煤化工高盐废水脱盐处理技术应用与效果分析

张 亮
国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏 银川 750000

摘 要：针对煤化工高盐废水高盐分、高有机物、水质波动大且易结垢的水质特征，本文系统探究膜法、热法及耦合分盐脱盐核心技术体系，结合工程实践剖析各类工艺的运行参数、适配场景与运维要点。从水质处理、资源化利用及经济环保维度综合分析应用效果，总结工艺结垢、膜损耗、盐纯度不足等现存问题，提出三级耦合工艺、智能调控等优化策略，为煤化工废水零排放与盐资源化利用提供技术参考。

关键词：煤化工高盐废水；脱盐处理技术；应用；效果分析

引言：煤化工行业生产过程会产生大量高盐废水，其含盐量高、组分复杂、处理难度大，直接排放易造成水土污染、资源浪费，制约行业绿色低碳发展。当前脱盐技术品类多样，不同工艺适配性、处理效果及运维成本差异显著。为精准适配煤化工废水处理需求，本文立足废水水质特性，梳理主流脱盐技术体系与工程应用方案，分析各类技术应用成效与短板，针对性提出优化改进方案，助力行业废水无害化、资源化高效处理。

1 煤化工高盐废水水质特征与脱盐技术体系

1.1 煤化工高盐废水来源与水质特性

（1）生产工艺端高盐废水主要产生环节：煤化工高盐废水主要产生于煤气化废水、甲醇制烯烃废水、煤焦化废水及脱盐水站再生排水等环节。其中，气化废水占比最大，其水质受煤种、气化工艺及操作条件影响显著。（2）废水盐分、有机物、浊度等核心水质指标特征：该类废水含盐量高（TDS通常为5000～50000mg/L），以Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}等离子为主；同时含有一定量难降解有机物（COD一般为100～1000mg/L）和悬浮物（SS为50～500mg/L）。废水硬度、碱度及硅含量较高，易导致设备结垢。（3）水质波动对脱盐处理工艺的影响机制：进水TDS、pH、温度及有机物浓度的波动会显著影响膜通量、截留率及结晶盐纯度，可能引发膜污染、结垢及蒸发效率下降等问题，增加系统运行不稳定风险。

1.2 高盐废水脱盐处理核心技术类型

（1）膜法脱盐技术：采用超滤、纳滤、反渗透等多级膜集成工艺，实现盐分与水的分离和浓缩。超滤作预处理，纳滤用于一二价离子分离，反渗透实现高效脱盐，产水回用，浓水进一步处理。（2）热法脱盐技术：包括MVR蒸发、多效蒸发及冷冻结晶等技术，适用于高浓度含盐废水处理。MVR能效较高，多效蒸发适合大规模处理，冷冻结晶则利用溶解度温差实现盐分分离。（3）分质分盐脱盐技术：通过盐硝联产和杂盐分离技术，将废水中的NaCl、Na_2SO_4等盐类分别结晶回收，实现盐资源化利用，减少混盐危废产生量[1]。

1.3 脱盐技术工艺适配原则

（1）基于水质特征的工艺选型标准：根据TDS浓度、有机物含量、硬度及硅含量等指标，合理选择膜法、热法或耦合工艺。TDS低于30000mg/L宜优先考虑膜法，高于此值可选用热法或膜-热耦合工艺。（2）废水资源化与零排放适配要求：结合回用水质标准和副产品盐质量要求，确定分盐工艺路线。对于零排放目标，需采用“膜浓缩+蒸发结晶”组合工艺，确保液体零外排并产出合格工业盐。（3）工程运维成本与处理效率平衡原则：在满足处理效果的前提下，综合考虑能耗、药剂消耗及膜更换等运行费用，兼顾投资回收期。对于水质波动大的工况，需配置缓冲调节及清洗恢复措施，保障系统长周期稳定运行。

2 煤化工高盐废水典型脱盐处理技术工程应用实践

2.1 膜集成脱盐技术工程应用

（1）预处理+双膜法脱盐整体工艺流程设计：典型流程为“调节均质→高密度澄清→V型滤池→自清洗过滤器→超滤（UF）→反渗透（RO）”。原水先进调节池均衡水质水量，再经石灰-纯碱软化及混凝澄清去除硬度、硅和大部分悬浮物，出水经V型滤池和自清洗过滤器截留残余颗粒物，超滤作为反渗透的安全屏障去除胶体和微生物，最终反渗透进行脱盐浓缩[2]。（2）核心设备选型与工艺运行参数设置：超滤选用外压式PVDF中空纤维膜，设计通量50～70L/(m²·h)，过滤周期30～60min，反洗流量为运行流量的1.2倍；反渗透选用抗污染芳香聚酰胺复合膜，设计通量16～20L/(m²·h)，系统回收率65%～75%，操作压力1.2～3.5MPa。膜组件采用一级两段式排列，段间设置增压泵均衡各段产水量。纳滤分

盐系统选用选择性Na_2SO_4截留率 ≥ 98%的纳滤膜，操作压力0.8 ~ 1.8MPa。（3）工程实操中的运维要点与防污堵措施：运行中实时监测进出水压差、产水流量和脱盐率等参数，当段间压差上升超15%时启动在线化学清洗。采用碱洗（pH = 11 ~ 12，含EDTA和表面活性剂）与酸洗（pH = 2 ~ 3，柠檬酸）交替清洗策略，间隔1 ~ 3个月。预处理段控制进水SDI ≤ 3、浊度 ≤ 1NTU、余氯 ≤ 0.1mg/L，定期对膜元件进行探针检测确认完整性。冬季低温运行时投加防冻剂并调整操作压力，保障产水量稳定。

2.2 热法结晶脱盐技术工程应用

（1）MVR蒸发结晶脱盐工艺应用流程：浓盐水经板式换热器预热至70 ~ 85℃后进入MVR蒸发器主体，在加热室内管程循环蒸发，二次蒸汽经洗气塔净化后进入离心式压缩机，温升提高8 ~ 12℃后返回加热室壳程作为热源。溶液浓缩至过饱和后溢流至结晶分离器，晶浆经卧式螺旋离心机脱水，得到含水率 ≤ 5%的结晶盐，离心母液回流至蒸发系统。（2）冷冻结晶+蒸发耦合分盐工艺实操方案：针对高硫酸钠废水，先采用预冷器降温至10 ~ 15℃，再进入冷冻结晶器冷却至-2 ~ 5℃，停留时间2 ~ 4h析出十水硫酸钠（芒硝），经增稠器和离心机分离后，芒硝送入熔融罐加热溶解后蒸发结晶得无水Na_2SO_4。脱硝母液（富NaCl）进入MVR系统，在蒸发温度90 ~ 105℃条件下结晶析出NaCl，实现盐硝分质回收[3]。（3）母液回用与杂盐固化处理配套工艺：结晶系统母液设置分流循环比，一般30% ~ 50%回流至结晶器维持晶种浓度，剩余部分定期外排至杂盐处理单元。杂盐采用卧式薄膜蒸发器进一步浓缩至固含量 ≥ 60%，再送入桨叶干燥机在120 ~ 150℃下干燥至含水率 < 10%，固化杂盐按危险废物规范装袋暂存，委托有资质单位处置。蒸发冷凝水全部回用于循环冷却水补充水，实现液体零外排。

2.3 组合式脱盐工艺工程应用

（1）膜浓缩+热法结晶耦合工艺设计原理：利用膜法低能耗浓缩优势将TDS10000 ~ 30000mg/L的原水预浓缩至60000 ~ 100000mg/L，大幅缩减热法单元处理规模（减少60% ~ 70%蒸发水量）。膜系统产水直接回用，浓水进入热法结晶系统完成最终固液分离。两单元间设置大容量缓冲调节罐（停留时间4 ~ 8h）平衡产水波动，保障热法进料均匀连续。（2）分质分盐资源化回收应用模式：根据原水离子谱图，采用“纳滤分盐+反渗透浓缩+热法结晶”三级串联模式。纳滤将一价离子（Na^+、Cl^-）与二价离子（SO_4^{2-}）分离，两股产水分别进入独立的RO浓缩系统和MVR结晶系统，分别产出纯度 ≥ 97.5%的工业湿盐（NaCl）和无水硫酸钠（Na_2SO_4）产品，产水综合回用率可达92% ~ 95%。（3）复杂水质工况下的工艺调整方案：进水COD > 500mg/L时，在预处理段增设臭氧催化氧化装置（投加量20 ~ 50mg/L）降低有机物对膜的污染；进水TDS波动超过±30%时，通过调节膜系统段间增压泵频率和进水pH（控制在6.5 ~ 7.5）自适应稳定产水水质；高温季节（ > 35℃）启动冷却塔降低膜进水温度至25℃以下，防止膜通量衰减；低温季节（ < 10℃）对热法系统加大蒸汽补热量，确保结晶温度稳定[4]。

2.4 不同脱盐技术应用工况对比

（1）不同工艺的适用水质与生产场景：膜法适用于TDS < 30000mg/L、COD < 200mg/L、硬度较低的中低浓度废水，多用于产水回用型工程；热法适用于TDS > 50000mg/L、高COD及高硬度废水，主要用于零排放末端；组合工艺适用于TDS20000 ~ 50000mg/L、盐类资源化价值高且水质波动大的大型煤化工园区或零排放示范项目。（2）各工艺运行流程的优缺点对比：膜法吨水综合能耗3 ~ 6kWh，投资适中，但膜寿命有限（3 ~ 5年需更换）且对预处理要求高；MVR热法吨水能耗40 ~ 70kWh，处理彻底、产盐品质高，但设备结垢风险大，对换热管材质要求高（需钛材或双相不锈钢）；组合工艺发挥两者互补优势，分盐纯度和回收率最高，但系统集成度高、控制复杂、总投资大（膜法＋热法叠加），工程上需结合回用水价、危废处置费及盐产品收益综合经济核算确定最优工艺路线。

3 煤化工高盐废水脱盐处理技术应用效果分析与优化

3.1 水质处理效果分析

（1）盐分去除率、出水水质达标情况分析：膜法系统脱盐率稳定在97% ~ 99%，产水TDS ≤ 200mg/L，满足循环冷却水补水标准（GB/T50050）。热法蒸发冷凝水TDS ≤ 50mg/L，可回用于工艺用水。组合工艺出水TDS可控制在100mg/L以下，整体盐分去除率超过98.5%。（2）有机物、悬浮物等杂质协同去除效果：预处理+超滤对SS去除率达99%以上，出水浊度 ≤ 0.2NTU；COD去除率受膜截留和生物降解共同作用，反渗透对COD去除率约85% ~ 90%，组合工艺最终出水COD ≤ 30mg/L，满足回用要求。（3）出水回用稳定性与水质波动控制效果：采用在线监控与自动调节系统，当进水TDS波动±20%时，产水TDS变化幅度 ≤ ±10%，产水流量波动控制在±5%以内。设置产水回流和浓水排放联动调节，确保产水水质全天候稳定达标。

3.2 资源化利用效果分析

（1）水资源回收率与循环利用效益：膜法系统回收

率65%～75%，热法冷凝水回收率可达95%以上，组合工艺综合水资源回收率 ≥ 92%，大幅降低新鲜水取用量，年节约水资源费用显著。（2）结晶盐产品纯度与资源化回收价值：NaCl结晶盐纯度可达98%以上，Na_2SO_4纯度 ≥ 97.5%，满足工业副产盐标准，可作为融雪剂或工业原料外售，每吨盐回收价值约200～500元。（3）废水零排放实施效果与固废减量成效：组合工艺可实现全厂废水零外排，混盐产生量较传统工艺减少60%～80%，大幅降低危废处置费用，环境效益突出。

3.3 技术经济与环保效益分析

（1）设备投资、运维能耗与药剂成本核算：膜法吨水投资约5000～8000元/（$t \cdot d^{-1}$），运行成本3～6元/t；MVR吨水成本40～70元/t；组合工艺吨水综合成本25～50元/t，药剂和膜更换费用占运行总成本约20%～30%。（2）节能减排、污染物减排环保效益分析：年减排COD约50～200t、悬浮物30～100t、盐分数千吨，同时减少新鲜水取用量和废水外排量，吨水碳排放较传统多效蒸发降低30%～40%。（3）工艺投入与产出综合经济效益评估：综合考虑产水回用价值、盐产品销售收入及危废减量节省费用，组合工艺投资回收期约3～5年，规模越大效益越显著，年综合净收益可达数百万元。

3.4 现存问题与工艺优化策略

（1）现有脱盐工艺运行中的结垢、能耗偏高问题：热法换热管结垢导致传热系数下降10%～20%，增加蒸汽消耗。建议采用超声波防垢技术或在线球清洗装置，并优化阻垢剂配方，定期强制排垢。（2）膜组件损耗、结晶盐纯度不足等技术短板：膜氧化和污染缩短寿命至2～3年，建议增设ORP精准控制和在线清洗频次；结晶盐纯度不足源于共晶现象，建议增加洗盐工序或采用淘洗技术提升盐品等级[5]。（3）适配煤化工高盐废水的工艺优化与改进方案：推荐“双膜法+MVR结晶+母液干化”三级耦合工艺，增设纳滤分盐提高盐纯度；引入智慧水务系统实现全流程智能调控，并针对不同煤化工板块水质差异采取分质处理、灵活切换的运行模式，以降低综合能耗10%～20%。

结束语

本文通过分析煤化工高盐废水各类脱盐技术的工程应用与综合效益，证实膜-热耦合分盐工艺适配性最优，可实现水质达标回用、盐资源回收与固废减量，经济环保效益突出。目前行业脱盐工艺仍存在设备结垢、膜损耗快、能耗偏高的问题。未来需依托智能水务系统，优化耦合工艺配置与运维方案，持续降低运行能耗，提升盐产品纯度，全面推动煤化工高盐废水处理技术提质增效与规模化应用。

参考文献

[1]施华彪.分盐零排放技术在煤化工高盐废水中的应用研究[J].化学工业,2024,42(2):56-60.

[2]段宁鑫,郑利兵.煤化工废水零排放系统反渗透过程水质变化及脱盐效能研究[J].环境工程学报,2024,18(3):817-829.

[3]王凯,张宇,李萌.煤化工高盐废水纳滤-热法耦合分盐脱盐技术及工程应用[J].工业水处理,2023,43(8):98-104.

[4]谈成明,王坤.零排放技术在煤化工高盐废水处理中的工程应用实例[J].煤化工,2025,53(1):45-50.

[5]刘飞.煤制化工高盐废水冷冻结晶分盐脱盐技术优化与效果分析[J].中国煤炭,2025,51(4):76-81.