

文章编号:1674-2869(2017)01-0019-06

# NAD-150 超高交联树脂对苯甲醇的吸附行为研究

陈佳东<sup>1</sup>,熊万利<sup>1</sup>,唐嘉齐<sup>1</sup>,毛 铤<sup>2</sup>,陈 雄<sup>2</sup>,余军霞<sup>1</sup>,池汝安<sup>1\*</sup>

1. 武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北 武汉 430074;

2. 湖北绿色家园精细化工有限责任公司,湖北 武汉 430022

**摘 要:**采用树脂吸附法对苯甲醇废水进行处理,考察了初始质量浓度、吸附时间、酸度、吸附剂用量、盐浓度等因素对 NAD-150 超高交联树脂吸附苯甲醇的影响,探讨了 NAD-150 超高交联树脂对苯甲醇的解吸附行为和重复利用效果. 研究结果表明 NAD-150 对苯甲醇的最大吸附量为 663.91 mg/g,树脂对苯甲醇的吸附速度快,吸附在 60 min 内完成并符合准二级动力学模型. 在所研究的范围内,酸度(pH 3~10)对苯甲醇吸附容量的影响小,盐浓度包括 NaCl 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>对苯甲醇的吸附呈现正效应,苯甲醇的吸附量随着盐浓度的增大而显著增大,该吸附剂可用于高盐苯甲醇废水的处理中. 树脂的解吸附实验结果表明饱和吸附的树脂可采用乙醇水溶液进行再生,再生后的树脂可重复使用.

**关键词:**苯甲醇;NAD-150 树脂;吸附

中图分类号:X703

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2017.01.004

## Adsorption Behavior of Benzyl Alcohol on Hyper-Cross Linked NAD-150 Resin

CHEN Jiadong<sup>1</sup>,XIONG Wanli<sup>1</sup>,TANG Jiaqi<sup>1</sup>,MAO Ting<sup>2</sup>,CHEN Xiong<sup>2</sup>,YU Junxia<sup>1</sup>,CHI Ru'an<sup>1\*</sup>

1.School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2.Hubei Greenhome Fine Chemical Co., LTD, Wuhan 430022, China

**Abstract:** We used resin absorption method to treat benzyl alcohol wastewater. The effects of initial mass density, adsorption time, pH, adsorbent dosage and salt concentration on the adsorption of benzyl alcohol on NAD-150hyper-cross linked resin were investigated, and the desorption behavior and reuse of the resin were also studied. Results show that the adsorption capacity of the resin for benzyl alcohol is 663.91 mg/g, and the adsorption process is fast and completed within 60 min, which can be described well by pseudo-second order kinetic model. In the investigated range, pH (3-10) has little effect on the adsorption of benzyl alcohol, however, the salt concentration (NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) has great influence on it. The amount of benzyl alcohol adsorbed increase linearly with the increase of the salt concentration, and the resin can be used in the hyperhaline benzyl alcohol wastewater treatment. Desorption experiment results show that the saturated resin can be reused after regeneration by ethanol-aqueous solution.

**Keywords:**benzylalcohol; NAD-150 resin; adsorption

收稿日期:2016-10-03

基金项目:二级连续反应法制备苯甲醇新工艺开发(2015BAA086)

作者简介:陈佳东,硕士研究生. E-mail:1163237961@qq.com

\*通讯作者:池汝安,博士,教授,博士研究生导师. E-mail:rac\_wit@163.com

引文格式:陈佳东,熊万利,唐嘉齐,等. NAD-150 超高交联树脂对苯甲醇的吸附行为研究[J]. 武汉工程大学学报, 2017,39(1):19-24.

CHEN J D,XIONG W L,TANG J Q,et al. Adsorption behavior of benzyl alcohol on hyper-cross linked NAD-150 resin[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2017,39(1):19-24.

随着我国化工产业的发展,生产过程中产生了大量的工业污染物,其中化工废水对环境污染十分严重.苯甲醇废水就是其中一种典型的和难以治理的化工废水,与许多化工废水一样,存在着难以生物降解、质量浓度高、含盐量多、毒性大、成分复杂一系列处理问题<sup>[1]</sup>.

苯甲醇作为氯化苄的延伸产品是一个重要的有机化工产品 and 中间体,广泛地应用在环氧、香精香料、有机溶剂、制药等领域.在苯甲醇的工业生产中,通常是以氯化苄为原料,在碱催化作用下加热水解制得<sup>[2]</sup>,然而在生产过程中,会有大量含盐量高(NaCl)和质量浓度高的苯甲醇废水被排出,造成很严重的环境污染问题.而且此类废水可生化性极差,很难以直接进行生化处理<sup>[3-4]</sup>.

在有机废水的处理中,通常采用树脂吸附法.该方法具有操作简单、吸附效果好、脱附再生容易等优点<sup>[5-7]</sup>.本研究采用NAD-150超高交联树脂对苯甲醇进行了吸附研究,探讨了初始质量浓度、吸附时间、吸附剂用量、酸度对大孔树脂吸附苯甲醇的影响<sup>[8]</sup>,以及NAD-150超高交联树脂对苯甲醇的解吸附行为和重复利用效果.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂及仪器

岛津 UV-2450 紫外可见分光光度计,上海捷辰仪器有限公司生产;甲醇(质量分数 $\geq 99.5\%$ ),国际集团化学试剂有限公司生产;无水乙醇(质量分数 $\geq 99.7\%$ ),天津博迪化工股份有限公司生产;苯甲醇(质量分数 $\geq 99\%$ ),国际集团化学试剂有限公司生产;NAD-150 超高交联吸附树脂,西安蓝晓科技有限公司生产;苯甲醇实际废水,由湖北某化工厂提供.

### 1.2 原料预处理

1) 苯甲醇实际废水预处理:对苯甲醇实际废水进行过滤得澄清废液待用.

2) 树脂前处理:将树脂加入到无水乙醇中,在 60 ℃ 下恒温回流 6 h,然后趁热抽滤,洗去残余的乙醇.在 60 ℃ 下干燥至恒重,密封保存在干燥器中备用<sup>[9]</sup>.

### 1.3 树脂的筛选

处理后的苯甲醇废液分别用 NAD-150、HPD-100、AB-8 三种树脂进行吸附试验,测得三种

树脂穿透时间和吸附容量分别为 105 min、28 min、18 min 和 293.32 mg/g、154.00 mg/g、119.10 mg/g,可知 NAD-150 超高交联树脂相对于其它两种大孔树脂吸附时间更长,吸附容量更大,表明 NAD-150 超高交联树脂具有更高的吸附效率和吸附容量,更适合苯甲醇的吸附处理<sup>[10]</sup>.

### 1.4 静态吸附实验

静态吸附实验均在室温下于振动摇床中进行.将一定量的树脂加入到 25 mL 一定质量浓度的苯甲醇溶液中,平衡后测定吸附前后溶液中苯甲醇的质量浓度,依据公式(1)计算吸附剂对苯甲醇的吸附量( $q_e$ , mg/g)

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (1)$$

式中,  $C_0$  和  $C_e$  分别为吸附前后溶液中苯甲醇的质量浓度(mg/L),  $V$  为溶液的体积(L),  $W$  为干树脂的质量(g).

### 1.5 动态吸附实验

采用湿法填充的方法将预处理过的 NAD-150 装入填充柱(内径 1.2 mm, 直径 20 cm)中, 1 g NAD-150 装填的湿体积为 4.5 cm<sup>3</sup>. 采用蠕动泵在不同条件下将苯甲醇溶液以下行的方式通入 NAD-150 填充柱, 定时取样, 计算其吸附量  $q_{it}$ (mg/g):

$$q_{it} = \frac{v \int_{t=0}^{t=t} (C_0 - C_t) dt}{m} \quad (2)$$

其中  $v$  为吸附柱流速(mL/min),  $C_0$  为初始溶液质量浓度(mg/L),  $C_t$  为流经吸附柱后  $t$  时刻溶液质量浓度(mg/L),  $m$  为大孔树脂的质量(g).

## 2 结果与讨论

### 2.1 苯甲醇初始质量浓度对树脂吸附的影响

图 1 插图为 NAD-150 超高交联吸附树脂的扫描电镜图, 由图可知, 该树脂具有多孔网状结构, 树脂表面的多孔结构为苯甲醇的吸附提供了大的比表面积.

图 1 为树脂对苯甲醇的吸附等温曲线, 从图中可以看出, 树脂对苯甲醇的吸附容量随着初始质量浓度的增大而逐渐增大, 直至到达吸附平衡. 为了更好的研究吸附机理, 采用 Langmuir[公式(3)], Freundlich[公式(4)]和 Temkin[公式(5)]等吸附模型对等温吸附曲线进行拟合<sup>[11-14]</sup>, 拟合结果见图 1.

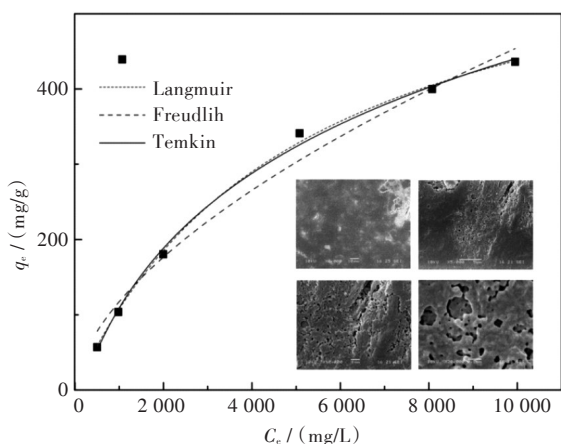


图1 大孔树脂对苯甲醇的等温吸附曲线  
(插图:树脂的扫描电镜图)

Fig. 1 Adsorption isotherm of benzyl alcohol on the resin  
(Inset: SEM image of resin)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e) \quad (5)$$

在 Langmuir 模型中,  $q_e$  为每克树脂吸附苯甲醇平衡的量(mg/g),  $q_m$  为最高吸附量(mg/g),  $K_L$  为 Langmuir 吸附常数(L/mg),  $C_e$  为吸附平衡是容易的平衡质量浓度(mg/L). 在 Freundlich 模型中,  $K_F$  ( $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} / \text{g}$ ) 是代表吸附能力的常数,  $n$  是一个描述的吸附强度的常数. 在 Temkin 模型中,  $A_T$  (L/mg) 是最大结合能源相应的平衡结合常数,  $b_T$  (g/mg) 是 Temkin 等温线常数,  $T$  为温度(K),  $R$  为理想气体常数(8.314 5).

Langmuir、Freundlich、Temkin 三种吸附模型的拟合优度  $R^2$  分别为 0.99、0.97、0.99, 表明三种模型符合程度均较高, 均比较适合拟合苯甲醇的吸附. 在 Langmuir 模型中, 可以根据分离因子  $R_L$  的大小来判断吸附反应的难易程度, 当  $0 < R_L < 1$  表示吸附反应容易进行,  $R_L$  的计算公式如式(6), 其中  $C_0$  是吸附质初始质量浓度, mg/L;  $K_L$  为 Langmuir 常数.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (6)$$

由计算得到  $R_L$  的值为 0.79, 表明吸附反应容易进行, 最高吸附量  $q_m$  为 663.91 mg/g, 表明树脂对苯甲醇具有很高的吸附能力. Freundlich 模型中, 依据吸附常数  $n$  值的大小来判断吸附反应的理化属性. 当吸附常数  $n < 1$  时表示吸附以化学过程为主,  $n > 1$  时表示吸附以物理过程为主,  $n = 1$  时表

示吸附呈线性趋势; 计算得到  $n$  值为 1.72, 说明树脂吸附苯甲醇主要为物理过程.

将 0.2 g 树脂分别加入 25 mL 的质量浓度为 500 mg/L、1 000 mg/L、2 000 mg/L、5 000 mg/L、8 000 mg/L、10 000 mg/L 的苯甲醇溶液中进行吸附, 不同质量浓度下吸附平衡后的吸附量和去除率见图 2. 由图 2 可知在一定质量浓度范围内, 随着苯甲醇初始质量浓度增加, 苯甲醇的去除率逐渐减小, 而吸附量在逐渐增加, 主要是由于吸附剂表面的活性位点数固定, 一旦吸附剂达到饱和吸附后底物将不再被吸附, 继续增大底物质量浓度将会使苯甲醇去除率降低. 当苯甲醇质量浓度低于 500 mg/L, 树脂对苯甲醇的去除率大于 95%.

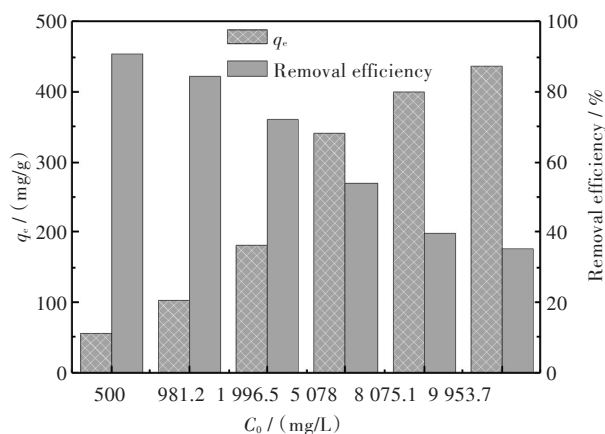


图2 初始质量密度对吸附量和去除率的影响

Fig. 2 Effects of mass density on adsorption capacity and removal efficiency of benzyl alcohol

## 2.2 吸附时间对树脂吸附的影响

将 0.2 g 树脂加入 25 mL 5 000 mg/L 的苯甲醇溶液中进行吸附, 放入摇床中振荡, 不同时间下吸附量和去除率见图 3. 由图 3 可知, 60 min 前, 随着时间的增加, 吸附量急剧增加, 吸附过程十分迅速; 60 min 后, 吸附量基本不随着时间的增加而变化, 这是由于在反应初期苯甲醇质量浓度较高, 树脂表面活性位点较多, 反应速率很快, 树脂表面活性位点会随着反应的逐步进行而逐渐减少, 苯甲醇质量浓度也随之降低, 反应速率降低直至达到吸附平衡. 由图 3 可知吸附达到平衡所需时间为 60 min, 平衡时吸附量为 650 mg/g, 表明 NAD-150 超高交联吸附树脂对苯甲醇吸附速度快、吸附量大. 为了探究苯甲醇吸附速率的影响因素, 采用准一级模型、准二级模型和颗粒内扩散 3 种吸附动力学模型对吸附穿透曲线进行模拟<sup>[15-16]</sup>.

粒子内扩散模型认为吸附反应的速率受颗粒内部的扩散控制, 其方程式为式(7), 式中  $q_e$  和  $q_t$

吸附平衡时和  $t$  时的吸附量 ( $\text{mg/g}$ ),  $k_p$  为粒子内扩散速率常数 ( $\text{g}/\text{mg}^{-1}\text{min}^{-1/2}$ ).

$$q_t = k_p t^{1/2} + C \quad (7)$$

在准一级动力学模型中,反应速率与  $(q_e - q_t)$  的一次方成正比,而且吸附反应只受单一因素控制,吸附速率是由活性位点数或被吸附质的浓度决定的,其方程式如式(8)所示,式中  $q_e$  是吸附平衡时的吸附量 ( $\text{mg/g}$ ),  $q_t$  为  $t$  时的吸附量 ( $\text{mg/g}$ ),  $k_1$  为准一级吸附速率常数 ( $\text{min}^{-1}$ )

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

在准二级动力学模型中,反应速率与  $(q_e - q_t)$  的二次方成正比,吸附速率由被吸附质的质量浓度和吸附剂表面的活性位点数这两个主要因素所控制,其方程式为式(9), 式中  $q_e$  为吸附平衡时的吸附量 ( $\text{mg/g}$ ),  $q_t$  为  $t$  时的吸附量 ( $\text{mg/g}$ ),  $k_2$  为准二级吸附速率常数 [ $\text{g}/(\text{mg}^{-1}\text{min}^{-1})$ ].

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (9)$$

三种模型拟合结果见图3. 颗粒内扩散模型、准一级模型和准二级模型模拟吸附穿透曲线的相关性  $R^2$  分别为 0.324 6、0.985 3 和 0.991 7, 可知准二级模型拟合效果最好,说明苯甲醇吸附反应速率由活性位点数和被吸附质的质量浓度所决定.

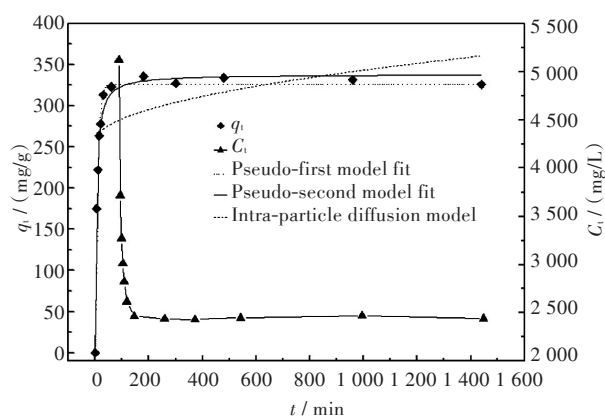


图3 苯甲醇的吸附动力学曲线

Fig. 3 Adsorption kinetics of benzyl alcohol on resin

### 2.3 pH对树脂吸附的影响

分别将 0.2 g 树脂加入到不同 pH 的 25 mL 质量密度为 5 000 mg/L 的苯甲醇溶液中进行吸附,当 pH 从 3 到 10 时,树脂对苯甲醇的吸附量分别为 323.05 mg/g、322.00 mg/g、326.65 mg/g、331.33 mg/g、324.85 mg/g、339.25 mg/g、341.12 mg/g 以及 339.25 mg/g,吸附量基本不发生变化,可知 pH 对树脂吸附基本无影响. 这是因为苯甲醇主要靠范

德华力吸附到树脂表面,而苯甲醇为非电解质, pH 值对苯甲醇的存在形态没有影响,所以树脂对苯甲醇的吸附不受 pH 值影响. 该吸附剂可在较宽的 pH 范围内使用.

### 2.4 盐浓度对树脂吸附的影响

将 0.2 g 树脂分别加入到含 0 mol/L、0.5 mol/L、1.0 mol/L、1.5 mol/L、2.0 mol/L、2.5 mol/L NaCl 和 0 mol/L、0.3 mol/L、0.6 mol/L、0.9 mol/L、1.2 mol/L、1.5 mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的 25 mL 5 000 mg/L 的苯甲醇溶液中,分别进行吸附,不同 NaCl 和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的浓度下达到吸附平衡时的吸附量和线性拟合结果见图4. 由图4可知,当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 NaCl 浓度的增加时,苯甲醇在树脂上的吸附量也会随之增大,由拟合结果可知盐浓度和苯甲醇吸附量存在线性关系,说明无机盐的存在对吸附过程产生正效应. 这是因为在大孔树脂对苯甲醇的吸附过程中,不仅树脂与吸附质苯甲醇之间存在吸附作用力,而  $\text{Na}^+$  (aq)、 $\text{CO}_3^{2-}$  (aq)、 $\text{Cl}^-$  (aq) 和苯甲醇分子间也存在复杂的相互作用,它们都会影响吸附过程. 吸附质苯甲醇为非电解质,其介电常数小于水,根据 Debye-Huckel 理论可能发生了盐效应,从而促进树脂对苯甲醇的吸附.

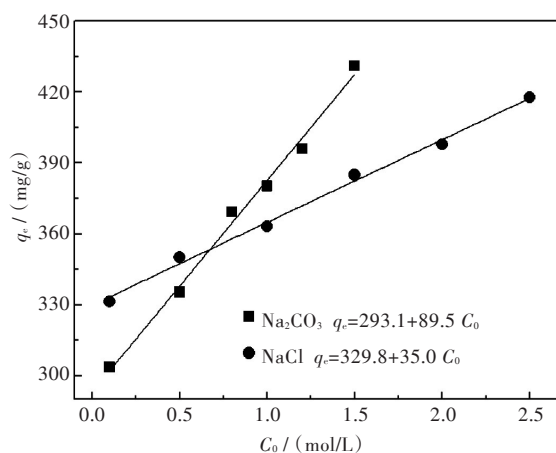


图4 NaCl和 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 的浓度对苯甲醇吸附量的影响

Fig. 4 Effects of concentration of NaCl and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  on adsorption of benzyl alcohol on resin

### 2.5 实际废水处理

分别将 0.1 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g、0.8 g、1 g 树脂加入到 25 mL 含盐的苯甲醇实际废水溶液中进行吸附,实际废液中苯甲醇的质量浓度为 7 800 mg/L,不同吸附剂用量下吸附平衡后的吸附量和去除率见图5. 由图可知随着吸附剂用量的增加,苯甲醇的去除率在逐渐增大,而吸附量在逐渐减小. 这主要是因为吸附剂用量增加,能提供的总的活性位

点数增加,吸附到单位树脂上的苯甲醇减少,所以苯甲醇的吸附量减少而去除率去增大.当吸附剂用量为1 g时,吸附剂对苯甲醇废水中苯甲醇的吸附量及去除率分别为184.64 mg/g和95.51%,此条件下废水中的苯甲醇被有效的去除.

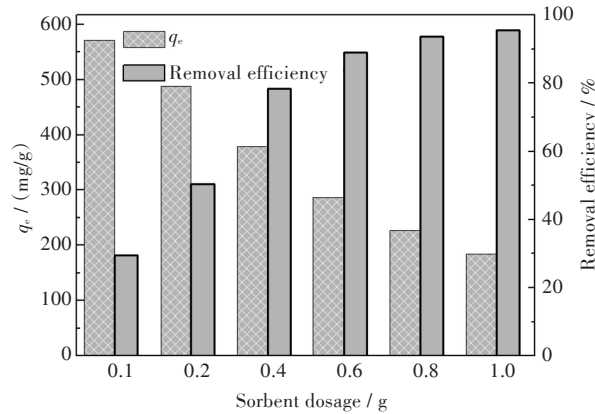


图5 吸附剂用量对苯甲醇吸附量及去除率的影响  
Fig. 5 Effects of sorbent dosage on adsorption capacity and removal efficiency of benzyl alcohol

动态吸附是实际污水处理中的主要方式,对其进行研究有着重要的意义.为此开展了模拟苯甲醇实际废水的动态吸附实验,在恒流泵流速为4 mL/min的情况下对初始质量密度为2 000 mg/L的苯甲醇实际废水溶液进行吸附,吸附时间为300 min.实验结果如图6所示,由图6插图可知,210 min前,吸附量随着时间增大而增大,210 min后,吸附量基本不随时间变化而变化.由图6插图可知,反应开始后,吸附剂大量吸附苯甲醇,当吸附进行到210 min时,对苯甲醇的吸附达到饱和,这是因为反应初期树脂表面活性位点较多,苯甲醇吸附速率很快,随着反应的进行,树脂表面活性位点减少,反应速率降低直至达到吸附平衡.

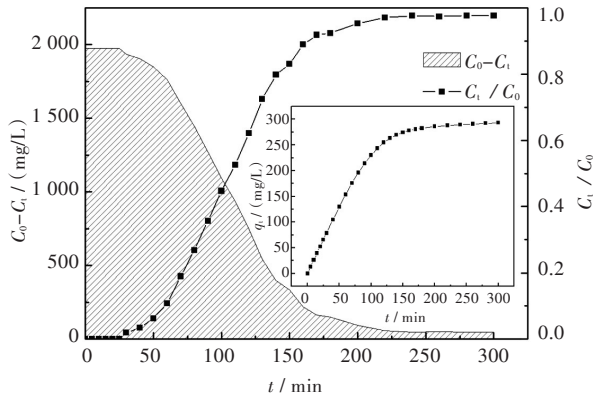


图6 苯甲醇实际废水动态吸附曲线  
(插图:苯甲醇实际废水的穿透曲线)  
Fig. 6 Dynamic adsorption curve of benzyl alcohol in the practical wastewater(Inset: Breakthrough curve of benzyl alcohol in the practical wastewater)

2.6 树脂的解吸附及重复利用

在恒流泵流速为4 mL/min条件下,采用一定比例的乙醇水溶液对初始质量浓度为2 000 mg/L的苯甲醇溶液进行解吸附,解吸附时间为180 min.实验结果如图7所示,随着时间的增加,流出液中的苯甲醇质量浓度逐渐降低,180 min时,苯甲醇质量浓度为8 mg/L,可认为近似脱附完全,说明脱附剂具有很好的脱附效果.由图7插图可知,洗脱率随着时间的增大而增大,180 min时,洗脱率达到91.12%,表明苯甲醇被有效的洗脱下来.

在相同条件下,用同一批树脂对苯甲醇进行吸附-解吸附实验,重复使用3次,达到吸附平衡后,树脂对苯甲醇的吸附量分别为305.08 mg/g、307.41 mg/g、303.34 mg/g,相差不大,说明该树脂重复利用效果较好,可有效用于苯甲醇的吸附处理中.

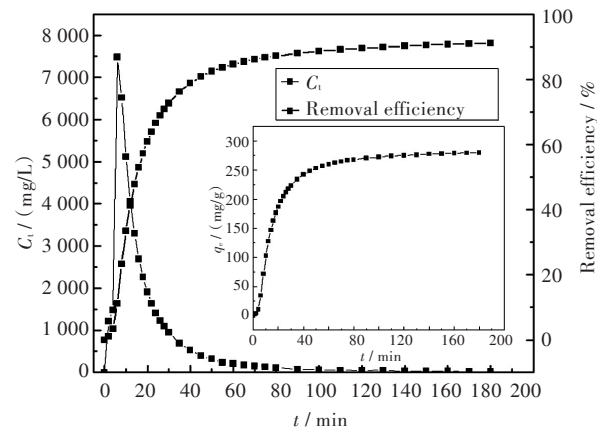


图7 苯甲醇的洗脱曲线  
(插图:时间对苯甲醇洗脱率的影响)  
Fig. 7 Elution curve of benzyl alcohol (Inset: Effects of time on desorption efficiency of benzyl alcohol)

3 结 语

NAD-150 超高交联树脂对苯甲醇的吸附动力学过程符合准二级动力学模型,相对于AB-8、HPD-100两种大孔树脂对苯甲醇具有更好的吸附效果.在pH3~9的范围内,酸度对苯甲醇的吸附基本无影响.无机盐Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和NaCl对苯甲醇的吸附呈现正效应,随着盐浓度的增加苯甲醇的吸附量显著增加.增加吸附剂用量可提高水体中苯甲醇的去除率,当初始质量浓度为7 800 mg/L,吸附剂用量大于1 g时,95%以上的苯甲醇可被高效的去除.NAD-150 超高交联树脂具有吸附容量大、吸附速度快、不受酸度和盐度影响等优点,且重复利用效果好,望用于实际苯甲醇废水的处理中.

## 参考文献:

- [1] 陈一良,潘丙才,张全兴. 无机盐对大孔脂吸附苯甲醇的影响研究[J]. 功能材料, 2007, 12(38): 2021-2024.  
CHEN Y L, PAN B C, ZHANG Q X. Study on influence of salt on the adsorption of benzyl alcohol onto macroporousresin[J]. Functional Materials, 2007, 12(38):2021-2024.
- [2] 吴鑫干,李陵岚. 苯甲醇制造方法[J]. 工业催化, 2002, 10(2):26-32.  
WU X G, LING L L. Process and catalysts for manufacture of benzyl alcohol[J]. Industrial Catalysis, 2002,10(2):26-32.
- [3] 罗嗣强,伟康,黄瑞婧,等. 物化法处理苯甲醇生产废水[J]. 能源研究与管理, 2012(1): 88-90.  
LUO S Q, WEI K, HUANG R J, et al. Treatment of wastewater from production of benzyl alcohol by physico-chemical method[J]. Energy and Management Research, 2012(1): 88-90.
- [4] 陈一良,潘丙才,张全兴. 树脂吸附法处理苯甲醇生产废水[J]. 化工学报, 2007, 58(5):1220-1224.  
CHEN Y L, PAN B C, ZHANG Q X. Treatment of wastewater from benzyl alcohol production with resin adsorption[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(5):1220-1224.
- [5] 张全兴,陈金龙,许昭怡,等. 树脂吸附法处理有毒有机化工废水及其资源化研究[J]. 高分子通报, 2005(4): 116-121.  
ZHANG Q X, CHEN J L, XU Z Y, et al. Application of polymeric resin adsorbent in organic chemical wastewater treatment and resources reuse[J]. Polymer Bulletin, 2005(4): 116-121.
- [6] 张海珍,陆光华. 大孔树脂对苯酚的吸附研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(1): 67-69.  
ZHANG H Z, LU G H. Study on the adsorption capability of macropeticular resin to phenol[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(1): 67-69.
- [7] 张庆建,许正文. 大孔树脂对对硝基苯胺的吸附行为及其应用研究[J]. 离子交换与吸附, 2006, 22(6): 503-511.  
ZHANG Q J, XU Z W. Adsorption behavior of p-nitroaniline on macroporous polymer and its application[J]. Ionexchange and Adsorption, 2006, 22(6):503-511.
- [8] WANG J L, ZHANG X M, QIAN Y. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by macroporousresin adsorption[J]. Journal of Environmental Science & Health Part A, 2000, 35(7): 1211-1230.
- [9] 贾存勤,李阳春,屠鹏飞,等. HPD系列大孔吸附树脂预处理方法研究[J]. 中国中药杂志, 2005, 30(18):1425-1427.  
JIA C Q, LI Y C, TU P F, et al. Study on the pretreatment of the series of HPD macroporous adsorption resin[J]. China Journal of Chinese Material Media, 2005, 30(18):1425-1427.
- [10] 陈一良,潘丙才,张全兴. 树脂吸附法处理酸析黑液废水的研究[J]. 中国造纸学报, 2008, 23(4): 61-64.  
CHEN Y L, PAN B C, ZHANG Q X. Treatment of wastewater of acid-precipitation black liquor with resin adsorption process[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2008, 23(4): 61-64.
- [11] 姜嵩,刘永峰,白清清,等. 大孔吸附树脂的吸附机理[J]. 化学进展, 2012, 24(8): 1427-1436.  
LOU S, LIU Y F, BAI Q Q, et al. Adsorption mechanism of macroporous adsorption resins[J]. Progress in Chemistry, 2012,24(8): 1427-1436.
- [12] RAVI V P, JASRA R V, BHAT T S G. Adsorption of phenol, cresol isomers and benzyl alcohol from aqueous solution on activated carbon at 278, 298 and 323 K[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 1998, 71(2): 173-179.
- [13] HARTER R D, BAKER D E. Applications and misapplications of the Langmuir equation to soil adsorption phenomena[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(6): 1077-1080.
- [14] 周玉新,雷攀,费月秋,等. 离子交换树脂吸附稀硫酸中铁离子的热力学和动力学[J]. 武汉工程大学学报, 2012(9):9-12.  
ZHOU Y X, LEI P, FEI Y Q, et al. Thermodynamics and kinetics of ion exchange resin adsorption iron ions of dilute sulfuric acid[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012(9):9-12.
- [15] BELTON G R. Langmuir adsorption, the Gibbs adsorption isotherm, and interracial kinetics in liquid metal systems[J]. Metallurgical Transactions B, 1976, 7(1): 35-42.
- [16] MA C Y, TAO G J, TANG J, et al. Preparative separation and purification of rosavin in rhodiolarosea by macroporous adsorption resins[J]. Separation and Purification Technology, 2009, 69(1): 22-28.

本文编辑:张 瑞