

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2014.06.022

硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的制备及其对亚甲基蓝的吸附^{*}

滕绍丛 王海增^{**}

(中国海洋大学化学化工学院, 青岛, 266100)

摘 要 以氯化镁和水玻璃为原料, 采用水热法制备了氧化镁含量低于 10% 的新型硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$, 讨论了体系 pH 值、水热时间和温度等因素对产物硅镁物质的量之比的影响, 通过比表面积分析、电位滴定法对样品进行了表征, 用亚甲基蓝溶液评价其吸附性能. 结果表明, $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的最佳制备条件为: 调节 pH 值到 9.5 左右、水热 12 h、水热温度 110 °C, pH 为控制产物硅镁物质的量之比的决定性因素; 硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 是多孔材料, 比表面积为 $285 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 表面零电荷点 pH_{zpc} 为 10.4; 25 °C 时, 对亚甲基蓝的最大吸附量可达 $151.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 吸附过程符合 Langmuir 吸附模型.

关键词 硅镁胶, $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$, pH, 亚甲基蓝, 吸附.

Preparation of $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ and its adsorption for methylene blue

TENG Shaocong WANG Haizeng^{**}

(Chemistry and Chemical Engineering, Ocean university of China, Qingdao, 266100, China)

Abstract: A new magnesium silicate gel adsorbent $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ was synthesized by hydrothermal method from sodium metasilicate and magnesium chloride hexahydrate. Different factors affecting the preparation, i.e. pH, reaction temperature and reaction time were studied. Surface area and pH_{ZPC} of the product were investigated by BET and potentiometric titration, respectively. The adsorption behavior for methylene blue was systematically investigated. Results indicated that the hydrothermal reaction was expected to proceed under 110 °C for 12 h and pH was the decisive factor for Si/Mg mole ratios. The surface area of $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ was $285 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and its pH_{ZPC} occurred around 10.4. At 298 K, the maximum adsorption capacity for methylene blue was $151.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and the adsorption process was fitted to Langmuir isotherm.

Keywords: magnesium silicate gel, $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$, pH, methylene blue, adsorption.

印染废水因其有机物含量高、色度深、难降解物质多等因素成为环境治理的热点之一^[1]. 吸附法成本低、操作简单, 被认为是一种去除水体染料最为有效的方法^[2]. 吸附技术的关键是吸附剂的选择, 吸附剂分为无机和有机吸附剂两大类, 以无机吸附剂应用较多^[3]. 常见的无机吸附剂包括活性炭、硅胶、沸石分子筛和黏土等. 活性炭是一种最常用的无机吸附剂, 比表面积大, 吸附性能好, 但由于操作成本昂贵、再生困难^[4], 在实际生产应用中受到限制; 硅胶是一种高活性吸附材料, 有较高的机械强度, 通常作为干燥剂来使用; 沸石分子筛具有独特的孔道结构, 化学性质稳定, 选择性强, 常用于气体的提纯与净化, 但目前工业化应用的分子筛类型较少^[5], 且生产成本低、再生能耗大^[6]; 黏土矿物如海泡石、膨润土、硅藻土^[7]等化学稳定性高, 孔隙结构发达, 廉价易得, 经活化或改性后吸附性能好, 但因不可再生^[8]而无法被重复利用. 因此, 吸附性能好、价格低廉且容易再生的新型吸附材料是未来研究的热点.

2013 年 10 月 3 日收稿.

^{*} 教育部博士点专项基金(20090132110009)资助.

^{**} 通讯作者, E-mail: haizwang@ouc.edu.cn

硅酸镁是一种吸附性能优良的两性化合物,常在聚醚精制、石油和动植物油净化中作为吸附剂使用,镁硅物质的量之比对硅酸镁的吸附性能影响较大^[9-11].Brew^[12]等以水玻璃和硝酸镁为原料,通过沉淀法制备了不同硅镁物质的量之比的硅镁胶,并对各产物进行了详细的表征;Tanada^[13]等以硫酸镁和硅酸钠为原料通过沉淀法合成了硅酸镁,用硅烷改性后研究了其对亚甲基蓝的吸附机理;Franco^[14]以氢氧化镁和硅胶为原料制得硅酸镁,测定了其对亚甲基蓝的吸附性能.

我国卤水镁资源丰富,其中氯化镁储量巨大.然而由于产品附加值低,长期以来氯化镁的开发与深加工利用未受到重视.本文以水玻璃和氯化镁为原料,通过水热法合成了一种氧化镁含量低于 10% 的新型硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$,用典型阳离子染料亚甲基蓝溶液评价其吸附性能,系统地考察了样品颗粒大小、焙烧活化温度、溶液 pH 及温度等因素对亚甲基蓝脱除率的影响,以期为水中染料分子去除或回收利用提供新型吸附材料,为卤水镁资源的深度利用探索新的途径.

1 实验部分

1.1 实验试剂

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (上海埃彼化学试剂有限公司)、硫酸 (烟台三和化学试剂有限公司) 为分析纯,亚甲基蓝 (国药集团化学试剂有限公司) 为生物纯,水玻璃 (青岛东岳泡花碱有限公司) 模数为 3.28.

1.2 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的制备

取一定体积浓度为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水玻璃溶液,边搅拌边滴加 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化镁溶液,使原料硅镁物质的量之比为 6:1,滴加完成后用硫酸调节 pH,室温下持续搅拌 2 h 得硅镁凝胶.将所得凝胶装入具有聚四氟乙烯内衬的高压反应釜中于适当温度下反应,一定时间后开釜,弃去上层清液,用蒸馏水洗涤样品至无 Cl 检出为止, $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥后得硅镁胶.将干燥后的样品研磨、过筛后,置于干燥器中备用.

1.3 组分及物理性质分析

1.3.1 硅镁物质的量之比的化学测定方法

用氯化铵重量法和 EDTA 络合滴定法分别测定样品中 SiO_2 和 MgO 的质量,从而算出样品中硅镁物质的量之比.

1.3.2 比表面积测定方法

准确称取 0.1—0.2 g 硅镁胶样品,置于 ASAP 2020 全自动比表面及孔隙度分析仪中,经预处理后,在温度为 77.35 K 和相对压力 (p/p_0) 为 10^{-6} —1 的范围内测定样品的氮气吸附量,画出样品吸附/脱附曲线,同时得到样品比表面积、平均孔径和孔容等参数.

1.3.3 零电荷点及电荷密度的测定

准确称取 0.2 g 的硅镁胶样品于若干 50 mL 离心管中,分别向各组离心管中加入 10 mL 浓度为 $0.001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的电解质溶液 (KNO_3),用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 或 NaOH 调节溶液 pH 后,加去离子水定容至 20 mL.将离心管放入振荡器中 ($25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$) 振荡 24 h 后取出测量体系 pH,以获得吸附平衡时的 $[\text{OH}^-]$ 和 $[\text{H}^+]$.表面电荷密度 $\sigma (\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$ 计算公式如下^[15]:

$$\sigma = \frac{F(C_A - C_B + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+])}{Sm} \quad (1)$$

式中, m 为体系中样品浓度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); C_A 、 C_B 为加入的酸或碱的浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); F 为 Faraday 常数 ($96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$); S 为样品颗粒的比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

绘制 σ —pH 图,曲线与横坐标的交点对应的 pH 值即为样品零电荷点 pH_{ZPC} .

1.4 对亚甲基蓝的静态吸附实验

取一系列 100 mL 锥形瓶,各加入 0.05 g 硅镁胶和 50 mL 一定浓度的亚甲基蓝溶液,于 $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下在恒温水浴振荡器中振荡一定时间,待吸附达到平衡后取出,离心分离.用紫外分光光度计在最大吸收波长 665 nm 处测定滤液吸光度.根据亚甲基蓝的标准工作曲线得到相应的吸附后滤液平衡浓度 $C_e (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$,分别计算脱除率 $E_e (\%)$ 和平衡吸附量 $q_e (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$:

$$E_e (\%) = (C_0 - C_e) / C_0 \times 100 \quad (2)$$

$$q_e = V(C_0 - C_e) / m$$

(3)

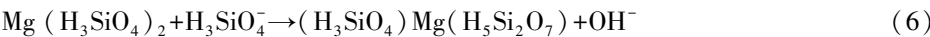
式中, C_0 为吸附液初始浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为吸附液体积(L); m 为硅镁胶质量(g).

2 结果与讨论

2.1 制备条件的确定

2.1.1 体系 pH 值的确定

水玻璃中存在 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 和 H_3SiO_4^- 两种阴离子^[16], Mg^{2+} 与水玻璃中的阴离子发生反应, 生成 $\text{Mg}(\text{H}_3\text{SiO}_4)_2$ 和 MgH_2SiO_4 , 产物可与原硅酸负离子进一步聚合, 形成高聚的水合硅酸镁($\text{MgO} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$)^[17]. 用酸调节 pH, 加入的 H^+ 很容易与 Mg^{2+} 形成竞争, 与 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 和 H_3SiO_4^- 反应生成原硅酸负离子(H_3SiO_4^-)和原硅酸(H_4SiO_4). 制备过程中存在如下反应:



调节体系 pH 值, 110 ℃ 下水热反应 12 h 制得一系列硅镁胶产品, 测定各产品的硅镁物质的量之比, 结果如图 1 所示. 由图 1 可知, 产品硅镁物质的量之比随 pH 值的增大而降低, 即加入的酸越多, 硅镁胶中的镁含量越低、pH 值在 9.5 左右时, 可得到硅镁物质的量之比与投加原料硅镁物质的量之比相同的硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$.

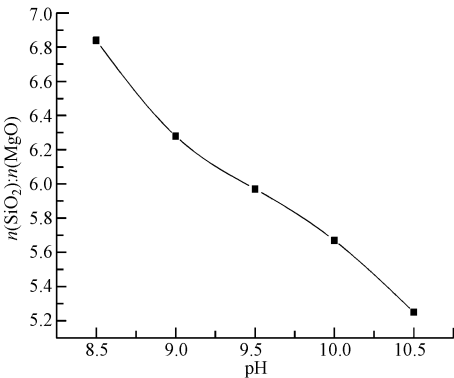


图 1 pH 值对产物硅镁配比的影响

Fig.1 Effect of pH on silica to magnesia molar ratios of the product

2.1.2 水热条件的确定

将 pH 值固定为 9.5, 分别改变水热温度和水热时间, 制得一系列硅镁胶样品, 测定各样品的硅镁物质的量之比, 结果如表 1 所示. 由表 1 可以看出, 当体系 pH 值固定时, 改变水热时间和水热温度对产物硅镁物质的量之比影响不大. 因此可知, pH 为控制产品硅镁物质的量之比的决定性因素. 实验过程中, 70 ℃ 制备的产品较黏稠, 抽滤洗涤时间较长; 110 ℃ 和 150 ℃ 制备的产品洗涤速率明显提高. 为使水热反应充分, 同时尽可能减小制备过程中的能耗, 将水热条件设定为 110 ℃ 反应 12 h.

2.2 硅镁胶的表征

2.2.1 BET 分析

硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的氮气吸附/脱附等温线和 BJH 孔径微分分布曲线如图 2 所示. 由图 2 可以看出, 硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的吸附/脱附等温线为 IV 型, 出现了 A 类滞后环, 由此可知该吸附材料孔结构为中孔^[18]. BET 计算的比表面积为 $285 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均孔径为 9.33 nm, 平均孔容为 $0.55 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. 孔径微分

分布曲线显示硅镁胶孔径范围以 2—5 nm 的中孔为主，孔径分布相对集中。

表 1 水热时间、水热温度对样品硅镁物质的量之比的影响

Table 1 Effect of hydrothermal time and temperature on silica to magnesia molar ratios of the product

水热时间/h	水热温度/℃	$n(\text{Si}):n(\text{Mg})$
6	70	6.04
6	110	6.11
6	150	5.86
12	70	6.02
12	110	5.97
12	150	6.07
20	70	6.13
20	110	5.82
20	150	6.09

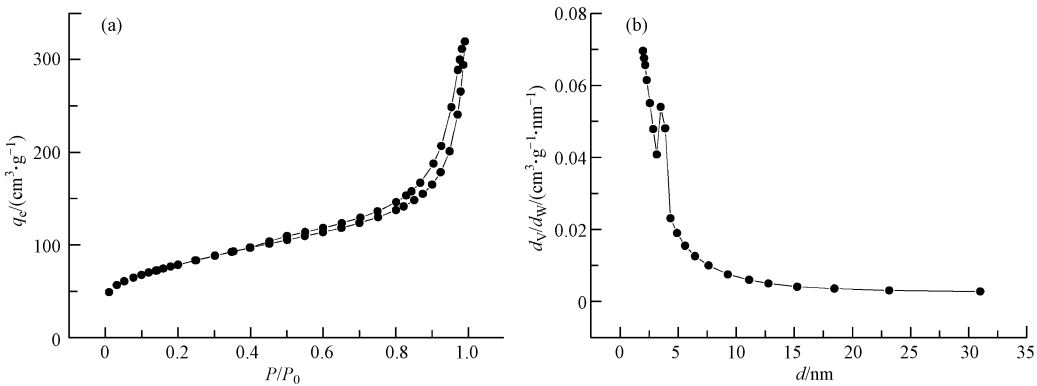


图 2 MgO · 6SiO₂ 的吸附/脱附等温线 (a) 和孔径微分分布曲线 (b)

Fig.2 Adsorption/desorption isotherm (a) and pore diameter differential distribution curve (b) of MgO · 6SiO₂

2.2.2 零电荷点及表面电荷密度

由图 3 可知，MgO · 6SiO₂ 的零电荷点 pH_{zpc} 在 10.4 左右，表面电荷密度随 pH 值的升高而降低.当 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$ 时，表面官能团发生质子化作用 ($\text{MOH} + \text{H}^+ = \text{MOH}_2^+$)，从而使硅镁胶表面带正电，当 $\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$ 时，表面官能团发生去质子化作用 ($\text{MOH} = \text{MO}^- + \text{H}^+$)，使得硅镁胶表面带负电^[19].随着溶液 pH 值的增加，硅镁胶对阳离子性吸附质的吸附性能逐渐增强，对阴离子性吸附质的吸附性能逐渐减弱。

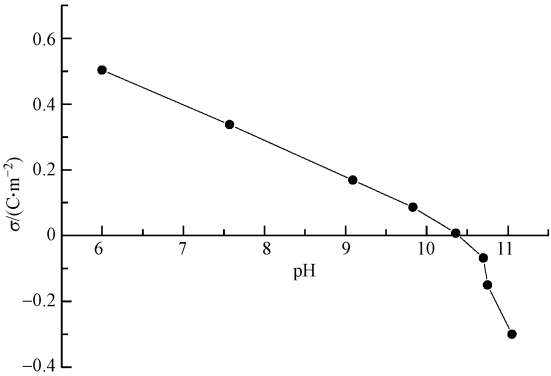


图 3 MgO · 6SiO₂ 的电位滴定曲线

Fig.3 The potentiometric titration curve of MgO · 6SiO₂

2.3 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附

2.3.1 颗粒大小对吸附性能的影响

将研磨后的样品过筛,分别取 0—40 目、40—80 目、80—100 目、100—150 目和 150—200 目之间的样品颗粒,通过静态吸附实验测定其对 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚甲基蓝的脱除率,结果如图 4 所示.由图 4 可知,随着硅镁胶粒径的减小,对亚甲基蓝的脱除率逐渐升高,到达一定数值之后保持稳定.80 至 200 目之间的硅镁胶颗粒对亚甲基蓝的吸附效果较好,即当硅镁胶粒径小于 $180\text{ }\mu\text{m}$ 时,对亚甲基蓝有较高的吸附性能.以后的吸附实验中,样品过 80 目筛即可.

2.3.2 热活化对吸附性能的影响

不同温度下对硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 进行热活化,测其对 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚甲基蓝的脱除率,结果如图 5 所示.由图 5 可以看出,当温度小于 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,热活化对样品吸附亚甲基蓝影响不大; $600\text{ }^\circ\text{C}$ 之后,由于样品表面硅羟基浓度减小^[20],由络合作用而引起的吸附作用被削弱,导致 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的脱除率有所降低.由此可知, $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 在用于吸附废水中染料时可不经热活化直接使用.

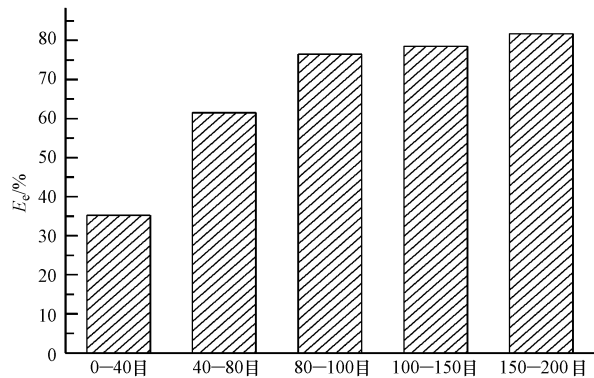


图 4 颗粒大小对样品吸附亚甲基蓝的影响
Fig.4 Effect of particle size of $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ on the removal rate of methylene blue

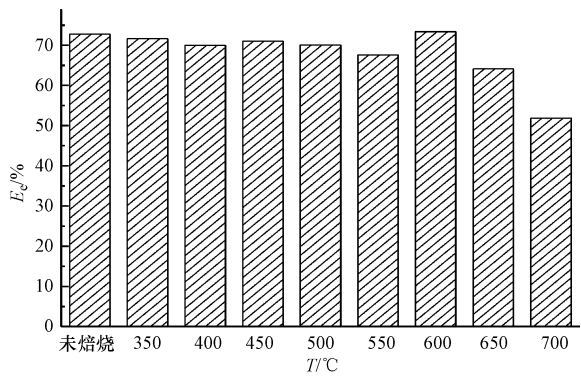


图 5 热活化温度对样品吸附亚甲基蓝的影响
Fig.5 Effect of calcination temperature on the removal rate of methylene blue

2.3.3 pH 对样品吸附性能的影响

图 6 所示为不同 pH 值下硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚甲基蓝的脱除率.由图 6 可知,随着 pH 值的增大,硅镁胶对亚甲基蓝的脱除率逐渐升高.亚甲基蓝为阳离子性染料,当 pH 值低于 4 时, $\text{pH}<\text{pH}_{\text{ZPC}}$, 硅镁胶表面带正电,对亚甲基蓝吸附性能较差,脱除率低于 50%;pH 值在 4—10 范围内,对亚甲基蓝的脱除率稳定在 60%左右;当 pH 值高于 10.4 时, $\text{pH}>\text{pH}_{\text{ZPC}}$, 硅镁胶表面带负电,在库伦引力的作用下硅镁胶对亚甲基蓝的吸附性能增强,脱除率明显升高,当 pH 值增加到 11.5 时,脱除率可达 98.8%.由此可知,碱性条件下 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附效果较好,静电作用在吸附过程中起重要作用.

2.3.4 吸附等温线

硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附等温线如图 7 所示.25— $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对亚甲基蓝的最大吸附量达 $151.52\text{—}200.00\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.温度对吸附影响较大,升高温度可以促进 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附.

分别用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温方程来拟合各组实验数据:

Langmuir 方程:

$$C_e/Q_e = 1/(K_L \cdot Q_m) + C_e/Q_m \tag{10}$$

Freundlich 方程:

$$\lg Q_e = \lg K_F + 1/n \lg C_e \tag{11}$$

式中, Q_e 为平衡吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); C_e 为溶液中吸附质的平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); K_L 为 Langmuir 吸附平衡常数; Q_m 为吸附剂的最大吸附容量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); K_F 为 Freundlich 常数; $1/n$ 为多相性因子, n 为与温度有关的常数.

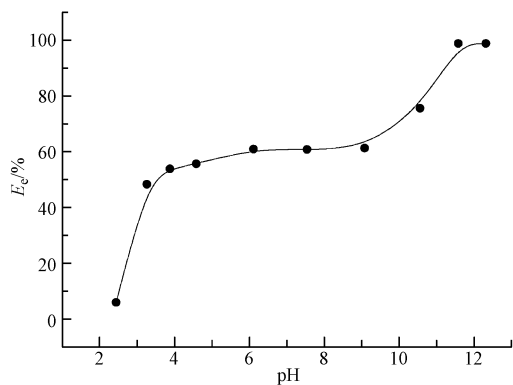


图 6 pH 对亚甲基蓝脱除率的影响
Fig.6 Effect of pH on the removal rate of methylene blue

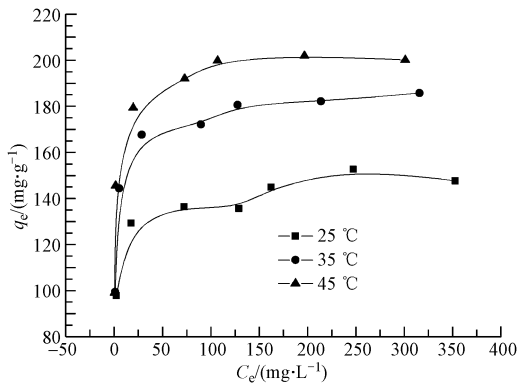


图 7 不同温度下MgO · 6SiO₂对亚甲基蓝的吸附等温线
Fig.7 The adsorption isotherms of methylene blue on MgO · 6SiO₂ at different temperature

拟合结果如表 2 所示, 根据 R^2 数据可知, Langmuir 吸附等温方程可以更好地描述亚甲基蓝在硅镁胶MgO · 6SiO₂上的吸附过程, 染料在吸附剂上更易发生单分子层吸附。
无量纲系数 R_L 是决定吸附是否容易进行的重要参数, 当 $R_L > 1$ 时, 吸附难以发生; 当 $0 < R_L < 1$ 时, 吸附易于发生; 当 $R_L = 0$ 时, 吸附不可逆^[14]:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

(12)

式中, C_0 为溶液的初始浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

从表 2 可以看出, 3 种温度下 R_L 值均在 0—1 之间, 说明亚甲基蓝在硅镁胶样品上的吸附容易发生。

表 2 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式参数
Table 2 The parameters of Langmuir and Freundlich adsorption isotherms

$T/^\circ\text{C}$	Langmuir				Freundlich		
	K_L	$Q_m/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2	R_L	K_F	n	R^2
25	0.197	151.52	0.9981	0.0101—0.0483	95.43	12.41	0.9180
35	0.318	185.19	0.9996	0.0063—0.0305	110.46	10.06	0.8925
45	0.746	200.00	0.9998	0.0027—0.0132	125.14	10.45	0.9042

2.4 再生性能

将吸附后的硅镁胶置于马弗炉中于 450 °C 下焙烧再生, 测定再生后样品对亚甲基蓝的吸附量, 结果如图 8 所示. 由图 8 可以看出, 再生后的硅镁胶MgO · 6SiO₂对亚甲基蓝的吸附量较高, 3 次再生后吸附量仍达 123.8 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明MgO · 6SiO₂是一种再生性能良好的吸附材料。

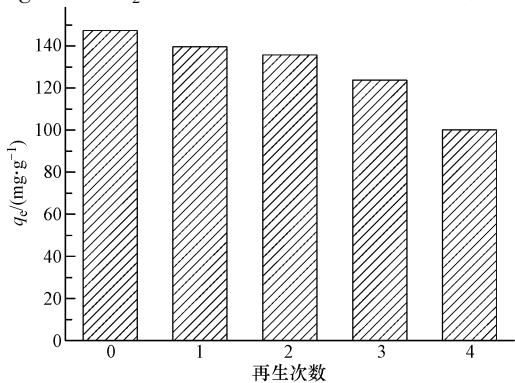


图 8 再生次数对MgO · 6SiO₂吸附性能的影响
Fig.8 Effect of regeneration times on the adsorptive property of MgO · 6SiO₂

3 结论

以水玻璃和氯化镁为原料,采用水热法制备了氧化镁含量低于 10%的新型硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$,并对其进行了表征,以亚甲基蓝为吸附质考察了 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 的吸附性能,得出以下结论:

(1)确定了最佳制备条件为:pH=9.5、水热温度 110 °C、水热时间 12 h, pH 为控制产物硅镁物质的量之比的决定性因素。

(2)硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 为多孔材料,比表面积为 $285 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,孔径范围分布在 2—5 nm 之间,零电荷点 pH_{zpc} 在 10.4 左右,样品表面电荷密度随 pH 值的升高而降低。

(3)硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附过程符合 Langmuir 吸附模型,吸附容易进行,25 °C 下最大吸附量可达 $151.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。硅镁胶 $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的脱除率随粒径的减小、溶液 pH 的升高而增大;热活化对硅镁胶吸附性能影响不大。

(4)3 次再生后, $\text{MgO} \cdot 6\text{SiO}_2$ 对亚甲基蓝的吸附量仍可达 $123.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

参 考 文 献

- [1] 何玉凤,王燕,张振花,等.膨润土基共聚合物的制备及对亚甲基蓝的脱色性能[J].环境化学,2013,32(8):1554-1559
- [2] 张佳,任秉雄,王鹏,等.山茶籽粉吸附亚甲基蓝的性能研究[J].环境化学,2013,32(8):1539-1545
- [3] 陆豪,吴祖良,高翔.吸附法净化挥发性有机物的研究进展[J].环境工程,2013,31(3):93-97
- [4] He W H, LÜ G C, Cui J, et al. Regeneration of spent activated carbon by yeast and chemical method[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(4): 659-664
- [5] 吴鹏.多功能沸石分子筛材料[J].化学教学,2008(6):1-4
- [6] Hiyoshi N, Yogo K, Yashima T. Adsorption characteristics of carbon dioxide on organically functionalized SBA-15[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2005, 84(1): 357-365
- [7] Ciesielczyk F, Krysztafkiewicz A, Jesionowski T. Magnesium silicates-adsorbents of organic compounds[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(20): 8435-8442
- [8] 薛瑞,赵美玲.印染废水脱色的研究进展[J].环境科学与管理,2005,30(3):30-33
- [9] Munson J R, Bertram B L, Caldwell J D, et al. Treatment of cooking oils and fats with magnesium silicate and alkali materials: US 5597600[P].1997-1-28
- [10] Pinnavaia T J, Polverejan M. Synthetic Layered Silicate nanolayers.: US 7449164 B2[P].2008-11-11
- [11] Bauer H, Schimmel G, Thewes V. Synthetic magnesium silicate: US 6274111 B1[P].2001-8-14
- [12] Brew D R M, Glasser F P. Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels[J].Cement and Concrete Research, 2005, 35(1): 85-98
- [13] Tanada S, Kita T, Boki K, et al. Mechanism of adsorption of methylene blue on magnesium silicate[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 1980, 28(8):2503-2506
- [14] Franco F. Adsorption of Methylene Blue on magnesium silicate: Kinetics, equilibria and comparison with other adsorbents[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(3):467-473
- [15] Zheng Y M, Lim S F, Chen P. Preparation and characterization of zirconium-based magnetic sorbent for arsenate removal[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 338(1):22-29
- [16] 李雪,赵海雷,李兴旺,等.硫酸-水玻璃体系的成胶特点[J].化工学报,2007,58(2):501-506
- [17] 冯凌.改性三硅酸镁多孔吸附剂的制备及其表征[D].北京:北京化工大学(硕士论文),2009:37
- [18] Zou J L, Dai Y, Wang X, et al. Structure and adsorption properties of sewage sludge-derived carbon with removal of inorganic impurities and high porosity[J]. Bioresource Technology, 2013,142:209-217
- [19] Al-Ghouti M A, Khraisheh M A M, Allen S J, et al. The removal of dyes from textile wastewater: A study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth[J]. Journal of Environmental Management, 2003, 69(3): 229-238
- [20] 赵振国. 吸附作用应用原理[M].北京:化学工业出版社,2005:447