

高温污泥厌氧消化器的启动

吴静¹, 赵鹏娟¹, 田磊², 史琳², 施汉昌¹, 姜艳¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要: 污泥厌氧消化是最常用的污泥减量化和稳定化技术, 高温消化污泥稳定快, 但我国缺乏启动和运行经验, 故进行了高温厌氧消化器处理剩余活性污泥的中试启动试验。所采用的消化器为内循环消化器, 它属于升流式反应器, 依赖回流沼气控制反应器的水力状况。启动采用了分步适应的策略, 促进厌氧细菌适应温度、反应器构型和处理对象的变化。主要措施有: 启动初期以容易降解的葡萄糖促进厌氧细菌的稳定和繁殖, 有机负荷 (以 COD 计) 为 $2.4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; 促进内循环形成; 控制反应器 pH 变化; 逐渐增加加入的剩余污泥量并及时启动热水解槽促进污泥水解。第 63 d 启动完成时, 有机负荷 (以 VSS 计) 为 $1.60 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, VSS 的平均产气率为 0.51 L/g , 即每 m^3 污泥 (96% 含水率) 产 15.3 m^3 沼气, VSS 和 SS 去除率分别为 60.8% 和 45.8%, 表明启动策略和措施有效。

关键词: 内循环消化器; 高温厌氧消化; 剩余活性污泥; 升流式反应器; 启动

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0520-04

Start-Up of a Thermophilic Anaerobic Sludge Digester

WU Jing¹, ZHAO Peng-juan¹, TIAN Lei², SHI Lin², SHI Han-chang¹, JIANG Yan¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Anaerobic digestion is one of the most widely-used technologies of the sludge reduction and stabilization, in which thermophilic digestion has advantage of fast stabilization. But it is lack of operation experience in China. Thus start-up of a thermophilic anaerobic sludge digester treating excess activated sludge was investigated. The digester was an internal circulation anaerobic sludge digester. It belongs to upflow reactor and its hydrodynamic conditions can be controlled by backflow biogas. A multistep strategy was applied to the start-up to enhance anaerobic bacteria to adapt the changes of temperature, reactor and treated sludge, including: to feed the digester with easily-degraded glucose to enhance bacteria reproduce at the first beginning with COD organic loading of $2.4 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; to accelerate the internal circulation; to control pH within a optimal range; to gradually increase excess sludge flow rate as well as to initiate pyrohydrolysis to enhance hydrolysis. The start-up took 63 days and when it finished, the VSS organic loading reached $1.60 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, the average VSS biogas rate was 0.51 L/g , i. e. $15.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ sludge (96% water content), VSS and SS removals were 60.8% and 45.8%. This shows that the strategy is valid.

Key words: internal circulation anaerobic sludge digester; thermophilic anaerobic digestion; excess activated sludge; upflow reactor; start-up

污水厂的污泥处理与处置属于国际关注的二次环境问题。一般污泥产量为所处理污水量的 1% ~ 3%^[1], 随着大量污水处理厂兴建并投入运行, 目前我国产生污泥 (干重) 大约 130 万 t/a, 而且以每年 >10% 增长率快速增加^[2]。据预测, 2010 年我国城市污水排放量将达到 $440 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$, 2020 年将达到 $536 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[3]。实际上, 我国仅有不到 10% 的污水厂建有污泥稳定设施, 而且还有一部分不能正常运行甚至停运^[4], 因此我国的污泥问题已经十分突出。

污泥厌氧消化是最常使用的污泥减量化和稳定化技术, 通常采用 35°C 左右的中温消化。与中温消化相比, 高温消化 (55°C 左右) 微生物生长速率较

高, 微生物的种间氢转移速率较快, 故反应速率较大^[5]。高温消化可以在较短的水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 内, 获得较好脱水性能^[6-8]、致病微生物少的消化后污泥^[5, 9, 10], 因此具有明显优点。其不足之处在于能耗较高, 所以仅在北欧和美国使用。污水源热泵可以从出水中回收能源^[11, 12], 解决了能耗问题, 使得污泥可以进行高温消化。我国还常见污水厂与电厂相邻而建的情况, 废

收稿日期: 2010-02-26; 修订日期: 2010-06-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAC02A00); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07313-002); 霍英东基金项目 (114020)

作者简介: 吴静 (1974 ~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为厌氧生物技术和水质预警, E-mail: wu_jing@mail. tsinghua.edu.cn

烟气也可以提供廉价能量.但由于应用少,高温消化启动和运行的经验也比较少^[13,14].

1 材料与方法

1.1 试验流程

试验地点在江苏某污水处理厂.污泥打入贮泥池,经过热水解槽后打入钢制的内循环污泥消化器内进行高温厌氧消化(55℃),消化后污泥可由反应器上部或者下部排出,流程如图1所示.内循环消化器是课题组在处理废水的内循环厌氧反应器^[15]的基础上根据污泥消化特点研发出的新型污泥消化器,靠回流沼气来控制反应器的水力混合状况.本试验的内循环消化器的有效容积为210 L,HRT为5.5 d.由于没有合适的小型沼气泵,所以采用压缩氮气来替代回流沼气.热水解可以加速污泥的细胞溶解,从而促进后续的厌氧消化,同时也是为了减少进泥对消化器内温度的冲击、实现稳定运行而设置的.通常热水解的温度采用120~275℃^[16-19],但能耗较高.据报道,与没有热水解以及80℃和100℃的热水解相比,60℃的水解能提高甲烷产率^[20,21],且能耗较低,所以热水解槽的温度采用60℃,其HRT为1 d.消化器和水解槽的温度由温控仪控制.

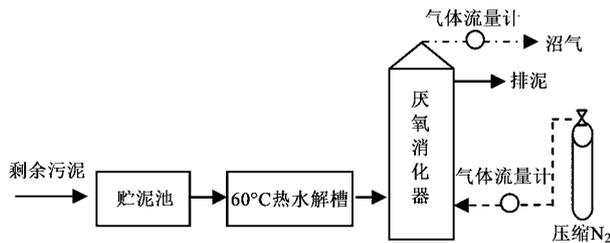


图1 工艺流程示意

Fig.1 Experimental set-up

1.2 种泥和消化原泥

试验接种污泥取自无锡卢村污水厂的中温污泥消化器,接种污泥浓度(以SS计)为10.4 g/L,挥发性悬浮物质(volatile suspended solids,VSS)为3.54 g/L,VSS/SS为0.34.消化原泥来自所在污水厂A/A/O系统的剩余活性污泥,含水率在99%左右,VSS/SS为0.45~0.75,SV₃₀为0.50~0.98.该厂没有初沉污泥.

1.3 其他检测方法

COD的测量采用YL-1A型COD速测仪测定.VSS、SS、碱度等的测量采用文献[22]中的方法.沼气和氮气混合的气量采用湿式流量计计量,氮气气量采用转子流量计测量.由于氮气流量稳定,所以沼

气量为两流量计测得的单位时间气量的差.

2 结果与分析

消化器启动用了63 d,启动过程如图2所示.

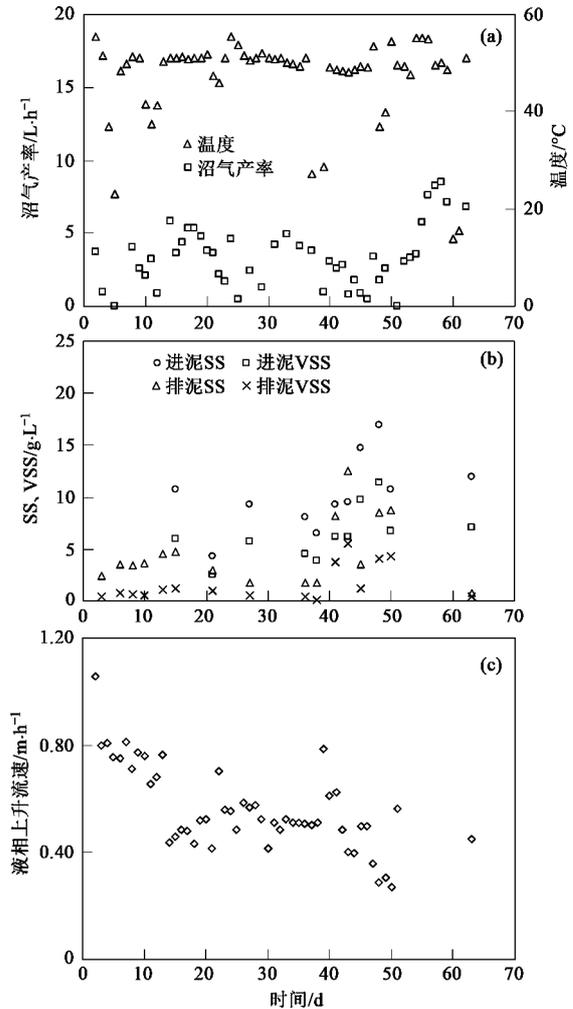


图2 反应器启动

Fig.2 Start-up of digester

在启动之初,每天间歇加入葡萄糖来帮助厌氧细菌适应反应器,有机负荷(COD计)为2.4 kg/(m³·d),同时打入氮气来促使内循环形成,最初液相上升流速为0.8 m/h左右,然后有所降低,最后保持在液相上升流速0.5 m/h左右.当天检测到有沼气产生,之后待产气速率稳定到一定强度后,第12 d以后,开始投加少量新鲜剩余污泥,并逐步提高投入量.第15 d后,只加入剩余污泥进行消化,进泥量稳定在40 L/d.由于污泥黏度比较大,产生的沼气不足以维持足够的液相上升流速,所以需要回流沼气来保持流速.试验中一直以压缩氮气来模拟回流沼气.

消化器在冬季启动,接种完成后,反应器的温度不足 20℃.按 1.1℃/h 的速率进行升温,第 2 d 达到 55℃.而后由于加热装置故障,不能提供热量,在第 5 d,温度降低至 16.8℃,然后上升到 49℃左右.经过调试,第 63 d 后温度稳定在 55℃左右,至此启动结束.预处理是在第 31 d 启动的,第 44 d 后大多稳定运行在 60℃.

在启动期的最后 2 周,消化器的平均有机负荷(以 VSS 计)为 1.60 kg/(m³·d),平均产气率为 7.67 L/h,即每 m³ 污泥(96% 含水率)产生 15.3 m³ 沼气, VSS 和 SS 的去除率分别为 60.8% 和 45.8%.

3 讨论

此次高温污泥消化器的启动耗时 63 d.在处理的污泥平均 VSS/SS 为 0.63 的情况下,产气率达到每 m³ 污泥(96% 含水率)产生 15.3 m³ 沼气, VSS 和 SS 的去除率分别达到 60.8% 和 45.8%.我国生产性污泥消化池的平均沼气产率为每 m³ 污泥(96% 含水率)产生 7.5 m³ 沼气,最高达到每 m³ 污泥(96% 含水率)产沼气 14 m³[4],表明本中试已经达到了较高的产气水平.

此次启动采取了分步适应的策略.种泥来自卢村污水厂,它的主要来水为生活污水,卢村污水厂采用了完全混合式的柱型厌氧消化池进行中温发酵.而中试所在的污水厂的来水除生活污水之外还有包含印染废水在内的大量工业废水,因此种泥接入中试反应器后,还需要适应温度变化、反应器构型变化和对象的变化.

分步适应分 2 步,第一步主要帮助污泥适应温度和反应器构型的变化.主要措施是:①以容易降解的葡萄糖促进厌氧细菌的稳定和繁殖.种泥的

VSS/SS 只有 0.34,厌氧菌的浓度低,再加上从中温升到高温以后,厌氧菌的主要种群会由中温菌为主变成高温菌为主,葡萄糖的引入可以帮助实现高温厌氧菌的快速增殖.②压缩氮气促使内循环形成,获得了 0.8 m/h 左右的液相上升流速,这对于改善传质,促进厌氧菌增殖很有帮助.图 3 显示这一措施确实使得在启动初期微生物量显著增加,且到第 13 d,反应器中、底部污泥的 VSS/SS 已经升高到 0.39.③密切注意反应器 pH 的变化,及时补充 NaHCO₃,以保证消化器 pH 值在厌氧产甲烷菌适宜的 7~8 范围.pH 是中高温交替运行时的关键控制参数[23].启动完成后,消化器的 pH 稳定在 7.5 左右,不再需要补充碱.

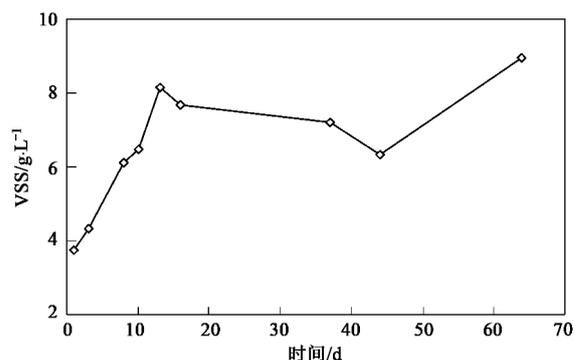


图 3 消化器中污泥浓度

Fig. 3 Sludge concentration in the digester

启动的第二步采取 2 种方法,帮助污泥顺利适应处理对象的变化:①逐渐增加加入的剩余污泥量;②及时启动热水解槽促进污泥水解.图 4 表明,热水解启动后,溶解性有机物浓度和碱度显著上升.由于这些物质只能来源于细胞的胞内和胞外物质,而胞外物质的主要成分胞外多聚物的含量一般在 20~

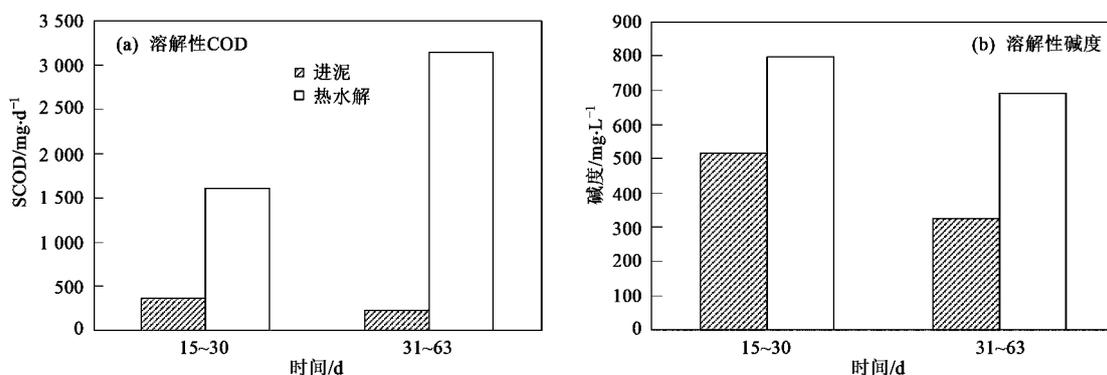


图 4 热水解效果

Fig. 4 Results of pyrohydrolysis

250 mg/g^[24, 25], 在进泥浓度为 7 g/L 的情况, 胞外物质溶出的溶解性化学需氧量 (soluble chemical oxygen demand, SCOD) 达不到 3 000 mg/L 水平, 所以可以判断有一部分溶解的有机物来自胞内, 也就是说, 部分细胞的细胞壁被打开. 一般污泥热水解的温度都比较高, 在 120 ~ 275 °C^[16-19], 对污泥厌氧消化的促进很明显, 但能耗太高. 也有人进行了 60、80 和 100 °C 的热水解实验, 发现 60 °C 的效果比 80 °C 和 100 °C 的效果好^[20]. 此外中试选择 60 °C, 还因为现有的污泥中温消化系统的加热锅炉就可以为这种水解提供热源, 在工程实施中, 不增加设备. 热水解未启动前, 平均产气率为 0.46 L/g, 热水解稳定后产气率达到 0.51 L/g, 产气速率增加 10%, 表明热水解能够促进污泥厌氧消化. 上述两措施使得在从葡萄糖到剩余污泥的过渡过程中, 未发现 pH 降低等负面现象, 污泥顺利适应处理对象的变化.

4 结论

经过 63 d, 处理剩余污泥的高温消化器完成了启动, VSS 有机负荷达到 1.60 kg/(m³·d), 平均产气率为 0.51 L/g, 即每 m³ 污泥 (96% 含水率) 产生 15.3 m³ 沼气, VSS 和 SS 去除率分别为 60.8% 和 45.8%. 启动采取了分步适应的策略, 是顺利启动的保障.

参考文献:

- [1] 马娜, 陈玲, 熊飞. 我国城市污泥的处置与利用[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 92-95.
- [2] 李季, 吴为中. 国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 1-11.
- [3] 徐强. 污泥处理处置技术及装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [4] 吴静, 姜洁, 周红明, 等. 我国城市污水厂污泥厌氧消化系统的运行现状[J]. 中国给水排水, 2008, 24(22): 21-24.
- [5] Zábranská J, Štěpová J, Wachtl R, *et al.* The activity of anaerobic biomass in thermophilic and mesophilic digesters at different loading rates [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 42(9): 49-56.
- [6] De la Rubia M A, Romero L I, Sales D, *et al.* Temperature conversion (mesophilic to thermophilic) of municipal sludge digestion[J]. *Aiche Journal*, 2005, 51(9): 2581-2586.
- [7] Rimkus R, Ryan J, Cook E. Full scale thermophilic digestion at the west - southwest sewage treatment works, Chicago, Illinois [J]. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1982, 54(11): 1447-1457.
- [8] Peddie C C, Tailford J, Hoffman D. Thermophilic anaerobic sludge digestion taking a new look at an old process [A]. In: *Proceeding of the 10th annual residuals biosolids management conference* [C]. *Water Environment Federation Alexandria*, 1996. 39-46.
- [9] Rojas-Oropeze M, Cabirol N, Ortega S, *et al.* Removal of fecal indicator organisms and parasites (fecal coliforms and helminth eggs) from municipal biologic sludge by anaerobic mesophilic and thermophilic digestion [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(4): 97-101.
- [10] Watanabe H, Kitamura T, Ochi S, *et al.* Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(6-7): 25-32.
- [11] 马最良, 姚杨, 赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7): 41-43.
- [12] 刘阳, 贾玉鹤. 沈阳市再生水源热泵技术推广应用实践[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(2): 54-56.
- [13] 王治军, 王伟, 倪达峰. ASBR 处理热水解污泥的启动试验研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 750-753.
- [14] 周杨, 高超, 毛士泽. 污泥厌氧消化池的启动运行经验[J]. 中国给水排水, 2007, 23(6): 92-94.
- [15] Habets L H A, Engelaar A J H H, Groeneveld N. Anaerobic treatment of in-line effluent in an internal circulation reactor[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(10): 189-197.
- [16] Muller J A. Prospects and problems of sludge pretreatment processes[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(10): 121-128.
- [17] Stuckey D C, McCarty P L. The effect of thermal pretreatment on the anaerobic biodegradability and toxicity of waste activated sludge[J]. *Water Research*, 1984, 18(11): 1343-1353.
- [18] 王治军, 王伟, 夏州, 等. 热水解污泥的厌氧消化试验研究[J]. 中国环境科学, 2003, 19(9): 1-4.
- [19] 王治军, 王伟. 剩余污泥的热水解试验[J]. 中国环境科学, 2005, 25(B06): 56-60.
- [20] Pinnekamp J. Effects of thermal pretreatment of sewage sludge on anaerobic digestion[J]. *Water Science and Technology*, 1989, 21(4-5): 97-108.
- [21] 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 Research*, 2003, 37(19): 4561-4572.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] 吴静, 盛飞, 陆正禹. 生产性 UASB 反应器的中温高温交替运行过程[J]. 环境科学, 2001, 22(5): 50-54.
- [24] Sponza D T. Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 32(3-4): 375-385.
- [25] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. Distribution of EPS and cell surface hydrophobicity in aerobic granules[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, 69(4): 469-473.