

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.17.008

新型重力驱动免清洗超滤膜设备处理山涧水的效能

向帆^{1,2}, 李明¹, 马宗凯^{1,2}, 张鹏³, 吴晓芝³, 彭炯焱³,
张振宁^{1,2}

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611100; 2. 四川省城市水环境治理工程技术研究中心, 四川 成都 611100; 3. 成都天源水务有限责任公司, 四川 成都 611100)

摘要: 针对村镇供水存在水质波动大、传统工艺依赖药剂、膜工艺清洗频繁的难题,研发了一种基于新型聚偏氟乙烯(PVDF)超亲水膜的重力驱动免清洗净水设备。该设备采用“多级预处理+重力流超滤”短流程,摒弃了絮凝剂与化学清洗药剂。在为期6个月、规模为100 m³/d的山涧水源中试过程中,原水浊度在2~1 500 NTU之间波动,设备表现出优异的抗冲击性与稳定性,出水浊度稳定在0.3 NTU以下,微生物指标完全达标。核心膜系统仅依靠每日自动气洗,跨膜压差稳定低于5.0 kPa,实现了长期“免化学清洗”运行。系统电耗仅为0.035 kW·h/m³,产水率达98.5%。该设备通过超亲水膜材料与“重力驱动+气洗维护”模式的创新结合,为偏远地区提供了低碳、高效、运维简便的饮用水处理解决方案。

关键词: 村镇供水; 超滤; 重力驱动; 免清洗

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)17-0055-06

Performance of a Novel Gravity-driven and Chemical Cleaning-free Ultrafiltration Membrane Device in Treating Mountain Stream Water

Xiang Fan^{1,2}, Li Ming¹, Ma Zongkai^{1,2}, Zhang Peng³, Wu Xiaozhi³,
Peng Jiongyan³, Zhang Zhenning^{1,2}

(1. PowerChina Chengdu Engineering Co. Ltd., Chengdu 611100, China; 2. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Municipal Water Environment Treatment, Chengdu 611100, China; 3. Chengdu Tianyuan Water Co. Ltd., Chengdu 611100, China)

Abstract: To address the challenges in rural water supply, including significant fluctuations in raw water quality, dependence on chemical agents in conventional treatment processes, and the high energy consumption associated with frequent cleaning in membrane technologies, this study developed a gravity-driven, chemical cleaning-free water purification device based on a novel PVDF super-hydrophilic membrane. The device employs a short process integrating “multi-stage pretreatment and gravity-flow ultrafiltration”, eliminating the need for coagulants and chemical cleaning agents. During a six-month pilot test with a capacity of 100 m³/d using a mountain stream source, the influent turbidity fluctuated between 2 NTU and 1 500 NTU. The device demonstrated excellent resistance to shock loads and operational stability: the effluent turbidity remained consistently ≤0.3 NTU, and all microbial indicators met the required standards. The core membrane system, relying solely on daily automatic air scrubbing for maintenance, maintained a stable transmembrane pressure below 5.0 kPa, achieving long-

term “chemical cleaning-free” operation. The system’s specific energy consumption was only $0.035 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, with a water recovery rate of 98.5%. Through the innovative integration of super-hydrophilic membrane materials with the “gravity-driven and air-scouring maintenance” mode, this research provides a low-carbon, efficient, and easily maintainable drinking water treatment solution for remote areas.

Keywords: rural water supply; ultrafiltration; gravity drive; chemical cleaning-free

保障农村饮水安全是全面推进乡村振兴、建设宜居宜业和美乡村的基础性工程^[1]。然而,我国广大村镇地区,特别是中西部山区、丘陵地带,供水设施普遍面临水源分散、水质波动剧烈(如季节性高浊度、微生物风险)、加药难精准、专业运维力量薄弱等多重挑战^[2]。传统的小型集中式供水站多采用“混凝-沉淀-砂滤-消毒”工艺,其处理效果严重依赖絮凝剂的精确投加,在农村现实管理条件下常因加药不当导致出水水质不稳定,甚至存在铝盐残留超标的风险^[3]。膜分离技术特别是超滤技术,因其高效的物理截留能力、稳定的出水水质和紧凑的模块化设计,已成为村镇安全供水领域的重要发展方向^[4]。

基于此,本研究团队成功研制了一种基于新型聚偏氟乙烯(PVDF)改性超亲水膜材料的重力驱动一体化净水设备——新型免清洗超滤膜净水设备。该技术的核心创新在于将具有超亲水、高强度特性的新型膜材料与“多级预处理屏障+重力流过滤+气动擦洗”的短流程工艺相结合,旨在从根本上摒弃絮凝剂和化学清洗药剂的使用,并大幅降低系统能耗。为验证该设备在实际复杂水源条件下的长期运行效能、稳定性和经济性,在四川省典型山涧水水源地开展了规模为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的现场中试,考察了净化效果、膜污染控制特性、运行能耗及成本,以期为该技术的工程化推广提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备与工艺原理

1.1.1 核心膜材料

中试设备的核心过滤单元采用由哈尔滨工业大学与吉林市润成膜科技有限公司联合生产的产品——新型PVDF改性超亲水膜材料,它以高强度涤纶编织管为内衬,通过特定的表面活化技术和表面化学接枝技术,在PVDF基质中引入永久性亲水链段,形成永久亲水表面,制备成中空纤维膜形式。该亲水材料具有良好的生物稳定性和化学稳定性,

亲水基团和膜材料的使用寿命可达10年以上(厂家提供质量保证承诺)。该超滤膜的关键物化性能参数如下:平均孔径为 $(0.072\pm0.012) \mu\text{m}$,纯水接触角为 $21^\circ\sim24^\circ$,断裂强度为 $4.0\sim5.5 \text{ cN/dtex}$,膜丝内径和外径分别为 $1.8、2.0 \text{ mm}$ 。与国内外主流商业超滤膜相比,该膜材料的特征在于极低的静态水接触角($<25^\circ$),赋予了膜丝超亲水性^[5]。

1.1.2 工艺流程与设备构成

中试设备采用模块化设计,主体工艺为“预处理罐+重力式超滤膜过滤+末端消毒”,其工艺流程如图1所示。原水(山涧水)在重力的作用下首先进入预处理系统,该系统是一个直径为 1.91 m 、高为 6.00 m 的圆柱形不锈钢罐,采用“三相分离器+环形斜板沉淀+纤维滤布”的耦合沉淀粗滤工艺。罐内自下而上依次设置三相分离器、环形斜管沉淀区和纤维滤布过滤单元。三相分离器通过交叉挡板实现气、液、固的初步分离^[6];斜管沉淀区基于“浅池理论”大幅提升沉降效率^[7];顶部的纤维滤布作为终端屏障,进一步截留悬浮物。该预处理单元旨在不投加任何絮凝剂的情况下,将高浊度进水稳定在超滤膜可耐受的负荷范围。罐体采用下进上出的运行方式,24 h连续运行,同时配置有自动排泥放空设施,可根据实际情况周期性自动排泥,并通过排泥的反向水流自清洗斜板和滤布。

预处理出水自流进入超滤膜系统,该系统由一个超滤膜箱和一个设备间组成。超滤膜箱采用不锈钢材质,PVDF超亲水膜组件及配套阀门均集成在膜箱内,总有效膜面积约为 300 m^2 。膜过滤的驱动力完全来源于进水与产水之间的重力势能,无需任何抽吸或加压水泵,设计运行跨膜压差为 $0.001\sim0.005 \text{ MPa}$ 。超滤膜采用恒通量运行模式,通过设备进水调节阀稳定进水流量,超滤膜出水管采用虹吸管方式布置,最高点与超滤膜组上侧齐平并设置真空破坏阀,出水水位即为固定值,则过滤的驱动力仅来自进出水水位的自然高差,随着跨膜压差的

增大,水位差增大。产水经次氯酸钠消毒后进入清水池。设备间作为工作站,集成消毒、气洗、供电、

自控仪表及监控安防系统,辅助处理设备的生产控制。

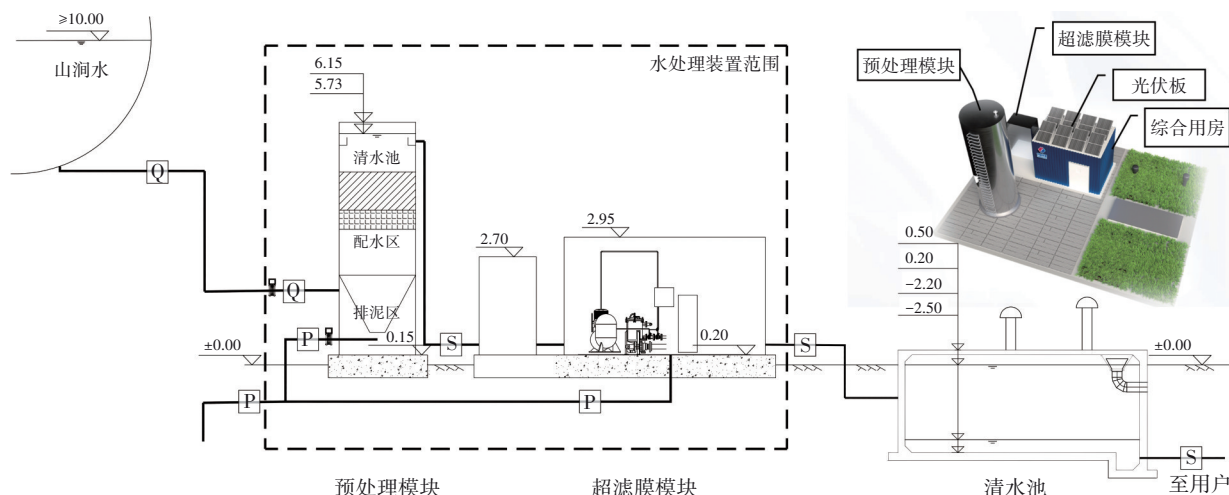


图1 中试设备工艺流程

Fig.1 Process flow of pilot equipment

系统的创新性维护方式在于其气洗工艺。膜污染控制通过一套独立的压缩空气系统实现,该系统包括一台1.7 kW空压机和一个1 000 L储气压力罐。运行中,PLC控制系统按照预设周期(为可调参数)自动触发“气洗-排泥”程序:短暂停止产水后,开启膜箱底部的排泥阀,随后以0.6~0.8 MPa的压缩空气从膜丝外侧进行曝气擦洗,利用空气的搅动和水力剪切力剥离膜表面污染物,最后随排泥水一并排出系统。整个过程无需使用化学清洗药剂(酸、碱、氧化剂),也无需反冲洗水泵和反冲洗水箱,实现了真正的“免化学清洗”。

1.1.3 中试设备的主要设计参数

中试设备设计处理规模为100 m³/d,预处理系统的设计上升流速为1.45 m/h,设计进水浊度上限为3 000 NTU。超滤膜系统的设计产水通量为15 L/(m²·h),运行水头为0.5 m,膜组件为4组并联,设计产水浊度≤0.3 NTU,气洗压力为0.6~0.8 MPa,气洗流量为40 L/(m²·min),气洗/排泥周期为1~15 d(可调)。系统采用可编程逻辑控制器(PLC)控制自动运行。采用商品次氯酸钠消毒,投加量为0.5~1.0 mg/L。

1.2 中试场地与水源

中试选址于四川省崇州市文井江镇某山区村落。该地区属亚热带湿润季风气候,雨量充沛,季节性降雨特征明显。试验水源为典型的山涧溪流,

水质受降雨影响波动剧烈^[8],是考验设备抗冲击负荷能力的理想条件。在为期6个月(涵盖丰水期与枯水期)的试验期内,对进水水质进行了定期监测。受地理位置及气候条件的影响,雨季短时间内浊度可达到1 500 NTU以上,pH为7.0~7.4,高锰酸盐指数为1.1~3.0 mg/L,氨氮为0.027~0.050 mg/L,铁离子和锰离子均在检出限以下,总大肠菌群为1 200~9 000 CFU/100 mL,其他理化指标均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准。

1.3 试验方案与检测方法

1.3.1 运行方案

设备安装调试完成后,进行连续30 d的稳定运行调试,旨在优化气洗周期、排泥时长等参数,随后进入为期6个月的中试性能评估期,设备全程处于全自动无人值守运行模式,通过PLC控制程序自动执行产水、气洗、排泥、加药等所有流程,远程监控平台实时采集并存储流量、压力、浊度、液位等关键运行数据。试验期间,除非设备自动报警,否则不进行任何人工化学清洗或物理擦洗,以严格验证“免清洗”的可行性。

1.3.2 分析项目与检测方法

为全面评估设备效能,对进出水水质、膜性能及运行经济性进行监测。每周至少采集一次进出水及预处理罐上取样口水样进行分析。其中,浊度采用WZB-172便携式浊度仪检测;微生物指标包括

菌落总数和总大肠菌群,分别采用《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2—2022)中的平板计数法和纸片法测定。

膜性能指标包括跨膜压差、膜通量和产水率。其中,跨膜压差通过调节产水管路的出水液位高度进行控制,其数值通过测量膜组件进水侧与产水侧之间的水柱静压差直接获得;膜通量是指单位时间内通过单位膜面积的产水量,由安装在产水管路上的电磁流量计(精度:±0.5%)实时记录产水流量,经过计算得到膜通量;产水率是指在一定运行时间内,累计产水量占累计进水量百分比。

系统的运行能耗通过安装在总配电柜的电表进行实时监测。该电表用于计量整套装置(含PLC、空压机、消毒单元、仪表等全部用电设备)的日耗电量。为消除产水量差异带来的影响,采用单位水量电耗(E_w)作为评价系统能效的关键指标^[9]。

2 结果与讨论

2.1 对浊度的去除效能

在为期6个月的中试期间,设备经历了从枯水期低浊度到丰水期高浊度剧烈冲击的完整水文周期考验,进水浊度波动范围极大(2~1 500 NTU),雨季期间原水浊度显著升高,其瞬时峰值多次达到1 500 NTU。然而,超滤膜系统出水浊度始终稳定在0.3 NTU以下(见图2),满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中浊度≤1 NTU的要求。这充分证明了“预处理+超滤”工艺组合的可靠性。预处理单元作为关键缓冲,对高浊度进水(>500 NTU)的平均去除率达到60%以上,将膜系统进水浊度稳定在较低水平,极大缓解了膜的瞬时负荷,超滤膜则作为终极屏障,确保了出水浊度的稳定。

在不同进水浊度条件下,进一步监测了预处理罐不同高度处的浊度情况。当进水浊度为3.2 NTU时,预处理罐1.0、1.5、3.0、4.0 m高度处的浊度分别为1.8、3.0、2.0、2.8 NTU;当进水浊度为155.8 NTU时,预处理罐各高度处的浊度分别为105.3、110.2、100.3、76.5 NTU;当进水浊度为1 480.2 NTU时,预处理罐各高度处的浊度分别为1 220.5、1 005.4、625.1、425.3 NTU。可见,预处理单元对较高浊度进水的去除效果较好,去除率达到75%,而对较低浊度的进水几乎没有去除效果。预处理单元对浊度的去除是通过自然沉降以及纤维滤布过

滤,在高浊度进水时,水中的颗粒粒径和颗粒密度较大,它们在预处理单元内部的三相分离器和环形斜板中发生“拥挤沉降”^[10],相互裹挟着一起沉到底部,同时纤维滤布对大颗粒杂质具有很好的截留效果,因此预处理单元能有效降低高浊度进水的浊度。而在进水浊度较低时,水中颗粒以胶体为主,由于未投加絮凝剂,胶体在整个预处理过程中均处于稳态,无法有效沉降,由于粒径较小也无法被纤维滤布有效截留,因此预处理单元对低浊度进水几乎没有去除效果。由此可见,预处理单元对高浊度进水的高效去除,能有效降低后续超滤膜的负荷,提高超滤膜的运行稳定性。

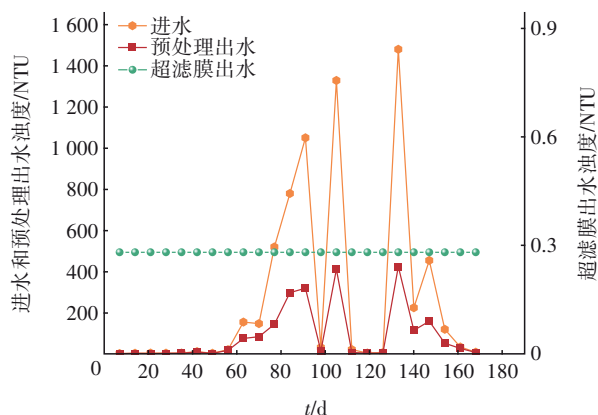


图2 中试设备对浊度的去除效能

Fig.2 Turbidity removal efficiency of pilot equipment

2.2 微生物安全性保障效能

微生物安全性是饮用水处理的核心目标。中试期间对进出水进行了24组平行样检测,进水菌落总数在30~850 CFU/mL范围内波动,总大肠菌群为1 200~9 000 CFU/100 mL;经设备处理后,出水菌落总数降至1~8 CFU/mL,总大肠菌群降至0~9 CFU/100 mL,去除率均大于99%。这充分验证了超滤膜对细菌、寄生虫(如隐孢子虫、贾第鞭毛虫)等病原微生物的物理屏障作用^[11]。与依赖消毒剂维持微生物安全的传统工艺相比,该设备提供了“膜屏障+末端消毒”的双重保障,安全性更为可靠,且避免了消毒副产物过量产生的风险。

2.3 膜过滤性能与长期运行稳定性

2.3.1 跨膜压差与通量稳定性

膜污染控制是超滤系统高效运行的关键,在整个中试周期内,仅依靠1次/d的自动气洗维护(未进行任何化学清洗),跨膜压差始终稳定在5.0 kPa以

下的极低水平,3月、4月、5月、6月、7月、8月的跨膜压差分别为2.8、3.0、3.1、3.0、3.5、4.5 kPa,平均仅为3.3 kPa。这显著低于传统外压式或浸没式超滤系统(通常需要30~80 kPa)。稳定的低跨膜压差直接反映了膜污染得到了有效控制。这主要得益于:①超亲水膜材料从根本上降低了污染物在膜表面的吸附能;②低跨膜压差结合重力流运行模式避免了虹吸或抽吸造成的污染物向内压实;③周期性气洗能有效扰动并剥离膜表面形成的疏松滤饼层。相应地,膜通量也表现出良好的稳定性,平均通量为 $15.2 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,与 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的设计值高度吻合,没有出现衰减。

为了验证不同浊度条件下超滤膜的抗污染性能,在三种典型进水浊度条件下进行中试,控制设备不进行反冲洗(每天仅排泥一次),连续运行直到跨膜压差达到5.0 kPa(设计最大跨膜压差),记录设备能稳定运行的时长。当进水浊度为2~10 NTU时,连续运行15 d后跨膜压差仍然小于设计最大跨膜压差。而随着进水浊度的升高,跨膜压差达到设计最大跨膜压差的时间缩短,当进水浊度为100~200 NTU时,超滤膜进水浊度为77~115 NTU,设备连续运行10 d后达到设计最大跨膜压差;当进水浊度为1 000~1 500 NTU时,超滤膜进水浊度为520~585 NTU,设备连续运行2 d后达到设计最大跨膜压差,但经过气反洗后通量立即恢复,没有对超滤膜产生不可逆的影响。这表明该设备抗污染能力强,在高进水浊度条件下,1次/d的反冲洗即可满足清洁要求,能够保证高浊度条件下的日产水量;在低进水浊度条件下,则可以适当延长反冲洗时间,以降低设备能耗。

2.3.2 产水率与能耗分析

该设备取消了传统工艺中的反冲洗水泵及反冲洗水箱,仅通过气洗排泥,消耗少量的水,因此实现了较高的水回收率。实测系统平均产水率达到98.5%,高于需要频繁水反洗的常规超滤系统(通常为90%~95%)。这对于水资源紧缺地区意义重大^[9]。

在能耗方面,系统主要耗能单元仅为1.7 kW的空压机(间歇运行)、PLC控制柜及消毒计量泵。经电表连续计量,系统单位产水平均电耗仅为 $0.035 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。以规模为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 计算,日耗电约 $3.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$,在阳光充足的区域,完全可由配套的小型光伏储能系统(如 1.8 kW 光伏板+ $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 储能)实现

能源自给。

2.4 技术经济初步分析

基于中试运行数据,对该设备进行初步技术经济分析。该设备运维简单,在运行成本上具有显著优势。运行成本的降低主要源于药剂费用(包括絮凝剂和化学清洗药剂)的完全节省、电耗的下降以及人员需求的大幅减少。现行业中常用的传统混凝-砂滤工艺需要24 h不间断投加絮凝剂,且由于加药量受进水水质影响,对人工操作调节的依赖程度较高;市场上的浸没式超滤工艺则需要每日进行气水反冲洗,每周进行化学强化清洗,每年进行人工化学恢复清洗,产生化学废液,无法真正实现无人值守。因此,本设备在10年以上生命周期内节省的药剂费、电费及人工管理成本将使其全生命周期成本具有明显竞争力。尤其对于分散的村镇供水站,其节约的运维和人力成本以及环境效益(无化学废液排放)将更为可观。

3 结论

① 基于新型PVDF超亲水膜的重力驱动免清洗净水设备具有良好的净化效果与稳定性。当进水浊度短时间内飙升至1 000 NTU以上时,系统出水浊度未出现任何波动,跨膜压差也未出现异常升高。这充分证明了“三相分离+斜管沉淀+纤维滤布”预处理有效承担了“预沉加粗过滤”和负荷波动缓冲的角色,与超滤膜工艺具有良好的工艺匹配性。同时,超滤膜系统本身也具有优良的抗污染能力。

② 依托超亲水膜材料的内在抗污染特性、重力流机制、合适的预处理单元以及每日的自动气洗维护,在完整中试期内,跨膜压差始终稳定在5.0 kPa以下的极低水平,膜通量无衰减。系统成功摒弃了传统超滤工艺必需的周期性化学清洗,从根本上消除了药剂消耗、二次污染及膜材料化学损伤风险,运维复杂性大幅降低。

③ 突出的低碳节能与经济性优势。系统运行电耗仅 $0.035 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,产水率高达98.5%。与常规“混凝-砂滤”及“浸没式超滤”工艺相比,运行成本可降低20%~40%,主要源于药剂费用的节省、人员需求的大幅减少以及能耗的下降。其低能耗特性与光伏储能系统具有良好的兼容性,为无可靠市电的偏远地区提供了可行的解决方案。

参考文献:

- [1] 罗惠云, 张宁. 城乡供水一体化工程技术要点及案例分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 72-76.
Luo Huiyun, Zhang Ning. Technical points and case analysis of urban and rural water supply integrated project [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 72-76(in Chinese).
- [2] 谭金章, 朱希望, 陆旭峰, 等. 浙江山区农村饮用水工程建设模式研究与实践[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 94-100.
Tan Jinzhang, Zhu Xiwang, Lu Xufeng, et al. Research and practice on rural drinking water project construction mode in a mountainous area of Zhejiang Province [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 94-100(in Chinese).
- [3] Xiang F, Ma Z, Li M, et al. Exploration of design for a small-scale water purification plant in mountainous rural areas [C]// Achal V, Abdullah A Z, Razif H, et al. Protect the water world: water pollution treatment and related biotechnology. Heidelberg: Springer, 2025: 44-51.
- [4] Qi L, Li S L, Duan L, et al. A review on membrane modification techniques for membrane fouling control: mechanisms and membrane preparation [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2025, 55(18): 1455-1478.
- [5] 岳鹏, 丁昀, 杨庆. 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. Research progress and application of ultrafiltration technology in urban drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(4): 36-42(in Chinese).
- [6] 向帆. 山区县城城乡供水一体化系统构建探讨[J]. 给水排水, 2022, 48(增刊1): 51-56.
Xiang Fan. Investigation of building urban and rural water supply integrated system in mountain city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 51-56(in Chinese).
- [7] Kim D, Kim M, Jeon S, et al. In situ modification of ultrafiltration membranes with eco-friendly pyrogallol/taurine to enhance antifouling performance [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 688: 122114.
- [8] Chen N, Han J, He X C, et al. Hydrophilic PVDF membrane doped with Ti_3C_2 for piezocatalytic purification of water flow [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 117829.
- [9] Kim D, Jeon J, Kim J, et al. Constant flux membrane system operation with gravity-driven filtration and backwash using a commercial-scale microfiltration membrane module [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 377: 134432.
- [10] Zha Y D, Hou P, Liu Z Y, et al. Effect of inclined-tube on the removal performance of fine sediment in a gravity sedimentation tank [J]. Irrigation and Drainage, 2026, 75(1): 159-172.
- [11] 林达超, 沈新旭, 廖梓宏, 等. 超滤-低剂量次氯酸钠消毒净水模式可行性研究[J]. 中国给水排水, 2026, 42(3): 38-45.
Lin Dachao, Shen Xinxu, Liao Zihong, et al. Feasibility evaluation of a novel water treatment process integrating with ultrafiltration and low-dose sodium hypochlorite disinfection [J]. China Water & Wastewater, 2026, 42(3): 38-45(in Chinese).

作者简介: 向帆(1989—), 男, 湖南株洲人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为市政给排水工程。

E-mail: 472163574@qq.com

收稿日期: 2026-03-01

修回日期: 2026-04-06

(编辑: 李德强)