

煤化工废水零排放技术中膜分离与结晶工艺的协同优化

李宝雎

国家能源集团煤焦化有限责任公司西来峰分公司焦化二厂 内蒙古 乌海 016000

摘要：在环保要求日益严苛与水资源愈发紧缺的当下，煤化工行业废水零排放成为必然趋势。本文聚焦煤化工废水零排放技术，深入探讨膜分离与结晶工艺的协同优化。首先阐述煤化工废水零排放的必要性，接着分析膜分离技术与结晶工艺各自的技术特性。在此基础上，提出针对性的协同优化策略，包括水质分质调控、工艺流程优化设计、关键参数协同控制以及运行成本与环境效益综合评估等方面。旨在通过协同优化，提升煤化工废水零排放技术的处理效率与效果，降低运行成本，实现环境效益与经济效益的双赢，为煤化工行业的可持续发展提供技术支持。

关键词：煤化工废水；零排放技术；膜分离；结晶工艺；协同优化

引言：随着煤化工行业的快速发展，其生产过程中产生的大量废水给环境带来巨大压力。煤化工废水成分复杂，含有高浓度有机物、无机盐等污染物，若直接排放，将严重破坏生态环境。因此，实现煤化工废水零排放成为行业可持续发展的关键需求。膜分离与结晶工艺作为零排放技术的核心环节，对废水处理效果起着决定性作用。膜分离技术可有效分离废水中的不同组分，结晶工艺则能将盐分转化为固体结晶，实现资源回收。然而，单一技术存在一定局限性，将二者协同优化，能充分发挥各自优势，提高废水处理效率，降低处理成本，对推动煤化工行业绿色发展具有重要意义。

1 煤化工废水零排放的必要性

煤化工产业作为我国能源领域的重要组成部分，其废水零排放具有不容忽视的必要性。第一，从生态环境保护角度而言，煤化工废水成分复杂且污染性强。其中包含大量难以降解的有机物、高浓度的氨氮、酚类物质以及多种重金属离子等。这些污染物一旦进入自然水体，会迅速消耗水中的溶解氧，导致水生生物窒息死亡，破坏水生态平衡。而且，部分有毒有害物质还会在生物体内富集，通过食物链传递，最终威胁人类健康。实现废水零排放，能有效切断污染物进入环境的途径，保护生态环境免受进一步破坏。第二，在水资源利用方面，我国水资源分布不均且总体匮乏，而煤化工生产是典型的高耗水行业。实现废水零排放，可将处理后的废水回用于生产环节，如冷却、洗涤等，大幅提高水资源的循环利用率，减少对新鲜水资源的开采，缓解水资源供需矛盾，保障煤化工产业的可持续发展。第三，从政策法规层面来看，随着国家对环境保护的重视程度不断提高，环保法规日益严格，对煤化工企业的废水排放标准提出了更高要求。零排放是企业顺应政策导向、避免

因违规排放而面临严厉处罚的必然选择。第四，废水零排放过程中产生的结晶盐等物质可进行资源化回收利用，变废为宝，为企业创造一定的经济效益。同时，减少废水排放也降低了企业的污水处理成本和环保风险，有助于提升企业的整体竞争力和社会形象^[1]。

2 膜分离与结晶工艺技术特性分析

2.1 膜分离技术特性

膜分离技术基于选择性透过原理，通过特殊制造的分离膜实现混合物的高效分离。其核心特性体现在高效性、节能性、操作灵活性及环保性上。首先，膜分离技术可在纳米级尺度实现物质分离，如反渗透膜可截留分子量小于100道尔顿的物质，分离效率远超传统重力沉降技术。其次，该技术无相变过程，能耗仅为蒸馏法的1/3至1/5，例如在海水淡化中，反渗透膜系统能耗可低至2.5-3.5kWh/m³。操作温度接近室温的特性使其特别适用于热敏性物质处理，如抗生素浓缩过程中可避免局部过热导致的活性成分破坏。此外，膜分离设备结构紧凑，占地面积仅为传统工艺的1/5-1/10，且模块化设计支持产能灵活调整。然而，膜污染问题仍是技术瓶颈，浓差极化导致的膜表面溶质沉积会使通量衰减30%-50%，需通过定期化学清洗或优化流道设计（如采用切向流过滤）来缓解。

2.2 结晶工艺特性

结晶工艺通过控制溶液过饱和度实现溶质的高纯度分离，其核心特性包括选择性、可控性及资源化潜力。选择性方面，结晶过程基于分子间作用力差异，仅同类分子可有序排列形成晶体，例如在煤化工废水处理中，硫酸钠结晶纯度可达98%以上，杂质主要富集于母液中。可控性体现在对晶体粒度分布的精准调节，通过调整冷却速率（0.5-5°C/min）或蒸发强度（0.5-2kg/m²·h），可获得粒径范围50-500μm的晶体产品，满足不同工业需

求。资源化方面，结晶工艺可将废水中的溶解性无机盐转化为可销售产品，如氯化钠结晶盐可用于氯碱工业原料，实现“变废为宝”。但该工艺对操作条件敏感，过饱和度波动超过10%可能导致晶体聚结或细晶生成，需通过在线粒度分析仪（如PCM结晶监测系统）实时监控。此外，连续结晶器与间歇结晶器的选择需权衡效率与灵活性，大规模生产（如海水制盐）宜采用连续蒸发结晶，而高附加值产品（如医药中间体）则适合间歇冷却结晶以控制晶型^[2]。

3 膜分离与结晶工艺的协同优化策略

3.1 水质分质调控的协同优化

膜分离与结晶工艺的协同优化需以水质分质调控为前提，通过针对性处理不同水质特性，实现膜系统与结晶单元的高效衔接，提升零排放体系的整体效能。（1）需针对有机物污染实施差异化控制。煤化工废水中有机物成分复杂，部分难降解组分易在膜表面吸附或堵塞孔道，导致膜通量衰减。应根据有机物可生化性及分子量分布，设计分级处理策略：对可生化性较好的组分，优先通过生化处理降低其浓度，减轻膜分离负荷；对难降解有机物，则采用高级氧化或吸附技术进行深度去除，避免其对膜性能的长期损害。（2）需实现无机盐的分质浓缩。废水中一价盐与二价盐的溶解度差异显著，若混合结晶会导致产品纯度降低。应通过纳滤技术实现盐类分离，将一价盐与二价盐分别浓缩至不同浓度区间，为后续分质结晶提供条件。分质调控可避免结晶过程中杂质共析，提升资源化产品的市场价值。（3）需强化硬度的定向去除。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等硬度离子易在膜表面或蒸发器内形成结垢，影响系统稳定运行。应通过化学软化或离子交换技术将硬度降至安全范围，并及时分离软化过程中产生的沉淀物，避免进入后续单元造成二次污染，从而降低膜清洗频率与结晶器维护成本。

3.2 工艺流程优化设计

膜分离与结晶工艺的协同优化需从流程架构、单元匹配及能量利用三方面入手，构建高效、稳定、低耗的零排放体系。（1）需优化工艺流程架构，强化模块化集成。传统线性流程易导致物质流与能量流断层，应采用“预处理-膜浓缩-结晶分质”三级模块化设计，各模块独立运行且通过管道柔性连接，既便于快速安装维护，又能根据水质波动灵活调整处理路径。（2）需强化单元间的协同匹配，实现物质梯度利用。膜分离与结晶单元的衔接需兼顾盐分浓缩与分质需求：通过纳滤技术将一价盐与二价盐分离，分别输送至不同结晶器，避免混合结晶导致的杂质共析；同时，将膜浓缩产生的浓水与结晶

母液循环回用至前端预处理，作为反洗水或配药用水，减少新鲜水取用量。（3）需深化能量梯级回收，降低运行能耗。利用蒸发结晶产生的二次蒸汽预热膜浓缩进水，减少生蒸汽消耗；通过热交换器回收膜组件产水余热，用于预处理单元的加热需求。此外，在膜浓缩环节配置能量回收装置，将浓水侧高压能量转化为进水侧压力建能，进一步降低泵送能耗。能量梯级回收可使系统热效率提升，实现低碳运行。

3.3 关键参数的协同控制与优化

膜分离与结晶工艺的协同运行需通过关键参数的动态调控实现系统效能最大化，需从膜分离压力、结晶温度、流速匹配及pH值控制等维度构建协同控制策略，确保各单元在稳定边界内高效运行。（1）膜分离压力需与浓缩倍数动态适配。膜组件的操作压力直接影响通量与截留率，但过高压力会加速膜污染并缩短寿命。需根据进水盐浓度梯度调整压力参数：在低浓度段采用低压运行以减少能耗，高浓度段逐步升压维持通量稳定；同时，通过压力反馈系统实时监测跨膜压差，当压差超过阈值时自动触发清洗程序，避免污染累积导致性能骤降。（2）结晶温度需与盐类溶解度曲线协同。不同盐类的结晶温度窗口差异显著，一价盐（如 NaCl ）需在高温下蒸发结晶，而二价盐（如 Na_2SO_4 ）则需低温冷冻结晶。需通过温度分层控制实现分质结晶：在蒸发结晶单元维持高温环境促进一价盐析出，在冷冻结晶单元控制低温条件诱导二价盐结晶；同时，利用热交换器实现温度梯度利用，将蒸发结晶的余热用于预热进水，降低能耗。（3）流速需在膜表面与结晶器内形成协同剪切。膜分离单元需通过循环流速控制浓差极化，避免溶质在膜表面沉积；结晶单元则需通过搅拌流速调节晶体成长速率，防止颗粒过大或过细。流速参数需与停留时间匹配，确保溶质充分迁移与晶体均匀生长，避免因流速失衡导致膜污染加剧或结晶产品品质下降。

3.4 运行成本与环境效益的综合评估

膜分离与结晶工艺的协同优化需从运行成本与环境效益的双重维度展开综合评估，通过技术整合与流程优化实现经济性与可持续性的协同提升。（1）运行成本控制需聚焦全流程能耗与物耗的精准管控。膜分离环节需优化操作压力与流速参数，避免因过高压力或流速波动导致膜组件频繁更换，同时通过抗污染膜材质的选择延长清洗周期，降低反冲洗用水与化学药剂消耗；结晶环节需结合热集成技术，利用蒸发结晶产生的二次蒸汽预热膜浓缩进水，减少生蒸汽用量，并通过机械蒸汽再压缩（MVR）技术替代传统多效蒸发，实现能源梯级

利用。此外，设备维护成本可通过模块化设计降低，独立功能模块便于快速检修与更换，减少整体停机时间与维修费用。（2）环境效益提升需强化资源循环与污染防控。膜浓缩与结晶分质工艺可实现水资源与盐资源的高效回收：浓缩淡水回用于生产环节，减少新鲜水取用量；分质结晶获得的高纯度盐类产品可作为工业原料替代天然矿产开采，降低资源消耗与生态破坏。同时，全流程封闭运行可大幅削减废水排放量，避免含盐废水对土壤与水体的盐渍化污染；有机物与重金属在预处理阶段被深度去除，防止其在结晶母液中富集形成危险废物，减轻末端处置压力。（3）需构建成本-效益动态平衡机制。通过建立全生命周期评估模型，将能耗、物耗、设备折旧等成本要素与水资源回收率、盐资源利用率、污染物减排量等效益指标关联分析，识别关键优化节点。例如，在膜材质选择时，需权衡初始投资与长期抗污染性能；在结晶工艺设计时，需平衡分质结晶的产品附加值与设备复杂度。

3.5 智能化监控与自适应调控系统构建

膜分离与结晶工艺的协同优化需依托智能化技术实现全流程动态管控，通过实时数据采集、模型预测与自适应调节，提升系统抗干扰能力与运行稳定性，最终形成“感知-分析-决策-执行”的闭环控制体系。（1）需构建多维度实时感知网络。在膜分离单元部署压力、流量、电导率传感器，监测跨膜压差、通量衰减及截留率变化；在结晶单元安装温度、浓度、粒度在线分析仪，追踪盐类结晶形态与过程参数波动；同时，集成水质光谱仪与离子色谱仪，对进水有机物、硬度、盐分组成进行高频次扫描。通过物联网技术将分散的监测节点数据汇聚至中央控制平台，形成覆盖全流程的“数字孪生”基础。（2）需开发基于机器学习的预测模型。利用历史运行数据训练膜污染速率预测模型，通过压力-流量曲线偏移量提前识别污染趋势，触发预防性清洗程序；构建

结晶动力学模型，结合实时温度、浓度数据预测晶体成长速率与粒度分布，动态调整搅拌强度与冷却速率，避免晶体团聚或过细；同时，建立能耗-效益优化模型，根据电价波动与产品需求自动切换运行模式（如高峰时段降低蒸发负荷、低谷时段强化结晶产率），实现经济性最优。（3）需实现自适应调控与故障自愈。当膜分离单元压差突破阈值时，系统自动降低操作压力并启动反向冲洗，同时调整后续结晶单元进料流量以匹配处理能力；若结晶器内粒度分布偏离目标范围，智能调节剂投加系统实时修正pH值或添加晶种，引导晶体向理想形态生长；对于突发水质波动（如硬度骤升），预处理单元快速切换至强化软化模式，并通过膜系统压力补偿机制维持整体通量稳定^[3]。

结束语

在煤化工废水零排放的征程中，膜分离与结晶工艺的协同优化是突破资源循环瓶颈、实现环境效益与经济效益双赢的关键路径。通过水质分质调控的精准化、工艺流程的模块化集成、关键参数的动态协同以及智能化监控的深度赋能，系统抗冲击能力显著增强，资源回收率与处理效率同步提升。未来，随着抗污染膜材料、高效结晶器及AI决策系统的持续创新，零排放技术将向更低能耗、更高稳定性的方向演进，为煤化工行业绿色转型提供坚实支撑，助力实现“水尽其用、盐尽其值”的可持续发展目标。

参考文献

- [1] 陈林.现代煤化工废水零排放技术[J].决策探索(中),2021(12):17.
- [2] 吕彬峰,马倩.现阶段煤化工废水“近零排放”技术[J].2021(2019-29):64-64.
- [3] 张旭.膜分离与结晶工艺技术特性分析[J].现代化工,2021,41(09):226-231.