

活性炭滤膜工艺在污水厂提标改造中的应用

张寅¹, 邸文瑞², 杜惠洋¹, 刘万鹏³, 张立挺⁴

(1. 北控(杭州)生态环境投资有限公司, 杭州 311100; 2. 浙江环龙环境保护有限公司, 杭州 310012; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 4. 浙江科技学院 环境与资源学院, 杭州 310023)

摘要: 为了探讨活性炭滤膜工艺深度处理污水厂出水的实际效果和可行性, 构建活性炭滤膜处理设备并开展中试, 以分析本工艺对污水厂出水的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Cr})和悬浮物(suspended solids, SS)的去除效率, 并优化运行条件。结果显示, 当活性炭投加量为 150 kg 时, COD_{Cr} 为 80~100 mg/L, SS 为 90~100 mg/L 的二沉池出水, 本工艺可将其出水 COD_{Cr} 和 SS 分别控制在 40 mg/L 和 10 mg/L 以下, 满足 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准规定的排放限值。此外, 根据测算, 本中试设备的直接运行成本为 0.84 元/t, 对 COD_{Cr} 和 SS 有迫切提高污染物排放标准需求的污水处理厂, 采用活性炭滤膜工艺处理二沉池出水在技术上和经济上是可行的。

关键词: 污水处理厂; 活性炭滤膜; 化学需氧量; 悬浮物; 深度处理

中图分类号: X505

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2022)03-0278-07

Application of activated carbon membrane treatment on upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant

ZHANG Yin¹, DI Wenrui², DU Huiyang¹, LIU Wanpeng³, ZHANG Liting⁴

(1. Beikong (Hangzhou) Ecological Environment Investment Co., Ltd., Hangzhou 311100, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Huanlong Environment Protection Co., Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China; 3. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, Zhejiang, China; 4. School of Environmental and Natural Resources, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In order to explore practical effect and feasibility of advanced treatment of activated carbon membrane on wastewater treatment plant outflow, the activated carbon membrane equipment was established and pilot experiments were carried out to analyze its removal efficiency of chemical oxygen demand (COD_{Cr}) and suspended solids (SS) of wastewater treatment plant outflow, and optimize operating conditions. The results show that when the loading of activated carbon is 150 kg, the COD_{Cr} concentration reaches below 40 mg/L in the

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ19B070001)

通信作者: 刘万鹏(1987—), 男, 浙江省云和人, 讲师, 博士, 主要从事水污染控制技术研究。E-mail: liu_wp@hdec.com。

outflow and ranges from 80 to 100 mg/L in the secondary effluent, and the SS concentration reaches below 10 mg/L in the outflow and ranges from 90 to 100 mg/L in the secondary effluent. The quality of ultimate effluent can meet the A class discharge limits specified in the Chinese National Standard GB 18918—2002 “Discharge Standard of Pollution for Municipal Wastewater Treatment Plant”. Besides, according to the measurement, the direct operation cost of this pilot system is 0.84 yuan/m³. As a result, for the wastewater treatment plant with urgent requirements for raising pollutant discharge standard, the activated carbon membrane treatment is technically and economically feasible.

Keywords: wastewater treatment plant; activated carbon membrane; chemical oxygen demand; suspended solids; advanced treatment

目前,中国仍面临水资源短缺、水环境恶化和水生态破坏等问题,这些因素严重限制了中国社会经济发展和生态文明建设^[1],而健康的水系统是维持城市可持续发展的重要基础。随着人们对环境质量的要求日趋提高,中国城镇污水排放标准呈现出污染控制指标增加、排放限值更加严格的趋势。作为水体污染外源输入的有效屏障,城镇污水处理厂对城市水环境治理和保护一直起着至关重要的作用。因此,开展城镇污水处理厂提标改造的实践探索,符合全面推进城镇污水治理工作的迫切需求^[2]。

针对城镇污水处理厂出水的特性,常用的提高污水排放标准(以下简称提标)改造工艺包括吸附法、高级氧化法、膜分离法、生物降解法等。其中,高级氧化法对化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Cr})、色度有较好的去除效果,但存在药剂消耗量大,污泥处置困难等问题;膜分离法可去除绝大部分有机污染物,但投入及运行成本较高;生物降解法虽然运行成本较低,但污染物去除率较低,对于低污染度的污水处理厂,其出水很难实现提标改造的目标^[3-4]。而活性炭作为一种较经济且易获取的吸附剂,对 COD_{Cr}等污染物具有良好的去除效果^[5-7]。粉末活性炭具有发达的微孔结构,水体中的有机污染物在与活性炭接触或通过致密的炭层时,会在范德华力、化学键等作用下^[8-9]吸附于活性炭微孔中。吸附饱和的活性炭经脱水、干燥和高温再生处理后可进行回收利用。活性炭成本较低,作用效果快,在处理系统中可通过吸附、过滤等作用,对 COD_{Cr}、氨氮、色度、浊度、悬浮物(suspended solids, SS)等进行去除,效果显著,活性炭在污水处理厂提标改造中具有良好的应用潜力。例如,刘鲁建等^[5]采用活性炭膜生物法开展了印染废水深度处理中试,结果表明,出水水质可满足 GB 4287—2012《纺织染整工业水污染物排放标准》中规定的特别排放限值,但中试工程中直接运行成本达 1.35 元/t。

本研究所涉污水处理厂二沉池出水可生化性较差,悬浮物中多含活性污泥颗粒、微生物等。由于现有高效澄清池深度处理技术运行成本过高,且存在效果不稳定等因素,为达到降低成本、稳定处理效果的目的,我们拟对该污水处理厂的现有工艺进行调整,在二沉池出水端增设粉末活性炭吸附与超滤膜分离有机结合的活性炭滤膜深度处理工艺;并通过开展中试,从处理效果、出水效率和经济性角度来分析本工艺在污水处理厂出水水质提标改造中的可行性,以为类似项目的提标改造提供参考。

1 工艺流程和试验方法

1.1 原水处理工艺和试验材料

本研究所涉污水处理厂的水处理工艺如图 1 所示,图中实线箭头表示原有工艺,虚线箭头表示提标工艺。污水处理厂水质指标见表 1。表 1 中, BOD₅ 为生化需氧量; NH₃-N 为氨氮; TP 为总磷; TN 为总氮。其中,设计出水水质达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》^[10] 一级 A 标准。本试验所用粉末活性炭,碘值 > 900 mg/L、亚甲基蓝吸附值 ≥ 100 mg/g、比表面积 > 1 200 m²/g、水分含量 ≤ 5%; 所用原水来自该污水处理厂二沉池出水。

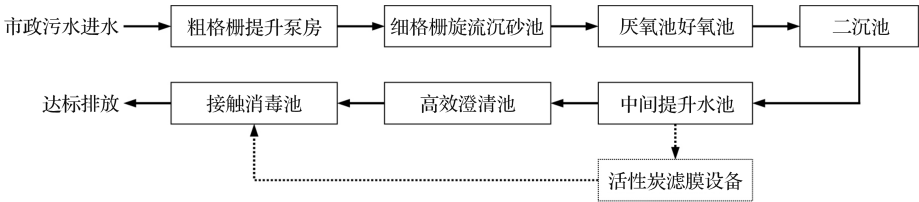


图 1 污水处理厂的水处理工艺流程图

Fig. 1 Technological flowchart of wastewater treatment plant

表 1 污水处理厂水质指标

| Table 1 Water quality indexes of waste water treatment plant | | | | | | | mg · L ⁻¹ |
|--|------|-------------------|------------------|------|--------------------|-----|----------------------|
| 水质 | pH | COD _{Cr} | BOD ₅ | SS | NH ₃ -N | TP | TN |
| 设计进水水质 | 6~9 | ≤500 | ≤150 | ≤240 | ≤25 | ≤3 | ≤30 |
| 设计出水水质 | 6~9 | ≤60 | ≤20 | ≤20 | ≤8(15) | ≤1 | ≤20 |
| 实际出水水质 | 7.38 | 90.4 | 18.3 | 98.8 | 5.1 | 0.4 | 18.7 |

注:实际出水水质均为双组试验数据的平均值。

1.2 处理设备和工艺流程

活性炭滤膜深度处理中试设备由布水、滤膜、曝气、冲洗等部分组成,集水池停留时间为 30 min,日处理量为 3 000 m³,设计进水水质的技术指标为 COD_{Cr} 80~100 mg/L,pH 6~9,SS 90~100 mg/L。本设备采用一次性投加活性炭,间隙运行,待活性炭吸附饱和后进行更换的处理方式;更换后继续运行。中试设备内部结构如图 2 所示,中试设备技术参数见表 2。

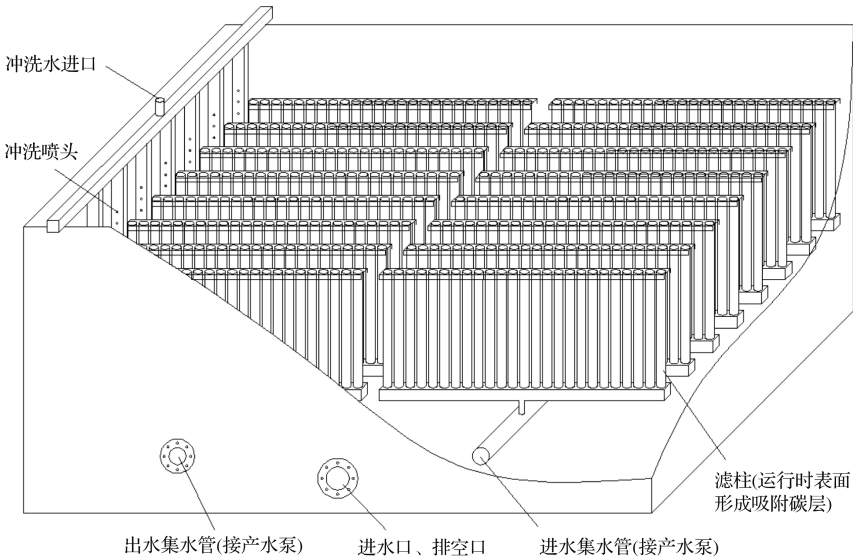


图 2 活性炭滤膜深度处理中试装置内部结构

Fig. 2 Internal structure of pilot equipment of advanced treatment of activated carbon membrane

表 2 中试设备技术参数

| Table 2 Technical parameters of pilot equipment | | |
|---|---|---|
| 设备名称 | 1 号箱体:6.0 m×2.35 m×2.5 m | 2 号箱体:5.5 m×2.35 m×2.5 m |
| 滤柱 | 长度 1 m,外径 80 mm;27 支×16 组(单支滤柱产水量约 0.3 m ³ /h) | 长度 1 m,外径 80 mm;25 支×16 组(单支滤柱产水量约 0.3 m ³ /h) |
| 产水泵 | 自吸泵,Q=150 m ³ /h,H=32 m,N=30 kW | 自吸泵,Q=150 m ³ /h,H=32 m,N=30 kW |
| 高压风机 | Q=320~380 m ³ /h;压力 50 MPa | Q=320~380 m ³ /h;压力 50 MPa |
| 冲洗泵 | 离心泵,Q=16 m ³ /h,H=59.5 m,N=30 kW | 离心泵,Q=16 m ³ /h,H=59.5 m,N=30 kW |
| 排空泵 | 管道泵,Q=150 m ³ /h,H=25 m | 管道泵,Q=150 m ³ /h,H=25 m |
| 加药泵 | 管道泵,Q=15 m ³ /h,H=30 m,N=3 kW | 与 1 号箱体合用 |
| 加药罐 | 不锈钢罐,φ=1 200 mm,H=1.5 m | 与 1 号箱体合用 |
| 加药搅拌机 | φ=600 mm,不锈钢 | 与 1 号箱体合用 |

注:Q 为流量;H 为最大抽水高度;N 为功率。

本活性炭滤膜深度处理中试设备的吸附系统主要部件为:吸附滤柱,用于活性炭截留,形成活性炭吸附层;加药设备,用于投加粉末活性炭;冲洗设备,用于清洗滤柱表面炭层。当活性炭外层吸附饱和时,需将活性炭层进行冲洗,重新曝气均匀后再次使用,形成新的活性炭层,或者直接排出更换新的活性炭。活性炭滤膜深度处理工艺流程如图3所示。

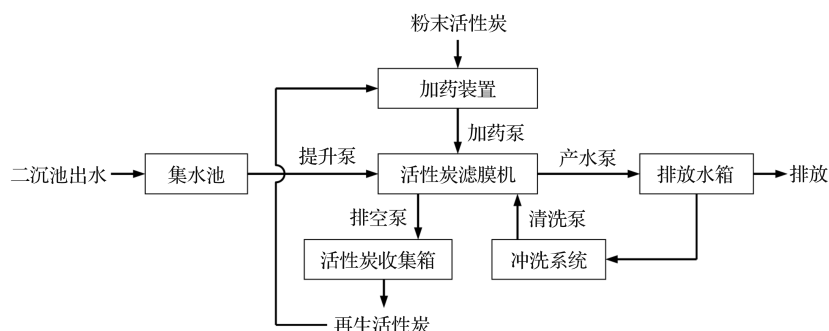


图3 活性炭滤膜深度处理工艺流程

Fig.3 Technological flowchart of advanced treatment of activated carbon membrane

1.3 试验和检测方法

将活性炭投入加药装置中(质量分数为0.2%,每12 h投加一次),加满水后,搅拌10 min,用加炭泵送入设备池体。投加完毕后,开启鼓风机曝气,直至池内水与活性炭粉末混合均匀。随后,打开进水泵,直到液位达到高液位;关闭鼓风机,同时关闭出水阀门,用产水泵先进行内循环。观察玻璃透镜,当出水由黑色浑浊的活性炭混合液变为无色透明清水,则表示滤柱外表的炭层已经形成,开启出水阀门。定期从出水口采集水样,进行 COD_{Cr} 和SS质量浓度测试,计算相应指标的去除率。 COD_{Cr} 质量浓度采用标准重铬酸钾法测定;SS质量浓度采用重量法测定^[11]。

2 结果与讨论

2.1 出水效果及效率分析

出水水质是对本深度处理工艺的重要评价指标,不同活性炭投加量下出水 COD_{Cr} 对比如图4所示。由图4可知,中试中进水 COD_{Cr} 为80~100 mg/L。在运行期间,出水 COD_{Cr} 范围为6~45 mg/L;随着运行时间的增加, COD_{Cr} 逐渐增加。运行6 h内,出水 COD_{Cr} 保持在25 mg/L以内,活性炭投加量对 COD_{Cr} 的去除效果没有显著影响。当运行时间超过6 h,活性炭投加量为150 kg的试验组,出水 COD_{Cr} 上升速率加快,且质量浓度超过活性炭投加量为250 kg的试验组,但仍然满足GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准规定的排放限值。根据已有研究,对于 COD_{Cr} 较低的进水,超滤膜法的最高去除率仅为53%^[12];微电解-曝气法仅为45%~53%^[13-14];O₃/H₂O₂工艺约为49%^[15]。与上述工艺相比,本

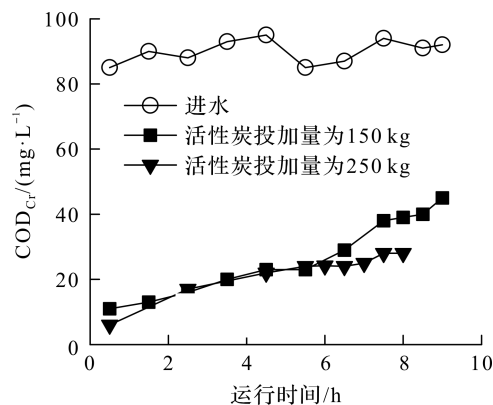


图4 不同活性炭投加量下出水 COD_{Cr} 对比

Fig.4 Comparison of COD_{Cr} in outflow under different activated carbon loadings

研究所用的活性炭滤膜深度处理工艺对进水 COD_{Cr} 的去除率最高达到93%;而当系统稳定运行后,出水SS去除率达到99%以上。试验结果表明本工艺的处理效果完全满足该污水处理厂的提标改造要求。

在满足污染物去除效果的前提下,出水效率也是评价本深度处理工艺适用性的另一项指标,不同活性炭投加量下产水速率和产水量对比如图5所示。由图5(a)可知,本设备产水速率随着运行时间的增加逐渐下降,清洗操作可显著恢复产水速率。当活性炭投加量从150 kg提升到250 kg时,产水速率明显下降,最终导致产水量下降(图5(b))。这是由于活性炭投加量增加时,炭层厚度增加,设备压力增加,从而导致产水速率下降。魏朝成等^[16]在粉末活性炭预沉积强化超滤膜处理工艺的研究中也观察到相同的结果。因此,在满足出水达标的情况下,可适当减少单批次活性炭投加量,并通过适当增加清洗次数来提升设备产水速率。

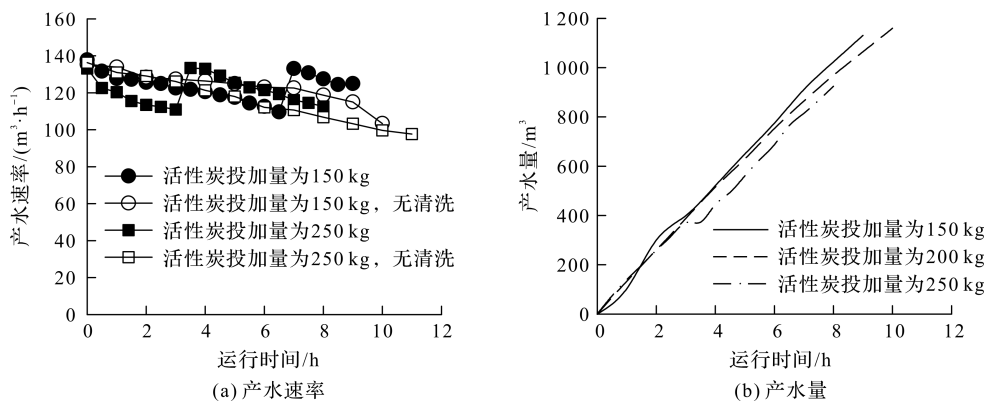


图 5 不同活性炭投加量下产水速率和产水量对比

Fig. 5 Comparison of outflow production rate and production capacity under different activated carbon loadings

2.2 系统稳定性分析

系统的运行稳定性是本处理工艺是否适用于实际处理的重要依据,而系统负压是系统稳定性的关键指标,系统负压随运行时间的变化如图 6 所示。由图 6 可知,系统的运行负压与单批次活性炭投加量密切相关。当活性炭投加量由 150 kg 增加至 200 kg 时,系统运行负压显著上升。然而,当活性炭投加量进一步增加至 250 kg 时,在运行 3 h 内,系统负压快速升高,随后系统负压出现快速下降及波动的现象。这可能是由于活性炭投加量过大时,设备内无法形成稳定的炭过滤层,最终影响处理系统的稳定性。

2.3 参数优化选择

由上述分析可知,活性炭投加量是影响出水水质、产水效率和系统稳定性的主要因素。单批次活性炭投加量过多,会造成系统运行负压快速上升,产水速率下降,单位时间产水量下降;同时还会导致设备运行不稳定,影响处理效果。因此,在处理不同水质、不同出水标准的污水时,需要根据实际情况优化单批次活性炭的投加量。另外,设备的运行负压与产水速率呈负相关。活性炭投加量为 150 kg 时,系统运行负压与产水速率的关系如图 7 所示。由图 7 可知,当系统负压达到 0.03 MPa 时,产水速率开始加速下降;因此,为保证运行效率,在负压 0.03 MPa 时,需进行清洗操作。

在上述优化条件下,设备连续运行 7 d 的结果(图 8)显示,本设备对出水 COD_{Cr} 具有良好的处理效果。在运行期间,对 COD_{Cr} 为 80~100 mg/L 的进水,出水 COD_{Cr} 可稳定保持在 20~40 mg/L 范围内,且系统负压稳定。

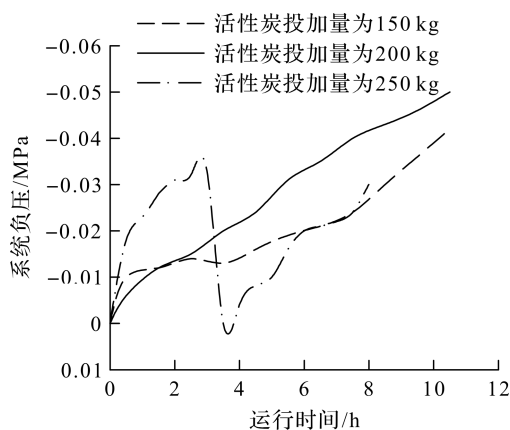


图 6 系统负压随运行时间的变化

Fig. 6 Variation of system negative pressure with running time

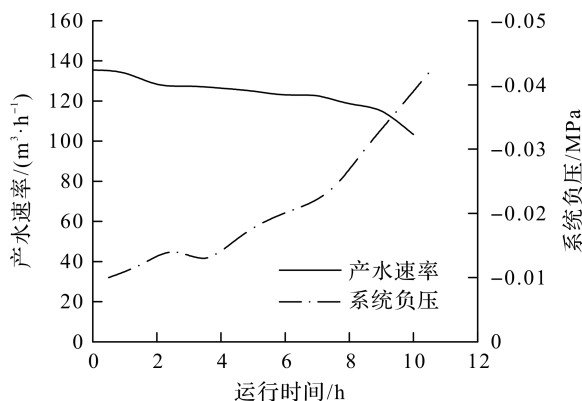


图 7 系统运行负压与产水速率的关系

Fig. 7 Relationship of negative pressure and production rate

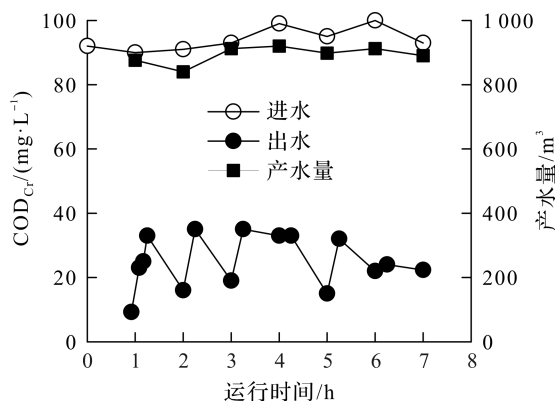


图 8 优化条件下设备连续运行 7 d 的处理效果

Fig. 8 Performance of 7-day's continuous running under optimized conditions

2.4 处理成本分析

本中试设备的主要运行成本包括活性炭费用和电费两部分。产水按 120 m³/h 计,150 kg 活性炭可使用 9 h 以上,活性炭成本为 4 650 元/t。因此,每吨水的活性炭消耗费用为 0.65 元。本设备运行期间主要的耗电部分为产水泵,按一批次活性炭运行 9 h 计,电费以 0.8 元/(kW·h)计,结合各设备运行频率(表 3),计算可得处理每吨水消耗的电费为 0.19 元。综上所述,本工艺的直接处理成本为 0.84 元/t。

表 3 各设备运行频率
Table 3 Operation frequency of each equipment

| 设备名称 | 功率/kW | 运行时间/min | 用电量/(kW·h) | 成本/元 |
|------|-------|----------|------------|--------|
| 产水泵 | 30 | 480 | 240.0 | 192.00 |
| 风机 | 5 | 30 | 2.5 | 2.00 |
| 清洗系统 | 30 | 10 | 5.0 | 4.00 |
| 排空泵 | 5 | 10 | 0.9 | 0.72 |
| 加药系统 | 5 | 10 | 0.9 | 0.72 |
| 合计 | | | 249.3 | 199.44 |

2.5 存在的问题及解决方案

- 1) 由于本工艺主要依赖于活性炭的吸附和致密炭层的过滤作用,对活性炭的性能要求较高,不同活性炭的性能不同,会造成设备运行参数的变化,故建议更换活性炭时,先对系统进行测试,调整投加量、清洗频率、更换频率等运行参数。
- 2) 虽然本工艺对 SS 的去除率极高,但同时受原水 SS 质量浓度影响也很大。过多的悬浮物可能会造成炭层堵塞,系统运行负压升高,产水速率下降,故建议对 SS 质量浓度较大的原水进行前端预处理。
- 3) 本工艺的活性炭用量较大,使用周期较短,活性炭成本较高,故建议更换活性炭时采用新炭和再生炭相结合的方式,可大大降低活性炭的使用成本,从而降低整个系统的运行成本。

3 结 语

采用活性炭滤膜深度处理工艺,能够有效降低污水处理厂出水中的 COD_{Cr} 和 SS。本中试设备单次活性炭投加量为 150 kg 时,COD_{Cr} 去除率为 69%~93%,SS 达到 100%。出水 COD_{Cr} 和 SS 均可满足 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准规定的排放限值。此外,本中试设备的直接运行成本为 0.84 元/t,对有迫切提标需求的城镇污水处理厂,采用本活性炭滤膜深度处理工艺在技术上和经济上是可行的。

参考文献:

[1] 任玉芬,方文颖,王雅晴,等.我国城市水资源利用效率分析[J].环境科学学报,2020,40(4):1507.

[2] 钱林,薛哲骅,王首都.城市污水厂一级 A 排放标准提标改造工艺设计[J].净水技术,2020,39(4):39.

[3] 曾木海.污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析[J].净水技术,2021,40(5):75.

[4] LINDTNER S, KROISS H, NOWAK O. Benchmarking of municipal waste water treatment plants (an Austrian project)[J]. Water Science and Technology,2004,50(7):265.

[5] 刘鲁建,董俊,张岚欣,等.粉末活性炭膜生物反应器深度处理印染废水的中试[J].化学与生物工程,2021,38(1):43.

[6] AHMAD A A, HAMEED B H. Reduction of COD and color of dyeing effluent from a cotton textile mill by adsorption onto bamboo-based activated carbon[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,172(2/3):1538.

[7] HALIM A A, AZIZ H A, JOHARI M A M, et al. Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment[J]. Desalination,2010,262(1/2/3):31.

[8] KRASNOVA T A, GORA N V, GOLUBEVA N S. Influence of physical-chemical properties of active carbons on gallic acid adsorption[J]. Food and Raw Materials,2015,3(1):120.

[9] MATTSON J A, MARK H B, MALBIN M D, et al. Surface chemistry of active carbon: specific adsorption of phenols[J]. Journal of Colloid and Interface Science,1969,31(1):116.

- [10] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002[S]. 北京:中国环境出版社,2003:5.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 张杨,姚晓林,路浩,等. 活性炭和膜处理工艺去除生化污水 COD 试验[J]. 油气田地面工程,2013,32(11):47.
- [13] 刘喆,江博,石梁,等. 铁碳微电解+A/O 工艺降解有机硅废水 COD 的研究[J]. 工业水处理,2020,40(3):85.
- [14] 赵爽. 铁碳微电解-曝气膜生物反应器处理印染废水[J]. 水处理技术,2019,45(3):35.
- [15] 王致远,吕药灵,吴敏,等. 不同臭氧预处理工艺组合常规工艺对西泑水中 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果[J]. 水污染及处理,2018,6(1):11.
- [16] 魏朝成,于彩虹,徐磊. 粉末活性炭预沉积强化超滤膜处理微污染水的效应研究[J]. 矿业科学学报,2020,5(4):458.

(上接第 232 页)

- [3] GRAICHEN T, RICHTER J, SCHMIDT R, et al. Improved indoor positioning by means of occupancy grid maps automatically generated from OSM indoor data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(4):216.
- [4] 陈秋莲,郑以君,蒋环宇,等. 基于神经网络改进粒子群算法的动态路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):51.
- [5] 许斯军,曹奇英. 基于可视图的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(3):220.
- [6] 徐钊,胡劲文,马云红,等. 无人机碰撞规避路径规划算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1):100.
- [7] 赵明,郑泽宇,么庆丰,等. 基于改进人工势场法的移动机器人路径规划方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(增刊 2):66.
- [8] 魏博,杨茸,舒思豪,等. 基于离子运动-人工蜂群算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2021, 41(2):379.
- [9] 胡立华,马瑞,张名师,等. 基于改进蚁群算法的智能小车路径规划方法[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(6):463.
- [10] 周驰,董宝力. 基于改进混合粒子群算法的窄巷道仓储三维拣选路径规划[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(6):823.
- [11] 蔺一帅,李青山,陆鹏浩,等. 智能仓储货位规划与 AGV 路径规划协同优化算法[J]. 软件学报, 2020, 31(9):2770.
- [12] 赵卫东,蒋超. 两阶段搜索的 A* 全局路径规划算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(12):249.
- [13] 刘子豪,赵津,刘畅,等. 基于改进 A* 算法室内移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(2):186.
- [14] STRAK Ł, SKINDEROWICZ R, BORYCZKA U, et al. A self-adaptive discrete PSO algorithm with heterogeneous parameter values for dynamic TSP[J]. Entropy, 2019, 21(8):738.
- [15] 孙文. 双层协调多粒子群算法在 TSP 问题中的研究与应用[D]. 青岛:山东科技大学, 2019.
- [16] 李再云,华玉伟,葛贤宏,等. 植物远缘杂交中的染色体行为及其遗传与进化意义[J]. 遗传, 2005(2):315.
- [17] 公冶小燕,林培光,任威隆. 基于 Grefenstette 编码和 2-opt 优化的遗传算法[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(6):19.
- [18] 袁斌,王辉,王伟博. 基于卡尔曼滤波的 AGV 惯性导航仿真研究[J]. 浙江科技学院学报, 2020, 32(3):191.