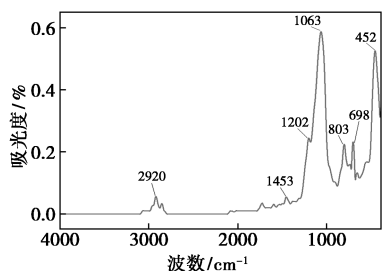
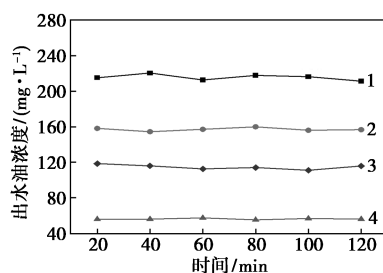


图 3 超疏水 PTFE 的红外光谱图

2.3 不同材料对聚结性能的影响

为了研究超疏水改性的材料和异质聚结材料对聚结除油性能的影响,在进水含油量为 $1\ 000\text{ mg/L}$ 、表观流速 4.2 m/h 的条件下,对 PTFE 和改性后的超疏水 PTFE、Cot+PTFE 和 Cot+超疏水 PTFE 作为聚结床层的除油性能进行了对比。不同填料材料对除油效果的影响见图 4。

由图 4 可知,这 4 种纤维填料材料聚结分离效



1—PTFE;2—超疏水 PTFE;3—Cot+PTFE;4—Cot+超疏水 PTFE

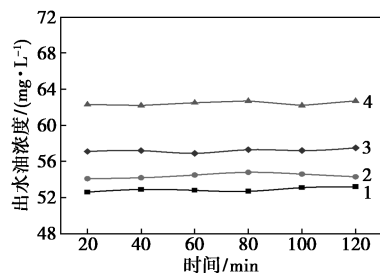
图 4 不同材料对除油效果的影响

果差异明显。PTFE 作为床层时,出水油浓度为 220 mg/L ,超疏水 PTFE 的出水油浓度为 155 mg/L ,超疏水改性提高了 PTFE 的除油性能;后将 Cot 分别与 PTFE 和超疏水 PTFE 组合,出水油浓度分别为 120 mg/L 、 55 mg/L 。Cot 是亲水疏油材料,较强的亲水疏油性有利于水的导流作用,继而提高聚结分离效果,Cot+超疏水 PTFE 的除油效率最高,油去除效率达到 94.41% 。

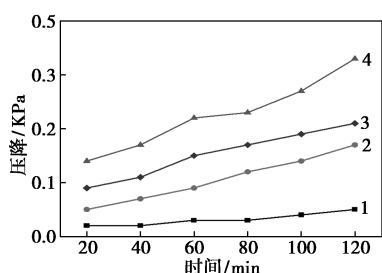
因此,后续利用 Cot+超疏水 PTFE 作为规整异质聚结床层进行进一步的聚结性能研究,探讨不同条件对床层的聚结分离效果的影响。

2.4 进水油浓度对聚结性能影响

基于 Cot+超疏水 PTFE 规整异质聚结材料,在表观流速 4.2 m/h 的条件下,考察进水油浓度分别为 500 、 $1\ 000$ 、 $1\ 500\text{ mg/L}$ 和 $2\ 000\text{ mg/L}$ 的含油污水对材料除油效果和压降影响,见图 5(a)、图 5(b)。随着进水油浓度升高,出水油浓度和压降也有小幅度升高。Cot+超疏水 PTFE 规整异质聚结材料在处理进水油浓度为 500 、 $1\ 000\text{ mg/L}$ 和 $1\ 500\text{ mg/L}$ 低中浓度的含油污水时,最终的出水油浓度可以降低到 $51\sim 57\text{ mg/L}$,压降可以稳定在 $0.02\sim 0.16\text{ kPa}$ 。在进水油浓度为 $2\ 000\text{ mg/L}$ 的高浓度进水条件下,Cot+超疏水 PTFE 材料也可以保证稳定除油,最终出水油浓度稳定在 62 mg/L ,去除率可达 96.61% ,且 2 h 内压降仅升高了大约 0.2 kPa 。综上,Cot+超疏水 PTFE 能有效处理不同浓度的含油污水,具有优异的处理效果,且性能保持稳定。



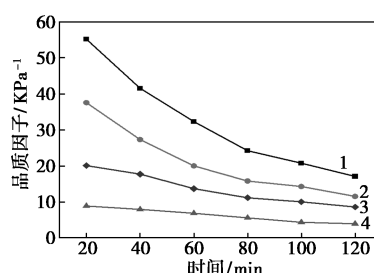
(a) 对除油效果的影响



(b) 对压降的影响

1—500 mg/L; 2—1 000 mg/L; 3—1 500 mg/L; 4—2 000 mg/L

图 5 进水油浓度对除油效果和压降的影响



(b) 对品质因子的影响

1—50 mm; 2—100 mm; 3—150 mm; 4—200 mm

图 6 材料长度对除油效果和品质因子的影响

2.5 床层长度对聚结性能影响

2.5.1 床层长度对除油效果影响

在进水油浓度 1 000 mg/L、表观流速 4.2 m/h 的条件下,研究了不同床层长度的 Cot+超疏水 PTFE 规整异质聚结材料对除油效果的影响,见图 6(a)。材料的床层长度从 50 mm 增加到 100 mm 时,出水中的油浓度从 54 mg/L 左右下降到 50 mg/L,去除率达到 95.05%,之后随着床层长度的增加,出水油浓度的变化不明显,去除率也趋于稳定。当床层长度为 50 mm 时,随着聚结实验的运行,出水油浓度有缓慢增加的趋势,其原因主要为床层长度的变化会引起水力停留时间发生变化,床层长度越长,油滴与床层的接触时间就越长,更有利于含油污水的处理,但当床层长度增加到满足油滴所需聚结时间之后,增加床层长度对聚结除油效果影响很小。当床层长度为 50 mm 时,床层中的水流通道很短,油滴不能被有效的拦截聚结,而且长时间的运行导致通道不断变大,使出水水质逐渐变差,导致出水油浓度随聚结时间增加而增加。

2.5.2 床层长度对品质因子影响

图 6(b)为不同床层长度的品质因子随时间的变化曲线。品质因子随着床层长度的增加而减小,显而易见,床层压降随着床层长度的增加而升高。表明床层长度的增加不仅不会大幅度的提高聚结效率和品质因子,反而会使聚结后的油滴通过较长的

床层,阻力增大,以至于增加整个床层的压降。综上所述,床层长度存在一个最佳值,结合品质因子可以得知,规整异质聚结材料的最佳床层长度应为 100 mm。

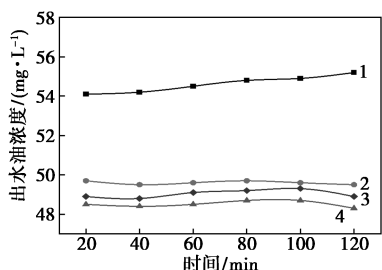
2.6 床层孔隙率对聚结性能影响

2.6.1 床层孔隙率对除油效果影响

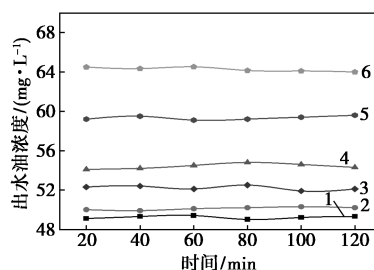
研究了 Cot+超疏水 PTFE 材料的不同孔隙率对除油性能的影响,见图 7(a)。由图 7(a)可知,随着孔隙率的增加,出水油浓度不断增加,含油污水中油滴的去除率逐渐下降。因为随着床层孔隙率的增加,床层拦截油滴能力逐渐下降,形成越来越多的孔隙通道,油滴就会随着这些孔隙通道流出。当 Cot+超疏水 PTFE 床层的孔隙率从 0.914 减小到 0.883 时,出水油浓度从 65 mg/L 下降到 52 mg/L。因孔隙率减小到一定数值时,孔隙通道的数量和占比也趋于稳定,之后即使随着孔隙率的下降,出水油浓度变化也不大。

2.6.2 床层孔隙率对品质因子的影响

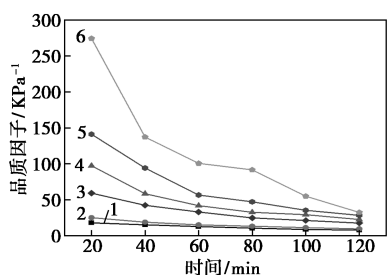
图 7(b)是不同孔隙率床层的品质因子随时间的变化曲线。可以看出,品质因子都能稳定在一个较大的数值,且随孔隙率的减小而减小,床层压降则相反。考虑品质因子,若出水中油浓度的要求较小,孔隙率为 0.914 的床层就能满足。如果需要出水水质较高,孔隙率为 0.883 的床层可达到要求,再减小孔隙率,不仅对除油效率影响不大,且能显著增加床层的压降,品质因子也将随之减小。



(a) 对除油效果的影响



(a) 对除油效果的影响



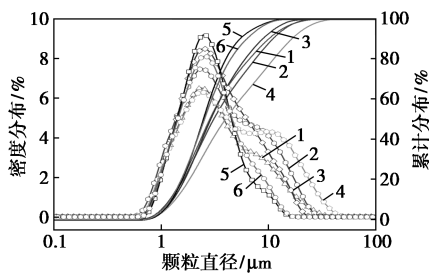
(b) 对品质因子的影响

1—0.864;2—0.872;3—0.883;4—0.892;5—0.904;6—0.914

图 7 材料孔隙率对除油效果和品质因子的影响

2.6.3 床层孔隙率对油滴粒径的影响

图 8 为不同孔隙率床层的出水油滴粒径分布曲线。其中床层孔隙率为 0.914、0.904、0.892 时,出水中含有较多的大于 10 μm 的油滴粒径,这是因为孔隙率增大,孔隙通道增多,对油滴的拦截捕获能力下降,继而这些油滴出现在出水中,造成出水中含有较多的大于 10 μm 的油滴。当孔隙率等于小于 0.883 时,从曲线可以看出,粒径大于 10 μm 的油滴减少很多,且出水油滴粒径也变得越来越大,这是由于孔隙率的减小,含油污水的排出通道也减小,继而有利的拦截了水中油滴。这也是 Cot+超疏水 PTFE 材料的出水油浓度随着孔隙率的减小而减小的主要原因。

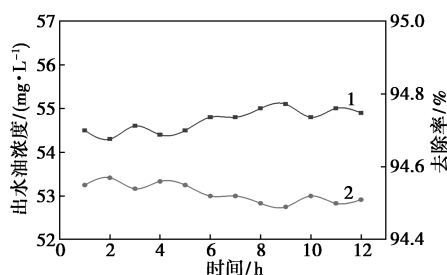


1—0.892;2—0.904;3—0.883;4—0.914;5—0.864;6—0.872

图 8 材料孔隙率对出水油滴粒径的影响

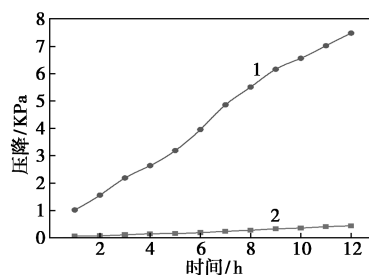
2.7 床层稳定性评价

图 9(a)是对 Cot+超疏水 PTFE 材料在长时间下聚结性能的评价。在长时间下,聚结出水油浓度可以稳定在 54~55 mg/L ,去除率稳定在 94.5%左右,材料在长时间的运行下仍然可以保持良好的聚结除油性能,出水油浓度和去除率可以稳定在理想数值。图 9(b)是不同材料在聚结过程中压降随时间的变化曲线,由图 9(b)可知,在长时间下 Cot+超疏水 PTFE 材料的压降稳定,仅从 0.05 kPa 增加到 0.55 kPa,12 h 内的压降仅增加了 0.5 kPa。



1—出水油浓度;2—去除率

(a) 出水油浓度及去除率随时间的变化

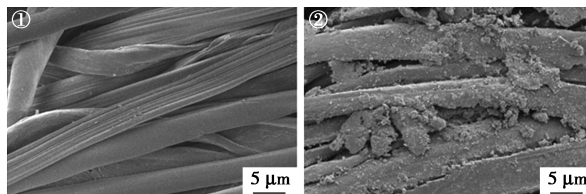


1—Cot;2—Cot+超疏水 PTFE

(b) 不同材料压降随时间的变化

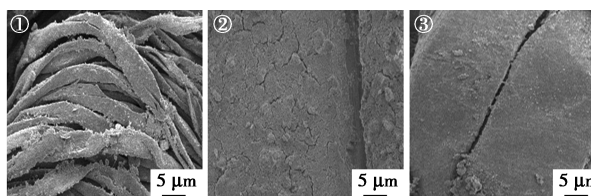
图 9 出水油浓度、去除率、不同材料压降随时间的变化

图 10 是单独的 Cot 和 Cot+超疏水 PTFE 使用前后的电镜扫描图。单独使用后的 Cot 被附着在床层的残留物严重堵塞,造成聚结过程中压降迅速升高,处理通量和性能不稳定。而 Cot+超疏水 PTFE 中的 Cot 表面残留物较少,且超疏水 PTFE 表面几乎不存在残留物,因此 Cot+超疏水 PTFE 床层材料可以在长周期运行中保持稳定的通量和高效的除油效率。



①未使用的 Cot;②使用后的 Cot

(a) 单独使用 Cot 材料进行聚结实验



①使用后的 Cot;②未使用的超疏水 PTFE;

③使用后的超疏水 PTFE

(b) 使用 Cot+超疏水 PTFE 进行聚结实验

图 10 不同材料聚结反应前后扫描电镜图

3 结论

(1) 本研究结合了不同表面润湿性的两种材料作为聚结床层处理乳化油,在进水油浓度 1 000 mg/L、表观流速 4.2 m/h 的条件下,Cot+超疏水 PTFE 最终出水油浓度达到 55 mg/L,去除效率达到 94.41%;且 Cot+超疏水 PTFE 可以有效处理各类含油浓度的乳化油。

(2) 结合品质因子,Cot+超疏水 PTFE 处理含油污水的最佳床层长度应为 100 mm 左右,此时出水油浓度为 49 mg/L,压降在 0.1 kPa。

(3) 若对出水中油浓度的要求较小,床层的孔隙率应为 0.914,如果需要出水水质较高,则床层孔隙率应为 0.883;当孔隙率等于小于 0.883 时,出水中几乎不存在粒径大于 10 μm 的油滴。

(4) 在长时间的聚结除油下,Cot+超疏水 PTFE 出水油浓度可以稳定在 54~55 mg/L,压降仅从 0.05 kPa 增加到 0.55 kPa,Cot+超疏水 PTFE 床层的使用寿命长,且性能稳定。

参考文献

- [1] 王维,费庆志,孙承林,等.混凝-芬顿氧化处理油田含油污水[J].现代化工,2015,35(10):105-109.
- [2] Huan S, Yong H, Yue S. Progress in the development and application of permeable reaction barriers for remediation of dissolved oil contaminants in groundwater[J].Water and Environment Journal,2021,36(2):188-198.
- [3] Mashael A, Joel M, Igor K, et al. Evaluation of polymeric adsorbents via fixed-bed columns for emulsified oil removal from industrial wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49(5):256-268.
- [4] 卢浩,刘懿谦.油水强化分离技术[J].化工进展,2020,39(12):4954-4962.
- [5] Jinjuan X, Jiamin G, Minjing X, et al. Super-wetting porous g-C₃N₄ nanosheets coated PVDF membrane for emulsified oil/water separation and aqueous organic pollutant elimination[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(19):121-128.
- [6] 黄斌,张威,王莹莹,等.超滤膜处理油田含油污水研究进展[J].现代化工,2017,37(6):43-47.
- [7] 石德金,马骋,赵天娇.含油污水处理技术的比较研究[J].北方环境,2011,62(8):897-901.
- [8] 张雷,郭海燕,刘惠玲.聚结除油器改造及处理聚驱采出液效果研究[J].现代化工,2012,32(7):95-97.
- [9] Yunpeng Y, Motoki H, Yasuhiro M. Continuous coalescence and separation of oil-in-water emulsion via polyacrylonitrile nanofibrous membrane coalescer[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 657(10):689-695.
- [10] Gadhve D A, Chase G G. Coalescence of emulsified water drops in ULSD using a steel mesh electrowet coalescer[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 254(11):110-118.
- [11] 马宁,周健,王雪清,等.脱脂棉纤维梯级聚结工艺的除油性能[J].化工环保,2023,43(5):620-626.
- [12] Qian W, Nan G, Xingtuan Y, et al. The effects of grain size and fractal porosity on thermal conductivity of nano-grained graphite: A molecular dynamics study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220(12):152-159.
- [13] Kaur S, Sundarrajan S, Rana D, et al. Review: The characterization of electrospun nanofibrous liquid filtration membranes[J]. Mater Sci, 2014, 49(18):6143-6159. ■
- [6] 陈璐,曾韬,李竹,等.纳米 TiO₂ 光催化臭氧化技术在处理难降解有机废水中的应用[J].环境工程,2014,32(S1):125-129.
- [7] 伍昌年,汤利华,凌琪.改性粉煤灰处理模拟含酚废水的实验研究[J].工业水处理,2011,31(10):57-60.
- [8] Zhang R, Wang H, Liu Y, et al. Extraction behavior of phenolic pollutants by ammonium-based deep eutectic solvents from wastewater[J]. Water Air and Soil Pollution, 2023, 234(7):1-16.
- [9] Guilherme Dias Rodrigues, Leandro Rodrigues de Lemos, Luis Henrique Mendes da Silva, et al. A green and sensitive method to determine phenols in water and wastewater samples using an aqueous two-phase system[J]. Talanta, 2010, 80(3):1139-1144.
- [10] Zhang C, Yang X, Dai J, et al. Efficient extraction of phenol from wastewater by ionic micro-emulsion method: Anionic and cationic[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 58(6):137-145.
- [11] 强喆林,王玲,吴迪,等.含酚废水处理技术研究进展[J].当代化工,2021,50(9):2206-2210.
- [12] 孙海丽,李春琴,岳斌,等.苯酚废水处理研究进展[J].绿色科技,2021,23(6):56-57.
- [13] Feng Y, Song H, Xiao M, et al. Development of phenols recovery process from coal gasification wastewater with mesityl oxide as a novel extractant[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166(11):1314-1322.
- [14] Li H, Wan L, Chu G, et al. (Liquid+liquid) extraction of phenols from aqueous solutions with cineole[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2017, 107(4):95-103.
- [15] 刘宁,杨思宇.煤气化废水酚氨分离回收系统的强化工艺[J].工业水处理,2019,39(5):84-87.
- [16] 赵宗祺,王超,李团结,等.高浓度含酚有机废水络合萃取试验[J].净水技术,2022,41(11):102-107.
- [17] 管国锋,徐晨,姚虎脚.络合萃取法分离多元羧酸盐析效应的研究[J].化工环保,2004,24(4):240-243.
- [18] 王鹏辰,莫娟,谢汝桢,等.响应曲面优化柏木屑微波活性炭的制备及其吸附 AR88 性能[J].环境工程学报,2017,11(11):6109-6116.
- [19] 唐维,王全红,刘永红,等.响应面法优化 TiO₂/ACF 光催化连续处理 ARB 废水研究[J].工业水处理,2022,42(9):79-86.
- [20] 王文强,王爱丽.响应面法优化粉末活性炭去除水中的 Cr(VI)[J].工业水处理,2017,37(3):56-60. ■

(上接第 206 页)