

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.020

五段 Bardenpho/反硝化深床滤池/臭氧氧化处理工业园废水

段跟定¹, 张胜利², 吴国忠²

(1. 西安航空学院 能源与建筑学院, 陕西 西安 710077; 2. 屏山首创水务有限责任公司, 四川 宜宾 644000)

摘要: 针对宜宾市王场工业园废水生化性较差、氨氮和 SS 含量较高、有机物难以降解的特点, 采用水解酸化/五段 Bardenpho/高效沉淀池/反硝化深床滤池/臭氧催化氧化工艺处理园区废水, 该组合工艺结构紧凑、布置集约化、耐冲击负荷。水解酸化提高了废水可生化性, 保证了后续二级处理和深度处理效果, 高效沉淀池/反硝化深床滤池去除 SS、深度脱氮和除磷效果十分理想。一期设计规模为 5 000 m³/d, 工程出水水质优于《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016) 以及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准要求。本工程直接运行成本为 0.94 元/m³。

关键词: 五段 Bardenpho; 反硝化深床滤池; 臭氧氧化; 水解酸化

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0116-05

Application of Five-stage Bardenpho/Denitrification Deep Bed Filter/Ozone Oxidation Process in Industrial Park Wastewater Treatment Project

DUAN Gen-ding¹, ZHANG Sheng-li², WU Guo-zhong²

(1. School of Energy and Architecture Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China; 2. Pingshan Capital Water Company Limited, Yibin 644000, China)

Abstract: According to the wastewater characteristics of poor biochemical property, high content of ammonia nitrogen, SS and difficult degradation of organic matter, the treatment process of hydrolysis acidification/five-stage Bardenpho/high efficiency sedimentation/denitrification deep bed filter/ozone catalytic oxidation was used as the main process to treat the wastewater of Wangchang industrial park in Yibin. The combination process had advantages of compact structure, intensive arrangement and strong impact load resistance. The biodegradability of wastewater was improved by hydrolysis acidification to ensure the subsequent secondary treatment and advanced treatment effect. The high efficiency sedimentation tank/denitrification deep bed filter had perfect performance for SS removal, deep denitrification and dephosphorization. The first stage design scale was 5 000 m³/d, the effluent quality of the project was better than the standard of *Discharge Standard of Water Pollutants in Minjiang and Tuojiang River Basins of Sichuan Province* (DB 51/2311-2016) and first level A standard of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The direct operation cost of the project was 0.94 yuan/m³.

Key words: five-stage Bardenpho; denitrification deep bed filter; ozone oxidation; hydrolysis acidification

1 工程概况

宜宾市屏山县王场工业园规划面积为 5.02 km², 园区规划主要产业定位为机械加工、农副产品加工、生物制药及相关配套产业。目前该园区已经确定引入 5 家企业, 主要为机械制造和加工、农副产品加工项目, 该工业园污水处理厂建成前, 入园企业不得排放废水。因此为完善园区配套设施, 污水处理厂工程(一期)的建设已经迫在眉睫。

2 工程设计

2.1 水质水量设计

参照国内多家相似产业工业园用水情况, 并根据王场工业区专项规划中企业生活污水、工业废水量预测数据, 预计近期(2020 年)、远期(2030 年)污水总排放量分别为 4 800、17 000 m³/d。工程设计用水量日变化系数取 1.1, 污水排放系数取 0.85, 确定工业园区污水处理厂一期工程设计规模为 5 000 m³/d, 远期工程(2030 年)设计规模为 20 000 m³/d。

根据园区规划建设相关要求, 工业废水在企业内部预处理达到相应的行业预处理标准或《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 三级标准后再排入园区的污水管网, 本项目结合《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015) 及《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 三级标准, 按最不利情况确定本次服务范围内工业废水水质。再根据园区工业废水与生活污水水量的比值 88 : 12, 加权平均计算得出园区污水厂进水各类污染物浓度。本项目位于岷江流域, COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP 等 5 项指标执行《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016), 其余排放指标按《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准执行。具体设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

mg · L⁻¹

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	500	180	400	50	70	8
出水	40	10	10	3	15	0.5

2.2 工艺选型

根据入驻工业园企业生产废水预处理后的水质状况, 确定主要污染因子为酸碱性、氨氮、COD 和悬浮物^[1], 存在生化性较差、氨氮和 SS 含量较高、有机物较难降解的特点。为保证处理效果, 需要在预

处理段设置水解酸化工艺用以提高废水可生化性。本项目二级生化处理采用技术成熟、处理效果好的五段 Bardenpho 生物池^[2], 比 A²O 工艺占地面积小, 与 CASS 和氧化沟工艺相比, 具有运行设备少、耐冲击负荷、脱氮除磷效果好的特点。由于本项目污水排放要求严格, 对 COD、SS、TP 处理难度较大, 且进水氨氮、TN 浓度较高, 需要在二级生化处理后增加深度处理工艺, 经论证采用高效沉淀池 + 反硝化深床滤池工艺^[3], 与 MBR 工艺相比, 具有维护、操作简单且运行费用较低的特点。工程最后采用臭氧氧化技术进一步去除难降解有机物, 以保证各项指标达到排放要求。

2.3 工艺流程

一期工程工艺流程见图 1, 平面布置见图 2。

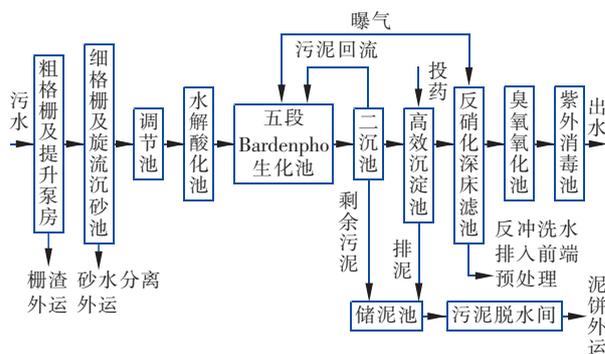


图 1 工业园污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of industrial park wastewater treatment plant

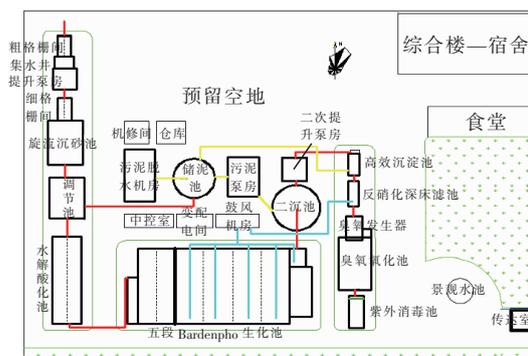


图 2 工业园污水处理厂平面布置

Fig. 2 Plane layout of industrial park wastewater treatment plant

企业预处理后的污水汇集到厂区排水总管后自流进入粗格栅渠, 去除大的漂杂物后经提升泵提升至细格栅及旋流沉砂池, 沉砂池出水进入调节池调节匀质, 再通过提升泵送至水解酸化池提高污水

的可生化性。预处理后的污水进入五段 Bardenpho 生物池中进行生化处理,然后进入高效沉淀池进一步去除污染物,出水再进入反硝化深床滤池进行深度脱氮。随后污水经过臭氧催化氧化池进行深度降解以去除难降解有机物,然后经紫外线消毒后排入牛鞍溪。生化池排出的剩余污泥经污泥泵提升至储泥池,然后通过压滤脱水形成泥饼。泥饼经有关部门鉴定不含有危险废物,同前端处理设施产生的栅渣等杂物一起运至屏山县垃圾处理场进行卫生填埋处理。

2.4 主要构筑物设计

由于部分处理构筑物和生产建筑物采用分期建设的模式并不经济,且不利于污水处理厂的运行管理,因此构(建)筑物通常采用土建按总规模一次建成、设备分期安装的方式。本工程建设分期如下:①粗细格栅、沉砂池土建均按 20 000 m³/d 建设,设备按 5 000 m³/d 规模安装。②调节池、水解酸化池、五段 Bardenpho 生物池、二沉池、高效沉淀池、反硝化深床滤池、臭氧氧化池、消毒池和污泥储池,土建和设备均按 5 000 m³/d 建设。③鼓风机房、污泥泵房、一次及二次提升泵房、污泥脱水间等设备间土建按 20 000 m³/d 建设,设备按 5 000 m³/d 安装。

2.4.1 水解酸化池

1 座,分两格,总体尺寸为 20.0 m × 15.2 m × 6.0 m,有效容积为 1 650 m³,水力停留时间为 8 h。配有 PE 材质生物悬浮填料 1 400 m³, $\emptyset \times H = 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。

2.4.2 五段 Bardenpho 生物池

五段 Bardenpho 生物池设置了 1 座厌氧池、2 座缺氧池和 2 座好氧池。平均污泥浓度为 6 000 mg/L,污泥沉降比为 25% ~ 30%,硝化液回流比为 250%,污泥回流比为 100%;硝化负荷为 0.034 kgNH₄⁺-N/(kgMLSS · d),反硝化负荷为 0.075 kgNO_x⁻-N/(kgMLSS · d);总池容为 2 350 m³;设计流量为 5 000 m³/d,总水力停留时间为 76.33 h。厌氧池 1 座,尺寸为 20.00 m × 7.5 m × 5.50 m,有效水深为 5 m,有效容积为 730 m³,停留时间为 3.5 h;1#缺氧池分两格,总体尺寸为 33.6 m × 25.00 m × 5.50 m,有效水深为 5 m,有效容积为 4 208 m³,停留时间为 20.2 h;1#好氧池 1 座,分 4 格,总体尺寸为 47.5 m × 30.0 m × 5.50 m,有效水深为 5 m,有效容积为 7 125 m³,停留时间为 34.2 h;2#缺氧池尺寸为

22.0 m × 15.5 m × 5.50 m,共 1 格,有效水深为 5 m,有效容积为 1 700 m³,停留时间为 8.16 h;2#好氧池 1 座,共 1 格,总体尺寸为 15.00 m × 11.20 m × 5.50 m,有效水深为 5 m,有效容积为 838 m³,停留时间为 4.02 h。

该生物池共配有低转速潜水推进器 11 台,其中厌氧池 3 台、1#缺氧池 4 台、2#缺氧池 2 台、2#好氧池 2 台, $N = 1.5 \text{ kW}$,叶轮直径为 400 mm,叶轮转速为 740 r/min;罗茨鼓风机 2 台(1 用 1 备), $Q = 198.1 \text{ m}^3/\text{min}$, $P = 58.8 \text{ kPa}$, $N = 220 \text{ kW}$;硝化液内循环回流泵 4 台(3 用 1 备), $Q = 180 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 150 \text{ kPa}$, $N = 7.5 \text{ kW}$;配有可提升管式曝气器 1 300 m,服务面积为 0.35 ~ 0.65 m²/m,供气能力为 3 ~ 3.5 m³/h。

2.4.3 高效沉淀池

设 1 座,为钢制设备,尺寸为 8.0 m × 5.5 m × 6.5 m,分混合区、絮凝区、沉淀区。混合区配有混合搅拌器 1 台,转速为 35 ~ 40 r/min, $N = 1.2 \text{ kW}$,PAC 投加量为 10 ~ 20 mg/L,投加浓度为 10% (质量分数),采用隔膜式压力计量泵投加;絮凝区配有絮凝搅拌器 1 台,转速为 30 ~ 40 r/min, $N = 1.2 \text{ kW}$,PAM 投加量为 0.5 ~ 1 mg/L,投加浓度为 0.2% (质量分数);斜管沉淀区配有 PP 材质斜管填料 100 m³,型号 $\emptyset 80$, $L = 1 \text{ m}$;此外配有污泥浓缩机 1 台, $N = 1.5 \text{ kW}$;污泥回流泵 2 台(1 用 1 备), $Q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 0.2 \text{ MPa}$, $N = 2.5 \text{ kW}$;排泥泵 2 台(1 用 1 备), $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 0.4 \text{ MPa}$, $N = 4.5 \text{ kW}$;加药间配有 PAC、PAM 加药、溶药系统各 1 套。

2.4.4 反硝化深床滤池

设 1 座,分 2 格,平面尺寸为 10.90 m × 4.55 m,滤池深为 6.2 m,滤速为 5.13 m/h,滤料厚度为 1 850 mm,滤料为 2.0 ~ 4.0 mm 石英砂,滤料体积为 91.8 m³,承托层高度为 450 mm,承托层为 8 ~ 40 mm 粒径的鹅卵石。每格设置 2 套进水堰板、1 套布水布气管路系统,均为 304 不锈钢材质,水反冲强度为 15.0 m³/(m² · h),空气反冲洗强度为 92 m³/(m² · h),反冲洗周期为 30 h,反冲洗水量 < 3%。

配有反冲洗鼓风机 2 台(1 用 1 备),安装于鼓风机房, $Q = 28.1 \text{ m}^3/\text{min}$, $N = 50 \text{ kW}$, $P = 68.8 \text{ kPa}$;反冲洗水泵 2 台(1 用 1 备), $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ kPa}$, $N = 15 \text{ kW}$;反冲洗废水排放泵 2 台(1 用 1 备), $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ kPa}$, $N = 6.5 \text{ kW}$;潜水搅拌

机 1 台, $N=2.2$ kW; 加药间配有碳源储存及投加系统 1 套, 采用纯度为 30% 的液态乙酸钠原液作为碳源, 投加量 ≥ 40 mg/L; 除磷絮凝剂投加系统 1 套, 聚合氯化铝投加量为 9.14 mg/L。

反硝化深床滤池现场运行情况见图 3。



图 3 反硝化深床滤池

Fig. 3 Denitrification deep bed filter

2.4.5 臭氧催化高级氧化池

臭氧催化高级氧化池 1 座, 分 2 格, 总体尺寸为 $25.6 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$, 设计流量为 $210 \text{ m}^3/\text{h}$, 反应时间为 110 min, 臭氧投加量为 24 mg/L。内置长柄滤头 2 600 个, 鹅卵石填料 20.5 m^3 , 专用催化剂 25.6 m^3 , $d=6 \sim 8 \text{ mm}$ 。配有高效臭氧溶气装置 1 套, 不锈钢 316L, $N=0.6$ kW。此外设有臭氧泵房 1 座, 尺寸为 $6.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$, 泵房配有卧式离心泵 5 台 (4 用 1 备), $Q=55 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=240 \text{ kPa}$, $N=7.5$ kW。臭氧发生间 1 座, 尺寸为 $15.0 \text{ m} \times 8.4 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$, 配有臭氧发生器 4 台 (3 用 1 备), 臭氧额

定发生量为 $3 \text{ kg}/\text{h}$, 单机运行功率为 21 kW, 单机配电 27.3 kVA; 尾气破坏器 2 套 (1 用 1 备)。

2.4.6 消毒池

消毒池 1 座, 尺寸为 $15.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$ 。紫外线灯每次消毒时间 $\geq 30 \text{ min}$ 。配有紫外消毒设备 1 套, $N=2.5$ kW。

2.4.7 污泥储池、污泥脱水间

污泥储池 1 座, 分 2 格, 总体尺寸为 $16.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$, 设计剩余污泥量 (一期) 为 $500 \text{ kg}/\text{d}$ (干质量), 每格池内配有 1 台搅拌器, $N=1.0$ kW。

污泥脱水间 1 座, 尺寸为 $22.2 \text{ m} \times 10.8 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$, 进泥含水率为 99.2%, 浓缩脱水后含水率 $\leq 60\%$ 。配有板框压滤机 2 台 (1 用 1 备), 滤室容积为 2500 L , 过滤面积为 150 m^2 , 过滤压力 $\geq 0.6 \text{ MPa}$, 电机功率为 3.0 kW; 絮凝剂配制装置 1 套, 絮凝剂投加量为 $3 \sim 5 \text{ kg}/\text{tDS}$, 其中加药泵 2 台 (1 用 1 备), $Q=380 \text{ L}/\text{h}$, $H=0.6 \text{ MPa}$, $N=0.75$ kW; 冲洗水泵 4 台 (3 用 1 备), $Q=25.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=550 \text{ kPa}$, $N=7.5$ kW; 污泥螺杆泵 4 台 (3 用 1 备), $Q=13 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=150 \text{ kPa}$, $N=5.5$ kW; 电动单梁悬挂式起重机 1 台, $N=2 \times 0.8$ kW; 电动葫芦 1 台, $N=0.8$ kW。

3 运行效果

试运行期间主要对五段 Bardenpho 生物池进行污泥驯化, 并对整个工艺设备运行参数进行调试, 一个季度过后, 项目工艺运行达到稳定处理状态。2018 年 4 月开始正式运营, 运行期间水质波动较大, 但五段 Bardenpho 工艺具有较强的抗冲击负荷能力, 出水浓度波动较小, 后续深度处理工艺基本可以保持稳定高效运行, 每年 7 月—10 月处理效率最高。进出水 pH 值始终维持在 $6 \sim 9$, 处理量维持在 $3140 \sim 4820 \text{ m}^3/\text{d}$ 范围内, 平均值为 $4430 \text{ m}^3/\text{d}$ 。各阶段运行效果见表 2, 出水水质优于设计值。

表 2 各处理单元运行效果

Tab. 2 Operation effect of each unit

项 目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP	
预处理 (格栅/沉砂池/水解酸化)	进水/(mg · L ⁻¹)	474	162	377	44.0	67.1	8.0
	出水/(mg · L ⁻¹)	436	150	254	42.8	63.6	7.9
五段 Bardenpho 生物池出水/(mg · L ⁻¹)	58	32	39.6	6.3	24.1	2.8	
高效沉淀/反硝化深床滤池出水/(mg · L ⁻¹)	46	19	5.9	2.4	9.6	0.40	
臭氧高级氧化/紫外消毒出水/(mg · L ⁻¹)	15	6	4.7	1.9	8.2	0.32	
总去除率/%	96.8	96.3	98.8	95.7	87.8	96.0	
出水标准/(mg · L ⁻¹)	40	10	10	3	15	0.5	

4 工程经济性分析

该项目建设总投资为6 559.16万元,年平均处理费用为398万元,年平均经营总成本为229万元,年平均处理成本为2.18元/m³,经营成本为1.25元/m³。本工程直接运行成本为0.94元/m³,其中电费、药剂费、人工费、自来水费用、污泥处理费用分别为0.432、0.327、0.104、0.048、0.029元/m³。

项目主要经济指标见表3,由此可知本工程的财务内部收益率大于行业基准收益率5%,静态投资回收期为12.21年(不含建设期),小于行业基准值(18年),同时财务净现值大于行业基准值,可见项目能够正常商业运转,并有一定发展能力。

表3 技术经济指标

Tab.3 Technical and economic indicators

项 目	税前	税后
财务内部收益率/%	7.11	6.37
投资回收期/a	12.21	12.64
投资收益率/%	6.38	6.24
财务净现值(ic=5%)/万元	856	743

5 结论

① 王场工业园污水处理工程采用五段Bardenpho生物池处理工业园综合污水,具有耐冲击负荷、处理效果好、工艺结构紧凑的特点,具有很好的实用性和推广价值。

② 采用高效沉淀池/反硝化深床滤池/臭氧催化氧化作为项目深度处理主体工艺,处理效果理想,不同工艺对特定污染物的去除具有针对性,尤其是反硝化深床滤池具有很好的脱氮效果,最终出水浓度远优于设计值,运行效果处于工业园综合废水深度治理的先进水平。

参考文献:

- [1] 苏媿,董贝,杨平. 工业园区废水集中治理方法分析[J]. 环境科学与技术,2011,34(5):187-192.

Su Shi, Dong Bei, Yang Ping. Centralized wastewater managements and treatments of industrial parks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34 (5): 187-192 (in Chinese).

- [2] 刘浩,杨俊杰,于宁. Bardenpho 五段法/MBBR 用于青岛李村河污水厂三期扩建[J]. 中国给水排水,2016,32(24):62-66.

Liu Hao, Yang Junjie, Yu Ning. Design and operation of third-phase expansion project of Qingdao Licunhe WWTP by five-stage Bardenpho and MBBR process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (24): 62 - 66 (in Chinese).

- [3] 杨兴豹,李激,阚薇莉,等. Denite[®]深床反硝化滤池在污水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水,2011,27(12):34-36.

Yang Xingbao, Li Ji, Kan Weili, et al. Application of Denite[®] deep-bed denitrification filter in upgrading and retrofitting of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(12):34-36 (in Chinese).



作者简介:段跟定(1974-),男,陕西富平人,硕士,副教授,从事科研工作,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:1877428581@qq.com

收稿日期:2019-09-18