

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.09.004

重金属螯合吸附剂的制备和吸附性能研究

严炜鑫^{1,2}, 王一鸣², 蔡建刚², 穆金鑫^{1,2}, 李忠玉^{1*}, 张雨哲¹, 韩晓刚^{2*}

(1. 常州大学 环境科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州清流环保科技有限公司, 江苏 常州 213144;)

摘要: 采用 CS₂、C₃H₅ClO 等原料制备螯合吸附材料 HDTC, 用于探究吸附剂在废水中对 Zn²⁺、Pb²⁺ 离子的吸附性能, 采用 SEM、BET 和 FTIR 等表征手段对 HDTC 进行分析, 对比传统吸附剂活性炭等, 其具有较好的孔隙结构, 其孔径与比面积达到 28.089 2 nm、36.87 m²/g。同时考察不同温度、pH 条件下 HDTC 对 Zn²⁺、Pb²⁺ 的吸附效果。结果表明, 在 pH 为 5~6、温度 45 °C 条件下, HDTC 对 Zn²⁺、Pb²⁺ 的饱和吸附量分别为 368.9 和 435.3 mg/g, 对 Zn²⁺、Pb²⁺ 的吸附过程满足二级动力学方程和 Langmuir 吸附等温模型。

关键词: 重金属;螯合;吸附;锌;铅

中图分类号: X703

文献标识码: A

Study on the preparation and adsorption properties of heavy metal chelating adsorbent

Yan Weixin^{1,2}, Wang Yiming², Cai Jiangang², Mu Jinxin^{1,2},
Li Zhongyu^{1*}, Zhang Yuzhe¹, Han Xiaogang^{2*}

(1.Department of Environmental Science & Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.Changzhou Qingliu environmental protection technology Co., Ltd, Changzhou 213144, China)

Abstract: The chelating adsorption material HDTC was prepared by using CS₂、C₃H₅ClO and other raw materials to explore the adsorption performance of the adsorbent for Zn²⁺ and Pb²⁺ ions in wastewater. In this paper, SEM, BET and FTIR were used to analyze HDTC. Compared with traditional adsorbents such as activated carbon, it has better pore structure, and its pore size and specific area reach 28.0892 nm and 36.87 m²/g. At the same time, the adsorption effect of HDTC on Zn²⁺ and Pb²⁺ under different temperature and pH conditions was investigated. The results showed that the saturated adsorption capacities of HDTC for Zn²⁺ and Pb²⁺ were 368.9 and 435.3 mg/g, respectively, under the conditions of pH 5 ~ 6 and temperature 45 °C. The adsorption process of Zn²⁺ and Pb²⁺ satisfied the second-order kinetic equation and Langmuir adsorption isotherm model.

Keywords: heavy metal; chelating; adsorption; zinc; lead

目前, 重金属污染问题在中国是一个严峻的环境问题。随着科学、工业和城市化的发展, 重金属

污染问题逐渐加剧^[1]。特别是在金属采矿、选矿、冶炼等工业过程中, 会产生大量含有铅、锌、镉、

收稿日期: 2024-04-05

修回日期: 2024-05-23

作者简介: 严炜鑫 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 固体废物资源化处置利用, email: 2026951661@qq.com
韩晓刚 (1983—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向: 危险废物资源化处置利用, email: 237414866@qq.com

通信作者: 李忠玉 (1970—), 男, 教授, 研究方向: 生态环境材料, email: 2483423851@qq.com

铬、汞、铜等重金属的废水、废酸和废渣^[2]。此外,城市中的汽车尾气排放也成为土壤中重金属污染的主要来源之一。对重金属污染处理的方法有很多种,物理方法有吸附、膜过滤和离子交换^[3];化学方法有化学反应、高级氧化等^[4];另外还有微生物法与植物吸附法^[3,4]。

螯合吸附剂是一种特殊的吸附剂,20世纪50年代得到发现并在含有重金属离子的废水中得到大量的研究和应用^[5]。徐超等^[6]对多胺类螯合吸附剂在微污染环境、高盐重金属等方面应用进行了重点总结,并归纳了多胺类螯合吸附剂在上述复杂环境中作用机理和未来研究的方向进行详细说明。潘伟民等^[7]以 Fe_3O_4 微球为磁核、二硫代甲酸基接枝交联环氧氯丙烷-三乙基四胺共聚物,制备了一种新型磁性核螯合吸附剂(FETCS),并研究了其对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附性能,表明pH为5~8和温度为25℃时,FETCS对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附容量分别为293.85和256.69 mg/g。王中华等^[8]制备了纤维素基多胺型螯合吸附剂(CPP),并研究其对 Pb^{2+} 的吸附性能,结果表明:吸附剂用量、吸附时间、溶液初始pH值、温度等对吸附性能有影响,Langmuir和伪二级动力学模型能更好地拟合CPP对 Pb^{2+} 的吸附过程。当重金属离子进入材料孔隙时,这种吸附剂主要通过整合作用,即形成配位键的方式,与重金属离子结合,从而达到去除重金属离子的目的^[9]。螯合吸附剂的选择性较好,可以针对特定的重金属离子进行吸附,且吸附容量大,易于再生,成本低^[10]。

常规的废水处理用的吸附剂对于重金属的吸附性不仅用量大,而且性能较差。因此笔者制备了重金属螯合吸附剂(HDTC),并研究其对废水中 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的热力学和吸附动力学,探究它的吸附机理以及循环利用的性能,为治理废水中的重金属污染提供参考。

1 实验部分

1.1 实验原料与仪器

实验用化学试剂主要有氢氧化钠、二硫化炭(CS_2)、二乙烯三胺(DETA)、环氧氯丙烷($\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$);无水乙醇、丙酮等,均为分析纯。

实验及分析仪器主要有:X-射线荧光光谱仪(XRF);PHS-3C型pH计;D/max2500X射线衍射仪(XRD);Nicolet 380型傅里叶红外光谱仪(FTIR);SHA-B型恒温水浴振荡器;720型UV-Vis分光光度

计;德国Zeiss Gemini 300扫描电子显微镜(SEM);表面积和孔隙率Bruner-Emmett Taylor (BET)通过美国Micromeritics 3Flex (Micromeritics)技术进行测试。

1.2 实验内容

(1) HDTC的制备

在配有电磁搅拌的三口圆底烧瓶中加入水100 mL,氢氧化钠10.0 g,待氢氧化钠溶解冷却后加入DETA 12 mL,再缓慢滴加 CS_2 14 mL(为防止有机物挥发,在滴加时使用冷水浴),滴加完毕,在室温下反应1 h,至溶液颜色呈橙黄色。用滴液漏斗以每秒一滴的速度逐滴滴加环氧氯丙烷10 mL,滴加完毕后继续搅拌至完全反应,转入60℃热水浴中,反应4小时,得到乳白色粘性固体。取出固态产物,先用蒸馏水冲洗,再用丙酮冲洗一遍,接着用无水乙醇冲洗两遍,随后再用蒸馏水冲洗直到产物为pH为中性,得到白色颗粒状最终产物。放在烘箱里烘干、称重、保存在干燥器里备用。

(2) 吸附实验

吸附动力学:将各100 mL的0.1 mol/L浓度的 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 离子溶液分别倒入锥形瓶中,加入1.0 g HDTC,在恒温水浴振荡器中20℃条件下分别10、20、30、40、50、60、70和80 min后进行抽滤。测定滤液中剩余离子浓度,同时计算吸附量。

吸附等温线:取不同浓度(0.04、0.06、0.08、0.1、0.12、0.16和0.20 mol/L)的 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 离子溶液,向每100 mL中加入1 g HDTC,然后在25、35和45℃的条件下,分别用恒温振荡器搅拌1 h,并进行过滤。对收集滤液离子浓度测定,并计算其平衡吸附量 q_e 。

pH值的作用影响:分别取浓度为0.1 mol/L的 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 离子溶液各100 mL,通过加入盐酸或者氢氧化钠溶液将其pH值调节至1至7之间。接着向每个溶液中加入1 g的HDTC,振荡1 h后进行抽滤以分离溶液。最后对剩余离子浓度进行测定,以此来计算其吸附量。

(3) 结果测定

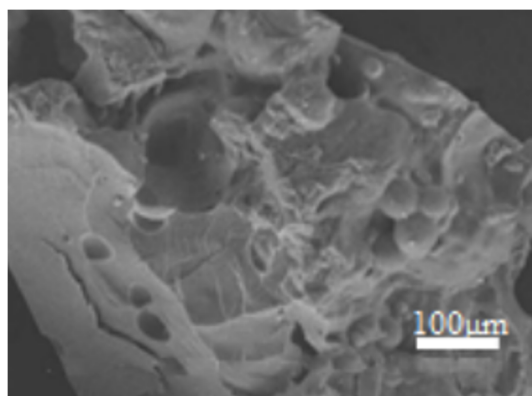
Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的剩余质量浓度,按照GB/T7475-1987的方法测定。

2 结果与讨论

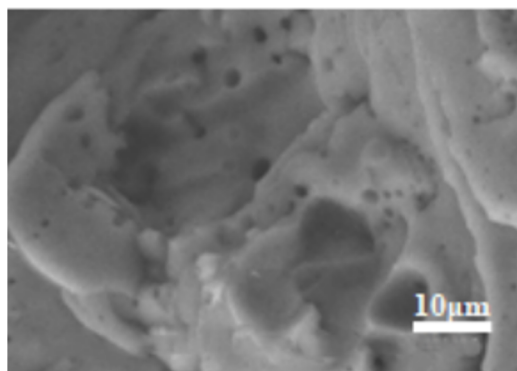
2.1 HDTC 的表征

(1) SEM分析

图1为螯合吸附剂HDTC的SEM分析图,图中看出HDTC吸附剂表面有明显的褶皱,凹凸不平,并且有大小不一且分布不均匀的孔隙,为吸附剂吸附溶液中的污染物提供有利的通道和空隙。



(a)×200



(b)×2000

图1 HDTC的SEM图

Fig.1 SEM photos of HDTC

(2) BET表征

吸附剂的表面结构会影响吸附剂的吸附性能,这主要取决于吸附剂的表面性质,气体吸附BET法是测定固态物质比表面积最常用的方法之一^[11],如图2所示利用比表面积和孔径分析仪测定吸附剂HDTC的比表面积为 $36.87 \text{ m}^2/\text{g}$,孔体积为 0.0258 mL/g ,而传统吸附剂活性炭的BET比表面积为 $500 \sim 1500 \text{ m}^2/\text{g}$,孔体积约 $0.26 \sim 0.9 \text{ mL/g}$,超细粉煤灰螯合吸附剂的BET比表面积为 $6.917 \text{ m}^2/\text{g}$,孔体积为 0.0056 mL/g ^[12]。

HDTC的孔结构特征如表1所示。三者相比,活性炭比高分子螯合吸附剂HDTC有着更大的比表面积和孔体积,而HDTC的比表面积和孔体积比超细粉煤灰螯合吸附剂的要大。比表面积大可以使吸附材料和污染物有更多的接触机会。孔体积丰富,可以为吸附污染物提供更多的吸附容量。

表1 HDTC和常规吸附剂孔结构特征对比

Tab.1 Comparison of pore structure characteristics between HDTC and conventional adsorbents

样品	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径/nm
HDTC	36.87	0.0258	28.0892
传统吸附剂 活性炭	500 ~ 1500	0.26 ~ 0.9	1.5 ~ 5
超细粉煤灰 螯合吸附剂	6.917	0.0056	5.057

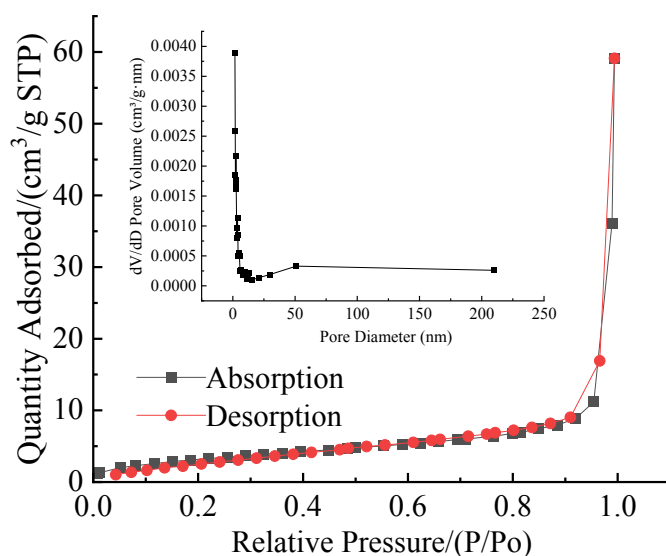


图2 HDTC的BET图

Fig.2 BET photos of HDTC

(3) FTIR表征

图3为DETA和HDTC的红外光谱图。由图3可知, 3 443 cm^{-1} 附近的强吸收峰为S-H伸缩振动吸收, 2 500~3 009 cm^{-1} 之间的峰是为亚甲基- CH_2 -伸缩振动吸收, 吸附剂HDTC在1 499 cm^{-1} 处出现N-C=S的特殊的吸收峰, 1 269 cm^{-1} 处出现了C=S的伸缩振动吸收峰, 在748 cm^{-1} 处出现C-S伸缩振动吸收峰, 由此可以证明产物中含有二硫代羧基。在1 033 cm^{-1} 附近出现吸收峰分别属于-OH的变形振动吸收, 说明环氧氯丙烷发生开环反应, 且在857和1 158 cm^{-1} 的范围内, 没有观察到吸收峰的出现, 这意味着环氧基是不存在的, 这表明环氧氯丙烷经历了开环交联的化学反应, N原子上的H被环氧氯丙烷成功取代。其化学结构与预期结构相一致。2 820、2 900和3 025 cm^{-1} 处DETA的特征峰在HDTC相应位置上都有体现, 说明合成的HDTC具有了DETA的相应官能团。

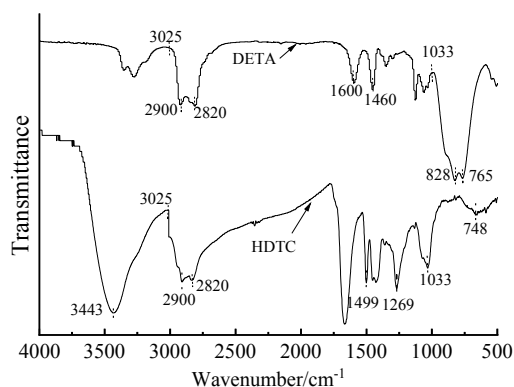


图3 HDTC的FTIR图

Fig.3 FTIR curves of HDTC

2.2 吸附动力学

经过不同时间吸附后, HDTC对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 两种重金属离子的吸附量与吸附时间关系见图4。

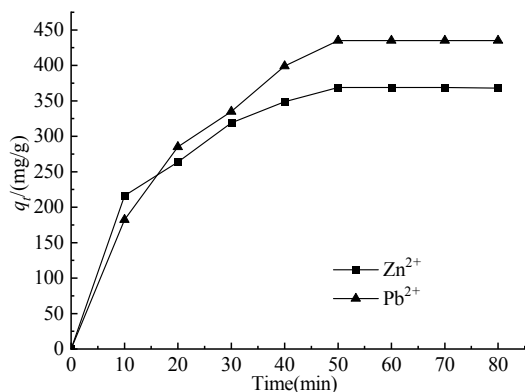


图4 HDTC吸附 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附动力学

Fig.4 Adsorption kinetics of Zn^{2+} and Pb^{2+} by HDTC

从图4中可以看出, 在吸附初期, 吸附速度相对都较快, 但随着吸附过程的深入, 这一速度逐渐减缓, 直至到达吸附的平衡状态。这种现象的出现是因为在初始吸附阶段, 溶液中的重金属离子浓度相对较高, 而在螯合吸附剂HDTC上的浓度则相对较低, 这使得吸附远离平衡状态, 从而增加了传质的推动力。另外, HDTC上存在大量的吸附位点, 这使得吸附过程能够迅速进行; 随着吸附过程的深入, 液相中的重金属离子浓度开始减少, 而HDTC上的金属离子的浓度上升, 导致吸附的驱动力减弱。与此同时HDTC上的吸附位点逐步减少, 从而使得吸附速率逐步下降, 直到达到一个稳定状态。当吸附 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 时, HDTC达到平衡所需的时间为50 min。此时HDTC对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附量分别为368.9和435.3 mg/g。这种对重金属离子快速吸附机理符合螯合吸附机理, 吸附作用主要为螯合作用力, 再加上高分子吸附剂在水溶液中溶胀扩张, 非常有利于重金属离子扩散到作用位点上, 从而达到上述良好的吸附行为^[13]。

吸附动力学可以反应螯合吸附剂对重金属离子的吸附速率^[14]。Lagergren一阶反应动力学模型和二阶反应动力学模型是常用的研究固-液吸附体系的动力学模型, 其表达式分别如下^[15, 16]:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

式中: q_t 为 t 时刻吸附量, mg/g; q_e 为平衡吸附量, mg/g; k_1 为一级吸附速率常数, min^{-1} ; k_2 为二级吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

由表2可知, HDTC吸附 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附行为更符合二级吸附动力学模型, HDTC对上述两种金属离子的吸附属化学反应。

2.3 吸附等温线

HDTC对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 两种重金属离子的吸附等温线如图5所示, 在同一温度下, 随着溶液浓度的增加, 其平衡吸附量也随之增加, 并逐渐趋于饱和; 在同一浓度下, 随着温度的升高, 吸附量增大, 表明吸附过程是吸热反应^[17]。

对于螯合吸附剂吸附金属而言, 吸附等温曲线能够反应树脂的表面性质、树脂与金属离子之间的相互关系, 揭示吸附机理, 对优化吸附体系的条件参数设计和预测模拟吸附过程等方面均有重要作用^[8]。Langmuir模型和Freundlich模型是应用最为广泛的两种^[18]。

表 2 HDTC 吸附 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的动力学方程回归参数

Tab.2 Regression parameters of kinetic equations for adsorption of Zn^{2+} and Pb^{2+} by HDTC

重金属离子	Lagergren 一级动力学			Lagergren 二级动力学		
	$k_1(\times 10^{-2}/\text{min})$	$q_e(\text{mg/g})$	R^2	$k_2(\times 10^{-5}\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min})$	$q_e(\text{mg/g})$	R^2
Zn^{2+}	8.91	438.1	0.876	0.53	434.8	0.995
Pb^{2+}	11.58	1 426.6	0.919	0.33	555.6	0.988

Langmuir模型线性表达式为^[19]:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q^0} + \left(\frac{1}{bQ^0} \right) \left(\frac{1}{C_e} \right) \quad (3)$$

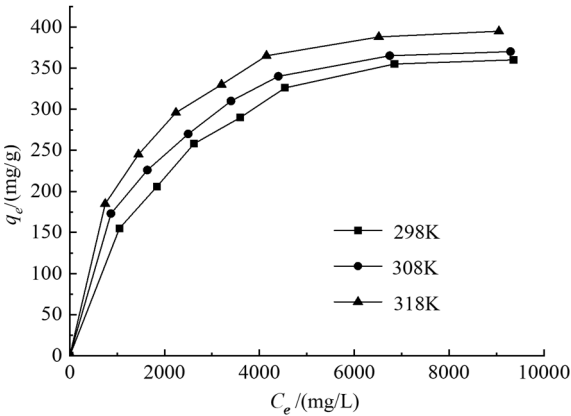
式中: q_e 为单位质量吸附剂对吸附质的吸附量, mg/g ; Q^0 为构成单分子层吸附过程中单位质量吸附剂的饱和吸附量, mg/g ; C_e 为平衡时溶液中的剩余吸附

质的浓度, mg/L ;

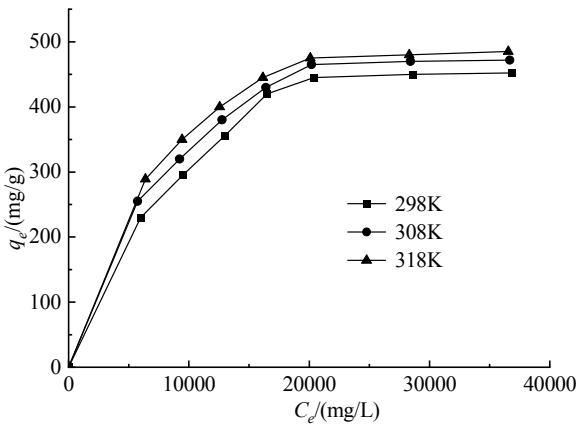
Freundlich模型的线性表达式为^[20]:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

式中: K_F 为与温度、吸附剂比表面积等因素有关的常数; n 为与温度等因素有关的常数, $n > 1$, 说明吸附为优惠吸附, $n < 1$, 表示非优惠吸附。



(a) Zn^{2+}



(b) Pb^{2+}

图 5 HDTC 吸附重金属离子的吸附等温线

Fig.5 Adsorption isotherm for HDTC adsorption of heavy metal ions

HDTC 吸附 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的 Langmuir、Freundlich 吸附等温式的线性回归见表 3。

表 3 HDTC 吸附重金属离子的等温线回归数据

Tab.3 Isotherm regression data of heavy metal ions adsorbed by HDTC

重金属离子	温度 (K)	Langmuir			Freundlich		
		$b/(\times 10^{-4}\text{L}/\text{mg})$	$Q^0/(\text{mg}/\text{g})$	R^2	K_F	n	R^2
Zn^{2+}	298	0.58	384.5	0.992 2	10.13	2.49	0.954 4
	308	0.92	400.2	0.989 0	19.00	2.98	0.951 3
	318	1.89	416.7	0.993 1	25.08	3.19	0.946 0
Pb^{2+}	298	0.28	476.2	0.973 4	8.28	2.57	0.880 7
	308	0.40	499.5	0.981 1	13.68	2.88	0.898 5
	318	0.63	526.32	0.977 2	22.44	3.32	0.883 8

由图5和表3可以看出,与Freundlich相比,吸附采用Langmuir等温式方程相关系数 R^2 均大于0.97,等温式回归效果,因为螯合吸附剂对金属离子的吸附是属于化学吸附范畴^[21],而化学吸附的重要特征之一就是单分子层吸附,因此以上实验结果与理论是相符的^[22]。高温有利于吸附的进行,在318 K时,由Langmuir等温式所计算的HDTC对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 的单层饱和吸附量分别为416.7和526.32 mg/g。

2.4 pH 对于 HDTC 吸附性能的影响

溶液的pH是影响物质吸附的重要因素之一,它不但影响吸附质、吸附剂表面电荷的种类和性质,还影响吸附质、吸附剂的存在形式^[23]。图6为 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 在不同pH值下的吸附量曲线。

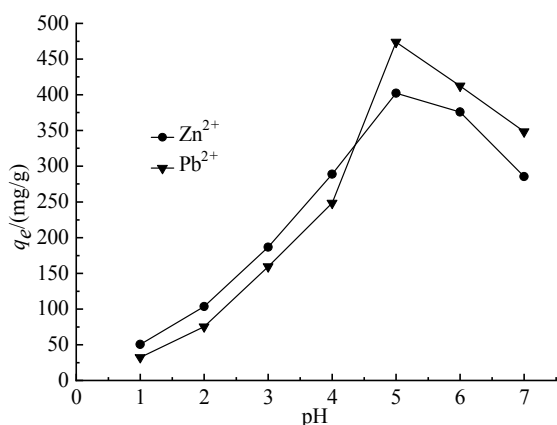


图6 pH对吸附容量的影响曲线

Fig.6 The influence curve of pH on adsorption capacity

由图6可以看出,当pH为1~7时,吸附量随pH值的增加呈现先增加后减小的规律。在pH值为5~6时吸附性能最好。对于 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} ,当pH小于5时,随着pH的增大,吸附容量增高;pH等于5时,吸附容量达到最高,其吸附量分别达到402.2和474.2 mg/g;当pH>5时,吸附容量又下降。这是由于金属离子和 H^+ 均具有空轨道和易于接收硫的孤对电子的缘故^[24]。 H^+ 具有很强的竞争力,不容易和金属离子发生配位,这在某种程度上会抑制HDTC吸附金属阳离子,从而降低其吸附量^[25]。表面的负电荷增多,重金属离子的吸附位点增加,使得HDTC对重金属离子的吸附量急剧上升;当pH过高时,重金属离子会发生水解作用,生成的螯合物稳定性降低,形成沉淀。在pH=2以下,吸附剂对重金属离子的吸附容量相对较小,因此可以用酸溶液对吸附剂进行脱附再生^[26]。

2.5 HDTC 的吸附机理分析

图7为吸附剂HDTC吸附前后的数码照片。图7(a)为吸附前,图7(b-c)为HDTC分别吸附 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 后照片。由照片明显可以看出HDTC原样由乳白色分别变成红褐,浅黄,经多次水洗,仍未褪色,说明HDTC对重金属离子吸附过程中化学反应^[27]。



(a) 吸附前

(b) 吸附 Pb^{2+}

(c) 吸附 Zn^{2+}

图7 HDTC 吸附重金属离子前后数码照片

Fig.7 Digital photographs of heavy metal ions before and after adsorption by HDTC

HDTC吸附 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 前后的红外光谱图如图9所示,由图可以看出,吸附 Zn^{2+} 后S-H伸缩振动的吸收峰由 3443 cm^{-1} 移至 3409 cm^{-1} 并且吸收峰略有减弱,分析认为HDTC在螯合重金属离子前分子中存

在S-H的分子间或分子内氢键作用,HDTC螯合重金属离子后,S原子与重金属离子形成配位键,氢键被破坏,因此S-H伸缩振动的吸收峰移向低波数。此外, 1499 cm^{-1} 处出现N-C=S的特殊的吸收峰分别向低

波数 1486 cm^{-1} ，并且在 758 cm^{-1} 处出现了新峰，证明了HDTC分子链上的S原子对重金属离子的进行配位络合。根据以上分析可以推断HDTC吸附重金

属离子时，主要以S原子与重金属离子络合，其吸附机理可以表述如图8所示：

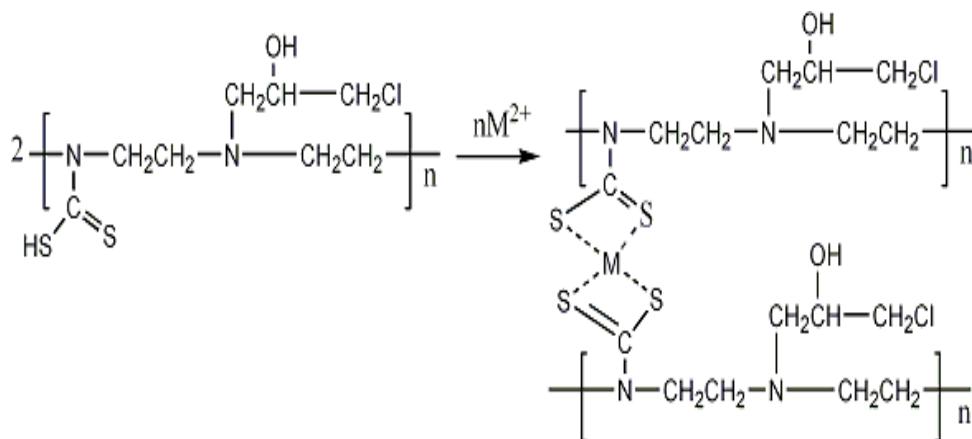


图8 HDTC 的吸附机理

Fig.8 Adsorption mechanism of HDTC

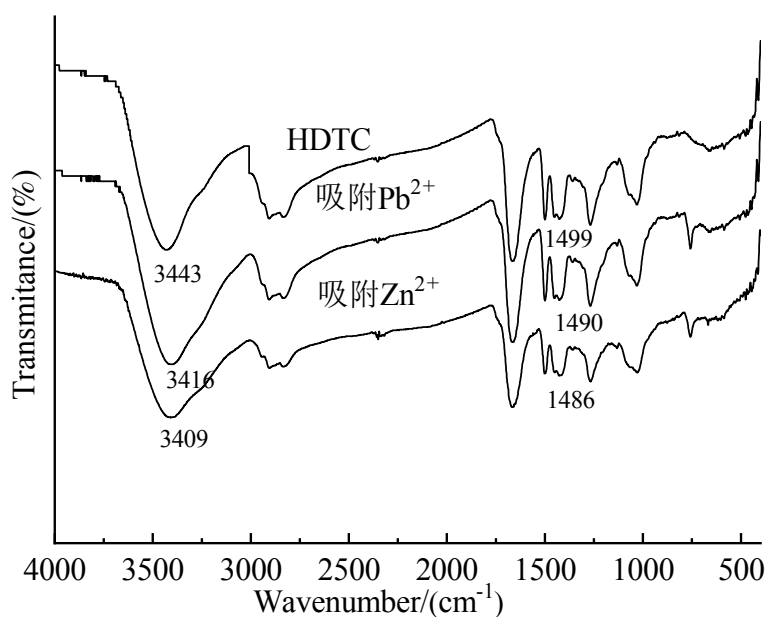


图9 HDTC 吸附 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 前后的红外光谱图

Fig.9 Infrared spectra before and after adsorption of Zn^{2+} and Pb^{2+} by HDTC

3 结论

本文使用DETA、 CS_2 和 $\text{C}_3\text{H}_5\text{ClO}$ 为主要原料制备了重金属螯合吸附剂(HDTC)，并研究其对重金属 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附性能。实验结果表明：HDTC在 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附量分别为368.9和435.3 mg/g；在pH值为5~6时吸附性能最好；在吸附温度为 $25\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ 时，随着温度升高，HDTC对 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 吸附效果越好，这符合螯合吸附剂对重金属的Langmuir吸附等温线模型，属于化学吸附范畴。

HDTC吸附重金属离子前后的红外光谱图显示，HDTC主要以其分子链上的S原子与重金属离子络合的方式，达到去除重金属离子目的。

参考文献

- [1] 王柳文. 我国土壤重金属污染现状及治理研究[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(12): 206-208.
- [2] 闫百瑞, 李健, 于亭亭. 生物质固体废弃物处理电镀废

- 水中重金属研究进展[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(7):18-22.
- [3] 潘忠成, 赖娜, 李琛. 吸附法处理电镀废水的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2014, 36 (1):41-46.
- [4] 李琛. 改性壳聚糖处理重金属废水研究现状[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(10):21-25.
- [5] 白蓝, 刘媛, 李俊玲, 等. 硅胶螯合吸附剂制备及其铅离子吸附综合实验[J]. 实验室科学, 2018, 21 (5):14-17.
- [6] 徐超, 刘福强, 凌晨, 等. 多胺类螯合吸附剂对重金属离子吸附分离的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2014, 30(1): 87-96.
- [7] 潘伟民, 刘预枝, 刘立华, 等. 核-壳型磁性螯合吸附剂的制备及其对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附性能[C]. 第十二届重金属污染防治技术及风险评价研讨会论文集, 2023: 108-116.
- [8] 王中华, 刘明源, 陈亚运等. 纤维素基多胺型螯合吸附剂 Cell-PGMA-PEI 对 $Pb(II)$ 的吸附研究[J]. 化学工程师, 2023, 334(7): 88-92.
- [9] 程爱华, 冯利凡, 畅飞, 等. 壳聚糖 Pb^{2+} 螯合吸附剂的性能表征[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 3597-3601.
- [10] 白皓, 邵书同. 螯合剂改性吸附剂富集环境样品中的重金属研究 I. 镉[J]. 苏州城建环保学院学报, 1992, (4):15-19.
- [11] 刘智峰, 宋凤敏, 葛红光, 等. 改性菌渣对含 Pb^{2+} 废水吸附性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(4): 31-37.
- [12] 汤吉昀, 陈娟, 张肖阳, 等. 活性炭孔径和表面性质对 H_2S 吸附脱除的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(6): 708-714.
- [13] 刘转年, 张焕, 王贵荣, 等. 煤基重金属螯合吸附剂的制备及性能研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40 (1):172-178.
- [14] 张洛红, 刘彩琴, 赵鑫, 等. 铁锰铈-PA6 基静电纺吸附剂的制备及其对水中铅和铬的吸附性能[J]. 化工新型材料, 2024, 52 (1):207-213.
- [15] 刘敏, 代刚, 娜米拉, 等. 一次环境化学开放实验探索: 二氧化硅纳米材料的制备及对铅离子的吸附动力学探究[J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(10):5-8.
- [16] 李波, 王志茹, 李红玑, 等. 改性 ATP 对重金属离子 Cu^{2+} 的吸附动力学性能研究[J]. 河南科技, 2022, 41(8): 82-86.
- [17] 李忠玉, 穆金鑫, 蔡建刚, 等. 含锌废水处理技术进展[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(9): 49-54.
- [18] 唐祝兴, 张岐龙, 余孟. 磁性金属有机骨架材料 $Fe_3O_4@ZIF-7$ 的制备及其吸附性能的研究[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(2): 1-5.
- [19] 罗中秋, 陕绍云. 吸附动力学模型在重金属吸附治理过程中的应用解析[J]. 科教导刊(电子版), 2023, (7): 201-203.
- [20] 李佑衡, 彭良琼, 郭丽君, 等. 固液吸附等温线模型与热力学参数计算[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33 (6): 36-43.
- [21] 喻开富, 何攀, 何宁宁, 等. 具有高效化学吸附、增强的载流子分离及抗光腐蚀能力的 CdS/COF 核壳结构纳米棒用于光催化还原铈(英文)[J]. Science China (Materials), 2023, 66 (12): 4680-4688.
- [22] 吴庭芳, 李宇英, 石善滕, 等. 磁性氧化石墨烯的制备及其对 Pb^{2+} 的吸附研究[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(2):1-4.
- [23] 杨杰, 白杨, 苗腾飞, 等. 碱性低氧环境中 pH 对活性炭金吸附的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2022, (1):68-72.
- [24] 李茁, 李维宁, 陈坤, 等. 聚氨酯基活性炭制备及吸附电镀废水中重金属离子研究 [J]. 应用化工, 2021, 50(1):134-138.
- [25] 郑学成, 颜玉如, 罗维, 等. CS/PVA 微球的制备及其对重金属离子吸附研究 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2):196-203.
- [26] 安焱, 石晓磊, 花静静, 等. 核桃壳生物炭对 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附特性及机制[J]. 有色金属工程, 2024, 14(03):177-187.
- [27] 李新宇, 萧汉敏, 康诗钊, 等. Langmuir-Blodgett 膜技术的应用研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3107-3112.