

集成式单阀重力反洗超滤工艺处理引黄水库原水

李 丽¹, 于海宽², 吕 谋¹, 李圭白³, 纪洪杰⁴

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266000; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 3. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 东营市自来水公司, 山东 东营 257091)

摘 要: 通过对单阀重力反洗直接超滤工艺处理引黄水库原水的中试研究,从超滤膜选型、长期稳定运行的膜污染控制、出水水质和运行成本4个方面分析了直接超滤工艺在农村饮用水工程中的应用效能。针对具有引黄水库原水质特质的微污染源,经直接超滤工艺处理后,出水浊度低于0.1 NTU,水质可稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,出水微生物安全性可以得到有效保障;采用超滤技术直接过滤引黄水库原水时,可选用截留分子质量较小的内压式PVC合金超滤膜,同时在反冲洗水中添加10 mg/L的NaClO进行化学强化反冲洗,可使跨膜压差增长速率明显降低,延长维护性化学清洗周期,有效缓解膜污染;另外,长期以10 L/(m²·h)的低通量工况运行有利于延缓膜污染。该工艺流程简单,管理方便,运行成本约为0.1元/m³,适宜在农村地区推广应用。

关键词: 引黄水库原水; 超滤; 单阀; 重力反洗; 膜污染; 跨膜压差; 化学强化反冲洗

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2019)05-0012-07

Purification Effect and Membrane Fouling Control of Integrated Single-valve Gravity Backwashing Ultrafiltration Membrane Process Treating Raw Water from the Yellow River Reservoir

LI Li¹, YU Hai-kuan², LÜ Mou¹, LI Gui-bai³, JI Hong-jie⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Dongying Waterworks Company, Dongying 257091, China)

Abstract: The single-valve gravity backwashing ultrafiltration (UF) process was used to treat the raw water from the Yellow River Reservoir, and its effectiveness in rural drinking water projects was analyzed from four aspects: ultrafiltration membrane selection, membrane fouling control, effluent quality and operating cost. The results showed that the effluent turbidity was less than 0.1 NTU after the direct UF process. The treated water quality could stably meet the requirement of the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006). The effluent microbiological safety could be guaranteed. When using direct UF technology to treat raw water from the Yellow River Reservoir, an internal pressure PVC alloy

ultrafiltration membrane with a small molecular weight cutoff should be selected. When 10 mg/L of NaClO was added to enhance backwashing, the growth rate of transmembrane pressure difference could be significantly reduced, the maintenance chemical cleaning cycle could be prolonged, and membrane fouling was effectively alleviated. In addition, long-term operation with low flux of 10 L/(m² · h) was beneficial to delaying the membrane fouling. The process had the advantages of simple process and convenient management, and the operating cost was 0.1 yuan/m³, which was suitable for application in rural areas.

Key words: raw water from the Yellow River Reservoir; ultrafiltration; single-valve; gravity backwashing; membrane fouling; transmembrane pressure difference; chemically enhanced backwashing

超滤工艺对颗粒物、胶体和病原微生物的截留效果好,在饮用水深度处理中具有非常广阔的应用前景^[1]。随着中国农村经济的快速发展,农村生活污水、工业废水、垃圾、农业生产及畜禽养殖废弃物排放量增加,导致农村供水水源也受到了不同程度的污染,污染物种类复杂但浓度较低,呈现出微污染的特征^[2]。对于农村地区而言,针对微污染水源水的强化常规处理工艺或深度处理工艺流程较为繁琐,操作复杂,管理成本也相对较高,不适宜在农村地区推广。近些年来,随着农村地区对饮用水水质要求的提升,超滤技术在农村地区的应用有了进一步的发展,其处理效果较好,集成化程度高,运行成本较低,并且可以通过互联网进行远程监控和操作^[3],这就使得超滤工艺在农村地区的推广具有了优势,但目前推广集成小型化超滤系统的主要障碍是反冲洗系统复杂、单元控制阀门多以及膜污染等问题。

笔者以李圭白院士提出的采用单个反冲洗阀门配合高位重力水箱控制反冲洗的原理,形成集成式单阀重力反洗超滤装置,通过处理引黄水库原水中试,获得装置运行的基本参数,主要包括超滤膜型号、稳定运行通量、膜污染控制方式及运行成本等。集成式单阀重力反洗超滤装置以原水泵为运行动力,整套系统只安装 1 个反冲洗球阀,反洗系统构造简洁,控制系统简单,维护简便,可有效解决超滤工艺在农村推广的瓶颈。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置及运行参数

装置核心部件包括进水泵、超滤膜组件、高位水箱、排水电动阀、PLC 控制系统,其构造如图 1 所示。初期以常规超滤运行参数为参考,设定过滤周期为 2 h,膜通量分别选取 10 和 20 L/(m² · h),反冲洗

强度为 60 L/(m² · h),反冲洗时间为 2 min。

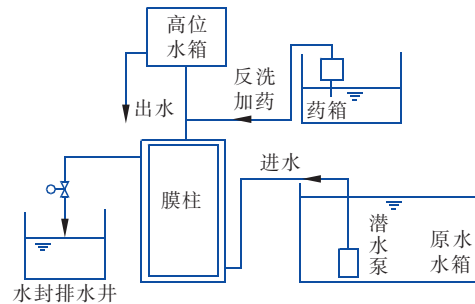


图 1 超滤装置构造示意

Fig. 1 Schematic diagram of ultrafiltration device

1.2 超滤膜选择

选取市场上较为常用的 PVC 和 PVDF 两种材质超滤膜,其主要性质见表 1。

表 1 两种超滤膜的性质

Tab. 1 Properties of two ultrafiltration membranes

项 目	内压式超滤膜	外压式超滤膜
膜材料	PVC	PVDF
平均孔径/μm	0.01	0.02
截留分子质量/ku	50	100
内径/mm	1.0	0.7
外径/mm	1.6	1.3
有效过滤面积/m ²	40	50

1.3 试验水质

装置进水为典型的黄河下游水库水,水质特征表现为:冬季低温低浊,夏季高藻微污染。经测定,浊度为 1.07 ~ 11.2 NTU, COD_{Mn} 为 1.60 ~ 4.18 mg/L, DOC 为 2.96 ~ 5.82 mg/L, UV₂₅₄ 为 0.037 ~ 0.056 cm⁻¹, 氨氮为 0.141 ~ 0.688 mg/L。

1.4 检测项目及方法

浊度: HACH2100 浊度仪; COD_{Mn}: 酸性高锰酸钾法; DOC: 岛津 TOC - L 总有机碳分析仪; UV₂₅₄: 紫外分光光度法; NH₃ - N: 纳氏试剂分光光度法。

测定 DOC 和 UV_{254} 时,水样先通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 微滤膜过滤。

2 结果与讨论

2.1 超滤膜的选择

分别对内压式 PVC 和外压式 PVDF 超滤膜直接处理水厂原水的运行效果进行研究,主要分析了在不同的反冲洗条件下不同类型超滤膜的膜污染情况。超滤膜系统在不同条件下的运行情况见图 2,系统过滤通量为 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反冲洗时间为 $2\ \text{min}$,反冲洗强度为 $60\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

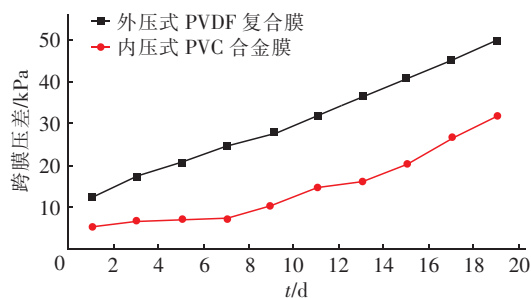


图2 不同超滤膜跨膜压差的变化

Fig.2 Change of TMP of different ultrafiltration membranes

当膜通量为 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,在直接采用膜后水进行反冲洗的条件下,两种超滤膜的跨膜压差增长速率有着较为明显的差异。截留分子质量为 $50\ \text{ku}$ 的内压式 PVC 超滤装置的跨膜压差增长速率为 $1.31\ \text{kPa}/\text{d}$,而截留分子质量为 $100\ \text{ku}$ 的外压式 PVDF 超滤装置的增长速率为 $1.88\ \text{kPa}/\text{d}$ 。对比发现,PVC 超滤装置的膜污染速率明显低于 PVDF 超滤装置,可能是由于截留分子质量较低的超滤膜可以更早地形成滤饼层,滤饼层可以进一步吸附并截留水中的污染物,防止其进入到膜孔内部。而截留分子质量较大的超滤膜由于孔径相对较大,污染物更容易进入到膜孔内部,形成膜孔内部的污染,从而造成膜阻力的增加,导致跨膜压差增长较快。

通过以上分析可知,对于单阀重力反洗直接超滤工艺,当处理引黄水库原水并采用膜后水进行反冲洗时,为了延长化学清洗周期,选用截留分子质量为 $50\ \text{ku}$ 的内压式 PVC 合金超滤膜能够使运行状况更为稳定。

2.2 工艺稳定运行时通量的选择

在超滤膜的实际运行过程中,膜通量是最为重要的参数之一,较高的膜通量可减少总的膜面积,节约投资,但也会相应地增加膜污染速率,提高物理、

化学清洗的频率,因而增加维护费用。“零污染通量”是基于临界通量理论提出的,即认为膜通量小于一定限值时,仅需反冲洗就能维持膜的通量,需要化学清洗的不可逆污染极轻或者不发生^[4]。结合直接超滤在实际工程中的应用情况,对运行效果较好的内压式超滤设备分别选取 10 、 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的通量值,考察了其膜污染情况,结果见图 3。

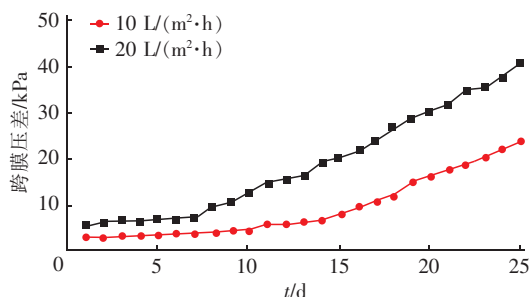


图3 不同通量下跨膜压差的变化

Fig.3 Change of TMP under different membrane fluxes

当膜通量分别为 10 、 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,跨膜压差增长速率分别为 0.99 和 $1.47\ \text{kPa}/\text{d}$ 。通过分析可以看出,随着膜通量的增加,膜污染速率加快。这是由于通量较高时,水中污染物向膜表面迁移和沉积的速度增大,从而使污染物在膜表面及膜孔内积累,跨膜压差也随之增大。设定超滤膜跨膜压差达到 $40\ \text{kPa}$ 时进行维护性化学清洗,则在 $10\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 通量下可运行 $35\ \text{d}$,在 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 下可运行 $25\ \text{d}$ 。因此在采用膜后水进行反冲洗的条件下直接处理引黄水库原水时,超滤膜的优化通量为 $10\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.3 超滤膜工艺净水效果分析

2.3.1 对浊度的去除效果

夏季原水浊度平均为 $10\ \text{NTU}$,冬季平均为 $3.78\ \text{NTU}$,在 10 、 $20\ \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 两种通量下,出水浊度均在 $0.1\ \text{NTU}$ 以下,对浊度的去除率分别为 97.34% 、 97.38% ,可知超滤工艺对原水中的颗粒物具有较高的去除率,可大大提高水质安全性,保证水厂出水的水质。

2.3.2 对 COD_{Mn} 的去除效能

原水的 COD_{Mn} 在 $1.60 \sim 4.18\ \text{mg}/\text{L}$ 之间,两种膜通量下水出的平均 COD_{Mn} 均在 $1.54\ \text{mg}/\text{L}$ 左右,平均去除率分别为 36.28% 、 36.98% (见图 4)。直接超滤对 COD_{Mn} 有一定的去除效果,但总体去除率不高,这与齐鲁^[5]的研究结果相一致。在本试验过

程中,由于原水的有机物含量较低,经过超滤膜过滤后出水 COD_{Mn} 低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的限值(3 mg/L)。

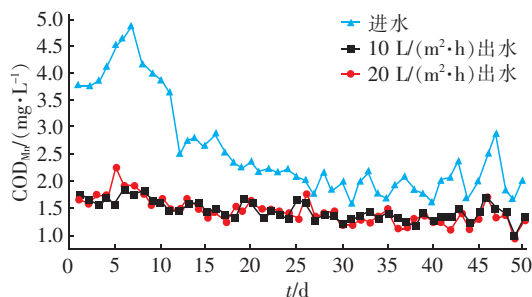


图4 不同通量下对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig. 4 Removal of COD_{Mn} under different membrane flux

2.3.3 对 DOC 的去除效能

原水的 DOC 为 2.96 ~ 5.82 mg/L,两种通量下的出水 DOC 分别为 2.910、2.908 mg/L,平均去除率分别为 19.07%、19.12%,可知超滤对 DOC 的去除效果甚微。

2.3.4 对 UV_{254} 的去除效能

原水的 UV_{254} 在 0.037 ~ 0.056 cm^{-1} 之间,两种通量下装置出水 UV_{254} 均值分别为 0.038 7、0.038 5 cm^{-1} ,平均去除率分别为 14.89%、15.30% (见图 5)。由于 UV_{254} 主要代表腐殖质、不饱和烃等分子质量较小的有机物,超滤对其去除主要依靠吸附作用,因此去除率较低。

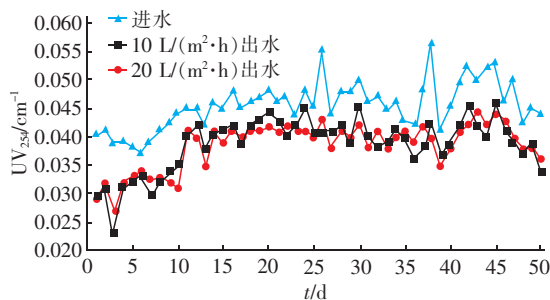


图5 两种通量下对 UV_{254} 的去除效果

Fig. 5 Removal of UV_{254} under different membrane fluxes

2.3.5 对氨氮的去除效能

原水的氨氮在 0.141 ~ 0.688 mg/L 之间,两种通量下的出水氨氮均值分别为 0.157、0.155 mg/L,平均去除率分别为 52.0%、52.4%。水体中的氨氮以铵盐或游离氨的形式存在,超滤膜无法截留这些小分子物质。超滤膜对氨氮表现出一定的去除能力,是由于超滤进水的氨氮含量很低,少量氨氮随着

悬浮物的截留而被去除。

超滤膜通过截留作用去除了大部分悬浮颗粒物,出水浊度低于 0.1 NTU 且基本不受原水水质波动的影响;但当超滤膜孔径大于小分子有机物的粒径时,无法将其截留,因此超滤工艺对有机物的去除率较低。直接超滤工艺对引黄水库水中 COD_{Mn} 的去除率约为 36%,因此,要想将此工艺应用到实际工程中并保证出水 COD_{Mn} 低于 GB 5749—2006 的限值(3 mg/L),则进水 COD_{Mn} 不能超过 10 mg/L。但由于 COD_{Mn} 的成分存在差异,处理不同类型的原水时,能否采用直接超滤工艺应进行具体分析。

2.4 强化反冲洗手段对膜污染的控制

在实际运行过程中,可通过前处理、优化膜工艺以及操作条件将超滤膜的不可逆污染降到十分轻微的水平,从而使膜的零污染通量得到提高^[6]。为解决超滤膜长期运行过程中存在的膜污染问题,通过前期调试,进一步对内压式 PVC 超滤装置直接处理水厂原水的运行效果进行研究。选取 10 和 20 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 两种通量,分析不同反洗条件对膜污染的影响。

2.4.1 NaCl 反冲洗对膜污染控制的影响

图 6 为不同膜通量条件下在反冲洗水中添加 100 mg/L 的 NaCl 时跨膜压差的变化情况。膜通量为 10、20 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,跨膜压差增长速率分别为 0.76、1.11 kPa/d。设定超滤膜跨膜压差达到 40 kPa 时进行维护性化学清洗,则在两种通量下分别可运行 45、30 d。通过分析可知,与直接用膜后水进行反冲洗相比,NaCl 的投加可使 10 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的跨膜压差增长速率降低 20.2%,使 20 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的跨膜压差增长速率降低 24.5%。因此,在反冲洗水中添加 NaCl,能够在一定程度上延缓跨膜压差增长速率,但整体效果不明显。

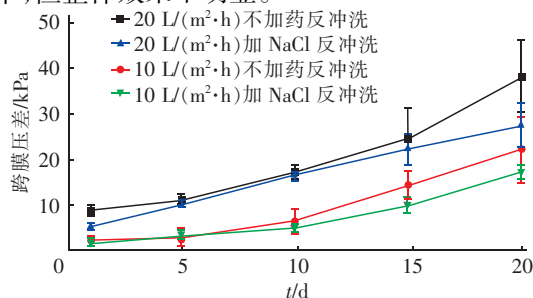


图6 NaCl 反冲洗对膜污染的影响

Fig. 6 Effect of NaCl backwashing on membrane fouling

2.4.2 NaClO 反冲洗对膜污染控制的影响

图7为不同通量下在反冲洗水中添加10 mg/L的NaClO时跨膜压差的变化情况。膜通量为10和20 L/(m²·h)时,跨膜压差增长速率分别为0.22和0.56 kPa/d。设定超滤膜跨膜压差达到40 kPa时进行维护性化学清洗,则在两种通量下可分别运行180和120 d。可见,在反冲洗水中添加NaClO能够大幅度地延缓膜污染,降低跨膜压差的增长速率。其中,10 L/(m²·h)通量的跨膜压差增长速率降低了77%,20 L/(m²·h)的跨膜压差增长速率降低67%。分析其原因可能是因为含氯水反冲洗能够对有机物和颗粒物协同作用造成的超滤膜污染进行有效的控制,并在一定程度上使超滤膜性能得到恢复,维持超滤膜的稳定运行^[7]。

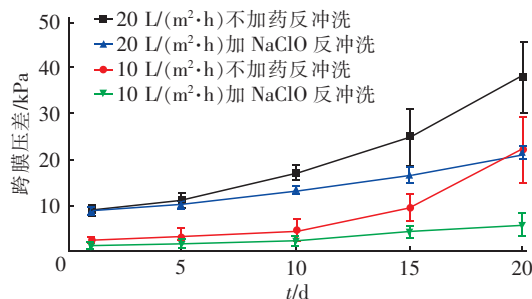


图7 NaClO 反冲洗对膜污染的影响

Fig. 7 Effect of NaClO backwashing on membrane fouling

通过以上分析可以得出,采用膜后水反冲洗时,超滤膜的稳定运行通量为10 L/(m²·h);当在反冲洗水中添加NaCl时,稳定运行通量为10 L/(m²·h);当在反冲洗水中添加NaClO时,稳定运行通量为20 L/(m²·h)。在实际工程中,较高的膜通量可减少总的膜面积,节约投资。因此,当直接超滤引黄水库原水时,在反冲洗水中添加10 mg/L的NaClO可有效缓解膜污染,降低跨膜压差,并使内压式PVC合金膜的稳定运行通量从10 L/(m²·h)提高至20 L/(m²·h)。

2.4.3 不同温度下化学强化反冲洗控制膜污染

膜污染是超滤过程中不可避免的现象,主要是由于污染物质在膜表面的沉积或者进入膜孔内部,即膜表面污染和膜孔污染,这两种形式的膜污染都会造成跨膜压差的提高和膜通量的下降^[8]。反冲洗可去除超滤膜运行过程中产生的可逆污染,在反冲洗水中添加一定量的NaClO进行化学强化反冲洗可提高反冲洗效率。化学强化反冲洗是对物理清

洗的强化,通过调控其反冲洗参数可在恢复膜通量的同时保证出水水质^[9-11]。针对所选用的内压式PVC超滤膜以及引黄水库水所具有的冬季低温低浊、夏季高藻的特点,分别在高温期(8月—10月,水温=28℃)和低温期(12月—2月,水温=4℃)进行了化学强化反冲洗试验,并对跨膜压差进行跟踪观察,部分数据见图8。

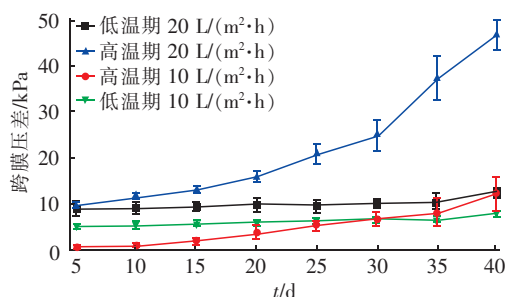


图8 不同温度下化学强化反冲洗对膜污染的控制

Fig. 8 Control of membrane fouling by chemically enhanced backwashing at different temperatures

在高温期,随着过滤周期的延长,膜的不可逆污染逐渐增加,两种通量下的跨膜压差增长速率分别为0.3、0.97 kPa/d;在低温期,通过化学强化反冲洗可将跨膜压差分别维持在(6.21 ± 1.47)、(11.56 ± 2.28) kPa范围内长期稳定运行。

通过分析可以看出,在高温期,随着过滤周期的增加,膜污染逐渐加重,20 L/(m²·h)通量的超滤膜表现得较为明显,其跨膜压差增长速率为0.97 kPa/d,约为10 L/(m²·h)通量超滤膜的3倍。设定超滤膜跨膜压差达到45 kPa时进行维护性化学清洗,则在20 L/(m²·h)通量下可运行40 d,而在10 L/(m²·h)下可运行约120 d。

综上,实际工程中若采用化学强化反冲洗的方式处理引黄水库水,在高温期,由于引黄水库水存在高藻的特点,会加重膜污染,因此应选择运行通量为10 L/(m²·h)。而在低温期,由于原水水质较好,浊度较低,因此采用20 L/(m²·h)的通量可使超滤膜系统高效稳定运行。

2.5 运行成本

单阀重力反洗超滤工艺日常运行成本包括电费、化学清洗费、反冲洗费(见表2)。耗电设备主要有潜水泵、加药计量泵、PLC控制柜、照明灯等,电费按0.78元/(kW·h)计。当以10 L/(m²·h)通量运行时成本为0.116元/m³;当以20 L/(m²·h)通

量运行时成本为 0.078 元/ m^3 。

表 2 日常运行成本估算

Tab. 2 Estimation of daily operation cost

项 目	膜通量/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	
	10	20
年运行时长/d	90	275
反冲洗药剂费/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.016	0.008
化学清洗费/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.060	0.01
电耗成本/ $(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.040	0.06

2.6 环境安全性评价

由于水资源紧缺,水处理技术受到全球的关注,想要提高水资源利用率的同时使环境污染得到有效的控制,就需要采取科学合理的水处理技术。单阀重力反洗超滤工艺采用对微污染水源水直接过滤的方式进行净化,除反冲洗过程中添加少量的次氯酸钠外不添加任何药剂;在维护性化学清洗及恢复性化学清洗时,采用的 NaOH、柠檬酸、HCl 等药剂,排放时先进行中和,因此不会对环境造成污染,可在农村地区推广应用。

3 结论

① 采用单阀重力反洗直接超滤装置过滤引黄水库原水时,选用截留分子质量较低的内压式 PVC 合金超滤膜,并在反冲洗水中添加 10 mg/L 的次氯酸钠对其进行化学强化反冲洗,可降低超滤膜的跨膜压差增长速率,保持膜系统的长期稳定运行,并且有效延长了维护性化学清洗周期。

② 对于具有微污染特征的引黄水库原水,超滤出水水质能够满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。超滤膜能够截留大部分悬浮颗粒物,出水浊度低于 0.1 NTU 且基本不受原水水质波动的影响;直接超滤工艺对引黄水库水中 COD_{Mn} 的去除率约为 36%,但由于 COD_{Mn} 的成分存在差异,处理不同类型的原水时,能否采用直接超滤工艺应进行具体分析。

③ 单阀重力反洗直接超滤工艺流程简单,集成化程度高,运行成本低。当以 $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 通量运行时成本为 0.116 元/ m^3 ;当以 $20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 通量运行时成本为 0.078 元/ m^3 。同时,该工艺通过 PLC 控制系统可实现全自动化净水,管理方便,运行过程产生的反冲洗废水经过处理后不含有对环境有害的成分,因此适宜在地表水质较好的农村地区推广应用。

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] 陈师楚,夏宏生,周建华. 农村供水微污染源特征及处理技术研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(6): 82-85.
Chen Shichu, Xia Hongsheng, Zhou Jianhua. Characteristics and treatment technology of micro polluted water source in rural water supply [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(6): 82-85 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水,2010,46(8): 11-15.
Li Guibai, Tian Jiayu, Qi Lu. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 46(8): 11-15 (in Chinese).
- [5] 齐鲁. 浸没式超滤膜处理地表水的性能及膜污染控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
Qi Lu. Performance of Immersed Ultrafiltration Membrane for Surface Water Treatment and Technology of Fouling Control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [6] 李圭白,梁恒. 超滤膜的零污染通量及其在城市水处理工艺中的应用[J]. 中国给水排水,2012,28(10): 5-7.
Li Guibai, Liang Heng. Zero irreversible flux for ultrafiltration and its application in water treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(10): 5-7 (in Chinese).
- [7] 杨英,蒋志国. 含氯水反冲洗对超滤膜污染的去除效能研究[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(5):55-59.

- Yang Ying, Jiang Zhiguo. Study on removal effect of ultrafiltration membrane pollution by chlorine water backwashing[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2015, 23(5): 55-59 (in Chinese).
- [8] 金鹏康, 吴鑫, 王晓昌. 不同截留分子量超滤膜污染过程分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(5): 712-716.
- Jin Pengkang, Wu Xin, Wang Xiaochang. Study on membrane fouling of ultrafiltration membrane with different molecular weight cut-off[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(5): 712-716 (in Chinese).
- [9] Ho C C, Zydney A L. A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration[J]. J Colloid Interface Sci, 2000, 232(2): 389-399.
- [10] 张新波, 温海涛, 张哲, 等. 化学强化反冲洗参数调控对副产物生成影响分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5): 55-59.
- Zhang Xinbo, Wen Haitao, Zhang Zhe, *et al.* Effect of chemically enhanced backwash on generation of by-products[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 55-59 (in Chinese).
- [11] 张新波, 李红霞, 贾辉, 等. 膜化学强化反冲洗中副产物的生成及变化规律分析[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(3): 60-65.
- Zhang Xinbo, Li Hongxia, Jia Hui, *et al.* Determination and variety of by products during chemically enhanced backwash [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2016, 35(3): 60-65 (in Chinese).



作者简介: 李丽(1993-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: 18765295556@163.com

收稿日期: 2018-09-12

(上接第11页)

- Li Weijia, Li Zhenshan, Zhao Huazhang. Application of ultrafiltration to the treatment of rural cistern water in Northwest China[J]. Industrial Water Treatment, 2009, 29(8): 13-17 (in Chinese).
- [4] Shi X, Tal G, Hankins N P, *et al.* Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2014, 1: 121-138.
- [5] Chang H, Qu F, Liang H, *et al.* Correlating ultrafiltration membrane fouling with membrane properties, water quality, and permeate flux[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 56(7): 1746-1757.
- [6] Field R W, Wu D, Howell J A, *et al.* Critical flux concept for microfiltration fouling[J]. J Membr Sci, 1995, 100(3): 259-272.
- [7] Sioutopoulos D C, Karabelas A J. Evolution of organic gel fouling resistance in constant pressure and constant flux dead-end ultrafiltration: Differences and similarities[J]. J Membr Sci, 2016, 511: 265-277.
- [8] 英海泉. 超滤在传统工艺供水厂改造中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Ying Haiquan. Research of Application of Ultrafiltration in Reconstruction of Traditional Process Water Plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).



作者简介: 陶辉(1981-), 男, 安徽寿县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为饮用水处理理论与技术及膜技术应用。

E-mail: taohui@hhu.edu.cn

收稿日期: 2018-07-19