

MSBR系统污泥周期性变化及其数学模拟研究

刘华波, 杨海真, 顾国维

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用处理能力为 $0.96 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的小规模试验设备, 以模拟的城市污水作为处理对象, 对改进型序批式反应器 (MSBR) 系统各功能区的污泥周期性变化进行了研究. 试验结果表明, 系统各功能区混合液污泥 (MLSS) 质量浓度呈现明显的周期性变化, 这种周期性变化主要是由于内回流的切换所致. 此外, 在试验的基础上推导了主曝区和序批区 MLSS 质量浓度变化的分段周期函数.

关键词: 城市污水; 改进型序批式反应器; 周期性变化; 数学模拟

中图分类号: X 505

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2005)10-1328-06

Study on Periodical Variation of Mixed Liquor Suspended Solids and Its Mathematical Modeling in Modified Sequencing Batch Reactor

LIU Hua-bo, YANG Hai-zhen, GU Guo-wei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A study on the periodical variation of mixed liquor suspended solids (MLSS) concentration was carried out using simulated municipal wastewater in a lab-scale equipment with treatment capacity of $0.96 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. The results showed that MLSS concentration in all functional zones has the features of periodical variation caused by circumfluence. And a 2-phase periodical function was deduced on the experimental data to describe the variation of MLSS concentration in aerobic zone and sequencing batch reactor zone.

Key words: municipal wastewater; modified sequencing batch reactor; periodical variation; mathematical modeling

MSBR(modified sequencing batch reactor,改进型序批式反应器)在正常运行时,系统各功能区污泥质量浓度处于动态变化之中^[1]. 本文拟对 MSBR 系统的污泥变化进行试验研究,这对于进一步研究 MSBR 工艺非稳态条件下的污染物降解动力学及计算机模拟具有一定的意义.

1 试验设备及方法

1.1 试验装置

MSBR 工艺从 20 世纪 80 年代初发展起来到现在,经过不断改进和完善,出现了四池、五池、六池、七池以及九池^[2]等多种工艺构型. 结合实际情况,

收稿日期: 2004-06-07

作者简介: 刘华波(1975-),男,湖北仙桃人,博士生. E-mail:lhbtme@126.com

本试验选用六池 MSBR 工艺. 试验装置由有机玻璃制作而成,主要设备有空气压缩机(ACO 系列电磁式空气压缩机)、蠕动泵、搅拌装置、曝气装置、电磁阀(Q22XD-2L)和自动控制柜(主要由单相空气开关、延时动作时间继电器和中间继电器组成). 试验装置处理能力为 $0.96\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$. 各功能区有效容积见表 1.

表 1 MSBR 各功能区有效容积

Tab. 1 Available cubages of different zones in MSBR system

L				
项目	厌氧区	缺氧区	主曝气区	序批区 (2 个)
有效容积	36.8	22.8	122.7	81.5 ×2

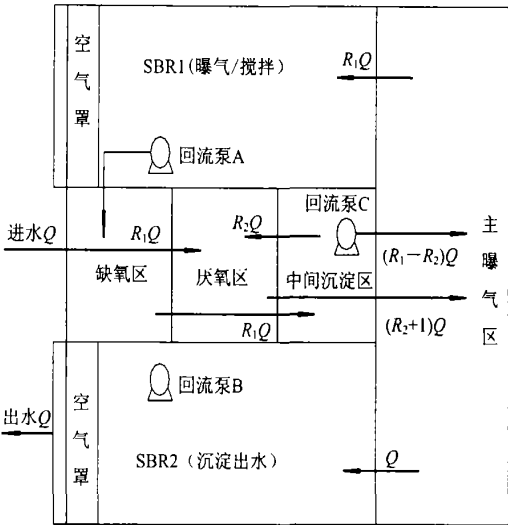
项目	中间沉淀区
有效容积	22.8

1.2 工艺流程

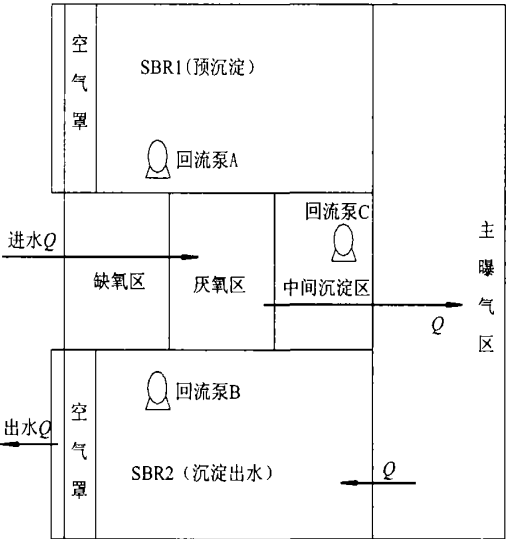
MSBR 工艺基本流程^[1]如下:原水首先进入厌氧区,聚磷菌在此分解体内聚磷,释放磷酸盐,产生能量用于吸收进水中低分子脂肪酸,合成聚β羟基丁酸(PHB). 然后厌氧区混合液进入主曝气区,在好氧环境下,聚磷菌氧化 PHB 产生能量和碳源,进行过量摄磷、聚磷的合成以及自身的增殖. 当 SBR1 (序批区 1) 处于好氧曝气或缺氧搅拌阶段时,在回流泵 A 的推动下,形成“主曝气区—SBR1—缺氧区—中间沉淀区—厌氧区—主曝气区”的回流,如图 1a所示. 图中, R_1 , R_2 分别为缺氧区和厌氧区的回流比. 此时,主曝气区的混合液以进水流量进入沉淀出水的 SBR2 (序批区 2),经污泥层过滤后流出系统;另一部分在序批区回流泵的推动下,进入 SBR1 区反应,进行反硝化或深入硝化;再以连续流形式由 SBR1 进入缺氧区,进一步反硝化;接着,进入中间沉淀区沉淀,含硝酸盐的上清液被回流泵抽至主曝气区,浓缩污泥回流至厌氧区,与原污水混合、反应后回到主曝气区. 当 SBR1 进入预沉淀时,所有回流泵停止工作,原水经厌氧区、主曝气区后直接进入沉淀出水阶段的 SBR2,进行泥水分离,如图 1b 所示. 此阶段为 SBR1 切换至出水的过渡期,历时很短. 当下一周期开始时, SBR2 循序进行缺氧搅拌、好氧曝气和预沉淀,而 SBR1 一直处于沉淀出水状态.

1.3 运行方式

试验中,MSBR 系统的两个序批区交替充当沉淀池,故而得以连续进水和出水. 当一个序批区循序进行缺氧搅拌、好氧曝气和预沉淀三种操作时,另一个序批区一直处于沉淀出水状态. 一个周期内,各个序批区的反应状态及回流泵工作状态的设置如表 2 所示.



a 序批区处于曝气和搅拌阶段



b 序批区处于预沉淀阶段

图 1 六池 MSBR 工艺流程图

Fig. 1 Process chart of MSBR with 6 zones

表 2 MSBR 中序批区和回流泵工作状态的周期设置

Tab. 2 Working state of SBR zones and reflux pump in MSBR process in a period

项目	反应状态历时/ min					
	50	40	30	50	40	30
SBR1	缺氧搅拌	好氧曝气	预沉淀	沉淀出水	沉淀出水	沉淀出水
SBR2	沉淀出水	沉淀出水	沉淀出水	缺氧搅拌	好氧曝气	预沉淀
回流泵 A	开启	开启	关闭	关闭	关闭	关闭
回流泵 C	开启	开启	关闭	开启	开启	关闭
回流泵 B	关闭	关闭	关闭	开启	开启	关闭

在序批区沉淀出水的后期(即另一个序批区进入预沉淀后),从序批区排放剩余污泥.

1.4 试验水质

试验用水采用人工合成的废水(模拟城市污

水),其水质见表 3.与文献报道的合流水质相比^[3],可以看出试验用水基本属于城市污水.

表 3 人工合成废水水质

Tab. 3 Index of simulated municipal wastewater quality

项 目	COD _{Cr}	BOD ₅	凯氮	硝酸盐	总磷
平均质量浓度	320	186	40	0	4.5

1.5 试验工况

试验工况见表 4.

表 4 试验工况

Tab. 4 Work condition

项目	工况一	工况二
水温/℃	15~30	10~15
进水流量/(L·h ⁻¹)	40	40
泥龄/d	20~25	20~25
厌氧区溶解氧/(mg·L ⁻¹)	<0.1	<0.1
缺氧区溶解氧/(mg·L ⁻¹)	<0.5	<0.5
主曝区溶解氧/(mg·L ⁻¹)	1.4~2.6	1.4~2.6
序批区溶解氧/(mg·L ⁻¹)	1.1~2.0	1.1~2.0
反应区平均污泥质量浓度/(mg·L ⁻¹)	3 336	3 122
$\rho(\text{MLVSS})^1/\rho(\text{MLSS})^2$	0.76	0.75
缺氧区混合液回流比	1.0	1.0
厌氧区污泥回流比	0.3	0.3

1)表示混合液挥发性污泥质量浓度;2)表示混合液污泥质量浓度.

1.6 分析监测方法

本试验采用重量法测定混合液污泥 (mixed liquor suspended solids,MLSS)质量浓度.

2 试验结果及分析

2.1 污泥质量浓度的周期性变化

在小规模试验中进行了二次各区污泥质量浓度的周期测试,结果见表 5、表 6 及图 2.

从图 2 可以看出,缺氧区在内回流启动初期,污泥质量浓度持续上升,然后下降,在内回流停止后,基本保持恒定;厌氧区污泥质量浓度随内回流启动而上升,随内回流停止而下降;主曝区污泥质量浓度随内回流启动而下降,随内回流停止而上升;SBR 区污泥质量浓度随内回流启动而上升,随内回流停止而趋于恒定.

图 2 中的各曲线有一共同之处,即均在 90 min 处有一折点,而这一时刻恰好是内回流的切换时刻.考虑到泥龄(20~25 d)较长,污泥在一个周期内的

增长量可忽略不计.说明污泥质量浓度的变化主要是由于内回流的切换所致.这一现象比文献资料^[1]上所描述的更为明显.

从图 2c 可以看出,从 120 min 处分段,主曝区 MLSS 质量浓度变化曲线前半段与后半段极其相似,呈现良好的周期性特征,周期为 120 min,恰好与 SBR 切换周期吻合.从试验中还发现,其他各区 MLSS 质量浓度也是以 120 min 呈现周期性变化.为减少工作量,缺氧区、厌氧区和 SBR 区的 MLSS 质量浓度只测了一个周期(120 min)的数据.

2.2 污泥质量浓度在各功能区的相对稳定

由表 5 可知,工况一条件下,15~90 min 内反应区污泥迁移总量为 68.2 g,即 15~90 min 内沉淀出水的序批区 SBR1 中有 68.2 g 的污泥增量,而 SBR1 入流量为 50 L (40 L·h⁻¹×75/60 h=50 L),折算成入流混合液的平均浓度为 1 364 mg·L⁻¹,远小于 15~90 min 内主曝区的平均污泥质量浓度 3 175 mg·L⁻¹.对于 SBR2,从理论上讲,15~90 min 进入的污泥量为 158.8 g,而事实上为 123.2 g(进入量=流出量-减少量,而流出量为 50×3 475/1 000=173.75 g,污泥减少量为(3 840-3 220)×81.5/1 000=50.53 g.事实上,进入 SBR2 的污泥量也小于理论计算的污泥量.工况二条件下也与此相似.

这主要与 SBR 区独具匠心的设计有关.在 SBR 区与主曝区的公共墙底部开有一个进水孔,其尺寸由设计流量下的过流速度所决定.小规模试验装置中此进水孔的尺寸保证在设计流量下过流速度为 1 m·min⁻¹.另外,在 SBR 区底部垂直入流的方向上设有污泥挡板,可以减少入流对沉淀污泥层的扰动^[4],并使入流的污泥主要积聚在 SBR 区后部近进水孔处.于是,当主曝区混合液以很低的流速进入沉淀出水的 SBR 区时,受到 SBR 区底部污泥层的阻挡,部分污泥就被截留在主曝区入口处.正是因为 SBR 区污泥层的这种作用,使得主曝区迁移的污泥受到“截留”.截留作用受“阻力”的影响,“阻力”与 SBR 区污泥状态有关.当污泥处于静置沉淀状态时,阻力较大,处于混合状态时,阻力较小.故无论是在工况一还是在工况二条件下,入流混合液在 SBR2 区受到的阻力均比 SBR1 小.相应地,事实上进入 SBR2 污泥量比进入 SBR1 污泥量大,而且入流混合液在 SBR1 区和 SBR2 区都受到不同程度的截留.

从图 2c,d 中不难发现,主曝区的污泥质量浓度变化幅度比 SBR2 区要小得多,变化曲线较为平缓.

这一现象还是源于序批区这一独特设计,同样可以用截留的观点来加以解释.由于主曝区混合液在进入 SBR2 区时有截留作用^[5],使主曝区污泥质量浓度相对稳定,变化幅度较小(在工况一条件下为 7.0 %,在工况二条件下为 6.8 %),而 SBR2 区混合

液进入缺氧区时没有截留作用,再加上本身进入 SBR2 区的入流液受截留作用的质量浓度较小,使 SBR2 区的质量浓度变化幅度较大(在工况一条件下为 16.1 %,工况二为 16.9 %).

表 5 工况一在一个周期内反应区各区污泥状况

Tab. 5 MLSS concentration in different zones on condition 1 in a period

污泥状况	时间/ min							
	15	30	45	60	75	90	105	120
缺氧区/ (mg L ⁻¹)	3 360	3 430	3 410	3 500	3 470	3 380	3 390	3 390
厌氧区/ (mg L ⁻¹)	2 440	2 520	2 570	2 620	2 640	2 650	2 520	2 370
主曝区/ (mg L ⁻¹)	3 260	3 240	3 210	3 180	3 110	3 050	3 160	3 280
SBR2 区/ (mg L ⁻¹)	3 840	3 650	3 460	3 390	3 290	3 220	3 220	3 220
反应区总量/ g	879.4	866.0	848.2	842.7	826.0	811.2	820.2	829.4
衰减比例/ %	100	98.5	96.5	95.8	93.9	92.2	93.3	94.3
时段/ min	—	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90	90~105	105~120
SBR1 区进入量/ g	—	13.4	17.8	5.5	16.7	14.8	- 9.0	- 9.2

表 6 工况二在一个周期内反应区各区污泥状况

Tab. 6 MLSS concentration in different zones on condition 2 in a period

污泥状况	时间/ min							
	15	30	45	60	75	90	105	120
缺氧区/ (mg L ⁻¹)	3 270	3 350	3 340	3 430	3 420	3 320	3 320	3 320
厌氧区/ (mg L ⁻¹)	2 310	2 380	2 430	2 470	2 480	2 490	2 380	2 250
主曝区/ (mg L ⁻¹)	2 900	2 880	2 850	2 810	2 760	2 730	2 820	2 930
SBR2 区/ (mg L ⁻¹)	3 780	3 530	3 370	3 290	3 200	3 140	3 140	3 140
反应区总量/ g	823.5	805.0	789.9	782.0	768.7	758.2	765.2	774.1
衰减比例/ %	100	97.8	95.9	95.0	93.3	92.1	92.9	94.0
时段/ min	—	15~30	30~45	45~60	60~75	75~90	90~105	105~120
SBR1 区进入量/ g	—	18.5	15.1	7.9	13.3	10.5	- 7.0	- 8.9

注:1.假定预沉淀阶段,SBR2 区的污泥质量浓度不再发生变化,按 90 min 时的质量浓度计;
2.污泥量衰减比例是指不同时刻的反应区污泥总量与 15 min 时反应区污泥总量之比;
3.为方便起见,以后用 SBR1 代表沉淀的序批区,用 SBR2 代表反应的序批区.

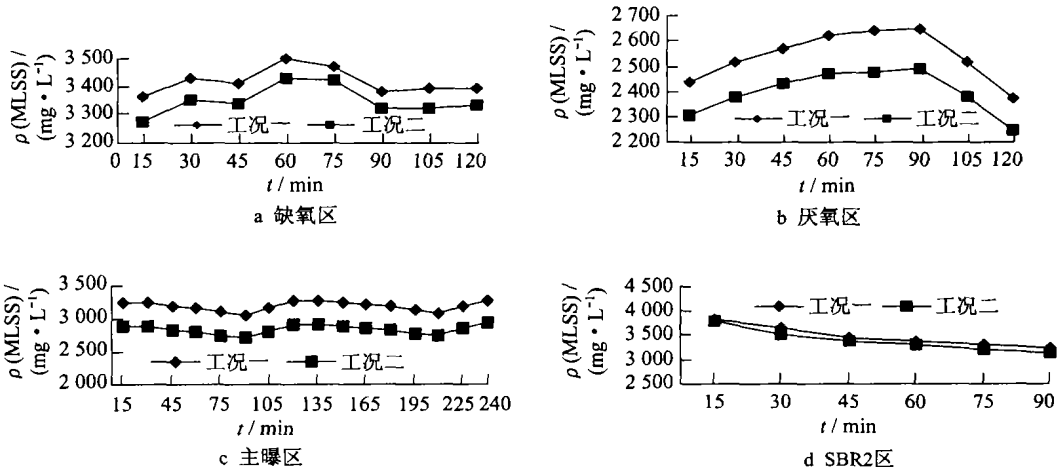


图 2 各区的 MLSS 质量浓度变化

Fig. 2 Variation of MLSS in different zones

通过上面的分析可知,主曝区污泥质量浓度相对稳定.其实其他各区污泥质量浓度也是相对稳定.这样就保证了生化反应的稳定进行,同时也使MSBR系统呈现出更多连续流的特点.就序批区而言,由于系统存在两个SBR区,污泥的迁移使得当一个SBR区内污泥质量浓度从高向低变化时,另一个SBR区的污泥质量浓度则从低向高变化;一个完整的周期之后,污泥质量浓度又得到恢复^[5].至于缺氧区和厌氧区,从图2a,b中可以清楚地看到,不管污泥质量浓度如何变化,一个周期的始末质量浓度基本持平.

此外,在试验中发现一个“特殊”现象. SBR1中的污泥质量浓度的重新恢复主要发生在一个周期的前90 min,即内回流停止之前.从表5、表6可知,无论是工况一还是工况二,在90~120 min内, SBR1区污泥进入量均为负值.也就是说,在这段时间, SBR1区平均污泥质量浓度不升反降.在工况一条件下,15~120 min内,对于SBR1,由于系统污泥迁移导致的污泥增量为50 g(13.4+17.8+5.5+16.7+14.8-9-9.2=50.0 g),而15~120 min内,污泥质量浓度从3 220 mg L⁻¹变到3 840 mg L⁻¹,所以事实上污泥增量为50.5 g((3 840-3 220)/1 000×81.5=50.5 g).二者基本吻合.工况二条件下,也与此相似.说明在这段时间, SBR1区平均污泥质量浓度不升反降是合理的.这可从以下两方面加以解释.一方面,这时SBR1处于沉淀出水后期,由于挡板的作用,污泥层抬升较高,且污泥层比较密实,而SBR1区平均污泥质量浓度本身也比主曝区大,这样造成污泥层的阻截作用比0~90 min时更大;在重力流作用下,主曝区污泥不易进入SBR1区.而在回流开启时,进入主曝区流量是现在的2倍,更利于主曝区污泥进入SBR1区.另一方面,这时SBR1区处于静止沉淀阶段,而主曝区处于曝气状态,由于挡板的作用,污泥层抬升较高,且污泥层比较密实,在这一局部区域,污泥质量浓度远远大于主曝区,在水力冲击下,存在局部的混合(甚至可能有返混发生),从而使SBR1区平均污泥浓度质量度不升反降.

2.3 主曝区与SBR2区MLSS质量浓度变化模拟

对于主曝区,曲线的折点刚好处于内回流的切换时刻.内回流是造成污泥质量浓度变化的主要原因.由于泥龄(20~25 d)较长,污泥在一个周期内的增长量可忽略不计.也就是说,污泥质量浓度变化是物理过程造成的,而非生化过程.在MSBR系统污泥质量浓度、流量、回流比、结构等条件确定的情况

下,可以假定,由于存在内回流,污泥质量浓度在一个周期内的两个阶段分别随时间呈线性变化.这与活性污泥法中普遍存在的各种非线性关系有很大不同.

在此前提下,就可以只测2个点来确定污泥变化曲线,从而估测其他时刻的污泥质量浓度.特别地,取0 min和90 min时的污泥质量浓度,可以推导出一般意义上的主曝区MLSS质量浓度变化曲线方程

$$\left. \begin{aligned} \rho_p &= \rho_0 + \frac{-\rho_0 + \rho_1}{T_1}(t - kT), \\ t &\in (kT, T_1 + kT], k = 1, 2, 3, \dots, n \\ \rho_p &= \frac{\rho_1 T - \rho_0 T_1}{T - T_1} + \frac{\rho_0 - \rho_1}{T - T_1}(t - kT), \\ t &\in (T_1 + kT, T + kT], k = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ρ_p 为 t 时刻主曝区污泥质量浓度,mg L⁻¹; ρ_0 为MSBR系统开始运行时主曝区污泥质量浓度,mg L⁻¹; ρ_1 为内回流停止时主曝区污泥质量浓度,mg L⁻¹; t 为MSBR系统的运行时间,min; T 为MSBR系统运行周期,min; T_1 为MSBR系统内回流切换时刻,min.

由上式可得工况一、工况二条件下各时刻主曝区MLSS质量浓度估测值(表7、表8).由表7、表8可知,绝对误差在-54~10 mg L⁻¹范围内,相对误差在0~1.70%之间,在允许范围内.故式(1)可以作为一般意义上的主曝区MLSS质量浓度变化曲线方程.

同理,也可以接受SBR2区污泥质量浓度在一个周期内的两个阶段分别随时间呈线性变化的假定,从而推导出一般意义上的SBR2区MLSS质量浓度变化曲线方程

$$\left. \begin{aligned} \rho_{SBR} &= \rho_0 + \frac{-\rho_0 + \rho_1}{T_1}(t - kT), \\ t &\in (kT, T_1 + kT], k = 1, 2, 3, \dots, n \\ \rho_{SBR} &= \rho_1, \quad t \in (T_1 + kT, T + kT], \\ k &= 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ρ_{SBR} 为 t 时刻SBR区污泥质量浓度,mg L⁻¹.

经检验,绝对误差在0~154 mg L⁻¹范围内,相对误差在0~4.57%之间,在可接受范围内.故式(2)可以作为一般意义上的SBR2区MLSS质量浓度变化曲线方程.

表 7 工况一条件下主曝区 MLSS 质量浓度估测值与实测值

Tab. 7 Estimated and measured values of MLSS concentration in aerobic on condition 1

项目	时刻/ min							
	15	30	45	60	75	90	105	120
实测值/ (mg L ⁻¹)	3 260	3 240	3 210	3 180	3 110	3 050	3 160	3 280
估测值/ (mg L ⁻¹)	3 241	3 203	3 165	3 126	3 088	3 050	3 165	3 280
绝对误差/ (mg L ⁻¹)	- 19	- 37	- 45	- 54	- 22	0	5	0
相对误差/ %	0.58	1.14	1.40	1.70	0.71	0	0.16	0

表 8 工况二条件下主曝区 MLSS 质量浓度估测值与实测值

Tab. 8 Estimated and measured values of MLSS concentration in aerobic on condition 2

项目	时刻/ min							
	15	30	45	60	75	90	105	120
实测值/ (mg L ⁻¹)	2 900	2 880	2 850	2 810	2 760	2 730	2 820	2 930
估测值/ (mg L ⁻¹)	2 897	2 863	2 830	2 797	2 764	2 730	2 830	2 930
绝对误差/ (mg L ⁻¹)	- 3	- 17	- 20	- 13	4	0	10	0
相对误差/ %	0.10	0.59	0.70	0.46	0.14	0	0.35	0

3 结论及建议

(1) MSBR 系统各功能区 MLSS 质量浓度呈现明显的周期性变化,这种周期性变化主要是由于内回流的切换所致.污泥变化曲线在 90 min 处有一折点,而这一时刻恰好是内回流的切换时刻.整个系统污泥质量浓度变化周期与序批区切换周期一致.

(2) SBR1 中的污泥质量浓度的重新恢复主要发生在一个周期的前 90 min;在 90~120 min 内, SBR1 区平均污泥质量浓度甚至不升反降.这一特殊现象可以从理论上加以解释.

(3) 污泥在 MSBR 系统内迁移,并没有对系统运行产生太大影响.由于狭缝、挡板和污泥层共同导致的截留作用,使系统各功能区污泥质量浓度相对稳定.这对于生化反应的稳定进行非常有利.由于 SBR 区独具匠心的污泥挡板设计而引起的污泥层截留作用,使得主曝区污泥质量浓度变化幅度较小,其变化曲线较为平缓.

(4) 在一个周期内的两个阶段,各功能区污泥质量浓度分别呈线性变化的假定基本可以接受,从而可以推导出一般意义上的 MLSS 质量浓度变化曲线方程.

(5) 针对系统各功能区 MLSS 质量浓度的周期性变化,建议从改进中间沉淀区和 SBR 区设计入手,使其变化幅度尽可能小.

参考文献:

[1] 李春鞠.城市污水除磷脱氮 MSBR 工艺的试验研究[D].上海:同济大学环境科学与工程学院,2000.

LI Chun-ju. Pilot studies on biological nutrient removal from municipal wastewater by MSBR process[D]. Shanghai :School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, 2000.

[2] 吴卫国, Timpany P L. 连续进水、恒水位的改进型 SBR 系统[J]. 中国给水排水,2001,17(7):17- 22.

WU Wei-guo, Timpany P L. Modified SBR system with continuous flow and constant level[J]. China Water and Wastewater, 2001, 17(7):17- 22.

[3] Tchobanoglous G,Burton F L. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse[M].New York:Metcalfe and Eddy Inc, 1991.

[4] 王 闯,杨海真,顾国维. 改进型序批式反应器(MSBR)的试验研究[J]. 中国给水排水,2003,19(5):41- 43.

WANG Chuang, YANG Hai-zhen, GU Guo-wei. Experimental study on the modified sequencing batch reactor (MSBR) [J]. China Water and Wastewater, 2003, 19(5):41- 43.

[5] 杨海真.城市污水 MSBR 脱氮除磷系统的机理和工艺试验研究[D].上海:同济大学环境科学与工程学院,2001.

YANG Hai-zhen. Study on mechanisms and technology of MSBR - a nutrient removal system for municipal wastewater [D]. Shanghai: School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, 2001.

(编辑:陶文文)