

# 两相厌氧工艺好氧预挂膜快速启动试验研究

施悦, 任南琪, 章育铭

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090, E-mail: realshiyue@sohu.com)

**摘要:** 为克服两相厌氧反应器启动时间长的缺点, 采用填料好氧预挂膜 (10 h) 的方法来加快两相厌氧反应器的启动速度, 小试试验结果表明: 以高浓度难降解中药废水为底物、好氧污泥为种泥, 13 d 就完成快速启动. 这个启动速度比接种普通污泥快 4~6 倍 (8~12 周), 与接种成熟厌氧颗粒污泥持平 (一般 2~3 周, 个别的一周之内快速启动). 启动后产酸相 (CSTR) 出水 VFA 含量逐步提高, pH 在 4.35~4.71; 产甲烷相 (UASBAF) 出水 VFA 在启动 10 d 后下降至 500 mg/L 以下, pH 在 7.21~7.85; UASBAF 出水比填料区前出水的各项挥发酸指标都低, 这证明填料的好氧预挂膜效果良好, 从而加快了反应器的启动速度. 研究还提出了“好氧活性污泥培养——污泥沉淀浓缩——喷淋预挂膜”的填料好氧预挂膜技术方案, 该方法有助于两相厌氧工艺在中国废水处理领域的实际应用.

**关键词:** 好氧预挂膜; 快速启动; 两相厌氧工艺; 中药废水

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2006)11-1831-04

## Rapid start-up of two-phase anaerobic process after aerobic pre-coating treatment

SHI Yue, REN Nan-qi, ZHANG Yu-ming

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, E-mail: realshiyue@sohu.com)

**Abstract:** In order to accelerate start-up velocity of two-phase anaerobic process, aerobic pre-coating treatment (10 h) was used in this laboratory-scale experiment. The result demonstrated that rapid start-up could be completed within 13 d, with the high strength refractory traditional Chinese medicine wastewater as substrate and aerobic sludge as seed sludge. This start-up velocity was about four or six times higher than the general sludge (8~12 weeks) and the same as mature granular anaerobic sludge (generally 2~3 weeks, sometimes within 1 weeks). Effluent volatile fatty acids (VFA) of CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) increased gradually and pH was between 4.35~4.71 after start-up. Effluent VFA of UASBAF (Up-flow Anaerobic Sludge Bed and Anaerobic Filter) decreased to 500 mg/L after start-up 10 d and pH was between 7.21~7.85. Effluent VFA of UASBAF was lower than the effluent before filler area, which proved the aerobic pre-coating treatment had a good effect and accelerated the start-up velocity of reactor. The pre-coating process of “aerobic active sludge accumulation——sludge sedimentation and concentration——sludge spraying and pre-coating” was put forward, which was useful for the application of two-phase anaerobic process in wastewater treatment in China.

**Key words:** aerobic pre-coating treatment; rapid start-up; two-phase anaerobic process; traditional Chinese medicine wastewater

由于厌氧菌增殖慢, 适应环境能力差, 两相厌

氧反应器的启动时间一般要 8~12 周, 有的甚至长达半年、一年以上<sup>[1]</sup>. 启动慢严重制约着它在工业废水和生活污水处理系统中的广泛应用.

由于启动时接种污泥的数量、活性和性质很大程度上影响着启动速度甚至反应器运行的成败, 所以国内外学者在两相厌氧污泥接种、启动方

收稿日期: 2005-10-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2002AA601310); 黑龙江省科技攻关计划重点资助项目 (GA01C201-01).

作者简介: 施悦 (1977—), 女, 博士, 副研究员;

任南琪 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 特聘教授.

式等方面进行了不少研究. 国外一般的结论认为接种厌氧颗粒污泥可以大大提高启动速度, 启动速度可以达到 2~3 周, 有的甚至一周就可完成启动. 因此, 研究也主要放在了接种颗粒污泥与接种其他污泥的启动对比<sup>[2-4]</sup>和颗粒污泥的形成条件、过程上<sup>[5-8]</sup>. 然而大批量接种厌氧颗粒污泥作为启动条件是难以适应我国国情的.

国内学者为寻找经济实用的种泥、快速稳定的接种启动方法进行了多种启动方法的研究. 对于有填料型反应器启动方法有: 快速排泥法<sup>[9]</sup>, 厌氧分批式投泥启动、挂膜法<sup>[10]</sup>, 预挂好氧膜厌氧启动法<sup>[11]</sup>等. 前两种方法分别有种泥量大、接种时间较长等缺点; 预挂好氧膜厌氧启动法是根据好氧菌繁殖迅速, 易于生成膜结构的特点, 将厌氧反应器的载体, 经过一定时间的好氧预挂膜处理形成膜基后再启动, 有利于改善载体表面性能、厌氧微生物附着生长, 能够达到快速挂膜的目的. 这种方法既节省种泥, 又适于高浓度废水. 但预挂膜好氧启动法的研究非常少, 而且其结果也不尽相同, 难以指导实践. 另外, 好氧预挂膜试验的预挂膜时间过长, 且所用的都是颗粒型填料, 处理的废水都是人工配制的易降解废水.

本研究利用实验室研究方法, 以好氧污泥作为两相厌氧反应器的种泥, 探讨好氧预挂膜方法对处理高浓度难降解中药废水快速启动的速度和效果, 以期得到更快的启动速度. 在试验基础上提出好氧预挂膜工艺技术, 为克服两相厌氧工艺启动慢, 有针对性地解决快速、高效的启动提供有力依据. 试验结果对两相厌氧工艺在废水处理领域的实际应用具有深远意义.

## 1 试验材料和方法

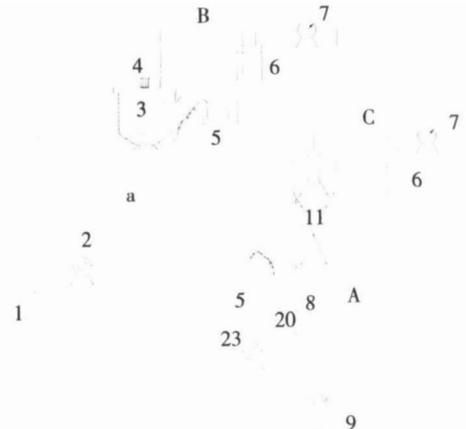
### 1.1 试验装置

如图 1, 试验用的两相厌氧反应器以有机玻璃制成: 产酸反应器为连续流搅拌槽式 (CSTR: 国家专利 ZL 98 2 40801. 3), 有效容积 9. 13 L; 产甲烷反应器为升流式厌氧污泥床式 + 厌氧生物滤池 (UASBAF), 顶部配有专利三角形自制填料 (国家专利 ZL 96 2 51960 X), 有效容积 40. 56 L.

### 1.2 接种污泥和预挂膜处理

为保证生物多样性, 本试验采用 3 种污泥混合接种: 哈尔滨制药总厂兼性厌氧污泥 (黑色), 哈尔滨中药二厂好氧污泥 (深棕色), 哈尔滨中药二厂产酸相厌氧污泥 (棕黄色), 将污泥分别进行曝气培养, 每天投入糖蜜、氮、磷等营养底物 (COD N P = 200 ~ 300 5 1) 并弃去上清液, 直至

污泥由泥浆变为絮状, 颜色由黑灰变为棕黄, 显微镜观察好氧生物种群繁多, 即微生物基本转型为好氧微生物后, 将污泥混合装入两相厌氧反应器 (质量之比为 1 : 1 : 0. 6, 污泥混合后 VSS = 18. 67 g/L), 产酸相反应器接种污泥量为有效容积的 2/3, 产甲烷相为有效容积的 5/8.



1. 水箱; 2. 水泵; 3. 产酸相反应器 CSTR; 4. 搅拌机; 5. 温控仪; 6. 水封; 7. 气表; 8. 产甲烷相反应器 UASBAF; 9. 出水水箱; 10. 温控探头; 11. 专利填料; 12. 循环水泵

图 1 两相厌氧反应器示意图

对产甲烷相的专利填料进行了好氧预挂膜处理: 将培养后准备接种的好氧污泥用蠕动泵通过穿孔管直接喷淋在填料上, 10 h 后停止喷淋, 暴露在空气中一天, 然后将填料层安装在反应器上, 该方法预挂膜时间最短<sup>[11]</sup>, 不到半天时间就可成功完成填料预挂膜. 预挂膜结束后, 将污泥接种到反应器进水, 污泥驯化、启动同时进行.

### 1.3 底物

试验以哈尔滨中药二厂高浓度难降解中药废水作为原水来稀释配制底物, 废水性质见表 1.

表 1 哈尔滨中药二厂废水性质

COD	BOD /	SS /	总氮 /	总磷 /	油 /	pH
/mg · L <sup>-1</sup>	COD	mg · L <sup>-1</sup>				
19 200	< 0. 2	418	22	16	8	6 ~ 7

### 1.4 操作条件

两相反应器的温度控制在 35 °C 左右; 水力停留时间分别为 12 h 和 53. 4 h; 进水流量  $Q = 0. 76$  L/h; 循环水泵流量  $Q = 12$  L/h; 试验期间向产甲烷相反应器中添加  $\text{NaHCO}_3$  以调整碱度, 使其出水碱度尽量保持在 2 000 mg/L (以  $\text{CaCO}_3$  计) 以上.

### 1.5 分析项目和方法

采用《水和废水检测分析方法》(第三版) 进行 COD、SS、VSS、pH 等指标的检测.

各相出水挥发性脂肪酸 (Volatile fatty acids, VFA) 利用 SP - 502 型气相色谱仪 (氢火焰检测器) 进行分析. 气相色谱分析条件: 色谱配置 2 m

×φ5 mm 不锈钢螺旋柱,内装 2% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 处理过的 GDX—103 担体(60~80 目),载气为氮气,气体流量 37 mL/min,柱箱温度 190,进样器温度 220,离子室温度 220,进样量 2 μL。测定前样品预处理:水样经离心或用普通定性滤纸过滤后,取 5 mL,同时加入 6 mol/L HCl 1 滴。

## 2 好氧预挂膜快速启动的运行效果

### 2.1 COD 去除率

以提高进水浓度的形式提高负荷,其 COD 去除情况见图 2。启动 13 d,反应器就通过了适应期,达到了稳定去除率(80.09%以上),此后提高负荷的过程中,去除率仍不断提高,出水 COD 低且稳定,因此,视为反应器 13 d 快速启动成功。

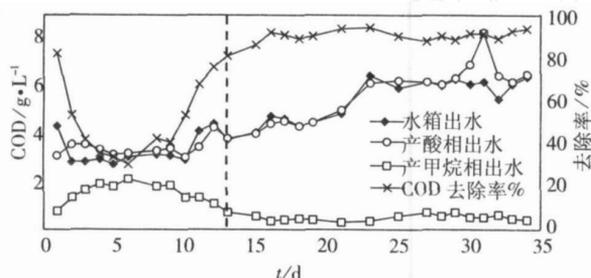


图 2 好氧预挂膜启动两相厌氧工艺的 COD 去除情况

两相厌氧反应器在 2 周之内达到快速启动,如前所述,这个启动速度只有接种厌氧颗粒污泥才能够实现,比接种普通污泥快 4~6 倍(8~12 周)。而且,本研究的底物又属于高浓度难降解工业废水,这个速度的实现就更加难能可贵。

### 2.2 发酵末端产物

试验所采用底物为中药废水,经过 GC 色谱检出含有的小分子挥发性有机物只有乙醇,乙醇含量一般占废水 COD 的 40%~50%。如图 3,经过 CSTF 产酸相的发酵 VFA 含量逐步提高,而产甲烷相出水 VFA 在启动 10 d 后就逐步下降至 500 mg/L 以下,并且在进一步提高负荷的情况下出水 VFA 相对稳定,这正是两相微生物驯化成熟,种群定居、各司其职,正常发挥作用的结果。图 4 对产甲烷相填料区前后的末端发酵产物进行了比较。废水在填料区前(图 3 中标号为 2)比经过填料区后(图 3 中标号为 1)各项挥发酸指标都要稍高,尤其以乙酸和丁酸较为明显。反应器启动 11 d 后出水中丁酸消失、15 d 后出水中丙酸消失。这证明填料的好氧预挂膜效果良好,填料上的微生物为反应器出水达标作出了巨大贡献。

### 2.3 pH

如图 5,两相出水在启动第 9 d 以后就非常稳定,产酸相 pH 在 4.35~4.71,平均 4.75;产甲烷

相 pH 在 7.21~7.85,平均 7.4。稳定的出水 pH 是两相厌氧系统正常运行的重要标志,同时也是快速启动的标志。

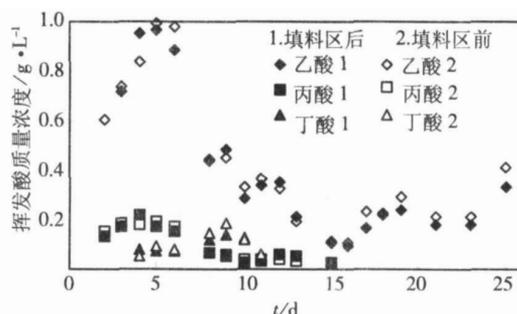


图 3 产甲烷相反应器填料区前后发酵末端产物

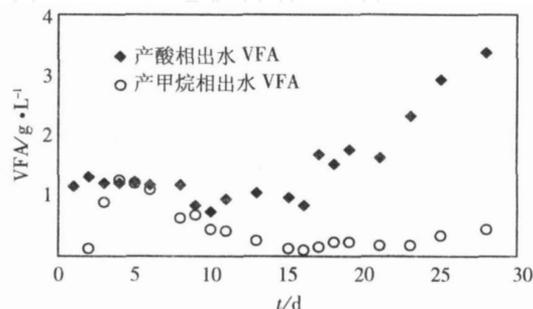


图 4 好氧预挂膜的两相厌氧反应器出水 VFA

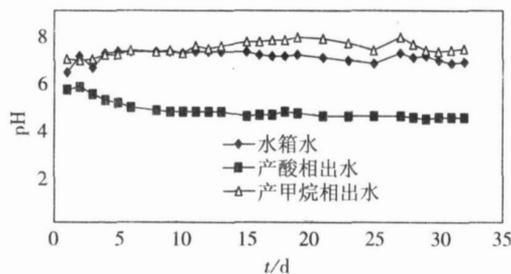


图 5 好氧预挂膜的两相厌氧反应器出水 pH

## 3 好氧预挂膜工艺技术的提出

好氧预挂膜两相厌氧工艺系统快速启动的动态试验结果表明,以好氧污泥接种并对填料的预挂膜能够大幅度提高启动速度。而且本研究的底物属于高浓度难降解工业废水,这个速度的实现就更加难得。这个启动速度是普通厌氧污泥启动难以达到的,而厌氧颗粒污泥的启动虽然能够与这个速度持平或稍快,但其昂贵的价格又使它难以广泛应用。因此,以好氧污泥接种、好氧预挂膜方法对填料进行预处理进行有填料型厌氧反应器的启动是一个快速、经济、稳定的优良启动方案。

根据小试试验,应以浓缩后的好氧污泥对填料进行反复喷淋,数小时后停止、沥干,即可形成成型的预挂膜填料。这样的挂膜方式有以下优点:

- (1) 挂膜速度快,5~10 h 即可完成;
- (2) 挂膜薄而且均匀,不易形成堵塞;
- (3) 所需污泥量小,可以循环利用;
- (4) 挂膜时氧传递效率高;
- (5) 沥干后

的填料,便于搬运,安装;(6)挂膜设备简单。

根据小试形成的预挂膜方案,提出填料好氧预挂膜工艺技术(图 6),该工艺的特点是:

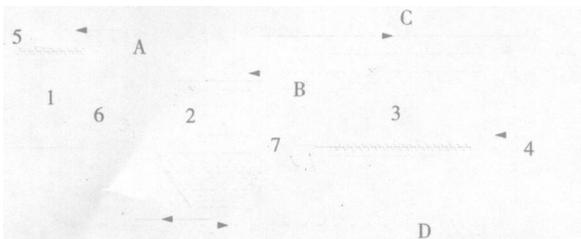
(1)形成“好氧活性污泥培养——污泥沉淀浓缩——喷淋预挂膜”一条龙工艺系统,各工艺参数可根据工作量进行灵活调整,伸缩性极强;

(2)曝气池中的活性污泥培养可以进行特殊驯化,因此填料上可以根据需要形成特殊生物膜,以处理特殊废水;

(3)预挂膜设备由污泥泵和穿孔管组成,填料可以以传送带输送的形式进行顺序预挂膜,效率高、速度快,设备简单易控制;

(4)如果污泥不需特殊驯化,预挂膜设备可以直接与城市污水处理厂的污泥系统连接或与所应用的污水处理站好氧污泥系统连接,这种利用现成的污泥培养、浓缩系统,就可以将图 6 中的工艺设备进一步减少,仅留下填料喷淋和污泥动力系统,有投资少、见效快的优点。

(5)预挂膜方法不仅可以应用于厌氧反应器中填料预挂膜,而且也可以应用于好氧接触氧化池等有填料型好氧反应器中,同样可以大大提高启动速度,减少接种污泥。



1. 填料喷淋塔; 2. 沉淀池; 3. 曝气池; 4. 培养液配置箱;  
5. 污泥喷淋器; 6. 污泥泵; 7. 鼓风机  
A. 浓缩污泥; B. 泥水混合液; C. 循环液; D. 回流污泥

图 6 填料好氧预挂膜工艺

## 4 结 论

1)好氧预挂膜两相厌氧反应器启动 13 d 完成快速启动,这个启动速度比接种普通污泥快 4~6 倍(8~12 周),与厌氧颗粒污泥持平(一般 2~3 周,个别的一周之内快速启动)。本研究的底物属于高浓度难降解工业废水,这个速度的实现就更加难得。这证明好氧预挂膜方法对有填料型厌氧反应器的快速启动是可行的,能够大大加快启动速度。

2)经过 CSTR 产酸相的发酵 VFA 含量逐步提高,而产甲烷相出水 VFA 在启动 10 d 后就逐步下降至 500 mg/L 以下。废水在经过 UASBAF 填料区后比填料区前的各项挥发酸指标都低,尤其

以乙酸和丁酸较为明显。这证明填料的好氧预挂膜效果良好,填料上的微生物为反应器出水达标作出了巨大贡献。

3)两相出水 pH 在启动第 9 d 以后就非常稳定,产酸相 pH 在 4.35~4.71,平均 4.75;产甲烷相 pH 在 7.21~7.85,平均 7.4。稳定的出水 pH 是两相厌氧系统正常运行、快速启动的重要标志。

4)根据小试研究形成的喷淋预挂膜方法,提出了“好氧活性污泥培养——污泥沉淀浓缩——喷淋预挂膜”的填料好氧预挂膜技术方案,具有灵活、适宜处理特殊废水、效率高、速度快、设备简单易控制、投资少、见效快等优点。该预挂膜方案也可以应用于好氧接触氧化池等有填料型好氧反应器中,同样可以大大提高启动速度,减少接种污泥。

## 参考文献:

- [1] JUNÄA, TREV ISAN M, ROZZIA, *et al* Influence of C: N ratio on the start - up of up - flow anaerobic filter reactors [J]. *Water Research*, 2000, 34(9): 2 614 - 2 619
- [2] Kazuaki Syutsubo, Hideki Harada, Akiyoshi Ohashi, *et al* Effective start - up of the thermophilic UASB reactor by seeding mesophilically - grown granular sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1997, 36(6 - 7): 391 - 398
- [3] MORVA IL, M IHALTZ P, Czako, L. Kinetic basis of a new start - up method to ensure the rapid granulation of anaerobic sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1992, 25(7): 113 - 122
- [4] GOODW N J A S, WASE D A J, FORSTER C F. Pre - granulated seeds for UASB reactors How necessary are they? [J]. *Bioresource Technology*, 1992, 41(1): 71 - 79
- [5] BR ITZ T J, VAN SCHALKW YK C, ROOS P. Development of a method to enhance granulation in a laboratory batch system [J]. *Water SA*, 2002, 28(1): 49 - 54
- [6] SCHM DT J E, AHR NG B K. Granular sludge formation in up - ow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors [J]. *Bioengineer Bioeng*, 1996, 49(3): 229 - 246
- [7] YAN Y G, TAY J H. Characteristics of the granular process during UASB start - up. [J] *Water Res*, 1997, 31(7): 1 573 - 1 580
- [8] Sharon McHugh, Caroline O'Reilly, Th é ère Mahony, *et al* Anaerobic granular sludge bioreactor technology [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2003, 2(2): 225 - 245
- [9] 顾国维. 水污染治理技术研究 [M]. 上海: 上海同济大学出版社, 1997.
- [10] 吴晓磊, 俞毓馨, 钱易, 等. 好氧及厌氧固定化微生物处理能力的比较研究 [J]. *环境科学*, 1994, 15(4): 50 - 52
- [11] 何强, 龙腾锐, 林刚. 预挂膜加速厌氧生物膜反应器启动的试验研究 [J]. *给水排水*, 2001, 27(5): 27 - 29.

(编辑 姚向红)