



文章栏目：“水中污染物非均相分离与控制”专题

DOI 10.12030/j.cjee.202005130

中图分类号 X703.3

文献标识码 A

胡长鑫, 吴瑞军, 马百文, 等. 重力驱动浸没式超滤技术在某饮用水厂提标改造中的应用案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(3): 799-805.

HU Changxin, WU Ruijun, MA Baiwen, et al. Gravity-driven submerged membrane filtration and its application for drinking water purification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 799-805.

重力驱动浸没式超滤技术在某饮用水厂提标改造中的应用案例

胡长鑫¹, 吴瑞军^{1,*}, 马百文², 高旭¹, 李梁梁¹, 胡晓宇¹, 刘锐平²

1. 天津膜天膜科技股份有限公司, 膜材料与膜应用国家重点实验室, 天津 300457

2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085

第一作者: 胡长鑫(1990—), 男, 工程师。研究方向: 膜法水处理工艺及应用。E-mail: hchx@motimo.com.cn

*通信作者: 吴瑞军(1979—), 男, 研发副总监。研究方向: 膜法水处理工艺及应用。E-mail: wrj@motimo.com.cn

摘要 饮用水源污染与饮用水标准提升双重约束条件下, 我国许多饮用水厂都面临提标改造的现实需求。浸没式超滤技术以其水质稳定、占地小、运行管理简单等优点在市政自来水厂提标改造中得到广泛应用。为进一步降低系统能耗和运行成本, 提出通过改造膜过滤池(膜池)进水和排水、药剂投加等辅助单元, 优化膜池构造和配套设施, 充分利用膜池与产水池之间的高差, 以重力驱动力完成膜过滤过程, 从而省却离心泵正压或抽吸泵负压驱动的耗能模块。工程应用案例显示, 重力驱动可以满足膜系统运行要求, 相对于传统浸没式膜过滤可节约 50% 以上能耗、10% 左右占地, 并有助于提高系统运行稳定性、简化膜系统运行管理, 在实际工程中具有良好的应用前景。

关键词 重力驱动; 浸没式膜过滤; 饮用水; 提标改造; 能耗

随着我国经济社会快速发展, 居民对饮用水水质的要求不断提高^[1]。然而, 我国饮用水源仍存在一定程度的污染问题^[2], 这给供水企业带来挑战^[3]。以混凝、沉淀、过滤为基础的常规处理工艺难以有效应对水源恶化和水质标准提升的问题, 许多水厂都面临提标改造等客观而迫切的需求^[4]。膜技术以其分离精度高、产水水质稳定、设备集成度高、占地面积小等优点^[5], 逐渐得到业内认可并在工程中得到推广应用^[6]。浸没式膜过滤工艺中, 膜组件为集成状态, 且完全浸置膜池中。经絮凝、沉淀等预处理工艺流程的水在离心泵抽吸负压驱动下进行膜过滤。水中颗粒物、脱稳胶体、部分溶解性有机物等在纳米或微米尺度膜孔的物理筛分和截留过滤等作用下去除^[7]。负压抽吸是浸没式膜过滤工艺的主要动力消耗^[8], 若能有效降低运行能耗和制水成本, 则可进一步推进膜技术在饮用水厂提标改造工程中的应用^[9]。

对于传统混凝-沉淀-砂滤工艺^[10], 用浸没式膜滤取代砂滤、砂滤池改为膜滤池^[11], 可充分利用现有土建构筑物, 且利用膜池(即原来的砂滤池)与清水池之间的高度差可为膜过滤提供驱动力, 形成重力驱动浸没式超滤技术^[12], 从而有效降低制水能耗、减少新增占地。相比于常规处理工艺

收稿日期: 2020-05-21; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2017ZX07106005); 国家重点研发计划重点专项(2019YFD1100100)

及混凝-沉淀-泵驱动式超滤工艺^[13],重力驱动浸没式超滤技术具有水质好、操作简易、建设运行成本较低等优点。

本文针对浸没式超滤技术在工程应用中的瓶颈问题^[14],以唐山某自来水厂改扩建工程为案例。综合考虑膜池高度、液位高差等因素,开展膜组件结构、膜池产水管路、产水主管路、真空虹吸管路等系统优化设计^[15],实现重力式、无动力超滤技术的工程改造,为重力驱动浸没式超滤技术在工程中应用提供设计经验和工程案例参考。

1 工程概况

1) 水厂概况。该水厂分为一期和二期工程。一期工程建于1987年,二期建于1996年。一、二期设计规模均为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。目前,实际生产情况为一期 $3 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,二期 $6 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,与设计规模相差很多。水源地为陡河水库,水库容量 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。采用常规处理工艺:加药絮凝→斜管沉淀→砂滤→出水。水厂产水不直接输送到管网,而送到龙王庙、西郊、开平水厂再集中加氯消毒。

2) 运行问题。由于该水厂一期工程已经运行30多年,产水量已无法满足当初设计的 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;另外,由于水源为水库水,受夏天降雨较多的影响,水库水中含有大量泥沙,会对水厂现有工艺造成有阶段性的冲击,出水水质难于达标;冬季北方气温较低,来水温度可低至 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,并且冬季来水浊度比较低;加上传统工艺中的絮凝、砂滤工序对低温低浊度的来水处理效果较差,冬季的出水水质反而会受影响。因此,目前工程一期设施已经长时间放弃不用。然而,水厂担负着为周边居民供水的责任,仅凭二期设施的处理能力已无法满足用户需求,所以改造一期项目迫在眉睫。本着节省成本,提供更好的饮用水产水品质,也为以后提高供水量做准备,计划将水厂一期的砂滤池进行改造,使一期 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理量提升至 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于水厂不能再增加土地面积,所以不适宜再用砂滤工艺,故占地面积小、出水水质更好的超滤膜工艺是最好的选择。改造后,不仅处理量增大,水质提升也非常明显。超滤膜的出水浊度在 0.2 NTU 以下,远远优于砂滤出水的 1 NTU 以内,且超滤膜出水的稳定性更优于砂滤。

3) 改造概况。基于以上考虑,水厂一期改扩建工程项目最终采用重力驱动浸没式超滤工艺,设计处理规模 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。结合原有虹吸滤池的特点,并结合浸没式超滤膜系统配置的要求,对砂滤进行改造。改造过程中,尽可能利用原有土建造物和构筑物,减少开孔和土建上的调整,尽可能地降低施工难度,不对原有虹吸滤池的结构进行改造,以保证池体结构上的安全。浸没式超滤系统设计集成程度较高,膜布置紧凑,在改造过程中,可减少无效占用的容积,较大程度提高改造后系统的回收率。该工艺进水水质主要指标有: $\text{COD} \leq 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{BOD}_5 \leq 180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{SS} \leq 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TN} \leq 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_3\text{-N} \leq 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{TP} \leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 重力驱动浸没式超滤改造工艺流程

2.1 工艺改造的总体思路

图1为重力驱动浸没式超滤膜过滤技术工艺原理示意图。上一级混合反应沉淀池出水进入浸没式超滤膜池后,在膜池水体重力驱动力的作用下,原水经过膜表面过滤后进入产水水池,过滤过程中无需水泵提供驱动力。重力驱动膜组件的产水阀门选用开度阀门。运行时,通过控制产水阀门的开度大小调节随水头变化而波动的水量,让产水流量保持在一个相对平稳的状态。膜组件的设计运行通量不会直接设计到阀门开度最大状态的产水量,而会为膜污染导致的水头降低留出充分量。浸没式超滤膜过滤系统设有曝气清洗系统、反洗清洗系统、加药清洗系统、抽真空引水系统和系统自动控制系统。

图2为重力驱动浸没式超滤膜过滤技术应用的效果图。虽然重力驱动浸没式超滤膜过滤系统

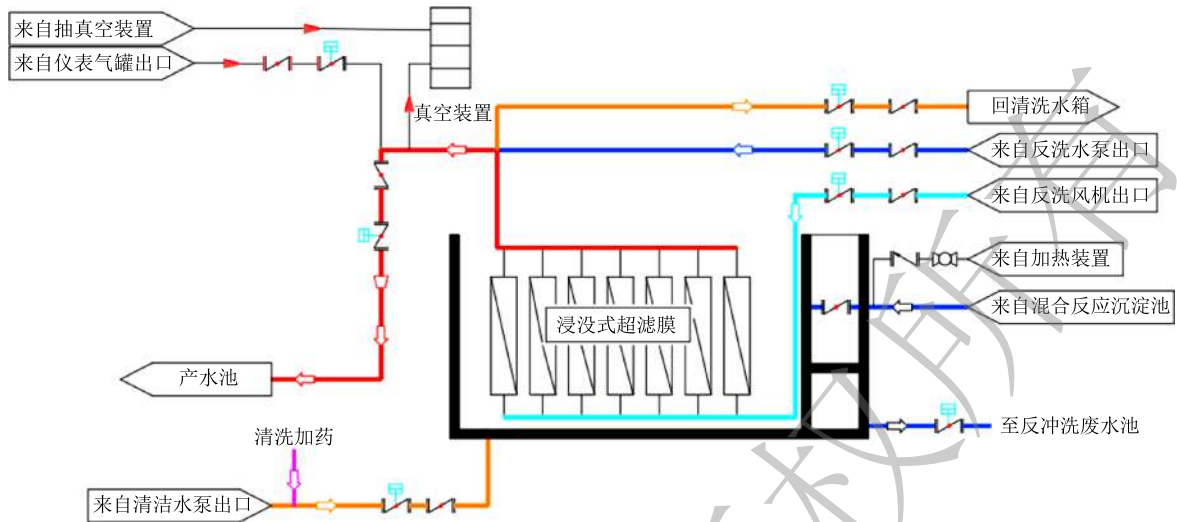


图1 重力驱动浸没式超滤膜过滤工艺原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gravity-driven submerged ultrafiltration membrane filtration process

技术具有优化系统能耗、节省系统占地等特点，但由于系统过滤过程依靠膜池水体重力作为驱动力，重力驱动浸没式超滤膜过滤技术在实际应用中也存在特定难点：膜池液位与浸没式超滤膜过滤系统产水口之间的高度差、产水管路的参数选择等。

2.2 重力驱动浸没式超滤改造工艺的单元设计

2.2.1 进水单元设计

原虹吸滤池采用配水渠进行配水，并通过虹吸进水管将进水引入滤池。该工程经浸没式超滤改造后，需要达到较短时间内满足膜池补水的要求(最佳不超过1 min)。这样可以减少非制水时间，对于提升系统收率有较大帮助。同时，改造后的配水渠应具有足够大的面积，以避免迅速补水对配水渠液位波动的干扰。因此，基于以上的要求，提出对进水膜池的改造方案。

1) 去除原有的虹吸进水管，在配水渠上开孔，使得配水渠直接与单池的进排水渠道联通，这样可增大改造后系统的配水渠道面积。

2) 进水管路设计可以采取2种方案：第1种方案，对于原滤池进水/排水孔进行部分封堵后，设置气动柱塞阀门，作为改造后膜池的进水阀门；第2种方案是在配水渠底部开孔设置管道，与新增池体排放管道相连接，同时设置气动蝶阀，作为膜池的进水阀门。进水阀门通过新增PLC系统进行控制，根据系统工艺流程设定，自动开启与关闭。

3) 在配水渠中设置液位计。

4) 保留原滤池的配水渠排空阀门。

2.2.2 滤池(膜池)中组件的改造

将滤池中的滤料清除后作为浸没式膜系统的膜池使用，根据膜组件的通量设计选择合适数量的膜组件进行布置。为保证池体构造安全，不对中间排水渠进行拆除。合理布置膜组件，尽可能

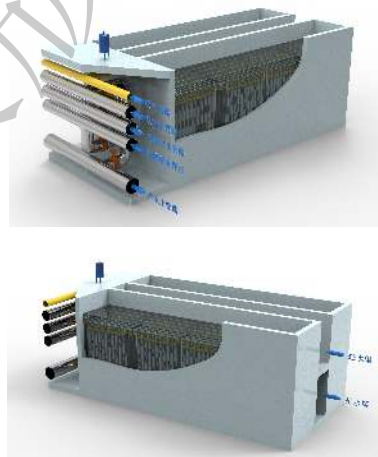


图2 重力驱动浸没式超滤膜过滤技术应用效果图

Fig. 2 Rendering of the gravity-driven submerged ultrafiltration membrane filtration technology

减少无效容积的占用。

1) 将滤池中的滤料清除, 同时将底部的布水多孔砖去除。

2) 拆除滤池反洗排水收集槽, 并封堵收集槽在排水渠上的开孔。根据膜架的设计在排水渠上设置膜产水主管的穿墙套管。每列膜池的产水主管和气管在排水渠内进行布置。

3) 在池壁上设置膜组件必需的埋件和导杆。

4) 在池内增设液位计, 每组膜池设置1台。

5) 将池体未占用部分进行分隔, 上部做走道和管廊(反洗水和空气管线、压缩空气、加药管线、清洗补水管道等)。

2.2.3 滤池(膜池)的排水系统改造

为了减少非制水的排放时间, 需要在短时间内(最佳不超过1 min)将反洗废水部分或全部排出, 所以应确保排放管道的通畅, 且管径应满足迅速排水的要求。另外, 由于原反洗进水渠为无效体积, 而且此处无效体积偏大, 所以必须考虑将此无效体积进行填充处理。整个滤池(膜池)的排水系统改造依托原有的反洗系统进行改造。

1) 清除池底部的滤砖以后, 采用水泥将反洗区与池体的缝隙进行填充封闭, 在填充处每侧预留DN200的穿墙套管(每侧预留4~6个)。

2) 在反洗水渠中安装1根DN500的管道做为排放水管, 从这个DN500的主管上分别设置8~12根DN200的排放支管与池体联通, 对称布置。

3) 反洗主管出池体后, 设置反洗排放气动蝶阀, 然后将管路连接至原有的滤池反洗排水槽中。反洗废水回流至回水水泵。

2.2.4 产水系统的改造

滤池改造为膜池以后, 膜池可以实现泵抽吸产水和静压产水两种产水模式。新增真空发生装置, 用做产水管道排气所用。产水主管布置在反洗排水主渠中, 以下为产水系统主要涉及的改造内容。

1) 在主排水渠中设置产水主管。产水主管从低位(只穿一道墙)出池体后分为两支: 一支直接与原有清水渠相连; 另一支进入抽吸产水泵(位置预留, 接口保留), 经产水泵进入清水渠。

2) 在产水管路上增设在线流量计。

3) 在产水管路设置一个回池体的支管, 并配气动蝶阀, 做清洗回流用。

2.2.5 反洗系统的改造

该工程浸没式超滤采用气水反洗的方式。当超滤膜组件运行一段时间, 膜组件表面堆积有大量的污染物, 这时通过对膜丝底部添加曝气装置通入空气。在气泡上升过程中, 膜丝抖动和膜丝之间摩擦的作用使堆积在膜丝表面的污染物脱落。同时, 向超滤膜丝内部注入清水, 使清水反向透过超滤膜, 用清水通过超滤膜孔冲击堆积在膜丝表面的污染物, 使污染物脱落。通过这2种方法, 可最大程度地缓解系统膜污染。反冲洗的频率随着水质的不同需要而定, 一般反冲洗时间为30~120 min。唐山项目现场的反洗周期为120 min。反洗时的空气是由鼓风机提供。

1) 增设反洗系统所需反洗水泵和反洗鼓风机。

2) 增设反洗主管和配套自动阀门。反洗主管与产水主管相连接。

3) 设置反洗水流量计和反洗空气流量计, 保证反洗水量和气量满足要求。

4) 反洗过程中通过设定液位进行控制与切换。

2.2.6 膜系统其他配套设置

除以上各系统的改造以外, 根据工程浸没式超滤系统的特点, 还需要增设以下的配套系统和附件, 以保证膜系统的正常稳定运行。

1) 压缩空气系统。压缩空气系统主要为自动阀门(气动蝶阀)提供满足要求的仪表风,也可配合膜组件的检漏,通过保压实验来确定膜组件是否存在破损。相关配套附件包括压缩空气的储罐、过滤器、阀门、仪表等。

2) 加药系统。膜系统需要配置加药系统,主要包括储药罐、加药泵和配套管路阀门等。该项目主要配套有次氯酸钠、柠檬酸和碱3种药剂加药系统,以用于膜组件的增强化学清洗(chemically enhanced backwash, CEB)和原位化学清洗(cleaning in place, CIP)。增强化学清洗即用少量药剂和少量时间对污染的超滤膜进行清洗,一般维护清洗周期是3~15 d(视水质而定)。唐山项目推荐每12 d进行一次增强化学清洗。化学清洗的周期相对比较长,一般6~12个月进行一次。唐山项目推荐每8个月进行一次化学清洗,清洗一次的时间为6~8 h。运行维护成本主要为药剂费,每吨水的成本不超过0.01元。

3) 化学清洗系统。膜系统需要定期进行原位清洗。在冬季,为增强清洗效果,需要对清洗水进行加热,所以,还应设置独立的化学清洗系统(包含储水罐、输水泵、管路及阀门)。

4) PLC控制系统。原有系统的控制系统不能满足膜系统的控制要求,故需要新设置PLC控制系统和上位机系统,实现系统的自动控制及无人值守运行,用以监控系统运行状态,并对故障和问题进行自动诊断和报警提示。

3 重力驱动浸没式超滤改造工艺的运行效果

3.1 工艺运行水质

超滤膜池进水为水厂斜板沉淀池出水。设备进水水质波动比较大,浊度最高达到6.8 NTU,大部分时候浊度都在4 NTU以下。去除极端情况下的水质,超滤膜池的进水和产水水质浊度如图3(a)所示。进水波动在1.5~4 NTU,但超滤膜产水浊度都稳定在0.1 NTU以内,出水水质要远远优于老工艺砂滤池出水(1 NTU以内)。图3(b)为超滤膜池出水的颗粒含量情况。由于进水颗粒数量超过了测量仪器的计数范围,未能对膜池进水颗粒进行有效测量。而从出水情况来看,每毫升产水颗粒计数在长时间内小于3个。此时的膜产水水质非常稳定,并未随着进水水质、温度、通量等条件变化而出现明显波动,体现了超滤系统良好的产水稳定性和系统抗冲击负荷能力。

另外,对超滤膜进水和产水进行细菌检测及大肠杆菌的检测,超滤膜进水细菌总数在1 000 cfu·mL⁻¹以上。而超滤膜产水的检测菌落总数为零,要远远优于砂滤池出水的处理效果,证明了超滤膜对细菌及大肠杆菌的高效截留能力。超滤系统产水的浊度和产水颗粒数等指标均优于国家出台的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),说明改造工程大幅提升了水厂的产水品质。

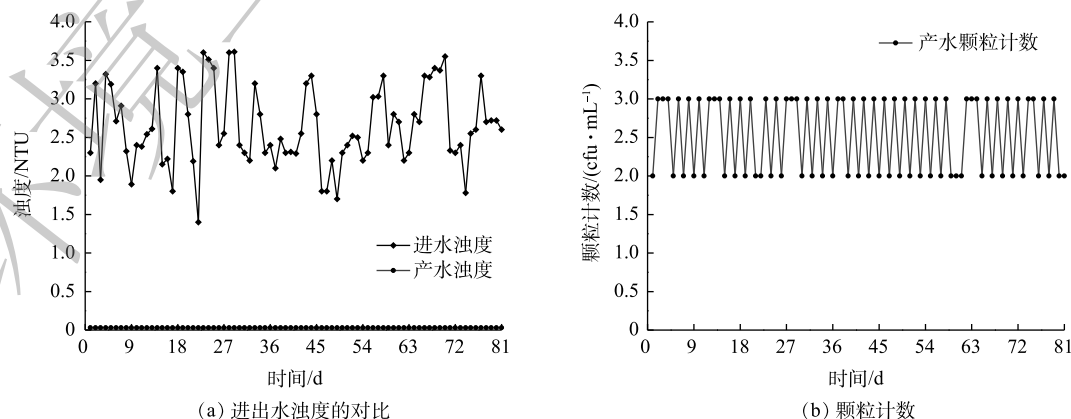


图3 唐山某自来水厂超滤出水水质主要指标

Fig. 3 Key indices of ultrafiltration effluent water quality of a tap-water treatment plant in Tangshan

3.2 工艺运行能耗分析

超滤膜系统运行过程中,主要能耗包括产水泵能耗、反洗泵能耗、清洗泵能耗、鼓风机能耗、阀门能耗。而重力驱动浸没式超滤膜与常规浸没式超滤膜工艺的主要区别在于产水方式的不同。重力驱动靠水头自身重力产生的压力实现超滤膜出水,常规的浸没式超滤膜靠产水泵的负压抽吸作用实现超滤膜出水。对比两个工艺的能耗,主要差别在于前者不使用产水泵,后者需要产水泵。而产水泵是整个系统使用最频繁、占用时间最长的主要耗电设备,减少或不使用产水泵会使系统能耗大幅度降低。因此,在确保其他条件相同的前提下,使用电表和水表分别计量常规浸没式超滤带产水泵抽吸产水和重力驱动浸没式无产水泵产水两台设备的用电量和产水量。对比3个月的连续运行数据发现(见图4),产水量相同(产出 1.4×10^4 t水)的情况下,用产水泵的常规超滤膜系统耗电630 kW·h,换算吨水能耗为 $0.045 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$;而重力驱动浸没式超滤膜系统的耗电259 kW·h,换算为吨水能耗为 $0.0185 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对比两种工艺的吨水能耗发现,重力驱动浸没式超滤膜系统比常规泵驱动超滤膜系统节省50%以上的能耗(图4)。

在设计上,重力驱动浸没式超滤膜系统要比常规浸没式超滤膜系统节省一个产水泵,在工程造价上大幅降低了成本。另外,产水管路也比常规浸没式超滤膜简单,可节省设置管路与产水泵的空间,约为总占地面积的10%。

以浸没式超滤膜 $1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的处理量为例,膜池占地面积为 36 m^2 ($6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$),而相同处理规模的砂滤池占地 80 m^2 ($5 \text{ m} \times 16 \text{ m}$),故浸没式超滤膜比砂滤池节省了50%以上的占地面积。因此,唐山水厂选择重力驱动浸没式超滤膜工艺取代砂滤池工艺,符合厂区的实际情况,也是最优选择。

4 结论

1) 在自来水提标改造工程中,选择混凝沉淀+重力驱动浸没式超滤膜过滤工艺,与传统的混凝沉淀+砂滤工艺处理方式相比产水品质得以大幅提高,出水水质高于国家饮用水标准。改造后,膜过滤系统的吨水能耗大幅降低。采用膜池单元改造设计和产水管道的位位置设计等优化措施,还能实现土地的有效利用,降低占地面积。

2) 通过对工程中相关配套设施的优化设计,特别是PLC自动控制系统的采用,有效降低了系统运维成本及人力成本。优化后的混凝沉淀+重力驱动浸没式超滤膜过滤工艺高效紧凑,可应用于自来水厂的提标改造。

参考文献

- [1] 潘玥,王可新.我国饮用水水质标准变迁的研究[J].能源技术与管理,2014,39(6):17-19.
- [2] 张亚雪,王少坡,常晶,等.水中医药品的污染现状及高级氧化处理[J].工业水处理,2019,39(3):11-16.
- [3] 孙丽华.基于浸没式超滤膜的饮用水高效净化技术研究[D].北京:北京工业大学,2011.
- [4] 孔艳丽.江苏某市水源水中特征污染物解析及强化常规除污染效能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [5] 刘云芳.水处理膜技术发展现状及趋势[J].资源节约与环保,2018(11):111.

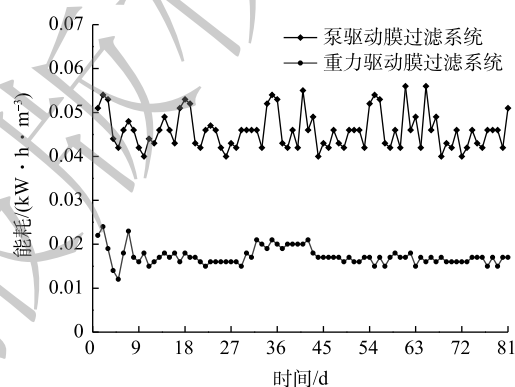


图4 唐山某自来水厂超滤出水水质主要指标(能耗)对比

Fig. 4 Comparison of key indices (energy consumption) of ultrafiltration effluent water quality of a tap-water treatment plant in Tangshan

- [6] 王婷婷, 孙文挺, 冯磊, 等. 中空纤维膜技术在饮用水处理中的应用[J]. *天津科技*, 2019, 46(5): 34-38.
- [7] 胡国林, 周力波. 絮凝斜管沉淀池-浸没式超滤膜工艺在水厂改扩建中的应用[J]. *给水排水*, 2014, 50(11): 25-28.
- [8] 刘洁琛. 信息化背景下探讨浸没式超滤海水预处理工艺[J]. *科学与信息化*, 2017(36): 196.
- [9] 顾宇人, 曹林春, 陈春圣, 等. 超滤膜法短流程工艺在南通市芦泾水厂提标改造工程中的应用[J]. *给水排水*, 2010, 46(11): 9-15.
- [10] 朱建文, 张珍, 沃静静, 等. 预臭氧化+混凝沉淀+炭砂滤池组合工艺处理饮用水的研究[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2008, 35(6): 653-658.
- [11] 张艳, 于丽君, 李立秋, 等. 浸没式超滤膜用于砂滤池的研究[J]. *膜科学与技术*, 2009, 29(5): 75-78.
- [12] 李晓东, 孟广祯, PAPUTCUB, 等. 重力驱动超滤膜技术在大型自来水厂的应用[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会水工业分会全国给水深度处理研究会年会论文集. 2013: 238-243.
- [13] 夏莉, 陆少鸣, 徐姮, 等. 浸没式超滤膜组合工艺处理饮用水的中试研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(10): 121-124.
- [14] 张春雷, 郭强, 杨杨, 等. 浸没式超滤膜工艺应用中几个问题及调整[J]. *给水排水*, 2015, 51(2): 9-15.
- [15] 沙祥宝. 远距离真空虹吸自流法在铁路卸酸碱中的应用[J]. *铁道运输与经济*, 1990(8): 29-31.

(责任编辑: 靳炜)

Gravity-driven submerged membrane filtration and its application for drinking water purification

HU Changxin¹, WU Ruijun^{1,*}, MA Baiwen², GAO Xu¹, LI Liangliang¹, HU Xiaoyu¹, LIU Ruiping²

1. Stake Key Laboratory of Membrane Materials and Membrane Applications, Tianjin Motimo Membrane Technology Co. Ltd., Tianjin 300457, China

2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

*Corresponding author, E-mail: wrj@motimo.com.cn

Abstract Many drinking water treatment plants (DWTPs) in China need upgrade of treatment process due to the serious pollution of source water and the requirement of meeting tighter drinking water standards. The submerged membrane filtration technology has been widely used in the upgrade of DWTPs due to the advantages of stable effluent water quality and low land use and maintenance requirement. To further minimize energy costs, this study proposes an optimization of the design of the influent and drainage systems, the chemicals dosing system, membrane filters basin, and auxiliary facilities. This strategy can achieve long-term stable performance of the membrane filtration process and avoids the use of pumps as the driving force. The demonstration engineering work demonstrates the feasibility and advantages of the gravity-driven membrane filtration. The energy costs and land use are reduced by nearly 50% and 10%, respectively. Besides, the stability of the membrane system improves and the operational requirements are simplified. This study suggests the good application prospects of the gravity-driven membrane filtration technology in practice.

Keywords gravity-driven; submerged membrane filtration; drinking water; process upgrade; energy cost