

# 水资源全回收的 MBR – NF 新水源工艺中试研究

薛 涛, 张朋川, 张彩云, 车淑娟, 俞开昌  
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 针对实际城镇污水,以水质优于地表Ⅲ类(总氮 $<10\text{ mg/L}$ )、水量全回收为目标开展了 MBR – NF 新水源工艺中试研究。将部分 NF 浓水回流至 MBR 并达到平衡后,NF 浓水中 COD 和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度分别降低约 40% 和 11%,实现了高回收率 NF 系统的稳定运行。在此基础上采用芬顿 – 生化技术处理剩余浓水,建立了水资源全回收的 MBR – NF 新水源工艺。NF 对 COD、氨氮和总磷的截留率分别高于 60%、30% 和 75%,但对总氮基本无去除。MBR – NF 工艺主要出水指标达到地表Ⅲ ~ Ⅱ类水质(总氮为  $5\sim10\text{ mg/L}$ ),电耗和药剂消耗成本为  $1.17\text{ 元/m}^3$ ,其中 MBR、NF 和浓水处理成本分别占 39.3%、48.7% 和 12.0%,开发和应用低压 NF 膜及高回收率 NF 系统是降低工艺运行成本的关键。MBR – NF 工艺出水水质优良,水量全回收,是一种有应用需求和发展前景的高品质再生水制备工艺。

**关键词:** 城镇污水; 膜生物反应器; 纳滤; 芬顿; 再生水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 4602(2018)09 – 0011 – 04

## Pilot-scale Study on MBR – NF Process for Complete Water Resource Reclamation from Wastewater

XUE Tao, ZHANG Peng-chuan, ZHANG Cai-yun, CHE Shu-juan, YU Kai-chang  
(Beijing Origin Water Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** To explore complete wastewater reclamation and ensure that the reclaimed water quality meets the class Ⅲ or higher standard of the *Environmental Quality Standards for Surface Water* in China ( $\text{TN} < 10\text{ mg/L}$ ), a pilot-scale study on the MBR – NF process treating real municipal wastewater was conducted. By recirculating a part of the NF concentrate to MBR, the balanced COD and  $\text{Ca}^{2+}$  concentrations of NF concentrate decreased by 40% and 11%. The high recovery NF system could run stably. The rest NF concentrate was further treated by the Fenton – biochemical technology, so the MBR – NF process for complete wastewater reclamation was established. The rejection rates of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TP by NF were higher than 60%, 30% and 75%, respectively. But TN could not be removed by NF. The effluent quality of the MBR – NF process could meet the class Ⅲ or Ⅱ standard ( $\text{TN} = 5\sim10\text{ mg/L}$ ). The operating cost of energy and chemicals consumption was  $1.17\text{ yuan/m}^3$ . The ratios of operating costs of the MBR, NF and concentrate treating units were 39.3%, 48.7% and 12.0%, respectively. Development and application of low pressure NF membrane and high recovery NF system are crucial to operating cost reduction. The MBR – NF process can produce high quality reclaimed wastewater with full water recovery. It is a feasible and promising technology for advanced wastewater reclamation.

**Key words:** municipal wastewater; membrane bio-reactor (MBR); nanofiltration (NF); Fenton; reclaimed wastewater

针对缺水地区,开发和应用城镇新水源工艺技术,将污水转化为高品质再生水,提升水资源利用效率,保障水资源战略安全,具有重要意义。MBR-NF/RO 双膜工艺是一种获得广泛认可的高品质再生水制备技术<sup>[1,2]</sup>,其应用推广的主要障碍是 NF/RO 产生占总水量 10%~30% 的浓水,既增加了处理成本也浪费了水资源。

为解决双膜工艺的浓水问题,最大限度回收水资源,以水质优于地表Ⅲ类(总氮<10 mg/L)、水量全回收为目标开展了 MBR-NF 工艺中试研究。首先,选择操作压力尽量低的 NF 膜以降低运行成本。其次,考察 NF 浓水回流至 MBR 对工艺稳定性的影响,即挖掘 MBR 生化系统对 NF 浓水的消纳能力以尽量减少浓水水量<sup>[3,4]</sup>。再次,考察芬顿-生化技术对剩余浓水的处理效果,使处理后的浓水与 NF 产水混合后达到目标水质并实现水量全回收。最后,分析了该工艺的电耗与药耗成本。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 中试装置

中试在北京市某污水处理厂进行,装置处理水量为 25~30 m<sup>3</sup>/d,其中 MBR 装置的工艺流程为厌氧-缺氧-好氧-膜池,HRT 为 14 h。NF 装置采用 DF30 低压纳滤膜,运行压力为 0.2~0.4 MPa。浓水处理采用流化床芬顿-好氧生化(MBR)装置,HRT 分别为 0.5 和 1 h。试验期间考察了如图 1 所示的 4 种工况。

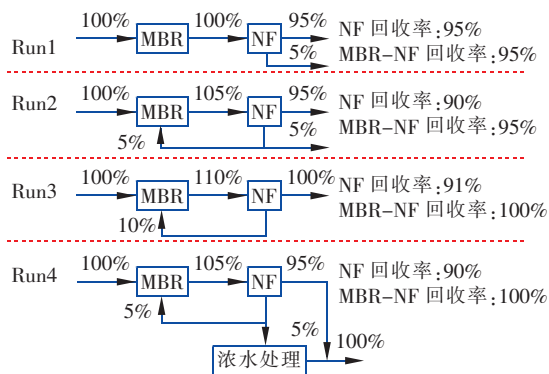


图1 中试装置运行工况

Fig. 1 Operating conditions of pilot-scale reactor

Run1 和 Run2 的系统回收率均为 95%, Run1

没有 NF 浓水回流, Run2 有 5% 的 NF 浓水回流至 MBR。Run3 的系统回收率为 100%, 10% 水量的 NF 浓水全部回流至 MBR。Run4 在 Run2 的基础上增加了浓水处理单元, 处理后的浓水与 NF 产水混合, 使系统回收率达到 100%。

### 1.2 分析方法

NF 膜的 20 °C 膜比通量  $SF = 20$  °C 校正膜通量/净驱动压力, 随 NF 运行,  $SF$  逐渐衰减, 以  $SF/SF_0$  代表 NF 运行稳定性, 其中  $SF_0$  为初始时刻的  $SF$ 。电导率采用电导率仪测定,  $Ca^{2+}$  浓度采用等离子体发射光谱仪测定, 其他水质指标采用国家标准方法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 系统稳定性

试验期间, MBR 单元始终运行稳定, MBR-NF 工艺稳定性取决于 NF 单元, Run1、Run2 和 Run3 中 NF 单元的  $SF/SF_0$  变化趋势如图 2 所示。

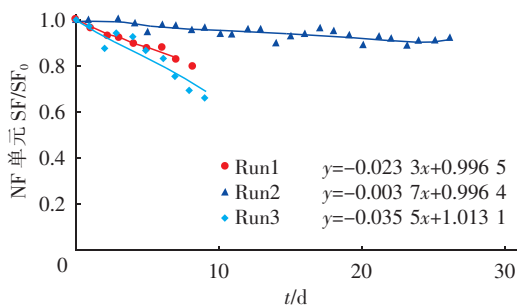


图2 Run1、Run2 和 Run3 中 NF 单元  $SF/SF_0$  变化

Fig. 2  $SF/SF_0$  of NF in Run1, Run2 and Run3

Run1 进行了 8 d,  $SF/SF_0$  衰减了 20%; Run2 进行了 26 d,  $SF/SF_0$  衰减不足 10% 并趋于稳定; Run3 进行了 9 d,  $SF/SF_0$  衰减了 34%, 稳定性最差。对 3 种工况下 NF 浓水中 COD、电导率和  $Ca^{2+}$  浓度进行了测定, 结果显示 Run1 浓水中 COD 浓度迅速升高至 150~160 mg/L, Run2 浓水中 COD 浓度缓慢上升至 80~100 mg/L, Run3 浓水中 COD 浓度持续升高, 不能平衡。Run2 浓水中 COD 平衡浓度比 Run1 降低约 40%, 表明 Run2 浓水中 COD 回流至 MBR 后被部分去除。由于浓水 COD 来自于 MBR 出水中已与活性污泥充分接触过的溶解性 COD, 回流至 MBR 后再被污泥物理吸附而去除的可能性不大, 所以应

该是被微生物降解而去除,即通过 NF 截留和浓水回流延长了难降解或慢速降解有机物在 MBR 生化系统中的停留时间,促进其降解并减轻了 NF 膜的有机污染。在 Run3 中,尽管 MBR 对回流有机物有一定的缓冲和去除能力,表现为初期 COD 浓度升高速率低于 Run1,但由于无浓水外排,有机物积累太快而无法平衡。

Run1 与 Run2 的浓水电导率变化规律相近,但 Run1 略高,表明 MBR 总体上对回流浓水中的无机盐没有明显去除效果(见图 3)。Run3 中无机盐持续积累,无法平衡。钙盐通常是最主要的 NF 膜无机结垢污染成分,Run2 浓水  $\text{Ca}^{2+}$  平衡浓度比 Run1 降低约 11%,可能是因为 MBR 中污泥絮体吸附、化学除磷共沉淀或微生物摄取所致。Run3 中  $\text{Ca}^{2+}$  持续积累,无法平衡(见图 4)。

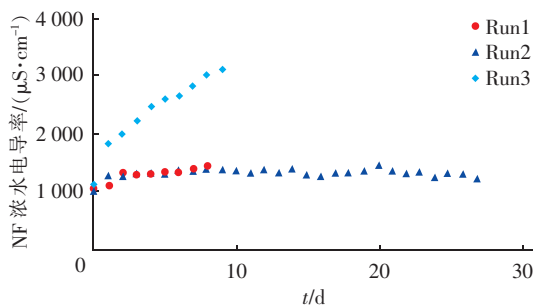


图 3 Run1、Run2 和 Run3 中 NF 浓水电导率变化

Fig. 3 EC of NF concentrate in Run1, Run2 and Run3

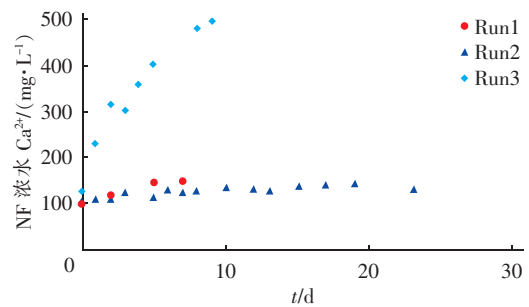


图 4 Run1、Run2 和 Run3 中 NF 浓水  $\text{Ca}^{2+}$  浓度变化

Fig. 4  $\text{Ca}^{2+}$  of NF concentrate in Run1, Run2 and Run3

综上,Run1 和 Run2 的系统回收率均为 95%,但有部分浓水回流的 Run2 中浓水有机物和  $\text{Ca}^{2+}$  含量比无浓水回流的 Run1 分别降低了 40% 和 11%,Run2 的运行稳定性大大高于 Run1。Run3 的系统回收率为 100%,有机物和无机盐不断积累,无法稳定运行。将适量的 NF 浓水回流至 MBR 可提高系统稳定性和产水回收率,回流量实质上受限于 MBR 系统对 NF 浓水的消纳能力,其随进水水质、工艺参数和 NF 膜性能的不同而变化,可通过试验确定。

## 2.2 工艺处理效果

为实现水量全回收,采用芬顿-生化技术处理 Run2 的剩余 5% 外排浓水,形成图 1 中的 Run4 工况并连续运行两周,获得各单元水质数据如表 1 所示,其中混合出水数据是基于 NF 出水和处理后浓水的水量及水质的计算值。

表 1 Run4 的运行效果

Tab. 1 Performance of Run4

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	MBR		NF		NF 浓水处理		混合出水
	进水	出水	出水	浓水	芬顿后	生化后	
COD	$122.5 \pm 31.0$	$16.5 \pm 5.7$	$< 10$	$95.8 \pm 30.2$	$36.0 \pm 5.1$	$23.3 \pm 2.0$	$< 11$
氨氮	$31.95 \pm 2.35$	$0.22 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.09$	$0.90 \pm 0.24$	$0.88 \pm 0.31$	$0.45 \pm 0.21$	0.16
总氮	$32.16 \pm 2.68$	$5.40 \pm 1.10$	$5.33 \pm 1.79$	$6.09 \pm 1.40$	$6.01 \pm 1.37$	$5.94 \pm 1.32$	5.36
总磷	$3.24 \pm 0.33$	$0.51 \pm 0.22$	$0.12 \pm 0.03$	$4.20 \pm 1.31$	$< 0.02$	$0.13 \pm 0.07$	0.12

NF 对 MBR 出水 COD、氨氮和总磷的截留率分别高于 60%、30% 和 75%,但对总氮基本无去除,因为 MBR 出水总氮主要为硝态氮,而 NF 膜对硝态氮的截留率很低,甚至由于 Donnan 效应可能出现负截留率现象。对于 NF 浓水,芬顿通过化学氧化作用去除了部分有机物并提高了其生化降解性,产生的化学污泥具有很强的除磷能力,以致后续生化单元需要投加少量磷以维持微生物生存。生化单元进一步去除了浓水中的有机物和氨氮,保障了出水水质。芬顿能够同步去除有机物和磷,比其他单一去除有

机物的高级氧化技术更适合 NF 浓水。芬顿出水需采用单独生化单元处理而不能再回到 MBR,因为 NF 浓水经过芬顿处理后仍含有大量无机盐,同时还会增加硫酸根等结垢离子,如回到 MBR 持续内部循环,实际上即相当于 Run3 工况,且无机污染将会更加严重,系统无法稳定运行。

该研究的水质目标是优于地表Ⅲ类水质(总氮  $< 10 \text{ mg/L}$ ),为此基于表 1 数据并结合工程经验,进一步分析 Run4 工况出水水质的目标可达性。现有 MBR 城镇污水处理工程的典型出水 COD、氨氮、

总氮和总磷浓度分别在 20~30、0.5~1.5、5~10 和 0.2~0.5 mg/L。按 Run4 工况,最终出水 COD 可达地表Ⅱ类水质。对于氨氮,分别控制 MBR 出水氨氮低于 1.2 和 0.7 mg/L 时,Run4 出水氨氮可达地表Ⅲ类和Ⅱ类水质。Run4 出水总氮与 MBR 基本一致,在 5~10 mg/L 之间。对于总磷,分别控制 MBR 出水总磷低于 0.7 和 0.3 mg/L 时,Run4 出水总磷可达地表Ⅲ类和Ⅱ类水质(河流),在后者情况下,MBR 出水总磷可比一级 A 标准更宽松,有利于减少 MBR 化学除磷加药量,节省成本并提高污泥活性。

因此,按 Run4 工况运行的 MBR-NF 工艺可满足地表Ⅲ~Ⅱ类主要水质指标要求(总氮为 5~10 mg/L),控制灵活,适用范围广。

### 2.3 电耗与药耗成本

MBR-NF 工艺的电耗成本按工程设备规格计算,电费按 0.7 元/(kW·h)计,药剂成本按中试结果并参考工程经验计算。经分析,MBR、NF、浓水处理的电耗和药耗成本分别为 0.32、0.35、0.02 元/m<sup>3</sup> 和 0.14、0.22、0.12 元/m<sup>3</sup>,整个系统的运行成本为 1.17 元/m<sup>3</sup>,其中 MBR、NF 和浓水处理单元的成本比例分别为 39.3%、48.7% 和 12.0%。MBR 工艺经过多年发展与大规模应用实践,其运行成本已趋于稳定。传统 NF 工艺的运行压力在 0.6~1 MPa,回收率在 70%~85%,该研究中 NF 运行压力低于 0.4 MPa,回收率高于 90%,显著降低了运行成本,但其成本比例仍最高,表明开发和应用低压 NF 膜及高回收率 NF 系统确实是降低总体运行成本的关键。

MBR 消耗的药剂包括化学除磷、膜清洗和污泥处理药剂,NF 消耗的药剂包括阻垢剂、清洗剂、杀菌剂和还原剂,浓水处理消耗的药剂构成和成本比例如下:双氧水为 45.8%,氢氧化钠为 32.5%,硫酸亚铁为 19.0%,硫酸为 1.6%,PAM 为 1.0%,磷为 0.1%。

## 3 结论

① 将部分 NF 浓水回流至 MBR 并达到平衡后,NF 浓水中的 COD 和 Ca<sup>2+</sup> 浓度分别降低约 40% 和 11%,实现了高回收率 NF 系统的稳定运行。利用 MBR 消纳部分 NF 浓水和芬顿-生化技术处理剩余浓水实现水资源全回收的思路是经济可行的。

② NF 对 MBR 出水中 COD、氨氮和总磷的截留率分别高于 60%、30% 和 75%,但对总氮基本无去除,脱氮完全依赖 MBR。MBR-NF 工艺的主要

出水指标可以达到地表Ⅲ~Ⅱ类水质(总氮为 5~10 mg/L),控制灵活,适用范围广。

③ MBR-NF 工艺的电耗和药耗成本为 1.17 元/m<sup>3</sup>,其中 MBR、NF 和浓水处理成本分别占 39.3%、48.7% 和 12.0%,开发和应用低压 NF 膜及高回收率 NF 系统是降低工艺运行成本的关键。

### 参考文献:

- [1] Alturki A A, Tadkaew N, McDonald J A, *et al.* Combining MBR and NF/RO membrane filtration for the removal of trace organics in indirect potable water reuse applications [J]. *J Membr Sci*, 2010, 365: 206-215.
- [2] 张攀,文湘华,王波,等. 纳滤生产再生水示范工程运行效果分析[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 4985-4992.
- [3] Zhang Pan, Wen Xianghua, Wang Bo, *et al.* Operation effect of a nanofiltration demonstration project for producing reclaimed water [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9): 4985-4992 (in Chinese).
- [4] Wang J, Li K, Wei Y, *et al.* Performance and fate of organics in a pilot MBR-NF for treating antibiotic production wastewater with recycling NF concentrate [J]. *Chemosphere*, 2015, 121: 92-100.
- [5] Kappel C, Kemperman A J B, Temmink H, *et al.* Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment [J]. *J Membr Sci*, 2014, 453: 359-368.



作者简介:薛涛(1977-),男,江苏镇江人,博士,高级工程师,研究方向为水污染控制与资源化。

E-mail: xt\_chn@163.com

收稿日期:2017-11-26