

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.09.016

电过滤氧化技术在煤化工纳滤浓水处理中的应用

刘 宁¹, 赵 欣¹, 王 灿¹, 黄威齐¹, 孔 韡², 汪 炎²

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 东华工程科技股份有限公司, 安徽 合肥 230024)

摘 要: 煤化工废水回用系统选用“纳滤分盐+蒸发结晶”工艺处理反渗透浓水来实现“废水零排放”,但纳滤分盐产生的浓水COD过高,直接蒸发结晶会导致液沫夹带等问题,工程上常采用臭氧催化氧化技术在结晶前对纳滤浓水进行氧化处理,但该技术运行不稳定、处理效果较差,故采用电过滤氧化技术对浓水处理工艺进行改造。结果表明,电过滤氧化系统对有机物的去除效果明显,以 7.64 mA/cm^2 的电流密度运行2 h,COD去除率可达50%左右,去除单位COD消耗的能量(EC)为 $0.128\text{ kW}\cdot\text{h/g}$,去除单位数量级污染物的能量消耗值(EE/O)为 $9.15\text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$;以 25.48 mA/cm^2 的电流密度运行2 h,COD去除率可达93%左右。电过滤氧化系统具有良好的稳定性,多次重复实验的处理效果大致相同,色度去除率达90%以上。余氯产生量在 $0.1\sim 1\text{ mg/L}$,有一定杀菌作用,不会氧化侵蚀反渗透膜。处理过程中废水理化性质保持稳定,规避了可能出现的工程安全隐患,可以为工业上膜过滤浓水的深度处理提供参考。

关键词: 纳滤浓水; 电过滤氧化技术; 煤化工; 高盐度废水; 废水零排放; 能耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)09-0109-07

Application of Electrofiltration Oxidation Technology for Treating Nanofiltration Concentrated Water in Coal Chemical Industry

LIU Ning¹, ZHAO Xin¹, WANG Can¹, HUANG Wei-qi¹, KONG Wei², WANG Yan²

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. East China Engineering Science and Technology Co. Ltd., Hefei 230024, China)

Abstract: The recycling system for coal chemical wastewater usually employs the “nanofiltration salt separation and evaporation crystallization” process to treat reverse osmosis concentrated water, thereby achieving “wastewater zero discharge”. However, COD in the concentrated water produced by nanofiltration is excessively high, and direct evaporation and crystallization may result in issues such as liquid entrainment. In engineering applications, catalytic ozonation is commonly utilized to oxidize nanofiltration concentrated water prior to crystallization. Nevertheless, this technology exhibits operational instability and poor treatment efficiency. Therefore, the electrofiltration oxidation technology was introduced to reform the concentrated water treatment process. The electrofiltration oxidation system demonstrated a significant efficacy in the removal of organic matters. When operated at a current density of 7.64 mA/cm^2 for 2 hours, the COD removal rate reached approximately 50%. The energy consumption

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52370207)

通信作者: 赵欣 E-mail: xinzhaotju.edu.cn

for removing COD was $0.128 \text{ kW} \cdot \text{h/g}$, while the energy consumption value for the removal of one unit order of pollutants was $9.15 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$. When the current density was maintained at 25.48 mA/cm^2 for a duration of 2 hours, the COD removal rate could achieve up to approximately 93%. The electrofiltration oxidation system exhibited excellent stability, with repeated experimental results demonstrating consistent treatment efficacy. Notably, the chroma removal rate exceeded 90%. The residual chlorine generated was within the range of 0.1 mg/L to 1 mg/L , which exhibited a certain level of bactericidal efficacy while ensuring no oxidation or corrosion of the reverse osmosis membrane. Additionally, physicochemical properties of the wastewater remained stable during the treatment process, thereby preventing potential engineering safety risks. This study can serve as a valuable reference for the advanced treatment of concentrated water in industrial membrane filtration processes.

Key words: nanofiltration concentrated water; electrofiltration oxidation technology; coal chemical industry; high salinity wastewater; wastewater zero discharge; energy consumption

20世纪70年代,“废水零排放”概念首次被提出,要求工业废水经处理后含盐量和污染物浓度高效降低,实现超过99%的废水回收再利用,无任何废液排出工厂^[1]。随着环保政策趋向严格,“废水零排放”受到了高度关注,不断引领工业废水处理技术的发展方向。在煤化工领域,水资源回用率低,污染物浓度高,废水中含有大量难生物降解的酚类、醛类等有毒有害物质^[2],水质复杂、波动性较大,是废水回用的重难点。

煤化工废水的“零排放”过程主要通过“预处理+膜浓缩+蒸发结晶”工艺来实现^[3]。反渗透(RO)技术因其设备简单、操作方便、自动化程度高和出水质量好等特点成为膜浓缩技术的优势工艺^[4],但其浓水极难处理,盐分复杂,直接蒸发结晶得到的混盐只能作为固废或危废,不但造成资源浪费,而且混盐的处置也存在环境安全隐患。

为实现RO浓水的资源回收再利用,采用膜分离技术高效分盐,其中纳滤(NF)分盐由于其性能好、成本较低成为“废水零排放”项目的主流核心工段^[5]。NF分盐产生的淡水经除硅后蒸发结晶回收产品氯化钠,而浓水具有高盐、高COD、高毒性等特点,难生物降解且含有大量新污染物^[6]。为避免直接结晶出现液沫夹带和母液量过多等问题,往往在浓水结晶前采用高级氧化技术(AOPs)来降低COD浓度。

目前工程上在高级氧化工段广泛采用臭氧催化氧化技术,但因其药剂消耗费用高,催化剂易流失或不易回收,处理效果不理想、不稳定,亟须开发

可工程应用的高效低耗水处理技术。电化学高级氧化技术^[7]具有反应条件温和、可控性强、设备集成度高、无二次污染的特点,在污水处理方面具有不可比拟的优势。同时,纳滤浓水的高盐特性也为电化学氧化提供了便利条件,无需额外添加电解质。大量氯离子与硫酸根离子的存在有利于降低电压,大大节省了能耗。除了产生的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)外,通电条件会将氯离子转化为高氧化性的活性氯,促进有机污染物的氧化,这使得该技术在高盐废水处理方面具有较好的应用前景。本研究提出的电过滤氧化技术,是在传统电化学高级氧化技术的基础上构建的Flow-through式^[8]反应体系,大大提高了电子传质效率,进一步增强了对工业高盐废水的处理效果,降低运行能耗,旨在为工业上深度处理高盐废水提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

实验试剂:三氯化铋、四氯化锡、柠檬酸、乙二醇、氟化铵、磷酸、高氯酸钠、过氧化氢(30%)、丙酮及盐酸(37%);实验仪器:HQ40d多功能水质分析仪、磁力搅拌器、直流稳压电源、蠕动泵、超声清洗仪、DRB200 COD快速消解仪、UV-1100紫外分光光度计、DR2800便携式分光光度计。

1.2 电极材料制备

采用某公司生产的厚度5 mm石墨毡(GF-5)为阴极,选用实验室自制电极MP-Ti-ENTA/ SnO_2 -Sb为阳极,其制备过程如下:

① 预处理。将孔径为 $50 \mu\text{m}$ 、厚度为3 mm的

多孔钛板打磨光亮,放入 $V(\text{H}_2\text{O}):V(\text{H}_2\text{O}_2)=5:1$ 的溶液中恒温水浴 ($80\text{ }^\circ\text{C}$) 10 min ,以丙酮、超纯水超声清洗 10 min 后,在 $V(\text{HF}):V(\text{H}_2\text{O}_2)=5:1$ 的溶液中反应 3 min ,移入 $V(\text{H}_2\text{O}):V(\text{HCl}):V(\text{H}_2\text{O}_2)=6:1:1$ 的溶液中清洗 10 min ,然后用超纯水超声清洗。

② 构造增强型二氧化钛纳米管阵列。在含 $0.25\% \text{ NH}_4\text{F}$ 、 $2\% \text{ H}_2\text{O}$ 的乙二醇溶液中恒压 (30 V) 阳极氧化 6 h ,在含 $5\% \text{ H}_3\text{PO}_4$ 的乙二醇溶液中二次恒压阳极氧化 1 h ,后置于 1 mol/L NaClO_4 溶液中,以 5 mA/cm^2 的电流密度进行 15 min 阴极化处理,依次用乙醇和超纯水超声清洗 10 min ,最后将多孔钛板置于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的空气氛围中煅烧 1 h 。

③ 负载 $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ 催化层。通过溶胶-凝胶法在增强型二氧化钛纳米管阵列中间层上负载金属氧化物催化层;将生长 $\text{TiO}_2\text{-ENTA}$ 的多孔钛基体浸没于陈化后的凝胶,匀速取出并将其置于 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中干燥 10 min ,移入 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的马福炉中退火处理 10 min ;重复上述步骤 15 次,并在最后一次置于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的马福炉中退火处理 2 h ;冷却至室温后,通过超纯水超声清洗多孔钛板至洗涤液澄清,得到 $\text{MP-Ti-ENTA/SnO}_2\text{-Sb}$ 阳极。

1.3 电化学反应系统的组成及运行

电化学反应系统由直流稳压电源、蠕动泵、磁力搅拌器、升流式 Flow-through 反应器以及烧杯组成。将待处理废水置于烧杯并在反应过程中不断对其进行搅拌,用蠕动泵将废水导入反应器上端(阳极一侧),水流垂直流过反应器后再次回到烧杯中。反应器外径为 112 mm ,内径为 52 mm ,高为 90 mm ,单组实验处理水量为 200 mL ,循环流量为 $2.92\text{ cm}^3/\text{s}$,流速为 8.43 cm/s 。其原理如图 1 所示。

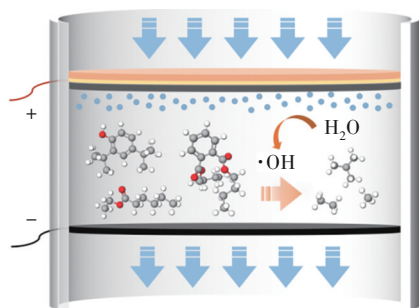
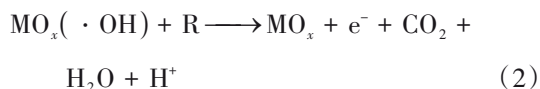
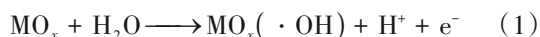


图 1 反应原理示意

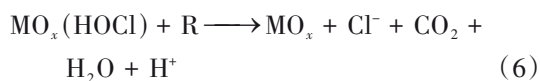
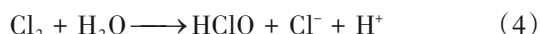
Fig.1 Schematics of reaction principle

该系统通电后,有机污染物(R)在金属氧化物(MO_x)表面通过电子转移直接被氧化或被阳极表面

产生的 $\cdot\text{OH}$ 等活性氧物种氧化而降解^[9]。反应机理见下式:



除产生的 $\cdot\text{OH}$ 外,浓水中存在的大量 Cl^- 在通电的条件下被活化活性氯物种(Cl_2 、 ClO^-/HClO)^[10], SO_4^{2-} 在阳极表面发生电子转移生成过硫酸盐($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$),而后被活化为硫酸根自由基($\cdot\text{SO}_4^-$)^[11],均为氧化有机污染物做出贡献,但 $\cdot\text{OH}$ 氧化仍为高盐废水中有机污染物去除的主要途径,贡献率为 $72\%\sim 75\%$ ^[12]。反应机理见下式:



1.4 分析方法

采用消解比色法测定 COD,采用 DPD 试剂比色法测定余氯^[13],采用 HQ40d 多功能水质分析仪实时监测废水理化性质,采用稀释倍数法测定色度。

选用去除单位数量级污染物的能量消耗值(EE/O)^[14]、去除单位 COD 消耗的能量(EC)^[15]和电化学氧化矿化有机污染物的瞬时电流效率(ICE)^[16]作为评价电过滤氧化系统降解 NF 浓水效果的指标,其计算方法见下式:

$$\text{EE/O} = \frac{U \cdot j \cdot S \cdot t}{V \cdot \lg\left(\frac{\text{COD}_0}{\text{COD}_t}\right)} \quad (9)$$

$$\text{EC} = \frac{U \cdot j \cdot S \cdot t}{V(\text{COD}_0 - \text{COD}_t)} \quad (10)$$

$$\text{ICE} = \frac{\text{COD}_t - \text{COD}_{t+\Delta t}}{8 \cdot j \cdot S \cdot \Delta t} \cdot F \cdot V \times 100\% \quad (11)$$

式中: EE/O 为电解使浓水中有机污染物降低一个数量级所需的耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; EC 为去除单位 COD 消耗的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{g}$; U 为反应器槽电压, V ; j 为表观电流密度, A/cm^2 ; S 为电极表观面积, cm^2 ; t 为反应时间, h ; V 为反应溶液体积, L ; COD_0 为反应初

始时的化学需氧量, mg/L ; COD_t 为反应时间 t 时的化学需氧量, mg/L ; ICE 为瞬时电流效率, %; $\text{COD}_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时的化学需氧量, mg/L ; Δt 为单位时间, s ; F 为法拉第常数, 取 $96\,485.34\text{ C/mol}$ 。

2 结果与讨论

2.1 实际水样的采集与水质分析

本研究所用 NF 浓水取自某煤化工企业的实际废水处理工艺, 其流程如图 2 所示。NF 装置进水为 RO 浓水, 因此 NF 浓水具有 RO 浓水的部分水质特征, 存在多环芳香族化合物、长链脂肪烃、多环芳烃等有机污染物, 有些分子结构中还带有具有生物毒性的官能团, 颜色呈浅黄棕色, 较为透明, 具有轻微难闻气味。测得 NF 浓水水质特征如下: $\text{COD}=170\text{ mg/L}$, $\text{BOD}_5=0.58\text{ mg/L}$, 浊度为 $0.7\sim 1.1\text{ NTU}$ 。

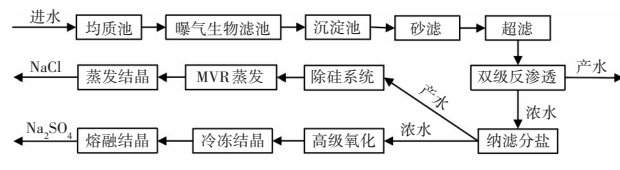


图2 煤化工废水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of coal chemical wastewater treatment process

NF 工段前设置生物法水处理工艺, 故 NF 浓水常包含微生物代谢产物, 有机物浓度较高, 可生化性极差 ($B/C=0.003$)。浓水呈弱碱性, pH 在 $9.3\sim 9.7$ 之间, 电导率为 34.00 mS/cm , 盐度较高 (2.04%), 含有大量的 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子, TDS 达 17.00 g/L , 含有大量环境高风险物质, 成分复杂。

2.2 纳滤浓水降解效果

2.2.1 电过滤氧化去除 COD 效果

为探究电化学氧化系统对 NF 浓水中有有机污染物的降解效果, 本研究考察了不同电流密度条件下废水 COD 随反应时间的变化情况。浓水降解曲线如图 3 所示。可知, 在 2 h 电化学氧化处理过程中, 随反应时间的增加, 废水 COD 持续降低; 随电流密度的升高, 系统氧化能力明显增强。当电流密度为 30.57 mA/cm^2 时, 200 mL 废水中有机污染物在 2 h 内全部被矿化。

臭氧催化氧化技术处理膜过滤浓水的 COD 去除率普遍低于 35% , 尤其当膜清洗药剂和膜面洗脱的污染物进入浓水时, 进、出水 COD 几乎没有变化^[17]。图 4(a) 统计了部分高级氧化技术对反渗透

浓水 ($\text{COD}=90\sim 112\text{ mg/L}$, $\text{pH}=7.5\sim 8.5$, $\text{TDS}=7\sim 10\text{ g/L}$, $\text{BOD}_5=0.6\sim 0.9\text{ mg/L}$, 浊度为 $0.88\sim 1.01\text{ NTU}$, $\text{Cl}^-=2\,000\sim 3\,000\text{ mg/L}$) 的处理效果^[18-20], 图 4(b) 为电过滤氧化系统在不同电流密度下对本研究所用纳滤浓水的处理效果, 由于水质特征相似, 可将不同技术的处理效果进行比较。可知, 以电过滤氧化技术替代臭氧催化氧化技术, 大大提高了对 NF 浓水的处理效果。当电流密度为 10.19 mA/cm^2 时, COD 去除率在 2 h 内可达 50% 以上; 当电流密度为 25.48 mA/cm^2 时, COD 去除率可达 93% 左右。企业可根据废水处理需求, 选择合适的工况。

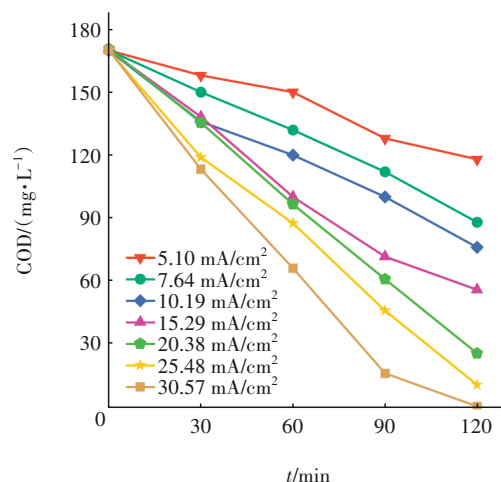


图3 不同电流密度下的浓水COD降解曲线

Fig.3 Degradation curves of COD in concentrated water under different current density conditions

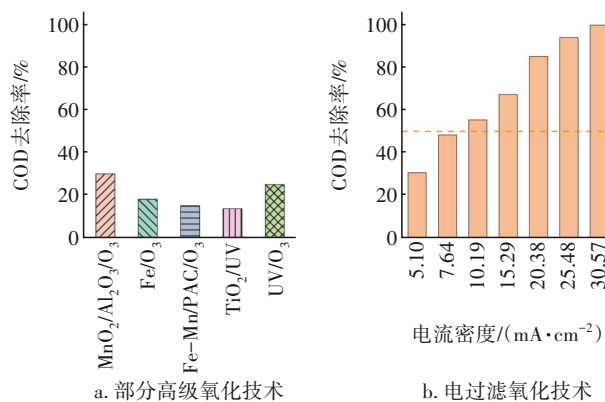


图4 高级氧化技术处理浓水效果

Fig.4 Effects of advanced oxidation technology in treating concentrated water

2.2.2 系统稳定性及色度变化

为探究电过滤氧化系统的稳定性, 在 10.19 mA/cm^2 的电流密度下进行多次重复实验, 系统稳定性及色度变化见图 5。可知, 电过滤氧化系统对废

水的处理效果具有良好的可重复性,6次实验的COD均由170 mg/L降至70 mg/L左右;在处理过程中,废水颜色发生明显变化,电过滤处理30 min后废水从浅黄棕色变为淡黄色,处理90 min后废水色度去除率达到90%以上。

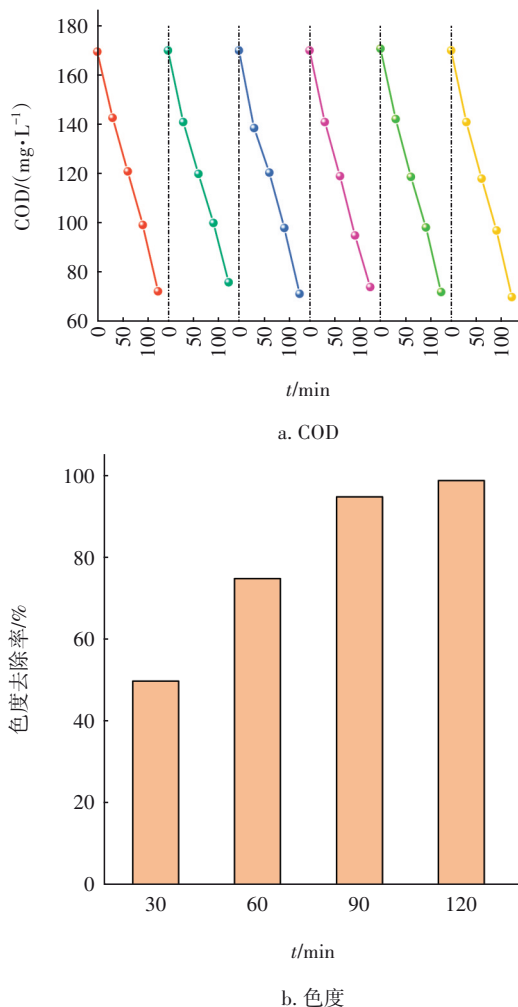


图5 系统稳定性及色度变化

Fig.5 System stability and chromaticity variation

2.2.3 处理后废水余氯变化

NF浓水含有大量氯离子,在电过滤氧化系统中可生成氧化性强的活性氯物种,因此有必要对电化学氧化过程中产生的游离氯进行分析。图6为将水电解处理2 h后余氯生成量与电流密度的拟合曲线,二者呈良好的对数函数关系。当电流密度为7.64~10.19 mA/cm²时,余氯产生量(以Cl₂计)为0.12~0.20 mg/L,有一定杀菌作用,无需额外投加氯消毒剂。当电流密度在30 mA/cm²以下时,系统产生余氯水平远远低于1 mg/L,不会氧化侵蚀反渗透膜从而影响其使用性能及寿命,属于安全无二次污

染的污水处理工艺。

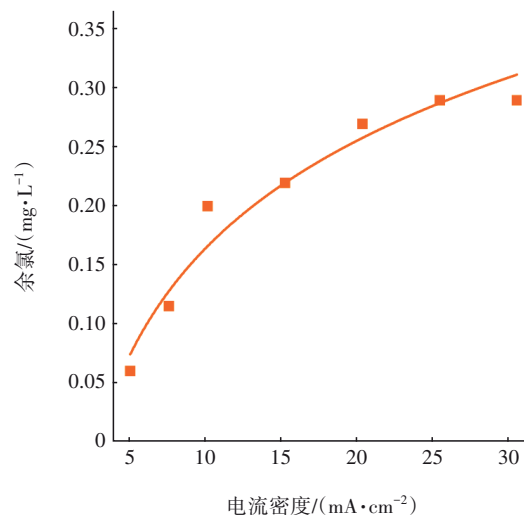


图6 余氯产生量变化曲线

Fig.6 Variation curve of residual chlorine production

2.2.4 处理中废水理化性质监测

在电流密度为10.19 mA/cm²条件下运行2 h,废水理化性质均未发生明显变化(见图7),未对反应装置产生不利影响。

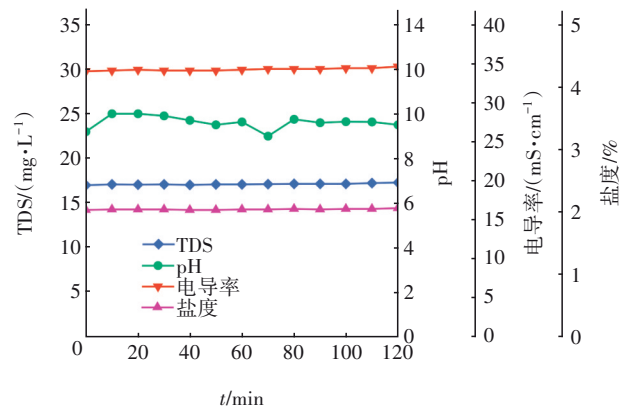


图7 废水理化性质随时间变化

Fig.7 Change in physicochemical properties of wastewater with time

2.3 运行成本分析

运行成本是工程应用考虑的重要因素,也是确定工艺运行工况最直接的因素,故从能耗角度对本研究中的电化学氧化系统进行评价。图8为不同电流密度下电流效率及能耗变化。可知,随着电流密度的增加,ICE呈下降趋势,EC逐渐升高,因此在较低电流密度下运行有利于降低能耗,提高电流效率。当电流密度为7.64~10.19 mA/cm²时,EC=0.128~0.234 kW·h/g,结合能耗以及降解效果来看,推荐电流密度选择7.64 mA/cm²,此时ICE=

18.31%, $EE/O=9.15 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, COD去除率可达50%左右。运行过程无任何化学药剂添加,无需调节酸碱,无二次污染生成,故运行成本仅计算电量损耗。按照工业用电平时段0.72元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)计算,废水处理费用为6.59元/ m^3 。

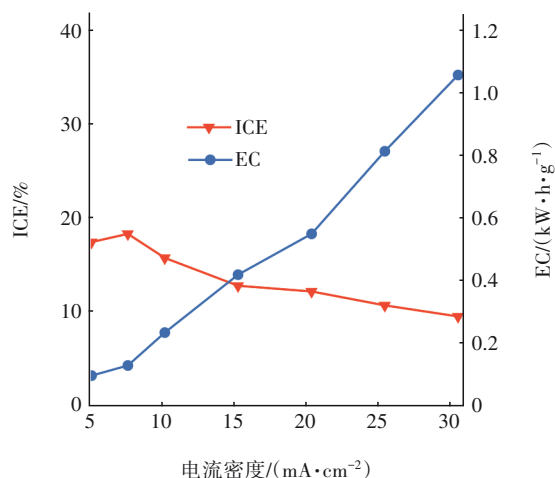


图8 不同电流密度下电流效率及能耗变化

Fig.8 Change in current efficiency and energy consumption under different current densities

3 结论

① 本研究开发的电过滤氧化技术是一种高效的电化学氧化技术,随电流密度升高,电化学氧化系统的氧化能力明显增强。在不调节pH条件下,当电流密度为 $7.64 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时,反应2 h后废水COD去除率可达50%左右;当电流密度为 $25.48 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时,COD去除率可达93%左右。

② 电过滤氧化系统具有良好的稳定性,在电流密度为 $10.19 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 的条件下多次重复实验,COD均由 $170 \text{ mg}/\text{L}$ 降至 $70 \text{ mg}/\text{L}$ 左右。且在处理过程中,废水颜色发生明显变化,电过滤处理30 min后废水从浅黄棕色变为淡黄色,处理90 min后废水色度去除率达90%以上。

③ 余氯产生量与电流密度呈良好的对数函数关系,余氯有一定杀菌作用,无需额外投加氯消毒剂。且电过滤氧化系统产生余氯(以 Cl_2 计)水平低于 $1 \text{ mg}/\text{L}$,不会氧化侵蚀反渗透膜。

④ 在电流密度为 $10.19 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 条件下监测废水的理化性质,发现其pH、电导率、盐度、TDS等均未发生明显变化,未对反应装置产生不利影响。

⑤ 结合能耗及污染物降解效果,推荐电流密度选择 $7.64 \text{ mA}/\text{cm}^2$,此时 $ICE=18.31\%$, $EC=0.128$

$\text{kW}\cdot\text{h}/\text{g}$, $EE/O=9.15 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,废水处理费用为6.59元/ m^3 。

参考文献:

- [1] CHEN F Y, ZHANG Z, ZENG F M, *et al.* Pilot-scale treatment of hypersaline coal chemical wastewater with zero liquid discharge [J]. *Desalination*, 2021, 518: 115303.
- [2] MA W C, ZHANG S B, CHEN Y R, *et al.* $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CuO@lignite}$ activated coke activated persulfate advanced treatment of phenolic wastewater from coal chemical industry [J]. *Environmental Research*, 2022, 213: 113601.
- [3] SHEFER I, LOPEZ K, STRAUB A P, *et al.* Applying transition-state theory to explore transport and selectivity in salt-rejecting membranes: a critical review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 56(12): 7467-7483.
- [4] WANG Z X, FENG D J, CHEN Y M L, *et al.* Comparison of energy consumption of osmotically assisted reverse osmosis and low-salt-rejection reverse osmosis for brine management [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(15): 10714-10723.
- [5] XU D L, LUO X S, JIN P R, *et al.* A novel ceramic-based thin-film composite nanofiltration membrane with enhanced performance and regeneration potential [J]. *Water Research*, 2022, 215: 218664.
- [6] MOUSAVI S S, KARGARI A. Water recovery from reverse osmosis concentrate by commercial nanofiltration membranes: a comparative study [J]. *Desalination*, 2022, 528: 115619.
- [7] QIAO J, XIONG Y Z. Electrochemical oxidation technology: a review of its application in high-efficiency treatment of wastewater containing persistent organic pollutants [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 44: 102308.
- [8] ROSHAN B, RASOULZADEH H, MASSOUDINEJAD M, *et al.* Enhanced desalination efficiency of flow-through capacitive deionization cell by mesh electrode with granular aerogel carbon in the removal of ions from synthetic and real samples [J]. *Water Reuse*, 2022, 12(1): 33-51.
- [9] GARCIA-ESPINOZA J D, ROBLES I, DURAN-MORENO A, *et al.* Photo-assisted electrochemical advanced oxidation processes for the disinfection of

- aqueous solutions: a review [J]. *Chemosphere*, 2021, 274: 129957.
- [10] CHEN M, PAN S, ZHANG C, *et al.* Electrochemical oxidation of reverse osmosis concentrates using enhanced TiO_2 -NTA/ SnO_2 -Sb anodes with/without PbO_2 layer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 399: 125756.
- [11] QI F, WANG Q, ZENG Z Q, *et al.* Insight into the roles of microenvironment and active site on the mechanism regulation in metal-free persulfate activation process coupling with an electric field [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129673.
- [12] LI P, YOSHIMURA T, FURUTA T, *et al.* Sunlight caused interference in outdoor N, N-diethyl-*p*-phenylenediamine colorimetric measurement for residual chlorine and the solution for on-site work [J]. *Ecology Environment and Conservation*, 2019, 169: 640-644.
- [13] MACHADO R M, DA SILVA S W, BERNARDES A M, *et al.* Degradation of carbendazim in aqueous solution by different settings of photochemical and electrochemical oxidation processes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 310: 114805.
- [14] DU X, LI Z Y, XIAO M Y, *et al.* An electro-oxidation reactor for treatment of nanofiltration concentrate towards zero liquid discharge [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 146990.
- [15] YOON J, FLAVIN M T, HAN J. Current efficiency and selectivity reduction caused by co-ion leakage in electromembrane processes [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117351.
- [16] BRILLAS E, MARTINEZ-HUITLE C A. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: an updated review [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 166: 603-643.
- [17] 黄南, 李阳, 吴乾元, 等. 臭氧高效催化氧化处理城市污水反渗透浓水 [J]. *工业水处理*, 2021, 41(12): 56-59.
- HUANG Nan, LI Yang, WU Qianyan, *et al.* Effective treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate by catalytic ozonation technology [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(12): 56-59 (in Chinese).
- [18] YANG L Y, SHENG M, LI Y J, *et al.* A hybrid process of Fe-based catalytic ozonation and biodegradation for the treatment of industrial wastewater reverse osmosis concentrate [J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124639.
- [19] JOTHINATHAN L, CAI Q Q, ONG S L, *et al.* Fe-Mn doped powdered activated carbon pellet as ozone catalyst for cost-effective phenolic wastewater treatment: mechanism studies and phenol by-products elimination [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424 (Pt. B): 127483.
- [20] 刘雪莲. 基于臭氧的高级氧化技术强化处理反渗透浓水 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- LIU Xuelian. Enhanced Treatment of Reverse Osmosis Concentrated Water by Ozone Based Advanced Oxidation Processes [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020 (in Chinese).
-
- 作者简介:** 刘宁(1998-), 女, 天津人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电化学氧化技术处理高盐废水。
- E-mail:** ningxiner_liu_007@163.com
- 收稿日期:** 2024-02-21
- 修回日期:** 2024-03-27

(编辑: 沈靖怡)