

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.04.014

好氧颗粒污泥技术的工业废水处理工程实例

梅慧瑞¹, 王 驰², 傅先松², 徐礼灿¹, 文志军¹, 张新国¹,
刘 青¹

(1. 北创环保<北京>有限公司, 北京 100102; 2. 龙游华水水业发展有限公司,
浙江 衢州 324400)

摘 要: 浙江某工业园区新建污水厂设计规模为 2×10^4 m³/d, 基于用地紧张、水质排放标准提高的现状, 确定以生物池(以SBR为基础的好氧颗粒污泥技术)+高效澄清池+反硝化深床滤池为主体工艺的设计方案。相较原污水厂的活性污泥法(一、二期分别采用CASS、A²O工艺), 本工艺节省占地约40%、降低运行费用30%以上。启动调试期间, 在进水COD、氨氮、总氮、总磷分别为360~660、20~42、35~55、1.65~3.66 mg/L波动的情况下, 出水COD、氨氮、总氮、总磷分别保持在38、1.9、10.5、0.3 mg/L以下, 满足浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)要求。后期培养出的颗粒污泥粒径达到1.4 mm以上, 污泥体积指数(SVI)保持在30 mL/g以下, 混合液悬浮固体浓度(MLSS)由4.28 g/L增加至10.64 g/L。该项目为好氧颗粒污泥技术在国内首次大型工程化的成功案例, 对该技术的应用具有指导意义。

关键词: 好氧颗粒污泥技术; 工业废水; 同步脱氮除磷; 高效节能

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)04-0084-05

An Engineering Example of Aerobic Granular Sludge Technology for Treating Industrial Wastewater

MEI Hui-rui¹, WANG Chi², FU Xian-song², XU Li-can¹, WEN Zhi-jun¹,
ZHANG Xin-guo¹, LIU Qing¹

(1. Beichuang Environmental Protection <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100102, China;

2. Longyou Huashui Water Industry Development Co. Ltd., Quzhou 324400, China)

Abstract: The design scale of a new wastewater treatment plant in an industrial park in Zhejiang Province is 2×10^4 m³/d. The main process consisting of biological tank (aerobic granular sludge technology based on SBR), high-efficiency clarifier and denitrification deep-bed filter was designed because of the shortage of land and the stricter effluent discharge standards. Compared with the activated sludge process used in the original wastewater treatment plant (the phase I and II adopted CASS and A²O process respectively), the process saved approximately 40% of the footprint area and reduced the operating cost by more than 30%. During the start-up and commissioning period, the influent COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus fluctuated in the ranges of 360~660 mg/L, 20~42 mg/L, 35~55 mg/L and 1.65~3.66 mg/L respectively, while the effluent COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus remained below 38 mg/L, 1.9 mg/L, 10.5 mg/L and 0.3 mg/L respectively, which met the limits specified in *Discharge Standard for Major Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (DB 33/2169-2018) of Zhejiang Province. In the later period, the particle size of the

cultured granular sludge reached 1.4 mm or more, the sludge volume index (SVI) remained below 30 mL/g, and the mixed liquid suspended solid concentration (MLSS) increased from 4.28 g/L to 10.64 g/L. This project has become the first successful case of large-scale aerobic granular sludge process in China, and has guiding significance for the application of aerobic granular sludge technology.

Key words: aerobic granular sludge technology; industrial wastewater; simultaneous nitrogen and phosphorus removal; high efficiency and energy-saving

1 工程概况

浙江某城南污水厂将服务范围内的园区生活污水、工业废水及县城生活污水混合后处理,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,目前水量已接近 4×10⁴ m³/d 的最大处理能力。考虑到园区入驻企业日益增多及城镇的发展,拟将原有污水厂作为生活污水处理厂,新建一座污水厂用于处理园区工业废水,将工业废水和生活污水分质处理,降低生活污水处理成本;同时促进城镇的可持续发展及保护衢江的水环境安全,将出水水质提升至浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)。

原污水厂一、二期规模均为 2×10⁴ m³/d,分别采用 CASS、A²O 工艺,其预处理区和主厂区在单独的区域建设,且距离较远。原预处理区预留地约 0.153 hm²,可满足原污水厂改造及新建污水厂预处理单元的用地需求;而原污水厂主厂区内仅有空地约 0.4 hm²,且周边无可拆迁征用地,因此选择占地小、处理效率高的生物处理系统是本工程的关键。

2 设计进、出水水质

本工程污水来源为浙江某县城南工业园区全部的工业废水,其在达到《污水综合排放标准》(GB 8798—1996)三级标准后进入污水厂,最终出水达到 DB 33/2169—2018 要求后排放至衢江。

本工程设计规模为 2×10⁴ m³/d,设计进、出水水质指标见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	pH	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	SS/ (mg·L ⁻¹)	TDS/ (mg·L ⁻¹)
进水	6~9	500	220	30	2.5	45	200	2 000
出水	6~9	≤40	≤10	≤2(4)	≤0.3	≤12(15)	≤10	
注: 括号内数值为每年 11 月—次年 3 月执行标准。								

3 污水处理工艺

3.1 污水处理工艺的选择

本项目的工业废水来自于 41 个中小企业,主要为毛绒、机械加工、食品、包装、电子行业等。各企业排水量均不超过 1 000 m³/d,水质差别较大,毛绒类废水中 COD、SS 和色度相对较高;机械加工废水可能含有乳化液、石油类污染物;食品行业废水中氨氮高;包装行业废水含有少量水性油墨;电子行业废水中有机物及氨氮浓度较高,且可能含有少量氟等。

由于共用一根排水总管,无法单独测定各企业水质,通过对混合废水进行为期 5 d 的连续监测,可知对于不同时段,主要污染物波动较为明显,COD、氨氮、总磷、总氮的平均值分别为 422、21.3、2.14、32.7 mg/L,最大值分别为 871、37.6、7.24、61.4 mg/L。结合出水要求可知,除总氮外,各污染物去除率均需达到 88%~95% 以上,且由于本工程是在原有预留地内实施,因此高效、紧凑的工艺单元设置是项目的设计核心。

由于混合废水水质来源多样、水质复杂,建议采用预处理+生物处理+深度处理的工艺路线。与原污水厂预处理工艺类似,本项目预处理采用初沉、隔油工艺。

随着好氧颗粒污泥的发现^[1],近年来以颗粒污泥为微生物聚集体的好氧处理技术应运而生。其中以荷兰公司为代表的好氧颗粒污泥技术凭借其工业化成熟度高、节能高效等优势在国外被大量应用^[2-4],该反应器以 SBR 工艺模式为基础,通过优化反应器内部结构及控制方式,培养出的成熟颗粒污泥粒径可达到 2 mm 左右,见图 1。

针对本项目用地紧张的问题,考虑将荷兰公司的好氧颗粒污泥技术以及紧凑型的 A²O+MBR 工艺作为生化处理单元的备选工艺,对比见表 2。

经综合对比,选用荷兰好氧颗粒污泥技术作为

本项目的生化处理工艺,该工艺的引用也为其对国内污水水质的适用情况提供了示范作用。

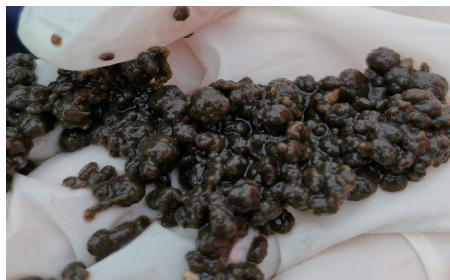


图1 好氧颗粒污泥

Fig.1 Aerobic granular sludge

表2 好氧颗粒污泥技术与 A^2O +MBR工艺对比

Tab.2 Comparison of aerobic granular sludge technology and A^2O +MBR process

项目	好氧颗粒污泥技术	A^2O +MBR
工艺特点	1个主反应器;以颗粒污泥为微生物聚集体,沉降性能好、结构密实;污泥浓度高($8\sim 15\text{ kg/m}^3$)	3个主反应器+膜池;以絮状污泥为微生物聚集体,结合生物膜提高污泥浓度;污泥浓度高($8\sim 15\text{ kg/m}^3$)
处理效率	优秀	优秀
运行管理	设备简单、自动化程度高,主反应器内无任何机械设备,运行管理方便	设备种类、数量较多;维护更换等管理复杂
占地情况	现有预留地可满足生物处理及深度处理用地要求	需新征土地 0.46 hm^2
运行费用/ (元 $\cdot\text{m}^{-3}$)	1.04	1.86
注: 运行费用为初步估算结果。		

深度处理单元的作用是强化对残余COD及TN、TP的去除,一般采用过滤、接触氧化等。污水厂出水对总氮要求较高,因此本项目采用高效澄清池+反硝化深床滤池^[5]工艺。

3.2 工艺流程

污水处理工艺流程见图2。

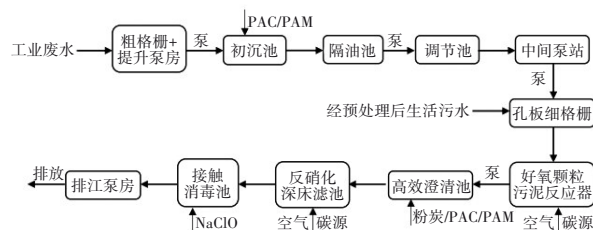


图2 污水处理工艺流程

Fig.2 Process flow of wastewater treatment

工业废水通过收集管道首先进入粗格栅间,截留较大的污染物以保护水泵等重要设备;经过粗格栅后,污水进入提升泵房。经水泵提升后依次进入初沉池、隔油池,去除悬浮物及油脂等,避免影响生物池供氧效率。调节池对工业废水起到均质的作用,设置水质在线监测设备,随时监控来水状况,当来水异常时,可及时通知管委会或中控室,采取相应的应对措施。污水进入好氧颗粒污泥反应器前,先经孔板细格栅进一步去除细小悬浮物,避免堵塞生物池曝气系统及布水系统。高效澄清池及反硝化深床滤池进行脱氮除磷及对SS的去除,经次氯酸钠消毒后排至衢江。由于工业废水B/C不足,在好氧颗粒污泥反应器和反硝化深床滤池均需投加碳源。当工业废水水量不足或生活污水量波动较大时,可将部分预处理后的生活污水切入新建污水厂。

3.3 工艺特点

本工程虽采用普遍的生物处理结合深度处理的总体路线,但基于好氧颗粒污泥技术的生物池设计具有独特的优势。

① 采用好氧颗粒污泥生物池,由于颗粒污泥密实、沉降性能好的特殊结构形式,使得颗粒由外到内存在明显的基质浓度梯度和溶解氧浓度梯度。曝气反应阶段,硝化细菌和异养细菌处在颗粒外层,可以实现有机物的降解和硝化反应,当硝酸盐产生后就会在颗粒缺氧层发生同步硝化反硝化反应。好氧颗粒污泥内的聚磷菌能强化生物除磷作用,在好氧环境下对磷的高吸收特性形成富磷污泥,然后通过排放剩余污泥达到除磷目的。因此,好氧颗粒污泥可以在一个生物反应器中进行碳去除、硝化、反硝化和磷去除^[6],使系统更加紧凑,并显著减少所需的占地面积。原污水厂的AAO池占地 0.387 hm^2 ,而新建生物池仅用地 0.119 hm^2 ,综合用地节省约40%。

② 生物池由底部布水器上流式进水,进水的过程可充分利用原水碳源同步实现反硝化脱氮及均质回流,固定堰溢流出水,整个生物池内无任何动力设备,大大降低了能耗。

③ 好氧颗粒污泥生物池采用全自动时序控制,实现智能化运行。根据来水和工艺运行状况,通过设置于反应器系统内各仪表的测量值,判断系统状态,自动调节优化各运行参数,动态调整周期

时间等。在满足处理需要的同时通过减少能耗、药耗而降低运行费用,相较传统的手动或半自动操作,该系统具有较高的工艺先进性。

4 主要工艺设计参数

① 调节池:1座,钢筋混凝土结构,尺寸为28 m×38 m×11.5 m,有效水深10.5 m,水力停留时间12 h。

② 好氧颗粒污泥生物反应器系统:包括进水缓冲池1座,生物池2座,污泥缓冲池1座。污水由进水缓冲池提升泵提升至生物池A池底部,同时顶部排水堰排水,随后依次完成曝气、沉淀、排泥,2组生物池交替运行。沉淀工序完成后,生物池排泥进入污泥缓冲池暂存,经快速沉降后,上清液自流排入进水缓冲池,沉淀污泥提升至污泥处理系统,污泥缓冲池清空后等待下一周期排泥。

进水缓冲池容积 800 m³, 设进水提升泵 2 台, 单台流量 870 m³/h, 功率 75 kW; 潜水搅拌机 1 台, 功率 7.5 kW。

单座生物池尺寸为22.7 m×17.2 m×11 m,水力停留时间9.36 h,混合液悬浮固体浓度(MLSS)为8 000 mg/L;平均污泥负荷为0.11 kgBOD₅/(kgMLSS·d),剩余污泥产量为4.28 tDS/d;好氧区实际需氧量(AOR)为6 330 kgO₂/d,设风机4台,3用1备,单台风量48.7 m³/min,功率110 kW;池内设专项布水系统、曝气系统、滗水器及液位调整系统,每池设仪表组1套(监测氨氮、硝酸盐、pH、DO等),无其他机械动力设备。生物池每个周期运行240 min,其中进/排水65 min、曝气145 min、沉淀30 min,具体见图3。

生物池的沉淀工序伴随着排泥进行,筛选出的

细碎颗粒污泥通过中部排泥设备排放至污泥缓冲池。污泥缓冲池容积 200 m³, 设污泥泵 2 台, 单台流量 50 m³/h, 功率 7.5 kW。污泥泵出口设置污泥浓度计 1 台, 当排泥浓度低于 8 000 mg/L 时, 自动停泵并排放上清液。

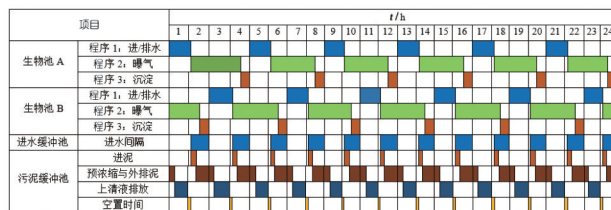


图3 设计周期

Fig.3 Design cycle time

③ 高效沉淀池:1座,钢筋混凝土结构,尺寸为21.6 m×10 m×7.85 m,水力停留时间1.38 h;设计表面负荷 $15.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;配套快速搅拌器4台;絮凝搅拌器1台;排泥/回流泵3台(2用1备),流量 $45 \text{ m}^3/\text{h}$;刮泥机直径 $\varnothing 9.4 \text{ m}$,功率1.1 kW。设计PAC投加量 50 mg/L ,PAM投加量 2 mg/L ,粉炭投加量 100 mg/L 。

④ 反硝化深床滤池:1座4格,钢筋混凝土结构,单格尺寸12.2 m×2.9 m×6.80 m;滤速<5.89 m/h;硝态氮容积负荷≤0.386 kgNO₃⁻-N/(m³·d);配套罗茨鼓风机3台(2用1备),风量53.8 m³/min,功率75 kW;反冲洗泵2台(1用1备),流量518 m³/h,功率44 kW。

5 处理效果及经济技术指标

2020年5月—10月主要污染物的平均去除效果见表3。

表3 2020年5月—10月主要污染物的平均去除效果

Tab.3 Average removal effects of major pollutants from May to October in 2020

处理单元	COD			氨氮			总氮			总磷		
	进水/ (mg·L ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%	进水/ (mg·L ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%	进水/ (mg·L ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%	进水/ (mg·L ⁻¹)	出水/ (mg·L ⁻¹)	去除 率/%
好氧颗粒污泥反应器	401	50	88	30	1.9	94	44	13	70	2.1	0.44	79
高效澄清池	50	43	14	1.9	1.9		13	13		0.44	0.25	43
反硝化深床滤池	43	39	9	1.9	1.9		13	10.5	19	0.25	0.25	
接触消毒池	39	38	3	1.9	1.8	5	10.5	10.5		0.25	0.25	

本项目自2019年11月正式启动调试,至2020年4月试运行结束后,正式投入运行。由表3可知,在进水COD、氨氮、总氮、总磷分别为360~660、20~42、35~55、1.65~3.66 mg/L波动的情况下,出水

COD、氨氮、总氮、总磷分别低于40、2、12、0.3 mg/L, 稳定达标。

好氧颗粒污泥同步脱氮除磷的优势在实际运行中得到了验证,反应器总氮去除率将近78%、总

磷去除率为88%,超过预期效果。通过持续观察记录,自2020年3月—2022年3月,颗粒污泥粒径由初期的以0.2 mm为主,持续增长至1.4 mm以上,见图4。图中由左至右、由上至下分别为0.2、0.4、0.8、1.4、2.0 mm孔径筛网。

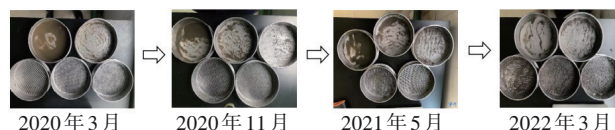


图4 好氧颗粒污泥持续增长情况

Fig.4 Continuous growth of aerobic granular sludge

颗粒污泥的大小及增长速率与水中部分离子浓度存在一定相关性,且不同水质形成的成熟污泥粒径也不同,低浓度废水培养的成熟污泥颗粒粒径为0.8~1.0 mm左右。截至2020年8月,污泥浓度由初期的4.28 g/L倍增至10.64 g/L,污泥体积指数(SVI)稳定在30 mL/g以下。

本项目建设投资约1.2亿元,实际平均水量 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,电耗 $0.32 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,10%的液体PAC消耗量为 $0.028 \text{ kg}/\text{m}^3$,10%的液体次氯酸钠消耗量为 $0.06 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。相较原一、二期(CASS及A²O工艺),节省运行费用(吨水处理综合电耗和药耗)30%以上。

6 结论

采用好氧颗粒污泥反应器+高效澄清池+反硝化深床滤池的主体工艺处理工业园区废水,出水水质达到浙江省地方标准《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018),出水排放至衢江。好氧颗粒污泥技术的成功应用,打破了传统絮状污泥耐冲击能力差、有机负荷难以提高的困境,在节省占地及降低运行费用方面有了较大的突破,节能高效的处理工艺为建设美丽衢江作出了一定贡献。同时,本工程作为好氧颗粒污泥技术在亚洲的首个工程化应用案例,对该技术在国内的应用推广具有指导性意义,可为后续新建或改扩建污水厂提供新选择,为节能减排提供新途径。

参考文献:

[1] MISHIMA K, NAKAMURA M. Self-immobilization of

aerobic activated sludge—a pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment [J]. Water Science Technology, 1991, 23: 981-990.

[2] 郝晓地,李季,吴远远,等. 蓝色水工厂:框架与技术[J]. 中国给水排水,2023,39(4):1-11.

HAO Xiaodi, LI Ji, WU Yuanyuan, *et al.* Blue water factories (BWFs): framework and technologies. [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (4): 1-11 (in Chinese).

[3] HAMZA R, RABII A, EZZAHRAOUI F, *et al.* A review of the state of development of aerobic granular sludge technology over the last 20 years: full-scale applications and resource recovery [J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2022, 5: 100173.

[4] 赵锡锋,李兴强,李军. 好氧颗粒污泥技术中试研究及应用进展[J]. 中国给水排水,2020,36(8):30-37.

ZHAO Xifeng, LI Xingqiang, LI Jun. A review on pilot-scale study and application progress of the aerobic granular sludge technology [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 30-37 (in Chinese).

[5] 杜创,雷振,张铁源. 深床滤池在污水厂地表Ⅳ类水提标改造中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(8): 99-103.

DU Chuang, LEI Zhen, ZHANG Tieyuan. Application of deep bed filter in WWTP upgrading project to meet class IV standard of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 99-103 (in Chinese).

[6] GIESEN A, VAN LOOSDRECHT M, ROBERTSON S, *et al.* Aerobic granular biomass technology: further innovation, system development, and design optimization [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2015(16): 1897-1917.

作者简介:梅慧瑞(1987—),女,山东菏泽人,硕士,高级工程师,主要研究方向为工业废水处理、好氧颗粒污泥技术及应用。

E-mail:hagongmhr@126.com

收稿日期:2023-02-15

修回日期:2023-06-19

(编辑:沈靖怡)