



文章栏目: 水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201812076

中图分类号 X522

文献标识码 A

骆青虎, 武福平, 李锡锋, 等. 碱改性活性炭纤维电吸附处理 RO 浓水效果及除盐动力学特性[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2545-2552.

LUO Qinghu, WU Fuping, LI Xifeng, et al. Electrosorption effect and desalination kinetic characteristics of reverse osmosis concentrated water with alkaline modified activated carbon fiber electrode[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2545-2552.

碱改性活性炭纤维电吸附处理 RO 浓水效果及除盐动力学特性

骆青虎, 武福平*, 李锡锋, 张国科

兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070

第一作者: 骆青虎(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水处理技术与应用。E-mail: 18215196520@163.com

*通信作者: 武福平(1962—), 男, 硕士, 教授。研究方向: 水处理技术与应用。E-mail: wfp1962@126.com

摘要 针对电吸附技术在反渗透浓水回收利用过程中的吸附效率问题, 通过 NaOH、KOH、氨水对 ACF 电极材料进行浸渍改性, 采用 SEM 观察、傅里叶变换红外光谱图分析的方法对改性前后 ACF 进行了表征; 研究了改性前后 ACF 对反渗透浓水的去除效果和除盐动力学特性; 探讨了碱改性前后 ACF 处理反渗透浓水的除盐机理。结果表明: 随着氨水改性 ACF 比表面积的增加, 表面碱性基团增加、酸性基团减少; ACF 理化特征的变化与改性剂溶液的酸碱性有关; 氨水改性 ACF 对反渗透浓水中电导率、氨氮、COD 均有很好的降低或去除效果, 而 NaOH 改性 ACF 对 UV₂₅₄ 有很好的去除效果; 碱改性 ACF 处理反渗透浓水除盐过程更符合 Elovich 动力学方程; 碱改性 ACF 电吸附处理反渗透浓水时, 对各污染物指标表现出选择性, 且与未改性 ACF 相比, 具有更好的降低或去除效果, 同时, 碱改性 ACF 电吸附除盐过程是以物理吸附和化学吸附共存的多相吸附过程, 也会存在离子交换作用。

关键词 电吸附; 活性炭纤维; 碱改性; 反渗透浓水; 除盐; 吸附动力学

随着国内经济的快速发展, 石化企业的产业范围和规模日益增长, 石化企业产生废水的数量及种类越来越多^[1-3]。同时, 随着石油化学工业污染物排放标准(GB 31571-2015)在 2017 年 7 月 1 日的实施, 国内石化企业的废水处理面临巨大的挑战^[4-5]。目前, 石化废水的处理主要以二级生物处理为核心, 出水可生化性差、含盐量高、难以资源化回收利用, 而直接外排又会造成水环境污染等问题, 因此, 对二级处理出水深度处理后进行资源化回收利用或者达标排放, 是当前石化企业的迫切需求^[5-6]。

近年来, 电吸附技术在废水处理、污水回用等领域备受关注^[7-8]。庞维亮等^[9]在对活性炭进行改性研究中发现, 电吸附技术吸附效率受到电极材料的孔径分布和表面官能团的种类及数量的影响。姚迪等^[10]考察了 KOH 添加量对煤基电极材料结构和性能的影响, 发现 KOH 添加量的增加使

收稿日期: 2018-12-11; 录用日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768031); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400703); 甘肃省重点研发计划(17YF1NA056)

得电极材料微孔和中孔数量及表面含氧官能团增加,有效促进了电吸附技术对氰化废水的处理效果。李虹雨等^[11]在研究椰壳活性炭对水中苯酚的吸附过程中,发现椰壳活性炭经氢氧化钠改性后,平均孔容增大,表面碱性基团增加,同时提高了对苯酚的吸附效果。

活性炭电极材料的表面形貌、化学结构会影响其电吸附效率。有研究^[10-12]表明,采用NaOH、KOH及氨水等改性剂对活性炭进行改性会可提高活性炭电吸附效率。但是,现阶段对于活性炭电极材料的改性研究多集中在不同改性方法及改性剂的不同改性条件对单一污染物电吸附处理效率的影响上,对于改性后活性炭电吸附处理水质状况较为复杂的水体中各污染物指标的去除规律及去除机理等方面的研究则相对较少^[9-11]。本研究以NaOH、KOH及氨水为改性剂,对活性炭纤维(ACF)电极材料进行改性,观察改性前后ACF电极材料对RO浓水各污染物指标的去除规律;同时,结合SEM、FT-IR表征分析与电吸附除盐吸附动力学方程拟合结果,探究了经碱改性的ACF电吸附除盐机理。

1 材料与方法

1.1 实验原料

实验试剂:硫酸银(Ag_2SO_4)、硫酸汞(HgSO_4)、重铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)、硫酸(H_2SO_4)、邻苯二甲酸氢钾($\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$)、氢氧化钠(NaOH)、氯化钠(NaCl)、氢氧化钾(KOH)、二氯化汞(HgCl_2)、碘化钾(KI)、酒石酸钾钠($\text{C}_4\text{O}_6\text{H}_4\text{KNa}$)、氯化铵(NH_4Cl)、溴化钾(KBr)、碘化汞(HgI_2)均为分析纯。

实验仪器:电导率仪(DDS-307,上海雷磁科学股份有限公司);恒温干燥箱(202型,北京科伟永兴仪器有限公司);浊度仪(2100P,上海而立环保科技有限公司);可见分光光度计(722N,上海光谱仪器有限公司);紫外分光光度计(752N,上海光谱仪器有限公司);电子天平(FA2004型,上海良平仪器仪表有限公司);蠕动泵(YZ-2515,无锡市天利流体工业设备厂);直流恒压电源(WYJ-5A,天正集团有限公司);傅里叶变换红外光谱仪(IRprestige-2,岛津国际贸易(上海)有限公司);扫描电子显微镜(Quanta FEG 450型,美国FEI公司)。

实验材料:本实验采用江苏苏通炭纤维有限公司生产的STF1300型活性炭纤维,其基本理化性质见表1。

表1 活性炭纤维基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of activated carbon fiber

BET比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	厚度/mm	孔径分布/%				孔容/($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)	灰分/%
		<1 nm	1~2 nm	2~5 nm	>5 nm		
1 500	2.00	83~84	6~7	6~7	4~5	0.9~1.28	2~3

实验用水:实验用水取自兰州某炼化企业的RO浓水,该企业深度处理采用超滤和反渗透组合工艺,RO浓水水质情况如下:pH 7.5 ± 0.2 , COD $50.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮 $1.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, UV_{254} 0.227 cm^{-1} , 浊度 1.84 NTU , 电导率 $(2\ 400\pm 10)\ \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

1.2 实验装置及方法

实验工艺流程图及电吸附装置如图1和图2所示。实验采用两级吸附,考察电吸附电极材料改性前后对RO浓水各指标的去除效果。实验前,用RO浓水冲洗电吸附装置,直至出水电导率和原水电导率相近,接着施加电压进行吸附实验。实验电压为2.1 V,电吸附时间为18 min,再生方式采用先反接6 min,再短接通水6 min,实验周期约为30 min。

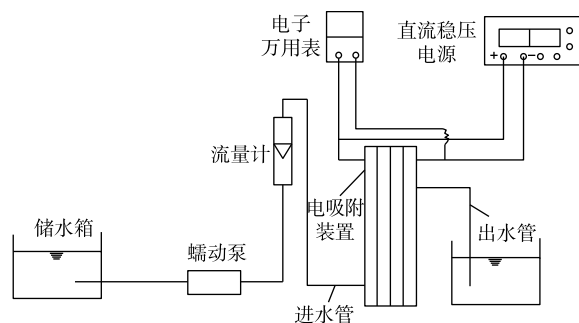


图 1 实验工艺流程

Fig. 1 Flow of experimental process

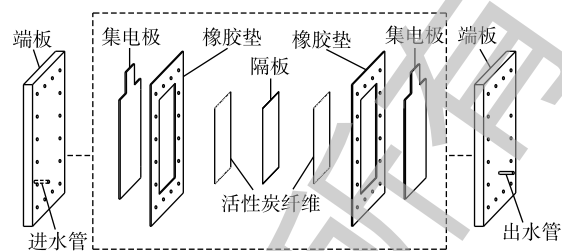


图 2 电吸附装置

Fig. 2 Electro-sorption device

2 结果与讨论

2.1 ACF 电极材料改性前后 SEM、FT-IR 表征分析

由图 3 可知，采用氨水改性前后 ACF 的表面形貌是有差别的，未改性 ACF 在低倍数扫描下，ACF 错乱无序地相互交杂在一起，相互之间存在明显缝隙；而在高倍数扫描下，整体上，看纤维表面是平滑的，排列比较整齐，沟槽明显，表面几乎没有其他附着物。由氨水改性的 ACF-1 电极材料表面有少量散落的碎屑物，这可能是附着在 ACF 表面及堵塞在孔隙中的灰分物质被改性剂氨水清洗掉或发生反应后形成的残留物，ACF 中灰分物质的降低不仅可以提高 ACF 比表面积，同时也会增强 ACF 的吸附活性。由此看出，氨水改性会使得 ACF 表面形貌发生变化，而这种变化对 ACF 电吸附性能会产生较大的影响^[13]。

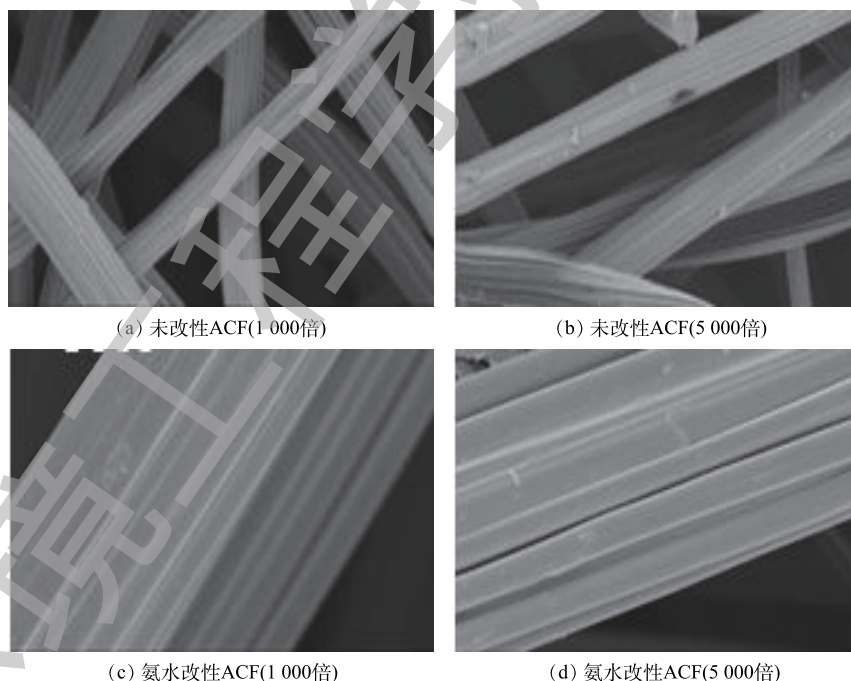
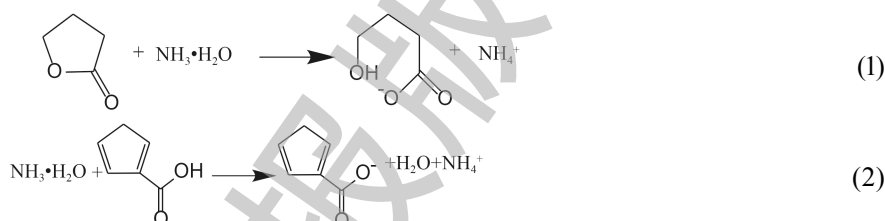


图 3 未改性活性炭纤维和氨水改性活性炭纤维的电子扫描显微镜图片

Fig. 3 SEM images of unmodified ACF and ammonia-modified ACF

图 4 为未改性 ACF 和氨水改性活性炭纤维 (ACF-NH₃) 红外吸收光谱图。可以看出，在 3 600 cm⁻¹ 附近有针状的峰形存在，可能是羟基或者其他干扰基团；在 2 320 cm⁻¹ 和 2 367 cm⁻¹ 附近有吸收峰，可能是 C=C 或者 C=O；在 1 700 cm⁻¹ 处出现微弱的变形振动波形，极有可能是苯的衍生物。

指纹区内, $1\ 521\ \text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰推断是含氧的基团; $988\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰可能会有醚基—C—O存在。同时, ACF-NH₃光谱图表现出不一样的形式, 其波形和吸收峰变得更加缓和, 这可能是因为改性剂氨水为弱碱, 可与ACF表面酸性官能团发生反应, 使得改性后ACF表面酸性官能团有一定程度的降低。 $3\ 400\ \text{cm}^{-1}$ 附近显示出较小的吸收峰, 这可能是—OH伸缩振动引起的; $2\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现吸收峰, 这可能是C≡N伸缩振动引起的; $1\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 附近显示的是由于C=O或者O—C=OH振动引起的特征吸收谱带。由此可以推测, 在氨水改性过程中与ACF表面可能发生的反应^[14]见式(1)和式(2)。



可见, 经过氨水改性处理后, 可以在一定程度上改变ACF表面官能团的种类和数量, 而这种改变会对ACF电吸附脱盐性能产生影响^[13-14]。

2.2 碱改性前后ACF电吸附处理RO浓水的效果

在室温条件下, 控制进水流量为 $20\ \text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 调节电压为 $2.1\ \text{V}$, 对前面所述的RO浓水进行电吸附实验。放置ACF-NaOH、ACF-KOH、ACF-NH₃及未改性ACF在电吸附装置上, 运行4个周期, 分析碱改性ACF对RO浓水电导率、氨氮、COD及UV₂₅₄的去除规律。

1) 碱改性前后ACF电吸附处理RO浓水除盐的效果。由图5可知, 改性ACF均比未改性时表现出更好的除盐性能, ACF-NH₃电极材料除盐性能最佳。这是因为未改性ACF、ACF-NaOH、ACF-KOH、ACF-NH₃的平均除盐率由小到大依次为5.29%、6.53%、6.64%及9.69%, ACF-NH₃的最大除盐率为13.81%。平均去除率与最大去除率越高, 说明材料的吸附性能越强、吸附容量越大。ACF-NaOH与ACF-KOH均表现出较好的电吸附除盐效果, 这是因为活性炭纤维经过NaOH及KOH强碱浸渍改性后对其表面成功地进行了刻蚀, 打开了原本“关闭”着的介孔, 使活性炭颗粒的粒径减小, 介孔孔容增加, 孔径分布得到了改善, 并使得活性炭表面亲水性、碱性增强且含氧官能团数量增多^[15]。经氨水改性后, ACF-NH₃电极材料可能引进含氮元素, 同时从一定程度上改变ACF表面官能团的种类和数量, 使其表面形成较丰富的官能团结构^[16]。

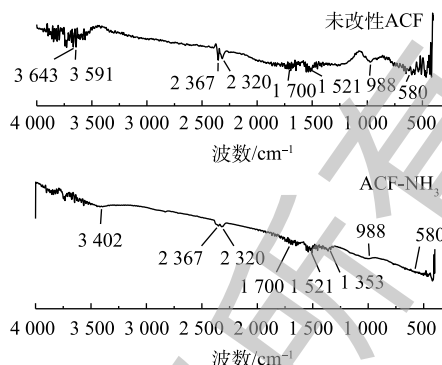


图4 未改性活性炭纤维和氨水改性活性炭纤维红外吸收光谱图

Fig. 4 FT-IR spectra of unmodified ACF and ammonia-modified ACF

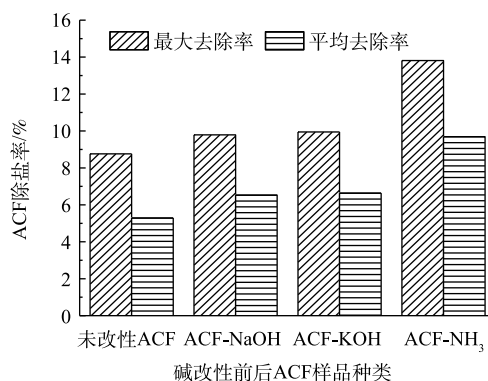


图5 碱改性前后ACF电吸附处理RO浓水除盐性能

Fig. 5 ROCW desalination performance by the electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

2) 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除氨氮的效果。由图 6 可知, NaOH 和 KOH 改性减弱了 ACF 对氨氮的平均去除率, 氨水改性会增强 ACF 对于氨氮的吸附效果。ACF-NaOH 和 ACF-KOH 氨氮平均去除率分别为 20.09%、20.65%, 低于未改性 ACF 的 27.43%, 这可能是因为 ACF 经过 2 种强碱 NaOH、KOH 改性后, 导致 ACF 表面的酸性官能团数量有显著的下降, 进而使改性后 ACF 表现出较强的碱性; 然而, 当环境中 pH 过高时, 溶液中氮以 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为主要形式存在, 减小了 NH_4^+ 的自由度^[17], 从而使得 ACF 吸附效果降低。ACF- NH_3 平均去除率达到 41.80%, 可见氨水改性增强了 ACF 对于氨氮的吸附效果。这可能是因为氨水为弱碱, ACF 表面所含有的酸性基团与氨水的反应并不完全, 因此, ACF 表面仍然会存在一定量的酸性基团, 不会使 ACF 表现出较强的碱性, 最终导致环境中 pH 偏碱性。在这种情况下, ACF 表面的 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{ROH}$ 等基团逐渐发生质子化作用, 形成带负电的 $-\text{COO}^-$ 、 $-\text{RO}^-$ 基团并和带正电的溶液中 NH_4^+ 通过静电引力实现结合, 此外, ACF 表面羰基等基团也可以与 NH_4^+ 形成氢键^[18]。

3) 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除 COD 的效果。由图 7 可知, NaOH 对 ACF 的改性减弱了其对 COD 的平均去除率, 而氨水和 KOH 改性会增强 ACF 对于 COD 的吸附效果。ACF-KOH 对 COD 的平均去除率优于未改性的 ACF。其主要原因为: 经 KOH 处理后, ACF 电极上羟基、羧基、羰基等官能团数量增多, 其中的羧基和羟基可以增强离子交换反应; 羰基可以加快感应电流反应的电子转移; 此外, 本研究反渗透浓水中有很大一部分带电的有机分子, 这部分分子能够在通电条件下向电极移动, 被吸附在电极表面^[19]。ACF- NH_3 对 COD 的平均去除率最高, 可达到 43.97%。其主要原因为: 一方面, 氨水改性使得 ACF 中灰分物质降低, 提高了 ACF 比表面积, 增强了 ACF 的吸附活性; 另一方面, 随着反应进行溶液中氨氮浓度逐渐增大, COD 也随之增大, 而产生 COD 的铵根离子可能受到极板的吸附和氧化双重作用, 使得 COD 的去除效果明显增强^[20]。ACF-NaOH 对 COD 的平均去除率比改性前有所降低, 这可能是因为 ACF 经 NaOH 改性后使 ACF 孔道坍塌, 孔容积呈整体下降趋势, 并使得 ACF 表面酚羟基和羧基数量明显减少^[21]。

4) 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除 UV_{254} 的效果。由图 8 可知, 改性后的 ACF 均比未改性时表现出对 UV_{254} 更好的去除效果, 而 ACF-NaOH 电极材料效果最佳, 平均去除率为 74.3%, 最大去除率为 75.1%。这是因为 NaOH 及 KOH 改性使 ACF 孔隙结构中孔和过渡孔比例增加, 同时使 ACF 表面碱性含氧基团大量增加。但是, KOH 改性也会产生大量的新微孔结构, 而 NaOH 改性则主要产生中孔孔隙结构^[22], 根据尺寸排斥效应, 在活性

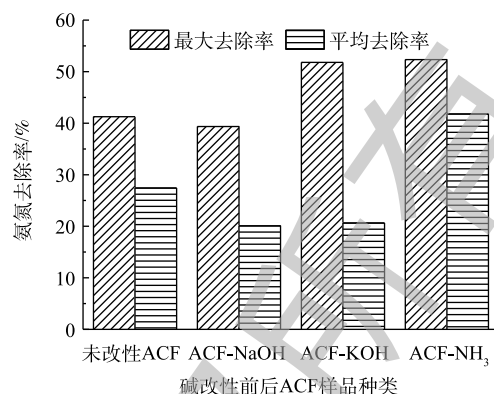


图 6 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除氨氮效果

Fig. 6 Ammonia nitrogen removal effect from ROCW by the electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

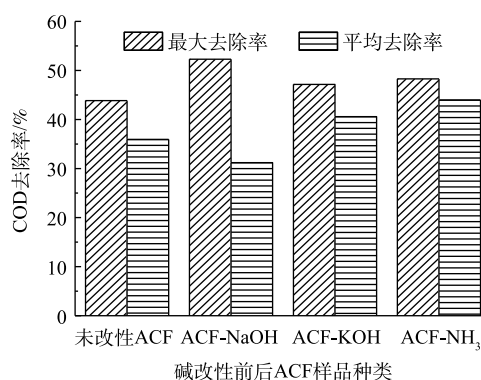


图 7 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除 COD 效果

Fig. 7 COD removal effect from ROCW by the electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

炭去除有机物时,只有当活性炭孔径大于有机物分子直径时,有机物分子才能进入活性炭孔隙中^[23];同时,活性炭对有机物的去除效果与有机物分子所能到达的吸附位数量成正比,而不只是与活性炭的比表面积有关^[24],ACF-NaOH丰富的中孔孔隙结构更有利于有机物分子扩散至吸附位。氨水改性腐蚀了ACF的结构,使其孔隙结构中微孔比例减小或被堵塞,从而使改性后的ACF对UV₂₅₄的吸附效果并未提高^[25]。

2.3 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水除盐动力学分析

实验对 ACF 电吸附处理 RO 浓水除盐过程进行动力学方程进行拟合,拟合曲线见图 9,拟合结果见表 2。常用的吸附动力学方程式^[26]如式(3)~式(7)所示。

准一级反应动力学方程式(3),式(3)可变形为线性方程(见式(4))。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

$$\ln(1 - q_t/q_e) = -k_1 t \quad (4)$$

式中: q_t 为 t 时刻的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_e 为平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_1 为一级吸附速率常数, min^{-1} 。

准二级反应动力学方程式(5),式(5)可变形为线性方程(见式(6))。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} \left(\frac{1}{t} \right) + \frac{1}{q_e} \quad (6)$$

式中: k_2 为二级吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$; $k_2 q_e^2$ 为初始吸附速率, $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

Elovich 动力学方程式(7)。

$$q_t = a + b \lg t \quad (7)$$

式中: a 为脱附常数, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; b 为初始吸附速率, $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

由图 9 可知, ACF-NaOH、ACF-KOH 及 ACF-NH₃ 的动力学方程拟合曲线变化趋势均一致,这说明实验所改性的 ACF 电极材料可应用于处理反渗透浓水除盐且效果较稳定。由表 2 可知,对于

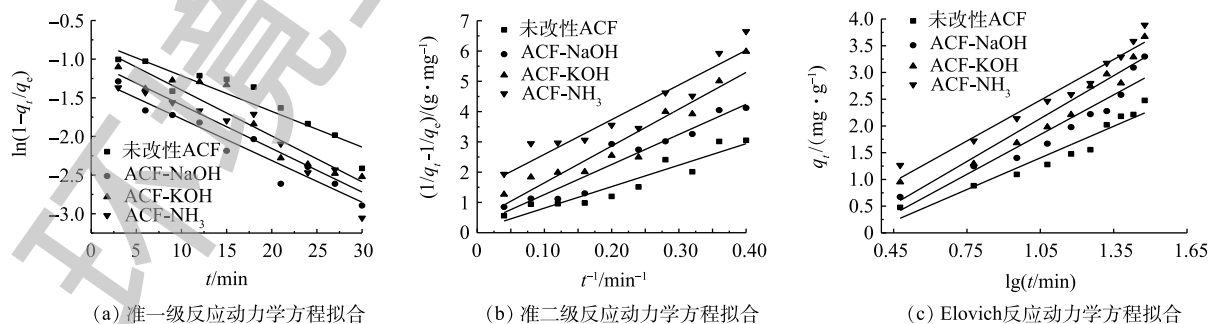


图 9 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水除盐过程吸附动力学方程拟合曲线

Fig. 9 Adsorption kinetic model curves of ROCW desalination process by electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

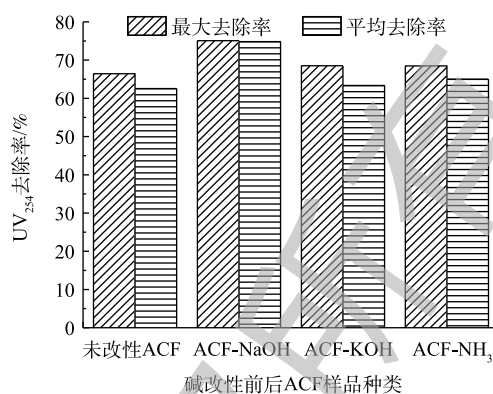


图 8 改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水去除 UV₂₅₄ 效果

Fig. 8 UV₂₅₄ removal effect from ROCW by the electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

表 2 碱改性前后 ACF 电吸附处理 RO 浓水除盐过程吸附动力学方程拟合结果

Table 2 Adsorption kinetic models of ROCW desalination process by electro-sorption treatment with ACF electrode before and after alkali modification

ACF样品	准一级动力学方程		准二级动力学方程			Elovich动力学方程		
	K_1	R^2	K_2	$K_2 q_e^2$	R^2	a	b	R^2
未改性ACF	0.046 2	0.846 3	0.001 5	0.141 0	0.888 2	-0.666 1	1.969 9	0.922 1
ACF-NaOH	0.053 9	0.921 3	0.007 1	0.100 7	0.918 2	-0.761 4	2.476 0	0.902 2
ACF-KOH	0.059 3	0.874 7	0.015 3	0.082 2	0.896 1	-0.668 1	2.672 4	0.915 2
ACF-NH ₃	0.056 4	0.873 2	0.181 9	0.087 3	0.890 7	-0.185 5	2.539 9	0.947 4

未改性 ACF 电吸附除盐过程，Elovich 动力学方程相关拟合系数 R^2 为最大值 0.922 1，拟合效果较好，这与李娜等^[27]的研究结果一致。对于碱改性 ACF 电吸附除盐过程，Elovich 动力学方程有更好的拟合效果，拟合系数 R^2 最高为 0.947 4，这表明碱改性 ACF 电吸附除盐过程是物理吸附和化学吸附共存的多相吸附过程，同时也会存在离子交换作用^[28]。这是因为，ACF-NH₃ 比未改性 ACF 处理反渗透浓水时具有更好的脱盐性能，再结合 SEM 和 FT-IR 表征分析结果来看，ACF 的比表面积、表面官能团的种类及数量是影响 ACF 脱盐性能的主要因素，因此，相应的物理、化学吸附是 ACF 电吸附除盐过程的主要作用机理^[29]。由 FT-IR 分析结果可知，ACF-NH₃ 电极上羟基等官能团数量会增多，而羟基可以增强电吸附除盐过程中的离子交换反应^[19]，所以 ACF 电吸附除盐过程中也会存在离子交换作用。

3 结论

1) ACF-NH₃ 对电导率、氨氮、COD 具有很好的降低或去除效果，平均去除率分别可达到 13.81%、41.80%、43.97%；同时，ACF-NaOH 对 UV₂₅₄ 有很好的去除效果，平均去除率可达到 74.3%。这一结果表明，使用碱改性 ACF 对 RO 浓水进行电吸附处理时，其会对各污染物指标表现出选择性。

2) 结合 SEM、FT-IR 表征分析的结果和吸附动力学方程拟合的结果，碱改性 ACF 电吸附除盐过程更符合 Elovich 动力学方程。这表明碱改性 ACF 电吸附除盐过程是以物理吸附和化学吸附共存的多相吸附过程，同时也存在离子交换作用。

参 考 文 献

- [1] 李聪. 石油化工废水处理技术研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(8): 79-80.
- [2] 张攀, 尤朝阳, 秦海燕, 等. MBR深度处理石化含油废水研究进展[J]. 水处理技术, 2016, 42(5): 5-7.
- [3] 解宏端, 王玲, 邢文东, 等. 石化工业废水处理技术与工艺优化[J]. 科技视界, 2015, 15(29): 29-34.
- [4] 徐海波, 孙健, 程鑫, 等. 石化废水深度处理回用的应用研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(1): 110-112.
- [5] 丁鹏元, 党伟, 滕艳, 等. 石化废水深度处理技术的研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(7): 7-14.
- [6] 张国珍, 李娜, 武福平, 等. 电吸附法处理炼化反渗透浓水脱盐研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(8): 88-91.
- [7] 陈明燕, 蓝大蔚, 刘宇程. 高含盐废水脱盐处理技术研究进展[J]. 化工环保, 2018, 38(1): 19-24.
- [8] 曹珊珊, 吝珊珊, 蒋雪, 等. 电吸附技术在水处理领域的应用与研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(9): 1767-1770.
- [9] 庞维亮, 胡柏松, 程丹丹, 等. 酸、碱改性活性炭对甲醇、甲苯吸附性能[J]. 化学工业与工程, 2018, 35(6): 48-53.
- [10] 姚迪, 宋永辉, 张珊, 等. KOH添加量对煤基电极材料结构与性能的影响[J]. 煤炭转化, 2017, 40(6): 41-47.
- [11] 李虹雨, 王可, 邢璇, 等. 响应曲面法优化碱改性活性炭吸附水中苯酚研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(4): 25-28.
- [12] 陈涵. 氨水改性活性炭及其性能的研究[J]. 福建林业科技, 2012, 39(4): 12-15.

- [13] 刘晓敏. 活性炭孔结构与正丁烷吸附性能的关系及吸附动力学研究[D]. 北京: 中国林业科学研究, 2012.
- [14] 刘桂芳. 表面改性活性炭吸附酚类内分泌干扰物的性能与机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [15] 汪昆平, 徐乾前. 几种不同处理方法对活性炭表面化学性质的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 373-380.
- [16] 梁霞, 王学江. 活性炭改性方法及其在水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2011, 37(8): 1-6.
- [17] 常兴涛, 岳建芝, 贾洋洋, 等. 锯末颗粒吸附去除低质量浓度氨氮废水的研究[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(4): 582-586.
- [18] 程琼. 玉米秸秆活性炭的改性及处理对苯二酚废水的研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [19] 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 等. 石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1832-1837.
- [20] 崔馨心, 谢海燕, 肖乐, 等. 电吸附对水中盐类、氨氮、COD的去除效果分析[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 4805-4810.
- [21] 陈玉莲. 活性炭的改性及其对甲苯和丙酮的吸附性能研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- [22] 黄镇, 马正飞, 刘晓勤. 活性炭孔结构的混合碱改性[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 51-55.
- [23] YIN C Y, AROUA M K, ASHRI W M, et al. Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 52(3): 403-415.
- [24] 刘守新, 陈曦, 张显权. 活性炭孔结构和表面化学性质对吸附硝基苯的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1192-1196.
- [25] 孙新元. 表面改性竹炭对微污染水中有机物的吸附[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [26] 周岩梅, 张琼, 刁晓华, 等. 硝基苯和西维因在活性炭上的吸附效果及动力学研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1177-1182.
- [27] 李娜, 张国珍, 杨仕超, 等. 活性炭纤维电吸附处理含盐溶液吸附特性研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(8): 48-51.
- [28] ZOU W H, BAI H J, GAO S P. Competitive adsorption of neutral red and Cu^{2+} onto pyrolytic char: Isotherm and kinetic study[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2012, 57(10): 2792-2801.
- [29] 谭珍珠, 张学杨, 骆俊鹏, 等. 小麦秸秆生物炭对四环素的吸附特性研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(2): 32-38.
- (本文编辑: 金曙光, 曲娜, 郑晓梅)

Electrosorption effect and desalination kinetic characteristics of reverse osmosis concentrated water with alkaline modified activated carbon fiber electrode

LUO Qinghu, WU Fuping*, LI Xifeng, ZHANG Guoke

School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

*Corresponding author, E-mail: wfp1962@126.com

Abstract In order to solve the problem of electrosorption efficiency in recovery and utilization of reverse osmosis concentrated water (ROCW), activated carbon fiber (ACF) electrode material was impregnated and modified by NaOH, KOH, and ammonia. SEM and FT-IR were used to characterize ACF before and after modification, and the removal effect, desalination kinetics and mechanism of ROCW by pristine and alkali modified ACF were discussed. The results showed that ammonia modified ACF had increased specific surface area and surface alkaline groups, decreased acidic groups, which corresponded to the acidity and alkalinity of the modifier solution. Ammonia modified ACF showed better removal of conductivity, ammonia nitrogen and COD, while NaOH modified ACF showed better UV_{254} removal. The ROCW desalination process of alkaline modified ACF could be better described by Elovich kinetic model, and presented selectivity and better removal efficiency for pollutants than pristine ACF. The adsorption process of alkaline modified ACF belongs to physical adsorption, chemical adsorption, and ion exchange.

Keywords electrosorption; ACF; alkali modification; ROCW; desalination; adsorption kinetics