

# 生产性 UASB 反应器的中温高温交替启动运行过程

吴静, 盛飞, 陆正禹 (清华大学环境科学与工程系, 北京 100084, E-mail: wj914@263.net)

**摘要:** 处理柠檬酸废水的 UASB 反应器因所处地区季节气温相差较大, 可在中温和高温条件下交替启动运行。反应器在中温条件下启动, 串联使用的两级 UASB 反应器的 COD 去除率达到 77% ~ 86%; 当气温升高反应器内水温达到 44 °C ~ 45 °C 时, 反应器升温进入高温启动运行阶段, 两级 UASB 反应器的 COD 去除率达到 84% ~ 93%; UASB 反应器停产 38 d 后, 进行了中温再启动, COD 去除率达到 82% ~ 96%。本文报道了生产性 UASB 反应器中温、高温交替启动运行的过程, 以及中温和高温厌氧颗粒污泥的特性。

**关键词:** UASB 反应器; 中温高温交替启动运行; 颗粒污泥

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)05-05-0050

## Start-up of Full-Scale UASB Reactors

Wu Jing, Sheng Fei, Lu Zhengyu (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: wj914@263.net)

**Abstract:** The UASB reactors treating high-temperature citric acid wastewater could be started up in the alternation of mesophilic and thermophilic ranges because the local climate changed greatly by seasons. The reactors were started up in mesophilic range, and the total efficiency of the two-stage reactors reached 77% ~ 86%; when the temperature of reactors reached 44 °C ~ 45 °C, the reactors were operated in thermophilic range, and the total efficiency of the two-stage reactors reached 84% ~ 93%; the reactors were re-operated in mesophilic range after closing about 38 days, and the total efficiency of the two-stage reactors reached 82% ~ 96%. The start-up in the alternation of mesophilic and thermophilic ranges of the full-scale UASB reactors and the characteristics of mesophilic and thermophilic granular sludge were reported in this paper.

**Key words:** UASB reactors; start-up in the alternation of mesophilic and thermophilic ranges; granular sludge

处理柠檬酸废水的连云港市发酵厂废水处理站的设计水量为 700t/d, 进水 COD 为 20000 ~ 25000 mg/L, 工艺流程见图 1<sup>[1, 2]</sup>。其主体反应器为两级升流式厌氧污泥层 (UASB) 反应器, 其中有 3 个有效容积分别为 583.2 m<sup>3</sup> 的一级 UASB 反应器, 设计 COD 容积负荷为 10 kg/(m<sup>3</sup>·d) [后因厂方调整生产, 一级 UASB 反应器的 COD 容积负荷始终未达到 10 kg/(m<sup>3</sup>·d)]; 1 个二级 UASB 反应器, 有效容积为 502.2 m<sup>3</sup>。由于连云港全年气温变化明显, 致使柠檬酸生产车间排出的废水经暗沟排入调节池混合后的水温由原来的 70 ~ 80 °C 有所下降, 且水温变化较大, 8、9 月一级 UASB 反应器内水

温为 40 °C ~ 45 °C, 而其余各月在 30 °C ~ 40 °C 之间。为了节约基建投资和运行费用, 反应器的启动运行采用中温和高温交替运行方式。该项目已于 1999 年 10 月通过省级环保设施竣工验收, 并一直正常运行。

### 1 中温、高温交替启动

UASB 反应器的接种污泥为处理啤酒废水的常温好氧活性污泥, 一级 UASB 反应器的接

作者简介: 吴静 (1974 ~), 女, 博士生, 主要从事厌氧生物反应器工艺和机理研究。

收稿日期: 2001-01-19

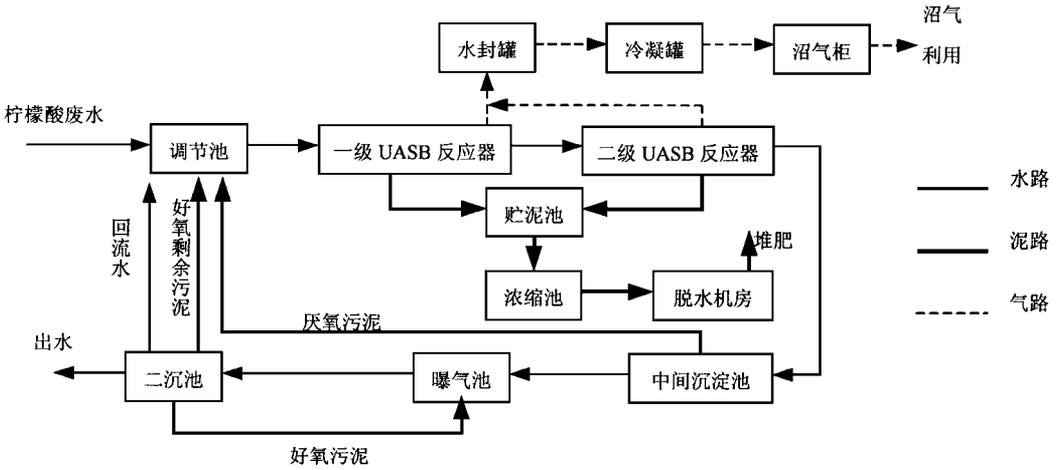


图 1 柠檬酸废水处理的工艺流程图

Fig.1 Flow diagram for treating citric acid waste water

种量为  $VSS\ 6.70\text{kg}/\text{m}^3$ , 二级 UASB 反应器的接种量为  $VSS\ 7.95\text{kg}/\text{m}^3$ <sup>[3,4]</sup>. 反应器从 1998-06-03 开始调试, 启动按反应器温度的不同分为中温启动运行期、中温升为高温启动运行期和中温再启动运行期.

### 1.1 中温启动运行

该启动阶段一级 UASB 反应器内水温为  $34\text{ }^\circ\text{C} \sim 36\text{ }^\circ\text{C}$ . 启动采用先间歇运行驯化污泥后连续运行逐步提高负荷的方式<sup>[4,5]</sup>. 第 1 至 18 天, 间歇进水, 每隔 1h 进水 0.5h. 一级 UASB 反应器进水量为  $4\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{池})$ , COD 为  $20000\text{mg}/\text{L}$  左右. 在污泥转型过程中, 出现部分污泥上浮, 反应器酸化的现象, 因此采取了增大加碱量和控制一级 UASB 反应器进水 COD 浓度的措施. 第 19 天至 30 天, 一级 UASB 反应器的进水量降为  $3\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{池})$ , 进水 COD 浓度为  $4100 \sim 5450\text{mg}/\text{L}$ , COD 容积负荷为  $0.5 \sim 0.7\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 水力停留时间为 8.1d, 3 个池子出水混合后的 COD 为  $3800 \sim 5200\text{mg}/\text{L}$ . 二级 UASB 反应器的水力停留时间为 2.3d, 出水 COD 为  $3500 \sim 4700\text{mg}/\text{L}$ . 此阶段后期, 上浮的污泥已经下沉, 被认为污泥驯化已经完成.

从第 31 天起, UASB 反应器出水部分回流, 并开始连续进水. 一级 UASB 反应器的进水量增为  $4\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{池})$ , 水力停留时间缩短至

6.1d, 二级 UASB 反应器的停留时间为 1.7d. 一级 UASB 反应器的进水 COD 浓度经稀释为  $7000 \sim 9000\text{mg}/\text{L}$ , COD 容积负荷为  $1.1 \sim 1.5\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 出水 COD 约为  $2900 \sim 4400\text{mg}/\text{L}$ , 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $2700 \sim 3800\text{mg}/\text{L}$ .

第 45 天至 56 天, 一级 UASB 反应器进水量提高至  $6\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{池})$ , 水力停留时间为 4.0d, 进水 COD 为  $8000 \sim 11000\text{mg}/\text{L}$ , COD 容积负荷为  $2.0 \sim 2.7\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 出水 COD 为  $2300 \sim 2800\text{mg}/\text{L}$ . 二级 UASB 反应器的出水 COD 为  $1200 \sim 2000\text{mg}/\text{L}$ . 第 56 天发现 UASB 反应器各池内均有粒径以 1mm 为主的光滑密实的颗粒污泥.

第 57 天至 66 天, 一级 UASB 反应器进水量增加到  $8\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{池})$ , 水力停留时间降为 3.0d, 进水 COD 浓度为  $8500 \sim 10000\text{mg}/\text{L}$ , COD 容积负荷为  $2.8 \sim 3.3\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , 出水 COD 浓度  $1800 \sim 1900\text{mg}/\text{L}$ . 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $950 \sim 1250\text{mg}/\text{L}$ . 两级 UASB 反应器总的 COD 去除率达到  $77\% \sim 86\%$  (图 2).

第 67 天至 75 天, 由于气温高, 开始时 UASB 反应器各池温度达到  $42\text{ }^\circ\text{C}$  左右, 并随时间推移, 逐步攀升至  $44\text{ }^\circ\text{C} \sim 45\text{ }^\circ\text{C}$ , 此时 UASB

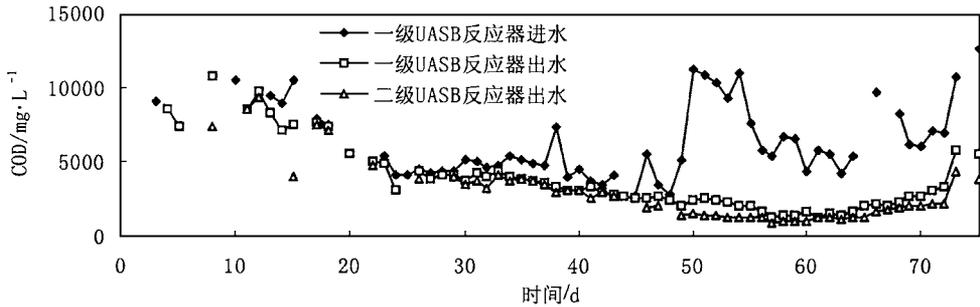


图 2 中温启动运行阶段两级 UASB 反应器进出水 COD 浓度

Fig.2 Influent and effluent COD concentration of the two-stage UASB reactors operated in mesophilic range

反应器出水 COD 升高, pH 值开始降低, 处理效率下降. 于是决定提高 UASB 反应器的运行温度, 进入高温启动期.

### 1.2 中温升为高温启动运行

从第 76 天开始, 向调节池内通高温蒸汽, 将一级 UASB 反应器温度提高至  $50^{\circ}\text{C}$  左右 (由于热交换设备效率较低, 无法进一步提高温度). 第 76 天至 78 天, 反应器进水水量和 COD 维持在中温阶段水平, 反应器出水的 pH 值由中温启动运行时的 7 ~ 8 降至 6 以下, 二级 UASB 反应器出水 COD 急剧增加达到  $5000\text{ mg/L}$  左右, 大量死亡的中温细菌的菌体漂浮在反应器表面形成约 5cm 厚的灰白色絮状物. 在采取了适当措施后, 解决了酸化问题.

第 79 天至 87 天, 一级 UASB 反应器进水量为  $8\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$ , 进水 COD 为  $4000 \sim 12000\text{ mg/L}$ , COD 容积负荷为  $1.3 \sim 3.9\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 出水 COD 为  $4000 \sim 5500\text{ mg/L}$ . 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $2800 \sim 4500\text{ mg/L}$ . 一级反应器温度为  $48^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ , 二级温度为  $44^{\circ}\text{C} \sim 49^{\circ}\text{C}$ . 第 87 天, UASB 各池都出现了粒径  $0.5\text{ mm}$  左右的高温颗粒污泥, 说明中温颗粒污泥向高温颗粒污泥的转型已经完成, 共历时约 11 天.

第 88 天至 94 天, 一级 UASB 反应器进水量为  $8\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$ , 进水 COD 为  $9000 \sim 14000\text{ mg/L}$ , COD 容积负荷为  $3.0 \sim 4.6\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 出水 COD 为  $2600 \sim 3300\text{ mg/L}$ . 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $1600 \sim 2500\text{ mg/L}$ .

一级 UASB 反应器温度为  $48^{\circ}\text{C} \sim 52^{\circ}\text{C}$ , 二级为  $44^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ .

第 95 天至 101 天, 一级 UASB 反应器进水量为  $8\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$ , 进水 COD 为  $11000 \sim 16000\text{ mg/L}$ , COD 容积负荷为  $3.6 \sim 5.3\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ . 出水 COD 为  $2600 \sim 3000\text{ mg/L}$ . 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $1300 \sim 1600\text{ mg/L}$ . 一级 UASB 反应器温度  $48^{\circ}\text{C} \sim 51^{\circ}\text{C}$ , 二级为  $44^{\circ}\text{C} \sim 49^{\circ}\text{C}$ .

从第 102 天至 120 天, 一级反应器进水量维持在  $8\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$ , 进水 COD 为  $13000 \sim 18000\text{ mg/L}$ , COD 容积负荷为  $4.3 \sim 5.9\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ , 出水 COD  $1900 \sim 3000\text{ mg/L}$ . 二级 UASB 反应器出水 COD 为  $1400 \sim 1800\text{ mg/L}$ . 一级 UASB 反应器温度为  $44^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ , 二级 UASB 反应器为  $42^{\circ}\text{C} \sim 46^{\circ}\text{C}$ . 从第 121 天开始厂方停产, 启动运行暂时停止. 两级 UASB 反应器总的 COD 去除率达到  $84\% \sim 93\%$  (图 3).

### 1.3 中温再启动运行

至第 159 天 (11 月 27 日), 厂方恢复生产 UASB 反应器重新启动. 由于已到冬季, 停止运行近 40 天的 UASB 反应器启动后池中水温在  $30^{\circ}\text{C}$  左右, 故采用中温重新启动. 第 160 天至 165 天, 一级 UASB 反应器进水量为  $4\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$ , 进水 COD 为  $12000 \sim 15000\text{ mg/L}$ . 反应器出水 pH 值下降, 二级 AUSB 反应器出水 COD 高于  $7000\text{ mg/L}$ , 各池表面又出现了较多灰白色絮状物质, 表明原先的高温细菌大量死亡.

第 166 天至 173 天, 一级 UASB 反应器进水

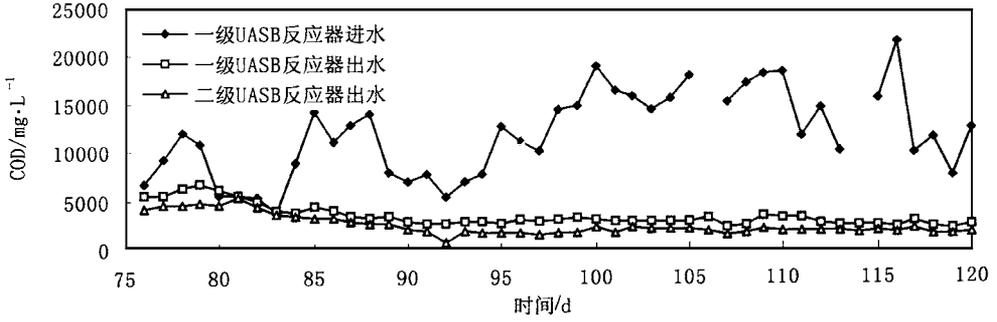


图 3 高温启动运行阶段两级 UASB 反应器进出水 COD 浓度

Fig. 3 Influent and effluent COD conc. of the two-stage UASB reactors operated in thermophilic range

流量仍为  $4 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$  ,这主要为了恢复污泥活性和提高反应器中的 pH 值 .

第 174 天至 180 天 ,一级 UASB 反应器进水流量为  $6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$  ,第 181 天至 187 天进水流量增为  $7.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$  ,第 188 天至 192 天进水流量增为  $9.3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$  .此阶段进水 COD 约为  $7200 \sim 10000 \text{ mg/L}$  ,COD 容积负荷为  $1.8 \sim 3.8 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  ,出水 COD  $3000 \sim 3800 \text{ mg/L}$  .二

级 UASB 反应器出水 COD 为  $2500 \sim 3500 \text{ mg/L}$  .

从第 192 天至 260 天 ,一级 UASB 反应器进水流量为  $9 \sim 10 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{池})$  ,进水 COD 约为  $4000 \sim 12000 \text{ mg/L}$  ,COD 容积负荷为  $3.0 \sim 8.6 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  ,出水 COD 为  $500 \sim 830 \text{ mg/L}$  .二级 UASB 反应器出水 COD 为  $400 \sim 1000 \text{ mg/L}$  .两级 UASB 反应器总的 COD 去除率为  $82\% \sim 96\%$  (图 4) .

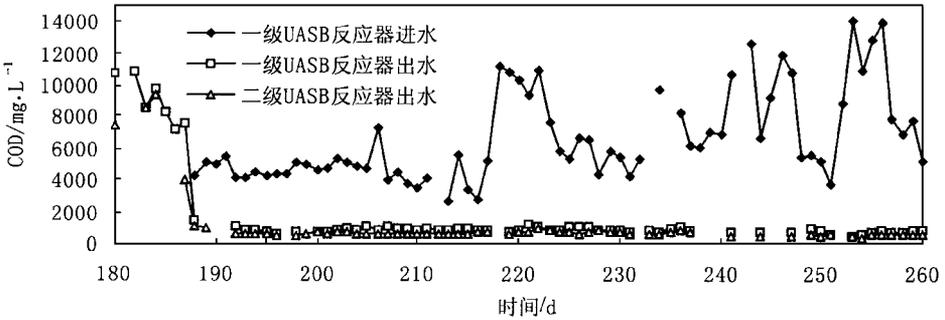


图 4 中温再启动运行阶段两级 UASB 反应器进出水 COD 浓度

Fig. 4 Influent and effluent COD conc. of the two-stage UASB reactors re-operated in mesophilic range

## 2 颗粒污泥性质的变化

中温颗粒污泥为黑色 ,不规则球形 ,表面光滑 ,粒径以  $0.5 \sim 2 \text{ mm}$  为主 ,最大粒径达到  $3 \text{ mm}$  以上 ,而高温颗粒污泥外形、颜色都未发生明显变化 ,仅粒径较小 ,只有  $0.5 \text{ mm}$  左右 ,个别超过  $1 \text{ mm}$  .表 1 列出了 2 种类型的颗粒污泥的性质比较 .高温颗粒污泥的活性高于中温颗

粒污泥的活性 .

中温颗粒污泥和高温颗粒污泥的外观、生物组成都有较大的差异 .表 2 列出了它们的差异 .

## 3 结论

(1) 对于具有较高温度的有机废水 ,在季节气温相差较大地区 ,生产性 UASB 反应器可

表 1 不同类型颗粒污泥的物理性质与生物活性比较<sup>1)</sup>

Table 1 Physical and bioactivated characteristics of different granular sludge

污泥特征	一级 UASB 反应器		二级 UASB 反应器		
	中温颗粒污泥 (第 45 天左右)	高温颗粒污泥 (第 94 天左右)	中温颗粒污泥 (第 220 天左右)	中温颗粒污泥 (第 45 天左右)	高温颗粒污泥 (第 94 天左右)
VSS/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	16.50	13.00	15.0	14.47	9.80
VSS/SS	0.59	0.52	0.56	0.69	0.50
$V_{\max, \text{CH}_4} / \text{ml} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	157.0	1285.0	364	92.0	1886.0

1) 一级 UASB 反应器接种的好氧活性污泥量为 VSS  $6.7 \text{ kg} / \text{m}^3$ , VSS/SS 为 0.70; 二级 UASB 反应器接种的好氧活性污泥量为 VSS  $7.95 \text{ kg} / \text{m}^3$ , VSS/SS 为 0.64.

表 2 不同类型颗粒污泥外观和生物组成比较

Table 2 Appearance and biological composition of different granular sludge

项目	中温颗粒污泥	高温颗粒污泥
外观	比较光滑, 有的有较大裂缝	凹凸不平, 有细小孔洞, 丝状菌较发达
生物组成	丝状菌, 球菌, 长、短杆菌等多种细菌同时存在, 没有明显的优势菌种	存有丝状菌, 球菌, 短杆菌, 长杆菌等多种细菌, 短杆菌, 球菌的优势比较明显. 存有大量的丝状物质, 具有明显的骨架作用.

在中温和高温 2 个发酵温度下交替启动和运行, 这既可节省废水处理系统的基建投资, 又可节约运行费用.

(2) 以常温条件下的好氧活性污泥作为生产性 UASB 反应器的种泥, 在中温条件下, 经历 50 ~ 60d 可培养成中温厌氧颗粒污泥. 将 UASB 反应器操作温度升为高温, 采取适当措施后, 历经 11d 左右, 反应器内的中温厌氧颗粒污泥可转化为高温厌氧颗粒污泥. 因工厂季节

性停产、设备检修或季节气温变低, UASB 反应器内的高温厌氧颗粒可在中温条件下再启动运行. 本生产装置系统总的 COD 去除率可以达到 82% ~ 96%.

(3) 高温厌氧颗粒污泥的生物活性及分解有机物能力均高于中温厌氧颗粒污泥. 中温和高温厌氧颗粒污泥内均有多种细菌, 但中温厌氧颗粒内无明显的优势菌种, 而高温颗粒污泥内存在明显的优势菌种.

#### 参考文献:

- 郝雯娣等. UASB 厌氧处理系统处理柠檬酸废水. 给水排水, 1999, 25(10): 41 ~ 45.
- 陆正禹等. 两级 UASB 好氧工艺处理柠檬酸废水. 给水排水, 2000, 26(11): 46 ~ 48.
- 刘志杰等. 处理啤酒废水的生产性 UASB 反应器常温下培养颗粒污泥的过程及工艺条件. 中国沼气, 1994, (4): 3 ~ 7.
- Weimin Wu et al. Cultivation of anaerobic granular sludge in UASB reactors with aerobic activated sludge as seed. Wat. Res., 1987, 21(7): 789 ~ 799.
- 吴唯民等. 厌氧颗粒污泥的形成及其特性的试验研究. 中国沼气, 1985, (4): 2 ~ 9.