

李江,何强, Henri Spanjers. 2012. UASB 反应器处理造纸废水不同高度的污泥特性[J]. 环境科学学报, 32(12): 2929-2934

Li J, He Q, Henri Spanjers. 2012. Sludge characteristics along the height of full-scale UASB reactor treating paper-mill effluents [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(12): 2929-2934

## UASB 反应器处理造纸废水不同高度的污泥特性

李江<sup>1</sup>, 何强<sup>1,\*</sup>, Henri Spanjers<sup>2</sup>

1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

2. 代尔夫特理工大学卫生工程系, 代尔夫特

收稿日期: 2012-02-24 修回日期: 2012-04-05 录用日期: 2012-04-17

**摘要:**为探讨上向流污泥床(UASB)反应器不同高度处的污泥特性,研究了生产性 UASB 反应器(总高 7.2 m)处理造纸废水时不同高度的污泥外观形态、稳定性及其产甲烷活性。结果显示,VS、TS、VSS、TSS 浓度随着在反应器中取样高度的增加逐渐降低,并在距离反应器底部 2.20 m 高度处出现分层。反应器 1.20 m 和 3.45 m 高度处的溶解性 COD 值较大( $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上)。反应器 1.20 m 处污泥的稳定性较好(VS/TS 较低),固体浓度较高( $\text{TS } 136 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{VS } 75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),产甲烷活性较高( $0.16 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,以每 g VSS 中的 COD 计),颗粒较大(平均当量直径为  $308 \mu\text{m}$ )。UASB 反应器处理造纸废水不同高度的污泥颗粒外观形态虽有差异,但污泥的生物活性近似。

**关键词:**污泥特性; 产甲烷活性; 生产性 UASB 反应器; 造纸废水

文章编号: 0253-2468(2012)12-2929-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

## Sludge characteristics along the height of full-scale UASB reactor treating paper-mill effluents

LI Jiang<sup>1</sup>, HE Qiang<sup>1,\*</sup>, Henri Spanjers<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045

2. Section Sanitary Engineering, Delft University of Technology, Delft

Received 24 February 2012; received in revised form 5 April 2012; accepted 17 April 2012

**Abstract:** The observations of sludge stability, granule morphology and specific methanogenic activity (SMA) were used to investigate the sludge characteristics along the height of full-scale upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor treating paper-mill effluents. The results showed that the solids concentration of sludge decreased and then stabilized with increasing heights along UASB reactor. Higher soluble COD concentration (more than  $900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of sludge was obtained at 1.20 m and 3.45 m of the UASB reactor. In terms of the ratio of VS/TS, SMA and morphology characteristics of sludge, the sludge from 1.20 m of UASB reactor was more stable (VS/TS as 50%) and had higher SMA ( $0.16 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , as amount of COD in per gram VSS) and bigger granule (average equivalent diameter as  $308 \mu\text{m}$ ) than that of other places of the reactor. The sludge along the height of full-scale UASB reactor had significant difference in granule morphology, but had close specific methanogenic activity.

**Keywords:** sludge characteristics; specific methanogenic activity; full-scale UASB reactor; paper-mill wastewater

### 1 引言(Introduction)

上向流污泥床(Upflow Anaerobic Sludge Bed, UASB)反应器是开发最早、应用最普遍的高效厌氧反应器之一(van Lier, 2008)。迄今,全球安装的 UASB 反应器已经超过 3000 座,主要用于处理食品加工行业产生的废水,诸如饮料、土豆、淀粉和糖类加工行业废水(Tchobanoglous *et al.*, 2003; van Lier, 2008);其次是处理造纸行业产生的废水

(Habets *et al.*, 1985)和生活污水,大约有 10% ~ 15% 的厌氧反应器用于处理纸浆和造纸废水(van Lier, 2008)。

UASB 反应器处理生活污水主要应用在一些热带国家或地区,这些地方的生活污水温度在  $24 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$  之间(van Haandel *et al.*, 1994)。水解是厌氧消化的限速步骤,在低温( $5 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )条件下水解速率大大降低,这就限制了 UASB 反应器在处理低温生活污水方面的应用。针对低温污水的厌氧处理,

作者简介: 李江(1982—),男,博士生, E-mail: lijia0808@126.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: hq0980@126.com

**Biography:** LI Jiang (1982—), male, Ph. D. candidate, E-mail: lijia0808@126.com; \* **Corresponding author**, E-mail: hq0980@126.com

Lettinga and Hulshoff Pol (1991) 设计出一种 UASB 反应器与厌氧消化池集成的处理系统. 该系统将 UASB 反应器中的少部分污泥回流到厌氧消化池, 经过厌氧消化后, 将消化污泥返回到 UASB 反应器中, 提高 UASB 反应器中污泥的活性, 从而提高 UASB 反应器低温污水的效率. Mahmoud 等 (2004) 研究了这种中试集成系统处理低温污水的效率, 结果表明, 总 COD 与悬浮 COD 去除率分别达到了 66% 和 87%, 并且产甲烷效率从单一 UASB 反应器的 20% 提高到了集成系统 UASB 反应器的 47%. 这种集成系统的应用需要解决的关键问题包括 UASB 反应器污泥回流的位置及集成系统处理低温污水的效能, 另外, 消化池的污泥停留时间也是研究的关键问题之一. 而目前关于这种集成系统的生产性试验未见报道.

关于 UASB 反应器不同高度的污泥特性研究已经在不同规模的反应器中有报道. Mahmoud 等 (2004) 研究发现, UASB 反应器 (处理生活污水的中试规模) 中总固体和挥发固体的浓度从底部到顶部逐渐降低, 在 40% 高度处出现分层, 而污泥的稳定性 (VS/TS) 从底部到顶部一致. An 等 (2009) 的研究显示, 总悬浮固体和挥发性悬浮固体浓度随 UASB 反应器 (处理生活污水中试规模) 高度的增加逐渐降低, 而反应器顶部挥发性悬浮固体与悬浮固体的比值 (有机质含量) 降低是因为后续膜系统的应用使无机物在反应器顶部沉淀下来. Uemura 和 Harada (2000) 的研究表明, UASB 反应器处理生活污水过程中, 溶解性 COD 随着反应器高度的增加逐渐降低, 主要是进水中的悬浮物在反应器底部被污泥层截留并逐渐水解导致溶解性 COD 增加. 另外, Mahadevaswamy 等 (2004) 研究发现, 处理造纸废水的 UASB 反应器中, pH 沿着反应器的高度逐渐增加. 以上研究说明 UASB 反应器存在污泥分层现象, 目前国内外关于 UASB 反应器处理造纸废水不同高度处的污泥特性报道较少. 因此, 本文从污泥的形态、稳定性及其产甲烷活性来研究生产性 UASB 反应器处理造纸废水不同高度的污泥特性. 以为集成系统中 UASB 反应器污泥回流位置的选取提供参考.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 污泥样品

实验在荷兰代尔夫特理工大学水处理技术实

验室完成, 测试污泥来源于德国某造纸厂. 该厂采用 UASB 和 EGSB 反应器两条独立的废水处理工艺处理造纸废水, 工艺流程如图 1 所示, 废水处理达标后排放至当地的生活污水处理厂进行最终处理. UASB 反应器高 7.2 m, 运行温度 35 ~ 37 °C, 水力停留时间 6 h, 进水流量为 40 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>. 分别从 UASB 反应器的不同高度取样, 取样口分别位于距离反应器底部 1.20、1.95、2.20 和 3.45 m 处, 具体如图 2 所示. 样品带回实验室, 0 ~ 4 °C 冷藏保存.

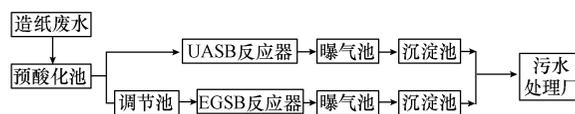


图 1 造纸厂废水处理工艺

Fig. 1 Schematic process of the WWTP

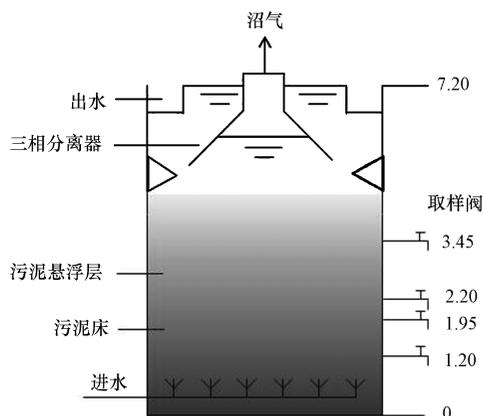


图 2 UASB 反应器取样口 (单位: m)

Fig. 2 Sampling ports in UASB reactor (unit: m)

### 2.2 分析方法

pH、总固体 (Total Solids, TS)、挥发固体 (volatile Solids, VS)、悬浮固体 (Total Suspended Solids, TSS) 和挥发性悬浮固体 (volatile Suspended Solids, VSS) 采用标准方法 (APHA, 2005), 3 次平行测试. COD 采用 COD 试剂 (Merck, 德国) 消解, 再用分光光度计测试, 两次平行. 测试溶解性 COD 之前, 先将样品离心 (3500 r·min<sup>-1</sup>) (Heraeus Labofuge 400, Thermo Scientific, 美国) 5 min, 再用 0.45 μm 醋酸纤维膜 (Millipore, 德国) 过滤, 收集滤液测试 COD. pH 由 pH 计测试 (197-s, WTW, 德国). 污泥的图像分析采用扫描电镜 (XL30-ESEM, Philips, 荷兰) 和荧光体视显微镜 (Leica M205 FA, 德国) 检测.

产甲烷活性 (Specific Methanogenic Activity,

SMA)测试系统 (AMPTS I, Bioprocess Control, 瑞典)如图 3 所示. 测试时,640 mL 的反应器装填厌氧污泥和基质及营养液,工作体积为 400 mL. 中温消化采用水浴锅加热和机械搅拌. 产生的沼气经过碱液吸收系统去除其中的酸性气体 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ ),余下的甲烷气体采用湿式气体流量计测体积,测试数据自动记录在储存系统.

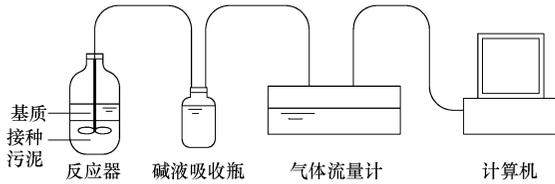


图 3 甲烷势自动测试系统

Fig. 3 Automated methane potential test system

产甲烷菌对环境相当敏感,因此,需要加入 pH 缓冲剂及所需的宏量元素与微量元素使其活性最大化并提高其稳定性 (Angelidaki, 2008; Angelidaki *et al.*, 2009; Tatiana *et al.*, 2010; Leitao *et al.*, 2009). pH 缓冲剂为  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ( $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 宏量元素为  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ( $170 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ( $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 微量元素为  $\text{FeCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ( $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ( $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{ZnCl}_2$  ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{HBO}_3$  ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ( $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ( $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{EDTA}$  ( $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances, EPS) 由可溶态 (Soluble Microbial Products, SMP) 和束缚态 (Bound EPS, eEPS) 组成 (Satyawali *et al.*, 2008). 污泥样品先离心 ( $12000 \text{ g}$ ) (Sorvall RC 5B Plus centrifuge, 英国) 15 min, 然后用  $0.45 \mu\text{m}$  膜过滤, 收集滤液测试 SMP (Gao *et al.*, 2010). 滤渣用  $0.9\%$  NaCl 溶液冲洗并溶解, 然后在  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  水浴锅中加热 1 h, 离心过滤, 收集滤液测试 eEPS (Chang *et al.*, 1998; Satyawali *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010).

### 3 结果 (Results)

#### 3.1 污泥稳定性

污泥固体浓度沿 UASB 反应器不同高度处的变化如图 4 所示. TS 和 VS 浓度分别从 1.20 m 处的

$136.75 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐降低到 3.45 m 处的  $113.67 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在 2.20 m 高度出现分层. TSS 和 VSS 浓度随高度的变化与 TS 和 VS 浓度的变化一致. VS/TS 和 VSS/TSS 的比值, 即有机质含量沿不同高度几乎不变 (1.20 m 处除外), 稳定在 60%, 而在反应器 1.20 m 处为 50%, 可能是 1.20 m 处污泥的活性较好, 也可能是进水中的无机物质在 1.20 m 处沉积导致底部的有机质含量降低.

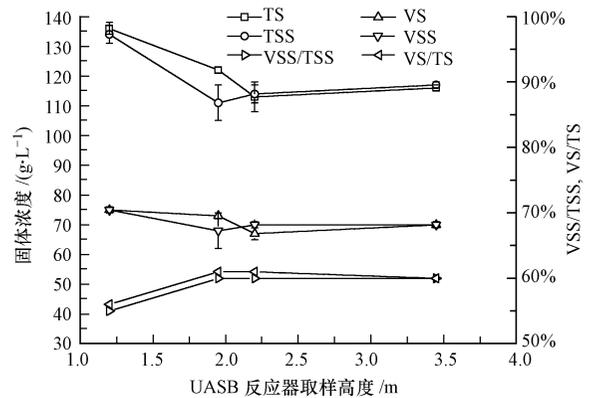


图 4 反应器不同高度处的固体浓度变化

Fig. 4 Profiles of TS, VS, TSS and VSS along the height of UASB reactor

污泥的 pH 稳定在 7.00 左右. 溶解性 COD 从 1.20 m 处的  $945 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐降低到 2.20 m 高度处的  $785 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 这种变化趋势与 Uemura 和 Harada (2000) 报道的一致. 而在 3.45 m 处为  $955 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 可能是富含有机物较多的小颗粒随着进水上流和沼气上升流, 在污泥层的顶部积累并水解.

#### 3.2 产甲烷活性

污泥在标准状况下 ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ atm}$ ) 的甲烷累积产量 (NL) 在 3 d 内就趋于稳定, 累积产气量曲线的斜率即为产甲烷活性, 结果如表 1 所示. 污泥的产甲烷活性在 1.20 m 处最高, 为  $0.16 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (以每 g VSS 中的 COD 计), 在其他位置的平均值为

表 1 UASB 反应器沿不同高度的甲烷累积产量和产甲烷活性  
Table 1 Cumulative methane production and SMA along the heights of UASB reactor

高度/m	甲烷累积产量*/NL	SMA/( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )
1.20	0.25	0.16
1.95	0.21	0.12
2.20	0.24	0.12
3.45	0.24	0.14

注: \* 表示两次平行测试结果, SMA 以每 g VSS 中的 COD 计.

$0.13 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ . 可能是因为进水通过 1.20 m 处时, 大部分的营养物质(无机物)被截留, 使得该部分的微生物长势较好, 产甲烷活性较高.

### 3.3 图像分析

UASB 反应器 1.20 m 处污泥外部和内部的扫

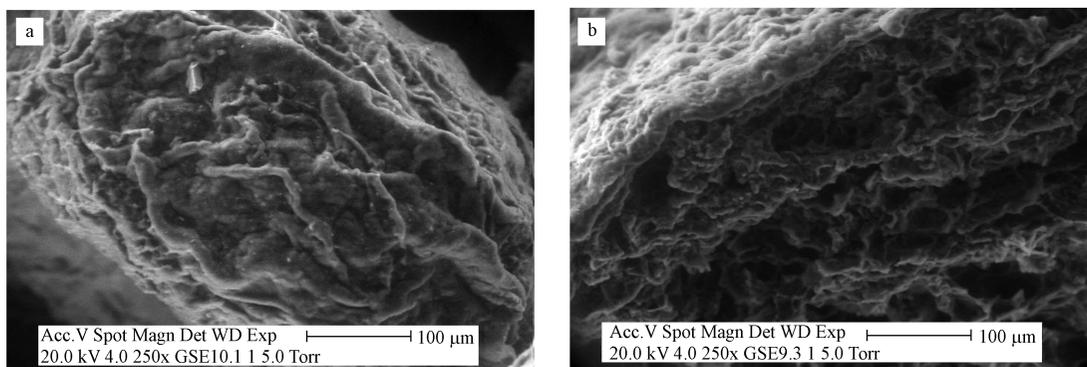


图5 UASB 反应器底部污泥外部(a)和内部(b)的扫描电镜图像

Fig. 5 Outside(a) and inside(b) images of sludge from the bottom of UASB reactor

反应器在 1.20 m 处和 3.45 m 处污泥的图像如图 6 所示. 由图 6 可知, UASB 反应器内污泥的颗粒化程度较高, 最大为 2 mm, 底部和顶部的颗粒大小及形状不一, 其中, 平均当量直径分别为 220、308  $\mu\text{m}$ , 圆度分别为 6.7、2.3(圆形的圆度为 1). 污泥的

颗粒大小及形状(圆度)可能与污泥的活性有关, 1.20 m 处污泥的产甲烷活性最高, 其颗粒最大, 不规则程度也大. 另外, 1.20 m 和 3.45 m 处污泥的 EPS 组成几乎一样, 总量为  $90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以每 g MLSS 中 VS 计).

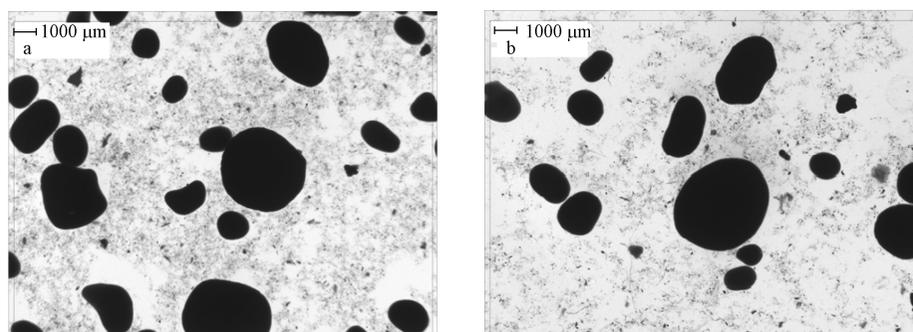


图6 UASB 反应器 1.20 m(a)和 3.45 m 处(b)污泥的图像

Fig. 6 Images of sludges from (a) 1.20 m of UASB reactor and (b) 3.45 m of UASB reactor

## 4 讨论(Discussion)

### 4.1 不同高度的污泥浓度

污泥固体浓度随在反应器中所处高度的增加逐渐降低, 与 Mahmoud 等(2004)和 An 等(2009)关于不同高度的污泥浓度的研究结果一致. Mahmoud 等(2004)研究发现, UASB 反应器中总固体和挥发固体的浓度从底部的  $37 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $27 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐降低到顶部的  $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $11 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在 40% 高度处出现分

层, 而污泥的稳定性(VS/TS)从底部到顶部恒定为 73%. An 等(2009)研究表明, UASB 反应器中总悬浮固体和挥发悬浮固体的浓度从底部的  $30.62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $22.01 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐降低到顶部的  $11.99 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $8.27 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而污泥的有机质(VS/TS)稳定在 70%. UASB 反应器不同高度的污泥浓度与 UASB 反应器污泥床的结构有关. UASB 反应器自下而上分为 3 部分: 污泥床(sludge bed)、污泥悬浮层(sludge blanket)和三相分离器(沉淀池)(Bolle

*et al.*, 1986a). Bolle 等 (1986b) 用示踪剂  $\text{Li}^+$  研究了 UASB 反应器的流态特性, 结果表明, 污泥床和污泥层的流态属于混合流, 同时也存在短流现象, 而沉淀区域的流态属于推流. 本研究从固体浓度的变化趋势可看出 2.20 m 高度处是污泥床与污泥悬浮层的分界点.

#### 4.2 集成系统中 UASB 反应器污泥的回流位置

从减小集成系统(UASB 反应器与消化池)的消化池体积考虑, 回流高浓度的污泥较合适. 污泥的固体浓度从 1.20 m 高度处到 3.45 m 高度处逐渐降低, 并在 2.20 m 高度处出现分层, 此处的污泥虽然浓度不是最高的, 但该处的污泥活性已经降低了, 而 1.20 m 处的活性最高, 因此, 认为回流污泥的最佳位置为反应器的 2.20 m 高度处, 从而提高该部分污泥的活性. Mahmoud 等(2004) 关于污泥回流的最佳位置为反应器的 40% 高度处, 仅仅是从污泥浓度的角度来选取, 因为污泥的固体浓度从底部到顶部逐渐降低, 并在 40% 高度出现分层, 而没有考虑污泥的活性.

#### 4.3 UASB 反应器处理造纸废水的污泥外观形态及生物活性

造纸废水中除了有机物浓度较高, 钙离子浓度也较高 (Lettinga *et al.*, 1991). 厌氧甲烷化阶段产生甲烷的同时, 释放  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  溶解形成的  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  形成  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  会沉降在颗粒污泥表面或进入颗粒污泥内部并逐渐沉降成为颗粒中心. Batstone 等(2002) 研究了 UASB 反应器 ( $1805 \text{ m}^3$ ) 处理造纸废水的颗粒污泥特性, 结果表明, 污泥颗粒的粒径为 0.5 ~ 1.5 mm, 平均粒径为 0.98 mm, 颗粒污泥是各种微生物以碳酸钙为核心逐渐聚集而成, 因为造纸废水中钙离子浓度较高 ( $400 \sim 700 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ). 本研究从污泥颗粒的外观形态来看, 可以认为污泥床与污泥悬浮层的污泥特性存在一定差异, Abreu 等 (2007) 认为污泥的颗粒大小及形状与污泥的活性有关. 顶部和底部的产甲烷活性有差异但并不大, 可能与微生物在污泥颗粒内的分布有关. Batstone 等(2002) 指出在颗粒污泥外部 0 ~ 200  $\mu\text{m}$  分别分布有产酸菌、产乙酸菌和产甲烷菌. 尽管底部与顶部的颗粒污泥大小不一, 但微生物分布相似, 吸附并降解有机物的能力也近似, 因此, 其活性并无差异. Conrad 等 (2000) 报道磷酸盐的浓度超过  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 会抑制乙酸型产甲烷菌的活性. 与厌氧颗粒污泥的产甲烷活性相比 (Angelidaki

*et al.*, 2009), 本研究的产甲烷活性值偏小, 可能是污泥本身的活性低, 也可能是活性测试时 pH 缓冲剂中的磷酸盐对产甲烷活性的影响, 建议用碳酸盐溶液代替磷酸盐作为缓冲剂进行对比实验.

#### 4.4 UASB 反应器处理其他废水的颗粒污泥形态

Batstone 和 Keller (2001) 比较了生产性 UASB 反应器处理不同种类废水的污泥特性, 结果表明, 生产性 UASB 反应器处理罐头加工废水形成的颗粒污泥最理想 (剪切力较大, 沉淀性能较好, 密度较大), 处理酿酒废水形成的颗粒污泥次之, 而处理蛋白废水形成的颗粒污泥最差, 研究结果进一步证实了颗粒污泥特性与处理废水种类有关, 与反应器设计或反应器操作条件无关. 和以上 3 种废水相比, 处理造纸废水形成的颗粒污泥的剪切力最大 (Batstone *et al.*, 2002). 这种差异主要是与废水中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度有关, 造纸废水、罐头加工废水、酿酒废水和蛋白废水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度分别为 7%、1.1%、0.2% 与 0.7%,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度越高, 形成的污泥颗粒越结实, 沉降性能越好.

## 5 结论 (Conclusions)

从污泥的颗粒形态、稳定性及其产甲烷活性研究了生产性 UASB 反应器 (总高 7.2 m) 处理造纸废水不同高度的污泥特性. 结果表明: 污泥的固体 (TS, VS, TSS, VSS) 浓度在 1.20 m 高度处最高, 随着高度的增加逐渐保持稳定; 而 VS/TS 和 VSS/TSS 的比值在反应器 1.20 m 高度处较低 (50%), 即稳定性较好; 溶解性 COD 随着高度的增加 (3.45 m 高度处除外) 逐渐减小; 从固体浓度与稳定性可看出, 2.20 m 高度处以下属于污泥床, 2.20 m 与 3.45 m 高度处之间属于污泥悬浮层, 污泥床和污泥悬浮层的胞外聚合物含量无变化, 而污泥床的污泥颗粒比悬浮层的污泥颗粒要大; 反应器 1.20 m 高度处的污泥颗粒呈椭球状, 外部由类似链状物质包裹, 而内部则是类似蜂窝状的沼气通道; 污泥的产甲烷活性在 1.20 m 处最大, 为  $0.16 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (以每 g VSS 中的 COD 计), 在其他高度处的平均值为  $0.13 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 从污泥的颗粒形态与固体浓度来看, UASB 反应器存在分层现象, 但并不影响整个反应器的生物活性.

致谢: 感谢代尔夫特理工大学卫生工程系 Hale Ozgun 和 Mustafa Evren Ersahin 两位博士生对论文实验的帮助, 感谢 Jules B. van Lier 教授对论文的指导.

**责任作者简介:**何强(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为废水处理理论与技术。E-mail: hq0980@126.com.

**参考文献 (References):**

- Abreu A A, Costa J C, Araya-Kroff P, *et al.* 2007. Quantitative image analysis as a diagnostic tool for identifying structural changes during a revival process of anaerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 41(7):1473-1480
- Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, *et al.* 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays [J]. *Water Science and Technology*, 59(5):927-934
- Angelidaki I, Wendy S. 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 3(2):117-129
- An Y Y, Yang F L, Buccioli B, *et al.* 2009. Municipal wastewater treatment using a UASB coupled with cross-flow membrane filtration [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 135(2):86-91
- APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [S]. Washington: American Public Health Association
- Batstone D J, Keller J. 2001. Variation of bulk properties of anaerobic granules with wastewater type [J]. *Water Research*, 35(7):1723-1729
- Batstone D J, Landelli J, Saunders A, *et al.* 2002. The influence of calcium on granular sludge in a full-scale UASB treating paper mill wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 45(10):187-193
- Bolle W L, Van Breugel J, Van Eybergen G C, *et al.* 1986. Modeling the liquid flow in up-flow anaerobic sludge blanket reactors [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(11):1615-1620
- Bolle W L, Van Breugel J, Van Eybergen G C, *et al.* 1986. An integral dynamic model for the UASB reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(11):1621-1636
- Conrad R, Klose M, Claus P. 2000. Phosphate inhibits acetotrophic methanogenesis on rice roots [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(2):828-831
- Chang I S, Lee C H. 1998. Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system-the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling [J]. *Desalination*, 120(3):221-233
- Gao D W, Zhang T, Tang C Y Y, *et al.* 2010. Membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor: Differences in relative abundance of bacterial species in the membrane foulant layer and in suspension [J]. *Journal of Membrane Science*, 364(1/2):331-338
- Habets L H A, Knelissen J H. 1985. Application of the UASB reactor for anaerobic treatment of paper and board mill effluent [J]. *Water Science and Technology*, 17(1):61-75
- Leitao R C, Santaella S T, Van Haandel A C, *et al.* 2009. The effect of operational conditions on the sludge specific methanogenic activity and sludge biodegradability [J]. *Water Science and Technology*, 59(9):1847-1853
- Lettinga G, Hulshoff Pol L W. 1991. UASB-process design for various types of wastewaters [J]. *Water Science and Technology*, 24(8):1847-1853
- Mahadevaswamy M, Murthy B M S, Girijamma A R. 2004. Performance evaluation of up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for treatment of paper mill wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 16(2):194-198
- Mahmoud N, Zeeman G, Gijzen H, *et al.* 2004. Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digester system [J]. *Water Research*, 38:2348-2358
- Satyawali Y, Balakrishnan M. 2008. Treatment of distillery effluent in a membrane bioreactor (MBR) equipped with mesh filter [J]. *Separation and Purification Technology*, 63(2):278-286
- Tatiana F S, Sérgio F A, Silvana Q S, *et al.* 2010. Influence of incubation conditions on the specific methanogenic activity test [J]. *Biodegradation*, 21(3):411-424
- Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel H D. 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* [M]. New York: McGraw-Hill
- Uemura S, Harada H. 2000. Treatment of sewage by a UASB reactor under moderate to low temperature conditions [J]. *Bioresource Technology*, 72(3):275-282
- Van Haandel A C, Lettinga G. 1994. *Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate* [M]. New York: John Wiley & Sons
- Van Lier J B. 2008. High-rate anaerobic wastewater treatment: Diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented techniques [J]. *Water Science and Technology*, 57(8):1137-1148
- Zhang X, Wang Z, Wu Z, *et al.* 2010. Formation of dynamic membrane in an anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 165(1):175-183