

惰性载体厌氧颗粒污泥培育及某些性质的研究

伦世仪 李建科

(无锡轻工业学院发酵工程系, 无锡)

研究了在焦碳颗粒上起动和育成厌氧颗粒污泥(或称厌氧附着膜), 及其在分批反应器和膨化床反应器内的某些运转特性。在一定的选择压力(Selection pressure)下, 从悬浮态种子污泥成长为颗粒污泥的过程中, 其微生物相发生了明显变化。颗粒污泥的比反应速率常数K比出发悬浮态种子污泥的增大了100%左右。从而断定, 除菌体浓度很高外, 菌体质量的改进是这类系统(如AAFEB和UASB等)效率特别高的另一重要原因。

关键词 厌氧颗粒污泥; 厌氧附着膜; 膨胀床反应器; 废水处理

目前人们致力于开发一种快速的厌氧处理系统, 既能有效地处理有机废水, 又能回收利用其中所具有的部分能量。

荷兰的G. Lettinga 开发的上流式厌氧污泥床(UASB)系统正在接近于达到这一目标^[1-4]。美国的W. J. Jewell 开发的厌氧附着膜膨化床(AAFEB)也是一类很有希望的处理系统^[5-10]。它们都具有特别高的效率。过去有关的文献对此均解释为反应器内菌体浓度特别高, 或菌体停留时间特别长^[8,9,11,12]。但这类系统中颗粒化的菌体浓度仅比厌氧接触系统中的菌体浓度约高10倍, 而前者的处理效率却较后者的远远高出10倍以上。另外, 过去的有关文献很少论述厌氧颗粒污泥或附着膜的培育, 这正是这类系统的关键所在。

本文涉及厌氧污泥在焦碳颗粒上起动成膜, 并从微生物相的变化等方面探讨这类系统效率特别高的其他原因。

材料和 方法

(一) 材料

1. 接种用厌氧污泥: 从正在旺盛产气的无锡南站畜牧场厌氧消化池中取得厌

氧污泥, 经合成废水驯养半月, 过滤、淘洗, 去除其中的杂物及泥沙。所得污泥再经半个月驯养后即可作为种子污泥。

2. 废水: 本研究采用以葡萄糖为碳源的合成废水, 其COD:N:P为100:5:1。氮源为NH₄Cl和NH₄HCO₃, P源用KH₂PO₄和K₂HPO₄, 用NaHCO₃控制废水的碱度。配成的废水贮存在4℃冰箱中备用。

3. 载体: 经筛选, 选中工业用焦碳为颗粒污泥的载体。

(二) 培养设备

1. 流加分批(Fed-batch)培养系统: 见图1。

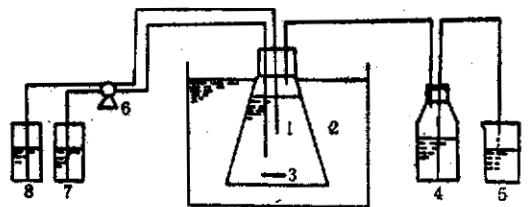


图1 厌氧颗粒污泥起动用流加分批培养系统

Fig.1 The fed-batch system for the start-up and development of anaerobic sludge granules

- 1. 消化瓶 Reactor
- 2. 恒温水浴 Thermostat
- 3. 磁力搅拌子 Magnetic stirrer
- 4. 集气瓶 Gas collector
- 5. 受水瓶 Water bottle
- 6. 泵 Pump
- 7. 进水瓶 Influent bottle
- 8. 出水瓶 Effluent bottle

本文于1986年11月25日收到。

2. 连续培养系统: 它是一个可以回流部分出水的膨化床反应器系统, 见图 2。

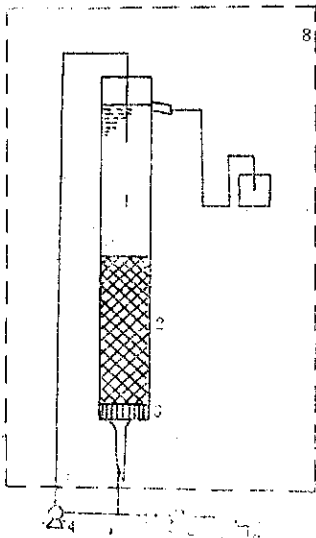


图 2 厌氧颗粒污泥连续培养系统

Fig.2 The continuous system for the development of anaerobic sludge granules

1. 厌氧膨化床反应器 AAFEB reactor
 2. 载体 Carrier 3. 分布器 Distribution plate
 4. 循环泵 Recycle pump 5. 供水泵 Feed pump
 6. 进水瓶 Influent bottle
 7. 出水瓶 Effluent bottle 8. 恒温箱 Thermostat box

反应器内载体充填率为45%左右。

(三) 分析方法

COD: 重铬酸钾法^[13,14]。

沼气: 气相色谱法, 固定相: TDX-02; 载气: N₂; 柱长 2m; 柱温 50℃; 热导型检测器。

VSS: 灼烧法^[13]。

pH: 用精密 pH 试纸, 精密酸度计测定。

实验结果

(一) 惰性载体厌氧颗粒污泥的培育

先把载体与驯化好的种子污泥装入图 1 所示的系统中进行流加分批培养, 待载体上已有菌体附着生长后, 将之转入图 2 所示的系统内继续培养。在此过程中要注意控制有机负荷率从 10kg COD/m³·day* 到 70kg COD/m³·day 逐步提高, 并使沉降性能不好、浮在液面上的污泥排出系统之外。

经过90天, 培养出了比较完好的颗粒污泥。其外观示于图 3。

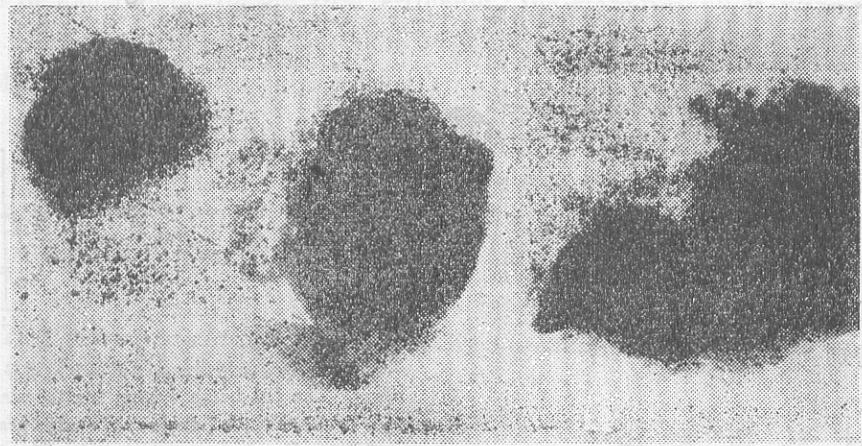


图 3 惰性载体厌氧颗粒污泥 (14.4×3)

Fig.3 Anaerobic sludge granule with coke nucleus

* 本文在计算OLR和HRT时, 对流加分批培养系统以反应器有效体积为反应器体积; 对连续培养系统以挂好膜的载体静置体积为反应器体积。下同。

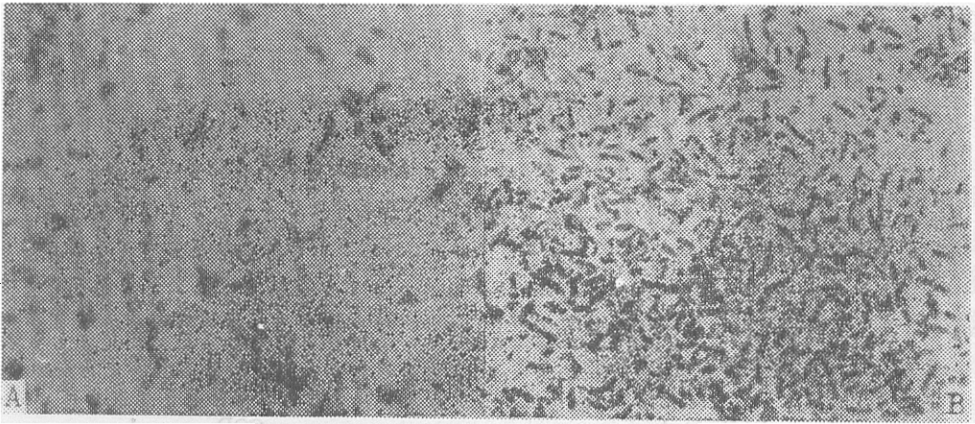


图 4 起动用种子污泥和颗粒污泥的微生物相

Fig.4. The microorganisms phase of the starting seed sludge and anaerobic sludge granules

A. 悬浮态种子污泥 Suspended seed sludge (360×5) B. 颗粒污泥 Sludge granule (360×3)

(二) 颗粒污泥的微生物相和沼气成分的变化

取颗粒污泥的剥落物，观察其生物相。与出发悬浮种子污泥相比，颗粒污泥中杆菌已占了明显优势，仅有少量球菌、叠球菌和链球菌。而起动用悬浮种子污泥中却以球菌为主，见图 4。

颗粒污泥育成后，所产生的沼气成分也发生了明显变化。不但甲烷的分率提高，而且还检出了 CO 成分。在本研究的条件下，种子污泥产生的沼气中检不出 CO 成分，见图 5。

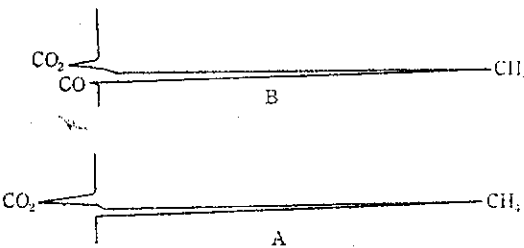


图 5 沼气成分的气相色谱图

Fig.5 G.C.graph of the methane gas mixtures

A. 悬浮态种子污泥 Suspended seed sludge
B. 颗粒污泥 Sludge granules

(三) 颗粒污泥耐有机负荷率能力的提高

对有机负荷率及操作温度变化的耐受能力是处理系统的重要操作性能。它是系

统本身的特点，特别是其中菌群性质的反映。

保持系统的温度恒定在 35℃ 的范围内，阶跃式地改变系统的有机负荷，同时记录出水 COD 的变化，如图 6、7 所示。

对于悬浮态种子污泥，有机负荷率的每次变化都引起出水 COD 的剧烈变化。当有机负荷率的冲击过去以后，出水 COD 恢复正常的速度非常之慢，而且在第一次冲击未获复原之前如有第二次即便是较小的冲击出现，系统就可能失控（见图 6）。这是因为有机负荷增大后，造成了有机酸积累，可能抑制了甲烷菌的正常代谢。虽

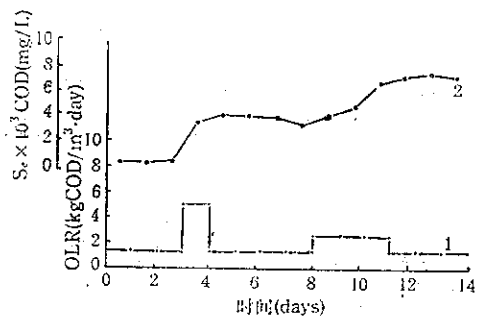


图 6 悬浮态种子污泥耐有机负荷率冲击能力
Fig.6 Resistance ability of the suspended seed sludge to OLR shock

1. OLR变化曲线 OLR curve
2. 出水COD曲线 Effluent COD

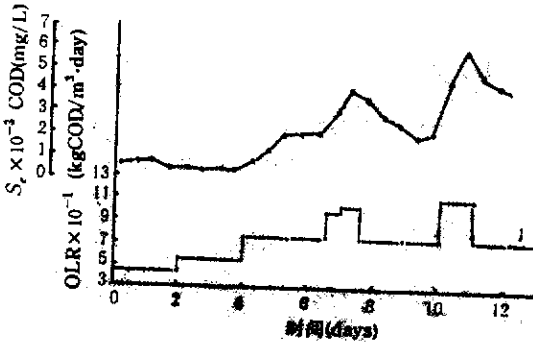


图7 颗粒污泥耐有机负荷冲击能力
Fig.7 Resistance ability of the sludge granules to OLR shock

- 1. OLR变化曲线 OLR curve
- 2. 出水COD曲线 Effluent COD

然冲击过去数日之久，但菌群一时不能靠自我调节恢复正常。

但颗粒污泥的这一特性发生了明显地变化。有机负荷率在较低的水平变化时，对出水COD几乎没有影响。当有机负荷率在较高的水平上发生较大变化时，出水COD也发生明显变化，但与前者不同的是，当冲击过去之后，颗粒污泥系统能靠自我调节使出水COD很快恢复到冲击前的水平（见图7）。除了两者菌体浓度不同之外，这不能不认为可能与两者微生物相的变化有密切关系。

(四) 颗粒污泥耐温度冲击能力的提高

在各种条件完全相同的情况下，阶跃式地改变处理系统的处理温度，考察温度变化对系统COD去除率的影响，结果见图8。

由图8可见，出发的悬浮态种子污泥对处理温度的变化极为敏感，温度下降的影响尤其显著。当温度从35℃降至25℃，COD去除率从85%下降到50%以下。与之相反，颗粒污泥对温度降低的变化很不敏感，而当温度从35℃上升到40℃，效率开始下降。

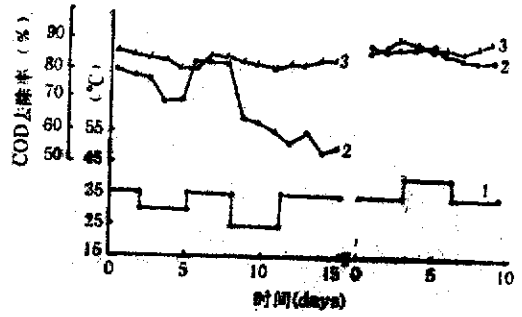


图8 温度变化对COD去除率的影响
Fig.8 The temperature change effect on COD removal

- 1. 温度曲线 temperature curve
- 2. 悬浮态种子污泥COD去除率 COD removal rate of the suspended seed sludge system
- 3. 颗粒污泥COD去除率 COD removal rate of the sludge granule system

(五) 比反应速率常数K的比较

平行运行4只反应器，分别取悬浮态种子污泥和颗粒污泥在不同的水力停留时间下操作，并在不同的基质浓度 S_0 下达到稳态。以 $\frac{S_0 - S_e}{X_e \cdot t}$ 对 S_0 作图，分别得到两条斜率不等的直线，如图9所示。

根据两条直接斜率分别求得，悬浮态种子污泥：

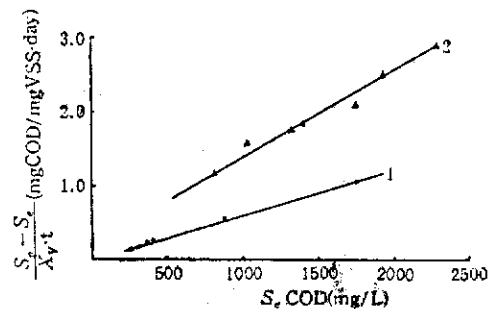


图9 比反应速率常数K
Fig.9 The Specific reaction rate constant K
1. 悬浮态种子污泥 Suspended seed sludge
2. 颗粒污泥 Sludge granules

$$K = 6.0 \times 10^{-4} \left(\frac{L}{mg \text{ VSS} \cdot \text{day}} \right);$$

颗粒污泥；

$$K = 1.1 \times 10^{-2} \left(\frac{L}{\text{mg VSS} \cdot \text{day}} \right)。$$

在实验的 S_0 范围内, 两者的降解反应均属一级反应动力学, 其方程分别为:

悬浮态种子污泥系统:

$$\frac{S_0 - S_t}{X_t \cdot t} = 6.0 \times 10^{-4} S_t,$$

颗粒污泥系统:

$$\frac{S_0 - S_t}{X_t \cdot t} = 1.1 \times 10^{-2} S_t,$$

讨 论

(一) 厌氧颗粒污泥的成长, 无论有无惰性载体, 其机制并没有本质的区别^[16]。但是惰性载体颗粒污泥的育成, 首先必须克服菌群在载体表面上生长的困难。我们曾在完全相同的条件下, 对焦炭、浮石、珍珠岩和白树脂等载体进行挂膜实验。结果发现, 经过一定时间的培育后, 焦炭粒表面已经生长菌体, 而白树脂上却没有菌体生长。这说明, 惰性载体的表面特性对菌体附着生长的起动力影响很大。另外还发现培养条件对附着生长的起动力也具有重要影响。有的实验室发现在焦炭粒上形成菌膜很困难, 但在本研究中发现在焦炭粒上最易育成菌膜。我们同意这样的观点: 微生物在载体表面上附着生长需要克服一定的能障^[16]。因此载体表面与菌体表面间的静电引力无疑有助于克服这种能障。另外, 不同的微生物外壁可能具有不同的带电性质, 不同的微生物在相同的条件下代谢产物不同, 如有的微生物在一定的条件下能产生某种胞外粘性聚合电解质, 有的就不能。一旦微生物被这种聚合电解质包围, 其外壁原来的带电性质就可能被改变。因此, 某种载体在某种条件下不能起动力菌膜生长, 而在改变的条件

下也许就不是不能起动力的。

(二) 为了使颗粒污泥尽快的育成, 必须创造有利于菌体附着生长的条件。机械地附着并不等于能在附着面上生长。污泥的颗粒化固然是菌体生长的结果, 但有利于菌体悬浮生长的条件并不等于菌体附着生长。菌体如果不能附着生长, 再多也要被排出。在一定的范围内, 较高的有机负荷(不发生有机酸抑制的条件下)无疑对菌体的生长有利。但我们发现, 在颗粒污泥育成过程中, 有机负荷较高时, 反应器内液体变混浊, 镜检发现菌体多以单个形式存在, 颗粒污泥的成长非常缓慢。适当降低有机负荷后, 情况正好相反。不过, 在控制有机负荷的前提下, 又需随颗粒污泥的成长不断提高投加的有机负荷, 为菌体的生长提供必要的营养。

(三) 污泥的颗粒化过程是一个在特定的选择压力下自然选择的过程, 因而也相应发生了厌氧菌群的质的变化。这种变化使单位重量菌体的甲烷化反应速率加快了近100%。从而可以断言, 这是这类厌氧处理系统效率特别高的另一个重要原因。

(四) 由于颗粒污泥系统的菌量浓度高, 加上单位菌体的甲烷化反应速率快, 因而这类系统能很快地将有机酸转化成甲烷, 使不易达到酸抑制的地步, 或抑制不那么严重。这极可能是厌氧颗粒污泥特别耐受有机负荷冲击的原因。

(五) 悬浮态生长的厌氧菌群, 尤其是甲烷菌群, 对温度下降非常敏感(见图8), 然而颗粒化后, 即使温度下降10℃, 系统的COD去除率几乎不变, 这除了与菌群发生的质的变化有关外, 进一步的原因尚不清楚。

符 号 说 明

HRT (h) 水力平均停留时间(h)或(d), OLR 有机负荷 ($g \cdot \text{COD}/l \cdot \text{day}$)或($g \cdot \text{COD}/l \cdot \text{g} \cdot \text{day}$);
 S₀ 出水基质浓度(对全混流反应器即反应器内基质浓度); S_i 进水基质浓度;
 VSS 挥发性固体物, X_v 反应器内菌体浓度; V_r 反应器体积(L); L_r 颗粒污泥体积(L)

参 考 文 献

- [1] Lettinga, G. et al., *Biotech. & Bioeng.*, 22:699, 1980.
- [2] Lettinga, G. et al., *Biotech. & Genetic Eng. Review*, 2:253, 1984.
- [3] Lettinga, G. et al., Proc. of the Fourth International Symposium on Anaerobic Digestion, Nov. 11-15, Guangzhou, China, p.279, 1985.
- [4] Lettinga, G. et al., *Wat. Sci. Tech.*, 15:177, 1983.
- [5] Jewell, W.J., *Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater*, Edited by Cooper, P.F. and Atkinson, B., Ellis Horwood, p.251, 1980.
- [6] Switzenbaum, W.S. et al., *JWPCF*, 52:1953, 1980.
- [7] Jewell, W.J. et al., *JWPCF*, 53:442, 1981.
- [8] Jewell, W.J. et al., Paper presented at the 36th Annual Purdue Industrial Waste Conf., May 13, West Lafayette, Indiana, U.S.A., 1981.
- [9] Jewell, W.J., AAFEB Fundamentals, presented at 1st International Conf. on Fixed-film Biological Processes, April 20-23, Pittsburgh, U.S.A., 1982.
- [10] Schraa, G. et al., *JWPCF*, 56:226, 1984.
- [11] Emer, C. et al., *Process Biochem.*, 17:12, 1982.
- [12] Callander, I.J. et al., *Process Biochem.*, 18:24, 1983.
- [13] 城乡建设环保部环保局, 环境监测分析方法, 城乡建设环保部环保局, 北京, 1983.
- [14] 陶大钧等, 无锡环境保护, (2):41, 1982.
- [15] Koster, I.W. et al., *Agriculture Wastes*, 9:205, 1984.
- [16] Rogers, H.J., Adhesion of Microorganisms to surface, Edited by Ellwood, D.C. et al., Academic Press, London, p.29, 1979.

THE CULTIVATION AND CHARACTERISTICS OF ANAEROBIC SLUDGE GRANULE WITH INERT NUCLEUS

Lun Shiyi Li Jianke

(Wuxi Institute of Light Industry, Wuxi)

The start-up and development of anaerobic sludge granules on the surface of coke nuclei and some characteristics of these granules in batch or expanded bed reactor performance were studied.

It was found that the microorganisms phase was greatly changed during the granulation process from suspended seed-sludge to sludge granules under certain selection pressure, the specific reaction rate constant K of the sludge granules doubled that of the starting suspended seed-sludge. This meant, not only the very high sludge concentration, the quality change of the microorganisms also played an important role leading to the extra-ordinary high efficiency of these system such as the UASB and AAFEB.

Key words

Anaerobic sludge granules; anaerobic attached film; expanded bed reactor; wastewater treatment