

工业水处理中超滤膜技术的应用

王 鹏

国家能源集团宁夏煤业有限公司煤制油分公司 宁夏 银川 750000

摘要：超滤膜技术凭借其高效分离特性，在工业水处理领域发挥关键作用。于化工、电力、食品饮料及冶金等行业，该技术有效实现废水处理与水资源回用，保障生产用水质量。然而，膜污染、高运行成本及严苛进水要求等问题制约其进一步发展。通过优化膜材料结构、降低运行成本及完善预处理工艺等策略，可提升超滤膜技术性能与经济性，推动工业水处理绿色化、高效化发展，助力实现水资源可持续利用目标。

关键词：工业水处理；超滤膜技术；应用

引言

随着工业快速发展，水资源短缺与水污染问题日益严峻，高效水处理技术成为工业可持续发展关键。超滤膜技术以其选择性筛分原理，能有效截留大分子物质与胶体颗粒，在工业废水处理及循环水利用中优势显著。本文聚焦工业水处理中超滤膜技术，深入探讨其在不同行业的具体应用，剖析应用过程中面临的膜污染、成本高及水质要求严等挑战，并针对性提出改进策略，旨在为该技术的优化与推广提供理论参考。

1 超滤膜技术概述

超滤膜技术作为一种以压力差为驱动力的膜分离过程，依托其不对称结构的多孔膜材料实现物质分离。超滤膜的截留分子量通常在1,000至1,000,000Da之间，膜孔径范围为0.001至0.1 μm ，这种精密的孔径设计使其能够有效分离溶液中的大分子物质、胶体、蛋白质、微生物和悬浮颗粒，而允许水和小分子溶质通过，从而实现对混合体系的净化、分离与浓缩。从材料角度，超滤膜主要分为有机膜和无机膜两大类。有机膜以聚砜（PS）、聚偏氟乙烯（PVDF）、聚丙烯腈（PAN）等高分子聚合物为原料，凭借良好的柔韧性、成膜性和经济性，在工业与民用领域广泛应用；无机膜则以陶瓷、金属氧化物等材料制备，具备耐高温、化学稳定性强、机械强度高的特性，适用于极端工况下的苛刻分离需求。膜组件结构类型多样，包括平板式、管式、中空纤维式和卷式，其中中空纤维超滤膜因单位体积膜面积大、装填密度高、操作压力低等优势，成为目前市场占有率最高的构型。超滤膜技术的分离过程遵循筛分原理，待处理流体在压力驱动下平行于膜表面流动，小分子物质透过膜孔形成透过液，大分子及颗粒物质被截留并随浓缩液排出，这种错流过滤模式有效减少了膜表面的浓差极化现象，提升了膜通量与使用寿命。在实际应用中，超滤膜技术已

深度融入水处理、食品饮料、生物制药、化工等多个领域，例如在饮用水净化中去除天然有机物和病原微生物，在乳制品生产中分离乳蛋白与乳糖，在生物发酵液处理中实现目标产物的浓缩纯化。随着材料科学与膜制备工艺的不断革新，高通量、抗污染、复合功能化的超滤膜材料持续涌现，推动该技术向更高效、节能、智能化的方向发展，为解决复杂体系分离难题提供了关键技术支撑。

2 工业水处理中超滤膜技术的具体应用

2.1 化工废水处理

(1) 化工生产过程中产生的废水成分复杂，常含有高分子有机物、胶体颗粒及重金属离子等污染物，超滤膜技术通过截留分子量为1000-100000Da的物质，可有效分离废水中的大分子有机物与小分子无机物。在实际处理中，废水首先经预处理去除悬浮物，随后进入超滤膜系统，在压力驱动下，水分子及小分子物质透过膜孔形成产水，大分子污染物则被截留浓缩。(2) 以石油化工废水处理为例，超滤膜能将废水中的乳化油、聚合物等大分子污染物高效分离，使油类物质的截留率达到95%以上，显著降低后续深度处理的负荷。超滤膜对胶体物质的有效去除，能防止后续反渗透膜组件的污染，保障整个处理系统的稳定运行。(3) 相较于传统的沉淀、气浮等分离技术，超滤膜技术具有分离效率高、占地面积小、自动化程度高的优势。其模块化设计便于根据废水处理规模灵活调整系统配置，且通过定期化学清洗可恢复膜通量，延长膜组件使用寿命，实现化工废水的高效预处理与资源化利用^[1]。

2.2 电力行业锅炉补给水处理

(1) 电力行业锅炉对补给水水质要求极高，水中的悬浮物、胶体、微生物等杂质会导致锅炉结垢、腐蚀及效率降低。超滤膜技术利用筛分原理，可有效截留水中

粒径大于0.01-0.1 μm 的颗粒物质,作为反渗透预处理工艺,为后续脱盐处理提供优质进水。在处理流程中,原水经粗过滤后进入超滤膜装置,通过错流过滤方式,将水中的浊度降至0.1NTU以下。(2)超滤膜系统在电力锅炉补给水处理中能有效去除水中的细菌、藻类及大分子有机物,避免其在反渗透膜表面滋生形成生物膜,降低反渗透膜的脱盐率和产水量。对铁、铝等金属氧化物胶体的截留,可防止其在反渗透膜表面沉积,提高反渗透系统的运行稳定性和使用寿命。(3)超滤膜技术的应用实现了电力行业锅炉补给水处理的高效化与自动化,其连续稳定的产水能力可满足锅炉对水质和水量的严格要求。与传统的石英砂过滤、活性炭吸附工艺相比,超滤膜系统具有出水水质稳定、运行成本低、抗冲击负荷能力强等特点,为电力生产的安全稳定运行提供可靠保障。

2.3 食品饮料行业水处理

(1)食品饮料行业对生产用水的微生物指标和有机物含量要求严格,超滤膜技术凭借其高精度的过滤性能,能有效去除水中的细菌、病毒、胶体及大分子有机物,保障生产用水的安全性。在实际应用中,原水经初步过滤后进入超滤膜组件,通过膜表面的微孔筛分作用,将水中的微生物截留率提升至99.9%以上,降低后续消毒工艺的压力。(2)超滤膜在食品饮料行业水处理中不仅能保障水质安全,还可用于生产过程中的物料分离与浓缩。例如,在果汁生产中,超滤膜可分离果汁中的果胶、纤维素等大分子物质,提高果汁的澄清度和稳定性,同时保留其中的风味物质和营养成分。在乳制品加工中,超滤膜可实现乳蛋白的浓缩,减少后续蒸发浓缩的能耗。(3)超滤膜技术具有操作条件温和、无相变、能耗低的特点,符合食品饮料行业对产品品质和生产能耗的要求。其可重复使用的特性,通过科学的清洗和维护,能有效降低生产成本。超滤膜系统的密闭性设计可防止外界污染,确保生产用水和物料处理过程的卫生安全^[2]。

2.4 冶金行业废水处理与回用

(1)冶金行业生产过程中产生的废水含有大量悬浮物、重金属离子及油类污染物,超滤膜技术可作为关键处理工艺实现污染物的有效分离。在处理流程中,废水首先经过调节池均化水质水量,然后进入超滤膜系统,通过压力驱动,将废水中的悬浮物、胶体及大分子有机物截留,产水水质得到显著改善,浊度可降至1NTU以下。(2)超滤膜对冶金废水中的乳化油具有良好的分离效果,通过选择合适的膜材料和操作参数,可使油类物质的去除率达到90%以上。其对重金属氢氧化物胶体的截留,能有效降低后续化学沉淀工艺中重金属离子的浓

度,提高重金属的去除效率和回收利用率。(3)将超滤膜技术应用于冶金行业废水处理与回用,可实现水资源的循环利用,减少新水取用量。超滤产水可回用于冶金生产的冷却系统、冲渣系统等对水质要求相对较低的环节,降低企业的用水成本和废水排放压力。其高效的分离性能和稳定的运行效果,为冶金行业的绿色可持续发展提供了有力的技术支持。

3 工业水处理中超滤膜技术应用面临的挑战与改进策略

3.1 面临的挑战

3.1.1 膜污染问题

在工业水处理过程中,超滤膜技术面临的膜污染问题是制约其高效运行的关键因素。工业废水中复杂多样的污染物成分,如胶体、微生物、有机物和无机离子等,极易附着在超滤膜表面或堵塞膜孔。当含有大量悬浮物和大分子有机物的工业废水流经超滤膜时,这些物质会在膜表面逐渐沉积形成滤饼层,增加水通过膜的阻力,导致膜通量显著下降。微生物在膜表面的生长繁殖会形成生物膜,生物膜内微生物的代谢活动不仅会改变膜表面的物理化学性质,还会产生粘性胞外聚合物,进一步加剧膜污染程度。随着膜污染的加剧,不仅处理效率大幅降低,频繁清洗操作也会加速膜的老化和破损,缩短膜的使用寿命,给工业水处理的稳定运行带来极大困扰。

3.1.2 运行成本较高

超滤膜技术在工业水处理中的运行成本较高,严重影响其大规模推广应用。从设备投资角度来看,超滤膜组件本身价格昂贵,优质的超滤膜材料和精密的制造工艺使得初始采购成本居高不下。在运行过程中,为维持超滤系统的稳定运行,需要持续消耗大量的电能用于驱动水泵,保证废水在膜组件中的合理流速和压力。频繁的膜清洗过程同样需要消耗大量的化学药剂,如酸、碱、杀菌剂等,这些化学药剂不仅增加了运行成本,其使用后的排放还可能对环境造成二次污染。超滤膜具有一定的使用寿命,到期后更换新膜组件的费用也是一笔不小的开支。综合设备投资、能耗、药剂消耗和膜更换等多方面因素,使得工业水处理采用超滤膜技术的运行成本远超其他常规处理技术^[3]。

3.1.3 对进水水质要求严格

超滤膜技术在工业水处理应用中对进水水质要求极为严格。超滤膜的孔径通常在0.01-0.1 μm 之间,虽然能够有效截留大分子物质和胶体颗粒,但对进水的浊度、悬浮物含量、有机物浓度、微生物含量等指标有着严格限

制。若进水浊度较高,大量悬浮物会快速堵塞膜孔,导致膜通量急剧下降;过高的有机物浓度会引发有机物在膜表面的吸附和沉积,形成难以清洗的污染层;水中的微生物还可能在膜表面滋生繁殖,引发生物污染。为满足超滤膜进水要求,往往需要在超滤处理前设置复杂的预处理工艺,如混凝、沉淀、过滤等,但即便如此,仍难以完全消除水中的潜在污染物质,一旦进水水质出现波动,就可能对超滤膜造成不可逆的损害,影响整个水处理系统的正常运行。

3.2 改进策略

3.2.1 优化膜材料与膜结构

优化膜材料与膜结构是解决超滤膜技术应用难题的重要途径。在膜材料方面,研发具有高亲水性、抗污染性和化学稳定性的新型膜材料至关重要。通过在膜材料中引入特殊的功能基团,如亲水性聚合物链段或抗菌基团,可以显著改善膜的表面性质,降低污染物在膜表面的吸附能力,提高膜的抗污染性能。在膜结构设计上,采用复合膜结构,将不同功能的膜材料进行复合,使其兼具高截留率和低污染特性。开发具有梯度孔径结构的超滤膜,使膜的表层孔径小用于截留污染物,底层孔径大降低水流阻力,从而在保证过滤效果的同时,提高膜通量和抗污染能力。通过不断优化膜材料与膜结构,能够有效提升超滤膜的性能和使用寿命,降低膜污染风险。

3.2.2 降低运行成本

降低超滤膜技术在工业水处理中的运行成本需要从多个方面入手。在设备选型和运行管理上,选择高效节能的水泵和其他配套设备,合理设计工艺流程,优化运行参数,降低不必要的能耗。针对膜清洗环节,研发高效、环保且低成本的清洗方法和药剂,减少化学药剂的使用量和使用频率。例如,采用物理清洗与化学清洗相结合的复合清洗技术,先通过超声、反冲洗等物理方式去除膜表面的大部分污染物,再使用少量化学药剂进行深度清洗,既能保证清洗效果,又能降低药剂成本。在膜组件的使用上,通过改进膜组件的安装方式和排列组合,提高膜组件的装填密度,在相同处理规模下减少膜组件的使用数量,从而降低设备投资成本和后期更换成

本。通过这些措施的综合应用,能够有效降低超滤膜技术的运行成本,提高其经济可行性。

3.2.3 完善预处理工艺

完善预处理工艺是确保超滤膜稳定运行的关键环节。针对工业废水水质复杂多变的特点,需要根据不同的进水水质特点,设计个性化的预处理方案。对于含有大量悬浮物和胶体的废水,可强化混凝沉淀工艺,选用高效的混凝剂和絮凝剂,优化混凝反应条件,提高悬浮物和胶体的去除效率。在去除有机物方面,采用活性炭吸附、臭氧氧化等高级氧化技术,将大分子有机物分解为小分子物质,降低其在膜表面的吸附能力。为抑制微生物污染,可在预处理过程中适当投加杀菌剂或采用紫外线消毒等方式,减少水中微生物数量。通过将多种预处理技术进行合理组合和优化,构建多级预处理体系,能够有效降低进水的浊度、有机物含量和微生物含量,提高进水水质的稳定性,为超滤膜的高效运行提供可靠保障^[4]。

结语

综上所述,超滤膜技术在工业水处理领域应用广泛且成效显著,为多行业解决废水处理与水资源循环利用难题。膜污染、高运行成本及严格进水要求等问题不容忽视。未来需持续探索新型膜材料与结构优化路径,创新节能降耗技术,完善预处理工艺体系。通过技术突破与创新,进一步提升超滤膜技术性能,降低应用成本,扩大适用范围,为工业可持续发展与水资源高效利用提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]袁芳,吴亚敏.浅谈工业水处理中超滤膜技术的应用[J].建筑工程技术与设计,2020(10):3396.
- [2]赵谋铭.超滤膜技术在工业水处理中的应用[J].清洗世界,2021,37(6):137-138.
- [3]徐丽洋.超滤膜技术在工业水处理中的应用实践探索[J].科海故事博览,2025(8):11-13.
- [4]王琦.超滤膜技术在水处理中的应用[J].区域治理,2020(39):134.