

文章编号: 1004-0609(2012)02-0604-07

## 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 负载啤酒酵母菌对铀的吸附性能与机理

彭国文<sup>1,2,3</sup>, 丁德馨<sup>2</sup>, 胡南<sup>2</sup>, 杨雨山<sup>1,2</sup>, 王晓亮<sup>3</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;  
2. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 衡阳 421001;  
3. 南华大学 化学化工学院, 衡阳 421001)

**摘要:** 以纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒负载啤酒酵母菌, 制备一种新型铀吸附剂, 考察其吸附铀的主要影响因素, 即溶液 pH 值、铀初始浓度、吸附剂投加量及其粒度, 分析吸附过程的反应动力学和等温吸附规律, 并用扫描电镜和能谱仪分析吸附机理。结果表明: 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  负载啤酒酵母菌(NFSC)吸附铀的最佳条件是 pH 值为 7.0, 铀初始浓度为 60 mg/L, NFSC 加入量为 50 mg, NFSC 的最佳粒径为 12 nm。NFSC 对铀的吸附动力学较好地符合准二级动力学模型, 相关系数为 0.999 6; 吸附等温线均能符合 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型, 说明该吸附体系是一个单层覆盖与多层吸附相结合的模式。扫描电镜和能谱图表明: NFSC 吸附铀后表面形态发生变化, 且吸附过程中共存物理吸附和化学吸附, 属于混合吸附类型。

**关键词:** 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  啤酒酵母菌; 负载; 吸附性能; 吸附机理; 铀

中图分类号: X172

## Adsorption properties and mechanism of *saccharomyces cerevisiae* loaded by nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ on uranium

PENG Guo-wen<sup>1,2,3</sup>, DING De-xin<sup>2</sup>, HU Nan<sup>2</sup>, YANG Yu-shan<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-liang<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Key Discipline Laboratory for National Defence for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy,  
University of South China, Hengyang 421001, China;  
3. School of Chemistry and Chemical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** A novel biosorbent was prepared by loading *saccharomyces cerevisiae* onto nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  *saccharomyces cerevisiae* (NFSC), and the factors, including pH value, initial concentration, adsorbent dosage and adsorbent particle size, impacting the adsorption of NFSC on uranium were investigated. The kinetics and adsorption isotherm law were analyzed, and the mechanisms of uranium adsorption were discussed by SEM and energy spectrum analysis. The results show that NFSC has high adsorption rate on uranium at the solution pH of 7.0, the adsorbent dosage of 50 mg and the optimal NFSC particle size of 12 nm when the initial concentration of uranium is 60 mg/L. The kinetic model of NFSC can be described by the pseudo-second-order model well, its correlation coefficient is 0.999 6, and the isotherm model is fitted to Langmuir and Freundlich adsorption models, which explains that the adsorption process is monolayer over and multilayer adsorption. The surface form changes because of adsorbing uranium of NFSC. And the adsorption mechanism is mixture adsorption, including the physical and chemical adsorption.

**Key words:** nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  *saccharomyces cerevisiae*; load; adsorption behavior; adsorption mechanism; uranium

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774047); 湖南省教育厅科研项目(10C1180); 衡阳市科技局项目(2010ks32)

收稿日期: 2011-06-21; 修订日期: 2011-11-21

通信作者: 丁德馨, 教授, 博士; 电话: 0734-8282534; E-mail: dingdxzzz@163.com

铀是一种具有放射性的稀有金属, 也是国防事业和核电产业非常重要的战略性资源<sup>[1]</sup>。铀将通过生物圈进入食物链, 再进入人体的肝脏、肾脏和骨骼, 以化学毒性和内照射 2 种形式对人体造成损伤<sup>[2]</sup>, 由此给人类健康和自然生态环境带来巨大的威胁。因此, 近年来对含铀废水的处理成为很多国内外学者的研究热点<sup>[3-7]</sup>。由于铀的传统处理方法存在很多缺陷, 生物吸附以其吸附来源丰富、操作简单、去除率高、选择性好等优点而备受关注<sup>[8]</sup>, 目前, 用于铀吸附的生物吸附剂主要有细菌、真菌、藻类、壳聚糖和无机吸附材料等<sup>[5-6, 9-10]</sup>, 其中一些学者对啤酒酵母菌应用于含铀废水的处理开展了大量的研究, 并取得较好的效果。但是, 由于啤酒酵母菌体机械强度低、化学稳定性弱, 给实际工业应用带来一定困难, 从而影响铀吸附的效果。

纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  作为一种磁性纳米微粒, 具有较高的比表面积和表面活性, 极易与菌类细胞表面的羟基、羧基、磷酰基、硫酸脂基和酰胺基相结合而趋于稳定<sup>[11-12]</sup>。本文作者为了增强啤酒酵母菌体机械强度和化学稳定性, 针对纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  微粒具有顺磁性以及生物兼容性强的特点, 尝试将其与啤酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*, SC)进行负载, 得到新型铀吸附剂——纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  负载啤酒酵母菌(Nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  loading *saccharomyces cerevisiae*, NFSC), 并从其吸附性能影响因素、吸附动力学等方面, 研究分析该吸附剂对含铀废水中铀的吸附性能和机理。

## 1 实验

### 1.1 主要仪器和设备

CL-32L 高压蒸汽灭菌器, 180 和 75  $\mu\text{m}$  标准筛, KDM 型调温电热套, 循环式多级超声波分散机, PHS-3C 型精密 pH 计, SHB-III 循环水式真空泵, 9800 型离心机, 78-1 型磁力加热搅拌器, DF205 电热鼓风干燥箱, JSM-6360LV 型高低真空扫描电镜(含 EDAX 能谱仪)。

### 1.2 主要材料和试剂

啤酒酵母菌(取自于湖南省衡阳燕京啤酒厂), 经预处理后储存备用。铀标准溶液采用文献[13]方法配制(根据实验需要稀释成对应浓度)。 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  及其他试剂均为分析纯。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 啤酒酵母菌的预处理

将取自湖南省衡阳市燕京啤酒厂的废弃啤酒酵母菌丝体用 180  $\mu\text{m}$  的筛子筛分, 将筛下产品研磨后进行高压蒸汽灭菌 45 min, 用蒸馏水洗涤、静置至上层为清液为止, 经离心(6 000 r/min, 30 min)收集菌体, 而后再离心, 再洗涤, 置冰箱(4  $^{\circ}\text{C}$ ) 中冷冻得到啤酒酵母菌体, 储存备用。

### 1.3.2 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性微粒制备

称取 27.14 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  于烧杯中, 加 50 mL 蒸馏水并微热搅拌使其溶解。称取 16.68 g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  和 2.0 g 十六烷基三甲基溴化铵于锥形瓶中, 加入 40 mL 的正丁醇和 16 mL 的正辛烷, 将配制的  $\text{FeCl}_3$  溶液转入其中, 放入磁子, 磁力搅拌约 15 min 至形成均一透明的暗红色溶液, 称为 A 液。

称取 32.0 g NaOH 和 2.0 g 十六烷基三甲基溴化铵于锥形瓶中, 加入 40 mL 的正丁醇、16 mL 的正辛烷和 100 mL 蒸馏水, 磁力搅拌约 10 min 至形成均一的乳白色溶液, 称为 B 液。

将 A 液转入到 500 mL 的三口瓶中, 中速电动搅拌 15 min 后将 B 液迅速转入到该三口瓶中与 A 液混合反应, 立即密闭装置, 用循环水式真空泵进行抽真空(负压大于 0.85 MPa), 并保持恒温 70  $^{\circ}\text{C}$  左右水浴加热, 加快搅拌速度。待反应 3 h 后, 用蒸馏水洗涤沉淀 3 次后置于 80  $^{\circ}\text{C}$  的恒温鼓风干燥箱中烘干, 研磨, 过 75  $\mu\text{m}$  筛, 储存备用。

### 1.3.3 纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 磁性微粒负载啤酒酵母菌

称取 15 g 试验制得的啤酒酵母菌于 1 000 mL 的烧杯中, 用蒸馏水浸泡 5 h, 得到啤酒酵母菌的悬浮液, 调节 pH 值为 5.0。将试验制得的纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒超声分散在啤酒酵母菌的悬浮液中, 室温下电动搅拌 30 min, 然后静止使之沉降, 倾去上清液, 经离心(8 000 r/min) 30 min, 得到纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  负载啤酒酵母菌吸附剂(NFSC)。

### 1.3.4 吸附实验

在 250 mL 锥形瓶中盛装不同浓度的铀标准溶液, 用 HCl 和 NaOH 调节溶液 pH, 根据实验要求, 加入一定量的 NFSC, 置于恒温水浴摇床内进行恒温振荡吸附, 反应后在 8 000 r/min 离心分离 10~15 min, 取上清液, 用三氯化钛还原/钒酸铵氧化滴定法测定铀的剩余浓度, 并根据吸附前后溶液中铀的浓度计算吸附剂 NFSC 对铀的吸附率  $P$ 。

吸附率  $P$  按照下式计算:

$$P = \frac{\rho_0 - \rho_i}{\rho_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P$  为吸附率, %;  $\rho_0$  为吸附前铀的质量浓度, mg/L;  $\rho_i$  为吸附时刻  $i$  时铀的质量浓度, mg/L。

#### 1.4 吸附机理分析实验

在样品台贴上导电胶, 用镊子分别夹取未吸附铀和吸附铀后的 NFSC 置于导电胶上, 干燥, 喷金, 在扫描电镜上观察和摄取 NFSC 的显微图像, 并用附带的 X 射线能谱仪对其进行表面成分的能谱分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂 NFSC 对铀吸附性能影响因素的分析

#### 2.1.1 溶液 pH 值对铀的吸附性能影响

研究表明, 溶液 pH 是影响生物吸附的一个重要的因素, 它不仅影响金属的形态和金属离子的结合位点, 而且还影响生物吸附剂表面功能团的结构与性能<sup>[14]</sup>。在铀初始浓度为 60 mg/L, 吸附剂 NFSC 用量为 50 mg, 考察溶液 pH 值(pH 和 3、4、5、6、7、8 和 9)对铀的吸附性能影响曲线, 结果见图 1 所示。

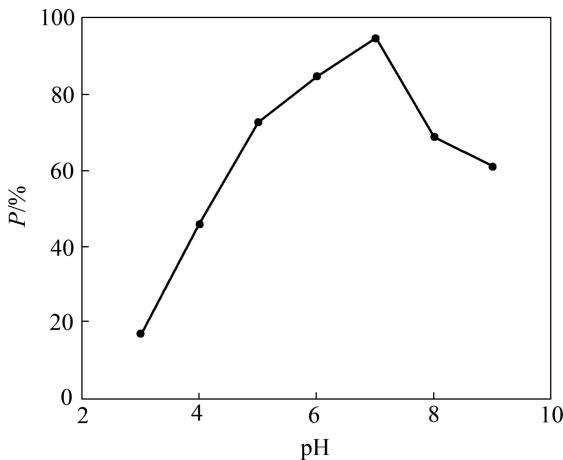


图 1 pH 对吸附铀的影响

Fig. 1 Effects of pH on adsorption of uranium

从图 1 可见, 当 pH 值增大时, NFSC 对铀的吸附率  $P$  也在增大。当 pH 值较低时, NFSC 对铀的吸附效果很差(pH 值在 3.0 时, 铀吸附率  $P$  仅为 11.8%), 主要是由于溶液中  $H^+$  浓度较高, 导致  $H^+$  与铀酰离子产生竞争吸附, 影响 NFSC 对铀的吸附效果。当 pH 值较高时,  $H^+$  浓度降低, NFSC 对铀的吸附逐渐占优势, 吸附率逐渐增大, pH 值为 7.0 时, 铀吸附率  $P$  最高(达 95%); 但是当 pH 值进一步升高时( $pH > 8$  时),  $UO_2^{2+}$  将会发生水解形成  $UO_2(OH)_2$  沉淀, 不利于 NFSC 对铀的吸附作用。因此, NFSC 对铀的吸附最佳 pH 值为 7.0。

#### 2.1.2 铀初始浓度对铀的吸附性能影响

溶液的化学状态是决定生物吸附效率的重要因素, 除 pH 外, 铀的初始浓度也是溶液化学状态的重要方面<sup>[15]</sup>。在 NFSC 加入量为 50 mg, pH=7.0 的条件下, 考察不同初始铀浓度( $\rho$  为 60、70、80、90、100、110 和 120 mg/L)对铀吸附性能的影响曲线, 结果见图 2 所示。

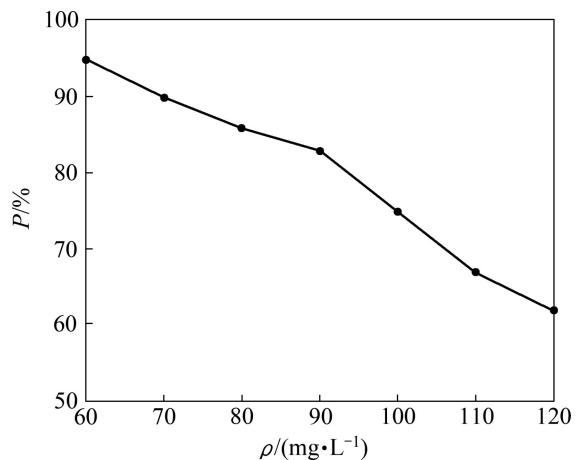


图 2 铀初始浓度对吸附铀的影响

Fig. 2 Effects of initial concentration of uranium on adsorption of uranium

由图 2 可以看出, 随铀初始浓度的增加, 吸附剂 NFSC 对铀的吸附率几乎呈线性下降。这主要是由于相同质量 NFSC 存在的实验条件下, 铀初始浓度较低时, 铀酰离子与吸附剂 NFSC 充分接触, 所有的铀酰离子均可与 NFSC 发生吸附作用, 因此, 在初始浓度为 60 mg/L 时, 铀的吸附率达 95.2%。但是吸附剂的吸附位点是有限的, 当吸附达到平衡时, 吸附位点达到饱和, 此时铀的初始浓度再提高, 相反铀的吸附率则降低。从图 3 还可以看出, 铀的初始浓度低于 100 mg/L 时, 铀的吸附率均在 75% 以上, 说明吸附剂 NFSC 适宜处理低浓度含铀废水, 且效果较好。

#### 2.1.3 吸附剂 NFSC 加入量对铀的吸附性能影响

在铀初始浓度为 60 mg/L 的溶液中加入不同质量吸附剂 NFSC( $m$  为 10、20、30、40、50、60 和 70 mg), 调节溶液 pH 为 7.0 的实验条件下, 考察不同质量吸附剂 NFSC 对铀的吸附性能影响曲线, 结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 吸附剂 NFSC 对铀的吸附率随 NFSC 用量的增加而提高, 在 50 mg 时, 出现最大值, 铀吸附率  $P$  达 98.1%。但是, 当吸附剂 NFSC 用量大于 50 mg 时, 铀吸附率趋于稳定。这主要是因为随吸附剂用量增加, 相应地增加了吸附活性位点, 从而使铀吸附率上升; 当吸附剂用量进一步增加时, 可能由于溶液中离子向吸附剂表面吸附时受阻, 从而使吸附

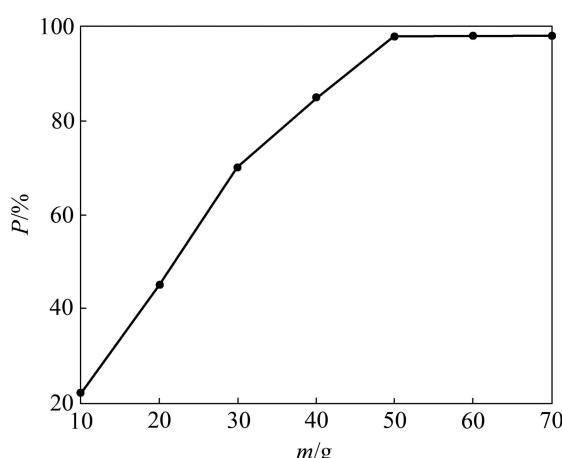


图3 NFSC加入量对铀的吸附性能影响

Fig. 3 Effects of NFSC mass on adsorption of uranium

趋于平衡, 铀吸附率趋于稳定, 因此, NFSC的最佳用量选择为 50 mg。

#### 2.1.4 吸附剂 NFSC 粒径对铀的吸附性能影响

取铀初始质量浓度为 60 mg/L 的标准溶液 200 mL, 调节 pH=7.0, 分别加入不同粒径的 NFSC 各 50 mg 条件下, 考察不同粒径( $d$  为 4、6、8、10、12、14 和 16 nm)的吸附剂 NFSC 对铀的吸附性能影响曲线, 结果如图 4 所示。

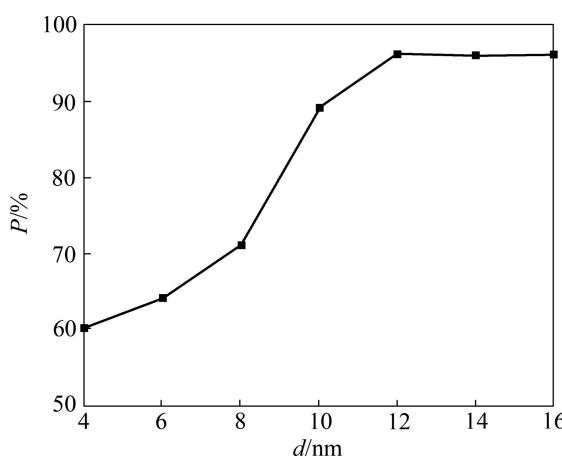


图4 NFSC粒径对铀的吸附性能影响

Fig. 4 Effects of particle size of NFSC on adsorption of uranium

由图 4 可以看出, 当吸附剂 NFSC 的粒径为 12 nm 时, 吸附剂 NFSC 对铀的吸附率最大, 达 96%且吸附速度最快; 而吸附剂 NFSC 粒径在 16 nm 时, 吸附剂 NFSC 对铀的吸附率为 54%。因此, 吸附剂 NFSC 的最佳粒径为 12 nm。这是由于纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与啤酒酵母菌在负载以后得到吸附剂 NFSC, 其结构更加规则, 机械强度和化学稳定性更好。

## 2.2 吸附剂 NFSC 对铀的吸附机理分析

### 2.2.1 吸附剂 NFSC 对铀的吸附动力学

吸附动力学是用来描述吸附剂对金属离子的吸附速率, 该速率决定了吸附的平衡时间。为进一步研究吸附剂 NFSC 对铀的吸附动力学特性, 本研究在铀初始质量浓度为 60 mg/L, 吸附剂 NFSC 加入量为 50 mg, 吸附剂 NFSC 的粒度为 106  $\mu\text{m}$  以及铀溶液 pH 值为 7.0 的条件下, 采用准一级和准二级反应动力学模型(表 1 所列)对吸附剂 NFSC 吸附铀的时间与吸附量之间的关系进行拟合, 拟合结果见表 2。

表1 吸附动力学模型及方程

Table 1 Kinetic models and equations of adsorption

| Kinetic model       | Kinetic equation                          |
|---------------------|---|
| Pseudo-first-order  | $\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - (K_1/2.303)t$ |
| Pseudo-second-order | $t/q_t = (K_2 q_e^2)^{-1} + t/q_e$        |

表2 NFSC吸附铀的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of uranium adsorption by NFSC

| Pseudo-first-order    |                                   | Pseudo-second-order |   |                                   |         |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|---|-----------------------------------|---------|
| $K_1/\text{min}^{-1}$ | $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $R^2$               | $K_2/\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ | $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ | $R^2$   |
| 0.032 2               | 3.025 8                           | 0.925 5             | 0.0588 7  | 6.158 4                           | 0.999 6 |

从表 2 可以看出, 准二级动力学模型对 NFSC 吸附铀过程的拟合优于准一级动力学模型, 通过  $t/q_t$  对  $t$  进行准二级拟合, 得到 NFSC 吸附铀的拟合准二级动力学模型:  $t/q_t = 0.162 3 t + 0.436 2$ , 相关系数  $R^2 = 0.999 6 \approx 1$  较大, 且由拟合准二级动力学模型获得的理论平衡吸附量(6.158 4 mg/g)与实验所得的平衡吸附量(5.997 4 mg/g)吻合较好, 表明表面吸附是动力学控制的主要步骤。出现这一现象的主要原因是纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性微粒与啤酒酵母菌对铀产生了协同吸附效果。

### 2.2.2 吸附剂 NFSC 对铀的吸附等温线

吸附等温线用来描述吸附剂对金属离子的吸附机理。本研究采用常用的 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温线(见表 3)来拟合吸附剂 NFSC 对铀的等温吸附过程, 拟合结果见表 4。

表3 吸附等温线模型及方程

Table 3 Isotherm models and equations of adsorption

| Isotherm model | Isotherm equation                                    |
|----------------|--|
| Langmuir       | $\rho_e/q_e = (K_L q_\infty)^{-1} + \rho_e/q_\infty$ |
| Freundlich     | $\lg q_e = \lg K_f + \lg(\rho_e/n)$                  |

表4 NFSC 吸附铀的等温线参数

Table 4 Kinetic parameters of uranium adsorption by NFSC

| T/K | Langmuir model         |                             |         | Freundlich model       |         |         |
|-----|------------------------|-----------------------------|---------|------------------------|---------|---------|
|     | $K_L/(L\cdot mg^{-1})$ | $q_\infty/(mg\cdot g^{-1})$ | $R^2$   | $K_F/(mg\cdot g^{-1})$ | $n$     | $R^2$   |
| 300 | 0.019 8                | 1.889 7                     | 0.949 7 | 0.0398 7               | 4.511 2 | 0.993 9 |
| 310 | 0.015 7                | 2.212 1                     | 0.922 1 | 0.0511 2               | 3.852 1 | 0.992 5 |
| 320 | 0.012 1                | 2.997 8                     | 0.909 8 | 0.751 4                | 3.025 7 | 0.991 7 |

研究表明, Langmuir 吸附等温线假设吸附剂对金属离子的吸附为均一的单分子层吸附(单层覆盖), 且被吸附的离子间无相互作用。Freundlich 吸附等温线假设吸附剂对金属离子的吸附为非均一的多分子层吸附(多层吸附), 且被吸附的离子的量随着溶液浓度的增加而增大<sup>[14]</sup>。从表 4 可以看出, Langmuir 和 Freundlich 等温线模型均能较好地拟合 NFSC 对铀的吸附, 体现了单层覆盖(Langmuir 等温线模型)与多层吸附(Freundlich 等温线模型)相结合的吸附模式。从相关系数  $R^2$  看, Freundlich 等温线比 Langmuir 等温线拟合的更好, 且在 Freundlich 等温线模型中,  $1/n$  值均小于 0.5, 说明 NFSC 对铀的吸附是自发的, 也对吸附过程非常有利。另外,  $q_\infty$  随温度升高逐渐增大, 说明升温有利于 NFSC 对铀的吸附。

### 2.2.3 扫描电镜(SEM)分析

SEM 可用于表面形貌的观察, 样品不必研磨和抛光, 可以直接观察样品的表面结构。图 5 所示为吸附剂

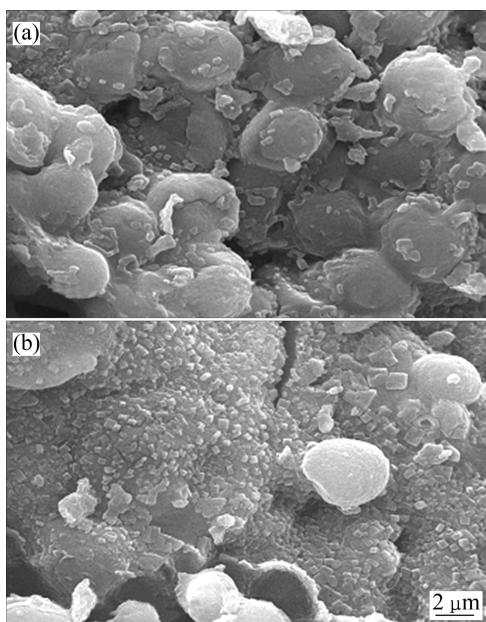


图5 NFSC 吸附铀前后的 SEM 像

Fig.5 SEM images before(a) and after(b) adsorption of uranium on NFSC

NFSC 吸附铀前后的 SEM 像。由图 5(a)可见, 吸附形状不规则, 表面凹凸不平, 具有较多的孔隙, NFSC 吸附提供了较大的表面积和更多的吸附位点。由图 5(b)可看出, NFSC 吸附铀后, NFSC 的表面形态发生了变化, 空隙明显减少, 且仍存在一定的团聚现象, 这表明 NFSC 吸附了一定量的铀, 且吸附剂 NFSC 表面的功能基团参与对铀的吸附作用, 说明存在化学吸附。

### 2.2.4 能谱图(EDS)分析

图 6 所示为吸附剂 NFSC 吸附铀前后的能谱图。由图 6 可见, 吸附剂 NFSC 主要含有 P、O、Fe 3 种元

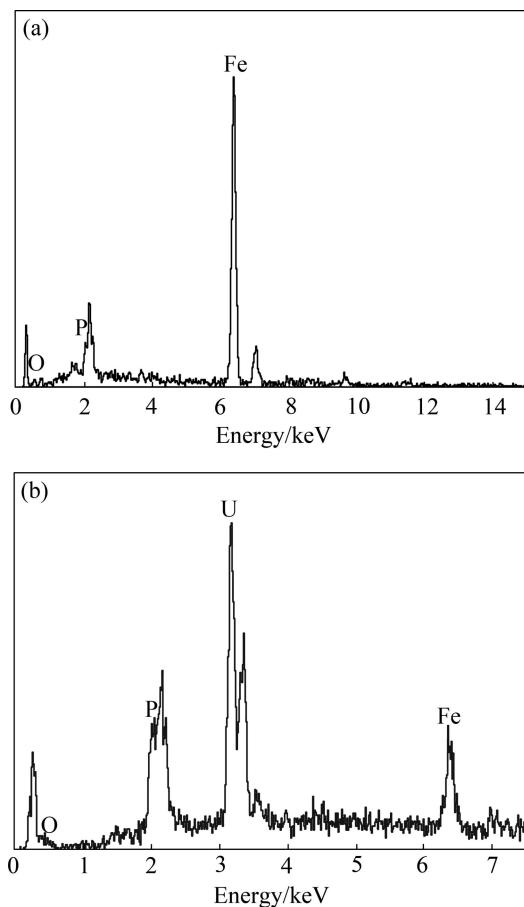


图6 NFSC 吸附铀前、后的 EDS 谱

Fig.6 EDS spectra before(a) and after(b) adsorption of uranium on NFSC

素。对比吸附前后的能谱图可知, NFSC 吸附铀后 Fe 元素峰明显降低, 可能是由于吸附过程中存在离子交换而使 Fe 元素峰明显降低, 说明存在物理吸附。同时, NFSC 吸附铀后, 铀元素的峰强出现, 这就说明吸附剂 NFSC 对铀的吸附效果明显。

### 3 结论

1) 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  负载啤酒酵母菌(NFSC)对铀具有协同吸附性能, 吸附效果较好。NFSC 吸附铀的最佳条件如下: pH 值为 7.0, 铀初始浓度为 60 mg/L, NFSC 加入量为 50 mg 以及 NFSC 的最佳粒径为 12 nm。

2) NFSC 吸附铀的行为均能基本符合 Langmuir 和 Freundlich 等温线模型, 体现了单层覆盖与多层吸附结合的吸附模式, 吸附率随温度升高而增大, 为自发进行的吸热反应; 吸附过程符合准二级动力学模型, 其线性相关系数高达 0.999 6。

3) 通过对 NFSC 吸附铀前后的扫描电镜和能谱分析, NFSC 因吸附一定量的铀而发生表面形态的变化, 表明吸附剂 NFSC 对铀的吸附效果明显。同时, NFSC 对铀的吸附过程中存在物理吸附和化学吸附, 属于混合吸附类型。

### REFERENCES

- [1] RODRIGUEZ A T, VELASCO A I, FIELD J, ALVAREZ R S. Anaerobic bioremediation of hexavalent uranium in groundwater by reductive precipitation with methanogenic granular sludge[J]. Water Research, 2010, 44: 2153–2162.
- [2] 聂小琴, 丁德馨, 李广悦, 高斌, 吴彦琼, 胡南, 刘玉龙. 某铀尾矿库土壤核素污染与优势植物累积特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(6): 719–725.  
NIE Xiao-qin, DING De-xin, LI Guang-yue, GAO Bin, WU Yan-qiong, HU Nan, LIU Yu-long. Soil radionuclide contamination and radionuclide accumulation characteristics of competitive plants in a uranium tailings repository in South China[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23 (6): 719–725.
- [3] WANG Jing-song, HU Xin-jiang, LIU Yun-guo, XIE Shui-bo, BAO Zheng-lei. Biosorption of uranium (VI) by immobilized *Aspergillus fumigatus* beads[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 504–508.
- [4] 冯媛, 易发成. 稻壳对铀吸附性能的研究[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(2): 0161–0167.
- [5] FENG Yuan, YI Fa-cheng. Adsorptive property of rice husk for uranium[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(2): 0161–0167.
- [6] RODRIGUES SILVA J I, de MELO FERREIRA A C, da COSTA A C A. Uranium biosorption under dynamic conditions: Preliminary tests with *Sargassum filipendula* in real radioactive wastewater containing Ba, Cr, Fe, Mn, Pb, Ca and Mg[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, 279(3): 909–914.
- [7] BAI Jing, YAO Hui-jun, FAN Fang-li, LIN Mao-sheng, ZHANG Li-na, DING Hua-jie, LEI Fan, WU Xiao-lei, LI Xiao-fei, GUO Jun-sheng, QI Zhi. Biosorption of uranium by chemically modified *rhodotorula glutinis*[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 969–973.
- [8] 聂小琴, 丁德馨, 李广悦, 吴彦琼, 胡劲松, 刘玉龙, 胡南. 铀矿浸出液胁迫对种子萌发和幼苗生长及抗氧化酶影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 32(2): 26–31.  
NIE Xiao-qin, DING De-xin, LI Guang-yue, WU Yan-qiong, HU Jing-song, LIU Yu-long, HU Nan. Effects of stress from uranium pregnant solution on seed germination and early growth and antioxidant enzymes of the seedlings of 4 crops[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(2): 26–31.
- [9] 夏良树, 谭凯旋, 王晓, 郑伟娜. 铀在榕树叶上的吸附行为及其机理分析[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(3): 0278–0281.  
XIA Liang-shu, TAN Kai-xuan, WANG Xiao, ZHENG Wei-na. Adsorption behavior of Uranium and mechanism analysis on banyan leave[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(3): 0278–0281.
- [10] XIE Shui-bo, ZHANG Chun, ZHOU Xing-huo, YANG Jing, ZHANG Xiao-jian, WANG Jing-song. Removal of uranium (VI) from aqueous solution by adsorption of hematite[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 100: 162–166.
- [11] WANG Jing-song, HU Xin-jiang, WANG Jie, BAO Zheng-lei, XIE Shui-bo, YANG Jin-hui. The tolerance of *rhizopus arrhizus* to U(VI) and biosorption behavior of U(VI) onto *R. arrhizus*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 51: 19–23.
- [12] 牛艳, 关晓辉, 尹荣. 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的制备及其强化生物聚合铁絮凝性能的研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(7): 0018–0021.  
NIU Yan, GUAN Xiao-hui, YIN Rong. Preparation of nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and study of its improvement of flocculation effect of bio-polymeric ferric sulfate[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(7): 0018–0021.
- [13] 关晓辉, 赵洁, 秦玉春. 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的制备及其辅助吸附重金属离子的特性[J]. 环境化学, 2005, 24(4): 409–412.  
GUAN Xiao-hui1, ZHAO Jie, QIN Yu-chun. Preparation of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nano-particles and its character of auxiliary adsorption to heavy metal ions[J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(4): 409–412.

- 409–412.
- [13] 王 晓, 夏良树, 郑伟娜, 谭凯旋. 改性麦秸对 U(VI)的吸附性能及机理[J]. 过程工程学报, 2010, 10(6): 1084–1090.  
WANG Xiao, XIA Liang-shu, ZHENG Wei-na, TAN Kai-xuan. Adsorption behavior and mechanism of Uranium( VI ) on modified wheat straw[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(6): 1084–1090.
- [14] 吴云海, 米娴妙, 冯仕训, 李 斌. 啤酒酵母吸附 Cr(VI)的动力学及热力学研究[J]. 应用化工, 2010, 39(4): 532–537.  
WU Yun-hai, MI Xian-miao, FENG Shi-xun, LI Bin. Equilibrium and kinetics of Cr( VI ) biosorption by *saccharomyces cerevisiae*[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(4): 532–537.
- [15] 杨沛珊, 于艳卿, 李超峰, 邹晓兰, 王新亭, 朱校斌. 硅胶固定的褐藻渣对重金属 Cu<sup>2+</sup>吸附特征研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(2): 044–051.  
YANG Pei-shan, YU Yan-qing, LI Chao-feng, ZOU Xiao-lan, WANG Xin-ting, ZHU Xiao-bin. Biosorption of Cu<sup>2+</sup> by silica-gel-immobilized brown algae residue[J]. Marine Sciences, 2011, 35(2): 044–051.

(编辑 李艳红)