反应与分离

DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217328

# 旋转填料床中活性炭上间苯二酚的脱附行为及动力学

郭 芳， 刘有智*， 郭 强

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

**摘 要**：以旋转填料床为脱附设备，采用准二级动力学模型研究了间苯二酚在活性炭上的脱附行为及动力学，并与传统固定床进行了对比. 结果表明，在温度 20℃、液体流量 50 L/h、超重力因子 32.63 及 pH 值 11、脱附剂乙醇 40wt%、脱附时间 90 min 的优化条件下，间苯二酚脱除率达 93.90%，比传统固定床提高了 58.54%，超重力强化了液固传质，对脱附有利；脱附速率常数随液体流量和超重力因子增大而增大，由以超纯水为脱附剂时的 $13.27\times10^{-3}$ g/(mg·min)提高到以乙醇为脱附剂时的 $25.48\times10^{-3}$ g/(mg·min).

**关键词**：旋转填料床；间苯二酚；活性炭；乙醇；脱附速率常数

**中图分类号**：TQ016 **文献标识码**：A **文章编号**：1009−606X(2018)03−0503−06

# Desorption Behavior and Kinetics of Resorcinol from Activated Carbon in Rotating Packed Bed

Fang GUO, Youzhi LIU*, Qiang GUO

(*Shanxi Province Key Laboratory of Higee-oriented Chemical Engineering,*
*Research Center of Shanxi Province for High Gravity Chemical Engineering and Technology,*
*North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China*)

**Abstract:** The desorption behavior and kinetics of resorcinol from activated carbon in rotating packed bed were studied by the pseudo-second-order kinetic model, compared with that in the traditional fixed bed. The optimal operation conditions were determined with temperature of 20℃, high gravity factor of 32.63, pH value of 11, flow rate of 50 L/h, desorption agent ethanol of 40wt% and desorption time of 90 min. In these case, desorption rate of resorcinol reached 93.90%. Compared with the fixed bed, desorption rate increased about 58.54% under the same operating conditions in rotating packed bed. The high gravity technology was beneficial to desorption performance by enhancing the mass transfer from liquid phase to solid phase. The desorption rate constant increased with the increased of flow rate and high gravity factor. In addition, the desorption rate constant improved from $13.27\times10^{-3}$ g/(mg·min) with ultrapure water as desorption agent to $25.48\times10^{-3}$ g/(mg·min) with ethanol as desorption agent.

**Key words:** rotating packed bed; resorcinol; activated carbon; ethanol; desorption rate constant

## 1 前 言

间苯二酚作为一种重要的精细化学品，普遍应用于石油、化工、造纸、医药等行业[1]. 间苯二酚属于内分泌干扰物，含间苯二酚的废水任意排放会造成生殖畸形、发育异常、污染环境[2]. 活性炭为常用的吸附剂，具有发达的孔隙结构，活性炭吸附已成为有机废水常用的处理方法[3,4]. 活性炭的吸附容量有限，吸附饱和后若不经处理即废弃会浪费资源并造成二次污染，对其进行脱附可降低成本和保护环境[5,6]. 目前常用的活性炭脱附方法有化学药品脱附法、热脱附法、微波再生法和超临界流体脱附法等[7−13]. 吸附高浓度酚的活性炭一般采用化学药品脱附法，通常以乙醇或 NaOH 为脱附剂[14]. 传统的液固脱附装置如固定床、流化床等存在设备体积庞大、脱附速率较小、脱附时间长、床层利用率较低等缺点. 近年来，超重力旋转填料床(Rotating Packed Bed, RPB)因体积小、投资和操作费用低、传质效果好等优势在脱附研究中受到关注.

Tan 等[15]以 RPB 为脱附装置、超临界 $CO_2$ 流体为脱附剂，研究了活性炭上甲苯的脱附行为，发现相同操

**收稿日期**：2017−08−25，**修回日期**：2017−10−23
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(编号：21376229)
**作者简介**：郭芳(1992−)，女，山西省太原市人，硕士研究生，研究方向为超重力化工过程强化，E-mail: 2271970276@qq.com；刘有智，通讯联系人，E-mail: lyzzhongxin@126.com.

**引用格式**：郭芳，刘有智，郭强. 旋转填料床中活性炭上间苯二酚的脱附行为及动力学. 过程工程学报，2018, 18(3): 503−508.
Guo F, Liu Y Z, Guo Q. Desorption Behavior and Kinetics of Resorcinol from Activated Carbon in Rotating Packed Bed (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(3): 503−508, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217328.

作条件下，RPB 中甲苯从活性炭上完全脱附的时间明显小于固定床，表明超重力场促进了脱附过程. Tan 等[16]在超重力场下采用超临界 $CO_2$ 脱附活性炭上的 2,2,3,3-四氟乙烯-1-丙醇，脱附率随转速、压力和 $CO_2$ 流率增大而增大，且相同时间内固定床中的脱附率远低于 RPB，证实了 RPB 替代传统固定床用于脱附的可行性. 但超临界流体投资费用大、应用受限，仍处于实验研究阶段，超重力对活性炭脱附行为及动力学的影响研究还较少.

本工作在 RPB 中采用溶剂萃取法对吸附高浓度间苯二酚的活性炭进行脱附，研究了不同操作条件下的脱附行为及动力学，为工业化应用提供一定的理论参考.

## 2 实 验

### 2.1 材料与试剂

间苯二酚(相对分子质量 110.1，分析纯，纯度≥99.50%，天津市兴复科技发展有限公司)，活性炭(柱状，工业纯，比表面积 671.5 $m^2/g$，平均孔径 0.524 nm，长度 0.002~0.008 m，平均直径 0.003 m，山西新华化工厂)，硝酸(相对分子质量 63.01，浓度 65wt%~68wt%，洛阳市化学试剂厂)，氢氧化钠(相对分子质量 40，纯度≥96.00%，天津化工试剂三厂)，无水乙醇(工业纯，浓度 99.70wt%，天津市光复科技发展有限公司)，超纯水(实验室自制).

### 2.2 实验流程与分析仪器

实验室自制旋转填料床，转子内外径分别为 30 和 65 mm, 高 40 mm，实验流程如图 1 所示. 吸附流程：

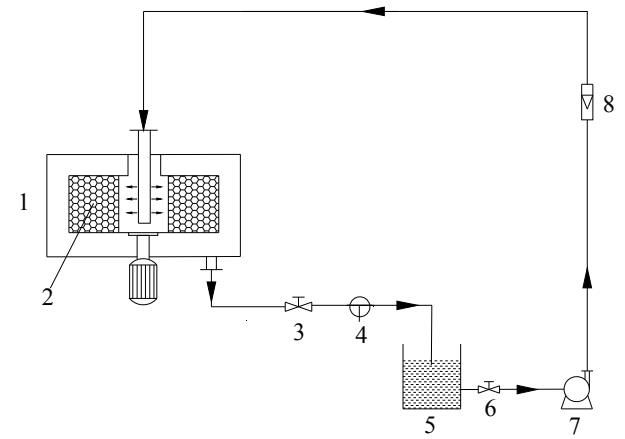


图 1 RPB 中活性炭吸附–脱附间苯二酚实验流程

Fig.1 Experimental process of adsorption of resorcinol on activated carbon and desorption from activated carbon in rotating packed bed

配制 900 mg/L 间苯二酚溶液 3 L，置于储液槽 5 中，由液泵 7 经液体流量计 8 进入活性炭装填量约为 100 g 的 RPB 1 中，进行吸附，完成吸附的废水经出液口排出，进入储液槽 5 中，再次进入 RPB 1 中循环. 在取样口 4 处取样，当水样中间苯二酚浓度变化很小(±2 mg/L)时结束吸附. 脱附流程：吸附完成后，将配制好的乙醇溶液 3 L 置于储液槽 5 内，经泵、流量计再次进入 RPB 1 中，与吸附平衡的活性炭接触进行脱附. 每隔一定时间在取样口 4 处取样，当水样中间苯二酚浓度变化很小(±2 mg/L)时结束实验，计算间苯二酚脱除率和其在活性炭上的脱附量.

分析仪器：戴安 Ultimate 3000 高效液相色谱仪(美国戴安公司)，PHS-3C 型 pH 酸度计(上海先导科技公司)，$iQ_2$ 型自动气体吸附仪(美国康塔公司).

### 2.3 实验方法

#### 2.3.1 活性炭预处理

活性炭煮沸 40 min，用超纯水多次冲洗后置于鼓风干燥箱中，110℃下干燥 12 h，置于干燥器中待用.

#### 2.3.2 间苯二酚浓度的测定

废水中间苯二酚浓度由高效液相色谱仪测定，C18 反相柱(250 mm×4.6 mm，5 μm)，检测波长 277 nm，流动相为甲醇/水(60/40, vol)，进样量 20 μL，温度 20℃，流速 1 mL/min.

间苯二酚脱除率 $\gamma$ 及平衡脱附量 $q_{de}$ 计算如下：

$$\gamma=\frac{C_t}{C_0-C_{ae}}\times 100\%, \tag{1}$$

$$q_{de}=\frac{C_{de}V}{W}, \tag{2}$$

式中，$C_t$ 为 $t$ 时刻间苯二酚浓度(mg/L)，$C_0$ 为间苯二酚初始浓度(mg/L)，$C_{ae}$ 为吸附平衡时的间苯二酚浓度(mg/L)，$C_{de}$ 为脱附平衡时间苯二酚浓度(mg/L)，$V$ 为溶液体积(L)，$q_{de}$ 为平衡脱附量(mg/g)，$W$ 为活性炭质量(g).

## 3 结果与讨论

### 3.1 超重力因子对间苯二酚脱除率的影响

采用无因次超重力因子($\beta$)表征超重力场强度[17]. 液体流量 50 L/h 及 pH 值 11、乙醇浓度 40wt%、温度 20℃时，超重力因子 $\beta$ 对间苯二酚脱除率的影响如图 2 所示. 由图可知，$\beta$ 从 12.75 增加到 32.63 时，间苯二酚脱除率从 80.55%增至 91.25%，$\beta$ 继续增大，间苯二酚脱除率基本不变. 原因为离心力可能增强了膜扩散、相间传质及内扩散的传质速率[15,16]，$\beta$<32.63 时，随 $\beta$ 增大，液体被逐渐增大的离心力剪切为更小的液滴、液丝和液

膜，表面更新速率加快，有效传质比表面积增大，活性炭与脱附剂接触更充分；随超重力场增加，脱附剂更易扩散至活性炭内外表面，增大了与活性炭上间苯二酚的接触机会，促进了间苯二酚从活性炭上脱附. $\beta$>32.63 时，随$\beta$增大，脱附剂在活性炭表面停留时间减少，脱附剂来不及与活性炭充分接触已由出液口排出[18]. 受超重力场强化和传质消弱共同作用，继续增大$\beta$对脱除率提高不明显，且增加电能消耗，32.63 为最优超重力因子.

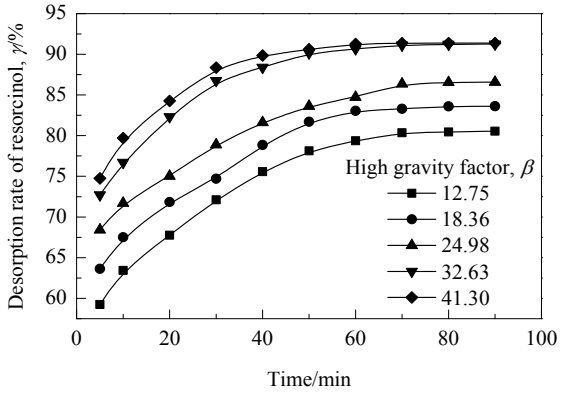


图 2　超重力因子对间苯二酚脱除率的影响
Fig.2　Effect of high gravity factor on desorption rate of resorcinol

### 3.2 液体流量对间苯二酚脱除率的影响

$\beta$=32.63 及 pH=11、乙醇浓度 40wt%、温度 20℃时，液体流量对间苯二酚脱除率的影响如图 3 所示. 由图可知，随液体流量增大，间苯二酚脱除率增加. 液体流量从 30 L/h 增至 50 L/h，间苯二酚脱除率从 85.65%增至 91.76%，提高约 6.11%. 这是因为相间传质速率取决于流量[15]，当液体流量增大时，液体流速增大，脱附剂流经活性炭更频繁，增大了活性炭上间苯二酚与脱附剂的接触机会. 增大液体流量，脱附剂被剪切形成的液滴和液膜总数增多[19]，RPB 中活性炭润湿程度增加，固液有

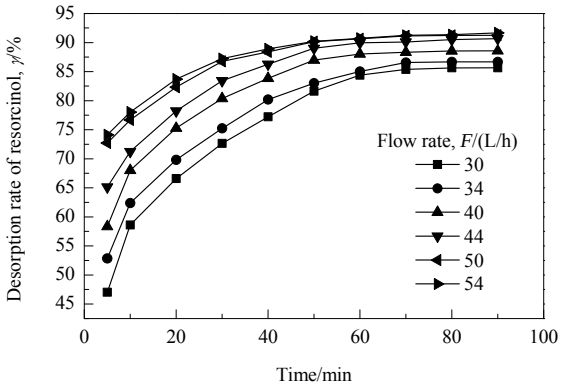


图 3　液体流量对间苯二酚脱除率的影响
Fig.3　Effect of liquid flow rate on desorption rate of resorcinol

效传质比表面积和传质推动力增加，膜扩散速率增大，脱附剂易被活性炭的外表面吸附，吸附速度加快，强化了脱附. 流量增大到 54 L/h，间苯二酚去除率仅增长 0.422%，原因是流量较大会造成液膜变厚，传质阻力增加，不利于脱附. 考虑间苯二酚的脱除率与成本，50 L/h 为较适宜的液体流量.

### 3.3 pH 值对间苯二酚脱除率的影响

$\beta$=32.63、液体流量 50 L/h、乙醇浓度 40wt%、温度 20℃时，pH 值对间苯二酚脱除率的影响如图 4 所示. 由图可知，间苯二酚脱除率随 pH 值增大而增大，pH 值从 3 增大到 11 时，脱附 90 min 间苯二酚脱除率从 89.52%增加到 93.91%，原因是活性炭吸附酚类与化学吸附有关，即酚类物质与活性炭表面的羧基发生酯化反应[20]，酸性条件利于酯化反应，间苯二酚以分子形式存在于水中，易吸附于活性炭上，不易脱附. 由于部分乙醇可与强酸生成质子化乙醇，难以分子形态存在于水中，不能充分发挥对已吸附在活性炭上的间苯二酚的萃取再生作用[21]，且酸与醇生成酯，脱附剂乙醇量减少，导致酸性条件下间苯二酚脱附率偏低. 活性炭吸附有机物主要归因于 π–π 色散力、氢键键合作用和电子供体–受体相互作用[3]. pH 值大于酸度系数 p$ka$(9.3)时，随 pH 值升高，酚基上的–OH 发生解离，抑制了活性炭与间苯二酚分子之间生成氢键，使间苯二酚分子易从活性炭上脱附[3]，吸附量急剧下降，脱除率上升[22]. pH 值从 11 增至 13 时，间苯二酚脱除率仅增长 0.703%. 考虑间苯二酚脱除率和实际情况，pH=11 较适宜.

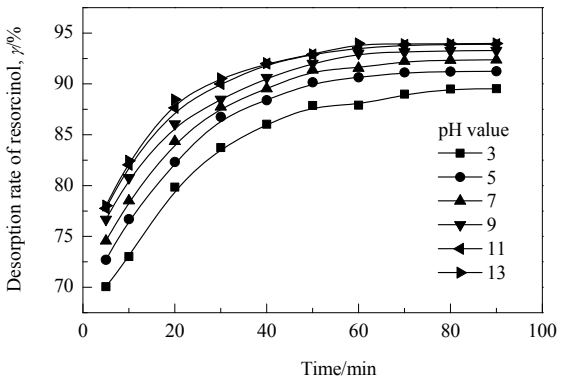


图 4　pH 值对间苯二酚脱除率的影响
Fig.4　Effect of pH value on desorption rate of resorcinol

### 3.4 乙醇浓度对间苯二酚脱除率的影响

$\beta$=32.63、液体流量 50 L/h 及 pH=11、温度 20℃时，乙醇浓度对间苯二酚脱除率的影响如图 5 所示. 由图可知，间苯二酚脱除率随乙醇浓度增大而增大，乙醇浓度从 20wt%增至 40wt%时，脱附 90 min 间苯二酚脱除率

从 85.60%增加到 93.90%，继续增大乙醇浓度到 50wt%，间苯二酚脱除率仅增长 0.96%. 原因是增大乙醇浓度，传质推动力增大，乙醇分子较易扩散至活性炭内外表面萃取间苯二酚，促进了间苯二酚的脱附. 考虑间苯二酚脱除效果和成本，RPB 脱除间苯二酚较适宜的乙醇浓度为 40wt%.

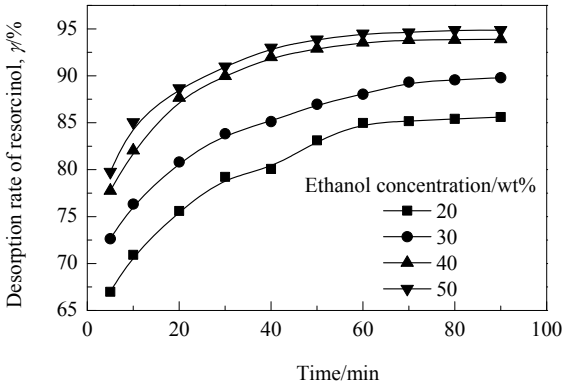


图 5 乙醇浓度对间苯二酚脱除率的影响

Fig.5 Effect of ethanol concentration on desorption rate of resorcinol

### 3.5 脱附动力学

采用准一级和准二级动力学模型对图 2~5 的数据进行拟合，通过相关系数判断模型可信度，准二级模型拟合的相关系数大于准一级模型. 用准二级动力学模型模拟间苯二酚脱附量与时间的关系为

$$\frac{t}{q_t}=\frac{1}{k_{de}q_{de}^{2}}+\frac{t}{q_{de}}, \tag{3}$$

式中，$q_t$ 为 $t$ 时刻的脱附量(mg/g)，$k_{de}$ 为脱附速率常数[g/(mg·min)].

#### 3.5.1 流量对脱附速率常数的影响

采用动力学准二级模型对图 3 数据进行拟合，液体流量对脱附速率常数的影响如图 6 所示. 由图可知，脱附速率常数随流量增大而增大，流量从 30 L/h 增至 54 L/h，$k_{de}$ 由 $6.429\times10^{-3}$ g/(mg·min) 增至 $4.124\times10^{-2}$ g/(mg·min)，增加了 5.41 倍. 这是因为增大液体流量，喷淋密度增大，单位体积内液滴数增多，活性炭润湿程度加大，有效传质比表面积增大，脱附剂与吸附质接触机会增多，反应更剧烈，促进了脱附.

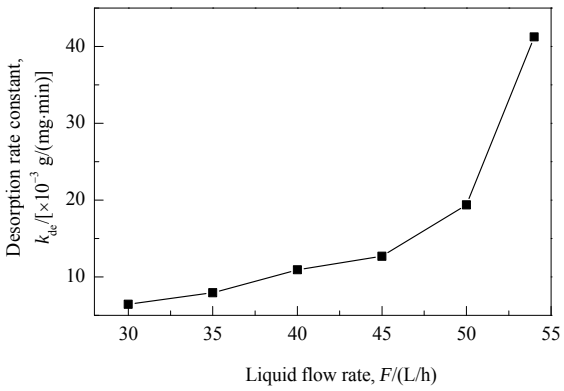


图 6 流量对脱附速率常数的影响

Fig.6 Effect of liquid flow rate on desorption rate constant

#### 3.5.2 超重力因子对脱附速率常数的影响

采用动力学准二级模型对图 2 数据拟合，超重力因子对脱附速率常数的影响如图 7 所示. 由图可知，脱附速率常数随$\beta$增大而增大，$\beta$从 12.75 增至 41.3，$k_{de}$ 由 $12.54\times10^{-3}$ g/(mg·min)增至 $25.78\times10^{-3}$ g/(mg·min)，增加了 1.056 倍，表明超重力场有利于间苯二酚从活性炭上脱附. 这是因为$\beta$增大，RPB 中液体混合充分，固–液界面更新速率提高，脱附剂与活性炭接触面积增大，促进了脱附. 增大$\beta$，强化了对液体的剪切能力，液滴直径和液膜厚度减小，传质阻力降低，脱附剂更易扩散到活性炭表面进行脱附[23].

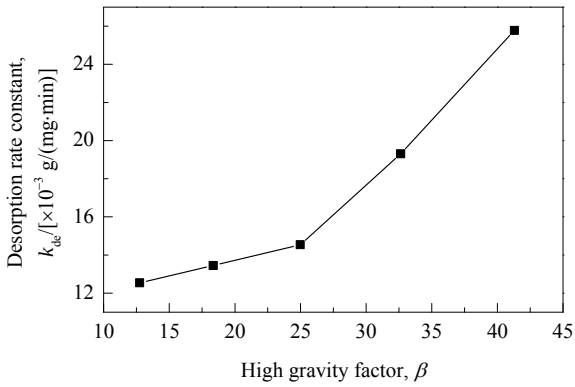


图 7 超重力因子对脱附速率常数的影响

Fig.7 Effect of high gravity factor on desorption rate constant

#### 3.5.3 工艺条件对脱附速率常数的影响

液体流量 50 L/h 及 pH=11、乙醇浓度 40wt%、脱附时间 90 min 条件下，分别用超纯水和 40wt%乙醇为脱附剂，以$\beta$=0 和 32.36 分别模拟固定床和 RPB 进行对比实验，结果如图 8 所示. 由图可知，相同操作条件下脱附 90 min，固定床中间苯二酚脱除率由超纯水为脱附剂时的 19.96%提高到乙醇为脱附剂时的 35.36%，提高了 15.4%，RPB 中间苯二酚脱除率由 65.71%提高到 93.90%，提高了 28.19%，表明乙醇脱附效果比超纯水好. 这是因为脱附机理不同，超纯水脱附主要依靠物质扩散，吸附质由活性炭表面向水中扩散，但受吸附力作用吸附质难以离开活性炭表面，扩散作用有限，脱附效果较差；而乙醇脱附为置换机理，易溶于水的小分子乙醇置换活性炭表面吸附的大分子，从而使间苯二酚从活

性炭上脱附[22].

对图 8 数据采用准二级动力学模型进行拟合，结果见表 1，RPB 和传统固定床中的准二级方程分别为 $t/q_t$=0.06267+0.03996$t$ 及 $t/q_t$=0.4530+0.1041$t$，用式(2)计算可得不同工艺条件下的平衡脱附量如图 9 所示.

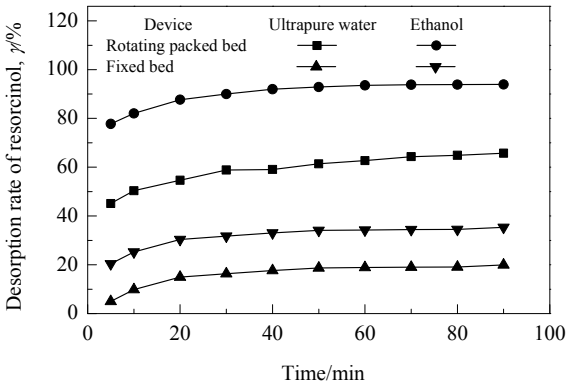


图 8　工艺条件对间苯二酚脱除率的影响

Fig.8　Effect of process condition on desorption rate of resorcinol

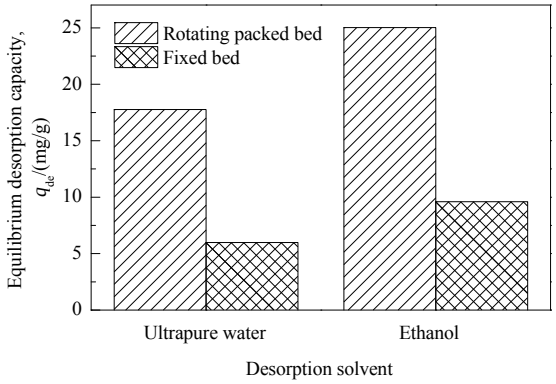


图 9　工艺条件对平衡脱附量的影响

Fig.9　Effect of process condition on equilibrium desorption capacity

**表 1　不同工艺条件下活性炭上间苯二酚脱附的动力学分析结果**

Table 1　The results of desorption dynamical analysis of resorcinol from activated carbon under different process

| Solvent | Device | Desorption rate constant, $k_{de}$/[×10$^{-3}$ g/(mg·min)] | Equilibrium desorption capacity, $q_{de}$/(mg/g) | Equation of desorption kinetics | Index of correlation, $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Ultrapure water | Rotating packed bed | 13.27 | 17.76 | $t/q_t$=0.2390+0.05631$t$ | 0.9993 |
| Ultrapure water | Fixed bed | 12.57 | 5.982 | $t/q_t$=2.224+0.1672$t$ | 0.9971 |
| Ethanol | Rotating packed bed | 25.48 | 25.03 | $t/q_t$=0.06267+0.03996$t$ | 0.9999 |
| Ethanol | Fixed bed | 23.95 | 9.602 | $t/q_t$=0.4530+0.1041$t$ | 0.9999 |

由表 1 及图 9 可知，采用相同脱附剂时，超重力脱附明显优于固定床脱附. 超纯水为脱附剂时，RPB 中间苯二酚脱除率是 65.71%，较固定床的 19.96%提高了 45.75%，平衡脱附量 $q_{de}$ 由 5.982 mg/g 提高到 17.76 mg/g，提高了 1.97 倍，平衡脱附常数 $k_{de}$ 由 12.57×10$^{-3}$ g/(mg·min)提高到 13.27×10$^{-3}$ g/(mg·min)；乙醇为脱附剂时，间苯二酚脱除率由固定床的 35.36%提高到 RPB 的 93.90%，提高了 58.54%，$q_{de}$ 由 9.602 mg/g 提高到 25.03 mg/g，提高了 1.61 倍，$k_{de}$ 由 23.95×10$^{-3}$ g/(mg·min)提高到 25.48×10$^{-3}$ g/(mg·min)，表明超重力能强化液固传质，促进活性炭上的间苯二酚脱附.

文献[5]分别采用浓度 70.58wt%(75vol%)的乙醇和 70.33wt%(75vol%)的甲醇脱附活性炭上的双酚 A，静置脱附 400 min，脱除率分别为 73%和 76%. 本工作采用 RPB 作为脱附装置，在适宜条件下，采用 40wt%的乙醇仅脱附 90 min，间苯二酚的脱除率达 93.90%，表明超重力强化了脱附传质.

## 4　结　论

在旋转填料床(RPB)中，以乙醇为脱附剂对活性炭上吸附平衡的间苯二酚进行脱附，研究了脱附装置和脱附剂对间苯二酚从活性炭上脱附的影响，考察了超重力因子$\beta$、乙醇流量、pH 等操作参数对间苯二酚脱除率的影响，得出如下结论：

(1) 常温下 RPB 中间苯二酚在活性炭上脱附的较适宜条件为乙醇流量 50 L/h，$\beta$=32.63，pH=11，乙醇浓度 40wt%，脱附时间 90 min，该条件下间苯二酚脱除率达 93.90%.

(2) 相同条件下，用乙醇作脱附剂的脱附效果优于超纯水，间苯二酚脱除率较超纯水分别提高了 28.19%(超重力)和 15.4%(传统固定床).

(3) 准二级动力学模型对实验数据拟合效果较好，乙醇为脱附剂，相同操作条件下，RPB 和传统固定床中的准二级方程分别为 $t/q_t$=0.06267+0.03996$t$ 及 $t/q_t$=0.4530+0.1041$t$. RPB 中的平衡脱附量高于传统固定床，表明超重力能强化脱附传质. 脱附速率常数随液体流量、超重力因子增大而增大，由以超纯水为脱附剂的 13.27×10$^{-3}$ g/(mg·min)提高到以乙醇为脱附剂的 25.48×10$^{-3}$ g/(mg·min).

**参考文献：**

[1] Liao Q, Sun J, Gao L. The Adsorption of Resorcinol from Water Using Multi-walled Carbon Nanotubes [J]. Colloids Surf., A, 2008, 312(2): 160–165.

[2] Pardeshi S K, Patil A B. Solar Photocatalytic Degradation of Resorcinol a Model Endocrine Disrupter in Water Using Zinc Oxide [J]. J. Hazard. Mater., 2009, 163(1): 403–409.

[3] Suresh S, Srivastava V C, Mishra I M. Study of Catechol and Resorcinol Adsorption Mechanism through Granular Activated Carbon Characterization, pH and Kinetic Study [J]. Sep. Sci. Technol., 2011, 46(11): 1750–1766.

[4] Kumar A, Kumar S, Kumar S. Adsorption of Resorcinol and Ratechol on Granular Activated Carbon: Equilibrium and Kinetics [J]. Carbon, 2003, 41(15): 3015–3025.

[5] Zhou C, Gao N Y, Li R Y, et al. Desorption of Bisphenol-A (BPA) and Regeneration of BPA-spent Granular Activated Carbon Using Ultrasonic Irradiation and Organic Solvent Extraction [J]. Desalin. Water Treat., 2015, 54(11): 3106–3113.

[6] 韩庭苇，王郑，朱垠光，等. 活性炭的再生方法比较及其发展趋势研究 [J]. 化工技术与开发, 2016, 45(10): 44–48.
Han T W, Wang Z, Zhu Y G, et al. Comparison on Regeneration Methods of Activated Carbon and Its Development Trend [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2016, 45(10): 44–48.

[7] San M G, Lambert S D, Graham N J D. The Regeneration of Field-spent Granular-activated Carbons [J]. Water Res., 2001, 35(11): 2740–2748.

[8] Ledesma B, Roman S, Sabio E, et al. Aqueous Thermal Desorption as an Effective Way to Regenerate Spent Activated Carbons [J]. J. Supercrit. Fluids, 2014, 85: 24–30.

[9] Ledesma B, Román S, Sabio E, et al. Improvement of Spent Activated Carbon Regeneration by Wet Oxidation Processes [J]. J. Supercrit. Fluids, 2015, 104: 94–103.

[10] Zanella O, Bilibio D, Priamo W L, et al. Electrochemical Regeneration of Phenol-saturated Activated Carbon-proposal of a Reactor [J]. Environ. Technol., 2017, 38(5): 549–557.

[11] Scholz M, Martin R J. Control of Bio-regenerated Granular Activated Carbon by Spreadsheet Modelling [J]. Chem. Technol. Biotechnol., 1998, 71(3): 253–261.

[12] Tianlong Z T, Wang Q H, Shi Z N, et al. Microwave Regeneration of Spent Activated Carbon for the Treatment of Ester-containing Wastewater [J]. R. Soc. Chem., 2016, 6(65): 60815–60825.

[13] Garcia M T, Carnicer A, Madrid M, et al. Adsorption of Phenol and Chlorophenols onto Granular Activated Carbon and Their Desorption by Supercritical $CO_2$ [J]. J. Chem. Technol. Biotechnol., 2015, 89(11): 1660–1667.

[14] 翁元声. 活性炭再生及新技术研究 [J]. 给水排水, 2004, 30(1): 86–91.
Weng Y S. Study on Regeneration of Activated Carbon and New Technology [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(1): 86–91.

[15] Tan C S, Lee P L. Supercritical $CO_2$ Desorption of Toluene from Activated Carbon in Rotating Packed Bed [J]. J. Supercrit. Fluids, 2008, 46(2): 99–104.

[16] Tan C S, Lee P L. Supercritical $CO_2$ Desorption of Activated Carbon Loaded with 2,2,3,3-Tetrafluoro-1-propanol in a Rotating Packed Bed [J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42(6): 2150–2154.

[17] 刘有智. 超重力化工过程与技术 [M]. 北京：国防工业出版社, 2009: 2–3.
Liu Y Z. Chemical Engineering Process and Technology in High Gravity [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 2–3.

[18] 武晓娜，刘有智，焦纬洲. 旋转填料床中活性炭吸附含酚废水研究 [J]. 含能材料, 2016, 24(5): 509–514.
Wu X N, Liu Y Z, Jiao W Z. Adsorption of Phenol on Activated Carbon in Rotating Packed Bed [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(5): 509–514.

[19] 王探，祁贵生，刘有智，等. 超重力湿法脱除气体中低浓度粉尘 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(1): 92–96.
Wang T, Qi G S, Liu Y Z, et al. Removal of Low Concentration Dust from Gas by Wet Dust Collection Technology under High Gravity [J]. Chin. J. Process Eng., 2017, 17(1): 92–96.

[20] Salame I I, Bandesz T J. Role of Surface Chemistry in Adsorption of Phenol on Activated Carbons [J]. Colloid Interface Sci., 2003, 264(2): 307–312.

[21] 韩永忠，谌伟艳，陈金龙，等. 活性炭微波辅助溶剂再生研究 [J]. 环境科学与技术, 2006 , 29(8): 25–27.
Han Y Z, Chen W Y, Chen J L, et al. Study on Solvent Regeneration of Activated Carbon Assisted with Microwave [J]. Enviromental Science & Technology, 2006, 29(8): 25–27.

[22] 郁捷. 活性炭对多元酚废水吸附效果的研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2010: 36–38.
Yu J. Studies of Activated Carbon Adsorption on Wastewater Containing Polyhydric Phenol [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 36–38.

[23] Chang C F, Lee S C. Adsorption Behavior of Pesticide Methomyl on Activated Carbon in a High Gravity Rotating Packed Bed Reactor [J]. Water Res., 2012, 46(9): 2869–2880.