

渗滤液处理系统中超滤膜技术应用

李 华 徐晓静

中城院(北京)环境科技股份有限公司 北京 100120

摘要: 垃圾处理产生的渗滤液水质复杂、污染负荷高,含高浓度有机物、氨氮及难降解物质,处理难度大且危害环境。超滤膜技术凭借精准筛分特性,可高效截留污染物,在渗滤液处理中应用广泛。本文阐述渗滤液与超滤膜技术基础,分析其典型工艺组合、参数优化及处理效果,探讨膜污染机制与控制策略,为该技术高效稳定应用提供理论与实践参考,助力渗滤液达标排放与资源化利用。

关键词: 渗滤液处理系统;超滤膜技术;应用

引言:随着城镇化进程加快,垃圾产生量激增,填埋、堆肥等处理方式产生的渗滤液成为主要污染源之一,其无序排放会严重破坏水体、土壤生态环境,威胁人体健康。传统处理工艺难以适配渗滤液复杂水质,处理效果不佳。超滤膜技术作为高效固液分离技术,具有截留效率高、运行稳定、占地面积小等优势,已逐步替代传统工艺成为渗滤液处理的核心技术,深入研究其应用要点与优化策略,对推动渗滤液处理行业发展、践行环保理念具有重要意义。

1 渗滤液处理与超滤膜技术基础理论

1.1 渗滤液的来源、特性及处理标准

(1) 渗滤液的来源:渗滤液主要产生于垃圾处理全流程,其中垃圾填埋、堆肥、焚烧是三大核心场景。雨水淋溶垃圾层、垃圾自身微生物分解产生的代谢液,以及地下水渗透进入处理系统,共同构成了渗滤液的主要产生途径,其产生量与季节、垃圾成分及处理工艺密切相关。(2) 渗滤液的核心特性:水质水量波动显著,受垃圾种类、填埋时间影响较大;含有高浓度有机物(COD值常达数千至数万mg/L)、高氨氮,且悬浮物含量高;同时含有微量重金属及腐殖酸等难降解物质,处理难度大,若直接排放会造成严重环境污染^[1]。(3) 渗滤液处理相关标准:我国以《生活垃圾填埋场污染控制标准》为核心规范,明确了渗滤液经处理后,出水的COD、氨氮、悬浮物、重金属等指标排放限值,同时规定了渗滤液回用的水质要求,为处理工艺选择和效果评价提供依据。

1.2 超滤膜技术核心原理与特性

(1) 超滤膜的分离原理:核心是基于膜孔径的筛分作用,超滤膜孔径处于纳米至微米级,可精准截留大分子有机物、胶体、悬浮物等污染物,同时允许水分子及小分子物质顺利通过,实现固液分离与污染物去除。

(2) 超滤膜的关键特性:膜孔径范围通常为1-100nm,截留分子量在1000-100000Da之间;通量、机械强度、耐化学性、亲水性是核心性能指标,直接影响处理效率、膜的使用寿命及运行稳定性。(3) 超滤膜的分离过程:主要分为死端过滤和错流过滤两种方式。死端过滤为垂直过滤,污染物截留在膜表面,适用于低悬浮物体系;错流过滤中料液平行于膜表面流动,可减少膜污染,适用于高悬浮物的渗滤液处理场景。

1.3 渗滤液处理中超滤膜的类型及选择依据

(1) 常用超滤膜类型:主流类型为聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜和增强型聚醚砜(PES)毛细管式膜。PVDF膜耐污染、耐化学性强,PES膜机械强度高、通量稳定,均适配渗滤液复杂水质。(2) 膜材料的选择依据:需结合渗滤液高污染、高腐蚀性的特性,优先选择耐污染性强、机械强度高、耐化学清洗能力优异的材料,同时兼顾运行成本与使用寿命,实现经济性与处理效果的平衡^[2]。(3) 超滤膜组件形式:主要有平板膜、中空纤维膜、管式膜。中空纤维膜占地面积小、通量高,是渗滤液处理的主流组件;平板膜易清洗,管式膜抗堵塞性强,可根据渗滤液悬浮物含量灵活选择。

2 超滤膜技术在渗滤液处理中的应用工艺与优化

2.1 超滤膜技术在渗滤液处理中的典型工艺组合

(1) 预处理+超滤工艺:该工艺是渗滤液处理中基础且常用的组合,核心是为超滤膜提供优质进水、降低膜污染风险。预处理主要采用混凝沉淀、活性炭吸附、格栅过滤等技术,其中混凝沉淀可去除85%以上悬浮物、70%以上胶体及部分大分子有机物,减少膜堵塞;活性炭吸附能去除90%以上异味、80%以上色度及部分难降解小分子有机物。经预处理后,渗滤液浊度降至5NTU以下、悬浮物低于10mg/L,可显著延长膜寿命,提升超滤处理的效率与稳定性。(2) 超滤+反渗透(UF+RO/DTRO)

组合工艺：作为渗滤液深度处理与回用的核心方案，超滤膜承担前置保护作用，可高效截留99%以上大分子有机物、98%以上胶体、悬浮物及微生物，避免其进入反渗透系统造成堵塞污染，保障系统稳定运行。反渗透单元负责截留95%以上小分子有机物、重金属离子及盐分，实现渗滤液深度净化，处理后出水可达回用标准，实现水资源循环利用，尤其适用于缺水地区^[1]。（3）生物处理+超滤（MBR）工艺：膜生物反应器将生物处理与超滤技术有机结合，替代传统二沉池实现泥水高效分离。生物反应器内的微生物可降解80%以上可生物降解有机物、90%以上氨氮等污染物；超滤膜分离活性污泥与处理后水，维持反应器内8000-12000mg/L的高污泥浓度，增强系统对渗滤液水质波动的适应能力，适用于高污泥、高有机物含量的渗滤液处理，处理效果稳定且出水水质优良。

2.2 超滤膜处理渗滤液的工艺参数优化

（1）操作压力的优化：操作压力是影响超滤膜处理效果的核心参数，直接关联膜通量与污染物截留率。压力过低时，膜通量低于10L/(m²·h)，处理效率不足，无法满足处理量需求；压力过高时，虽能将膜通量提升至35L/(m²·h)以上，但会加剧膜污染、缩短膜寿命，且运行能耗增至0.3kWh/m³以上。因此，需通过实验确定0.1-0.3MPa的适宜范围，实现处理效率、膜污染控制与能耗的平衡。（2）跨膜通量的控制：跨膜通量指单位时间内通过单位面积超滤膜的水量，其取值直接影响处理效率与膜污染程度。通量超过25L/(m²·h)时，污染物沉积加快，易造成膜堵塞、通量衰减，使膜清洗周期缩短至7天内；低于15L/(m²·h)则处理效率不足，无法满足实际需求。需结合渗滤液水质，通过实验确定最佳通量范围，并采用阶段性调通量、定期反洗等方法，维持膜通量稳定。（3）其他参数优化：进水温度、pH值、搅拌速度也会影响处理效果。进水温度控制在25-35℃可降低渗滤液黏度、提升膜通量，超过40℃会影响膜稳定性；pH值控制在6.5-7.5，可避免膜被腐蚀，同时提升污染物截留效果；搅拌速度150-200r/min可减少污染物沉积、降低膜污染，过快则能耗增加15%以上。通过单因素与正交实验，可确定各参数最优组合，最大化处理效果^[4]。

2.3 超滤膜处理渗滤液的效果评价

（1）污染物去除效果：这是评价超滤工艺处理效果的核心指标，主要针对渗滤液中的COD、悬浮物、胶体、腐殖酸、重金属等主要污染物，通过检测处理前后污染物的浓度，计算截留率，验证处理效果是否满足我国《生活垃圾填埋场污染控制标准》及回用标准要求。实际应用中，超滤膜对悬浮物、胶体的截留率可达99%以

上，对大分子有机物、腐殖酸的截留率可达85%以上，对Cu²⁺等重金属截留率达60%以上，能将渗滤液COD从25000mg/L降至3000mg/L以下，有效降低渗滤液的污染负荷。（2）膜通量稳定性评价：膜通量的稳定性直接反映超滤工艺的可持续性和可靠性，需通过长期运行实验，监测膜通量的变化规律。正常工况下，连续运行30天膜通量下降幅度控制在10%以内，说明工艺参数设置合理，膜污染控制有效；若膜通量3天内下降超过20%，需分析原因并优化工艺参数或清洗方案。通过膜通量稳定性评价，可及时发现工艺运行中的问题，保障处理系统长期稳定运行。（3）经济性评价：从工程应用角度出发，经济性是衡量超滤工艺可行性的重要指标，主要包括膜组件投资、运行能耗、药剂消耗、维护成本等方面。与传统渗滤液处理工艺相比，超滤膜工艺初始投资约80-120万元/千吨，虽相对较高，但处理效率提升30%以上、出水水质达标率达99%、占地面积缩减40%，且随着膜技术的发展，膜组件成本每年降低5%，运行能耗控制在0.2-0.3kWh/m³。通过经济性分析，可对比超滤工艺与传统工艺的优势与不足，为工艺选择和优化提供经济依据。

3 超滤膜技术应用中的膜污染问题及控制策略

3.1 超滤膜污染的产生机制与类型

（1）膜污染的产生机制：超滤膜处理渗滤液过程中，膜污染的核心产生过程是渗滤液中的各类污染物与膜表面、膜孔发生相互作用，具体表现为污染物在膜表面的物理吸附、化学吸附及机械沉积，同时部分小分子污染物会进入膜孔内部，造成膜孔堵塞，最终导致膜通量下降、截留性能变差，增加运行能耗与维护成本，这是超滤膜应用中最主要的制约因素。（2）主要污染类型：根据污染物性质可分为三类，各有不同形成特点与危害。有机污染由腐殖酸、蛋白质、多糖等有机物引起，这类物质易通过吸附作用附着在膜表面，形成致密污染层，阻碍水的透过；无机污染主要是钙、镁离子等在膜表面结晶结垢，尤其在水质硬度较高、操作条件不适时易发生，会导致膜孔堵塞且难以清除；生物污染是微生物在膜表面滋生、繁殖，形成生物膜，不仅堵塞膜孔，还会分泌代谢产物加剧污染，缩短膜的使用寿命。（3）影响膜污染的关键因素：膜污染速率受多种因素综合影响，渗滤液水质是核心因素，污染物浓度越高、成分越复杂，污染速率越快；操作参数中，过高的操作压力和跨膜通量会加速污染物沉积，不合理的反洗周期会导致污染累积；膜材料特性方面，亲水性差、孔径不均匀的膜易吸附污染物；此外，运行时间越长，污染物累积越多，膜污染程度也会逐渐加重。

3.2 超滤膜污染的预防措施

(1) 预处理强化: 预处理是预防膜污染的第一道防线, 通过优化混凝、沉淀、过滤等预处理工艺, 可有效降低渗滤液中悬浮物、胶体、大分子有机物等污染物浓度, 减少进入超滤系统的污染负荷。例如, 优化混凝剂投加量, 提升混凝沉淀效果, 去除大部分悬浮态和胶体态污染物; 增设精密过滤单元, 进一步拦截细小杂质, 为超滤膜提供更优质的进水, 从源头减缓膜污染。(2) 膜材料改性: 通过物理、化学方法对膜材料进行改性, 是提升膜抗污染能力的有效手段。亲水改性可增加膜表面的亲水性, 减少有机物的吸附附着; 抗菌改性可在膜表面引入抗菌基团, 抑制微生物滋生, 减少生物膜形成; 此外, 通过表面涂层、交联等改性方式, 还可优化膜的表面结构, 降低污染物与膜的相互作用, 延长膜的污染周期。(3) 运行参数调控: 合理调控运行参数, 可有效减缓膜污染速率。控制适宜的操作压力和跨膜通量, 避免因参数过高导致污染物快速沉积; 优化反洗周期和反洗强度, 定期清除膜表面的松散沉积物, 防止污染累积; 同时, 合理控制进水温度和pH值, 维持膜的稳定性能, 减少污染物的吸附与结垢, 延长膜的运行周期^[5]。

3.3 超滤膜污染的清洗技术

(1) 物理清洗方法: 主要采用反洗、气洗、超声清洗等物理手段, 针对膜表面的松散沉积物进行清除。反洗是通过反向通入清水, 冲刷膜表面的污染物, 操作简单、成本低, 无化学污染, 是日常运行中最常用的清洗方式; 气洗通过通入气体产生扰动, 破坏污染物与膜表面的结合, 提升清洗效果; 超声清洗利用超声波的振动作用, 清除膜表面及膜孔内的污染物, 适用于污染较严重的场景。(2) 化学清洗方法: 针对物理清洗无法去除的顽固污染, 需采用化学清洗方法, 根据污染类型选择适宜的清洗药剂与浓度。有机污染可选用碱性清洗剂

(如氢氧化钠溶液), 无机结垢可选用酸性清洗剂(如柠檬酸溶液), 生物污染可选用氧化剂(如次氯酸钠溶液), 通过化学作用分解、剥离污染物, 有效恢复膜通量, 确保超滤系统正常运行。(3) 清洗工艺优化: 清洗工艺的优化是实现清洗效果与膜寿命平衡的关键。合理确定清洗周期, 避免清洗过于频繁导致膜损伤, 或清洗间隔过长导致污染无法彻底清除; 优化清洗时间和药剂用量, 在保证清洗效果的前提下, 减少药剂消耗, 降低清洗成本; 同时, 采用物理清洗与化学清洗结合的方式, 提升清洗效率, 延长膜的使用寿命。

结束语

超滤膜技术在渗滤液处理中展现出显著优势, 可有效解决渗滤液高污染、难处理的难题, 通过合理选择膜类型、优化工艺参数及科学控制膜污染, 可实现渗滤液达标排放与回用。尽管目前该技术仍存在初始投资较高、膜污染防控难度大等问题, 但随着膜材料改性与工艺优化技术的发展, 其经济性与稳定性将持续提升, 未来有望在渗滤液处理领域实现更广泛应用, 为生态环境保护提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1]尹坤,姜蕤.环保工程水处理中超滤膜技术的应用探讨[J].皮革制作与环保科技,2024,5(07):24-26.
- [2]唐朕,田野,季也酩,等.超滤膜技术在环境工程水处理中的应用分析[J].海峡科技与产业,2022,35(03):89-91.
- [3]袁玺.市政工程水处理过程中超滤膜技术应用分析[J].低碳世界,2023,13(02):34-36.
- [4]黄美慧.超滤膜技术在环境工程污水处理中的应用研究[J].山西化工,2025,45(06):161-163.
- [5]李华北.超滤膜技术在环境工程废水处理中的优势及应用研究[J].中国资源综合利用,2025,43(06):257-259.