

超声辅助锆柱撑膨润土吸附刚果红的研究

郝梦亚, 朱 薇, 马姝雅, 张 晶, 端 允*

(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 太原 030000)

摘要:为了提高锆柱撑膨润土(Zirconium Pillar Bentonite, Zr-Bent)对刚果红(Congo Red, CR)的吸附速率和吸附能力,采用超声辅助 Zr-Bent 强化吸附 CR,并建立吸附预测模型,优化其反应条件,探究超声辅助吸附机理。结果表明,相较于 Zr-Bent 单独处理,超声辅助 Zr-Bent 吸附可使吸附速率提高 11 倍,去除率提高 10.3%。根据 Box-Behnken 响应面优化实验结果,当 pH 6.0、吸附时间为 10 min、吸附剂投加量为 1.5 g/L 时,CR 去除率可达 99.6%。对建立的预测模型进行验证,CR 实际去除率为 99.8%,预测精度高。根据 SEM、BET 检测和吸附动力学分析,超声不但改变了吸附剂的结构,同时能加快化学吸附的液-固相传质过程。

关键词: 锆柱撑膨润土; 超声; 刚果红; 吸附; Box-Behnken 响应面法

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0163-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.033

Adsorption of Congo red by ultrasound enhanced zirconium pillar bentonite

HAO Meng-ya, ZHU Wei, MA Shu-ya, ZHANG Jing, DUAN Yun*

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to improve the adsorption rate and capacity of zirconium pillar bentonite (Zr-Bent) to Congo red, ultrasound is utilized to enhance the adsorption of Zr-Bent to Congo red. The adsorption prediction model is established to optimize the reaction conditions and explore the mechanism of ultrasound-enhanced adsorption. The results show that compared with Zr-Bent treatment alone, ultrasonic-enhanced Zr-Bent adsorption can increase the adsorption rate by 11 times and the removal rate by 10.3%. According to the results by Box-Behnken response surface optimization experiments, the removal rate of Congo red can reach 99.6% when pH = 6.0, adsorption time is 10 min and adsorbent dosage is 1.5 g·L⁻¹. The removal rate of Congo red can reach 99.8% when it is verified by the established prediction model, showing a high prediction accuracy. It is found through SEM, BET observation and adsorption kinetic analysis that ultrasound has changed the structure of the adsorbent and accelerated the liquid-solid mass transfer process of chemical adsorption.

Key words: zirconium pillar bentonite; ultrasonic; Congo red; adsorption; Box-Behnken response surface method

印染废水是我国目前难以处理的有害工业废水之一,具有水量大、水质复杂、COD 浓度高、生物降解难、色度深等特点^[1]。刚果红(Congo Red, CR)是印染废水中典型的偶氮染料,可在水中生成毒性芳香胺类物质,对水生环境具有很强的破坏作用^[2]。

CR 结构稳定,不易被降解,一般通过物理化学方法^[3]去除。其中,吸附法因高效快速、无二次污染以及易操作等优点,被广泛使用^[4-5]。锆柱撑膨润土(Zirconium Pillared Bentonite, Zr-Bent)作为一种高效吸附剂,对阴离子的吸附能力强,且在酸性和碱性条件下物理化学性质均稳定,是一种极具应用前景的吸附材料^[6]。

超声波空化效应(液体中空化气泡的形成、增长和崩溃)产生的能量,可改变吸附剂的吸附性能^[7-8]。Asfaram 等^[9]利用超声协同活性炭对亮绿

和孔雀绿进行吸附,发现相比于搅拌,超声可使吸附容量增加 50%,吸附时间缩短为 3 min,大大降低成本。

本文采用水热合成法制备 Zr-Bent,在超声辅助下吸附水体中的 CR。采用 Box-Behnken 响应面设计^[10],以 pH、吸附时间和吸附剂投加量为变量,建立吸附响应值(去除率)预测模型,优化 CR 吸附过程;结合微观结构、比表面积变化和吸附动力学分析,探究超声对 Zr-Bent 吸附 CR 过程的影响机制。

1 材料与方 法

1.1 Zr-Bent 的制备

Zr-Bent 的制备过程参考文献[11]。

1.2 吸附实验

实验在恒温 40℃、CR 初始浓度为 100 mg/L、超

收稿日期:2021-03-11;修回日期:2021-05-27

基金项目:山西省重点研发项目(社发领域)(201903D321055,201903D321057);国家重点研发计划项目(2019YFC0408601,2019YFC0408602)

作者简介:郝梦亚(1996-),女,硕士研究生,研究方向为水处理技术,2630554378@qq.com;端允(1977-),女,博士,副教授,研究方向为水处理技术,通讯联系人,duanyun@tyut.edu.cn。

声频率为 40 kHz、功率 100 W 的条件下进行。在 497 nm 处测定溶液的吸光度(UV-1900)。

Zr-Bent 吸附 CR: 利用超声或搅拌混合, 条件分别记为 US、Stir。Zr-Bent 超声 10 min 后吸附 CR: 利用超声或搅拌混合, 条件分别记为 US-US、US-Stir。

1.3 表征

用扫描电子显微镜 (SEM, Field Emission Scanning Electron Microscope JSM-7100F, 日本) 观察 Zr-Bent 超声处理前后的形貌变化; 采用全自动 BET 比表面积分析测试仪 (micromeritics ASAP 2460) 对比 Zr-Bent 超声处理前后的比表面积、平均孔体积和孔径的变化。

1.4 响应面法优化设计

采用 Box-Behnken 响应面法, 设计三因素三水平实验, 确定最佳吸附条件, 具体见表 1。

表 1 响应面实验设计

水平	pH(A)	吸附时间(B)/min	投加量(C)/(g·L ⁻¹)
-1	3	1	0.5
0	6	10	1.0
1	9	20	1.5

2 结果与讨论

2.1 实验结果优化及模型预测

根据 Box-Behnken 数据模型及表 1 所列实验因素水平, 以 CR 去除率为响应值, A(pH)、B(吸附时间)、C(投加量) 为考察因素, 采用软件 Design-Expert 10 分析, 结果见表 2。响应面模型的方差分析如表 3 所示。

表 2 Box-Behnken 设计实验结果

编号	A	B	C	去除率/%
1	-1	-1	0	76.04
2	1	-1	0	56.03
3	-1	1	0	90.90
4	1	1	0	64.63
5	-1	0	-1	81.50
6	1	0	-1	58.77
7	-1	0	1	96.52
8	1	0	1	69.41
9	0	-1	-1	72.25
10	0	1	-1	75.39
11	0	-1	1	73.54
12	0	1	1	99.67

13	0	0	0	89.05
14	0	0	0	90.60
15	0	0	0	90.86
16	0	0	0	90.03
17	0	0	0	89.72

表 3 响应面模型的方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	2803.02	9	311.45	248.18	<0.0001
A	1161.10	1	1161.10	925.22	<0.0001
B	351.87	1	351.87	280.39	<0.0001
C	347.77	1	347.77	277.12	<0.0001
AB	9.52	1	9.52	7.59	0.0283
AC	4.78	1	4.78	3.81	0.1019
BC	135.77	1	135.77	108.19	<0.0001
A ²	504.59	1	504.59	402.09	<0.0001
B ²	239.78	1	239.78	191.07	<0.0001
C ²	27.51	1	27.51	21.92	0.0023
误差	8.78	7	1.25	—	—
失拟项	6.73	3	2.24	4.37	0.0942
纯误差	2.05	4	0.51	—	—
所有项	2811.80	16	—	—	—

注: $R^2=0.9969$ 调整后 $R_{adj}^2=0.9929$; 精度比=51.896。

由表 3 可见, P 值<0.01, 说明该模型差异极显著^[12]。最小变异系数 $CV=1.39%$ (<10%) 和精度比为 51.896, 远大于 4^[13], 说明有效数据充分。较高的决定系数 $R^2(0.9969)$ 和预测决定系数 $R_{pred}^2(0.9604)$ 说明该模型可以准确地预测 Zr-Bent 对 CR 的去除率。

A、B、C、AB、BC、A²、B²、C² 的效应显著 ($P<0.05$), 即 pH、吸附时间、投加量以及 pH 与吸附时间、投加量与吸附时间的交互效应对 CR 去除率有显著影响。其大小依次为: pH>吸附时间>投加量。

优化后的实验条件为 pH=6.0、吸附时间为 10 min、吸附剂投加量为 1.5 g/L, 此时 CR 去除率可达 99.6%。取 3 组平行样进行验证, 测得结果为 99.8%, 与预测值接近。说明响应面模型可信度高^[14]。

2.2 超声和搅拌条件下吸附实验

最优条件下, 吸附实验结果见图 1。与 Stir 相比, US 条件下 10 min 即可达吸附平衡, 去除率为 99.8%, 而 Stir 条件下需 120 min, 去除率仅为 89.5%。US 使吸附速率提高了 11 倍, 去除率增加

了 10.3%。

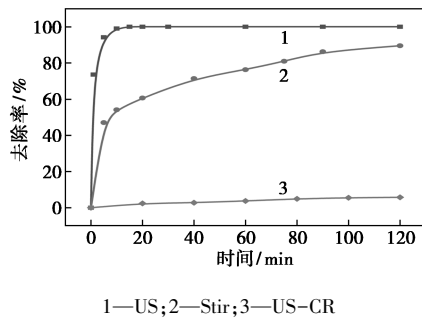


图 1 不同体系下对 CR 去除率的影响

Khataee 等^[15]研究有机染料分子时发现,超声可以直接降解或者产生羟基自由基降解染料。由图 1 中 US-CR 曲线(未加吸附剂,只超声溶液)可以看出,120 min 后 CR 仅降低 5.7%,说明超声对 CR 的降解作用有限。

根据 CR 的吸附等温线,最大理论吸附容量为 140 mg/g,接近报道的最大值(148 mg/g)。与同类型文献相比,本研究的吸附平衡时间最短(10 min),详见表 4。

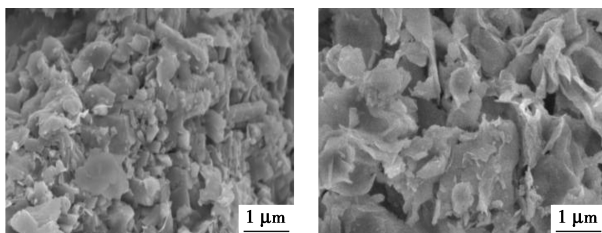
表 4 不同吸附剂对 CR 的吸附效果比较

吸附剂	最大吸附容量/ (mg·g ⁻¹)	平衡时间/ min	混合 方式	参考 文献
铅铝柱撑膨润土	55.5	30	搅拌	[16]
改性膨润土	34.5	30	搅拌	[17]
磁铁矿插层膨润土	48	105	搅拌	[18]
CTAB-膨润土	116	60	搅拌	[19]
石灰石-膨润土	148	120	搅拌	[20]
羟基磷灰石	75.2	60	搅拌	[21]
Cu ₃ (BTC) ₂	50	125	搅拌	[22]
Zr-Bent	118	120	搅拌	本实验
Zr-Bent	140	10	超声	本实验

2.3 超声对 Zr-Bent 结构的影响

2.3.1 SEM

对超声处理前后的 Zr-Bent 进行 SEM 分析,如图 2 所示。



(a) 超声前 (b) 超声后

图 2 超声前后 Zr-Bent 的 SEM 图

根据图 2 可知,超声后,Zr-Bent 由相互堆积团聚的絮状结构变为结构松散、形状均一的层片状结构,其吸附比表面积明显增大,孔隙结构和数目也显著增加。这是因为,超声过程中产生的空化界面效应在气泡崩裂时能够产生高压冲击波和高速微射流^[23],可将固体表面一些不规则的形状磨平呈层片状结构。该层片状结构使更多的吸附位点暴露出来,同时空隙通道增加,这就使 CR 容易与吸附位点接触,从而提高了吸附速率和吸附容量。

2.3.2 BET

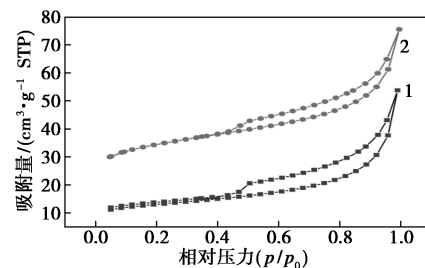
Zr-Bent 的 BET 分析如表 5 所示。

表 5 Zr-Bent 的 BET 分析

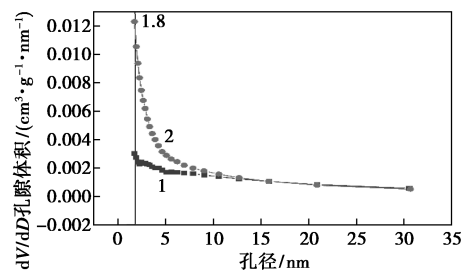
样品	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	平均孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹)	平均孔径/ nm
未超声	43	0.07	4.97
超声	108	0.09	3.35

根据表 5 可知,超声后 Zr-Bent 比表面积增加,由 43 m²/g 增到 108 m²/g,相应地,活性吸附点位增加,可促进吸附效果。平均孔体积由 0.07 cm³/g 增加到 0.09 cm³/g,有利于吸附较大的溶质分子。平均孔径由 4.97 nm 降低到 3.35 nm,虽略有减小,但仍属于介孔,容易吸附较大的溶质分子。

Zr-Bent 超声后,在相同的压力下吸附量明显提高,见图 3(a);在孔径范围内(1.5~30 nm)的孔隙体积数量均大于未超声的 Zr-Bent,见图 3(b)。



(a) 比表面积分析图



(b) 孔径分布图

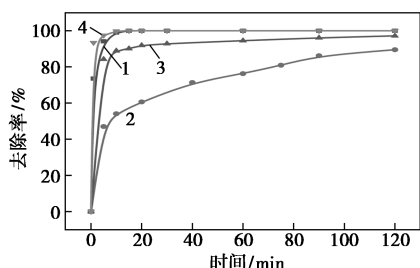
1—未超声;2—超声

图 3 BET 分析图

这是因为超声空化作用产生气泡,在爆破瞬间,冲击力可改变 Zr-Bent 内部的孔隙结构,比表面积和孔体积增大。

2.3.3 超声处理 Zr-Bent 对吸附 CR 的影响

不同体系下对 CR 去除率的影响见图 4。



1—US;2—Stir;3—US-Stir;4—US-US

图 4 不同体系下对 CR 去除率的影响

由图 4 可知,Stir 条件下最不利于 CR 吸附实验进行。Stir 条件下吸附平衡时间最长(120 min),US-Stir 次之(30 min),US-US 与 US 最短(10 min)。CR 去除率的顺序为 Stir(89.5%)<US-Stir(92.8%)<US-US 与 US(99.8%)。

对比 Stir 和 US-Stir 曲线可以推测,超声作用会对 Zr-Bent 结构产生一定影响,表现是吸附时间由 120 min 缩短为 30 min,CR 去除率由 89.5% 提高到 92.8%,有利于吸附实验进行,与 SEM 和 BET 分析结果一致。

对比 US-Stir 与 US 曲线,US 条件下,吸附平衡时间由 30 min 缩短为 10 min,CR 去除率由 92.8% 提高到 99.8%,说明吸附过程中超声不仅对吸附剂的结构有一定影响,还对吸附过程有促进作用。

对比 US-US 与 US 曲线,两者的平衡时间和去除率接近,所以选取 US 为最佳实验条件。

2.4 超声对吸附过程的影响

为了探讨超声对吸附过程的影响,分别在 US、US-Stir 条件下进行了吸附动力学分析,如图 5 所示。用准一级动力学模型(式 1)、准二级动力学模型(式 2)和内扩散模型(式 3)^[24]分别模拟 Zr-Bent 吸附动力学结果。表达式如下:

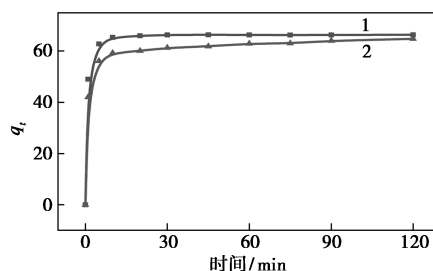
$$\ln(q_{e1} - q_t) = \ln q_{e1} - k_1 t \quad (1)$$

$$t/q_t = t/q_{e2} + 1/(k_2 q_{e2}^2) \quad (2)$$

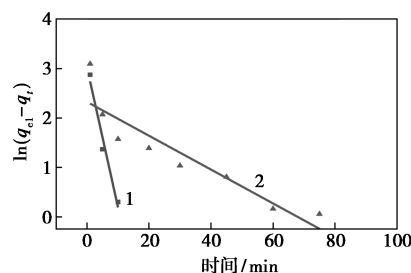
$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad (3)$$

式中: q_{e1} 和 q_{e2} 为准一级动力学模型和准二级动力学模型 CR 平衡吸附容量,mg/g; q_t 为 t 时刻 CR 的吸附容量,mg/g; k_1 为准一级动力学模型的速率常数, min^{-1} ; k_2 为准二级动力学模型的速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附时间,min; k_i 为颗粒内扩散速

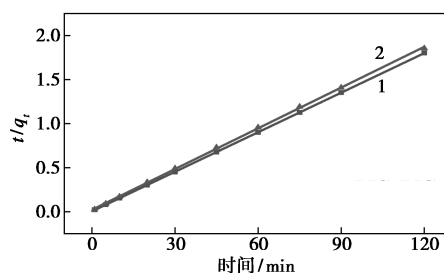
率常数, $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$; C 为和厚度、边界层相关的常数。



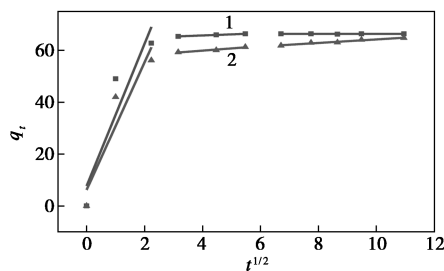
(a) 吸附动力曲线图



(b) 准一级动力曲线图



(c) 准二级动力曲线图



(d) 内扩散

1—US-US;2—US-Stir

图 5 吸附动力学

由图 5(a)可以看出,US-Stir 时 30 min 达到吸附平衡,吸附容量为 64.77 mg/g,US-US 时 10 min 即可达到吸附平衡,吸附容量为 66.35 mg/g。将超声处理后的 Zr-Bent 分别在超声和搅拌条件下吸附 CR,在超声的作用下,可使吸附速率提高 2 倍,吸附容量提高 3%。这是因为超声的空化效应可提高固液界面混合的速率,促进液-固相传质过程,从而提高吸附速率。

拟合结果及动力学参数值如表 6 所示。

表 6 吸附动力学参数

模型	参数	US-US	US-Stir
	$q_e/(mg \cdot g^{-1})$		66.35
准一级动力学	k_1/min^{-1}	0.3246	0.0342
	$q_{e1}/(mg \cdot g^{-1})$	25	10
	R_1^2	0.9918	0.8502
准二级动力学	$k_2/[g \cdot (mg \cdot min)^{-1}]$	0.075	0.012
	$q_{e2}/(mg \cdot g^{-1})$	66.67	64.23
	R_2^2	0.9999	0.9997
内扩散模型	$k_{i,1}/[g \cdot (mg \cdot min^{1/2})^{-1}]$	27.42	24.58
	R_{i1}^2	0.8661	0.0018
	$k_{i,2}/[g \cdot (mg \cdot min^{1/2})^{-1}]$	0.42	0.85
	R_{i2}^2	0.9862	0.9724
	$k_{i,3}/[g \cdot (mg \cdot min^{1/2})^{-1}]$	0.001	0.684
	R_{i3}^2	0.8887	0.9628

注: q_e 为实际平衡吸附容量。

根据表 6 中相关系数 R^2 和图 5(b)、5(c) 可以看出,US-US、US-Stir 两者的吸附过程都更符合准二级动力学模型(R^2 分别为 0.999 9、0.999 7),且此模型的理论吸附容量(66.67、64.23 mg/g)与实际吸附容量(66.35、64.77 mg/g)接近。因此,基于准二级动力学模型的理论基础,说明该过程主要是化学吸附^[25]。US-US 的吸附速率常数 k_2 (0.075) 大于 US-Stir(0.012),说明对溶液超声可促进化学吸附。

采用颗粒内扩散模型,通过 q_t 对 $t^{1/2}$ 的曲线是否为线性,分析吸附过程的速率限制步骤^[26]。由表 6 可见,在 US-US、US-Stir 条件下,吸附过程均可分为 3 个阶段:第 1 阶段为膜扩散阶段、第 2 阶段为内扩散阶段、第 3 阶段为吸附平衡阶段。在第 1 阶段,吸附速率较大,因为吸附剂表面活性点位较多,且吸附剂内外存在较大的浓度差,使 CR 分子通过水膜层扩散作用,占据了吸附剂表面的活性点位。在此阶段,吸附速率 US-US $k_{i,1}$ > US-Stir $k_{i,1}$ 。因为超声空化的湍动效应^[21],输出的涡流气泡相当于高强度的连续机械搅拌,使液体与固体表面高速碰撞,破坏了固体表面的水膜层,增强了液体分子向固体传递。在第 2 阶段,吸附速率均明显下降,此时 CR 以孔扩散和颗粒内扩散为主,孔内外浓度差变小,内扩散的速率减小。在此阶段,吸附速率 US-US $k_{i,2}$ < US-Stir $k_{i,2}$ 。在第 3 阶段,吸附趋近于平衡,外表面的活性

点位已基本被覆盖,吸附均达到饱和状态。

此外,从图 5(d)中可看出 3 个阶段的拟合曲线均未通过原点,表明这 3 个阶段都不是唯一速率限制步骤^[26],化学反应仍然是控制步骤。

3 结论

(1) 根据 Box-Behnken 响应面优化实验结果,pH 对 CR 去除率的影响最显著。在优化反应条件 pH = 6.0、吸附时间为 10 min、吸附剂投加量为 1.5 g/L 下,CR 去除率可达 99.6%。对预测模型进行验证,CR 实际去除率为 99.8%,与预测值接近,说明此模型能够有效预测及优化实验条件。

(2) 相较于 Zr-Bent 单独吸附,超声辅助 Zr-Bent 吸附 CR 可使吸附速率提高 11 倍,去除率提高 10.3%。

(3) 根据 SEM 和 BET 分析,超声可改变 Zr-Bent 的结构,增大 Zr-Bent 比表面积与孔体积,增加活性点位,提高吸附性能。根据吸附动力学分析,该吸附过程更符合准二级动力学模型,以化学吸附为主。因此,吸附过程中的超声作用,一方面可改变 Zr-Bent 的结构,另一方面,也可促进液-固相传质过程,促进化学吸附速率,具有协同效应。

参考文献

- [1] Raval N P, Shahp U, Shah N K. Adsorptive amputation of hazardous azo dye Congo red from wastewater: A critical review [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2016, 23(15): 14810-14853.
- [2] Liu J, Yu H, Wang L, et al. Superior absorption capacity of tremella like ferrocene based metal-organic framework in removal of organic dye from water [J]. J Hazard Mater, 2020, 392: 122274.
- [3] Zheng Y Q, Bei C, Fan J J, et al. Review on nickel-based adsorption materials for Congo red [J]. J Hazard Mater, 2021, 403: 123559.
- [4] Shahnaz T, Fazil S M M, Padmanaban V C. Surface modification of nanocellulose using polypyrrole for the adsorptive removal of Congo red dye and chromium in binary mixture [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 151: 322-332.
- [5] Masoudian N M, Rajabi M, Ghaedi M, et al. Titanium oxide nanoparticles loaded onto activated carbon prepared from bio-waste watermelon rind for the efficient ultrasonic-assisted adsorption of Congo red and phenol red dyes from wastewaters [J]. Polyhedron, 2019, 173: 114105.
- [6] Peng X J, Luan J K, Zhang H M, et al. Zirconia pillared montmorillonite for removal of arsenate from water [J]. Journal of Environmental Science and Health. Part A, 2005, 40: 1055-1067.
- [7] Hooman D M, Campbell N, Bertrand W K, et al. Ultrasound-assisted regeneration of zeolite/water adsorption pair [J]. Ultrason Sonochem, 2020, 64: 105042.
- [8] 周溢甜, 徐璐奕, 徐黎蔚, 等. Zn/Ni/Cu-BTC 强化吸附 CR 性能

- 研究[J].中国环境科学,2019,39(5):2021-2027.
- [9] Asfaram A, Ghardi M, Hajati S, *et al.* Screening and optimization of highly effective ultrasound-assisted simultaneous adsorption of cationic dyes onto Mn-doped Fe₃O₄-nanoparticle-loaded activated carbon[J]. Ultrason Sonochem, 2017, 34: 1-12.
- [10] Asfaram A, Ghaedi M, Goudarzi A, *et al.* Response surface methodology approach for optimization of simultaneous dye and metal ion ultrasound-assisted adsorption onto Mn doped Fe₃O₄-NPs loaded on AC: Kinetic and isothermal studies[J]. Dalton Trans, 2015, 44(33): 14707-14723.
- [11] 王建丽, 鹿必阳, 杨俊杰. 铅柱撑蒙脱石对油酸钠的吸附试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(2): 111-115.
- [12] Tripathi P, Srivastava V C, Kumar A. Optimization of an azo dye batch adsorption parameters using box-behnken design[J]. Desalination, 2009, 249(3): 1273-1279.
- [13] Asfaram A, Ghaedi M, Hajati S, *et al.* Rapid removal of auramine-O and methylene blue by ZnS:Cu nanoparticles loaded on activated carbon: A response surface methodology approach[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 53(7): 80-91.
- [14] 殷雪妍, 张艾, 刘亚男. 过氧化钙去除水中糖皮质激素的响应面分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 608-615.
- [15] Khataee A, Sheydaei M, Hassani A, *et al.* Sonocatalytic removal of an organic dye using TiO₂/montmorillonite nanocomposite[J]. Ultrason Sonochem, 2015, 22(1): 404-411.
- [16] 韦科陆, 唐艳葵, 童张法, 等. 微波辅助制备柱撑膨润土对刚果红的吸附性能[J]. 过程工程学报, 2010, 10(3): 503-507.
- [17] 孙志勇, 严彪, 王爱民, 等. 改性膨润土对刚果红的吸附动力学及热力学研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 4(36): 62-67.
- [18] Belachew N, Bekele G. Synergy of magnetite intercalated bentonite for enhanced adsorption of Congo red dye[J]. Silicon, 2020, 12(3): 603-612.
- [19] 汤睿, 张寒冰, 施华珍, 等. CTAB 改性磁性膨润土对刚果红和酸性大红的吸附[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(3): 748-757.
- [20] Vimonses V, Jin B, Chow C W. Insight into removal kinetic and mechanisms of anionic dye by calcined clay materials and lime[J]. J Hazard Mater, 2010, 177(13): 420-427.
- [21] 王瑜, 孙鹏跃, 种响楠. 碳羟基磷灰石对模拟 CR 染料废水吸附性能的研究[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(4): 599-608.
- [22] 付秋平, 刘秋霞, 王洋, 等. 金属有机骨架材料 Cu-3(BTC)₂ 对 CR 的吸附[J]. 化工环保, 2019, 39(4): 471-475.
- [23] 罗彦伟. 超声波强化沸石分子筛离子交换吸附传质过程的研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2008.
- [24] 符剑刚, 贾阳, 李政, 等. 磁性生物炭负载 Mg-Fe 水滑石的制备及其吸附水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的性能[J]. 化工环保, 2019, 39(5): 574-580.
- [25] 石家豪, 韩非, 邱磊, 等. 复合改性粉煤灰对磷的吸附性能[J]. 化工环保, 2020, 40(2): 74-79.
- [26] 王殊凡, 徐卫华, 刘云国, 等. 壳聚糖/改性平菇复合吸附剂对 Cr(VI) 的吸附特性[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3264-3270. ■

(上接第 162 页)

- [7] Chen Y, Hu S, Li J, *et al.* Improvement on combustible matter recovery in coal slime flotation with the addition of sodium silicate[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 603. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125220.
- [8] 刘程. 表面活性剂应用大全(修订版)[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1997: 497-507.
- [9] Dey A, Sandre V, Marangoni D G, *et al.* Interaction between a non-steroidal anti-inflammatory drug (ibuprofen) and an anionic surfactant (AOT) and effects of salt (NaI) and hydrotrope (4-4-4)[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2018, 122(14): 3974-3987.
- [10] 肖楠, 朱玲, 王春雨, 等. 含油污泥化学清洗处理实验研究与工艺参数优化[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1202-1208.
- [11] Ramirez D, Collins C D. Maximisation of oil recovery from an oil-water separator sludge: Influence of type, concentration, and application ratio of surfactants[J]. Waste Management, 2018, 82: 100-110.
- [12] Chen G, Cheng C, Zhang J, *et al.* Synergistic effect of surfactant and alkali on the treatment of oil sludge[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 183. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106420.
- [13] 刘自强. 炼油厂含油污泥萃取分离实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- [14] 杨飞飞, 回军, 李宝忠, 等. 热化学清洗法处理罐底油泥的研究[J]. 当代化工, 2014, 43(6): 890-892.
- [15] 荆国林, 霍维晶, 崔宝臣. 含油污泥中的原油回收[J]. 油气田地面工程, 2007, (12): 32, 42.
- [16] 刁潘, 刘静, 张永奎, 等. 阴离子/非离子表面活性剂体系洗涤含油污泥[J]. 化工进展, 2014, 33(10): 2753-2757.
- [17] 李建柱, 李晓鸥, 刘洁, 等. 水-剂-空气法处理油田油泥技术的研究[J]. 石油炼制与化工, 2010, 41(1): 62-66.
- [18] 肖楠, 朱玲, 王春雨, 等. 含油污泥化学清洗处理实验研究与工艺参数优化[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1202-1208.
- [19] 焦龙, 程超, 闫昕, 等. 表面活性剂-碱协同处理老化油泥工艺[J]. 油田化学, 2019, 36(3): 535-539.
- [20] 赵阳, 戴跃玲, 李晓鸥, 等. 热水洗法处理油田油泥技术的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2011, 31(2): 14-16, 44.
- [21] Duan M, Wang X, Fang S, *et al.* Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 554(5): 272-278.
- [22] 蒲跃琪, 于超, 李志良, 等. 鼠李糖脂强化热化学洗涤落地油泥研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(6): 572-575. ■