

某制革园区污水处理项目改造设计实例

张 燊¹, 李 超², 马 坤¹, 刘 强¹

(1. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要: 针对某制革园区污水处理系统不能满足一级 A 排放标准的问题,对现有污水处理系统进行整体改造。改造方案统筹布置事故水处理、混合水处理系统及中水回用系统,其中事故水处理系统采用粗格栅+提升泵站+事故水调节池+絮凝沉淀池+事故水储池;混合水处理系统采用预处理+絮凝初沉池+缺氧池+MBBR 与 PACT 组合好氧池+二沉池+絮凝沉淀池+反硝化深床滤池+臭氧接触池工艺,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准;中水回用系统对处理后达标水进行二氧化氯消毒,出水水质满足制革企业生产用水要求。详细介绍了污水处理项目的现状、设计水质、工艺设计方案、主要经济技术指标及调试运行等。

关键词: 制革废水; MBBR; PACT; 反硝化深床滤池; 臭氧接触池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)10-0105-06

Case Study of a Wastewater Treatment Renovation Project in a Tannery Park

ZHANG Shen¹, LI Chao², MA Kun¹, LIU Qiang¹

(1. Environmental Engineering Co. Ltd. of SAES, Jinan 250013, China; 2. Shandong Academy of Environmental Science Co. Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: The current treatment system was renovated wholly to solve the unqualified effluent of a wastewater treatment process in a tannery park. In the reconstruction plan, the accident water treatment, mixed wastewater treatment system and the reclaimed wastewater reuse system were arranged as a whole, in which the accident water treatment system adopted rough grille, lifting pump station, regulation tank, flocculation sedimentation tank and storage tank. The combined process including pretreatment, primary flocculation settling tank, anoxic tank, combination of MBBR and PACT aerobic tank, secondary setting tank, flocculation and settling tank, denitrification deep bed filter and ozone contact tank were used in the mixed wastewater treatment system. The effluent quality could meet the first level A criteria of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 - 2002). The effluent disinfected by chlorine dioxide could meet the production requirement of the tannery enterprise. The present situation, designed wastewater quality, process design scheme and the main economic and technical indicators were elaborated.

Key words: tannery wastewater; MBBR; PACT; denitrification deep bed filter; ozone contact tank

1 工程概述

某制革工业区始建于 1997 年,现占地近 20

hm²,包括制革企业 100 余家,其中牛皮、羊皮制革企业占 70% 左右,其余为毛革企业和硝染企业等。

主要产品有羊皮服装革及鞋面革、牛皮服装革及鞋面革、裘皮革、皮革服装及毛革一体鞋等。在生产过程中产生的制革废水具有盐度高、有机物高、氨氮高、含有硫化物和总铬等无机有毒化合物等特点^[1]。园区内所有制革企业清洁生产水平达到清洁生产三级标准。

该制革工业区现有 4 座污水处理厂,分别为水处理中心、园区一厂、园区二厂及园区三厂。市区的部分市政污水(包括生活污水、淀粉、橡胶等工业废水以及地热废水)由水处理中心处理,制革工业区的工业废水则形成了企业自建污水处理厂预处理,到园区污水处理厂二级处理,最终排入水处理中心三级处理的废水处理模式。

① 水处理中心

水处理中心设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前分为两个时段进水:非供暖期进水量为 $(7 \sim 8) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,供暖期进水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。现有处理工艺流程为进水井+粗格栅+提升泵站+细格栅+旋流沉砂池+厌氧池+氧化沟+二沉池+二级提升泵站+配水渠+V型滤池+消毒渠,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。目前,水处理中心进水主要为市政污水(占比为 65%)和制革废水(占比为 35%),由于进水水质严重超过设计进水水质且波动范围大、生化系统效率低以及设备老化破损等,出水水质不能稳定达标。

② 园区一厂

园区一厂设计规模为 $9\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该污水处理厂已经废弃,故本次改造工程不予考虑。

③ 园区二厂、三厂

园区二厂的设计处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,园区三厂的设计处理规模为 $2.55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前,这两座污水厂均仅有集水池运行,出水经泵站提升至水处理中心,而且部分构筑物及设备老化破损、腐蚀严重。

为确保整个污水处理系统出水水质稳定达标,需要对水处理中心及园区二厂、园区三厂进行整体改造。

各污水处理厂的功能定位见图 1。

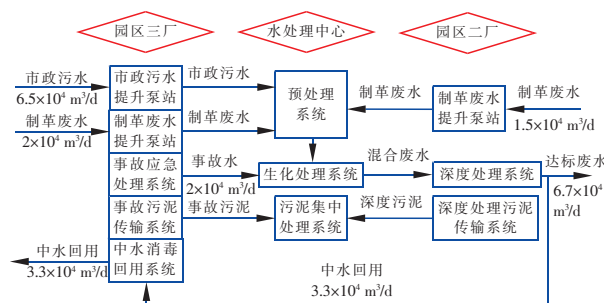


图 1 各污水厂功能定位

Fig. 1 Functional orientation of sewage treatment plants

2 设计水质

2.1 进水水质

制革废水设计进水水质参照《制革及毛皮加工工业水污染物排放标准》(GB 30486—2013)表 2 的间接排放限值,见表 1。

表 1 制革废水设计进水水质

Tab. 1 Design quality of tannery wastewater

项目	pH 值	色度/倍	SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	动植物油/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	六价铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氯离子/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	6~9	≤100	≤120	≤80	≤300	≤30	≤70	≤140	≤4	≤1.5	≤0.1	≤5 000

市政污水(包括生活污水、淀粉、橡胶等工业废水以及地热废水)进水水质见表 2,并应满足《污水

排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)表 1 中 A 级要求。

表 2 市政污水设计进水水质

Tab. 2 Design quality of municipal wastewater

项目	pH 值	BOD ₅ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	动植物油/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	石油类/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	六价铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氯离子/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	6~9	≤200	≤500	≤70	≤140	≤300	≤10	≤100	≤20	≤1.5	≤0.5	≤1 000

2.2 设计出水水质

根据当地环保部门要求,设计出水水质执行

《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,如表 3 所示。

表 3 设计出水水质

Tab.3 Design effluent quality

项目	pH 值	色度/ 倍	SS/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	COD/ (mg · L ⁻¹)	动植物油/ (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	总氮/ (mg · L ⁻¹)	总磷/ (mg · L ⁻¹)	总铬/ (mg · L ⁻¹)	六价铬/ (mg · L ⁻¹)	石油类/ (mg · L ⁻¹)
数值	6~9	≤30	≤10	≤10	≤50	≤1	≤5(8)	≤15	≤0.5	≤0.1	≤0.05	≤1

3 工艺设计方案确定

3.1 方案选择

① 预处理

进水 COD 波动范围较大(市政污水:300~850 mg/L,制革废水:220~400 mg/L),且进水 SS 较高,因此,在生物处理前增加预处理措施。预处理采用常规絮凝沉淀工艺,去除大部分 SS 及部分 COD,以减少对后续生物处理的冲击负荷。

② 生物处理

现状生物处理工段为“缺氧池+奥贝尔氧化沟”工艺,奥贝尔氧化沟具有同步硝化反硝化的功能,且具有一定的耐冲击负荷能力,但由于市政污水实际进水水质超出原设计能力,使得此工艺的脱氮及去除 COD 能力不能满足现状水质的要求,因此需进行改造提升,强化生物处理效果。综合考虑占地面积、技术经济可行性,同时结合其他类似工程的应用实例及前期小试、中试结果,拟采用 MBBR 工艺对氧化沟进行改造^[2]。根据 MBBR 试验结果,进水 COD 波动较大时,出水 COD 稳定在 90 mg/L 左右,与排放标准仍有较大差距,仅靠后续深度处理实现达标排放的成本较高,因此,借鉴其他制革污水厂的设计运行经验,采用 PACT 工艺强化生物处理,使曝气池内同时发生生物降解与物理吸附两种作用,粉末活性炭可吸附去除溶解性的不可降解有机物,减

少工业废水对微生物降解反应的抑制作用,进一步提高生化过程对 COD 的去除率^[3-4]。根据经验数据,当粉末活性炭投加量为 50~100 mg/L 时,可去除难降解 COD 为 30~50 mg/L。综上所述,生物处理采用 MBBR 与 PACT 组合工艺。

③ 强化脱氮

现状进水 TN 为 120~140 mg/L,出水 TN 为 30~40 mg/L,缺氧池实际平均停留时间为 14.7 h。根据理论计算,已达到其最大处理能力,因此必须增加后置反硝化措施以保证出水 TN 达标。根据全国多地采用反硝化深床滤池的经验^[5-6],拟采用后置反硝化深床滤池,其工艺运行灵活,可实现生物脱氮模式和纯过滤模式自由切换,也可在生物脱氮的同时起到过滤作用,从而节省投资。

④ 深度处理

深度处理主要去除 COD、SS 及色度。MBBR 出水絮凝沉淀及臭氧氧化试验结果显示,絮凝沉淀对 COD 的去除率为 30% 左右,臭氧对 COD 的去除率为 15%~40%。结合臭氧在其他工业废水处理中的案例^[7],确定深度处理工艺为絮凝沉淀+臭氧氧化组合工艺。

3.2 工艺流程

制革园区污水处理及污泥处理工艺流程如图 2 所示。

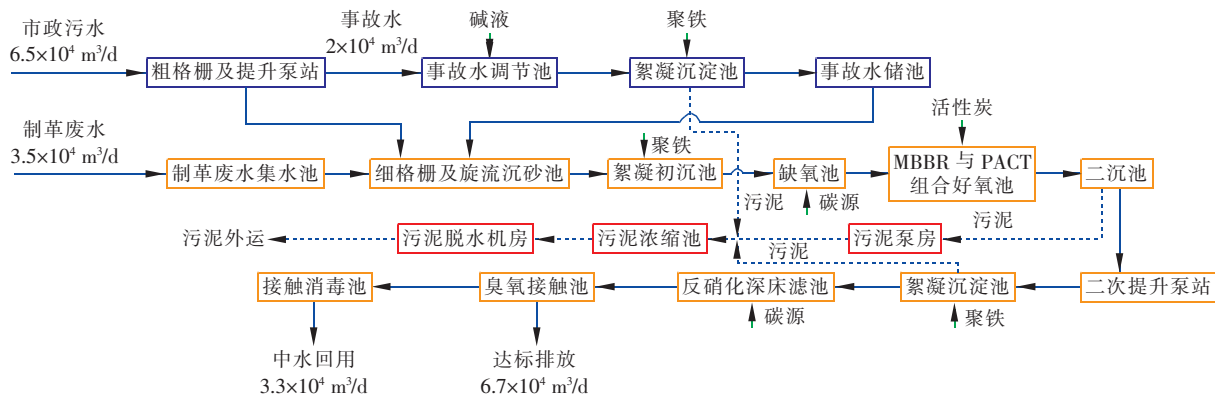


图 2 污水及污泥处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater and sludge treatment process

4 工艺设计

4.1 基础数据

设计总规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 其中, 市政污水设计平均流量为 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (生活污水 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 橡胶、淀粉等工业废水及地热废水共计 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 变化系数为 1.35, 设计最大流量为 $656.3 \text{ m}^3/\text{h}$; 皮革废水设计流量为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (折合 $1458.3 \text{ m}^3/\text{h}$); 混合污水设计最大流量为 $5114.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。事故应急处理系统设计平均流量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 中水回用系统设计平均流量 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.2 事故应急处理系统

① 事故水调节池。利用原有的池体改造, 2 座。设计停留时间为 24 h。

② 絮凝初沉池。利用原有的池体改造, 4 座。将现有的一级反应池改造为絮凝反应池及配水井, 现有的絮凝沉淀池及一级生化沉淀池改造为沉淀池, 增加絮凝反应搅拌机, 更换沉淀池刮泥机。絮凝时间为 23 min, 聚铁投加量为 $30 \sim 50 \text{ mg/L}$, PAM 投加量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 。辐流沉淀池设计表面负荷为 $0.82 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

4.3 废水处理系统

4.3.1 预处理

① 粗格栅及提升泵站。粗格栅渠宽为 1.8 m, 2 条; 提升泵站有效集水容积为 175 m^3 , 1 座, 与粗格栅合建。该单元用于去除可能堵塞水泵及管道阀门的较大悬浮物质, 以保证后续处理设施正常运行, 同时将污水提升以满足后续处理单元的高程要求。

② 细格栅渠及旋流沉砂池(改造)。利用原有池体, 2 座。更换细格栅机、罗茨鼓风机、提砂器、砂水分离器等设备。该单元主要去除污水中细小悬浮物及无机砂粒, 降低生物处理负荷。

③ 絮凝初沉池(改造)。半地下钢混结构, 3 座。将现有缺氧/厌氧池的前两条廊道通过垫高底板改造为絮凝初沉池; 增加絮凝反应搅拌机、链条式刮泥机和排泥泵。该单元主要功能为投加絮凝剂, 使絮凝剂与污水充分混合并发生絮凝反应, 沉淀部分悬浮物, 减轻后续生化处理负荷。絮凝时间为 10 min, 聚铁加药量为 $30 \sim 50 \text{ mg/L}$, PAM 投加量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 。新增反应搅拌机 12 台。平流式沉淀池设计表面负荷为 $2.84 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 单座尺寸 ($L \times B$) 为 $7.9 \text{ m} \times 31.0 \text{ m}$ (分 2 格), 有效水深为

4.0 m。新增链条式刮泥机 12 台, 排泥泵 6 台。

4.3.2 生化处理

① 缺氧池(改造)。半地上钢混结构, 3 座, 停留时间为 7.3 h, 有效水深为 6.1 m。将现有缺氧/厌氧池的后 6 条廊道改造为缺氧池, 更换现有搅拌机, 增加污泥回流管道及改造混合液内回流管道。

② MBBR 好氧池(改造)。半地下钢混结构, 3 座, 利用现有氧化沟改造。将现有氧化沟的转碟曝气改造为池底微孔曝气; 增加推流器; 更换混合液回流泵; 投加粉末活性炭, 中沟投加 MBBR 生物填料, 其他设备继续利用。单座池体水力停留时间为 14.5 h, 有效水深为 4.4 m, 污泥浓度为 $3500 \sim 4500 \text{ mg/L}$, 粉末活性炭日常投加量为 $30 \sim 100 \text{ mg/L}$, 污泥回流比为 100%, 混合液回流比为 100%~200%, 污泥负荷为 $0.11 \text{ kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$, 总氮负荷为 $0.034 \text{ kgTN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$, 气水比为 11.8:1。新增微孔曝气管为 8145 m, 生化填料为 6000 m^3 , 潜水推流器 30 台, 混合液回流泵 9 台。

③ 二沉池(利旧)。辐流式圆形沉淀池, 直径为 50 m, 3 座。

4.3.3 深度处理

① 二次提升泵站。地下钢混矩形结构, 1 座。集水池容积为 280 m^3 , 尺寸 ($L \times B \times H$) = $10.0 \text{ m} \times 8.0 \text{ m} \times 5.2 \text{ m}$ 。设置污水提升泵 5 台。

② 絮凝沉淀池。半地上式钢混结构, 4 座。该单元主要投加絮凝剂, 强化去除 COD、SS、TP、色度等, 并进行固液分离。絮凝反应区设计停留时间为 22 min, 聚铁投加量为 $30 \sim 50 \text{ mg/L}$, PAM 投加量为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$, 设置反应搅拌机 16 台。平流沉淀池设计表面负荷为 $1.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 水平流速为 6.6 mm/s , 单座尺寸 ($L \times B$) = $52 \text{ m} \times 17 \text{ m}$, 有效水深为 4.5 m, 设桁车式刮泥机 4 台, 排泥泵 8 台。

③ 反硝化深床滤池。半地上式钢混结构, 1 座(分 9 格)。设计滤速为 5.6 m/h , 强制滤速为 6.7 m/h , 单格过滤面积为 83.66 m^2 , 滤料厚度为 2.0 m, 滤料为 1505.88 m^3 , 空气冲洗强度为 $13 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 水冲洗强度为 $4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。设置桨叶式搅拌机 3 套, 气动铸铁镶铜闸门 9 台, 不锈钢配水堰板 18 块以及滤砖 753 m^2 。

④ 臭氧接触池。半地上式钢混结构, 防腐, 1 座分 4 组, 尺寸 ($B \times L \times H$) = $21.85 \text{ m} \times 24.8 \text{ m} \times 8.85 \text{ m}$ 。设计接触时间为 67 min, 臭氧投加量为 14

mg/L,有效水深为8.1 m。设置臭氧扩散器4套。

4.4 污泥处理

污泥处理系统主要包括园区三厂事故污泥传输系统、园区二厂深度处理污泥传输系统及水处理中心污泥集中处理系统。

a. 污泥浓缩池。半地上式钢混结构,2座。设计池径 $\varnothing=18$ m,池深5 m,设计污泥总量为24 250 kgDS/d,固体通量为 $47.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。设置污泥浓缩机2台。

b. 污泥调理池。半地上式钢混结构,1座,尺寸 $(L \times B \times H)=13.4 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ 。设置搅拌机2台、螺旋输送机1台、石灰料仓1套。

c. 污泥脱水机房。地上式框架结构,1座,尺寸 $(L \times B \times H)=32.6 \text{ m} \times 23.0 \text{ m} \times 12.3 \text{ m}$ 。设计干污泥总量为24 250 kgDS/d,湿污泥量为1 262.5 m^3/d ,进泥含水率为97%~98%,出泥含水率为55%~60%。设置板框压滤机5台,水平带式旋输送机5套,倾斜带式旋输送机1套,电动葫芦3套。

d. 污泥泵房。地上式框架结构,1座,尺寸 $(L \times B \times H)=20.0 \text{ m} \times 10.8 \text{ m} \times 5.9 \text{ m}$ 。设低压进料螺杆泵6套、压榨螺杆泵6套、滤布洗涤泵2套、污泥输送泵3套、PAM加药系统1套、空气压缩机2台、压榨水箱1套、洗布水箱1套、电动葫芦2套。

4.5 中水回用系统

① 接触消毒池。利用现有的一级生化池改造,1座。拆除现有的曝气系统,并对池体进行维护处理。设计停留时间为50 min。

② 清水池。利用现有的一级生化池改造,1座。设计停留时间为4 h。

③ 回用水泵房。1座,平面尺寸 $(L \times B)=15.6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,设置离心泵4台。

5 主要经济指标

设计处理水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,总投资约1.8亿元,劳动定员70人。直接运行费用为2.19元/ m^3 ,其中:人工费0.10元/ m^3 ,电费0.52元/ m^3 ,药剂费1.62元/ m^3 ,污泥处置费0.04元/ m^3 ,自来水费0.01元/ m^3 。

6 调试运行情况

自2018年3月初进入调试阶段,先将MBBR池的污泥浓度控制在 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ mg/L}$,然后投加粉末活性炭,其孔容积 $\geq 0.65 \text{ mL/g}$,比表面积 $\geq 800 \text{ m}^2/\text{g}$,堆积密度 $\geq 450 \text{ g/L}$,碘吸附值 $\geq 900 \text{ mg/g}$,粒

度:200目。粉末活性炭分三批投加,3 d内完成一次投加,9~12 d完成全部投加,将MBBR池中粉末活性炭浓度提高至 $2\,500 \text{ mg/L}$ 。投加完成15 d后,按照 $30 \sim 50 \text{ mg/L}$ 连续投加,控制粉末活性炭的停留时间为90 d,保证MBBR池的粉末活性炭浓度在 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ mg/L}$ 。

2018年4月初,污水厂开始稳定运行,除TN外,其余指标均优于排放标准;TN于2018年11月开始稳定达标。运行中控制反硝化深床滤池进水 $\text{DO} \leq 2 \text{ mg/L}$,乙酸钠投加量为 $30 \sim 35 \text{ mg/L}$,臭氧投加量为 $10 \sim 15 \text{ mg/L}$ 。2018年11月—12月污水处理厂的出水水质实测数据见图3、4。根据实验室实测数据,COD平均值为 30.5 mg/L , NH_3-N 平均值为 0.6 mg/L ,TN平均值为 11.5 mg/L ,TP平均值为 0.20 mg/L ,出水水质优于排放标准。

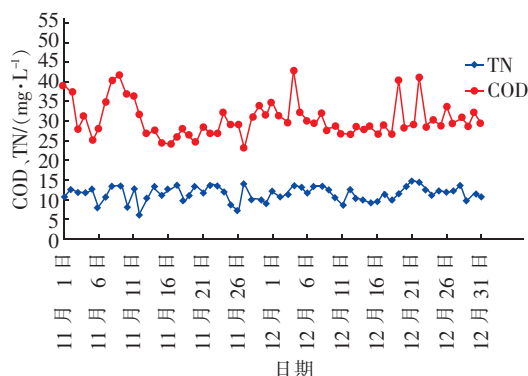


图3 实测出水COD及TN

Fig.3 Content of COD and TN in the effluent

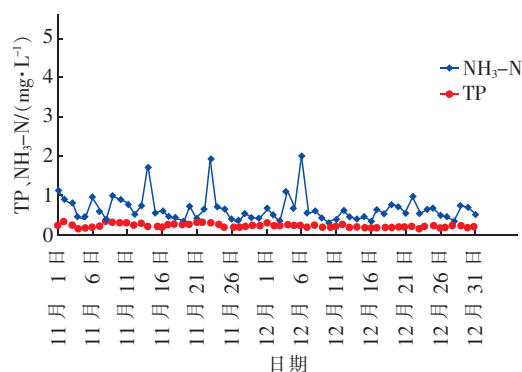


图4 实测出水 NH_3-N 及TP

Fig.4 Content of NH_3-N and TP in the effluent

7 结论

① 制革园区污水处理项目改造采用“预处理+絮凝初沉池+缺氧池+MBBR与PACT组合好氧池+二沉池+絮凝沉淀池+反硝化深床滤池+臭

氧接触池”工艺,调试运行结果显示,整套工艺处理效果稳定、经济可行。

② MBBR 与 PACT 组合工艺首次应用在制革废水生化处理系统改造中,运行中控制污泥浓度为 $3\,500 \sim 4\,500\text{ mg/L}$,粉末活性炭浓度为 $2\,000 \sim 3\,000\text{ mg/L}$ 。实践证明,该工艺能够显著提高系统的抗冲击负荷能力及有效去除氨氮和可溶性难降解污染物。

③ “强化絮凝沉淀+反硝化深床滤池+臭氧高级氧化”首次利用在含制革废水的深度处理系统中,控制反硝化深床滤池进水 $\text{DO} \leq 2\text{ mg/L}$,乙酸钠投加量为 $30 \sim 35\text{ mg/L}$,臭氧投加量为 $10 \sim 15\text{ mg/L}$ 。运行实践证明,该工艺能够有效去除 TN 和难生化降解的 COD。

参考文献:

- [1] 吴娜娜,郑璐,李亚峰,等. 皮革废水处理技术研究进展[J]. 水处理技术,2017,43(1):1-5.
Wu Nana,Zheng Lu,Li Yafeng, *et al.* Research progress in the treatment technologies of tannery wastewater[J]. Water Treatment Technology, 2017, 43(1):1-5 (in Chinese).
- [2] 刘宜龙,吴迪,刘飞,等. MBBR 在工业园区废水处理升级改造中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(17):14-18.
Liu Yilong,Wu Di,Liu Fei, *et al.* Application of MBBR in industrial park WWTP upgrading[J]. China Water & Wastewater,2017,33(17):14-18 (in Chinese).
- [3] 张龙,涂勇,郭方峥,等. 化工产业为主的工业园区污水处理厂提标改造工程设计[J]. 中国给水排水,2014,30(18):76-80.
Zhang Long,Tu Yong,Guo Fangzheng, *et al.* Design of upgrading and reconstruction project of wastewater treatment plant in chemical industrial park[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(18):76-80 (in Chinese).
- [4] 吴伟,张龙,刘伟京. PACT 工艺系统中的吸附和生物降解性能研究[J]. 环境科学研究,2010,23(8):1064-1067.
Wu Wei,Zhang Long,Liu Weijing. Adsorption and biodegradation effects in PACT process systems[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(8):1064-1067 (in Chinese).
- [5] 陈莉,雷睿,刘洋,等. 反硝化深床滤池/电磁催化臭氧氧化用于污水厂升级改造[J]. 中国给水排水,2016,32(20):44-47.
Chen Li,Lei Rui,Liu Yang, *et al.* Application of denitrification deep bed filter and electromagnetic catalytic ozonation to upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2016,32(20):44-47 (in Chinese).
- [6] 严国奇,张丽丽. 七格三期污水处理厂反硝化深床滤池的调试与运行[J]. 中国给水排水,2017,33(16):127-132.
Yan Guoqi,Zhang Lili. Commissioning and operation of deep-bed denitrification filter in Qige phase III wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater,2017,33(16):127-132 (in Chinese).
- [7] 田文达. EGSB/水解/三级 AO/臭氧接触池/BAF 处理皮革废水[J]. 中国给水排水,2017,33(20):127-132.
Tian Wenda. Tannery wastewater treatment by combined process of EGSB/hydrolysis acidification tank/three stage AO/ozone contact tank/biological aerated filter[J]. China Water & Wastewater,2017,33(20):127-132 (in Chinese).



作者简介:张燊(1986-),女,山东青岛人,硕士,工程师,主要从事污水处理应用研究和工程咨询设计工作。

E-mail:zhangshen860306@163.com

收稿日期:2018-10-20