

生物造粒流化床中颗粒污泥的物理性质及破碎与恢复特性研究

王晓昌, 邹林琳, 李 侃, 朱 蕊, 李忠民, 刘金光

(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, 陕西 西安 710055)

摘 要: 通过两套生物造粒流化床试验装置的并联和串联运行, 运用摄影与图像分析、颗粒静沉和密度分析等方法, 研究了流化床中颗粒污泥的物理性质及破碎与恢复特性. 在作为一级柱(接受人工配置污水)运行的过程中, 流化床主要经历了颗粒成长; 在作为二级柱(接受一级柱出水)运行的过程中, 流化床主要经历了颗粒破碎. 试验结果表明, 在多次轮回切换工作的过程中, 流化床中的颗粒污泥具有动态稳定性, 破碎的颗粒很容易得到恢复. 颗粒污泥的有效密度随粒径而变化的趋势不明显, 粒径-密度关系在双对数坐标图上始终处于同一领域, 且远高于常规絮凝体的密度, 表明流化床中形成的颗粒污泥具有密实的构造.

关键词: 生物造粒; 流化床; 颗粒污泥; 粒径分布; 有效密度

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1006-7930(2010)01-0060-05

生物造粒流化床是将造粒流化床高效固液分离技术扩展到污水处理领域的污水处理新技术. 其特点是在一个处理单元内通过物化方法和生化方法的有机结合, 同时完成化学混凝、污泥造粒、生化降解、固液分离等多个过程. 实际城市生活污水直接处理的实验研究结果表明, 在优化运行的条件下, 生物造粒流化床的 SS、COD、BOD、TP 去除率可达到 90% 以上, TN 去除率也能达到 50% 左右^[1], 颗粒污泥中丰富的微生物含量和生物多样性^[2], 以及高浓度颗粒污泥对溶解性污染物的良好吸附性能^[3] 是其具备高效污染物去除特性的主要原因. 在生物造粒流化床作为独立污水处理单元的操作中, 一个很重要的问题是颗粒污泥的稳定性和抗干扰能力. 为此, 本文通过实验室小型装置的试验, 考察了在周期性改变流化床进水负荷的条件下, 床内颗粒污泥的粒径分布、密度等物理性质的变化规律, 在此基础上对颗粒污泥的破碎与恢复性能进行了评价.

1 实验方法

1.1 装置与实验操作

本实验采用的生物造粒流化床装置如图 1 所示. 装置的主体是两组内径为 50 mm, 高度为 150 cm 的生物造粒流化床柱(有机玻璃柱), 两柱既可以单独或并联运行, 也可以串联运行. 实验用污水为人工模拟污水, 采用乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾分别作为水中碳、氮、磷的来源, 高岭土作为悬浮固体的来源, 并投加一定量的硫酸镁、氯化钙、硫酸亚铁作为微量元素. 原污水中主要物质的浓度为: SS 20 mg/L、COD 300 mg/L、NH₃-N 30 mg/L、TP 10 mg/L. 污水通过定量泵从原水箱泵入预曝

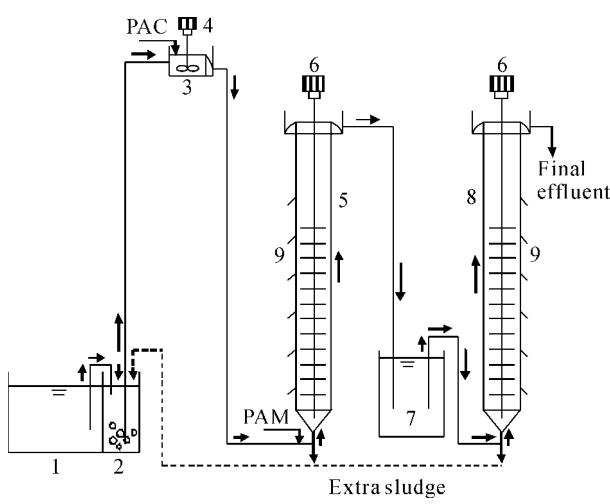


图 1 生物造粒流化床实验装置图
Fig. 1 Diagram of the experimental setup of the fluidized pellet bed bioreactor

*收稿日期: 2009-10-28 修改稿日期: 2009-11-22
基金项目: 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)
作者简介: 王晓昌(1953), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 主要从事污水处理与再生利用理论与技术的研究.
©1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气池, 在运行初期, 曝气池内投入一定量活性污泥进行微生物接种和培育, 稳定运行条件下的预曝气时间为 2 h. 预曝气后的原水定量泵入高位混合搅拌槽, 与投加的聚合氯化铝(PAC, 投量 50 mg/L) 均匀混合后重力流进入流化床底部, 同时瞬时注入聚丙烯酰胺高分子混凝剂(PAM, 投量 2 mg/L). 通过流化床顶部的搅拌器提供床内的机械搅拌(转数 50 r/min). 在稳定运行的条件下, 床内形成颗粒污泥的流化床, 流化床高度控制在 110~ 130 cm 之间, 剩余污泥从底部排出. 流化床上升流速为 1 mm/s, 从而床内水力停留时间为 25 min. 处理水从顶部出水堰收集. 在并联运行时, 两柱的操作条件完全相同. 在串联运行时, 一级柱操作条件不变, 二级柱的进水则为一级柱的出水, 但不再投加 PAC 和 PAM, 其它操作条件不变. 此时, 二级柱进水的污染物负荷仅为一级柱的残余污染物. 由于一级柱流化床的良好固液分离性质, 二级柱的 SS 负荷几乎为零. 两个流化床柱可以交替工作, 即定时进行一级柱和二级柱的倒换. 两柱在不同高度上设有取样口, 根据需要进行颗粒污泥的采样.

1.2 颗粒污泥的粒径和密度分析

流化床内颗粒污泥的粒径分析采用图像分析法. 即沿流化床柱不同高度进行定焦距近拍摄影, 图像输入计算机后运用课题组开发的 Size Analysis 软件进行图像分析. 对于某一高度的颗粒图像, 一般连续不跳跃地选取 500 个以上的颗粒进行粒径分析, 根据分析结果得出粒径的体积累积分布, 同时得到代表性中值粒径(d_{50} , 即对应于 50% 累积体积的粒径).

颗粒密度分析采用粒径分析和单一颗粒静水沉降法. 即对于某一断面处采集的颗粒污泥, 随机选取若干颗粒, 应用特制沉降筒进行颗粒沉降试验, 摄影确定颗粒粒径, 通过纪录沉降高度和沉降时间计算颗粒的自由沉速, 然后计算颗粒的有效密度(水中的密度). 根据颗粒沉速公式^[4]

$$u = \left(\frac{4}{3} \frac{g}{C_d} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{4}{3} \frac{g}{C_d} \cdot \rho d \right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

得出颗粒有效密度为

$$\rho_t = \frac{3}{4} \frac{C_d u^2}{g d} \tag{2}$$

式中: u 为颗粒沉速(cm/s); d 为颗粒粒径(cm); ρ_s 为颗粒密度(g/cm³); ρ 为水的密度(g/cm³); C_d 为与绕流雷诺数 Re 有关的阻力系数.

$$C_d = \frac{24}{Re} Re^{0.82 - 0.05 \lg Re} \quad (0.02 < Re < 20) \tag{3}$$

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.1935 Re^{0.6305}) \quad (20 < Re < 260) \tag{4}$$

式中: $Re = \frac{100 \times u \times d}{\mu}$; μ 为动力粘滞系数(Pa · s)

2 实验结果

2.1 颗粒污泥的形成状态和粒径分布

如图 2 所示, 在稳定运行的条件下, 流化床内形成了良好的颗粒污泥. 一般来说, 经过 1 d 运行后即可形成表观形态良好的颗粒污泥, 但生物量等达到稳定需要 3 d 以上的运行时间.

图 3 为流化床不同高度(10 cm、50 cm、90 cm)处颗粒污泥粒径的体积累积分布曲线. 从图中可以看到, 在底部的 10 cm 处, 粒径的主要分布范围为 1.5~ 4.0 mm, 到中部的 50 cm 处, 粒径的主要分布范围则为 1.0~ 3.5 mm, 而上部的 90 cm 处, 粒径的主要分布范围进一步迁移到 0.8~ 3.0 mm, 从而呈现出沿高度粒径明显减小的趋势. 三个高度的 d_{50} 依次为 2.84、2.22、1.92 mm.

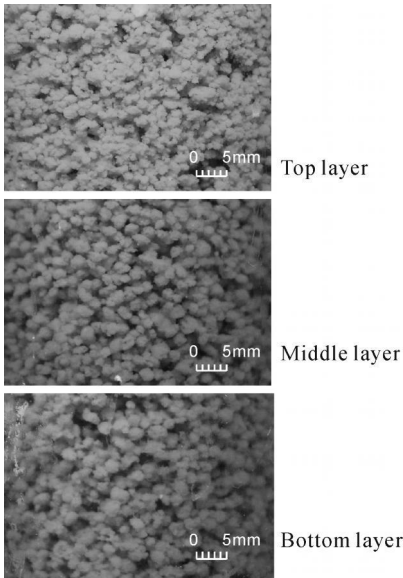


图 2 流化床内的颗粒污泥

Fig.2 Granular sludge particles in the FPB column

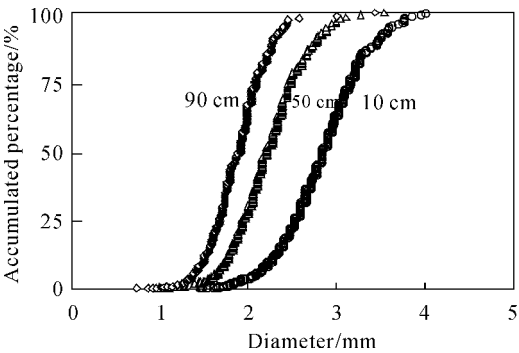


图 3 稳定操作条件下流化床内颗粒污泥的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of the granular sludge in the FPB column under stable operation condition

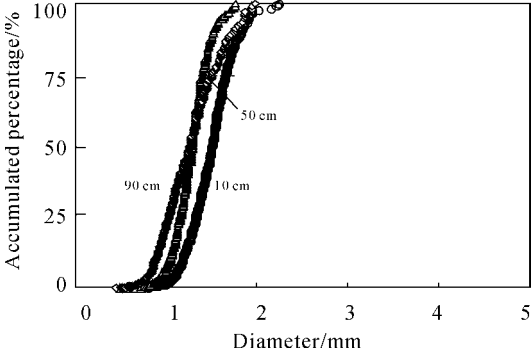


图 4 切换为二级柱工作 12 h 后流化床内颗粒污泥的粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of the granular sludge in as the FPB column worked as the second column in the series for 12 hours

2.2 两柱交替串联运行条件下粒径分布的变化

在两个流化床柱并联启动,均达到稳定运行的条件下,改变两柱的运行模式为串联运行,即一个流化床作为一级柱,继续原条件运行,另一个流化床作为二级柱,接受一级柱的出水作为进水.运行 12 h 后,两柱倒换,即原二级柱切换为一级柱,元一级柱切换为二级柱.此后每隔 12 h 进行一次交替切换,考察床内颗粒粒径的变化情况.

交替运行结果表明,在 12 h 之内,二级柱中的颗粒污泥仍能保持较好的粒状,但呈现出一些明显的变化特征:第一,随着作为二级柱时间的延续,首先流化床上部颗粒的粒径有减小的趋势;第二,随着上部粒径的减小,二级柱出水虽然能够保持清澈,但已有微小颗粒出现;第三,颗粒粒径的减小有逐渐向下部推移的趋势.而当二级柱切换为一级柱之后,流化床中颗粒粒径逐渐恢复,流化床出水中的微小颗粒很快消失.

图 4 为最先切换为二级柱的流化床中三个高度处的粒径分布曲线.与图 3 相比,各个高度颗粒的粒径虽还有一定的差别,但明显已相互接近,且粒径分布的范围明显缩小.

以流化床三个高度的 d_{50} 作为其代表粒径,做出最先切换为二级柱的流化床的粒径剖面在 0 h(切换前)、12 h(作为二级柱工作后)、24 h(恢复为一级柱工作后)以及又一个轮回的变化情况.可得到图 5 所示的结果.由此可见,流化床内的颗粒明显经历了破碎-恢复-再破碎-再恢复这样的往复过程.

2.3 多次轮回过程中颗粒密度的分析结果

对每次轮回后在流化床 10 cm、50 cm、90 cm 取样颗粒的有效密度进行分析,其结果如图 6 所示.在图示的双对数坐标上,可以看到不同时刻在不同高度的颗粒污泥密度有一定差别,但不很明显.对于同一组颗粒样品,有颗粒有效密度随粒径增大降低的现象,但分析的数据基本上都落入同一区域,说明在多次轮回切换的过程中,颗粒的粒径和有效密度之间的关系没有发生大的变化.

3 讨 论

生物造粒流化床内颗粒污泥的粒径分布是床内颗粒成长、剪切力作用下的颗粒破碎、以及上向水流作用下的颗粒分层等现象达到动态平衡的结果.在流化床柱作为一级柱工作期间,由于进入流化床的污水中含有较高浓度的 SS、COD 和其它污染物质,在 PAC 和 PAM 混凝剂的作用下,进入流化床的微小颗粒物以及可混凝的溶解性污染物和床内处于流化状态的高浓度颗粒污泥之间,一方面发生逐一附着模式的结合^[5],另一方面发生颗粒污泥对溶解性物质的吸附^[6].这两种过程对导致颗粒的成长.与此同时,过度成长的颗粒在水力、机械搅拌力以及颗粒污泥间碰撞摩擦的作用下也会发生破碎,对于粒径原超过平衡粒径的颗粒,颗粒破裂可能是主要的破碎模式,而对于较小的颗粒,表面磨损可能是主要的破

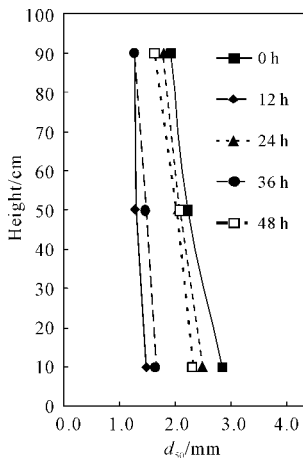


图 5 多次轮回过程中流化床内以 d_{50} 为代表的粒径剖面的变化情况

Fig. 5 Variation of the profile of d_{50} along the FPB height when it was shifted between the first and the second column for several times

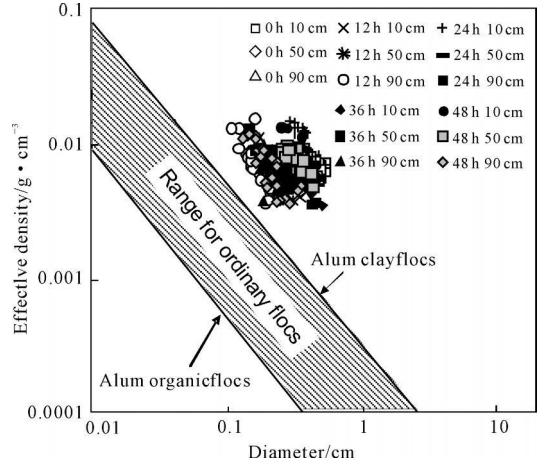


图 6 多次轮回过程中流化床不同高度处颗粒的有效密度

Fig. 6 Size density relationship of granular sludge particles when the FPB column was shifted between the first and the second column for several times

碎模式^[6]。破碎后粒径变小的颗粒会随着上升水流向上移动, 从而形成图 3 所示的粒径分布, 它是上述各种作用达到动态平衡的结果。

当流化床柱切换为二级柱后, 由于进入流化床的液体是一级柱的出水, SS、COD 和其他污染物质浓度很低, 从而在上述的各种作用过程中, 颗粒在水力、机械搅拌力, 尤其是颗粒污泥间碰撞摩擦的作用下发生破碎成为主要过程, 因此原有的动态平衡被破坏, 颗粒污泥发生以表面磨损为主的破碎, 形成图 4 所示的粒径分布, 不同高度处的粒径差别缩小。

流化床内形成的颗粒污泥有别于常规絮凝体的一个重要特征是其有效密度随粒径增大而降低, 随粒径减小而增大的趋势不明显^[7]。这一特点通过图 6 得到充分说明。在流化床多次轮回切换, 颗粒污泥多次经历破碎- 成长- 再破碎- 再成长的过程中, 颗粒的有效密度并未发生明显变化。在图 6 中, 为了将生物造粒流化床中颗粒污泥的密度与常规絮凝体的密度进行对比, 根据絮凝体密度公式^[8], 绘出了粘土类铝盐絮凝体 (Alum clay flocs) 和有机物铝盐絮凝体 (Alum organic flocs) 的粒径- 密度函数关系, 双对数坐标上两条直线之间可认为是常规絮凝体的密度分布范围。由此可见, 本实验得到的颗粒污泥的有效密度远高于常规絮凝体的密度, 说明通过生物造粒流化床操作形成的颗粒污泥具有更加密实的构造。

4 结 论

通过两套生物造粒流化床试验装置的并联和串联运行, 运用摄影与图像分析、颗粒静沉和密度分析等方法, 研究了流化床中颗粒污泥的物理性质及破碎与恢复特性。研究工作可得出以下结论:

(1) 在稳定工作的条件下, 生物造粒流化床内形成了良好的颗粒污泥, 由于床内颗粒成长和破碎的动态平衡和水力分层, 呈现出沿流化床高度颗粒污泥粒径明显减小的趋势。

(2) 在两柱串联运行的条件下, 二级柱中颗粒破碎起主要作用, 运行 12 h 后各个高度的颗粒粒径减小, 且不同高度的颗粒粒径趋于均匀化, 但颗粒形态仍能保持; 切换为一级柱后, 颗粒成长起主要作用, 破碎的颗粒得到恢复, 表明流化床内的颗粒具有良好的动态稳定性和自我恢复性。

(3) 多次轮回切换操作条件的流化床中, 颗粒污泥的有效密度随粒径而变化的趋势不明显, 粒径- 密度关系在双对数坐标图上始终处于同一领域, 且远高于常规絮凝体的密度, 表明流化床中形成的颗粒污泥具有密实的构造。

参考文献 References

[1] WANG XC, YUAN HL, LIU YJ, et al. Fluidised pellet bed bioreactor: a promising technology for onsite

- wastewater treatment and reuse [J]. Water Science and Technology, 2007, 55(1-2): 59-67.
- [2] LIU YJ, WANG XC, YUANG HL. Characterization of microbial communities in a fluidized pellet bed bioreactor for wastewater treatment [J]. Desalination, 2009, doi:10.1016/j.desal.2009.06.059
- [3] WANG XC, LI ZH, WANG Z, et al. Effectiveness of fluidized pellet bed for removing soluble contaminants [J]. J. Environmental Sciences, 2009, 21: 13-17.
- [4] GREGORY R, ZABEL TF, EDZWALD JK. Sedimentation and flotation[M] // Raymond D. Lettermann RD (ed.). Water Quality and Treatment 5th Edition. New York: McGraw-Hill, Inc., 1999.
- [5] TAMBO N, WANG XC. The mechanism of pellet flocculation in a fluidized bed operation [J]. Jour Water SRT-Aqua, 1993, 42(2): 67-76.
- [6] 李侃, 王晓昌, 王振, 等. 造粒流化床颗粒污泥对溶解性有机物的吸附机理研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(11): 42-46.
- LI K, WANG XC, WANG Z, et al. Mechanism of granule absorption for dissolved organic matters in fluidized pellet bed reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(11): 42-46.
- [7] 王晓昌, 丹保宪仁. 絮凝体形态学和密度的探讨(II) 一致密型絮凝体形成操作模式[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 385-390.
- WANG XC, TAMBO N. A study on the morphology and density of flocs (II): Operation modes for compact floc formation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(4): 385-390.
- [8] TAMBO N, WATANABE Y. Physical aspect of flocculation process I. The floc density function and aluminum floc [J]. Water Research, 1979, 13: 409-419.

Physical property of granular sludge in a fluidized pellet bed bioreactor and its breakage recovery characteristics

WANG Xiaochang, ZOU Lin-lin, LI Kan, ZHURui, LI Zhong-min, LIU Jin-guang

(Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology,
MOE, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The physical property of granular sludge generated in a fluidized pellet bed (FPB) bioreactor and its breakage recovery characteristics were investigated by laboratory experiment using two sets of FPB columns under parallel and series operation modes. Particle size distribution was measured by photographing and image analysis, and particle density was measured by single particle sedimentation method. By series operation, the first FPB underwent mainly particle growth, while the second FPB underwent mainly particle breakage. The experimental results indicated that the granular sludge particles had very good dynamic stability. The broken particles could easily recover their previous state. The effective density of the granular sludge did not show a tendency of variation of particle density with particle size as the ordinary flocs. The size density relation remained within a certain area in the log-log plot and with effective density much higher than the ordinary flocs, indicating that the granular sludge formed by FPB operation possessed a dense structure.

Key words: Biopelleting; fluidized bed; granular sludge; particle size distribution; effective density