

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.013

无锡市某工业污水处理厂准Ⅳ类提标改造工程设计

张万里, 陈晓光, 程文, 冯仕训
(无锡市政设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214072)

摘要: 无锡市某工业污水处理厂规模 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 考虑适当超前的原则, 其提标改造工程设计出水水质执行准Ⅳ标准(TN 除外)。但由于进水中工业废水含量较高且种类复杂, 为确保稳定达标, 在中试研究结论的基础上, 采用了浅层气浮工艺强化预处理, 增设曝气生物滤池 + 反硝化滤池 + 均相臭氧催化氧化工艺进行深度处理。工程投产后实际出水水质稳定达到了设计要求, 同时可根据来水水质灵活调整运行参数, 以减少运行成本。

关键词: 工业污水处理厂; 提标改造; 准Ⅳ类标准

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0070-06

Design of an Industrial Wastewater Treatment Plant Quasi-Ⅳ Standard Upgrading and Reconstruction Project in Wuxi

ZHANG Wan-li, CHEN Xiao-guang, CHENG Wen, FENG Shi-xun
(Wuxi Municipal Design Institute Co. Ltd., Wuxi 214072, China)

Abstract: Treatment capacity of an industrial wastewater treatment plant in Wuxi is $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. Base on the principle of moderate advance, the designed effluent quality needs to meet surface water quasi-Ⅳ standard (except TN) in the upgrading and reconstruction project. However, the influent is characterized by a high proportion of industrial wastewater and complex composition. In order to ensure that the effluent quality meeting the discharge standard, shallow air flotation was employed as the pretreatment process, and biological aerated filter (BAF), deep bed denitrification filter and homogeneous catalytic ozonation technology were constructed to be the advanced treatment process based on the results of pilot experiments. After application of the project, the actual effluent quality stably met the design requirements, and it was flexible for managers to modify operating parameters according to the influent quality to reduce the operational cost.

Key words: industrial wastewater treatment plant; upgrading and reconstruction; quasi-Ⅳ standard

1 项目概况

无锡市某工业污水处理厂规模 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 服务面积 26.2 km^2 , 收水范围内工业企业较多, 且涵盖电子(线路板)、食品、印染、化工、机械加工等多个类别, 进水中工业废水的比例达 50% 左右, 原设计中采用 MBR 工艺作为主体工艺, 出水水质执行一级 A 标准。

1.1 原工艺流程

原工艺流程如图 1 所示。由于尚未建成“一企一管”的监管机制, 部分工业企业废水排放浓度较高, 造成进厂污水有机物浓度高且不稳定, 出水有机物指标存在波动, 不利于尾水的达标排放, 同时也增加了污水厂的运行能耗和污泥量, 直接增加了运行成本。

随着《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)新标准的颁布,该厂的提标改造工程实施在即。

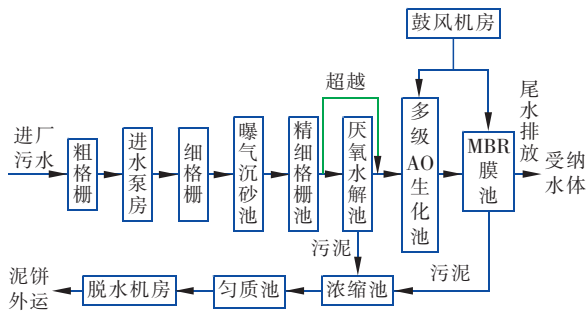


图1 原工艺流程

Fig.1 Original process flow

1.2 水量、水质

提标改造工程规模为 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 与原工程规模一致。

现状处理水量为 $(3.82 \sim 5.58) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 出水稳定达到一级 A 标准, 但受来水冲击影响, 出水 COD 波动较大 ($15 \sim 45 \text{ mg/L}$)。由于受纳水体为当地重点河道, 且有国考断面, 因此考虑排放标准适度超前, 本次提标改造该厂出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的准Ⅳ类标准 (TN 除外), 处理后的尾水经人工湿地进一步净化后排入受纳水体。

对近两年的进水水质分析表明, 由于进水中工业废水含量较高, 且存在较多的冲击, 进水有机物浓度波动明显, 取 90% 涵盖率的实际进水水质为本期工程设计进水水质, 具体设计进、出水水质指标如表 1 所示。

表1 提标改造前、后设计水质

Tab.1 Design influent and effluent quality before and after upgrading $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
原设计进水	500	165	250	25	40	5.0
提标改造设计进水	500	200	350	35	60	6
原设计出水	50	10	10	5(8)	15	0.5
提标改造设计出水	30	6	5	1.5(2.5)	10(12)	0.3

1.3 提标改造难点重点分析

根据实际进水情况, 本项目难点、重点如下:

① 在现有用地紧张条件下, 如何强化预处理, 减轻高浓度污水对后续处理工段的冲击;

② 如何进一步稳定高效地去除 MBR 出水中的难生物降解 COD, 保障出水有机物稳定达标。

为此, 建设单位于 2018 年 6 月—8 月针对高浓度进水的预处理、难生物降解有机物的深度处理, 分别进行了中试研究, 以保障所选技术路线满足污水厂的提标要求。

2 中试研究

2.1 预处理

为有效降低进入生化处理段的污染物浓度, 减轻后续处理段的负荷, 中试研究采用浅层气浮工艺, 进水为厂区进水泵房原水。

① 中试参数: 装置尺寸为 $\varnothing 4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$, 处理规模为 $80 \text{ m}^3/\text{h}$, 气浮停留时间为 $3 \sim 5 \text{ min}$, 处理负荷为 $6.37 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 回流比为 $10\% \sim 15\%$ 。

② 中试装置结构形式: 由气浮池体、布水装置、微气泡发生装置、微氧化强溶气装置、消能减压混合装置、加药系统、回流系统、刮渣系统等部分组成。

③ 药剂选用: 选用聚合氯化铝 (PAC) 作为絮凝剂, 配制浓度为 10% ; 聚丙烯酰胺 (PAM) 作为助凝剂, 配制浓度为 0.1% 。

中试结果显示:

① 浅层气浮系统能够有效降低进入后续处理工段的污染物负荷, 对 COD、SS、TP 的去除率分别为 $23\% \sim 56\%$ 、 $27\% \sim 62\%$ 、 $12\% \sim 67\%$, 对氨氮、总氮也有一定的去除效果, 但去除率不高。

② 同时使用混凝剂、助凝剂对来水进行处理, 对 COD、TP、SS 的去除效果比仅使用混凝剂更好, 但 PAC (10% 浓度) 的投加量不宜太高, 宜控制在 $150 \sim 250 \text{ mg/L}$, 一方面 PAC 投加量越大越不经济, 另一方面去除过多的有机物也会造成后续生化处理段碳源不足。

③ 同时使用混凝剂、助凝剂对来水进行处理, 对 SS 的去除效果较仅使用混凝剂优势不明显。

④ 来水浓度波动大不利于气浮系统的稳定运行^[1], 建议提标改造工程设置缓冲池或调节池, 对来水进行有效均质。

⑤ 助凝剂 (阴离子 PAM) 投加量在 $1 \sim 2.5 \text{ mg/L}$ 时已可以取得较好的去除率, 投加量继续增加去除率虽然也会提高, 但药剂成本增加较多。

2.2 COD 深度处理

由于进厂工业废水比例较高且成分复杂, 污水

厂委托相关检测机构对出水进行有机物成分测试,结果显示出水中的难降解有机物含量约为 40%。其中主要成分为 4-氨基苯甲酸、N-甲基吡咯烷酮、1,3-丙二醇、六甲基环三硅氧烷等有机物质,因此难以通过生化处理有效削减。中试研究采用了均相臭氧催化氧化工艺^[2],进水为污水厂的 MBR 工艺段出水。

① 中试参数:处理规模为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$,水力停留时间为 60 min。

② 中试装置结构形式:由氧气源臭氧发生器、均相催化反应器、臭氧高效溶气装置、催化氧化反应罐、尾气破坏装置等组成。

③ 药剂选用:有效浓度 99.5% 以上的液氧。

中试结果显示:

① 均相臭氧催化氧化对 COD 的去除效果较好,平均去除率为 45%,多数分布在 32%~55% 内。

② 均相臭氧催化氧化工艺要去除 1 mg 的 COD 约需投加 2.1 mg 的 O_3 ,投加更多的 O_3 虽然可以进一步提高 COD 去除率,但增幅不大,而电耗和液氧消耗量增加较多,性价比不高。

因此,可按照 2.1:1 的投加比指导设计并应用到具体的生产中。

③ 试验过程对出水 BOD_5 也进行了多次取样

检测,出水 BOD_5 均低于 5 mg/L ,甚至低于检测下限值 2 mg/L 。由此可见,臭氧催化氧化未能有效提高尾水的 B/C。

3 工艺流程

在中试研究的基础上,结合进一步去除污染物的需要和厂区用地条件,在多方案比选的基础上进行合理设计。

主要设计思路如下:

① 强化预处理,有效减轻后续处理单元的负荷,但不宜去除过多的有机物和 TP,以便于后续脱氮和微生物的生长繁殖。

② 强化二级生化处理,针对工业废水较多、进水有机物浓度较高的特点,提高供氧量;强化脱氮除磷,减轻后续深度处理段的负荷,在适当条件下可以超越部分深度处理单元,减少运行成本;同时增设部分膜组件,降低膜通量,延长使用寿命。

③ 从稳定达标的角度出发,增设 N、P、COD 深度处理单元,用以保障出水各项指标稳定达标,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 的去除尽量在二级生化段解决,TP 可以考虑通过生化段和深度处理段多点投加药剂来去除。

综合以上分析,本工程最终确定的工艺流程如图 2 所示。

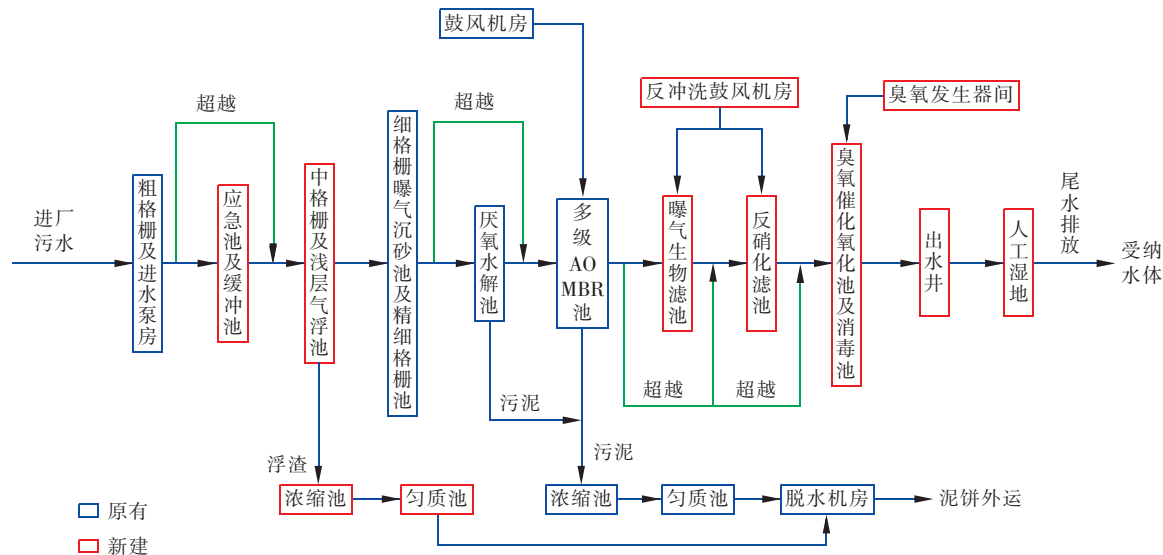


图 2 提标改造工程工艺流程

Fig. 2 Process flow chart of upgrading project

4 工程设计

提标改造工程在现有征地范围内建设,无需新征用地。

4.1 各处理段的预计出水水质

根据中试结果,结合 MBR 工艺的去除能力,各处理段的预计出水水质见表 2。

表2 各处理段预计出水水质

Tab.2 Supposed effluent quality of each section

项 目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ - N	TN	TP
设计进水	500	200	350	35	60	6
预处理段出水	400	180	200	35	60	3
二级生化处理段出水	45	6	5	3	15	0.5
深度处理段出水	28	4	5	1	10(12)	0.2

mg · L⁻¹

4.2 预处理系统

4.2.1 应急池及缓冲池

新建应急池及缓冲池一座,分为6格,应急池(5格)用于来水冲击负荷较大时应急调节使用,缓冲池(1格)用于缓冲滤池反冲洗废水,总有效池容10 937 m³。主要设备有潜水搅拌机6套(10 kW);应急池潜污泵4台(3用1备),其中2台为变频控制,单台 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=150\ \text{kPa}$, $N=90\ \text{kW}$;缓冲池潜污泵3台(2用1备),单台 $Q=300\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=80\ \text{kPa}$, $N=11\ \text{kW}$ 。

4.2.2 中格栅及浅层气浮池

新建中格栅与浅层气浮池一座,规模 $6.0 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。设中格栅3套、浅层气浮池4套。气浮池平均表面负荷 $5.77\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、回流比15%、气水比0.031。主要设备有内进流格栅3套,孔径5 mm,单套过流能力 $3.0 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,配套冲洗系统和栅渣输送、压榨系统;浅层气浮池主机4套($D=14\ \text{m}$),单套处理能力最大 $2.5 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,配套溶气系统4套、回流泵5套(4用1备,单台 $Q=160\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=600\ \text{kPa}$, $N=45\ \text{kW}$,变频控制)、压缩空气系统($Q=1.3\ \text{m}^3/\text{min}$)、PAM和PAC加药系统各一套;配套浮渣池一座(池内设搅拌装置,用以去除浮渣中的气泡,便于污泥脱水),设置浮渣输送螺杆泵2台(1用1备),将气浮的浮渣输送至新建的浓缩池。

4.3 深度处理系统

4.3.1 曝气生物滤池(BAF)

由于进水水质复杂,为避免生化处理段受冲击时活性污泥系统处理效果受影响而造成出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 超标,深度处理段设置一座BAF滤池,用于进一步去除有机物和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ (去除量按 $2\ \text{mg}/\text{L}$ 计),规模 $6.0 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,在实际运行中可以根据水质情况超越运行。采用BioforCN上向流曝气生物滤池,设计 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除负荷 $0.154\ \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,平均时水力

负荷 $8.65\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,分两系列,滤池分为6格,单格平面尺寸 $7.28\ \text{m} \times 6.63\ \text{m}$,曝气量 $25\ \text{m}^3/\text{min}$,过滤周期48 h,水洗强度 $20 \sim 30\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气洗强度 $100\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。主要设备有球形生物滤料(配套滤板、滤头等) $782\ \text{m}^3$ (滤床深度3.7 m)、空气压缩系统一套、阀门系统等。

4.3.2 反硝化滤池

设置下向流深床反硝化滤池一座^[3],主要用于保障出水TN(去除量按照 $7\ \text{mg}/\text{L}$ 计)的稳定达标。规模 $6.0 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,滤池分为8格,单格平面尺寸 $12.2\ \text{m} \times 4.88\ \text{m}$,池深5.8 m。滤池前端设有2组混合池,分别用于碳源、除磷药剂投加混合反应。平均水力负荷为 $5.25\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷为 $0.482\ \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,过滤周期24 h,水冲洗强度 $15\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气冲洗强度 $92\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。采用石英砂滤料,滤床深度1.83 m。

主要设备有混合搅拌机2台,功率为5.5 kW;气动铸铁镶铜闸门8套,规格 $B \times H=500\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$;气分布滤砖 $476.3\ \text{m}^2$,反冲洗配气管8套,滤料 $872\ \text{m}^3$,承托层 $183\ \text{m}^3$;压缩空气系统一套,阀门系统等。

4.3.3 臭氧催化氧化及消毒池

设置臭氧催化氧化池及消毒池一座,主要用于进一步去除难生物降解有机物,同时也起到尾水消毒、脱色的作用;考虑到滤池的反洗,在消毒池边拼建反冲洗泵房一座。设计臭氧最大投加量 $25 \sim 40\ \text{mg}/\text{L}$,COD去除量 $15 \sim 20\ \text{mg}/\text{L}$ 。臭氧催化氧化池分为两个系列,单系列分为三段,每段的臭氧投加比为 $2:1:1$,臭氧催化氧化池停留时间1.2 h。主要设备有均相催化反应器1套,高效臭氧溶气装置4套,Ⅰ段臭氧混合释放器2套,Ⅱ、Ⅲ段臭氧混合释放器4套,回流泵4台(定制泵, $Q=560\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=240\ \text{kPa}$, $N=55\ \text{kW}$,变频,不锈钢316L材质),尾气破坏装置2套,电动葫芦2套等;反冲洗泵房设有曝气生物滤池反洗泵3台(卧式离心泵, $Q=500\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=170\ \text{kPa}$, $N=37\ \text{kW}$,变频),反硝化滤池反洗泵3台(卧式离心泵, $Q=500\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=100\ \text{kPa}$, $N=30\ \text{kW}$,变频),厂区中水回用恒压供水系统1套,电动单梁起重机1套。

4.4 配套建(构)筑物

4.4.1 反冲洗鼓风机房及分变配电所

设置反冲洗鼓风机房及分变配电所1座,反冲

洗鼓风机房平面尺寸为22.0 m×15.0 m,分变配电所15.0 m×9.0 m。设有BAF滤池反冲洗鼓风机3台($Q=2\,414\text{ m}^3/\text{h}$, $H=95\text{ kPa}$, $N=90\text{ kW}$, 2用1备),BAF滤池工艺鼓风机3台($Q=750\text{ m}^3/\text{h}$, $H=90\text{ kPa}$, $N=37\text{ kW}$, 2用1备),反硝化滤池反冲洗鼓风机3台($Q=2\,760\text{ m}^3/\text{h}$, $H=73.5\text{ kPa}$, $N=90\text{ kW}$, 2用1备),电动单梁起重机1套。

4.4.2 臭氧发生器间

新建臭氧发生器间一座,该车间为乙类车间,采用防爆设计^[3],平面尺寸为34.2 m×8.5 m。主要设备有氧气源臭氧发生器4套(25 kg/h , $N=257\text{ kW}$)、闭路循环冷却水系统(含内循环冷却系统、水冷机组、外循环冷却系统、冷却塔等)、氮气投加系统等。

4.4.3 液氧站

新建液氧站一座,平面尺寸为16.0 m×7.0 m。设有 $V=30\text{ m}^3$ 液氧储罐2套、处理量 $1\,500\text{ m}^3/\text{h}$ 液氧汽化器2套、调压阀组以及充装电源箱1套。

4.4.4 反冲洗废水池

新建反冲洗废水池一座,平面尺寸为20.0 m×8.5 m,有效水深2.5 m。用于缓冲曝气生物滤池的反冲洗废水,避免对厂区污水管造成冲击。主要设备有潜水搅拌机1套($N=3.5\text{ kW}$),潜污泵3台(2用1备),单台 $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=80\text{ kPa}$, $N=11\text{ kW}$ 。

4.5 污泥处理系统

由于气浮浮渣量较大且密度低,为减轻现状浓缩池和脱水机的负荷,增设污泥浓缩池及匀质池一座,并增设1台带式浓缩脱水一体机。

4.5.1 污泥浓缩池及匀质池

新建污泥浓缩池及匀质池一座,浓缩池直径18 m、有效水深3.5 m、固体负荷 $40.0\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,匀质池直径4 m、有效水深4 m。主要设备有中心传动浓缩机1台($D=18\text{ m}$, $N=1.5\text{ kW}$)、框式搅拌机1台($D=4\text{ m}$, $N=5.5\text{ kW}$)。

4.5.2 污泥脱水机房改造

脱水机房现状设有2台2 m带宽的带式浓缩脱水一体机,本期工程新增1套同规格的脱水机,并配套污泥螺杆泵、冲洗泵、加药装置等设备;为便于污泥的存储和运输,新增污泥料斗一座。新增污泥量(主要为气浮池浮渣)为 375 kgDS/h ,脱水后污泥含水率 $\leq 80\%$ 。

4.6 生物除臭系统

现状预处理的除臭装置规模较小,无法满足本期工程的需求,故新增生物除臭系统1套予以替换,主要用于预处理区域的粗格栅及进水泵房、细格栅曝气沉砂池及精细格栅池、应急池及缓冲池、中格栅及浅层气浮池、厌氧水解池除臭。经核算,现状污泥处理系统除臭装置处理能力可以满足新增的浓缩池及匀质池、现状浓缩池及匀质池、脱水机房的除臭,因此本期工程不再增设。从节省投资、便于运维等方面考虑,经多方案比选,生物除臭系统的密封方式如表3所示。

表3 各建(构)筑物密封措施

Tab.3 Sealing measures of each unit

臭气源	密封措施
粗格栅及进水泵房	池体敞口处采用玻璃钢盖板密封,格栅及螺旋(压榨)输送机出渣口处采用钢化玻璃密封
中格栅及浅层气浮池	池体敞口处采用玻璃钢盖板密封,格栅设备主机整体密封,气浮池主机采用反吊膜密封
细格栅曝气沉砂池及精细格栅池	池体敞口处采用玻璃钢盖板密封,格栅设备主机整体密封,沉砂池采用随动式密封
应急池及缓冲池	池体敞口处采用玻璃钢盖板密封,其他土建方式密封
厌氧水解池	池体敞口处采用玻璃钢盖板密封,其他土建方式密封

根据除臭的范围,以及场所是否进人和预处理单元的特点选择换风次数,并考虑10%的漏风次数,本期工程的除臭风量为 $52\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。治理后的废气臭气浓度执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)中的厂界二级排放标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的废气排放二级标准。

主要设备有除臭主机1套($17.5\text{ m}\times 8\text{ m}\times 3.8\text{ m}$)、风机2台(1用1备, $Q=52\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $H=3\text{ kPa}$, $N=90\text{ kW}$)、循环水泵4台(2用2备, $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$)。

5 实际处理效果分析

该项目于2018年9月正式动工,2019年6月开始试运行,2019年10月正式投产,2019年10月—2020年3月的平均进、出水水质如表4所示。可见,该厂平均进水水质接近设计值,出水水质稳定达到设计要求的《地表水环境质量标准》(GB 3838—

2002)中的准Ⅳ类(TN 除外)排放标准,说明该工艺的处理效果较好。

表 4 实际水质指标及去除率

Tab. 4 Actual water quality and removal rates

项 目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ - N	TN	TP
进水/ (mg · L ⁻¹)	469	186	332	26.8	45.8	4.55
预处理段 出水/ (mg · L ⁻¹)	365	128	155	24.6	42.1	2.21
二级生化处 理段出水/ (mg · L ⁻¹)	27.2	4	4	0.42	5.88	0.11
深度处理 段出水/ (mg · L ⁻¹)	18	3	4	0.36	5.03	0.04
平均去 除率/%	96.16	98.39	98.80	98.66	89.02	99.12

本工程总投资 2.98 亿元,工程直接费 2.32 亿元。气浮处理段新增运行药剂费 0.08 ~ 0.15 元/m³,新增电费 0.03 ~ 0.05 元/m³;臭氧催化氧化处理段液氧费约 0.15 ~ 0.20 元/m³,新增电费 0.2 ~ 0.29 元/m³。

6 结论

① 本项目在中试研究的基础上,为保障出水水质稳定达标,设计采用了浅层气浮工艺强化预处理及曝气生物滤池 + 反硝化滤池 + 均相臭氧催化氧化深度处理工艺。经过 6 个月连续运行,出水水质能够稳定达到准Ⅳ类(TN 除外)排放标准,运行效果较好。

② 浅层气浮作为预处理工艺,能够有效去除进水中的油类、有机物、SS、TP,降低后续处理段的负荷。但水量和水质波动太大不利于气浮工艺的稳定运行(需要频繁调节加药量和回流量),为此本工程设置了调节池对进水进行缓冲调节以便于气浮的稳定运行;在浅层气浮池实际运行中应根据需要调整助凝剂、混凝剂的投加量,不宜大量投加,达到既节省药剂又便于后续生化处理的目的。

③ 均相臭氧催化氧化工艺可以进一步去除难

生物降解 COD,实际生产中臭氧投加比例约为 2 : 1 (投加量/去除量),与中试研究基本一致,实际运行中臭氧投加量约为 15 ~ 30 mg/L,COD 去除量约为 8 ~ 15 mg/L。

④ 对于工业废水较多、水质复杂的污水处理厂的提标改造项目,建议在分析进水水质特点的基础上,先进行相关特征污染物的中试研究,然后再确定合理的技术路线。

参考文献:

[1] 夏沈阳,李孟,闫爱萍,等. 浅层气浮—吸附再生—氧化沟工艺处理再生纸废水工程[J]. 给水排水,2014,40(11):42-44.
XIA Shenyang, LI Meng, YAN Aiping, *et al.* Reclaimed paper mill wastewater treatment by the process of shallow gas flotation - adsorption regeneration - oxidation ditch [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40 (11) : 42 - 44 (in Chinese).

[2] 栗文明,白永刚,周军,等. 臭氧催化氧化应用于工业园区污水处理厂深度处理工艺的选择及设计[J]. 给水排水,2019,45(5):90-93.
LI Wenming, BAI Yonggang, ZHOU Jun, *et al.* Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (5) : 90 - 93 (in Chinese).

[3] 李双凤. 净水厂臭氧制备车间的爆炸危险性分析及电气设计[J]. 给水排水,2012,38(2):120-123.
LI Shuangfeng. Explosion risk analysis and electrical design for ozone generation workshop in water treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38 (2) : 120 - 123 (in Chinese).

作者简介:张万里(1983 -),男,江苏泗阳人,硕士,高级工程师,无锡市政设计研究院有限公司第二分院副院长,主要从事水污染治理的设计咨询工作。

E-mail:13382889636@163.com

收稿日期:2020-07-10

修回日期:2020-09-14

(编辑:孔红春)