

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.016

陕西省某纺织工业园区污水处理厂提标改造工程实例

张鹏辉, 雷海东, 孔海霞

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 陕西省某纺织工业园区污水处理厂一期设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用预处理+混合池+BBR装置+BBR曝气池+二沉池处理工艺。现状BBR曝气池停留时间较短,二沉池负荷偏高,且缺少深度处理工艺。在有限的用地条件下,为满足提标水质要求,本次提标改造扩建混合池、BBR曝气池及二沉池,新建磁混凝沉淀池及臭氧接触氧化池深度处理设施,同时改造加药间及鼓风机房,以保证各处理单元对污染物的有效去除。通过枯水期构筑物的池容调蓄、增加临时管道及控制阀门,实现了不停产改造。该项目建成后运行良好,出水水质稳定达到《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018)的A标准。

关键词: 污水处理; 提标改造; BBR工艺; 不停产改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0098-06

Upgrading Case of a Textile Industrial Park WWTP in Shaanxi Province

ZHANG Peng-hui, LEI Hai-dong, KONG Hai-xia

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The first phase of the WWTP in a textile industrial park in Shaanxi Province has the capacity of $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, adopting the process of pre-treatment, mixed tank, baffled bioreactor (BBR) device, BBR aeration tank, and secondary sedimentation tank. The BBR aeration tank had short retention time, the secondary sedimentation tank had high load, and there was a lack of advanced treatment process. In order to meet the water quality requirements for upgrading, under the condition of limited land, the mixed tank, BBR aeration tank, and secondary sedimentation tank are expanded. A new magnetic coagulation process, and an ozone contact oxidation tank for advanced treatment facilities are built. Meanwhile, the dosing room and the air blower room are renovated to ensure the effective removal of pollutants by each treatment unit. The non-stop production renovation is achieved through the regulation and storage of the tank capacity of the structures during the dry season, the addition of temporary pipelines and control valves. The project operates well after completion, and the effluent quality stably reaches level A criteria in the *Integrated Wastewater Discharge Standard of Yellow River Basin in Shaanxi Province* (DB 61/224-2018).

Key words: wastewater treatment; upgrading and reconstruction; BBR process; non-stop production renovation

陕西省某纺织工业园区污水处理厂一期工程
设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,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,该项目自2014年建成投运后出水水质稳定达
标,运行效果良好。为响应国家黄河大保护战略,
2018年《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB

61/224—2018)发布,要求自2019年1月起施行。因该污水处理厂现状工艺及设施已不能满足新排放标准,故需进行提标改造。

本次提标改造需在不停产情况下,拆除现状部分构筑物,利用厂区现有预留用地,对生化处理单元进行改造,以实现有机物、 NH_4^+-N 及TN的有效去除,同时增加深度处理单元,以确保出水COD、TP及SS达标。

1 工程概况

1.1 工程规模

该纺织工业园污水处理厂设计总规模为 $18\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,其中一期设计规模 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,总变化系数1.4,占地约3.84 hm^2 。根据2018年—2019年实际进水量资料,最大进水量为 $2.8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平均进水量约 $1.1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

本次提标改造仅针对一期工程,同时根据园区发展需求,需考虑建设 $1.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 再生水系统供给园区企业生产及市政使用。

1.2 改造前工艺及水质

① 处理工艺

一期主体工艺采用预处理+BBR装置+BBR曝气池+二沉池,工艺流程见图1。

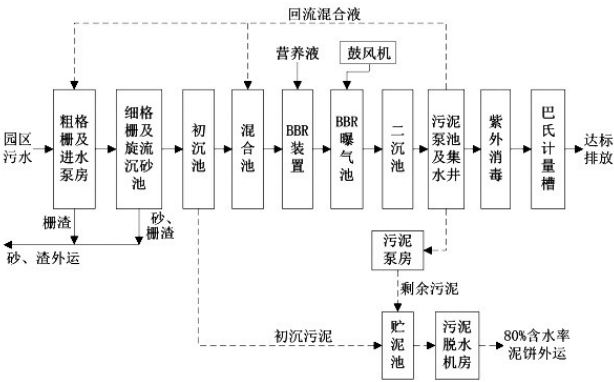


图1 原污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of original wastewater treatment process

由图1可知,在混合池中投加营养液,回流污泥中的芽孢杆菌利用进水提供的营养物质、营养液提供的生长因子,在混合槽及BBR装置中被激活。污水与回流污泥充分混合,在BBR设备中实现芽孢杆菌的优势培养^[1]。优势芽孢杆菌因其黏性大和BBR膜片的特殊性质,容易挂膜,微生物在附着型生物处理设备上的增殖速率远大于悬浮型的生物处理设备。

在污水中的氮、硫成分被氧化前芽孢杆菌已将氨、硫化氢等物质摄取,产生恶臭、臭气的成分也同时被吸收^[2]。同时,芽孢杆菌可分泌大量胞外聚合黏性物质,具有很强的吸附能力,可将产生的恶臭物质一并吸收去除。此外,优势芽孢杆菌通过污泥回流至预处理前端,实现污水处理厂全流程除臭目标。

② 进水水质

该污水处理厂来水主要为纺织工业园废水、食品工业园废水及居民生活污水。2018年—2019年实际进水水质分析结果见表1。

表1 2018年—2019年各污染物累积频率对应进水浓度

Tab.1 Concentrations of pollutants at different frequencies from 2018 to 2019 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

特征值	COD	TP	NH_4^+-N	TN	SS
80% 累积频率浓度	153.1	7.8	30.3	39.8	265
85% 累积频率浓度	165.7	8.5	32.1	43.3	276
90% 累积频率浓度	182.0	9.2	33.6	47.4	287
进水平均浓度	121.93	6.78	26.49	31.17	242.47
改造前设计进水浓度	400	7	45	60	240

因进水中含有工业废水,TN较高,实际C/N偏低,影响脱氮效果,且夏秋季污水浓度低,需增加碳源投加设施。欲提高 BOD_5 、COD的去除率,需将去除 BOD_5 、COD与脱氮除磷的生物过程统筹考虑,选择合适的污泥负荷及水力停留时间。

冬季最低进水温度为 $14\text{ }^\circ\text{C}$,而活性污泥法处理工艺适宜温度为 $15\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$, $12\text{ }^\circ\text{C}$ 是满足硝化菌生长繁殖的最低温度,因此需要考虑低温对脱氮效果的影响。

③ 出水水质

该污水处理厂2018年—2019年实测出水水质见表2。

表2 2018年—2019年实测出水水质

Tab.2 Actual effluent quality from 2018 to 2019

特征值	COD	TP	NH_4^+-N	TN	SS
最大值/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	49.1	1.3	5	18	10
最小值/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.9	0.04	0.04	1.26	4
平均值/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	27.85	0.32	1.08	10.01	7.44
90% 保证率/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	41.2	0.5	3.4	14.2	9
一级A标准/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	50	0.5	5	15	10
准IV类标准/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	30	0.3	1.5	15	10
准IV类达标率/%	65.5	61.5	70.15	100	100

根据实测出水水质, COD、TP 及 NH_4^+-N 在本次提标改造中均需重点考虑, 同时 TN 及 SS 也接近准 IV 类指标限值, 在生化及深度处理单元也需要强化去除。

2 提标改造方案

2.1 提标改造设计规模及水质

根据园区发展规划、企业入驻现状及目前实际进水量情况, 本次提标改造维持原一期设计规模 ($4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 不变, 总变化系数 1.4, 无增加用地。参照实测进水水质及原设计进水水质指标, 考虑到工业园区污水水质变化波动的实际情况及园区远期的发展需求, 本次提标改造设计进水指标维持原设计指标不变, 出水水质执行《陕西省黄河流域污水综合排放标准》(DB 61/224—2018) 的 A 标准。提标改造设计进、出水水质见表 3。

表 3 提标改造设计进、出水水质

Tab.3 Design influent and effluent quality of upgrading and reconstruction project $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

特征值	COD	BOD ₅	TP	NH_4^+-N	TN	SS
设计进水	400	260	7	45	60	240
设计出水	30	6	0.3	1.5(3)	15	10

注: 括号外数值为水温 $>12^\circ\text{C}$ 时的控制指标, 括号内数值为水温 $\leq 12^\circ\text{C}$ 时的控制指标。

2.2 提标改造工艺方案

① 预处理单元

一期预处理单元采用粗、细格栅+旋流沉砂池+辐流式初沉池。预处理设备设施均运行良好, 满足本次提标处理要求, 仅需对粗、细格栅出渣口进行密封改造。

② 生化处理单元

生化处理单元包括混合池、BBR 装置、BBR 曝气池、二沉池。混合池用于进水、BBR 曝气池回流液及回流污泥充分混合, 原设计外回流比 100%, 进水与回流混合液停留时间约 1 min, 不能满足混合均匀所需停留时间。因此, 本次提标需要扩建混合池, 延长混合停留时间。现状 BBR 装置共 16 套, 设备停留时间为 17.9 min, 设备表面积为 $1\,500 \text{ m}^2$, 生物转盘表面负荷为 $0.4 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 满足本次提标改造需求。

现状 BBR 曝气池 1 座 2 组, 单组等分为 4 个区域, 每段停留时间约 1.5 h, 总停留时间约 6 h。原设计厌氧、缺氧及好氧段停留时间较短, 不能保证充

分的硝化反硝化过程, 对 COD、BOD₅、 NH_4^+-N 及 TN 指标的去除率不能达到地表水准 IV 类标准。因此, 本次提标改造需扩建 BBR 曝气池, 以保证生化系统对污染物的有效去除。

现状二沉池采用周进周出辐流式沉淀池, 共 2 座, 直径 30 m, 池边水深 3.6 m, 表面负荷为 $1.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。现状二沉池负荷过高, 因此需扩建二沉池, 降低现状二沉池运行负荷, 保证进入深度处理单元的 SS 浓度。

③ 深度处理单元

因新排放标准对出水 TP、SS 提出了更高要求, 且现状 TP、SS 在出水 90% 保证率条件下已接近标准限值, 故本次提标改造增加磁混凝沉淀池, 以确保出水 TP 及 SS 稳定达标。

考虑到工业废水中 COD 组分的不确定性, 故增加深度处理工艺, 以保证 COD 稳定达标。目前应用较多的有粉末活性炭吸附、臭氧氧化及芬顿工艺。粉末活性炭吸附通过活性炭巨大的比表面积吸附污染物^[3]; 从原理而言, 氧化工艺可分为臭氧直接氧化和催化氧化两种^[4], 前者是由 O_3 分子或单个 O 原子直接参与反应的直接接触氧化工艺, 单一的 O_3 直接氧化反应具有选择性, 无法彻底降解废水中所有的有机污染物; 另一种是由 O_3 分解产生的 $\cdot\text{OH}$ 作为强氧化剂参与完成, $\cdot\text{OH}$ 几乎可以无选择性地与污水中所有的污染物发生反应, 从而达到去除难降解有机物的目的^[5]。

考虑到厂区用地紧张的实际情况, 芬顿工艺系统较为复杂, 且加药系统改造工程量较大, 同时在延长 BBR 曝气池停留时间后, 对 COD 可进一步降解, 因此选择臭氧直接氧化作为深度处理工艺。

④ 再生水回用单元

根据园区要求, 本次提标改造需增建 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的再生水系统, 包括消毒接触池及再生水送水泵房, 同时将一期紫外消毒改建为成品次氯酸钠消毒工艺, 以满足再生水水质要求。

⑤ 污泥处理系统

现状污泥脱水机房设带式浓缩压滤机 (2 台, 带宽 2 m, 单台处理能力 $30 \sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$) 以及其他配套附属设备。提标改造后污水处理总绝干污泥量为 12 tDS/d , 折合 80% 污泥含水率泥量为 60 t/d , 现状污泥脱水机及其配套设施能力满足提标要求。因此, 本次提标对污泥系统不做改造。

⑥ 配套辅助设施

根据本次提标改造工艺方案,需要同步改造配套鼓风机房和加药间,以满足生化及深度处理单元的工艺需求。

2.3 提标改造工艺流程及总平面布置

本次提标改造需扩建混合池、BBR曝气池及二沉池,深度处理单元需增加磁混凝沉淀池、臭氧接触池及接触消毒池。提标改造工艺流程见图2。

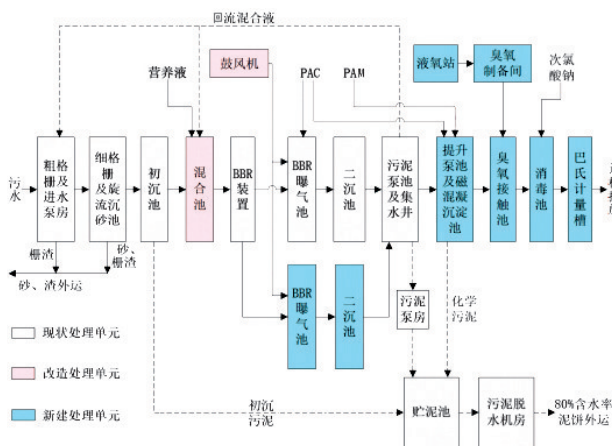


图2 提标改造工艺流程

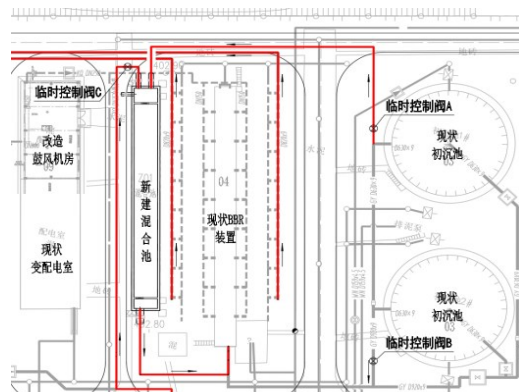
Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process for upgrading and reconstruction

由于本次提标改造无新增用地,厂区北侧可建设用地较少且不规则,建设内容主要位于厂区南侧,考虑到处理工艺流程及现场用地实际情况,破除鼓风机房西侧现状道路向东平移,将新建混合池置于现状BBR装置东侧。扩建生化处理单元及深度处理单元布置于厂区南侧,在满足各处理建(构)筑物功能、规范间距及现场可实施性的前提下,新建BBR曝气池增加池深,新建二沉池采用矩形池型,同时将臭氧接触池、接触消毒池、巴氏计量槽、吸水井、中水回用泵房及出水检测间6个单体整体合建,以尽量节省占地。由于厂区西南侧为不规则斜角地,为满足新建构筑物布置需求,拆除现状巴氏计量槽及出水检测间,在尽量不影响现状的前提下完成提标改造。

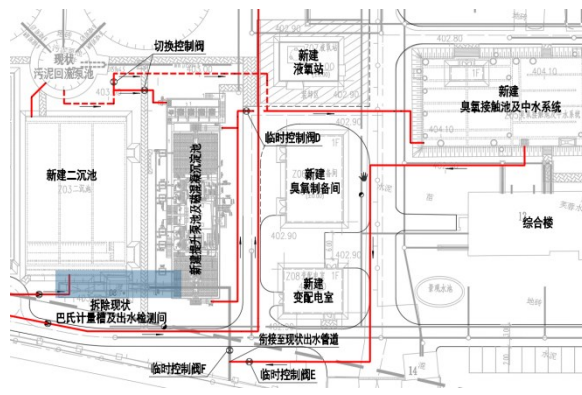
2.4 不停产改造技术方案

根据园区要求,本次提标改造期间污水处理厂需正常运行,以保证园区工业企业生产及居民生活不受影响。不停产改造主要有以下难点:①新建混合池与上游初沉池进水、现状BBR曝气池回流液及二沉池回流污泥的衔接,与下游现状BBR装置的流

程衔接;②新建BBR曝气池出水分为两部分,1×10⁴ m³/d与现状BBR曝气池出水汇合进入现状二沉池,1×10⁴ m³/d进入新建二沉池,因此,新建BBR曝气池出水需与现状二沉池进水管进行接驳;③需拆除现状出水检测间及巴氏计量槽,在新建单体建成投运之前,现状构筑物需正常运行。不停产改造管道及控制阀布置见图3。



a. 新建混合池上下游衔接管道



b. 新建深度处理单元衔接管道

图3 不停产改造的管道及控制阀布置

Fig.3 Layout of pipeline and control valve for non-stop production renovation

根据近两年进水量数据,每年3月底—5月进水量较小,约5 000~5 500 m³/d。现状初沉池高进高出,BBR装置低进高出,在枯水期通过临时泵将厂区进水转运至现状初沉池、BBR装置及生物池可控液位以下,利用构筑物池容调节进水流量,同时泄空初沉池至生物池之间工艺管道,结合临时控制阀门,完成新建混合池与上下游构筑物的衔接。新建混合池上下游衔接管道见图3(a)。

现状BBR曝气池与二沉池可实现单组独立运行,通过现状生物池出水控制闸门与二沉池进水连通管道阀门完成单组切换运行,以实现新建BBR曝

气池出水管道与现状二沉池进水管道的接驳。

新建二沉池、磁混凝池与现状巴氏计量槽及出水检测间的平面位置有冲突,为实现污水处理厂运行的连续性,先完成臭氧接触池及中水系统内容,并利用厂区枯水期完成现状污泥回流泵池(与二沉池出水集水井合建)至新建臭氧接触池和中水系统的工艺连接管道及控制阀门安装,同时打通新建臭氧接触池和中水系统至现状厂区尾水排放管道接驳及控制阀门的安装。在现状巴氏计量槽和出水检测间拆除前完成新建巴氏计量槽和出水检测间工程内容及上下游衔接管道,以实现全厂的不停产改造。深度处理单元衔接管道见图3(b)。

3 提标改造设计

3.1 新建混合池

1座,设计规模为 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,尺寸 $46.0\text{ m}\times 4.5\text{ m}\times 7.0\text{ m}$,有效水深 6.6 m ,停留时间 41 min 。设潜水搅拌机3台,单台功率 2.5 kW ,叶轮直径 710 mm 。

3.2 新建BBR曝气池

1座,设计规模为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,分2组,单格尺寸 $15.0\text{ m}\times 10.0\text{ m}\times 8.0\text{ m}$,共8格,总有效池容 $9\,600\text{ m}^3$ 。新建BBR曝气池与现状BBR曝气池并联运行,规模均为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。设潜水搅拌机8台,单台功率 6.0 kW ;配置回流泵4台(2用2备,变频),单泵 $Q=550\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=70\text{ kPa}$ 、 $N=22\text{ kW}$ 。

3.3 新建二沉池

矩形平流二沉池1座,设计规模 $1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,尺寸 $7.2\text{ m}\times 32.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ (单格),共3格,水力负荷 $0.84\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。新建二沉池与2座现状二沉池并联运行,规模分别为 1×10^4 、 1.5×10^4 、 $1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。二沉池设回流污泥泵2台,1用1备, $Q=420\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=50\text{ kPa}$ 、 $N=15\text{ kW}$ 。

3.4 新建提升泵池及磁混凝沉淀池

1座,磁混凝沉淀池分2组,并联运行。设计规模 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,提升泵池尺寸 $5.1\text{ m}\times 11.9\text{ m}\times 5.8\text{ m}$,磁混凝沉淀池尺寸 $41.75\text{ m}\times 12.5\text{ m}\times 7.85\text{ m}$,提升泵池设轴流泵4台, $Q=800\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=40\text{ kPa}$ 、 $N=15\text{ kW}$,3用1备,2台变频。磁混凝池沉淀区设计平均负荷 $12.05\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值负荷 $16.87\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。设备间设置污泥回流泵及磁粉回收泵,单组设置污泥回流泵2台,1用1备, $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=100\text{ kPa}$ 、 $N=3.0\text{ kW}$;单组设置磁粉回收泵1台, $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=$

100 kPa 、 $N=2.2\text{ kW}$ 。污泥暂存池设置剩余污泥排放泵2台,1用1备, $Q=30\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=220\text{ kPa}$ 、 $N=4.0\text{ kW}$,剩余污泥排放至现状贮泥池。

3.5 新建液氧站

液氧站包含液氧储罐、汽化器、减压阀组。设液氧储罐1套,有效容积 40 m^3 ;汽化器2套,单台汽化量 $1\,200\text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.6 新建臭氧制备间

臭氧制备间土建及设备设计规模 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。臭氧发生器按照最大投加量 20 mg/L 配置,设3套臭氧制备系统,2用1备,单套额定臭氧产量 25 kg/h 。设置板式换热器3套,单套冷却水量 $50\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $N=3.7\text{ kW}$ 。

3.7 新建臭氧接触池及再生水回用系统

新建臭氧接触池1座,分2组,单组反应池尺寸 $19.25\text{ m}\times 9.8\text{ m}\times 6.5\text{ m}$,设计平均水力停留时间 47 min ,设计COD最大去除量 7 mg/L ,臭氧最大投加量 20 mg/L 。新建再生水池1座,与臭氧接触池合建,总有效容积 $1\,498\text{ m}^3$,平均停留时间 54 min 。新建中水泵房1座,设计规模 $1\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,时变化系数取1.4。设6台再生水泵,其中3台 $Q=271\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=400\text{ kPa}$ 、 $N=45\text{ kW}$,2用1备,2台变频;其余3台 $Q=90\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=200\text{ kPa}$ 、 $N=7.5\text{ kW}$,2用1备,2台变频。

3.8 改造鼓风机房

新增1台空悬鼓风机备用,风量 $120\text{ m}^3/\text{min}$,风压 60 kPa ,功率 170 kW 。新增2台空悬鼓风机用于新建生物池曝气,1用1备,风量 $120\text{ m}^3/\text{min}$,风压 90 kPa ,功率 220 kW 。

3.9 改造加药间

① 新增碳源投加系统:设置 35 m^3 乙酸钠储罐1台,同时增设乙酸钠隔膜计量泵3台,2用1备, $Q=180\sim 240\text{ L/h}$ 、 $H=400\text{ kPa}$ 、 $N=0.25\text{ kW}$ 。

② 新增PAM投加系统:设PAM一体化制备机1套,制备能力 $1\,500\text{ L/h}$,PAM浓度 0.2% ;PAM在线稀释装置2套,稀溶液浓度 0.05% ;PAM投加螺杆泵3台,2用1备,全变频, $Q=500\text{ L/h}$ 、 $H=400\text{ kPa}$ 、 $N=0.55\text{ kW}$ 。

③ 新增次氯酸钠投加系统:设次氯酸钠储罐2台,单台容积 15 m^3 ,次氯酸钠隔膜计量泵3台,2用1备, $Q=100\sim 150\text{ L/h}$ 、 $H=400\text{ kPa}$ 、 $N=0.25\text{ kW}$ 。

4 工程投资及运行效果

本次提标改造工程总投资为8 380.60万元,单位经营成本增加0.74元/m³。提标改造工程于2021年5月建成投运。截至目前污水处理厂运行稳定,出水水质良好。2022年—2023年实测进、出水水质见表4。

表4 2022年—2023年实测进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality from

2022 to 2023

mg·L⁻¹

特征值	COD	TP	NH ₄ ⁺ -N	TN	SS
进水最大值	480	8.9	40.9	50	267
进水平均值	185	3.4	12.6	26	114
进水最小值	92	1.2	2.1	12.8	164
出水平均值	12	0.08	0.45	7.2	4.6

根据2022年—2023年水质资料,扩建BBR曝气池对NH₄⁺-N及TN的去除效果明显,通过增加磁混凝池及臭氧接触池,出水SS、TP及COD明显下降,达到设计预期效果。

5 结论

① 纺织工业园区污水处理厂提标改造采用BBR装置+BBR曝气池+二沉池+中间提升泵池及磁混凝沉淀池+臭氧接触氧化池+次氯酸钠消毒工艺,对各污染物去除效果明显,出水水质稳定达标。依托BBR工艺优势,实现全厂良好的除臭效果,节省了投资。

② 在厂区用地受限的条件下,通过增加池深、选择合理的池型、不同功能单体合建,在有限的用地条件下完成提标改造。利用厂区枯水期,通过现状构筑物池容调蓄,同时增加临时管道及控制阀,合理安排施工时序,实现了全厂不停产改造。

参考文献:

- [1] 侯继燕,聂楠. BBR工艺在污水处理工程中的应用[J]. 给水排水, 2020, 46(S1): 412-417.
HOU Jiyan, NIE Nan. Application of BBR process using in wastewater treatment plant [J]. Water &

Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 412-417 (in Chinese).

- [2] 赵旭雍,邓利智,徐欣,等. BBR工艺用于污水处理厂准IV类水提标改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 115-120.

ZHAO Xuyong, DENG Lizhi, XU Xin, *et al.* Research and demonstration of BBR process for upgrading and renovation of quasi-IV standard in sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 115-120 (in Chinese).

- [3] 王磊. 反硝化滤池+臭氧活性炭在高标准城镇污水处理厂原位提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(7): 160-167, 182.

WANG Lei. Application of denitrification filter and ozone activated carbon in in-situ upgrading of high-standard urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7): 160-167, 182 (in Chinese).

- [4] 刘娟,沈军,贾新强,等. 芬顿-臭氧氧化工艺用于工业园区污水处理厂技术改造[J]. 水处理技术, 2023, 49(7): 137-141.

LIU Juan, SHEN Jun, JIA Xinqiang, *et al.* Fenton-ozone oxidation process for industrial park sewage treatment plant technical transformation [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(7): 137-141 (in Chinese).

- [5] 王国庆,吴念鹏,张雯,等. MBR+臭氧催化氧化处理工业废水的设计优化及存在问题分析[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 110-117.

WANG Guoqing, WU Nianpeng, ZHANG Wen, *et al.* Design optimization and analysis on problems of MBR+catalytic ozonation process for industrial wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 110-117 (in Chinese).

作者简介:张鹏辉(1993—),男,陕西宝鸡人,硕士,工程师,主要研究方向为市政给排水。

E-mail: 971674763@qq.com

收稿日期: 2024-03-07

修回日期: 2024-04-13

(编辑:衣春敏)