

刘可, 张宏, 戴仲怡. AAO-RPIR 工艺在高排放标准污水厂的应用及其工艺特点分析[J]. 净水技术, 2023, 42(7):168–175.

LIU K, ZHANG H, DAI Z Y. Application and characteristic analysis of AAO-RPIR process in WWTP with stricter discharge standard[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(7):168–175.

AAO-RPIR 工艺在高排放标准污水厂的应用及其工艺特点分析

刘 可^{1,*}, 张 宏², 戴仲怡¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 深圳市环境水务集团有限公司, 广东深圳 518031)

摘 要 深圳市某污水处理厂设计规模为 24 万 m³/d, 因片区污水处理需求增长迅速, 污水厂长期超负荷运行。为缓解该厂污水处理压力, 需利用厂区闲置绿地新增一套规模为 6 万 m³/d 的污水处理设施。项目采用以 AAO-快速生化污水处理 (RPIR) 为核心的污水处理工艺, 生化池缺氧区混合液回流比为 266%~400%, 厌氧区混合液回流比为 266%, 斜管区平均时表面负荷为 1.25 m²/(m²·h), 单位用地指标为 0.225 m²/(m³·d⁻¹)。项目用时 4 个月即实现了单组构筑物通水调试, 正式运行以来, 出水主要水质指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的Ⅳ类水标准(除 TN 外, TN≤15 mg/L), 在未投加碳源的情况下生化池平均进水、出水 TN 分别为 36.87、7.63 mg/L, TN 去除效果好。结合近 4 年的运行实践详细分析了 AAO-RPIR 工艺的特点与不足, 指出 AAO-RPIR 工艺处理效果好, 适用于高排放标准污水处理厂, 用地集约、工期短、布置灵活是其核心竞争优势。斜管藻类滋生和化学除磷效率较低等问题则应在设计阶段引起足够的重视, 建议采用斜管加盖、设置自动反冲洗系统以及强化后置化学除磷等措施优化工艺设计。

关键词 污水厂扩容 AAO-RPIR 工艺 集约化污水处理工艺 高排放标准 脱氮除磷 自动反冲洗系统

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2023)07-0168-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.07.022

Application and Characteristic Analysis of AAO-RPIR Process in WWTP with Stricter Discharge Standard

LIU Ke^{1,*}, ZHANG Hong², DAI Zhongyi¹

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design & Research General Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Shenzhen Water and Environment Group Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract Due to the rapid growth of wastewater treatment demand in the area, a wastewater treatment plant (WWTP) in Shenzhen, which design scale is 240 000 m³/d, operates under long-term overload. For the solution of wastewater treatment capacity shortage, a scale of 60 000 m³/d wastewater treatment facilities need to build in the green land of current WWTP. The project adopts AAO-RPIR as the core wastewater treatment process, with the return sludge ratio of 266% to 400% in the anoxic zone and 266% in the anaerobic zone. The average surface load of the tube settler zone is 1.25 m²/(m²·h) and the land use index is 0.225 m²/(m³·d⁻¹). The construction takes 4 months to realize the water commissioning of a single treatment line. Since the official operation, the main indices of effluent reach the Ⅳ criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002) (except TN, TN≤15 mg/L). Without additional carbon source, the average TN of the biological pond influent and effluent is 36.87 mg/L and 7.63 mg/L respectively, indicating an excellent removal performance of TN. Combined with the operation practice of nearly 4 years, the characteristics and defects of AAO-RPIR process are analyzed in detail. It is pointed out that AAO-RPIR process has good treatment effect and is suitable for WWTPs with stringent discharge standards. The core competitive advantages of AAO-RPIR process are land intensive, short construction period and flexible layout. The problems of algae breeding and low efficiency of chemical phosphorus removal should be paid enough attention in the design stage. It is suggested to optimize the process design by capping tube settler zone,

[收稿日期] 2022-11-06

[通信作者] 刘可(1992—), 男, 硕士, 主要从事市政排水工程、市政给水工程设计及研究工作, E-mail: 494106760@qq.com。

setting up automatic backwash system and enhancing chemical phosphorus removal after biochemical treatment.

Keywords capacity expansion of WWTP AAO-RPIR process integrated wastewater treatment process stricter discharge standard nitrogen and phosphorus removal automatic backwash system

快速生化污水处理(RPIR)技术是基于反应沉淀一体式矩形环流生物反应器(reaction and precipitation intergrated bio-reactor)的一项应用于污水处理领域的新兴技术,近年来因其占地较省、施工安装简便、建设周期短的特点,在深圳市水环境治理项目中得到了大量应用,引起了业界的广泛关注。

早期的 RPIR 工艺仅设置曝气池,工艺形式简单,投运速度快,但对 TN 和 TP 的去除效率有限,因此,该工艺主要以不考核 TN 的临时污水应急处理站的形式建设,以实现快速投运弥补近期污水处理能力的缺口。深圳沙湾河丹竹头污水应急处理站采用预处理+RPIR 工艺^[1],工程实施仅 90 d 即实现了通水达标,该项目设计规模为 1 万 m³/d,出水标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准,不考核 TN 指标。A-RPIR 工艺在 RPIR 工艺基础上增设了缺氧区及硝化液回流系统,可实现生物脱氮,适用于对 TN 有考核要求的工程。武汉市某污水处理厂采用 A-RPIR+磁混凝工艺^[2],设计规模为 10 万 m³/d,出水标准为一级 A,调试期间进出水 TN 质量浓度分别为 24.5 mg/L 和 11.2 mg/L,达到了设计预期。AAO-RPIR 工艺则是在 A-RPIR 工艺基础上进一步增设了厌氧区,以实现生化池的同步脱氮除磷,为一种改良型 AAO 工艺。张其殿等^[3]在某设计规模为 3 万 m³/d 的生活污水处理厂提标改造中,采用 AAO-RPIR 工艺对现有 AAO 生化池进行原位改造,原二沉池作为备用混凝沉淀池的方式,将该厂的排放标准由一级 B 标准提升至一级 A 标准。

目前 RPIR 的运用主要以传统 RPIR 以及 A-RPIR 工艺为主,对 AAO-RPIR 工艺运用的报道相对较少,本工程是首个在新建污水处理设施中采用 AAO-RPIR 工艺的项目,也是目前运行时间最长、出水水质标准最高的 RPIR 项目。本文介绍了该工程的 AAO-RPIR 工艺设计,并结合实际运行情况系统地分析了 RPIR 工艺的特点、适用场景以及采用该工艺时应注意的问题,针对部分关键问题提出了优化建议,可为类似工程项目建设提供参考,并促进该工艺的优化与推广。

1 工程概况及设计规模

现状污水厂设计处理能力为 24 万 m³/d,处理工艺流程为粗格栅及进水泵房→细格栅及旋流沉砂池→改良 AAO 生物池→圆形周进周出二沉池→再生水厂深度处理,进入再生水厂前出水水质要求达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准。

随着本项目污水厂服务片区的快速发展,片区污水总量增长迅速,导致该厂长期超负荷运行。该片区规划有一座 32 万 m³/d 的半地下污水处理厂,但距离建成投产至少需要 3 年时间。为弥补近期片区污水处理能力缺口,本工程利用污水厂闲置绿地新建一套规模为 6 万 m³/d 的完整污水处理设施,出水主要水质指标执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类水标准。待规划半地下污水处理厂建成后,本次新建设施实施“减量提质”工程,减量后运行规模降低至 4 万 m³/d,出水主要水质指标提升至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 IV 类水标准(除 TN 外,TN≤15 mg/L)。

2 核心处理工艺比选

本工程用地面积仅为 13 500 m²,远低于同类型建设项目,因此,用地是本工程的最大制约因素,拟采用的污水处理工艺必须集约高效。本工程选取了以 AAO-RPIR、曝气生物滤池(BAF)以及膜生物反应器(MBR)工艺为核心的 3 套集约化处理工艺进行比选,如表 1 所示。

表 1 污水处理工艺比选

Tab. 1 Comparison and Selection of Wastewater Treatment Processes

工艺方案	预处理+AAO-RPIR+反硝化滤池	预处理+碳氧化 BAF+硝化 BAF+反硝化深床滤池	预处理+MBR 池
占地面积/m ²	10 500	9 000	9 500
施工周期	短	长	较长
运行管理	一般	复杂	复杂
设备维护量	少	较多	较多
运行成本	低	较低	高
工程投资	较高	较高	高

上述 3 种方案占地及出水水质均可以满足本项

目需求,其中以 BAF 为核心工艺的方案占地最省,但滤池土建结构复杂,施工周期长,难以满足本项目对工期的要求,同时滤池还存在滤头堵塞、滤料板结等问题,运行管理要求高,设备维护量大,因此,不推荐采用。MBR 工艺采用膜过滤技术,对出水 SS 指标有较高的保障,但存在曝气擦洗能耗较高、需要定期药剂清洗、膜更换费用较高等问题,综合运行成本及工程投资均为最高,同样不推荐采用。AAO-RPIR 工艺需采用专利技术,设备投资稍高,但土建施工难度最低,施工周期最短,符合本项目对用地和

工期的需求,同时运行成本与常规 AAO 工艺相似,运行管理难度相对较低,设备维护量少,因此,推荐采用 AAO-RPIR 工艺为本项目的核心处理工艺。

3 工艺设计

3.1 设计进出水水质

本工程设计进水水质综合现污水厂多年实际进水水质确定,出水主要水质指标分阶段分别执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类和 IV 类水标准(除 TN 外, $TN \leq 15 \text{ mg/L}$),设计进水及两阶段出水水质如表 2 所示。

表 2 设计进出水水质

Tab. 2 Designed Influent and Effluent Quality

项目	$BOD_5/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$COD_{Cr}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$SS/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$TN/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	氨氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$TP/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
进水水质	180	420	280	48	35	6
出水水质 (新建扩容阶段)	10	40	10	15	2.0	0.4
出水水质 (减量提质阶段)	6	30	10	15	1.5	0.3

3.2 工艺流程

本工程污水处理采用“粗格栅提升泵房(现状)+细格栅旋流沉砂池+AAO-RPIR 生化池+精细格栅+反硝化滤池+紫外消毒池”工艺,工艺流程如图 1 所示。

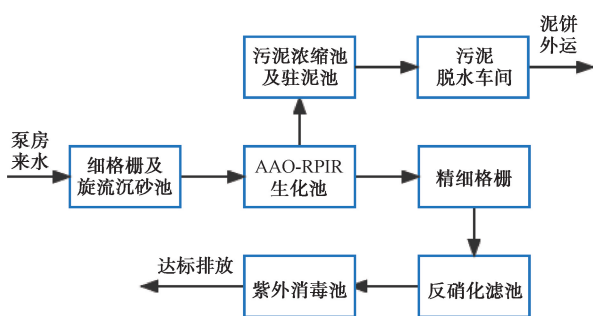


图 1 污水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Wastewater Treatment

3.3 AAO-RPIR 生化池工艺设计

从工艺流程上来看,AAO-RPIR 工艺中污水先后经过厌氧区、缺氧区以及好氧区,与传统 AAO 工艺一致,其与 AAO 工艺主要区别如下。

①RPIR 模块置于好氧池上方进行泥水分离,污泥沉降后回到好氧池,无需污泥外回流,从而取代传统工艺的二沉池工艺,大大节约项目用地,同时无二沉池厌氧缺氧过程,回流污泥活性较高。

②RPIR 好氧池水为池底进水、池顶出水,需在

池底均匀布置穿孔配水管,污水通过曝气的驱动在 RPIR 模块内形成环流,更有利于活性污泥与有机物接触,提高传质效率^[4]。

③污泥回流采用好氧池至缺氧池、缺氧池再到厌氧池的形式,避免了好氧池溶解氧破坏厌氧区环境,同时可减少硝态氮对微生物厌氧释磷的影响,提高生物除磷效果。

AAO-RPIR 生化池工艺流程及 AAO-RPIR 曝气池剖面分别如图 2 和图 3 所示。

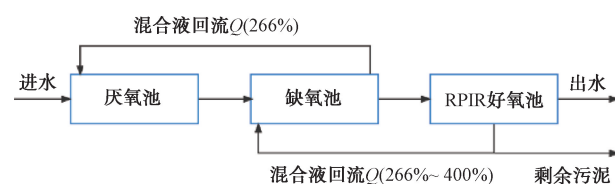


图 2 AAO-RPIR 工艺流程

Fig. 2 Process Flow of AAO-RPIR

AAO-RPIR 生化池设计规模为 $6 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,总变化系数 K_z 为 1.33,设置 1 座,分为可独立运行的 2 组。其中厌氧区有效水深为 7 m,有效容积为 $3\,528 \text{ m}^3$,污水有效停留时间为 1.4 h;缺氧区有效水深为 7 m,有效容积为 $13\,590 \text{ m}^3$,污水有效停留时间为 5.4 h;好氧区有效水深为 6.5 m,有效容积为 $27\,300 \text{ m}^3$,污水有效停留时间为 10.4 h。好氧池设计污泥质量浓度为 $4\,000 \text{ mg/L}$, BOD_5 污泥负荷为 0.1 kg

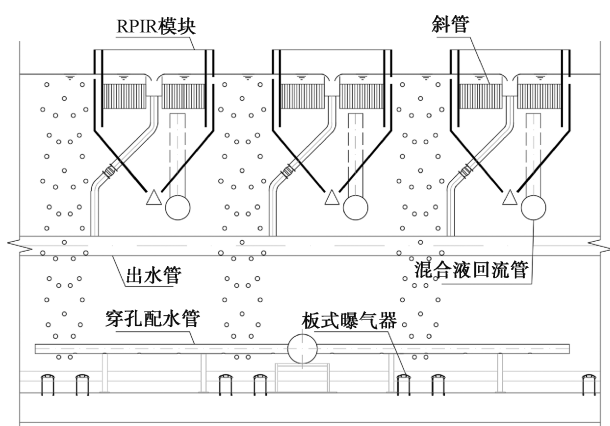


图3 AAO-RPIR 曝气池剖面

Fig. 3 Section View of AAO-RPIR Aeration Tank

$BOD_5/(kg\ MLSS \cdot d)$, 缺氧区混合液回流比为 266%~400%, 厌氧区混合液回流比为 266%。为加强好氧区及 RPIR 模块内的环流效果, 好氧区曝气系统采用长条形的板式曝气器, 连续、均匀地分布于 RPIR 模块之间, 曝气板宽为 200 mm, 共 2 200 m, 设计最大气水比为 7.5 : 1.0。好氧池共设置 RPIR 模块 224 个, 单座池呈 4 列 28 排布置, 每列模块设置一根出水总管, 由于单列串联模块数较多, 在每列的出水主管末端设置通气管排除立管出水时夹带的空气, 避免主管压力不均衡导致出流不畅。模块内斜管沉淀区平均时表面负荷为 $1.25\ m^2/(m^2 \cdot h)$, 最大时表面负荷为 $1.67\ m^2/(m^2 \cdot h)$ 。

3.4 其他主要构筑物工艺设计

3.4.1 细格栅及旋流沉砂池

细格栅与旋流沉砂池合建, 设计规模为 $6\ 万\ m^3/d$, 设置 1 座, 分 2 组, K_z 为 1.33。由于后续 RPIR 工艺中涉及的配水、回流管道较多, 为防止垃圾及细小的杂质堵塞穿孔管, 设计时应优先采用较小栅隙的细格栅, 本工程采用栅隙为 4 mm 的回转式细格栅。受用地限制, 本工程采用旋流式沉砂池, 沉砂池停留时间为 30 s, 沉砂分选区直径为 4 m。

3.4.2 精细格栅

本工程深度处理工艺设置有反硝化深床滤池, 为防止 RPIR 生化池出水杂质以及毛发类的纤维物质较多造成滤床堵塞, 反硝化滤池前需设置精细格栅。本工程设置精细格栅 1 座, 共分 3 格, 配置转鼓式精细格栅 3 台, 栅隙间距为 1 mm。

3.4.3 反硝化滤池

为进一步确保出水 SS、TP 以及 TN 指标达标,

本工程采用上向流反硝化深床滤池对污水进行深度处理, 反硝化深床滤池设计规模为 $6\ 万\ m^3/d$, K_z 为 1.33。设计进水 TN 质量浓度为 20 mg/L, TP 质量浓度为 0.5 mg/L, SS 质量浓度为 20 mg/L, 设计出水 $TN \leq 15\ mg/L$, $TP \leq 0.3\ mg/L$, $SS \leq 10\ mg/L$ 。反硝化滤池采用上向流形式, 滤池采用单排布置, 共分为 5 格, 单格过滤面积为 $93.8\ m^2$, 设计滤速为 5.3 m/h, 强制滤速为 6.6 m/h, 滤料深度为 1.8 m。

3.4.4 紫外消毒池

为保证尾水粪大肠杆菌指标达标, 采用紫外消毒对尾水进行最终处理, 紫外消毒池采用渠道式, 共分为 2 格, 紫外有效剂量为 $28\ mJ/cm^2$, 同时考虑次氯酸钠辅助消毒。

3.4.5 加药间

于缺氧区进水端设置乙酸钠投加点, 在进水碳源不足时补充乙酸钠以提高缺氧区反硝化效果, 设计最大投加量为 90 mg/L (25% 乙酸钠); 于缺氧池出水溢流堰设置聚合氯化铝铁 (PAFC) 投加点, 设计最大投加量为 100 mg/L (10% PAFC); 于精细格栅后混合反应池设置 PAFC 及乙酸钠投加点, 后续进入滤池除反硝化外可通过滤池接触絮凝作用进一步去除污水中的 TP, PAFC 和乙酸钠设计最大投加量分别为 50 mg/L (10% PAFC) 和 100 mg/L (25% 乙酸钠); 于反硝化滤池产水池设置备用次氯酸钠投加点, 设计最大投加量为 60 mg/L (10% 次氯酸钠)。

4 运行效果及经济分析

4.1 工程进度及运行效果

该工程于 2018 年 8 月开始施工, 2018 年 11 月底第一组生化池开始运行调试, 2019 年 3 月正式投入运行。2019 年—2021 年年均处理水量分别为 6.55 万、5.97 万、5.78 万 m^3/d , 2021 年 11 月开始实施“减量提质”, 运行规模降低至 4 万 m^3/d 。项目运行至今污水处理效果好, 出水主要指标可稳定达到地表水 IV 类水的标准, 实际进出水水质及处理水量如表 3 所示。AAO-RPIR 生化池在未投加碳源的情况下, 年平均进出水 TN 质量浓度分别为 36.87 mg/L 和 7.63 mg/L, TN 去除效果优于设计预期, 反硝化滤池未进行碳源投加, 主要用于 TP 和 SS 指标的保障。

4.2 经济分析

本项目工程总投资约为 1.8 亿元, 占地面积约

表 3 月均日处理水量及进出水水质
Tab. 3 Monthly Average Daily Treated Water Capacity and Influent and Effluent Quality

月份	月均日处理水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\text{BOD}_5/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\text{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		氨氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2021-01	51 847	623	13. 1	202	4. 17	303	3. 06	19. 6	0. 27	6. 53	0. 11	61. 9	8. 05
2021-02	54 080	605	14. 9	199	4. 53	261	3. 25	18. 7	0. 24	6. 50	0. 19	60. 1	9. 02
2021-03	58 128	638	12. 5	202	4. 01	290	3. 13	21. 9	0. 35	6. 32	0. 15	60. 5	8. 68
2021-04	53 925	558	13. 8	183	4. 42	251	3. 17	21. 5	0. 37	6. 01	0. 14	61. 3	7. 80
2021-05	67 333	529	13. 5	168	4. 34	244	3. 10	20. 7	0. 55	6. 05	0. 14	51. 3	7. 50
2021-06	70 818	485	12. 9	153	4. 06	237	3. 03	18. 6	0. 53	5. 77	0. 17	42. 9	6. 38
2021-07	70 548	499	14. 1	156	4. 45	228	3. 23	18. 7	0. 39	5. 78	0. 11	42. 5	5. 80
2021-08	72 184	444	12. 6	144	4. 04	212	3. 06	19. 1	0. 45	5. 60	0. 08	38. 5	5. 49
2021-09	64 028	462	14. 6	152	4. 34	220	3. 30	21. 6	0. 27	6. 11	0. 20	38. 5	6. 90
2021-10	53 678	381	14. 3	131	4. 55	186	3. 42	18. 0	0. 17	6. 18	0. 18	38. 2	7. 37
2021-11	43 447	335	16. 6	147	5. 12	169	3. 27	24. 6	0. 18	5. 28	0. 23	39. 0	9. 72
2021-12	33 708	442	14. 7	203	4. 63	238	3. 65	26. 4	0. 28	6. 75	0. 25	44. 9	10. 44
2022-01	37 077	423	14. 3	189	4. 49	227	3. 19	24. 0	0. 26	6. 98	0. 23	44. 3	8. 49
2022-02	40 924	361	14. 9	170	4. 61	199	3. 18	19. 7	0. 31	6. 93	0. 15	40. 2	9. 74
2022-03	44 266	335	14. 1	153	4. 41	185	3. 08	24. 3	0. 28	5. 77	0. 19	38. 6	8. 92
2022-04	42 277	307	13. 3	129	4. 33	173	3. 03	24. 5	0. 29	6. 12	0. 23	37. 3	6. 97
2022-05	35 286	265	13. 2	112	4. 21	155	3. 00	20. 2	0. 26	5. 06	0. 19	33. 6	6. 89
2022-06	43 155	239	12. 6	110	4. 25	146	3. 00	19. 1	0. 25	4. 71	0. 18	29. 7	5. 98
2022-07	42 419	250	13. 1	112	4. 17	140	3. 03	19. 8	0. 25	5. 11	0. 20	30. 5	5. 60
2022-08	46 246	246	13. 4	92	4. 24	133	3. 00	16. 2	0. 18	5. 03	0. 19	27. 7	4. 61

为 $13\,500\,\text{m}^2$ (不含综合楼),单位用地指标为 $0.225\,\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。以 2021 年 3 月为统计期进行测算,单位运行成本约为 $0.70\,\text{元}/\text{m}^3$,其中电费为 $0.24\,\text{元}/\text{m}^3$,药剂费为 $0.095\,\text{元}/\text{m}^3$,PAFC(10%)平均投加量约为 $100\,\text{mg}/\text{L}$,次氯酸钠(10%)平均投加量约为 $20\,\text{mg}/\text{L}$ 。

本项目吨水电耗约为 $0.35\,\text{kW} \cdot \text{h}$,高于武汉某污水厂采用 A-RPIR 工艺仅 $0.188\,\text{kW} \cdot \text{h}$ 的吨水电耗^[2],差距可能主要来源于本项目进水污染物浓度远高于武汉项目。本项目污水厂原一期工程采用改

良 AAO 工艺,同期的平均吨水电耗为 $0.28\,\text{kW} \cdot \text{h}$,剔除出水水质标准差异以及规模效应造成的影响,可认为在相同进水水质条件下,AAO-RPIR 工艺的能耗成本与常规改良 AAO 工艺无显著差异。这是由于一方面,RPIR 生物池的反应原理仍是基于 AAO 形式,理论所需的曝气量与 AAO 工艺一致;另一方面,尽管 AAO-RPIR 工艺省去了外回流,但回流污泥浓度较低,好氧区至缺氧区、缺氧区至厌氧区的两段总回流量较大,回流的总能耗接近。类似项目的具体能耗对比如表 4 所示。

表 4 类似项目能耗对比
Tab. 4 Comparison of Energy Consumption in Similar Projects

项目	本项目	本项目污水厂原一期工程	深圳南山水质净化厂一套系统升级改造工程	武汉某污水厂
主体工艺	AAO-RPIR	改良 AAO	RPIR	A-RPIR
设计规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	4 万	24 万	17.6 万	15 万
设计标准	地表Ⅳ	一级 B	一级 A	一级 A
吨水电耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$	0.35	0.28	0.33 ^[5]	0.188 ^[2]

5 AAO-RPIR 工艺特点分析及优化建议

本项目自建成通水已顺利运行了 4 年,运行效果稳定,文中从设计角度出发,结合部分建设及运营阶段的经验,总结了该工艺的特点以及应用于本工程遇到的问题,并提出了优化建议。

① 占地省

RPIR 工艺巧妙地利用矩形反应沉淀池一体化模块,将二沉池“叠层”设置于好氧池上方,可大大节省工程占地。以本项目污水厂原一期改良 AAO+周进周出二沉池为对比,在出水标准高于原一期处理设施的情况下,二级处理部分构筑物的单位占地仍可节省约 20%,用地指标与 MBR 工艺接近,节地效果显著。

② 结构简单,启动快

RPIR 模块通过钢构件支撑设置于生化池好氧区上部空间,工艺结构通过模块实现。对比周进周出二沉池、矩形平流沉淀池、MBR 膜池等泥水分离工艺,土建结构简单,池体施工期间 RPIR 模块可同步车间预制,因此,可以大大节约项目施工工期,项目启动快。

③ 抗冲击负荷能力强,传质效率高

RPIR 生化池进水配水管均匀分布于整个池底,出水溢流堰均匀分布于好氧池上方,因此,曝气池的水流方向与曝气方向一致,更有利于污水通过曝气产生的气提作用上升形成升流区。污水上升至自由液面气水分离后进入 RPIR 模块,污水含气率下降,密度增大,水流下降,形成降流区。污水携 RPIR 模块分离的污泥回到池底后重新进入升流区由此形成环流。

从整体上看,RPIR 曝气池这一结构形式与曾经在我国广泛使用的合建式完全混合曝气池^[6]有许多相似之处,其混合液流动形态总体上倾向于完全混合式,因此,具有较强的抗冲击负荷能力。从单个环流区域来看,由于 RPIR 模块的分隔,降流区位于生物反应器的末端,随着反应的进行降流区水中的溶解氧及有机物浓度低于升流区,因此,该工艺同时又具有推流式的特点,有机物及溶解氧的浓度梯度使其可以获得比完全混合式更佳的传质效率。

④ 池形布置灵活

在解决好配水问题的前提下,RPIR 模块的布置

非常灵活,理论上好氧池可以采用矩形、圆形甚至异形形式,如深圳市南山水质净化厂一套系统升级改造^[5]利用闲置的 6 座辐流式初沉池原位改造为 RPIR 曝气池,提升污水处理能力。可见该工艺受用地、池形等方面的限制较小,在用地不规则、需利用现状构筑物改造的项目上采用该工艺具有一定优势。

⑤ 工艺管道较多

RPIR 好氧池特殊的布置形式造成了其管路布置较为复杂,单组生化池规模越大该问题越发凸显。以本项目为例,为保证水流均匀地进入曝气池,在缺氧区出水通过溢流堰结合 4 根 DN1200 主干管配水,每组主干管对应 32 根穿孔配水支管呈丰字形均匀布置于池底。为了保证硝化液回流均匀,避免出现短流问题破坏环流效果,本项目共设置了 168 根硝化液回流管均匀布置于 RPIR 模块之间,并通过回流渠最终提升至缺氧区,本项目曝气池配水管及混合液回流管平面布置如图 4 所示。由于工艺管道较多,应特别重视对施工质量以及日后运行维护的管理。本项目于 2022 年年中对 RPIR 曝气池进行了清池维护,池内工艺管道未出现松脱、断裂等问题,仅部分模块出水管在法兰连接处出现了少量渗漏,池内管道总体情况良好。

⑥ 斜管堵塞及藻类滋生

好氧池上方 RPIR 模块通过斜管进行泥水分离可以实现较高的表面负荷,但也带来了污泥堆积、斜管堵塞等问题,需运维人员定期对堵塞的斜管进行冲洗。尤其是在模块未加盖的情况下,夏季斜管区受阳光照射易滋生藻类,会进一步加剧斜管区堵塞的问题,加之本工程好氧池各列模块之间未设置检修通道,不便于运维人员操作、通行,综合上述原因增加了本工程生化池的维护难度以及工作量。建议工程设计应对斜管区加盖并考虑设置自动冲洗设施,同时考虑模块之间检修通道的设置,确保每个模块都可以通过检修通道抵达,以利于模块的维护、检修作业,并保障运维人员的安全。

该厂于 2022 年 6 月在模块进水及斜管区新增了自动气冲系统,气源来自曝气鼓风机。实践表明气冲系统可以较好地解决斜管堵塞问题,对藻类清理也能起到一定作用,每次对 4 个模块进行冲洗,冲洗时间约为 10 min,清洗周期为一周,可在保证出水水质的前提下实现模块的自动清洁。

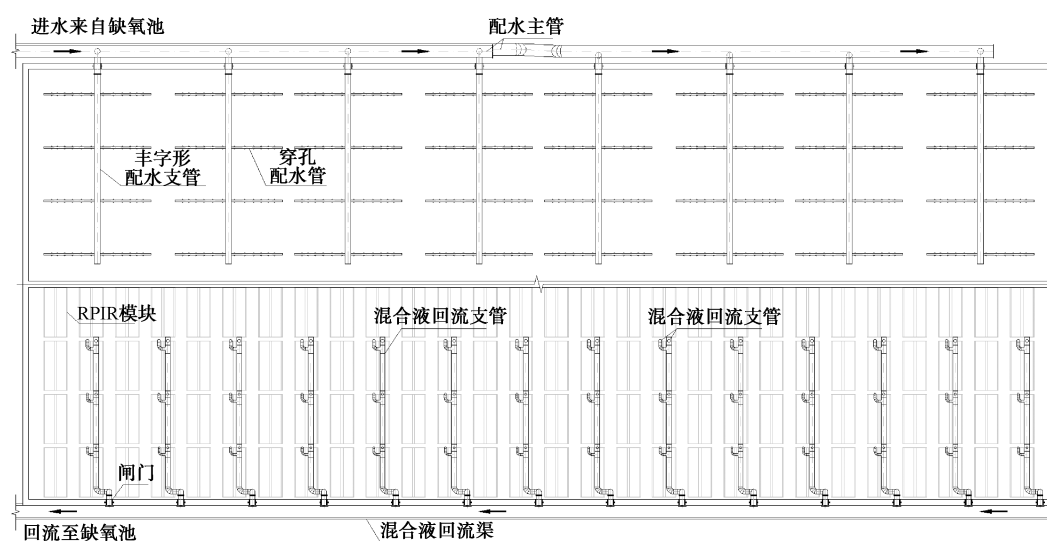


图4 AAO-RPIR 曝气池配水及回流管平面布置

Fig. 4 Layout of Water Distribution and Sludge Recirculation Pipe of AAO-RPIR Aeration Tank

⑦ 排泥浓度较低

该工艺可以实现的好氧池污泥浓度很大程度上取决于斜管区的负荷,本项目斜管区表面负荷为 $1.25 \text{ m}^2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,实际运行时好氧区污泥质量浓度不宜高于 5000 mg/L ,否则较容易出现跑泥问题。同时,由于本工艺不具备二沉池浓缩的功能,生化池排放的混合液污泥浓度较低,由此会产生剩余污泥排水量较大的问题,减少实际处理水量。过低的排泥浓度亦不利于污泥脱水,吴明明等^[2]在采用 A-RPIR+磁混凝组合工艺处理城镇污水时发现, RPIR 生化池排放的污泥浓度较低,与磁混凝排放的较高浓度污泥混合后影响污泥脱水效果。因此,设计阶段应重点考虑设计污泥浓度与斜管区负荷的关系,确保设计污泥浓度可达,同时建议设置预浓缩池,提高生化池排放的剩余污泥浓度,减少排放水量的同时为后续污泥脱水创造良好的条件。

⑧ 工艺形式有限

受限于斜管区表面负荷,模块安装区域须位于主好氧区,由此也一定程度上限制了 RPIR 生化池工艺形式的选择,如具有更高脱氮效率的多点进水多段 AAO 工艺^[7]、改良 Bardenpho 工艺^[8]、污泥双回流-厌氧好氧缺氧(SDR-AOA)工艺^[9]等均较难在 RPIR 工艺中实现。此外,由于泥水分离模块均匀布置于好氧池池顶,无法结合二沉池在好氧段末端进行除磷剂的同步投加,生化池除磷剂多点投加的可选位置较少。本工程将除磷剂投加于缺氧区出水溢

流堰处,化学除磷反应过程在好氧区进行,对聚磷菌好氧吸磷有一定抑制作用,除磷剂与其他有机物的反应亦会导致化学除磷效率降低,由此增加除磷剂的消耗量。对于出水 TP 要求较为严格的场合,建议深度处理采用高效沉淀池等化学除磷效率较高的工艺,避免在生化段同步投加过多的除磷药剂。

尽管工艺选择形式有限,近年来也出现了竖流式 A-RPIR 工艺^[10]以及 AG-RPIR(RPIR 耦合好氧颗粒污泥)^[11]等 RPIR 新工艺的相关研究,为 RPIR 工艺的优化与升级提供了新的发展思路。

6 结论

① AAO-RPIR 工艺在早期单纯设置曝气池的 RPIR 工艺上新增了厌氧区和缺氧区,大大强化了其同步脱氮除磷的功能,并具有污水处理效率高、抗冲击负荷能力强、传质效率高的特点。本工程采用以 AAO-RPIR 工艺为核心的污水处理工艺,至今已稳定运行 4 年,年均处理水量达到设计规模的 $6 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,出水主要指标达到地表水 IV 类的标准,单位用地指标为 $0.225 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,单位运行成本约为 $0.70 \text{ 元}/\text{m}^3$,实践证明该工艺应用于高排放标准的市政污水处理可行、可靠。

② AAO-RPIR 工艺具有占地省、启动快、工期短、池形布置灵活、一体化程度高的特点,在污水厂提标扩容、污水应急处理、河道水环境治理、村镇小型一体化污水处理等领域具有一定的推广价值。

③ AAO-RPIR 特殊的工艺形式同样存在一些

缺点,如工艺管道较多、斜管堵塞及藻类滋生、排泥浓度较低、可实现的工艺形式有限等问题,设计时应引起足够的重视。设置自动气冲系统可以较好地解决斜管堵塞问题并大大减少人工清理的工作量,类似项目可参考借鉴。未来对该工艺的研发、探索建议重点向解决上述问题的方向进行。

参考文献

- [1] 林佩斌, 李小江, 李辉, 等. 快速污水处理技术(RPIR)用于深圳水环境治理[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 117-120.
- LIN P B, LI X J, LI H, et al. Application of rapid wastewater treatment technology (RPIR) in water environment improvement in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 117-120.
- [2] 吴明明, 熊珍, 徐海飞, 等. A/RPIR+磁混凝工艺调试及能耗分析[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 158-162.
- WU M M, XIONG Z, XU H F, et al. Process commissioning and energy consumption analysis of A/RPIR + magnetic coagulation[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 158-162.
- [3] 张其殿, 李辉, 孔树伟, 等. A²/RPIR 工艺用于生活污水处理厂提标改造[J]. 广东化工, 2019, 46(19): 236-240.
- ZHANG Q D, LI H, KONG S W, et al. A²/RPIR in the upgrading and transformation of sewage treatment plant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(19): 236-240.
- [4] LIU S J, ZHANG L F, KONG S W, et al. Performance of an integrated reactor with airlift loop and sedimentation for municipal wastewater treatment; A 150 m³/d pilot case study [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2020, 98(2): 475-483.
- [5] 韩小波, 姚立三, 范翊, 等. RPIR 技术及反吊膜封闭除臭用于水质净化厂提标改造[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 202-205.
- HAN X B, YAO L S, FAN Y, et al. The utilize of RPIR technology and anti-hanging membrane sealing and deodorizing for upgrading a water purification plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(s1): 202-205.
- [6] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- ZHANG Z J, LIN R C, JIN R L. Water drainage engineering [M]. 4th Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [7] 戴仲怡, 李瑞成, 王建兴. 多段强化脱氮 A²/O 工艺用于大型半地下式污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 75-78.
- DAI Z Y, LI R C, WANG J X. Application of multi-stage A²/O process for enhanced nitrogen removal in large semi-underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 75-78.
- [8] 杨敏, 郭兴芳, 孙永利, 等. 某高排放标准污水处理厂运行问题与对策措施研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 6-10.
- YANG M, GUO X F, SUN Y L, et al. Study on countermeasures and operational problems of a WWTP with high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 6-10.
- [9] GAO X J, ZHANG T, WANG B, et al. Advanced nitrogen removal of low C/N ratio sewage in an anaerobic/aerobic/anoxic process through enhanced post-endogenous denitrification [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126624. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126624.
- [10] 石翔宇. 竖向流缺氧-好氧-泥水分离一体式 RPIR 工艺处理城市污水中试脱氮研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- SHI X Y. Research on denitrification in municipal wastewater treatment by vertical flow anoxic-aerobic-mud water separation integrated RPIR process [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [11] LI Y, LIU S J, CHEN F M, et al. Development of a dynamic feeding strategy for continuous-flow aerobic granulation and nitrogen removal in a modified airlift loop reactor for municipal wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136764. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136764.
- [31] 付香云, 余诚, 王凯军, 等. 连续流培养好氧颗粒污泥研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1726-1736.
- FU X Y, YU C, WANG K J, et al. Research advances on continuous flow aerobic granular sludge cultivation [J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1726-1736.
- [32] 杨庆, 程蓉, 刘秀红, 等. 一体式厌氧氨氧化工艺系统的研究与应用进展[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 775-787.
- YANG Q, CHENG R, LIU X H, et al. Research and application progress of integrated anammox process system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 775-787.
- [33] 吴岩. 短程硝化反硝化处理高浓氨氮废水效果及机理研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- WU Y. Study on the effect and mechanism of wastewater treatment with high concentration of ammonia nitrogen by partial nitrification [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [34] 李苏洁, 陈姗姗, 栾天罡. 藻菌共生处理污水的机制与应用研究进展[J]. 微生物学报, 2022, 62(3): 918-929.
- LI S J, CHEN S S, LUAN T G. Advances in mechanisms and applications of algae-bacteria/fungi symbiosis in sewage treatment [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(3): 918-929.

(上接第 48 页)