

5-9

1992年第4期

✓  
2  
废水处理, 厌氧生物处理  
江苏沼气

X703

5

# 厌氧生物处理新工艺及其特点

申立贤

(北京市环保研究所)

## 一、厌氧生物处理新工艺

厌氧生物处理技术约有一百年的历史, 曾有过两次发展高潮。第一次高潮是在五十年代初期, 其厌氧装置以传统消化池为代表。

由于能源危机、环境污染、土地贫瘠化等问题, 厌氧处理能将污染环境的有机物转变成使用方便的沼气能, 其工艺自身能耗低, 剩余污泥量少的突出特点越来越受到人们的重视。因此, 近廿年是厌氧生物处理技术发展的第二个高潮, 人们将这期间开发的厌氧装置称为新工艺或第二代厌氧发酵装置。一般来说, 新工艺有: 厌氧接触消化池, 厌氧过滤器、上流式厌氧污泥床反应器、厌氧澄清消化池、厌氧生物流化床(膨胀床), 厌氧生物转盘, 最近又开发了两相厌氧消化工艺、厌氧复合床反应器、厌氧颗粒污泥膨胀床反应器(EGSB)等。

## 二、厌氧生物处理新工艺的特点

上述厌氧新工艺与传统消化池比较有一个共同的特点: 新工艺延长了厌氧污泥的停留时间, 提高了厌氧装置的污泥浓度, 改善了厌氧装置内的流态, 新工艺具有以下特点:

1. 在厌氧反应器内保持有大量的厌氧污泥, 因而厌氧微生物、特别是产甲烷菌数量多;
2. 具有较长的固体(污泥)停留时间, 使固体停留时间远远大于水力停留时间;
3. 具有较高的容积负荷及去除效率和产气率;
4. 可用于处理不同浓度的有机废水;
5. 可作为常温下的厌氧处理工艺;
6. 具有较大的缓冲能力。

新工艺的处理能力得到很大提高, 一般都能达 $10\text{KgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 以上, 特别是上流式厌氧污泥床工艺取得了突出的成绩, 在形成了颗粒污泥以后, 其负荷与稳定性更好, 可达 $30\sim 50\text{KgCOD}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ 以上, 去除率仍可稳定在90%左右。

## 三、厌氧装置中的微生物固化技术

在生物工程中, 采用固定化细胞技术生产酒精、高果糖浆、氨基酸等。在废水处理中, Karnbe(1980)研究了用固定化甲烷发酵菌从废水中制取沼气, 采用琼脂、聚丙烯酰胺和骨胶原膜作为载体包埋固定甲烷发酵菌。试验说明, 固定化的甲烷发酵菌活性高, 提高了对氧的耐受能力等。这种方法目前仅限于试验室研究阶段。

在废水处理工程中, 特别在厌氧处理工艺中, 为了延长厌氧污泥微生物的停留时间, 研究者都在千方百计将细菌污泥保留在反应器内, 所有新工艺都建立在某种细菌污泥固定化模式的基础上, 目前采用的方法有:

1. 细菌附着在填料上;
2. 形成高度可沉降的颗粒污泥;
3. 在静态填料之间截留菌体絮状物及聚集体。

比利时卢文大学纳沃教授采用微粒载体固化的流化床工艺,使微生物附着在 $10\sim 70\mu\text{m}$ 直径的砂粒上,微生物颗粒约 $2\sim 3\text{mm}$ ,这些颗粒随水的上流而流化,成为流化床处理工艺。

荷兰Lettinga开发的上流式厌氧污泥床反应器能够形成颗粒污泥是该装置的一个突出特点。近年来,国内外一些研究者对此反应器的初次启动与形成颗粒污泥的条件、机理等进行了大量研究,以求在初次启动阶段获得满意的厌氧生物污泥,使之具有优良的沉淀性能和很高的产甲烷能力。综合各研究者的试验结果,投产初期应注意遵循如下三个原则:

1. 最初的污泥负荷应低于 $0.1\sim 0.2\text{KgCOD/KgTS}\cdot\text{d}$ ;
2. 废水中原来存在和产生出来的各种挥发酸未能有效地分解之前,不应增加反应器负荷;
3. 反应器内的环境条件应控制在有利于厌氧细菌(产甲烷菌)的增殖。

一般来说,在接种污泥充足,操作控制得当的情况下,形成具有一定高度的颗粒污泥床需要 $3\sim 4$ 个月左右。

#### 四、形成颗粒污泥的主要工艺条件

影响污泥颗粒化的因素很多,总的来说,颗粒污泥的形成受污泥接种物的性质、基质成分、反应器的工艺条件、微生物的性质、以及微生物菌种间的相互作用等影响,是生物、化学及物理因素等多种作用的结果。

**1. 接种污泥** 接种污泥量在 $6\sim 15\text{KgVSS/m}^3$ 为宜。以接种厌氧消化污泥或其脱水的湿污泥的最好,也可采用含甲烷菌的其它接种物,并注意不要让大块物质与惰性物质(如污砂等)进入反应器内。

**2. 废水的性质** COD浓度以 $4000\sim 5000\text{mg/l}$ 为宜,一般不低于 $1000\text{mg/l}$ 。废水中的SS应控制在 $2\text{g/l}$ 以下,尽量少进悬浮物特别是惰性物质为宜。从各研究者的试验结果看,用未经酸化的废水(碳水化合物)培养颗粒污泥比主要由挥发酸为基质的快。

**3. 反应器的工艺条件** 在培养颗粒污泥的过程中,各种条件都应控制在有利于厌氧菌增殖的范围内(主要是产甲烷菌),这里对温度、挥发酸、固体停留时间及反应器负荷进行讨论。

a. 温度,在高温( $50\sim 55^\circ\text{C}$ )、中温( $35\sim 41^\circ\text{C}$ )及常温下皆有形成颗粒污泥的报导,但在中温条件下形成的颗粒污泥,颗粒大、活性高、形成速度较快。

b. 污泥停留时间(SRT)的影响 反应器启动初期,SRT应保持在 $100\text{d}$ 以上,大约需要 $15\sim 40\text{d}$ ,应根据反应器中的污泥量及污泥的沉淀性能决定。

c. 出水挥发酸 有资料报导,控制反应器出水中的乙酸含量对污泥颗粒化及颗粒污泥中的优势菌种有很大影响。Wegant等报导在 $55^\circ\text{C}$ 以挥发酸为基质的研究中,当出水中乙酸浓度低于 $200\text{mg}\cdot\text{COD/l}$ 时增加负荷时,培养出的颗粒污泥以含甲烷细菌为主,当出水中乙酸浓度控制在 $700\text{mg}\cdot\text{COD/l}$ 时,培养出的颗粒污泥以含甲烷八叠球菌为主。

d. 反应器负荷 污泥颗粒化过程一般是在反应器有机负荷在 $2\sim 6\text{KgCOD/m}^3\cdot\text{d}$ ,其污泥负荷在 $0.2\sim 0.6\text{KgCOD/KgVSS}\cdot\text{d}$ 范围。

## 五、颗粒污泥形成(固化)的原理及性质

### 1. 颗粒污泥的形成原理

污泥颗粒化是污泥自身固定所形成的污泥颗粒。其Lettinga与合作者通过UASB装置小试、中试、半生产与生产装置试验研究认为,细菌是很容易在惰性表面上附着的,细菌的结团(絮凝)很容易发生。用消化污泥接种时,污泥结团的主要核心是较重的污泥及颗粒,细菌以某种程度附着在上面。通过新生成细菌的附着,截留或缠绕,而使这些较重的“基本核心”增长成颗粒污泥。当反应器处于有利于微生物生长状态时,这一过程进行得很快。在启动的后一阶段,附着的细菌膜或大的细菌胶团破裂而成为次级生长核心,颗粒污泥的形成是细菌在污泥絮凝物内或污泥絮凝物上繁殖,在重力(压力)、水流及逸出的气体造成的轻微(水平的、垂直方向的)扰动的影响下发生的生物团聚作用。同时认为污泥增稠可通过增加污泥床的高度来促进;在一定限度内,可通过增加搅拌强度来促进,而增加搅拌强度的方法最好靠增加反应器的产气量与利用进水的水力作用来实现。

近期的研究结果表明,在颗粒污泥中存在大量的丝状甲烷菌(Methanotrix)或索化丝状甲烷菌(Methanotrix Soehgenii),这些丝状菌具有极强的附着能力,并可以通过控制适当的工艺条件进行筛选使之成为优势菌种,这对污泥颗粒化的理论研究与应用具有很大意义。在UASB反应器内丝状甲烷菌的增殖,在反应器内水流及生成的气体上升时产生的稳定缓和搅动下,丝状菌体相互网络而变大,其它有机物分解菌在其表面产生粘质物,由粘质物形成的被膜层而使污泥保持颗粒形状。

### 2. 颗粒污泥的性质

为了加深对厌氧颗粒污泥的认识,有助于确定合理的反应器结构与工艺条件,现将一些报导颗粒污泥的性质情况归纳如下。

#### (1) 颗粒污泥的物理性质

①形状不规则,一般呈球形或椭圆形,直径0.1~2mm左右,最大可达3~5mm。颜色呈灰黑色或褐黑色,肉眼可见表面包裹着的灰白的生物膜。

②比重 一般为1.01~1.05左右。

③污泥指数(SVI) 细小颗粒一般为20ml/gss左右,颗粒污泥一般为10ml/gss;沉淀性能较好的絮凝状污泥约为40~60ml/gss。

④颗粒污泥的沉降速度 荷兰反应器体积为30m<sup>3</sup>中试的颗粒污泥沉速为5~10m/S;荷兰200m<sup>3</sup>生产试验的颗粒污泥沉速为0.2~13.9mm/S;清华大学用醋酸等培养的颗粒污泥沉速为0.42m/S;北京环保所等在山东24m<sup>3</sup>酒糟滤出液废水处理中试装置的颗粒污泥在清水中的自由沉速为14~34.8mm/S。

#### (2) 颗粒污泥的成分

成熟的颗粒污泥,其VSS/SS一般在70~80%左右(VSS—挥发性有机物)。Lettinga介绍其范围在30~90%,上限是小试纯培养颗粒污泥,下限是废水中含有CaCO<sub>3</sub>,在含有CaCO<sub>3</sub>为800mg/l时,颗粒污泥呈螺旋状,但表面没有结壳。在处理含有CaCO<sub>3</sub>500~3000mg/l的玉米淀粉废水时,形成了钉状(针状)污泥,使颗粒污泥表面结壳,主要是CaCO<sub>3</sub>、CaHPO<sub>4</sub>的沉淀物所致,从而严重影响污泥活性。

颗粒污泥一般都含有惰性物质如碳酸钙一类无机盐晶体、纤维、砂粒、碎屑等,还含有多种金属离子。

颗粒污泥中的碳、氢、氮的含量大致为:碳40~50%、氢约7%、氮约10%左右。

### (3) 颗粒污泥的活性

葡萄糖人工配水培养的颗粒污泥的最大比COD去除速率 $V_{max}$ 为1.2Kg COD/Kg $v_{ss}$ ·d;啤酒废水的颗粒污泥的 $V_{max}$ 为1.9KgCOD/Kg $v_{ss}$ ·d;挥发酸混合基质培养的颗粒污泥 $V_{max}$ 为2.2~2.5KgCOD/Kg $v_{ss}$ ·d;酒精糟滤出液形成的颗粒污泥的 $V_{max}$ 为0.8~1.2KgCOD/TS·d;高温甲烷丝菌(以乙、丁酸为基质)的颗粒污泥的 $V_{max}$ 为4.2~7.3KgCH<sub>4</sub>-COD/Kg $v_{ss}$ ·d。

### (4) 颗粒污泥的微生物组成

构成颗粒污泥的细菌大致有革兰氏阴性的多细胞丝状菌及革兰氏性质不确定的球菌、杆菌、八叠球菌等。

如前所述,由于基质、操作工艺等不同,颗粒污泥的性质与其优势菌种亦不同。即是同一种废水,因操作工艺不同其结果也不一样,北京环保所在对苯二甲酸废水处理小试与中试中,所用废水水质基本一致(同时运行),但小试装置以甲烷八叠球菌为主,污泥细小;中试装置较好,其原因主要启动初期,小试在低负荷下运行时间短,提高负荷的速度较快,亦即其污泥负荷较高。中试启动时在低负荷下运行的时间长,初期污泥负荷在0.1~0.2KgCOD/KgTS·d,后来增加到0.3KgCOD/KgTS·d左右,稳定运行时污泥负荷为0.5~0.6KgCOD/KgTS·d。而小试则达到0.6~1.2KgCOD/KgTS·d,此外,小试与中试装置的高度不同、反应器中的水力条件差别等也都是产生差别的原因。

## 六、酒精废水厌氧中试颗粒污泥的形成

由北京环保所、山东酒精总厂在1982~1985年期间合作进行的上流式厌氧污泥床反应器(24m<sup>3</sup>)中试,处理以薯干为原料的酒精糟滤出液,原水COD20000~25000mg/l、BOD12000~15000mg/l、挥发酸1500~3000mg/l、SS710~1600mg/l、总固体(TS)为10~15g/l。

试验说明,在进水SS为0.5~2.0g/l(有时达3g/l)、总固体TS为10~16g/l(有时18g/l),培养颗粒污泥的运行条件为有机负荷5~6KgCOD/m<sup>3</sup>·d、产气率2.5~3.5m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·d,污泥负荷0.2KgCOD/KgTS·d左右,适当补加钙盐,经过四个月左右运行形成了颗粒污泥。随后,即可较迅速地增加有机负荷,其COD去除率皆保持在90%以上,反应器负荷达到22.3KgCOD/m<sup>3</sup>·d, BOD去除率为97%, HRT为0.93d,装置容积产气率为12.16m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·d,每去除1KgCOD产沼气0.58m<sup>3</sup>,出水挥发酸为35mg/l左右,其颗粒污泥床高度大于1.5m,污泥浓度为100~150g/l,反应器的负荷变化情况见表。

## 结 束 语

厌氧新工艺的发展很快,特别是上流式厌氧污泥床工艺(UASB),近年来已有上百座大型生产装置投入正常运行。在国内,北京市环保所从八十年代初开始,分别在常温、中温、高温下对不同浓度的十多种废水进行了研究,根据不同水质调整装置结构及工艺条件,对厌氧装置、培养颗粒污泥的工艺条件、装置流态、降解动力学、降解途径及厌氧污泥的优

势菌等进行了较细致的研究,并设计建成了四个UASB厌氧工程,最大装置达3000m<sup>3</sup>/座,调试运行效果良好,还有几个大型工程正在设计或施工中。此外,厌氧过滤器、厌氧复合床反应器、两相厌氧消化器等新工艺发展亦很迅速。厌氧生物处理在去除污染的同时回收了沼气和能,并具有促进生态良性循环的功能,它的经济效益表现在环境、生态、能源三个方面。此外还可促进一些难降解有机物的分解、显著提高脱氮效果等。总之,厌氧生物处理技术和处理装置在向高效率、低成本、多用途方面发展,已展现出广泛应用的前景。

附表 反应器的负荷变化情况  
(各负荷阶段运行平均值)

累计运行日数 (d)	有机负荷 (kgCOD/ m <sup>3</sup> ·d)	进水COD (mg/l)	出水COD (mg/l)	COD去除率 (%)	装置产气率 (m <sup>3</sup> 沼气/ m <sup>3</sup> 池·d)	COD产气率 (m <sup>3</sup> /kg COD)	甲烷含量 (%)
241~245	8.8	21339	1051	95.1	4.3	0.526	62.9
246~259	9.3	25063	1334	94.7	5.3	0.570	60.7
260~269	10.3	22729	1626	92.6	5.5	0.570	65.3
270~275	11.9	22162	2008	90.9	6.2	0.574	61.7
276~290	13.7	24146	2078	91.4	7.2	0.574	62.0
291~297	16.6	25166	1915	92.8	9.0	0.586	59.7
298~306	18.7	28085	2180	91.3	10.7	0.628	57.7
307~316	20.5	24470	2344	90.4	11.2	0.620	60.0
317~325	22.3	20896	1823	91.2	12.16	0.580	62.1

(上接第4页) 仅仅只有一个单一的聚合酶被发现在任何一个古细菌聚合酶对鹅膏蕈碱又是不敏感的。在嗜盐细菌里,转录的起始位点已被认定相同于Bacterospin的基因与rRNA基因组。此外,可能的终端位点类似于真细菌。Methanococcus spp.的mRNA是无盖的,其特征也类似于真细菌的转录与转移系统。

#### 7. DNA结构与复制

古细菌的总的基因结构类似于真细菌。其复杂性变化在E.coli的40~90%。对应的基因大小为 $1.0 \times 10^9 \sim 2.4 \times 10^9$ 道尔顿。古细菌的基因数大致和真细菌里的基因数相比拟。DNA组成也类似于真细菌,G+C含量变化超过大多数真细菌。染色体DNA也存在于古细菌中。在产甲烷细菌中已发现Cryptic质粒。

#### 8. 古细菌的能量代谢

在古细菌里均已发现并报导了膜转移电位和质子梯度的质子动力。在嗜盐细菌里,质子动力偶联ADP磷酸化和主动运输。在产甲烷细菌里,质子动力的ADP偶联产生ATP,仍然有争论,然而甚至是在产甲烷细菌里,质子动力象是在其他生物产能里,起着一个中心的作用,类似于真细菌的呼吸系统是特别有趣的,目前已描述了三种古细菌的呼吸链Halobacterium、Sulfolobus及Thermoplasma spp类似于真细菌。尽管有一些独特的特点,如产甲烷细菌,在底物的利用方面等都不一样。但总的来讲,古细菌的代谢和生理类似于真细菌,如碳水化合物的分解代谢,N<sub>2</sub>的同化和生物合成的总的途径等均类似于真细菌。然而许多酶的结构与催化特性,既相似于真细菌又相似于真核生物的酶。(参考文献略)