

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.19.002

# 双区沉淀池用于连续流好氧颗粒污泥工艺的可行性

吴越<sup>1</sup>, 赵传峰<sup>2</sup>, 孙法文<sup>2</sup>, 刘文龙<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学环境学院 浙江省工业污染微生物控制技术重点实验室, 浙江 杭州 310014;

2. 衢州市清泰环境工程有限公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要:** 选取一座已初步形成好氧颗粒污泥的工业污水处理厂的辐流式沉淀池为研究对象, 结合实际运行情况建立固液二相流模型, 分析沉淀池内活性污泥的沉降性能和分布规律。从沉淀池底径向距离中心1、6和12 m处取得3个污泥样本S1、S2和S3, 其中S1的平均粒径(294.6  $\mu\text{m}$ )远高于S2(142.8  $\mu\text{m}$ )和S3(55.2  $\mu\text{m}$ ), 对应的污泥指数(SVI)分别为56.2、63.4和81.3 mL/g。综合试验结果和计算流体力学(CFD)模拟结果可以发现, 沉淀池内颗粒污泥主要集中在半径为1~6 m的圆环区域内。因此, 可以通过选择性回流中心区域内的颗粒污泥来制造选择压, 从而实现连续流工艺的污泥颗粒化。

**关键词:** 好氧颗粒污泥; 连续流; 双区沉淀池; 辐流式沉淀池; 选择压

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)19-0009-07

## Feasibility of Aerobic Granular Sludge Formation in Continuous Flow Reactor Based on Two-zone Sedimentation Tank

WU Yue<sup>1</sup>, ZHAO Chuan-feng<sup>2</sup>, SUN Fa-wen<sup>2</sup>, LIU Wen-long<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Key Laboratory of Microbial Technology for Industrial Pollution Control, College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Quzhou Qingtai Environmental Engineering Co. Ltd., Quzhou 324000, China)

**Abstract:** A radial sedimentation tank from a full-scale industrial sewage treatment plant which has formed the primary aerobic granular sludge (AGS), was used to investigate the settling performance and distribution of the activated sludge in a solid-liquid two-phase flow system using computational fluid dynamics (CFD) model. Three sludge samples (S1, S2 and S3) were taken from the bottom of the sedimentation tank at the different radial distances (1 m, 6 m and 12 m, respectively) from the center of the tank. The average particle size of S1 sludge (294.6  $\mu\text{m}$ ) was higher than that of S2 sludge (142.8  $\mu\text{m}$ ) and S3 sludge (55.2  $\mu\text{m}$ ), while the corresponding sludge volume index for three sludge samples were 56.2 mL/g, 63.4 mL/g and 81.3 mL/g, respectively. Both CFD simulation and experimental data showed that the ring area with a radius of 1–6 m in sedimentation tank contributed to the retention of heavier and larger granular sludge. Therefore, the selection pressure could be generated by selective recirculation of the granular sludge in the center area of the sedimentation tank to enhance the aerobic granulation in the continuous flow reactor.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478433); 浙江省重点研发计划项目(2018C03006)  
通信作者: 李军 E-mail: tanweilijun@zjut.edu.cn

**Key words:** aerobic granular sludge; continuous flow; two-zone sedimentation tank; radial sedimentation tank; selection pressure

污泥颗粒化是一种微生物的自凝聚现象,颗粒污泥(AGS)具有结构紧凑、生物量大、沉降性能好等优点<sup>[1]</sup>。目前,基于序批式反应器(SBR)的好氧污泥颗粒化在经过长期研究之后已经得到实际应用<sup>[2]</sup>。然而,在连续流反应器(如氧化沟和A<sup>2</sup>O工艺等)中实现污泥颗粒化依旧存在瓶颈<sup>[3-4]</sup>。

本研究团队于2016年美国水环境联合会(WEFTEC® 2016)好氧颗粒污泥研讨会上首次公开提出连续流好氧颗粒污泥双区沉淀池技术,双区沉淀池是将传统的辐流式沉淀池按径向分为内外两区,内区沉淀的重污泥回流,外区沉淀的轻污泥作为剩余污泥,以促进好氧污泥颗粒化。该技术于2016年取得国家发明专利<sup>[5]</sup>,并在小试<sup>[6]</sup>和中试<sup>[7-8]</sup>规模的连续流反应器中得到了成功应用,取得了较好的污泥颗粒化效果和污染物去除性能。

为探索和发掘分区沉淀池应用于连续流好氧颗粒污泥工艺的潜力,以及在未来用于实际污水处理厂污泥颗粒化升级改造的可行性,笔者以一座已初步形成好氧颗粒污泥的工业污水处理厂的辐流式二沉池为研究对象,分析了污泥在池底径向上的分布特征,并通过计算流体力学(CFD)方法进行流态和物态分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 污水处理厂概况及污泥取样点

某化工污水处理厂二期I系列设计处理规模为10 000 m<sup>3</sup>/d,处理工艺主要包括水解酸化池、氧化沟、辐流式沉淀池、臭氧接触池、MBBR池、溶气气浮池、滤布滤池等。由于进水主要由园区化工厂排放的污水(氟化工废水、高分子材料废水、制碱废水等)组成,因而可生化性较差,含盐量较高(主要为Ca<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等)。该工艺主要用于去除水中氨氮和难降解COD,出水水质需达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。由于进水中存在的大量金属离子能够有效降低微生物表面电负性,促进污泥凝聚,因此,该处理厂的污泥中存在大量边界清晰、结构完整的颗粒污泥。

污泥样品取自该污水处理厂二期I系列的辐流式二沉池,取样点如图1所示,以二沉池中心点为圆

心,沿同一半径方向距离圆心1、6和12 m位置分别为第1次的取样点A1、B1、C1,第2次的取样点A2、B2、C2和第3次的取样点A3、B3、C3。为避免取到上清液,取样点均设在泥层以下靠近池底处。为保证试验的准确性,在间隔120°的3个半径上进行等距离取样,之后将取得的3个污泥样品进行混合,得到试验污泥样品,按照取样点的半径由短到长分别命名为S1、S2和S3。

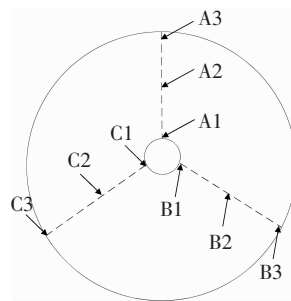


图1 取样点示意

Fig. 1 Diagram of sampling points

## 1.2 辐流式沉淀池网格模型的建立及边界条件

### 1.2.1 网格模型的构建

该辐流式沉淀池设计流量为10 000 m<sup>3</sup>/d,采用中心管淹没式潜孔进水、周边出水的设计,污泥沉积于沉淀池底部,经刮吸泥机收集后进入贮泥池,具体的结构参数与实际运行条件如下:表面负荷为0.75 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),有效沉淀时间为2 h,池体直径为28 m,有效水深为4 m,池底坡度为0.05,配水井直径为1 m,挡板直径为2 m,挡板深度为1 m,进口流速为0.01 m/s,刮吸泥机运行周期为45 min。由于本研究主要考察污泥在池底的分布状况,而中心管内流体状态的影响不大,因此将挡板下缘范围设置为入流口。同时将沉淀池简化为一半进行模拟,以期在不降低精度的同时降低计算量,提高效率。本次模拟主要研究颗粒污泥在沉淀池中的沉淀位置与池中水流流态的关系。刮吸泥机转速较小,对流态的影响不大,因此在模拟中忽略污泥的收集与排出,在建立模型时未设置污泥斗和排泥管等设备。使用Design Modeler建立简化后的模型,并使用ICEM CFD六面体棱柱对流场进行网格划分,得到的网格模型如图2所示。

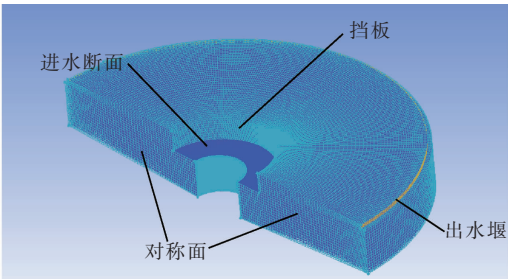


图 2 辐流式沉淀池的网格模型

Fig. 2 Grid model of radial sedimentation tank

1.2.2 边界条件

为了研究沉淀池内流态对颗粒污泥在池底分布的影响,在模拟时忽略温度的变化,流体温度为 20℃。将颗粒污泥和絮体视为均匀球体,在运动过程中各相不发生质量交换。模拟采用瞬态迭代计算的方式,计算一个刮吸泥机运行周期内池底污泥的分布情况。对比几种控制方程,最终选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型用于沉淀池的数值模拟<sup>[9]</sup>。二沉池内存在着大量絮体污泥和颗粒污泥,池内流态可看作是固-液二相流动,其中水流可视为原始的连续相,污泥作为离散相。本次模拟采用混合模型 (Mixture Model) 和 PISO 算法,离散格式采用 QUICK 格式<sup>[10-11]</sup>。

1.3 分析项目与检测方法

采用标准方法<sup>[12]</sup>测定 MLSS、MLVSS、SVI 等常规污泥特性指标,采用 Olympus BX51/52 光学显微镜观察污泥形态特征,采用 Microtrac S3500 激光粒度分析仪测定污泥粒径分布,污泥密度采用比重法测定。

2 结果与讨论

2.1 沉淀池不同空间位置的污泥特性

表 1 统计了不同取样点污泥样品的理化特性。沉淀池内污泥浓度随取样点半径的增大而减小,例如 S1、S2 和 S3 污泥样品的 MLSS 分别为 27 100.0、15 012.7 和 13 956.6 mg/L;3 个取样点污泥样品的沉降性能也有着较大差异,SVI 值分别为 56.2、63.4 和 81.3 mL/g,其中取样点 S1 的污泥沉降性最好,S2 次之,S3 相对较差。MLVSS/MLSS 值的大小可间接反映污泥中的无机质含量<sup>[10]</sup>,取样点 S1、S2 和 S3 的 MLVSS/MLSS 值分别为 0.51、0.60 和 0.66,这说明取样点 S1 的污泥样品中含有较多的无机质,S2 次之,S3 最少。取样点 S1 污泥样品的密度 (1 027.1 kg/m<sup>3</sup>) 明显高于取样点 S2 (1 015.1 kg/

m<sup>3</sup>) 和 S3 (1 013.9 kg/m<sup>3</sup>)。此外,采用激光粒度仪检测污泥样品的粒径分布,得到取样点 S1、S2 和 S3 污泥样品的平均粒径分别为 294.6、142.8 和 55.2 μm,这说明在传统辐流式沉淀池内,密度较重且粒径较大的污泥更易沉淀在中心管附近,密度较轻且粒径较小的污泥会随水流向周边扩散。

表 1 不同取样点污泥样品的理化特征

Tab. 1 Characteristics of the sludge sampled from different points

项 目	S1	S2	S3
MLSS/(mg · L <sup>-1</sup> )	27 100.0	15 012.7	13 956.6
MLVSS/(mg · L <sup>-1</sup> )	13 941.6	9 007.6	9 211.3
SVI/(mL · g <sup>-1</sup> )	56.2	63.4	81.3
混合污泥密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	1 027.1	1 015.1	1 013.9
平均粒径/μm	294.6	142.8	55.2

采用显微镜观察 3 个取样点污泥样品的形态特征,结果如图 3 所示。由于处理的工业废水中含有大量 Ca<sup>2+</sup> 和 Al<sup>3+</sup> 等易结晶沉淀的金属离子,因而 3 个污泥样品的镜检视野中都存在大量的白色无机盐颗粒,无机金属离子能够显著降低微生物细胞表面的电负性,促进絮体污泥的凝聚,从而在一定程度上加速污泥的沉降<sup>[13]</sup>。

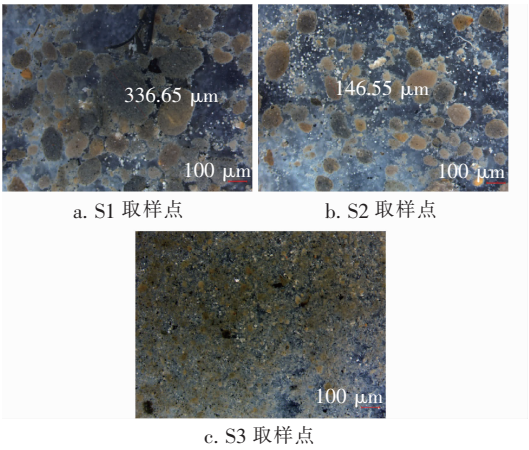


图 3 沉淀池不同位置污泥样品的镜检照片

Fig. 3 Microscopic photos of different sludge samples

污泥样品中除了白色无机金属物质以外,还存在一定量的黑色小颗粒。这些黑色颗粒来源于活性炭吸附池内投加的粉末状活性炭,有文献表明<sup>[14]</sup>,活性炭能起到吸附架桥和晶核的作用,从而加速颗粒污泥的形成。镜检结果显示取样点 S1 和 S2 的污泥具有较清晰的边界和明显的球形结构,其中取样点 S1 样品的颗粒污泥体积较大,且所占比例较高。此外,取样点 S3 污泥样品主要由微小的颗粒和无固



定形状的絮体构成,其中夹杂较多的粉末活性炭,原因在于絮体具有较大的比表面积,能够对水中的悬浮颗粒物进行卷扫和网捕<sup>[15]</sup>。

综上所述,取样点 S1、S2 和 S3 的污泥样品均由不同比例的颗粒和絮状污泥构成,且各污泥样品的沉降能力与其中的颗粒污泥含量呈正相关<sup>[16]</sup>。相比絮状污泥,颗粒污泥拥有紧凑的结构和更大的生物量。且由于其多孔的结构特征,颗粒污泥更容易吸附金属离子并将其固定在内部,因而具有更大的密度和更快的沉降速率。有研究指出,在絮体污泥中混入一定量的颗粒污泥能够显著改善污泥的沉降性能<sup>[17]</sup>。

## 2.2 辐流式沉淀池模拟的可靠性验证及结果分析

### 2.2.1 模型参数

由表 1 可知,取样点 S1、S2 和 S3 处污泥样品的平均粒径分别在 300、150 和 50  $\mu\text{m}$  左右。因此为提高计算效率,在模拟过程中将实际沉淀池内的污泥简化为粒径分别为 300、150、50  $\mu\text{m}$  (依次记作 P1、P2、P3) 的颗粒污泥组成的混合污泥。通过 200、80 和 15 目复合筛网筛选得到相应粒径的污泥,测定这 3 种污泥样品的物理性质,并作为模型参数。结果如表 2 所示。

表 2 建模用颗粒污泥的理化特性

Tab. 2 Characteristics of granular sludge for modeling

项 目	P1	P2	P3
平均粒径/ $\mu\text{m}$	335.8	163.1	85.3
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 080.06	1 045.75	1 027.33

### 2.2.2 沉淀池内各位置的污泥密度差异

图 4 显示了距离池底 0.1 m 处泥层密度随径向距离的变化。

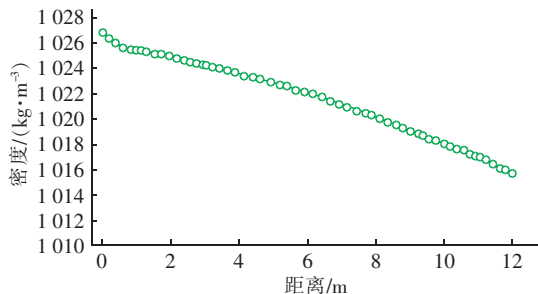


图 4 沉淀池底 0.1 m 处污泥密度随径向距离的变化

Fig. 4 Change of sludge density with the increase of radial distance (0.1 m from the bottom of the sedimentation tank)

由图 4 可见,靠近中心管位置的污泥密度约为

1 026  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,沉淀池周边位置泥层密度降至 1 015  $\text{kg}/\text{m}^3$  左右,与取样点 S1 和 S3 实际样品的污泥密度 (分别为 1 027.1 和 1 013.9  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 基本相符,一定程度上证明了模型的可靠性。

图 5 为沉淀池纵截面和水平截面上 (水深 3.8、3.2.5 和 1.5 m 处) 的污泥密度云图。可见,沉淀池内存在清晰的水平泥水界面,泥层密度随深度增加而增大,各水平截面上的质量分布较为均匀。在深度为 3.8、3.2.5 和 1.5 m 的水平截面上的混合液密度分别约为 1 024、1 016、1 006 和 998  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,说明沉淀池泥水界面以上 (水深 0 ~ 1.5 m) 污泥浓度基本为 0,为清水区;界面以下是污泥浓度和密度逐渐上升的絮凝区 (水深 1.5 ~ 3 m),接下来是污泥浓度变化不大的成层沉淀区 (3 ~ 3.8 m),底层存在一层厚度约为 0.2 m 的区域,该区域内混合污泥密度较大且与成层沉淀区存在明显的界面。

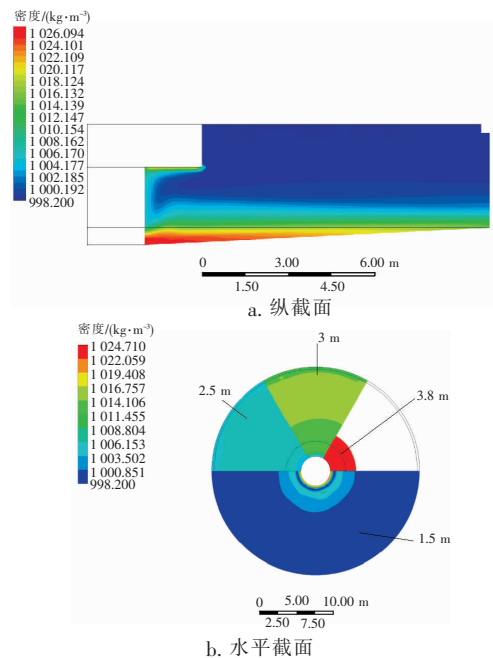


图 5 沉淀池污泥密度分布

Fig. 5 Sludge density distribution

### 2.2.3 沉淀池内水流流态分析

湍流动能通常用以衡量流体不规则运动的程度<sup>[18]</sup>,湍流动能较大不利于颗粒自由沉降。模拟显示 (见图 6),入口下方靠近中心壁处存在一个湍流动能为 0.003  $\text{m}^2/\text{s}^2$  的区域,其他区域的湍流动能较小,约为 0.001  $\text{m}^2/\text{s}^2$ 。该沉淀池中各个位置都处于低湍流动能 ( $\leq 0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) 状态,对污泥的沉降干扰较小。径向上的水流速度决定了污泥在沉淀池

中的位移,由图6(b)可知,沉淀池入口下方2 m处存在一个回流区域,污泥经过该区域时速度方向发生明显改变,随后沿径向以0.007 m/s左右的速度扩散至整个沉淀池。流体切向上的速度会干扰污泥的沉降,导致池底污泥分布不均匀,影响回流污泥的浓度。

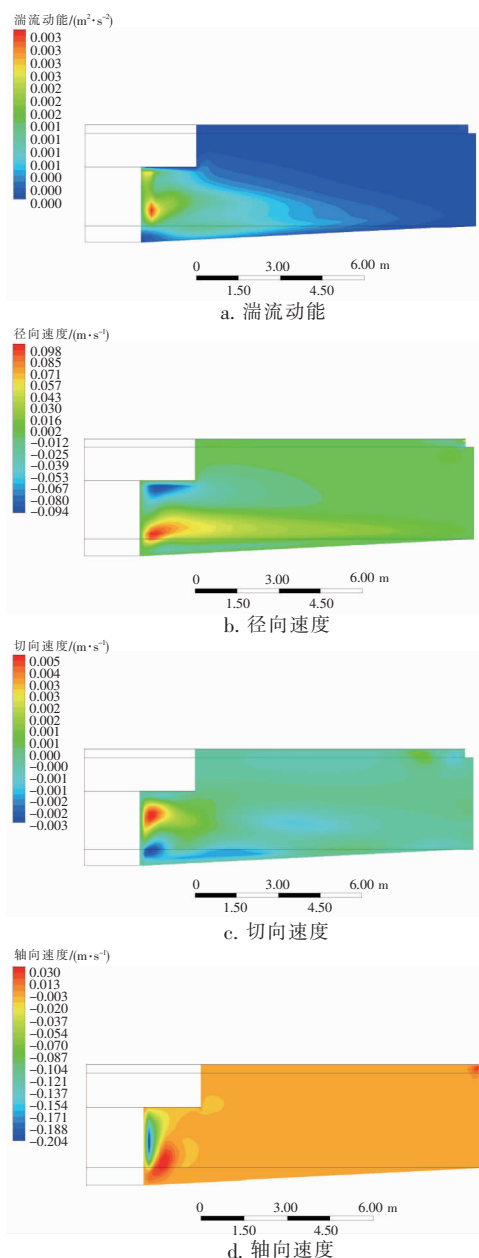


图6 沉淀池流态模拟

Fig. 6 Flow pattern simulation of the sedimentation tank

图6(c)表明,除了在湍流动能较大的回流区,其他各位置的水流切向速度在 $-0.001 \sim 0.001$  m/s之间,对污泥的沉降干扰较小。由图6(d)可见,除了回流区域和出口附近,其他区域的水流轴向分速

度稳定在 $-0.003$  m/s左右。轴向上的水流速度直接影响污泥的沉降性能,能够促进沉降能力不同的污泥进行分层。值得一提的是,池底附近有一层厚度约为0.1 m的静止层,层内水流速度和湍流动能都接近于0,有利于完成沉降的污泥保持静止。

## 2.2.4 不同类型污泥在沉淀池内的分布

图7显示了颗粒污泥P1、P2和P3在沉淀池内的体积分数分布。由于P1、P2和P3颗粒具有不同的密度和体积,受到的流体曳力也不同,导致不同颗粒的沉降路线和沉降位置也不相同。粒径和密度较大的P1污泥多半聚集于沉淀池底部靠近中心管的位置,体积分数大于20%,而在距离较远处含量较低,最低值约为7%。P2污泥分布较为均匀,除湍流区外,在整个池底部均有存在;而P3沉降速率较小,沉降时间较长,可通过水流作用运动至距离较远处,因而主要沉淀于靠近池周的底部。

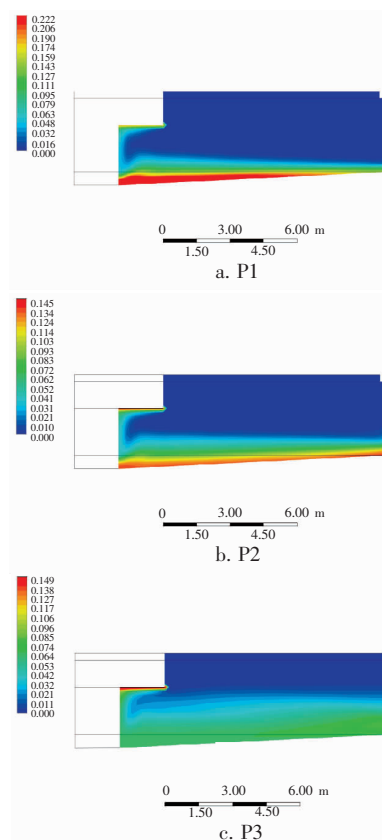


图7 特征颗粒污泥在沉淀池内的体积分数分布

Fig. 7 Distribution of volume fraction of the granular sludge in sedimentation tank

图8显示了P1、P2和P3颗粒污泥在池底的分布情况和变化趋势。颗粒污泥P1受湍流干扰较小,在进入沉淀池后很快开始下沉,主要分布在S1、S2

取样点附近(体积分数分别为21%和16%左右),而在S3取样点附近体积分数较低(7%左右)。P2的沉降受水流影响较大,因而在S1取样点附近体积分数波动较大(11%~14%);S2和S3取样点附近水流较为平稳,因此在到达S3取样点之前大部分P2已经完成沉淀。相对于P1和P2而言,P3颗粒粒径更加细小,在波动的水流中更加趋近于悬浮状态,因此只有在水流接近静止的S3取样点附近才能稳定沉淀,体积分数达到10%,而在S2和S3的位置P3的沉淀趋势尚不明确。根据定义<sup>[19]</sup>,污泥粒径超过220  $\mu\text{m}$ 且结构紧凑,具有清晰边界的污泥可被认为是颗粒污泥。据此,可以确定在沉淀池底部径向距离中心管1~6 m的圆环区域能够收集到纯度较高的颗粒污泥。

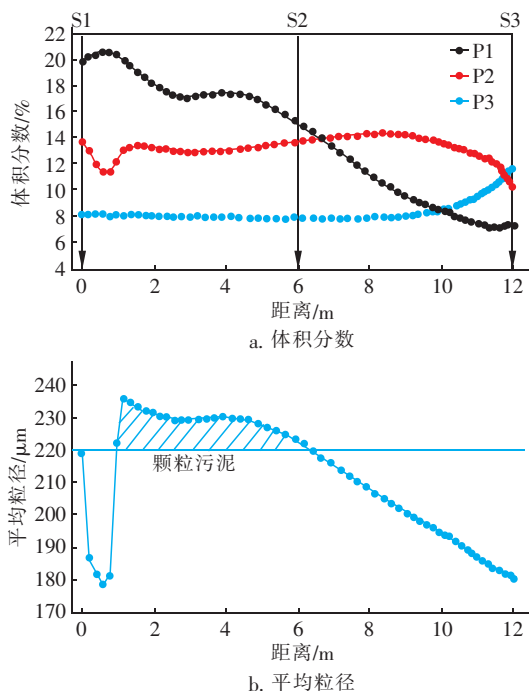


图8 沉淀池底部(0.1 m)特征颗粒污泥的分布

Fig. 8 Distribution of the granular sludge at the bottom of the sedimentation tank

### 2.3 改造传统辐流式沉淀池促进污泥颗粒化

试验及模拟结果表明,在该沉淀池中 AGS 和絮体污泥具有不同的沉淀位置:颗粒污泥多沉淀于池底径向距离中心管1~6 m的圆环区域,而6~12 m之间圆环区域多被粒径和密度较小的絮体污泥占据。将反应器中的絮体污泥通过选择压排出是实现颗粒化的关键,在该辐流式沉淀池内两种污泥沉淀位置的不同可作为淘汰絮体污泥的依据。如图

9所示,只需通过两座刮吸泥机分别将特定区域的颗粒污泥回流并将絮体污泥作为剩余污泥排出,便可为连续流好氧污泥颗粒化提供所需的选择压,从而在实际连续流污水处理厂中实现颗粒化。

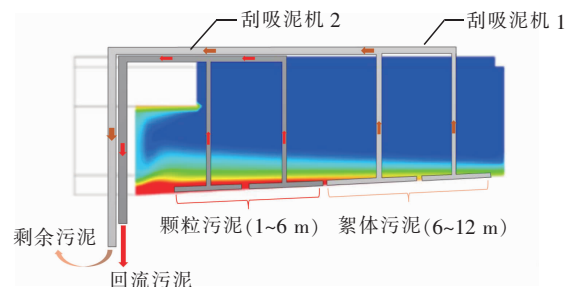


图9 促进污泥颗粒化的分区回流的辐流式沉淀池运行方式

Fig. 9 Operation mode of the granulation-promoting radial sedimentation tank with separating reflux

### 3 结论

某工业污水处理厂活性污泥中存在大量好氧颗粒污泥。采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型、Mixture 模型和 Simplec 压力速度耦合方法,结合实际调研,分析了该厂辐流式沉淀池内不同污泥的沉降性能和分布规律。调研显示:沉淀池底部距离圆心1、6和12 m处获取的污泥样本 S1、S2 和 S3 的 SVI 分别为 56.2、63.4 和 81.3 mL/g;密度分别为 1 027.1、1 015.1 和 1 013.9  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。模拟显示:池内各位置湍流动能较低,处于 0.001~0.003  $\text{m}^2/\text{s}^2$  之间,有利于絮体污泥和颗粒污泥的分离;池底污泥密度、粒径随径向距离的增大而递减,符合调研结果;在半径为 1~6 m 的圆环区域能收集到纯度较高的颗粒污泥。因此,该辐流式沉淀池具有升级改造潜力,可为连续流好氧污泥颗粒化提供选择压。

### 参考文献:

- [1] Li X M, Xie S, Yang Q, et al. Cultivation of aerobic granular sludge and its application in simultaneous nitrification and denitrification [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14: 104-108.
- [2] Pronk M, De Kreuk M K, De Bruin B, et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. Water Res, 2015, 84: 207-217.
- [3] Chen C Q, Bin L Y, Tang B, et al. Cultivating granular sludge directly in a continuous-flow membrane bioreactor with internal circulation [J]. Chem Eng J, 2017, 309: 108-117.

- [4] Corsino S F, Campo R, Di Bella G, *et al.* Study of aerobic granular sludge stability in a continuous-flow membrane bioreactor[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 200: 1055 – 1059.
- [5] 李军, 陈涛, 倪永炯. 用于连续流好氧颗粒污泥的辐流式双区沉淀池[P]. 中国专利: CN201610576528. 2, 2016 – 11 – 23.  
Li Jun, Chen Tao, Ni Yongjiong. Radial double-zone sedimentation tank for continuous flow of aerobic granular sludge[P]. China: CN201610576528. 2, 2016 – 11 – 23 (in Chinese).
- [6] Zou J T, Tao Y Q, Li J, *et al.* Cultivating aerobic granular sludge in a developed continuous-flow reactor with two-zone sedimentation tank treating real and low-strength wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 247: 776 – 783.
- [7] Xu D, Li J, Liu J, *et al.* Rapid aerobic sludge granulation in an integrated oxidation ditch with two-zone clarifiers[J]. *Water Res*, 2020, 175: 115704.
- [8] Liu W L, Wu Y, Zhang S J, *et al.* Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic ( $A^2O$ ) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage[J]. *Water Res*, 2020, 178: 115825.
- [9] 江伟. 中进周出辐流式沉淀池的数值模拟研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
Jiang Wei. Numerical Simulation Study on Intermediate-inflow and Circular Outflow Radial Sedimentation Tank [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [10] 刘玉玲, 张沛, 魏文礼. 辐流式沉淀池液固两相流力学特性二维数值模拟[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2013, 46(4): 409 – 412.  
Liu Yuling, Zhang Pei, Wei Wenli. Two-dimensional numerical simulation on the mechanical characteristics of liquid-solid two-phase flow in radial sedimentation tank [J]. *Journal of Wuhan University: Engineering Science Edition*, 2013, 46(4): 409 – 412 (in Chinese).
- [11] 刘玉玲, 张沛, 魏文礼, 等. 辐流式沉淀池液固两相流力学特性三维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 25 – 27.  
Liu Yuling, Zhang Pei, Wei Wenli, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of liquid-solid two-phase flow dynamics in radial sedimentation tank [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(4): 25 – 27 (in Chinese).
- [12] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [M]. 21th ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [13] Liu Y, Yang S F, Xu H, *et al.* Biosorption kinetics of cadmium(II) on aerobic granular sludge[J]. *Process Biochem*, 2003, 38: 997 – 1001.
- [14] Li A J, Li X Y, Yu H Q. Granular activated carbon for aerobic sludge granulation in a bioreactor with a low-strength wastewater influent [J]. *Sep Purif Technol*, 2011, 80: 276 – 283.
- [15] Liu Y J, Liu Z, Wang F K, *et al.* Regulation of aerobic granular sludge reformulation after granular sludge broken: Effect of poly aluminum chloride (PAC) [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 158: 201 – 208.
- [16] De Bruin L M M, De Kreuk M K, Van Der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge [J]. *Water Sci Technol*, 2004, 49: 1 – 7.
- [17] Di Bella G, Torregrossa M. Aerobic granular sludge for leachate treatment [J]. *Chem Eng Trans*, 2014, 38: 493 – 498.
- [18] Cleary P W, Hilton J E, Sinnott M D. Modelling of industrial particle and multiphase flows [J]. *Powder Technol*, 2017, 314: 232 – 252.
- [19] Zhu L F, Tian Y E, Wu J Y, *et al.* Research on micro-aerobic granular sludge in the process of cultivation[J]. *Adv Environ Technol*, 2013, 726/731: 2753 – 2756.



作者简介: 吴越(1993 – ), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 研究方向为水体污染控制和计算流体力学模拟。

E-mail: 574181994@qq.com

收稿日期: 2020 – 03 – 01