

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.010

NSUF技术在自来水厂废水回用处理中的应用

盛忠祥¹, 耿安朝¹, 耿策², 李旭², 单以停²

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 苏州膜海水务科技有限公司,
江苏 苏州 215000)

摘 要: 针对传统超滤技术在自来水厂生产废水处理过程中存在的问题,设计研发了一种非浸没式超滤(NSUF)技术对水厂生产废水进行回用处理。通过考察和优化运行过程中膜通量与膜污染的关系,确定了较优的运行参数和清洗工况。中试结果表明,相较于传统卷式膜和管式膜,采用NSUF技术后出水水质稳定,对浊度的平均去除率为99%,产水浊度<0.03 NTU,产水各项指标均优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),平均产水率达98.5%。此外,通过扫描电子显微镜(SEM)对膜表面进行表征,发现膜污染情况较轻;NSUF技术处理成本约为0.238元/m³。相较传统水厂生产废水回用处理技术,NSUF技术处理效能更高,运维成本更低,具有推广应用的前景。

关键词: 非浸没式超滤(NSUF)技术; 自来水厂; 生产废水; 回用处理; 膜通量

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0069-07

Application of Non-submerged Ultrafiltration Technology in Wastewater Reuse and Treatment at Waterworks

SHENG Zhong-xiang¹, GENG An-chao¹, GENG Ce², LI Xu², SHAN Yi-ting²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Suzhou Mohai Water Service Technology Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In this study, a non-submerged ultrafiltration (NSUF) technology was designed and developed to facilitate the reuse and treatment of production wastewater from waterworks, providing references for solving the issues associated with traditional ultrafiltration technology in treating such wastewater. The optimal operating parameters and cleaning protocols were identified by systematically investigating and optimizing the relationship between membrane flux and membrane fouling during operation. Compared with traditional spiral-wound membranes and tubular membranes, the effluent quality remained stable upon employing NSUF technology in a pilot test. The average turbidity removal rate reached 99%, with the effluent turbidity being less than 0.03 NTU. Various indicators of effluent were superior to the values specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022), and the average water production rate was as high as 98.5%. In addition, the surface morphology of the membrane was characterized by scanning electron microscope (SEM), revealing that the membrane fouling was relatively mild. The processing cost associated with NSUF technology was approximately 0.238 yuan/m³. Compared to production wastewater reuse and treatment technologies in conventional waterworks, the NSUF technology demonstrates higher treatment efficiency and lower operation and maintenance costs, making it

a promising candidate for widespread adoption and application.

Key words: non-submerged ultrafiltration (NSUF) technology; waterworks; production wastewater; reuse and treatment; membrane flux

近年来我国自来水厂数量不断增加,供水能力日益增强,同时也产生了大量生产废水,其主要来源于沉淀池的排泥水和滤池的反冲洗废水,约占水厂日产水量的3%~10%,若直接排放不仅污染环境,还会造成水资源的大量浪费。因此从可持续性角度考虑,需对这部分废水进行处理回用^[1]。

自来水厂生产废水通常富集大量悬浮物,浊度在3~180 NTU,同时还含有有机物、三卤甲烷、金属离子、细菌微生物以及生产过程中加入的混凝剂等。目前对生产废水处理回用的方式有两种,一是直接回用,二是处理后回用,前者是国内采用较多的处理方式,但排泥水与反冲洗废水水质差异较大,使得后续污水脱泥效果不理想且出水水质存在安全风险;后者采用的膜法处理回用工艺因其出水浊度低、可有效控制消毒副产物前体物及致病微生物、回收率高和运行费用低等优势逐渐得到重视,而超滤(UF)技术作为一种安全高效的处理方式更适用于水厂生产废水的回用处理^[2-7]。

超滤技术不但能够稳定去除水厂生产废水中的悬浮物、金属物质、腐殖质等污染物,而且产水率高、能耗低、占地面积小,易进行自动化操作,因此具有良好的发展前景。目前国内外应用广泛的UF膜分离装置包括卷式膜、管式膜、中空纤维膜(帘式)、板式膜等,在缓解膜污染的措施上,管式膜和卷式膜需通过提高膜面流速的方式减小边界层;板式膜和中空纤维膜采用浸没式操作方式,需对膜面实施高强度曝气冲刷^[8-11]。同时为防止高悬浮物生产废水对UF膜造成污染堵塞,通常还需向原水投加混凝剂进行预处理,使得自来水厂废水处理回用工艺更加复杂,吨水处理成本更高,操作维护也更困难^[12-13]。因此,为改善传统超滤工艺在运行中的缺陷,笔者设计了一种非浸没式超滤(NSUF)膜分离装置,并对某自来水厂废水进行了中试,旨在为水厂废水回用提供一种新型高效的处理工艺。

1 NSUF技术

1.1 NSUF基本原理

NSUF是一种在膜操作原理上与传统浸没式超

滤有较大差异的膜分离技术,其独特之处在于利用陶瓷膜的泡点压力高于超滤时负压抽吸的操作压力这一特点,使超滤膜在湿润状态下具备良好的气密性以及一定的跨膜压差。在此理论前提下,NSUF设备被设计成膜组件与滤池分离的形式,无需传统膜池,过滤时通过射流分布器向膜面均匀提供滤液并形成湍流边界层,结合膜腔负压抽吸产生的错流剪切力,便可实现溶质的高效截留。

与传统浸没式超滤相比,NSUF因独特的“膜面流”错流方式使其能够随进水进行实时在线正冲洗,无需采用曝气冲刷或滤液循环错流的方式减缓膜污染;而且相比传统“管式流”,其供水量与产水量比值(供/产水比)仅为2~4,节能效果更加显著;同时配合多级串联式NSUF,可有效解决滤液在膜池中连续浓缩而导致设备高负荷运行的问题,使膜工艺进一步优化。

1.2 NSUF的操作过程

NSUF装置如图1所示,主要由进水与布水系统、膜组件、集水与抽吸系统、浓水循环与排浓系统、清洗系统等构成。其中NSUF设备的膜组件非浸没地置于槽体中,产水时原水由布水器向膜面均匀喷射布水,料液在重力驱动下从膜组件顶部流至底部,充分接触并浸润膜面形成一定厚度的“膜面流”,有利于减小边界层以及消除浓差极化,同时起到正冲洗效果;原水在膜表面产生的高剪切力使得膜面微粒向主体溶液反向扩散,从而被带出膜组件流入下方浓水池,当微粒在膜表面的沉积速度等于向溶液反向扩散的速度时,被截留在膜表面的微粒形成的沉积层厚度将不再增加并一直保持较薄状态,不仅不会对出水水质产生负面影响,还可以使膜通量在较长时间保持较高水平;在连续“膜面流”的浸润下,膜片始终气密性良好,抽液泵通过负压抽吸最终完成NSUF的错流过滤过程,产水从膜腔流至膜元件出液口,汇集于出液管路出液口,再经管路收集到清水箱;膜面过剩的原水流入下方浓缩池,当需要进行高浓缩比运行时,浓缩池中液体可以通过循环泵与原水混合,继续向膜面循环供水,

也可以根据实际情况作为下一级超滤的原水,实现多级串联式 NSUF 操作模式,以减轻膜组件运行负荷;浓缩池的浓缩液定期排放。

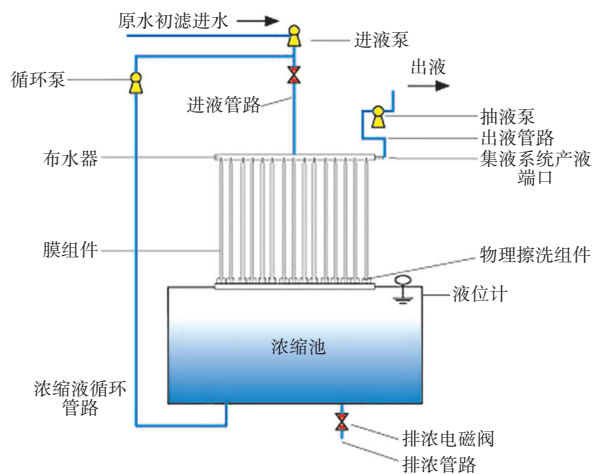


图1 NSUF装置示意

Fig.1 Schematic diagram of NSUF device

1.3 膜污染与膜清洗

膜污染是膜组件运行过程中无法避免的问题,传统浸没式超滤多采用高强度曝气或大流量滤液循环,通过强力气流或水流冲刷表面防止滤层堵塞并延缓膜污染,但此类操作方式对膜丝磨损高、设备能耗大、清洗频繁、耗时且不利于进行正冲洗。为此,NSUF装置专门设计了内置于膜组件的在线清洗系统。物理擦洗组件由PLC程序控制,与原水“膜面流”的正冲洗相结合,利用清洗辊与膜表面的摩擦力去除松散的沉积物,在电机驱动下实现对膜表面周期性上下往复擦洗,也可以打开反洗管路上的反洗泵进行定期反洗,通过设定清洗循环周期以执行日常维护清洗;当常规的物理擦洗无法使膜通量恢复至正常水平时,可以切换至化学清洗系统,通过循环泵使化学清洗药剂回流至药液池循环使用;也可以根据实际运行中膜污堵的情况将物理清洗与化学清洗相结合,以更高效地恢复膜通量,缓解膜污染。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

试验中使用的NSUF装置是集原水进水、布水、超滤产水、浓水循环、浓水排放、膜清洗等功能于一体的自主研发设备,采用PLC程序控制,其中超滤膜组件采用中空腔式陶瓷平板膜,膜孔径为 $0.08\mu\text{m}$,单片膜面积为 0.5m^2 ,共计100片,膜片总面积

为 50m^2 ;NSUF和浸没式超滤技术对比试验中使用相同的5片膜,总面积为 2.5m^2 。出水泵功率为600W,电机功率为120W,进水泵和离心泵功率均为700W。设备设计产水通量为 $5\text{m}^3/\text{h}$,过滤方式为外进内吸式,可24h不间断运行。

2.2 试验原水

试验原水为福州市东区某水厂废水,经检测,水厂水源水质理化指标良好,无色无味,无肉眼可见杂质,多次取样后发现水质情况较稳定,其中浊度为 $8.36\sim 9.36\text{NTU}$, UV_{254} 为 $0.035\sim 0.053\text{cm}^{-1}$,电导率为 $93.5\sim 94.0\mu\text{S}/\text{cm}$,氨氮为 $0.057\sim 0.066\text{mg}/\text{L}$,pH为 $7.1\sim 7.5$, COD_{Mn} 为 $2.15\sim 2.81\text{mg}/\text{L}$,氯离子为 $4.7\sim 5.0\text{mg}/\text{L}$ 。

2.3 分析项目和方法

浊度:哈希2100Q便携式浊度仪; UV_{254} :紫外可见分光光度计;电导率:DDS-307型电导率仪;氨氮:纳氏试剂分光光度法;pH:力辰LC-PH-2B台式酸度计; COD_{Mn} :酸性高锰酸钾法;氯离子:SSWY-810氯离子检测仪;膜片显微特征:扫描电子显微镜(SEM)。

2.4 试验方法

试验流程如图2所示。根据NSUF装置的跨膜压差和膜通量变化情况确定该设备的最佳膜面供水量、供/产水比,同时通过对比试验探究NSUF与浸没曝气式超滤工艺的运行清洗情况以及NSUF设备的连续运行表现等,并对产水水质及处理成本进行考察,为验证和优化NSUF技术应用于自来水厂生产废水的处理提供相关数据支持。

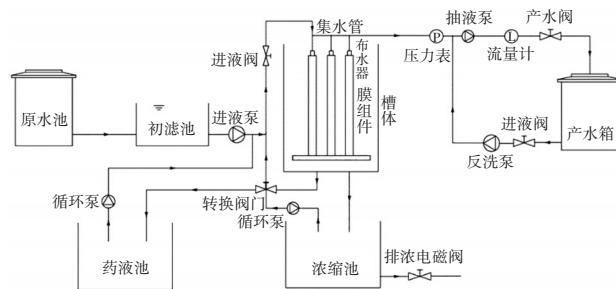


图2 试验流程

Fig.2 Flow chart of the experiment

3 结果与讨论

3.1 膜面供水量的确定

膜面供水量是影响NSUF系统运行效能的关键参数,其通过改变膜面流速显著影响通量特性。当

供水量不足时,膜表面难以形成连续水化层,导致膜污染加剧、产水量衰减;反之,供水量较大则会引引起能量损耗增加、效率下降等问题。为优化该参数,本研究设计了具有均匀布水特性的喷射式膜面布水装置,图3为在初始跨膜压差恒定为30 kPa条件下,膜通量随膜面供水量的变化。

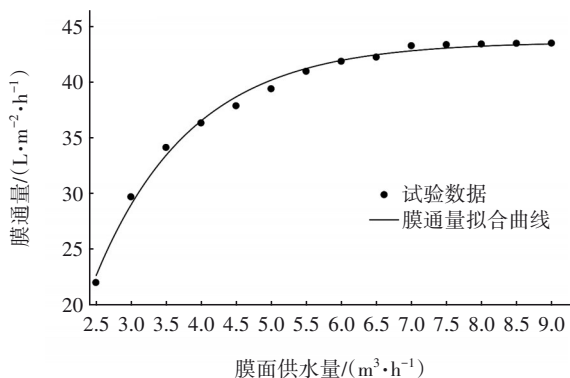


图3 不同膜面供水流量下膜通量的变化

Fig.3 Change in membrane flux under different surface water supply flow rate

由图3可知,在跨膜压差相同的条件下,当膜面供水量从2.5 m³/h增至7.0 m³/h时,膜通量由22 L/(m²·h)增至42.8 L/(m²·h),继续增加膜面供水量至9.0 m³/h,膜通量基本不再增大。从膜操作效率考虑,当供水量越小、膜通量越大时,膜操作效率越高,余液的浓缩比也越高;但同时考虑到更大的膜面流速能为膜片提供更好的正冲洗效果,故膜面供水量也应适当“过剩”。当供水量为7.0 m³/h时,单位膜面积供水量为0.14 m³/(m²·h),膜通量接近峰值42.8 L/(m²·h),即超滤产水量为2.14 m³/h,可见在此条件下NSUF膜设备不仅具备良好的正冲洗效果,而且也达到了较高的运行效率。传统管式膜和卷式膜在运行过程中需数十倍滤液进行大流量循环,浸没式超滤则需通过曝气冲刷缓解膜污染,相较于此,NSUF设备在超滤过程中只需使膜片形成一定厚度的“膜面流”即可,具有更高的操作效率。

3.2 供/产水比对膜污染的影响

NSUF设备通过布水器向膜面均匀喷射布水并产生“膜面流”,滤液沿着膜面切线方向自上而下垂直运动,在错流传质过程中滤液不断被浓缩,膜污染程度也随之加剧,因此供水量与产水量的比值会直接影响膜片的水力负荷。当供/产水比接近1时,膜片可能会出现极端“干化”,膜面无法覆盖一定厚

度水层,不具备良好的气密性,甚至出现抽气现象,且超滤膜截留的微粒大量附着于膜表面,导致膜片污堵、膜通量降低,所以供/产水比需大于1。随着供/产水比的提高,膜面流速相应增大,正冲洗效果提高,但若比值过大则会增加设备能耗,降低产水效率。控制膜面供水量为7.0 m³/h,设定跨膜压差从初始值30 kPa上升至60 kPa所需的时间为物理清洗周期,考察供/产水比对膜通量和物理清洗周期的影响,结果见图4。

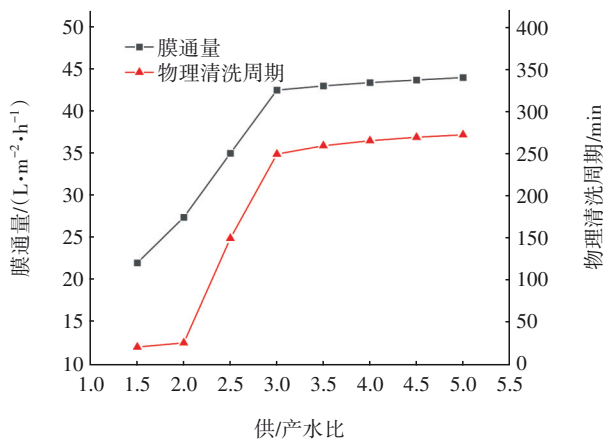


图4 供/产水比对膜通量和物理清洗周期的影响

Fig.4 Effect of water supply to water production ratio on membrane flux and physical cleaning cycle

由图4可知,随着供/产水比增大,膜通量和物理清洗周期也不断增大。当供/产水比由1.5增至4.0时,膜通量从22 L/(m²·h)增至42.8 L/(m²·h),物理清洗周期从20 min增至270 min;而当供/产水比由3.0增至4.0时,膜通量和清洗周期的增长幅度均不足6%。考虑到设备综合运行成本,当供/产水比为3.0时,原水对膜面正冲洗效果较好,膜污染情况也较轻。

3.3 NSUF与浸没式超滤运行对比

为考察NSUF与传统浸没式超滤的运行和清洗恢复情况,分别对两种工艺进行中试,试验原水为滤池反冲洗废水的上清液,设定抽停比为60:10(即产水60 min,维护性清洗10 min),起始压差为20 kPa,NSUF采用物理擦洗,浸没式超滤在压力为600 kPa条件下进行曝气冲洗,当物理清洗无法大幅度恢复膜透水性能时,开始化学清洗。试验运行10 h,记录两种超滤工艺运行过程中的膜通量和跨膜压差变化,结果如图5所示。可以看出,浸没式超滤的跨膜压差和膜通量变化幅度较为平缓,但膜通量始

终小于 NSUF 运行时的膜通量,这是因为跨膜压差相同情况下,浸没式超滤的死端过滤方式对产水通量有一定影响,而 NSUF 特殊的“膜面流”错流过滤方式不仅可提高膜通量,还有利于缓解浓水对膜的污染情况。同时对比两种工艺每运行 60 min 后的 10 min 维护性清洗效果发现,相较浸没式超滤的曝气冲洗,NSUF 独特的物理擦洗方式可以较大幅度降低跨膜压差,膜通量平均恢复率可达到 95% 以上。运行至 420 min 时,两种工艺均进行 120 min 的化学恢复性清洗,结果发现,NSUF 系统采用化学清洗协同机械擦洗的方式,使膜通量恢复率达到 $(98.1 \pm 0.5)\%$,显著高于浸没式超滤系统采用化学清洗联合曝气冲洗的恢复率 $[(90.2 \pm 1.3)\%]$;在操作层面,NSUF 通过 PLC 控制的在线清洗系统实现全流程自动化,相较于浸没式超滤需中断运行并分离膜组件的清洗方式,NSUF 更易操作。综上所述,NSUF 工艺可以获得更高的膜通量和更佳的膜性能恢复效果。

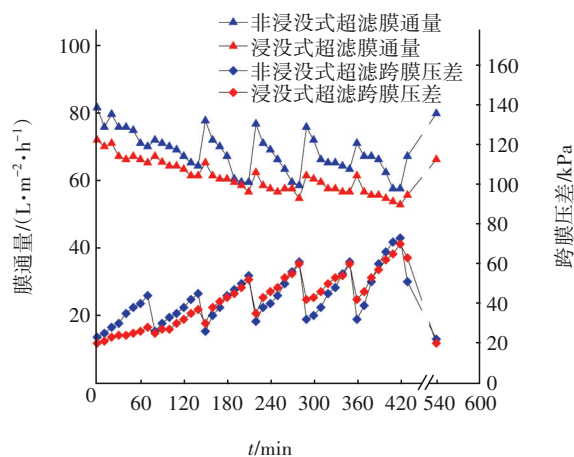


图5 NSUF和浸没式超滤的膜通量及跨膜压差随运行时间的变化

Fig.5 Change in membrane flux and transmembrane pressure of NSUF and submerged ultrafiltration with operating time

3.4 NSUF 清洗效能显微分析

采用 SEM 对污染前后以及清洗后陶瓷膜的微观形貌进行表征,结果如图 6 所示。可知,平板陶瓷新膜的表面较为光滑,膜孔清晰,而污染后的陶瓷膜表面形成了较厚的污染层,堵塞了大部分膜孔。NSUF 设备经物理、化学清洗后均能较大幅度实现膜污染物质的清除与膜性能的恢复,膜面结构几乎与新膜无异,表明 NSUF 设备的物理和化学清

洗可以较大程度地抑制膜污染并恢复膜通量,降低跨膜压差。

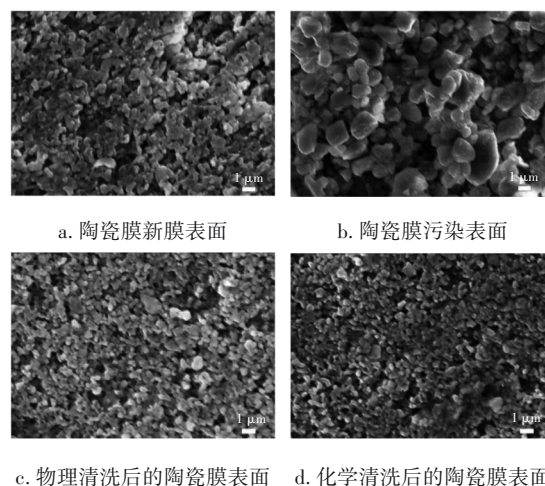


图6 陶瓷膜表面的显微表征($\times 10\ 000$)

Fig.6 Microscopic characterization of ceramic membrane surface ($\times 10\ 000$)

3.5 连续操作运行效果

为全面考察 NSUF 设备对自来水厂废水处理回用的性能,以该水厂的生产废水为原水进行中试。根据原水水质设定装置的循环流量为 $15\text{ m}^3/\text{h}$,浓水排放量为 $0.31\text{ m}^3/\text{h}$,平均产水率控制为 98.5%,初始跨膜压差为 30 kPa;设备运行 60 min,PLC 自动控制系统进行 10 min 常规物理擦洗;当跨膜压差超过 35 kPa 时,系统自动停机,使用 0.05% 的 NaOH 溶液并联合物理清洗系统对膜组件进行 15 min 的擦洗。设备连续运行 20 d,产水量及跨膜压差随时间的变化如图 7 所示。

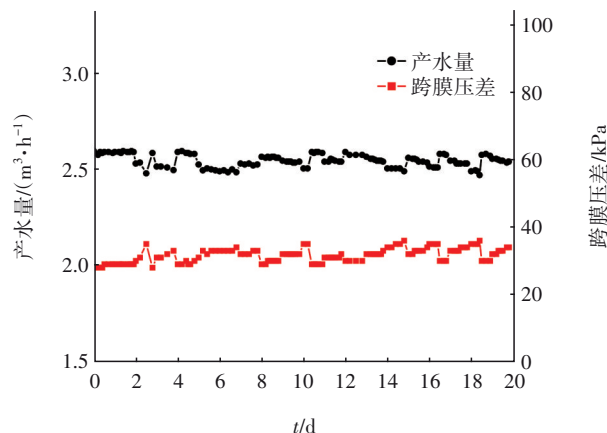


图7 长期运行时产水量和跨膜压差的变化

Fig.7 Change in water yield and transmembrane pressure during long-term operation

由图 7 可知,在该工况下运行的前 72 h,超滤产

水量在2.44~2.61 m³/h之间波动,跨膜压差在28~39 kPa之间变化,膜片经清洗后跨膜压差总能恢复至30 kPa左右;但随着装置的连续运行,每经过一个物理清洗周期,逐渐出现产水量略微下降、跨膜压差缓慢上升的趋势,说明膜表面开始出现累积性污染,仅靠原水物理擦洗无法完全清除。因此需要将NSUF装置的浓水排空后切换至化学清洗管路进行化学清洗,清洗药剂经药液循环系统回收至药液池循环使用。经化学恢复性清洗后,超滤产水量和跨膜压差的恢复率接近100%。因此,采用原水维护性物理擦洗和碱洗结合的方式,可以使超滤产水量和跨膜压差均保持在正常范围内,证明NSUF设备在处理水厂废水中具有长期运行稳定性。

3.6 净水效能

为考察NSUF技术处理水厂废水时的净水效能,多次对设备进、出水取样,检测浊度、COD_{Mn}等水质指标,如表1所示。结果表明,超滤产水水质完全满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),浊度、UV₂₅₄、氨氮、COD_{Mn}去除率分别为99.2%~99.5%、19.6%~31.5%、76.9%~82.0%、22.3%~30.6%。

表1 NSUF的净水效能

Tab.1 Water purification efficiency of NSUF

项目	浊度/NTU	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	氨氮/(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)
进水	8.36~9.36	0.035~0.053	0.057~0.066	2.15~2.81
出水	<0.03	0.024~0.039	<0.001 5	1.67~1.95

3.7 经济效益分析

NSUF技术与传统工艺处理成本的对比见表2。

表2 NSUF技术与传统工艺处理成本对比

Tab.2 Comparison of treatment cost between NSUF technology and traditional treatment process

膜法处理工艺	主要耗费	处理成本/(元·m ³)
混凝/沉淀/过滤+粉末活性炭+浸没式超滤	曝气系统耗能、混凝剂、粉末活性炭、电费等	0.62
混凝-压入式超滤+浸没式超滤	曝气系统耗能、混凝剂、清洗药剂、电费等	0.49
絮凝/沉淀/过滤+浸没式超滤	曝气系统耗能、絮凝剂、电费等	0.53
调节池+混合絮凝+浸没式超滤	曝气系统耗能、絮凝剂、混凝剂、电费等	0.685
沉淀/过滤+NSUF	电费、化学清洗药剂等	0.238

对中试过程中NSUF工艺的经济效益进行考察,仅分析膜设备本身的运行成本,不包含滤池前的运行费用以及设备折旧费用,主要探讨膜设备的耗能费用以及膜清洗的药剂费用两部分。通过对整个试验运行期间统计测算,采用NSUF处理水厂废水的成本约为0.238元/m³,低于传统水厂废水处理成本。NSUF工艺较传统浸没式超滤等处理工艺,不仅缩短了处理流程,减小了占地面积,避免了大能耗曝气设备的使用,同时其在操作中自动化程度更高,物料更换和人工费用较少,因此具有良好的经济效益。

4 结语

① NSUF作为一种创新性技术,采用膜组件与滤池分置的模式,为实现NSUF的多级串联以及优化分配浓水对膜组件的工作负荷提供了技术支撑;采用原水“膜面流”的错流方式代替传统膜池的滤液湍流,实现了过滤产水与在线正冲洗同步进行。装置独特的在线清洗系统不仅缓解了膜污堵情况,大大提高了处理效率,而且无需进行高能耗的曝气冲刷和滤液循环错流操作,对自来水厂含悬浮物较多的生产废水具有较好的处理效果。

② NSUF技术具有比传统管式膜和卷式膜更高的操作效率,供/产水比仅需2~4便可实现良好的正冲洗效果;当NSUF设备膜面供水量为7 m³/h时,膜通量接近峰值42.8 L/(m²·h),运行效率优于传统浸没式超滤等处理工艺。

③ NSUF装置利用原水维护性的物理擦洗并配合定期的化学清洗,可以实现长期稳定运行,平均产水率达到98.5%,超滤产水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022);综合处理成本低于目前常规水厂生产废水处理工艺,证明NSUF技术在对水厂废水回用处理方面具有推广应用的前景。

参考文献:

- [1] 李文英,黄廷林,黄卓,等. 给水厂生产废水回用系统的风险评价与分析[J]. 中国给水排水,2012,28(5): 57~60.
LI Wenying, HUANG Tinglin, HUANG Zhuo, et al. Risk evaluation and analysis of wastewater reuse system in water supply plant[J]. China Water & Wastewater, 2012,28(5):57~60 (in Chinese).

- [2] 戴仲怡. 超滤膜技术处理水厂生产废水应用研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(7): 106-108, 114.
DAI Zhongyi. Application research of ultrafiltration membrane technology treating wastewater in waterworks [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43 (7) : 106-108, 114 (in Chinese).
- [3] 陈杰, 黄汝英, 朱春伟, 等. 浸没式超滤膜净化西江水中试研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(3): 46-49.
CHEN Jie, HUANG Ruying, ZHU Chunwei, *et al.* Pilot study on application of immersed ultrafiltration membrane to purify Xijiang water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 46-49 (in Chinese).
- [4] 陈楠, 李星, 杨艳玲, 等. 低水头、低通量浸没式直接超滤工艺净水效能研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(19): 53-57.
CHEN Nan, LI Xing, YANG Yanling, *et al.* Water purification efficiency of submerged direct ultrafiltration process with low head and low flux [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 53-57 (in Chinese).
- [5] 纪洪杰, 于海宽, 沈裘昌, 等. 大型浸没式超滤膜水厂的设计及运行[J]. 中国给水排水, 2013, 29(18): 42-47.
JI Hongjie, YU Haikuan, SHEN Qiuchang, *et al.* Design and operation of large immersed ultrafiltration membrane system in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(18): 42-47 (in Chinese).
- [6] 邹振裕, 黄明珠, 罗永恒, 等. 佛山新城浸没式超滤膜水厂设计经验及运行调试实践[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 98-102.
ZOU Zhenyu, HUANG Mingzhu, LUO Yongheng, *et al.* Design experience and operation practice of waterworks with submerged ultrafiltration membrane in Xincheng District, Foshan City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 98-102 (in Chinese).
- [7] 吴杨超, 戴海平, 柯永文, 等. 浸没式膜过滤技术在再生水厂的应用研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13): 81-83, 87.
WU Yangchao, DAI Haiping, KE Yongwen, *et al.* Application of submerged membrane filtration technology in reclaimed wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(13): 81-83, 87 (in Chinese).
- [8] PETER-VARBANETS M, ZURBRUEGG C, SWARTZ C, *et al.* Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology [J]. Water Research, 2009, 43(2): 245-265.
- [9] 范小江, 张锡辉, 苏子杰, 等. 超滤技术在我国饮用水厂中的应用进展[J]. 中国给水排水, 2013, 29(22): 64-70.
FAN Xiaojiang, ZHANG Xihui, SU Zijie, *et al.* Application of ultrafiltration technology in drinking water treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22): 64-70 (in Chinese).
- [10] 齐麟, 赖冰冰, 杨晓伟. 浸没式超滤膜清洗技术及研究进展[J]. 清洗世界, 2015, 31(8): 29-33.
QI Lin, LAI Bingbing, YANG Xiaowei. Immersion ultrafiltration membrane cleaning technology and research progress [J]. Cleaning World, 2015, 31(8): 29-33 (in Chinese).
- [11] 王学军, 张恒, 郭玉国. 膜分离领域相关标准现状与发展需求[J]. 膜科学与技术, 2015, 35(2): 120-127.
WANG Xuejun, ZHANG Heng, GUO Yuguo. Status and development demands of related standards on membrane separation [J]. Membrane Science and Technology, 2015, 35(2): 120-127 (in Chinese).
- [12] 齐希光, 郭群峰, 李秀芬. 超滤操作条件对超滤膜清洗效率的影响[J]. 膜科学与技术, 2006, 26(1): 47-49, 54.
QI Xiguang, GUO Qunfeng, LI Xiufen. Effect of UF operating condition on cleaning efficiency of fouled membrane [J]. Membrane Science and Technology, 2006, 26(1): 47-49, 54 (in Chinese).
- [13] 张春雷, 郭强, 杨杨, 等. 浸没式超滤膜工艺应用中几个问题及调整[J]. 给水排水, 2015, 41(2): 9-15.
ZHANG Chunlei, GUO Qiang, YANG Yang, *et al.* Several problems and countermeasures in the operation of immersed ultrafiltration membrane [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(2): 9-15 (in Chinese).

作者简介: 盛忠祥(1996-), 男, 安徽铜陵人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为膜分离技术在水处理方面的应用。

E-mail: zhongxiangsheng777@163.com

收稿日期: 2023-03-21

修回日期: 2023-05-05

(编辑: 沈靖怡)