

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.10.010

MBBR+磁混凝用于A²/O微曝氧化沟污水厂提标扩容

杨平¹, 徐康康^{2,3}, 周家中^{2,3}, 杨忠启^{2,3}, 韩文杰^{2,3},
吴迪^{2,3}, 黄青¹, 钟晨⁴

(1. 青岛首创瑞海水务有限公司, 山东 青岛 266042; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司 青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室, 山东 青岛 266510; 4. 葛洲坝集团生态环保有限公司, 湖北 武汉 430030)

摘要: 广东某污水厂处理工艺为A²/O微曝氧化沟,现要求同时扩容提标,处理规模由10×10⁴ m³/d提升至15×10⁴ m³/d,扩容50%,出水水质需满足广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准中的较严者。针对改造工程扩容体量大、可用土地少及排放标准严的问题,最终选择“MBBR原位强化生化处理能力+二沉池提高负荷+新建磁混凝沉淀保障固液分离”技术路线。通过生化段镶嵌MBBR工艺,使出水NH₃-N和TN分别稳定降至(1.28±0.91) mg/L和(5.78±1.33) mg/L;虽然改造后二沉池表面负荷提高致使出水SS略有升高,但磁混凝较高的固体通量承受能力,可确保SS由(17.45±4.18) mg/L稳定降至(3.59±0.71) mg/L,同时保障出水TP达到(0.09±0.09) mg/L。“MBBR+磁混凝沉淀”技术路线脱氮除磷效果好、占地省、抗冲击能力强,适用于污水厂的新建或扩容提标改造。如污水厂扩容量进一步提高,则需采用更加集约高效的“纯膜MBBR+磁混凝沉淀”技术路线。

关键词: 提标扩容; MBBR; 磁混凝沉淀池

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)10-0067-08

Application of MBBR and Magnetic Coagulation Process in Upgrading and Expansion of a WWTP with A²/O Microporous Aeration Oxidation Ditch

YANG Ping¹, XU Kang-kang^{2,3}, ZHOU Jia-zhong^{2,3}, YANG Zhong-qi^{2,3},
HAN Wen-jie^{2,3}, WU Di^{2,3}, HUANG Qing¹, ZHONG Chen⁴

(1. Qingdao Shouchuang Ruihai Water Co. Ltd., Qingdao 266042, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 3. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 4. Gezhouba Group Eco-Environmental Protection Co. Ltd., Wuhan 430030, China)

Abstract: The treatment process of a wastewater treatment plant (WWTP) in Guangdong Province was A²/O microporous aeration oxidation ditch, which requires treatment capacity expansion and

基金项目: 青岛市科技惠民示范引导专项(22-3-7-CSPZ-10-nsh); 青岛西海岸新区科技攻关“揭榜制”专项(2021-07)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

discharge standard upgrading at the same time. The treatment scale is increased from $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ to $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (the expansion ratio is 50%), and the effluent quality needs to meet the stricter of the first level limit in the second period specified in the Guangdong local standard *Discharge Limits of Water Pollutants* (DB 44/26-2001) and first level A limit specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). To solve the problems of large expansion capacity, less available land area and strict discharge standards of the upgrading project, the technical route of MBBR to in-situ enhance the biochemical treatment, secondary sedimentation tank to increase the hydraulic loading rate and new magnetic coagulation sedimentation to ensure the solid-liquid separation was finally selected. The newly-built MBBR in biochemical section stably reduced the $\text{NH}_3\text{-N}$ and TN in effluent to $(1.28 \pm 0.91) \text{ mg/L}$ and $(5.78 \pm 1.33) \text{ mg/L}$, respectively. Although the SS in effluent increased slightly with the increase of the surface loading rate of secondary sedimentation tank after the upgrading, the higher solid flux tolerance of magnetic coagulation ensured that the SS stably decreased from $(17.45 \pm 4.18) \text{ mg/L}$ to $(3.59 \pm 0.71) \text{ mg/L}$ and the TP in effluent reached $(0.09 \pm 0.09) \text{ mg/L}$. The technical route of MBBR and magnetic coagulation sedimentation has good nitrogen and phosphorus removal performance, less footprint area occupation and strong impact resistance, which is suitable for the construction or expansion and upgrading of WWTP. If the expansion capacity of WWTP is further increased, the more intensive and efficient technical route of pure membrane MBBR and magnetic coagulation sedimentation should be adopted.

Key words: upgrading and expansion; MBBR; magnetic coagulation sedimentation tank

1 项目背景与工艺选择

广东某污水厂始建于2004年,设计规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,核心生化工艺为 A^2/O 微曝氧化沟,二沉池出水经紫外消毒后达到广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)一级标准。该污水厂已长期满负荷运行,根据城市整体规划,其处理能力需达到 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,亟需扩容50%。同时,出水水质也需提升至广东省地方标准《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)第二时段一级标准及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准中的较严值。扩容提标工程设计水质见表1。

表1 改造前、后设计和实际进、出水水质

Tab.1 Design and actual influent and effluent quality before and after reconstruction $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD_5	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP	SS
原设计进水	250	110	25		4	90
原设计出水	40	20	10		0.5	20
现设计进水	250	110	25	35	4	200
现设计出水	40	10	5	15	0.5	10
改造前实际进水	170.0 ± 35.0	80.0 ± 15.8	18.12 ± 3.13	27.13 ± 4.06	3.23 ± 0.63	101 ± 15
改造前实际出水	21.00 ± 3.21	7.1 ± 1.4	3.11 ± 2.51	9.52 ± 7.83	0.30 ± 0.51	8.80 ± 3.54

本次提标新增控制指标TN,同时根据进水水质长期监测结果,设计进水水质除SS由 90 mg/L 提升至 200 mg/L 外,其余维持不变。

1.1 改造难点

① 扩容体量大

本次扩容改造,处理水量需由 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,扩容比例达50%,远超常规污水厂改造的扩容比例^[1-3]。2015年,青岛某污水厂进行扩容提标改造,要求从 $17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 扩容至 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,但受限于二沉池过水能力,以及深度处理采用高效沉淀池难以应对SS的冲击,为确保出水SS稳定达标,项目最终实施只能实现原池提量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的目标,扩容21%,其余 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 只能通过新建的方式予以解决^[4]。本项目难度显然更大。

② 可用土地少

由于厂区周边无可征用扩建用地,因此扩容提标改造只能在厂内解决,而厂内预留扩建用地较少,需充分利旧实现节地改造。根据设计进出水质及处理水量变化,核算系统硝化能力至少需提高3倍,常规工艺实施运行难度大。

③ 排放标准严

在处理水量大幅提升的基础上,该项目出水标准也需进一步提升,现状工艺难以达标,尤其是NH₃-N、TP和SS,同时本次改造对出水TN作了进一步规定,因此需提升生化系统和深度处理系统的处理能力。

鉴于污水厂周边无新增用地的现实,场内预留用地不足以新建生化池和二沉池,因此优先考虑原位扩容。若采用MBR工艺,改造工程量较大,投资高^[5],易产生膜污染^[6],运行能耗高且需周期性更换膜^[7],费用较高。若按原工艺路线,污水厂提量50%,首先要考虑水力问题,包括各管道、渠等需增加管径或并联新管满足过水要求,校核二沉池过水能力,寻找强化生化池处理负荷的措施。

1.2 技术路线选择

① 二沉池:现况中心进水周边出水辐流式二沉池的平均表面负荷为0.66 m³/(m²·h),峰值时为0.86 m³/(m²·h),实际出水SS为(8.80±3.54) mg/L。处理规模提升至15×10⁴ m³/d时,表面负荷增至0.99 m³/(m²·h),虽然提高了50%,但仍在规范容许的范围内。因此改造时考虑牺牲一部分二沉池沉淀性能,满足基本的污泥回收要求,同时提高后续工艺的SS保障能力,综合实现对SS的稳定控制。

② 深度处理:深度处理若采用传统的混凝沉淀工艺,综合考虑现有用地,核算沉淀池表面负荷达18.3 m³/(m²·h)以上,停留时间仅为5.3 min。二沉池表面负荷提升后,SS可能会提升至20 mg/L水平,传统混凝沉淀工艺不足以作为本项目的SS保障单元。加载沉淀是通过介质的投加及回收循环利用强化沉淀效果,是工程常用手段,其中的磁混凝沉淀更是应用广泛^[8],其表面负荷能够达到20~40 m³/(m²·h),占地面积极小,万吨水占地仅为60~100 m²^[9],适合于占地受限型污水厂的新改扩建。刘强^[10]在大连某污水厂提标改造项目中采用磁混凝沉淀工艺进行深度处理,处理规模为9×10⁴ m³/d,磁混凝沉淀池设计表面负荷达到19.3 m³/(m²·h),HRT为6 min,运行结果表明,出水SS和TP稳定优于一级A标准。东北某新建污水厂选择磁混凝沉淀工艺进行深度处理,处理规模为3×10⁴ m³/d,表面负荷为14.4 m³/(m²·h),出水SS由18.45 mg/L显著降至0.69 mg/L,实现了该新建污水厂的稳定达标^[11]。肇庆市某新建污水厂同样采用磁混凝沉淀作为深度处理工艺,且磁混凝沉淀池直接承接纯膜MBBR池

出水,保障了SS由60.78 mg/L稳定降至0.26 mg/L^[12]。除高效稳定的处理效果外,磁混凝沉淀工艺的外投磁粉还可以回收利用,回收率可达99.5%以上,节约了运行成本^[13-14]。可见,磁混凝沉淀显然具有更高的表面负荷、更大的进水SS容忍度、更小的占地面积,适合作为本项目的SS保障单元。

③ 生化池:生化池提量后,HRT由12.6 h缩减至8.3 h,且对脱氮有了更高的要求。MBBR作为应用成熟且运行可靠的工艺被编入《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),且有较多类似成功案例。MBBR工艺通过向生化池投加悬浮载体,在载体表面进行功能菌的固定培养和专性富集,从而实现生化池处理能力的原位提升,其对硝化菌的富集能力能够达到活性污泥的10倍以上^[15],同时,在好氧反应器中载体通过曝气充分流化,老化的生物膜在气流与水流的冲刷作用下脱落,可促进生物膜的更新,从而维持较高的活性,脱落的生物膜也可对活性污泥中的硝化菌数量进行补充。目前,MBBR工艺已广泛应用于污水厂的提标扩容改造。浙江省某污水厂采用MBBR工艺进行原池扩容提标改造,处理规模由3.5×10⁴ m³/d提升至4.5×10⁴ m³/d,扩容28.6%,且出水执行标准由一级A标准提升至地表水Ⅳ类标准^[16]。广东省某水质净化厂采用MBBR工艺进行原池扩容提标改造,处理规模由20×10⁴ m³/d提升至25×10⁴ m³/d,扩容25%,改造后出水水质稳定达标^[17]。因此本项目采用MBBR工艺对生化池进行原池改造,以实现提量50%情况下的稳定达标。

2 工艺设计

2.1 工艺流程

本次扩容提标改造的核心是通过MBBR原位改造强化生化池的处理能力,同时新建磁混凝沉淀池提高对SS的去除效果,以保证出水水质的稳定达标。

改造后污水厂的平面布置和工艺流程分别见图1和图2。

污水依次经过粗细格栅、旋流沉砂池、泥膜复合MBBR池、二沉池、磁混凝沉淀池,实现六大指标达标处理。磁混凝沉淀池出水经紫外消毒后排入受纳水体。二沉池剩余污泥和磁混凝沉淀池化学污泥排入储泥池,经脱水后外运处理。



图1 改造后污水厂航拍图

Fig.1 Aerial photo of the WWTP after reconstruction

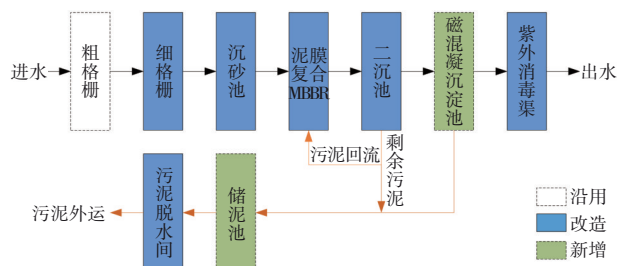


图2 改造后工艺流程

Fig.2 Process flow chart after reconstruction

2.2 工艺管道

改造后污水厂现况工艺管道流速提高 50% 以上,经核算管道流速已超过《室外排水设计标准》的经济流速,因此需要进行管道改造,具体改造内容见表 2。

表2 工艺管道改造

Tab.2 Reconstruction of pipeline

管道类型	工艺流程	管道改造
污水管	沉砂池→生化池	废除原 D920 mm×8 mm 管道,新建 D1 220 mm×10 mm 管道
	生化池→二沉池	废除原 D920 mm×8 mm 管道,新建 D1 220 mm×10 mm 管道
	二沉池→磁混凝沉淀池	新建 D1 620 mm×14 mm 管道
	磁混凝沉淀池→消毒渠进水	新建 D1 620 mm×14 mm 管道
	消毒渠出水	新建 D1 620 mm×14 mm 管道
污泥管	回流污泥:二沉池→生化池	废除原 D720 mm×8 mm 管道,新建 D1 020 mm×10 mm
	剩余污泥:二沉池→储泥池	保留旧管道,新建 D325 mm×8 mm 剩余污泥管道
	化学污泥:磁混凝沉淀池→储泥池	新建 D219 mm×6 mm 化学污泥管道
曝气管		保留旧曝气管道,并新建 D630 mm×6 mm 曝气管道

首先对污水管道进行改造,将生化池及二沉池

进水管管道管径由原来的 D920 mm×8 mm 扩建至 D1 220 mm×10 mm,并新建磁混凝沉淀池进水管管道及紫外消毒渠进水管管道,管径均为 D1 620 mm×14 mm。其次对污泥管道进行改造,将污泥回流管道管径由原来的 D720 mm×8 mm 扩建至 D1 020 mm×10 mm;剩余污泥管道在保留原有管道基础上,新建一条管径为 D325 mm×8 mm 的管道,同时在磁混凝沉淀池与储泥池之间新建化学污泥管道,管径为 D219 mm×6 mm。最后对曝气管道进行改造,在保留原有管道基础上,新建一条管径为 D630 mm×6 mm 的管道。

2.3 设计参数

2.3.1 预处理

提升泵房:现况提升泵站设提升泵 6 台(4 用 2 备),单台 $Q=1\ 200\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=165\ \text{kPa}$, $N=80\ \text{kW}$ 。本次改造新增大流量提升泵 4 台(2 用 2 备), $Q=1\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=170\ \text{kPa}$, $N=132\ \text{kW}$,以满足进水需求。

细格栅:现况细格栅土建及设备安装规模均为 $10\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,共分为两个系列,每个系列设 2 台内进流垂直孔板格栅及 1 台回转式事故格栅,本次考虑将事故格栅更换为同等规格的孔板格栅,使孔板格栅总数达到 3 台(2 用 1 备),栅条间距 5 mm,安装角度 90° ,渠宽 1 600 mm,渠深 1 400 mm, $N=0.75\ \text{kW}$;配套冲洗水泵 1 台, $Q=11\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=870\ \text{kPa}$, $N=4\ \text{kW}$ 。

沉砂池:现况旋流沉砂器单台最大处理能力为 $4.5\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,电机功率 1.5 kW,转速 12~16 r/min,共设置 4 台,累计处理能力为 $18\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。本次改造在原池基础上更换搅拌器,满足变化系数为 1.27 时的流量要求。将现况旋流沉砂搅拌器更换为流量 $1\ 980\ \text{m}^3/\text{h}$, $N=1.5\ \text{kW}$,共 4 台。同时配备两台砂水分离器,流量 $72\ \text{m}^3/\text{h}$, $N=0.37\ \text{kW}$;两套螺旋输送机,有效长度 10 m, $N=3.0\ \text{kW}$ 。

2.3.2 生化池

现况生化池设计规模 $10\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,总池容为 $51\ 836\ \text{m}^3$,有效水深为 5.25 m,设计 HRT 为 12.6 h,其中厌氧区 1.7 h、缺氧区 2.4 h、好氧区 8.5 h。MLSS 为 3 600 mg/L,SVI 为 75 mL/g 左右。采用 MBBR 工艺将 A²O 微曝氧化沟改造为 A²O+MBBR 工艺,保留现有厌氧池池容不变,分割一部分好氧池容作为缺氧池容,优先满足反硝化脱氮需求,在剩余好氧区设置 MBBR 区,强化好氧区氧化有机物与硝化功能,并设置拦截筛网、悬浮载体专用推流器、辅助曝

气系统,保证悬浮载体良好流化且不随水流出,实现专性富集培养。改造后生化池总停留时间降至8.3 h,其中厌氧区1.1 h、缺氧区3.7 h、好氧区3.5 h。厌氧区和缺氧区共设潜水搅拌机8台, $N=5.5$ kW。好氧MBBR池投加SPR-Ⅲ型悬浮载体,比表面积为 $800\text{ m}^2/\text{m}^3$,悬浮载体密度约 $0.94\sim 0.97\text{ kg}/\text{m}^3$,符合行业标准《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014);设计最低水温为 $14\text{ }^\circ\text{C}$,污泥浓度为 $3\,500\text{ mg}/\text{L}$ 。好氧区增设硝化液回流泵6台,合计12台, $Q=1\,563\text{ m}^3/\text{h}$, $H=5\text{ kPa}$, $N=3\text{ kW}$;并新增悬浮载体专用推进器8台, $N=5.5\text{ kW}$,转速 $60\text{ r}/\text{min}$ 。

2.3.3 二沉池

现况二沉池为4座圆柱形池体,采用中心进水周边出水辐流式运行方式,单座处理能力为 $2.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,变化系数为1.3,有效内径 45 m ,改造后平均表面负荷为 $0.99\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值水量下为 $1.29\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,平均污泥负荷由 $57\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 升至 $83\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,峰值水量下为 $108\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,均处于《室外排水设计标准》规定的范围之内,出水堰平均负荷则由 $2.05\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 升至 $3.07\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$,峰值水量下为 $4.00\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。现况二沉池吸泥机直径 45 m ,功率 0.55 kW ,无法满足提标扩容后吸泥量需求,因此对吸泥机进行更换,更换后功率增至 0.75 kW ,其他设备保持不变。

2.3.4 磁混凝沉淀池

新建磁混凝沉淀池1座,设计规模 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,变化系数1.3。磁混凝沉淀池分两个系列,每个系列分别设置进水井、混凝池、磁加载池、絮凝池及斜管沉淀池,沉淀池设计表面负荷为 $18.3\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,峰值流量表面负荷为 $23.8\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。其中进水井设轴流泵4台(3用1备), $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$, $H=65\text{ kPa}$;混凝池设有搅拌机两台, $N=4\text{ kW}$,并设有PAC投加系统,配备单缸单头隔膜式计量泵3台, $Q=400\text{ L}/\text{h}$, $P=500\text{ kPa}$, $N=0.25\text{ kW}$;磁加载池设有搅拌机两台, $N=5.5\text{ kW}$;絮凝池设有搅拌机两台, $N=7.5\text{ kW}$;斜管沉淀池设有刮泥机两台,直径 $=14.0\text{ m}$,并配备冲洗泵1台($Q=10\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$)及污泥转输泵3台(2用1备, $Q=120\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$)。另外,斜管沉淀池后设有污泥回流泵房,配备污泥回流泵4台(2用2备), $Q=120\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=7.5\text{ kW}$;剩余污泥泵3台(2用1备), $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=5.5\text{ kW}$ 。

2.3.5 其他设施

紫外消毒渠:采用钢筋混凝土渠道,安装紫外线消毒设备。紫外消毒间下部为池体,上部设置遮阳棚,规模 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,平面尺寸为 $13.45\text{ m}\times 7.6\text{ m}$,分4条渠道,单条渠宽 1.2 m 。紫外消毒装置共4套,其中2套利旧,2套新建,装置紫外透光率为65%。紫外消毒装置灯管64支/套, $D=915\text{ mm}$,插板闸尺寸为 $1\,200\text{ mm}\times 1\,800\text{ mm}$,导流板尺寸为 $1\,200\text{ mm}\times 1\,800\text{ mm}$ 。

鼓风机房:现况鼓风机房处理规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,设置多级离心风机6台(4用2备), $Q=69\text{ m}^3/\text{min}$, $H=59\text{ kPa}$, $N=110\text{ kW}$ 。本次改造后,根据生物池需氧量核算,更换3台(2用1备)多级离心风机为空气悬浮鼓风机, $Q=225\text{ m}^3/\text{min}$, $H=65\text{ kPa}$, $N=327\text{ kW}$,同时保留3台(2用1备)现况风机。

脱水机房:现况脱水机房设3台(2用1备)带式浓缩脱水机,处理能力 $20\sim 35\text{ m}^3/\text{h}$,带宽 1.5 m 。另设置离心脱水机1台,流量 $60\text{ m}^3/\text{h}$ 。按照设计进出水水质计算,剩余污泥产泥量为 $22.07\text{ tDS}/\text{d}$,化学污泥量 $1.27\text{ tDS}/\text{d}$,总干泥量为 $23.24\text{ tDS}/\text{d}$ 。本次改造保留原离心脱水机($60\text{ m}^3/\text{h}$, $N=90\text{ kW}$),并将3台带式浓缩脱水机更换为3台(2用1备)离心脱水机,单机处理能力为 $60\text{ m}^3/\text{h}$, $N=90\text{ kW}$,出泥含水率为80%,工作时间 24 h 。另外,配套螺旋输送机3套(2用1备), $N=2.2\text{ kW}$;污泥切割机3套(2用1备), $Q=30\sim 70\text{ m}^3/\text{h}$;絮凝剂制备系统及稀释装置1套, $Q=3\,000\text{ L}/\text{h}$;加药泵3套(2用1备), $Q=200\sim 1\,500\text{ L}/\text{h}$, $P=200\text{ kPa}$;气动泥斗1个。

储泥池:新建储泥池1座,设计规模 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,停留时间 2.05 h 。储泥池平面净空尺寸 $6.5\text{ m}\times 6.5\text{ m}$,水深 4.0 m 。储泥池共设2格,每格设潜水搅拌机1台, $N=2.2\text{ kW}$;同时设双曲面搅拌器1台,直径 1.5 m ,功率为 2.2 kW 。

3 运行效果

该污水厂扩容提标改造工程于2020年顺利完工。改造后污水厂进水量由 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,扩容50%,最高处理规模达到 $18\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,较改造前提高80%。实际进、出水水质见表3。可见,除进水TP偏高外,进水水质均处于设计范围内。经MBBR工艺改造后,生化池处理效果明显改善,尽管污水量提高50%以上,但二沉池出水COD、BOD₅、

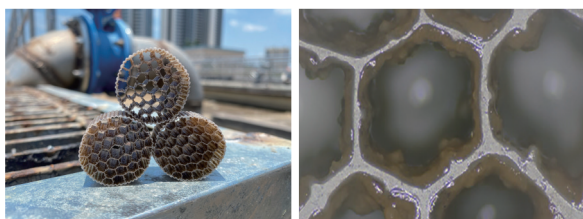
$\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 依然能够分别降至 (18.00 ± 3.32) 、 (6.08 ± 1.07) 、 (1.28 ± 0.91) 和 (5.78 ± 1.33) mg/L , 稳定达到一级 A 标准。MBBR 池悬浮载体生物膜生长状态见图 3, 可见, 生长状态良好。核算 MBBR 池实际硝化负荷达到 $0.16 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 比改造前提高 2.38 倍, 体现了 MBBR 在原池大幅度提量的潜力。

表 3 改造后污水厂进、出水水质

Tab.3 Influent and effluent quality of the WWTP after reconstruction $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
进水	177.82± 80.33	80.00± 15.77	17.26± 4.90	25.09± 7.73	4.22± 1.83	144.63± 26.14
二沉池 出水	18.00± 3.32*	6.08± 1.07*	1.28± 0.91	5.78± 1.33*	0.44± 0.18*	17.45± 4.18
磁混凝 出水	14.74± 2.87	5.5±1.0	0.97± 0.12	5.14± 1.25	0.09± 0.09	3.59± 0.71

注: *取样后经简单沉淀后取上清液。



a. MBBR 池悬浮载体

b. 悬浮载体微观照片

图 3 MBBR 池悬浮载体

Fig.3 Suspended carrier of MBBR tank

改造后二沉池表面负荷由 $0.66 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 增至 $0.99 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 虽仍处于规范范围之内, 但进水量的冲击仍使其出水 SS 由 $(8.80 \pm 3.54) \text{ mg/L}$ 升至 $(17.45 \pm 4.18) \text{ mg/L}$, 日波动峰值最高达到 50 mg/L 。而经磁混凝沉淀池深度处理后, 出水 SS 稳定降至 $(3.59 \pm 0.71) \text{ mg/L}$, 同时出水 TP 也能降至 $(0.09 \pm 0.09) \text{ mg/L}$, 稳定达到一级 A 标准, 且较改造前具有更高稳定性。改造前生化池 MLSS 为 3600 mg/L , SVI 为 75 mL/g 左右, 二沉池出水堰负荷为 $2.05 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 固体负荷为 $57 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 改造后生化池 MLSS 为 3500 mg/L , SVI 为 73 mL/g , 二沉池出水堰负荷为 $3.07 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$, 固体负荷为 $83 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 对比改造前后, 生化池活性污泥 MLSS 和 SVI 未发生明显变化, 说明改造后污泥状态能够保持稳定, 而污水量的显著提升, 使得二沉池出水堰负荷和固体负荷均出现显著升高, 是导致二沉池出水 SS 升高的主要原因。磁混凝沉淀池出水清澈, 处理效果良好。

另外, 核算磁混凝沉淀池实际表面负荷能够达到 $13.62 \sim 21.93 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 明显高于高效沉淀池和加砂高效沉淀池等常见深度处理工艺^[18], 证明了磁混凝沉淀工艺高效的处理性能和抗水力冲击能力。可见, “泥膜复合 MBBR+磁混凝沉淀”组合工艺针对性地解决了污水厂扩容提标改造中面临的难题, 保障了污水厂出水水质的稳定达标。本项目单套磁混凝处理规模在目前投运生产的工程中体量最大, 单台设计处理能力为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4 进一步扩容的可行性探讨

本项目能够原位扩容 50%, 本质是提升生化池处理负荷, 国内已有大量泥膜复合 MBBR 成功应用案例; 另外, 固液分离部分, 通过二沉池负荷提升、磁混凝沉淀池保障, 在总体保障 SS 达标的前提下实现了提升 50% 水力负荷的目标。从二沉池出水 SS 情况来看, 对于本项目, 若仍采用活性污泥法, 50% 扩容已是极限, 且后续必须与能承受较高浓度 SS 的强化混凝沉淀联用, 如本项目选用的磁混凝沉淀工艺。若进一步扩容, 则现有技术路线无法实现。

MBBR 引入国内后, 主要以泥膜复合工艺形式用于活性污泥系统性能的强化。在国外, MBBR 广泛采用纯膜方式, 即连续流生物膜法, 系统内不主动富集悬浮态污泥, 微生物主要以附着态生物膜形式存在。纯膜 MBBR 负荷高、占地省, 同等条件下 HRT 约为活性污泥法的 40%~60%, 对于已建污水厂, 意味着可提高 100% 的处理能力^[19]。国外在出水 SS 和 TP 要求不高时, 采用纯膜 MBBR 与气浮联用较多。国内对于 SS 和 TP 限制较为严格, 单独气浮无法保证出水水质, 需设置多级气浮, 或气浮与其他深度处理技术联用。随着近些年磁混凝沉淀工艺的广泛应用, 为纯膜 MBBR 的固液分离提供了新的可能。青岛某食品生产企业的污水处理站采用磁混凝沉淀工艺进行提标改造, 运行期间污水站原 IC 池出水曾直接进入磁混凝沉淀池进行深度处理, 虽然 IC 池出水 SS 高达 $(473.48 \pm 40.01) \text{ mg/L}$, 但经磁混凝沉淀池处理后, 出水 SS 仍能够降至 $(7.62 \pm 1.08) \text{ mg/L}$, 稳定达到一级 A 排放标准要求^[13]。工程实践证明了磁混凝沉淀工艺耐受高水力负荷、高固体通量的特点, 是纯膜 MBBR 固液分离的理想工艺^[20-21]。若本项目采用纯膜 MBBR+磁混凝沉淀的技术路线, 可望实现原厂 100% 的扩容; 若采用此路

线进一步利用停用的二沉池,最高可实现150%的扩容能力。这为城市建设土地利用从粗放扩张转向存量挖潜提供了较好的技术基础。

值得关注的是,磁混凝沉淀工艺应确保磁粉的回收及设备的可靠性。脱落生物膜较活性污泥黏性更强,若磁混凝沉淀工艺直接连接纯膜MBBR,则可能裹挟磁粉,造成磁粉的逃逸,加大磁粉投药量。磁粉回收将是重大挑战,应针对于此加强专用磁混凝设备的研发。

5 结论与展望

广东某污水厂采用“MBBR+磁混凝沉淀”技术路线解决了污水厂扩容提标面临的扩容体量大、可用土地少及排放标准严的问题,实现了污水厂厂内原位扩容提标的目标。项目改造后,处理规模由 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,扩容50%,峰值处理规模达到 $18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同时保障了出水水质优于一级A标准。生化段通过镶嵌MBBR工艺保障碳、氮的稳定达标,且通过新建磁混凝沉淀工艺,保障了TP和SS的稳定达标。“MBBR+磁混凝沉淀”技术路线适用于污水厂的新建或扩容提标改造。通过采用更加集约高效的“纯膜MBBR+磁混凝沉淀”技术路线,可进一步挖潜,满足污水厂原厂扩容100%以上的目标。

参考文献:

- [1] 刘影. MBBR、双填料滤池、MBR用于污水厂多期同步扩容提标[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 63-69.
LIU Ying. Applications of MBBR, double packing media filter and MBR in multi-phase synchronous expansion and upgrading of sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 63-69 (in Chinese).
- [2] 刘海茹, 王斌, 陈鑫, 等. 河北省丰宁县清源污水处理厂扩容提标改造工程技术总结[J]. 净水技术, 2021, 40(S1): 160-163, 239.
LIU Hairu, WANG Bin, CHEN Xin, et al. Technical summary of the capacity expansion and upgrading project of Hebei Fengning County Qingyuan wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(S1): 160-163, 239 (in Chinese).
- [3] 罗佳文, 杨伟龙, 钟良生, 等. AAO-MBBR+滤布滤池+深床滤池用于污水厂扩容提标[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 115-118.

- LUO Jiawen, YANG Weilong, ZHONG Liangsheng, et al. Application of AAO-MBBR, cloth media filter, DDBF process in upgrading and expansion of a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 115-118 (in Chinese).
- [4] 杨晓美, 宋美芹, 吴迪, 等. 新型悬浮载体强化脱氮除磷技术用于高标准污水处理[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 97-102.
YANG Xiaomei, SONG Meiqin, WU Di, et al. Application of new style suspended carriers enhancing nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment for high standard [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 97-102 (in Chinese).
- [5] 郝晓地, 陈峤, 李季, 等. MBR工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7-12.
HAO Xiaodi, CHEN Qiao, LI Ji, et al. Status and trend of MBR process application in the world [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 7-12 (in Chinese).
- [6] TIAN Y, LI H, LI L P, et al. In-situ integration of microbial fuel cell with hollow-fiber membrane bioreactor for wastewater treatment and membrane fouling mitigation [J]. Biosensous & Bioelectronics, 2015, 64: 189-195.
- [7] XIAO K, XU Y, LIANG S, et al. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: current state and future prospect [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(6): 805-819.
- [8] 施园. 磁混凝澄清工艺在污水厂提标中的应用[J]. 水处理技术, 2018, 44(11): 136-137, 140.
SHI Yuan. Application of magnetic coagulation clarification technology in reconstruction of wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(11): 136-137, 140 (in Chinese).
- [9] 高伟楠, 纪海霞, 程树辉, 等. MBR与MBBR+磁混凝技术路线比较与工程实践[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 63-67.
GAO Weinan, JI Haixia, CHENG Shuhui, et al. Comparison and engineering practice of technology route between MBR and MBBR + magnetic coagulation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 63-67 (in Chinese).
- [10] 刘强. 前置缺氧池+CAST+磁混凝工艺用于紧凑型污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2021, 37(24): 69-73.

- LIU Qiang. Application of pre-anoxic tank/CAST/magnetic coagulation process in upgrading of a compact wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(24): 69-73 (in Chinese).
- [11] 茹春, 张爽, 路晖, 等. 低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(9): 1-6.
- RU Chun, ZHANG Shuang, LU Hui, *et al.* Pollutants removal performance and operation regulation of urban wastewater treatment plant under low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(9): 1-6 (in Chinese).
- [12] 彭明, 周家中, 韩文杰, 等. 基于纯膜MBBR的BioFIMag®工艺用于新建污水处理厂[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 71-75.
- PENG Ming, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, *et al.* Application of BioFIMag® process based on pure MBBR in new wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 71-75 (in Chinese).
- [13] 卢立念, 韩文杰, 吴迪, 等. 基于磁加载沉淀的超效分离工艺的应用[J]. *市政技术*, 2019, 37(6): 209-213.
- LU Linian, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Application of super-efficiency separation technology based on magnetic loading precipitation [J]. *Journal of Municipal Technology*, 2019, 37(6): 209-213 (in Chinese).
- [14] 周家中, 宋平周, 张爽, 等. 占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 76-82.
- ZHOU Jiazhong, SONG Pingzhou, ZHANG Shuang, *et al.* Engineering design of a new high-standard wastewater treatment plant with limited footprint area in north China [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 76-82 (in Chinese).
- [15] 谢建康, 徐康康, 李新利, 等. 倒置A²O-MBBR工艺强化氮磷去除及微生物研究[J]. *工业用水与废水*, 2021, 52(6): 25-32.
- XIE Jiankang, XU Kangkang, LI Xinli, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal by invert A²O-MBBR process and micro-organism study thereof [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2021, 52(6): 25-32 (in Chinese).
- [16] 倪黄蕾, 魏洪波, 陈晓会, 等. MBBR工艺用于浦江县城第四污水处理厂扩容提标效果分析[J]. *给水排水*, 2022, 48(3): 40-44.
- NI Huanglei, WEI Hongbo, CHEN Xiaohui, *et al.* Effect analysis of MBBR process used in expansion and upgrading of Pujiang County No. 4 wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(3): 40-44 (in Chinese).
- [17] 李亮. MBBR在CAST工艺扩容提质工程中的应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(20): 87-91.
- LI Liang. Application of MBBR in CAST process expanding and upgrading project [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 87-91 (in Chinese).
- [18] 刘志鹏. 磁混凝沉淀工艺在污水处理行业的应用[J]. *当代化工研究*, 2021(24): 98-100.
- LIU Zhipeng. Application of magnetic coagulation sedimentation process in sewage treatment industry [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(24): 98-100 (in Chinese).
- [19] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜MBBR工艺在国内外的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 37-47.
- ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [20] 周家中, 韩文杰, 宋平周, 等. 华北某集约型污水厂BFM工艺设计与运行分析[J/OL]. *中国给水排水*. [2022-11-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20220409.1928.002.html>.
- ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, SONG Pingzhou, *et al.* BFM process design and operation analysis of an intensive WWTP in north China [J/OL]. *China Water & Wastewater*. [2022-11-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20220409.1928.002.html> (in Chinese).
- [21] 高彦博, 杨忠启, 周家中, 等. BFM装配式用于占地受限型污水处理工程设计[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(2): 46-51.
- GAO Yanbo, YANG Zhongqi, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of BFM fabricated structure in the design of land limited wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(2): 46-51 (in Chinese).

作者简介: 杨平(1973—), 男, 辽宁铁岭人, 本科, 高级工程师, 研究方向为污水处理厂运营管理。

收稿日期: 2022-11-03

修回日期: 2022-11-21

(编辑: 孔红春)