

“CSTR_H-UASB_{Met}-C_O”产氢产甲烷除碳新工艺的构建与运行

刘瑞娜, 李永峰*, 梁乾伟 (东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 采用建立的“CSTR_H-UASB_{Met}”两相厌氧系统,以糖蜜废水为发酵底物,考察系统的产氢、产甲烷性能;为进一步去除有机物,同时建立好氧系统来处理两相厌氧系统出水;进水 COD 控制在 4 000 ~ 10 000 mg/L。运行结果表明,CSTR 产酸相最大产氢率为 4.6 m³/(m³·d),系统 pH 稳定在 4.1 ~ 4.3;UASB 产甲烷相最大产甲烷速率为 10.5 m³/(m³·d),系统 pH 稳定在 6.8 ~ 7.2。在最佳运行参数下,产氢反应体系经过混合酸型发酵、丁酸型发酵后,最终反应体系均达到稳定的乙醇型发酵。经好氧处理后,整个系统的 COD 去除率始终维持在 95% 以上。

关键词 糖蜜废水;氢气;甲烷;COD 去除率

中图分类号 S216.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)30-12118-03

Set-up and Operation of “CSTR_H-UASB_{Met}-C_O” New Process to Coproduce Hydrogen, Methane and Remove COD

LIU Rui-na et al (School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract A two-phase anaerobic digestion “CSTR_H-UASB_{Met}”-aerobic system was established to treat molasses wastewater. The performance of hydrogen-methane production was investigated, and aerobic reactor accomplished residual COD removal. When COD concentration was from 4 000 to 10 000 mg/L, the highest hydrogen production rate of 4.6 m³/(m³·d) was obtained from molasses wastewater and methane was continuously produced from effluents of hydrogen fermentation with a production rate of 10.5 m³/(m³·d). Under the optimum operating parameters, the fermentation type of the simultaneous production of hydrogen was gradually butyrate-type fermentation, mixed acid fermentation and the reaction system set up stable ethanol-type fermentation finally. The effluent pH value of acidogenic phase and methanogenic phase were separately kept in 4.1-4.3 and 6.8-7.2. COD removal efficiency can be maintained above 95% at last.

Key words Molasses wastewater; Hydrogen; Methane; COD removal efficiency

能源是未来社会发展的重要限制性因素之一^[1]。氢气和沼气是重要的可再生清洁能源,可利用厌氧消化技术以不同的有机基质为底物获得。可用于厌氧发酵的有机基质有食品废渣、废蜜、蔗糖废水、乳品废水等^[2-6]。糖蜜废水含有丰富的碳水化合物和氮素物质,可被微生物利用,可生化性好,国内外研究多采用生化法处理^[7-9]。暗发酵产氢的能源回收率低,产氢的同时伴随乙酸、丙酸、丁酸、乙醇等有机酸和醇副产物生成,不能将有机质完全转化为氢^[10]。为提高能源回收效率,可采用氢-甲烷两相厌氧发酵工艺。Ruggeri 等对两相厌氧消化的能源回收率进行了分析,与单相厌氧消化工艺相比,其处理能力和效率大大提高^[11]。

目前,越来越多的学者对两相厌氧工艺和好氧工艺进行研究,为氢气、沼气和废物处理工程提供了技术指导。王兵等研究了 HRT 对以废蜜为底物的乙醇型发酵生物制氢的影响,以 CSTR 为反应器,在不同的 HRT 条件下,乙醇型发酵和产氢速率都形成了稳定的对应关系^[12]。张振家进行了两相 UASB 反应器处理糖蜜酒精糟液的试验研究,结果表明,系统对废水中有机物及硫酸盐均有良好的去除效果^[13]。郑淑文等利用两相 UASB 与好氧组合工艺,对城市生活垃圾渗滤液的处理进行了研究,虽取得了良好的试验结果,但只研究了有机物和氨氮的去除,并未考虑能源的回收^[14]。也有一些学者同时对产氢和产甲烷的两相厌氧进行研究,但氢气和沼气的产率和含量都较低^[15]。笔者采用两相厌氧消化 CSTR_H-UASB_{Met}与好氧组合工艺处理糖蜜废水,逐级递进进水有机

负荷量,对试验阶段的各个影响因素进行分析,评价产氢和产甲烷的特性以及 COD 去除率,以期工艺的启动提供方法和试验数据,并取得高的处理效率。

1 材料与方法

1.1 试验废水 将从哈尔滨某甜菜制糖厂取得的废糖蜜加水稀释成废水,作为产氢和产甲烷的底物。糖蜜组成成分主要为有机碳(28% ~ 34%)、糖分(48% ~ 58%)、干物质(78% ~ 85%)。可见,糖蜜废水有机物含量高,溶解性好,可生化降解能好,是一种具有代表性的碳水化合物类的有机废水。投配适量 NH₄NO₃ 和 KH₂PO₄,使废水中的 COD:N:P 保持在 1 000:5:1 左右,以保证污泥微生物在生长过程中对 N、P 营养的需求。通过投加 Na₂HCO₃,来调节进水 pH 和碱度,从而调节反应器内的 pH 维持在产氢菌和产甲烷菌适合的 pH 范围内。

1.2 接种污泥

1.2.1 CSTR 反应器接种污泥。接种污泥取自哈尔滨文昌污水处理厂二沉池排放并经脱水后的剩余污泥。污泥经稀释、过滤、沉淀、淘洗后,以配制的糖蜜废水为底物间歇曝气处理 40 d,抑制耗氢细菌(主要为产甲烷菌)的生长,形成具有一定产氢能力的厌氧活性污泥,建立优势产氢菌群。当污泥由黑色变为棕黄色,污泥絮体性能良好时,将污泥接种到 CSTR 反应器内开始驯化,接种时污泥的 TSS 为 13.0 kgTSS/m³,VSS 为 8.5 kg/m³。

1.2.2 UASB 反应器接种污泥。取得的二沉池剩余污泥,经稀释及曝气处理后,使得污泥充分混匀,恢复活性;并用 40 目的筛子进行淘洗,以去除污泥中的非有机体杂质,然后作为种泥置入反应器内,进行反应器的启动和运行试验。加入 UASB 反应器的污泥浓度为 20.48 kgTSS/m³、13.51 kgVSS/m³。

基金项目 黑龙江省自然科学基金(E201354)。

作者简介 刘瑞娜(1987-),女,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向:水污染控制工程与资源化。*通讯作者,教授,博士生导师,从事水污染控制工程与生物能源的研究。

收稿日期 2013-09-23

1.2.3 好氧池污泥。接种污泥取自本试验室处理生活污水的好氧反应器回流污泥,接种浓度为 $7.3 \text{ kgTSS}/\text{m}^3$ 、 $2.5 \text{ kgVSS}/\text{m}^3$ 。

1.3 试验装置 采用 CSTR_H-UASB_{Met} 联产系统和多级好氧反应器串联运行(图 1)。CSTR 反应器由有机玻璃制成,内设气-液-固 3 相分离装置,为反应区和沉淀区一体化结构,有效容积为 11 L,沉淀区为 5.5 L。作为产氢的试验装置,糖蜜废水开始以有机负荷 $4\,000 \text{ mgCOD}/\text{L}$ 连续泵入 CSTR 反应器,控制 HRT 为 6 h ^[16]。待反应稳定后,依次将有机负荷升至 $5\,000$ 、 $6\,000$ 、 $8\,000$ 、 $10\,000 \text{ mgCOD}/\text{L}$,分别考察各个反应参数的变化和氢气产量。UASB 反应器也是由有机玻璃制成,

有效容积为 15 L,其反应区和 3 相分离区的容积比为 3:1,反应区高径比为 10:1。人工调节 CSTR 的出水 pH 为 7.0~8.0 后,作为产甲烷的进水,保持 HRT 为 13 h 运行仪器^[17]。CSTR 和 UASB 反应器外壁均由电热丝缠绕加热保温,并通过温控仪将内部混合液的温度控制在 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。好氧反应器有效容积为 10 L,由隔板分为 5 个格室,各格室间由隔板上的上下交错圆孔相通,UASB 的出水依次流过 5 个格室形成良好推流,利用传统的活性污泥法,进一步降解废水。沉淀池为竖流沉淀池,直径 10 cm,高 72 cm。沉淀池污泥回流到好氧反应器的首端。

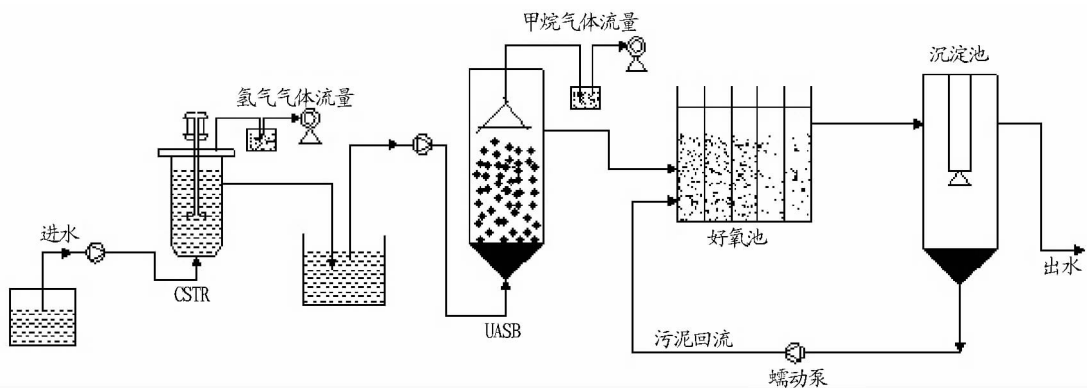


图 1 两相厌氧 CSTR-UASB 系统+好氧工艺流程

反应装置系统建立后,保持 CSTR 发酵制氢反应器内部的泥水混合液温度为 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$,HRT 为 6 h,进水 pH 为 7.0~8.0,以分步提高有机负荷(OLR)的方式启动。将 CSTR 反应器的出水 pH 人工调节至 7.0 左右,作为 UASB 反应器的进水,并保持温度为 $(37 \pm 1)^\circ\text{C}$,HRT 为 13 h,欲在 UASB 反应器内培养出具有完整甲烷发酵功能的絮状悬浮微生物体系。在常温下启动好氧池的 5 个格室,溶解氧浓度为 $2 \text{ mg}/\text{L}$ 以上,保证充足的停留时间,为有机物降解提供充足的溶解氧和接触时间。

1.4 分析方法 试验的主要分析项目有 pH、碱度、COD、生物量(MLSS 和 MLVSS)、挥发酸,气体含量和气体成分等。各常规监测项目采用国家标准方法检测^[18]。pH 和 ORP 的测定采用 pHS-25 酸度计,分别以 pH 复合电极和氧化-还原电极测定;进水及出水 COD 采用 COD-571 型化学需氧量测定仪测定;生物气体体积采用 LML-1 型湿式气体流量计计量;气体产物及组分采用 GC-7890 II 型气相色谱仪,以 TCD 检测器测定,色谱柱选择以 TDX-01(60-80 目)为担体的 $2 \text{ m} \times 3 \text{ mm}$ 的不锈钢填充柱,以氮气为载气,流速为 $40 \text{ ml}/\text{min}$;液相末端产物(VFAs)组分及含量采用 GC-7890 II 型气相色谱仪以 FID 检测器测定,色谱柱选择以 GDX-103(60-80 目)为担体的 $2 \text{ m} \times 3 \text{ mm}$ 的不锈钢柱,以氮气为载气,流速为 $30 \text{ ml}/\text{min}$ 。

2 结果与分析

2.1 产氢性能 由表 1 可知,在启动初期,进水 COD 浓度为 $4\,000 \text{ mg}/\text{L}$,微生物竞争底物,产生能量、获得适宜的生长生

态位,是厌氧活性污泥对底物的选择和适应的过程^[19],此阶段该系统表现为混合酸发酵,酸化率逐渐升高。随着 COD 浓度的提高,在 30~53 d,出水中丁酸含量最高,达 $509.7 \text{ mg}/\text{L}$,形成丁酸型发酵,此阶段酸化率为 50% 左右。在运行至 60 d 时,液相末端产物中乙醇含量快速升高,且随着 COD 浓度的提高,其含量也趋于稳定,约占挥发酸总含量的 55.7%,产氢能力不断加强,说明此时以产氢、产乙酸、产乙醇为主的优势菌群已在反应体系内确立。从第 60 天开始,系统一直保持乙醇型发酵,生物制氢系统中乙醇和乙酸的含量约占挥发酸总量的 78%,而丙酸、丁酸和戊酸的含量均低于 15%。在此阶段,酸化率达到最大值 66.14% 后,随有机负荷的升高反而下降,在 40%~50% 之间波动,说明在挥发酸的浓度达到一定数值后,酸化过程很难再深入进行。

表 1 CSTR 反应器出水挥发酸及酸化率

进水 COD 浓度/ 度//mg/L	乙醇 mg/L	乙酸 mg/L	丙酸 mg/L	丁酸 mg/L	酸化率 %
4 000	298.7	298.4	135.6	273.3	42.5
5 000	474.9	337.1	107.3	509.7	51.7
6 000	994.0	448.5	107.2	261.2	66.1
8 000	1 084.9	491.3	144.7	336.1	48.0
10 000	1 119.2	611.3	164.4	322.3	40.8

由图 2 可知,在启动初期,由于微生物的主要生理功能是产生能量,完成自身的快速增长^[20],所以代谢主要是能量合成,氢气产量很少,几乎检测不出。第 50 天后,产酸产氢菌适应糖蜜底物后,产氢速率随着负荷的升高而明显增加,产氢量平稳上升。第 117 天,CSTR 反应器获得最大产氢速

率为 $4.9 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 之后稳定运行期间产氢速率平均为 $4.6 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 氢气体积含量占发酵气的 48% ~ 59%。

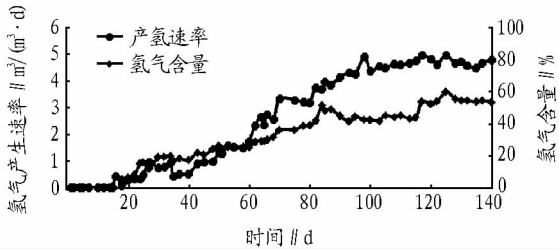


图2 氢气产生速率及含量

2.2 产甲烷性能 由图3可知, 由于UASB反应器启动慢, 在前60 d, 甲烷产率不到 $2 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{d}$, 含量在30%左右波动。从第66天, 随着COD浓度的加大, 由于挥发性脂肪酸的积累, 甲烷含量降低。但由于CSTR反应器为产甲烷菌群提供了适宜的基质, 提高了系统的抗冲击能力, 运行到75 d, 甲烷产生速率出现了一个明显的上升阶段, 但在第90 d 出现 $7.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的峰值后又稍有下降。此后, 产甲烷速率随COD浓度增加有小幅度的下降, 但很快恢复到稳定产甲烷的能力。当进水COD浓度为 $10\,000 \text{ mg/L}$ 时, 甲烷最大产生速率达 $10.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 平均占总发酵气体的73.5%。

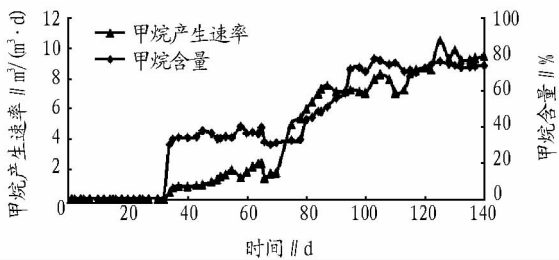


图3 甲烷产生速率及含量

pH及ORP的变化会影响微生物群落的组成, 继而影响产氢产甲烷的发酵类型^[21]。结合表1和表2可知, 在该试验条件下, 丁酸发酵发生在pH为4.3~4.5, ORP值为-350 mV左右; 而乙醇型发酵的ORP值为-425 mV以下, pH为4.1~4.3; 当ORP大于-300 mV时, 反应体系呈混合酸型发酵, 此时pH为4.6~5.0。试验结果还表明, 随着COD浓度的升高, 系统pH呈下降的趋势, 而随着碱度体系的形成及完善和产酸产氢优势菌群的建立, pH稳定在一定范围内, 表现为乙醇型发酵。说明pH和ORP制约着发酵类型, pH降低有利于向乙醇型发酵转化。而UASB产甲烷系统在进水pH维持在7.0左右时, 其出水pH一直稳定在6.8~7.2。90 d后形成典型的乙醇发酵, 其ORP值稳定在-450 mV, 说明产甲烷菌群对氧的要求更为严格。

2.3 COD去除率 由图4可知, 在反应初期, 由于未成功驯化出产酸和发酵细菌, 好氧池内絮状的活性污泥微生物菌群生长旺盛, 能很好地降解易生化的有机物质, 并提高污泥的活性^[22], COD去除率可达95.86%, 这个阶段有机物的去除主要依赖于好氧池的活性污泥。运行30 d后, CSTR反应器内产酸产氢菌群数量和活性得以恢复, 使CSTR+UASB的COD去除率逐渐升高。运行65 d后, 产甲烷菌繁殖速度加

表2 CSTR-UASB反应系统运行参数

时间 d	pH		ORP//mV	
	CSTR 出水	UASB 出水	CSTR 反应器	UASB 反应器
0~30	4.6~5.0	6.70~6.91	≥ -300	-240~-300
30~65	4.3~4.5	6.79~7.00	-350	-330~-390
65~90	4.1~4.3	6.68~7.01	-380~-425	-400~-450
90~115	4.1~4.2	6.80~7.12	≤ -425	-450~-460
115~140	4.1~4.2	6.80~7.20	≤ -425	-450~-460

快, 能很好地利用产酸产氢反应器(CSTR)降解生成的乙酸、丁酸、乙醇等小分子有机酸^[23]。出水COD迅速下降, COD去除率也得到很大的提高。从第80天开始, 尽管进水的有机负荷不断提高, UASB的出水COD降至 $1\,200 \text{ mg/L}$ 以下, 最低可达 476 mg/L , 去除率最高可升至94.29%。这说明将CSTR-UASB反应器串联起来, 可以提高系统的抗冲击能力, 提高整个系统的稳定性。在整个试验过程中, COD总去除率稳定在95%以上, 经好氧池处理后最后的出水COD稳定在 400 mg/L 以下。但后期好氧池对COD去除的贡献不大, 这说明两相厌氧CSTR-UASB系统对有机物具有高效降解作用, 剩余的COD已基本不能被生物利用。

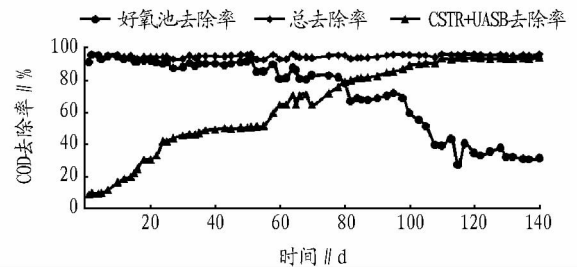


图4 COD去除率变化

3 结论

(1) CSTR-UASB制氢制甲烷系统先后经历了混合酸型发酵、丁酸型发酵, 最终形成乙醇型发酵, 乙醇和乙酸的含量占挥发酸总量的78%以上。UASB产甲烷反应器在稳定运行后呈乙醇型发酵, 进水COD为 $10\,000 \text{ mg/L}$ 时, 总VFAs仅为 535.8 mg/L 。

(2) CSTR_H-UASB_M联产系统提高了氢气、甲烷的产生速率和含量, 氢气最大产生速率为 $4.6 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 占总发酵气体的48%~59%; 甲烷最大产生速率为 $10.5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 占总发酵气体的73.5%。

(3) pH和ORP共同制约着发酵类型, 产甲烷菌群对氧的要求更为严格。

(4) 产氢反应器CSTR启动时间短, 25 d左右, 稳定后COD去除率维持在42%。产甲烷反应器UASB可以在60 d形成具有完整甲烷发酵过程的絮状悬浮厌氧活性污泥系统, CSTR+UASB的COD去除率最高达92.29%。在可生化性有机物浓度低的情况下, 好氧池对COD的处理效果不明显, 整个系统抗冲击能力强, 处理效能好, COD总去除率维持在95%以上。

(下转第12124页)

生态系统的良性循环。

(12)河段 F——生态保障带。经过生态净化系统,最终进入渭河,成为渭河优质的补充水源。

(13)河段 G——输水廊道:连接皂河生态净化系统和调蓄库塘的纽带;沿线商住、休闲的良好场所;构建景观小品,展现生态魅力的有力载体。

东皂河的治理原理同西皂河,经过河流生态廊道-生态库塘多级串联系统,大大削减污染负荷。改善河网水质,通过构建河道水生系统并形成良性循环,可提高水文化综合效应,使得河水主要水质指标从污水处理厂一级 B 出水达到优于(GB3838-2002)IV类标准。

5 结论

笔者设计的工艺对皂河进行生态治理,最终既满足接纳水体对水质的要求,又实现水体的生态提升、景观提升功能。皂河通过生态系统的构建,将增加生物多样性,提升景观水品质,提高清水空间,增加经济效益,为城市居民提供一个更

好的生活环境;同时为北方河流治理提供了更丰富的理论知识储备。对北方河流进行生态治理与修复,使其水体得到修复,实现景观功能,“以河流生态反应器为指导思想,近自然构建河道生态系统,实现水质净化、水质持续改善和生态构件、景观美化相统一”,成为了不二选择。

参考文献

- [1] 郑连合,王瑞玲,赵洪亮,等.北方河流与毗邻城市相互关系及综合治理[J].海河水利,2008(5):18-19.
- [2] 刘黎明,邱卫民,许文年,等.传统护坡与生态护坡比较与分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2007,29(6):528-532.
- [3] 童国璋,叶旭红.生态浮岛技术概述及应用前景[J].江西科学,2010,28(4):470-472.
- [4] 董雯,李怀恩,李家科.西安市皂河氨氮污染特征分析[J].黑龙江大学学报,2011,24(6):22-24.
- [5] 赵静,宁有丰,沈冰.西安市皂河流域降雨径流估算及其特性分析[J].黑龙江大学学报,2011,2(2):12-15.
- [6] 董浩平,黄玮.浅谈城市河流整治与景观设计[J].水电站设计,2005,2(6):48-51.
- [7] 金舒丽,袁兴中.城市河流近自然治理概念构架与治理设计[J].资源开发与市场,2005,21(3):190-205.
- [8] SHI Y C, LI S Z, LIU X J. China's bioenergy industry development roadmap[J]. Engineering Sciences, 2009, 7(2): 57-61.
- [9] LIU D, ZENG R J, ANGELIDAKI I. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process[J]. Water Res, 2006, 40(11): 2230-2236.
- [10] CHENG J, XIE B, ZHOU J, et al. Cogeneration of H₂ and CH₄ from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation[J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3029-3035.
- [11] PARK M J, JO J H, PARK D, et al. Comprehensive study on a two-stage anaerobic digestion process for the sequential production of hydrogen and methane from cost-effective molasses[J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35(12): 6194-6202.
- [12] WANG B, LI Y F, LIU R N, et al. Simultaneous coproduction of hydrogen and methane from sugary wastewater by an "ACSTR_H-UASB_{Met}" system[J]. Int J Hydrogen Energy, 2013, 38: 7774-7779.
- [13] YANG Z, GUO R, XU X, et al. Hydrogen and methane production from lipid-extracted microalgal biomass residues[J]. Int J Hydrogen Energy, 2011, 36(5): 3465-3470.
- [14] 刘文剑, 扬林, 刘淑云. 糖蜜废水处理与资源化研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(7): 39-40.
- [15] HAN W, WANG B, LIU X Y. Fermentative hydrogen production from molasses in an activated sludge immobilized bioreactor[J]. International Journal of Energy Engineering, 2012, 2(1): 28-31.
- [16] NOOPHAN P L, PAJORN P, SIRIVITHAYAPAKORN S, et al. Nitrogen removal efficiencies for two biological nutrient removal (BNR) plants in thailand: Molasses as an external carbon source for enriched denitrifying culture in a BNR process[J]. Journal of Environmental Science and Engineering, 2011, 5(10): 1245-1251.
- [17] 郭婉茜, 任南琪. 新型生物制氢反应器的运行及产氢特性[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 397-399.
- [18] RUGGERI B, TOMMASI T, SASSI G. Energy balance of dark anaerobic fermentation as a tool for sustainability analysis[J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35(19): 10202-10211.
- [19] WANG B, LI Y F, REN N Q. Biohydrogen from molasses with ethanol-type fermentation; Effect of hydraulic retention time[J]. Int J Hydrogen Energy, 2013, 38: 4361-4367.
- [20] 张振家, 王太平, 谷成. 两相 UASB 反应器处理糖蜜酒精糟液的试验研究[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(4): 29-30.
- [21] 郑淑文, 王淑莹, 张树军, 等. 两级 UASB 与好氧组合工艺处理城市生活垃圾渗滤液的启动研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(10): 88-91.
- [22] LUO G, XIE L, ZOU Z, et al. Anaerobic treatment of cassava stillage for hydrogen and methane production in continuously stirred tank reactor (CSTR) under high organic loading rate (OLR)[J]. Int J Hydrogen Energy, 2010, 35(21): 11733-11737.
- [23] FAN K S, KAN N R, LAY J J. Effect of hydraulic retention time on anaerobic hydrogenesis in CSTR [J]. Int J Hydrogen Energy, 2006, 31: 84-89.
- [24] 李萌, 程丽华, 毕学军. UASB 启动和运行过程中各影响因素分析[J]. 青岛理工大学学报, 2011, 32(6): 72-74.
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 102-226.
- [26] HAN W, CHEN H, LI Y F, et al. Biological fermentative hydrogen and ethanol production using continuous stirred tank reactor[J]. Int J Hydrogen Energy, 2012, 37: 843-847.
- [27] 白羽, 蔡体久, 韩伟. 连续流 BiohydrogenbacteriumR3sp. nov. 菌株糖蜜废水发酵产氢能力分析[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 94-100.
- [28] RUGGERI B, TOMMASI T, SASSI G. Fermentative hydrogen production from molasses wastewater in a continuous mixed immobilized sludge reactor [J]. Bioresource Technology, 2012, 110: 219-223.
- [29] 金浩, 李柏林, 欧杰. 污水处理活性污泥微生物群落多样性研究[J]. 微生物学杂志, 2012, 32(4): 1-4.
- [30] CHANDRA N R, SHEKAR REDDY, RAMARAJ H K. Biomethanisation of municipal solid waste by an aerobic fungi co-culture with methanogens: An approach to energy recovery[J]. Journal of Environmental Science and Engineering, 2010, 4(6): 60-65.

(上接第 12120 页)

参考文献