

对硝基酚在超高交联吸附树脂 NDA-701 上的脱附行为研究

洪昌红^{1,2}, 黄本胜^{1,2}, 邱静^{1,2}, 张炜铭³

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510610; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广州 510610; 3. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘要:通过碱当量选择、脱附动力学以及固定床吸附-脱附实验, 研究了对硝基酚在自制的超高交联吸附树脂 NDA-701 上的脱附行为, 考察了 2 个温度下不同碱当量比 ($M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$) 对树脂脱附率的影响; 研究了 3 个脱附温度和 3 种 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 值情况下 NDA-701 的脱附动力学性能; 考察了 NDA-701 的固定床吸附性能和不同脱附剂浓度方案下的动态脱附性能. 结果表明, 在 303 K 和 333 K 温度下, 当 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}} < 1.2$ 时, NDA-701 脱附不完全, 其脱附率随温度的增加而增加, 但温度对脱附率的贡献随 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 值的增大而逐渐减小; 当 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}} = 1.2$ 时, 2 个温度下 NDA-701 脱附率均达到 100%, 说明碱当量是影响 NDA-701 的脱附热力学性能的关键性因素. 脱附动力学符合伪二级动力学模型, 脱附温度由 303 K 增加至 333 K, 脱附速率常数 k_2 值由 $0.010 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ 增至 $0.035 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$, 当 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 值达到临界值之后, $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 值由 1.2 增至 5.0, k_2 值变化微小, 仅由 $0.038 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ 变化至 $0.044 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$, 说明脱附温度能够明显提高其动力学性能, 过高的碱当量比对其动力学性能影响甚小, 温度是影响 NDA-701 脱附动力学性能的关键因素; 脱附温度为 333 K 时, 以 2BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水为脱附剂, 总脱附效率达到 100%, 与实际工程的脱附方案 (脱附剂浓度为 1BV 8% NaOH + 1BV 4% NaOH + 水, 温度为 353 K) 相比, 碱量为工程脱附方案的 1/3, 温度降低 20 K, 说明树脂吸附法在实际应用中, 具备节能降耗的空间.

关键词:对硝基酚; 脱附; 脱附动力学; 固定床脱附; 超高交联吸附树脂

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1388-06

Desorption Behaviors of 4-nitrophenol on Hyper-Cross-Linked Polymer Resin NDA-701

HONG Chang-hong^{1,2}, HUANG Ben-sheng^{1,2}, QIU Jing^{1,2}, ZHANG Wei-ming³

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Water Resources Experiment Base and Hydrodynamic Research Key Laboratory of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Desorption behaviors of loaded 4-nitrophenol (4-NP) on hyper-cross-linked polymer resin NDA-701 were studied. The molar ratio of NaOH and 4-NP desorbed ($M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$) selection experiments were carried out at two different reaction temperature (303 K and 333 K). Desorption kinetics characteristic of 4-NP on NDA-701 in the batch and fixed-bed mode were examined at different reaction temperature and $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values. The results showed that optimal $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values were 1.2 and 100% 4-NP could be desorbed from NDA-701 at two different temperature. When the $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ was lower than 1.2, the desorption efficiency increases with the increase of temperature, but the function of temperature decrease with increasing of $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values for desorption ratio. The information indicated that desorption thermodynamic characteristic of NDA-701 was controlled by $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values. Desorption kinetics in the alkaline system can be well described by pseudo-second-order kinetic model, and desorption rate is increased with the increase of desorption temperatures, the k_2 value increase from $0.010 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ to $0.035 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ when desorption temperature increase from 303 K to 333 K. Nevertheless, higher $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values could not promote desorption rate if only $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ value was larger than the optimal molar ratio of NaOH and 4-NP. When $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ values increase from 1.2 to 5.0, the k_2 value increase from $0.038 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ to $0.044 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$ merely at 333 K. the results indicated that desorption kinetic characteristic of NDA-701 was controlled by temperature. NDA-701 can be completely recovered using 2 times Bed Volume of 2% NaOH solution at the temperature of 333 K, comparing with field application, implying that more energy and cost can be saved in comparison with the actual desorption process in the industry.

Key words: 4-nitrophenol; desorption; desorption kinetics; fixed-bed desorption; hyper-cross-linked polymer resin

树脂吸附法作为芳香族有机工业废水治理与资源化新技术之一,已在污水治理领域得到广泛的应用^[1-6].树脂吸附技术由吸附和脱附两阶段组成.针对树脂吸附特性,国内外学者已经开展了大量的研究工作,主要通过改变树脂物理结构和表面化学性质,以提高其吸附性能^[7-9].树脂的脱附性能与吸附性能一样重要,能够保证树脂的循环利用和实现脱附液的资源化,吸附材料的脱附性能与脱附的经济性很大程度上决定了其在废水治理领域的实际应用^[10],然而,树脂脱附阶段的研究还没得到足够的重视,对树脂脱附特性的系统研究则报道甚少^[11-14],尤其尚未系统地研究脱附剂浓度与脱附温度对树脂脱附性能的影响.在超高交联吸附树脂处理含酚废水的工程实践中,酚类物质的脱附剂浓度一般采用 8% 与 4% 的碱液梯度脱附,脱附体系温度选择为 353 K^[15],在脱附阶段消耗于碱量和能量方面的运行费用占据整体运行费用的 50% 以上,直接影响到树脂吸附法的技术可行性和经济可行性^[3].

为此,本研究通过分析对硝基酚在超高交联吸附树脂 NDA-701 上的脱附行为,阐明脱附剂耗量与脱附体系温度对树脂脱附效率的影响,以期对树脂吸附法在工程实践上的进一步优化提供理论指导,以达到减少脱附剂耗量和降低能耗的目的.

1 材料与方法

1.1 实验试剂和仪器

1.1.1 试剂

吸附质:对硝基苯酚(4-NP),分析纯,上海化学试剂供应站;吸附剂:NDA-701 树脂,自制;脱附剂:NaOH 水溶液和蒸馏水.

超高交联吸附树脂 NDA-701 的理化性质见表 1.从表 1 中可知,NDA-701 既具有较多的大孔结构,同时又具有较多的微孔结构,形成了双峰孔分布结构.通过前期研究表明,这种孔分布的结构有利于提高材料的吸附性能,呈现双峰孔分布的 NDA-701 树脂对对硝基酚具有很强的吸附能力^[3].同时,前期研究表明:NDA-701 丰富的大孔和中孔结构为吸附在微孔中的对硝基酚提供了脱附扩散通道,具有优越的脱附性能,不存在明显的脱附滞后性^[10].

1.1.2 主要仪器

恒温水浴振荡器(THZ-82 型,江苏太仓光明仪器厂),数显恒流泵(HL-2B,江苏太仓光明仪器厂),自动部分收集器(BSZ-100,上海沪西分析仪器厂),pH 计(pHS-3C 型,上海精密科学仪器有限公

表 1 NDA-701 的理化性质表 ^[10]		
Table 1 Main properties of adsorbents used in this study		
项目	参数	
骨架	聚乙烯-二乙烯苯	
平均孔径/nm	2.24	
BET 表面积/m ² ·g ⁻¹	总面积	824
	大孔	306
	中孔	88
	微孔	430
孔体积/m ³ ·g ⁻¹	0.58	
微孔体积/cm ³ ·g ⁻¹	0.22	
湿密度/g·mL ⁻¹	1.08	
粒径/mm	0.5~1.0	

司)和紫外-可见分光光度计(JH-725,上海菁华科技仪器有限公司).

1.2 实验方法

1.2.1 碱当量选择实验

将 50 mL 不同浓度的 NaOH 水溶液加入 0.40 g 吸附饱和的 NDA-701 树脂中,在 303 K 和 333 K 的恒温水浴振荡器中,以 200 r/min 的转速振荡 24 h,确保脱附达到平衡.测定脱附平衡溶液中对硝基酚的浓度,计算脱附率以及碱当量比[即碱(NaOH)的物质的量与吸附的对硝基酚(4-NP)物质的量之比,记为 $M_{NaOH/4-NP}$],绘制脱附率与碱当量之间的关系曲线.

1.2.2 脱附动力学实验

在吸附饱和的 NDA-701 样品中加入当量比为 2 的 400 mL 的碱溶液,分别控制温度为 303、318 和 333 K,考察温度的影响;在 333 K 的温度下,分别加入碱当量为 1.2、2.0 和 5.0 的碱溶液 400 mL,考察碱当量的影响.以 200 r/min 的转速进行搅拌,每隔一段时间移取 0.5 mL 的溶液进行分析,直至达到脱附平衡,计算脱附率,计算公式如下.

$$\text{脱附率} = \frac{q_t}{q_e} \times 100\%$$

(1)

式中, q_t 为 t 时刻的脱附量($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$), q_e 为树脂饱和吸附量($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$).

1.2.3 固定床吸附实验

准确量取 8 mL(湿体积)NDA-701 树脂置于玻璃吸附柱中(直径 12 mm,长度 230 mm),将一定体积的 $6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的对硝基酚溶液流过吸附柱,吸附柱温度控制为 303 K,流速为 6 BV/h(BV 为树脂的床体积),检测每床体积的出水对硝基酚浓度.

1.2.4 固定床脱附实验

将吸附之后的 NDA-701 树脂,用 4 种不同的脱附方案进行脱附,脱附柱温度控制为 333 K,脱附剂

流速为 6 BV/h,检测每床体积的脱附液浓度,计算脱附率.脱附方案如下.

脱附方案 I :1BV 8% NaOH + 1BV 4% NaOH + 5 BV 蒸馏水;脱附方案 II :7BV 4% NaOH;脱附方案 III :1BV 4% NaOH + 1BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水;脱附方案 IV :2BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水.

1.3 分析方法

对硝基酚溶液采用紫外-可见分光光度计测量,波长 400 nm,所以样品的 pH 用 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液调至 10 ± 0.5^[16].

2 结果与讨论

2.1 碱当量选择

在 303 K 和 333 K 时,碱当量比 ($M_{NaOH/4-NP}$) 与脱附率之间的关系如图 1 所示.从图 1 可以看出,随着碱当量比的增加,对硝基酚在 NDA-701 上的脱附率随之相应增加,这主要是由于 NaOH 溶液与酚类物质发生反应,转化为酚钠离子态,显著增加其水溶性,从而从吸附剂上脱附^[17].当 $M_{NaOH/4-NP} = 1.2$ 时,2 种温度下对硝基酚均达到完全脱附;当 $M_{NaOH/4-NP} < 1.2$ 时,333 K 的脱附率均高于 303 K 的脱附率,这主要是因为一部分对硝基酚已与 NaOH 反应以离子态存在,而另一部分对硝基酚仍以未反应的分子态存在.温度的提高可以增加对硝基酚在水相中的扩散系数,有利于分子态的对硝基酚脱附^[18].但随着 $M_{NaOH/4-NP}$ 的增大,333 K 和 303 K 曲线之间的差值越来越小,说明温度对脱附的促进作用变得越来越小.这可能是由于对硝基酚变成离子态之后,容易从吸附位点上解吸,在足够长的时间里,能够从吸附剂中扩散至液相,而温度对这部分离子态对硝基酚钠

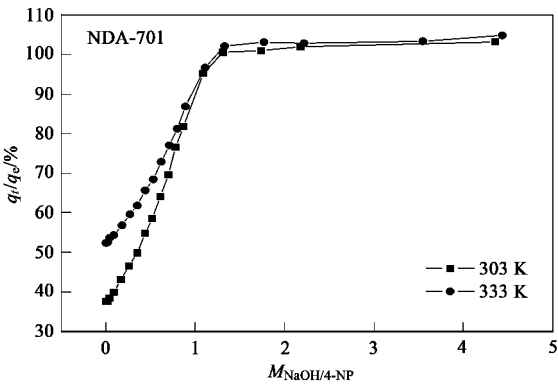


图 1 不同温度的脱附率与 $M_{NaOH/4-NP}$ 的关系曲线
Fig. 1 Relationship of desorption efficiency and $M_{NaOH/4-NP}$ under different temperatures

的脱附率影响不大;然而温度对分子态对硝基酚的脱附率影响较大,升温显著增加分子态对硝基酚的水溶性,大幅度促使其从吸附剂表面脱附.随着碱量比的增加,更多的对硝基酚转化为离子态,使得温度对脱附率的影响越来越弱,2 条不同温度脱附曲线之间的差距也越来越小.

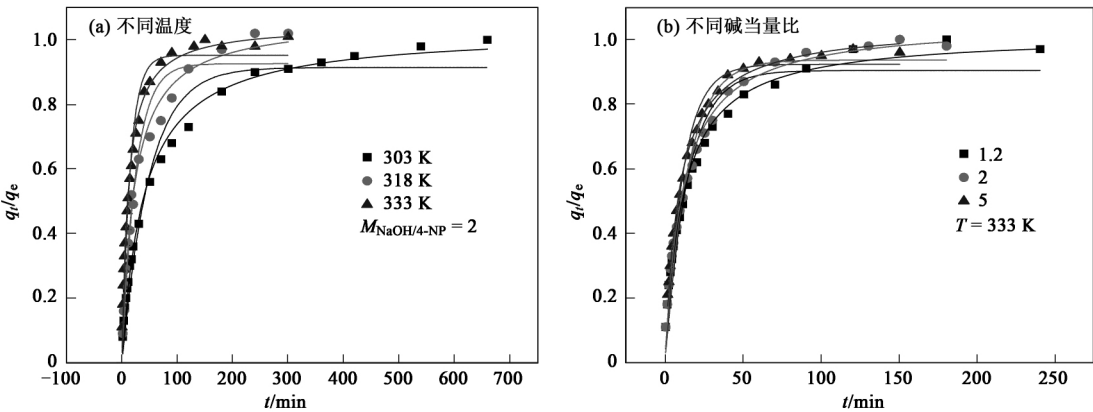
2.2 脱附动力学

不同温度和不同碱当量比下,4-NP 的 NDA-701 脱附动力学曲线如图 2 所示.采用非线性伪一级动力学和伪二级动力学模型进行拟合^[19,20],拟合结果见表 2.

$$\lg(q_{ed} - q_t) = \lg q_{ed} - \frac{k_1}{2.303}t \tag{2}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{ed}^2} + \frac{t}{q_{ed}} \tag{3}$$

式中, q_t 表示 t 时刻的脱附量 (mmol·g⁻¹), q_{ed} 表示



虚线:伪一级动力学拟合线;实线:伪二级动力学拟合线
图 2 4-NP 在 NDA-701 上不同温度和不同碱当量比下的脱附动力学曲线
Fig. 2 Desorption kinetics curves of 4-NP from sorbent NDA-701 at different time and $M_{NaOH/4-NP}$

表 2 不同温度和碱当量比 NDA-701 伪一级和伪二级动力学参数								
Table 2 Desorption Kinetic Parameters of 4-NP onto NDA-701 at different temperature and $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$								
条件	T/K	$q_{\text{ed}}^{\text{Exp}}$ $/\text{g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$	伪一级			伪二级		
			$q_{\text{ed}}^{\text{Cal}}$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_{\text{ed}}^{\text{Cal}}$	$k_2/\text{g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$	R^2
温度	303	2.41	2.20	0.020	0.965	2.48	0.010	0.993
	318	2.46	2.23	0.040	0.951	2.56	0.018	0.990
	333	2.44	2.25	0.069	0.959	2.54	0.035	0.989
碱当量比	1.2	2.37	2.13	0.069	0.942	2.40	0.038	0.985
	2	2.44	2.25	0.069	0.959	2.54	0.035	0.989
	5	2.39	2.19	0.089	0.975	2.51	0.044	0.996

平衡脱附量($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$), k_1 代表伪一级动力学速率常数 (min^{-1}), k_2 为伪二级动力学速率常数 [$\text{g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$].

通过图 2 以及表 2 的拟合结果可以看出,伪二级动力学模型的拟合结果要优于伪一级动力学模型的拟合结果,伪二级动力学模型拟合的平衡脱附量 q_{ed} 值与实验得到的平衡脱附量 $q_{\text{ed}}(\text{Exp})$ 值更加吻合.

2 倍碱当量条件下,4-NP 在 303、318 和 333 K 体系温度下的脱附率均达到 100%,然而,温度对吸附剂的脱附性能具有显著的影响,随着温度从 303 K 升高至 333 K,4-NP 从 NDA-701 上的伪二级脱附速率常数从 $0.010\text{ g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$ 增加至 $0.035\text{ g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$. 这是由于温度的升高,增强了脱附剂和吸附质在吸附剂孔道中的扩散性能,使得 NaOH 溶液进入 NDA-701 孔道的速率增加,同时也增加了反应后的对硝基酚钠从 NDA-701 孔道以及表面解析的速率.333 K 脱附温度条件下,碱当量比由 1.2 增加至 5 时,4-NP 从 NDA-701 上的脱附率均达到 100%,然而,伪二级脱附动力学常数由 $0.035\text{ g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$ 变化至 $0.044\text{ g}\cdot(\text{mmol}\cdot\text{min})^{-1}$,脱附速率没有发生明显变化. 实验结果说明:对于 NDA-701 这类以苯乙烯-二乙烯苯为骨架的吸附树脂,碱当量是决定其脱附热力学性能的关键性因素,脱附温度是决定其脱附动力学性能的关键性因素,当碱当量达到临界值之后,过高的碱量并未明显提高其脱附性能.

2.3 固定床吸附

图 3 为 NDA-701 吸附对硝基酚的穿透曲线,出水控制在国家一级排放标准($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21]. 从穿透曲线中可以看出,8 mL(湿体积)NDA-701 可以处理 95BV 6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的对硝基酚废水,树脂干重吸附量为 $2.32\text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$.

2.4 固定床脱附

采用 4 种不同的脱附方案对吸附 800 mL 6

$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 4-NP 的 NDA-701 树脂进行柱脱附,柱脱附曲线见图 4 所示.

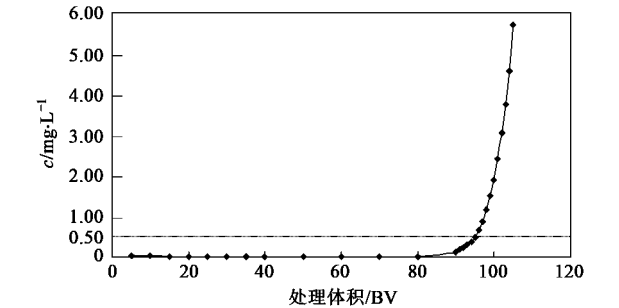


图 3 NDA-701 吸附 4-NP 穿透曲线
Fig. 3 Adsorption dynamic curve of 4-NP on NDA-701

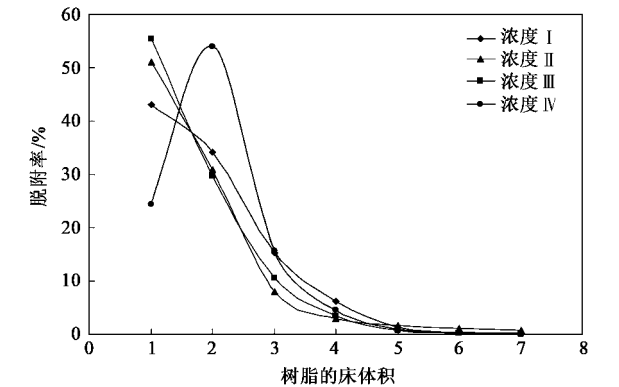


图 4 不同脱附剂浓度下 NDA-701 脱附曲线
Fig. 4 Desorption curves on NDA-701 by different NaOH alkaline solution

由图 4 可知:
(1)采用脱附方案 I (1BV 8% NaOH + 1BV 4% NaOH + 5BV 蒸馏水)脱附,总脱附率达到 100%,但是第 1BV 脱附率不足 45%,这可能是由于碱度过高,脱附的对硝基酚钠容易析出结晶,造成吸附剂孔道和工艺管道堵塞,从而导致第 1BV 脱附液中 4-NP 含量较低. 该浓度配比是对硝基酚脱附工艺中常用浓度.
(2)采用脱附方案 II (7BV 4% NaOH)脱附时,

第 1BV 出水浓度超过 50%, 总脱附率达到 100%。采用脱附方案Ⅲ(1BV 4% NaOH + 1BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水)作为脱附剂时, 前 2BV 的 NaOH 溶液具有浓度梯度, 后 5BV 的蒸馏水充分利用了吸附剂中残留的碱度, 与脱附方案Ⅱ相比具有相似的脱附效果, 同时降低了碱液消耗, 而且减少了后续处理成本; 与脱附方案Ⅰ相比, 克服了装置堵塞问题, 减少了碱液消耗量并提高了脱附效率。

(3) 当进一步降低脱附剂浓度, 采用脱附方案Ⅳ(2BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水)时, 总脱附率亦达到 100%, 但是与前 3 种浓度方案相比, 脱附浓度高峰出现于第 2BV, 脱附浓度超过 50%, 与高浓度碱液的第 1BV 相当。NDA-701 超高交联吸附树脂呈双峰孔分布结构, 既具有较多的大孔又具有较多的微孔结构, 第 1BV 2% 的 NaOH 溶液不足以产生类似高浓度碱液的推动力, 在前 10 min 不断被消耗, 因此, 只能使得树脂表面以及大孔容易快速脱附的部分对硝基酚发生解吸, 而难以使微孔中的对硝基酚转化成酚钠扩散出来。第 2BV 的 NaOH 溶液具有足够的时间扩散至微孔区域, 使微孔区域的对硝基酚进一步解吸, 而且丰富的大孔结构也为碱液进一步扩散至微孔区以及微孔区的酚钠扩散出来提供了通道, 因此, 呈现出良好的脱附性能。浓度Ⅳ所使用的 NaOH 物质的量与吸附的对硝基酚物质的量相比为 1.65, 碱耗与能耗均小于文献报道^[2,3,22]和实际工程应用。

3 结论

(1) 在 303 K 和 333 K 时, NDA-701 的临界脱附 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}} = 1.2$, 当 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}} < 1.2$ 时, 温度的上升有利于脱附率的提高, 但是碱当量是决定 4-NP 在 NDA-701 上脱附热力学性能的关键因素。

(2) NDA-701 的脱附动力学符合伪二级动力学模型, 脱附温度能够明显提高其动力学性能, 脱附体系温度是决定 4-NP 在 NDA-701 上脱附动力学性能的关键因素, 而当 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 达到临界值之后, 过高的 $M_{\text{NaOH}/4\text{-NP}}$ 值对其动力学性能影响甚小。

(3) 8 mL(湿体积) NDA-701 树脂能够达标处理 95BV 6 mmol·L⁻¹ 对硝基酚。

(4) 以 2BV 2% NaOH + 5BV 蒸馏水为脱附剂, NaOH 物质的量与吸附的对硝基酚物质的量相比为 1.65, 脱附温度为 333 K, 总脱附效率达到 100%, 与实际工程应用(碱耗物质的量与对硝基酚物质的量之比为 5, 温度为 353 K)相比, 具备节能减耗的

空间。

参考文献:

- [1] Pan B C, Zhang W M, Zhang Q X, *et al.* Application of resin adsorbents in pollution control of toxic compounds in water systems[A]. In: International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution (ISNEPP 2006) [C]. Hongkong: 2006. 16-19.
- [2] 唐树和, 王京平, 费正皓. 间硝基酚在超高交联树脂上的吸附性能[J]. 环境工程学报, 2008, 2(5): 615-618.
- [3] Pan B C, Du W, Zhang W M. Improved adsorption of 4-nitrophenol onto a novel hyper-cross-linked polymer [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(14): 5057-5062.
- [4] Zhang W M, Hong C H, Pan B C, *et al.* Removal enhancement of 1-naphthol and 1-naphthylamine in single and binary aqueous phase by acid-basic interactions with polymer adsorbents [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(2-3): 293-299.
- [5] Zhang W M, Hong C H, Pan B C, *et al.* Sorption enhancement of 1-naphthol onto a hydrophilic hyper-cross-linked polymer resin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(1): 53-57.
- [6] 张伟铭, 陈金龙, 张全兴, 等. 甲萘酚和甲萘胺在超高交联吸附树脂上的协同吸附行为[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 727-731.
- [7] 陈一良, 潘丙才, 孟凡伟, 等. 苯酚及对硝基酚在大孔树脂上吸附等温线的研究[J]. 离子交换与吸附, 2004, 20(3): 205-13.
- [8] 张全兴, 裴兆蓉, 周希圣, 等. 树脂吸附法处理对硝基酚钠废水的研究[J]. 离子交换与吸附, 1989, 5(2): 95-101.
- [9] Bilgili M S. Adsorption of 4-chlorophenol from aqueous solutions by XAD-4resin: Isotherm, kinetic, and thermodynamic analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 157-164.
- [10] Hong C H, Zhang W M, Pan B C, *et al.* Adsorption and desorption hysteresis of 4-nitrophenol on a hyper-cross-linked polymer resin NDA-701 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 1217-1222.
- [11] Laszlo J A. Regeneration of azo-dye-saturated cellulosic anion exchange resin by *Burkholderia cepacia* anaerobic dye reduction [J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34(1): 167-172.
- [12] Gu B, Brown G M, Maya L, *et al.* Regeneration of perchlorate (ClO_4^-)-loaded anion exchange resins by a novel tetrachloroferrate (FeCl_4^-) displacement technique [J]. Environmental Science and Technology, 2001, 35(16): 3363-3368.
- [13] Bryjak M, Poźniak G, Kabay N. Donnan dialysis of borate anions through anion exchange membranes: a new method for regeneration of boron selective resins [J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(12): 1635-1642.
- [14] Üstün G E, Solmaz S K A, Birgül A. Regeneration of industrial district wastewater using a combination of Fenton process and ion exchange-a case study [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 52(2): 425-440.

- [15] 姜华, 张全兴, 陈金龙. 树脂吸附法处理邻硝基苯酚废水的研究[J]. 离子交换与吸附, 2000, **16**(6): 540-556.
- [16] 刘国杰, 邓桂春, 张渝阳, 等. 分光光度法测定药厂废水中对硝基酚的含量[J]. 渤海大学学报, 2006, **27**(1): 14-17.
- [17] Goto M, Hayashi N, Goto S. Adsorption and Desorption of Phenol on Anion-Exchange Resin and Activated Carbon[J]. Environmental Science and Technology, 1986, **20**(5): 463-467.
- [18] Dachs J, Bayona J M, Raoux C. Spatial, vertical distribution and budget of polycyclic aromatic hydrocarbons in the western mediterranean seawater [J]. Environmental Science and Technology, 1997, **31**(3): 682-688.
- [19] Zhang W M, Hong C H, Pan B C, *et al.* A comparative study of the adsorption properties of 1-naphthylamine by XAD- 4 and NDA- 150 polymer resins [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **331**: 257-262.
- [20] 李静, 岳钦艳, 李倩, 等. 阳离子聚合物改性膨润土对六价铬的吸附特性研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1738-1743.
- [21] GB 8978-1996, 污水综合排放标准[S].
- [22] 邱宇平, 陈金龙, 陈一良, 等. 超高交联树脂吸附处理 2,4-D 含酚废水的研究[J]. 工业水处理, 2003, **23**(4): 50-52.