

兰炭废水全过程零排放处理技术与应用

韦凤密^{1*}, 王立媛², 张务滨², 马星辰², 徐峰², 熊耀²

(1.北京赛科康仑环保科技有限公司, 北京 100083; 2.北京中科康仑能源科技有限公司, 北京 102627)

摘要:为解决兰炭废水处理难度大、废水中毒性污染物脱除率低、处理费用高等问题,迫切需要开发低成本、高稳定性全流程零排放处理技术。通过预处理除油去除废水中油类,强化脱酚蒸氨处理实现高效酚氨资源的回收,处理出水 COD 稳定达到 $\leq 6\ 000\ \text{mg/L}$ 、氨氮达到 $50\sim 100\ \text{mg/L}$ 。通过强化生化处理技术,废水中的 COD、氨氮、总氰可稳定达到 $120\sim 150\ \text{mg/L}$ 、 $5\ \text{mg/L}$ 、 $0.2\ \text{mg/L}$ 以下。采用高效臭氧催化氧化+MBR 处理工艺,处理出水 COD 可稳定达到 $\leq 40\ \text{mg/L}$ 。强化脱盐预处理、多级梯度脱盐及分盐处理集成,实现废水产水率 $\geq 90\%$ 。浓水经过纳滤分盐,纳滤淡水经过浓缩进行双极膜电渗析处理,实现 $10\%\sim 15\%$ 酸溶液、碱溶液的回收。纳滤浓水通过短程复分解与结晶处理工艺,在加入碳酸氢铵的条件下,制取高品质的硫酸铵(氮含量 $\geq 21\%$)和碳酸钠(纯度约 97%)盐品,高效回收废水中有价资源,真正实现废水低成本零排放处理。

关键词:兰炭废水;脱酚蒸氨预处理;生化及深度处理;膜脱盐及零排放

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)12-0224-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.12.041

Zero discharge treatment technology for semi-coking wastewater and application

WEI Feng-mi^{1*}, WANG Li-yuan², ZHANG Wu-bin², MA Xing-chen², XU Feng², XIONG Yao²

(1.Beijing Cycle Columbus Environmental Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2.Beijing Zhongke Kanglun Energy Technology Co., Ltd., Beijing 102627, China)

Abstract: There exist problems in treating with semi-coking wastewater, such as difficult to treat, low removal rate of toxic pollutants in wastewater, and high treatment cost. It is necessary to develop treatment technologies with low cost, high stability and whole process zero emission. Oil substances in wastewater are removed by pretreatment, and the high-efficiency recovery of phenol-ammonia resource is realized through an enhanced phenol-removing and ammonia-evaporating treatment. The contents of COD and ammoniacal nitrogen in the treated effluent are less than $6\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $50\sim 100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Through strengthening the biochemical treatment technology, the contents of COD, ammoniacal nitrogen and total cyanide in wastewater can reach below $120\sim 150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The content of COD in the treated effluent can stably be less than $40\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ after using high-efficient ozone catalytic oxidation+MBR process. Enhanced desalination pretreatment, multi-grade gradient desalination and salt splitting treatment are integrated to realize a water yield of more than 90% from wastewater. About 10%–15% of acid solution and alkali solution is recovered after the concentrated water has been separated by nanofiltration, and the fresh water has been concentrated by bipolar membrane electro dialysis. High-quality ammonium sulfate (nitrogen content $\geq 21\%$) and sodium carbonate (a purity of about 97%) salts are obtained from concentrated nanofiltration water by short-range double decomposition and crystallization processes with the addition of ammonium bicarbonate. High-efficient recovery of valuable resources in wastewater achieves low-cost zero-discharge wastewater treatment.

Key words: semi-coking wastewater; phenol removal and ammonia distillation pretreatment; biochemical and in-depth treatment; membrane desalination and zero emission

目前制约兰炭废水零排放处理的因素,主要体现在处理技术不成熟,技术集成化不高,处理效果欠佳,处理成本过高等。针对上述问题,通过开发设计集成兰炭废水低成本、高效率、无害化处理的全流程成套处理技术工艺包,单元处理技术成熟,单元间处理技术衔接科学合理,处理技术集成化高,处理成本低,处理效果好,能够有效地解决兰炭废水的资源化处理问题,对支持煤化工行业的绿色可持续发展具有积极意义。

1 废水水质特征

以新疆某煤化集团有限公司 500 万 t/a 煤分质清洁高效综合利用项目废水处理为例,针对废水的

特征,设计主体处理工艺路线为:除油、酚氨回收预处理+强化生化处理+高效深度处理+梯度膜脱盐处理+零排放处理的综合处理技术路线,并通过单元技术开发与优化,提高废水综合处理效果,降低废水处理成本。水质如表 1。

表 1 兰炭废水主要水质指标

项目	COD	油	总酚	氨氮	TDS
指标	30000~ 80000	1500~ 5000	5000~ 9000	3500~ 5000	3000~ 5000

2 全流程零排放技术及应用

2.1 除油、酚氨回收预处理技术

兰炭废水的水质比较复杂,处理难度大。针对

收稿日期:2024-02-19;修回日期:2024-10-29

作者简介:韦凤密(1987-),女,本科,高级工程师,研究方向为工业污水处理,通讯联系人,fmwei@saikekanglun.com。

废水中的油类、酚类、氨氮需要进行单独的预处理,既能实现废水中有价资源的高效回收利用,同时有效去除废水中的污染物,保证后续处理工段的稳定运行。

以新疆某兰炭废水处理项目为例,预处理段的主体工艺流程见图 1。通过单元技术的优化实现废水的高效预处理。

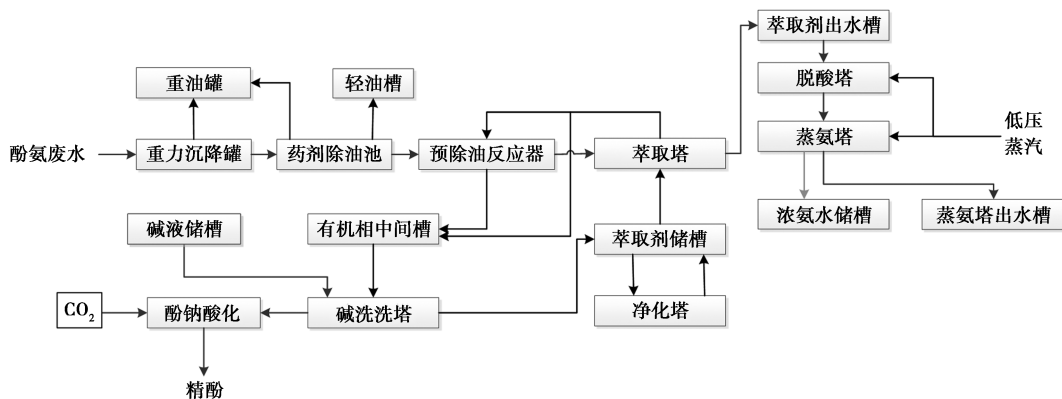


图 1 除油、酚氨回收预处理段的主体工艺流程

2.1.1 除油预处理技术

兰炭废水中的油含量一般为 1 500~5 000 mg/L,主要成分为焦油、石脑油、乳化油,其中大部分焦油等重油经过重力沉降器进行分离去除与回用,轻油通过药剂除油进行去除,乳化油是比较难以去除的油分,结合萃取处理工艺,通过一体化的预除油反应器进行去除^[1]。

重力除油设计油类去除率为 50%~70%;轻油通过投加除油药剂去除率 30%~40%;废水中的乳化油通过一体化预除油反应器,通过与萃取单元结合,利用萃取塔出来的富酚有机相中少量剩余萃取剂进行油类的协同萃取,达到废水除油的目标,油类去除率 10%~20%。

通过除油预处理后,废水中油类的去除指标情况见图 2。

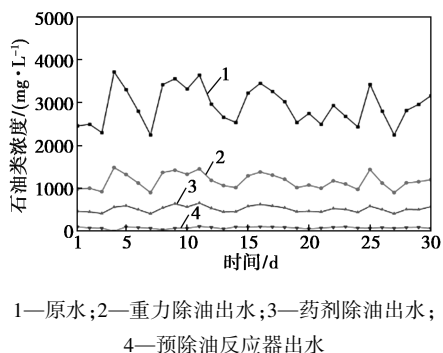


图 2 除油预处理单元出水指标

2.1.2 脱酚蒸氨预处理技术

兰炭废水中的酚含量很高,对酚类进行萃取分离能有效地进行有价资源的回收,去除废水中的污染物。煤化工废水的酚回收处理技术目前主要有萃

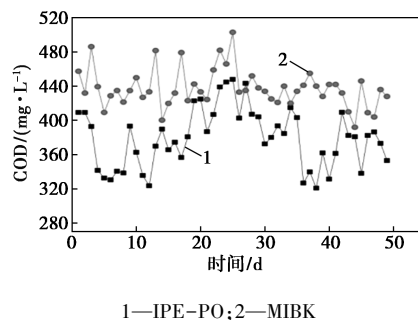
取、树脂吸附等工艺^[2]。由于酚氨废水中酚含量很高,树脂等吸附方法吸附剂再生频繁使得工艺处理成本较高,所以一般采用溶剂萃取脱酚工艺^[3]。

萃取脱酚结合开发的 IPE-PO 萃取剂,相对于其他的萃取剂化学性质更稳定、损耗小、处理效果好,并且处理后的废水可生化性更好,处理成本更低。IPE-PO 与常规萃取剂 DIPE、MIBK 在 25℃ 下纯水中的溶解度见表 2。

表 2 不同萃取剂在纯水中的溶解度

萃取剂	MIBK	DIPE	IPE-PO
水中溶解度(25℃)/%	2.2	0.94	0.048

与 MIBK 和 DIPE 相比,IPE-PO 在水中溶解度很低,对多元酚萃取效率高,溶解度不到万分之五^[4]。IPE-PO 本身的毒性低,溶解到废水中所产生的 COD 不超过 1 000 mg/L。因此与另外 2 类萃取剂相比,采用 IPE-PO 萃取后的废水可直接进入后续工序,无需通过蒸汽汽提回收。萃取出来后出水废水可生化性见图 3。



1—IPE-PO;2—MIBK

图 3 IPE-PO 与 MIBK 萃取处理后废水生化性能比较

基于 IPE-PO 萃取剂的免蒸汽汽提回收优势,

酚氨回收处理工艺可设计为先脱酚后蒸氨,减少浓氨水被污染的影响。萃取塔利用相似相溶原理,废水中的酚类、油类转到萃取剂中,并从塔顶排除富酚有机相,净化后的废水从塔底部排除。萃取剂的消耗量控制在 0.05%。富酚有机相进入碱洗塔进行萃取剂的分离再生。碱洗塔设计为两级串联,采用质量分数 15%~20% 的氢氧化钠溶液进行错流碱洗。酚类通过酸化处理,得到精酚产品,净化后的萃取剂继续进行系统内循环。

兰炭废水中的氨氮含量较高,需要进行脱氨预处理,进行浓氨水的回收,消除高浓度氨氮对后续生化处理的影响。蒸氨采用汽提蒸氨法专利技术^[5]。废水首先调节 pH 至 12 左右,蒸氨塔底部通入低压饱和蒸汽,氨氮从液相中以氨分子的形式转向气相中,通过塔顶换热器进行冷凝及内循环得到 10%~20% 的浓氨水。蒸氨塔塔底出水氨氮浓度 100~200 mg/L,可直接进入生化处理系统。

基于 IPE-PO 处理技术与蒸氨处理技术的优势,其处理效果、处理成本与常规 MIBK 及蒸氨处理技术的对比情况如表 3、表 4 所示。

表 3 IPE-PO 与 MIBK 处理效果比较 mg/L

工艺流程	原水	IPE-PO 处理工艺	MIBK 处理工艺
pH	9.2~9.4	7.14~7.38	5.45~6.07
COD	30000~37000	4300~6350	3891~5470
总酚	8361~9200	652~870	600~873
氨氮	3440~5000	89~133	102~140
油	3570~4615	98~155	120~180

表 4 IPE-PO 与 MIBK 处理成本比较 元/t

项目	IPE-PO 处理工艺	MIBK 处理工艺
直接处理成本	-31.62	-37.98
产生收益	+34.40	+22.40
综合处理成本	+2.78	-15.58

从上述内容可知,兰炭废水通过设计的工艺组合进行处理,系统工艺运行稳定,能够对废水中的污染物进行有效的净化处理,出水水质指标及处理成本优于常规的 MIBK 处理工艺。

2.2 生化及深度处理技术

2.2.1 生化处理技术

经过前端的除油、蒸氨脱酚预处理后,兰炭废水进入生化处理系统的水质指标相对较好。生化处理单元是兰炭废水去除 COD、氨氮、挥发酚、氰化物等的重要处理单元,通过多种处理工艺的对比、优化升级,集成升级版的 A²O² (厌氧+缺氧+好氧+好氧) 处理工艺^[6-7]。主体流程见图 4 所示。

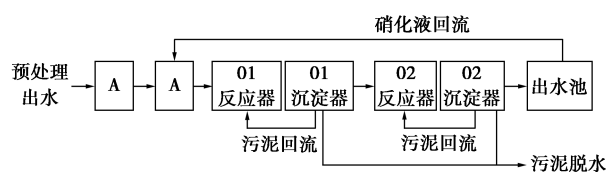


图 4 生化段处理工艺流程

工艺优势主要体现在以下几点。

(1) 厌氧处理反应器通过厌氧水解酸化,提高废水的可生化性,COD 的去除率达到 10%~20%。

(2) 缺氧处理是以有机物作为电子供体,NO₃⁻/NO₂⁻ 作为电子受体,在微生物菌群的作用下进行反硝化,实现反硝化效率大于 90%,COD 去除率达到 35% 以上,尤其是使得相当部分难降解有机物得到去除,极大降低了好氧段的有机负荷,降低了曝气成本,保证了好氧段硝化菌的优势竞争力,同时反硝化产碱也降低后续硝化的碱耗。反硝化强化去除有机物见图 5。

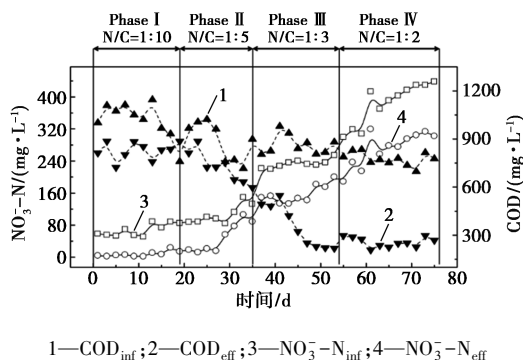
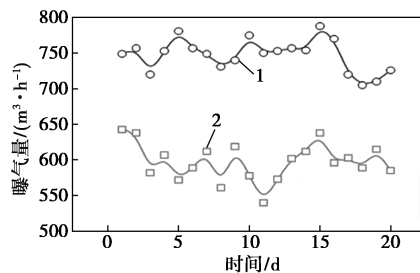


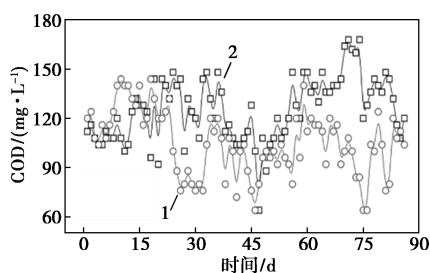
图 5 反硝化强化有机物去除

(3) 在 O₁ 阶段通过新型生物反应-沉淀一体式设备,将好氧段进行分级,分别营造脱 COD 异养菌和脱氨氮自养菌的最佳生存环境,保证碳氧化细菌和硝化细菌分别优势生长,消除过高有机物对硝化过程的影响,对有毒物和负荷的耐冲击能力较强,节能 30%,COD 去除提高 20~40 mg/L,抗冲击能力提高 20%~40%。以某厂生化改造前后为例,曝气能耗及处理效果对比如图 6、图 7 所示。



1—2017 年;2—2018 年

图 6 改造前后曝气量对比



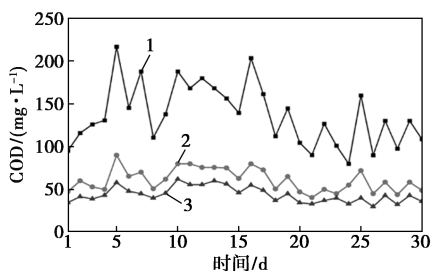
1—2017年;2—2018年

图7 改造前后生化处理出水 COD 比较

2.2.2 深度处理技术

深度处理的重点是进一步去除难以生物去除的有机物和色度。针对废水深度处理技术,通过技术开发与研究,在国内外率先开发了低成本高效臭氧催化氧化技术^[8]。该技术通过研制长寿命的高效非均相催化剂,结合催化氧化反应器结构优化设计,提高氧化剂利用率高达95%以上,大幅度降低氧化剂(臭氧)使用量,处理成本低。臭氧氧化处理工艺结合 MBR 膜处理工艺,深度去除氧化出水中的 COD,确保出水 COD 低于 40 mg/L^[9]。

深度处理单元废水处理运行效果如图 8 所示。



1—生化出水;2—臭氧氧化出水;3—MBR 出水

图8 深度处理出水指标

2.3 梯度膜脱盐及零排放处理技术

2.3.1 梯度膜脱盐处理技术

煤化工废水的盐含量常规在 3 000~5 000 mg/L。根据反渗透膜的适用范围及技术经济性,膜脱盐设计为两级梯度脱盐处理工艺^[10]。一级脱盐采用常压反渗透膜,设计在 70%~75%的产水率一般较易实现。一级脱盐浓盐水需要进行二级预处理除 COD 至 50~60 mg/L,除硬至 20~30 mg/L 再进入二级膜脱盐。第二级膜采用高压的海水淡化膜,经济性最高的产水率设计为 60%~70%,产水率总量 90%~93%,处理后的高盐水含盐量为 2%~3%。高浓盐水再进行最终的零排放处理。

2.3.2 高浓盐水零排放处理技术

针对高浓盐水资源化处理技术,设计、集成了高盐水分盐处理,纳滤淡水制稀酸稀碱溶液^[11]。纳滤浓水制硫酸铵与碳酸钠的零排放处理技术,回收的酸碱溶液可以回用到企业的生产工段,硫酸铵与碳酸钠作为重要的工业产品,可以回收利用,同时实现废水最终零排放的目标,不产生二次污染。处理工艺见图 9 所示。

纳滤淡水主要成分是氯化钠。制取稀酸稀碱的处理工艺,是将纳滤淡水采用 SWRO 与 ED 组合的处理工艺,SWRO 将废水浓缩至 2%~3%,产水进水回用,浓水进入 ED 进行深度浓缩,含盐量达到 15%~20%,浓水经过螯合树脂去除废水中的重金属至 1 mg/L 以下,进入双极膜进行处理^[12-13],制取 10%~15%酸溶液和碱溶液。废水中 80%以上氯化钠转化为盐酸和氢氧化钠,回用至生产线。

纳滤浓水主要成分是硫酸钠。制硫酸铵与碳酸

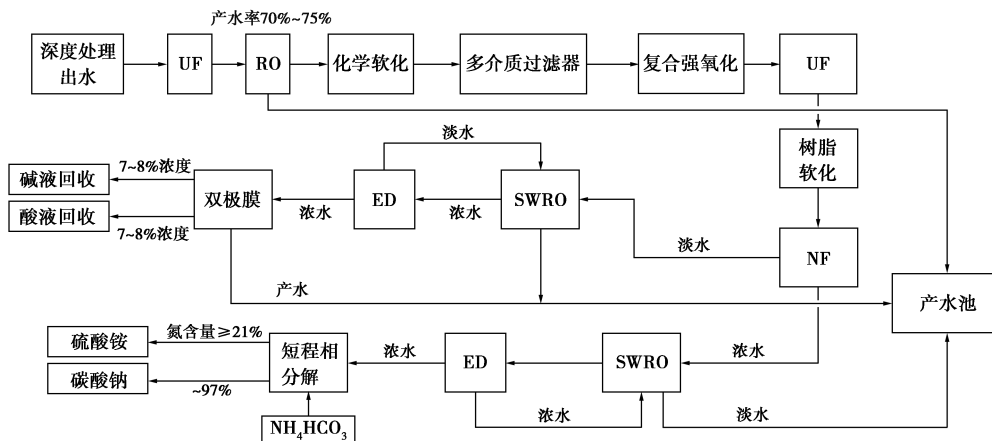


图9 膜脱盐及分盐处理制稀酸和稀碱、硫酸铵和碳酸钠处理工艺

钠处理工艺,同样经过 SWRO+ED 组合的处理工艺,浓水浓缩至盐量为 15%~20%,然后进入复分解结

晶反应器,在加入碳酸氢铵条件下制取碳酸氢钠,再进行进一步的煅烧得到碳酸钠。复分解反应器的母

液进入碳铵循环反应器,分离出的碳铵回流至复分解单元进行料液补充,剩余的硫酸铵进行蒸发结晶得到硫酸铵产品。

3 处理效果及处理成本分析

根据废水水质分析,兰炭废水的主要污染物包括 COD、酚、油、氨氮,并且有机物和氨氮含量很高,

属于典型的高浓度有机废水。先通过除油和酚氨回收预处理技术对废水进行酚、氨、油脱除并回收后,进入后续的生化处理和深度处理进一步有效去除 COD、氨氮等污染物,出水满足一定要求,则进行梯度膜脱盐零排放处理。兰炭废水成套处理技术能够有效地对废水中各种污染物进行针对性去除,全流程各处理工艺单元的处理出水效果详见表 5。

表 5 全流程处理技术分段处理出水指标

水质指标	pH	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	总酚/(mg·L ⁻¹)	石油类/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	TDS/(mg·L ⁻¹)
兰炭废水	8~10	35000~40000	5000~9000	1000~5000	3500~5000		
酚氨回收单元							
进水	8~10	35000~40000	5000~9000	1000~5000	3500~5000		
出水	6~9	5000~6000	700~1500	100	≤50	≤50	
生化处理(含混凝)							
进水	6~9	4000~5500	450~850	100	120~140	50~150	
出水	6~9	120~150	0~0.2	1~3	≤5	50	
深度处理							
进水	6~9	20~150	0~0.2	1~3	≤5	50	
出水	6~8	40~50	0.2	≤1	≤5	10	3000~5000
脱盐处理							
进水	12~13	40	0.2	≤1	≤5	10	3000~5000
出水	6.5~7.5	产水率 90%以上	≤0.5	≤1	≤5	≤3	300
高盐水零排放处理							
							淡水/冷凝水达标回用,产品合格回收

成套处理技术集成化高,处理效果好,处理成本低,各单元的综合废水处理成本分析详见表 6。

表 6 全流程处理技术分段处理成本 元/t

处理单元	处理成本	备注
酚氨回收单元	2~2.5	
生化处理(含混凝)	5~6	
深度处理	2~3	
脱盐处理	3~4	产水率 90%
高盐水零排放处理	~3	处理成本与收益基本持平

通过上述各处理单元出水指标及处理成本分析,结合技术工程应用情况,兰炭废水全流程零排放集成处理技术能够实现废水的综合处理,各单元的处理效果达到设计的处理目标,处理技术先进、高效回收有价资源、废水处理效果好,处理成本较常规处理技术更低,真正实现废水的零排放处理目标。

4 结论

通过技术开发、优化升级、技术集成、技术应用等途径,形成兰炭废水全流程零排放成套处理技术,

有效实现废水的高效率、低成本零排放处理目标。专项技术及成果主要包括以下方面。

(1) 强化预处理除油、高效脱酚蒸氨(IPE-PO)资源回收处理技术,实现废水中油类、浓氨水、粗酚等资源的高效分离回收,减少后续生化处理系统的压力,处理成本低,经济效益好。

(2) 强化生化处理脱碳脱氮处理技术,高效臭氧催化氧化及 MBR 深度处理技术,在较低的处理成本下,高效深度脱除废水中 COD、氨氮等污染物,提高废水处理效果,优化膜处理单元的进水水质。

(3) 强化脱盐预处理、多级别梯度脱盐及分盐集成处理技术,可实现废水 90% 以上的淡水回收利用,通过分盐处理有效实现废水中氯化钠、硫酸钠等有价资源转化与回收。

(4) 成套处理工艺包能够真正实现兰炭废水的零排放处理目标,工艺技术先进,处理能效高,处理效果好,不产生二次污染,处理成本低。

(5) 各处理技术目前均有示范工程运用,为落地性的高效实用技术。

(下转第 234 页)

年预计有 200 艘甲醇动力船运营,按照每艘船平均每年耗甲醇 6 万 t 计算,2025 年需甲醇 1 200 万 t,假设 50% 为电制甲醇,则需要 66 个 300 MW 的风场。

(3) 我国的能源禀赋是“富煤、贫油、少气、风光优渥”,CO₂ 排放量高是发展中国家经济增长过程中不可避免的,基于中国国情,将 CO₂ 捕获循环利用而非掩埋,是中国迈向碳中和的助力。中国不必过度追求绿色甲醇,低碳甲醇路线的一大贡献就是消纳陆上未来的大量碳捕集的碳源。

(4) 风电、制氢和甲醇合成是影响平准化甲醇成本的主要环节,假设未来风电环节降本 10%、制氢环节降本 30%、二氧化碳运输环节降本 20%、甲醇合成环节降本 20%,未来低碳甲醇成本为 0.8~1.0 万元/t,与目前生物柴油价格接近,考虑热值后,低碳甲醇的成本是生物柴油成本的 2 倍。考虑到生物柴油很难实现大规模稳定供应,低碳甲醇在中国具备差异化竞争能力。

参考文献

- [1] Irena. Innovation outlook; Renewable methanol [R]. 2021.
- [2] 生态环境部. 中国落实国家自主贡献目标进展报告 [R]. 2022.
- [3] Recalde Melodf, Chang-Chien L R. Synergistic control between hydrogen storage system and offshore wind farm for grid operation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 18-27.
- [4] Mathur J, Agarwal N, Swaroop R, et al. Economics of producing hydrogen as transportation fuel using offshore wind energy systems [J]. Energy Policy, 2008, 36(3): 1212-1222.
- [5] 田甜, 李怡雪, 黄磊, 等. 海上风电制氢技术经济性对比分析 [J]. 电力建设, 2021, 42(12): 137-144.
- [6] 张岑, 魏华, 庄妍, 等. 海上风电制氢经济评价模型及关键影响

(上接第 228 页)

参考文献

- [1] 韦风密, 盛宇星, 李海波, 等. 一种用于煤化工废水除油萃取设备: CN201920326477 [P]. 2019-03-15.
- [2] Meenakshi S, Viswanathan N. Identification of selective ion-exchange resin for fluoride sorption [J]. J Colloid Interface Sci, 2007, 308(2): 438-450.
- [3] 吴限, 韩洪军, 方芳. 高酚氨煤化工废水处理创新技术分析 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(4): 26-32.
- [4] 刘新雨, 赵月红, 王青杰, 等. 煤化工废水脱酚萃取剂计算机辅助设计 [J]. 计算机与应用化学, 2017, 34(5): 363-368.
- [5] 林晓, 刘晨明, 林林, 等. 一种利用热分解处理氨氮废水的方法及利用: CN201210331553.6 [P]. 2012-09-07.
- [6] 林琳, 李玉平, 曹宏斌, 等. 焦化废水厌氧氨氧化生物脱氮的研

参数 [J]. 天然气工业, 2023, 43(2): 146-154.

- [7] 张轩, 历一平. 绿色甲醇生产工艺技术经济分析 [J]. 现代化工, 2023, 43(3): 209-212.
- [8] 林代峰, 张臻, 罗永晋, 等. 二氧化碳加氢制甲醇催化剂研究进展 [J]. 现代化工, 2021, 41(6): 11-16.
- [9] 林海周, 罗志斌, 裴爱国, 等. 二氧化碳与氢合成甲醇技术和产业化进展 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 14-19.
- [10] 煤化工智库. 总投资约 6.1 亿, 中煤鄂尔多斯 10 万吨液态阳光项目绿色甲醇合成单元公示 [EB/OL]. [2023-03-24]. https://mp.weixin.qq.com/s/2N7hOK1Cdmy6BEf_fQLrNg.
- [11] D'amore-Domenech R, Leo T J, Pollet B G. Bulk power transmission at sea: Life cycle cost comparison of electricity and hydrogen as energy vectors [J]. Applied Energy, 2021, 288: 116625.
- [12] 许传博, 张文座, 李忻颖, 等. 离网型光伏制氢项目经济性分析及压力测试 [J]. 现代电力, 2023, 40(1): 1-7.
- [13] 虞和锡, 尹贻林. 工程经济分析与计算——微软 Excel 在工程经济中的应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2015.
- [14] 安信证券. 收益率! 收益率! 收益率! 绿色投资不可忽视的要素 [R]. 2022.
- [15] 德邦证券. 氢能产业系列报告(三): 深度解析制氢成本, 探寻氢能时代的投资机会 [R]. 2022.
- [16] 李彦斐, 江涵, Farhad Taghizadeh-Hesary, 等. 可再生能源制氢技术经济性评述及其在东盟地区应用评估 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 292-297.
- [17] 邓甜音, 何广利, 缪平. 不同应用场景的电解水制氢成本分析 [J]. 能源化工, 2020, 41(6): 1-5.
- [18] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 中国 21 世纪议程管理中心, 球碳捕集与封存研究院, 清华大学, 2023.
- [19] 国海证券. 二氧化碳加氢制甲醇有望迎来产业化 [R]. 2021.
- [20] 中国银河证券. 全球风电需求旺盛, 漂浮式海风未来可期 [R]. 2023.
- [21] 汪颖异, 金强, 潘放. 国际航行船舶替代燃料应用预测 [J]. 船舶, 2022(5): 21-28. ■

究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1201-1206.

- [7] 薛占强, 李玉平, 李海波, 等. 短程硝化/厌氧氨氧化/全程硝化工艺处理焦化废水 [J]. 中国给水排水, 2011, (1): 22-26.
- [8] 邢林林, 曹宏斌, 李玉平. 非均相催化臭氧氧化深度处理焦化废水的中试研究 [A]. 2010 中国环境科学学会学术年会, 2010.
- [9] 王靖宇, 付晓伟, 韦风密, 等. 基于 O₃-MBR 工艺的焦化废水深度处理 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45(9): 10-14.
- [10] 李海波, 王靖宇, 刘亚丽, 等. 一种用于工业废水近零排放的处理工艺: CN201820711573.9 [P]. 2018-05-14.
- [11] 赛世杰. 纳滤膜在高盐废水零排放领域的分盐性能研究 [J]. 工业水处理, 2017, 37(9): 75-78.
- [12] 廖尚志, 莫剑雄. 双极膜的发展和应 [J]. 水处理技术, 1995, (6): 311-318.
- [13] 夏敏, 操容, 叶春松, 等. 双极膜电渗析技术在工业高含盐废水中的应用 [J]. 化工进展, 2018, 37(7): 371-380. ■