

过滤器与超滤装置协同设计及性能优化路径

徐陆培

浙江弗莱德环境科技股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8804

[摘要] 针对水处理系统中过滤器与超滤单元适配性不足、运行能耗偏高、膜污染加剧等行业痛点，构建二者协同运行的技术框架，剖析预处理过滤与膜分离单元的耦合机理，明确精度匹配、流量协同、结构适配三大核心设计维度。通过参数调控、结构改良、运维优化等多维手段，实现系统通量提升、污染速率放缓、使用寿命延长的目标，为水处理分离装置的高效化、长效化设计提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 过滤器；超滤装置；协同设计；膜污染控制

Synergistic Design and Performance Optimization Path for Filters and Ultrafiltration Systems

Xu Lupei

Zhejiang Fred Environmental Technology Co., Ltd.

[Abstract] Addressing industry challenges such as poor compatibility between filters and ultrafiltration units in water treatment systems, high operational energy consumption, and accelerated membrane fouling, this study establishes a technical framework for their coordinated operation. It analyzes the coupling mechanisms between pretreatment filtration and membrane separation units, identifying three core design dimensions: precision matching, flow rate coordination, and structural compatibility. Through multidimensional approaches including parameter optimization, structural improvements, and operational maintenance enhancements, the study achieves objectives of increased system flux, reduced fouling rates, and extended service life. These findings provide theoretical support and practical references for the efficient and long-term design of water treatment separation systems.

[Key words] Filter; Ultrafiltration device; Collaborative design; Membrane fouling control

超滤技术凭借高精度分离、低压运行、绿色环保等优势，在饮用水净化、工业废水回用、特种流体提纯等领域广泛应用，但其膜组件易受颗粒杂质、胶体污染物堵塞，制约系统稳定运行^[1]。前置过滤器作为超滤单元的核心预处理环节，可有效截留大粒径杂质、缓解膜面污染，二者协同效能直接决定整体系统的处理效率与运维成本。当前行业内多存在单元独立设计、参数匹配脱节问题，亟需构建一体化协同设计体系，挖掘性能提升潜力，推动分离工艺提质增效。

1 过滤器与超滤装置协同设计核心机理

1.1 预处理过滤与超滤分离的耦合关系

过滤器与超滤装置并非独立的分离单元，而是形成梯度拦

截、逐级净化的协同体系，二者的耦合效应贯穿流体输送、杂质截留、通量维持全流程。前置过滤器承担粗滤与精滤双重职能，针对性去除水体中悬浮颗粒、铁锈碎屑、絮状胶体等易造成超滤膜孔堵塞的污染物，构建稳定的进水水质环境，从源头降低超滤膜的污染负荷。超滤装置则依托微孔分离机制，实现细微胶体、微生物、大分子有机物的精准截留，完成终端净化，二者形成互补式分离梯度，避免单一单元负荷过载。

协同运行的核心在于实现过滤精度与截留粒径的有序衔接，过滤器的截留孔径需大于超滤膜孔径，同时兼顾杂质去除率与流体通量大平衡。若过滤精度过高，会加剧系统阻力、提升运行能耗；若精度不足，则无法发挥预处理屏障作用，超滤

膜污染速率将大幅加快。这种梯度适配关系，是协同设计的底层逻辑，也是保障系统连续稳定运行的关键前提^[2]。

1.2 协同设计的核心约束条件

开展协同设计需综合考量水质特性、处理规模、运行工况、运维成本等多重约束，构建多目标优化的设计边界。原水水质是首要约束因子，针对高浊度、高胶体含量的进水，需强化过滤器的杂质截留能力，增设多级过滤结构；针对低浊度、溶解性杂质为主的进水，可简化过滤层级，聚焦流量匹配与压力调控。处理规模决定装置的选型与布局，大流量系统需选用自清洗式、盘式等高通量过滤器，搭配帘式、柱式超滤膜组件，实现处理能力的协同匹配。

运行压力、流体流速、反洗周期等动态参数，同样是协同设计的重要约束。压力失衡会导致过滤器穿透、超滤膜破损，流速不均会引发局部污染堆积，反洗节奏脱节则会降低系统再生效率。此外，装置材质耐腐蚀性、占地面积、运维便捷性等工程因素，也需纳入设计体系，确保协同方案兼具技术可行性与经济合理性^[3]。

2 过滤器与超滤装置一体化协同设计方案

2.1 过滤单元与超滤单元的结构协同布局

结构布局的合理性直接影响流体输送效率与杂质截留效果，协同布局遵循“紧凑化、梯度化、易运维”原则，优化单元连接方式与空间排布。采用串联式主体布局，将过滤器设于超滤装置前端，搭配旁路缓冲管路与压力调节模块，实现流体的平稳过渡。针对复杂水质，可采用“粗滤+精滤”双级过滤结构，粗滤单元截留大颗粒杂质，精滤单元去除细微悬浮物，两级过滤器并联备用，保障连续运行；超滤单元采用模块化组装，依据处理量灵活增减膜组件数量，与过滤单元处理能力精准匹配。

管路系统采用变径设计，衔接段增设导流装置，消除涡流与死区，避免杂质沉积；同时预留在线监测接口，实时采集进水浊度、压差、流量等参数，实现单元间的联动调控。整体布局减少弯头与阻力件，降低沿程水头损失，兼顾处理效率与运维空间，为后续性能优化奠定结构基础。

2.2 运行参数的协同匹配设计

运行参数协同是提升系统效能的核心，重点围绕流量、压力、过滤速率三大核心指标开展精准匹配。流量匹配遵循“过滤器通量略大于超滤装置通量”的原则，预留10%~15%的流量冗余，应对水质波动与杂质堵塞引发的通量衰减，避免超滤单元进水不足。压力协同采用分级调控模式，过滤器运行压力控制在0.1~0.3MPa，超滤装置运行压力维持在0.2~0.4MPa，前

后压差控制在合理区间，防止压力突变导致膜丝断裂或滤料穿透^[4]。

过滤速率与膜面流速协同调控，过滤器滤速根据水质特性设定，高浊度进水采用低滤速以提升截留效果，低浊度进水可适当提高滤速保障处理量；超滤膜面流速控制在1.0~1.5m/s，通过错流冲刷减少污染物附着，与过滤器的截留效率形成联动。同时设定压差预警阈值，当过滤器前后压差超0.15MPa或超滤膜压差超0.2MPa时，自动启动反洗程序，实现参数动态协同。

2.3 材质与选型的协同适配

材质选型兼顾耐腐蚀性、截留性能与环保性，实现过滤与超滤单元的长效适配。过滤器滤料选用石英砂、无烟煤、聚丙烯滤芯等材质，针对腐蚀性进水采用316L不锈钢壳体与耐酸碱滤料，提升使用寿命；超滤膜组件优先选用聚偏氟乙烯(PVDF)材质，具备优异的耐污染性与机械强度，适配过滤器预处理后的进水水质。

选型方面，大流量、连续运行场景选用自清洗过滤器、叠片过滤器，搭配中空纤维超滤膜；小流量、间歇运行场景选用滤芯式过滤器，搭配板式超滤膜。滤料孔径与膜孔径形成梯度配比，常规场景下过滤器孔径控制在50~100 μm ，超滤膜孔径控制在0.01~0.1 μm ，既保障预处理效果，又避免过度过滤造成能耗浪费。

3 协同系统性能瓶颈与影响因素分析

3.1 膜污染与滤料堵塞的协同影响

膜污染与滤料堵塞是制约协同系统性能的核心瓶颈，二者存在连锁反应，形成恶性循环。过滤器滤料长期运行会出现孔隙堵塞、截留效率下降，未被去除的细微杂质进入超滤单元，附着在膜面、堵塞膜孔，导致超滤通量快速衰减、运行压力升高；而超滤膜污染加剧后，会引发系统背压增大，反向加剧过滤器的负荷，进一步加速滤料失效。

污染成因主要包括颗粒杂质沉积、胶体吸附、微生物滋生、有机物络合等，水质波动、参数匹配不当、反洗不彻底会加速污染进程。高浊度进水、高有机物含量流体，更容易引发滤料板结与膜面浓差极化，大幅缩短系统清洗周期与使用寿命，成为性能优化的重点攻克方向。

3.2 运行能耗与效率失衡问题

协同系统能耗主要集中在流体输送、反洗再生、压力调控环节，能耗失衡多源于单元参数不匹配、结构设计不合理。过滤器与超滤装置流量、压力脱节，会导致水泵频繁启停、扬程过剩，增加电能消耗；反洗频率过高、反洗水量过大，会造成

水资源浪费与能耗上升;管路阻力过大、布局不合理,会加剧水头损失,提升运行能耗。

同时,部分系统存在“重处理、轻优化”问题,盲目提升过滤精度与膜面积,导致处理效率过剩、能耗偏高,投入产出比失衡。效率失衡还体现在杂质截留不均,局部滤料与膜丝负荷过载,整体系统利用率偏低,难以实现效能最大化。

3.3 运维管控与长效运行短板

运维管控缺失是影响协同系统长效运行的关键因素,传统运维模式多采用人工定期清洗、更换耗材,缺乏智能化调控手段。过滤器滤料更换不及时、反洗强度不足,会导致截留效率持续下降;超滤膜化学清洗频率不当、清洗剂选型不合理,会损伤膜丝结构,降低分离性能。

此外,缺乏在线监测与联动预警机制,无法及时感知水质波动、污染速率变化,难以及时调整运行参数,导致小故障演变为系统失效,增加运维成本与停机风险。运维流程不规范、耗材质量不达标,也会进一步弱化协同效能,制约系统长期稳定运行。

4 协同系统性能优化实施路径

4.1 污染控制与通量稳定优化

针对水处理系统运行过程中普遍存在的膜污染与滤料堵塞难题,我们构建“预处理强化+在线调控+高效清洗”一体化全流程污染控制体系,通过全周期精准管控,切实实现水处理系统膜通量的长效稳定维持,保障整体处理工艺连续高效运行。系统重点优化前置过滤器的截留处理效果,针对性采用多级梯度过滤工艺,同时配合投加微量絮凝剂(全程采用非化学强化模式,避免二次污染与药剂残留),全面提升水体中细微悬浮杂质、胶体颗粒的去除率,大幅削减后续超滤膜单元的污染负荷,从源头阻断污染物在膜面和滤料孔隙内的初始沉积。

清洗环节系统采用“物理反洗+化学清洗”协同联动模式,针对不同处理单元制定差异化清洗方案,兼顾清洗效果与组件使用寿命。针对前置过滤器,系统定期开展气水联合反洗作业,强力清除滤料孔隙内部淤积的杂质,疏通滤料过滤通道,恢复滤料截留能力。针对超滤膜组件,优先采用脉冲反洗、海绵球机械擦洗等纯物理清洗手段,剥离膜面松散污染物,再搭配低浓度环保型专用清洗剂开展温和化学清洗,深度清除膜面致密污染层,快速恢复膜通量。

4.2 运行参数与能耗精细化优化

依托智能化调控技术,实现运行参数精细化匹配,降低系统能耗、提升处理效率。采用变频调速技术,根据水质波动与处理需求,动态调节水泵转速与流量,避免大马拉小车现象;

优化压力分级控制,缩小前后单元压差,减少水头损失。

建立能耗评估模型,核算过滤精度、滤速、反洗水量等参数对能耗的影响,确定最优运行区间。针对高能耗环节进行改造,简化管路布局、更换低阻力配件、采用高效节能泵,实现能耗与效率的平衡。同时优化反洗程序,采用气水联合反洗,减少反洗水量与时间,降低再生能耗,提升系统经济性。

4.3 结构改良与智能化运维优化

结构改良聚焦提升流体分布均匀性,优化过滤器布水装置与超滤膜组件排布,消除死区与涡流,避免杂质局部堆积;采用模块化、可拆卸设计,便于滤料更换与膜组件检修,降低运维难度。增设在线监测仪表,实时采集浊度、压差、流量、pH等参数,搭建联动管控平台,实现自动预警、自动反洗、参数自适应调节。

且企业可建立全生命周期运维体系,制定滤料更换、膜清洗、设备检修的标准化流程,选用高品质耗材与配件,提升系统可靠性。开展运维人员专业培训,规范操作流程,定期进行系统性能检测与参数校准,保障协同系统长期高效运行。

5 结论与展望

过滤器与超滤装置的协同设计是提升水处理分离系统效能的核心路径,通过结构布局、运行参数、材质选型的多维适配,可有效缓解膜污染、降低运行能耗、提升系统稳定性。性能优化需围绕污染控制、能耗管控、智能运维三大方向,实施精细化、系统化改良,实现分离效率与运维成本的最优平衡。

未来,企业可进一步融合新材料技术、人工智能算法,研发自适应协同调控系统,实现水质感知-参数优化-智能清洗的全自动化运行。并探索新型滤料与膜材料的协同适配,提升梯度分离精度,推动过滤器-超滤协同技术向高效化、智能化、绿色化方向升级,拓展其在特种水处理、高端流体提纯等领域的应用场景。

[参考文献]

- [1]何北奇. IGCC 除盐水预处理装置问题分析与改造方案选择 [J]. 炼油技术与工程, 2022, 52 (02): 21-24.
- [2]梁宗俊, 张克磊. 便携式洗车废水处理装置的研究及应用 [J]. 广东化工, 2021, 48 (17): 151-152.
- [3]李扬, 王晓平. 双膜处理装置膜污染原因分析及对策 [J]. 大氮肥, 2019, 42 (05): 357-360.
- [4]王海向. 基于DCS的生活水处理装置控制系统设计 [J]. 石油化工自动化, 2018, 54 (03): 16-19.

作者简介: 徐陆培, 出生年月: 1971-09-19, 男, 汉族, 籍贯: 浙江, 学历: 本科, 研究方向: 化工。