

用于牛粪液厌氧消化的推流式和完全混合式反应器性能研究

李荣平¹, 李秀金^{1*}, Shulin Chen²

(1. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029; 2. Department of Biological System Engineering, Washington State University, Pullman 99164, USA)

摘要: 对推流式反应器(PFR)和完全混合式反应器(CSTR)用于牛粪液厌氧消化的性能进行了比较研究。在中温 35℃ 下, 对进料浓度 40、80 和 128 g/L 的 3 种牛粪液分别进行了试验。结果表明, CSTR 比 PFR 具有更好的去除 VS(挥发性固体)和产生物气的性能, 在进料浓度为 40、80 和 128 g/L 时, CSTR 中 VS 去除率比 PFR 中分别提高了 17.4%~21.5%, 3.9%~21.5% 和 0.5%~5.3%。在最优进料浓度 80 g/L 下, CSTR 获得了最高的容积产气率和单位 VS 产气量, 比 PFR 中提高了 9.8%~25.9%。研究认为, CSTR 中的搅拌作用加强了微生物与物料之间物质的传递, 提高了降解去除有机物和产生物气的消化效果。因此, 在牛粪液厌氧消化时, 推荐使用 CSTR 反应器。

关键词: 牛粪液; 厌氧消化; 推流式反应器; 完全混合式反应器; 性能比较; 进料浓度

中图分类号: S216.4; X713

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)9-0186-05

李荣平, 李秀金, Shulin Chen. 用于牛粪液厌氧消化的推流式和完全混合式反应器性能研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 186-190.

Li Rongping, Li Xiujin, Shulin Chen. Performance evaluation of anaerobic digestion of dairy manure in plug flow reactor and continuous stirred tank reactor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 186-190. (in Chinese with English abstract)

0 引言

厌氧消化技术是处理高浓度有机废水的有效方法。禽畜粪便中有机物含量高, 利用该技术能够实现有机废水的稳定化和资源化^[1,2]。推流式反应器(Plug Flow Reactor, PFR)和完全混合式反应器(Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)是废水处理中比较常用的两种厌氧消化反应器^[3,4], 在养牛场粪水处理中应用普遍, 但是, 两者在水力学性质和处理性能方面有较大差异, 在废水处理方面各有优缺点。在 PFR 中, 水流基本不混合, 流体内各种组分停留时间相同, 反应器内废水像塞子一样依次向前推进^[3]; 但实际上绝大多数 PFR 受进出水流扰动以及横向分散作用, 不是理想的推流式, 运行时容易发生短路; PFR 动力消耗较低, 运行成本低。在 CSTR 中, 基质进入后立即分散到整个反

应器, 发生完全混合, 不存在任何组分的浓度梯度或者温度梯度; CSTR 中微生物和基质能够充分接触, 抗冲击负荷能力较强; 但一部分进水会随着出水一起排出, 使处理效率降低。Liu^[5]利用 PFR 和 CSTR 对饲料进行了厌氧消化的对比试验, 认为 PFR 的处理效率比 CSTR 高。Wright^[6]在对美国纽约州 5 个牛场的消化反应器经济性比较中, 发现 CSTR 的产气量和经济性明显高于 PFR 等反应器。目前, 对单个 PFR 和 CSTR 的研究较多^[7,8], 但未见对两者用于牛粪液厌氧消化性能比较方面的研究报道。而通过比较两个反应器的 TS(进料浓度)、VS(挥发性固体)去除率, 容积产气率和单位 VS 产气量, 可以帮助确定实际生产中使用哪种反应器, 以获得更好的处理效果, 从而为牛场处理粪液时选择适宜的反应器和实际运行提供依据和指导。

1 材料和方法

1.1 牛粪液的配制

某奶牛场的新鲜牛粪^[9], 配制进料浓度(TS)为 40、80 和 128 g/L 的牛粪液, 贮存在-20℃的冰箱中冷冻, 进料时提前一天从冰箱中取出在室温下解冻。新鲜牛粪中所含木质纤维素占干质量的 49.1%, 其中纤维素为 26.6%, 木质素占 11.2%。牛粪液的初始 pH 值为 7.1, 挥发性固体(VS)浓度分别为 35、70 和 110 g/L, 碱度分别为 2190、4382 和 7046 mg/L。

收稿日期: 2006-11-15 修订日期: 2007-03-12

基金项目: 美国农业部小型企业创新研究项目; Paul Allen Family 基金提供部分赞助

作者简介: 李荣平(1978-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事畜牧粪便及污泥的厌氧消化研究。北京 北京化工大学环境科学与工程系, 100029。Email: lirongping@126.com

*通讯作者: 李秀金(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事污水和固体废物处理方面的教学与科研工作。北京 北京化工大学环境工程系, 100029。Email: xjli@mail.buct.edu.cn

1.2 反应器与试验设计

CSTR 反应器高 30 cm, 直径 20 cm, 总容积 9.4 L, 工作容积 3 L; 内置搅拌浆叶, 以 30 r/min 的速度转动。PFR 长 84 cm, 直径为 11 cm, 总容积 8.0 L, 工作容积为 6.5 L (40 g/L 和 80 g/L 进料浓度时) 和 5 L (进料浓度 128 g/L 时); PFR 倾斜 5° 放置, 以便于进出料。根据反应器类型和不同进料浓度 (TS), 共设置了 6 个试验组合, 分别为: CSTR (128)、PFR (128)、CSTR (80)、PFR (80)、CSTR (40) 和 PFR (40)。其中, 括号前的字母表明反应器的类型, 括号中的数字表示该反应器中的进料浓度 (TS)。

采用中温厌氧消化, 所有反应器皆置于 $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温室内。每天进/排料一次, 没有接种, 驯化期 3 个月, 总共运行 8 个月后结束试验。容积负荷率以每升反应器每天所投入的挥发性固体 (VS) 的量表示, 单位为 $\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$; 水力停留时间是指反应器内消化液总体积 (L) 与每日排出的排放液体积 (L/d) 之比, 单位为 d。在进料浓度 (TS) 一定时, 投料中的 VS 浓度也一定, 则水力停留时间, VS 浓度和容积负荷率之间有如下关系:

$$\begin{aligned} & \text{容积负荷率} (\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})) \\ &= \text{VS 浓度} (\text{g}/\text{L}) / \text{水力停留时间} (\text{d}) \end{aligned} \quad (1)$$

本试验中所设计的总固体、挥发性固体含量以及容积负荷率的参数如表 1 所示。由式 (1) 知: 容积负荷率由低到高逐步提高, 表明水力停留时间由长到短逐步缩短。在每一负荷率下, 当产气量连续 5 d 波动小于 10% 时, 即认为达到了稳定状态, 然后, 提高容积负荷率 (或缩短水力停留时间) 到另一水平继续进行试验。当 pH 值低于 6.0 或产气量骤减时, 则降低容积负荷率 (或者增加水力停留时间)。

表 1 试验中总固体、挥发性固体含量及容积负荷率的设计参数

Table 1 Experimental parameters of TS, VS and organic loading rate

试验组合	总固体 $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	挥发性固体 $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	容积负荷率 $/\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$
PFR (128)	128	110	6.7
	128	110	8.0
	128	110	9.3
	128	110	11.1
	128	110	13.9
	128	110	22.3
PFR (80)	80	70	5.4
	80	70	6.8
	80	70	8.7
	80	70	13.9

试验组合	总固体 $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	挥发性固体 $/\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	容积负荷率 $/\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$
PFR (40)	40	35	3.5
	40	35	4.3
	40	35	5.0
	40	35	5.9
	40	35	7.0
	40	35	8.1
CSTR (128)	128	110	7.4
	128	110	9.3
	128	110	11.1
	128	110	13.4
	128	110	14.8
	128	110	22.3
CSTR (80)	80	70	5.4
	80	70	6.9
	80	70	7.7
	80	70	11.6
	80	70	13.9
	80	70	16.6
CSTR (40)	40	35	3.5
	40	35	4.0
	40	35	4.9
	40	35	5.8
	40	35	7.0
	40	35	8.1
	40	35	9.7
	40	35	11.6

1.3 分析方法

日产气量采用排水集气法测定, 在产气稳定之后取平均值。收集气体之前在反应器中充入高纯氮气, 以保持厌氧环境。TS、VS 分别在 105°C 和 550°C 下采用称重法^[10]测得, 并取平均值。甲烷和二氧化碳的含量使用气相色谱仪 GC (Varian, Palo Alto, CA) 测定, 分析柱为 Restek (Bellefonte, PA) Shincarbon ($2 \times 1/16$ inch) 的填料柱, 配置热导检测器, 载气为高纯氮气。pH 值、碱度及其它测定依据标准测定方法^[10]。

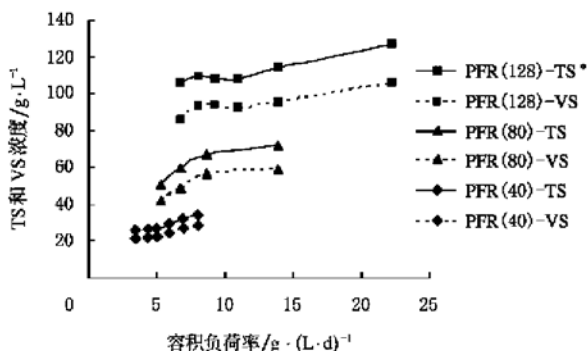
2 结果与分析

2.1 PFR 反应器

1) TS 和 VS 的去除率

在厌氧消化过程中, 厌氧菌会消化利用牛粪液中的有机物, 从而导致反应器出料中总固体 TS 和总挥发性固体 VS 量的变化。从图 1 可以看出, 相对于不同的进料浓度, 出料中 TS、VS 浓度都呈减少趋势, 其变化趋势基本一致, 说明进料中有机物被转化利用了。消化前, 牛粪液中 VS/TS 比值的平均值为 87%, 消化后, VS/TS 比值稍有降低, 在 PFR (128)、PFR (80) 和 PFR (40) 消化液出水中 VS/TS 比值的平均值分别为 84.1%、82.5% 和 83.0%。这是因为牛粪液中有机物含

量较高,TS 和 VS 都比较容易降解。



注: * 括号内的数值为进料 TS,下同

图 1 PFR 中 TS 和 VS 的浓度曲线

Fig. 1 TS and VS concentration curve in PFR

图 2 反映了 TS 和 VS 的去除率情况。可以看出,TS 和 VS 去除率的变化趋势基本一致,但 TS 去除率要稍低于 VS 去除率。进料浓度对去除率的影响不大,在 5.4~8.7 g/(L·d) 负荷率内,PFR(80) 中的 VS 去除率比 PFR(40) 高出 3.5%~8.2%;而在 8.7~13.9 g/(L·d) 负荷率内,PFR(80) 与 PFR(128) 差异不显著 ($P > 5\%$)。在 PFR(128) 后阶段 HRT(水力停留时间)由 8.0 d 降低到 5.0 d,即负荷率由 13.9 g/(L·d) 提高到 22.3 g/(L·d) 时,因负荷率提高过多,TS、VS 去除率下降到 0.9% 和 4.4%,整个系统基本失去处理功能。总的来说,3 个进料浓度下的 TS、VS 去除率相差不大。

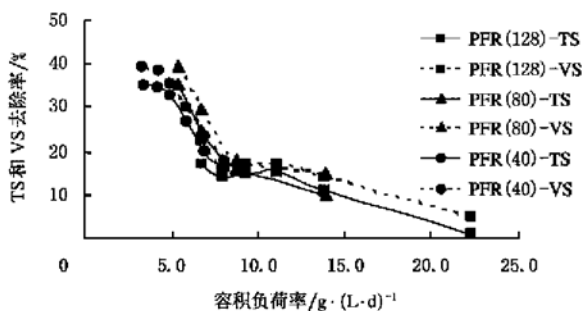


图 2 PFR 中 TS 和 VS 去除率

Fig. 2 TS and VS removal efficiency in PFR

2) 容积产气率和单位 VS 产气量

经过水解酸化过程,牛粪液中的大分子有机物被转化成小分子成分,进而被甲烷菌转化生成生物气^[11]。PFR(40) 和 PFR(128) 的容积产气率随负荷率先下降后又出现上升趋势,原因尚待进一步研究。而 PFR(80) 的容积产气率随负荷率升高而增加。负荷率越高,反应器中加载的挥发性固体量越大,容积产气率上升。同时,容积负荷率越高,厌氧菌的工作负荷加大,单位 VS 产气量则降低。有机负荷率要适宜,过高会超出厌氧菌的

消化能力,使之无法消化,还会使厌氧菌流失;过低则降低反应器的处理量,不经济。由图 3、4 可见,3 个进料浓度中,80 g/L 是产气的最优浓度。PFR(80) 的单位 VS 产气量在 3 个 PFR 中最高,在 5.4~13.9 g/(L·d) 负荷率内,为 0.11~0.25 L/g。同样,PFR(80) 有着最高的容积产气率 1.35~1.53 L/(L·d),比 PFR(40) 和 PFR(128) 分别高出 16.2%~30.7% 和 7.7%~22.1%。原因主要是生物气产生与反应器的进料浓度以及甲烷菌生物量有关。进料浓度过高时,由于 PFR 搅拌混合作用弱,传质受到限制,影响产气效果^[12];进料浓度过低时,厌氧菌缺乏足够的“食料”而无法正常工作,导致产气量低,严重时甚至完全停止产气。另外,PFR(40) 和 PFR(80) 产气中的甲烷平均含量在 56.9%~58.6% 之间,PFR(128) 的平均含量稍低,为 54.5%。

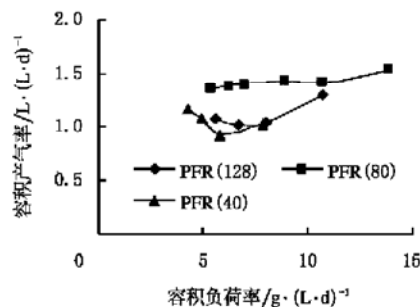


图 3 PFR 中容积产气率

Fig. 3 Gas productivity in PFR

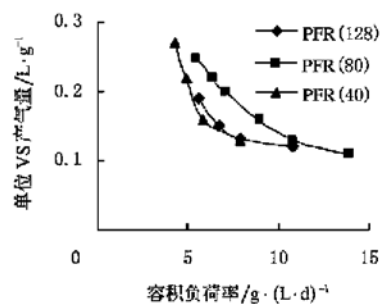


图 4 PFR 中单位 VS 产气率

Fig. 4 Gas yield in PFR

2.2 CSTR 反应器

1) TS 和 VS 去除率

CSTR 中的 TS、VS 浓度变化与 PFR 中的趋势相似,见图 5。在 CSTR(128)、CSTR(80) 和 CSTR(40) 中消化液出水中 VS/TS 比值的平均值分别为 84.1%、84.1% 和 82.9%。而图 6 中,进料浓度对 CSTR 中 TS 和 VS 去除率的影响不同。在 4.9~8.1 g/(L·d) 负荷率内,CSTR(40) 的 TS、VS 去除率随负荷率的增高下降较快;在 8.1~11.6 g/(L·d) 负荷率内,CSTR(40)

的 VS 和 TS 去除率稳定于 24.0% 和 30.4% 左右。CSTR(80) 和 CSTR(128) 的 VS 去除率与负荷率之间呈线性相关 ($R^2 = 0.988, 0.963$)。在 $7.4 \sim 16.6 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 负荷率内, CSTR(80) 的 VS 去除率比 CSTR(128) 高出 $7.8\% \sim 9.6\%$ 。同样, CSTR(128) 在 HRT 降低到 5.0 d , 即容积负荷率 $22.3 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 时, TS、VS 去除率下降到 2.0% 和 5.9% , 整个系统趋于停滞。总之, CSTR 的 3 个浓度之间 TS、VS 去除率的差别明显大于 PFR。

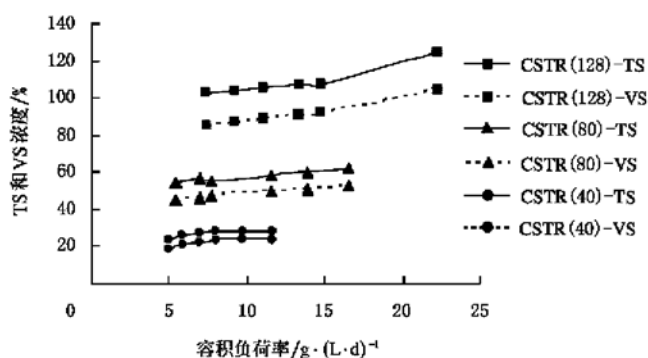


图5 CSTR 中 TS、VS 浓度变化曲线

Fig. 5 TS and VS concentration in CSTR

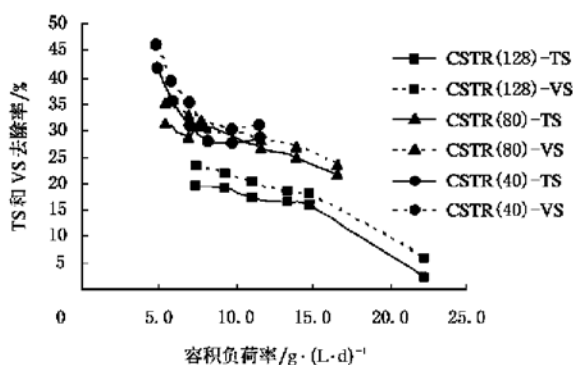


图6 CSTR 中 TS、VS 去除率

Fig. 6 TS and VS removal efficiency in CSTR

2) 容积产气率和单位 VS 产气量

由于 CSTR 中的搅拌混合作用, 新加入的废水可以迅速接触到反应器中的厌氧菌并发生反应, 因此产气效率更高。由图 7、8 可见, 与 PFR 相比, 随着负荷率升高, CSTR 中的容积产气率增长比 PFR 中要快, 单位 VS 产气量降低的要慢。在所研究负荷率内, CSTR(40) 中的容积产气率和单位 VS 产气量与 CSTR(128) 中的大致相同。CSTR(80) 的容积产气率和单位 VS 产气量为 $1.56 \sim 2.16 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 和 $0.15 \sim 0.24 \text{ L/g}$, 比 CSTR(40)、CSTR(128) 提高了 $24.8\% \sim 45.0\%$ 和 $26.7 \sim 45.0\%$ 。3 个 CSTR 中的甲烷平均含量均在 $56.9\% \sim 58.6\%$ 之间。

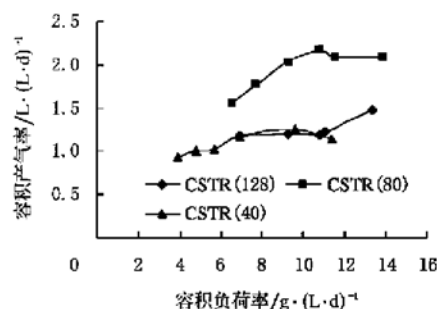


图7 CSTR 中容积产气率

Fig. 7 Gas productivity in CSTR

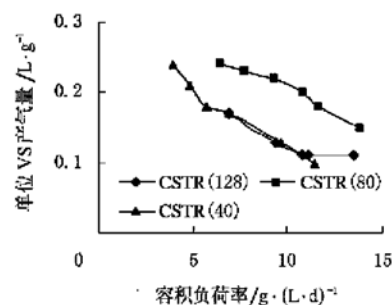


图8 CSTR 中单位 VS 产气量

Fig. 8 Gas yield in CSTR

2.3 讨论: PFR 和 CSTR 反应器性能比较

对去除率的影响: 由于 PFR 不存在搅拌或者受到的扰动较小, 水解酸化主要依靠自身所含微生物的降解作用, 不同进料浓度下去除率相差不大。而 CSTR 内搅拌加速了水解酸化的速度^[13, 14], 明显提高了 TS 和 VS 的去除率。在相同的搅拌强度下, CSTR(40)、CSTR(80) 和 CSTR(128) 的 VS 去除率比 PFR(40)、PFR(80) 和 PFR(128) 分别提高了 $17.4\% \sim 21.5\%$, $3.9\% \sim 21.5\%$ 和 $0.5\% \sim 5.3\%$ 。浓度越低, VS 去除率提高越明显。

产气率和产气量: CSTR(80) 在 6 个反应器中有着最高的容积产气率和产气量。与 CSTR(80) 在 $6.5 \sim 13.9 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 下的单位 VS 产气量相比, 其余 5 个反应器 PFR(40)、PFR(80)、PFR(128)、CSTR(40) 和 CSTR(128) 的单位 VS 产气量分别只有 CSTR(80) 的 $56.6\% \sim 65.4\%$ 、 $74.1\% \sim 90.2\%$ 、 $56.8\% \sim 66.1\%$ 、 $52.8\% \sim 72.7\%$ 和 $55.6\% \sim 74.6\%$ 。说明在这 5 个反应器中有更大比例的有机物没有被降解或者没有被转化成生物气体^[15]。CSTR 中的混合搅拌在产甲烷阶段起到了促进作用, PFR(80) 即使在最优浓度下, 也只有 CSTR(80) 产气量的 $74.1\% \sim 90.2\%$ 。

3 结论

CSTR 比 PFR 具有更好的去除 VS 和产生物气的

性能,在进料浓度为 40、80 和 128 g/L 时,CSTR 中 VS 去除率比 PFR 中分别提高了 17.4%~21.5%,3.9%~21.5% 和 0.5%~5.3%。CSTR 在进料浓度 80 g/L 时获得了最高的容积产气率和单位 VS 产气量,而 PFR 中单位 VS 产气量只有 CSTR 单位产气量的 74.1%~90.2%,该浓度可认为是本试验中的最优进料浓度。研究认为,CSTR 中的搅拌作用加强了微生物与物料之间物质的传递,提高了降解去除有机物和产生物气的消化效果。因此,在牛粪液厌氧消化时,推荐使用 CSTR 反应器。

[参 考 文 献]

- [1] Verstraete W, Vandevivere P. New and broader applications of anaerobic digestion [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, 29(2): 151–173.
- [2] Garrison M V, Richard T L. Methane and manure: feasibility analysis of price and policy alternatives [J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(3): 1287–1294.
- [3] 李秀金. 固体废物工程[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 67–68.
- [4] 美国梅特卡夫和埃迪公司. 废水工程: 处理、处置及回用(第 2 版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1979: 100–108.
- [5] Liu T. Anaerobic digestion of solid substrate in an innovative two-phase plug-flow reactor(TPPRF) and a conventional single-phase continuously stirred-tank reactor[J]. *Wat Sci & Tech*, 1998, 38(8,9): 453–461.
- [6] Peter Wright, Scott Inglis, Jianguo Ma, et al. Comparison of five anaerobic digestion systems on dairy farms [A]. *Proceeding of 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting*[C]. Ottawa, Canada, 2004.
- [7] Chen T H, Shyu W H. Performance of four types of anaerobic reactors in treating very dilute dairy wastewater [J]. *Biomass & Bioenergy*, 1996, 11(5): 431–440.
- [8] Sharma V K, Testa C, Lastella G, et al. Inclined-plug-flow type reactor for anaerobic digestion of semi-solid waste[J]. *Applied Energy*, 2000, 65: 173–185.
- [9] Wen Zhiyou, Liao Wei, Chen Shulin. Hydrolysis of animal manure lignocellulosics for reducing sugar production [J]. *Bioresource & Technology*, 2004, 84: 81–91.
- [10] APHA. standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 20th ed., Washington D. C.: American Public. Health Assoc., 1998.
- [11] 周雪飞, 张亚雷, 顾国维. 厌氧消化 1 号模型(ADM1)简介[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(2): 85–87.
- [12] Vavilin V A, Shchelkanov Y M, Rytov Sergey V. Effect of mass transfer on concentration wave propagation during anaerobic digestion of solid waste[J]. *Water Research*, 2002, 36: 2405–2409.
- [13] Vavilin V A, Angelidaki I. Anaerobic degradation of solid material: Importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2 D distributed model [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2004, 89: 113–122.
- [14] Stroot P G, Katherine D M, Roderick I M, et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. Digestion performance [J]. *Wat Res*, 2001, 35: 1804–1816.
- [15] 赵庆良, 王宝贞, 库格尔. 厌氧消化中的重要中间产物—有机酸[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 29(5): 32–38.

Performance evaluation of anaerobic digestion of dairy manure in plug flow reactor and continuous stirred tank reactor

Li Rongping¹, Li Xiuji^{1*}, Shulin Chen²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Department of Biological System Engineering, Washington State University, Pullman 99164, USA)

Abstract: Plug flow reactor(PFR) and Continuous stirred tank reactor(CSTR) were studied to compare their performance for treating dairy manure. Three solid concentrations of dairy manure slurry of 40, 80 and 128 g/L were tested at mesophilic temperature of 35°C. The results showed that CSTR had better treatment performance of VS removal and biogas production than PFR. VS removal efficiencies in CSTR were increased by 17.4%~21.5%, 3.9%~21.5%, and 0.5%~5.3% as compared with those in PFR at 40, 80 and 128 g/L concentrations, respectively. The influent concentration of 80 g/L was believed to be the optimal one in this study in terms of gas production, in which CSTR achieved the highest gas productivity and gas yield, 9.8%~25.9% higher than those in PFR. Based on the current results, it could be concluded that mixing in CSTR could enhance the mass transfer between microorganisms and substrate, and improve the effects of organic matter removal and gas production. CSTR was recommended in the anaerobic digestion of dairy manure.

Key words: dairy manure; anaerobic digestion; plug flow reactor; CSTR; performance evaluation; influent concentration