



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202007138

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

高新源, 李爱民, 刘佩春, 等. 流动电极电吸附去除水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 及 Ca^{2+} [J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1252-1259.

GAO Xinyuan, LI Aimin, LIU Peichun, et al. Removal of Na^+ , SO_4^{2-} , Fe^{3+} and Ca^{2+} from water by means of flow-electrode capacitive deionization[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1252-1259.

流动电极电吸附去除水中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 及 Ca^{2+}

高新源^{1,2}, 李爱民^{1,*}, 刘佩春², 刘玉斌², 宋海鸥¹, 李阳², 战树岩²

1. 南京大学环境学院, 南京 210023

2. 天津万峰环保科技有限公司, 天津 300300

第一作者: 高新源(1988—), 男, 博士, 工程师。研究方向: 水处理理论与技术。E-mail: gaoxinyuan881203@126.com

*通信作者: 李爱民(1963—), 男, 博士, 教授。研究方向: 有毒物质污染控制与资源化等。E-mail: liaimin@nju.edu.cn

摘要 采用流动电极代替传统的固定电极电吸附水中离子, 即流动电极电吸附技术, 以解决传统电吸附技术的吸附效率衰减和电极再生难等问题。结果表明: 流动电极浆体的搅拌可提高电吸附出水电导率的稳定性, 搅拌有助于改善流动电极浆体的均匀性及离子脱附率; 电压的增加极大提高电吸附的去除率, 当电压为 1.5 V 时, 电吸附 Na_2SO_4 的去除率达到 14.3%; 当 Na_2SO_4 溶液流速由 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 降为 $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 电吸附 Na_2SO_4 的去除率增加了 11%, 但流动电极的流速影响较小; 流动电极中吸附的盐分浓缩度可达到 11 倍以上, 降低了电吸附过程中浓水量, 增加了得水率。相比于固定电极电吸附, 流动电极电吸附在处理重金属 Fe^{3+} 和结垢离子 Ca^{2+} 等均可实现稳定的吸附-脱附循环。

关键词 流动电极; 电吸附; 除盐; 搅拌; 浓缩度

随着人口增长和工业发展对水的需求量越来越大, 水资源短缺是全球面临的最严峻的问题及挑战。污水回用、苦咸水及海水淡化是缓解水资源短缺的有效方法^[1], 其中的关键环节就是除盐。传统除盐方法主要包括蒸馏法、反渗透法、电渗析法、离子交换法等^[2-5], 但均存在能耗大、成本高、二次污染等问题^[6-9]。电吸附除盐技术是利用外接直流电源产生的电场, 使在电极间流动溶液中的带电离子向带有与自身电荷相反的电极移动, 从而被电极表面产生的双电层吸附达到净化原水效果^[10-13]。相比于传统除盐方法, 电吸附除盐主要优势为能耗小、寿命长、无二次污染和电极易再生^[14-16]。

但是, 电吸附除盐技术存在吸附-脱附效率不稳定, 循环除盐吸附效率衰减及电极再生性差等问题, 这极大影响电吸附除盐技术的应用前景。电吸附效率的衰减及电极再生性差的主要原因为电极脱附不完全、电极的炭颗粒被水流冲刷流失及电极发生电化学反应损耗等。

LIANG 等^[17]采用添加炭黑至流动电极中增强其导电性, 发现随着电极电压增加, 吸附效率有所提高, 但电荷效率明显下降。杨宏艳等^[18]的研究发现, 当电压为 1.4 V、流速为 $2.5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进料室盐溶液流速与阴阳电极室中电极浆料流速比为 1:2:2 时, 流动电极电吸附除盐率达到 70.38%。莫恒亮等^[19]采用流动电极与电渗析耦合实现连续脱盐, 其中电渗析为间歇性工作, 整套

收稿日期: 2020-07-22; 录用日期: 2020-11-30

基金项目: 天津万峰环保科技有限公司电吸附除盐机理以及工程应用研究项目(WF-YFZX-YFLX-2018-3)

装置水效达到 95%。

基于上述研究,为解决传统电吸附的吸附效率衰减及电极再生难等问题,本研究采用流动电极代替传统的固定电极,对流动电极电吸附除盐的效率及出水水质的稳定性进行了优化,分别考察了电压、流速等对除盐率的影响,并探讨了流动电极中盐分的浓缩度和电极的电吸附适用性,本研究可为流动电极电吸附技术的工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 原水及试剂

本研究中原水采用去离子水和化学试剂配制而成,化学试剂 Na_2SO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 及 CaSO_4 ,均为分析纯,来自于天津光复精细化工研究所;去离子水为实验室自制。配制的原水模拟实际工程中某脱硫废水,其主要的成分为 Na_2SO_4 、 Fe^{3+} 及 Ca^{2+} 等,其中 Na_2SO_4 浓度为 $(1\ 250\pm 100)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Fe^{3+} 浓度为 $4\sim 9\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Ca^{2+} 浓度为 $(200\pm 50)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 为 7 ± 0.3 。

1.2 流动电极的制备

流动电极采用炭材料、石墨粉和蒸馏水(Na_2SO_4 溶液)混合配置,混合比例为质量比,其中炭材料的比表面积为 $1\ 500\ \text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,孔径为 $1.22\ \text{nm}$,比电容量为 $150\ \text{F}\cdot\text{g}^{-1}$,灰分为 0.3%。取 200 mL 溶液按比例添加炭材料和石墨粉,搅拌器下搅拌 1 h 混合均匀备用。

1.3 实验流程及方法

流动电极电吸附实验流程如图 1 所示。正负两电极分别贴附阴阳离子交换膜,在两电极间施加电压后,原水中带负电离子和带正电离子在电极电势驱动下分别透过阴阳离子交换膜,电吸附到流动电极中的多孔炭材料表面,随着流动电极循环带出,在流动电极罐中脱附,分别检测进水及出水溶液的电导率。流动电极中盐分过大会影响流动电极电吸附效率,故需要进行流动电极除盐,本研究采用过滤方法去除流动电极中的高盐,测试浓水电导率。

图 1 中正负电极选用不锈钢集流体,尺寸为 $125\ \text{mm}\times 125\ \text{mm}$,在不锈钢上开 $2\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 的流动电极流动槽,流动电极槽总长为 1.1 m (图 2)。原水通道由有机玻璃板形成,原水通道与流动电极槽一致,有机玻璃厚度为 2 mm (阴膜和阳膜间距为 2 mm)。

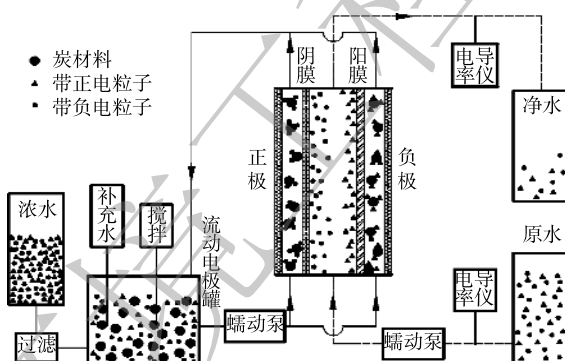


图 1 流动电极电吸附装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the flow-electrode capacitive deionization

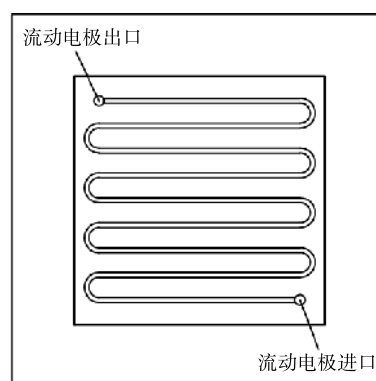


图 2 集流体示意图

Fig. 2 Diagram of current collector

2 结果与讨论

2.1 流动电极电吸附处理金属离子及结垢离子

传统电吸附装置易出现吸附效率衰减,主要原因为吸附的离子未能及时完成有效脱附,尤其是重金属离子及结垢离子等,而此类离子易与炭材料表面基团发生化学反映,该类吸附比电吸附

离子更难脱附,如活性炭吸附的重金属离子需要强酸才能达到有效脱附^[20-21]。

图3是对电极炭材料红外图谱及XPS分析。由图3可知,在波数1415、1632和3441 cm^{-1} 处有明显的峰,分别对应的官能团为羧基($-\text{COOH}$)、羰基($\text{C}=\text{O}$)及羟基($-\text{OH}$)^[22-23]。将活性炭中C1s的XPS谱图采用XPS Peak V4.1进行分峰处理^[24-25],由图3可知,吸附材料活性炭表面的官能团同样主要以羧基、羰基及羟基为主。这类官能团易与重金属离子发生化学络合^[26],且难脱附,本文采用流动电极电吸附法连续处理重金属离子 Fe^{3+} 及结垢离子 Ca^{2+} ,分析吸附-脱附循环。

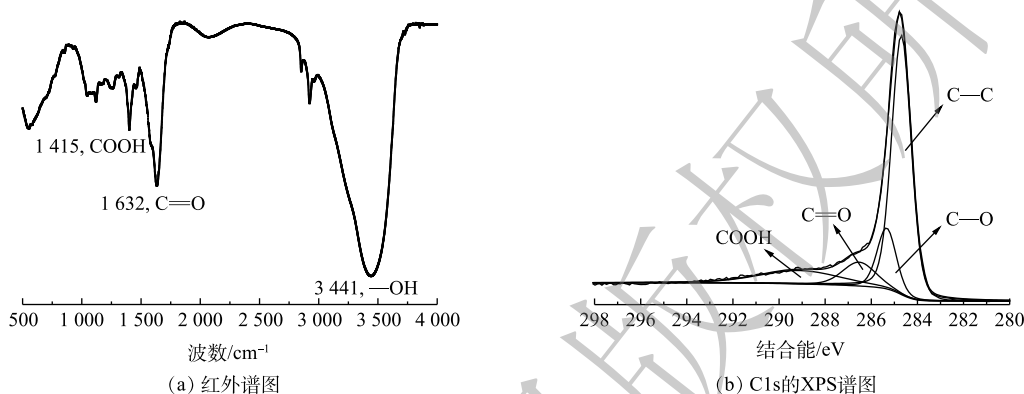


图3 炭材料的红外谱图和C1s的XPS谱图

Fig. 3 FT-IR spectra and XPS spectra of N1s of the carbon materials

2.2 流动电极浆体中溶液、炭材料及石墨粉混合比率对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响

图4为溶液、炭材料及石墨粉的不同混合比例构成的流动电极电吸附 Na_2SO_4 。实验条件为初始电导率为 $(1\ 850\pm 10)\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、流动电极浆体为200 mL、 Na_2SO_4 溶液流速为 $5\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、流动电极流速为 $10\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、电压为1.5 V。由图4可知,当流动电极中固体比率较高时,电吸附效率较差。这是因为流动电极中固体率较高可导致流动电极的流动性变差,且影响流动电极浆体的分散性。而当流动电极固液比率恒定时,流动电极中石墨粉含量增加,导致炭材料比率降低,尽管流动电极浆体的导电性增加,但流动电极的比电容明显降低,从而导致吸附效率下降。因此,本研究选用的流动电极中溶液、炭材料及石墨粉的最佳混合比为0.85:0.12:0.03。

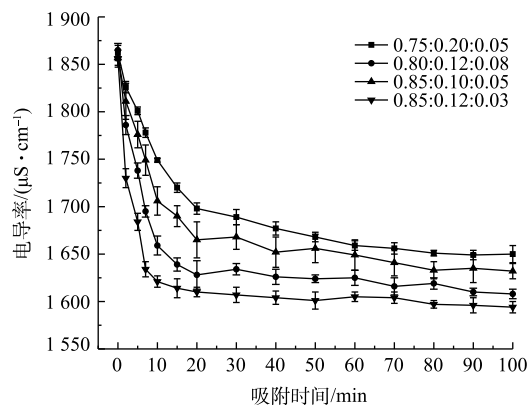


图4 不同混合比例对电吸附 Na_2SO_4 吸附能力的影响

Fig. 4 Effect of mixing ratio on the adsorption capacities of Na_2SO_4 by capacitive deionization

2.3 流动电极搅拌对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响

传统的电吸附除盐技术为净水和浓水交替出水,且净水出水水质波动较大^[27]。流动电极电吸附实现了吸附和脱附分离,可优化出水水质的稳定性。但流动电极易出现固液不均匀,导致流动电极电阻增大,从而减弱电吸附效率。本研究采用流动电极搅拌解决流动电极分布不均匀及分层问题,流动电极搅拌用磁力搅拌器实现,每次搅拌设置为 $300\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,持续1 min。图5为流动电极的搅拌对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响,实验条件为初始电导率为 $(1\ 850\pm 10)\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,流动电极浆体为200 mL, Na_2SO_4 溶液流速为 $5\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,流动电极流速为 $10\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,电压为1.5 V。由图5可知,流动电极的搅拌对电吸附 Na_2SO_4 出水电导率的稳定性影响较大,当流动电极未搅拌时,出

水Na₂SO₄溶液的电导率越来越高,电吸附效率越来越低,同时会引发流动电极浆体堵塞通道。随着搅拌频率的降低,出水电导率的波动减小,且电吸附效率增加。流动电极的搅拌一方面保证流动电极浆体的均匀性,防止出现固液分层以及循环回流动电极罐的浆体未经充分脱附便再次循环回电吸附装置的现象;另一方面,流动电极的搅拌可促进炭材料中吸附的离子在流动电极罐中快速脱附,如图6所示,流动浆体电极搅拌过程中,吸附在炭材料表面的离子会受到溶液或炭材料中相反电荷离子的牵引而脱落。

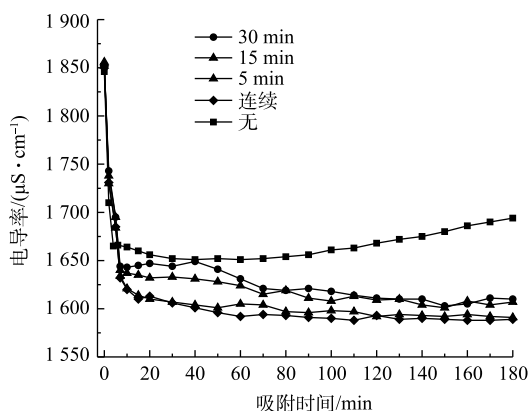


图5 流动电极的搅拌对电吸附Na₂SO₄吸附能力的影响

Fig. 5 Effect of stirring of flow electrode on the adsorption capacities of Na₂SO₄ by capacitive deionization

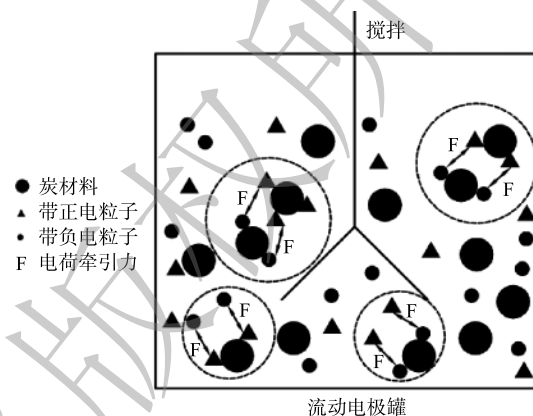


图6 搅拌作用下炭材料吸附的离子的作用力

Fig. 6 Force of ions adsorbed by carbon materials under stirring

分析流动电极搅拌后浓水电导率变化,当连续吸附10 min后连续搅拌得到的浓水电导率为1765 μS·cm⁻¹,而无搅拌得到浓水电导率仅为876 μS·cm⁻¹;当连续吸附30 min后连续搅拌得到的浓水电导率达到5963 μS·cm⁻¹,而无搅拌得到浓水电导率仅为3459 μS·cm⁻¹。由此可知,经过搅拌后得到的浓水电导率比未搅拌更高,这说明在搅拌作用下,炭材料表面电吸附的离子脱附率更高。

2.4 电压对电吸附Na₂SO₄溶液的影响

图7是电压对流动电极电吸附的Na₂SO₄溶液的影响,实验条件初始电导率为(1850±10) μS·cm⁻¹,流动电极浆体200 mL,Na₂SO₄溶液流速5 mL·min⁻¹,流动电极流速10 mL·min⁻¹,搅拌频率为5 min。如图7中所示,电压对电吸附Na₂SO₄溶液的处理效率影响很大,当电压为0.8、1.2、1.5和2 V时,电吸附Na₂SO₄的去除率为4.4%、10.1%、14.3%和19.4%。

提高电极电压一方面可增加离子的迁移速率,另一方面增加了流动电极的电容以及电吸附过程中双电层厚度,可吸附更多带电离子^[28]。但随着电压的升高,会发生水解反应及电极氧化反应(式(1)~式(3)),即损坏了电极材料,又降低了电荷效率,故电吸附电压不宜过高,本研究选取电压为1.5 V。

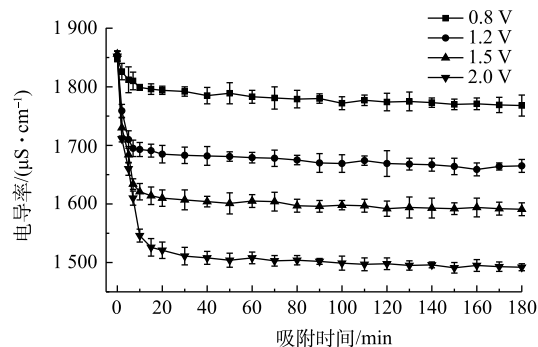
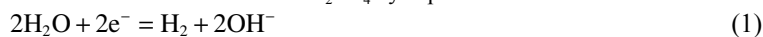


图7 电压对电吸附Na₂SO₄吸附能力的影响

Fig. 7 Effect of the voltage on the adsorption capacities of Na₂SO₄ by capacitive deionization



2.5 流动电极流速和原水流速对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响

为了简便, 将流动电极记作“FE”, Na_2SO_4 溶液记作“S”, 其中 FE10-S5 为流动电极流速为 $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, Na_2SO_4 溶液流速为 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。图 8 为 Na_2SO_4 溶液流速和流动电极流速对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响。由图 8 可知, Na_2SO_4 溶液的流速对电吸附 Na_2SO_4 溶液的去除率影响较大, 当 Na_2SO_4 溶液流速由 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 降至 $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, Na_2SO_4 的去除率由 14.3% 增加至 25.3%。 Na_2SO_4 溶液流速降低, 溶液在吸附模块中停留时间增长, 对应的吸附量增加, 但随着流速降低, 设备的处理能力会严重削弱。此外, 由图 8 可知, 流动电极的流速对电吸附 Na_2SO_4 溶液的影响较小, 其中 FE10-S5 组分电吸附能力最大。当流动电极流速高于溶液速度时, 可以保证流动电极不会因吸附饱和而降低在停留时间内的吸附率。但流动电极流速与溶液流速相差过大导致离子膜两侧压差大, 不仅损害膜组件, 而且增加水分子的迁移, 因此, 流动电极流速为 $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 Na_2SO_4 溶液流速为 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 适宜。

2.6 流动电极电吸附浓水的浓缩度分析

图 9 为不同流动电极电导率对电吸附影响, 流动电极的初始电导率分别选取 $10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 蒸馏水、10、15 和 $30 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ Na_2SO_4 溶液, 实验条件为流动电极浆体 200 mL、 Na_2SO_4 溶液流速 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、流动电极流速 $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、电压为 1.5 V、搅拌间隔 5 min。由图 9 可知, 当流动电极中电导率由 $10 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 升至 $10 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 电吸附效率并无明显下降。由此可知, 当流动电极电吸附处理 Na_2SO_4 溶液时, 流动电极中吸附的盐分可浓缩 11 倍 (相比于原水), 可极大降低浓水量, 从而增加得水率。当流动电极中盐分继续增加到 $15 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $30 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 除盐率出现下降, 太多的盐分存在流动电极溶液中会降低吸附在炭材料中离子的脱附率。同时, 流动电极溶液中盐分浓度过大会发生浓差渗透现象, 流动电极溶液中离子所受的浓差扩散力大于其电场力而反渗透到原水中, 进而降低了除盐率。

2.7 流动电极电吸附处理 Fe^{3+} 和 Ca^{2+}

图 10 为流动电极电吸附处理 Fe^{3+} 和结垢离子 Ca^{2+} , 实验条件为流动电极浆体 200 mL、原水溶液流速 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、流动电极流速 $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、电压为 1.5 V, 搅拌间隔 5 min。由图 10 可知, 电吸附初期的出水电导率较低, 电吸附效率较高, 电吸附前期 Fe^{3+} 的去除率达到 28.21%。由 FT-IR 和 XPS 分析结果可知, 炭材料表面以羧基、羰基及羟基基团为主, 这类官能团易与重金属离子及结

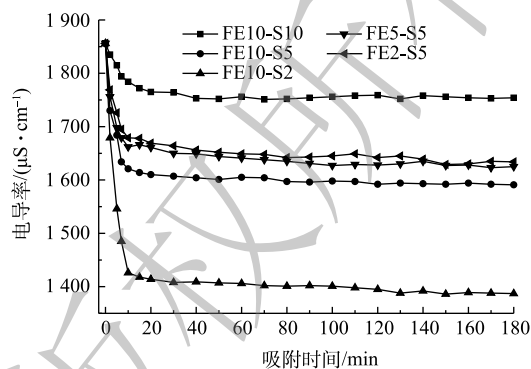


图 8 Na_2SO_4 溶液流速和流动电极流速对电吸附 Na_2SO_4 吸附能力的影响

Fig. 8 Effect of the rate of Na_2SO_4 solution and flow electrode on the adsorption capacities of Na_2SO_4 by capacitive deionization

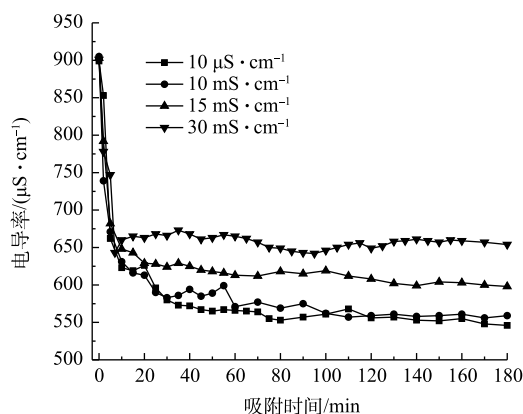


图 9 流动电极中含盐量对电吸附 Na_2SO_4 吸附能力的影响

Fig. 9 Effect of saltiness of flow-electrode on the adsorption capacities of Na_2SO_4 by capacitive deionization

垢离子发生化学吸附^[20-21, 26], 即使添加搅拌辅助, 仍难以有效脱附。由图10可知, 在连续电吸附50 min后, 流动电极吸附 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 趋于稳定, 但去除率比前期低, 其中 Fe^{3+} 的去除率为25.49%。这是因为随着前期在炭材料表面化学吸附点位饱和后, 流动电极后续吸附 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 以双电层吸附为主, 电吸附在炭材料表面的各类离子会随着流动电极浆体的循环带出电吸附装置, 进入流动电极罐, 与传统固定电极电吸附相比, 流动电极电吸附在炭材料表面的离子有充足的时间进行有效脱附。因此, 后续流动电极吸附处理 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 时, 出水电导率稳定, 可实现稳定的吸附-脱附循环。

3 结论

- 1) 流动电极浆体的搅拌可提高电吸附出水电导率的稳定性, 减少电吸附效率的衰减。随着搅拌频率的降低, 出水电导率的波动减小, 且电吸附效率增加。
- 2) 电压的增加可显著提高电吸附去除率, 当电压为1.5 V时, 电吸附 Na_2SO_4 溶液的去除率达到14.3%。
- 3) Na_2SO_4 溶液的流速对电吸附 Na_2SO_4 溶液的去除率影响显著, 当 Na_2SO_4 溶液流速由 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 降至 $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, Na_2SO_4 的去除率由14.3%增加至25.3%, 但流动电极的流速影响相对较小。
- 4) 流动电极中吸附的盐分浓缩度高, 达到11倍以上, 降低了电吸附过程中的浓水量。
- 5) 使用流动电极电吸附技术处理 Fe^{3+} 及 Ca^{2+} 时, 均可实现稳定的吸附-脱附循环。

参考文献

- [1] ZOU L D, MORRI G, QI D D. Using activated carbon electrode in electrosorptive deionisation of brackish water[J]. *Desalination*, 2008, 225: 329-340.
- [2] ANDERSON M A, CUDERO A L, PALMA J. Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: will it compete?[J] *Electrochimica Acta*, 2010, 55(12): 3845-3856.
- [3] BORSANI R, REBAGLIATI S. Fundamentals and costing of msf desalination plants and comparison with other technologies[J]. *Desalination*, 2005, 182(1/2/3): 29-37.
- [4] XU T, HUANG C. Electrodialysis-based separation technologies: A critical review[J]. *Aiche Journal*, 2010, 54(12): 3147-3159.
- [5] 梁宏旭, 赵新坤, 宋彬, 等. 改性活性炭毡电吸附污水中的 Zn^{2+} [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1336-1345.
- [6] 范力, 张建强, 程新, 等. 离子交换法及吸附法处理含铬废水的研究进展[J]. *水处理技术*, 2009, 35(1): 30-33.
- [7] LEE H J, SARFERT F, STRATHMANN H, et al. Designing of an electrodialysis desalination plant[J]. *Desalination*, 2002, 142(3): 267-286.
- [8] 施周, 杨文浩, 杨灵芳, 等. 等离子改性CNT/TiO₂电极吸附去除水中苯酚的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2664-2669.
- [9] VILLAR I, ROLDAN S, RUIZ V, et al. Capacitive deionization of NaCl solutions with modified activated carbon electrodes[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(6): 3329-3333.

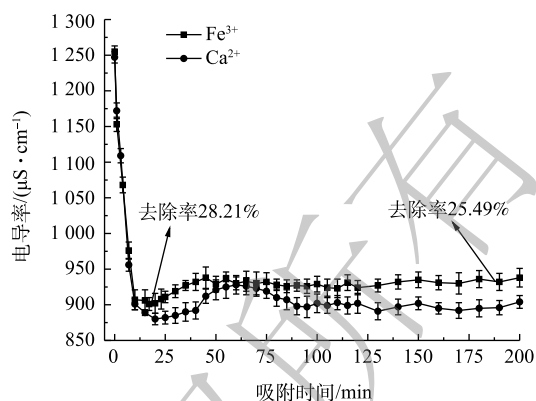


图10 流动电极电吸附 Fe^{3+} 和 Ca^{2+} 的吸附性能
Fig. 10 Adsorption capacities of Fe^{3+} and Ca^{2+} by flow-electrode capacitive deionization

- [10] 毕慧芝, 田秉晖. 电吸附活性炭电极制备及电吸附特性[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4): 1606-1612.
- [11] NADAKATTI S, TENDULKAR M, KADAM M. Use of mesoporous conductive carbon black to enhance performance of activated carbon electrodes in capacitive deionization technology[J]. *Desalination*, 2011, 268(1/2/3): 182-188.
- [12] 孙晓慰, 朱国富. 电吸附水处理技术(EST)的原理及构成[J]. *工业用水与废水*, 2002, 33(4): 18-20.
- [13] 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.
- [14] FARMER J C, FIX D V, MACK G V, et al. Capacitive deionization of NH_4ClO_4 solutions with carbon aerogel electrodes[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1996, 26(10): 1007-1018.
- [15] HOU C H, HUANG J F, LIN H R, et al. Preparation of activated carbon sheet electrode assisted electrosorption process[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2012, 43(3): 473-479.
- [16] PARK K K, LEE J B, PARK P Y, et al. Development of a carbon sheet electrode for electrosorption desalination[J]. *Desalination*, 2007, 206: 86-91.
- [17] LIANG P, SUN X, BIAN Y, et al. Optimized desalination performance of high voltage flow-electrode capacitive deionization by adding carbon black in flow-electrode[J]. *Desalination*, 2017, 420: 63-69.
- [18] 杨宏艳, 张卫珂, 葛坤, 等. 流动性电极电容去离子技术的脱盐性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(8): 911-915.
- [19] 莫恒亮, 唐阳, 陈咏梅, 等. 流动电极电吸附(FCDI)与电渗析(ED)耦合实现连续脱盐技术研究[J]. *现代化工*, 2019, 39(5): 91-95.
- [20] GAO X Y, WU L, XU Q, et al. Adsorption kinetics and mechanisms of copper ions on activated carbons derived from pinewood sawdust by fast H_3PO_4 activation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(8): 7907-7915.
- [21] WU L, WAN W J, SHANG Z S, et al. Surface modification of phosphoric acid activated carbon by using non-thermal plasma for enhancement of Cu(II) adsorption from aqueous solutions[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 197: 156-169.
- [22] TERZYK A P. The influence of activated carbon surface chemical composition on the adsorption of acetaminophen (paracetamol) in vitro: Part II. TG, FTIR, and XPS analysis of carbons and the temperature dependence of adsorption kinetics at the neutral pH[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 177(1): 23-45.
- [23] MACIAS-GARCIA A, GOMEZ C M, ALFARO D M, et al. Study of the adsorption and electroadsorption process of Cu(II) ions within thermally and chemically modified activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 328: 46-55.
- [24] PUZIY A M, PODDUBNAYA O I, ZIATDINOV A M. On the chemical structure of phosphorus compounds in phosphoric acid-activated carbon[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(23): 8036-8038.
- [25] ZHANG B, XU P, QIU Y, et al. Increasing oxygen functional groups of activated carbon with non-thermal plasma to enhance mercury removal efficiency for flue gases[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 263: 1-8.
- [26] PUZIY A M, PODDUBNAYA O I, MARTNEZ-ALONSO A, et al. Synthetic carbons activated with phosphoric-acid I. Surface chemistry and ion binding properties[J]. *Carbon*, 2002, 40(9): 1493-1505.
- [27] 高新源, 刘佩春, 李爱民, 等. 电吸附技术去除水中磷酸盐离子的研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 155-160.
- [28] 李桂菊, 王刚, 何威, 等. 中孔炭电极在电吸附除盐中的应用研究[J]. *天津科技大学学报*, 2016, 31(6): 39-43.
- (责任编辑: 曲娜)

Removal of Na⁺, SO₄²⁻, Fe³⁺ and Ca²⁺ from water by means of flow-electrode capacitive deionization

GAO Xinyuan^{1,2}, LI Aimin^{1*}, LIU Peichun², LIU Yubin², SONG Haiou¹, LI Yang², ZHAN Shuyan²

1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Win Future Environmental Protection Tech. Co. Ltd., Tianjin 300300, China

*Corresponding author, E-mail: liaimin@nju.edu.cn

Abstract The flow-electrode was used to replace the traditional fixed electrode for ions adsorption from water, which can solve the problems of the adsorption efficiency attenuation and difficulty for electrode regeneration of the traditional electro-adsorption. The results showed that the stirring of the flow-electrode slurry greatly increased the stability of the effluent water conductivity, and improved the uniformity of the slurry and the desorption rate of the ions. With the increase of voltage, the removal rate by the electro-adsorption was extremely enhanced. When the voltage was 1.5 V, the removal rate by the electro-adsorption of Na₂SO₄ solution reached 14.3%. When the flow rate of Na₂SO₄ solution decreased from 5 mL·min⁻¹ to 2 mL·min⁻¹, the removal rate by the electro-adsorption of Na₂SO₄ solution increased by 11%. However, the flow rate of the flow electrode had a slight effect on the removal rate of Na₂SO₄ solution. Over 11 times of the salt concentration adsorbed in the flow-electrode slurry occurred, the concentrated water amount decreased and the purified water yield increased. Compared with the fixed electrode, a stable adsorption-desorption cycle can be achieved when treating heavy metal of Fe³⁺ or scaling ion of Ca²⁺ using the flow-electrode capacitive deionization.

Keywords flow-electrode; electro-adsorption; desalting; stirring; concentration degree