

Fe₃O₄@碳/氧化石墨烯复合材料制备及染料吸附性能

吴日良¹, 刘云芳^{1,2*}, 任森¹, 石向辉^{1,2}, 迟伟东¹, 黄启谷^{1,2}, 喻长远³, 田小军³ (1.北京化工大学, 化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029; 2.北京化工大学, 碳纤维及功能高分子教育部重点实验室, 北京 100029; 3.北京化工大学生命科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 采用水热法合成了四氧化三铁@碳/氧化石墨烯(Fe₃O₄@C/GO)复合材料, 并利用 XRD、TEM、VSM 等对其结构与性质进行了表征, 进一步研究了其对水中染料的吸附性能。研究表明, Fe₃O₄ 比较均匀地分散在 GO 上; 在实验范围内, 随着 GO 用量、罗丹明 B 初始浓度或吸附温度的提高, Fe₃O₄@C/GO 复合材料对罗丹明 B 染料的饱和吸附量均相应地增加; 而且高 GO 用量条件下所制备的复合材料的吸附速率更快; 随着 pH 值在 2~11 范围内增加, 复合材料的饱和吸附量先增大后降低, pH 值为 7 时达到最大值。对于 GO 和 Fe₃O₄ 质量比为 0.8 的条件下所制备的 Fe₃O₄@C/GO 复合材料, 当罗丹明 B 初始浓度为 1000mg/L, 其饱和吸附量可达到 303.4mg/g。

关键词: 四氧化三铁; 碳; 氧化石墨烯; 染料; 吸附

中图分类号: X703.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2016)10-2981-07

Preparation and dye adsorbing properties of Fe₃O₄@carbon/graphene oxide composites. WU Ri-liang¹, LIU Yun-fang^{1,2*}, REN Sen¹, SHI Xiang-hui^{1,2}, CHI Wei-dong¹, HUANG Qi-gu^{1,2}, YU Chang-yuan³, TIAN Xiao-jun³ (1.State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2.Key Laboratory of Carbon Fiber and Functional Polymers, Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3.College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2016,36(10): 2981~2987

Abstract: Fe₃O₄@carbon/graphene oxide (Fe₃O₄@C/GO) composites were synthesized by hydrothermal method and characterized by X-ray diffraction, transmission electron microscopy, vibrating sample magnetometer. And their dye adsorbing properties were investigated. The results indicated that the Fe₃O₄ nanoparticles were uniformly anchored on GO sheets. The saturated adsorption capacities towards Rhodamine B (RhB) of the composites increased with the increase of GO content, initial RhB concentration and adsorbing temperature. And the higher GO content in the composite was, the quicker the absorbing rate was. The saturated adsorption capacity of the composite reached a maximum value when the pH value was 7. For the composite prepared at 0.8 of the mass ratio of GO to Fe₃O₄, the saturated adsorption capacity reached 303.4mg/g at 1000mg/L of initial RhB concentration.

Key words: Fe₃O₄; carbon; graphene oxide; dye; adsorption

染料污染带来的水体安全问题已引起广泛关注^[1]。染料废水的处理方法很多, 如生物法、离子交换法、光降解法、化学絮凝法和吸附法等^[2-4]。其中, 吸附法常用于处理难生物降解的污染物, 而且也是废水深度处理的重要技术。吸附剂的优良决定了吸附处理效果。研究报道的吸附剂有碳纳米管^[5]、粘土矿物^[6]、粉煤灰^[7]、聚合树脂^[8]、生物炭^[9]等。如何获得优良的吸附剂仍然是相关领域的研究重点和热点。磁性吸附材料由于既具有良好的吸附能力, 又具有从污染物中快速分离

的特性, 引起了人们的广泛关注^[10-12]。研究者通过各种方法制备 Fe₃O₄@碳(Fe₃O₄@C)复合材料, 并进行了水中污染物的吸附研究。研究表明, Fe₃O₄@C 复合材料的吸附性能与其表面积、孔径和 Fe₃O₄ 的结构与用量有关^[12-13]。Fe₃O₄@C 复合材料具有合成原材料易得、无毒、合成方法简

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(21174011, U1462102); 中央高校基本科研业务费项目(JD1406)

* 责任作者, 副教授, liuyunfang@mail.buct.edu.cn

单的特点,而且吸附过程中不引入对水体有害的物质,因此有望成为重要的吸附材料。

石墨烯作为一种新型碳材料因其巨大的比表面积和良好的表面可修饰性使其可以成为优良的吸附材料^[14-16],但面临着难以回收、重复利用率低的问题,而与其与 Fe_3O_4 复合后,则赋予其良好的磁性分离和回收再生特性,可以充分发挥两者的优势。研究者采用溶剂热法和水热法等方法制备出氧化石墨烯/ Fe_3O_4 复合材料($\text{GO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$),并进行染料吸附研究,其结果表明复合材料对染料具有很好的吸附能力^[17-19]。

本文以 GO、共沉淀法 Fe_3O_4 和可溶性淀粉为原料,通过水热法制备出 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料。淀粉基生物质碳将 Fe_3O_4 包覆并固定于 GO 平面。这样既可以保持了 GO 和生物质碳的大比表面积和多孔结构特性,又可以稳定 Fe_3O_4 ,使其不容易脱落,而且不被氧化而失去磁性,从而扩大了复合材料的应用范围。本文对所制备复合材料的结构和 RhB 吸附性能进行了研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

氯化铁 AR 级、氢氧化钠 AR 级、可溶性淀粉 AR 级,北京现代东方精细化学品有限公司;硫酸亚铁 AR 级,罗丹明 B(AR 级),天津市光复精细化工研究所;GO(自制)^[20]。

1.2 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 材料的制备

Fe_3O_4 纳米颗粒通过共沉淀法制备:1)称取 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (40mmol)和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (20mmol)溶于 300mL 去离子水中,称取 NaOH(160mmol)也溶于 300mL 去离子水中($\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}:\text{OH}^- = 2:1:8$),配好的溶液通氮气 30min 以除氧;2)用恒流泵将 Fe 离子溶液加入 NaOH 溶液中,流速为 5mL/min,混合后立即发生反应,整个过程持续通氮气保护;3)反应结束后,所得产物用水和乙醇洗涤数次,直至 pH 为中性,然后 60℃ 真空干燥 24h,得到 Fe_3O_4 纳米颗粒。

采用水热法制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 材料:1)称取制备的 0.65g Fe_3O_4 、3g 可溶性淀粉和一定量的 GO,加入 50mL 去离子水中,超声处理 10min,并充

氮气除氧 15min;2)所得混合物转移至水热反应釜中,加热到 180℃ 反应 20h;3)待反应结束后,所得产物水洗和乙醇洗若干次,真空干燥后待用。

1.3 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 材料吸附罗丹明 B 实验

0.05g 吸附剂分散在 100mL 不同浓度的 RhB 溶液中,定时取样,磁场分离后取上清液,采用紫外可见分光光度计(TU1810,北京普析通用仪器有限责任公司)在 RhB 最大吸收波长 552nm 测定其浓度。不同时间的吸附量 q_t (mg/g)通过下式计算:

$$q_t = 100(C_0 - C_t)/m \quad (1)$$

式中: C_0 为染料起始浓度,mg/L; C_t 为吸附后剩余浓度,mg/L; m 为吸附剂质量,g。饱和吸附量同理计算^[15]。实验流程图如图 1 所示。

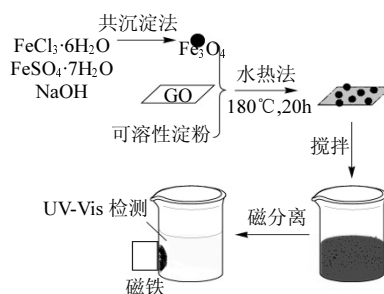


图 1 实验流程示意

Fig.1 Experimental schematic illustration

1.4 材料表征

采用日本理学 X 射线衍射仪(Rigaku D/max-2400 型,激发源为 CuK α 靶, $\lambda = 0.15418\text{nm}$, 40kV, 200mA, 石墨单色器,X-射线计数为闪烁计数器)对材料进行物相分析;采用透射电子显微镜(TEM,日立 H-800 型)表征吸附剂的微观结构与形貌;采用振动样品磁强计(美国 Lakeshore 7307vsM)测试样品的室温磁滞曲线;采用 BK100C 型比表面积及孔隙度分析仪(北京精微高博科学技术有限公司)进行 N_2 吸附-脱附实验,通过 BET(Brunauer-Emmet-Teller)模型计算样品的比表面积,通过 DFT(density functional theory)理论来计算孔径分布;采用 ESCALAB 250 型 X 射线光电子能谱仪(美国 THERMO VG 公司)对材料元素及表面含氧基团含量进行分析;

采用 ZetaPALS 型 Zeta 电位仪(美国布鲁克海文仪器公司)对材料的等电点进行测试并确定。

2 结果与讨论

2.1 吸附剂结构

图 2 为样品的 XRD 衍射曲线。 Fe_3O_4 的衍射图在 $30.0^\circ(220)$, $35.2^\circ(311)$, $42.9^\circ(400)$, $56.9^\circ(511)$ 和 $62.5^\circ(440)$ 有衍射峰, 与反尖晶石结构的 Fe_3O_4 (JCPDS 卡片序号 03-0863)数据相一致, 没有杂峰, 峰强且尖锐。GO 在 24.8° 左右有一个宽的衍射峰。 Fe_3O_4 @C 复合材料的衍射曲线只能看到明显的 Fe_3O_4 衍射峰, 说明所含碳组分为无定形结构, Fe_3O_4 @C/GO 复合材料在 24.8° 左右出现 GO 的衍射峰, 而且衍射峰强度随着 GO 添加量的增大而增强。

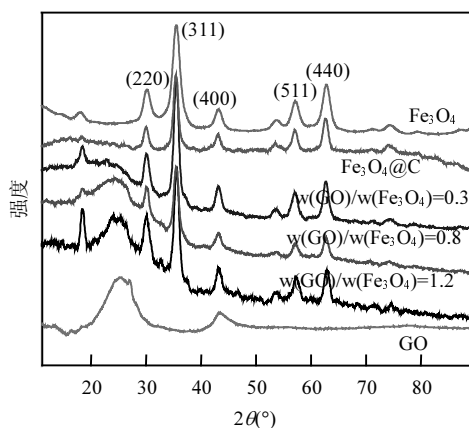


图 2 材料的 XRD 衍射图

Fig.2 X-ray diffraction patterns of samples

图 3 为样品的 TEM 照片。共沉淀法合成的 Fe_3O_4 纳米颗粒的平均粒径为 12nm, 碳包覆后 Fe_3O_4 颗粒分散均匀。图 3(b)~(d) 为不同 GO/ Fe_3O_4 配比条件下所制备 Fe_3O_4 @C/GO 复合材料的 TEM 照片。结果显示, Fe_3O_4 纳米颗粒负载于片状结构的 GO 上, 而且随着 GO 用量的增大, 单片 GO 上的 Fe_3O_4 纳米颗粒减少。样品在清洗过程中经过了长时间的超声处理, 但是 Fe_3O_4 颗粒仍然良好地负载于 GO 而没有脱落。结果清楚地表明, 通过淀粉基碳的包覆及其与 GO 的良好结合将 Fe_3O_4 颗粒牢固地固定在 GO 上。

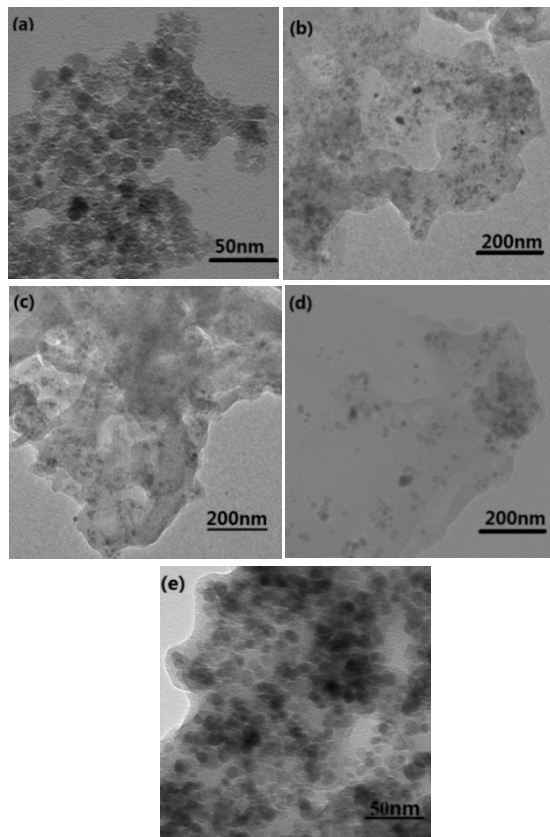


图 3 样品的 TEM 照片

Fig.3 TEM images of samples

(a) Fe_3O_4 , 不同 GO/ Fe_3O_4 配比所制备 Fe_3O_4 @C/GO (b) 0.3 (c) 0.8 (d) 1.2 (e) 0

图 4 是样品室温下的磁滞曲线。所制备的材料均具有超顺磁特性, Fe_3O_4 纳米颗粒、 Fe_3O_4 @C 和 Fe_3O_4 @C/GO(GO 与 Fe_3O_4 质量比为 0.8)的磁饱和强度 M_s 分别为 56.1、15.1 和 11.9emu/g。 Fe_3O_4 与生物质碳和 GO 复合后, 其相对含量降低, 因此复合材料的磁饱和强度降低。如果 Fe_3O_4 纳米颗粒含量过低, 复合材料的 M_s 会过小, 从而其磁分离能力会减弱。图 4 中的插图清楚地显示, 所制备的 Fe_3O_4 @C/GO(同上)在外磁场作用下能快速容易地从水中分离出来。

Fe_3O_4 @C/GO(GO 与 Fe_3O_4 质量比为 0.8)的氮气吸附-脱附曲线如图 5 所示, 有明显滞后环。这表明材料具有中孔结构。孔径分布图结果显示, 材料主要为中孔和大孔结构。材料的比表面积和

总孔容分别为 $62.5\text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.343\text{cm}^3/\text{g}$, 微孔孔容为 $0.024\text{cm}^3/\text{g}$. 另外, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 的比表面积和总孔容分别为 $15.6\text{m}^2/\text{g}$ 和 $0.069\text{cm}^3/\text{g}$, 微孔孔容为 $0.0045\text{cm}^3/\text{g}$. 通过比较得出, GO 的加入使复合材料的比表面积和孔容增大, 性能显著提高.

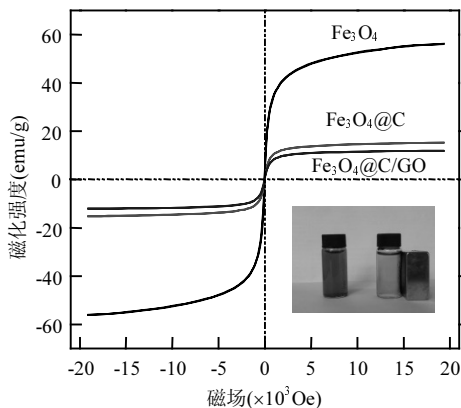


图 4 样品室温下的磁滞曲线

Fig.4 Magnetization curves of samples at room temperature

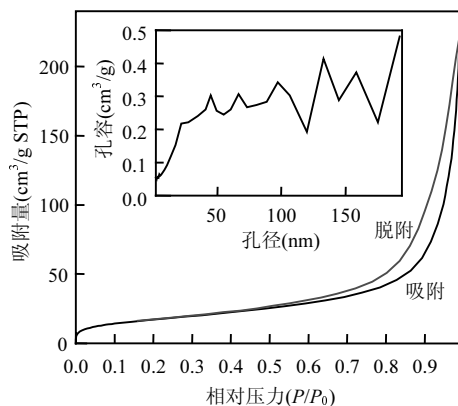


图 5 样品的氮气等温吸脱附曲线及孔径分布

Fig.5 Nitrogen adsorption/desorption isotherms and pore size distribution (inset) of sample

图 6 为样品 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ (O 与 Fe_3O_4 质量比为 0.8) 的 XPS 图. 结果表明, 复合材料表面, Fe 含量为 0.54wt.%, O 含量为 24.66wt.%, C 含量为 74.8wt.%, 结果分析表明, 复合材料表面有丰富的含氧官能团, 如表 1 所示.

图 7 中 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料的 Zeta 电位图. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料的等电点约为 $\text{pH}=2$.

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料的表面电性是由其表面 H^+ 、 OH^- 荷电离子决定的. 当 pH 值小于等电点时, 材料表面带正电; 当 pH 值大于等电点时, 材料表面带负电.

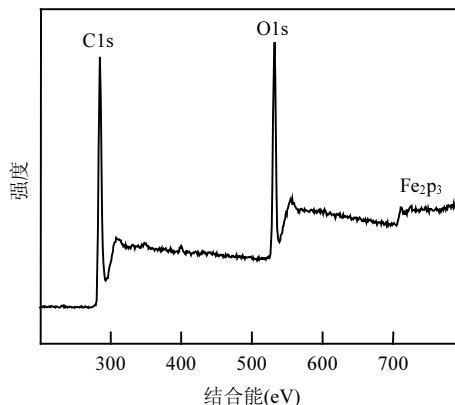


图 6 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料的 XPS 图

Fig.6 XPS curve of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ composite

表 1 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料 C 元素的 XPS 分析结果

Table 1 C1s XPS spectrum analysis of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$

材料	峰含量(%)			
	C-C	C-OH	C=O	COOH
$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$	63.8	31.3	0.6	4.3

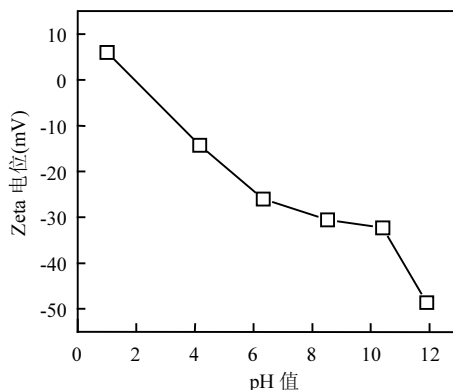


图 7 样品的 Zeta 电位与 pH 值的关系

Fig.7 Relationship between Zeta potential and pH value of sample

2.2 GO 与 Fe_3O_4 的对比对吸附性能的影响

图 8 为材料的 RhB 等温吸附曲线. 结果清楚地显示, 复合材料的 RhB 饱和吸附量随着 GO 用

量的增大而增大,当 $w(\text{GO})/w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ 超过 0.8 后,饱和吸附量变化不大,但是吸附速率增大.纯 Fe_3O_4 基本没有吸附能力, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 复合材料的饱和吸附量只有 15mg/g,但是 $w(\text{GO})/w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ 为 0.8 和 1.2 条件下所制备 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 复合材料的饱和吸附值分别为 48.5mg/g 和 48.7mg/g.结果清楚地表明,GO 的引入显著提高了材料对 RhB 的吸附能力.从成本和磁回收效率角度考虑,选用合适的 $w(\text{GO})/w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ 比值即可.后续实验均采用 $w(\text{GO})/w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ 为 0.8 条件下所制备产物.

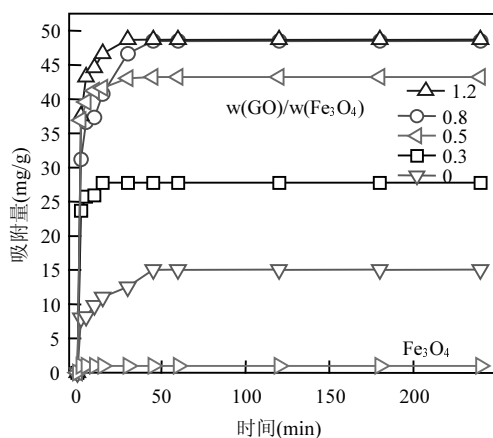


图 8 样品的 RhB 等温吸附曲线

Fig.8 RhB adsorbing isotherms of samples

2.3 染料初始浓度对材料吸附性能的影响

图 9 显示了染料初始浓度对材料吸附性能的影响.随着 RhB 初始浓度的增大, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 的饱和吸附量增大.RhB 初始浓度从 25mg/L 提高到 1000mg/L 时, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 的饱和吸附值从 33.7mg/g 增大到 303mg/g.复合材料初始吸附速率快,在 30min 内基本达到饱和吸附.吸附初期, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 材料表面的吸附位点较多,因此吸附速率快,随着吸附位点减少,材料内外 RhB 浓度差减小,吸附阻力逐渐增大,RhB 与吸附剂接触机会减小,因此吸附速率降低^[21].复合材料能够吸附 RhB 的原因可能是:1)RhB 为阳离子型碱性染料,能与材料产生静电作用;2)RhB 的结构中存在羧基,可与 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 表面的羟基和羧基产生氢键作用;3)二者的共轭 π 键结构使彼此产生 $\pi-\pi$ 堆积作用^[22].

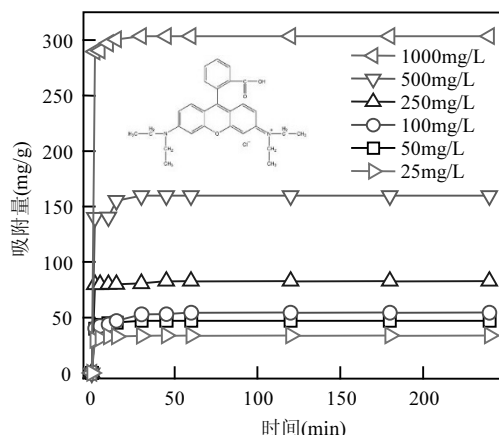


图 9 RhB 初始浓度对材料吸附的影响(24℃,pH 3.64)

Fig.9 Effect of RhB initial concentration on adsorption of sample (24℃, pH 3.64)

2.4 温度对材料吸附性能的影响

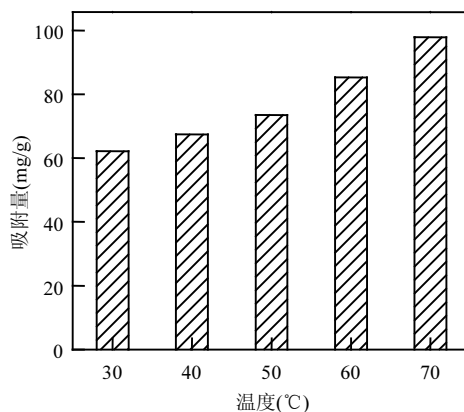


图 10 温度对 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 吸附 RhB 的影响

Fig.10 Effect of temperature on RhB adsorption of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$

温度是影响吸附的重要因素.图 10 为不同温度下复合材料的饱和吸附量. $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}/\text{GO}$ 对染料的吸附有物理吸附和化学吸附.物理吸附过程较快,吸附力不强,为可逆性吸附,温度升高容易导致脱附.化学吸附是由吸附剂与吸附质间的化学键作用力而引起的,吸附热较大,吸附需要活化能,温度升高有利于吸附^[23].此外,温度对溶液粘度和染料分子活性也有影响,在一定范围内,随着温度的升高,溶液的粘度减小,分子运动加剧,与吸附剂的碰撞机会增多,进而有利于吸附,使吸附

量增加.实验结果显示,在 30~70℃ 范围内,随吸附温度的升高,吸附剂的饱和吸附量增大,在 70℃ 达到了 97.9mg/g,吸附作用应以化学吸附为主^[24].

2.5 pH 值对材料吸附性能的影响

图 11 为不同 pH 值条件下复合材料的 RhB 饱和吸附量.饱和吸附量随 pH 值的提高先增大后降低,在 pH 值为 6.94 时达到最大值(67.4mg/g). pH 值在 2.01~6.94 范围内,Fe₃O₄@C/GO 表面含氧官能团去质子化程度逐渐加大,使得吸附剂与 RhB 分子的作用力更强;而在 6.94~11 范围内,pH 值继续增大时,RhB 会发生团聚作用,即由单分子向二分子结合体过渡,增大了吸附阻力,因此饱和吸附量有所下降.以上结果也表明,若在更低的 pH 值下吸附剂可被重生回收^[25].pH 值对吸附过程的影响可能主要是吸附剂表面的含氧官能团和染料分子的结构^[26].XPS 测试得出, Fe₃O₄@C/GO 材料表面存在大量的含氧基团,使其表面带负电荷.同时通过对材料在不同 pH 值条件下的 Zeta 电位测试得出其等电点为 2,当染料溶液 pH 值大于 2 时,吸附剂表面带负电,有利于吸附过程.

综上所述,吸附剂与 RhB 分子间的主要作用是静电吸附.

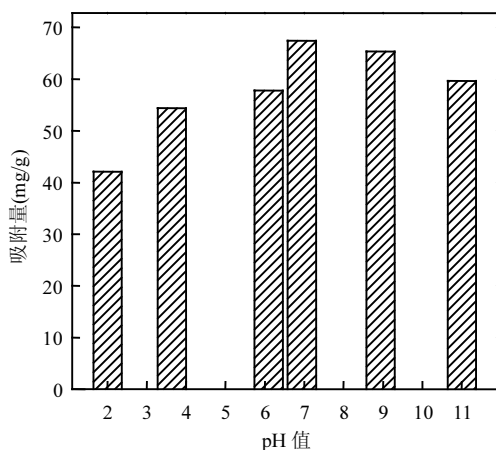


图 11 pH 对 Fe₃O₄@C/GO 吸附 RhB 的影响

Fig.11 Effect of pH on RhB adsorption of Fe₃O₄@C/GO

3 结论

3.1 采用水热法制备了 Fe₃O₄@C/GO 复合材料,Fe₃O₄ 被淀粉基生物物质包覆,并固定在 GO 片

层上,复合材料通过外加磁场能快速从水中分离出来.

3.2 Fe₃O₄@C/GO 复合材料对染料(RhB)具有良好的吸附能力,随着 GO 用量增大,复合材料的吸附速率和饱和吸附量呈增大趋势.

3.3 在实验范围内,Fe₃O₄@C/GO 对 RhB 的饱和吸附量随温度和 RhB 初始浓度的升高而增大,随 pH 值升高而先增大后降低,在 pH 值为 6.94 时达到最大值.

3.4 Fe₃O₄@C/GO 表面含有丰富的含氧官能团,其等电点 pH 值为 2,与 RhB 分子的作用主要是静电吸附,以及氢键作用.

参考文献:

- [1] Martínez-Huitle C A, Brillas E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 87(3):105-145.
- [2] 佟雪娇,李九玉,袁金华,等.稻草炭对溶液中 Cu (II) 的吸附作用 [J]. 环境化学, 2012,31(1):64-68.
- [3] 丁绍兰,李郑坤,王 睿.染料废水处理技术综述 [J]. 水资源保护, 2010,26(3):73-78.
- [4] 陈文华,李 刚,许方程,等.染料废水污染现状及处理方法研究进展 [J]. 浙江农业科学, 2014,1(2):264-269.
- [5] 王 彬,龚继来,杨春平,等.磁性多壁碳纳米管吸附去除水中罗丹明 B 的研究 [J]. 中国环境科学, 2008,28(11):1009-1013.
- [6] Shen D, Fan J, Zhou W, et al. Adsorption kinetics and isotherm of anionic dyes onto organo-bentonite from single and multisolute systems [J]. Journal of hazardous materials, 2009,172(1):99-107.
- [7] Wei L, Wang K, Zhao Q, et al. Kinetics and equilibrium of adsorption of dissolved organic matter fractions from secondary effluent by fly ash [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(7):1057-1065.
- [8] Yavuz E, Bayramoğlu G, Arica M Y, et al. Preparation of poly (acrylic acid) containing core-shell type resin for removal of basic dyes [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011,86(5):699-705.
- [9] 郎印海,刘 伟,王 慧.生物炭对水中五氯酚的吸附性能研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(8):2017-2023.
- [10] Wang Z, Guo H, Yu Y, et al. Synthesis and characterization of a novel magnetic carrier with its composition of Fe₃O₄/carbon using hydrothermal reaction [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006,302(2):397-404.
- [11] 刘云芳,任 森,吴日良,等.双层 SiO₂ 包覆 Fe₃O₄ 复合材料的制备及其染料吸附性能 [J]. 无机化学学报, 2015,31(12):2373-

- 2378.
- [12] Zhang S, Niu H, Hu Z, et al. Preparation of carbon coated Fe_3O_4 nanoparticles and their application for solid-phase extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental water samples [J]. *Journal of Chromatography A*, 2010,1217(29):4757–4764.
- [13] Han C, Ma Q, Dong X, et al. In situ synthesis of porous $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ composite nanobelts with tunable magnetism, electrical conduction and highly efficient adsorption characteristics [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015,26(4): 2457–2465.
- [14] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. *Science*, 2004,306:666–669.
- [15] Lazar P, Karlický F, Jurečka P, et al. Adsorption of small organic molecules on graphene [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013,135(16):6372–6377.
- [16] 庄媛,于飞,马杰,等.石墨烯去除水中重金属和抗生素的研究进展 [J]. *功能材料*, 2014,45(23):23001–23009.
- [17] Santhosh C, Kollu P, Doshi S, et al. Adsorption, photodegradation and antibacterial study of graphene- Fe_3O_4 nanocomposite for multipurpose water purification application [J]. *RSC Advances*, 2014,4(54):28300–28308.
- [18] Qin Y, Long M, Tan B, et al. RhB Adsorption Performance of Magnetic Adsorbent $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{RGO}$ Composite and Its Regeneration through A Fenton-like Reaction [J]. *Nano-Micro Letters*, 2014, 6(2):125–135.
- [19] Geng Z, Lin Y, Yu X, et al. Highly efficient dye adsorption and removal: a functional hybrid of reduced graphene oxide- Fe_3O_4 nanoparticles as an easily regenerative adsorbent [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012,22(8):3527–3535.
- [20] Zhou H, Liu Y, Chi W, et al. Preparation and antibacterial properties of $\text{Ag}@\text{polydopamine}/\text{graphene oxide}$ sheet nanocomposite [J]. *Applied Surface Science*, 2013,282(10):181–185.
- [21] 张春荣,闫李霞,申大忠,等. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ 纳米粒子的制备及其对水中罗丹明 B 的去除 [J]. *环境化学*, 2012,31(11):1670–1675.
- [22] Pereira M F R, Soares S F, Órfão J J M, et al. Adsorption of dyes on activated carbons: influence of surface chemical groups [J]. *Carbon*, 2003,41(4):811–821.
- [23] 陈荣.化学吸附中的几个问题 [J]. *化学通报*, 1963,16:18–25.
- [24] Iram M, Guo C, Guan Y, et al. Adsorption and magnetic removal of neutral red dye from aqueous solution using Fe_3O_4 hollow nanospheres [J]. *Journal of hazardous materials*, 2010,181(1): 1039–1050.
- [25] Qu L, Han T, Luo Z, et al. One-step fabricated $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ core-shell composites for dye removal: Kinetics, equilibrium and thermodynamics [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2015,78:20–27.
- [26] Wu R, Liu J H, Zhao L, et al. Hydrothermal preparation of magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ nanoparticles for dye adsorption [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014,2(2):907–913.

作者简介: 吴日良(1990–),男,江西上饶人,北京化工大学硕士研究生,主要从事炭材料的制备及其性能研究。

《中国环境科学》再次获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”,位列学科榜首

《中国环境科学》在武汉大学中国科学评价研究中心发布的第四届中国学术期刊评价中获评“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”。中国学术期刊评价按照各期刊的期刊学术质量和影响力指标综合得分排名,将排序期刊分为 A+、A、A-、B+、B、C 6 个等级,评价的 6201 种中文学术期刊中有 316 种学术期刊获评权威期刊(A+),A+为得分排名前 5%的期刊。此次获得“RCCSE 中国权威学术期刊(A+)”称号的环境类期刊有 3 种,《中国环境科学》在环境科学技术与资源科学技术学科内荣登榜首。