

# 高盐废水零排放过程中的膜分离技术集成研究

方小龙

合众思(北京)环境工程有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i11.2958

**[摘要]** 高盐废水作为工业排放中的顽固“硬骨头”,长期困扰着水资源循环与生态安全的推进。其高浓度溶解盐、复杂杂质与成分多变,使传统处理手段频频受阻。膜分离技术在此类极端工况下展现出优异的适应能力与集成潜力,尤其在零排放工艺流程中承担着浓缩分离、污染削减与资源回收的关键环节。依托实际工程案例,逐步形成了以纳滤、反渗透、膜蒸馏等为核心的多段组合体系,并通过与蒸发结晶、渗透汽化等单元深度协同,实现了污染物分级截留、能源效率优化与系统稳定性提升。结果表明,膜分离集成路径不仅限于技术堆叠,又在于逻辑结构协同与参数精细调控的落地实践,展现出巨大的现实应用价值与推广前景。

**[关键词]** 高盐废水; 膜分离; 零排放; 集成技术; 工程应用

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A

## Integrated Research on Membrane Separation Technology in Zero Discharge Process of High Salinity Wastewater

Xiaolong Fang

United Think (Beijing) Environmental Engineering Co., Ltd

**[Abstract]** High-salinity wastewater, a persistent challenge in industrial discharge, has long hindered the advancement of water resource recycling and ecological security. Its high concentration of dissolved salts, complex impurities, and variable composition frequently impede traditional treatment methods. Membrane separation technology demonstrates exceptional adaptability and integration potential under such extreme conditions, particularly serving as a critical component in zero-discharge processes for concentration separation, pollution reduction, and resource recovery. Through practical engineering cases, a multi-stage integrated system centered on nanofiltration, reverse osmosis, and membrane distillation has been progressively developed. By deeply synergizing with units like evaporation crystallization and pervaporation, this system achieves hierarchical pollutant retention, optimized energy efficiency, and enhanced system stability. The results indicate that membrane separation integration not only involves technical stacking but also practical implementation of logical structural coordination and precise parameter control, showcasing significant real-world application value and promotion prospects.

**[Key words]** High-salinity wastewater; Membrane separation; Zero discharge; integrated technology; Engineering application

### 引言

高盐废水不再只是“处理难、代价高”的环境难题,更成为制约工业可持续发展的隐性桎梏。在资源刚性约束与生态红线叠加下,如何突破高盐废水治理瓶颈、构建高效闭环的排放控制体系,已成为摆在众多用水大户面前的现实考题。膜分离技术并非简单的替代手段,而是一场系统性重构,从源头预处理到末端回收,每一个膜段的参数匹配、耦合工艺的协同程度都决定着整体运行的成败。技术选型失误、运行通量衰减、膜污染失控等

问题频繁上演,使得“技术组合”向“技术融合”转变势在必行。唯有将膜分离真正嵌入工艺主链条,构建有机联动的多段处理逻辑,才能真正将高盐废水从末端负担转化为资源转化的增量动力。

### 1 高盐废水的成因与零排放驱动需求

#### 1.1 高盐废水的典型来源与排放特征

高盐废水主要产生于煤化工、电力、煤矿井水、制药、新能源等高耗水行业的生产过程中。在煤化工脱盐水系统、火电

厂冷却塔排污水与石油炼化装置中,此类废水普遍具有盐分浓度高(TDS常超2万mg/L)、组分复杂、难以生化降解等显著特征。部分排放物还伴随氨氮、挥发酚、重金属与有机溶剂,增加了处理技术的适应难度。高硬度、高硫酸根、高COD的叠加效应,使得常规物化与生化工艺在应对过程中出现沉积结垢、负荷冲击与系统崩溃等风险。一旦处理不当,这类废水将导致接纳水体渗透压异常升高,破坏水生态系统稳定,甚至造成地下水盐渍化与土地退化问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 零排放政策驱动与企业技术转型需求

近年来,国家对工业水资源利用效率提出更高要求,在“工业水效提升行动方案”“重点行业用水定额标准”“水污染物特别排放限值”等政策推动下,尤其在长三角、京津冀等区域,部分行业已被强制实施“近零排放”或“全流程零排放”改造任务。此类政策倒逼企业加快淘汰高污染工艺、压缩排污许可空间,并寻求“末端治理向过程控制”的转型路径。在此背景下,膜分离技术因其可实现高效截留、浓缩及回用,逐渐成为工程设计与投资方案中的关键选项。同时,在环保合规、绿色评估、碳足迹计算等多维评价机制作用下,企业对膜工艺系统运行能耗、经济性与稳定性提出更高标准,要求技术方案在满足政策约束的同时,兼顾企业经济承受能力与运行可持续性。

## 2 膜分离技术在高盐废水处理中的功能定位

### 2.1 反渗透、纳滤、超滤的技术特性与适用环节

在高盐废水零排放系统中,不同膜分离技术被赋予明确功能分工。超滤(UF)主要承担预处理角色,其中以中空纤维或平板膜为载体,拦截悬浮颗粒、大分子有机物与胶体物质,有效减缓后续膜段污染风险。纳滤(NF)则位于核心中段,具备对二价离子与小分子有机物的选择性截留功能,可实现对有价值物质的富集分离,如钙镁离子、硫酸根与部分酚类组分的浓缩与回收。反渗透(RO)作为末端高压段,执行最终淡化与浓缩任务,将废水中的大部分盐分推向浓水侧,从而产出可回用的纯净水,保障后续蒸发结晶系统进水负荷降低。

不同膜种的选择不仅限于技术指标,还在于对原水水质、污染物谱系及运行压力的适配能力。例如,含油废水适合配置亲水型改性膜,硬度高的废水应搭配抗结垢性能突出的复合膜材。膜组件的排列顺序、面积设计与运行参数配比,均需在设计阶段进行定量评估与现场验证<sup>[2]</sup>。

### 2.2 单元技术的集成瓶颈与系统运行难点

尽管各类膜技术在实验室环境下表现出良好效果,但在实际应用中仍面临污染易发、能耗偏高与维护频繁等问题。单膜系统容易因膜污染而造成通量骤降,跨膜压差持续升高,运行周期大幅缩短,尤其在高温高盐环境下,结垢与有机污染共存现象更加显著。传统“串联组合”式设计在处理复杂废水时,往往忽视了各单元之间的运行节奏与清洗逻辑匹配,从而导致系统整体稳定性下降。

此外,膜组件更新成本高、清洗剂消耗大、系统能耗波动性强等因素,也制约了膜系统在中小型企业中的广泛复制。此类瓶

颈问题迫切需从“单点优化”转向“系统集成”理念的全面升级,推动膜分离不再作为辅助处理环节,而是嵌入至废水治理的主干路径中,形成多技术间的动态协同机制。

## 3 膜分离技术集成模式与关键参数优化

### 3.1 集成工艺路径设计与耦合策略分析

为突破单一膜段技术在高盐环境中的运行瓶颈,集成式设计成为当前膜分离系统的关键突破口。常见集成路径包括UF-NF-RO三级膜分离组合、NF-ED(电渗析)-RO多段耦合结构,以及将膜蒸馏(MD)或渗透汽化技术引入末端强化浓缩段的多元构型。这类系统构建需基于原水水质组成、进水波动性与出水指标要求,制定模块化、可调节的膜段设计策略,确保各环节负荷均衡、污染控制合理<sup>[3]</sup>。

在工程实践中,耦合策略不仅限于设备堆叠,更在于运行逻辑的联动匹配。UF段需精准控制压力与错流速度,保证大分子杂质截留而不过载;NF段需根据二价离子含量确定通量上限与回收率目标,避免过度浓缩带来膜结垢;RO段作为关键产水模块,需配置浓水循环与自动清洗单元,降低膜面极化与干扰积累。此外,集成系统还应预留旁路调节通道,提升灵活性与故障应对能力。

### 3.2 通量控制、回收率与能耗指标的协同优化

高盐废水零排放系统中的膜段运行效率,受到跨膜压差、膜污染速率与清洗周期多重制约。为了确保系统稳定高效,应建立以“稳定通量输出”为核心的运行优化机制。具体措施包括调节进水pH、控制进水温度与预处理强化,延缓膜污染发生;采用变频调压控制系统,根据进水负荷动态调整运行压力,降低能耗峰值;设置定期物理冲洗与化学清洗计划,保障膜通量恢复率维持在85%以上<sup>[4]</sup>。

在能耗方面,可引入能量回收装置(如压力交换器),将高压浓水中的残余能量反馈至低压进水侧,减少泵浦功耗。综合运行数据显示,采用优化回收率(RO控制在65%左右)与通量分配的双重策略,可使整体膜系统单位处理水能耗控制在2.5~3.5kWh/m<sup>3</sup>之间,兼顾产水量、膜寿命与经济性。

## 4 膜分离与浓缩结晶技术的协同路径研究

### 4.1 膜浓缩-蒸发结晶一体化设计思路

在高盐废水零排放系统中,仅依赖膜技术难以实现最终盐分去除,需引入热法单元完成终端固液分离。膜浓缩-蒸发结晶一体化设计成为工程首选路径,其核心在于将膜段浓缩效率与蒸发段能耗控制进行有效匹配。前端膜系统负责将废水中的水分回收至最大限度,同时将盐分浓缩至接近饱和状态,为蒸发结晶段创造经济运行条件。一般RO浓缩倍率控制在3~5倍之间,使得蒸发量减少50%以上,从而显著降低能源消耗与系统投资负担。

在实际设计中,需明确膜段产水水质与浓缩液浓度界限,并合理设置中间缓冲水箱与在线监测装置。浓缩液经调节后进入多效蒸发器或机械压缩蒸发系统,完成水分二次分离。末端结晶器将残余盐分析出形成固体,经脱水后可作为副产品回收或无

害化处置。该路径在多个大型电厂与煤化工企业中已投入运行,验证了其运行稳定性与回收效率的工程可行性。

#### 4.2 渗透汽化、膜蒸馏等前沿技术的补充协同

在高盐废水处理逐步向多源污染、高复杂度演化过程中,部分特殊废液成分对传统膜与热法单元构成挑战。例如,含有挥发性有机物(如苯系物、酮类)的废液需依托更高选择性的分离手段。渗透汽化技术因其对有机溶剂具有良好分离特性,可嵌入前处理系统,对VOCs进行选择性脱除;膜蒸馏技术则依托温差驱动下的蒸汽透过机制,在低温低压环境中完成水分分离,特别适合利用工业余热资源运行,具有良好的能耗优势<sup>[5]</sup>。

此类前沿膜技术作为辅助段加入集成系统,可有效拓展整体系统的适应范围,提高复杂废水处理能力。在部分回收场景中,膜蒸馏与晶体析出结合可实现稀溶液再浓缩,减少浓水循环负担,减缓结晶系统负荷,同时降低系统堵塞风险,提升运行连续性与安全性。

### 5 工程案例与实际应用效果分析

#### 5.1 某大型电厂膜集成零液体排放系统应用实践

在华北某大型煤电企业,因地区水资源紧张与环保政策高压双重影响,企业启动了高盐废水零排放技术改造工程。项目采用“UF+NF+RO+MVR蒸发结晶”四段式集成处理系统,原水主要来源于循环水浓缩排污与脱硫废水,盐分含量通常在15,000~25,000mg/L(折算电导率约为30,000~50,000 $\mu$ S/cm),其中以氯化钠与硫酸钠为主。该项目旨在将系统回用率提升至85%以上,产水主要回用于锅炉补水与循环冷却系统,显著减少外部取水依赖。

系统运行数据显示,超滤单元将悬浮物(SS)降至10mg/L以内,显著减轻后续膜段负担。纳滤单元运行浓缩倍率维持在2.5~3倍,重点实现了对二价离子的高效截留与富集,特别是硫酸根、钙镁离子以及部分有机污染物的分离,为后续结晶单元产出硫酸钠(芒硝)或其混盐提供了有效条件。反渗透单元作为淡化核心段,其脱盐率超过98%,产水水质稳定满足工业回用标准。由于进水TDS已超2万mg/L,RO段浓水TDS实际运行可达80,000mg/L以上,对应浓水电导率稳定在80,000~100,000 $\mu$ S/cm左右,为蒸发结晶单元提供了高度浓缩进水,减少了热法负荷与能耗。

系统膜段已连续稳定运行超4,000小时,依托智能监控与优化清洗管理,化学清洗频率控制在每两月一次,膜通量恢复率保持良好。此外,通过配置压力能回收系统与分段调压机制,整体膜系统能耗控制在3.8kWh/m<sup>3</sup>以下,较传统工艺节能约22%。

蒸发结晶单元根据前段分盐情况,分别产出氯化钠粗晶与硫酸钠副产物,其中氯化钠经固液分离与干化处理后实现资源化销售,硫酸钠部分用于厂区脱硫工段回用,形成内部闭环。该集成模式不仅强化了污染物末端控制,还实现了多路径资源回收,为企业高盐废水的合规减排与绿色转型提供了示范性样板。

#### 5.2 运行维护策略与经济性评估

为了保障膜分离系统的长期稳定运行,企业建立了智能化控制平台,实时监控膜段的跨膜压差、通量衰减率、清洗周期等关键指标。通过在线调节膜进水压力、流速与pH值,平台能动态调整运行参数,以应对水质波动,从而保障系统的高效运行。与此同时,企业还引入了高效的阻垢剂和清洗剂配方,有效延缓膜污染速率,降低了化学药剂的使用量。

在经济性方面,虽然该项目的初期投资较传统工艺方案高,但由于膜系统的稳定性和结晶产品的资源化利用,该项目在三年内成功收回了初期投资成本,通过综合评估,单位吨水的处理费用被控制在8.6元左右,远低于区域水资源替代成本。这不仅有效降低了运营成本,还提升了企业在环保合规方面的优势,避免了可能产生的高额环保处罚与运营风险。

该膜分离技术集成系统的成功应用,已在多个大型电厂和化工企业中推广应用,证明了其良好的经济适应性与环保示范效应。随着技术不断进步,膜分离系统在高盐废水处理中的应用前景愈加广阔,成为推动绿色低碳制造与水资源循环利用的重要力量。

### 6 结束语

高盐废水的治理不应只是末端处理技术的堆叠,更是一场融合系统优化、资源协同与工程智慧的全流程革新。膜分离技术在零排放目标驱动下,逐步从辅助角色跃升为工艺主轴,其集成能力与协同效率决定了系统能否高质运行、低碳落地。只有真正打通从污染物识别到资源化利用的逻辑链条,在多膜段组合、参数动态调控、与热法单元耦合等环节形成稳态闭环,才能从根本上破解“高污染、高能耗、高成本”的现实困局。未来应进一步拓展前沿膜工艺边界,深化工程场景中的数字化联动与运行智能化,推动膜分离从技术集成走向价值集成,让水处理不再是企业的负担,而是面向绿色低碳转型的关键引擎。

#### 【参考文献】

- [1]连坤宙.多效蒸发与结晶技术在废水零排放中的应用[J].资源节约与环保,2025,(10):36-39.
- [2]靳辉,李栋栋,邱梦雅.膜技术在高盐废水零排放处理中的膜污染控制策略[J].当代化工研究,2025,(17):94-96.
- [3]霍宗浩.煤化工高盐废水纳滤分盐零排放项目设计及运行分析[J].煤化工,2025,53(04):59-63.
- [4]刘丛,张欢欢,黄祺祺.化工行业高含盐废水资源化零排放技术研究[J].中国资源综合利用,2025,43(08):265-267.
- [5]张泽田.高盐废水零排放工艺中反渗透膜污染控制及清洗策略[J].清洗世界,2025,41(04):130-132.

#### 作者简介:

方小龙(1988--),男,汉族,河南信阳人,大学本科,工程师,研究方向:工业水处理零排放。