

文章编号: 1000-5862(2020)06-00567-06

# GO/APT 复合材料对水中 Cd(II) 的吸附研究

傅炳鑫, 王宇慧, 郭红梅, 张小亮\*

(江西师范大学化学化工学院 江西 南昌 330022)

**摘要:** 将氧化石墨烯(GO)与凹凸棒土(APT)通过插层化学的方法制备了氧化石墨烯/凹凸棒土(GO/APT)复合材料,并研究了其对水中Cd(II)的吸附性能,考察了pH值、温度、吸附时间和吸附剂的用量等因素对吸附性能的影响. 研究表明:制备的GO/APT复合材料具有优异的吸附性能. 在温度为298 K、pH值为7、 $t=24$  h条件下,该复合材料对水中Cd(II)的最大吸附量为 $216.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其吸附等温线符合Langmuir方程、吸附过程可用准1级动力学方程描述. 吸附热力学研究表明该吸附过程属于自发吸热过程. 与纯GO和APT粉末相比,GO/APT复合材料对水中的Cd(II)的吸附性能更好.

**关键词:** 氧化石墨烯; 凹凸棒土; 吸附; Cd(II)

**中图分类号:** O 642 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.06.03

## 0 引言

随着工业与国民经济的快速发展,重金属废水污染越来越严重,尤其是镉污染. 水体中的镉主要来源于电镀、有色金属冶炼和铅锌矿等<sup>[1-2]</sup>,一般以Cd(II)的形式存在. 当环境受到镉污染后,镉可在生物体内富集,通过食物链进入人体而引起慢性中毒. 镉被人体吸收后,在体内形成镉硫蛋白,选择性地蓄积在肝、肾中,对人体造成极大的伤害<sup>[2]</sup>. 目前处理含镉废水的工艺有电解法、化学沉淀法、吸附法、膜处理法和反渗透法等<sup>[3]</sup>. 其中吸附法因操作简单、成本低、选择性好、去除率高和可重复使用等优点而备受青睐<sup>[4]</sup>.

氧化石墨烯(graphene oxide, GO)是石墨烯的重要衍生物之一,具有比表面积大、稳定性良好、亲水性强等优点<sup>[5-7]</sup>,且其表面含有大量的含氧官能团,可作为良好的吸附材料. 但是GO片层之间极易发生堆叠,且GO具有较强的亲水性,使其被吸附后难以分离,限制了GO在吸附方面的应用. 凹凸棒土(attapulgite, APT)是一种具有多孔链层状结构且含水镁铝硅酸盐的天然黏土,其骨架结构中含有较多羟基,常作为1维纳米吸附材料用于重金属废水处理等<sup>[8-11]</sup>. 但是,APT黏土容易聚集堆垛成棒状晶束,难以提高其吸附性能. 在前期工作中,本课题组分别采用MWCNTs、GO改性APT制备吸附剂用于

去除水中Cr(VI)和Pb(II),获得了较好的吸附能力和去除效果<sup>[10-11]</sup>. 但是,目前有关改性的APT吸附剂用于去除水中Cd(II)的研究鲜见文献报道.

本文研究了GO/APT复合材料对水中Cd(II)的吸附性能,考察了溶液pH值、吸附时间和吸附剂的用量等条件对其吸附水中Cd(II)的影响,并研究了其吸附动力学特征.

## 1 实验部分

### 1.1 材料与试剂

所用材料与试剂有氧化石墨烯(常州第六元素材料科技股份有限公司、SE2430型),凹凸棒土(JC-TW03,平均粒径约为 $7 \mu\text{m}$ ,江苏玖川纳米材料科技有限公司)、六偏磷酸钠(上海晶纯生化科技股份有限公司)、硝酸镉(阿拉丁化学试剂公司)、浓硝酸(南昌鑫光精细化工有限公司)和氢氧化钠(上海润捷化学试剂有限公司). 以上试剂均为分析纯.

### 1.2 GO/APT复合材料的制备

称取 $0.3000 \text{ g}$  GO倒入 $100 \text{ mL}$ 烧杯中,加入 $50 \text{ mL}$ 去离子水,在 $20 \text{ kHz}$ 的频率、70%的振幅下超声 $10 \text{ min}$ ,使GO均匀分散于去离子水中. 然后称取 $1.2000 \text{ g}$ 经过 $150^\circ\text{C}$ 焙烧预处理的APT粉末倒入 $500 \text{ mL}$ 烧杯中,分别加入 $300 \text{ mL}$ 的去离子水和 $1.25 \text{ mL } 9.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的六偏磷酸钠溶液,搅拌后超

收稿日期: 2020-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(21766011)和江西省教育厅科学技术研究课题(GJJ170166)资助项目.

通信作者: 张小亮(1980-)男,江西峡江人,教授,博士,博士生导师,主要从事膜分离材料研究. E-mail: xlzhang@jxnu.edu.cn

声 30 min. 最后将上述 2 种溶液混合搅拌, 在室温下搅拌反应 4 h 后将反应后的混合液进行抽滤、水洗、干燥, 将干燥后的固体(GO/APT 复合材料)研磨成粉末, 备用<sup>[11]</sup>.

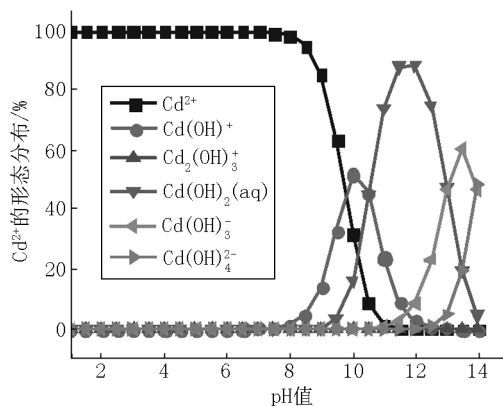
### 1.3 Cd(II) 的吸附实验

移取初始质量浓度为  $C_0$  的 20 mL Cd(II) 溶液到 50 mL 样品瓶中, 然后用氢氧化钠调节其 pH 值, 加入 5 mg 的 GO/APT 复合材料吸附剂, 置于恒温水浴中, 在不同温度下匀速振荡  $t$  h 进行吸附实验. 吸附实验结束后, 利用真空过滤法进行固液分离, 取过滤清液用原子吸收分光光度计(PerkinElmer AAnalyst 400 型; 波长为 228.8 nm, Cd 空心阴极灯)测定 Cd(II) 的质量浓度<sup>[12-13]</sup>, 计算吸附平衡后 Cd(II) 的质量浓度. 根据  $Q_e = (C_0 - C_e)V/m$ ,  $R = (C_0 - C_e)/C_0 \times 100\%$  计算 GO/APT 复合材料对 Cd(II) 的平衡吸附量  $Q_e$  ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和去除率  $R$ , 其中  $C_0$  和  $C_e$  分别为吸附前后 Cd(II) 的质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $V$  为溶液的体积 (L),  $m$  为吸附剂的质量 (g).

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 值和吸附剂的用量对 Cd(II) 吸附性能的影响

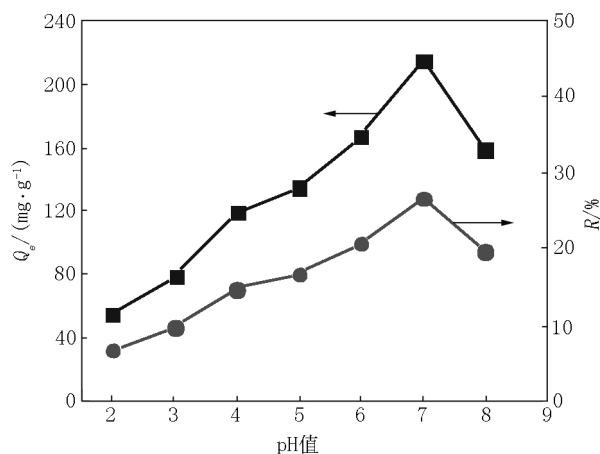
图 1 为利用 Visual MINTEQ 软件模拟水溶液中 Cd(II) 的形态分布与 pH 值的关系图<sup>[13]</sup>. 由图 1 可知, 当 pH 值在区间 [1, 14] 内时, Cd(II) 可能以  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})^+$ 、 $\text{Cd}_2(\text{OH})_3^+$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{aq})$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$  等形式存在. 当 pH 值  $\leq 8$  时, 水中的 Cd(II) 主要以  $\text{Cd}^{2+}$  形式存在; 当  $10 \leq \text{pH} \leq 12$  时, 水中的 Cd(II) 主要以  $\text{Cd}(\text{OH})^+$  和  $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{aq})$  等形式存在; 当 pH 值  $> 12$  时, 水中的 Cd(II) 主要以  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$  和  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$  等形式存在. 为了保证吸附实验的准确性, 本文选择溶液 pH 值的范围为 2~8.



$T = 298 \text{ K}$ ,  $C_{\text{Cd(II)}} = 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ .

图 1 水中 Cd(II) 的形态分布与 pH 值的关系

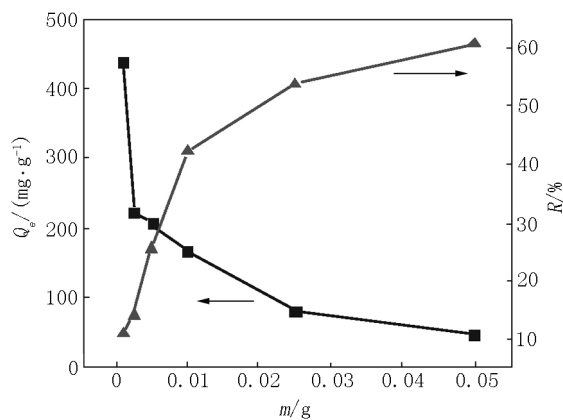
在 20 mL 质量浓度为  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd(II) 溶液中加入 5 mg GO/APT 复合材料, 在室温下振荡吸附 24 h, 考察 pH 值对吸附性能的影响(分别用硝酸和氢氧化钠将 pH 值调节为 2~8). 由图 2 可知: 溶液的 pH 值明显影响 GO/APT 复合材料对水中 Cd(II) 的吸附效果. 随着 pH 值的增大, GO/APT 复合材料对水中 Cd(II) 的吸附量  $Q_e$  和去除率  $R$  均呈先上升后下降的趋势. 当  $2 \leq \text{pH} \leq 7$  时, GO/APT 复合材料对水中 Cd(II) 的吸附量和去除率均随 pH 值的增大而增大; 当 pH 值为 7 时其吸附效果最好, 吸附量为  $216.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 去除率约为 27.5%; 当  $7 < \text{pH} \leq 8$  时, 吸附量和去除率均随 pH 值的增加而减小, 并出现了 Cd(II) 沉淀物种<sup>[14]</sup>. 因此, 本文选择 Cd(II) 溶液的 pH 值为 7.



$T = 298 \text{ K}$ ,  $C_0 = 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $m = 5 \text{ mg}$ ,  $t = 24 \text{ h}$ .

图 2 pH 值对 Cd(II) 吸附性能的影响

在 20 mL 质量浓度为  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 Cd(II) 溶液中, 分别加入不同质量的 GO/APT 复合材料粉末 (1~50 mg), 在温度为 298 K、pH 值为 7、吸附时间为 24 h 的条件下进行吸附实验以考察吸附剂的用量对吸附效果的影响, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知, Cd(II) 的吸附量随复合材料用量的增加而减少, 由



$T = 298 \text{ K}$ ,  $C_0 = 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 值为 7,  $t = 24 \text{ h}$ .

图 3 吸附剂用量对 Cd(II) 吸附性能的影响

刚开始的约 450.0 mg · g<sup>-1</sup> 减少到约 50.0 mg · g<sup>-1</sup>;但其去除率随复合材料用量的增加而增加,由最初的 10% 增加到 60% 左右.综合考虑吸附量和去除效率,本文选择 GO/APT 复合材料的最佳用量为 5 mg.

2.2 吸附动力学

在 20 mL 质量浓度为 200 mg · L<sup>-1</sup> 的 Cd( II) 溶液中加入 5 mg GO/APT 复合材料,在温度为 298 K 下进行吸附 0 ~ 28 h,其吸附性能如图 4 所示.从图 4 可看出,当吸附时间小于 20 h 时,其吸附量随着吸附时间的增长而不断增加;随着吸附的进行,吸附速率逐渐下降并趋于平衡,在吸附时间超过 20 h 后,其吸附量基本维持不变,这说明此时已经达到了 Cd( II) 溶液的吸附-脱附平衡<sup>[3-4]</sup>.为了探究 Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附过程,将图 4 中的实验数据分别采用准 1 级动力学方程和准 2 级动力学方程进行拟合分析:

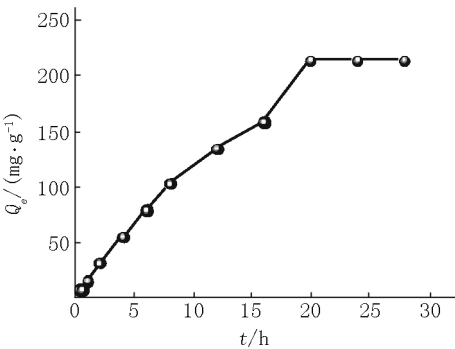
$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t, \tag{1}$$

$$t/Q_t = 1/(k_2 Q_e^2) + t/Q_e, \tag{2}$$

其中  $Q_t$  和  $Q_e$  分别为  $t$  (h) 时刻和平衡时刻的吸附量 (mg · g<sup>-1</sup>);  $k_1$  为准 1 级吸附速率常数 (h<sup>-1</sup>);  $k_2$

为准 2 级吸附速率常数 (g · mg<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup>).

根据 (1) ~ (2) 式拟合所得的结果如表 1 所示.从表 1 可看出,在温度为 298 K 时,Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附过程中所拟合的准 1 级动力学的相关系数 ( $R^2 = 0.998$ ) 远高于准 2 级动力学的相关系数 ( $R^2 = 0.858$ ),而且准 1 级动力学方程计算的最大理论吸附量 (218.3 mg · g<sup>-1</sup>) 比准 2 级动力学方程的计算值 (401.6 mg · g<sup>-1</sup>) 更接近于实验实测值 (216.0 mg · g<sup>-1</sup>).在其他吸附温度条件下也呈现类似的吸附趋势.因此,准 1 级动力学方程能更好地拟合 Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附过程<sup>[13]</sup>.



$C_0 = 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 值为 7  $m = 5 \text{ mg}$ .

图 4 吸附时间对 Cd( II) 吸附性能的影响

表 1 Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附动力学参数

$Q_{e \text{ exp}} / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	准 1 级吸附			准 2 级吸附		
	$k_1 / \text{min}^{-1}$	$Q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$R^2$	$k_2 / (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$Q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$R^2$
216.0	5.040	218.3	0.998	0.120	401.6	0.858

2.3 吸附热力学

图 5 为在优化条件下 20 mL 不同初始质量浓度 (10 ~ 500 mg · L<sup>-1</sup>) 的 Cd( II) 溶液在 GO/APT 复合材料上吸附 24 h 后的吸附等温曲线.从图 5 可看出,GO/APT 对 Cd( II) 的吸附量随着 Cd( II) 的平衡质量浓度的升高而不断增加,且随着吸附温度的升高,GO/APT 对 Cd( II) 的最大吸附量也随之增加.这是因为在相同温度下初始 Cd( II) 溶液的质量浓度越大,GO/APT 复合材料吸附量也就越大,直至达到饱和吸附量;吸附温度升高,使得 GO/APT 表面基团和 Cd( II) 的活度都有一定程度地增强,从而加快了 Cd( II) 在水溶液中的扩散速率,有利于 Cd( II) 的吸附<sup>[15-16]</sup>.为进一步探究 Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附机制,分别采用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程对上述实验结果进行线性拟合,拟合方程为

$$1/Q_e = 1/Q_m + 1/(K_L Q_m C_e),$$

$$\ln Q_e = \ln K_F + (\ln C_e) / n,$$

其中  $Q_e$  为在吸附平衡时最大吸附量 (mg · g<sup>-1</sup>);  $Q_m$

为在单层吸附理论中达到饱和时的理论最大吸附量 (mg · g<sup>-1</sup>);  $C_e$  为溶液的平衡质量浓度 (mg · L<sup>-1</sup>);  $K_L$  为 Langmuir 系数 (L · mg<sup>-1</sup>);  $K_F$  为 Freundlich 系数 (mg · g<sup>-1</sup> · (L · mg<sup>-1</sup>)<sup>1/n</sup>);  $n$  为无量纲的特征系数 (与温度有关).吸附等温线的拟合参数如表 2 所示.

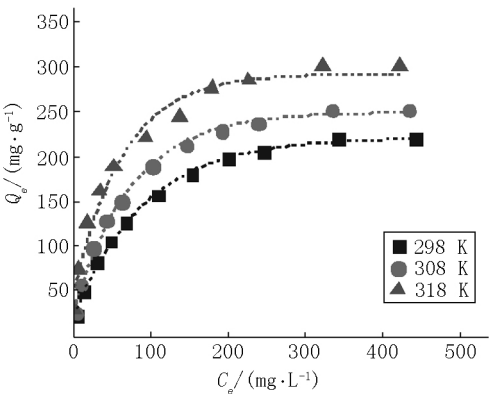


图 5 Cd( II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附等温线

从表 2 可知,在不同温度下 Langmuir 吸附模型的拟合相关系数  $R^2$  明显高于 Freundlich 模型的拟合相关系数,更接近于 1.因此,Cd( II) 在 GO/APT

复合材料上的吸附过程更符合 Langmuir 等温吸附模型,这说明该吸附过程呈现非均质吸附特性,可能是因为 GO/APT 表面的官能基团分布不均导致多层吸附现象.羧基对金属离子具有不同程度的亲和力,有利于提高金属离子与表面吸附位点的碰撞概

率,从而使得带负电荷的 GO/APT 复合材料与在 pH 值为 7 时的 Cd(II) 离子通过静电作用优先吸附并最终达到最大饱和吸附量. $n > 1$  说明吸附比较容易进行,并且随着温度的升高  $n$  值增大,这表明温度的升高有利于该吸附过程<sup>[13,17]</sup>.

表 2 GO/APT 复合材料对水中 Cd(II) 的吸附等温线拟合参数

T/K	Langmuir 模型参数			Freundlich 模型参数		
	$Q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	$R^2$	$n$	$K_F / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})^{1/n})$	$R^2$
298	253.8	0.018	0.996	2.104	15.46	0.965
308	282.5	0.024	0.997	2.240	21.45	0.958
318	324.7	0.033	0.996	2.499	33.85	0.939

此外,可通过图 5 中的吸附性能进一步研究 Cd(II) 在 GO/APT 复合材料上的吸附热力学参数 ( $\Delta G$ 、 $\Delta H$ 、 $\Delta S$ ).以上热力学参数可通过下面公式求得

$$\Delta G = -RT \ln K, \quad (3)$$

$$\partial \Delta G / \partial T = -\Delta S, \quad (4)$$

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S, \quad (5)$$

$$K_d = (C_0 - C_e) V / (m C_e),$$

其中  $M$  为理想气体常数 ( $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $T$  为热力学温度 (K);  $K$  为吸附平衡常数;  $K_d$  为吸附过程中的分配系数 ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ).

由图 6 可得各温度下的  $\ln K$  ( $\ln K_d \sim C_e$  曲线的截距,即当  $C_e \rightarrow 0$  时的值),由 (3) 式可得不同温度下的  $\Delta G$  值,然后根据 (4) ~ (5) 式可分别求得  $\Delta S$  和  $\Delta H$  值.这些热力学参数的计算结果如表 3 所示.从表 3 可看出,当  $\Delta H > 0$  时,GO/APT 复合材料对 Cd(II) 的过程是个吸热反应<sup>[18]</sup>,这与图 5 中的吸附等温线实验分析结果相一致;当  $\Delta G < 0$  时,GO/APT 复合材料对 Cd(II) 吸附的过程是自发的过程,且  $\Delta G$  值随着温度的升高而减小,即吸附温度的升高有利于该吸附过程的进行.

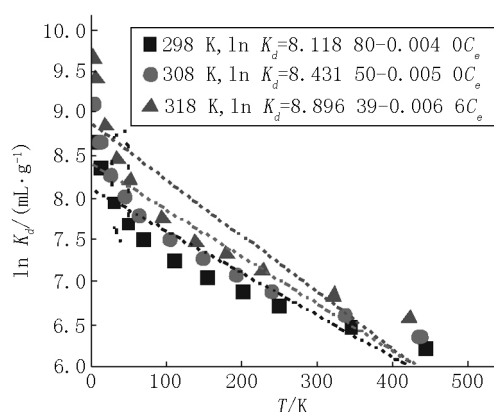


图 6 Cd(II) 在 GO/APT 复合材料上吸附等温线  $\ln K_d \sim C_e$  线性关系图

表 3 GO/APT 复合材料吸附 Cd(II) 的热力学参数

T/K	$\Delta G / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
298	-20.115	30.634	170.3
308	-21.591	30.862	170.3
318	-23.521	30.635	170.3

## 2.4 解吸过程和可重复利用性

吸附剂的解吸过程和可重复利用性也是评价吸附剂好坏的一个重要方面<sup>[14]</sup>.为了研究 GO/APT 复合材料的可重复利用性,采用  $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$  溶液作为 GO/APT 的解吸剂.在  $10 \text{ mL}$  物质的量浓度为  $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的硝酸溶液中,加入  $5 \text{ mg}$  已吸附饱和的 GO/APT 复合材料进行  $\text{Cd}^{2+}$  的脱附实验,在不同时间点处抽取溶液样品进行检测.计算解吸率  $D = C_d V_d / (m Q_e) \times 100\%$ ,其中  $C_d$  为解吸后滤液中 Cd(II) 的质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $V_d$  为解吸液的用量 (L);  $m$  为饱和吸附剂的用量 (g).实验结果如图 7 所示.由图 7 可知,在一定时间内解吸率随着时间的推移而不断增加,经过  $1 \text{ h}$  处理后解吸率约为  $83\%$ ,经  $3 \text{ h}$  处理后其解吸率约为  $93\%$ ,这说明 GO/APT 复合材料具有一定的可重复利用性.

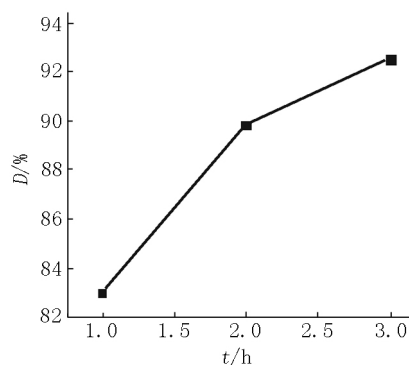
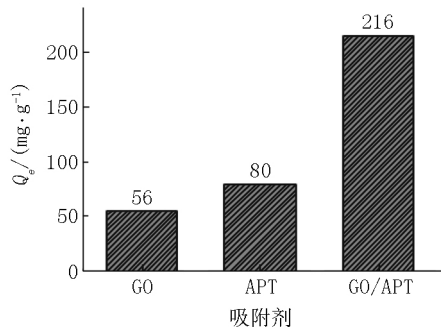


图 7 Cd(II) 在 GO/APT 复合材料上的脱附动力学曲线

## 2.5 吸附性能的比较

在相同条件下,研究了 GO、APT 和 GO/APT 复

合材料对水中 Cd( II) 的吸附性能 ,结果如图 8 所示. 由图 8 可看出 ,GO/APT 复合材料的吸附量 ( 216  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 远高于纯 GO ( 56  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和纯 APT ( 80  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的吸附量 ,可见 APT 通过插层化学的方法与 GO 结合能够大大提高其吸附性能. 此外 ,与文献 [3 ,15-18 ]报道的其他吸附材料对水中 Cd( II) 的吸附性能比较( 见表 4) ,在室温条件下 GO/APT 复合材料的吸附性能较好 ,但仍需进一步优化改善.



温度为 298 K 吸附剂用量为 5 mg ,Cd( II) 的初始质量浓度为 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 值为 7 吸附时间为 24 h.

图 8 GO、APT 和 GO/APT 复合材料对水中对 Cd( II) 的吸附性能

表 4 不同吸附材料对 Cd( II) 的理论吸附容量

吸附材料	$T/\text{K}$	$Q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	文献
改性油页岩灰渣	303	7.9	[3]
A 型分子筛	298	161.3	[15]
EDTA 螯合树脂	323	8.4	[16]
负载锰氧化物活性炭	298	52.0	[17]
N-亚甲基磷酸壳聚糖	303	105.3	[18]
GO/APT	298	216.0	本文

3 结论

- 1) 在酸性条件下 ,通过插层化学的方法成功合成了对水中 Cd( II) 具有优异吸附性能的 GO/APT 复合材料;
- 2) 在温度为 298 K 时 ,GO/APT 复合材料对水中 Cd( II) 的饱和吸附量为 216.0  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  ,该吸附过程属于准 1 级反应 ,也是自发吸热过程 ,呈现非均质吸附特性 ,符合 Langmuir 吸附等温模型 ,且其吸附性能随着温度的升高而提高;
- 3) GO/APT 复合材料的饱和吸附量远高于纯 GO 和纯 APT 的 ,作为一种新型吸附剂 ,其在 Cd( II) 等金属污染废水处理中具有潜在的应用前景.

4 参考文献

[1] Banfalvi G. Removal of insoluble heavy metal sulfides from water [J]. Chemosphere 2006 63( 7) : 1231-1234.

[2] Wenzel W W ,Uniter brunner R ,Soeeder P ,et al. Chelate-assisted phytoextraction using canola ( *Brassica napus* L. ) in outdoors pot and lysimeter experiments [J]. Plant Soil , 2003 249( 1) : 83-96.

[3] 金兰淑 ,刘洋 ,高湘骥 ,等. 改性油页岩灰渣对水中镉离子的吸附性能 [J]. 环境工程学报 ,2012 6( 6) : 1941-1946.

[4] 王桂仙 ,张启伟. 高分子螯合树脂吸附动力学参数测定 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 ,2005 29( 3) : 203-206.

[5] Ma Lixuan ,Li Kai ,Wang Chi ,et al. Enhanced adsorption of hydrophobic organic contaminants by high surface area porous graphene [J]. Environmental Science and Pollution Research 2020 27( 7) : 7309-7317.

[6] Wang Weixue ,Gong Qiaobin ,Chen Zhe ,et al. Adsorption and competition investigation of phenolic compounds on the solid-liquid interface of three-dimensional foam-like graphene oxide [J]. Chemical Engineering Journal 2019 , 378: 122085.

[7] Xie Jieli ,Li Lingyun ,Sun Lixiang ,et al. Formation of hydroxylated polybrominated diphenyl ethers and hydroxylated polybrominated biphenyls during the adsorption of bromophenols by reduced graphene oxide [J]. Chemical Engineering Journal 2019 378: 122134.

[8] Wang Caiyun ,Zeng Wenjuan ,Jiang Tingting ,et al. Incorporating attapulgite nanorods into graphene oxide nanofiltration membranes for efficient dyes wastewater treatment [J]. Separation and Purification Technology ,2019 214: 21-30.

[9] Mu Bin ,Wang Aiqin. Adsorption of dyes onto palygorskite and its composites: a review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering 2016 4( 1) : 1274-1294.

[10] 王彩云 ,刘恋 ,李创 ,等. MWCNTs 改性凹凸棒土对水中 Cr( VI) 的吸附研究 [J]. 中国环境科学 2017 37( 6) : 2179-2186.

[11] Zeng Wenjuan ,Wang Caiyun ,Wang Yuhui ,et al. Facile synthesis of graphene oxide/palygorskite composites for Pb( II) rapid removal from aqueous solutions [J]. Water Science and Technology 2019 80: 989-997.

[12] 陆志发. 原子吸收分光光度法测定水中微量镉的方法试验 [J]. 化工技术与开发 2005 34( 1) : 32-35.

- [13] Li Jie ,Chen Changlun ,Zhu Kairuo Z ,et al. Nanoscale zero-valent iron particles modified on reduced graphene oxides using a plasma technique for Cd( II) removal [J]. Chemistry: An Asian Journal 2015 ,10( 6) : 1410-1417.
- [14] Chen Lifeng ,Liang Haiwei ,Lu Yang ,et al. Synthesis of an attapulgite clay @ carbon nanocomposite adsorbent by a hydrothermal carbonization process and their application in the removal of toxic metal ions from water [J]. Langmuir , 2011 ,27( 14) : 8998-9004.
- [15] 王春燕 ,周集体 ,何俊慷 ,等. A 型分子筛的合成及其对镉离子的吸附性能 [J]. 催化学报 ,2012 ,33( 11) : 1862-1869.
- [16] 吴佳林 ,鲍纬 ,程云雷 ,等. EDTA 螯合树脂对镉离子的吸附性能探究 [J]. 安徽化工 2017 ,43( 4) : 28-30 ,35.
- [17] 张琪 ,王鼎 ,潘远凤 ,等. 负载锰氧化物活性炭对水中镉离子的吸附性能研究 [J]. 广东化工 ,2019 ,46( 24) : 7-8.
- [18] 罗珊 ,陈前林 ,敖先权 ,等. 磷酸化壳聚糖对镉离子的吸附研究 [J]. 环境科学与技术 2019 ,42( 6) : 101-105.

## The Adsorption of Aqueous Cd( II) on the GO/APT Composites

FU Bingxin ,WANG Yuhui ,GUO Hongmei ,ZHANG Xiaoliang\*

( College of Chemistry and Chemical Engineering ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China)

**Abstract:** The graphene oxide/attapulgite ( GO/APT) composites are prepared by the intercalation method between GO and APT. The adsorption behavior and properties of aqueous Cd( II) on the GO/APT composites are also investigated. The effects of pH ,temperature ,adsorption time and adsorbent amounts on adsorption properties are investigated in details. The results indicate that the GO/APT composites show high adsorption performance for aqueous Cd( II) . The maximum adsorption capacity of Cd( II) on the GO/APT composites is obtained over  $216.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  under pH of 7 and adsorption time for 24 h at 298 K. The adsorption isotherm of Cd( II) on the GO/APT composites can be described better with Langmuir equation model than Freundlich model ,and the pseudo-first-order kinetics equation fits well with the adsorption data. The adsorption process for Cd( II) on the GO/APT composites is an exothermic and spontaneous. Compared with pristine GO and APT powders ,such the GO/APT composites can significantly improve the adsorption properties for aqueous Cd( II) .

**Key words:** graphene oxide; attapulgite; adsorption; cadmium( II)

( 责任编辑: 刘显亮)