

高温厌氧膜生物反应器处理餐厨废水的启动

姜萌萌¹, 林敏¹, 郑晓宇², 乔玮^{1*}, 侯振¹, 董仁杰¹ (1. 中国农业大学工学院, 国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术研发(实验)中心, 北京 100083; 2. 光大环境科技(中国)有限公司, 南京 210007)

摘要: 以除油后的实际餐厨废水为原料, 在高温(50±1)℃条件下利用浸没式纤维膜生物反应器(AnMBR)进行连续厌氧消化试验, 以水力停留时间(HRT) 20d 启动, HRT 15d 运行, 直到发生膜污染, 试验共进行了 50d。研究了反应器启动和运行期间的发酵特性和膜过滤性能。研究表明, 反应器 30d 完成了启动, 在 HRT 15d 条件下, 甲烷产量达到 578L/kgVS_{in}, COD 和挥发性固体(VS)去除率均达到 94%以上, 膜出水总挥发性脂肪酸(TVFA)浓度为(103±77) mg/L, 其中乙酸浓度为(98±28) mg/L。系统 pH 8.26, 具有良好的稳定性。膜通量设定为 9L/(m²·h), 运行 30d 后发生了明显的膜污染, 伴随着反应器内挥发性悬浮固体(VSS)浓度由 8.1g/L 逐渐增加到 18 g/L。在处理高浓度餐厨废水时, AnMBR 可以短时间启动且在 8.5kgCOD/(m³·d)的高负荷条件下稳定运行, 反应器中污泥浓度和溶解性微生物产物的增加导致膜过滤性能下降是导致膜污染的主要因素。

关键词: 餐厨废水; 高温厌氧发酵; 厌氧膜生物反应器; 膜污染

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)12-5318-07

Start-up operation of anaerobic membrane bioreactor treating food wastewater under thermophilic condition. JIANG Meng-meng¹, LIN Min¹, ZHENG Xiao-yu², QIAO Wei^{1*}, HOU Zhen¹, DONG Ren-jie¹ (1. College of Engineering, China Agricultural University, R&D Center for Efficient Production and Comprehensive Utilization of Bio-based Gaseous Fuels, Energy Authority, National Development and Reform Committee (BGFeuls), Beijing 100083, China; 2. Everbright Envirotech (China) Ltd. Nanjing 210007, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5318~5324

Abstract: In this study, the actual food wastewater was used as raw material to do experiment with an immersed hollow fiber membrane bioreactor (AnMBR) under thermophilic condition (50±1) °C for 50days until the membrane fouling occurred. The reactor was started with a hydraulic retention time (HRT) of 20days, and operated at HRT 15days, the system stability and membrane filtration characteristics were studied. The experiment showed that under the above condition, the startup stage can be completed in one month. At HRT 15days, the methane production reached to 578L/kgVS_{in}, the total chemical oxygen demand (TCOD) and volatile solid (VS) removal rates were both higher than 94%; no volatile fatty acid (VFA) accumulated with a concentration of (103±77) mg/L of the permeate and dominant with acetate ((98±28) mg/L) showed a good stability of the system combined with a pH of 8.26. The membrane flux was set to 9L/(m²·h), membrane occurred parentally after 30days with the volatile suspended solids (VSS) concentration gradually increased from 8.1g/L to 18.0g/L. Research showed that the AnMBR can start in a short time during treating high concentration food wastewater, and run stable under high organic loading rate such as 8.5kgCOD/(m³·d). Long time filtration of the membrane leading to an increasing of VSS and soluble microbial products which may be the main reason causing membrane fouling.

Key words: food wastewater; thermophilic anaerobic digestion; membrane bioreactor; membrane filtration

据估计,我国城市餐厨垃圾年产量约 9000 万 t^[1],若处置不当会引发一系列环境卫生和食品安全问题^[2]。餐厨垃圾经过分选和除油后,形成悬浮物高和易降解有机物含量高的餐厨废水,是餐厨垃圾处理的难点。厌氧消化可以将有机物转化为生物能源,广泛的应用在废水和废物的处理中,是当前餐厨垃圾处理的主流技术。有研究表明餐厨垃圾除油后产生的餐厨废水在厌氧发酵过程中,产气潜能和产甲烷速率均显著提高^[3],且高温处理餐厨垃圾比中温处理的产气量高 32%^[4],但是普遍存在稳定性差的问题^[5-6]。餐厨废水的悬浮固体含量约为 30~50g/L,难以

通过沉降等预处理去除。如采用全混式厌氧反应器会导致搅拌能耗投入过高,容积效率较低;如采用 UASB 一类的微生物固定化反应器处理高悬浮固体含量的废水可能存在床层堵塞的问题。厌氧膜生物反应器(AnMBR)技术能够有效的截留微生物,实现固体停留时间(SRT)与水力停留时间(HRT)的分离,在截留微生物的同时提高系统稳定性和出水水质

收稿日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(51778616);中国农业大学国际化培养提升项目(00119521)

* 责任作者, 教授, qiaowei@cau.edu.cn, wayqiao@sina.cn

以及有机物去除率^[5,7-8],具有良好的应用前景.目前 AnMBR 处理除油餐厨废水的研究较少,且多集中在中温条件,如黄振兴等^[9]研究了中温 AnMBR 在 20、30 和 50d 的 SRT 条件下对除油后餐厨废水的处理,结果表明 3 个条件下反应器均可稳定运行,膜出水 COD 去除率可达 90%以上,可获得最佳 COD 转化率的工况为 SRT30d;Cheng 等^[5]进行了中温 AnMBR 在不同有机负荷(OLR)条件下对配制的低油脂餐厨废水的研究,OLR 可达 9.72gCOD/(L·d),AnMBR 运行效果优于折流板反应器和全混式厌氧反应器.目前关于高温 AnMBR 处理餐厨废水的研究较少,且由于不同餐厨废水的复杂和异质性、膜种类的各异性,AnMBR 对餐厨废水的处理效果不明确.本文以实际工程的除油后餐厨废水为处理对象,在高温 (50±1)℃条件下研究 AnMBR 中的高负荷启动与运行,直至发生膜污染,以期餐厨废水的厌氧膜处理提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料与装置

表 1 餐厨废水与接种污泥的基本性质
Table 1 Characteristics of food waste and inoculum

参数	单位	餐厨废水(n=13)	接种污泥(n=2)
TS	g/L	83.8±6.0	34.7±0.1
VS	g/L	64.4±8.5	9.8±0.4
MLSS	g/L	41.1±7.5	18.4±2.6
VSS	g/L	38.3±7.0	9.1±0.8
TCOD	g/L	128.3±9.4	19.4±3.2
SCOD	g/L	73.5±7.0	10.0±1.1
氨氮	mg/L	557±67	2208±267
总蛋白质	g/L	16.0±4.3	/
溶解性蛋白质	g/L	7.0±2.4	/
碳水化合物-以葡萄糖计	g/L	36.2±23.4	/
溶解性碳水化合物-以葡萄糖计	g/L	23.0±4.5	/
粗脂肪含量	g/kgDM	98±18	/

注:“/”为未测试.TS:总固体含量;VS:挥发性固体含量; MLSS:悬浮固体;VSS:挥发性悬浮固体; TCOD:总化学需氧量.

餐厨废水取自江苏省某餐厨垃圾处理公司,经公司完成分拣、破碎、制浆和高温除油处理后,取液相餐厨废水保存在 4℃条件下供研究使用.接种污泥取自实验室运行良好的中温(37±1)℃垃圾渗滤液厌氧处理后的出料,首先将接种污泥每天升高 5℃培养,达到 50℃后维持该温度至 1 周,之后用于连续试验.

餐厨废水与接种污泥性质如表 1 所示.试验启动初期未添加微量元素,试验启动后期以及 HRT15d 运行阶段,每次进料都加入一定浓度的微量元素: Fe²⁺ 100mg/L, Co²⁺ 1mg/L, Ni²⁺ 1mg/L.

试验装置如图 1 所示,采用分置式厌氧膜生物反应器.系统由全混式厌氧发酵罐和膜分离单元组成.全混反应器的有效容积为 12L,高度 370mm,直径 300mm.膜生物反应器的有效容积为 3L,反应器总体的有效容积为 15L.纤维膜组件由日本东北大学环境保全研究室提供,膜的有效过滤面积为 0.1m²,孔径为 0.1μm,膜材质为聚四氟乙烯.发酵温度为 (50±1)℃,通过恒温加热器(亚速旺 TMK-2K)控制全混式发酵罐和膜分离单元的温度.

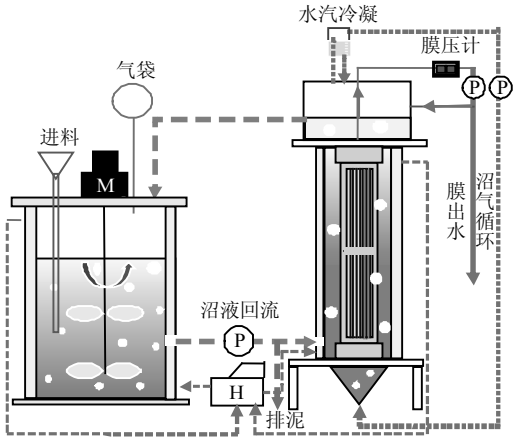


图 1 厌氧膜生物反应器试验装置

Fig.1 Set up of AnMBR

字母 P 表示泵,H 表示加热水箱,M 表示电机(左:CSTR 单元;右:膜分离单元)

AnMBR 的运转方式如下:每天手动进料,保持运行过程 SRT 恒定为 100d,启动 HRT 为 20d,运行 HRT 为 15d.膜运转方式为 5min 一个循环,其中抽吸 4min,松弛 1min.膜运行的过滤通量为 9L/(m²·h),包括松弛时间在内的平均通量为 7L/(m²·h).膜过滤压力由负压计(ESMPS 数显压力变送器)监测.装置中使用了 2 个蠕动泵(申辰 BT100N 蠕动泵)、1 个隔膜式气泵(日本 Iwaki APN-053)和水汽冷凝装置.其中 2 个蠕动泵分别用于从膜单元中抽取膜出水、连接 CSTR 与膜分离单元并将污泥从 CSTR 中运送到膜单元和定期排泥.每天排泥 1 次约 2min,排泥量为 150mL,排泥泵的转速为 16r/min.隔膜式气泵流量为 5~6L/min,用于将系统产生的沼气运送到膜单元底部,形成气泡对纤维膜丝进行抖动,减轻膜污染.水汽

冷凝装置位于膜单元上空并与隔膜式气泵管路相接,在气体通过时得到冷凝,之后回流到反应器中.此外,发酵的产气通过气袋被收集并通过气体流量计(LML-1)检测产量.在发酵罐内设有温控器(臣源WK-206),其电源直接与恒温加热水箱相接,监测反应器内部的温度并控制电源.

1.2 分析方法

TS、VS、MLSS 和 VSS 的测定采用重量法^[10].pH 值用 Mettler-Toledo 酸度计测定.COD 采用连华试剂盒和美国 Hach 消解仪消解后用分光光度计在 600nm 吸光度下检测,以葡萄糖为标准样品;氨氮采用纳氏试剂比色法测定;碱度采用滴定法^[11]测定.蛋白质采用 Lowry 法测定,以牛血清白蛋白为标准样品,碳水化合物的测定为硫酸-苯酚法,以葡萄糖为标准样品,具体步骤参照文献[12].粗脂肪含量测定依据索氏抽提法.沼气产量由湿式气体流量计读数变化得出,沼气成分(CH₄与 CO₂)由岛津 GC-8A 气相色谱仪检测,检测条件:载气(氢气)分压 0.38MPa,流速为 20~30mL/min,进样口、柱温、检测器(FID)温度分别为 120℃,50℃和 120℃,测样体积 0.5mL,测样时间 4min.挥发性有机酸(VFAs)用岛津 GC-2010Plus 检测,检测条件:载气(氮气)分压为 0.5MPa,氢气流速 20~30mL/min,进样口、柱温和检测器(FID)温度设置分别为 230℃,60℃和 250℃,进样体积为 1μL.

1.3 去除率的计算公式

有机物去除率计算方法如式(1)所示:

$$R_x = \frac{M_{x.in} - M_{x.slu} - M_{x.eff}}{M_{x.in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_x 为有机物去除率,%; $M_{x.in}$ 为进料中 x 的质量,g/d; $M_{x.slu}$ 为排泥中 x 的质量,g/d; $M_{x.eff}$ 为膜出水中的 x 的质量,g/d.

数据采用 Excel 2019 和 Origin 2017 软件处理.

2 结果与讨论

2.1 反应器启动及运行性能

由图 2 可见,HRT 20d 为启动期,初始进料的有机负荷为 5.6kgCOD/(m³·d),1~6d 运行过程中,反应器中发酵液的 pH 值由 7.91 逐渐降到 6.90,产沼气速率由 0.70L/(L·d)逐渐下降到 0.56L/(L·d),CH₄ 含量始终较低,为 31%左右,TVFA 达到 10868mg/L.有机酸积累导致系统开始发生酸化,于是在 7~15d 停止进

料,反应器中的 TVFA 逐渐降解至 2231mg/L,产沼气速率逐渐上升到 1.0L/(L·d),之后降低到 0.27L/(L·d);反应器中 pH 值上升到 8.25.从第 16d 开始,向进料中添加微量元素.第 20d 开始增加系统有机负荷至 6.9kgCOD/(m³·d),系统产气逐渐恢复,最高达到 4.1L/(L·d),之后逐渐稳定在 3.2L/(L·d)左右,COD 去除率为 95%.系统 pH 值稳定在 8.18 左右,CH₄ 含量也逐渐稳定在(61.3±1.1)%,启动后期,反应器中的 TVFA 含量较低,为(368±104) mg/L,氨氮浓度始终维持在 2000mg/L 左右,没有明显的增加,且低于文献中报道的餐厨垃圾高温厌氧发酵氨氮抑制阈值 2500~3500mg/L^[13-14].本试验的启动时间比文献[15]报道的 53d 短.

从第 30d 开始,将 HRT 缩短为 15d 运行,由表 2 可见,该阶段的 OLR 提高到 8.5kgCOD/(m³·d)左右,产沼气速率稳定在 4.3L/(L·d),CH₄ 含量为(60.5±1.1)%.反应器的 TVFA 始终保持在(183±147)mg/L,膜出水 TVFA 为(103±77)mg/L,乙酸占主要成分,发酵罐内的 pH 值为 8.08 左右,表明在高温、高有机负荷下处理餐厨垃圾时,AnMBR 可以稳定运行.

由图 3 可看出,HRT 为 15d 时收集的甲烷占总进料 COD 的 86%,而膜出水和排泥的 COD 分别仅为 1.6%和 4.4%,经过膜反应器发酵后 COD 大部分转化为甲烷,出水 COD 浓度大幅度降低.TS 和蛋白质去除率分别为 81%和 85%,VS、TCOD 和碳水化合物的去除率均达到 94%以上,表明 AnMBR 对废弃物中有机物的去除效率较好,且排出的沼液少,减小了沼液量多造成的储存和处理的难度.以 TS、VS 和 COD 表示的沼气产量分别达到 833.6L/kgTS、948.3L/kgVS 和 486.0L/kgTCOD.此外,以 TCOD 表示的甲烷产量为 301.3L/kgCOD,是理论值 350L/kgCOD^[14]的 86%,这一点也与物料平衡中甲烷所占 COD 比例相吻合.

由表 3 可见,高温餐厨厌氧发酵中,甲烷产量为 400~578L/kgVS_{in}.本研究中当 OLR 为 8.5kgCOD/(m³·d)时,甲烷产量为 578L/kgVS_{in},比 Algapani 等^[12]研究中 OLR 为 10kgCOD/(m³·d)条件下以 CSTR 厌氧处理结果高 25%,比 Micolucci 等^[16]对餐厨垃圾两相高温厌氧处理研究高 21%.相近的 OLR 条件下比中温厌氧研究^[5]中的甲烷产量高.在有机物去除率方面,由于将膜出水和排出污泥的 TCOD/VS 都作为

出料 TCOD/VS 计算在内,本研究中 TCOD 和 VS 去除率分别为 96%和 94%,与两相厌氧处理效果^[17]和其他厌氧膜生物反应器^[5,15]忽略排出污泥 TCOD/VS 计算得到的去除率结果相比略低^[12,18],比 CSTR 反应器^[19]处理效果好.可见 AnMBR 在中高温条件下提高餐厨垃圾厌氧处理效果和产气方面都有很好的优势,高温条件下 AnMBR 处理餐厨垃圾甲烷产量高,相比于两相厌氧处理具有较优的表现.

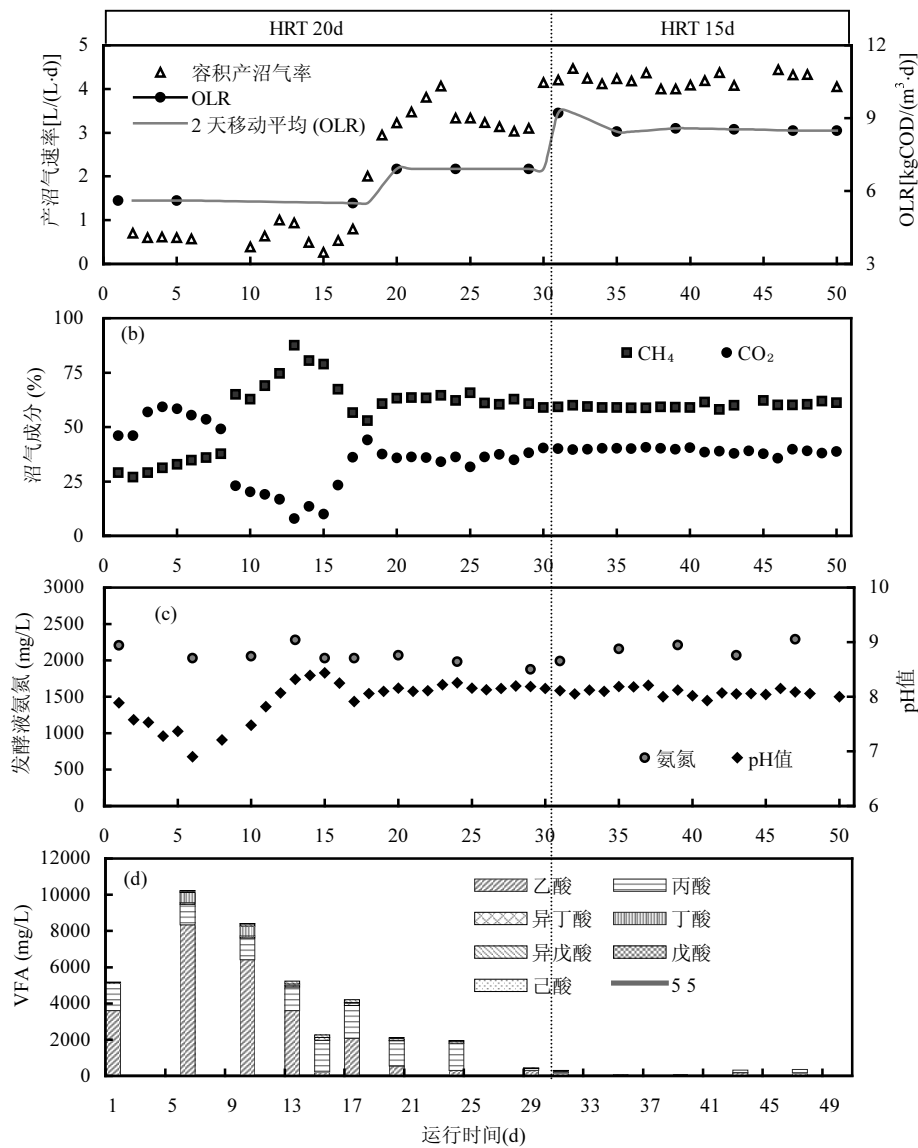


图 2 AnMBR 连续实验运行情况
Fig.2 Performance of AnMBR with different HRTs

表 2 反应器在 HRT15d 的运行性能

Table 2 Summary of the parameters in AnMBR of HRT 15days					
参数	单位	数值	参数	单位	数值
运行时间	d	30-50	总碱度	g-CaCO ₃ /L	11.3±0.8
OLR	kg-COD/(m ³ ·d)	8.5	碳酸氢盐碱度	g-CaCO ₃ /L	5.9±0.3
沼气容积产率	L/(L·d)	4.3±0.2	TVFA	mg/L	103±77
CH ₄	%	60.5±1.1	乙酸	mg/L	98±28
CO ₂	%	38.9±1.4	丙酸	mg/L	3±2
pH-膜出水		8.26±0.02	丁酸	mg/L	ND
pH-发酵罐内		8.08±0.04	戊酸	mg/L	ND

注：“n.d.”表示低于检出限;TVFA浓度为膜出水中的浓度.

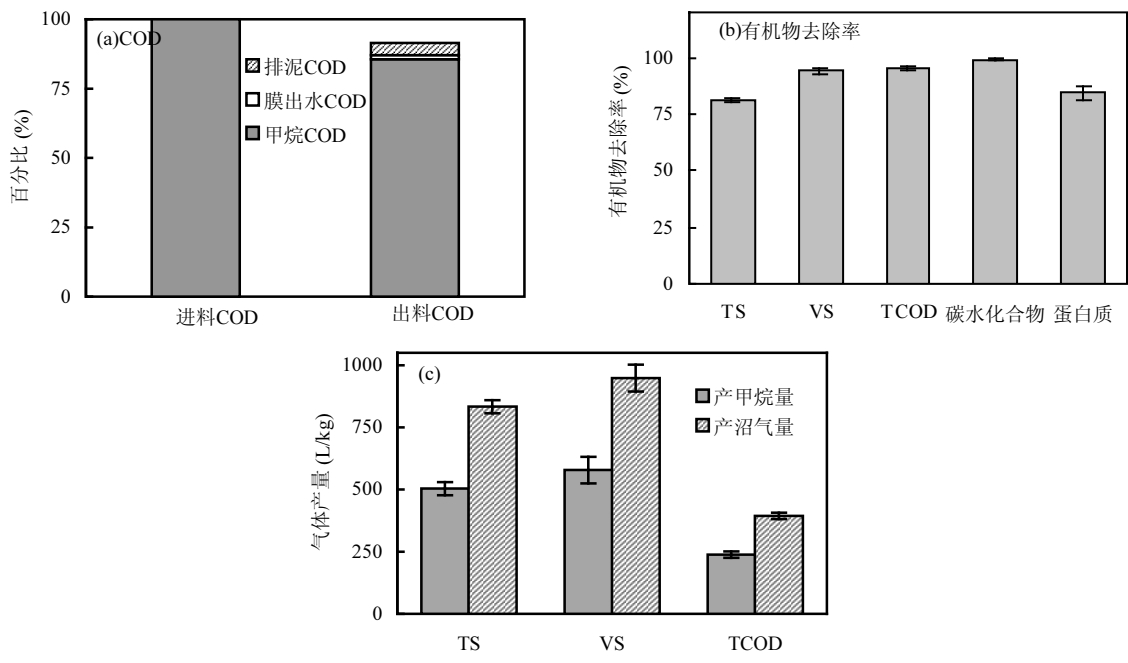


图3 基于 COD 的物料平衡、有机物去除率以及甲烷/沼气产量

Fig.3 COD mass balance, organic removal efficiency and methane/biogas production

表 3 本研究与其他餐厨垃圾厌氧处理对比

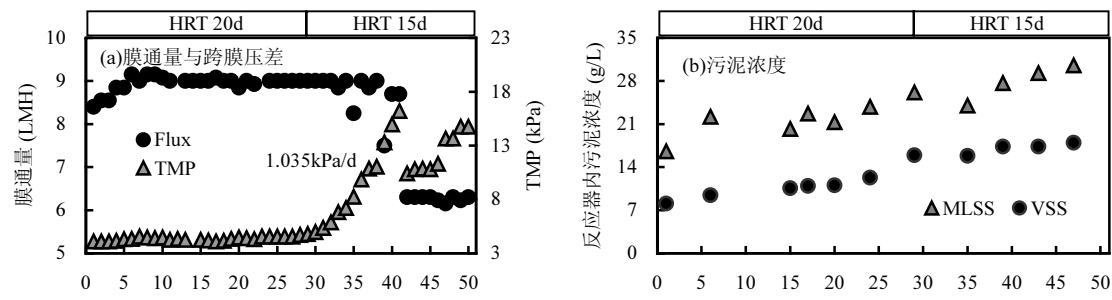
Table 3 Comparison of current study and existing literature

废弃物类型	反应器类型	温度(℃)	HRT(d)	OLR[kg-COD/(m ³ ·d)]	甲烷产量(L/kgVS _m)	TCOD 去除率(%)	VS 去除率(%)	参考文献
餐厨回收废水	旋转盘式 AnMBR	30	10	3	140.5L/kgCOD _{去除}	98	98	[15]
配制餐厨	CSTR +AnMBR	35	7.5	9.72	550	99	98	[5]
餐厨垃圾	CSTR	35		2gVS/(L·d)	330		72	[18]
餐厨垃圾	CSTR	55	15	10	463	73	82	[12]
餐厨垃圾	两相 CSTR	55/55	3.3/12.6	18.4/4.8gVS/(L·d)	476			[16]
餐厨垃圾	CSTR	55		2gVS/(L·d)	400			[19]
配制餐厨	两相 CSTR	55/37	3.7/1.5	3.4/6.1	578		99	[17]
餐厨废水	CSTR +AnMBR	50	15	8.5	578	96	94	本研究

2.2 膜过滤性能

通过对膜运行过程中的膜通量(Flux)和跨膜压差(TMP)监测可判定膜的运行是否正常.图 4 所示,在实验 1~30d 调节膜通量由 8.6L/(m²·h)逐渐稳定为 9.0L/(m²·h),该阶段的 TMP 为 4.4kPa 左右,增长速率较缓慢,为 0.015kPa/d;从第 31d 后 TMP 以 1.035kPa/d 的速率迅速增加,在第 41d 增加至

17.0kPa,膜的渗透性呈现明显降低的趋势.在第 35d 膜通量降低到 8.3L/(m²·h),手动调节使其恢复设定值,在 39d 时再次下降到 7.5L/(m²·h),较难调节回 9.0L/(m²·h);因此,在第 42d 尝试将膜通量降低到 6.3L/(m²·h)缓解 TMP 的迅速增加,然而 TMP 仍以 0.628kPa/d 的增长速率增加,膜的渗透性较低且呈下降趋势.



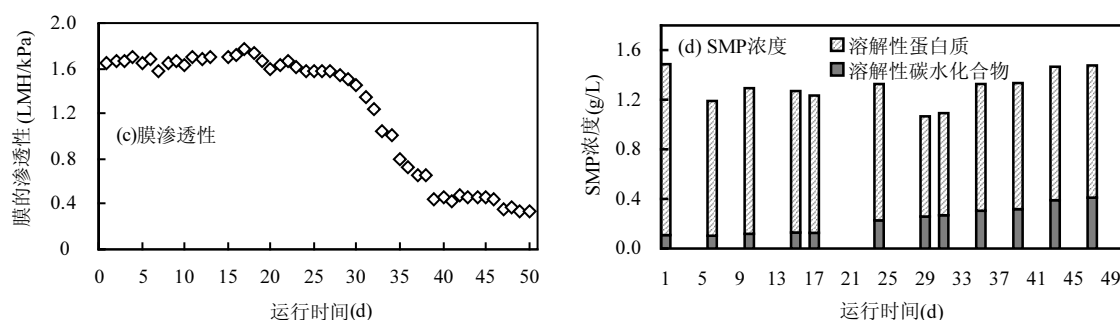


图4 膜运行过程中膜通量(Flux)、TMP、污泥浓度、膜渗透性和 SMP 浓度

Fig.4 Flux, TMP, permeability and sludge concentration of the whole experiment

反应器中污泥浓度直接影响膜的过滤阻力,溶解性微生物产物(SMP)被普遍认为是膜的主要污染物质之一^[20-22],其主要成分包括蛋白质、多糖、腐殖质和核酸等.本研究中 MLSS 和 VSS 浓度随反应器运行时间的延长而逐渐升高(图 4b),其中 MLSS 浓度由 16.6g/L 升高到 29.3g/L,VSS 浓度由 8.1g/L 逐渐升高到 18.0g/L,这一结果也与之前的研究结果相似^[23-24].以发酵液中溶解性蛋白质和溶解性碳水化合物代表 SMP 浓度,由图 4d 可知,溶解性蛋白质在整个运行过程中浓度为 1039~1071mg/L,是 SMP 的主要成分,也与以往研究结果相同^[25-26].本研究中碳水化合物的浓度相对较低,且逐渐增加,在 HRT 20d 的平均浓度为(160±65) mg/L,在 HRT 15d 的平均浓度达到(337±46) mg/L,比 HRT 20d 增加了 1 倍多.整个运行过程的 MLSS 增长量为 76.5%,SMP 增长量为 12%,悬浮颗粒的积累较为明显,这也体现了厌氧膜生物反应器中膜对固体颗粒和微生物的有效截留作用.

由图 5 可以看出,在 VSS 浓度为 12.3g/L 左右时,膜的渗透性开始呈现出缓慢下降趋势,从 1.77L/(m²·h·kPa)降低到 1.58L/(m²·h·kPa),TMP 略有升高.当 VSS 浓度大于 15.5g/L 时膜的渗透性开始出现明显的下降,随着 VSS 浓度继续上升到 18.0g/L 时,跨膜压差急剧上升到 13.7kPa,同时伴随着膜渗透性的急剧下降.结合对 TMP 增长率和渗透性变化等分析,膜污染发生的原因可能是:(1)由于膜的长时间运行导致反应器内污泥浓度增加,使膜孔逐渐堵塞,膜的渗透性降低;(2)由于反应器有机负荷的突然增加导致微生物自身保护机制分泌的 SMP 增加.

膜通量的降低和 TMP 的升高并不一定完全同步,而是 TMP 先展现出升高的趋势(从第 31d 开始),这就预示着可能已经发生膜污染,之后的膜通量降

低(第 35d)伴随着 TMP 的迅速升高进一步说明膜污染已经发生.反应器内污泥浓度的升高也会造成膜渗透性能下降,而使跨膜压差升高.此外,在膜污染发生后采取降低膜通量的方式缓解膜污染并不是一种很好的解决方式,跨膜压差依然会很快增加,污泥浓度和 SMP 浓度的增加也直接影响到膜污染程度.可进行物理或化学清洗等方式^[27-28]解除膜污染.

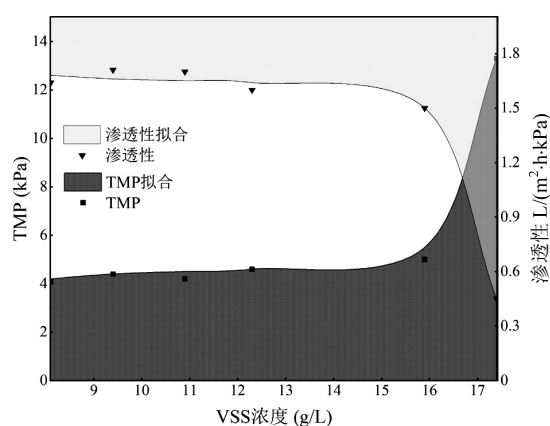


图5 TMP 和膜渗透性随 VSS 的变化

Fig.5 TMP and permeability with the variation of VSS concentration

3 结论

3.1 在高温条件下用纤维膜厌氧反应器在高负荷下处理实际经过除油后的餐厨废水,1 个月时间能成功启动反应器.在 HRT 15d 和 OLR 为 8.5kgCOD/(m³·d)的条件下,甲烷产量达到 578L/kgVS_m,容积产气率达到 4.3L/(L·d),COD 去除率达到 96%.厌氧膜生物反应器内的有机酸维持在 103mg/L 左右的较低水平,在高温高负荷的条件下没有发生丙酸的积累.

3.2 反应器中污泥浓度和溶解性微生物产物的增加导致膜过滤性能下降是膜污染的主要因素,在发生膜

污染之后,通过降低过滤通量并不能显著缓解 TMP.

参考文献:

- [1] 王丽华,李宇宸,韩 聪.城市餐厨垃圾处理技术分析 & 思路分析 [J]. 中国资源综合利用, 2018,36(12):77-79.
Wang L H, Li Y C, Han C. Technical analysis and thinking analysis of urban kitchen waste treatment technology [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018,36(12):77-79.
- [2] 张 妍,王元刚,卢志强,等.我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 [J]. 环境科学, 2015,36(10):3603-3610.
Zhang Y, Wang Y G, Lu Z Q, et al. Odor emission characteristics from biochemical treatment facilities of kitchen waste in China [J]. Environmental Science, 2015,36(10):3603-3610.
- [3] 苏 敏,乔 玮,Algapani D E,等.餐厨垃圾与污泥厌氧发酵产气动力学特性研究 [J]. 新能源进展, 2016,4(1):1-9.
Su M, Qiao W, Algapani D E, et al. Kinetics characterization of anaerobic digestion of food waste and sludge [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016,4(1):1-9.
- [4] 郭香麟,左剑恶,史绪川,等.餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 [J]. 环境科学, 2017,38(7):3070-3077.
Guo X L, Zuo J E, Shi X C, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and straw [J]. Environmental Science, 2017,38(7):3070-3077.
- [5] Cheng H, Hiro Y, Hojo T, Li YY. Upgrading methane fermentation of food waste by using a hollow fiber type anaerobic membrane bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2018,267:386-394.
- [6] 彭绪亚,洪俊华,贾传兴,等.磷酸酯酶活性对餐厨垃圾单相厌氧消化抑制的预警作用 [J]. 中国环境科学, 2012,32(3):541-546.
Peng X Y, Hong J H, Jia C X, et al. Role of phosphatase activity as an early warning indicator of inhibition in a single-phase anaerobic digester treating food waste [J]. China Environmental Science, 2012, 32(3):541-546.
- [7] 戴金鑫,牛承鑫,潘 阳,等.基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 [J]. 环境科学, 2020,https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202001036.
Dai J J, Niu C X, Pan Y, et al. Performance of anaerobic membrane bioreactors for co-digestion of sewage sludge and food waste [J]. Environmental Science, 2020,https://doi.org/10.13227/j.hjkk. 202001036.
- [8] Jiang M M, Westerholm M, Qiao W, et al. High rate anaerobic digestion of swine wastewater in an anaerobic membrane bioreactor [J]. Energy, 2019,193:116783.
- [9] 黄振兴,席克忠,肖小兰,等.污泥停留时间对厌氧膜生物反应器处理餐厨废水效能的影响 [J]. 环境工程学报, 2016,10(11):6357-6363.
Huang Z X, Xi K Z, Xiao X L, et al. Effect of sludge retention time on performance of anaerobic membrane bioreactor treating kitchen wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11):6357-6363.
- [10] Clesceri L S, Grenberg A, Eaton A D, et al. Standard methods for the examination of waters and wastewaters [J]. Health Laboratory Science, 2005,4(3):137.
- [11] Rieger C, Weiland P. Prozessstörungen frühzeitig erkennen [J]. Biogas Journal, 2006,6(4):18-20.
- [12] Algapani D E, Wang J, Qiao W, et al. Improving methane production and anaerobic digestion stability of food waste by extracting lipids and mixing it with sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2017,244: 996-1005.
- [13] 黄安寿,何永全,曾祖刚.餐厨垃圾高温厌氧消化过程参数研究 [J]. 中国沼气, 2019,37(2):36-41.
Huang A S, He Y G, Zeng Z G. Study on parameters of high temperature anaerobic digestion of kitchen waste [J]. China biogas, 2019,37(2):36-41.
- [14] 野池达野.甲烷发酵 [M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- Tatsuya Noike. Methane Fermentation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [15] Seo H, Cho K, Shin J, et al. Linking process performances and core microbial community structures in anaerobic membrane bioreactor with rotatory disk (ARMBR) system fed with high-strength food waste recycling wastewater [J]. Bioresource Technology, 2019,291:121918.
- [16] Micolucci F, Gottardo M, Bolzonella D, et al. Automatic process control for stable bio-hythane production in two-phase thermophilic anaerobic digestion of food waste [J]. International journal of hydrogen energy, 2014,39(31):17563-17572.
- [17] Yeshanew M M, Frunzo L, Pirozzi F, et al. Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors [J]. Bioresource Technology, 2016, 220:312-322.
- [18] Logan M, Safi M, Lens P, et al. Investigating the performance of internet of things based anaerobic digestion of food waste [J]. Process Safety and Environment Protection, 2019,127:277-287.
- [19] Yirong C, Heaven S, Banks C J. Effect of a Trace element addition strategy on volatile fatty acid accumulation in thermophilic anaerobic digestion of food waste [J]. Waste and Biomass Valorization, 2015, 6(1):1-12.
- [20] Luna H J, Baëta B E L, Aquino S F, et al. EPS and SMP dynamics at different heights of a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) [J]. Process Biochemistry, 2014,49(12):2241-2248.
- [21] Zhang Q, Tan V, Hong G, et al. Optimal biogas sparging strategy, and the correlation between sludge and fouling layer properties in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) [J]. Chemical Engineering Journal, 2017,319:248-257.
- [22] Mahmoud I, Liao B. Effects of sludge concentration and biogas sparging rate on critical flux in a submerged anaerobic membrane bioreactor [J]. Journal of Water Process Engineering, 2017,20:51-60.
- [23] Wandera S M, Qiao W, Jiang M M, et al. Enhanced methanization of sewage sludge using an anaerobic membrane bioreactor integrated with hyperthermophilic biological hydrolysis [J]. Energy Conversion and Management, 2019,196:846-855.
- [24] Qiao W, Takayanagi K, Shofie M, et al. Thermophilic anaerobic digestion of coffee grounds with and without sludge as co-substrate using a submerged AnMBR: system amendments and membrane performance [J]. Bioresource Technology, 2013,150:249-258.
- [25] Ng K K, Lin C F, Panchangam S C, et al. Reduced membrane fouling in a novel bio-entrapped membrane reactor for treatment of food and beverage processing wastewater [J]. Water Research, 2011,45:4269-4278.
- [26] Huang Z, Ong S L, Ng H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling [J]. Water Research, 2014,45:705-713.
- [27] 王 盼.平板膜污泥浓缩工艺中污染膜的膜清洗方式 [J]. 净水技术, 2015,(1):82-87.
Wang P. Membrane cleaning patterns of fouled membrane for flat-sheet membrane sludge thickening process [J]. Water Purification Technology, 2015,(1):82-87.
- [28] 乔 玮,姜萌萌,Wandera S M,等.厌氧平板膜生物反应器连续处理猪场废水研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):104-110.
Qiao W, Jiang M M, Wandera S M, et al. Continuous methane fermentation of swine wastewater using a flat sheet membrane bio-reactor [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):104-110.

致谢: 本论文试验平台的搭建得到了日本东北大学李玉友教授环境保全研究室的帮助。

作者简介: 姜萌萌(1992-),女,山东烟台人,中国农业大学博士研究生,研究方向为厌氧膜生物反应器.发表论文 5 篇。