

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.001

中试厌氧膜生物反应器对剩余污泥的消化效果

晏习鹏^{1,2}, 肖小兰^{1,2}, 亓金鹏^{1,2}, 李倩^{1,2}, 阮文权^{1,2}

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 采用中试规模的内置式两级厌氧膜生物反应器对未经预处理的剩余污泥进行厌氧消化,考察其消化效能及膜运行性能。反应器分两阶段运行,第Ⅰ阶段(第1~59天)保持不排泥运行,有机负荷为 $0.58 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,挥发性固体(VS)降解率为51.7%,单位产气量为 $0.143 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ 。不排泥运行条件下,反应罐内污泥总固体(TS)迅速累积到 131.1 g/L ,溶解性微生物产物(SMP)持续增加到 27.0 mg/L 。快速累积的污泥浓度及SMP使膜污染加剧,导致膜通量从 $1.74 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降到 $0.60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。为解决此问题,第Ⅱ阶段(第60~90天)开始排泥运行,此时有机负荷为 $0.50 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,VS降解率为48.6%,单位产气量为 $0.139 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ 。通过排泥,罐内污泥TS降至 $(50 \pm 10) \text{ g/L}$,明显低于不排泥状态;SMP不再增加并保持动态平衡,而且此时的膜污染得到有效缓解,膜清洗间隔延长,表明厌氧消化过程中污泥性质的变化是导致膜污染加剧的主要原因,排泥能延缓膜污染。

关键词: 厌氧膜生物反应器; 剩余污泥; 两级厌氧消化; 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0001-08

Digestion of Excess Sludge in a Pilot Anaerobic Membrane Bioreactor

YAN Xi-peng^{1,2}, XIAO Xiao-lan^{1,2}, QI Jin-peng^{1,2}, LI Qian^{1,2}, RUAN Wen-quan^{1,2}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China)

Abstract: Excess sludge without pretreatment was digested in a pilot internal two-stage anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), and the digestion efficiency and membrane performance were investigated. The reactor was operated in two phases. During phase I (days 1 to 59), the reactor operated without sludge discharge, the organic loading rate (OLR) was $0.58 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, the volatile solid (VS) reduction rate was 51.7%, and the biogas yield was $0.143 \text{ m}^3/\text{kgVS}$. The total solids (TS) of the sludge in the reactor quickly accumulated to 131.1 g/L , and the soluble microbial products (SMP) continuously increased to 27.0 mg/L . Rapid accumulation of sludge concentration and SMP aggravated membrane fouling, and membrane flux reduced from $1.74 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to $0.60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. In order to solve this problem, sludge was discharged during Phase II (days 60 to 90), OLR was controlled to $0.50 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, and VS reduction rate and the biogas yield were 48.6% and

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(21506076)

通信作者: 阮文权 E-mail: wqruan@jnu.edu.cn

0.139 m^3/kgVS , respectively. TS decreased to (50 ± 10) g/L by sludge discharge, which was significantly lower than that without sludge discharge. In addition, SMP no longer increased and maintained dynamic balance, and membrane fouling was effectively alleviated and membrane cleaning interval was prolonged. Therefore, the change of sludge properties during anaerobic digestion was the main cause of the increased membrane fouling, and sludge discharge could alleviate membrane fouling.

Key words: anaerobic membrane bioreactor; excess sludge; two-stage anaerobic digestion; membrane fouling

市政污水厂在处理城市污水的过程中不可避免地产生大量剩余污泥。剩余污泥中含有重金属、病原微生物、多氯联苯等易对环境产生二次污染的有毒有害物质^[1]。因此,对剩余污泥进行减量化、无害化、稳定化处理是当前亟待解决的环保问题。近年来,厌氧消化技术广泛运用于剩余污泥的稳定化处理。传统的厌氧消化反应器由于其水力停留时间(HRT)等于污泥停留时间(SRT),厌氧微生物富集速率较慢,因此其处理周期较长、消化效率偏低^[2]。厌氧膜生物反应器(AnMBR)是将厌氧生物处理工艺与膜分离技术相结合而形成的新型污泥处理技术^[3],可以实现HRT与SRT的分离控制,延长污泥停留时间。此外,膜的截留作用可维持反应器内较高的生物质浓度、提高挥发性固体(VS)降解率并改善污泥稳定性^[4]。Yu等人^[5]在采用小试规模的AnMBR消化剩余污泥的研究中发现,其VS降解率为 $(50.8 \pm 6.8)\%$,甲烷产率为 $0.27 \text{ m}^3/\text{kgVS}$,而传统厌氧消化反应器的VS降解率和甲烷产率仅分别

为 $(30.2 \pm 9.1)\%$ 、 $(0.02 \pm 0.02) \text{ m}^3/\text{kgVS}$,表明AnMBR对污泥的处理效率明显高于传统厌氧消化工艺。

目前污泥消化工艺大多采用一级消化工艺,而我国的剩余污泥具有无机物含量偏高的特点,单级消化可能会使无机物在反应器底部聚集结垢而影响消化效率。相比之下,两级厌氧消化能使密度较大的无机物在一级消化中沉降分离,同时二级消化可进一步提高有机物的降解效率^[6]。关于AnMBR与两级厌氧消化工艺相结合用于污泥厌氧消化的研究目前还鲜有报道,鉴于此,笔者采用中试内置式AnMBR,结合两级厌氧消化工艺,对未经预处理的城市剩余污泥进行厌氧消化,旨在有效解决剩余污泥的处理问题,探究中试规模下的污泥消化效率及膜运行效能,为其工程化应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

两级AnMBR中试装置如图1所示。

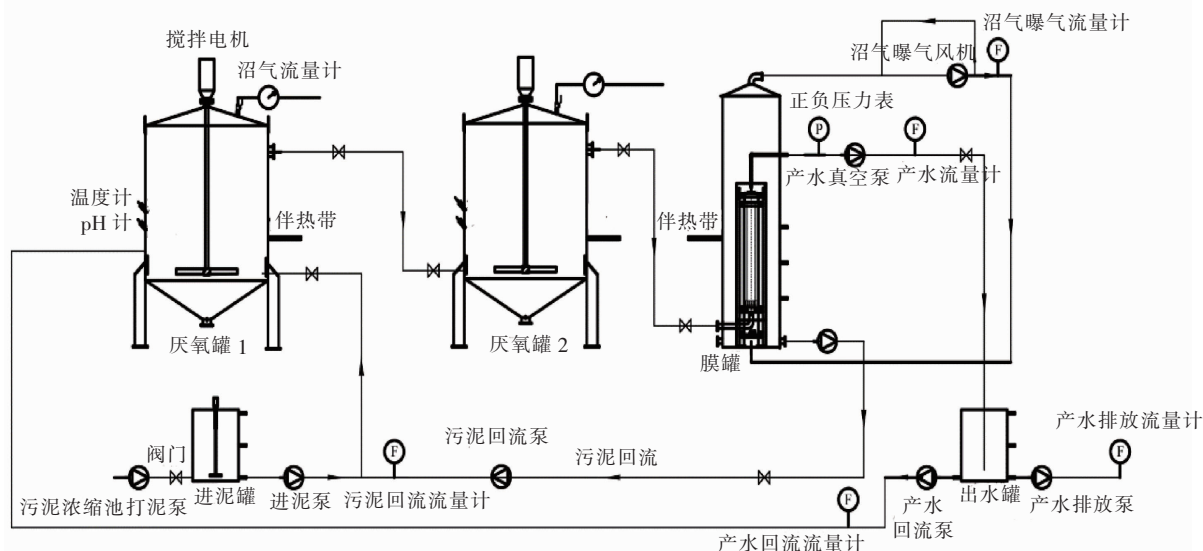


图1 AnMBR装置示意

Fig.1 Schematic diagram of AnMBR

中试装置主要由进泥罐、厌氧罐 1(一级污泥厌氧消化罐)、厌氧罐 2(二级污泥厌氧消化罐)、膜罐(内含膜组件)和出水罐组成,总有效体积为 6 m^3 。其中,厌氧罐 1 用于初步降解经进泥泵泵入的剩余污泥,同时通过控制较低的搅拌转速,使得罐内实现污泥浓度梯度分层,密度较大的无机物沉降于锥形底部排泥口,密度小的有机物浮在上层;厌氧罐 2 用于进一步降解经一级污泥厌氧消化罐溢流过来的剩余污泥,进一步实现有机物的降解及无机物的分离;膜罐用于分离经二级污泥厌氧消化罐溢流过来的剩余污泥,并将悬浮物截留至反应器内进一步降解。产水泵的抽吸作用使膜组件内产生负压,实现泥水分离的同时控制出水量。产水排入产水罐,膜分离装置内泥水分离后的污泥浓缩液回流至一级厌氧消化罐进行再次发酵,如此循环,以提高剩余污泥中有机物的降解效果。膜罐顶部排气口外接 1 台防爆风机,用于将产生的沼气从膜分离装置底部循环至顶部,完成对膜组件的冲刷作用以延缓膜污染。

1.2 试验用污泥

试验采用的剩余污泥来自于无锡市某市政污水处理厂的浓缩池,其主要性质如下:总固体(TS)为 $(34.3 \pm 4.0) \text{ g/L}$,VS 为 $(14.5 \pm 3.0) \text{ g/L}$,VS/TS 值为 0.42 ± 0.05 ,COD 为 $(6\,500 \pm 500) \text{ mg/L}$,氨氮为 $(62.39 \pm 10) \text{ mg/L}$,总氮为 $(100.55 \pm 15) \text{ mg/L}$,挥发性脂肪酸(VFA)为 $(60.20 \pm 20) \text{ mg/L}$,C/N 值为 5.64,pH 值为 6.7 ± 0.2 。

1.3 试验方法

AnMBR 连续运行 90 d,分为两个阶段。第 I 阶段(第 1~59 天)保持不排泥运行,SRT 可看作无限长,HRT 为 24 d;连续的不排泥运行使污泥浓度迅速增加,膜污染严重导致膜通量急剧下降,因此第 II 阶段(第 60~90 天)开始排泥运行,控制 SRT 在 200 d,HRT 为 30 d,以期能缓解膜污染保证系统稳定运行,同时研究两种运行方式对污泥厌氧消化的影响。两个阶段的运行温度均为 $(36 \pm 2)^\circ\text{C}$,厌氧罐 1 和 2 的搅拌速度分别为 5 和 10 r/min。

AnMBR 反应器在初始运行时接种 4 m^3 浓缩池剩余污泥(原泥)到厌氧反应罐内保持厌氧状态 10 d 左右,以进行污泥驯化并激活厌氧菌活性。10 d 后,通过逐步提升进泥量的方式来提高有机负荷,稳定后维持在一定的负荷水平。AnMBR 在整个启动和运行过程中通过泵的控制保持膜恒定通量运行,

多余的产水回流至厌氧罐 1 内以维持液位恒定。反应器温度通过伴热带和温度传感器自动控制。在此基础上,监测长期运行的各项指标数据,考察 AnMBR 系统对剩余污泥的消化能力。

1.4 分析项目与方法

TS 和 VS 含量分别采用 105°C 烘箱烘干法和 600°C 马福炉灼烧法测定,定期从各罐的上、中、下 3 个取样口取样测定;常规水质指标包括 COD、氨氮、碱度(ALK,以 CaCO_3 计)等,均采用国家标准方法测定,从各反应罐中部取样口取样并离心得到污泥上清液,然后进行水质分析;pH 值采用在线 pH 计实时监测;挥发性脂肪酸(VFA)采用总量比色法^[7]测定;溶解性微生物产物(SMP)和结合性胞外聚合物(BEPS)的提取与测定参照肖小兰^[8]的方法;沼气产量采用湿式流量计计量。

2 结果与讨论

2.1 厌氧消化特性

2.1.1 有机负荷与产气情况

图 2 为反应器运行期间的有机负荷提升与产气情况。

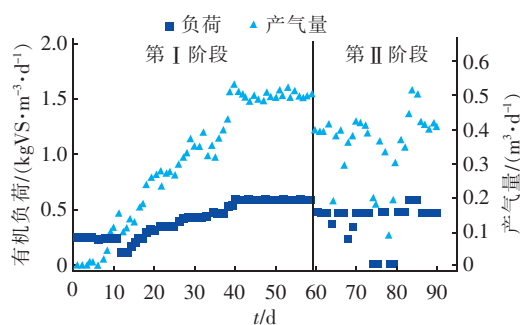


图 2 有机负荷与沼气产量的变化

Fig. 2 Change of OLR and biogas yield

由图 2 可以看出,在第 I 阶段有机负荷逐步提升到 $0.58 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,产气量从 $(0.110 \pm 0.02) \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $(0.500 \pm 0.02) \text{ m}^3/\text{d}$,单位产气量从 $0.068 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ 增加到 $0.143 \text{ m}^3/\text{kgVS}$;第 II 阶段有机负荷降至 $0.50 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,产气量稳定在 $(0.390 \pm 0.02) \text{ m}^3/\text{d}$,单位产气量为 $0.139 \text{ m}^3/\text{kgVS}$,两个阶段的单位产气量差异不大,但均低于 Yu 等人^[5]采用厌氧动态膜生物反应器消化剩余活性污泥的研究结果,其单位产气量为 $(0.27 \pm 0.07) \text{ m}^3/\text{kgVS}$ 。分析认为,这主要与本研究所采用的剩余污泥性质有关:一是原剩余污泥中有机物含量仅占 TS 的 42% 左右,根据污泥中有机物含量与降解

率之间的近似关系^[9],其中能被实际降解的有机物占比不足30%,这导致污泥消化性能较差;二是原剩余污泥的C/N值仅为5.64,远低于12~16的最佳范围^[10]。过低的C/N值会限制污泥中厌氧菌的增殖,造成厌氧微生物的活性不足,进而导致产气量偏低。

2.1.2 VS降解率与COD去除率

图3为反应器运行期间VS降解率的变化。

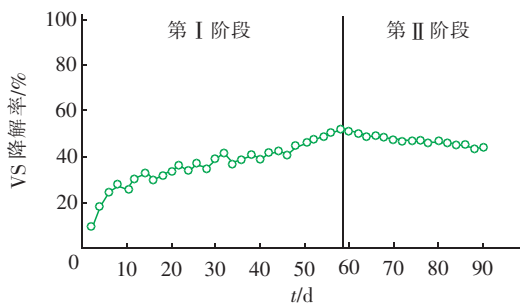


图3 VS降解率的变化

Fig. 3 Change of VS degradation rate

在第I阶段负荷提升与稳定运行的过程中,VS降解率逐渐升高并保持在51.7%左右,至第II阶段降低到约48.6%。前期VS降解率逐渐升高显然是因为厌氧微生物各种生命活动的增强使基质利用率逐渐增大;第II阶段开始排泥,与第I阶段相比,由于污泥停留时间缩短,有机物与微生物接触相对不够充分,导致VS降解率有所下降。杜朝丹等人^[11]利用热水解和传统厌氧消化技术处理市政污泥时VS降解率仅为29.68%,相比之下,本研究中AnMBR的VS降解率有着较为明显的提升。分析原因主要有:①两级厌氧消化将生物质置于浓度梯度下,可以使存在于反应器内的微生物种群达到最优基质利用率,从而提高处理效率;②膜具备强大的固液分离能力,微生物被有效截留在厌氧反应罐内,获得足够长的停留时间,使有机物最大限度地被降解;③搅拌以及内循环强化了系统的传质效果,使微生物和有机物得以充分接触。

另外,反应器运行期间对COD的去除效果如图4所示。整个试验过程中,进泥的COD浓度稳定在6000~7000 mg/L,产水COD在第I阶段随着负荷的提升从120 mg/L最高上升至340 mg/L,第II阶段维持在300~350 mg/L,两个阶段的COD去除率均在95%以上,这说明AnMBR中膜组件对污泥和有机物的截留效果十分显著。

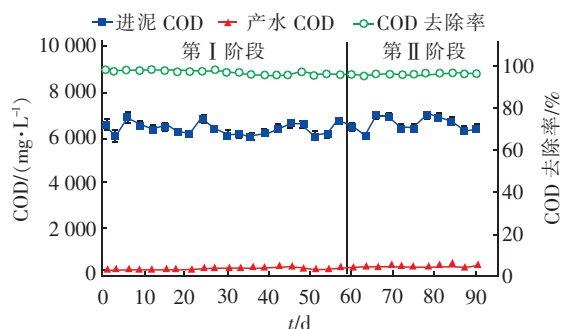


图4 对COD的去除效果

Fig. 4 Removal effect of COD

2.1.3 pH值、VFA、ALK、氨氮等指标的变化

pH值、VFA、ALK是判断系统是否酸化、评估系统稳定性的重要指标,其变化情况如图5所示。连续监测数据表明,两级反应罐内的pH值在第I阶段从最初的6.9上升到7.4,并在第II阶段稳定在7.4~7.5范围内。整个试验过程中未出现酸化现象,pH值处于厌氧消化的理想范围内。

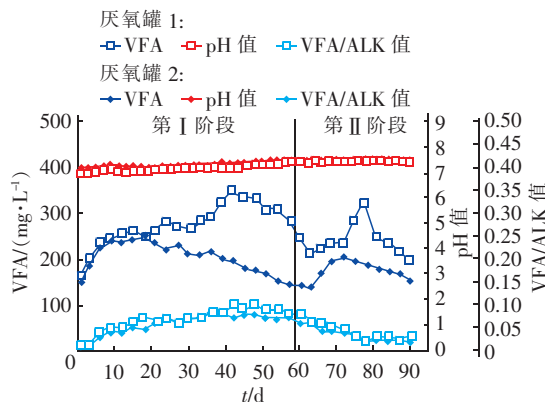


图5 pH值、VFA、VFA/ALK的变化情况

Fig. 5 Change of pH, VFA and VFA/ALK

VFA浓度常常用来评价厌氧反应器性能,特别是产酸菌和产甲烷菌的活性^[12]。在第I阶段,一、二级消化罐内的VFA浓度均呈先增大后减小的趋势,分别从162.1和148.4 mg/L增加到346.6和252.5 mg/L,二级消化罐的VFA浓度明显低于一级消化罐,且上升期也更短。分析认为,反应器启动初期产酸菌的活性大于产甲烷菌,导致VFA的积累,随着反应器的稳定运行,产甲烷菌的活性逐渐增强,前期积累的VFA被利用并转化成甲烷。两个消化罐中的VFA浓度差异可能是因为剩余污泥的水解产酸过程在一级消化罐中初步完成,二级消化罐的进一步降解主要是利用产生的VFA进行产甲烷过程。第II阶段由于排泥缩短SRT,使反应罐内的微

生物数量和活性下降,VFA浓度再次呈现出与第Ⅰ阶段相同的趋势。通常认为VFA/ALK值 <0.3 时,系统处于稳定状态^[13]。本试验中两个阶段的VFA/ALK值均未超过0.1,远低于0.3的失稳值,说明反应器在运行期间一直保持稳定。

氨氮也是厌氧反应器需要重点监测的一项指标。有研究表明,当氨氮 $>1\ 500\text{ mg/L}$ 时会对厌氧消化过程产生抑制作用^[14]。图6为AnMBR运行过程中氨氮浓度随时间的变化。进泥上清液的氨氮浓度稳定在 $60\sim90\text{ mg/L}$,反应罐、膜罐和产水的氨氮浓度从最初的约 200 mg/L 上升到第Ⅰ阶段末期的 820 mg/L 左右,未超过氨氮抑制浓度,第Ⅱ阶段也未出现明显的下降趋势。这说明含氮有机物被持续降解,其中的有机氮在水解发酵阶段逐渐转化为氨氮,且AnMBR对厌氧消化的内源性抑制因素也有良好的调节能力。此外,注意到产水的氨氮浓度与罐内基本一致,说明体系对氨氮基本没有去除效果,这与闫林涛等人^[15]的研究结果一致。

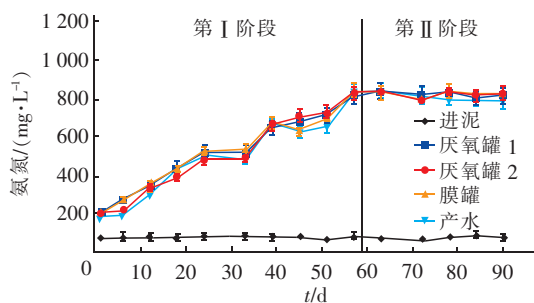


图6 氨氮浓度的变化

Fig. 6 Change of ammonia nitrogen concentration

2.2 膜的运行性能

膜的运行性能是AnMBR反应器稳定运行的关键。本试验主要在两个阶段膜通量分别为 1.74 和 $1.39\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 并保持不变的条件下,通过观察跨膜压差(TMP)的变化来评估膜运行性能以及膜污染情况,结果如图7所示。当TMP达到 25 kPa 时认为膜污染较为严重,此时应对膜进行清洗。可以看出,系统运行期间TMP分别在第42天、第59天和第84天增至 25 kPa ,因此进行了3次膜清洗,清洗方式均为物理清洗和化学清洗,即先用自来水冲洗,然后再依次用 0.5% 的 NaClO 溶液和 0.5% 的 HCl 溶液浸泡 12 h 。注意到后两次清洗间隔分别为 17 d 和 25 d ,第Ⅱ阶段膜清洗间隔增加,膜污染有所延缓,这可能是因为排泥使罐内引起膜污染的特征物质减少。分析认为,膜运行性能的变化主要与膜污

染有关。膜污染是一个持续累积的过程,主要分为可逆污染(物理清洗去除)和不可逆污染(化学清洗去除)^[16],其中不可逆污染在AnMBR的长期运行中占据主导地位^[17]。不可逆污染主要与污泥浓度、SMP、BEPs、污泥粒径等污泥性质的变化有关,本研究通过分析两阶段污泥性质的变化来评价其对膜运行性能的影响,并根据此变化判断排泥运行是否有助于缓解膜污染和提升AnMBR的整体性能。

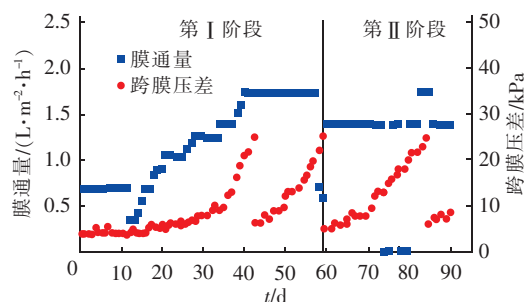


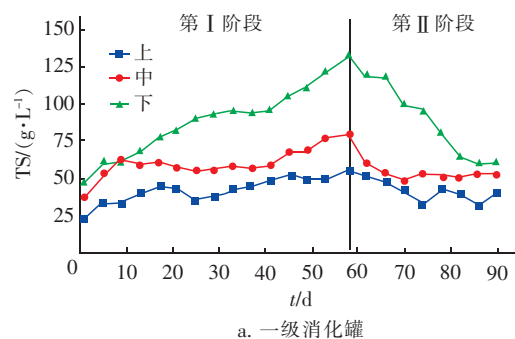
图7 膜通量及跨膜压差的变化

Fig. 7 Change of membrane flux and TMP

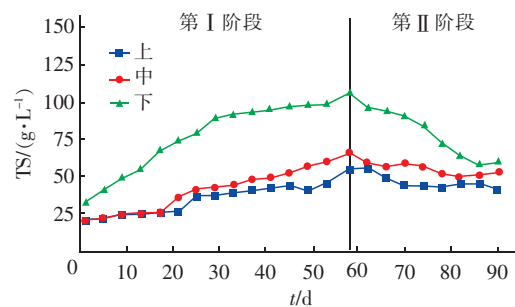
2.3 污泥性质的变化

2.3.1 污泥浓度的变化

反应器运行过程中污泥浓度的变化如图8所示。在第Ⅰ阶段,随着负荷的提升,污泥浓度迅速上升并形成一定的浓度梯度,下部TS增加明显,厌氧罐1下部TS从 46.9 g/L 增加到 131.1 g/L ,厌氧罐2下部TS从 32.5 g/L 增加到 105.6 g/L 。



a. 一级消化罐



b. 二级消化罐

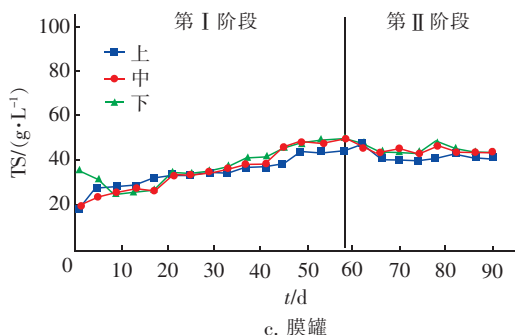


图8 污泥浓度的变化

Fig.8 Change of sludge concentration

第II阶段开始排泥后,TS含量大幅减少,厌氧罐上、中、下部的TS含量分别稳定在40、50、60 g/L左右,膜罐由于沼气循环冲刷作用使得各部分TS含量稳定在44 g/L左右。监测数据表明,TS的变化基本达到预期效果,即两级厌氧消化以及较低的搅拌转速使消化罐内TS形成一定的浓度梯度,密度较大的无机物沉降在一级消化罐底部,方便后期排出,密度小的有机物在中、上部或者流入二级消化罐进一步降解。分析认为,第I阶段不排泥运行使TS含量持续增加,过高的TS含量导致膜过滤阻力增大,TMP逐渐上升,膜污染加剧,膜过滤性能变差。第II阶段开始排泥有助于降低TS含量,有效缓解膜过滤阻力,保证膜的正常过滤以及系统的稳定运行。

2.3.2 SMP和BEPS含量的变化

SMP是微生物在降解环境中可利用的基质、进行内源呼吸或者应对环境干扰过程中产生的溶解性有机物^[18]。反应器运行期间,SMP含量的变化情况如图9所示。

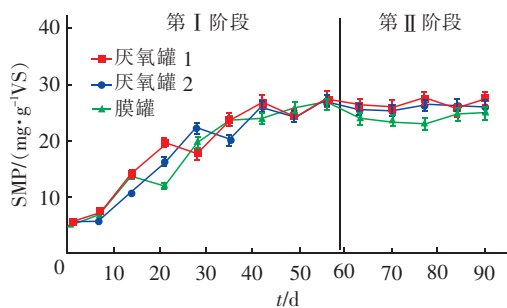


图9 SMP含量的变化

Fig.9 Change of SMP content

各罐中SMP含量在第I阶段处于增加状态,从最初的5.6 mg/gVS左右增加到约27.0 mg/gVS,第II阶段保持动态平衡。有研究指出,SMP根据产生途径可分为与基质降解相关联的微生物产物

(UAP)和与微生物内源呼吸相关联的微生物产物(BAP),前者的产生速率与基质的利用成正比,后者的产生速率与污泥浓度成正比^[19-20]。本研究中,第I阶段VS降解率和TS含量均持续增加,使得SMP含量迅速增加;第II阶段VS降解率和TS含量均下降,但微生物为获取维持自身活性及生存的能量,会通过内源呼吸或代谢细胞内物质而分泌更多的有机物^[19],这就使得SMP含量在第II阶段基本保持动态平衡。

BEPS是在一定环境条件下由活性微生物分泌于体外的一些高分子聚合物,是维持污泥絮体结构的重要物质^[20]。图10为BEPS含量的变化情况,各罐中BEPS含量整体呈减少趋势。第I阶段各罐中BEPS含量逐渐减少,可能是因为在该阶段微生物活性逐渐增强,部分BEPS作为营养物质被微生物所利用。第II阶段SRT变短,微生物对BEPS的利用减少,使其含量略有上升。

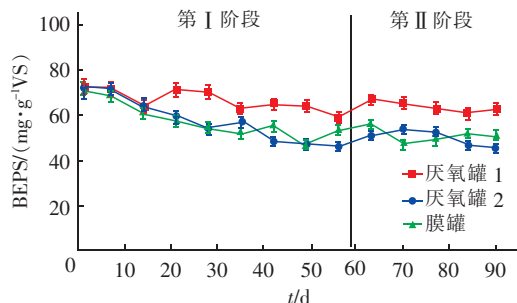


图10 BEPS含量的变化

Fig.10 Change of BEPS content

有研究^[21-22]表明,SMP和BEPS是引起膜污染的两种特征物质。其中SMP易在膜表面累积或者渗入膜孔使膜孔堵塞从而导致膜的不可逆污染,而BEPS会在膜表面聚集形成凝胶层而造成膜的可逆污染。第I阶段SMP含量的持续增加,引起膜孔堵塞而导致膜的不可逆污染;BEPS含量整体减少,一定程度上破坏了污泥絮体结构,污泥平均粒径减小,这使得污泥颗粒更容易向膜表面迁移形成泥饼层而影响膜过滤性能。第II阶段排泥运行使SMP含量保持稳定、BEPS含量略有上升,从而使得膜污染速度有所减缓。

3 结论

① 采用中试内置式两级AnMBR对剩余污泥进行厌氧消化,VS降解率相较于传统反应器有较大提高。其中不排泥条件下有机负荷最高为0.58

kgVS/(m³·d),VS降解率为51.7%,单位产气量为0.143 m³/kgVS;排泥条件下有机负荷为0.50 kgVS/(m³·d),VS降解率为48.6%,单位产气量为0.139 m³/kgVS;SRT在一定程度上影响降解效果,剩余污泥性质不佳是产气率偏低的主要原因。

② 两个阶段的试验过程中,各反应罐内pH值、VFA、ALK均在合理范围内变化,VFA/ALK值最高为0.1,低于失稳值0.3,表明AnMBR系统具备良好的稳定性。

③ 膜的过滤性能较好,能有效截留微生物使有机物被充分降解。污泥浓度、SMP和BEPS含量等污泥性质的变化是引起膜污染的主要原因,排泥运行能延缓膜污染。

参考文献:

- [1] 余智勇. 厌氧膜生物反应器的污泥消化和膜污染特性[D]. 北京:清华大学,2015.
Yu Zhiyong. Characteristics of Sludge Digestion and Membrane Fouling in Anaerobic Membrane Bioreactor [D]. Beijing:Tsinghua University,2015(in Chinese).
- [2] Pileggi V, Parker W J. AnMBR digestion of mixed WRRF sludges: Impact of digester loading and temperature[J]. J Water Process Eng,2017,19:74-80.
- [3] 林红军,陆晓峰,梁国明,等. 厌氧膜生物反应器的研究和应用进展[J]. 净水技术,2007,26(6):1-6.
Lin Hongjun, Lu Xiaofeng, Liang Guoming, et al. Research and application progress of anaerobic membrane bioreactors in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2007, 26(6):1-6(in Chinese).
- [4] Berkessa Y W, Yan B, Li T, et al. Novel anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) design for wastewater treatment at long HRT and high solid concentration[J]. Bioresour Technol,2018,250:281-289.
- [5] Yu H, Wang Z, Wu Z, et al. Enhanced waste activated sludge digestion using a submerged anaerobic dynamic membrane bioreactor: performance, sludge characteristics and microbial community[J]. Sci Rep,2016,6:20111.
- [6] 郜白璐. 两级厌氧系统处理垃圾渗滤液的试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
Gao Bailu. Experimental Research on Two-stage Anaerobic System Treatment of Incineration Leachate [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017 (in Chinese).
- [7] 汪婷. 沼气发酵过程中产甲烷菌分子多样性研究及产甲烷菌的分离[D]. 南京:南京农业大学,2005.
Wang Ting. Analysis of Genetic Diversity of the Methanogen during the Methane Fermentation and Isolation of Methanogen [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2005(in Chinese).
- [8] 肖小兰. 厌氧膜生物反应器处理含油餐厨废水的效能及其微观机制研究[D]. 无锡:江南大学,2018.
Xiao Xiaolan. The Performance and Micromechanism of the Anaerobic Membrane Reactor for Treating High Lipids Kitchen[D]. Wuxi:Jiangnan University,2018(in Chinese).
- [9] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
Zhao Qingxiang. Sludge Resource Technology [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2002(in Chinese).
- [10] 戴前进,李艺,方先金. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究[J]. 中国给水排水,2006,22(23):95-98.
Dai Qianjin, Li Yi, Fang Xianjin. Study on anaerobic digestion of excess activated sludge from municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater,2006,22(23):95-98(in Chinese).
- [11] 杜朝丹,陈美香,林志龙,等. 热水解+厌氧消化处理市政污泥示范工程[J]. 中国给水排水,2019,35(10):97-99,104.
Du Chaodan, Chen Meixiang, Lin Zhilong, et al. Demonstration project of municipal sludge treatment by thermal hydrolysis and anaerobic digestion process[J]. China Water & Wastewater,2019,35(10):97-99,104(in Chinese).
- [12] Wijekoon K C, Visvanathan C, Abeynayaka A. Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor [J]. Bioresour Technol,2011,102(9):5353-5360.
- [13] Xu R, Yang Z, Chen T, et al. Anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with food waste under different fat, oil, grease contents: Study on reactor performance and extracellular polymeric substances[J]. RSC Adv,2015,5:103547-103556.
- [14] 孟晓山,张玉秀,隋倩雯,等. 氨氮浓度对猪粪厌氧消化及产甲烷菌群结构的影响[J]. 环境工程学报,2018,12(8):2346-2356.
Meng Xiaoshan, Zhang Yuxiu, Sui Qianwen, et al. Effects of ammonia concentration on anaerobic digestion

- of swine manure and community structure of methanogens [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(8): 2346–2356 (in Chinese).
- [15] 闫林涛, 黄振兴, 肖小兰, 等. 厌氧膜生物反应器处理高浓度有机废水的中试研究[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1248–1255.
- Yan Lintao, Huang Zhenxing, Xiao Xiaolan, *et al.* Pilot experiment of anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) for treating high-concentration organic wastewater [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(12): 1248–1255 (in Chinese).
- [16] Hafuka A, Mashiko R, Odashima R, *et al.* Digestion performance and contributions of organic and inorganic fouling in an anaerobic membrane bioreactor treating waste activated sludge [J]. Bioresour Technol, 2019, 272: 63–69.
- [17] Wang Z, Ma J, Tang C Y, *et al.* Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review [J]. J Membr Sci, 2014, 468: 276–307.
- [18] Duncan J B, David C S. A review of soluble microbial products (SMP) in wastewater treatment systems [J]. Water Res, 1999, 33(14): 3063–3082.
- [19] Shin H S, Kang S T. Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention times [J]. Water Res, 2003, 37(1): 121–127.
- [20] 张赛. 膜生物反应器运行特性及溶解性微生物产物 (SMP) 对膜污染的研究 [D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012.
- Zhang Sai. Study on Operational Characteristics of Membrane Bioreactor and Effect of Soluble Microbial Products on Membrane Fouling [D]. Shenyang: Liaoning University, 2012 (in Chinese).
- [21] Meng F, Zhang S, Oh Y, *et al.* Fouling in membrane bioreactors: An updated review [J]. Water Res, 2017, 114: 151–180.
- [22] Shi Y, Huang J, Zeng G, *et al.* Evaluation of soluble microbial products (SMP) on membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) at the fractional and overall level: A review [J]. Rev Environ Sci Biotechnol, 2017, 17(1): 1–15.



作者简介: 晏习鹏 (1993 –), 男, 江西上高人, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理与处置技术。

E-mail: 524555166@qq.com

收稿日期: 2019 – 10 – 15

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次