

泳动床技术处理高浓度废水特性研究

杨宏¹, 杨佳丽¹, 张岩¹, 古川宪治²

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 2. 熊本大学自然科学研究院, 熊本 860-8555, 日本)

摘要:在泳动床反应器进水 COD 浓度为 2 400 ~ 4 600 mg/L, 容积负荷为 1.7 ~ 4.5 kg/(m³·d) 的运行条件下, 对污染物去除效果良好, COD 去除率均值达 96%, 系统平均硝化率为 80.7%。MLSS 最高可达到 23 g/L, 并能在高 MLSS 的同时保持 SVI 在 20 ~ 50 mL/g 的低范围内, 污泥沉降性很好。研究表明, 黏度和 MLSS 间服从指数相关, 并有颗粒化污泥絮体产生。通过 DNA 测定和显微镜观察, 反应器中生物种类多样, 从而保证了泳动床系统极低的污泥产率 (MLSS/BOD = 0.104 6 ~ 0.172 3), 实现了污泥减量。

关键词:泳动床技术; 高浓度废水; 污泥特性; 污泥减量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)02-0445-06

Characteristics of Sludge in Treatment of High Concentrated Organic Wastewater by Swim-Bed Technology

YANG Hong¹, YANG Jia-li¹, ZHANG Yan¹, Kenji Furukawa²

(1. Beijing Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environmental Restoration Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan)

Abstract: Based on the technology of conditional activated sludge process, swim-bed technology involving the novel biomass attachment material biofringe (BF) is one of the new and efficient advanced municipal wastewater treatments process. The process demonstrated effective treatment of high concentrated organic wastewater. When VLRs were from 1.7 kg/(m³·d) to 4.5 kg/(m³·d), 96% of average COD removal efficiencies and 80.7% of nitrification rate were achieved, respectively. The BF material allowed for attachment of large amounts of biomass. The mixed liquor suspended solid (MLSS) concentrations in the reactor reached 23 g/L at the highest during operation period, with holding 20-50 mL/g of SVI. An exponential law was found to be suitable to describe the variation of the viscosity as a function of MLSS. The granulation phenomenon of sludge was observed during the experiment. Protozoan and metazoans on the bio-film and suspended sludge were proved existing in the system by microscopic observation and DNA experiment. Observed sludge yields from 0.104 6 to 0.172 3 (MLSS/BOD) were obtained in swim-bed system.

Key words: swim-bed technology; high concentrated organic wastewater; characteristics of sludge; sludge reduction

活性污泥法从诞生到现在已经有一百多年的历史, 是目前应用最广泛的污水生物处理工艺, 世界上超过 90% 的城市污水处理都是采用活性污泥法^[1]。但传统的活性污泥污水处理系统大多存在缺点, 如对冲击负荷敏感、反应器体积庞大及负荷较低等, 尤其是剩余污泥的处置问题是所有运用活性污泥法的污水处理厂都要面临的一个难题, 据估计剩余污泥的处置费用占整个污水处理费用的 65%^[2], 而且, 污泥处置不当还会产生二次污染。

利用亲水性丙烯酸树脂纤维 Biofringe (BF) 的泳动床技术是在活性污泥法的基础上发展起来的一种污水生物处理新技术。该工艺不但拥有活性污泥法的优点, 又因为加入了高性能的 BF 填料而将悬浮生长工艺和附着生长工艺合为一体, 提高了污水处理能力与稳定性。Rouse 等^[3]考察了泳动床系统对污水的高效处理; 张岩等^[4]将泳动床技术与好氧颗粒

污泥技术结合起来处理生活污水。

本研究对泳动床系统处理高浓度污水过程中表征污泥性状的理化参数, 如 MLSS、SVI、黏度、颗粒化程度、生物相、污泥产率等以及这些污泥参数之间的关系进行了探讨, 以期为该技术的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 泳动床反应器共分 4 格, 有效容积共为 34 L。BF 槽内通过内隔板将反应池分为上向流区和下向流区 2 部分, 曝气头设置在上向流区的底部, 透过单侧曝气使混合液高速循环, 曝气量为 10 L/min。其它各槽与传统活性污泥法相同, 曝

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-04-06

作者简介: 杨宏 (1963 ~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: yhong@bjut.edu.cn

气量以 DO 浓度不低于 2 mg/L 为准. 4 个槽中只有 BF 槽为高性能新型生物载体 Biofringe 填充区, 即泳动床区, 单槽填充率为 50%, 其它 3 槽未填充, 全槽填充率为 14.7%. 各槽串联连通, 整个系统为连续流好氧系统. 沉淀池有效容积为 2 L, 污泥回流比为 100%.

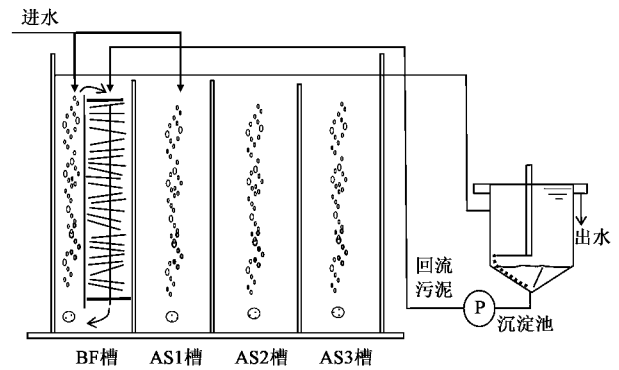


图 1 泳动床系统实验装置
Fig.1 Schematic diagram of swim-bed system

1.2 填料

实验所用的生物载体为 Biofringe, 是由亲水性丙烯酸树脂纤维制成, 主要技术参数如表 1 所示.

表 1 填料的技术参数 Table 1 Characteristics of the carrier			
项目	规格	项目	规格
直径/mm	100	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	3 410
长度/mm	520	填料名称	Biofringe
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.8	填料厂家	NET 株式会社

1.3 原水水质和运行条件

实验用水是由鲢鱼肉和面粉用地下水按一定比例混合模拟水产工业后续废水. 进水中 BOD_5 含量占 COD 的 67% 左右, C/N 为 10:1. 试验用地下水中微量元素含量 (mg/L) 为: Na^+ 19; K^+ 6; Ca^{2+} 20; Mg^{2+} 7; SO_4^{2-} 24. 运行温度在 25℃ 左右. 取实验室培养的活性污泥为种泥, 污泥浓度为 3 g/L. 实验运行条件如表 2 所示. 实验分 5 阶段运行, 通过调节进水流量, 改变进水 COD 浓度来考察不同 COD 负荷下的运行情况, 以及污泥特征.

1.4 分析方法

COD 采用重铬酸钾回流法测定^[5]. BOD 用呼吸计测定 (BOD 仪, Hach Co., Ltd., Loveland, CO). pH 用 pH 仪测定 (IM-22P; TOA Electronics, Ltd., Tokyo, Japan). 溶解氧 (DO) 用 DO 仪测定 (OM-51; Horiba,

Ltd., Kyoto, Japan). MLSS 和 SVI 根据标准方法^[5]测定. TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法^[6], NO_3^- -N 采用下水实验方法^[6], NH_4^+ -N 采用 OPP 法^[7]. 活性污泥絮体通过光学显微镜来观察 (Nikon, ECLIPSE E600), 并用数码相机拍照 (Nikon Coolpix 4500). 黏度采用旋转黏度计测定 (B 型 Viscometer; Tokisangyo Co., Ltd.). 颗粒粒径分析采用激光散射颗粒粒径分析仪 LA-920 (HORIBA Co., Ltd.). 并采用变性梯度凝胶电泳 (denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE) 的方法对系统中生物种群进行了分析.

表 2 各实验阶段的运行条件 Table 2 Operational characteristics in each test stage		
COD 负荷 $/\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	流量 $/\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$	进水 COD 浓度 $/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
2.0	28	2 400
1.7	24	2 400
3.0	28	3 600
3.5	33	3 600
4.5	33	4 600

2 结果与讨论

2.1 COD 和 N 的去除效果

连续运行泳动床反应器 360 d 左右, 在实验过程中, 系统对有机物、氨氮等均具有很好的去除效果.

实验考察了不同负荷下的 COD 去除效果, 如图 2 所示. 反应器进水 COD 浓度由低到高, 范围为 2 400 ~ 4 600 mg/L, 反应器总容积负荷为 1.7 ~ 4.5 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 而出水浓度较稳定, 当 COD 负荷达到 4.5 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时, 出水 COD 仍可低于 150 mg/L 水平. 反应器总 COD 去除率均值可达 96%, 这说明泳动床生物膜反应器具有在高负荷下出水稳定的优点. 随着系统的稳定运行, 进水的 COD 负荷仍有提高的余地. 另外, 系统始终保持良好的硝化效果 (图 3), 进水氨氮为 240 ~ 460 mg/L 时, 氨氮的平均去除率达到了 80.7%. 由此可见, 泳动床生物膜反应器对高氨氮高浓度有机废水有良好的处理效果, 可以达到对氨氮和有机污染物的同时去除.

2.2 污泥特性

从 BF 槽中取样测定, SVI 与 MLSS 的变化如图 4 所示. 在整个实验过程中 MLSS 一直处于上升的趋势, 最高时达到 23 775 mg/L (不包括生物膜量), 远远高于传统活性污泥系统和好氧颗粒污泥系统^[8]. 正是如此高的污泥量, 才保证了对有机污染物良好的去除效果. 在反应进行到第 50 d 时, SVI 即降到了

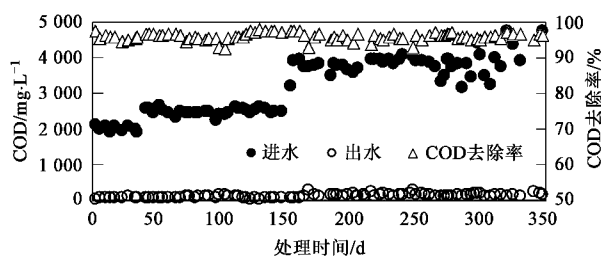


图 2 不同工况下 COD 的去除情况
Fig.2 COD removal under different conditions

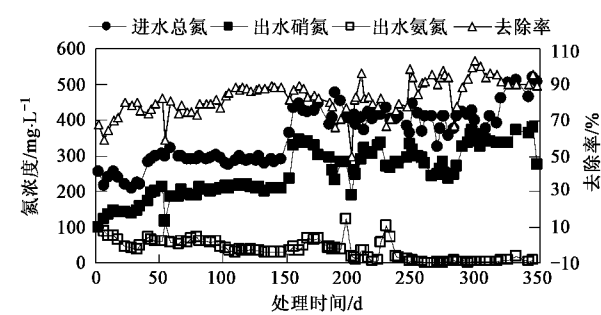


图 3 氮素经时变化
Fig.3 Changes in nitrogens

100 mL/g 以下. 此后随着污泥各组分逐渐稳定, SVI 值在 20 ~ 50 mL/g 之间变化. 而在高的污泥承载量下, 又能保持低的污泥沉降指数, 正是泳动床技术的优势所在.

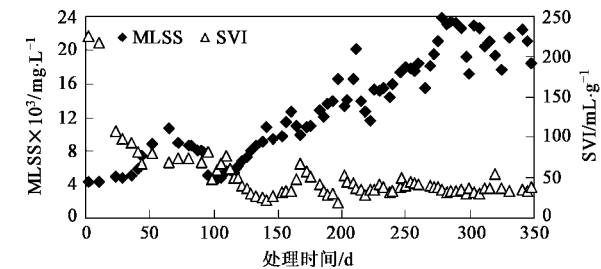


图 4 MLSS、SVI 经时变化
Fig.4 Changes in MLSS, SVI

泳动床系统之所以能在很高的 MLSS 下, 保持较低的 SVI, 主要有以下 2 方面的原因.

首先是泳动床系统中污泥的黏度非常低. 微生物的生长代谢会产生大量的蛋白质、多聚糖等粘性物质, 致使污泥混合液的黏度随之增大. 从而使泥水难于分离, 导致 SVI 增大, 污泥沉降性恶化, 进而发生黏性膨胀^[9]. 图 5 显示了试验过程中黏度与 MLSS 之间的关系. 活性污泥法过程中, 当污泥浓度达到 6 000 mg/L 左右时, 黏度和 SVI 急剧增加, 发生黏性膨胀, 系统崩溃. 而在泳动床过程中因为 BF 填料的

加入, 高密度污泥是生物膜随着填料的泳动而脱落产生的. 脱落的生物膜是颗粒状污泥絮体大量产生的前提, 也是颗粒状污泥絮体的核心. 所以泳动床生物反应器在高 MLSS 条件下仍能保证良好的沉降性能, 当系统中污泥浓度达到 23 775 mg/L 时, 黏度值也只有 9.1 mPa·s⁻¹.

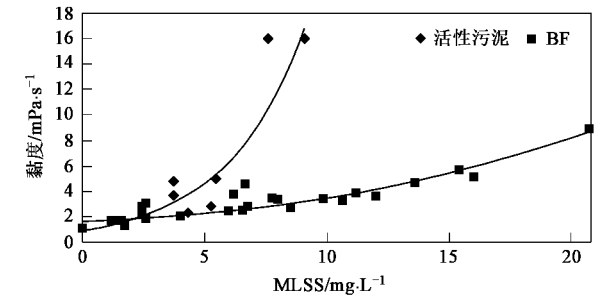


图 5 黏度与 MLSS 之间的关系
Fig.5 Relationship between viscosity and MLSS

常见的关于污泥黏度与 MLSS 的模型有: Einstein 模型^[10,11]、Leighton 模型^[12] 和指数模型^[13]. 经过比较, 指数模型的适用性和符合程度较高. 试验得出的污泥黏度与 MLSS 的指数模型为:

$$\eta = 1.0214 \exp(0.1059x) \quad R^2 = 0.9929$$

活性污泥法过程中, 污泥黏度与 MLSS 的指数模型为:

$$\eta = 0.9338 \exp(0.3176x) \quad R^2 = 0.8474$$

从上述指数模型中, 也可明显地看出泳动床系统在黏度方面的优越性.

其次是有颗粒化污泥絮体出现. 反应器驯化过程中, 通过光学显微镜连续观察, 在第 20 d 开始就发现有颗粒化污泥絮体出现, 在第 300 d 时基本达到完全颗粒化(图 6). 实验过程中对污泥样品进行了颗粒粒度分析. 絮体直径从 0.06 mm 开始逐渐增大, 最大算术平均直径为 0.151 mm. 虽然试验中得到的污泥絮体不管从粒度还是有核方面都未达到普通好氧颗粒污泥(0.5 ~ 1.5 mm)^[14] 的标准, 但是却同样实现了颗粒污泥的沉降性好, SVI 低的良好特性.

污泥絮体颗粒化是生物膜生长的一种特殊形式, 它是微生物的自身固定化过程. 正是污泥的低黏度和絮体颗粒化, 保证了高 MLSS 下低 SVI 的良好结果.

2.3 污泥产率

实验过程中测得了不同 COD 容积负荷下的污

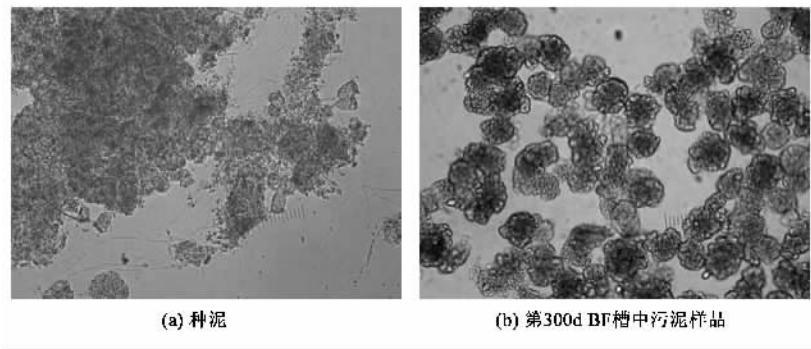


图 6 污泥颗粒化现象
Fig.6 Photos of the granulation of sludge

泥产率^[15],并与其它工艺进行了比较,结果如图 7 所示.从中可知,污泥产率随着容积负荷的增加而略有上升.在整个实验过程中,污泥产率(MLSS/BOD,质量比)都在0.104 6~0.172 3的范围之内.图 7 中还将本试验结果与 CAS 系统、MBR 系统和 OSA 系统做了比较^[16],污泥产率比 CAS 系统降低了 80%左右,比 MBR 系统降低了 60%,比 OSA 系统降低了 30%.泳动床处理过程中,污泥产率之所以能保持在很低的水平上,主要是因为系统具有丰富的微生物群落,尤其是种类多样的原生动物和后生动物(图 8),如钟虫、累枝虫、吸管虫、轮虫、线虫、红斑瓢体虫、水蜘蛛等,从而形成了长而稳定的食物链.

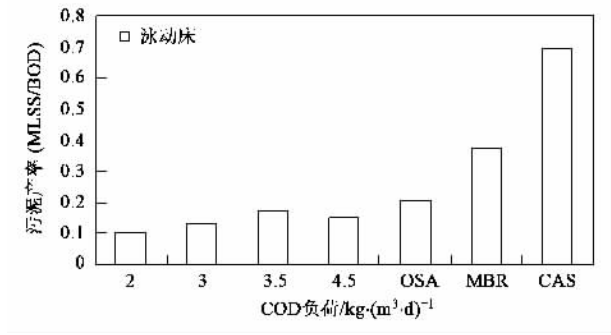


图 7 不同条件下的污泥产率
Fig.7 Sludge production in different conditions

从生态学角度讲,系统食物链越长,能量损失越多,可用于生物体合成的能量就越少.活性污泥可看成人造生态系统,因此,可通过延长食物链或强化食物链中微型动物的捕食作用而减少污泥的产量^[17].

实验过程中还采用 DGGE 法对系统中生物种群进行了分析.对种泥和污泥样品同时进行总 DNA 提取、纯化,经过 PCR 扩增后再进行 DGGE 分析,最终得到 DGGE 图谱,如图 9 所示.一般认为,在 DGGE 图谱上,每一条带代表某种特定的微生物,且亮度相

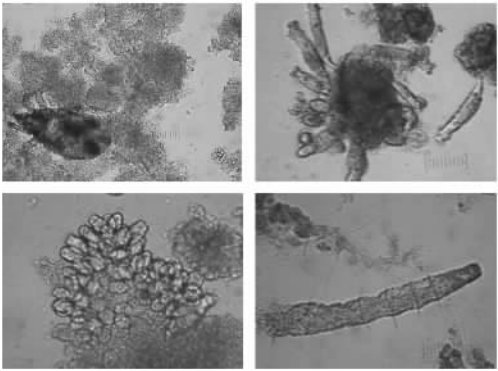


图 8 BF 填料上污泥显微镜照片
Fig.8 Microscopic photographs of activated sludge on BF material

对大的条带代表样品中的优势微生物^[18].图 9 表明:与接种污泥相比,反应器中微生物的种类和优势菌种均发生了明显的变化.在种污泥中,*Xanthomonadaceae* 和 *Comamonadaceae* 等有机物分解菌大量存在(表 3);但是在污泥样品中,不但能检测到 *Xanthomonadaceae* 等有机物分解菌大量存在,而且 *Nitrosomonas* 消化菌也大量存在(表 4),这也为系统具有较高的硝化率提供了生物学上的依据.

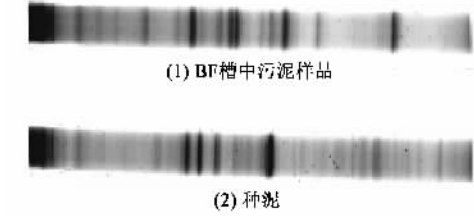


图 9 污泥样品和种污泥中微生物的 DGGE 图谱
Fig.9 DGGE fingerprint of microorganism in sludge sample and seed sludge

实验还进一步对种污泥和污泥样品中可能代表的微生物的种属进行了分析.种污泥可能代表的微生物的属有 20 种,泳动床污泥样品中可能代表的微

生物的属有 38 种. 其中相同的微生物的属有 16 种, 分别占种污泥和泳动床污泥样品微生物属的 80% 和 42%. 在接种污泥中, β -变形纲、 γ -变形纲和拟杆菌纲占优势. 而在泳动床污泥样品中不但上述 3 种微生物的数量上大大增加, α -变形纲的种属量也增加到了 5 种, 放线菌、芽单胞菌各增加到 2 种. 泳动床反应器中微生物种属是接种污泥的近 2 倍, 体现了生物种类的多样性.

表 3 种污泥中微生物种类

Table 3 Taxons of microorganisms in seed sludge			
分类	相似度/%	种数	百分比/%
<i>Xanthomonadaceae</i> (family)	98	4	20.0
<i>Luteibactor rhizovicina</i>			
<i>Acidovorax avenae</i>			
<i>Variovorax</i> sp.	97 ~ 94	3	15.0
<i>Bata proteobacterium</i>			
<i>Comamonadaceae</i> (family)	100 ~ 96	2	10.0
<i>Flavobacteria</i> (class)			
<i>Sphingobacteria</i> (class)	96	2	10.0
<i>Thermomonas</i> sp.			
<i>Thermomonas koreensis</i>	94	1	5.0
<i>Gamma</i>			
<i>Xanthomonadaceae</i> (family)	100 ~ 97	1	5.0
<i>proteobacterium</i> (class)			
<i>Chitinophaga</i>	100	1	5.0
<i>Ideonella</i> sp.	97	1	5.0
Unclassified	98	1	5.0
合计		4	20.0
		20	100

表 4 BF 槽中微生物种类

Table 4 Taxons of microorganisms in BF tank			
分类	相似度/%	种数	百分比/%
<i>Thermomonas koreensis</i>	97	6	15.8
<i>Nitrosomonas oligotropha</i>	96	2	5.3
<i>Simplicispira</i> sp.	97 ~ 96	5	13.2
<i>Comamonas</i> sp.			
<i>Acidovorax</i> sp.			
<i>Aquaspirillum</i> sp.	100	2	5.3
<i>Bartonella tamiiae</i>			
<i>Mesorhizobium</i> sp.			
<i>Leadbetterella byssophila</i>			
<i>Lysobacter</i> sp.	96	3	7.9
<i>Xanthomonas</i>			
<i>Xanthomonadaceae</i>	96	4	10.5
<i>Flavobacteria</i>			
<i>Porphyrobacter</i> sp.	96	2	5.3
<i>Gemmatimonas</i>	100	3	7.9
<i>Sphingobacteria</i>	99 ~ 97	2	5.3
<i>Microbacterium</i> sp.	96	1	2.6
<i>Croceobacterium</i> sp.	100	1	2.6
<i>Bacteroidates</i>	98	1	2.6
Unclassified	98	1	2.6
合计		5	13.2
		38	100

在常规工艺中, 细菌常以菌胶团或成膜的细菌存在, 不易被原生动物等捕食, 从而导致污泥产率高^[19]. 在泳动床系统中, 悬浮式生长方式和附着式生长方式同时存在, 生物种群得到了最大程度的丰富, 原生动物、后生动物大量存在, 使污泥减量化得以实现. 从而使污泥处置费用大大减少, 工艺及操作简单, 节省基建费用和运行费用, 具有较高的经济效益.

3 结论

(1) 实验运行期间, 系统总进水 COD 浓度范围为 2 400 ~ 4 600 mg/L, 反应器容积负荷范围为 1.7 ~ 4.5 kg/(m³·d), 反应器总 COD 去除率均值达 96%, 系统平均消化率为 80.7%. 这说明在高浓度、高负荷进水情况下, 泳动床生物膜系统对 COD 和氨氮同时具有良好的去除效果.

(2) 运用 BF 填料的泳动床反应器可以保持低黏度和实现污泥颗粒化, 保证了反应池内混合液悬浮固体浓度 MLSS 可以达到很高的程度, 最高时可达 23 g/L. 并能在高生物量的同时, 保持 SVI 值在 20 ~ 50 mL/g 的范围内, 污泥性能良好, 为污染物的去除提供了保证.

(3) 该工艺的污泥产率极低, 较好地实现了污泥减量化. 在系统运行过程中污泥产率 (MLSS/BOD, 质量比) 都在 0.104 6 ~ 0.172 3 的范围之内, 可以节省大部分污泥处理费用, 有较广阔的实际应用前景. 这主要是由于泳动床生物膜系统可以聚集较高的生物量, 使系统中微生物种群多样化. 通过 DNA 测定显示泳动床系统中微生物种属是接种污泥的近 2 倍, 并用显微镜观察到大量原生动物、后生动物的存在.

(4) 实验证明, 泳动床技术具有在高浓度高负荷下对 COD 和氨氮的高效去除、保持高 MLSS 的同时又有良好的 SVI、污泥黏度低和污泥颗粒化以及丰富的微生物种群等方面的优点, 从而可以大大减小或省去污泥沉淀池, 缩短工艺流程和降低反应器占地面积, 减少污泥处置费用, 工艺及操作简单, 节省基建费用和运行费用, 具有较高的经济效益.

致谢: 感谢日本熊本大学 Furukawa 教授提供的实验场地和宝贵意见.

参考文献:

[1] 胡和平, 刘军, 罗刚, 等. 活性污泥工艺中污泥减量化技术研究进展[J]. 水资源保护, 2007, 23(6): 32-35.

[2] Zhao Q I, Kugel G. Thermophilic/mespphilic digestion of sewage sludge and organic waste [J]. J Environ Sci Health, 1997, 31: 2211-2231.

- [3] Rouse J D, Yazaki D, Cheng Y J, *et al*. Swim-bed technology as an innovative attached-growth process for high-rate wastewater treatment [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 2004, **40**(3): 115-124.
- [4] 张岩,王永胜,白玉华,等. 泳动床/好氧颗粒污泥新技术处理生活污水的特性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2249-2254.
- [5] APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater[M]. (19th ed). Washington D C: American Public Health Association, 1995.
- [6] Japan Sewage Association. Sewage Analytical Method[R]. 1993.
- [7] Kanda J. Determination of Ammonium in Seawater Based on the Indophenol Reaction with *o*-Phenylphenol (OPP) [J]. Water Research, 1995, **29**: 2746-2750.
- [8] 迟寒,刘毅慧,杨凤林,等. 好氧颗粒污泥处理城市生活污水[J]. 水处理技术, 2006, **32**(8): 73-77.
- [9] 李庆召,王定勇. 活性污泥膨胀机理及抑制对策的研究现状[J]. 环境保护科学, 2001, **27**(4): 14-15.
- [10] 李葵英. 界面与胶体的物理化学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [11] 周祖康,马季铭,译. 胶体与表面化学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1986.
- [12] Leighton D T, Acrivos A. The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions[J]. Journal of Fluid Mechanism, 1987, **181**: 415-439.
- [13] 顾国维. 膜生物反应器——在污水处理中的研究和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [14] Morgenrot H E, Sherdent. Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [15] Ghyoot W, Verstraete W. Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bioreactor [J]. Water Research, 1999, **34**(1): 205-215.
- [16] 梁鹏,黄霞,钱易,等. 污泥减量化技术的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(1): 44-52.
- [17] 魏源送,樊耀波. 污泥减量技术的研究及其应用[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(7): 23-26.
- [18] 张丽丽,陈效,陈建孟,等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 795-799.
- [19] 翟小蔚,潘涛, Ghyoot W,等. 利用原生动物消减剩余活性污泥产量[J]. 中国给水排水, 2000, **16**(11): 6-9.