

复合生物反应器处理城市污水的试验研究^{*}

曹 斌 王晓昌 王恩让 赵 颖

提要 在传统活性污泥工艺中投加悬浮填料以形成悬浮生长和附着生长两种生物结构而构成一种复合生物反应系统,用于城市污水处理试验研究,并与传统活性污泥法进行了对比。复合式生物反应器较之传统活性污泥工艺具有更强的有机污染物去除能力和良好的运行稳定性,在 HRT 为 5.5 h 和有机负荷率为 0.21~0.51 kgCOD/(kg 总生物量·d) 下,COD、TOC 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别大于 89%、81% 和 72%,均优于活性污泥法,出水色度低。复合生物反应器中的生物膜对 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除起主要作用。

关键词 复合生物反应器 活性污泥 生物膜 污水处理 填料 附着生长 悬浮生长

0 前言

复合式生物反应器(HBR)是近年来颇受关注的新型污水处理工艺^[1],其特点是在活性污泥曝气池中投加填料作为微生物附着生长的载体,进而形成悬浮生长的活性污泥和附着生长的生物膜,共同承担去除污水中有机物的任务^[2~4]。与传统活性污泥法(CAS)相比,HBR 系统一是通过投加生物载体供微生物附着生长,可提高反应器中的生物量,在较高有机负荷下增强了对有机物的去除能力^[5~6];二是可使丝状菌优先附着生长在载体上,从而改善污泥的沉降性能,防止污泥膨胀,提高系统运行的稳定性^[2~3];三是世代时间较长的硝化菌优先附着在载体上,使硝化作用不受悬浮生长的固体停留时间(SRT)的影响,从而提高系统的脱氮功效^[1,3,7]。

HBR 系统的主要构型有活性污泥-生物膜反应器、序批式生物膜反应器、升流式厌氧污泥床-厌氧生物滤池和附着生物污水稳定塘等^[1]。另外,生物载体在反应器中的存在方式既可以处于悬浮态也可以处于固定状态。近年来,在污水好氧与厌氧处理的其它工艺中也引入了生物载体,形成厌氧-缺氧-好氧复合式生物膜反应器^[8~11],提高了生物反应器去除有机污染物和脱氮除磷的效率。这些研究均表明,复合式生物反应器是提高有机物去除能力行之有效的办法,既可以用于现有污水处理厂改建和扩建,又可以用于新建的污水处理厂。

为探讨活性污泥-生物膜复合系统处理城市污水的生化降解特性,本试验在 CAS 中直接投加悬浮载体,形成悬浮生长微生物(活性污泥)和附着生长微生物(生物膜)的复合生物反应器(HBR),进而研究了此工艺对色度、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TOC 等的去除特性,并和 CAS 工艺进行了平行对比试验。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置

本试验是在西安市北石桥污水净化中心进行的,试验装置见图 1。

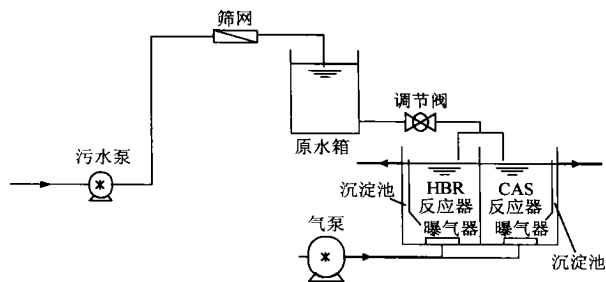


图1 HBR与CAS工艺对比试验流程

试验用水取自该中心细格栅后的城市污水,提升并经筛网至高位水箱,再经调节阀流至两反应器内,反应器出水进入沉淀池经泥水分离后以溢流方式出水。

在 HBR 反应器内,投加由挪威生产的 K1 型 Kaldnes 悬浮填料,形状为内有十字支架的圆柱形,投加量为反应器容积的 50%。其性能参数见表 1。

^{*} 国家自然科学基金重点项目(501380201)。

表 1 K1 型 Kaldnes 悬浮载体性能参数

材料	密度 / g/cm ³	直径 / mm	高度 / mm	估计有效表 面积/mm ² /个	有效比表 面积/ m ² / m ³	容量 / 个/L
聚乙烯	0.95	10	7	490	335	1 030

在反应器内,生物膜载体随着曝气产生的水流而移动。试验证明,成熟而完整的生物膜附着在载体的内表面,其厚度正常情况下不大于 100 μm,理想的生物膜应该是薄且均匀分布在填料表面^[11]。为使生物膜生长良好,保持反应器内混合液的紊流状态是非常重要的,紊流比层流更有利于生物膜的生长,且由于紊流而形成的水力剪切力使生物膜保持在较低的厚度,使生物膜中的好氧层较厚而厌氧层较薄,这样有利于基质的降解。在 K1 型载体内表面,由于紊流流速很低,水流对生物膜形成的剪切力小,所以生长了大量的生物膜,污水中的有机质随水的流动被生物膜吸附降解。而在载体外侧,由于曝气和混合所形成的紊流较强,使得生物膜难以生长。更多的生物膜生长在载体的内表面而非外表面,这主要是由于载体移动过程中不断碰撞磨损所致。

移动床生物膜反应器(MBBR)的优势还在于,载体的填充率可任意选择,这取决于工艺的特点和处理目的。另外,和大多数生物膜反应器相反,移动床生物膜使用了整个反应器空间,这就使得在整个反应器内部随着载体的自由移动都可以保证生物量的增长^[11]。

1.2 试验条件

为准确地进行 HBR 和 CAS 平行对比试验,两系统采用了相同或相当的试验条件。具体参数见表 2。

试验共进行了四个月,前两个月进行了生物膜

表 2 两反应器试验条件

参 数	HBR	CAS
反应器有效容积/L	50	50
水力停留时间/h	5.5	5.5
DO/ mg/L	4.1~4.4	4.1~4.4
温度/	14~23	14~23
生物膜浓度/ mg/L	1 450~2 050	
MLSS/ mg/L	1 330~2 700	1 400~3 750
MLVSS/ MLSS	0.62~0.73	0.58~0.72
总生物量/ mg/L	2 780~4 750	1 400~3 750
有机负荷率/ kgCOD/(kg 总生物量 d)	0.21~0.62	0.31~0.95

的培养和活性污泥的培养与驯化,培养期间,在两反应器中分别投加了取自北石桥污水净化中心的氧化沟接种污泥,待两系统出水稳定后进行了两个月的水质检测与分析。

试验用水为典型的城市污水,其水质见表 3。

表 3 原水水质

COD/ mg/L	NH ₃ - N/ mg/L	TOC/ mg/L	pH
116~488	20.21~63.15	44.76~79.52	7.2~7.6

1.3 分析方法及仪器

(1)水质分析。COD:重铬酸钾氧化法;TOC:岛津(SHINAZDU) TOC - 5050A 分析仪;NH₃ - N:纳氏试剂比色法,用日立(HITACHI)U - 2001 型分光光度计于 420 nm 处测定水样的吸光度;色度:用日立(HITACHI)U - 2001 型分光光度计于 420 nm 处测定水样的吸光度;DO:奥力龙(ORION)842 型溶解氧仪;MLSS:重量法。

(2)生物膜质量分析。碱洗法^[12]:随机抽取一定数量的生物膜填料,放置于烘箱中烘干 2 h 后于干燥器内冷却至恒温,称重为 W₁,然后用 20 %NaOH 溶液加热并不断搅拌将填料表面上的生物膜完全溶解,用清水冲洗填料,之后将填料放置于烘箱中再烘 2 h,取出填料再冷却至恒温,称重为 W₂,则总的生物量 $W = [(W_1 - W_2) / \text{取样的填料个数}] \times \text{反应器中的填料总数}$ 。超声波剥落法^[11]:将一定数量带生物膜的载体置于盛有少量水的锥形瓶中,利用超声波冲击剥落生物膜。剥落后的生物膜可供各种分析之用。两种分析方法均取得了满意的结果。

2 试验结果与讨论

2.1 色度的去除

试验期间,HBR 和 CAS 工艺出水色度对比见图 2。由图2可以看出,复合生物反应器出水的色度

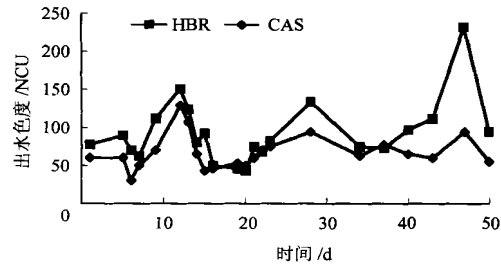


图 2 两系统对色度的去除

低于活性污泥反应器,其原因在于生物膜对色度物质的去除率高于活性污泥。

2.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除

HBR,CAS 系统进出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化见图 3。由图 3 可知,HBR 出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度明显较 CAS 低,去除率大于 CAS 系统。这是由于在 HBR 中世代时间较长的硝化菌优先附着生长在生物膜上,使得反应器的硝化作用与活性污泥的 SRT 无关^[3],在完全混合式的好氧复合生物反应器中取得较高的脱氮效果成为可能。

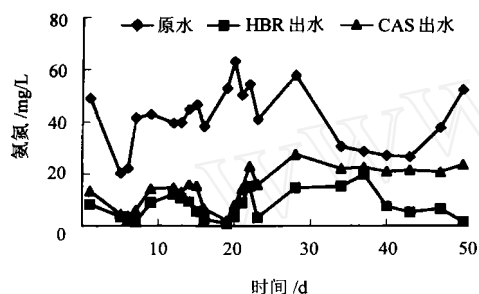


图 3 两系统对氨氮的去除

2.3 COD 的去除

HBR,CAS 系统进出水的 COD 浓度变化见图 4。由图 4 可以看出,两系统均对 COD 有较高的降解能力,去除率基本上在 80 % 以上。但 HBR 出水的 COD 仍低于 CAS 系统,去除率略高于 CAS 系统,这可能是由于生物膜的存在提高了氧传递能力,有利于微生物的新陈代谢。由于试验期间两反应器中的生物量大体相近,所以 HBR 的 COD 去除率总体上与 CAS 相当,二者无明显差异。

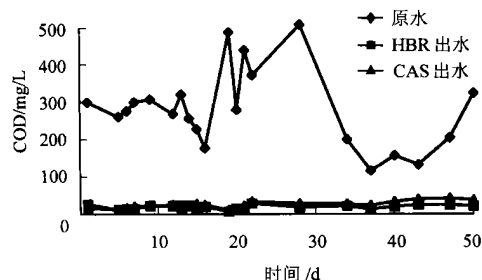


图 4 两系统对 COD 的去除

图 3,图 4 还显示,在试验进行到第 40 天左右时,原水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 COD 值均较低,而同时两反应器对二者的去除率下降。这是由于当原水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 COD 值较低时,其中溶解性的 COD,

$\text{NH}_3\text{-N}$ 比例增加,而悬浮性的成分降低,HBR 及 CAS 系统对去除溶解性的 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的能力是有限的,造成反应器的处理能力减弱。

2.4 TOC 的去除

HBR,CAS 系统进出水的 TOC 浓度变化见图 5。因 TOC 分析仪故障,中间停机约两星期。从图 5 可看出,HBR 出水 TOC 比 CAS 低,TOC 去除率达 80 % 以上,高于 CAS 系统。TOC 作为水中溶解性有机物(DOC)浓度的一个替代参数,间接反映出 HBR 对 DOC 具有较好的去除效果。因为在 HBR 系统中,生物膜以附着生长的方式存在,对 DOC 物质吸附性能好,克服了以悬浮生长方式存在的活性污泥易流失的弊端,稳定、成熟的生物膜对 DOC 起到了累积的作用。

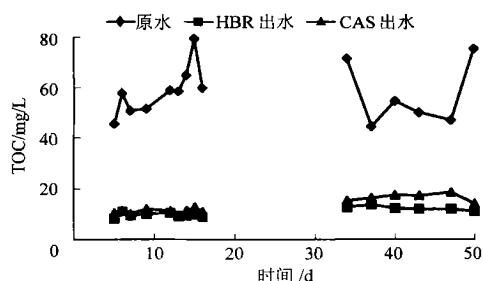


图 5 两系统对 TOC 的去除

2.5 有机负荷率与比基质去除率的关系

有机负荷率(OLR)即 F/M ,亦称之实际的有机负荷率(Applied OLR)^[5~6],用 $\text{kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 单位表示;比基质去除率(Specific Substrate Removal Rate),亦称去除的有机负荷率(Removed OLR)^[8],其单位相应地用 $\text{kgCOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 表示。对 HBR 而言,反应器中总的生物量等于生物膜和活性污泥两种生物量之和,因此其单位用 $\text{kgCOD}/(\text{kg总生物量} \cdot \text{d})$ 表示。对某一生化反应器而言,比基质去除率直接反映了处理的功效和能力,理想的状况是比基质去除率与有机负荷率呈良好的线性关系。本试验条件下二者的关系见图 6,图 7。

从图 6,图 7 可知,在本试验条件即 OLR 不高且变化不大的情况下,CAS 法对 COD 具有较高的去除率,而在 HBR 中,有机物的去除率也随着有机负荷的增加而增加,且有机负荷率与比基质去除率呈良好的线性关系。但如果 OLR 在较大的范围内

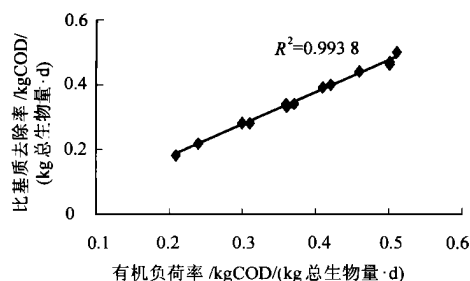


图6 HBR系统有机负荷率与比基质去除率的关系

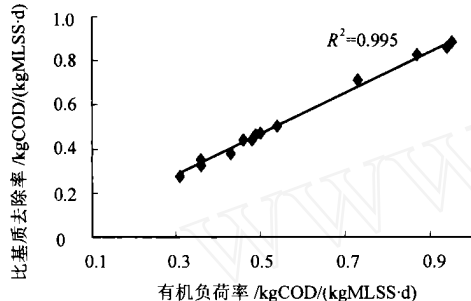


图7 CAS系统有机负荷率与比基质去除率的关系

变化时,二者之间的关系有待于进一步研究。

2.6 有机负荷率与 COD 去除率的关系

试验条件下的 HBR, CAS 两系统有机负荷率与 COD 去除率的关系见图 8。由图 8 可以看出,随着有机负荷率的增加,两系统对 COD 的去除率均增加。但在本试验条件下, HBR 系统的增加幅度大于 CAS 系统,且 HBR 反应器对 COD 的去除率高于 CAS 反应器。所以在相同的负荷下 HBR 系统表现出了较强的有机污染物去除能力,其运行能力和稳定性优于 CAS 工艺。

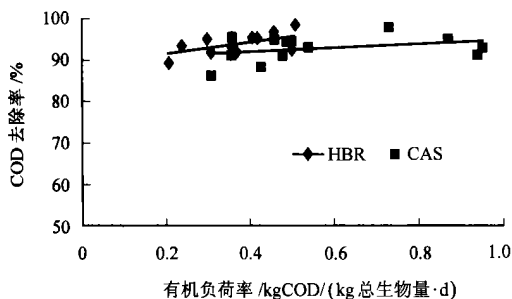


图8 有机负荷率与 COD 去除率的关系

3 结语

(1) 投加载体后, HBR 和 CAS 两反应器中 MLSS 变化不大,但由于生物膜的形成, HBR 中总生物量增大, COD, TOC, $\text{NH}_3\text{-N}$ 等的去除效果明

显改善,出水色度低。

(2) 在相同有机负荷率下, HBR 对有机物的去除率大于 CAS 法,有机物的去除率随着有机负荷的增加而增加,且有机负荷率与比基质去除率呈良好的线性关系。

(3) 因生物膜的存在,改善了活性污泥易膨胀、流失和沉降性差等缺点,使复合生物系统比单一的活性污泥法具有更强的运行稳定性和处理能力。

参考文献

- 1 刘雨,赵庆良,郑兴灿. 生物膜法污水处理技术. 北京:中国建筑工业出版社,2000
- 2 王建龙,吴立波,钱易. 复合生物反应器处理废水特性的研究. 中国给水排水,1998,14(2):29~32
- 3 J Wanner, K Kucman, P Grau. Activated sludge process combined with biofilm cultivation. Wat Res,1988,22(2):207~215
- 4 Fadi Gebara. Activated sludge biofilm wastewater treatment system. Wat Res,1998,33(1):230~238
- 5 Wang Jianlong, Shi Hanchang, Qian Yi. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor (HBR): effect of organic loading rates. Process Biochemistry,2000,36:297~303
- 6 Hyung Sool Lee, Se Jin Park, Tai Il Yoon. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification. Process Biochemistry,2002,38:81~88
- 7 J X Liu, J W van Groenestijn, H J Doddema, B Z Wang. Removal of nitrogen and phosphorus using a new biofilm-activated sludge system. Wat Sci Tech,1996,34(1~2):315~322
- 8 Yung Kyu Park, Chul Hee Lee. Dyeing wastewater treatment by activated sludge process with a polyurethane fluidized bed biofilm. Wat Sci Tech,1996,34(5~6):193~200
- 9 J L Su, C F Ouyang. Nutrient removal using a combined process with activated sludge and fixed biofilm. Wat Sci Tech,1996,34(1~2):477~486
- 10 S H Chuang, C F Ouyang, H C Yuang, S J You. Effects of SRT and DO on nutrient removal in a AS-biofilm process. Wat Sci Tech,1997,36(12):19~27
- 11 Østgaard H, Rusten B, Westrum T. A new moving bed biofilm reactor-Application and results. Wat Sci Tech,1994,29(10~11):157~165

作者通讯处:710055 西安建筑科技大学 356 信箱

E-mail: bincao1965@hotmail.com

王恩让 赵颖 西安北石桥污水净化中心

收稿日期:2003-7-30

ABSTRACTS

Wastewater Disinfection Standard and Application of Ultraviolet Disinfection Zhang Chen et al (1)

Abstract : Wastewater ultraviolet disinfection (UVD) has been matured adequately as a reliable and high-yield investable green technology for environment protection. UVD has been applied widely worldwide to replace the traditional chlorination as a main stream in urban wastewater treatment plants. During the time of SARS outbreak in this country UVD was nominated by the national environmental bureau equally with ozone and chlorination as one of main measures for epidemic protection. In this paper the application and standards deal with wastewater UVD home and abroad are presented.

Application of Bio-Filter for Water Purification Zha Renguang et al (4)

Abstract : Bio-filter (BF) was applied for raw water purification at Nanmen waterworks in Jiaying city. The trail-run shows that the COD and NH_3 - N removals are much better than that of the routine filter and the organoleptic indicators of the output water are upgraded evidently. Under adjusted operating condition the removal of turbidity seems improved. This is a feasible way to reconstruct old filter into bio-filter, no new structures will be needed and it will be easy to maintenance and low investment.

Power and Heat Generation by Methane in Gaobeidian Wastewater Treatment Plant Li Wei et al (17)

Abstract : As a well-known regenerated energy, so called bio-gas with methane as main component could be generated in sludge digestion. The utilization of bio-gas in Gaobeidian WWTP was presented, this is a composite of methane engine, surplus heat recovery and electricity generation system. The technical process, equipment and the source, volume and quality of the bio-gas for this system are described and attentions in bio-gasutilization are also added.

Treatment of Slightly Polluted Raw Water by Ceramite Bio-Filter and Activated Micro Flocculation Filter Sun Lina et al (24)

Abstract : Pilot-plant was conducted with composite processes of ceramite bio-filter (BF) and activated micro-flocculation filter (AMFF) to treat the slightly polluted raw water of Luanhe River diverting to Tianjin. The results show that this integrated process is effective, and stable removals of 93.5%, 62.5%, 65.8%, 58.5% and 77.0% for turbidity, ammonia nitrogen, COD_{Mn} , chlorophyll and UV_{254} respectively have been obtained. The output water is satisfied. So this process has great potentials in further development and application for drinking water purification.

Experimental Study on Urban Wastewater Treatment by Composite Bio-Reactor Cao Bin et al (28)

Abstract : Hybrid bio-reactor (HBR) containing both suspended and attached growths was developed by adding suspended carriers into conventional activated sludge (CAS) system. A HBR laboratory model was conducted to treat municipal wastewater with experiment of CAS for comparison. The results indicate that the HBR provided higher removal efficiencies of organic compounds as well as process stability rather than the CAS, and the removal percent were >89% for COD, >81% for TOC and >72% for NH_3 - N respectively, in terms of the hydraulic retention time (HRT) at 5.5 hours and the organic loading rate (OLR) at 0.21 ~ 0.51 kg COD/kg Total Biomass per day. The colority of the effluent of HBR is also lower than that in the CAS process. Consequently, the biodegradation capacity can be improved in the HBR system. Moreover, the biofilm (attached-biomass) in the HBR plays a major role in COD removal.

P and N Removals and Bio-Selector Wu Fansong et al (32)

Abstract : The structures and working mechanisms of various biological selectors (BS) are discussed and indicate that the aerobic BS is working on the kinematics of filamentous and zoogea colonies in different conditions and the anaerobic or anoxia BS is working on the particular metabolisms of denitrifying bacteria and poly-phosphorus bacteria in different conditions. Although the later has similar working mechanism with the anaerobic or anoxia tank for P and N removals, but otherwise, they are quit different in working targets and results so in design and operation different structures and parameters have to be applied.

Hydrolysis-Acidification and PACT/SBR Processes in Treating Photosensitive Preparation Wastewater Ji Fangying et al (41)

Abstract : On the basis of profound investigation of wastewater discharges from photosensitive preparation, it is proposed a program constituted by separate fore-treatments of diversified discharges, especially the high salt contained discharge, and finally a comprehensive treatment to meet the national wastewater discharge standard. The existing wastewater treatment system will be reconstructed to a composite system called hydrolysis-acidification and PACT/SBR processes for comprehensive treatment which is developed from base of laboratory study. The practical results state that this way is effective to treat photosensitive wastewater with complex constitution and high salt content. In case when the inflow with COD = 2 500 ~ 4 000 mg/L, effluent with COD < 150 mg/L has been obtained, and this can be meet the requirement of class II of the national wastewater discharge norm.