

膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中的应用探讨

张佳琳

运城市生态环境局平陆分局 山西 运城 044300

摘要：本论文针对铝矿煅烧污水成分复杂、处理难度大的问题，深入探讨膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中的应用。详细阐述了膜分离技术的原理、分类及特点，分析了其在去除污水中悬浮物、重金属离子、有机物等污染物方面的优势与效果。同时，研究了膜分离技术应用过程中面临的膜污染、能耗控制等问题，并提出相应的解决策略。研究表明，膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中具有良好的应用前景，通过优化工艺参数和采取有效的膜维护措施，可实现高效、稳定的污水处理效果，为铝矿行业的可持续发展提供技术支持。

关键词：膜分离技术；铝矿煅烧污水；污水处理；膜污染；工艺优化

1 引言

铝作为现代社会不可或缺的重要金属材料，广泛应用于航空航天、建筑、电子等众多关键领域。在铝的生产流程里，铝矿煅烧堪称核心环节。然而，该过程会产生大量成分复杂的污水，这些污水中除了包含悬浮物、重金属离子（例如铅、汞、镉等）、有机物外，还含有高浓度的盐分等污染物。若此类污水未经有效处理就直接排放，会对周边的土壤、水体等生态环境造成极为严重的污染，进而对人体健康构成威胁，同时也与可持续发展理念背道而驰。以某大型铝矿企业为例，其每日排放的铝矿煅烧污水可达数千立方米，若不加以妥善处理，将对当地生态系统产生难以估量的破坏。因此，探索高效且环保的铝矿煅烧污水处理技术，已然成为铝矿行业亟待解决的关键问题。

膜分离技术作为一种新兴的分离技术，具备分离效率高、操作简便、能耗低、无相变等显著优点，在污水处理领域展现出巨大的发展潜力。近年来，随着膜材料科学和制造工艺的不断进步，膜分离技术在工业污水处理中的应用范围持续拓展。其借助选择性透过膜，依据混合物中各组分在物理性质（如粒径大小、分子形状、电荷性质等）或化学性质上的差异，对不同物质进行分离、浓缩和提纯，能够有效地去除污水中的各类污染物，实现水资源的循环利用。本文将深入探讨膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中的应用，分析其应用优势、存在问题及解决策略，旨在为铝矿行业污水处理提供坚实的理论依据和切实可行的技术参考。

2 膜分离技术

2.1 膜分离技术原理

膜分离技术的核心是利用具有特殊选择透过性的膜，依据混合物中各组分在物理性质（如粒径大小、分

子形状、电荷性质等）或化学性质上的差异，实现对不同物质的分离。从微观角度来看，在膜两侧压力差、浓度差或电位差等驱动力的作用下，小分子物质或溶剂能够凭借其较小的尺寸，顺利透过膜的孔隙，而大分子物质、胶体颗粒以及污染物由于尺寸较大，无法通过膜孔，从而被截留，以此达成分离、浓缩和提纯的目的。例如，在压力差驱动的微滤过程中，水等小分子溶剂能够在压力作用下透过微滤膜，而粒径大于膜孔径的悬浮物则被阻挡在膜的一侧。

2.2 膜分离技术分类及特点

根据膜的孔径大小和分离原理，膜分离技术主要分为微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）和反渗透（RO）。

微滤：微滤膜的孔径范围一般在0.1-10 μm ，这一孔径区间使其主要用于截留污水中的悬浮物、细菌、胶体等较大颗粒物质。其操作压力相对较低，通常维持在0.05-0.2MPa，具有通量高、成本低的显著特点。不过，由于其孔径相对较大，对小分子污染物的去除效果欠佳。在某铝矿煅烧污水处理项目中，采用微滤工艺处理污水，每小时的产水量可达数百立方米，能够快速去除污水中大量肉眼可见的悬浮物，但对溶解性小分子污染物的去除率不足10%。

超滤：超滤膜孔径在0.001-0.1 μm 之间，该孔径范围决定了其能够截留相对分子质量为1000-1000000的大分子物质，诸如蛋白质、多糖、微生物等。操作压力一般处于0.1-0.5MPa。超滤技术在去除污水中大分子有机物和胶体方面表现卓越，但对于离子和小分子有机物的去除能力较为薄弱。例如，在处理含有大量胶体和大分子有机物的铝矿煅烧污水时，超滤膜可将污水中90%以上的大分子有机物去除，然而对单价离子的截留率仅为10%-

20%。

纳滤：纳滤膜的孔径约为0.001-0.01 μm ，对二价离子和相对分子质量200-1000的有机物具有较高的截留率，同时能部分截留单价离子，操作压力一般在0.5-1.5MPa。纳滤技术在去除水中硬度离子、有机物和部分重金属离子方面独具优势，且相较于反渗透，其能耗更低。在实际应用于铝矿煅烧污水处理时，纳滤膜对污水中钙、镁等二价硬度离子的截留率可达80%-90%，对部分重金属离子如铅、镉的截留率也能达到70%-80%，且能耗仅为反渗透的60%-70%^[2]。

反渗透：反渗透膜孔径小于0.0001 μm ，在较高压力（1-10MPa）作用下，几乎能截留所有的溶解性盐类、有机物和微生物，是目前脱盐率最高的膜分离技术，常用于制备高纯度的水，但能耗相对较高。以某纯净水生产厂为例，采用反渗透技术制备纯水，脱盐率高达99%以上，但设备运行过程中的电力消耗较大，成本较高^[3]。

3 膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中的应用优势

3.1 高效去除悬浮物和胶体

铝矿煅烧污水中含有大量的悬浮物和胶体颗粒，这些物质会使污水呈现浑浊状态，且凭借传统沉淀方法难以完全去除。微滤和超滤技术能够高效截留这些悬浮物和胶体，使污水得到初步净化。研究表明，采用微滤-超滤组合工艺处理铝矿煅烧污水，可使污水的浊度从初始的数百NTU降低至1 NTU以下，有效改善污水的澄清度，为后续处理工序创造良好条件。在一项实际工程案例中，某铝矿企业采用微滤-超滤组合工艺处理污水，处理后的污水清澈透明，浊度从500 NTU降至0.8 NTU，为后续纳滤和反渗透处理提供了优质的进水水质。

3.2 有效去除重金属离子

铝矿煅烧污水中含有的重金属离子具有毒性大、易富集等特点，对生态环境和人体健康危害极大。纳滤和反渗透技术能够利用膜的电荷效应和筛分效应，有效去除污水中的重金属离子。例如，纳滤膜对铅、镉等二价重金属离子的截留率可达90%以上，反渗透膜对各类重金属离子的截留率更是高达95%以上。

3.3 去除有机物和降低COD

铝矿煅烧污水中含有一定量的有机物，这些有机物会增加污水的化学需氧量（COD），对水体生态系统造成破坏。纳滤和反渗透膜对有机物具有良好的截留效果，能够有效降低污水的COD值。实验数据显示，采用纳滤-反渗透组合工艺处理铝矿煅烧污水，可使污水的COD从初始的500mg/L左右降低至50mg/L以下，达到污水排放的相关标准。

3.4 实现水资源的循环利用

膜分离技术处理后的出水水质较好，可满足铝矿生产过程中对水质的要求，实现水资源的循环利用。例如，经过反渗透处理后的水可作为铝矿煅烧工艺中的冷却水、洗涤水等，不仅减少了新鲜水资源的取用，降低了生产成本，还实现了污水的零排放，具有显著的经济效益和环境效益。某大型铝矿企业通过膜分离技术处理污水，将处理后的水回用于生产过程，每年可节约新鲜水资源数十万吨，节省水费支出数百万元，同时减少了污水排放对环境的负面影响。

4 膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中面临的问题及解决策略

4.1 膜污染问题

膜污染是膜分离技术应用过程中面临的主要问题之一。在铝矿煅烧污水处理中，污水中的悬浮物、胶体、有机物、微生物以及金属离子等物质会在膜表面沉积，形成滤饼层或凝胶层，导致膜通量下降，分离效率降低，同时增加运行成本。加强污水的预处理环节，采用混凝、沉淀、过滤等传统处理工艺，去除污水中大部分悬浮物、胶体和有机物，降低膜污染的负荷。例如，在膜分离处理前，通过投加混凝剂（如聚合氯化铝），使污水中的胶体颗粒发生凝聚，然后通过沉淀和过滤去除，可有效减少膜表面的污染物沉积。在某铝矿污水处理项目中，通过强化预处理，在投加聚合氯化铝并经过沉淀、过滤后，进入膜系统的污水中悬浮物含量降低了80%，有效减轻了膜污染程度。对膜材料进行表面改性，提高膜的抗污染性能。例如，通过在膜表面接枝亲水性聚合物，增加膜表面的亲水性，减少有机物和微生物在膜表面的吸附；或者引入抗菌基团，抑制微生物在膜表面的生长繁殖。科研人员通过实验发现，对超滤膜进行亲水性改性后，膜表面的有机物吸附量减少了50%以上，膜的抗污染性能显著提高。合理控制膜分离过程中的操作参数，如操作压力、流速、温度等。适当提高流速可增加膜表面的剪切力，减少污染物在膜表面的沉积；控制合适的操作压力，避免因压力过高导致膜污染加剧。在实际运行中，将膜分离系统的流速提高20%后，膜表面的污染物沉积速率降低了30%，有效延长了膜的使用寿命。定期对膜进行化学清洗，去除膜表面和孔道内的污染物。根据膜污染的类型选择合适的化学清洗剂，如对于有机物污染，可采用氢氧化钠和次氯酸钠混合溶液进行清洗；对于无机物污染，可采用盐酸或柠檬酸溶液进行清洗。在某铝矿膜分离处理系统中，针对有机物污染的膜，采用氢氧化钠和次氯酸钠混合溶液清洗后，膜通

量恢复率可达80%以上^[1]。

4.2 能耗问题

反渗透等膜分离技术在处理铝矿煅烧污水时需要较高的操作压力,导致能耗较高,增加了污水处理成本。根据铝矿煅烧污水的水质特点,选择合适的膜分离技术进行组合,避免过度使用高能耗的膜工艺。例如,采用微滤-超滤-纳滤的组合工艺,在满足污水处理要求的前提下,减少反渗透的使用,降低整体能耗。某铝矿企业通过采用微滤-超滤-纳滤组合工艺,相比单纯使用反渗透工艺,能耗降低了30%-40%。研发具有高通量、低压操作性能的新型膜材料,降低膜分离过程中的操作压力。同时,改进膜组件的结构设计,提高膜设备的运行效率,降低能耗。例如,采用中空纤维膜组件,相比平板膜组件具有更大的比表面积,可在较低压力下实现更高的通量。近年来,新型的聚酰亚胺复合膜材料的研发,使得膜分离操作压力降低了20%-30%,通量提高了15%-20%^[4]。在反渗透等高压膜分离过程中,采用能量回收装置,将浓水的压力能转化为机械能或电能,用于驱动进水,从而降低能耗。目前,常用的能量回收装置有涡轮式能量回收器和压力交换器等。某大型铝矿污水处理厂安装涡轮式能量回收器后,反渗透系统的能耗降低了15%-20%。

4.3 膜寿命问题

由于铝矿煅烧污水成分复杂,对膜的腐蚀性较强,导致膜的使用寿命缩短,增加了设备更换成本。

针对铝矿煅烧污水的特点,选择耐酸、耐碱、耐氧化的膜材料,如聚偏氟乙烯(PVDF)膜、聚砜(PS)膜等。这些膜材料具有良好的化学稳定性,能够在恶劣的水质条件下长期稳定运行。某铝矿污水处理项目采用聚偏氟乙烯(PVDF)膜,相比普通膜材料,使用寿命延

长了1-2年。建立完善的膜维护管理制度,定期对膜进行检查、清洗和保养,及时发现和处理膜的损坏问题。同时,控制污水的进水水质,避免含有强腐蚀性物质进入膜系统,延长膜的使用寿命。某铝矿企业通过严格控制进水水质,并加强膜的维护管理,膜的使用寿命从原来的1.5年延长至3年。

5 结论

膜分离技术凭借其高效的分离性能和独特的优势,在铝矿煅烧污水处理中展现出广阔的应用前景。通过微滤、超滤、纳滤和反渗透等膜分离技术的合理应用,能够有效去除铝矿煅烧污水中的悬浮物、重金属离子、有机物等污染物,实现污水的净化和水资源的循环利用,具有显著的环境效益和经济效益。然而,在实际应用过程中,膜分离技术仍面临膜污染、能耗高、膜寿命短等问题。通过加强预处理、优化工艺组合、开发新型膜材料和设备、加强膜的维护管理等措施,可以有效解决这些问题,进一步提高膜分离技术在铝矿煅烧污水处理中的应用效果和稳定性。未来,随着膜技术的不断创新和发展,膜分离技术将在铝矿行业污水处理中发挥更加重要的作用,为推动铝矿行业的绿色可持续发展提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1]张兰,李健.铝矿煅烧污水处理技术研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(5):120-125.
- [2]陈建新,周强.纳滤技术在重金属废水处理中的应用[J].工业水处理,2021,41(3):85-89.
- [3]吴东林,郑灿.反渗透膜污染机理及防治措施研究[J].水处理技术,2022,48(4):1-5.
- [4]孙尚.膜材料改性研究进展[J].高分子材料科学与工程,2023,39(6):150-156.