

UASB 厌氧反应器处理木薯酒精废水实验研究^{*}

包颖, 黄伟, 纪钧麟, 范兴, 徐良, 杨红, 尹芳, 张无敌

(云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 采用 UASB 厌氧反应器处理木薯酒精废水, 实验运行周期为 62 d. 在室温条件下, 进水 COD 浓度逐渐从 5 129 mg/L 提高到 28 920 mg/L. 实验过程中 COD 去除率最高达 95.9%, 沼气中的甲烷含量最高达到 73%, 池容产气率最高达 4.6 m³/(m³·d), 反应器运行良好. UASB 厌氧反应器处理木薯酒精废水的效果显著. 实验对 UASB 反应器的工艺参数进行了研究, 为规模化、工程化处理高浓度木薯酒精废水提供参考.

关键词: UASB 厌氧反应器; 木薯酒精废水; COD 去除率

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9793(2018)06-0016-06

1 引言

木薯, 产量大, 淀粉含量高, 具备良好的经济价值, 是生产燃料乙醇的常用非粮原料^[1], 但是酒精生产过程中会排放出大量的有机废水, 每年酒精产业排放的高浓度废水高达 5 000 万吨^[2]. 木薯酒精废水中含有大量的悬浮物、有机化合物等, 是一种高浓度并且呈酸性的有机废水^[3], 处理难度大, 在一定程度上制约了木薯酒精产业的发展^[4-5]. 处理高浓度废水, 通常优先考虑厌氧生物法去除废水中的有机物, 目前通过厌氧消化处理有机废水的厌氧反应器主要包含 CSTR、UASB、EGSB 和 IC 等.

李秋园等人^[4]用 CSTR 厌氧微生物法处理木薯酒精废水, 运行温度为 58 °C, 进水 pH 约为 4.0~4.2, 进水 COD 浓度达 60 000 mg/L, COD 去除率为 90%, 甲烷含量在 54%~56% 之间, 处

理高浓度木薯酒精废水效果良好; 韦雪梅等人^[6]用 UASB 处理木薯酒精废水, 运行温度在 35~40 °C 之间, 进水 pH 约为 4.5, 进水 COD 浓度为 30 000 mg/L, COD 去除率为 95%, 容积负荷达 7 kgCOD/(m³·d), 水力停留时间为 2 d; 潘玲等人^[7]用 EGSB 处理木薯酒精废水, 运行温度为 38 °C, 进水 pH 在 7.6~7.8 之间, COD 去除率达到 96.9%, 但进水 COD 浓度仅为 2 000~3 000 mg/L. 陈小华等人^[8]用 IC 处理木薯酒精废水, 运行温度在 50~55 °C 之间, 进水 COD 浓度为 7 209 mg/L, COD 去除率为 79.19%. 从上述不同的厌氧反应器运行数据可看出这些反应器都能高效处理酒精废水.

UASB 属于第二代厌氧反应器, 该反应器具有运行稳定、维护简单和投资成本较低等特点, 在世界各国的污水处理行业得到广泛的应用. 但是处理难度较大的有机废水时, 高效反应器普遍存在启动过程耗时较长和容易酸化等问题. 为此, 实

* 收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51366015)、2016 云南省大学生创新创业训练计划(201610681127)、2018 云南省应用基础研究计划青年项目(2018FD018)和云南省农村能源工程重点实验室基金(2017KF03) 联合资助项目.

作者简介: 包 颖(1995-), 女, 云南宣威人, 主要从事废弃资源能源化利用方面研究.

通信作者: 尹 芳. E-mail: yf6709@sina.com.

验采用 UASB 反应器处理木薯酒精废水,对反应器的启动过程和运行情况进行研究,为沼气的运行提供参考。

2 材料与方

2.1 实验材料

接种物:使用酒精废水长期驯化后的活性污泥,对污泥性质进行测定得到表 1。

木薯酒精废水:木薯原料经过正常乙醇发酵并蒸馏后的剩余物,经过固液分离后获得酒精废水,对废水的性质进行测定得到表 2。

表 1 活性污泥的主要性质

Table 1 Main characteristics of Activated sludge

接种物	含水率/%	悬浮物 MLSS /(g/L)	挥发性悬浮物 MLVSS /(g/L)	$\frac{MLVSS}{MLSS}/\%$
活性污泥	91.89	82.14	46.55	56.67

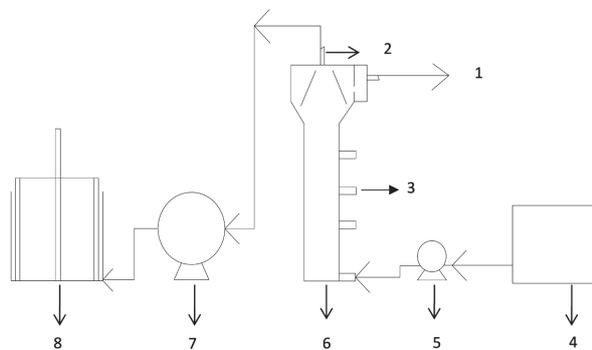
表 2 木薯酒精废水的主要特性

Table 2 Main characteristics of Cassava alcohol wastewater

原料	MLSS/(g/L)	MLVSS/(g/L)	化学需氧量(COD)/(mg/L)	pH
木薯酒精废水	34.03~41.43	30~36.45	57 295~63 246	3.8~4.4
配置废水	5.67~20.72	3.51~17.02	5 129~28 920	4.5~7.0

2.2 实验装置

实验装置是有机玻璃制的成 UASB 反应器,其有效容积为 1.65 L,高度为 41 cm,直径为 8 cm,底部设有进料口和排泥口,反应器中部平均分布三个取样口,反应器进料口设有环形布水器以保证反应器进水均匀,减少进水过程中出现死角和短流,整套实验装置包含进料池、UASB 反应器、气体流量计和气柜,各装置之间由 PVC 软管连接,装置示意如图 1 所示。



1. 出料口; 2. 出气孔; 3. 取样孔; 4. 进料池; 5. 蠕动泵;
6. 排泥; 7. 气体流量计; 8. 集气柜

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

2.3 实验方法

实验在室温进行,以木薯酒精废水为原料,通过 UASB 厌氧反应器对木薯酒精废水进行厌氧消化处理.实验开始之前,先组装好实验装置并进行检漏,检漏完毕后再将厌氧活性污泥加入反应器,污泥的加入量约占反应器有效容积的三分之一,之后把木薯酒精废水与自来水按照一定比例混合到目标 COD 浓度并调整 pH 后作为进水.通过蠕动泵把准备好的木薯酒精废水逐渐加入整个反应器,全程固定 HRT 为 3 d,定时测定相关数据。

2.3.1 实验启动方法

实验启动分为三个阶段,第 1—13 天为第一阶段,此阶段为启动初期,持续进已经稀释过且调过 pH 的木薯酒精废水,进料 COD 为 5 129 mg/L,进水 pH 调节到 6.2~6.7,通过蠕动泵控制水力滞留时间(HRT)为 3 d,经过滞留时间后,每天同一时间对反应器出水 COD,出水 pH,甲烷含量,产气量及温度进行定时测定并记录数据,待 COD 去除率在 80% 以上保持稳定后进入下一阶段。

第 14—39 天为第二阶段,此阶段逐渐提升负荷,缓慢的阶梯式提高进料木薯酒精废水的 COD 从 5 129 mg/L 升至 20 156 mg/L,进水 pH 调节到 6.2~6.7,每天定时记录相关数据;待反应器运行稳定即去除率保持 80% 以上、产气量和出水 pH 值均保持相对稳定后进入下一个阶段。

第 40—62 天为第三阶段,此阶段适当减慢负荷提升速度并逐渐降低进水 pH,缓慢提高进水 COD,由 20 156 mg/L 升至 28 920 mg/L,进水 pH 调节到 4.5~5.5,探究反应器的抗负荷能力和运行情况,每日定时监测相关数据。

2.3.2 测定项目

COD:使用哈希 COD_{max} II 在线测定仪;

pH:使用上海三爱思试剂有限公司生产的多量程精密试纸和 pHS-3C 型 pH 计测定;

产气量:使用气体流量计测定;

甲烷含量:使用福立 GC9790 II 型气相色谱仪测定;色谱条件为:柱箱温度 105 °C、TCD 温度 120 °C,载气为纯氮气;

室内温度由便携式电子温度仪测定。

3 实验结果与分析

3.1 日产气量、甲烷含量随时间的变化情况

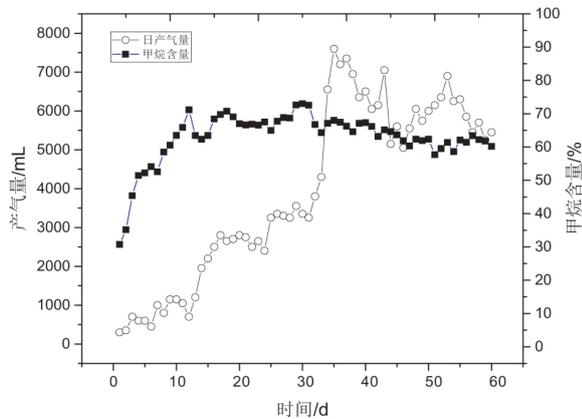


图 2 日产气量、甲烷含量随运行时间的变化关系

Fig.2 Relationship between daily gas production and methane content and running time

如图 2 示,整个反应运行 62 d,反映了反应器的日产气量和甲烷含量变化随运行时间的变化情况.反应器的日产气量随着运行时间的增加逐渐增加,甲烷含量随运行时间的增加越来越高.在反应运行到第 9 天的时候,甲烷含量达到 60% 左右,在第 10 天及以后,甲烷含量基本稳定在 60%~75% 之间,只是在提升负荷时有轻微影响,在第 35 天产气量达 5 000~7 500 mL 之间,甲烷含量稳定在 55%~65% 之间,甲烷含量有所降低的原因是负荷的提升使微生物未能及时适应反应器内的环境,甲烷含量降低后又升高说明了反应器内的微生物已经开始基本适应反应器内的环境,整个厌氧消化体系基本趋于稳定,同时也具备处理更高浓度木薯酒精废水的能力,为下一阶段做好准备。

3.2 进出水 COD 及 COD 去除率随运行时间的变化

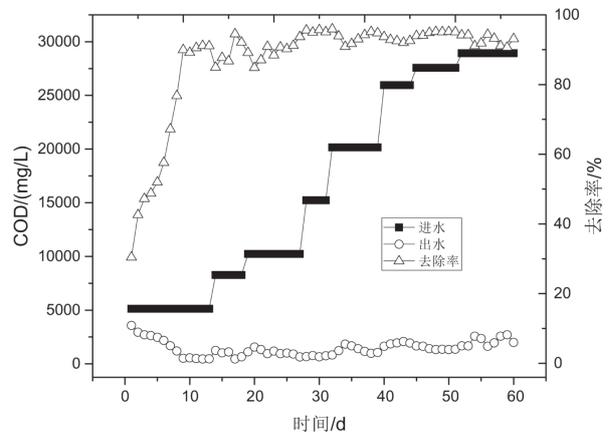


图 3 进出水 COD 及 COD 去除率随运行时间的变化关系

Fig.3 Variation of COD of influent and effluent and degradation rate of COD with running time

图 3 给出了反应器进出水 COD 浓度和 COD 去除率随着反应时间的变化情况.从图中的曲线变化趋势可以看出随着进水 COD 浓度不断提升,出水 COD 浓度一直保持较低状态,COD 去除率整体保持上升趋势,在反应运行 10 天以后去除率趋于稳定,只是在期间提升负荷时产生轻微的

变化.前 1—9 天,活性污泥中的厌氧微生物群还没适应发酵环境,降解有机质能力不够强,因此出水 COD 浓度相对较高,COD 去除率较低,但整个反应器的反应随着厌氧微生物群对反应器内环境的适应,出水 COD 持续呈现降低状态,COD 去除率持续呈现上升状态;在第 10—23 天,COD 去除率都在 80% 以上,出水 COD 相对稳定在较低状态;第 24 天及以后,反应器运行稳定,COD 去除率几乎都保持在 90% 以上,出水 COD 稳定在较低状态.

3.3 进出水 pH 随时间的变化情况

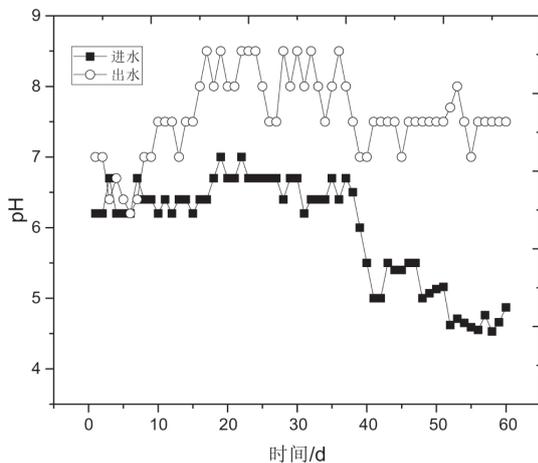


图 4 进出水 pH 随时间的变化情况

Fig.4 The change of pH in and out of water

图 4 反映了反应器进出水 COD 浓度和 pH 随着反应时间的变化趋势.实验启动的前 37 天,活性污泥中的厌氧微生物群还没适应发酵环境,木薯酒精废水的进料 pH 用 NaHCO_3 调节在 6~7 之间,使产甲烷菌尽快适应 UASB 反应器内的环境,在适宜的 pH 范围内快速增长.但是通过调节 pH 也会改变木薯酒精废水的性质,处理效果在一定程度上会受到影响;如果不调节进水木薯酒精废水 pH 进行启动,对接种物的要求较高,需要对微生物长期驯化培养,微生物适应时间较长,但相比来说,不调 pH 而培养出的微生物体系更加强稳定.对于驯化不充分的接种物,调节进水 pH 有利于降低酸化风险,在启动实验过程继续

驯化微生物.实验中,对进料的木薯酒精废水进行梯度稀释,目的是防止高浓度废水对微生物的冲击过大而导致酸化;对于驯化培养充分的接种物,可尝试原液循环启动^[9],相比于常规的启动方式更具优势,可以在一定程度上缩短反应器启动时间.随着反应趋于稳定,从第 38 天开始,进料 COD 的 pH 降低到 4.5~5.5 之间;在实验启动初期,活性污泥中的厌氧微生物群还没适应发酵环境,降解有机质能力还不够强,所以出水 COD 相对较高,出水 pH 没有太大的变化,随着微生物的自适应调节和微生物体系的日益强大,COD 降解能力增强,出水 pH 随 COD 的去除率而波动^[10],增加到 7.5~8.5 之间,反应器运行状态良好.

3.4 池容产气率和温度的时间变化情况

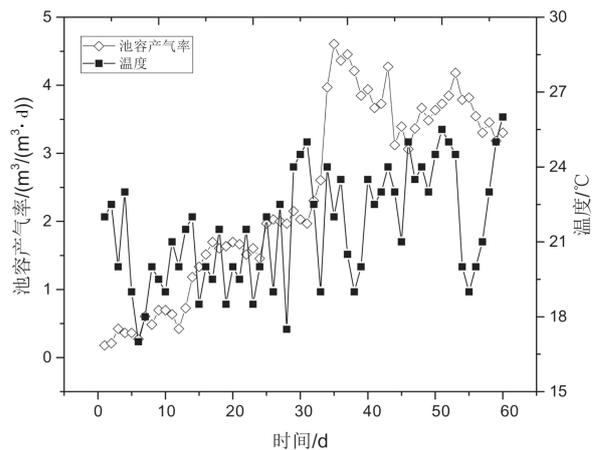


图 5 池容产气率和温度的时间变化情况

Fig.5 Time variation of gas yield and temperature in tank capacity

图 5 反映了池容产气率和温度的时间变化情况.室温下,在整个启动过程中,池容产气率呈上升趋势,从第 32 天开始,池容产气率迅速上升并且逐步趋于稳定;容易看出,除了进水水质和负荷对产气有较大的影响外,池容产气率同样受到温度变化的影响,温度升高和温度降低都会使产气量出现波动,主要是因为温度对 UASB 反应器内的微生物有影响,低温对微生物的活动有抑制作用,实验过程中室温几乎都保持在 20 °C 以上,产

气量未因温度过低而大幅降低,保持适宜的温度是反应器稳定运行的基础。

3.5 有机负荷和池容产气率的时间变化情况

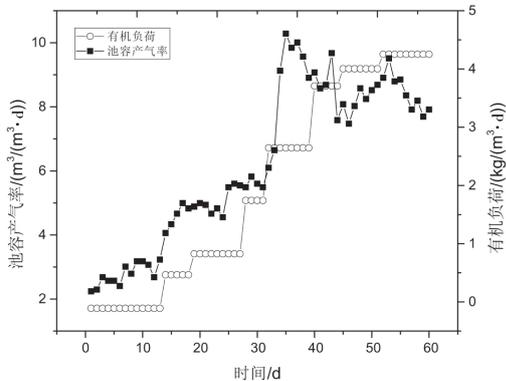


图 6 有机负荷和池容产气率的时间变化情况

Fig.6 Temporal variations of organic loading and gas production capacity

图 6 反映了有机负荷和池容产气率的时间变化情况,在图中容易看出有机负荷增加,池容产气率随之增加,在第 44 天及以后池容产气率有所起伏,主要原因是进水 pH 的降低和有机负荷的升高,反应器内微生物未能及时适应环境,故池容产气率先有所下降,待再一次提升负荷时,池容产气率回升,说明微生物已适应了反应器内的高浓度木薯酒精废水。

3.6 实验结果

实验在室温下进行,用 UASB 厌氧发酵工艺来处理木薯酒精废水,启动过程中不断提升木薯酒精废水进水的 COD 浓度,进水 COD 由 5 129 mg/L 逐渐提升至 28 920 mg/L,进水 pH 由 6.2~6.7 逐渐降低到 4.5~5 之间,待反应器运行逐渐稳定时,出水 pH 稳定在 7.5 左右,池容产气率最高达 $4.6 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,COD 去除率达 91% 以上,产气效率高,甲烷含量高达 60% 以上,反应器启动成功.UASB 工艺能稳定高效的处理高浓度木薯酒精废水,若将沼气回用到酒精生产的过程中,解决废水污染问题的同时还能降低生产能耗,充分发挥沼气发酵系统的综合效益。

与其他学者做的木薯酒精废水厌氧发酵相比

较,本实验在常温下启动,温度相对较低,但对高浓度木薯酒精废水的处理效果也较好,无需对反应器进行加热保温,减少了能耗。

4 结 论

(1)UASB 工艺对高浓度木薯酒精废水的降解是高效的,能将废弃有机物转化为沼气能源,可将其有效利用到酒精的生产过程中,达到降低能耗的目的。

(2)反应器启动初期的运行效果对环境温度的变化较为敏感,主要表现在产气量和 COD 去除率的变化,较低的温度会延长反应器的启动时间.反应器运行稳定后,在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的环境中,温度的小幅变化($\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$)不会对反应器造成较大影响。

参 考 文 献:

- [1] 杜金宝,黄加军,王国庆,等.木薯酒精废醪液处理工艺研究进展[J].酿酒科技,2012(1):89-92.
- [2] 车昱晓,张毅敏,汪龙眠,等.我国酒精废水治理技术的比较研究[C]//2014 中国环境科学学会学术年会,2014.
- [3] 豆宁龙,李杰,王亚娥,等.木薯酒精废水厌氧消化液的后处理试验研究[J].工业用水与废水,2013,44(3):29-34.
- [4] 李秋园,代淑梅,申明华.连续全混反应处理木薯酒精废水产沼气能力研究[J].基因组学与应用生物学,2018,37(5):2 074-2 079.
- [5] 谷顺明,周若飞,傅胜辉.木薯酒精发酵工业废水的工艺研究[J].广东化工,2017,44(1):105-106.
- [6] 韦雪梅,张英慧.UASB 工艺处理木薯酒精废液生产运行发现[J].西安文理学院学报:自然科学版,2011,14(3):59-62,71.
- [7] 潘玲,徐艳红,李红艳,等.EGSB 反应器处理酒精废水启动方法[J].化工科技,2015,23(1):32-34.
- [8] 陈小华.IC 反应器在木薯酒精综合废水处理中的应用[J].中国给水排水,2015,31(24):88-90,94.
- [9] 刘健峰,王强,田光亮,等.膨胀颗粒污泥床厌氧反应器原废水循环启动的实验研究[J].环境污染与防治,2017,39(1):77-81.

- [10] 蒋柱武,谢丽.高温厌氧膨胀床反应器处理木薯酒精
废水试验[J].同济大学学报:自然科学版,2014,42
(6):918-923.

Experimental Study on Treatment of Cassava Alcohol Wastewater by UASB Anaerobic Reactor

BAO Ying, HUANG Wei, JI Jun-lin, FAN Xing, XU Liang,

YANG Hong, YIN Fang, ZHANG Wu-di

(College of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The cassava alcohol wastewater was treated with UASB anaerobic reactor. The experimental operation period was 62 days. At room temperature, the influent COD concentration gradually increased from 5 129 mg/L to 28 920 mg/L. During the experiment, the COD removal rate was up to 95.9%, the methane content in biogas was up to 73%, the volume gas productivity was up to 4.6 m³/(m³ · d), the reactor was running well. The effect of UASB reactor on the treatment of cassava alcohol wastewater was significant. The experimental parameters of the UASB reactor were studied, which provided a reference for the large-scale and engineering treatment of high-concentration cassava alcohol wastewater.

Keywords: UASB anaerobic reactor; Cassava alcohol waste water; COD degradation rate