

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.012

# 厌氧氨氧化组合工艺处理老龄垃圾渗滤液工程研究

姜元臻<sup>1</sup>, 周松伟<sup>2</sup>, 汪晓军<sup>1,2,3</sup>, 高博<sup>1</sup>, 饶力<sup>1</sup>, 郭训文<sup>1</sup>

(1. 广州市华绿环保科技有限公司, 广东 广州 510006; 2. 佛山市化尔铵生物科技有限公司, 广东 佛山 528300; 3. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 构建了一套前置反硝化-亚硝化-厌氧氨氧化脱氮系统,用于处理老龄垃圾渗滤液,整套系统启动历时151 d,处理量达到132 m<sup>3</sup>/d。将垃圾渗滤液与一级A/O出水按比例混合后进入反硝化反应器,去除垃圾渗滤液中的可生化有机物,以满足后续亚硝化与厌氧氨氧化反应器的进水水质要求;亚硝化反应器通过游离氨实现亚硝化后,控制进水负荷与曝气量使出水亚硝态氮与氨氮之比在1.1~1.4之间。通过控制出水浓度和多次补加菌种达到快速启动厌氧氨氧化的目的,满负荷运行期间厌氧氨氧化对总氮的平均去除率为73.3%,平均总氮去除负荷为0.74 kg/(m<sup>3</sup>·d)。与原有生化处理系统相比,该厌氧氨氧化系统节约了54.0%的能耗和82.6%的处理费用。

**关键词:** 老龄垃圾渗滤液; 厌氧氨氧化; 亚硝化; 反硝化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0078-06

## Treatment of Aged Landfill Leachate via Anammox Combined Process

JIANG Yuan-zhen<sup>1</sup>, ZHOU Song-wei<sup>2</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1,2,3</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>, RAO Li<sup>1</sup>, GUO Xun-wen<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Hualu Environmental Technology Co. Ltd., Guangzhou 510006, China; 2. Hua An Biotech Co. Ltd., Foshan 528300, China; 3. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A nitrogen removal system, comprising pre-denitrification, partial nitrification, and Anammox, was established for the treatment of aged landfill leachate. The entire system was successfully commissioned over a period of 151 days, achieving a treatment capacity of 132 m<sup>3</sup>/d. The landfill leachate was proportionally mixed with the effluent from the primary A/O process before entering the denitrification reactor. This ensured that biodegradable organic matters in the landfill leachate were effectively removed, thereby meeting the influent quality requirements for subsequent partial nitrification and Anammox reactors. Following partial nitrification via free ammonia, the ratio of nitrite nitrogen to ammonia nitrogen in the effluent could be maintained between 1.1 and 1.4 through precise control of the influent load and aeration intensity. The rapid start-up of the Anammox process was accomplished through precise control of effluent concentration and repeated inoculation of Anammox bacteria. During full-load operation, the average total nitrogen removal efficiency by Anammox was 73.3%, with an average total nitrogen removal load of 0.74 kg/(m<sup>3</sup>·d). Compared to the conventional biochemical treatment system, the Anammox system reduced energy consumption by 54.0% and lowered treatment costs by 82.6%.

通信作者: 汪晓军 E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

**Key words:** aged landfill leachate; Anammox; partial nitrification; denitrification

在城市生活垃圾填埋场中,随着填埋时间的推移,填埋垃圾中的有机物逐渐被分解,整个填埋区的厌氧发酵作用逐渐转入产甲烷阶段,填埋区内大量挥发性脂肪酸(VFAs)转化为 $\text{CH}_4$ 与 $\text{CO}_2$ ,同时在微生物作用下含氮有机物被分解氨化,导致垃圾渗滤液的氨氮浓度不断提高。在这种情况下产生的老龄垃圾渗滤液具有氨氮浓度极高、可生化性较差、碳氮比失衡等特点<sup>[1-2]</sup>。

粤西某市生活垃圾填埋场一期工程已运营 5 年,其垃圾渗滤液的氨氮浓度目前已升至 3 500 mg/L, COD 浓度降至 6 000 mg/L,属于典型的老龄垃圾渗滤液。一期工程原采用两级 A/O+MBR+RO 工艺处理垃圾渗滤液,由于进水水质与建设初期相比变化较大,生化处理系统难以稳定运行,出水氨氮和总氮浓度达标压力较大,并且外加碳源量不断增多,大大增加了运营方的运维成本和难度。相比传统硝化-反硝化脱氮工艺,部分亚硝化-厌氧氨氧化(Anammox)工艺能够在无碳源投加的情况下,高效低碳去除氨氮和总氮污染物,同时降低能耗和减少剩余污泥产量<sup>[3-4]</sup>。为了解决该垃圾填埋场存在的问题,运营方决定建设一套垃圾渗滤液厌氧氨氧化脱氮系统,用于减轻现有生化处理系统的脱氮压

力,降低运营成本。

1 工程项目概况

该垃圾渗滤液处理厂采用两级 A/O+MBR+RO 工艺,原设计处理规模为 250 m<sup>3</sup>/d,由于设备老化、进水水质变化等原因,在实际运行中为确保系统稳定运行,降低了处理量,目前整套系统的实际处理量约为 150 m<sup>3</sup>/d。结合现有厂区情况与水质条件,新增的厌氧氨氧化脱氮系统决定采用前置反硝化-部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺,其中,前置反硝化的设置是为了去除垃圾渗滤液中含有的有机物和少量悬浮物,避免有机物对部分亚硝化和厌氧氨氧化反应器的运行造成影响。反应器采用搪瓷罐形式设计建设,反硝化反应器尺寸为 $\varnothing\times H=4.2\text{ m}\times 8.4\text{ m}$ ,有效容积约为 100 m<sup>3</sup>;亚硝化反应器尺寸为 $\varnothing\times H=7.0\text{ m}\times 8.4\text{ m}$ ,有效容积约为 250 m<sup>3</sup>;厌氧氨氧化反应器尺寸为 $\varnothing\times H=7.0\text{ m}\times 12\text{ m}$ ,有效容积约为 440 m<sup>3</sup>。厌氧氨氧化脱氮系统投产后可以增加厂区渗滤液处理能力,减轻现有生化处理系统的脱氮压力,降低运营成本。

1.1 设计水质

厌氧氨氧化脱氮系统设计处理垃圾渗滤液原液 132 m<sup>3</sup>/d,设计进水水质如表 1 所示。

表 1 设计进水水质

Tab.1 Design influent quality

项目	pH	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )
垃圾渗滤液原液	7.5~8.8	5 000~7 000	≤2 500	2 500~4 000	3 000~4 500
一级 A/O 出水	7.0~8.0	1 300~1 800	≤100	10~50	150~200

1.2 工艺流程

工艺流程如图 1 所示。受限于场地布置,结合两级 A/O 运行情况,将一级 A/O 出水与垃圾渗滤液原液按 10:1~5:1 的比例混合后,进入前置反硝化反应器进行脱氮除碳处理;混合进水经反硝化反应器去除垃圾渗滤液中的大部分 BOD 后,进入到沸石-曝气生物滤池(ZBAF)进行部分亚硝化处理,处理后 ZBAF 出水中亚硝态氮与氨氮之比为 1.0~1.4;然后再进入到 Anammox 反应器进行脱氮处理,Anammox 出水流入二级 A/O 池进行进一步的生化处理。ZBAF 与 Anammox 反应器设置有内回流泵,ZBAF 通过罗茨风机进行曝气供氧,Anammox 反应器单独投

加营养液。

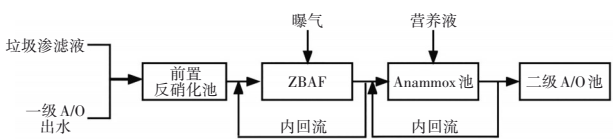


图 1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process

1.3 分析项目与方法

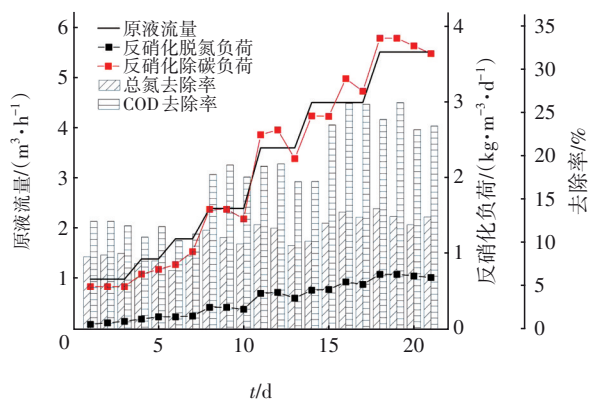
$\text{NH}_4^+-\text{N}$ : 纳氏试剂分光光度法;  $\text{NO}_2^--\text{N}$ :  $\text{N}-(1-\text{萘基})-\text{乙二胺}$  分光光度法;  $\text{NO}_3^--\text{N}$ : 紫外分光光度法;  $\text{TN}$ : 碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;  $\text{COD}$ : 重铬酸钾滴定法;  $\text{pH}$ : 便携式  $\text{pH}$  计; 溶解氧: 哈希 HQ-30d 溶氧仪。

## 2 结果与分析

### 2.1 反硝化与亚硝化的启动

由于有机物对亚硝化菌和厌氧氨氧化菌活性有很大影响<sup>[5-7]</sup>,且亚硝化出水水质达到厌氧氨氧化进水水质要求才可以进行 Anammox 反应器调试,因此本次调试思路为先启动反硝化与 ZBAF,待具备 Anammox 反应器调试条件后再启动 Anammox 反应器。具体做法如下:将反硝化反应器加满 A<sub>1</sub> 反应池(一级 A/O 中的 A 池)内的泥水混合物,一级 A/O 出水与垃圾渗滤液原液按 10:1 的比例混合后进入反硝化反应器开始启动反硝化,启动期内视出水情况提高进水流量与流量比;反硝化出水部分进入 ZBAF 启动亚硝化,ZBAF 在前 3 d 以吸附状态运行,随后投加 O<sub>1</sub> 反应池(一级 A/O 中的 O 池)污泥闷曝 5 d 进行挂膜,挂膜成功后按亚硝化负荷调控进水流量与曝气量,使 ZBAF 出水的亚硝态氮与氨氮之比为 1.0~1.4。

由于反硝化接种污泥为 A<sub>1</sub> 池污泥,进水后即观察到反硝化现象[见图 2(a)],随着进水流量不断提升,反硝化负荷亦不断提高。由于反硝化出水总氮浓度远高于氨氮浓度[见图 2(b)],推断限制反硝化效率的主要原因是进水 BOD 浓度低,因此在第 8 和 15 天将混合进水流量比分别调整为 7:1 和 5:1,以提高反硝化混合进水 BOD 浓度。调整流量比后反硝化混合进水 COD 浓度升高,而出水 COD 浓度变化不大[见图 2(c)],这表明反硝化去除的 BOD 量增多,同时反硝化的总氮去除率也从 8.1% 升高到 13.0%。随着进水流量的提高,反硝化脱氮除碳负荷也随之增加,启动 21 d 后反硝化脱氮负荷达到 0.71 kg/(m<sup>3</sup>·d),渗滤液原液处理量达到 132 m<sup>3</sup>/d,达到了设计目标。



a. 整体处理效果

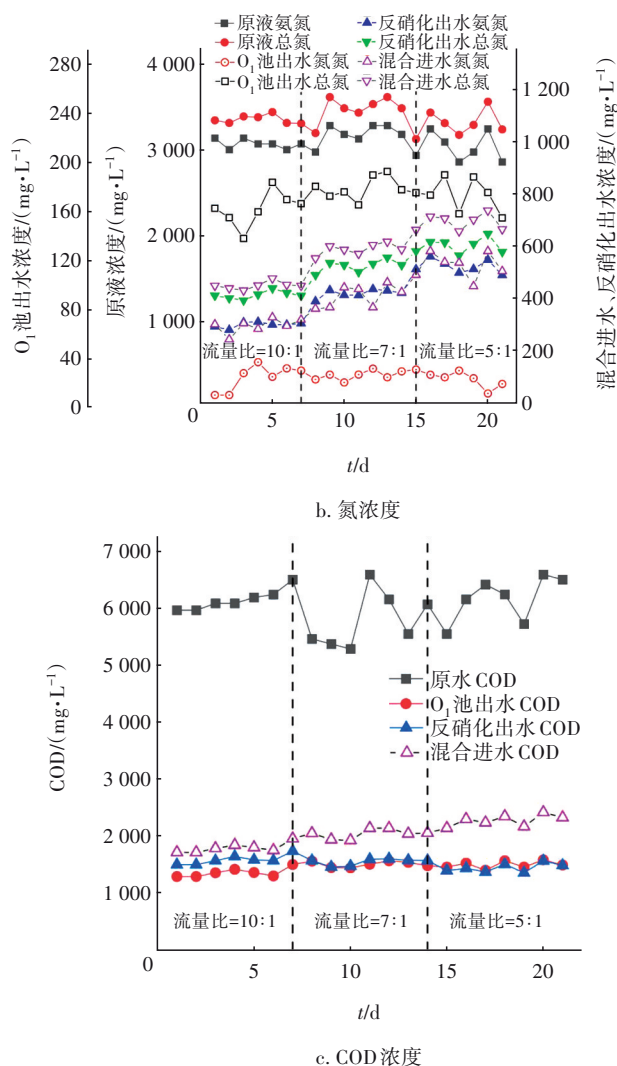


图2 启动阶段反硝化运行情况

Fig.2 Denitrification operation at start-up stage

ZBAF 的启动情况如图 3 所示。启动前 3 d ZBAF 出水氨氮浓度较低,主要是因为沸石起到了吸附氨氮的作用。自第 4 天起 ZBAF 进行闷曝挂膜,出水中开始检测到亚硝态氮,出水硝态氮浓度明显升高,这表明污泥硝化活性较好,而亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)在游离氨(FA)抑制作用下活性减弱<sup>[6-7]</sup>,ZBAF 表现出亚硝化能力。由于沸石的吸附-解吸氨氮作用<sup>[8-9]</sup>,在闷曝阶段 ZBAF 出水氨氮浓度较低,出水亚硝态氮浓度则从 5 mg/L 升高至 79 mg/L。随着沸石表面逐渐形成生物膜,闷曝阶段 ZBAF 的亚硝化负荷不断升高。因此第 9 天开始连续进水,ZBAF 出水氨氮浓度迅速升高,对 NO<sub>B</sub> 的抑制也进一步增强,出水硝态氮浓度显著降低,亚硝化率升高。第 12 天,ZBAF 出水亚硝态氮与氨氮之比达到



1.16,这标志着ZBAF已成功实现对垃圾渗滤液的部分亚硝化处理。启动阶段后期ZBAF出水硝态氮浓度低于进水,这可能是因为渗滤液经过好氧处理后可生化性提高,在沸石层缺氧区出现反硝化反应。完成部分亚硝化启动后,通过调控进水负荷与曝气量,ZBAF出水亚硝态氮与氨氮之比能够稳定保持在1.0~1.4之间,达到了启动Anammox反应器的水质条件。

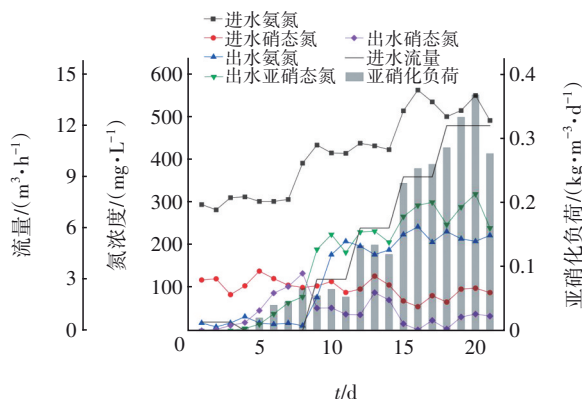
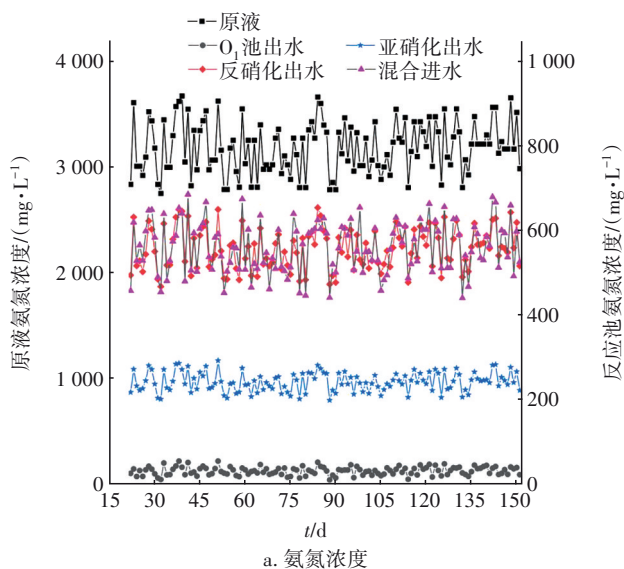


图3 启动阶段ZBAF运行情况

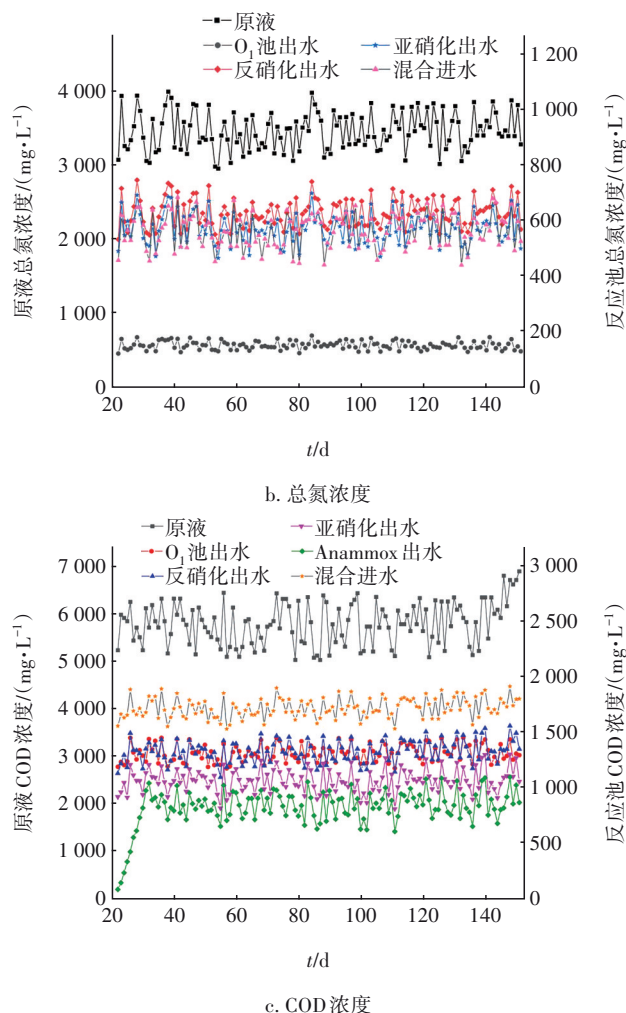
Fig.3 ZBAF operation at start-up stage

## 2.2 各反应器的长期运行情况

反硝化与ZBAF亚硝化启动完成后,第22天向Anammox反应器投加厌氧氨氧化菌进行启动,初始进水流量为2 m³/h,停留时间为225 h,根据出水浓度调整进水流量。反硝化总进水流量保持在33 m³/h,ZBAF进水流量维持在12 m³/h,第100天后ZBAF出水完全进入Anammox反应器。各反应器的进出水质变化情况如图4所示。



a. 氨氮浓度



c. COD浓度

图4 各反应器的进出水质变化情况

Fig.4 Change in influent and effluent quality of each reactor

从图4(a)和(b)可以看出,渗滤液原液与O<sub>2</sub>池出水混合后进入反硝化反应器,反硝化出水氨氮浓度降至500~700 mg/L,总氮浓度则大约在550~750 mg/L,这说明流量比为5:1时能保障反硝化进水硝态氮充足,提高反硝化的碳源利用率。反硝化出水经ZBAF亚硝化处理后,氨氮浓度降至200~250 mg/L,总氮降至500~600 mg/L,COD亦从1100~1500 mg/L降至900~1300 mg/L[见图4(c)],这表明在长期运行过程中,ZBAF内已形成稳定的亚硝化-反硝化耦合体系。

图5为Anammox反应器启动过程的氮负荷和氮浓度变化。从图5(a)可以看出,厌氧氨氧化前期进水总氮负荷增长速度较慢,为了加速启动度过前期低负荷期,在第37和58天分别投加厌氧氨氧化菌。由于厌氧氨氧化菌的低增长速度特性,启动期过半

时 Anammox 反应器的总氮去除负荷只有  $0.22 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 如何快速度过厌氧氨氧化低负荷阶段将是未来厌氧氨氧化工程化应用的研究重点。启动期负荷提升策略较为保守, 前 100 d 总氮平均去除率为 81.26%, 出水氨氮与亚硝态氮浓度均低于  $50 \text{ mg/L}$ , 有效避免了启动阶段出现基质浓度过高而导致厌氧氨氧化菌活性受到抑制<sup>[10-11]</sup>, 如图 5(b) 所示。

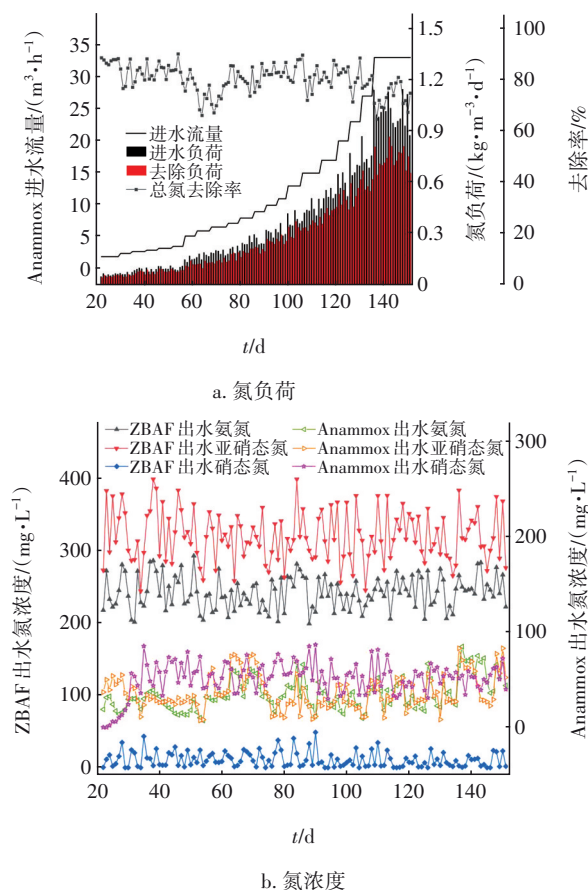


图5 厌氧氨氧化反应器中氮负荷和氮浓度的变化

Fig.5 Change in nitrogen load and nitrogen concentration in Anammox reactor

满负荷运行阶段(115~130 d), Anammox 反应器进水和出水总氮平均浓度分别为  $587$ 、 $156 \text{ mg/L}$ , 总氮平均去除率为 73.3%, 平均总氮去除负荷为  $0.74 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 实现了高效节能去除垃圾渗滤液中氮污染物的目标。整个启动期 Anammox 反应器出水硝态氮平均浓度只比进水高  $30.15 \text{ mg/L}$ , 低于理论应产生的硝态氮值( $53.68 \text{ mg/L}$ )<sup>[12]</sup>, 表明在 Anammox 系统中依然存在较微弱的反硝化作用, 这与图 4(c) 中 Anammox 反应器出水 COD 浓度低于 ZBAF 出水 COD 浓度相对应。

## 2.3 成本分析

该厌氧氨氧化脱氮系统的运行费用主要由营养液消耗与电耗构成。取以设计流量运行的 15 d 数据进行成本核算。该厌氧氨氧化脱氮系统全天运行的设备有: 污水提升泵 4 台、总功率为  $8.8 \text{ kW}$ , 回流泵 2 台、总功率为  $18.7 \text{ kW}$ , 罗茨风机 1 台、功率为  $30 \text{ kW}$ , 日均耗电量为  $1380 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 电价按  $0.7 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  计。Anammox 反应器需要投加专属营养液, 日均消耗量为  $100 \text{ kg}$ , 单价按  $15 \text{ 元}/\text{kg}$  计。计算得到整套厌氧氨氧化脱氮系统日均运行费用为  $2466 \text{ 元}$ , 日处理垃圾渗滤液原液  $132 \text{ m}^3$ 、去除总氮  $444 \text{ kg}$ , 则去除单位 TN 的成本为  $5.55 \text{ 元}/\text{kg}$ 。原生化系统日处理垃圾渗滤液  $150 \text{ m}^3$ 、去除总氮  $523 \text{ kg}$ , 生化系统工艺段全天运行的设备总功率为  $118.7 \text{ kW}$ , 日均耗电量为  $2848.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 药剂乙酸钠日均消耗  $4.3 \text{ t}$ 、单价按  $3500 \text{ 元}/\text{t}$  计, 则原生化系统日均运行费用为  $16694 \text{ 元}$ , 去除单位 TN 的成本为  $31.92 \text{ 元}/\text{kg}$ 。由于厌氧氨氧化系统无需投加外碳源, 处理垃圾渗滤液这类高氨氮低碳氮比废水可以节约大量药剂费用, 与原生化处理系统相比, 厌氧氨氧化系统可节约 54.0% 的能耗和 82.6% 的处理费用。

## 3 结论

① 将一级 A/O 出水与垃圾渗滤液原液按比例混合, 可以通过反硝化去除垃圾渗滤液中的 BOD, 满足后续亚硝化和厌氧氨氧化反应器的进水水质要求。

② 采用沸石-曝气生物滤池可以快速启动亚硝化, 通过调控进水负荷与曝气量可以实现亚硝化出水满足厌氧氨氧化反应器的进水水质要求。

③ 经过反硝化处理后的垃圾渗滤液, 在亚硝化与厌氧氨氧化反应器中会有少部分 COD 被转化为 BOD, 导致亚硝化与厌氧氨氧化反应器内存在微弱的反硝化作用。

④ 通过多次投加厌氧氨氧化菌和控制出水浓度的策略, 可以较快启动厌氧氨氧化反应器; 经过前置反硝化-亚硝化处理后的垃圾渗滤液, 可以通过厌氧氨氧化作用实现高效低碳脱氮的目的。

⑤ 对于该工程中的高氨氮低碳氮比老龄垃圾渗滤液, 相比传统的硝化-反硝化工艺, 厌氧氨氧化工艺可节约 54.0% 的能耗和 82.6% 的处理费用, 去除单位 TN 的成本仅为  $5.55 \text{ 元}/\text{kg}$ 。

## 参考文献:

- [1] 申雅静,刘慧婷,代文臣. 老龄化垃圾渗滤液处理技术研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(12): 170-171, 182.  
SHEN Yajing, LIU Huiting, DAI Wenchen. Research progress of mature landfill leachate treatment technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(12): 170-171, 182 (in Chinese).
- [2] NANDA S, BERRUTI F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19: 1433-1456.
- [3] MA B, WANG S Y, CAO S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 981-990.
- [4] 沈明玉,吴莉娜,李志,等. 厌氧氨氧化在废水处理中的研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 16-21.  
SHEN Mingyu, WU Lina, LI Zhi, *et al.* Research and application progress of anaerobic ammonium oxidation in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 16-21 (in Chinese).
- [5] LI J L, LI J W, PENG Y Z, *et al.* Insight into the impacts of organics on anammox and their potential linking to system performance of sewage partial nitrification-anammox (PN/A): a critical review [J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122655.
- [6] 陈小珍,汪晓军,Chayangkun Karasuta,等. 反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 345-352.  
CHEN Xiaozhen, WANG Xiaojun, KARASUTA Chayangkun, *et al.* Nitrogen removal from mature landfill leachate via denitrification-partial nitritation-ANAMMOX based on a zeolite biological aerated filter [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 345-352 (in Chinese).
- [7] 杨永愿,汪晓军,赵爽,等. 沸石曝气生物滤池短程硝化特性及其机制[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4518-4525.  
YANG Yongyuan, WANG Xiaojun, ZHAO Shuang, *et al.* Partial nitrification performance and mechanism of zeolite biological aerated filter for ammonium wastewater treatment [J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4518-4525 (in Chinese).
- [8] WANG R X, WANG X J, DENG C L, *et al.* Partial nitritation performance and microbial community in sequencing batch biofilm reactor filled with zeolite under organics oppression and its recovery strategy [J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123031.
- [9] 周松伟,汪晓军,郑旭文,等. 沸石强化SBR处理印染丝光高氨氮废水[J]. 水处理技术, 2020, 46(9): 98-103.  
ZHOU Songwei, WANG Xiaojun, ZHENG Xuwen, *et al.* Zeolite enhanced SBR for high ammonia dyeing mercerizing wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(9): 98-103 (in Chinese).
- [10] 丁爽,郑平,毕竑,等. 基质性毒物对厌氧氨氧化富集培养物的单独和联合抑制效应[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 2936-2943.  
DING Shuang, ZHENG Ping, BI Hong, *et al.* Independent and joint inhibition effects of substrate-toxicants on anaerobic ammonia oxidation (anammox) enrichment culture [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 2936-2943 (in Chinese).
- [11] 唐崇俭,郑平,陈小光. 厌氧氨氧化工艺的基质抑制及其恢复策略[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4): 561-570.  
TANG Chongjian, ZHENG Ping, CHEN Xiaoguang. Substrate inhibition and recovery strategies for Anammox process [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 561-570 (in Chinese).
- [12] 冯叶成,王建龙,钱易. 生物脱氮新工艺研究进展[J]. 微生物学通报, 2001, 28(4): 88-91.  
FENG Yecheng, WANG Jianlong, QIAN Yi. Research progress of new biological denitrification technology [J]. Microbiology China, 2001, 28(4): 88-91 (in Chinese).

**作者简介:**姜元臻(1983- ),男,山东青岛人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为水污染控制理论及治理工程。

**E-mail:** 108634722@qq.com

**收稿日期:** 2023-02-20

**修回日期:** 2023-05-09

(编辑:刘贵春)