剩余污泥高固态卧式厌氧消化的中试启动研究

许凤剑[1,2]，赵明星[1,2]，宋 联[3]，朱 葛[3]，施万胜[1,2]，阮文权[1,2]，缪恒锋[*1,2]

（1. 江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 江苏省厌氧生物技术重点实验室，江苏 无锡 214122；3. 无锡国联环保科技股份有限公司，江苏 无锡 214131）

摘要：针对含固率20%的剩余污泥，采用卧式反应器进行厌氧消化的中试启动研究.采取连续进料的方式，通过太阳能保温系统进行反应器的启动，经过3个月的运行，污泥产沼气率达到274 mL/gVS，甲烷体积分数为58%，VS转化率达到46%，蛋白质和多糖降解率分别为36.7%和30.1%，消化过程中VFA质量分数最大值为2 395 mg/kg，最大值出现在第42天。消化过程中氨氮质量分数一直缓慢增加，最大值约124.3 mg/kg。反应器沿程4个取样口污泥的VS，蛋白质和多糖降解率呈现出明显的差异性，反应器内污泥的降解率与其所处的沿程距离成正相关。经过73 d厌氧消化后，污泥的产甲烷潜力值达到273 mL/gVS，说明其已具备了良好的产甲烷潜力，反应器中的剩余污泥已转变为具有厌氧活性的污泥。

关键词：剩余污泥；厌氧消化；高固态；卧式反应器；沼气

中图分类号：X 703　**文章编号：**1673-1689(2019)06-0041-08　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.06.006

Start Up Study of Pilot-Scale Horizontal Anaerobic Digestion from Excess Sludge by High-Solid

XU Fengjian[1,2]，*ZHAO Mingxing*[1,2]，*SONG Lian*[3]，*ZHU Ge*[3]，*SHI Wansheng*[1,2]，*RUAN Wenquan*[1,2]，*MIAO Hengfeng*[*1,2]

（1. School of Environment and Civil Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；3. Wuxi Guolian Environmental Science & Technology Co. Ltd.，Wuxi 214131，China）

Abstract： The pilot-scale horizontal reactor was investigated in this research for the anaerobic digestion of excess sludge. The reactor with the solar thermal insulation was operated under conditions of 20% solid content and continuous feeding mode. Results showed that the biogas yield reached 274 mL/g VS with methane content of 58% after 3 months' operation. The VS conversion rate was 46%, in which protein and polysaccharide were 36.7% and 30.1% respectively. Moreover, the maximum VFA content with the value of 2 395 mg/kg was appeared on the 42nd day during the whole process. The ammonia concentration increased slowly, then reached the maximum value of ~ 124.3 mg/kg during the digestion process. The degradation rate of VS, protein and polysaccharide in

收稿日期：2016-11-23

基金项目：国家自然科学基金项目(51508230，51678279)。

*** 通信作者：**缪恒锋(1980—)，男，博士，教授，硕士研究生导师，主要从事废水的深度处理和剩余污泥的资源化研究。

E-mail：hfmiao@jiangnan.edu.cn

引用本文：许凤剑，赵明星，宋联，等. 剩余污泥高固态卧式厌氧消化的中试启动研究[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(06)：41-48.

four sampling port of the reactor showed obvious difference, indicating that the sludge degradation rate in the reactor was positively collated with the distance along the reactor. After 73 days' anaerobic digestion, the methane producing potential of sludge could reach 273 mL/g VS, which showed that the system had a good potential for methane generation, and the residual municipal in the reactor had been successfully transformed into anaerobic activated sludge.

Keywords: municipal sludge, anaerobic digestion, high-solids, horizontal reactor, biogas

剩余污泥是指污水处理厂处理废水时在初沉池以及二级、三级处理工艺中产生的沉淀污泥物、颗粒物和漂浮物等。随着我国社会经济的发展和城镇化的快速发展,城镇污水厂的数量和规模在不断增加。我国在污泥处理处置中存在的"重水轻泥"问题十分严重,对污泥处理处置的重视和投入不够,80%的污泥没有得到合理的处理处置。初步估算"十二五"期间,全国年平均产80%含水率的湿污泥3 500~6 000万吨,折合干污泥约700~1 200万吨[1]。到2020年污泥年产量将突破6 000万吨,污泥产量的不断增加给环保行业带来了巨大的压力[2]。

剩余污泥易降解的有机组分为有机固体总量的59%~88%[3]。在众多的污泥处置技术中,厌氧消化技术是污泥处理处置的有效方式之一,厌氧消化可以减少污泥体积,稳定污泥性质,提高污泥的脱水效果,减少污泥恶臭,减少病原微生物量,提高污泥的卫生质量[4]。传统污泥湿式消化中污泥含水率高达95%,产生大量难以处理的沼液,同时由于反应体系含有大量的水给增温系统带来巨大困难,处理时所占空间大却消化能力低[5]。污泥高固态消化克服了传统厌氧处置的不足,提高了单位有机物的处理量,同时大大降低了沼液的产生量,减少了占地面积,提高了消化能力[6]。但是传统的立式消化装置也存在一定的不足,由于污泥的粘度和密度较大,厌氧处理时污泥容易堆积在底部,造成局部酸化,传质传热受阻,发酵速率较慢等。而卧式反应器具有搅拌效率高,有效体积大,能耗低等特点,采用卧式反应器可有效的避免立式反应器处理污泥的不足。

本研究作者选择高固态厌氧消化,为提高体系传质传热性能,采用卧式反应器,内置横向搅拌系统。研究了剩余污泥在卧式反应器中有机物降解的情况,分析了污泥中蛋白质和多糖的变化情况,分析了消化过程中污泥产气量,有机酸和氨氮质量分数的变化情况,研究了消化结束后污泥的产甲烷性能,进行了卧式厌氧消化反应器的启动研究。通过中试反应器的运行为污泥厌氧消化工程化的应用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验材料

剩余污泥取自无锡市滨湖区太湖新城污水处理厂带式压滤机出泥,污泥性质见表1。

表1 剩余污泥性质

Table 1 Characteristics of excess sludge

样品	pH	TS	VS/TS	氨氮质量分数/(mg/kg)	总碳质量分数/(g/kg)	总氮质量分数/(g/kg)	碳氮比
剩余污泥	7.6	20%	57%	23.15	148.63	27.84	5.3

1.2 实验装置

本实验的运行装置位于无锡太湖新城污水处理厂,该反应装备主要分为进料装置、卧式厌氧反应装置、沼气收集和净化装置、太阳能保温装置和沼渣脱水装置等。剩余污泥进入储料罐中,通过提升机输送到一定高度,在螺旋输送机的作用下从上部进入厌氧发酵罐中,发酵罐为卧式厌氧发酵罐,可以自动监测压力、流量和液位等,可实时监控。厌氧发酵产生的沼气经过脱水和脱硫净化后进行收集和利用。设置了沼渣出料装置,沼渣通过板式压滤机进行脱水。为了实现反应器全年稳定运行,克服冬季或低温情况下反应效率低的问题,设计了太阳能保温设施,可维持反应器的全年稳定运行。温室采用的太阳能保温装置以槽钢和角钢为骨架,以

PC 阳光板覆盖四周和顶端，整个装置密封良好，PC 阳光板带有紫外线吸收膜可吸收紫外线。日照时，棚内温度可快速升高，夜晚时对反应器也有良好的缓冲保温作用。卧式反应装置的体积为 50 m^3，装置示意图如图 1 所示，反应器按沿程平均分布 4 个取样口，分别为 1 号、2 号、3 号和 4 号，分别用 R1、R2、R3 和 R4 表示。太阳能温室体积约 80 m^3。

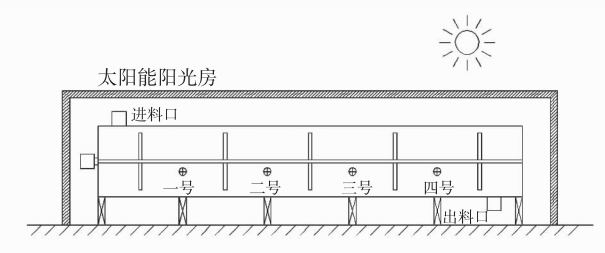


图 1　中试反应装置示意图

Fig. 1　Diagram of pilot reactor

反应器启动时采用连续进料的方式进行加料，第 1 天进剩余污泥 10 吨，以后每天进料 1 吨，1 个月内完成进料，共加料 40 吨，体积约为 35 m^3，未加入产甲烷菌种。完成进料后每日定时进行搅拌，搅拌转速为 5 r/min，启动过程的厌氧消化时间为 73 d。

1.3　测定方法

测定氨氮、VFA、蛋白质和多糖时，对污泥进行预处理，取 1 g 污泥加入 9 g 无氨水震荡离心后测定上清液指标，参照《城市污水厂污泥检测方法》(CJ/T221–2005)[7]。VS 的测定根据《国家水和废水监测分析方法》[8]；总氮和蛋白质的质量分数测定采用凯氏定氮法[9]；总碳的测定采用总有机碳分析仪；多糖测定采用苯酚–硫酸法[10]。沼气产量采用热式气体质量流量计测定，规格为 FAJR–15 DN15 mm。甲烷体积分数测定采用便携式甲烷测定仪测定。

2　结果与分析

2.1　启动过程中反应器保温效果的分析

温度是影响厌氧消化效果的关键因素之一，不同的温度对应特定的产甲烷群落，厌氧消化的温度波动不能太大，否则会影响产甲烷效果的稳定性[9]。为考察启动阶段太阳能温室的温控效果，记录了反应器内，温室棚内以及室外的温度变化情况，分析了 4 月 20 号一天内温度的变化情况(图 2)；同时记录了从三月底以来的 73 天温度变化的数据(图 3)。从图 2 可知温室棚内温度明显高出室外 10~12 ℃，反应器内温度高出室外 6~9 ℃，且反应器内温度更加稳定，温度波动幅度小，最低温度 26 ℃，最高温度 33.5 ℃，反应器温差为 7.5 ℃，温室棚内温度波动较大，最高温度 38.2 ℃，最低温度 25.4 ℃，温差为 12.8 ℃，温室外最高温度 24.7 ℃，温室外最低温度 17.5 ℃，温差达到 7.4 ℃，这表明温室不但对反应器有良好的增温效果，而且对其温度的稳定性起到一定的作用。

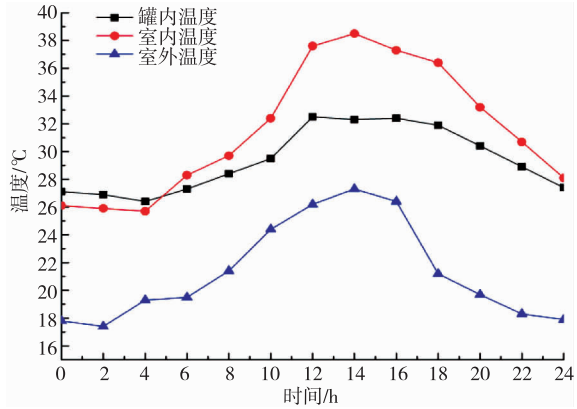


图 2　一日内温差变化

Fig. 2　Daily variation in temperature

图 3 为连续 73 d 内温度变化的情况，从图中可以看出，前期反应器内和温室内外 3 处温度都处于最低温度，分别是 10.2、15.1 ℃和 11 ℃。后期反应器内和温室内外三处温度处于最高温度，分别为 30.8、41.2 ℃和 37.2 ℃。前期室外温度最低时棚内外温差较小，温差为 4.9 ℃，罐内温度和室外温度差只有 0.8 ℃，而到后期，当室外温度最高时，温室内外温度差为 10.4 ℃，反应器内和室外的温度差为 6.8 ℃，由此可以看出，当室外温度越高时，温室内外温差

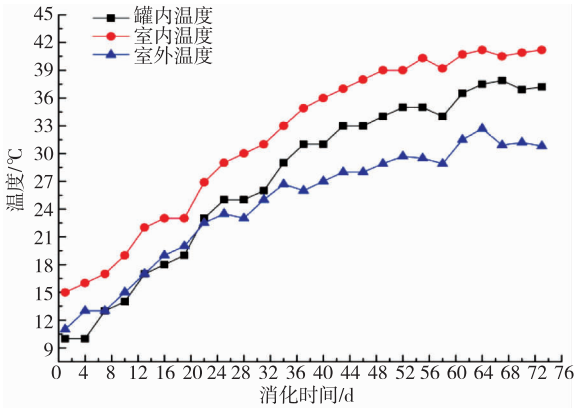


图 3　消化过程中温度的变化

Fig. 3　Changes of the temperature during digestion

越大,温室的增温效果越好。启动过程的后半段室内外温差高于反应前半段。在第 50 天到第 73 天时,温室内温度明显高出室外 10 ℃左右,反应器内温度高出室外 7~8 ℃,说明随室外温度的提高,温室的升温效果越来越好。本研究的结果与孟成林等人对污泥厌氧消化的温室-太阳能热水器组合增温系统的研究结果相似[11]。

2.2 启动过程中沼气量和甲烷体积分数的情况

图 4 为发酵罐产气量和甲烷体积分数的变化曲线,从图可知,反应初始阶段,反应器内产气效果不明显,这主要是因为投料为好氧剩余污泥,自然驯化需要的时间较长,在没有接种物的情况下,初期几乎无产气。但随着反应的不断进行,反应器日产沼气量不断提升,初期日产气的增速较缓慢,在第 25—55 天,反应器产气量明显提升,日产气量从 3.9 m^3 迅速提高到 16 m^3,对比图 3 可知,这一时期反应器内的温度从 25 ℃上升到 35 ℃,产气量和温度均迅速提高,温度的上升大大提升了产甲烷菌的活性,提高了消化效率,反应器温度达到 35 ℃时,有利于污泥的中温厌氧消化。在第 55—65 天,反应器产气速率维持在一个较高的水平,到第 60 天后产气量有所下降,这主要是由于反应器内底物的大部分已被利用,体系中已没有充足的有机物维持较高的厌氧消化速率,到第 73 天,反应器中污泥每克 VS 累计产气量为 274 mL。高军等在研究剩余污泥固态厌氧消化时污泥的产甲烷量为 350~730 mL/gVS[12],这一结果比本文的产气率高,可能的原因是其添加了厌氧污泥作为种泥,加快了反应的速率。从图中甲烷变化的情况可以看出初始阶段所产沼气中甲烷量较少,前 45 d 均维持在一个较低的状态,在第 45—60 天不断提高并达到最大值 58%,之后均维持在 40%~55%之间,对应 65 d 后的产气量,产气先达到高峰一周后气体中甲烷体积分数达到高峰。从产沼气量和甲烷体积分数的数据分析表明反应器污泥厌氧消化启动已完成。反应器内污泥的微生物主要由杆菌属、变形菌属、胞菌属、拟杆菌类、八叠球菌和产甲烷髦毛菌等组成[13]。

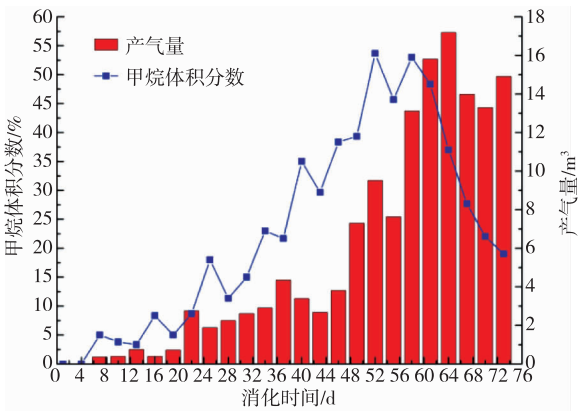


图 4 产气量和甲烷含量的变化

Fig. 4 Changes of accumulation biogas and methane yield

2.3 启动过程中挥发性脂肪酸和氨氮的变化分析

厌氧发酵过程中,有机物逐步被微生物转化为挥发性脂肪酸(VFA),VFA 可作为产甲烷菌的底物,通过自身代谢作用生成甲烷。但较高浓度的 VFA 会引起发酵体系酸化、pH 值降低、微生物代谢过程停滞,导致发酵过程失败[14]。但是在高固态污泥厌氧消化过程中,因为反应体系具有较高的氮源,能提高 pH 值,从而能够中和水解产生的酸,避免发生酸抑制现象[15]。

图 5 为启动阶段发酵罐 4 个取样口污泥 VFA 的变化情况,从图中可以看出 VFA 初始质量分数较低,第 1 天到第 15 天,VFA 的质量分数迅速增加到 1 500 mg/kg,这一阶段中有机物迅速分解为有机酸,从第 15 天到第 42 天 VFA 质量分数缓慢上升,在第 42 天时达到最大值 2 395 mg/kg,从第 15 天到第 43 天 VFA 质量分数缓慢上升,虽然这一阶段反应器温度不断提高,但 VFA 质量分数的增加速率并不快,可能的原因是产甲烷菌利用有机酸的速率不断提高,到第 40 天有机酸的质量分数开始下降,在第 40 到 55 天经过波动后逐渐降低,在 60 到 74

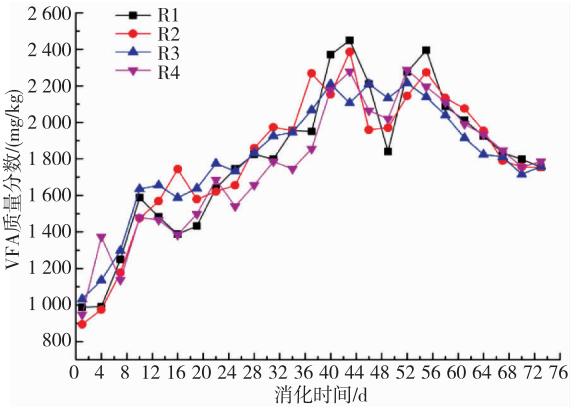


图 5 厌氧消化中 VFA 的变化情况

Fig. 5 Changes of total VFA concentration during the reaction process

天,有机酸的质量分数也逐渐降低,在第 73 天 VFA 质量分数减少至1 800 mg/kg 左右,这一阶段正好对应了图 4 中产气量减少的阶段,可能是因为罐内污泥经过 2 个月的消化后有机物的质量分数已经较低,没有足够的底物供产甲烷菌利用,造成产气量减少。对比反应器沿程 4 个取样口所取污泥的 VFA 质量分数,由于反应器内搅拌桨叶有一定的倾斜角度,且反应器进料共用了约 30 d,进料中会对反应器内污泥有推流作用,4 组数据的变化趋势几乎相同。

厌氧消化过程中,过高的氨氮质量分数会使体系溶解性有机酸质量分数降低,对厌氧消化产生抑制作用[16]。图 6 为启动过程中氨氮的变化情况,从图中可以看出氨氮质量分数从一开始到第 60 天都处于上升的趋势，从开始的 49.9 mg/kg 增加到 124.3 mg/kg，前30 d 氨氮的增加速率比后 30 d 的速率更快,随着消化反应的进行,含氮有机物大量被降解,系统释放大量氨氮,同时产甲烷菌活性增强,对酸的降解速率大于产酸,氨氮质量分数整体呈上升的趋势。比较 4 个取样口的氨氮质量分数,可以看出 4 组污泥氨氮质量分数整体呈现差异性,4 号口污泥氨氮质量分数在变化过程中的质量分数均高于其它几组,1 号污泥氨氮质量分数最低,这可能是因为反应器搅拌方式的推流作用使不同沿程的污泥有不同的消化时间,4 号口污泥消化时间最长,1 号口污泥消化时间最短,消化时间越长污泥中氨氮量累积越多,所以 4 号污泥氨氮值高于其他几组。比较高瑞丽等在摇瓶中进行的实验,污泥氨氮值为 100~400 mg/kg[17],这一数值较高的原因可能是因为其添加了接种污泥并控制温度稳定在 36 ℃。厌氧消化最适的 C/N 为 10:1~12:1,但由于剩余污泥的碳源不足,其碳氮比一般为 5:1~6:1,过低的碳氮比容易使反应过程中 pH 值上升,铵盐积累,本实验的中后期出现了氨氮的升高现象,可能会对消化效果产生一定的影响。

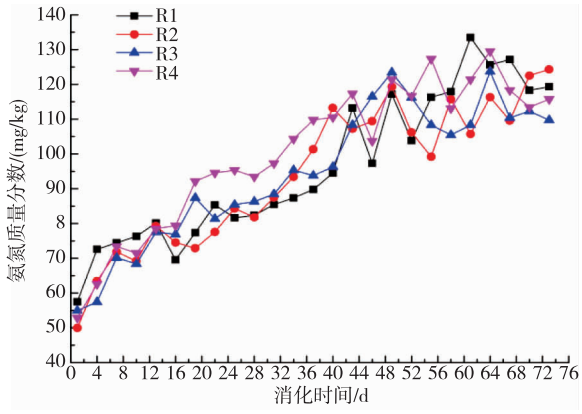


图 6　厌氧消化过程中氨氮的变化情况

Fig. 6　Ammonia nitrogen concentration for different groups during the fermentation process

2.4　启动过程中 VS、蛋白质和多糖降解情况的分析

图 7 为反应器启动过程中 4 个取样口污泥 VS 的变化情况。由图可知,反应前期 4 个取样口污泥 VS 几乎没有明显的变化，前 20 d VS 转化率由 5% 提高到 10%左右，到第 20 天,VS 质量分数约为 10.2%,从第 30 天开始 VS 的转化速率明显加快,转化率从 10%提高到约 38.5%，到第 73 天 VS 值为 7%,此时 VS/TS 约为 35.7%,对比图 3 可知,前期速率较低,而后期速率较高的原因,可能是因为一方面反应器进料完全采用剩余污泥作为消化底物,没有接种厌氧污泥,另一方面后期的消化温度比前期提高 10 ℃左右，后期的温度更有利于污泥的厌氧消化。比较 4 个取样口污泥 VS 的转化率,4 号取样口污泥 VS 降解率初始值大于 1 号污泥,这是由于 4 号取样口附近污泥的停留时间大于 1 号取样口附近的污泥。这使得 4 个取样口所取污泥的 VS 转化率呈现出明显的差异性。

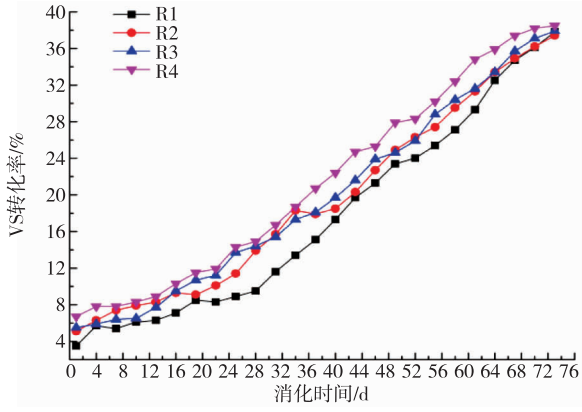


图 7　厌氧消化中 VS 转化率的变化

Fig. 7　Changes of the VS conversion rate in anaerobic digestion

图 8 反映的是污泥中蛋白质的变化趋势,从图中可以看出随着消化时间的增加,污泥中蛋白质的质量分数不断减少，从最初的 425 mg/kg 降低到第 73 天的 269 mg/kg,降解率约为 36.7%。其中从第 20

到第 60 天,蛋白质的降解速率最快,降解率为总降解量的 65%,这主要是因为适宜的温度提高了污泥的消化效果。对比 4 组污泥变化情况,在消化的过程中 4 号口的污泥蛋白质质量分数明显低于其他几组,这是因为 4 号附近的污泥较其他几组经历了更长的消化延程,4 号取样口的污泥的消化时间大于 3 号取样口的污泥。3 号取样口的污泥消化时间大于 2 号和 1 号取样口污泥,其蛋白质质量分数也较 2 号和 1 号更低。

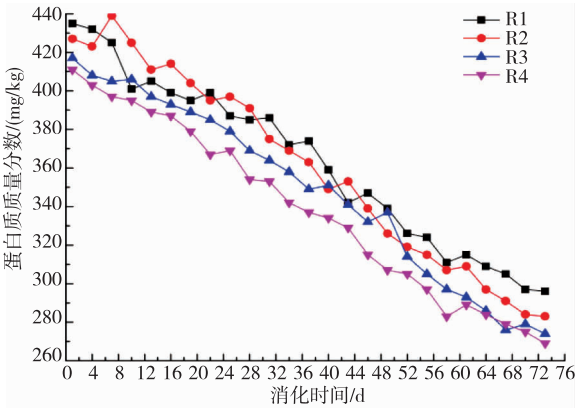


图 8　消化过程中蛋白质的变化

Fig. 8　Changes of the protein content during digestion

图 9 反映的是消化过程中各延程污泥中多糖质量分数的变化,比较图 8 图 9,二者有的变化趋势较相似,说明在厌氧消化中蛋白质和多糖都是可被降解的有机物,多糖质量分数从一开始的 315 mg/kg 降低到第 73 天的 220 mg/kg,降解率达到了 30.1%,略低于蛋白质的降解率,本文这种现象的产生可能是因为剩余污泥中蛋白质总量较多,消化过程中利用的效率高。

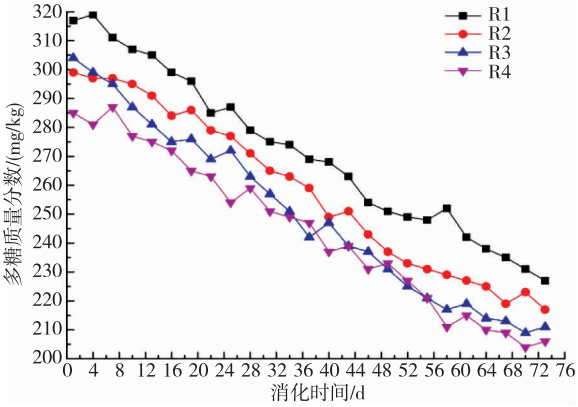


图 9　多糖质量分数的变化

Fig. 9　Change of the polysaccharides in digestion process

2.5　反应器启动中污泥产甲烷潜力的研究

产甲烷潜力是指单位有机物料在厌氧条件下发酵产生甲烷气体的数量。有机物料的产甲烷潜力分析对于了解厌氧消化效率有重要的参考价值[18]。在一个 100 mL 的厌氧培养瓶内,加入 15 g 不同时期从反应器 4 号取样口取出的污泥(约 1 gVS),分别是反应 15、30、45、60 d 和 75 d 的污泥,标记为 B_1、B_2、B_3、B_4 和 B_5。把污泥加入以乙酸盐为底物的厌氧培养液 50 mL,质量浓度为 1.5 g/L。营养母液配制质量浓度:NH_4Cl:170 g/L;KH_2PO_4:37 g/L;$MgSO_4 \cdot 4H_2O$:9 g/L 在 35 ℃恒温水浴内进行培养,用史氏发酵管内 NaOH 溶液吸收所产沼气中的 CO_2,并对所产 CH_4 进行计量。比较反应器中不同时期污泥的产甲烷活性,实验结果如图 10。

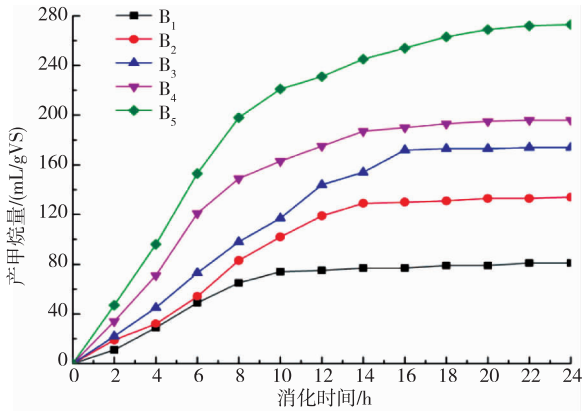


图 10　产甲烷潜力的变化

Fig. 10　Change of Cumulative methane production

从图 10 可知,5 组实验组最终的产甲烷量呈现出差异性,B_5 组产甲烷量最大,达到 273 mL/gVS 甲烷,明显高于其他几组,B_1 组的产甲烷量最小为 79 mL/gVS,说明消化时间的长短对污泥的产甲烷潜力有影响,消化时间越长的污泥产甲烷潜力越大。比较 5 组实验组产甲烷速率可知,5 组实验组产气高峰均在前 10 d,B_5 组的产气速率最快,B_1、B_2 和 B_3 前期产气速率较接近,但 B_3 组产气时间较长,维持到第 16 天,而 B_1 组在第 8 天几乎就不产气,这也说明了污泥消化时间提高了其产甲烷潜力,反应器运行 74 d 内污泥厌氧活性不断提高。董春娟对处理焦化废水的 EGSB 反应器中颗粒污泥进行产甲烷潜力测试,发现其最终产甲烷量为 125 mL/gVS[19],洗萍等对造纸厂厌氧颗粒污泥进行了产甲烷潜力测试,实验的产甲烷量累计达到 330 mL/gVS[20]。结合文献

的研究成果，对比本文 B_5 组产甲烷潜力值 273 mL/gVS，本实验 B_5 组污泥产甲烷潜力值已达到厌氧污泥产甲烷潜力水平，说明经过 73 d 的厌氧消化，反应器内的剩余污泥已转化成为厌氧污泥，具有了一定的产甲烷活性。

3 结 语

通过搭建太阳能温室装置，起到提高和稳定反应器内温度的作用，反应器内温度较室外温度能提高 10 ℃左右，可以将反应器内温度的波动控制在 4~5 ℃。

经过 73 d 的厌氧消化，含固率 20%左右的剩余污泥的 VS 降解率可达到 38.5%，VS/TS 由开始的 57%降低到 35.7%，蛋白质和多糖均得到一定程度的降解，降解率分别为 36.7%和 30.1%。通过研究反应器不同沿程污泥性质的差异，发现不同沿程上污泥的 VS、蛋白质、多糖和氨氮均呈现明显的差异性，说明具有推流效果的卧式反应器不同沿程上污泥具有不同的消化时间，污泥所处沿程越长的消化时间越长。

经过 73 d 厌氧消化，反应器中污泥每克 VS 累计产气量为 274 mL，甲烷体积分数最大达到 58%。通过对反应器内不同时间污泥进行产甲烷潜力分析发现，在消化 73 d 后，污泥的产甲烷潜力达到 273 mL/gVS，表明污泥已经具备了良好的产甲烷潜力，剩余污泥在卧式反应器内经过 73 d 的消化后具备了一定的厌氧活性。

参考文献：

[1] QIAN Jinghua，TIAN Ningning. Sewage sludge anaerobic digestion technology and energy consumption[J]. **China Water & Wastewater**，2010，11(2)：102-104.(in Chinese)

[2] DAI Xiaohu. Current situation of municipal sludge treatment in china[J]. **China Water & Wastewater**，2012，38(2)：1-5.(in Chinese)

[3] GAO Ruili，YAN Qun，ZOU Hua，et al. Effects of different pretreatment of waste activated sludge on methane production via anaerobic digestion[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2009，28(1)：107-112.(in Chinese)

[4] YAO Bin. Treatment and countermeasures of excess sludge[J]. **Urban Construction Theory Research**，2015，17(5)：57-59.(in Chinese)

[5] 李健. 剩余污泥的高温厌氧消化[D]. 合肥：合肥工业大学，2014.

[6] CHEN T H，CHYNOWETH P，BIIJETINA R. Anaerobic digestion of municipal solid waste in a nonmixed solids concentrating digestor[J]. **Applied Biochemistry and Biotechnology**，1990，24(1)：533-544.

[7] 中华人民共和国建设部. 城市污水处理厂污泥检验方法[M]. 北京：中国标准出版社，2006：6-97.

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版). 北京：中国环境科学出版社，2002：105-220.

[9] AQUINO S F，STUCKEY D C. Soluble microbial products formation in anaerobic chemostats in the presence of toxic compounds [J]. **Water Research**，2004，38(2)：255-266.

[10] LAY J J，LI Y Y，NOIKE T，et al. Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste [J]. **Water Science and Technology**，1997，36(6-7)：497-499.

[11] MENG Chenglin，LI Rongping，LI Xiujin. Integrated system of greenhouse and solar heater for anaerobic digestion of excess activated sludge[J]. **Transactions of The CSAE**，2009，25(9)：210-214.(in Chinese)

[12] 高军. 有机废弃物高温好氧堆肥和厌氧消化工艺研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2013.

[13] 董慧峪. 两种剩余污泥厌氧消化评估与研究[D]. 天津：天津大学，2008.

[14] APPELS L，BAEYENS J，DEGREVE J，et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge[J]. **Progress in Energy and Combustion Science**，2008，34(6)：775-781.

[15] 黄晓艳. 高含固率高氮污泥厌氧消化工艺的研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2014.

[16] XU Zhiyang，ZHAO Mingxing，MIAO Henfeng，et al. Analysis of ammonia inhibition on anaerobic digestion via food wastes[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2014，33(3)：282-287.(in Chinese)

[17] 高瑞丽. 剩余污泥固态发厌氧消化产沼气过程的研究[D]. 无锡：江南大学，2009.

[18] ELBESHBISHY E，NAKHLA G，HAFEZ H. Biochemical methane potential（BMP）of food waste and primary sludge：influence

of inoculum pre-incubation and inoculum source[J]. **Bioresource Technology**,2012,1(1):325-332.

[19] DONG Chunjuan,FENG Meirong,WANG Haihui,et al. Changes in methanogenic activity of granular sludge acclimated by coking wastewater in EGSB reactor[J]. **China Water &Wastewater**,2010,26(6):25-28.(in Chinese)

[20] XIAN Pin,LI Yinghua,DENG Bin,et al. Influence of landfill leachate on anaerobic granular sludge methane-producing activity [J]. **Chinese Journal of Environmental Engineering**,2009,10(3):1767-1770.(in Chinese)

会　议　消　息

会议名称:第五届酶国际研讨会(ICE 2019)

The 5th Int'l Conference on Enzyme (ICE 2019)

大会时间:2019 年 7 月 19-21 日

主办单位:工程信息研究院

大会官网:http://www.confjuly.org/conference/ICE2019/

注册地址:http://www.confjuly.org/RegistrationSubmission/default.aspx?ConferenceID=1129

大会地点:中国桂林

邮箱投稿:intelconf@163.com

会议简介:ICE 2019 旨在为业内专家学者分享技术进步和业务经验,聚焦酶的前沿研究,提供一个交流的平台。会议将集聚来自世界各地的科研人员、工程师、学者及业界专家,展示他们在酶领域的最新研究成果及活动进展。

联系人:张老师(Rolin)

邮箱: intelconf@163.com

QQ: 3025797047

电话: 13264702250