

厌氧膜生物反应器处理高浓度有机废水的中试研究

闫林涛, 黄振兴, 肖小兰, 任红艳, 赵明星, 阮文权, 缪恒锋*

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 对厌氧膜生物反应器(AnMBR)处理高浓度有机废水的运行效能进行了中试研究。在不排泥工况下(SRT无限长), AnMBR的COD去除负荷和沼气生产强度可分别稳定在 $4.4\sim 4.8\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $2.2\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右;而在排泥条件下(SRT=50 d)两者可分别稳定在 $5.2\sim 6.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 和 $2.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右。在整个220 d的运行过程中, AnMBR的COD总去除率都可维持在90%以上,且沼气中甲烷体积分数基本保持在58%左右。发酵系统中pH较为稳定,保持在7.6~7.8之间;VFA含量始终维持在较低水平。此外,虽然运行过程中有较高浓度的氨氮积累,但是并没有对厌氧消化性能造成显著影响,展现了AnMBR对内源性抑制因素的良好耐受力。排泥和不排泥条件下的运行参数对比表明, AnMBR运行过程中SRT的优化非常关键,不同SRT会导致发酵体系发生一系列的变化,很大程度上决定了AnMBR的处理效能。中试结果表明, AnMBR可以实现高效厌氧消化系统的快速启动,而且良好的抗冲击负荷能力能够保证消化体系长期高效稳定运行。

关键词: 厌氧膜生物反应器;高浓度有机废水;膜通量;厌氧消化

中图分类号: X 703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2015)12—1248—08

Pilot Experiment of Anaerobic Membrane Bioreactor(AnMBR)for Treating High-Concentration Organic Wastewater

YAN Lintao, HUANG Zhenxing, XIAO Xiaolan, REN Hongyan,

ZHAO Mingxing, RUAN Wenquan, MIAO Hengfeng

(School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The operation of a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for treating high-concentration organic wastewater was investigated. The result showed that AnMBR could finish the fast start-up of a highly efficient anaerobic digestion system and its good anti-shock loading capability could ensure a long-term and stable operation of the digestion system. Without the biomass withdrawal condition(SRT infinitely long), the COD removal loading rate and the biogas production strength of AnMBR were about $4.4\sim 4.8\text{ kg COD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and $2.2\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, respectively, while they were $5.2\sim 6.0\text{ kg COD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ and $2.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ with biomass withdrawal (SRT=50 d). In the whole process of 220 days, the COD removal rate was about 90% and the CH_4 content was about

收稿日期: 2014-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC 21276114);国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC11B05);中央高校基本科研业务资金专项(JUSRP11435, JUSRP111A12)。

* 通信作者: 缪恒锋(1980—),男,江苏江阴人,工学博士,副教授,主要从事废水厌氧生物处理研究。E-mail: hfmiao@jiangnan.edu.cn

58%. The pH was kept at 7.6~7.8 and VFA was at a low level in the digestion system. Furthermore, the high accumulation of ammonia had no significant effect on the digestion performance, which indicated that AnMBR had good tolerance to the endogenous inhibitory factor. A comparison of the operating parameters without biomass withdrawal and with biomass withdrawal conditions showed that the optimization of sludge retention time (SRT) was very important to the AnMBR operation. Different SRTs would lead to a series of variations in the digestion system, which largely determined the processing performance of the AnMBR.

Keywords: anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), high-concentration organic wastewater, flux, anaerobic digestion

厌氧生物技术是一种低成本的废水处理技术,尤其在处理高浓度有机废水中,降解有机物的同时可以产生沼气,有效地将废水处理和能源回收相结合,实现废物的“减量化、无害化、资源化”。一般说来,传统厌氧消化的停留时间较长且需要较大的反应容积,传统高速颗粒污泥厌氧技术(如EGSB, UASB)又难以解决由于废水较高悬浮物导致的污泥流失问题^[1]。因此,厌氧膜生物反应器(Anaerobic Membrane Bioreactor, 简称 AnMBR)作为一种可以实现高负荷并解决污泥流失问题的新型废水处理技术,引起了国内外的广泛关注^[2-3]。

AnMBR 是一种有机结合厌氧生物处理单元和膜分离技术的新型废水处理工艺^[4],其不仅保留了厌氧技术的诸多优点,而且膜组件的引入可以将微生物完全截留,从而实现 SRT 和 HRT 的有效分离。也正因如此,厌氧膜生物反应器具备污泥浓度高、泥龄长、耐冲击负荷能力强等优点^[4-5],其在处理高浓度和复杂有机废水方面展现出很好的应用前景。然而,目前国内采用 AnMBR 工艺处理高浓度复杂有机废水的相关研究和应用较少。为此,本文中重点讨论了 AnMBR 工艺在高浓度有机废水厌氧消化过程中的运行效能和特性,旨在为高浓度有机废水的能源化回收利用提供一种高效稳定的技术途径。

1 材料与方法

1.1 餐厨废水水质

本实验所用的实验进水是取自于苏州某工厂的高浓度有机废水。废水水质如表 1 所示。废水中 COD 为 78 000~100 000 mg/L, SS 为 15.5~21.4 g/L, 电导率为 8.98~12.4 ms/cm, pH 在 4 左右, 此外

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等无机离子质量浓度较高。

表 1 废水水质

Table 1 Characteristics of the wastewater

参数	单位	数值
TCOD	mg/L	78 000~100 000
TSS	g/L	15.5~21.4
VSS	g/L	13.8~19.6
VSS/TS	%	89.5~94.2
pH	—	3.59~4.12
钙	mg/L	1 080~1 243
镁	mg/L	95.2~107.8
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	mg/L	268~383
TN	mg/L	1 658~2 098
TP	mg/L	76.5~89.3
电导率	ms/cm	8.98~12.4

1.2 厌氧膜生物反应器

中试规模 AnMBR 装置构筑于苏州某工厂内,其结构如图 1 所示,该系统主要包括厌氧反应单元和膜单元。其中膜单元主要由膜分离组件和循环泵组成,该膜分离组件采用管式超滤膜,每根内部包括 4 根直径为 8 mm、长度为 1 m 的膜管,总膜面积为 0.095 m²,膜材质为 PVDF(德国 MEMOS),截留相对分子质量为 100 kDa。循环泵(25QY-2SS,南方泵业股份有限公司制)的功率为 1.1 kW,体积流量为 26 L/min,操作压力为 0.23 MPa,提供的错流速度为 2.2 m/s。在 AnMBR 设计和构筑之前,该膜组件在上述参数下,首先以现场 CSTR 反应器中的餐厨废水消化混合液为进水试运行了 10 个月,获得的膜平均通量为 30 L/(m²·h);同时结合现场 CSTR 反应器的实际运行工况,根据相应参数设计和构建

AnMBR 反应器。AnMBR 主体结构由 304 不锈钢制成,总体积为 1.2 m^3 ,工作容积为 1 m^3 。反应器侧壁

上留有上、中、下 3 个取样口。反应器的温度通过自动加热和温度控制器维持在 $(39 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

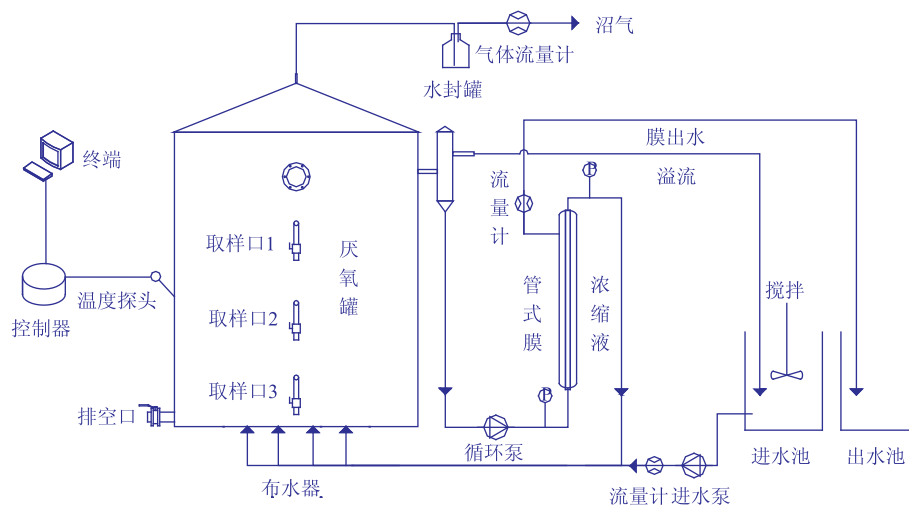


图 1 厌氧膜生物反应器中试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of AnMBR

原水经过 16 目 (1 mm) 的细格栅去除大于 1 mm 的杂质,然后与膜浓缩液混合后从底部布水管进入厌氧反应器,由于循环泵提供了较大的循环量,使得厌氧反应器内部产生 2.0 m/h 的上升流速,能够保证底物与微生物的充分接触,因此该反应器没有外加搅拌装置。

1.3 AnMBR 的启动和运行

AnMBR 接种污泥取自于该厂处理废水的 CSTR 反应器,接种量为 1 m^3 ,其中 MLSS 为 7.1 g/L ,MLVSS/MLSS 为 0.75。反应器总共运行 220 d,分为两个阶段:第一阶段(0~140 d)不排泥,即 SRT 无限长;第二阶段(141~220 d)每天从反应器中排出泥水混合液 20 L 以缩短 SRT,即 $\text{SRT}=50 \text{ d}$ 。在反应器启动过程中,进水量逐步提升,初期的膜出水量要大于进水量,因此采用出水回流以保证进出水量平衡;在此后的运行过程中则根据膜通量的变化来控制每天的进水量,从而达到进水平衡。在整个 AnMBR 的启动和运行阶段,当膜通量降低至 $(10 \pm 0.5) \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,采用化学法膜清洗,在此基础上考察和分析 AnMBR 系统对高浓度有机废水的处理效能和特性。

1.4 分析方法

每次分别从反应器上、中、下 3 个取样口取样,将 3 个水样等体积混合进行指标测定。电导率采用

DDS-307 电导率仪测定,TN、TP、氨氮、钙、镁、 COD_G 、VFA 的测定方法见参考文献[6],MLSS、MLVSS、碱度(以 CaCO_3 计)的测定见参考文献[7];沼气产量的测定采用在线湿式流量计计量,甲烷含量采用便携红外沼气分析仪(Gasboard-3200 L,武汉四方光电科技有限公司制)测定。

2 结果与讨论

2.1 AnMBR 的快速启动和稳定运行

由于接种污泥取自于该工厂处理废水的 CSTR 反应器,本身活性较高且对原水具有较好的适应能力,因此在 10 d 内完成了反应器的启动。由图 2 可以看出,在反应器启动阶段,进水 COD 容积负荷从 $2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 逐渐提升至 $7.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,HRT 从 40 d 逐渐降低到 11 d,COD 的总去除率达到 93% 以上。但是此后随着反应器的运行,膜过滤阻力显著增加,导致膜通量从 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 急剧下降至 $11 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而进水 COD 容积负荷只能稳定在 $2.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 左右,HRT 稳定在 34 d 左右。由于膜组件在 AnMBR 启动之前已经以现场 CSTR 反应器中的废水消化混合液为进水试运行了 10 个月,获得的稳定膜平均通量为 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。因此中试 AnMBR 启动运行后膜过滤阻力的显著增加可能归因于以下两点:其一,在 AnMBR 的运行初期,由于微生物的生长和富

集,污泥浓度和发酵液黏度逐渐升高,从而造成了膜过滤阻力的增加^[1,8];其二,为了提高膜表面的错流速率,AnMBR配置了大流量的循环泵,循环泵的剪切力会减小污泥的粒径。研究表明,污泥粒径的大小是影响膜过滤的主要因素之一,小粒径污泥会优先吸附在膜表面,且由于其比表面积和比阻更大,因此更容易吸附SMP等溶解性有机物,进而会进一步增加膜的过滤阻力^[8]。有鉴于此,为了保障AnMBR的处理负荷,第63天时,在膜分离组件内增加了一根膜管,由两根膜管串联运行。最终在第一阶段AnMBR的进水COD容积负荷稳定在4.5~4.9 kg/(m³·d),HRT在12~20 d之间。从第141天开始,每天从反应器中排出20 L污泥混合液以考察排泥条件下的运行效能和特性,最终进水COD容积负荷维持在5.8~6.5 kg/(m³·d)左右,HRT在15 d左右。反应器在运行过程中进水量非人为控制,而是由膜通量决定,膜污染引起的膜通量变化导致进水容积负荷和HRT也相应变化。因进水浓度基本维持不变,可知容积负荷和HRT为反比关系。本文从容积负荷的角度来讨论反应器的运行性能。

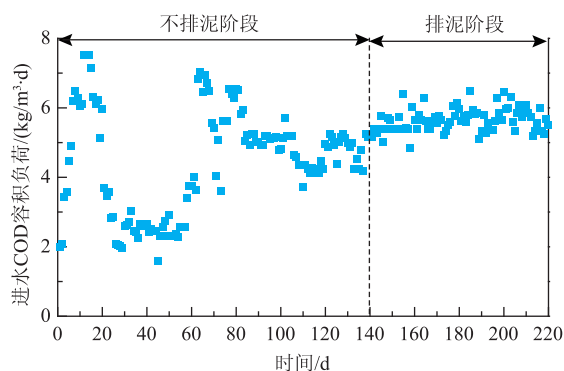


图2 反应器内运行过程中进水容积负荷变化

Fig. 2 Influent volume loading rate variation during the operating process in the reactor

2.2 AnMBR启动和运行过程中COD的去除

图3反映了AnMBR启动和运行过程中COD的变化。在0~140 d的不排泥阶段,由于膜对悬浮物质和大分子有机物的截留作用,出水COD维持在1 100~1 500 mg/L之间,但是反应器内污泥混合液上清液COD却从5 800 mg/L逐渐上升至18 000 mg/L,同时污泥浓度和发酵液黏度也显著增高。根据相关文献报道,SRT过长会降低微生物代谢活性,甚至会导致污泥中微生物细胞的大量自溶,而污泥胞外

多聚物EPS和溶解性产物SMP含量则会随着SRT的延长而逐渐增加^[7,9]。已有研究表明EPS和SMP的积累是加剧膜污染的主要因素之一^[8],而这可能也正是所研究反应器内上清液COD显著增加的主要诱因之一。总之,污泥浓度、发酵液黏度、EPS和SMP含量均与膜污染程度密切相联,从而会进一步影响膜通量和AnMBR的运行效能。因此为了避免膜的过度污染和保证反应器的高效稳定运行,在第二阶段(141~220 d)通过每天排出20 L的泥水混合液以缩短SRT。AnMBR稳定运行后的结果表明(170~220 d),最终反应器内的上清液COD维持在8 000 mg/L左右,同时膜出水COD维持在870~1 500 mg/L。由此可见,通过缩短SRT可以有效控制反应系统中的溶解性有机质浓度,而大量研究表明,溶解性有机质浓度的降低是减缓膜污染的有效途径之一^[8]。

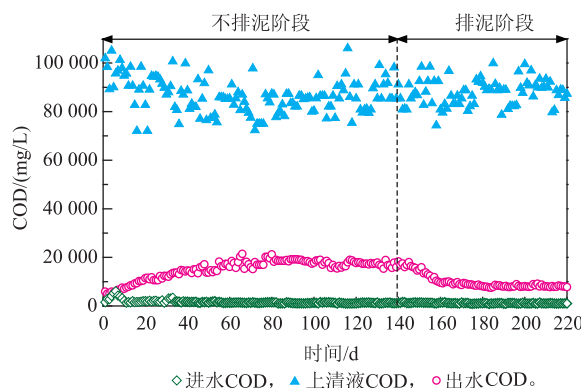


图3 反应器内运行过程中COD变化

Fig. 3 COD variation during the operating process in the reactor

根据物料平衡分析,AnMBR的COD去除负荷和总去除率分别可以按照公式(1)和(2)进行计算,其变化如图4所示。

$$L = l_j - l_{mc} - l_{ph} \quad (1)$$

$$R = \frac{l_j - l_{mc} - l_{ph}}{l_j} \quad (2)$$

式(1)(2)中: L 为COD去除负荷, l_j 为进水COD负荷, l_{mc} 为膜出水COD负荷, l_{ph} 为排出泥水混合液COD负荷, R 为COD总去除率。

在0~140 d的不排泥阶段,COD的总去除率维持在98%左右,COD去除负荷最终可稳定在4.4~4.8 kg/(m³·d)。而在排泥阶段的141~220 d,由于部分有机质随着泥水混合液被排出反应器,COD去除

率会有所降低,但是 AnMBR 的 COD 总去除率仍可维持在 90%左右。此外,在排泥阶段虽然部分生物量被排出,但是其代谢活性却显著增加,最终反应器 COD 去除负荷可稳定在 $5.2\sim 6.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,污泥 COD 负荷可达 $0.27\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

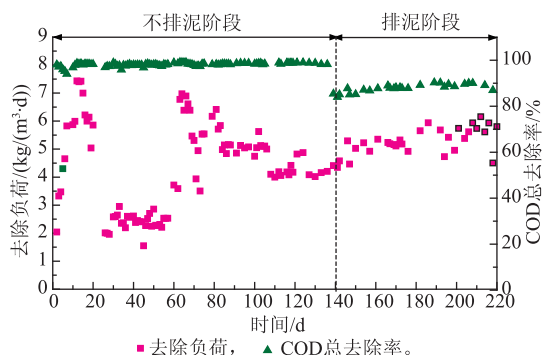


图 4 反应器内运行过程中 COD 总去除率和去除负荷变化
Fig. 4 COD total removal rate and COD removal loading rate variation during the operating process in the reactor

2.3 AnMBR 启动和运行过程中沼气生产强度及甲烷体积分数的变化

由于废水 COD 非常高,通过厌氧消化将有机质大量转化成 CH_4 可以实现能源的高效回收。中试考察了 AnMBR 启动和运行过程中沼气生产强度和甲烷体积分数的变化,结果如图 5 所示。由于本实验的接种污泥取自于现场正常运行的处理高浓度有机废水的 CSTR 反应器,活性较高且对原水较易适应,因此在启动初期,随着反应器去除负荷从 $2.0\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 持续增加至 $7.4\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右,沼气生产强度从 $0.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 迅速提高至 $2.8\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右。此后随着膜通量的急剧下降,虽然进水负荷降低至只有 $2.5\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右,但是沼气生产强度仍可维持在 $1.6\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右。第 63 天时,由于膜分离组件内增加了一根膜管,进水负荷的增加使得沼气生产强度再次增加至 $3.2\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,然后在不排泥阶段的后期逐渐下降并稳定在 $2.2\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右。当 AnMBR 运行进入排泥阶段,进水容积负荷和厌氧污泥活性的显著增加使得系统处理能力得到有效释放,沼气生产强度显著提升并最终稳定在 $2.9\text{ m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。此外,在整个反应器的启动和运行过程中,沼气中的甲烷含量则较为稳定,体积分数始终保持在 58%左右。

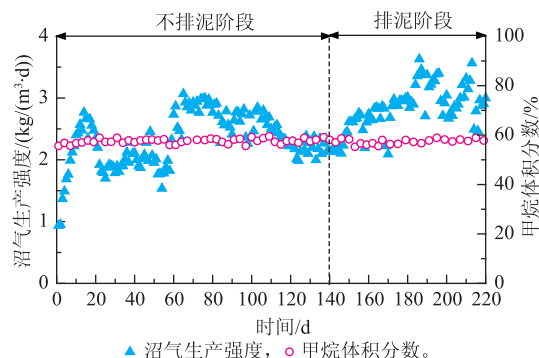


图 5 反应器沼气生产强度和甲烷含量变化情况

Fig. 5 Biogas production strength and methane content variation during the operating process in the reactor

2.4 AnMBR 启动和运行过程中 pH、VFA 质量浓度和碱度的变化

已有研究表明,在有机负荷较高的情况下,厌氧消化过程极易出现酸化现象,从而会抑制有机物的去除效率。也正因如此,VFA 质量浓度和 pH 等参数通常被用来作为厌氧消化过程的反馈和调控指标^[7,10]。中试时对 AnMBR 启动和运行过程中 pH、VFA 质量浓度、碱度的变化进行了跟踪测定,结果如图 6 (a)所示。虽然原水 pH 在 3.6~4.2 之间,且不经调节直接进入反应器,但是在 AnMBR 稳定运行过程中,厌氧系统的 pH 基本可以维持在 7.6~7.8 之间。这表明 AnMBR 系统中的高生物量能够迅速将原水中自然酸化产生的 VFA 转化成甲烷,从而有效避免了反应器严重酸化的可能性。反应器内碱度(ALK)和出水 VFA 质量浓度的变化情况如图 6(b)所示,在启动阶段(0~10 d),微生物处于适应和生长富集时期,进水负荷的快速提升造成系统中食微比(F/M)显著增加;同时由于产酸菌的生长速率要高于甲烷菌的生长速率,因此该阶段有机酸产生速率高于其消耗速率,VFA 质量浓度逐渐从 650 mg/L 上升至 1 670 mg/L。此后随着系统中微生物的富集和适应,VFA 质量浓度逐渐下降并趋于稳定,在不排泥的情况下其可以维持在 150~200 mg/L,在后期排泥阶段最终稳定在 50~100 mg/L。以上结果表明,AnMBR 的高生物量尤其是产甲烷菌的高效富集,可以有效弱化甚至避免高有机负荷下的 VFA 积累。

相关文献^[9,11-12]表明,VFA/ALK 的比值可以用来判断厌氧消化的稳定性,如果 VFA/ALK 的比值小于 0.4,说明厌氧消化非常稳定;而当 VFA/ALK 的

比值大于 0.8 时,厌氧消化非常不稳定,极易发生崩溃。在中试的反应器启动阶段,VFA/ALK 从 0.08 逐渐上升到 0.23,始终低于 0.4;而在随后的运行过程中,其基本维持在 0.02 左右(见图 6(a))。这说明虽然该废水有机质浓度很高,且启动过程中进水容积负荷变化明显,但是 AnMBR 较强的抗冲击负荷能力依然可以保证发酵体系的稳定运行。白玲^[13]等人在采用浸没式厌氧膜生物反应器处理啤酒废水的研究中也充分证明了其良好的稳定性和抗冲击负荷能力。

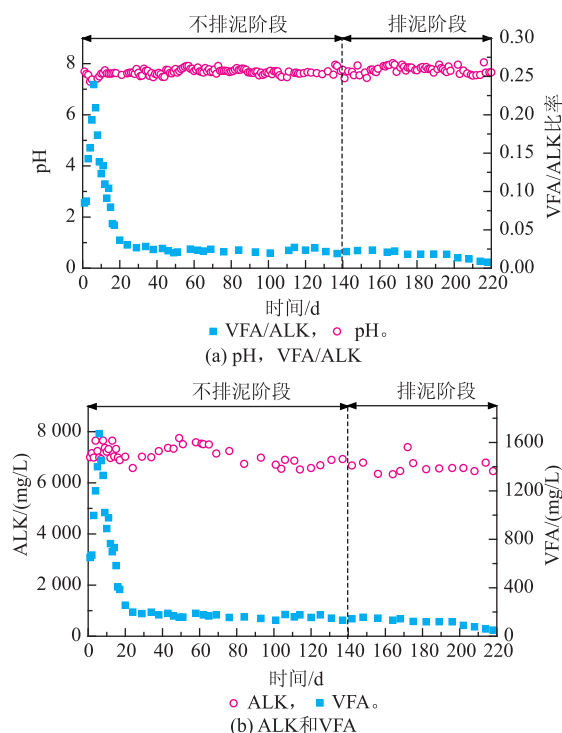


图 6 反应器内 pH 和 VFA/ALK 的变化情况以及反应器 ALK 和 VFA 的变化情况

Fig. 6 pH and VFA / ALK variation during the operating process in the reactor; VFA and ALK variation during the operating process in the reactor

2.5 反应器启动和运行过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的变化情况

高浓度有机废水中含有一定量的蛋白质、氨基酸等有机氮源,这些有机氮在厌氧消化过程中一部分用以合成细胞物质,绝大部分则被生物降解成氨氮。发酵液中一定量的氨氮可以中和 VFA 的酸性,从而有助于厌氧消化的稳定运行;但过高的氨氮质量浓度会对微生物特别是产甲烷菌产生毒害作用,从而抑制厌氧消化效率。有鉴于此,中试时对

AnMBR 启动和运行过程中的氨氮进行了跟踪测定,结果如图 7 所示。整个厌氧消化过程的进水氨氮质量浓度在 180~480 mg/L 之间,在不排泥阶段出水氨氮质量浓度随着每天进水水质的变化处在 889~1 574 mg/L,而排泥阶段则处于 665~1 222 mg/L。结合本文 2.2 节中的 COD 降解分析,可以认为该废水中的有机氮在厌氧消化过程中得到了充分转化。此外对反应器内部上清液的氨氮质量浓度进行了测定,发现其与出水氨氮质量浓度差别甚微,这说明厌氧膜对氨氮基本没有截留作用。图 7 数据还显示,排泥阶段的氨氮质量浓度要明显低于不排泥阶段,这可能是由于一部分氮素以污泥的形式进行了释放。发酵体系中氨氮质量浓度的下降可以减弱其对微生物的毒害作用,这也是排泥条件下污泥活性增加的原因之一。

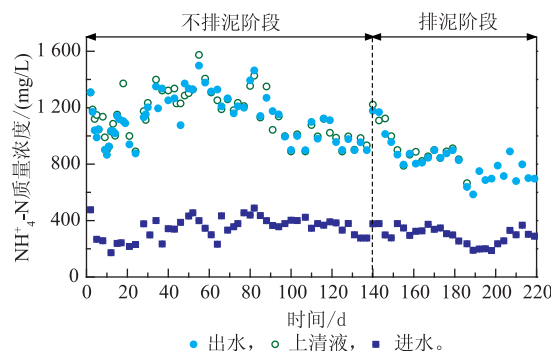


图 7 运行过程中氨氮的变化情况

Fig. 7 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ variation during the operating process

Koster^[14]的研究表明,氨氮对产甲烷活性的半抑制浓度为 1 000 mg/L,而在本实验研究中,反应器内氨氮质量浓度为 832~1 241 mg/L,但是有机物的去除和沼气生产强度依然保持在较高水平。由此可见,AnMBR 不仅对外界环境变化有着较好的缓冲能力,而且对消化体系的内源性抑制因素也有着良好的耐受能力。

2.6 反应器启动和运行过程中 MLVSS 和 MLSS 浓度的变化情况

由于该废水中含有一定量的悬浮性固体,伴随着每天的连续进水,固体有机成分被迅速水解和降解;此外污泥生物量的缓慢增殖和累积也会引起 MLVSS 和 MLSS 浓度的变化,因此中试时对反应器启动和运行过程中 MLVSS 和 MLSS 质量浓度进行了跟踪测定,结果如图 8 所示。在 0~90 d 内,由于膜的截留作用,反应器内的 MLVSS 和 MLSS 质量浓度

分别从 5.3 g/L 和 7.1 g/L 缓慢增加至 14.8 g/L 和 20.0 g/L, 且 MLVSS/MLSS 质量比维持在 75% 左右。MLVSS 质量浓度的缓慢增加主要归因于生物量的生长和富集; 同时也意味着原水中的有机悬浮固体物质得到了有效降解, 从而并没有发生 MLVSS 的显著积累。然而, 在不排泥阶段的后期(91~140 d), MLVSS 和 MLSS 质量浓度却快速增加, 但是此阶段并不是微生物的快速生长期, 不会出现生物量的快速增殖和富集, 因此这种变化应该与反应器内悬浮固体有机质的累积有关。

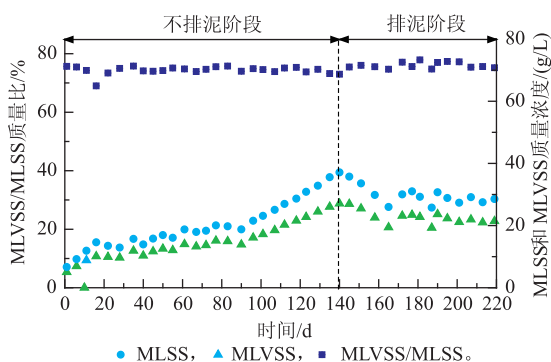


图 8 运行过程中 MLSS、MLVSS 及 MLVSS/MLSS 质量比的变化

Fig. 8 MLSS, MLVSS and MLVSS / MLSS variation during the operating process

此外, 如图 3 和图 5 所示, 在不排泥阶段后期, 虽然发酵体系内上清液 COD 稳定, 但是沼气生产强度却显著降低, 这也能侧面反映出此时系统中悬浮有机质的降解有所减缓。以上结果表明, 过长的 SRT 会限制餐厨废水中悬浮有机质的降解, 从而会进一步影响 AnMBR 系统的稳定运行。反应器运行

至第 141 天时, 系统进入排泥阶段。随着反应器的运行, MLSS 和 MLVSS 质量浓度逐渐下降并最终分别维持在 30 g/L 和 22 g/L 左右。

3 结 语

对厌氧膜生物反应器处理高浓度有机废水的运行效能进行了中试研究。在启动和运行过程中跟踪测定并分析了 COD 的去除、氨氮和 VFA 质量浓度、沼气生产强度以及 MLVSS 质量浓度等一系列重要参数的变化规律, 获得的研究结果可为 AnMBR 今后处理高浓度有机餐厨废水的实际工程应用提供一定的理论依据和经验。

采用 AnMBR 处理高浓度有机废水可以实现厌氧消化系统的快速启动; AnMBR 能够有效降解原水中的液、固相有机质并实现沼气能源的高效回收, 其良好的抗冲击负荷能力和对外界环境变化的缓冲能力, 可以保证发酵体系的稳定运行。

虽然该废水中含有一定量的 VFA, 且 pH 较低; 但是在不人为控制 pH 的条件下, 发酵系统中较高的产甲烷活性依然可以将系统中 VFA 维持在较低水平, 有效保证了厌氧消化的稳定性。有机氮在厌氧消化过程中被转化成氨氮, AnMBR 系统中的氨氮质量浓度达到甚至超过了文献报道的半抑制浓度, 但是其厌氧消化性能并未受到显著影响。这说明 AnMBR 对厌氧消化的内源性抑制因素也有良好的耐受能力。排泥和不排泥条件下的运行参数对比表明, AnMBR 运行过程中 SRT 的优化非常关键, 不同 SRT 会导致发酵体系发生一系列变化, 从而很大程度上决定了 AnMBR 的处理效能。

参考文献:

- [1] Recep K D, Mustafa E E, Hale Hale O, et al. Potentials of anaerobic membrane bioreactors to overcome treatment limitations induced by industrial wastewaters[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 122: 160-170.
- [2] 张欣欣, 沈菊李, 朱宝库, 等. 厌氧膜 - 生物反应器的研究及其在废水处理中的应用[J]. *膜科学与技术*, 2008, 28(2): 79-84. ZHANG Xinxin, SHEN Juli, ZHU Baoku, et al. Study on anaerobic membrane bioreactor and its applications for wastewater treatment[J]. *Membrane Science and Technology*, 2008, 28(2): 79-84. (in Chinese)
- [3] 何义亮, 吴志超, 李春杰, 等. 厌氧膜生物反应器处理高浓度食品废水的应用[J]. *环境科学*, 1999, 20(6): 53-55. HE Yiliang, WU Zhichao, LI Chunjie. Application of the anaerobic MBR for treatment of high concentration food wastewater[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(6): 53-55. (in Chinese)
- [4] 孙凯, 陆晓峰, 周保昌, 等. 厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 处理高浓度豆制品废水的研究[J]. *膜科学与技术*, 2011, 31(4): 65-69. SUN Kai, LU Xiaofeng, ZHOU Baochang, et al. Research on the treatment of high concentration soybean processing wastewater with AnMBR[J]. *Membrane Science and Technology*, 2011, 31(4): 65-69. (in Chinese)

- [5] 白玲,蓝伟光,严滨,等. 废水处理中膜生物反应器的研究进展[J]. 膜科学与技术,2008,28(1):91-96.
BAI Ling,LAN Weiguang,YAN Bin,et al. Progress of membrane bioreactor in wastewater treatment [J]. **Membrane Science and Technology**,2008,28(1):91-96.(in Chinese)
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法[M]. 第4版. 北京:中国环境科学出版社,2002:200-418.
- [7] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京:中国轻工业出版社,1998:514-524.
- [8] Lin H J,Peng W,Zhang M J,et al. A review on anaerobic membrane bioreactors:Applications,membrane fouling and future perspectives[J]. **Desalination**,2013,314:169-188.
- [9] Switzenbaum M S,Giraldo-Gomez E,Hickey R F. Monitoring of the anaerobic methane fermentation process [J]. **Enzyme Microbial Technology**,1990(12):722-730.
- [10] 胡纪萃. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003:140.
- [11] Zickerfoose C,Hayes R B J. Anaerobic sludge digestion:operations manual[M]. Washington:Environmental Protection Agency,1976.
- [12] Callaghan F J,Wase D A J,Thayanithy K C,et al. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure[J]. **Biomass Bioenergy**,2002,27:71-77.
- [13] 白玲. 浸没双轴旋转厌氧膜生物反应器的研究[D]. 南昌:南昌大学 环境与化学工程学院,2008.
- [14] Koster I W,Lettinga G. Ammonium toxicity in anaerobic digestion. Proc. Anaerobic wastewater treatment symp [M]. Hague:[s. n.],1983:553.

会 议 信 息

会议名称(中文): 第六届国际分子生物工程学术会议(ICBE 2016)

会议名称(英文): International Conference of Biomolecular Engineering ICBE

所属学科: 高分子化学与物理,生物物理学、生物化学及分子生物学,生物技术与生物工程

开始日期: 2016-01-05

结束日期: 2016-01-07

所在国家: 新加坡

所在城市: 新加坡

具体地点: 新加坡

主办单位: the Society for Biological Engineering

会议网站: <https://aiche.confex.com/aiche/icbe16/cfp.cgi>

会议背景介绍:

ICBE brings together researchers who are using quantitative approaches to advance the understanding and application of molecular biology. These scientists, engineers, and professionals are contributing to the development of analytical, molecular, high-throughput, and therapeutic strategies that are directly relevant to public health and energy related issues. The conference, co-chaired by Paula T. Hammond (Massachusetts Institute of Technology, USA), Michael C. Jewett (Northwestern University, USA) and Mary Chan Park (Nanyang Technological University, Singapore) will stimulate efforts to integrate these approaches across the scales of biological complexity.