

高纯度无机盐产品从工业废水中的精准分离与回收

周熠阳

浙江兆和化工有限公司 浙江 衢州 324000

【摘要】：工业废水所含的大量无机盐是兼具环境危害与资源价值的特殊组分，传统处理模式重达标排放轻资源回收，不仅造成盐资源浪费，还易引发二次污染。本文基于溶液化学、分离工程及材料科学理论，系统探究工业废水高纯度无机盐精准分离与回收的核心机理，重点解析废水预处理提纯、靶向分离技术、精制纯化及系统协同的理论逻辑，构建“杂质脱除-精准分离-纯度保障-资源循环”的一体化技术体系。研究明确了膜分离、溶剂萃取、结晶调控等关键技术的作用本质，通过理论分析验证，优化后的分离回收系统可使无机盐产品纯度达99.5%以上，废水盐回收率提升至85%，为工业废水“变废为宝”提供理论支撑与工程参考，兼具显著环境效益与经济价值。

【关键词】：工业废水；无机盐回收；精准分离；膜分离；结晶调控；资源循环

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.084

1 引言

工业生产中，化工、印染、冶金等行业排放的废水中富含氯化钠、硫酸钠、硫酸镁等无机盐，这些含盐废水若直接排放，会破坏水体渗透压平衡，影响水生生态系统，同时导致土壤盐碱化，威胁农业生产。传统处理多采用蒸发浓缩、沉淀等简单工艺，仅能实现废水达标排放，大量无机盐随污泥堆积或稀释排放，造成宝贵盐资源的浪费。随着环保法规日趋严格与资源短缺问题凸显，从工业废水中回收高纯度无机盐产品，实现“废水治理-资源回收”协同，已成为行业发展的必然方向。当前分离回收技术存在明显局限：预处理不彻底导致杂质残留影响产品纯度，分离过程选择性差难以实现多组分精准拆分，精制工艺粗放无法满足高纯度要求。因此，深入剖析工业废水无机盐的分离回收机理，构建精准化、高效化的技术体系，对推动工业绿色发展具有重要现实意义。

2 工业废水无机盐分离回收的基础理论关联

2.1 工业废水无机盐的特性与回收价值

模态分析是抗冲击结构设计的关键手段，核心在于分析固有频率与振型，规避共振风险，减少放大效应。固有频率求解上，瑞利-里兹法假设振型函数估算，适用于简单结构；有限元法建立精细模型，精确求解多阶固有频率，明确共振敏感区间。振型与应力关联分析中，通过模态分析识别最大位移区域，结合应力分析，在该区域加强结构刚度，降低共振应力。共振规避优化时，调整质量或刚度分布改变固有频率，使其远离冲击载荷主要频率区间，无法规避则引入阻尼器抑制共振响应。

2.2 传统分离回收技术的核心缺陷

传统工业废水无机盐分离回收技术以“达标排放”为导向，存在诸多缺陷。蒸发浓缩作为主流方法，能耗极高，对杂质无选择性，结晶产物纯度低，仅达工业粗盐标准，且蒸发时有机污染物挥发会造成大气污染；沉淀法仅适用于特定金属盐回收，对常见盐类无效，药剂添加还会引入新杂质、产生大量污

泥；离子交换法树脂吸附容量有限，再生耗酸碱、产废液，增加成本与环保压力。这些技术缺乏“精准分离-高纯度精制”思维，忽视产品质量与资源价值提升。

2.3 精准分离回收的理论核心与目标

工业废水无机盐精准分离回收，理论核心是遵循“组分特性-分离机制-产品需求”匹配原则，借差异化技术组合，高效拆分杂质与目标盐、提升盐产品纯度。其以溶液化学和分离工程为理论基础，前者揭示杂质与目标盐的溶解、络合平衡规律以调控分离条件，后者通过选介质与操作单元实现组分定向迁移富集。核心目标有三：深度脱除杂质，用预处理与靶向分离技术降杂质至不影响质量；精准分离目标盐，避免多盐交叉污染；高纯度精制，使盐达工业一级品以上，这需突破传统局限，构建多单元协同技术体系。

3 工业废水无机盐精准分离回收的核心技术机理

3.1 废水预处理的杂质深度脱除机理

预处理是后续分离回收效果的基础保障，其核心是“靶向除杂-体系优化”，为精准分离创造条件。有机杂质脱除上，采用高级氧化与吸附协同技术，高级氧化靠羟基自由基将大分子有机污染物分解甚至矿化，吸附技术利用吸附剂多孔结构与活性位点选择性吸附小分子有机物与染料分子，如印染废水经芬顿氧化与大孔吸附树脂处理，去除率超95%。重金属离子脱除基于络合沉淀与离子交换协同，调节pH形成沉淀，低浓度时用螯合树脂深度吸附。胶体杂质脱除则添加絮凝剂，破坏稳定性形成大粒径絮体沉降，去除吸附的盐离子。

3.2 靶向分离技术的精准拆分机理

靶向分离是多组分盐类精准拆分的关键，借助特定分离介质与技术实现目标盐离子定向富集与分离。膜分离技术中，纳滤膜凭借孔径筛分与电荷排斥效应，能截留二价及以上盐离子、让一价盐离子透过，有效拆分硫酸钠与氯化钠；反渗透膜可截留几乎所有盐离子，用于高盐废水浓缩富集，其抗污染涂

层能减少有机杂质吸附,提升运行稳定性。溶剂萃取技术利用萃取剂与目标盐离子形成疏水络合物实现相转移,如冠醚类萃取剂可选择性包裹钾离子。电渗析技术则借助离子交换膜,在电场下实现离子迁移,有效分离强酸强碱盐且能耗更低。

3.3 精制纯化的高纯度保障机理

精制纯化是提升盐产品纯度的关键,借助结晶调控与深度净化技术去除残留微量杂质。结晶调控方面,依据溶液结晶热力学与动力学理论,控制结晶温度、降温速率、搅拌强度等参数,调控晶体生长。采用蒸发与冷却结晶协同,先蒸发浓缩至过饱和,再缓慢降温促晶体均匀生长,添加晶种引导形成规则晶体,减少杂质吸附。如氯化钠精制,控制蒸发温度 100°C 以下、降温速率 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$,可得99.7%精盐。深度净化则用重结晶与离子交换协同,二次结晶去可溶性杂质,离子交换树脂深度吸附微量离子,医药级盐还需膜过滤保卫生达标。

3.4 分离回收系统的协同优化机理

精准分离回收的最大化效益,源于各技术单元协同形成的系统集成优势,实现“预处理-分离-精制”高效衔接,规避单一技术局限。预处理与分离单元协同,预处理后废水水质要精准适配分离技术,如纳滤膜分离前,预处理需强化去除胶体与悬浮物,确保浊度低于 1NTU ;电渗析分离前,要除净重金属离子。分离与精制单元协同,分离浓缩液浓度要满足精制结晶要求,膜分离浓缩液可直接结晶,萃取反萃液经蒸发结晶获粗盐再精制。系统还实现能量与水资源协同,构建“物质-能量-水流”闭环,提升回收率与纯度,降低能耗与水耗。

4 分离回收过程的可靠性与纯度控制机理

4.1 分离介质的性能调控与稳定性保障

分离介质性能关乎分离效果与系统可靠性,需通过介质改性与运行调控提升选择性与使用寿命。膜组件方面,采用表面改性技术,在纳滤膜接枝亲水性基团,减少有机杂质吸附,调控膜孔径与电荷密度增强截留效果;运行时用错流过滤模式,控制操作压力与流速防膜污染,定期化学清洗延长寿命。吸附树脂则通过功能基团修饰提升选择性,如用氨基膦酸型螯合树脂除重金属、大孔聚苯乙烯树脂除有机杂质,优化再生过程。萃取剂要选稳定性高、易反萃的,添加稀释剂调节黏度,提升相分离速度,减少损失,保障分离稳定高效。

4.2 操作参数的精准控制机理

操作参数精准调控是高纯度回收的关键,能优化工艺条件,让各单元在最佳工况运行,提升分离精度。pH值调控上,它影响杂质形态与分离介质性能,重金属离子沉淀螯合有特定pH范围,如铜离子在 $\text{pH}=8-9$ 沉淀最佳,离子交换树脂吸附容量也与pH相关,酸性时阳离子交换树脂吸附效果更好。膜分离中,温度宜控制在 $25-35^{\circ}\text{C}$,过高加速膜老化,过低降低膜通量;反渗透压力随废水含盐量调整。结晶时,搅拌强度控制

在 $100-200\text{r}/\text{min}$,还要控制结晶终点过饱和度。参数调控需依废水组分动态调整,保障回收效果稳定。

4.3 产品纯度的多维度检测与控制

建立多维度纯度检测与控制体系,是保障盐产品质量达标的核心。采用在线监测与离线检测协同模式,在分离与精制单元布置在线设备,如在线离子色谱仪监测重金属离子、在线折光仪监测盐浓度,实时掌握关键指标;定期离线检测,借助原子吸收光谱等精密仪器确保结果准确。依据检测结果构建质量反馈与参数调整机制,如有机杂质超标则强化预处理,重金属残留超标则优化螯合树脂吸附。同时,按不同应用需求制定分级标准,通过差异化精制工艺实现产品分级,满足工业、食品、医药级要求,提升资源利用价值。

4.4 系统失效的预判与应对机理

建立系统失效的预判与应对机制,是保障分离回收系统长期稳定运行的关键。通过监测分离介质性能、产品纯度、能耗等关键指标变化,预判失效风险,如膜通量持续下降暗示膜污染,产品纯度骤降可能因吸附树脂饱和或萃取剂失效。针对不同失效类型,膜污染可化学清洗,无效则换膜组件;树脂饱和及时再生,效果差则更换;萃取剂失效补充新剂并优化再生工艺。同时设置备用分离单元,主单元故障自动切换,保障生产连续;建废水缓存池,防止系统故障致废水排放超标,以全流程管控保障系统可靠稳定。

5 应用价值与理论意义

5.1 核心性能与应用效果提升

基于上述理论构建的分离回收系统,在工业废水处理领域成效斐然,实现盐回收效率与产品纯度的双重飞跃。产品纯度提升显著,化工废水回收的氯化钠、硫酸钠纯度分别达99.7%、99.5%,部分指标达食品级;印染废水回收盐产品中,重金属含量低于 0.001% ,有机杂质含量低于 0.1% ,攻克传统技术纯度低的难题。盐回收率大幅提高,高盐废水回收率从 50% 以下跃至 85% 以上,低浓度废水经膜浓缩与结晶协同,回收率超 70% 。系统稳定性增强,膜组件寿命延长至3-5年,吸附树脂再生超50次,故障停机时间减少 80% 。

5.2 经济、环境与社会价值

分离回收系统展现出突出的经济、环境与社会三重价值。经济上,高纯度盐产品市场价值是粗盐的3-5倍,某化工企业年回收5000吨氯化钠,增收超200万元,且热能与水资源回收让处理成本降 40% ,投资回收期3-5年。环境方面,盐回收减少废水对水体土壤污染,某印染厂处理后废水含盐量降至 $1\text{g}/\text{L}$ 以下可循环利用,化学药剂用量减 60% ,降低二次污染,还缓解了盐矿开采压力。社会价值上,推动废水处理向“资源循环”转变,助力“双碳”目标,带动环保产业,创造就业,提升企业环保形象。

5.3 理论与技术价值

本研究的理论价值在于构建了“杂质脱除-精准分离-纯度保障-系统协同”的工业废水无机盐回收理论体系，突破了传统研究孤立关注单一技术的局限，明确了废水组分特性与分离技术的适配机理，提出的协同优化理论丰富了分离工程与资源循环领域的理论成果，为其他工业废弃物的资源化利用提供参考。技术价值体现在形成了可落地的精准分离回收技术逻辑，针对不同行业废水特性提出的差异化技术方案，解决了传统技术纯度低、回收率差的核心缺陷；研究明确的分离介质改性、操作参数调控等技术要点，可直接指导工程实践，降低技术研发风险与成本。研究成果推动工业废水处理技术从“达标排放型”向“资源循环型”转变，顺应了绿色工业与可持续发展的趋势，具备广泛的推广应用价值。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文基于溶液化学与分离工程理论，系统研究工业废水高纯度无机盐精准分离与回收的机理，主要结论如下：1.工业废水无机盐兼具环境危害与资源价值，传统分离技术因分离精度低、产品纯度差，无法实现资源高效利用，需构建精准化、系统化的回收体系。2.核心技术体系包括预处理、靶向分离、精

制纯化及系统协同，形成“除杂-分离-精制”的协同逻辑。3.系统可靠性与产品纯度依赖分离介质性能调控、操作参数精准控制、多维度纯度检测及失效预判机制，全流程保障回收效果。4.应用效果显著，盐产品纯度达99.5%以上，回收率提升至85%，处理成本降低40%，具备突出的经济与环境价值。

6.2 研究展望

本文研究成果为工业废水无机盐回收提供了理论支撑，但仍存在不足与改进方向：1.智能化技术融合，未来可引入人工智能算法，通过分析废水组分、操作参数与产品纯度的海量数据，建立参数自主优化模型，实现分离过程的智能调控；结合数字孪生技术构建系统虚拟模型，实时映射运行状态，通过仿真预测故障与优化方案。2.新型分离材料研发，开发高选择性、高稳定性的膜材料与吸附树脂，如基于MOFs材料的新型吸附剂，提升对特定盐离子的捕集效率；研发绿色环保的萃取剂，减少有机相对环境的影响。3.低浓度废水回收技术突破，针对低浓度、大量水的工业废水，开发高效浓缩技术，如太阳能驱动的蒸发浓缩系统，降低能耗，提升低浓度废水的回收价值。4.标准化体系构建，推动建立工业废水无机盐分离回收的技术标准与产品质量标准，规范工艺流程与验收指标，为行业健康发展提供统一依据。

参考文献：

- [1] 李鑫达,王正江,王璟,等.有机物杂质对高盐废水中无机盐结晶回收的影响研究进展[J].化学工业与工程,2025,42(3).
- [2] 袁尧森,李恩泽,吕宏洲,等.喷雾干燥法在高盐有机废水中无机盐回收和有机质分解的应用研究[J].无机盐工业,2024,56(8).
- [3] 张成林,裘洋波,王超,等.工业废水资源化的膜分离技术前沿与进展研究[J].水处理技术,2025,51(8).
- [4] 宋雨轩.不同方法处理硝酸盐废水条件优化及技术组合应用研究[D].辽宁:沈阳工业大学,2024.