

弱碱性树脂吸附-解吸苦味酸

谢祖芳¹ 童张法^{2*} 陈渊¹ 庞起¹ 黄艳¹ 何雪玲¹

(1. 玉林师范学院化学与材料学院, 玉林 537000;

2. 广西大学化学化工学院, 广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 南宁 530004)

摘要 考察了水中苦味酸在弱碱性离子交换树脂 D301R 上的吸附与解吸。研究了吸附热力学、动力学特性及吸附机理。结果表明,树脂在 pH = 2.7 ~ 10.2 时,吸附能力最好。等温平衡吸附遵循 Freundlich 模型。吸附过程为吸热、熵增的自发过程。吸附动力学符合 Lagergren 准二级速率方程,颗粒内扩散为吸附速率的主要控制步骤,吸附速率常数为 $7.23 \times 10^{-5} \sim 1.20 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$, 吸附活化能为 19.4 kJ/mol。树脂上吸附的苦味酸可用 HNO₃ + 丙酮混合液定量洗脱,洗脱率达 99%。静态吸附和脱附的比较结果证实了吸附过程中存在不可逆化学吸附。树脂对苦味酸的吸附主要是通过静电吸附、酸碱络合吸附、氢键吸附等协同作用来完成的。

关键词 苦味酸 弱碱性树脂 吸附热力学 动力学 解吸

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)09-3131-06

Adsorption-desorption of picric acid by weakly basic resin

Xie Zufang¹ Tong Zhangfa² Chen Yuan¹ Pang Qi¹ Huang Yan¹ He Xueling¹

(1. School of Chemistry and Materials, Yulin Teachers' College, Yulin 537000, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Key Lab of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract The adsorption and desorption of aqueous picric acid solution onto D301R weakly basic anion exchange resin were investigated. The kinetics, thermodynamics and adsorption mechanism were also studied. The results showed that the maximum adsorption ability of resin occurred at pH = 2.7 ~ 10.2. The adsorption of picric acid on the resin obeyed Freundlich isotherm and was a spontaneous, endothermic and entropy increasing process. Kinetic analysis shows that the adsorption reaction could be approximated by a Lagergren pseudo-second-order-rate equation for which the intraparticle diffusion is the rate-controlling process with an adsorption rate constant of $7.23 \times 10^{-5} \sim 1.20 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$ and activity energy of 19.4 kJ/mol. Washout rate of 99% of the picric acid adsorbed on the resin can be eluted with a HNO₃ + acetone solution quantitatively. The comparison of static adsorption and desorption confirmed the presence of irreversible chemical adsorption in the adsorption process. The synergistic interactions by the electrostatic, acid-base complex and hydrogen bonding were the main driving forces of picric acid adsorption on the weakly basic resin.

Key words picric acid; weakly basic resin; adsorption thermodynamics; kinetics; desorption

苦味酸(2,4,6-三硝基苯酚)是生产火药、医药、杀虫剂、染料及防腐剂等的重要原料和中间物^[1]。苦味酸的工业生产中常以苯酚为原料,经磺化、硝化、水洗而制得^[2],生产过程中产生的废水主要包括废酸液和水洗水,水洗水中含有浓度较高的苦味酸、苯酚和其他硝基化合物等,直接排放将对人类、牲畜和水环境造成极大危害和破坏,并浪费大量的资源。目前对苦味酸废水治理的研究报道甚少,王淑红等^[1]研究了以葡萄糖和苯酚作为共基质降解苦味酸;黄群贤等^[2]采用磺化煤吸附处理苦味酸废水,但存在吸附剂再生后重复使用性能差等缺陷。

本课题组曾研究了聚酰胺树脂对苦味酸的吸附,脱附再生容易,重复使用性能好,但树脂的吸附容量不够理想^[3]。以国产已商品化的 D301R 弱碱性阴离子交换树脂(简称 D301R 树脂)通过交换吸附分离及资源化苦味酸是一种更为有效和廉价的处理方法,该树脂不仅价廉易得、吸附容量高,而且操作简

基金项目:广西自然科学基金资助项目(0991285)

收稿日期:2011-03-19; 修订日期:2011-04-11

作者简介:谢祖芳(1956~),女,学士,教授,主要从事废水处理及资源化的研究。E-mail:zfxie86@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhtong@sina.com

便、适用范围宽、易洗脱再生,对苦味酸废水的治理及资源化有重要的实际意义和应用价值。本文研究了D301R树脂对水中苦味酸的吸附与脱附行为,探讨了吸附热力学、动力学规律及吸附机理,为工业应用提供理论基础和实验依据。

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

仪器:TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司);KYC111 空气恒温摇床(上海福玛实验设备有限公司);pHS-3C 型精密 pH 计;FA2104N 电子天平。

试剂:市售 D301R 树脂(天津市光复精细化工研究所),蒸馏水浸泡 24 h,抽干水,再用 2 mol/L HCl 浸泡 12 h,抽干,蒸馏水洗至中性,自然凉干。取粒径在 0.45 ~ 0.9 mm 之间的颗粒备用。

苦味酸(分析纯,广东汕头市西陇化工厂)。其他试剂 HNO₃、丙酮、无水乙醇和正己烷均为分析纯。

1.2 实验方法

静态实验:称取 0.2000 g 树脂于碘量瓶中,加入 50 mL 一定浓度的苦味酸溶液,于恒温摇床中定温振荡吸附,达平衡后取清液分析苦味酸浓度。树脂对苦味酸的吸附量用式(1)计算:

$$q_e = (C_0 - C_e) V / m \quad (1)$$

式中: q_e 为平衡吸附量,mg/g; C_0 和 C_e 分别为吸附前和吸附平衡后苦味酸浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为树脂质量,g。

吸附过程中,在不同时间取样分析苦味酸浓度,计算得不同时刻的吸附量 q_t ,作出吸附动力学曲线。

动态实验:称取 1.0000 g 树脂,湿法装入离子交换柱(内径 7 mm 高 150 mm)中,一定浓度的苦味酸溶液以一定流速通过树脂柱,定容接收流出液,分析苦味酸浓度,作出穿透曲线;对载酸树脂柱用洗脱剂以一定流速洗脱,定容接收洗脱液,分析苦味酸浓度,作出脱附曲线。

1.3 分析方法

用紫外可见分光光度计在苦味酸溶液的最大吸收波长 356 nm 处测定吸光度,以标准回归方程分析苦味酸浓度。

2 实验结果与讨论

2.1 pH 对吸附效果的影响

在 298 K 下,将系列 50 mL 浓度为 500 mg/L 的

苦味酸溶液(已用 HCl 或 NaOH 调至不同的 pH)加入至装有 0.2000 g 树脂的碘量瓶中,于恒温摇床中振荡 1 h,分别测定树脂对苦味酸的吸附量与 pH 的关系,结果见图 1。

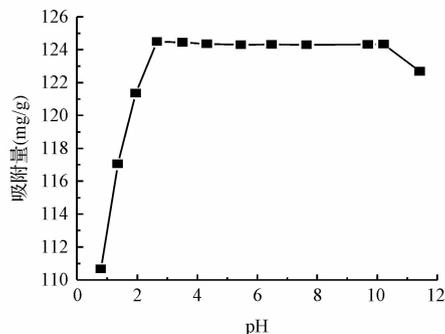


图 1 pH 对吸附效果的影响

Fig. 1 Effect of pH on adsorption capability

由图 1 知,pH < 2.7 时,吸附量随 pH 的增大而增加;pH = 2.7 ~ 10.2 之间时的吸附量达最大且趋于平缓。D301R 树脂为阴离子交换树脂,其对芳环有机物的主要吸附机制之一是离子交换和静电作用,因而 pH 对吸附的影响与吸附质在水溶液中的存在形态密切相关。苦味酸的 pKa 为 1.02,根据酸碱离解平衡理论^[4],苦味酸离子态物质所占的比例为 $1/(1 + 10^{(pKa-pH)})$,通过计算知,当 pH 较小时,苦味酸主要以分子态存在;随 pH 逐渐增大,苦味酸分子态逐渐减小而离子态逐渐增多;pH ≥ 3 后,主要以离子态存在,离子态的苦味酸有利于与树脂功能基中可活动反离子之间的离子交换和静电作用,因而吸附量达最大且趋于平缓。pH > 10.2 后,吸附量有所下降,是因为 D301R 为弱碱性树脂,随溶液中 OH⁻ 浓度的增加,树脂功能基的解离程度减小,其与苦味酸之间的离子交换作用也减小,从而导致吸附量有所下降。实验结果显示,pH ≥ 2.7 时,吸附已达最大值,因此吸附可在 pH 2.7 ~ 10.2 之间进行,有较宽的 pH 操作范围。以下实验采用苦味酸水溶液的自然 pH(约为 3)下进行。

2.2 吸附等温线

一定温度下,将 50 mL 浓度为 500、800、1 000、1 500、2 000、2 500 和 3 000 mg/L 的苦味酸水溶液分别加入装有 0.2000 g 树脂的碘量瓶中,在恒温摇床中振荡 6 h(实验结果显示一般振荡 4 h 后吸附可达平衡),计算树脂对苦味酸的吸附量,绘制吸附等温线。测定了苦味酸在 5 种不同温度:293、303、313

和 318 K 和经 318 K 平衡吸附后又降到 303 K (记作 303 K*) 时的平衡吸附等温线,见图 2。

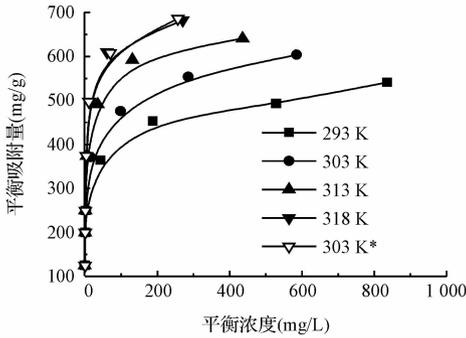


图 2 D301R 树脂对苦味酸的吸附等温线

Fig. 2 Adsorption isotherms of D301R resin for picric acid

由图 2 知,在 313 K,苦味酸初始浓度为 3 000 mg/L 时,树脂对苦味酸的平衡吸附量高达 641 mg/g (即 2.8 mmol/g),此时还未达到饱和吸附,表明树脂对苦味酸有较高的吸附容量;并且平衡吸附量随温度的升高而增加,体现了吸附吸热特征,升温对吸附有利。其原因主要与溶液中苦味酸与水的氢键作用有关^[5],苦味酸分子中的芳环连有 3 个硝基,在水溶液中与水分子之间能结成强烈的氢键,使得苦味酸分子充分溶解于水溶液中,不利于在树脂表面吸附。当温度升高时,氢键作用被破坏,苦味酸分子在液相中的溶解度降低,化学势增大,疏水性增强,显示出强烈的向树脂表面扩散的趋势,从而使吸附量增加。

一般来说,若吸附过程为物理吸附,则吸附量随温度的升高而下降,即吸附放热且吸附过程可逆^[6]。然而,D301R 树脂对苦味酸的吸附为吸热过程,并且 318 K 的吸附等温线与 303 K* 的几乎重叠在一起,这些结果均表明吸附过程中存在着不可逆的化学吸附,升高温度有利于吸附反应的发生。

采用 Freundlich 模型^[7]对图 2 数据进行拟合:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

式中: q_e 为平衡吸附量 (mg/g); C_e 为吸附平衡时苦味酸质量浓度 (mg/L); K_F 和 n 均为 Freundlich 常数。

Freundlich 模型的拟合结果见表 1。由表 1 知,不同温度下 D301R 树脂对苦味酸的吸附行为与 Freundlich 方程均有较好的相关性 (相关系数 $r^2 > 0.96$),表明 Freundlich 模型适用于本研究体系。Freundlich 常数 n 均大于 1, $1/n$ 在 0.13 ~ 0.18,体

现了树脂对苦味酸的较强吸附亲和能力及优惠吸附特征^[7]。 K_F 随温度的升高而增大,这也说明温度升高树脂对苦味酸的吸附能力增强。

表 1 D301R 树脂吸附苦味酸的 Freundlich 方程

Table 1 Freundlich isotherm parameters for adsorption of picric acid on D301R resin

温度 (K)	Freundlich 方程	n	r^2
293	$q_e = 215.1 C_e^{0.1366}$	7.321	0.9928
303	$q_e = 229.9 C_e^{0.1545}$	6.472	0.9929
313	$q_e = 263.4 C_e^{0.1703}$	5.872	0.9843
318	$q_e = 276.9 C_e^{0.1746}$	5.727	0.9602

2.3 吸附热力学

等量吸附焓变 ΔH 、吉布斯函数 ΔG 和吸附熵变 ΔS 分别应用下列方程计算^[7,8]:

$$\ln C_e = -\ln K_0 + (\Delta H / RT) \quad (3)$$

$$\Delta G = -nRT \quad (4)$$

$$\Delta S = (\Delta H - \Delta G) / T \quad (5)$$

式中: C_e 为平衡浓度 (mg/L); R 为气体常数, 8.314 J/(K·mol); K_0 为常数; T 是绝对温度 (K)。

ΔH 、 ΔG 和 ΔS 的计算结果见表 2。

表 2 D301R 树脂吸附苦味酸的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters for adsorption of picric acid on D301R resin

q_e (mg/g)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)			ΔS (J/(K·mol))		
		293 K	303 K	313 K	293 K	303 K	313 K
300	84.3				348	332	318
350	83.3	-17.8	-16.3	-15.3	345	329	315
400	82.2				343	325	312

由表 2 知, ΔH 均为正值,说明吸附为吸热过程。平衡吸附量变化时, ΔH 发生的变化较小,表明树脂表面的不均匀性对吸附质吸附的影响不大。 ΔH 值均大于 42 kJ/mol,表明吸附过程存在有化学吸附^[6],这与前面温度对吸附影响的结果相一致。 ΔG 均为负值,体现了吸附质倾向于从溶液中吸附到吸附剂表面,吸附过程可自发进行。 ΔS 为正值,是因为 D301R 树脂的吸水性较强,高分子链上亲水的功能基能大量地结合水,使链间的空隙增加,也使树脂发生一定程度的膨胀。当选择性高的苦味酸取代水分子交换吸附到树脂上时,由于苦味酸分子的体积远大于水分子体积,则苦味酸分子的吸附引起

更多水分子的脱附,水分子的脱附进入液相是熵增加过程;同时,由于树脂往往发生收缩,使高分子链间的水分子和反离子的部分水化水释放到液相中,也使树脂骨架熵增大;此外,在液相中苦味酸易形成分子内及分子间氢键,与水分子也能结成强烈的氢键,因吸附到树脂上而使缔合状态引起解离,也引起熵增加。尽管苦味酸分子与树脂功能基结合会失去一些自由度(包括平动和转动),引起熵减少,但总的熵值增加,最终导致了吸附过程的总熵变为正值^[5]。

2.4 吸附动力学

定温下,将浓度为 2 000 mg/L 的苦味酸溶液 250 mL 加入装有 1.0000 g 树脂的碘量瓶中,置恒温摇床中振荡,于不同时间取样分析苦味酸浓度,累计计算吸附量,绘制吸附动力学曲线,结果见图 3。

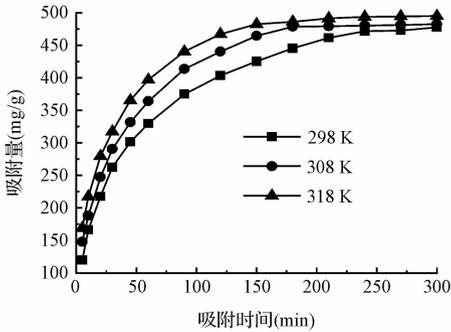


图3 D301R树脂对苦味酸的吸附动力学曲线

Fig. 3 Adsorption kinetic curves of D301R resin for picric acid

可看出,随温度升高,吸附速率加快,吸附达平衡的时间缩短,平衡吸附量随之有所增加,进一步表明了吸附为吸热过程。

通常情况下,吸附动力学可用 Lagergren 准一级速率方程或准二级速率方程来描述^[9,10]。

准一级速率方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{或} \quad q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (6)$$

准二级速率方程:

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad \text{或} \quad q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (7)$$

式中: k_1 和 k_2 为表观吸附速率常数; q_e 和 q_t 分别为平衡时和 t 时刻的吸附量(mg/g)。

对图3数据采用式(6)及式(7)拟合,结果见表3。由表3的相关系数比较可知,准二级方程的拟合

度优于准一级方程, r_2^2 均大于 0.97,表明苦味酸在树脂上的吸附动力学特性符合准二级速率方程。根据 Arrhenius 公式($\ln k = -E_a/RT + \ln A$),以 $\ln k_2$ 对 $1/T$ 作图进行线性拟合(图略),由直线斜率求得树脂对苦味酸的吸附活化能 E_a 为 19.4 kJ/mol。

表3 苦味酸在 D301R 树脂上的吸附动力学参数

Table 3 Adsorption kinetic parameters of picric acid on D301R resin

温度(K)	准一级速率方程		准二级速率方程	
	k_1 (/min)	r_1^2	k_2 (g/(mg·min))	r_2^2
298	0.0279	0.9268	0.0000723	0.9782
308	0.0340	0.9227	0.0000930	0.9764
318	0.0422	0.9097	0.0001204	0.9772

根据 Kannan & Sundaram 颗粒内扩散模型^[7]:

$$q_t = k_p t^{0.5} + b \quad (8)$$

式中: k_p 为颗粒内扩散速率常数(mg/(min^{0.5}·g)); b 为常数。

对图3数据采用式(8)拟合(图略),结果显示树脂在 298、308 和 318 K 下的 q_t 对 $t^{0.5}$ 均呈现良好的线性关系,相关系数分别为:0.9955、0.9972 和 0.9962,表明颗粒内扩散过程是树脂对苦味酸吸附速率的主要控制步骤,但直线均不经过原点,吸附可能同时受液膜扩散的影响^[7]。由直线斜率可求得颗粒内扩散速率常数 k_p 分别为 38.2、39.7 和 41.4 mg/(min^{0.5}·g)。

2.5 动态吸附性能

303 K 下,取浓度为 1 000 mg/L 或 2 000 mg/L 的苦味酸水溶液以 1.0 mL/min 流速通过内装 1.0000 g 树脂的交换柱,每次接收流出液 10 mL,分析苦味酸浓度,作出动态吸附穿透曲线,见图 4。

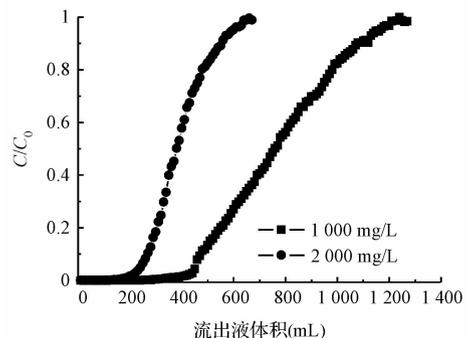


图4 不同初始浓度下的吸附穿透曲线

Fig. 4 Breakthrough curves under different initial concentrations

本实验以流出液浓度达到进柱液浓度的 3% 为泄漏点。从图 4 知,当进柱液浓度为 1 000 mg/L 时,吸附于 430 mL 处开始泄漏,达到 1 200 mL 时趋于饱和,泄漏点吸附量和饱和吸附量分别为 419.1 和 649.2 mg/g;当进柱液浓度为 2 000 mg/L 时,吸附于 210 mL 处开始泄漏,达到 630 mL 时趋于饱和,泄漏点吸附量和饱和吸附量分别为 416.8 和 666.8 mg/g。表明进样浓度越低,树脂交换柱内离子交换越充分,泄漏点和饱和点出现得越迟,有利于提高树脂交换柱的利用率。

2.6 脱附性能

首先以静态法进行脱附实验筛选脱附剂。取 50 mL 脱附剂加入至已定量吸附了苦味酸的 0.200 g 树脂中,置恒温摇床中于 293 K 下振荡 1 h,分析脱附液中苦味酸浓度,计算脱附率,结果见表 4。

表 4 脱附剂的选择

Table 4 Selection of desorption agents

脱附剂	脱附率 (%)
HCl (1.5 mol/L)	20.1
HNO ₃ (1.5 mol/L)	50.2
HNO ₃ + 乙醇 (1.5 mol/L + 40%)	65.3
丙酮 (40%)	0.26
HNO ₃ + 丙酮 (1.5 mol/L + 20%)	68.5
HNO ₃ + 丙酮 (1.5 mol/L + 40%)	84.6
HNO ₃ + 丙酮 (1.5 mol/L + 60%)	92.1
HNO ₃ + 丙酮 (2.0 mol/L + 60%)	95.3

由表 4 知,对载苦味酸树脂,以硝酸和丙酮组合的混合液洗脱效果较好。若仅用有机溶剂(40% 丙酮水溶液)脱附时,脱附率很低,仅为 0.26%。然而,在丙酮中添加硝酸后,脱附率大幅增加,这也是苦味酸在 D301R 树脂上的吸附过程存在化学吸附的又一证据^[11]。

对 2.5 已饱和吸附苦味酸的树脂柱,用不同浓度的硝酸和丙酮混合液作为脱附剂,以流速 1.0 mL/min 进行动态洗脱,得到脱附曲线见图 5。由图可知,以 2.0 mol/L HNO₃ + 60% 丙酮混合洗脱时,50 mL 的用量可完全洗脱树脂上吸附的苦味酸;用 1.5 mol/L HNO₃ + 40% 丙酮混合洗脱时,则需 170 mL 的用量才可完全洗脱。表明加大硝酸和丙酮浓度,可使脱附峰更为集中,洗脱速度快,无拖尾现象,实际应用时可酌情选用,并可通过蒸馏回收丙酮。动态洗脱率可达 99%,表明树脂易于脱附再生重复使用。

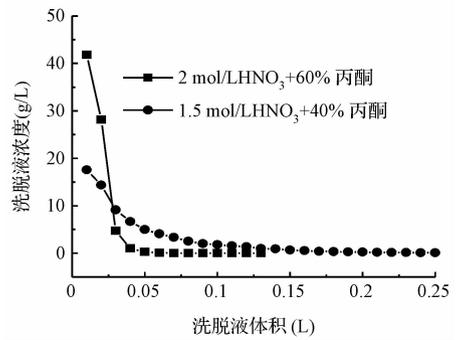


图 5 动态脱附曲线

Fig. 5 Dynamic desorption curves

2.7 吸附机理探讨

固体吸附剂在液相中对吸附质的吸附富集是吸附剂、吸附质和溶剂三者之间相互作用的综合体现。从结构上分析,D301R 树脂含有聚苯乙烯骨架和叔胺功能基(-N(CH₃)₂),N 上有孤对电子,其对苦味酸的吸附除了离子交换和静电作用外,树脂上的弱碱胺基可与作为有机较强酸的苦味酸发生酸碱络合作用^[12],也可与苦味酸上的酚羟基形成氢键,它们的协同作用使树脂对苦味酸的吸附亲和力强,吸附容量大。这可通过树脂在不同溶剂中对苦味酸的吸附结果得以验证。图 6 为 318 K 下,以水、乙醇及正己烷与乙醇混合液(体积比为 4:1)为溶剂时测定的吸附等温线。

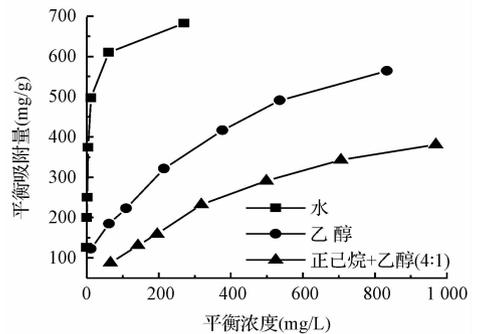


图 6 不同溶剂中 D301R 树脂吸附苦味酸的吸附等温线

Fig. 6 Adsorption isotherms of D301R resin for picric acid in different solvent

由图 6 的比较可知,树脂对苦味酸的吸附量在水溶剂中最高,在乙醇溶剂中居中,在正己烷与乙醇混合溶剂中为低,但仍有一定的吸附量,表明存在有氢键吸附。因为正己烷为非极性溶剂,在其中吸附质及吸附剂都不能与溶剂形成氢键,吸附质与吸附剂的氢键吸附得以充分表现,则吸附主要是氢键作用^[13](由于仅用正己烷难以溶解苦味酸,故采用体

积比为4:1的正己烷与乙醇作为混合溶剂);在弱极性的乙醇溶剂中,虽然氢键吸附、静电吸附和酸碱络合吸附受到一定的抑制,但吸附量比在正己烷与乙醇混合溶剂中的高,表明它们之间存在着协同作用;在极性水溶剂中,苦味酸的极性较强,与树脂的碱性基团产生的静电作用力强,且酸碱络合吸附、氢键吸附等的协同作用,大大增强了树脂对苦味酸的吸附能力,显示出较高的吸附量,实验结果与理论分析相吻合。

3 结论

(1) D301R树脂对水中苦味酸的吸附可在pH为2.7~10.2之间进行。等温吸附符合Freundlich模型,吸附亲和能力强,为优惠吸附。

(2) 由热力学计算结果 $\Delta H > 0$ 、 $\Delta S > 0$ 和 $\Delta G < 0$ 表明,树脂对水中苦味酸的吸附是吸热、熵增的自发过程。吸附过程中存在不可逆的化学吸附。

(3) 吸附动力学可用准二级速率方程描述,颗粒内扩散是吸附速率的主要控制步骤,吸附活化能为19.4 kJ/mol。

(4) 动态吸附表明,进柱液浓度越低,泄漏点和饱和点出现得越迟。用 HNO_3 与丙酮组合的混合液可定量洗脱树脂上吸附的苦味酸,洗脱率达99%。

(5) D301R树脂是基于静电吸附、酸碱络合吸附、氢键吸附等的协同作用而吸附苦味酸的。

参考文献

- [1] 王淑红,马邕文,王金泉,等. 不同基质共代谢降解2,4,6-三硝基苯酚的研究. 环境工程学报,2009,3(3):479-484
Wang Shuhong, Ma Yongwen, Wan Jinqian, et al. Study on co-metabolic biodegradation of 2, 4, 6-trinitrophenol with different substrates. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(3): 479-484 (in Chinese)
- [2] 黄群贤,任宏强,赵秋华. 苦味酸废水处理的研究. 河北轻化工学院学报,1995,16(1):78-82
Huang Qunxian, Ren Hongqiang, Zhao Qiuhua. Research on the wastewater treatment of picric acid. Journal of Hebei Institute of Chemical Technology and Light Industry, 1995, 16(1): 78-82 (in Chinese)
- [3] 谢祖芳,陈孟林,马国足,等. 聚酰胺树脂对苦味酸的吸附性能研究. 现代化工,2002,22(增刊):120-123
Xie Zufang, Chen Menglin, Ma Guozu, et al. Investigation on adsorbing properties of polyamide to picric acid. Modern Chemical Industry, 2002, 22 (Supplement): 120-123 (in Chinese)
- [4] 魏瑞霞,陈金龙,陈连龙,等. 2-噻吩乙酸在3种树脂上的吸附行为研究. 高分子学报,2004,(4):471-477
Wei Ruixia, Chen Jinlong, Chen Lianlong, et al. Study of ad-

sorption of 2-thiopheneacetic acid on three adsorbent resins. Acta Polymerica Sinica, 2004, (4): 471-477 (in Chinese)

- [5] 李长海. 以弱碱性树脂去除废水中5-氨基-2-氯甲苯-4-磺酸和盐酸:平衡及动力学. 化工学报,2007,58(6):1494-1500
Li Changha. Removal of 5-amino-2-chlorotoluene-4-sulfonic and hydrochloric acids from wastewater by weakly basic resin: Equilibrium and kinetics. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58 (6): 1494-1500 (in Chinese)
- [6] 傅献彩,沈文霞,姚天杨,等. 物理化学(第5版)(下册). 高等教育出版社,2006. 368-369
- [7] 谢祖芳,童张法,庞起,等. 阴离子交换树脂对磺基水杨酸的吸附解吸性能. 化学工程,2009,37(1):4-7
Xie Zufang, Tong Zhangfa, Pang Qi, et al. Adsorption and desorption properties of sulfosalicylic acid on anion exchange resin. Chemical Engineering (China), 2009, 37 (1): 4-7 (in Chinese)
- [8] Zhang W. M., Du Q., Pan B. C., et al. Adsorption equilibrium and heat of phenol onto aminated polymeric resins from aqueous solution. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 2009, 346(1): 34-38
- [9] 张青梅,郑寿荣,王家宏,等. 胺基树脂的合成及对水中重金属离子的吸附特征. 环境工程学报,2010,4(12):2657-2661
Zhang Qingmei, Zheng Shourong, Wang Jiahon, et al. Synthesis of amine resin and its adsorption properties for heavy-metal ions in water. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(12): 2657-2661 (in Chinese)
- [10] Wei R. X., Chen J. L., Chen L. L., et al. Study of adsorption of lipoic acid on three types of resin. Reactive & Functional Polymers, 2004, 59(3): 243-252
- [11] 费正皓,施卫忠,李振兴,等. 氨基酸修饰的吸附树脂对间苯三酚的吸附效果. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(6): 64-70
Fei Zhenghao, Shi Weizhong, Li Zhenxing, et al. The adsorption effect of m-trihydroxybenzene from water with adsorption resins modified with amino acids. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, 26 (6): 64-70 (in Chinese)
- [12] 孟凡伟,潘丙才,李晓戮,等. 大孔树脂对磺酸类化合物吸附行为的研究. 离子交换与吸附,2004,20(5):438-444
Meng Fanwei, Pan Bingcai, Li Xiaotao, et al. Sorption behavior of sulfonates onto macroporous resins. Ion Exchange and Adsorption, 2004, 20 (5): 438-444 (in Chinese)
- [13] 李家政,欧来良,史作清,等. 水介质中氢键吸附与疏水吸附协同作用的研究. 离子交换与吸附,2005,21(2):97-102
Li Jiazheng, Ou Lailiang, Shi Zuoqing, et al. Adsorption from aqueous solution based on the synergism between hydrogen bonding and hydrophobic interactions. Ion Exchange and Adsorption, 2005, 21 (2): 97-102 (in Chinese)