

剩余污泥与酒精糟液共厌氧消化性能研究

高军林¹, 台明青², 陈杰瑛²

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473009; 2. 西安交通大学生命科学学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 利用工业废料酒精糟液, 对城市剩余污泥的厌氧消化实验, 分别平行设计 3 套不同反应条件的厌氧反应系统, 并对污泥产气率, 最大有机负荷, 反应对污泥中 TS、VS 和 COD 的去除率, 厌氧后消化液污泥比阻等项目进行了测定, 并对厌氧污泥的脱水性能进行了对比分析。结果表明, 高温下剩余污泥添加酒精糟液共厌氧消化, 与高温剩余污泥单独厌氧消化相比, 其沼气产气率增加 178 % 以上, 有机负荷增加 85 %, 污泥脱水性能由不易脱水变为接近中等脱水。城市剩余污泥和当地酒精厂工业废料酒精糟液共厌氧达到了废物利用的功效, 为城市剩余污泥的工业化应用提供了依据。

关键词: 酒精糟液; 剩余污泥; 共厌氧消化; 反应活性

中图分类号: TS262.2; X797; X17

文献标识码: B

文章编号: 1001- 9286(2008) 03- 0123- 05

Study on Anaerobic Co- digestion of Waste Activated Sludge and Alcohol Draff

GAO Jun-lin¹, TAI Ming-qing² and CHEN Jie-rong²

(1. He'nan Polytechnical Institute, Nanyang, He'nan 473009; 2. School of Life Science and Technology, Xi'an Communication University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: The anaerobic co-digestion of waste activated sludge (WAS) and alcohol draff was investigated. Three parallel anaerobic reaction systems under different conditions were designed. The biogas yield in 24 h, maximum organic loading, removal rate of COD, total solids (TS) and volatile solids (VS) were measured. In addition, the anaerobic digested sludge dewaterability was determined for constrastive analysis. Compared with the anaerobic digestion on WAS, the biogas yield in 24 h increased by 178 %, the organic loading rate increased by 85 %. In addition, sludge dewaterability was improved. The co-digestion on WAS and alcohol draff reached the reuse level of waste, which provided the basic experimental data for industrial application of anaerobic digestion on WAS.

Key words: alcohol draff; waste activated sludge; co-digestion; reation activity

目前国内许多污水处理厂产生的污泥大多数没有经过处理直接任意堆放而造成了严重的二次污染。杨健等^[1] 对城市污水处理厂污染负荷定量分配研究表明, 城市污水处理厂在处理城市污水的同时, 对进水 BOD₅ 处理后约 48 % 被转化为污泥, 10 % 随尾水释放环境, 真正意义上实现污水氧化分解的只占 42 %, 产生的污泥不处理就意味着污水处理厂只能算作半处理厂。随着我国城市化进程的加快和城市污水处理率的提高, 到 2010 年, 全国城市污水处理率将不低于 70 %, 届时城市污水日处理能力将达到 1 亿 t 左右, 污泥产生量按 0.5 % 计日产污泥 50 万 t (含水率为 97.5 %), 大量的污泥需要妥善处理后方可进一步利用, 但由于污泥处理费用占污水处理厂运行费用的 30 % ~ 50 %, 有时甚至更高, 多数污水处理厂无力承担此项费用, 因此, 我国城市污泥引起的二次污染势必成为更为严重的环境问题。

剩余污泥厌氧消化可获得沼气能源、有效杀灭病原

菌、实现污泥的减量化、稳定化和资源化, 因此厌氧消化技术在国内外得到广泛重视和应用。另一方面, 剩余污泥所具有的特性如碳氮比 (C/N) 比较低^[2~4], 一般在 5 ~ 6 以下, 溶解性 COD 也较低等, 造成常规污泥厌氧处理产气率低、污泥消化停留时间长、处理效率低^[5] 等问题, 又限制了污泥厌氧工艺的工业化应用。所以污泥厌氧消化产气量能否达到在工艺上可接受的水平, 成为该项技术的关键。近年来环保工作者探讨了通过污泥预处理技术如加碱预处理^[6~7]、超声波预处理^[8]、热水解预处理^[9] 等方法来改善污泥厌氧消化性能, 提高降解效率, 增加产气率。这些方法均存在一定的不足, 如有的方法处理成本较高, 有的方法对后续厌氧消化处理产生不良影响等, 人们又纷纷探讨在污泥中添加其他成分进行混合共厌氧消化以提高污泥的碳氮比, 增加污泥降解程度, 共厌氧消化研究取得了一定的效果。Murto, M^[10] 以城市污泥和猪粪混合共同厌氧进行了研究, 乔玮等^[10] 对易腐有机

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No: 30571636)。

收稿日期: 2007- 10- 30

作者简介: 高军林 (1965-), 男, 硕士, 副教授, 从事水处理教学与科研工作, Email: gaojunl2002@163.com。

物与剩余污泥混和共厌氧消化进行了研究, H.- W.Kim 等^[11]对剩余污泥与食品废物进行了共厌氧研究, Attilio Converti 等^[12]对城市污泥和木质的农业废物共厌氧消化进行了试验, X.Gómez 等^[13]对初沉污泥与城市固体废弃物中的水果、蔬菜片段进行共厌氧消化。这些研究都取得了一定的基础成果, 为该技术的进一步研究奠定了基础。城市污泥混合共厌氧消化技术的优点在于: 稀释了潜在的有毒化合物, 改善了营养物的平衡, 促进了微生物之间的协同降解作用, 增加可降解的有机物负荷和更好的产气率。另一方面, 厌氧高温消化由于产气量大、反应速度快而成为研究的热点。但剩余污泥与废弃物酒精糟液混合共厌氧消化研究至今未见报道, 本文研究了中温和高温下厌氧消化对剩余污泥的降解结果, 以及剩余污泥中添加一定量的废弃物酒精糟液在高温 55 ℃ 下共厌氧消化效果, 整个实验历时 93 d。与污泥单独消化相比, 对厌氧反应活性、污泥停留时间、最大有机负荷、产气量、沼气成分、酸化处理、厌氧消化后污泥比阻、及共厌氧消化反应机理作了一定的探讨。结果表明, 剩余污泥中添加酒精糟液共厌氧消化, 使污泥 VS 降解率达到了 40% 以上, 从而达到了工业上可接受的水平^[13], 同时达到了以废治废, 又回收了污泥中沼气能源的目的。

1 方法与材料

1.1 厌氧消化试验装置

污泥厌氧消化反应器为 6 L 的玻璃三角抽滤瓶, 工作容积 5 L。下侧口接出料管, 上侧口接进料管并与蠕动泵相连接, 上顶部出口接出气管, 然后通过净化缓冲瓶(净化缓冲瓶使用大气采样气泡吸收管, 内装饱和 NaCl 溶液, 以防生物气的大量溶解)与湿式气体流量计相连, 反应瓶放在恒温水浴锅中, 共同组成污泥厌氧消化系统。平行设计 3 套厌氧消化反应系统, 分别称系统 A、系统 B 和系统 C。

厌氧反应系统 A 为常温污泥厌氧消化, 反应条件: 35 ℃, 进料为剩余污泥; 厌氧反应系统 B 为高温污泥厌氧消化, 反应条件: 55 ℃, 进料为剩余污泥; 厌氧反应系统 C 为高温污泥添加酒精糟液后的共厌氧消化, 反应条件: 55 ℃, 进料为剩余污泥和酒精糟液的混合物, 二者体积比为 4:1。

1.2 厌氧试验材料

1.2.1 剩余污泥

剩余污泥取自南阳市污水处理厂二次沉淀池污泥, 该厂采用活性污泥法处理城市污水, 日处理污水规模 10 万 t/d, 工业废水与生活废水的比例约 4:6。每星期取污泥 1 次, 取回试验室经自然沉淀浓缩 16~18 h 后冷藏备用, 用时加热后进样。浓缩后的剩余污泥物理化学性质见表 1。

1.2.2 酒精糟液

表 1 剩余污泥物理化学性质

项目	pH	TS (g/L)	VS (g/L)	TCOD (g/L)	C/N
指标	6.5~6.9	27.1~30.8	18.4~20.7	30.0~34.5	5.6

酒精糟液作为污泥共厌氧材料, 取自南阳酒精厂, 该厂生产酒精原料为玉米、小麦和薯干。酒精糟液性质随生产原料的变化而异。每星期取样 1 次, 冷藏备用, 使用时加热后进样。酒精糟液性质见表 2。

表 2 酒精糟液物理化学性质

项目	pH	TS (g/L)	VS (g/L)	COD (g/L)	C/N
指标	3.7~4.1	36.2~39.8	28.5~31.8	35.5~38.6	30.2

1.2.3 种子污泥

取南阳酒精厂酒精糟液厌氧消化液作为种子污泥进行培养, 该厂拥有年产 30 万 t 乙醇生产线, 有大量酒精糟液需要处理。该厂现有一套厌氧处理酒精糟液系统, 日处理酒精糟液 2500 m³ 左右, 水力停留时间为 4~5 d, 消化温度为 55 ℃, 酒精糟液厌氧消化液取自现有酒精糟液厌氧处理系统, 其性质见表 3。

表 3 酒精糟液厌氧消化液物理化学性质

项目	pH	TS (g/L)	TCOD (g/L)	BOD (g/L)	VFA (mg/L)
指标	7.5~7.8	8.3~10.4	8.5~10.7	1.8~2.7	148~196

1.3 分析项目及仪器

pH: pHs-3C 酸度计法;

COD: 重铬酸钾法;

BOD₅: 5 d 培养法 (SPX-250 生化培养箱);

总固体 TS, 挥发性固体 VS: 重量法 (万分之一电子天平, 德国, sartorius);

总有机炭 TC₁₀₀: 重量法;

总氮 TN: 消解后比色法;

挥发性脂肪酸 (VFA): 蒸馏滴定法;

甲烷产生量: LML-1 型湿式气体流量计, 长春汽车滤清器有限公司;

甲烷含量: 气相色谱法 (安捷伦 Agilent 6890N, TCD 填充柱, 柱温 50~230 ℃, 流量 21 mL/min);

黏度: NDJ-1 型旋转式黏度仪, 上海衡平仪器厂。

1.4 试验

试验过程由种子污泥培养阶段和污泥厌氧消化阶段组成。

1.4.1 种子污泥培养阶段

反应开始时, 分别在厌氧反应系统 A、B 和 C 反应瓶中加入 5 L 酒精糟液厌氧消化液, 连接好管路, 在厌氧状态下进行反应, 然后每天 8:00~9:00 进行排泥。排泥前摇匀反应瓶, 每次排泥 600 mL, 然后进样 600 mL, 进样后摇匀反应瓶, 中间再摇匀反应瓶 1 次 (下同), 每次摇匀时间 0.5 min。每天定时记录产气量 (下同) 并对厌氧后污泥进行 pH 分析, 直至产气量稳定并使 pH 在 6.7~

7.4 之间,该过程历时 25 d,然后进入下一阶段。

1.4.2 污泥厌氧消化阶段

当酒精糟液培养阶段稳定后开始进入剩余污泥及混合物进行厌氧消化。厌氧反应消化系统 A 每天排泥 100 mL,同时进剩余污泥 100 mL,直到产气量和 pH 稳定后再增加进样量,从 100 mL、150 mL,最后到 200 mL;厌氧反应消化系统 B 每天进样从 200 mL 剩余污泥开始,然后增加进样量,从 200 mL、250 mL 到 300 mL;厌氧反应消化系统 C 每天进样从 300 mL 混合污泥开始,系统运行稳定后从 350 mL 逐步增加到 450 mL,此阶段历时 68 d,系统厌氧消化总时间 93 d。

1.4.3 污泥比阻的测定

污泥脱水性能的好坏及难易程度一般用比阻 (R)^[14]来表示,它反映了单位重量的污泥,在一定的压力下过滤时,在单位过滤面积上滤饼单位干重所具有的阻力。测定过程是取 100 mL 污泥倒入比阻测定装置的布氏漏斗中,漏斗内首先铺一张直径略小于漏斗内径的滤纸,并用水湿润,依靠重力过滤约 1 min,此时过滤的滤液在分析时应扣除,然后在真空度为 5×10^4 Pa 下进行定压抽滤,以 30 s 的间隔记录不同抽滤时间时 t 的滤液体积 V,直到滤饼破裂,t/V 与 V 成直线关系,

其斜率是比阻公式 $R=2bPA^2/\mu C$ 的系数 b。

式中:A——为过滤面积即布氏漏斗的底面积;

C——为滤液的干重与抽滤液总重量之比;

μ ——为滤液的黏度;

最后由公式计算出污泥的比阻。

2 结果与分析

2.1 厌氧系统反应活性

当各个厌氧反应系统运行稳定后(产气量稳定,液体的 pH 稳定在一定范围),计算厌氧反应系统 A、B 和 C 的运行特性,各指标见表 4。

表 4 厌氧系统反应特性

项目	反应系统 A	反应系统 B	反应系统 C
反应温度(℃)	35±1	55±1	55±1
反应瓶工作容积(L)	5	5	5
最大进样量(mL)	200	300	450
进样类型	剩余污泥	剩余污泥	混合污泥
C/N	5.6	5.6	10.5
水力停留时间 HRT(d)	25	16.7	11.2
24 h 平均产气量(L)	0.70	2.21	6.16
污泥产气率 (m^3 沼气 / $\text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$)	0.18	0.38	0.457
消化排液 pH	6.7~7.2	6.8~7.3	7.0~7.4
VFA(mg/L)	360~576	124~286	252~530
甲烷含量(%)	54.5	55.7	55.3
最大有机负荷 ($\text{kg} \cdot \text{VS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$)	0.696	1.044	1.936

注:混合污泥 450 mL,其中污泥体积 360 mL,酒精糟液体积 90 mL。

由表 4 可以看出,对于污泥厌氧消化反应系统 A,在 35±1℃、停留时间为 25 d,对污泥单独消化最大进料量为 200 mL,依据消化排液的 pH 分析,即意味着进样量超过 200 mL 时就产生酸化现象,厌氧消化后污泥 pH 在 6.7~7.2 之间,也就是说在 200 mL 以下进料量时,厌氧消化系统可以稳定正常运行,24 h 产气量为 0.7 L,污泥平均产气率为 0.18 m^3 沼气 / $\text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$,最大有机负荷 0.696 $\text{kg} \cdot \text{VS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ 。对于系统 B 在高温 55±1℃下剩余污泥进样量为 300 mL,可稳定运行,每天产气量 2.2 L,污泥平均产气率为 0.38 m^3 沼气 / $\text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$,最大有机负荷 1.044 $\text{kg} \cdot \text{VS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$ 。对于系统 C 高温下厌氧消化比中温下厌氧消化污泥最大进样量、污泥平均产气率和最大有机负荷分别提高了 0.5 倍、1.11 倍和 0.5 倍。

剩余污泥添加酒精糟液后在 55±1℃下当剩余污泥与酒精糟液的体积比为 4:1 时,厌氧反应系统 C 总的进样量增大,最大进样量达到 450 mL,从而使停留时间降到由中温下剩余污泥厌氧消化的 25 d、高温下剩余污泥厌氧消化的 16.7 d 下降为 11.2 d,24 h 产气量为 6.16 L,分别比厌氧反应系统 A 和 B 产气量增加了 5.46 L 和 3.96 L,混合污泥产气率为 0.457 $\text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$,比系统 A 和系统 B 的产气率分别提高了 0.277 $\text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$ 和 0.077 $\text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{VS} \cdot \text{d}$;最大有机负荷 1.936 $\text{kg} \cdot \text{VS} / \text{m}^3 \cdot \text{d}$,比系统 A 和系统 B 分别提高了 1.78 倍和 0.85 倍。

此外,试验结果表明,污泥高温厌氧消化要比污泥中温消化产气率高、有机负荷大、停留时间短。而在高温下,添加酒精糟液可使剩余污泥的降解程度增大,即消化产气率高、有机负荷大、停留时间短,究其原因主要是污泥添加酒精糟液后其混合污泥的 C/N 比得到提高,更适合微生物对底物,也即对营养物的生长要求^[15],因为 C/N 比影响微生物的生长、代谢途径、代谢产物的积累、基因表达以及酶活性水平^[16~18],另一方面,降解污泥的微生物种群和降解酒精糟液的微生物种群可以起到协同作用,共同对系统中的有机物进行降解^[17]。

各厌氧系统在上述停留时间下排出液的 pH 值均在 6.7~7.2 之间,在试验过程中,当厌氧消化污泥的 pH 值小于 6.5 时,整个厌氧反应系统会出现产气停止,此时反应溶液的挥发酸(VFA)会达到 3000 mg/L 以上,这时应该立即采取补救措施,在实际操作中利用酒精糟液厌氧消化液去中和反应中的挥发酸十分有效,该法要比出现酸化现象后停止进料、静止等待的方法有效得多。一般加入酒精糟液厌氧消化液为酸化反应液总体积的 1/4~1/5,即可恢复系统正常运行,如果出现酸化前期加入,酒精糟液厌氧消化液的量会更少。在相同条件下,即进样种类一致时,酸化现象的发生与有机负荷成正比,这与 KSM in et al^[19]研究的结果一致,控制有机负荷对控制酸化现象有重要意义。在试验中观察到,当反应系统

还不稳定时稍微增加负荷便会导致酸化现象的出现,出现酸化现象时表现为:产气量下降、pH 值降低,此时测定 VFA 结果会更准确了解酸化程度,这也是在废水厌氧消化处理实际生产过程中用产气量、VFA 和 pH 值 3 个指标控制反应过程的理由。

2.2 24 h 产气量的变化

图 1 中列出了厌氧反应系统 A、B 和 C 稳定后 24 h 内产气量的变化曲线。

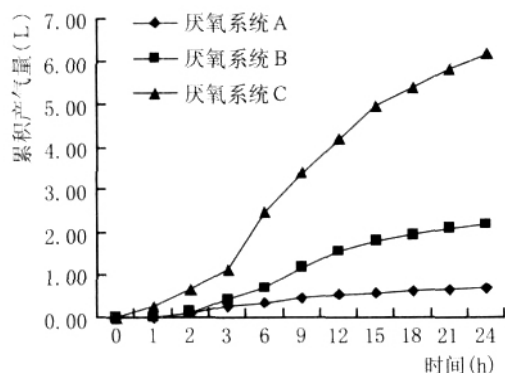


图 1 累计产气量的变化

从图 1 可以看出,在 A 系统中,反应始终较为平缓,即污泥单独厌氧消化进料后反应速度明显小于污泥添加酒精糟液后 C 的厌氧反应速度。在试验过程中观察到每次进料后,C 反应瓶反应均较 A 和 B 激烈,且有大量气泡快速上升。A 和 B 的反应趋势相近,C 的产气量最大,B 次之,A 的最小,这主要是由于酒精糟液中含有大量的挥发酸和总糖,这些物质易于降解,降解的同时微生物又得到生长,最终协同其他微生物群对污泥进行降解,从而使污泥降解率提高。

2.3 厌氧系统对 TS、VS 和 COD 的去除率

当厌氧反应系统运行稳定后,测定其厌氧消化液的 TS、VS 和 COD,然后计算各自的去除率,TS、VS 和 COD 的变化趋势见图 2、图 3 和图 4。

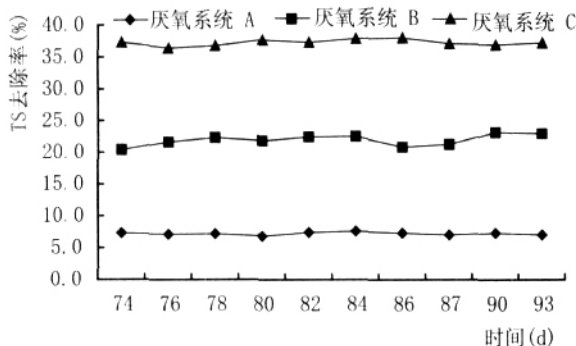


图 2 厌氧消化系统对 TS 的去除率

由图 2 可知,当厌氧消化系统运行稳定时,厌氧反应系统 A、B 和 C 的 TS 去除率分别是 6.8 % ~ 7.6 %、20.4 % ~ 23.1 % 和 36.4 % ~ 38.0 %。三者去除率之间的关系是: C > B > A,高温比中温厌氧消化对 TS 的去除率提高 13.6 % ~ 15.5 %;而在高温下污泥添加酒精糟液后

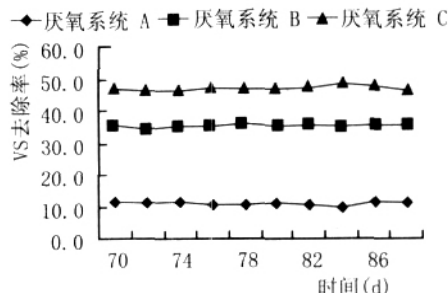


图 3 厌氧消化系统对 VS 的去除率

其厌氧反应活性增大,TS 的去除率比高温下剩余污泥单独厌氧消化提高 16.0 % ~ 14.9 %。

由图 3 可知,厌氧消化系统运行稳定时,A、B 和 C 系统的 VS 去除率分别是 8.7 % ~ 9.8 %、30.4 % ~ 32.5 % 和 40.3 % ~ 42.5 %。3 个反应系统对 VS 去除率之间的关系是: C > B > A,这与 TS 去除率变化关系相同,同样也说明污泥中温消化比高温消化活性低,高温下剩余污泥添加酒精糟液后,其共厌氧反应活性比高温下剩余污泥单独厌氧消化活性增大。

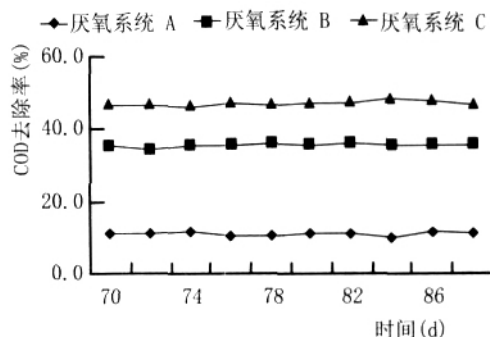


图 4 厌氧消化系统对 COD 的去除率

从图 4 可看出,A、B 和 C 三者的 COD 去除率分别是 9.9 % ~ 11.5 %、34.5 % ~ 36.1 % 和 46.2 % ~ 48.4 %。3 个系统对 COD 去除率大小之间的关系是 C > B > A,与 TS、VS 关系一致。整体说明,污泥高温厌氧比污泥中温厌氧消化降解程度增大,高温下污泥添加酒精糟液后厌氧反应活性增大,已经达到剩余污泥工业化生产应用的水平^[13]。

2.4 厌氧消化反应后污泥沉淀性能的对比

在试验过程中发现,污泥单独厌氧消化和污泥添加酒精糟液厌氧消化后消化液的沉淀性能有很大的差别。当系统运行稳定后对 A、B 和 C 3 个厌氧系统的厌氧消化液进行自然沉淀和污泥比阻测定,测定结果见表 5。

表 5 厌氧污泥脱水性能

消化液来源	系统 A	系统 B	系统 C
污泥比阻 (m/kg)	9.3×10^{13}	6.8×10^{13}	8.5×10^{12}
12 h 沉降比 (上清液高度占总体积百分数, %)	18.7	25.2	44.1

由表 5 可以看出,剩余污泥中温厌氧消化和污泥高

温厌氧消化,其厌氧消化后污泥的比阻下降不大,高温下添加酒精糟液厌氧消化后污泥的比阻较 B 有较大的下降,由不易脱水到接近中等脱水程度。按照一般的污泥脱水性能判断标准, R 越小,污泥的脱水性能越好,通常认为, $R > 4.0 \times 10^{12}$ m/kg 时,不易脱水; R 在 $1.0 \times 10^{12} \sim 4.0 \times 10^{12}$ m/kg 时,脱水中等; $R < 1.0 \times 10^{12}$ m/kg 时比较容易脱水。A 的 R 为 9.3×10^{13} m/kg, B 的 R 为 6.8×10^{13} m/kg 均属于不易脱水,而 C 的 R 为 8.5×10^{12} m/kg,说明其脱水性能得到一定的改善。从 12 h 污泥沉降比数据也可看出,厌氧消化反应系统 C 厌氧消化后厌氧液的自然沉降率分别较 A 和 B 提高了 1.36 倍和 0.75 倍,说明厌氧反应系统 C 的消化后的污泥脱水性能得到改善。

3 结论

3.1 剩余污泥高温 55 ℃ 厌氧消化比中温 35 ℃ 厌氧消化降解程度增加,高温下添加一定比例的酒精废糟液(污泥与糟液体积比为 4:1),其厌氧反应活性增大。高温下污泥添加酒精糟液,分别比中温和高温下剩余污泥单独厌氧消化对 TS、VS 和 COD 去除率提高了 2.02 倍、3.52 倍、3.32 倍和 0.71 倍、0.32 倍、0.34 倍。高温下剩余污泥添加酒精糟液厌氧消化已经达到工业生产可接受的水平。

3.2 污泥中温厌氧消化和污泥高温厌氧消化其厌氧消化后污泥的比阻下降不大,高温下添加酒精糟液厌氧消化后污泥的比阻较 A 和 B 有较大的下降,由不易脱水到接近中等脱水程度,污泥脱水性能变好。

3.3 城市污泥添加一定比例的酒精废糟液厌氧反应对产生的甲烷含量影响不大。

3.4 进一步要做的工作是把该技术应用于中试研究,并对污泥与酒精糟液混合厌氧过程各阶段微生物种群演变过程和规律进行解析^[19-20]研究。

参考文献:

- [1] 杨健,吴敏.我国城市污水厂延伸污泥处理与处置责任[J].城市环境与城市生态,2004,17(1): 16- 18.
- [2] K S Min,AR Khan,MK Kwon,Y J Jung,Z Yun and y Kiso. Acidogenic fermentation of blended food-waste in combination with primary sludge for the production of volatile fatty acids[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, 80: 909- 915.
- [3] 张雪英,周立祥.江苏地区城市污水处理厂污泥泥质性质研究 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 101- 104.
- [4] Jing-Yuan Wang,Olena stabnikova, Stephen Tiong-Lee Tay, Volodymr Iranov and Joo-Hwa Tay.Intensive bioconversion of sewage and food waste by bacillus thermoamylovorans[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2003,19: 427- 432.
- [5] 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.
- [6] 林志高,张守中.废弃活性污泥加碱预处理后厌氧消化的试验研究[J].给水排水, 1997, 23(1): 10- 15.
- [7] Vlyssides,A.G.Karlis,P.K.Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion[J]. Bioresource Technology, 2004,91(2): 201- 207.
- [8] Gr?nroos,Antti.Kyll?nen,Hanna.Korpajarvi.Kirsi.Pirkonen,Pentti.Paavola,Teija.Rintala,Jukka. Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD)of sewage for digestion[J].Ultrasonic sonochemistry,2005,12(1/2): 115- 121.
- [9] Murto,M.Bj?rnsson,L.Mattiasson,B.Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage and pig manure[J]. Journal of environmental Management.2004,70(2): 101- 108.
- [10] 乔玮,曾光明,袁兴中,黄国和,刘存芳.易腐有机废物与剩余污泥混合厌氧消化处理[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 607- 610.
- [11] H.-W.Kim,S.-K.Han,H.-S.Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste using temperature-phased anaerobic digestion process[J].Water Science & Technology.2004,5(9): 107- 114.
- [12]. Attilio Converti, Fabio Drago,Giovanni Ghiazza,Marco Del Borghi.Co-digestion of municipal sewage sludges and pre-hydrolysed woody agricultural wastes[J].Chem.Tech.Biotechnol. 1997,69: 231- 239.
- [13] X.G?mez,M.J. Cuetos,J.Cara,A. Moran,A.I.Garc í a.Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes-Conditions for mixing and evalution of the organic loading rate[J].Renewable Energy 2006, 31: 2017- 2024.
- [14] 王电站,周立祥,何锋.生物淋滤法提高制革污泥脱水性能的研究[J].中国环境科学, 2006, 26(1): 67- 71.
- [15] M..A.de la Rubia,L.I.Romero,D.Sales,and M.Perez.Temperature conversion (Mesophilic to thermophilic) of municipal sludge digestion, [J] Environmental and energy engineering, 2005, 51(9): 2581- 2586.
- [16] 邓良伟,郑平,李淑兰,等.添加原水改善 SBR 工艺处理猪场废水厌氧消化性能[J].环境科学, 2005, 26(6): 105- 109.
- [17] 李秋波,邢德峰,任南琪,等.C/N 比对嗜酸细菌 X-29 产氢能力及其酶活性的影响[J].环境科学, 2006, 27(4): 810- 814.
- [18] MD.ZAHANGIR ALAM,A.FAKHRU'L-RAZI,SURAINI ABD-AZIZ and ABUL H.MOLLA. Optimization of compatible mixed cultures for liquid state bioconversion of municipal wastewater sludge[J]. Water, Air and Soil Pollution 2003, 149: 113- 126.
- [19] 席劲瑛,胡洪营,姜键,钱易.生物过滤塔中微生物群落的代谢特征[J].中国环境科学,2005,26(4): 165- 170.
- [20] 孙寓娇,左剑恶,李建平,鲁颂琼.厌氧颗粒污泥中微生物种群变化的分子生物学解析[J].中国环境科学, 2006, 26(2): 183- 187.