

IC 反应器处理猪粪废水的启动特性研究

张 杰, 刘亚纳, 胡张保, 赵青玲, 张百良

(农业部可再生能源重点开放实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要:采用 IC 反应器,研究了该反应器处理猪粪废水启动特性以及处理效果。结果表明,在逐渐加大进水流量和 COD 浓度来提高有机负荷的情况下,随着反应器的运行,反应器污泥床区逐渐充满沉降性能良好的颗粒污泥,到启动完成时经历了 60 d 左右的时间;启动完成后污泥床区中粒径大于 1 mm 的颗粒污泥量约占 81.3%,且污泥床区下部的颗粒污泥粒径均大于上部的颗粒污泥粒径;在进水有机负荷率达到 $20.6 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, HRT 不低于 12 h 时, COD 去除率保持在 90% 以上;同时,反应器对 N、P 也有一定的去除效果, T-N 和 T-P 去除率约为 20.8% 和 34.6%。

关键词: IC 反应器; 猪粪废水; 有机负荷率; 颗粒污泥; 特性

中图分类号: X703.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2004)03-0777-05

Characterization of IC Reactor in Treating Piggery Wastewater

ZHANG Jie, LIU Ya-na, HU Zhang-bao, ZHAO Qing-ling, ZHANG Bai-liang

(Key Laboratory of Renewable Energy Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: We studied several aspects of a IC reactor in treating piggery wastewater, including start-up and running characteristics, granular sludge forming process in the reactor, diameter distribution of granular sludge and removal rate of organic contamination. In the experiment, leaching liquid of swine manure was prepared into 5 ranges of COD concentrations, i. e $2\,000 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, $3\,000 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, $4\,000 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, $5\,000 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$ and $6\,000 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, which were used as fermentation substrate. During the start-up of IC reactor, organic loading rate (OLA) increased from $0.4 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ to $20.6 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$, and COD concentration in the outflow needed dropping to below $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ before increasing the value of OLA every time. OLA was improved by means of increasing inflow flux and COD concentration alternately. When the reactor was full of granular sludge at the 60th days, the start-up was finished. At the time, COD concentration of inflow, inflow flux and OLA of inflow was $63\,338.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $180 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ and $20.6 \text{ kg COD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ respectively. Variation of COD concentration following height orientation of the reactor was studied, respectively, at the several COD concentrations of $2\,840 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, $3\,651 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$ and $5\,236 \text{ m} \cdot \text{L}^{-1}$, the COD removal rate in the sludge bed area occupied 90.5%, 91.6% and 93.4% of the total COD removal rate of the system that was 69.71%, 80.14% and 87.45%, respectively, and only 9.5%, 8.4% and 6.6% at the refined treatment area, revealing that the sludge bed area consumed most of the organic contamination, but part of the residual at the refined treatment area. Diameter distribution of granular sludge was studied depend on the sludge sample taken at the 20th, 60th and 80th day. The results made clear that the granular sludge diameter exceeding 1mm was little at the refined treatment area, and at the sludge bed area was about 81.2%, which was important for COD removal with a high-speed. At the same time, diameter distribution of granular sludge was different at different height of the sludge bed area. Depending on the data gained at the 80th day, the diameter of the granular sludge at the underside was bigger than that at the upside. After start-up of the reactor was finished, the concentration of T-N, T-P and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the inflow and outflow had been determined once every two days during the following 20 days, results showed that IC reactor had a certain removal effect for N and P. The T-N and T-P removal rate was 20.8% and 34.6% respectively, but $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration had a little addition.

Keywords: IC Reactor; piggery wastewater; OLA; granular sludge; characterization

内循环厌氧反应器 (Internal Circulation Anaerobic Reactor, 简称 IC 反应器) 由荷兰 PAQUES 公司于 20

收稿日期: 2003-11-18

作者简介: 张 杰(1975—),男,博士,研究方向为农业生物环境与农业工程。E-mail: jack66@xinhuanet.com

世纪 80 年代中期开发成功,是第三代厌氧生化反应器的代表工艺之一^[1]。该反应器是根据污泥膨胀床理论,在 UASB 反应器的基础上发展起来的新一代厌氧消化系统,具有高效稳定的运行特点^[2],其有机负荷可高达 $40 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,这比第一代厌氧反应

器至少提高了 10~20 倍^[3, 4], 比第二代提高了 1~2 倍, 可以称得上是目前世界上处理效能最高的厌氧反应器^[5]。IC 反应器在工业废水处理上得到了广泛的应用, 如乳制品加工废水、食品加工废水和酿酒业废水等^[2, 6]。但是 IC 反应器在处理养殖场废水中的应用目前还是空白, 而我国集约化养殖场产生的污染问题已相当严重。根据国家环保总局对全国 23 个省、市、自治区进行的规模化畜禽养殖业污染情况的调查结果, 1999 年我国畜禽粪便化学需氧量达到 7 118 万 t, 远远超过我国工业废水和生活废水的排放量之和, 而经过无害化处理排放的废水仅占不到 1/3。目前多数进行废水处理的养殖场多数采用 SBR、UASB 和 CSTR 反应器, 这些反应器由于效率较低致使反应器容积大、投资高, 许多养殖场无力承担, 这是造成养殖污染日益严重的主要根源之一, 所以开展 IC 这种超高效反应器在养殖场废水处理方面的研究就显得非常重要。鉴于此, 本文对 IC 反应器处理猪粪废水的启动特性进行了实验研究, 以便为猪粪废水处理寻求新途径。

1 IC 反应器处理猪粪废水试验

1.1 试验装置

IC 反应器为有机玻璃加工制作而成, 其直径为 25 cm, 总高度为 217 cm, 有效高度为 180 cm, 总容积为 88 L。反应器分为污泥床区、精细处理区、气水分离器、气体提升管和回流管等^[3], 污泥床区有效体积是 41 L, 精细处理区的有效容积为 35 L, 试验采用中温发酵, 利用辅助加热方式将反应器温度控制在 30℃~35℃。试验系统如图 1 所示。

1.2 试验材料

试验用废水为取自养猪场的猪粪经淘洗、沉淀、过 200 目滤网去除大颗粒泥沙以及部分悬浮物后, 根据需要进行稀释而得。

接种污泥取自该养猪场第一沉淀池内, 外观较黑, 活性低, VSS/SS 在 0.12 左右, 经过除泥沙、悬浮固体并过 200 目滤网后, 进入反应器。

1.3 分析项目及方法

(1) 化学需氧量(COD): 重铬酸钾法;

(2) 悬浮固体(SS)和挥发性悬浮固体(VSS): 标准质量法;

(3) 总氮(T-N)和氨氮(NH₃-N): 凯氏总氮法和滴定法;

(4) T-P: 钼锑抗分光光度法;

(5) 污泥体积指数(SVI): 重量法; 以上项目均采用标准方法^[11]测定。

(6) 颗粒污泥直径分布: 取一定量的污泥, 使其顺序通过孔径分别为 4, 3, 2, 1 mm 筛网, 将各筛网所截留的污泥收集、烘干并称重, 即可计算不同粒径范围颗粒污泥的质量占污泥总质量的百分比, 由此, 可以得出按质量计算的颗粒污泥的粒径分布。

2 结果与讨论

2.1 反应器的启动

2.1.1 反应器的启动过程

反应器中加入接种污泥后开始启动运行。开始阶段进水 COD 浓度控制在 1 800~2 000 mg·L⁻¹, 初始负荷定为接种污泥活性 (0.086 3 gCH₄·g⁻¹VSS·d⁻¹) 的 70%, 控制进水量和有机负荷, 并当系统出水 COD 浓度稳定在 800~1 000 mg·L⁻¹ 时提高进水负荷, 提高进水负荷的途径分为增加进水流量和提高进水 COD 浓度。

开始阶段进水流量控制在 20 L·d⁻¹, 随后每天进水流量增加 2 L, 连续运行 2 周, 出水 COD 浓度降到 986.3 mg·L⁻¹, 进水流量增加到 48 L·d⁻¹, 并以此流量连续运行 1 周后, 出水 COD 浓度稳定在 950 mg·L⁻¹ 左右, 此时保持进水流量不变, 将进水 COD 浓度增加到 3 105.2 mg·L⁻¹, 开始时出水 COD 浓度有小幅度提高, 坚持运行 5 d 后, 出水 COD 下降到 997.6 mg·L⁻¹, 随后, 进水流量平均每天增加 7 L, 14 d 后进水流量达到 140 L·d⁻¹, 进水 OLA 增至 6 kg COD·m⁻³·d⁻¹, 在此过程中, 没有发现出水恶化现象, 且出水 COD 浓度稳定在 900 mg·L⁻¹, 左右。接着, 保持进水流量为 140 L, 将进水 COD 提高到 4 156.2 mg·L⁻¹, 连续运行 3 d, 出水 COD 浓度仍然保持在 900 mg·L⁻¹ 左右, 产气量增加, 沉降管中出现污泥, 内循环系统开始运行。此后将进水流量突然增加到 180 L, 出水状况恶化, 出水 COD 浓度提高到 2 389.5 mg·L⁻¹, 大量污泥被洗出, 接着把进水流量降低到 150 L, 随着反应器的运行, 出水 COD 浓度逐渐降低到 950 mg·L⁻¹ 左右, 随后, 分别在第 50 d 和第 70 d 将进水浓度提高到 5 274.1 mg·L⁻¹ 和 6 338.3 mg·L⁻¹, 进水流量增加到 180 L·d⁻¹, 除出水有少量污泥洗出外, 出水 COD 浓度均在 1 000 mg·L⁻¹ 以下。在此过程中, 颗粒污泥逐渐增多长大, 并充满了污泥床区。

2.1.2 不同 HRT 和 OLA 对 COD 去除率的影响

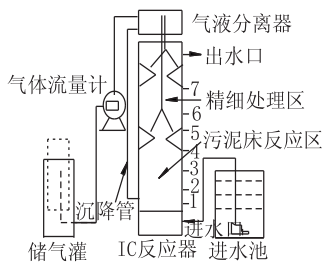


图 1 处理工艺流程

Figure 1 Flow chart of the treatment process

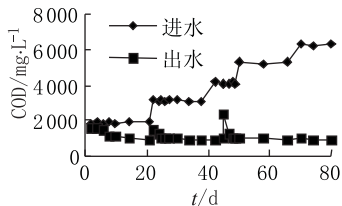


图 2 IC 反应器启动过程

Figure 2 Start-up process of IC reactor

对不同停留时间 HRT 和进水有机负荷 OLA 条件下反应器处理猪粪废水的 COD 去除率进行了研究,结果如图 3。由图 3 可见,当进水有机负荷 OLA 控制在 $1.6 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右时,COD 去除率随着 HRT 的增长而增加。当 $\text{HRT} = 4 \text{ h}$ 时,COD 去除率为 70.6%; $\text{HRT} = 6 \text{ h}$ 时,COD 去除率为 85.6%;而当 HRT 超过 12 h 以上时,去除率基本稳定在 95% 左右,即使是 $\text{HRT} = 24 \text{ h}$ 时,COD 去除率也不过在 96.3%。但当 OLA 提高到 $3.4 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$, $\text{HRT} = 4 \text{ h}$ 的情况下,出水水质恶化,COD 去除率严重下降,仅有 53.1%,而此时提高水力停留时间,COD 去除率就会增大。当 HRT 提高到 6 h,COD 去除率就回复到 81.4% 左右;提高到 8 h 以上时,COD 去除率就回复到 90% 以上;当有机负荷提高到 $9.4 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $12.2 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,HRT 分别为 6 h 和 8 h 时出水水质分别恶化。但 HRT 在 12 h 以上时,即使有机负荷到达 $20 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,COD 去除率仍然超过 90%,且出水水质稳定。由此可见,IC 反应器具有稳定而有效的运行特性以及较高的处理效率,在不同 OLA 时,适宜的 HRT 范围也不同,详见表 1。

2.2 沿反应器高度方向 COD 去除率的变化情况

分别从反应器的污泥床反映区第 1, 2, 3, 4 取样口和精细反应区第 5、6、7 取样口以及进水和反应器出水取样,考察了 COD 浓度在反应器中的变化,结果如图 4。

在进水 COD 浓度为 2840 、 3651 和 $5236 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

表 1 不同 OLA 下的适宜 HRT 范围和相应的 COD 去除率

Table 1 Removal rates for sitting HRT range and relevant COD at

different OLA value

OLA/ $\text{kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$	HRT/h	COD 去除率/%
1.6	4 ~ 8	70 ~ 90.3
1.6 ~ 3.4	6 ~ 8	81.7 ~ 90
3.4 ~ 9.4	6 ~ 12	76.3 ~ 92.5
9.4 ~ 15	8 ~ 12	86.9 ~ 91.2
15 ~ 20.6	12	88.4 ~ 91.2

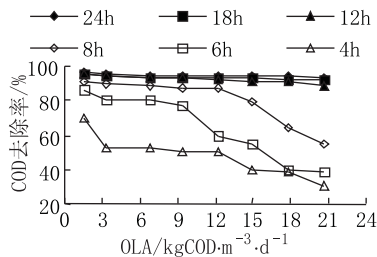


图 3 不同 HRT 和 OLA 情况下 COD 的去除率

Figure 3 Removal rates of COD at the conditions of different HRT and OLA

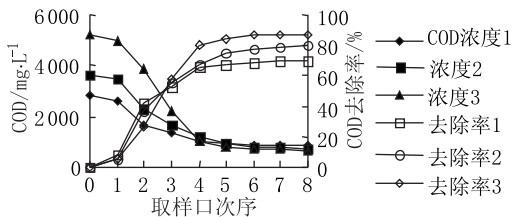


图 4 沿反应器高度方向 COD 浓度的变化

Figure 4 COD concentration variation following altitudinal direction of reactor

3 个不同浓度水平下,出水 COD 的去除率为 69.71%、80.14% 和 87.45%,污泥床区的 COD 去除率为 63.1%、73.4% 和 81.7%,分别占 COD 总去除率的 90.5%、91.6% 和 93.4%。由此可以看出,IC 反应器对废水中有机污染物的去除主要在污泥床区,因此,IC 反应器工作状况正常与否以及处理效果的好坏与污泥床区微生物的富集程度、产甲烷活性有直接关系。

2.3 颗粒污泥的粒径分布情况

整个试验过程对污泥床区颗粒污泥的粒径分布进行了 4 次测量,分别是在运行的第 20 d,第 40 d,第 60 d 和第 80 d,颗粒污泥取自第 2 取样口,其结果如图 5 所示。在这 4 d 中反应器内相应的水力上升流速分别为 1.27 、 4.46 、 4.78 和 $5.73 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从图 5 中可看见,在反应器运行到第 20 d 时可以见到粒径大于 1 mm 的颗粒污泥,其所占比例为 8% 左右;到第 40 d

时,粒径大于 1 mm 的颗粒污泥迅速增长,所占比例达到 38.2%,其中主要是粒径在 1,2 mm 之间的颗粒污泥;在第 60 d 时,粒径在 1 mm 以上的颗粒污泥达到 76.3%,粒径在 1,2 mm 之间的污泥颗粒仍然占有相当大的比例,但增长速度较慢,而粒径在 2,3 mm 之间的颗粒污泥增长速度较快,约占 25.8%,同时,粒径大于 3 mm 的颗粒污泥也有一定数量的增加;到第 80 d,反应器中粒径在 1 mm 以上的颗粒污泥比例为 81.2%,其中粒径大于 3 mm 的为 8%。由此可以看出,随着反应器内水力上升速度的增加,反应器内颗粒污泥的粒径呈增大的趋势。

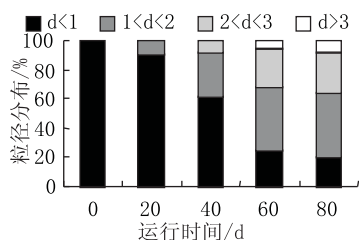


图 5 污泥颗粒粒径随运行时间的变化

Figure 5 Diameter variation of granular sludge with runtime

在反应器内,污泥区不同高度处其颗粒污泥的粒径分布也有所不同,图 6 所示为第 80 d 时污泥床区第 1,3 取样口所取颗粒污泥粒径分布情况。从图中可以看出,污泥床区上部颗粒污泥的粒径要比下部的小,上部污泥中粒径为 1~2 mm 和 2~3 mm 的颗粒所占比例最大,而下部污泥中颗粒粒径大于 1 mm 的 4 种粒径范围内都有颗粒污泥存在,而在上部则没有发现大于 4 mm 的颗粒污泥。

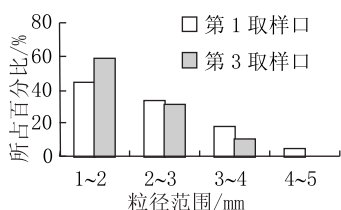


图 6 第 80 d 时污泥床上部和下部颗粒污泥的粒径分布

Figure 6 Granular diameter distribution at the top and bottom of sludge bed at the 80th day

2.4 IC 反应器脱氮除磷效果

对进水和出水中 T-N、T-P 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度连续进行 20 d 的取样测定,每 2 d 取一次样,结果如图 7,8 所示。IC 反应器在正常运行的情况下,对 T-N 有一定的去除,去除率约平均为 20.8%,T-N 浓度在 $400 \sim 700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,反应器运行稳定。而出水

$\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度与进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度相比有增大的趋势,这是因为废水中的大分子含氮有机物经过异养型微生物氧化分解转化成的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 较之微生物利用的较多^[10]。IC 反应器对 T-P 也有一定的去除效果,去除率约为 34.6%。

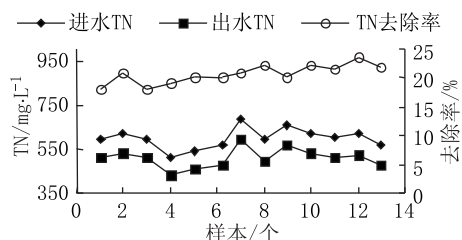


图 7 TN 去除率

Figure 7 Removal rates of total N

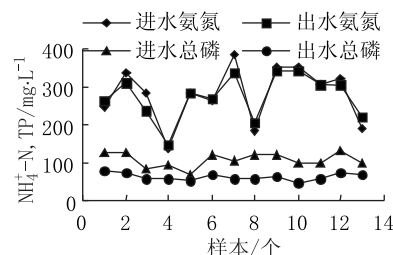


图 8 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 浓度的变化

Figure 8 Concentration varies of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and total P

3 结论

(1) IC 反应器对猪粪废水具有稳定高效的处理效果,在温度为 $30^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$,进水负荷为 $15 \sim 20.6 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,HRT = 16 h 时,COD 的去除率均高于 88%,最高可达到 91.2%。并且 IC 反应器的污泥床区承担着去除 COD 的主要任务,试验证明,该反应区对 COD 的去除占 COD 总去除率的 90% 以上。

(2) IC 反应器在启动过程中应逐步提高有机负荷率,避免短时间内 OLA 产生大的波动,影响反应器的运行。HRT 和 OLA 是影响 IC 反应器处理效率的 2 个主要因素,试验证明,高的 OLA 更有利于发挥反应器的效能,HRT 应根据 OLA 的高低进行相应的调整。

(3) 随着运行时间的延长和 IC 反应器内水力上升速度的提高,颗粒污泥的粒径不断增大,且处于污泥床区下部的颗粒污泥的粒径均大于处于污泥床区下部的颗粒污泥粒径。

(5) IC 反应器对 T-N 和 T-P 也具有一定的去除效果。

参考文献:

- [1] 王凯军. 厌氧工业的发展和新型厌氧反应器[J]. 环境科学, 1998, 19(1): 94 – 96.
- [2] Driessen W, Yspeert P. Anaerobic treatment of low, medium and high strength effluent in the agro – industry [A]. 5th Latin – American Workshop – Seminar on Wastewater Anaerobic Treatment, Helden Vina Del Mar, Chile, 27 – 30 October, 1998. 221 – 228.
- [3] 杨世关. 内循环厌氧反应器试验研究[D]. 河南: 河南农业大学, 2002.
- [4] Motegi Kouichi. IHI – internal circulation reactor[J]. 石川岛播磨技报, 1998, 38, (2) 94 – 98.
- [5] 胡纪萃. 论内循环厌氧反应器[J]. 中国沼气, 1999, 17(2): 3 – 6.
- [6] Yamashita, Masaharu, Yoshioka, Kazumi, Fukunaga, Sakae. System of thermochemical liquidization of organic waste combined with biogas recovery[J]. 石川岛播磨技报, 2001, 41, (5) 235 – 239.
- [7] Sanchez E, Travieso L, Weiland P, et al. Effect of influent strength changes on the performance of a down – flow anaerobic fixed bed reactor treating piggery waste[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2002, 36(1): 73 – 82.
- [8] Bernet N D, Elgenes J P, Moletta R D, et al. SBR as a relevant technology to combine anaerobic digestion and D. Nitrification in a single reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(3): 209 – 214.
- [9] Sanchez E, Borja R, Weiland P. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate[J]. *Process Biochemistry*, 2001, 37(5): 2001, 483 – 489.
- [10] 李 军, 杨秀山. 微生物与水处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [11] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[D]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.