

天然气净化厂高盐环胺废液处理工艺研究

肖芳¹ 廖晓伟¹ 范锐² 廖铁³ 李云龙¹ 曹亮¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610215;
3. 中国石油西南油气田公司天然气净化总厂万州分厂, 重庆 404002

摘要:天然气净化厂尾气氧化吸收工艺中会产生大量高盐环胺废液,主要为胺液净化装置中树脂再生产生的废液,主要为有机胺及硫酸盐,可生化性差。以氧化吸收工艺产生的高盐环胺废液为处理对象开展了全流程工艺的研究,形成了“预处理→反渗透脱盐→电渗析膜浓缩分离→组合氧化降解→蒸发结晶”的尾气废液组合处理工艺。废液经尾气废液组合处理工艺处理后,再通过生化处理,最终产水化学需氧量降至81.5 mg/L,氨氮浓度小于1 mg/L,Na₂SO₄浓度降至0.23 g/L,实现达标排放。研究结果可为后期工程化设计提供技术指导。

关键词:胺液净化;Na₂SO₄;废液;高盐环胺;达标排放

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.04.015

Study on treatment process of high-salinity cyclamine waste liquid in a natural gas purification plant

XIAO Fang¹, LIAO Xiaowei¹, FAN Rui², LIAO Tie³, LI Yunlong¹, CAO Liang¹

1. CPECC Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610215, China;
3. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company Natural Gas Purification Plant Wanzhou Branch, Chongqing, 404002, China

Abstract: In natural gas purification plants, the wastewater produced by resin regeneration in the amine purification unit (APU) of the tail gas oxidation process contains a large amount of organic amines and sulfates, and has poor biodegradability. This paper took the tail gas oxidation process wastewater as the subject of the study to carry out research on the integrated process, and formed a complete set of tail gas waste water treatment process of “pretreatment → reverse osmosis desalination → electrodialysis membrane concentration and separation → combined oxidative degradation → evaporative crystallization”. After the above treatment process, followed by the biochemical treatment, the COD of the produced water was reduced to 81.5 mg/L, the ammonia nitrogen concentration was less than 1 mg/L, and the sodium sulfate concentration was reduced to 0.23 g/L, meeting the requirements of the discharge standard. The research results can provide technical guidance for future engineering design.

Keywords: Amine purification; Na₂SO₄; Waste liquid; High-salinity cyclamine; Meeting the requirements of the discharge standard

收稿日期:2022-11-01

基金项目:中国石油工程建设有限公司科研项目“天然气净化厂高盐环胺废水达标外排工艺优化研究”(FKY2021-206)

作者简介:肖芳(1979-),女,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,硕士,主要从事给排水、污水处理等设计研究工作。E-mail: xiaofang_sw@cnpc.com.cn

0 前言

天然气净化厂尾气中 SO_2 是造成大气污染的主要污染物之一^[1],氧化吸收工艺^[2]采用高选择性的有机胺溶液脱除尾气中 SO_2 ,可以满足 SO_2 排放浓度小于 400 mg/m^3 的要求,通过优化操作参数还可以满足 SO_2 排放浓度小于 100 mg/m^3 甚至更严格的环保要求,同时还可以制酸^[3],且相比传统的壳牌克劳斯尾气处理(Shell Claus Off-gas Treating, SCOT)还原吸收工艺投资和操作运行费用更低,是天然气净化厂尾气处理工艺的重要方案之一。但氧化吸收工艺过程中会产生两种含盐废液,一种为文丘里塔产生的酸水,主要为稀硫酸;一种为胺液净化装置^[4](Amine Purification Unit, APU)树脂采用碱液再生时产生的含有机胺及硫酸盐类的废液。APU 主要通过离子交换的方式脱除胺液中的溶解性杂质及热稳定性盐,确保胺液纯度,提高吸收效率^[5],但在树脂再生过程会产生大量含有机胺及硫酸盐类的废液^[6]。

现有的高盐有机废水处理工艺包括物理分离、化学氧化和基于生物法的组合处理工艺^[7]。物理分离主要有混凝法^[8]、吸附法^[9-10]和膜分离法^[11-14]等,其中膜分离法可以实现盐的分离。化学氧化是通过直接或间接加入 O_3 、 Cl_2 、 HClO 等氧化剂^[15-16],或通过化学反应产生 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{Cl}$ 等中间体的方式^[17-19],将污染物氧化为无害的终端产物或易降解的中间产物,提高可生化性,但是单独的化学氧化处理工艺存在药剂投加大、能耗高、处理成本高等问题;生物法^[20-22]是利用微生物自身的新陈代谢将废水中的有机物降解为 CO_2 和 H_2O 等无害物质,但是高盐体系下,微生物降解能力会受到抑制^[23]。本文以尾气氧化吸收工艺产生的高盐环胺废液为处理对象,形成一套可实现达标排放、高效经济的高盐有机废液处理组合工艺,为工程化设计提供指导。

1 水质特点及影响分析

1.1 水质特点

目前川内在运天然气净化厂中,有5座天然气净化厂尾气处理装置采用了氧化法处理工艺,其中3座为新建厂、2座为已建厂。采用该工艺后,会产生两种含盐废液,一种为文丘里塔产生的酸水,主要为稀硫酸, pH 为 $1 \sim 2.5$,通过加入 NaOH 中和后排出,主要为 Na_2SO_4 废液,其盐含量约为 4.32 kg/m^3 ;另一种为 APU 树脂采用碱液再生时产生的含有机胺及硫酸盐类的废液, pH 为 $11 \sim 13$,其中硫酸盐及亚硫酸盐混合盐含量约 $15\,000 \text{ mg/L}$,水中盐含量估算为 15 kg/m^3 ;而再生过程会有部分有机胺残留,使得废液化学需氧量(COD)在 $1\,000 \sim 4\,000 \text{ mg/L}$ 之间,该类有机环胺性质稳定,不易

被氧化,沸点高,有生物抑制性,在高盐环境下处理难度很大。

1.2 对新建厂及已建厂的影响分析

新建厂内的污水分为生产污水和生产废水,其中生产污水为含有机物类的水,通常采用生化处理的方式;生产废水主要为含盐水,基本不含有机物,采用双膜法处理后全厂回用,膜浓缩液进入蒸发结晶装置或外运。对于新建厂,尾气处理装置排出的高盐环胺废液只能掺混进入厂内生产废水系统,但由于有机物过高,造成了反渗透膜的污堵,效率下降,蒸发结晶装置也因过高的有机物含量影响到盐的结晶,造成污堵,无法正常排盐。

已建厂污水处理只有常规生化处理工艺,通常是处理后外排,而后期增建的尾气处理装置排出的高盐环胺废液无法进入原有的生化处理系统,更无法实现达标外排。由于环保部门对排放水体的盐含量也有进一步要求,尤其是排入长江流域,盐含量要达到地表三类水体的要求($\text{SO}_4^{2-} < 250 \text{ mg/L}$),否则不能排放。因此,亟待研究一套合适的废液处理工艺,对 APU 废液中有机物及热稳定性盐进行有效处理。

2 实验内容

针对高盐环胺废液高盐及高有机物的特点,通过选择合理的高级氧化工艺对有机物进行降解,并采用膜分离的方式实现有机物与盐的分离,使出水可以实现达标外排。由于尾气处理工艺产生酸水中总体的有机物不高,硫酸根含量相对较低,本实验方案将酸水中和后先通过反渗透预提浓,再与 APU 废液进行深度提浓减量。

为有效降解高盐环境的有机物,进行了催化氧化实验;为进一步分离有机物与盐,进行了膜分离及浓缩实验;为使出水 COD 达到外排标准,进行了生化实验;为实现废液的固液分离,进行了蒸发实验;最后进行了整体工艺流程实验,验证工艺路线。

2.1 实验水质及出水水质要求

本实验水样来自某天然气净化厂尾气处理工艺产生的酸水及 APU 废液,具体水质情况见表1,出水水质要求见表2。

表1 酸水及 APU 废液水质情况表

Tab.1 Water quality of sour water & APU waste liquid

项目	APU 废液	酸水
pH	8.74	<2.00
电导率 / ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	35.01	14.29
COD / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	525 ~ 1 500	88
氨氮 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.60	1.06
总氮 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	150.6	1.8
硫酸根 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	22 200.0	2 937.6

表 2 出水水质要求表
Tab. 2 Water quality requirement

项目	GB 8978—1996 《污水综合排 放标准》一级	GB/T 31962—2015 《污水排入城镇下 水道水质标准》B 级
总溶解固体 / (mg·L ⁻¹)	—	2 000
COD / (mg·L ⁻¹)	100	500
氨氮 / (mg·L ⁻¹)	15	—
硫酸盐 / (mg·L ⁻¹)	250	600

注:环保部门要求外排水硫酸根浓度小于 250 mg/L,在有市政污水厂依托的情况下出水水质满足 GB/T 31962—2015《污水排入城镇下水道水质标准》要求。

2.2 材料和方法
2.2.1 反渗透提浓实验装置

反渗透设备主要由原水箱、高压泵、保安过滤器、反渗透膜元件等组成。采用 2.5 in(8.33 cm)膜分离元件,料液被膜分为透过液、浓缩液,通过对透过液、浓缩液取样分析离子浓度,考察膜分离元件的分离效果,实验装置见图 1。

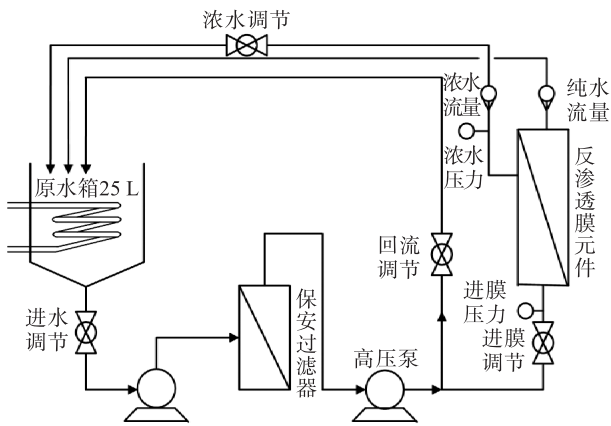


图 1 反渗透提浓实验装置图
Fig. 1 Reverse osmosis enrichment experimental equipment

2.2.2 电催化氧化实验装置

电催化氧化实验采用有效体积为 1.5 L 的电解槽,阴极采用不锈钢极板,阳极采用钛涂贵金属电极板,极板间距 10 cm,底部设有曝气板,通过气泵和气体流量计控制曝气量在合适的范围内,实验装置见图 2。

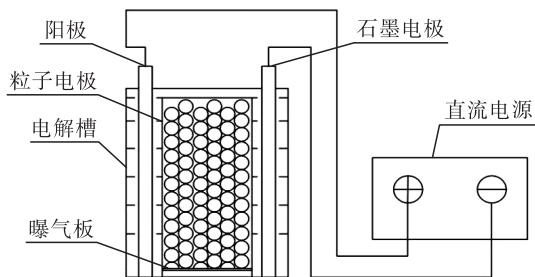


图 2 电催化氧化实验装置图
Fig. 2 Electrocatalytic oxidation experimental equipment

2.2.3 电渗析浓缩实验装置

电渗析浓缩实验装置由膜堆、直流电源、浓室、淡室、阴极室和阳极室组成。膜堆由 10 对阴阳离子交换膜交替排列组成。膜堆两侧通过电极与直流电源连接。每个隔室配有离心泵,用于完成溶液在膜堆与储槽间的循环,实验装置图 3。

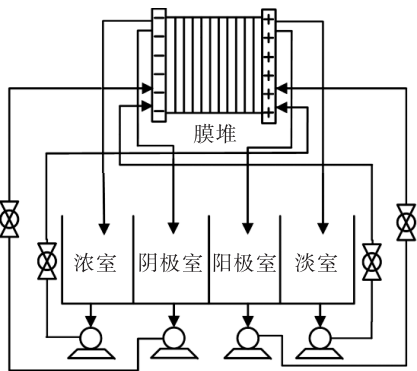


图 3 电渗析浓缩实验装置图
Fig. 3 Electrodialysis experimental apparatus

2.2.4 生化氧化实验装置

生化氧化实验采用缺氧/好氧法,生化氧化实验装置包括进水箱、输送泵、搅拌桨、缺氧反应池、好氧反应池、气泵及沉淀池。缺氧反应池尺寸为 10 cm×15 cm×25 cm,好氧反应池尺寸为 20 cm×15 cm×25 cm。好氧反应池底部设置微孔曝气管,运行期间连续曝气,确保反应池中溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)保持在 6~7 mg/L,缺氧/好氧实验装置见图 4。

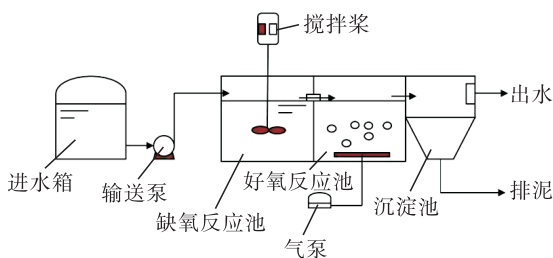


图 4 生化氧化实验装置图
Fig. 4 Schematic diagram of biochemical oxidation experimental apparatus

2.3 反渗透预提浓实验

2.3.1 反渗透对盐离子浓缩分离效果

反渗透预提浓实验过程中,主要处理中和后的酸水,控制一定反渗透膜通量,产水流量控制在 50 L/h,考察不同回收率下 Na₂SO₄ 浓缩分离的效果。不同回收率下 Na₂SO₄ 浓度变化见图 5,相同回收率下 Na₂SO₄ 浓度变化见图 6。由图 5~6 可知,在相同产水流量条件下,随着回收率增加,浓水侧和淡水侧 Na₂SO₄ 浓度不断增加。当回收率达到 85% 时,浓水侧 Na₂SO₄ 浓度可以达到 84.7 g/L,淡水侧 Na₂SO₄ 浓度可降至 0.24 g/L,浓水浓缩倍数达到 10.3 倍,Na₂SO₄ 截留率达 97%。

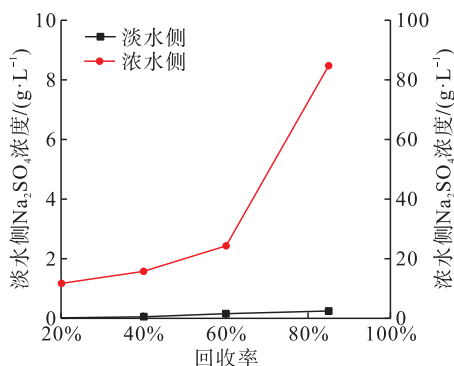
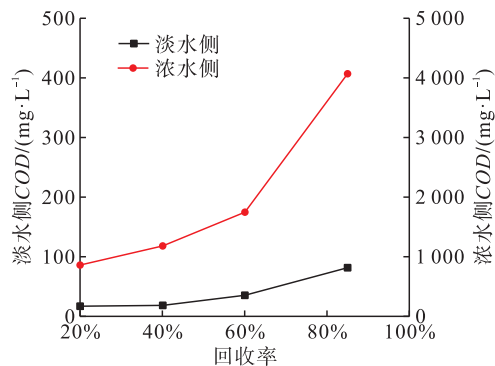
图5 不同回收率下 Na_2SO_4 浓度变化图Fig. 5 Concentration changes of Na_2SO_4 at different recovery rates

图7 不同回收率下 COD 变化图

Fig. 7 Changes of COD at different recovery rates of reverse osmosis

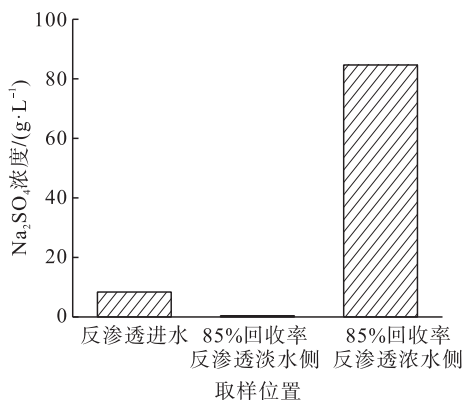
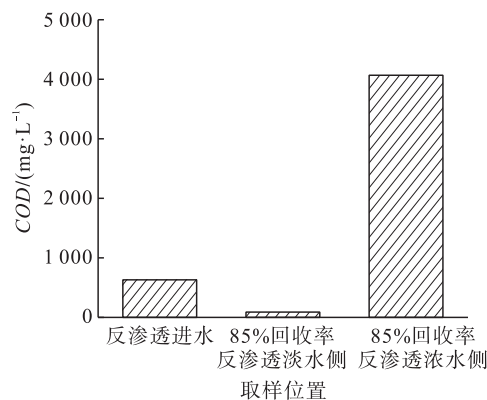
图6 85% 回收率下浓水侧和淡水侧 Na_2SO_4 浓度变化图Fig. 6 Distribution of Na_2SO_4 on concentrated water side and fresh water side at 85% recovery rates

图8 85% 回收率下浓水侧和淡水侧 COD 分布情况图

Fig. 8 COD distribution on concentrated water side and fresh water side at 85% recovery rate

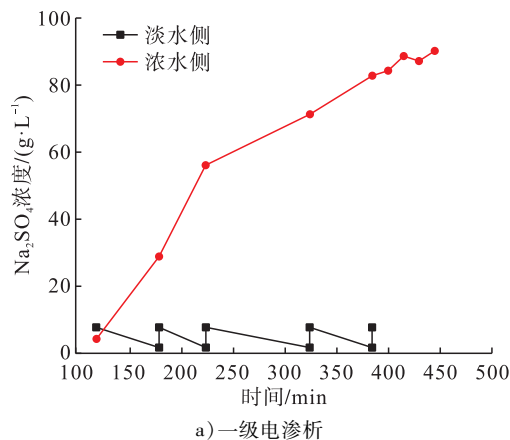
2.3.2 反渗透对有机物分离效果

反渗透预提浓实验过程中,控制一定反渗透膜通量,产水流量控制在 50 L/h,考察不同回收率下有机物分离效果。不同回收率下 COD 变化见图 7,相同回收率下 COD 分布情况见图 8。由图 7~8 可知,在相同产水流量条件下,随着回收率增加,浓水侧和淡水侧 COD 不断增加,当回收率达到 85% 时,浓水侧 COD 可以达到 4 066 mg/L,淡水侧 COD 可降到 81.2 mg/L,浓水侧 COD 浓缩倍数达到 6.5 倍,COD 截留率达 87%。

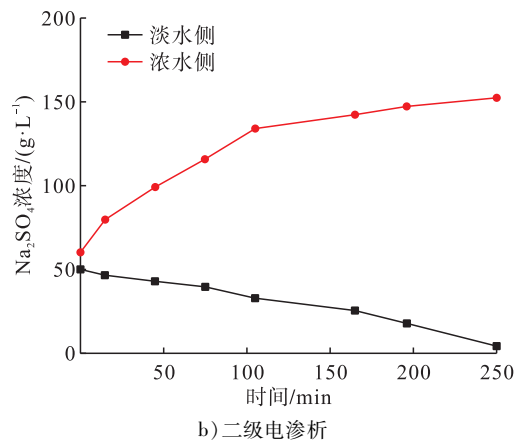
2.4 电渗析膜浓缩分离实验

2.4.1 电渗析对盐离子浓缩分离效果

电渗析膜浓缩分离实验以 APU 废液为电渗析进水,保持阴、阳极室循环流量均为 100 L/h,浓、淡室流量均为 250 L/h,采用恒压、批次进料模式,控制淡水侧产水电导率低于 3 mS/cm, Na_2SO_4 浓度低于 1 200 mg/L,考察多级电渗析对废水脱盐浓缩效果。一级/二级电渗析浓水侧和淡水侧 Na_2SO_4 浓度变化见图 9。



a) Primary electro dialysis



b) Secondary electro dialysis

图9 一级/二级电渗析浓水侧和淡水侧 Na_2SO_4 浓度变化图Fig. 9 Change of Na_2SO_4 concentration in primary/secondary electro dialysis chamber

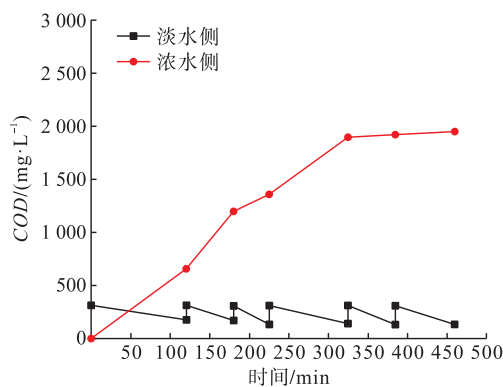
由图 9-a)可知,一级电渗析采用批次进料模式,淡水侧 Na_2SO_4 浓度随时间呈现规律性下降,浓水侧 Na_2SO_4 浓度逐步上升;在恒压模式下,每个批次淡水侧 Na_2SO_4 浓度可降至 1 200 mg/L 以下,浓水侧 Na_2SO_4 浓度可上升到 90 g/L 以上。

为降低浓水体积,减少末端蒸发浓缩能源消耗,本实验进一步开展了二级电渗析。由图 9-b)可知,二级电渗析淡水侧 Na_2SO_4 浓度随时间增加不断下降,浓水侧 Na_2SO_4 浓度逐步上升,在恒流模式下,浓水侧 Na_2SO_4

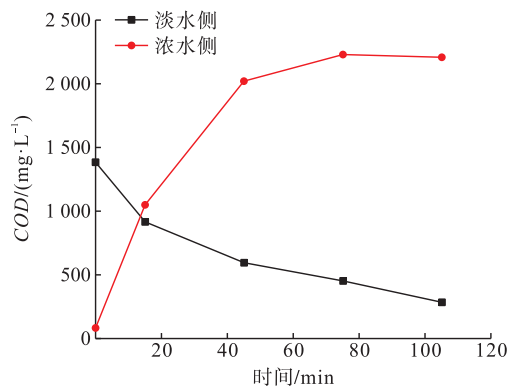
浓度可达 150 g/L 以上。

2.4.2 电渗析对有机物分离效果

本实验以 APU 废液为电渗析进水,保持阴、阳极室循环流量均为 100 L/h,浓、淡室流量均为 250 L/h,采用恒压、批次进料模式,控制淡水侧产水电导率低于 3 mS/cm, Na_2SO_4 浓度低于 1 200 mg/L,考察多级电渗析对废水有机物分离效果。一级/二级电渗析浓水侧和淡水侧 COD 变化见图 10。



a) 一级电渗析
a) Primary electrodialysis



b) 二级电渗析
b) Secondary electrodialysis

图 10 一级/二级电渗析浓水侧和淡水侧 COD 变化图

Fig. 10 Change of COD in primary/secondary electrodialysis concentration chamber

由图 10-a)可知,淡水侧 COD 随着一级电渗析运行时间增加略有下降, COD 从 312 mg/L 降至 176.9 mg/L,浓水侧 COD 持续上升,当 Na_2SO_4 浓度达到 90 g/L 时, COD 稳定在 1 925 mg/L,计算可得 COD 透过率达 39.8%。

由图 10-b)可知,淡水侧 COD 随着二级电渗析运行显著下降, COD 从 1 384 mg/L 降至 500 mg/L 以下,浓水侧 COD 持续上升,当 Na_2SO_4 浓度达到 152 g/L 时, COD 稳定在 2 204 mg/L, COD 透过率约 51%。

2.5 电催化氧化降解有机物实验

电催化氧化降解有机物实验基于前期工艺优化研究成果,确定了最佳工艺条件:电流为 1.75 A、pH 为 3,考察优化条件下电催化氧化对 APU 废液中 COD 的降解效果。不同反应时间对电催化氧化影响见图 11。

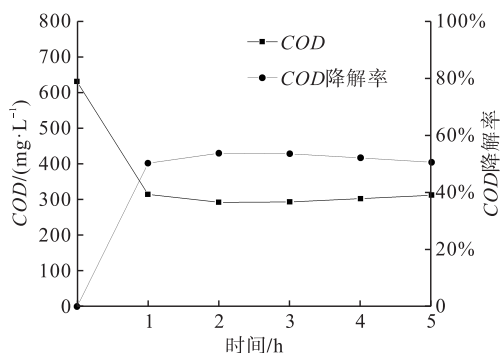


图 11 不同反应时间对电催化氧化影响图

Fig. 11 Influence of different reaction times on electrocatalytic oxidation

由图 11 可知,随着反应时间的增加, COD 降解率逐渐提高,当反应时间大于 2 h 时, COD 降解率逐渐趋于稳定, COD 降解率最高达到 53%。

此外,由于单一的电催化氧化工艺运行成本较高,通过采用“电催化氧化+生化”组合工艺,提高有机物降解效果,同时提高整体经济性,本实验考察了电催化氧化对废水可生化性的提高效果。电催化氧化前后可生化性对比见表 3。由表 3 可知,采用电催化氧化工艺处理后,生化需氧量 BOD 与 COD 的比值 ($BOD : COD$) 显著提高,大幅提升了 APU 废液的可生化性。

表 3 电催化氧化前后可生化性对比表

Tab. 3 Comparison of biodegradability before and after electrocatalytic oxidation

介质	COD / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD : COD
APU 废液	525	27.6	0.05
电催化氧化产水	346	52.8	0.15

2.6 全流程工艺论证实验

基于前面研究成果,采用“预处理→反渗透脱盐→电渗析膜浓缩分离→组合氧化降解→蒸发结晶”对 APU 废液进行全流程实验论证。

2.6.1 COD 降解效果

全流程工艺论证实验考察全流程处理工艺中有机

物降解效果,见图 12。

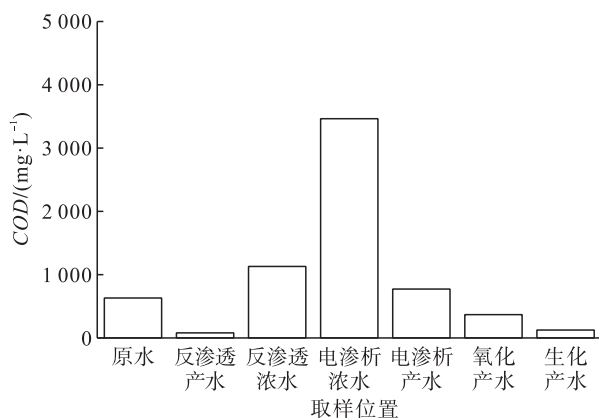


图 12 全流程处理工艺 COD 变化图

Fig. 12 COD change of the whole process

由图 12 可知,有机物主要富集在电渗析浓水,最终外排的反渗透产水 COD 为 81.5 mg/L, COD 去除率达到 87%,经过常规生化,可以实现最终外排水水质中的 COD 符合一级排放标准。

2.6.2 氨氮去除效果对比

本实验考察全流程处理工艺中氨氮去除效果,见图 13。

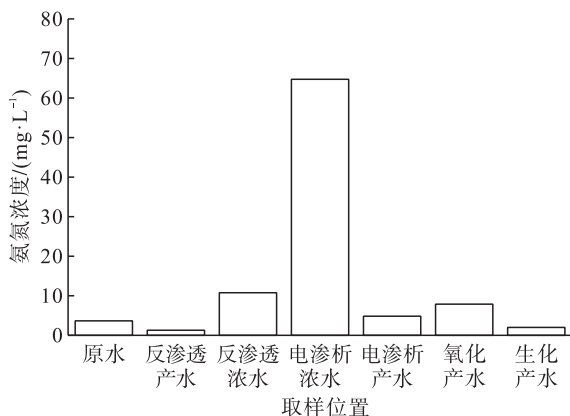


图 13 全流程处理工艺氨氮浓度变化图

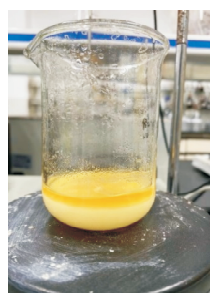
Fig. 13 Ammonia nitrogen concentration changes in the whole process



a) 蒸发浓缩 4 倍
a) 4 times concentration
of evaporation



b) 蒸发浓缩 10 倍
b) 10 times concentration
of evaporation



c) 电渗析浓缩 4 倍
c) 4 times concentration
of electrodialysis



d) 电渗析浓缩 10 倍
d) 10 times concentration
of electrodialysis

图 15 APU 废液中 COD 浓度对结晶的影响图

Fig. 15 Effect of COD in APU waste liquid on crystallization

由图 13 可知,本实验中有有机物主要属于有机胺类,其在化学氧化过程中会释放出一部分氨氮,同时部分氨氮会在膜浓缩浓水侧浓缩,经过生化系统后,氨氮会被微生物通过硝化反硝化的方式脱氮去除,最终的生化产水氨氮浓度均能降到 1 mg/L 以下。

2.6.3 盐离子浓缩效果对比

本实验考察全流程处理工艺中盐离子的浓缩情况,见图 14。

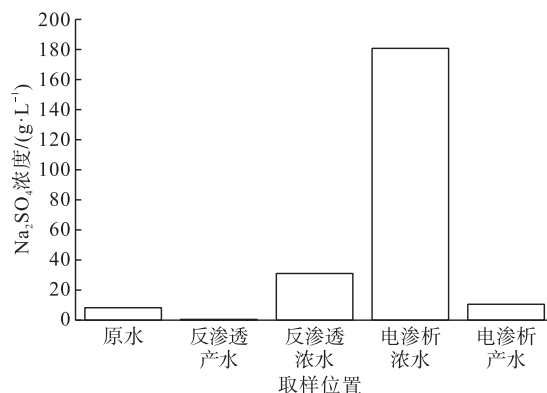


图 14 全流程处理工艺盐离子浓缩情况图

Fig. 14 Salt ion concentration diagram of the whole process

由图 14 可知,Na₂SO₄ 主要浓缩在电渗析浓水,通过“反渗透+电渗析”膜耦合处理可将电渗析浓水 Na₂SO₄ 浓度提高至 181 g/L,最终的反渗透产水中 Na₂SO₄ 浓度为 0.23 g/L。

2.6.4 有机物对盐结晶效果的影响

分别将 APU 废液直接蒸发和电渗析浓缩相同倍数,考察有机物对蒸发结晶的影响,图 15-a)、b) 分别为 APU 废液直接蒸发浓缩 4 倍和 10 倍时的效果,当浓缩 10 倍时 COD 为 21 330 mg/L,大量有机物附着在结晶盐表面,影响结晶盐的正常析出。图 15-c)、d) 分别为 APU 废液经过电渗析浓缩 4 倍和 10 倍的效果,浓缩 10 倍后, COD 为 13 030 mg/L,结晶盐与母液分层明显,均未出现显著粘黏问题。可见,这种 APU 废液中有机会包裹结晶盐晶核,抑制晶体长大,从而无法出盐,因此,若要进一步蒸发,需要将有机物进行分离,避免影响结晶。

3 结果及讨论

1) 本文实验思路是基于高盐高有机物如环胺类废液实现达标外排的情况,同时结合已建天然气净化厂采用双膜法提浓后蒸发结晶的方式处理此类污水出现的问题,如废液中环胺类物质产生的有机污染物易造成膜表面污染,同时高盐水中高有机物使得结晶困难,在蒸发结晶装置的部分管路内,形成堵塞及污垢;通过实验得出的组合工艺,可将大部分的有机物与盐类物质进行有效分离,经过电渗析浓缩后的高盐水再采用蒸发结晶的方式,设备及管道不易发生污垢。

2) 进水 COD 波动在 30% 内电渗析工艺均可正常运行,同时可以通过在电渗析设计过程中预留足够的有效膜面积来实现对不同进水盐离子浓度的适应性,通过电渗析分离了大部分有机物,有利于蒸发结晶过程顺利出盐。

3) 针对高盐环胺废液进行了处理工艺的全流程论证,形成了“预处理→反渗透脱盐→电渗析膜浓缩分离→组合氧化降解→蒸发结晶”成套组合处理工艺。通过组合处理工艺及后续生化处理,最终外排水 COD 降至 81.5 mg/L,氨氮浓度小于 1 mg/L, Na_2SO_4 浓度为 230 mg/L,实现 APU 废液达标排放,为后期工程化设计提供技术指导。

4) 本文的实验流程已在某天然气净化厂设计实施,工程采用了预处理→反渗透脱盐→电渗析膜浓缩分离→蒸发结晶的方式处理此类污水,目前所有设备已完成安装调试,应用效果有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 周新青. 空气中二氧化硫的污染危害及其防治对策[J]. 河南农业, 2006(4): 16.
ZHOU Xinqing. Pollution hazards and countermeasures of sulfur dioxide in air [J]. Agriculture of Henan, 2006 (4): 16.
- [2] 李明松, 廖薇, 马悦, 等. Cansolv 尾气处理工艺在天然气净化厂的应用及运行优化[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(6): 26-31.
LI Mingsong, LIAO Wei, MA Yue, et al. Application and operational optimization of Cansolv tail gas treatment process in a natural gas purification plant [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50 (6): 26-31.
- [3] 陈志刚. 非连续性冶炼烟气制酸系统的设计及运行实践[J]. 硫酸工业, 2012(1): 13-16.
CHEN Zhigang. Design and operation of sulphuric acid system based on non-continuous off-gas [J]. Sulphuric Acid Industry, 2012 (1): 13-16.
- [4] 林丽梅, 岑永虎, 任标, 等. 浅析重庆天然气净化总厂胺液净化装置[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(4): 281-284.
LIN Limei, CEN Yonghu, REN Biao, et al. Analysis of the amine treating unit of Chongqing General Natural Gas Purification Plant [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2005, 34 (4): 281-284.
- [5] 赵志君, 闫鸿寿, 马驰, 等. 硫磺尾气 CONSOLV 工艺下设备腐蚀及防护[J]. 石油和化工设备, 2020, 23(10): 96-98.
ZHAO Zhijun, YAN Hongshou, MA Chi, et al. Corrosion and protection of equipment in process of sulfur tail gas Consolv [J]. Petro & Chemical Equipment, 2020, 23 (10): 96-98.
- [6] 胡军, 刘静, 章明智. 胺液净化单元的控制及局部优化[J]. 有色冶金设计与研究, 2019, 40(5): 34-36.
HU Jun, LIU Jing, ZHANG Mingzhi. Control of amine purification unit and local optimization [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2019, 40 (5): 34-36.
- [7] 曹美玲, 李海, 刘佛财, 等. 高盐有机废水的处理与研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(3): 92-98.
CAO Meiling, LI Hai, LIU Focai, et al. Recent development in the treatment process for high salt organic wastewater [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10 (3): 92-98.
- [8] 时钰, 杨晓芳, 杨招艺, 等. 可用于去除高盐废水中有机污染物的混凝-Fenton 氧化联合工艺[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 4958-4964.
SHI Yu, YANG Xiaofang, YANG Zhaoyi, et al. Organic pollutant removal from high-salinity wastewater by coagulation-Fenton integrated process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (9): 4958-4964.
- [9] 李阳阳, 于鲁冀, 柏义生, 等. 以树脂吸附为主的集成工艺处理高盐有机废水[J]. 工业水处理, 2016, 36(9): 35-38.
LI Yangyang, YU Luji, BAI Yisheng, et al. Integrated process for treating organic wastewater with high salinity mainly by resin adsorption [J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36 (9): 35-38.
- [10] 易斌. 活性炭吸附-Fenton 氧化处理高盐有机废水的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
YI Bin. Treatment of high-salt organic wastewater with activated carbon adsorption-Fenton oxidation process [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [11] 贾正万, 占国仁, 陈进旺, 等. 利用电渗析法脱除胺液中热稳定盐的应用[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(6): 22-26.
JIA Zhengwan, ZHAN Guoren, CHEN Jinwang, et al. Application of electrodialysis on removing heat stable salts in

- amine solution [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2018, 47 (6): 22-26.
- [12] 宋莎莎. 膜蒸馏有机工业废水处理及膜污染研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- SONG Shasha. Membrane distillation-based industrial organic wastewater treatment and membrane fouling study [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [13] 谢林. 高盐有机废水的膜蒸馏集成技术开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- XIE Lin. Development of integrated process based on membrane distillation for wastewater with high salinity and high organic compounds concentration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] 朱学武, 党敏, 甘振东, 等. 超滤—纳滤双膜工艺深度处理南四湖水中试研究[J]. 给水排水, 2018, 54(3): 28-32.
- ZHU Xuewu, DANG Min, GAN Zhendong, et al. Pilot study on advanced treatment of Nansi Lake water by UF-NF hybrid membrane process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54 (3): 28-32.
- [15] 王少雄, 俞彬, 张彦海, 等. 臭氧及双氧水处理高盐有机废水的工程应用[J]. 工业用水与废水, 2018, 49(5): 74-76.
- WANG Shaoxiong, YU Bin, ZHANG Yanhai, et al. Engineering application of ozone and hydrogen peroxide treating high salinity organic wastewater [J]. Industrial Water & Wastewater, 2018, 49 (5): 74-76.
- [16] 吴开元, 陈霞辉, 顾秋月, 等. 深度氧化技术系统在高难废水处理中的应用研究[J]. 水处理技术, 2013, 39 (11): 114-116.
- WU Kaiyuan, CHEN Xiahui, GU Qiuyue, et al. Application research of HPOD (Deep Purification Technology) system in caprolactam wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39 (11): 114-116.
- [17] 王孙崧, 陈英文, 魏基业, 等. Fenton 氧化法预处理高浓度有机胺废水的研究[J]. 工业水处理, 2011, 31(8): 25-27.
- WANG Sunyin, CHEN Yingwen, WEI Jiye, et al. Study on the pretreatment of highly concentrated organic amines wastewater by Fenton oxidation reaction [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31 (8): 25-27.
- [18] 彭思伟. Fenton 氧化技术在高盐有机废水处理过程中的应用及优化控制研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- PENG Siwei. Application and process optimization of Fenton oxidation for treatment of high saline wastewater with high organic content [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [19] 焦旭阳, 张新妙, 栾金义. 电催化氧化技术处理含盐有机废水研究进展[J]. 化工环保, 2019, 39(1): 6-10.
- JIAO Xuyang, ZHANG Xinmiao, LUAN Jinyi. Progresses in treatment of salt-containing organic wastewater by electro-catalytic oxidation technology [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2019, 39 (1): 6-10.
- [20] 王兆丰. 微生物强化处理含盐有机废水[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
- WANG Zhaofeng. Treatment of high salt wastewater by microbial augmentation method [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2014.
- [21] 谭淞文, 李维国, 公天齐, 等. 新型活性污泥的培养及其处理高盐有机废水[J]. 环境工程学报, 2012, 6 (11): 4059-4064.
- TAN Songwen, LI Weiguo, GONG Tianqi, et al. Cultivation of novel activated sludge and saline wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6 (11): 4059-4064.
- [22] 徐爱琴. 生物接触氧化工艺处理高盐有机废水的可行性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- XU Aiqin. Feasibility study of high salinity wastewater treatment by biological contact oxidation process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [23] 刘亚楼. 耐盐菌 *Staphylococcus* sp. WS-1 及其在高盐废水生物处理中的应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- LIU Yalou. Salt-tolerant bacteria *Staphylococcus* sp. WS-1 and its application in biological treatment of high-salt wastewater [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.