

# 好氧活性污泥在升流式厌氧污泥床反应器中的厌氧颗粒化过程及机制

李建政<sup>1,2</sup>, 张立国<sup>1</sup>, 班巧英<sup>1</sup>, 许一平<sup>1</sup>, 艾斌凌<sup>1</sup>

1. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090

2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090

**摘要** 采用升流式厌氧污泥床(UASB)反应器,以城市污水处理厂二沉池活性污泥为种泥,研究好氧絮状污泥的厌氧颗粒化过程及其机制。UASB在污泥负荷(SLR)0.25kg(COD)/(kg(VSS)·d)和水力负荷(HLR)0.1m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)的条件下启动后,通过分阶段缩短水力停留时间(HRT)的方式逐步将SLR和HLR提高到0.52kg(COD)/(kg(VSS)·d)和0.3m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),经过150d的连续运行,成功培育出了厌氧颗粒污泥,系统对COD的去除率达到了95%以上。厌氧颗粒污泥的形成过程先后经历了污泥驯化期、微生物聚集形成期、初生颗粒污泥形成期、次生颗粒污泥形成期、成熟颗粒污泥形成期5个时期。好氧絮状污泥的厌氧颗粒化机制整体上符合二次核学说,其中初生颗粒污泥的形成符合黏液学说,而次生颗粒污泥的形成机制与目前已报道的厌氧颗粒污泥形成机制不同,其内核是由初生颗粒污泥破碎后的碎片组成,产甲烷丝状菌和其他细菌通过插入碎片中或者附着于碎片表面的方式形成聚集体,并逐渐发展成为次生颗粒污泥。

**关键词** 升流式厌氧污泥床;好氧活性污泥;厌氧颗粒污泥;颗粒化

中图分类号 X703

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.36.001

## Mechanism and Process of Anaerobic Sludge Granulation in UASB Reactor with Aerobic Activated Sludge as Seed

LI Jianzheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ligu<sup>1</sup>, BAN Qiaoying<sup>1</sup>, XU Yiping<sup>1</sup>, AI Binling<sup>1</sup>

1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

**Abstract** The mechanism and the process of the anaerobic sludge granulation of the aerobic flocculent sludge in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket(UASB) reactor are studied in this paper. The sludge is obtained from a secondary sedimentation tank of an activated sludge plant for treating municipal wastewater. The results show that the anaerobic granular sludge is cultivated successfully after the continuous operation for 150 d and the Hydraulic Retention Time (HRT) is reduced from 24h to 8h. During the phase-shortening, the sludge load and the hydraulic load are increased from 0.25kg COD/(kg(VSS)·d) and 0.1m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) to 0.52kg COD/(kg(VSS)·d) and 0.3 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), respectively. The process of the granulation contains five stages, including the sludge acclimation, the microbial aggregates formation, the primary granular sludge formation, the secondary granular sludge formation and the mature granular sludge formation. During the mature granular sludge formation stage, the COD is removed approximately by 95%. The mechanism of the anaerobic sludge granulation of the aerobic flocculent sludge is consistent with the second nuclei theory as a whole. The primary granular sludge formation mechanism is consistent with the Extracellular Polymers (ECP) theory, while the secondary granular sludge formation mechanism is consistent with other reported theories. In this study, the secondary granular sludge is formed by the methane filamentous bacteria and other bacteria inserting or absorbing to the fragments while its inner nuclei are composed of primary granular broken fragments.

**Keywords** upflow anaerobic sludge blanket; aerobic activated sludge; anaerobic granular sludge; granulation

收稿日期: 2012-09-04;修回日期:2012-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178136);城市水资源与水环境国家重点实验室项目(2010DX06)

作者简介: 李建政,教授,研究方向为废水厌氧生物处理及资源化技术,电子邮箱:ljjz6677@163.com

## 0 引言

升流式厌氧污泥床(UASB)作为一种高效厌氧生物反应器,在世界范围内被大量应用,其最大特点是能够形成沉降性能良好、产甲烷活性高的颗粒污泥,而较高的生物持有量则会有效提高系统对污染物的去除效能和抗冲击负荷能力<sup>[1-3]</sup>。因此,厌氧颗粒污泥的培育是UASB成功启动和高效运行的关键。一般而言,接种厌氧消化污泥可加快反应器的启动和厌氧颗粒污泥的培育过程,但对于工业化厌氧反应器而言,其启动所需要的大量厌氧消化污泥往往缺少足够来源,给工程应用带来了困难,接种好氧活性污泥则成为常用的替代接种物<sup>[4-5]</sup>。好氧活性污泥量大而易得,但如何在厌氧生物处理系统中将其尽快培育为颗粒化的厌氧活性污泥,是工程应用必须解决的一个技术问题<sup>[6]</sup>。

关于厌氧颗粒污泥的形成及其机制已有很多报道,但大都是基于以厌氧消化污泥为接种物的研究<sup>[6-9]</sup>。以好氧絮状污泥为接种物的厌氧颗粒污泥驯化虽有少量研究<sup>[4-5]</sup>,但关于其形成机制目前尚不清晰。本文以好氧絮状污泥为接种物,通过逐步缩减水力停留时间(HRT)的方法,研究了UASB中厌氧颗粒污泥的形成过程并探讨了其形成机制,以期为好氧活性污泥的厌氧颗粒化培育及其生产性应用提供指导。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

装置如图1所示,UASB反应器由有机玻璃制成,有效容积为11L,其反应区和三相分离区的容积比为3:1,反应区高径比为10:1。反应器外壁缠绕电热丝,并通过温控仪将内部混合液的温度控制在 $(35\pm 1)^\circ\text{C}$ 。沼气由三相分离器的气室导出,经水封后由湿式气体流量计计量。

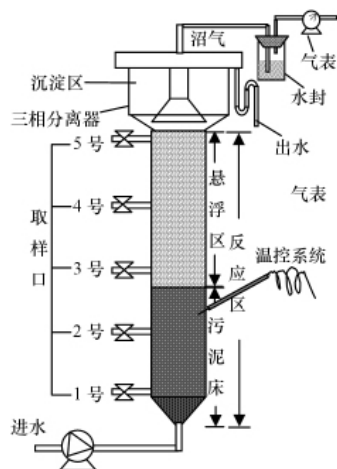


图1 污泥驯化期UASB中挥发酸组成分析

Fig. 1 UASB System schematic diagram

### 1.2 接种污泥及实验废水

接种污泥取自哈尔滨市某污水处理厂二沉池,为好氧絮

状活性污泥,该污水处理厂采用SEA改良型A/O工艺。接种污泥的混合液悬浮固体浓度(MLSS)为20.45g/L,混合液挥发性悬浮固体浓度(VSS)为13.29g/L,VSS/MLSS为0.65。

实验废水是某甜菜制糖厂的废糖蜜加自来水稀释而成,投配适量尿素和 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 使废水中的COD:N:P为200:5:1,用小苏打将其pH值调节为7.0—7.2。

### 1.3 反应器运行调控

UASB在污泥接种量(以VSS计)1.412g/L、进水COD 1000mg/L、HRT 24h等条件下启动。在达到相对稳定运行后,保持进水COD不变,分阶段缩短HRT。UASB的运行共分为I(前55d)、II(56—80d)、III(81—103d)、IV(104—124d)和V(125—150d)5个阶段,其HRT分别为24、20、16、12和8h。采用低进水COD,逐步缩短HRT的方式启动,主要是为了增加水力负荷,加速颗粒污泥的形成。

### 1.4 分析项目及方法

COD、pH值、MLSS、VSS和碱度(ALK)采用标准方法测定<sup>[10]</sup>,产气量通过湿式气体流量计(LML-1,长春汽车滤清器有限责任公司)测定,气体组成和有机挥发酸(VFAs)组成采用气相色谱测定(SP-6800A和SP6890,山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司)<sup>[11]</sup>。电镜观察采用日立S-3400N型扫描电子显微镜进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的运行控制

如表1,UASB运行过程中进水COD始终保持在1000mg/L,分5个阶段将系统的HRT由24h缩短至8h,使水力负荷和污泥负荷分别由 $0.1\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $0.25\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ 逐步提高到 $0.3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $0.52\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ 。随着HRT的逐步缩短及负荷率的逐步提高,出水COD及VFAs残留呈现依次递减的趋势,而甲烷产量和COD去除率依次递增,表明系统中厌氧污泥的产甲烷活性在逐步提高。在运行的第I至第V阶段,尽管水力负荷和产气负荷在不断提高,系统内污泥浓度(生物量)仍然呈现不断增加的趋势,表明系统内厌氧污泥的沉降性能也在不断提高,絮状污泥的颗粒化过程随之发生。已有研究结果表明,UASB的水力负荷和污泥负荷是影响厌氧颗粒污泥形成的两个主要因素。当水力负荷和污泥负荷分别在 $0.20\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $0.3\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ 以上时,有利于形成沉降性好、产甲烷活性高的成熟颗粒污泥<sup>[12-13]</sup>。本研究采用保持进水的COD为1000mg/L不变,通过分阶段缩短HRT的方式逐步提高水力负荷和污泥负荷,当HRT缩短至12h时,UASB系统的水力负荷和污泥负荷分别达到了 $0.20\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $0.4\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ ,较高的水力负荷有利于筛选沉降性好的污泥,淘汰结构松散的污泥,而较高的污泥负荷有利于厌氧微生物的快速生长,有利于厌氧活性污泥的颗粒化发生。随着HRT继续缩短,系统的水力负荷和污泥负荷将继续提高,为厌氧污泥的颗粒化创造了更有利的

表 1 UASB 反应器各阶段运行控制参数

Table 1 Summary of the conditions during the operation period of the UASB reactor

参数	运行阶段				
	I	II	III	IV	V
天数/d	1—55	56—80	81—103	104—124	125—150
进水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	1000	1000	1000	1000	1000
水力停留时间/h	24	20	16	12	8
容积负荷/(kg(COD)·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0
污泥负荷/(kg(COD)·kg <sup>-1</sup> (VSS)·d <sup>-1</sup> )	0.25	0.32	0.35	0.4	0.52
水力负荷/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.1	0.12	0.15	0.2	0.3
稳定期/d	42—55	72—80	95—103	117—124	144—150
出水 pH 值	7.4	7.5	7.5	7.6	7.7
出水残留 VFA/(mg·L <sup>-1</sup> )	114	96	78	76	65
出水 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	132	127	96	92	63
COD 去除率/%	91.2	91.5	93.6	93.9	95.8
产气量/(L·d <sup>-1</sup> )	5.6	8.2	10.6	12.8	17.5
产气负荷/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.05	0.07	0.1	0.14	0.21
产甲烷量/(L·d <sup>-1</sup> )	3.1	3.8	5	6.8	9.8
比产甲烷速率/(L·kg <sup>-1</sup> (VSS)·d <sup>-1</sup> )	88.5	90.4	92.5	101.4	116.6
生物量/(g L <sup>-1</sup> ,VSS)	3.5	4.2	5.4	6.7	8.4

条件。后文将结合厌氧污泥的生物相观察对好氧絮状污泥的厌氧颗粒化过程做进一步探讨。

## 2.2 厌氧颗粒污泥形成过程

絮状污泥的颗粒化是一个十分复杂的物理化学与微生物学过程<sup>[4-5]</sup>。本研究以好氧絮状活性污泥为种泥,经过 150d 连续运行,在 UASB 反应器中成功培育出成熟厌氧颗粒污泥。通过对污泥形态变化的观察发现,UASB 中厌氧颗粒污泥的形成先后经历了污泥驯化期、微生物聚集体形成期、初生颗粒污泥形成期、次生颗粒污泥形成期、成熟颗粒污泥形成期 5 个时期。

### 2.2.1 污泥驯化期

如图 2(a)所示,接种的好氧絮状污泥中存在大量的丝状菌体,期间夹杂着球菌和杆状菌。UASB 启动后,适应性且增殖快的产酸发酵菌群会首先得到富集并快速增长,而利用丙酸、丁酸的产氢产乙酸菌和利用乙酸的产甲烷菌增殖相对缓慢,因此,在运行的前 21d,在出水中检测到了大量的 VFAs (>450mg/L)(图 3)。随着运行时间的延长,出水中的 VFAs 逐渐降低,运行至稳定期时(42—55d),VFAs 稳定在 150mg/L 以下(图 3),表明污泥中产氢产乙酸菌和产甲烷菌群数量得到了比较充分的富集,相对平衡的代谢机制在主要微生物类群之间最终得以建立。生物相观察发现,在第 I 阶段运行结束时(第 55 天),能够观察到大量游离的甲烷八叠球菌(图 2(b)),但未发现有产甲烷丝状菌的存在。

### 2.2.2 微生物聚集体形成期

污泥驯化完成后,通过缩短 HRT 的方式来提高污泥负荷,为厌氧微生物的增殖提供充足的营养。当污泥负荷由 0.25kg

(COD)/(kg(VSS)·d) 提高到 0.32kg(COD)/(kg(VSS)·d),运行 10d 后发现,产甲烷八叠球菌周围开始附着其他细菌,如梭菌、长杆菌、微球菌等(图 2(c))。继续运行 15d 后(第 80 天)发现,UASB 反应区形成了大量的以产甲烷八叠球菌为核的深褐色微小颗粒(图 2(d)),表明新的微生物聚集体形成。

### 2.2.3 初生颗粒污泥形成期

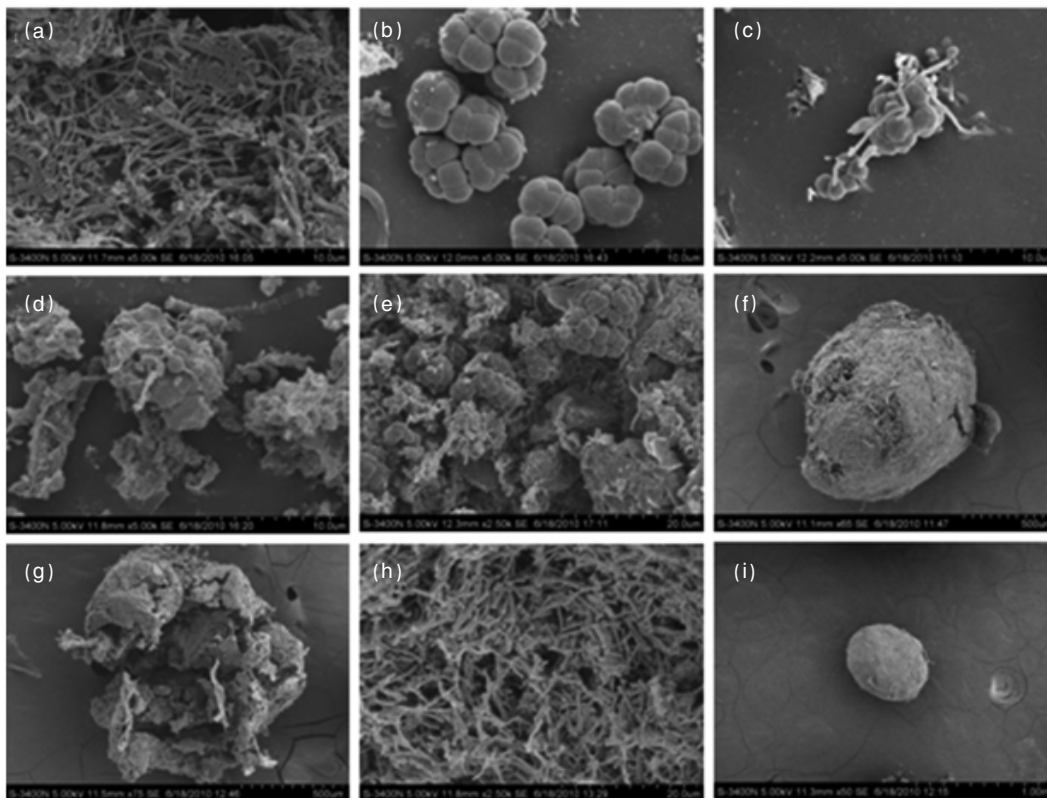
继续提高系统的污泥负荷和水力负荷,使已形成的微小颗粒能够聚合成更大的颗粒。当污泥负荷和水力负荷分别提高到 0.35kg(COD)/(kg(VSS)·d) 和 0.15m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),运行 8d 后发现,多个小颗粒聚合在一起形成更大的颗粒(图 2(e))。继续运行 15d 后(第 103 天),UASB 反应区出现了大量粒径在 1.5—2.0mm、表面粗糙、呈暗灰色的颗粒污泥(图 2(f)),表明此时初生颗粒污泥已经形成。

### 2.2.4 次生颗粒污泥形成期

继续提高水力负荷和产气负荷,强化水流的上升流速和沼气的上升流速对颗粒污泥的筛选作用。当水力负荷和产气负荷分别上升到 0.2m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) 和 0.14m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),运行 8d 后发现,大量中空的初生颗粒污泥在上升水流和沼气的剪切作用下开始解体(图 2(g))。继续运行 12d 后(第 124 天)发现,伴随着初生颗粒污泥的解体,次生颗粒污泥在反应区大量生成,并且次生颗粒污泥表面缠绕了大量的典型的竹节状甲烷丝状菌(图 2(h))。

### 2.2.5 成熟颗粒污泥形成期

HRT 缩短至 8h,相应的污泥负荷和水力负荷分别提高到了 0.52kg(COD)/(kg(VSS)·d) 和 0.3m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),运行 25d(第 150 天)后发 0 现,UASB 反应区出现了大量粒径在 1.0—



(a) 接种污泥 (b) 游离八叠球菌 (c) 微核体 (d) 微聚体 (e) 微颗粒 (f) 初生颗粒污泥  
(g) 解体的初生颗粒污泥 (h) 次生颗粒表面 (i) 成熟颗粒污泥  
(a) Inoculated sludge (b) *Methanosarcina* (c) Microkernel (d) Aggregates (e) Microparticles (f) Primary granular  
(g) Broken fragments of primary granular (h) Secondary granular surface (i) Mature granular  
图 2 好氧絮状污泥厌氧颗粒化过程中污泥形态及组成分析

Fig. 2 Sludge morphology and composition analysis of anaerobic granulation process with aerobic floc sludge as seed

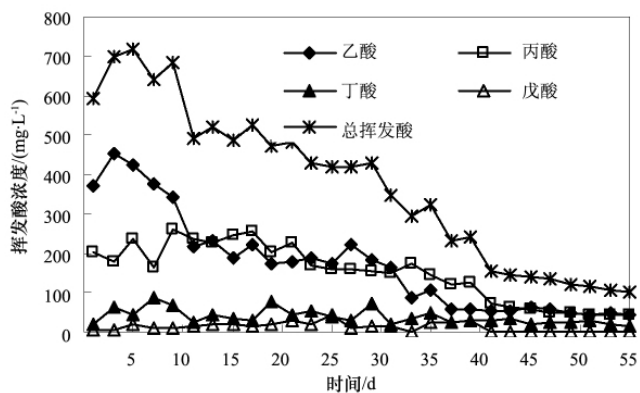


图 3 污泥驯化期 UASB 中挥发酸组成分析  
Fig. 3 VFAs in UASB system during the sludge acclimation period

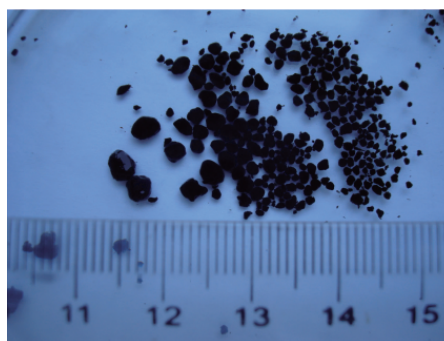


图 4 成熟颗粒污泥数码照片  
Fig. 4 Digital photo of mature granular sludge

1.5mm(个别达 2—3mm)、表面光滑、呈黑色的颗粒污泥(图 2 (i),图 4),表明在较高的选择压的作用下,UASB 反应器中成功培育出了成熟厌氧颗粒污泥。

### 2.3 厌氧颗粒污泥形成机制

通过对好氧活性污泥的厌氧颗粒化过程进行分析,可以

对其形成机制做初步的探讨。就好氧絮状污泥的厌氧颗粒化整体而言,其形成机制符合 Grotenhuis 等<sup>[4]</sup>提出的二次核学说,即:在适宜的条件下先形成部分颗粒污泥(初生颗粒污泥),随着颗粒的生长和粒径的增大,其内部微生物会因营养的不足而死亡,致使颗粒污泥的结构变得松散、强度降低。这

样的污泥颗粒在水流剪切力的作用下容易破裂,而破裂后的污泥碎片则成为再生颗粒污泥(次生颗粒污泥)的核心。在本研究中,初生颗粒污泥和次生颗粒污泥形成的机制完全不同。初生颗粒污泥的形成机制符合已报道的黏液学说,即:某些细菌可以分泌胞外多聚物(ECP),而ECP使得菌体可以相互黏合或者附着于其他物质表面而形成颗粒污泥<sup>[5]</sup>。本研究中初生颗粒污泥的形成主要靠产甲烷八叠球菌分泌的ECP,通过ECP的黏合作用使其他细菌(如:水解发酵菌和产氢产乙酸菌)附着在其表面,形成以产甲烷八叠球菌为核的微小颗粒(一次核),这些微小颗粒进一步聚集,最终形成了初生颗粒污泥。次生颗粒污泥的形成机制与目前已报道的厌氧颗粒污泥形成机制不同。在本研究中,次生颗粒污泥的内核是由初生颗粒污泥破碎后的碎片组成,产甲烷丝状菌和其他细菌通过插入碎片中或者附着于碎片表面的方式形成次生颗粒污泥。由此可见,好氧絮状污泥的厌氧颗粒化机制与厌氧消化污泥的颗粒化机制既有相似之处,又有差异。当采用好氧絮状污泥作为接种污泥时,适时提高UASB反应器的污泥负荷和水力负荷,可促使初生颗粒污泥的破裂和次生颗粒污泥的形成,对加快颗粒污泥的成熟具有显著的促进作用。

### 3 结论

(1) 以好氧絮状污泥为接种污泥,在污泥负荷和水力负荷分别为 $0.25\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ 和 $0.1\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 条件下启动UASB反应器,通过分阶段缩短水力停留时间的方式,逐步将SLR和HLR提高到 $0.52\text{kg}(\text{COD})/(\text{kg}(\text{VSS})\cdot\text{d})$ 和 $0.3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,经过150d的连续运行,成功培育出了成熟厌氧颗粒污泥。

(2) 厌氧颗粒污泥形成过程先后经历了污泥驯化期、微生物聚集体形成期、初生颗粒污泥形成期、次生颗粒污泥形成期、成熟颗粒污泥形成期5个时期。

(3) 好氧絮状污泥的厌氧颗粒化机制符合二次核学说,其中初生颗粒污泥的形成机制符合黏液学说,但次生颗粒污泥的形成机制与目前已报道的厌氧颗粒污泥形成机制不同,其内核是由初生颗粒污泥破碎后的碎片组成,产甲烷丝状菌和其他细菌通过插入碎片中或者附着于碎片表面的方式形成聚集体,并发展成为次生颗粒污泥。

### 参考文献 (References)

- [1] Liu Y, Xu H L, Show K Y, et al. Anaerobic granulation technology for wastewater treatment[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2002, 18(2): 99-113.
- [2] Nishio N, Nakashimada Y. Recent development of anaerobic digestion processes for energy recovery from wastes [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2007, 103(2): 105-112.
- [3] Atashi H, Ajamein H, Ghasemian S. Effect of operational and design parameters on removal efficiency of a pilot-scale UASB reactor in a sugar factory[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2010, 11(4): 451-456.

- [4] 胡纪萃, 吴唯民, 顾夏声. 好氧活性污泥作为厌氧反应器接种污泥的可行性研究[J]. *中国环境科学*, 1998, 8(2): 62-65.  
Hu Jicui, Wu Weimin, Gu Xiasheng. *China Environmental Science*, 1998, 8(2): 62-65.
- [5] Wu W M, Hu J C, Gu X S, et al. Cultivation of anaerobic granular sludge in UASB reactors with aerobic activated sludge as seed [J]. *Water Research*, 1987, 21(7): 789-799.
- [6] Liu Y, Xu H L, Yang S F, et al. Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Water Research*, 2003, 37(3): 661-673.
- [7] Hulshoff Pol L W, de Castro Lopes S I, Lettinga G et al. Anaerobic sludge granulation[J]. *Water Research*, 2004, 38(6): 1376-1389.
- [8] Ahmad A, Ghufuran R, Wahid Z A. Role of calcium oxide in sludge granulation and methanogenesis for the treatment of palm oil mill effluent using UASB reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 198(30): 40-48.
- [9] Tiwari M K, Guha S, Harendranath S, et al. Influence of extrinsic factors on granulation in UASB reactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 71(2): 145-154.
- [10] Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 19th ed. Washington DC: American Public Health Association, 1995.
- [11] Li J Z, Zheng G C, He J G, et al. Hydrogen-producing capability of anaerobic activated sludge in three types of fermentations in a continuous stirred-tank reactor[J]. *Biotechnology Advance*, 2009, 27(5): 573-577.
- [12] 李克勋, 徐智华, 张振家. 水力作用对颗粒污泥形成的影响 [J]. *中国沼气*, 2003, 21(1): 12-14.  
Li Kexun, Xu Zhihua, Zhang Zhenjia. *China Biogas*, 2003, 21 (1): 12-14.
- [13] 谢汉方, 苏希. UASB系统启动过程中颗粒污泥形成全过程的机理性分析[J]. *微生物学杂志*, 1993, 14(1): 25-28.  
Xie Hanfang, Su Xi. *Journal of Microbiology*, 1993, 14(1): 25-28.
- [14] Grotenhuis J T C, Kissel J C, Plugge C M, et al. Role of substrate concentration in particle size distribution of methanogenic granular sludge in UASB reactors[J]. *Water Research*, 1991, 25(1): 21-27.
- [15] Schmidt J E, Ahring B K. Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, 49(3): 229-246.

(责任编辑 岳臣)

### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。