



膜法 SBR 三相外循环流化床反应器

陈小光¹, 潘永亮², 黄卫星², 胡兆吉¹, 何 璠³

(1. 南昌大学环境科学与工程学院, 江西 南昌 330029; 2. 四川大学化工学院, 四川 成都 610065;
3. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 本文分析了以多孔高分子载体为固相的三相外循环流化床反应器的优点, 通过与膜法 SBR 工艺相结合, 在处理 COD 浓度范围为 600~1400 mg/L, 容积负荷范围为 1.78~4.15 kg COD / m³·d 的有机废水, 其 COD 去除率能高达 90.0% 以上, NH₄⁺-N 的去除率能高达 70.0% 以上。结果还表明, 该工艺具有处理较高浓度废水的潜力。

关键词: SBR; 流化床; 反应器; 废水处理

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: B

文章编号: 1000-3770(2005)12-0076-04

气-液-固三相外循环流化床反应器不仅传热、传质效率高, 床内温度、浓度均匀, 而且操作方便、能耗低、投资少、处理能力强、占地面积小, 因而在工业上得到了广泛的应用^[1]。废水处理中三相流化床的应用得益于生物工程中的生物膜法和化工操作中的流态化技术的成功结合, 主要优点为宏观混合程度高, 固相内扩散阻力低, 液体和固体外部传质阻力小, 微生物浓度高等。随着水处理技术的不断发展, 三相流化床反应器应用于废水的生物处理越来越受到人们的重视^[2,3]。

近几年来废水处理中出现了一些新型生物流化床反应器, 但多为内循环式结构, 其原因可能是外循环床内载体颗粒的循环流动难于实现, 需要较大的推动力, 能耗较高, 这与载体的选择有关。目前, 国内外研究中, 三相生物流化床中的固相多数采用砂、玻璃球、陶粒、空心塑料球、焦炭碎粒、活性炭等作为微生物的载体^[4]。但由于各种载体的密度, 流化过程中的能耗及沉降性能等因素的限制, 阻止了这类反应器在生物废水处理中的大规模应用, 尤其是外循环流化床的应用尚未见报道。而本实验以 HP-8-8 型低密度多孔高分子载体^[5]作为固相, 设计了一种高径比较大的外循环式流化床反应器, 与膜法 SBR 工艺相结合, 对有机废水的处理进行了探索性的研究。

1 设备和方法

1.1 装置与流程

实验装置的主体设备为外循环流化床反应器, 由有机玻璃制成, 便于观察反应器内部载体流化, 载体挂膜和流化状态等。主要参数尺寸为: 提升管高 2000 mm, 内直径 70 mm, 外循环管高 1 600 mm, 内直径 40 mm, 沉降区内直径 200 mm, 床身总高 2210 mm, 流化床的工作容积为 18.0 L, 总容积为 21.0 L。整个实验装置包括储料槽、阀门、空压机等组成。

本装置集调节、曝气与沉淀于一体, 其工艺流程为:
进水→反应→沉淀→排水→闲置

1.2 原料和仪器

实验原料: 以空气为曝气源, 某污水处理厂 A-O 工艺的活性污泥为接种污泥, 试验用水为人工合成废水, 用自来水、葡萄糖、碳酸氢钠、氯化铵、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾和微量硫酸镁配置而成, 通过改变投加养料的比例, 制成 pH 值不同和 COD、NH₄⁺-N 浓度不同的有机废水, 废水营养成分比例大致为 COD:N:P=100:5:1。

仪器: 转子流量计、精密 pHS 系列 pH 计和生化分析仪器。

1.3 实验的启动

所用接种污泥量为 1.4 L, 其中含有大量的兼性厌氧菌, 所以该污泥对膜法 SBR 工艺有良好的适应能力。该污泥置于外循环流化床中驯化一周后, 微生物迅

表 1 SBR 工艺常用反应器的一些结构和技术参数对比

序号	参考文献	常见 SBR 反应器主要结构尺寸 (mm)	高径比 (倍)	工作容积 (L)	颗粒种类	废水类型	好氧段曝气量 (空气, L/h)
1	7	Φ180× 500 圆柱体	2.8	14.0	活性污泥	石油废水	600
2	8	Φ300× 700 圆柱体	2.3	38.0	活性污泥	豆制品废水	600~1 000
3	9	Φ220× 240 圆柱体	1.1	5.0	活性污泥	猪场粪污	600~1 200
4	10	圆柱体	/	60.0	活性污泥	工业废水	1 200
5	11	Φ100× 360 圆柱体	3.6	1.8	弹性立体填料	生活污水	20~60
6	12	300× 100× 450 立方体	/	10	软性梳状纤维填料	生活污水	1 100
7	本文	Φ70× 2 000 圆柱体	28.6	18.0	多孔高分子载体	有机废水	40

速成长, 活性污泥量达到 4.8 L, 此时对 COD 浓度为 605.6 mg/L, 容积负荷为 0.92 kgCOD/m³·d 的有机废水进行处理, 其去除率为 92.7%, 认为该工艺驯化完毕。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数的确定

本文通过正交试验确定该工艺最佳工况运行参数为: 进水期 1 min 内, 曝气期 3 h, 沉淀期 1 h, 闲置期 0.5 h, 排水期 5 min 内, 总周期时间约 4.5 h, 曝气量 40 L/h。

2.2 三相外循环生物流化床反应器的特性分析

实验发现, 以多孔高分子载体为固相的三相循环生物流化床反应器具有以下优点:

(1) 载体颗粒均匀。从流化床的结构尺寸来看, 其高径比很大, 约为 28.6 倍, 而目前试验研究 SBR 工艺大多采用的反应器高径比不大, 约为 1.0~4.0, 如表 1 所示。从理论上讲, 颗粒密度沿床层轴向呈上稀下浓的单调指数函数或 S 形的连续分布^[6], 而颗粒浓度沿床层径向为中心壁浓, 曝气面积一定时, 直径愈大, 颗粒轴向均匀情况愈明显, 这种现象在高径比小的反应器上表现得尤为明显, 因此, 增加高径比, 有利于床内颗粒均匀分布。

(2) 系统流态化稳定, 能耗低。提升管内流体具有气液固三相, 而外循环管内基本上只有液固两相, 其流体密度较前者大, 两者的密度差恰好使循环管内向下流动的流体对提升管内有一个向上的推力, 从而加速了水系的流动, 同时使床内载体生物膜颗粒循环流动, 从而维持操作稳定运行。方佩珍等^[4]研究 HP-8-8 型低密度多孔高分子载体作为固相, 与用玻璃球载体为固相的实验相比较, 达到相近的压力梯度, 前者所需的气速只有后者的十分之一; 另外, 若关闭外循环管, 使床内处于不循环状态, 在相同的载体量下, 在循环条件下颗粒的起始输送速度要比不循环条件下相应的速度低 2~3 倍。这些表明了采用高分子载体的三相循环流化床系统能耗非常低, 而且快速流态化具有更高的气液固接触效率, 并获得更为均匀的固相颗粒分布。

从表 1 中好氧段曝气量也可看出, 虽然各种工艺处理的废水不尽相同, 但序号 1 至序号 6 的曝气量与本实验(序号 7)所需的曝气量相差悬殊, 相比较而言, 本实验曝气量仅为 40 L/h, 能耗较低。

(3) 氧利用率高。要获取较高的氧利用率, 就必须尽可能产生较多的“泡表膜”, “泡表膜”是进行氧传递的功能膜。一个大泡, 如果被分割成小泡的数量愈多, 则所形成的泡表膜面积愈多。由于气泡有曝气头的孔隙越细, 按照孔隙扩散原理, 所产生的气泡也就越细, 便能达到氧利用率高的效果, 但“泡细”与“阻力”是一对矛盾, 孔隙越细阻力越大, 孔隙也就越易被堵塞, 必然带来损耗大, 性能不稳定等问题。本文从气泡动力扩散角度考虑, 设计高径比较大的提升管, 增加了传质距离和延长了传质时间, 使空气泡在管内上升的过程中, 大大增加了与液相和固相发生“碰撞”的机会, 从而获得大量的细胞。这种“碰撞”也加速了对反应生成的气体的排出, 促进了碳氮有机物的消耗。另一方面, 提升管内的中心区与边壁区的湍动流化状态, 不仅促进了细胞的生产, 而且这种载体生物膜间一定程度的频繁碰撞, 有利于生物膜的新老更替和微生物的新陈代谢。

另外, 整个膜法 SBR 工艺在流化床反应器中载体生物膜沉降性能良好, 完全未出现污泥膨胀现象, 无需外加搅拌装置。

2.4 COD 和 NH₄⁺-N 的去除效果

图 1 为该工艺处理有机废水的 9 个不同周期 COD 的变化曲线。从图中 1 可以看出, 除周期 1、8、9 外, 即当有机废水的 COD 浓度范围在约为 600~1400 mg/L, 容积负荷为 1.78~4.15 kgCOD/m³·d 时, 有较好的 COD 去除效果, 其去除率均在 90%以上, 其中除个别周期外, 其出水 COD 均在 100 mg/L 以下, 表明该工艺具有良好的出水稳定性。

图 1 中相应周期的 NH₄⁺-N 去除效果如图 2 所示。其中周期 1 表明, 太低的 COD 值使得 NH₄⁺-N 去除率下降, 在 70%以下。随着 COD 值的增长, NH₄⁺-N 值也随之增长, 但 NH₄⁺-N 的去除率却在一段时间内呈上升趋势。虽然在周期 7 出现了一次较为明显的下降, 但整



体上, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率均在 70% 以上, 除周期 7、9 外, 其余周期出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度均在 15 mg/L 以下, 表明该工艺具有良好的出水水质。对周期 9 而言, COD 浓度高达 2 026.6 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高达 121.8 mg/L, 其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率仍能达到 85% 以上, 出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 值在 20 mg/L 以下, 表明在碳源充足的情况下, 该工艺具有更高的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除潜力, 这为研究本工艺对高浓度废水的处理提供了实践和理论的基础。

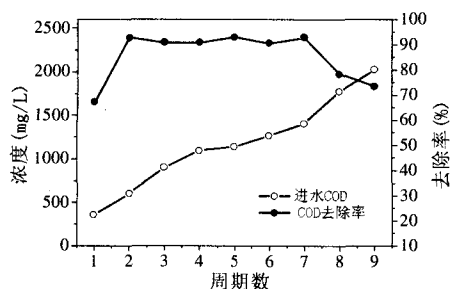


图1 该工艺的 COD 浓度适宜处理范围

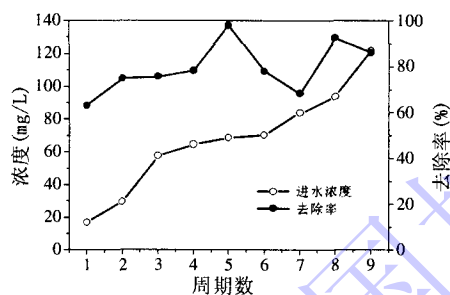


图2 该工艺的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 适宜处理范围

2.5 高浓度废水的去除潜力

本工艺是在正交实验下的研究结果, 确定其曝气量为 40 L/h, 从图 1 和图 2 还可以看出, 它对 COD 浓度约为 600~1 400 mg/L 的范围内最为适用, 但对高浓度有机废水而言, 因其对溶解氧需求量更大, 则在该曝气量下就不一定适用。因此, 本试验还考察了该工艺对高浓度废水的去除潜力。针对图 1 和图 2 中周期 9 的高浓度有机废水, 其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率虽然能达到 85% 以上, 但 COD 的去除率却不高, 在 80% 以下的情况, 保持原有曝气时间不变, 做了不同气量下的处理效果探索性实验。结果可看出, 随着曝气量的逐渐增加至 60 L/h 时, COD 的去除率也提高至 89.5%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除率提高至 96.5%, 出水浓度分别为 213.0 mg/L 和 42 mg/L。但进一步增大曝气量至 100 L/h 时, COD 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效果明显下降, 当曝气量增至 120 L/h 时, COD 的去除效率又上升至 90.4%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效果也略有上升。这表明在高曝气量下运行, 虽对有机物的去除有利, 但

体系的溶解氧过高, 会对反硝化脱氮有抑制作用, 从而影响总氮 (TN) 的脱除, 而且过高的曝气量还会引发丝状菌膨胀现象的发生。此外, 从节能的角度考虑, 也不宜采用过高的曝气量。因此, 正确的选择曝气量, 有助于提高工艺的去除效果和节能。本文认为, 在去除 COD 浓度高达 2 026.6 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高达 121.8 mg/L 的有机废水时, 采用 60 L/h 的曝气量较为合适。

3 结 语

以多孔高分子载体为固相的三相循环生物流化床反应器具有以下优点: 载体颗粒均匀; 系统流态化稳定, 能耗低 (实验所用曝气量为 40 L/h); 氧利用率高等优点。整个膜法 SBR 工艺在流化床反应器中载体生物膜沉降性能良好, 完全未出现污泥膨胀现象, 无需外加搅拌装置。

该工艺在流化床反应器中处理 COD 浓度范围为 600~1 400 mg/L, 容积负荷范围为 1.78~4.15 kgCOD/m³·d 的有机废水, 其 COD 去除率能高达 90.0% 以上, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率能高达 70.0% 以上。若正确的选择曝气量, 该工艺具有处理高浓度废水的潜力, 在去除 COD 浓度高达 2 026.6 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高达 121.8 mg/L 的有机废水时, 采用 60 L/h 的曝气量, 其去除率分别为 89.5% 和 96.5%, 出水浓度分别为 213.0 mg/L 和 4.2 mg/L。

参考文献:

- [1] 蔡平, 俞芷青, 等译. 气液固流态化工程 [M]. 北京: 中石化出版社, 1989, 368-384.
- [2] Sen Priyali, Dentel Steven K. Simultaneous Nitrification-denitrification in a Fluidized Bed Reactor [J]. Wat Sci Tech., 1998, 38(1): 247-254.
- [3] 蔡建安. 三相气提式循环流化床处理焦化废水 [J]. 水处理技术, 1997, 23 (2): 110-114.
- [4] 方佩珍, 潘永亮, 黄卫星. 低密度多孔颗粒在三相循环床中的流动特性研究 [J]. 四川大学学报 (工科版), 2003, 6 (35): 49-53.
- [5] 陈小光. 膜法 SBR 工艺在流化床中处理有机废水的研究 [D]. 四川大学, 2004.
- [6] Bai D R, Jin Y, Yu Z Q, Zhu J X. The axial distribution of the cross-sectionally averaged voidage in fast fluidized beds [J]. Power Tech., 1992, 71: 51-58.
- [7] 张统, 方小军, 张志仁编. SBR 及其变法污水处理与回用技术 [M]. 2003, 358-362.
- [8] 李世明, 王淑莹, 彭永臻, 等. 以 DO 作为 SBR 法处理豆制品废水的控制参数 [J]. 哈尔滨商业大学学报 (自然科学学报), 2002, 18 (5): 537-540.
- [9] 邓良伟. 水解-SBR 工艺处理规模化猪场粪污研究 [J]. 中