超滤和反渗透技术在中水回用中的应用及其维护探究

吴金海

江苏今创环境集团有限公司 江苏常州 213000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14310

[摘要] 文章主要围绕超滤和反渗透技术在中水回用里的应用以及维护情况展开研究,超滤技术是基于筛分和吸附等原理来发挥作用,它有着操作压力低和能耗小等诸多优势,不过其去除小分子污染物的能力相对有限,反渗透技术依靠半透膜的选择透过性实现水分子和溶质的分离,它的出水水质比较好,然而存在能耗大以及膜容易被污染等问题,在中水回用过程中,超滤通常用于预处理工作,以此去除悬浮物等杂质并减轻后续工艺的负担,同时它也能够与其他工艺组合起来应用,反渗透则大多用于深度处理环节,可进一步去除盐分等污染物从而满足特定的用水需求,为保证系统能够稳定运行,超滤系统需要进行日常的运行参数监测、定期开展化学清洗并适时更换膜组件,反渗透系统要监控运行参数、做好膜污染的防治工作并开展系统的清洗消毒,本次研究为超滤和反渗透技术在中水回用中的有效应用与维护提供了专业的参考。

[关键词] 超滤技术; 反渗透技术; 中水回用; 维护

随着社会经济快速发展以及人口持续不断增长,水资源短缺问题变得日益严峻起来,已成为制约可持续发展的关键重要因素,中水回用作为一种有效的水资源循环利用方式,能够显著提高水资源的实际利用效率,减少对新鲜水资源的过度依赖情况,对缓解水资源供需之间的矛盾有着重要意义,超滤和反渗透技术属于先进的水处理技术类型,在中水回用过程当中发挥着十分关键的作用,超滤技术可以有效去除水中的悬浮物与胶体等杂质,为后续的处理工作提供优质的进水条件,反渗透技术则能够深度去除溶解性盐类和有机物等物质,让出水水质达到更高的相关标准要求,研究超滤和反渗透技术在中水回用里的应用与维护事宜,有助于优化处理工艺并降低运行成本,延长设备使用寿命以进一步提高水资源利用效率,对保障水资源的可持续利用具备迫切的现实意义^[1]。

1 超滤和反渗透技术原理及特点

表1 超滤技术与其他过滤方法的对比

特性	超滤 (UF)	微滤 (MF)	反渗透 (RO)
孔径范围	1 - 100nm	0.1 - 10 μm	<1nm
操作压力	0.1 - 0.6MPa	0.01 - 0.2MPa	1 - 10MPa
截留物质	大分子、胶体、细菌	悬浮颗粒、细菌	离子、小分子
矿物质保留	是	是	否
能耗	低	极低	高

1.2 反渗透技术

反渗透 (Reverse Osmosis, RO) 这种技术是基于半透膜的高效分离技术,它的核心原理是利用选择性透过膜在高压

1.1 超滤技术

超滤也就是 Ultrafiltration、UF 是以压力为驱动力的膜分离技术,它的核心是依靠超滤膜的筛分作用,还伴随吸附、静电作用等辅助机制,超滤膜的孔径范围在 1 到 100 纳米之间,能选择性截留水中蛋白质、胶体、细菌等大分子物质以及悬浮颗粒,同时允许水、无机盐等小分子透过,分离过程主要是基于分子大小和形状存在的差异,当流体通过膜表面的时候,粒径大于膜孔径的组分就会被机械截留也就是产生筛分效应,部分溶质会因膜材料亲疏水性或电荷特性吸附在膜表面,此外膜表面的荷电性能够通过静电排斥增强对带电物质的分离效果,超滤技术的优势有操作压力低在 0.1 到 0.6MPa、能耗小、无需相变,并且能保留水中钙、镁离子等部分有益矿物质,然而它对重金属离子、低分子量有机物等小分子污染物的去除效果有限,还容易受膜污染影响,需要定期进行清洗维护^[2]。

作用下实现水分子与溶质分离,在自然渗透过程里水分子会从低浓度侧向高浓度侧迁移以平衡化学势差,而反渗透是通过施加超过渗透压 (通常为 1 - 10MPa) 的外界压力迫使水

分子逆浓度梯度透过半透膜,同时截留溶解性盐类、有机物、微生物及重金属等污染物,RO膜的分离机制不光依赖于筛分效应(孔径<1nm),还涉及溶解-扩散模型也就是水分子优先吸附并扩散通过膜材料而溶质因低溶解性或高能垒被阻隔,该技术对各类污染物(包括离子、小分子有机

物和胶体)的去除率能达到95%~99.9%,出水水质接近纯水标准,不过反渗透系统面临操作压力高、能耗大(需增压泵)、膜易受污染(如结垢、生物污堵)等挑战,需要结合预处理(如超滤、活性炭过滤)和定期化学清洗来维持性能(如表2所示)^[3]。

表2 反渗透技术与其他膜分离技术的对比

特性	反渗透 (RO)	纳滤 (NF)	超滤 (UF)
孔径/截留分子量	<1nm (~100Da)	1 - 2nm (200 - 1000Da)	1 - 100nm (>1000Da)
操作压力	1 - 10MPa	0.5 - 2MPa	0.1 - 0.6MPa
主要截留物质	离子、小分子	二价离子、有机物	大分子、胶体、细菌
能耗	高	中	低
典型应用	海水淡化、纯水制备	硬水软化、废水处理	饮用水净化、预过滤

2 超滤和反渗透技术在中水回用中的应用

2.1 超滤技术的应用

超滤(UF)在中水回用系统里当作预处理手段使用,能够高效地截留悬浮物(SS)、胶体、细菌以及大分子有机物(像蛋白质、多糖之类),能显著降低后续工艺(例如反渗透、高级氧化)的污染负荷。它的分离过程是基于筛分效应的,典型截留分子量(MWCO)处于10~100kDa范围,可有效控制浊度(使其小于0.1NTU)和污泥密度指数(让SDI小于3),进而延长后续膜系统的使用寿命并且降低清洗频率。就比如在市政污水回用当中,超滤可以去除90%以上的COD(胶体态)以及99.9%的病原微生物,能为反渗透提供具有低污染潜力的进水^[4]。超滤和生物处理(例如MBR)、活性炭吸附等工艺

进行组合能够发挥协同效应。在“生物处理+UF+活性炭”工艺中,MBR通过生物降解来转化溶解性有机物,而超滤会截留残留菌胶团以及未被降解的大分子物质,后续活性炭吸附能进一步去除小分子有机物(例如腐殖酸),组合工艺对COD的总去除率能够达到95%以上。其协同作用可通过污染物分级去除模型量化:

$$\eta_{\text{总}} = 1 - (1 - \eta_{\text{生物}})(1 - \eta_{\text{UF}})(1 - \eta_{\text{活性炭}})$$

在这个式子当中, η (eta)所代表的是各单元对于目标污染物的去除率,从实际案例能够看到,某工业园区的中水回用系统采用这一组合工艺之后,反渗透膜污染速率降低了60%,运行成本节约了25%(如表3所示)。

表3 超滤组合工艺在中水回用中的典型性能对比

工艺组合	COD去除率	浊度控制	运行能耗(kWh/m ³)	适用场景
MBR+UF	85% - 90%	<0.2NTU	0.8 - 1.2	高有机负荷废水
UF+活性炭+RO	>95%	<0.1NTU	1.5 - 2.5	高标准回用水
混凝+UF	70% - 80%	<0.5NTU	0.5 - 0.8	低投资需求预处理

2.2 反渗透技术的应用

反渗透(RO)在中水回用深度处理环节起着关键作用,凭借其高选择性分离机制(孔径小于1纳米)能有效去除水中残留溶解性盐分(像钠离子、氯离子)、重金属离子(例如镉离子、铅离子)以及小分子有机物(比如农药、抗生素),让出水TDS(总溶解固体)降低到10至50毫克每升,以满足高品质回用水标准(如GB/T18920-2020城市杂用水要求)^[5]。其分离效率可通过截留率(R)表征:

$$R = \left[1 - \frac{C_p}{C_f} \right] \times 100\%$$

式子当中, C_p 和 C_f 分别代表透过液与进料液的溶质浓度,

就像某电子工业废水回用项目里,RO系统对 SO_4^{2-} 的截留率达到99.2%且出水电阻率大于15M $\Omega \cdot \text{cm}$ 可直接用于芯片清洗工艺。

在工业循环冷却水补水中,RO技术能够显著降低系统结垢风险(LSI指数小于0.5)。某电厂案例显示采用“UF+RO”双膜工艺后循环水浓缩倍数从3倍提升至6倍年节水达12万吨,在城市杂用水(例如绿化、冲厕)领域,RO出水结合紫外消毒可确保微生物安全性,北京某再生水厂运行数据表明其吨水处理成本较传统深度处理低0.8元,在农业灌溉方面,RO脱盐与滴灌系统联用可避免土壤盐渍化,以色列某项

目通过RO处理咸水(TDS从2000变为50mg/L)使作物产量提高22%,不过,RO的高能耗(3-6kWh/m³)和膜污染问题需通过优化预处理(比如UF抗污染保护)和能量回收装置(例如PX)来缓解。

3超滤和反渗透技术在中水回用中的维护策略

3.1 超滤系统的维护

超滤系统的维护对保障稳定运行和高效处理中水很重要,日常运行维护要定期检查膜组件完整性,可通过气泡观察法、压力衰减测试等方法,及时发现膜丝破损等问题以防杂质未有效拦截影响出水水质,同时要密切监测运行参数像进水压力、产水流量、跨膜压差及水质指标如浊度、COD等,一旦发现压力异常升高、流量下降或水质变差就应及时排查原因,此外还要及时清理砂滤器、保安过滤器等预处理设备,避免其堵塞影响超滤系统进水水质和流量^[6]。

化学清洗是让超滤膜性能恢复的重要手段,当跨膜压差较初始值上升15%-20%、产水量下降10%-15%或者出水水质变差的时候就应进行化学清洗,清洗剂的选择要依据膜污染的具体类型来确定,针对有机物污染通常会使用碱性清洗剂,对于无机盐垢污染则会选用酸性清洗剂,清洗方法一般采用循环清洗和浸泡清洗相结合的方式,先进行一段时间循环清洗让清洗剂充分与污染物接触,接着再浸泡一段时间以此增强清洗效果,不同清洗方案对膜性能恢复效果存在差异需要根据实际情况进行优化。

当膜组件出现严重破损情况、性能无法恢复正常或者达到设计使用寿命的时候,就需要对其进行更换,更换之前要认真做好各项准备工作,停机并且排空系统里面的液体,更换的时候要注意按照操作规范来做,避免在操作时损坏新的膜组件,更换完成之后要进行调试以及检测,以此确保超滤系统处理效果能够达标^[7]。

3.2 反渗透系统的维护

反渗透系统的维护对保障其高效稳定运行和出水水质很关键,运行参数的监控与调整这一工作至关重要,需实时关注进水压力、浓水压力、回收率、脱盐率等关键参数,进水压力过高或者过低会影响产水量与脱盐率,浓水压力出现异常情况可能暗示膜组件发生堵塞,回收率设置过高容易引发膜污染的问题,脱盐率出现下降情况表明膜性能已经受损,要依据实际情况及时对参数做出调整,让系统处于最佳运行状态之中。

膜污染防治这件事绝对不能被忽视,反渗透膜污染的成

因较为复杂且类型多样,像颗粒物堵塞、无机盐结垢以及微生物滋生等情况都有,可采取具有针对性的防治措施来处理,要优化预处理工艺通过砂滤、活性炭过滤等去除大颗粒杂质,还可添加阻垢剂防止无机盐结垢并利用杀菌剂抑制微生物生长,从而从源头上减少膜污染的发生。

系统清洗与消毒属于维护工作里的重要环节,要依据系统实际运行情况来确定清洗周期,通常当产水量下降幅度达到10%-15%或者脱盐率降低5%-10%的时候就需要进行清洗,清洗方法包含物理清洗像低压冲洗以及化学清洗需根据污染类型选择合适清洗剂,与此同时要定期开展消毒工作,以此保障系统出水水质的安全并且延长膜的使用寿命。

4结束语

超滤和反渗透技术用于中水回用的时候成效特别显著,超滤技术依靠其筛分以及吸附等机制,能有效去除水中的悬浮物和胶体等杂质,通常作为预处理手段来减轻后续处理负担,与其他工艺组合应用可提升整体处理效果,反渗透技术能够深度去除盐分和重金属离子等,让出水水质达到更高标准从而满足多种用水需求,在维护方面超滤系统需要定期监测运行参数并适时化学清洗与更换膜组件,反渗透系统要严格监控运行参数、防治膜污染并且做好清洗消毒,超滤和反渗透技术的应用极大提高了中水水质有力推动水资源循环利用,对缓解水资源短缺问题具有重要意义值得在中水回用领域进一步推广应用。

[参考文献]

- [1]冯洁. 浅析反渗透技术在中水回用装置中的应用[J]. 山东化工, 2019, 48(01): 198-199.
- [2]余冬贞. 超滤和反渗透技术在电厂中水回用中的应用[J]. 工业水处理, 2017, 37(11): 101-105.
- [3]李红卫. 反渗透技术在中水回用系统中的应用探讨[J]. 环境与发展, 2017, 29(05): 115+117.
- [4]彭巧玲, 曹顺安, 郑观文. 超滤和反渗透技术在电厂中水回用中的应用[J]. 应用化工, 2017, 46(01): 199-202.
- [5]李晋, 张杰. 简析反渗透技术在中水回用系统中的应用[J]. 科技创新与应用, 2016, (17): 164.
- [6]兰建霜, 于立洋, 邢晨曦. 超滤+反渗透技术在排污水回用中的应用[J]. 科技风, 2010, (08): 210+213.
- [7]任佑. 反渗透技术在热电厂中水回用系统中的应用[D]. 大连理工大学, 2007.