

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.019

电絮凝/陶瓷膜滤/UV消毒一体化设备处理雨水

陈苑晴¹, 郑柔洵¹, 吴子烨¹, 卢森¹, 王朝广², 陈章²,
杜星¹

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 通过构建太阳能驱动电絮凝+重力驱动陶瓷膜滤+紫外消毒的一体化雨水处理设备, 对模拟屋面雨水进行处理。结果显示, 太阳能光伏发电系统的产电量可完全满足该系统的运行需求。在长期运行中, 该系统对浊度、总磷、UV₂₅₄、氨氮、COD_{Mn}等具有良好的去除效果, 其中, 浊度、总磷、氨氮去除率接近100%。在电絮凝预处理的作用下, 重力驱动陶瓷膜滤面生物净水层孔隙率增加, 产水效能提高, 且在系统暂停运行90 d后, 陶瓷膜面生物净水层的微生物仍保持良好的生存状态, 重启后能够在维持高效率去除氨氮的同时保持稳定的膜通量, 这一优异性能匹配了雨水的间歇性降水和水量不稳定性的特征。通过紫外消毒系统可有效杀灭膜滤出水残留细菌, 进一步提高出水的微生物安全性。此外, 该装置全程结合太阳能和屋面距离地面的重力势能作为驱动力净化雨水, 节约能耗, 可为分散式屋面雨水收集利用提供技术支撑。

关键词: 屋面雨水; 电絮凝; 太阳能; 重力驱动陶瓷膜

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0131-06

Electrocoagulation, Ceramic Membrane Filtration and UV Disinfection Integrated Equipment for Rainwater Treatment

CHEN Yuan-qing¹, ZHENG Rou-xun¹, WU Zi-ye¹, LU Sen¹, WANG Chao-guang²,
CHEN Qin², DU Xing¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co. Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The construction of an integrated rainwater treatment system, featuring solar-driven electrocoagulation combined with gravity-driven ceramic membrane filtration and ultraviolet disinfection, was undertaken to treat simulated roof rainwater. The solar photovoltaic power generation system could fully satisfy the operational requirements of the system. The system demonstrated excellent long-term performance in removing indicators such as turbidity, total phosphorus, UV₂₅₄, ammonia nitrogen and COD_{Mn}, with removal rates for turbidity, total phosphorus, and ammonia nitrogen approaching 100%. Through electrocoagulation pretreatment, the porosity of the biological purification layer on the gravity-

基金项目: 广东省科学技术协会青年科技人才培养计划项目(SKXRC202406); 国家自然科学基金面上基金资助项目(52170070)

通信作者: 杜星 E-mail: hitduxing@163.com

driven ceramic membrane surface was increased, leading to improved water production efficiency. Furthermore, even after a 90-day system suspension, the microorganisms in the biological purification layer on the ceramic membrane surface maintained a robust living state and sustained stable membrane flux with high efficiency in ammonia nitrogen removal upon restart. This outstanding performance aligned with the intermittent precipitation and fluctuating rainwater quantity characteristics. The UV disinfection system was capable of effectively eradicating residual bacteria in the effluent from the membrane filtration, thereby enhancing the microbial safety of the effluent. Furthermore, the system harnessed both solar energy and gravitational potential energy from the rooftop to the ground as a driving force for rainwater purification, reducing energy consumption and offering technical support for decentralized collection and utilization of rainwater on rooftops.

Key words: roof rainwater; electrocoagulation; solar energy; gravity-driven ceramic membrane

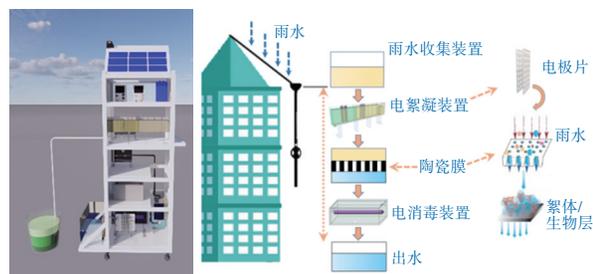
雨水经收集处理后,可回用为生活杂用水,通常采用屋顶、庭院、道路、广场和停车场等作为雨水收集面^[1]。根据雨水水质和回用目的选择合适的处理技术,在确保用水安全可靠的情况下,提高整个雨水收集利用系统的经济效益和便捷性,可达到削减地表径流和节约水资源的目的。

近些年,低能耗运行的重力驱动膜过滤系统被逐渐应用到分散式水处理中,且得到了越来越多的关注^[2]。课题组前期在重力驱动膜滤系统前设置电絮凝预处理单元,用于提高系统的净水效率和去除污染物的能力,提升产水效率^[3]。特别是电驱动方法具有潜在利用太阳能的优势,可有效节约能源,实现清洁生产^[4-5]。但是有机材质微滤膜构建的重力驱动膜生物反应器的产水效能仍然受限,而陶瓷膜具有机械性能稳定、产水性能高等特点,可以弥补这一缺陷^[6]。此外,为增强膜滤出水的微生物安全性,对微滤膜出水可以设置消毒设施^[7]。利用紫外线对膜出水进行消毒处理,消毒反应池构造简单,无其他消毒副产物的生成,具有消毒效果显著、技术成熟、安全可靠的特点。然而,目前尚未见电絮凝预处理+重力驱动陶瓷膜系统+紫外消毒相结合的屋面雨水处理系统的研究报道^[3]。鉴于此,笔者构建了太阳能产电驱动电絮凝+重力驱动陶瓷膜滤+紫外消毒的一体化雨水处理设备,在评估太阳能产电供电效率的同时,考察了一体化系统在长期运行过程中的净水效能和产水效率,旨在为分散式屋面雨水的收集利用提供理论依据和技术支撑。

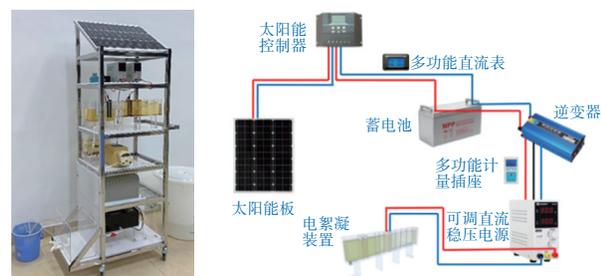
1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置由太阳能产电驱动的电絮凝系统、重力势能驱动的陶瓷膜滤系统以及紫外消毒装置组成,装置的三维图及运行原理见图1(a),装置实物图及太阳能光伏发电系统连接原理见图1(b)。



a. 装置三维图及运行原理



b. 装置实物图及太阳能光伏发电系统连接原理

图1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

实验装置采用单晶55 W太阳能板,尺寸为530 mm×640 mm×25 mm,配备一台12 V、24 A·h蓄电池以及一台12 V转220 V的逆变器,功率为300 W;采用60 V/3 A直流稳压可调电源为电絮凝反应池供

电,采用铁片作为电絮凝电极片,尺寸为125 mm×53 mm×1.5 mm,表面开有21个直径为6 mm的小孔;紫外消毒系统采用潜水式紫外线消毒灯,长为30 cm,功率为6 W。

膜池液面与出水后缓流池的液面高差为陶瓷膜运行过程中的跨膜压差,根据前期对陶瓷膜工作压力的大量研究^[3,7],重力式陶瓷膜运行过程中的跨膜压差采用0.5 m(1 m水柱压强约为9.8 kPa),其他反应池高度无具体要求,可根据实际需求灵活变动。本实验装置实际高度为1.6 m,安装太阳能板后高为1.85 m,低于单层建筑的屋面高度,可通过重力实现屋面雨水膜滤,具有良好的适用性。

1.2 实验方案

1.2.1 太阳能产电利用适配性研究

结合电絮凝及紫外消毒装置的用电需求,构建小型太阳能产电蓄电光伏电池系统,利用蓄电池进行电能储存并通过逆变器转换电压至220 V,同时结合电絮凝技术的运行特性,采用可调直流稳压电源进行电流输出,以保证系统稳定运行。

1.2.2 装置净水特性研究

实验原水为模拟屋面雨水,其具备典型的屋面雨水水质特征^[3,6-7]。将自来水静置24 h以上以脱除余氯,然后加入高岭土以模拟实际雨水中的总悬浮固体,再加入一定量腐殖酸、醋酸钠、硝酸钾、氯化铵、磷酸二氢钾、重铬酸钾、硫酸亚铁、三氯化铝、硫酸锰、硝酸锌、硝酸铜、氯化钙等,以模拟实际雨水水质。

实验所需的各装置按不同高度放置,用于模拟屋面雨能,充分利用屋面高差实现雨水重力流动,利用潜水泵将原水输送至电絮凝装置,模拟屋面雨水流入絮凝池的过程。首先,在电絮凝池中,电极表面电解出的铁离子,通过池中设置的导流板 and 不同孔径铁片,利用不同的水力条件产生絮凝作用;随后,经电絮凝预处理后的混合液进入膜池,随着运行时间的延长在膜面形成生物净水层,利用雨水本身重力促使膜过滤出水;膜出水依靠重力流入紫外消毒系统,经消毒后出水储存于清水池。

装置运行过程中,测定进水和出水的浊度、总磷、UV₂₅₄、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、COD_{Mn}等常规水质指标以及细菌总数,同时监测膜通量及水温的变化,对电絮凝产生的絮体粒径进行测定,并在实验结束后对生物膜表面形貌进行扫描分析。

1.3 检测指标与分析方法

1.3.1 常规水质指标分析方法

装置运行期间,每隔2 d从原水及膜出水中取水样进行基础水质指标检测分析,包括浊度、总磷、UV₂₅₄、氨氮、硝态氮、亚硝态氮等,COD_{Mn}每隔5 d检测一次。浊度采用HACH 2100Q浊度仪测定,其余水质指标均采用国家标准方法测定。

1.3.2 膜通量测试

测定1 min内从膜池流入量筒的水量,据此确定膜出水通量。膜通量可根据下式计算:

$$J_w = \frac{\Delta V}{A_m \Delta t} \quad (1)$$

式中: J_w 为膜出水通量,L/(m²·h); ΔV 为一定时间内收集的膜出水体积,L; A_m 为膜滤有效面积,m²; Δt 为膜出水收集时间,h。

1.3.3 其他指标检测方法

采用涂布平板法检测细菌总数以评判装置出水的微生物安全性。电絮凝絮体粒径采用马尔文粒度分析仪进行测定。生物膜的表面形貌特征和微观结构采用扫描电子显微镜-X射线能谱分析仪(SEM-EDS)进行分析。

2 结果与讨论

2.1 太阳能的产电效能

在太阳能板与蓄电池之间连接一个多功能直流表,每天在18:30左右记录该表显示的数据,共对太阳能光伏发电系统的每日产电量进行了一个月的统计。另外,在电絮凝装置和电源之间加入一个多功能计量插座,以记录电絮凝装置的用电量,每日开启电絮凝装置至耗电1 W·h时停止,测量出此时的电絮凝产水量并记录。

太阳能光伏系统产电量与电絮凝装置产水量的关系可根据以下公式^[6]得到:

$$V = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 W}{60P} q \quad (2)$$

式中: V 为产水量,L; ε_1 为蓄电池电能转换效率; ε_2 为逆变器电能转化效率; ε_3 为可调直流稳压电源的工作效率; W 为太阳能板的发电量,W·h; P 为可调直流稳压电源的功率,W; q 为电絮凝装置进水量,L/min。

在本研究中,太阳能光伏系统产电量与电絮凝装置产水量的关系如图2所示。太阳能光伏发电系统主要受天气影响,在运行监测时间段内,太阳能

板每日产电量为 12.02~44.7 W·h,其对应的处理水量为 17.67~65.72 L。为了提升系统产水效率,可以通过增加太阳能板面积和陶瓷膜面积,进而适配对应的用水量。总体而言,该系统供电稳定,可满足电絮凝的用电需求且具有较强的适配性。

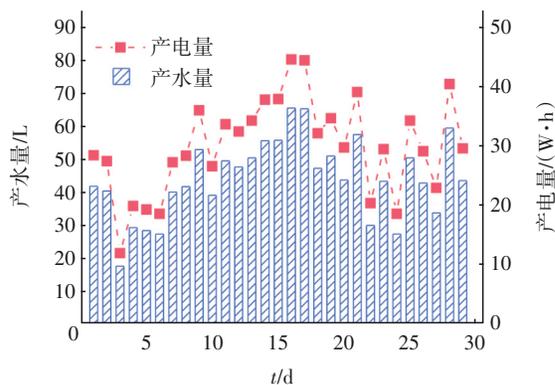


图2 产水量与太阳能供电量的关系

Fig.2 Relationship between water production and solar power supply

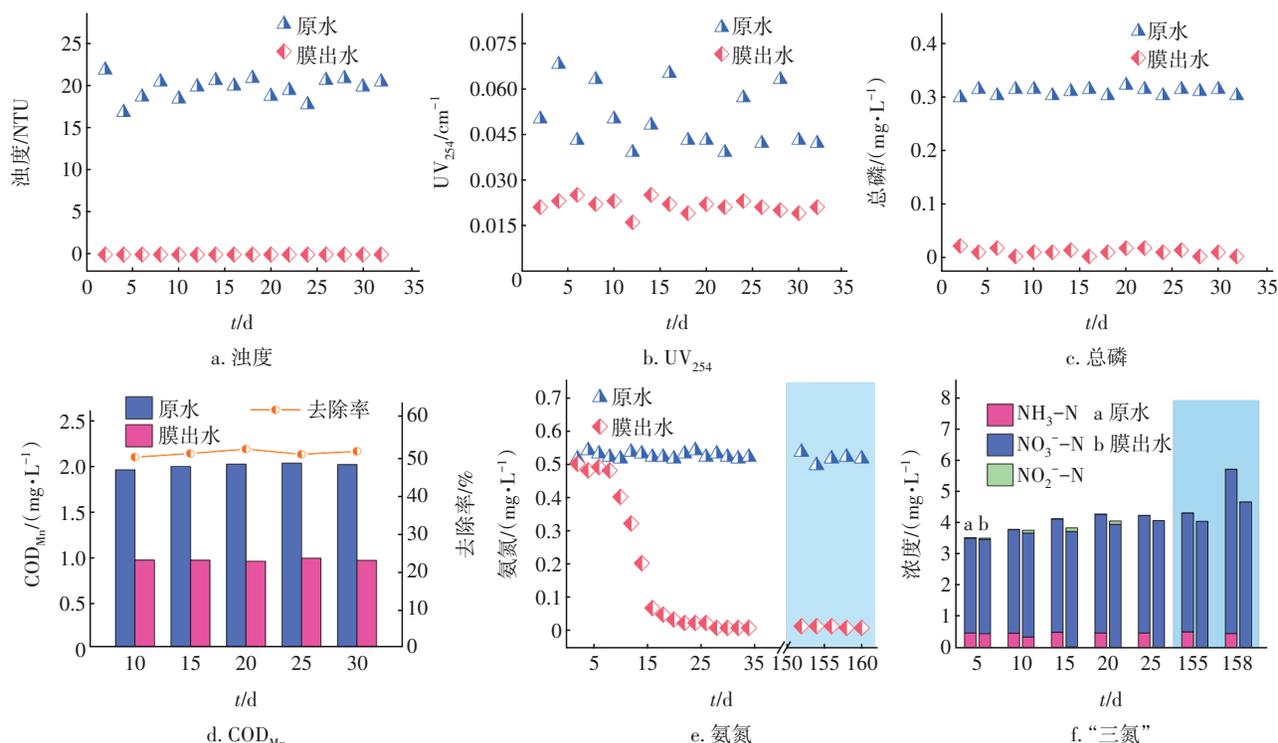


图3 电絮凝耦合陶瓷膜滤系统的净水效能

Fig.3 Rainwater purification efficiency of electrocoagulation coupled ceramic membrane filtration system

装置进水 COD_{Mn} 浓度基本维持在 2 mg/L 左右,除在膜面生物净水层中部分降解外,电絮凝预处理中大量有机物可被凝结和沉淀,经处理后,膜出水 COD_{Mn} 浓度约为 0.97 mg/L,去除率基本维持在 51.6% 左右。进水中氨氮的去除主要依靠陶瓷膜

2.2 电絮凝耦合陶瓷膜滤系统的净水效能

电絮凝耦合陶瓷膜滤系统的净水效能见图 3。可以看出,系统对模拟雨水的浊度、有机物、氮、磷等具有良好的去除效果。进水浊度在 16.76~21.76 NTU 之间,膜出水浊度全部降至 0.01 NTU,重力式陶瓷膜可实现对雨水中颗粒物的有效拦截。进水 UV_{254} 在 0.039~0.075 cm^{-1} 之间波动,而膜出水 UV_{254} 较稳定,平均值为 0.021 cm^{-1} ,表明该装置对腐殖质类有机物具有良好的去除效果。系统运行期间表现出良好的除磷性能,进水总磷浓度约为 0.3 mg/L,经处理后,膜出水总磷浓度下降明显,基本保持在 0.01 mg/L 左右。其除磷原理是,在电絮凝体系中阳极电解产生 Fe^{2+} ,与 PO_4^{3-} 形成不溶性磷酸盐沉淀,此外 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 在碱性条件下的水解产物也可以吸附和去除磷。总而言之,电絮凝预处理对磷的混凝、吸附和沉淀效果较好,而重力式陶瓷膜对絮体和沉积物的捕集效果较好,因此除磷效果显著^[3,7]。

面生物净水层,在运行后的 16 d 内,氨氮出水浓度从进水的 0.5 mg/L 逐渐下降至 0.07 mg/L。由于在运行前期,生物膜还未形成,对氨氮无明显的去除效果,随着时间的延长,生物膜逐步形成,对氨氮的去除效果日益增强^[3]。因为实验环境温度较低导致

微生物生长繁殖较为缓慢,直至运行22 d后,膜出水氨氮浓度下降至0.01 mg/L,才基本实现对氨氮的完全去除。但是暂停运行90 d后再次重启实验发现,微生物仍旧处于良好的生长状态,对进水中的氨氮仍具有良好的去除效果,氨氮出水浓度仍可降至0.01 mg/L,这主要缘于生物净水层中存在的硝化细菌(如*Nitrospira*)^[6-8]。“三氮”浓度的变化如图3(f)所示,实验运行前中期,氨氮经硝化作用后主要以亚硝态氮形式存在,随着装置继续运行,硝化程度提高,水中的氮主要以硝态氮形式存在;之后膜出水总氮逐步低于原水,这主要是由于生物净水层具有一定的反硝化作用。

2.3 电絮凝耦合陶瓷膜滤系统的产水效能

装置运行过程中膜通量的变化如图4所示。重力驱动膜滤系统的压力水头为0.5 m,装置初始运行通量为90 L/(m²·h),随后40 d内膜通量持续下降,尤其在前10 d膜通量下降迅速,10~15 d由于气温的回升引起了膜通量的短暂升高,在此之后的15~50 d内,重力驱动膜滤系统的通量下降速度减缓并逐渐趋于稳定,最后阶段膜通量稳定维持在12~15 L/(m²·h)。出现这种情况的原因是,系统运行前期大量絮体沉积至陶瓷膜表面,导致膜通量的迅速下降,但随着运行时间的延长,膜表面的微生物层开始形成并逐渐稳定。

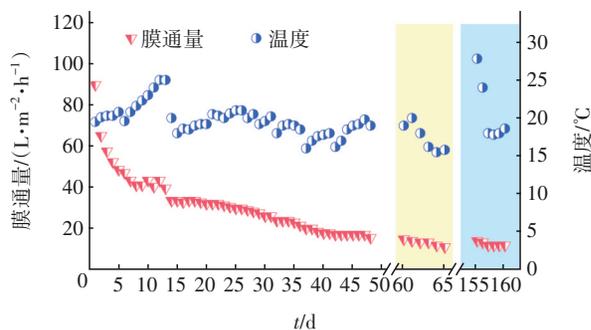


图4 膜通量的变化

Fig.4 Change of membrane flux

通过分析,最终的稳定通量相较于其他无预处理的陶瓷膜过滤系统的运行通量更高,这是由于电絮凝产生絮体的网捕卷扫作用,大量游离细菌沉积到生物净水层,增强了净水效能^[3,6];同时,絮体(中位粒径约为110 μm)使陶瓷膜表面生物净水层的孔隙率增加,进而增加产水通量。经过90 d的暂停运行后,再次重启,膜通量基本维持在12 L/(m²·h)左右,与暂停前一致,在此期间,重力驱动陶瓷膜滤系

统未经清洗和反洗,且未排放污泥^[3]。

随着实验装置长期运行,陶瓷膜表面的生物膜会出现老化脱落的现象。实验中发现,一部分生物膜脱落后,另一部分生物膜对有机物仍有良好的去除效果。同时,由于絮体对游离细菌的网捕卷扫作用,膜表面也会很快形成一层新的生物膜。因此,部分生物净水层的脱落不会对反应器出水水质造成影响。随着絮体的沉积以及生物膜的新陈代谢,可每隔半年对膜池进行一次排泥。

2.4 陶瓷膜表面生物净水层的形貌特征

运行180 d后,将陶瓷膜取出并自然风干,然后在陶瓷膜表面取下几片生物净水层进行SEM-EDS分析。利用SEM对生物净水层的上表面和截面进行表征,结果显示,陶瓷膜表面形成的生物净水层结构比较粗糙,生物净水层表面存在相对较大的颗粒,进一步说明絮体的沉降使得生物膜呈现出疏松多孔的形态,此形态结构不易堵塞膜孔,因此可以使膜通量保持稳定;另外观察到,由于絮体的沉降,生物净水层的厚度达到了2.30 mm。生物净水层的EDS分析结果显示,该净水层上存在大量构成有机化合物的元素,主要为C、O和N,可能来自微生物的新陈代谢以及陶瓷膜对水中有机物的截留;Fe、Cr、Cu等无机元素也存在于生物膜中,证明了电絮凝强化的陶瓷膜表面净水层具有去除痕量金属的能力^[3]。同时,前期研究表明,生物净水层中含有大量多糖、蛋白质及微生物成分,说明生物净水层中的生物作用活跃,会产生胞外聚合物^[3,7]。

2.5 太阳能供电紫外消毒的性能

实验装置对细菌的去除效果如图5所示。受天气和温度影响,进水中的细菌总数变化较大,3次细菌总数检测平均值为4.16×10⁴ CFU/mL,经电絮凝处理后,细菌总数略微下降,再经重力式陶瓷膜过滤后,细菌总数继续下降,3次检测平均值为8 467 CFU/mL。膜池出水在稳流水箱中储满后流入紫外消毒池,同时开启紫外灯,待消毒池装满水后,在该池内停留5~10 min,然后流入清水池。取此时的出水进行细菌总数检测,结果显示细菌总数下降至400~500 CFU/mL。与前期研究^[7,9]所使用的电氧化消毒工艺相比,紫外消毒的停留时间较短,对细菌的去除率超过95%。该一体化设备可以根据中水回用相关标准(如冲刷、洗涤、浇灌、景观用水和消防用水等),改变紫外消毒接触池的水力停留时间,

来灵活控制出水效果。同时,紫外灯的能耗可通过太阳能发电的蓄电池提供,进而节约能耗。

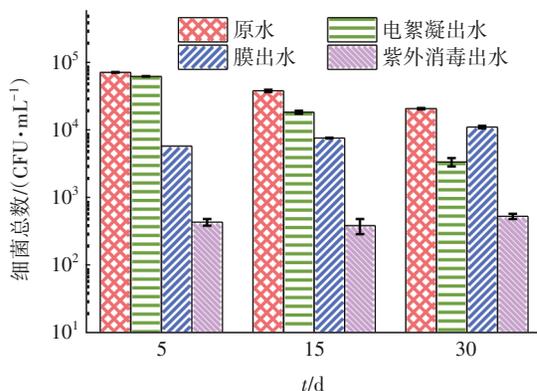


图5 一体化设备对细菌的去除效果

Fig.5 Removal effect of bacteria in integrated equipment

3 结论

① 利用太阳能和屋面雨能作为驱动力,构建电絮凝耦合陶瓷膜滤+紫外消毒的一体化雨水处理设备。太阳能光伏发电系统产电稳定,可基本满足系统中电絮凝和紫外消毒模块的用电需求,且无需外加化学药剂,具有节省能耗、绿色环保和方便运行管理的特点,有利于雨水资源的收集利用。

② 一体化设备对雨水中浊度、磷、氮、有机物等具有良好的去除效果,其中浊度、总磷、氨氮去除率接近100%。紫外消毒对膜出水具有优良的杀菌效果,经消毒处理后水中的细菌总数大幅降至400~500 CFU/mL,即使在长期运行中也能达到城市杂用水的使用标准。

③ 系统运行过程中,陶瓷膜表面形成的生物净水层具有去除污染物的作用,减少了膜前污染,并且生物净水层结构疏松多孔,因此不易堵塞膜孔,从而使得膜通量在系统长期运行中仍能保持稳定,通量维持在12 L/(m²·h)左右。

参考文献:

- [1] 尚淑丽. 屋面雨水雨能联合利用及电絮凝试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
SHANG Shuli. Study on the Co-use of Roof Rainwater & Rain Energy and Electrocoagulation Experiment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese).
- [2] PRONK W, DING A, MORGENROTH E, *et al.* Gravity-driven membrane filtration for water and wastewater treatment: a review [J]. *Water Research*,

2019, 149: 553-565.

- [3] XU J J, DU X, ZHAO W T, *et al.* Roofing rainwater cleaner production using pilot-scale electrocoagulation coupled with a gravity-driven membrane bioreactor (EC-GDMBR): water treatment and energy efficiency [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128055.
- [4] CHA-UMPOONG W, LI Q Y, RAZMJOU A, *et al.* Concentrating brine for lithium recovery using GO composite pervaporation membranes [J]. *Desalination*, 2021, 500: 114894.
- [5] OTTER P, SATTTLER W, GRISCHEK T, *et al.* Economic evaluation of water supply systems operated with solar-driven electro-chlorination in rural regions in Nepal, Egypt and Tanzania [J]. *Water Research*, 2020, 187: 116384.
- [6] DU X, ZHAO W T, WANG Z, *et al.* Rural drinking water treatment system combining solar-powered electrocoagulation and a gravity-driven ceramic membrane bioreactor [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 276: 119383.
- [7] DU X, WANG Z, LIU Y, *et al.* Gravity-driven membrane bioreactor coupled with electrochemical oxidation disinfection (GDMBR-EO) to treat roofing rainwater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131714.
- [8] WANG Z H, WU Z K, ZHI X J, *et al.* TiO₂/CTS/ATP adsorbent modification and its application in adsorption-ultrafiltration process for dye wastewater purification [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(42): 59963-59973.
- [9] 刘立凡, 王震, 赵文涛, 等. 屋面雨能驱动微滤膜池耦合电氧化消毒处理雨水 [J]. *环境工程*, 2021, 39(3): 14-21, 28.
LIU Lifan, WANG Zhen, ZHAO Wentao, *et al.* Utilizing roof rainwater energy to drive microfiltration membrane coupled with electro-oxidation disinfection to treat rainwater [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(3): 14-21, 28 (in Chinese).

作者简介:陈苑晴(2001-),女,广东惠州人,硕士研究生,研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: unicyque@163.com

收稿日期:2024-01-02

修回日期:2024-04-26

(编辑:刘贵春)