

# 高温厌氧膨胀床反应器处理木薯酒精废水试验

蒋柱武<sup>1</sup>, 谢 丽<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福州 350108; 2. 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:** 实验考察了厌氧膨胀床反应器(EGSB)处理木薯酒精废水的启动、运行和基质产沼气转化特性。结果表明, 高温 EGSB 反应器接种中温颗粒污泥, 需 20 d 即可完成启动, 反应器故障停运 54d 后进行二次启动的时间仅需 10 d。EGSB 适宜的有机负荷是  $10 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  (以 COD 计), 稳定运行期间对化学需氧量(COD)的去除率在  $80\% \sim 90\%$  之间, 在标准状态下的产沼气转化率(BCR)为  $0.315 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验期间反应器内的污泥颗粒化程度良好, 直径 2 mm 以上的大颗粒污泥增长迅速。260 d 时污泥挥发性悬浮固体(VSS)与总固体(TSS)质量浓度之比  $\rho_{\text{VSS}}/\rho_{\text{TSS}}$  由接种时的 0.51 变为 0.84。启动和运行期, 出水 pH 值随着 COD 去除率的变化而波动, 可以通过系统出水 pH 大小来初步判断 EGSB 的运行状况。

**关键词:** 酒精废水; 高温厌氧膨胀床反应器; 启动和运行; 厌氧颗粒污泥

中图分类号: X703

文献标志码: A

## Expanded Granular Sludge Bed Treating Cassava Ethanol Wastewater Under Thermophilic Condition

JIANG Zhuwu<sup>1</sup>, XIE Li<sup>2</sup>

(1. College of Ecological Environment and Urban Contrustion, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The research focuses on the characteristics of the start-up, operation and methane production of the expanded granular sludge bed (EGSB) treating cassava ethanol wastewater. The results show that the start-up of the EGSB reactor inoculated with mesophilic granular sludge needs only 20 days. The second start-up needs only 10 days after 54 days' shutdown. The optimal organic load rate range of EGSB is within  $10 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , and chemical oxygen demand (COD) removal rate maintains  $80\% \sim 90\%$  during the

stable operation. The biogas conversion rate(BCR) of EGSB is  $0.315 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  under standard temperature and pressure (STP) condition. It is found that the granulation of sludge in EGSB is good and the large granules with diameter more than 2 mm grow rapidly. The  $\rho_{\text{VSS}}/\rho_{\text{TSS}}$  ratio of sludge increases from 0.51 to 0.84 after 260 d test. The pH value of the effluent fluctuates with the COD removal rate of the system, and pH can be regarded as a primary indicator of EGSB operation condition.

**Key words:** ethanol wastewater; thermophilic expanded granular sludge bed; start-up and operation; anaerobic granular sludge

工业废水中, 酒精糟液是继造纸废水之后的第二大有机污染源。据统计, 2004 年, 我国发酵酒精生产企业共 457 家, 生产能力达 418.06 万 t<sup>[1]</sup>, 其中以薯类为原料的酒精占 22.89%。常规生产工艺每生产 1t 酒精排出的废水约 12~15 t。木薯酒精废水中含有大量的有机化合物及悬浮物, 化学需氧量质量浓度  $\rho_{\text{COD}}$  高达  $30 \sim 60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水温度高, 属于典型的高浓度有机废水<sup>[2]</sup>。

对厌氧生化反应而言, 温度是影响微生物生存及生物化学反应最重要的因素<sup>[3-4]</sup>。厌氧膨胀床反应器(expanded granular sludge bed, EGSB)作为第三代厌氧反应器的代表之一<sup>[5-6]</sup>, 处理效率高、占地小、抗冲击负荷能力强, 为高浓度有机废水的厌氧处理提供了很好的解决方案<sup>[7-8]</sup>。目前, 中温厌氧条件下应用 EGSB 处理有机工业污水的研究较多。Zhang 等<sup>[9]</sup>研究了 EGSB 处理棕榈油废液的启动与运行。反应器在  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下经过连续运行 514 d, 显示 EGSB 对棕榈油废水有较好的处理效果, 水力停留时间为 2 d, 去除率达到 91%。郭晓燕等<sup>[7]</sup>在中温条件下研究了 EGSB 处理米酒废水, 最高有机负荷

收稿日期: 2013-07-11

基金项目: 上海市科委项目(062307038); 福建省教育厅基金(GY-Z11047)

第一作者: 蒋柱武(1974—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制。E-mail: jiangzhuwu@126.com

(organic loading rate, OLR) 达到  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  (以 COD 计), COD 去除率在 70% 左右. 相对中温条件, 高温厌氧处理的温度范围达到  $55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ . 与中温厌氧反应相比, 高温厌氧细菌的代谢速率可以比中温厌氧细菌的代谢速率提高 50%~100%<sup>[10]</sup>, 但高温厌氧比中温厌氧对温度的变化可能更为敏感<sup>[11]</sup>. 目前国内外对高温条件下 EGSB 的研究还不多.

因为处理高浓度有机工业污水的厌氧反应器的稳定运行和产沼气转化率对控制出水水质、节能降耗和回收能源具有重要意义, 本课题针对木薯酒精废水的特点和处理现状, 综合文献和实际情况, 对 EGSB 在高温条件下处理木薯酒精废水的可行性进行了深入研究, 主要考察了高温 EGSB 的启动与稳定运行情况, 对高温颗粒污泥的相关性质和产沼气效率进行了分析, 研究结论可为该类企业的污水处理提供理论依据和设计参考.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验废水和接种污泥

木薯酒精废水取自广西某酒精厂, 废水总化学需氧量质量浓度  $\rho_{\text{COD}}$  为  $(50.5 \pm 0.4) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解性  $\rho_{\text{COD}}$  为  $(25.4 \pm 0.4) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 总悬浮固体 (TS) 质量浓度  $\rho_{\text{TS}}$  为  $(47.9 \pm 0.4) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 挥发性固体 (VS) 质量浓度  $\rho_{\text{VS}}$  为  $(39.4 \pm 0.7) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 为  $4.1 \pm 0.1$ , 水温大于  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . 将原水静止沉淀, 取上清液按比例稀释后作为 EGSB 的进水, 接种污泥取自该酒精厂中温上流式厌氧污泥床反应器 (UASB) 的颗粒污泥, 污泥中挥发性悬浮固体 (VSS) 质量浓度  $\rho_{\text{VSS}}$ 、总悬浮固体 (TSS) 质量浓度  $\rho_{\text{TSS}}$  和 pH 值分别为  $42 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $70 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  和 7.5, 接种污泥体积为 2.5 L.

### 1.2 实验装置

实验处理流程和装置见图 1. EGSB 反应器由有机玻璃制成, 反应区容积为 5 L, 反应区高度为 860 mm, 内径 86 mm, 三相分离器体积为 2.5 L, 反应器不同高度均匀分布有取样口. 恒温水浴循环控制反应器内温度为  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . 反应器的内循环由蠕动泵控制, 从反应器上部引出, 再泵入反应器底部, 初始循环比为 10:1, 稳定运行后调整为 15:1. 实验中通过调节进水 COD 浓度来调节容积负荷. 产生的沼气经水封后通过排水集气法测定体积.

### 1.3 试验方法

反应器接种颗粒污泥后, 将经稀释后的全糟厌氧发酵罐出水通过蠕动泵注入反应器内. 静置 24 h

后, 测得反应器最上层取样口处 pH 为 7.3 左右, 此后连续进水, 起始进水 COD 质量浓度为  $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 有机负荷约为  $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ . 启动期和运行期进水负荷逐步提高, 每阶段 OLR 增加  $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ .

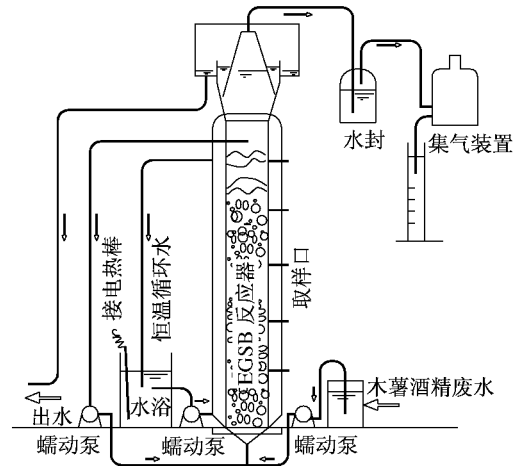


图 1 EGSB 工艺处理木薯酒精废水流程图

Fig.1 Flowchart of EGSB treatment of cassava ethonal wastewater

### 1.4 分析方法

试验中各项指标均采用标准方法测定. 液体样品在  $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  转速下离心 10 min, 上清液经  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤后测定溶解性 COD 和碱度. COD 用重铬酸钾法测定; 碱度通过酸碱指示剂滴定法确定; pH 由 pH 计测定 (英格 620 型 pH 计); 产气量采用饱和 NaCl 溶液排水集气法测定.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 EGSB 的启动与运行分析

图 2 显示了高温厌氧 EGSB 启动和整个运行过程中 COD 的去除率随有机负荷变化的情况. 在初次启动阶段 (1~20 d), 反应器内的污泥质量浓度较低, 为  $25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 随着反应器的启动成功和负荷的不断提高, 污泥质量浓度随之上升, 稳定运行时污泥质量浓度保持在  $38 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ .

#### (1) 初次启动期

第 1~20 d 为初次启动期, COD 的去除率有明显波动, 对于负荷变化敏感, 当 OLR 由  $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  提高至  $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , COD 去除率由 80% 降至 66%, 随后逐步趋于稳定, 经过 20d 的运行, OLR 提高至  $6.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 系统 COD 去除率稳定在 80% 左右.

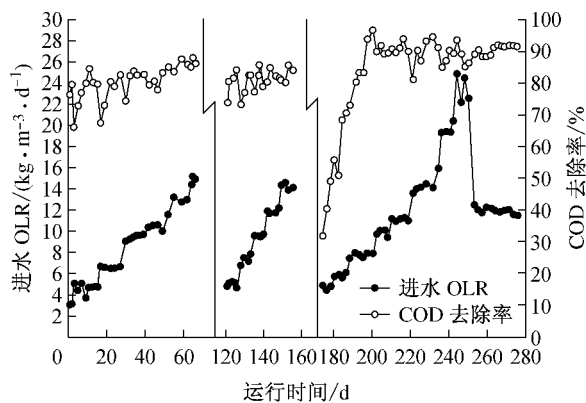


图 2 启动与运行期进水 OLR 与去除率关系图

Fig.2 Correlation between OLR and removal rate during the periods of the start-up and operation

### (2) 稳定运行期(21~66 d)

启动成功后,以  $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  的幅度逐步提高 OLR,每个负荷条件运行 1 周以上,在去除效果和各项指标稳定后继续提高负荷.结果显示,在稳定运行期,负荷的变化对去除率波动的影响逐渐降低,随负荷增大去除率也呈上升趋势.当进水 COD 质量浓度提升至  $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,OLR 达到  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ,此时 COD 去除率仍保持在 80% 以上.

### (3) 反应器的再启动和运行(121~275 d)

由于恒温加热装置损坏,在第 67~120 d 反应器停运 54 d,进水和温度控制停止.在第 121 d 对反应器进行了二次启动.二次启动<sup>[12]</sup>的意义是研究驯化成熟的厌氧污泥能否在停运一段时间后快速启动,恢复到理想的去除效率.由图 2 显示,二次启动时间较初次启动期明显缩短,仅需 10 d 左右,COD 去除率即可恢复到 80% 左右.反应器运行至第 156 d,由于泄漏造成大量污泥流失,又终止运行约一个月.通过向反应器内补充 1.5 L 接种污泥,并将进水 pH 值调至 7.0 左右,去除率恢复至 80% 时同样需要 10 余天.此后,EGSB 恢复运行并将容积负荷逐渐调整到  $10 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  范围,去除率达到 90%.

颜智勇等<sup>[13]</sup>研究了中温条件下有机负荷对 EGSB 处理高浓度有机废水的影响.实验结果显示当有 OLR 高于  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  时,进水 COD 波动将导致工艺运行不稳定.本实验稳定运行阶段 OLR 超过  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  的连续运行天数达到 20 d (第 235~254 d),反应器出水水质良好,没有出现酸化现象,去除率仍可保持在 80% 以上.这说明高温 EGSB 厌氧处理与中温相比,较高的有机负荷并不影响系统的稳定运行.

当进水 COD 质量浓度升高至  $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  以上,

OLR 高达  $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  时,去除率虽能达到 80% 以上,但随着 OLR 的继续提升,反应器的平均去除率并未随之上升,出水碱度和 pH 值却有所下降(图 3 和图 4),酸碱缓冲能力降低.白威等<sup>[14]</sup>在对高温 UASB 处理酒精废液的研究中发现,在 UASB 反应器的稳定运行阶段,反应器内合适的污泥负荷 (sludge load rate, SLR) 应保持在  $0.27 \sim 0.34 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  之间(以 COD 和 VSS 计).从本实验结果图 2 看出,当反应器的 OLR 处于  $10 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  之间时,此时的进水 COD 质量浓度范围为  $4 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,对应的 SLR 范围为  $0.25 \sim 0.36 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,反应器运行平稳,COD 平均去除率达到 90.3%.因此,综合考虑去除效率、运行稳定性和抗冲击负荷能力,OLR 控制在  $10 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  是 EGSB 处理木薯酒精废水适宜的负荷范围.

### 2.2 启动与运行过程中出水 pH 值和碱度变化

产甲烷菌的活性在酸性环境中会受到抑制,因此对于厌氧反应器而言,防止酸化是一个关键问题.启动初期,由于水解酸化反应较强,有机酸大量生成,容易引发酸化现象.系统 pH 值和碱度能及时反映厌氧消化的运行状况.如图 3 所示,启动初期,出水 pH 值和碱度波动较大,特别是前 5d, pH 值降至 7.0 以下,碱度也下降到  $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ .期间通过在进水中添加碳酸氢钠以平衡反应器内产生的有机酸,确保了正常启动.二次启动初期,碱度仍有较大的波动,但 pH 值一直较为稳定.泄露故障修复后,由于严格控制进水的 pH 值在 6.5 以上,出水碱度和 pH 值没有大的波动,有效防止了反应器的酸化,有助于反应器的恢复运行.在稳定运行中,出水 pH 值在 7.5 左右波动,维持弱碱性,出水碱度保持稳定.

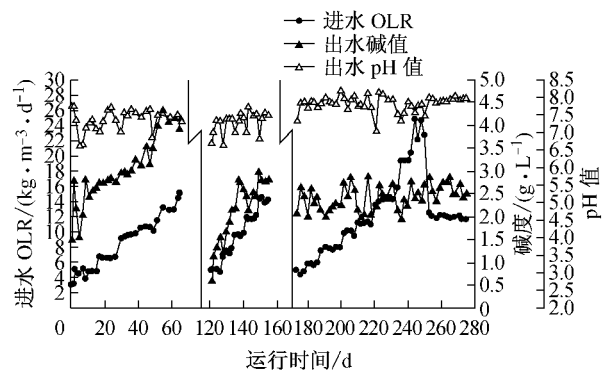


图 3 启动与运行期进水 OLR 与出水碱度和 pH 值关系图

Fig.3 Correlation between OLR and pH, alkalinity in effluent during the periods of start-up and operation

图 4 进一步显示了出水 pH 值与 COD 去除率的关系,可以看出,启动和整个运行期,出水 pH 值也随着系统对 COD 去除率的变化而波动,启动初期 COD 去除率由 80% 降至 65%,出水 pH 值则由 7.8 降低至 6.5;随着 COD 去除率的提高,出水 pH 值也随之提高. pH 值的升高与 COD 去除率的提高保持一致,因此,通过系统 pH 的变化来初步判断 EGSB 反应器的运行状况是有效的.

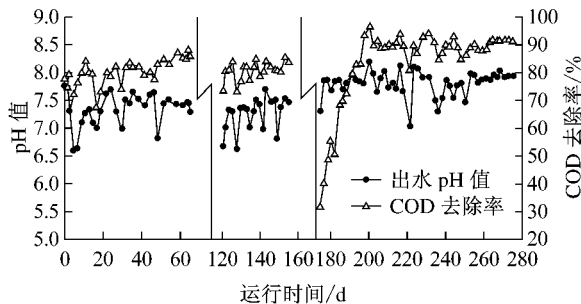


图 4 启动与运行期出水 COD 去除率和 pH 值关系图

Fig.4 Correlation between COD removal rate and pH in effluent during the period of start-up and operation

### 2.3 EGSB 的产沼气转化

沼气是厌氧反应器回收生物能源的有效方式.产气量是衡量厌氧消化效果的一个重要指标,研究反应器的产沼气转化效率,有助于了解 EGSB 处理酒精废水的经济性能<sup>[15]</sup>.

高温条件下,厌氧 EGSB 反应器的沼气产量随有机负荷的增加而以较快的速率增长.研究表明 OLR 提高至  $24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  后,反应器仍能正常运行,此时产气量达到 40L 以上,未出现产气量受抑制的现象.若认为基质中的碳水化合物全部厌氧分解转化为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ,蛋白质和含硫物质转化为  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ,可得到木薯酒精废水标准状态下的理论产沼气转化率 (biogas conversion rate, BCR) 为  $0.465 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (以 COD 计).

为研究 COD 负荷与 EGSB 反应器实际产气量的关系,将不同负荷下单位反应器容积的日产气量和对应的 COD 去除负荷作图,拟合后得线性关系的直线,其斜率即为去除单位质量 COD 的沼气产量,即为 EGSB 的实际产沼气转化率.图 5 为第 202~275 d 稳定运行期反应器单位有效容积的日产气量和对应的 COD 去除负荷图.由图得高温 EGSB 在稳定运行期的 BCR 为  $0.377 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,合标准状态下的 BCR 为  $0.315 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,小于理论值.这是因为实际条件下 COD 的平均去除率为 85% 左右,被去除

的 COD 除一部分转化为沼气外,另有一部分用于反应器内微生物增殖,所以实际产沼气转化率稍低于理论值. Pereira 等<sup>[16]</sup>也研究了中温 EGSB 反应器处理含油酸废水时的产沼气转化情况,产沼气转化率高于本实验的结果,分析其原因,应该是高温条件下厌氧微生物增殖速率高于中温条件,用于产沼气的基质比例降低,造成反应器的产沼气转化率有一定下降.

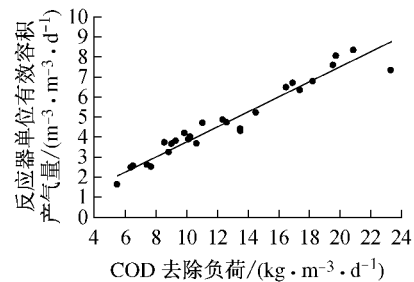


图 5 EGSB 反应器在 202~275 d 的 BCR 求解图

Fig.5 Curve fitting for BCR of EGSB during 202~275 d

### 2.4 EGSB 颗粒污泥的粒径分布与生物相

成形的较大颗粒污泥能停留在反应器内而不随出水流失,是厌氧反应器稳定高效运行的基础.对高温 EGSB 在启动和运行各时期的颗粒污泥进行粒径分布分析可知,直径大于 2 mm 的颗粒污泥随着反应器的运行所占比例增长最快,个别颗粒粒径超过 5 mm,较小粒径的颗粒污泥占比变化不大.这种现象说明,反应器内的微生物在运行期间较好地利用了进水中的有机物,颗粒污泥的生长状况良好,颗粒污泥在高温 EGSB 反应器内具有较强的稳定性,颗粒化形态完好.

在高温条件下,颗粒污泥中微生物生长迅速,污泥  $\rho_{\text{vss}}/\rho_{\text{TSS}}$  相应改变.在接种入 EGSB 反应器后,经过高温驯化和运行, $\rho_{\text{vss}}/\rho_{\text{TSS}}$  由接种污泥的 0.51 上升至 0.84 (运行第 260 d 时),说明厌氧污泥对酒精糟液的适应性强,经过长期运行,生物活性显著提高.进一步通过扫描电镜 (SEM) 放大 10 000 倍拍摄颗粒污泥表面微生物的照片,可以观察到颗粒表面和剖面的微生物状况.图 6 和图 7 分别是中温接种污泥和试验第 260 d 时取出的高温颗粒污泥的表面和剖面照片.从污泥表面看到,那些外形像圆棍、端头平整、成竹节状、直径在  $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$  间、呈束状或分散生长,能形成较长丝状体的生物体应为颗粒污泥中广泛存在的索氏产甲烷丝菌 (Methanotrix soehngenii),其革兰氏染色呈阴性.从颗粒污泥剖面图看,运行 260d 的颗粒污泥破裂、缝隙较多,外层更粗糙,这种变化可能更有利于底物的转移和利

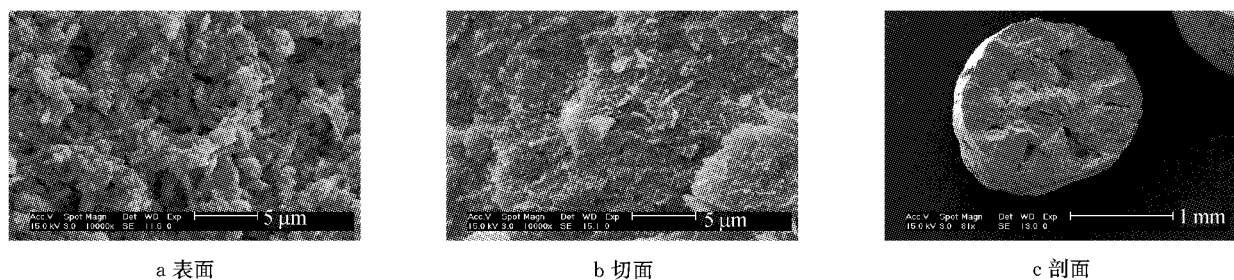


图 6 接种颗粒污泥表面和剖面微生物电镜图

Fig. 6 SEM picture of microorganism on the surface and core of mesophilic inoculated sludge

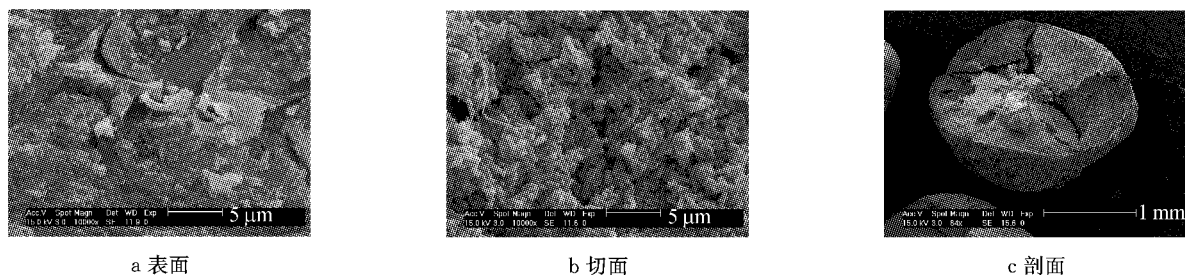


图 7 运行 260 d 颗粒污泥表面微生物电镜图

Fig. 7 SEM picture of microorganism on the surface and core of granular sludge (260 d)

用,从而提高颗粒污泥对有机底物的降解效率和产甲烷活性.

### 3 结论

(1)EGSB 反应器采用中温厌氧颗粒污泥为接种污泥,在高温(55 °C)条件下处理木薯酒精废水,反应器启动迅速,运行期间处理效果较好,适宜的 OLR 是  $10\sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ .

(2)反应器内颗粒污泥的活性保持良好,反应器停运 54 d 后,二次启动时间明显缩短,仅需 10 d 左右,COD 去除率即可恢复到 80%左右.

(3)启动和运行期,pH 值的升高与 COD 去除率的提高保持一致,可以通过系统 pH 的变化来初步判断 EGSB 反应器的运行效果.

(4)根据产气量与 COD 去除负荷的关系得出反应器稳定运行期在标准状态下的产沼气转化率(BCR)为  $0.315 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ .

(5)经驯化和长期运行后,EGSB 内直径大于 2 mm 的颗粒污泥随着反应器的运行所占比例增长,颗粒化程度好.污泥挥发性悬浮固体(VSS)与总悬浮固体(TSS)的质量浓度之比  $\rho_{\text{VSS}}/\rho_{\text{TSS}}$  由接种时的 0.51 变为 0.84,污泥活性良好.

### 参考文献:

[1] 周海峰,吕锡武,王新刚,等.酒精行业循环经济模式研究[J].

安全与环境工程,2007,14(3):1.

ZHOU Haifeng, LÜ Xiwu, WANG Xingang, et al. Research on the circular economy mode in alcohol producing industry[J]. Safety and Environmental Engineering, 2007, 14(3): 1.

[2] 陈金荣,谢丽,罗刚,等.高温 CSTR-中温 UASB 两级厌氧处理木薯酒精废水[J].工业水处理,2011,31(2):33.

CHEN Jinrong, XIE Li, LUO Gang, et al. Two-stage anaerobic treatment of cassava ethanol wastewater using thermophilic CSTR and mesophilic UASB[J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(2): 33.

[3] Bandara W M, Satoh H, Sasakawa M, et al. Removal of residual dissolved methane gas in an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating low-strength wastewater at low temperature with degassing membrane[J]. Water Research, 2011, 45(11):3533.

[4] LUO Gang, XIE Li, ZOU Zhonghai, et al. Fermentative hydrogen production from cassava stillage by mixed anaerobic microflora: Effects of temperature and pH [J]. Applied Energy, 2010, 87(12):3710.

[5] 王翔,王钊,丁丽丽,等. EGSB-MBBR 处理高浓度聚酯废水[J].化工环保,2010,30(1):48.

WANG Xiang, WANG Zhao, DING Lili, et al. Treatment of high-concentration polyester wastewater by EGSB-MBBR process[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2010, 30(1): 48.

[6] Zheng M X, Wang K J, Zuo J E, et al. Flow pattern analysis of a full-scale expanded granular sludge bed-type reactor under different organic loading rates[J]. Bioresource Technology, 2012(107):33.

[7] 郭晓燕,张振家. EGSB 反应器处理米酒废水的启动方法研究[J].环境污染与防治,2004,26(2):107.

GUO Xiaoyan, ZHANG Zhenjia. Study on the starting up of expanded granular sludge bed reactor for treating rise-wine

- wastewater[J]. *Environment Pollution and Control*, 2004, 26(2):107.
- [8] Cheng Fang, Boe Kanokwan, Irini Angelidaki. Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10):5734.
- [9] ZHANG Yejian, YAN Li, CHI Lina, et al. Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent[J]. *Journal of Environmental Sciences: English Edition*, 2008, 20(6):658.
- [10] 韩芸,李玉友,任勇翔,等. 城市污水处理厂预热处理混合污泥的高温厌氧消化特性研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(7): 1174.
- HAN Yun, LI Yuyou, REN Yongxiang, et al. Thermophilic anaerobic digestion of thermal pretreated WWTP sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7): 1174.
- [11] Alvarez J A, Armstrong E, Gómez M, et al. Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15):7051.
- [12] 邢金龙. EGSB反应器的启动运行[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(10): 128.
- XING Jinlong. Startup operations of the EGSB reactor [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(10): 128.
- [13] 颜智勇,胡勇有. 有机负荷对 EGSB 处理高浓度有机废水的影响[J]. *水处理技术*, 2007, 33(4):25.
- YAN Zhiyong, HU Yongyou. Effect of organic loading on treatment of high strength organic wastewater by EGSB [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(4): 25.
- [14] 白威,陈玉谷,王廷放,等. UASB 反应器高温处理酒精废液的研究[J]. *应用与环境生物学报*, 1997, 3(4):380.
- BAI Wei, CHEN Yugu, WANG Tingfang, et al. Study on treating distillery wastewater by UASB reactor at thermophilic conditions [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 1997, 3(4):380.
- [15] Gatze L, Salih R, Grietje Z. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment[J]. *Trends in Biotechnology*, 2001, 19(9):363.
- [16] Pereira M A, Mota M, Alves M M. Operation of an anaerobic filter and an EGSB reactor for the treatment of an oleic acid-based effluent: influence of inoculum quality [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(9):1025.

#### (上接第 829 页)

段的长短,将缺失数据分为三大类型和两类特征. 然后,当缺失数据具有特征一时,第一类缺失数据和第二类缺失数据可通过回归分析进行补偿,第三类缺失数据则需要通过精确的数值分析得到中间数据点,然后将数据进行分段,再按照第一类和第二类缺失数据的处理方法进行补偿. 当缺失数据具有特征二时,不同类型缺失的数据需要通过相应的方法确定构件在新仪器开始监测时的初始状态. 最后,通过实际钢工程监测数据分析说明,本文的数据补偿方法有效,且具有较高的精确性.

#### 参考文献:

- [1] 罗永峰,王春江,陈晓明. 建筑钢结构施工力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- LUO Yongfeng, WANG Chunjiang, CHEN Xiaoming, et al. Construction mechanism of steel structures in building engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] Kline R B. Principles and practice of structural equation modeling[M]. New York: Guilford Press, 2011.
- [3] Kim J, Curry J. The treatment of missing data in multivariate analysis[J]. *Sociological Methods & Research*, 1977, 6(2): 215.
- [4] Raaijmakers Q A. Effectiveness of different missing data treatments in surveys with Likert-type data: introducing the relative mean substitution approach [J]. *Educational and Psychological Measurement*, 1999, 59(5): 725.
- [5] Tsirikris N. A review of techniques for treating missing data in OM survey research[J]. *Journal of Operations Management*, 2005, 24(1): 53.
- [6] 庞新生. 缺失数据插补处理方法的比较研究[J]. *统计与决策*. 2012, 24: 18.
- PANG Xinsheng. The comparative study on imputation methods of treating missing data[J]. *Statistics and Decision*, 2012, 24: 18.
- [7] Rubin D B. Multiple imputation for nonresponse in surveys [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [8] Little R J, Rubin D B. Statistical analysis with missing data [M]. New York: John Wiley & Sons, 1987.