

水流紊动特性对活性污泥沉降性能的影响

冯骞^{1,2}, 王超^{1,2}, 汪翊²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 为优化活性污泥处理系统的设计和运行, 在 SBR 反应器中通过改变搅拌桨的转速, 调整水流的紊动条件, 借助粒子图像测速技术分析了反应器内水流的紊动特性, 研究了反应器内不同区域紊动强度对活性污泥沉降性能的影响。结果表明, 搅拌桨叶周围 15 mm 的范围内, 紊动强度远高于距桨叶更远的区域, 距离桨板 5 mm 的 1-1 断面和距离桨板 60 mm 的 3-3 断面搅拌轴心处的紊动强度值分别反映了反应器搅拌主体区和其他区的紊动特征。随搅拌桨转速的增加, 反应器内各区域的紊动强度逐渐增加, 活性污泥的沉降性能表现出先改善后恶化的规律。当反应器搅拌主体区紊动强度 1.51%, 其他区紊动强度 0.31% 时, 本试验条件下形成的活性污泥沉降指数(SVI)达到最小值 67 mL/g, 界面沉降速率(ZSV)达到最大值 0.20 mm/s, 活性污泥的沉降性能最佳。搅拌主体区范围较小, 紊动强度较高, 增强该区的紊动强度会加剧污泥的侵蚀破坏; 其他区范围较大, 紊动强度较低, 增强该区的紊动强度对改善污泥的沉降效果作用明显。工程中可通过降低搅拌主体区的紊动强度, 选择其他区适当的紊动强度, 改善活性污泥的沉降性能。

关键词: 紊动强度; SBR; 活性污泥; 污泥沉降指数

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)06-1604-07

Influence of Hydrodynamic Turbulence Characteristics on the Sedimentation of Activated Sludge

FENG Qian^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, WANG Hui²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the optimization on design and function of active sludge system, the influences of hydrodynamic turbulence characteristics on the sedimentation of active sludge were studied. Hydrodynamic turbulence conditions were changed by adjustment of stirring paddle in sequencing batch reactor (SBR). With the technology of particle image velocimetry (PIV), the distribution of turbulence intensity under different parts in sequencing batch reactor (SBR) was analyzed. The results show that the turbulence intensity in area within the 15 mm distance around stirring paddle was higher than other areas. The characteristics of turbulence were reflected by the turbulence intensity of string axis in 1-1 section and 2-2 section. With increasing of rotate speed of stirring paddle, the turbulence intensity of different parts in SBR increased gradually, and the sedimentation performances of active sludge improved first and then deteriorated. The best sedimentation performance of active sludge in the experiment, which the smallest sedimentation volume index (SVI) was 67 mL/g, and the largest sedimentation velocity was 0.20 mm/s, occurred when the turbulence intensity of the main part in stirring zone was 1.51% and other part 0.31%. The area of main part in stirring zone was smaller than other parts, and the turbulence intensity of main part in stirring zone was higher than other parts. The hydrodynamic turbulence characteristics of main part had remarkable function on the breaking up of active sludge, while the hydrodynamic turbulence characteristics of other part had higher influence on sedimentation performances of active sludge. Decreasing the hydrodynamic turbulence intensity of main part in stirring zone and increasing the hydrodynamic turbulence intensity of main part in stirring zone can be performed to improve the sedimentation of activated sludge in practice.

Key words: turbulence intensity; sequencing batch reactor (SBR); active sludge; sedimentation volume index (SVI)

活性污泥是生物处理系统中通过自凝聚作用聚集生长形成的复杂微生物群体。在活性污泥处理工艺中, 由于需要通过泥水分离来完成污染物的去除, 因此污泥的沉降性能对保障处理系统的正常运行有着重要的意义^[1~5]。水环境中的能量消耗与活性污泥的结构和沉降性能关系密切^[6~10]。Tay 等^[11]研究了不同表观上升流速的上流式 SBR 中的活性污泥特性, 发现表观上升流速从 0.3 cm/s 增加到 3.8 cm/s, 活性污泥的比重增加, 污泥沉降指数(SVI)从

180 mL/g 下降到 40 mL/g。詹健等^[12]的研究也发现在活性污泥法中增加不同搅拌程度、不同停留时间的絮凝室, 可改善进入沉淀池混合液中活性污泥的特性, 降低二沉池出水的悬浮物浓度。受分析手段制约, 研究者多采用 G 值、体积输入功率或表观上升

收稿日期: 2007-06-05; 修订日期: 2007-10-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601070)

作者简介: 冯骞(1977~), 男, 讲师, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: xiaofq1977@sohu.com

流速等宏观参数表征系统的剪切作用及能量消耗^[13~16],对活性污泥系统中产生水体能量消耗的紊动特性及其对活性污泥特性的影响,国内外相关研究鲜见报道.

本研究在模拟处理生活污水的 SBR 反应器中引入粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV),对不同搅拌转速下活性污泥处理系统中水流的紊动特性进行了分析,结合不同搅拌转速下活性污泥沉降性能分析结果,探讨了水流紊动强度对活性污泥沉降性能的影响,提出了优化活性污泥处理系统设计和运行的建议.

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置主体为 5 个平行的柱状 SBR 反应器,采用有机玻璃制成,其有效容积均为 2 L,单套装置如图 1 所示.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.反应器底部设有微型曝气头,利用小型曝气泵向反应器中供氧,通过调节曝气管上阀门大小选择曝气量大小.此外,系统还设置了搅拌器,通过调速电机调节搅拌桨转速.SBR 反应器直径 135 mm,有效水深 140 mm,内设搅拌桨.桨板高度 b 为 59 mm;桨板的外缘直径 D 为 12 mm;搅拌轴直径 d 为 6 mm;桨叶离槽底距离 C 为 0.07 m,搅拌桨尺寸及位置如图 2 所示.

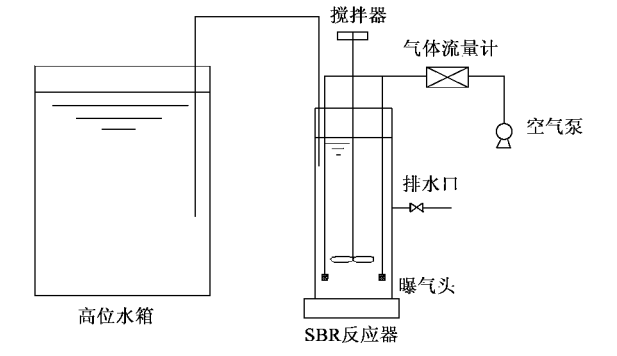


图 1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of the experiment

1.2 试验条件与过程

在各 SBR 反应器中接种等量南京锁金村污水处理厂二沉池的回流污泥,利用自配污水进行驯化启动和运行.试验过程中,分别调节 1~5 号 SBR 中搅拌桨转速为 80、120、150、180、220($r \cdot \min^{-1}$),控制曝气强度为 0.2 L/min,连续监测反应器的进出水水

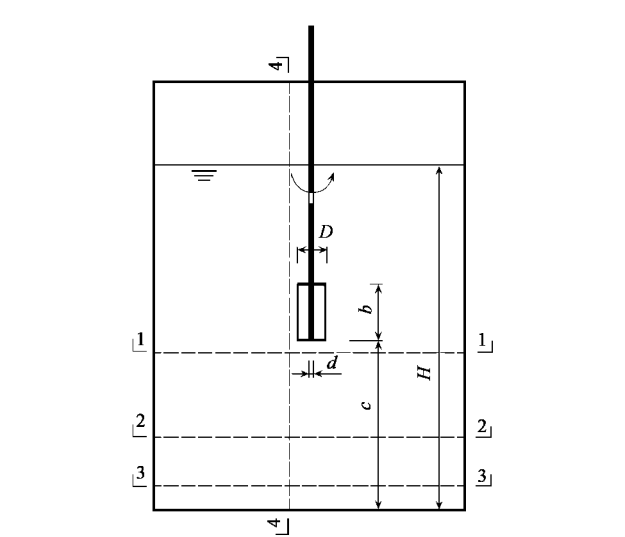


图 2 搅拌桨尺寸及测速断面位置

Fig.2 Size of stirring paddle and the position of speed monitoring

质和污泥特性,当 SBR 反应器内各项指标趋于平稳, COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别超过 85% 和 90%,认为系统进入稳定运行期.继续运行 2 周,定期监测污泥的各项特性,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 公司生产的 PIV 测试系统对 SBR 反应器中各搅拌桨转速下的流场进行监测,分析活性污泥系统中水流紊动特性.由于活性污泥系统中流动的混合液含水率可达 99%,加之试验系统中由于紊动、掺混产生的机械能耗散远大于由于粘滞性产生的粘滞耗散,综合考虑操作的便利性、PIV 测试对水体透光度的要求^[17~19]及紊动特性分析的目标,试验中选择了流动性近似、透光性强的清水作为流体介质,进行 PIV 测量.

试验原水参照生活污水水质采用葡萄糖为碳源,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、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TP(以 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,水温为 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$.根据水流紊动特性分析的要求,结合 PIV 系统的测定范围,选定了 4 个断面进行.测速断面位置如图 2 所示,其中水平向的 1-1、2-2、3-3 断面分别距离反应器下底面 65 mm(距离桨板 5 m)、30 mm(距离桨板 40 m)和 10 mm(距离桨板 60 m),垂向的 4-4 断面距离搅拌轴 10 mm.

紊流是由平均流叠加不同规则变化的脉动流构成的,而紊动强度反映了紊流状态下水流的扰动程度,体现了紊流的随机性、扩散性和耗散性的大

小^[20,21].以不同转速下 SBR 中的速度矢量分布为基础,进一步分析即可得到系统中的紊动强度分布.为试验分析需要,本研究中采用了脉动流速分量的二阶中心矩与时均流速的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^[21]为:

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

式中, ζ 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 分析监测项目与方法

本试验中的主要监测项目及方法^[22,23]见表 1 内容所示.

表 1 测试项目及方法
Table 1 Items and methods of wastewater test

监测项目	监测方法
COD	重铬酸钾标准法
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法
DO	JPB-607 型便携式溶氧仪
MLSS 和 MLVSS	烘干恒重法
生物相	Nikon eclipse E600 型显微镜
相对紊动强度	PIV 系统分析

2 结果与讨论

2.1

不同搅拌转速下 SBR 内的紊动特性

图 3 分别表明了搅拌浆转速 180 r•min⁻¹时反应器中各检测断面的紊动强度分布.其他搅拌浆转速下各反应器相应断面处紊动强度分布规律相同,仅断面各点处的紊动强度值随着搅拌浆转速的增加而增加.

从图 3 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.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.

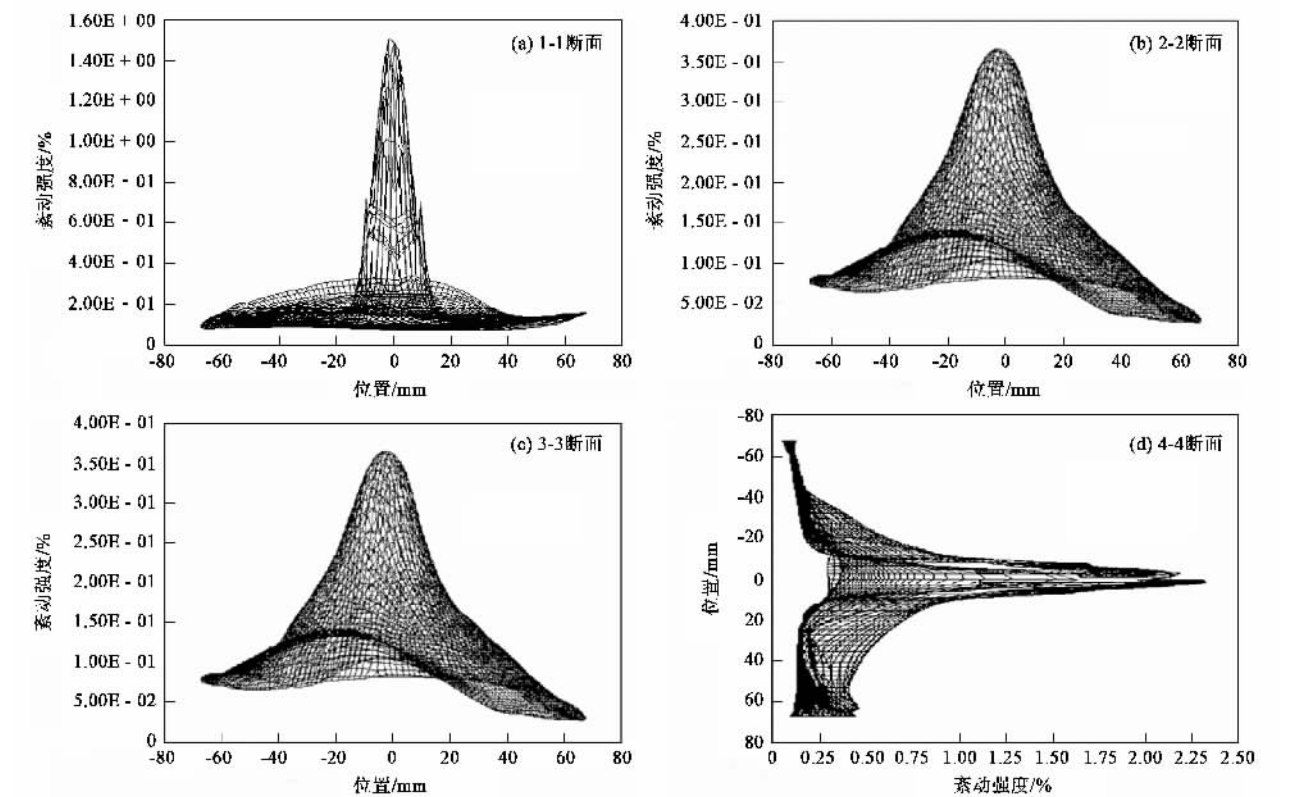


图 3 各监测断面的紊动强度分布(180 r•min⁻¹)

Fig.3 Distribution of turbulence intensity of each monitoring position (180 r•min⁻¹)

根据各断面的紊动强度分析结果,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,以此为基础分析水流紊动特性对活性污泥特性的影响。

2.2 不同搅拌转速下活性污泥的沉降性能

图 4 表明了搅拌浆转速 80、120、150、180 和 220 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的各反应器中形成活性污泥的沉降指数。图 5 则表明了处理系统稳定运行后,不同搅拌转速的各反应器中形成活性污泥的 30 min 沉降曲线。

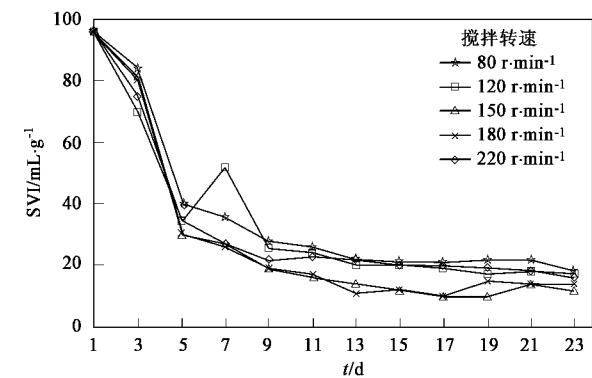


图 4 不同搅拌转速下污泥的沉降指数(SVI)
Fig.4 Sludge volume index under different stirring velocity

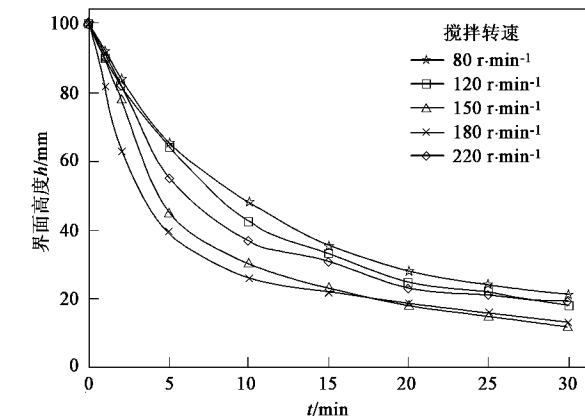


图 5 不同搅拌转速下的污泥沉降曲线
Fig.5 Sludge settling curves under different stirring velocity

从图 4 中可见,除搅拌浆转速最大的 5 号反应器外,系统内污泥的 SVI 随搅拌转速的增加逐渐降低。污泥沉降曲线的斜率表明了活性污泥的界面沉降速率,从图 5 所示的沉降曲线可见,曲线前段近似直线,斜率最大,沉降初期污泥的界面沉降速率也最

大;随沉降时间增加,曲线斜率逐渐降低,污泥的界面沉降速率也呈递减趋势。比较图 5 各反应器中活性污泥的沉降曲线,可以看出在搅拌浆转速 80 ~ 180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的各反应器中,搅拌浆转速越大,污泥沉降曲线前段斜率就越大,此时相应的污泥最大界面沉降速率也越高;搅拌浆转速增加到 5 号反应器中的 220 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,由沉降曲线最大斜率表征的最大界面沉降速率却出现了不增反降的现象。

Das 等^[15]的研究表明, G 对活性污泥的沉降性能影响显著,过大或过小的 G 值都会造成污泥沉降性能的下降。试验采用的搅拌型 SBR 反应器中的 G 值可由式(2)^[24]求得:

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu \cdot V}} \tag{2}$$

式中, μ 为水的动力粘滞系数; V 为池中被搅动的水流的体积(m^3)。 W 为搅拌过程中的能量消耗,可根据搅拌浆的数目、高度、位置及转速,按式(3)求得。

$$W = C \cdot \frac{\rho \cdot \omega^3 \cdot Z \cdot b(R^4 - r^4)}{4} \tag{3}$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0.105 \cdot n \tag{4}$$

式中, ρ 为水的密度(kg/m^3); C 为阻力系数,0.2 ~ 0.5,本试验中取为 0.22; Z 为浆板数目; b 为浆板高度(m),试验中 $b = 0.059 \text{ m}$; R 为垂直轴中心至浆板外缘的距离(m),本试验取用的搅拌器 $R = 0.012 \text{ m}$; r 为垂直轴中心至浆板内缘的距离(m),若浆板与垂直轴紧接,则 $r = 0$; ω 为浆板旋转的角速度(弧度/s); n 为垂直轴的转数($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)。

由于试验中的搅拌转速直接关系到系统中的能量消耗,影响 G 值的大小,因此这一结果也进一步证实了系统中的能量消耗对活性污泥沉降性能有影响。

3 紊动特性对活性污泥沉降性能的影响分析

分别取搅拌主体区和其他区紊动强度特征值为横轴、反应器稳定运行期活性污泥沉降指数(SVI)均值和污泥界面最大沉降速率(ZSV)为纵轴,可得到 SBR 中不同区域紊动特性与活性污泥 SVI 和 ZSV 的相关关系,如图 6 和图 7 所示。

从图 6 和图 7 中可见,SBR 中活性污泥的沉降指数随紊动强度特征值的增加表现出先降低后升高的规律,污泥的界面沉降速率则随紊动强度特征值的增加表现出先升高后降低的规律,且其他区紊动强度对沉降指数和界面沉降速率的影响较主体区紊

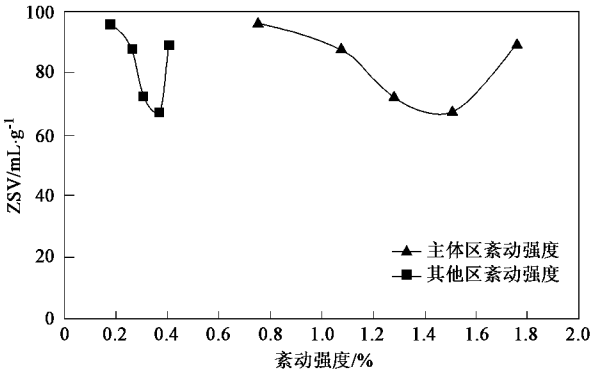


图 6 紊动强度与污泥沉降指数(SVI)的相关关系

Fig.6 Relation between turbulence intensity and sludge volume index

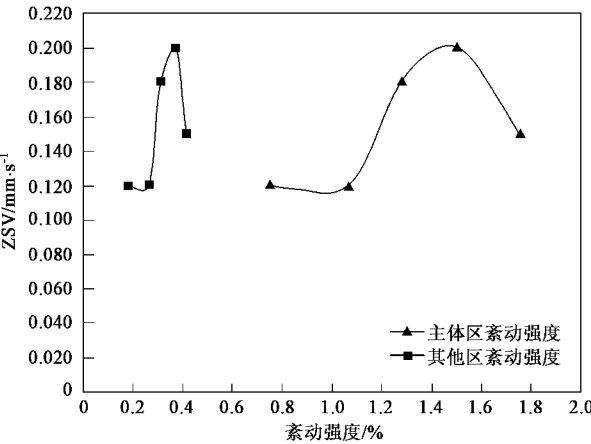


图 7 紊动强度与界面沉降速率(ZSV)的相关关系

Fig.7 Relation between turbulence intensity and sludge setting velocity

动强度更为显著.当搅拌主体区的紊动强度由 0.75% 上升到 1.51% 时, SBR 中污泥的沉降指数 (SVI) 从 96 下降到最低值 67, 界面沉降速率 (ZSV) 由 0.12 mm/s 增加到 0.20 mm/s 的最大值, 此时其他区的紊动强度仅由 0.18% 上升到 0.37%. 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 1.76%, 此时随紊动强度的增加, 污泥的沉降指数却出现了不降反升的现象, 界面沉降速率也出现了不升反降的现象. 与试验中 SVI 和 ZSV 的最优值相比, SVI 增加了 32.8%, ZSV 降低了 25.0%, 反应器中其他区的紊动强度也仅由 0.37% 上升至 0.41%.

SBR 中流体的紊动是活性污泥系统物质和能量传递的主要动力学致因, 由于流体紊动程度不同引发污泥颗粒间碰撞聚集程度和流体剪切应力的差异, 会在 SBR 中产生不同的选择压力^[25], 改变活性

污泥的组成结构和形态, 进而影响活性污泥的尺寸、形状、密实度和沉降性等物理特性. 搅拌转速较低时, 主体区和其他区紊动强度较低, 产生的选择压力较小, SBR 中形成的活性污泥平均粒径较大, 结构较为松散, 污泥的沉降指数较高, 界面沉降速率也相对较小. 随着搅拌转速的增加, 主体区和其他区紊动强度增加, SBR 系统的选择压力也随之增大. 此时, SBR 中结构松散、尺寸较大、沉降性能较差的活性污泥由于承受不了高选择压力的作用将从 SBR 中流失. 而那些结构相对紧密、尺寸较小、沉降性能良好的活性颗粒经筛选后将留在 SBR 中. 转速越大, 紊动强度越大, 这种选择作用也越强. 因此, 不同紊动强度下的 SBR 反应器经过启动驯化后, 稳定运行期 SBR 中污泥的沉降指数 (SVI) 随紊动强度的增加逐渐减小, 污泥的界面沉降速率 (ZSV) 则随紊动强度的增加而逐渐增加. 当 SBR 中的搅拌转速增加到 $220 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 后, 活性污泥由于紊动强度过大导致活性污泥破碎解体现象频发, SBR 中活性污泥的正常结构也受到了一定程度的影响, 因此污泥沉降指数 (SVI) 表现出不降反升, 界面沉降速率 (ZSV) 表现出不升反降的规律.

不同区紊动强度对污泥沉降性能的影响程度差异较大的主要原因在于, SBR 内不同区域的紊动引发了不同尺度的紊动涡旋, 对活性污泥产生了不同的作用. 根据 Kolmogorov 局部各向同性紊流理论^[25~27], 紊流中存在各种尺度不相等的涡旋. 桨叶搅拌施加的能量在 SBR 反应器中形成了尺度较大的涡旋, 利用液体对能量的传递作用, 部分大涡旋将能量输送给小涡旋, 而小涡旋又将一部分能量输送给更小的涡旋, 逐级进行, 最终完成能量的传递和耗散. 不同尺度的涡旋对活性污泥的作用有所不同. 大尺度的涡旋往往使污泥作整体移动; 而尺度过小的涡旋则不足以推动污泥进一步碰撞聚集, 还会增加涡旋对絮体颗粒的冲击破坏作用. 只有尺度与污泥颗粒粒径相当的涡旋, 才能促进污泥颗粒之间的碰撞聚集, 改善污泥的特性. 由于距离搅拌桨较近, 搅拌主体区的范围较小, 但紊动强度最高, 紊动能量耗散的最多, 涡旋尺度也最小; 反之, 受水体粘滞性的影响, 距离搅拌桨较远的其他区范围较大, 但紊动强度相对较小, 紊动能量的耗散更少, 涡旋尺度也相应更大. 分析表明, 搅拌主体区内紊动产生的涡旋尺度明显低于正常污泥颗粒粒径, 而试验选择的搅拌转速下其他区产生的涡旋尺度与颗粒污泥粒径大致相当. 因此, 系统中其他区域大范围、较低强度的紊动

对活性污泥沉降性能的影响幅度明显高于搅拌主体区小范围、高强度的紊动.在保证其他区紊动强度的基础上,降低搅拌主体区的紊动强度,能有效降低外界的能量输入,减少搅拌主体区的紊动,改善污泥的沉降性能.

通过活性污泥的镜检观测,还可进一步分析活性污泥沉降性能随 SBR 紊动强度变化改变的原因.图 8 表明了不同紊动特性的 5 个反应器中活性污泥的镜检照片.从中可清晰地看出,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.这种污泥结构和形态上的变化,也是导致污泥沉降性能变化的主要致因之一.需要说明的是,当其他区紊动强度由 0.37% 增长到 0.41% 时,镜检下活性污泥絮凝体的形状和尺寸变化并不显著.目测观察搅拌转速 $220\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 5 号反应器中的活性污泥,可发现系统中出现了一定数量的破碎污泥悬浮在 SBR 中,这也直接导致了污泥的 SVI 值较搅拌转速 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 4 号反应器有所升高,ZSV 有所下降.

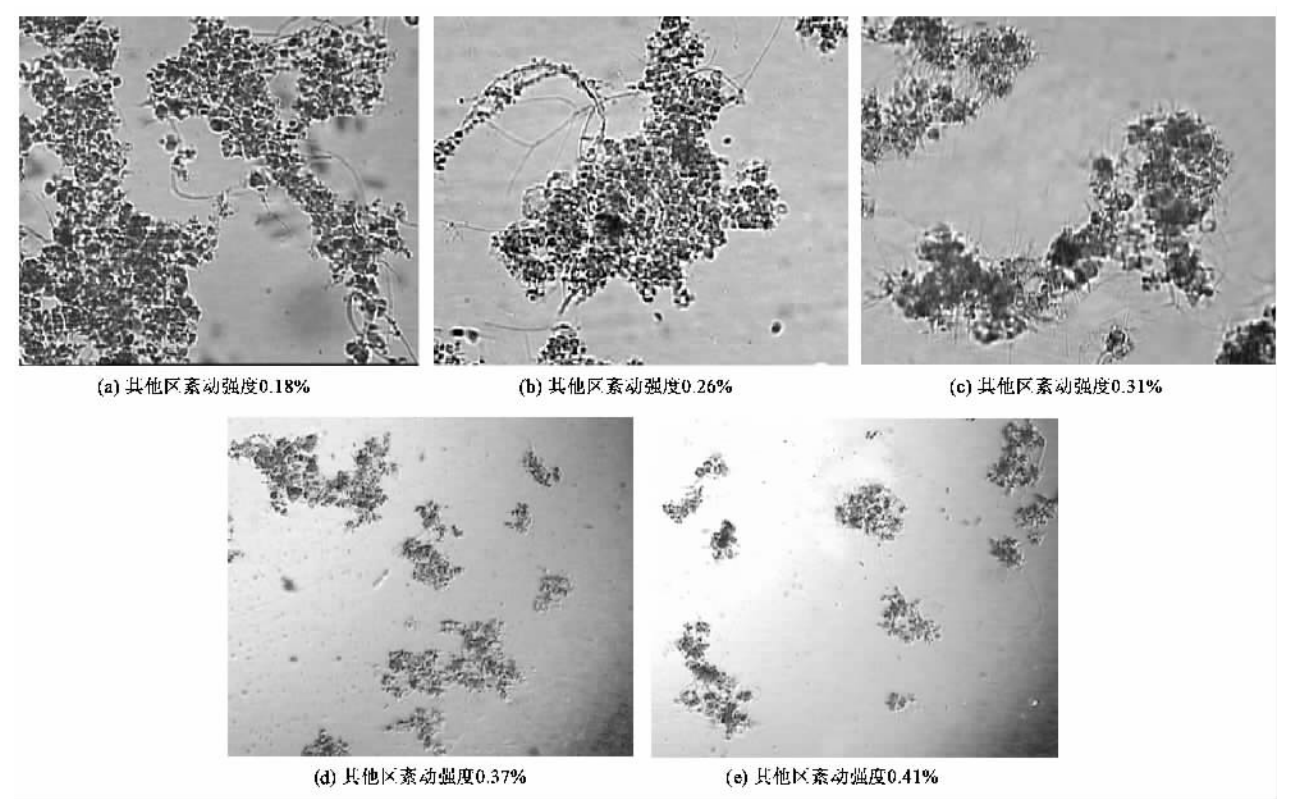


图 8 不同紊动特性下活性污泥絮凝体的镜检照片(×100 倍)
Fig.8 Microscope photo of active sludge under different turbulence intensity(×100)

试验中发现当搅拌主体区紊动强度 1.51%、其他区紊动强度 0.31% 时,SBR 中活性污泥的污泥沉降指数(SVI)最小,界面沉降速率(ZSV)最大.根据试验中搅拌桨尺寸,利用式(2)测算最佳转速下的 G 值为 110 s^{-1} .与 Das 等^[15]研究出的最佳 G 值 125 s^{-1} 相比,本试验中最佳紊动强度下的 G 值大致相当,这也从另一方面验证了水流紊动特性优化条件研究的结论.

4 结论

(1) 在搅拌型柱状 SBR 反应器中,随着搅拌转速的增加,SBR 中的紊动强度逐渐增加.由于流体和

边壁粘滞力的影响,距离搅拌桨较近的搅拌主体区紊动强度明显高于距离搅拌桨较远的其他区.试验中两区的界限为桨叶周围半径 15 mm 的区域.

(2) 反应器内的紊动特性直接影响活性污泥的沉降性能.试验中随着搅拌转速的增加,紊动强度逐渐加大,系统中活性污泥的沉降性能表现出先改善后恶化的规律.选择合适的紊动特性,能改善活性污泥的沉降性能,优化活性污泥处理系统的运行.试验条件下 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 1.51% 和 0.37%.

(3) SBR 中不同区域的紊动引发了不同尺度的紊动涡旋,对活性污泥产生了不同的作用.各 SBR

搅拌主体区内强紊动产生的涡旋尺度低于污泥颗粒的粒径,对污泥的侵蚀破坏作用较大,其他区内较弱的紊动产生的涡旋尺度与污泥颗粒的粒径大致相当,对改善污泥的沉降效果作用明显.如能通过反应器结构的改进和搅拌转速的合理控制,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,选择其他区最佳的紊动强度,对于减少污泥颗粒的破碎解体,促进活性污泥沉降性能的改善,都将具有重要的现实意义.

参考文献:

- [1] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface property of sludge and their role in biofloculation and settle ability[J]. Water Res, 2001, **35**(2): 339-350.
- [2] 李久义, 吴晓清, 陈福泰, 等. Fe(Ⅲ)对活性污泥絮体结构和生物絮凝作用的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(5): 582-587.
- [3] 张自杰. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 306-314.
- [4] 李圭白, 张自杰. 水质工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 376-377.
- [5] Luis B, Esley W, Eckenfeder J. Relationship between organic loading and zone setting velocity in the activated sludge process[J]. Water Res, 1984, **18**(1): 91-94.
- [6] 施力荣, Wenjem N G. 进水与曝气方式对 SBR 中活性污泥产率和性能的影响[J]. 上海环境科学, 2003, **22**(6): 393-395.
- [7] Franco A, Roca E, Lema J M. Improvement of the properties of granular sludge in UASB reactors by flow pulsation[J]. Water Sci Technol, 2003, **48**(6): 51-56.
- [8] 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**(7): 1653-1665.
- [9] Etterer T, Wilderer P A. Generation and properties of aerobic granular sludge[J]. Water Sci Technol, 2001, **43**(3): 19-26.
- [10] Beun J J, Hendriks A, Loosderecht M C, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. Water Res, 1999, **33**(10): 2283-2290.
- [11] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2001, **57**(1-2): 227-233.
- [12] 詹健, 高廷耀, 周增炎. 生物絮体的物理特性调节[J]. 中国给水排水, 1996, **12**(1): 4-7.
- [13] Molina G E, Chisti Y, Moo-Young M. Characterization of shear rates in airlift bioreactors for animal cell culture[J]. J Biotechnol, 1997, **54**(3): 195-210.
- [14] Chen S Y, Huang S Y. Shear stress effects on cell growth and L-DOPA production by suspension culture of *Stizolobium hassjoo* cells in an agitated bioreactor[J]. Bioprocess Engineering, 2000, **44**(1): 5-12.
- [15] Das D, Keinath T M, Paker D S, *et al.* Floc breakup in activated sludge plants[J]. Water Environ Res, 1993, **65**(2): 138-145.
- [16] Beun J J, Loosderecht M C, Heijnen J J. Aerobic Granulation[J]. Water Research, 2000, **41**(4): 41-48.
- [17] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的发展[J]. 力学与实践, 2002, **24**(5): 1-13.
- [18] 华怀峰, 黄岐善, 翁志学, 等. 激光测速技术及其在化工搅拌流场测量中的应用[J]. 化工进展, 2002, **21**(5): 338-341.
- [19] 聂毅强, 包雨云, 施力田. 改进 PIV 技术在测量搅拌槽内流场中的应用[J]. 北京化工大学学报, 2002, **29**(1): 6-9.
- [20] 张书农. 环境水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988. 15-18.
- [21] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. 34-35.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 17-89.
- [23] 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. 133-135.
- [24] 罗辉荣. 混凝搅拌试验方法的探讨[J]. 工业水处理, 1984, **4**(1): 30-36.
- [25] 王绍文. 亚微观传质在水处理反应工艺中的作用[J]. 中国给水排水, 2000, **16**(1): 30-32.
- [26] 王强, 陈坚, 堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 99-104.
- [27] 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.