

工程实例

直接超滤在重庆村镇安全供水中的工程实践

雷晓玲^{1,2}, 陈麟¹, 杨程², 魏泽军²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆科学技术研究院, 重庆 401123)

摘要: 介绍不同出水方式的直接超滤工艺在重庆村镇安全供水工程中的应用。主要对2个典型实例的出水水质、运行成本及膜污染情况进行分析。结果表明,采用直接超滤工艺处理微污染水源水,出水水质可稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),特别是浊度和细菌指标远优于标准要求;压力式超滤工艺和浸没式超滤工艺的年度内直接生产成本分别为0.178、0.132元/m³;无前处理设施的条件下,通过优化反冲洗和化学清洗等运行参数,膜污染程度控制良好,但膜抗污染能力有所下降。直接超滤工艺在重庆近5年的实际运行表明,该工艺具有出水水质好、运行成本低、膜性能较稳定、管理维护简单的特点。原水条件达到设计要求时,直接超滤工艺适宜在村镇分散式供水系统中推广应用。

关键词: 村镇安全供水; 直接超滤; 压力式超滤; 浸没式超滤; 膜污染

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)22-0076-07

Engineering Practice of Direct Ultrafiltration in Safe Water Supply of Villages and Towns in Chongqing

LEI Xiao-ling^{1,2}, CHEN Lin¹, YANG Cheng², WEI Ze-jun²

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Academy of Science and Technology, Chongqing 401123, China)

Abstract: The application of direct ultrafiltration process with different water discharge modes in safe water supply projects of Chongqing villages and towns was introduced. The effluent quality, operating cost and membrane fouling of two typical cases were analyzed. The results showed that the effluent quality of micro-polluted source water treated by direct ultrafiltration process could reach the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006) steadily, especially the turbidity and bacteria indicators were far superior to the standard requirements. The annual direct production costs of pressure process and immersion process were 0.178 yuan/m³ and 0.132 yuan/m³ respectively. The membrane fouling degree without pre-treatment facilities was well controlled by optimizing operating parameters such as backwashing and chemical cleaning, but the anti-pollution ability was reduced. The actual operation in Chongqing for nearly 5 years showed that the direct ultrafiltration process had the advantages of good effluent quality, low operation cost, stable membrane performance, and simple management and maintenance. If the raw water conditions meet the design requirements, the direct ultrafiltration process is

suitable for application in decentralized water supply system in villages and towns.

Key words: safe water supply to villages and towns; direct ultrafiltration; pressured ultrafiltration; submerged ultrafiltration; membrane fouling

随着经济的发展和人民生活水平的提高,饮用水安全问题越来越受到关注^[1]。重庆作为典型的山地集镇,因其地势特点,供水管网布局往往受到限制,无法通过使用管网延伸的办法来满足村镇居民用上“放心水”的需要。山地村镇供水一般占地小、技术人员匮乏,需要采用操作简单、运行维护方便的处理工艺。常规饮用水处理工艺用于山地村镇供水时存在占地面积大、药剂投加等运行操作要求高、技术人员缺乏等问题,易造成已建农村供水设施出水水质达标率偏低的情况^[2]。

超滤作为“第三代城市饮用水净化工艺”^[3],能够有效地去除水中悬浮物、胶体以及致病微生物,具有占地面积小、安装时间短、自动化程度高等优点,近年来已在国内发达地区的市政给水厂得到广泛应用。随着国产超滤膜、自动控制系统和在线仪表的性能提升及造价的控制,使得超滤工艺在重庆村镇饮用水处理中的应用成为可能。目前超滤工艺通常作为市政给水厂的深度处理单元,有较完善的前处理设施,如果村镇供水设施不结合当地具体情况而盲目照搬以往市政给水厂经验,势必大幅增加水厂的占地面积和投资费用,其应用必然受到限制,因此,常规工艺加超滤深度处理在村镇供水应用中尚十分少见。

以重庆市新建和改建的多处镇级直接超滤饮用水厂作为研究对象,包括在綦江、璧山、潼南、万盛等多地运行的工程项目,取其中典型项目分析直接超滤饮用水厂自建厂以来的运行数据,考察直接超滤工艺在长期运行过程中的稳定性及其经济性特点,为该技术在村镇分散式供水系统中的推广应用提供相关建议。

1 新建压力式直接超滤工程

1.1 工程概况

新建压力式直接超滤工程位于重庆市綦江区永新镇,而老水厂修建于1999年,采用简易混凝沉淀工艺。水源为小型水库水,汛期浊度变化大,出水不稳定,浊度、色度等指标无法满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),当地居民反映强烈。新水厂的建设于2016年启动,在前期示范工程基础上,

主体工艺采用压力式(内压式)直接超滤膜过滤,水库水自流进入老水厂简易絮凝沉淀池(作为原水调节池),沉淀池中部取水加压进入膜系统,具体工艺流程如图1所示。

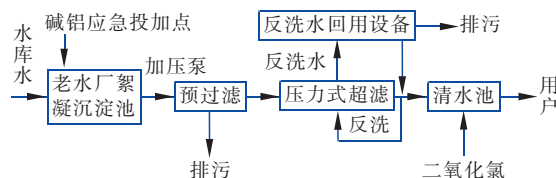


图1 压力式超滤膜处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of pressured ultrafiltration membrane treatment process

原水(水库水)水质良好,为地表Ⅲ类水质, COD_{Mn} 为2~4 mg/L, $\text{BOD}_5 < 2$ mg/L,总硬度(以 CaCO_3 计)为100~190 mg/L,无其他超标污染物,主要问题为汛期浑浊度变化大,需在老水厂应急投加絮凝剂,反应沉淀后进入膜系统,非汛期不投加絮凝剂。设计膜通量为 $50 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,制水规模为 $5000 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积约 300 m^2 ,于2017年11月正式通水。

目前因水源及供水管网限制,实际供水量约 $2300 \text{ m}^3/\text{d}$,过滤周期为40~90 min,根据原水水质情况适时调整,采用化学恢复性清洗,维护清洗周期为15~30 d。根据维护清洗效果,不定期进行恢复性清洗。

1.2 出水水质

新建项目于2017年11月调试通水后,当地卫生主管部门对出厂水31项指标进行检测,各项指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),后对外正式供水。

各主要水质指标见表1。

水厂自检清水池9项水质指标均稳定满足国家标准要求,其中,浊度、 COD_{Mn} 月均值见图2,可见清水池浊度长期稳定在 $0.4 \sim 0.75 \text{ NTU}$, COD_{Mn} 为 $2.18 \sim 2.94 \text{ mg/L}$ 。值得一提的是,设备自带哈希低量程浊度仪表显示浊度稳定在 $0.01 \sim 0.2 \text{ NTU}$,长期低于 0.1 NTU 。清水池浊度高于设备出水,可能原因是:为提高调蓄能力,新清水池和老清水池串联

使用,老清水池为半开放式且久未清洗,一定程度上 导致浊度有所升高。

表 1 綦江永新镇某水厂送检部分结果

Tab. 1 Partial results of inspection of a waterworks in Yongxin Town, Qijiang

项 目	检测结果	GB 5749—2006 标准限值	项 目	检测结果	GB 5749—2006 标准限值
浊度/NTU	0.66	1	铁/(mg·L ⁻¹)	<0.2	0.3
臭和味	无	无	锰/(mg·L ⁻¹)	<0.05	0.1
肉眼可见物	无	无	铅/(mg·L ⁻¹)	<0.005	0.01
pH 值	7.84	6.5≤ pH 值≤8.5	镉/(mg·L ⁻¹)	<0.000 25	0.005
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	36	250	砷/(mg·L ⁻¹)	<0.001	0.01
氰化物/(mg·L ⁻¹)	<0.002	0.05	硒/(mg·L ⁻¹)	<0.001	0.01
三氯甲烷/(mg·L ⁻¹)	0.02	0.06	铜/(mg·L ⁻¹)	<0.1	1
四氯化碳/(mg·L ⁻¹)	<0.001	0.002	锌/(mg·L ⁻¹)	<0.005	1
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.1	0.5	铬(六价)/(mg·L ⁻¹)	<0.004	0.05
硝酸盐/(mg·L ⁻¹)	1.2	10	氟化物/(mg·L ⁻¹)	0.1	1
阴离子合成洗涤剂/(mg·L ⁻¹)	<0.1	0.3	氯化物/(mg·L ⁻¹)	<5	250
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	未检出	100	溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	151	1 000
总大肠菌群/(CFU·100 mL ⁻¹)	0	不得检出	耗氧量(COD _{Mn} ,以 O ₂ 计)/ (mg·L ⁻¹)	0.7	3(水源限制,原水耗 氧量>6 mg/L 时为 5)
耐热大肠菌群/(CFU·100 mL ⁻¹)	0	不得检出	总硬度(以 CaCO ₃ 计)/ (mg·L ⁻¹)	96	450

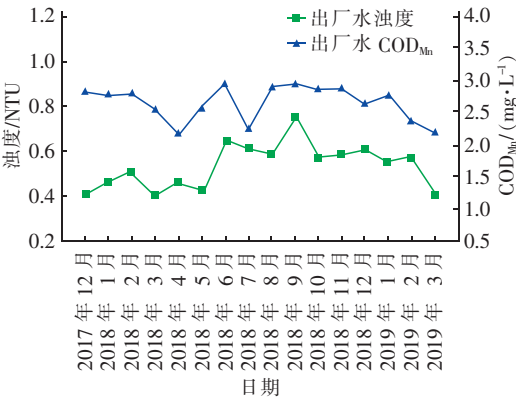


图 2 綦江永新镇某水厂出厂水浊度、COD_{Mn} 自检月均值
Fig. 2 Monthly effluent turbidity and COD_{Mn} self-test value
of a waterworks in Yongxin Town, Qijiang

1.3 直接生产成本

水厂运行全成本包括人工、折旧、改造及电耗、药耗、维修等,电耗、药耗及维修费用一般视为水厂运行的直接生产成本,同时人工、折旧及改造费用因为不同水厂的管理、经济水平等实际情况不同而有较大差异,此处重点关注超滤设备的直接生产成本。超滤设备自投入使用以来,未有大的维修,维修成本可忽略不计。电耗主要为原水加压泵、反洗泵、PLC 系统控制及照明等,药耗主要为膜化学清洗药剂和消毒剂,包括次氯酸钠、氢氧化钠、柠檬酸及二氧化

氯 AB 剂。根据该水厂 2018 年度统计数据,日均产水量为 2 300 m³/d,具体成本见表 2。其中,消毒剂费用占总药剂费用的 83%,膜化学清洗药剂费约占 17%。

表 2 綦江永新镇某水厂电耗、药耗

Tab. 2 Electricity and chemical consumption of a waterworks in Yongxin Town, Qijiang

项 目	单价	月均消耗量	单位消耗成本/ (元·m ⁻³)
电	0.7 元/ (kW·h)	8 125 kW·h	0.082
次氯酸钠	3.5 元/kg	250 kg	0.013
氢氧化钠	7.5 元/kg	31.25 kg	0.003
二氧化氯 AB 剂	80 元/组	69 组	0.080

综上,该水厂直接生产成本为 0.178 元/m³。

2 浸没式直接超滤应急工程

2.1 工程简介

浸没式直接超滤工程在重庆市璧山区及綦江区高庙坝均有应用。

璧山区原水厂采用絮凝/斜管沉淀/无阀滤池/清水池的传统工艺路线,设计产水量为 3 000 m³/d,水源为水库水,呈微污染状态,藻类季节性超标。因夏季高峰期用水量激增,供水量超过 4 000 m³/d,水厂出现超负荷运行的情况,同时夏季原水水质变化

大,出水浊度、色度等时常超标。为解决供水量及水质问题,2016 年 4 月启动应急工程建设,采用浸没式超滤膜工艺,利用膜池与清水池高差自流产水,高差约 4.5 m,设计膜通量为 13 L/(m²·h),制水规模为 2 000 m³/d,占地为 70 m²,8 月完成超滤设备安装调试,水质检测合格后对外正式供水。

綦江区高庙坝某水厂位于度假区,设施老旧,无法满足夏季用水高峰需求,决定在保留利用原有清水池和高位水池基础上,新建浸没式超滤一体化设备以适应其用水量波动大的特点。应急工程于 2015 年 5 月启动,设计膜通量为 13 L/(m²·h),制水规模为 2 000 m³/d,占地约 100 m²,6 月底调试后通水运行。采用超滤工艺与传统工艺并联运行,用水低峰期优先满足超滤产水。

据考察,两个地区的工程面临的问题相似,制水规模相同,实际供水规模为 2 000 m³/d,过滤周期为 60~120 min,且根据原水水质情况调整,采取相同工艺流程(见图 3)。两个工程的原水水质均呈现微污染特征,汛期浊度突变。主要超标污染物为 COD_{Mn},璧山区 COD_{Mn} 为 5.7~8.1 mg/L,綦江区高庙坝水质条件稍好,COD_{Mn} 为 2.5~4.3 mg/L。设计在进水管增加应急投药口,用于降雨导致水库水浊度激增或其他紧急情况时应急处理。同时,原水

水库周边退耕还林,加强了水源地综合整治,原水水质逐年稳定,自超滤设备投用后,应急投加装置并未使用,出水水质稳定达标。

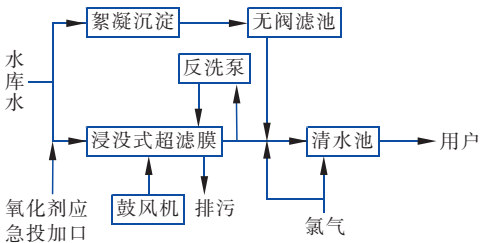


图 3 浸没式超滤膜处理工艺流程
Fig. 3 Flow chart of submerged ultrafiltration membrane treatment process

2.2 出水水质

上述两个项目安装调试完成后,均委托第三方检测机构对出厂水 108 项指标进行全项检测,其中璧山区水厂部分指标如表 3 所示,各项指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),之后对外正式供水。

璧山区水厂超滤出水浊度稳定在 0.1 NTU,出厂水浊度为 0.5 NTU 左右,綦江区高庙水厂出水浊度稳定在 0.04 NTU,微生物指标均满足要求,由此可见,与传统工艺相比,超滤出水的微生物安全性得到极大提高。

表 3 璧山区某水厂送检部分结果

Tab. 3 Partial results of inspection of a waterworks in Bishan District

项 目	结果	GB 5749—2006 标准限值	项 目	结果	GB 5749—2006 标准限值
浊度/NTU	0.1	1	锰/(mg·L ⁻¹)	<0.005	0.1
臭和味	无	无	铅/(mg·L ⁻¹)	<0.007	0.01
肉眼可见物	无	无	镉/(mg·L ⁻¹)	<0.001	0.005
pH 值	7.97	6.5≤pH 值≤8.5	砷/(mg·L ⁻¹)	<0.002	0.01
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	40.2	250	硒/(mg·L ⁻¹)	<0.002	0.01
氰化物/(mg·L ⁻¹)	<0.002	0.05	铜/(mg·L ⁻¹)	<0.005	1
三氯甲烷/(mg·L ⁻¹)	0.016 5	0.06	锌/(mg·L ⁻¹)	<0.002	1
四氯化碳/(mg·L ⁻¹)	<0.001	0.002	铬(六价)/(mg·L ⁻¹)	<0.004	0.05
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.084	0.5	氟化物/(mg·L ⁻¹)	0.322	1
硝酸盐/(mg·L ⁻¹)	0.523	10	氯化物/(mg·L ⁻¹)	12.9	250
阴离子合成洗涤剂/(mg·L ⁻¹)	<0.05	0.3	溶解性总固体/(mg·L ⁻¹)	183	1 000
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	未检出	100	耗氧量(COD _{Mn} ,以 O ₂ 计)/(mg·L ⁻¹)	4.48	3(水源限制,原水耗氧量>6 mg/L 时为 5)
总大肠菌群/(CFU·100 mL ⁻¹)	0	不得检出	总硬度(以 CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	140	450
耐热大肠菌群/(CFU·100 mL ⁻¹)	0	不得检出			
铁/(mg·L ⁻¹)	<0.02	0.3			

两座水厂自检清水池浊度、COD_{Mn}、色度、余氯等指标均符合国家标准。

綦江区高庙坝某水厂超滤设备自 2015 年 6 月投用,2015 年 6 月—2016 年 5 月自检浊度、COD_{Mn}

变化趋势如图4所示;璧山区超滤设备自2016年11月投用,2017年1月—2019年2月清水池自检浊度、 COD_{Mn} 变化趋势如图5所示。

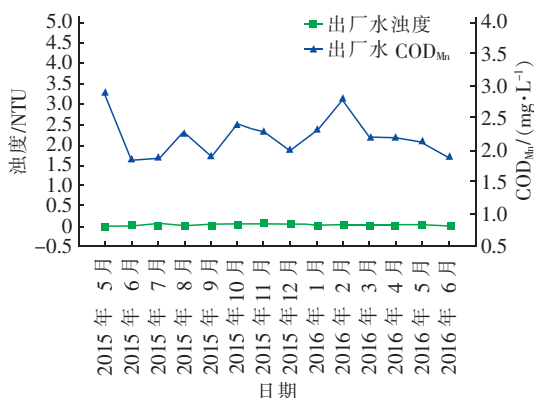


图4 綦江高庙坝某水厂出厂水浊度、 COD_{Mn} 自检月均值

Fig. 4 Monthly effluent turbidity and COD_{Mn} self-test value of a waterworks in Gaomiaoba, Qijiang

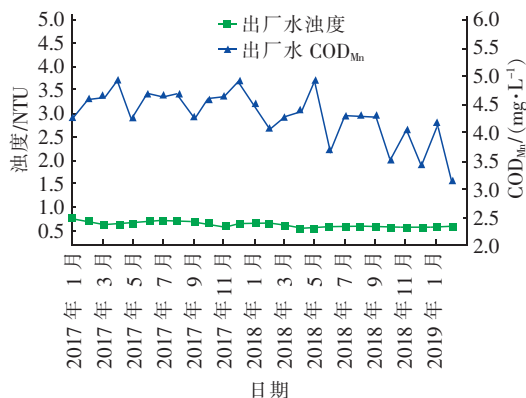


图5 璧山区某水厂出厂水浊度、 COD_{Mn} 自检月均值

Fig. 5 Monthly effluent turbidity and COD_{Mn} self-test value of a waterworks in Bishan District

由图4、5可见,清水池出水浊度总体平稳, COD_{Mn} 有一定波动。綦江区高庙坝某水厂出水浊度为0.02~0.04 NTU, COD_{Mn} 为1.84~2.9 mg/L。璧山区某水厂出水浊度为0.55~0.72 NTU, COD_{Mn} 为3.10~4.91 mg/L,均呈下降趋势;璧山水厂因原水限制,出水 COD_{Mn} 限值为5 mg/L,超滤设备投用前,出厂水 COD_{Mn} 不稳定,超滤设备自2016年投用后,出厂水 COD_{Mn} 稳定低于5 mg/L,浊度、细菌指标等在超滤设备投用前时常超标项亦稳定达标。

2.3 直接生产成本

上述两个应急项目直接生产成本比较接近,故以璧山区某水厂为例进行分析。设备自2016年11月投用以来,电耗主要为鼓风机、反洗泵、真空泵、

PLC系统及照明等,药剂主要有次氯酸钠、氢氧化钠、柠檬酸及液氯。根据2018年度统计数据,平均产水量为2 000 m^3/d ,且不含原水提升费用,消毒剂(液氯)费用按照超滤供水40%计算。电耗、药耗具体情况见表4。另外,运行期间更换膜池压力式液位传感器2个、膜池进水电动阀1个以及其他维修,维修费用合计12 780元,单位维修成本约为0.007元/ m^3 。

综上,该水厂超滤工艺年度内直接生产成本为0.132元/ m^3 。

表4 璧山区某水厂电耗、药耗

Tab. 4 Electricity and chemical consumption of a waterworks in Bishan District

项 目	单价	月均消耗量	单位消耗成本/(元· m^{-3})
电	0.7元/(kW·h)	6 000 kW·h	0.070
次氯酸钠	3.5元/kg	325 kg	0.019
氢氧化钠	7.5元/kg	145.83 kg	0.018
液氯	3元/kg	875 kg	0.018

3 膜污染控制

膜污染和使用寿命是超滤技术在应用过程中不可避免的问题^[4]。膜污染是指污染物在膜表面或膜孔中积累而限制水流通过,影响膜通量和产水量,其主要包括胶体、溶解性有机物、微生物、无机离子以及这些物质通过相互作用形成的混合物^[5-6];溶解性有机物(DOM),特别是腐殖酸、富里酸、单宁酸等被认为是引起膜不可逆污染的主要原因^[7]。定期清水物理反冲洗、维护性清洗和化学恢复性清洗是控制膜可逆污染和不可逆污染常用且有效的手段^[8-9]。与有前处理工艺或设施的超滤膜相比,采用直接过滤原水的超滤膜更容易受到污染^[10],因此在设计使用直接超滤过滤时,更应考虑原水水质条件和优化运行、清洗的参数及手段。

重庆村镇供水水源多为地表水(山坪塘、水库、溪河等),汛期浊度波动大,易受污染,部分水源呈现微污染状态,又无替代水源。直接超滤过滤工艺在重庆的工程实践中,充分考虑了重庆村镇水源特征,因綦江区高庙坝新建直接超滤项目水源水质良好;綦江区永新镇新建项目运行时间短,且未满负荷运行,这两个项目的膜污染控制良好,性能稳定。因此,以水源呈有机物微污染且运行时间较长的璧山区某水厂为例,对超滤膜的清洗效果及稳定性进行分析。一个物理反冲洗过滤周期内跨膜压差变化及

反冲洗后压差恢复情况见图6。

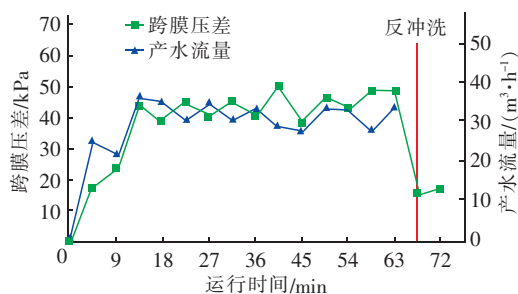


图6 过滤周期跨膜压差变化及反冲洗效果

Fig. 6 Change of transmembrane pressure difference and backwashing effect in a filtration cycle

在过滤的初始阶段,跨膜压差迅速上升,从过滤开始到15 min,跨膜压差从18.5 kPa上升至40 kPa,过滤中后期也即15~65 min,跨膜压差在40~48 kPa之间波动,且呈现逐渐升高趋势,反洗后跨膜压差恢复较好。同时可以看出,虽然跨膜压差处于较高水平,但产水流量并未明显降低。

重庆市璧山区某水厂自2016年8月通水以来,已满负荷运行32个月,通过控制产水手动阀门开闭程度,稳定和均衡地控制总产水量为90~100 m³/h,当手动阀全开以后,产水量明显下降,则进行恢复性清洗。2016年9月时的超滤膜可视为新膜,在运行初期跨膜压差平均约25 kPa,运行974 h后跨膜压差上升至44~45 kPa,运行28个月后即2018年12月开始,化学清洗后运行初期跨膜压差恢复到25 kPa左右,运行915 h后跨膜压差上升至44~45 kPa。虽然在化学清洗后跨膜压差恢复较好,但上升速率较新膜更快,累计运行时间有所缩短,即抗污染能力有所降低,累计运行时间缩短约6%。与连震雷等^[11]对运行7年的东超滤膜进行分析研究的结果类似,长期运行的超滤膜过滤周期会缩短,抗污染能力会降低,继而引起运行阻力增大、维修成本增加、化学清洗更加频繁等问题,一定年限内继续使用旧膜导致的运行成本增加高于更换新膜的成本时,应进行更为详细的经济性分析以指导膜的更换。

4 结论

① 重庆两处镇级供水工程中采用超滤直接过滤原水工艺,针对不同原水水质情况,设计应急处理手段,出水水质稳定满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),出水浊度几乎不受原水水质波

动的影 响,微生物安全性高。

② 压力式超滤供水厂和浸没式超滤供水厂的年度内直接生产成本分别为0.178、0.132元/m³。

③ 根据进水水质适时调整运行参数、优化清洗方式,膜污染会得到良好控制,化学清洗后膜通量和跨膜压差恢复良好;与新膜相比,化学清洗后的膜抗污染能力有所下降。

④ 直接超滤工艺流程短,占地面积小,设备集成化、自动化程度高,出水水质好,运行成本低,可实现互联网远程监控与操作;原水条件满足时,适宜在分散式供水地区推广使用。

参考文献:

- [1] 陈奇画. 加强饮用水水源环境保护的探讨[J]. 科技与创新, 2017(19): 105-106.
Chen Qihua. Discussion on strengthening environmental protection of drinking water sources[J]. Science and Technology & Innovation, 2017(19): 105-106 (in Chinese).
- [2] 王志宏. 农村饮水工程水处理工艺现状分析[J]. 科技创新与应用, 2013(16): 196.
Wang Zhihong. Analysis of current status of water treatment technology in rural drinking water projects[J]. Technology Innovation and Application, 2013(16): 196 (in Chinese).
- [3] 李圭白, 杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺——超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 1.
Li Guibai, Yang Yanling. The third generation urban drinking water purification process—A combined process of ultrafiltration as the core technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(4): 1 (in Chinese).
- [4] Huang W, Wang L, Zhou W, et al. Effects of combined ozone and PAC pretreatment on ultrafiltration membrane fouling control and mechanisms[J]. J Membr Sci, 2017, 533: 378-389.
- [5] 敖澹, 刘文君, 方振东, 等. 超滤膜污染的主要成因与控制膜污染的预处理技术[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(4): 41-46.
Ao Lu, Liu Wenjun, Fang Zhendong, et al. Main causes of ultrafiltration membrane fouling and the pretreatment technology for membrane fouling control[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2017, 33(4): 41-46 (in Chinese).
- [6] 杨海燕, 王灿, 赵焱, 等. 东江水膜污染物质的确定及

- 污染机理研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 1-7.
- Yang Haiyan, Wang Can, Zhao Yan, *et al.* Identification of foulants and fouling mechanism for ultrafiltration of Dongjiang River water[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 1-7 (in Chinese).
- [7] Yamamura H, Kimura K, Watanabe Y. Mechanism involved in the evolution of physically irreversible fouling in microfiltration and ultrafiltration membranes used for drinking water treatment [J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(19): 6789-6794.
- [8] 李诚, 李荣, 孙晓彤. 超滤膜污染 EFM 清洗效果研究及污染物成分分析[J]. 供水技术, 2014, 8(2): 19-21.
- Li Cheng, Li Rong, Sun Xiaotong. Analysis of the EFM cleaning effect and contamination component of ultrafiltration membrane fouling [J]. Water Supply Technology, 2014, 8(2): 19-21 (in Chinese).
- [9] 杨威, 雷晓玲, 王忠运, 等. 直接超滤工艺处理微污染水库水的工程实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 42-45.
- Yang Wei, Lei Xiaoling, Wang Zhongyun, *et al.* Engineering practice of direct ultrafiltration process for treatment of lightly polluted reservoir water[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 42-45 (in Chinese).
- [10] 王红雨, 齐鲁, 陈杰, 等. 颗粒物粒径和有机物分子量对超滤膜污染的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1993-1998.
- Wang Hongyu, Qi Lu, Chen Jie, *et al.* Effects of particle sizes and organics molecular weights on ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(5): 1993-1998 (in Chinese).
- [11] 连震雷, 李星, 于海宽, 等. PVC 合金超滤膜运行 7 年效能及膜污染特性研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 1-6.
- Lian Zhenlei, Li Xing, Yu Haikuan, *et al.* Performance evaluation and membrane fouling characteristics of long-term operation of PVC alloy ultrafiltration membrane [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 1-6 (in Chinese).



作者简介:雷晓玲(1967-),女,陕西澄城人,硕士,教授,主要从事市政给水排水、农村安全饮水、水务运营与管理、海绵城市建设、水环境治理等方面研究。

E-mail: 1362002949@qq.com

收稿日期: 2019-05-10

节水就是开源,就是增效,就是减排,就是降损