

二级串联生物造粒流化床对有机物的去除特性研究

李忠民 王晓昌 刘金光 朱蕊 邹林琳 李侃

(西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要 为了考察延长水力停留时间对改善生物造粒流化床对有机物去除效果的影响,进行了二级串联生物造粒流化床的工艺试验,在每隔 12 h 进行串联顺序交替的运行条件下,两柱中的颗粒污泥均能保持 108 个/g 数量级的生物量,且在作为二级柱运行的过程中,流化床仍能保持良好的颗粒污泥形态。两级串联的流化床中, COD_{Cr} 的去除和 DO 的消耗具有延续性,且 COD_{Cr} 的去除符合相近的一级反应规律。研究表明,生物造粒流化床中的颗粒污泥具有良好的动态稳定性,采用二级串联的方法延长流化床的水力停留时间有望作为提高生物造粒流化床污水处理功效的方法。

关键词 生物造粒流化床 二级串联 颗粒化 动态稳定性

Characteristics of organic removal by a fluidized pellet-bed bioreactor under 2-stage serial operation

Li Zhongmin, Wang Xiaochang, Liu Jinguang, Zhu Rui, Zou Linlin, Li Kan

(Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to understand the removal of organic matter in the fluidized pellet bed (FPB) bioreactor by extending hydraulic retention time (HRT), a 2-stage serial FPB bioreactor was used for laboratory experiment. Under a condition of changing the sequence of the two reactor columns every 12 hours, a biomass concentration of 108 ind./g could be maintained and the sludge particles could keep good granular shape in both columns. The removal of COD_{Cr} and consumption of DO showed a continuity in the two columns. A first order kinetic relationship could be found for COD_{Cr} in both columns with quite similar kinetic coefficients. The results indicated that the granular sludge in the FPB had very good dynamic stability, and the 2-stage serial FPB operation could provide an effective way to extend HRT and to improve the efficiency of pollutant removal.

Keywords: Fluidized pellet bed bioreactor; 2-stage serial; Granulation; Dynamic stability

0 前言

颗粒污泥处理技术是近年倍受关注的污水处理技术,代表了技术发展的一个重要方向^[1]。造粒流化床(Fluidized pellet bed, FPB)是针对高浊度和高 SS 悬浊液的高效固液分离水处理技术,该技术通过

合理的控制无机盐和有机高分子絮凝剂的投加和混合条件,对微小粒状污染物进行微脱稳,然后导入上向流搅拌反应装置,通过初始反应阶段形成高浓度、大粒径的颗粒流化床,完成自我造粒过程。关于在流化床操作条件下水中悬浊质自我造粒(Self-pelleting)的机理和动力学原理已有系统研究^[2,3]。

生物造粒流化床把颗粒污泥水处理技术和造粒流化床高效固液分离水处理技术有机地结合起来,

国家自然科学基金资助项目(50778148);国家水体污染与控制重大专项课题(2008ZX07317-004)。

是近年发展起来的一种集混凝、造粒、生物降解、固液分离于一体的污水处理系统^[4,5]。FPB 反应器的生物量并不像传统的活性污泥法的生物单元一样存在于类絮体的活性污泥中,而是存在于结构紧密的球形颗粒中^[6],且采用化学方法诱导的颗粒污泥与 SBR 反应器中好氧颗粒污泥和 UASB 反应器中的厌氧颗粒污泥在污泥特性、形成机理、微生物特性和污染物转移和降解过程上均有明显的不同,以往对流化床内颗粒的动态稳定性和床层高度对有机物去除的影响少见报道,鉴于此,采用流化床二级串联运行工艺,并以 12 h 为周期交换一二级柱的顺序,进行长期连续运行试验,对污染物的去除特性进行进一步的研究。

1 试验方法

1.1 试验装置

二级串联生物造粒流化床装置见图 1。

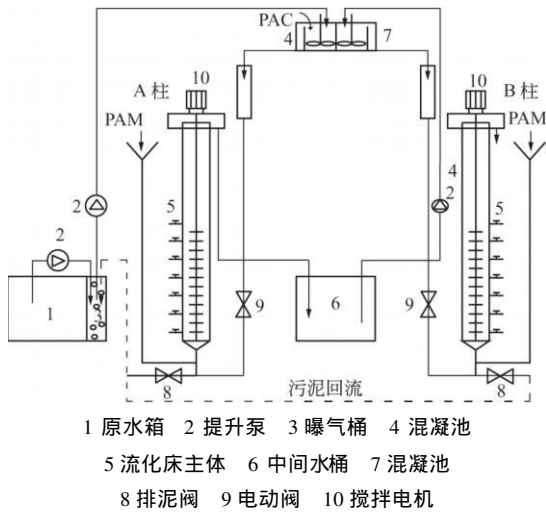


图 1 生物造粒流化床污水处理系统工艺流程

两套相同的生物造粒流化床装置可单独运行也可串联运行,串联运行条件是通过流化床颗粒动态稳定性试验来确定的。原水从原水箱由提升泵泵入曝气桶曝气后,再提升至絮凝池进行 PAC 絮凝反应,之后由自流进入一级生物造粒流化床,进行混凝造粒和生物降解过程,一级出水由流化床上部溢流堰溢流汇入中间水箱,再由提升泵提升进入混凝池,此时混凝池只起过渡作用,不投加聚氯化铝 (PAC),经过渡后一级出水进入二级生物流化床继续混凝造粒和生物降解,出水外排。流化床内泥床长到 130 cm 时,采用底部排泥阀排泥到 110 cm,并部分回

流到曝气桶中,维持其中的生物量和 SS 浓度。

生物造粒流化床主体装置为有机玻璃制造,一级床和二级床均为内径 50 mm、高 150 cm 的有机玻璃柱,两者的有效高度均为 110 cm,缓冲区高度 40 cm,且串联次序可以通过管路控制进行串联次序切换,对应的混凝池 4 和混凝池 7 则通过投加 PAC 与否在混凝和过渡功能之间进行切换。一级床和二级床串联次序的切换频率为每 12 h 切换 1 次,一级柱投加混凝剂 PAC 和助凝剂聚丙烯酰胺 (PAM),二级柱只投加一定量的 PAM。

1.2 装置运行操作条件

利用曝气泵在曝气桶对原水进行充氧,曝气桶水力停留时间 2 h,此时流化床进水溶解氧稳定在 8 mg/L 左右;混凝池水力停留时间 5 min,搅拌强度 200 r/min, PAC 投加量 50 mg/L;流化床上升流速 1 mm/s,搅拌速度 55 r/min,为提高混凝造粒效果,尚需在流化床中投加一定量的助凝剂 PAM,投加量 3 mg/L。为了提高二级柱颗粒的动态稳定性, PAM 投加量为 1 mg/L。

1.3 试验水样

原水用氯化铵、磷酸二氢钾、乙酸钠、高岭土配制,并投加一定量的硫酸镁、氯化钙、硫酸亚铁作为微量元素。具体水质条件见表 1。

表 1 试验原水水质

原水指标	SS/mg/L	COD _{Cr} /mg/L	NH ₃ -N/mg/L	TP/mg/L
浓度	50	300	30	10

注:微量元素组分: FeCl₃ · 6H₂O: 0.454 5 mg/L, CuSO₄ · 5H₂O: 0.009 1 mg/L, MnCl₂ · H₂O: 0.036 4 mg/L。

2 结果与分析

2.1 生物流化床的启动过程

接种污泥取自西安市北石桥污水处理厂氧化沟末端,取接种污泥 5 L 一次性投入曝气桶, SS 约 1 500 mg/L,再加入所配制的原水至曝气桶有效容积,之后曝气桶开始曝气,启动流化床开始连续运行进行驯化,1 h 能出现颗粒污泥,10 h 后能形成较稳定的颗粒污泥流化床,然后两柱开始串联运行。驯化期间流化床内生物量变化如图 2 所示。

由图 2 可知,流化床启动初期,生物量仅为 3.01 × 10⁶ 个/g,随着驯化时间的延长,流化床内生物量开始迅速增加,第 3 天后即可增加至 3.5 × 10⁷

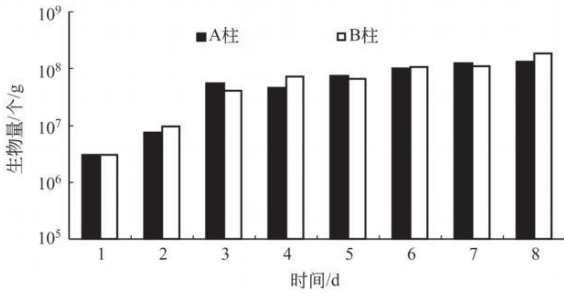


图2 生物量增殖情况

个/g, 较第1天增加了一个数量级。第6天后生物量可以稳定在 1.07×10^8 个/g 以上, 污泥的球形度和凝聚沉降性能好, 含有大量的菌胶团和纤毛虫原生动物, 污水出水水质稳定, 表明驯化成功。传统活性污泥处理系统, 在一般污水浓度和水温在 15°C 以上的条件下, 要10天左右才能达到上述状态, 而且在生物接种期系统不能连续运行^[7], 流化床工艺接种驯化所需的时间比传统活性污泥法要短, 并且接种期间也可以连续运行。

2.2 颗粒动态稳定性试验

为研究颗粒的动态稳定性, 两组流化床先并联运行, 待泥床高度达110 cm后改为串联运行。分别取自来水和一级出水为二级柱进水, 考察两种情形下二级柱内部污泥颗粒的动态稳定性。对于前者, 流化床运行4 h后, 床体内部颗粒开始破碎, 出水浑浊, 颗粒变小, 泥床上浮; 对于后者, 颗粒在运行6 h左右的时候开始破碎, 破碎过程与前者类似。

为了提高后者颗粒稳定性, 向二级柱内投加少量的PAM, 试验表明1 mg/L的投加量可使二级柱稳定运行12 h以上而不发生颗粒破碎的现象。据此确定流化床的串联运行周期为12 h。

2.3 双柱串联交替运行情况

在双柱串联交替运行条件下, 单柱内部不同床高处污泥颗粒粒径随运行时间变化情况如图3所示。

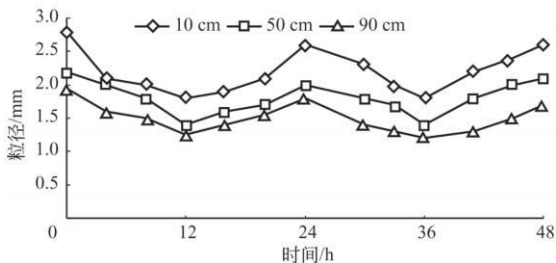


图3 生物造粒流化床中颗粒粒径变化

由图3可知, 流化床的串联次序对污泥颗粒粒径影响较大。当流化床作为二级柱运行时(0~12 h, 24~36 h), 颗粒粒径随运行时间的延长有降低的趋势; 而作为一级柱运行时(12~24 h, 36~48 h), 则有增加的趋势。这种变化趋势的差异主要是由串联次序交换后进水水质的改变所致。流化床作为一级柱和二级柱运行时, 进水分别为原水和一级柱出水, 后者较前者而言, 可混凝污染物的含量明显减少, 不能提供足够的原始颗粒供流化床进一步的结团絮凝, 因而颗粒粒径逐渐减小。进一步分析可知, 流化床内污泥颗粒的变化呈明显的周期性。虽然流化床作为二级柱运行会导致污泥颗粒粒径的减小, 但改为一级柱运行后, 污泥颗粒可逐渐成长并最终恢复到原来的水平。污泥粒径的这种周期性变化, 为流化床长期稳定运行提供了有利条件。

2.4 COD_{Cr}与DO的纵向分布

图4中10~110 cm高度所显现的关系分别表示DO和COD_{Cr}在一级柱中的消耗和降解情况, 130~230 cm则为在二级柱中的情况。由图可知, 在两级串联流化床中, COD_{Cr}的去除和DO的消耗具有延

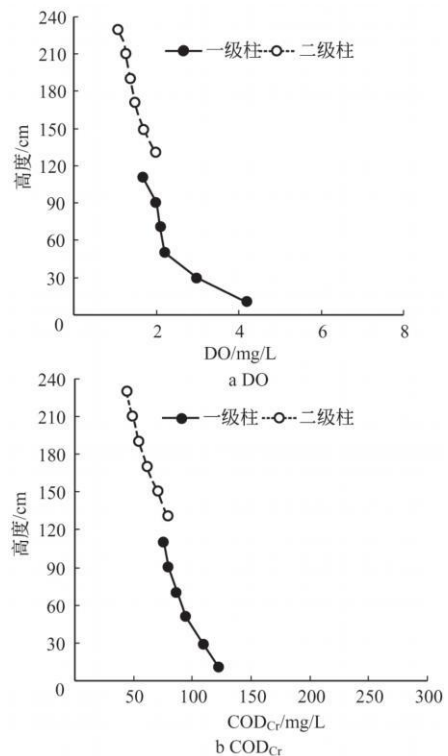


图4 流化床内部DO和COD_{Cr}沿床高分布

续性,并且二级柱在一级柱的基础上,能进一步的提高 COD_{Cr} 的去除效果。

流化床中水流上升流速为 1 mm/s ,把流化床高换算成时间,以 $\ln COD$ 为纵坐标,时间为横坐标作图(见图5),发现两柱中 COD_{Cr} 与时间线性关系明显,即都满足 $\ln C = \ln C_0 - kt$ 的关系式,进一步分析发现这种关系符合一级反应方程式 $dC/dt = -kt$,表明流化床中的反应是一级反应。由于两组线性方程中的斜率分别为 $k_1 = -0.0473$ 和 $k_2 = -0.0357$,可以认为 COD_{Cr} 的降解在一级柱和二级柱符合相近的一级反应规律。

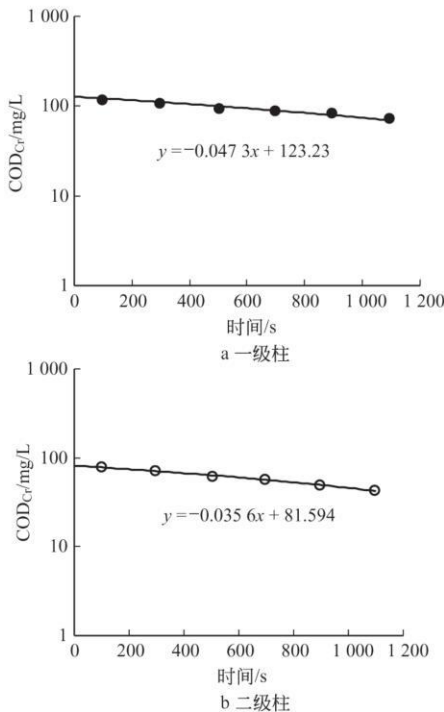


图5 流化床内部 COD_{Cr} 随时间变化

3 讨论

3.1 生物造粒流化床的快速启动性质

装置启动约 1 h 后即开始出现颗粒污泥,约 10 h 后形成较为稳定的颗粒污泥流化床,且随运行时间的推移,颗粒污泥球形度越加良好,数日后即达到完全稳定的状态,床内生物量生长迅速,从开始启动第3天后即可增加至 3.5×10^7 个/g,其启动到稳定运行的时间要比传统活性污泥法短的多。在稳定的工作条件下,从流化床底部进入的微小颗粒与流化床中悬浮颗粒之间的反应属于粒径和浓度相差悬殊的两

种颗粒之间的反应,由于颗粒属于微脱稳状态,其与浓度高,表面积大的悬浮颗粒之间的结合力要远大于微小颗粒之间的结合力,因此,颗粒的结合和成长以微小颗粒在悬浮颗粒表面的逐一附着方式进行,所以泥床成长很快,而且颗粒形态应该很适合微生物的附着生长。

3.2 有机物(COD_{Cr})的去除特性

试验表明,预曝气对有机物的去除能达到 50% 左右,曝气桶的预曝气部分相当延时曝气工艺,流化床中颗粒吸附的有机物,其生物还没有来得及降解的部分在这里去除。对于一级柱和二级柱而言,由于在自我造粒流化床中,相同吸附质浓度越大,颗粒对吸附质的吸附量越大^[8],所以前者的吸附作用较后者要明显,而且这个过程中吸附平衡很快能够达到,在水力停留时间 25 min 里,污染物先由液相向固相转移,在固相中实现微生物的原位生化降解过程。颗粒提供可供微生物附着的固体表面可认为是促进颗粒污泥快速形成的重要途径之一。助凝剂 PAM 的加入,在形成凝胶时可将微生物细胞包埋在凝胶内部从而达到固定细胞的目的^[9],从而为有机物原位生化降解的实现提供条件。

3.3 高效 COD_{Cr} 去除的机理

曝气桶中的延时曝气对有机物的降解作用是显而易见的,颗粒吸附的有机物主要由曝气桶中的生化作用来去除。混凝造粒过程让污染物由液相到固相的转移得以实现,初期形成的颗粒污泥则能为微生物的附着和繁殖提供大量的固体表面,因此,从微生物生长的角度而言,后期的流化床操作已类似于预加载体的生物流化床装置。从污染物去除的角度而言,在这一过程中起重要作用的可能既包括混凝本身的作用(可凝聚污染物的直接转移),也可能包括物理吸附(Adsorption)、生物吸附(Biosorption)、以及生物降解的作用^[10],这与运用造粒流化床进行悬浊液固液分离时的单纯物理化学作用基本相同,因此,二级串联生物造粒流化床是集生化—混凝—吸附—固液分离于一体的高效 COD_{Cr} 去除工艺。

4 结论

(1) 生物造粒流化床能为微生物提供良好的生存繁殖条件,运行过程中两柱均能保持 10^8 个/g 数量级的生物量。

西安市西南郊污水处理厂工艺设计介绍

谢纯德¹ 马耀平¹ 高荣宁¹ 刘毅² 周文献¹ 朱文涛¹ 王社平¹

(1 西安市市政设计研究院, 西安 710068; 2 中国市政工程西北设计研究院, 兰州 730000)

摘要 西安市西南郊污水处理厂污水处理采用 DE 氧化沟+紫外线消毒工艺, 污泥处理采用机械浓缩和离心脱水一体化处理系统, 再生水处理采用高密度沉淀池+V 型滤池过滤工艺。工程设计一期建设规模为 $8 \text{万 m}^3/\text{d}$, 其中 $1.5 \text{万 m}^3/\text{d}$ 二级生化处理出水经深度处理后再生利用。介绍了该工程的设计进出水水质指标确定、主要构筑物的工艺设计参数以及工艺设计特点。

关键词 设计水质 DE 氧化沟工艺 高密度沉淀池 V 型滤池 设计参数

1 工程概况

西安市西南郊污水处理厂是西安市利用日本国际协力银行贷款环境综合治理二期项目之一, 位于西安高新技术开发区的西南部, 西汉高速路以北, 西三环以西。主要接纳和处理西安高新技术开发区一、二期和拓展区以及长安科技产业园区的生活污水和工业企业生产废水, 服务区域面积约为 48.27 km^2 。规划远期建设规模为 $20 \text{万 m}^3/\text{d}$, 近期建设规模为

$8 \text{万 m}^3/\text{d}$ 。全区工业企业以电子、医药、进出口加工和汽车制造业为主, 居民生活污水与工业企业的生产废水相混合, 由厂区西侧的污水总管进入污水处理厂, 经二级生化处理后的出水除排入污水处理厂西侧的太平河外, 其余经深度处理后用于厂区南侧的集中供热站锅炉循环冷却用水和市政道路及园林绿化用水。该项目由西安市市政设计研究院和中国市政工程西北设计研究院有限公司联合设计, 按

(2) 在二级串联交替运行过程中, 流化床中的颗粒能保持良好的动态稳定性。

(3) 采用二级串联工艺后, 总的水力停留时间延长, 有效处理泥床高度加倍, 污染物的去除得到强化。

(4) 两级串联流化床中, COD_G 去除和 DO 消耗具有延续性, 且 COD_{Cr} 去除符合相近的一级反应规律。

参考文献

- 1 Yan Y G, Tay J H. Characterisation of the granulation process during UASB start-up. *Water Research*, 1997, 31 (7): 1573 ~ 1580.
- 2 王晓昌, 丹保宪仁. 絮凝体形态学和密度的探讨—I. 从絮凝体分形构造谈起. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 257~ 262
- 3 王晓昌, 丹保宪仁. 絮凝体形态学和密度的探讨—II. 致密型絮凝体形成操作模式. *环境科学学报*, 2000, 20(4): 385~ 390
- 4 Wang X C, Yuan H L, Liu Y J, et al. Fluidized-pellet-bed bioreactor: a promising technology for onsite wastewater treatment and reuse-Part 1. Characteristics of treatment. *Wastewater Reclamation & Reuse for Sustainability*, IWA

Specialty Conference. Jeju Korea: IWA, 2005.

- 5 Wang X C, Yuan H L, Liu Y J. Fluidized-pellet-bed bioreactor: a promising technology for onsite wastewater treatment and reuse-Part 2. Microbiological Characteristics. *Wastewater Reclamation & Reuse for Sustainability*, IWA Specialty Conference. Jeju Korea: IWA, 2005.
- 6 刘永军, 袁宏林, 王晓昌, 等. 生物造粒流化床污水处理反应器中微生物的分布特征. *生态科学*. 2007, 26(1): 75~ 78
- 7 张自杰, 林荣忱, 金儒霖, 等. 排水工程(下册). 第4版. 北京: 中国建筑工业出版社. 2004. 194~ 196
- 8 李佳育, 李金容, 王振. 自我造粒流化床中颗粒对不同吸附质的吸附特性研究. *环保科技*, 2009, 15(1): 44~ 48
- 9 邵春利, 李靖. 好氧颗粒污泥的形成机理及其影响因素. *给水排水*. 2007, 33, (增刊): 36~ 39
- 10 袁宏林, 刘永军, 王晓昌. 生物造粒流化床污水处理反应器中微生物生长比较分析. *环境科学学报*, 2000, 27(6): 973~ 978

& 通讯处: 710055 西安市雁塔路13号西安建筑科技大学环境学院

电话: 13474297846

E-mail: lizhongm_88@163.com

收稿日期: 2009-10-28