

# 铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒的制备及其对磷酸盐吸附性能的研究

宁军<sup>1</sup>, 田琳<sup>1</sup>, 占明飞<sup>1</sup>, 项贤领<sup>2\*</sup>

(1.安徽水韵环保股份有限公司, 安徽 芜湖 241000;

2.安徽师范大学生态与环境学院, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:**采用铁铝复合氧化物对壳聚糖进行改性, 制备了铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒(FACP), 并用于富营养化水体中磷酸盐的去除。结果表明, 采用初始磷质量浓度为 30 mg/L 的溶液、体积为 300 mL、吸附剂投加质量浓度为 10 g/L, 于 (25±1) °C、150 r/min 振荡 96 h, 铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒对磷酸盐的吸附量 (2.033 mg/g) 远高于壳聚糖 (CTS, 0.168 mg/g), 高于铁铝复合氧化物 (Fe-Al, 1.533 mg/g)。溶液初始 pH 为 3 时, FACP 对磷酸盐的最大吸附量为 0.99 mg/g。溶液中加入 NaCl 对 FACP 吸附磷酸盐影响不大, 表明 FACP 对磷酸盐具有选择吸附性。通过动力学模型拟合发现, FACP 吸附过程由液膜扩散和内部扩散共同控制。通过 Langmuir 模型模拟得出 FACP 对磷酸盐最大的吸附容量为 11.05 mg/g。

**关键词:**铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒; 吸附; 磷酸盐

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)11-0122-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.11.026

## Preparation of iron-aluminum composite oxides/chitosan particles and study on their adsorption performance to phosphates

NING Jun<sup>1</sup>, TIAN Lin<sup>1</sup>, ZHAN Ming-fei<sup>1</sup>, XIANG Xian-ling<sup>2\*</sup>

(1. Anhui Shuiyun Environmental Protection Co., Ltd., Wuhu 241000, China;

2. School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Fe-Al composite oxides/chitosan particles (FACP) are prepared through modifying chitosan by Fe-Al composite oxides and used to remove phosphates from eutrophic water. The results indicate that the adsorption capacity of FACP to phosphates reaches 2.033 mg·g<sup>-1</sup>, much higher than either the 0.168 mg·g<sup>-1</sup> of chitosan or the 1.533 mg·g<sup>-1</sup> of Fe-Al composite oxides when the initial concentration of phosphates solution is 30 mg·L<sup>-1</sup>, the volume of solution is 300 mL, the adsorbent dosage is 10 g·L<sup>-1</sup>, the temperature is at 25±1 °C, the oscillation lasts for 96 h at a speed of 150 r·L<sup>-1</sup>. When the solution has an initial pH value of 3, the maximum adsorption capacity of FACP to phosphates is 0.99 mg·g<sup>-1</sup>. The addition of NaCl in the solution has little impact on the adsorption of phosphates by FACP, indicating that FACP has selective adsorption on phosphates. It is found by kinetic model fitting that the adsorption process of FACP is jointly controlled by liquid film diffusion and internal diffusion. It is shown through Langmuir model simulation that the maximum adsorption capacity of FACP to phosphates is 11.05 mg·g<sup>-1</sup>.

**Key words:** iron-aluminum composite oxide/chitosan particles; adsorption; phosphates

磷是水体富营养化的控制因素之一, 水体中过量磷的存在通常会导致富营养化现象的产生<sup>[1]</sup>。水体富营养化会导致藻类异常繁殖再死亡分解、水质恶化, 从而破坏水体生态系统平衡<sup>[2-3]</sup>。因此控制磷的浓度尤为重要。

除磷方法包括生物法、化学沉淀法、吸附法、离子交换法等。利用细胞合成将磷吸收到污泥细胞中, 然后再通过沉淀、过滤等分离手段将磷从污水中

去除<sup>[4]</sup>。常见的吸附剂主要有粉煤灰<sup>[5]</sup>、铁氧化物<sup>[6]</sup>、离子交换树脂<sup>[7-9]</sup>等, 但是存在吸附容量低、难以回收再利用、人工合成树脂吸附剂不易生物降解等问题<sup>[10]</sup>。

为开发一种可生物降解的高效吸附磷酸盐的吸附剂, 笔者采用价格低廉、易降解的壳聚糖为骨架, 制备出铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒(FACP), 并通过对比 3 种材料(Fe-Al、CTS 及 FACP), 系统研究

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(31872208)

作者简介: 宁军(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水污染控制的研究和应用, 417929176@qq.com; 项贤领(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水生态修复和水环境治理的研究, 通讯联系人, xiangxianling@163.com。

了FACP对吸附磷酸盐的效果影响,以期为高效除磷提供新的可生物降解材料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验试剂与仪器

试剂:壳聚糖、醋酸、三氧化二铁、三氧化二铝、磷酸二氢钾、氢氧化钠,溶液采用去离子水配制。

仪器:电子分析天平、恒温振荡器、电热鼓风干燥箱、多参数水质测定仪、pH计、扫描电子显微镜。

### 1.2 铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒(FACP)的制备

制备铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒(FACP)分为2步:第1步将 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 固体分别放入 $55^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥,研磨,过80~100目筛;第2步将4g壳聚糖溶解在100 mL(4%)醋酸中(封口)24 h,接着加入1.5 g均匀混合的铁铝复合氧化物粉末于壳聚糖黏稠物中,搅拌均匀。然后把均匀混合后的黏稠物逐滴缓慢滴入到2.5 mol/L的氢氧化钠溶液中,静置3 h,用去离子水清洗颗粒至中性,然后 $55^\circ\text{C}$ 烘干,即得到FACP颗粒。

将4g壳聚糖溶解在100 mL(4%)醋酸中(封口)24 h,然后把黏稠物逐滴缓慢滴入到2.5 mol/L的氢氧化钠溶液中,后续过程同上,得到壳聚糖颗粒。

### 1.3 磷酸盐吸附实验

用磷酸二氢钾固体配置实验所需质量浓度(mg/g)的磷储备液。实验最长反应时间控制在96 h。

#### 1.3.1 反应时间对吸附磷酸盐效果的影响

采用初始磷质量浓度为30 mg/g的溶液,吸附剂投加质量浓度均为10 g/L,于 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、150 r/min振荡,在不同时间点(0.5、1、5、7、9、11、13、24、48、72、96 h)取样分析。

#### 1.3.2 初始pH对吸附磷酸盐效果的影响

采用初始磷质量浓度为10 mg/g的溶液,将pH分别调节为1、2、3、5、7、9、11,分别加入吸附剂10 g/L,在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、150 r/min条件下振荡96 h后取样分析。

#### 1.3.3 转速对吸附磷酸盐效果的影响

采用初始磷质量浓度为40 mg/g的溶液,吸附剂投加质量浓度均为10 g/L,于 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、转速分别在50、100、150、200、250、300 r/min振荡,在不同时间点(0.5、1、5、7、9、11、13、24、48、72、96 h)取样分析。

#### 1.3.4 离子强度对吸附磷酸盐效果的影响

采用初始磷质量浓度为10 mg/g的溶液,向溶液中分别加入烘干的NaCl固体,使得溶液中背景NaCl浓度分别为0、0.05、0.1、0.2、0.4 mol/L,分别加入10 g/L的吸附剂,在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、150 r/min条件下振荡96 h后取样分析。

#### 1.3.5 吸附等温线实验

采用初始磷质量浓度分别为5、20、50、100、120、350、500 mg/g的溶液,分别加入10 g/L的吸附剂,在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、150 r/min条件下振荡96 h后取样分析。

## 1.4 分析方法

### 1.4.1 检测分析

在FACP中挑选粒径为1.322 mm的颗粒,在CTS中挑选直径为1.319 mm的颗粒,误差范围 $\pm 10\%$ 。取样并经 $0.45\ \mu\text{m}$ 纤维滤膜过滤后,采用钼锑抗分光光度法(GB 11893—89)测定溶液中磷酸盐的含量。

### 1.4.2 吸附动力学分析

FACP颗粒的粒径较大,推测可能存在液膜扩散和内扩散。为了研究FACP对磷酸盐的吸附过程,选取转速50、300 r/min,绘制了在2个不同转速下FACP对磷酸盐的吸附量随时间的变化曲线。采用液膜扩散模型<sup>[11]</sup>[见式(1)]、Weber and Morris模型<sup>[12]</sup>[式(2)]、颗粒内扩散模型<sup>[13]</sup>[式(3)、式(4)、式(5)]对实验数据进行拟合。

$$\ln(1-F) = -kt \quad (1)$$

$$q_t = k_p t^{0.5} + C \quad (2)$$

$$F = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \{6w(w+1) \times \exp[-\text{Dintra} \times (\beta_n^2 t/r^2)]\} / (9+9w+\beta_n^2 w^2) \quad (3)$$

$$\tan\beta_n = 3\beta_n / (3+w\beta_n^2) \quad (4)$$

$$q_{\infty} / (VC_0) = 1 / (1+w) \quad (5)$$

式中: $k$ 为速率常数; $k_p$ 为粒子内扩散模型速率常数; $C$ 为涉及厚度、边界层的常数; $F$ 为平衡吸附量的积分; $\beta_n$ 为非零根; $w$ 根据其与最终吸附量的关系[见式(5)]来计算; $V$ 为反应的体积; $C_0$ 为反应的初始浓度。

### 1.4.3 吸附等温线分析

采用初始磷质量浓度分别为5、20、50、100、120、350、500 mg/g的溶液,体积为50 mL,Fe-Al、FACP的投加质量浓度各10 g/L,进行吸附磷酸盐实验。采用Langmuir、Freundlich和Temkin模型对Fe-Al、FACP吸附磷酸盐的实验数据进行拟合

分析:

Langmuir 方程表达式:

$$1/q_e = 1/(q_m k_L C_e) + 1/q_m \quad (6)$$

Freundlich 方程表达式:

$$\ln q_e = \ln k_F + (1/n) \ln C_e \quad (7)$$

Temkin 方程表达式:

$$q_e = (RT/b) \ln k_T + (RT/b) \ln C_e \quad (8)$$

式中:  $q_e$  为平衡吸附量;  $q_m$  为 Langmuir 最大吸附量;  $k_L$  为 Langmuir 常数;  $C_e$  为平衡时溶液中磷浓度;  $k_F$  为与吸附强度有关的常数;  $n$  为与吸附能力有关的常数;  $k_T$  为与最大结合能有关的平衡常数;  $R$  为气体常数;  $T$  为绝对温度;  $b$  为 Temkin 等温常数, 与吸附热有关。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂形貌

CTS、Fe-Al、FACP 的形貌如图 1 所示。

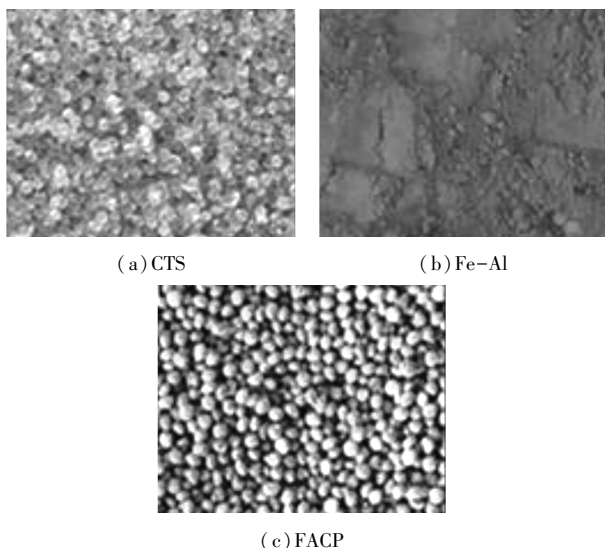


图 1 吸附剂的形貌

从图 1 中可以看出, CTS 外观呈晶状黄, Fe-Al 为粉末状, FACP 外观呈红褐色。图 2 为 CTS 和 FACP 的扫描电镜图像。

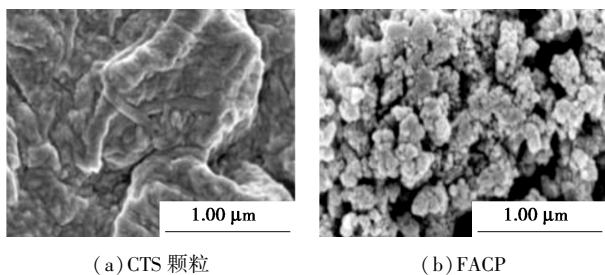


图 2 CTS 和 FACP 的扫描电镜图像

### 2.2 吸附剂吸附磷酸盐效果的影响

溶液初始质量浓度为 30 mg/g, 吸附剂投加质

量浓度各为 10 g/L, 于  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、150 r/min 振荡 96 h 取样。研究 96 h 3 种吸附剂吸附磷酸盐的效果, 结果如表 1 所示。

表 1 3 种吸附剂吸附磷酸盐的效果 mg/g

| 试验组 | 吸附剂   |       |       |
|-----|-------|-------|-------|
|     | Fe-Al | FACP  | CTS   |
| 第一组 | 1.566 | 2.030 | 0.165 |
| 第二组 | 1.502 | 2.040 | 0.170 |
| 第三组 | 1.530 | 2.028 | 0.168 |
| 平均值 | 1.533 | 2.033 | 0.168 |

由表 1 可知, 相同反应条件下, 96 h 时 FACP 对磷酸盐的吸附量 (2.033 mg/g) 最大, 较 Fe-Al 对磷酸盐的吸附量 (1.533 mg/g) 提高了 32.6%。

### 2.3 反应时间对吸附磷酸盐效果的影响

3 种吸附剂中在不同反应时间对吸附磷酸盐效果的影响如图 3 所示。

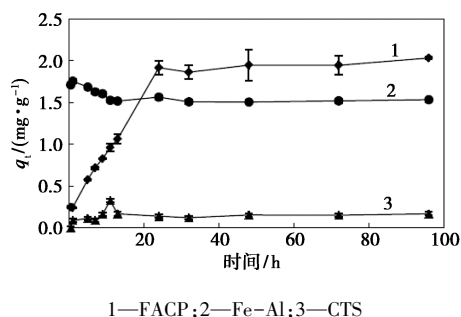


图 3 反应时间对吸附磷酸盐效果的影响

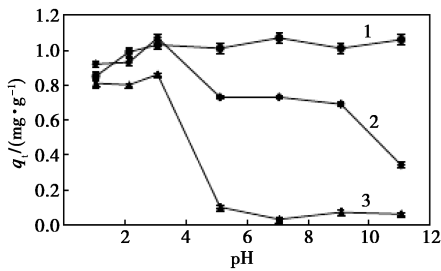
由图 3 可知, Fe-Al 对磷酸盐的吸附量在初期即达到最大, 随后有个吸附-解吸的平衡过程, 然后达到一个稳定状态; CTS 一直处于较低的吸附量; FACP 在最初的 0~24 h 内呈快速吸附, 然后达到一个稳定状态。在 0~20 h 内, FACP 对磷酸盐的吸附量小于 Fe-Al 的吸附量, 20 h 后 FACP 的吸附量超越 Fe-Al 的吸附量。

3 种吸附剂在 24~96 h 对磷酸盐的吸附趋于平衡状态。FACP 吸附过程中的始末时间点测得溶液的 pH 从 6.80 逐渐上升到 8.14, 说明 FACP 对磷酸盐的吸附反应伴随着  $\text{OH}^-$  的产生。在 96 h 时, FACP 对磷酸盐的吸附量约是 CTS 的 12 倍, 表明 CTS 可以作为 Fe-Al 粉末的良好载体。铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒对磷酸盐具有较好的吸附效果, 这主要是由于  $\text{PO}_4^{3-}$  与 FACP 颗粒中的  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  和 Fe-O 等形成配位键发生磷酸盐的专性吸附, 与杨金梅等<sup>[14]</sup>研究的壳聚糖载纳米羟基氧化铁对水中

磷的吸附中推断 CNFeOOH 对磷的吸附机理是以静电引力和配位作用为主的特性吸附结果类似。

#### 2.4 初始 pH 对吸附磷酸盐效果的影响

研究不同 pH 条件下的吸附量并与 Fe-Al 和 CTS 进行了对比。溶液 pH 对吸附磷酸盐效果的影响如图 4 所示。



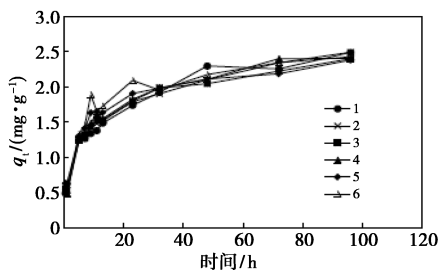
1—Fe-Al; 2—FACP; 3—CTS

图 4 初始 pH 对吸附磷酸盐效果的影响

从图 4 可以看出,在 pH 为 1~3 时,Fe-Al、FACP、CTS 的吸附量随着 pH 的升高而升高;在 pH 为 3~11 时,FACP、CTS 的吸附量随着 pH 的升高而降低,Fe-Al 对磷酸盐的吸附量基本不受 pH 的影响。在 pH=3 时,Fe-Al、FACP、CTS 3 种吸附剂对磷酸盐的吸附量均达到最大值,分别为 1.03、1.07、0.86 mg/g;当 pH 为 3~5 时,FACP、CTS 吸附量随 pH 的升高急剧下降,其中 FACP 在 pH 为 5~9 时仍保留了 64%~68% 的吸附量,并在 pH 大于 9 时进一步降低,表明溶液 pH 对 FACP 吸附磷酸盐的影响较大。CTS 在 pH 为 3~5 时吸附量急剧降低,在 pH 为 5~11 时基本保持稳定,表明壳聚糖在 pH 为 3~5 时比较敏感<sup>[14]</sup>,从而影响吸附剂整体的吸附效率。

#### 2.5 转速对吸附磷酸盐效果的影响

不同转速条件下对吸附磷酸盐效果的影响如图 5 所示。



1—50 r/min; 2—100 r/min; 3—150 r/min; 4—200 r/min;  
5—250 r/min; 6—300 r/min

图 5 转速对吸附磷酸盐效果的影响

从图 5 中可以看出,不同转速下振荡 96 h, FACP 吸附磷酸盐的效果基本不受影响。

#### 2.6 离子强度对吸附磷酸盐效果的影响

NaCl 背景溶液不同离子强度对吸附磷酸盐效果的影响如表 2 所示。

表 2 不同离子强度下 FACT 对磷酸盐的吸附效果表

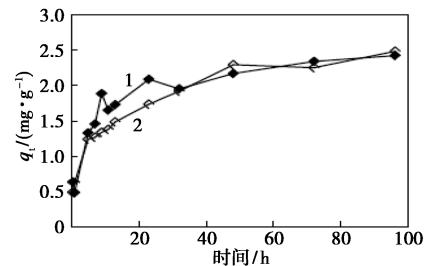
| 试验组   | 离子强度                         |                                 |                                |                                |                                |
|-------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|       | 0/<br>(mol·L <sup>-1</sup> ) | 0.05/<br>(mol·L <sup>-1</sup> ) | 0.1/<br>(mol·L <sup>-1</sup> ) | 0.2/<br>(mol·L <sup>-1</sup> ) | 0.4/<br>(mol·L <sup>-1</sup> ) |
| 第 1 组 | 0.882                        | 0.871                           | 0.950                          | 0.930                          | 0.821                          |
| 第 2 组 | 0.824                        | 0.845                           | 0.950                          | 0.943                          | 0.801                          |
| 第 3 组 | 0.907                        | 0.891                           | 0.945                          | 0.904                          | 0.831                          |
| 平均值   | 0.871                        | 0.869                           | 0.948                          | 0.926                          | 0.818                          |

从表 2 中可以看出,当溶液 NaCl 从 0 增加到 0.4 mol/L, FACT 对吸附磷酸盐的效果影响不大,表明磷酸盐与 FACP 形成了内层络合的特性吸附,与辛杰等<sup>[15]</sup>研究的改性后铁铝泥、赤泥、粉煤灰在不同离子(Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)条件下不会对吸附效果产生明显影响类似,从而证明了 FACP 对磷酸盐具有选择吸附性。

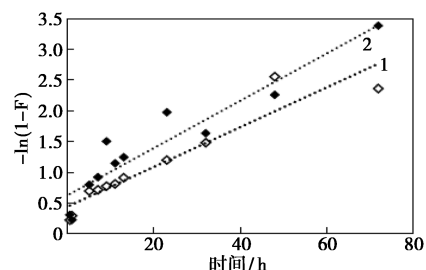
#### 2.7 吸附动力学

溶液初始质量浓度为 40 mg/g、体积为 300 mL、吸附剂投加质量浓度各为 10 g/L,于 (25±1) °C 和 50、300 r/min 振荡 0.5~96 h 取样分析。

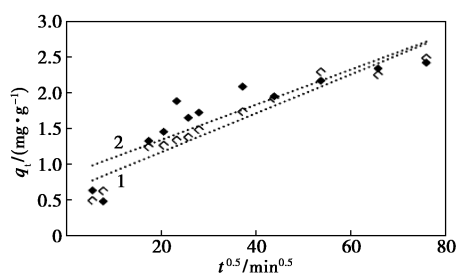
从图 3 中可以看出,FACP 吸附速率明显小于 Fe-Al,且 FACP 颗粒的粒径较大,推测可能存在液膜扩散和内扩散。因此对 FACP 颗粒在 50、300 r/min 的振荡条件下进行动力学模型拟合,结果如图 6 所示<sup>[11-13]</sup>。



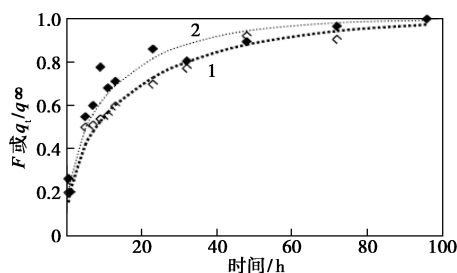
(a) FACP 的吸附容量随吸附时间的变化



(b) 液膜扩散模型拟合



(c) Weber and Morris 模型拟合



(d) 颗粒内扩散模型拟合

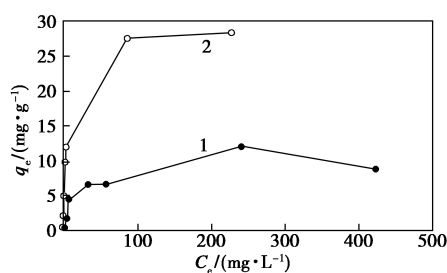
1—50 r/min; 2—300 r/min

图 6 FACP 颗粒在 50,300 r/min 的振荡条件下的动力学模型拟合结果

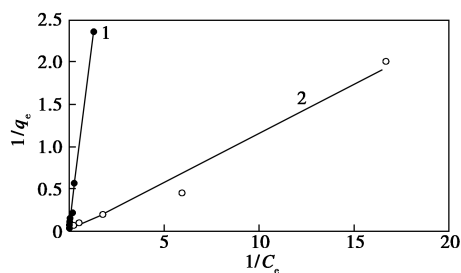
由图 6(a) 可知, FACP 在高转速下展现了稍快的反应速率。这是由于高转速减少了液膜厚度, 从而加快了液膜扩散, 促进了反应速率<sup>[11]</sup>。由图 6(b) 中可以看出, 拟合线未通过原点, 说明液膜扩散不是唯一的控制步骤。由图 6(c) 中可以看出, FACP 的拟合线  $q_t-t^{0.5}$  未经过原点, 说明内扩散不是唯一的控制步骤<sup>[16-17]</sup>。综合图 6(b)、图 6(c) 可知, 磷酸盐在 FACP 上的吸附过程由液膜扩散和粒子内扩散联合控制。为了进一步研究 FACP 的内扩散, 结合 Li 等<sup>[13]</sup> 研究的内扩散模型对 FACP 在 50,300 r/min (液膜扩散最低) 的吸附数据进行内扩散拟合, 结果如图 6(d) 所示。根据已知的 CTS-Fe 在 300 r/min 时的相关数据 [ $q_{\infty} = 2.4257$  (mg/g),  $V = 300$  mL,  $C_0 = 41.12$  mg/L,  $r = 0.0661$  cm, 求出  $W = 4.086$ ,  $\beta_1 = 3.3447, \beta_2 = 6.3955, \beta_3 = 9.5013, \beta_4 = 12.6242, \beta_5 = 15.7544, \beta_6 = 18.8883, \beta_7 = 22.0244, \beta_8 = 25.1619, \beta_9 = 28.3002, \beta_{10} = 31.4393$ ], 得出内扩散系数  $D_{\text{eff}} = 5.18 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

## 2.8 吸附等温线

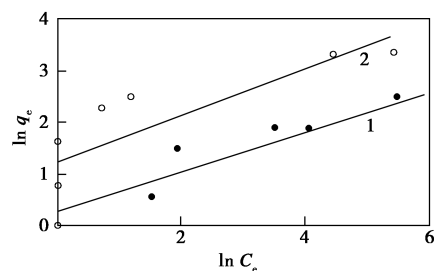
由于 FACP 和 Fe-Al 相较于 CTS 表现出较高的吸附容量, 为确定这 2 种材料的最大吸附量, 进行了吸附等温线实验。FACP 和 Fe-Al 吸附磷酸盐的吸附等温线及 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 模型拟合结果如图 7 所示。



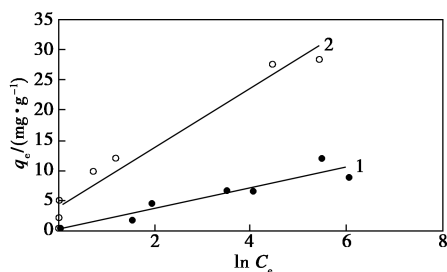
(a) Fe-Al 和 FACP 吸附磷酸盐的吸附等温线



(b) Langmuir 模型拟合



(c) Freundlich 模型拟合



(d) Temkin 模型拟合

1—FACP; 2—Fe-Al

图 7 FACP 和 Fe-Al 对磷酸盐的吸附效果及其模型拟合

由图 7(a) 可知, Fe-Al 对磷酸盐的吸附量随着磷酸盐质量浓度的增加逐渐趋于平衡。FACP 对磷酸盐的吸附量随着磷酸盐质量浓度的增加呈现先上升后下降的趋势, 推测是由于机械搅拌造成颗粒物部分解吸, 使吸附量有所下降<sup>[18]</sup>。模型拟合结果表明, Langmuir 模型 ( $R^2 = 0.99$ ) 较 Freundlich 模型 ( $R^2 = 0.87$ ) 和 Temkin 模型 ( $R^2 = 0.88$ ) 能更好地描述 FACP 对磷酸盐的吸附过程, 即 FACP 对磷酸盐的吸附主要为单分子层吸附<sup>[19]</sup>。根据 Langmuir 模型计算得到 FACP 对磷酸盐最大的吸附量为 11.05

mg/g,这与付军等<sup>[20]</sup>研究的铁锰复合氧化物/壳聚糖珠的除磷吸附剂的吸附容量  $Q_{\max}$  (13.3 mg/g) 接近。

### 3 结论

通过制备 FACP 并与 Fe-Al 和 CTS 对比发现, FACP 和 Fe-Al 对磷酸盐的吸附量远高于 CTS,弥补了 CTS 吸附容量小和 Fe-Al 粉末在水体中难以回收的缺点,证明 FACP 复合颗粒的应用潜力。结果表明,铁铝复合氧化物/壳聚糖颗粒对磷酸盐的吸附量远高于壳聚糖,高于铁铝复合氧化物。在 pH 为 3 时, FACP 对磷酸盐有最大的吸附量。NaCl 离子强度对 FACP 吸附磷酸盐影响不大,表明 FACP 对磷酸盐具有选择吸附性。通过动力学模型拟合发现 FACP 吸附过程由液膜扩散和内扩散共同控制。通过 Langmuir 模型模拟得出 FACP 对磷酸盐最大的吸附容量为 11.05 mg/g。该研究结果将促进可生物降解的复合壳聚糖吸附剂在吸附磷酸盐中的应用,从而解决现有人工合成树脂吸附剂不易生物降解的缺点。

### 参考文献

- [1] 吴玉兰,蛋壳负载纳米铁对水体中磷酸盐的去除及机理研究[D].成都:成都理工大学,2017.
- [2] 仇春华,王文君,安晓雯,等.质子化壳聚糖的除磷性能[J].环境工程学报,2013,7(2):568-572.
- [3] 李如忠,刘科峰,钱靖,等.合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J].环境科学,2014,35(5):1718-1726.
- [4] 王昶,吕晓翠,贾青竹,徐永为.含磷废水处理技术研究进展[J].水处理技术,2009,35(12):16-17.
- [5] Cheung K, Venkitachalam T. Improving phosphate removal of sand infiltration system using alkaline fly ash[J]. Chemosphere, 2000, 41(1):243-249.

- [6] 梁美娜,王敦球,朱义年,等.甘蔗渣活性炭/纳米氧化铁对磷的吸附作用[J].环境化学,2012,31(8):1279-1280.
- [7] Hang Dong, Michael German, Lin Tian, et al. Multifunctional ion exchange pretreatment driven by carbon dioxide for enhancing reverse osmosis recovery during impaired water reuse [J]. Desalination, 2020, 485:114459.
- [8] Hang Dong, Tian Lin, Arup K. Sen Gupta. Field validation of multifunctional ion exchange process for reverse osmosis pretreatment and phosphate recovery during impaired water reuse [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 36:101347.
- [9] Zhou Q, Wang X, Liu J, et al. Phosphorus removal from wastewater using nano-particulates of hydrated ferric oxide doped activated carbon fiber prepared by Sol-Gel method [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 200-202(16):619-626.
- [10] 李海宁,铁锰复合氧化物/壳聚糖珠吸附材料制备及其去除水中砷、磷的研究[D].烟台:烟台大学,2016.
- [11] 马红梅,朱志良,张荣华,等.弱碱性环氧阴离子交换树脂去除水中铜的动力学研究[J].离子交换与吸附,2006,22(6):519-526.
- [12] Weber W J, Morris J C. Kinetics of adsorption on carbon from solution [J]. Asce Sanitary Engineering Division Journal, 1963, 1(2):1-2.
- [13] Li Ping, Arup K, Sen Gupta. Intraparticle diffusion during selective ion exchange with a macroporous exchanger [J]. Reactive & Functional Polymers, 2000, 44:273-287.
- [14] 杨金梅,吕建波,李莞璐,等.壳聚糖载纳米羟基氧化铁对水中磷的吸附[J].环境工程学报,2018,12(5):1286-1294.
- [15] 辛杰,裴元生,王颖,等.几种吸附材料对磷吸附性能的对比研究[J].环境工程,2011,29(4):30-34.
- [16] Popuri Sr, Vijaya Y, Boddu V M, et al. Adsorptive removal of copper and nickel ions from water using chitosan coated PVC beads [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1):194-199.
- [17] Sankaramakrishnan N, Dixit A, Iyengar L, et al. Removal of hexavalent chromium using a novel cross linked xanthated chitosan [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(18):2377-2382.
- [18] 洗昶华.壳聚糖对水中磷的吸附处理研究[J].化工时刊,2008,22(3):29-31.
- [19] 郑晓英,李楠,邱丽佳,等.羟基铁对污水厂二级处理出水中低浓度磷的深度处理性能[J].净水技术,2019,38(3):70-75.
- [20] 付军,范芳,等.铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂[J].环境科学,2016,37(12):4882-4890. ■

(上接第 121 页)

- [5] Vairavel P, Murty V R. Decolorization of Congo red dye in a continuously operated rotating biological contactor reactor [J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 196:299-314.
- [6] Sonu K, Sogani M, Syed Z, et al. Effect of corncob derived biochar on microbial electroremediation of dye wastewater and bioenergy generation [J]. Chemistryselect, 2020, 5(31):9793-9798.
- [7] 薛齐,陆曦,陈静,徐炎华. Fenton 氧化处理颜料中间体生产废水的生化尾水[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,36(1):107-111.
- [8] Zhang W X, Li X M, Yang Q, et al. Pretreatment of landfill leachate in near-neutral pH condition by persulfate activated Fe-C micro-electrolysis system [J]. Chemosphere, 2019, 216:749-756.
- [9] Zhang L L, Gao Y, Yue Q Y, et al. Preparation and application of novel blast furnace dust based catalytic-ceramic-filler in electrolysis assisted catalytic micro-electrolysis system for ciprofloxacin wastewater treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,

383:121215.

- [10] 柯钰,朱易春,连军锋.铁碳微电解去除水中硝酸盐影响因素的研究[J].现代化工,2019,39(7):79-82.
- [11] 郝素菊,孙天昊,张文博,等. Fe-C@CNTs 球团降解含氰废水 [J]. 现代化工, 2019, 39(6):104-106.
- [12] Yang Z M, Ma Y P, Liu Y, et al. Degradation of organic pollutants in near-neutral pH solution by Fe-C micro-electrolysis system [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 315:403-414.
- [13] Malakootian M, Pourmamdari M, Asadipour A, et al. Degradation and removal of p-nitroaniline from aqueous solutions using a novel semi-fluid Fe/charcoal micro-electrolysis reactor [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2019, 36(2):217-225.
- [14] Yang R H, Zhu J Zh, Li Y L, et al. A study on the preparation of regular multiple micro-electrolysis filler and the application in pretreatment of oil refinery wastewater [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(5):457. ■