

Three-Dimensional Numerical Simulation of the Influence of Temperature Density Flow on Vertical Secondary Sedimentation Tank

Jingkai Liu, Zhenhong Liu

College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai
Email: 358270585@qq.com

Received: Mar. 11th, 2020; accepted: Apr. 2nd, 2020; published: Apr. 9th, 2020

Abstract

In order to explore the flow field of vertical secondary sedimentation tank which the temperature density flow affects, the three-dimensional transient numerical simulation is carried out by RNG k-epsilon turbulence model and mixture model to explore the impact of different inlet water temperature and reflux ratio on the flow field of secondary sedimentation tank. The results show that: the high-temperature water inflow will produce the up density flow, which is characterized by the mixed liquid turning up along the central pipe to the outlet tank, leading to discharge of mud. However, the low-temperature water inflow will produce the down density flow, which is characterized by the mud turning phenomenon along the wall of the sedimentation tank, which will affect the solid-liquid separation efficiency. Increasing the sludge backflow of secondary sedimentation tank can reduce the influence of up density flow on the working efficiency of secondary sedimentation tank. Under the same temperature difference, the greater the reflux ratio, the smaller the influence of the overweighted flow.

Keywords

Vertical Flow Secondary Sedimentation Tank, Temperature Density Flow Reflux Ratio

温度异重流对竖流式二沉池影响的三维数值模拟

刘经凯, 刘振鸿

东华大学环境科学与工程学院, 上海
Email: 358270585@qq.com

摘要

为了探究温度异重流对竖流式二沉池的流场影响, 使用RNG k-epsilon湍流模型和mixture模型, 对其进行三维瞬态数值模拟从而探究不同进水温度和不同回流比对二沉池流场的影响。结果表明: 高温水入流会产生上异重流, 其特征是混合液沿中心管上翻至出水槽而导致出水带泥; 而低温水入流会产生下异重流, 其特征是沿沉淀池池壁会产生翻泥现象而影响固液分离效率。增大二沉池污泥回流可适当减缓高温入流产生的上异重流对二沉池的工作效率影响, 在相同温差下, 回流比越大, 上异重流的影响越小。

关键词

竖流式二沉池, 温度异重流回流比

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

废水的生物处理法是工业及市政有机废水处理中应用最久、最广且最有效的一种方法, 而二沉池是废水生物处理系统中不可分割的组成部分, 尤其是在活性污泥法中占有至关重要的地位, 二次沉淀池的工作效率直接影响整体的污水处理能力[1]。由于水的密度和粘度随着温度的改变而发生改变, 因此在二沉池的运行过程中, 如果进水温度和池内水的温度不同, 则由于液体密度差而造成二沉池内部的流场不均匀而偏离设计时假定的理想状态, 即产生异重流现象。异重流本质为密度流, 是指两种密度差别不大的流体, 由于密度差异而引起的相对流动[2]。异重流的出现对二沉池的沉淀效率影响有利有弊, 但总体来讲是弊大于利[3]。随着计算机技术的愈加成熟, 数值模拟成为流场研究的主要方法[4]。由于水流流动的复杂性和实际实验的困难性, 目前国内外学者大多开始采用计算流体力学 CFD 技术来模拟二次沉淀池的工作情况[5]。目前关于二沉池的数值模拟更加精确化, 且研究多基于实际二沉池工况并考虑了回流比、混合液流变性质以及污泥沉降速度[6] [7]。何志江、张源凯等以出水悬浮物浓度(ESS)和异重流比例为表征指标, 对影响二沉池沉淀效率的3个因素, 即污泥颗粒粒径、表面溢流率和挡板比例进行分析[8]。谭立新等通过增加和改变竖流式沉淀的挡板结构, 从而分析池内异重流现象并进行优化[9]。刘百仓、罗麟等模拟计算了圆形沉淀池内的温差异重流现象, 并得到了圆形沉淀池内温差引起的异重流的流动特点[10]。王玲等人通过模拟研究矩形沉淀池中颗粒的流动轨迹和池内流态, 通过改变挡板长度和工况对沉淀池颗粒去除率影响因素进行研究[11]。

混合液澄清分离、污泥浓缩并回流至生物处理系统是二沉池的主要功能, 竖流式二沉池以其分离效果好、占地面积小、设备简单且排泥方便而被广泛应用于中小型污水处理系统中。而由于污泥回流对二沉池流场造成的影响研究较少, 本文根据竖流式沉淀池的构造及原理, 结合二沉池的实际运行工况, 基于CFD中的Fluent软件进行数据分析, 使用SCDM进行三维建模, 利用改进的RNG k-epsilon两方程模型和Mixture模型进行两相流二沉池温度异重流的数值模拟研究[12]。

2. 数学模型计算方法及模型验证

2.1. 多相流模型

2.1.1. 连续方程

$$\frac{\partial}{\partial y}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (1)$$

其中, (1)公式中 $\rho_m = \sum_{k=1}^n a_k \rho_k$, $v_m = \frac{\sum_{k=1}^n v_k \rho_k \alpha_k}{\rho_m}$, ρ_m 为混合密度, 单位为 kg/m^3 ; v_m 是混合相的质

量

平均速度, 单位为 m/s ; ρ_k 是 k 相的密度, 单位为 kg/m^3 [9]。

2.1.2. 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) \\ = -\nabla p + \nabla \cdot [u_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \rho_m g + F + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n a_k \rho_k v_{dr,k} v_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, (2)公式中 n 为相数; p 为压强, 单位是 Pa ; $v_{dr,k}$ 为混合相粘度, 单位是 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; F 为体积力, 单位为 N ; g 为重力加速度, 单位是 m/s^2 ; $v_{dr,k}$ 为第 k 相的漂移速度, $v_{dr,k} = v_k - v_m$, 单位为 m/s [4]。

2.1.3. 次相 P 的体积分数方程

$$\frac{\partial}{\partial y}(a_p \rho_p) + \nabla \cdot (a_p \rho_p v_m) = -\nabla \cdot (a_p \rho_p v_{dr,p}) \quad (3)$$

其中, (3)公式中 a_p 为 P 相的体积分数; ρ_p 为 P 相的密度, 单位为 kg/m^3 ; $v_{dr,p}$ 为 P 相的漂移速度, 单位为 m/s [4]。

2.2. 紊流数学模型

紊流模型大多包括单方程模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、可实现 $k-\varepsilon$ 模型、雷诺应力模型以及大涡模型[13]。由于沉淀池内部水体的流动处于紊流状态, 故而针对于沉淀池的数值模拟研究应建立在紊流数值模拟的基础之上, 本次的沉淀池模拟计算选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型的 k 和 ε 方程, 其他方程不在此全部列出。

紊动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\delta_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} + G_k - \rho \varepsilon \right] \quad (4)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho_\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_i}{\delta_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中, ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 ; k 为紊动能; u_i 为各个时刻时平均速度的分量, 单位为 m/s ; G_k 含义为彭俊速度梯度引起的紊动能; ε 为紊动能耗散率; u_i 为时刻均速度的分量, 单位为 m/s [14]。

3.2.2. 网格无关性验证

划分网格后网格数量分别约为 54 W, 60 W, 65 W 三组网格, 设置沉淀池进水温度 25℃, 池内温度 10℃, 对中心管中心点下端 0.1 m 的点(位置示意图见图 2(b))进行温度监控, 三组网格的点温度随时间变化如图 2(a)所示, 发现三组网格的监测点的温度值最大差值在 5% 内, 因此网格数量在 54 W 上增加不会改变计算结果, 为节约计算资源采用 54 W 网格数量的模型进行模拟计算。

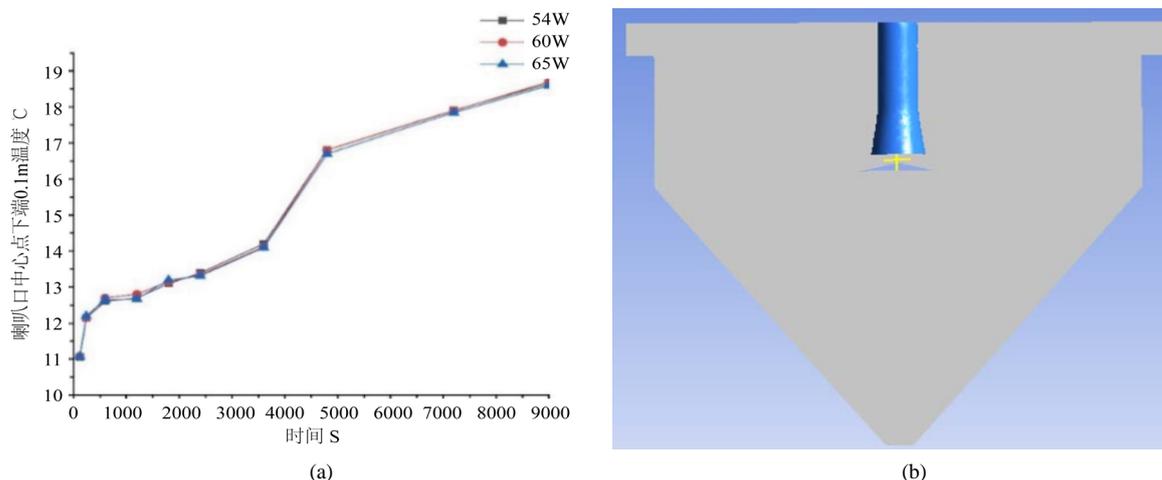


Figure 2. Mesh independence verification. (a) Grid independence verification curve; (b) The location of the monitoring points
图 2. 网格无关性验证。(a) 网格无关性验证曲线图; (b) 监测点位置示意图

3.3. 模拟条件

本次模拟采用瞬态模拟计算, 进口边界条件采用速度进口(velocity inlet)条件, 上部清液出水口采用自由出流(outflow)条件, 排泥口在有回流时采用自由出流(outflow)条件, 无回流时采用无滑移壁面(wall)条件, 其他固体壁面和自由液面采用无滑移壁面(wall)条件。数值求解方法采用一阶迎风格式对各控制方程离散化, 有限体积法求解微分方程, 压力与速度耦合方程使用 SIMPLE 算法进行求解。设计二沉池运行表面负荷 $0.533 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, 无回流时, 中心管进口流速为 0.02 m/s ; 有回流时, 则依据回流比确定中心管进口流速与排泥口和出水口出流流量分配。水的密度和粘度随着温度改变和发生变化[15], 故进水和池内水的材料属性设定依据图 3 来进行设定。

4. 模拟结果和分析

本研究设定竖流式二沉池内温度固定为 25℃, 与夏季地表水温度接近, 分别研究了在无污泥回流以及在不同污泥回流比的运行工况下, 入流污水与池内温差为 0℃ 和 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的情况下, 模拟研究竖流式二沉池内部的水流特征, 水的粘度和密度按图 3 材料属性进行设定。

4.1. 无污泥回流时二沉池的流场分析

4.1.1. 无温差入流时的流场分析

图 4 和图 5 为池进水温度与池内温度均为 25℃ 温度下竖流式沉淀池内不同时刻的流态, 水流经中心管自上而下流动, 经反射板折射后向上方的出水槽竖向流动, 在折流板两侧和下端由于水流撞击作用形成小涡旋, 随着时间推移, 折流板涡旋略有变大但其位置无明显改变。由图可见在二沉池分离区过流断面上部水流基本上能够满足竖流式沉淀池均匀向上的理想流态分布, 而在折流板下方和两侧较周围有明显的涡旋和回流区存在。

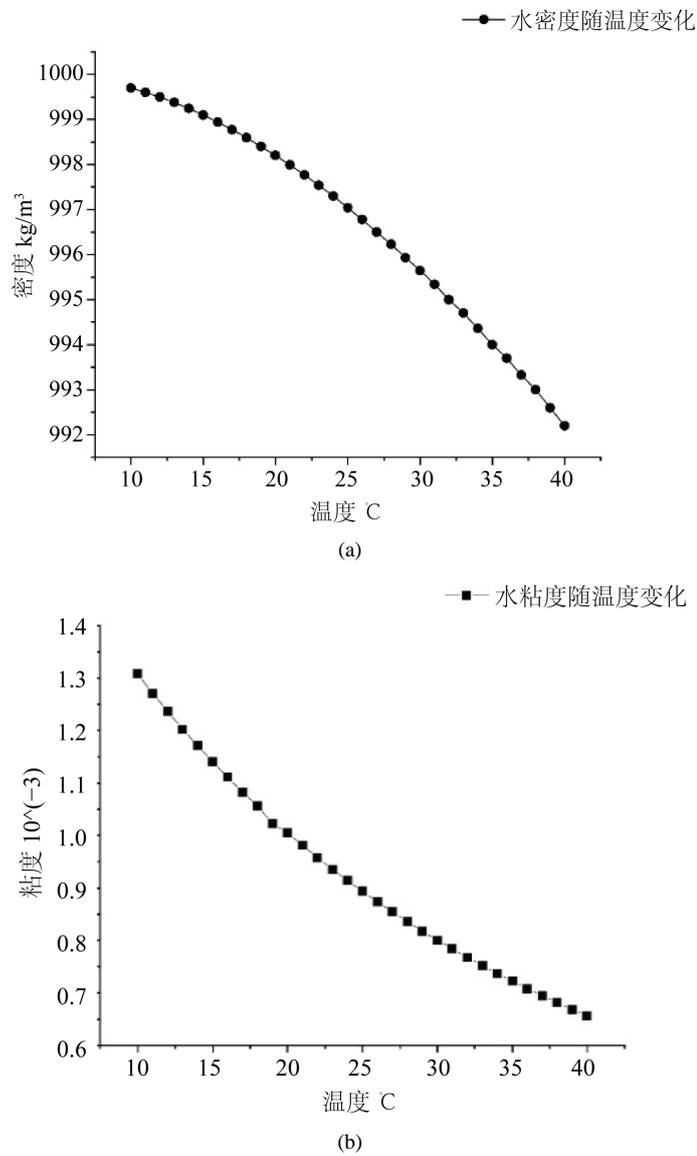


Figure 3. Relationship between temperature and density of water. (a) Water temperature and density diagram; (b) Water temperature and viscosity diagram

图 3. 水的温度与密度关系图。(a) 水温度与密度关系图; (b) 水温度与粘度关系图

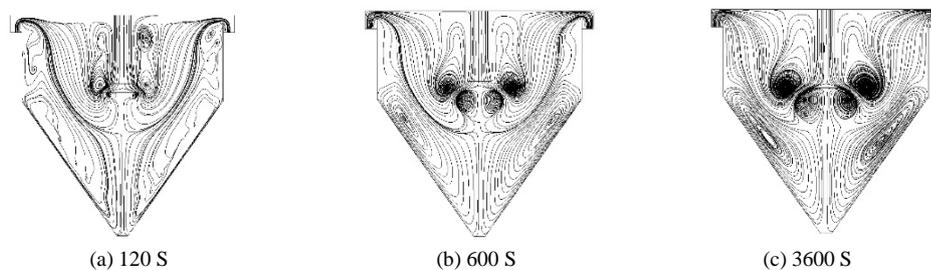


Figure 4. Flow diagram of two sinks without temperature difference and backflow

图 4. 无温差无回流时二沉池流线图

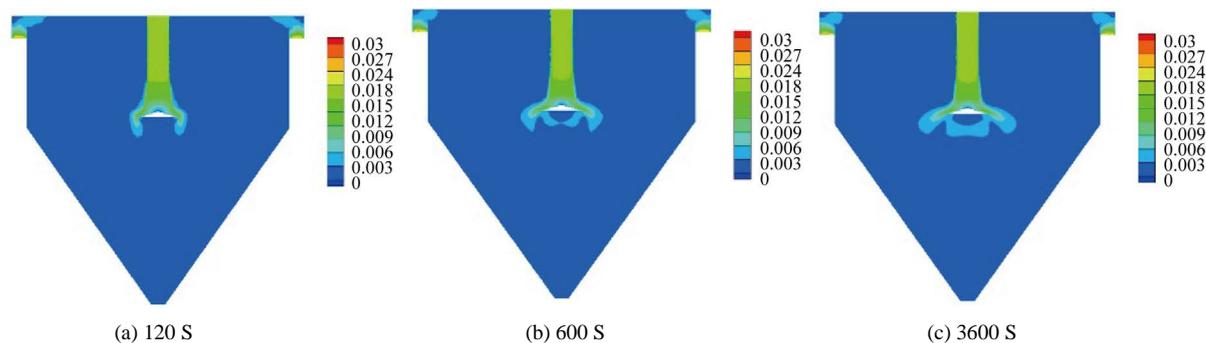


Figure 5. Cloud image of second sedimentation velocity without temperature difference and reflux

图 5. 无温差无回流时二沉池速度云图

4.1.2. 高温入流时的流场分析

图 6 和图 7 为池内温度 25°C , 入流温度为 30°C 状态下竖流式沉淀池内不同时刻的流态, 由于入流水温高于池内水温, 密度较小, 在离开中央导流筒后就折流向上, 沿导流筒壁上浮至水面并向出水槽流动, 产生明显的上异重流现象, 并在分离区形成面向出流槽的涡流。随着时间推移, 由于中心管出水处水流迅速沿着中心管四周向上至液面并且向出水口流动, 但受到出流口出水量的限制, 这得上浮的水流向下有越来越强烈的挤压作用从而使得涡旋的位置愈加靠近出水堰处, 沉淀池上方涡旋愈来愈紊乱。

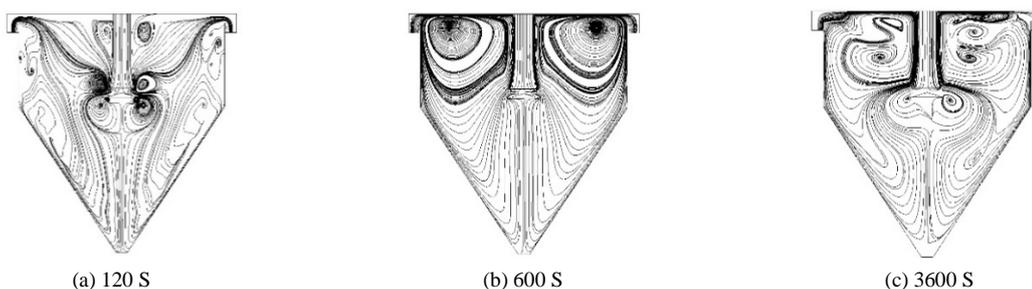


Figure 6. Flow diagram of secondary sedimentation tank with inlet temperature difference $+5^{\circ}\text{C}$ without reflux

图 6. 入流温差 $+5^{\circ}\text{C}$ 无回流时二沉池流线图

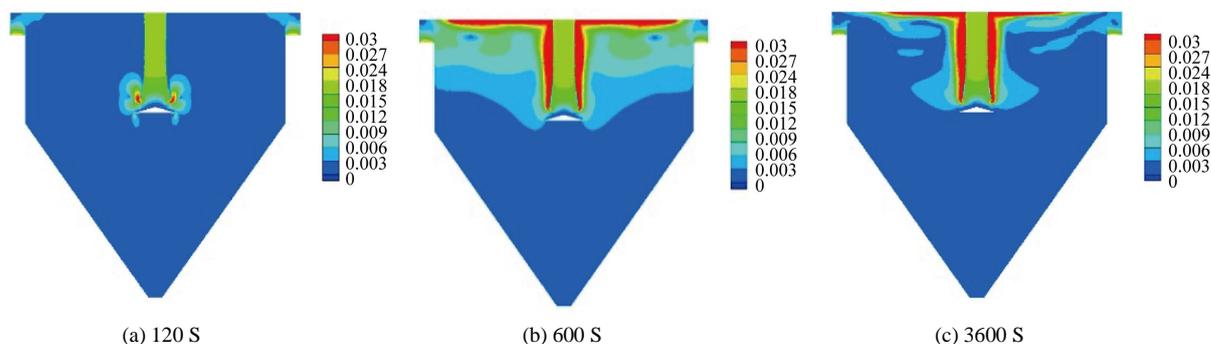


Figure 7. Cloud image of second sedimentation velocity in case of inlet temperature difference $+5^{\circ}\text{C}$ without reflux

图 7. 入流温差 $+5^{\circ}\text{C}$ 无回流时二沉池速度云图

图 8 的温度云图可以发现入流的高温度水在未经反射板折流作用, 即迅速沿着中心管向上流动分布于二沉池分离区上部。由于上异重流的存在, 入流混合液沿中心管上翻, 并加速向出水口流动, 致使出水悬浮物浓度增加, 泥水分离效率下降, 严重时出现二沉池翻泥现象。

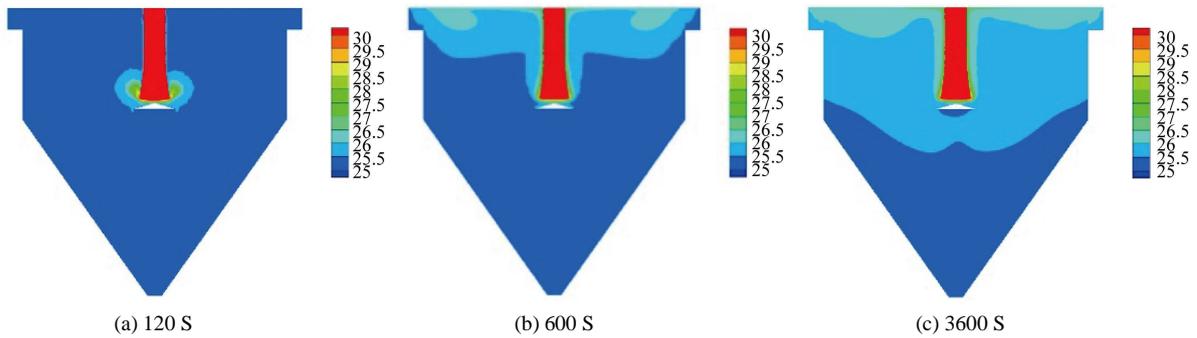


Figure 8. Cloud image of temperature of secondary sedimentation tank no reflux when inlet temperature difference +5°C
图 8. 入流温差+5°C无回流时二沉池温度云图

图 9 为速度监测点位置示意图, 监测点位于距池表面垂直距离 1 m 处, 由图 10 所得的速度分布发现, 当高温进水时距离中心管越近, 向上的流速越大, 远大于二沉池设计上升流速; 而在二沉池池壁附近, 流速为负值, 上异重流至池壁处, 由于对水流的挤压作用, 使得水流向下而形成涡流。

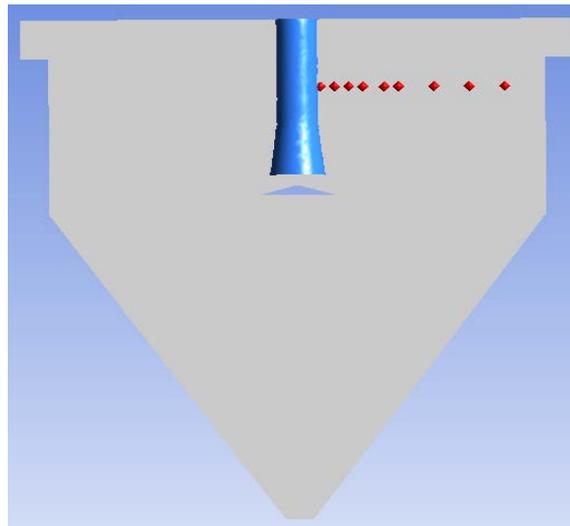
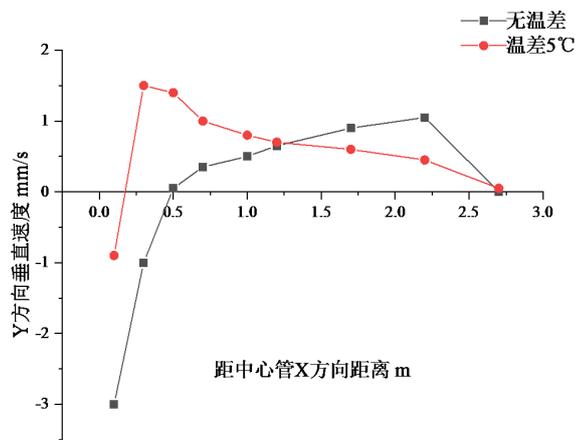
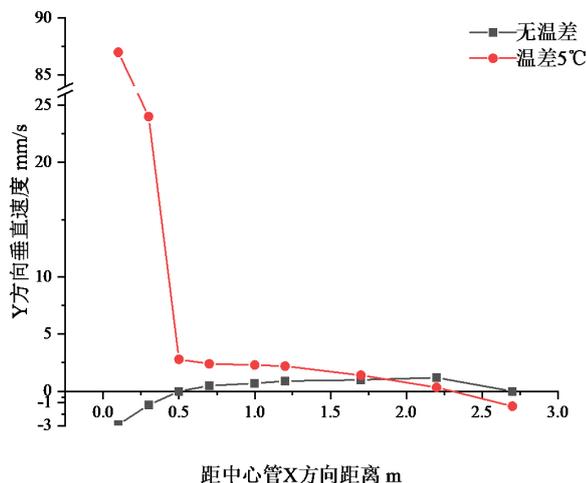


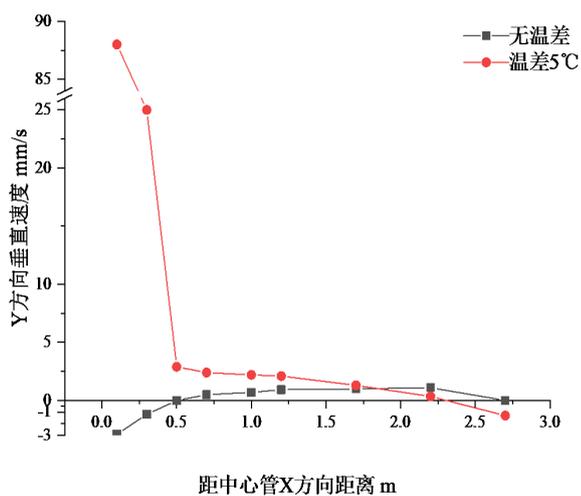
Figure 9. Schematic diagram of speed monitoring points
图 9. 速度监测点位置示意图



(a) 120 S



(b) 600 S



(c) 3600 S

Figure 10. Y-direction velocity at a vertical distance of 1 m from the pool surface

图 10. 距池表面垂直距离 1 m 时 Y 方向速度

4.1.3. 低温入流时的流场分析

图 11 和图 12 为池内温度 25℃, 入流温度为 20℃ 状态下竖流式沉淀池内不同时刻的流线和速度云图, 由图可见, 低温高密度水由中心管流出时, 由于其密度较大, 在离开导流筒喇叭口及反射板之间的狭缝后随即下沉, 水流至泥斗壁后向上折流, 形成明显的下异重流现象, 在反射板的作用下于两侧产生了涡旋。随着时间推移, 折流板下方的涡旋越来越大, 沉淀池底端的回流区变大, 由于下沉水流流速较大而产生波动, 致使沉淀池下方泥斗流态紊乱, 但沉淀池分离区仍能够维持相对稳定的上升流态。

图 13 的温度云图可见, 高密度水沉积于沉淀池底部, 而沉淀池上方水流的温度和密度变化不大。下异重流可使入流混合液下沉, 相当于增加了泥水分离时间, 对混合液分离是有益的, 但若下沉水流流速过大冲击水泥斗内的污泥, 并沿池壁上升至出口, 可能使出水带泥。

由上述分析, 在 5℃ 温差的情况下, 下异重流相比于上异重流对二沉池分离效果的影响要小得多, 这也与二沉池在冬季运行时容易翻泥, 致使分离效果变差的实际情况较为吻合。

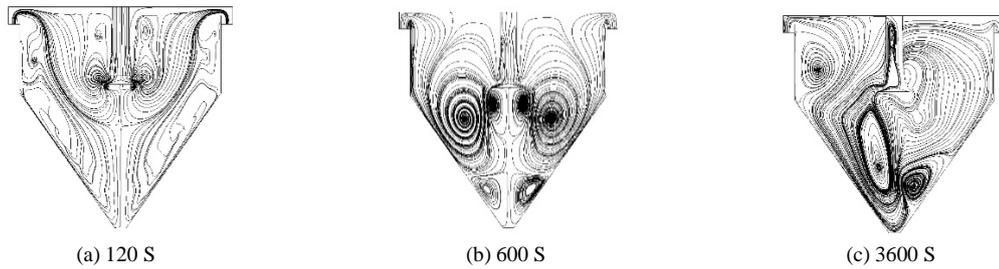


Figure 11. Flow diagram of two sinks without reflux when the inlet temperature difference is -5°C
图 11. 入流温差 -5°C 无回流时二沉池流线图

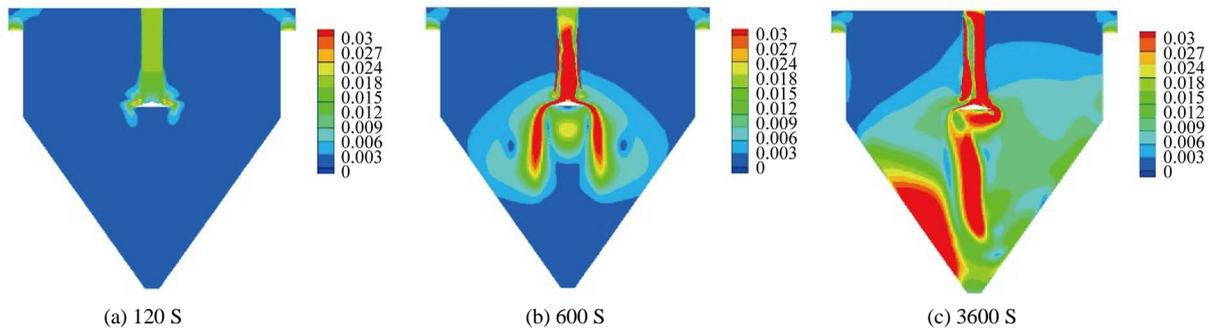


Figure 12. Cloud image of second sedimentation velocity in case of inlet temperature difference -5°C without reflux
图 12. 入流温差 -5°C 无回流时二沉池速度云图

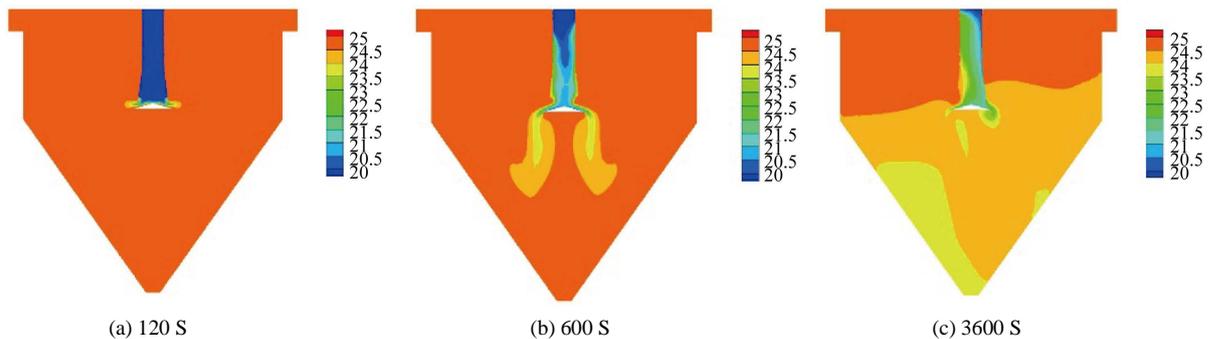


Figure 13. Cloud image of temperature of secondary sedimentation tank no reflux when the temperature difference of inflow is -5°C

图 13. 入流温差 -5°C 无回流时二沉池温度云图

4.2. 有回流时上异重流对二沉池的影响分析

污泥回流是二沉池的重要功能之一，由于污泥回流的存在，二沉池的入流水量将加倍增加，虽然污泥排放口的出流平衡了沉淀池分离区的上升流速，但二沉池不同的回流比仍可能对其内部流动状态造成一定影响。本文就二沉池在不同回流比运行条件下，继续探究上异重流对沉淀分离的影响情况。

保持二沉池池内温度为 25°C ，进水温度为 30°C 条件不变。设定回流比为 50%、100% 以及 150% 时池内流场及对上异重流的影响，以下均为运行 600 S 时的模拟结果。

图 14、图 15 为二沉池不同回流比运行状态下的流态，由图所示，随着回流比的增大，沉淀池底部污泥口出流也随之增加，由上异重流所形成的分离区涡流向泥斗方向拉长，虽然涡流范围变大，但涡流内部速度梯度变小，分离区速度分布较为均匀。

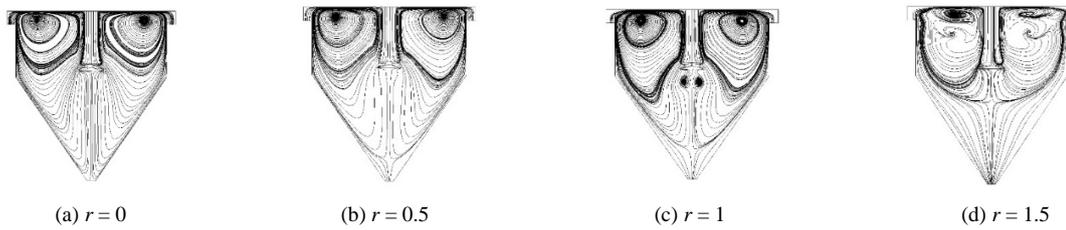


Figure 14. Flow diagram of two sinks with different inlet temperature difference +5°C

图 14. 入流温差+5°C不同回流时二沉池流线图

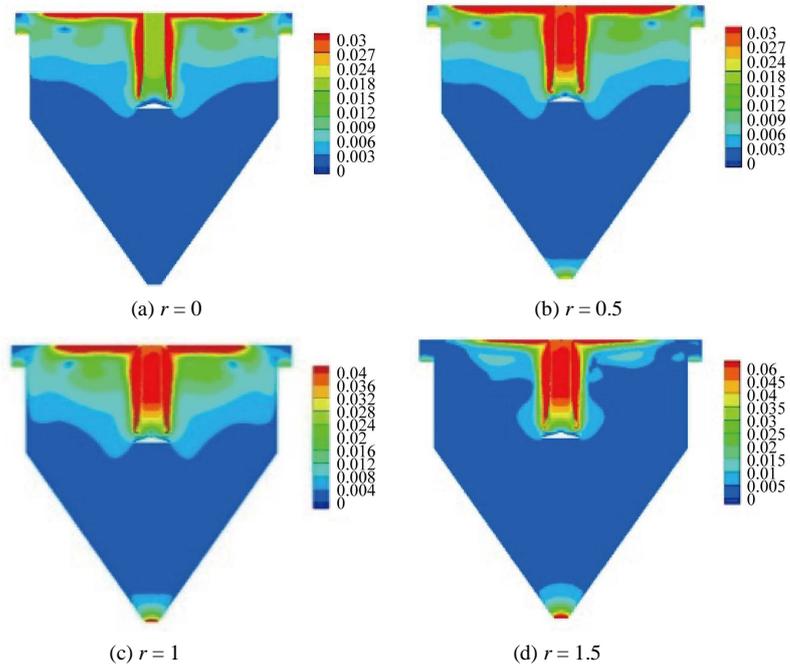


Figure 15. Cloud image of secondary sedimentation velocity under different reflux conditions with inlet temperature difference +5°C

图 15. 入流温差+5°C不同回流时二沉池速度云图

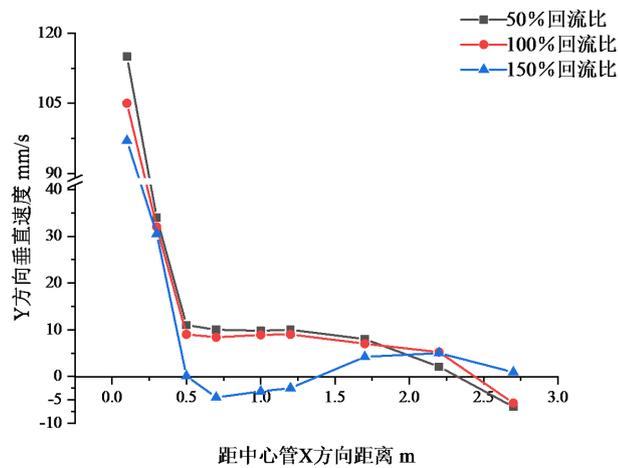


Figure 16. Y-direction velocity at a vertical distance of 1 m from the pool surface

图 16. 距池表面垂直距离 1 m 时 Y 方向速度

图 16 可以发现, 随着二沉池回流比的增大, 中心管附近低密度水流的上升流速逐渐变小, 而涡流贴近池壁的下降流速也是随之变小, 分离区过水断面流速波动变缓, 可见上异重流对二沉池的影响程度由于池底污泥口的排放流量加大而被减小。因此, 在二沉池的实际运行过程中, 若冬季出现由于高温混合液入流而导致沉淀效果变差可通过加大污泥回流比来改善固液分离效率。

5. 结论

本研究主要从二沉池的实际运行角度出发, 考虑在二沉池不同回流比的情况下, 在入流混合液与池内水存在温度差的工况下, 对竖流式二沉池内部异重流现象进行了数值模拟。通过分析在不同回流比时, 在异重流影响下的二沉池内部流场、速度分布及温度分布的变化情况。得出以下结论:

1) 入流混合液与二沉池内部存在温度差会使沉淀池产生异重流现象, 其对二沉池运行造成的分离效率影响不容忽视。高温水入流会产生上异重流, 其特征是混合液沿中心管上翻至出水槽而导致出水带泥; 而低温水入流会产生下异重流, 其特征是沿沉淀池池壁会产生翻泥现象而影响固液分离效率。相对而言, 下异重流比上异重流对二沉池分离效果的影响要小得多。

2) 二沉池污泥回流可适当减缓高温入流产生的上异重流对二沉池的工作效率影响, 在相同温差下, 回流比越大, 上异重流的影响越小。在二沉池的实际运行过程中, 若冬季出现由于高温混合液入流而导致沉淀效果变差可通过加大污泥回流比来改善固液分离效率。

参考文献

- [1] 肖羽堂, 何德文. 城市污水处理技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2015.
- [2] 任实. 温度分层水库中密度流运动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [3] 王欣, 黄利彬, 刘永亮. 平流式二次沉淀池中异重流现象研究[J]. 江苏环境科技, 2007, 20(2): 24-26.
- [4] 刘凤凯, 张永丽, 李方才. 竖流式二沉池的数值模拟与分析[J]. 中国农村水利水电, 2014(2): 75-78.
- [5] Zeng, G.M., Zhang, S.F., Qin, X.S., *et al.* (2003) Application of Numerical Simulation on Optimum Design of Two-Dimensional Sedimentation Tanks in the Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Sciences*, **15**, 346-350.
- [6] Ramin, E., Wágner, D.S., Yde, L., Binning, P.J., Rasmussen, M.R., Mikkelsen, P.S. and Plósz, B.G. (2014) A New Settling Velocity Model to Describe Secondary Sedimentation. *Water Research*, **66**, 447-458. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.034>
- [7] Patziger, M. (2016) Computational Fluid Dynamics Investigation of Shallow Circular Secondary Settling Tanks: Inlet Geometry and Performance Indicators. *Chemical Engineering Research and Design*, **112**, 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.06.018>
- [8] 何志江, 张源凯, 王洪臣, 齐鲁, 尹训飞, 张晓军. 平流式二沉池三维数值模拟分析[J]. 环境工程, 2015, 33(10): 15-20.
- [9] 谭立新, 唐敏, 徐长贺. 斜板对竖流式沉淀池影响的三维数值模拟[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 86-95.
- [10] 刘百仓, 罗麟, 马军, 等. 圆形沉淀池内温差异重流与浮力流的数值模拟[J]. 四川大学学报, 2009, 41(1): 34-40.
- [11] Wang, X.L., Li, T., Lang, J., *et al.* (2010) Numerical Analysis of Solid-Liquid Two-Phase Flow on Sandstone Wastewater of Hydropower Stations in a Rectangular Sedimentation Tank. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **49**, 11714-11723. <https://doi.org/10.1021/ie901993t>
- [12] 屈强, 马鲁铭, 王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 1212-1216.
- [13] 黄忠钊. 考虑絮凝作用的二次沉淀池三维数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- [14] 徐长贺, 谭立新, 杨欢, 黄忠钊. 考虑絮凝作用的辐流式二次沉淀池的三维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 157-162.
- [15] 涂朦朦. 水温对二沉池运行影响的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.