

# 紊动特性对活性污泥降解污染物性能的影响

冯 骞<sup>a,b</sup>, 王 超<sup>a,b</sup>, 汪 翔<sup>b</sup>

(河海大学 a. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; b. 环境科学与工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 为寻求反映活性污泥处理系统水力条件的微观指标, 采用 PIV (Particle Image Velocimetry) 系统研究了搅拌型 SBR 反应器中不同转速下反应器内的紊动强度分布。利用不同搅拌浆转速下 SBR 系统降解污染物性能和絮凝体结构、形态分析结果, 研究了搅拌主体区和其他区紊动强度对活性污泥处理系统降解污染物性能的影响, 提出了搅拌主体区和其他区紊动强度特征值指标反映活性污泥处理系统的微观水力条件。结果表明: 随搅拌浆转速的增加, 活性污泥反应器内污染物的降解速率常数则随紊动强度的增加先增加后降低。试验中最佳紊动强度指标为搅拌主体区 1.4%, 其他区 0.34%。活性污泥处理系统中的紊动强度特征值指标反映了水力条件的局部差异; 搅拌主体区的紊动强度, 对污泥破碎的影响显著; 其他区的紊动强度与污泥颗粒的碰撞聚集关系密切。

**关键词:** 紊动强度; 活性污泥; COD; NH<sub>3</sub>-N; 降解性能

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2009)02-0142-06

## Influence of Turbulence Characteristics on the COD and NH<sub>3</sub>-N Degradation Capacity of Activated Sludge System

FENG Qian<sup>a,b</sup>, WANG Chao<sup>a,b</sup>, WANG Hui<sup>b</sup>

(a. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education; b. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** The distribution of turbulence intensity under different rotation speed was analyzed to seek micro indexes reflecting hydraulic conditions of active sludge system by PIV (Particle Image Velocimetry) in a stirring SBR (Sequencing Batch Reactor). Based on the SBR degradation capacity, flocs structure under different rotating speed of stirring paddle, the influences of turbulence intensity on the degradation capacity were studied, and the indexes of turbulence intensity in the main part of stirring zone and other parts were given. The results show that the specified degradation constant of the pollutants in the active sludge reactor increases firstly and then decreases with the increasing of turbulence intensity. The optimum indexes of turbulence intensity in the experiment are 1.4% of main part and 0.34% of other parts. The turbulence intensity indexes in the active sludge system reflect part differences of hydraulic conditions. The turbulence intensity has remarkable influence on the breaking up of active sludge in the main part of stirring zone, while it has good correlation with the collision and gathering of sludge flocs in other parts of the reactor.

**Key Words:** turbulence intensity; activated sludge; chemical oxygen demand (COD); ammonia nitrogen; degradation capacity

收稿日期: 2008-08-12

基金项目: 国家“十五”重大科技专项基金资助项目(2003AA601070)

作者简介: 冯骞(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要从事水处理理论与技术、给水排水工程优化等方面的研究, (E-mail) xiaofq@hhu.edu.cn。

活性污泥工艺是污水生物处理中应用最广泛的处理工艺之一,它对污染物的降解能力和效果受到分子水平上的基因特性、细胞水平上的代谢特征和反应器水平上的传递特征的共同影响。由于水流担负了活性污泥处理系统中物质和能量传递的主要功能,因此水力条件直接影响活性污泥处理系统的特性<sup>[1-9]</sup>。限于传统分析手段和方法的制约,现有的研究<sup>[10-13]</sup>中往往采用 $G$ 值、体积输入功率或表观上升流(气)速等指标,分析水力条件对活性污泥处理系统的影响。但 $G$ 值的推导建立在层流的基础上,体积输入功率未能表明流态差异的影响,表观上升流(气)速也仅适用于大多柱状反应器,因此水力条件的分析结果往往较为宏观,控制指标适应面不广,指标值的控制范围也较宽泛,用于指导活性污泥处理系统的优化设计和运行仍有不小的缺陷。

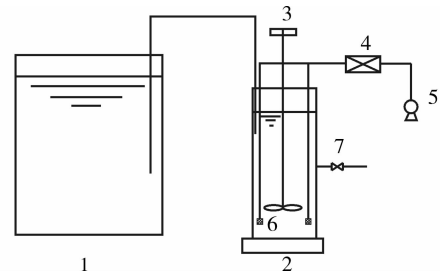
近年来,随着计算机图像处理技术的发展和阵列式计算机的产生,在经典的流动显示技术基础上发展起来的粒子图像测速技术 PIV (Particle Image Velocimetry) 以其能进行瞬态流场测试、对狭窄流场和复杂流场适应性强等特点,在流体量测领域得到了广泛的应用<sup>[14-17]</sup>。利用 PIV 技术测定活性污泥反应器中的流场,分析反应器中的微观水力条件已经成为可能。为此,论文在 SBR 反应器中比较了不同搅拌浆转速下活性污泥系统降解有机物的性能,利用 PIV 测试技术,得到了不同转速下反应器内的紊动特性。在此基础上引入了紊动强度特征值这一水力条件微观指标,研究了紊动特性对活性污泥处理系统降解污染物性能的影响规律,可为系统的优化设计和运行提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置与材料

试验装置如图 1 所示。试验中采用 5 个平行柱状 SBR 反应器,接种等量的南京锁金村污水处理厂二沉池的回流污泥,利用自配原水在不同搅拌浆转速下启动和运行。原水采用葡萄糖为碳源、硫酸铵为氮源、磷酸二氢钾为磷源自行配置。试验期间污水的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP (以  $\text{PO}_4^{3-}$  计) 的浓度分别为 420~480 mg/L, 20~32 mg/L 和 3.5~5.5 mg/L。

SBR 采用有机玻璃制成,有效容积均为 2 L,反应器直径 135 mm,有效水深 140 mm,内设搅拌器。搅拌器浆板高度  $b$  为 59 mm;浆板的外缘直径  $D$  为 12 mm;搅拌轴直径  $d$  为 6 mm;浆叶离槽底距离  $C$  为 0.07 m,如图 2 所示。



1. 自配高位水箱 2. SBR 反应器 3. 搅拌器 4. 气体流量计  
5. 空气泵 6. 曝气头 7. 排水口

图 1 试验装置

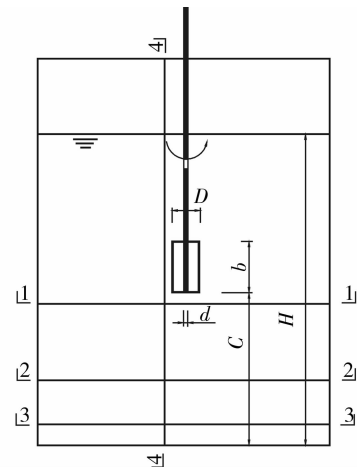


图 2 搅拌浆尺寸及测速断面位置

### 1.2 试验条件与过程

SBR 系统运行周期为 12 h,其中进水 15 min、曝气 8 h、沉淀 1 h、排水 15 min、闲置 2.5 h。各 SBR 反应器中搅拌浆转速分别为 80、120、150、180、220  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,曝气强度均为 0.2 L/min。试验期间水温为  $(22\pm 2)^\circ\text{C}$ 。当 SBR 反应器内各项指标趋于平稳,COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除率分别超过 85% 和 90% 时,系统进入稳定运行期。在系统稳定运行期,取一个周期对反应器中 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度随降解时间的变化情况进行连续跟踪测试,考察不同搅拌转速下污染物的降解过程,分析 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的速率常数。定期监测系统的出水水质,观测系统中的微生物类型和絮凝体结构。

生物降解试验结束后,利用美国 TSI 公司的 PIV 测试系统测试清水条件下 SBR 反应器中不同搅拌浆转速下的流场,分析紊动强度分布。水平向的 1-1、2-2、3-3 测试断面分别距离反应器下底面 65 mm (距离浆板 5 mm)、30 mm (距离浆板 40 mm) 和 10 mm (距离浆板 60 mm),垂向的 4-4 测试断面距离搅拌轴 10 mm。为消除器壁对光线的折射作用,测试过程中,整个反应器置于 0.20 m  $\times$  0.40 m  $\times$  0.50 m 的长方体玻璃水槽内,槽内充满清水。

考虑数据分析的需要,本研究中采用了脉动流速分量的二阶中心矩与时均流速商表示的相对紊动强度(无量纲数)作为紊动特性指标,其计算式<sup>[18]</sup>为:

$$\zeta = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (1)$$

式中: $\zeta$ 为相对紊动强度; $u'$ 为脉动流速; $\bar{u}$ 为时均流速; $\sqrt{u'^2}$ 为脉动流速的均方根。

### 1.3 分析方法

试验中 COD 的测定采用重铬酸钾标准法,  $\text{NH}_3\text{-N}$  的测定采用纳氏试剂分光光度法, MLSS 和

MLVSS 的测定采用烘干恒重法,生物相的观测采用 Nikon eclipse E600 型显微镜<sup>[19-20]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 搅拌转速对反应器内紊动特性的影响

图 3(a)~(d)分别表明了搅拌浆转速  $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 1-1~4-4 断面的紊动强度分布。其他搅拌浆转速下,反应器相应断面处的紊动强度分布规律相同,仅断面各点处的紊动强度值随搅拌浆转速的增加而增加。

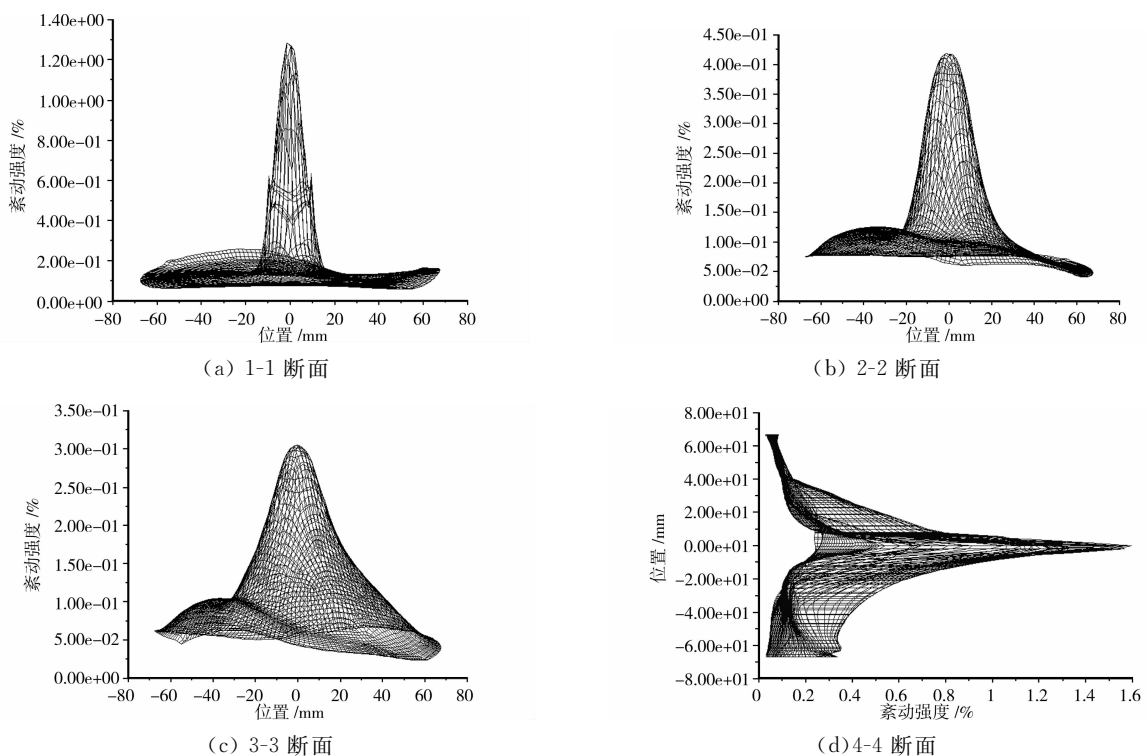


图 3 各监测断面的紊动强度分布/ $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

从图 3(a)~(d)中可以看出,由于反应器具有轴对称性,加之浆叶正好位于反应器中间水深处,反应器中的径向紊动强度分布表现出较强的轴对称性,垂向紊动强度分布也表现出一定的弱对称性。距搅拌轴的水平距离越近,紊动强度越大;距搅拌轴的水平距离越远,紊动强度就越低。在搅拌轴直径 40 mm 的范围内,紊动强度明显高于其他区域,且这种差异程度随测量断面距浆叶垂直距离的增加而减少。以搅拌浆转速  $150 \text{ r} \cdot \text{min}$  为例,1-1 断面(距离浆板 5 mm)搅拌轴心处紊动强度为 1.28%,而距离搅拌轴 20 mm 的区域处紊动强度陡降到 0.18%,降幅达到 85.9%;2-2 断面(距离浆板 40 mm)搅拌轴心处紊动强度减小为 0.42%,距离搅拌轴 20 mm 的区域处紊动强度下降为 0.12%,降幅下降为 71.4%;

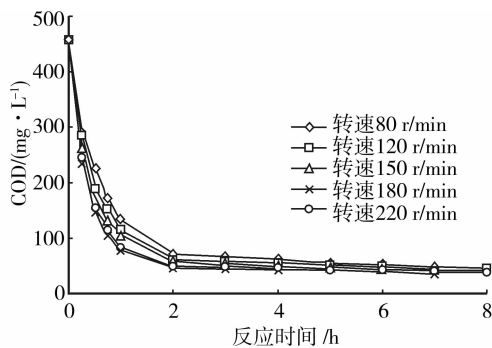
3-3 断面(距离浆板 60 mm)搅拌轴心处的紊动强度下降为 0.31%,距离搅拌轴 20 mm 的区域处紊动强度下降为 0.11%,降幅进一步降为 64.5%。其他转速下,反应器内紊动强度分布也表现出一致的规律,即在搅拌浆叶周围 15 mm(搅拌轴周围直径 40 mm)的范围内,紊动强度明显高于距浆叶更远的区域。

出现反应器内紊动强度随距搅拌浆距离增加而降低的原因主要在于流体和边壁粘滞力的影响。在搅拌浆附近的区域,由于搅拌浆机械运动输入的能量影响,流速和紊动强度均最大。随着距搅拌浆距离的不断增加,流体自身对能量的耗散和传递,使流速和紊动强度不断降低。离边壁距离逐渐减小,还使得固体边壁对流动的抑制作用不断增强,进一步强化了这种表现。因此,在搅拌型的 SBR 反应器

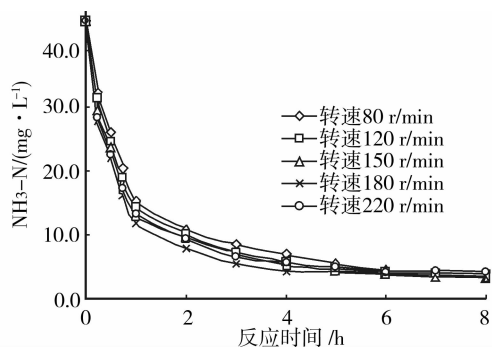
中,水平断面上各点的流速值和紊动强度值表现出随距搅拌浆的距离增加逐渐减小的规律。而出现反应器中的紊动强度垂向非对称分布,搅拌浆上部(靠近液面处)紊动强度低于下部的原因主要在于自由液面对流场的影响。由于搅拌浆的转动,会在反应器中形成一定数量的涡旋,特别是在自由液面上,伴随着涡旋的不断生成和消失,大量的紊动能量被消耗,因此出现了上部紊动强度低于下部的情况。

根据各断面的紊动强度监测结果,搅拌浆附近紊动强度明显高于其他区域。结合垂向紊动强度分布分析,距离浆板 5 mm 的 1-1 断面和距离浆板 60 mm 的 3-3 断面搅拌轴心处的紊动强度值反映了浆板附近和反应器远离浆板区域的紊动强度均值,因此笔者分别选择了此两断面搅拌轴心处的紊动强度值为反应器搅拌主体区和其他区的特征紊动强度,并作为活性污泥系统水力条件微观指标进行分析。

## 2.2 紊动特性对活性污泥降解污染物性能的影响



(a) COD 的降解过程



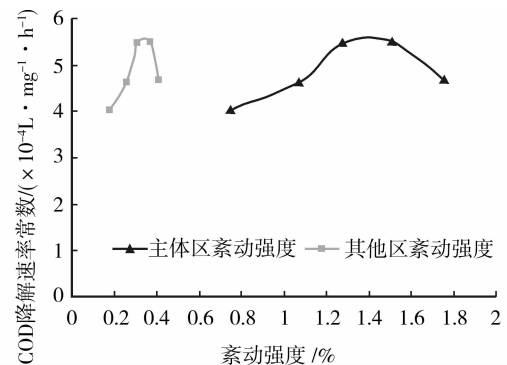
(b) NH<sub>3</sub>-N 的降解过程

图 4 不同搅拌转速下 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解过程

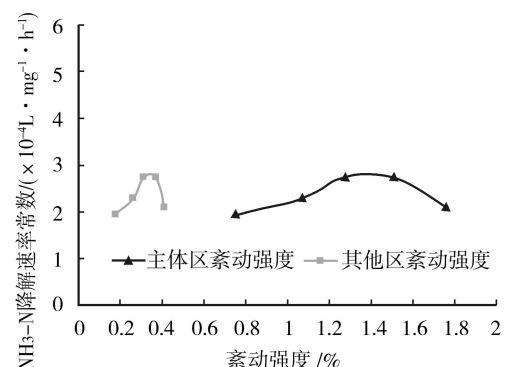
图 4 表明了系统稳定运行期内,不同搅拌浆转速下反应器内 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解过程曲线。从图中可见 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解过程均符合一级降解动力学,采用活性污泥反应动力学模式分析可求得不同转速下 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率常数。分别以搅拌主体区和其他区的紊动强度特征值为横坐标值,相应条件下的降解速率常数为纵坐标值,可得到反应器内紊动强度与 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 降解速率常

数的相关关系,如图 5 所示。

从图 5 中可见,COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率常数随紊动强度特征值的增加均表现出先升高后降低的变化规律,且其他区紊动强度对降解速率常数的影响幅度大大超出主体区。当搅拌主体区的紊动强度由 1# 反应器的 0.75% 上升到 3# 反应器的 1.28% 时,COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率分别从  $4.04 \times 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1.94 \times 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  增加到  $5.49 \times 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $2.75 \times 10^{-4} \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,此时其他区的紊动强度仅由 0.18% 上升到 0.31%。搅拌主体区的紊动强度上升为 4# 反应器中的 1.51%,COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率与 3# 反应器相比几乎保持不变;随搅拌浆转速的继续增加,搅拌主体区的紊动强度进一步升至 5# 反应器中的 1.76%,此时 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率却随紊动强度的增加出现了不同程度的下降。与 4# 反应器相比,5# 反应器中的 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 的降解速率分别降低了 15.0% 和 24.1%,反应器中其他区的紊动强度也仅由 0.37% 上升至 0.41%。



(a) 紊动强度与 COD 降解速率常数关系



(b) 紊动强度与 NH<sub>3</sub>-N 降解速率常数关系

图 5 紊动强度与 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 降解速率常数关系

活性污泥系统中流体的紊动特性是引发活性污泥反应器中微生物碰撞、聚集,产生有效碰撞,形成降解性能良好的活性污泥的首要动力学致因。在微生物生长的过程中,合适的紊动强度保证了系统中

活性污泥、有机底物和 DO 之间的混合,对于促进氧气和营养物质的传递,加快微生物的生长繁殖速度,提高微生物细胞产率,增加次生代谢产物产量都有显著的作用。但过强搅动产生过大的紊动强度,则会破坏由丝状菌和胶团菌粘结在一起形成絮状污泥的网状结构,造成活性污泥处理系统降解污染物性能的降低。由于流体对能量的耗散和传递,搅拌主体区的紊动强度远大于其他区。试验条件下搅拌主体区中较大的紊动强度特征值表现为对活性污泥结构的破坏和污染物降解的制约作用,而其他区的紊动强度则表现为对微生物聚集、物质传递和污染物降解的促进作用。不同搅拌转速下活性污泥处理系统的降解性能,就是上这两区域内紊动各自效应共同作用的结果。

根据图 5 分析可知,当搅拌主体区特征紊动强度低于 1.4%,其他区特征紊动强度低于 0.34%时,主体区紊动强度递增引起污染物降解能力的下降低于其他区紊动强度递增引起的污染物降解能力升高,因此活性污泥反应器中的污染物降解常数表现出随紊动强度增加而递增的趋势。当两区域的特征紊动强度超过此两值后,搅拌主体区紊动对活性污泥的破碎效应已经超出其他区紊动强度递增引起的污染物降解促进效应,此时系统降解污染物的能力随紊动强度的增加开始下降。

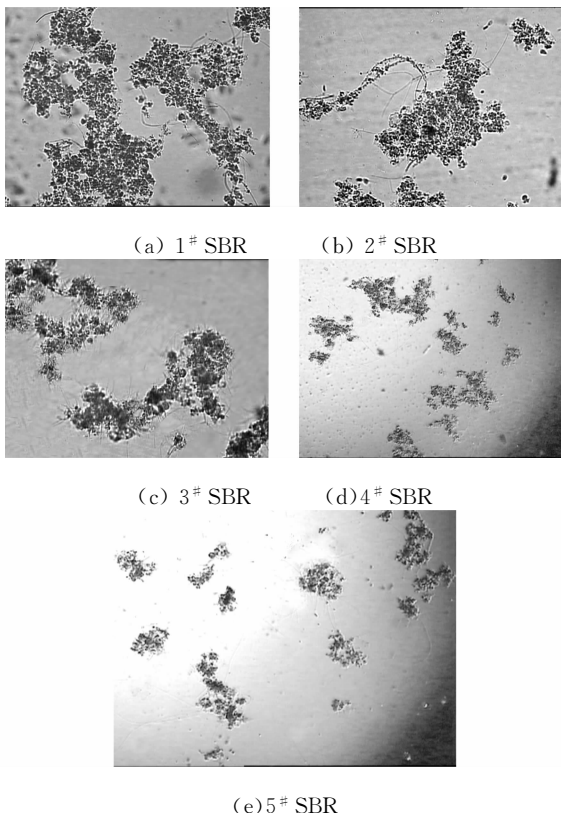


图 6 不同紊动特性下活性污泥絮凝体的镜检照片( $\times 100$ 倍)

图 6 为不同紊动特性的 5 个反应器中活性污泥的镜检照片。从图中可清晰的看出,随着 SBR 反应器紊动强度的增加,活性污泥絮凝体逐渐由不规则的块状转变为规则的形状,絮凝体的紧密程度不断增加,絮凝体尺寸不断减小。由于搅拌主体区的紊动强度大大高于其他区域,因此该区域的紊动特性直接导致了絮凝体形状和尺寸的变化。这也从另一方面表明了高紊动强度对活性污泥的破碎效应。

试验中发现污染物降解速率常数最大时,相应紊动强度分别为搅拌主体区 1.40%、其他区 0.34%。考虑到搅拌浆转速与紊动强度的正相关性,利用插值反推搅拌浆转速可得最佳转速为 165 r·min。根据试验中搅拌浆尺寸,利用甘布公式<sup>[21]</sup>测算最佳转速下的 G 值为  $97 \text{ S}^{-1}$ 。与 Das 等人<sup>[12]</sup>得到最佳 G 值  $125 \text{ S}^{-1}$ 相比,本试验中得到最佳紊动条件下的 G 值略低。分析原因,主要在于紊动特性试验分析中,未能同时考虑曝气产生的紊动。

与传统的 G 值和体积消耗功率相比,反应器内不同区域的紊动强度体现了系统中水力条件的局部差异。搅拌主体区的紊动强度较大,对污泥破碎的影响明显,与污泥颗粒尺寸有显著的正相关性;其他区的紊动强度较小,与污泥颗粒的碰撞聚集关系密切。如能通过反应器结构改进合理控制反应器内的紊动强度及分布,在保证系统功率消耗不变的基础上有效降低搅拌主体区的紊动强度,增加其他区的紊动强度,对于促进活性污泥颗粒的聚集、强化 DO 和底物的传质,减少污泥颗粒的破碎解体,最终改善活性污泥处理系统降解污染物的性能,都具有积极的效果。水处理领域中提高柱状反应器中的 H/D 比、采用受限曝气反应器<sup>[1,22]</sup>等方式有助于紊动强度的均匀分布,能充分利用其他区的紊动,促进反应器内的形成,产生更好的污染物去除效果,这一点也在生产和试验中得到了验证。

### 3 结 论

1)在搅拌型 SBR 柱状反应器中,垂向和径向紊动强度表现出一定的对称性,其紊动强度值随距浆叶距离的增加逐渐降低。试验设定的转速下,距离浆叶周围 15 mm 范围内的紊动强度值明显高于反应器中的其他区域。

2)反应器内不同区域的紊动特性直接影响活性污泥的降解性能。搅拌主体区的紊动强度较大,对污泥破碎和解体的影响显著,与污泥颗粒尺寸有明显的正相关性;其他区的紊动强度较小,与污泥颗粒的碰撞聚集关系密切。在试验选定的紊动强度范围内,随紊动强度的增加,活性污泥处理系统对污染物

的降解速率常数先增加后降低,活性污泥絮凝体的尺寸逐渐减小,絮凝体的形状由不规则的块状逐渐变为规则的形状,紧密程度也不断增加。

3)试验中得到 SBR 反应器中搅拌主体区和其他区的最佳紊动强度特征值分别为 1.40% 和 0.34%。与传统的 G 值和体积消耗功率相比,水力条件优化参数范围值相当,但不同区域紊动强度特征值更好的体现了系统中水力条件的局部差异,也更有利于活性污泥反应器的优化设计和运行。

#### 参考文献:

- [1] LIU Y, TAY J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge[J]. *Water Res*, 2002, 36: 1653-1665.
- [2] LIU Y, TAY J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2004, 22: 533-563.
- [3] JARVIS P, JEFFERSON B, GREGRY J, et al. A review of floc strength and breakage [J]. *Water Research*, 2005, 39: 3121-3137.
- [4] LIU Y, WANG Z W, QIN L, et al. Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2005, 67: 26-32.
- [5] JIN B, LANT P. Flow regime, hydrodynamics, floc size distribution and sludge properties in activated sludge bubble column, air-lift and aerated stirred reactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59: 2379-2388.
- [6] QIN L, TAY J H, LIU Y. Selection pressure is a driving force of aerobic granulation in sequencing batch reactors[J]. *Process Biochemical*, 2004, 39: 579-84.
- [7] YANG S F, LIU Q S, TAY J H, LIU Y. Growth kinetics of aerobic granules developed in sequencing batch reactors[J]. *Letter Apply Microbiology*, 2004, 38: 106-112.
- [8] SHENG G P, YU H Q, CUI H. Model-evaluation of the erosion behavior of activated sludge under shear conditions using a chemical-equilibrium-based model [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 140: 241-246.
- [9] SHENG G P, YU H Q. Chemical-equilibrium-based model for describing the strength of sludge: taking hydrogen-producing sludge as an example [J]. *Environment Science Technology*, 2006, 40: 1280-1285.
- [10] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Stability of sludge flocs under shear conditions [J]. *Biochemical Engineering*, 2008, 38: 302-308.
- [11] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Stability of sludge flocs under shear conditions; roles of extracellular polymeric substances (EPS) [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 2006, 93: 1095-1102.
- [12] DAS D, KEINATH T M, PAKER D S, et al. Floc breakup in activated sludge plants [J]. *Water Environment Research*, 1993, 65: 138-145.
- [13] TAY J H, LIU Q S, LIU Y. The effect of upflow air velocity on the structure of aerobic granules cultivated in a sequencing batch reactor[J]. *Water Sci & Technol*, 2004, 49: 35-40.
- [14] GHADGE R S, PATWARDHAN A W, SAWANT S B, et al. Effect of flow pattern on cellulase deactivation in stirred tank bioreactor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60: 1067-1083.
- [15] PRAT O P, DUCOSTE J J. Modeling spatial distribution of floc size in turbulent processes using the quadrature method of moment and computational fluid dynamics[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61: 75-86.
- [16] ZIMA B E, DiEZ L, KOWALCZYK W, et al. Biofluid mechanical investigation in sequencing batch reactor (SBR) [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63: 599-608.
- [17] DiEZ L, ZIMA B E, KOWALCZYK W, et al. Investigation of multiphase flow in sequencing batch reactor (SBR) by means of hybrid methods [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62: 1803-1813.
- [18] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4th. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 俞毓馨, 吴国庆, 孟宪庭. 环境工程微生物检验手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [21] 李圭白, 张杰. 水质工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [22] 范潇梦, 王绍文, 王鹤立, 等. 高分散、高传质好氧生化反应器的处理效果 [J]. *中国给水排水*, 2002, 18 (2): 46-48.
- FAN XIAO-MENG, WANG SHAO-WEN, WANG HE-LI, et al. Treatment effect of aerobic biochemical reactor with high level dispersion and high rate of mass transfer[J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18 (2): 46-48.

(编辑 王秀玲)