

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.022

臭氧-超滤工艺用于城乡供水一体化工程

刘伟超¹, 王龙占¹, 李培校¹, 韩永峰¹, 张银良¹, 郭兴¹,
郝俊升², 王笑飞³

(1. 许昌市建安区中州水务有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 上海熊猫机械<集团>有限公司, 河南 郑州 450001; 3. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 城乡供水水源采用地表水后,面临水源水质突变风险。某地区城乡供水一体化工程为提高供水的生物安全性和化学安全性,依据原水水质特征,选用臭氧-超滤组合处理工艺。介绍了该组合工艺的设计参数、设备选型及配置情况,并分析了实际运行效果和运行成本。实践表明,臭氧-超滤组合工艺用于城乡供水一体化工程,能有效保障供水的生物安全性和化学安全性,并提升饮用水的供水品质。

关键词: 城乡供水一体化工程; 南水北调; 臭氧氧化; 超滤; 耐氧化超滤膜

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0131-06

Application of Combined Ozone and Ultrafiltration Process in an Integrated Urban and Rural Water Supply Project

LIU Wei-chao¹, WANG Long-zhan¹, LI Pei-xiao¹, HAN Yong-feng¹,
ZHANG Yin-liang¹, GUO Xing¹, HAO Jun-sheng², WANG Xiao-fei³

(1. Xuchang Jian'an District Zhongzhou Water Holding Co. Ltd., Xuchang 461000, China;
2. Shanghai Panda Machinery <Group> Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Water & Power Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: After the use of surface water for urban and rural water supply, the risk of sudden change in water quality is faced. In order to improve the biological and chemical safety of water supply, a combined ozone and ultrafiltration process is selected according to the characteristics of raw water quality in an integrated urban and rural water supply project. The design parameters, equipment selection and configuration characteristics of the combined process are elaborated, and the operation cost and effect are also analyzed. Practice shows that the combined ozone and ultrafiltration process used in the integrated urban and rural water supply project can effectively ensure the biological and chemical safety of water supply, and effectively improve the quality of drinking water supply.

Key words: integrated urban and rural water supply project; South-to-North Water Diversion; ozone oxidation; ultrafiltration; oxidation resistant ultrafiltration membrane

为有效保护地下水,南水北调中线工程通水运行以来,受水区范围内城乡居民生活饮用水水源逐渐由丹江水地表水置换地下水,实现水源地表化。供水水源地表化后,原水水质不同程度受到夏季洪

水等因素影响,水源水质面临浊度升高、夏季藻类增多、微污染物浓度升高、生物安全性增大等地表水源水质突变风险。

第一代净水工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)和第

二代净水工艺(常规工艺+臭氧-颗粒活性炭)都难以完全解决新的生物安全性问题^[1]。相对于常规净水工艺的水厂,超滤水厂能使供水的生物安全性和化学安全性得到提高^[2]。

从供水的生物安全性来看,采用超滤几乎可以完全去除水中微生物,极大地提高供水的生物安全性^[1]。从供水的化学安全性来看,超滤过程主要是物理截留过程,不添加化学药剂或产生新的污染^[3]。同时,由于减少了消毒剂的用量,也显著减少了消毒副产物的生成量,从而提高了供水的化学安全性^[4]。

超滤是绿色物理分离技术^[4],以超滤为核心的绿色组合工艺对天然水源水的天然属性影响和干

扰最小,推广超滤具有重要意义^[5]。

1 项目概述

南水北调中线工程受水区范围内某城乡供水一体化工程,设计建设1座处理能力为 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的净水厂,再通过建设配套输配水管网将水厂净化出水供到周边乡镇,与现有农村集中饮水安全供水站联通,置换现有供水站的地下水水源,并由现状管网输送至用户。

该工程原水为南水北调中线干渠丹江水,水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅱ类和Ⅲ类标准;出水水质须达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。主要设计进、出水水质见表1。

表1 主要设计进、出水水质

Tab.1 Main design influent and effluent quality

项目	微生物指标	浑浊度/NTU	色度/度	高锰酸盐指数/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	游离氯/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH
进水水质限值	粪大肠菌群 $\leq 10\,000$ 个/L	≤ 100	≤ 30	≤ 6	TN ≤ 1.0		6.0~9.0
设计出水标准	总大肠菌群不得检出	≤ 1	≤ 15	≤ 3	氨 ≤ 0.5	2~0.3(≥ 0.05)	6.5~8.5

2 设计净化工艺

根据原水水质特征,从工艺先进性、出水水质生物安全性、化学安全性和提高供水品质等因素考虑,采用超滤为核心的“叠片预过滤-臭氧氧化-超滤过滤”组合处理工艺。

叠片过滤器设置在前端作为预处理,拦截过滤水体中漂浮物、大颗粒物、藻类等污染物质,可有效提升臭氧氧化效率,降低臭氧消耗量,缓解膜污染。

臭氧氧化作为化学安全性保障措施,主要去除可溶性有机物及可氧化无机物,同时增强对色度和臭味的去除,弥补超滤技术的局限性^[2],保障饮用水的化学安全性。

超滤作为末端“把关”措施,主要去除颗粒物、大分子天然有机物、藻类、贾第虫和隐孢子虫、细菌以及病毒等,保障饮用水生物安全性。

设计工艺流程见图1。

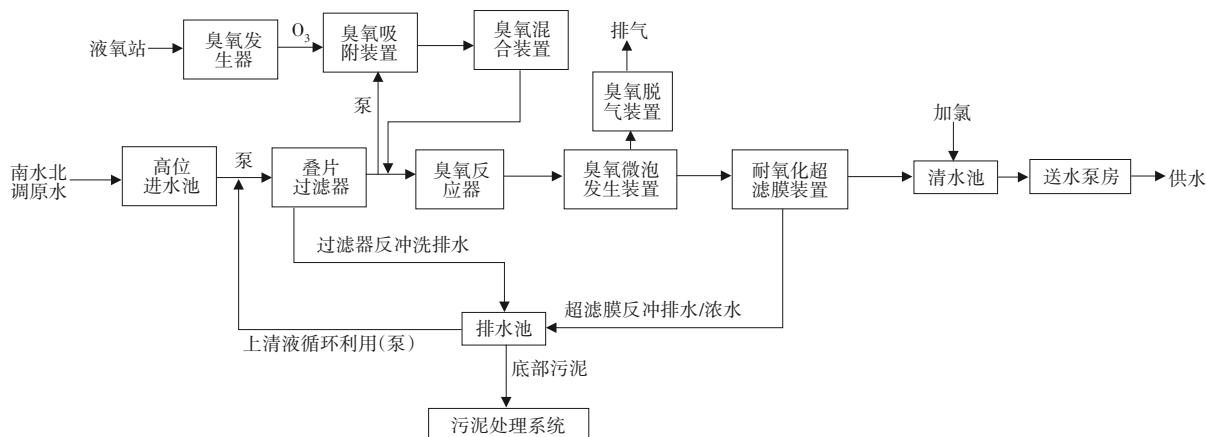


图1 臭氧-超滤净水工艺流程

Fig.1 Flow chart of drinking water purification process by ozone and ultrafiltration

3 主要构(建)筑物、设备及工艺参数

3.1 主要构(建)筑物设施

该工艺设计主要构(建)筑物设施有:高位进水

池、制水车间、清水池、排水池、排泥池、送水泵房、配电室,以及配套的工艺设备等。主要构(建)筑物设施设计参数见表2。

表2 主要构(建)筑物设施设计参数
Tab.2 Design parameters of main structures (buildings)

主要构(建)筑物	规格尺寸	配套工艺设备及参数	备注
高位进水池	HRT=35 min, $V_{有效}=733\text{ m}^3$, 1座;格栅渠尺寸 15.3 m×2.0 m×2.5 m	3套人工格栅网,第1道间隙 20 mm,第2道间隙 10 mm,第3道间隙 5 mm	有效水头 $H=101.3\text{ kPa}$
制水车间	建筑尺寸 54.0 m×30.0 m;室内地上高 10.0 m,地下深 2.0 m	①原水提升泵 3台(2用1备),单台 $Q=750\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=180\text{ kPa}$ 、 $N=55\text{ kW}$,变频;②臭氧制备设备、臭氧投加装置、臭氧反应设施、尾气破坏装置等臭氧系统;③碟片预过滤装置、超滤膜组件、超滤膜反洗装置等超滤膜系统;④次氯酸钠发生器 2台(1用1备),单台产量 2 kg/h 、 $N=10\text{ kW}$;溶盐装置 1套, $V_{有效}=6\text{ m}^3$;储液罐 1套, $V_{有效}=5\text{ m}^3$;计量泵 2台(1用1备),单台 $Q=300\text{ L/h}$ 、 $P=0.5\text{ MPa}$ 、 $N=0.37\text{ kW}$	制水工艺设备主要安装在制水车间
清水池	1座, $V_{有效}=4\text{ }000\text{ m}^3$	有效容积按最高日用水量的 13.33% 设计	地埋式
排水池/排泥池	排水池尺寸 24.6 m×9.5 m×8.0 m, $H_{有效水深}=4.5\text{ m}$, 1座;排泥池尺寸 14.0 m×3.0 m×2.5 m, $H_{有效水深}=2.0\text{ m}$, 1座	刮泥机 1套, $N=5.5\text{ kW}$;排泥泵 2台(1用1备), $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$, $N=4\text{ kW}$;斜管填料 170 m^2 ;出水槽 1批;循环回水泵 2台(1用1备),单台 $Q=230\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=300\text{ kPa}$ 、 $N=37\text{ kW}$	地下式
送水泵房	建筑尺寸 27.55 m×8.4 m,地上 6.5 m,地下 3.0 m, 1座;吸水井尺寸 16.8 m×4.3 m×7.1 m	单级离心泵 5台;大泵 3台(2用1备), 1台变频泵, $Q=460\text{ m}^3/\text{h}$, $H=470\text{ kPa}$, $N=110\text{ kW}$;小泵 2台(1用1备), 1台变频泵, $Q=250\text{ m}^3/\text{h}$, $H=470\text{ kPa}$, $N=55\text{ kW}$	半地上式
配电室	建筑尺寸 19.4 m×12.4 m×4.5 m	高低压配电系统及 PLC 控制系统 1套	地上式

3.2 臭氧系统

3.2.1 臭氧发生装置

采用板式臭氧发生器,氧气源为液氧。板式臭氧发生器 2套(1用1备),单套臭氧产量 5 kg/h ,气量 $40\text{ m}^3/\text{h}$,臭氧浓度 140 g/m^3 ,功率 40 kW 。板式换热器 2套(1用1备),循环泵 2台(1用1备),流量 $20\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 350 kPa ,功率 5.5 kW 。液氧储罐 1套,有效容积 50 m^3 ,空浴式汽化器 2台(1用1备)。

3.2.2 臭氧混合加注设计

臭氧加注的方式一般有微孔曝气和文丘里水射器两种,该工程采用文丘里水射器加注。

根据文丘里水射器要求核算增压泵流量和扬程,设计增压泵 4台(2用2备),单台流量 $150\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 400 kPa ,功率 30 kW ,变频控制。文丘里水射器 2套,316L 不锈钢材质,保证 $1\text{ m}^3/\text{min}$ 臭氧被吸入 0.3 MPa 压力管道内。

臭氧投加量为 2 mg/L ,根据进水量自动增减臭氧投加量,维持水中剩余臭氧 $\leq 0.1\text{ mg/L}$ 。

3.2.3 臭氧反应设计

臭氧氧化能力极强,臭氧与水混合后在臭氧反应器中进行高效强氧化反应,去除常规水处理工艺难以去除的物质,有效提高处理效果^[6]。臭氧反应采用卧式反应罐,2台,尺寸 $\varnothing 2.0\text{ m}\times 10.0\text{ m}$,单台处理水量 $750\text{ m}^3/\text{h}$,有效容积 30 m^3 ,316L 不锈钢材质;臭氧尾气脱液装置 2套,尺寸 $\varnothing 350\text{ mm}\times 1\text{ }200\text{ mm}$ 。

配套臭氧尾气处理装置 1套,尺寸 $\varnothing 500\text{ mm}\times 1\text{ }000\text{ mm}$,功率 1.6 kW ,处理量 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 。臭氧尾气加热催化分解,经在线检测达标后排放。

3.2.4 旋流微泡设计

经臭氧氧化处理后的出水进入臭氧微泡发生装置,利用旋流离心分离大气泡和水,根据空穴效应设计臭氧微泡切割水分子技术并利用压降产生细微气泡,含微泡的工艺水进入后续超滤膜,对膜表面附着的污染物进行连续擦洗,可有效防止污染物附着集聚在超滤膜外表面,具有防止超滤膜污染的作用。臭氧微泡发生装置 1台,最大处理水量 $1\text{ }500\text{ m}^3/\text{h}$,尺寸 $\varnothing 1.5\text{ m}\times 2.8\text{ m}$,316L 不锈钢材质。配套多功能泄压保障系统 1套。

3.3 超滤膜系统

3.3.1 碟片预过滤

叠片预过滤器过滤精度为 $200\text{ }\mu\text{m}$,耗水率极低,通过压差或时间自动反冲洗,无需化学药剂。碟片过滤器 2套,单套处理量 $750\text{ m}^3/\text{h}$,产水率 99.5%,改性 PP 材质。自清洗过滤装置 1套,处理量 $750\text{ m}^3/\text{h}$;碟片化学清洗泵 1台,流量 $10\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 200 kPa ,功率 2.2 kW 。

3.3.2 耐氧化超滤膜

采用耐臭氧氧化的改性 PVDF 热致相分离法超滤膜,进水连续臭氧微泡清洗而不需要频繁化学清洗,可大幅提高超滤膜寿命。该超滤膜在臭氧环境

下有效寿命为10年及以上,每年断丝率不超过0.25%。

超滤膜按照材质不同,可分为有机膜和无机膜;按照膜组件不同,可分为管式超滤膜、平板超滤膜、卷式超滤膜和中空纤维超滤膜;按照膜系统形式不同,可分为压力式超滤膜和浸没式超滤膜。其中,压力式膜又分为外压式和内压式、死端过滤和错流过滤;压力式膜跨膜压差相对较高,膜渗透通量一般高于 $70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[3]。

该工程超滤膜采用外压式中空纤维膜、错流过滤,最大进水压力0.4 MPa,跨膜压差0.02~0.15 MPa,最大跨膜压差0.25 MPa。超滤膜组6套,并联运行,每套56支膜元件,共计336支膜元件;膜组架采用304不锈钢材质。单套处理水量 $250 \text{ m}^3/\text{h}$,膜元件面积 $72 \text{ m}^2/\text{套}$;超滤膜运行通量 $40 \sim 120 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反洗通量 $50 \sim 140 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气洗强度 $5 \sim 12 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{支})$ 。

3.3.3 超滤膜反洗装置

胶体和天然有机物是超滤过程中形成膜污染的主要来源^[2]。膜污染不仅使超滤膜通量下降,增加工艺运行能耗,增加超滤运行成本,还会改变膜对水中其他污染物的去除效能^[7]。

超滤膜每运行过滤45~60 min须进行一次物理清洗,通过气水反冲洗去除膜表面的附着物、胶体等杂质,以保持膜运行的产水通量。该工程物理清洗设备设计参数:反冲洗水泵2台(1用1备),流量 $360 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程280 kPa,功率37 kW,采用变频控制;反冲洗空压机2套(1用1备),流量 $8 \text{ m}^3/\text{min}$,压力0.7 MPa,功率45 kW;空气干燥机2台(1用1备),流量 $8 \text{ m}^3/\text{min}$,功率1 kW;空气储罐2台,单台容积 2 m^3 ,工作压力0.7 MPa,采用恒压控制。

根据原水水质特征不同,当超滤膜长时间运行后,每半年至一年须对其进行适当的化学清洗,从而有效去除超滤膜表面累积的污染物,以保持超滤膜运行的产水通量。

该工程化学清洗设备设计参数:化学清洗药箱1台,水箱容积 5 m^3 ,PE材质;化学清洗泵1台,流量 $150 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程200 kPa,功率18.5 kW;保安过滤器1台,尺寸 $\varnothing 600 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$,过滤精度 $50 \mu\text{m}$,316L不锈钢材质。

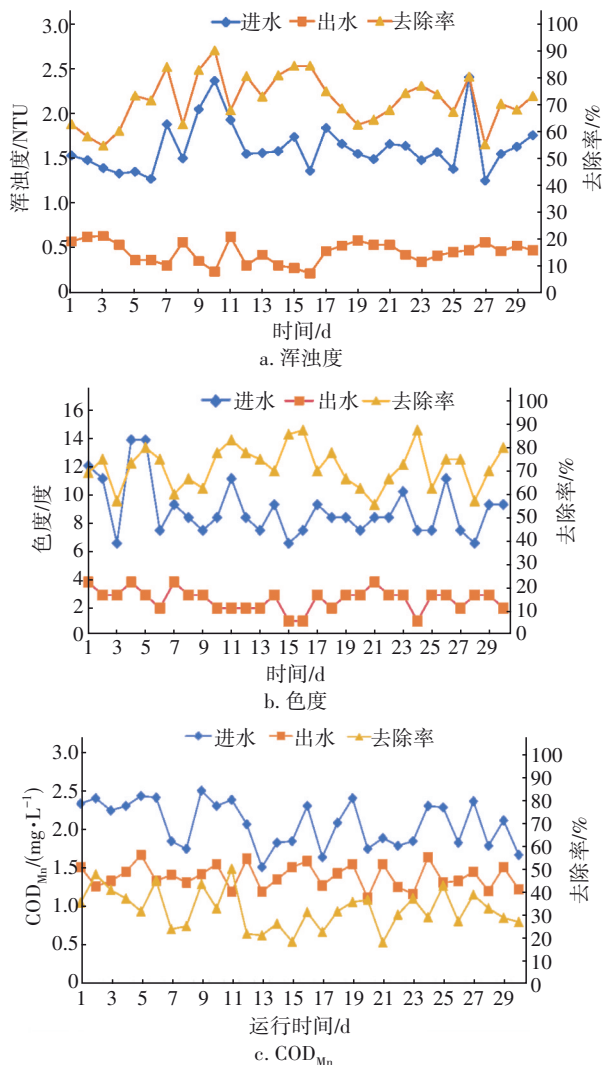
4 工艺运行效果分析

该工程设计处理规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,于2021年7

月开工建设,2023年6月建设完工并投入运行。运行初期启用1组工艺系统,平均供水规模约 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

该工程原水水质为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅱ类和Ⅲ类标准,出水水质执行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。水厂运行后出水水质检测指标共97项,全部合格,主要特征指标良好,大部分出水检测数值甚至优于国标水质。选取出厂水浑浊度、色度、 COD_{Mn} 、总大肠菌群及余氯等具有代表性的水质指标进行连续检测,结果见图2。

该工程选用“叠片预过滤-臭氧氧化-超滤过滤”组合工艺^[8-13]能够保障水厂出水水质稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),还能优化部分微生物指标、感官性状和一般化学指标,大幅改善出厂水饮用水感官特性,提升供水品质。



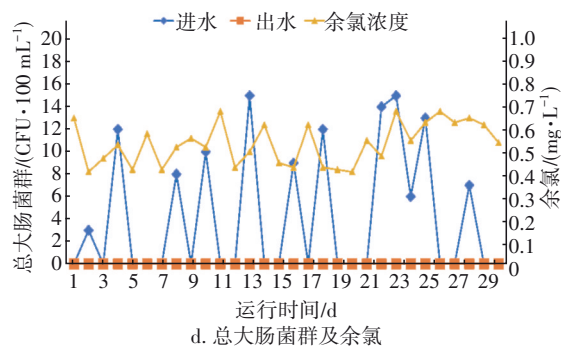


图2 工艺出水主要特征水质指标

Fig.2 Main characteristic water quality indexes of process effluent

5 运行成本分析

运行成本由电耗成本、药耗成本、人工成本及其他项目组成。其中,电耗成本、药耗成本及人工成本三者之和占运行成本的70%以上^[8]。该工程“臭氧-超滤”组合工艺与传统处理工艺(第一代净水工艺及第二代净水工艺)运行成本比较见表3。

表3 工艺运行成本比较

Tab.3 Comparison of process operation cost

元·m⁻³

项目	第一代/第二代 净水工艺	臭氧-超滤 组合工艺	备注
电耗成本	0.2~0.25	0.333	实际为0.21
人工成本	0.1~0.2	0.075	按15人计
药耗成本	0~0.03	0.038	液氧和食盐
合计	0.3~0.48	0.446	实际为0.323

从表3可以看出,该工程“臭氧-超滤”组合工艺单位电耗成本明显高于传统处理工艺(第一代及第二代净水工艺),单位人工成本略低于传统处理工艺,单位药耗成本略高于传统处理工艺。该工程“臭氧-超滤”组合工艺单位电耗运行成本占比达75%,进一步降低单位电耗成本对于降低该组合工艺运行单位成本至关重要。

该工程供水对象为乡镇村居民,生产用电可享受农业生产用电电价等惠民政策,生产用电电价为0.47元/(kW·h),办公用电则采用非居民用电电价0.75元/(kW·h)。依据农业生产惠民电价0.47元/(kW·h)计算,该工艺运行电耗成本0.21元/m³;为对比分析不同工艺水厂电耗成本,按照可比性电价[非居民电价0.75元/(kW·h)],电耗成本为0.333元/m³。因此,在不考虑设备折旧及维修等其他项目情况下,该工程实际单位运行成本合计0.323元/m³,

按照可比性电价修订后的单位运行成本合计0.446元/m³。

6 结论

① 臭氧-超滤组合工艺能有效保障水厂出水水质稳定达标,保障出水的生物安全性和化学安全性,提升出水水质的感官性状和一般化学指标,有效提高水厂出水品质。

② 臭氧制备和超滤膜运行均需消耗能源,且超滤膜过滤净化水质主要通过压力差驱动,与传统处理工艺运行能耗相比,臭氧-超滤组合工艺运行能耗相对较高,需进一步研究降低其运行能耗的方法和途径。

③ 超滤过程主要依靠机械截留作用去除污染物,不添加化学药剂或产生新的污染物;臭氧可减少含氯消毒剂的使用量,降低化学药剂对水质的污染和消毒副产物的生成量。臭氧-超滤组合工艺作为新一代净化工艺在城乡供水一体化工程中可以推广应用。

参考文献:

[1] 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,2010,36(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, 36 (8) : 11-15 (in Chinese).
[2] 姜立君,张永强,柏章明. 超滤膜技术在我国城市净水厂中的应用现状[J]. 供水技术,2014,8(4):3-7.
JIANG Lijun, ZHANG Yongqiang, BAI Zhangming. Application of ultra-filtration membrane technology in urban waterworks in China [J]. Water Technology, 2014,8(4):3-7(in Chinese).
[3] 范小江,张锡辉,苏子杰,等. 超滤技术在我国饮用水厂中的应用进展[J]. 中国给水排水,2013,29(22): 64-70.
FAN Xiaojiang, ZHANG Xihui, SU Zijie, et al. Application of ultrafiltration technology in drinking water plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22):64-70(in Chinese).
[4] 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).
- [5] 李圭白, 瞿芳术, 梁恒. 关于在城市饮水净化中采用绿色工艺的一些思考[J]. *给水排水*, 2014, 40(8): 1-3.
- LI Guibai, QU Fangshu, LIANG Heng. Probe into the application of the green technology in municipal drinking water engineering [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(8): 1-3(in Chinese).
- [6] 张红专, 高乃云, 张永明. 臭氧技术在饮用水处理中的应用和研究现状[J]. *给水排水*, 2009, 35(S2): 59-62.
- ZHANG Hongzhuang, GAO Naiyun, ZHANG Yongming. Application and research status of ozone technology in drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(S2): 59-62(in Chinese).
- [7] 岳鹏, 丁昀, 杨庆, 等. 超滤技术在城镇给水处理中的研究进展与应用[J]. *净水技术*, 2017, 36(4): 36-42.
- YUE Peng, DING Yun, YANG Qing, *et al.* Research progress and application of ultrafiltration technology in urban water treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(4): 36-42(in Chinese).
- [8] 张小亚, 苑宏英, 张嘉艺, 等. 国内给水厂可变运行成本现状分析[J]. *水处理技术*, 2019, 45(2): 129-132.
- ZHANG Xiaoya, YUAN Hongying, ZHANG Jiayi, *et al.* Status analysis of the variable operating costs of domestic water supply plants [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(2): 129-132(in Chinese).
- [9] 刘春霞, 付婉霞. 超滤技术在饮用水处理中的效果和应用前景[J]. *给水排水*, 2008, 34(S1): 121-124.
- LIU Chunxia, FU Wanxia. The effects and application prospect of ultra-filtration technology on drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(S1): 121-124(in Chinese).
- [10] 李红兰, 张克峰, 王永磊. 臭氧在饮用水处理中的应用[J]. *水资源保护*, 2006, 22(3): 60-62, 65.
- LI Honglan, ZHANG Kefeng, WANG Yonglei. Application of ozone to drinking water treatment [J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(3): 60-62, 65(in Chinese).
- [11] 陈伟, 徐兴忠. 臭氧及其联合氧化工艺在饮用水处理中的应用[J]. *城市管理与科技*, 1999, 1(3): 39-41.
- CHEN Wei, XU Xingzhong. Ozone and its associated oxidation process used in drinking water treatment [J]. *Urban Management and Science & Technology*, 1999, 1(3): 39-41(in Chinese).
- [12] 袁波祥, 陈莎, 杨圣杰. 臭氧化技术在饮用水处理中的应用[J]. *北方交通大学学报*, 2001, 25(6): 54-56, 72.
- YUAN Boxiang, CHEN Sha, YANG Shengjie. Application of ozonation in drinking water treatment [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2001, 25(6): 54-56, 72(in Chinese).
- [13] 刘建广, 夏鹏, 祁峰, 等. 臭氧催化氧化技术在饮用水处理中的应用[J]. *水处理技术*, 2010, 36(12): 11-14.
- LIU Jianguang, XIA Peng, QI Feng, *et al.* Application of the catalytic ozonation in the drinking water treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(12): 11-14(in Chinese).

作者简介: 刘伟超(1982-), 男, 河南许昌人, 学士, 工程师, 研究方向为水处理与水污染控制技术, 给水排水工程建设管理及生产运营管理。

E-mail: 289735100@qq.com

收稿日期: 2023-08-02

修回日期: 2023-10-08

(编辑: 衣春敏)