

徐振峰, 陈文松, 黎钱波, 等. 陶瓷膜工艺在浙江省农村饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(3):39-45.

XU Z F CHEN W S, LI Q B, et al. Application of ceramic membrane process in rural drinking water treatment in Zhejiang Province[J].

Water Purification Technology, 2022, 41(3):39-45.



扫我试试?

陶瓷膜工艺在浙江省农村饮用水处理中的应用

徐振峰¹, 陈文松², 黎钱波², 程永康², 樊丞越^{1,*}, 刘宏远¹

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江杭州 310023; 2. 天健水务集团<杭州>有限公司, 浙江杭州 310020)

摘要 为保障农村饮用水安全, 浙江省建设了大量农村饮用水工程。由于抗污染能力强、出水水质稳定等特点, 陶瓷膜技术已在浙江省多个地区开展实地应用。文中从水源特点、供水工程特点、供水工程控制技术与建设运行成本等方面总结了浙江省农村地区的供水特性, 并以小规模农村供水站为例, 分析了陶瓷膜技术的应用情况, 提出应对农村微污染源条件下的处理工艺流程。

关键词 饮用水安全 浙江省 农村地区 陶瓷膜 水源

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2022)03-0039-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.006

Application of Ceramic Membrane Process in Rural Drinking Water Treatment in Zhejiang Province

XU Zhenfeng¹, CHEN Wensong², LI Qianbo², CHENG Yongkang², FAN Chengyue^{1,*}, LIU Hongyuan¹

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Tianjian Water Group <Hangzhou> Co., Ltd., Hangzhou 310020, China)

Abstract To ensure drinking water safety, a large number of rural drinking water projects have been built in Zhejiang Province. Ceramic membrane technology has been applied of many areas in Zhejiang Province for its strong antifouling ability and stable effluent quality. The characteristics of water supply in rural areas in Zhejiang Province from the characteristics of water source, characteristics of water supply projects, control technology of water supply engineering, and construction and operation costs are reviewed. Taking several small-scale rural water supply stations as examples, analyzes the application of ceramic membrane technology, and proposes treatment processes for micro-pollution water sources in rural areas.

Keywords drinking water safety Zhejiang Province rural area ceramic membrane water source

随着国家乡村振兴战略的不断推进, 因地制宜选择合适的处理工艺, 解决潜在供水危机的要求迫在眉睫。2018年浙江省实施《浙江省农村饮用水达标提标行动计划(2018—2020年)》, 旨在实现城乡

同质、同标、同服务供水。然而受限于复杂的地形条件, 浙江省西南山区与东部海岛分布大量小规模的自然村落^[1], 人口少, 地形险峻, 难以集中供水; 另一方面, 浙江省工业农业活动曾造成的环境污染始终对水环境有极大影响^[2-3]; 此外, 浙江省夏秋季台风、梅雨期暴雨频发, 季节性丰、枯水变化常致农村水源水质大幅波动^[4]。至2020年末, 浙江省农村地区建有集中式农村供水工程10422处, 总供水规模为2767.00万m³/d, 自来水普及率达到99.7%, 供水设施服务人口和供水水质均有极大提升。然而仍有463.23万农村人民仅由小规模单村供水站供

[收稿日期] 2021-07-15

[作者简介] 徐振峰(1996—), 男, 硕士, 主要从事膜分离技术、农村饮用水处理技术工作, E-mail: 616749971@qq.com。

[通信作者] 樊丞越(1995—), 男, 博士, 主要从事膜分离技术、饮用水工程技术工作, E-mail: 18639709003@163.com。

水,存在部分供水站水源条件差、智慧化管理水平不足、成本水价远超实收水价而难以维持长效运行等一系列问题^[5]。因此,如何实现浙江省农村饮水安全稳定仍是当今热点问题之一。

本文分析了浙江省农村地区供水特点,对陶瓷膜过滤机理、工艺发展进行综述,以小规模单村供水为研究对象,总结研究了陶瓷膜在浙江省农村地区的应用情况,进而提出进一步推广应用陶瓷膜的相关建议,旨在为陶瓷膜技术在更大范围的应用提供借鉴和参考。

1 浙江省农村供水特点

浙江省具有复杂地形特征,且以温和、湿润、多雨为主要气候特征。西南部多有海拔达千米的山地,中部地区为丘陵、盆地,东北部为平原地区^[1]。降雨量时空分布不均、生产活动导致的水体污染风险广泛存在,使得浙江省农村供水条件表现出明显时空差异。

1.1 水源特点

(1) 水体污染风险依旧严峻

浙江省河网密布,水资源丰富,水源水质整体较好^[17]。但曾发生多起水环境污染事件^[3],伴随着城市建设、农业污染,可能导致污染物在河网、土壤中的迁移和富集。根据李欣红等^[18]的研究,浙江省农田土壤中多环芳烃广泛存在;陈文轩等^[19]发现,浙江省农田土壤中 Zn、Hg、Pb 等重金属富集程度较高;此外,工农业生产和城市生活污水排放曾导致多个水系发生富营养化现象^[17,20],均对饮用安全造成很大风险。

(2) 水源水质水量季节性波动大,存在时空差异性

浙江省地处中国东南沿海地区,兼有春夏之交梅雨绵绵、夏季台风频发、冬季晴冷少雨的气候特点,年降雨集中在 6 月—8 月,自西南向东北递减,表现为山区大于平原、沿海山地大于盆地^[21],因此,形成水资源空间赋存不均的状况。同时,台风、暴雨频发,常伴有山洪、泥石流等次生灾害^[22],均可能造成剧烈的水源水质、水量波动。

由于浙江省农村地区水源主要为山塘、河流、泉水以及山溪等,相比中大型水库在水量、水质方面受季节更替影响更为敏感。当发生短历时强降雨,河流及溪流径流量增大,但难以存储和取用,并易造成

水体浑浊度上升、土壤中有机污染物和重金属释放。而山区及东部海岛地区存在取水点至供水工程间高差大的情况,需根据处理工艺对原水提升或泄压,造成额外的成本。此外,逢冬季枯水,低温可能引发水源氨氮^[23]超标,均会对水源水质造成严重威胁。

1.2 供水工程特性

根据供水规模和管网布置方式,浙江省农村供水工程可分为 3 类:城市市政管网延伸供水、联村供水以及单村供水站。其中,前两类供水多适用于人口密度高的农村地区,而单村供水站则适用于人口密度低且难以建设大型供水工程的地区。

(1) 城市市政管网延伸供水与联村供水

这两类供水工程多分布在浙江省中部、东北部低山以及杭嘉湖、宁绍平原等浙江省主要农耕区域^[24],这类地区大型市政管网敷设及输配水工程相对完善,供水规模可达数千~数十万 m³/d,具备采用市政工程大中型供水工程的条件,其工程建设和运行成本与城市大中型水厂别无二致。鉴于水源微污染广泛存在^[25],主要为常规工艺,并根据原水水质特点结合深度处理。常规工艺主要依靠人工管理,而随着智慧水务^[26-27]等技术的推广应用,人工管理结合自动化控制,以及远程运维的运营模式已在浙江省农村地区逐步推进。

(2) 单村供水站

浙江省西南山区的中部丘陵以及东部海岛地区分布着大量自然村,受限于地形条件影响,村落人口较少且居住分散,村镇之间交通联系较差,因此,供水工程多为单村供水站形式,覆盖人口仅数十~数百人。目前,供水站制水工艺以一体化常规处理设备为主,其占地面积小、简便实用,但存在工艺流程失宜甚至无处理直接供水的情况,根据陈媛等^[28]的研究,2017 年浙江省农村地区采用常规工艺的水厂占仅总数的 61.43%,经消毒后仍有 10.34%未达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。此外常规工艺对进水水质有较高要求,面对水质大幅波动时处理效果并不理想。常规处理工艺需要人工管理,而在规模小、标准低、欠发达的山区丘陵区域往往缺少足够的专职人员,难以满足供水工程日常维护和安全供水的要求^[5]。

以陶瓷膜技术为核心的一体化处理设备已在浙江省农村地区逐步推广应用,因膜组件体积较小、出

水水质稳定,在结合适当的预处理工艺下,可有效降低膜组件负荷,进而实现成本控制和稳定出水水质。目前,采用陶瓷膜组件供水站的主要运维方式主要为全自动运行结合远程控制的集中运维方式,可减少因缺乏人工或人为错误操作导致的供水事故,并相应降低成本,更适合人口少、供水规模小的农村地区。相比常规工艺,陶瓷膜组件成本更高,但其出水水质稳定、人工成本较低;而相较于采用有机膜组件的一体化设备,其在相同规模上虽建设成本更高,但良好运行状态下膜组件寿命可达有机膜的 2~3 倍(表 1),因而在远期运行成本上并无劣势。

表 1 浙江省农村供水站成本

Tab. 1 Construction and Operation Costs of Rural Water Supply Stations in Zhejiang Province

供水站工艺特点	规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	建设成本 /万元	制水成本/ ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)
一体化常规工艺	100~240	5~20	0.037~0.090
有机膜组件一体化设备	100~240	15~35	0.080~0.110
陶瓷膜一体化设备	100~240	60~90	0.022~0.320

2 陶瓷膜技术研究进展

2.1 陶瓷膜的过滤原理

目前,常见的陶瓷膜材料主要有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 等金属氧化物,以及新兴的堇青石、 SiC 和 Si_3N_4 等无机材料^[6]。根据膜过滤精度,可分为微滤(microfiltration, MF, 平均孔径为 0.1~10 μm)、超滤(ultrafiltration, UF, 平均孔径为 2~100 nm)、纳滤(nanofiltration, NF, 平均孔径为 0.1~2 nm)和反渗透(reverse osmosis, RO, 平均孔径<1 nm)^[7-8]。其中,给水处理中 MF、UF 陶瓷膜最为常用,可去除原水中颗粒物、胶体、微生物和大分子有机物等污染物。

陶瓷膜截留污染物的机理与有机膜类似,主要有 4 个方面(图 1)。(1)机械截留。原水中粒径大于膜孔径的总悬浮固体、浑浊度、细菌和藻类等污染物截留在膜表面。(2)吸附作用。依靠分子间作用力、静电力以及化学键力等作用,将粒径小于膜孔的污染物吸附在膜表面或膜孔内,实现污染物的截留。(3)架桥作用。污染物在膜表面或膜孔内桥联成一体,使粒径超过膜孔径而被截留。(4)Donnan 效应。对于更小孔径的 UF、NF,其膜表面静电力对污染物的截留则不可忽视,受 Donnan 效应影响,陶瓷

膜会排斥相同电性的污染物,而部分低价同性或中性离子可通过膜,同时为保持膜两侧电荷平衡,部分反离子也随之流出^[9]。

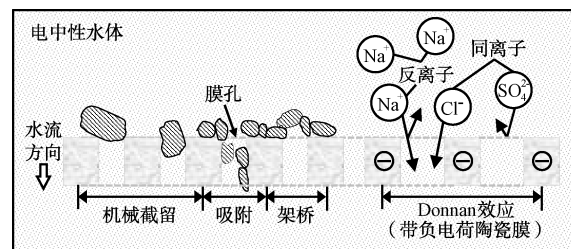


图 1 陶瓷膜过滤机制

Fig. 1 Filtration Mechanism for Ceramic Membrane

膜分离过程中,污染物在膜表面和膜孔中黏附、沉积、堆叠,导致膜孔径减小、膜通量下降,即膜污染现象^[10]。膜污染将导致产水量下降,甚至引起产水水质下降的风险,因此,需要对膜进行定期清洗。

2.2 陶瓷膜净水工艺发展

陶瓷膜技术是当前发展迅速的一种膜分离技术,目前已在多个国家或地区展开应用^[11-12]。陶瓷膜的研究始于 20 世纪 40 年代,其发展历程可分为 3 个时期:用于分离铀同位素的核工业时期^[13]、以无机 MF 和 UF 为主的液体分离时期^[14]、以膜催化反应为核心的全面发展时期。目前,陶瓷膜的制备技术趋于成熟,商品化陶瓷膜多为多孔金属氧化物的 MF、UF^[15]。其中, MF 陶瓷膜在 20 世纪 80 年代初首次应用于水处理领域,80 年代末 UF 陶瓷膜也进入了水处理领域^[16]。与有机膜相比,陶瓷膜材料化学稳定性好、热稳定性好、机械强度高、易清洗再生、使用寿命长、孔径分布窄,目前,以陶瓷膜组件为核心的水处理工艺已在多个国家和地区开展规模化饮用水生产。其中,日本是全球最多应用陶瓷膜技术处理饮用水的国家,2014 年投入使用的日本横滨市川井水厂,其产水能力为 17.11 万 m^3/d ,是目前日本产水量最高的采用陶瓷膜工艺的水厂。而 2019 年新加坡改造完成的蔡厝港水厂,采用了臭氧/活性炭结合陶瓷膜工艺,处理规模为 18.18 万 m^3/d ,为目前世界规模最大的陶瓷膜水厂。

我国陶瓷膜研究起步于 20 世纪 90 年代,规模化的陶瓷膜组件主要应用于工业生产与废水处理领域,然而陶瓷膜组件制备成本高,在饮用水处理领域其所占的市场份额远小于有机膜组件^[12]。但陶瓷

膜设备在自动化控制、抗冲击与出水水质方面优势凸显,随着制膜技术的逐步提升,成本进一步下降,陶瓷膜或将在饮用水处理领域占据更大市场。

3 浙江省农村地区陶瓷膜技术应用

3.1 实际案例分析

基于浙江省农村饮用水提标改造的需求以及单村供水存在的现实困难,以较小规模供水站为例,介绍浙江省农村饮用水处理中陶瓷膜的应用情况。

(1) 实现复杂地形下稳定供水

浙江省西南部 Q 市,地形复杂破碎,具有高山、中山、丘陵、盆地等多种地貌特点,山地面积占全市面积近一半,山岭走向复杂多变,交通困难,存在大量分散自然村,单个村落人口少,平整土地面积较小,因而难以建设和使用大型供水工程。其中, A 供水站四面环山,地势起伏大,城市供水管网无法到达。供水水源为泉水,水源水微生物指标常年超标[菌落总数为 195 CFU/mL,总大肠菌群为 350 MPN/(100 mL)]。以往供水站未对原水进行处理,仅通过水泵直接供给居民,存在很大隐患。2019 年对供水站进行改造,采用自动运行+远程控制式陶瓷膜净水设备,原水经电絮凝和砂滤工艺后去除部分浑浊度、有机污染物和微生物等,于陶瓷膜前自动投加次氯酸钠(图 2),占地面积仅为 30 m²,可有效应对山区平整地面面积小的难点。基于陶瓷膜抗氧化性强的优势,在膜过程截留污染物的同时,继续氧化水中有机污染物,实现出水菌落总数与总大肠菌群未检出,同时浑浊度由原水的 0.4~1 NTU 下降到 <0.1 NTU,出水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),制水成本为 0.11 元/t,有效保障了饮水安全。

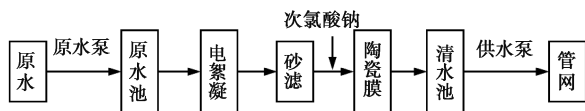


图 2 A 供水站处理工艺流程

Fig. 2 Treatment Process Flow of Water Supply Station A

A 供水站处理工艺主要设计参数如下。(1)原水泵:2 台,1 用 1 备,流量为 0~16 m³/h,扬程为 15.5~26 m,功率为 2.2 kW;(2)电絮凝:2 组,每组处理流量为 10 m³/h,规格为 Φ377 mm×1 800 mm,电流为 0~50 A,电压为 0~24 V;(3)砂滤罐:2 组,

每组处理流量为 10 m³/h,规格为 Φ1 200 mm×3 500 mm,滤层为 1.2 m,滤速为 7.5~9 m/h;(4)膜组件:3 支,每支通量为 6 m³/h,膜孔径为 0.03 μm,膜面积为 24.3 m²,每 2 h 反冲洗 1 次,每周化学清洗 1 次;(5)清水池:重力流;(6)次氯酸钠:次氯酸钠发生器现场电解食盐水,有效氯投加量为 0.8 mg/L,控制余氯为 0.4~0.6 mg/L。

(2) 有效解决水源铁、锰超标

位于 H 市的 B 水厂,地处浙江省山区-平原过渡地区,水源为水库水,原水常有异味且铁(1.23 mg/L)、锰(1.08 mg/L)超标,水源微污染问题时有发生,原处理工艺为常规一体化净水装置,由于工艺流程简单、人工投药量控制不当等,常致出水水质不达标。因此,采用集装箱一体化的自动化陶瓷膜净水设备,原水经电絮凝、自动投加次氯酸钠和砂滤后进入陶瓷膜(图 3),通过自动化控制和远程运维,解决了投药量不当的问题;陶瓷膜的预处理工艺可去除原水中部分浑浊度、臭味及铁、锰污染物,陶瓷膜单元则进一步去除以上污染物,该工艺出水水质中铁、锰质量浓度均<0.05 mg/L,目前设备制水成本为 0.17 元/t,有效解决了原水水质差、出水水质不达标的问题。

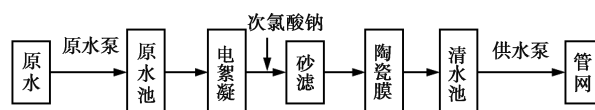


图 3 B 水厂处理工艺流程

Fig. 3 Treatment Process Flow of Water Treatment Plant B

B 水厂处理工艺主要设计参数如下。(1)原水泵:1 台,流量为 0~4.4 m³/h,扬程为 16~37.2 m,功率为 0.55 kW;(2)电絮凝:1 组,处理流量为 5 m³/h,规格为 Φ273 mm×1 800 mm,电源电流为 0~30 A,电压为 0~18 V;(3)砂滤罐:1 组,处理流量为 2.5 m³/h,规格为 Φ615 mm×1 850 mm,滤层为 1.35 m,滤速为 8~9 m/h;(4)膜组件:1 支,通量为 2.5 m³/h,膜孔径为 0.1 μm,膜面积为 4.6 m²,每 1 h 反冲洗 1 次,每 12 h 化学清洗 1 次;(5)次氯酸钠:次氯酸钠发生器现场电解食盐水,有效氯投加量为 0.9 mg/L,控制余氯为 0.3~0.5 mg/L。

(3) 缓解山塘水质季节性恶化问题

浙江省东部 Z 市分布大量海岛,由于多数小岛地势崎岖、水源水量与水质受台风和季节性影响极

大,建设供水设施成本甚至可达百万元。其中,C供水站地处悬水小岛,供水人口仅为200人,区域降水集中在梅雨、台风季节,起初小岛因缺乏供水工程,供水能力不足与用水需求增长的矛盾突出,缺水问题严重。该地区主要水源为山塘,原水微生物[菌落总数为270 CFU/mL,总大肠菌群为1 600 MPN/(100 mL)]、浊度(20.9 NTU)、铁(1.21 mg/L)、锰(0.74 mg/L)等多个指标超标,兼具水质型、水量型缺水的特点。经采用一体化陶瓷膜处理设施(图4),原水投加次氯酸钠和聚合氯化铝后经气浮池、锰砂过滤工艺,去除了原水中大部分浊度与铁、锰,陶瓷膜组件则有效拦截剩余微生物等污染物。该设施出水中菌落总数和总大肠菌群指标未检出、浊度<0.07 NTU,铁为0.13 mg/L,锰<0.05 mg/L,有效应对常规工艺难以解决的进水水质差的难题,实现出水水质达标、水量稳定,目前制水成本为0.21元/t,缓解了该地区一直以来的缺水问题。

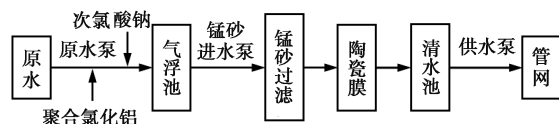


图4 C供水站处理工艺流程

Fig. 4 Treatment Process Flow of Water Supply Station C

C供水站处理工艺主要设计参数如下。(1)次氯酸钠:根据原水流量自动投加;(2)聚合氯化铝:投加量为15~20 mg/L;(3)气浮池:流量为25 m³/h,外形尺寸为8 000 mm×2 000 mm×3 000 mm,溶气泵扬程为60 m,流量为10 m³/h,回流比为40%,溶气压力为500 kPa;(4)锰砂过滤:过滤罐直径为2.2 m,滤速为8~9 m/h,锰砂厚度为105 cm,石英砂厚度为45 cm;(5)膜组件:8支,孔径为0.03 μm,膜面积为24.3 m²,每2 h反冲洗1次,每24 h化学清洗1次。

(4) 节约能源,降低运行成本

由于浙江省广泛存在多山地区,其水源与供水站之间可能有较大高差,若能有效利用这部分能量,可极大降低水处理设备的运行成本。位于浙江省Z市的D供水站,水源为山溪水,取水点与供水站高差为60 m。进水压力高,使用常规工艺则需降低进水压力,而有机膜可承受压力一般低于300 kPa。因此,处理工艺选择陶瓷膜一体化净水设备(图5),基

于陶瓷膜的抗高压特性,利用供水站与取水点间高差产生压力提供膜组件驱动压和部分供水压力,省去原水泵及供水泵,制水成本为0.03元/t,实现了节约能源、降低建设和运行成本。

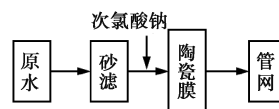
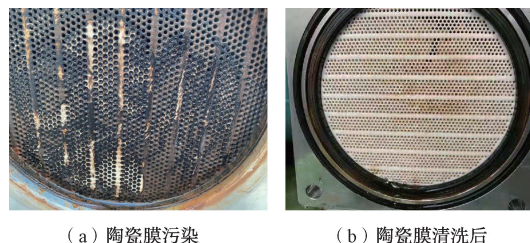


图5 D供水站处理工艺流程

Fig. 5 Treatment Process Flow of Water Supply Station D

D供水站处理工艺主要设计参数如下。(1)砂滤罐:10 m³/h,滤速为8~13 m/h;(2)膜组件:1支,膜面积为24.3 m²,最高允许压力为700 kPa,膜孔径为0.03 μm,每2 h反冲洗1次,每48 h化学清洗1次;(3)次氯酸钠:次氯酸钠发生器现场电解食盐水,控制余氯为0.4~0.6 mg/L。

以陶瓷膜技术为核心的水处理工艺,在应对复杂地形条件、水源水质问题和人工维护困难等方面具有常规工艺难以企及的优势,长期运行下制水成本合理。相较于有机膜,陶瓷膜具有更好的化学稳定性和更高的机械强度,往往更易清洗再生(图6),也因此具有更长的使用寿命^[29],适合在浙江省农村小规模的单村供水工程中采用。



(a) 陶瓷膜污染

(b) 陶瓷膜清洗后

图6 陶瓷膜污染与清洗后

Fig. 6 Ceramic Membranes Fouling and Cleaning

3.2 浙江省农村饮用水处理工艺流程建议

根据浙江省广泛存在微污染原水的特点(表2),部分农村地区水源水质可能存在微生物指标、铁、锰、臭味和浊度等多种指标超标,以及水资源时空分布不均的问题,建议根据区域用水需求与实际水源情况,提出采用预处理结合陶瓷膜的工艺流程(图7)。工艺流程①特点:以C供水站工艺流程为基础,混凝-气浮工艺与锰砂过滤以去除水中较高的浊度、铁、锰等污染物;陶瓷膜前投加次氯酸钠以去除水中微生物,防止膜表面生物膜的形成。

工艺流程②特点:该工艺于陶瓷膜前设电絮凝结合活性炭滤池工艺,主要应对铁、锰、微生物、氨氮及有机污染物等指标较高的情况;当出现突发水污染事件时,可适时应急性投加粉末活性炭。

表2 浙江省农村地区微污染原水水质指标
Tab.2 Water Quality Indexes of Micro-Polluted Raw Water in Rural Areas of Zhejiang Province

微污染水源超标的水质指标	指标值	限值
浑浊度/NTU	1~20	≤1
色度	5~30	≤15
菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	0~400	≤100
总大肠菌群/[MPN·(100 mL) ⁻¹]	100~2 500	不得检出
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0~0.3	≤0.5
铁/(mg·L ⁻¹)	0.05~1.25	≤0.3
锰/(mg·L ⁻¹)	0.05~1.1	≤0.1
耗氧量(以 O ₂ 计)/(mg·L ⁻¹)	0.3~3	≤3

注:限值为《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的对应指标

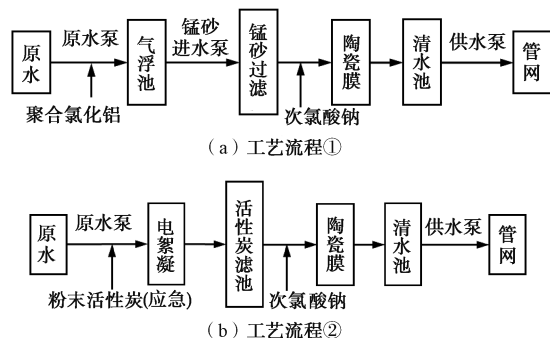


图7 供水站的2种处理工艺流程

Fig.7 Two Kinds of Treatment Process Flows of Water Supply Station

4 结论

陶瓷膜组合工艺业已形成了较成熟的产品线,在浙江省多个农村地区已逐步推广使用,保障了浙江省农村居民的饮用水安全。目前开展的示范工程案例表明,在浙江省农村地区应用陶瓷膜技术,具有工程占地小、操作简便、出水水质稳定等优点,但同时也需要对各地水源特性、工程造价与制水成本、膜污染的控制以及组合工艺的遴选等方面高度关注。以陶瓷膜为核心的饮用水处理工艺,不仅符合浙江省农村饮用水提标改造的要求,对城市净水工程建设也具有一定借鉴价值。

参考文献

- [1] 汪洁,殷亚秋,于航,等. 基于RS和GIS的浙江省矿山地质环境遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 232-236.
- [2] 孙忠,沈俏会,董萍,等. 近十年浙江省地表水环境质量变化趋势及影响因素研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(4): 23-26.
- [3] 许静,王永桂,陈岩,等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4566-4575.
- [4] 何锡君,王贝,邱超,等. 浙江省农村饮用水水质状况调查与分析[J]. 中国水利, 2019(11): 40-42.
- [5] 浙江省水利厅. 浙江省水利厅关于公开征求《浙江省农村供水安全保障“十四五”规划(征求意见稿)》意见的公告[EB/OL]. (2021-03-10)[2021-07-23]. http://slt.zj.gov.cn/art/2021/3/10/art_1607343_59017844.html.
- [6] 张诗洋,单历元,廖松义,等. 陶瓷膜在废水处理领域中的研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(4): 31-36.
- [7] 成小翔,梁恒. 陶瓷膜饮用水处理技术发展展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8): 1-10.
- [8] MUNTHA S T, KAUSAR A, SIDDIQ M. Advances in polymeric nanofiltration membrane: A Review [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2017, 56(8): 841-856.
- [9] HE Z, LYU Z, GU Q, et al. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 578: 123513. DOI:10.1016/j.colsurfa.2019.05.074.
- [10] LIU B, ZHU T, LIU W, et al. Ultrafiltration pre-oxidation by boron-doped diamond anode for algae-laden water treatment: Membrane fouling mitigation, interface characteristics and cake layer organic release [J]. Water Research, 2020, 187: 116435. DOI:10.1016/j.watres.2020.116435.
- [11] 赵梦,周丽,蔡宙,等. 陶瓷膜及其组合工艺在饮用水处理中的研究进展[J]. 给水排水, 2016, 42(7): 133-140.
- [12] 范益群,漆虹. 陶瓷纳滤膜制备与应用研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(6): 1786-1793.
- [13] 王连超,谢佳,席赞. 多孔金属陶瓷膜研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2016, 26(3): 69-76,77.
- [14] GOH P S, ISMAIL A F. A review on inorganic membranes for desalination and wastewater treatment [J]. Desalination, 2017. DOI:10.1016/j.desal.2017.07.023.
- [15] HU W, GAO C, SUN X. Research progress on materials of thermostable membranes [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(8): 10-15.
- [16] MEULENBERG W A, SCHULZE-KUEPPERS F, DEIBERT W, et al. Ceramic membranes: Materials-components-potential applications [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2019(8): 1091-1100.
- [17] 浙江省生态环境厅. 2019年浙江省生态环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-04)[2021-04-15]. <http://sthjt.zj.gov.cn/>

- art/2020/6/4/art_1201912_44956625.html.
- [18] 李欣红, 史咲岷, 马瑾, 等. 浙江省农田土壤多环芳烃污染及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1531–1540.
- [19] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2822–2833.
- [20] 王以森, 周胜利. 浙江省水体富营养化特征及防治对策[J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 170–178.
- [21] 丁楠, 沙晓军, 高颖会, 等. 1961–2010 年浙江省极端降水特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 104–107.
- [22] 方楠, 黄清瀚, 丁雨鑫, 等. 浙江省近 3a 气象类灾害预警信息特征[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(6): 1246–1250.
- [23] HONGYUAN L, LIYING Z, XIAOHE T, et al. Seasonal variation of bacterial community in biological aerated filter for ammonia removal in drinking water treatment [J]. Water Research, 2017, 123: 668 – 677. DOI: 10.1016/j. watres. 2017. 07. 018.
- [24] 朱从谋, 李武艳, 杜莹莹, 等. 浙江省耕地多功能价值时空变化与权衡-协同关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 263–272.
- [25] 陈永明, 王筱俊, 胡璇璇, 等. 浙江省饮用水水源资源建管模式与发展思考[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 61–63.
- [26] 丁亮. 南方地区农村供水管网漏损控制的应用研究[J]. 给水排水, 2018, 44(6): 115–118.
- [27] 陈丽艳. 供水企业智慧水务建设——以邯郸为例[J]. 净水技术, 2020, 39(1): 155–158.
- [28] 陈媛, 伍立志, 徐沛维, 等. 浙江省农村饮用水消毒效果及影响因素研究[J]. 预防医学, 2019, 31(10): 992–997.
- [29] 王浩, 张凯, 王晓爽, 等. 臭氧对陶瓷膜污染的控制及深度处理污水的效果[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 1–5.
- [31] MOKONE T P, HILLE R P V, LEWIS A E. Metal sulphides from wastewater: Assessing the impact of supersaturation control strategies[J]. Water Research, 2012, 46(7): 2088–2100.
- [32] 刘旭东, 何欧文, 陈艳红, 等. 骨碳诱导 HAP 结晶除磷的影响因素研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 944–951.
- [33] YU R, GENG J, REN H, et al. Struvite pyrolysate recycling combined with dry pyrolysis for ammonium removal from wastewater[J]. Bioresource Technology, 2013(2): 154–159.
- [34] DAI H L, LU X W, PENG Y H, et al. An efficient approach for phosphorus recovery from wastewater using series-coupled air-agitated crystallization reactors[J]. Chemosphere, 2016, 165: 211–220. DOI: 10.1016/j. chemosphere. 2016. 09. 001.
- [35] BERG U, DONNERT D, WEIDLER P G, et al. Phosphorus removal and recovery from wastewater by tobermorite-seeded crystallization of calcium phosphate [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2006, 53(3): 131–138.
- [36] DUAN J M, CAO Y L, HE B Y. Phosphates recovery through hydroxyapatite crystallization from wastewater using converter slag as a seed crystal [C]. Chengdu: 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2010.
- [37] SONG Y H, QIU G L, YUAN P, et al. Nutrients removal and recovery from anaerobically digested swine wastewater by struvite crystallization without chemical additions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 190(1–3): 140–149. DOI: 10.1016/j. jhazmat. 2011. 03. 015.
- [38] 蔡佳盛, 叶欣, 叶志隆, 等. 鸟粪石结晶流化床结构优化[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2092–2101.
- [39] PRIAMBODO R, TAN Y L, SHIH Y J, et al. Fluidized-bed crystallization of iron phosphate from solution containing phosphorus[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 80: 247 – 254. DOI: 10.1016/j. jtice. 2017. 07. 004.
- [40] MUNCH E V, BARR K. Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams [J]. Water Research, 2001, 35(1): 151–159.
- [41] SUZUKI K, TANAKA Y, KURODA K, et al. Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1573–1578.
- [42] SUZUKI K, TANAKA Y, KURODA K, et al. Recovery of phosphorous from swine wastewater through crystallization [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(14): 1544–1550.
- [43] WANG J S, YE X, ZHANG Z J, et al. Selection of cost-effective magnesium sources for fluidized struvite crystallization [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 70(8): 147–156.
- [44] GUAN W, JI F Y, CHEN Q K, et al. Phosphorus recovery using porous calcium silicate hydrate as seed crystal in form of hydroxyapatite [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(1): 43–49.
- [45] OKANO K, MIYAMARU S, KITAO A, et al. Amorphous calcium silicate hydrates and their possible mechanism for recovering phosphate from wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2015, 144: 63–69. DOI: 10.1016/j. seppur. 2015. 01. 043.

(上接第 25 页)