

两段曝气生物滤池处理生活污水的净化效能

王春荣¹, 李 军², 王宝贞³, 张国柱⁴

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京工业大学 北京水质科学与环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 3. 哈尔滨工业大学 水污染控制研究中心, 哈尔滨 150090; 4. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳 518055)

摘 要: 采用两段曝气生物滤池进行了生活污水的试验研究, A段反应器进水负荷分别控制在 9.17、15.59 和 22.01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 气水体积比为 6:1; B段反应器气水体积比控制在 2:1, 温度在 18~20 $^{\circ}\text{C}$. 经过近 3 个月的试验运行, 结果表明: 在稳态运行条件下, 该系统出水稳定优质 $\rho_{\text{sCOD}} < 30 \text{ mg/L}$, $\rho_{\text{NH}_3\text{-N}} < 4.0 \text{ mg/L}$, $\rho_{\text{SS}} < 10 \text{ mg/L}$, 无色无味透明, 做进一步的消毒处理后可作生活杂用水. 而在负荷变化及实施反冲洗等非稳态条件下, 系统出水的 sCOD、氨氮、TN 和 TP 出水质量浓度仍保持较低值. 试验表明, 要维持两段 BAF 系统持续稳定运行, 预处理、适当的反冲洗强度和良好的启动条件是必要的.

关键词: 两段曝气生物滤池(BAF); 稳态运行; 非稳态运行; 去除率

中图分类号: X 701.1

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2006)12-1071-06

20 世纪 80 年代末, 曝气生物滤池(biological aerated filter, 简称 BAF)在欧洲开始发展起来^[1]. 作为一项新的污水处理技术, 进入 90 年代后, 掀起了对曝气生物滤池研究和开发的热潮^[2-3]. 它是一种固定膜生物处理工艺, 其中的载体填料对运行有重要影响, 而外在的运行条件如水力停留时间、温度、溶解氧、水力负荷、有机负荷以及反冲洗方式都对 BAF 的运行有重要影响.

目前, 有关专家就稳态条件下生物膜系统的处理情况也做了大量研究^[4-7], “稳态”生物膜系统是^[8]: 当液体质量浓度一定时, 反应器内的生物膜即没有净增长也没有净脱落时的状态. 稳态的生物膜将一直稳定地去除污染物, 直到质量浓度达到某一极限值(S_{min}), 此时部分生物膜受到破损, 稳态运行受到破坏. 因此, 提高或降低有机负荷或水力负荷就能破坏生物膜的稳态运行, 引起生物膜的增长或脱落, 造成“非稳态运行”.

本文针对 BAF 的运行特点, 采用两段曝气生物滤池进行生活污水处理, 研究了稳态及非稳态运行阶段系统的运行情况, 证实了系统具有良好的处理效果, 并探讨了长期稳定运行的控制条件和注意事项, 为实际运行提供参考.

1 材料和方法

1.1 试验装置

本试验装置如图 1, 2 个反应器均由有机玻璃加工而成, 外形为圆柱形, 直径 10 cm, 其中 A 段反应器高 1.8 m, B 段反应器高 2 m, 有效容积分别为 9.8 L 和 11.8 L.

两反应器均装有火山岩填料, 粒径 3~5 mm, 具体填料特性见表 1.

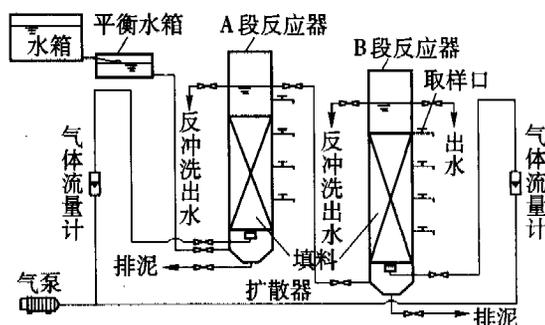


图 1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experiment

收稿日期: 2005-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助(50678008); 北京市自然科学基金资助(8052005); 北京市科技新星计划项目资助(9558100800).

作者简介: 王春荣(1978-), 女, 内蒙古赤峰人, 讲师.

表1 火山岩填料特性

Tab.1 Characteristic of lava-media

填料	占反应器的体积/%		堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	实际密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙度/%
	A段	B段			
火山岩	67	70	0.628×10^3	1.673×10^3	62.5

1.2 原水及试验方法

本试验用水为生活污水,取自北方某大学家属区,其主要水质参数见表2.该水质为经过筛网过滤后的原水水质.

表2 生活污水的水质情况

Tab.2 Quality of domestic wastewater

项目	$\rho_{\text{SS}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{sCOD}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{TN}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{DO}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH
范围	60.21~98.64	145.6~330.2	34.30~40.38	38.18~49.22	0.9~1.6	6.5~8.18
平均值	75.8	236.5	38.20	45.10	1.2	7.2

两反应器均从底部进水,气水同向. A段反应器启动时投加一定量的SBR池沉降污泥作为种泥,闷曝3 d后改为连续流进水,系统运行15 d后对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别达到70%和30%,至此标志挂膜成功. B段反应器在此试验前,一直进行高氨废水的脱氮处理,已经连续运行8个月,其中微生物主要以硝化菌为主,经过15 d的启动运行具有良好的脱氮效果. 系统启动后, A段反应器分别在 9.17 、 15.59 和 $22.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 的水力负荷下运行,气水比6:1,水温为 $18\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$; B段气水比2:1,运行时测定各反应器进、出水及各取样口处的sCOD、SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、pH值和DO,以考察反应器内稳态及非稳态运行时污染物的去除效果.

2 结果及讨论

2.1 稳态运行时两段反应器污染物的去除效果

图2(a)表示了系统稳定运行后,两段BAF进出水sCOD的质量浓度及去除效率随时间的变化曲线.

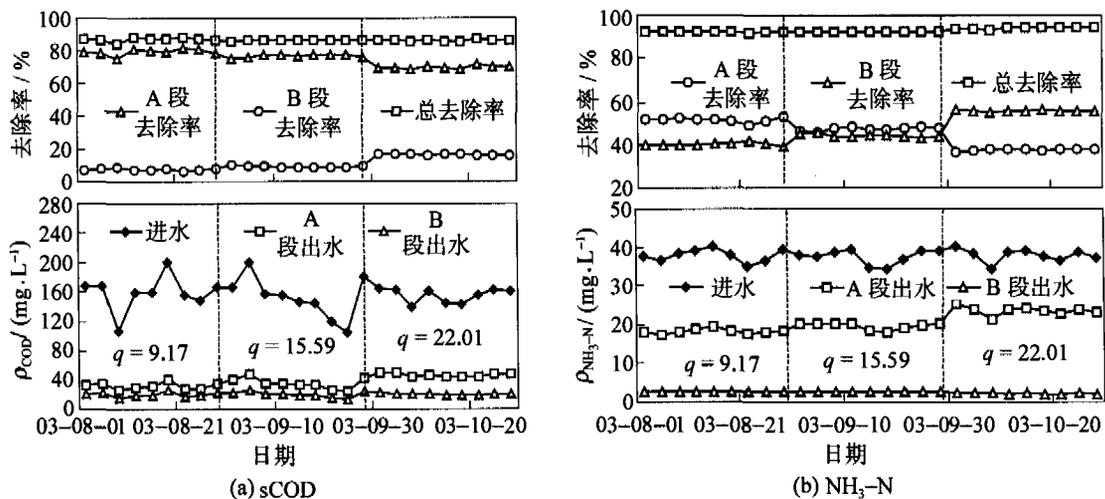


图2 进出水浓度及去除率的变化

Fig.2 Variation of concentration and removal

A 段反应器主要进行脱碳处理,随着进水负荷的提高 sCOD 去除率有所降低,当负荷分别为 9.17、15.59 和 22.01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,平均 sCOD 去除率分别为 80.2%、76.8% 和 69.2%,表明 A 段反应器在供氧充足的情况下,sCOD 的去除率与进水负荷呈负相关性,也说明水力停留时间越长越有利于 sCOD 的去除. B 段反应器主要功能是脱氮,sCOD 的去除率,介于 7.71%~16.43% 之间,研究发现 A 段出水 sCOD 质量浓度越高(即负荷越高),B 段的 sCOD 去除率就越高. 从长期的运行结果来看,系统出水 sCOD 均保持在 30 mg/L 以下,尽管因负荷的变化导致 A 段出水 sCOD 有波动,但经过 B 段反应器的再次处理后,系统出水的 sCOD 去除率仍保持稳定、出水水质较好.

图 2(b) 为系统运行稳定后,各段进出水氨氮质量及去除率随时间的变化曲线. 系统对氨氮的去除率为 91.54%~93.96%;A 段反应器对氨氮的去除率介于 37.18%~52.88% 之间,且随水力负荷的增加,氨氮去除率呈下降趋势;B 段为脱氮段,氨氮去除率达到 39% 以上. 由于 B 段反应器进行生活污水处理前,一直进行氨氮废水的处理,因此其中的硝化菌数量较多,致使废水中的氨氮得以充分硝化,系统出水氨氮质量浓度均在 4 mg/L 以下.

图 3(a) 为各段进出水 TN 质量浓度及去除率随时间的变化情况. A 段反应器对 TN 平均去除率为 19.8%;TN 的去除主要是在 B 段发生,且随着 B 段进水负荷的增加,TN 的去除率明显升高,这是因为当 B 段气水比控制在 2:1 时,反应器底部主要进行氮的硝化作用,随着硝化作用的进行,反应器中上部溶解氧浓度降低,生物膜内部的缺氧和厌氧层厚度增加,在生物膜外部发生硝化作用的同时,内部缺氧及厌氧层也进行着反硝化作用. 由于 A 段负荷高时,B 段进水 COD 质量浓度相对较高,致使反硝化过程有充足的碳源,反硝化效果好,这也解释了为什么 A 段进水水力负荷高时,系统出水的 COD 和 TN 质量浓度相对较低.

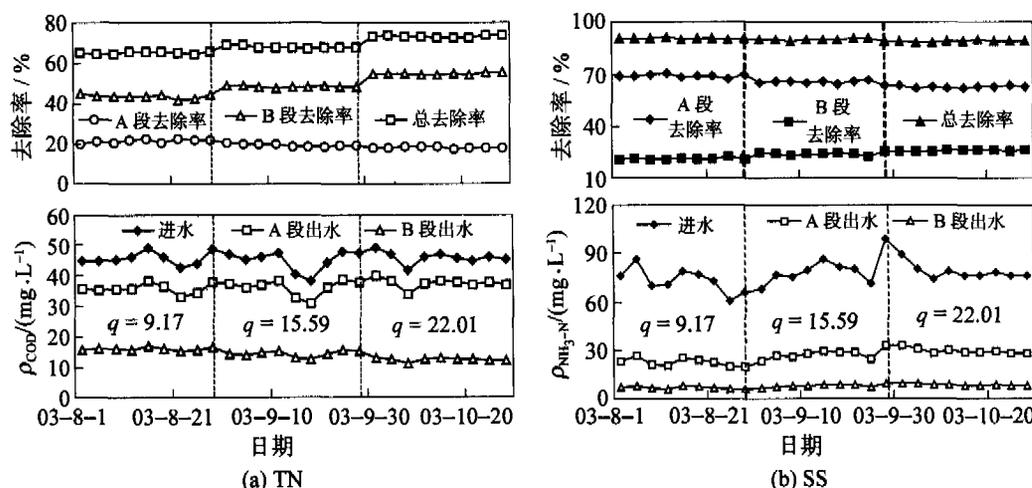


图 3 进出水浓度及去除率随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of concentration and removal

由于系统原水是经过筛网过滤后的污水,所以进水 SS 没有太大的悬浮颗粒,进水质量浓度介于 60.2~98.6 mg/L 之间,平均质量浓度 75.8 mg/L . 图 3(b) 表示系统稳定运行后的各段进出水 SS 浓度及去除率变化情况. A 段反应器随负荷的增加对 SS 的去除率呈下降趋势,在水力负荷为 9.17、15.59 和 22.01 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,A 段平均去除率分别为 68.9%、65.5% 和 62.4%.

分析认为,进水负荷较大时,出水携带的 SS 也较多;经过 B 段反应器的再次过滤截留后,出水的 SS 较稳定,基本介于 6~9.8 mg/L 之间,平均出水浓度为 7.3 mg/L ,表明两段 BAF 对 SS 具有良好的去除效果,SS 总去除率达 90.4%.

通过系统对各污染物的净化效能可以看出,如果对系统出水再进行消毒处理可满足生活杂用水的回收利用标准.

2.2 非稳态运行时两段反应器污染物的去除效果

“非稳态运行”是指在水力负荷变化及实施反冲洗后,反应器从一个稳定状态达到另一个稳定状态的时间段。

实际运行过程中,进水负荷的变化是经常的现象,而对于曝气生物滤池来说反冲洗也是维持生物膜高活性的必要步骤,针对以上2种运行工况,对曝气生物滤池去除污染物的效果进行了试验.试验发现,当水力负荷变化时,系统对SS、氨氮、TN的影响不是很明显,总的来说,负荷增加后其去除效果主要在A段有变化,且基本发生在负荷变化2h后,随之达到去除效率最低点,经过2~3h的适应期后,处理效果再次达到稳定.而sCOD的去除效果在此期间变化较明显,图4(a)为负荷从 $9.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 升高到 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,各段反应器对sCOD去除率的变化曲线.负荷增加后,A段sCOD的去除效果变化明显,而B段的去除效果保持稳定,确保了系统出水的稳定性;增加负荷后,A段出水sCOD浓度并没有立即发生变化,在施加负荷近2h后,去除率有所下降,到3h去除率仅为45%;系统不断地适应,在水力负荷增加近5h后A段反应器的sCOD去除率得以恢复,系统逐步达到稳态运行.

图4(b)为负荷从 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 增加到 $22.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,系统对sCOD的去除效果.与图4(a)的结果相似,增加负荷,A段反应器的sCOD去除率有所变化,B段反应器运行稳定.与图4(a)结果不同的是,负荷较大时进一步调整负荷对sCOD去除率的影响减小;A段sCOD去除率最低点也是在施加负荷3h后达到,但该值却增加到57.5%.BAF反应器在高负荷下运行时,对流量变化具有良好的抗冲击能力.

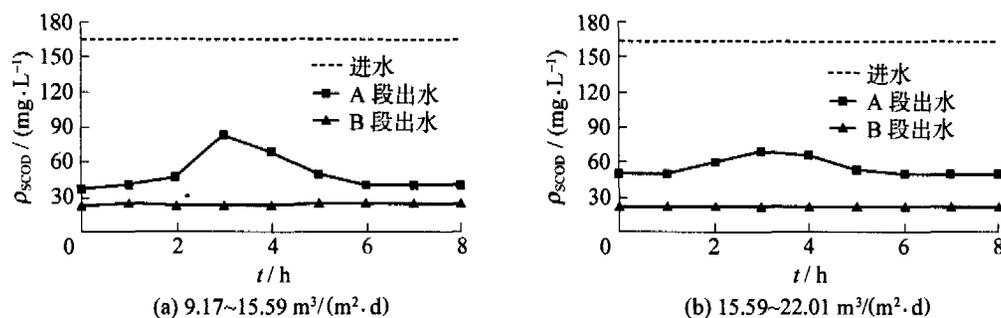


图4 不同负荷下系统出水sCOD的变化规律

Fig.4 Variation of sCOD with different hydraulic loading rate

试验还考察了反冲洗后各参数的变化情况,其中A段反应器因进水有机物浓度较高,在运行过程中反冲洗较频繁,基本在1.5~2d反冲洗1次;而B段反应器的反冲洗频率较低,控制在7~10d冲洗1次,这是因为B段反应器进水sCOD质量浓度较低,主要进行硝化及反硝化作用,生物膜增长缓慢.试验期间在负荷为 $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时对A段反应器进行反冲洗而B段反应器正常运行进行试验跟踪,结果表明,反冲洗后1个周期内,A段的sCOD、氨氮、TN和TP去除率略有变化,经过B段的进一步处理后,出水仍保持稳定,而SS则变化明显.

图5(a)为1个周期内系统sCOD随时间的变化规律.反冲洗结束初期A段出水sCOD质量浓度,达到 87.5 mg/L (进水 156.5 mg/L),经过近5~6h的恢复,出水sCOD质量浓度开始达到稳定;在反冲洗后的6~36h内,A段sCOD的去除率保持稳定,且在整个周期内B段的出水sCOD质量浓度均较稳定.

图5(b)为系统中的SS在1个周期内的变化情况.A段SS在反冲洗后的最初2h基本上没有去除,有时出水浓度甚至高于进水浓度,这是因为反冲洗后部分残余生物膜被冲出所致.4~5h后,随着生物膜的生长,SS去除率恢复;8h后SS去除率达到稳定;持续到下个周期前2~3h,出水SS又开始增加,准备进行下次的反冲洗.B段SS在A段反冲初期因进水SS的突然增大,出水SS也相对较高,最高达到 33.5 mg/L ,但随着A段SS去除率的恢复,B段反应器在反冲4~5h后恢复正常,且在后期的运行过程中出水SS基本维持在 10 mg/L 以下.分析认为,在实施反冲洗的过程中,主要采用气水联合反冲,而单独水冲历

时 6 min 不足以将脱落的生物膜完全漂洗掉, 造成反冲洗后的 1~2 h 内, 出水 SS 很高, 因此有必要延长单独水冲的时间. 在后续的实验中单独水冲历时提高到 8 min, 反冲洗后出水 SS 降低, 保证了良好的出水效果.

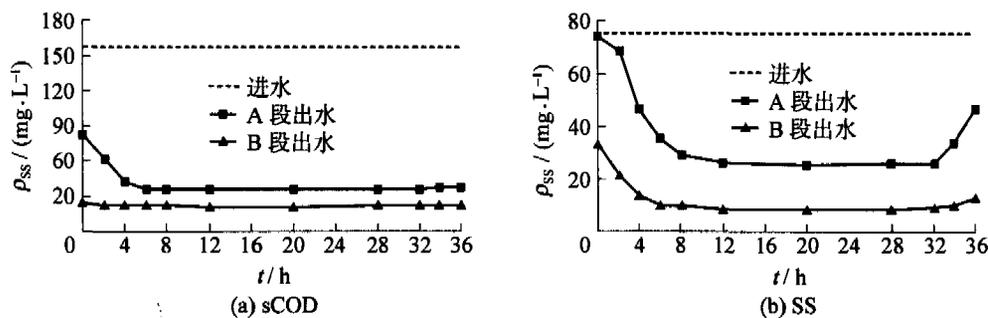


图 5 反冲洗后一个周期内随时间的变化规律

Fig. 5 Variation of during one period after backwashing

以上的试验结果表明, 当 A 段负荷变化时, A 段反应器各污染参数的变化在时间上均表现出滞后性, 且变化幅度较小, 表明曝气生物滤池具有良好的抗冲击能力, 这要归于火山岩填料良好的孔隙度, 大量的微生物寄居在其中, 当负荷发生变化时, 表现出极佳的缓冲能力. 此外, 当实施反冲洗后, 尽管 A 段出水各参数有所变化, 但经过 B 段的处理, 系统出水良好.

2.3 反应器长期稳定运行的主要控制条件和注意事项

1) 做好 B 段反应器的启动工作. B 段反应器主要是进行脱氮处理, 启动过程应尽量使接种污泥的 C/N 控制在较低水平, 待 B 段反应器运行基本稳定后再与 A 段反应器相连.

2) 保持 A 段反应器内曝气量适当. A 段反应器主要目的是部分脱碳, 因此曝气量不宜过大, 目的是为 B 段反应器创造较佳的 C/N.

3) 适当的反冲洗强度及充足的反冲洗历时是维持 BAF 稳定运行的重要因素.

4) 必要的预处理是 BAF 稳定运行的前提. 试验结果表明, BAF 在一个周期的运行过程中, sCOD、氨氮、TN 和 TP 的去除波动均很小, 变化最大的是 SS 的浓度, 因此, 要减小 BAF 进水的 SS 浓度, 预处理是非常必要的.

3 结论

1) 两段 BAF 进行生活污水处理, 无论在稳态还是非稳态条件下, 出水水质均良好. 稳态运行时系统出水的 $\rho_{\text{sCOD}} < 30 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) < 4 \text{ mg/L}$ 、 $\rho_{\text{SS}} < 10 \text{ mg/L}$, 且出水无色无味. 而负荷变化及反冲洗后, 各污染物浓度在 A 段有所变化, 经过 B 段再处理, 系统出水即保持稳定, 表明采用两段 BAF 进行生活污水处理能达到持续稳定运行, 具有实际的应用价值.

2) 系统总 sCOD 去除率达 87.5% 以上, 主要是在 A 段完成, B 段通过进一步氧化和反硝化作用也去除部分 sCOD, 并对维持系统的稳定出水起到了关键性作用.

3) 系统对氨氮的去除率达到 91.5% 以上, 主要依靠 B 段的硝化作用.

4) 良好的启动条件、适当的反冲洗强度及充足反冲洗历时、必要的预处理是维持系统长期稳定运行的前提.

参考文献:

- [1] PUJOL R, HAMON M. Biofilters: flexible, reliable biological reactors[J]. Wat. Sci. Tech, 1994, 29(10-11): 33-39.
- [2] PUJOL R. Process improvements for upflow submerged biofilters[J]. Water 21, 2000(4): 25-29.
- [3] REBECCA M, JOANNE Q, STEPHENSON T. The effects of media size on the performance of biological aerated filters[J]. Water Research, 2001, 35(10): 2514-2522.

- [4] PUXNZVA N, PAYRAUDEAU M, THORNBERG D. Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real time aeration control[J]. *Wat. Sci. Tech*, 2001, 43(1): 269-276.
- [5] 田文华, 文湘华, 钱易. 沸石滤料曝气生物滤池去除 COD 和氨氮[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(12): 13-15.
TIAN Wen-hua, WEN Xiang-hua, QIAN Yi. Use of zeolite medium biological aerated filter for removal of COD and ammonia nitrogen[J]. *China Water and Wastewater*, 2002, 18(12): 13-15. (in Chinese)
- [6] 肖文胜, 徐文国, 齐兵强. 上流式曝气生物滤池处理城市污水[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(2): 49-50.
XIAO Wen-sheng, XU Wen-guo, QI Bing-qiang. Up-flow biological aerated filter for municipal wastewater treatment[J]. *China Water and Wastewater*, 2003, 19(2): 49-50. (in Chinese)
- [7] 乔晓时, 许云岗, 全燮. Biofor 曝气生物滤池用于城市污水处理[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(7): 83-85.
QIAO Xiao-Shi, XU Yun-gang, QUAN Xie. Biofor aerated bio-filter process for municipal wastewater treatment[J]. *China Water and Wastewater*, 2004, 20(7): 83-85. (in Chinese)
- [8] RITTAMANN B E, MCCARTY P L. Evaluation of steady-state biofilm kinetics[J]. *Biotechnol Bioeng*, 1980, 22: 2359-2373.

Experimental Two-stage Biological Aerated Filter for Domestic Wastewater Treatment

WANG Chun-rong¹, LI Jun², WANG Bao-zhen³, ZHANG Guo-zhu⁴

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science & Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. Water Pollution Control Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, ShenZhen 518055, China)

Abstract: Two-stage biological aerated filter was used for domestic wastewater treatment. The hydraulic loading rate of A-stage limited to $9.17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $15.59 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $22.01 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ respectively and the ratio of air to water was 6 to 1, while the ratio of air to water was 2 to 1 at B-stage, and temperature was kept in the range of $18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ throughout the experiment. After 3-month operation, the result shows that stable and advanced effluent with the results of $\text{sCOD} < 30 \text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N} < 4.0 \text{ mg/L}$, $\text{SS} < 10 \text{ mg/L}$ at steady state has been obtained, and the chlorinated effluent well meets the quality standards of water reused for toilet flushing, street flushing, fire fighting and urban greening; Meanwhile, the sCOD, ammonium, total nitrogen and total phosphorous of the effluent also has been kept at lower level under the condition of non-steady state such as loading rate adjustment or backwashing. Moreover, it is to maintain a stable operation of the BAF system, pre-treatment, suitable backwashing rate and good start-up conditions are quite necessary.

Key words: two-stage biological aerated filter (BAF); steady state; non-steady state; removal