

# 投加甲烷鬃菌对厌氧颗粒污泥培养的影响\*

龚淑芬<sup>1,2</sup> 郑明月<sup>1</sup> 马海玲<sup>1</sup> 王凯军<sup>1\*\*</sup> 李凌燕<sup>3</sup> 东秀珠<sup>3</sup>

<sup>1</sup>清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100084

<sup>2</sup>中国地质大学水资源与环境学院 北京 100083

<sup>3</sup>中国科学院微生物研究所 北京 100101

**摘要** 通过在中温条件下向EGSB (Expanded Granular Sludge Bed, 膨胀颗粒污泥床) 反应器中加入竹节状甲烷鬃菌6Ac, 研究其对颗粒污泥形成的影响以及形成的颗粒污泥性质和反应器运行的情况. 在(35 ± 1) °C下, 利用实验室相同规模的反应器, 对照组(R1)接种厌氧絮状污泥, R2组接种厌氧絮状污泥的同时加入甲烷鬃菌, 培养颗粒污泥. 结果显示: 当有机负荷(以COD计)逐步提高到11.1 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>时, R2的COD去除率达到85.9%, 高于R1的75.0%. 运行到第46天(d 46)时两个反应器均可观测到颗粒污泥, R2中污泥粒径大于0.1 mm的颗粒污泥已经达到62.3%, d 28-46时, 0.1-0.3 mm颗粒的比例从10.0%增加到49.8%, 对照组R1只从10%增加到33.3%, 仍主要以絮状污泥为主. 研究表明, 颗粒污泥培养过程中投加甲烷鬃菌有利于促进颗粒污泥的形成、增殖与稳定, 改善其沉降性能, 提高有机物的去除效果, 加快EGSB的启动. 图6 表3 参16

**关键词** EGSB; 有机负荷; 颗粒污泥; 甲烷鬃菌

CLC X172: X703.5

## Effect of *Methanosaeta* on anaerobic granular sludge formation\*

GONG Shufen<sup>1,2</sup>, ZHENG Mingyue<sup>1</sup>, MA Hailing<sup>1</sup>, WANG Kaijun<sup>1\*\*</sup>, LI Lingyan<sup>3</sup> & DONG Xiuzhu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup>School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

<sup>3</sup>Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** In order to understand the effect of filamentous cells of *Methanosaeta harundinacea* 6Ac on granular sludge formation under the medium temperature in the EGSB reactor, as well as the properties of the granular sludge formed and operation of the reactor, we cultivated granular sludge with two laboratory scale reactors under the constant temperature condition of 35 ± 1 °C. One reactor (R2) was inoculated anaerobic flocculent sludge with a bristle methane bacteria species; the other reactor (R1) was the control only inoculated with the anaerobic flocculent sludge. The results showed that when the organic load gradually increased to 11.1 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>, the COD removal rate of R2 reached 85.9%, higher than that of R1 (75.0%). Granular sludge was founded in both reactors after 46 days, with 62.3% sludge particles greater than 0.1 mm in R2. During 28-46 days, the percentage of sludge particles 0.1-0.3 mm increased from 10.0% to 49.8% in R2, but only from 10% to 33.3% in the control group R1, where flocculent sludge was mainly detected. This research showed that adding *Methanosaeta* could promote formation of granular sludge, enhance its proliferation and stability, improve precipitation of granular sludge and removal of organic matter, and accelerate start-up of EGSB.

**Keywords** EGSB; organic load; granular sludge; *Methanosaeta*

EGSB (Expanded Granular Sludge Bed, 膨胀颗粒污泥床) 在处理高浓度有机废水方面现已得到广泛的应用, 在EGSB中接种厌氧颗粒污泥能在短时间内获得较高的对有机物的去除率<sup>[1]</sup>, 颗粒污泥的形成成为反应器的高效运行奠定了基础<sup>[2]</sup>, 因此培养性质良好的颗粒污泥对EGSB反应器在实

际工程上的运用起着重要的作用, 同时也可以使反应器具有较高的沉降速度和高的比产甲烷活性. 国内外有很多关于颗粒污泥形成影响因素和控制条件的报道: Imai在接种污泥中同时添加吸水性聚合物(WAP), 结果显示在以葡萄糖为基质的反应器中, WAP的添加明显强化了颗粒污泥的形成过程<sup>[3]</sup>; 曹玉成等的研究表明, 多次加入竹炭等惰性载体有利于大粒径颗粒污泥的形成和致密化<sup>[4-5]</sup>; 李保石、王劲松等的研究结果表明在常温低浓度进水条件下, 投加絮凝剂可以加速厌氧颗粒污泥的形成, 提高颗粒污泥的产甲烷活性和沉降性能<sup>[6-7]</sup>; Yu等则发现在反应器中加入惰性物质可以加快UASB反应器的启动时间<sup>[8]</sup>.

甲烷鬃菌 (*Methanosaeta*) 是某实验室从啤酒废水中分离出的一种甲烷古菌<sup>[9]</sup>, 是一种以乙酸为基质的产甲烷

收稿日期 Received: 2013-08-05 接受日期 Accepted: 2013-10-12

\*国家自然科学基金项目(51278271)、环保公益性行业科研专项(201009017)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07205-002)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (51278271), the National Department Public Benefit Research Foundation (201009017) and the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China (2012ZX07205-002)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: wkj@tsinghua.edu.cn)

菌,同时是污水处理反应器中重要的功能菌,在自然环境及厌氧反应器中细胞通常为长丝状,有助于颗粒污泥结构的形成和维持<sup>[10]</sup>.我们通过在恒温条件下向EGSB反应器中加入甲烷鬃菌,探究其对颗粒污泥形成的影响,以及形成的颗粒污泥性质和反应器运行的情况,以期在实际生产中培养颗粒污泥提供有利依据和条件.

## 1 材料与实验方法

### 1.1 试验装置与条件

使用两套实验室规格的EGSB反应器R1和R2,实验装置如图1所示.其中,反应器内径60 mm,总高度500 mm,有效容积1 L.反应装置置于恒温室(35 ± 1) °C运行.实验进水由蠕动泵从反应器底部进入反应器,沉淀区出水从上部出口排出,产气由三相分离器进入气体流量计计量.

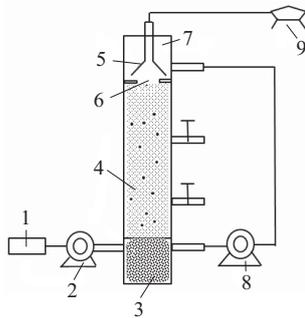


图1 实验装置示意图. 1:进水;2:蠕动泵;3:污泥床;4:反应区;5:三相分离器;6:沉淀区;7:出水;8:回流蠕动泵;9:气体流量计.

**Fig. 1 Schematic diagram of the experiment device.** 1: influent; 2: peristaltic pump; 3: sludge bed; 4: the reaction zone; 5: three-phase separator; 6: precipitation area; 7: effluent; 8: reflux peristaltic pump; 9: gas metering meter.

### 1.2 接种及进水组成

接种污泥为北京市小红门污水处理厂污泥消化池的厌氧絮状污泥.接种后R1和R2的污泥浓度(以VSS计)均为10.1 g/L,其中R1仅接种厌氧絮状污泥,在反应开始之前测其菌种浓缩液的VSS为0.266 g/L,考虑在反应运行过程中菌种会随着负荷的提高逐渐流失,且加进去的是长丝状6Ac菌,更容易随絮状污泥一起流失,为了保证反应运行中6Ac菌一直存在反应器中,R2按9:1(以VSS计)混合接种厌氧污泥和增殖培养的甲烷鬃菌.

实验进水采用自来水人工配制,以葡萄糖和乙酸钠为基质(乙酸钠保持在COD 500 mg/L),以COD:N:P = 200:5:1投加氮[CO(CN)<sub>2</sub>]和磷(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>),在进水中加入微生物所需的微量元素(表1),最后加入碳酸氢钠调节pH

表2 反应器R1和R2的运行方式

**Table 2 Operating mode of the reactors R1 and R2**

阶段 Phase	COD ( $\rho/\text{mg L}^{-1}$ )	进水量 Water inflow ( $V/\text{L d}^{-1}$ )	有机负荷 OLR (COD, $\rho/\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ )	上升流速 Upflow velocity ( $v/\text{m h}^{-1}$ )	停留时间 HRT ( $t/\text{h}$ )	运行时间 Running time ( $t/\text{d}$ )
1	1000	2.0	2.0	0.37	12.0	1-14
2	1400	2.0	2.8	0.37	12.0	15-21
3	2000	2.0	4.0	0.37	12.0	22-30
4	2000	2.8	5.6	0.38	8.5	31-41
5	2000	3.9	7.8	0.40	6.1	42-48
6	3000	3.7	11.1	0.40	6.5	49-98

在6.5-7.8之间.

表1 实验自配水中加入的微量元素

**Table 1 Trace elements in the artificial influent water**

成分 Composition	$\rho/\text{mg L}^{-1}$	成分 Composition	$\rho/\text{mg L}^{-1}$
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	10.0	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	0.5
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	15.0	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.5
FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	10.0	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.5
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.5	ZnCl <sub>2</sub>	0.5
KI	1.0	AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.5
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.5	CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.5
Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub>	0.5		

### 1.3 试验启动及运行策略

分别向两个反应器中接种厌氧絮状污泥,系统充氮气15 min,密闭.以乙酸钠和葡萄糖为基质,初始进水浓度(以COD计)为1 000 mg L<sup>-1</sup>,有机负荷率(OLR)为2.0 kg m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>,水力停留时间(HRT)为12 h,通过内回流的方式使上升流速达到0.37 m h<sup>-1</sup>.

试验过程中以COD去除率连续3 d稳定在80%以上,出水VFA < 300 mg/L为阶段结束标志,进一步通过提高进水浓度或进水流量的方式快速提高有机负荷,当反应器中观察到颗粒污泥,对形成的颗粒污泥性质进行测试分析.试验各阶段参数如表2所示.

### 1.4 分析方法

实验运行过程中检测的指标有进出水的pH和COD、反应器内污泥的挥发性固体浓度(VSS)、总悬浮物浓度(TSS)和污泥粒径分布,以及形成厌氧颗粒污泥后对菌种形态及结构组成进行分析;其中pH采用pH测定仪测定(雷磁),COD采用重铬酸钾法测定<sup>[11]</sup>,TSS和VSS采用标准分析法测定<sup>[12]</sup>,产甲烷活性采用单位时间计量的方法测定<sup>[13]</sup>.

厌氧颗粒污泥外观形态通过环境扫描电子显微镜(FEI Quanta 200)进行分析,样品的预处理过程:2.5%戊二醛固定 磷酸缓冲溶液清洗 50%、70%、80%、90%、100%乙醇溶液各洗一次 100%乙醇洗3次 叔丁醇:乙醇(1:1) 纯叔丁醇各洗一次,每次8 min,最后用导电胶将样品固定在台上.用离子溅射仪(IONSPUTTER, JFC21100)溅射,镀上一层金属膜 电镜观察;粒径分布测试方法采用激光粒度仪,样品无需处理.

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验运行过程

实验历经98 d完成了EGSB颗粒污泥化的过程,根据有机负荷的大小和颗粒污泥出现的时间将污泥颗粒化大致分

为三个阶段:(1)启动运行期(1-21 d). 这段时期,随着反应器中污泥的活性开始提高,大量的气泡冲出泥水界面,细小絮体粘附在气泡上开始上浮,并流出反应器,启动运行期结束时有机负荷达到 $2.8 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ . (2)有机负荷上升期(22-48 d). 这一运行期反应器内较重的污泥和分散的絮状污泥进行选择性的筛选,污泥总量由于轻质污泥的洗出降低到最小值,反应器内可以观察到明显的颗粒污泥(直径为0.1-1 mm),表示经过一个多月的运行,反应器内污泥的形态开始发生转变,由絮体向颗粒体进化,此阶段结束. (3)颗粒污泥形成期(49-98 d). 该阶段结束时有机容积负荷为 $11.1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,污泥颗粒继续生长,粒径增大至1-2 mm,污泥基本上转变为颗粒化状态.

## 2.2 颗粒污泥培养过程

### 2.2.1 COD去除率的变化

运行每一个负荷阶段COD去除率达到80%以上后再稳定运行3 d. 在第21天(d 21)时有机负荷达到 $2.8 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , COD去除率达到80%以上,启动运行期基本完成. 在启动运行期完成后, COD污泥负荷(COD/VSS)和水力负荷分别保持在 $0.6 \text{ kg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ m h}^{-1}$ 以上,继续提高有机容积负荷,直到反应器中出现颗粒污泥. d 46时,在反应器中检测到颗粒污泥,到d 74两个反应器中均以颗粒污泥为主,最终有机负荷达到 $11.1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,水力停留时间缩短为6.5 h.

从表2可知,在第一阶段运行时间为14 d,在启动运行初期R1和R2的COD去除率都不高,启动运行初期微生物的活性低,生物降解能力不足,反应器运行到d 23, R1和R2的COD去除率都达到80%以上,微生物的活性逐渐得到恢复,到d 52时有机负荷已经达到 $11.1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ . 图2分别表示R1和R2中COD去除率和有机负荷随运行时间的变化. 可以看出,提高负荷后,仅接种厌氧絮状污泥的R1,其COD去除率迅速降低,恢复到80%以上所需时间为7-8 d,这是由于产生的气体使厌氧絮体污泥开始上浮,污泥随着负荷的提高随出水大量流出,微生物的活性降低从而其降解有机物的能力降低,导致反应出水COD去除率变低;而接种泥额外添加了甲烷鬃菌的R2中COD去除率一直稳定在80%以上,甚至达到90%以上,提高负荷仅会导致R2的去除率短暂降低后,1-3 d便恢复到90%,说明R2中添加的甲烷鬃菌有利于反应器内的稳定运行,反应器内絮状污泥的流失也减少,从而有机物的去除效果得到稳定的提高,进而能够缩短颗粒污泥培养的时间. 在51-98 d的运行过程中, R2反应器的COD去除率均稳定在80%以上,在之后的继续培养中对R2提高负荷到 $14 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,运行至d 165时为90.8%,处理效果稳定,而R1反应器在此阶段COD的去除率一直低于70%,没有对其继续提高负荷.

### 2.2.2 进出水中pH随时间的变化

pH是厌氧微生物代谢过程中的重要参数,厌氧体系中产甲烷菌的pH一般在6.5-7.8之间,如果pH不在5.0-8.5范围,多种微生物的种群生活就会受到抑制,特别是产甲烷菌的活性就会受到抑制. 因此在厌氧消化反应中控制进水pH值并及时了解反应过程中pH的变化对反应的运行及为重要,为了防止反应运行过程中产甲烷菌的活性受到抑制,在进水中加入碳酸氢钠调节pH使之在7.5左右. R1和R2中进出水pH随时间的变化见图3.

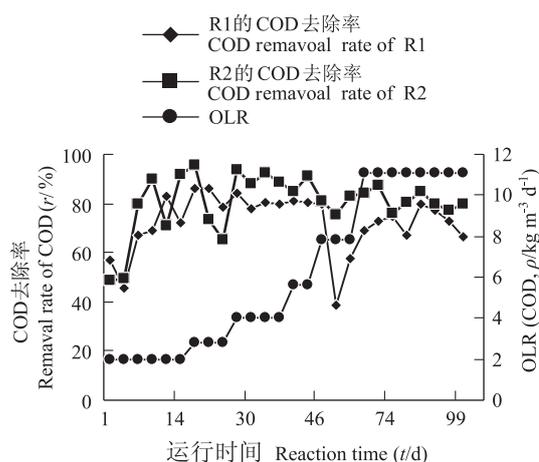


图2 反应器中COD去除率与OLR随时间的变化.

Fig. 2 Changes of COD removal efficiency and OLR over time.

当废水进入反应器内,复杂的有机物发生水解酸化,产生大量醇和有机酸等中间产物,使pH降低,随着反应的运行,pH开始趋于平缓并逐渐稳定. 从图3可以看出,在反应运行的d 38即有机负荷为 $5.6 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ 时,R1的出水pH低于进水的pH, COD开始下降,说明R1中过快地提高有机负荷会导致有机酸的积累,从而反应器有酸化的趋势,应放慢R1中有机负荷提高的速度,在整个运行过程中,R1的变化比较大,R2在运行20 d后出水的pH都稳定在7.8以上,R1反应器中pH值的波动较R2反应器明显,R2运行更稳定.

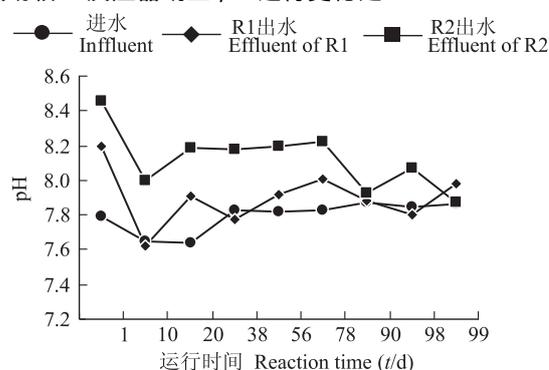


图3 反应器出水和进水pH随时间的变化.

Fig. 3 Effluent pH in the reactors and influent pH value changes over time.

### 2.2.3 污泥浓度的变化

两个反应器的初始接种污泥浓度相同,为 $10.6 \text{ g/L}$ . 从图4中可以看出开始运行反应器后,水的上升流速和产生的气体使细小的污泥流失,反应器内总污泥的浓度呈现下降的趋势,并且R1的流失量较投加了甲烷鬃菌的R2严重. 在运行到48 d以后污泥浓度达到最低,随着有机负荷的增加,在此阶段反应器中开始出现细小的颗粒污泥,随着颗粒污泥的形成,系统内的污泥量又开始逐渐恢复,并且增长超过了较轻的污泥流失,最终使反应器内污泥浓度重新增加,R2的增长明显优于R1,R1污泥流失得较多. 污泥增长较慢,R2中加入了甲烷鬃菌有利于絮状污泥更好地生长,污泥增长速度快.

从图中可知污泥颗粒化过程经历了大量的絮状污泥流失和污泥总量逐渐增加的过程,表3是反应器运行到d 98时

污泥的性质,可以看到R1的TSS只有3.6 g/L,R2增长到8.3 g/L.这一结果也表明加入甲烷鬃菌对R2反应器中微生物的固定和增长起到促进的作用.在后面持续培养至d 165时分别对R1和R2的污泥浓度进行检测,结果显示其污泥浓度分别为4.3 g/L和8.6 g/L,这一结果说明在后面持续运行中反应器运行效果已稳定,污泥浓度有增长的趋势,而且R2污泥浓度优于R1.

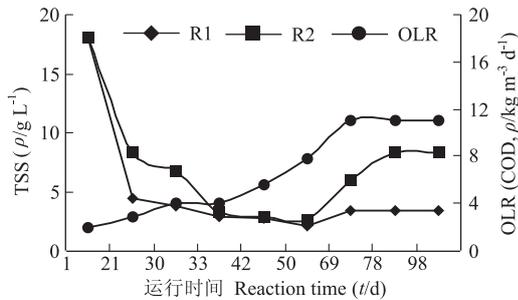


图4 反应器中污泥浓度与OLR随时间的变化.

Fig. 4 Changes of OLR and TSS in the reactors over time.

表3 d 98时反应器污泥的基本性质

Table 3 Properties of the sludge in the reactors on 98<sup>th</sup> day

参数 Parameter	TS ( $\rho/g L^{-1}$ )	VS ( $\rho/g L^{-1}$ )	TSS ( $\rho/g L^{-1}$ )	VSS ( $\rho/g L^{-1}$ )
接种污泥 Inoculated sludge	20.1	10.6	18.1	10.1
R1	6.4	3.4	3.6	2.8
R2	8.8	7.8	8.3	8.2

2.2.4 污泥粒径分布的变化 在反应运行过程中,分别在启动运行期、负荷上升期和颗粒污泥形成期这3个时期末期,采用加大回流流量的方式,将反应器内污泥混合后从底部取得一定量的污泥,对污泥的粒径分布情况进行测定.结果如图5所示,R1污泥的粒径主要集中在小于0.1 mm范围内,到d 74时粒径大小增加趋势明显,主要为0.2 mm,由图可知超过0.1 mm的粒径所占百分比超过60%.R2从d 46到d 74时增加不够明显,可能是因为反应一直停留在同一个阶段,水力冲刷作用不够大,导致反应器中污泥处于一个饱和的状态,但R2反应器在d 46时颗粒污泥粒径为0.2 mm的已经达到68%,最大的为2 mm,明显快于R1形成颗粒污泥,到d 154时R2中粒径大于0.5 mm的达到了10.9%,R1也有明显增长,均主要以颗粒污泥为主,表明在EGSB中加入某种甲烷鬃菌有利于污泥的增殖,可以快速提高负荷,促进颗粒污泥的形成.

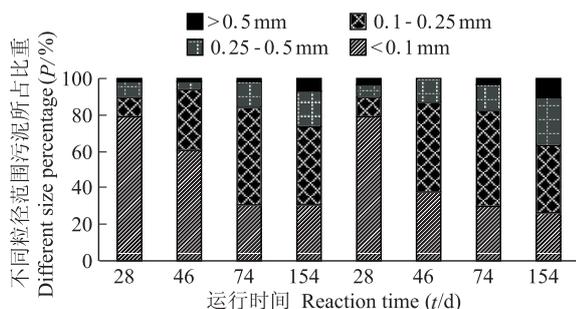


图5 颗粒污泥粒径分布.

Fig. 5 Diameter distribution of granular sludge in the reactors.

在培养颗粒污泥过程中,随着液体上升流速的逐步提高和产气量的增大,不断形成颗粒污泥,粒径的大小主要集中在0.2 mm,根据Hulshoff Pol的报道<sup>[14]</sup>主要是c类颗粒污泥,这类颗粒呈球形,包含有像甲烷八叠球菌,颗粒较小( $D < 0.5$  mm).

### 2.3 培养的颗粒污泥的性质分析

2.3.1 颗粒污泥的沉降速度 污泥沉降指数(SVI)是表征颗粒污泥沉降性能的一个重要参数,Schmidt等根据沉降速率,将颗粒污泥的沉降性能分为沉降性能较差(沉降速率 $< 20$  m/h)、沉降性能中等水平(沉降速率为20-50 m/h)和沉降性能良好(沉降速率 $> 50$  m/h)3类水平<sup>[15]</sup>.R1和R2两组反应器中,粒径位于0.5-1.7 mm范围内的颗粒污泥沉降性能均处于良好水平,而粒径超过1.7 mm的颗粒污泥沉降性能达到了很好水平.两组反应器中颗粒污泥的沉降速度均随粒径的增大而增加.对反应运行了98 d,在反应器的底部取污泥测其沉降性,发现R1和R2的污泥沉降比分别是17%和51%,可见R2的沉降性明显优于R1.结果表明,在反应器中加入甲烷鬃菌可促进颗粒污泥的形成与致密化,进而改善其沉降性能.

2.3.2 颗粒污泥的产甲烷活性 产甲烷活性(SMA)是厌氧颗粒污泥活性的重要指标,表示厌氧颗粒污泥产甲烷的能力,在反应开始时测定絮状污泥的产甲烷活性( $CH_4$ ,以COD/VSS计)为 $0.18 g g^{-1} d^{-1}$ ,颗粒污泥形成后分别取R1和R2运行了98 d的颗粒污泥测定产甲烷活性,分别是 $0.3 g g^{-1} d^{-1}$ 和 $0.5 g g^{-1} d^{-1}$ ,说明污泥的活性有所增加,并且加入甲烷鬃菌的污泥活性要高于未加入的,李保石等人在UASB中投加了阳离子絮凝剂,发现投加和未投加形成的颗粒污泥的产甲烷活性分别是 $1.2 g g^{-1} d^{-1}$ 和 $1.0 g g^{-1} d^{-1}$ <sup>[6]</sup>,这也与EI. Mamouni的研究结果<sup>[16]</sup>一致.因此,推测本研究培养的颗粒污泥并未最终成熟稳定,活性仍有一定的上升空间.

2.3.3 颗粒污泥外观形态 对培养了98 d的颗粒污泥进行扫描电子显微镜测试,图6分别为R1和R2在高低显微镜条件下的外观结构和菌种组成.可以看出,R1污泥表面结构松散,粒径在0.3 mm左右(图6a);污泥表面主要是丝状菌占优,并有少量的球菌和杆菌,结构松散(图6b).R2形成的颗粒污泥比R1大,呈黑灰色、椭球形(图6c);随着运行时间的推移,污泥中微生物量逐渐增多,污泥结构越来越密实,凹凸不平,污泥表面主要是由甲烷鬃菌组成,也有少量的球菌和丝状菌(图6d).R1和R2的优势菌群在形态上有着明显的差别,R1以丝状菌为主,R2表面主要是甲烷鬃菌,说明在EGSB中加入甲烷鬃菌有利于形成以此菌为优势菌的颗粒污泥,球菌和丝状菌占少数.

## 3 结论

本研究表明,以厌氧絮状污泥接种的EGSB反应器中,在中温低浓度条件下,投加甲烷鬃菌有利于反应器中厌氧颗粒污泥的形成,缩短有机负荷提高的时间,提高厌氧颗粒污泥的产甲烷活性.

(1)在EGSB中投加该甲烷鬃菌,可以减少甲烷菌的流失:有利于菌种更多地保留在反应器内,厌氧微生物的活性恢复快,每个负荷阶段的COD去除率高并稳定,可以缩短有机负荷提高的时间.

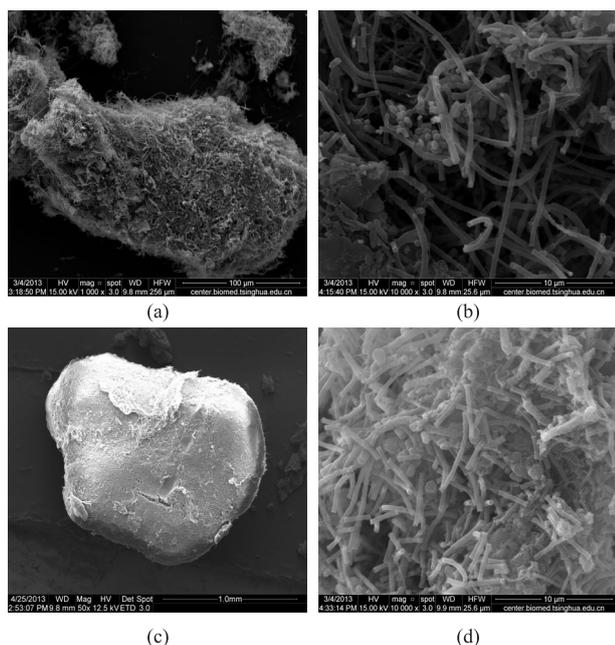


图6 d 98时反应器内颗粒污泥的SEM图。a、b分别为R1污泥表面放大1 000倍、10 000倍；c、d分别为R2污泥表面放大50倍、10 000倍。

Fig. 6 SEM figure of granular sludge in the reactors on 98<sup>th</sup> day. a and b: surface of the sludge in R1 magnified 1 000 and 10 000 times respectively; c and d: surface of the sludge in R2 magnified 50 and 10 000 times respectively.

(2) 投加甲烷鬃菌可以使反应器内的颗粒污泥增长较快：在d 28-46时0.1-0.3 mm的颗粒污泥从10%增加到49.8%，反应器中粒径 > 0.1 mm的颗粒污泥已经达到62.3%。而未投加该种菌种的只从10%增加到33.3%，主要以絮状污泥为主。

(3) 投加甲烷鬃菌可以使形成的颗粒污泥的产甲烷活性提高：颗粒污泥形成后，投加过该菌种的颗粒污泥产甲烷活性高于未投加的，分别是 $0.3 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 。

本研究结果表明，投加甲烷鬃菌形成的颗粒污泥性能较稳定，繁殖速度较快，有利于反应器的稳定运行。但由于受实验条件的限制，还存在一些问题，建议在后期研究中用实际废水代替人工废水，通过少量多次添加甲烷鬃菌，用形成的颗粒污泥处理实际废水，进一步探究其对颗粒污泥形成的影响。

## 参考文献 [References]

- 左剑恶, 王妍春, 陈浩, 左宜, 申强. EGSB反应器的启动运行研究[J]. 给水排水, 2001, 27 (3): 26-30 [Zuo JW, Wang YC, Chen H, Zuo Y, Shen Q. The study of EGSB reactor start-up operation [J]. *China Water Wastewater*, 2001, 27 (3): 26-30]
- Randall AW, Richard RD. Enhancement of granulation and start-up in the anaerobic sequencing batch reactor. *Water Environ Res*, 1996, 68: 883-892
- Imai T, Ukita M, Liu J, Sekine M, Nakanishi H, Fukagawa M. Advanced start-up of UASB reactors by addition of water absorbing polymer [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 36 (6): 399-406
- 曹玉成, 张妙仙, 单胜道. 两次投加竹炭对UASB反应器污泥颗粒化的促进作用[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (5): 246-250 [Cao YC, Zhang MX, Dan SD. Effect of two-added powdered bamboo-charcoal on sludge granulation of UASB reactor [J]. *Trans CSAE*, 2010, 26 (5): 246-250]
- 韩剑宏, 倪文, 江翰. 投加硬硅钙纤维粒对UASB低温运行的影响[J]. 中国给水排水, 2003, 19 (10): 4-17 [Han JH, Ni W, Jiang H. Influence of addition of xonotlite fibrous particle on UASB operation at low temperature [J]. *China Water Wastewater*, 2003, 19 (10): 4-17]
- 李保石, 余宗莲, 樊玉清, 于晓静. 投加阳离子聚合物加速UASB反应器中颗粒污泥形成[J]. 环境工程学报, 2009, 7 (3): 1322-1325 [Li BS, She ZL, Fan YQ, Yu XJ. Accelerated granulation by cationic polymer in UASB reactor [J]. *Chin J Environ Eng*, 2009, 7 (3): 1322-1325]
- 王劲松, 胡勇. 微生物絮凝剂促进厌氧污泥颗粒化及其机制的研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (3): 361-366 [Wang JS, Hu YY, Mechanism of anaerobic granulation enhancement with bio-flocculant [J]. *Acta Sci Circumst*, 2005, 25 (3): 361-366]
- Yu HQ, Tay JH, Fang Herbert HP. Effect of added powdered and granular activated carbons on start-up performance of UASB reactors [J]. *Environ Technol*, 1999, 20: 1095-1101
- Ma K, Liu XL, Dong XZ. *Methanosaeta harundinacea* sp. nov, a novel acetate-scavenging methanogen isolated from a UASB reactor. *Intern J Syst Evol Microbiol*, 2006, 56: 127-131
- MacLeod FA, Guiot SR, Costerton JW. Layered structure of bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor. *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56 (6): 1598-1607
- 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002 [The State Environmental Protection Agency. *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002]
- 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998. 509-542 [He YL. *Anaerobic Biological Treatment of Wastewater* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998. 509-542]
- Letting G, van Velsen AFM, Hobma SW, de Zeeuw W, Klapwijk A. Use of upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1980, 22 (4): 699-734
- Hulshoff Pol L. The phenomena of granulation of anaerobic sludge [D]. The Netherlands: Wageningen University, 1989
- Schmidt JE, Ahring BK. Granular sludge formation in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1996, 49 (3): 229-232
- EIMamouni R, Leduc R, Guiot SR. Influence of synthetic and natural polymers on the anaerobic granulation process. *Water Sci Technol*, 1998, 38 (8-9): 341-347