



钙铝类水滑石的清洁制备及其对甲基橙的吸附

张 超¹, 周新崇¹, 周 喜¹, 张翠央²

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南邵阳 422000; 2. 湖南省微生物研究院分子室, 湖南长沙 410009)

[摘要] 以氢氧化钙、氢氧化铝和碳酸钠为原料, 利用清洁法制备了钙铝类水滑石, 并探讨了制备方法对钙铝类水滑石吸附甲基橙(MO)性能的影响。通过X射线衍射仪(XRD)、红外光谱仪(IR)、比表面积分析仪、扫描电子显微镜(SEM)和X射线能谱仪(EDS)表征其组成与结构。结果表明, 与传统共沉淀法相比, 在相同吸附条件下, 清洁法制备的钙铝类水滑石(Ca₄Al-LDHs-1)对MO的吸附性能更优, MO的去除率(90.4%)是共沉淀法的5.5倍。此外, Ca₄Al-LDHs-1对MO的吸附更符合准二级动力学模型, 吸附等温线符合Langmuir等温方程, 当MO初始质量浓度为600 mg/L时, Ca₄Al-LDHs-1的平衡吸附容量达545 mg/g。

[关键词] 氢氧化物; 清洁法; 钙铝类水滑石; 甲基橙; 吸附

[中图分类号] TQ424; X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0124-06

Clean preparation of Ca-Al layered double hydroxide and its adsorption for methyl orange dye

ZHANG Chao¹, ZHOU Xinchong¹, ZHOU Xi¹, ZHANG Cuiyang²

(1. Institute of Food and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;

2. Molecular Laboratory, Hunan Institute of Microbiology, Changsha 410009, China)

Abstract: Ca-Al layered double hydroxides (CaAl-LDHs) was cleanly prepared with calcium hydroxide, aluminum hydroxide, and sodium carbonate. The influence of preparation methods on the adsorption effect of methyl orange (MO) was discussed. Its composition and structure were characterized by XRD, IR, specific surface area analyzer, SEM and EDS. The results showed that the adsorption performance for MO of Ca₄Al-LDHs prepared by clean method was better than that of traditional coprecipitation method under the same adsorption conditions, and the removal rate of MO (90.4%) was 5.5 times higher than that of the coprecipitation method. In addition, it was found that the adsorption kinetic and isotherm parameters could be well described by the pseudo second order kinetic model and the Langmuir isotherm equation. When the initial mass concentration of MO was 600 mg/L, the equilibrium adsorption capacity of Ca₄Al-LDHs-1 was up to 545 mg/g.

Key words: hydroxide; clean method; Ca-Al layered double hydroxide; methyl orange; adsorption

甲基橙(Methyl Orange, MO)等偶氮类染料在特殊条件下能分解产生多种致癌物, 对人体健康存在极大的潜在危害。目前, 废水中MO染料的处理方法主要有吸附法、光降解法^[1]等, 吸附法由于操作简单、分离效率高且固液易分离等优势得到广泛应用。

近年来, 以改性生物质材料^[2]、改性聚合物材料^[3]、改性无机材料^[4]等作为吸附剂处理MO的报道很多, 但这些类型的吸附材料普遍吸附容量小, 且加入的改性剂对环境不友好。层状双金属氢氧化物

(LDHs)因其特殊的记忆效应、层间距可调控、层间阴离子可交换等性质, 在吸附领域得到了广泛应用。Na LI等^[5]采用低共熔溶剂(DESs)一步水热法合成Mg₂Al-Cl LDH, S. SAGHIR等^[6]将金属有机框架材料与水滑石复合制得ZIF-67@LDH, 上述水滑石及改性水滑石对MO等阴离子染料具有良好的吸附性能, 但均是以可溶性金属盐及碱为原料通过共沉淀法制备的。共沉淀法的制备过程中原子利用率较低, 会产生大量高浓度含盐废水, 易对环境造成二

[基金项目] 湖南省自然科学基金(2018JJ3475); 湖南省教育厅一般项目(20C1677, 17C1432)

次污染。

本研究以金属氢氧化物代替可溶性金属盐为原料,通过诱导水解清洁制备钙铝类水滑石,滤液可重复使用,减少了废水排放。探讨了不同制备方法(共沉淀法、清洁法)对钙铝类水滑石吸附MO性能的影响,并通过吸附动力学和等温吸附模型拟合,结合吸附前后样品的IR、XRD和SEM图谱,探究了钙铝类水滑石的吸附机理。

1 材料与方法

1.1 实验材料

Ca(OH)₂(质量分数96%); Al(OH)₃、Na₂CO₃、甲基橙、CaCl₂、NaAlO₂、NaOH均为分析纯;自制蒸馏水。

1.2 钙铝类水滑石的制备

(1) 清洁法:取0.16 mol Ca(OH)₂、0.04 mol Al(OH)₃和0.01 mol Na₂CO₃固体于三颈烧瓶中,加入热蒸馏水200 mL,保持油浴温度80℃,机械搅拌反应2 h;将反应液转至晶化釜中,80℃晶化17 h;抽滤,洗涤滤饼3次,再将滤饼于80℃烘箱内烘干,将得到的产物研磨,过75 μm标准筛,装袋,记为Ca₄Al-LDHs-1。

(2) 共沉淀法:取0.16 mol CaCl₂、0.04 mol NaAlO₂和0.01 mol Na₂CO₃溶于120 mL蒸馏水配得A液,取适量NaOH固体溶于120 mL蒸馏水配得B液;将A、B两溶液同时滴入装有60 mL蒸馏水的三颈烧瓶中,控制油浴温度80℃,保持釜内pH为10左右,液体滴加时长约1 h,滴加完毕再机械搅拌反应1 h;将反应液转至晶化釜中,80℃晶化17 h;抽滤,洗涤滤饼3次,再将滤饼于80℃烘箱内烘干,将得到的产物研磨,过75 μm标准筛,装袋,记为Ca₄Al-LDHs-2。

1.3 材料表征

采用Bruke D8 Advance型X射线粉末衍射仪对样品的物相进行分析;利用Thermo Scientific Nicolet iS5型红外光谱仪测定吸附前后样品的分子结构(波数600~1 750 cm⁻¹);比表面积采用康塔AUTOSORB IQ全自动比表面积分析仪分析;样品的形貌及Ca、Al元素的相对含量采用德国ZEISS Gemini 500场发射扫描电子显微镜分析(附X射线能谱仪,德国Bruker);采用722型可见分光光度计测定溶液中

MO的浓度。

1.4 吸附实验

取50 mL一定质量浓度(100~600 mg/L)的MO溶液于锥形瓶中,将锥形瓶置于一定温度(293~303 K)的恒温振荡仪内振荡数分钟,称取50 mg钙铝类水滑石于锥形瓶内,同时开始振荡吸附。隔一段时间取样、过滤,于464 nm下测定上清液的吸光度,吸附后溶液中MO的浓度根据标准曲线 $y=0.070\ 79x+0.0194$ ($R^2=0.999\ 68$)计算。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

2种不同方法合成的类水滑石、MO、Ca₄Al-LDHs-1吸附MO后的红外光谱如图1所示。

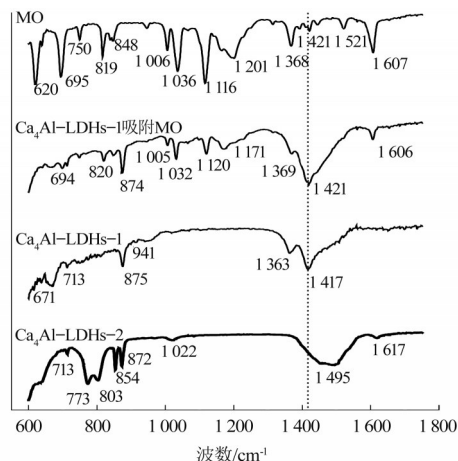


图1 Ca₄Al-LDHs、MO和Ca₄Al-LDHs-1吸附MO后的红外光谱

Fig. 1 IR of Ca₄Al-LDHs, MO and Ca₄Al-LDHs-1 after MO adsorption

由图1可知, Ca₄Al-LDHs-1吸附MO后的样品中出现了MO的特征吸收峰, 820 cm⁻¹和1 120 cm⁻¹分别为苯环C—H键平面外和平面内弯曲振动峰, 1 032 cm⁻¹和1 171 cm⁻¹是—SO₃⁻和S=O的典型吸收峰, 由于MO分子苯环上的C—H平面内弯曲振动峰与S=O伸缩振动峰发生一定重叠, 因此此处峰较宽。1 606 cm⁻¹为C=C双键伸缩振动吸收峰, 与文献[7]报道结果几乎一致, 说明Ca₄Al-LDHs-1成功吸附了甲基橙分子。600~900 cm⁻¹处出现的吸收峰主要是由水滑石结构中金属氧键M—O的伸缩振动产生的, 1 400 cm⁻¹左右出现的强而宽的吸收带很可能是层间CO₃²⁻的反对称伸缩振动引起的^[8]。对比Ca₄Al-LDHs-1和Ca₄Al-LDHs-2的红外图谱, 2种不

同方法合成的类水滑石在组成和结构上存在一定差异。

图2为采用不同方法合成的钙铝类水滑石以及 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后的XRD图谱。

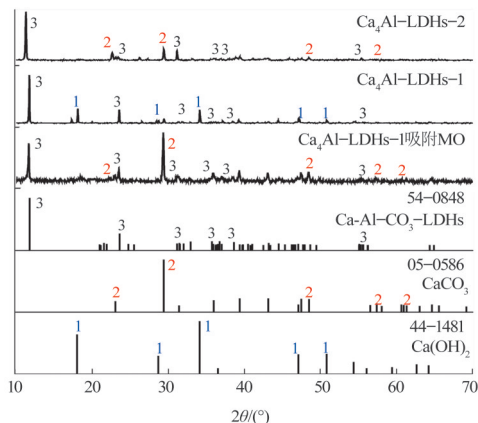


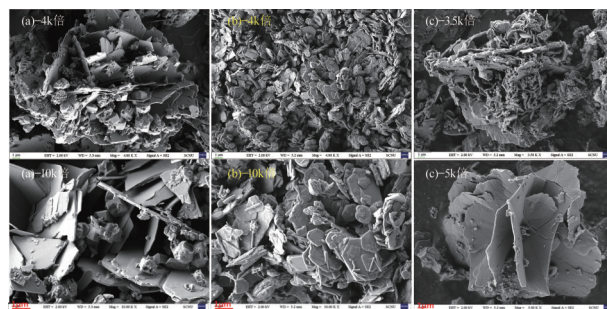
图2 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs}$, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后的XRD

Fig. 2 XRD patterns of $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs}$ and $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ after MO adsorption

由图2可知,3种样品均具有较尖锐的衍射峰,说明类水滑石在吸附前后均保持较好的结晶状态,但吸附MO后的样品衍射峰有明显的变宽现象,可能是MO插入类水滑石层间,使得类水滑石结晶度有所降低^[9];对比类水滑石与PDF卡片中的特征衍射峰,采用清洁法合成的 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 和共沉淀法合成的 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 均至少有2个物相,其中 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 主要包含插层了 CO_3^{2-} 的类水滑石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,而 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 则主要由插层了 CO_3^{2-} 的类水滑石和 CaCO_3 组成,且 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 的特征衍射峰与对应的标准卡片特征衍射峰的位置及强度偏差较小,这可能是由于共沉淀法制备的类水滑石其层间阴离子不仅有 CO_3^{2-} ,同时也有 Cl^- (其特征衍射峰与PDF #44-0616也很相似)。值得重点指出的是, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后出现了 CaCO_3 的特征衍射峰,且峰强度很大,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的特征峰基本消失,说明 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO的过程发生了化学变化,而这一化学变化极可能成为 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 具有较强MO吸附性能的关键原因。

图3为采用清洁法和共沉淀法合成的钙铝类水滑石以及 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后的SEM图。

从图3可以看出,2种方法合成的样品均具有片



(a) $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$; (b) $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$; (c) $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后

图3 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs}$, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO后的SEM

Fig. 3 SEM images of $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs}$ and $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ after MO adsorption

层结构,但清洁法制备的样品尺寸不均匀、堆叠紧致无序、层间距较大,且层间夹杂着较多形貌规则的固体颗粒,结合XRD分析,极可能是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;共沉淀法由于原料混合更加均匀,合成的样品尺寸也相对更均匀,平均粒径较 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 小很多,形貌与文献[10]报道接近。对比 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO前后的SEM发现,吸附前后类水滑石的片层结构与形貌变化不大,但层间形貌规则的固体颗粒明显变少,片层周边形貌不规则的固体颗粒明显增多,说明 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附MO前后确有化学反应,与XRD分析中猜测的结论相符。

图4是能谱仪通过点分析获得的 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 和 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 的元素分布情况。

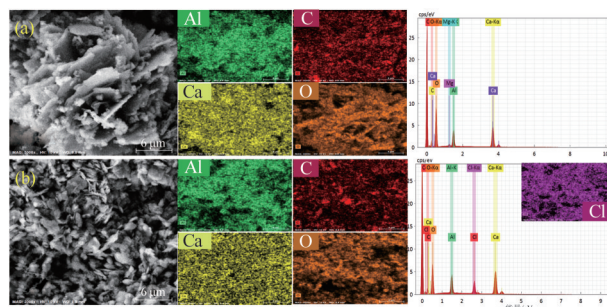


图4 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ (a)和 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ (b)的EDS分析

Fig. 4 EDS analysis of $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ (a) and $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ (b)

从图4可知,2种方法合成的类水滑石中Ca、Al、C、O元素分布均匀,且 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 中均匀分布Cl元素,说明 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 层间既有 CO_3^{2-} 又有 Cl^- ^[11],与XRD分析结果一致。

$\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 和 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-2}$ 比表面积及孔

结构测试结果如表1所示。

表1 Ca₄Al-LDHs的比表面积及孔结构

Table 1 Surface area and pore structure of Ca₄Al-LDHs

样品	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	孔容/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	孔径/nm
Ca ₄ Al-LDHs-1	3.987	0.011	3.078
Ca ₄ Al-LDHs-2	6.536	0.021	3.840

由表1可知,清洁法制备的Ca₄Al-LDHs-1比表面积、孔容及孔径均比共沉淀法制备的样品要小,较文献[12]报道的其他类型的水滑石也小,这主要是因为Ca₄Al-LDHs-1的平均粒径远大于Ca₄Al-LDHs-2,且Ca₄Al-LDHs-1在合成过程中极易生成CaCO₃等其他杂质,加之水热沉淀过程中类水滑石也更容易团聚^[9]。

2.2 制备方法对Ca₄Al-LDHs吸附性能的影响

在MO初始质量浓度为100 mg/L,吸附剂用量为1 g/L,吸附温度为30 ℃,吸附时间为90 min时,考察了清洁法和传统共沉淀法制备的类水滑石对MO去除效果的差异,结果见图5。

如图5所示,清洁法制备的Ca₄Al-LDHs-1对MO的去除率达90.4%,是传统共沉淀法制备的Ca₄Al-LDHs-2的5.5倍,这与史月月等^[(13)-(14)]提到的情况相似,材料的吸附性能与材料的比表面积和孔容非正相关。究其原因,主要取决于材料的吸附机理。目前,关于MO的吸附机理包括:与材料本身的比表面积和孔径结构相关的物理吸附,以及与材料表面的官能团或材料层间特殊作用相关的物理/化学吸附^[(11),(15)]。钙铝类水滑石由于制备过程中易团聚^[9]或产生其他杂质,因而比表面积和孔容较小,主要靠其

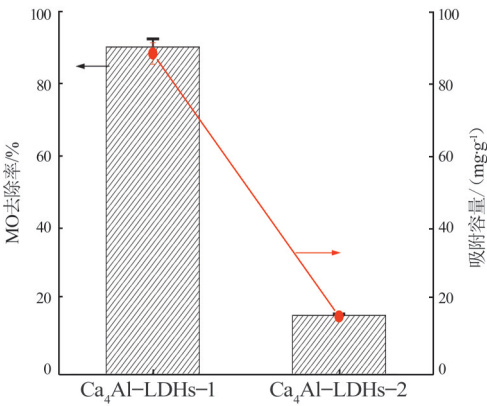


图5 制备方法对类水滑石吸附MO性能的影响

Fig. 5 Effect of preparation method of Ca₄Al-LDHs on MO adsorption

结构正电荷与阴离子产生静电引力,从而实现吸附作用。而Ca₄Al-LDHs-1由于层间夹杂少量Ca(OH)₂,其在低温水溶液中具有一定的溶解度,溶解出来的Ca²⁺与类水滑石层间交换出来的CO₃²⁻结合生成CaCO₃(Ca₄Al-LDHs-1吸附MO后的XRD已证实),这一反应便成为MO阴离子交换层间CO₃²⁻的驱动力,使得MO不断插层进入类水滑石层间,而溶液中Ca²⁺浓度的降低又促使Ca(OH)₂继续溶解,由此实现Ca₄Al-LDHs-1对MO的高吸附容量。

2.3 吸附动力学

在不同温度(293、303、313 K)下测量了Ca₄Al-LDHs-1对100 mg/L的MO溶液的平衡吸附量随吸附时间的变化。不同温度下, Ca₄Al-LDHs-1均能在吸附40 min左右达到平衡。将实验数据用准一级动力学和准二级动力学方程拟合,结果见表2。

表2 Ca₄Al-LDHs-1吸附MO的动力学数据

Table 2 Adsorption kinetics parameters of MO on Ca₄Al-LDHs-1

T/K	$C_0/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$q_{\text{e,exp}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	准一级动力学			准二级动力学		
			$q_{\text{e,cal}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_{\text{e,cal}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	R^2
293	100	98.51	54.97	0.048 04	0.891 7	100	0.003 623	0.999 87
303	100	97.31	17.47	0.038 99	0.979 7	98.04	0.006 120	0.999 98
313	100	94.35	5.234	0.021 7	0.829 7	93.46	0.018 77	0.999 99

由表2的 R^2 可知,不同温度下Ca₄Al-LDHs-1对MO的吸附均符合准二级动力学,由此说明MO分子在Ca₄Al-LDHs-1上的吸附过程受外部液膜扩散、表面吸附和内部扩散综合因素的影响^[(16)],且数据拟合

得到的平衡吸附量($q_{\text{e,cal}}$)与实验值($q_{\text{e,exp}}$)更接近。

2.4 MO的初始浓度对吸附效果的影响

图6是不同温度下Ca₄Al-LDHs-1对MO的吸附等温线及不同初始浓度对MO吸附性能的影响。由

图 6(b)可知,当 MO 的初始质量浓度小于 350 mg/L 时, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 具有良好的去除率和吸附容量,且吸附容量随着初始质量浓度的增大迅速增加,低温时吸附更好;当 MO 的初始质量浓度大于 350 mg/L 时,则温度越高,吸附效果越好。

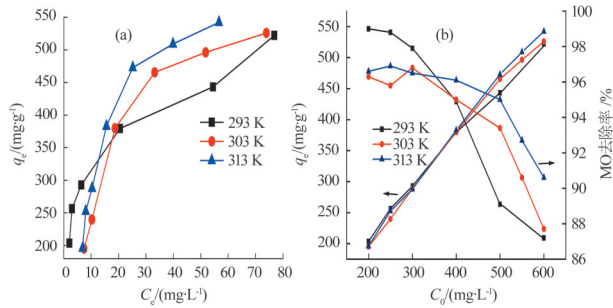


图 6 温度(a)和 MO 初始质量浓度(b)对 MO 吸附性能的影响

Fig. 6 Effect of temperature (a) and initial mass concentration (b) on MO adsorption

将实验数据代入 Langmuir 等温方程和 Freundlich 等温方程中进行拟合,相应的热力学参数及相关系数见表 3。由 R^2 可知,实验温度下, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 的吸附更符合 Langmuir 等温方程。

表 3 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 的吸附等温线参数

Table 3 Isotherm parameters of MO adsorbed on $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$

T/K	Langmuir 等温模型			Freundlich 等温模型		
	$q_m/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	$K_L/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	R^2	$K_F/(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1})$	n	R^2
293	526.32	0.196 5	0.993 78	186.05	4.32	0.988 34
303	645.16	0.064 96	0.997	89.75	2.28	0.962 19
313	689.66	0.070 32	0.994 92	95.13	2.17	0.958 71

2.5 吸附容量与其他吸附剂对比

表 4 对比了 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 和其他文献报道的吸附材料对 MO 的饱和/平衡吸附容量,从数据可以看出, $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 的吸附容量 (545 mg/g) 明显大于其他类型的水滑石及改性材料,且本法操作简单,滤液可重复利用,具有较强的工业应用前景。

3 结论

(1) 清洁法和共沉淀法均能制备具有层状结构的类水滑石。相同吸附条件下,清洁法制备的样品对 MO 的去除率 (90.4%) 是共沉淀法样品的 5.5 倍。

(2) $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 的吸附更符合准二级动力学模型和 Langmuir 等温方程。

表 4 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 对 MO 的吸附容量与其他文献对比情况

Table 4 Comparison of MO adsorption capacity of $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ with literatures

吸附剂	饱和/平衡吸附容量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	参考文献
$\text{Mg}_2\text{Al-LDH(SDS)}$	44.4	[17]
$\text{Mg}_{2.5}\text{Al-LDH}$	83.33	[18]
$\text{Zn}_2\text{Al-LDH}$	110.52	[19]
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@HTlc}$	138.9	[20]
Ca-Mg-Al-Fe LDHs	490.2	[21]
$\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}(\text{CO}_3^{2-})$	545	本研究

(3) 比表面积分析及 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs-1}$ 吸附 MO 前后的 IR、XRD 及 SEM 表明,吸附作用主要是层间阴离子交换作用的结果,且吸附过程中发生的化学反应促进了 MO 阴离子与 CO_3^{2-} 的层间交换作用。

(4) 清洁法制备的 $\text{Ca}_4\text{Al-LDHs}$ 是一类低成本、高效能、环保的吸附材料,有望工业化并成为去除阴离子污染物的候选材料。

参考文献

- [1] ZENG Qianqian, LIU Ying, SHEN Liguang, et al. Facile preparation of recyclable magnetic Ni@filter paper composite materials for efficient photocatalytic degradation of methyl orange [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 582: 291-300.
- [2] 黄岚, 张顺喜, 刘霞, 等. HNO_3 改性鱼鳞对染料废水中甲基橙吸附探究 [J]. 应用化工, 2020, 49(11): 2816-2820.
HUANG Lan, ZHANG Shunxi, LIU Xia, et al. Adsorption of methyl orange by modified fish scales with HNO_3 [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(11): 2816-2820.
- [3] HUSSAIN S, KAMRAN M, KHAN S A. Adsorption, kinetics and thermodynamics studies of methyl orange dye sequestration through chitosan composites films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 168: 383-394.
- [4] RADOOR S, KARAYIL J, JAYAKUMAR A, et al. Efficient removal of methyl orange from aqueous solution using mesoporous ZSM-5 zeolite: Synthesis, kinetics and isotherm studies [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 611: 125852.
- [5] LI Na, CHANG Zhidong, DANG Hui, et al. Deep eutectic solvents assisted synthesis of MgAl layered double hydroxide with enhanced adsorption toward anionic dyes [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 591: 124507.
- [6] SAGHIR S, XIAO Zhenggang. Hierarchical mesoporous ZIF-67@LDH for efficient adsorption of aqueous methyl orange and alizarine red S [J]. Powder Technology, 2021, 377: 453-463.
- [7] GRÉGOIRE B, BANTIGNIES J L, LE-PARC R, et al. Multiscale mechanistic study of the adsorption of methyl orange on the external

- surface of layered double hydroxide [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(36): 22212–22220.
- [8] ZHANG Ping, WANG Tianqi, QIAN Guangren, et al. Removal of methyl orange from aqueous solutions through adsorption by calcium aluminate hydrates [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 426: 44–47.
- [9] CAO Lei, GUO Jintang, TIAN Jianhua, et al. Preparation of Ca/Al-layered double hydroxide and the influence of their structure on early strength of cement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 203–214.
- [10] ZHANG Ping, OUYANG Sida, LI Peng, et al. Effect of anion co-existence on ionic organic pollutants removal over Ca based layered double hydroxide [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 534: 440–446.
- [11] KO S J, YAMAGUCHI T, SALLES F, et al. Systematic utilization of layered double hydroxide nanosheets for effective removal of methyl orange from an aqueous system by π - π stacking-induced nanoconfinement [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 277: 111455.
- [12] YANG Kai, DU Yi, SHEN Jie, et al. Preparation and characterization of hydrotalcite with superb absorption capacity toward congo red [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2019, 34(4): 866–875.
- [13] 史月月, 单锐, 袁浩然. 改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 [J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2783–2792.
- SHI Yueyue, SHAN Rui, YUAN Haoran. Effects and mechanisms of methyl orange removal from aqueous solutions by modified rice shell biochar [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2783–2792.
- [14] 刘红光, 张贯艳, 刘强, 等. CoFe_2O_4 /磺化石墨烯的合成及对低浓度甲基橙的吸附 [J]. 工业水处理, 2018, 38(12): 60–63.
- LIU Hongguang, ZHANG Guanyan, LIU Qiang, et al. Synthesis of CoFe_2O_4 /sulfonated graphene and its adsorption for low-concentration methyl orange [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38(12): 60–63.
- [15] LING Faling, FANG Liang, LU Yi, et al. A novel CoFe layered double hydroxides adsorbent: High adsorption amount for methyl orange dye and fast removal of Cr(VI) [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2016, 234: 230–238.
- [16] 李冬, 陈华军. 活化煤矸石对水中亚甲基蓝吸附行为的研究 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 109–111.
- LI Dong, CHEN Huajun. Adsorption of methylene blue from aqueous solution on activated coal gangue [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(3): 109–111.
- [17] 龚娴, 杨陈凯, 马若男, 等. 三维花状层状双金属氢氧化物的制备及其对甲基橙的去除 [J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1396–1342.
- GONG Xian, YANG Chenkai, MA Ruonan, et al. Synthesis of 3D flower-like hierarchical layered double hydroxide microspheres and removal of methyl orange [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(6): 1396–1342.
- [18] 张璐虹, 唐有根, 张丽, 等. MgAl-LDH 吸附甲基橙性能研究 [J]. 功能材料, 2012, 43(18): 2469–2472.
- ZHANG Luhong, TANG Yougen, ZHANG Li, et al. Studies on adsorption of methyl orange from aqueous onto Mg/Al-LDH [J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(18): 2469–2472.
- [19] 刘宇程, 张寅龙, 陈明燕, 等. Zn-Al 水滑石及焙烧产物对甲基橙废水的吸附研究 [J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(4): 435–438.
- LIU Yucheng, ZHANG Yinlong, CHEN Mingyan, et al. Adsorption research of Zn-Al hydrotalcite and calcined product to methyl orange waster water [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(4): 435–438.
- [20] 毕浩宇, 李燕, 周丹, 等. 磁性镁铝类水滑石的制备及其对甲基橙的吸附研究 [J]. 化学通报, 2018, 81(2): 175–181.
- BI Haoyu, LI Yan, ZHOU Dan, et al. Preparation of Fe_3O_4 @hydrotalcite-like compound and its adsorption capacity for methyl orange [J]. Chemistry, 2018, 81(2): 175–181.
- [21] 王晨晔, 陈艳, 郭占成, 等. 以钢渣为原料合成 Ca-Mg-Al-Fe 层状双金属氢氧化物及其对甲基橙的吸附 [J]. 过程工程学报, 2018, 18(3): 570–574.
- WANG Chenye, CHEN Yan, GUO Zhancheng, et al. Preparation of Ca-Mg-Al-Fe layered double hydroxides using steelmaking slag as raw material and its adsorption to methyl orange [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(3): 570–574.
- [作者简介] 张超(1987—), 硕士, 讲师。E-mail: 175095516@qq.com。
- [收稿日期] 2021-12-20(修改稿)