

## UASB 反应器中影响污泥颗粒化的工程因素

郭养浩 孟 春 石贤爱 邱宏端 陈剑峰 吴 陵

(福州大学生工系 福州 350002)

**摘 要** 研究了具有不同微生物群系的接种污泥、流动方式和流速对上流式厌氧污泥床(UASB)反应器中活性污泥粒化的影响。颗粒化过程包括:微生物絮凝体的形成、亚核的形成、亚核增长和颗粒成熟四个阶段。微絮凝体的形成取决于酸化菌的作用。流体的动量传递和流体对悬浮物的剪切作用是影响亚核形成的关键性工程因素。为此提出最低流速概念,即形成污泥膨胀床的最低流速。合适的进料速率、污泥负荷、布水均匀性以及碱度控制是 UASB 反应器工程放大和过程控制的四大要素。

**关键词** UASB 反应器, 污泥颗粒化, 流体的动量传递, 最低流速

鉴于经济效益因素,高浓度有机废水的厌氧治理技术逐渐被人们所重视。上流式厌氧污泥床(Upflow anaerobic sludge bed, 简称 UASB)反应器具有运行负荷高、抗水力冲洗能力强和转化效率高的优点。能否成功地培育颗粒污泥,是保证 UASB 反应器高效和稳定运行的关键。由于影响颗粒化的因素很多,UASB 反应器启动较麻烦,启动时间长,同时存在显著的工程放大效应。这些因素成为其广泛应用的障碍。颗粒污泥的形成机制以及优化启动措施一直是各国学者注目的课题<sup>[1~3]</sup>。关于丝状菌的起主导作用的缠绕效果<sup>[4~5]</sup>,胞外多聚物(ECP)的粘合作用<sup>[6]</sup>,外加微细粒子形成亚核作用<sup>[7]</sup>以及某些无机离子在促进颗粒化的作用<sup>[8]</sup>均已有报道。这些研究工作从不同的角度强调了生物催化反应体系中微生物种属、代谢产物或外加物质的效应。另一些作者则从颗粒化过程的角度从事研究。Macleol 等<sup>[9]</sup>认为产甲烷丝状菌先形成颗粒内核,酸化菌及其他氢消耗菌附在其表面,形成颗粒外围。这种理论注意到事物发展的阶段性<sup>[2]</sup>,但各种微生物群系在颗粒中如此严格分布并不多见,而且这种机理尚无法解释当接种物中丝状菌数量少时的颗粒化过程。UASB 反应器运行时,反应物料和产物气体向上运动,流经整个污泥床层。在不同进料条件下,活性污泥层呈固定床、膨胀床或流化床状态。虽然流体对微小絮凝物的冲洗作用已被确认,但反应器内物料的流动方式及流体传动因素对污泥颗粒化的影响尚未见报道。

本工作考察了不同微生物群系的生长和絮凝特性以及不同的接种污泥(丝状菌数量不同)、反应物料的流动方式和空床线速对颗粒化过程的影响,重点研究丝状菌数量较少

本项目由福建省自然科学基金资助。

本文于 1996 年 4 月 22 日收到。

的污泥的颗粒化过程,并进一步探讨颗粒污泥的形成机制。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

1.1.1 接种污泥:分别取样于福州酒厂、啤酒厂和抗生素厂的废水处理构筑物。

1.1.2 反应器:UASB反应器用玻璃管制成,内径28mm,长1000mm。反应器底部装有砂芯进水分布器,上部有气、液、固三相分离器。无搅动反应器,园柱形,内径100mm,高200mm。各反应器均在30℃条件下运行。

1.1.3 培养基(g/L):启动初期培养基为蔗糖1.0;酵母膏0.1;K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>0.1;NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>0.3;Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>0.8;适量微量元素。颗粒增长期的培养基中蔗糖含量为2.0,其余相同。

### 1.2 方法

1.2.1 化学需氧量COD的测定:采用标准重铬酸钾法测定<sup>[12]</sup>。

1.2.2 挥发性悬浮固体VSS(Volatile suspended solid):采用干热恒重法测定<sup>[12]</sup>。

1.2.3 污泥沉降特性SVI(Sludge volomn index):以1g干重的污泥经30min静置沉降的堆体积计<sup>[12]</sup>。

1.2.4 电镜观察:采用JEOL-JSM-350F型电子显微镜进行颗粒表面的扫描电镜观察和颗粒截面切片的透射电镜观察。

1.2.5 化学相组成:采用TN-5500X射线能谱仪。

## 2 结果和讨论

### 1.2 不同来源的污泥对颗粒化的影响

所用污泥分别取自不同发酵行业的废水处理装置。对接种污泥进行镜检,发现自啤酒厂和抗生素厂取的污泥中含相当多的丝状菌,而酒厂的污泥中所含丝状菌仅占总菌数的3%~4%。在UASB反应器中分别对不同污泥进行颗粒化实验。尽管各接种污泥中微生物群系不同,在连续运行30~40d之后,各反应器均发现颗粒化现象。

Dubourguier H. C<sup>[4]</sup>曾典型地报道了以丝状菌形成的聚集体为主干束的颗粒化现象。用扫描电镜对以酒厂污泥为接种污泥所形成的颗粒进行表面观察,发现在颗粒的部分表面也存在着类似于上述报道的树干状丝状菌聚集体<sup>[10]</sup>,但颗粒的大部分表面以致密的球菌和杆菌为主(图3b)。实验表明接种污泥中微生物群系的分布,尤其是丝状菌的数量并不是影响颗粒化的关键因素。

### 2.2 不同微生物群系的生长和絮凝特性

将接种污泥在酸化培养基(蔗糖为唯一碳源和能源,pH5.5)中培养,经过4代传接后进行纯培养。取上清液为接种物,接种后24h培养基已混浊。经3d培养,底物耗尽,培养基中出现相当量的黄灰色絮凝物,上清液中菌体浓度为 $9 \times 10^8$ 个/ml,镜检多为杆状酸化菌。数日后,絮凝物沉降于容器底部,一个月后转变为黑色,微生物发酵类型从酸化为主转变为甲烷化为主。

在甲烷化培养基(乙酸和丁酸为碳源和能源)中对接种污泥进行4代的传接驯化,刃

天青为指示剂,厌氧培养。分别取上清液和污泥为接种物,在含乙酸钠 1.5g/L 和丁酸 0.5g/L 的甲烷化培养基中培养,接种 5d 后,底物基本耗尽而培养基仍较透明,不混浊,上清液中菌体浓度为  $6 \times 10^6$  个/ml。增加培养基中底物浓度(乙酸钠 3.0 g/L,丁酸 1.0g/L),培养 14d,也未见混浊或絮凝现象。

酸化菌增殖速度快,可在较宽的 pH 范围(pH5.0-8.5)内增殖<sup>[11]</sup>。酸化菌易形成菌体絮凝物,这可能与酸化菌分泌较多的胞外多聚物(ECP)有关。扫描电镜观察到酸化菌所形成的微絮凝体主要由一些丝状和凝胶状的物质组成,有趣的是在部分絮凝体表面,可观察到大量酸化菌被包裹在薄层包膜内,而在部分絮凝体表面,细菌分布十分分散。赵一章等<sup>[5]</sup>曾报道产甲烷索氏丝状菌在纯培养中形成菌团。在本实验条件下,未观察到甲烷菌形成微絮凝体的现象,这可能与福州酒厂接种污泥中含丝状菌较少并且甲烷菌生长速度慢有关。在酸化菌和甲烷菌共存的体系中,在产甲烷丝状菌数量较少的场合,微生物絮凝体的产生应主要归因于酸化菌的作用。

### 2.3 不同物料流动方式对颗粒化的影响

在相同的进料流速和污泥负荷情况下,考察了不同物料流动方式对颗粒化的影响。图 1a 为 UASB 反应器,反应物料与产物气体向上流动,污泥受到水流的冲击作用。图 1b 为对照实验的无搅动反应器,物料从污泥层表面流过,底物以分子扩散方式进入污泥层。污泥层高度约 5mm,气体向上流动所引起的搅动可忽略不计,操作过程中,污泥床处于相对静止状态。表 1 中实验 1 与对照实验均采用相同的接种污泥(酒厂污泥)。实验 1 颗粒污泥形成期为 27d,继续运行至 50d,反应器内已生成相当数量的颗粒污泥。而在无搅动反应器中,污泥聚集交联成碎片状,稍加摇晃便解散,又形成类似于接种物的絮状污泥。

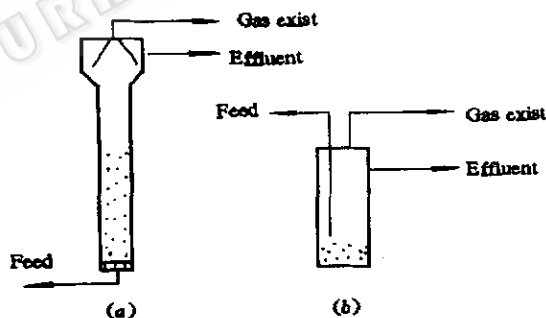


图 1 生物反应器内不同的物料流动方式

Fig. 1 Different flow model in bioreactors

(a)UASB reactor, (b)No-sirring reactor

生物反应器中流体的流动方式对污泥的颗粒化过程起着重要的作用。UASB 反应器中,物料流经污泥层,流体动量对微絮凝物产生搅动作用。流体的搅动和剪切作用促成了污泥颗粒化。在作为对照实验的无搅动反应器中,虽然污泥层也具有较好的 COD 去除率和产气性能,但未观察到颗粒化趋势。

在发酵工业中,以放线菌或真菌等丝状菌为目标菌株的纯培养过程中,常观察到菌团,但在球菌或杆菌,或混合菌株的培养中,除 UASB 反应器外,尚未见其他反应体系中

有关菌体颗粒化的报道。

2.4 不同物料流速对颗粒化的影响

各 UASB 反应器接种后,以设定流速恒定进料(表 1)。反应器内污泥的颗粒化过程大致可分为 3 个时期,冲洗阶段、增殖阶段和成熟阶段(图 2)。在本实验的体积流速范围内,冲洗阶段持续约 5~12d。流经污泥床的线速越大,冲洗阶段持续时间越短,反应器内剩余的污泥量也越少(图 2a)。实验 4 中,运行 7~8d 后的剩余污泥量仅为接种量的 65%,冲洗阶段之后,污泥量逐渐增加。运行 15d 后,污泥层中能观察到大量粒径 0.1~1.0mm 的颗粒,污泥比增殖速率约 0.0136d<sup>-1</sup>与此同时,污泥中 VSS 含量也明显增加(图 2b)。VSS 是污泥中微生物浓度的表征量,表明颗粒内部微生物量显著增加。随着颗粒不断的充实和长大,其沉降性能也不断改善(图 2c)运行 30d 后,实验 4 的反应器中污泥量增加速度变慢,VSS 和 VSI 也趋于稳定,表明颗粒污泥已进入成熟阶段。

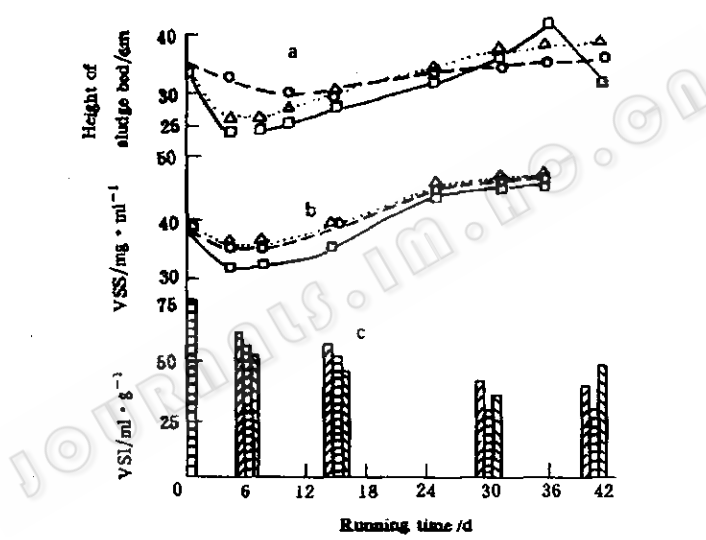


图 2 污泥颗粒化过程各参数变化曲线  
Fig.2 Variable curves during sludge granulation  
(a)Height of sludge bed,(b)VSS (c) VSI  
○, △, □ Experiment No. 1, △, □ Experimental No. 4  
□, ▨ Experiment No. 5

表 1 各 UASB 运行条件和污泥颗粒化进程

Experiment No.	1	2	3	4	5
Sludge load/g(COD·(d L) <sup>-1</sup>	4.30~8.60	6.45~12.90	9.46~18.9	12.9~25.8	32.2~64.4
Linear flow rate/cm h <sup>-1</sup>	6.77	12.40	15.00	20.84	50.90
Resident time/h	14.8	10.0	6.7	5.0	1.2
* Sludge granule forming time/d	27~30	25~30	15~20	12~15	12~15
* * Sludge granule mature time/d	>50	45~50	35~45	30~35	30~35

\* :Defined as the running days when the granulated sludge with diameter of 0.2mm or bigger is more about 25% ~ 30% of the total volume of sludge.  
\* \* :Definde as the running days when the granulated sludge with diameter of 0.5~3.0mm is about 70% ~ 80% of the total volume of sludge.

图 2 中,实验 1 的污泥增殖速度一直很慢,这可能与物料流速慢,污泥负荷小有关。实验 5 的颗粒化效果在运行期 25d 之前与实验 4 接近,后期运行中,由于进料负荷提高导致反应器酸化,部分已颗粒化的污泥膨胀、解体。

在各反应器连续运行过程中,定期取样观察污泥的颗粒化进程。“污泥颗粒化时间”和“颗粒污泥成熟时间”分别给予定义,见表 1 附注。在本实验条件下,USAB 反应器中的污泥不同程度地颗粒化,其中实验 3、4 和 5 的颗粒化尤为显著,污泥颗粒化时间仅 15d 左右。对运行 50d 各批实验的 USAB 污泥进行比较:实验 3 和 4 污泥颗粒强度较高,外表面比较光滑致密,粒径大于 1.0mm 的颗粒约占总污泥体积的 70% 以上;实验 1 反应器内虽有不少污泥颗粒,但粒径以 0.5~1.0mm 为多,大于 1.0mm 的颗粒不足 20%,而且污泥中仍有占总体积 1/3 左右的絮状污泥。

实验表明,高的流速有利于颗粒污泥的形成和颗粒长大。本实验所采用的流速范围高于已报道的数据,但未观察到因高流速致使颗粒污泥破碎的现象<sup>[2]</sup>。污泥负荷也是影响颗粒化的重要因素。负荷过小,颗粒形成和增长速度缓慢;若负荷太大,由于酸化菌增殖速度高于甲烷菌,容易导致反应体系酸化,酸化破坏了已颗粒化污泥的稳定性和生物活性。在控制合适的运行负荷约(26g(COD)/d·L<sup>-1</sup>)的前提下,采用合理的措施如增加回流比提高流经污泥床的线速,可加速 USAB 中活性污泥的颗粒化进程,最佳的空床线速约 20cm/h。

## 2.5 颗粒化过程微观结构和化学相成分的变化

对各个运行阶段的污泥用光学显微镜和扫描电镜观察。图 3a 为初形成亚核的污泥,大小约 5~50μm,形状不一,表面可观察到细胞,细胞间距较大,并可清楚地看到包裹在细胞表面的物质。对已成熟的颗粒污泥进行表面观察,发现颗粒表层是十分致密的细胞,部分区域以杆菌为主(图 3b),而部分区域可见密集的甲烷丝状菌和甲烷八叠球菌(图 3c)。在颗粒污泥的表面,细胞间距约 0.5~1.0μm,微生物群系的分布并不均匀。用透射电镜对颗粒内表面进行观察,发现在颗粒横断面上存在着比较明显的细胞浓度分布<sup>[10]</sup>。在颗粒内部,细胞间隔较大,约 1~5μm(图 3d)。

表 2 污泥表层的化学相组成(原子比)

Table 2 Chemical composition of the surface layer of sludge (atom proposition)

	Si	P	S	K	Ca	Fe
Sludge before granulation	16.59	45.37	21.66	5.07	7.16	4.15
Granule 1	0	79.40	9.13	0	6.43	5.04
Granule 2	0	67.57	12.32	2.33	2.63	8.04

用 TN5500 能谱仪分析颗粒污泥表面的化学相组成。分析结果(表 2)表明,污泥颗粒表层中,原子序数大于 Na 的大量元素有:Si、P、S、K、Ca 和 Fe,颗粒化之前的微絮凝体中含有大量 Si、Ca 和 K 元素。在颗粒污泥成熟时,由于颗粒表面被致密的细胞层复盖,Si 的测定量为零,而 P 元素含量显著增加。颗粒化前后,S、Ca 和 Fe 含量没有明显变化。

## 2.6 多步骤的污泥颗粒形成机理

活性污泥实现颗粒化是个相当复杂的并持续相当长时间的过程,影响因素众多。以

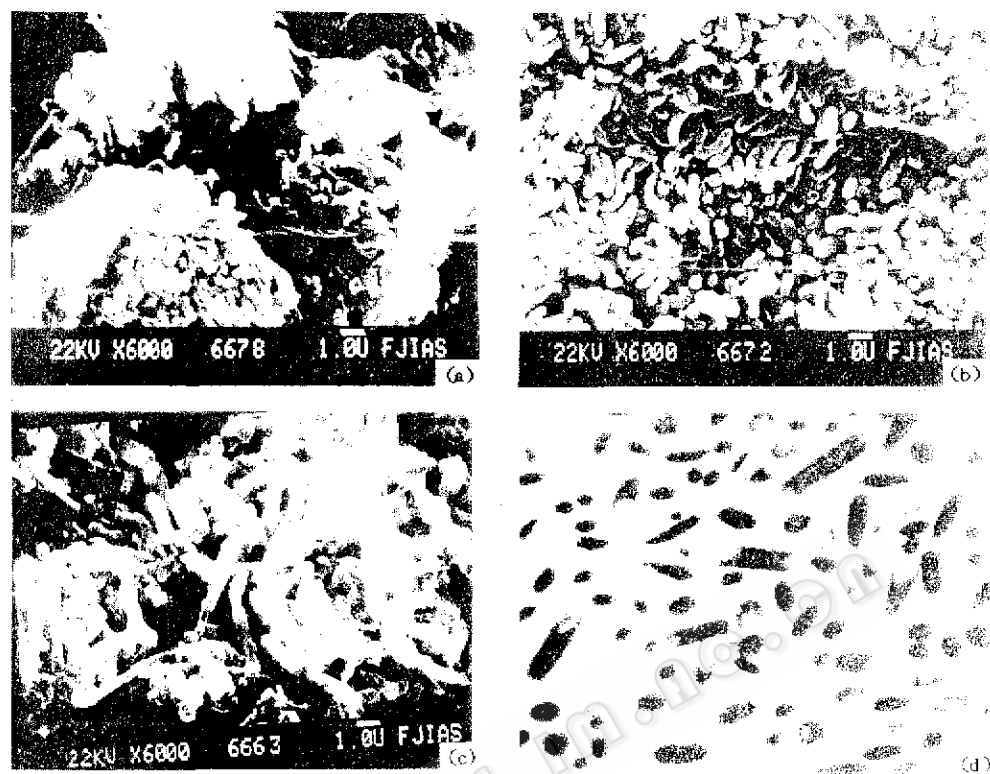


图 3 活性污泥外表面和内截面的微观结构电镜观察

Fig. 3 Electrol microscope observation of the micros fructure on the outer and inner surface of the active sludge

(a)Sludge with the form of subcore, (b)Outer surface of granulated sludge, (c)Outer surface of granulated sludge, (d)Inner surface of granulated sludge.

单一因素分析颗粒形成机理,难以综括全过程,也难以以为 UASB 反应器的启动制定合理战略。

UASB 反应器中活性污泥颗粒化过程可分为 4 个阶段:菌体絮凝物形成阶段、亚核形成阶段、亚核增长阶段和颗粒成熟阶段。微生物菌体在培养基中呈悬浮状。菌体通过胞外多聚物与培养基中其他物质形成高硅高钙含量的微絮凝物。钙和硅带正电荷,有利于带负电荷的细胞的聚集<sup>[8]</sup>。在一相 UASB 反应器酸化菌和甲烷化菌共存的体系,当接种物中含甲烷丝状菌数量较少时,微絮凝体的产生主要取决于酸化菌的作用。微絮凝体继而成为吸附和栖息甲烷菌及其他厌氧菌的良好场所。微絮凝体在物料流的作用下,相互间距加大,床层膨胀。流体动量传递和流体对悬浮物的剪切作用造成絮状污泥自身缠绕凝集,形成亚核。亚核是包含了多种微生物群系的比较松散的颗粒。亚核的形成提供了各微生物群系互营共生的良好环境。各微生物群系,尤其是生长速度慢的甲烷菌,均可保持较好的生长和代谢活性。亚核增长阶段的特征是颗粒长大,颗粒中 VSS 含量显著增加。亚核的增长速度取决于线速和进料负荷。在防止酸化的前提下,增加供料速率可促

进亚核的增长。运行一段时间, VSS 增殖速度趋缓, 此时颗粒的机械强度和沉降性能良好, 大部分颗粒粒径约 0.5~3.0mm, 表明颗粒已经成熟。

在污泥颗粒化过程中, 亚核形成阶段和亚核增长阶段是关键性阶段。流体动量传递效应是颗粒化过程必要的工程条件。UASB 启动期, 依重力沉降形成的絮状污泥层的流通性能不良, 污泥床易形成沟流或柱塞式整体上浮, 影响亚核的形成。因此布水均匀性和最低流速的控制十分重要。最低流速定义为形成污泥膨胀床的最低流速。该值取决于接种污泥的大小, 球形度和密度以及进水粘度。在本实验条件下, 启动期的空床流速应大于 6.7cm/h。UASB 反应器的工程放大和过程控制的四大要素是: 控制足够的进料流速, 合理的污泥负荷, 保证均匀布水和控制反应体系中合适的碱度<sup>[11]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Lettinga G, Zehnder A J. Microbiology and Technology, Netherlands: Pudoc Wageningen, 1987, 18~33.
- [2] 陈 坚, 李春生, 伦世仪. 中国环境科学, 1993, 13(5): 334~338.
- [3] 刘双江, 唐 一, 胡纪萃等. 中国沼气, 1991, 9(2): 1~5.
- [4] Dubourguler H C, Prensier G, Albagnac G. Proceeding of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. 1988.
- [5] 赵一章, 张 辉, 唐 一等. 微生物学报, 1994, 34(1): 45~54.
- [6] Dlofing J A R W, Griffioen Zelenhuizen L P T M. Can J Microbiol, 1985, 31: 744~750.
- [7] Beaufink H H, Thesis Ph.D. Netherland: University of Amsterdam, 1987, 39~51.
- [8] K P K Alibhai, Forster C F. Enz Microbiol technol, 1986, 3: 601~606.
- [9] Macleod, F A Guiot S R, Costerton J W *et al.* Appl Environ Microbiol, 1990, 59: 1298~1307.
- [10] 孟 春. 福州大学生工系硕士学位论文, 1996.
- [11] 郭养浩, 陈金志, 潘文良等. 微生物学通报, 1995, 22(5): 289~292.
- [12] 吴 锦, 宇振东泽. 日本规格规会, 工业废水分析方法, 北京: 中国环境科学出版社, 1984.

## Engineering Factors Affecting the Formation of Granular Sludge in UASB Reactor

Guo Yanghao Meng Chun Shi Xianai Qiu Hongchan Wu Ling Cheng Jianfeng

(Fuzhou University Department of Biotechnology, Fuzhou 350002)

**Abstract** The influence of different inoculum sludges involving different microbial populations, different flow models of stream in a bioreactor and different flow rates on the formation of granular sludge were studied. In the granulation process there were four periods: formation of microbial flocs, formation of subcore, growth of subcore and mature of granules. The production of microflocs could be attributed to acid-forming bacteria. The dynamic transfer caused by moving phases and the hydraulic shear effect are the most important factors affecting the formation of subcore. A new concept, lowest limited flow rate was proposed, that is the lowest flow rate to form the expanded sludge bed. A sufficient feed rate (higher than the lowest flow rate), an appropriate sludge charge and an equal distribution of feed as well as a suitable alkalinity in medium are the main factors for the scale-up and process control of UASB.

**Key words** UASB reactor, granulation of active sludge, dynamic transfer of liquid, lowest flow rate