

电化学耦合曝气生物滤池处理施工期生活污水

祁建民¹, 张玉峰², 邱勇军¹, 傅高健¹, 杨柳燕², 缪爱军²

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

(2.南京大学环境学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对施工期临时宿营地生活污水中化学需氧量(COD)、氨氮、总磷含量高的特点,研发出电化学耦合曝气生物滤池的处理技术,以电解曝气生物滤池为核心工艺,用电絮凝和电催化技术强化脱氮除磷,并定制了一套生活污水一体化处理装置对其处理效果进行检验.结果表明,系统稳定运行后出水中 COD、氨氮、总氮、总磷的质量浓度分别可降到 50、1、15、0.5 mg/L 以下,去除率分别为 90%、99%、80%、98%,均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准.该组合工艺自动化程度高、占地面积小、抗冲击负荷能力强,适用于高浓度污水的处理,可供相关污水处理工程参考.

[关键词] 电化学,曝气生物滤池,生活污水,污水处理

[中图分类号] X506 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)04-0125-06

Electrochemical Coupled Biological Aerated Filter for the Treatment of Domestic Sewage During Construction

Qi Jianmin¹, Zhang Yufeng², Qiu Yongjun¹, Fu Gaojian¹, Yang Liuyan², Miao Aijun²

(1.Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd, Nanjing 211102, China)

(2.School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: As the concentrations of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus in domestic sewage of temporary campsites during the construction are high, a processing technology based on electrochemical coupled biological aerated filter is developed. This technology uses electrolytic biological aerated filter as the core, and further uses electroflocculation and electrocatalysis to enhance the removal efficiency of nitrogen and phosphorus. At the end, a set of domestic sewage integrated treatment device is customized to test its pollutants' removal efficiency. The results show that the mass concentrations of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus in the effluent can be reduced to below 50, 1, 15, and 0.5 mg/L, the removal rates are 90%, 99%, 80%, and 98%, respectively, after the system arrives at the steady state. The concentrations of these pollutants in the effluent thus meet class A standard of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002). The combined process has a high degree of automation, a small footprint, and strong shock load resistance. It is suitable for the treatment of sewage with high-concentration pollutants and can be used as a reference for related sewage treatment projects.

Key words: electrochemistry, biological aerated filter, domestic sewage, sewage treatment

施工期临时宿营地的生活污水中的 COD、氨氮、总磷含量较高,污水排放量较大,如不经过处理便排放会对周围环境造成恶劣影响^[1-3]. 与农村生活污水相比,施工期生活污水的水量更大,污水中总氮总磷含量较高,需要高效的脱氮除磷技术. 目前生活污水的常用处理技术主要包括上流式厌氧污泥床(UASB)、缺氧好氧(AO)系列工艺、膜生物反应器(MBR)工艺等^[4-6]. 但是上述工艺占地面积较大、前期投入成本较高且很难移动,施工结束后会造成资源闲置,因此不适用于施工期生活污水的处理. 曝气生物滤池是处理生活污水首选工艺之一. 该工艺占地面积小、具有良好的脱氮除磷性能,其中的填料还能截留悬浮颗粒和大分子物质,是一种集物理、生物方法于一体的生物膜法处理工艺^[7-8]. 然而施工期生活污水

收稿日期:2022-09-10.

基金项目:江苏方天电力技术有限公司科技项目(YF202103)、国家自然科学基金项目(22176093).

通讯作者:缪爱军,博士,教授,研究方向:污染生态修复、生态与环境毒理学. E-mail: miaoj@nju.edu.cn

中污染物浓度较高,仅靠曝气生物滤池处理很难达到排放要求,因此需要联用其他工艺.

电化学法具有设备简单、占地面积小、自动化程度高等优点,该方法可以通过电催化和电絮凝工艺来去除生活污水中的污染物^[9-10]. 电催化氧化是通过阳极氧化直接降解有机污染物,或通过电解过程中产生的强氧化性自由基间接降解污染物^[11-12]. 电絮凝工艺是一种集气浮、混凝、电氧化于一体的处理技术,与混凝处理不同的是,电絮凝的混凝剂是通过阳极氧化溶解生成的,产生污泥量更少^[13-14].

此前有研究^[15]将电化学与曝气生物滤池联用处理焦化废水,其 COD 和氨氮的指标与施工期生活污水相接近,该方法通过电催化和微生物的共同作用去除污水中的污染物,实验结果表明电催化提高了曝气生物滤池的脱氮效率,整个装置对 COD 和氨氮具有良好的去除效果,去除率分别可达 83.3% 和 99.8%. 此外,可以联用电絮凝工艺来提高处理系统的除磷效率. Samadikun 等^[16]通过电絮凝技术处理洗衣废水,在 60 V 的电压下,使得污水中磷酸盐浓度从 9.58 mg/L 下降到 3.01 mg/L,去除效率为 68.56%,具有较好的处理效果.

鉴于此,本研究提出电解曝气生物滤池耦合电絮凝、电催化的组合工艺处理施工期生活污水,以上述工艺为核心的一体化处理装置占用宿营地面积较小且能跟随施工队移动,适用于处理施工宿营地临时贮存的生活污水.

1 实验部分

1.1 电解/电絮凝实验装置

电解曝气生物滤池装置如图 1 所示,整个装置为圆柱体,高度为 30 cm,装置的有效容积为 4.2 L,从上到下分为 3 个区域,依次为清水层、填料层(沸石)、承托层(鹅卵石),各个区域的高度分别为 5、15、5 cm,下方布有进水进气系统,填料区平行放置 3 块电极(2 块钛板阴极、1 块钉铍钛阳极)外接电源,水流通过下方蠕动泵从进水箱进入. 电絮凝曝气生物滤池实验设备是在该装置的基础上把钉铍钛电极换成铁板,水力停留时间为 6 h,气水比为 30:1.

1.2 中试试验装置

为了验证整个处理系统的可行性,定制了一套生活污水一体化处理设备,每天处理 1 t 人工模拟生活污水,工艺流程如图 2 所示.

(1)调节池:调节池长×宽×高为 50 cm×100 cm×100 cm,有效容积为 0.4 m³,水力停留时间为 10 h,内部装有曝气搅拌装置,用来均匀水质水量.

(2)电解曝气生物滤池:电解曝气生物滤池长×宽×高为 70 cm×100 cm×100 cm,填料层的高度为 50 cm,有效容积为 0.32 m³,水力停留时间为 8 h,电流密度为 20 A/m²,阳极极板为钉铍钛,内部装有沸石填料,同时装有电解系统(放置方式如图 1 所示)、曝气系统和反冲洗系统,气水比维持在 30:1.

(3)电絮凝曝气生物滤池:电絮凝曝气生物滤池长×宽×高为 30 cm×100 cm×100 cm,填料层的高度为 50 cm,有效容积为 0.1 m³,水力停留时间为 2.7 h,电流密度为 20 A/m²,阳极极板为铁板,内部装有沸石填料,同时装有电解系统(放置方式如图 1 所示)、曝气系统和反冲洗系统,气水比维持在 30:1,与电解曝气生物滤池不同的是,此时阳极极板为铁材料.

(4)电催化槽:电催化槽长×宽×高为 30 cm×100 cm×100 cm,有效容积为 0.21 m³,水力停留时间为 5 h,电流密度为 150 A/m²,阳极极板为钉铍钛,电解的同时通入氯化钠强化氧化效果,电极材料平行放置于固定模块中.

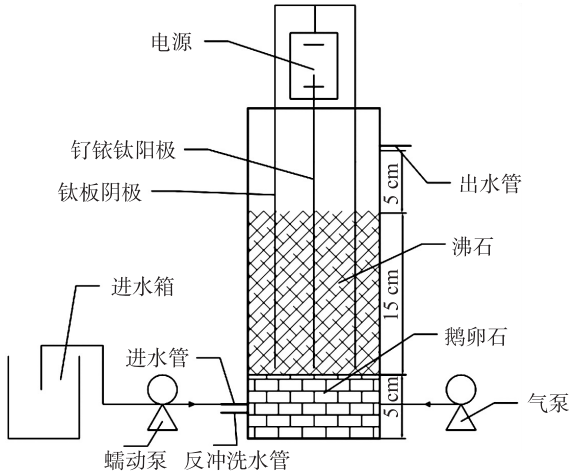


图 1 电解曝气生物滤池装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrolytic biological aerated filter device

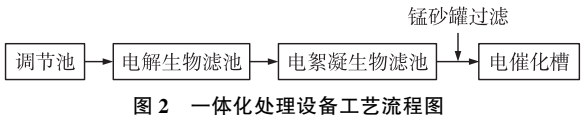


图 2 一体化处理设备工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of integrated treatment equipment

1.3 接种污泥和水样

污泥为上海碧莱清生活污水专用菌种,同时购买专用的营养剂加快挂膜速度. 原水水样取自南京市某变电站施工现场,生化需氧量(BOD)与 COD 的比值大于 0.4,可生化性良好. 人工配制生活污水,用水取自自来水,同时添加葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾以补充微生物生长所需的微量元素. 原水水质、人工配制污水水质、《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)出水一级 A 标准如表 1 所示.

表 1 施工期生活污水指标及人工模拟污水进水水质

Table 1 Domestic sewage index and artificial simulated sewage inflow quality during construction						
类别	COD/(mg/L)	BOD/(mg/L)	pH	氨氮/(mg/L)	总氮/(mg/L)	总磷/(mg/L)
原水	300~400	≤200	6~9	≤70	≤80	≤8
配水	400	/	6~9	80~100	/	10~13
一级 A 标准	≤50	≤10	6~9	≤5	≤15	≤0.5

1.4 实验材料

选择沸石作为曝气生物滤池的填料,因为沸石对氨氮具有极佳的吸附效果. 钉铍钛阳极在足够的电压下会产生羟基自由基对污水中的有机物和氨氮进行催化氧化,强化脱碳脱氮效果. 锰砂具有很好的除铁效果,电絮凝出水需要锰砂过滤后才能通入电解槽,否则磷酸铁沉淀会溶解,导致出水磷含量超标.

1.5 实验与分析方法

(1)挂膜:采用快速挂膜法进行挂膜^[17]. 将配制好的挂膜溶液(每升水体中加入 40 g 菌剂和 10 g 营养剂)倒入实验装置. 闷曝 8 h 后将含泥溶液全部排出,之后通入人工配制的生活污水,水力停留时间为 6 h,每天测定水中的 COD、氨氮和总磷. 当氨氮的去除率大于 60%、硝态氮增量和氨氮去除量的比值趋于 1.0、处理效果基本稳定即可认为挂膜成功^[18].

(2)驯化:挂膜成功之后在 10 A/m² 的电流密度下进行驯化,每天测定出水指标,待出水指标稳定后可逐渐提高电流密度.

(3)指标的测定:改变电流密度时,要在该电流密度驯化 2 d 后测定出水中的 COD、氨氮、总氮、总磷. 本实验中各项指标测定方法如下:COD:重铬酸钾法;氨氮:纳氏试剂分光光度法;总氮:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;总磷:钼酸铵分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 电解曝气生物滤池

2.1.1 电流密度对电解曝气生物滤池处理效果的影响

近年来,有研究^[19-20]指出适当的电流密度可以促进微生物增长,从而提高生物反应器的效率,但过高的电流密度会使得微生物活性下降,从而降低去除污染物的能力,因此需要找到电解曝气生物滤池的最佳电流密度.

不同的电流密度对电解曝气生物滤池的影响如图 3 所示. 随着电流密度逐渐提高,微生物活性也在逐渐增强,对 COD 的降解率逐渐升高,在 20 A/m² 左右取得最佳处理效果,之后随着电流密度的升高,微生物的活性下降,导致出水 COD 指标升高. 磷的去除率在电流密度大于 20 A/m² 时基本稳定,达到 90%. 氨氮和总氮的去除效果随着电流密度升高而升高,20 A/m² 与 40 A/m² 的处理效果相近. 综上所述,电流密度设定为 20 A/m² 开展后续实验.

2.1.2 电解曝气生物滤池对人工模拟污水的处理效果

电解曝气生物滤池对人工模拟污水的处理效果如图 4 所示.

进水 COD 在 300~600 mg/L 范围内波动,出水 COD 稳定在 50 mg/L 以下,达到 GB 18918—2002 的一

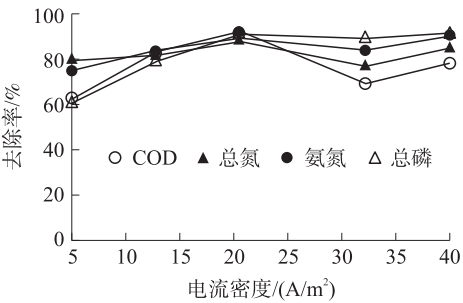


图 3 电流密度对电解曝气生物滤池的影响
Fig. 3 Influence of current density on electrolytic biological aerated filter

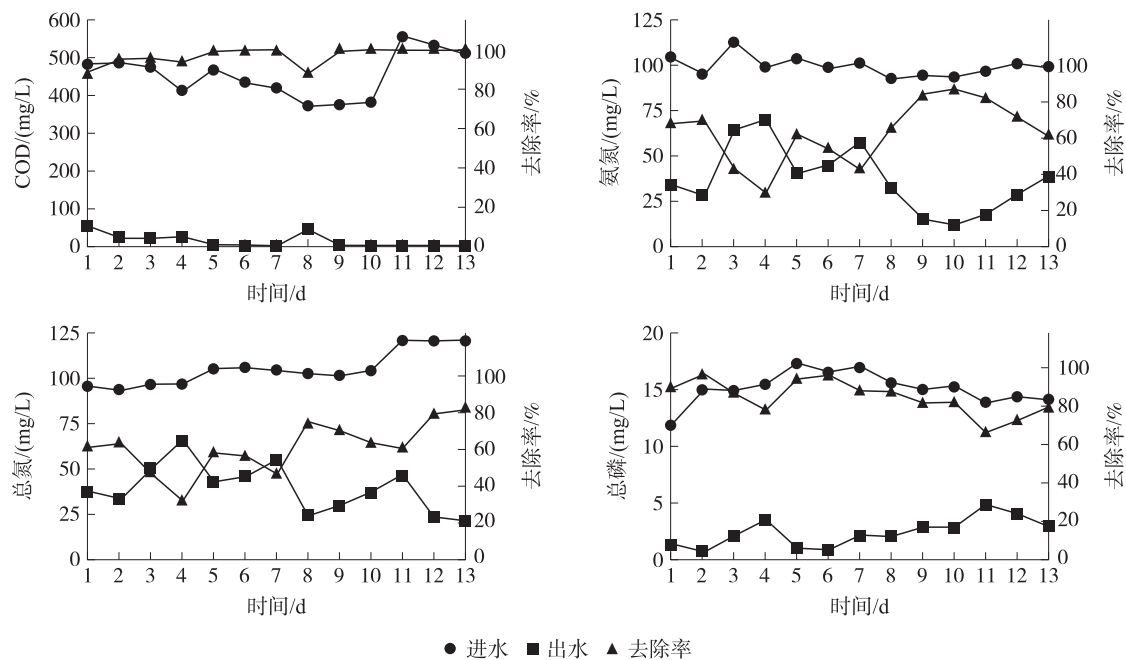


图 4 电解曝气生物滤池进出水中 COD、氨氮、总氮、总磷的含量及其去除率
Fig. 4 Content and removal rate of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus in influent and effluent of electrolytic biological aerated filter

级 A 标准($\text{COD} \leq 50 \text{ mg/L}$),这说明电解曝气生物滤池对 COD 的降解比较稳定,具有一定的抗冲击负荷能力^[21].

氨氮的进水浓度在 100 mg/L 左右,在 1 个周期内(反冲洗后到下一次反冲洗前),氨氮的处理效果逐渐降低.分析原因可能是 COD 含量过高,微生物生长繁殖快,硝化细菌很难成为其中的优势菌种^[22],随着时间的推移,硝化效果越来越差,导致出水氨氮含量增加.反冲洗(4 d、7 d)之后氨氮的处理效果会增强,但也难维持很长时间,需要频繁进行反冲洗,在此条件下,出水指标可在 $20 \sim 30 \text{ mg/L}$ 浮动.

总氮和氨氮的去除趋势相近,因为电解曝气生物滤池的反硝化效果比较好,硝化细菌生成的 NO_3^- 和 NO_2^- 都被阴极还原成 N_2 排出,使得总氮与氨氮的处理效果相似^[23].

总磷的进水浓度在 15 mg/L 左右,反冲洗之后出水浓度维持在 $2 \sim 3 \text{ mg/L}$,对磷的去除效果可达 80%.

2.2 电絮凝曝气生物滤池对人工模拟污水的处理效果

选用电絮凝曝气生物滤池作为后续除磷工艺,选择适宜的电流密度,以防铁电极溶解过快.处理效果如图 5 所示,电絮凝曝气生物滤池拥有良好的除磷效果,主要依靠电极氧化产生的 Fe^{3+} 的絮凝沉淀与填料的吸附作用^[21],去除率可达 98% 以上,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准.除了高效除磷,电絮凝曝气生物滤池对 COD、氨氮、总氮也有一定的净化效果,可以进一步去除污水中的污染物.

2.3 电催化槽对人工模拟污水的处理效果

将 2 个钉铍钛电极平行放入烧杯中,在通入电压为 10 V 、极板间距为 1 cm 的条件下,测试了电催化槽对氨氮强化处理的效果,体系中 COD、氨氮、氯化钠的浓度分别为 400 、 100 、 $1\,000 \text{ mg/L}$.

处理效果如图 6 所示,在前 0.5 h 主要进行氨氮的氧化,COD 未被降解,当氨氮的去除率达到 60% 左右,开始氧化降解 COD,在 2 h 氧化过程中,COD 和氨氮的去除率分别可达 60% 和 90%.分析原因可能是前 30 min 溶液中 Cl^- 浓度较高,大量的 Cl^- 会吸附在阳极表面,此时 ClO^- 较 $\cdot\text{OH}$ 更容易生成,而 ClO^- 对 COD 处

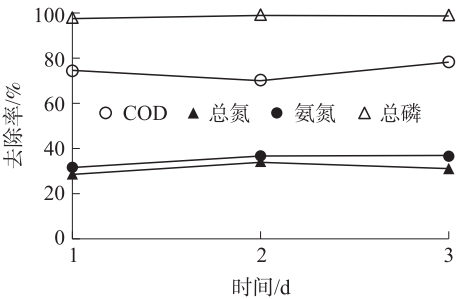


图 5 电絮凝曝气生物滤池对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除率
Fig. 5 Removal rate of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus by electroflocculation biological aerated filter

理效果较差,所以此时主要进行氨氮的氧化.随着反应的进行, Cl^- 浓度逐渐降低, $\cdot\text{OH}$ 开始大量生成,COD开始被降解^[24].

2.4 生活污水一体化处理设备对人工模拟污水的处理效果

研究测定了装置挂膜驯化后 15 d 的处理效果,如图 7 所示.在 15 d 装置稳定运行过程中,对 COD 的去除率逐渐提高并稳定在 90% 左右,出水 COD 稳定在 50 mg/L 以下,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准.

氨氮在前 5 d 的出水浓度在 10 mg/L 左右,第 5 d 开启电催化装置后,出水浓度稳定在 0 mg/L,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准,说明电催化装置对氨氮具有很好的处理效果.

总氮的去除效果较氨氮差,分析原因可能是随着反应的进行,电催化槽产生大量的 ClO^- 和 $\cdot\text{OH}$,其中 ClO^- 的氧化电位为 0.89 eV, $\cdot\text{OH}$ 的氧化电位为 2.8 eV,羟基自由基的氧化电位较高,会将一部分氨氮氧化成硝态氮,导致出水总氮偏高.但出水总氮浓度仍稳定在 15 mg/L 以下,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准.后续可在电催化槽出水区域增加 1 块阴极极板进行硝态氮的反硝化,强化脱氮效果.

总磷在前 5 d 的出水浓度在 1~5 mg/L 范围内波动,第 5 d 开启电絮凝装置后,去除率大幅增加,出水浓度稳定在 0.5 mg/L 以下,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准.

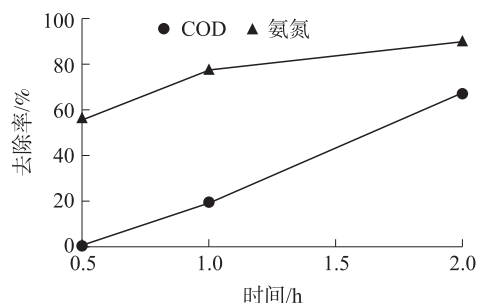


图 6 电催化装置对 COD、氨氮的去除率

Fig. 6 Removal rate of COD and ammonia nitrogen by electrocatalytic device

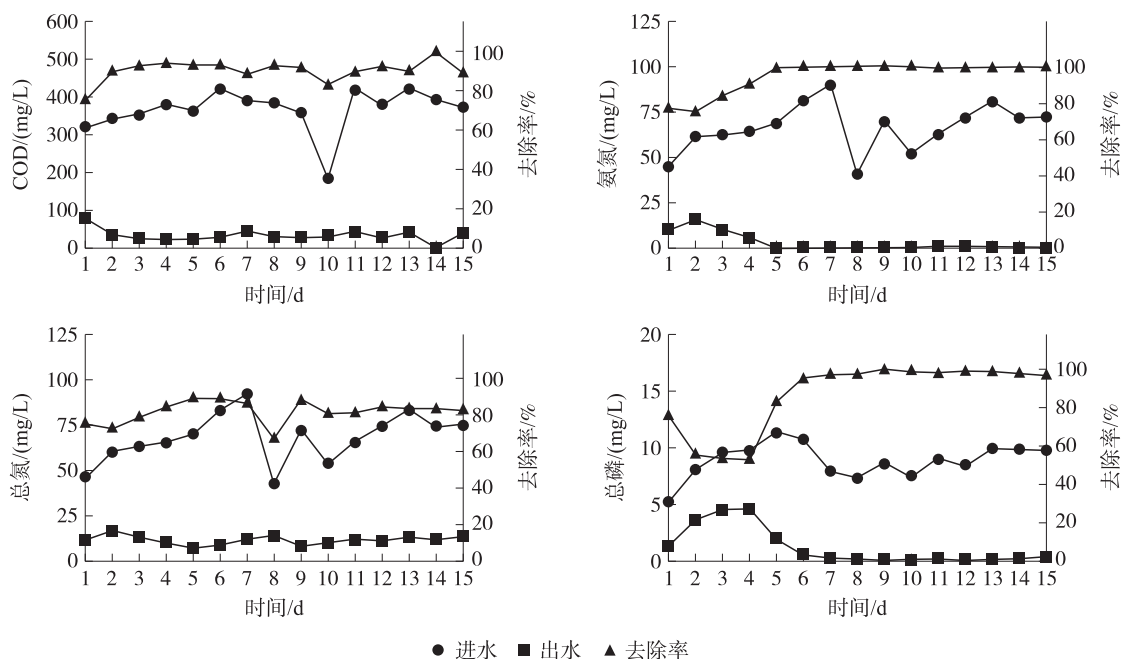


图 7 生活污水一体化处理设备进出水中 COD、氨氮、总氮、总磷的含量及其去除率

Fig. 7 Content and removal rate of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus in influent and effluent of domestic sewage integrated treatment equipment

3 结论

本研究以电解曝气生物滤池作为核心工艺,同时利用电絮凝、电催化技术进一步强化脱氮除磷效果.以上述技术为核心的一体化污水处理装置对高浓度的人工模拟污水具有较好的处理效果,挂膜启动时间较短,具有较好的抗冲击负荷能力.通过实验确定电解曝气生物滤池、电絮凝生物滤池、电催化槽的电流密度及水力停留时间等参数.中试装置稳定运行期间,电解曝气生物滤池、电絮凝生物滤池、电催化槽的电流密度分别为 20、20、150 A/m²,对人工模拟污水中的污染物具有很好的去除效果,COD、氨氮、总氮、总磷的出水浓度基本稳定在 50、1、15、0.5 mg/L 以下,去除率分别达到 90%、99%、80%、98%,达到 GB 18918—2002 的一级 A 标准.其中总氮的去除率较低,可能是由于电解生物滤池极板覆盖面积有限,可以在电催化槽出水区域增加 1 块阴极极板来提高反硝化效果,进一步降低总氮指标.装置稳定运行期

间,每吨水的处理成本为3.84元。曝气生物滤池具有较好的脱氮除磷性能,但对于氮、磷的高效去除很难同时满足,并且,施工期生活污水的污染物含量较高,曝气生物滤池很难对其处理完全,本研究引入电化学技术,强化整个系统的脱氮除磷效率,可以有效解决上述存在问题。

[参考文献]

- [1] 翟红娟,彭才喜,王孟. 金沙江旭龙水电站施工期水环境影响研究[J]. 中国农村水利水电,2021(5):188-192.
- [2] SHRITAMA M,ANIMESH J,SOURJA G,et al. Arthrospira sp. mediated bioremediation of gray water in ceramic membrane based photobioreactor:process optimization by response surface methodology[J]. International journal of phytoremediation, 2022,24(13):1364-1375.
- [3] DEY CHOWDHURY S,BHUNIA P,SURAMPALLI R Y. Sustainability assessment of vermifiltration technology for treating domestic sewage:a review[J]. Journal of water process engineering,2022,50(1):103266.
- [4] 徐波,周正兵,甘雁飞,等. 不同填料曝气生物滤池处理生活污水效能研究[J]. 水处理技术,2020,46(6):126-129.
- [5] RATTIER M,JIMENEZ J A,MILLER M W,et al. Long-term comparison of pilot UASB and AnMBR systems treating domestic sewage at ambient temperatures[J]. Journal of environmental chemical engineering,2022,10(6):108489.
- [6] WANG C S,NG T C A,DING M Y,et al. Insights on fouling development and characteristics during different fouling stages between a novel vibrating MBR and an air-sparging MBR for domestic wastewater treatment[J]. Water research, 2022, 212:118098.
- [7] 包木平,冯振鹏,赵芳,等. 高密度沉淀池/BAF工艺处理生活污水的应用[J]. 水处理技术,2021,47(8):137-140.
- [8] REN W,CAO F F,CHAI B B,et al. Enhancing nitrogen removal from domestic sewage with low C/N ratio using a biological aerated filter system with internal reflux-coupled intermittent aeration[J]. Biochemical engineering journal, 2022, 185:108532.
- [9] 钟登杰,胡芝悦. 电化学法处理生活污水研究进展[J]. 工业水处理,2016,36(4):5-9.
- [10] JI Y Y,NIU J F,XU D,et al. Efficient electrocatalysis for denitrification by using TiO₂ nanotube arrays cathode and adding chloride ions[J]. Chemosphere,2021,274:129706.
- [11] 仲昭宇,宦恒庆,缪莉,等. 电化学氧化处理有机废水综述[J]. 当代化工研究,2019(13):42-44.
- [12] 侯鹏飞,陈晓飞,祁浩杰,等. 电化学氧化工艺处理高氨氮制药废水[J]. 净水技术,2023,42(1):115-121.
- [13] 周杰,宋小三,王三反. 水处理电絮凝技术的研究进展与挑战[J]. 化工进展,2020,39(S2):329-335.
- [14] 杨亚红,朱立帆,杨兴峰,等. 电絮凝技术深度除低浓度磷的研究进展[J]. 水处理技术,2023,49(4):20-26.
- [15] WU Z Y,ZHU W P,LIU Y,et al. An integrated biological-electrocatalytic process for highly-efficient treatment of coking wastewater[J]. Bioresource technology,2021,339:125584.
- [16] SAMADIKUN B P,OKTIAWAN W,RAIS A K,et al. Effect of electrode configuration and voltage variations on electrocoagulation process in phosphate removal of laundry wastewater[J]. IOP conference series:earth and environmental science,2021,896(1):012025.
- [17] 俞汉青. 一种快速、简便的挂膜方法[J]. 化工给排水设计,1988(3):39-41.
- [18] 陆少鸣,方平,杜敬,等. 曝气生物滤池挂膜的中试实验[J]. 水处理技术,2006,32(8):67-69.
- [19] ELNAKER N A,HASAN S W,YOUSEF A F. Impact of current density on the function and microbial community structure in electro-bioreactors[J]. Journal of hazardous materials,2019,368(1):877-884.
- [20] 钱琪卉,于元超,王皓,等. 基质种类和电流强度对电解强化潜流人工湿地运行性能影响[J]. 安徽农业大学学报, 2021,48(6):981-988.
- [21] FARABEGOLI G,CHIAVOLA A,ROLLE E. The biological aerated filter(BAF)as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance[J]. Journal of hazardous materials,2009,171(1/3):1126-1132.
- [22] 易彪. 曝气生物滤池脱氮除磷性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [23] GAO Y,XIE Y W,ZHANG Q,et al. High performance of nitrogen and phosphorus removal in an electrolysis-integrated biofilter[J]. Water science & technology,2016,74(3):714-721.
- [24] 王永祺. 电催化-电絮凝技术高效处理船舶生活污水的效能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.

[责任编辑:丁 蓉]