第 22 卷 第 3 期
2006 年 6 月

哈 尔 滨 商 业 大 学 学 报(自然科学版)
Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)

Vol. 22 No. 3
Jun. 2006

水力停留对复合生物膜 - 活性污泥工艺的影响

许春生,姜　涛,赫俊国,吕炳南,杨晓南,刘　杰

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘　要:研究了水力停留时间(HRT)对复合式生物膜 - 活性污泥工艺处理城市污水效能和反应器中微生物性质的影响. 研究结果表明,HRT 对系统 COD 的去除效果影响不大,对氮源污染的影响较大. 随着 HRT 的减少,系统中的污泥质量浓度呈现不断增加的趋势,系统的 COD 容积去除负荷显著增强. 对微生物呼吸速率(OUR)的分析表明,维持较长的 HRT 能够使反应器内微生物具有更强的活性. 因此,建议复合式生物膜 - 活性污泥工艺合理的 HRT 的范围为 6～8 h.

关键词:水力停留时间;复合式生物膜 - 活性污泥工艺;呼吸速率;微生物活性

中图分类号:X703　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672 - 0946(2006)03 - 0026 - 06

Study on effect of hydraulic retention time as factor affecting performance of hybrid biofilm-activated sludge process

XU Chun-sheng, JIANG Tao, HE Jun-guo, LV Bing-nan, YANG Xiao-nan, LIU Jie

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effect of hydraulic retention time (HRT) on the performance of hybrid biofilm-activated sludge process on treating domestic waste water as well as characteristics of microorganisms was investigated respectively in this paper. The results demonstrated that HRT performed a slight influence on COD removal in contrast to a considerable effect of HRT on nitrogen removal. Moreover, decreasing HRT was able to increase sludge concentration, resulting in a substantial increase of removal for COD volume loadings. Analysis on oxygen uptake rate (OUR) of bacteria suggested that activity of microorganisms in such a system was enhanced when longer HRT was used. Therefore, HRT at the range of 6～8 h is recommended within hybrid biofilm-activated sludge process system.

Key words: hydraulic retention time; hybrid biofilm-activated sludge process; oxygen uptake rate; activity of microorganism

20 世纪 80 年代中期随着新型填料和载体的出现,复合式生物膜 - 活性污泥工艺(又称淹没式生物膜工艺),被广泛应用于生活污水、垃圾渗滤液及工业废水的处理,也是适应于中小城镇污水处理的高效污水处理工艺[1～4]. 从生物膜的固定与污水的流动来说,它类似于生物滤池法. 从污水充满曝气池和采用人工曝气来讲,它又类似于活性污泥法. 所以复合式生物膜工艺的特点介于生物滤池和活性污泥法之间. 但与常规活性污泥法相比,复合式生物膜工艺还具有曝气池水力停留时间短,后沉

收稿日期:2006 - 02 - 13.
基金项目:黑龙江省科委重点科技攻关项目(GC30C307).
作者简介:许春生(1970 -),男,博士,研究方向:污水处理及其资源化.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

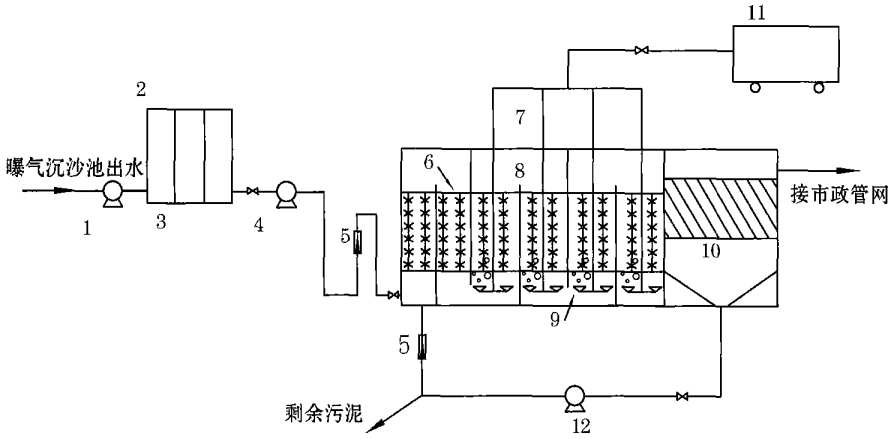
池出水水质好,SS,BOD_5,COD 和 NH_4 —N 的去除率高,剩余污泥少,处理、处置及运行维护费用低等优点[5,6].

复合式生物膜 - 活性污泥工艺处理系统中,水力停留时间(HRT)是一个非常重要的参数,它不仅影响整个系统的处理效能,还直接决定了生物反应器容积的大小,从而影响了系统的基建费用. 因此,研究水力停留时间对复合式生物膜 - 活性污泥工艺处理城市污水的影响,对于保证复合式生物膜活性污泥工艺的处理效能,为实际工程设计提供参考及节省工程投资都具有十分重要的意义. 本试验通过对复合式生物膜 - 活性污泥工艺处理城市污水的中试研究,系统地探讨了 HRT 对复合式生物膜 - 活性污泥工艺处理效能的影响和反应器中微生物性质的影响,在此基础上提出了合理的 HRT 范围.

1　试验装置和方法

1.1　试验装置

本试验自 2004 年 5 月开始,试验地点为哈尔滨文昌污水处理厂. 试验中设计安装了复合式生物膜活性污泥反应器. 试验装置为 5 mm 厚钢板制成,反应器内外表面进行防腐处理,具体的试验装置工艺流程如图 1 所示,试验装置的具体技术参数如表 1 所示,试验中选用填料为半软性束状纤维填料,填料的性能参数见表 2.



1 —管道泵;2 —调节水箱;3 —隔网;4 —管道泵;5 —流量计;6 —填料;7 —反应器;8 —隔板;
9 —曝气头;10 —斜板沉淀装置;11 —鼓风机;12 —回流泵

图 1　实验装置图

表 1　中试设备主要技术参数

	尺寸($L \times B \times H$/mm)
调节箱	1 500 ×500 ×1 000
缺氧段	7 500 ×1 000 ×2 000
好氧段	2 000 ×1 000 ×2 000
二沉池	900 ×1 000 ×2 000

表 2　试验用填料性能参数

材料	直径/mm	密度/(kg·m^{-3})	比表面积/(m^2·m^{-3})
聚合塑料、醛	3	1.05	1 353

试验用水取自污水厂的曝气沉砂池出水,经潜水泵提升至调节水箱,再经管道泵打入反应器内,设计水量为 0.5 m^3/d,进水流量通过转子流量计控制;反应器为一体式,分缺氧,好氧,沉淀三个区. 缺氧区的设计水力停留时间为 2.25 h,好氧区的设计水力停留时间为 6 h,沉淀区为 3 h,最后以溢流方式出水. 二沉池底部设有混合液回流管,外接回流泵,用以回流硝化液和活性污泥.

1.2　试验条件

在试验过程中,反应器的缺氧区通过搅拌器来使泥水充分混和,好氧区溶解氧质量浓度控制在 3 mg/L 左右,温度为常温. 反应器内活性污泥的质量浓度通过混合液回流比来控制.

试验共进行了 4 个月. 前一个月进行了生物膜的培养和活性污泥的培养和驯化,接种污泥取自污水厂的二沉池回流污泥. 待系统出水水质稳定后进行为期 3 个月的水质检测分析.

试验用水为典型的城市污水,其水质见表 3.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 试验用生活污水组成成分

水质指标质量浓度/(mg·L^{-1})						pH 值
COD	NH_4—N	总氮	总磷	SS	BOD	
300～500	20～30	30～50	5～11	150～290	100～300	6.7～7.8

1.3 分析方法和仪器

1) 水质分析 试验中所有的水质分析方法全部按照国家环保总局 1987 年颁布的水质监测分析方法进行[7]. 试验中主要的分析指标包括:MLSS、BOD_5、COD、TN、NH_3^-—N、pH 等,具体采用的分析方法和检测设备见表 4.

2) 微生物质量浓度分析 由于复合式生物膜 - 活性污泥工艺中存在着附着的生物膜和悬浮生长的污泥,而这两种污泥质量浓度的单位不同,生物膜是以 mg/m^2 表示,悬浮污泥是以 mg/L 来表示的. 因此,需要统一二者的单位. 总生物质量浓度的方程以下式表示:

$$Tb = \frac{TS_b}{V} + \mathrm{MLSS}$$

式中: Tb 为总体生物质量浓度,mg/L; TS_b 为悬浮载体上的生物膜量,mg; V 为反应器容积,L; MLSS 为悬浮污泥质量浓度,mg/L.

表 4 水质分析方法及检测设备

序号	分析项目	分析方法	分析检测设备
1	MLSS	重量法	CS101 - A 型电热鼓风干燥箱
2	MLVSS	重量法	RJM - 28 - 10 型焚烧炉
3	BOD_5	稀释接种法	电热恒温培养箱
4	DO	仪器法	YSI - 50B 溶解氧测定仪
5	COD	重铬酸钾回流法	四联可调电炉
6	pH	酸度计	PHS - 3C 型酸度计
7	TN	碱性过硫酸钾消解氧化法	752 紫外分光光度计
8	TP	过硫酸钾消解氯化亚锡还原法	721 分光光度计
9	NH_3—N	纳氏试剂分光光度法	721 分光光度计

对于悬浮相污泥质量浓度的检测方法,参照水和废水监测分析方法[7]提供的方法进行检测. 悬浮填料上附着生长的生物膜量的测定参照文献[8]进行,具体步骤如下:取出一定量的带有生物膜的纤维载体,放入 200 mL 的小烧杯中轻轻用去离子水淋洗数遍洗去夹带的悬浮生长的悬浮污泥,然后将洗净的生物膜颗粒转移到已称重的铝箔(W_1, g)中,再放入 105 ℃的烘箱中烘干、冷却和称重至(W_2, g);再将干燥的颗粒转移到装有 20 mL 的 NaOH 的烧杯中,在恒温水浴(80 ℃)中加热 1 h,加热过程中伴以搅拌至所有生物膜脱落,然后弃去脱膜碱液并用去离子水淋洗数遍,洗净的轮胎颗粒再转移至已洗净的原有铝箔中,再遵循同样步骤放入 105 ℃烘箱中烘干、冷却和称重(W_3, g). 由 W_1、W_2、W_3 即可计算出单位面积上微生物浓度,进而得到生物膜的总体质量浓度.

3) 微生物活性分析

SOUR 法:试验装置采用的是静态气体 - 静态水的呼吸测定装置,如图 2 所示. 将试验用水经过一段时间的曝气,放入一个密闭的瓶子内,再放入一定量的微生物,插入溶解氧电极,然后置于 25 ℃水浴中,根据瓶内溶解氧的下降来测定 OUR.

用此装置测定 SOUR 时,物料平衡方程十分简单.

$$\frac{\mathrm{d}S_o}{\mathrm{d}t} = -r_O = \frac{DO_1 - DO_2}{t_1 - t_2}$$

再由 $\mathrm{SOUR} = \frac{r_O}{X}$

求得 SOUR 的值.

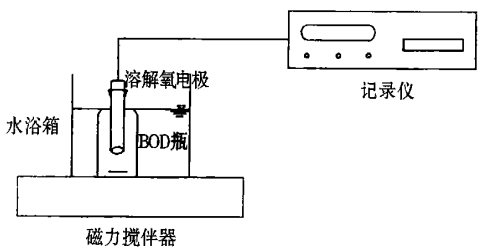


图 2 测定 OUR 实验装置图

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　试验结果与讨论

2.1　HRT 对反应器处理效能的影响

2.1.1　HRT 对 COD 去除效果的影响

HRT 对 COD 去除效果的影响如图 3 所示,不同 HRT 下系统的容积去除负荷如图 4 所示.

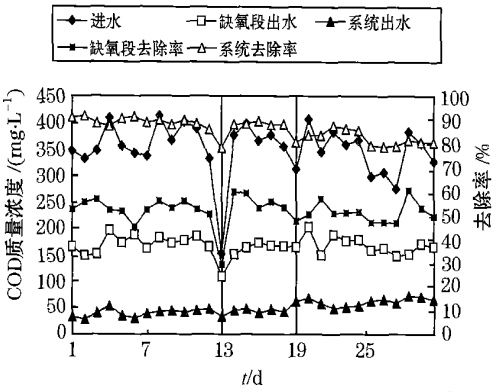


图 3　HRT 对 COD 去除效果的影响

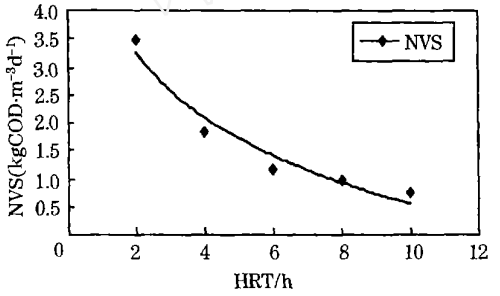


图 4　HRT 对 COD 容积去除负荷的影响

由图 3、4 可以看出 HRT 对反应器的 COD 处理效果影响不大,随着水力停留时间的增加,系统对 COD 的去除效果没有显著的提高,即使在 HRT 为 2 h 时,反应器对 COD 的去除效率也可以达到 80 % 以上,这时整个系统的容积负荷提升到了 3.45kgCOD/(m^3·d),表明复合式生物反应器具有很高的有机物去除能力.而且,缺氧段对 COD 的去除起到了很大的作用,这主要是由于缺氧段发生了反硝化作用,反硝化细菌利用回流液中硝酸盐中的氧进行呼吸,氧化分解大量可生化性好的有机物,缺氧段对 COD 的去除率在 50 %以上.在最高的负荷条件下,系统对 COD 的去除率只减少了 8 %,但是系统的容积去除负荷有很大的提高,由 0.76 kgCOD/(m^3·d)提高到 3.45 kgCOD/(m^3·d),这主要是由于在良好的水力条件与充足的溶解氧的环境下,促进了有机底质、氧气、微生物菌团三相物系亚微观传质,从而提高了整体的处理效率.而且微生物的浓度随着负荷的增加而增大,活性污泥和生物膜的更新速度加快.在目前普遍使用的复合式生物膜反应器中,生物膜上的微生物发挥主要处理作用,与活性污泥法的结合使其克服了传质速率慢、微生物更新速度慢的缺点,随着 HRT 的减少,系统的负荷不断提升,大量的有机物被附着的生物膜以不同形式的电子受体(O_2、NO_3^-—N、SO_4^{2-})所降解,悬浮污泥只降解少量有机物质[9].

2.1.2　HRT 对氮源去除效果的影响

HRT 对 NH_3^-—N 和 TN 的去除效果如图 5、6 所示.

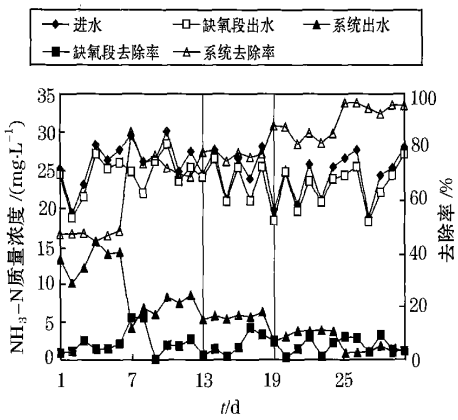


图 5　HRT 对氨氮去除效果的影响

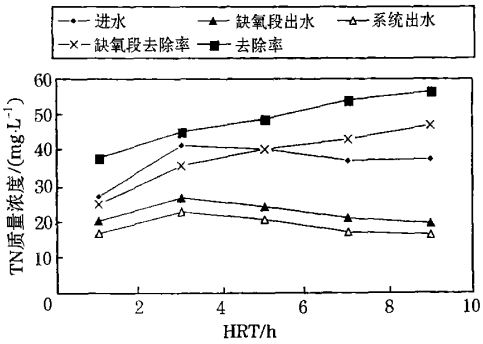


图 6　HRT 对总氮去除率的影响

由图 5 可以看出,由于二沉池部分污泥回流到缺氧池进行反硝化反应,因此缺氧池内 NH_3^-—N 质量浓度的降低是由于回流液稀释作用引起的,其总量没有减少.在本试验条件下,当进水NH_3^-—N 质量浓度在 19.76～30.1 时,好氧池 HRT 大于6 h,出水 NH_3^-—N 完全可以达到中水回用的标准,出水的最低质量浓度为 2.48 mg/L.当 HRT 小于 6 h 时,异氧菌发挥了其比增值速率高的优点,与自养型硝化菌竞争 O_2,且在生物膜外侧的异氧菌也会

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

抑制氧气的扩散,导致出水的 NH_3^-—N 随 HRT 的减少而迅速增加,难以满足中水回用的指标. 由于目前普遍采用的普通活性污泥法污泥负荷较高,污泥龄短,世代期长、比增长速率小的硝化细菌来不及大量繁殖就从系统中排除. 因此,在普通活性污泥系统中,硝化菌占活性污泥微生物中的比例很小,约为 5 %. 在碳化与硝化合并的处理系统中,一般认为处理系统的 BOD_5 负荷小于 0.15 kgBOD_5/kg·MLSS·d 时,处理系统的硝化才可能正常进行. 复合式生物法是在保持悬浮污泥质量浓度基本不变的条件下,通过增加生物膜上的微生物量来提高微生物质量浓度,达到降低污泥负荷的目的;而且填料对硝化细菌有滞留作用,可防止絮凝性差的硝化细菌随水流出[10,11]. 因此当系统中存在填料时,在溶解氧和温度不成为限制因素的条件下,活性污泥 - 生物膜法具有较强的硝化能力. 但是如果污水的停留时间太短,部分 NH_3^-—N 未被硝化细菌完全硝化或者 HRT 的缩短降低了系统对有机物的去除能力使异氧菌增殖迅速,都会导致硝化细菌的活性降低,从而降低了 NH_3^-—N 的去除效率,因此研究认为当 6 h < HRT < 8 h 时,系统能够维持较强的硝化能力并减少基建费用.

对于 TN 而言,由于进水直接进入缺氧区,从而缺氧区内有足够的碳源,有利于异养的兼性厌氧反硝化菌的生长繁殖,它利用由污泥回流带回的硝酸盐氮作电子受体,进行无氧呼吸,氧化大量有机物,起到脱除硝态氮作用的同时也降低了污水负荷,有利于后续好氧区内自养硝化菌的生长,从而提高了硝化作用的程度,使整个系统的脱氮效果得以提高. 该系统与 A/O 工艺相似,但不设内回流,系统的硝酸盐氮是由回流带回至缺氧段,降低了系统的动力能耗. 随着 HRT 的不断增加,系统出水的 TN 质量浓度逐渐降低,主要是由于缺氧段的 HRT 增加,使得反硝化反应能够较为彻底的进行,但是由于本阶段反应是在污泥回流比为 100 %时进行的,污泥回流所携带的 NO_3^-—N 质量浓度是有限的,因此出水中含有一定的 NO_3^-—N 和 NH_3^-—N.

2.2 HRT 对微生物性质的影响

2.2.1 HRT 对微生物数量的影响

图7反映了不同的 HRT 条件下,系统中各种形态污泥的质量浓度变化情况,试验数值取稳定运行状态下的平均值. 横坐标代表了 HRT 分别为 10、8、6、4、2 h 的 5 个运行状态. 由于 HRT 的改变直接决定了容积负荷的能力. 因此,随着 HRT 的减少,系统中的污泥质量浓度呈现不断增加的趋势. 我们将悬浮污泥的质量浓度视为传统工艺,在相同的运行状况下,复合式生物反应器的污泥质量浓度能达到传统工艺的 2 倍左右,尤其是在 HRT 为 2 h 的情况下. 与悬浮污泥的变化趋势一致,生物膜的量也是随着 HRT 的减少而不断增加的,这就促进了系统对有机物的降解能力. 由于大量的生物膜附着在载体上,大部分的底物都被生物膜所降解,即使存在底物与溶解氧向生物膜扩散过程中的阻力,情况也是如此. 图 3 中 COD 的去除率能较好的解释此种说法.

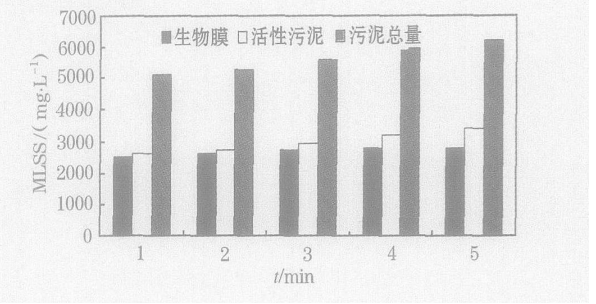


图 7 污泥质量浓度随 HRT 的变化

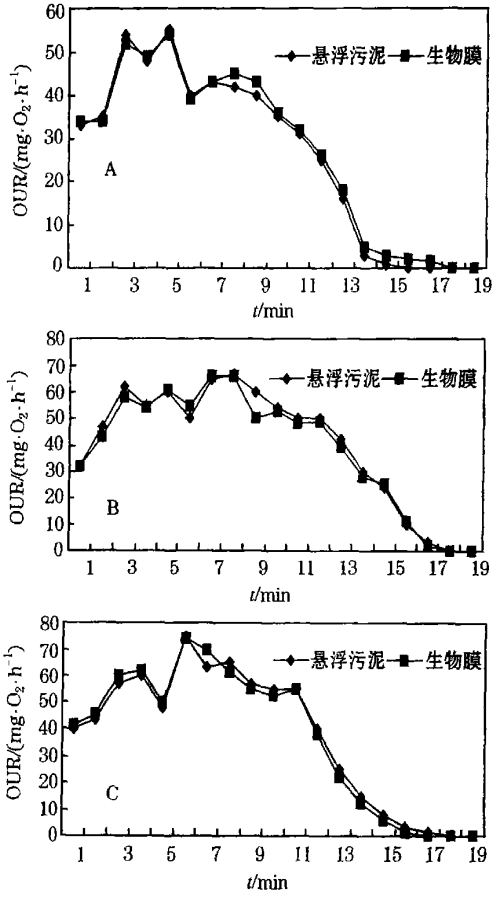


图 8 微生物活性随 HRT 的变化

(A:HRT = 10 h;B:HRT = 6 h;C:HRT = 2 h)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2.2　HRT 对微生物活性的影响

OUR 数值与较高的 COD 去除率和去除速度是一致的,在内源呼吸条件下的 OUR 值能很好的反映异养菌的活性[12],而且 OUR 的迅速下降能够表明微生物具有较高的活性. 图 8 表明了随着 HRT 的改变系统中悬浮相和附着相微生物的 OUR 值的变化,由于水力停留时间的减少,系统承受的有机负荷不断增加,使得系统中的微生物浓度有了很大程度的提高,这导致了微生物活性的降低,图中 A、B、C 分别代表了 HRT 为 10、6、2 h 的微生物活性状况,可以看出,在 HRT 较长的情况下,OUR 很快达到顶点,然后在极短的时间内下降到零点. 与悬浮污泥相比,生物膜中的微生物活性较低,但是在复合式反应器中,二者的差别不大,这主要是由于底物或者溶解氧向生物膜扩散的阻力较大所致[13].

3　结　论

1) HRT 的改变对系统 COD 的去除效果影响不大,系统对 COD 的去除能力始终保持在 80 %以上,但是会显著增强系统的 COD 容积去除负荷,由 10 h的 0.76 kgCOD/(m^3 ·d) 提高到 2 h 的 3.45 kg · COD/(m^3 ·d) .

2) HRT 对氮源污染的去除效果影响较大,NH_3^- —N 和 TN 的去除率随着 HRT 的增加都呈现上升趋势,其中 NH_3^- —N 由 50 %上升到 95 %以上,但由于试验过程中污泥回流比较小,所携带的 NO_3^- —N 质量浓度是有限的,因此出水中含有一定的 NO_3^- —N 和 NH_3^- —N.

3) 由于 HRT 的改变直接决定了容积负荷的能力,随着 HRT 的减少,系统中的污泥质量浓度呈现不断增加的趋势,因此低 HRT 条件下系统仍具备很强的降解能力. 较长的 HRT 情况下,反应器内微生物 SOUR 值很高,即具有更强的活性.

4) 与传统工艺相比,由于生物膜和活性污泥的共同降解作用,复合式生物膜 - 活性污泥工艺具备更强的抗冲击负荷能力,在保证出水水质和节省费用的前提下,研究认为 HRT 的合理值在 6～8 h 之间.

参考文献:

[1] WANNER J, KUCMAN K, GRAU P. Activated sludge process combined with biofilm cultivation[J]. War Res, 1988, 22 (2): 207 - 215.

[2] GEBARA F. Activated sludge biofilm wastewater treatment system [J]. War Res, 1998, 33 (1): 230 - 238.

[3] WANG Jian-long, SHI Han-chang, QIAN Yi. Wastewater treatment in a hybrid Biological reactor (HBR): effect of organic loading rates[J]. Process Biochemistry, 2000, 36: 297 - 303.

[4] HYUNG S L, SEJ P, TAI I Y. Wastewater treatment in a hybrid biological reactor using powdered minerals: effects of organic loading rates on COD removal and nitrification[J]. Process Biochemistry, 2002, 38: 81 - 88.

[5] 刘　雨,赵庆良,郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[6] LIU J X, GROENESTIJN J W, DODDEMA H J, *et al*. Removal of nitrogen and phosphorus using a new biofilm-activated sludge system [J]. War Sci Tech, 1996, 34 (1 - 2): 315 - 322.

[7] 国家环保局. 水和水质监测分析方法(第 3 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.

[8] LAZAROWA V, PIERZO V, FONTVILLE D, *et al*. Integrated approach for biofilm characterization and biomass control [J]. Wat. Sci. Technol, 1994 (7): 345 - 354.

[9] OHASHI A, DESILVA D G V, MOBARRY B, *et al*. Influence of substrate C/N ratio on the structure of multi - species biofilms consisting of nitrifiers and heterotrophs[J]. Wat Sci Technol, 1995, 32: 75 - 84.

[10] OKABE S, OOZAWA Y, HIRATA K, *et al*. Relationship between population dynamics of nitrifiers in biofilms and reactor performance at various C:N ratios[J]. Wat Res, 1996, 30: 1563 - 72.

[11] YANG L. Investigation of nitrification by co - immobilized nitrifying bacteria and zeolite in a batchwise fluidized bed[J]. Wat Sci Technol, 1997, 35: 169 - 75.

[12] PANSWARD T, POLPRUCKSA P. Specific oxygen uptake, nitrification and denitrification rates of zinc - added anoxic/oxic activated sludge process[J]. Wat Sci Technol, 1998, 38: 133 - 139.

[13] 赵庆良,刘淑彦,王　琨. 复合式生物膜反应器中生物膜量、厚度及活性[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32 (6): 39 - 43.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net