

# 木薯酒精废水高温厌氧发酵产氢研究\*

邹中海 罗刚 谢丽<sup>#</sup> 周琪

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

**摘要** 以木薯酒精废水为厌氧发酵产氢底物,以中温(37℃)厌氧颗粒污泥作为接种物,研究了高温条件(60℃)下厌氧发酵产氢的可行性;并比较了60~80℃条件下的累积产氢量、产氢速率和液相发酵产物组成,以确定温度对木薯酒精废水厌氧发酵产氢的影响以及不同温度下厌氧发酵产氢菌的代谢类型。结果表明,60℃时累积产氢量为383 mL(木薯酒精废水用量140 mL)、产氢率为70.0 mL/(以每克挥发性固体(VS)计),中温厌氧颗粒污泥适合作为高温条件下木薯酒精废水厌氧发酵产氢的接种物;从60℃升高到80℃时,累积产氢量逐渐下降,最大产氢速率逐渐降低,80℃时产氢完全受到抑制,70℃为产氢的临界点,低于70℃时厌氧发酵产氢菌的代谢类型属典型的丁酸型发酵,此过程中伴随着大量氢气产生,大于等于70℃时,正丁酸生成受到严重抑制,累积产氢量迅速降低;氢气的产生主要来自于溶解性碳水化合物的分解。

**关键词** 木薯酒精废水 厌氧发酵产氢 高温

**Studies on hydrogen production from thermophilic anaerobic fermentative of cassava ethanol wastewater** Zou Zhonghai, Luo Gang, Xie Li, Zhou Qi. (State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** The feasibility of hydrogen production from cassava ethanol wastewater with mesophilic anaerobic granular sludge as seeding sludge was studied. The effect of temperature on cassava ethanol wastewater anaerobic fermentative and metabolic pathways of microorganisms was investigated through the comparison of the cumulative hydrogen production, hydrogen production rate and liquid fermentative products at various temperatures. The results showed that mesophilic anaerobic granular sludge presented perfect efficiency for anaerobic fermentative, 140 mL cassava ethanol wastewater could produce total of 383 mL hydrogen at 60℃, given the hydrogen production rate of 70.0 mL/g. The cumulative hydrogen production was decreased with increasing the temperature from 60℃ to 80℃. 70℃ was a critical point for hydrogen production, when the temperature below 70℃, the fermentation belonged to butyrate type with higher hydrogen production, when the temperature above the 70℃, the hydrogen produced in the anaerobic fermentative was mainly from the decompose of soluble organic carbon.

**Keywords:** cassava ethanol wastewater; anaerobic fermentative hydrogen production; thermophilic temperature

研究者发现,利用厌氧发酵细菌制取氢气,不仅反应条件温和、能耗少,而且还可利用大量的有机废弃物(如污水处理厂剩余污泥、畜牧污水、淀粉等有机含糖废水等)作为底物,实现能源回收<sup>[1],[2][80],[3],[4]</sup>。

研究表明,有机物的降解途径、厌氧发酵产氢速率、微生物的生长都与温度有着密切的关系<sup>[5],[6]</sup>。YO KO YAMA 等<sup>[7][47]</sup>利用牛粪为底物进行厌氧发酵产氢,考察了温度(37~85℃)对厌氧发酵产氢率的影响,发现60℃时产氢率最大,为29 mL/(按每克挥发性固体(VS)计);TANG 等<sup>[2][84]</sup>利用养牛厂污水进行厌氧发酵产氢,发现45℃时的产氢率最大,为319 mL/(按每克COD计),当升高到55℃时,产氢率迅速下降至182 mL/(按每克COD计)。可见温度

对生物厌氧发酵产氢率有很大影响。

木薯酒精生产过程中产生的大量高浓度有机废水中含有大量的碳水化合物,呈酸性。研究表明,该废水是一种合适的厌氧发酵底物,其厌氧发酵产生气体中甲烷所占体积分数约为55%<sup>[8]</sup>。此外,在木薯酒精生产过程中,发酵得到的醪液在蒸馏塔蒸出酒精后排放的废水温度很高(一般都在90℃以上),如果采用中温条件(37℃)进行厌氧发酵处理,则需要增加冷却设备,导致处理成本增加。因此,笔者以木薯酒精废水作为厌氧发酵产氢底物,以中温厌氧颗粒污泥为接种物,研究了高温条件(60℃)下木薯酒精废水厌氧发酵产氢的可行性;鉴于木薯酒精废水排放时的温度在90℃以上,比较了60~80℃条

第一作者:邹中海,男,1986年生,硕士研究生,研究方向为水污染控制与资源化。<sup>#</sup> 通讯作者。

\* 拜耳-同济可持续发展基金项目;国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2008ZX07316-002)。

件下的累积产氢量、产氢速率和液相发酵产物分布,确定了温度对厌氧发酵产氢的影响以及不同温度下厌氧发酵产氢菌的代谢类型。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

木薯酒精废水取自江苏太仓新太木薯酒精厂,为蒸馏塔排放废水。水样的各项指标如表1所示。为防止水样变质,将水样储存在4℃的冰箱中备用。

表1 木薯酒精废水的各项指标

Table 1 Characteristics of cassava ethanol wastewater

指标	质量浓度(或数值)范围
总 COD(TCOD)/(g·L <sup>-1</sup> )	50.5 ±0.4
总固体(TS)/(g·L <sup>-1</sup> )	47.9 ±0.4
挥发性悬浮固体(VSS)/(g·L <sup>-1</sup> )	39.4 ±0.7
总碳水化合物/(g·L <sup>-1</sup> )	28.2 ±1.4
溶解性碳水化合物/(g·L <sup>-1</sup> )	4.5 ±0.9
溶解性蛋白质/(g·L <sup>-1</sup> )	5.7 ±0.1
pH	4.1 ±0.1
温度/℃	>90

接种污泥为取自该厂升流式厌氧污泥床(UASB)的中温(37℃)厌氧颗粒污泥。经检测,接种污泥中挥发性悬浮固体(VSS)质量浓度、总固体(TS)质量浓度和pH分别为42 g/L、70 g/L和7.5。接种前将接种污泥于90℃水浴加热1 h以抑制产甲烷菌的活性。

### 1.2 试验设计

反应在250 mL的血清瓶中进行。先在血清瓶中加入40 mL经过高温预处理的厌氧颗粒污泥和140 mL木薯酒精废水,加入蒸馏水定容至200 mL,再用2 mol/L的HCl溶液或2 mol/L的NaOH溶液调节pH至6.0。用氮气驱除瓶中残余的氧气后,迅速用橡胶塞将瓶密封,置于水浴摇床中,在设定温度(先分别调节至37、60℃,再进一步调节至65、70、75、80℃)下进行厌氧发酵,摇床的震荡速率设为150 r/min。反应过程中产生的气体用集气袋收集,定期用注射器量取气体体积。每批试验均重复3次。

### 1.3 分析方法

反应一定时间后,取出适量血清瓶中发酵液置于离心机中,于3 500 r/min离心10 min,用0.45 μm滤纸过滤,以过滤液测定溶解性碳水化合物、溶解性蛋白质、溶解性总有机碳(DOC)、挥发性脂肪酸(VFA)、乙醇以及pH。溶解性碳水化合物采用苯酚/硫酸法测定;溶解性蛋白质采用福林/酚法测定;DOC采用TOC-5000型总有机碳分析仪(日本Shimadzu公司)测定;VFA、乙醇用HP5890II型气相

相色谱仪(日本Shimadzu公司)测定;气体组分采用GC-14B型气相色谱仪(日本Shimadzu公司)测定;pH采用620型pH计测定。

### 1.4 动力学分析

采用修正的Gompertz方程<sup>[9]</sup>(式(1))对木薯酒精废水厌氧发酵产氢过程进行动力学拟合。

$$H(t) = P \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m \cdot e}{P}(-t) + 1\right]\right\} \quad (1)$$

式中:H(t)为累积产氢量,mL;P为最大产氢量,mL;R<sub>m</sub>为最大产氢速率,mL/h;τ为产氢滞后时间,h;t为反应时间,h;e=2.718。

使用Origin软件对试验数据进行非线性回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高温和中温条件下的累积产氢量、产氢率比较

高温(60℃)和中温(37℃)条件下,木薯酒精废水厌氧发酵的累积产氢量变化曲线如图1所示。由图1可见,高温条件下木薯酒精废水在反应初期的13 h内未产氢,13 h后产氢量迅速增加,45 h时累积产氢量达到最大,为383 mL;中温条件下累积产氢量变化曲线与高温条件下相似,最大累积产氢量为376 mL;高温条件下的累积产氢量比中温条件下提高了1.9%。经计算,高温和中温条件下,木薯酒精废水厌氧发酵的产氢率分别为70.0、68.7 mL(均以每克VS计)。GUO等<sup>[10]</sup>用经过酸预处理的啤酒酒糟作为厌氧发酵产氢的底物,以堆肥后的牛粪作为接种物,测得在36 h时的产氢率为68.6 mL(以每克VS计)。KIM等<sup>[11]</sup>用餐厨垃圾作为厌氧发酵产氢的底物,以消化污泥为接种物,测得在35 h时的产氢率为62.6 mL(以每克VS计)。而本研究未对木薯酒精废水做任何预处理,在高温条件下仍可获得如此高的产氢率,且在反应生成的混合气体中,

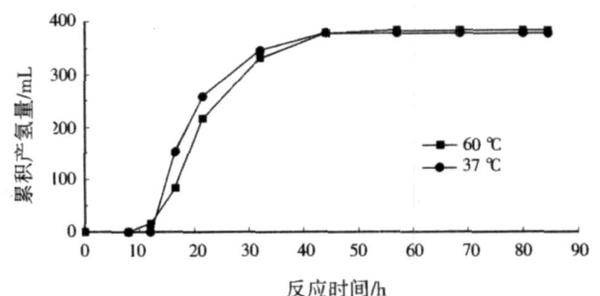


图1 高温(60℃)和中温(37℃)条件下累积产氢量随反应时间的变化曲线

Fig. 1 The cumulative hydrogen production under mesophilic 37℃ and thermophilic 60℃ condition

氢气所占体积分数为 36%~58%,表明木薯酒精废水是高温厌氧发酵产氢的合适底物。

在高温条件下,发酵液中所含溶解性碳水化合物、溶解性蛋白质质量浓度随反应时间的变化如图 2 所示。由图 2 可见,高温条件下反应进行 84.5 h 后,溶解性碳水化合物的降解率为 71.2%,而溶解性蛋白质降解率仅为 34.7%,说明氢气的产生主要来自于含糖物质的分解。

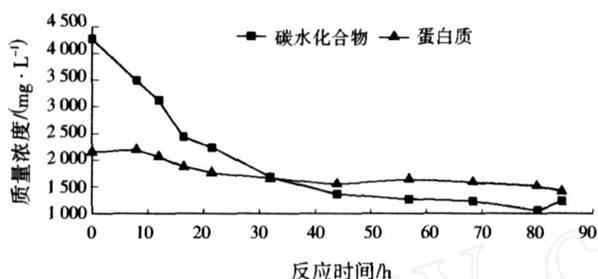


图 2 高温(60 °C)条件下发酵液中溶解性碳水化合物和溶解性蛋白质质量浓度随反应时间的变化

Fig. 2 The carbohydrates and protein concentrations under thermophilic 60 °C condition

对高温、中温条件下木薯酒精废水厌氧发酵产氢过程采用 Gompertz 修正方程进行动力学拟合,拟合相关参数如表 2 所示。由表 2 可见,中温条件下的最大产氢速率(30.3 mL/h)比高温条件下(24.0 mL/h)高 26.3%,但 2 种反应温度条件下的产氢滞后时间近似相等。YO KO YAMA 等<sup>[12]</sup>以牛粪作为接种物进行厌氧发酵产氢,得出最佳反应温度为 60 °C,而 37 °C 时的厌氧发酵产氢效果很差,这可能是由于牛粪中的中温厌氧发酵产氢菌较少,导致其在 37 °C 时的累积产氢量较低。而本研究中接种污泥为中温厌氧颗粒污泥,可能含有中温厌氧发酵产氢菌,故在 37 °C 时累积产氢量没有明显降低。

表 2 不同温度条件下累积产氢量的 Gompertz 方程参数<sup>1)</sup>  
Table 2 Modified Gompertz equation parameter values for cassava ethanol wastewater at various temperatures

温度/°C	$H(t)$ / mL	$R_m$ / (mL · h <sup>-1</sup> )	$\lambda$ / h	$R^2$
37	376	30.3	12.0	0.9 958
60	383	24.0	13.0	0.9 989
65	326	20.2	32.2	0.9 770
70	113	13.7	31.8	0.9 998
75	63	12.5	45.2	0.9 985
80	0	-	-	-

注:1)“-”为在该温度下没有检测到氢气的存在,无法得出相应数据。

### 2.2 温度对累积产氢量、产氢速率的影响

60~80 °C 条件下,木薯酒精废水厌氧发酵累积产氢量随时间的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可见,反应 60 h 后,所有温度条件下的累积产氢量都

达到最大;60、65、70、75 °C 时,累积产氢量分别为 383、326、113、63 mL;80 °C 时厌氧发酵产氢完全受到抑制。由表 2 可见,60~80 °C 时,累积产氢量、最大产氢速率均随着反应温度的升高快速降低,产氢滞后时间随着温度的升高越来越长。最大产氢速率和产氢滞后时间反映了厌氧发酵产氢菌的活性,最大产氢速率的降低和产氢滞后时间的延长说明厌氧发酵产氢菌需要更长的时间来适应外界环境的变化。故在木薯酒精废水厌氧发酵产氢过程中,控制反应温度不高于 70 °C 才能保证正常的氢气产量。但 YO KO YAMA 等<sup>[7]477</sup>利用牛粪中存在的天然菌落对牛粪进行厌氧发酵产氢试验,发现 75 °C 时仍然是产氢波峰。这可能是由于厌氧发酵产氢菌存在较大差异,对于 75 °C 是否存在厌氧发酵高效产氢菌还有待进一步研究。

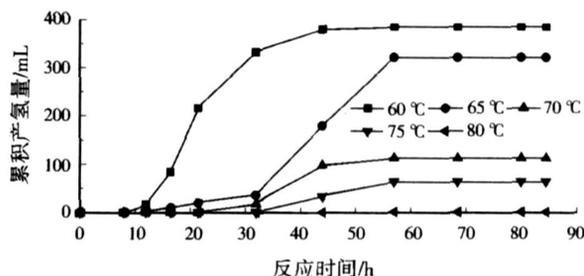


图 3 60~80 °C 条件下累积产氢量随反应时间的变化曲线

Fig. 3 Effect of temperature on cumulative hydrogen production

### 2.3 温度对液相发酵产物的影响

60~80 °C 条件下,液相发酵产物中 VFA、乙醇的质量浓度如图 4 所示。由图 4 可见,VFA 的生成量受反应温度的影响很大,60 °C 时 VFA 的质量浓度为 5 532 mg/L,75 °C 时迅速降低为 1 564 mg/L,而 80 °C 时仅为 210 mg/L。这与图 3 所示的不同温度条件下的累积产氢量比较吻合,VFA 的生成量越多,累积产氢量也越多。有研究报道乙醇型发酵对

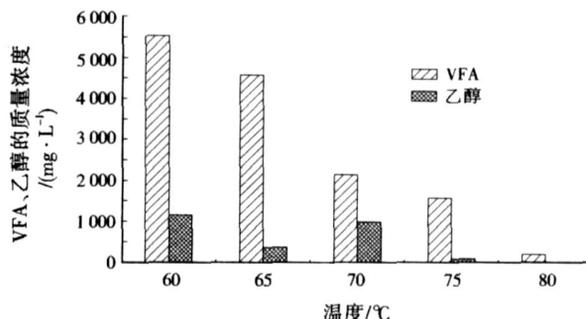


图 4 60~80 °C 条件下液相发酵产物中 VFA 和乙醇的质量浓度

Fig. 4 The metabolite concentrations of VFA and ethanol at various temperatures

产氢不利,因其发酵过程中伴随着氢气的消耗<sup>[13]</sup>。而在本研究中,乙醇的生成量与累积产氢量没有明显的相关性。

60~80 条件下,VFA的组分变化如图5所示。由图5可见,乙酸、丙酸、正丁酸是VFA的主要组分;60 时液相发酵产物中正丁酸质量浓度为4 291 mg/L,占VFA总量的64.2%,此时的累积产氢量为383 mL;大于等于70 时液相发酵产物中的正丁酸质量浓度急剧降低,70 时正丁酸质量浓度为75 mg/L,乙酸质量浓度为1 984 mg/L,乙酸占VFA总量的63.4%,75 时液相发酵产物中已检测不到正丁酸,而乙酸质量浓度为1 487 mg/L,占VFA总量的89.6%,此时的累积产氢量仅为63 mL。由此可见,由60 升高到75 过程中,厌氧发酵产氢菌的代谢类型从以丁酸型发酵为主转化为以乙酸型发酵为主,丁酸型发酵更有利于产氢。汤桂兰等<sup>[14]</sup>探讨了不同底物种类对厌氧发酵产氢的影响,同样发现厌氧发酵以丁酸型发酵为主,随着液相发酵产物中正丁酸/乙酸(质量比)的增加,氢气产量也随之增加。而YOKOYAMA等<sup>[7]478</sup>发现,60 和75 的主要液相发酵产物为乙酸,厌氧发酵产氢菌代谢类型变化不明显。而在本研究中可以明显地观察到厌氧发酵产氢菌代谢类型的变化。这可能是由于液相发酵产物与厌氧发酵产氢菌的种类密切相关,试验所用的发酵底物、接种物不同,厌氧发酵产氢菌存在差异,从而导致液相发酵产物不同。

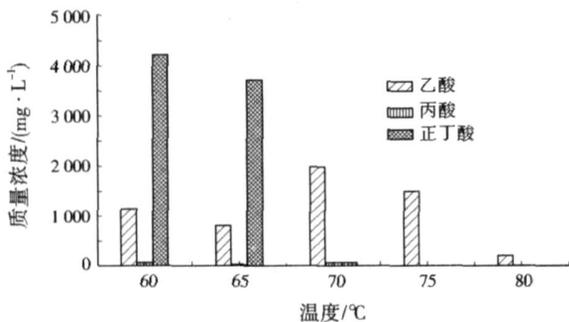


图5 60~80 条件下VFA的组分变化

Fig. 5 The composition of VFA at various temperatures

#### 2.4 温度对DOC组成和pH的影响

60、70 条件下,发酵液中DOC组成随反应时间的变化如图6、图7所示。由图6、图7可见,初始DOC质量浓度约为5 000 mg/L,DOC主要由溶解性碳水化合物、溶解性蛋白质、VFA及其他长链脂肪酸类等组成。厌氧发酵过程中伴随着CO<sub>2</sub>的产生,DOC理应下降,但木薯酒精废水中含TS量很高,反应中部分TS转化成DOC,导致发酵过程中

DOC质量浓度逐渐升高;60、70 时的DOC质量浓度变化分别为4 428~4 896、4 748~5 192 mg/L,随着温度升高,DOC质量浓度也升高;60 时初始溶解性碳水化合物质量浓度为1 710 mg/L,发酵末期为493 mg/L,溶解性碳水化合物质量浓度的降低,导致VFA生成量增加,伴随的累积产氢量较多;70 时溶解性碳水化合物的分解受到抑制,导致VFA生成量减少,伴随的累积产氢量较少,这也表明厌氧发酵过程中氢气的产生主要来自于溶解性碳水化合物的分解。另外,60 时DOC的其他组成成分的质量浓度明显降低,但70 时变化不明显,可能是由于长链脂肪酸类等物质在高温下不易分解,具体原因有待后续试验进一步研究。由此可见,木薯酒精废水厌氧发酵产氢在60~80 条件下进行时,随着反应温度的提高,厌氧发酵产氢菌的活性受到抑制,溶解性碳水化合物的分解受阻,导致累积产氢量降低。

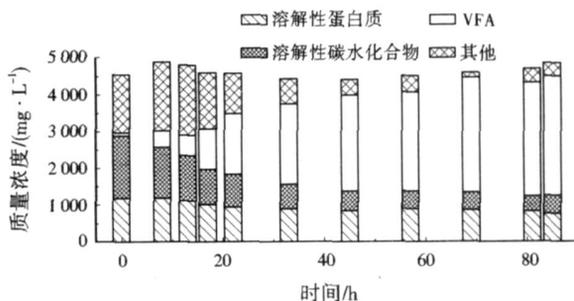


图6 60 °C时DOC的组成随反应时间的变化

Fig. 6 The composition of dissolved TOC at 60 °C

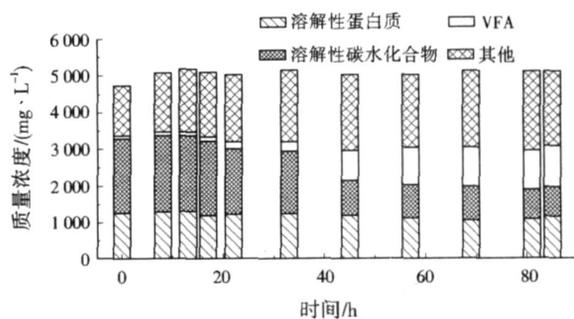


图7 70 °C时DOC的组成随反应时间的变化

Fig. 7 The composition of dissolved TOC at 70 °C

对60~80 条件下发酵液的最佳pH进行了测定,发现最终pH都低于初始pH(pH=6.0),且最终pH比较接近,为5.19~5.80。这是由于厌氧发酵初期产氢量较少,大量生成的VFA使得发酵液pH降低,同时由于木薯酒精废水中溶解性蛋白质质量浓度较高,反应中有一部分溶解性蛋白质降解生成氨氮,在一定程度上缓冲了发酵液pH的快速下降。

### 3 结论

(1) 初始 pH 为 6.0、反应温度为 60 条件下,木薯酒精废水厌氧发酵的累积产氢量最大,为 383 mL,产氢率为 70.0 mL(以每克 VS 计)。中温厌氧颗粒污泥适合作为高温条件下(60 )木薯酒精废水厌氧发酵产氢的接种物。

(2) 60~80 条件下,随着反应温度的升高,累积产氢量逐渐下降,最大产氢速率逐渐降低,80 时厌氧发酵产氢完全受到抑制,70 为厌氧发酵产氢的临界点,控制反应温度不高于 70 才能保证正常的氢气产量。

(3) 60~80 条件下,当反应温度低于 70 时,厌氧发酵产氢菌代谢类型属典型的丁酸型发酵,此过程中伴随着大量氢气产生;当反应温度大于等于 70 时,正丁酸生成受到严重抑制,累积产氢量迅速降低。

(4) 60~80 条件下,随着反应温度的升高,厌氧发酵产氢菌的活性受到抑制,溶解性碳水化合物的分解受阻,导致累积产氢量降低,厌氧发酵过程中氢气的产生主要来自于溶解性碳水化合物的分解。

#### 参考文献:

- [1] 蔡木林. 污水厂剩余活性污泥厌氧发酵产氢技术研究[D]. 北京:中科院生态环境研究中心,2004:4-5.
- [2] TANG Guilian, HUANG Jian, SUN Zhenjun, et al. Biohydrogen production from cattle wastewater by enriched anaerobic mixed consortia: influence of fermentation temperature and pH[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, 106(1).
- [3] GINKEL S V, SUNG S. Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(24):4726-4730.
- [4] ZHANG Tong, LIU Hong, FANG H H P. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic condition[J]. Journal of environmental management, 2003, 69(2):149-156.
- [5] MU Yang, ZHENG Xianjun, YU Hanqing, et al. Biological hydrogen production by anaerobic sludge at various temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(6):780-785.
- [6] ZHANG Yongfang, SHEN Jianquan. Effect of temperature and iron concentration on the growth and hydrogen production of mixed bacteria[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(4):441-446.
- [7] YOKOYAMA H, WAKI M, MORIYA N, et al. Effect of fermentation temperature on hydrogen production from cow waste slurry by using anaerobic microflora within the slurry[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 74(2).
- [8] 罗刚, 谢丽, 周琪, 等. 高温厌氧 CSTR 反应器处理木薯酒精废水研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(9):13-16.
- [9] ZWIETERING M H, JONGENBURGER I, ROMBOU TS F M, et al. Modeling of the bacterial growth curve[J]. Applied Environmental Microbiology, 1990, 56(6):1875-1881.
- [10] GUO Yong, XING Yan, FAN Maohong, et al. Biohydrogen production from beer lees biomass by cow dung compost[J].

Biomass & Bioenergy, 2006, 30(5):493-496.

- [11] KIM S H, SHIN H S. Effects of base-pretreatment on continuous enriched culture for hydrogen production from food waste[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(19):5266-5274.
- [12] YOKOYAMA H, WAKI M, OGINO A, et al. Hydrogen fermentation properties of undiluted cow dung[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, 104(1):82-85.
- [13] OH S E, VAN G S, LOGAN B E. The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(22):5186-5190.
- [14] 汤桂兰, 汤亲青, 黄键, 等. 不同底物种类对厌氧发酵产氢的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2345-2349.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期:2009-05-18)

(上接第 38 页)

(3) 将复合高铁酸盐溶液与 PAC 联合投加处理含藻水时,在 PAC 投加量为 30 mg/L、复合高铁酸盐溶液为 0.50 mg/L 时,浊度和藻细胞的去除率可分别达到 73%、90%,与单独投加 PAC 相比,两项指标的去除率提高 18%、10%,且达到相同去除效果所需的 PAC 可减少 10~20 mg/L。另外,复合高铁酸盐溶液与 PAC 联合投加对实际水体的除藻效果理想。

#### 参考文献:

- [1] 王利平,徐金妹,董旭,等. 高铁酸钾药剂处理废水的研究现状[J]. 工业水处理, 2007, 27(10):9-13.
- [2] 许良,邱慧琴. 多功能水处理药剂高铁酸钾的研制及应用研究[J]. 净水技术, 2004, 23(4):29-31.
- [3] 邓子峰,喻赛芳,胡婷婷. 高铁酸钾降解苯酚的机制研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(12):905-907.
- [4] 马军,梁咏梅,刘伟,等. 预投加高铁酸盐强化混凝去除原水中的铅、镉[J]. 中国给水排水, 2007, 23(7):48-54.
- [5] 贾汉东,孟祥茹,刘立松. 高铁酸盐溶液除臭效果的研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(2):82-84.
- [6] 樊耀亭,张峻,林琳,等. 复合高铁酸盐在焦化废水脱色中的应用研究[J]. 水处理技术, 2004, 30(1):36-38.
- [7] 弓晓峰,雷婷,武和胜,等. 高铁酸钾滤液处理垃圾渗滤液[J]. 水处理技术, 2008, 34(6):37-39.
- [8] 许巧哲,傅金祥,邹倩. 高铁酸盐复合药剂氧化助凝效能研究[J]. 供水技术, 2008, 2(4):8-10.
- [9] SCHREYER J M, THOMPSON G W, OCKERMAN L T. Oxidation of chromium( ) with potassium ferrate( ) [J]. Anal. Chem., 1950, 22(11):1426-1427.
- [10] 贾汉东,鲍改玲,孙红宾,等. 次氯酸根对高铁酸盐溶液的稳定作用[J]. 无机盐工业, 2002, 34(5):4-5.
- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:12.
- [12] 周群英,高廷耀. 环境工程微生物学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2000:7.
- [13] 贾汉东,卫世乾,鲍改玲,等. 加入阴、阳离子对高铁酸盐溶液稳定性的影响[J]. 郑州大学学报:理学版, 2006, 38(1):101-104.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2009-03-02)