

颜加兴, 顾群, 邓宇, 等. 硅藻土复合粉末载体在城镇污水处理中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(3):106–112.

YAN J X, GU Q, DENG Y, et al. Application of diatomite-based composite powder carrier in municipal wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3):106–112.

硅藻土基复合粉末载体在城镇污水处理中的应用

颜加兴¹, 顾群¹, 邓宇¹, 易境¹, 柴晓利², 戴晓虎^{2,*}

(1. 湖南三友环保科技有限公司, 湖南长沙 410205; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 以硅藻土作为微生物载体、硫铁矿作为替代碳源功能材料, 经湿式方法复合得到复合粉末载体。通过扫描电子显微镜(SEM)对复合粉末载体的微观结构进行观测, 发现硫铁矿紧密吸附在硅藻土表面上和孔隙内, 投加后其表面大量附着生物膜。在长沙某水质净化厂进行了复合粉末载体用于实际城镇污水处理中试试验, 试验结果表明, 在进水 BOD_5/TN 均值不足 2.0、生化池水力停留时间仅为 4.37 h、后端无深度处理的条件下, 中试系统主要出水水质指标 $COD_{Cr} < 30$ mg/L、氨氮 < 1.5 mg/L、 $TN < 10$ mg/L、 $TP < 0.70$ mg/L, 与厂区基本相同; 同时污泥沉降性能得到改善, 污泥的 SV_{30} 和 SVI 均值分别为 45% 和 46.7 mL/g。复合粉末载体可强化脱氮除磷, 在不增加生化单元占地面积的条件下, 实现污水处理能力大幅提升。

关键词 硅藻土 硫铁矿 复合粉末载体 城镇污水处理 污泥沉降性能

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)03-0106-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.03.013

Application of Diatomite-Based Composite Powder Carrier in Municipal Wastewater Treatment

YAN Jiaking¹, GU Qun¹, DENG Yu¹, YI Jing¹, CHAI Xiaoli², DAI Xiaohu^{2,*}

(1. Hunan Sanyou Environmental Protection Co., Ltd., Changsha 410205, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Diatomite as microbial carrier and pyrite as carbon source functional material, the composite powder carrier was prepared by wet method. The microstructure of composite powder carrier observation by scanning electron microscope show that pyrite was tightly adsorbed on the surface and in the pores of diatomite, and lots of biomembranes on the surface of the composite powder carrier after added. The pilot-scale test was carried out in a wastewater treatment plant (WWTP) in Changsha, which aimed to treat municipal wastewater by add composite powder carrier. The experimental result showed that under the conditions that the mean BOD_5/TN of influent was less than 2.0, the HRT of biochemical tank was only 4.37 h and no further treatment at the back end, and the main effluent quality indices of the pilot-scale test were basically the same as the WWTP ($COD_{Cr} < 30$ mg/L, ammonia nitrogen < 1.5 mg/L, $TN < 10$ mg/L, $TP < 0.70$ mg/L). At the same time, the sludge settle performance was improved, and the mean SV_{30} and SVI of sludge were 45% and 46.7 mL/g respectively. The composite powder carrier can enhance efficiency of nitrogen and phosphorus removal, and improve the capacity of wastewater treatment greatly without increasing the area of biochemical unit.

Keywords diatomite pyrite composite powder carrier municipal wastewater treatment sludge settle performance

目前, 城镇污水处理厂提标与扩容改造技术, 普

遍存在占地面积大、投资运行费用偏高等问题。高浓度复合粉末载体生物流化床 (high concentration powder carrier bio-fluidized bed, HPB) 技术可在不增加现有生化单元占地面积的条件下, 实现污水处理厂同步提标与扩容^[1-2]。该技术通过向生化池中投加复合粉末载体, 提高生化池混合液浓度的同时, 构建悬浮生长和附着生长“双泥”共生的微生物系

[收稿日期] 2021-10-20

[基金项目] 流域水体污染控制与生态修复集成核心技术攻关 (2019GK4004); 湘江流域多源有机固废生物转化集成技术研究 (2020WK2024)

[作者简介] 颜加兴 (1992—), 男, 硕士, 研究方向为水处理用载体的开发及应用, E-mail: yanjiaking@sanyouep.cn。

[通信作者] 戴晓虎, E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn。

统^[1-2]。复合粉末载体是由较大当量粒径微生物载体和微米级替代碳源功能材料复合而成^[1-2]。微生物载体具有比表面积大、生物亲和性好和化学稳定性好等特点,如硅藻土、膨胀珍珠岩、粉末沸石等^[1-4]。

城镇污水处理厂在进水碳源不足的情况下,为使处理后排放出水的总氮(TN)达标,通常需要投加碳源,为反硝化微生物提供电子供体,以强化生物脱氮,虽然脱氮效果较好,但需要投加大量碳源,且污泥产量高^[5-7]。硫自养反硝化技术是指某些微生物在缺氧或厌氧条件下利用还原态硫(S^0 、 S^{2-} 、 $S_2O_3^{2-}$)为自养反硝化提供电子的技术,该技术在脱氮过程中无需外加碳源,现已应用于处理低碳氮比的污染水体,如市政污水、地下水等。实际应用中大规模使用硫磺存在成本较高、容易造成二次污染等问题^[5-6]。硫铁矿(主要成分为 FeS_2)是一种天然硫化矿物,在地壳中含量丰富且主要以矿物加工厂选矿尾矿存在,价格低廉,可以作为电子供体,将 NO_3^- 还原为 N_2 ,但是硫铁矿密度较大,在污水中易沉积而不易被微生物利用,造成反应启动慢且脱氮性能差^[8-14]。

本研究针对以上问题,将硫铁矿作为替代碳源功能材料与微生物载体硅藻土复合得到复合粉末载体,通过开展中试试验,探究该复合粉末载体在城镇污水处理中的应用情况,为城镇污水处理用复合粉末载体发展提供指导,同时对污水处理厂深度处理与提标扩容改造技术发展提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究中用于制备复合粉末载体的硅藻土取自临江某硅藻土加工厂,其理化性能指标如下:二氧化硅含量为85.96%,比表面积为 $17.75\text{ m}^2/\text{g}$,当量粒径为 $20\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,真密度为 $2.08\text{ g}/\text{cm}^3$ 。硫铁矿取

自长沙某矿业公司,其理化性能指标如下:硫含量为46.49%,铁含量为41.00%,当量粒径为 $10\sim 100\text{ }\mu\text{m}$,真密度为 $4.97\text{ g}/\text{cm}^3$ 。中试试验进水取自长沙某水质净化厂,进水 BOD_5/TN 如图1所示,进水 BOD_5/TN 均值为1.96,且波动性较大,是典型的低碳氮比水质。

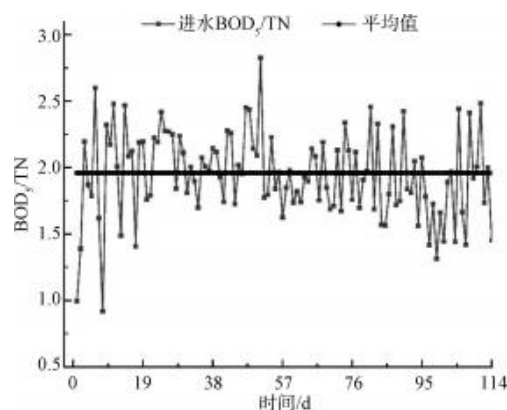


图1 进水 BOD_5/TN

Fig. 1 BOD_5/TN of Influent

1.2 试验方法

1.2.1 复合粉末载体的制备

先采用砂磨机将硫铁矿研磨至当量粒径为 $1\sim 3\text{ }\mu\text{m}$,再将硫铁矿、硅藻土和水按 $1:10:20$ 的质量配比进行混合,混合浆液搅拌均匀后静置沉降、过滤,滤饼在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 4 h 后再自然冷却至室温即得到复合粉末载体。

1.2.2 城镇污水处理中试试验

中试试验选用HPB技术与AAO工艺结合,构成复合生物反应器来进行模拟,中试装置主要包括生化池、二沉池和回收系统,工艺流程如图2所示。生化池为 $1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}\times 1.45\text{ m}$ (有效水深)的钢制反应容器,有效容积为 2.842 m^3 ,均分为4格,其中厌氧池中上部设置挡板,上下容积比例约为

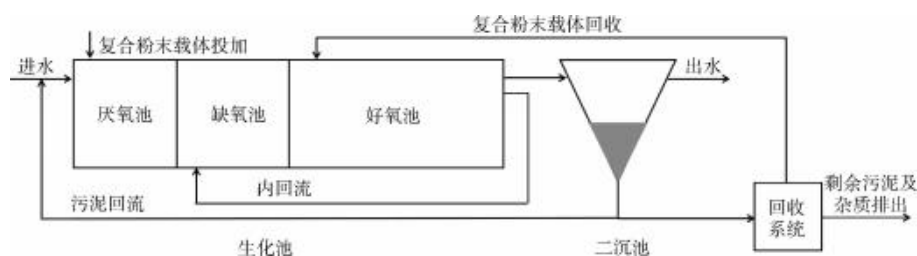


图2 中试试验工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Pilot-Scale Test

0.79:1;二沉池采用钢制“中进周出”形式的辐流式沉淀池,直径为0.85 m,有效沉淀面积约为0.57 m²,有效容积约为1.99 m³;后端设置回收系统,在剩余污泥中回收复合粉末载体,节省运行成本以及增强系统处理效果。

中试试验进水取自长沙市某水质净化厂,BOD₅/TN 均值不足2,是典型的低碳氮比水质。该水质净化厂通过投加乙酸钠维持生化系统脱氮效果,生化池平均水力停留时间为11.52 h。中试系统通过提高进水流量、缩短停留时间来模拟处理水量倍增,生化池水力停留时间为4.37 h。中试系统与厂区(氧化沟+MBR 组合工艺)生化段工艺参数对比如表1所示。

表1 中试与厂区生化段工艺参数对比
Tab. 1 Comparison of Biochemical Section Parameters between Pilot-Scale Test and WWTP

参数	中试	厂区
处理规模/(m ³ ·d ⁻¹)	15.6	8×10 ⁴
生化池总停留时间/h	4.37	11.52
厌氧池停留时间/h	0.48	1.04
缺氧池停留时间/h	0.61	1.61
好氧池停留时间/h	3.28	8.87
溶解氧控制/(mg·L ⁻¹)	2.0~3.0	2.0~3.0
污泥质量浓度/(mg·L ⁻¹)	8 000~10 000	3 500~5 000
内回流比	100%	100%
外回流比	60%	60%

表2 中试设计出水水质标准
Tab. 2 Effluent Quality Standard of Pilot-Scale Test

标准	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
出水水质	30	10	1.5	10	0.7
湖南省地标一级	30	10	1.5	10	0.3

2 结果与讨论

2.1 复合粉末载体微观结构分析

微生物载体和复合粉末载体投加前与投加后的SEM如图3所示,微生物载体[图3(a)]呈圆筛状,结构完整,孔隙较多,可为微生物提供多处附着位点,利于微生物生长繁殖;复合粉末载体[图3(b)]中硫铁矿紧密吸附在当量粒径为20~50 μm的硅藻土表面上和孔隙内;复合粉末载体投加后[图3(c)],其表面大量附着生物膜。复合粉末载体在采用湿式方法复合时主要利用了微生物载体硅藻土较

中试试验分为以下3个阶段。

第一阶段(第1~14 d),接种该水质净化厂好氧池末端混合液,并在厌氧池投加微生物载体硅藻土(50 mg/L)进行培养,将污泥质量浓度由3 500~5 000 mg/L提升至8 000~10 000 mg/L,MLVSS 占比由0.45调整至0.23,通过投加微生物载体和调节排泥量共同控制。

第二阶段(第15~28 d),在厌氧池投加复合粉末载体(50 mg/L),进行硫自养反硝化菌微生物培养,并通过回收系统对复合粉末载体进行回收。截至第28 d,复合粉末载体挂膜成熟,污泥质量浓度稳定在8 000~10 000 mg/L,MLVSS 占比由0.23提升至0.27,进入稳定运行期。

第三阶段(第29~114 d),稳定运行,经检测MLSS 每日减少量约为100 g,计算后调整复合粉末载体日常补充量为80 g(约5 mg/L),稳定运行期间设计出水标准如表2所示。

1.3 分析项目与测定方法

采用扫描电子显微镜(SEM)观察复合粉末载体微观结构。常规水质指标测定:COD_{Cr}采用预制试剂快速密闭消解法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定。污泥性能指标测定:MLSS和MLVSS采用重量法测定;SV₃₀采用静置沉降法测定。

大的表面能,复合粉末载体既具有比表面积大、利于微生物附着生长等优点,又可为功能微生物提供电子供体,优化生化池微生物群落结构,促进反硝化作用。复合粉末载体的真密度为2.36 g/cm³,在挂膜成熟后能悬浮于水中,不需任何支架或其他固定方式,可随活性污泥一起在生物池中流化,有效解决了硫铁矿因比重大易沉降、难被微生物利用等问题。

2.2 COD_{Cr}

中试系统与厂区COD_{Cr}处理效果对比如图4所示,进水COD_{Cr}均值均为124 mg/L,中试系统稳定



图3 (a)微生物载体、(b)复合粉末载体投加前与(c)复合粉末载体投加后 SEM

Fig. 3 SEM Pictures of (a) Microbial Carrier, (b) before Composite Powder Carrier Added and (c) after Composite Powder Carrier Dosing

运行期间(Ⅲ)出水 COD_{Cr} 均值为 8 mg/L , 平均去除率约为 93.5% , 同期厂区出水 COD_{Cr} 均值为 8 mg/L , 平均去除率约为 93.5% 。中试系统在生化池水力停留时间仅为 4.37 h 时与厂区 COD_{Cr} 处理效果持平, 出水 COD_{Cr} 稳定达到湖南省地标一级标准 ($\text{COD}_{\text{Cr}} \leq 30 \text{ mg/L}$)。相比厂区, 中试系统微生物的数量较高, 抗冲击能力更强, 在水力停留时间减半的情况下, 出水 COD_{Cr} 波动较小, 稳定性好。

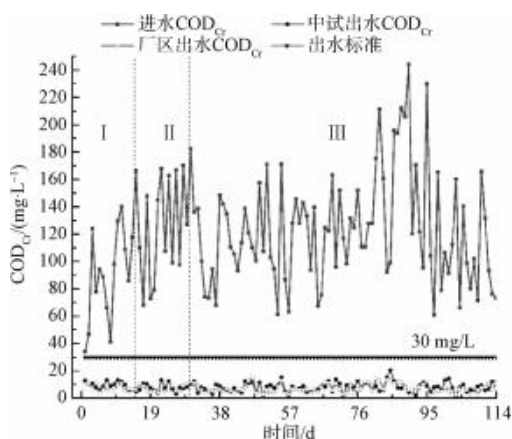


图4 中试系统与厂区 COD_{Cr} 处理效果对比

Fig. 4 Comparison of COD_{Cr} Treatment Effect between Pilot-Scale Test and WWTP

2.3 氨氮

中试系统与厂区氨氮处理效果对比如图 5 所示, 进水氨氮均值均为 12.70 mg/L , 中试系统稳定运行期间(Ⅲ)出水氨氮均值为 0.14 mg/L , 平均去除率约为 98.9% , 同期厂区出水氨氮均值为 0.16 mg/L , 平均去除率约为 98.7% 。中试系统在生化池水力停留时间仅为 4.37 h 时与厂区氨氮处理效果基本持平, 出水氨氮稳定达到湖南省地标一级标准 (氨氮 $\leq 1.5 \text{ mg/L}$)。宋珊珊等^[15]基于 AAO 工艺进

行了试验, 发现在 1.5 倍水力冲击的情况下, 出水氨氮有明显的上升, 说明 HRT 的减少不利于硝化反应的进行。中试系统在投加复合粉末载体后, 抗冲击能力强, 出水氨氮波动小, 稳定性好。

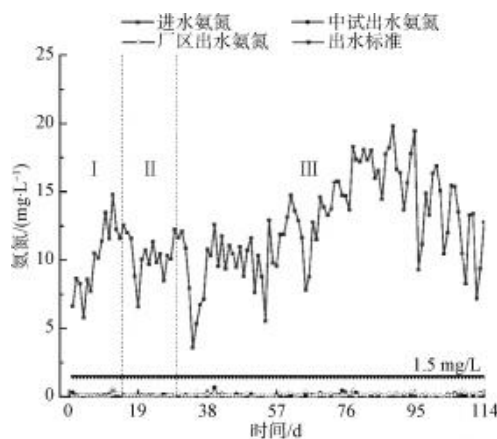


图5 中试系统与厂区氨氮处理效果对比

Fig. 5 Comparison of Ammonia Nitrogen Treatment Effect between Pilot-Scale Test and WWTP

2.4 TN

中试系统与厂区 TN 处理效果对比如图 6 所示, 进水 TN 均值均为 15.70 mg/L , 中试系统稳定运行期间(Ⅲ)出水 TN 均值为 7.19 mg/L , 平均去除率约为 54.2% , 同期厂区出水 TN 均值为 7.39 mg/L , 平均去除率约为 52.9% 。中试系统在第 $1 \sim 14 \text{ d}$ (I), 仅投加了微生物载体硅藻土, TN 去除率明显低于厂区实际生产状况, 于第 15 d 进行复合粉末载体投加, 第 29 d 开始中试系统出水 TN 出现明显的降低, 在无外加碳源以及生化池水力停留时间不足厂区一半的情况下, 出水 TN 可稳定达到湖南省地标一级标准 ($\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$), 较厂区同期 TN 去除率提升 1.3% , 说明投加复合粉末载体可强化污水处理脱氮效果, 提高脱氮速率。

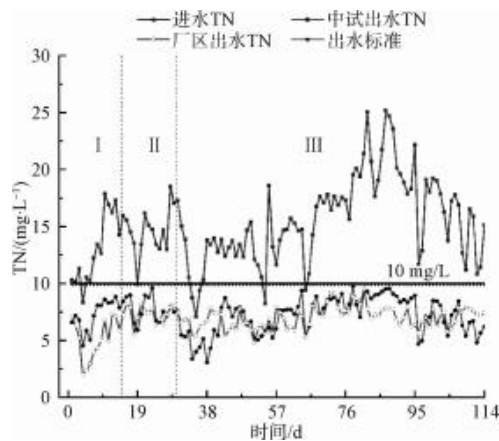
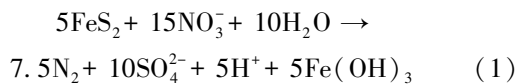


图6 中试系统与厂区 TN 处理效果对比

Fig. 6 Comparison of TN Treatment Effect between Pilot-Scale Test and WWTP

复合粉末载体中低价态的硫元素和 Fe^{2+} 可作为电子供体^[9,16],将 NO_3^- 还原为 N_2 ,以硫铁矿为硫源及电子供体的自养反硝化化学计量式如式(1)^[16]。



2.5 TP

中试系统与厂区 TP 处理效果对比如图 7 所示,进水 TP 均值均为 3.36 mg/L,中试系统稳定运行期间(Ⅲ)出水 TP 均值为 0.50 mg/L,平均去除率为 85.1%,同期厂区经过后端处理出水 TP 均值为 0.20 mg/L,平均去除率约为 94.0%。虽然进水 TP 波动较大,但中试系统在无深度处理和复合粉末载体投加量仅为厂区除磷药剂 1/10 的条件下,出水 TP 能保持相对稳定,稳定控制在 0.70 mg/L 以下,

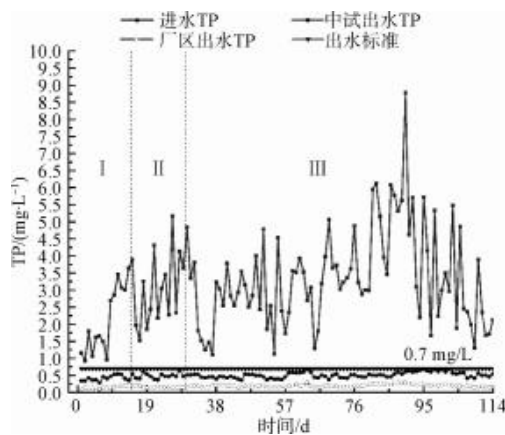
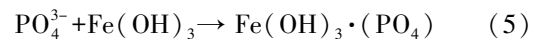
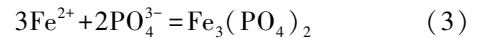


图7 中试系统与厂区 TP 处理效果对比

Fig. 7 Comparison of TP Treatment Effect between Pilot-Scale Test and WWTP

说明复合粉末载体有强化除磷的效果。

复合粉末载体强化除磷主要在两方面作用:一是通过硫铁矿在有氧条件下氧化产生的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 与水中 PO_4^{3-} 形成铁磷化合物析出,反应如式(2)~式(3)^[16-17];二是 Fe^{3+} 水解产生的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等羟基络合物,利用吸附和絮凝等作用,强化磷的去除,反应如式(4)~式(5)^[16-17]。



2.6 SS

中试系统与厂区 SS 处理效果对比如图 8 所示,进水 SS 均值均为 302 mg/L,中试系统稳定运行期间(Ⅲ)出水 SS 均值为 2 mg/L,平均去除率约为 99.3%,同期厂区出水 SS 均值为 2 mg/L,平均去除率约为 99.3%。中试系统在无深度处理条件下与厂区 SS 去除率持平,出水 SS 质量浓度稳定在 1~3 mg/L,说明复合粉末载体可有效改善出水水质降低 SS。复合粉末载体中由硫铁矿氧化产生的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 水解产生的多核羟基络合物,具有混凝剂的作用,可吸附 SS 形成沉淀,强化 SS 的去除^[16-17]。

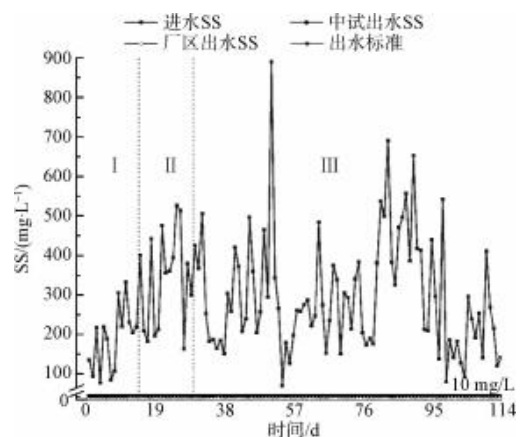


图8 中试系统与厂区 SS 处理效果对比

Fig. 8 Comparison of SS Treatment Effect between Pilot-Scale Test and WWTP

2.7 污泥沉降性能

SV_{30} 和 SVI 指数能够比较直观地反映污泥的凝聚沉降特性,为探究复合粉末载体对污泥沉降性能的影响,对厂区和中试系统的污泥性能及 SV_{30} 、

SVI 指数进行了测定分析。中试试验在 6 月—9 月, 水温波动较小, 对污泥沉降性能影响小, 中试系统稳

定运行期间(第 29 ~ 114 d)与厂区污泥 SV_{30} 和 SVI 指数变化趋势如图 9 所示。

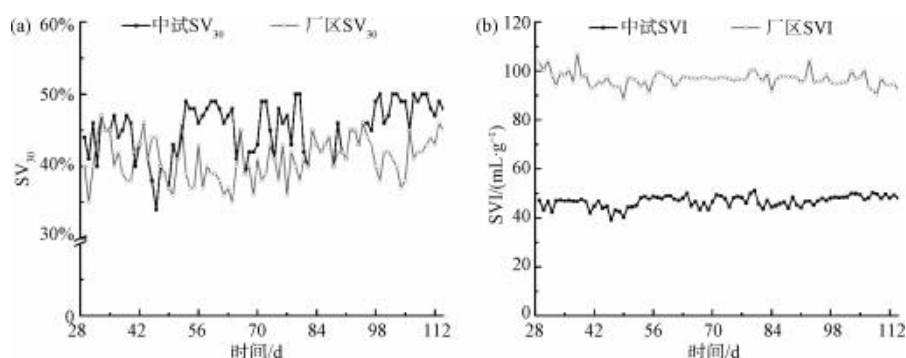


图 9 中试系统与厂区污泥(a) SV_{30} 和(b) SVI 对比

Fig. 9 Comparison of (a) SV_{30} and (b) SVI between Pilot-Scale Test and WWTP

对测定的厂区与中试污泥性能各参数数据取平均值进行对比, 如表 3 所示。厂区污泥的 SV_{30} 和 SVI 均值分别为 41% 和 96.6 mL/g, 中试系统污泥的 SV_{30} 和 SVI 均值分别为 45% 和 46.7 mL/g, 中试系统污泥的 SV_{30} 较厂区上升了 4%, 污泥浓度是厂区的 2 倍以上, SVI 值降低了 49.9 mL/g, 说明复合粉末载体可以使污泥的沉降性能得到改善。复合粉末载体属于较高密度无机材料, 可以调节污泥中无机和有机成分的比例, 使絮体更加密实, 利于沉降。

表 3 厂区和中试污泥性能

Tab. 3 Sludge Performance of WWTP and Pilot-Scale Test

项目	厂区	中试
MLSS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	4 245	9 639
MLVSS/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1 835	2 603
MLVSS/MLSS	0.43	0.27
SV_{30}	41%	45%
SVI/($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	96.6	46.7

2.8 剩余污泥产量

稳定运行期间(第 29 ~ 114 d), 每日记录中试系统排泥体积以及检测剩余污泥浓度。经计算, 中试系统产泥系数为 0.087 kg/m^3 , 厂区产泥系数为 0.081 kg/m^3 。中试系统与厂区产泥系数的差值约等于中试系统复合粉末载体的日常补充量(约 5 mg/L)。

3 结论与建议

(1) 复合粉末载体是由较大当量粒径微生物载体硅藻土和微米级替代碳源功能材料硫铁矿复合而成, 在制备时利用微生物载体硅藻土较大的表面能,

将微米级硫铁矿吸附在硅藻土表面上和空隙内, 复合粉末载体投加后其表面大量附着生物膜。复合粉末载体具有比表面积大、利于微生物附着生长等特点, 在挂膜成熟后能悬浮于水中, 不需任何支架或其他的固定方式, 可随活性污泥一起在生物池中流化, 有效解决了硫铁矿因比重大易沉积、不易被微生物利用、脱氮性能差等问题。

(2) 投加复合粉末载体处理低碳氮比城镇污水无需再投加碳源, 生化池水力停留时间为 4.37 h, 后端无深度处理, 出水水质指标 $\text{COD}_{\text{Cr}} < 30 \text{ mg/L}$ 、氨氮 $< 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} < 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} < 0.7 \text{ mg/L}$ 。复合粉末载体可强化生物脱氮除磷, 改善出水水质、降低水体 SS, 同时对污泥沉降性能改善起到积极作用。

(3) 复合粉末载体用于城镇污水处理, 可在不增加现有生化单元占地面积的条件下, 实现污水处理能力大幅提升, 同时实现在无碳源投加条件下的氮、磷等高标准排放。

(4) 复合粉末载体应用于城镇污水处理具有较大的应用潜力和较好的应用前景, 但复合粉末载体强化脱氮除磷的微生物学机理还需进一步研究。

参考文献

- [1] 牟悦, 柴晓利, 韩红波, 等. 城镇污水处理厂提标改造 HPB 技术中试研究[C]. 天津: 中国污水处理厂提标改造高级研讨会论文集, 2019.
MU Y, CHAI X L, HAN H B, et al. Pilot study on upgrading HPB technology of urban wastewater treatment plant [C]. Tianjin: Proceedings of the Advanced Seminar on Upgrading Wastewater Treatment Plants in China, 2019.
- [2] 柴晓利, 韩红波, 张宏亮, 等. HPB 工艺用于污水厂提标扩容

- 改造的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 9-15.
- CHAI X L, HAN H B, ZHANG H L, et al. Full-scale test of HPB process applied in upgrading and capacity expansion of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 9-15.
- [3] 柴晓利, 易境, 牟悦, 等. 一种城镇污水处理用复合粉末载体的制作方法: CN110627195B[P]. 2021-01-01.
- CHAI X L, YI J, MU Y, et al. A preparation method of composite powder carrier for urban wastewater treatment; CN110627195B[P]. 2021-01-01.
- [4] 王学凯, 王金淑, 杜玉成, 等. 硅藻土功能化及其应用[J]. 材料导报, 2020, 34(2): 17-27.
- WANG X K, WANG J S, DU Y C, et al. Functionalization of diatomite and its applications[J]. Materials Reports, 2020, 34(2): 17-27.
- [5] 李文超, 石寒松, 王琦, 等. 硫自养反硝化技术在污水废水处理中应用研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(8): 1-6.
- LI W C, SHI H S, WANG Q, et al. Application progress of sulfur-autotrophic denitrification technology in wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(8): 1-6.
- [6] 徐康康, 闫慧娟, 崔有为. A²/O 硫自养反硝化处理低碳氮比废水计量学研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(7): 118-122.
- XU K K, YAN H J, CUI Y W. Metrological study on the treatment of wastewater with low carbon and nitrogen ratio by A²/O sulfur autotrophic denitrification[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(7): 118-122.
- [7] 袁飞, 马一行, 卫鸣志. 城镇污水处理厂强化生物脱氮除磷的工艺优化探索与应用[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 173-178.
- YUAN F, MA Y H, WEI M Z. Exploration and application of process optimization for enhanced biological nitrogen and phosphorus removal in municipal sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 173-178.
- [8] 周娅, 买文宁, 梁家伟, 等. 硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1885-1891.
- ZHOU Y, MAI W N, LIANG J W, et al. Nitrogen removal performance of a sulfur/pyrite autotrophic denitrification system [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1885-1891.
- [9] 汪秀仲, 柴晓利. 硫铁矿粉末在生活污水高浓度污泥工艺中的应用研究[J]. 山东化工, 2021, 50(2): 272-274.
- WANG X Z, CHAI X L. The application of pyrite powder in high-concentration activated sludge system treating municipal wastewater[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(2): 272-274.
- [10] YANG Y, CHEN T H, MORRISON L, et al. Nanostructured pyrrhotite supports autotrophic denitrification for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from secondary effluents[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 511-518. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.061.
- [11] TONG S, RODRIGUEZ-GONZALEZ L C, FENG C P, et al. Comparison of particulate pyrite autotrophic denitrification (PPAD) and sulfur oxidizing denitrification (SOD) for treatment of nitrified wastewater[J]. Water Science & Technology, 2017, 75(1/2): 239-246. DOI: 10.2166/wst.2016.502.
- [12] 张理泰, 杨长军, 余丹, 等. 硫自养反硝化用于深度处理脱氮的研究与进展[J]. 云南化工, 2020, 47(3): 1-6.
- ZHANG L T, YANG C J, YU D, et al. Research and progress of sulfur autotrophic denitrification for advanced treatment of nitrogen removal[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(3): 1-6.
- [13] 马潇然, 郑照明, 卞伟, 等. 硫自养反硝化系统运行效能和微生物群落结构研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4335-4341.
- MA X R, ZHENG Z M, BIAN W, et al. Study on operation efficiency and microbial community structure of sulfur-based autotrophic denitrification system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(10): 4335-4341.
- [14] 孟宪瑜, 高起鹏, 秦贵杰, 等. 某伴生铜锌硫铁矿选矿试验研究[J]. 有色矿冶, 2018, 34(6): 26-34.
- MENG X Y, GAO Q P, QIN G J, et al. Experiment research on mineral processing of a pyrite ore associated copper and zinc[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2018, 34(6): 26-34.
- [15] 宋姗姗, 谢震方, 白海梅, 等. 水量冲击对 AAO 系统中微生物群落结构的影响[J]. 净水技术, 2021, 40(s2): 94-101.
- SONG S S, XIE Z F, BAI H M, et al. Effects of high influent flow rate on microbial community structure in AAO process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s2): 94-101.
- [16] 钟佩琳, 曾宪霖, 侯静, 等. 硫铁矿自养脱氮技术研究进展[J]. 环境保护前沿, 2018(5): 389-395.
- ZHONG P L, ZENG X L, HOU J, et al. Research and progress of pyrite-based autotrophic denitrification [J]. Advances in Environmental Protection, 2018(5): 389-395.
- [17] 王梦雨, 邱仙辉, 袁勤智, 等. 硫铁矿在废水处理中的研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2020, 11(1): 78-84.
- WANG M Y, QIU X H, YUAN Q Z, et al. Research status of iron sulfide minerals in wastewater treatment [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2020, 11(1): 78-84.