

# 厌氧颗粒污泥人工床层快速培养与吸附动力学分析

施云芬 孙萌 张更宇

(东北电力大学化学工程学院, 吉林 132012)

**摘要:** 为加快颗粒污泥的形成速率,解决颗粒污泥培养时间长、污泥活性差的问题,通过向厌氧池中加入人工污泥床层快速培养厌氧颗粒污泥,实现厌氧颗粒污泥培养的可控性。采用电子扫描电镜对培养好的厌氧颗粒污泥微观形态进行观察,通过电子显微镜观察颗粒污泥形态变化,确定颗粒污泥分形维数。以颗粒污泥的数量分布、平均粒径、含水率为表征参数,建立厌氧颗粒污泥的吸附动力学模型。结果表明,厌氧颗粒污泥附着在人工污泥床层上,由于人工污泥床层均匀分布使得形成粒径为4~5 mm的厌氧颗粒污泥质量占总污泥质量的80%,分形维数在2.68~2.83之间,颗粒轮廓清晰,颗粒污泥在水力负荷达到5 kg/(L·d)时,人工污泥床层上形成的颗粒污泥质量浓度仍保持在5.84 kg/m<sup>3</sup>,颗粒污泥耐冲击能力强;针对吸附在人工污泥床层上的厌氧颗粒污泥建立吸附动力学模型,发现反应池中污泥的内循环可以促进厌氧颗粒污泥的形成,当厌氧反应池任意断面颗粒污泥向上和向下的污泥浓度之比为0.8~0.9时,形成的厌氧颗粒污泥吸附性能最强。

**关键词:** 厌氧颗粒污泥; 人工污泥床层; 动力学; 分形维数

**中图分类号:** X703.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0227-07

## Rapid Cultivation of Anaerobic Granular Sludge within Artificial Sludge Bed and Analysis of Adsorption Kinetics

Shi Yunfen Sun Meng Zhang Gengyu

(College of Chemical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The installation of artificial sludge blanket layer to the anaerobic ponds has accelerated the sludge formation rates, shortened the cultivation time and improved the sludge activity. It also enhances the operability of the formation process of the anaerobic granular sludge. The impacts on the formation of anaerobic granular sludge from the artificial sludge bed and the mechanisms of granular sludge adsorption were investigated. Scanning electron microscope (SEM) was used to measure the shapes of the anaerobic granular sludge and furthermore determine their fractal dimension. A granular sludge adsorption model was developed based on the distribution patterns, average particle sizes and water contents of the granular sludge. Results show that when attached to the artificial sludge blanket layer, the anaerobic granular sludge was evenly distributed across the layer, with particle sizes between 4 mm and 5 mm, and made up to 80% of the total sludge in the system. Under the SEM, their shapes were clearly observed and their fractal dimensions were between 2.68 and 2.83. Results also show strong stability of granular sludge on the artificial sludge layer. When the hydraulic loading rate reached 5 kg/(L·d), they still maintained an average concentration of 5.84 kg/m<sup>3</sup>. Results from the granular sludge adsorption model indicated that the internal circulation of the sludge inside the reaction pond can stimulate the formation of the anaerobic granular sludge. Peak adsorption capacity of the anaerobic granular sludge was achieved when the concentration ratio of up-flow/down-flow sludge fell between 0.8 and 0.9. This study will provide a reference to the formation of anaerobic granular sludge for the industrial treatment of wastewater with high organic concentrations.

**Key words:** anaerobic granular sludge; artificial sludge blanket; dynamics; fractal dimension

收稿日期: 2016-03-11 修回日期: 2016-04-11

基金项目: 吉林省环保厅科研项目(吉环科字2009-13号)和吉林市科技计划项目(201232404)

作者简介: 施云芬(1964—),女,教授,主要从事废水处理研究, E-mail: 928830935@qq.com

## 引言

规模化厌氧废水处理中,厌氧反应器的运行稳定性和高效能在一定程度上取决于能否培养出沉降性能好和比产甲烷活性(Specific methanogenic activity, SMA)高的厌氧颗粒污泥,如果厌氧反应器内的污泥以松散的絮状体存在,则易出现污泥流失、有机负荷低、处理效果差等问题<sup>[1]</sup>。

施云芬等<sup>[2]</sup>以养猪废水为进水,以离子交换树脂、粉煤灰、聚合氯化铝等为惰性载体进行厌氧颗粒污泥的快速培养,发现颗粒污泥培养成熟后反应器内存在大颗粒污泥且分散排布在反应器底部,污泥床层明显存在,占反应器容积 1/3 左右。SHANMUGAM 等<sup>[3]</sup>在培养厌氧颗粒污泥时发现存在污泥床层的现象,这种床层的出现会影响颗粒污泥内部吸附强度,降低了甲烷的产生量,而且厌氧颗粒污泥沉降过程中会造成颗粒污泥松散、污泥脱落的问题。厌氧颗粒污泥培养中在厌氧反应器内形成污泥床层,但是形成的污泥床层耐水流冲击性差,且成熟颗粒污泥之间的孔隙率不同导致污泥床层不稳定<sup>[4]</sup>。

COSTA 等<sup>[5]</sup>研究发现当颗粒污泥粒径大于 1 mm 时,污泥床层孔隙率相应增大 10%,并且厌氧反应器出水 COD 去除率随着污泥之间相互作用力的增大而增大;ZHANG 等<sup>[6]</sup>发现由于厌氧反应器运行过程中选择压的不同,污泥相互之间的作用强度也有所不同,随着选择压的增大,污泥之间的吸附呈现先增大后减小的趋势;BARTACEK 等<sup>[7]</sup>研究了掺镍对产甲烷颗粒污泥吸附动力学的影响,结果表明镍在厌氧颗粒污泥中的吸附过程是由粒子扩散引起的;YANG 等<sup>[8]</sup>采用宾汉模型对 UASB 中污泥浓度和运行温度进行评估并分析颗粒污泥流变学特性,结果表明,污泥浓度的提高可以改变颗粒污泥流变学特性;ADRIANA 等<sup>[9]</sup>研究表明颗粒污泥在较低的 SVI 值条件下,具有较高的沉降性能。

因此,如何形成一种人工可控制的性能稳定的污泥床层及探讨形成机理值得研究。本文通过模拟人工污泥床层进行厌氧颗粒污泥的培养,对厌氧颗粒污泥中不同菌种的吸附特性进行研究。

## 1 材料和方法

### 1.1 反应池的运行

试验采用自制培养厌氧颗粒污泥的反应池如图 1 所示,它是集厌氧颗粒污泥培养和人工污泥床层为一体的厌氧反应池(1 000 mm × 500 mm × 1 000 mm),反应池有效容积 450 L。反应池主体由厚度为 5 mm 的钢板围成,外壁敷设厚度为 10 cm 的

聚苯板作保温<sup>[10]</sup>;人工污泥床层系统中底部塑料板和顶部塑料板分别由底部固定支架和顶部固定支架固定,底部塑料板和顶部塑料板之间由空心填料支座连接,空心填料支座透过底部塑料板和顶部塑料板,空心填料支座周围设有填料,填料上均匀缠绕碳纤维,这样就形成了人工污泥床层;厌氧培养装置底部进水系统中进水总管路通过五通阀分为 4 条支路由进水泵输送到厌氧培养装置底部中心并且进入厌氧培养装置中,保证了足够的进水负荷,厌氧培养装置中接种污泥受到水力冲击后处于悬浮状态,附着于人工污泥床层上,厌氧培养装置顶部侧壁设有溢流堰和出水系统,其中出水系统在溢流堰下部;厌氧培养装置底部侧壁设有排泥系统,污泥通过排泥系统由排泥泵输送到污泥收集池中二次使用。

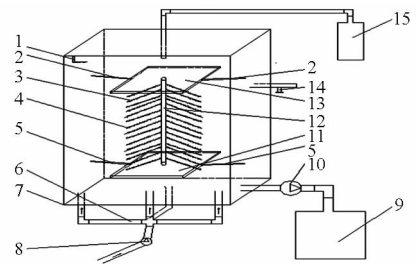


图 1 人工模拟床层反应池示意图

Fig. 1 Artificial anaerobic granular sludge reactor

1. 溢流堰 2. 顶部固定支架 3. 丝状填料 4. 碳纤维 5. 底部固定支架 6. 进水系统 7. 厌氧培养装置 8. 离心泵 9. 污泥收集池 10. 真空泵 11. 底部玻璃板 12. 空心填料支架 13. 顶部玻璃板 14. 出水系统 15. 集气罐

### 1.2 接种污泥和培养方式

接种污泥采用吉林市酒精厂 UASB 反应器中的失活污泥,接种量为 40 L,质量浓度为 947.98 mg/L。反应池进水采用有机物质和 N、P 含量丰富的养猪废水,不需外加营养物质<sup>[11]</sup>。反应池运行过程中逐渐提高猪废水浓度<sup>[12-13]</sup>。厌氧颗粒污泥培养过程分为 3 个阶段:污泥驯化阶段、颗粒污泥形成阶段、颗粒污泥成熟阶段<sup>[14]</sup>。在各个阶段开始培养时采用电子显微镜观察反应池中污泥,对比加入人工污泥床层和未加入人工污泥床层 2 个反应池中的颗粒污泥,其中加入人工污泥床层的反应池为 1 号反应池,未加入人工污泥床层的反应池为 2 号反应池。表 1 为接种污泥指标。

### 1.3 分析方法

化学需氧量(COD)、混合液质量浓度(MLSS)等指标均采用国家规定的标准方法测定<sup>[15]</sup>。

颗粒污泥的评价指标(数量分布、平均粒径、含水率)等根据 BEUN 等<sup>[16]</sup>的方法测定。

颗粒污泥形态观察:采用电子扫描电镜对培养好的厌氧颗粒污泥进行观察<sup>[17]</sup>。

表1 接种污泥指标  
Tab.1 Inoculation sludge index

参数	数值
混合液悬浮固体质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	4 365.00
混合液挥发性悬浮固体质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	1 265.00
悬浮固体质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2 654.98
污泥体积指数	1 532.98
含水率/%	95.00

向上表面线性流速  $v_1$  ( $\text{m/s}$ ):通过单位横截面积流入量和流入时间计算,即

$$v_1 = Q_1/t$$

式中  $Q_1$ ——单位横截面积流入量,  $\text{m}^3/\text{s}$

$t$ ——时间,  $\text{s}$

向上表面线性气体流速  $v_g$  ( $\text{m/s}$ ):通过气体流量计测定,气体通过流量计时,通过速度传感器测算出气体流速。

颗粒污泥的沉降速度  $v_s$  ( $\text{m/s}$ ):将一定量污泥放入若干沉降柱内(直径 100 mm,高度 1000 mm),通过测算污泥沉降至柱底部所用时间,计算出污泥沉降速度

$$v_s = H/t$$

式中  $H$ ——沉降柱高度,  $\text{m}$

分形维数  $D_f$ :通过电子显微镜连接数据分析系统测定,即将电子显微镜连接到计算机上,通过显微镜观察颗粒污泥形态变化,同时计算机实时抓拍,分析颗粒污泥分形维数,保持室内温度 20~25℃。

## 2 结果与讨论

在厌氧颗粒污泥形成过程中,对加入人工污泥床层和未加入人工污泥床层 2 个反应池中的颗粒污泥进行对比,接种污泥均为絮状污泥。第 1.2 节已有叙述,在此不再赘述。

### 2.1 絮状接种污泥颗粒化过程

有机废水初始 COD 值为 3 000~5 000  $\text{mg/L}$ ,反应池内温度为 35~40℃<sup>[18-20]</sup>,pH 值为 7.0,进水碱度为 1 000  $\text{mg/L}$ 。采用静态驯化方式对 2 个反应池中接种污泥驯化,设置水力停留时间为 25 h,测定 2 个反应池取样口 COD 值,1 号反应池和 2 号反应池在驯化阶段进行到第 15 天和第 20 天时,取样口 COD 去除率达到 90%,驯化阶段结束。

颗粒污泥形成阶段从反应池底部进水,冲击反应池中污泥,使污泥在 1 号反应池中与人工污泥床层接触并且聚集其上,缩短水力停留时间为 10 h,1 号反应池和 2 号反应池在颗粒污泥形成阶段进行到第 24 天和第 50 天时,出水 COD 去除率达到 90%,1 号反应池产甲烷量 10.48  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,2 号反

应池产甲烷量 6.48  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,1 号反应池中污泥分布在人工污泥床层中,其中粒径在 1~2 mm 的污泥占污泥总数的 85%,颗粒污泥形成阶段结束。

颗粒污泥成熟阶段提高进水负荷使 COD 负荷在 28.9  $\text{kg}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ ,水力停留时间缩短为 7 h,1 号反应池中污泥在人工污泥床层中不断积累并相互聚集,形成大颗粒污泥,其中粒径在 4~5 mm 的污泥质量占污泥总质量的 70%,粒径在 3~4 mm 的污泥质量占污泥总质量的 15%,粒径在 3 mm 以下的污泥质量占污泥总质量的 15%,1 号反应池和 2 号反应池在颗粒污泥成熟阶段进行到第 30 天和第 61 天时,测定 1 号反应池和 2 号反应池出水 COD 去除率达到 90%,1 号反应池中产甲烷量 23.48  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,2 号反应池中产甲烷量 13.48  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,颗粒污泥成熟阶段结束。

本试验 1 号反应池和 2 号反应池培养厌氧颗粒污泥时间分别为 69 d 和 136 d,通过试验测定发现 1 号反应池和 2 号反应池中厌氧颗粒污泥平均沉降速度分别为 85.4  $\text{m/h}$  和 56.54  $\text{m/h}$ ,1 号反应池中厌氧颗粒污泥活性高,且性能稳定。污泥在人工污泥床层中均匀分布,人工污泥床层与 2 号反应池中形成的污泥床层相比,人工污泥床层由于具有特定的床层结构,污泥依附于人工污泥床层上,污泥之间相互吸附形成粒径较大的颗粒状污泥,且吸附在人工污泥床层上的颗粒污泥孔隙率均匀,耐水力冲击能力强,人工污泥床层整体结构不会破损,在扫描电镜下观察颗粒污泥孔道疏松,便于甲烷的传输,形成的颗粒污泥粒径均匀且污泥内部的粘度系数高,稳定性强,产甲烷量多<sup>[21-23]</sup>。厌氧颗粒污泥培养过程中各反应池 COD 去除率变化情况如图 2 所示,产甲烷量变化情况如图 3 所示,扫描电镜观察成熟厌氧颗粒污泥形态如图 4 所示,电子显微镜观察 2 个反应池中污泥在各个阶段特性如图 5 所示。

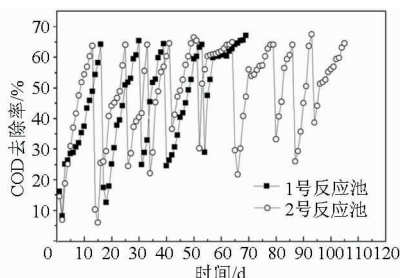


图2 1号 and 2号反应池出水 COD 去除率变化情况

Fig.2 Changing of effluent COD in reactors No.1 and No.2

2 个反应池中厌氧颗粒污泥成熟后,同时处理质量浓度为 5 000  $\text{mg/L}$  的养猪废水,1 号反应池处理养猪废水过程中水力负荷维持在 8.52  $\text{kg}/(\text{L}\cdot\text{d})$ ,产甲烷率变化公式为

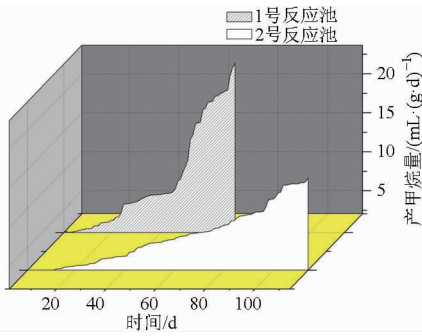


图3 1号和2号反应池产甲烷量变化情况

Fig. 3 Changing of methane-producing amount in reactors No. 1 and No. 2

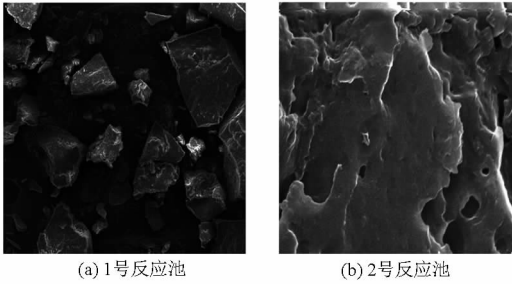


图4 各反应池中成熟厌氧颗粒污泥形态

Fig. 4 Mature anaerobic granular sludge

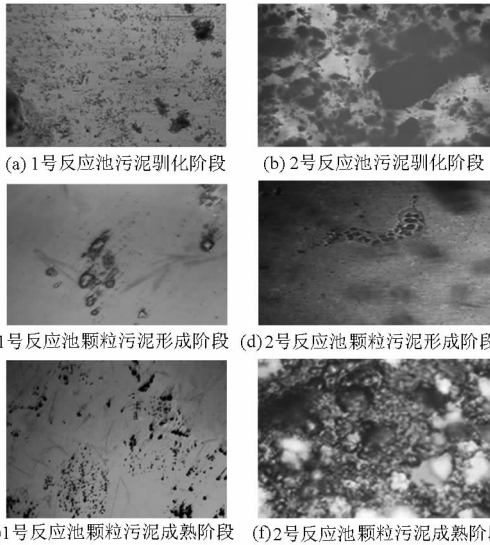


图5 厌氧反应池中污泥在各个阶段的特性

Fig. 5 Sludge characteristics at each stage in two morphology in pool reaction pools

$$d = \frac{f(C) - f(C_0)}{t_1 - t_0} \quad (1)$$

式中  $C$ ——产甲烷量,  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$

$C_0$ ——初始产甲烷量,  $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$

$t_1$ ——时刻  $t_0$ ——初始产甲烷时刻

结果表明,甲烷产生率由开始的  $1.3 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$  逐渐增大到  $3.2 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,说明厌氧颗粒污泥在处理废水过程中产甲烷菌活性良好,运行第 20 天时,甲烷产生量达到稳定  $33 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,出水 COD 去除率达到 89%,测定 1 号反应池运行结束后污泥沉降

速度为  $79.87 \text{ m}/\text{h}$ ,粒径为  $4 \sim 5 \text{ mm}$  之间的污泥质量占总体污泥质量的 80%。与 1 号反应池人工污泥床层相比,2 号反应池中污泥吸附形成的床层在过高的水力负荷条件下会发生污泥破损现象,且形成的污泥床层存在污泥孔隙率变化无规则等问题,进而导致污泥流失现象严重,试验结果表明,当水力负荷达到  $4.52 \text{ kg}/(\text{L}\cdot\text{d})$  时,根据式(1),甲烷产生率由开始的 0.5 逐渐增大到 1.5,运行第 45 天时,甲烷产生量达到稳定的  $21 \text{ mL}/(\text{g}\cdot\text{d})$ ,出水 COD 去除率达到 89%,测定 2 号反应池运行结束后污泥沉降速度为  $30 \text{ m}/\text{h}$ ,粒径为  $4 \sim 5 \text{ mm}$  之间的污泥质量占总体污泥质量的 56%。1 号和 2 号厌氧反应池处理养猪废水过程中 COD 去除率变化情况如图 6 所示,产甲烷率变化情况如图 7 所示,运行结束后各反应池中粒径分布情况如图 8 所示。

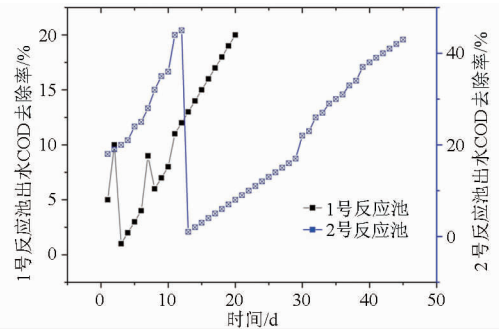


图6 1号和2号反应池运行过程中 COD 去除率变化情况

Fig. 6 Changing of COD of reactor Nos. 1 and 2 in processing

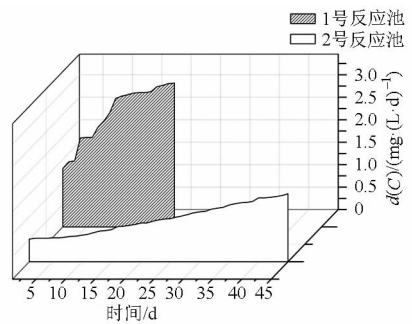


图7 1号和2号反应池运行过程中产甲烷率变化情况

Fig. 7 Changing of methane-producing amount of reactors No. 1 and No. 2 in processing

## 2.2 厌氧颗粒污泥吸附动力学模型的建立

厌氧颗粒污泥的吸附特性主要与反应池内不同高度处的污泥传输速率和传输过程中的反应池温度变化有关<sup>[24]</sup>。根据流体力学分析方法测定 1 号反应池不同高度处的污泥传输速率与温度之间的关系并建立污泥吸附动力学模型。如图 9 所示,污泥处在反应池同一高度时,随着传输速率的增大反应池温度也相应增大。

厌氧颗粒污泥形成过程中污泥吸附动力学数学模型的研究逐渐成熟<sup>[25]</sup>,本试验建立 1 号反应池中

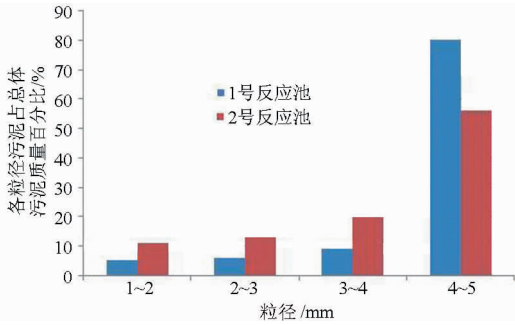


图8 1号和2号反应池运行后污泥粒径分布情况  
Fig. 8 Sludge particle size distribution in reactors No. 1 and No. 2 after operation

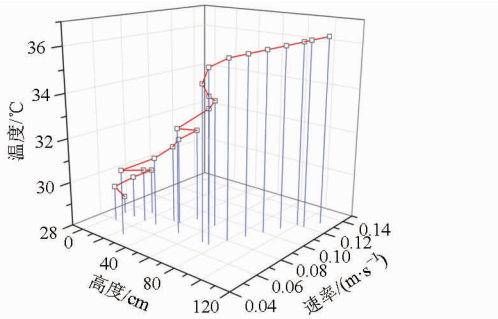


图9 1号反应池中污泥的流体力学变化  
Fig. 9 Sludge hydrodynamics trends in No. 1 reactor

颗粒污泥的吸附动力学模型,模型建立条件:①研究过程中外界条件恒定不变。②在调查条件下,厌氧反应池中颗粒污泥形态恒定不变。③厌氧反应池运行过程中传质阻力恒定不变。④厌氧颗粒污泥吸附形式应用于动力学模型。

图10表示人工污泥床层中污泥传质速率简图,图中 $F_{w,n}$ 表示第 $n$ 个断面中天然气产率; $C_{m,n-1}$ 是第 $n-1$ 个断面中污泥质量浓度; $C_{m,n}$ 是第 $n$ 个断面中污泥质量浓度; $\Delta V_n$ 表示污泥床层第 $n-1$ 个断面到第 $n$ 个断面的横截面体积, $m^3$ ;  $\Delta V_{n-1}$ 表示污泥床层第 $n-2$ 个断面到第 $n-1$ 个断面的横截面体积, $m^3$ 。

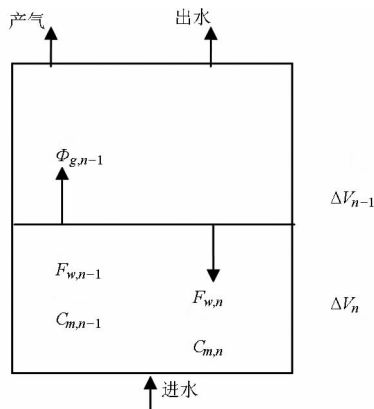


图10 人工模拟床层中污泥传质速率简图  
Fig. 10 Sludge transfer rates sketch in artificial sludge bed

由于进水负荷的冲击作用,使得污泥产生向上

传输的动力。将人工污泥床层等分为 $n$ 个断面,取其中第 $n-1$ 和第 $n$ 个断面进行分析。第 $n-1$ 到第 $n$ 个断面的污泥传输通量( $\Phi_{m,n-1}$ , kg/h)可以表示为

$$\Phi_{m,n-1} = k_{m,n-1} F_{w,n-1} C_{m,n-1} \quad (2)$$

式中  $k_{m,n-1}$ ——污泥传输常量  
 $F_{w,n-1}$ ——第 $n-1$ 个断面中天然气产率, %

因此  $F_{w,n-1} = k_w \Phi_{g,n-1} \quad (3)$

式中  $\Phi_{g,n-1}$ ——第 $n-1$ 个断面到第 $n$ 个断面过程中气体产量

$k_w$ ——向上传输的单位气体体积, $m^3$

由式(2)、(3)得出

$$\Phi_{m,n-1} = k_w k_{m,n-1} \Phi_{g,n-1} C_{m,n-1} \quad (4)$$

从第 $n-1$ 到第 $n$ 个断面向下传输的污泥通量( $\Phi_{m,n}$ , kg/h)是由于污泥沉降和污泥在反应池中逆循环引起的。

$$\Phi_{m,n} = (v_{s,n} - 0.85v_1) A C_{m,n} \sin\alpha + k_{w',n} F_{w',n} C_{m,n} \quad (5)$$

式中  $\alpha$ ——污泥向上运动中与竖直方向夹角

$v_{s,n}$ ——第 $n$ 个断面中污泥的沉降速度, m/s

$v_1$ ——进水表面的直线向上流速, m/s

$A$ ——反应池断面面积,  $m^2$

$F_{w',n}$ ——第 $n$ 个断面天然气产率, %

由式(4)、(5)得出

$$\frac{C_{m,n-1}}{C_{m,n}} = \frac{(v_{s,n} - 0.85v_1) a b \sin\alpha}{k_{t,n-1} \Phi_{g,n-1}} \frac{1}{k_{t,n-1}} + \frac{k_{t,n}}{k_{t,n-1}} \quad (6)$$

式中  $k_{t,n-1}$ 、 $k_{t,n}$ ——在第 $n-1$ 到第 $n$ 个断面之间污泥向上和向下传输率

$a$ ——断面长度, mm

$b$ ——断面宽度, mm

表2为污泥在不同断面中的污泥传输变量变化情况。人工污泥床层反应池中颗粒污泥的形成过程中,颗粒污泥从第 $n-1$ 个到第 $n$ 个断面之间的污泥质量浓度比随着进水强度的增加而减小,当向上和向下污泥传质浓度之比达到0.8~0.9,颗粒污泥吸附性能和动力学特性最强。

### 2.3 厌氧颗粒污泥分形维数的确定

分形理论主要用于研究工程的系统特性,没有固定的形成模式<sup>[26-27]</sup>。评价分形理论的重要参数是分形维数( $D_f$ ),对厌氧颗粒污泥而言,分形维数的确定需要较高的颗粒轮廓清晰度<sup>[28-29]</sup>。分形维数不仅可以准确分析出颗粒污泥结构,而且可以反映出颗粒的絮凝程度,是描述颗粒密集程度的一个重要指标。 $D_f$ 的理论值为1~3,随着颗粒絮体密集程度的增大, $D_f$ 随之增加<sup>[30-31]</sup>。

根据图5分析,1号反应池中颗粒污泥的 $D_f$ 在

表2 污泥在不同断面中的污泥传输变量变化情况

Tab.2 Sludge transmission variable changes in different sections

断面 节数 $n$	第 $n-1$ 个断面 污泥向上传输 率 $k_{i,n-1}$	第 $n$ 个断面 污泥向下 传输率 $k_{i,n}$	第 $n$ 个断面 气体向上传质 速率 $v_{s,n}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	断面 长度 $a/\text{mm}$	断面 宽度 $b/\text{mm}$	第 $n-1$ 个断面到 第 $n$ 个断面气体 产量 $\Phi_{g,n-1}/$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	第 $n-1$ 个断面 污泥质量浓度 $C_{m,n-1}/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	第 $n$ 个断面 污泥质量浓度 $C_{m,n}/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	向上进水 流速 $v_1/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
2	0.221 3	0.195 4	32	800	450	5.42	4.43	5.54	58
3	0.175	0.152	29	800	450	4.48	3.97	4.67	60
4	0.195	0.177	25	800	450	3.37	2.26	2.51	62

2.68 ~ 2.83 之间, 2 号反应池中颗粒污泥的  $D_f$  在 1.84 ~ 1.98 之间, 未成颗粒的絮状污泥的  $D_f$  在 1.23 ~ 1.43 之间, 由此可知, 颗粒污泥形成的机理是颗粒之间相互吸附聚集, 絮状污泥附着在人工污泥床层上, 避免了颗粒污泥形成过程中水解酸化阶段产生的产酸菌的积累, 人工污泥床层结构均匀使得形成的颗粒污泥粒径大, 颗粒轮廓清晰, 颗粒污泥耐冲击性能强。分析发现, 当分形维数大于 2 时, 絮体聚集过程中渗透性能大大减少, 说明厌氧颗粒污泥表面水解酸化菌的活性高于颗粒污泥内部产甲烷菌活性, 絮状污泥附着在人工污泥床层上, 水解酸化菌产生的挥发性脂肪酸可以快速分解, 这样不仅降低了水解酸化菌的活性同时也避免了反应池运行过程中发生酸化中毒的危险, 而且提高了颗粒污泥内部产甲烷菌的活性, 大大缩短了颗粒污泥形成周期。厌氧颗粒污泥总体因子 ( $S$ ) 可以表示厌氧颗粒污泥空间填充能力即厌氧颗粒污泥密实度, 厌氧颗粒污泥密实度的强弱对污泥聚集过程中表现出的流动性能有较大的影响, 其计算公式为

$$S = \left( \frac{R_H}{R_A} \right)^{D_f} \quad (7)$$

式中  $R_H$ ——水力半径, mm

$R_A$ ——颗粒污泥半径, mm

其中反应池运行过程中水力半径和颗粒污泥半径之比为

$$\frac{R_H}{R_A} = \sqrt{1.56 - \left( 1.728 - \frac{D_f}{2} \right)^2} - 0.228 \quad (8)$$

1 号反应池中厌氧颗粒污泥的总体结构因子  $S$  在 0.934 ~ 0.941 之间, 2 号反应池中厌氧颗粒污泥的总体结构因子  $S$  在 0.824 ~ 0.901 之间, 未成颗粒的絮状污泥的总体结构因子  $S$  在 0.542 ~ 0.659 之间, 说明加入人工污泥床层的反应池中颗粒污泥动力学特性、颗粒污泥沉降性能与絮状污泥相比更为明显。

### 3 结论

(1) 厌氧反应池中加入人工污泥床层可以缩短颗粒污泥培养时间, 厌氧颗粒污泥附着在人工污泥床层上聚集絮凝, 增大了颗粒污泥相互之间的空隙, 提高了厌氧颗粒污泥活性。

(2) 建立厌氧颗粒污泥的吸附动力学模型, 结果发现污泥在厌氧反应池中内循环可以促进厌氧颗粒污泥的形成, 当厌氧反应池任意断面颗粒污泥向上和向下的污泥浓度之比为 0.8 ~ 0.9 时, 形成的厌氧颗粒污泥吸附性能最强。

(3) 加入人工污泥床层的厌氧池中形成的成熟厌氧颗粒污泥分形维数与未加入人工污泥床层反应池中颗粒污泥分形维数相比有所提高, 成熟颗粒污泥相互吸附增大了颗粒污泥的密实度, 提高了颗粒污泥的耐冲击性能。

### 参 考 文 献

- BING J, HAN Y. Mathematical modeling of aerobic granular sludge: a review[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 895 - 909.
- 施云芬, 孙萌, 张更宇, 等. 厌氧颗粒污泥的快速培养和特征分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(5): 7 - 12. SHI Yunfen, SUN Meng, ZHANG Gengyu, et al. Rapid culture and characteristics analysis of anaerobic granular sludge[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(5): 7 - 12. (in Chinese)
- SHANMUGAM A, AKUNNA J. Modelling head losses in granular bed anaerobic baffled reactors at high flows during start-up[J]. Water Research, 2010, 44(18): 5474 - 5480.
- 汤桂兰, 孙振钧. 厌氧污泥发酵制氢工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 201 - 204. (in Chinese) TANG Guilán, SUN Zhenjun. Technology for biohydrogen production through anaerobic sewage sludge fermentation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 201 - 204. (in Chinese)
- COSTA J C, ALVES M M, Ferreira E C. A chemometric tool to monitor high-rate anaerobic granular sludge reactors during load and toxic disturbances[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 53(1): 38 - 43.

- 6 ZHANG B, CHEN Z, QIU Z, et al. Dynamic and distribution of ammonia-oxidizing bacteria communities during sludge granulation in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 2011,45(18): 6207 – 6216.
- 7 BARTACEK Jan, FERMOSEA F G, CATENA A B, et al. Effect of sorption kinetics on nickel toxicity in methanogenic granular sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010,180(1 – 3): 289 – 296.
- 8 YANG M, HAN Y. Rheological and fractal characteristics of granular sludge in an upflow anaerobic reactor[J]. *Water Research*, 2006,40(19): 3596 – 3602.
- 9 ADRIANA L, CLAUDIO I. Physical characterisation of the sludge produced in a sequencing batch biofilter granular reactor[J]. *Water Research*, 2012,46(16): 5316 – 5326.
- 10 黎强,叶进. 重庆养猪场自给能源废水中温发酵系统温度调控研究[J]. *农业工程学报*,2007,23(7):186 – 190.  
LI Qiang, YE Jin. Temperature-control of moderate temperature anaerobic digestion system supplied energy by self for pig farm wastewater treatment in Chongqing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007,23(7):186 – 190. (in Chinese)
- 11 施云芬,战祥轩,刘景明,等. 交替 A/O 工艺处理养猪废水脱氮研究[J]. *东北电力大学学报*,2011,31(2):32 – 35.  
SHI Yunfen,ZHAN Xiangxuan, LIU Jingming, et al. Study of ammonia nitrogen in swine wastewater by alternating A/O process [J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2011,31(2):32 – 35. (in Chinese)
- 12 马磊,王德汉,杨文杰,等. 餐厨垃圾高温厌氧消化接种物的驯化研究[J]. *农业工程学报*,2007,23(6):203 – 207.  
MA Lei, WANG Dehan, YANG Wenjie, et al. Domestication of inoculums in treating food waste by thermophilic anaerobic digestion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007,23(6):203 – 207. (in Chinese)
- 13 沈东升,贺永华,冯华军,等. 农村生活污水埋式无动力厌氧处理技术研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(7):111 – 115.  
SHEN Dongsheng, HE Yonghua, FENG Huajun, et al. Underground unpowered anaerobic reactor for rural domestic sewage treatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005,21(7):111 – 115. (in Chinese)
- 14 柳珊,吴树彪,张万钦,等. 白腐真菌预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷影响实验[J]. *农业机械学报*,2013,44(增刊2): 124 – 129,142.  
LIU Shan,WU Shubiao,ZHANG Wanqin, et al. Effect of white-rot fungi pretreatment on methane production from anaerobic digestion of corn stover[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013,44(Supp. 2):124 – 129,142. (in Chinese)
- 15 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- 16 BEUN J J, Van JOOSDRECHT M C, HEIJNEN J J, et al. Aerobic granulation[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(4 – 5): 41 – 48.
- 17 郑蕾. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. *环境科学*,2007,28(7):1507 – 1511.  
ZHENG Lei. Effects of pH on the surface characteristics and molecular structure of extracellular polymeric substances from activated sludge[J]. *Environmental Science*, 2007,28(7):1507 – 1511. (in Chinese)
- 18 HWU C S, CAI W Y. Enhanced biogas production of bagasse by anaerobic granular sludge under thermophilic conditions[J]. *Journal of Biotechnology*, 2010,150(Supp. ):21.
- 19 WINKLER M, BASSIN J, KLEEREBEZEM R, et al. Temperature and salt effects on settling velocity in granular sludge technology[J]. *Water Research*, 2012,46(12):3897 – 3902.
- 20 JOE O, CHANGSOO L, GAVIN C, et al. Quantitative and qualitative analysis of methanogenic communities in mesophilically and psychrophilically cultivated anaerobic granular biofilms[J]. *Water Research*, 2009,43(14):3365 – 3374.
- 21 田梦,刘晓玲,李十中,等. 香蕉秸秆与牲畜粪便固体联合厌氧发酵产沼气的特性[J]. *农业工程学报*,2013,29(7):177 – 184.  
TIAN Meng, LIU Xiaoling, LI Shizhong, et al. Biogas production characteristics of solid-state anaerobic co-digestion of banana stalks and manure[J]. *Transactions of the CSAE*,2013, 29(7): 177 – 184. (in Chinese)
- 22 李伟,吴树彪,HAMIDOU Bah,等. 沼气工程高效稳定运行技术现状及展望[J]. *农业机械学报*,2015,46(7):187 – 196.  
LI Wei,WU Shubiao, HAMIDOU Bah,et al. Status analysis and development prospect of biogas engineering technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(7):187 – 196. (in Chinese)
- 23 李雪,林聪,沙军冬,等. 不同生物预处理方式对污泥厌氧消化过程性能的影响[J]. *农业机械学报*,2015,46(8):186 – 191.  
LI Xue,LIN Cong,SHA Jundong, et al. Effect of different biopretreatments on anaerobic digestion process performance of sludge [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(8):186 – 191. (in Chinese)
- 24 XIAO C, PING Z, MAHMOOD Q. Dynamic behavior and concentration distribution of granular sludge in a super-high-rate spiral anaerobic bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2012,111:134 – 140.
- 25 张宽地,王光谦,王占礼,等. 人工加糙床面薄层滚波流体力学特性试验[J]. *农业工程学报*,2011,27(4):28 – 34.  
ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, WANG Zhanli, et al. Experiments on hydraulic characteristics of roll wave for sheet flow with artificial rough bed [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4): 28 – 34. (in Chinese)
- 26 陈信信,丁启刚,李毅念,等. 稻茬麦根系构型可视化与三向分型维研究[J]. *农业机械学报*,2015,46(3):328 – 335.  
CHEN Xinxin,DING Qishuo,LI Yinian, et al. Visualization of post-paddy wheat rooting system and 3-D fractal dimensions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(3):328 – 335. (in Chinese)

- 17 GUO Wenchuan, ZHU Xinhua, LIU Hui, et al. Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 344 – 350.
- 18 BANACH J K, ŻYWICA R, SZPENDOWSKI J, et al. Possibilities of using electrical parameters of milk for assessing its adulteration with water[J]. *International Journal of Food Properties*, 2012, 15(2): 274 – 280.
- 19 GUO Wenchuan, SHANG Liang, ZHU Xinhua, et al. Nondestructive detection of soluble solids content of apples from dielectric spectra with ANN and chemometric methods[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 1126 – 1138.
- 20 郭文川, 房丽洁, 董金磊, 等. 介电谱无损检测梨内部品质方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 233 – 239.  
GUO Wenchuan, FANG Lijie, DONG Jinlei, et al. Nondestructive detection of internal qualities for pears using dielectric spectra [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 233 – 239. (in Chinese)
- 21 ARAÚJO M C U, SALDANHA T C B, GALÃO R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2001, 57(2): 65 – 73.
- 22 MAIER H R, DANDY G C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, 15(1): 101 – 124.
- 23 BURGESS C J. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 121 – 167.
- 24 BRERETON R G, LLOYD G R. Support vector machines for classification and regression[J]. *Analyst*, 2010, 135(2): 230 – 267.
- 25 HUANG Guangbin, ZHU Qinyu, SIEW C K. Extreme learning machine: theory and applications[J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1): 489 – 501.
- 26 NICOLAI B M, BEULLENS K, Bobelyn E, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(2): 99 – 118.
- 27 SACILIK K, COLAK A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz[J]. *Powder Technology*, 2010, 203(2): 365 – 370.
- 28 朱新华, 郭文川. 影响食品射频-微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 410 – 414.  
ZHU Xinhua, GUO Wenchuan. A review of affecting factors and their mechanisms of the radio frequency-microwave dielectric properties of foods[J]. *Food Science*, 2010, 31(17): 410 – 414. (in Chinese)
- 29 ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng, et al. Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(3): 670 – 680.

~~~~~  
(上接第 233 页)

- 27 周学成, 罗锡文. 基于 XCT 技术的原位根系三维可视化研究[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 202 – 205.  
ZHOU Xuecheng, LUO Xiwen. 3-D root system in situ based on XCT technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.): 202 – 205. (in Chinese)
- 28 BO J, BRITT W, PAUL L. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 95(1 – 3): 221 – 234.
- 29 LECH G. Hydrodynamics of aggregated media[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 178(1): 80 – 86.
- 30 刘建禹, 陈泽兴, 李文涛. 厌氧发酵反应器一维稳态传热模型的建立与验证[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 217 – 222.  
LIU Jianyu, CHEN Zexing, LI Wentao. Development and verification of one-dimensional model of steady-state heat transfer for anaerobic fermentation reactor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(17): 217 – 222. (in Chinese)
- 31 付鹏, 胡松, 向军, 等. 气化过程中谷壳焦颗粒孔隙结构及分形特性的演化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 276 – 281.  
FU Peng, HU Song, XIANG Jun, et al. Evolution of pore structure and fractal characteristics of rice husk char particles during gasification[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 276 – 281. (in Chinese)