

热水解对污泥高温厌氧消化产气及群落结构的影响

刘长青, 张峰, 张雪, 廖足良

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 针对剩余污泥厌氧消化效率及产气量低的问题,采用热水解(THP)技术对剩余污泥进行预处理,然后进行55℃高温厌氧消化,考察对产气性能及微生物群落结构的影响。THP预处理可以有效提高剩余污泥高温厌氧消化的产气性能,在反应时间为16 d时,厌氧消化总产气量增加了39.14%;反应时间为8 d时,厌氧消化产气量提高了36.36%。经THP预处理后,厌氧消化系统功能微生物的多样性略有下降,群落的丰富度指数由未经THP预处理的2.32降为1.81;但系统微生物的群落组成及优势微生物的数量均发生了明显变化,群落结构的变化是厌氧消化产气量增加的微生物学基础。

关键词: 剩余污泥; 热水解; 高温厌氧消化; 产气量; 群落结构

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0026-05

Effect of THP on Gas Production Performance and Microbial Community Structure of Excess Sludge with Thermophilic Anaerobic Digestion Treatment

LIU Chang-qing, ZHANG Feng, ZHANG Xue, LIAO Zu-liang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: Release of organic matter in excess sludge cells is one of the major bottlenecks in limiting the anaerobic digestion efficiency. THP (Thermal Hydrolysis Pretreatment) technology was used as pretreatment process, followed by 55℃ thermophilic anaerobic digestion, to investigate the effect of THP on biogas production and microbial community structure. The results showed that THP pretreatment could effectively improve the sludge biogas production performance of thermophilic anaerobic digestion. The total gas production increased by 36.36% and 39.14% respectively when the reaction time was 8 days and 16 days. After pretreatment of THP, functional microbial diversity of anaerobic digestion system decreased slightly. The community abundance index decreased from 2.32 to 1.81, but the number of species composition and dominant microbial communities had changed significantly. The change of community structure was the microbiology basis of anaerobic digestion gas production increased.

Key words: excess sludge; THP; thermophilic anaerobic digestion; biogas production; community structure

随着我国城镇化进程逐渐加快,全国污水处理总量及处理能力日渐提高。由于目前污水处理通常

采用活性污泥法,在污水处理过程中会产生大量剩余污泥,一般占污水处理量的0.3%~0.5%(以含

水率为 97% 计)^[1],剩余污泥的处理与处置日益成为污水处理领域迫切需要解决的难题。厌氧消化作为一种成熟的污泥处理工艺,可以较好地实现污泥稳定化、减量化、无害化及资源化,目前在国内外均得到了广泛应用^[2]。根据反应温度不同,厌氧消化通常可分为中温厌氧消化和高温厌氧消化,目前应用较多的是中温厌氧消化工艺,高温厌氧消化工艺由于其能耗较高,在我国尚未广泛应用。但高温厌氧消化相对于中温厌氧消化具有水力停留时间短、产气量高的优点^[3,4],在城市用地日益紧张及能源短缺的现状下,具有较好的应用前景。

由于剩余污泥主要由微生物组成,细胞内部有有机物质的释放困难是制约厌氧消化效率提高的主要瓶颈问题之一。为了提高细胞内有机物的释放率,剩余污泥在厌氧消化前的预处理技术成为国内外研究的热点^[5]。对剩余污泥进行预处理可以有效溶出污泥细胞中的有机物,改善剩余污泥的厌氧消化性能^[6,7]。常用的剩余污泥预处理方法有热水解、酸碱处理和超声处理等^[8]。

为了进一步缩短高温厌氧消化的水力停留时间、提高产气率,笔者通过热水解预处理与高温厌氧消化相结合的方法处理剩余污泥,考察了该方法与单纯高温厌氧消化工艺在产气效率上的差异,并采用限制性片段多态性(RFLP)的分析方法研究了两种厌氧污泥生物多样性与微生物群落结构的差异。

1 材料及方法

1.1 接种及试验污泥

接种污泥取自污水处理厂厌氧消化罐,由于该污水处理厂采用中温厌氧消化工艺,所以在进行试验前首先对接种污泥进行驯化,以使厌氧微生物更好地适应温度的转变。剩余污泥取自青岛市某城市污水处理厂二沉池回流污泥,该厂处理工艺为多模式 A²/O 工艺,以生活污水为主要处理对象。取出的剩余污泥首先浓缩至含固率为(5±1)%,一部分直接进行厌氧消化,另一部分经热水解预处理后再进行厌氧消化。

1.2 试验装置

污泥的热水解预处理采用 Cambi 公司研发的中试装置(如图 1 所示),包括浆化罐、反应罐和闪蒸罐等三部分。工作压力为 600 kPa,反应罐温度控制在 155~170℃,加热元件的功率为 20 kW,工作电压为 380 V。



图 1 THP 热水解装置

Fig. 1 Picture of thermal hydrolysis pretreatment device

高温厌氧消化装置为瑞典 Bioprocess 公司生产的 AMPTS(Automatic Methane Potential Test System) II 型装置(如图 2 所示),由厌氧消化单元、CO₂ 吸收单元和气体流量检测单元三部分组成。由于该设备设有 CO₂ 吸收单元,因此得到的产气量可近似看作甲烷气体生成量。

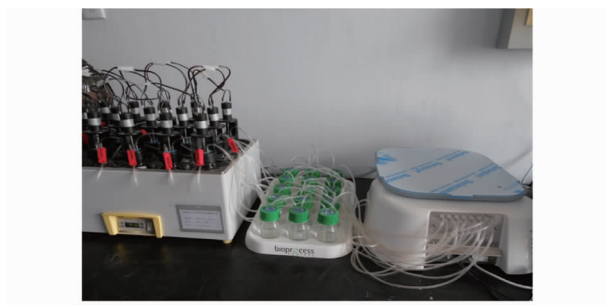


图 2 AMPTS II 型厌氧试验装置

Fig. 2 Picture of AMPTS II anaerobic experimental device

1.3 试验方法

① 热水解预处理方法

将需要进行预处理的污泥首先输送至浆化罐中,混匀预热至 97℃后再进入反应罐,高温加热蒸煮 20~30 min,最后进入泄压罐闪蒸,冷却降温至室温即完成 THP 预处理。

② 高温厌氧消化试验

将驯化好的接种污泥和试验污泥置于 500 mL 厌氧瓶中进行高温厌氧消化,温度控制在(55±0.2)℃。试验污泥与接种污泥按照 1:2 的比例投加(以 VS 计),搅拌强度控制为 50 r/min,间歇搅拌,搅拌时间和停歇时间均为 60 s,通过电脑监测厌氧消化全过程。

1.4 分子生物学试验方法及仪器设备

由于甲基辅酶 M 还原酶(MCR)是产甲烷过程中的关键酶,也是产甲烷菌所特有的酶,其 α 亚基

(mcrA)基因可以作为区分和检测产甲烷菌的独特分子标记,可代替16S rDNA进行遗传分析研究^[9]。为此,选择产甲烷菌功能基因mcrA为研究对象,采用文献[10]中的方法提取DNA,参考徐彦胜等^[11]的研究设计基因特性引物,其中ME1为GCMATG-CARATHGGWATGTC,ME2为TCATKGCRTAGTTD-GGRTAGT,目标序列长度为760 bp,退火温度为50℃。

特性基因经PCR扩增及回收、纯化后,采用TIANGEN公司的pGM-T试剂盒连接反应完成克隆,采用限制性内切酶RsaI和HhaI对PCR产物进行双酶切,于PCR仪中(37℃)酶切20 min,在80℃条件下反应5 min使酶失活,然后于4℃下保存。

用3%的琼脂糖凝胶电泳分离酶切片段,并用凝胶成像仪拍照进行图谱分析,每个酶切类型即为一个操作单元(OTU)。酶切图谱中不同的酶切类型代表不同菌种,以OTU为单位进行群落的多样性指标分析。

分析所需仪器设备包括:OMEGA公司的E. Z. N. A Gel Extraction Kit纯化试剂盒,Lifepro PCR扩增仪,NV3000型核酸微量分析仪,JY600C型电泳仪,Hitachi高速冷冻离心机,岛津紫外分光光度计。

2 结果与讨论

2.1 THP预处理对高温消化产气量的影响

图3为高温厌氧消化过程中累积产气量的变化。

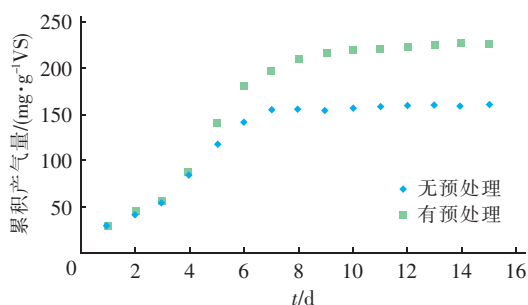


图3 污泥单位VS累积产气量的变化

Fig.3 Curve of accumulation gas production per gram VS

由图3可以看出,无论是否经过THP预处理,剩余污泥高温厌氧消化的产气量在第8~9天基本达到稳定。相对于中温厌氧消化一般15~30 d的厌氧消化周期^[12],达到相同的产气量,高温厌氧消化的产气周期明显缩短。而产气周期的缩短,可以显著降低厌氧消化反应所需的有效容积,减少构筑

物的一次性投资。相对于未经过THP预处理的剩余污泥,经过THP预处理的污泥其产气量明显提高,在厌氧消化反应结束时,总产气量提高了约39.14%。如果以8 d作为高温厌氧消化的控制周期,经过THP预处理的剩余污泥的累积产气量较未经预处理的污泥提高了36.36%。这是因为THP预处理利用高温高压蒸汽对剩余污泥进行蒸煮,溶解了污泥颗粒,水解了污泥的胞外聚合物,对剩余污泥的破胞作用明显,大量细胞内含物得到有效释放,增加了厌氧消化反应的底物浓度,进而提高了后续厌氧消化的产气量。

2.2 THP预处理对微生物多样性的影响

将消化污泥产甲烷菌mcrA基因在克隆文库中克隆子的PCR产物用限制性内切酶RsaI和HhaI酶进行双酶切,然后用3%的琼脂糖凝胶进行电泳,即得到酶切图谱。剩余污泥和经过THP处理的剩余污泥产甲烷菌mcrA基因的酶切图谱如图4所示。

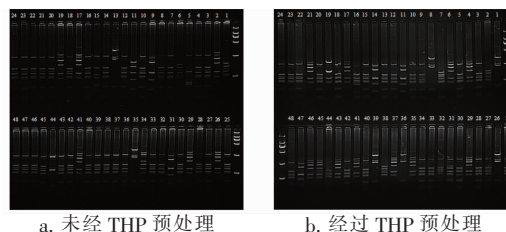


图4 产甲烷菌mcrA基因的酶切图谱

Fig.4 Enzymatic map of methanogens mcrA genes

由图4可以看出,两种污泥在克隆子数量和酶切类型上都存在一定的差异,其中未经THP预处理的剩余污泥厌氧消化系统中产甲烷菌的酶切类型较多,共有10种不同的OTU;经过THP处理后剩余污泥厌氧消化系统中产甲烷菌有8种不同的OTU。为了更好地比较两厌氧消化系统中产甲烷菌的多样性,对其进行了多样性指数分析,结果如表1所示。

表1 污泥产甲烷菌克隆文库的多样性指数

Tab.1 Diversity index of sludge methanogens clone library

项 目	总克隆数	覆盖率/%	丰富度	均匀度
未处理	48	90	2.32	0.58
经处理	48	94	1.81	0.73

由表1可以看出,两种污泥的微生物克隆文库的覆盖率分别达到90%和94%,可真实反映两种污泥系统功能微生物的多样性。未经THP预处理的剩余污泥微生物系统的物种丰富度指数为2.32,经

THP 预处理后系统的物种丰富度指数为 1.81,表明经过 THP 预处理后,厌氧消化系统功能微生物的多样性有所下降。

经过 THP 预处理后,剩余污泥厌氧消化产气效率得到大幅提高,但微生物种群数量和多样性与未经 THP 预处理的相差不大,甚至还略有下降,说明微生物多样性与厌氧消化效率之间没有直接的相关性,THP 预处理提高厌氧消化产气效率更多的是因为热水解的破壁作用增加了厌氧反应的基质浓度。

2.3 THP 预处理对产甲烷菌群落结构的影响

为了进一步了解两种污泥系统中产甲烷菌群落结构组成的差异,对酶切图谱进行统计学分析,结果如图 5 所示。

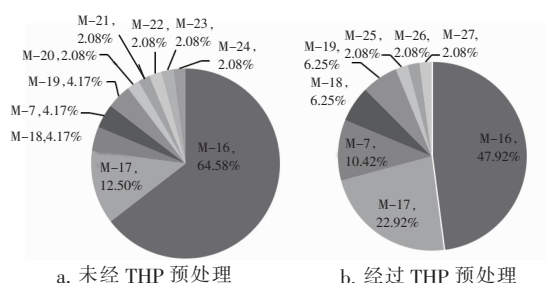


图5 两系统产甲烷菌克隆文库的组成

Fig. 5 Compositions of methanogens clone library in two systems

由图 5 可以看出,无论剩余污泥是否经过 THP 预处理,其厌氧消化系统中的优势微生物均为 OTU M-16 和 OTU M-17,但两种优势微生物在整个系统中所占的比例有所差异。未经 THP 预处理的体系中 OTU M-16 和 OTU M-17 所占比例分别为 64.58% 和 12.50%,经 THP 预处理的体系中两者所占比例分别为 47.92% 和 22.92%。经 THP 预处理后,两种优势微生物的总占比下降了 6.24%,其中 OTU M-16 下降了 16.66%,而 OTU M-17 的比例上升了 10.42%。除了 OTU M-16 和 OTU M-17 这两种优势微生物之外,两种污泥系统均存在 OTU M-7、M-18、M-19,但三种微生物在各自系统中的比例发生改变,经 THP 预处理后,厌氧系统中三种微生物总占比由 12.51% 上升到 22.92%,提高了 10.41%。

除此之外,作为非优势微生物的 OTU M-20、M-21、M-22、M-23、M-24 仅出现在未经 THP 预处理的剩余污泥厌氧消化系统中,其总占比为

10.41%;而 OTU M-25、M-26、M-27 仅出现在经过 THP 预处理的剩余污泥厌氧消化系统中,总占比为 6.24%。

虽然经过 THP 预处理后厌氧消化系统中功能微生物的多样性差异不大,但其群落结构发生了明显变化,优势微生物的数量及微生物种类均有明显差异。THP 预处理不仅增加了厌氧消化基质的浓度,还因为细胞内物质的释放部分改变了反应基质的类型,这种变化在宏观上引起了产气量的增加,在微观上导致了微生物群落组成结构的变化,而群落组成结构的变化是厌氧消化产气量增加的微生物学基础。

3 结论

① 热水解预处理可以有效提高剩余污泥高温厌氧消化的产气量,相比未经 THP 预处理的剩余污泥,整个反应期间,其厌氧消化总产气量增加了约 39.14%;反应时间为 8 d 时,总产气量增加了约 36.36%。

② 经 THP 预处理后,剩余污泥厌氧消化功能微生物群落的多样性略有下降,群落的丰富度指数由原来的 2.32 下降为 1.81。

③ 经 THP 预处理后,剩余污泥厌氧消化系统微生物的群落组成结构发生明显改变,微生物群落的种类及优势微生物的数量均发生了明显变化,群落组成结构的变化是厌氧消化产气量增加的微生物学基础。

参考文献:

- [1] 陈伟袁,贾原媛,郑伟,等. 胞外多聚物对酶催化污泥厌氧水解的影响研究[J]. 环境科学,2011,32(8): 2334-2339.
- [2] 王治军,王伟. 热水解预处理改善污泥的厌氧消化性能[J]. 环境科学,2005,26(1):68-71.
- [3] Ferrer I, Ponsá S, Vázquez F, et al. Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion[J]. Biochem Eng J,2008,42:186-192.
- [4] Gavala H N, Yenal U, Skiadas I V, et al. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of primary and secondary sludge. Effect of pre-treatment at elevated temperature [J]. Water Res,2003,37:4561-4572.
- [5] 肖本益,阎鸿,魏源送. 污泥热处理及其强化污泥厌氧消化的研究进展[J]. 环境科学学报,2009,29(4):

- 673-682.
- [6] Bougrier C, Delgenes J P, Carrere H. Impacts of thermal pre-treatments on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Biochem Eng J*, 2007, 34(1): 20-27.
- [7] Wilson C A, Novak J T. Hydrolysis of macromolecular components of primary and secondary wastewater sludge by thermal hydrolytic pretreatment [J]. *Water Res*, 2009, 43(18): 4489-4498.
- [8] 戴前进, 方先金, 邵辉煌. 城市污水处理厂污泥厌氧消化的预处理技术[J]. *中国沼气*, 2006, 25(2): 11-14, 19.
- [9] Hales B A, Edwards C, Ritchie D A, *et al.* Isolation and identification of methanogen-specific DNA from blanket bog peat by PCR amplification and sequence analysis [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1996, 62(2): 668-675.
- [10] 黄书娟. 基于分子生物学复合铁酶活化污泥硝化机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
- [11] 徐彦胜, 阮志勇, 刘小飞, 等. 应用 RFLP 和 DGGE 技术对沼气池中产甲烷菌多样性的研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1319-1324.

- [12] 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.



作者简介: 刘长青(1973-), 男, 山东聊城人, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制。

E-mail: 18661459311@163.com

收稿日期: 2016-12-10

(上接第25页)

- [2] 郅燕秋, 朱晓辉, 吕东明, 等. 饮用水紫外线消毒——实施安全消毒的重要技术选择[J]. *给水排水*, 2008, 34(6): 9-13.
- [3] 张伟, 陈仁灼. 北美给水厂紫外线消毒系统设计方法简介[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(8): 50-53.
- [4] 郝晓地, 魏丽, 仇付国. 未来饮用水处理技术及其工程应用展望[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(24): 1-5.
- [5] Donna S, Erin A, Rebecca N, *et al.* Comparative effectiveness of membrane bioreactors conventional secondary treatment and chlorine and UV disinfection to remove microorganisms from municipal wastewaters [J]. *Water Res*, 2012, 46(13): 4164-4178.
- [6] Siebel E, Wang Y, Egli T, *et al.* Correlations between total cell concentration, total adenosine tri-phosphate concentration and heterotrophic plate counts during microbial monitoring of drinking water [J]. *Drinking Water Engineering and Science*, 2008, (1): 1-6.
- [7] Hammes F, Berger C, Koster O, *et al.* Assessing biological stability of drinking water without disinfectant residuals in a fullscale water supply system [J]. *Journal of Water Supply*, 2010, 59(1): 31-40.

- [8] 董晓磊, 信昆仑, 刘遂庆, 等. 基于 Matlab 的供水管网余氯衰减模拟[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(1): 49-52.



作者简介: 黄慧婷(1984-), 女, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事饮用水安全保障技术研究。

E-mail: angel8026@163.com

收稿日期: 2016-12-28