

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.012

蜂巢石对 UASB 反应器启动性能的影响

张勇^{1,2}, 胡群林^{1,3}, 徐广松^{1,2}, 詹宇^{1,2}, 王慧^{1,2}

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 太湖县住房和城乡建设局, 安徽 安庆 246000)

摘要: 向厌氧系统中投加载体材料是促进反应器快速启动的有效手段,为此将蜂巢石投加到上流式污泥床反应器(UASB)中,研究蜂巢石对 UASB 反应器处理垃圾焚烧发电渗滤液启动性能的影响。结果表明,与未投加蜂巢石相比,投加蜂巢石的反应器可在 24 d 内完成启动,COD 去除率保持在 90% 以上,启动时间缩短了 10 d;反应器的产气性能得到显著提升,平均日产气量与产甲烷量分别提高 9.38% 和 9.81%;同时挥发性悬浮物/总悬浮物(VSS/TSS)与蛋白质平均含量分别提高 6.7%、21.4%,导致粒径大于 0.50 mm 的污泥占污泥总量的比例达 22.56%,远高于对照组的 7.39%,污泥在 15 d 内实现了颗粒化。

关键词: 蜂巢石; UASB; 厌氧颗粒污泥; 产气性能

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)21-0075-07

Effect of Pumice on Start-up of Upflow Anaerobic Sludge Blanket

ZHANG Yong^{1,2}, HU Qun-lin^{1,3}, XU Guang-song^{1,2}, ZHAN Yu^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Resuse, Hefei 230601, China; 3. Taihu County Housing and Urban - Rural Development Bureau, Anqing 246000, China)

Abstract: Adding carrier material to an anaerobic system is an effective way to accelerate the start-up of the reactor. In this work, pumice was added into an upflow anaerobic sludge blanket (UASB), and the effect of pumice on the start-up of the reactor for the treatment of leachate from a waste incineration power plant was investigated. Compared with the reactor without pumice, the reactor with pumice was started within 24 days, the COD removal efficiency remained above 90%, and the start-up time was shortened by 10 days. The gas yield performance of the reactor was significantly improved, and the average daily gas and methane yields were increased by 9.38% and 9.81%, respectively. At the same time, the ratio of VSS/TSS and the average content of protein increased by 6.7% and 21.4%, respectively, resulting in the portion of the sludge with particle size greater than 0.50 mm to the total sludge was 22.56%, which was much higher than that of the control group (7.39%). Therefore, the sludge was successfully granulated within 15 days.

基金项目: 安徽省高校自然科学研究项目(KJ2018ZD048); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408504); 中国科学院科技服务网络计划区域重点项目(KFJ-ST-S-QYZD-173)

通信作者: 张勇 E-mail: zhangy@ahjzu.edu.cn

Key words: pumice; UASB; anaerobic granular sludge; gas yield performance

厌氧生物处理技术能耗低、剩余污泥量少,同时污水中有机物能够分解为沼气等可再次利用的能源,是一种经济、高效的废水处理技术。但厌氧反应器一般存在启动时间长、污泥颗粒化进程慢、易发生酸化等问题,导致厌氧消化效率难以进一步提升甚至下降^[1-2]。有研究表明^[3-4],投加载体材料可以提高厌氧消化效率,明显缩短反应器的启动时间,促进厌氧颗粒污泥的形成。

载体材料具有多孔、比表面积大、吸附性能好等特点,能将微生物固定在载体材料表面,形成胚胎颗粒物,有助于颗粒污泥的形成^[5]。有学者^[3,6-7]向 UASB 反应器中投加生物炭、活性炭、壳聚糖等载体材料,发现这些载体材料可以通过形成生物膜来提供“晶核”,增强种间电子传递作用等方式促进污泥颗粒化进程,并缩短 UASB 反应器的启动时间。

目前,大多数研究均采用人工配水,应用实际废水的研究较少,而且一些载体存在价格高等问题。蜂巢石作为一种天然绿色的载体材料,是由火山喷发后的火山玻璃、矿物质和气泡形成的多孔石头,具有孔隙多、强度高、耐酸碱、耐腐蚀等特点,可以作为人工填料用于污、废水的处理,对 COD、TN、悬浮固体(SS)均有较高的去除率^[8-9]。因此,笔者采用经济环保、吸附性能更好的蜂巢石作为 UASB 反应器填料,以垃圾焚烧发电厂调节池的渗滤液为处理对象,研究投加蜂巢石对 UASB 反应器处理垃圾焚烧发电厂渗滤液启动时间及污泥颗粒化的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

UASB 实验装置如图 1 所示。

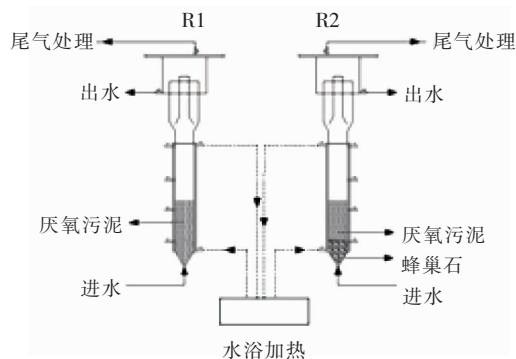


图 1 UASB 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of UASB device

两个 UASB 反应器材质均为有机玻璃,反应柱高 730 mm,总容积为 9.0 L,反应柱部分由水浴夹层将温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。废水从反应器底部进入,顶部有集气导管,气体流经导管由集气袋收集。对照组(R1)接种污泥量占反应器有效容积的 40%,实验组(R2)接种与对照组等量的污泥,同时投加粒径为 3~5 mm 的蜂巢石,占反应柱体积的 10%。

1.2 实验用水及接种污泥

新鲜垃圾渗滤液取自合肥市某垃圾焚烧发电厂调节池,具体水质指标:COD 为 58 000~72 000 mg/L, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为 2 000~3 200 mg/L, TP 为 70~110 mg/L, pH 值为 4.6~6.5;经过适当稀释后作为实验废水。接种污泥取自该厂污泥浓缩池,污泥含水率为 83.7%,挥发性悬浮物/总悬浮物(VSS/TSS)为 0.57。

1.3 运行方式

UASB 反应器采用低负荷高去除率启动方式^[10]。运行工况见表 1,初始水力停留时间(HRT)为 20 h,当 COD 去除率在 80% 以上且稳定运行 3~6 d 时,将 HRT 缩短至 18 h;为进一步考察 UASB 反应器的稳定性,当 COD 去除率在 $(90 \pm 1)\%$ 且稳定运行 3~6 d 时,将 HRT 缩短至 14 h。

表 1 反应器运行工况

Tab. 1 Operating conditions of the UASB system

运行 工况	运行时间/ d	HRT/h	COD 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	有机负荷率 (OLR)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)
工况一	28	20	850~1 800	0.51~1.05
工况二	28	18	1 800~8 700	1.56~5.80
工况三	12	14	9 300~10 500	7.98~8.94

1.4 分析项目及检测方法

COD、pH 值、挥发性脂肪酸(VFA)、VSS/TSS 参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)进行测定。甲烷含量采用便携式红外沼气分析仪测定,实验过程中产生的生物气体采用气袋收集,气体体积用 500 mL 的注射器测量^[11]。溶解性有机物(DOM)采用三维荧光光度计测定,具体参数设置和操作步骤与靳百川等^[12]相同。污泥粒径采用粒径分析仪测定,胞外聚合物(EPS)提取采用热提取法,多糖(PS)采用蒽酮硫酸法测定^[13],蛋白质(PN)采用

BCA 试剂盒测定。

2 结果与讨论

2.1 UASB 反应器启动过程中 COD 去除率的变化

COD 去除率及进水有机负荷的变化如图 2 所示。可以看出,随着反应器的运行,COD 去除率逐渐上升,运行至第 24 天时,R2 反应器的 COD 去除率稳定达到 90% 以上,UASB 反应器成功启动;运行至第 34 天时,R1 反应器的 COD 去除率稳定达到 $(90 \pm 1.2)\%$,UASB 反应器成功启动。为进一步考察 UASB 反应器的稳定性,缩短水力停留时间至 14 h,R1、R2 反应器的 COD 去除率仍然保持在 $(90 \pm 1.5)\%$ 。在 68 d 的运行过程中,R1、R2 反应器对 COD 的平均去除率分别为 77.61%、80.37%。与 R1 相比,R2 反应器的 COD 平均去除率提高了 3.6%,提前 10 d 完成 UASB 反应器的启动。同时,通过 SPSS 分析发现,R1 和 R2 的 COD 去除率具有显著性差异($p=0.008$)。综上可知,投加蜂巢石能缩短 UASB 反应器的启动时间,提升厌氧污泥对有机污染物的去除率。

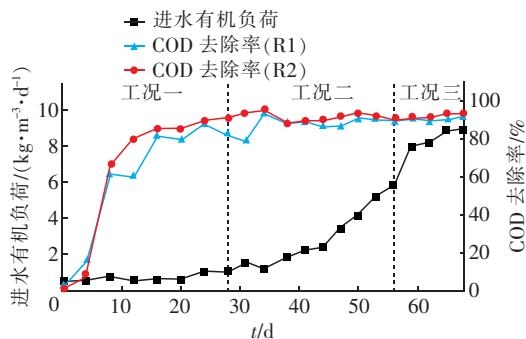


图 2 COD 去除率及进水有机负荷的变化

Fig. 2 Change of COD removal rate and influent organic load

2.2 出水 VFA 及 pH 值的变化

VFA 是厌氧消化过程的重要中间产物之一,水解酸化细菌分解有机物产生 VFA,而产甲烷菌以 VFA 为底物,在生长代谢过程中产生甲烷^[14]。出水 VFA 浓度及 pH 值随运行时间的变化如图 3 所示。可以看出,在工况一条件下,R2 反应器出水 VFA 浓度低于 R1 反应器,同时出水 VFA 浓度总体呈下降趋势,可能是由于蜂巢石多孔、比表面积大的特点使得微生物以生物膜的形式固定在载体表面,产甲烷菌在载体生物膜上富集提高了 VFA 的降解效率^[15],使得工况一条件下 R2 对 VFA 的降解率高于

R1;但 R1 和 R2 运行稳定后,VFA 的降解率基本相同;运行至 41 d 后,由于底物浓度的大幅度增加,VFA 出现了累积,蜂巢石的存在提高了微生物的多样性和丰富度^[16],促进了水解酸化效率,而且产酸细菌世代时间短、生长速率快,可以大量产生有机酸,产甲烷菌世代时间长、增殖速率慢,消耗有机酸的能力弱^[17],使得 R2 中 VFA 的累积程度高于 R1,但在整个启动运行过程中,出水 VFA 浓度均在 20 mmol/L 以下,在第 62 天,R1、R2 反应器出水 VFA 达到峰值,COD 去除率仍较为稳定,并未出现酸抑制现象。通常 VFA 过量累积,会导致 pH 值下降,当 pH 值低于 6.5 时,产甲烷过程会受到抑制^[18]。两个反应器刚开始运行的第 3 天,pH 值低于 7.0,后期 pH 值在 7.2~7.8 之间波动,说明反应器内具有适宜的酸碱性,适宜的 VFA 浓度和 pH 值使得反应器运行良好,UASB 反应器成功启动。

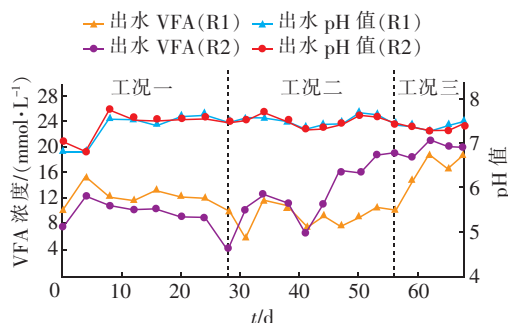
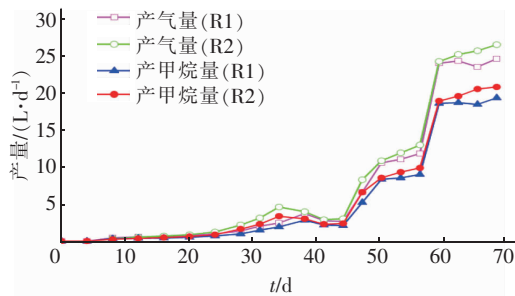


图 3 出水 VFA 及 pH 值的变化

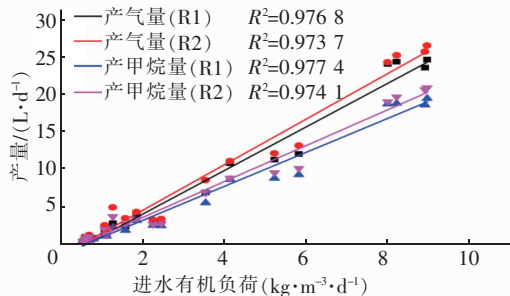
Fig. 3 Change of effluent VFA and pH

2.3 产气效果分析

产气量和产甲烷量能够间接反应产甲烷菌的活性,是反映厌氧消化性能的重要参数^[19]。图 4 为 UASB 启动阶段产气效果分析。由图 4(a)可知,从第 4 天开始,反应器内才开始有气体产生,产气量及产甲烷量随进水有机负荷提升而逐渐增加,同时甲烷含量最终维持在 70%~80% 之间。对进水有机负荷和产气量进行线性回归拟合,拟合结果如图 4(b)所示,两个反应器的产气量与进水有机负荷呈显著正相关关系,而产甲烷量也表现出同样的规律。与 R1 相比,R2 反应器在 68 d 的运行过程中,平均日产气量与平均产甲烷量分别提高了 9.38%、9.81%。以上数据说明,在启动阶段的有机负荷范围内可降解有机物充足,底物水解酸化和产气过程稳定,反应器启动成功,并且投加蜂巢石有助于提升厌氧消化效率,增加产甲烷量。



a. 产气量及产甲烷量



b. 进水有机负荷与产气量、产甲烷量的相关性

图 4 UASB 启动阶段产气效果分析

Fig. 4 Analysis of gas yield effect in start-up stage of UASB

2.4 溶解性有机物三维荧光特征分析

DOM 分子质量大、成分复杂,主要包括腐殖酸、富里酸和各种亲水性有机酸、核酸、氨基酸等^[20]。图 5 为启动阶段各工况下出水三维荧光光谱图。

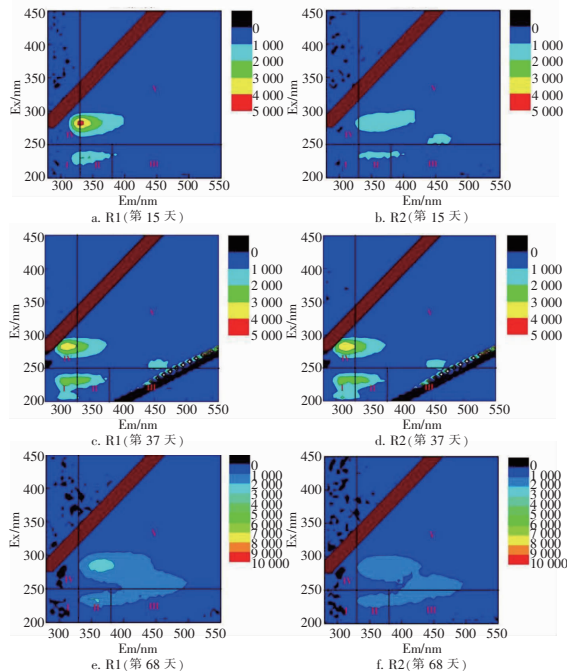
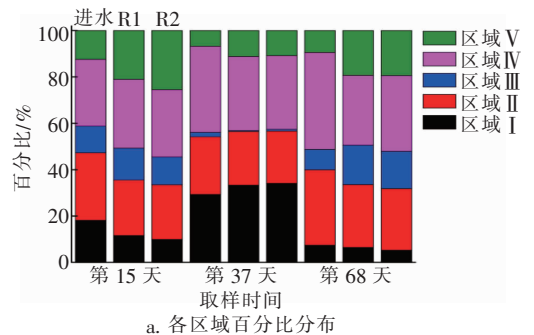


图 5 UASB 启动阶段各工况下出水三维荧光光谱图

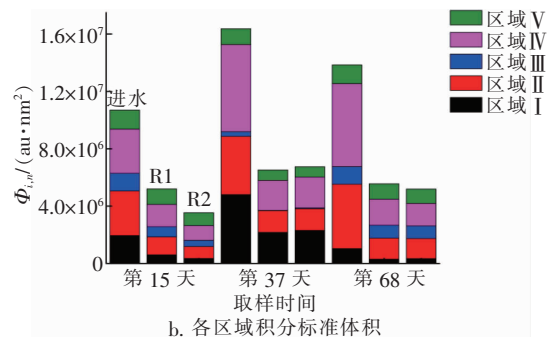
Fig. 5 Three dimensional fluorescence spectrum of influent and effluent in start-up stage of UASB

图 5 中荧光峰颜色可以反映溶解性有机物浓度的高低,颜色越深说明该处某种有机物的浓度越高^[21],反应器运行至第 15 天时,R2 荧光峰颜色明显比 R1 浅,出水溶解性有机物浓度低于 R1,运行至第 37、68 天时,R1、R2 中出水荧光峰颜色基本相同,溶解性有机物得到高效降解。

根据 FRI 积分法^[22]得到 5 个荧光区域的积分标准体积 $\Phi_{i,n}$,其数值间接表示了各区域溶解性有机物的相对含量。图 6 为 UASB 启动阶段进出水 EEM 光谱分析。可知,垃圾渗滤液经过 UASB 处理后,出水中各荧光区域百分比变化较小,第 15 天、第 37 天、第 68 天进水中 $\Phi_{i,n}$ 总和分别为 1.1×10^7 、 1.6×10^7 、 1.4×10^7 $\text{au} \cdot \text{nm}^2$ 。运行至第 15 天时,R1 和 R2 的 $\Phi_{i,n}$ 总和分别降低了 51.38%、66.90%;运行至第 37 天时,分别降低了 60.20%、58.79%;运行至第 68 天时,分别降低了 59.87%、62.59%。由此可知,随着反应器的运行,R1、R2 均对溶解性有机物有高效、稳定的降解效率,反应器运行稳定。



a. 各区域百分比分布



b. 各区域积分标准体积

图 6 UASB 启动阶段进出水 EEM 光谱分析

Fig. 6 EEM spectrum analysis in start-up stage of UASB

2.5 UASB 反应器启动过程中污泥特性分析

2.5.1 污泥 EPS 变化规律

胞外聚合物 (EPS) 主要来自细菌代谢、细菌自溶、外界环境物质的吸附和细菌表面物质的脱落所产生的细胞外分泌物,EPS 主要包括蛋白质 (PN) 和

多糖(PS)^[23-24]。PN 的含量与污泥的表面电荷有关,PN 含量升高能够提升污泥表面的疏水性,从而促进细菌间粘连聚集,加速细菌间的物质传输,加快颗粒污泥的快速生成;PS 则反映了污泥的亲水性,PS 越高亲水性越强,对于厌氧颗粒污泥的强度及稳定性具有重要作用^[25]。VSS/TSS 是评价污泥中有机组分含量的重要指标,能够间接反映污泥中微生物的含量^[26]。UASB 启动阶段厌氧颗粒污泥 EPS 的变化如图 7 所示。

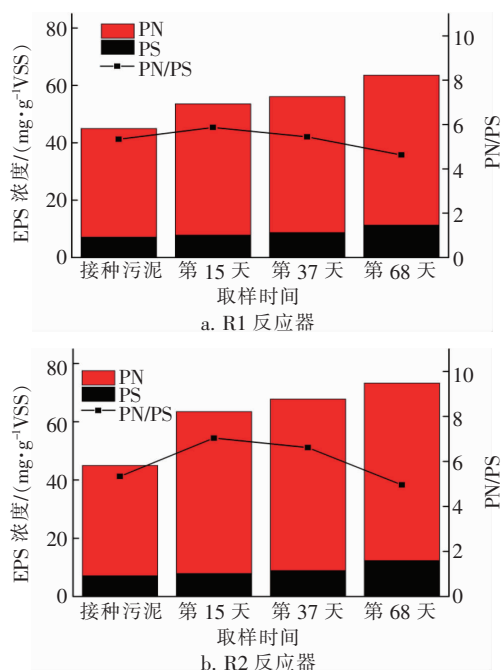


图 7 UASB 启动阶段厌氧颗粒污泥 EPS 的变化

Fig. 7 Change of EPS of anaerobic granular sludge in start-up stage of UASB

从图 7 可知,接种污泥的蛋白质含量为 37.9 mg/gVSS,多糖含量为 7.1 mg/gVSS,随着微生物对环境的适应,代谢能力增强,蛋白质含量逐渐增加,但是多糖含量变化不大,维持在 (10.0 ± 2) mg/gVSS。R2 反应器中,厌氧污泥在第 15 天、第 37 天、第 68 天的 PN 含量分别为 55.6、58.9、61.0 mg/gVSS,与 R1 相比,PN 含量相应提高了 21.4%、24.3%、16.6%;同时,R1 反应器中 VSS/TSS 值呈现先增加后减少的趋势,且在第 37 天达到最大值 0.692,而 R2 反应器呈现出逐渐增加的趋势,在第 68 天达到最大值 0.736,与 R1 相比,R2 的 VSS/TSS 值相应提高了 6.7%、2.2%、4.5%。说明在启动阶段,微生物逐渐适应了生存环境,微生物含量逐渐增加,投加蜂巢石能够提高微生物量,促进微生物分泌

更多的 EPS,从而提升颗粒污泥的强度、增大污泥的粒径。

2.5.2 污泥粒径分布

UASB 反应器能否成功启动,颗粒污泥的形成起着重要作用,与接种的絮状污泥相比,颗粒污泥有更好的沉降性能。一般来说,厌氧污泥粒径大于 0.50 mm 可称之为颗粒污泥,而高活性颗粒污泥的形成,则有利于 UASB 反应器维持高效、稳定的运行状态。UASB 反应器启动阶段厌氧颗粒污泥的粒径分布如图 8 所示。接种污泥中,粒径小于 0.14 mm 的污泥占污泥总量的 91.30%,粒径大于 0.50 mm 的污泥仅占污泥总量的 0.28%。随着进水有机负荷的升高,微生物聚集,絮状污泥逐渐向颗粒污泥转化,第 15 天时,R2 反应器中粒径大于 0.50 mm 的污泥占污泥总量的 22.56%,大于 R1 反应器的 7.39%,较大颗粒污泥能够增强污泥的沉降速度。第 37 天时,R1、R2 反应器中粒径大于 0.50 mm 的污泥分别占总污泥量的 24.08%、22.97%。第 68 天时,污泥粒径进一步增加,R1、R2 反应器中粒径小于 0.14 mm 的污泥占比分别为 31.74%、31.54%,粒径大于 0.50 mm 的占比分别为 24.42%、24.26%。由此可以发现,最终两个反应器的污泥粒径占比基本相同,反应器基本稳定运行,但 R2 在 15 d 内形成的大颗粒污泥占比更高。说明经过短期的适应,微生物可以通过吸附作用在蜂巢石表面定殖,加速了污泥粒径的增长。

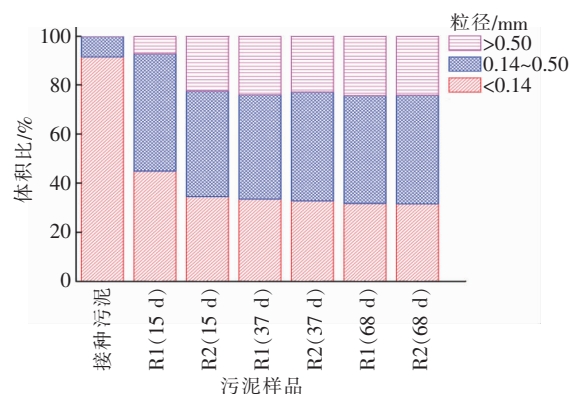


图 8 UASB 反应器启动阶段厌氧颗粒污泥的粒径分布

Fig. 8 Size distribution of anaerobic granular sludge in start-up stage of UASB reactor

3 结论

① R1 和 R2 两个 UASB 反应器通过 68 d 的连续运行,COD 去除率稳定达到 90% 以上,甲烷含

量最终稳定在70%~80%之间,出水pH值在7.2~7.8之间波动,VFA浓度均在20 mmol/L以下,反应器运行稳定,启动成功。

② 投加蜂巢石能缩短UASB反应器启动时间并提高厌氧消化效率。与R1相比,R2启动时间缩短了10 d,平均产气量与甲烷产量分别提高了9.38%、9.81%。

③ 蜂巢石能够提高微生物含量,从而促进微生物分泌更多的EPS,提升颗粒污泥的强度与污泥沉降性能,加速颗粒污泥的形成。第15天时,R2反应器中粒径大于0.50 mm的污泥占污泥总量的22.56%,远大于R1反应器的7.39%。

参考文献:

- [1] VINARDELL S, ASTALS S, PECES M, *et al.* Advances in anaerobic membrane bioreactor technology for municipal wastewater treatment: a 2020 updated review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 130:109936.
- [2] XIA Y, ZHU C Y, YAN Q, *et al.* Morphological and physiological response of anaerobic granular sludge during the enhanced biohydrogen process via cascade acid stress [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(34):10775–10779.
- [3] WANG C Q, LIU Y, GAO X Y, *et al.* Role of biochar in the granulation of anaerobic sludge and improvement of electron transfer characteristics [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268:28–35.
- [4] LEI Y Q, SUN D Z, DANG Y, *et al.* Metagenomic analysis reveals that activated carbon aids anaerobic digestion of raw incineration leachate by promoting direct interspecies electron transfer [J]. *Water Research*, 2019, 161:570–580.
- [5] 李婷,刘永红,王利娜,等. 生物载体在促进厌氧污泥颗粒化过程中的应用[J]. *中国沼气*, 2015, 33(2): 8–12.
- LI Ting, LIU Yonghong, WANG Lina, *et al.* Application of bio-carriers in accelerating the granulation of anaerobic sludge[J]. *China Biogas*, 2015, 33(2): 8–12 (in Chinese).
- [6] 王冰,韩洪军,刘硕,等. 颗粒活性炭加速厌氧反应器污泥颗粒化的研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(11):72–74.
- WANG Bing, HAN Hongjun, LIU Shuo, *et al.* Speeding up sludge granulation in anaerobic reactor by adding granular activated carbon [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(11):72–74 (in Chinese).
- [7] GUO J, KANG Y. Characterization of sulfate-reducing bacteria anaerobic sludge granulation enhanced by chitosan[J]. *Journal Environmental Management*, 2020, 253:109648.
- [8] 李晓斌,邓润义,张勇,等. 蜂巢石改性及其对 Mn^{2+} 吸附试验研究[J]. *工业用水与废水*, 2017, 48(3): 21–25, 42.
- LI Xiaobin, DENG Runyi, ZHANG Yong, *et al.* Experimental research on modification of pumice and its adsorption performance to Mn^{2+} [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2017, 48(3):21–25, 42 (in Chinese).
- [9] 郝晓地,魏丽,仇付国. 火山岩填料曝气生物滤池内循环强化脱氮试验研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(2):239–245.
- HAO Xiaodi, WEI Li, QIU Fuguo. Experimental study on enhancing nitrogen removal by effluent recirculation in a BAF reactor with crushed lava packed as carriers [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(2):239–245 (in Chinese).
- [10] 王涛. UASB反应器处理垃圾渗滤液的效果及机理研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2017.
- WANG Tao. Study on the Removal Performance and Mechanism of Landfill Leachate by Upflow Anaerobic Sludge Blanket [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2017 (in Chinese).
- [11] 雷雨晴. 直接种间电子传递强化垃圾焚烧渗沥液厌氧生物处理效能的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- LEI Yuqing. Study on Enhancing the Efficiency of Anaerobic Bio-treatment Treating Incineration Leachate via Direct Interspecies Electron Transfer [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 (in Chinese).
- [12] 靳百川,蒋梦云,白文荣,等. 三维荧光光谱-平行因子法解析再生水补给人工湿地DOM的光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4):1240–1245.
- JIN Baichuan, JIANG Mengyun, BAI Wenrong, *et al.* Fluorescence spectra characteristics of reclaimed water to replenish constructed wetlands using EEM-PARAFAC [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1240–1245 (in Chinese).
- [13] 杨明明,党超军,张爱余,等. 厌氧氨氧化颗粒污泥胞外聚合物金属元素特性[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(11):4728–4734.
- YANG Mingming, DANG Chaojun, ZHANG Aiyu, *et al.*

- Characteristics of metal elements in anammox granular sludge extracellular polymeric substances [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40 (11): 4728 – 4734 (in Chinese).
- [14] LI Y, CHEN Y G, WU J. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: a review [J]. *Applied Energy*, 2019, 240 (15): 120 – 137.
- [15] ZHANG B, JIAO Y, YU G, *et al.* Effects of bioporous carriers on the performance and microbial community structure in side-stream anaerobic membrane bioreactors [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2020, 66 (8): 475 – 489.
- [16] WANG P B, YE M Y, CUI Y, *et al.* Enhancement of enzyme activities and VFA conversion by adding Fe/C in two-phase high-solid digestion of food waste: performance and microbial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 331: 125004.
- [17] 张文存, 王丽莉, 张国辉. 提高厌氧消化中产甲烷效能的技术进展 [J]. *现代化工*, 2021, 41 (6): 41 – 45.
ZHANG Wencun, WANG Lili, ZHANG Guohui. Review of technology development to improve methane yielding efficiency in anaerobic digestion [J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41 (6): 41 – 45 (in Chinese).
- [18] 马佳莹, 汪冰寒, 乔子茹, 等. 碳基材料对餐厨垃圾厌氧消化效率和微生物群落的影响研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26 (3): 730 – 738.
MA Jiaying, WANG Binghan, QIAO Ziru, *et al.* Effects of carbon-based materials on anaerobic digestion efficiency and microbial community of food waste [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2020, 26 (3): 730 – 738 (in Chinese).
- [19] 周慧敏, 姜珺秋, 王琨, 等. 有机负荷和进料频率对高含固厨余垃圾厌氧消化系统性能的影响 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40 (10): 3639 – 3650.
ZHOU Huimin, JIANG Junqiu, WANG Kun, *et al.* Effects of organic loading rate and feeding frequency on high solid food waste anaerobic digestion system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40 (10): 3639 – 3650 (in Chinese).
- [20] 闫晓寒, 文威, 解莹, 等. 溶解性有机物特性及在国内的污染研究现状 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43 (6): 169 – 178.
- YAN Xiaohan, WEN Wei, XIE Ying, *et al.* Study on the properties of dissolved organic matter and its pollution status in China: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43 (6): 169 – 178 (in Chinese).
- [21] 刘峰. 厌氧颗粒污泥的培养与性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LIU Feng. Study on the Development and Performance of Anaerobic Granular Sludge [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [22] 姚亮. 短程反硝化实验研究及厌氧氨氧化的荧光光谱分析 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
YAO Liang. Experimental Study on Partial Denitrification and Fluorescence Spectroscopic Analysis of Anaerobic Ammonia Oxidation [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018 (in Chinese).
- [23] XU X L, LIU G H, ZHAO D M, *et al.* Enhancement of anammox bacterial activity by sodium glutamate [J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125570.
- [24] DONG J J, ZHANG Z M, YU Z D, *et al.* Evolution and functional analysis of extracellular polymeric substances during the granulation of aerobic sludge used to treat *p*-chloroaniline wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 330: 596 – 604.
- [25] 高心怡. 高有机负荷下生物炭强化厌氧生物处理工艺性能的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
GAO Xinyi. Research on Enhanced Performance of Anaerobic Biological Treatment Process with Biochar Addition under High Organic Loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [26] MENONI L, BERTANZA G. Wet oxidation of sewage sludge: a mathematical model for estimating the performance based on the VSS/TSS ratio [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 306: 685 – 692.

作者简介: 张勇 (1975 –), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理技术。

E-mail: zhangy@ahjzu.edu.cn

收稿日期: 2021-05-28

修回日期: 2021-06-29

(编辑: 任莹莹)