

# NAD-150 超高交联吸附树脂对苯甲醇动态吸附行为

熊万利<sup>1</sup>, 余军霞<sup>1</sup>, 陈佳东<sup>1</sup>, 毛 铤<sup>2</sup>, 陈 雄<sup>2</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 430073; 2. 湖北绿色家园精细化工有限责任公司, 湖北 武汉 430022)

**摘要:**室温下研究了流速、初始质量浓度及树脂用量对苯甲醇动态吸附的影响。结果表明在所研究的范围内树脂对苯甲醇的吸附容量受流速的影响较小, 吸附容量随着苯甲醇初始质量浓度的增大而增大, 随着吸附剂用量的增大而减小。当流速为 4 mL/min、初始质量浓度为 2 000 mg/L, 吸附剂用量在 2—3 g 时, NAD-150 超高交联吸附树脂对苯甲醇的吸附量为 303.35 mg/g, Bohart-Adams 模型较 Yoon and Nelson 模型能更好地拟合不同条件下苯甲醇吸附的穿透曲线。脱附实验表明乙醇水溶液对苯甲醇的脱附效果显著优于甲醇水溶液, 再生后的树脂可重复使用。实验所采用的 NAD-150 超高交联吸附树脂对实际废水中苯甲醇的处理能力要显著高于市售树脂 AB-8 和 HPD-100。NAD-150 以其对苯甲醇的吸附量高, 处理效果好, 可望应用于苯甲醇工业废水的处理中。

**关键词:** NAD-150 树脂; 苯甲醇; 吸附; 洗脱

中图分类号: O 647.3; X 783

文献标识码: A

文章编号: 1005-9954(2017)07-0022-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2017.07.005

## Dynamic adsorption of benzyl alcohol on macroporous hyper-crosslinked resin NAD-150

XIONG Wan-li<sup>1</sup>, YU Jun-xia<sup>1</sup>, CHEN Jia-dong<sup>1</sup>, MAO Ting<sup>2</sup>, CHEN Xiong<sup>2</sup>, CHI Ru-an<sup>1</sup>

(1. Department of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei Province, China; 2. Hubei Green House Fine Chemicals Co., Ltd., Wuhan 430022, Hubei Province, China)

**Abstract:** Effect of flow rate, initial mass concentration and resin dosage on the adsorption of benzyl alcohol was investigated on macroporous hyper-crosslinked resin NAD-150 at room temperature under dynamic condition. Results show that flow rate has little effect on the adsorption of benzyl alcohol, and the adsorption capacity of NAD-150 increases with the benzyl alcohol initial mass concentration increasing, while decreases with the sorbent dosage increasing. Adsorption capacity of macroporous hyper-crosslinked resin NAD-150 for benzyl alcohol is 303.35 mg/g at flow rate of 4 mL/min, initial mass concentration of 2 000 mg/L and resin dosage of 2-3 g, and Bohart-Adams model fits better than Yoon and Nelson model in predicting the dynamic curves. Desorption results show that desorption efficiency by ethanol-water solution is much better than by methyl alcohol-water solution, and the regenerated resin can be used repeatedly. NAD-150 used in this experiment shows much higher adsorption capacity toward benzyl alcohol than HPD-100 and AB-8. NAD-150 with high adsorption capacity and efficiency is hoped to be used in the benzyl alcohol industry waste water treatment.

**Key words:** NAD-150 resin; benzyl alcohol; adsorption; desorption

苯甲醇又名苄醇,是最简单的芳香醇之一。广泛应用于化妆品、化学品生产、医药、有机溶剂、油漆等领域,是重要的工业原料<sup>[1]</sup>。目前苯甲醇主要采用苄氯碱解法制得,其生产过程会产生高盐的苯甲

醇废水,对此类废水的主要处理方法有:物化法、生化法、氧化法和大孔树脂吸附法<sup>[2-5]</sup>。大孔树脂吸附法<sup>[6-8]</sup>,因其对苯甲醇的吸附容量高、处理效果好、抗干扰能力强、使用寿命长、洗脱容易、操作简单

收稿日期:2016-09-23

基金项目:湖北省科技支撑计划(2015BAA086)

作者简介:熊万利(1993—),男,硕士研究生,从事分离富集与吸附的研究, E-mail:2350917869@qq.com;池汝安,通信联系人, E-mail: rac\_wit@163.com.

等优点而被备受关注。然而大孔树脂的动态吸附行为和机理较为复杂,受各因素的影响较大<sup>[9]</sup>,迫切需要对其进行详细的探讨。

为此,本文深入考察了流速、溶液初始质量浓度、树脂用量对 NAD-150 吸附苯甲醇的动态吸附行为的影响,探讨了不同洗脱剂对苯甲醇的洗脱效率,并对比了 NAD-150 与市售 AB-8 和 HPD-100 处理苯甲醇工业废水的能力。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 主要试剂及仪器

岛津 UV-2450 紫外可见分光光度计,上海捷辰仪器有限公司;NAD-150 超高交联吸附树脂,西安蓝晓科技有限公司;HPD-100,沧州宝恩吸附材料科技有限公司;AB-8,天津波鸿树脂科技有限公司;苯甲醇实际废水,由湖北某公司提供。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 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 cm,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  $q_{t1}$  (mg/g):

$$q_{t1} = \frac{v \int_0^t (\rho_0 - \rho_t) dt}{m} \quad (1)$$

式中: $v$  为吸附柱流速, mL/min;  $\rho_0$  为苯甲醇的初始质量浓度, mg/L;  $\rho_t$  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。

#### 1.2.2 动态脱附实验

将一定体积比的甲醇和乙醇水溶液泵入饱和和吸附苯甲醇的 NAD-150 填充柱内,定时取样,计算其脱附量  $q_{t2}$  (mg/g):

$$q_{t2} = \frac{v \int_0^t \rho'_t dt}{m} \quad (2)$$

式中: $\rho'_t$  为  $t$  时刻脱附液中苯甲醇的质量浓度, mg/L。

#### 1.2.3 实际工业废水处理

将 3.0 g NAD-150 装柱,在流速为 4 mL/min 条件下考察了其对实际工业废水中苯甲醇的吸附情况,并对比了市售的 AB-8 和 HPD-100 树脂对废水处理的能力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流速对苯甲醇动态吸附的影响

在苯甲醇初始溶液质量浓度为 2 000 mg/L, NAD-150 的用量为 2.0 g,考察了液流速分别为 3, 4, 6, 9 mL/min 时, NAD-150 对苯甲醇的吸附曲线,如图 1 所示。

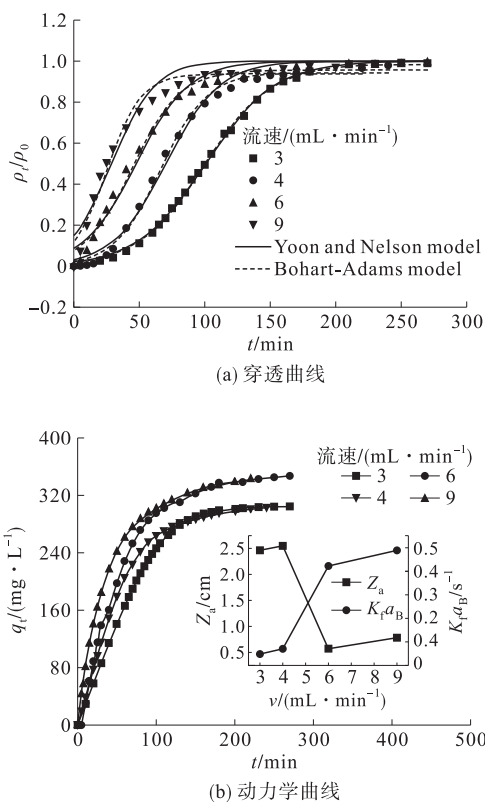


图 1 流速对树脂吸附苯甲醇的影响

Fig. 1 Effect of flow rate on benzyl alcohol on NAD-150 fixed-bed column

图 1(a) 为流速对苯甲醇的吸附穿透曲线的影响,由图可知穿透时间随着流速的增加而减小,分别为 100, 65, 45, 25 min,采用 Bohart-Adams [式(3)] 和 Yoon and Nelson [式(4)] 模型对穿透曲线拟合,结果见表 1。

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{e^{k_{AB}\rho_0 t}}{e^{k_{AB}N_0 Z/v_1} - 1 + e^{k_{AB}\rho_0 t}} \quad (3)$$

式中: $\rho$  为在  $t$  时刻苯甲醇的质量浓度, mg/L;  $k_{AB}$  为动力学常数, L/(mg·min);  $N_0$  为最大吸附容量, mg/L;  $v_1$  为线速度, cm/min;  $Z$  为柱高, cm。

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{1 + e^{K_{YN}(\tau-t)}} \quad (4)$$

式中: $K_{YN}$  为比例常数, min<sup>-1</sup>;  $\tau$  为穿透时间, 即当  $\rho = 0.5\rho_0$  时所对应的时间, min。表 1 的结果表明 Bohart-Adams 较 Yoon and Nelson 模型能更好地对

穿透曲线进行拟合。在 Bohart-Adams 模型中,  $N_0$  在流速为 3—6 mL/min 时变化不太大, 表明流速在 3—6 mL/min 对吸附量的影响很小。在 Yoon and

Nelson 模型中, 穿透时间随着流速的增加而减少, 速率常数  $K_{YN}$  则增大, 即流速增大加速了吸附质在溶液中的扩散<sup>[10-12]</sup>, 使得吸附达到平衡的时间缩短。

表 1 不同吸附条件下的穿透曲线 Bohart-Adams model 和 Yoon-Nelson model 拟合结果

Table 1 Fitted parameters of breakthrough curves of benzyl alcohol at different adsorption condition using Bohart-Adams and Yoon-Nelson model

项目	Bohart-Adams 模型			Yoon-Nelson 模型		
	$k_{AB}/(\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$N_0/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$R^2$	$K_{YN}/\text{min}^{-1}$	$\tau/\text{min}$	$R^2$
流速/(mL · min <sup>-1</sup> )						
3.0	0.020	65.07	0.999	0.038	100.79	0.999
4.0	0.028	59.36	0.996	0.049	70.38	0.989
6.0	0.028	60.18	0.989	0.05	47.66	0.984
9.0	0.038	52.24	0.973	0.06	29.09	0.958
初始质量浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )						
1 000	0.017	87.97	0.996	0.030	100.79	0.991
2 000	0.028	59.36	0.996	0.049	70.38	0.989
3 000	0.032	45.82	0.995	0.057	54.1	0.990
5 000	0.042	33.12	0.995	0.077	38.42	0.991
m/g						
1.0	0.034	59.63	0.985	0.057	35.84	0.972
1.5	0.030	57.28	0.994	0.050	52.70	0.983
2.0	0.028	59.36	0.996	0.048	70.38	0.989
3.0	0.022	60.92	0.998	0.038	108.60	0.991

图 1(b) 为不同流速下的吸附动力学曲线, 由图可知吸附量在 100 min 内快速上升, 之后趋于平缓直至达到平衡。在流速分别为 3.0, 4.0, 6.0, 9.0 mL/min 时, 吸附量分别为 305.09, 303.35, 347.8, 343.20 mg/g。不同流速下的苯甲醇吸附的传质区长度  $Z_a$  和传质系数  $K_f a_B$  采用式 (5) 和 (6) 进行计算<sup>[13]</sup>, 结果如图 1(b) 插图所示。

$$Z_a = 2Z_b \left( 1 - \frac{f_c}{q_0} \right) \quad (5)$$

$$K_f a_B = \frac{u \int_{\rho_B}^{\rho_s} \frac{d\rho}{\rho - \rho_e}}{2Z_b \left( 1 - \frac{f_c}{q_0} \right)} \quad (6)$$

式中:  $Z_b$  为床层高度, cm;  $f_c$  为动态吸附量, mg/g;  $q_0$  为静态吸附量, mg/g;  $u$  为流体空塔速度, cm/s;  $\rho_s$  为饱和点质量浓度 (95%  $\rho_0$ ), mg/L;  $\rho_B$  为穿透点质量浓度 (10%  $\rho_0$ ), mg/L;  $\rho$  为流体相中的吸附质质量浓度, mg/L;  $\rho_e$  为与吸附量  $q$  相平衡的

流体相中的吸附质质量浓度, mg/L。由图可知, 随着流速的增大,  $Z_a$  先缓慢增大后迅速减小最后趋于平衡,  $K_f a_B$  则逐渐增大。在固液吸附过程中, 液膜传质是控制步骤时, 流速增加, 边界层厚度减小, 总传质系数增大, 对传质过程有促进作用。在流速为 4 mL/min 时, 传质区长度最长, 利于苯甲醇与 NAD-150 的充分接触。

## 2.2 初始质量浓度对苯甲醇动态吸附的影响

在流速为 4 mL/min, NAD-150 质量 2.00 g, 考察初始质量浓度对苯甲醇吸附的影响。图 2(a) 为不同初始质量浓度下苯甲醇的穿透曲线和拟合曲线, 由图可知穿透时间随着初始质量浓度的增加而降低, 分别为 100, 65, 55, 38 min。在质量浓度为 1 000—5 000 mg/L 的范围内, Bohart-Adams 较 Yoon and Nelson 模型能更好地对穿透曲线进行拟合, 拟合结果如表 1 所示。  $k_{AB}$  和  $K_{YN}$  随着质量浓度的增大而增大, 而  $\tau$  和  $N_0$  则随质量浓度的增大而减小, 表明随着苯甲醇质量浓度的增加, 苯甲醇的扩散增加,

吸附达到平衡时间缩短。图 2(b) 为不同质量浓度下苯甲醇吸附动力学曲线,由图可知最大吸附量随着质量浓度的增加而增加,分别为 221.78,303.35,355.53,443.50 mg/g。高质量浓度苯甲醇溶液提供足够的驱动力克服苯甲醇在树脂上的传质阻力<sup>[14]</sup>,增加苯甲醇初始质量浓度,驱动力增加,从而提高 NAD-150 树脂对苯甲醇的吸附容量。

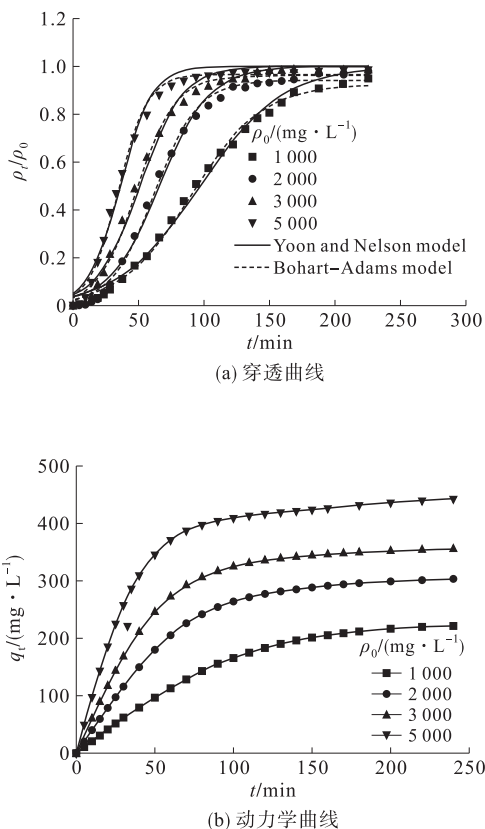


图 2 初始质量浓度对 NAD-150 树脂吸附苯甲醇的影响  
Fig.2 Effect of initial concentration on benzyl alcohol on NAD-150 fixed bed column

### 2.3 树脂用量对苯甲醇动态吸附的影响

在流速为 4 mL/min 和初始质量浓度 2 000 mg/L 考察树脂用量对苯甲醇吸附的影响。图 3(a) 为不同树脂用量下苯甲醇的吸附穿透曲线和拟合曲线,由图可知,在 NAD-150 用量分别为 1.0,1.5,2.0,3.0 g 时穿透时间分别为 35,50,65,105 min。Bohart-Adams 较 Yoon and Nelson 模型能更好地对穿透曲线进行拟合,拟合结果如表 1 所示。 $k_{AB}$  和  $K_{YN}$  随着树脂用量的增加而增大,而  $N_0$  和  $\tau$  却相反,表明树脂用量越多,床层的高度越长,苯甲醇在床层上停留的时间越长,从而吸附达到平衡的时间越长。

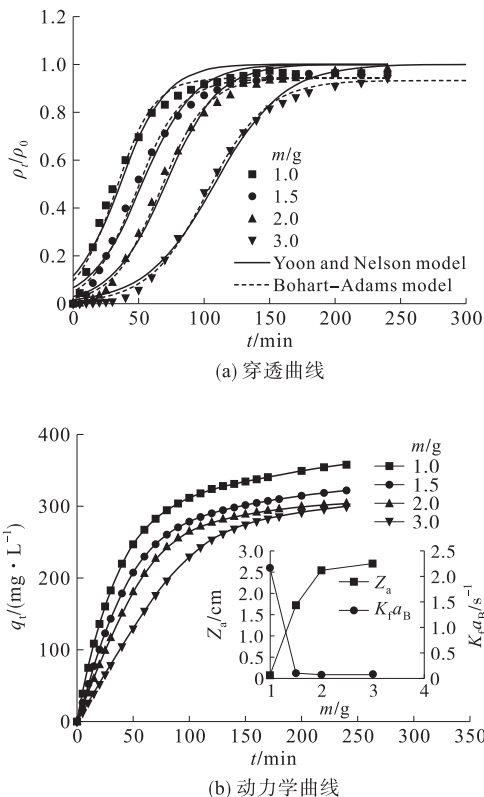


图 3 树脂用量对吸附苯甲醇的影响

Fig.3 Effect of sorbent dosage on benzyl alcohol on NAD-150 fixed bed column

图 3(b) 为不同树脂用量下的苯甲醇吸附动力学曲线,吸附量随吸附剂用量的增加而减小,在相同时间内吸附量分别为 359.00,322.10,303.35,300.00 mg/g。随着床层高度的增加,质量传质区长度增加,而有效床层长度和利用率降低<sup>[15-16]</sup>,导致吸附量降低。不同流速下的苯甲醇吸附的传质区长度( $Z_a$ )和传质系数( $K_t a_B$ )见图 3(b)插图所示。由图可知,随着吸附剂用量的增加,传质区越长,而传质系数降低,树脂用量在 1.0—2.0 g,传质区长度快速增长,当树脂用量在 2.0—3.0 g 时,传质区长度变化趋于平缓,而传质系数在树脂用量为 1.0—1.5 g 时,降低明显,树脂用量在 1.5—3.0 g 时,则趋于平缓。虽然传质系数越大,越利于吸附,但由于传质区长度较小,苯甲醇与 NAD-150 的接触时间缩短,易造成苯甲醇还未来得及扩散到树脂表面,就大量流出,影响对苯甲醇的处理效果。

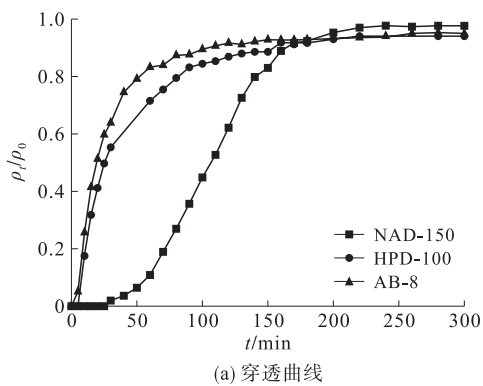
### 2.4 苯甲醇动态解吸附

采用体积比[ $V(\text{醇}):V(\text{水})$ ]为 2:3 的甲醇水溶液和乙醇水溶液作洗脱液对吸附达到饱和的 NAD-150 洗脱,流速为 4 mL/min。结果表明甲醇和乙醇水溶液对苯甲醇的洗脱率分别为 34.48% 和

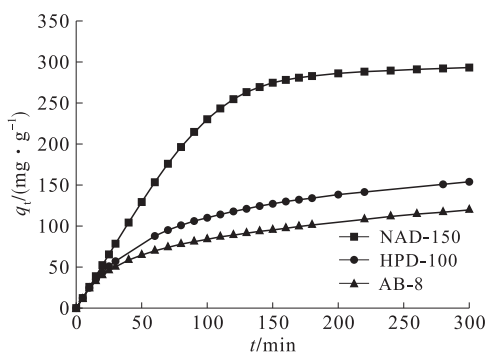
86.93%。乙醇对 NAD-150 的洗脱效果好、洗脱容易、洗脱后的树脂重复使用性好(重复使用 3 次的吸附容量分别为:303.35,293.15,290.67 mg/g),洗脱剂可回收循环使用。

## 2.5 实际工业废水处理

苯甲醇工业废水成分较为复杂,对吸附苯甲醇有较大的干扰。由于使用的原料为氯苯和碳酸钠,故而实际废水中盐浓度较高<sup>[17-18]</sup>。将实际废水中的苯甲醇稀释到 2 000 mg/L,以减少盐离子强度对吸附的干扰<sup>[19]</sup>。在吸附剂用量为 3.0 g,流速为 4 mL/min 条件下,将 NAD-150 与市售其他树脂 HPD-100 和 AB-8 处理工业废水效果进行了对比。图 4 (a)和(b)为 3 种树脂在处理实际废水中的穿透曲线和动力学曲线,由图可知,NAD-150,HPD-100,AB-8 对苯甲醇的穿透时间分别为 105,28,18 min,吸附容量分别为:293.32,154.00,119.70 mg/g,NAD-150 处理苯甲醇废水的效果要明显优于其他 2 种。



(a) 穿透曲线



(b) 动力学曲线

图 4 苯甲醇在 NAD-150,HPD-100,AB-8 上的穿透曲线和动力学曲线  
Fig.4 Breakthrough and kinetic curves of benzyl alcohol on NAD-150, HPD-100 and AB-8 resins fixed-bed column

## 3 结论

单因素实验结果表明流速对吸附量的影响较小,质量浓度和树脂用量对吸附量的影响较大。树

脂对苯甲醇的吸附量随着苯甲醇初始质量浓度的增加而增加,随着树脂用量的增加而减小。脱附实验结果表明乙醇水溶液对苯甲醇的洗脱效果明显优于甲醇水溶液,洗脱后的树脂可重复使用。NAD-150 树脂对苯甲醇苯甲醇废水的处理效果较市售的 HPD-100,AB-8 树脂好,可望应用于实际废水处理。

## 参考文献:

- [1] 孙占松. 国内苯甲醇生产及应用分析 [J]. 精细与专用化学品, 2012, 20: 12-14.
- [2] 陈一良, 潘丙才, 张全兴. 无机盐对大孔树脂吸附苯甲醇的影响研究 [J]. 功能材料, 2007, 12 (38): 2021-2024.
- [3] 陈传好, 谢波, 任源, 等. Fenton 试剂处理废水中各影响因子的作用机制 [J]. 环境科学, 2000, 21(3): 93-96.
- [4] LI Jiuan, ZHOU Houzhen, LIU Qinghua, et al. Progress in bioaugmentation technology research for biological treatment of wastewaters [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2012, 17 (2): 273-279.
- [5] 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.
- [6] 陈一良, 潘丙才, 张全兴. 树脂吸附法处理苯甲醇生产废水 [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58 (5): 1220-1224.
- [7] 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.
- [8] 宋应华, 朱家文, 陈葵. 大孔吸附树脂 HZ816 对红霉素的固定床吸附过程研究 [J]. 化学工程, 2007, 35 (11): 9-12.
- [9] 娄嵩, 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.
- [10] FU Yujie, ZU Yuangang, WEI Liu, et al. Preparative separation of vitexin and isovitexin from pigeonpea extracts with macroporous resins [J]. J Chromatogr A, 2007, 1139 (2): 206-213.
- [11] AKSAKAL O, UCUN H. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of the biosorption of textile dye (Reactive Red 195) onto Pinus sylvestris L [J]. J Hazard Mater, 2010, 181 (1/2/3): 666-672.
- [12] HOSSEINI B A, HOSSEINI M S, SARW M, et al. Kinetics, equilibrium and thermodynamic study of Cr(VI) sorption into toluidine blue o-impregnated XAD-7 resin beads and its application for the treatment of wastewaters containing Cr(VI) [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 160 (1): 190-198.

【下转第 31 页】

在 35 ℃, 乙酸异丙酯的反应速率常数为 2.47 (mol/L)<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>, 相对误差 < 0.4%。由阿累尼乌斯公式得: 乙酸异丙酯皂化反应活化能  $E_a = 43.05$  kJ/mol。

通过对乙酸异丙酯水解反应及其动力学的研究发现, 乙酸异丙酯在近中性条件下水解量较小。根据经验相对水解损耗, 溶剂挥发损耗可能更多。我公司工艺指标中原材料消耗按单系列 300 t/h 处理量计, 二异丙基醚(99.9% 计) 消耗量为 0.12 t/h。乙酸异丙酯比异丙醚的挥发性小, 因此每小时的损耗量也小。

#### 4 结论

(1) 乙酸异丙酯的萃取效率较高, 对苯酚、邻苯二酚和间苯三酚, 乙酸异丙酯的萃取效率和分配系数高于异丙醚的, 略低于 MIBK, 但乙酸异丙酯在其他方面优于 MIBK, 如价格较低, 汽提分离的能耗也较低。

(2) 煤气化污水的 pH 值在 8.3—8.5 之间变化, 实验证明萃取脱酚的 pH 值在 8.3—8.5 之间可获得理想的效果, 因此不必调节污水的 pH 值, 对气化酚水直接进行萃取。

(3) 萃取比对萃取脱酚效果的影响显著, 萃取比为越高越好, 但为节约萃取液的用量, 和满足若后续采用生化处理要求, 适当降低萃取比。通过大量实验证明, 当萃取萃取比为 1:6—1:8, 萃取级数为三级, 可获得 96.9% 以上的萃取率, 同时宽泛的萃取比利于工业控制。

(4) 从乙酸异丙酯的分解曲线, 分解速率及其水解动力学可以得出: 乙酸异丙酯在近中性条件下水解量较小。根据经验: 相对水解损耗, 溶剂挥发损耗可能更多, 因此乙酸异丙酯的水解可暂不考虑。

相对于异丙醚, 乙酸异丙酯相对密度较大, 即乙酸异丙酯的相对密度和水更接近, 分层速率比异丙醚的小, 还可能伴有乳化现象, 增加了液液相分离的难度(如何降低乳化现象, 还需进一步研究)。但其对酚类的萃取效率高, 挥发损失较小, 价格便宜, 毒性更低。乙酸异丙酯水解实验证明乙酸异丙酯在室温—40 ℃, pH 值为 6.15—8.55 分解速率较小。将乙酸异丙酯与 MIBK 对比, 尽管 MIBK 的某些性质突出, MIBK 价格较高, 汽提分离的能耗也较高, 因此乙酸异丙酯是一种比较理想的、可替代的酚水萃取剂。

#### 参考文献:

- [1] 武斌斌, 戚真. 鲁奇加压气化含酚废水回收工艺的改进[J]. 广东化工, 2014, 41(6): 131-132.
- [2] 司晓凤, 刘念. 煤气净化污水氨回收的流程进展及优化[J]. 山西化工, 2014, 153(5): 42-44.
- [3] 陈赟, 王卓. 煤气化污水酚氨回收技术进展、流程优化及应用[J]. 煤化工, 2013, 167(4): 44-48.
- [4] 陈庆俊. 鲁奇炉气化废水处理工艺突破方向探讨[J]. 化学工业, 2012(12): 12.
- [5] 张桂英, 刘振学, 宋吉勇, 等. 煤的复合溶剂萃取研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(3): 18-20.
- [6] 张翼, 于婷, 毕永慧, 等. 含油废水处理方法研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(8): 1155-1161.

#### 【上接第 26 页】

- [13] 赵平, 张月萍, 任鹏. AB-8 大孔树脂对葡萄籽原花青素的吸附过程[J]. 化工学报, 2013, 64(3): 980-985.
- [14] YU Junxia, CHI Ruonan, ZHANG Yuefei, et al. A situ co-precipitation method to prepare magnetic PMDA modified sugarcane bagasse and its application for competitive adsorption of methylene blue and basic magenta [J]. Bioresour Technol, 2012, 110: 160-166.
- [15] SOTELO J L, OVEJERO G, RODRIGUEZ A, et al. Removal of atenolol and isoproturon in aqueous solutions by adsorption in a fixed-bed column[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(13): 5045-5055.
- [16] SOTELO J L, RODRIGUEZ A, ÁLVAREZ S, et al. Re-

moval of caffeine and diclofenac on activated carbon in fixed bed column [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012, 90(7): 967-974.

- [17] ARAFAT A, H, FRANZ M, PINTO N G. Effect of salt on the mechanism of adsorption of aromatics on activated carbon [J]. Langmuir, 1999, 15: 5997-6003.
- [18] 肖信, 陈炳稔, 屈炎梅. 电位分析法研究外加盐对 D354 树脂吸附稀醋酸的影响[J]. 化工时刊, 2005, 19(11): 9-12.
- [19] 乐清华, 吴凡, 施云海, 等. 大孔树脂吸附法处理含苯胍工业废水的研究[J]. 离子交换与吸附, 2004, 20(1): 82-88.