

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.021

超高标准除磷的纳滤再生水工艺设计及工程验证

张彩云, 张朋川, 袁璐璐, 俞开昌, 薛涛
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

摘要: 云南大理某城镇污水处理厂设计产水水质达到地表水Ⅲ类标准(湖、库),采用膜生物反应器(MBR)-纳滤(NF)双膜处理工艺。针对产水总磷 ≤ 0.05 mg/L的超高标准除磷需求,对该项目的NF工艺段进行除磷衡算和膜系统设计分析,确定了浓水分段双回流、两段元件排列比4:1的最佳工况条件。实际工程验证结果表明,产水水质稳定达标,其中总磷为0.013~0.042 mg/L,NF工艺段的电耗、药剂、耗材及膜折旧成本合计0.37~0.55元/m³,NF膜系统清洗周期约为1个月。MBR-NF双膜工艺的常规产水水质指标达到地表水Ⅲ类标准(湖、库),并具有较高的环境生态安全性,适用于富营养化敏感水体治理、工业水回用、再生水地下回灌等。

关键词: 污水再生; 除磷; 纳滤; MBR

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0116-05

Design and Engineering Verification of Nanofiltration Process for Super High Standard Phosphorous Removal in Wastewater Reclamation

ZHANG Cai-yun, ZHANG Peng-chuan, YUAN Lu-lu, YU Kai-chang, XUE Tao
(Beijing Origin Water Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

Abstract: To meet the effluent quality as level III criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) (S-III), the MBR-NF process was applied in a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in Dali, Yunnan Province. Aiming at the super high effluent requirement of TP ≤ 0.05 mg/L, the phosphorus removal balance and membrane system design were analyzed for the NF process section of this project, and the optimal working conditions of double reflux of concentrate and 4:1 ratio of two-section element arrangement were determined. The verification results of actual project show that the water quality is stable and up to the standard. Among them, the effluent TP concentration was 0.013-0.042 mg/L. The operational cost including energy, chemicals, consumption materials and NF membrane depreciation was 0.37-0.55 yuan/m³. The duration of a membrane cleaning cycle was about a month. The common effluent indexes of MBR-NF process can meet S-III, and have high safety to environmental ecosystem, which is suitable for wastewater treatment in eutrophication sensitive areas, industrial water reuse and wastewater reclamation for groundwater recharge.

Key words: wastewater reclamation; phosphorous removal; NF; MBR

大量氮、磷排入水环境是导致水体富营养化的主要原因。近年来我国水环境质量总体向好,但富

营养化湖泊(水库)占比从2012年的25%增至2018年的29%,严格控制氮、磷排入水体,尤其是水环境敏感流域的湖泊(水库),是扭转我国水体富营养化趋势、进一步提升整体水环境质量的迫切需求。

云南大理某城镇污水处理厂位于洱海上游,设计处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;为保护“苍山不墨千秋画,洱海无弦万古琴”的高原湖泊景观,设计产水水质为地表水Ⅲ类标准(湖、库),其中总氮 $\leq 1 \text{ mg/L}$ 、总磷 $\leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。因此,需要达到近乎极限的污水脱氮除磷效果,是本项目的特殊要求和技术难点。

在二级生化处理的基础上,将城镇污水深度处理为高品质再生水(地表水Ⅲ类左右)的技术路线主要有2条:一是以微滤(MF)或超滤(UF)+纳滤(NF)或反渗透(RO)为核心工艺的膜法技术路线^[1-2];二是由生物滤池、混凝沉淀/气浮、砂滤、活性炭滤池等工艺单元组合而成的技术路线^[3]。膜法技术路线的建设投资和运行成本相对较高,但产水水质更安全可靠,不仅能满足COD、氮、磷等常规水质指标稳定达标,而且能够高效去除重金属、微量有机污染物和病毒等^[2,4]。目前在美国、新加坡等发达国家和地区,将城镇污水处理为高品质再生水并补给地下水或饮用水源地的总规模已超过 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中膜法技术路线占到60%以上,已成为主流技术路线。

经综合考虑,本项目采用了MBR-NF双膜深度处理工艺。NF膜具有纳米级过滤精度,能够高效截留有机物和磷酸根等高价离子,但对铵根、硝酸根等一价离子的截留率较低^[5]。为此,该项目在MBR工艺段设后置缺氧反应池,以投加碳源的方式强化脱氮,实现MBR产水总氮 $\leq 1 \text{ mg/L}$;MBR产水中的COD与总磷在NF膜系统中被截留和浓缩,浓水经混凝沉淀、UF、臭氧催化氧化处理后与NF产水混合,使最终产水水质达到设计标准。为保证产水总磷 $\leq 0.05 \text{ mg/L}$,该项目的NF膜系统采用了混合膜元件和浓水分段双回流的特殊设计,并进行了工程实际运行验证,取得了较好的效果。现将该NF再生水工艺的设计要点及工程运行结果进行总结,希望为膜法高品质再生水处理技术的持续完善与推广提供经验参考。

1 材料与方法

1.1 NF工艺段与膜元件

本项目设计处理水量为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,MBR工

艺段于2019年5月完成改造并通水,现阶段处理水量约为 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (运行1/2系列)。NF工艺段于2019年6月建成通水,含NF膜系统4组(现阶段运行2组),每组处理能力为 $2\,500 \text{ m}^3/\text{d}$;浓水处理系统2套(现阶段运行1套),每套处理能力为 $750 \text{ m}^3/\text{d}$,处理工艺为混凝沉淀/浸没式UF/臭氧催化氧化。NF工艺段流程如图1所示。

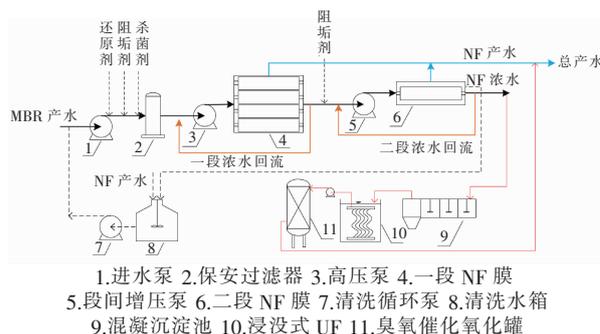


图1 NF工艺段流程

Fig. 1 Flow chart of NF process

NF膜系统采用一级两段(6芯/段)模式,设计回收率为90%,设计膜通量为 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。为保障水质,两段分别采用不同类型的NF膜元件(碧水源DF系列产品),其性能见表1。

表1 NF膜元件性能

Tab. 1 Performance of NF membrane elements

项目	DF8040-R30 (一段膜)	DF8040-R90 (二段膜)
压力/kPa	175	300
TDS截留率/%	36.3	95.1
总磷截留率/%	95.0	99.6
TOC截留率/%	95.3	97.3

注: 测试水为典型MBR工程产水;测试条件为膜元件回收率50%,膜通量 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水温 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 分析方法

NF膜系统水量、水质及能耗分析采用碧水源纳滤工艺设计软件。水温和TDS采用电导率仪(德国WTW, multi3430)测定;TOC采用总有机碳分析仪测定;其他水质指标采用国家标准方法测定。

2 结果与讨论

2.1 NF工艺除磷衡算分析

针对该项目的超高标准除磷需求,首先开展了浓水处理预试验,用同类型NF膜将典型MBR工程产水按同等回收率进行浓缩,获得的浓水总磷为 $1.9 \sim 4.8 \text{ mg/L}$ 。浓水处理系统对总磷的去除率为

85% ~ 95%，处理后产水总磷为 0.1 ~ 0.3 mg/L。基于浓水处理预试验结果、MBR 典型产水水质和项目总产水设计标准进行 NF 工艺除磷衡算，可得到 NF 膜系统的产水总磷要求，如图 2 所示。

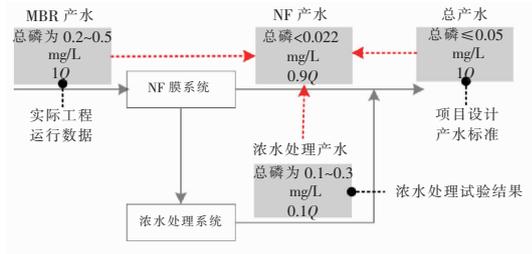


图 2 NF 工艺除磷衡算分析

Fig. 2 Analysis of NF process for phosphorus removal

NF 膜系统产水总磷要求低于 0.022 mg/L，即 NF 膜系统对总磷的截留率需达到 89% ~ 96%。

2.2 NF 膜系统设计

浓水回流方式和各段膜元件数量排列比是 NF 膜系统的两个重要工艺条件，直接影响产水水质、运行能耗及系统稳定性。为此，采用 NF 工艺设计软件对比分析 2 种回流方式（单回流：二段浓水回流至一段进水；双回流：一段浓水回流至一段进水，二段浓水回流至二段进水）与 5 种排列比（3 : 2、2 : 1、3 : 1、4 : 1、5 : 1）对产水总磷浓度和运行能耗的影响，结果见图 3。

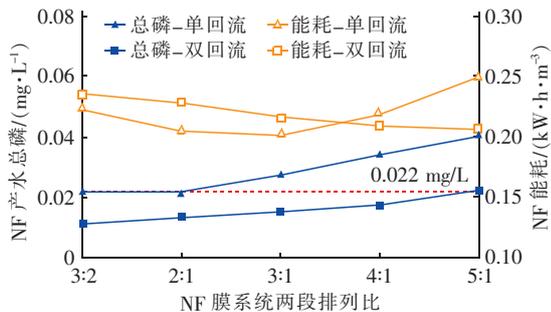


图 3 浓水回流方式和排列比对 NF 膜系统的影响

Fig. 3 Effect of concentrate recirculation mode and ratio of elements between two stages on NF membrane system

单回流方式下，NF 膜系统产水总磷仅在排列比为 3 : 2 和 2 : 1 时接近 0.022 mg/L，水质达标保障存在较大风险；双回流方式下，NF 膜系统产水总磷除了排列比 5 : 1 之外，均低于 0.022 mg/L，其中排列比为 4 : 1 时的能耗最低，确定为最佳设计工况条件。双回流方式将水质相对较好的一段浓水回流至一段进水，而将水质较差的二段浓水回流至二段进水，同时二段膜的截留率高于一段膜，因此产水水质

优于单回流方式。

双回流方式下，膜通量沿程分布的均匀性优于单回流方式，如图 4 所示。这是因为双回流可以单独控制两段浓水的回流量，以保障两段的最末支膜元件均具有合适的浓水流速，而单回流无法兼顾。保持相对均衡的膜通量分布，避免个别膜元件通量过高，有利于延缓膜污染，增强膜系统的运行稳定性^[6]。

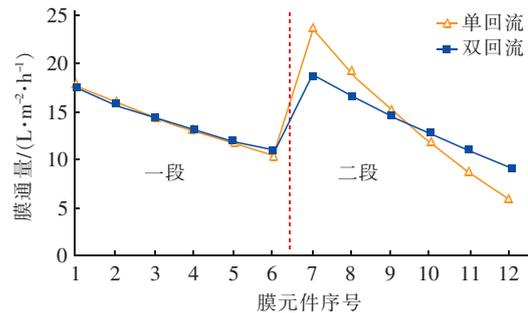


图 4 两种回流方式下的沿程膜通量（排列比 4 : 1）

Fig. 4 Membrane flux distribution under two concentrate recirculation modes (elements ratio 4 : 1)

双回流方式下，二段膜的浓水“更浓”，结垢离子成分浓度高于单回流方式，如表 2 所示。因此对于膜污染控制，双回流方式同时存在有利因素和不利因素，其综合效应有待进一步研究和验证。

表 2 两种回流方式下的二段浓水结垢离子浓度及 pH 值
Tab. 2 Scaling ion concentrations and pH values in concentrate of stage 2 under two concentrate recirculation modes

项目	单回流	双回流
pH 值	8.13	8.36
Ca ²⁺ / (mg · L ⁻¹)	266.7	355.0
HCO ₃ ⁻ / (mg · L ⁻¹)	832.5	1 417.8
SO ₄ ²⁻ / (mg · L ⁻¹)	701.8	745.5
P* / (mg · L ⁻¹)	4.4	4.8

注：P* 包括 H₂PO₄⁻、HPO₄²⁻、PO₄³⁻。

综合考虑产水水质、运行能耗与膜污染控制的需要，NF 膜系统设计最终采用了双回流、排列比为 4 : 1 的最佳工况条件，并在常规进水投加阻垢剂的基础上，预留了二段补加阻垢剂的运行调控手段。实际运行时，两段的浓水回流量随处理水量而调整，以保证末支元件浓水流量不低于 3 m³/h（工程经验值）。

2.3 工程验证结果

2.3.1 NF 膜系统运行稳定性

工程启动后 3 个清洗周期的运行情况见图 5。

运行水温为 15.9 ~ 25.6 °C,压力进行了温度校正。

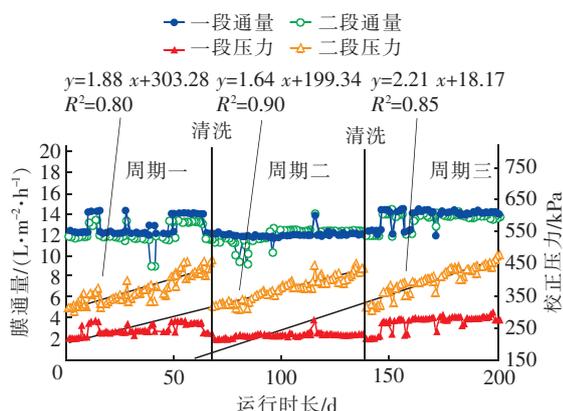


图5 NF膜系统运行膜通量及校正压力变化

Fig.5 Operational flux and temperature calibration pressure of NF membrane system

周期一以调试为主,通量不稳定;周期二和周期三的平均运行通量分别维持在 12、14 L/(m²·h)。三个周期的一段压力均较为稳定,无明显升高趋势,二段压力上升速率分别为 1.88、1.64、2.21 kPa/d。三个周期中,校正压力升高 40% ~ 50% 时进行清洗,

清洗后压力基本可恢复至初始水平。按设计通量为 14 L/(m²·h),以校正压力升高 20% 为常规膜清洗节点,膜清洗周期约为 1 个月。

2.3.2 NF 工艺段各节点水质

NF 工艺段进水(即 MBR 产水)、NF 产水、浓水处理后产水、总产水的主要水质指标实测结果如表 3 所示。

NF 工艺段对总磷的去除率高于 90%,各节点总磷浓度基本符合图 2 的分析结果。MBR 产水总氮中硝态氮和氨氮合计占到 95% 以上,经过 NF 工艺段后无明显去除。NF 浓水经混凝沉淀及 UF 可去除一部分有机物,对 COD 的总去除率为 10% ~ 25%,当 MBR 产水 COD < 25 mg/L 时,一般不需开启臭氧催化氧化单元即可实现总产水 COD ≤ 20 mg/L。MBR - NF 工艺总产水的常规水质指标稳定达到地表水 III 类标准(湖、库)。

MBR 产水和 NF 产水的 TDS 分别为 472 ~ 650 mg/L 和 362 ~ 433 mg/L,NF 系统平均脱盐率约为 30%。

表3 NF工艺段各节点水质实测结果

Tab.3 Determination results of water quality in NF process

mg·L⁻¹

项目	总磷	总氮	氨氮	硝态氮	COD
MBR 产水	0.157 ~ 0.443	0.31 ~ 0.88	0.04 ~ 0.55	0.18 ~ 0.74	9.6 ~ 22.5
NF 产水	0.009 ~ 0.018	0.21 ~ 0.80	0.02 ~ 0.17	0.19 ~ 0.78	5.5 ~ 11.3
浓水处理后产水	0.102 ~ 0.301	0.43 ~ 2.51	0.18 ~ 2.41	0.10 ~ 0.41	37.8 ~ 74.5
总产水	0.013 ~ 0.042	0.23 ~ 0.78	0.03 ~ 0.39	0.18 ~ 0.73	8.7 ~ 17.4

2.3.3 NF 工艺段主要运行成本

NF 工艺段的电耗成本为 0.1 ~ 0.15 元/m³,平均电价按 0.5 元/(kW·h) 计,其中进水泵、高压泵、段间增压/回流/加药泵、浓水处理系统(不含臭氧催化氧化,目前未开启)分别约占 37%、33%、15%、15%;药剂及耗材成本为 0.15 ~ 0.2 元/m³,其中阻垢剂、保安过滤器滤芯、浓水混凝药剂、杀菌/清洗等药剂分别约占 35%、27%、22%、16%;纳滤膜寿命以 3 ~ 5 年计,折旧费为 0.12 ~ 0.2 元/m³。NF 工艺段的电耗、药剂、耗材及膜折旧成本合计为 0.37 ~ 0.55 元/m³。

3 结论与展望

云南大理某城镇污水处理厂采用了 MBR - NF 双膜深度处理工艺,实际工程验证结果表明,产水水质稳定达标,其中总磷为 0.013 ~ 0.042 mg/L;NF

工艺段的电耗、药剂及耗材成本合计为 0.37 ~ 0.55 元/m³;NF 膜系统清洗周期约为 1 个月。

NF 膜可以高效截留水中的有机污染物、高价离子、病毒等,与 MBR 技术组成双膜工艺后,COD、氮、磷等常规产水水质指标能够达到地表水 III 类标准(湖、库),并具有较高的环境生态安全性。MBR - NF 双膜工艺的适用领域包括富营养化敏感水体治理、工业水回用、再生水地下回灌等,是一种具有应用前景的高品质再生水处理技术,未来需要持续研究以支持其完善与发展。

参考文献:

- [1] 李艺,李振川. 北京北小河污水处理厂改扩建及再生水利用工程介绍[J]. 给水排水,2010,36(1):27-31.
LI Yi, LI Zhenchuan. Extension and reconstruction of Beijing Beixiaohe wastewater treatment plant and their

(下转第 125 页)