

# MBR膜组清洗工艺流程优化与维护方案研究

周士恒, 付波, 李东, 秦宝兰, 王青华

西安思源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年12月4日; 录用日期: 2022年1月4日; 发布日期: 2022年1月13日

---

## 摘要

针对A<sup>2</sup>/O工艺+MBR膜生物反应器连续运行10年, MBR处理出水水质稳定达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》(GB/T 18921-2002), 本文总结提炼思源运行10年的超长寿命MBR膜组清洗工艺流程优化与维护方案经验, 为推行专业化运行维护提供参考, 降低企业运行维护成本。

## 关键词

高校生活废水, MBR, 膜清洗, 跨膜压差

---

# Optimization of the Cleaning Process and Maintenance Scheme Analysis of MBR Membrane Module

Shiheng Zhou, Bo Fu, Dong Li, Baolan Qin, Qinghua Wang

Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

For A<sup>2</sup>/O process + MBR bioreactor operating continuously for 10 years, the water quality stably reached the Water Quality Standard of Urban Sewage Recycling Landscape Environment (GB/T 18921-2002), this paper summarizes the procedures and methods of the optimization and maintenance scheme of the cleaning process of MBR membrane module by Siyuan for 10 years. Furthermore, the experience of professional operation and maintenance should be promoted to reduce the cost of operation and maintenance of enterprises.

## Keywords

College Domestic Wastewater, MBR, Membrane Module Cleaning, Transmembrane Pressure Difference

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

到目前为止, MBR 膜生物反应器仍然是大规模污水深度处理、确保再生水中各种指标排放浓度达到国家标准的首选技术[1]-[14]。从 2011 年 9 月开始, 西安思源学院再生水厂(简称“思源”)的 A<sup>2</sup>/O-MBR 系统已经安全、连续、经济地运转至今。本文的主要目的是分析思源运行维护积累的经验[15]-[20], 从厂家预测的膜组 5 年寿命到思源运行 10 年的超长寿命的运行过程中, 总结提炼 MBR 膜组清洗工艺流程的优化方案, 以及研究其维护方案, 并总结经验, 为推行专业化运行维护提供参考, 降低企业运行维护的成本。

## 2. 实验部分

### 2.1. 废水水质

从 2017 年 9 月到 2021 年 9 月, 经连续 5 年的监测, 总进口水质均值见表 1。

Table 1. Mean value of raw water (mg/l)

表 1. 原水均值(mg/l)

时间 \ 项目	COD	PH	氨氮	动植物油	总氮	总磷
2017 年	332.6	7.6	36.7	6.7	43.3	5.2
2018 年	342.6	7.8	37.6	6.8	44.2	5.3
2019 年	557.4	8.4	38.4	35	45.3	6.6
2020 年	563.9	8.3	40.3	36	50.6	6.4
2021 年	358.7	8.1	35.4	11.9	46.5	5.6

根据废水 5 年监测, 除:2019 和 2020 年因厨余垃圾的排放使废水成分变化较大, 其余时间段废水污染物指标较为稳定。

### 2.2. 工艺流程

工艺采用 PLC 自动控制, 实现了间歇进水功能, 气浮池、生物池、曝气系统、清洗系统的自动化控制。图 1 为原 MBR 工艺流程。采用 5 mm 回旋式耙齿格栅主要处理较为粗大的杂质。调节池主要用于调节校园污水水质的波动, 以便在一定程度上稳定原生的水质。而 1 mm 转鼓式格栅则是处理比较细小的杂质。

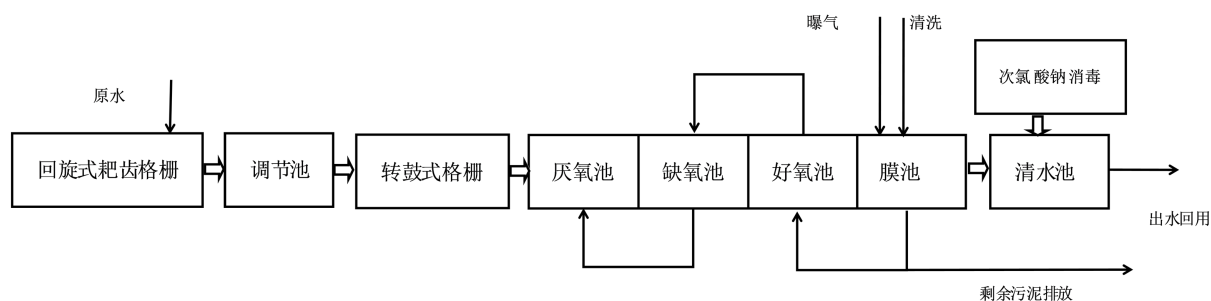


Figure 1. The MBR process flow without the air floating tank

图 1. 无气浮池的 MBR 工艺流程

整个系统从 5 mm 回旋式耙齿格栅、调节池和 1 mm 网状栅孔的内径流格栅组成的预处理开始，而后依次进入厌氧池、缺氧池、好氧池，经膜分离后得到出水。厌氧池和缺氧池内设潜流搅拌器，好氧池内设微孔曝气装置，在膜组件下面设穿孔曝气管，通过曝气为活性污泥供氧并实现对膜面污染物的擦洗。生物池 A<sup>2</sup>/O 工艺内，BOD、SS 和以各种形式存在的氮和磷将一并被去除，为后续 MBR 膜过滤减少污染。

因 2019 年和 2020 年厨余垃圾的排放使废水成分变化较大，在 2020 年时，在调节池和生化池之间添加气浮池来去除油脂。在气浮部分，主要是去除水中的乳化油或相对密度接近于 1 的微小悬浮颗粒。图 2 为现 MBR 工艺流程。

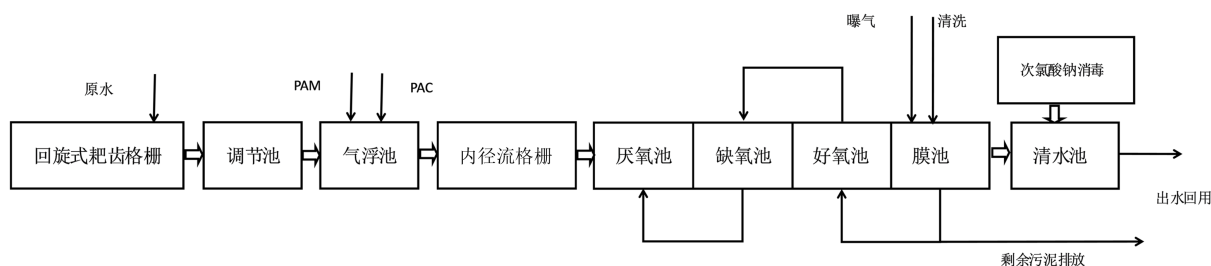


Figure 2. The MBR process flow with the air floating tank

图 2. 加气浮池的 MBR 工艺流程

该工艺设置了 3 个混合液回流：膜池污泥回流至好氧池的回流比约为 250%，好氧池至缺氧池的回流比约为 200%，缺氧池至厌氧池的回流比约为 100%。好氧池溶解氧控制在 2 mg/L 左右。

整个污水处理系统的主要设备和相关型号、规格列于表 2。

Table 2. Main equipment of MBR

表 2. MBR 设施主要设备

设备	数量	规格
回旋式耙齿格栅	2 台	栅宽 5 mm，单台处理能力 5500 m <sup>3</sup> /d
提升泵	2 台	Q = 85 m <sup>3</sup> /h，H = 7 m
内径流格栅	2 台	网状栅孔 1 mm，单台处理能力 3000 m <sup>3</sup> /d
生物池曝气风机	4 台	风量：20 Nm <sup>3</sup> /min，压差：700 mbar 17.5 kw
膜擦洗风机	4 台	风量：35 Nm <sup>3</sup> /min，压差：350 mbar 37 kw

## Continued

混合液回流泵	6 台	Q1 = 110 m <sup>3</sup> /h, H = 4.5m; Q2 = 90 m <sup>3</sup> /h, H = 6m
膜池抽吸泵	6 台	Q1 = 35 m <sup>3</sup> /h, H1 = 7 m; Q1 = 41 m <sup>3</sup> /h, H2 = 9 m
膜组件	432 支	膜单支膜面积: 25 m <sup>2</sup> 浸入式柱式中空纤维膜
加药泵	6 台	P066-368SI
化学清洗泵	2 台	100WQ-80-73
氯 EFP 清水泵	2 台	SLSP40-160
压泥机	1 台	HTB-1000

## 2.3. 膜组件的选择

中空纤维柱式膜组件由日本旭化成公司提供, 材料为偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜, 结构上膜表面开孔率达到 20% 以上, 增加了膜的透过能力, 孔径在 0.03~1  $\mu\text{m}$ , 膜池尺寸 2264  $\times$  167 mm。每个膜池中安放膜组件 72 支, 膜面积为 1800 m<sup>2</sup>。膜组件的形状、安装方式和膜抽吸的方式, 是决定膜组清洗工艺、延长膜使用寿命的关键因素, 我们研究的膜组件结构如图 3 和图 4 所示。

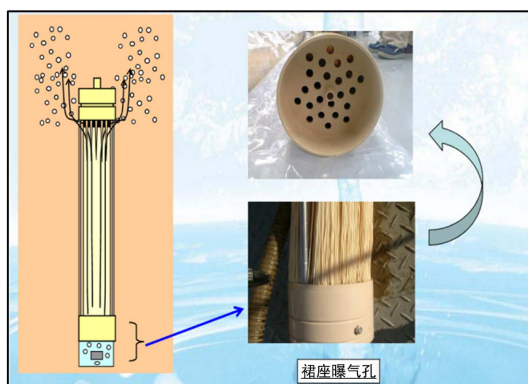


Figure 3. Dress aeration hole

图 3. 裙座曝气孔



Figure 4. Installation of the hollow fiber membrane

图 4. 中空纤维膜安装

## 2.4. 系统运行参数

思源 10 年 MBR 系统完全按照原设定的条件运行。运行参数如表 3 所示。

**Table 3.** MBR system operation parameters

**表 3.** MBR 系统运行参数

pH	温度/°C	水力停留时间/h	污泥泥龄/d	溶解氧/mg/l	膜通量/(L/m <sup>2</sup> ·h)
6~9	<30	1.3	30~50	2	16

## 3. 运行结果

采用恒通量运行模式，膜通量维持在 16 L/(m<sup>2</sup>·h)。厌氧池、缺氧池、好氧池和膜池的水力停留时间分别为 1.6、4.7、5.3 和 1.3 h，合计为 13 h，污泥停留时间为 30~50 d。

### 3.1. 处理效果

经过 10 年运行，MBR 工艺对思源生活废水的处理效果如表 4 所示。

**Table 4.** Water quality derived from MBR treatment

**表 4.** MBR 处理出水水质(均值)(单位: mg/l)

水样	COD	氨氮	总磷	油脂
进水口原水	431.04	37.65	5.81	35
膜过滤出水	14.4	0.41	0.04	0.06
去除率(%)	96.7	98.9	99.3	99.8

由表 4 可知，MBR 处理出水水质稳定达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》(GB/T 18921-2002)。

### 3.2. 膜组维护清洗

MBR 由自吸泵间歇抽吸出水，抽停时间比为 9 min/1 min。为了进行有效的膜污染控制，延长膜的使用寿命，1~2 周进行一次维护性清洗(EFM)，根据运行情况 6~12 个月进行一次在线化学清洗(CIP)。MBR 运行过程中，膜截留了混合液中的固体悬浮物，并在膜表面形成了可压缩的滤饼。滤饼本身也可以作为一种过滤介质，使装置的过滤性能得以增强。但是也需要对滤饼层加以控制，以保证过滤过程中跨膜压差维持在合理的范围之内。过滤泥饼可以通过 4 种方式进行控制，分别是：① 膜反洗；② 维护性清洗(EFM)；③ 物理维护清理；④ 化学在线清洗(CIP)。

#### 3.2.1. 膜反洗

膜反洗是由 MBR 由自吸泵间歇抽吸出水自动进行的。反洗时，膜过滤过程停止工作，此时 TMP 减为 0。使用透过液泵从反洗水池抽取清水，进入膜丝内部，由内而外的水流将膜丝表面积累的污染物冲离表面。抽停时间比为 9 min/1 min，表示产水时间 9 分钟，反洗时间 1 分钟，即反洗阶段的一个运行周期为 10 分钟。停止过滤和反洗对防止泥饼层的过度增长非常有效，包括，其中，该时间也可依系统运行情况做出调整。通过反洗可维持膜过滤滤速，但是，经过长时间运行后，膜丝表面污染物的少量沉积会随时间的推移而累积。这时，膜过滤阻力会逐步增加。为了清除这些沉积污染物，须对膜进行化学清洗，即维护性清洗(EFM)和在线化学清洗(CIP)。

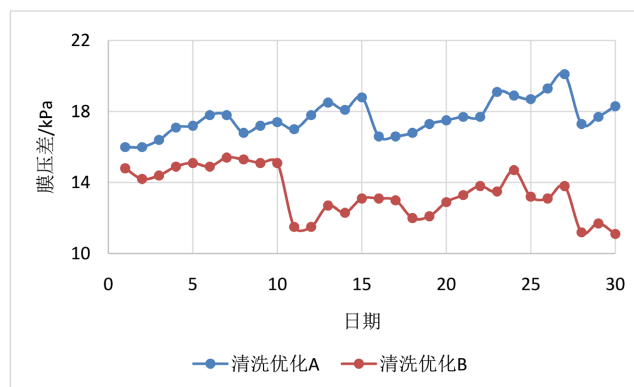
### 3.2.2. 维护性清洗(EFM)

为了有效清除膜表面的污染物,需要定期对膜组件进行维护性清洗(EFM),EFM 包括次氯酸钠 EFM 和柠檬酸 EFM。MBR 的膜系统运行 1 周左右需要采用含次氯酸钠的滤后液对膜组件进行反冲洗一次,耗时约 90 分钟。为防止无机物在膜表面的积累,MBR 的膜系统运行 1 月左右需要采用含柠檬酸的滤后液对膜组件进行反冲洗一次,耗时约 5 分钟。EFM 一般通过 TMP (跨膜压差)的设定值或时间的设定值启动。每次只能进行一个膜组的 EFM,其它膜组正常运行产水。在 EFM 期间,膜组在混合液中始终处于完全浸没状态。EFM 过程所用的主要设备见表 5。

**Table 5.** EFM cleaning equipment  
**表 5.** EFM 清洗设备

序号	名称	流量(m <sup>3</sup> /h)	扬程(m)	安装数量
1	氯 EFM 清水泵	2.5	7	1
2	氯 EFM 投加泵	0.065	30	1
3	酸 EFM 清水泵	43	7.5	1
4	酸 EFM 投加泵	1.5	20	1

在维护性清洗工艺上,思源做了相应的实验。主要目的是在保证清洗效果的前提下,优化清洗次数,以达到节省清洗药剂,提高经济效益。衡量清洗效果的指标是在相同的月份(2012 年 6 月 和 2014 年 6 月),从计算机上抄录每天的膜压差和产水量。选择在 6 月是为了保证水温和学校产生的校园污水量基本相同,具有可比性。2012 年 6 月共进行 12 次次氯酸钠 EFM 清洗,2 次柠檬酸洗 EFM,对此标识为“清洗优化 A”。而 2014 年 6 月共进行 8 次次氯酸钠 EFM 清洗,3 次柠檬酸洗 EFM,对此标识为“清洗优化 B”。3 号膜组于 6 月每天的膜压差数据列于图 5。



**Figure 5.** Daily differential membrane pressure data in June for two cleaning optimization schemes of No. 3 membrane group  
**图 5.** 3 号膜组两种清洗优化方案于 6 月每天的膜压差数据

从两条曲线直观的比较,清洗优化 B 的膜压差都小于清洗优化 A。从统计学上分析,可以计算算术平均值和标准偏差。

$$\text{算术平均值} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

其中:  $X_i$ -每天的数值;  $n$ -记录的天数。

$$\text{标准偏差} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \text{算术平均值})^2}{n-1}} \quad (2)$$

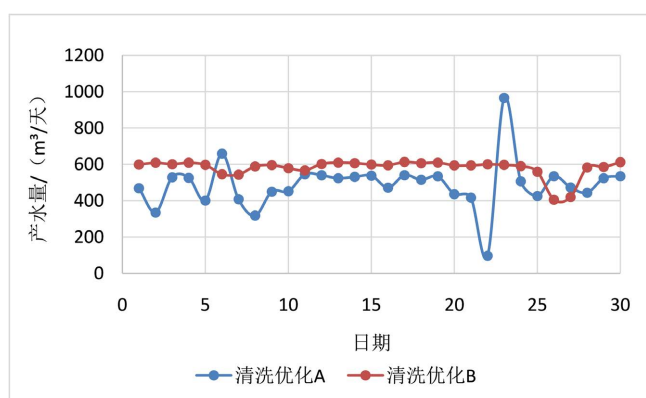
标准偏差是度量数据分布的分散程度，即用于衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差越小，这些值偏离平均值就越少，反之亦然。将两种清洗优化方案的膜压差的算术平均值和标准偏差列于表 6。

**Table 6.** Arithmetic mean and standard deviation of the membrane pressure difference for the two cleaning optimization schemes  
**表 6.** 两种清洗优化方案的膜压差的算术平均值和标准偏差

	清洗优化 A	清洗优化 B
算术平均值	17.65	13.43
标准偏差	0.99	1.35

从算术平均值的比较，清洗优化 B 的膜压差都小于清洗优化 A 的膜压差。从标准偏差的比较，清洗优化 B 的膜压差与等于清洗优化 A 的膜压差。

3 号膜组于 6 月每天的产水量数据列于图 6。



**Figure 6.** Water production data in June for two cleaning optimization schemes of No. 3 membrane group  
**图 6.** 3 号膜组两种清洗优化方案于 6 月每天的产水量数据

将两种清洗优化方案的产水量的算术平均值和标准偏差列于表 7。

**Table 7.** Arithmetic mean value and standard deviation of the water yield optimized for two cleaning schemes  
**表 7.** 两种清洗优化方案的产水量的算术平均值和标准偏差

	清洗优化 A	清洗优化 B
算术平均值	488.27	580.67
标准偏差	133.98	49.03

从算术平均值的比较，清洗优化 B 的产水量都大于清洗优化 A 的产水量。从标准偏差的比较，清洗优化 B 的产水量优于清洗优化 A 的产水量。

常见的透水率定义是单位面积( $\text{m}^2$ )单位时间(小时)单位压差(kPa)下的透水体积(L 升)，一般用英文“LMH”表示。这样的定义非常不适合大工业规模的计算。新定义工业透水率来代替透水率。工业透水率定义是单位面积( $1000 \text{ m}^2$ )单位时间(d, 天)单位压差(kPa)下的透水体积( $\text{m}^3$ )，一般用英文“VMD”表示。



思源 MBR 膜组里的膜面积是  $1800 \text{ m}^2$ 。所以思源每个膜组的工业透水率就是将该膜组的每天产水量除以膜压差后再除以 1.8 可得。

$$\text{工业透水率 VMD} = \frac{\text{每天膜组产水量}(\text{m}^3)}{\text{膜组压差}(\text{kPa}) * 1.8} \quad (3)$$

图 7 是 3 号膜组于 6 月每天的工业透水率数据。

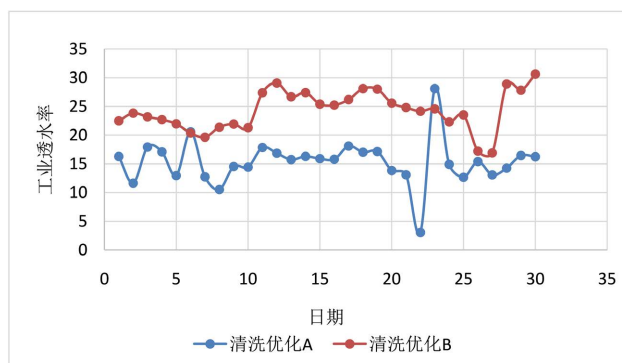


Figure 7. Daily industrial permeability data of two cleaning optimization schemes of membrane group in June of No. 3 membrane group

图 7. 3 号膜组两种清洗优化方案于 6 月每天的工业透水率数据

将两种清洗优化方案的工业透水率的算术平均值和标准偏差列于表 8。

Table 8. The arithmetic mean and standard deviation of industrial permeability optimized for two cleaning schemes  
表 8. 两种清洗优化方案的工业透水率的算术平均值和标准偏差

	清洗优化 A	清洗优化 B
算术平均值	15.35	24.29
标准偏差	3.94	3.42

从算术平均值的比较, 清洗优化 B 的工业透水率都大于清洗优化 A 的工业透水率。从标准偏差的比较, 清洗优化 B 的工业透水率优于清洗优化 A 的工业透水率。

根据以上的比较, 清洗优化 B 可以达到在保证清洗效果的前提下, 降低化学清洗频率, 节省药剂。

### 3.2.3. 化学在线清洗(CIP)

连续几年的运行, 跨膜压差依次维持在 0~30 KPa, 膜组最大允许跨膜压差为 50 KPa。化学在线清洗(CIP)频率为 3~6 个月 1 次, 该工艺是在膜池加入稀释的清洗化学药剂, 通过透过液抽吸泵使得清洗药剂穿过膜并行成循环回路, 从而大大提高化学清洗效果。清洗过程是先使用 1.96 wt% 的柠檬酸水溶液浸泡 8~10 小时, 再用 1 wt% 的氢氧化钠(NaOH)水溶液中和至 pH 为 6~9; 后用 0.9 wt% 的次氯酸钠(NaClO)水溶液浸泡 8~10 小时, 再用 0.5 wt% 的亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )水溶液中和至 pH 为 6~9。做化学在线清洗(CIP)时膜组完全浸没在清洗溶液里。

原工艺 CIP 清洗, 3 个膜组依次药液浸泡、中和、排空。换句话说, 该工艺在膜池内完成, 无需将膜组件取出并放到单独的清洗池去清洗, 使操作运行更为简便。3 个膜组共需要 3 次柠檬酸水溶液浸泡, 3 次氢氧化钠(NaOH)水溶液中和, 3 次次氯酸钠(NaClO)水溶液浸泡, 和 3 次亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )水溶液中和。

优化工艺后, 仅在一个 CIP 池依次放入 3 个膜组件, 按照化学在线清洗的顺序浸泡, 每个膜组浸泡之后添加少量相同的药剂。3 个膜组共需要一次柠檬酸水溶液浸泡(每个膜组浸泡之后添加少量相同的药



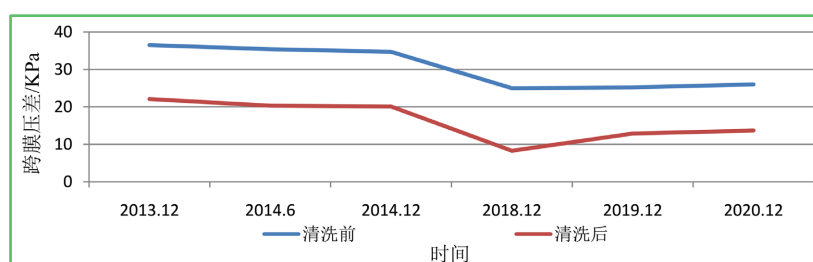
剂), 一次氢氧化钠(NaOH)水溶液中和(每个膜组浸泡之后添加少量相同的药剂), 一次次氯酸钠(NaClO)水溶液浸泡(每个膜组浸泡之后添加少量相同的药剂), 和一次亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )水溶液中和(每个膜组浸泡之后添加少量相同的药剂)。从思源的经验看每个膜组浸泡之后添加 5% 相同的药剂即可。表 9 列出主要的 CIP 清洗设备。

**Table 9.** The major equipment of CIP process

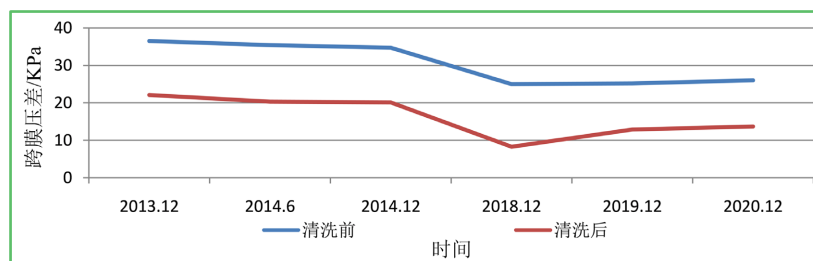
**表 9.** CIP 过程主要设备

序号	名称	流量( $\text{m}^3/\text{h}$ )	扬程(m)	安装数量
1	CIP 清水泵	85	4.5	1
2	氯 CIP 投加泵	3	20	1
3	亚硫酸氢钠投加泵	1.5	20	1
4	酸 CIP 投加泵	1.5	20	1
5	NaOH 投加泵	1.5	20	1

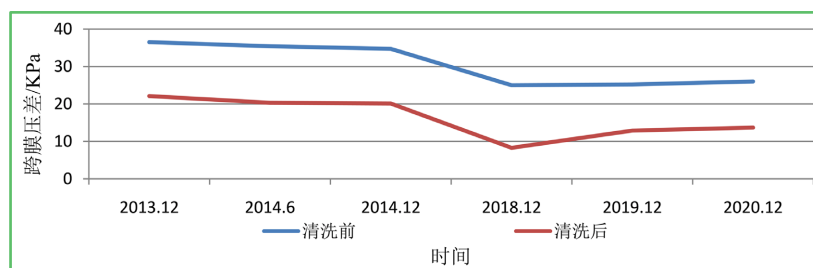
图 8(a)~(c)是优化前 CIP 清洗前后跨膜压差曲线图。



(a)



(b)



(c)

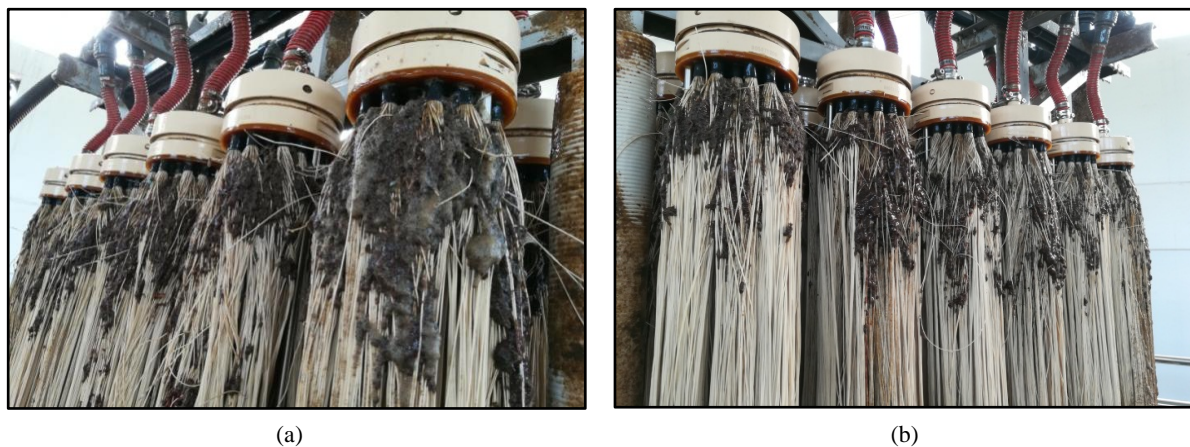
**Figure 8.** (a) Transmembrane pressure difference curve of CIP cleaning in membrane group 1; (b) Transmembrane pressure difference curve of CIP cleaning in membrane group 2; (c) Transmembrane pressure difference curve of CIP cleaning in membrane group 3

**图 8.** (a) 1 号膜组 CIP 清洗跨膜压差曲线; (b) 2 号膜组 CIP 清洗跨膜压差曲线; (c) 3 号膜组 CIP 清洗跨膜压差曲线

做一次 CIP 的药剂费用从改良之前的 29,730 元，降低到 11,000 元，节约 18,730 元。

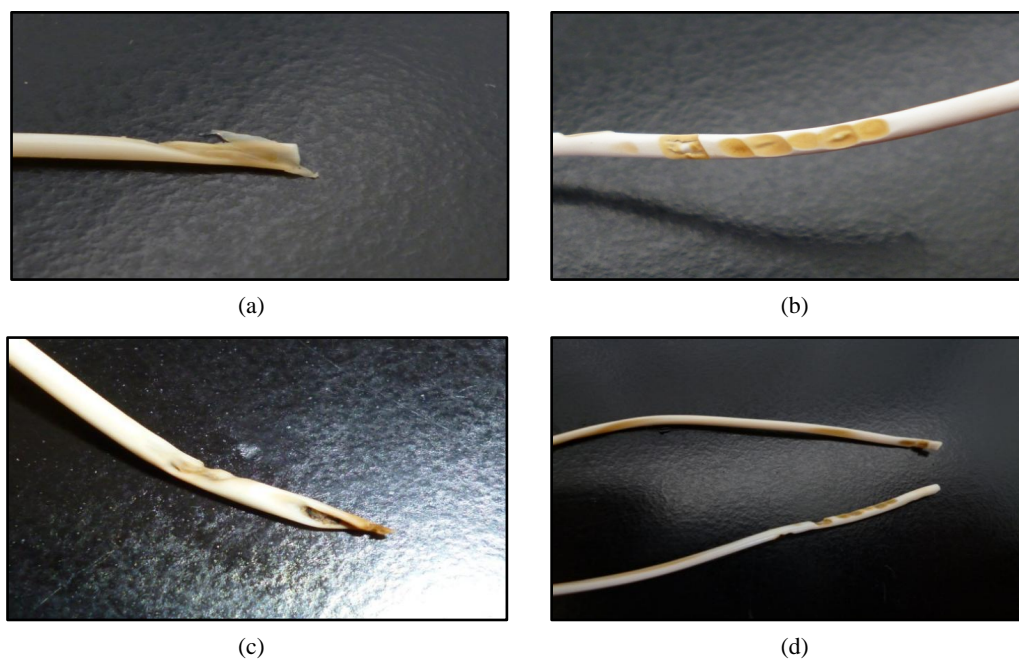
### 3.2.4. 物理维护清理

按期在做 CIP 清洗之前，先进行一次物理维护清理，能恢复到跨膜压差的最初值，从维护清洗效果可知，膜组在短期内不会发生不可逆的损伤。做物理维护清理的原因是思源在校有 2 万人，污水中毛发过多，因曝气搅拌毛发漂浮，造成膜组上层毛发和膜丝纠结导致断丝，致使膜组产水面积减少降低产水量。图 9(a)、图 9(b)是毛发纠结的膜组。



**Figure 9.** Hair tangle in the upper part of membrane group  
**图 9.** 膜组上部毛发纠结

膜组上部毛发纠结造成的直接后果是偏氟乙烯(PVDF)中空纤维断丝。图 10(a)~(d)均为现场几种典型的中空纤维断丝。



**Figure 10.** Several typical hollow fiber broken wires  
**图 10.** 几种典型的中空纤维断丝

对于产生的膜组上部毛发纠结只能采取人工物理清洗的笨方法去进行清洗。先将膜组件从膜池吊到维修池维护，手工去除膜组上层纠结在一起的毛发。图 11(a)、图 11(b)是人工物理维护现场。图 12(a)、图 12(b)是人工物理维护后的膜组件。



**Figure 11.** Manual physical cleaning  
**图 11.** 手工物理清洗



**Figure 12.** The membrane assembly after artificial physical maintenance  
**图 12.** 人工物理维护后的膜组件

在  $A^2/O+MBR$  污水处理再生水回用系统 10 年运转过程中，思源也十分注重创新、改进、和优化。既有前面提到的维护性清洗和化学在线清洗的改进，也有在调节池和生化池之间气浮池的添加。要使 MBR 膜生物反应器能够长期运转，预处理是一个必须重视的环节。2020 年 12 月思源将转鼓式膜格栅换成效果更好的内径流膜格栅。图 13(a)、图 13(b)转鼓式膜格栅、图 14(a)、图 14(b)内径流膜格栅是生物池前的预处理设备。



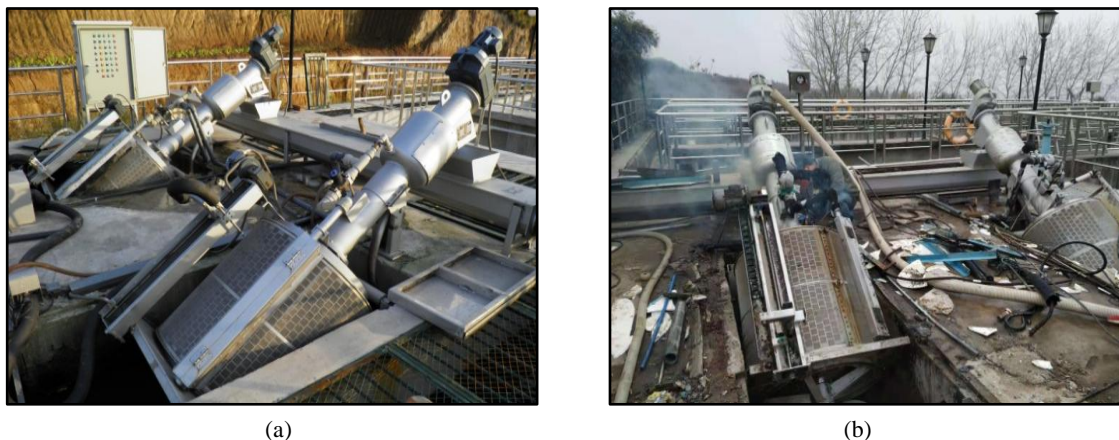


Figure 13. (a) Transfer drum film grille; (b) Removing the transfer drum film grille  
图 13. (a) 转鼓式膜格栅; (b) 转鼓式膜格栅拆除中



Figure 14. (a) Installing the internal runoff membrane grille; (b) The internal runoff membrane grille  
图 14. (a) 安装内径流膜格栅; (b) 内径流膜格栅

#### 4. 结论

西安思源学院再生水厂的  $A^2/O+MBR$  组合工艺, 从 2011 年 9 月稳定运行至今已经十年, 累计产水 465 万  $m^3$  全部回用, MBR 处理出水水质稳定达到《城市污水再生利用景观环境用水水质标准》(GB/T 18921-2002), 远超厂家给出的 5 年膜组使用寿命。

运行实践证明, 只要科学地遵循以下几点, 长期稳定运行、出水水质优良可控、膜组的使用寿命延长和企业运维成本降低是可以实现的:

- 1) 遵循厌氧 - 缺氧 - 好氧活性污泥法污水处理工程技术规范;
- 2) 加强膜污染控制操作(膜通量选择、膜冲洗曝气设定、膜的间歇抽吸)并严格执行选定的操作参数;
- 3) 按照研究所述的 MBR 膜组清洗工艺流程操作。

#### 基金项目

陕西省水利厅科技计划项目; 合同名称: 高校中水回用系统技术标准体系研究; 合同编号: 2021slkj-14。

## 参考文献

- [1] 陈威, 袁书保, 龚松. MBR 膜维性护清洗实验研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(6): 100-102+106.
- [2] 聂新宇, 罗敏, 刘慰, 等. 无锡梅村污水处理厂 MBR 工艺多年运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 25-27.
- [3] 韦玮. 广州市京溪污水处理厂工程造价分析[J]. 建筑经济, 2011(10): 42-44.
- [4] 韩永萍, 肖燕, 宋蕾, 等. MBR 膜污染的形成及其影响因素研究进展[J]. 膜科学与技术, 2013, 33(1): 102-110.
- [5] 杨学贵, 肖晓文, 孙雁, 等. 昆明第四水质净化厂 MBR 工艺 7 年运行实践分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 121-127.
- [6] 王春晖, 邓磊, 王春, 等. AAO+MBR 工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 79-81.
- [7] 张伟. 膜生物反应器(MBR)技术研究及其在国内应用现状[J]. 北方环境, 2011, 23(11): 192-194.
- [8] 曾木海. 污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 75-80+102.
- [9] 姚远. A/O+MBR 工艺在生活污水处理站中的应用[J]. 给水排水, 2016, 52(S2): 110-113.
- [10] 邱维. 昆明市第九、第十地下污水处理厂设计实例分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 22-27.
- [11] 马宏伟, 陈雅琼, 陈阳. 多级 AO-MBR 工艺用于污水处理厂提标扩建工程设计[J]. 给水排水, 2017, 43(6): 30-34.
- [12] 王舜和, 郭淑琴, 魏新庆. 分段进水多级 A/O 工艺计算与探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 81-85.
- [13] 杨柳, 庞新生, 蔡正科, 等. 大型平板膜 MBR 处理城镇污水工程设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 68-72.
- [14] 薛涛, 董良飞, 关晶, 等. MBR 强化脱氮除磷工艺处理城市污水的中试[J]. 水处理技术, 2011, 37(2): 45-47.
- [15] 李东, 张洪生, 付波, 等. 5 年 A<sup>2</sup>O-MBR 中水回用系统经济调查分析——以西安思源学院为例[J]. 给水排水, 2017, 43(S1): 159-161.
- [16] 李东, 郝静远, 马青华, 等. MBR 工艺的长期运行数据分析[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 92-96+130.
- [17] 周士恒, 王青华, 付波, 等. 西安思源学院污水处理厂 MBR 工艺多年运行情况分析[J]. 山西科技, 2020, 35(4): 84-87.
- [18] 郝静远, 李东, 马青华, 等. A<sup>2</sup>O-MBR 污水再生回用成本精算及经济评价——以西安思源学院为例[J]. 山西科技, 2019, 34(1): 125-128+132.
- [19] 郝静远, 李东, 张学梅, 等. 思源 A<sup>2</sup>O-MBR 多年运行效果与其他相似范例的比较分析[J]. 山西科技, 2018, 33(6): 121-123+127.
- [20] Zhang, X., Hao, J., Ma, Q., Li, D., Fu, B., *et al.* (2020) Comprehensive Analysis of 9-Year Running Data of A<sup>2</sup>O-MBR in Xi'an Siyuan University. *Meteorological and Environmental Research*, **11**, 139-143.