

蜂巢石强化 UASB 反应器处理垃圾渗滤液研究

张勇^{1, 2}, 胡群林^{1, 2}, 王涛^{1, 2}, 徐广松^{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安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 向厌氧系统中投加载体材料是提升反应器稳定性及厌氧效率的有效手段。本试验将蜂巢石投加到上流式污泥床反应器 (UASB) 中, 研究其对垃圾焚烧发电厂渗滤液厌氧消化效率的影响及厌氧污泥中产甲烷菌群落结构的变化。试验结果显示, 投加蜂巢石缩短了 UASB 污泥驯化时间, 与未投加蜂巢石的反应器相比, COD_{Cr} 去除率提前 12 天稳定达到 85% 以上; 污泥形貌观察及粒径分布测试表明, 蜂巢石作为固定微生物的载体能够有效加速污泥颗粒化进程, 运行至第 15 天, 投加蜂巢石的反应器中粒径大于 0.2 mm 的污泥占比 53.17%, 高于未投加蜂巢石反应器的 31.92%, 形成了更加密实、更大的颗粒污泥。当有机负荷逐步提升至 $28.77 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 投加蜂巢石的反应器 COD_{Cr} 去除率仍稳定达到 97%, 所能承受的最大有机负荷是未投加蜂巢石反应器的 2 倍以上。高通量测序表明, 有机负荷提升后, 投加蜂巢石反应器中产甲烷丝菌 (Methanosaeta) 代替产甲烷杆菌 (Methanobacterium) 成为优势种属。

关键词: 蜂巢石; UASB; 产甲烷丝菌; 渗滤液

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 03-026-06

Study on Enhancement of UASB Reactor for Treating Incineration Leachate by Pumice

ZHANG Yong^{1, 2}, HU Qunlin^{1, 2}, WANG Tao^{1, 2}, XU Guangsong^{1, 2}

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Key Laboratory of Anhui Province of Pollution Control and Waste Resuse, Hefei 230601, China)

Abstract: Addition of the loading material to the anaerobic system is an effective way to improve the stability and anaerobic efficiency of the reactor. In this work, pumice was added to the upflow sludge bed reactor (UASB) to study its effects on anaerobic digestion efficiency of the leachate from municipal solid waste incineration power plant and structural changes of methanogens community in anaerobic sludge. The experimental results showed that adding pumice could shorten the acclimation time of the sludge, in which it took 12 days less than the reactor without pumice to reach the COD_{Cr} removal efficiency above 85%. Meanwhile, the observation of the sludges' morphology and the distribution of particle size demonstrated that pumice as the carrier for fixing microorganism could accelerate the granulation process of sludge. On the 15th day of operation, the sludge with a particle size larger than 0.2 mm accounted for 53.17% in the reactor with added pumice, which was higher than 31.92% of the reactor without pumice, forming more dense and larger granular sludge. Finally, it was found that the high organic loading rate impact ability of UASB reactor was strengthened by adding pumice. When the organic loading rate was increased to $28.77 \text{ kgCOD}_{\text{Cr}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, the COD_{Cr} removal efficiency of the reactor with

收稿日期: 2020-12-17

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

作者简介: 张勇 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 水处理理论与技术。

pumice could still keep 97%, which indicated that the maximum organic load of the reactor was more than twice that of the reactor without pumice. To further investigate of the anti high organic loading rate impact ability, the high-throughput sequencing was carried out, which showed that the Methanosaeta became the dominant methanogenic bacteria instead of Methanobacterium in the reactor with pumice after increasing the organic loading rate.

Key words: Pumice; UASB; Methanosaeta; Leachate

近年来,城市人口的激增导致城市生活垃圾越来越多,生活垃圾焚烧发电作为一种高效的可实现垃圾资源化和减量化的处理技术,具有占地面积少、无害化等优点,符合我国可持续发展的理念,逐渐成为今后城市生活垃圾处理的主要发展方向^[1]。

焚烧发电过程中所产生的垃圾渗滤液是最主要的污染物之一,相比于垃圾填埋场产生的渗滤液,同样具有有机物浓度高、氨氮浓度高、水质变化大、存在一定的生物毒性等特点,但是垃圾焚烧渗滤液具有更高的有机污染物浓度,且成分复杂,其 COD 和 BOD₅ 均达到数万 mg/L,具有良好的可生物降解性能 (BOD₅/COD > 0.5), 适合应用厌氧生物处理技术^[2-3]。上流式厌氧污泥床 (UASB) 因具有容积负荷高、污泥产量少等优点而在渗滤液处理中的研究和应用越来越多^[4]。但同时 UASB 反应器也存在启动时间长、抗有机负荷 (OLR) 冲击能力差、运行不稳定、直接处理原液困难等问题,使得反应器处理效率大大降低^[3]。

研究发现通过投加载体材料是有效措施之一。YuqingLei 等^[5]向 UASB 反应器中投加活性炭,发现当有机负荷为 25 kgCOD/(m³·d) 时, COD_{Cr} 去除率仍保持在 90% 以上。Yang Bo^[6]等向厌氧产甲烷系统中添加合成的 GAC-MnO₂ 复合材料,发现 COD_{Cr} 去除效率和 CH₄ 产率分别提高了 77% 和 36%。蜂巢石因其较大的比表面积,内部多孔隙结构,化学和稳定性好,且原料来源易得、成本低廉,因此同样存在作为厌氧体系中载体材料的可能^[7]。为进一步提升 UASB 处理负荷及处理效率,本研究向 UASB 反应器中投加蜂巢石,研究蜂巢石对反应器性能及产甲烷菌群落结构的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

垃圾渗滤液原液是取自某垃圾焚烧发电厂调节池,试验用水是经过原液稀释而成,接种污泥取自该发电厂污泥浓缩池,含水率 83.71%,污泥质量

浓度约为 35 g/L, VSS/TSS 为 0.6。对照组 (R0) 接种污泥量占反应器有效容积的 30%, 实验组 (R1) 在接种等量污泥的基础上再投加 500 g 粒径约为 3~5 mm 蜂巢石。

1.2 实验装置

两个 UASB 反应器完全相同,有效容积 4.5L,反应区用遮光纸包裹,避免光照对微生物的影响。反应器设有外水浴循环装置用来保证反应器内温度维持在 35 ± 2℃。

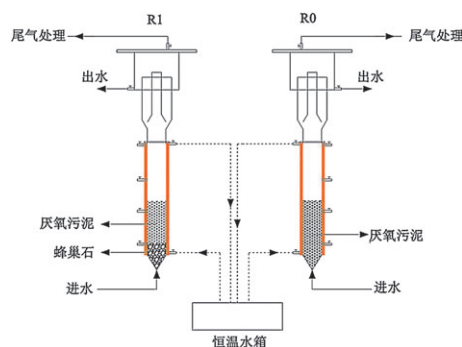


图1 实验装置图

1.3 运行方式

UASB 反应器采用连续进出水的方式,保持水力停留时间不变,逐渐提高进水 COD_{Cr} 浓度。通过投加碳酸氢钠保持进水 pH 值为 6.5~7.6。UASB 反应器具体运行参数如表 2。

1.4 分析项目及方法

化学需氧量 (COD_{Cr}) 采用重铬酸钾法测定^[8]; VFA 采用酸碱滴定法^[9]。三维荧光光谱采用日立 F-7000 荧光光度计分析,激发波长 (Ex) 范围 200~450 nm,发射波长 (Em) 280~550 nm,带通均为 2 nm,扫描速度 2 400 nm/min。为降低测量时产生的内滤效应,将待测水样经适当稀释后用 0.45 μm 的滤膜过滤,运用 Origin 绘制荧光光谱图。

运用电子扫描显微镜 (JSM-7500F) 及相差荧光显微镜 (BX51) 观察厌氧污泥形貌^[10]。污泥粒径采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定。

产甲烷菌群落结构采用高通量测序的方法,

表 1 垃圾焚烧发电厂渗滤液水质指标

指标	COD _{Cr}	BOD ₅	NH ₃ -H	TN	TP	pH
数值	58 000~72 000	28 000~34 000	2 900~3 200	3 000~3 850	70~110	4.6~6.5

注:单位均为 mg/L,pH(无单位)除外

表 2 UASB 反应器各阶段运行参数

运行阶段	运行天数(d)	水力停留时间(h)	进水 COD _{Cr} 浓度(mg/L)	有机负荷 kgCOD _{Cr} /(m ³ ·d)
启动阶段	27	15	900~2 400	1.52~3.84
稳定阶段	78	15	2 400~4 800	3.84~7.70
负荷冲击阶段	63	15	4 800~18 000	7.70~28.77

在稳定阶段第(100天)和负荷冲击阶段(第152天)取样分别命名为R0(100)、R1(100)、R0(152)、R1(152)。使用Soil DNA Kit试剂盒提取污泥样品中DNA,用细菌引物338F:5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'和806R:5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'对16S V3+V4区域进行扩增,扩增条件如下:在98℃条件下初变性2 min,在(98℃ 30 s,50℃ 30 s,72℃ 60 s)条件下循环30个周期,最后在72℃下延伸5 min。将扩增子送至百迈克生物公司的IlluminaMiSeq平台上进行高通量测序。

2 结果与讨论

2.1 反应器 COD_{Cr} 去除效果分析

UASB 反应器运行 168 天,启动阶段为减小垃圾渗滤液中毒性物质对微生物的影响,采用低负荷的运行方式来启动 UASB 反应器,初始进水有机负荷为 1.52 kgCOD/(m³·d),随着微生物对水质特性的适应,反应器 COD_{Cr} 去除率逐渐从 50% 上升到 85% 以上。与 R0 相比,R1 提前 12 天 COD_{Cr} 去除率达到 85% 以上进入稳定阶段,投加蜂巢石填料明显缩短了反应器的启动时间。在稳定阶段运行过程中,有机负荷提升从

3.84 kgCOD/(m³·d) 提升至 7.70 kgCOD/(m³·d),R1、R2 反应器 COD_{Cr} 平均去除率均稳定在 90% 以上。

为进一步探究其抗有机负荷冲击能力,再次提高进水有机负荷至 28.77 kgCOD/(m³·d),结果发现:当进水有机负荷提升至 9.93 kgCOD/(m³·d)以后,R0、R1 反应器 COD_{Cr} 去除率均开始出现下降,同时反应器 VFA 浓度(图 2b)均有所升高。R1 反应器经过 12 天之后 COD_{Cr} 去除率又稳定在 95% 以上,同时 VFA 也稳定在 700 mg/L 以下,而 R0 反应器在有机负荷为 14.38 kgCOD/(m³·d)时 COD_{Cr} 去除率开始急剧下降,说明此时达到 R0 反应器的最大处理能力,负荷冲击过程中 VFA 逐渐大量累积,在第 168 天时达到 1254 mg/L。相关研究表明,有机负荷提升可迅速产生更多的酸中间产物,在产氢产乙酸菌的作用下 VFA 分解为乙酸、氢气和二氧化碳,然后在产甲烷菌的作用下产生甲烷,由于产甲烷菌对 pH 较为敏感,并使反应器的 pH 降至低于产甲烷菌的耐受水平,从而影响产甲烷效率^[11-12]。R1 反应器在有机负荷为 28.77 kgCOD/(m³·d)时 COD_{Cr} 去除率仍为 97%,与 R0 相比,R1 反应器所能承受的进水有机负荷提高了 2 倍,可能是由于蜂巢石作为微生物附着

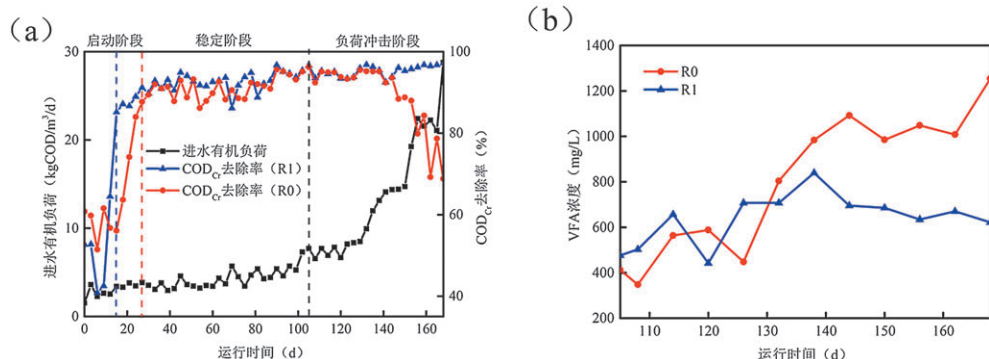


图 2 (a) COD_{Cr} 去除率随进水有机负荷的变化情况 (b) 负荷冲击阶段出水 VFA 变化情况

的载体,提高了微生物的多样性与丰富度。说明投加蜂巢石能有效提高厌氧系统酸缓冲能力,促进 VFA 向产甲烷途径降解,提高 UASB 反应器处理高浓度有机废水能力,保持反应器高效稳定运行。

2.2 进出水三维荧光光谱分析

三维荧光光谱技术具有测试精确、操作快速、成本低且对样品无破坏的优点,可高效的表征水体中 DOM^[13]。在三维荧光光谱图中荧光峰颜色的深浅可直观反应污染程度,颜色越深说明该位置所代表的有机物浓度越高^[14]。根据文献中的分类方法^[15],图 4 中共出现 4 中荧光特征峰,分别代表四种不同类型的有机物,分别为峰 A(色氨酸类蛋白质, $E_x/E_m=225(230)/340$),峰 B(溶解性微生物代谢产物, $E_x/E_m=280/350(360)$)、峰 C(富里酸类物质, $E_x/E_m=250(255)/450$)峰 D(腐殖酸类物质, $E_x/E_m=330/410(415)$),随着进水有机负荷的提升,反应器进出水 DOM 荧光峰强度也在不断增强。

由图 3 发现,运行至第 15 天时,进水中峰 A、峰 B 的荧光强度分别为 4918、4434,R1 反应器出水峰 A、峰 B 的荧光强度分别为 1673、1761,分别比 R0 低 19.1%、21.8%,并未检测出峰 C、峰 D。运行至 152 天时,进水中峰 A、峰 B、峰 C、峰 D 的荧光强度分别为 7578、10000、3755、2517,R1 反应器出水分别为 R1 反应器出水峰 A、B、C、D 的荧光

强度分别为 3395、3326、3949、2611,分别比 R0 低 6.1%、14.8%、22.4%、9.9%,由此说明废水中主要溶解性有机物为色氨酸类蛋白质和溶解性微生物代谢产物,在厌氧微生物的作用下进一步被分解利用,荧光峰强度大幅度减弱,然而富里酸类物质和腐殖酸类物质对应的荧光峰强度几乎没有改变,相对较难降解^[16]。同时也说明 R1 反应器对有机物的去除效率更高,由于蜂巢石的加入为微生物的附着提供了良好的生长位点,增加了微生物群落结构的多样性,从而促进微生物对溶解性有机物的降解。

2.3 厌氧颗粒污泥形态分析

厌氧颗粒污泥的形成是 UASB 反应器高效稳定运行的关键,通常颗粒污泥的粒径范围为 0.14~5 mm 之间,粒径的大小及强度受废水种类、运行参数等诸多条件的影响^[17]。分别在运行的第 15 d、80 d 进行取样,通过光学显微镜以及电子扫描显微镜观察其形态结构,研究蜂巢石对污泥颗粒化的影响。由图 4 可知接种污泥呈絮状,结构松散,颜色为棕灰色,外形不规则。反应器运行至 15 天时,可以看见污泥颜色变深,污泥结构变密实,有少量颗粒状污泥出现,通过 a2 与 b2 比较发现 R1 反应器中污泥颜色更深,粒径略大与 R0。SEM 显示颗粒污泥表面主要以杆菌和球菌为主,丝状菌较少,污泥表面杆菌相互交错缠绕,维持着污泥密实性与整体性。通过图 a3 与 b3 比较发现 R1 反应器中

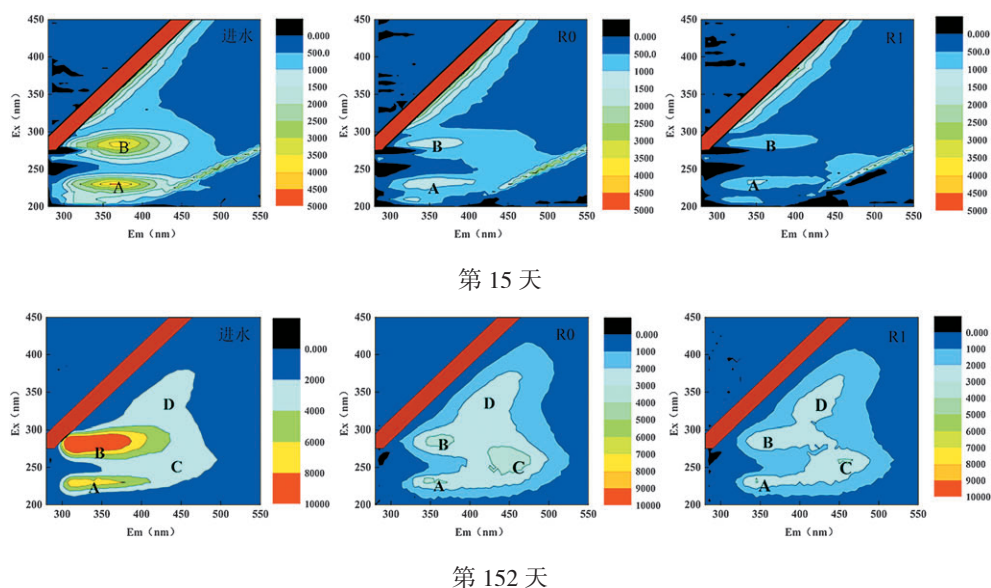


图3 不同时间反应器进出水三维荧光光谱图

污泥结构更加光滑密实,杆菌球菌分布更加密集,表明添加蜂巢石反应器的颗粒污泥有更高的机械强度。

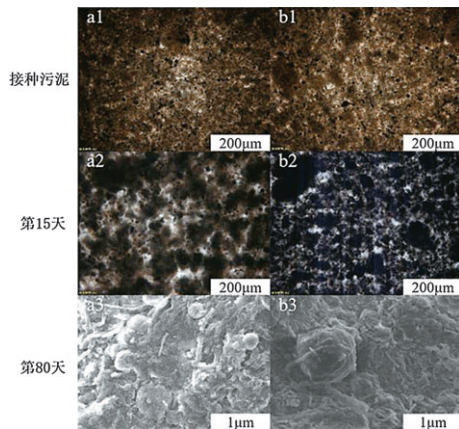


图 4 厌氧颗粒污泥形态结构 (a1~a3) R0 反应器; (b1~b3) R1 反应器

粒径变化可直观体现污泥颗粒化过程。从图 5a 可以看出,接种污泥粒径小于 0.2 mm 占 98.72%,几乎全部为絮状污泥。在运行至 15 天时投加蜂巢石反应器中污泥粒径明显更大,大于 0.2 mm 的污泥占污泥总量的 53.17%,而 R0 反应器为

31.92%,此时 R1 反应器 COD_{Cr} 去除率达到 85% 以上,反应器进入稳定阶段。反应器运行到第 27 天时,R0 反应器中污泥粒径分布才基本与 R1 反应器相近。R0 反应器 COD_{Cr} 去除率才基本稳定达到 85% 以上。与 R0 相比,投加蜂巢石(R1)反应器启动时间缩短了 12 天,加速了污泥颗粒化进程。其作用机理可能是微生物吸附在蜂巢石表面,以蜂巢石为“晶核”,污泥粒径快速生长。

2.4 产甲烷菌群落结构分析

各阶段门分类水平上的比较如图 6 所示,R0、R1 中优势菌门均为广古菌门(Euryarchaeota),属分类水平上分析表明主要产甲烷菌属为产甲烷杆菌(Methanobacterium)、产甲烷丝菌(Methanosaeta)、产甲烷八叠球菌(Methanosarcina),产甲烷杆菌为氢型产甲烷菌,主要利用 H_2/CO_2 或甲酸产甲烷,产甲烷丝菌为乙酸型产甲烷菌,产甲烷八叠球菌可以使用几种底物产生甲烷,包括乙酸、 H_2/CO_2 和甲基化合物^[18]。反应器稳定阶段优势产甲烷菌均为产甲烷杆菌,在 R0、R1 反应器中相对丰度分别为 88.5%、61.5%。在负荷提升阶段,产甲烷丝菌丰度均有增加,在 R0、R1 反应器中相

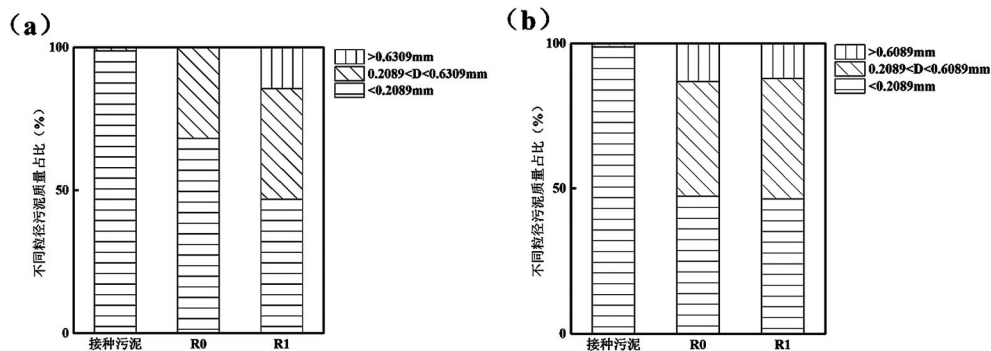


图 5 不同反应器启动过程中的粒径分布图 (a) 第 15 天; (b) 第 27 天

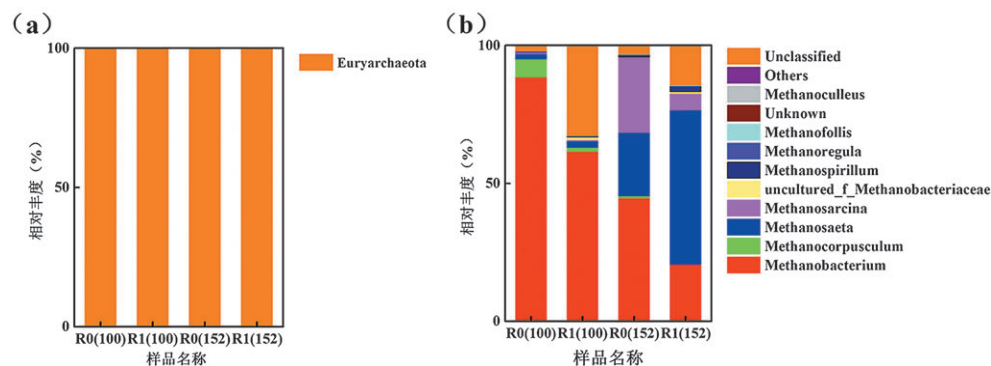


图 6 产甲烷菌结构与分布 (a) 门水平; (b) 属水平

对丰度分别为 23.0%、55.9%。R0 中的优势菌属仍为产甲烷杆菌,而 R1 中产甲烷丝菌代替了产甲烷杆菌成为了优势菌属。

有机负荷的连续提高使得水质的快速变化显著干扰微生物群落,导致 VFA 的过量积累对产甲烷菌产生抑制作用。由于 R0 反应器中产甲烷丝菌丰度较低,导致 VFA 不能及时转化使得反应器酸化逐渐崩溃。而在 R1 反应器能够及时将大量 VFA 分解产生甲烷,使得反应器能够转化更多的 VFA,承受更高的有机负荷。可能是由于投加蜂巢石能够为产甲烷菌的生长提供舒适的场所,在有机负荷的冲击下蜂巢石能够保护产甲烷菌免受不利条件的影响,保持较高的活性,从而能够根据环境变化,快速生长繁殖所需要产甲烷菌。

3 结论

向厌氧生物反应器中投加生物载体是提高反应器性能的有效措施。投加蜂巢石可以缩短 UASB 反应器启动时间,同时能提高 UASB 反应器抗冲击负荷能力,承受更高的有机负荷。在有机负荷为 $28.77 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的条件下,投加蜂巢石的 UASB 反应器仍能高效稳定运行, COD_{Cr} 去除率达到 97%, 高于对照组的 68%。并且蜂巢石丰富的多孔结构可以作为微生物生长聚集的惰性核心,提高颗粒污泥的机械强度与稳定性,增大颗粒污泥粒径,加速污泥颗粒化进程,同时为微生物的生长及富集提供了位点,增加了微生物的多样性和丰富度,使得优势菌种由产甲烷杆菌(*Methanobacterium*) 转变为产甲烷丝菌(*Methanosaeta*),提高了 UASB 反应器的抗冲击负荷能力。

参考文献:

- [1] 杨柳,耿晓丽. 城市生活垃圾焚烧厂渗滤液特点及处理现状[J]. 中国沼气,2014,32(4):24-28,47.
- [2] 邓黛青,夏凤毅,李光明,等. UASB 法处理城市生活垃圾焚烧场渗滤液[J]. 环境工程,2006,24(2):11-13,2.
- [3] 雷雨晴. 直接种间电子传递强化垃圾焚烧渗滤液厌氧生物处理效能的研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.
- [4] 胡刚,王里奥,林衍,等. 上流式厌氧污泥床处理垃圾

渗滤液的效果研究[J]. 中国给水排水,2007,23(13):56-59.

- [5] 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.
- [6] Yang B, Xu H, Liu Y B, et al. Role of GAC-MnO₂ catalyst for triggering the extracellular electron transfer and boosting CH₄ production in syntrophic methanogenesis[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 383.
- [7] 聂凤,熊正为,黄建洪,等. 改性火山石-PAC 复合絮凝剂处理城镇生活污水试验研究[J]. 水处理技术,2012,38(4):87-90.
- [8] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会,魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境出版社,2002.
- [9] 马宏瑞,常敏,崔强,等. 酸化程度对高 VFA 毛皮废水厌氧生物处理的影响[J]. 皮革科学与工程,2017,27(6):68-71,73.
- [10] 徐恒,汪翠萍,颜锐,等. 颗粒型厌氧生物膜改善高氢分压下丙酸降解抑制研究[J]. 中国环境科学,2016,36(5):1435-1441.
- [11] Sen B, Aravind J, Kanmani P, et al. State of the art and future concept of food waste fermentation to bioenergy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53:547-557.
- [12] 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.
- [13] 陈昭宇. 三峡库区城镇化背景下河流溶解性有机质特征及降解规律研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院),2020.
- [14] 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.
- [15] 段粹. UF+RO 膜集成技术对城市污水中 DOM 的分离特性及膜污染机制研究[D]. 北京:北京建筑大学,2018.
- [16] 李海青,刘欣艳,孙宇,等. 生活垃圾焚烧厂渗滤液处理过程有机物特性分析[J]. 环境科学与技术,2020,43(7):154-159.
- [17] 梁家豪. 颗粒载体对 UASB 的启动和运行性能的影响研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2017.
- [18] Zhang Z H, Gao P, Cheng J Q, et al. Enhancing anaerobic digestion and methane production of tetracycline wastewater in EGSB reactor with GAC/NZVI mediator[J]. Water Research, 2018, 136:54-63.