

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.04.018

# 节地型 HBR 生物膜技术在贵阳金百再生水厂的应用

刘彦君<sup>1</sup>, 蒋崇德<sup>2</sup>, 曹效鑫<sup>1,2</sup>, 庞洪涛<sup>1</sup>, 侯 锋<sup>1,2</sup>, 邵彦青<sup>1</sup>, 孙事昊<sup>1</sup>,  
袁 莉<sup>2</sup>, 高 霖<sup>2</sup>

(1. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 100084; 2. 贵州筑信水务环境产业有限公司,  
贵州 贵阳 550081)

**摘 要:** 贵阳金百再生水厂设计规模为  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 就近作为麦架河河道生态补水。生化处理采用节地型生物膜技术, 通过悬浮填料和高填充率的固定床结构, 实现生物膜处理和生物过滤的双重作用, 高效去除污染物, 省去二沉池, 节省占地面积。介绍了该厂的工艺流程、构筑物设计及设备配置情况, 并对运行效果进行总结。自运行以来, 出水水质稳定达标, COD、SS、氨氮、总氮、总磷去除率分别为 89.4%、92.8%、96.3%、48.4%、90.9%; 节地效果明显, 吨水占地仅为  $0.36 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ; 运行成本为 0.56 元/ $\text{m}^3$ , 与同等规模的传统活性污泥法污水厂的运行成本相近。

**关键词:** 污水处理; 生物膜; 固定床; 节地

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)04-0087-05

## Application of a Land-saving Hybrid Biofilm Reactor (HBR) in Guiyang Jinbai Reclaimed Water Plant

LIU Yan-jun<sup>1</sup>, JIANG Chong-de<sup>2</sup>, CAO Xiao-xin<sup>1,2</sup>, PANG Hong-tao<sup>1</sup>, HOU Feng<sup>1,2</sup>,  
SHAO Yan-qing<sup>1</sup>, SUN Shi-hao<sup>1</sup>, YUAN Ju<sup>2</sup>, GAO Lin<sup>2</sup>

(1. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co. Ltd., Beijing 100084, China; 2. Guizhou  
Zhuxin Water Environment Co. Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The effluent quality of Jinbai reclaimed water plant in Guiyang City, with designed treatment capacity of  $30\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ , meets level I-A of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) and recharged into Maijia River as replenishment. A hybrid biofilm reactor (HBR) was applied in bio-treatment process, which utilized high volumetric filling ratio of suspended carriers to achieve biofilm treatment and filtration simultaneously. This biofilm technology removed pollutants efficiently and saved plant footprint obviously by omission of secondary settling tank. This paper described the treatment process, structure design and equipment configuration of the plant, and also summarized the operation effect. The effluent pollutants meet the discharge standard since operation. The removal efficiencies of COD, SS, ammonia nitrogen, TN, TP are 89.4%, 92.8%, 96.3%, 48.4%, 90.9%, respectively. The footprint for unit treated wastewater is  $0.36 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ . The operation cost is 0.56 yuan/ $\text{m}^3$ , which is close to that of conventional activated sludge process with

similar capability.

**Key words:** wastewater treatment; biofilm; fixed bed; land-saving

针对再生水厂的节地问题,通过对再生水厂组成单元占地分析发现,在总占地面积中占比最大的构筑物是生化池,平均约占48%,其次是二沉池,平均约占18%<sup>[1]</sup>。因此研发应用节地型生物处理工艺是降低污水厂整体占地的一条重要途径。

贵阳是我国西南地区典型山地城市,城市用地非常紧张。以贵阳金百再生水厂为例开展应用研究,生化段采用节地型 hybrid biofilm reactor (HBR) 生物膜技术——新型悬浮填料和高填充率的固定床结构,耦合生物膜处理和生物过滤的双重作用,省去二沉池。以下将详细介绍该项目的技术路线和工艺参数,并针对处理效果和用地情况进行深入分析。

## 1 工艺原理

节地型 HBR 生物膜技术的基本特征是采用新型轻质填料和高填充率固定床的结构,新型轻质填料比表面积  $> 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ,较常规悬浮填料提高30%以上<sup>[2]</sup>,为菌体提供了更多生长空间<sup>[3-4]</sup>,提高了处理负荷。填料孔隙率  $> 80\%$ ,截留微生物和悬浮物,纳污能力提高,解决了传统固定床生物膜易堵塞、易板结、能耗高等问题。生化段 HRT 降至  $5 \sim 8 \text{ h}$ ,省去二沉池,可大幅节省占地。

该工艺技术原理如图1所示。

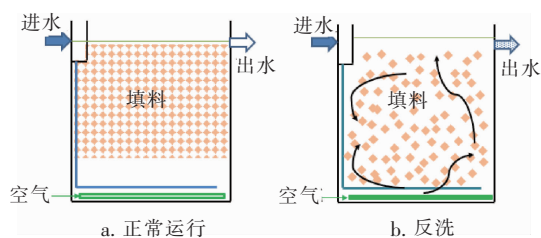


图1 节地型 HBR 生物膜技术原理

Fig. 1 The principle of HBR

正常运行时固定床结构和填料的大孔隙率截留大量悬浮物,出水 SS 低;当截留的污染物达到一定程度时,通过加大曝气量进行反洗,污水仍连续进入反应器,在曝气和水流的作用下,填料混合碰撞,截留的悬浮物和老化的生物膜脱落随水排走。运行和反洗交替进行。

## 2 工程设计

### 2.1 设计进、出水水质

金百再生水厂为贵阳南明河水环境综合整治的

二期项目,近期设计规模为  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,中期为  $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进、出水水质见表1,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

表1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	COD	SS	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TN	TP
设计进水	300	180	30	40	3
设计出水	50	10	5(8)	15	0.5

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

### 2.2 工艺设计

金百再生水厂工艺流程见图2。泵站设置在厂外,细格栅及后续的处理设备均建在污水处理厂内。生化处理系统为节地型 HBR 生物膜工艺,出水 SS 低,可直接进入深度处理。深度处理采用高效沉淀池和滤池,进一步去除 SS 和 TP,经接触消毒池处理后出水排放。污泥处理采用带式浓缩脱水一体机,脱水至污泥含水率  $< 80\%$ ,再运送至污泥深度处理中心进行深度处理。

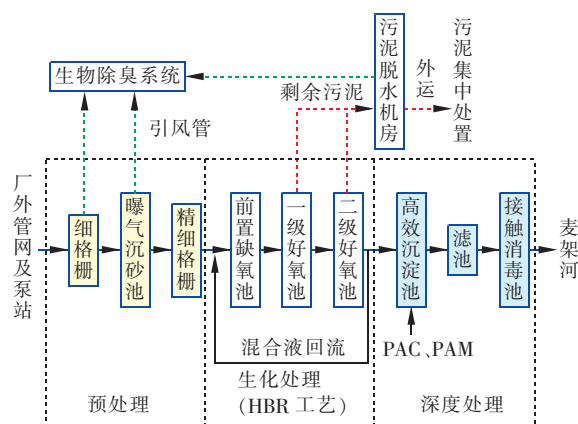


图2 金百再生水厂工艺流程

Fig. 2 Treatment process of Jinbai reclaimed water plant

#### 2.2.1 预处理系统

① 细格栅。采用2台阶梯式网板格栅除污机,单渠宽为1.2 m,栅前水深为1.5 m,栅间距为3 mm。

② 曝气沉砂池。有效水深2.3 m,平均停留时间为10 min。配置桥式吸砂机1套,螺旋砂水分离器1台。

③ 精细格栅。采用精细格栅 2 台,渠宽 1 300 mm,栅隙 2 mm,保证后续生化池的稳定运行,进一步去除细小杂质。

### 2.2.2 生化处理系统

金百再生水厂采用 HBR 生物膜工艺,设生化池 2 座,单座平面尺寸为 25.4 m × 20.9 m,每座分为 2 组,每组包括前置缺氧池、一级好氧池、二级好氧池, HRT 分别为 2.14、1.73、1.73 h,填料填充率分别为 70.9%、76.4%、76.4%,填料主要参数见表 2。缺氧池一般每天反洗 0.5 ~ 1 h,好氧池反洗间隔一般为 5 ~ 7 d,每次 0.5 h。

表 2 金百再生水厂填料参数

Tab.2 Properties of suspended carriers in Jinbai reclaimed water plant

填料参数	尺寸/ (mm × mm × mm)	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	孔隙 率/%	比表面积/ (m <sup>2</sup> · m <sup>-3</sup> )
缺氧池	14.5 × 14.5 × 5.0	0.95	>60	≥828
好氧池	14.5 × 14.5 × 8.2	0.95	>60	≥650

缺氧池配置双曲面搅拌机 6 台,4 用 2 备,直径为 2.5 m,功率为 5.5 kW。生化系统采用穿孔曝气管,配置螺杆鼓风机 8 台,6 用 2 备,单台额定风量 25 m<sup>3</sup>/min,功率 55 kW。配置混合液回流泵 8 台,4 用 4 备,单台处理流量为 500 m<sup>3</sup>/h,功率 11 kW。根据负荷情况,每个池内采用 4 个圆筒出水筛网,防止填料流入下游,缺氧池筛网圆筒尺寸为 Ø800 mm × 4 800 mm,好氧池筛网圆筒尺寸为 Ø1 000 mm × 3 800 mm。

### 2.2.3 深度处理系统

① 高效沉淀池。2 座,单座平面尺寸为 13.5 m × 11.15 m,停留时间 1 h。每座分为混合池、反应池和斜管沉淀池,混合池的混合时间为 3 min,絮凝池的反应时间为 10 min。采用混合搅拌机 2 台,直径 1 m,功率 5.5 kW。絮凝搅拌机 4 台,直径 1.3 m,功率 5.5 kW。沉淀区配置中心传动刮泥机 4 套,直径 6.5 m,功率 0.55 kW。

② 滤池。1 座,2 个单元,每个单元安装 6 台过滤器,设计滤速 6.51 m/h。

③ 接触消毒池。2 座,水力停留时间为 0.5 h,投加 6 ~ 10 mg/L 二氧化氯消毒后的水排入麦架河。

### 2.2.4 污泥及臭气处理系统

污泥脱水机房内配置 2 台带式浓缩脱水一体

机,污泥脱水达到含水率 < 80% 后,运至污泥深度处理中心进行深度处理。

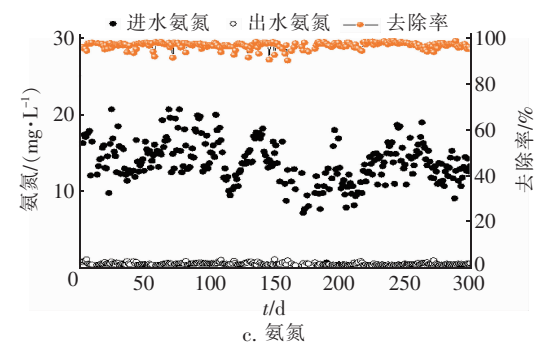
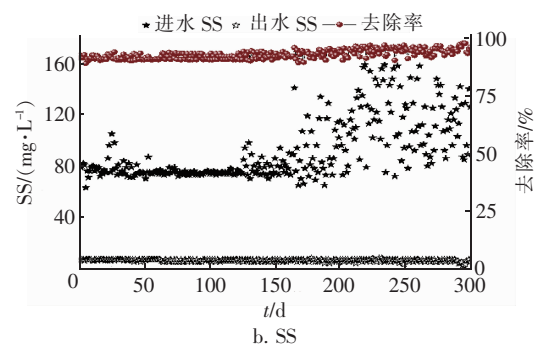
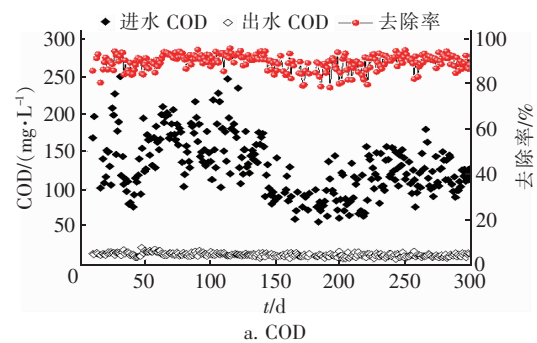
全厂设炭质填料生物除臭塔 1 座,除臭风量为 15 000 m<sup>3</sup>/h。

## 3 工程实施效果

### 3.1 出水效果

金百再生水厂自 2017 年 7 月开始运行以来,出水各项指标均稳定达到一级 A 标准,2019 年进、出水水质见图 3。

出水 COD 平均浓度为 13 mg/L,去除率平均值为 89.4%;出水 SS 均值为 6 mg/L,去除率平均值为 92.8%;出水氨氮平均浓度为 0.5 mg/L,去除率平均为 96.3%;出水 TN 浓度平均为 9.8 mg/L,去除率平均为 48.4%;出水 TP 平均浓度为 0.1 mg/L,去除率平均为 90.9%。



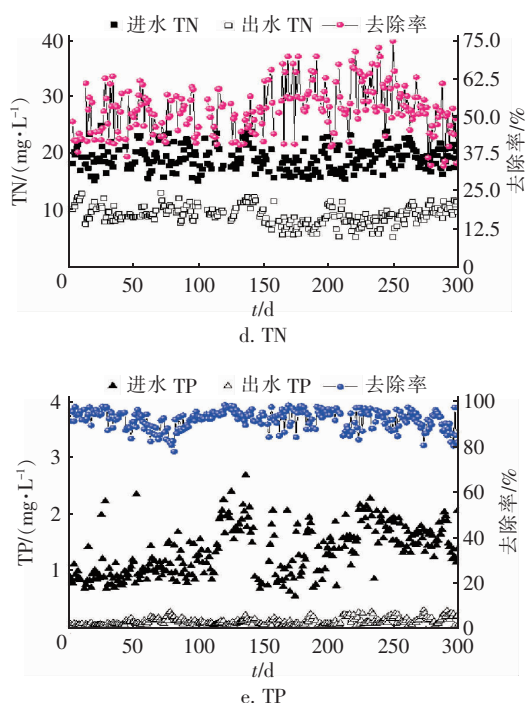


图3 2019年进、出水水质

Fig. 3 Influent and effluent quality in 2019

### 3.2 污染物去除过程分析

对生化系统各池进、出水水质进行测试,沿程污染物去除效果见图4。

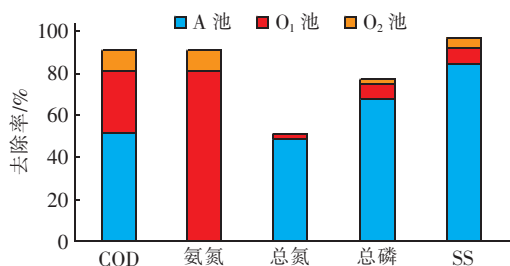


图4 生化系统沿程污染物去除率

Fig. 4 Removal efficiency of different pollutants along the bio-treatment tanks

在典型周期下,约51%的COD降解发生在缺氧池;81%的氨氮在一级好氧池去除,二级好氧池的硝化贡献较少。缺氧池的TN去除率为50%,与回流比100%的预期结果一致;83%的SS在缺氧池被截留去除;70%的TP在缺氧池去除,主要是进水总磷中的颗粒态磷随SS在缺氧池被截留,后随反冲洗水排出。

对好氧池生物膜微生物群落结构进行高通量测序分析,常见的硝化菌属如硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)和亚硝化螺旋菌属(*Nitrosopira*)均有

发现,表3为高通量测序分析结果。

表3 高通量测序硝化菌占比分析

Tab. 3 Proportion of nitrifying bacteria based on high-throughput sequencing technology %

项目	氨氧化菌占比	亚硝化菌占比	总硝化菌占比
一级好氧池	3.31	0.74	4.05
二级好氧池	0.37	0.91	1.28

一级好氧池、二级好氧池的总硝化菌占比分别为4.05%、1.28%,硝化菌占比与反应器运行结果一致,可见氨氮主要在一级好氧池去除。其中一级好氧池硝化菌比例高,与移动床生物膜工艺相比处于高值区间<sup>[5]</sup>。

### 4 节地效果分析

根据《城镇污水处理厂节地技术导则》(T/CECS 511—2018)对400余座污水厂的调研(见表4),污水厂用地面积与处理规模可用函数分析测算<sup>[6]</sup>,金百再生水厂实际占地 $0.36 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ,仅为该用地标准的24%。该项目的可研工艺论证中,HBR工艺相对于改良AAO工艺,大幅缩短HRT,省去二沉池,节省占地68%。

表4 HBR工艺与改良AAO工艺占地面积和水力停留时间对比

Tab. 4 Comparison of footprint and HRT between HBR process and modified AAO process

项目	占地面积/ $\text{m}^2$		水力停留时间/h	
	生化池	二沉池	生化池	二沉池
HBR工艺	1 061	0	5.6	0
改良AAO工艺	3 381	1 061	13	2

与HBR工艺相比,MBR工艺虽省去二沉池,但需增加膜池占地面积,有研究统计分析60余座处理规模 $>1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的MBR项目,其占地为 $0.9 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ,高于金百再生水厂HBR工艺的吨水占地。此外,MBR膜组件因膜污染和曝气池内生物量高,需要定期清洗,运行能耗高,为 $0.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ <sup>[7]</sup>,亦高于金百再生水厂。

### 5 经济效益分析

金百再生水厂运行成本为 $0.56 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,电费为 $0.30 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,药剂费为 $0.11 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,人工费为 $0.05 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,维修管理费为 $0.10 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

有研究分析了国内80余座不同规模、不同工艺城镇污水处理厂的运行成本<sup>[8-9]</sup>,金百再生水厂与同等规模的传统活性污泥法污水厂运行成本相近。因涉及厂外二次提升,该厂电耗为 $0.50 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,



略高于  $A^2O$  工艺的电耗 ( $0.43 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ )。本项目不需外加碳源,在高效沉淀池投加 PAC、PAM 药剂强化去除 SS 和 TP,药剂费共  $0.11 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。绝干污泥产量为  $1.48 \text{ t}/\text{d}$ 。

## 6 结论

① 金百再生水厂以节地型 HBR 生物膜技术为核心,充分利用高填充率和填料的高比表面积,为生物膜生长提供充足的空间,提高了污染物去除效果。实践运行表明,该工程出水水质稳定达到一级 A 标准,COD、SS、氨氮、总氮、总磷的平均去除率分别为 89.4%、92.8%、96.3%、48.4%、90.9%。

② 该项目节地效果明显,生化池占地面积较改良 AAO 工艺可节省 50% 以上,且无需二沉池,占地仅为  $0.36 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ ,可为城镇污水厂的节地工艺选择提供借鉴。

③ 该项目运行成本为  $0.56 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,与同等规模的传统活性污泥法的污水厂运行成本相近。

## 参考文献:

- [1] 冯硕,李振川,李艺.再生水厂平面布局分析与节地策略探讨[J].中国给水排水,2016,32(4):59-62.  
FENG Shuo,LI Zhenchuan,LI Yi. Analysis on layout of reclaimed water plant and discussion on land saving methods[J]. China Water & Wastewater,2016,32(4):59-62(in Chinese).
- [2] 美国水环境联合会.生物膜反应器设计与运行手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.  
Water Environment Federation. Biofilm Reactors[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2013(in Chinese).
- [3] 陈洪斌,屈计宁,何群彪.悬浮填料生物膜工艺的研究进展[J].应用与环境生物学报,2005,11(4):514-520.  
CHEN Hongbin,QU Jining,HE Qunbiao. Progress of study on suspended carrier biofilm process[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,2005,11(4):514-520(in Chinese).
- [4] ØDEGAARD H, GISVOLD B, STRICKLAND J. The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process[J]. Water Science & Technology,2000,41(4):383-391.
- [5] 肖可可,周律,贺北平,等.城市污水  $A^2/O$  移动床生物膜工艺菌群结构分析[J].中国给水排水,2016,32(9):20-24,29.  
XIAO Keke,ZHOU Lü,HE Beiping,et al. Analysis of microbial community structure in  $A^2/O$ -MBBR system for treatment of municipal wastewater[J]. China Water & Wastewater,2016,32(9):20-24,29(in Chinese).
- [6] 中国工程建设标准化协会城市给排水专业委员会.城镇污水处理厂节地技术导则:T/CECS 511-2018[S].北京:中国计划出版社,2018.  
Branch of Urban Water Supply and Drainage, China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Guidelines for Land Saving in Municipal Wastewater Treatment Plant:T/CECS 511-2018[S]. Beijing:China Planning Press,2018(in Chinese).
- [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] 周斌.华东地区城市污水处理厂运行成本分析[J].中国给水排水,2001,17(8):29-30.  
ZHOU Bin. Analysis of operating cost of urban wastewater treatment plant in east China region[J]. China Water & Wastewater,2001,17(8):29-30(in Chinese).
- [9] 刘杰,郑西来,高超,等.城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J].环境工程学报,2010,4(11):2522-2526.  
LIU Jie,ZHENG Xilai,GAO Chao,et al. Study on area, operating and construction costs of urban wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2010,4(11):2522-2526(in Chinese).
- [10] 范波,颜秀勤,夏琼琼.污水处理厂节能降耗途径分析[J].中国资源综合利用,2020,38(1):159-161.  
FAN Bo,YAN Xiuqin,XIA Qiongqiong. Analysis of energy consumption saving in sewage treatment plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2020,38(1):159-161(in Chinese).

作者简介:刘彦君(1992-),女,山东烟台人,硕士,工程师,主要从事水污染控制工程技术研究。

E-mail:1641319428@qq.com

收稿日期:2020-07-03

修回日期:2020-08-05

(编辑:衣春敏)