

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.005

Al/CTMAB 复合改性膨润土的制备及对苯酚和 Cu^{2+} 的吸附性能

余晓皎, 唐喜颜, 李 举, 张 健, 赵园园, 周文娜, 王力波

(西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用羟基铝柱撑剂对钠基膨润土进行预改性,再分别用十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)和十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB)改性,制备复合改性钠基膨润土。采用响应曲面优化法对影响制备的主要因素进行了优化,并建立了二次多项式回归方程的预测模型,同时对模型进行了方差分析与响应曲面分析。利用 X 射线衍射仪(XRD)、红外光谱仪(FTIR)和液态氮吸附仪(BET)对样品的结构和性能进行了表征与分析。结果表明:改性剂进入到钠基膨润土层间使其层间距和比表面积均增大,二次模型的 R^2 为 0.998 4,具有较高的拟合度。从预测模型得到制备复合改性钠基膨润土的最优条件为:CTMAB 用量 0.08%,反应温度 65 °C,反应时间 4 h。在此条件下,所制备的 Al/CTMAB 复合改性钠基膨润土对苯酚和 Cu^{2+} 的吸附率分别可达 69.6%和 77.9%,预测值与真实值的相对误差为 0.41%。

关键词: 钠基膨润土; 复合改性; 响应曲面优化; 吸附性能

中图分类号: TQ424

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2017)02-0152-07

Preparation and adsorption performance of Al/CTMAB composite modified bentonite for phenol and copper ions

YU Xiaojiao, TANG Xiyan, LI Ju, ZHANG Jian,
ZHAO Yuanyuan, ZHOU Wenna, WANG Libo

(School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Sodium bentonite was pre-modified by hydroxyl-Al pillared, and then was modified using 12-alkyl trimethyl ammonium bromide and 16-alkyl trimethyl ammonium bromide, respectively. The compound modified sodium bentonite was prepared. The response surface methodology (RSM) was employed to investigate the effects of various factors on absorption rate of phenol, with the quadratic polynomial regression prediction model was established. While the variance analysis and response surface analysis of the model were made, XRD, FTIR and BET were used to characterize and analyze the structure and properties of the samples. The results showed that two modifiers got into the sodium bentonite interlamination and that the interlayer spacing and specific surface area increased. The R^2 of quadratic model was 0.9984 with had better fitness. The optimal preparation conditions were obtained as follows; 16-alkyl trimethyl ammonium bromide dosage was 0.08%, reaction temperature was 65 °C and reaction time was 4 h. Under the optimal conditions, the absorption rate of prepared compound modified sodium bentonite for phenol and Cu^{2+} can reach 69.6% and 77.9%, respectively. The predicted value of absorption rate

收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21276208,21576220);陕西省自然科学基金重点资助项目(2015JZ005);西安市科技计划资助项目(CX1435③);陕西省教育厅自然科学专项资助项目(14JK1517);2016 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201610700043)

作者简介: 余晓皎,女,教授,博导,博士,研究方向为膜分离及水处理技术。E-mail:yxjw@xaut.edu.cn

satisfied properly with experimentation data, with the relative error found to be 0.41%.

Key words: sodium bentonite; composite modification; response surface methodology; adsorption performance

天然矿物吸附剂具有储量丰富、价格低廉等特点,近年来在废水处理中的应用引起了人们格外的关注^[1]。膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的细粒黏土,具有大的比表面积、良好的吸附性能和离子交换能力^[2]。由于膨润土表面硅氧结构的亲水性及层间阳离子的水解,使天然膨润土显示出很强的亲水性,在处理含有机污染物的废水时效果欠佳^[3]。因此,需要对天然膨润土进行改性以改善膨润土的吸附性能。

膨润土中的阳离子可以通过阳离子交换过程被阳离子表面活性剂或羟基-金属取代,得到改性有机膨润土和柱撑膨润土^[4-6]。利用阳离子表面活性剂改性膨润土,使膨润土表面具有有机物,由于阳离子表面活性剂不会被水解,因此改性后可以增强膨润土对有机污染物的吸附性能^[7-9],但改性膨润土对无机物的吸附性能提高不大。通过加入无机盐改性剂对膨润土进行改性,使分散的膨润土单晶片形成柱层状的缔合结构,在缔合的颗粒之间形成较大的空间,可改变膨润土在水中的分散状态,提升膨润土的吸附性能以及离子交换能力^[10-12]。有机与无机复合改性可以结合两者各自的优点,使改性膨润土具有特殊的结构和吸附性能。

本文选用羟基铝和十二烷基三甲基溴化铵(DTAB,分析纯,上海山浦化工有限公司)、十六烷基三甲基溴化铵(CTMAB,分析纯,天津市巴斯夫化工有限公司)分别作为无机和有机改性剂,对钠基膨润土层空间结构进行调控,制备无机和有机复合改性钠基膨润土,并研究改性钠基膨润土对水溶液中苯酚和Cu²⁺的吸附性能。

1 实验部分

1.1 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土的制备

称取适量钠基膨润土(bent,阳离子交换容量:90.1 mmol/100 g,pH:9.2,胶质价:60 mL/15 g,膨胀容:7.2 mL/g,吸蓝量:70.7 mL/100 g,陕西洋县),分散在蒸馏水中,配制成1%的悬浊液。

将羟基铝柱撑剂(OH⁻:Al³⁺=2.3:1,自制)按照Al:膨润土=1 mol:110 g的比例缓慢滴加到悬浊液中,80℃下搅拌2 h,老化48 h,去离子水洗涤至无Cl⁻,烘干研磨,得到羟基铝柱撑改性钠基膨润土(Al/bent)备用。

取5 g Al/bent加入95 mL去离子水,在60℃下搅拌30 min,得到羟基铝柱撑改性钠基膨润土溶液,在此溶液中加入一定量的CTMAB,在一定温度下搅拌一定时间,减压抽滤,再用去离子水洗至无Cl⁻,烘干,得到Al/CTMAB复合改性钠基膨润土(Al/C₁₆bent)。

按上述实验步骤在羟基铝柱撑改性钠基膨润土溶液中加入DTAB,即可得到Al/DTAB复合改性钠基膨润土(Al/C₁₂bent)。

1.2 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土的结构表征

用6100型X射线衍射仪(XRD,日本岛津有限公司)测定改性钠基膨润土的晶体结构,Cu靶K α 线,扫描速度10°/min,扫描角度(2 θ)范围为1°~40°。

膨润土研磨后,用KBr压片制样,FTIR-8900型红外光谱仪(FTIR,日本岛津有限公司)记录波长4 000~400 cm⁻¹范围的红外光谱图。

利用JW-BK122W型液氮吸附仪(BET,北京精微高博科学技术有限公司)测定比表面积及其孔径。

1.3 膨润土层间距计算

膨润土的层间距由Bragg方程计算^[13]:

$$2d\sin\theta = \lambda \quad (1)$$

式中, d 为膨润土片层之间的平均距离, θ 是半衍射角, λ 是入射X射线的波长(0.154 nm)。

1.4 响应曲面法实验设计

在单因素实验的基础上,根据Box-Behnken design(BBD)的中心组合实验设计原理,选取因素CTMAB用量(A)、反应温度(B)和反应时间(C)为自变量,以苯酚吸附率为响应值(R)。每一自变量的低、中、高实验水平分别以-1、0、1进行编码。实验设计因素及水平编码见表1。根据模型提供的实验设计方案,将对应条件下的实验结果导入,结果如表2所示。

表1 实验因素及水平编码
Tab.1 Independent variables and levels in experimental design

自变量	水平编码		
	-1	0	1
CTMAB用量 A/%	0.06	0.072	0.084
温度 B/℃	50	60	70
时间 C/h	2	3	4

表2 BBD实验设计及响应值

Tab.2 BBD experimental design and response values

编号	CTMAB用量 A/%	温度 B/℃	时间 C/h	苯酚吸附率 R/%
1	0	1	-1	61
2	-1	0	1	45
3	-1	0	-1	43
4	0	0	0	65
5	-1	1	0	40
6	0	0	0	65
7	-1	-1	0	37
8	0	-1	1	56
9	0	-1	-1	53
10	1	1	0	64
11	1	0	-1	63
12	0	0	0	65
13	0	0	0	65
14	0	1	1	68
15	1	-1	0	52
16	0	0	0	65
17	1	0	1	63

1.5 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土对苯酚和Cu²⁺的吸附性能研究

将0.2 g复合改性钠基膨润土加入到40 mL含50 mg/L苯酚(分析纯,成都市科龙化工试剂厂)和 5×10^{-5} mol/L CuSO₄(分析纯,天津红岩化学试剂厂)的混合溶液中,25℃下振荡吸附2 h,振荡速率为150 r/min。离心取上清液,分别测定上清液中苯酚和Cu²⁺的浓度。苯酚浓度用紫外分光光度法在波长270 nm下测定;Cu²⁺浓度采用分光光度法测定,1-(2-吡啶偶氮)-2-萘酚为显色剂,测定波长为550 nm。计算苯酚和Cu²⁺的吸附率。

1.6 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土吸附-脱附实验

在最佳吸附条件下,对改性钠基膨润土进行吸附-脱附实验。将吸附苯酚和Cu²⁺后的改性钠基膨润土0.2 g加入到20 mL、0.1 mol/L的盐酸溶液中,在25℃、150 r/min振荡速率条件下,振荡脱附2h,离心,用蒸馏水洗涤至洗涤液中无苯酚和Cu²⁺,105℃下烘干,研磨待用。上述过程重复进行10次。苯酚和Cu²⁺浓度的测定按上述方法进行,脱附率按常规方法计算。

2 结果与讨论

2.1 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土的XRD分析

图1为改性钠基膨润土的XRD谱图。由图1可以看出,钠基膨润土、Al/bent、Al/C₁₂bent和Al/C₁₆bent分别在 2θ 为5.86°、4.46°、4.82°和4.66°出现衍射峰,其对应d(001)面的衍射峰。通过式(1)计算出钠基膨润土、Al/bent、Al/C₁₂bent和Al/C₁₆bent的层间距 d 分别为:0.754 nm、0.990 nm、0.759 nm和0.948 nm。计算结果表明,无机改性后,羟基铝柱撑钠基膨润土的层间距明显增大,比原土增大了0.236 nm。这是由于聚合氢氧化铝离子(Keggin离子)进入蒙脱石层间域内,替换了部分层间可交换阳离子,扩大了层间域高度,使底面间距从钠基膨润土的0.754 nm增大到0.990 nm。CTMAB改性的钠基膨润土的层间距较原土明显增大,其层间距大于DTAB改性的钠基膨润土的层间距,说明长链季铵盐CTMAB的改性效果优于DTAB,但Al/CTMAB复合改性钠基膨润土层间距均小于羟基铝柱撑改性钠基膨润土,这可能是形成的羟基铝柱撑钠基膨润土不稳定,再次进行有机改性时,部分柱撑结构倒塌的缘故。

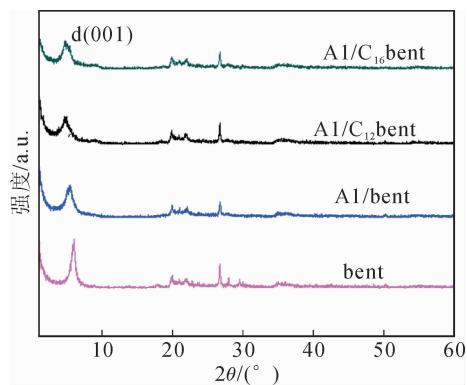


图1 改性钠基膨润土的XRD谱图

Fig.1 XRD spectra of modification sodium bentonite

由图1还可以看出,在 $10^\circ < 2\theta < 40^\circ$ 范围内,钠基膨润土改性前后的XRD图谱无明显的改变,这说明改性剂进入晶层间时并没有改变钠基膨润土的晶体结构。

2.2 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土的FTIR分析

改性前后钠基膨润土的FTIR谱图如图2所示。由图2可以看出,钠基膨润土在 3624 cm^{-1} 处出现较强而宽的吸收带,它是羟基(-OH)的伸缩振动峰,中频波段 1647 cm^{-1} (H-O-H)处的弯曲振动吸收峰是膨润土晶格中含有结晶水的反映, 1037 cm^{-1} 、 796 cm^{-1} 处为四面体Si-O-Si的面

内伸缩振动峰,519 cm⁻¹处为Si—O—Al的弯曲振动吸收峰。图2中Al/bent曲线显示,与钠基膨润土相比,无机改性钠基膨润土在519 cm⁻¹左右的Si—O—Al的弯曲振动吸收峰向高波数移动。从图2中Al/C₁₂bent和Al/C₁₆bent曲线可以看出,复合改性钠基膨润土在2 928~2 852 cm⁻¹范围内出现C—H伸缩和弯曲振动特征吸收峰,这表明阳离子表面活性剂与钠基膨润土发生了有效结合。与钠基膨润土相比,复合改性钠基膨润土在1 037 cm⁻¹和796 cm⁻¹左右同样出现Si—O、Si—O—Si伸缩振动吸收峰,这说明复合改性并没有改变钠基膨润土的层状硅酸盐骨架。

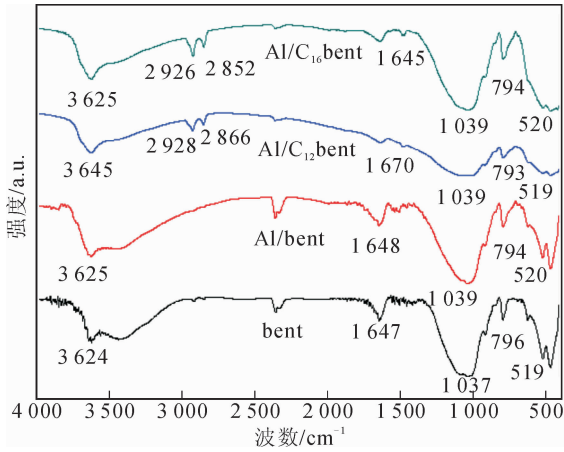


图2 改性钠基膨润土的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of modification sodium bentonite

2.3 Al/CTMAB复合改性钠基膨润土的BET分析

图3为复合改性钠基膨润土的N₂吸附-脱附曲线,表3为其比表面积、孔容和孔径。由图3可以看出,钠基膨润土的N₂吸附-脱附等温曲线与Ⅱ类等温曲线较为吻合,这说明钠基膨润土的孔型是片层状结构,改性后各个样品的N₂吸附-脱附等温曲线仍与Ⅱ类等温曲线吻合,说明改性钠基膨润土的孔型没有发生改变,仍是片层状结构。由图3(a)、(c)和(d)可以看出,钠基膨润土、Al/C₁₂bent和Al/C₁₆bent在低压阶段吸附量的增幅相对比较平缓,此时N₂分子是呈单层到多层吸附在膨润土介孔的内表面。氮气比压(P/P_0)在0.5~1.0范围内出现了吸附量突增现象,这表明该阶段是N₂在膨润土孔道内的冷凝积聚过程。由图3(c)可以看到,在该段位置Al/C₁₂bent的吸附量增加较小,表明它的孔径比较小,钠基膨润土和Al/C₁₆bent在该段位置的变化较大,表明样品的孔径较大。图3(b)表明Al/bent在低压阶段吸附量的增幅很大,但到高压阶段吸附量增幅相对比较平缓,表明膨润土孔径很小,这和表3的孔径数据相一致。从表3中的孔径分析数据也可看出,相比钠基膨润土,改性钠基膨润土的比表面积都有较为明显的提高,而孔径明显减小^[5],这表明改性后样品比表面积的增加并不只是由于孔径的减小而增加,片层间硅氧烷的表面也得到了不同程度的挖掘。

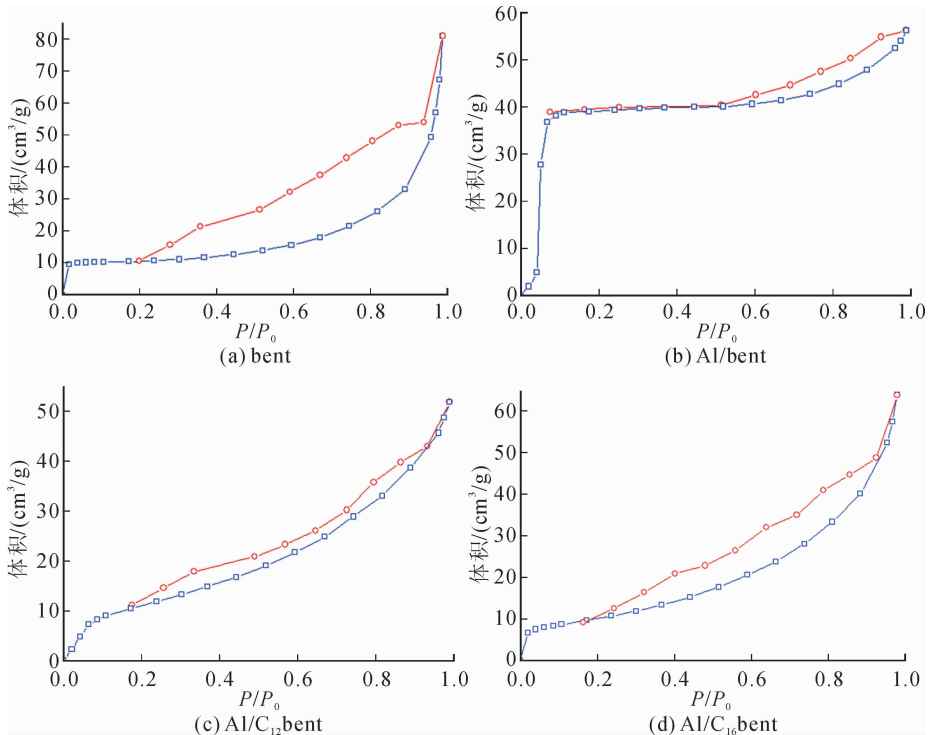


图3 复合改性钠基膨润土的N₂吸附-脱附曲线

Fig. 3 N₂ adsorption-desorption curves of composite modified sodium bentonite

表3 改性钠基膨润土的比表面积、孔径和孔体积分析
Tab.3 Specific surface area, pore diameter and pore volume analysis of modified sodium bentonite

样品	总比表面积/ (m ² /g)	外比表面积/ (m ² /g)	孔径/ (nm)	孔体积/ (cm ³ /g)
bent	34.008	20.148	14.719	0.125
Al/bent	131.330	6.926	2.648	0.087
Al/C ₁₂ bent	42.745	53.449	7.496	0.080
Al/C ₁₆ bent	36.326	49.334	10.875	0.099

2.4 响应曲面设计分析

2.4.1 回归模型及方差分析

利用统计软件 Design Expert 8.0 对实验数据进行回归拟合,得到 CTMAB 用量、反应时间、反应温度与苯酚吸附率之间的二次多项式回归方程:

$$R = 65.00 + 9.63A + 4.25B + 1.38C + 2.25AB - 0.50AC + 0.75BC - 11.25A^2 - 5.50B^2 - 0.25C^2$$

该回归方程的方差分析如表4所示。由表4可以看出,一次项 A、B 以及二次项 A²、B² 的模型显著性(P 值)小于 0.0001,对苯酚吸附率影响高度显著,交互项 AB 的 P < 0.05,对苯酚吸附率影响显著。模型的 P 值小于 0.0001,远小于 0.05,表明回归效果较好。模型的 F 值为 152.7,说明模型是显著的,即拟合良好。模型相应的修正复相关系数平方 R²_{adj} = 0.9884,说明模型具有较好的回归性,所建立的二次多项式回归方程能很好地模拟真实的曲面。因此,该模型可以用来优化 Al/CTMAB 复合改性钠基膨润土的制备条件,并对实验结果进行分析、预测。

表4 回归方程的方差分析

Tab.4 Variance analysis of regression equation

来源	平方和	均方差	F 值	P 值
模型	1 619.75	179.97	152.70	<0.000 1
A	741.13	741.13	628.83	<0.000 1
B	144.50	144.50	122.61	<0.000 1
C	15.13	15.13	12.83	0.008 9
AB	20.25	20.25	17.18	0.004 3
AC	1.00	1.00	0.85	0.397 6
BC	2.25	2.25	1.91	0.209 6
A ²	532.98	532.98	452.15	<0.000 1
B ²	127.37	127.37	108.07	<0.000 1
C ²	0.26	0.26	0.22	0.650 9
失拟值	8.25	2.75		

R² = 0.998 4 R²_{adj} = 0.988 4

对比,结果如图4和图5所示。

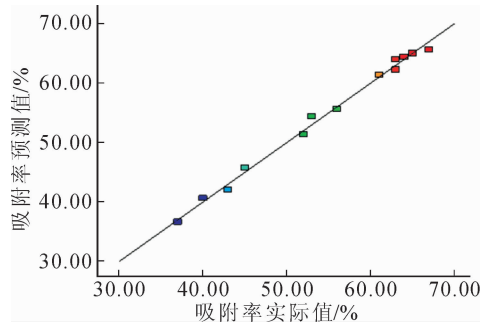


图4 吸附率实际值与预测值对比图
Fig.4 Comparison of actual and predicted at phenol adsorption rate

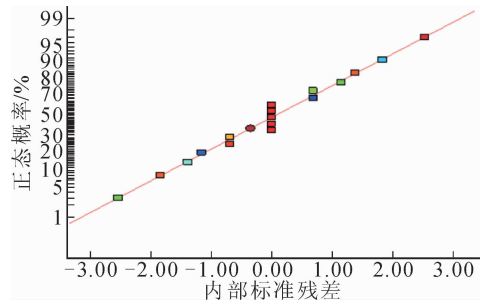


图5 残差正态概率率图
Fig.5 Residual normal probability plots

从图4可以看出,实测值和预测值均匀分布于一条直线,计算得到其相关系数为 0.9915,表明二次模型预测的苯酚吸附率与实际值的匹配度较高,可以用来分析预测。图5显示出所有的残差点均匀分布在一条直线上,表明标准残差服从正态分布,说明模型的误差主要为系统误差,并在可控范畴之内。由此说明所建立的模型可适用于 Al/C₁₆bent 制备过程中优化条件的预测。

图6为自变量影响苯酚吸附率的扰动曲线,其中 CTMAB 用量的曲线曲率变化最大,灵敏度最高,对苯酚吸附率的影响最大。综合扰动曲线和方差分析的结果可以说明,CTMAB 用量对改性钠基膨润土性能的影响最显著。

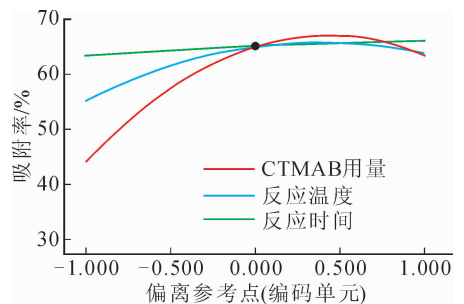


图6 苯酚吸附率的扰动曲线
Fig.6 Disturbance curve at phenol adsorption rate

将苯酚吸附率的实验真实数据与预测数据进行

2.4.2 响应曲面分析

从回归方程的方差分析可知 A、B 两因素交互作用对苯酚吸附率的影响显著 ($P=0.0043$)。其响应曲面的 3D 图及其对应的等高线如图 7 所示。由图 7 可以看出,在温度恒定时,苯酚的吸附率随 CTMAB 用量的增加而增加;当温度在 65℃ 左右时,吸附率的增幅最大,并且 CTMAB 用量在 0.39 g (质量分数 0.08%) 时,苯酚的吸附率达到最大。

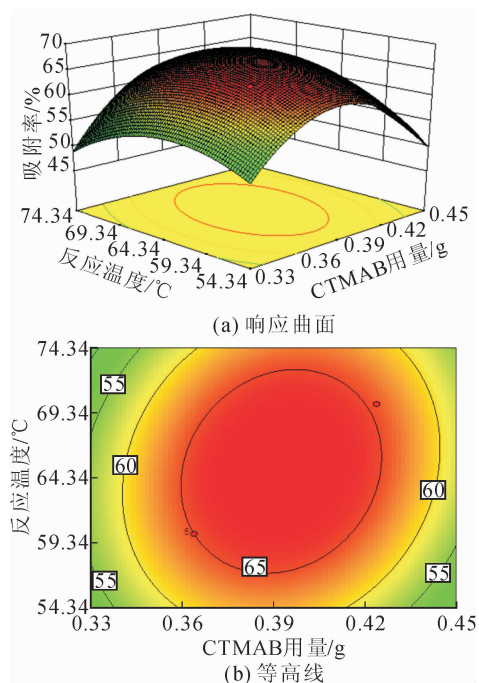


图7 CTMAB用量与反应温度交互作用图
Fig. 7 Interaction of CTMAB dosage and reaction temperature factors

综合分析得出制备复合改性钠基膨润土的最优条件为:CTMAB用量 0.08% (质量分数),反应温度 65℃,反应时间 4 h,在此条件下制备的复合改性膨润土对苯酚的理论吸附率为 68.0%。对苯酚和 Cu²⁺ 吸附进行验证实验,苯酚的实际吸附率为 69.6%,同时对 Cu²⁺ 的吸附率可达 77.9%,预测值与真实值的相对误差为 0.41%。

2.5 Al/CTMAB 复合改性钠基膨润土的吸附-脱附性能分析

图 8 是复合改性钠基膨润土重复进行吸附-脱附的实验结果。由图 8 可以看出,复合改性钠基膨润土经过 7 次再生后,对 Cu²⁺ 的吸附率仍可达到 70% 以上,对苯酚的吸附率达到 60% 以上,重复再生 10 次后,对 Cu²⁺ 和苯酚的吸附率分别为 50% 和 45%。通过脱附实验计算得到 Cu²⁺ 和苯酚的脱附率分别为 99.4% 和 98.8%。这说明 Al/CTMAB 复合改性钠基膨润土具有较好的再生性能和重复使

用性能。

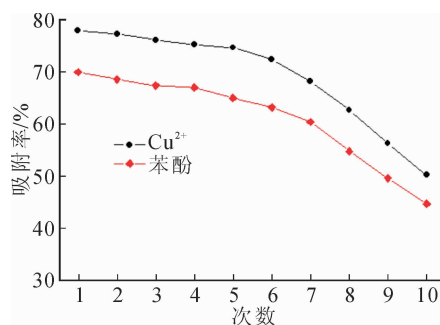


图8 复合改性钠基膨润土的重复使用性能
Fig. 8 Reuse performance of the composite modified sodium bentonite

3 结论

用铝柱撑剂和 CTMAB 或 DTAB 复合改性钠基膨润土时,通过离子交换反应,羟基铝阳离子和 CTMAB 或 DTAB 同时进入钠基膨润土层间,钠基膨润土片层状结构没有发生改变。钠基膨润土、Al/bent、Al/C₁₂bent 和 Al/C₁₆bent 的层间距 d 分别为 0.754 nm、0.990 nm、0.759 nm 和 0.948 nm,比表面积分别为 30.01 m²/g、131.33 m²/g、42.75 m²/g 和 36.33 m²/g,孔径分别为 14.72 nm、2.65 nm、7.50 nm 和 10.88 nm。改性后钠基膨润土的层间距和比表面积变大,孔径减小,吸附性能增强。

响应曲面优化法建立的二次多项式回归模型相应的 $R^2=0.9984$,具有较好的拟合度,能有效预测钠基膨润土的吸附效果。CTMAB 用量、反应温度和反应时间能够显著影响改性钠基膨润土的吸附性能,CTMAB 用量和反应温度之间存在显著的交互作用,对改性钠基膨润土的吸附性能产生较大影响。Al/CTMAB 复合改性钠基膨润土的最佳制备条件为:CTMAB 用量 0.08% (质量分数),反应温度 65℃,反应时间 4 h。在此条件下所制备的 Al/C₁₆bent 对苯酚的吸附率为 69.6%,对 Cu²⁺ 的吸附率可达 77.9%。改性后的钠基膨润土具有较好的再生和稳定性能,重复再生使用 7 次后,对苯酚和 Cu²⁺ 的吸附率仍可达 60% 和 70% 以上,显示出一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] SALAMA O E A, REIAD N A, ELSHAFEI M M. A study of the removal characteristics of heavy metals from wastewater by low-cost adsorbents [J]. Journal of Advanced Research, 2011, 2(4): 297-303.
- [2] 冷阳春, 庾先国, 宿吉龙, 等. 钙基膨润土和钠基膨润土对 Pu 的吸附行为 [J]. 环境化学, 2014, 33(8):

- 1321-1325.
- LENG Yangchun, TUO Xianguo, SU Jilong, et al. Sorption behavior of Pu on Ca-bentonite and Na-bentonite [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33 (8): 1321-1325.
- [3] GUO J Z, CHEN S W, LIU L, et al. Adsorption of dye from wastewater using chitosan-CTAB modified bentonites [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, 382(1): 61-66.
- [4] LU S H, TAN X L, YU S J, et al. Characterization of Fe(III)-saturated montmorillonite and evaluation its sorption behavior for U(VI) [J]. *Radiochimica Acta*, 2016, 104(7): 481-490.
- [5] PAWAR R R, LALHMUNSIAMA, BAJAJ H C, et al. Activated bentonite as a low-cost adsorbent for the removal of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions: Batch and column studies [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 34: 213-223.
- [6] CHEN K, WANG G H, LI W B, et al. Synthesis of magnetically modified Fe-Al pillared bentonite and heterogeneous fenton-like degradation of orange II [J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2015, 30(2): 302-306.
- [7] LI Y M, BI M L, WANG Z P, et al. Organic modification of bentonite and its application for perhenate (an analogue of pertechnetate) removal from aqueous solution [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 62: 104-111.
- [8] 余晓皎, 孟瑞军, 张健, 等. 有机膨润土对敌敌畏的吸附性能研究 [J]. *环境科学*, 2011, 32(6): 1745-1750.
- YU Xiaojiao, MENG Ruijun, ZHANG Jian, et al. Studies on the sorption of DDVP on cetyltrimethylammonium bromide bentonite [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(6): 1745-1750.
- [9] GAO Y W, GUO Y Z, ZHANG H. Iron modified bentonite: Enhanced adsorption performance for organic pollutant and its regeneration by heterogeneous visible light photo-Fenton process at circumneutral pH [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 302: 105-113.
- [10] MENG R, YU X J. Investigation of ultrasound assisted regeneration of Ni-bentonite with response surface methodology (RSM) [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 54(1): 112-117.
- [11] TAMAYO A, KYZIOL-KOMOSINSKA J, SANCHEZ M J, et al. Characterization and properties of treated smectites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(11): 2831-2841.
- [12] WANG G F, SU X, HUA Y Y, et al. Kinetics and thermodynamic analysis of the adsorption of hydroxy-Al cations by montmorillonite [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 129: 79-87.
- [13] CHEN B L, HUANG W H. Effect of background electrolytes on the adsorption of nitro aromatic compounds onto bentonite [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1044-1052.

(责任编辑 周 蓓)