

厌氧颗粒污泥的性能研究

董春娟^{1,2} 吕炳南²

(1. 太原大学环境工程系, 太原 030009; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要 对接种市政消化污泥 EGSB 反应器内所形成的颗粒污泥在低浓度 (100 ~ 500 mg/L)、低温 (8 ~ 15 ℃)、微氧 (氧化还原电位为 380 ~ 400 mV) 等条件下的沉速、粒径、活性、形态等性能进行研究。结果表明: 厌氧中温 (35 ℃ 左右) 稳定运行时, 颗粒污泥的沉速较大, 在低温或微氧时, 颗粒污泥的沉速相对较低, 但都能维持在 15 m/h 以上, 不会被冲出反应器而造成污泥的流失。低温时大颗粒污泥所占重量百分比在逐渐增加, 微氧使得颗粒污泥粒径分配更加均匀。低温时, 颗粒污泥的产甲烷活性明显降低, 降幅为 55.5%; 但微量氧的加入并没有使 EGSB 反应器内颗粒污泥的产甲烷活性降低, 反而提高了 10%。中温稳定运行时, 颗粒污泥规则、密实, 微生物菌群中甲烷八叠球菌明显增多。低温时, 颗粒污泥的表面和内部微生物排列都比较松散, 而且出现大量微生物胞外分泌物; 低温中高浓度时, 甲烷八叠球菌没有出现, 髯毛甲烷菌属占优势。微氧时颗粒污泥同样是规则、密实的, 菌种更加丰富, 颗粒表面和内部的优势菌群不同, 但在中高浓度时没有出现甲烷八叠球菌的明显优势。

关键词 厌氧 颗粒污泥 低温 低浓度 微氧 性能

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2007)06-0102-07

Characteristic research of anaerobic granules

Dong Chunjuan^{1,2} Lu Bingnan²

(1. Department of Environmental Engineering, Tanyuan University, Tanyuan 030009;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090)

Abstract The characteristics of the settled velocity, size, activity and morphology at the conditions of low strength (100 ~ 500 mg/L), low temperature (8 ~ 15 ℃), oxygen-limited (with the oxidation-reduction potential of 380 ~ 400 mV) for the granules in the EGSB reactor seeded with municipal digestion sludge were investigated in this paper. The results showed that the settled velocity of the granules was higher at medium temperature than that at low temperature or under the micro-aerobic conditions, but not lower than the velocity of 15 m/h, thus the sludge was not washed out from the reactor. The weight percent of the large granules was increased gradually at low temperature. The size of the granules was more uniformity under the oxygen-limited conditions. The methanogenic activity of the granules decreased distinctly at 15 ℃ low temperature and the decreased percentage was 55.5%. But supplement of limited oxygen was not harmful to the methanogens and on the contrary stimulated the methanogenic activity of the granules, the increased percentage was 10%. In stable operation at medium temperature, the granules were regular and dense. And more methanosarcina were existed in the granules. At low temperature, The microbes distributed loosely in district on the surface and in the interior of the granular sludge. At low temperature and medium, high concentration, it was appeared not the methanosarcina but the predominance of the mathanothrix. In the oxygen-limited EGSB reactor the granules had more microbe species. The microbes distributed in district on the surface and in the interior of the granular sludge, there was no distinct predominance of methanosarcina at medium and high concentration.

Key words anaerobic; granules sludge; low temperature; low strength; oxygen-limited; characteristic

以形成高活性的颗粒污泥为典型特征的 UASB、EGSB 反应器, 由于其高污泥浓度、高有机负荷率引起国内外水处理者的普遍关注。目前, UASB 反应器已经取得商业化成功^[1-3]。EGSB 反应器在充分保留 UASB 反应器优势的同时进行了结构改

基金项目: 山西省教育厅 2006 高校科技发展项目; 太原市 2006 科技发展计划项目 (06021420)

收稿日期: 2006-12-20; 修订日期: 2007-03-23

作者简介: 董春娟 (1970 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 污水厌氧处理技术和污水资源化。

E-mail: chunjuand@126.com

进,为其在低温、低浓度废水以及一些难降解废水的高效处理方面提供可能^[4-6]。

高活性、菌群丰富、良好沉淀性、稳定的颗粒污泥的形成是 EGSB 反应器成功启动的关键。但要保证反应器的高效稳定运行,还必须保证颗粒污泥在成熟期和运行期(如在低浓度、低温、微氧等条件下运行)的高活性和良好沉淀性等。本文重点考察了接种市政消化污泥 EGSB 反应器内所形成的颗粒污泥的特性以及在低浓度、低温和微氧等条件下颗粒污泥的性能的变化情况。以期进一步为 EGSB 反应器的实际应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 反应器

实验所用 EGSB 反应器总体积为 16.5 L,反应区的体积为 10 L,反应器内径为 90 mm,高径比为 19:1,具体的工艺流程如图 1 所示。将水银温度计插入反应器中部取样口以准确指示反应器内的温度。EGSB 反应器内的限氧状态是通过给回流桶曝气的方式来实现的,可通过对反应器内的氧化还原电位进行监测来调节曝气量。

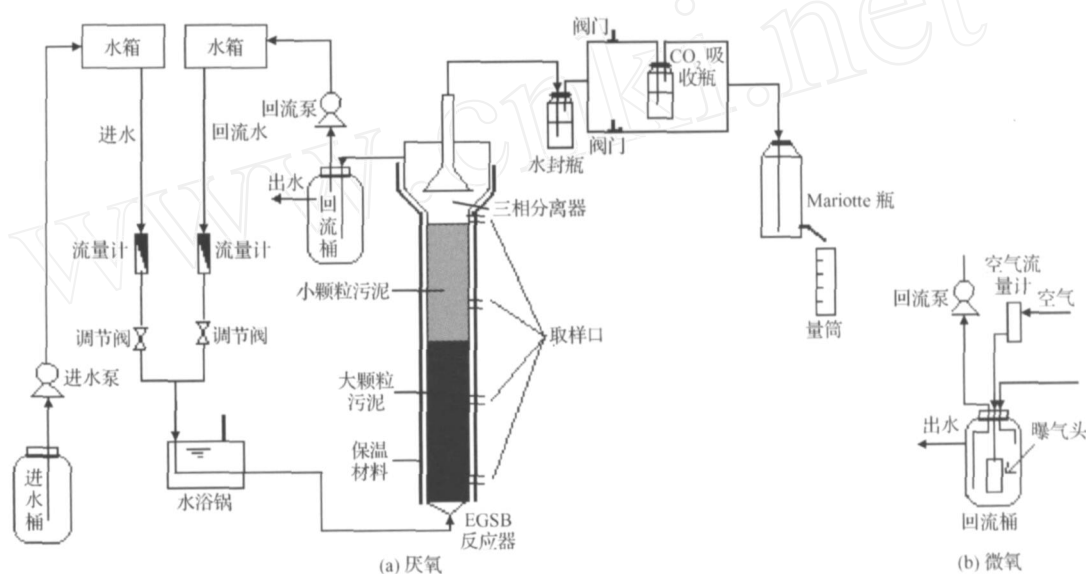


图 1 实验用 EGSB 反应器的工艺流程图

Fig 1 Scheme of the experimental EGSB reactor

1.2 实验用水

EGSB 反应器进水采用自配水。以蔗糖、啤酒为碳源,并按质量比 $\text{COD} : \text{N} : \text{P} = 100 : 3 : 1$; $\text{S} : \text{P} = 1 : 2$; $\text{S} : \text{Fe}^{2+} = 3 : 1$; $\text{Fe}^{2+} : \text{Co}^{2+} : \text{Ni}^{2+} = 10 : 1 : 2$ 加入 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 等营养物质。

1.3 实验方法

在 EGSB 反应器内接种市政消化污泥,在中温条件下启动,依次在中温高中低浓度(300 ~ 4500 mg/L)、低温和微氧条件下稳定运行,分析 EGSB 反应器内颗粒污泥的沉速、污泥浓度、产甲烷活性、颗粒污泥形态的变化情况以及在经历温度、pH 值、负荷冲击和在微氧条件下污泥性能的变化。

1.4 分析项目和方法

污泥浓度和颗粒污泥沉速的测定见文献[7];颗粒污泥粒径分配的测定采用湿式筛分析法;污泥产甲烷活性利用改进的 Mariotte 瓶进行测定,具体方法见文献[8];通过扫描电镜观察颗粒污泥表面和剖面形态。

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥的形成

接种市政消化污泥的 EGSB 反应器宜采用低进水浓度、高有机负荷的方式^[9-12]促进颗粒污泥的形成。具体按以下 3 个阶段进行:

第一阶段:低进水浓度、高进水流量和高回流量。接种市政消化污泥 EGSB 反应器首先在低进水

浓度: 500 mg/L 左右、高进水流量: 3 L/h、高回流量: 12 L/h、高液体上升流速: 2.5 m/h、进水负荷为 2.88 kg COD/m³·d 左右的情况下运行 1 周。

第二阶段: 先低进水流量和低回流量, 然后逐步提高进水浓度和回流量。从第 7 d 起为提高污泥的产甲烷活性, 以尽快形成产酸菌和产甲烷菌等各种微生物共存的稳定的微生物群落, 进水流量降至 0.9 L/h, 回流量降至 0, 进水 COD 浓度提高至 700 mg/L 左右, 进水 COD 负荷维持在 1.5 kg COD/m³·d 左右。随后在进水 COD 去除率达到 60% 以上去除率的基础上逐步提高进水 COD 浓度, 并逐步提高回流量 (从 0 到 3 L/h)。直至进水 COD 负荷提高到 4.27 kg COD/m³·d, 此时 COD 去除率也提高到了 80%。

第三阶段: 快速提高进水浓度和进水流量。第 36 d 起开始, 进水浓度从 0.9 L/h 提高至 1.2 L/h, 并快速提高进水浓度 (到 1800 mg/L 左右) 及出水回流比 (从 0.5 到 1.6), 大约 10 d 左右。进水 COD 负荷达到 7.12 kg COD/m³·d, COD 去除率也相应提高到 91.06%。

2.2 颗粒污泥的性能

接种市政消化污泥的 EGSB 反应器在 25 d 时在底部出现少量颗粒污泥, 35 d 时在底部有大量颗粒污泥出现, 中部也出现一些颗粒污泥。46 d 时反应器内大量颗粒污泥形成, 颗粒污泥的表面逐渐变得规则、光滑, 强度逐渐提高, 产气明显。此时, 颗粒污泥的沉速为 28.87 ~ 96.75 m/h, 粒径为 0.25 ~ 1.25 mm, 污泥浓度为 30.01 g MLSS/L, MLVSS/MLSS 为 0.51, 产甲烷活性为 0.478 (g CODCH₄/g VSS·d)。随后让 EGSB 反应器在低浓度、低温和微氧等各种条件下运行, 对颗粒污泥的性能变化进行考察研究。

2.2.1 颗粒污泥沉速

图 2 反映了颗粒污泥在不同运行条件下沉速的变化情况。可以看出, 在运行条件突然变化时, EGSB 反应器内不同粒径颗粒污泥的沉速均会突然降低。如运行条件从中温中高浓度到低浓度、从中温低浓度到低温低浓度、从低温低浓度到低温中高浓度、从厌氧运行到微氧运行突变时, 1.25 ~ 2.0 mm 的颗粒污泥的沉速分别从 84.73, 74.73, 66.97, 78.46 m/h 突降到了 74.73, 64.01, 63.33, 56.85 m/h。在各种条件下稳定运行时, 颗粒污泥的沉速变化很小, 尤其是小粒径时基本不变化。

对比发现, 在厌氧中温时, 沉速较大, 在低温或微氧时, 沉速相对较低。如对于 0.25 ~ 0.45 mm 的颗粒污泥, 中温时沉速为 23.69 ~ 30.64 m/h, 低温时为 15.29 ~ 19.18 m/h, 微氧时为 20.07 ~ 20.83 m/h。这主要是由于低温极大地减弱了微生物对基质的亲和力, 使得微生物不能从环境中获取足够基质。这有可能导致微生物细胞能的耗尽、细胞内物质渗漏或微生物细胞的完全解体^[13]。尤其是产甲烷菌对温度更为敏感。但微生物在适应低温低浓度条件的过程中一方面会尽可能地聚集, 另外, 形成的颗粒会更加密实, 细胞排列更加紧密。在实验中也发现, 低温低浓度后期, 各个粒径范围颗粒的沉速又有所回升, 但仍比中温时偏低。在微氧条件下, 虽然微量氧气的存在能使好氧菌在颗粒污泥表面生长。但由于液体上升流速较高, 水力剪切力较大, 颗粒污泥表面的好氧污泥量是有限的, 相应的沉速也不会降低很多。

在各种运行条件下, 颗粒污泥沉速虽有所降低, 但最小的颗粒污泥沉速也能维持在 15 m/h 以上, 不会被冲出反应器, 在实验中也几乎没有发现颗粒污泥的流失。

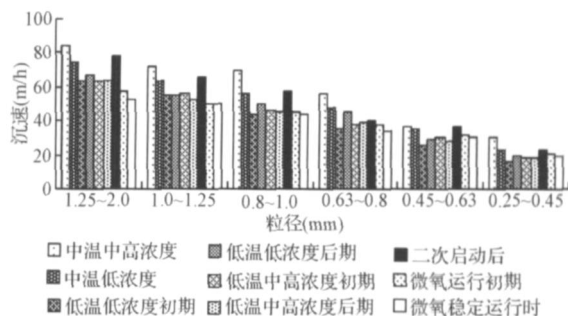


图 2 EGSB 反应器不同运行条件下颗粒污泥沉速的变化情况

Fig 2 Variation of the settled velocity of granules in the EGSB reactor under varied performance conditions

2.2.2 颗粒污泥粒径

EGSB 反应器内颗粒污泥在不同运行条件下的粒径分配的变化情况见表 1。可以看出, 与 UASB 反应器相比, EGSB 反应器内颗粒污泥的粒径相对较小, 维持在 0.25 ~ 2.0 mm 之间。以前人们多研究大颗粒污泥, 但现在发现大颗粒污泥不如小颗粒污泥活性高^[14], 而且, 截留和过滤基质也不如小颗粒污泥, 这也许是 EGSB 反应器的优势所在。

另外,从整体趋势上看,低温时大颗粒污泥所占重量百分比在逐渐增加。比如,中温低浓度、低温低浓度、低温中高浓度时,1.0 mm 以上颗粒所占重量百分比分别为 40.60%、51.87%和 57.27%。分析主要是,一方面降低 EGSB 反应器的运行温度在一般情况下会降低最大比基质利用速率,但也可能会导致产甲烷菌或产酸菌的净产量的增加;另一方面,不利的温度条件使得微生物最大程度地聚集在一起,这更有利于微生物间的物质交换和传递。实验中发现 EGSB 反应器内的污泥浓度也呈现出相似的变化规律,具体见表 2。

表 1 EGSB反应器在不同运行条件下的颗粒污泥粒径分配情况

Table 1 Size distributions of granules in the EGSB reactor under varied performance conditions

(重量百分比,%)

运行阶段	粒径 (mm)					
	1.25 ~ 2.0	0.9 ~ 1.25	0.8 ~ 0.9	0.63 ~ 0.8	0.45 ~ 0.63	0.25 ~ 0.45
中温中高浓度	17.6	7.9	23.4	19.6	26.6	4.9
中温低浓度	25.3	9.2	18.2	13.2	17.6	10.4
低温低浓度初期	24.87	10.23	17.08	13.54	22.88	11.40
低温低浓度后期	40.63	11.24	16.17	13.02	13.62	5.32
低温中高浓度初期	29.01	9.94	18.75	12.98	20.19	9.13
低温中高浓度后期	42.14	15.13	13.65	12.91	11.27	4.90
反应器二次启动时	35.30	17.90	20.2	11.7	9.4	5.5
微氧运行初期	29.72	9.93	17.54	15.75	17.21	9.86
微氧稳定运行时	27.77	9.81	16.28	12.73	19.42	13.99

微氧使得 EGSB 反应器内颗粒污泥粒径分配更加均匀。如下部取样口颗粒污泥 1.2 ~ 2.05 mm、1.0 ~ 1.25 mm、0.8 ~ 1.0 mm、0.63 ~ 0.8 mm、0.45 ~ 0.63 mm、0.25 ~ 0.45 mm 所占重量百分比在微氧运行开始时分别为 35.30%、17.95%、20.20%、11.70%、9.45%和 5.50%;在微氧稳定运行时分别为 27.77%、9.81%、16.28%、12.73%、19.42%和 13.99%。即在整个微氧运行的过程中大颗粒污泥所占重量百分比在逐渐减少,小颗粒污泥所占重量百分比在逐渐增加,各粒径分配趋向均匀。

2.2.3 颗粒污泥活性

(1) MLVSS/MLSS

EGSB 反应器的一个明显特点就是颗粒污泥的形成保证了反应器内的高污泥浓度。表 2 反映了 EGSB 反应器在不同条件下污泥浓度和 MLVSS/MLSS 的变化情况。可以看出,EGSB 反应器在经历低浓度、低温、微氧等条件突变时,污泥浓度并没有降低。MLVSS/MLSS 有所降低,但很快能恢复。尤其是低温时,污泥浓度能提高到 42 g/L 左右,MLVSS/MLSS 提高到了 0.64,保证了 EGSB 反应器在低温下的高效稳定运行。

(2) 产甲烷活性

分别从颗粒污泥形成初期、中温稳定运行、低温稳定运行、中温微氧稳定运行的 EGSB 反应器内

表 2 EGSB反应器不同运行阶段的污泥浓度

Table 2 Sludge concentration at varied operation stage for EGSB reactor

运行阶段	MLSS (g/L)	MLVSS (g/L)	MLVSS/MLSS
中温中高浓度	35.23	22.90	0.65
中温低浓度	38.08	23.99	0.63
低温低浓度初期	39.36	23.91	0.61
低温低浓度后期	41.47	26.65	0.64
低温中高浓度初期	42.75	27.08	0.63
低温中高浓度后期	42.62	27.21	0.64
反应器二次启动时	41.67	28.48	0.68
微氧稳定运行时	41.42	28.67	0.69

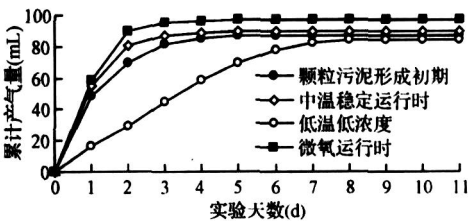


图 3 EGSB 反应器内颗粒污泥在不同运行条件下的产甲烷活性

Fig 3 Methanogenic activity of granules in the EGSB reactor under varied performance conditions

取颗粒污泥,通过血清瓶实验(其中,低温污泥在 15℃、其他 3 种情况在 35℃ 下培养)分析污泥产甲烷活性的变化规律,具体见图 3,图 3 中曲线的斜率反映了颗粒污泥的产甲烷活性。

由图 3 可以看出,EGSB 反应器内颗粒污泥形成后,逐步提高有机负荷并稳定运行,污泥的产甲烷活性有所提高;但进而降低温度并在 15℃ 条件下稳定运行时,污泥的产甲烷活性明显降低;与厌氧时相比,微量氧的加入并没有使 EGSB 反应器内颗粒污泥的产甲烷活性降低,反而有所提高。

低温时颗粒污泥的产甲烷活性虽然明显降低,但由于 EGSB 反应器的结构优势,较高的液体上升流速能够促进传质,并能使 EGSB 反应器保持很低的活化能,在很大程度上缓解温度降低对 EGSB 反应器运行效果产生的不利影响。

对比几种运行条件下的污泥产甲烷活性,微氧条件时最高。考虑主要是在微氧条件下,氧可被用于充当微生物生长和代谢过程中的电子受体和酶反

应的调节者,参与电子传递系统,氧化在厌氧发酵、TCA 循环和生物合成过程所释放的还原力,使系统的还原力达到其产生与消耗的平衡,保持高效稳定运行;氧也可以被用于氧化 VFAs、 H_2S 及一些中间代谢产物等;氧还可通过在低氧浓度下产生的选择性条件将 SO_4^{2-} 还原为单质 S 或 $S_2O_3^{2-}$ 而不是 H_2S ,减少有毒中间产物的积累,从而可有效减轻对甲烷菌的毒害作用。

2.2.4 颗粒污泥的形态

图 4 是初次启动成功后颗粒污泥的扫描电镜照片。可以看出,接种市政消化污泥的 EGSB 反应器初次启动成功后所形成的颗粒污泥形状各异,有椭圆形、球形和土豆形等,也有一些颗粒污泥呈破碎状,说明此时颗粒污泥的强度还不够高,还有待于进一步通过各种运行条件的优化而逐步得到提高。颗粒污泥表面和内部的微生物并未呈现明显的分区分布,而是相互交融的,偶有一些细菌以成簇、成团的方式出现,形成了一个互营共生的微生态系统。

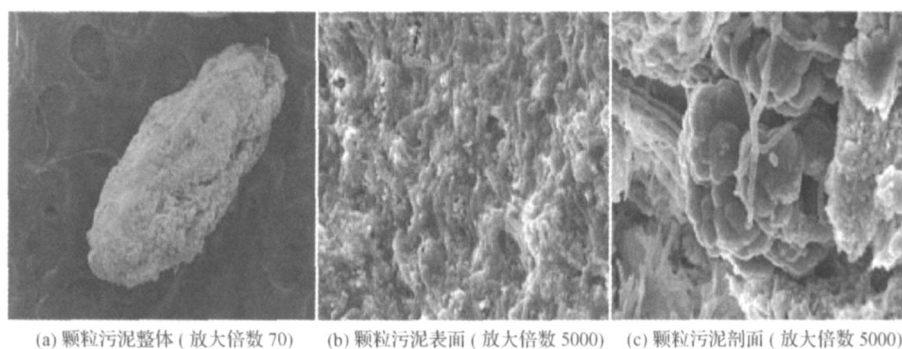


图 4 初次启动成功时颗粒污泥的扫描电镜照片

Fig 4 Scanning electron photomicrographs of granular sludge after the primary startup

中温稳定运行时,EGSB 反应器内的颗粒污泥变得更加规则、密实、光滑。颗粒污泥微生物菌群中甲烷八叠球菌明显增多;颗粒表面更加凹凸不平,这使得颗粒的比表面积明显增加,更有利于泥水接触、明显提高传质效果(见图 5)。

低温低浓度时,从图 6 可以看出,EGSB 反应器内颗粒污泥的表面和内部微生物排列比较松散,而且出现大量微生物胞外分泌物。考虑主要是微生物在低温和低浓度的双重不利条件下,为解除环境压力而产生的。在低于微生物生长的理想温度下,对基质较低的亲和力;再加上微生物所能利用的基质有限,微生物不能从环境中获取基质,导致细胞能的

耗尽,细胞内物质渗漏或细胞完全解体。在图 6 中可以观察到颗粒污泥表面和内部的微生物细胞内物质外渗造成微生物细胞收缩现象。

低温中高浓度时,EGSB 反应器内颗粒污泥表面和内部同样出现大量微生物胞外分泌物,也出现了微生物细胞内物质渗透造成的细胞收缩现象,但不如低温低浓度时明显。虽然进水浓度较高,但由于温度较低,甲烷八叠球菌没有出现,鬃毛甲烷菌属占优势^[15]。颗粒污泥内部出现了空洞,在空洞中心、周围和颗粒的边缘均是鬃毛甲烷菌属占明显优势。

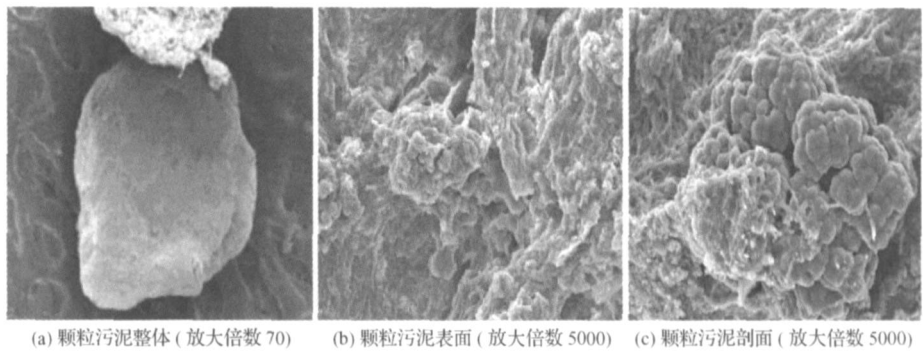


图 5 中温稳定运行时颗粒污泥的扫描电镜照片

Fig 5 Scanning electron photomicrographs of granular sludge at stable stage

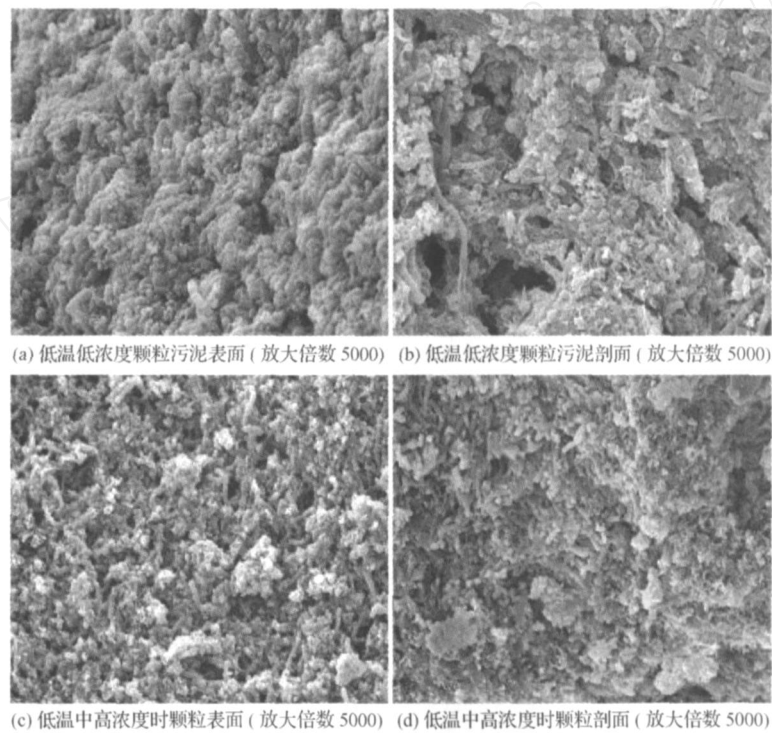


图 6 低温时颗粒污泥扫描电镜照片

Fig 6 Scanning electron photomicrographs of granular sludge at low temperature

从图 7 可以看出,在微氧 EGSB 反应器内的颗粒污泥同样是规则、密实的,菌种更加丰富,颗粒表面和内部的优势菌群不同。分析表面的优势菌群可能主要是兼性菌(由于微量氧的存在,好氧菌占优势的可能性小),颗粒内部的优势菌群主要是厌氧菌,尤其是甲烷菌。但在中高浓度时没有出现甲烷八叠球菌的明显优势。在有些颗粒表面的微生物细胞出现收缩现象。主要原因是微氧 EGSB 反应器在经历了温度和负荷双重冲击后造成的。温度和负荷的突然冲击后,COD 去除率虽然能在 20 d 后很快恢复,但微生物的恢复稍慢一些。

3 结 论

(1)接种市政消化污泥的 EGSB 反应器采用低进水浓度、高有机负荷的方式,能够在 46 d 内形成大量颗粒污泥,颗粒污泥的表面逐渐变得规则、光滑,强度逐渐提高,产气明显。颗粒污泥的沉速为 28.87 ~ 96.75 m/h,粒径为 0.25 ~ 1.25 mm,污泥浓度为 30.01 g MLSS/L,MLVSS/MLSS 为 0.51,产甲烷活性为 0.478 g COD_{CH₄}/g VSS · d。

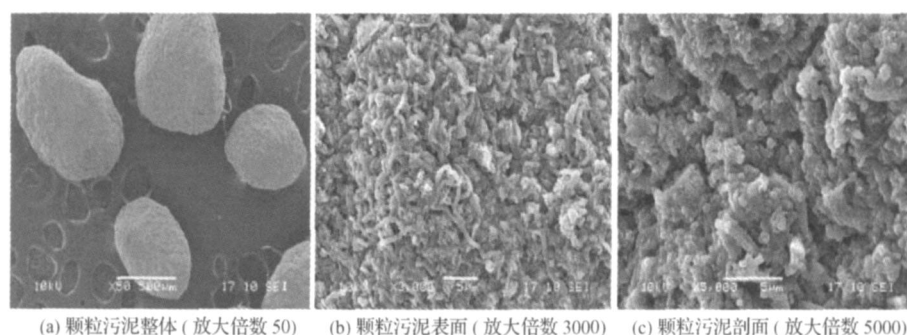


图 7 限氧 EGSB 反应器内颗粒污泥的扫描电镜照片

Fig 7 Scanning electron photomicrographs of granular sludge in the microaerobic EGSB reactor

(2)所形成的颗粒污泥在中温、低温、低浓度和微氧等条件下的运行特性:

厌氧中温稳定运行时,颗粒污泥的沉速较大,在低温或微氧时,颗粒污泥的沉速相对较低。如对于 0.25 ~ 0.45 mm 的颗粒污泥,中温、低温和微氧时的沉速分别为 23.69 ~ 30.64 m/h、15.29 ~ 19.18 m/h 和 20.07 ~ 20.83 m/h,都能维持在 15 m/h 以上,不会被冲出反应器而造成污泥的流失。

低温时大颗粒污泥所占重量百分比在逐渐增加,微氧使得颗粒污泥粒径分配更加均匀。

在经历低浓度、低温、微氧等条件突变时,反应器内颗粒污泥的浓度并没有降低,MLVSS/MLSS 有所降低,但很快能恢复。尤其是低温时,污泥浓度提高到 42 g/L 左右,MLVSS/MLSS 提高到了 0.64,保证了 EGSB 反应器在低温下的高效稳定运行。

15 低温时,颗粒污泥的产甲烷活性明显降低;但微量氧的加入并没有使 EGSB 反应器内颗粒污泥的产甲烷活性降低,反而有所提高。

中温稳定运行时,颗粒污泥规则、密实、光滑,微生物菌群中甲烷八叠球菌明显增多。低温时,颗粒污泥的表面和内部微生物排列都比较松散,而且出现大量微生物胞外分泌物;低温中高浓度时,甲烷八叠球菌没有出现,鬃毛甲烷菌属占优势。微氧时颗粒污泥同样是规则、密实的,菌种更加丰富,颗粒表面和内部的优势菌群不同,但在中高浓度时没有出现甲烷八叠球菌的明显优势。

参考文献

[1] 匡武,殷福才,孙世群,等. UASB 工艺在啤酒废水处理中的应用. 中国给水排水, 2006, 22(16): 62 ~ 66
[2] 王琳,任南琪,吴忆宁,等. 一体式 UASB-MBR 反应器处

理高浓度有机废水. 中国给水排水, 2006, 22(15): 33 ~ 36

[3] 孟卓,贺延龄,杨数成. UASB 反应器处理甲醇废水的研究. 中国给水排水, 2006, 22(13): 42 ~ 44, 48
[4] 王强,吴昌敏. 常温 EGSB 去除有机物的性能与机理. 中国给水排水, 2005, 21(8): 51 ~ 53
[5] 杜占鹏,李冬雪,赵敏,等. EGSB 反应器的生物特性及研究进展. 工业安全与环保, 2006, 32(10): 8 ~ 10
[6] 张旭栋,刘燕,邓从蕊. 常温下膨胀颗粒污泥床 (EGSB) 反应器处理城市污水. 复旦学报:自然科学版, 2006, 45(3): 353 ~ 358
[7] 董春娟,吕炳南. EGSB 反应器内颗粒污泥的快速培养及特性研究. 中国给水排水, 2006, 22(15): 62 ~ 66
[8] Zeng A. P., Deckwer W. D. Bioreaction techniques under microaerobic conditions: From molecular level to pilot plant reactors. Chemical Engineering Science, 1996, 51(10): 2305 ~ 2314
[9] 周律. 厌氧生物反应器的启动及其影响因素. 工业水处理, 1996, 16(5): 1 ~ 3
[10] 曹刚,徐向阳,冯孝善. 碱度对 UASB 污泥颗粒化的影响. 中国给水排水, 2002, 18(8): 13 ~ 16
[11] 叶芬霞. 载体好氧预处理对厌氧消化反应器运行特性的影响. 中国沼气, 2001, 19(1): 16 ~ 19
[12] 许丹东,肖红,藤兰珍. 高效厌氧生物反应器快速启动的研究. 甘肃环境研究与监测, 1997, 7(1): 28 ~ 32
[13] Lettinga G., Rebac S., Zeeman G. Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. Trends in Biotechnology, 2001, 19(9): 363 ~ 370
[14] Cristiano Nicolella, Mark C. M. van Loosdrecht, Sef J. Heijnen. Particle-based biofilm reactor technology. Tibtech, 2000, 18(7): 312 ~ 320
[15] R. E. Speece,李亚新译. 工业废水的厌氧生物技术. 北京:中国建筑工业出版社, 2001. 257 ~ 283