

降流式厌氧紊动床 COD 去除 与生物膜厚度及密度的关系研究

何成达 王惠民

(淮海大学水文水资源及环境学院 江苏 南京 210098)

摘要 介绍了一种用沼气强制循环使悬浮载体颗粒流化的反应器——降流式厌氧紊动床. 在 COD 有机负荷为 $6 \sim 22 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 、水力停留时间为 $0.25 \sim 0.94 \text{ d}$ 下, COD_{Cr} 去除率保持在 $65\% \sim 85\%$. 此时生物膜厚度相对较低 ($5 \sim 30 \mu\text{m}$), 而生物膜密度达到较高水平 ($\text{VSS} > 70 \text{ g/L}$). 试验发现, 生物膜厚度及密度的变化与 COD 去除呈相反变化. 反应器里高水平的生物活性表明: 剧烈紊动和剪切有利于微生物生长并形成薄的、致密的活性膜; 在高有机负荷下挥发性固体的脱落程度随着 COD 去除率和反应器里固体总量的水平下降而近似线性增加.

关键词 降流式厌氧紊动床; COD 去除; 生物膜厚度; 生物膜密度

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2001)04-0091-04

在废水处理领域中, 三相流化床技术由于其效率高而一直受到人们的关注. 但是在实践中也发现了厌氧流化床技术在运行控制方面的一些缺点, 例如生物颗粒不稳定, 反应器内水力条件要求高^[1,2], 需要大量回流水^[3]等等. 这些缺点导致了一种新型反应器即用部分沼气强制循环使悬浮载体颗粒流化的降流式厌氧紊动床(the downflow anaerobic turbulent bed)的产生. 该反应器的优点是反应器内生物量的增长和沼气的产生不影响反应器运行^[4~6]. 重要的是该反应器能在保持高 COD 去除率下使生物膜厚度达到较高水平和避免松散生物膜. 这种反应器仍然是流化床, 但液体的流化是由沼气强制循环来实现的. 在这类反应器里, 上升气体通过假沸腾机理形成悬浮膨胀床. 因为反应器里气泡上升, 流化(气体 + 液体)使围绕在颗粒周围的外观密度下降而载体颗粒上升, 在这种流化状态下生物膜的实际密度变大. 进一步地, 上升的气泡造成颗粒旋转, 使老化而松散的生物膜脱落. 本文通过试验研究了该反应器在给定的水力学条件下, COD 去除与生物膜厚度及密度的关系. 所有试验在反应器经 60 d 的启动期后连续进行.

1 试 验

1.1 反应器

用于研究的反应器见示意图 1. 该反应器的内径为 100 mm, 有效高度为 1000 mm, 有效容积为 0.0785 m^3 . 底部设有积累脱落污泥的圆锥体. 反应器内水温保持在 $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. 沼气由气体泵循环, 气流速度为 0.5 L/min . 循环气体布气点距反应器底部 200 mm 上, 气体通过穿孔橡皮管输送. 载体材料的直径为 0.175 mm , 密度为 0.6 kg/m^3 , 比表面积为 $20000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. 载体材料置于不锈钢筛网上. 反应器里填满了占有效容积 40% 的载体. 废水取自某奶牛场生产废水, 废水浓度(COD)为 $5000 \sim 6000 \text{ mg/L}$. 废水由污

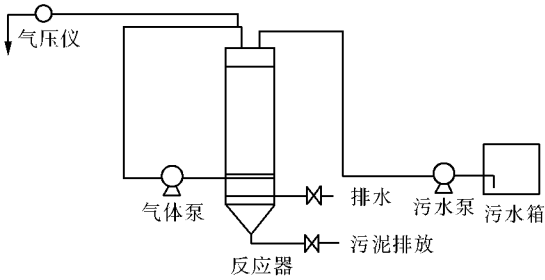


图 1 降流式厌氧紊动床工艺流程

Fig.1 Process of the downflow anaerobic turbulent bed

水泵连续抽吸进反应器,产生的污泥沉淀于床的底部.反应器的启动时间约 60 d,有机负荷率(OLR)达到了 $16\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$.在此以后,反应器按试验要求进行稳定的运行.

1.2 测定和计算

测定进水 COD、出水 COD 和 VSS 以及排出污泥的 VSS.附着在载体材料上的 VSS 每 3 d 测定一次. COD 测定用重铬酸钾法, VSS 测定用灼烧法.载体上 VSS 的测定方法为从反应器取出 2 mL 生物载体样本,用蒸馏水仔细冲洗,再在 105°C 下干燥.对干燥的物质称重后,样本在马弗炉 600°C 下焚烧以去除有机物质.样本再一次被称重,附着的 VSS 质量从两次称重的差值计算得出.用原始生物体积和清洗后的载体体积差值计算生物量体积.

生物膜密度 D_{bf} (g/L) 计算公式为

$$D_{\text{bf}} = M_{\text{VSS}}/V_{\text{bf}}$$

式中: M_{VSS} ——VSS 的质量; V_{bf} ——生物膜体积, $V_{\text{bf}}=(V_s-V_{\text{cs}})$; V_s ——原始生物膜体积, L; V_{cs} ——清洗后的载体体积.

生物膜厚度(假定是均匀的)计算表达式为

$$L_f = \frac{d_s}{2} \left[\left(1 + \frac{V_{\text{bf}}}{V_{\text{cs}}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

其中:假定生物载体是圆形的, d_s 表示清洁载体直径的平均值.

用 b_s 表示生物膜脱落率,稳态运行下 b_s 可表述为

$$b_s = m_{\text{out}}/S_p$$

式中: m_{out} ——VSS 的产率; S_p ——清洁载体面积. VSS 的量是剩余污泥的 VSS 与出水 VSS 之和.

2 结果和讨论

2.1 关于生物膜厚度、密度和脱落率

在启动期后,反应器通过调节进水流速以便在不同的 OLR 下连续运行,详见表 1.图 2 表示了生物膜厚度和密度对 COD 去除率的影响.从图 2 可以看出,当去除率增加时生物膜厚度增加,而生物膜的密度从 $300\text{ kg}/\text{m}^3$ 下降到 $70\text{ kg}/\text{m}^3$.同时,可以从图 3 看出生物膜的脱落率也增加(表示为单位载体表面积的 VSS 减少).这说明生物膜的外部是不致密且易碎的,生物膜密度与附着强度有关.在本试验的 OLR 范围内,紊流、剪力和高 OLR 的作用一方面促进了生物量的生长,另一方面又导致了生物膜的脱落.当然,内源厌氧分解反应也是生物膜脱落的原因之一,但不是主要原因.

表 1 连续试验下的有关参数

Table 1 Operational conditions in continuous mode

进水 COD 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	OLR ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	HRT /d	持续时间 /d
5232	16	0.33	15
5476	18	0.30	18
5017	20	0.25	12
5727	22	0.26	17
5428	14	0.39	14
5941	12	0.50	16
5783	10	0.58	14
5172	8	0.67	13
5634	6	0.94	12

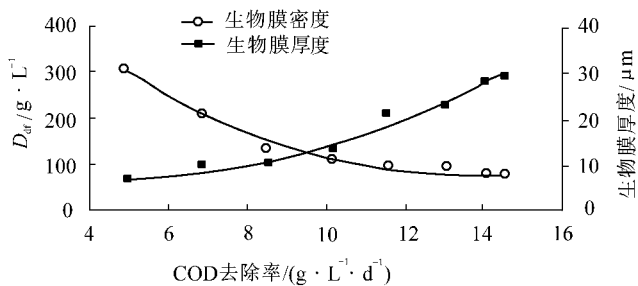


图 2 生物膜密度和厚度对
COD 去除率的影响

Fig.2 Influence of biofilm thickness and density
on COD removal rate

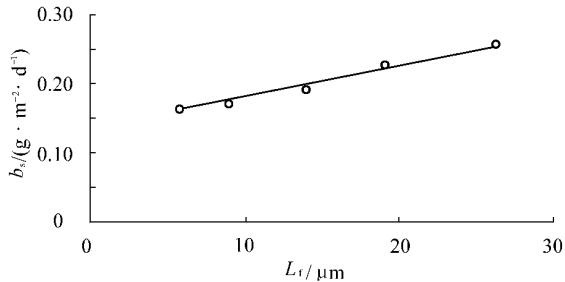


图 3 生物膜脱落速率对
生物膜厚度的影响

Fig.3 Influence of biofilm detachment
rate on biofilm size

2.2 COD 去除与生物活性

反应器的主要性能见图 4. 该图表示了 COD 转化率(即有机物的转化程度)与 OLR 的关系. 试验数据表明,当 OLR 增加时 COD 转化率降低. 这是因为污水 COD 在 5 000 ~ 6 000 mg/L 下 HRT 从 0.92 d 变化到 0.25 d. 但 COD 转化率的下降程度较轻. 因为在试验范围内 COD 转化率下降最大在 25% 之内,而 OLR 增长 3.7 倍. 显然,OLR 的增大使生物活性迅速加强. 生物活性随着 OLR 的增加而上升,这说明生物膜的组成是变化的且与 OLR 相关,或者说生物膜里活性生物总量增加及生物膜基质里细胞有更高的比例. 当然,试验达到的高负荷与小粒度(平均 0.175 mm)的载体具有巨大比表面积(20 000 m²/m³)也有关. 但在载体粒度相同的情况下,薄的生物膜比厚的、松散的生物膜更有活性. 从传质的观点来看生物膜愈薄则生物动力学过程愈易进行.

从 HRT 对反应器里附着和悬浮 VSS 分配关系上可以得到更多的生物膜特质信息. 如图 5,在 0.25 d 的 HRT 下悬浮的 VSS 在反应器里的比例为 5.6%,而 HRT 为 0.94 d 时这个比例上升到 18%. HRT 的减少促进了附着 VSS 的生长,因而悬浮 VSS 所占的分数较低. 这显然是当 OLR 增加时生物量里的活性细胞增长更快. 图 5 中总 VSS 曲线的形状显示了 VSS 总量在低 HRT 时达到最大. 这意味着在多种因素综合作用下,显著的剪切或碰撞作用产生的脱落作用与高 OLR 产生的生物高活性作用相比不占主导地位,或者说剪切和碰撞作用更有利于传质. 因此,反应器里附着的生物固体量增加并达到最大.

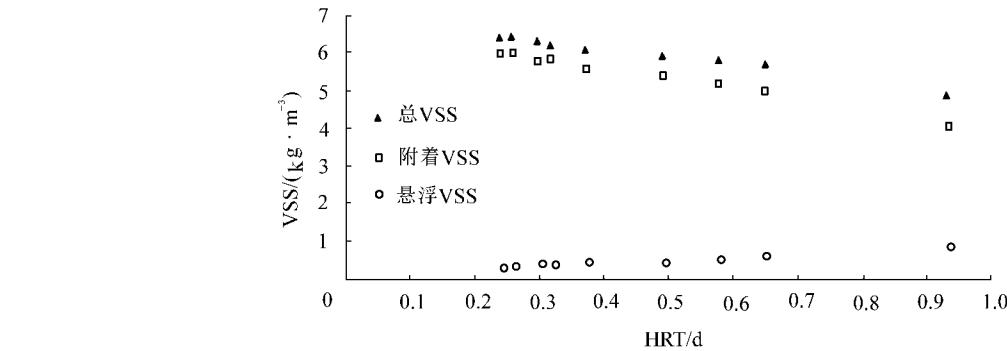


图 5 HRT 对悬浮 VSS、附着 VSS 和总 VSS 之间关系的影响
Fig.5 Influence of hydraulic retention time on the relationships between suspended fixed and total biomass

从这个观点出发,紊动和剪力条件不但不影响反应器的效率,反而有利于控制生物生长水平和保持微生物的高活性. 传统的升流式流化床由于生物的过分生长和沼气产生带来一系列的操作问题,如颗粒带出、气体冲出和短流等. 而在逆流紊动床里运用沼气作为流化介质,上述缺陷几乎不存在. 由于在高 OLR 下产生的沼气足够循环,避免了大量能量消耗于水循环. 显然,在生产规模下,沼气的循环比液体循环要容易得多,也更容易在反应器的横断面实现均匀的气体分配. 从试验中可以发现产生的剩余污泥较少,加之在反应器的底部设置了沉淀装置,所以不需要外设沉淀器分离脱落生物.

在本试验中没有考虑气泡粒度大小对工艺的影响,如何进一步优化工艺以及对各种废水的适应能力等,这有待于今后进一步研究.

3 结 论

- a. 厌氧逆流紊动床是一种新型的生物膜反应器,反应器里悬浮的颗粒是生物载体,与传统厌氧流化床不同的是降流式厌氧紊动床的流化机理是由上升的气泡来实现的.
- b. 由于反应器里强烈的紊动使聚合物的合成和大量生物停留于具有高比表面积载体的小容积里,降流

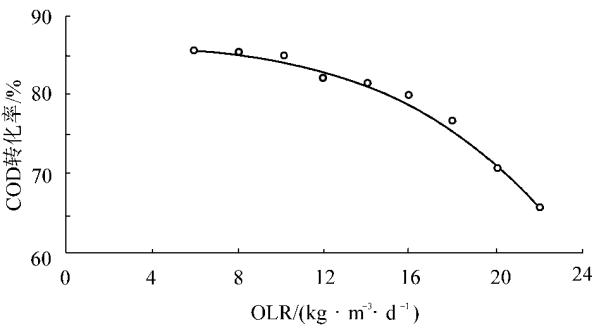


图 4 有机负荷率对 COD 转化率的影响
Fig.4 Influence of organic loading rate on COD conversion rate

式厌氧紊动床生物膜生长表现出低厚度和高密度的特点,当厚度增加时生物膜的密度变小且脱落速度加快.

c. COD 去除与生物膜的特质密切相关.在连续运行方式中,当 OLR 为 $6 \sim 22 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 时附着生物 VSS 量约在 $4050 \sim 5900 \text{ kg/m}^3$ 之间,变化幅度约为 45%,但高有机负荷时的生物活性却是低有机负荷时的 3 倍多.这说明当生物膜体积近似保持相同时生物膜里的细胞量显著增加.

d. 生物膜脱落速度一方面取决于水力条件和附着强度,另一方面也取决于微生物的生长和活性水平.

参考文献:

- [1] Grasius M G, Iyengar L, Venkobachar C. Anaerobic biotechnology for the treatment of wastewater: a review[J]. Scientific and Industrial Research, 1997, 56: 385 ~ 397.
- [2] Buffière P, Fonade C, Moletta R. Mixing and phase hold-up variations due to gas production in anaerobic fluidized digesters: influence on reactor performance[J]. Biotech Bioeng, 1998, 60(1): 36 ~ 43.
- [3] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998. 120 ~ 123.
- [4] Nicolella C, Difelice R, Rovatti M. An experimental model of biofilm detachment in liquid fluidized bed biological reactors[J]. Biotech Bioeng, 1996, 51(6): 713 ~ 719.
- [5] Gjaltema A, Vinke J L, van Loosdrecht M C M, *et al.* Abrasion of suspended biofilm pellets in airlift reactors: importance of shape, structure, and particle concentrations[J]. Biotech Bioeng, 1997, 53(1): 88 ~ 99.
- [6] Comte M P, Bastoul D, Hebrard G, *et al.* Hydrodynamics of a threephase fluidised bed-the inverse turbulent bed[J]. Chem Eng Sci, 1997, 52(21/22): 3971 ~ 3977.

Relations Between COD Removal and Biofilm Thickness and Density of Downflow Anaerobic Turbulent Bed

HE Cheng-da, WANG Hui-min

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract A reactor, called a downflow anaerobic turbulent bed, is introduced, in which the circulation is forced by biogas to ensure fluidization of floating carrier particles. When the operational range of the reactor is $6 \sim 22 \text{ kg/(m}^3 \cdot \text{d)}$ and the hydraulic retention time $0.25 \sim 0.94 \text{ d}$, the COD_{Cr} removal efficiency remains 65% ~ 85%, and the bio-film thickness is rather small ($5 \sim 30 \mu\text{m}$), while the bio-film density is high ($> 70 \text{ g/L}$). Experimental results show that the biofilm thickness and density increase with the decrease of COD removal. Bioactivity kept at a high level in the reactor indicates that violent turbulence and shear are beneficial for the growth of microbe and the formation of a thin, dense and active film. Meanwhile, the volatile solid detachment at a high organic loading rate (OLR) increases quasi-linearly with COD removal and with the decrease of the amount of solid in the reactor.

Key words downflow anaerobic turbulent bed; COD removal; biofilm thickness; biofilm density