

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.016

电去离子法提取垃圾渗滤液中氨氮的研究

廖德祥, 琚佳琪, 魏福强, 胡超

(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 针对目前高氨氮、低碳氮比废水传统处理工艺中的缺陷,运用电去离子技术(EDI)提取其中的氨氮,既可降低传统处理工艺的难度与成本,又可实现氨氮资源化。以垃圾渗滤液为处理对象,考察了电压、淡水循环流量对EDI技术提取渗滤液中氨氮性能的影响。在电压为20 V、淡水循环流量为8 mL/min的条件下,EDI装置运行8 h后,氨氮去除率和最佳提取率分别为81.7%、67.3%,此时电流效率为23.4%、能耗为1.9 kW·h/g(以N计)。另外,利用扫描电镜观测膜污染前后以及经不同方式清洗后的表面特征,研究膜清洗后EDI装置性能的恢复情况,结果表明,采用3%的酸碱液交替清洗膜即可使EDI装置提取氨氮的性能恢复至初始水平。

关键词: 电去离子技术; 垃圾渗滤液; 氨氮; 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0106-08

Electrodeionization Method for Recovery of Ammonia Nitrogen from Landfill Leachate

LIAO De-xiang, JU Jia-qi, WEI Fu-qiang, HU Chao

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In view of the problems existed in the current traditional process for the treatment of high ammonia nitrogen and low carbon to nitrogen ratio wastewater, the application of electrodeionization (EDI) to extract ammonia nitrogen can not only reduce the difficulty and cost of the traditional treatment process, but also realize the recycle of ammonia nitrogen. The effects of voltage and feed flow on the performance of EDI for extracting ammonia nitrogen from landfill leachate were investigated. When the voltage and feed flow were 20 V and 8 mL/min, the ammonia nitrogen removal rate and the optimal extraction rate were 81.7% and 67.3%, respectively, and the current efficiency and energy consumption were 23.4% and 1.9 kW·h/g (calculated in N) after operation of the EDI device for 8 hours. In addition, the surface characteristics of the membrane before and after fouling and after cleaning in different ways were observed by scanning electron microscopy, and the recovery of EDI performance after cleaning was investigated. The performance of EDI for extraction of ammonia nitrogen was restored to the initial level by alternately cleaning with 3% acid and alkali solution.

Key words: electrodeionization; landfill leachate; ammonia nitrogen; membrane fouling

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109126); 上海国际合作基金资助项目(17230732300); 上海自然科学基金资助项目(18ZR1417000)

通信作者: 廖德祥 E-mail: dexiangliao@163.com

目前,废水中氮素的去除多采用传统硝化-反硝化生物脱氮工艺,但该方法在处理高氨氮、低碳氮比废水时存在如下缺陷:一是硝化作用需要氧气,能耗高;二是硝化菌群繁殖速度慢并且抗冲击能力弱,高浓度的氨氮会抑制微生物活性,使系统难以稳定运行;三是反硝化作用需要添加碳源,处理费用高^[1-2]。

污泥消化液、垃圾渗滤液、畜禽养殖废水等均属于典型的高氨氮、低碳氮比废水。氨氮浓度高一直是此类废水处理过程中的一大难点,若能预先去除其中的氨氮,并加以回收,既能够降低传统硝化-反硝化处理工艺的技术难度和成本,又可以回收其中的氨氮资源。电去离子技术(EDI)是电渗析的改良工艺,将离子交换与电渗析技术有机结合,在运行过程中没有污染物产生且不需要外加药剂,具有高效、清洁的优势^[3]。近年来,EDI技术被用于处理各类废水^[4-9],包括去除水中的低浓度氮素^[10-14],都取得了良好的效果。但目前利用EDI提取实际高氨氮废水中氨氮的研究较少。为此,笔者以垃圾填埋场的渗滤液为处理对象,探究EDI技术提取高氨氮废水中氨氮的可行性,并分析电压、淡水循环流量对其性能的影响;另外,还分析了EDI装置中阴、阳离子交换膜污染以及清洗后其性能的恢复情况。

1 实验部分

1.1 实验用水

垃圾渗滤液取自上海老港垃圾填埋场,并利用管式超滤膜进行预处理。实验用水均为超滤预处理后的垃圾渗滤液,其pH为8.2~8.4,电导率为25~28 mS/cm,氨氮为2 000~2 930 mg/L, COD为9 000~11 000 mg/L,硬度为672~700 mg/L。

1.2 实验装置

实验用EDI系统包含EDI装置、淡水罐、浓水罐、蠕动泵、电源等,如图1所示。EDI装置为有机玻璃材质,由5个隔室组成,依次为阳极室、浓水室、淡水室、浓水室、阴极室,每个隔室的有效尺寸为150 mm×20 mm×20 mm;阳极室固定有钛涂钎阳电极,阴极室固定有不锈钢阴电极,电极片尺寸均为130 mm×15 mm,并分别与电源的正负极相连;各个隔室以阴、阳离子交换膜(分别记作AM、CM)隔开,每片膜的有效面积为150 mm×20 mm。淡水室填充比例为1:1的混合阴、阳离子交换树脂。

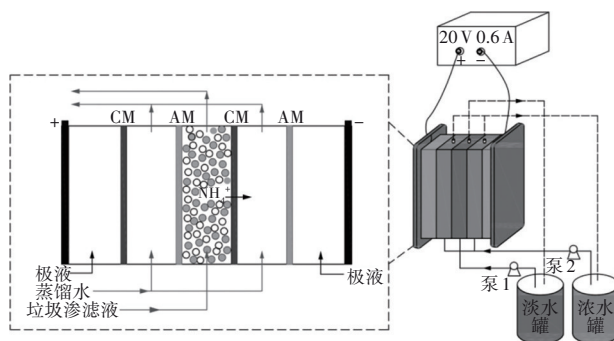


图1 EDI实验装置

Fig.1 EDI experiment setup

1.3 实验材料与方法

EDI装置中,离子交换膜选用杭州华膜科技公司的均相阴、阳离子交换膜;离子交换树脂选用争光树脂有限公司的D201大孔型强碱性阴树脂和D001大孔型强酸性阳树脂。膜在使用前置于5%的NaCl溶液中浸泡24 h,树脂用酸碱溶液预处理,再用蒸馏水冲洗后备用。

EDI实验方法:采用批式实验,每批次实验周期为8 h。每批次所用树脂均在该批次处理废水中充分吸附15 min后才装填进行实验,每批次实验均使用新树脂、新膜。淡水罐中盛放500 mL废水、浓水罐中盛放500 mL蒸馏水。用蠕动泵1将淡水罐中的废水泵入淡水室,淡水室出口与淡水罐相连,形成淡水循环;用蠕动泵2将浓水罐中的蒸馏水泵入浓水室,浓水室出口与浓水罐相连,形成浓水循环;极室中填充2%的 Na_2SO_4 溶液。实验过程中每1 h检测EDI装置的电流、淡水灌和浓水罐溶液电导率及氨氮浓度,并检测最终两室出水COD浓度。

膜清洗方法:先酸后碱交替清洗阴离子交换膜、先碱后酸交替清洗阳离子交换膜^[15-16]。将污染后的阴离子交换膜先置于300 mL盐酸溶液中清洗30 min,用蒸馏水冲洗膜表面后再置于300 mL氢氧化钠溶液中清洗30 min,然后用蒸馏水冲洗膜至洗液为中性,置于蒸馏水中浸泡24 h后使用;阳离子交换膜采用先碱后酸交替清洗,操作方式同阴离子交换膜。

1.4 分析方法

电导率采用便携式电导率仪测定,氨氮浓度采用纳氏试剂分光光度法测定,COD采用重铬酸钾法测定,膜表面特征采用扫描电镜(SEM)观测。

EDI提取氨氮的性能分析方法如下:

$$\text{氨氮去除率} = \frac{C_i - C_0}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氨氮提取率} = \frac{C_c}{C_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{电流效率} = \frac{zFn}{\int_0^t Idt} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{能耗} = \frac{UIt}{c \cdot V} \quad (4)$$

式中: C_i 为淡水室进水氨氮浓度; C_0 为淡水室出水氨氮浓度; C_c 为浓水室出水氨氮浓度; z 为目标离子本身带电荷数量, 氨氮的 $z=1$; F 为法拉第常数, 即 96 500 C/mol; n 为迁移至浓水室的氨氮的物质的量; V 为浓水室溶液体积; U 为电压; I 为电流; t 为 EDI 运行时间; c 为迁移到浓水室的氨氮浓度。

2 结果与讨论

2.1 电压的影响

控制淡水循环流量为 8 mL/min, 分别在 10、15、20 V 电压下进行实验, 结果见图 2。从图 2(a) 可以看出, 在不同电压条件下, EDI 装置的电流均是先增大后减少, 但是电压越高, EDI 装置电流的峰值就越高、出现峰值的时间就越短。电流先增大后减小是由于 EDI 装置中淡水室和浓水室电导率的变化[见图 2(b)]所致。EDI 装置开始运行时浓水室填充的是蒸馏水, 此时浓水室的电导率较低, 导致 EDI 装置的电阻较大, 初始电流仅为 0.01 A; 随着淡水室渗滤液中的 NH_4^+ 和其他离子在电场作用下迁移到浓水室中, 浓水室溶液的电导率逐渐增大, 系统整体电阻减小, 使得 EDI 装置的电流增大; 待淡水室和浓水室中的离子达到平衡, 此时系统电流达到最大值; 系统电流增至最大值后, 由于淡水室中的离子继续迁移至浓水室, 淡水室的电导率进一步降低, 导致 EDI 装置的电流开始下降。

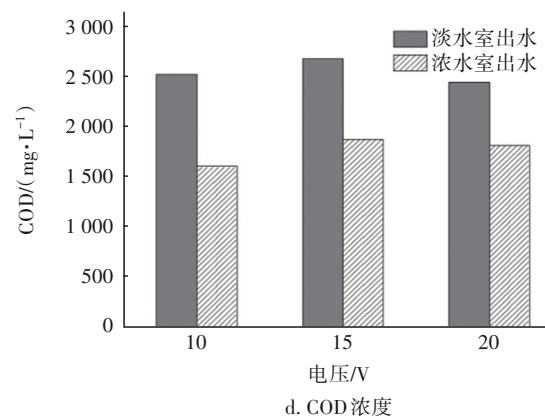
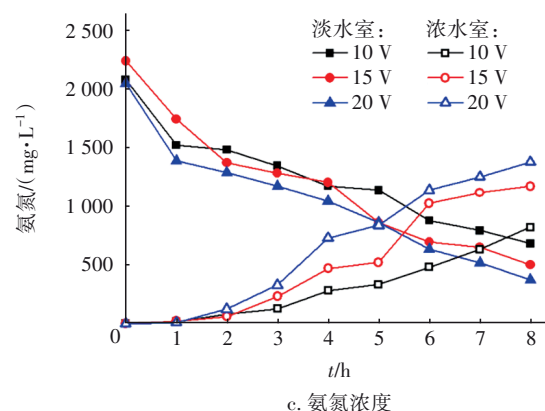
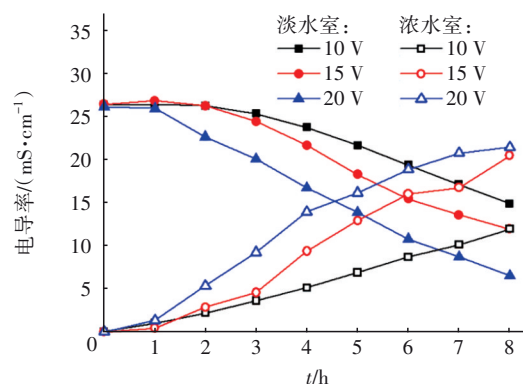
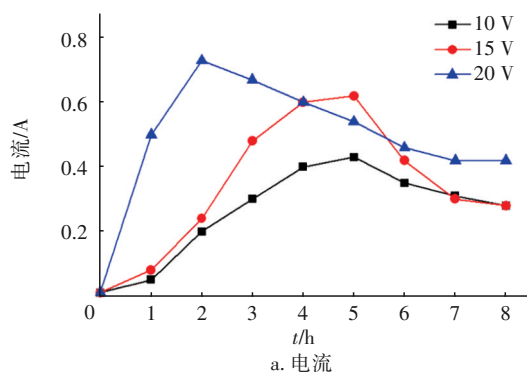


图2 不同电压下EDI装置的电流以及淡水室和浓水室的电导率、氨氮和COD浓度变化

Fig.2 Change of current of EDI device and conductivity, ammonia nitrogen and COD concentrations of dilute compartment and concentrate compartment at different voltages

从图 2(c) 可知, 当原水氨氮浓度为 2 052~2 245 mg/L 时, 电压越大, 淡水室出水氨氮浓度越低、浓水室出水氨氮浓度越高。在 10、15、20 V 电压下, 淡水室出水氨氮浓度分别为 683.6、503.7、376.0 mg/L, 浓水室出水氨氮浓度分别为 823.3、1 172.7、1 381.9 mg/L, 氨氮迁移速率分别为 51.5、73.3、

86.4 mg/h;在20 V电压下,氨氮的去除率和提取率最高,分别为81.7%、67.3%。当电压较低时,淡水室中主要进行的是离子交换过程,随着电压升高, H_2O 电解出 H^+ 、 OH^- ,可以加速树脂再生,从而帮助离子迁移^[17]。电压越高,EDI中离子所受电场力就越大,离子迁移速率就越大。同时高电压又使EDI能够维持高电流,从而使其在相同时间内具有较大的电场力驱动离子迁移,最终使得氨氮去除率和提取率更高。EDI实验过程中,电压是电流的主要影响因素,电流与两室电导率又相互作用,两室电导率的变化也从一定程度上反映溶液中氨氮浓度的变化。

原水COD浓度为9 000~11 000 mg/L,其中的有机物会在电场作用下发生迁移,从图2(d)可知,COD的去除与EDI操作电压的变化之间没有明显规律。淡水室出水COD浓度在2 500 mg/L左右,浓水室出水COD浓度均低于2 000 mg/L。从COD浓度平衡可知,每批次实验约有4 500~5 500 mg/L的COD从系统原水中被去除,这可能是由于离子交换树脂和离子交换膜对有机物的吸附作用所致。

2.2 淡水循环流量的影响

控制EDI装置的电压为20 V,分别在6、8、10 mL/min的淡水循环流量条件下进行实验,结果如图3所示。

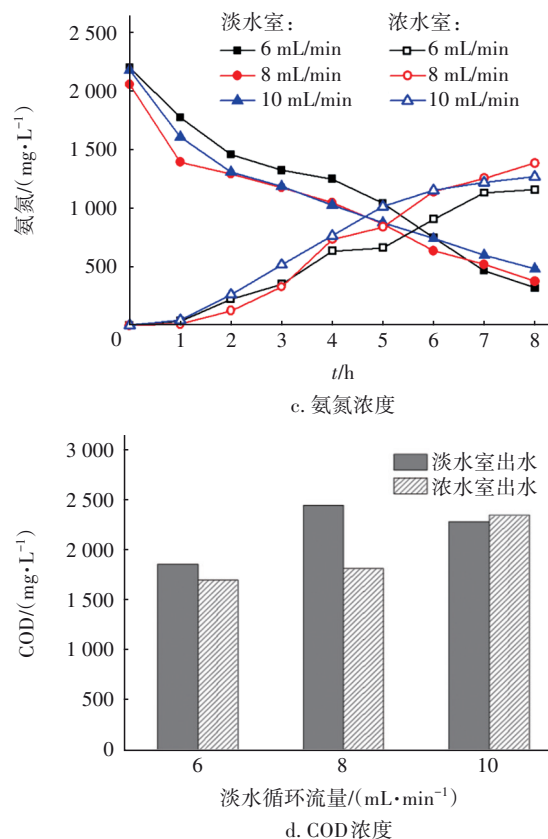
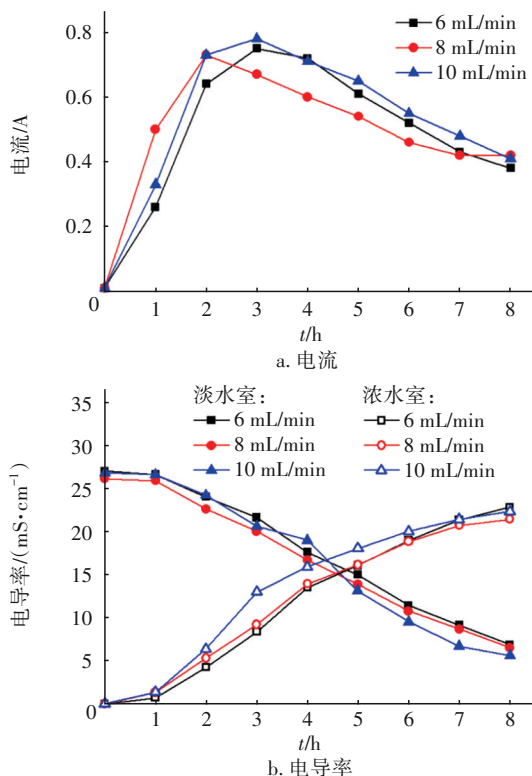


图3 不同淡水循环流量下EDI装置的电流以及淡水室和浓水室的电导率、氨氮和COD浓度变化

Fig.3 Change of current of EDI device and conductivity, ammonia nitrogen and COD concentrations of dilute compartment and concentrate compartment at different feed flows

由图3(a)可知,不同淡水循环流量下,EDI装置的电流变化情况相似,可见淡水循环流量对电流的影响较小。电流受电导率的影响,由图3(b)中淡水室和浓水室电导率的变化可知,不同淡水循环流量下各室电导率的变化类似,8 h后各室出水电导率差距也较小。由图3(c)可知,当淡水循环流量为6、8、10 mL/min时,淡水室的氨氮去除率分别为85.4%、81.7%、77.8%,淡水循环流量越低,EDI装置对废水中氨氮的去除效果越好。当电场力相同时,增大淡水循环流量会使废水在淡水室中的停留时间减少,离子还未向浓水室迁移便流出淡水室,从而导致氨氮去除率下降。当淡水循环流量为8 mL/min时,浓水室出水氨氮浓度最高,达到1 381.9 mg/L。可见EDI提取和去除氨氮的性能与淡水循环流量的关系并不一致,提取氨氮存在一个最佳参数条件^[18]。不同淡水循环流量下,EDI对垃圾渗滤液中氨氮的去

除率均可达到77.8%以上,提取率达到52.6%以上;当淡水循环流量为8 mL/min时,EDI对垃圾渗滤液中的氨氮同时具有良好的去除效果和最佳提取效率。

根据前文所述,溶液的电导率在一定程度上反映了氨氮浓度,但在该批实验中,浓水室出水氨氮浓度最高时,出水电导率并不是最高的。出现这种现象的原因是,实验采用的实际垃圾渗滤液成分复杂,废水中有较多其他离子干扰。电流与两室的电导率相互作用并相互牵制,当电压不同时,EDI装置中的电流差距较大, NH_4^+ 及其他离子运动更剧烈,使得渗滤液中的其他离子干扰不显现;而淡水循环流量对EDI装置中电流的影响较小,使得其他离子的干扰得以显现。

当原水COD浓度为10 000~11 000 mg/L时,在不同淡水循环流量下,EDI运行8 h后淡水室和浓水室的出水COD浓度如图3(d)所示,淡水室出水COD浓度与淡水循环流量之间不存在明显规律,当淡水循环流量为8 mL/min时淡水室出水COD浓度最高。另外,淡水循环流量越大,浓水室出水COD浓度越高,但结合淡水室出水COD浓度变化可以判断,浓水室出水COD浓度与淡水循环流量之间并不呈正相关性。

2.3 膜污染及清洗后膜性能的恢复情况

EDI系统运行过程中离子交换膜污染是指膜表面或者内部被污染物附着、堵塞,造成膜电阻增大,并影响膜的性能,导致膜的离子交换容量、脱盐率等下降的现象^[19]。实验时控制EDI装置操作电压为20 V、淡水循环流量为8 mL/min、淡水罐和浓水罐分别加入500 mL垃圾渗滤液和蒸馏水,每个周期工作8 h,每个周期结束后,只重新更换淡水罐和浓水罐中的液体,连续批式运行,测试EDI装置连续运行的膜污染及膜清洗特性,结果如图4所示(a为新膜;b为污染后的膜;c为经1%酸碱清洗后的膜;d为经3%酸碱清洗后的膜;e为经5%酸碱清洗后的膜)。由图4可知,新膜在第1个运行周期结束时,淡水室和浓水室出水氨氮浓度分别为376.0、1 381.9 mg/L,对氨氮的去除率和提取率分别为81.7%和67.3%;连续运行至第7个周期时,EDI中离子交换膜受到污染,淡水室和浓水室出水氨氮浓度分别为545.3、973.7 mg/L,对氨氮的去除率和提取率分别降至71.4%和51.0%。

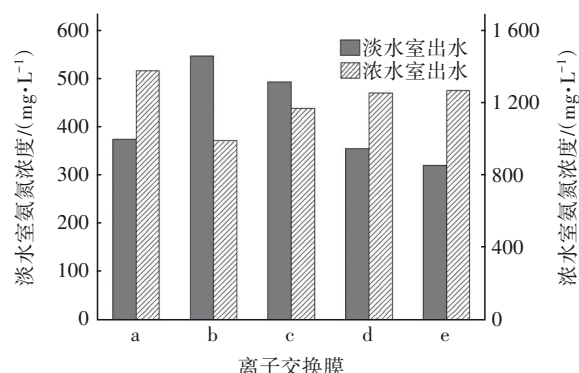


图4 EDI中使用不同的膜运行8 h后淡水室和浓水室的氨氮浓度

Fig.4 Ammonia nitrogen concentration of dilute compartment and concentrate compartment after 8 hours of operation with different membranes in EDI

运行7个周期后的阴、阳离子交换膜分别采用1%、3%和5%的酸碱液交替清洗。从图4可以看出,经1%的酸碱液交替清洗之后,膜性能得到部分恢复,而经3%和5%的酸碱液交替清洗后,膜性能基本能恢复到新膜的水平。经3种不同浓度的酸碱液交替清洗后的膜在EDI装置中运行8 h后,淡水室氨氮浓度分别为495.0、357.0、322.1 mg/L,去除率分别为74.1%、81.4%、83.2%,浓水室氨氮浓度分别为1 173.9、1 259.4、1 273.7 mg/L,提取率分别为61.5%、65.5%、66.4%。以上数据表明,膜经3%的酸碱液交替清洗后,EDI去除和提取氨氮的性能基本恢复。

将连续运行7个周期的EDI装置中的离子交换膜拆下,采用SEM观测阴、阳离子交换膜使用前后的表面特征变化(主要观测的是淡水室两侧的膜)。结果表明,与新膜[见图5(a)]相比,阳离子交换膜在使用后出现了一定程度的污染,膜表面污染物呈现大面积片状[见图5(b)]。经1%酸碱液交替清洗后,阳离子交换膜表面污染物减少,但仍有片状物附着[见图5(c)];经3%酸碱液交替清洗后,阳离子交换膜表面残留少量片状污染物[见图5(d)];经5%酸碱液交替清洗后,阳离子交换膜的SEM照片与新膜几乎没有差别[见图5(e)]。阴离子交换膜使用前后的表面特征变化与阳离子交换膜类似,不同的是阴离子交换膜表面的污染物呈块状。由此可知,酸碱交替清洗对离子交换膜的污染具有清洁作用,并且采用5%的酸碱液可将膜表面污染物基本洗净。

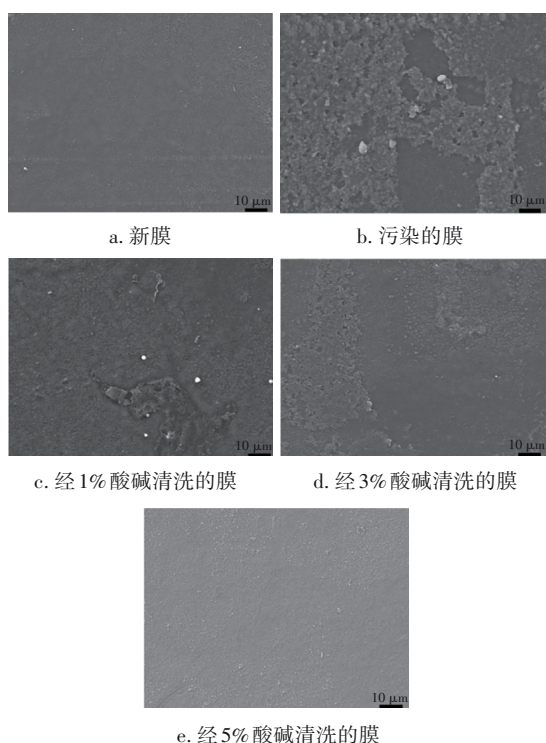


图5 阳离子交换膜污染前后及不同方式清洗后膜的SEM照片

Fig.5 SEM pictures of cation exchange membrane before and after fouling and after different cleaning methods

实验采用的垃圾渗滤液虽然已进行超滤等预处理,但其COD、硬度等指标依然很高,膜会同时受到无机和有机污染。膜的无机污染主要发生在浓室靠近电源负极侧的阴离子交换膜表面,当浓水室的阴离子交换膜表面有 OH^- 堆积时,迁移至此的金属离子会与 OH^- 反应生成沉淀并附着于膜表面,而造成膜污染^[20]。水体中的有机物大多带负电,有机物从阴极向阳极迁移时容易与阴离子交换膜表面所带的正电基团结合,阴离子交换膜也会受到有机污染^[21-22]。而且,从图2(d)和图3(d)中EDI进出水COD浓度平衡可知,每批次实验都有50%左右的COD被离子交换树脂和离子交换膜吸附,由此判断膜表面的有机污染较严重。

2.4 电流效率与能耗

不同电压下EDI装置的电流效率和能耗如图6(a)所示。当电压为20 V时,虽然氨氮的提取率最高,但电流效率是最低的,而电流效率最高是在电压为10 V时,达到了30.3%;另外可以看出,电压越大,能耗越大,可见增大电压虽然提高了离子迁移率,但也增加了能耗^[9]。在不同淡水循环流量下,

EDI装置的电流效率均可达到20%以上,当淡水循环流量为8 mL/min时,电流效率最高,为23.4%[见图6(b)];另外,随着淡水循环流量的增大,能耗逐渐降低。根据能耗计算公式,不同淡水循环流量下,当电流变化相似时,浓水室中富集的氨氮浓度越高,能耗则越低,但淡水循环流量为10 mL/min时的电流相比8 mL/min时略高,导致此时能耗更低一些。由前文可知,当电压为20 V、淡水循环流量为8 mL/min时氨氮提取率最高,此时电流效率为23.4%,能耗为1.9 kW·h/g(以N计),EDI提取氨氮的性能应结合氨氮提取率、电流效率和能耗这3个指标进行综合分析。另外,EDI稳定运行的7个周期内平均能耗为1.41 kW·h/g,考虑到酸碱液对膜的清洗,一次清洗周期内的总成本为1.54元。实验采用的是单极膜堆,若是多级膜堆则能耗会更低一些。

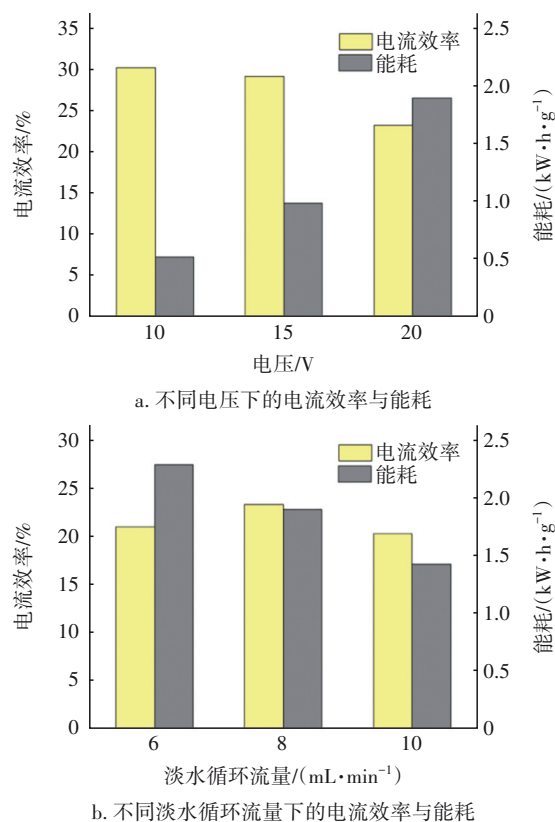


图6 不同运行参数下电流效率与能耗的变化

Fig.6 Change of current efficiency and energy consumption at different operating parameters

3 结论

① EDI技术对垃圾渗滤液中的氨氮具有良好的提取效果,当电压为20 V、淡水循环流量为8 mL/

min时氨氮提取率最高,EDI装置运行8 h后,淡水室和浓水室出水氨氮浓度分别为376.0、1 381.9 mg/L,氨氮去除率和提取率分别达到了81.7%、67.3%。淡水室和浓水室出水COD浓度的变化与电压、淡水循环流量之间并无明显相关规律。

② EDI装置批次运行7个周期后,膜性能下降,经1%的酸碱液交替清洗后EDI去除并提取氨氮的性能部分恢复,经3%和5%的酸碱液交替清洗后EDI去除并提取氨氮的性能基本能恢复到初始水平。通过SEM观测发现,膜使用后表面污染较重,酸碱液交替清洗的方式具有显著的清洁效果,其中经3%的酸碱液交替清洗后膜表面仅残留少量的污染物,经5%的酸碱液交替清洗后膜表面的污染物基本洗净。

③ 电压越高,EDI装置对氨氮的提取效果就越好,但电流效率越低、能耗越高;当淡水循环流量为8 mL/min时氨氮提取率和电流效率最高,而能耗则随着淡水循环流量的增大而降低。当电压为20 V、淡水循环流量为8 mL/min时,氨氮提取率最高,此时电流效率为23.4%,能耗为1.9 kW·h/g;EDI连续批次稳定运行的7个周期内,平均能耗为1.41 kW·h/g,每个膜清洗周期内总成本为1.54元。如果采用多级膜堆,总成本则会更低。

④ 本研究中,虽然最终出水氨氮和COD浓度均未达到排放要求,但利用EDI技术将渗滤液中的氨氮预先提取出来,为目前高氨氮、低碳氮比废水处理工艺提供了新思路,可以考虑将EDI作为预处理工艺,提取氨氮资源,将废水的碳氮比提高至合适比例,从而降低硝化-反硝化生物脱氮工艺的复杂程度、减少占地面积与处理成本。

参考文献:

- [1] 何佳敏. 高氨氮低碳氮比养猪废水微氧处理系统的调控运行与效能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
HE Jiamin. Operation and Efficiency of a Microaerobic System Treating Piggery Wastewater with High Ammonium and Low C/N Ratio [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [2] WANG B, ZHAO M Y, GUO Y Y, *et al.* Long-term partial nitrification and microbial characteristics in treating low C/N ratio domestic wastewater [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2018, 4(6): 820-827.
- [3] ARAR Ö, YÜKSEL Ü, KABAY N, *et al.* Various applications of electrodeionization (EDI) method for water treatment—a short review [J]. Desalination, 2014, 342: 16-22.
- [4] TAO R, GAO D G, SHI X L, *et al.* The relationship between the pH value of dilute effluent streams and system durability in the separate bed electrodeionization process [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 247: 116980.
- [5] ZHANG Z Y, LIBA D, ALVARADO L, *et al.* Separation and recovery of Cr(Ⅲ) and Cr(Ⅵ) using electrodeionization as an efficient approach [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 137: 86-93.
- [6] LEE D, LEE J Y, KIM Y, *et al.* Investigation of the performance determinants in the treatment of arsenic-contaminated water by continuous electrodeionization [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 179: 381-392.
- [7] YANG G, ZHANG Y G, GUAN S. Study on the desalination of high hardness water by electrodeionization reversal [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(18): 8127-8138.
- [8] SHI L, HU Y S, XIE S H, *et al.* Recovery of nutrients and volatile fatty acids from pig manure hydrolysate using two-stage bipolar membrane electrodialysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 134-142.
- [9] YE Z L, GHYSELBRECHT K, MONBALLIU A, *et al.* Fractionating various nutrient ions for resource recovery from swine wastewater using simultaneous anionic and cationic selective-electrodialysis [J]. Water Research, 2019, 160: 424-434.
- [10] 杨阳. 基于电去离子技术的氮/磷/碳酸盐脱除及浓缩回收研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
YANG Yang. Removal and Concentration of Nitrogen/Phosphate/Carbonate Salts for Reuse by Electrodeionization Based Technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese).
- [11] 花莉, 胡阳阳, 张庚. 电去离子法去除水中硝酸盐电流效率的实验研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(9): 66-69.
HUA Li, HU Yangyang, ZHANG Geng. Experimental study of electrodeionization current efficiency on water nitrate removal [J]. Technology of Water Treatment,

- 2014, 40(9): 66-69 (in Chinese).
- [12] 杜耀邦, 王建友, 任行, 等. 电驱动膜过程脱除水体氮素的研究进展[J]. 水处理技术, 2018, 44(3): 5-10.
- DU Yaobang, WANG Jianyou, REN Xing, *et al.* Research progress on removal of nitrogen from water by electromembrane processes [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(3): 5-10 (in Chinese).
- [13] ZHANG Z Y, CHEN A C. Simultaneous removal of nitrate and hardness ions from groundwater using electrodeionization [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 164: 107-113.
- [14] ZHENG H Y, GONG X, YANG Y, *et al.* Concentration of nitrogen as new energy source from wastewater by electrodeionization [J]. Energy Procedia, 2017, 142: 1421-1426.
- [15] 孙艺欣, 曹刚, 戴景富, 等. 聚丙烯酸钠污染阴离子交换膜的清洗方法[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 666-672.
- SUN Yixin, CAO Gang, DAI Jingfu, *et al.* A cleaning method for anion exchange membrane fouled by sodium polyacrylate [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(6): 666-672 (in Chinese).
- [16] 张艳, 马宁, 张智. 膜污染及其清洗方法研究进展[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 26-29.
- ZHANG Yan, MA Ning, ZHANG Zhi. Research progress in membrane fouling and membrane cleaning methods [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 26-29 (in Chinese).
- [17] LIU Y, WANG J Y, XU Y, *et al.* A deep desalination and anti-scaling electrodeionization (EDI) process for high purity water preparation [J]. Desalination, 2019, 468: 114075.
- [18] 刘晓亚. 电去离子技术去除及浓缩污泥水解酸化液中氮磷的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- LIU Xiaoya. Study on Simultaneous Removal and Concentration of Nitrogen and Phosphorus in Sludge Hydrolysis Acidification Solution by Electrodeionization Technology [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018 (in Chinese).
- [19] 刘璐, 赵志娟, 李雅, 等. 工业废水电渗析过程中膜污染研究进展[J]. 过程工程学报, 2015, 15(5): 881-891.
- LIU Lu, ZHAO Zhijuan, LI Ya, *et al.* Research progress in fouling of ion exchange membrane for electrodialysis desalination of industrial wastewater [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(5): 881-891 (in Chinese).
- [20] 王斌斌, 周志军, 江增. 电去离子运行过程中的结垢问题及其防止措施[J]. 水处理技术, 2010, 36(9): 120-123.
- WANG Binbin, ZHOU Zhijun, JIANG Zeng. Scaling problem and preventing measures of electrodeionization process [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(9): 120-123 (in Chinese).
- [21] ZHAO Z J, CAO H B, SHI S Y, *et al.* Characterization of anion exchange membrane modified by electrodeposition of polyelectrolyte containing different functional groups [J]. Desalination, 2016, 386: 58-66.
- [22] 潘杰峰, 谭瑞卿, 丁金成, 等. 电渗析用阴离子交换膜抗有机污染的调控[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(6): 114-120.
- PAN Jiefeng, TAN Ruiqing, DING Jincheng, *et al.* Progress on design and preparation of anti-organic fouling anion exchange membranes for electrodialysis [J]. Membrane Science and Technology, 2017, 37(6): 114-120 (in Chinese).

作者简介: 廖德祥(1978-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 研究方向为污水处理与资源化。

E-mail: dexiangliao@163.com

收稿日期: 2020-08-28

修回日期: 2021-01-05

(编辑: 刘贵春)