

膜技术在高盐工业废水处理中的应用研究

张琪 吴春蕾 王妙婷

身份证号码: 1306291989****0544

摘要: 高盐工业废水来源广泛、成分复杂,对自然资源和生态环境具有较大危害性,其减量和零排放处理势在必行。膜处理技术目前已被广泛应用于水处理工艺。论文介绍了超滤、纳滤、正渗透、反渗透、电渗析及膜蒸馏等膜处理技术的特点及应用情况。

关键词: 膜技术; 高盐; 工业废水; 零排放

Application Study of Membrane Technology in Wastewater Treatment of High Salt Industry

Qi Zhang Chunlei Wu Miaoting Wang

ID No.: 1306291989****0544

Abstract: High-salt industrial wastewater has wide sources and complex composition, which has great harm to natural resources and ecological environment, and its reduction and zero discharge treatment are imperative. Membrane treatment technology has been widely used in the water treatment process. This paper introduces the characteristics and applications of membrane treatment techniques such as ultrafiltration, nanofiltration, forward osmosis, reverse osmosis, electrodialysis and membrane distillation.

Keywords: membrane technology; high salt; industrial waste water; zero discharge

0 前言

随着工业化进程的不断加速,高盐工业废水的排放量急剧增加,已成为当今环境保护领域亟待解决的关键问题。高盐工业废水主要来源于石油化工、制药、煤化工、造纸及食品加工等行业,其特点是含盐量高、有机污染物复杂、毒性大,常规处理技术难以满足日益严格的环保要求。近年来,膜技术凭借其高效分离、能耗低、操作简便等优势,在高盐工业废水处理领域展现出巨大潜力,并逐渐成为实现废水减量化和零排放的核心技术之一。论文将系统探讨超滤、纳滤、正渗透、反渗透、电渗析及膜蒸馏等膜处理技术在高盐工业废水处理中的应用现状、技术特点及发展趋势,为解决高盐工业废水处理难题提供理论参考和技术支持。

1 高盐工业废水的来源及危害

1.1 高盐废水的来源与特点

高盐工业废水主要来源于石油化工、煤化工、制药、造纸、纺织印染、冶金、电力和食品加工等行业的生产过程。石油化工行业产生的废水含有高浓度的无机盐、油类和有机物;煤化工过程中产生的气化废水和脱硫废水含盐量高达3%~10%;制药工业产生的发酵废水和合成废水含有高浓度盐分及难降解有机物;造纸行业中碱回收系统产生的绿液和白液含有大量的钠盐;纺织印染行业的染色和漂洗废水含有高浓度的硫酸钠和氯化钠等。

高盐工业废水具有显著的特点,使其处理难度远超普通工业废水。第一,其含盐浓度极高,通常盐度在

10000mg/L 以上,某些特殊行业如氯碱工业、石油开采和煤化工领域产生的废水盐度甚至高达 100000mg/L,远超海水浓度。第二,这类废水成分极为复杂,除大量无机盐外,还含有各种难降解有机物、表面活性剂、酚类物质、多环芳烃以及铬、铅、汞等重金属离子和悬浮固体颗粒物。第三,高盐废水水质波动性大,随着生产工艺调整、原料变化和工况转换而呈现明显的时空变化,增加了稳定处理的难度。第四,高盐环境严重抑制微生物活性,导致废水难以生物降解,常规活性污泥法等生化处理技术效率显著降低,甚至完全失效。第五,高盐废水具有显著的腐蚀性,长期接触会加速金属设备的锈蚀和非金属材料的老化,对处理设施的材质选择和防腐措施提出了严格要求,增加了工程建设和维护成本。

1.2 高盐工业废水的危害

高盐工业废水若未经有效处理直接排放,将对环境和生态系统造成严重危害:

水体污染: 高盐废水排入淡水水体后,会导致水体盐度急剧升高,破坏水生态平衡,抑制水生植物的生长,降低水体自净能力。

土壤污染: 长期灌溉使用含盐废水会导致土壤盐碱化,影响土壤物理结构,降低土壤肥力,严重时可使农田荒漠化。

地下水污染: 高盐废水渗入地下,污染地下水资源,影响饮用水安全。

生物毒性: 废水中的高浓度盐分会改变淡水生物体内的渗透压,导致脱水甚至死亡;同时废水中的有机污染物和重金属等可能对生物产生毒性效应。

处理设施损害：高盐废水对常规污水处理设施具有抑制作用，降低生物处理效率，同时其腐蚀性会加速处理设备的老化和损坏。

资源浪费：高盐废水中含有大量可回收利用的无机盐资源，直接排放造成资源浪费。

经济损失：由于高盐废水处理难度大，企业需投入大量资金进行处理，增加生产成本；若违规排放则面临高额罚款。

2 膜处理技术

2.1 超滤（UF）

超滤是利用压力差为驱动力，通过孔径为 0.001~0.1μm

的半透膜将水中大分子物质和小分子物质分离的膜分离技术。在高盐工业废水处理中，超滤主要用作预处理工艺，具有以下特点：超滤基于筛分作用，能有效截留废水中的悬浮物、胶体、细菌、病毒和大分子有机物，但不能截留盐分和小分子有机物；操作压力通常在 0.1~0.5MPa 范围内，能耗相对较低；膜材料常用聚砜（PS）、聚醚砜（PES）、聚偏氟乙烯（PVDF）等高分子材料制备，具有良好的机械强度和化学稳定性。在高盐废水处理中，超滤常作为反渗透和纳滤的预处理工艺，去除废水中可能导致后续膜污染的物质，延长后续膜系统的使用寿命，但其局限性在于不能直接去除废水中的溶解盐分，仅作为高盐废水处理的前端工艺。膜处理技术对比如表 1 所示。

表 1 膜处理技术对比

类型	运行压力	预处理要求	抗结垢性能	操作性	技术成熟性
超滤(UF)	较低	简单	易结垢	简单	高
纳滤(NF)	较高	简单	易结垢	简单	高
反渗透(RO)	高	简单	易结垢	较复杂	一般
正渗透(FO)	低	复杂	不易结垢	复杂	较低
电渗析(ED)	低	简单	易结垢	简单	高
膜蒸馏(MD)	低	简单	不易结垢	较复杂	较低

2.2 纳滤（NF）

纳滤技术是介于超滤和反渗透之间的压力驱动膜分离技术，其膜孔径约为 0.5~2nm，在高盐废水处理中具有以下特点：纳滤兼具筛分作用和电荷效应，能有效截留二价和多价离子（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} ）、有机物和色素，但对一价离子（如 Na^+ 、 Cl^- ）的截留率较低；操作压力通常在 0.5~1.5MPa 范围内，低于反渗透但高于超滤；膜材料主要有聚酰胺复合膜、聚砜或聚醚砜表面接枝改性膜等。纳滤的应用优势包括可实现对高价离子和一价离子的选择性分离，在软化工艺中可保留水中部分有益矿物质，操作压力低于反渗透，能耗较低，通量高于反渗透。纳滤广泛应用于制药工业废水中抗生素的回收、染料工业废水中色素和盐的分离、纺织工业废水中二价硫酸盐的去除等。

2.3 反渗透（RO）

反渗透是利用半透膜的选择透过性，在外加压力作用下，实现溶剂（水）与溶质（盐）分离的膜过程。反渗透膜的平均孔径小于 1nm，能够截留几乎所有离子和小分子有机物。在高盐工业废水处理中，反渗透技术是实现脱盐的核心工艺，其特点包括：反渗透膜对各种离子均有很高的截留率（通常 > 98%），能有效去除废水中的溶解性盐分；操作压力通常在 2~8MPa 范围内，取决于废水的含盐量，废水含盐量越高，所需操作压力越大；目前应用最广泛的反渗透膜材料为芳香族聚酰胺复合膜，具有高脱盐率、高水通量和较好的化学稳定性。反渗透系统在高盐废水处理中面临的主

要挑战是膜污染和结垢问题，特别是在处理含有高浓度盐分的废水时，溶解盐在膜表面析出形成结垢，降低系统性能；此外，高操作压力也导致能耗较高。目前反渗透技术已成功应用于石油化工、煤化工、制药等行业的高盐废水处理，通常作为多级膜系统的最终脱盐单元。

2.4 正渗透（FO）

正渗透是利用浓差作为驱动力，通过半透膜将水从低浓度溶液（进料液）自发渗透到高浓度溶液（汲取液）的膜分离过程。与反渗透相比，正渗透技术具有以下特点：正渗透不需要外加压力，仅依靠溶液间的渗透压差为驱动力，因此能耗低，膜污染倾向小；正渗透过程需要高效的汲取液，理想的汲取液应具有高渗透压、低反向渗透、易回收等特性，常用的汲取液包括 NaCl、 MgCl_2 、葡萄糖等溶液；正渗透膜材料需要同时具备高水通量和低盐透过性，目前常用的膜材料有纤维素三醋酸酯膜、聚酰胺复合膜等。正渗透技术在高盐废水处理中的主要应用包括废水减量化预浓缩和直接脱盐处理。正渗透处理高盐废水的主要挑战是汲取液的选择和回收问题以及内部浓差极化导致的水通量下降。

2.5 电渗析（ED）

电渗析是在直流电场作用下，利用离子交换膜选择性透过离子的原理，实现溶液中离子与水的分离。电渗析系统由阳离子交换膜、阴离子交换膜、电极和间隔物组成，形成多室结构。在电场驱动下，阳离子向阴极迁移，穿过阳离子交换膜；阴离子向阳极迁移，穿过阴离子交换膜，从而实现

脱盐和浓缩。电渗析技术在高盐工业废水处理中具有以下特点：分离机理基于离子在电场中的迁移，不需要高压，能耗主要消耗在电能上；处理效率受废水导电性影响，对高盐废水处理效率高，但对低盐废水则效率下降；操作条件温和，无相变过程，能耗随废水盐浓度增加而增加；系统可连续运行，自动化程度高。电渗析技术在高盐废水处理中主要应用于浓缩废水中的盐分，实现废水减量化和盐资源回收；常与反渗透、蒸发结晶等技术组合使用，构建高盐废水零排放系统。电渗析在食品工业废水、煤化工废水、海水淡化浓水等处理中已有成功应用。

3 结语

综上所述，膜技术在高盐工业废水处理领域展现出独特优势和广阔前景。超滤、纳滤、反渗透、正渗透和电渗析等不同膜处理技术各具特点，可针对不同来源和特性的高盐废水量身定制处理方案。随着膜材料科学和工艺技术的不断创新，膜技术的分离效率、抗污染性能和经济性将进一步提升。未来，膜技术与其他处理方法的深度融合将成为发展趋

势，多技术、多工艺的协同处理体系将为高盐工业废水减量化和零排放提供更加高效、稳定和经济的解决方案。

参考文献：

[1] 白玥萌,李环宇.膜技术处理高盐废水的研究进展[J].2024.
[2] 邱立萍,张晓凤.高盐废水处理技术研究及应用进展[J].无机盐工业,2023,55(2):1-9.
[3] 胡明,刘永丰,颜鲜林,等.膜浓缩技术在高盐废水减量处理中的应用研究[J].中国资源综合利用,2024,42(4):202-204.
[4] 袁增立.膜技术在工业废水处理中的应用探讨[J].科学与财富,2017(24):147.
[5] 徐峰,徐应星,何灿.新型压力驱动高倍膜浓缩技术在废水零排放处理中的应用研究[J].现代化工,2024,44(8):221-223.
[6] 刘阳.膜处理技术在高盐废水零排放中的应用探讨[J].生态环境与保护,2021,3(11):94-95.

作者简介: 张琪 (1989-), 女, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事环保废水处理方面的研究。