

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.011

兰州某大型污水厂原位提标改造工程设计实例

张 强^{1,2}, 夏海霞¹, 彭永立¹, 李 平³, 闫 博¹, 李 一¹,
李红博¹, 刘 晨¹, 朱加勇¹

(1. 北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038; 2. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 为满足强化黄河流域生态环境保护、削减污染物入河量的需求,兰州某污水处理厂需同时进行扩容提标,处理规模由 $26\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 扩大至 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,出水水质由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准提高至一级A标准。针对扩容体量大、可用土地少及排放标准严等问题,制定了提标改造决策思路;通过挖掘老旧设施潜力、利用竖向位置空间、原位耦合高负荷固定生物膜活性污泥(IFAS)工艺,形成多元处理路线。其核心在于生化处理段采用“大池型削减负荷,小池型耦合IFAS”的改造手段;泥水分离段采用“二沉池降低负荷,MBR补足空缺”的组合形式;深度处理段采用“磁混凝+回转式精密过滤器”的固液分离保障。结果表明,改造后出水COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP、SS分别为(23.2±2.9)、(5.3±2.8)、(1.7±0.9)、(9.4±3.4)、(0.2±0.1)、(4.6±2.2) mg/L,出水水质稳定且优于设计标准。

关键词: 污水处理厂; 原位改造; 提标扩容; 固定生物膜活性污泥工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0069-06

Design Case of In-situ Upgrading and Reconstruction of a Large-scale Wastewater Treatment Plant in Lanzhou

ZHANG Qiang^{1,2}, XIA Hai-xia¹, PENG Yong-li¹, LI Ping³, YAN Bo¹, LI Yi¹,
LI Hong-bo¹, LIU Chen¹, ZHU Jia-yong¹

(1. Beijing ENFI Protection Co. Ltd., Beijing 100038, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: To address the imperative of enhancing ecological and environmental protection within the Yellow River basin and to mitigate the influx of pollutants into the river, a wastewater treatment plant in Lanzhou was mandated to simultaneously augment its capacity and elevate its discharge standard. Specifically, the treatment capacity should be expanded from $26\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ to $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, while the effluent quality should be upgraded from the first level B limit to the first level A limit specified in the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). Considering the challenges of substantial expansion requirements, limited available land, and stringent discharge standard, a technical decision-making route for upgrading and reconstruction was developed. By leveraging the potential of existing facilities, utilizing vertical spaces, and implementing an in-situ coupled high-load integrated fixed-film activated sludge (IFAS) process, a multi-treatment approach was established. The core of this approach lay in the transformation method of “load reduction through large

tank, small tank coupled with IFAS” in the biochemical treatment section. The sludge-water separation section employed a combined approach featuring “secondary sedimentation tank to reduce the load, MBR to fill the gap”. The advanced treatment section utilized a solid-liquid separation system comprising “magnetic coagulation in conjunction with a rotary precision filter”. Following the transformation, the effluent COD, BOD₅, NH₃-N, TN, TP and SS were (23.2±2.9) mg/L, (5.3±2.8) mg/L, (1.7±0.9) mg/L, (9.4±3.4) mg/L, (0.2±0.1) mg/L and (4.6±2.2) mg/L, respectively. The effluent quality remains stable and is always lower than the design discharge standard.

Key words: wastewater treatment plant; in-situ reconstruction; upgrading and expansion; integrated fixed-film activated sludge (IFAS) process

黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略,城镇污水处理厂是实现流域保护的重要载体。然而,随着城市化进程的推进,基础设施持续完善,污水收集率不断提高,国内部分污水处理厂已处于满负荷甚至是超负荷运行状态,尤其在冬季低温期间,极易出现出水水质不稳定的情况,对环境产生严重影响。

兰州某大型污水处理厂不仅面临上述问题,而且受周边区域限制,无法新增用地,这对污水厂的扩容提出了更为严苛的要求。此外,兰州市政府先后印发了《兰州市2017年度水污染防治行动工作方案》和《关于启动城区污水处理厂提标扩容改造工作的通知》,根据要求,该厂出水指标需由《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准提升至一级A标准。以该污水厂提标改扩建设计为例,探讨在用地受限条件下对一级B出水的城市污水厂进行提标扩容的设计思路。

1 原始工艺概述

该污水厂原设计规模 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,核心工艺为改良AAO(A/A/A/O),出水水质满足GB 18918—2002一级B标准,剩余污泥采用重力浓缩+离心脱水至含水率80%后外运。原工艺流程见图1,原设计进、出水水质见表1。

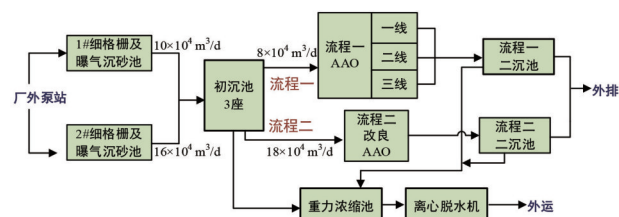


图1 原工艺流程

Fig.1 Original process flow

表1 原设计进、出水水质

Tab.1 Original design influent and effluent quality
mg·L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	200	450	220	35	45	5
出水	20	60	20	8(15)	20	1

2 运行主要问题

2.1 冗余量不足

2011年—2018年日均处理水量如表2所示。可知,日均处理水量呈逐年上涨趋势,2018年增至 $22.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,已达设计值的87%。结合污水厂所属地区城市规划,污水量将进一步提升,这意味着 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的设计处理能力将不能满足远期所需。为从容应对后续水量的增长,保证污水厂运行稳定与出水水质达标,扩充处理规模迫在眉睫。

表2 日均处理水量

Tab.2 Daily average treatment capacity

$10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
日均处理水量	12.0	12.4	13.0	14.5	17.6	19.8	21.4	22.6

2.2 进水水质超标多

提标改造前2年(2017年—2018年)的实际运行数据如表3所示。

对于实际进水水质而言,除COD外,BOD₅、NH₃-N、TN、TP以及SS皆超出设计值,超标率分别为17.5%、45.1%、32.9%以及39.5%、154.0%。值得一提的是,即便在进水水质超标的工况下,二沉池出水仍可满足一级B标准,但除COD、NH₃-N外,其余水质指标较一级A出水标准仍有较大差距,这意味着在后续处理工艺遴选时,需重点关注TN、TP以及SS的去除。

表3 提标改造前进、出水水质

Tab.3 Influent and effluent quality before upgrading and reconstruction $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计总进水	200	450	220	35	45	5
进水 95% 涵盖率水质	235	426	307	50.8	59.8	12.7
二沉池出水均值	16	40	18	3.6	19.0	0.9

2.3 污泥沉降性能差

由于该厂地处西北地区,受地理位置影响,冬季水温较低,为 $(11 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。在该环境下,生物池内丝状菌具有生长优势,极易诱发污泥膨胀现象发生,导致污泥沉降比(SVI)升高。由2018年各月SVI变化情况可知,自10月起,生物池SVI呈逐步升高趋势,在12月左右达到峰值(均值超过 200 mL/g),而后保持高值至来年4月,如此直接影响二沉池泥水分离效果,加剧二沉池运行风险。

2.4 泥饼产量高

提标改扩建前外运泥饼(含水率80%,下同)量为 $(250 \pm 25) \text{ t/d}$ 。由于兰州地处黄土高原,雨季排入管网的泥沙量巨大,而部分管网尚未实现雨污分流,导致夏季峰值时外运泥饼量高达 350 t/d 。根据实际污泥产率核算,当进水量达到设计规模 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,外运泥饼量将达到 $(332 \pm 25) \text{ t/d}$,峰值时可达 465 t/d 。因此,从污泥处理处置成本以及填埋影响等方面考虑,需进一步降低脱水污泥体积。

3 技术路线决策

由于该污水厂位于黄河河畔,一侧临河,一侧临山,周遭几乎无多余空地,因此提标改造工程仅可以在原厂范围内进行建设,这给工程设计和施工增加了难度,不仅要在原位实现设计功能性^[1],解决固有问題,还需兼顾现场运行,尽可能避免停水施工,降低对周遭环境的影响。因此,如何选择合适的提标工艺路线显得尤为重要。

以目标为导向,该提标改造的主要目标是通过原位改造实现水量扩容及出水标准提高至一级A,工艺设计决策思路如图2所示。

在有限的用地条件下,为保证处理效果,应当降低无法轻易改动的生化处理工艺的负荷,延长水力停留时间,从而换取处理效果的提升,也可以通过拆除新建,实现池容的增加。此外,引入固定生物膜活性污泥法^[2](IFAS),通过活性污泥法与生物膜法优势的有机结合,不仅具备较强的抗冲击能

力,还可以在原位实现工艺改造。膜曝气生物膜反应器(MABR)与移动床生物膜反应器(MBBR)是两种常见的IFAS工艺,作为新兴技术,MABR特有的无泡曝气、异相传质、微生物群落独特的分层结构为高效去除特定污染物提供了条件,但投资成本较高;而MBBR前期投入相对较低,处理效果尚佳,但运行能耗较高,且悬浮填料存在跑漏风险。综上所述,为切实评价两种工艺的优劣,MABR与MBBR皆被用于工艺改造,并在后续的实际运行过程中进行监测、总结,以期类似工程提供数据支撑。

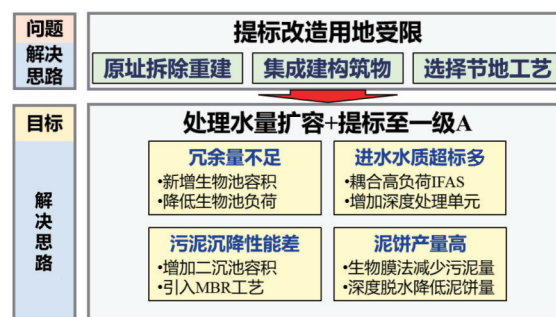


图2 提标改造决策思路

Fig.2 Decision-making for upgrading and reconstruction

冬季低温期间,污泥沉降性能较差,为妥善解决水量剧烈波动时威胁二沉池泥位稳定的问題,设计首选考虑增加二沉池直径,以降低表面负荷。当二沉池体量需求与占地面积之间的矛盾无法解决时,引入膜生物反应器(MBR)^[3],其不仅占地面积小,而且具有水力停留时间与污泥龄分开的优势特性,可有效保证泥水分离效果。此外,为保证出水TP与SS的稳定达标,末端选择增设表面负荷更高的磁混凝高效沉淀池^[4]。

针对泥饼产量过高的问題,可以从两个角度进行审视:其一为从源头降低活性污泥的生成量,其二为末端管控降低脱水污泥含水率。通过在前端生化系统内耦合IFAS工艺,即利用生物膜法的特性,从根本上减少污泥量的产生。此外,由于泥饼含水率对泥饼体量有着较大影响,因此,设计采用以板框隔膜压滤机为核心的高效深度污泥脱水系统,不仅满足外运泥饼含水率 $\leq 60\%$ 的要求,还可以有效降低外运泥饼体量,降低处置费用。

4 工艺流程设计

4.1 设计水量、水质

结合污水处理厂现状及规划,确定提标改扩建

29 040 m²,为适应现有池型结构,所有膜箱分为2组进行布置,且全部安置于缺氧池前端。为避免对池体造成额外负载,对结构产生较大影响,将膜组件以可调节的形式安装在漂浮式可拼装整体浮台上。新增2台(1用1备)独立变频风机为MABR工艺供气,供气量为4 m³/min,平均分为2路供给2组膜箱。2#、3#生物池为原有生物池改造,采用AAO原位耦合MBBR工艺,设计水量为1.75×10⁴ m³/d,总池容分别为10 400和10 532 m³,总HRT均为14.3 h。选用Ø25 mm、厚度为10 mm的改性高密度聚乙烯MBBR填料,其在缺氧池、好氧池中的填充率分别为40%和45%。为保证填料流化状态,配备填料区专用潜水推流器,并在进、出水口处设置拦截筛网,保证填料的良好流化并且不随出水流失。4#生物池为新建生物池,设计规模为1.5×10⁴ m³/d,依据地势位置建成不规则四边形,总池容10 792 m³,总HRT为17.3 h。流程一中各线生物池设计污泥有机负荷皆为0.075 kgBOD₅/(kgMLSS·d),MLSS为5 g/L,内回流比250%,外回流比100%。

流程二中原有生物池为半地下建设,采用AAAO工艺,减产后设计规模为15×10⁴ m³/d,总池容105 950 m³,总HRT达到17.0 h。设计污泥有机负荷及内、外回流比同流程一。

流程三中新建生物池采用AAAOA工艺(预缺氧池、厌氧池、第一缺氧池、好氧池及第二缺氧池),生物池总池容50 001 m³,总HRT为15 h。设计污泥有机负荷为0.072 kgBOD₅/(kgMLSS·d),MLSS为5 g/L。污泥回流共三级,其中MBR膜池回流至好氧池为400%、好氧池回流至第一缺氧池为400%、第一缺氧池回流至预缺氧池为300%。

4.4.3 泥水分离单元

流程一新建1座Ø50 m的二沉池和2座Ø30 m的二沉池,均时表面水力负荷0.82 m³/(m²·h),峰值表面水力负荷1.07 m³/(m²·h)。

流程二减产后,原有4座Ø50 m的二沉池利旧,均时表面水力负荷0.80 m³/(m²·h),峰值表面水力负荷1.04 m³/(m²·h)。

流程三采用MBR工艺,共设计10组膜池(8用2备),单组膜池有效尺寸13.5 m×6.3 m,有效水深3.2 m。膜丝采用PVDF的中空纤维膜,设计通量23.29 L/(m²·h),MBR膜池设计污泥浓度为10 g/L。

4.4.4 深度处理单元

深度处理间设计规模22×10⁴ m³/d, K₂=1.3。建筑物为地下、地上两层结构,包含磁混凝高效沉淀池、精密过滤器、配电室、加药系统(PAM、PAC、磁粉回收系统)。

磁混凝高效沉淀池设置4套,其中混凝池、磁粉混合池、絮凝池停留时间分别为2.4、2.1、4.9 min。沉淀池有效尺寸13.5 m×13.5 m,均时表面负荷16.01 m³/(m²·h),峰值表面负荷20.83 m³/(m²·h)。

回转式精密过滤器可以进一步截留、去除水中的颗粒絮体,共设置11台(9用2备),单台处理水量33 000 m³/d,过滤精度20 μm。

4.4.5 污泥脱水单元

污泥浓缩机房设计绝干污泥产量为101 tDS/d,共设置6台(4大2小)离心浓缩机及1套PAM溶药投加装置。其中4台大浓缩机单台设计处理量为130 m³/h,2台小浓缩机单台设计处理量为50 m³/h。

污泥脱水机房设计峰值绝干污泥产量为128 tDS/d。主要设备:①板框隔膜压滤机8台,单台日均脱泥5~6批次,过滤面积800 m²;②高压进料螺杆泵8台,单台Q=50 m³/h、H=1.6 MPa;③低压进料螺杆泵8台,单台Q=100 m³/h、H=0.6 MPa。

4.4.6 消毒处理单元

组合消毒间集成了接触消毒池、紫外消毒渠、消防水池、消防控制间、次氯酸钠储池及投加系统、中水提升泵池、水源热泵机房、出水在线间及配电室等单元,地下一层为接触消毒池,上层的维护结构具有紫外消毒、消防控制等功能。

组合消毒间设计规模30×10⁴ m³/d, K₂=1.3,平面尺寸45.4 m×21 m。受占地面积所限,末端采用两种消毒方式,次氯酸钠消毒池设计规模22×10⁴ m³/d,接收深度处理段出水,停留时间0.5 h;MBR膜池出水采用紫外线消毒,设计规模8×10⁴ m³/d,消毒后的出水作为厂区中水回用水。

4.4.7 其他单元

① 膜格栅

膜格栅集成于流程三生物池上,主要用于进一步去除污水中的细小纤维物和悬浮物,保证后续MBR膜设备的正常运行。膜格栅采用内进流精细格栅,孔径1 mm,安装角度90°,共设置4台(3用1备)。单台处理量1 600 m³/h,渠道宽度1.8 m。

② 鼓风机房

流程一和流程二利旧原多级离心鼓风机,共6台(4用2备),用于生物反应池曝气。1#、2#风机的单台 $Q=667\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=75\text{ kPa}$ 、 $N=1\,250\text{ kW}$;3#、4#风机的单台 $Q=500\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=75\text{ kPa}$ 、 $N=1\,000\text{ kW}$;5#、6#风机的单台 $Q=167\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=75\text{ kPa}$ 、 $N=315\text{ kW}$ 。

流程三风机安装于新建鼓风机房内,集成于新建AAAO池顶。选用磁悬浮风机,共9台,其中5台(4用1备)用于生物反应池曝气,单台 $Q=150\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=92\text{ kPa}$ 、 $N=350\text{ kW}$;其余4台(3用1备)用于

MBR吹扫,单台 $Q=120\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $H=92\text{ kPa}$ 、 $N=150\text{ kW}$ 。

5 改造运行效果

5.1 出水水质

项目投产运行后,2022年1月—12月的实际进、出水水质见表5。可知,虽然部分进水指标(COD、 BOD_5 、SS)波动性较大,接近甚至超过设计进水限值,但各项出水指标皆可稳定达标,满足排放标准,说明此次提标改造工艺选择高效且容错性强。

表5 提标改造后进、出水水质

Tab.5 Influent and effluent quality after upgrading and reconstruction

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

项目	COD		BOD_5		SS		TN		$\text{NH}_3\text{-N}$		TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
最大值	534.5	26.1	359.4	8.1	511.9	6.8	52.8	12.7	49.4	2.5	7.3	0.4
最小值	253.2	20.4	96.7	2.5	122.9	2.5	39.3	6.0	37.3	0.8	3.8	0.1
均值	356.1	22.9	202.8	4.6	248.1	4.8	47.1	9.2	43.3	1.5	5.1	0.2

5.2 投资用地分析

该工程吨水建设投资约3 000元/ m^3 。厂区总面积约 $11.04\times 10^4\text{ m}^2$ (包含 $0.29\times 10^4\text{ m}^2$ 无效用地),经核算,该厂规划用地指标为 $0.37\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,远低于《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中的城市污水处理厂规划用地指标[$0.81\sim 1.10\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$]。

6 结语

该工程因地制宜,在不新增占地的情况下,采用原位耦合高负荷IFAS工艺、集成建筑物与构筑物、发展竖向空间的思路,形成“双线路、三流程”的工艺路线,在用地受限的条件下,实现了提标及扩容的双重效果,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,可以为类似的提标改扩建工程提供参考及实例支撑。

参考文献:

- [1] 刘浩,臧海龙,耿安锋,等. 青岛李村河污水处理厂类IV类标准提标扩建工程设计[J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 52–57.
LIU Hao, ZANG Hailong, GENG Anfeng, et al. Design of quasi class IV discharge standard upgrading and expansion project in Qingdao Licunhe wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 52–57 (in Chinese).
- [2] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水,

2023, 39(12): 1–12.

ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, et al. Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12): 1–12 (in Chinese).

- [3] 王曦,朱羽廷,梁郡. 贵州大规模集中处理酱香型白酒废水处理厂设计及运行[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 61–66.

WANG Xi, ZHU Yuting, LIANG Jun. Design and operation of the large-scale centralized sauce-flavor liquor brewing wastewater treatment plant in Guizhou [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 61–66 (in Chinese).

- [4] 杨平,徐康康,周家中,等. MBBR+磁混凝用于 A^2/O 微曝氧化沟污水厂提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 67–74.

YANG Ping, XU Kangkang, ZHOU Jiazhong, et al. Application of MBBR and magnetic coagulation process in upgrading and expansion of a WWTP with A^2/O microporous aeration oxidation ditch[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 67–74 (in Chinese).

作者简介:张强(1983–),男,湖北孝感人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水资源管理及污水处理技术。

E-mail:zhangq@enfie.com

收稿日期:2024-01-04

修回日期:2024-03-17

(编辑:沈靖怡)