

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.07.009

多孔蒙脱土的制备及对 Pb(II) 吸附特性研究

周智芳^{1,2}, 张有贤¹, 赵佰平³, 黄 韬¹, 孙寒雪², 景凌云²

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州理工大学 石油化工学院, 兰州 7300050;
3. 兰州陇垦建筑工程勘察设计有限公司, 兰州 730000)

摘要:为改善蒙脱土对 Pb(II) 的吸附性能, 以碳酸钙作为致孔剂, 以钠基蒙脱土(MMT, montmorillonite) 作为实验原料, 制备多孔蒙脱土材料(PM, porous montmorillonite)。通过(SEM, scanning electron microscopy), (FTIR, fourier transform infrared spectrum), (XRD, X-ray diffraction) 进行表征分析, 研究了 PM 对 Pb(II) 的吸附性能。实验结果表明: PM 具有发达的孔状结构; 在 25 °C 时, PM 对 Pb(II) 的吸附量, 随 pH 值的增加先增加后减小, 在 pH 为 5.5 时达到最大; PM 对 Pb(II) 的吸附动力学过程符合准二级动力学模型; 吸附等温线符合 Langmuir 模型, 在 25 °C, pH 为 5.5 时, 饱和吸附量达到 143.5 mg · g。

关键词:蒙脱土; 碳酸钙; 吸附; Pb(II); 吸附动力学; 吸附等温线

中图分类号: X592

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)07-079-09

Preparation of porous montmorillonite and adsorption properties study of Pb(II) on It

ZHOU Zhifang^{1,2}, ZHANG Youxian¹, ZHAO Baiping³, HUANG Tao¹,
SUN Hanxue², JING Lingyun²

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China;
2. College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China;
3. Lanzhou Longken Construction Engineering Survey and Design Co., Ltd., Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: To improve adsorption properties of Pb(II) on montmorillonite, porous montmorillonite (PM) is prepared using CaCO₃ porogen and Na-montmorillonite material. The properties of PM are characterized by scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectrum (FTIR) and X-ray diffraction (XRD), and the adsorption properties of Pb(II) on PM are discussed. The experimental results show that PM has abundant pores. With the increase of PH value, adsorption capacity by PM of Pb(II) increases first and then decreases at 25 °C, and the adsorption capacity is the highest when initial pH is 5.5. The adsorption process accords with the pseudo-second order kinetics model and the adsorption isotherm accords with Langmuir equation. The saturated adsorption capacity is 143.5 mg/g at 25 °C, when pH is 5.5.

Keywords: montmorillonite; CaCO₃; adsorption; pb (II); adsorption kinetics; adsorption isotherms

收稿日期: 2019-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41503089); 甘肃省自然科学基金资助项目(1606RJYA298, 17JR5RA063)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41503089); Supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (1606RJYA298, 17JR5RA063).

作者简介: 周智芳(1982—), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事环境功能材料的制备、废水吸附特性方向研究,

(E-mail) zhouzf@lut.cn。

通讯作者: 张有贤, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事环境规划及管理工作, (E-mail) zhangyx0931@163.com。

重金属污染已成为当今世界倍受关注的一类公害^[1-3]。重金属铅可以在人体蓄积,进入人体血液,破坏儿童的神经系统^[4]。常用的去除废水中 Pb(II)的方法有离子还原、共沉淀、膜过滤、离子交换和吸附等^[5]。其中,吸附法由于成本低、操作简单、容易再生等优点,在含 pb(II)废水处理中应用最广^[6-7]。目前,处理废水中 Pb(II)吸附剂种类主要有活性炭、粘土、泥煤、壳聚糖、生物质等,而新型廉价吸附剂材料的开发与应用是目前国内外研究的热点^[8-10]。很多学者研究了关于原生粘土矿物或改性粘土对重金属的去除性能^[11-16]。其中蒙脱土(MMT, montmorillonite)是应用最广泛的粘土矿物,是由硅氧四面体和铝氧八面体所组成的层状结构的硅酸盐,高的阳离子交换容量、大的比表面积和微观分层结构表明,钠基蒙脱土具有良好的吸附能力^[17]。郭堃梅等^[18]研究了天然蒙脱土吸附重金属 Pb(II)的主要影响因素及吸附机理,当初始浓度小于 20 mg/L 时,去除率达到 99%,吸附受吸附剂用量、振荡时间、以及溶液 pH 值的影响。Sidi Zhu 等^[19]研究了通过在钠基蒙脱土层中加入赖氨酸,制备了新型吸附剂 L-Mt,分子动态模拟揭示了赖氨酸和钠基蒙脱土之间的微观结构和相互作用,L-Mt 对 Pb(II)的饱和吸附能力高于钠基蒙脱土。KatayoonKalantari 等^[20]研究了合成的 Fe₃O₄/MMT 材料,对 Cu(II)、Ni(II)和 Pb(II)的吸附能力都很大,饱和吸附量分别达到 70.92、65.78 和 263.15 mg/g。Ana-Maria Georgescu 等^[21]用 Cr(III)改性蒙脱土,制备了 Cr(III)柱撑蒙脱土多孔纳米材料,基体间距和比表面积随材料制备参数的变化而变化,合成的纳米材料对水溶液中 Pb(II)具有良好的吸附性能。Liang 等^[22]以碳酸钙为制孔剂,制备凹凸棒基多孔材料,该材料表面润湿性可以在疏水和亲水之间可逆调控,因此既可以分离水体中的油/有机物,又可以吸附重金属离子,且吸附容量高。若采用碳酸钙对蒙脱土进行致孔改性,势必能够充分发挥蒙脱土的优良吸附性能,但是此方面的研究尚不多见。研究用碳酸钙改性钠基蒙脱土,制备多孔蒙脱土材料(PM),分析 PM 对 Pb(II)的吸附动力学模型和等温线模型,以及溶液 pH 值对 PM 吸附 Pb(II)的影响,探讨其吸附机理,以为废水中 Pb(II)的去除提供实验依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

主要材料:钠基蒙脱土(MMT)(型号:PGN,CEC:120 meq/100 g)为工业级,硝酸铅(Pb(NO₃)₂)、碳酸钙(CaCO₃)、盐酸(HCl)等化学品均为分析纯,实验用水为去离子水。1 000 mg/L 的 Pb(II)储备液使用 pb(NO₃)₂ 配制。

主要仪器:INESA 型超声波机(上海仪电分析仪器有限公司);CJJ-931 型磁力搅拌器(江苏金坛市环宇科学仪器厂);GZX9140MBE 型鼓风干燥箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂);AA800 型原子吸收光谱仪(美国 Perkin Elmer);TGL-16C 型离心机(上海安亭科学仪器厂);SHA-BA 型恒温水浴振荡器(金坛荣华);LA-pH10 pH 计(哈希公司)。

1.2 多孔蒙脱土材料(PM)的制备

1.2.1 PM 的制备

称取 20 g 蒙脱土,加入 200 mL 去离子水,常温下搅拌 36 h,再加入 10 g 碳酸钙,继续搅拌 72 h,超声 4 h。放入鼓风干燥箱中,90 °C 干燥,把完全干燥好的材料放入管式炉中,600 °C 加热,加热率为 5 °C/min,连续通氮气 1 h。再将所得材料浸泡在 1 mol/L 的盐酸中 24 h,去除 CaCO₃,用去离子水清洗,直到没有 Cl⁻ 被检测到为止。在 90 °C 下干燥,研磨过 100 目筛,得到 PM 材料。

1.2.2 表征方法

用日本 JEOL 公司生产的 JSM-6480A 型扫描电子显微镜(SEM)对样品的形貌进行分析,用美国 Nicolet IR-NexuS670 型傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)在 4000~400 cm⁻¹ 范围内扫描,用日本 Rigaku D/max-TTR-III 系列 X 射线衍射仪(XRD)对晶体结构进行分析。

1.3 吸附实验

1.3.1 吸附动力学的测定

分别称取质量为 100 mg 的 PM 于 14 个锥形瓶中,加入 200 mg/L 的 Pb(II)溶液 100 mL,用 0.1 mol/L

的 HNO_3 或 NaOH 调节 pH 为 5.5, 置于摇床上, $25\text{ }^\circ\text{C}$, 180 r/min 分别震荡 10、20、40、60、90 min, 2、2.5、3、3.5、4、6、8、12、24 h 后取出, 过滤离心, 测定上清液中 Pb(II) 质量浓度, 并根据公式(1), 计算吸附容量 q_e , mg/g

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e) \times v}{m}, \quad (1)$$

式中: c_0 为 Pb(II) 初始浓度, mg/L; c_e 为吸附后溶液中 Pb(II) 浓度, mg/L; m 为吸附剂质量, g; v 为 Pb(II) 溶液体积, L。

1.3.2 吸附等温线的测定

称取质量为 100 mg 的 PM, 分别加入浓度为 30~400 mg/L 的 Pb(II) 溶液 100 mL, 调节 pH 至 5.5, 置于摇床上, $25\text{ }^\circ\text{C}$, 180 r/min 震荡 24 h 后取出, 过滤离心, 测定上清液中 Pb(II) 质量浓度, 计算吸附容量 q_e , mg/g。

1.3.3 pH 值对 Pb(II) 吸附的影响

分别称取质量为 100 mg 的 PM 于 10 只锥形瓶中, 加入 200 mg/L 的 Pb(II) 溶液 100.00 mL, 分别调节 pH 为 2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、7, 置于摇床上, $25\text{ }^\circ\text{C}$, 180 r/min 震荡 24 h 后取出, 过滤离心, 测定上清液中 Pb(II) 质量浓度, 计算吸附容量 q_e , mg/g。

2 结果与讨论

2.1 PM 的形貌结构特征

材料的微观形貌如图 1 所示, 蒙脱土呈层状结构, PM 具有发达的孔隙结构。由此可以推断, 蒙脱土分散液中加入碳酸钙, 干燥, 后经管式炉加热, 再经盐酸浸泡并且清洗之后, 和蒙脱土相比, PM 结构发生了改变, 发达的孔道使 PM 具有更大的比表面积。

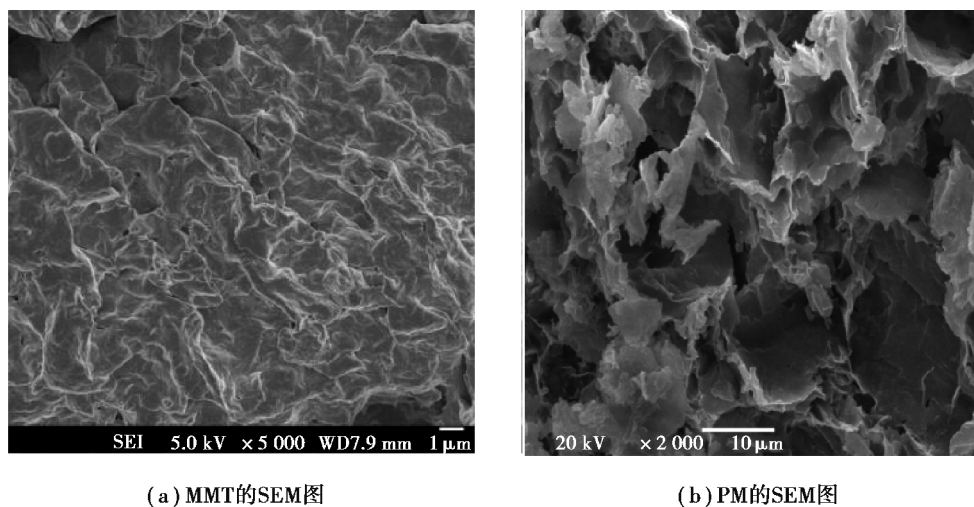


图 1 MMT 和 PM 扫描电镜图

Fig. 1 SEM images of MMT and PM

材料的红外谱图如图 2 所示, 从 MMT 的红外谱图中可知, 在 $3\ 634\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为蒙脱土本身含有的结合水的伸缩振动峰, $3\ 428\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为蒙脱土 Si-OH 及 Al-OH 的分子内氢键羟基缔合峰所致, $1\ 641\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为 -OH 键的弯曲振动峰, $1\ 424\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 038\text{ cm}^{-1}$ 为蒙脱土 Si-O 伸缩振动峰, $400\sim 600\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为 Si-O 和 Al-O 的弯曲振动峰。从 PM 的红外图谱中可知, PM 出现了蒙脱土的特征吸收峰。

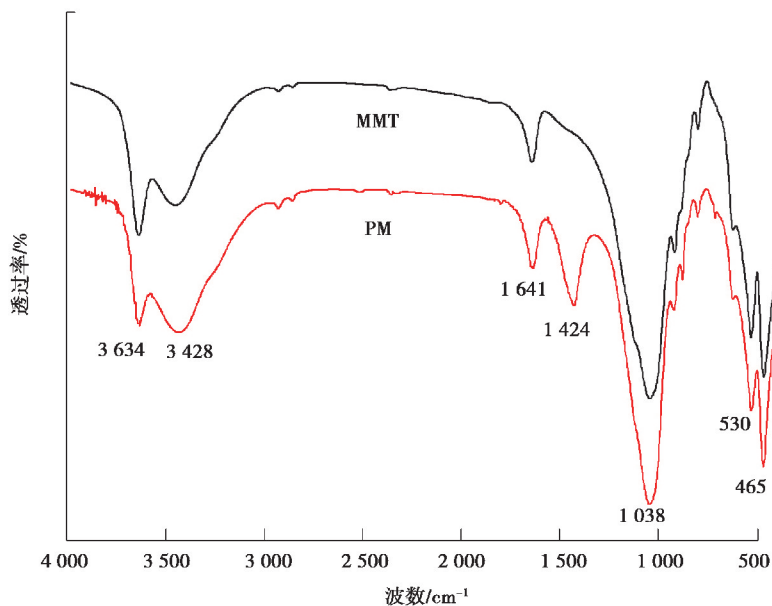


图 2 MMT 和 PM 的 FTIR 图

Fig. 2 FTIR spectra of MMT and PM

MMT 和 PM 的 XRD 如图 3 所示, MMT 在 2θ 为 $5^\circ \sim 70^\circ$ 出现了 6 个特征衍射峰, PM 具备 MMT 的所有衍射峰, 表明加入碳酸钙致孔剂, 经管式炉加热, 盐酸浸泡, 和 MMT 相比 PM 晶体结构未发生改变。

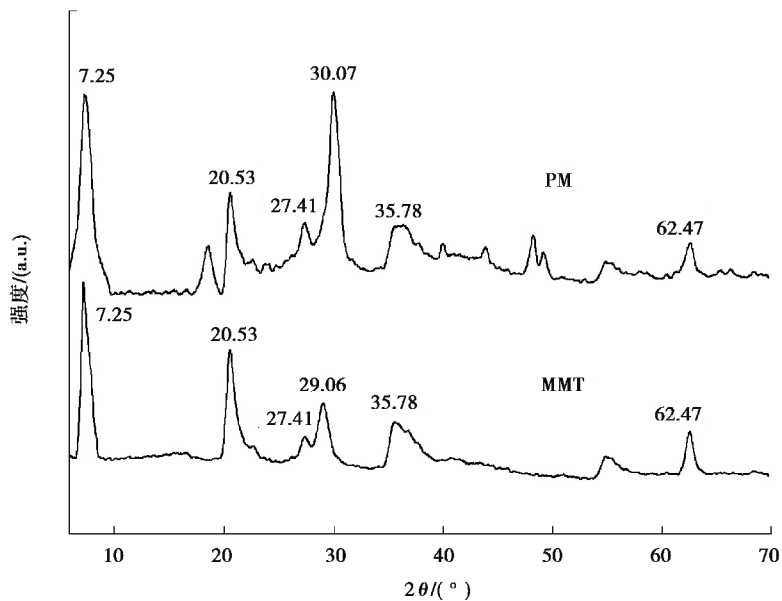


图 3 MMT 和 PM 的 XRD 图

Fig. 3 XRD patterns of MMT and PM

2.2 吸附动力学研究

图 4 显示了 PM 在初始 $Pb(II)$ 浓度为 200 mg/L 的溶液中不同接触时间的吸附。很容易看出, 从 $0 \sim 120 \text{ min}$, 吸附能力随接触时间的增加而迅速增加, 180 min 后吸附量稳定, 达到了平衡。吸附 180 min 后, PM 对 $Pb(II)$ 的吸附量达到 146.1 mg/g 。延长接触时间不能显著提高 $Pb(II)$ 的吸附量。

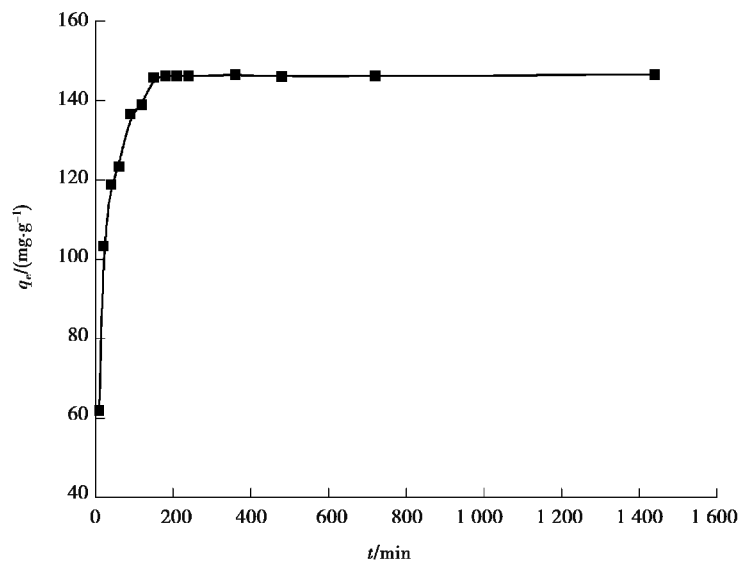


图 4 Pb(II) 吸附量与吸附时间的关系

Fig. 4 The relationship between adsorption capacity and adsorption time on Pb(II)

为了研究吸附机理,应用准一级动力学方程(式(2))和准二级动力学方程(式(3))对实验数据进行模拟

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t, \tag{2}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t, \tag{3}$$

式中: k_1 为准一级动力学模型吸附速率, min^{-1} ; q_t 和 q_e 分别为 t 时刻的吸附容量和吸附平衡时的吸附容量, mg/g ; k_2 为准二级动力学模型吸附速率, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; t 为吸附时间, min 。

从图 5 和表 1 可以得出,准二级动力学模型相关系数 R^2 优于准一级动力学模型,且计算吸附量与实验数据更接近,说明 PM 吸附溶液中 Pb(II) 的过程中,发生了电子转移或共享,主要受化学吸附的控制^[23]。

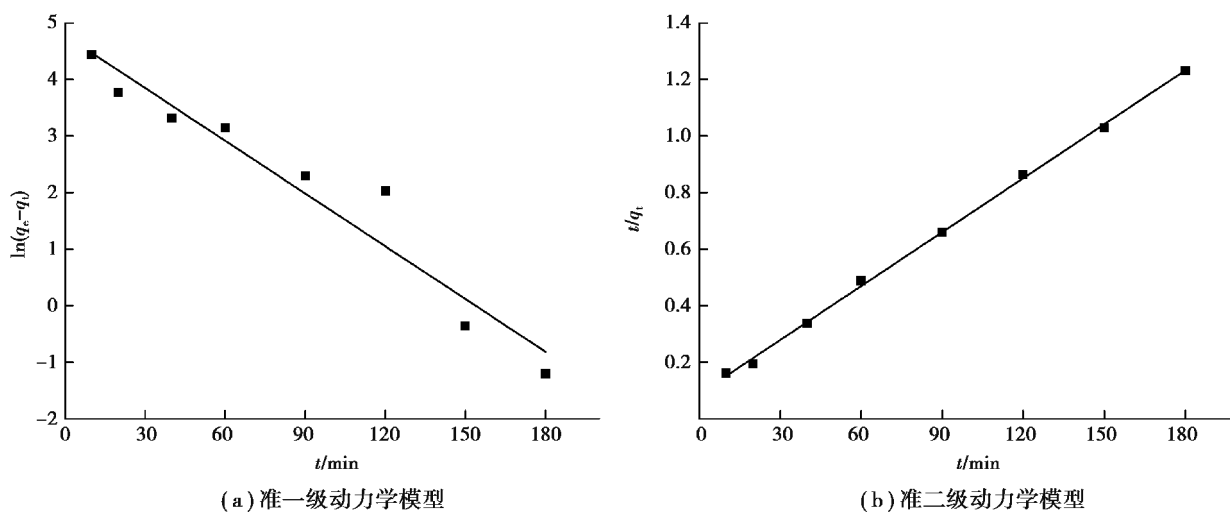


图 5 PM 对 Pb(II) 的吸附动力学模型

Fig. 5 Adsorption kinetic simulation on Pb(II) by PM

表 1 Pb(II) 的吸附动力学拟合参数

Table 1 model parameters for adsorption kinetics on Pb(II)

pH	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_m /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_1 /$ min^{-1}	R^2	$q_m /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_2 /$ ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	R^2
5.5	114.3	0.032 7	0.993	158.7	0.000 5	0.999

2.3 吸附等温线研究

吸附量与平衡质量浓度之间的关系见图 6, 刚开始, 随着铅离子浓度的增大, 铅离子的吸附容量也增加, 当初始浓度达到 200 mg/L 时, 吸附量达到 143.5 mg/g, PM 对 Pb(II) 的吸附量达到 MMT 对 Pb(II) 吸附量的 1.6 倍。随着初始浓度的继续增大, 吸附量基本保持不变。

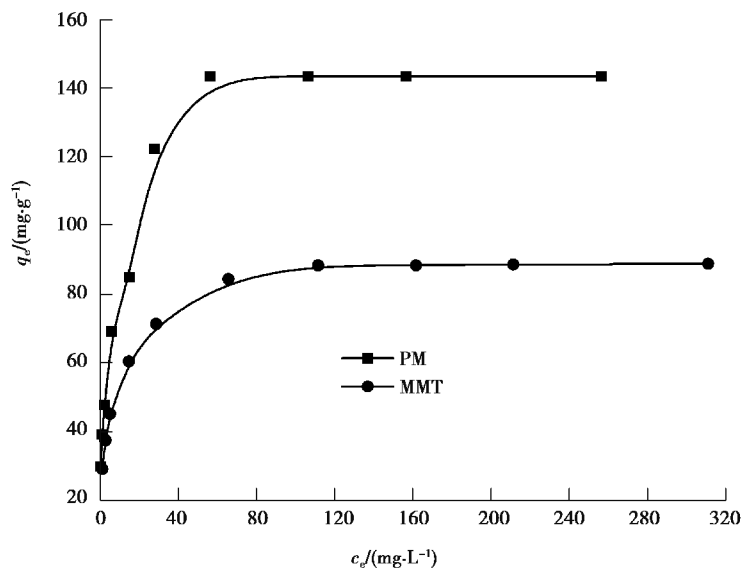


图 6 Pb(II) 吸附量与平衡质量浓度之间的关系

Fig. 6 Relationship between adsorption capacity and equilibrium concentration on Pb(II)

为了进一步研究 PM 对 Pb(II) 的吸附机理, 采用 Langmuir 模型(式(4))和 Freundlich 模型(式(5))对实验数据进行拟合。Langmuir 等温线假设以表面均匀的单分子层吸附, 吸附分子之间没有相互作用^[20-21], Freundlich 等温线假设在非均相表面的多层吸附, 吸附活化能分布不均匀^[21]。

Langmuir 模型

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_m} + \frac{1}{k_L q_m}, \quad (4)$$

Freundlich 模型

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \ln c_e, \quad (5)$$

式中: q_e 为吸附平衡吸附量, mg/g; q_m 为最大吸附量, mg/g; c_e 为平衡吸附浓度, mg/L; k_L 为 Langmuir 模型吸附常数; k_F 和 $1/n$ 为 Freundlich 模型吸附常数。

拟合结果见图 7 和表 2。图 7 和表 2 表明, Langmuir 模型的 R^2 均高于 Freundlich 模型, 说明在吸附的过程中, MMT 和 PM 对 Pb(II) 的吸附均以单分子层吸附为主^[19]。此外, 由 Langmuir 模型求出的 MMT 和 PM 的最大吸附量分别为 90.09 mg/g 和 147.06 mg/g, 与实验结果相差较小。

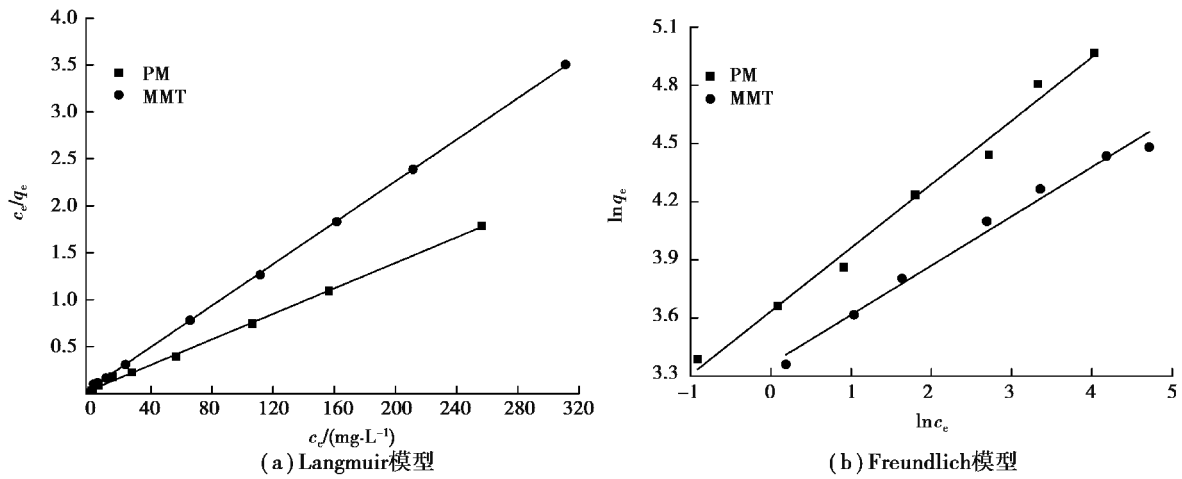


图 7 MMT 和 PM 对 Pb(II)的吸附等温线

Fig. 7 Adsorption isotherms on Pb(II) by MMT and PM

表 2 Pb(II)吸附等温线模型参数

Table 2 model parameters for adsorption isotherms of Pb(II)

材料	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$q_m / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_L / (\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$	R^2	$1/n$	$k_F / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$	R^2
PM	147.1	0.21	0.999	3.05	37.89	0.993
MMT	90.1	0.21	0.999	4.15	30.23	0.991

2.4 pH 值对吸附效果的影响

溶液的 pH 值是影响吸附剂吸附的重要因素^[20]。在 Pb(II)吸附行为中,pH 是一个重要的参数,因为质子浓度的变化可以强烈地改变吸附剂的化学形态以及吸附剂的表面电荷。图 8 为不同初始 pH 下,PM 对 Pb(II)吸附能力的影响。在本研究条件下,当 pH 大于 7 时,Pb(II)将与 OH⁻反应形成沉淀,因此,溶液 pH 值的影响在 2~7 范围内进行。pH 从 2.0 增大到 7.0,PM 对 Pb(II)吸附量由 59.4 mg/g 增加到 140.5 mg/g。在 pH 为 5.5 时,吸附量达到最大。吸附能力随 pH 值的变化可以从吸附剂的表面电荷和结合位点的质子竞争来合理解释。在低 pH 值下,可能由于铅离子与质子之间的竞争而抑制了 PM 对 Pb(II)的吸附^[20]。此外,PM 的 -OH 基团在低 pH 值下吸附更多的正电荷,吸附剂与 Pb(II)之间的静电斥力抑制吸附过程。随着溶液 pH 的增加,质子间的竞争和静电斥力减弱,金属离子的吸附增加^[20-21]。

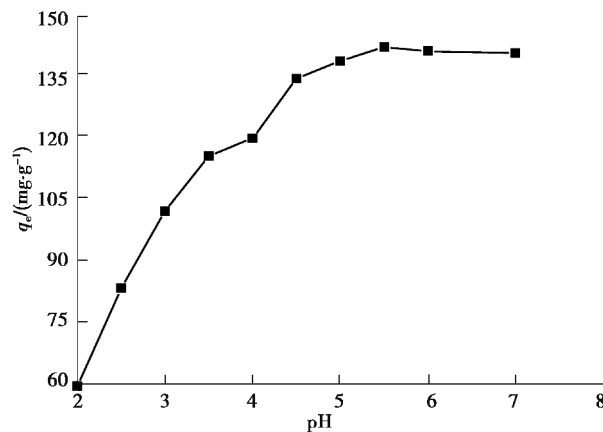


图 8 溶液 pH 值对 PM 吸附 Pb(II)的影响

Fig. 8 Effect of solution pH value on Pb(II) adsorption by PM

3 结 论

1) 由钠基蒙脱土和碳酸钙制备了 PM, 通过 SEM 分析表明, 碳酸钙对钠基蒙脱土形成了“致孔”作用。

2) 吸附动力学研究表明, 准二级动力学方程能较好地描述 PM 对 Pb(II) 的吸附行为, 其吸附过程主要为近单分子层的化学吸附。Langmuir 模型能更好地描述其吸附行为, 25 °C 时 PM 对 Pb(II) 最大吸附量为 143.5 mg/g, MMT 对 Pb(II) 的最大吸附量为 88.8 mg/g, 吸附量提高了 1.6 倍。

3) 溶液 pH 对 PM 吸附 Pb(II) 的影响较大。在低 pH 值下, 吸附受到抑制, pH 为 5.5 时 PM 对 Pb(II) 的吸附量达到最大。

参考文献:

- [1] Bouazza D, Miloudi H, Adjdir M, et al. Competitive adsorption of Cu (II) and Zn (II) on impregnate raw algerian bentonite and efficiency of extraction[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 151: 118-123.
- [2] Liu W, Zhao C, Wang S, et al. Adsorption of cadmium ions from aqueous solutions using nano-montmorillonite: kinetics, isotherm and mechanism evaluations[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2018, 44: 1441-1458.
- [3] Park C W, Kim B H, Yang H M, et al. Enhanced desorption of Cs from clays by a polymeric cation-exchange agent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 327: 127-134.
- [4] 边凌涛, 张连科, 李海鹏, 等. 壳聚糖/羟基镧复合改性膨润土对 Pb(II) 的吸附特性[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(5): 76-84.
BIAN Lingtao, ZHANG Lianke, LI Haipeng, et al. Adsorption property on Pb(II) of bentonite modified by chitosan/hydroxy-lanthanum[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(5): 76-84. (in Chinese)
- [5] Marques M, Fernandes B. Cation exchange and surface complexation of lead on montmorillonite and illite including competitive adsorption effects[J]. *Applied Geochemistry*, 2019, 100: 190-202.
- [6] Ma Y L, LV L, Guo Y R, et al. Porous lignin based poly (acrylic acid)-organo-montmorillonite nanocomposites-swelling behaviors and rapid removal of Pb(II) ions[J]. *Polymer*, 2017, 128: 12-23.
- [7] Tsai W C, Luna M D G D, Bermillo-Arriegas H L P, et al. Competitive fixed-bed adsorption of Pb(II), Cu(II), and Ni (II) from aqueous solution using chitosan-coated bentonite[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2016, 6: 1-11.
- [8] Hua C, Zhu P F, Cai M, et al. Comparative adsorption of Pb (II), Cu (II) and Cd (II) on chitosan saturated montmorillonite-Kinetic, thermodynamic and equilibrium studies[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 143: 320-326.
- [9] 张帆, 李菁, 谭建华, 等. 吸附法处理重金属废水的研究进展[J]. *化工进展*, 2013, 32: 2749-2756.
ZHANG Fan, LI Jing, TAN Jianhua, et al. Advance of the treatment of heavy metal wastewater by adsorption[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32: 2749-2756. (in Chinese)
- [10] 王秀莉, 尚玉俊, 宋丹丹. 新型吸附剂处理重金属废水的研究进展[J]. *工业水处理*, 2014, 7: 5-12.
WANG Xiuli, SHANG Yujun, SONG Dandan. Research progress in a new type of adsorbents for removing heavy metals from wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 7: 5-12. (in Chinese)
- [11] Vijay B Y, Ranu G, Sippy K. Clay based nanocomposites for removal of heavy metals from water-A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 803-817.
- [12] Ma L, Chen Q, Zhu J, et al. Adsorption of phenol and Cu (II) onto cationic and zwitterionic surfactant modified montmorillonite in single and binary systems[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 880-888.
- [13] Taha A, Shreadah M A, Ahmed A, et al. Cd (II), and Ni (II) onto Egyptian Na-activated bentonite; equilibrium, kinetics, thermodynamics, and application for seawater desalination[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4: 1166-1180.
- [14] Ninago M D, López O V, Passaretti M G. Mild microwave-assisted synthesis of aluminum-pillared bentonites[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2017, 129(3): 1517-1531.

- [15] 梁亚琴, 张淑萍, 李慧, 等. 改性蒙脱土去除水中重金属离子研究新进展[J]. 化工进展, 2018, 37(8): 3179-3187.
LIANG Yaqin, ZHANG Shuping, LI Hui, et al. Progress in development of modified montmorillonite for adsorption of heavy metal ions[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(8): 3179-3187. (in Chinese)
- [16] Yang J, Yu K, Liu C. Chromium immobilization in soil using quaternary ammonium cations modified montmorillonite- Characterization and mechanism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 73-80.
- [17] Wang S, Dong Y, He M, et al. Characterization of GMZ bentonite and its application in the adsorption of Pb (II) from aqueous solutions[J]. Applied Clay Science, 2009, 43: 164-171.
- [18] 郭堃梅, 马毅杰, 韩和平, 彭润土对 Pb^{2+} 的吸附性能及影响吸附的主要因素[J]. 环境科学学报, 2000, 20(5): 654-656.
GUO Kunmei, MA Yijie, HAN Heping. Adsorption of Pb^{2+} on Bentonite and major effecting factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(5): 654-656. (in Chinese)
- [19] Zhu S D, Xia M Z, Chu Y T, et al. Adsorption and desorption of Pb(II) on L-Lysine modified montmorillonite and the simulation of interlayer structure[J]. Applied Clay Science, 2019, 169: 40-47.
- [20] Katayoon K, Mansor B A, Hamid R F M, et al. Rapid and high capacity adsorption of heavy metals by Fe_3O_4 /montmorillonite nanocomposite using response surface methodology: preparation, characterization, optimization, equilibrium isotherms, and adsorption kinetics study[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 49: 192-198.
- [21] Ana-Maria G, Françoise N, Valentin Z, et al. Adsorption of lead (II) ions from aqueous solutions onto Cr-pillared clays[J]. Applied Clay Science, 2018, 152: 44-50.
- [22] Liang W D, Liu Y, Sun H X, et al. Robust and all-inorganic absorbent based on natural clay nanocrystals with tunable surface wettability for separation and selective absorption[J]. The Royal Society of Chemistry, 2014, 4: 12590-12595.
- [23] Hannatu A S, Mansor B A, Mohd Z H, et al. Nanocomposite of ZnO with montmorillonite for removal of lead and copper ions from aqueous solutions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 109: 97-105.

(编辑 侯 湘)