

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.007

超滤膜短流程工艺处理南水北调原水的运行效能

张娟^{1,2}, 牛豫海¹, 张自力¹, 刘书明², 张强¹, 张士民¹, 刘堪平¹

(1. 河北建投水务投资有限公司, 河北 石家庄 050051; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 采用超滤膜短流程工艺处理南水北调原水,分析了超滤膜的净水效能以及膜污染情况。从出水水质分析结果可知,无论原水及膜池进水浊度如何变化,出水浊度始终稳定维持在0.1 NTU左右,出水浊度合格率为100%;出水COD_{Mn}浓度稳定控制在2.0 mg/L以下,合格率为100%。超滤膜短流程工艺对大肠杆菌等致病微生物具有100%的去除效果,且去除效果稳定,出水水质能够达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。现场实际运行结果表明,膜丝在遭受严重污染时,膜通量的恢复、跨膜压差的下降需要一个较长的过程。通过调整清洗程序,膜污染得到缓解,跨膜压差维持在一个极低的范围,可实现膜系统“零污染”技术,而且此时系统运行状态良好,能耗低。

关键词: 南水北调原水; 超滤膜; 短流程工艺; 净水效能; 化学清洗; 跨膜压差

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0037-05

Operational Efficiency of Short-flow Ultrafiltration Process Treating Water from South-to-North Water Diversion Project

ZHANG Juan^{1,2}, NIU Yu-hai¹, ZHANG Zi-li¹, LIU Shu-ming², ZHANG Qiang¹,
ZHANG Shi-min¹, LIU Kan-ping¹

(1. HCIG Water Investment Co. Ltd., Shijiazhuang 050051, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Short-flow ultrafiltration (UF) purification process was used to treat water from South-to-North Water Diversion Project, and water purification efficiency and membrane fouling were analyzed. According to the results of effluent quality, no matter how turbidity in the raw water and influent of the membrane changed, effluent turbidity maintained consistently at about 0.1 NTU and its qualification rate was up to 100%, and COD_{Mn} concentration in the effluent was always less than 2.0 mg/L and its qualification rate was also 100%. The process had 100% removal efficiency of almost all pathogenic microorganisms (such as *Escherichia coli*) and stable performance, and the effluent quality could meet *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006). Results of field operation showed that it would take a long time to restore the membrane flux and reduce the transmembrane pressure (TMP) if the membrane was badly polluted. Membrane fouling was relieved and the TMP was maintained in a very low range by adjusting the washing procedure. Therefore, “zero-membrane fouling” technologies with good performance and low energy consumption could be realized.

Key words: water from South-to-North Water Diversion Project; UF membrane; short-flow process; water purification efficiency; chemical cleaning; transmembrane pressure (TMP)

超滤(UF)属于纯物理净水技术,对水中的悬浮物、藻类、胶体、细菌、病毒等污染物能进行有效截留,保证出水的微生物安全性,具有绿色、高效、节能、工艺简便、过程易控制、占地面积小、出水水质稳定等优点,是新一代饮用水净化工艺的较佳选择^[1-2]。

1 水厂概况

邢台市某水厂设计规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (自用水量按照3%计算),原水为南水北调干渠出水,枯水期时水源为河北六库用水。该水厂采用“混凝+膜”的短流程处理工艺(见图1),混凝的主要作用是使水体中的胶体脱稳,与水体中的悬浮颗粒结合,形成较大的矾花,而浸没式超滤膜作为水厂的最后一道屏障,能有效截留水体中剩余的悬浮物、浊度、胶体、藻类、细菌、病毒等,使出水浊度降低到0.1 NTU,保证出水水质安全。水厂主要处理构筑物包括预沉调节池、进水口及进水泵房、配水井、超滤膜车间(含混合反应池、超滤膜池及附属设备间)、清水池、送水泵房及变配电间、加氯加药间、活性炭投加间、中和池、排泥池、污泥浓缩池、污泥脱水机房等。混凝剂采用聚合氯化铝(PAC)。

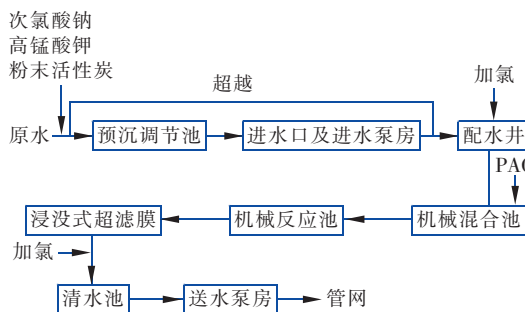


图1 邢台市某水厂超滤短流程处理工艺

Fig. 1 Short-flow UF water purification process in a WTP of Xingtai City

该处理工艺的核心元件为复合PVC浸没式超滤膜(LJ2A-2000-PV2型),其公称孔径为 $0.02 \mu\text{m}$ 、膜丝内/外径为 $1.00/1.60 \text{ mm}$ 、水流方向由外向内、最大跨膜压差为 80 kPa 、设计膜通量为 $23 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、进水最高温度为 40°C 。

超滤膜采用浸没式压力过滤、虹吸产水,过滤周期为 90 min (含气冲 30 s +气水反冲 60 s),采用气

水联合清洗,维护清洗周期为 10 d 、清洗药剂为 300 mg/L 的 NaClO ,恢复性清洗周期为 1 年 、清洗药剂为 0.5% 的 NaOH + 1000 mg/L 的 $\text{NaClO}/0.5\%$ 的 HCl 。

2 超滤膜短流程系统

2.1 过滤过程

混凝出水通过两条配水渠道均匀流向A~J这10个膜池内,膜池参数如下:膜柱数为280个、膜柱面积为 15 m^2 、池内膜面积为 4200 m^2 、单池容积为 57 m^3 、单池产水量 $<100 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过负压抽吸(虹吸)把待滤水从中空纤维膜外侧抽吸过膜壁,收集于集水管。每个膜池中的所有产水汇集到产水母管中,进入清水池。

2.2 反洗过程

反洗过程一方面将超滤产水反向透过中空纤维膜,同时在膜堆底部通过气冲擦洗中空纤维膜丝表面从而去除沉积物,反洗结束后将膜池中的液体排到排水池。

水厂膜处理车间共10个膜池,分为南北两列,每列5个膜池,膜池反冲洗时两列同步进行,即A~E池、J~F池。设定反冲洗周期为 90 min ,因此分配给每个膜池的反冲洗时间为 18 min ,包括冲洗前的降压、反洗、静沉、进水程序。

2.3 化学清洗过程

维护性化学清洗采用次氯酸钠溶液浸泡以去除水中污染物,周期一般为 10 d ,每天清洗1个膜池,轮流清洗,具体由现场运行情况而定。

恢复性化学清洗采用酸、碱浸泡,周期为 1 年 。采用低浓度的次氯酸钠对超滤膜进行维护性化学清洗,以维护运行的稳定性。该水厂设计膜系统采用在线化学清洗,即在膜池内进行酸碱加药洗。

膜系统清洗情况总结如下:①气水联合清洗,周期为 90 min ,清洗时间为 100 s ,清洗程序为关进水阀→降压→关产水阀→气冲→气水反冲→静沉→排污;②维护性化学清洗,周期为 10 d ,清洗时间为 $4 \sim 6 \text{ h}$,清洗程序为降压→气水混合洗→排空→进水加药浸泡→气洗、排污→水洗、排污;③恢复性化学清洗(碱洗),周期为 360 d ,清洗时间为 $12 \sim 24 \text{ h}$,清洗程序为降压→气水混合洗→排空→进水加碱

浸泡→气洗、排污→水洗、排污;④恢复性化学清洗(酸洗),周期为360 d,清洗时间为12~24 h,清洗程序为降液→气水混合洗→排空→进水加酸浸泡→气洗、排污→水洗、排污。

3 超滤膜短流程工艺净水效能

南水北调原水水质可分为两个不同阶段:高温高藻期和水质正常期,最主要的区别是温度和浊度,其中高温高藻期为7月—10月,水质正常期为11月—次年6月,具体水质如表1所示。

表1 不同阶段南水北调原水水质

Tab.1 Raw water quality of South-to-North Water Diversion Project at different stages

项 目	高温高藻期	水质正常期
温度/℃	17.5~32.0	4.5~18.6
浊度/NTU	6.58~32.5	0.33~6.42
色度/度	10~20	5~10
pH 值	7.82~8.68	7.75~8.32
COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	2.56~4.43	1.12~2.86
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.03~0.08	0.03~0.07
藻类数/(10 ⁴ 个·L ⁻¹)	2 360~13 562	432~4 578

3.1 对浊度的去除效果

南水北调原水的浊度大概为2~10 NTU,而超滤膜池进水浊度在35~55 NTU之间,运行结果表明,无论原水及膜池进水浊度如何变化,超滤膜池出水浊度始终稳定维持在0.1 NTU左右,超滤膜直接过滤混凝出水取得了很好的除浊效果。由此可知,超滤膜对原水中微生物、悬浮物和胶体具有极高的去除能力^[3];由于水中的“两虫”、细菌、病毒等通常是附着于颗粒性物质之上,因此对水中浊度的强化去除也必将极大地提高饮用水的微生物安全性,降低水介传染病的暴发风险^[4]。

3.2 对微生物的去除效果

因该水厂采用过滤精度为0.02 μm的超滤膜,而大肠杆菌等微生物的直径通常在0.5 μm以上^[5],因此超滤膜短流程工艺对它们的去除能力达到99.99%以上。分析水厂水质日检报告发现,全年总大肠菌群、耐热大肠菌群、大肠埃希氏菌均未检出,此项水质指标合格率为100%。

3.3 对有机物的去除效果

生产运行期间,南水北调原水COD_{Mn}检测值≤4 mg/L、平均值为(3.1±0.25) mg/L,符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅱ类水标准。经过前端混凝、末端超滤膜短流程工艺处理后,出水

COD_{Mn}可以控制在2.0 mg/L以下,出水合格率为100%,COD_{Mn}平均去除率在40%~50%之间。有研究表明^[4],超滤工艺出水COD_{Mn}含量均略高于同期砂滤池出水,这可能是因为超滤膜主要依靠膜孔的物理截留,无法对水中小分子可降解有机物进行生物降解,因此对小分子有机物的去除效果不佳。然而,因为经过了前端混凝,大分子有机物已成为超大颗粒絮体而自动沉降于混凝池及膜池底部,通过排泥通道排出了池外,且部分有机物颗粒絮体会自动在膜丝表面形成一种动态膜,也称为次生膜^[6],这种自生动态膜对有机物也有一定的降解作用^[7],所以,超滤膜短流程工艺处理南水北调原水时对COD_{Mn}有很好的去除效果。

3.4 水质全分析结果

该水厂目前已稳定运行3年时间,对膜后产水进行的106项水质指标的全分析结果表明,出厂水水质全面达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),水质安全性已得到完全验证。

4 超滤膜短流程工艺运行状况

4.1 运行初期膜污染情况

该超滤膜短流程工艺的设计膜通量为23 L/(m²·h),采用的是低通量、低跨膜压差运行方式,膜系统为浸没过滤、虹吸产水,试运行初期因膜通量较低、产水较小,膜污染有一个逐渐增加的过程。因水厂运行管理问题,运行初期膜组未进行正常维护性清洗。图2对比了在试运行2个月后A、F两组不同膜池在运行初期膜系统跨膜压差的变化情况,其中A池未进行正常维护性清洗,F池则按照既定程序在2016年5月1日、11日、21日分别进行了维护性清洗。

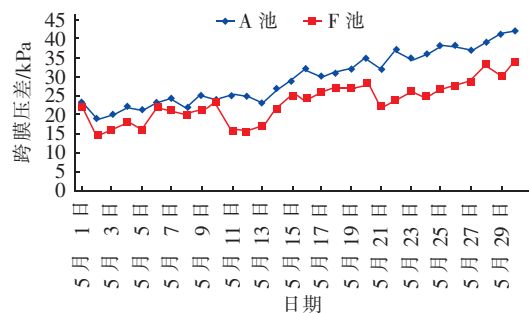


图2 运行初期跨膜压差变化

Fig.2 Change of transmembrane pressure at the beginning of operation

由图2可见,膜池的跨膜压差在自然过滤状态

下呈现逐步上升趋势。因为前期运行过程中未进行正常维护性清洗,膜池底部污泥始终未完全排空,因此,即便F池后续进行了维护性清洗,但膜池底部膜丝仍污堵严重,膜通量恢复不畅,维护性清洗后跨膜压差仍继续上升,此时物理性清洗及维护性清洗难以恢复膜原有的处理能力。

4.2 膜通量及跨膜压差的恢复

为使膜通量和跨膜压差得到正常恢复,对水厂膜池进行了恢复性化学清洗,且在清洗前工作人员先用高压水枪对膜柱进行了强力冲洗,确保膜柱底部积泥完全被冲刷出来,不留淤泥,冲刷后的废液完全排空。物理冲洗完成后,在膜池内配制氢氧化钠和次氯酸钠混合溶液,并通过循环泵抽吸药液进行循环;碱洗完毕后,将膜池内废弃碱液排入中和池,再在膜池内配入盐酸溶液,对膜元件进行循环清洗;酸洗完毕后,废弃酸液排入中和池,膜系统则进入完整性检测程序,之后进行正常产水过滤。

图3记录了超滤膜短流程工艺运行第2年、第3年分别进行恢复性清洗时跨膜压差的变化。

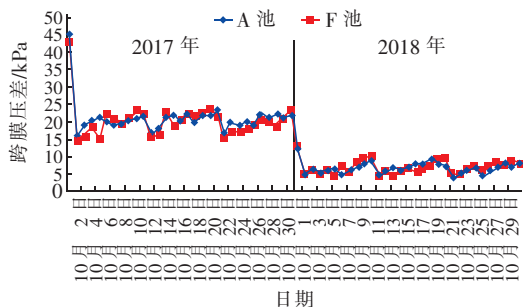


图3 恢复性清洗后跨膜压差变化情况

Fig.3 Change of transmembrane pressure after restorative cleaning

2017年10月恢复性清洗时对膜池进行了强力冲洗,膜通量恢复较好,但是因为膜丝之前污堵严重,清洗完后跨膜压差只下降了一半,当月跨膜压差在15~22 kPa范围内。该水厂共有10个膜池,维护性化学清洗的周期为10 d,每天清洗1个,轮流清洗,因此每月对膜池进行3次化学清洗。每次清洗后,跨膜压差有明显下降,且随着过滤时间的延长,跨膜压差缓慢增长。自2017年10月清洗后,膜池完全按照既定清洗程序进行清洗,因运行维护较好,在不断的反冲洗和维护性清洗后,膜丝污堵逐渐减轻,跨膜压差在后续一年的运行过程中也得到持续改善。至2018年10月再次进行恢复性化学清洗

后,系统跨膜压差基本保持在5~10 kPa,进入了一个非常稳定的状态,这与国外一些学者的研究结果类似^[8-10]。

4.3 膜组使用效率分析

按照反冲洗、维护性清洗程序设定来看,每天正常状态下,总有2个膜池在进行反冲洗、有1个膜池在进行维护性清洗,因此整个膜系统的使用效率为70%。该使用效率分析可对未来水厂设计膜通量、设计产水量、产水率等指标提供参考。

4.4 “零污染”技术的探索

实际运行中,保持水厂运行膜通量在一个合适的范围,并采用更多控制手段令膜污染极轻或为零,这些控制手段称为“零污染”技术^[11]。该水厂运行过程中,产水量为 $(1.2 \sim 1.6) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,膜通量维持在 $17 \sim 22.6 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,通过调整反冲洗、维护性清洗程序,膜污染得到了有效控制,跨膜压差增长缓慢,超滤膜不可逆污染极轻,甚至不会产生,后续运行基本上可以不进行或极少进行恢复性化学清洗。自2018年6月以来,水厂膜池跨膜压差基本维持在8 kPa以下,运行效果良好。

4.5 膜系统运行电耗

2016年—2019年间,随着运行经验的积累,该水厂通过不断调整膜池反洗、维护性清洗方式和频率,膜池产水运行效果越来越好,膜通量保持较好,跨膜压差变动平缓且逐渐向好。随着膜通量的不断恢复、跨膜压差的持续降低,膜车间运行电耗逐渐降低,并维持在较低水平(见图4)。

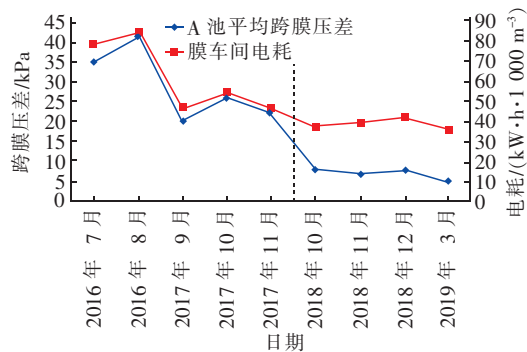


图4 膜系统运行电耗随跨膜压差的变化情况

Fig.4 Variation of power consumption with transmembrane pressure in UF system

5 结论

① 超滤膜短流程工艺省去了净水工艺的沉淀环节,待处理水直接由混凝池进入膜池进行过滤,主

要通过膜孔的直接筛除作用去除水中污染物,去除效果稳定性好。

② 无论原水及膜池进水浊度如何变化,超滤膜池出水浊度始终稳定维持在 0.1 NTU 左右,出水 COD_{Mn} 低于 2.0 mg/L,且该工艺对大肠杆菌等致病微生物达到 100% 的去除效果。

③ 膜池运行过程中需要及时对膜进行清洗维护,避免膜丝污染严重而增加运行能耗。在严重污染情况下,膜通量的恢复需要一个较长的过程,影响产水率,供水可靠性得不到保证,因此要确保膜系统在一个良好的状态下运行。

④ 分析水厂运行情况可知,通过科学设计膜池反洗、维护性清洗及化学清洗程序,合理设定清洗强度和频率,在工程中采用“零污染通量”,可实现膜系统“零污染”技术,且在一定时间范围内,膜运行状态可随工艺的科学调整而逐渐向好。

参考文献:

- [1] 李圭白,杨艳玲. 超滤——第三代城市饮用水净化工艺的核心技术[J]. 供水技术,2007,1(1):1-3.
Li Guibai, Yang Yanling. Ultrafiltration — the 3rd generation key water purification technology for city[J]. Water Technology,2007,1(1):1-3(in Chinese).
- [2] 李文敏. 超滤膜技术在自来水处理中的应用范例[J]. 净水技术,2013,32(z1):45-48.
Li Wenmin. Application example of ultrafiltration membrane technology in drinking water treatment[J]. Water Purification Technology,2013,32(z1):45-48(in Chinese).
- [3] Antony A,Blackbeard J,Angles M,*et al.* Nonmicrobial indicators for monitoring virus removal by ultrafiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science,2014,454:193-199.
- [4] 谢义忠,段宇浩,冯绮澜,等. 超滤与混凝沉淀单元短流程适配的中试研究[J]. 工业水处理,2015,35(5):19-22.
Xie Yizhong,Duan Yuhao,Feng Qilan,*et al.* Pilot study on the shortened process by ultrafiltration adapting to conventional coagulation/sedimentation for drinking water treatment[J]. Industrial Water Treatment,2015,35(5):19-22(in Chinese).
- [5] 张晶,陈晓霞,吕海泉,等. 超滤技术在饮用水净化处理中的应用[J]. 辽宁化工,2013,42(5):563-564.
Zhang Jing, Chen Xiaoxia, Lü Haiquan, *et al.* Application of ultrafiltration membrane in advanced treatment of drinking water [J]. Liaoning Chemical Industry,2013,42(5):563-564(in Chinese).
- [6] Lee J,Ahn W Y, Lee C H. Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor[J]. Water Res,2001,35(10):2435-2445.
- [7] 张娟,邓慧萍,潘若平. 预涂动态膜技术在水处理中的研究进展[J]. 给水排水,2009,35(z1):145-149.
Zhang Juan, Deng Huiping, Pan Ruoping. Research progress of pre-coated dynamic membrane technology in water treatment[J]. Water & Wastewater Engineering,2009,35(z1):145-149(in Chinese).
- [8] Nakatsuka S, Nakate I, Miyano T. Drinking water treatment by using ultrafiltration hollow fiber membrane [J]. Desalination,1996,106(1/3):55-61.
- [9] Boerlage S F E, Kennedy M D, Aniye M P, *et al.* Monitoring particulate fouling in membrane systems[J]. Desalination,1998,118(1/3):131-142.
- [10] Yiantios S G, Karabelas A J. An experimental study of humic acid and powdered activated carbon deposition on UF membranes and their removal by backwashing [J]. Desalination,2001,140(2):195-209.
- [11] 张磊,顾军农,游晓旭,等. 超滤处理丹江口水库源水的“零污染”技术研究[J]. 中国给水排水,2016,32(23):5-9.
Zhang Lei, Gu Junnong, You Xiaoxu, *et al.* Non-fouling ultrafiltration technology for treatment of source water from Danjiangkou Reservoir [J]. China Water & Wastewater,2016,32(23):5-9(in Chinese).



作者简介:张娟(1986-),女,湖南衡阳人,博士研究生,高级工程师,主要从事给水厂及污水厂投资和运营管理工作。

E-mail:13739737722@163.com

收稿日期:2019-06-13