

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.014

占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计

周家中¹, 宋平周¹, 张 爽², 刘宜龙¹, 杨华仙³, 李新利¹, 吴 迪¹

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266555; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 东北地区某新建污水厂设计规模 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 设计出水要求 TN 低于 12 mg/L, SS 低于 10 mg/L, 其余指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中 IV 类水标准。该污水厂面临占地受限、排放标准高、低温等难题。污水处理采用“改良 Bardenpho—MBBR + 矩形周进周出二沉池 + 磁加载沉淀”组合工艺, 实现了各工艺段的紧凑布置。实际运行效果显示, 出水各指标稳定达标, Bardenpho—MBBR 工艺提高了系统的耐低温性能, 并实现了高效脱氮除磷效果。磁加载沉淀工艺提高了深度处理系统应对 SS 冲击的能力, 实现了高效、稳定的 SS 和 TP 去除。污水厂占地面积 $0.641 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, 直接运行费用 0.512 元/ m^3 。该组合工艺具有流程简洁、占地省、出水效果好等优势, 特别适用于占地受限条件下的高标准污水厂的建设和运行。

关键词: 移动床生物膜反应器; 矩形周进周出二沉池; 磁混凝; Bardenpho 工艺; 占地受限; 低温

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0076-07

Engineering Design of a New High-standard Wastewater Treatment Plant with Limited Footprint Area in North China

ZHOU Jia-zhong¹, SONG Ping-zhou¹, ZHANG Shuang², LIU Yi-long¹, YANG Hua-xian³, LI Xin-li¹, WU Di¹

(1. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266555, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited of Power China, Xi'an 710000, China; 3. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

Abstract: Design treatment capacity of a new wastewater treatment plant (WWTP) in north China is $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. TN and SS in the effluent are required to be lower than 12 mg/L and 10 mg/L, respectively, and other indicators need to meet class IV limitations of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The construction of the WWTP is faced with problems such as limited footprint area, high discharge standard and low temperature. A combined process of modified Bardenpho—MBBR, secondary sedimentation tank with rectangular peripheral inflow and peripheral outflow and magnetic coagulation precipitation was selected to realize compact layout of each process section. The actual operational results showed that all the indices of the effluent could stably meet the discharge

standards. The Bardenpho-MBBR process improved the low temperature resistance of the system and achieved efficient nitrogen and phosphorus removal. Magnetic coagulation precipitation improved the ability of the advanced treatment system to resist SS impact and realized efficient and stable SS and TP removal. The WWTP covered an area of $0.641 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, and the direct operational cost was $0.512 \text{ yuan}/\text{m}^3$. The combined process has the advantages of simple process, less footprint area and good effluent water quality, which is suitable for construction and operation of high-standard WWTPs, especially those with limited footprint area.

Key words: MBBR; rectangular peripheral inflow and peripheral outflow secondary sedimentation tank; magnetic coagulation; Bardenpho; limited footprint area; low temperature

当前我国正处于城市化快速发展阶段,特大型及大型城市土地需求短缺矛盾日益突出。所以,节省土地资源、有效利用土地资源将成为中、大型城市污水处理工程发展的新趋势。对于高标准污水厂,通常做法是采用传统的工艺流程,然后耦合更多处理单元实现高标准排放,但势必会增加占地,须进一步优化工艺流程和工艺形式。膜生物反应器(MBR)是典型的节地高效工艺,但是投资高、运行费用高、周期性换膜等问题限制了其进一步使用^[1],尤其是设计水温低于 10°C 的案例报道较少。移动床生物膜反应器(MBBR)近些年应用广泛,国内市政污水运行规模超过 $1500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且有低温应用案例。但 MBBR 工艺只能确保有机物、氨氮和 TN 等指标实现高标准排放,对于 TP、SS 等指标需结合深度处理工艺。笔者以东北地区辽宁省某高标准新建污水厂为例,在占地受限的条件下,分析了“改良 Bardenpho - MBBR + 矩形周进周出二沉池 + 磁加载沉淀”组合工艺的设计思路与应用效果,以期类似污水处理厂建设、提标改造提供技术参考。

1 项目概况

该新建污水厂设计规模为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水主要为生活污水。要求出水 BOD_5 、COD、氨氮、TP 满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水标准, TN 低于 12 mg/L ,包括 SS 在内的其他指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,即通常所述的“准 IV 类”标准。设计进、出水水质见表 1,设计水温 9°C 。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	BOD_5	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
设计进水	200	450	250	50	65	4
设计出水	6	30	10	1.5	12	0.3

低温、高排放标准、占地紧张是本项目面临的三个核心难题。低温和高排放标准,都意味着需要更大的生物池容、更大的占地,才能确保生化段运行稳定,达到预期目的,而占地恰恰是本项目的制约性因素。本项目建筑用地 25100 m^2 (见图 1 黄色部分),按此核算吨水占地为 $0.837 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,低于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中规定的城市污水处理厂规划用地范围 $[1.70 \sim 2.15 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})]$ 。此外,由于可用土地呈不规则分布,使得核心构筑物布置受限,部分土地不能得到有效利用,因此实际可利用占地更低。综上,污水厂核心工艺选择需围绕高效、紧凑开展,以实现在占地受限的条件下污水得到高标准处理。



图 1 新建污水厂可利用土地

Fig. 1 Available land for the new wastewater treatment plant

2 技术路线选择

2.1 生化工艺选择

A^2/O 工艺是活性污泥法应对脱氮除磷衍生的典型工艺,在国内外大中型污水厂得到了广泛应用。但本项目对 TN 去除率要求较高,达到 81.5% 以上,若采用 A^2/O 工艺,则面临回流比过大的问题,若 TN 去除完全依靠回流硝酸盐,核算所需要的回流比超过 500% 。过高的回流比不仅会增加设备投资以及运行能耗,还会提高缺氧区的 DO,降低碳源的有

效利用率,增加药耗。表 2 列举了 TN 去除效果与回流比的关系。从表 2 可以看出,当反硝化碳源满足时,TN 去除主要受限于回流比,且当回流比超过

400% 时,即使增大回流比对 TN 去除率的提升效果也有限。所以对于高标准的 TN 出水水质要求,需破除回流比对 TN 去除的限制。

表 2 出水 TN 浓度与进水 TN 浓度和回流比(R)关系

Tab.2 Relationship of effluent TN and influent TN, reflux ratio

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

进水 TN	出水 TN					
	$R = 200\%$	$R = 300\%$	$R = 400\%$	$R = 500\%$	$R = 600\%$	$R = 700\%$
85	29.33	22.38	18.20	15.42	13.43	11.94
75	26.00	19.88	16.20	13.75	12.00	10.69
65	22.67	17.38	14.20	12.08	10.57	9.44
55	19.33	14.88	12.20	10.42	9.14	8.19
45	16.00	12.38	10.20	8.75	7.71	6.94

注: 出水氨氮均按照 1.5 mg/L 计算。

针对以上问题,拟在 A^2/O 工艺的基础上增加后置 AO 工艺,将反硝化过程分为前缺氧区和后置缺氧区 2 个部分。前缺氧区利用原水碳源进行反硝化,根据进水有机物的量控制回流比,确保回流硝酸盐的彻底反硝化,实现低回流比运行,降低能耗,保障原水碳源的最大化利用;其次,后置缺氧区利用内碳源以及外投碳源继续进行反硝化脱氮,根据出水标准需求投加碳源,破除 A^2/O 工艺脱氮受回流比的限制,满足更为苛刻的 TN 出水要求。此外,为了减少回流污泥中硝酸盐氮对厌氧释磷的影响,在厌氧区前设置预缺氧区,保护厌氧区厌氧环境。最终,生物池选择的工艺流程为:预缺氧区-厌氧区-前缺氧区-好氧 MBBR 区-后置缺氧区-后好氧区,即采用改良 Bardenpho 工艺。由于本项目占地受限,若采用传统活性污泥方式,池容不足,需寻求强化措施,满足占地池容受限下的工艺需求,因此在活性污泥系统中镶嵌悬浮载体系统,形成泥膜复合 MBBR 工艺是常规手段。

MBBR 工艺通过向生化系统内投加悬浮载体,富集生物膜,形成活性污泥-悬浮载体生物膜的复合系统,可以强化生化段对污染物的去除性能。在国内污水厂提标改造或者节地新建方面得到广泛应用^[2-3]。由于悬浮载体生物膜在拦截筛网的作用下专性培养,实现了特定功能菌的专性富集,且在流化的过程中,实现了生物膜的动态更新,有效保障了该工艺高效的处理效果。在水质水量冲击^[4]、低温^[5]、高盐^[6]等特殊环境下可有效保障系统出水的稳定达标。尤其是针对低温难题,目前国外已有在 3.5 $^{\circ}\text{C}$ 下运行的 MBBR 工程案例,其出水 BOD_5 、COD、TN 分别可达 2.2、35.0、2.9 mg/L ,稳定优于

排放标准^[7]。对于泥膜复合系统,悬浮载体应优先投加在好氧区,更为经济和可靠,而不应把在缺氧区投加悬浮载体作为首选方案。

基于本项目的设计难点,生化段最终选择基于 MBBR 的改良 Bardenpho 工艺,通过在好氧区投加悬浮载体,从而降低了好氧区的池容及整个生物池的占地,生物池工艺流程见图 2。经过预处理后的废水依次经过预缺氧区、厌氧区、前缺氧区、好氧 MBBR 区、后置缺氧区、后好氧区,好氧 MBBR 区出水经过内回流至缺氧区用于脱氮。



图 2 生物池工艺流程

Fig.2 Flow chart of biological tank

2.2 MBBR 流化池型选择

MBBR 工艺的实施难点是悬浮载体流化,这也是制约 MBBR 工艺工程运行的主要问题。2000 年初,虽然国内已开始有 MBBR 相关研究,但在工程化道路上受阻,主要原因也是未能彻底解决悬浮载体流化及流化不佳引发的拦截筛网堵塞问题。2008 年,国内首个采用 MBBR 工艺进行一级 A 提标改造的大型污水厂在无锡芦村污水厂成功落地^[8]。在该项目中,好氧区通过采用“循环流动池型”解决了悬浮载体易堆积、难流化的问题。“循环流动池型”如图 3 所示,通过在原池内增加弧形导流墙并安装辅助推流搅拌器,保障了悬浮载体的均匀流化,目前该项目已稳定运行 12 年。随着工艺的不断优化,已

形成了在无外加推流搅拌器的“微动力混合池型”^[9-10]。通过创新基于穿孔管空气搅拌、行进向不均匀曝气、纵向循环流动的悬浮载体微动力混合技术,解决了传统流化方式需推流动力设备与曝气器维护不便等难题,降低了工程投资及改造成本。并且,通过借助基于 CFD 软件的仿真模拟对微动力混合池整体水流场进行模拟分析,可进一步实现工艺系统优化布置,保障项目顺利实施。图 4 显示了基于该项目的仿真模拟效果,从整体模拟结果看,进水流速度比较均匀,开启底部曝气后,末端水流速度变大,形成了池内下部自进水端指向出水端、上部自出水端指向进水端的纵向循环流动,可有效防止悬浮载体在末端堆积。



图 3 无锡芦村污水厂循环流动池型

Fig. 3 Circulating flowing type of Wuxi Lucun WWT

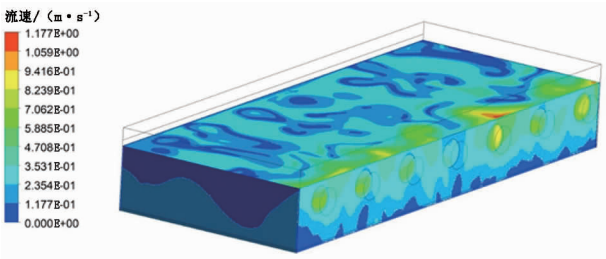


图 4 基于 CFD 的微动力混合池流场分析

Fig. 4 Flow field analysis of micro power mixing tank based on CFD

2.3 二沉池形式选择

二沉池的设计要点在于高设计负荷并考虑出水水质的稳定。目前,周边进水周边出水形式的二沉池应用较为广泛。周进周出二沉池由于池周长,过水断面大,可降低进水流速,从而获得更稳定的出水。配水槽内的流速一般控制在 0.3 ~ 0.5 m/s 范围内,有效地促进了槽内流态向层流发展。此外,周

进周出可形成大环行密度流,容积利用率更高。表 3 对比了目前常用的矩形周进周出二沉池和辐流式周进周出二沉池,两种形式的二沉池均可满足工艺出水的要求,但矩形周进周出二沉池设计负荷更高,占地面积更小,并且可以实现与生物池共壁建设。所以,综合考虑现场的平面布置,采用矩形周进周出二沉池。

表 3 矩形周进周出二沉池和辐流式周进周出二沉池对比
Tab. 3 Comparison of rectangular and radial flow peripheral inflow and peripheral outflow secondary sedimentation tank

项 目	矩形周进周出二沉池	辐流式周进周出二沉池
典型设备投资/(元 · m ⁻³)	60 ~ 110	40 ~ 60
占地面积/(m ² · 10 ⁴ m ⁻³ · d)	450 ~ 500	800 ~ 1 000
设计负荷/(m ³ · m ⁻² · h ⁻¹)	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0
运行效果	较好	较好

2.4 深度处理工艺选择

经过生化工艺处理之后,可保障氨氮、TN、BOD₅ 的稳定去除,削减 TP 的负荷。深度处理的作用是通过混凝沉淀的方式实现化学除磷,并获得清澈的出水,同时应对难降解 COD 的冲击。此外,由于占地受限,所以二沉池设计负荷较高,则对深度处理工艺抵抗 SS 冲击的性能提出了更高的要求。目前深度处理中应用较多的主要有高密度沉淀和磁加载沉淀两种工艺,设计负荷分别为 5 ~ 15、15 ~ 40 m³/(m² · h),磁加载沉淀具有比高密度沉淀更快的沉淀速度、更小的占地面积、更好的出水效果等优势。如江西省湖口县双钟污水处理厂采用磁混凝工艺进行深度处理,后续不接滤池工艺,磁混凝出水直接消毒外排,实际运行效果显示,污水厂出水 SS 平均值小于 5 mg/L,出水 TP 平均值小于 0.3 mg/L,均达到地表水Ⅳ类标准^[11]。周传庭等^[12]研究了磁混凝对高磷废水的去除效果,结果显示,进水 TP 在 20 mg/L 左右时,出水 TP 可稳定达到 0.3 mg/L 以下,具有良好的抗冲击效果。此外,如果增设活性炭粉末投加单元,则可用于难降解 COD 的去除^[13]。所以本项目深度处理单元最终采用优化的磁加载沉淀超效分离技术^[14]。

鉴于该项目位于北方且污水厂服务片区有较多服装纺织印染企业,出水 COD 达标存在一定风险,故超效分离工艺段设置了活性炭投加池作为保障和应急措施。超效分离工艺之后设纤维转盘滤池,用以保障出水 SS 稳定达标。

2.5 污水处理总工艺流程

污水厂设计工艺流程如图 5 所示。预处理工艺为常规工艺,主要去除大块漂浮物和砂砾;生化工艺采用基于 MBBR 的改良 Bardenpho 工艺,保障氨氮、TN、BOD₅ 的稳定达标;深度处理工艺采用磁加载沉淀超效分离+纤维转盘滤池+次氯酸钠消毒工艺,进一步去除难降解 COD、TP、SS。纤维转盘滤池主要对 SS 起保障性作用,故增加了超效分离到消毒车间的超越管道,正常运行时污水不经过纤维转盘滤池直接消毒排放。只在长期冲击或 SS 超标时使用纤维转盘滤池。二沉池的剩余污泥和超效分离的化学污泥均排入污泥储池,污泥经过板框压滤后外运。除粗格栅和提升泵房位于厂外污水提升泵站外,其余均位于厂内。

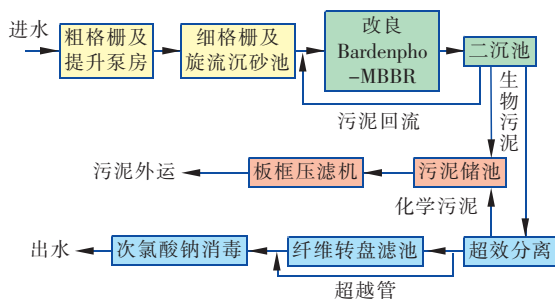


图 5 污水厂工艺流程

Fig. 5 Design process flow diagram of WWTTP

3 主要构筑物及设计参数

3.1 预处理段

细格栅采用回转式钩齿格栅除污机,共设 2 台, $N = 1.1 \text{ kW}$; 格栅宽度为 900 mm, 栅条间隙为 5 mm, 过栅流速 $\leq 1.0 \text{ m/s}$ 。配套无轴螺旋输送机 1 套, 长 6 m, $N = 2.2 \text{ kW}$ 。

旋流沉砂池 2 座, 钢混结构, 单座直径 3.05 m, 池深 3.70 m。进水渠道长 \times 宽为 3.70 m \times 0.61 m, 出水渠道 3.40 m \times 1.20 m, 渠道深为 1.4 m。安装旋流沉砂器 2 套, 处理量 1 080 m^3/h , $N = 0.75 \text{ kW}$; 设砂水分离器 2 套, 处理量 3 m^3/h , $N = 0.37 \text{ kW}$ 。排砂方式采用气提排砂, 设罗茨鼓风机 2 台 (1 用 1 备), 单台风量 1.8 m^3/min , $N = 2.2 \text{ kW}$ 。

3.2 生物池

生物反应池为半地下式钢混水池, 设 2 座, 单座平面尺寸为 67.0 m \times 34.1 m, 有效水深 6.0 m, 单座有效池容为 13 391.9 m^3 , 设计总变化系数 1.1。采用基于 MBBR 的改良 Bardenpho 工艺, 进水依次经

过预缺氧区、厌氧区、前缺氧区、好氧区、后置缺氧区和后好氧区, 并在好氧区投加 SPR-III 型悬浮载体。生物池总停留时间为 19.47 h, 设计水温为 9 $^{\circ}\text{C}$, MLSS 为 3.5 ~ 4.0 g/L, 污泥负荷不低于 0.54 $\text{kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。污泥回流比和硝化液回流比分别为 100% 和 200%。单座生物池内, 预缺氧区安装潜水搅拌机 1 台, $N = 2.5 \text{ kW}$; 厌氧区安装水下推进器 2 台, $N = 3.0 \text{ kW}$; 前缺氧区安装 4 台下水推进器, $N = 4.0 \text{ kW}$; 好氧区内安装回流泵 2 台 (1 用 1 备), 单台流量 1 250 m^3/h , 扬程 15 kPa, $N = 10 \text{ kW}$; 后置缺氧区安装潜水搅拌机 1 台, $N = 5.5 \text{ kW}$ 。采用悬浮高速离心机对好氧区进行曝气, 共设 3 台 (2 用 1 备), 单台功率 112 kW, 风量 87.1 m^3/min , 扬程 80.0 kPa。

3.3 二沉池

二沉池与生物池合建, 为半地下式矩形钢混水池, 设 2 座, 总尺寸为 20 m \times 60 m \times 5.4 m, 有效水深 4.5 m。设计单池水量 1.5 $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总变化系数 1.45。设计表面负荷 1.05 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 出水堰负荷 2.42 L/(m \cdot s), 沉淀时间 4 h。设非金属链板式刮泥机 2 台, $N = 0.5 \text{ kW}$ 。

3.4 超效分离工艺

磁加载沉淀池 2 座, 单座处理能力 1.5 $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总变化系数 1.45。该系统由活性炭吸附池、混合池、磁加载池、絮凝池、沉淀池五部分组成。设 4 组活性炭吸附池, 单组尺寸为 4.3 m \times 4.3 m \times 6.0 m, 设计混合时间 19.5 min, 安装搅拌机 4 台, $N = 7.5 \text{ kW}$; 设 4 组混合池, 单组尺寸为 2.0 m \times 2.0 m \times 6.0 m, 有效反应时间 4.2 min, 安装搅拌机 4 台, $N = 2.2 \text{ kW}$; 设 2 组磁加载池, 单组尺寸为 2.0 m \times 2.0 m \times 6.0 m, 有效反应时间 2.1 min, 安装搅拌机 2 台, $N = 3.0 \text{ kW}$; 设 2 组絮凝池, 单组尺寸为 2.0 m \times 2.0 m \times 6.0 m, 有效反应时间 2.1 min, 安装搅拌机 2 台, $N = 3.0 \text{ kW}$; 设 2 组沉淀池, 采用斜管沉淀, 共安装斜管 87 m^2 , 设计表面负荷为 14.4 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 安装中心传动刮泥机 2 台, 直径 8 m, $N = 1.1 \text{ kW}$ 。设高剪机 2 台, $N = 1.5 \text{ kW}$; 磁分离机 2 台, $N = 4 \text{ kW}$ 。

3.5 纤维转盘滤池

设转盘滤池 1 座, 为半地下钢混水池, 分 2 格, 尺寸为 13.7 m \times 8.7 m \times 5.0 m。共安装 2 套纤维转盘设备, 设计滤速 8.8 m/h。每套包含一组过滤

转盘,驱动功率0.75 kW,包含2台反冲洗水泵及配套阀门,水泵 $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $H=80\text{ kPa}$, $N=2.2\text{ kW}$ 。

4 运行情况

该项目于2019年4月开工建设,2019年11月通水运行,项目实际占地 $0.641\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ (含办公区域)。表4为2020年2月—5月的实际运行效果,该阶段最低水温 $8.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。可以看出,在低温条件下,出水各指标稳定达到准Ⅳ类标准,MBBR工艺保障了低温下生化系统稳定的硝化效果。Bardenpho工艺强化了TN的去除,在实际总回流比

200%的情况下,TN去除率达到76.24%,远高于系统回流所能达到的最大值。通过对Bardenpho碳源投加点进行优化,在后置缺氧区投加碳源,可极大地提高碳源的利用率,降低碳源的投加费用。系统TP平均去除率达到94.9%,其中生物除磷占比86.4%,化学除磷占比13.6%,高效的生物除磷效果也进一步降低了除磷药剂的投加量。超效分离系统提高了深度处理系统应对SS冲击的能力,实现了高效、稳定的SS去除,实际运行中超效分离出水超越纤维转盘滤池,直接消毒后外排。

表4 实际运行进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目	COD	NH_4^+-N	TN	TP	SS
总进水	136.83 ± 40.10	27.42 ± 6.75	30.51 ± 6.66	2.95 ± 0.75	—
生化段出水	—	—	—	0.53 ± 0.19	—
总出水	14.45 ± 3.77	0.23 ± 0.13	7.25 ± 1.74	0.15 ± 0.04	0.69 ± 0.92

污水厂运行药剂费用 $0.242\text{ 元}/\text{m}^3$,其中碳源费用 $0.086\text{ 元}/\text{m}^3$ 、磁粉成本 $0.006\text{ 元}/\text{m}^3$,磁粉的回收率达到99.6%。全厂电耗 $0.5\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,结合水厂的综合电价,吨水电费均值为 $0.270\text{ 元}/\text{m}^3$ 。综上,污水厂直接运行成本为 $0.512\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

5 结论

针对占地受限条件下的高标准新建污水厂,采用“改良Bardenpho-MBBR+矩形周进周出二沉池+磁加载沉淀”组合工艺,实际运行效果显示,出水各指标稳定达到并优于设计标准,Bardenpho-MBBR工艺提高了系统的耐低温性能,并实现了高效的脱氮除磷效果。超效分离工艺提高了深度处理系统应对SS冲击的能力,实现了高效、稳定的SS和TP去除。该污水厂实际占地面积为 $0.641\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,直接运行费用为 $0.512\text{ 元}/\text{m}^3$ 。该组合工艺具有工艺流程简洁、占地省、出水效果好等优势,特别适用于占地受限条件下的高标准污水厂的建设 and 运行。

参考文献:

- [1] 郝晓地,陈娟,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).
- [2] 李玮,郑临奥,白华清,等. 新建污水厂移动床生物膜

工艺的设计与运行[J]. 水处理技术,2020,46(8):126-131,134.

LI Wei, ZHENG Lin'ao, BAI Huaqing, et al. Design and operation of the moving bed biofilm reactor in the newly-built wastewater treatment plant [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(8): 126-131, 134 (in Chinese).

[3] 吴迪. MBBR在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水,2018,34(16):22-31.

WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16):22-31 (in Chinese).

[4] 黄青,周家中,吴迪,等. Bardenpho 镶嵌 MBBR 工艺用于北方某污水厂抗冲击性能[J]. 环境工程学报,2020,14(6):1698-1704.

HUANG Qing, ZHOU Jiazhong, WU Di, et al. Shock-loading resistance of Bardenpho-embed MBBR process in a WWTP of northern China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1698-1704 (in Chinese).

[5] 刘强,王泰,沈淳,等. MBBR工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果[J]. 中国给水排水,2020,36(13):7-13.

LIU Qiang, WANG Tai, SHEN Bo, et al. Operation effect of MBBR applied in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Tianjin at low temperature [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 7-13 (in Chinese).

[6] 栾志翔,李志伟,王江宽,等. 北方某污水处理厂抗氯

- 离子冲击效果分析[J]. 给水排水, 2020, 46(1): 32 - 38.
- LUAN Zhixiang, LI Zhiwei, WANG Jiangkuan, *et al.* Effectiveness analysis of anti-chloride ion shock in a wastewater treatment plant in northern China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(1): 32 - 38 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 88.
- [9] 吴迪, 郑临奥, 刘曙. 一种微动力混合污水处理装置: CN201811283263.2[P]. 2018 - 12 - 21.
- WU Di, ZHENG Lin'ao, LIU Shu. Micro-power Mixed Wastewater Treatment Device: CN201811283263.2[P]. 2018 - 12 - 21 (in Chinese).
- [10] 宋美芹, 于振滨, 张晶晶, 等. 一种 MBBR 微动力混合生物处理系统: CN201710176351.1[P]. 2017 - 06 - 13.
- SONG Meiqin, YU Zhenbin, ZHANG Jingjing, *et al.* MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) Micro - Dynamic Hybrid Biological Treatment System: CN201710176351.1 [P]. 2017 - 06 - 13 (in Chinese).
- [11] 魏锋, 曹名帅. 改良型氧化沟 + 磁混凝沉淀工艺用于污水处理厂扩容提标[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 55 - 57, 63.
- WEI Feng, CAO Mingshuai. Application of improved oxidation ditch and magnetic coagulation sedimentation process in expansion and upgrading of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 55 - 57, 63 (in Chinese).
- [12] 周传庭, 陈广, 周振. 磁混凝高效沉淀池用于处理高磷废水[J]. 中国市政工程, 2020(3): 53 - 55.
- ZHOU Chuanting, CHEN Guang, ZHOU Zhen. Treatment of high phosphorus wastewater by magnetic coagulation sedimentation tank [J]. *China Municipal Engineering*, 2020(3): 53 - 55 (in Chinese).
- [13] 郑利兵, 焦赞仪, 陈梅雪, 等. 磁混凝工艺处理市政废水中的污染物去除特征研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(6): 2118 - 2127.
- ZHENG Libing, JIAO Yunyi, CHEN Meixue, *et al.* The pollutants removal in municipal wastewater treatment by magnetic coagulation technology [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(6): 2118 - 2127 (in Chinese).
- [14] 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]. *Municipal Engineering Technology*, 2019, 37(6): 209 - 213 (in Chinese).

作者简介: 周家中(1990 -), 男, 河北张家口人, 硕士, 工程师, 主要从事水处理强化脱氮除磷技术的研究与设计工作, 具体包括 MBBR、自养脱氮工艺等。

E-mail: zhoujiazhong@qdspr.com

收稿日期: 2020 - 12 - 31

修回日期: 2021 - 01 - 15

(编辑: 孔红春)

加强水土保持, 打造绿水青山