

废 FCC 催化剂吸附苯酚废水

何捍卫¹, 孟佳¹, 解东梅¹, 胡学武², 于向真²

- (1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;
2. 中国石油化工股份有限公司催化剂分公司, 北京 100011)

摘要: 将炼油厂排放的废 FCC(fluid catalytic cracking, 流化催化裂化)催化剂粉末(含稀土元素 2%)进行酸浸处理, 其中的稀土及有价金属进入浸出液后得以回收, 粉末残渣经过水洗、干燥后, 分析其结构, 并进行吸附苯酚废水的实验, 考察吸附时间、苯酚的初始浓度、吸附温度及吸附方式等对苯酚吸附量的影响, 分析废 FCC 催化剂残渣对苯酚的等温吸附特性。结果表明, 吸附达到平衡需要 60 min; pH 在 7.0~8.0 时, 苯酚的吸附量较大; 苯酚的初始浓度越高, 吸附量越大; 温度对苯酚吸附量的影响较显著; Freundlich 方程和 Langmuir 方程都可用于描述废 FCC 催化剂残渣对苯酚的等温吸附特征, Langmuir 方程更为准确, 通过计算, 理论饱和吸附量为 36.751 mg/g, 实验测得饱和吸附容量为 35.540 mg/g。

关键词: 废 FCC 催化剂残渣; 苯酚; 废水; 吸附; 等温吸附特性

中图分类号: TE992.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-0224(2012)1-069-07

Adsorption of phenol by spent FCC catalyst residue from wastewater

HE Han-wei¹, MENG Jia¹, XIE Dong-mei¹, HU Xue-wu², YU Xiang-zhen²

- (1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;
2. China Petrochemical Processing Stock Limited Company, Beijing 100011, China)

Abstract: The spent FCC catalyst powder (containing 2% rare earth) discharged from oil refinery was disposed by acid leaching and separation process firstly, and the rare earth and valuable metals from the catalyst dissolution in the leaching solution were recovered separately. Then the spent FCC catalyst powder residue was washed with water and dried for the analyse of the structure and the study of adsorption of phenol. The influences of adsorption time, initial Phenol concentration, temperature and adsorption types on the sorption were investigated and the isothermal adsorption characteristics on adsorption of Phenol in wastewater by spent FCC catalyst residue were studied. The results show that the equilibrium time of this experiment is about 60 min; the Phenol adsorptive capacity is larger when $7.0 < \text{pH} < 8.0$; the adsorption amount of phenol increases with the increasing of phenol initial concentration; the effect of temperature on the adsorption amount of phenol is significantly; the isothermal adsorption characteristics of phenol can be described by both of the Freundlich equation and Langmuir equation, and the Langmuir equation is more accurate. The perfect maximal equilibrium absorbance is 36.751 mg/g through calculation and the value measured in the experiment is 35.540 mg/g.

Key words: spent FCC catalyst residue; Phenol; wastewater; adsorption; isothermal adsorption characteristics

FCC(fluid catalytic cracking, 流化催化裂化)催化剂主要用于原油的催化裂化, 长时间使用后, 其催化活性和选择性降低, 催化效率下降, 致使大量的催化

剂报废。废 FCC 催化剂主要由分子筛组成, 包括 Y 型分子筛和 ZSM-5 择形沸石分子筛, 具有多孔结构, 有一定的吸附能力, 可用作有害物质或离子的吸附

基金项目: 中国石化股份有限公司资助项目(H09007)

收稿日期: 2011-03-31; 修订日期: 2011-06-27

通讯作者: 何捍卫, 教授, 博士。电话: 0731-88836311; E-mail: hehanwei@163.com

剂。文献[1]报道将废 FCC 催化剂用来吸附废水中的烃类物质和一些有毒化学物质, Sanga^[2]用经过碱处理后的废 FCC 催化剂吸附下水管道污水中的重金属离子和铵离子。陈芳艳等^[3-4]研究了不经任何处理的废 FCC 催化剂对废水中铅离子、铜离子(II)的吸附特性。刘公召等^[5]用废 FCC 催化剂吸附溶液中的微量镍。郑淑琴等^[6]对废 FCC 催化剂进行改性, 改性后的废 FCC 催化剂比表面积和孔体积都有所增大, 且对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 均具有较强的吸附作用。这些研究主要是将废 FCC 催化剂直接进行吸附, 或是将废 FCC 催化剂活化后进行吸附, 未对其中的稀土、Al 等进行回收, 这在一定程度上造成资源的浪费。并且目前主要研究废 FCC 催化剂对重金属离子的吸附, 很少有人研究其对废水中毒害较大的有机物质的吸附能力。苯酚是 1 种重要的有机化工原料, 存在于炼焦、炼油、石油化工、化肥、农药、塑料制造、燃烧等过程的工业废水中, 这些废水直接排放会对环境造成严重污染^[7]。

本文作者用盐酸对炼油厂的废 FCC 催化剂粉末(含有 3%~5% 稀土元素)进行酸浸处理, 其中的稀土及有价金属进入浸出液中得以回收; 粉末残渣经过水洗、干燥后, 用来分析其物相和结构, 并进行含苯酚的废水吸附实验, 研究吸附时间、废水中苯酚的初始浓度、吸附温度及吸附方式等对苯酚吸附作用的影响, 分析废 FCC 催化剂残渣对苯酚的等温吸附特性, 其结果有望为废 FCC 催化剂的工业化应用和研究提供一定的数据支持。

1 实验

1.1 试剂与仪器

试剂: 废 FCC 催化剂粉末(中石化催化剂长岭分公司提供); 盐酸(优级纯); 溴酸钾、苯酚、溴化钾、碘化钾均为分析纯, 实验室用水为自制去离子水。

废 FCC 催化剂中主要含高岭土、氢氧化铝、Y 型分子筛、ZSM-5 择型分子筛和氯化铝等, 其化学组成列于表 1。

仪器: KS-2 康氏振荡器; ES-300 电子天平; TG-

表 1 废 FCC 催化剂的化学组成

Table 1 Chemical composition of the spent FCC catalyst (mass fraction, %)

SiO_2	Al_2O_3	RE_2O_3	Metal
50	42~48	3~5	2

16WS 台式高速离心机; 752N 单光束紫外-可见分光光度计; HH-S2s 数显恒温水浴锅等。

1.2 废 FCC 催化剂的酸浸处理

称取一定量废 FCC 催化剂粉末置于烧杯中, 加入一定浓度的盐酸溶液, 在恒温水浴锅中于一定温度下搅拌、浸取 6~8 h 后, 过滤、洗涤至中性, 在 105 °C 下完全干燥, 得到废 FCC 催化剂残渣粉末。

1.3 废 FCC 催化剂残渣的等温吸附实验

称取 0.25 g 废 FCC 催化剂残渣粉末, 放入 250 mL 具塞锥形瓶中, 加入 100 mL 不同浓度的苯酚溶液。在室温条件下将锥形瓶置于康氏振荡器上, 震荡 20 min 后, 静置, 取上层清液 5 mL 在转速为 10 000 r/min 的离心机中离心分离 10 min。采用 KBrO_3 -KBr 紫外分光光度法^[8]测定上清液中的苯酚浓度。做 3 个平行样, 取平均值。按下式计算不同时间下苯酚的平衡吸附量 q 和平衡吸附率 E :

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: q 为平衡吸附量, mg/g; E 为平衡吸附率, %; C_0 为溶液中苯酚的初始质量浓度, mg/L; C_e 为溶液中达到吸附平衡时苯酚的质量浓度, mg/L; V 为苯酚溶液的体积, L; m 为吸附实验中所用废 FCC 催化剂残渣的质量, $m=0.25$ g。

1.4 样品表征

采用德国西门子公司 D-500 型 X 射线衍射仪分析废 FCC 催化剂残渣的物相。扫描速率: 4 (°)/min; 步宽: 0.02°; Cu 靶; 管压: 36 kV, 管流: 30 mA; 夹缝: 0.3, 0.15 和 0.3°; 起始角: 10°, 终止角: 80°。

采用氮气静态吸附容量法测定废 FCC 催化剂残渣的比表面积、孔体积、孔径及孔径分布, 所用仪器为美国康塔仪器公司生产的 Quadrasorb SI-3MP 型全自动 3 站分析仪。用 BET 法检测废 FCC 催化剂残渣的比表面积。

2 结果与讨论

2.1 酸浸对废 FCC 催化剂结构及表面性质的影响

2.1.1 废 FCC 催化剂中分子筛的结构

图 1 所示为废 FCC 催化剂在酸浸处理前后的 XRD 谱。

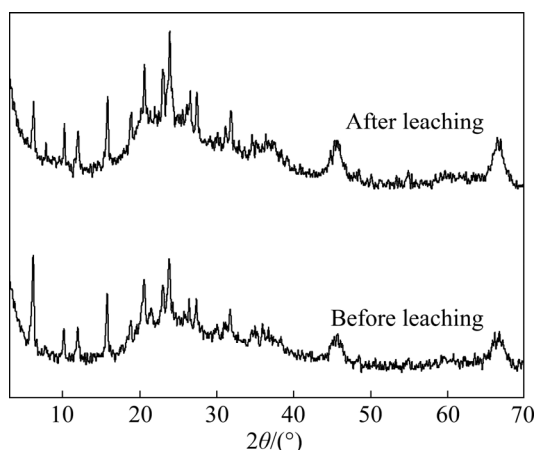


图 1 酸浸前后废 FCC 催化剂的 XRD 谱
Fig.1 XRD curves of spent FCC catalyst before and after leaching

由图 1 可见, 未经酸浸处理的废 FCC 分子筛催化剂的 XRD 谱中, 在 2θ 为 10.140° 、 15.780° 和 20.619° 处存在典型的 Na 交换 Y 型分子筛 $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{13}\cdot x\text{H}_2\text{O}$ 的特征衍射峰(标准图样检索号为 PDF#43-0168), 同时在 2θ 为 6.183° 、 21.550° 和 22.981° 存在 Na 型分子筛 $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的特征衍射峰(标准图样检索号为 PDF#39-1380), 且峰形齐全, 分子筛中具有八面沸石结构; 还有少量 ZSM-5 分子筛(2θ 为 21.273° 和 22.981° 处)以及少量 La、Ca 交换的沸石分子筛(PDF# 检索号为 77-0029、71-0882)的特征衍射峰, 但峰强较弱且峰不齐全, 这说明 FCC 催化剂在长时间使用后, 分子筛的结构遭到部分破坏。由于废 FCC 催化剂是由多种物质混合而成, 除分子筛具有晶体结构外, 还含有一些无定形物质, 因此 XRD 谱的背景较高, 而分子筛本身含有 Al_2O_3 和 SiO_2 , 这样可能会遮盖 Al_2O_3 的一些特征衍射峰。

废 FCC 催化剂粉末经酸浸处理后, 分子筛特征衍射峰的位置基本没有变化, 说明酸处理没有破坏分子筛的骨架结构。但部分特征峰($2\theta=15.781^\circ$ 和 23.839°) 的强度有所增强, 这可能是由于酸浸处理脱除了分子筛中的稀土元素和孔道中的污染物 V_2O_5 , 使分子筛的孔道结构得以复原, 所以峰强增强; 而另一些特征峰($2\theta=6.181^\circ$) 强度明显减弱, 可能是酸浸时脱除了分子筛的结构组成中的部分 Al, 使其中一小部分内部结构遭到破坏, 原子排列更加无序, 晶格密度减小, 导致样品的相对结晶度降低。

2.1.2 废 FCC 催化剂的比表面积及孔结构的变化

废 FCC 催化剂酸浸前后的比表面积 S_{BET} 、孔体积 V_p 和平均孔径 d 列于表 2, 其中酸浸用的盐酸浓度为

3 mol/L, 酸浸温度 60°C , 时间为 6 h。从表中看出, 与酸浸前相比, 酸浸后废 FCC 催化剂的比表面积、孔体积和孔径都有所增加。其中比表面积增加较明显, 是因为酸浸过程中脱除了分子筛表面和孔道中的污染物, 使孔道得以疏通。

表 2 酸浸前后废 FCC 催化剂的比表面积 S_{BET} 、孔体积 V_p 及孔径 d

Table 2 Surface area, pore volume and pore diameter of spent FCC catalyst before and after acid leaching

Catalyst	Surface area, $S_{\text{BET}}/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	Pore volume, $V_p/(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$	Pore diameter, d/nm
Before acid leaching	56.484	0.117	3.815
After acid leaching	60.638	0.123	3.821

图 2 所示为废 FCC 催化剂在酸浸前以及在不同浓度和不同温度的盐酸溶液中酸浸 6 h 后的吸附等温曲线。由图 2 看出, 吸附等温线都是典型的 IV 型等温曲线, 表明酸浸前后分子筛中有一定量的介孔存在, 因为只有在介孔材料的吸附等温曲线中才会出现迟滞现象。酸浸后稍大的滞后回环表明废 FCC 催化剂残渣中的分子筛拥有相对丰富的介孔结构。这可由图 3 所示的介孔分布图佐证。

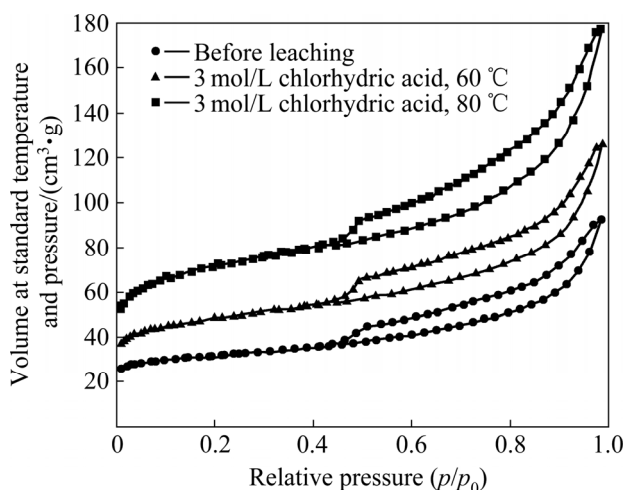


图 2 酸浸前后废 FCC 催化剂的吸附等温曲线
Fig.2 Adsorption isotherm curves of spent FCC catalyst before and after leaching

由图 3 可见, 在相同的孔径下, 经盐酸浸取后, 分子筛的平均孔体积比酸浸前的平均孔体积大, 并且随酸浸温度升高, 孔体积增大。表 2 显示酸浸处理前分子筛的平均孔径为 3.815 nm, 酸浸后平均孔径为

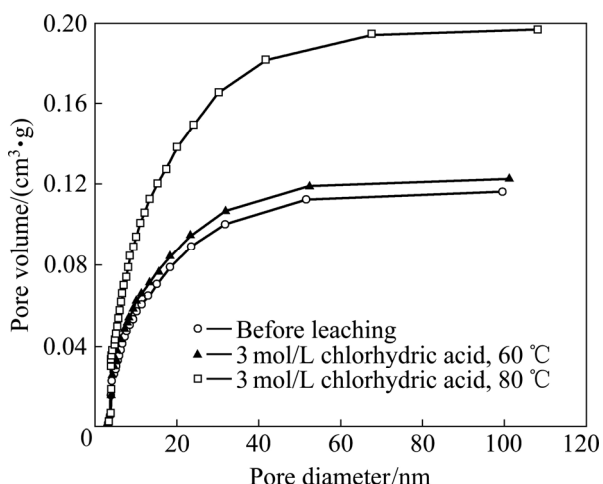


图3 废 FCC 催化剂在不同条件下酸浸后的孔径分布曲线

Fig.3 Different pore size distribution curves of spent FCC catalyst under different leaching conditions

3.821 nm, 即平均孔径稍有增大。浸洗过程中随着金属离子从分子筛中脱除, 分子筛的比表面积和孔容积都有所增大。同时当金属和一小部分铝脱除后, 分子筛内部有一些结构单元遭到破坏, 使得一小部分小孔相互联通, 形成介孔, 脱铝达到一定程度时形成一些大孔, 导致孔容增大。

2.2 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量

2.2.1 吸附时间对吸附量的影响

在室温条件(15 °C)下, 吸附时间对苯酚吸附量的影响如图 4 所示。

从图 4 中看出, 吸附的开始阶段, 即前 20 min 内苯酚的吸附量随时间延长而迅速增加; 当吸附时间从

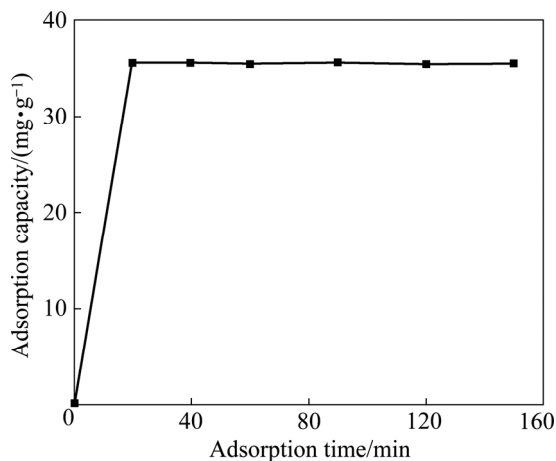


图4 吸附时间对吸附量的影响

Fig.4 Effect of adsorption time on phenol adsorptive capacity ($C_0=100$ mg/L)

20 min 延长至 60 min 时, 吸附量变化很小, 由 35.420 增加到 35.484 mg/g, 吸附率在 88.55%~88.71%之间。当吸附时间为 90 min 时吸附量达到最大, 此时苯酚的吸附量为 35.540 mg/g, 吸附率为 88.85%。之后吸附量基本不再发生变化, 达到吸附平衡状态。如果时间继续延长, 吸附在废 FCC 催化剂残渣表面上的部分吸附质(苯酚)可能会脱落, 导致苯酚的吸附量降低。因此, 废 FCC 催化剂残渣吸附苯酚的平衡吸附时间约为 90 min, 最大饱和和吸附容量为 35.540 mg/g。

2.2.2 pH 值对苯酚吸附量的影响

苯酚溶液的 pH 值对苯酚吸附量的影响如图 5 所示。

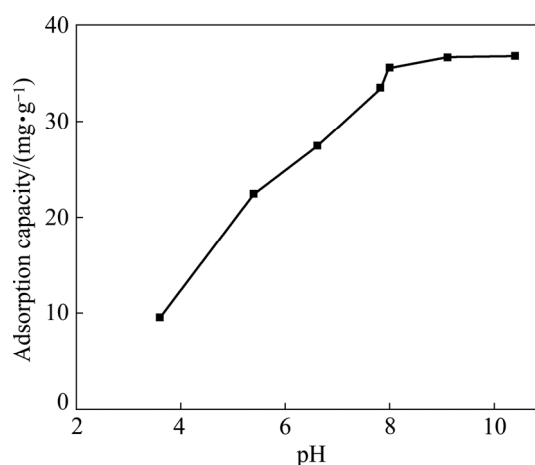


图5 溶液 pH 值对吸附量的影响

Fig.5 Effect of pH on phenol adsorptive capacity

从图 5 看出, 在 $\text{pH}<4.0$ 时, 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量比较小, pH 值在 4.0~8.0 范围内的吸附量随 pH 增大而迅速增加, 但 pH 值从 8.0 增大到 10.0 时, 吸附量增加缓慢。由于分子筛的第 1 个作用是晶体的外表面吸附多种吸附物, 外表面提供了 1 个被吸附分子的精确尺寸。如果被吸附物的分子尺寸超过该尺寸, 就不能进入晶体内部, 只能被吸附在外表面。外表面的吸附作用很弱, 而晶体内部有成千上万的晶体空隙和槽, 它们能进一步吸附分子。苯酚的离解常数 $\text{p}K_a=9.96$, 在溶液 $\text{pH}<\text{p}K_a$ 且较小时, 苯酚在溶液中主要以中性分子存在, 不易被吸附剂的面吸附场所吸附。改变溶液 pH 值会影响苯酚在溶液中的存在形态, pH 值升高有利于吸附剂表面羟基的质子转移, 形成质子表面电荷^[6]; 同时随着 pH 值增加, 苯酚分子发生电离, 阴离子比例不断增加, 使苯酚易于与带电荷的吸附剂表面发生吸附作用, 导致吸附量迅速增加^[9]。因此, 在实验中选择溶液 pH 值以 7.0~8.0 为宜。

2.2.3 苯酚的初始浓度对吸附量的影响

分别配制苯酚的质量浓度为 20、40、60、80 以及 100 mg/L 的溶液, 用 0.25 g 废 FCC 催化剂残渣进行吸附实验。苯酚的初始浓度对吸附量的影响如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 废 FCC 催化剂残渣对不同初始浓度的苯酚的吸附量随时间的变化趋势基本相似。苯酚的初始浓度是影响吸附作用的主要因素之一, 随着苯酚初始浓度升高, 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量明显增加。当初始浓度为 20 mg/L 时, 平衡吸附量仅为 3.056 mg/g; 而初始浓度增加到 100 mg/L 时, 平衡吸附量增加到 35.544 mg/g。这是因为苯酚的初始浓度越高, 供废 FCC 催化剂残渣吸附的苯酚量越多, 苯酚在固液两相间的浓度差越大, 使苯酚向废 FCC 催化剂表面迁移的推动力越大, 致使吸附量增加。因此, 增大苯酚溶液的初始浓度有利于提高苯酚的吸附量。本实验中苯酚溶液的初始浓度从 20 mg/L 增大到 100 mg/L 时, 吸附量增加 91.40%, 增长较明显。

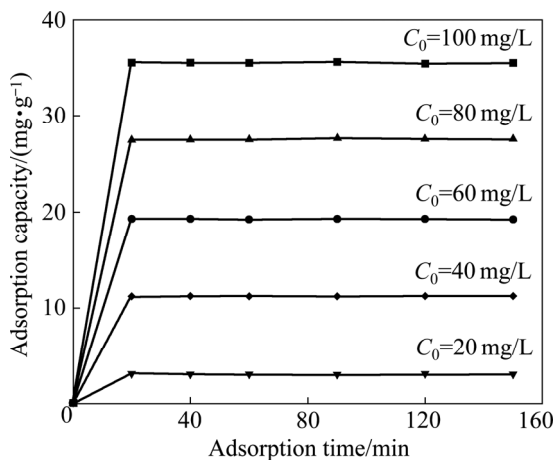


图 6 苯酚溶液初始浓度对吸附量的影响

Fig.6 Influence of initial concentration C_0 of phenol on adsorptive capacity

2.2.4 温度对吸附作用的影响

在苯酚的初始质量浓度为 100 mg/L 的条件下, 温度对吸附量的影响如图 7 所示。

吸附过程要在一定温度下才能发生^[10], 当温度为 15、25、35、45、65 和 85 °C 时, 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量相差不大, 平衡吸附量分别为 35.540、35.344、35.240、35.520、35.268 和 35.432 mg/g。温度超过 15 °C 时, 随温度升高吸附量先略有降低, 这是由于苯酚的热运动能力增强, 导致表面吸附点与苯酚的分子间作用力降低^[11]; 而随着温度继续升高, 吸

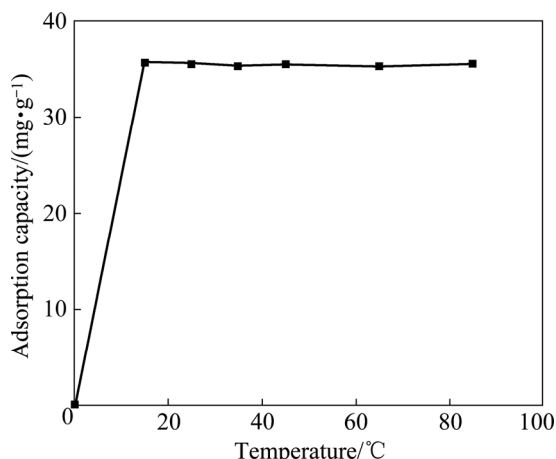


图 7 温度对吸附量的影响

Fig.7 Effect of the temperature on the phenol adsorptive capacity ($C_0=100$ mg/L)

附量又稍有增加。综合考虑能耗, 选择在 15 °C 下进行吸附。

2.2.5 吸附方式对吸附作用的影响

实验中用初始质量浓度为 100 mg/L 的苯酚溶液, 在室温状态(15 °C)下, 用 0.25 g 废 FCC 催化剂分别以振荡吸附和磁力搅拌 2 种方式进行吸附, 吸附方式对苯酚吸附量的影响如图 8 所示。由图 8 可以看出振荡吸附的吸附量高于磁力搅拌吸附。这是由于振荡吸附过程中苯酚溶液与废 FCC 催化剂残渣颗粒接触更加充分, 吸附更易于进行。

2.2.6 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附等温线

分别取初始质量浓度为 20、40、60、80、100 mg/L 的苯酚溶液 100 mL, 用 0.25 g 废 FCC 催化剂残渣在室温下进行吸附, 吸附 90 min 并离心分离后, 测定其

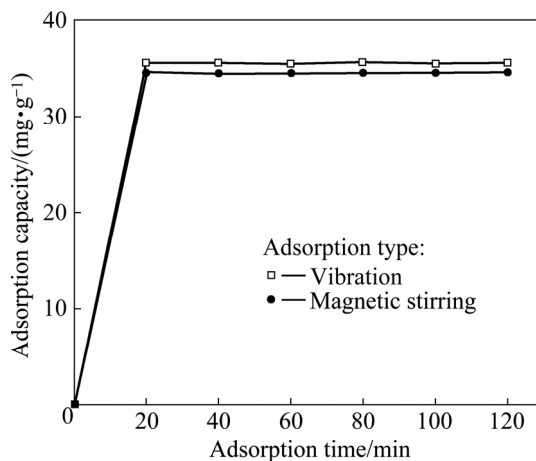


图 8 吸附方式对吸附量的影响

Fig.8 Effects of the adsorption types and adsorption time on the phenol adsorptive capacity

吸光度。根据实验数据绘制苯酚吸附等温线。

在恒温条件下, 溶液中固体表面发生的吸附现象常用 Freundlich 方程和 Langmuir 方程来描述, Freundlich 方程和 Langmuir 方程分别为^[6]:

$$q_t = kC^n \quad (3)$$

$$\frac{C}{q_t} = \frac{C}{q_m} + \frac{1}{Kq_m} \quad (4)$$

式中: C 为吸附平衡时溶液的质量浓度, mg/L; q_m 为理论饱和吸附量, mg/g; k 、 n 、 K 均为常数。采用 Freundlich 模型对实验数据进行拟合, 得到:

$$q = 0.5077C^{0.94319} \quad R^2=0.99864 \quad (5)$$

采用 Langmuir 模型对实验数据拟合, 得到:

$$\frac{1}{q} = 0.0646\frac{1}{C} + 0.02721 \quad R^2=0.99998 \quad (6)$$

根据式(5)和(6)得到苯酚吸附等温线的 Freundlich 拟合曲线和 Langmuir 拟合曲线(R 为相关系数), 分别如图 9 和 10 所示。由图 9 可见, 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量随苯酚溶液平衡浓度增大而逐渐增大。

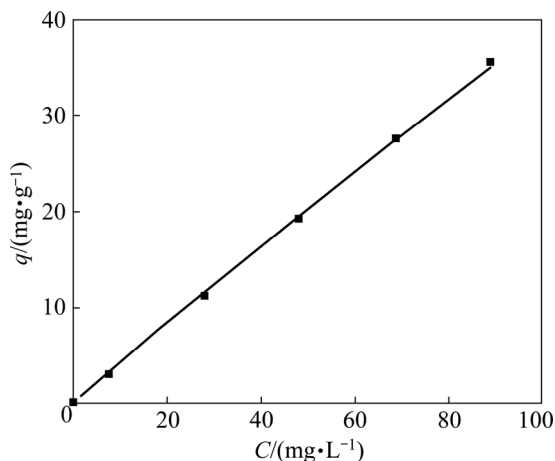


图 9 苯酚的吸附等温线 Freundlich 拟合曲线

Fig.9 Adsorption isotherms fitting curve of phenol with Freundlich equation

经回归处理, 废 FCC 催化剂残渣吸附苯酚的等温吸附曲线符合 Freundlich 方程和 Langmuir 方程, 这两个方程都可用来描述废 FCC 催化剂残渣吸附苯酚的等温吸附特征。其中, Langmuir 方程的相关系数 R^2 值优于 Freundlich 方程的, 因此, 用 Langmuir 方程描述废 FCC 催化剂残渣的吸附过程更加准确。

式(3)所示 Freundlich 方程中, k 表示吸附能力, k 值越大, 表明吸附剂的吸附能力越强; n 表示吸附剂

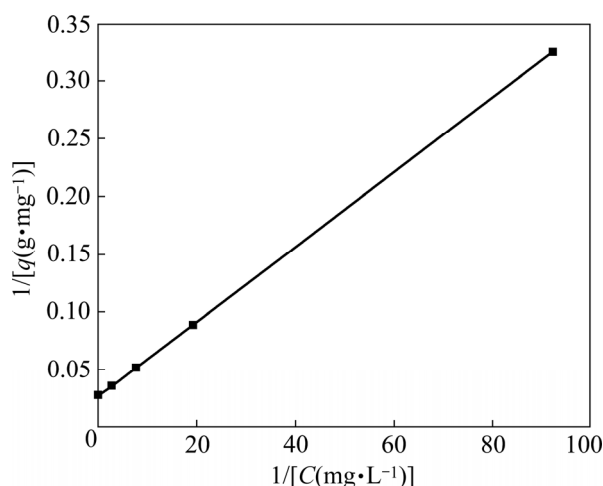


图 10 苯酚的吸附等温线 Langmuir 拟合曲线

Fig.10 Adsorption isotherms fitting curve of phenol with Langmuir equation

的吸附强度, $n < 0.5$ 时吸附容易进行; $n > 2.0$ 时吸附很难进行。本实验中, $n = 0.94319$, 表明废 FCC 催化剂残渣对废水中的苯酚有一定的吸附能力, 可以用作苯酚的吸附剂。

根据 Langmuir 方程拟合, 计算出废 FCC 催化剂残渣对苯酚的最大饱和吸附容量 q_m 为 36.751 mg/g, 最大缓冲容量 Kq_m 为 15.48 L/g。本实验中测得的最大饱和吸附容量为 35.540 mg/g, 与理论值非常接近。

3 结论

1) 通过测量废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量随时间的变化曲线, 得到吸附达到平衡时需要大约 60 min; 苯酚溶液的 pH 值较小时, 苯酚吸附量较小, 随着 pH 增加, 吸附量迅速增大, 较佳的 pH 值为 7.0~8.0; 苯酚的初始浓度越高, 废 FCC 催化剂残渣对苯酚的吸附量越大。吸附过程中, 温度从 15 °C 升至 85 °C 时, 吸附量变化不大, 考虑能耗因素, 吸附实验选择在 15 °C 下进行。

2) 采用振荡吸附和磁力搅拌吸附 2 种不同的方式进行吸附实验, 苯酚的吸附量相差不大, 分别为 35.540 和 34.568 mg/g。

3) 通过对吸附等温曲线进行拟合, 表明 Freundlich 方程和 Langmuir 方程都可用于描述废 FCC 催化剂残渣对苯酚的等温吸附特征, 相关系数均大于 0.99, 用 Langmuir 方程描述更为准确。通过计算, 理论饱和吸附量为 36.751 mg/g, 实验测得的最大饱和吸附量为

35.540 mg/g, 二者非常接近。

4) 用废 FCC 催化剂残渣吸附苯酚溶液的吸附率(即苯酚的去除率)可达到 88%左右。

REFERENCES

- [1] 张霞. 国外催化裂化废催化剂处理和利用[J]. 石油化工环境保护, 1989, 5(4): 47-50.
ZHANG Xia. Treatment and utilize of waste FCC catalyst abroad [J]. Environmental Protection in Petrochemical Industry, 1989, 5(4): 47-50.
- [2] SANGA S. Waste water treating agent produced from waste cracking catalyst [P]. US, 3960760, 1976.
- [3] 陈芳艳, 何军, 唐玉斌, 等. 废 FCC 催化剂对水中铅离子的吸附特性研究[J]. 石油化工高等学校学报, 1999, 12(2): 37-39.
CHEN Fang-yan, HE jun, TANG Yu-bin, et al. Waste FCC catalyst performance of adsorption to lead in the water [J]. Journal of Petrochemical Universities, 1999, 12(2): 37-39.
- [4] 陈芳艳, 何军, 唐玉斌, 等. FCC 废催化剂对水中铜(II)吸附[J]. 中国环境科学, 1999(2): 28-31.
CHEN Fang-yan, HE jun, TANG Yu-bin, et al. Adsorption of Cu^{2+} onto waste FCC catalyst [J]. China Environmental Science, 1999(2): 28-31.
- [5] 刘公召, 安源. FCC 废催化剂吸附溶液中微量镍的研究[J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(3): 10-13.
LIU Gong-zhao, AN Yuan. Adsorption of Ni^{2+} in aqueous by spent FCC catalyst [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2003, 30(3): 10-13.
- [6] 郑淑琴, 黄石, 钱东, 等. FCC 废催化剂的改性及其对重金属离子的吸附性能[J]. 石油学报: 石油加工, 2009, 38(4): 430-434.
ZHENG Shu-qin, HUANG Shi, QIAN Dong, et al. Modification of FCC waste catalyst and its adsorption performance for heavy metal ions [J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2010, 26(4): 430-434.
- [7] 写文彬, 俞凌云, 张新申. 苯酚的测定方法及其研究进展[J]. 西部皮革, 2009, 31(3): 10-15.
XIE Wen-bin, YU Lin-yun, ZHANG Xin-shen. Development in determination methods of Phenol [J]. West Leather, 2009, 31(3): 10-15.
- [8] 杨景芝, 孙衍华, 周杰, 等. $\text{KBrO}_3\text{-KBr}$ 紫外分光光度法测定痕量苯酚[J]. 分析实验室, 1999, 18(4): 57-59.
YANG Jing-zhi, SUN Yan-huan, ZHOU Jie, et al. Determination of trace Phenol by $\text{KBrO}_3\text{-KBr}$ and UV spectrophotometry [J]. Analytical Laboratory, 1999, 18(4): 57-59.
- [9] 陈丽萍. 活性白土吸附去除苯酚废水的实验研究[J]. 内蒙古师范大学学报, 2009, 38(4): 430-434.
CHEN Li-ping. Experimental research on adsorption of phenol onto activated clay from wastewater [J]. Journal of Mongolia Normal University, 2009, 38(4): 430-434.
- [10] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 135.
ZHAO Zhen-guo. Chemistry Application and Principle [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 135.
- [11] 杨维, 杨军锋, 王立东, 等. 阴/阳离子有机膨润土制备及其对苯酚吸附性能的实验研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(10): 725-730.
YANG Wei, YANG Jun-feng, WANG Li-dong, et al. Preparation of anion-cation organic bentonite and its adsorption of phenol [J]. Environmental Pollution and Control, 2007, 29(10): 725-730.

(编辑 汤金芝)