

天然黄铁矿对阳离子有机染料 RhB 吸附特性研究

蔡宽^{1,2}, 熊世威^{1,2}, 张欣欣^{1,2}, 李瑞萍^{1,2}, 黄应平^{1,2}

(1. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:以黄铁矿作为吸附剂研究罗丹明 B (Rhodamine B, RhB) 的吸附特性, 用 X 射线衍射仪 (XRD) 扫描电子显微镜 (SEM) 对黄铁矿进行了表征。考察了接触时间、溶液 pH 值、离子强度、温度等对黄铁矿吸附 RhB 的影响。结果表明, 在吸附平衡时间 120 min、pH 值 4.0 时, 吸附量达到最大值 21.3 mg/g。升高温度, 黄铁矿对 RhB 的吸附量逐渐增大。而离子强度对吸附几乎没有影响。实验数据与 Langmuir 吸附模型拟合良好, 整个吸附动力学模型符合准二级吸附动力学模型。热力学研究证实了该吸附过程是自发进行的。通过对吸附反应结束后的黄铁矿进行煅烧处理, 去除表面吸附的 RhB, 结果表明煅烧一次的黄铁矿仍然可以吸附废水中约 50% 的 RhB, 具有重复利用的价值。

关键词:黄铁矿; 罗丹明 B; 吸附; 动力学; 煅烧

中图分类号: P579; P578.2⁺92

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0370-07

Adsorption characteristics of cationic organic dye RhB on pyrite

CAI Kuan^{1,2}, XIONG Shi-wei^{1,2}, ZHANG Xin-xin^{1,2}, LI Rui-ping^{1,2} and HUANG Ying-ping^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China)

Abstract: As an adsorbent, natural pyrite was used to study adsorption characteristics of Rhodamine B (RhB), which was characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). In this study, the factors which affect the adsorption of RhB by pyrite such as reaction time, pH, temperature and ionic strength were investigated. The maximum RhB uptake was 21.3 mg/g, which was observed at the equilibrium time 120 min and pH 4.0. The adsorption capacity of RhB increased gradually with adsorption temperature, while the ionic strength showed little effect on the adsorption process. The adsorption process was well described by the Langmuir isotherm model and the pseudo second-order kinetics model. Thermodynamics results confirmed that the adsorption was a spontaneous process. RhB loaded pyrite was regenerated through calcination in air. The results show that the regenerated pyrite could effectively remove 50% of RhB, demonstrating a strong reuse potential.

Key words: pyrite; RhB; adsorption; kinetic; calcine

罗丹明 B (Rhodamine B, RhB) 是一种阳离子染料, 在水中具有很强的溶解性, 被广泛用于纺织物和

食品的着色剂, 有毒甚至致癌, 当它污染水体后, 会严重危及水生生物和人类健康。目前, 染料废水的

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(21207079); 面上基金资助项目(21177072); 国家 863 计划(2012AA06A111-4)

作者简介: 蔡宽(1989-), 男, 汉, 硕士, 研究方向为分析化学, E-mail: chem_ctgu@126.com; 通讯作者: 李瑞萍(1968-), 女, 教授, 博士, 主要从事环境化学研究, E-mail: amylee0289@163.com。

处理方法主要有光催化氧化法(苏营营等,2009; Zhang and Oh, 2009)、溶剂萃取法(Pandit and Basu, 2004)、传统生物法(周觅等,2009; Li and Guthrie, 2010)、膜分离技术(Daas and Hamdaoui, 2010)、电化学法(杨蕴哲,2009)和吸附法(王彬等,2008; 郝艳玲等,2009)等。其中吸附法因具有效率高、成本低、易操作等优点,被认为是将这些污染物从水中除去的最有效的处理方法之一。

天然铁的硫化物,由于其优良的表面活性,特殊的晶体结构及物理性质,使其对有机污染物、重金属离子和阴离子(团)有良好的吸附作用,这些特征使天然铁矿石在治理水体、土壤污染方面的应用日益广泛和成熟(鲁安怀,1999)。黄铁矿(FeS_2)在自然界是资源丰富的硫化物矿物,具有来源广泛、价格低廉等特点。目前,黄铁矿的吸附研究主要体现在重金属和有机物如: $\text{Hg}(\text{II})$ (Philippe *et al.*, 2001)、 $\text{Mn}(\text{VI})$ (Wang *et al.*, 2012)、 CN^- (Han *et al.*, 2013)、磷脂质类化合物(Zhang *et al.*, 2003)等。选用黄铁矿吸附染料的研究则较少,染料和黄铁矿的吸附机理以及吸附剂再生等重要问题仍然存在许多不清楚的地方。本文选择黄铁矿作为吸附剂重点研究其对水中溶解的 RhB 的吸附行为。用 XRD 和 SEM 对黄铁矿进行了特征描述,确定了黄铁矿的等电点和比表面积。研究了接触时间、溶液离子强度、溶液 pH 值、吸附温度等因素对黄铁矿吸附 RhB 的影响。通过利用 Langmuir 和 Freundlich 两种吸附模型,以及准一级和准二级动力学模型分别对吸附的过程进行拟合、分析,并结合热力学计算以及红外分析对黄铁矿吸附 RhB 的机理进行了初步的探讨。对吸附了 RhB 的黄铁矿进行煅烧处理,再次用来吸附 RhB,结果表明煅烧一次的黄铁矿仍然可以将废水中的 RhB 吸附 50% 左右,因此可以通过煅烧处理进行黄铁矿重复利用,之后可以直接进行回收填埋或用作工业建筑材料(陈永亮等,2009)。

1 实验部分

1.1 主要仪器及试剂

主要仪器:UV-1800PC 紫外-可见分光光度计(Hitachi, 日本),CHA-S 恒温振荡仪(国华企业),NEXUS 型 FTIR 傅立叶红外光谱仪(Thermo Electron, 美国),D/max2500 型射线衍射仪(Rigaku, 日本),XL30 扫描电子显微镜(Philips, 荷兰),Au-

tosorb-1 型 N_2 物理吸附仪(Quantachrome 美国)。

主要试剂:天然黄铁矿样品(中南冶金地质研究所);罗丹明 B(Rhodamine B, RhB, 结构见图 1), 255 mg/L 水溶液作为标准溶液,稀释成不同浓度的水溶液进行实验,实验所用其他试剂均为分析纯,水为二次蒸馏水。

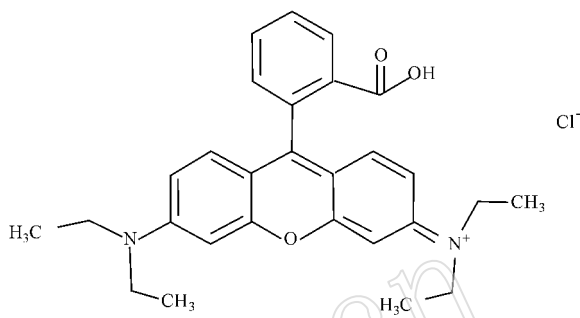


图 1 罗丹明 B 的结构

Fig. 1 Structure of RhB

1.2 实验方法

1.2.1 天然黄铁矿的表征

采用 X 射线衍射仪(XRD)测定黄铁矿的晶相, 2θ 为 $5^\circ \sim 90^\circ$, 扫描速度 $8^\circ/\text{min}$, 步长 0.02° , 连续扫描。采用扫描电子显微镜(SEM)观察黄铁矿形貌。采用 N_2 物理吸附仪(BET)测定催化剂的比表面积, 77 K 温度下 N_2 吸附。比表面积采用 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 公式计算。

1.2.2 吸附实验

将 10 mg 的天然黄铁矿置于 50 mL 的锥形瓶中,加入一定体积的 RhB 标准溶液(pH = 7.0, 温度 25°C) , 加盖,置于恒温振荡仪中反应 120 min, 转速为 150 r/min。测定溶液吸附前后的浓度,溶液中 RhB 的浓度利用紫外-可见分光光度计测定,最大吸收波长为 554 nm。计算公式为 $Q_e = V(C_0 - C_e)/m$ 。式中: Q_e 为天然黄铁矿吸附 RhB 平衡时吸附量(mg/g); V 为 RhB 溶液的体积(L); C_0 为 RhB 溶液初始的质量浓度(mg/L); C_e 为吸附平衡时 RhB 溶液的质量浓度(mg/L); m 为天然黄铁矿的质量(g)。

2 结果与讨论

用 XRD、SEM 对天然黄铁矿进行测试见图 2,天然黄铁矿衍射峰 2θ 与标准卡 JCPDS42-1340 比对可得到晶胞参数 $a = b = c = 5.418 \text{ \AA}$ 。由 SEM 图可

知,天然黄铁矿形貌为层状。采用 BET 测定天然黄铁矿的比表面积为 $2.77 \text{ m}^2/\text{g}$ 。天然黄铁矿的等电点为 6.4(端木合顺等,2007),当溶液 pH 值小于 6.4

时,天然黄铁矿表面带正电荷,反之当溶液 pH 值大于 6.4 时带负电荷。

2.1 温度的影响

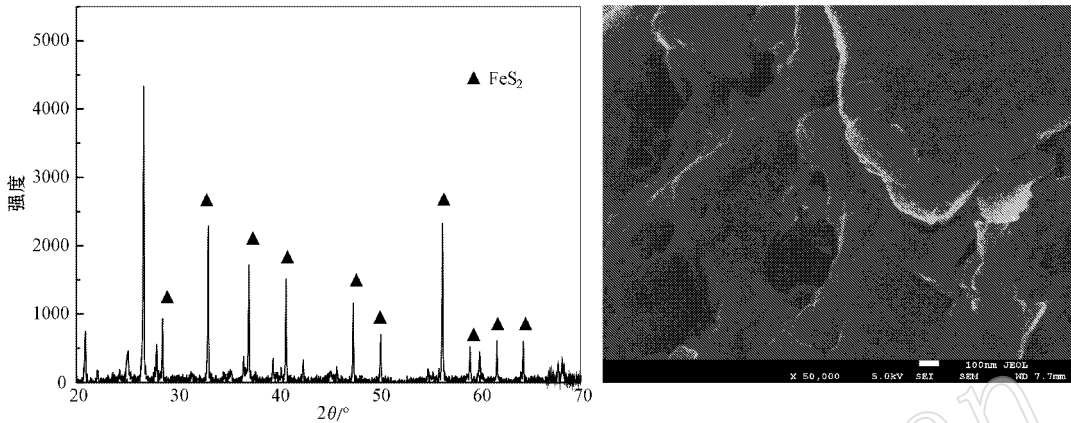


图 2 黄铁矿的 XRD 和 SEM 图

Fig. 2 XRD and SEM patterns of pyrite

温度对黄铁矿吸附 RhB 的影响如图 3。由图可知,温度对吸附有很大的影响,在平衡浓度小于 1 mg/L 时,温度对吸附影响不大。当平衡浓度高于 1 mg/L 时,温度起主要作用,温度越高吸附量就越大。在同一温度下,黄铁矿吸附 RhB 的吸附量是随着初始浓度的增大而增大,最终处于一个平衡状态。当初始浓度超过 10 mg/L 时,黄铁矿吸附 RhB 达到饱和,所以继续增加初始浓度对吸附影响不大。温度影响吸附量可能是由于在同一浓度下,温度越高, RhB 分子运动越剧烈,增大了与黄铁矿的碰撞概率,使吸附量增大(Li *et al.*, 2010),由此可知,升高温度有助于黄铁矿对 RhB 的吸附。

2.2 pH 值对黄铁矿吸附 RhB 的影响

溶液初始 pH 值影响着整个吸附过程,如图 4。pH 值为 4.0 时,黄铁矿对 RhB 的吸附达到最大,在 pH 值为 4.0~7.0,吸附量依次减小,当溶液 pH 值继续增大(>7.0),吸附量依次增大。RhB 是一种阳离子染料,结构见图 1,由于同时具有氨基($-\text{NHR}_2$)和羧基($-\text{COOH}$),RhB 分子表面的电荷取决于溶液的 pH 值,芳香羧基的 pK_a 值为 4.0,当溶液 $\text{pH} < 4.0$ 时, RhB 分子上的 N 处于正价位,而羧基没有电荷,黄铁矿 pH_{PZC} 为 6.4,此时黄铁矿表面带正电荷。根据静电吸引原理,阳离子染料 RhB 分子与黄铁矿阳离子互相排斥,导致吸附量降低;当 $\text{pH} > 4.0$ 时,羧基离子化, RhB 分子处于两性离子状态,可能发生二聚作用(Deshpande and Kumar, 2002),使 RhB 分

子表面不带电荷,而无法吸附到黄铁矿表面;当 $\text{pH} > 7.0$ 时, OH^- 会与 COO^- 竞争与 N^+ 发生连接, RhB 分子的聚合体减少,使吸附量增大。

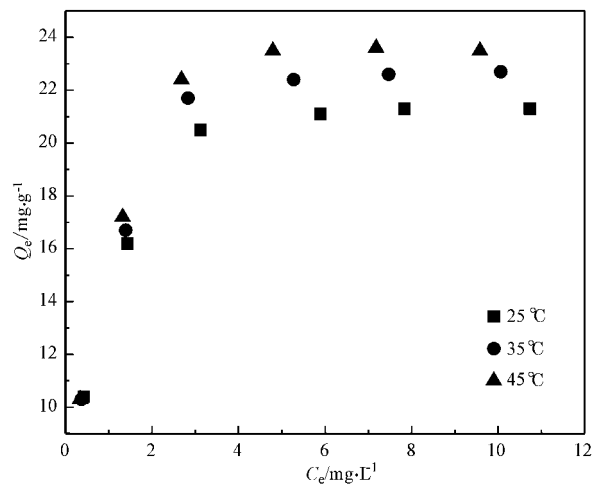


图 3 温度对吸附的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the adsorption capacity of pyrite

2.3 离子强度的影响

通过调节溶液 NaCl 浓度来控制溶液的离子强度,本实验考察了在 4 个浓度下离子强度对吸附的影响。结果(图 5)显示,离子强度对黄铁矿吸附 RhB 几乎没有影响。可能是因为当溶液中的离子强度增大时,围绕黄铁矿表面的双电层受到挤压,使 RhB 吸附到黄铁矿上的量减少;另一方面, NaCl 可以掩

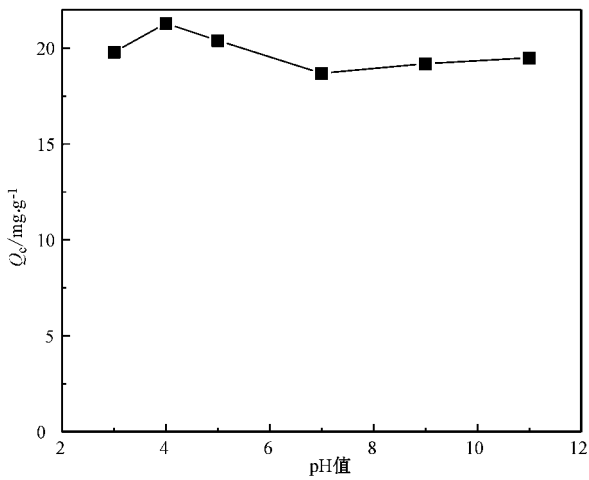


图 4 溶液 pH 值对吸附的影响

Fig. 4 Effect of initial solution pH on the adsorption capacity of pyrite

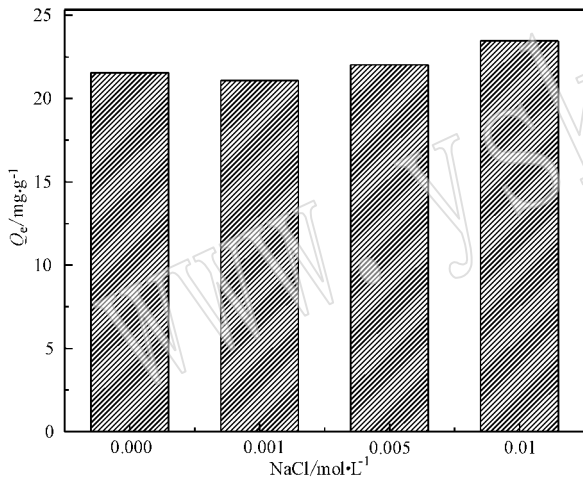


图 5 离子强度对黄铁矿吸附 RhB 的影响

Fig. 5 Effect of ionic strength on the adsorption capacity of pyrite

蔽两性离子 RhB 上带相反电荷基团之间的静电作用,使 RhB 的吸附量随着 NaCl 浓度的增大而增大。由于两种相反的影响,使得 RhB 在黄铁矿上的吸附量几乎不受离子强度的影响(Li *et al.*, 2010),吸附能力不受共存的其它电解质的影响这一特点使得黄铁矿能够成为水中最佳的染料污染物的吸附剂之一。

2.4 黄铁矿吸附 RhB 的吸附等温线

分别选择 Langmuir 吸附等温线和 Freundlich 吸附等温线来描述黄铁矿吸附 RhB 的吸附行为。

Langmuir 吸附等温式的一般表达式为: $1/Q_e =$

$1/(bQ_{\max}C_e) + 1/Q_{\max}$ 。式中: Q_{\max} 为饱和吸附量 (mg/g); b 为吸附系数 (L/mg); C_e 为吸附平衡时吸附质的浓度 (mg/L); Q_e 为吸附平衡时的吸附量 (mg/g)。 Freundlich 吸附等温式对染料吸附进行热力学描述,其方程如下: $Q_e = K_f C_e^m$ 。式中 K_f 为容量因子 (L/g), m 为指数因子。

图 6 为黄铁矿吸附 RhB 的吸附等温线,在不同的温度下 Langmuir 和 Freundlich 吸附模型相关参数见表 1。由表可知, Langmuir 吸附模型相关系数 R^2 均大于 Freundlich 吸附模型的相关系数,且根据 Langmuir 吸附模型计算的 Q_{\max} 值与实验值接近,表明黄铁矿吸附 RhB 用 Langmuir 吸附模型可以更好的描述,属于单分子层吸附。

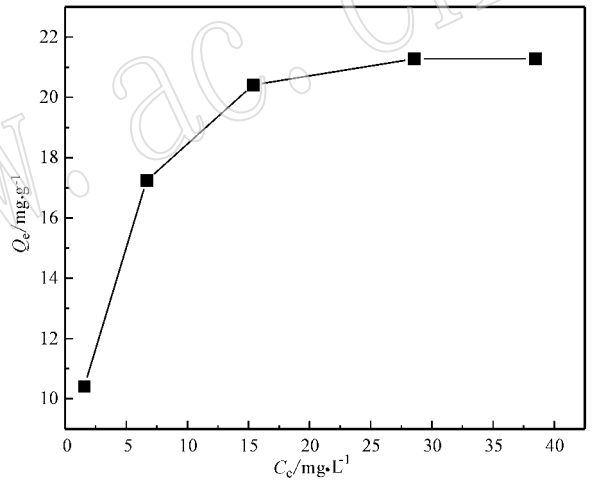


图 6 黄铁矿吸附 RhB 的吸附等温线

Fig. 6 Isotherms of RhB to pyrite

2.5 黄铁矿吸附 RhB 的动力学研究

黄铁矿对 RhB 吸附动力学模型可用准一级反应或准二级反应描述。准一级吸附动力学方程为: $\log(q_e - q_t) = \log q_e - k_1 t / 2.303$ 。准二级吸附动力学方程为: $t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e$ 。

t 为吸附时间 (min), q_t 、 q_e 分别为 t 时刻吸附量和平衡吸附量 (mg/g), k_1 (min^{-1})、 k_2 ($\text{g}/\text{mg} \cdot \text{min}$) 分别为准一级和准二级吸附速率常数。初始吸附速率 h ($\text{mg}/\text{g} \cdot \text{min}$) 可以用下述方程得出: $h = k_2 q_e^2$ 。

两种热力学模型的准确性可以通过线性分析得到,通过相关系数可以比较两种热力学模型对实验数据的适用性。表 2 是两种热力学模型在不同温度下的相关参数,通过比较 R^2 可以得知,准二级动力

表 1 不同温度下黄铁矿吸附 RhB 的 Langmuir 和 Freundlich 吸附模型参数

Table 1 Langmuir and Freundlich isotherms model constants and respective coefficients for RhB adsorption on pyrite

温度(℃)	$Q(\text{exp})(\text{mg/g})$	Langmuir 吸附模型			Freundlich 吸附模型		
		$Q_{\text{max}}(\text{mg/g})$	$b(\text{L/mg})$	R^2	$K(\text{L/g})$	n	R^2
25	21.1	22.7	0.55	0.998 2	10.3	0.25	0.891 5
35	22.4	23.8	2.2	0.982 2	21.2	0.24	0.882 0
45	23.5	25	2.1	0.953 6	22.0	0.26	0.885 3

表 2 黄铁矿吸附 RhB 准一级和准二级动力学参数

Table 2 Parameters of kinetic models of RhB adsorption on pyrite

吸附条件	$Q(\text{exp})(\text{mg/g})$	准一级动力学模型			准二级动力学模型			
		$K_f(\text{min}^{-1})$	$Q(\text{cal})(\text{mg/g})$	R^2	$Q(\text{cal})(\text{mg/g})$	$K_2(\text{g/mg}\cdot\text{min})$	R^2	$h(\text{mg/g}\cdot\text{min})$
温度(℃)								
25	22.1	0.037	14.25	0.937 0	22.57	0.005	0.998 4	2.53
35	22.4	0.035	14.62	0.915 0	23.98	0.004	0.998 1	2.56
45	23.5	0.030	15.56	0.807 4	25.0	0.004	0.994 8	2.78
pH 值								
3	19.8	0.029	13.21	0.930 7	20.7	0.005	0.999 1	2.14
4	21.3	0.035	15.1	0.915 5	22.5	0.004 8	0.993 3	2.42
5	20.4	0.037	16.6	0.985 9	22.78	0.003 2	0.995 3	1.66
7	18.7	0.029	11.3	0.905 6	19.3	0.005 8	1	2.16
9	19.2	0.032	11.3	0.870 6	19.8	0.007 3	0.997 4	2.88
11	19.5	0.027	13.2	0.928 7	20.04	0.004 8	0.996 8	1.95
离子强度(mol/L)								
0.001	21.08	0.045 0	17.98	0.980 7	23.47	0.003 6	0.999 3	2.46
0.005	22.03	0.041 1	16.98	0.929 6	23.59	0.004 4	0.995 6	2.34
0.01	23.47	0.029 5	16.26	0.918 6	24.55	0.003 9	0.996 0	2.11

学模型能更好的描述黄铁矿在不同条件下吸附 RhB 的动力学行为,且通过准二级动力学方程计算的不同条件下的 $Q(\text{cal})$ 更接近实验值 $Q(\text{exp})$ 。

2.5.1 吸附时间对黄铁矿吸附 RhB 的影响

吸附剂用量不同,接触时间对黄铁矿吸附 RhB 的影响如图 7,可以明显的看到在起始的 60 min,黄铁矿吸附 RhB 速率不断减小,吸附量不断增大,120 min 时达到吸附平衡。可以看出,随着吸附剂浓度的增大,速率加快,可能是吸附剂量的增加使吸附剂有效吸附位点增多的缘故。图 8 表示不同初始浓度下,接触时间对黄铁矿吸附 RhB 的影响。黄铁矿吸附 RhB 的速率取决于 RhB 的初始浓度,吸附速率随着时间的变化而减小至逐渐达到吸附平衡。

2.6 黄铁矿吸附热力学

热力学研究可以更全面的了解此吸附自然发生的过程,通过下述方程可以计算热力学参数 ΔG^0 , ΔS^0 , ΔH^0 。 $\Delta G^0 = -RT \ln b$, $\ln b = \Delta S^0/R - \Delta H^0/RT$ 。式中 $b(\text{L/mol})$ 表示不同温度下的 Langmuir

吸附常数, $R(8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K})$ 是摩尔气体常量。

不同温度下的热力学常数见表 3。由表可知,黄铁矿吸附 RhB 属于自发过程,温度从 25℃ 到 45℃, ΔG^0 从 -13.45 kJ/mol 变到 -15.88 kJ/mol ,表明温度越高吸附更容易自发进行。 $\Delta H^0(28.87 \text{ kJ/mol})$ 是正值,表明此吸附是吸热过程,这从之前温度越高,黄铁矿吸附量越大的结论可以得到进一步说明。 $\Delta S^0(121.8 \text{ kJ/mol})$ 是正值,根据熵增大原理,溶液中随着黄铁矿吸附 RhB 的反应向平衡移动,最后达到吸附和脱附的动态平衡,使其固液接触面的无序性随着吸附的进行不断增大。

2.7 黄铁矿吸附 RhB 的红外分析

利用黄铁矿吸附 RhB 前后样品的红外光谱特征峰差异,研究了黄铁矿表面对 RhB 吸附的机理。从图 9 中可以看出,吸附之前黄铁矿在 1100 cm^{-1} 处有一个强吸收峰,吸附 RhB 之后该吸收峰消失了,表明黄铁矿与 RhB 发生了键合吸附,推断黄铁矿吸附 RhB 是化学吸附。

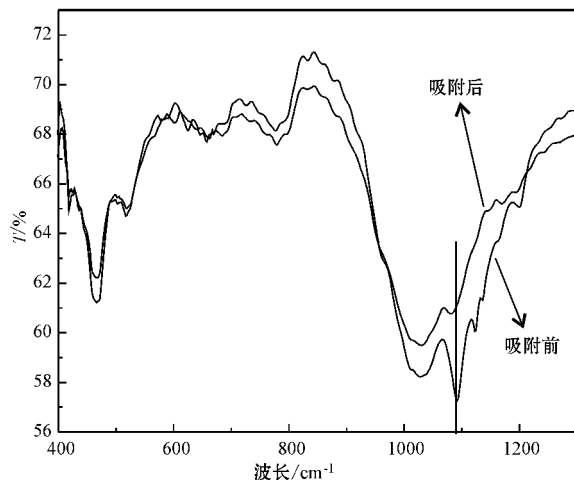
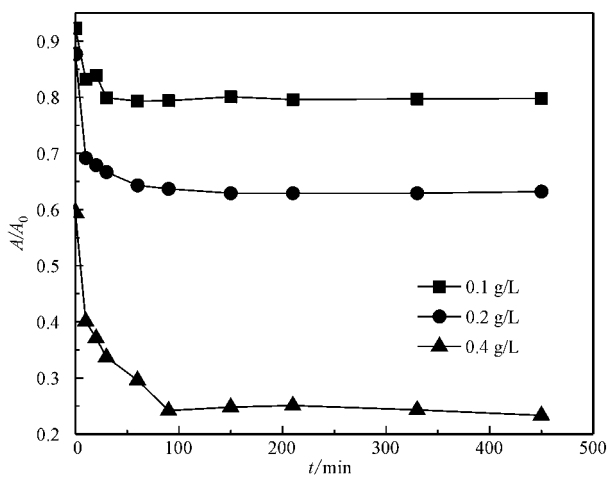


图 7 不同吸附剂浓度下接触时间对吸附的影响

Fig. 7 Effect of touch time and adsorbent dosage on adsorption kinetics

图 9 黄铁矿表面吸附 RhB 前后的红外光谱

Fig. 9 IR spectra of pyrite

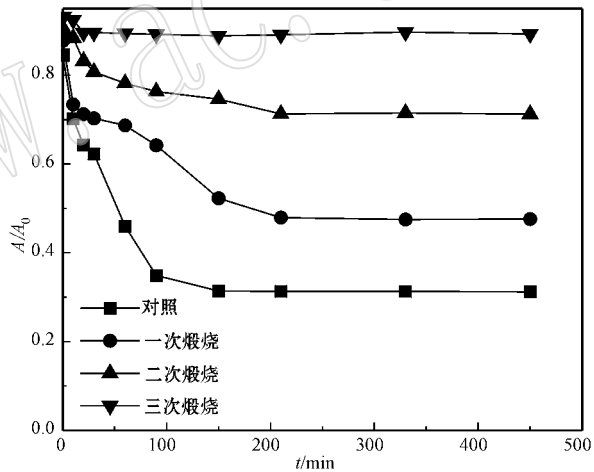
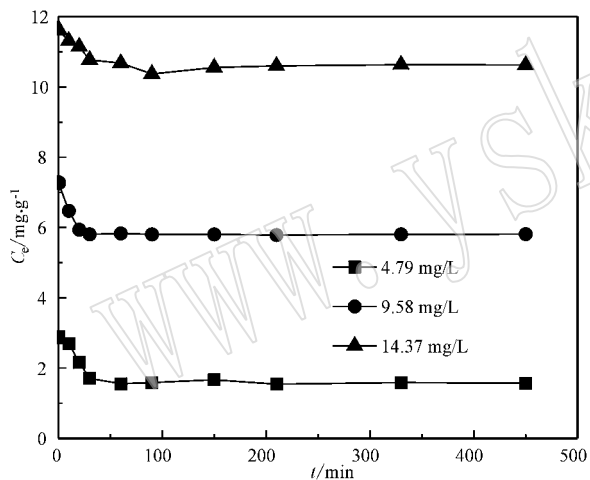


图 10 煅烧处理对黄铁矿吸附 RhB 的影响

Fig. 10 Effect of calcination on the adsorption capacity of pyrite

图 8 不同初始浓度下接触时间对吸附的影响

Fig. 8 Effect of contact time and initial RhB concentration on adsorption kinetics

表 3 不同温度下的热力学参数

Table 3 Thermodynamic parameters at different temperatures

温度(℃)	$-\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/k·mol)
25	13.45		
35	15.43	28.87	121.8
45	15.88		

3 黄铁矿吸附 RhB 之后的处理

吸附了 RhB 的黄铁矿是一种危险的废弃物, 如果得不到妥善安全的处理, 将会对环境造成二次污

染。对此, 本文对吸附之后的黄铁矿进行煅烧处理, 以彻底去除吸附在黄铁矿表面的 RhB, 进而研究黄铁矿煅烧处理后的重复利用率。

将吸附之后的黄铁矿离心干燥, 在 650 ℃ 下煅烧 3 h, 冷却, 进行第 2 次吸附实验, 重复上述步骤, 进行第 3 次吸附实验。结果如图 10, 可以看出煅烧第 1 次的黄铁矿仍然可以将溶液中的 RhB 吸附 50% 左右, 煅烧第 2 次的黄铁矿的吸附能力大幅度减小。说明吸附了 RhB 的黄铁矿可以通过煅烧进行二次利用, 但没有多次重复利用的价值, 因此二次利用后的黄铁矿可以直接进行回收填埋或用作工业建筑材料(陈永亮等, 2009)。

4 结论

黄铁矿吸附 RhB 在 120 min 达到吸附平衡,在不同的 pH 值下,吸附过程有不同的变化,温度对吸附有很大的影响,然而离子强度对吸附几乎没有有什么影响。Langmuir 吸附模型能很好的描述黄铁矿吸附 RhB 的过程,吸附动力学符合准二级动力学模型,热力学研究证实该吸附属于自发进行的化学吸附过程。吸附之后的黄铁矿通过煅烧可以进行二次利用,之后可以回收填埋或用于工业建筑材料。

References

Chen Yongliang, Zhang Yimin and Chen Tiejun. 2009. Progress in the Research of Using Iron Tailings as Building Material Resourc[J]. *Metal Mine*, 39(1): 162~165(in Chinese).

Daas A and Hamdaoui O. 2010. Extraction of anionic dye from aqueous solutions by emulsion liquid membrane[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1): 973~981.

Deshpande A V and Kumar U. 2002. Effect of Method of Preparation on Photophysical Properties of RhB Impregnated Sol-Gelhosts[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 306(2): 149~159.

Duanmu Heshun and Wen Shengyan. 2007. Adsorption of Cd(II) from aqueous solution onto pyrite[J]. *Journal of Xi-An University of Science and Technology*, 27(4): 576~580(in Chinese).

Han Yuexin, Ma Yiwen, Zhu Yimin, *et al.* 2013. Research on Adsorption Rule of Cyanide Ions on the Pyrite Surface[J]. *Jinshu Kuangshan/Metal Mine*, 1 : 70~72.

Hao Yanling, Wang Yuan, Dong Liangyu, *et al.* 2009. A thermodynamic study of the adsorption of organic dyes on palygorskite clay [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(6): 661~664(in Chinese with English abstract).

Li Li, Liu Shuangxi and Zhu Tan. 2010. Application of Activated Carbon Derived from Scrap Tires for Adsorption of Rhodamine B[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 22(8): 1 273~1 280.

Li Tie and Guthrie James Thomas. 2010. Colour removal from aqueous solutions of metal-complex azo dyes using bacterial cells of *Shewanella* strain[J]. *Bioresource Technology*, 101(12): 4 291~4 295.

Lu Anhui. 1999. The Application of Environmental Mineral Materials to the Treatment of Contaminated soil, Water and Air[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(4): 292~300(in Chinese).

Pandit P and Basu S. 2004. Removal of ionic dyes from water by solvent extraction using reversed micelles[J]. *Environmental Science and Technology*, 38(8): 2 435~2 442.

Philippe Behra, Renaud Revel, Jean Jacques Ehrhardt, *et al.* 2001. XPS and XAS Study of the Sorption of Hg(II) onto Pyrite[J]. *Langmuir*, 17(13): 3 970~3 979.

Su Yingying, Yu Yanqing, Yang Peishan, *et al.* 2009. Photocatalytic degradation of anthraquinone dye wastewater with nano-TiO₂/diatomite[J]. *China Environmental Science*, 29(11): 1 171~1 176 (in Chinese).

Wang Bin, Gong Jilai, Yang Chunping, *et al.* 2008. Removal of Rhodamine B from aqueous solution by magnetic multi-wall carbon nanotubes[J]. *China Environmental Science*, 28(11): 1 009~1 013 (in Chinese).

Wang F Q, Zhang Y M, Lian J J, *et al.* 2012. Removal of Mo(VI) from Aqueous Solutions using Pyrite and Cinder: Batch and Column Adsorption Studies[J]. *Nature, Environment and Pollution Technology*, 11(4): 613~619.

Yang Yunzhe. 2009. Electrochemical decolorization of C I Reactive black KN-B simulated wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 3(9): 1 607~1 610(in Chinese).

Zhang Kan and Oh WonChun. 2009. The Photocatalytic Decomposition of Different Organic Dyes under UV Irradiation with and without H₂O₂ on Fe-ACF/TiO₂ Photocatalysts[J]. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 46(6): 561~567.

Zhang Xiang, Michael J Borda, Martin A A Schoonen, *et al.* 2003. Adsorption of Phospholipids on Pyrite and Their Effect on Surface Oxidation[J]. *Langmuir*, 19(20): 8 787~8 792.

Zhou Mi, Liu Guangfei, Zhou Jiti, *et al.* 2009. Decolorization of azo dyes using quinone reductase and quinoid compound[J]. *Environmental Science*, 30(6): 1 810~1 817(in Chinese).

附中文参考文献

陈永亮,张一敏,陈铁军. 2009. 铁尾矿建材资源化研究进展[J]. *金属矿山*, 39(1): 162~165.

端木合顺,文生燕. 2007. 天然黄铁矿吸附废水中 Cd(II) 的实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 27(4): 576~580.

郝艳玲,王远,董良宇,等. 2009. 坡缕石粘土对有机染料的吸附热力学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(6): 661~664.

鲁安怀. 1999. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 18(4): 292~300.

苏营营,于艳卿,杨沛珊,等. 2009. 纳米 TiO₂/硅藻土催化降解蒽醌染料废水的研究[J]. *中国环境科学*, 29(11): 1 171~1 176.

王彬,龚继来,杨春平,等. 2008. 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*, 28(11): 1 009~1 013.

杨蕴哲. 2009. 活性黑 KN-B 染料模拟废水电化学脱色[J]. *环境工程学报*, 3(9): 1 607~1 610.

周觅,柳广飞,周集体,等. 2009. 醌还原醌类化合物对偶氮染料脱色的作用[J]. *环境科学*, 30(6): 1 810~1 817.