

# 内循环颗粒污泥床硝化反应器流动模型研究

卢 刚 郑 平\*

(浙江大学环境工程系 杭州 310029)

**摘 要** 采用脉冲刺激响应技术,对稳态内循环颗粒污泥床硝化反应器进行了示踪试验。根据试验结果,分别运用轴向扩散模型和多釜全混流反应器串联模型对反应器沉淀区和循环区的流态进行了分析和判断。结果表明,反应器沉淀区的分散数  $D/ul$  为 0.00148,该区域的流态接近于平推流反应器(PFR);反应器循环区的串联级数为 1.021,该区域的流态接近于全混流反应器(CSTR)。稳态时,反应器的理论水力停留时间为 360min,实际水力停留时间为 341.2min,反应器中死区所占的体积百分比为 5.22%,其中生物体死区为 0.75%,水力死区为 4.47%,表明反应器结构性能良好。根据试验和分析结果,建立了内循环颗粒污泥床硝化反应器的流动模型,即全混流和平推流的串联组合模型。由流动模型所得的理论停留时间分布曲线与由试验所得的实际停留时间分布曲线吻合良好,两者的平均相对误差为 8.56%,表明所建模型具有较高的准确性。

**关键词** 内循环颗粒污泥床硝化反应器 稳态 脉冲刺激响应技术 流态 水力停留时间分布 死区 流动模型  
中图分类号 TQ92 文献标识码 A 文章编号 1000-3061(2003)06-0754-04

随着环境中氮素污染的加剧,含氮废水的处理受到了普遍关注,生物脱氮技术则因高效低耗而成为研究和应用的热点。无论在传统的硝化-反硝化工艺,还是在新型的厌氧氨氧化、短程硝化-反硝化等工艺中<sup>[1-3]</sup>,硝化过程都是必不可少的重要环节,并往往是整个工艺的限速步骤。因此,研发高效硝化反应器,对于废水生物脱氮具有重要的现实意义。

气提式内循环生物反应器是 20 世纪 80 年代初期开发的新型高效反应器,已成功应用于有机污染物的控制<sup>[4]</sup>。近年来,这种反应器已逐渐拓展应用于硝化过程<sup>[5]</sup>,但并没有显现出预期的处理效能。究其原因,可能是硝化细菌生长缓慢,在一般的水力停留时间下反应器中无法持留高浓度的生物细胞<sup>[6]</sup>。内循环颗粒污泥床硝化反应器融合了气提式内循环反应器中优良的传质性能与上流式厌氧污泥床(UASB)反应器中污泥颗粒化的理念,通过形成好氧颗粒污泥,有效地解决了反应器中菌体浓度不高的问题,取得了很高的生物硝化效能<sup>[7-9]</sup>。

本文旨在实现反应器高效稳定运行的基础上,进一步探索内循环颗粒污泥床硝化反应器内部的流态,建立反应器的流动模型,并为后续的过程动力学模型研究打下基础,以实现对该反应器的成功开发和应用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

内循环颗粒污泥床硝化反应器及其流程如图 1 所示。

反应器由有机玻璃制成,其内部结构包括升流区、降流区、气液分离区、泥水分离区等 4 个部分。反应器的总有效容积为 10.38L,高径比为 1:1,升流区、降流区和泥水分离区的截面积分别为 153.9cm<sup>2</sup>、97.3cm<sup>2</sup> 和 346.4cm<sup>2</sup>。试验装置内采用微孔气体分布器曝气,孔径约为 0.2mm。反应器运行时,含氮废水采用蠕动泵从底部进水口泵入反应器,空气采用气泵从微孔气体分布器引入反应器。在浮力作用下,气泡向上运动,其中大部分在气液分离区溢出。由于升流区和降流区中气体含量不同,使两区中混合液的密度产生差异,密度差所致的压差可使混合液在升流区和降流区之间形成内循环运动,因此升流区和降流区可统称为循环区。

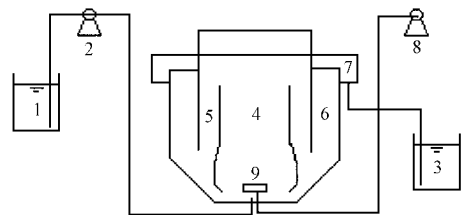


图 1 内循环颗粒污泥床硝化反应器装置与流程图  
Fig.1 The interal-loop granular sludge bed nitrifying reactor and its flowsheet

- 1. Influent bottle ; 2. Influent pump ; 3. Effluent bottle ;
- 4. Riser ; 5. Downcomer ; 6. Settling section ;
- 7. Overflow weir ; 8. Aeration pump ; 9. Blowhole

在一定的操作条件下,经过3个月的运行,反应器内可形成颗粒状的污泥,标志着内循环颗粒污泥床硝化反应器成功启动。反应器稳态运行时可以达到很高的处理效能,理论水力停留时间仅为360min(6h),进水氨氮浓度为40mmol/L,容积负荷高达160mmol(L·d),氨氮去除率保持在95%以上,反应器中污泥浓度保持在7.5g/L左右。此时,曝气流量为0.65L/min,升流区液体表观速率为3.20cm/s,降流区液体表观速率为5.06cm/s。在上述的稳态运行条件下,对反应器流动模型进行研究。

### 1.2 试验过程与测定方法

采用脉冲刺激响应技术测定反应器内部不同区域的停留时间分布,对各区域的流态进行分析和判断,计算反应器内部的实际水力停留时间及死区分布和大小,由此建立整个反应器的流动模型。本试验通过瞬时注入一定量的示踪剂以形成脉冲信号,所采用的示踪剂为氟离子,测定方法为离子选择电极法<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉淀区的流态

在反应器稳态运行时,沉淀区内水流平缓且泥水分离良好,沉淀区下部的静止污泥与循环区的紊动污泥之间存在一个明显的环形截面,其具体位置在沉淀区水面以下9cm处,该截面区域即沉淀区与循环区的交界处,也就是沉淀区入口或循环区的出口。为了判断沉淀区的流态,在沉淀区入口处均匀地瞬时注入10mL浓度为120mg/L的示踪剂溶液,同时监测从沉淀区溢流出来的出水中的示踪剂浓度随时间的变化,结果如图2所示。

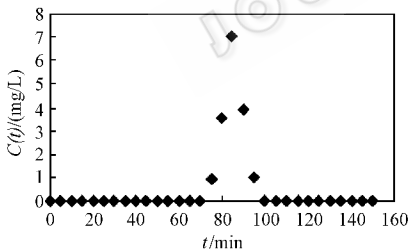


图2 沉淀区出水中示踪剂浓度随时间变化  
Fig.2 The change of the concentration of effluent tracer from settling section with time

由图2可以看出,反应器沉淀区内的返混程度很小,该区域的水力混合特征非常接近于平推流。对其进一步分析,用式(1)计算流体在沉淀区内的停留时间分布密度函数 $E(t)$ 、平均停留时间 $\bar{t}$ 和停留时间分布的散度 $\sigma_t^2$ <sup>[11]</sup>:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}; \quad \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tE(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt};$$

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 E(t) dt - (\bar{t})^2 \quad (1)$$

式中, $C(t)$ 为出水中氟离子浓度,随时间而变化。

当返混较小时,可用轴向扩散模型对流态进行判断,轴向扩散模型中,反应器某微元体积中的示踪剂浓度变化速率可表示为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - u \frac{\partial C}{\partial l} \quad (2)$$

式中, $D$ 为轴向扩散系数, $l$ 为反应器轴向距离, $u$ 为流动速率。引入无因次变量 $C^* = C/C_0$ 、 $\theta = t/\bar{t}$ 、 $Z = l/L$ ,分别代表无因次的浓度、时间和长度,其中 $C_0$ 为初始浓度, $L$ 为反应器轴向总长度。将上述无因次变量代入式(2)中得到该模型的无因次表达式:

$$\frac{\partial C^*}{\partial \theta} = (D/uL) \frac{\partial^2 C^*}{\partial Z^2} - u \frac{\partial C^*}{\partial Z} \quad (3)$$

式中, $D/uL$ 为分散数,当返混较小时, $D/uL = 0.5\sigma_0^2$ ,这里 $\sigma_0^2$ 为无因次方差: $\sigma_0^2 = \sigma_t^2/\bar{t}^2$ 。当 $D/uL = 0$ 时,反应器为平推流反应器(PFR),当 $D/uL = \infty$ 时,反应器为全混流反应器(CSTR)。根据已有的试验数据,采用Newton-Cotes插值求积法计算式(1)中的积分值,进而可得到 $D/uL$ 的值,结果如表1所示。

表1 反应器沉淀区流态分析结果

Table 1 The analysis on flow pattern in settling section

$\sigma_t^2/\text{min}^2$	$\bar{t}/\text{min}$	$\sigma_0^2$	$D/uL$
19.855	81.9	0.00296	0.00148

从分析结果可知,反应器沉淀区内的分散数非常小,该区域的流态接近于平推流反应器(PFR)。此外,由表1可知,此时沉淀区的实际水力停留时间为81.9min,而该区域的理论停留时间约为82.1min,两者非常接近。

### 2.2 循环区的流态

在反应器底部的进水口处瞬时注入10mL浓度为5g/L的示踪剂溶液,同时监测循环区出水中示踪剂浓度随时间的变化,结果如图3所示。

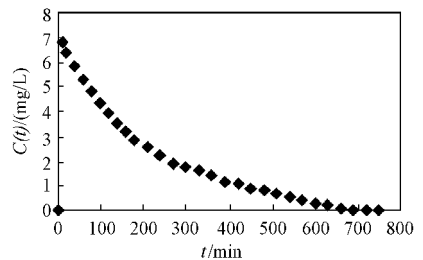


图3 循环区出水中示踪剂浓度随时间变化  
Fig.3 The change of the concentration of effluent tracer from circulating section with time

根据图3判断,反应器循环区中的返混现象很明显,因此采用多釜全混流反应器串联模型进行分析。该模型中,反应器串联级数可通过下式计算<sup>[11]</sup>:

$$N = \frac{1}{\sigma_0^2} \quad (4)$$

这里, $\sigma_0^2$ 为无因次方差: $\sigma_0^2 = \sigma_t^2/\bar{t}^2$ 。显然, $N = 1$ 时为全混流, $N = \infty$ 时为平推流。根据式(1)和(4)对以上试验数据  
© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 http://journals.im.ac.cn

进行分析,结果如表 2 所示。

表 2 反应器循环区流态分析结果

Table 2 The analysis on flow pattern in circulating section

$\sigma_t^2/\text{min}^2$	$\bar{t}/\text{min}$	$\sigma_{\theta}^2$	$N$
64059.5	255.8	0.979	1.021

从分析结果可知,反应器循环区内的串联级数接近于 1,因此该区域的流态可用全混流反应器(CSTR)来模拟。此外,由表 2 可知,此时循环区的实际水力停留时间为 255.8 min,而该区域的理论停留时间约为 277.9min,两者有一定差距,这实际上是由死区引起的,将在下面进一步分析。

### 2.3 反应器实际水力停留时间与死区

为了确定稳态下反应器的实际水力停留时间,需要对整个反应器进行水力示踪试验。在反应器的入口处瞬时注入 10mL 浓度为 5g/L 的示踪剂溶液,同时监测反应器出水中示踪剂浓度随时间的变化,结果如表 3 所示。

表 3 反应器出水中示踪剂浓度

Table 3 The effluent tracer concentration of the reactor

$t/\text{min}$	0	10	20	30	40
$C(t)$ (mg/L)	0.00	0.00	0.00	0.03	0.15
$t/\text{min}$	50	60	70	80	90
$C(t)$ (mg/L)	1.23	3.41	6.29	7.02	6.44
$t/\text{min}$	100	110	120	130	140
$C(t)$ (mg/L)	6.50	6.44	5.64	5.62	5.57
$t/\text{min}$	150	160	180	200	220
$C(t)$ (mg/L)	5.03	4.42	3.89	3.71	2.92
$t/\text{min}$	240	260	280	300	320
$C(t)$ (mg/L)	2.51	2.09	1.83	1.67	1.47
$t/\text{min}$	340	360	380	400	460
$C(t)$ (mg/L)	1.40	1.15	0.91	0.85	0.70
$t/\text{min}$	520	580	640	700	760
$C(t)$ (mg/L)	0.57	0.49	0.42	0.35	0.21
$t/\text{min}$	820	880	940	1000	
$C(t)$ (mg/L)	0.09	0.05	0.03	0.00	

根据试验数据,通过式(1)可计算反应器的实际停留时间 $\bar{t}_T$ ,结果发现 $\bar{t}_T$ 小于理论停留时间,说明反应器中存在一定的死区,死区所占的体积百分比可用下式计算:

$$\eta_{v_d} = (1 - \bar{t}_T/HRT) \times 100\% \quad (5)$$

式中, $HRT$ 为理论停留时间。反应器中的死区一般由两部分组成:水力死区( $d_h$ )和生物体死区( $d_b$ )。水力死区主要受反应器内部结构的影响,生物体死区则是由于微生物自身体积而导致的反应器有效容积的损失。在稳态时,用重量法测得反应器中污泥湿密度为 1.017g/mL,结合已知的污泥浓度,可以计算出反应器中生物体死区所占的体积百分比。由已知的总的死区和生物体死区的大小,可以计算出水力死

区所占的体积百分比。试验与计算结果如表 4 所示。

表 4 反应器水力停留时间与死区

Table 4 The hydraulic retention time and dead space in the reactor

$HRT/\text{min}$	$\bar{t}_T/\text{min}$	$\eta_{v_d}/\%$	$d_h/\%$	$d_b/\%$
360	341.2	5.22	0.75	4.47

结果表明,反应器中总的死区和水力死区所占的体积百分比均较小,反应器的结构性能优良。

### 2.4 反应器流动模型

根据前面的试验和分析结果,反应器的沉淀区可模拟为一个平推流反应器(PFR),反应器的循环区可模拟为一个全混流反应器(CSTR)。基于反应器中循环区和沉淀区的前后串联关系,并考虑反应器的实际水力停留时间和死区体积( $v_d$ )整个反应器在稳态下的流动模型可以表示为全混流反应器和平推流反应器的串联组合,如图 4 所示。

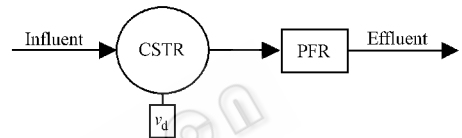


图 4 反应器流动模型示意图

Fig.4 Flow model of the reactor

根据上述的理论模型,可以得到反应器稳态运行时理论停留时间分布曲线,同时由表 3 的数据可以得到实际停留时间分布曲线,将两者进行对比以验证所建流动模型的准确性,结果如图 5 所示。

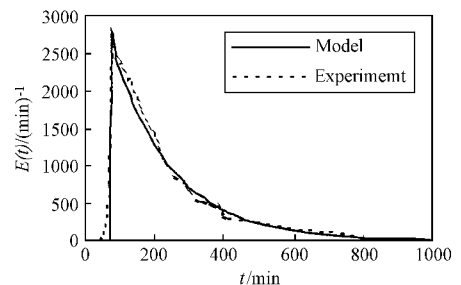


图 5 反应器停留时间分布

Fig.5 The retention time distribution of the reactor

对比分析结果表明,由流动模型所得的理论停留时间分布曲线与由试验所得的实际停留时间分布曲线吻合良好,两者的平均相对误差为 8.56%。因此,所建的反器流动模型能够较为准确地描述和预测整个反应器的流态。

## 3 结 论

内循环颗粒污泥床硝化反应器是一种新型硝化装置,在理论停留时间为 360min(6h),反应器实现高效稳态运行的条件下,对该反应器内部的流态进行了试验研究。研究结果表明,反应器沉淀区的流态接近于平推流反应器(PFR),反应器循环区的流态接近于全混流反应器(CSTR)。在稳态时,反应器的实际水力停留时间为 341.2min,反应器中死区所占的体积百分比为 5.22%,其中生物体死区为 0.75%,水力死

区为 4.47% ,表明反应器结构性能良好。根据试验和分析结果,整个反应器的流动模型可以表示为全混流反应器和平推流反应器的串联组合。由流动模型所得的理论停留时间分布曲线与由试验所得的实际停留时间分布曲线吻合良好,两者的平均相对误差为 8.56% ,表明所建模型具有较高的准确性。

## REFERENCES(参考文献)

- [ 1 ] Verstraete W , Philips S. Nitrification-denitrification processes and technologies in new contexts. *Environmental Pollution* , 1998 , **102** ( 31 ) : 717 - 726
- [ 2 ] Daniel S H , John G R. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* , 1998 , **18** : 223 - 244
- [ 3 ] Van Kempen R , Mulder J W , Uijterlinde C A *et al.* Overview : full scale experience of the SHARON process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering. *Water Science and Technology* , 2001 , **44** ( 1 ) : 145 - 152
- [ 4 ] Heijnen J J , Mulder A , Weltevrede R *et al.* Large-scale aerobic treatment of complex industrial waste water using immobilized biomass in fluidized bed and air-lift suspension reactor. *Chemical Engineering and Technology* , 1990 , **13** : 202 - 208
- [ 5 ] Van Benthum W A J , Derissen B P , van Loosdrecht M C M *et al.*

Nitrogen removal using nitrifying biofilm growth and denitrifying suspended growth in a biofilm airlift suspension reactor coupled with a chemostat. *Water research* , 1998 , **32** ( 7 ) : 2009 - 2018

- [ 6 ] Dincer A R , Fikret K. Kinetics of sequential nitrification and denitrification processes. *Enzyme and Microbial Technology* , 2000 , **27** : 37 - 42
- [ 7 ] ZHENG P ( 郑平 ) , HU B L ( 胡宝兰 ) . Internal-loop granular sludge bed nitrifying reactor. *Applied and new-style patent* ( 实用新型专利 ) , 2002 , patent number : 02215398.5
- [ 8 ] ZHENG P ( 郑平 ) , Pieme Constant Anatole , DU Z J ( 杜泽俊 ) *et al.* Treatment of strong ammonia wastewater with an internal-loop airlift bioreactor. *Journal of Zhejiang University* ( 浙江大学学报 ) , 2001 , **27** ( 1 ) : 23 - 27
- [ 9 ] Zheng Ping , Hu Baolan. Start-up strategies of UASB for treatment of pharmaceutical wastewater. *Journal of Environmental Science* , 2002 , **14** ( 2 ) : 250 - 254
- [ 10 ] China Environmental Protection Bureau ( 国家环保局 ) . Methods for monitor and analysis of water and wastewater ( 3rd edition ) . Beijing : China Press of Environmental Science ( 中国环境科学出版社 ) , 1997
- [ 11 ] XU B J ( 许保玖 ) . Theory of modern water and wastewater treatment. Beijing : Higher Education Press ( 高等教育出版社 ) , 1990

## Flow Model of Internal-loop Granular Sludge Bed Nitrifying Reactor

LU Gang ZHENG Ping\*

( Department of Environmental Engineering , Zhejiang University , Hangzhou 310029 , China )

**Abstract** Internal-loop granular sludge bed nitrifying reactor is a new type of aerobic nitrifying equipment and has shown a good potential for nitrification. To study the flow pattern and construct the flow model , the tracer tests were performed using pulse stimulus-response technique. Based on the experimental results , the flow pattern in the settling section and the circulating section of reactor were analyzed by axial dispersion model and tank-in-series model , respectively. The dispersion number  $D/uL$  of 0.00148 in the settling section indicates that its flow pattern is similar to plug flow reactor ( PFR ) , and the series number  $N$  of 1.021 in the circulating section indicates that its flow pattern is similar to continuously stirred tank reactor ( CSTR ) . During steady state , the theoretic hydraulic retention time is 360 min , and the actual hydraulic retention time is 341.2 min. The percentage of dead space in the reactor is 5.22% , thereinto the dead space caused by biomass (  $d_b$  ) is 0.75% and the hydraulic dead space (  $d_h$  ) is 4.47% , which shows that the structural performance of the reactor is excellent. Based on the experiments and analysis , a model of CSTR and PFR in series was constructed. The actual hydraulic retention time distribution of the reactor is in good agreement with the model predictions. Since the relative error between them is 8.56% , the model is accurate to describe the flow pattern. The results have laid a foundation for the kinetic model of the reactor and will be helpful for its design and operation.

**Key words** internal-loop granular sludge bed nitrifying reactor , steady state , pulse stimulus-response technique , flow pattern , hydraulic retention time distribution , dead space , flow model

Received : 06-09-2003

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China ( No. 30070017 ) and the Excellent Youth Foundation of China Education Ministry.

\* Corresponding author. Tel 86-571-86971709 Fax 86-571-86971648 E-mail ipzheng@zju.edu.cn