

海水淡化工程中膜污染防治关键技术与机制分析

严海波

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：海水淡化是解决全球水资源短缺问题的关键途径之一。在海水淡化工程中，膜技术尤其是反渗透（RO）技术因其高效性和节能性而得到广泛应用。然而，膜污染问题一直是制约海水淡化技术发展的瓶颈。本文旨在分析海水淡化工程中膜污染防治的关键技术与机制，探讨膜污染的形成原因、影响因素及防治措施，以期为海水淡化工程的稳定运行和效率提升提供理论支撑和实践指导。

关键词：海水淡化；膜污染防治；反渗透技术；预处理技术

引言

随着全球人口增长和工业化进程的加速，淡水资源短缺问题日益严峻。海水淡化作为一种重要的水资源开发方式，正逐渐成为解决淡水资源短缺的重要途径。在海水淡化过程中，膜技术因其高效、节能、环保等优点而备受青睐。然而，膜污染问题却一直是制约海水淡化技术发展的关键因素之一。膜污染不仅会导致膜通量下降、分离性能恶化，还会增加能耗和运行成本，甚至引发系统故障。因此，研究海水淡化工程中膜污染防治的关键技术与机制具有重要意义。

1 海水淡化工程中膜污染的形成原因

1.1 膜污染的形成原因

膜污染是指膜在过滤过程中，由于与料液中的微粒、胶体粒子或溶质大分子发生物理、化学作用，或因浓差极化导致某些溶质在膜表面浓度超过其溶解度，进而在膜面或膜孔内吸附、沉积，造成膜孔径变小或堵塞的现象。在海水淡化工程中，膜污染的形成原因主要包括以下几个方面：

1.2 有机物污染

海水中含有丰富的有机物，其中腐殖质和蛋白质是主要的污染源。腐殖质是一类复杂的有机化合物，具有高度的吸附性和胶体性质，容易在膜表面形成一层致密的污染层。这些污染层不仅减小了膜的有效过滤面积，还增加了水通过膜的阻力，从而降低了膜的过滤效率。蛋白质则是另一类重要的有机污染物。蛋白质分子中含有大量的氨基和羧基等官能团，这些官能团容易与膜表面的活性位点发生相互作用，导致蛋白质在膜表面的吸附。吸附后的蛋白质分子可能进一步发生变性、聚集，形成更厚的污染层，严重阻碍水的通过。此外，海水中还可能

的存在。

1.3 无机物污染

海水中含有大量的无机盐类，其中钙、镁等离子的浓度较高。在膜过滤过程中，这些离子可能因为浓差极化效应而在膜表面浓度升高，当浓度超过其溶解度时，就会以沉淀的形式析出，形成水垢。水垢的形成不仅减小了膜孔径，还可能堵塞膜孔，导致膜的过滤性能下降^[1]。同时，水垢的存在还可能改变膜表面的电荷性质，影响膜与料液中的其他成分之间的相互作用，从而进一步加剧膜污染的形成。除了钙、镁等离子外，海水中还可能

1.4 微生物污染

海水中含有大量的微生物，包括细菌、藻类、真菌等。这些微生物容易在膜表面黏附并繁殖，形成生物膜层。生物膜层的形成不仅减小了膜的有效过滤面积，还可能改变膜表面的性质，如亲水性、电荷性等，从而影响膜的过滤性能。此外，微生物在繁殖过程中还会产生大量的代谢产物，如多糖、蛋白质等。这些代谢产物同样有可能在膜表面吸附、沉积，进一步加剧膜污染的形成。同时，微生物还可能通过其活动破坏膜的结构，导致膜的破损和失效。

2 海水淡化工程中膜污染的影响因素

膜污染的形成受到多种因素的影响，主要包括以下几个方面：

2.1 水质条件

海水的水质条件对膜污染的形成具有至关重要的影响。其中，盐度、pH值、温度和浊度是四个关键指标。盐度是海水最基本的特性之一，高盐度意味着海水中含有大量的溶解性固体，这些固体在膜过滤过程中容易在膜表面沉积，形成水垢，从而加剧膜污染。此外，高盐

度还可能导致膜的渗透压增大,使得膜过滤的驱动力减小,进而影响膜的过滤效率。pH值则决定了海水的酸碱度,不同的pH值会影响膜材料的稳定性和污染物的存在形态。例如,在酸性或碱性条件下,膜材料可能发生化学降解,导致膜孔径变大或膜结构破坏;同时,某些污染物在特定pH值下可能更容易在膜表面吸附或沉淀。温度对膜污染的影响主要体现在两个方面:一是影响污染物的溶解度,高温下某些污染物的溶解度增大,可能减轻膜污染;二是影响膜材料的性能,高温可能导致膜材料膨胀或软化,使得膜孔径变大,过滤精度下降。浊度则直接反映了海水中悬浮物的含量。高浊度意味着海水中含有大量的泥沙、藻类等悬浮物,这些悬浮物在膜过滤过程中容易堵塞膜孔,形成污染层,严重影响膜的过滤性能。

2.2 膜材料性质

不同材质的膜具有不同的抗污染性能。聚酰胺复合膜和醋酸纤维素膜是海水淡化工程中常用的两种膜材料。聚酰胺复合膜具有优异的截留性能和较高的通量,但其抗污染性能相对较弱。因为聚酰胺材料容易与海水中的有机物发生相互作用,导致膜表面污染。为了提高其抗污染性能,通常需要对聚酰胺复合膜进行表面改性处理。醋酸纤维素膜则具有较好的亲水性和抗污染性能^[2]。因为醋酸纤维素材料本身含有羟基等亲水基团,容易与水分子形成氢键,从而减少污染物在膜表面的吸附。但醋酸纤维素膜的截留性能和通量相对较低,需要在实际应用中权衡选择。

2.3 操作条件

操作条件对膜污染的形成也具有重要影响。操作压力、流速和回收率是三个关键的操作参数。操作压力决定了膜过滤的驱动力。过高的操作压力可能导致膜表面的浓差极化现象加剧,使得污染物在膜表面沉积的速度加快,从而加剧膜污染。因此,在实际操作中需要合理控制操作压力,避免过高的压力对膜造成损害。流速则影响了膜表面的冲刷作用。适当的流速可以带走膜表面的污染物,减轻膜污染;但过高的流速可能导致膜表面的冲刷作用过强,加速膜的磨损。因此,在选择流速时需要综合考虑多方面因素,确保既能够减轻膜污染,又能够保护膜的使用寿命。回收率则决定了海水淡化的效率。高回收率意味着更多的海水被转化为淡水,但同时也意味着膜过滤的负担加重,膜污染的风险增加。因此,在实际操作中需要合理控制回收率,确保海水淡化的经济性和可持续性。

3 海水淡化工程中膜污染防治关键技术及机制

3.1 预处理技术

预处理是海水淡化过程中防止膜污染的第一道防线,其核心目标是去除海水中可能对膜造成损害的杂质和污染物。沉淀和过滤是预处理技术中的基础环节。混凝沉淀通过投加混凝剂(如铝盐、铁盐等),使海水中的悬浮物、胶体等杂质凝聚成较大颗粒,然后通过重力沉降或机械过滤去除。这一过程可以有效去除海水中的大颗粒杂质,如泥沙、藻类等。砂滤则利用不同粒径的砂层对海水进行逐级过滤,进一步去除细小的悬浮物和杂质。这两种技术结合使用,可以显著降低海水中悬浮物的含量,减轻后续膜过滤的负担。活性炭吸附是预处理技术中的另一重要环节。活性炭因其高度的孔隙结构和强大的吸附能力,被广泛用于去除海水中的有机物、异味、余氯等污染物。活性炭吸附不仅可以提高海水的感官质量,还可以有效去除可能对膜造成损害的有机污染物,从而延长膜的使用寿命。微生物处理也是预处理技术中不可或缺的一部分。海水中含有大量的微生物,如细菌、藻类等,这些微生物容易在膜表面黏附并繁殖,形成生物膜层,导致膜污染。因此,需要通过微生物处理技术来有效阻止和消除膜表面的生物污染。紫外线消毒是一种常用的微生物处理技术,它利用紫外线破坏微生物的DNA结构,使其失去繁殖能力。电化学氧化则是通过电解产生氧化剂(如次氯酸钠等),杀灭海水中的微生物,并去除部分有机物。这两种技术都可以有效减少海水中的微生物数量,降低微生物污染的风险^[3]。此外,还有一些新兴的预处理技术,如纳滤、超滤等膜分离技术,它们可以在更细的尺度上去除海水中的杂质和污染物,为后续的膜过滤提供更高质量的进水。

3.2 膜清洗技术

膜清洗是恢复膜性能、延长膜使用寿命的重要手段。在海水淡化过程中,由于海水中污染物的不断积累,膜通量会逐渐下降,跨膜压差会增大。当这些指标达到一定程度时,就需要进行膜清洗。物理清洗是膜清洗技术中的一种重要方法。它利用物理力量去除膜表面的污染物,如高压冲洗、超声清洗等。高压冲洗通过高压水流冲刷膜表面,将附着的污染物冲走。超声清洗则利用超声波的空化作用,产生微小气泡,当这些气泡破裂时,会产生强大的冲击力,将膜表面的污染物击碎并冲走。物理清洗的优点是不使用化学物质,对膜的腐蚀风险较小,但清洗效果可能不如化学清洗彻底。化学清洗是另一种常用的膜清洗方法。它通过使用化学物质溶解、分解和去除膜表面的污染物。常见的化学清洗剂包括酸性清洗剂、碱性清洗剂和氧化剂等。酸性清洗剂如盐酸、硫酸等,可以溶解膜表面的无机盐垢;碱性清洗

剂如氢氧化钠等,可以去除膜表面的有机物和油脂;氧化剂如次氯酸钠等,可以杀灭膜表面的微生物,并去除部分有机物。化学清洗的优点是清洗效果彻底,但需要使用化学物质,对膜存在一定的腐蚀风险,且清洗后的废液需要妥善处理,以防止环境污染。在实际应用中,常常将物理清洗和化学清洗相结合,以达到更好的清洗效果。例如,可以先用高压冲洗或超声清洗去除膜表面的大部分污染物,然后再用化学清洗剂进行深度清洗,以彻底去除残留的污染物。

3.3 膜改性技术

膜改性技术是提高膜抗污染能力的重要途径。通过改性,可以改变膜表面的化学性质和物理结构,从而降低污染物在膜表面的吸附能力和附着能力。表面涂覆是一种常见的膜改性方法。它通过在膜表面涂覆一层亲水性聚合物,如聚乙二醇、聚乙烯醇等,来提高膜表面的亲水性。亲水性聚合物可以形成一层水合层,阻止污染物与膜表面的直接接触,从而减轻膜污染。此外,亲水性聚合物还可以减少膜表面的静电作用,降低有机物和微生物在膜表面的吸附能力。接枝聚合是另一种有效的膜改性方法。它通过在膜表面引入具有抗污染功能的官能团,如羟基、羧基、氨基等,来提高膜的抗污染能力。这些官能团可以与海水中的污染物发生相互作用,阻止其在膜表面的吸附和沉积。例如,引入羟基可以增加膜表面的亲水性,引入羧基可以与钙、镁等离子形成络合物,防止其在膜表面结垢^[4]。等离子体处理也是一种新兴的膜改性技术。等离子体是一种高度电离的气体状态,其中包含了大量的活性粒子(如电子、离子、自由基等)。通过将这些活性粒子作用于膜表面,可以改变膜表面的化学性质和物理结构,从而提高膜的抗污染能力。例如,等离子体处理可以增加膜表面的亲水性、减少膜表面的粗糙度、改变膜表面的电荷性质等。等离子体处理具有处理速度快、效果好、无污染等优点,在膜改性领域具有广阔的应用前景。

3.4 操作条件优化

操作条件的优化也是防止膜污染的重要措施之一。通过调整操作压力、流速、温度等条件,可以降低膜污染的风险,提高海水淡化的效率。操作压力是影响膜

污染的重要因素之一。过高的操作压力会导致膜表面的浓差极化现象加剧,使得污染物在膜表面沉积的速度加快,从而加剧膜污染。因此,在实际操作中,应根据膜的特性和海水的质量,合理设定操作压力,以减少膜表面的浓差极化现象,降低膜污染的风险。流速也是影响膜污染的重要因素。适当的流速可以冲刷膜表面的污染物,提高膜的过滤性能。然而,过高的流速可能导致膜表面的冲刷作用过强,加速膜的磨损;过低的流速则可能导致污染物在膜表面沉积,形成污染层。因此,在选择流速时,需要综合考虑膜的耐冲刷性能、海水的质量以及系统的处理能力等因素,确保既能够减轻膜污染,又能够保护膜的使用寿命。温度对膜污染的影响也不容忽视。在一定范围内,提高温度可以增加污染物的溶解度,降低其在膜表面的吸附能力;同时,提高温度还可以改变膜材料的性质,如增加膜的亲水性等,从而提高膜的抗污染能力。然而,过高的温度可能导致膜材料的性能发生变化,如膜孔径的扩大、膜强度的降低等。因此,在选择操作温度时,需要综合考虑膜材料的耐温性能、海水的质量以及系统的处理能力等因素,确保既能够提高膜的抗污染能力,又能够保护膜的材料性能。

结语

海水淡化工程中膜污染防治是一个复杂而重要的问题。通过深入研究膜污染的形成原因、影响因素及防治措施,可以为海水淡化工程的稳定运行和效率提升提供理论支撑和实践指导。未来,随着科技的不断进步和创新,相信膜污染防治技术将在海水淡化工程中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1]刘思雨,明红霞,任恺佳,等.辽宁某海水淡化系统反渗透膜污染成因分析[J].膜科学与技术,2024,44(03):89-96.
- [2]刘舒悦.正渗透同步处理城市污水和海水淡化浓水过程中膜污染特性与控制研究[D].江南大学,2022.15(01):89-96.
- [3]刘耀辉.基于BP神经网络模型的海水淡化反渗透膜污染预测研究[D].青岛理工大学,2023.8(2):55-60..
- [4]陈勇强,李宣丽,任新华.某电厂海水淡化系统冬季反渗透膜污堵研究[J].水处理技术,2021,47(10):121-124.