

厌氧污泥颗粒化  
和UASB反应器放大的研究

陈 坚

1990年12月



# 厌氧污泥颗粒化 和UASB反应器放大的研究

## 摘 要

UASB反应器中厌氧污泥的颗粒化和反应器的比拟放大已成为世界范围内厌氧废水处理技术方面的一个研究热点和难点。本文首先从颗粒化对反应器中菌体浓度、菌体分布和颗粒内部传质阻力对反应速率的影响等方面对厌氧污泥颗粒化的意义进行了研究；从颗粒污泥的化学成分测定、生物相观察及颗粒化的过程分析对颗粒化的条件进行了探讨。然后，在合理设计的中试规模(15m<sup>3</sup>) UASB反应器中，研究确定了布水系统的优良性能、三相分离器的分离模型和分离效率，并控制反应器运行达到了良好的工作状态。在此基础上，通过对流体流动模型、污泥分布模型和生化反应动力学模型的研究得到了UASB反应器的过程动力学模型，由此提出了UASB反应器的设计方法。本研究结果表明：①颗粒厌氧污泥具有优良的沉降性能、稳定的结构和良好的适应性；污泥颗粒化使共生菌群间的距离缩短从而种间代谢交流(如种间氢转移)速率加快；因此厌氧污泥的颗粒化提高了反应器中的菌体浓度、优化了反应器中的菌体分布。颗粒内部复杂的微环境对基质输送的影响使得在实际的大规模反应器中其内部的传质阻力可以忽略。②颗粒污泥内部的FeS和ECP对其结构的稳定作用不可低估；厌氧污泥颗粒化的机理可分为内核的形成和实际颗粒的生长这两个方面。参与内核形成的主要菌体为*M. sarcina*和*M. thrix*，而非产甲烷菌在实际颗粒的生长过程中有着重要的作用。③单层多点式布水系统具有可调性、自排除能力和结构简单、制造安装方便的优点，每3.8 m<sup>2</sup>有一个布水点即可保证布水均匀；三相分离器的分离功能主要由底部折流板、两个循环流和沉降区的作用来完成，并且在不同负荷下其分离效率在95%左右；单级UASB反应器处理酒糟废水在有机负荷22.5kgCOD/m<sup>3</sup>·day、HRT 1.04day的条件下，COD去除率达86.3%；两级串联UASB反应器在同样的条件下COD去除率可达95%，出水COD在1000ppm左右。④UASB反应器中流体流动组合模型为：污泥床和污泥层是全混流，沉降区趋向多级串联全混流，其中存在死区、沟流和反向流；污泥分布模型为：床部污

泥浓度相对稳定，床、层污泥浓度之比与床部气体产率的倒数成线性关系；生化反应动力学模型为：床部和层部可用同样的方程描述，但模型参数有差别。

本研究结果对UASB工艺的研究、应用和发展，包括颗粒厌氧污泥的培养、控制，UASB反应器的设计、放大，具有重要的理论和实践意义。

关键词：UASB反应器；颗粒厌氧污泥；颗粒化意义和条件；反应器结构和设计；模型。

# STUDIES ON ANAEROBIC SLUDGE GRANULATION AND SCALE UP OF UASB REACTORS

## ABSTRACT

Granulation of anaerobic sludge and scale up of UASB reactors in the field of anaerobic wastewater treatment technology have become a worldwide research focus. In this thesis, the granulation of anaerobic sludge were studied as a function of cell concentration and cell distribution in UASB reactors, as well as the mass transfer resistance within the granules. The conditions required for sludge granulation were discussed based on the chemical composition, distribution of cells in the granules, and granulation process analysis. Also, in this thesis, the influent distribution system, the separation model, and the efficiency of the three-phase separator (15m<sup>3</sup> pilot scale UASB reactor) were investigated. A process kinetic model and design method of UASB reactors were obtained from the fluid flow pattern, sludge distribution and biochemical reaction model.

The following conclusions are derived from the experimental results: (1) Granular anaerobic sludge have good settle-ability, stability and adaptability. Sludge granulation process shorten the distance between syntrophic bacteria cells, so that interspecies exchange rate (for example: interspecies hydrogen transfer) become faster. On the other hand, the internal mass transfer resistance in full scale reactors become negligible with the complex micro-environment of the granules. (2) FeS and ECP in granules play a role in stabilizing granule structure to some

degree. The mechanism of anaerobic sludge granulation consists of two aspects: nucleation and actual granule growth (maturation). It is also observed that *M.sarcina* and *M.thrix* are dominant bacteria within the nuclei, while non-methanogenic bacteria play an important part in the granule maturation process. (3)The type multi-inlet distribution system is adjustable to cover different cross areas. One inlet is able to distribute over  $3.8\text{m}^2$  of the bottom surface. The function of the separator depends on the baffles, two recirculation stream, and settling compartments. The efficiency of the separator reach 95% with different organic load. In a UASB reactor for treating alcohol distilleries' wastewater, COD removal rate reaches 86.3% when the organic load and HRT are at  $22.5 \text{ kgCOD/m}^3\text{-day}$  and 1.04 day respectively. Under the same condition, COD removal rate reaches 95%, and COD of the effluent is only about 1000ppm when two UASB reactors in series is used. (4)The fluid flow pattern of the entire UASB reactor can be described as a combination of CSTRs for sludge bed and sludge blanket, CSTRs-in-series for settling compartment, dead space, bypassing flow, and backmixing flow. Sludge distribution in the reactor indicate that the sludge concentration in the bed is almost constant, and the ratio of the sludge concentration in the bed and blanket has a linear relation with the inverse of the gas volume at the top of the sludge bed. Biochemical reaction model is the same in the bed and blanket, but the parameters of the model are different.

The experimental results of these studies have both partical and theoretical value in development of UASB technology. This

includes the cultivation and control of the granular sludge, design and scale up of UASB reactors.

Key words: UASB reactor; Granular anaerobic sludge;  
Significance and condition of granulation;  
Structure and design of reactor; Model.

# 目 录

第一章 绪论-----	1
1.1 厌氧废水处理工艺的发展-----	1
1.2 厌氧甲烷发酵微生物学-----	4
1.3 UASB工艺-----	9
1.4 本研究的任务和目的-----	16
第二章 UASB反应器中厌氧污泥颗粒化的意义-----	17
2.1 颗粒化对提高反应器中菌体浓度的作用-----	17
2.2 颗粒化优化反应器中菌体分布-----	25
2.3 颗粒污泥内部传质阻力对反应速率的影响评价-----	33
第三章 UASB反应器中厌氧污泥颗粒化的条件-----	39
3.1 颗粒污泥的化学成分研究-----	41
3.2 颗粒污泥的生物相研究-----	46
3.3 颗粒污泥的形成机理-----	55
第四章 UASB反应器结构与性能的研究-----	60
4.1 布水系统-----	61
4.2 三相分离器-----	68
4.3 处理酒糟废水的效能-----	73
第五章 UASB反应器过程动力学模型的研究-----	81
5.1 流体流动模型-----	81
5.2 污泥分布模型-----	90
5.3 生化反应动力学模型-----	94
第六章 结论-----	108
参考文献-----	111
致 谢	



# 第一章 绪 论

## 1.1 厌氧废水处理工艺的发展

### 1.1.1 早期的研究

厌氧处理是在无氧和无其它强氧化物存在下,通过一系列的微生物作用将各种有机物分解的过程。甲烷( $\text{CH}_4$ )和二氧化碳( $\text{CO}_2$ )是主要终端产物,也有少量的 $\text{N}_2$ , $\text{H}_2$ , $\text{NH}_3$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 。参与或具有这种功能的微生物在自然界中广泛存在,如在土壤,湖泊沉淀和动物肠道中。

在一定的控制条件下,人为地利用微生物的作用来加速污染物降解的历史至今仅有一百多年(1,2,3):

1881年, M.L.Mouras首先将厌氧处理应用于去除生活污水中的悬浮固体。这个称为“Mouras' Automatic Scavenger”的装置类似于今日的化粪池(Septic Tank)。

1890年, W.D.Scott-Moncrief建造了一个工作原理与厌氧滤池相近的装置,大量去除废水中的悬浮固体。

1895年, D.Cameron在英国的Exeter,改进" Mouras'Automatic Scavenger"建成一座称为"Septic Tank"的装置。

1895年,在Exeter,全部废水都用此系统进行处理,并首次进行气体收集和用于处理运行的加热和照明。

1904年, W.O.Travis改进"Septic Tank",将废水中悬浮固体分离进入水解室,使其与废水有不同的停留时间,称为"Travis Tank"。

1914年, K.Imhoff改进"Travis Tank"成"Imhoff Tank",使悬浮固体停留几星期至几个月,极大地减少了处置费用,因而在美国受到欢迎。

1927年,在改进"Imhoff Tank",将沉淀室与消化室分离的同时,消化室开始采用加热措施,处理效率迅速提高,在全世界得到广泛应用。

1930年末,由于对厌氧处理系统的接种和pH控置等问题的研究,城市污水污泥的处理已在有加热装置的消化池中全面进行。

1950年，为了消除浮渣和保证菌体与废水的充分接触，各种搅拌设备和措施引进消化池。同时，Stander开始认识到在产甲烷反应器中维持高菌体浓度的价值。

1955年，G.J.Schroepfer等人首先开发了厌氧接触过程(Anaerobic Contact Process)，通过将流出污泥沉降、回流入反应器中的方法来保证高菌体浓度。从此，以提高厌氧微生物浓度和停留时间(SRT)、缩短液体停留时间(HRT)为目标的新型反应器，即所谓的第二代厌氧废水处理反应器，相继出现。

### 1.1.2 第二代厌氧废水处理反应器

第二代厌氧废水处理反应器(Anaerobic Wastewater Treatment, AWWT)的典型代表(4)有：上流式厌氧滤池(Anaerobic Filter, AF)，上流式厌氧污泥床反应器(Uplow An-aerobic Sludge Blanket, UASB)，下行式固定膜反应器(Downflow Stationary Fixed Film, DSFF)，厌氧附着膜膨胀床反应器(Anaerobic Attached Film Expanded Bed, AAFEB)和厌氧流化床反应器(Anaerobic Fluidized Bed, AFB)(5,6,7,8,9)。图1-1为这几种反应器的结构和操作示意图。

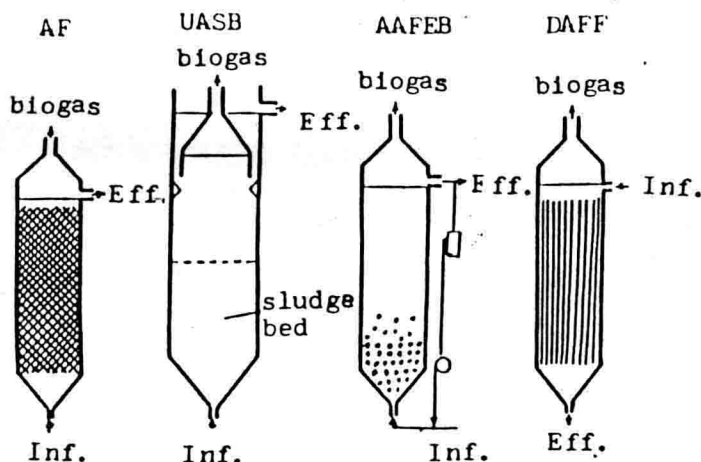


图1-1 第二代厌氧废水处理反应器结构示意图

第二代厌氧废水处理反应器的共同特征是滞留生物量(10)。通过不同的固定方式(表1-1)，使反应器中达到高菌体(污泥)浓度，从而解决了厌氧微生物生长缓慢(厌氧过程本身特点)和菌体悬浮生长易被液体洗出(第一代反应器弱点)，不利于反应器高效运行的关键问题。

表 1 - 1 第二代AWWT反应器中菌体固定方式(11)

固定化方式	反应器类型
1. 菌体污泥附着	
a. 于静止的填充物上(附着膜)	AF、DSFF
b. 于颗粒载体上(附着膜)	AAFEB FB AGLR
2. 菌体污泥自身聚集	
a. 颗粒化(granules)	UASB AF
b. 絮体形成(fioc)	ABR

三十年的研究与实践表明,第二代AWWT反应器除具有传统厌氧消化过程的一般优点外(12),还对第一代装置的许多限制和弱点均有所突破或冲击。表现在:

1. 具有相当高的有机负荷和水力负荷,因而反应器的容积比传统装置减少90%以上;
2. 在不利的条件下(低温、冲击负荷、存在抑制物等)仍具有很高的稳定性;
3. 反应器建造简单,结构紧凑,从而投资小,占地面积少,并适合于各种规模和可作为运行单元被结合在整体的处理技术中;
4. 处理低浓废水的高效率已具备与好氧处理竞争的能力;
5. 通常几乎不需要操作和管理费用,是能源净生产过程。

每一个高速反应器都有各自的特点和不足,这取决于其最佳操作的过程条件是否满足。从工程实际出发,比较和选择厌氧废水处理反应器要考虑的最关键的因素是反应器具有的有机负荷能力和水力负荷能力。其它应考虑的因素有:反应器首次起动和二次起动所需的时间;反应器对一些因素的变化具有的稳定性,如负荷率、废水成分和浓度、温度等等;反应器处理含部分不溶性固形物的废水的能力;投资和操作费用;占地面积。

由于在UASB反应器中能够培养得到一种具有优良沉降性能和高比产甲烷活性的颗粒厌氧污泥(Granular Anaerobic Sludge),因而相对于其它同类装置,颗粒污泥UASB反应器具有明显的优势:

1. 有机负荷居第二代反应器之首,水力负荷能满足要求(表1-2);
2. 污泥颗粒化后使得反应器对不利条件的抗性增强;

3. 由于将污泥或流出液的人工回流和机械搅拌一般维持在最低限度,甚至完全取消。尤其是颗粒污泥UASB,由于颗粒污泥的比重一般比人工载体小,在一定的水力负荷下,可以靠反应器内产生的气体来混合,使污泥与基质充分接触。因此,UASB可省去搅拌和回流所需的设备和能耗;

4.在反应器上部设置的气-固-液三相分离器,对沉降性良好的污泥或颗粒污泥避免附设沉淀分离装置、辅助脱气设备和回流污泥设备,简化了工艺,节约了投资和运行费用;

5.在反应器内不需投加填料和载体,提高了容积利用率,避免了堵塞问题。

正因如此,UASB反应器已成为第二代厌氧废水处理反应器中发展最快的装置。据不完全统计的资料,从1977年到1987年国外大约已有100座生产性UASB装置正在运行。

表1-2 第二代AWWT反应器有机负荷和水力负荷比较(13)

最大可达到的有机负荷	UASB(颗粒污泥)>FB>AAFEB>UASB(絮状污泥)>AF>DSFF
最大可达到的水力负荷	DSFF>FB>AAFEB>UASB(颗粒污泥)>AF>UASB(絮状污泥)

## 1.2 厌氧甲烷发酵微生物学

### 1.2.1 厌氧处理的微生物学过程

有机物厌氧发酵产甲烷的过程是一个非常复杂的由多种微生物群体共同作用的生物化学、微生物学过程。根据过程中各种特性不同的反应系列(14),过程中不同阶段的能量水平(15),不同营养功能菌群的代谢途径(16),和不同微生物的性状(17),大批学者对这一复杂过程从不同角度进行了充分的研究。

Zeikus在第一届国际厌氧消化会议上提出了四菌群说(18)。图1-2给出了四菌群说有机物降解的图解。四个代谢菌群及其功能是:

1. 水解菌群(hydrolytic bacteria): 发酵分解代谢糖类、蛋白质、脂类和其它有机物成有机酸、 $H_2$ 和乙酸等;

2. 产 $H_2$ 产乙酸菌群( $H_2$ -producing acetogenic bacteria): 代谢各种脂肪酸和中性化合物(乙醇、丙醇等)成 $H_2$ 和乙酸;

3. 同型乙酸菌群(homoacetogenic bacteria): 将一碳化合物(如 $CO_2$ 、甲

酸等)和多碳化合物转化为乙酸;

4. 产甲烷菌群(methanogenic bacteria): 利用乙酸、 $H_2/CO_2$ 和甲酸、甲醇等几种有限的一碳化合物产生甲烷。

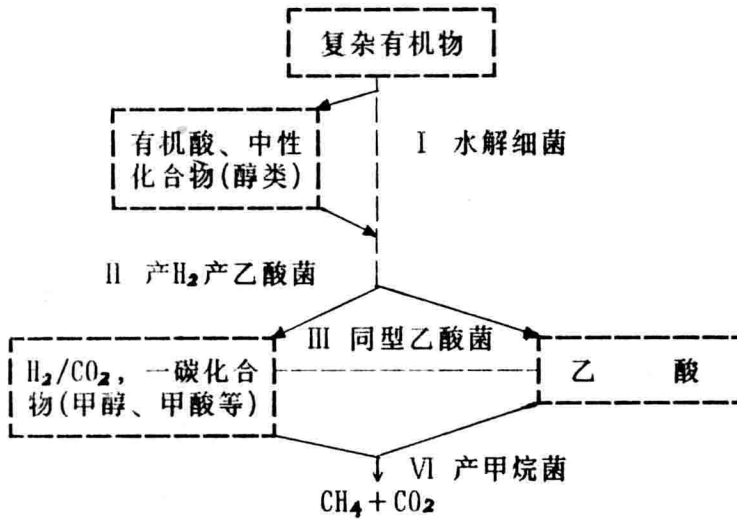


图1-2 四菌群说有机物降解图

四菌群说概括了目前对产甲烷发酵微生物群体研究的主要成果,较好地揭示了产甲烷发酵过程中不同代谢菌群间相互作用、相互影响的生态关系,并且阐述了复杂有机物厌氧发酵的基本生物机理。四菌群说也为在工艺上研究厌氧处理系统的原理和性能,调节微生物群体的结构组成和生产中维持厌氧系统的稳定性提供了科学依据。四菌群说的观点已为越来越多的人所接受。

### 1.2.2 厌氧微生物群体间的共生关系

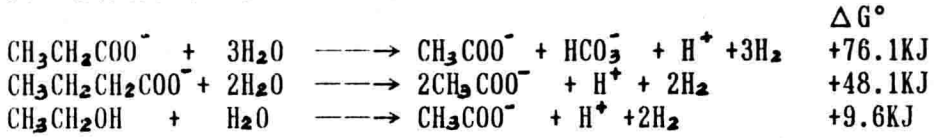
复杂有机物转化成甲烷的过程要求不同营养功能的菌群的协同作用,其中以不产甲烷菌和产甲烷菌之间的相互关系最为重要。概括地说这种关系主要表现在几个方面(19):

1. 不产甲烷菌为产甲烷菌提供生长和产甲烷所需要的基质;
2. 不产甲烷菌为产甲烷菌创造适宜的氧化还原条件;
3. 不产甲烷菌为产甲烷菌清除有毒物质;
4. 产甲烷菌为不产甲烷菌的生化反应解除反馈抑制;
5. 不产甲烷菌和产甲烷菌共同维持环境中适宜的pH值。

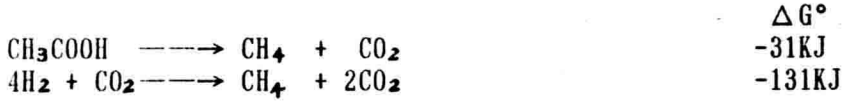
近年来,人们的兴趣集中于产氢菌(hydrogen-producing bacteria, 如产

氢产乙酸菌)和耗氢菌(hydrogen-consuming bacteria, 如产甲烷菌)之间的共生关系, 这种关系是基于热力学上的可能性(20)。

产氢产乙酸菌在厌氧甲烷发酵过程中的功能是将乙酸、丙酸、丁酸等其它中间代谢物转化成乙酸和分子氢, 相应的反应均为耗能反应(21):



产甲烷菌可以直接将产氢产乙酸菌的代谢产物转化成甲烷, 放能反应为:



因此, 如果要求转化在热力学上可行, 首先 $\text{H}_2$ 分压必须很低(丙酸 $<10^{-4}$  atm, 丁酸 $<10^{-3}$  atm, 乙醇 $<10^{-1}$  atm), 否则挥发酸将在系统内积累而不是分别转化成甲烷和 $\text{CO}_2$ 。事实上, 产氢产乙酸菌生产氢气的代谢效率和产率在很大程度上取决于 $\text{H}_2$ 被产甲烷菌这样的耗氢菌的去除速率。这一过程被称为种间氢转移(Interspecies Hydrogen Transfer)(22)。其次, 由于耗氢菌在系统内维持低 $\text{H}_2$ 分压的同时可为产氢产乙酸菌提供能量, 使由于热力学原因不能自发进行的生化反应变为可以进行, 因而在存在种间氢转移的系统中, 一种或多种耗氢菌的存在将极大的加速菌群向着产生更多终端氧化产物的方向进行的代谢速率。表现在甲烷发酵过程中, 形成的游离氢气迅速地被产甲烷菌转化, 还原 $\text{CO}_2$ 形成甲烷。

图1-3给出了在甲烷发酵过程中氢分压对转化乙醇、乙酸、丙酸和氢气所需的自由能的影响情况(1)。

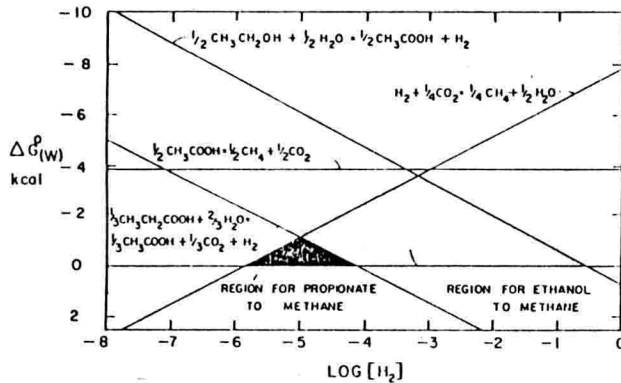


图1-2 氢分压对转化乙醇等所需自由能的影响

研究和实践证明:(1)运行良好的厌氧反应器,复杂的有机物可多途径地被转化成甲烷和CO<sub>2</sub>,挥发酸浓度很低,H<sub>2</sub>的分压则几乎难以测到;(2)在厌氧反应系统中,加入的H<sub>2</sub>会被迅速地转化成甲烷;(3)乙酸、丙酸、丁酸和H<sub>2</sub>的积累是反应器失常的必然结果。

### 1.2.3 产甲烷菌特性和产甲烷反应

产甲烷细菌是一种特殊的微生物类群。现在发现,它们既不同于原核生物,又不同于真核生物,它们属于一类原始细菌(Archebacteria)。表1-3列举了产甲烷细菌所特有的一些性质。表1-4为产甲烷细菌的分类表,其中还包括产甲烷细菌的形态、最适生长温度和pH以及能利用的基质。表中所列的索氏甲烷丝菌、马氏甲烷球菌、史氏甲烷短杆菌等在厌氧处理中是常见的。表1-5为基本的产甲烷反应,表中还给出了反应的自由能。

表1-3 产甲烷菌的特性

- 
1. 代谢物: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>;
  2. 基质范围窄: H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, 甲醇, 甲酸, 甲胺类, 乙酸;
  3. 氧化还原电位低: -330毫伏;
  4. 辅酶和辅助因子: 辅酶M, 辅酶F420, 辅酶F430, F342因子, CDR因子, B组分, 运动甲烷杆菌因子;
  5. 16S rRNA与典型原核生物关系很远;
  6. tRNA的普通臂与典型原核生物不同;
  7. 细胞壁无 D - 氨基酸, 无胞壁酸;
  8. 类脂: 大多数不能皂化, 含有植烷基醚键键合的角鲨烯、羟角鲨烯;
  9. DNA 的复杂性(基因组大小), 可能只有大肠杆菌的三分之一;
  10. 电子传递磷酸化作用: 无细胞色素和醌;
  11. CO<sub>2</sub>固定为细胞碳素的途径还未被确定。
- 

表1-5 基本的产甲烷反应

---

反 应	ΔG° (KJ)
1. 乙酸: CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O → CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-31.0
2. 甲醇: 4CH <sub>3</sub> OH → 3CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O	-314
3. H <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> : 4H <sub>2</sub> + H <sup>+</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> → CH <sub>4</sub> + 3H <sub>2</sub> O	-135.6
4. 胺类: 4CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O → 3CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 4NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup>	-225
2(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3H <sub>2</sub> O → 3CH <sub>4</sub> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 2NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + H <sup>+</sup>	-220
4(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 9H <sub>2</sub> O → 9CH <sub>4</sub> + 3HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 4NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + 3H <sup>+</sup>	-669
5. 甲酸: 4HCOOH + H <sub>2</sub> O → CH <sub>4</sub> + 3HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + 3H <sup>+</sup>	-130

---

### 1.2.4 甲烷发酵过程中优势菌群的演替

在甲烷发酵过程中,菌群间存在着基质竞争。某种菌能否占优势取决于其所处的复杂的生态环境。比较方便地确定竞争结果的可靠方法是根据在给定的

表1-4 产甲烷细菌分类表

目 (Order)	科 (Family)	属 (Genus)	种 (Species)	革兰氏染色	最适温度 <sup>°C</sup>	最适pH	基质	形态
甲烷杆菌目	甲烷杆菌科	甲烷杆菌属	反产甲烷短杆菌	+	37-45	6.7-7.8	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	长杆状到丝状
			布氏产甲烷短杆菌	不定	37-39	6.9-7.2	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	长杆状
			嗜热自养产甲烷短杆菌	+	65-70	7.2-7.6	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	长杆状到丝状
甲烷球菌目	甲烷球菌科	甲烷短杆菌属	反产甲烷短杆菌	+	37-39	6.3-6.8	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	近球状或梭镜状
			嗜热木产甲烷短杆菌	+	33-40	6.8-7.3	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	短杆状
			史氏产甲烷短杆菌	+	37-39	6.9-7.4	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	近球状或梭镜状
			万氏产甲烷球杆菌	-	36-40	6.5-9.0	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	不规则小球状
			沃氏产甲烷球杆菌	-	36-40	6.7-7.4	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	不规则小球状
			马氏产甲烷球杆菌	不定	30-40	6.5-7.5	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	似球状
甲烷微菌目	甲烷微菌科	产甲烷微菌属	运动产甲烷微菌	不定	40	6.1-6.9	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	短杆状
			卡里亚产甲烷微菌	-	20-25	6.8-7.3	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	不规则小球状
			产甲烷微菌	-	20-25	6.8-7.3	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	不规则小球状
			黑海产甲烷微菌	-	30-40	6.8-7.5	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	长短不一螺旋状
甲烷八叠球菌目	甲烷八叠球菌科	甲烷八叠球菌属	洪氏产甲烷八叠球菌	+	50	6.1-7.2	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	似球状
			巴氏产甲烷八叠球菌	-	35-40	7.4-7.8	乙酸	长丝状



复杂生态系统中菌体各自的有关生长动力学参数。

首先是在厌氧条件下，硫酸盐还原菌利用游离氢还原硫酸盐成硫化物与产甲烷细菌利用游离氢还原 $\text{CO}_2$ 成甲烷方面的竞争。产甲烷菌对 $\text{H}_2$ 代谢的半饱和常数( $K_s$ )为 $6.6\mu\text{m}$ ，而硫酸盐还原菌仅为 $1.3\mu\text{m}$ 。因此，仅仅在高硫酸盐和氢气受限制的环境中，硫酸盐还原菌对产甲烷菌才有竞争优势。同样，以乙酸为基质时，硫酸还原菌和产甲烷菌的表观 $K_s$ 值分别为 $0.2\mu\text{m}$ 和 $3.0\mu\text{m}$ 。至今已多次发现，当含硫酸盐每升几百毫克的生活污水被厌氧处理时，产甲烷过程几乎不进行，而废水中需氧量的降低与硫化氢的产量却很吻合。因此，待处理水中的硫酸盐浓度对甲烷发酵系统是一个重要参数。

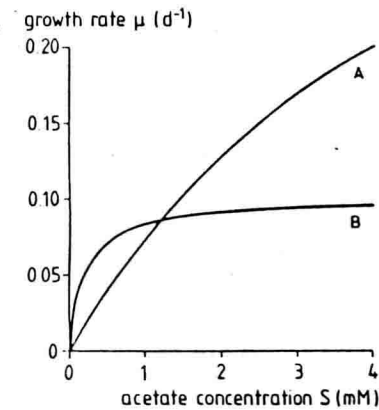


图1-3 乙酸浓度与产甲烷菌生长速率的关系

A: *M.sarcina barkeri*,  
 $\mu_{\max}=0.45\text{d}^{-1}$ ,  $K_s=5\text{mM}$   
B: *M.thrix soehngenii*,  
 $\mu_{\max}=0.10\text{d}^{-1}$ ,  $K_s=0.2\text{mM}$

优势菌群的演替也存在于产甲烷菌之间。在中温条件下( $35-40^\circ\text{C}$ ), *Methanosarcina barkeri* 乙酸代谢的动力学参数是: 比基质利用速率 $k=6-10\text{day}$ , 半饱和常数 $K_s$ 约 $400\text{mg/l}$ 。而*Methanothrix soehngenii*的 $k=2\text{day}$ ,  $K_s=20-40\text{mg/l}$ 。图1-3给出了这两种菌的相对比生长速率与乙酸浓度之间的函数关系(23)。因此在乙酸浓度低于 $70\text{mg/l}$ 的情况下, *M.soehngenii*有竞争优势; 反之, *M.barkeri*占上峰。同样, 在高温条件下( $55-58^\circ\text{C}$ ), *Methanothrix*与*Methanosarcina*之间的生长优势关系也有类似的结果(24,25)。

### 1.3 UASB工艺

#### 1.3.1 UASB工艺的发展历史

1971年, Lettinga教授等在研究用上流式厌氧滤池处理土豆加工废水和甜菜制糖废水时, 发现实际上滤池累积的大部分生物量和具有的大部分净化作用均发生在装置的底部。于是便在底部设置了一个不填充填料的区域来积累更多的生物量, 后来干脆取消了池内的全部填料, 在反应器的上部设置了一个气体收集器。如此, 第一个实验室规模的UASB反应器在荷兰Wageningen农业大学建成并开始运行(26)。当时采用沉降性能良好的絮状污泥, 污泥浓度在 $15\text{kg}$