

Doi:10.20062/j.cnki.CN37-1453/N.2023.01.012

# 纳米金负载的磁性微球吸附汞的研究

甄博如<sup>1</sup>,张媛媛<sup>2</sup>,张聪<sup>2</sup>,张升晓<sup>3</sup>

(1. 华能山东电力设计有限公司,山东烟台 264002;2. 山东省烟台生态环境监测中心,山东烟台 264000;  
3. 鲁东大学 化学与材料科学学院,山东烟台 264039)

**摘要:**采用溶剂热法制备纳米四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ),其粒径大约在 200~300 nm 之间,利用聚多巴胺(PDA)对其进行包覆,再在其上原位还原生成金纳米颗粒,制得  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}@ \text{Au}$  复合材料,然后灼烧碳化制得  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$ ,考察其对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附性能。结果表明  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$  在溶液 pH 为 1~7 的范围内对  $\text{Hg}^{2+}$  都有较高的吸附容量,其等温吸附符合 Langmuir 吸附模型,最大吸附容量为  $473.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,动力学数据符合伪二级动力学模型。该研究为吸附去除  $\text{Hg}^{2+}$  开辟了新的道路。

**关键词:**四氧化三铁;金纳米颗粒; $\text{Hg}^{2+}$ ;吸附

**中图分类号:**X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2023)01-0083-06

重金属是一类有高毒性和致癌性的污染物,重金属离子能够经过食物链富集在生物体内,严重威胁其健康,其中汞毒性最大,汞离子可以在人体内富集,引起严重的健康问题<sup>[1]</sup>。随着工业化进程的不断推进,环境中汞的含量也在一直增多,其对环境的污染和人体健康的危害格外受重视<sup>[2]</sup>。目前去除水体中汞离子的办法包括化学沉淀法、膜分离法、电解法、离子交换法、生物法以及吸附法等<sup>[3]</sup>。吸附法具有高效、成本低、易操作、不易构成二次污染等优点,是其中最具有前景,应用最广泛的一种方法。

近年来兴起的磁性纳米四氧化三铁( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )不但具有一般纳米材料比表面积较高、吸附性能较强的特点,而且还具有顺磁性,借助外磁场可以很容易实现固液分离,因此在吸附和环境修复领域具有很大的应用潜力<sup>[4-5]</sup>。然而单纯的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  由于缺少特异性的官能团,对汞的吸附性能较弱。经过包覆和修饰的磁性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  用于汞的吸附得到广泛研究<sup>[6-8]</sup>。金可以和汞生成金汞齐,可以实现对汞的高效吸附。本研究通过多巴胺的自聚合反应在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  包覆一层聚合多巴胺(PDA),而 PDA 具有较强的还原性,可以将氯金酸原位还原

为金纳米颗粒<sup>[9]</sup>,通过高温碳化增加其稳定性,得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$  材料,研究该材料对溶液中汞的吸附性能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器及试剂

六水三氯化铁( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )和三羟甲基氨基甲烷(Tris)购自国药集团化学试剂有限公司(北京,中国),盐酸多巴胺来自于阿拉丁试剂有限公司(上海,中国),乙二醇和氢氧化钠来自于莱阳经济技术开发区精细化工厂(山东烟台,中国),硝酸汞由姜堰市环球试剂厂(江苏泰州,中国)提供。

采用山东省龙口市先科仪器有限公司(山东烟台,中国)的开启式管式炉煅烧材料,采用原子吸收分光光度计(瓦里安 AA240,美国)测定溶液中的  $\text{Hg}^{2+}$  浓度。采用透射电子显微镜(Tecna G20,美国 FEI 公司)和扫描电子显微镜(SU8020,日本 Hitachi 公司)观察材料的粒径、形貌和表面结构;X 射线衍射仪(D/max-2500VPC,日本

收稿日期:2022-09-20;修回日期:2022-11-03

基金项目:国家自然科学基金(21207059);烟台市科技计划项目(2022XDRH009)

通信作者简介:张升晓(1977—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为环境分析。E-mail:lduzsx@ldu.edu.cn

Rigaku 公司)用于表征材料的晶体结构;采用振动磁强计(MPMS-XL-7,美国 Quantum Design 公司)测定材料的磁滞回线。

### 1.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$ 的制备

取 2.0 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 5.4 g 无水 NaAc, 溶于 60 mL 乙二醇中, 搅拌至澄清。置于高压反应釜中, 在 200 °C 下反应 24 h 后冷却至室温取出。借助 Rb-Fe-B 磁铁, 分别用乙醇、蒸馏水清洗分离, 乙醇清洗两次, 蒸馏水洗三次, 最后置于真空干燥箱 40 °C 烘干后得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。称取制备的

$\text{Fe}_3\text{O}_4$  500 mg, 分散到 200 mL 纯水中, 加入 600 mg Tris 和 600 mg 多巴胺, 在冰水浴下混合, 超声 10 min 后, 室温搅拌 24 h。反应完毕后, 蒸馏水洗涤 5 次, 烘干得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$ 。

取 0.7 g  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  超声分散到 200 mL 蒸馏水中, 再加入 0.97 mL  $\text{HAuCl}_4$  溶液 ( $0.1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ), 在室温下机械搅拌 12 h 后, 用去离子水和乙醇各清洗 3 次, 置于真空烘箱中烘干 12 h。干燥后在 Ar 气的保护下于 600 °C 灼烧 4 h, 在升温过程中控制升温速度  $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , 灼烧得  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料。该材料的制备流程图如图 1 所示。

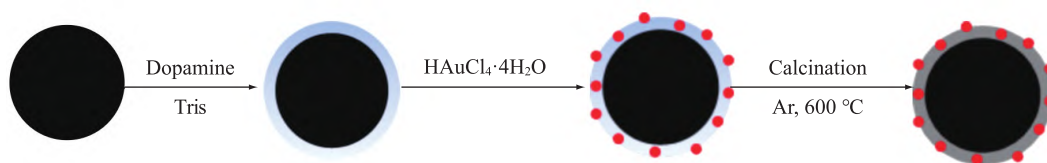


图 1  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  的制备流程图

Fig 1 The preparation route of  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$

### 1.3 吸附实验

吸附实验在 100 mL 聚丙烯瓶中进行, 溶液的体积保持在 25.00 mL。吸附剂的浓度设定为  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。用 HCl 和 NaOH 溶液将混合液 pH 调整为设定值, 最后在恒温振荡器中 25 °C 下振荡 5 h。将  $\text{Hg}^{2+}$  浓度设定在  $40 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围进行等温吸附研究, 调整溶液 pH 为 1~7, 用来考察酸碱度对  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  吸附  $\text{Hg}^{2+}$  的影响, 在不同的时间间隔取样测定溶液中剩余的  $\text{Hg}^{2+}$  进行吸附动力学研究。吸附完成后, 将装溶液的容器置于磁铁上静置 5 min 后取上层清液, 用原子吸收分光光度计来检测剩余  $\text{Hg}^{2+}$  的浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吸附剂表征

用扫描电镜和透射电镜分析  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料的表面形貌、粒径大小及 Au 负载情况等。从表征结果如图 2 所示, 扫描电镜(图 2 (a), (b), (c))的结果表明,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒呈球形且分散均匀, 直径约为 160~200 nm, 但  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  表面粗糙。包覆 PDA 之后的  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$

材料表面光滑, 直径也增大到约为 220~260 nm 左右。将  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  材料在氯金酸溶液中反应并煅烧后, 可以清晰地观察到表面负载上的粒径均匀的 Au 纳米颗粒。从透射电镜表征(图 2 (d), (e), (f))可以看出, 在  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  表面包覆 PDA 后, 形成了规整的且均匀的 PDA 包覆层, 制备出了核壳结构的  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  颗粒, 厚度约为 60~80 nm, 粒径均匀, 轮廓清晰,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料可以清晰观察到 Au 纳米颗粒镶嵌在碳层, 粒径约为 20 nm, 粒径大小均一且负载量较多, 无明显的局部聚集现象。电镜表征结果说明, 负载金的磁性炭材料  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  被成功制备。

采用 X 射线衍射仪考察  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料的晶体结构, 由图 3(a) 可以看出,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  的衍射峰的位置相同, 在  $2\theta$  为  $30.12^\circ$ 、 $35.38^\circ$ 、 $43.05^\circ$ 、 $53.39^\circ$ 、 $56.91^\circ$ 、 $62.54^\circ$  处出现了较强的衍射峰, 其分别对应立方相  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (JCPDS No. 851436) 的 (220)、(311)、(400)、(422)、(511)、(440) 晶面<sup>[10-12]</sup>。 $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料在  $2\theta$  为  $38^\circ$ 、 $43^\circ$ 、 $65^\circ$  和  $78^\circ$  处有 4 个新的衍射峰, 分别是  $\text{Au}^0$  (111),  $\text{Au}^0$  (200),  $\text{Au}^0$  (220) 和  $\text{Au}^0$  (311) 晶面 (JCPDS card No. 04784)<sup>[13-14]</sup>。由 XRD 分析结果可以看出, 纳米 Au 已经成功以零价金颗粒的形式负载到了

材料上,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料成功制备, 与电镜结果分析一致。

图 3(b) 为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  的磁滞回线图。结果表明  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料的矫顽磁性和剩磁基本为零,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料均没有磁滞现象, 说明  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  都具有典型的超顺磁性。  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  的最高饱和磁强度分别

为 78.12、37.95 和 43.58  $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  包覆了无磁性的聚合物, 使其最高饱和磁强度比  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  低,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  比  $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA@Au$  的饱和磁强度略有增大, 是因为包覆材料经过高温炭化部分分解。  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料具有较高的饱和磁强度和良好的超顺磁性, 因而可以方便地将降解了污染物之后的催化剂, 在磁铁的辅助下轻松地分离出来, 有利于  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  材料的回收与重复利用。

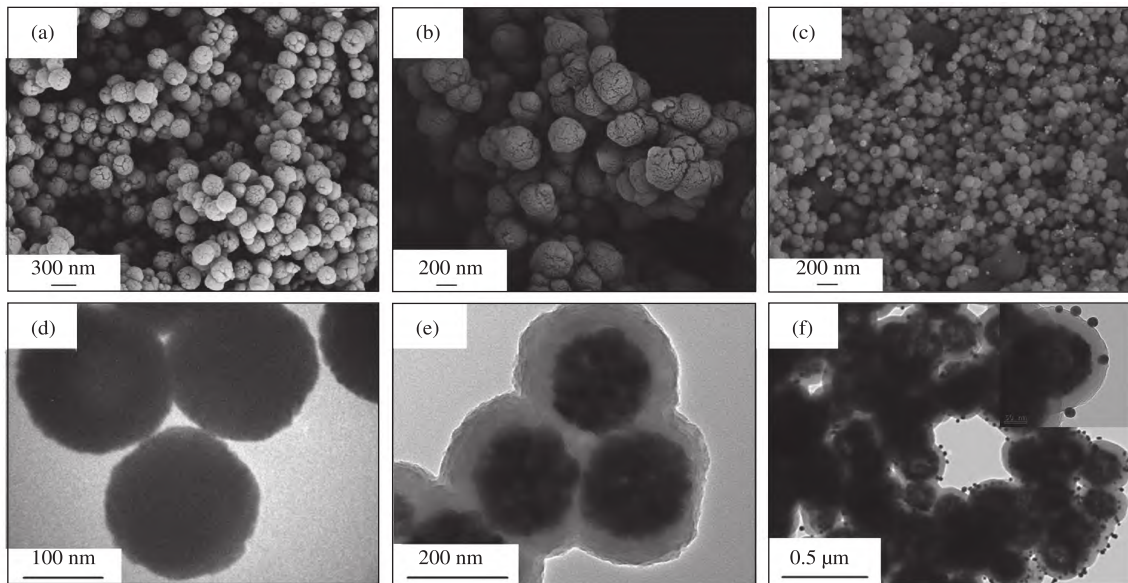


图 2  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  的扫描电镜图 (a), (b), (c) 和透射电镜图 (d), (e), (f)

Fig. 2 SEM images (a), (b), (c) and TEM images (d), (e), (f) of the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$

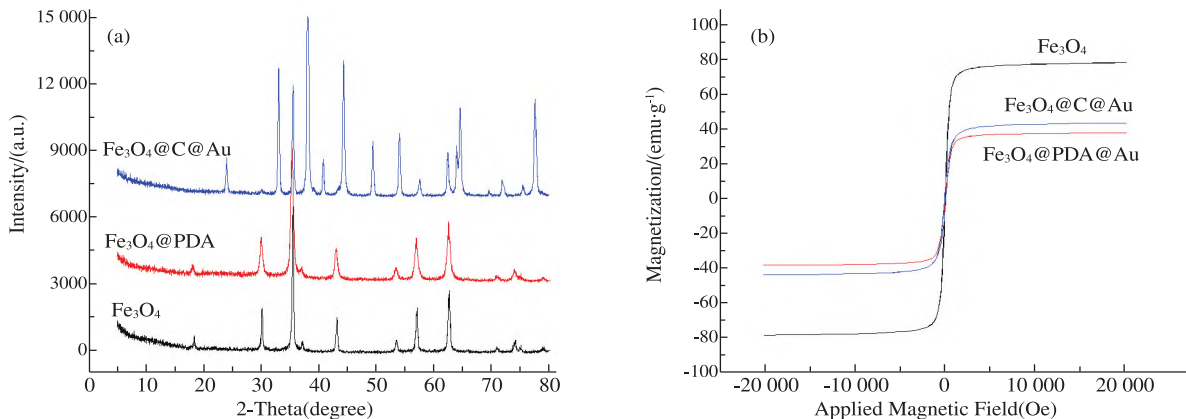


图 3  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  的 X 射线衍射曲线 (a) 和磁滞回线 (b)

Fig. 3 XRD curves (a) and magnetization hysteresis loops (b) of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4@PDA$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$

## 2.2 吸附实验结果分析

### 2.2.1 溶液 pH 值对吸附的影响

溶液 pH 对  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  吸附  $\text{Hg}^{2+}$  的影响

见图 4。如图 4 所示, 随溶液 pH 由 1 上升到 3, 其吸附容量上升比较明显, 由  $327 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  上升至  $404 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 随后溶液 pH 继续提高, 吸附容量上升缓慢, 到 pH 为 6.5 时吸附容量达到最高, 为

434  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在低的溶液 pH 下吸附容量降低,可能是由于在溶液酸度较高时材料表面质子化带上正电荷,与带正电荷的  $\text{Hg}^{2+}$  之间的静电斥力使其难以接触而相互作用,当溶液 pH 升高后,材料表面脱质子化带上负电荷,有利于金纳米颗粒和  $\text{Hg}^{2+}$  相互作用。虽然酸度升高,吸附容量有所下降,但即使在溶液 pH 为 1 时,仍然保持了较高的吸附容量(327  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

### 2.2.2 等温吸附研究

$\text{Hg}^{2+}$  的初始浓度设为 40、80、100、120、160  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  对溶液中  $\text{Hg}^{2+}$  的平衡吸附数据如图 5(a) 所示,随着  $\text{Hg}^{2+}$  初始浓度升高,其吸附容量逐渐提升,最终基本达到平衡,采用 Langmuir 等温吸附方程式对等温吸附数据进行线性拟合<sup>[15]</sup>。Langmuir 方程线性形式为:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{\theta b} + \frac{C_e}{\theta}, \quad (1)$$

其中:  $C_e$  是溶液中剩余  $\text{Hg}^{2+}$  的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $q_e$  是平衡吸附容量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $\theta$  为最大吸附容

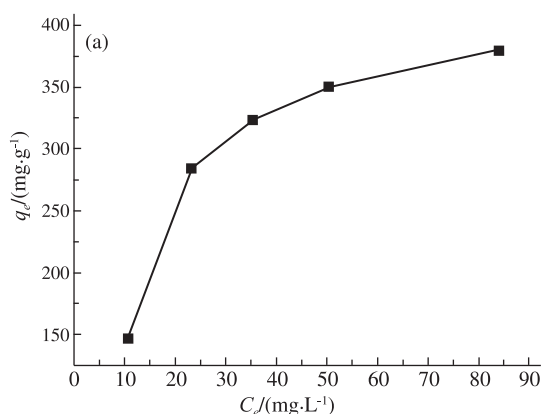


图 5  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  对  $\text{Hg}^{2+}$  吸附等温线(a)及朗格缪尔线性拟合(b)

Fig. 5 Adsorption isotherms (a) and Langmuir line fit (b) of  $\text{Hg}^{2+}$  adsorption on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$

### 2.2.3 吸附动力学研究

$\text{Hg}^{2+}$  初始浓度设定为 160  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶液 pH 设定为 6.5, 测定  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  对其的吸附量随时间的变化, 其曲线如图 6(a), 可以看出  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附量在一开始就快速上升, 随后上升缓慢, 最终基本达到平衡。使用拟二级动力学方程对吸附数据拟合<sup>[16]</sup>, 其线性方程如下:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{1}{q_e}t, \quad (2)$$

其中:  $k$  为吸附速率常数 ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $q_t$  为在一定的时间吸附的  $\text{Hg}^{2+}$  的量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $q_e$  为

量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $b$  是平衡吸附常数 ( $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$ )。其中  $\theta$  和  $b$  可通过  $C_e/q_e$  对  $C_e$  所做的线性拟合方程的斜率和截距计算得到。

$\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  对  $\text{Hg}^{2+}$  吸附朗格缪尔等温线拟合如图 5(b), 从图中看出拟合线性良好, 其线性相关系数为 0.983 6, 表明该吸附符合朗格缪尔吸附等温模型, 计算得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  对  $\text{Hg}^{2+}$  最大吸附量为 473.9  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 表明该材料在汞污染治理方面有很大的应用潜力。

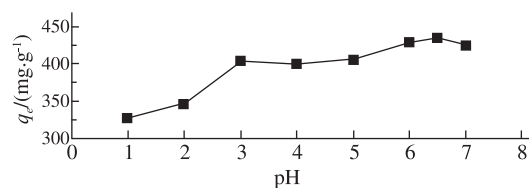
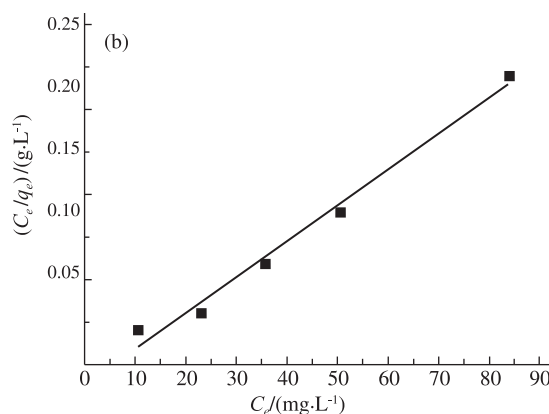


图 4 溶液 pH 对吸附剂  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  吸附金属离子  $\text{Hg}^{2+}$  的影响

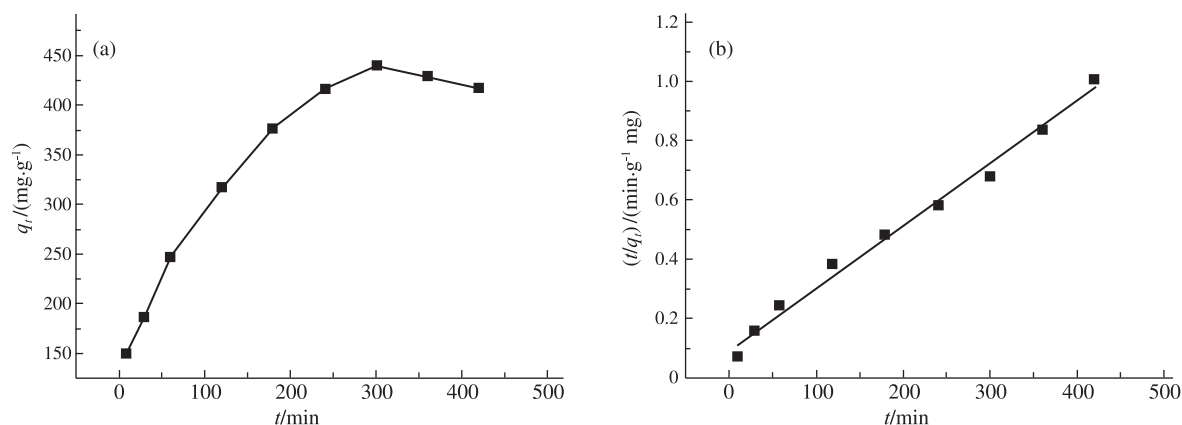
Fig. 4 Effect of solution pH on removal efficiencies of  $\text{Hg}^{2+}$  with  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  material



$\text{Hg}^{2+}$  的平衡吸附容量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $h$  为初始吸附速率 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $h$  的与  $q_e$  的关系如下:

$$h = kq_e^2 (t \rightarrow 0), \quad (3)$$

利用  $t/q_t$  对  $t$  做线性拟合, 从直线的斜率和截距能够计算得到  $k$  和  $h$  的值。图 6(b) 为拟二级动力学线性拟合图, 拟合出的相关参数如表 1 所示, 拟合曲线的线性相关系数  $R^2$  为 0.989 8, 显示出良好的线性,  $h$  和  $k$  的值均较高, 表明重金属离子  $\text{Hg}^{2+}$  在  $\text{Fe}_3\text{O}_4@C@Au$  上的初始吸附速率较快, 并且有较高的吸附容量。

图 6  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}@\text{Au}$  对  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附动力学数据(a)和拟二级动力学线性拟合曲线(b)Fig. 6 Adsorption kinetics data (a) and pseudo - second - order line fit (b) of  $\text{Hg}^{2+}$  on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}@\text{Au}$  material表 1  $\text{Hg}^{2+}$  在  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}@\text{Au}$  吸附的拟二级动力学拟合参数Tab. 1 Pseudo - second - order fit parameters for  $\text{Hg}^{2+}$  adsorption on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}@\text{Au}$ 

Pollutants	$k/(g \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$h/(mg \cdot g^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$R^2$
$\text{Hg}^{2+}$	$2.12 \times 10^{-3}$	471.70	0.989 8

### 3 结论

本研究以聚合多巴胺包覆纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 并通过原位还原氯金酸在其上负载 Au 纳米颗粒, 煅烧后得到  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}@\text{Au}$ , 将该材料用于水体中  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附, 结果表明即使在较高的酸度情况下也具有较高的吸附容量, 等温吸附研究拟合出的最大吸附容量为  $473.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 吸附动力学表明材料对  $\text{Hg}^{2+}$  具有较快的吸附速率。该研究开发了一种新的合成纳米金负载的磁性微球的方法, 为消除水体中汞污染提供了新的思路。

#### 参考文献:

- [1] INBARAJ B S, WANG J S, LU J F, et al. Adsorption of toxic mercury (II) by an extracellular biopolymer poly ( $\gamma$  - glutamic acid) [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 200 - 207.
- [2] PACYNA E G, PACYNA J M. Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995 [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2002, 137(1): 149 - 165.
- [3] FU F, WANG Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters; a review [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 407.
- [4] 石冬妮, 李慧玲, 滕然, 等.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  基类 Fenton 催化剂的改性及应用研究进展 [J/OL]. 工业水处理: 1 - 23 (2022 - 08 - 17) [2022 - 11 - 02]. DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2022 - 0492.
- [5] 朱海燕.  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  复合材料的制备及其对染料吸附性能研究 [J]. 化学研究与应用, 2022, 34(7): 1649 - 1654.
- [6] 曹静, 刘盛余, 杨杰, 等. 锰铁复合磁性材料制备及其对零价汞吸附性能研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3745 - 3752.
- [7] 朱鹤, 周超, 王钦, 等.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁性纳米氧化石墨烯制备及对汞 (II) 的吸附 [J]. 水处理技术, 2018, 44(1): 48 - 54.
- [8] SUN Y, GU Y P, LI X, et al. Synthesis of novel thiol-modified lysozyme coated magnetic nanoparticles for the high selective adsorption of  $\text{Hg}(\text{II})$  [J]. Reactive and Functional Polymers, 2022, 170: 105129.
- [9] XU Q, GAO T P, ZHANG S X, et al. Synthesis of gold nanoparticle-loaded magnetic carbon microsphere based on reductive and binding properties of polydopamine for recyclable catalytic applications [J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44: 16227 - 16233
- [10] YWE Y P, SHAMELI K, MIYAKE M, et al. Green synthesis of magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) nanoparticles using seaweed (*kappaphycus alvarezii*) extract [J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1): 276.
- [11] MITRA A, MOHAPATRA J, MEENA S S, et al. Verwey transition in ultrasmall-sized  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  octahedral  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118(33): 19356 - 19362.
- [12] XUAN S, WANG F, LAI J M, et al. Synthesis of biocompatible, mesoporous  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nano/microspheres with large surface area for magnetic resonance imaging and

- therapeutic applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 3(2): 237–244.
- [13] TRIPATHY P, RAM S, J. FECHT H. Gold nanoparticles from induced  $\text{Au}^{3+} \rightarrow \text{Au}^0$  reaction in polyvinyl alcohol molecules in presence of sucrose in hot water[J]. Plasmonics, 2006, 1(2/3/4): 121–127.
- [14] REDDY A N, ANJANEYULU K, BASAK P, et al. A simple approach to the design and functionalization of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – Au nanoparticles for biomedical applications [J]. Chempluschem, 2012, 77(4): 284–292.
- [15] ZHENG J, WANG Z W, MA J X, et al. Development of an electrochemical ceramic membrane filtration system for efficient contaminant removal from waters[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(7): 4117–4126.
- [16] 刘彪, 杨净, 薛田田, 等.  $\text{TiO}_2$  –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – ATP 吸附剂对 P(V) 的吸附动力学和热力学[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 68–73.

## Adsorption of Mercury by Gold Nanoparticles Supported Magnetic Carbon Microspheres

ZHEN Boru<sup>1</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>2</sup>, ZHANG Cong<sup>2</sup>, ZHANG Shengxiao<sup>3</sup>

(1. Hua'neng Shandong Power Design Co. LTD, Yantai 264002; 2. Ecological Environment Monitoring Center, Yantai 264000;  
3. School of Chemistry and Materials Science, Ludong University, Yantai 264039)

**Abstract:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles were prepared by solvothermal method, and its particle size was about 200 ~ 300 nm.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  was encapsulated by polydopamine (PDA), and then gold nanoparticles were modified by in-situ reduction to obtain  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{PDA}@ \text{Au}$ , and it was transformed into  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$  by calcination. The adsorption performance of  $\text{Hg}^{2+}$  on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$  was investigated. The results showed that the adsorption capacity of  $\text{Hg}^{2+}$  on  $\text{Fe}_3\text{O}_4@ \text{C}@ \text{Au}$  was high in the pH range of 1 ~ 7, and the isothermal adsorption data were in accordance with the Langmuir model, and the calculated maximum adsorption capacity was  $473.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . The kinetic adsorption data fitted well with the pseudo-second-order kinetic model. The study opens up a new way for the removal of  $\text{Hg}^{2+}$  by adsorption.

**Keywords:**  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; Au nanoparticle;  $\text{Hg}^{2+}$ ; adsorption

(责任编辑 李维卫)