

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.012

# AAOA+MBR工艺用于济南东客站地下污水处理厂

田海成<sup>1</sup>, 杨曦凯<sup>1</sup>, 焦文海<sup>1</sup>, 杨红红<sup>1</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 王丹石<sup>1</sup>,  
张元元<sup>1</sup>

(1. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东 济南 250001; 2. 光大水务  
<济南>有限公司, 山东 济南 250001)

**摘要:** 济南东客站污水处理厂设计规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , 主体工艺为AAOA+MBR, 出水 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TP}$ 等指标日均值优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准; 剩余污泥经机械浓缩+高压隔膜压滤机工艺处理后含水率 $\leq 65\%$ 。通过采用高负荷的MBR工艺, 同时将构筑物上下叠合、合壁共建于地下的方式, 克服了用地紧张的限制并满足了高标准的景观环境要求, 项目总用地面积仅为《山东省建设用地控制标准》(2019年版)中规定值的 $2/5$ , 地下箱体占地面积指标仅为 $0.2\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ , 低于国内其他地下污水处理厂。通过设置速闭闸门及事故泵房的方式应对超量污水进入箱体造成的淹没风险, 并通过抬高地坪、设置排涝泵房的方式使地下箱体免于洪涝威胁。基坑施工中采用了上部适当放坡+下部桩锚支护方案, 并在采用管井+集水明排降水的同时设置止水帷幕与回灌井, 共同保障了基坑周边输水管线和高压线塔的安全运行。

**关键词:** 地下污水处理厂; AAOA+MBR; 高压隔膜压滤机

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0078-06

## Application of AAOA-MBR Process in Jinan Dongkezhan Underground Wastewater Treatment Plant

TIAN Hai-cheng<sup>1</sup>, YANG Xi-kai<sup>1</sup>, JIAO Wen-hai<sup>1</sup>, YANG Hong-hong<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>,  
WANG Dan-shi<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-yuan<sup>1</sup>

(1. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Jinan 250001, China; 2. Everbright Water <Jinan> Co. Ltd., Jinan 250001, China)

**Abstract:** The design scale of Jinan Dongkezhan wastewater treatment plant is  $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , and the key process is AAOA-MBR. The daily average values of  $\text{BOD}_5$ ,  $\text{COD}$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{TP}$  and other indicators in the effluent is better than the class IV limits specified in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and the water content of excess sludge is less than 65% after treatment by mechanical thickening and high pressure diaphragm filter press. The limitation of land use is overcome and the requirements of high standard landscape environment are achieved by adopting the high-load MBR process and overlapping the structure up and down and co-building the wall underground. The total footprint area of the project is only  $2/5$  of the value specified in *Shandong Province Construction Land Control Standards* (2019 edition), and the underground box covers an area index of only  $0.2\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$ , which is lower than other underground sewage treatment plants in China. The flood risk caused by excess sewage entering the box is prevented by setting the quick-closing gate and the emergency pumping house, and the underground box is free from the threat of flood by raising the floor and setting the drainage pump

room. In the construction of the foundation pit, the scheme of proper slope in the upper part and pile anchor support in the lower part is adopted, open channel and well points are constructed for construction drainage while water curtain and recharge well are also set up, which jointly ensure the safe operation of the water transmission pipeline and high voltage tower around the foundation pit.

**Key words:** underground WWTP; AAOA+MBR; high pressure diaphragm filter press

1 项目概况

济南东客站污水处理厂位于济南高铁新东站以北 1.3 km 处,规划用地红线面积 3.77 hm<sup>2</sup>,设计污水处理规模 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,设计进、出水水质见表 1,要求污泥含水率≤65%。污水处理采用预处理+AAOA+MBR+紫外线消毒工艺,尾水达标后排入小清河;污泥处理采用带式浓缩机+高压隔膜压滤机工艺,污泥脱水后外运焚烧处置,工艺流程见图 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L<sup>-1</sup>

项目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水	200	500	400	60	70	8
设计出水	6	40	10	2	15	0.4

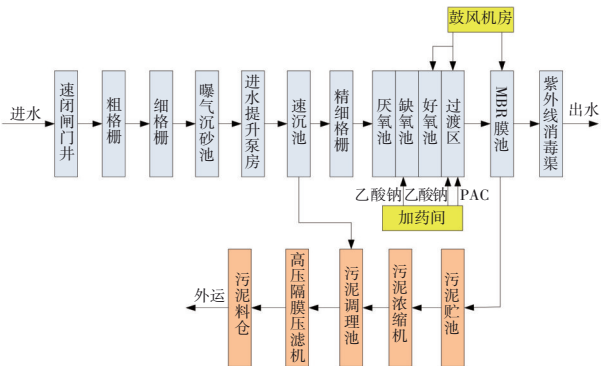


图 1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

2 建设形式

该污水处理厂位于济南高铁新东站片区核心地段,周边为白泉湿地公园、站前传统风貌区以及华山-白泉景观廊道。由于污水处理厂选址的特殊性,项目建设不仅需要考虑臭气、噪声污染等对周边环境的影响,更需要考虑景观效果与周边环境的协调性。根据《山东省建设用地控制标准》(2019 年版),用地面积需求为 9.5 hm<sup>2</sup>,而污水处理厂规划用地面积仅为 3.77 hm<sup>2</sup>(约为规定值的 2/5),远远无法满足地上式污水处理厂的建设需求。鉴于高标准

的景观环境要求和用地紧缺的限制,污水处理厂采用地下式的建设形式。污水处理厂地上效果图见图 2,地下箱体模型见图 3。



图 2 污水处理厂效果图

Fig.2 Rendering of the wastewater treatment plant

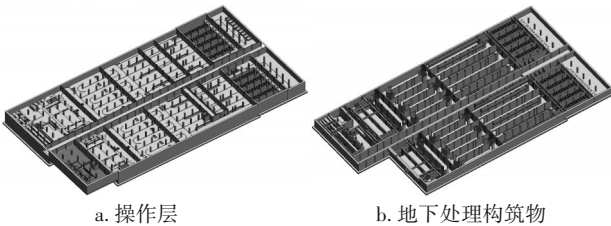


图 3 地下箱体模型

Fig.3 Underground box model

3 主要工艺设计参数

3.1 污水处理系统

3.1.1 速闭闸门井

速闭闸门井独立于地下箱体建设,井内设置 DN1 500 液速闭闸门一台,速闭闸设置断电时自动关闸措施,速闭时闸门关闭时间<35 s。

3.1.2 预处理间

预处理间内设置手电两用闸门、粗格栅、细格栅、曝气沉砂池、提升泵房、速沉池及精细格栅等。其中粗格栅选用 3 台回转式粗格栅,栅条间隙 15 mm;细格栅选用 3 台回转式细格栅,栅条间隙 3 mm;曝气沉砂池水平流速 0.062 7 m/s,停留时间 6.38 min;进水提升泵房选用 5 台(4 用 1 备)轴流提升泵,单台 Q=1 355 m<sup>3</sup>/h, H=55 kPa, N=37 kW;速沉

池表面负荷  $6.84 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 停留时间  $0.51 \text{ h}$ , 水平流速  $16.78 \text{ mm/s}$ ; 精细格栅选用4台内进流孔板格栅, 孔径  $1 \text{ mm}$ 。

### 3.1.3 AAOA反应池

AAOA反应池2座, 单座平面尺寸  $113 \text{ m} \times 46.8 \text{ m}$ , 有效水深  $6.7 \text{ m}$ , 每座包含厌氧区、缺氧区、好氧区、过渡区(同时布置搅拌器和曝气管), 设计水温为  $12^\circ\text{C}$ , 膜池→好氧区、好氧区→缺氧区、缺氧区→厌氧区的设计回流比分别为  $500\%$ 、 $400\%$ 、 $200\%$ , 好氧区及过渡区、缺氧区、厌氧区设计污泥浓度分别为  $6\ 600$ 、 $5\ 300$ 、 $3\ 500 \text{ mg/L}$ , 设计总水力停留时间  $16.19 \text{ h}$ (其中厌氧区  $2.01 \text{ h}$ 、缺氧区  $6.25 \text{ h}$ 、好氧区  $6.93 \text{ h}$ 、过渡区  $1.00 \text{ h}$ ), 设计泥龄  $28.3 \text{ d}$ , 污泥负荷  $0.09 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ , 设计气水比  $6.91$ , 控制好氧区末端溶解氧  $(1.0 \pm 0.5) \text{ mg/L}$ 。

### 3.1.4 MBR膜池

MBR膜池2座, 每座平面尺寸  $27.3 \text{ m} \times 46.8 \text{ m}$ , 有效水深  $3.6 \text{ m}$ , 每座10格, 每格设置6组膜组件(同时预留2组安装位置), 膜材质为改性PVDF, 膜孔径  $0.01 \mu\text{m}$ , 单组膜面积  $1\ 804 \text{ m}^2$ , 过滤周期  $10 \text{ min}$ (其中过滤期  $9 \text{ min}$ 、暂停期  $1 \text{ min}$ ), 平均膜通量  $19.25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 运行膜通量  $21.39 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 总变化系数  $1.3$ , 峰值膜通量  $27.80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 膜组件最小临界膜通量  $30.90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 膜池设计污泥浓度  $8\ 000 \text{ mg/L}$ 。通过曝气吹扫和膜清洗等方式减缓膜污染, 膜吹扫气水比为  $11.52$ , 膜清洗包括水反洗和化学清洗, 水反洗采用产水进行反向冲洗, 反洗通量为  $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 化学清洗包括维护性清洗和离线恢复性清洗, 维护性清洗采用次氯酸钠和柠檬酸, 每4天进行1次低浓度的次氯酸钠维护性清洗(浓度  $200 \text{ mg/L}$ , 每次  $30 \text{ min}$ ), 每2个月进行1次柠檬酸清洗(浓度  $2\ 000 \text{ mg/L}$ , 每次  $30 \text{ min}$ ); 当大通量水反洗、空气擦洗、维护性清洗都不能够维持足够的膜产水性能时, 则需要对膜组件进行离线恢复性清洗, 也采用柠檬酸(浓度  $2\ 000 \text{ mg/L}$ )和次氯酸钠(浓度  $1\ 500 \text{ mg/L}$ ), 每年进行1次。

### 3.1.5 紫外线消毒及出水计量渠

紫外线消毒渠设置30个消毒模块, 每个模块由8个灯管组成, 合计240支灯管, 每支灯管  $320 \text{ W}$ 。出水计量渠设置巴歇尔量水槽1套, 喉宽  $1\ 200 \text{ mm}$ 。

## 3.2 污泥处理系统

设计污泥量  $20 \text{ tDS/d}$ , 其中MBR剩余污泥  $12$

$\text{tDS/d}$ , 污泥含水率  $99.2\%$ ; 速沉池污泥  $8 \text{ tDS/d}$ , 污泥含水率  $97\%$ , 脱水后的泥饼含水率小于  $65\%$ 。设置带式浓缩机3台(2用1备),  $Q=60\sim 95 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 高压隔膜压滤机3台(2用1备), 单台过滤面积  $500 \text{ m}^2$ , 压榨压力  $\leq 3.0 \text{ MPa}$ ; 污泥料仓1套,  $V=100 \text{ m}^3$ 。

## 3.3 臭气处理系统

臭气处理范围包括预处理间、AAOA反应池、MBR反应池、脱水机房等全部污水、污泥处理构筑物。采取分散式处理+集中排放模式, 共设置7套生物除臭滤池, 总风量  $150\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ , 臭气经预洗池洗去部分水溶性物质和灰尘后, 再经过微生物滤料层, 对恶臭物质的吸附和降解达标后, 通过  $15 \text{ m}$  高排放塔有组织排放。生物滤池滤料高度  $1.8 \text{ m}$ , 有效停留时间  $20 \text{ s}$ , 其中预洗段有效停留时间  $3 \text{ s}$ , 采用PP球填料, 粒径  $50 \text{ mm}$ , 比表面积  $237 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , 空隙率  $91\%$ , 密度  $52 \text{ kg}/\text{m}^3$ ; 生物过滤段有效停留时间  $17 \text{ s}$ , 采用火山岩和竹炭复合填料, 火山岩有效粒径  $22.64 \text{ mm}$ 、比表面积  $206 \text{ m}^2/\text{kg}$ 、空隙率  $51.69\%$ 、密度  $1.42 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 竹炭比表面积  $389 \text{ m}^2/\text{g}$ 、表观密度  $0.336 \text{ g}/\text{mL}$ 、挥发灰分占比  $8.38\%$ 。

## 4 设计特点及难点分析

### ① 设计进水浓度高

本工程设计进水水质参考济南市其他几座大型污水处理厂的实际进水水质确定, 其中氨氮、总氮分别为  $60$ 、 $70 \text{ mg/L}$ , 而国内其他地下式污水处理厂的设计进水氨氮、总氮分别为  $30\sim 38$ 、 $35\sim 55 \text{ mg/L}$ <sup>[1-7]</sup>, 氨氮、总氮是影响AAOA反应池好氧区和缺氧区水力停留时间继而影响地下箱体占地面积的重要因素, 高浓度的进水水质使得本就有限的用地更加捉襟见肘, 为此本工程选择了污泥浓度高、容积负荷高、水力停留时间短且在地下式污水处理厂中广泛应用的MBR工艺。

### ② 污泥含水率要求低

根据济南市《关于进一步规范污水处理厂污泥处理处置工作的通知》(济水发[2019]20号)要求: “全市污水处理厂污泥含水率应低于  $65\%$ , 实现源头减量。”离心浓缩脱水一体机或带式浓缩脱水一体机等无法满足要求, 因此本工程选择了尺寸较大、脱水后含水率较低的高压隔膜压滤机。与此同时, 高压隔膜压滤机所需的高大空间也给地下式污水处理厂的竖向布置提出了挑战, 为便于污泥车运



输,最终选择将污泥料仓设置于地下负一层,高压隔膜压滤机设置于箱体地上一层的方案,将污泥贮池、污泥调理池及污泥泵房等设置于地下箱体负一层,浓缩机、药剂储罐、压榨系统、反洗系统等设置于箱体地上一层。

### ③ 集约化布置解决用地不足难题

用地紧缺是很多污水处理厂选择地下式建设形式的主要原因,而MBR工艺不仅可以缩短生物池停留时间,还可以省去二沉池及深度处理等建设用地,据统计,采用MBR工艺的地下式污水处理厂达到了24%<sup>[8]</sup>。本工程规划用地面积仅为《山东省建设用地控制标准》(2019年版)的2/5,为充分集约用地将污水处理构筑物全部合壁共建于地下箱体(尺寸197.30 m×101.60 m)负二层,将鼓风机房、变配电室等辅助生产用房全部叠合设置于地下箱体负一层,综合楼、脱水机房等叠合设置于箱体地上一层。通过合壁共建、上下叠合以及采用MBR工艺等方式实现了地下箱体占地指标仅为 $0.2 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ,在设计进水浓度高、用地面积不足等不利条件下实现了集约化用地,地下箱体占地指标优于国内其他已建地下式污水处理厂的 $0.22 \sim 0.37 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ <sup>[2,4,7,9]</sup>。

### ④ 场地环境复杂

由于很多地下式污水处理厂建设于市中心甚至居民区,因此场地环境复杂是地下污水处理厂时常面临的施工难题,例如广州京溪污水处理厂东侧3 m即为5~7层的民房<sup>[1]</sup>。本工程地下箱体北侧距离现状DN1 600输水管线仅为6 m,东侧地下箱体通道距离现状DN2 400输水管线仅为8.1 m,地下箱体南侧距离现状220 kV高压线仅为11 m,因此,地下式污水处理厂的建设不仅要考虑自身施工安全,更要防止因基坑降水导致的周边输水管线以及高压线安全问题的发生。为此本工程基坑安全等级确定为一级,基坑支护采用上部适当放坡+桩锚支护方案,对周围地下管线变形、坡顶水平位移、坡顶竖向位移、锚杆拉力、地表竖向位移等累计变化量和变化速率进行监测控制,以保障城市输水管线 and 高压线运行安全。场地设计地坪标高26.5 m,抗浮设防水位24.50 m,因地下水降深较大,采用管井+集水明排的降水方案,设置止水帷幕,并在基坑外设置回灌井,防止地下水位下降过大造成输水管线及高压线塔沉降。厂区平面布置见图4。

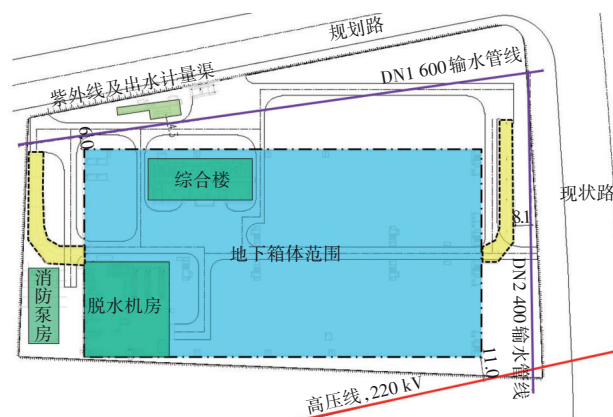


图4 地面层布置

Fig.4 Layout of ground floor

### ⑤ 应急安全设计

水淹事故是地下式污水处理厂运行中最主要的风险之一<sup>[10-11]</sup>,主要由超过污水处理厂处理能力的管网污水或通过地下箱体出入口等进入地下箱体的地面雨水造成,因此地下式污水处理厂设计时需针对水淹风险采取安全措施。

#### a. 超量污水应急措施

本工程进水共设置两道闸门,其中第一道为液压速闭闸门,当地下箱体断电时自动落闸,切断地下箱体的进水,防止地下箱体被淹,这是目前地下污水处理厂普遍采用的应对超量污水的安全措施。在进水泵房和AAOA反应池均设置溢流管道,溢流水接至事故检修泵房,检修泵房出水一路接至与片区另外一座污水厂的连通工程,另一路接至粗格栅进水井。当膜池产水泵流量小于进水提升泵流量时,AAOA反应池水位会不断升高并最终发生溢流,此时应通过减少进水泵运行台数或通过变频方式降低流量;当进水水量过高导致进水泵房溢流时应减小第二道手电一体闸门的开度或关闭闸门。地下式污水处理厂设计时常采用多级泵站联动方式,即每一级泵站故障时前端泵站自动停止工作,并关闭进水闸门<sup>[11]</sup>。

#### b. 防洪排涝应急措施

污水处理厂往往位于地势较低的城市末端,防止客水倒灌是避免地下式污水处理厂被淹的关键,同时将用地内的雨水顺利排除并防止进入地下箱体是厂区竖向设计时考虑的重要因素。由于雨水进入地下箱体造成的危害损失极大,因此地下式污水处理厂往往在地下箱体内建设排涝泵房以应对极端情况的发生。本工程设计地坪标高为26.5

m,高于厂址周边道路规划标高约1 m,同时在地下箱体通道入口处设置越坡阻水,并设置截水沟将雨水截流至地面雨水管道系统,通道末端设置截水沟并截流至地下箱体内部的排涝泵房,排涝泵出水管接入地面雨水管道系统,排涝泵房设置溢流管道,当进入地下箱体的雨水量过大时,溢流至检修泵房,借助于检修泵排出地下箱体,通过上述措施确保地下箱体免于洪涝影响。

#### ⑥ 消防设计

目前国内缺少专门针对地下式污水处理厂消防设计的规范要求,虽然《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020)中对地下污水处理厂消防设计要求较《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)的设计要求宽松,但其仅为推荐性协会标准。虽然部分地下式污水处理厂通过消防专项论证会或消防局专项方案审查等方式突破《建筑设计防火规范》的防火分区面积要求<sup>[12]</sup>,但在正常情况下仍然建议从严执行《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)的要求。本工程根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)要求,地下箱体共划分14个防火分区,每个防火分区面积均小于2 000 m<sup>2</sup>,每个防火分区设有一个直通室外出口,同时利用通向相邻防火分区的甲级防火门作为第二安全出口,人员疏散距离不超过60 m。地下箱体内设置室内消火栓系统和自动喷水灭火系统,高、低压变配电室及控制室设柜式无管网七氟丙烷灭火装置,同时地下箱体按照《建筑灭火器配置设计规范》(GB 50140—2005)布置灭火器。

#### ⑦ 通风排烟设计

变配电室等电气用房均设置机械送排风系统。设置有气体灭火系统的电气用房,火灾时气体灭火系统启动,灭火结束后,在电气用房外开启排风机及电动防火阀排出残余灭火剂。电气用房、鼓风机房、地下二层管廊的通风次数分别按6、15、2次/h设计,地下箱体其他房间换气次数按9次/h设计,送风量按排风量的80%设计。

本工程4处防烟楼梯间设置机械加压送风系统,加压送风量按《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017)第3.4.5~3.5.7条计算,其余封闭楼梯间采用自然通风系统。

地下箱体层高均大于6 m,除车行道防火分区设置有挡烟垂壁外,其他防火分区内的防烟分区面

积均满足《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017)第4.2.4条不大于2 000 m<sup>2</sup>的规定。地下箱体机械排烟量按防火分区净高根据《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017)第4.6.3条计算(火灾热释放速率按有喷淋取值),机械补风量不小于排烟量的50%。

### 5 运行效果及经济分析

2021年9月1日—2022年8月31日期间,该污水厂平均实际运行水量61 578 m<sup>3</sup>/d,实际出水水质中BOD<sub>5</sub>、COD、NH<sub>3</sub>-N、TP等指标日均值均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准,具体见表2。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

mg·L<sup>-1</sup>

项 目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
实际进水平均值	102	270	391	33.9	48.9	5.68
实际出水最大值	4.5	22.4	4.50	1.07	12.7	0.28
实际出水平均值	2.60	7.74	3.60	0.12	10.5	0.19
实际出水最小值	0.50	0.86	0.60	0.04	8.14	0.14

项目总投资55 826.97万元,其中工程投资53 864.16万元,采用BOT模式建设,项目资本金为30%,其余为银行贷款。单位制水经营成本1.30元/m<sup>3</sup>,单位制水总成本1.99元/m<sup>3</sup>,项目特许经营期为26年(含1年建设期),污水处理费为2.68元/m<sup>3</sup>,资本金税后财务内部收益率为8%,财务净现值为219万元,投资回收期为14.29年(含1年建设期)。

### 6 结论

济南东客站地下式污水处理厂采用AAOA+MBR污水处理工艺,污泥处理采用机械浓缩+高压隔膜压滤机工艺,在进水水质浓度较高、污泥含水率要求较低的情况下实现了高标准的出水水质。通过构筑物上下叠合、合壁共建以及采用MBR工艺等方式充分集约用地,地下箱体占地指标仅为0.2 m<sup>2</sup>/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>),克服了用地面积受限、场地环境复杂等现实困难。

### 参考文献:

- [1] 陈贻龙. 地下式MBR工艺在广州京溪污水处理厂的应用[J]. 给水排水, 2010, 36(7): 51-54.  
CHEN Yilong. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant[J]. Water

- & Wastewater Engineering, 2010, 36 (7) : 51-54 (in Chinese).
- [ 2 ] 施卫娟,李培培. 金港地下污水处理厂工程建设及设计特点[J]. 中国给水排水,2013,29(18):81-83.  
SHI Weijuan, LI Peipei. Construction and design features of underground wastewater treatment plant of Jingang[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (18) : 81-83(in Chinese).
- [ 3 ] 何国钢,侯锋,邵彦青,等. 贵阳青山下沉式污水处理厂设计[J]. 中国给水排水,2016,32(4):51-54.  
HE Guogang, HOU Feng, SHAO Yanqing, *et al.* Design of Qingshan underground treatment plant in Guiyang City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4) : 51-54(in Chinese).
- [ 4 ] 张明杰,周建忠,杨斌,等. 地下式污水厂与商场、公交站相结合的地下综合利用工程[J]. 中国给水排水, 2016,32(22):68-72.  
ZHANG Mingjie, ZHOU Jianzhong, YANG Bin, *et al.* Underground comprehensive utilization project of combining WWTP, mall and bus station[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22) : 68-72(in Chinese).
- [ 5 ] 邱维. 昆明市第九、第十地下污水处理厂设计实例分析[J]. 中国给水排水,2017,33(10):22-27.  
QIU Wei. Design principle of the ninth and the tenth underground wastewater treatment plants in Kunming City[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(10) : 22-27(in Chinese).
- [ 6 ] 马刚,张琦,张飞. 大型埋地式地表水类Ⅳ类出水标准污水厂工艺设计[J]. 中国给水排水,2018,34(8): 45-50.  
MA Gang, ZHANG Qi, ZHANG Fei. Design of large-scale underground wastewater treatment plant with effluent standard as surface water class IV [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8) : 45-50(in Chinese).
- [ 7 ] 陈秀成,牛天浩. 上海泰和全地下大型污水处理厂工艺设计要点及特点[J]. 中国给水排水,2021,37(10): 83-88.  
CHEN Xiucheng, NIU Tianhao. Key points and characteristics of process design of Taihe underground large sewage treatment plant in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (10) : 83-88 (in Chinese).
- [ 8 ] 房阔,王凯军. 我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J]. 给水排水,2021,47(8):49-55.  
FANG Kuo, WANG Kaijun. Development of underground wastewater treatment plant and eco-civilization in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8) : 49-55(in Chinese).
- [ 9 ] 陈谷. 小孤山再生水厂工程设计案例与探讨[J]. 净水技术,2018,37(7):4-9.  
CHEN Gu. Engineering design case and discussion on project of Xiaogushan reclaimed water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(7) : 4-9 (in Chinese).
- [10] 邱维. 地下污水处理厂风险分析及对策探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(8):32-34.  
QIU Wei. Risk assessment and solution proposal of underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8) : 32-34(in Chinese).
- [11] 徐晓波,崔洪升,刘世德. 地下污水处理厂的安全设计分析及建议[J]. 中国给水排水,2017,33(10):17-21.  
XU Xiaobo, CUI Hongsheng, LIU Shide. Safety design analysis and suggestions for underground wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (10) : 17-21(in Chinese).
- [12] 杨涛,吴志高,谢小龙,等. 埋地式污水处理厂地下箱体防火设计研究及案例剖析[J]. 给水排水,2022,48 (2):33-39.  
YANG Tao, WU Zhigao, XIE Xiaolong, *et al.* Research and case analysis on the fire protection design of the underground box in buried wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2) : 33-39(in Chinese).
- 
- 作者简介:**田海成(1991- ),男,黑龙江黑河人,硕士,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),一级建造师(市政工程),注册咨询工程师(投资),从事城镇供排水设计、咨询工作,曾获山东省及济南市优秀工程勘察设计奖9项。
- E-mail:**shjythe@jnszy.com
- 收稿日期:**2023-01-07
- 修回日期:**2023-05-07

(编辑:孔红春)