

文章编号: 1006-9941(2016)05-0509-06

旋转填料床中活性炭吸附含酚废水研究

武晓娜^{1,2}, 刘有智^{1,2}, 焦伟洲^{1,2}

(1. 中北大学山西省超重力化工工程技术研究中心, 山西太原 030051; 2. 超重力化工过程山西省重点实验室, 山西太原 030051)

摘要:以旋转填料床(RPB)作为吸附设备,活性炭为吸附剂处理模拟含酚废水,考察了转速、液体流率及初始浓度等因素对苯酚去除率的影响,确定适宜操作条件;分别采用拟一级和拟二级动力学模型研究了吸附动力学,并考察了各因素对吸附速率常数的影响;在相同操作条件下就去除率和速率常数与传统吸附法进行对比。结果表明:超重力因子为44.68、液体流率为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,处理初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯酚废水,吸附2 h后,苯酚去除率最大,为90%左右,相同操作条件下较传统吸附法提高了30%;拟二级动力学模型线性拟合得到的吸附速率常数随着超重力因子以及液体流率的增大而增大,并得到最适宜操作条件下旋转填料床吸附法和传统吸附法的动力学方程分别为 $t/q_t = 0.02648 + 0.77932t$ 和 $t/q_t = 0.02869 + 1.55707t$,吸附速率常数较传统吸附法而言,由 5.28×10^{-4} 提高到 9.02×10^{-4} 。

关键词:旋转填料床(RPB); 吸附; 苯酚; 废水; 吸附速率常数

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.014

1 引言

酚类化合物是一类重要的有机化工原料,广泛应用于火炸药合成、石油化工、炼油等工业领域,是火炸药企业工业废水的主要成分之一^[1],这种废水的毒性强,来源广、水量大,其排放会给环境造成严重的污染,因此对该类废水的治理非常重要^[2-3]。而对于高浓度的含酚废水,首先要考虑对酚的回收^[4]。目前含酚废水的处理方法主要有吸附法、溶剂萃取法、化学法、膜分离技术和生物法等,其中吸附法因工艺比较成熟,且处理物质易回收,被国内外作为处理含酚废水的主要方法,但传统的吸附设备存在吸附速率较慢,床层阻力较大,不易脱附等问题^[5-8]。

超重力旋转填料床(Rotating Packed Bed, RPB)是20世纪80年代开发的一种强化传质过程的新型传质设备^[9],它依靠旋转产生的超重力和剪切力使液体在多孔填料中高度分散,大大提高了气液两相间的接触面积、湍动程度以及相对运动速度。目前,超重力

技术已广泛应用于吸收、精馏和分离等化工过程^[10-16],但将其用于吸附领域的报道较少。2000年, Lin等^[17]研究了在超重力场中低浓度碱性黄色染料的吸附过程,采用拟一级反应和内扩散模型解释该过程,结果表明:超重力可以提高速率常数以及扩散速率,强化传质。同时对比了超重力作用下,活性炭对低浓度碱性黄色染料以及活性橙的吸附^[18],结果表明超重力对两种物质的吸附均有促进作用。2004年, Lin和Chen等^[19]在超重力场下去除水中的乳化十二烷,分别采用活性炭和锯屑作吸附剂,发现超重力可强化传质,增大吸附速率,且在一定范围内,传质系数随转速以及液体流率的增大而增大。2012年, Chang等^[20]在RPB中采用活性炭吸附溶液中低浓度灭多威,并与传统间歇式搅拌釜(BBR)进行比较,发现RPB较BBR有更低的平衡浓度,更快的内部传质,同时吸附动力学也表明RPB中的扩散大大增强。而以上研究大多是针对低浓度废水(低于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),对高浓度废水的吸附研究欠缺,且对于吸附动力学的研究不够全面。同时,活性炭具有发达的孔隙结构和较大的比表面积,作为性能优良的吸附材料广泛应用于工业用水、饮用水及废水的净化^[21-24]。

基于此,本研究以苯酚模拟污染物,活性炭为吸附剂,利用超重力技术强化吸附法处理高浓度含酚废水,

收稿日期: 2015-06-10; 修回日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(21376229)

作者简介: 武晓娜(1991-),女,硕士研究生,主要从事超重力技术在吸附方面的应用研究。e-mail: 1025781818@qq.com

通信联系人: 刘有智(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事超重力场中多相流传质与化学反应研究。e-mail: lyzzhongxin@126.com

将旋转填料床代替传统吸附床,探讨了不同条件下 RPB 的吸附性能,并研究了苯酚在 RPB 中的吸附动力学,以期为重重力技术在吸附处理高浓度炸药废水领域提供一定的理论基础。

2 实验部分

2.1 实验原料

苯酚(分析纯)由天津化工试剂三厂提供,蒸馏水为实验室自制。

表 1 活性炭的孔结构特性

Table 1 The pore structures of the activated carbon

average particle diameter /m	length/m	BET Surface Area / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	total pore volume / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	micropore volume / $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	micropore area / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	external surface area / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	average pore diameter /nm
0.003	0.002-0.008	689.101	0.582	0.144	403.032	286.070	3.38

2.2 实验装置及流程

实验所用的吸附主体设备是 RPB(自制),转子内径、外径、高度分别为 0.030,0.065,0.040 m,活性炭随机散装在转子中,装填量为 100 g 左右。

旋转填料床吸附模拟苯酚废水的实验流程如图 1 所示。储液槽 5 中的苯酚溶液(液体体积为 3.5 L)由泵 6 经过液体流量计 8 后进入旋转填料床 1 中,通过转子中心的液体分布器均匀喷到填料环内侧,在超重力作用下被剪切成液丝、液膜,沿径向向外运动,与活性炭填料接触进行吸附传质,从出液口离开旋转填料床 1 进入储液槽 5,出口苯酚溶液在三通阀门 3 处取样,液体在旋转填料床 1 中循环处理。

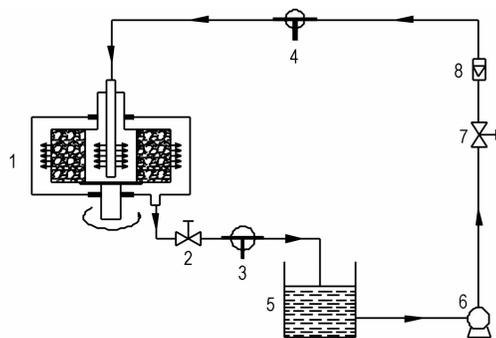


图 1 RPB 中活性炭吸附苯酚的实验流程图

1—旋转填料床, 2, 7—阀门, 3, 4—三通阀门, 5—储液槽, 6—泵, 8—液体流量计

Fig.1 Experiment progress flow of adsorption of phenol on activated carbon in rotating packed bed (RPB)

1—rotating packed bed, 2, 7—valves, 3, 4—three-way valves, 5—fluid reservoir, 6—liquid pump, 8—fluid flow meter

活性炭(工业纯、柱状)由山西新华化工厂提供,活性炭的孔结构特性采用 Quadrasorb SI 型比表面积分析仪进行测试。在 77.3 K 下进行氮气吸附测定,吸附测定前,样品在 300 °C 下脱气 3 h,比表面积(S_{BET})根据 N_2 吸附脱附等温线,采用 BET (Brunauer-Emmett-Teller)方法计算得到。在相对压力 $p/p_0 = 0.99$ 下,对总孔体积(V_{total})进行了表征,平均孔径通过公式 $D_p = 4V_{\text{total}}/S_{\text{BET}}$ 计算得出。采用 t-plot 法^[8]测定微孔体积,结果如表 1 所示。

2.3 实验方法

活性炭预处理,以除去其表面的灰分及杂质,具体步骤为:将实验所用活性炭经蒸馏水多次冲洗后,置于 110 °C 烘箱中 24 h 后取出,放置于磨口烧瓶,密封保存待用。

常温,在去离子水中溶解苯酚,得到不同浓度的模拟苯酚废水,分别改变操作条件如超重力因子(0 ~ 80)、液体流量(10 ~ 50 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)、初始浓度(500 ~ 2000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)等,进行 RPB 中的吸附实验,确定适宜的操作条件。

2.4 分析方法

对模拟苯酚废水取样,苯酚浓度采用戴安 Ultimate 3000 高效液相色谱仪测定。色谱柱: C_{18} 反相柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 甲醇-水, 体积比为 60 : 40; 流速: 1.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 柱温: 25 °C; 波长: 270 nm; 进样量: 20 μL 。按下式计算苯酚去除率:

$$\eta = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为苯酚去除率; c_0 和 c_t 分别是活性炭吸附前后苯酚浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

3.1 超重力因子对苯酚去除率的影响

超重力因子是用来描述旋转填料床中超重力场的强度,即超重力场下任意处(或任意点)的平均离心加

速度与常重力加速度之比^[9],是无因次量,其积分化简式为:

$$\beta = \frac{2\omega^2(r_1^2 + r_1r_2 + r_2^2)}{3(r_1 + r_2)g} \quad (2)$$

式中, r_1 为内半径, m; r_2 为外半径, m; ω 为角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

固定液体流率为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 在 RPB 中吸附处理初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟苯酚废水, 考察超重力因子 β 对苯酚去除率的影响, 以超重力因子为 0 时模拟传统吸附法, 实验结果如图 2 所示。

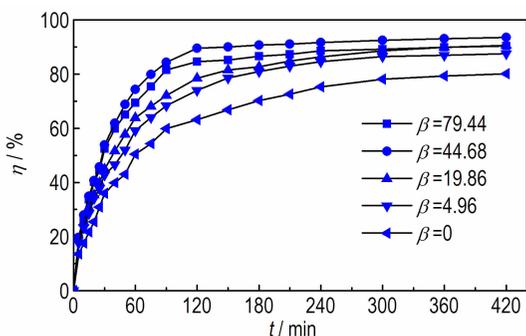


图 2 超重力因子对苯酚去除率的影响

Fig. 2 Effect of high gravity factor on removal efficiency of phenol

由图 2 可知, 苯酚去除率随着超重力因子的增大先增大后有下降趋势。这可能是因为, 在超重力场中, 液体被剪切成液丝、液膜, 与活性炭填料接触进行吸附传质, 增大超重力因子 β , 促进了填料床中液体的混合, 加强了苯酚从液相到固相的传质过程, 使得苯酚更快地到达活性炭颗粒表面, 为吸附提供了更大的推动力。RPB 中的吸附过程与活性炭对苯酚的吸附以及活性炭颗粒间的持液量有关, 随着超重力因子 β 的增大, 填料的润湿面积增大^[25], 使得液固接触面积增大, 强化了活性炭与废水间的传质, 有利于吸附过程的进行, 但同时吸附剂颗粒间的持液量可能一定程度上减小了, 导致吸附效果下降。这两个因素随着超重力因子 β 的增大呈竞争关系, 因此继续增大 β , 可能会使持液量的减少起主导作用, 不利于 RPB 中的吸附, 另外, 超重力因子 β 越大, 电机能耗也越大。因此, 从苯酚去除效果和成本考虑, 在本实验范围内确定 RPB 吸附苯酚较适宜的超重力因子 β 为 44.68。

在超重力因子 β 为 44.68 时, 苯酚去除率 η 在 2 h 后达到 90% 以上, 与传统吸附法 ($\beta=0$) 相比, 去除率 η 增大约 30%; 持续吸附 30 min 后, η 的增幅小于 1%, 基于经济优惠考虑, 将吸附时间定为 2 h。

3.2 液体流率对去除率的影响

超重力因子 β 为 44.68, 在 RPB 中吸附处理初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟苯酚废水, 考察液体流率对苯酚去除率的影响, 吸附时间为 2 h, 实验结果如图 3 所示。

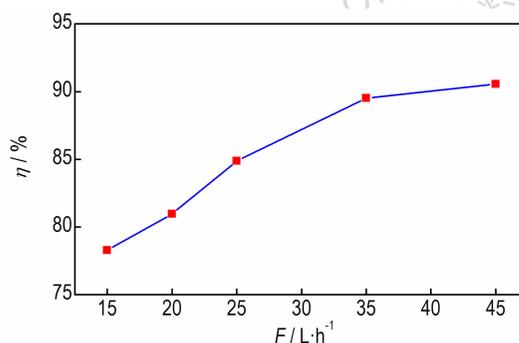


图 3 液体流率对苯酚去除率的影响

Fig. 3 Effect of flow rate on removal efficiency of phenol

由图 3 可知, 苯酚去除率随着液体流率的增大而增大。这可能是因为, 增大液体流率, 液膜流速增加, 活性炭填料的润湿程度增大, 填料间隙以及外腔内的液滴增多, 从而有效地增大了润湿效率, 且极大地增大了实际液-固的接触面积, 此外液体流经填料更加频繁, 从而加强了液-固间的传质, 促进了吸附过程, 综合考虑苯酚去除效果和成本, 在本实验范围内确定 RPB 吸附苯酚较适宜的液体流率 F 为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.3 初始浓度对去除率的影响

超重力因子 β 为 44.68, 液体流率为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下, 在 RPB 中吸附处理不同初始浓度 ($500 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的模拟苯酚废水, 考察初始浓度对苯酚去除率的影响, 吸附时间为 2 h, 实验结果如图 4 所示。

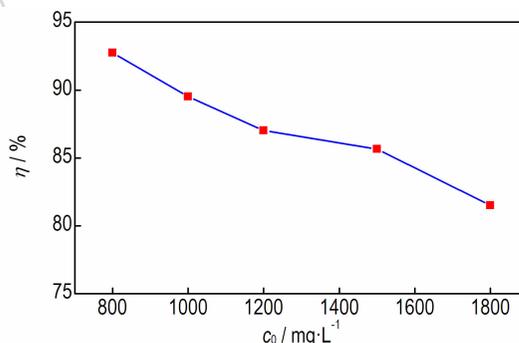


图 4 初始浓度对苯酚去除率的影响

Fig. 4 Effect of initial concentration on removal efficiency of phenol

由图 4 可知, 在一定时间内, 苯酚去除率随着初始浓度的增大而减小。这可能是因为废水浓度越低, 传

质阻力越小,苯酚到达活性炭表面的速率越快,使传质效率得到了较大的提高,从而提高了苯酚的去除率,此外,如果初始浓度过高,会消耗大量的活性炭,再生操作会很频繁,再结合实际含酚废水处理的现状,选用处理初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的苯酚废水。

综上所述,最适宜的操作条件为:超重力因子为 44.68、液体流率为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,苯酚废水的初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,吸附时间为 2 h。

3.4 RPB 吸附动力学

拟一级动力学方程和拟二级动力学方程广泛应用于液-固吸附体系的动力学分析^[26]。

拟一级动力学模型方程为:

$$\frac{dq(t)}{dt} = k(q_e - q(t)) \quad (3)$$

式中, q_e 和 $q(t)$ 分别是在平衡时和 t 时吸附质在固相吸附剂上的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_1 是一级吸附的吸附速率常数, min^{-1} 。

将边界条件: $t=0$ 时 $q(t=0) = 0$; $t=t$ 时, $q(t=t) = q_t$, 代入式(3)中可得:

$$\ln q_e - \ln(q_e - q_t) = k_1 t \quad (4)$$

k_1 的值由 $\ln(q_e - q_t)$ 对 t 所作直线的斜率决定。

拟二级动力学模型方程为:

$$\frac{dq(t)}{dt} = k(q_e - q(t))^2 \quad (5)$$

式中, k 是二级吸附的吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

将边界条件: $t=0$ 时 $q(t=0) = 0$; $t=t$ 时, $q(t=t) = q_t$, 代入式(5)进行整合可得:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

k 的值由 t/q_t 对 t 所作直线的斜率决定。

为了进一步了解 RPB 的吸附性能,本研究分别采用拟一级、拟二级动力学模型对最适宜操作条件下获得的实验数据进行线性拟合,即分别考察 $\ln(q_e - q_t)$ 、 t/q_t 随时间 t 的变化,拟合分析结果列于表 2。

从表 2 可以看出,实验与拟二级动力学的拟合程度较好,其相关系数为 0.9917。此外,由最适宜操作条件下 RPB 吸附法及模拟传统吸附法的拟二级拟合结果(图 5)可知,拟合直线与实验有较好的相关度,实验和拟二级动力学模型能较好地吻合,并得到了最适宜操作条件下 RPB 吸附法及模拟传统吸附法的动力学方程,分别为: $t/q_t = 0.02648 + 0.77932t$, $t/q_t = 0.02869 + 1.55707t$ 。此外,由图 5 中给出的 q_e 值可知, q_e 变化不大,说明超重力因子对平衡吸附量影响不大。

表 2 最适宜操作条件下 RPB 吸附苯酚的拟一级、拟二级拟合结果

Table 2 Linear fitting results from the pseudo-first order kinetic model and the pseudo-second order kinetic model of phenol adsorption in a RPB under the optimum operation conditions

project	equation of linear fitting	R^2
$\ln(q_e - q_t) - t$	$y = 3.4965 - 0.0204x$	0.9854
$t/q_t - t$	$y = 0.0264 + 0.7793x$	0.9917

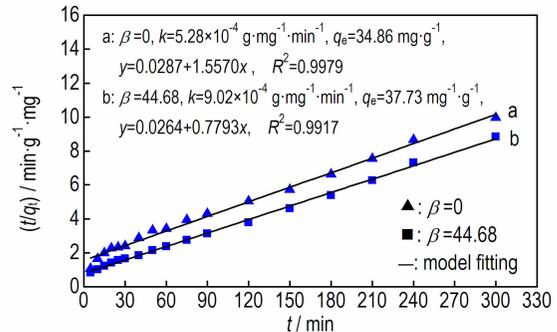


图 5 拟二级动力学模型线性拟合

Fig. 5 Linear fitting results from the pseudo-second order kinetic model

采用拟二级动力学模型对不同操作条件下处理初始浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 模拟苯酚废水的实验数据进行线性拟合,得到吸附速率常数 k ,图 6、图 7 分别为超重力因子 β 和液体流率 F 对吸附速率常数 k 的影响。由图 6、图 7 可知吸附速率常数 k 随着超重力因子和液体流率的增大而增大,且在最适宜操作条件下 RPB 吸附法得到的吸附速率常数 k 值,较相同条件下传统吸附法而言,由 5.28×10^{-4} 提高到 9.02×10^{-4} ,说明超重力强化了液固传质,对吸附有利,为前述 3.1、3.2 的分析提供了理论支撑。

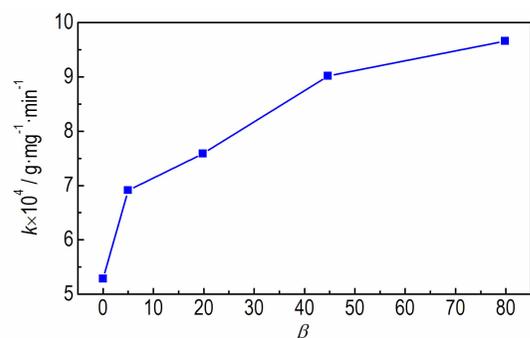


图 6 超重力因子对吸附速率常数的影响

Fig. 6 Effect of high gravity factor on adsorption rate constant

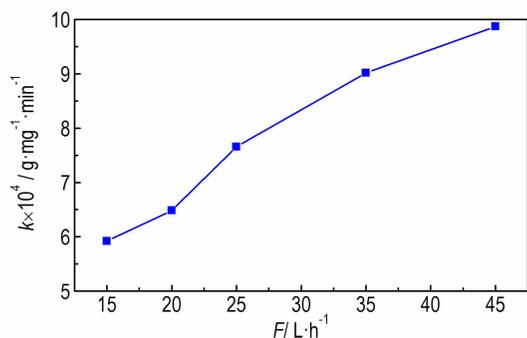


图7 液体流率对吸附速率常数的影响

Fig.7 Effect of flow rate of wastewater on adsorption rate constant

4 结论

(1) 苯酚去除率 η 随着超重力因子的增大先增大后又下降趋势,在吸附时间为 2 h 内,随着液体流率的增大而增大,随着初始浓度的增大而减小,得到较适宜操作条件:超重力因子为 44.68、液体流率为 $35 L \cdot h^{-1}$ 时,处理初始浓度为 $1000 mg \cdot L^{-1}$ 的模拟苯酚废水,吸附时间为 2 h 后,苯酚去除率为 90% 左右,在相同条件下较传统吸附法去除率提高约 30%。

(2) 拟二级动力学模型可以很好地拟合本实验数据,并得到较适宜操作条件下 RPB 吸附法以及传统吸附法的动力学方程,分别为: $t/q_t = 0.02648 + 0.77932t$, $t/q_t = 0.02869 + 1.55707t$ 。此外,吸附速率常数 k 随着超重力因子以及液体流率的增大而增大,且在较适宜操作条件下 RPB 吸附法得到的吸附速率常数 k 值,较相同条件下传统吸附法而言,由 5.28×10^{-4} 提高到 9.02×10^{-4} ,说明超重力强化了液固传质,对吸附有利。

参考文献:

- [1] 肖忠良,胡双启,吴晓青,等. 火炸药的安全与环保技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:79-86.
- [2] 陈美玲. 含酚废水处理技术的研究现状及发展趋势[J]. 化学工程师,2003,95(2):48-51.
CHEN Mei-ling. Actuality and developing trend in the treatment of phenolic wastewater[J]. *Chemical Engineer*, 2003, 95(2): 48-51.
- [3] Gonzalo Vázquez, Ramona Alonso, Sonia Freire, et al. Uptake of phenol from aqueous solutions by adsorption in a pinus pinaster bark packed bed[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 133: 61-67.
- [4] Juang Ruey-shin, Lin Su-hsia, Chen Ching-hsien. Liquid-phase adsorption and desorption of phenol onto activated carbons with ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13: 251-260.

- [5] SHAO Yan, Zhang Huiping, Yan Ying. Adsorption dynamics of p-nitrophenol in structured fixed bed with micro-fibrous entrapped activated carbon [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 225: 481-488.
- [6] Asok Adak, Anjali Pal. Removal of phenol from aquatic environment by SDS-modified alumina: Batch and fixed bed studies[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 50: 256-262.
- [7] Aik Chong Lua, JIA Qi-peng. Adsorption of phenol by oil-palm-shell activated carbons in a fixed bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 150: 455-461.
- [8] 邵琰. 含酚废水在结构化固定床上的吸附动力学[D]. 广州:华南理工大学,2013.
SHAO Yan. Adsorption dynamics of phenolic wastewater in structured fixed bed[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [9] 刘有智. 超重力化工过程与技术[M]. 太原:国防工业出版社,2009:9-15.
- [10] 刘有智,李裕,柳来栓,等. 改性纳米 $Al(OH)_3$ 粉体的制备[J]. 过程工程学报,2003,3(1):57-61.
LIU You-zhi, LI Yu, LIU Lai-shuan, et al. The preparation of modified nano- $Al(OH)_3$ powder [J]. *Journal of Process Engineering*, 2003, 3(1): 57-61.
- [11] 祁贵生,刘有智,焦纬洲. 超重力法脱除气体中硫化氢[J]. 化工进展,2008,27(9):1404-1407.
QI Gui-sheng, LIU You-zhi, JIAO Wei-zhou. The removal of hydrogen sulfide by high gravity method[J]. *Chemical Progress*, 2008, 27(9): 1404-1407.
- [12] LIU You-zhi, QI Gui-sheng, JIAO Wei-zhou. Preparation and properties of methanol-diesel oil emulsified fuel under high-gravity environment[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1463-1468.
- [13] JIANG Xiu-ping, LIU You-zhi, GU Mei-duo. Absorption of sulphur dioxide with sodium citrate buffer solution in a rotating packed bed [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2011, 19(4): 687-692.
- [14] LI Xiu-ping, LIU You-zhi, LI Zhi-qiang, et al. Continuous distillation experiment with rotating packed bed[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(4): 656-662.
- [15] JIAO Wei-zhou, LIU You-zhi, QI Gui-sheng. Gas pressure drop and mass transfer characteristics in a cross-flow rotating packed bed with porous plate packing[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49(8): 3732-3740.
- [16] YUAN Zhi-guo, SONG Wei, LIU You-zhi, et al. Regeneration of SO_2 -loaded sodium phosphate solution in rotating packed bed [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2014, 47(10): 777-781.
- [17] Lin Chia-Chang, Liu Hwai-Shen. Adsorption in a centrifugal field: basic dye adsorption by activated carbon [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2000, 39(1): 161-167.
- [18] Lin Chia-Chang, Liu Hwai-Shen. Dye adsorption by activated carbon in the centrifugal field [J]. *Bioseparation Engineering*, 2000: 25-28.
- [19] Lin Chia-Chang, Chen Yu-Shao, Liu Hwai-Shen. Adsorption of dodecane from water in a rotating packed bed[J]. *J Chin Inst Eng*, 2004, 35(5): 531-538.
- [20] Chang Chiung-Fen, Lee Shu-Chi. Adsorption behavior of pesticide methomyl on activated carbon in a high gravity rotating packed bed reactor [J]. *Water Research*, 2012, 46: 2869-2880.

- [21] 黄文风, 赵君科, 黄明万. TNT-RDX 混合废水处理的实验研究—生物-吸附法[J]. 含能材料, 1998, 6(2): 49–53.
HUANG Wen-feng, ZHAO Jun-ke, HUANG Ming-wan. Experimental research on TNT-RDX wastage treatment—biodegradation and adsorption[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 1998, 6(2): 49–53.
- [22] 杜仕国, 闫军, 汪明球, 等. AC/TiO₂ 复合颗粒的低温制备及对 TNT 废水的降解[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 239–243.
DU Shi-Guo, YAN Jun, WANG Ming-qiu, et al. Preparation of AC/TiO₂ composite particles at low temperature and its application in degradation of TNT wastewater[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 239–243.
- [23] 朱江涛, 黄正宏, 康飞宇, 等. 活性竹炭对苯酚的吸附动力学[J]. 新型炭材料, 2008, 23(4): 326–330.
ZHU Jiang-tao, HUANG Zheng-hong, KANG Fei-yu, et al. The adsorption kinetics of phenol on activated charcoal[J]. *New Carbon Materials*, 2008, 23(4): 326–330.
- [24] 岳钦艳, 杨晶, 高宝玉, 等. 活性炭纤维对水中酚类化合物的吸附特性[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2862–2867.
YUE Qin-yan, YANG Jing, GAO Bao-yu, et al. The adsorption properties of phenolic compounds in water on activated carbon fiber[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2862–2867.
- [25] Munjal S, Dudukovc M P. Mass transfer in rotating packed beds-II. experimental results and comparison with theory and gravity flow[J]. *Chemical Engineering Science*, 1989, 44: 2257–2268.
- [26] HU Yu-na, WANG Hao-yi. The adsorption of toluene-diamine from the wastewater by activated carbon in batch and fixed bed systems[J]. *Desalination*, 2011, 279: 54–60.

Adsorption of Phenol on Activated Carbon in Rotating Packed Bed

WU Xiao-na^{1,2}, LIU You-zhi^{1,2}, JIAO Wei-zhou^{1,2}

(1. Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory of Hige-oriented Chemical Engineering, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Rotating packed bed(RPB) was applied in adsorption removal of phenol from simulation wastewater, with the activated carbon as adsorbent. The influence of operating parameters of RPB on removal efficiency such as high gravity factor, flow rate and initial concentration of phenol wastewater were examined to determine the optimum operating conditions. The pseudo-first-order model and the pseudo-second-order model were used to study the adsorption kinetics. The effect of operating parameters on the adsorption rate constant were studied. The removal efficiency and adsorption rate constant were compared with those of traditional adsorption method. Results show that under the operational conditions: high gravity factor of 44.68, flow rate of 35 L · h⁻¹, initial concentration of phenol wastewater of 1000 mg · L⁻¹, the adsorption time of 2 h, the removal efficiency of phenol can reach maximum about 90%, which is 30% higher than the traditional adsorption method. The adsorption rate constant obtained by pseudo-second-order model increases with the increasing of high gravity factor and flow rate. The kinetics equations in RPB and traditional adsorption method under the optimum condition are as follows: $t/q_t = 0.02648 + 0.77932t$, $t/q_t = 0.02869 + 1.55707t$, and the adsorption rate constant improves from 5.28×10^{-4} to 9.02×10^{-4} .

Key words: rotating packed bed(RPB); adsorption; phenol; wastewater; adsorption rate constant

CLC number: Tj55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.014