

# 厌氧颗粒污泥膨胀床 (EGSB) 的工艺特征与运行性能

季民 霍金胜

(天津大学环境科学与工程研究院 天津 300072)

**摘要:**分析了颗粒污泥膨胀床 (EGSB) 的工艺特征以及特殊条件下的处理性能。EGSB 采用处理水回流技术与较高的上升速度,使颗粒污泥床处于膨胀状态,强化了传质速率,减少了水力停留时间,提高了处理效率。适用于超高浓度和含有毒物质的工业废水,也特别适用于低温和低浓度的有机废水的处理。

**关键词:**颗粒污泥膨胀床;EGSB;厌氧生物处理

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-4826(1999)04-0001-04

## Characteristics and Advantages of Expanded Granular Sludge Bed Reactor

Ji Min HUO Jin-sheng

**ABSTRACT:** The process characteristics of a new type of anaerobic reactor, expanded granular sludge bed (EGSB) reactor, and its treatment performance at a few special conditions were reviewed and evaluated. In EGSB, the effluent recirculation and the high superficial liquid velocity cause complete fluidization of the sludge bed. This improves the mass transfer rate from the liquid to the granules, decreases the hydraulic retention time and increases the organic removal efficiency. EGSB reactors are possible to treat the industrial wastewater with ultra high concentration and toxic compounds, as well as the low strength organic wastewater at low temperature.

**KEY WORDS:** expanded granular sludge bed (EGSB); anaerobic wastewater treatment

### 1 厌氧生物处理工艺的发展

普通消化池是采用最广泛的一种厌氧反应器。但停留时间长,设备庞大,能耗高。厌氧接触工艺 (Anaerobic Contact Process) 的出现,标志着第二代厌氧生物处理工艺的诞生<sup>[1-2]</sup>。高效生物处理系统的关键之一是尽量提高设备中的生物量<sup>[3]</sup>。第二代厌氧处理工艺正是基于这一理论,如厌氧滤池 (AF),升流式厌氧污泥床 (UASB) 等。但反应器结构复杂,例如 UASB 对布水系统和三相分离器要求很严格。之二是强化传质作用,加速基质从废水向微生物细胞内的传递过程,保持进水与厌氧污泥之间的充分接触<sup>[3]</sup>。在 UASB 反应器中,由于反应器内混合强度不够,容易形成短流,污染物会对微生物产生抑制和毒

害作用。为解决这些矛盾,需要提高反应器水力负荷,通常采用处理水回流技术。基于上述理论和技术,第三代厌氧处理工艺应运而生,包括膨胀颗粒污泥床 (EGSB),厌氧内循环反应器 (IC),厌氧升流式流化床 (UFB BIOBED),以及阶段多相厌氧反应器 (SMPA) 等<sup>[4]</sup>。本文重点分析 EGSB 的工艺特征以及处理性能。

### 2 EGSB 反应器的工艺特征

Lettinga 教授和其同事自 1974 年开创了 UASB 之后,在 80 年代后期,又根据 UASB 工艺的缺点,开始研究 EGSB。EGSB 与 UASB 反应器结构相似,细高型,采用处理水回流,通过高的水流上升速度,污泥床处于膨胀化状态,从而保持了进水与颗粒污泥的

充分接触。资料表明,EGSB 可在 1~2 h 的水力停留时间下,取得 UASB 工艺需要 8~12 h 才能达到的效果<sup>[4]</sup>。

### 2.1 EGSB 处理系统的工艺流程

EGSB 处理系统工艺流程示意图如图 1 所示。

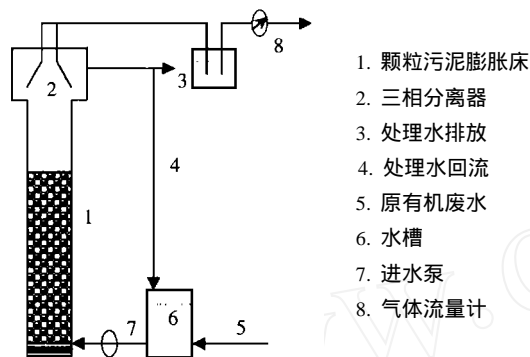


图 1 EGSB 工艺流程示意图<sup>[5]</sup>

### 2.2 EGSB 的工艺特点

与 UASB 反应器相比,EGSB 有以下 5 个显著特点:

EGSB 能在高负荷下取得高处理效率,尤其是在低温条件下,对低浓度有机废水的处理。EGSB 在处理 COD 低于 1 000 mg/L 的废水时仍能有很高的负荷和去除率。例如处理挥发性有机酸(VFA)废水的试验研究中达到同样的去除率,在 10 时,UASB 负荷为 1~2 kg COD/(m<sup>3</sup>·d),EGSB 为 4~8 kg COD/(m<sup>3</sup>·d); 15 时,UASB 为 2~4 kg COD/(m<sup>3</sup>·d),EGSB 为 6~10 kg COD/(m<sup>3</sup>·d)。处理未酸化的废水时,在 10 时,UASB 负荷为 0.5~1.5 kg COD/(m<sup>3</sup>·d),EGSB 为 2~5 kg COD/(m<sup>3</sup>·d); 15 时,UASB 负荷为 2~4 kg COD/(m<sup>3</sup>·d),EGSB 为 6~10 kg COD/(m<sup>3</sup>·d)<sup>[1]</sup>。

EGSB 反应器内维持很高的水流表观上升流速。在 UASB 中液流最大上升速度仅为 1 m/h,而 EGSB 其速度可高达 3~10 m/h<sup>[6]</sup>,最高可达 15 m/h<sup>[7]</sup>。可采用较大的高径比(15~40),细高型的反应器构造,有效地减少占地。

EGSB 的颗粒污泥床呈膨胀状态,颗粒污泥性能良好。在高水力负荷条件下,颗粒污泥的粒径较大(3~4 mm)<sup>[8]</sup>,凝聚和沉降性能好(颗粒沉速可达 60~80 m/h)<sup>[6]</sup>,机械强度也较高(3.2×10<sup>4</sup> N/m<sup>2</sup>)<sup>[8]</sup>。

EGSB 对布水系统要求较为宽松,但对三相分离器要求更为严格。高水力负荷,使得反应器内

搅拌强度非常大,保证了颗粒污泥与废水的充分接触,强化了传质,有效地解决了 UASB 常见的短流、死角和堵塞问题。但是高水力负荷和生物气浮力搅拌的共同作用,容易发生污泥流失。因此,三相分离器的设计成为 EGSB 高效稳定运行的关键。

EGSB 采用处理水回流技术,对于低温和低负荷有机废水,回流可增加反应器的水力负荷,保证了处理效果。对于超高浓度或含有毒物质的有机废水,回流可以稀释进入反应器内的基质浓度和有毒物质浓度,降低其对微生物的抑制和毒害,这是 EGSB 区别于 UASB 工艺最为突出的特点之一。

### 3 EGSB 在几种特殊条件下的运行性能及颗粒污泥特性

#### 3.1 EGSB 对低浓度有机废水有很高的去除效率

根据 Monod 动力方程式:

$$-\frac{dS}{dt} = v_{max} \frac{XS}{K_s + S}$$

式中:  $\frac{dS}{dt}$  — 基质降解速率;

$S$  — 基质浓度;

$X$  — 污泥浓度;

$K_s$  — 饱和常数;

$v_{max}$  — 基质最大比降解速率。

可知有机物降解速率依赖于反应器内的基质浓度。当  $S \ll K_s$  时,方程化简为  $-\frac{dS}{dt} = \frac{v_{max}}{K_s} XS$ , 遵循一级反应,对上式积分处理可得去除率表达式:

$$= 1 - e^{-\frac{v_{max}}{K_s} X t}$$

式中: — 基质去除率;

$t$  — 水力停留时间。

以上两式表明,进水低基质浓度使得反应器内有机物降解速率减小。基质去除率依赖于反映细菌和基质之间亲和力的饱和常数  $K_s$ 。本征饱和常数  $K_s$  反映了基质从废水进入处于悬浮状态的分散细菌细胞的传质过程阻力。而表观饱和常数  $K_s$  则反映了基质先进入生物膜,而后进入细菌体内的传质过程阻力。因为仅有有限的基质进入生物膜,所以表观  $K_s$  比本征  $K_s$  的值大。这样,厌氧处理低浓度废水就需要通过高水力湍流来获取充分的混合强度以降低表观  $K_s$  的值。由于 EGSB 反应器中具有良好的水力湍流条件,减少了传质阻力,处理低浓度废水时,能够获得较高的基质去除率。

在 UASB 和 EGSB 的对比试验中<sup>[8]</sup>, 为了保证 80% 以上的去除率, UASB 对啤酒废水的最低允许进水 COD 浓度为 630 mg/L, 而对酒精废水其最低 COD 浓度为 422 mg/L。对低浓度废水的处理, EGSB 具有很高负荷和去除率。例如应用 EGSB 处理 COD 浓度为 100 mg/L 的酒精废水时, 有机负荷可达 12 kg/(m<sup>3</sup>·d), COD 去除率为 80%~97%。

### 3.2 进水溶解氧对 EGSB 处理性能影响很小

一般情况下, 厌氧处理对溶解氧极为敏感, 但厌氧颗粒污泥对溶解氧的承受能力却很高。主要机理在于颗粒污泥中某些兼性菌的有氧呼吸。当无基质供给时, 兼性菌有氧呼吸减弱, 对产甲烷菌产生毒害作用。但是, 即使在无足够基质供给的情况下, 产甲烷菌对溶解氧仍有一定的承受能力, 说明产甲烷菌存在一个固有的溶解氧承受能力极限值。在正常条件下, 与兼性菌消耗的生化需氧量(BOD)相比, 进入反应器的溶解氧非常低, EGSB 试验已证实溶解氧是无害的。表 1 是 EGSB 反应器两个平行试验的结果, 数据表明二者的 COD 去除率以及出水水质相近<sup>[9]</sup>。

表 1 EGSB 在 30 °C 下处理酒精废水的性能

反应器	R1	R2	R1	R2	R1	R2
COD (mg/L)	196	163	154	127	146	148
有机负荷 (g COD/(L·d))	4.7	3.9	7.4	6.1	17.5	17.8
污泥负荷率 (g COD/(g VSS·d))	0.47	0.39	0.74	0.61	1.75	1.78
HRT (h)	1.0	1.0	0.5	0.5	0.2	0.2
去除率 (%)	97	97	89	92	67	69

注: 平行试验的 EGSB 反应器, R1 进水中充氧, R2 中不含溶解氧

### 3.3 低温状态 EGSB 的处理能力

厌氧处理中, 低温通常意味着低反应器性能。但利用 EGSB 工艺在 15~20 °C 下处理进水 COD 浓度范围为 666~886 mg/L 的低浓度啤酒废水的效果为: 水力停留时间(HRT)小于 2.4 h, 负荷为 10 kg COD/(m<sup>3</sup>·d), COD 去除率为 70~91%。这一事实表明, EGSB 厌氧工艺在低温下具有较高的处理能力。有低温条件(8 °C)下处理低浓度麦芽糖和酸性废水

表 3 EGSB 反应器的研究和应用

处理废水	温度(°C)	反应器容积(L)	进水 COD 浓度(mg/L)	水力停留时间(h)	COD 容积负荷率(kg/m <sup>3</sup> ·d)	COD 去除率(%)
长链脂肪酸废水 <sup>[5]</sup>	30 ±1	3.95	600~2700	2	30	83~91
甲醛和甲醇废水 <sup>[6]</sup>	30	275 000	40 000	1.8	6~12	>98
低浓度酒精废水 <sup>[8]</sup>	30 ±2	2.5	100~200	0.09~2.1	4.7~39.2	83~98
酒精废水 <sup>[9]</sup>	30	2.18~13.8	500~700	0.5~2.1	6.4~32.4	56~94
啤酒废水 <sup>[9]</sup>	15~20	225.5	666~886	1.6~2.4	9~10.1	70~91
低温麦芽糖废水 <sup>[10]</sup>	13~20	225.5	282~1436	1.5~2.1	4.4~14.6	56~72
蔗糖和 VFA 废水 <sup>[11]</sup>	8	8.6	550~1100	4	5.1~6.7	90~97

注: 甲醛和甲醇废水<sup>[6]</sup>的处理水回流比为 30 倍。

并获高效处理效果的报道<sup>[10]</sup>。

### 3.4 低温低浓度条件下的颗粒污泥特性

性能良好的颗粒污泥是保证 EGSB 工艺的高效稳定运行的关键。通常条件下, 颗粒污泥是由多种专性厌氧菌种组成。其中的索氏甲烷菌(Methanotrix)是一种丝状菌, 很容易吸附; 八叠甲烷球菌(Methanoscandia)形成的颗粒污泥紧密, 具有密度大和沉降性能好等特点。它们在颗粒污泥形成中发挥了巨大作用。但是在低温低浓度特殊条件下, 颗粒污泥的成分有所变化, 其优势产甲烷菌属为甲烷毛发菌属(Methanosaeta)和甲烷短杆菌属(Methanobrevibacter)<sup>[11]</sup>。EGSB 反应器内的上升流速促进了颗粒污泥的粒径增大和沉降性能的增强, 使得颗粒污泥在重力作用下沿水流方向分层分布。在二级串联 EGSB 系统中, 反应器顶部的颗粒污泥粒径较小, 但其活性却分别比底部的颗粒污泥高 18% 和 48% (表 2)。且顶部污泥的表观扩散系数也大。EGSB 反应器底部的环境条件和压力导致颗粒污泥密度和粒径增加, 这与颗粒污泥低活性和基质传质限制有关<sup>[11]</sup>。

表 2 二级串联 EGSB 系统在 10 °C 处理醋酸盐废水的颗粒污泥性能

检测项目	第一级顶部	第一级底部	第二级顶部	第二级底部
醋酸降解活性 (kgCOD/(gVSSd))	0.221	0.178	0.304	0.205
表观扩散系数 (10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s)	1.42	1.11	1.25	1.12
机械强度 (kN/m <sup>2</sup> )	94.3	76.1	90.6	116.0
平均粒径 (mm)	1.25	1.95	1.30	1.85

## 4 EGSB 的应用实例

表 3 中列出了国外文献报道的有关研究和应用实例。

## 5 EGSB 的推广前景

以 EGSB 为代表的第三代厌氧生物反应器将成为现在和将来厌氧生物处理工艺关注的焦点。EGSB

生物反应器可应用于以下领域：

EGSB 作为一种高效、节能的厌氧生物反应器，采用处理水回流技术，有效地降低了进水中有毒物质的浓度和毒性，用于处理含有有毒物质的废水。

EGSB 适用于各种浓度（低中高）工业废水和城市污水的处理。在处理低浓度有机废水时，处理水回流可以获得充足的水力混合强度，在处理超高浓度有机废水时，处理水回流则起到稀释作用。

EGSB 对水温的适用范围广。尤其在低温条件下，其最低允许进水浓度和处理效果都明显优于其它厌氧处理工艺。

EGSB 还可应用于小型和大型生活污水处理系统、垃圾填埋厂的渗滤液处理系统以及农业废物废水处理领域<sup>[7]</sup>。

#### 参考文献：

- [1] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998
- [2] 申立贤. 高浓度有机废水处理技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992
- [3] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程 (下) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [4] 王凯军. 厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器 [J]. 环境科学, 1998, 19(1): 94~96

[5] Arjen Rinzema. Anaerobic Digestion of Long - Chain Fatty Acids in UASB and Expanded Granular Sludge Bed Reactors [J]. Process Biochemistry, 1993, 28: 527~537

[6] George, R. Z. and Frankin, R. Anaerobic Treatment of Chemical and Brewery Wastewater with a New Type of Anaerobic Reactor [J]. The Biobed EGSB Reactor. Wat. Sci. Tech., 1996, 34(5~6): 375~381

[7] Lettinga, G. et al. Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in the Near Future [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 35(10): 5~12

[8] Kato, M. T. et al. Feasibility of Expanded Granular Sludge Bed Reactors for the Anaerobic Treatment of Low - Strength Soluble Wastewaters [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 44(5): 469~479

[9] Kato, M. T. et al. The Anaerobic Treatment of Low Strength Wastewaters in UASB and EGSB Reactors Wat. Sci. Tech., 1997, 36(6~7): 375~382

[10] Rebac, S. et al. High-Rate Anaerobic Treatment of Maltng Waste Water In A Pilot-Scale EGSB System Under Psychrophilic Conditions [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 1991, 68(2): 135~146

[11] Jules, B. et al. Anaerobic Treatment of Partly Acidified Wastewater In A Two - Stage Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) System at 8 [J]. Wat. Sci. Tech., 1997, 36(6~7): 317~324

[12] de, Man, A. W. A. et al. The Use Of EGSB And UASB Anaerobic Systems For Low Strength Soluble And Complex Wastewaters At Temperatures Rangings From 8 To 30 [D]. Proc. Fifth International Symp. Anearobic Digestion, Bologna, Italy, 1988, 197~209

#### 作者简介：

季民 (1957 - )，男，副教授。主要研究城市和工业污水污水处理。

霍金胜 (1976 - )，男，硕士生，主要研究废水生物处理及模型分析。