

# 化工含盐废水处理现状及资源化利用研究

杨金才

宁夏一帆生物科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5063

**[摘要]** 化工含盐废水因成分复杂、盐度高、毒性大,处理难度显著,已成为制约化工行业可持续发展的关键环境问题。本文综述了当前化工含盐废水的处理技术现状,包括物理化学法、生物处理法及新型联用技术的应用进展与局限性,重点探讨了膜分离、蒸发结晶、高级氧化等主流技术的工艺特点与适用场景。在此基础上,分析了含盐废水中盐资源、水资源及有价值组分资源化利用的途径与潜力,指出了现有技术在能效、成本及二次污染控制方面存在的挑战,并展望了未来通过技术耦合、智能化调控及功能材料研发推动化工含盐废水高效处理与资源化的发展方向。

**[关键词]** 化工含盐废水; 处理技术; 资源化利用; 膜分离; 蒸发结晶; 双极膜电渗析制酸碱

中图分类号: X703 文献标识码: A

## Research on the Current Status of Treatment and Resource Utilization of Saline Wastewater in the Chemical Industry

Jincai Yang

Ningxia Yifan Biotechnology Co., Ltd.

**[Abstract]** Saline wastewater in the chemical industry is characterized by complex composition, high salinity, and high toxicity, making its treatment particularly challenging. It has become a key environmental issue restricting the sustainable development of the chemical industry. This paper reviews the current status of treatment technologies for chemical saline wastewater, including physical-chemical methods, biological treatment methods, and emerging combined technologies, focusing on the process characteristics and application scenarios of mainstream technologies such as membrane separation, evaporation crystallization, and advanced oxidation processes. On this basis, it analyzes the pathways and potential for resource utilization of salts, water resources, and valuable components in saline wastewater. The study highlights the challenges of existing technologies in terms of energy efficiency, cost, and secondary pollution control, and further prospects are provided for future development directions, including technology coupling, intelligent regulation, and functional material innovation to promote efficient treatment and resource recovery of chemical saline wastewater.

**[Key words]** Chemical Saline Wastewater; Treatment Technology; Resource Utilization; Membrane Separation; Evaporation Crystallization; Bipolar Membrane Electrodialysis for Acid-Base Production.

### 引言

化工含盐废水是化工生产过程中产生的一类特殊废水,其特征为含盐量高(通常总溶解固体TDS>1%)、有机物浓度波动大、含有毒有害污染物,若直接排放将对水体、土壤生态系统造成严重威胁。随着化工产业的快速发展,废水排放量持续增加,传统处理技术面临效率低、成本高、资源浪费等问题。如何实现此类废水的高效净化与资源回收,已成为环境工程与化工领域的研究热点。

### 1 化工含盐废水的特性与处理难点

化工含盐废水因其独特性质,给处理带来了极大挑战。其复杂性首先体现在来源多样、成分特殊上。不同化工行业产生的废水,在盐的种类、浓度以及污染物组成方面差异显著。常见的溶解盐无机离子如氯化钠、硫酸钠、氯化钙等,同时还有酚类、芳烃、杂环化合物等难降解有机物,部分废水还含有重金属离子和氨氮等营养盐。

废水中部分特征污染物具有生物累积性和毒性,在处理过程中,不仅要考虑如何高效去除这些污染物,还要时刻警惕二次污染风险,避免在去除一种污染物的同时,又产生新的环境问题。

化工含盐废水处理的这些难点,归根结底是在高盐条件下,如何实现污染物的高效去除以及资源的有效回收。这要求我们在处理技术上不断创新,既要探索能适应高盐环境的新型生物处理技术,也要优化物理化学和高级氧化等处理技术,同时还要注重多种技术的耦合应用,以实现废水的高效处理和资源的最大化回收利用,推动化工行业向绿色可持续发展<sup>[1]</sup>。

## 2 化工含盐废水处理技术现状

### 2.1 物理化学处理技术

物理化学法是处理化工含盐废水的常用手段,主要通过物质的相转移、化学反应或吸附作用实现污染物分离。混凝沉淀技术通过投加混凝剂(如铁盐、铝盐)形成絮体,去除废水中的胶体颗粒与部分溶解性有机物,但对高盐废水中的可溶性盐类去除效果有限,通常作为预处理单元。吸附法利用活性炭、树脂、分子筛等材料的多孔结构吸附污染物,具有操作简便、选择性高的特点,适用于低浓度有机污染物的深度处理,但吸附剂的再生成本与吸附容量限制了其大规模应用。膜分离技术(如微滤、超滤、纳滤、反渗透)凭借其无相变、分离效率高的优势,在含盐废水处理中得到广泛应用。其中,反渗透技术可有效截留水中的盐离子与有机物,产出淡水,但高盐浓度会导致膜污染与渗透压升高,增加运行能耗;纳滤则能选择性分离二价离子与部分有机物,可作为反渗透的预处理或分盐回收的关键单元。

### 2.2 生物处理技术

生物处理技术通过微生物的代谢作用降解有机物,具有成本低、环境友好的特点,但高盐环境对微生物的抑制作用是其应用的主要瓶颈。为克服这一问题,研究者开发了耐盐微生物驯化与基因工程菌构建技术,通过逐步提高盐浓度筛选出适应高盐环境的功能菌群,或通过基因编辑增强微生物的耐盐性与降解能力。厌氧生物处理(如UASB、IC反应器)在高盐有机废水处理中展现出潜力,其产甲烷过程可实现能源回收,但需严格控制盐浓度波动以维持微生物活性。好氧生物处理中,序批式活性污泥法(SBR)与膜生物反应器(MBR)通过优化运行参数(如污泥龄、溶解氧)可提高系统耐盐性,MBR的膜截留作用还能有效保留高浓度活性污泥,增强污染物降解效率。然而,生物处理技术对盐度的耐受范围仍有限(通常TDS<5%),且对有毒污染物敏感,需与其他技术联用以拓展应用场景<sup>[2]</sup>。

### 2.3 高级氧化技术

高级氧化技术(AOPs)通过产生具有强氧化能力的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )等活性物种,实现难降解有机物的氧化分解,适用于化工含盐废水中有毒污染物的去除。常见的AOPs包括芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化及电化学氧化等。芬顿氧化法利用 $\text{Fe}^{2+}$ 与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 反应生成 $\cdot\text{OH}$ ,反应条件温和,但需调节pH至酸性,且产生铁泥二次污染;臭氧氧化具有氧化效率高、无二次污染的优点,但臭氧溶解度低、能耗较高,且对某些卤代有机物的降解效果有限。光催化氧化利用半导体材料(如 $\text{TiO}_2$ )在光照下产生电子-空穴对,进而生成活性自由基,可在常温常压下进行,但催化剂的回收与光利用率是其工业化应用的挑战。电化学氧化通过电

极反应直接或间接氧化污染物,具有可控性强、适应性广的特点,尤其适用于高盐废水,因为废水中的氯离子可在阳极生成具有强氧化性的 $\text{ClO}^-$ ,强化污染物去除效果,但电极材料的稳定性与能耗问题仍需解决。

### 2.4 蒸发结晶技术

蒸发结晶技术是实现高盐废水减量化与盐分离的有效手段,通过加热使水分蒸发,达到过饱和后使盐结晶析出。根据加热方式的不同,可分为多效蒸发、机械蒸汽再压缩蒸发(MVR)、热力蒸汽再压缩蒸发(TVR)等。多效蒸发利用前一效产生的二次蒸汽作为后一效的加热源,提高能源利用率;MVR则通过压缩机将二次蒸汽压缩升温后循环利用,显著降低能耗,已成为高盐废水处理的主流技术之一。蒸发结晶技术可直接得到固体盐,实现废水的零排放,但设备投资大、运行能耗高,且结晶盐的纯度受废水中有机物与杂质影响较大,若盐中含有毒成分,需进一步处理才能实现资源化。

## 3 化工含盐废水资源化利用途径

### 3.1 水资源回收利用

水资源回收是化工含盐废水资源化的重要目标,通过处理后回用于生产工艺或其他用水场景,可减少新鲜水消耗,缓解水资源压力。膜分离技术是水资源回收的核心手段,反渗透(RO)可将含盐废水处理至符合工业循环水或锅炉补给水标准,其产水率通常在70%-80%,浓水则需进一步处理。针对RO浓水,可采用正渗透(FO)、膜蒸馏(MD)等技术进行深度浓缩,提高水回收率。膜蒸馏利用疏水性膜两侧的蒸汽压差实现水的分离,对盐浓度不敏感,适合高盐浓水的处理,但其膜污染与热量损失问题仍需优化。此外,蒸发结晶过程中产生的蒸馏水也可作为回用水源,但其能耗较高,通常与其他技术联用以降低成本。水资源回收的关键在于处理水的水质稳定性与回用安全性,需根据回用场景制定严格的水质标准,如控制COD、硬度、重金属等指标,避免对生产设备或产品质量造成不利影响<sup>[3]</sup>。

### 3.2 盐资源回收利用

化工含盐废水中的盐类(如 $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{CaCl}_2$ 等)具有较高的回收价值,通过分离提纯可作为工业原料或副产品。盐资源回收的核心在于实现盐的纯度提升与杂质去除,常用的技术包括蒸发结晶、冷冻结晶、膜分离、双极膜电渗析制酸碱等。蒸发结晶根据盐的溶解度差异,通过控制蒸发温度与速率实现不同盐的分步结晶,例如在煤化工废水中,可先结晶析出硫酸钠,再处理氯化钠母液。冷冻结晶则利用盐在低温下溶解度降低的特性实现分离,适用于硫酸钠与氯化钠的分离,但能耗较高。膜分离技术中的纳滤(NF)可基于离子半径与电荷差异选择性截留二价离子(如 $\text{SO}_4^{2-}$ ),实现一价与二价盐的分离,为后续盐的提纯创造条件。双极膜电渗析制酸碱(BMED)是用双极膜在电场下水解离为 $\text{H}^+/\text{OH}^-$ ,结合阴阳离子膜,直接将盐溶液转化为酸+碱的绿色技术。回收盐的品质直接决定其利用途径,若纯度达到工业级标准,可用于氯碱工业、纯碱生产等;若纯度较低,可作为融雪剂、建筑材料添加剂等。然而,废水中的有机物与重金属杂

质易混入结晶盐中,需通过预处理(如高级氧化、吸附)去除,以提高盐的资源化价值。

### 3.3 有机污染物资源化

化工含盐废水中的有机物若具有较高的浓度与回收价值,可通过提取、转化等方式实现资源化。对于高浓度有机废水(如含酚废水、含醇废水),可采用萃取、蒸馏等方法分离回收有用成分,直接作为化工原料回用。例如,通过溶剂萃取回收废水中的酚类化合物,经精制后可返回生产工艺;对含甲醇、乙醇的废水,采用蒸馏法回收醇类物质,降低原料消耗。对于低浓度有机物,可通过厌氧生物处理将其转化为甲烷等能源气体,实现能量回收。厌氧消化过程中,微生物将有机物分解为挥发性脂肪酸,进一步转化为甲烷与二氧化碳,产生的沼气可作为燃料或发电。此外,某些难降解有机物可通过化学转化生成高附加值化学品,如通过催化氧化将芳香族化合物转化为有机酸或酯类,但该技术仍处于实验室研究阶段,面临催化剂选择性与转化率的挑战<sup>[4]</sup>。

### 3.4 盐分与水协同资源化技术

单一资源化技术往往难以实现废水的全组分回收,盐分与水的协同资源化需通过多技术联用构建集成工艺。典型的集成工艺包括“预处理-膜分离-蒸发结晶”组合,预处理(如混凝、高级氧化)去除悬浮物与难降解有机物,减轻后续膜污染;膜分离(如NF-RO联用)实现水与部分盐分的分离,产水回用,浓水进入蒸发结晶系统回收固体盐。例如,某化工园区采用“UF+RO+MVR”工艺处理含盐废水,RO产水回用率达75%,MVR结晶盐纯度达98%以上,实现了水资源与盐资源的协同回收。另一类集成工艺为“生物处理-膜分离-蒸发”联用,适用于可生化性较好的高盐有机废水,生物处理降解有机物,膜分离回收水,蒸发处理膜浓水回收盐。协同资源化的关键在于工艺参数的匹配与优化,例如膜分离的浓水浓度需与蒸发结晶的进料要求相适应,避免盐分在系统内积累,同时通过能量回收(如MVR的蒸汽压缩、膜过程的压力能回收)降低整体能耗。

### 3.5 双极膜电渗析制酸碱技术(BMED)

阴/阳膜+中间催化层在电场下水解离为 $H^+/OH^-$ ,结合阴阳离子膜,直接将废盐溶液转化为酸+碱。一步法,盐直接制酸碱,具有无副产物、低能耗、绿色的特点,电压约1-3V/对,无电极反应,不引入新杂质,无氯气/氢气排放;产物浓度,酸/碱0.5-2mol/L(工程常用);常见应用有高盐废盐资源化(硫酸钠→硫酸+氢氧化钠 $NaSO_4 + H_2O \rightarrow HSO_4 + NaOH$ ;氯化钠→盐酸+氢氧化钠 $NaCl + H_2O \rightarrow HCl + NaOH$ 等);化工/锂电:硫酸锂→硫酸+氢氧化锂;发酵:有机酸盐→有机酸+碱(如柠檬酸钠→柠檬酸)。

### 3.6 资源化技术的经济性与环境影响

化工含盐废水资源化利用的可行性取决于技术经济性与环境效益的综合评估。经济性分析需考虑设备投资、运行成本(能耗、药剂、人工)、资源回收收益等因素。膜分离技术的初期投资较高,但运行成本相对稳定;蒸发结晶技术能耗占比大,其经济性受能源价格影响显著;生物处理技术成本较低,但受水质波动影响较大;双极膜电渗析制酸碱初期投资较大,市场应用不成熟,针对杂盐的残液处置成本较高。资源化收益方面,回收水的价值可按工业用水价格计算,回收盐的收益取决于其纯度与市场需求,高纯度盐(如工业级氯化钠)具有较高的经济价值,而低纯度盐可能需支付处置费用,双极膜电渗析制酸碱后期收益良好。环境影响评估需考虑工艺过程中的能耗、温室气体排放、二次污染(如膜清洗废水、蒸发冷凝水)等,例如MVR相较于传统多效蒸发可降低30%-50%的能耗,减少碳排放。此外,资源化过程中产生的固废(如废膜、废吸附剂)需妥善处理,避免造成二次环境问题。综合而言,资源化技术的推广需结合具体废水特性,通过技术优化与集成,实现经济可行性与环境效益的平衡<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

化工含盐废水处理与资源化利用是实现化工行业绿色发展的重要途径,当前物理化学、生物、高级氧化及蒸发结晶等技术的应用为废水净化提供了多样化选择,但在高盐高有机物协同处理、资源回收效率及成本控制方面仍存在挑战。未来研究应聚焦于新型功能材料(如耐污染膜、高效催化剂)的研发、多技术耦合工艺的优化、智能化过程控制等方向,以提升处理效率、降低能耗,并推动回收盐、水及有机物的高值化利用。通过技术创新与工程实践的结合,有望实现化工含盐废水从“末端治理”向“资源循环”的模式转变,为行业可持续发展提供有力支撑。

## [参考文献]

- [1]代春龙,张华东,高庆刚.高盐化工废水零排放和废盐资源化利用技术研究[J].石化技术,2024,31(7):229-230+261.
- [2]张钟,赵迪,许高洁.煤化工含盐废液中杂质对硫酸钠溶解行为影响研究[J].环境工程,2024,42(9):156-166.
- [3]傅忠君,李韶璞,黄昊飞.染料、颜料含盐废水处理与资源化利用工艺技术研究[J].上海染料,2025,53(1):1-6.
- [4]王莉莉.石油化工高盐废水深度处理技术及应用[J].节能与环保,2023(6):37-40.
- [5]曹晶,任斌,齐志丽.煤化工废水处理产品盐氯化钠纯度影响因素研究[J].山西化工,2025,45(7):279-282.