

电厂化学废水零排放预处理技术及余热利用经济效益

吴国亮

华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司 内蒙古 包头 014013

摘要：电厂化学废水零排放预处理技术通过高效集成物理化学处理、膜分离及热能回收工艺，实现废水深度净化与资源回收，同时结合余热利用显著提升经济效益，采用中和沉淀（如石灰乳调节pH至碱性）及混凝工艺（聚合氯化铝+PAM）去除悬浮物、重金属离子及部分盐分，防止后续设备堵塞与腐蚀。强化工艺（如螯合剂+TMT）可同步降低氟、氯等离子浓度，重金属去除率达99%以上，污泥量减少80%。

关键词：电厂化学；废水零排放预处理技术；余热利用经济效益

利用多效蒸发（MED）或机械蒸汽再压缩（MVR），结合电厂低品位余热将浓盐水蒸发结晶，产出工业级盐类（如 Na_2SO_4 、 NaCl ）。通过技术协同，电厂化学废水零排放预处理与余热利用不仅满足严苛环保要求，更在3-5年内实现投资回本，推动绿色低碳转型。

1 电厂化学废水零排放预处理技术

（1）基础物化预处理。中和沉淀，投加石灰乳（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）调节废水pH至碱性范围（通常 $\text{pH} = 9-10$ ），沉淀去除钙、镁等结垢离子及部分重金属离子，同时降低后续设备结垢风险。控制指标：出水浊度要求 $< 1\text{NTU}$ 。混凝-絮凝强化，采用聚合氯化铝（PAC）与聚丙烯酰胺（PAM）组合药剂，通过电荷中和及网捕作用去除胶体、悬浮物（SS）及胶态硅，SS去除率 $> 95\%$ 。污泥减量：优化药剂投加比例可减少污泥产量达80%。

（2）特种污染物靶向预处理。重金属深度脱除。投加螯合剂（如TMT15）或硫化物，形成稳定沉淀物分离镉、汞、铅等毒性重金属，去除率 $> 99\%$ 。氟/氯离子控制。钙盐沉淀法（如 CaCl_2 ）降低氟化物浓度；离子交换树脂选择性吸附氟离子，避免后续膜系统腐蚀。有机物降解。针对含油废水及化学清洗废液，采用气浮分离+臭氧氧化组合工艺，COD削减率超85%。

（3）浓缩前预处理保障。膜系统抗污堵防护。管式超滤（TUF）：宽流道设计（流道高度 $\geq 2.4\text{mm}$ ）应对高SS废水，截留粒径 $> 0.1\mu\text{m}$ 的颗粒物。自清洗过滤器：50 μm 精密过滤拦截纤维类杂质，配套脉冲反冲洗降低膜污堵频率。结垢离子深度软化。碳酸钠+氢氧化钠二级软化，将残余钙、镁离子浓度降至 $< 10\text{mg/L}$ ，保障后续膜浓缩及蒸发结晶稳定运行。

2 电厂化学废水余热利用的技术

（1）废水余热直接回收技术。梯级换热系统，板式/管式换热器：回收40–60℃废水余热用于预热锅炉补给水

或生活用水，热回收率达70%以上。氟塑料换热器：耐腐蚀材质适配高盐废水，将废水温度从80℃降至35℃，热量转移至供暖系统。热泵提温技术，吸收式热泵：利用电厂低压蒸汽驱动，将30–50℃废水余热提升至70–90℃供生产工艺使用，能效比（COP）达1.8–2.5。电动压缩热泵：适用于无蒸汽热源场景，将废水热能提升后用于脱硫系统加热或冷冻水制备。

（2）余热驱动废水处理技术。蒸发浓缩节能工艺。利用烟气余热（120–150℃）或汽轮机抽汽替代传统蒸汽，驱动多效蒸发（MED）系统处理高盐废水，降低蒸汽消耗40%。案例：某厂采用烟气余热驱动蒸发器，吨水处理能耗从60 kWh降至35kWh。膜处理热能协同，预热废水至35–40℃提升反渗透（RO）膜通量，产水率提高15–20%，并减少膜污堵风险。

（3）系统耦合与资源回收。余热-结晶一体化，机械蒸汽再压缩（MVR）系统直接引入冷却塔排污水余热（约30℃），浓缩废水同时产出工业盐，综合能耗降低50%。区域能源联供，回收废水余热用于厂区供暖或周边社区供热，如唐山热力项目利用电厂余热供热，减排 CO_2 4.2万吨/年。

3 高级氧化技术在电厂化学废水余热利用

（1）余热强化高级氧化技术。热活化自由基反应。利用40–80℃废水余热加速自由基生成：过硫酸盐活化：废水中过硫酸盐（PS）在余热作用下分解为硫酸根自由基（ $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ），难降解有机物降解效率提升40%–60%。臭氧催化氧化：预热废水至50℃以上时，臭氧分解产生羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ）速率提高3倍，COD去除率达85%–90%。热协同电化学氧化，电极反应增效：废水预热至40–50℃后进入电化学系统，电极表面反应速率提升，处理高盐含油废水时能耗降低30%，COD去除率 $> 95\%$ 。案例：某电厂采用余热预热+电催化系统，吨水耗电量从15

kWh降至9.5kWh。

(2) 余热驱动系统集成方案。蒸发-氧化耦合工艺, MVR蒸发浓缩后的高温浓水(70–90℃)直接通入臭氧反应器, 减少臭氧投加量40%, 同步实现盐分浓缩与有机物深度矿化。烟气余热回收联用, 150℃烟气余热驱动光催化反应器: UV光强增强50%, TiO_2 催化剂活性提升, 苯系物降解率从70%增至95%。年节约电能超120MWh(以300吨/日系统计)。

4 蒸发结晶法在电厂化学废水中的应用

(1) 核心工艺原理。相分离机制, 利用加热使废水蒸发, 水分以蒸汽形式分离, 溶质浓缩至过饱和后结晶析出, 实现废水减量化和盐分固化。适用场景: 脱硫废水($\text{TDS} \geq 50\text{g/L}$)、化学再生废水等高盐体系。技术分类, 多效蒸发(MED): 串联多个蒸发器, 利用前效二次蒸汽加热后效, 适合蒸汽资源丰富的电厂。机械蒸汽再压缩(MVR): 通过压缩机将二次蒸汽升温升压后循环利用, 能耗较MED降低40%以上。低温蒸发结晶: 真空环境下沸点降至30–50℃, 结合热泵回收潜热, 吨水电耗仅30–150kWh。

(2) 电厂应用关键环节, 预处理强化, 重金属/硬度控制: 石灰软化+碳酸钠沉淀降低钙镁离子浓度($\leq 50\text{mg/L}$), 减少蒸发器结垢。悬浮物拦截: 管式超滤(TUF)或自清洗过滤器确保进水 $\text{SS} < 1\text{NTU}$ 。分盐与资源化, 盐硝分离: 纳滤(NF)预分离氯化钠与硫酸钠, MVR结晶产出工业盐(纯度 $\geq 95\%$)。浓水固化: 结晶残液经烟道雾化蒸发或滚筒干燥, 实现全量零排放。

(3) 技术经济性案例。国电电厂, 工艺: 石灰软化→DTRO膜浓缩→MVR蒸发结晶, 成效: 结晶盐纯度97.5%, 吨水成本18.3元, 年回收工业盐1.2万吨。某300MW机组脱硫废水项目, 工艺: MED余热驱动(烟气温度140℃), 节能效益: 吨水蒸汽消耗量0.25t, 较传统蒸发降耗38%。

(4) 挑战与对策。结垢控制, 低温运行(40–60℃)抑制硫酸钙析出, 结合在线清洗(CIP)保障连续运行。结晶盐品质, 重金属超标的结晶盐需按危废处置, 建议前端强化螯合沉淀(如TMT15)。

5 膜分离技术在电厂化学废水余热利用

(1) 余热协同膜分离增效技术。温度调控提升膜通量。利用40–60℃废水余热预热进水, 使反渗透(RO)系统膜通量提高15–20%, 同时降低膜污堵风险(因高温抑制微生物滋生)。案例: 预热脱硫废水至35℃后, RO产水率从65%提升至82%, 吨水电耗降低25%。热驱动膜蒸馏(MD), 耦合60–80℃低品位余热驱动疏水膜(如

PTFE), 废水侧蒸发的水蒸气透过膜孔冷凝为淡水, 盐分截留率 $> 99.9\%$, 适用于高盐废水深度浓缩。节能效益: 对比常规蒸发, 膜蒸馏吨水电耗仅30–50kWh, 节能50%以上。

(2) 余热回收与膜工艺集成。膜浓水余热梯级利用, RO浓水(温度35–45℃)经板式换热器回收热能, 预热锅炉补给水或供暖回水, 热回收率超70%。创新方案: 浓水余热驱动吸收式热泵, 将热能提温至70℃供厂区工艺使用。零排放系统热能优化, “超滤+RO+膜蒸馏”耦合: 烟气余热(120–150℃)驱动膜蒸馏处理RO浓水, 实现脱硫废水全量资源化(淡水回用+结晶盐回收)。经济性: 某电厂集成方案吨水运行成本降至18元, 盐分回收纯度 $\geq 97\%$ 。

6 电厂化学废水零排放预处理经济效益

(1) 直接运行成本节约。降耗增效, 膜分离系统: 预热废水至40℃提升RO膜通量20%, 吨水电耗降低25%; 浓水余热回收用于供热系统, 蒸汽消耗减少30%。蒸发结晶: MVR技术较传统蒸发节能40%以上, 吨水能耗降至30–50 kWh; 余热驱动MED系统可降蒸汽消耗38%。高级氧化: 余热活化过硫酸盐节省氧化剂35%, 吨水成本降低28元。药剂与维护优化, 预处理阶段采用精确加药技术(如石灰软化), 减少药剂过量投加20%。超滤膜(PVDF)耐污染特性降低化学清洗频率30%, 延长膜寿命。

(2) 资源回收收益。水资源回用, 处理后淡水回用于锅炉补给水或冷却系统, 年节水超48万吨(如兰州石化案例), 节约成本1410万元。膜蒸馏产水率达99.9%, 年回收淡水12万吨, 抵消原水采购成本。盐分资源化, 分盐结晶技术产出工业盐(纯度 $\geq 95\%$), 国电电厂年回收1.2万吨, 创造直接收益。脱硫废水结晶盐达工业一级标准, 避免危废处置费用。

(3) 风险控制与经济优化。技术适配性, 能源结构匹配: 电价较低地区优选MVR, 蒸汽充裕场景采用余热驱动MED。水质预处理: 强化重金属沉淀(如TMT15螯合), 避免结晶盐危废化增加处置成本。运维管理, 自动化控制系统动态调节药剂投加量与能耗, 降低人为操作成本。

7 电厂化学废水零排放整体经济效益分析

(1) 水资源回收与成本节约。节水降耗, 淡水回用率超95%, 年节水超10万吨(如费县电厂案例), 减少原水采购成本。膜分离技术(如RO)结合余热预热进水, 膜通量提升20%, 吨水电耗降低25%。能耗优化, MVR蒸发结晶吨水电耗降至30–50kWh, 较传统蒸发节能

40%；余热驱动MED系统蒸汽消耗降低38%。浓水余热回收用于供热或工艺用水，热回收率超70%，降低蒸汽消耗30%。

(2) 资源化收益与循环经济，工业盐回收，分盐结晶技术产出工业盐纯度 $\geq 95\%$ ，年回收量达1.2万吨，创造直接经济收益。结晶盐达工业一级标准，避免危废处置费用（危废处置成本降低50%）。副产品增值，浓水固化后用于水泥制造或灰场喷洒，实现残渣资源化；灰渣年回收超20万吨（如灵谷化工案例）。二氧化碳、氩气等气体回收年收益超5000万元。

(3) 经济性挑战与优化路径。初始投资控制，预处理强化（如石灰软化+超滤）降低蒸发系统结垢风险，延长设备寿命，减少维护成本。分质盐技术避免混盐危废化，降低结晶盐处置成本。技术适配性优化，电价低位区优选MVR工艺，蒸汽充裕场景采用余热驱动MED，平衡能源成本。自动化加药与能耗动态调控，降低药剂过量投加20%及人为操作成本。

8 电厂化学废水零排放技术实施挑战

(1) 高盐废水浓缩极限与分离难点。膜技术瓶颈，回收率受限：反渗透（RO）处理高盐废水（含盐量1万-4万mg/L）时，回收率超80%后膜通量骤降40%，需频繁化学清洗。浓缩极限：常规RO浓缩极限约7万mg/L，而CFRO（浓盐水反渗透）技术虽可提至26万mg/L，但设备投资增加35%。分盐纯度不足，钙、镁离子共存导致结晶盐混盐率高（纯度 $< 90\%$ ），需强化预处理（如TMT15螯合除重金属），否则结晶盐被判危废。

(2) 设备结垢与腐蚀风险。蒸发系统结垢，脱硫废

水中石膏颗粒（SS达3万mg/L）和硬度离子（ $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ）引发蒸发器换热管结垢，热效率降低30%。煤化工废水水质波动10倍以上，加剧蒸发器结垢频率。高氯腐蚀，氯离子浓度约2万mg/L，腐蚀金属设备，MVR蒸发器需采用钛合金材质，成本提升50%。

(3) 运维管理与技术适配性。水质波动敏感，燃煤负荷变化导致废水组分波动，需动态调节药剂投加量，自动化控制不足时药剂过量20%。膜污染防控，废水中有有机物/胶体引发超滤膜污染，化学清洗频率增加50%，缩短膜寿命至2年。工艺协同难题，分质盐工艺要求严格匹配预处理与结晶单元，混盐率超5%即触发危废判定。

(4) 系统优化路径。技术升级，采用CFRO+蒸发结晶组合工艺，提升盐浓缩效率并降低能耗；高级氧化预处理（如臭氧活化）分解有机物，减轻膜污染。运维强化，构建AI动态调控系统，实时优化加药量与能耗（如SmartOps技术）；严格水质监控，控制钙镁离子浓度 $\leq 50\text{mg/L}$ ，预防蒸发结垢。政策利用，申请可再生资源补贴（如2024年中央预算补助）及地方专项资金。

总之，通过余热与高级氧化技术的协同，电厂化学废水处理在保障零排放的同时，实现能耗与药耗的双重优化，推动降本增效与绿色转型。

参考文献

- [1]刘萍.电厂化学废水零排放预处理技术及余热利用经济效益探析.2022.
- [2]张海英,电厂化学废水零排放预处理技术及余热利用经济效益分析.2023.