

刘杰, 温军杰, 吴怀之, 等. 2014. 原煤吸附净化含油污水的实验研究[J]. 环境科学学报, 34(1): 91-96

Liu J, Wen J J, Wu H Z, et al. 2014. Purification of oily wastewater by crude coal adsorbent filtering medium[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(1): 91-96

原煤吸附净化含油污水的实验研究

刘杰¹, 温军杰^{2,*}, 吴怀之¹, 葛晶晶³

1. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所生物基材料重点实验室, 青岛 266100

2. 清华大学环境学院, 北京 100084

3. 青岛市环保局, 青岛 266100

收稿日期: 2013-03-27

修回日期: 2013-05-17

录用日期: 2013-06-04

摘要:通过室内模拟研究了各因素对原煤吸附净化含油污水的影响,并探讨了利用原煤吸附净化含油污水的可行性.研究表明,当吸附温度为 20 ℃, pH 为 5, 吸附时间为 10 min, 煤粒径为 3 mm, 投加浓度为 0.075 g·mL⁻¹ 时, 原煤吸附除油的效果最佳, 稳定性最好. 结果同时表明, 在最佳条件下, Langmuir 方程可以较好地描述低浓度重质油在阳泉烟煤上的吸附过程, 且可判知该反应较易发生, 可使油组分的去除率达 52.28% 以上, 出水均符合排放要求. 研究结果为含油污水的治理提供了科学依据.

关键词: 阳泉烟煤; 含油污水; 静态吸附; 动态吸附

文章编号: 0253-2468(2014)01-91-06

中图分类号: X703

文献标识码: A

Purification of oily wastewater by crude coal adsorbent filtering medium

LIU Jie¹, WEN Junjie^{2,*}, WU Huaizhi¹, GE Jingjing³

1. CAS Key Laboratory of Bio-based Materials, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266100

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084

3. Qingdao Environmental Protection Bureau, Qingdao 266100

Received 27 March 2013;

received in revised form 17 May 2013;

accepted 4 June 2013

Abstract: Laboratory experiments were conducted to study the influence of various parameters on purification of oily wastewater by crude coal adsorbent filtering medium. The feasibility of using crude coal adsorbent filtering medium to purify oily wastewater was also discussed. Results show that crude coal adsorbent filtering medium exhibits the best performance and stability when adsorption temperature is 20 ℃, pH is 5, adsorption time is 10 min, granular size is 3 mm and the dose is 0.075 g·mL⁻¹. Results also suggest that Langmuir equation can describe the adsorption process of heavy oil in Yangquan bituminous very well under the optimum condition. Moreover, it could be predicted that the reaction would occur readily. The removal rate of oil could reach more than 52.28% and the effluent could meet the requirements of discharge standards. The study would provide scientific basis for the technology of purifying oily wastewater.

Keywords: Yangquan bituminous coal; oily wastewater; static adsorption; dynamic adsorption

1 引言(Introduction)

重质油是本世纪能源利用的重要组成部分,需要大力开发重质油资源以满足能源需求的增长(Al-Futaisi *et al.*, 2007). 但重质原油在开采、运输过程中由于跑、冒、滴、漏等原因,均有原油散落于地面(Machín-Ramírez *et al.*, 2008). 声化学的超声作用是进行油水分离净化石油污染场地的有效手段,而

利用声化学手段净化重质油污染土壤过程中势必会产生大量含重质油的清洗污水(Chen *et al.*, 2003; Pouloupoulos *et al.*, 2005). 含油污水中的原油一般以漂浮油、分散油、乳化油、溶解油和油-固体物 5 种形式存在(James-Smith *et al.*, 2007). 除漂浮油外,均不能采用静置法使油水得到有效分离(da Rosa *et al.*, 2007). 因此,除油成为含油污水治理的重中之重.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40572140, 40872150)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40572140, 40872150)

作者简介: 刘杰(1980—), 女, E-mail: liujie19801208@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: 241834082@qq.com

Biography: LIU Jie(1980—), female, E-mail: liujie19801208@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: 241834082@qq.com

含油污水处理的传统方法分为物理法 (Su *et al.*, 2003; Nicolaisen *et al.*, 2003)、化学法 (Owen *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2007) 和生物法 (Kriipsalu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2005) 等. 传统的处理方法虽取得了一定的成果, 但仍有一些不足, 这些不足促使研究人员不断地探索处理含油污水的新技术. 而吸附法 (曹乃珍等, 1997; 吴敦虎等, 1996) 以其可以简易、快速地将污染物直接富集在吸附剂上的独特优势, 越来越多地被应用在含油污水的治理上.

煤是一种天然燃料, 本身富含丰富的孔隙结构, 其孔隙结构注定其具有独特地吸附性能, 是一种天然的碳质吸附剂. 用煤作吸附剂净化含油污水的独特优点是不用考虑吸附剂与油的再分离, 可以将其作为燃料直接燃烧, 使废油得以重新利用, 减少能源浪费, 节约成本. 本研究拟选用阳泉烟煤作吸附剂, 对重质油污染场地的含油污水进行吸附净化.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 实验材料

2.1.1 吸附剂 所用吸附剂为孤岛采油厂集中供热站的燃煤——阳泉烟煤, 其元素组成见表 1.

表 1 阳泉烟煤组成

Table 1 Composition of the Yangquan bituminous coal

方法	干基分析	结果
全元素分析	基于干基的含水量	1.62%
	灰分 (±0.1%)	24.90%
	挥发物 (±0.4%)	9.85%
	固定碳 (±0.4%)	63.47%
	C (±0.3%)	63.1%
	H (±0.1%)	2.2%
	O (±0.6%)	2.6%
	N (±0.4%)	1.0%
灰分分析	元素组成*	
	金属	
	Al	17.43%
	Fe	3.661%
	Mn	0.00285%
	Zn	0.0203%
	主要阳离子	
	Ca ²⁺	1.246%
	Mg ²⁺	0.978%
	Na ⁺	0.237%
	K ⁺	1.705%
	非金属物种	
	Eshka 重量法	S
荧光 X-ray 光谱	Cl	0.235%

注: * : 元素含量在 0.01% ~ 0.10% 范围内的误差为 ±0.01%, 对含量超过 0.10% 的误差为 ±0.02%. 煤样产地: 阳泉.

2.1.2 含油污水 场地污染土取自孤岛采油厂, 对其进行 20 °C、pH 为 9 的声化学清洗, 静置破乳 45 min 后, 撇除上层浮油, 对下层泥浆进行水土分离、稀释后, 制得实验所需含油污水, 含油量为 8.5 mg·L⁻¹. 超过了《山东省半岛流域水污染物综合排放标准》(DB37676—2007) 中对石油类含量的限值要求 (5 mg·L⁻¹).

2.2 分析方法

温度采用水银温度计测定, 量程 0 ~ 150 °C. pH 采用意大利 HANNA 公司产便携式酸度计 (型号: 30100-0165) 测定. 石油类含量按《海洋监测规范》(GB17378.4—2007) 中紫外分光光度法测定. 所用正己烷 (分析纯) 购自天津市富宇精细化工有限公司. 仪器采用日本岛津公司产 UV2550 型紫外可见分光光度仪; 波长范围: 190 ~ 900 nm (所选吸收波长为 254nm); 分辨率: 0.1nm; 谱带宽度: 6 段转换; 双光束方式. 测定过程中, 每组设 3 个平行. 台湾产 48 kHz、68 W 超声波单槽清洗器, 槽体尺寸: 140 mm × 130 mm × 75 mm, 槽体容积: 1.36 L.

2.3 研究方法

2.3.1 泥浆沉降时间的确定 声化学清洗后, 分别在 0、2、4、6、8、10、12 min 取上部泥浆 23.5 mL, 置于烘箱中, 于 105 °C 下烘干, 对残留固体进行称重, 以样品中 TSS 的质量为评价指标, 确定适宜的沉降时间.

2.3.2 阳泉烟煤对含油污水中油的吸附 吸附剂的静态吸附条件优化: 以含油污水中油的去除率 (η) 为评价指标, 考察阳泉烟煤在不同温度 (5、10、15、20、25、30、35、40 °C)、pH 值 (4、5、6、7、8、9)、时间 (0、3、5、10、15、30、45 min)、粒径 (2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 mm)、吸附剂投加浓度 (0.025、0.0375、0.050、0.075、0.100、0.150 g·mL⁻¹) 下对除油效果的影响. 油的去除率按式 (1) 计算. 吸附过程中, pH 值的调节用 1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液和 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液进行.

$$\eta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_0 为原水中含油浓度 (mg·L⁻¹), C_e 为出水中含油浓度 (mg·L⁻¹).

动态吸附: 20 °C、吸附剂粒径 3.0 mm、pH 为 5 的条件下进行动态吸附实验, 实验装置如图 1 所示. 吸附剂的装卸可经由法兰口直接进行. 为增加装置的可控制性, 使水流均匀地分散于过水断面, 采用

上向流式布置固定床。

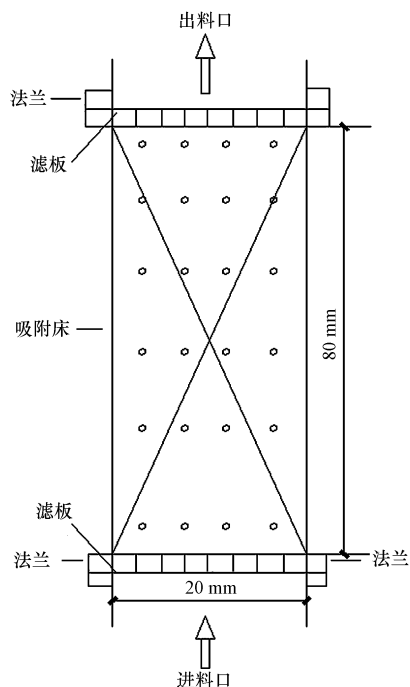


图1 动态吸附试验装置图

Fig. 1 Experimental setup for dynamic adsorption

吸附固定床的相关参数见图1所示。经公式 $BV = \pi r^2 h$ 计算床体积(BV)为 25.1 cm^3 。煤床层干重组装密度 $0.706 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，按煤颗粒密度 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 计算，充水后需用水量约 9 cm^3 。

吸附前活化步骤包括：通过兰格蠕动泵将 500 mL 去离子水泵入吸附固定床，控制流量为 $10 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ，去离子水的 pH 值与预流入的含油污水一致。用振动器振动吸附固定床去除其中的气泡，活化结束后，固定床中的残余水通过抽吸装置排出。

通过兰格蠕动泵将含油污水泵入煤吸附固定床，分别控制流量约为 2.5 、 5 、 $10 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ，样品在间隔特定体积后被再次采集，测定其中石油类含量。

2.3.3 吸附等温线 在最优吸附条件下，改变含油水初始浓度 (0.74 、 0.89 、 1.11 、 1.48 、 2.23 、 4.56 、 6.89 、 $8.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，按式(2)计算吸附容量 q_e ，绘制吸附等温线。Langmuir 吸附等温线的线性形式如式(3)所示。

$$q_e = V(C_0 - C_e)/m \quad (2)$$

式中， q_e 为吸附容量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)， V 为水的体积 (L)， m 为吸附剂用量 (g)。

$$q_e = q_{\max} \frac{k_L C_e}{1 + k_L C_e} \Rightarrow \frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max}} \cdot \frac{1}{k_L C_e} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (3)$$

式中， k_L 为 Langmuir 常数， q_{\max} 为单层饱和吸附容量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 泥浆沉降时间

泥浆中含有悬浮固体颗粒 (TSS)，其粒径一般为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 。主要包括粘土颗粒 ($0.05 \sim 4 \mu\text{m}$)、粉沙 ($4 \sim 60 \mu\text{m}$) 和细砂 ($60 \sim 100 \mu\text{m}$)。单从粒径大小来看，若不对泥浆的水土体系进行分离，粉土颗粒就会吸附到煤的表面，甚至进入大孔中造成堵塞，从而影响煤的吸附性能。

将 7 个不同时间节点的样品置于烘箱中， $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干称重，发现在最初的 6 min 泥浆中固体快速沉降，样品干重由最初的 2.70 g 迅速降至 0.20 g ；而 6 min 以后，水土的分离效果变得不再明显；至第 10 min ，TSS 量仅比第 6 min 下降 0.02 g ；第 10 min 与第 12 min 的 TSS 量基本不变。从整个沉降过程可知，泥浆中水土分离的静置沉降时间宜选为 10 min 。

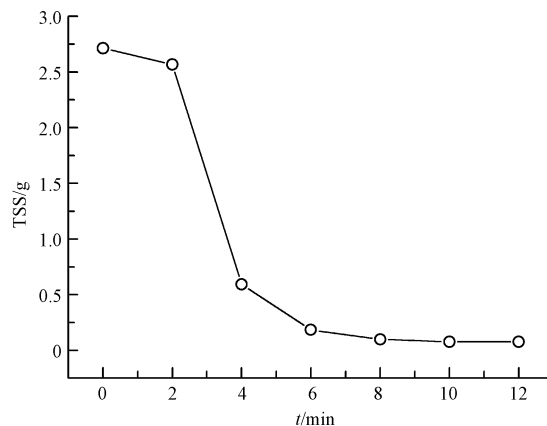


图2 分离时间对悬浮颗粒的影响

Fig. 2 The influence of settling separation time on TSS

3.2 静态吸附

吸附体系温度对吸附效果的影响见图3a。由图可知，阳泉烟煤吸附重质油组分的最优温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，此温度下油的去除率为 73.86% 。继续升高温度，去除率出现下降趋势，特别是温度由 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升至 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，去除率急剧下降为 18.64% 。分析其原因，煤吸附去除油的过程无论是放热还是吸热，在温度较低时，体系温度的升高总是能加快反应速度，短时间内使吸附容量增大，去除率升高；当温度升高到一定程度，反应向解吸方向进行，去除率下降。对于该异常变化，Gálvez 等 (2003) 在碳基煤球吸附去除 NO 的研究中，也获得了类似的结果。由此

可见,煤吸附剂在净化含油污水时,吸附体系温度保持 20 ℃ 即可。

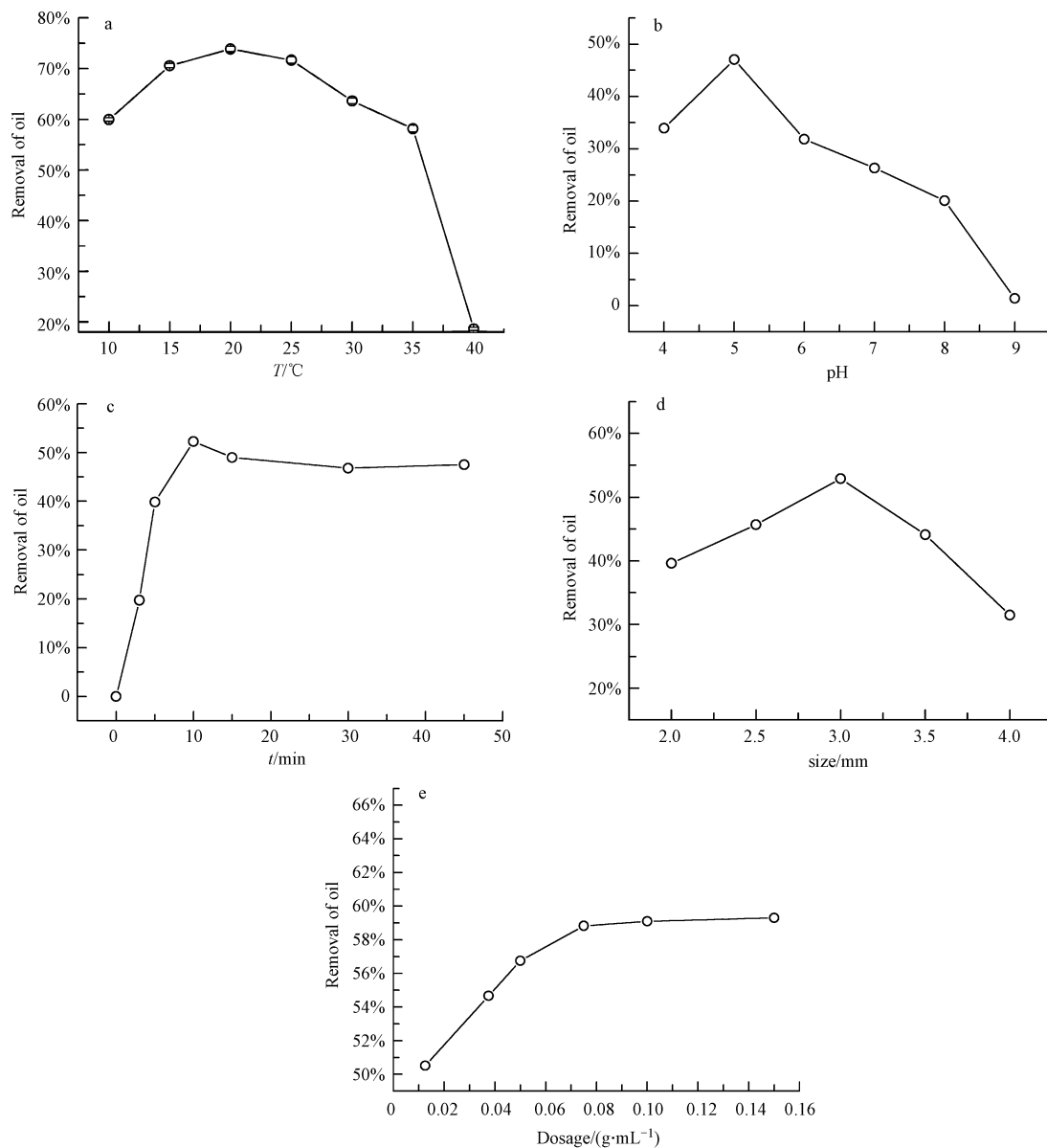


图3 不同因素对油吸附去除的影响(a. 温度, b. pH, c. 吸附时间, d. 粒径, e. 投加浓度)

Fig. 3 The influence of different factors on oil removal (a. temperature, b. pH, c. adsorption time, d. granular size, e. dosage of adsorbent)

pH 是影响水除油的重要影响因素. 通过配制不同初始 pH 的油水混合系统进行静态吸附, 测定不同 pH 值下的吸附效果. 由图 3b 可知, pH 升为 5 时, 去除率达最高值 47.06%; 随后, 随着 pH 升高, 去除率逐渐降低, pH 为 9 时, 吸附除油率仅为 1.4%, 升高 pH 对煤吸附油不利. 究其原因, 主要是因为碱性条件下有利于 O/W 型重质油乳状液的稳定, 不利于油组分从油水体系中被吸附到煤的表面 (Merv *et al.*, 2009). 另外, 重质油中的酸性组分、两性组分及沥青质等均具有降低界面张力的特性,

而水相的碱性组分能直接活化重质油的酸性组分、两性组分以及沥青质等, 所以 pH 越高越有利于稠油乳状液的稳定 (Anru *et al.*, 2010; Andreas *et al.*, 2006), 油水分离越困难. 通过以上分析可知, 在采用原煤作吸附剂净化含油污水时, 为了破坏乳状液的稳定性, 需引入弱酸性的环境条件, 以使油水的分离更有利, 结合实验可知, pH 为 5 时净化效果最佳.

保持吸附体系温度为 20 ℃、含油污水的 pH 为 5、煤的投加浓度及处理水量与上述实验保持一致,

研究不同吸附时间对除油效果的影响,实验结果如图 3c 所示.由图 3c 可以看出,在最初的 10 min 内,受浓度梯度的影响,模拟污水中的油组分能够迅速转移至吸附剂上,使去除率呈指数级增长.10 min 时,吸附量达最大值,吸附达到饱和,污水中油组分去除率达 52.28%.随后,油组分去除率基本不变.因此,煤吸附油组分的最佳吸附时间至少为 10 min.

粒径对原煤吸附除油效果的影响见图 3d.由图可知,随着吸附剂粒径的增大油组分的去除率逐渐增加,3.0 mm 时去除率达最大值,为 52.9%;之后随着粒径的增大,去除率逐渐降低.理论上,比表面积与粒径成反比,粒径越小,比表面积越大,吸附剂上可用于吸附的点位越多,单位质量吸附剂的吸附量越高,而实验结果与理论有较大出入.分析其原因,主要是因为过小的粒径极易发生抱团粘结现象,减小了吸附点位,且粒径过小,吸附剂间的空隙过小,液相不易通过;粒径过大,比表面积小,吸附剂上可用于吸附的点位越少,单位质量吸附剂的吸附量越低.

在油水中分别投加 0.0125、0.0375、0.050、0.075、0.100、0.150 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 粒径为 3.0 mm 的阳泉烟煤吸附剂.保持 pH 为 5,吸附时间为 10 min,体系温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 进行静态吸附.吸附效果如图 3e 所示.由图可知,投加浓度由 0.0125 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 升至 0.075 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,油份去除率逐渐升高,由 0.075 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 升至 0.150 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时去除率基本不变,投加浓度为 0.075 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时去除率达最大值,为 59.1%.这说明,随着投加浓度的增大,吸附剂的总表面积也相应增大,可用于吸附的点位就随之增多,导致吸附去除的油组分量也相应增大.但并不是随着投加浓度的增加,去除率也无限增大,当投加浓度达到一定值后,吸附平衡,去除率增加缓慢甚至不增加,这与粒径对油份去除率的影响原理基本一致.因此,当投加浓度为 0.075 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,阳泉烟煤吸附剂对油组分的去除效果最好.

含油污水属于稀溶液体系,该体系的吸附等温式最常用的是 Langmuir 方程,经对本实验的最佳实验条件进行拟合,等温线拟合结果见表 2.由表 2 可知,Langmuir 方程可以较好地描述低浓度重质油在阳泉烟煤上的吸附过程.由 Langmuir 吸附等温线可知,阳泉烟煤用于低浓度重质油污水的饱和吸附容量有限,仅为 0.0247 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,即 24.7 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$.Langmuir 分离因子常数 R_L 可用于判断吸附反应是

否容易进行,当 $0 < R_L < 1$ 时,可以认为吸附较易进行.故可判知,此吸附反应较易发生.

表 2 等温线拟合结果表

Table 2 Results of Isotherm

T/K	q_{\max} / $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	k_L / mg^{-1}	R_L	R^2
293	0.0247	0.375	0.545	0.9517

3.3 动态吸附

不同流量对阳泉烟煤固定床吸附效果的影响如图 4 所示.在试验选取的 3 个不同流量范围(2.5、5、10 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)内,阳泉烟煤吸附剂的吸附净化效果随流量的增加而变差.由固定床动态吸附结果可知,流量越低,吸附饱和越滞后,处理的含油污水越多.而流量加大时,穿透点会相应提前,导致穿透点吸附量减小.动态吸附表现出较好的处理能力与该吸附剂有限的吸附容量这一事实相矛盾.分析原因,认为在 pH 为 5 的条件下,高级脂肪酸根容易发生酸化反应(Merv *et al.*, 2009),生成固态的饱和和高级脂肪酸,从而被吸附剂截滤在固定床中,最终使动态吸附净化效果得到显著增强.

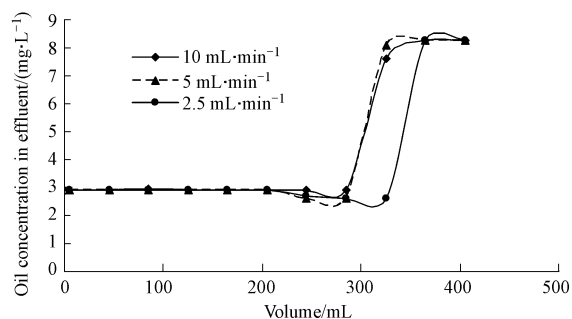


图 4 不同流量下的动态吸附穿透曲线

Fig. 4 Dynamic adsorption breakthrough curves influenced by feedwater flow variation

总之,阳泉烟煤吸附剂处理含油污水的水量在试验所选定的 3 种情况下,处理水量在小于 10 倍 BV 时,出水均符合了《山东省半岛流域水污染物综合排放标准》(DB37676—2007)中对石油类含量的限值要求($5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).而煤在吸附饱和后,持有大量油组分,使其具有更大的低位发热量,不必进行再生,可以直接作为燃料煤.因此,这种天然优势决定了其终将成为净化重质油污染水的一种重要选择.净化后的水可循环回用于重质油污染场地的清洗,从而实现节约用水的目的.

4 结论(Conclusions)

1) 超声清洗后需 10 min 的静置沉降时间以实现泥浆中水土分离。

2) 阳泉烟煤固定床净化含油污水的最佳反应条件是吸附温度为 20 ℃, pH 为 5, 吸附时间为 10 min, 煤粒径为 3 mm, 投加浓度为 $0.0075 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

3) 在最佳条件下用 Langmuir 方程可以较好地描述低浓度重质油在阳泉烟煤上的吸附过程, 且由分离因子常数 R_L 判知该反应较易发生, 可使污水中油组分的去除率达 52.28% 以上。

4) 流量对动态吸附有很大影响, 流量加大, 穿透点提前, 吸附量减小, 处理水量在小于 10 倍 BV 时, 出水均符合《山东省半岛流域水污染物综合排放标准》(DB37676—2007) 中对石油类含量的限值要求 ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 实现了水污染控制。

责任作者简介: 温军杰 (1978—), 男, 清华大学环境学院。
E-mail: 241834082@qq.com.

参考文献(References):

- Ahmed A, Ahmad J, Basma Y, *et al.* 2007. Assessment of alternative management techniques of tank bottom petroleum sludge in Oman [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3): 557-564
- Bjarne N. 2003. Developments in membrane technology for water treatment[J]. *Desalination*, 153(1/3): 355-360
- 曹乃珍, 沈万慈, 金传波. 1997. 新型石墨材料对水中油性物质脱除的实验研究[J]. *中国环境科学*, 17(2): 188-190
- Chen G H, He G H. 2003. Separation of water and oil from water-in-oil emulsion by freeze/thaw method[J]. *Separation and Purification Technology*, 31(1): 83-89
- da Rosa J J, Rubio J. 2005. The FF (flocculation-flotation) process [J]. *Minerals Engineering*, 18(7): 701-707
- Fan Y, Simon S, Sjöblom J. 2010. Interfacial shear rheology of asphaltenes at oil-water interface and its relation to emulsion stability: Influence of concentration, solvent aromaticity and nonionic surfactant [J]. *Colloids and Surfaces (A: Physicochemical and Engineering Aspects)*, 366(1/3): 120-128
- Fingas M, Fieldhouse B. 2009. Studies on crude oil and petroleum product emulsions: Water resolution and rheology [J]. *Colloids and Surfaces (A: Physicochemical and Engineering Aspects)*, 333(1/3): 67-81
- Galvez M E, Boyano A, Moliner R, *et al.* 2010. Low-cost carbon-based briquettes for the reduction of NO emissions: Optimal preparation procedure and influence in operating conditions [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 88(1): 80-90
- Hannisdal A, Ese M H, V. Hemmingsen P V, *et al.* 2006. Particle-stabilized emulsions: Effect of heavy crude oil components pre-adsorbed onto stabilizing solids [J]. *Colloids and Surfaces (A: Physicochemical and Engineering Aspects)*, 276(1/3): 45-58
- James-Smith M A, Alford K, Shah D O. 2007. Effect of long-chain alcohols on SDS partitioning to the oil/water interface of emulsions and on droplet size [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 315(1): 307-312
- Kriipsalu M, Marques M, Nammari D R, *et al.* 2007. Bio-treatment of oily sludge: The contribution of amendment material to the content of target contaminants, and the biodegradation dynamics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 148(3): 616-622
- Li Q X, Kang C B, Zhang C K. 2005. Waste water produced from an oilfield and continuous treatment with an oil-degrading bacterium [J]. *Process Biochemistry*, 40(2): 873-877
- Machín-Ramírez C, Okoh A I, Morales D, *et al.* 2008. Slurry-phase biodegradation of weathered oily sludge waste [J]. *Chemosphere*, 70(4): 737-744
- Ol'shanskii V O. 2004. Sorbent for removing crude oil and petroleum products from water and ground surface and preparation from brown coal [J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 31(7): 251
- Owen A T, Fawell P D, Swift J D. 2007. The preparation and ageing of acrylamide/acrylate copolymer flocculant solutions [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1/4): 3-14
- Pouloupoulos S G, Voutsas E C, Grigoropoulou H P, *et al.* 2005. Stripping as a pretreatment process of industrial oily wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 117(2/3): 135-139
- Su D L, Wang J L, Liu K W, *et al.* 2007. Kinetic performance of oil-field produced water treatment by biological aerated filter [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15(4): 591-594
- 吴敦虎, 吕福荣, 许涛, 等. 1996. 硼泥处理含油废水 [J]. *水处理技术*, 22(2): 113-118
- Zeng Y B, Yang C Z, Zhang J D, *et al.* 2007. Feasibility investigation of oily wastewater treatment by combination of zinc and PAM in coagulation/flocculation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3): 991-996
- Zhang Y Q, Gao B Y, Lu L, *et al.* 2010. Treatment of produced water from polymer flooding in oil production by the combined method of hydrolysis acidification-dynamic membrane bioreactor-coagulation process [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 74(1/2): 14-19