城镇给排水工程设计案例专栏

王磊, 俞健, 张敏君. AA/RPIR+磁混凝工艺在城市污水处理厂扩能改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(12):154-161.
WANG L, YU J, ZHANG M J. Application of AA/RPIR and magnetic coagulation process in expansion and reconstruction of municipal WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(12): 154-161.

AA/RPIR+磁混凝工艺在城市污水处理厂扩能改造中的应用

王　磊[1,*],俞　健[1,2],张敏君[2]
(1. 昆山建工环境投资有限公司,江苏昆山　215300;2. 昆山建邦环境投资有限公司,江苏昆山　215300)

摘　要　昆山某城市污水处理厂处理水量长期处于超负荷状态,同时又面临建设面积紧缺及出水标准升级的问题,研究后决定采用 AA/快速生化污水处理(RPIR)+磁混凝工艺在原厂址基础上进行扩能改造。重点对 AA/RPIR+磁混凝工艺的实际运行效果及经济运行效益展开分析。结果表明:该工艺对污染物的去除效果极好,COD_{Cr} 去除率高达 94.2%;出水浓度均优于设计标准,其中 COD_{Cr}、BOD_5、SS、氨氮、TN、TP 均值分别为 13.38、2.31、6.31、0.313、7.86、0.082 mg/L;沿程分析结果显示 AA/RPIR 与磁混凝工艺结合取得了良好脱氮除磷效果,氨氮、TN、TP 去除率分别达到了 99.0%、77.5%、97.9%,75.0%~90.2%的磷均在生化段去除且具备良好的工艺稳定性;经济效益分析结果显示本项目投资运行成本低,正式运营后 RPIR 池吨水电耗由 0.511 kW·h 下降到0.215 kW·h,磁混凝 PAC+PAM 吨水耗药成本由 0.026 元下降到 0.004 6 元,节能降耗效果较好。

关键词　快速生化污水处理技术(RPIR)　磁混凝　污水厂　改造　脱氮除磷　节能降耗
中图分类号: TU992　　**文献标识码**: B　　**文章编号**: 1009-0177(2023)12-0154-08
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.12.019

Application of AA/RPIR and Magnetic Coagulation Process in Expansion and Reconstruction of Municipal WWTP

WANG Lei[1,*], YU Jian[1,2], ZHANG Minjun[2]
(*1. Kunshan Jiangong Engineering Environment Investment Co., Ltd., Kunshan　215300, China;*
2. Kunshan Jianbang Engineering Environment Investment Co., Ltd., Kunshan　215300, China)

Abstract　The amount of water treated by a municipal wastewater treatment plant(WWTP) in Kunshan is in the state of exceeding load for a long time, facing the problem of lack of construction land and upgrading of water standard. The AA/RPIR+ magnetic coagulation process is determined to be used for capacity expansion at the original site. This study focuses on the analysis of AA/RPIR+ magnetic coagulation process practical operation effect and economic operation benefits. The results show that the process has excellent removal effect on pollutants, and the COD_{Cr} removal rate is as high as 94.2%. The effluent concentration is better than the standard. The mean values of COD_{Cr}, BOD_5, SS, ammonia nitrogen, TN and TP are 13.38, 2.31, 6.31, 0.313, 7.86, 0.082 mg/L, respectively. The results of analysis along the process show that AA/RPIR combined with magnetic coagulation process achieved good nitrogen and phosphorus removal effect, and the removal rates of ammonia nitrogen, TN and TP reach 99.0%, 77.5% and 97.9%, respectively. 75.0%~90.2% phosphorus is removed in the biochemical stage and maintained good process stability. The results of economic benefit analysis show that the project has a low cost of investment and operation. After the formal operation, the water and electricity consumption per ton of RPIR pool decreases from 0.511 kW·h to 0.215 kW·h, and the water consumption cost per ton of magnetic coagulation decreases from 0.026 yuan to 0.004 6 yuan, which has a good effect of energy saving and consumption reduction.

[收稿日期]　2023-05-15
[通信作者]　王磊(1981—　),女,硕士,研究方向为污染治理及水处理,E-mail:651465834@qq.com。

Keywords rapid purification and integrated reactor (RPIR) magnetic coagulation wastewater treatment plant (WWTP) reconstruction nitrogen and phosphorus removal energy-saving and cost-reducing

AA/快速生化污水处理技术(RPIR)工艺是将RPIR技术与AAO工艺相结合,采用RPIR取代传统AAO工艺的好氧段及二沉池,进而强化污水处理效果的新型工艺技术。AA/RPIR工艺的核心原理为RPIR技术,其本质属于活性污泥法。国内成功案例[1-2]指出AA/RPIR具有传统工艺不具备的优点:占地面积省、设备投资低、启动快、系统运行稳定性强、出水稳定、抗冲击能力强等。磁混凝是一种高效的固液混合方法,磁粉的加入能加速絮凝体形成,从而促进高效固液分离优于常规混凝技术[3]。磁混凝工艺对于SS、TP等的去除效果也很优异[4],同时因为其表面加载速率比一般絮凝高,占有的土地面积更小。国内将AA/RPIR工艺与磁混凝工艺结合[5-8],能实现更小的占地面积及更好的脱氮除磷效果,同时降低能耗,实现了反应、沉淀、出水一体化[5]。

1 工程介绍

1.1 扩建背景

昆山某污水处理厂位于沪宁高速及312国道夹角地带,总规模为12.5万 m^3/d,一期工程(6.25万 m^3/d)已于2015年9月建成投产,采用AAO+高密度沉淀池+V型滤池污水处理工艺,尾水排入小瓦浦河后最终进入吴淞江。该项目尾水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准,2020年通过工艺改造提标至《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)标准,2021年开始通过强化管理措施达到"苏州特别排放限制"标准。随着该地工业园区不断扩增和人口的不断增加,自2018年7月开始该污水厂水量一直处于超负荷状态,运行压力大,扩能改造工程建设迫在眉睫。但是由于现场占地面积非常有限,常规的AAO工艺无法安置,而膜生物反应器(MBR)工艺又有能耗过大、运行成本过高[9]等缺点,因此,综合考虑最终确定采取AA/RPIR+磁混凝工艺进行扩能改造。

1.2 方案论证

1.2.1 原进出水水质

污水厂原设计进出水水质如表1所示。该厂进水水质波动较大,主要是雨季对污水水质的稀释作用引起,随着该地区雨水管网配套设施的不断完善,水质会趋于稳定。由表1中出水数据可知,一期水质完全达到出水排放标准DB 32/1072—2018要求,另外除了TN有所波动外其余数据都达到了"苏州特别排放限值"标准要求。因此,本次扩能改造完成后的重点就是通过管理手段保证TN的稳定达标。同时,氨氮去除效果良好,可以推断出TN中硝态氮含量较高,因此,可以通过降低硝化末端DO,并适量投加碳源来提高反硝化速率。

表1 污水厂进出水水质

Tab. 1 Designed Influent and Effluent Quality of WWTP

项目	COD_{Cr}	BOD_5	SS	氨氮	TN	TP
设计进水水质/($mg \cdot L^{-1}$)	350	150	120	45	50	6
实际进水水质/($mg \cdot L^{-1}$)	108~769	48.7~254	75~211	6.39~38.0	9.78~43.3	0.12~11.7
设计出水水质/($mg \cdot L^{-1}$)	≤50	≤10	≤10	≤4(6)	≤12(15)	≤0.5
管理目标水质/($mg \cdot L^{-1}$)	≤30	≤10	≤10	≤1.5(3)	≤10	≤0.3
实际出水水质/($mg \cdot L^{-1}$)	13.7~24	3.4~5.6	5.1~7	0.08~0.64	7.1~13.03	0.02~0.27

注:括号外数字为水温>12 ℃时的控制目标,括号内数字为水温≤12 ℃时的控制目标;尾水的总大肠杆菌数≤1×10^3 个/L。

1.2.2 进水浓度累计频率分析

为了进一步明确现状进水情况,对现阶段进水水质进行浓度累计频率分析,如图1所示。从目前水质情况来看,水质变化幅度相对稳定,设计进水水质中 COD_{Cr}、氨氮、TN及TP的覆盖率均可以满足实际进水水质的95%,但是进水 BOD_5 和SS的覆盖率均低于80%,因此,需要强化对于 BOD_5 以及SS的去除效果。为了保证设计进水水质覆盖率均提升至95%,本次改造将进水 BOD_5 和SS标准分别调整为180 mg/L和150 mg/L,其余进出水设计标准值均

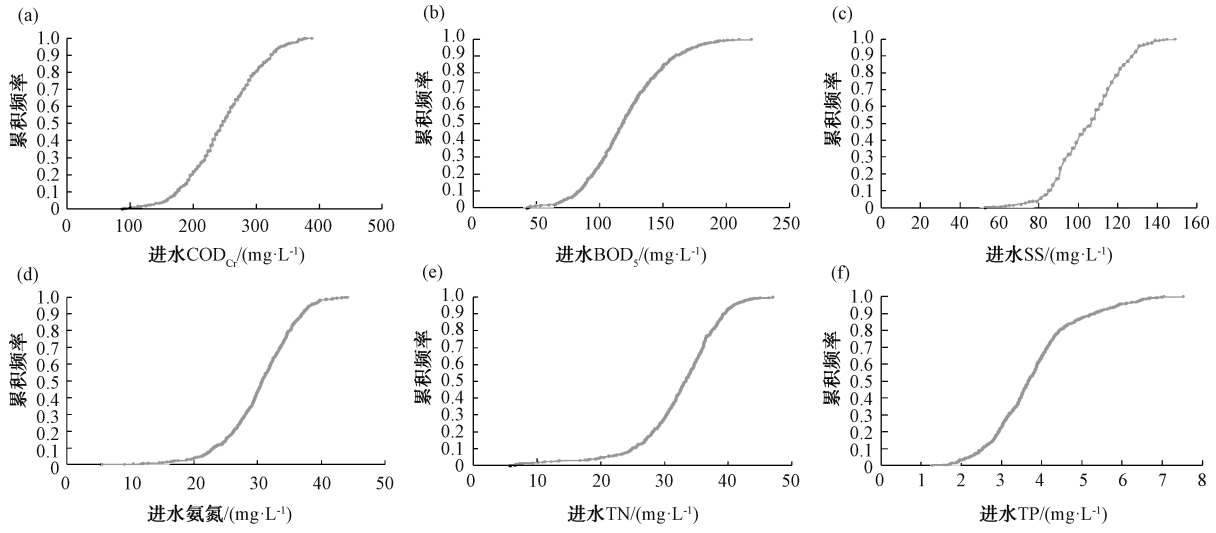


图 1　进水累计频率

Fig. 1　Cumulative Frequency of Influent

不变。

1.2.3　建设形式方案选择

本次改造建设形式备选方案有:(1)地上单层加盖(无检修层);(2)半地下式布局(双层加盖);(3)全地下式布局(双层加盖)。由于地下污水厂工程投资大,运行成本高,原一期工程现场建成部分地上设施难以与地下工程形式相协调,本次改造最终还是确定采用地上单层加盖作为建设形式,池顶仅设置检修孔及观察孔,其余覆土绿化。具体比选情况如表 2 所示。

表 2　建设形式比较

Tab. 2　Comparison of Construction Forms

项目	方案 1:全地上	方案 2:半地下	方案 3:全地下
上部空间可利用及景观效果	设备安装孔较多;景观效果一般	上部无设施;景观效果好	上部无设施;景观效果好
人员进出	无特殊进出通道	生产区设人员进出通道	景观区设人员进出通道
设备吊装	由预设吊装孔进出	由生产区道路进出	由地下车道进出
周围环境	大量检修孔不密封,少量臭气	密封性好,对环境影响小	密封性好,对环境影响小
对操作人员影响	地上巡视,不影响人员健康	地上巡视多,人员健康影响小	全地下巡视,人员健康影响大
工程费用/万元	14 024.2	33 723.3	38 730.6
运行费用/(元·t^{-1})	0.66	0.70	0.75
建设标准	低	较高	较高

1.2.4　主体工艺及深度处理工艺

本工程主体工艺优先采用效率高、运行可靠、占地省的工艺。本工程深度处理的目的主要是通过降低 SS 值进一步降低水中其余指标。在综合考虑水质、造价和占地等问题后决定采用 AA/RPIR 作为主体工艺,采用磁混凝沉淀池+滤布滤池作为深度处理工艺。

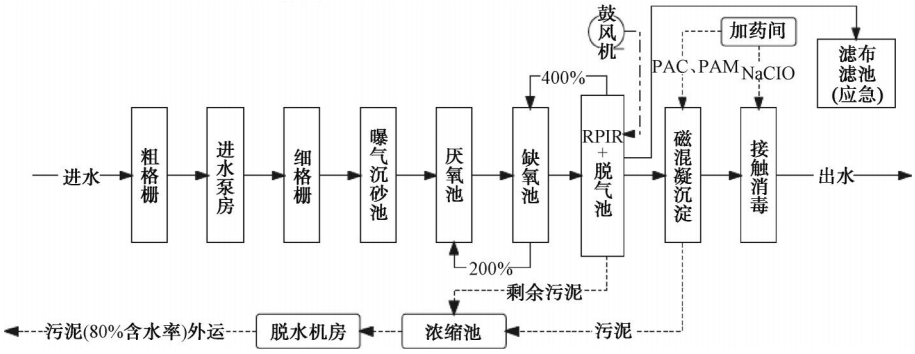
1.3　工艺流程

该工程设计规模为 6.25 万 m^3/d,总变化系数 K_Z=1.3,设计出水标准参照 DB 32/1072—2018,工艺流程图如图 2 所示。

1.4　扩能改造主要构筑物及设备

1.4.1　AA/RPIR 池

AA/RPIR 池总设计规模为 6.25 万 m^3/d,变化系数为 1.3,分为厌氧池 2 组、缺氧池 2 组、RPIR(好氧)池 2 组和兼氧脱气池 2 组,其中好氧池单组尺寸为 27.7 m×25.8 m×9.0 m,有效水深为 7.5 m(其中,2.8 m 为 RPIR 模块,模块高度范围不计入好氧区,模块间 0.5 m 间距计入好氧反应区),池顶覆土绿化面积为 3 789 m^2。好氧池至缺氧池回流比为



注:PAC 为聚合氯化铝;PAM 为聚丙烯酰胺。

图 2 污水处理工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Wastewater Treatment

400%,缺氧池至厌氧池为 200%,RPIR 表面负荷为 1.5 m/h。主要新增设备:RPIR 模块 158 套($L\times B\times H$ =5.0 m×2.4 m×3.0 m),薄膜盘式微孔曝气器 6 464 套单台曝气量为 4 m^3/h,缺氧池至厌氧池新增 11 kW 穿墙回流泵 3 台(2 用 1 备),好氧池至缺氧池新增 11 kW 穿墙回流泵 7 台(6 用 1 备),新增潜水推流器若干等。

1.4.2 磁混凝沉淀池

新建磁混凝沉淀池由混凝反应器、高剪机、磁鼓等组成。设计规模为 6.25 万 m^3/d,变化系数为 1.3,沉淀池尺寸为 34.2 m×13.8 m×8.0 m。沉淀池表面负荷为 17 m/h,磁粉为 2~4 mg/L,有效水深为 7 m。主要设备有:混合搅拌器 2 台,磁混凝搅拌器 2 台,絮凝搅拌器 2 台,刮泥机及高剪机各 2 台,污泥回流泵 2 用 1 备,剩余污泥泵 2 用 1 备,排污泵 1 用 1 备等。

2 结果和讨论

2.1 实际运行情况

该扩能项目自 2022 年 8 月正式通水,目前处理水量为4.3 万 m^3/d,出水水质已经完全达到了“苏州特别排放限值”标准要求。分析 2023 年 1 月—3 月数据,进出水水质及污染物平均去除情况如表 3 所示。

表 3 实际进出水水质及去除率

Tab. 3 Influent and Effluent Quality and Removal Rate

项目	COD_{Cr}	BOD_5	SS	氨氮	TN	TP
实际进水/(mg·L^{-1})	229.07	96.05	97.31	32.6	34.9	3.96
实际出水/(mg·L^{-1})	13.38	2.31	6.31	0.314	7.86	0.082
去除率	94.2%	97.6%	93.5%	99.0%	77.5%	97.9%
一期 AAO 去除率	93.9%	97.6%	93.5%	98.2%	83.8%	98.5%
同类项目去除率 1[5]	90.0%	92.2%	96.7%	97.6%	61.5%	88.1%
同类项目去除率 2[6]	88%	/	/	93%	54%	82%
同类项目去除率 3[7]	91.4%	/	94.3%	98.5%	63%	89.9%
同类项目去除率 4[8]	91.9%	94%	96.9%	97.6%	/	98.4%

2.1.1 对污染物的去除效果

连续进出水水质情况如图 3 所示。

(1)进水 COD_{Cr} 质量浓度在 138~322 mg/L,平均值为 229.07 mg/L;出水 COD_{Cr} 质量浓度在 10~20 mg/L,平均值为 13.38 mg/L,完全达到出水标准要求。COD_{Cr} 平均去除率为 94.2%,优于同厂一期 AAO 工艺及同类项目[5-8],体现了该工艺对污染物良好的去除效果,尤其在面对进水水质波动时表现出良好的稳定性。

(2)进水 BOD_5 质量浓度在 56.8~135 mg/L,平均值为 96.05 mg/L;出水 BOD_5 质量浓度在 2.0~3.1 mg/L,平均值为 2.31 mg/L,满足出水标准。BOD_5 平均去除率为 97.6%,与同厂一期 AAO 工艺去除效果一致,优于同类项目[5,8]去除效果,说明该

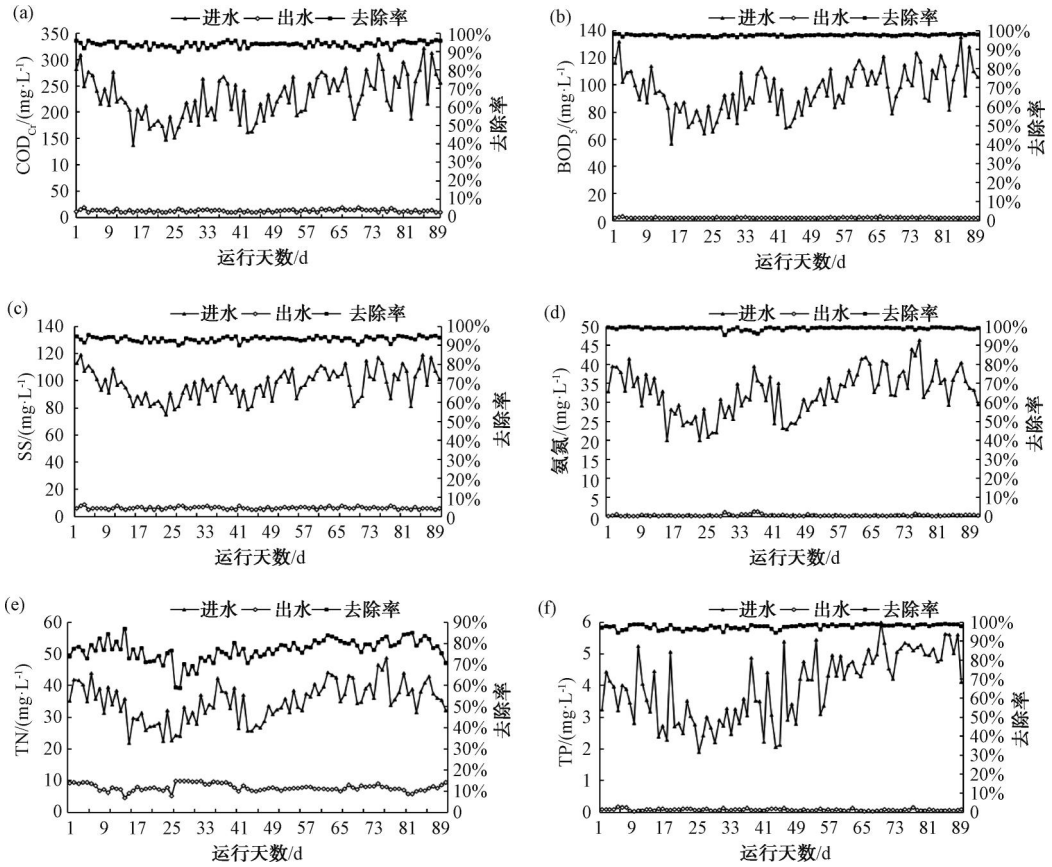


图 3　污染物浓度去除效果

Fig. 3　Removal Efficiency of Pollutants Concentration

工艺对进水中的有机物具有良好的去除效果。

(3)进水 SS 质量浓度在 75~119 mg/L,平均值为 97.31 mg/L;出水 SS 质量浓度在 5~9 mg/L,平均值为 6.31 mg/L。SS 平均去除率为 93.5%,比同类项目[5,7-8]去除效果稍差,与 AAO 去除效果一致。部分运营时段局部 RPIR 出水模块会出现泡泥,如果配合滤布滤池将能进一步提高 SS 去除效果。但由于目前出水已经稳定达标,出于节能降耗的目的,暂时未开启滤布滤池,仅将之作为应急池备用。

(4)进水氨氮质量浓度在 20.1~46.4 mg/L,平均值为 32.60 mg/L;出水氨氮质量浓度在 0.111~1.31 mg/L,平均值为 0.313 mg/L,在冬季低温状态下依然能达标排放。氨氮平均去除率为 99.0%,优于同厂 AAO 工艺及其他同类项目[5-8],说明该项目 RPIR 池硝化效果极好。

(5)进水 TN 质量浓度在 21.9~48.8 mg/L,平均值为 34.90 mg/L;出水 TN 质量浓度在 4.68~9.89 mg/L,平均值为 7.86 mg/L,C/N=6.6,即使在冬季低温状态下不投加外部碳源也能实现达标排放。因为 RPIR 模块底部的非曝气区域呈缺氧状态,不仅取代了部分二沉池的作用还可同步实现反硝化,达到高效脱氮的目的。TN 平均去除率为 77.5%,优于同类其他项目[5-7],但是却不如同厂一期 AAO 工艺去除效果。主要原因是:外管网缺水导致实际处理水量仅 4.3 万 m^3/d,属于低负荷运行;RPIR 池曝气系统设备提供的 DO 浓度无法大幅度调低,回流至缺氧段 DO 偏高导致 TN 无法进一步去除。随之带来的还有 RPIR 高能耗问题,虽然 TN 目前已经实现达标排放,但出于节能降耗考虑厂区已经计划对设备进行技改,通过增加变频器、精确曝气控制、备用低功率设备等方式来控制 DO、降低能耗,提高 TN 去除效率。

(6)进水 TP 质量浓度在 1.9~5.99 mg/L,平均值为 3.96 mg/L;出水 TP 质量浓度在 0.03~0.18 mg/L,平均值为 0.082 mg/L。此项工程通过将生化除磷和化学除磷相结合的方式来保障除磷效果。

RPIR 池出水 TP 实测值在 0.39~0.99 mg/L,此时 TP 去除率已达到 75.0%~90.2%,生化除磷效果较好。后续磁混凝沉淀池中由于磁种的重力作用加快了絮体的沉降速度,有效提高了处理效率,实现了高效除磷,配合加药出水 TP 由原来的质量浓度≤0.5 mg/L 提标到质量浓度≤0.3 mg/L。TP 平均去除率为 97.9%,优于其他同类项目[5-7],但是却不如同厂 AAO 和同类项目 4[8],如表 3 所示。由于 TP 已达标排放,磁混凝的精确加药控制会是下阶段研究重点。

2.1.2 RPIR 沿程分析结果

沿程各单元污染物浓度变化情况(图 4),图中浓度为各单元出水口浓度 。

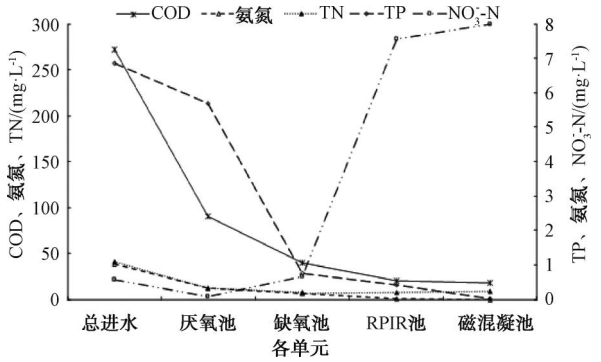


图 4 AA/RPIR 沿程分析

Fig. 4 On-Way Analysis of AA/RPIR Process

(1) 污水进入厌氧池后 COD_{Cr} 除了受到缺氧池回流液稀释的作用外,大部分被该池中的聚磷污泥吸收用于合成细胞体贮存颗粒聚-β-羟基丁酸(PHB),实现了有机物的快速去除和磷的释放,COD_{Cr} 去除率达到 67%;经缺氧池后 COD_{Cr} 浓度又呈现一定幅度的下降,去除率提升到了 85%,这部分的 COD_{Cr} 除 RPIR 池回流稀释外,大部分被该池反硝化污泥吸收用于将 NO_3^--N 还原转化为 N_2;经 RPIR 池后 COD_{Cr} 去除率达 93%,大部分有机物被微生物同化作用吸收。到 RPIR 池出口 COD_{Cr} 质量浓度只剩 20 mg/L,已满足出水要求。

(2) 进水 TP 经过厌氧池没有大幅度提高,可见污泥中的磷没有得到充分释放,而经过缺氧池后 TP 的浓度却出现大幅度降低,去除率达到了 89%,证明了反硝化聚磷菌(DPB)的存在,该缺氧池能同步实现脱氮除磷。再经过 RPIR 池,在好氧聚磷菌(PAO)作用下 TP 被污泥吸收质量浓度降到了 0.41 mg/L,已满足出水设计标准要求。最后经过磁混凝后 TP 质量浓度降到了 0.03 mg/L,满足苏州特别排放限值管理要求。

(3) 原水进入厌氧池后,由于稀释作用,TN 浓度比原水大为降低,还有很小部分被微生物同化作用所吸收利用,缺氧池之前氨氮和 TN 值非常接近,说明水体中氮类物质主要由氨氮构成,到 RPIR 池出口大部分转化为 NO_3^--N,转化率已达到 99%,整体上氨氮、TN、NO_3^--N 保持平衡。污水从好氧池经过内循环回流至缺氧池后,在异养反硝化细菌的作用下发生反硝化作用,NO_3^--N 被还原成 N_2 从而被吹脱出系统,这样出水中的 NO_3^--N 浓度和 TN 浓度都有大幅度的降低,从而实现系统的脱氮功能,出水氨氮质量浓度维持在 0.23 mg/L 附近,TN 质量浓度则降到 8.33 mg/L,完全达到管理标准要求。

2.2 经济效益分析

2.2.1 工程投资分析

在原厂址不增加建设面积的基础上进行扩能改造,项目总投资额为 13 599.4 元(100%环保投资),其中工程费用为 11 530.6 元。项目建设期 2 年,生产运营期 14 年。

2.1.2 财务分析

建设前本项目单位总成本预计 1.15 元/m^3,经营成本预计 0.72 元/m^3,测算收费单价为 1.65 元/m^3,测算借款偿还期(不含建设期)为 6.3 年。

2.1.3 运行成效分析

以“苏州特别排放限值”标准值为基准,用 2023 年 1 月—3 月实际出水水质推算该项目建成后的年污染物减排量如表 4 所示。由于出水标准提标至优于设计标准(DB 32/1072—2018),该项目通过工艺调控等管理手段实现了 COD_{Cr}、氨氮、TN、TP 等指标的有效减排。

表 4 污染物减排量

Tab. 4 Discharging Reduction of Pollutant

指标	减排量/(t·a⁻¹)
COD_{Cr}	259.23
BOD_5	119.95
SS	57.56
氨氮	18.50
TN	33.38
TP	3.40

2.1.4　运行能耗分析

针对新增工艺能耗分析如表5所示。扩能改造后新增 RPIR 工艺的吨水电耗占了全厂能耗的38%。与武汉某同类项目的吨水电费0.13元[7]比较发现,本项目调试期电费吨水成本约0.216元,偏高,但武汉该项目执行标准为 GB 18918—2002,本项执行的标准远高于此。运营期稳定后吨水耗电成本下降到0.206元,较深圳某同类项目的0.252元[8]偏低,且本项目出水标准要求的 TN 质量浓度≤10 mg/L 是高于深圳该项目出水标准要求的。根据本项目目前的实际情况分析,外管网缺水造成的进水的低负荷运行(≤68.8%)是引起吨水能耗无法进一步下降的主要原因。大多数大功率设备都在低效区运转,尤其是曝气风机的开度无法进一步调小造成 RPIR 末端 DO 质量浓度维持在1.5 mg/L 附近,而同厂执行同样出水标准的一期 AAO 工艺的生化池末端 DO 一般维持在1 mg/L 附近。后期随着处理水量回升,这部分吨水能耗将会有所回落。综合以上,本项目的实际运行能耗水平是优于国内同类其他项目的。

表5　能耗分析

Tab. 5　Analysis of Energy Consumption

项目	全厂调试期	全厂运营期	RPIR 调试期	RPIR 运营期
日均电量/kW·h	25 853	24 265	10 833	9 168
电单耗/(kW·h·m^{-3})	0.318	0.303	0.511	0.215
吨水耗电成本/元	0.216	0.206	0.347	0.146
其他类似项目成本/元	0.13[7]	0.252[8]	/	/

2.1.5　运行药耗分析

本工程主要涉及的水处理药剂如表6所示。经过调试,磁混凝中 PAC 及 PAM 加药量已减少到最初的1/6,PAC+PAM 吨水耗药本由工艺调整前的0.026元下降至0.004 6元;磁粉费用计入建设期投资成本,其吨水药剂成本按2023年预算水量均摊,由于该项目运营期较短,目前暂未获取磁粉损耗数据;次氯酸钠需按固定浓度投加确保出水粪大肠菌群稳定达标。AA/RPIR 工艺在脱氮方面的优势极为明显,即使在温度较低的冬季运行,在没有外加碳源(乙酸钠)时,依然能实现出水 TN 质量浓度≤10 mg/L 的管理目标。与同类项目[16]相比,本项目将各项药剂成本控制在较好范围,占同类项目的1/10不到。另外,由于实际生产中测得 RPIR 池出水 TP 质量浓度基本维持在0.3~1.0 mg/L,如能将其稳定控制在0.3 mg/L 以下,那么理论上磁混凝沉淀池除磷剂用量还能有进一步的节省空间。

表6　药耗分析

Tab. 6　Analysis of Chemicals Consumption

项目	PAC	PAM	NaClO	乙酸钠	磁粉
工艺调整前药耗/(mg·L^{-1})	36.6	0.366	38.2	0	1.08
工艺调整前吨水耗药成本/元	0.02	0.006	0.018	0	0.002 2
工艺调整后药耗/(mg·L^{-1})	6	0.06	38.2	0	1.08
工艺调整后吨水耗药成本/元	0.003 6	0.001	0.018	0	0.002 2
其他类似项目成本/元[8]	0.047	0.093	/	/	0.043

3　结论

(1)AA/RPIR 与磁混凝沉淀工艺的结合有效节省了工程占地面积,建设面积在原来该污水厂5 200 hm^2 的基础上仅增加了8.57 hm^2,而处理水量却提升了一倍。运营期吨水耗电成本为0.206元,总吨水耗药成本由调试期0.046 2元下降至0.024 8元,磁混凝 PAC+PAM 吨水药耗则由0.026元下降至0.004 6元。

(2)该工艺对 COD_{Cr}、BOD_5、SS、氨氮、TN 的去除效果均达到了出水排放管理要求,其中 COD_{Cr} 质量浓度≤30 mg/L、BOD_5 质量浓度≤10 mg/L、SS 质量浓度≤10 mg/L、氨氮质量浓度≤1.5(3) mg/L、

TN 质量浓度≤10 mg/L。

(3)RPIR 高效脱氮优势明显,在冬季不外加碳源情况下,仍然能保证 TN 质量浓度最高不超过 9.89 mg/L。

(4)AA/RPIR 具有良好的生物除磷效果,生化除磷占 75.0%~90.2%,剩余部分基本由磁混凝加药脱除直至达标排放。

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, 137.
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, 137.

[2] 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.

[3] LÜ M, ZHANG Z H, ZENG J Y, et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 337-343. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.11.011.

[4] LI Z W, CHEN H, ZHANG J J, et al. Combined application analysis of MBBR and magnetic coagulation process in a full-scale project[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49: 102955. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102955.

[5] 高翔, 于水利. 某污水厂用地紧张情况下"RPIR +磁混凝澄清池"的应用[J]. 环境生态学, 2021, 3(9):70-78.
GAO X, YU S L. Application of "RPIR+magnetic coagulation clarifier" in a wastewater treatment plant under land shortage [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 70-78.

[6] 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. Procss commissioning and energy consumption analysis of A/RPIP + magnetic coagulation [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 158-162.

[7] 彭冠平, 邹静, 石稳民, 等. A/RPIR+磁混凝沉淀用于临时分散式污水处理工程[J]. 中国给水排水, 2022, 38(6): 93-98.
PENG G P, ZOU J, SHI W M, et al. Application of A/RPIR and magnetic coagulation sedimentation in a temporary decentralized sewage treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(6): 93-98.

[8] 彭东升, 许洋, 李方源, 等. RPIR+磁混凝工艺在污水处理厂提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 158-163.
PENG D S, XU Y, LI F Y, et al. Application of RPIR + magnetic coagulation process in upgrading and reconstruction of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 158-163.

[9] 黄志伟, 石雷, 隋军, 等. 3AMBR 工艺处理城市污水节能降耗的中试实验[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2692-2698.
HUANG Z W, SHI L, SUI J, et al. Pilot test of 3AMBR in municipal sewage treatment based on energy consumption and energy saving [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 2692-2698.

(上接第 153 页)

[8] 赵也, 汤钟, 曾胜. 基于模型评估的黑臭水体综合治理方案目标可达性分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 73-82.
ZHAO Y, TANG Z, ZENG S. Objective reachability analysis of comprehensive treatment scheme of black and odorous water body based on model evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 73-82.

[9] 陈瑶雪, 曾磊, 石永杰, 等. 水系调度对锡山区水环境改善效果分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 59-62.
CHEN Y X, ZENG L, SHI Y J, et al. Effect analysis of water transfer on water environment improvement in Xishan Region[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 59-62.

[10] 张海军, 马永法, 叶萍, 等. 基于数值模拟的嘉兴市区河道水质优化调度方案[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 64-68.
ZHANG H J, MA Y F, YE P, et al. Optimal regulation of river water quality based on numerical modeling in Jiaxing City[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 64-68.

[11] 张海丽, 贺新春, 邓家泉. 基于闸泵联控的感潮河网区水动力水质调控[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 36-41.
ZHANG H L, HE X C, DENG J Q. Regulation of hydrodynamics and water quality in tidal river network based on gate-pump joint operation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(8): 36-41.