

镍对餐厨垃圾厌氧消化中挥发酸降解的影响

周友新¹, 王晓玘², 康晓荣¹, 刘占孟³

(1. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224002; 2. 南昌大学 科学技术学院, 江西 南昌 330031; 3. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330028)

摘要: 针对高浓度有机废物厌氧消化过程中易发生反应器酸化问题,通过投加镍(Ni^{2+})来强化挥发性脂肪酸(VFAs)降解,考察镍强化 VFAs 降解和产生物气的效果。试验结果表明,当镍投加量为 0.5 mg/kgTS 时,反应 11 h 后, VFAs 浓度降低至 80.9 mg/L,生物气产量明显升高。长期连续试验发现,在反应器中积累 90 d 的 VFAs 可在投加 Ni^{2+} 后的 10 d 内完全降解,系统稳定后的平均生物产气速率达到 0.548 $\text{m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$ 。对古细菌群落结构和 VFAs 组成结构的分析表明,投加 Ni^{2+} 以后 *Methanosarcina* 和 *Methanosaeta* 所占比例分别从 25.5% 和 28.8% 升高至 30.3% 和 32.6%,促进了 VFAs 中乙酸和丙酸的降解。

关键词: 镍; 餐厨垃圾; 厌氧发酵; 挥发性脂肪酸

中图分类号: TU993.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0101-04

Effects of Nickel on Volatile Fatty Acids Degradation during Anaerobic Digestion Process of Kitchen Waste

ZHOU You-xin¹, WANG Xiao-pin², KANG Xiao-rong¹, LIU Zhan-meng³

(1. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224002, China; 2. College of Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330028, China)

Abstract: For reactor acidification problem during anaerobic digestion of high concentration organic waste, Ni^{2+} was added to enhance volatile fatty acids (VFAs) degradation, and the effects of nickel enhancing VFAs degradation and biogas production were investigated. Results showed that the biogas production increased obviously after 11 hours when dosage of Ni^{2+} was 0.5 mg/kgTS and the VFAs concentration was decreased to 80.9 mg/L. During the long-term continuous test, VFAs accumulated in 90 days were completely degraded in 10 days after Ni^{2+} addition, and average methane production rate was up to 0.548 $\text{m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$ after the system was stable. Comprehensive analysis of archaea and VFAs composition indicated that the ratio of *Methanosarcina* and *Methanosaeta* increased from 25.5% and 28.8% to 30.3% and 32.6% respectively after Ni^{2+} addition, which eventually led to the degradation of acetic and propionic acids.

Key words: nickel; kitchen waste; anaerobic digestion; volatile fatty acids

厌氧消化工艺能够实现废物减量,并可回收生物能源,同时消化液可作为肥料,故被广泛用于处理

有机固体废物^[1-3]。然而,餐厨垃圾(KW)等固体废物水解酸化产生的大量挥发性脂肪酸(VFAs)会造成反应器酸化,成为抑制产甲烷反应的关键因素^[4,5]。因此,如何消除酸化对产甲烷菌的抑制,提高厌氧消化运行的稳定性,已成为研究热点。试验发现,向厌氧消化反应器中添加铁、钴、镍等能够促进挥发性固体(VS)降解,并可有效提高生物气产量和甲烷含量^[5-7]。然而,目前的研究主要集中在微量元素促进甲烷产生的效能和机理方面,而对VFAs积累,特别是长期酸化反应器的消除分析相对较少。

因此,笔者针对厌氧消化过程中VFAs积累造成的反应器酸化问题,分析了短期和长期运行条件下,镍对VFAs降解和生物气产生的影响,并探讨添加镍对古细菌群落结构的影响,揭示镍消除反应器酸化的生物学机理。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

采用的接种污泥取自实验室UASB反应器,总固体(TS)浓度为 $(28\ 500 \pm 500)$ mg/L,VS浓度为 $(19\ 500 \pm 450)$ mg/L。KW取自盐城工学院学生食堂,去除油分、盐分和杂物后,捣碎至2~3 mm。KW的具体含量如下:TS为12.5%、VS为10.2%,其中蛋白质含量为17.2%、多糖含量为51.7%、脂类含量为20.6%。KW经150℃热处理2 h后,储存在4℃冰箱中待用。

1.2 试验设计

本试验共设2套厌氧消化装置,如图1所示。

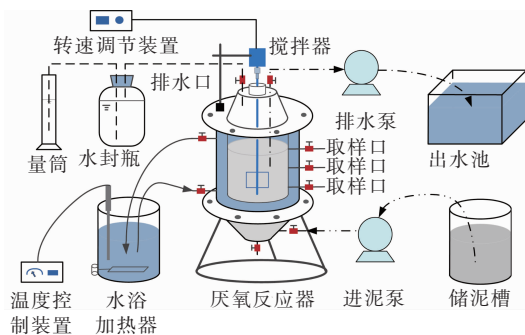


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

厌氧反应器由有机玻璃制成,总容积为5 L(内径为200 mm,高为160 mm)。搅拌器的转速为100 r/min,温度为 (35 ± 1) ℃。

短期批次试验:向2个反应器(R_1 和 R_2)中同

时添加2.5 L热水解后的KW和0.5 L接种污泥,再分别投加50 mg/kgTS的 $MgSO_4$ 、5 mg/kgTS的 $FeCl_2$ 和1 mg/kgTS的 $CoCl_2$ 。最后,向 R_2 反应器中投加0.5 mg/kgTS的 $NiCl_2$,未投加 $NiCl_2$ 的反应器作为对照组(R_1)。

长期连续试验:向2个反应器(R_1' 和 R_2')中投加2.5 L热水解后的KW、0.5 L接种污泥,水力停留时间(HRT)为20 d,通过自动控制进、出料蠕动泵实现,反应器共运行120 d。试验初期向对比反应器(R_1')中投加Mg、Fe、Co等组分(如短期批次试验),在90 d时向 R_1' 中再次投加Mg、Fe、Co等组分,同时向试验反应器(R_2')中添加0.5 mg/kgTS的 $NiCl_2$ 。

1.3 分析方法

TS、VS采用《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定;VFAs采用气相色谱仪测定^[8];蛋白质和多糖分别采用修正的Lowry法^[9]和蒽酮硫酸法^[10]检测;微生物群落结构采用宏基因组测序技术进行分析^[11];生物气体积采用排水法计量。

2 结果和讨论

2.1 Ni^{2+} 对VFAs浓度和生物气产量的影响

相比于 R_1 ,投加 Ni^{2+} 使VFAs浓度和生物气产量均发生了明显的变化(见图2)。 R_2 中VFAs浓度从2 h的897.3 mg/L快速降低至11 h的80.9 mg/L。而此时, R_1 中VFAs浓度仅从1 052.4 mg/L降低至620.7 mg/L。此外,从生物气产量来看, Ni^{2+} 明显促进了生物气的产生。因此, Ni^{2+} 能够促进VFAs的降解和生物气的产生,有利于避免酸化现象的发生。

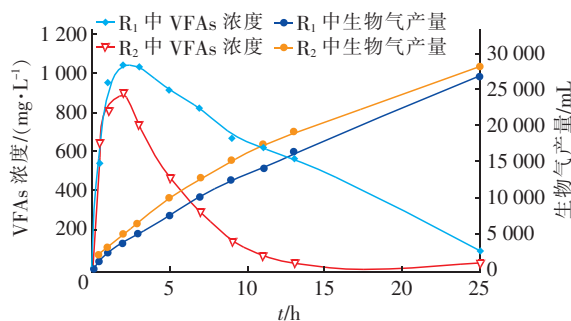
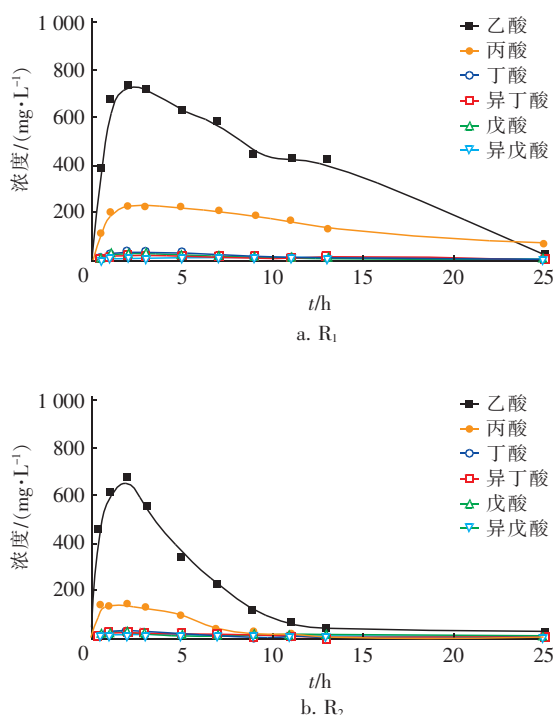


图2 Ni^{2+} 对VFAs浓度和生物气产量的影响

Fig.2 Effect of Ni^{2+} on VFAs concentration and biogas production

2.2 Ni^{2+} 对VFAs组分的影响

图3为 Ni^{2+} 对VFAs组分的影响。

图3 Ni^{2+} 对 VFAs 组分的影响Fig. 3 Effect of Ni^{2+} on VFAs composition

由图3可知,无论是否添加 Ni^{2+} ,乙酸和丙酸都是 VFAs 的主要成分。但从浓度方面看,投加 Ni^{2+} 可使乙酸和丙酸浓度迅速降低,反应11 h后基本消耗殆尽。此时, R_1 中的乙酸和丙酸浓度分别为425.7和166.4 mg/L。反应25 h后, R_1 中的丙酸浓度仍为71.6 mg/L。这说明 Ni^{2+} 很可能在短时间内提高产甲烷菌的活性,使得 VFAs 的产生速率低于其降解速率。

2.3 微生物群落的变化

图4为反应器中的古细菌在属水平上的分布。

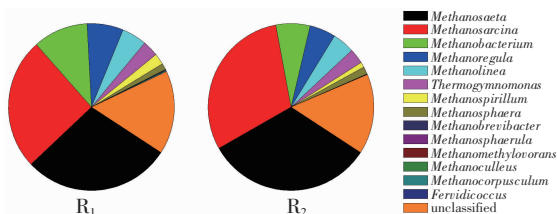


图4 古细菌在属水平上的分布

Fig. 4 Taxonomic classification archaea sequences at genus levels

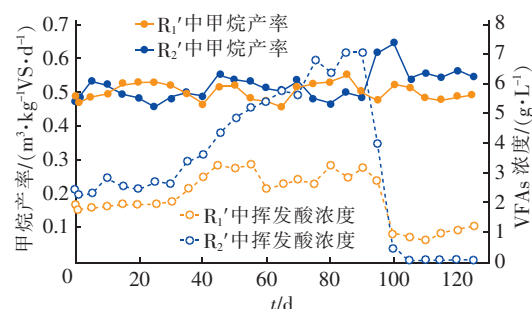
由图4可知,2个反应器中产甲烷菌主要为甲烷鬃毛菌(*Methanosaeta*)、甲烷八叠球菌(*Methanosarcina*)和甲烷细菌属(*Methanobacterium*),约占古

细菌总量的65%以上。同时,添加 Ni^{2+} 使得产甲烷菌的组成结构发生了明显改变。比如,投加 Ni^{2+} 后,*Methanosarcina*和*Methanosaeta*的含量从25.5%和28.8%分别升高至30.3%和32.6%,而*Methanobacterium*则从10.7%降低至6.5%。Munk等人^[12]在研究厌氧消化时发现,投加镍能够促进*Methanosarcina*的生长。中温条件下,*Methanosarcina*的数量随着 VFAs 浓度的升高而增加,而*Methanosaeta*主要利用乙酸产生 CH_4 ^[13]。

因此,本试验中 Ni^{2+} 通过促进这两种菌的生长,加速了 VFAs 降解,特别是乙酸的降解和生物气的产生,避免了反应器酸化。

2.4 Ni^{2+} 对长期连续运行的影响

反应器长期连续运行时,生物气产气速率和 VFAs 浓度的变化如图5所示。

图5 Ni^{2+} 对反应器长期连续运行效能的影响Fig. 5 Effect of dosing Ni^{2+} on long-term continuous operation of reactor

由图5可知,反应器运行30 d时, R_2' 中 VFAs 浓度稳定在2.21 g/L左右,30 d以后, R_2' 反应器中 VFAs 浓度快速上升,并在90 d时达到7.02 g/L。在0~90 d的运行过程中, R_2' 中平均生物气产气速率为0.45~0.54 $\text{m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$ 。另外,在长期运行过程中 VFAs 产生积累,相应的产气量降低。向 R_2' 反应器中投加 Ni^{2+} 后的10 d内, VFAs 浓度快速降低至0.05 g/L。相应的生物气产气速率先快速升高至0.642 $\text{m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$,然后稳定于0.548 $\text{m}^3/(\text{kgVS} \cdot \text{d})$ 左右。这说明 Ni^{2+} 能够在短时间内将KW厌氧消化过程积累的 VFAs 转化成生物气,可有效避免反应器酸化。

3 结论

添加的镍能够有效促进 VFAs 降解,减少乙酸和丙酸积累,提高生物气产率。同时,添加镍后提高了乙酸型产甲烷菌*Methanosarcina*和*Methanosaeta*

的含量,促进了底物中乙酸的降解,进而避免了VFAs 积累。

参考文献:

- [1] Mao C L, Feng Y Z, Wang X J, *et al.* Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 540 – 555.
- [2] 罗鸿信, 林鸿, 余育方, 等. 污泥与餐厨垃圾联合厌氧发酵产氢余物产甲烷条件优化研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(8): 3449 – 3453.
- Luo Hongxin, Lin Hong, Yu Yufang, *et al.* Study on the optimum conditions of methanogenesis of residue from anaerobic fermentative hydrogen production using combined sludge and food waste [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(8): 3449 – 3453 (in Chinese).
- [3] 裴占江, 刘杰, 王粟, 等. 微量金属元素对餐厨垃圾与牛粪联合厌氧消化效率影响[J]. *可再生能源*, 2015, 33(3): 462 – 467.
- Pei Zhanjiang, Liu Jie, Wang Su, *et al.* The effect of trace metals on anaerobic co-digestion of food waste and cow manure [J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(3): 462 – 467 (in Chinese).
- [4] Moestedt J, Nordell E, Shakeri Yekta S, *et al.* Effects of trace element addition on process stability during anaerobic co-digestion of OFMSW and slaughterhouse waste [J]. *Waste Manage*, 2016, 47: 11 – 20.
- [5] 宋珍霞, 王萧, 徐建平, 等. 微量金属强化餐厨垃圾厌氧消化优化条件研究[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(1): 269 – 273.
- Song Zhenxia, Wang Xiao, Xu Jianping, *et al.* Condition optimization for the anaerobic digestion of food wastes aggravated by the trace metals [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(1): 269 – 273 (in Chinese).
- [6] Choong Y Y, Norli I, Abdullah A Z, *et al.* Impacts of trace element supplementation on the performance of anaerobic digestion process: A critical review [J]. *Biore-sour Technol*, 2016, 209: 369 – 379.
- [7] 王艳琴, 张洁, 赵晨曦, 等. 金属离子强化餐厨垃圾高温厌氧发酵产酸[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 2051 – 2056.
- Wang Yanqin, Zhang Jie, Zhao Chenxi, *et al.* Enhancem-ent of volatile fatty acid production from anaerobic fermentation of food wastes under thermophilic condition by adding metal ions [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 2051 – 2056 (in Chinese).
- [8] Chen Y G, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs [J]. *Water Res*, 2007, 41(3): 683 – 689.
- [9] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Appl Microbiol Bio-technol*, 1995, 43(4): 755 – 761.
- [10] Morris D L. Quantitative determination of carbohydrates with Dreywood's anthrone reagent [J]. *Science*, 1948, 107(2775): 254 – 255.
- [11] 邵君娜. 生境氧化还原电位调控强化废水水解酸化效果研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- Shao Junna. Enhancement of Hydrolysis and Acidification Effect of Starch by Habitat Oxidation [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).
- [12] Munk B, Leubhn M. Process diagnosis using methanogenic *Archaea* in maize-fed, trace element depleted fermenters [J]. *Anaerobe*, 2014, 29: 22 – 28.
- [13] Ziganshin A M, Liebetrau J, Pröter J, *et al.* Microbial community structure and dynamics during anaerobic digestion of various agricultural waste materials [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97(11): 5161 – 5174.



作者简介:周友新(1971 –), 女, 江苏盐城人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为污水处理与回用。

E-mail: zyxqx@ycit.cn

收稿日期: 2017 – 09 – 12