

文章编号:1000-582X(2005)07-0086-04

# HRT 对 SUFR 系统处理效果的试验分析\*

罗固源,唐刚,季铁军,张瑞雪

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**分析了总水力停留时间(11 h、9 h、8 h、6 h)对螺旋升流式反应器系统处理效果的影响。利用 SUFR 系统进行试验研究的结果表明,在 HRT 大于 8 h(厌氧停留时间 1.51 h,缺氧停留时间 2.25 h,好氧停留时间 4.24 h)时,该系统 COD、TN、TP 的处理效果随着水力停留时间的减小变化不大,COD、TN、TP 去除率仍分别达到 93%、87%、90.2% 以上。当 HRT 降为 6 h(厌氧停留时间 1.13 h,缺氧停留时间 1.69 h,好氧停留时间 3.18 h)时,处理效果变化较大,但 COD 的去除率仍高于 85%,TN、TP 的去除率变为 76%、72%,仍具有较高的去除率。这说明,接近活塞流特征的 SUFR 系统可以减轻增加水力负荷对污水处理的负影响,具有较强的抗冲击负荷能力。

**关键词:**螺旋升流式反应器;总水力停留时间(HRT);水力负荷;生物脱氮除磷;活塞流

**中图分类号:**X703

**文献标识码:**A

在城市污水处理系统中,影响系统处理效果的因素归纳起来有 3 类:第 1 类是环境因素,如温度、pH、溶解氧;第 2 类是工况因素,如微生物量、C/N、负荷等;第 3 类是运行方式,即水力停留时间 HRT(厌氧时间、缺氧时间与好氧时间)的组合方式等。而水力停留时间往往直接影响工程投资,因此对其研究很具有实际意义。

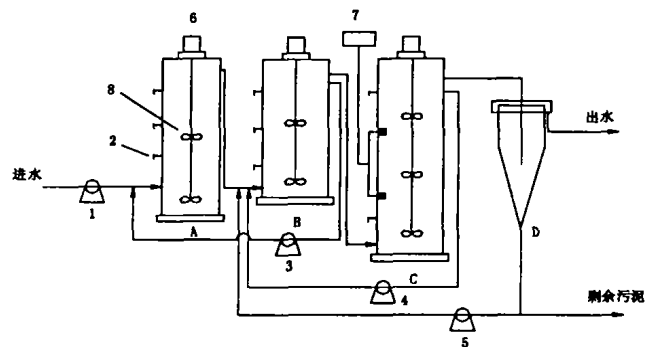
课题组在 UCT(University of Capetown)工艺的基础上对单个反应器技术进行优化设计,开发出具有自主知识产权的“螺旋升流式反应器”(Spiral Up-Flow Reactor, SUFR)系统。该系统中反应器的主要特点是<sup>[1]</sup>:反应器中水流以螺旋升流方式行进,可形成较好的活塞流流态。基质浓度可呈明显的梯度分布。笔者着重就 SUFR 系统在不同 HRT 影响下对营养物去除效果的变化并结合反应器的特性进行试验分析。目的在于寻求 SUFR 系统最佳的 HRT,以减小该系统在实际工程应用中的投资。

## 1 试验方法及装置

### 1.1 试验装置

试验在自行设计的 SUFR 中进行,流程如图 1 所示。进水经蠕动泵计量后与从缺氧反应器回流的混合液一起进入厌氧反应器底部,厌氧末端的混合液与从

沉淀池回流的污泥及从好氧反应器回流的混合液一起进入缺氧反应器底部,缺氧末端的混合液进入好氧反应器底部,好氧末端的混合液进入沉淀池进行泥水分离,沉淀池的上清液为系统的出水。混合液在厌氧反应器、缺氧反应器与好氧反应器中,在有特定倾角导流叶片的推动下,螺旋上升。



A. 厌氧反应器 B. 缺氧反应器 C. 好氧反应器 D. 沉淀池  
1. 进水泵 2. 取样口 3. 缺氧液回流泵 4. 好氧液回流泵  
5. 污泥回流泵 6. 导流电机 7. 曝气装置 8. 导流叶片

图 1 螺旋升流式反应器系统流程图

试验表明,导流电机的转速为 77 r/min 时即可维持较好的螺旋升流流态。好氧反应器、缺氧反应器和厌氧反应器中叶片的中心轴长分别为 15 cm、15 cm、9 cm。在好氧反应器中下部装有微孔曝气砂头,以保持

\* 收稿日期:2005-04-10

基金项目:国家“十五”攻关课题(2001BA604A01-03-01);国家自然科学基金(50378095);荷兰赠款项目(2003-MOC-NGGP-03)

作者简介:罗固源(1944-),男,重庆人,重庆大学教授,博士生导师,主要从事水污染控制理论与技术的研究。

中上部的完全好氧状态和下部的好氧-缺氧过渡状态。

试验所用反应器用有机玻璃管制成,厌氧反应器内径13 cm,高120 cm,有效容积约16 L;缺氧反应器内径19 cm,高85 cm,有效容积约24 L;好氧反应器内径19 cm,高160 cm,有效容积约45 L.操作参数为:缺氧至厌氧混合液回流为进水流量的150%;好氧至缺氧混合液回流量为200%~250%;污泥回流量为50%~80%;污泥龄SRT=20 d.

1.2 试验水质及分析方法

试验原水由生活污水和自来水再加一定量的KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、奶粉、豆粉使其接近中等浓度城市污水情况.其中生活污水的COD占总量的60%左右,试验原水水质如表1所示.

表1 试验原水水质指标及分析方法 mg/L

指标	数值范围	数值平均值	分析方法
COD <sub>Cr</sub>	260.0~350.0	328.0	HACH-COD测定仪(美)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	3.2~6.6	5.4	钼锑抗分光光度法
TP	5.2~7.5	6.5	过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	27.0~36.0	32.0	纳氏试剂光度法
TN	35.0~55.0	46.0	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法
pH	6.8~7.2	7.0	PHS-3C型精密酸度计

试验主要考虑水力停留时间对螺旋升流式反应器SUFR处理效果的影响.在试验过程中通过调节进水流量来改变整个系统的水力停留时间,总水力停留时间HRT分别取11.0 h、9.0 h、8.0 h、6.0 h.具体各反应器停留时间分布见表2,在每种HRT下稳定运行7~10 d.试验温度在15~25℃.

表2 试验日期安排和不同水力停留时间下各反应器的时间分布 h

名称	试验时间或日期			
总水力停留时间 HRT	11	9	8	6
厌氧段停留时间	2.07	1.69	1.51	1.13
缺氧段停留时间	3.11	2.54	2.25	1.69
好氧段停留时间	5.82	4.77	4.24	3.18
试验日期/d	1~9	10~18	19~28	29~37

2 试验结果与分析

2.1 不同HRT下SUFR系统对COD的去除

由图2可以看出,SUFR系统在不同的水力停留时间HRT(HRT=11 h、9 h、8 h)下,在进水COD在252~462 mg/L时,出水COD为8~35 mg/L,当为6 h时,去除率降到85.3%.

从图2中还发现,水力停留时间HRT从11 h降到6 h时,系统中厌氧反应器的出水COD上升幅度较大,由35 mg/L上升到153 mg/L左右.缺氧反应器和好氧反应器的出水COD也有所上升.主要是因为水力

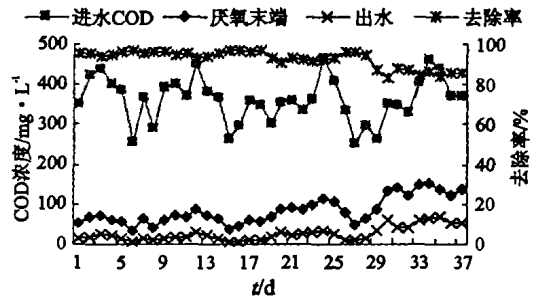


图2 SUFR系统在不同HRT下对COD的去除效果

停留时间的减小,厌氧段、缺氧段和好氧段时间也分别减小,厌氧时间从2.08 h降到1.3 h.有机物与污泥的接触时间也随之减小.根据进水流量及各个回流量对试验结果统计分析发现:厌氧反应器对COD的平均去除量较高,但该过程并未真正地对COD降解,只有很少一部分发生了厌氧稳定<sup>[1]</sup>,大部分只是形式上的转变,从外碳源转为内碳源PHB等高分子聚合物,该内碳源在缺氧段或好氧段被用作反硝化或吸磷的能量.

在水力停留时间的整个变化过程中,对SUFR系统COD去除率影响不大,系统COD去除率均高于90%.说明该系统具有较高的稳定性,主要原因可能以下几点:

- 1) 与SUFR系统的反应器有关.流态试验表明该反应器流内可形成较好的活塞流流态.基质浓度可呈明显的梯度分布,有利于基质与微生物间的良好接触.
- 2) 通过镜检发现SUFR系统中微生物丰富.根据生态学中的“多样性导致稳定性原理”,种群丰富、结构完整的生态系统更能保持反应器处理能力的稳定<sup>[2]</sup>,从而降低了水力停留时间对COD去除效果的负作用.

2.2 不同HRT下SUFR系统对总氮及氨氮的去除(见图3、图4)

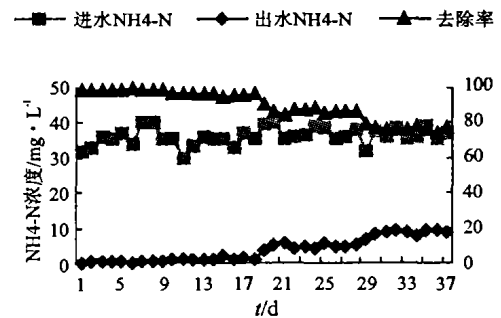


图3 SUFR系统在不同HRT下对NH<sub>4</sub>-N的去除效果

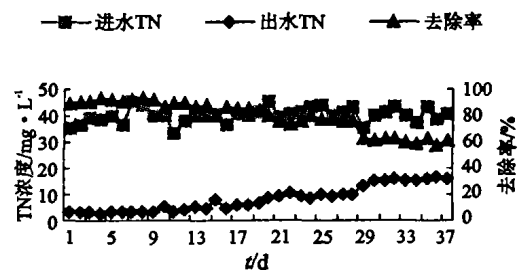


图4 SUFR系统在不同HRT下对TN的去除效果

由图 3 和图 4 可知,当进水总氮在 35 ~ 45 mg/L 时,随着水力停留时间的减小,出水总氮从 3.23 mg/L 增加到 13.6 mg/L,出水氨氮从 0.42 mg/L 增加到 6.65 mg/L. 水力停留时间为 11 h 时氨氮的去除率为 98.8%,总氮的去除率为 91.8%,当水力停留时间为 6 h 时,氨氮的去除率为 76.2%,总氮的去除率为 62.2%. 不难看出,氨氮去除的下降是由于硝化时间不够引起的. 而总氮的去除率下降则是由于硝化不够和碳源不足而使反硝化脱氮不完全的双重原因引起的. 同时在试验中发现出水中硝酸盐氮的含量有所增加,从 2.35 mg/L 到 11.36 mg/L. 另外,在 HRT 降低到 6 h 时,发现沉淀池中偶尔会出现小块的污泥上浮. 这一试验现象主要是由于沉淀池中的污泥利用其内源呼吸或自身解体形成的碳源进行反硝化作用时产生的氮气而引起的<sup>[3]</sup>.

据文献报道<sup>[4]</sup>,改良型 A<sup>2</sup>O 工艺在水力停留时间为 8.63 h 时氨氮的去除率 73%. 而一般 UCT 工艺的设计时间为:第一个缺氧 2 ~ 4 h,好氧 4 ~ 12 h,第二个缺氧 2 ~ 4 h,在较短的水力停留时间如 9 h 时总氮去除率也仅为 82%<sup>[5]</sup>. 由此可以看出,就水力停留时间对氨氮和总氮的去除而言,SUFR 系统具有一定的优势. 在试验中还发现好氧反应器对总氮也有一定的去除作用,在 HRT 为 9 h 时,其去除量约占 SUFR 系统去除总量的 12% ~ 35%,平均值为 25% 左右. 这表明在好氧反应器内发生了同步硝化反硝化脱氮现象,其原因有如下 2 个方面:

1) 与 SUFR 系统独特的设计有关. 在 SUFR 系统中曝气头安装在好氧反应器的中下部,而底部并没有安装曝气头,这就使好氧反应器底部溶解氧的浓度维持在 0.5 ~ 0.95 mg/L 左右,在较低的溶解氧浓度范围内,有利于同步硝化反硝化脱氮<sup>[6]</sup>.

2) 通过镜检发现 SUFR 系统中的污泥呈现明显的颗粒化状态,污泥颗粒的粒径在 0.7 ~ 0.9 mm 之间,是普通活性污泥絮体粒径(0.1 mm)的 7 ~ 9 倍,大的颗粒污泥有利于发生好氧反硝化作用<sup>[7]</sup>,因为颗粒污泥的形成,使其形成外部为好氧区而内部为缺氧区的微环境,这样在外部好氧区进行硝化的同时,为内部缺氧区进行反硝化提供了可能条件.

### 2.3 不同水力停留时间 HRT 下 SUFR 系统对磷的去除

#### 2.3.1 温度对总磷的影响的分析(见图 5)



图 5 SUFR 系统在不同 HRT 下对 TP 的去除效果

由图 5 可知,在进水总磷在 5.50 ~ 7.53 mg/L 时,在不同的水力停留时间下,处理效果变化较大,在水力停留时间为 11 h 时,出水 TP 为 0.1 ~ 0.23 mg/L,去除率为 97.2%,水力停留时间为 9 h 时,去除率降低到 96.1%,影响不是很大. 但当水力停留时间为 6 h 时,TP 去除降到 72.4%. 可见缩短水力停留时间对除磷有一定的影响.

#### 2.3.2 水力停留时间对厌氧释磷的影响与分析(见图 6)

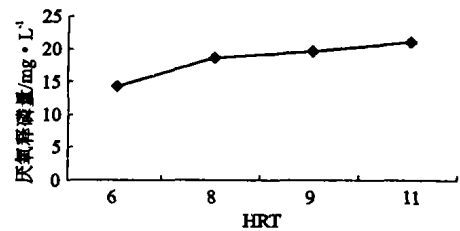


图 6 水力停留时间对厌氧释磷的影响

从图 6 可以看出,厌氧释磷量随水力停留时间的减小而减小. 开始时厌氧释磷量减小较慢,但当厌氧水力停留时间为 1.51 h 以下时,减小变快. 在厌氧水力停留时间为 2.07 h 时,厌氧释磷为 21 mg/L,而到 1.13 h 时厌氧释磷降为 14.3 mg/L.

根据生物除磷原理:系统的吸磷能力取决于磷的厌氧释放量. 而磷的厌氧释放由可利用的水解产物小分子有机酸决定. 从图 3 可以看到随着水力停留时间的减小,厌氧吸附的 COD 逐渐降低,可以判断出水解产物 VFA 也降低<sup>[8]</sup>,则在厌氧下转化生成的 PHB 就减少,从而需要释放的磷产生的能量就相对减少. 同时有研究表明过长的厌氧停留时间并没有好处,停留时间过长可导致没有 VFA 的吸收的磷释放,这就有可能导致碳源贮存物量不足,不能在好氧区产生足够的能量来吸收所有释放的磷<sup>[9]</sup>.

厌氧释磷量的减小还有另外一个原因就是缺氧反硝化不完全,从缺氧反应器回流至厌氧反应器混合液中硝态氮的含量将增加,这样在厌氧反应器就存在着反硝化菌与聚磷菌对碳源竞争的矛盾,进一步会影响到厌氧释磷量的大小.

#### 2.3.3 水力停留时间对吸磷的影响与分析

在试验中取出每种停留时间下的厌氧出水污泥做特性试验分析,测试每种污泥的吸磷速率,结果见图 7.

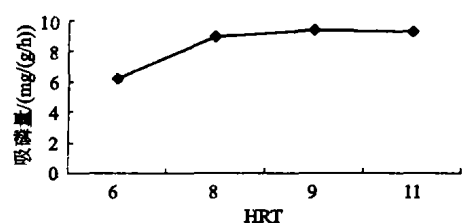


图 7 不同水力停留时间下的吸磷速率

从图7中可以发现在不同的水力停留时间下的污泥吸磷量不同,水力停留时间在11 h、9 h、8 h时,每克污泥吸磷速率变化不大,大致在9 mg/(g/h)左右,而水力停留时间为6 h时的污泥吸磷速率为6.23 mg/(g/h)。这一现象说明,好氧段吸磷量的降低不仅仅是贮存的PHB降低而引起的。另外一个原因可能是进入缺氧和好氧的COD增加,聚磷菌在与非聚磷菌对有机物的竞争中逐渐处于劣势,非聚磷菌的量逐渐增多,聚磷菌在活性污泥中的比例下降,除磷效果也逐渐下降。试验中发现当水力停留时间回到8 h以上时,经过3~5 d的调整,脱氮除磷效果又很快恢复正常,说明SUFR系统有较强的自身恢复调节能力。

### 3 结论

1) SUFR系统能形成稳定的厌氧、缺氧和好氧环境,对TN、TP、和COD都有较高的去除效果。在水力停留时间大于8h时该反应器稳定运行后能保证COD、TN、TP平均去除率分别达93%、87%、90.2%以上。在水力停留时间为6h时COD、TN、TP平均去除率也能达到85%、76%、72%。

2) 接近活塞流特征的SUFR系统可以减轻增加水力负荷对污水处理的负影响,具有较强的抗冲击负荷能力。

3) SUFR系统在较短的水力停留时间下具有较好的处理效果,使其工程投资成本降低,应用推广上更具优势。

### 参考文献:

- [1] 罗固源,豆俊峰,吉芳英,等. 螺旋升流式反应器脱氮除磷效果及其特性的研究[J]. 环境科学学报,2004,24(1):15-19
- [2] 罗固源,罗富金,豆俊峰. 螺旋升流式反应器系统中污泥特性[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2003,26(10):112-115.
- [3] MULKERRINS D, JORDAN C, MCMAHON S. Evaluation of the Parameters Affecting Nitrogen and Phosphorus Removal in A/A/O Biological Nutrient Removal System[J]. J Chem Technol Biotechnol,2000,(75):261-268.
- [4] 任洁,顾国维,杨海真. 改良型A<sup>2</sup>O工艺处理城市污水的中试研究[J]. 给水排水,2000,26(6):7-10.
- [5] 高峻发. 王社平. 污水处理工艺设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [6] YOO H, AHN K H, LEE H J. Nitrogen Removal from Synthetic Wastewater by Simultaneous Nitrification and Denitrification Via Nitrite in an Intermittently-aerated Reactor[J]. Wat Res,1999,33(1):145-154.
- [7] 冯叶成,王建龙,钱易. 同时硝化反硝化的试验研究. 上海环境科学[J]. 2002,21(9):527-530.
- [8] BANERJEE A, ELEFSINIOTIS P, TUHTAR D. Effect of HRT And Temperature On The Acidogenesis Of Municipal Primary Sludge And Industrial Wastewater[J]. Wat. Sci. Tech,1998,38(8):417-423.
- [9] 郑兴灿,李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

## HRT Effects on Biological Nutrient Removal in Spiral Up-flow Reactor System

LUO Gu-yuan, TANG Gang, JI Tie-jun, ZHANG Rui-xue

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** Overall effects of HRT (11 h, 9 h, 8 h, 6 h) on the Spiral up-flow reactor (SUFR) system are analyzed. The results of the operation under different HRT condition shows that the removal efficiencies of COD, TN and TP decreased not obviously with decreasing HRT when HRT is longer than 8h. Anaerobic retention time, anoxic retention time and aerobic retention time were 1.51 h, 2.25 h and 4.24 h, respectively. The removal efficiencies of COD, TN and TP is kept over 93%, 87% and 90.2%, respectively. Although the removal efficiencies changed obviously when the HRT was 6 h. Anaerobic retention time, anoxic retention time and aerobic retention time are 1.13 h, 1.69 h and 3.18 h, respectively. COD-removal efficiency is always up to 85%, the removal efficiencies of TN and TP is kept over 76% and 72%, also has upper removal efficiencies. It is indicated that the SUFR system, which is similar to plug-flow-reactor, has strong stability and can compensate negative effects of increasing hydraulic loading.

**Key words:** spiral up-flow reactor; hydraulic retention time (HRT); hydraulic loading; biological nitrogen and phosphorus removal; plug flow