

文章编号: 1006-4710(2013)02-0182-06

平流二次沉淀池中温差对异重流影响的数值模拟

谭立新¹, 李博², 李尔康¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 北方重工设计研究院 散料成套工程技术研究所, 辽宁 沈阳 110141)

摘要: 由于进水与池内水的浓度差异及不同季节进水与池内水的温度差异, 会在沉淀池内产生异重流现象, 会对池内的流态产生影响。以城市污水处理厂中平流二次沉淀池为研究对象, 针对池内的异重流现象应用数值模拟的方法, 选取 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型和两相流混合模型作为计算的数学模型, 对平流式二沉池池内单纯由浓度差引起的异重流, 进一步引入温度差, 进行了流动的二维数值模拟。研究了温差对平流二沉池中异重流的影响。结果表明, 温差产生的影响随温差类型及温差大小的不同而改变, 低温水流入产生下异重流效应, 高温水流入产生上异重流效应; 温差越大, 影响越明显; 随着温度达到平衡, 温差的影响渐趋消失。

关键词: 平流二次沉淀池; 数值模拟; 异重流

中图分类号: X703

文献标志码: A

Numerical Simulation of the Effect of Temperature Difference on Gravity Flow in Rectangular Secondary Setting Tanks

TAN Lixin¹, LI Bo², LI Erkang¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Research Department of EPC Engineering Technology of NHI Design and Research Institute, Shenyang 110141, China)

Abstract: The concentration difference between influent water and tanks' water, or the different inlet temperature in different seasons would produce gravity flow phenomena in the sedimentation tanks. In this paper, gravity flow effected by temperature difference in rectangular secondary settling tanks is studied by numerical simulation. In aspect of mathematical model, the RNG $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model and the Mixture model are selected as the simulation secondary setting tank mathematical model, and the temperature differences are further introduced into the density flow caused by the simple concentration differences in the rectangular secondary setting tanks to carry out the flowing $Z-D$ numerical simulation. The effect of temperature differences upon the density flow in the rectangular secondary setting tanks is studied. The results show that the effects of temperature difference changes with the types and size of the temperature difference, and that low-temperature inflow would produce the gravity flow in the substrate, while high-temperature inflow produces the gravity flow on the top. Accordingly, the greater is the temperature difference, the more obvious the influence will be, and the effect of temperature difference will gradually disappear with the temperature reaching balance.

Key words: numerical simulation; rectangular secondary setting tanks; garvity flow

由于进水与池内水的浓度差异及不同季节进水与池内水的温度差异, 会在沉淀池内产生异重流现象。二沉池中的异重流对二沉池的运行效果有明显

的影响, 有必要对其进行研究。

目前, 国内已有一些学者对沉淀池流动数值模拟进行了研究^[1-4]。在平流式二沉池异重流数值模

收稿日期: 2012-11-15

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助项目。

作者简介: 谭立新, 女, 博士, 副教授, 研究方向为计算水力学及两相流数值模拟。E-mail: tanlx@xaut.edu.cn。

拟方面,邓云、李嘉等对水库温差异重流现象进行了数值模拟^[5],对比不同的紊流模型,认为 RSM 模型和 $k-\varepsilon$ 模型对温差异重流模拟具有较好的精度和可用性;王欣、黄利彬等对平流二沉池中的异重流进行了实验研究^[6],重点研究了浓度差异引起的异重流现象;刘百仓、罗麟等模拟计算了圆形沉淀池内的温差异重流^[7],得到了圆形沉淀池内温差异重流的流动特点。李开展等对浓度差异重流进行了二维数值模拟^[8],李博等模拟计算了平流二次沉淀池内的清水条件下的温差异重流^[9],研究了平流二次沉淀池内温差异重流的流动特点。

本文选取 RNG $k-\varepsilon$ ^[9-10] 两方程紊流模型和 Mixture 模型,对单纯浓度差产生的异重流,在平衡稳定后,进一步引入温度差,模拟计算温差对已产生的异重流的影响,为平流沉淀池运行、设计提供参考。

1 数学模型及模型验证

1.1 数学模型

连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = m \quad (1)$$

式中, $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$; $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$; α_k 是第 k 相的体积分数。

动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = & -\nabla p + \\ \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + & \\ \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{rr,k} \mathbf{v}_{dr,k}) & \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$; $\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$; n 是相数; \mathbf{F} 是体积力。

第二相 p 的体积分数方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = & \\ -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) & \end{aligned} \quad (3)$$

湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ε 的运输方程分别为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = & \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \varepsilon}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中, $G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $\mu = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{\frac{1}{2}} \frac{k}{\varepsilon}$; $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; σ_k 和 σ_ε 为 k 和 ε 的紊动普朗特数; $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}(\rho \mathbf{v} T) = \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (6)$$

式中, c_p 为比热容, T 为温度, λ 为流体传热系数, S_T 为流体的内热源及由于粘性作用产生的源项。

将密度定义为温度的函数,引入以下能量方程计算温度场^[11]。以此考虑温差引起的密度变化和浮力作用。

1.2 模型验证

文献[8]将模型计算结果同埃施(Esch R E)提出的明流弗劳德数理论以及二沉池实际运行状态进行比较,初步验证了该模型对存在密度差异的二沉池流动模拟的适用性。为了对计算结果与实测数据进行比较,下面分别从流速和沉降性两方面进行对比^[11]。

1.2.1 流速场验证

流速场的验证采用 Imam^[12]测得的矩形沉淀池内速度分布试验结果。模拟的沉淀池几何形状和计算区域如图 1 所示^[11]。

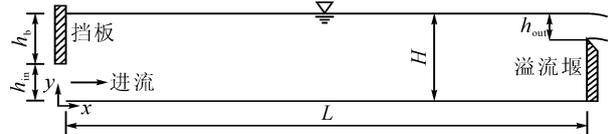


图 1 几何模型简图

Fig. 1 Sketch of geometric model

计算参数如下:流量为 $109.4 \text{ cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm})$,进口悬浮物质量浓度为 3.2 mg/L (体积分数为 2.7×10^{-6}),悬浮物密度为 1200 kg/m^3 ,沉淀池几何尺寸 $L = 73.7 \text{ cm}, H = 11.95 \text{ cm}, h_{in} = 5.0 \text{ cm}, h_{out} = 3.45 \text{ cm}$ 。

图 2 为计算值与 Imam 试验值的比较。计算值为 x 方向上的水流和悬浮物的流速分布。从图 2 可以看出,模拟结果与试验结果吻合良好。由此,本文研究所选的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和混合模型在二维异重流流场的模拟上有较好可用性。

1.2.2 沉降特性验证

选用 Jeriffa De Clercq^[13]等应用高分辨率的伽马摄像机测量、对流体无扰动的固体放射性物质作

为示踪剂进行的静止沉淀试验得出的污泥浓度分布曲线作为验证实例。试验在1 m高的圆柱形沉淀柱中进行,浑水初始浓度为3 230 mg/L,由静止开始沉

淀,记录不同时间内浓度分别为3 000、5 000、7 000和9 000 mg/L的分界面高度的变化情况。

比较结果如图3所示。

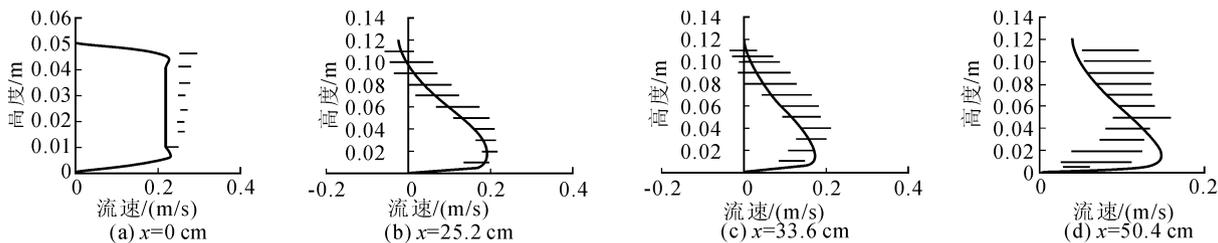


图2 中垂线上的流速分布比较

Fig.2 Velocities comparison at downstream

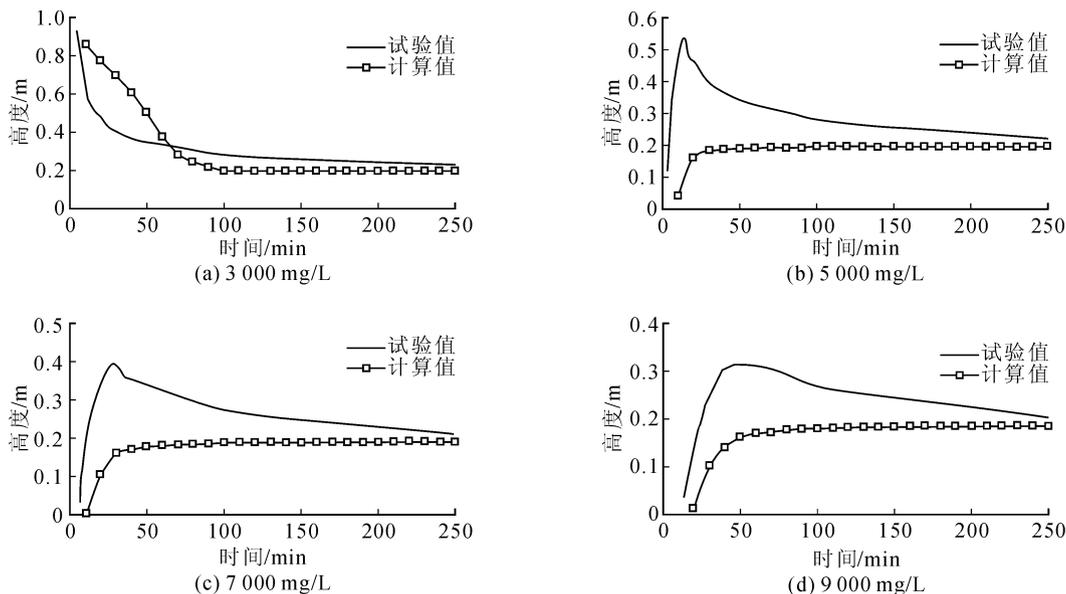


图3 计算值与试验值比较图

Fig.3 Comparison between calculation and experimental value

从图3可看出,计算值与试验值在变化时间、趋势和平衡点上基本吻合,模型有一定适用性。但试验值界面变化有一个升到最高点再下降的过程,而计算值没有,这主要是由于模型未考虑絮凝作用的原因。

综上,本文采用上述模型及方法研究温差对平流式二沉池异重流的影响。

2 二次沉淀池数值模拟及结果分析

应用本文的数学模型,对二沉池进行二维流场计算,研究温差对异重流的影响^[11]。

2.1 几何模型及边界条件

几何模型如图4所示。沉淀池长30 m,有效水深3 m,进口尺寸0.5 m,出口采用溢流堰,出口0.1 m。挡板距进口的距离为0.7 m,淹没深度1 m。池底坡度取*i* = 0.05,泥斗底部设有排泥管,直径为300 mm。

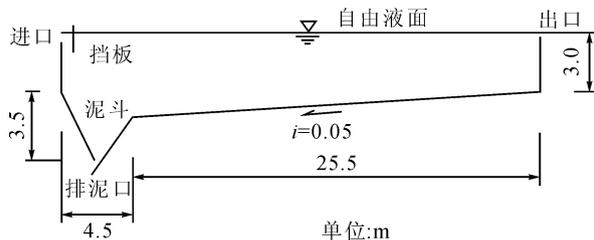


图4 几何模型简图

Fig.4 Sketch of geometric model

1) 进水口:采用速度进口,并假定断面上速度、湍动能和湍动耗散率均匀分布,取值为:

$$u = \frac{q}{h_{in}}, k = av^2, \varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_{in}} \quad (7)$$

式中,*q*为单宽流量(m²/s);*h_{in}*为进口高度(m);*l_{in}*为混合长度,*l_{in}* = *C_μ*(0.5*h_{in}*),*C_μ* = 0.09;*a*为经验系数,取0.2。

2) 出水口:采用自由流出边界,按回流比计算两个出口占总流出量的权重。

3) 自由液面:采用对称边界条件。

4) 固体壁面:壁面处无滑移,近壁区采用标准壁面函数。

2.2 研究方法

在浓度差异重流计算稳定的基础上,加入温差的影响。具体方法为:①不考虑进水与池内水的温度差,从污水流入池内清水开始非稳态计算,至池内的流场和浓度场达到稳定,其中进水单宽流量为 $0.024 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,进水浓度 $3\ 000 \text{ mg/L}$,悬浮物粒径取 $75 \text{ }\mu\text{m}$,密度取 $1\ 180 \text{ kg/m}^3$,回流比为 0.6 ;②分别使不同温度的高温水和低温水流入沉淀池,比较有温差和无温差稳定时的流态和颗粒沉淀情况,得出相应结论。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 大温差计算结果

二沉池内的水可以看作地表水,在夏季,地表水水温约为 $27^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$,曝气池混合液的温度低,最低为 21°C ;在冬季,南方不结冰的地表水水温至少有 $4^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ ^[4]。因此,夏季选用进水温度为 21°C ,池内水温度 28°C ;冬季选用进水温度 21°C ,池内水温度 5°C 。分别对夏季和冬季二沉池内不同温度差流动情况进行模拟,如图 5 所示。图中无温差指无温差稳定时的情况(下同)。

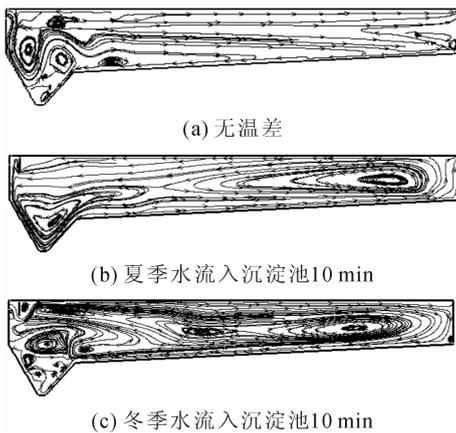


图 5 沉淀池内的流线图

Fig. 5 Stream lines in the sedimentation tank

由流线图 5 可以看出:夏季冷水流入对流态产生了很大的影响(图 5(b)),污泥斗处旋流向污泥斗方向收敛,上方由反向回流代替,沉淀池前半部受到此旋流的控制,整个后半部池体由另一个顺时针的大旋流控制。冬季时,进水流入后浮于上部,形成上异重流现象,在池中所形成的旋流中,以顺时针的旋流为主;从图 5(c)可以看到,整个池体被一个大的旋流

占据。

图 6 为悬浮物浓度变化。图 6(b)中来流贴着池壁流动,在污泥斗壁面处可见一个明显的来流运动的轨迹,回流污泥受到来流的影响,原本回流的污泥部分随来流向出口方向推进,沉淀池后半部清浑水交界面上升。图 6(c)表现为进水沿池上表面向前推进,污泥斗高浓度污泥增加。

在冷水流入 400 min 后温差基本消失,流态与无温差时基本相同(图 6(d))。高温水流入 400 min 后(图 6(e)),温度梯度基本消失,浓度分布恢复正常状态。

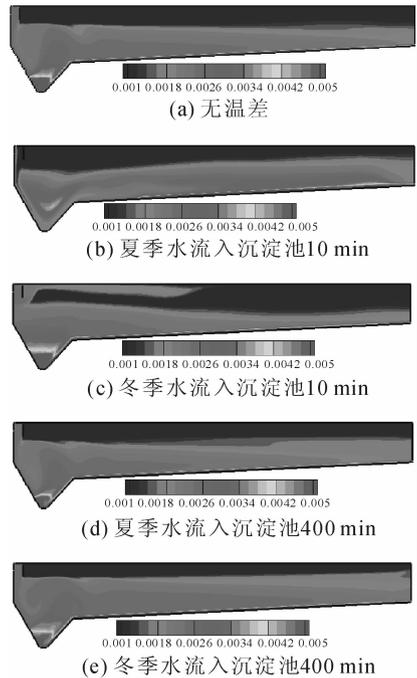


图 6 悬浮物浓度分布图

Fig. 6 The distribution of suspended concentration

流入冷水后,图 7(a)上层反向回流速度较无温差时增加,中层正向流速增大,下层回流变化不大;图 7(b)和图 7(c)中,中层异重流高度下降,下层污泥回流变为正向流速,下异重流效应明显。

图 8 表明,在冬季有温差情况下,上层水及下层水流速变得很大,上异重流的现象明显。

2.3.2 大、小温差计算比较

除了上述典型的夏季和冬季大温差情况外,再对小温差情况进行模拟。低温入水:进水 21°C ,池内水温 22°C ;高温入水:进水 21°C ,池内水温度 20°C 。

1°C 温差低温水流入与夏季 7°C 温差的悬浮物浓度比较如图 9 所示。表明温差越大,影响越明显。

1°C 温差高温水流入与冬季大温差热水流入的悬浮物浓度比较如图 10 所示。图 10(b)显示,由于温差增大,冬季入水上异重流效应更加显著。

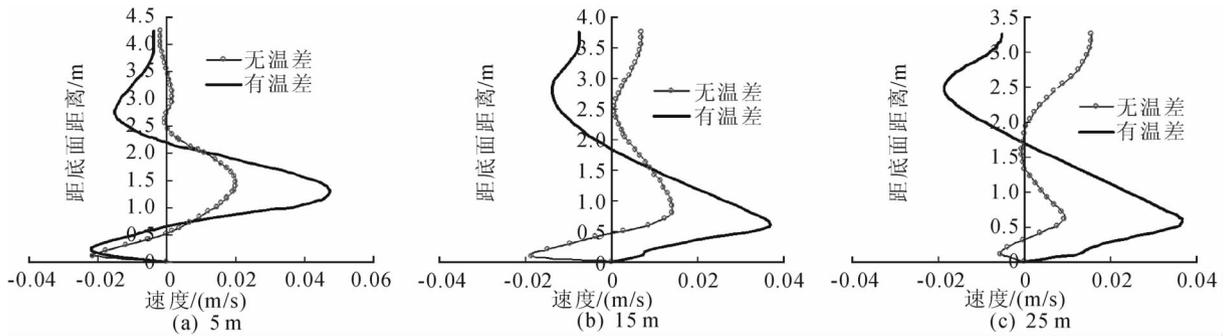


图7 夏季水流入30 min时刻距入口5 m、15 m及25 m断面上的流速分布图
Fig.7 Velocity distribution at 5 m, 15 m and 25 m section downstream from inlet in summer at 30 min

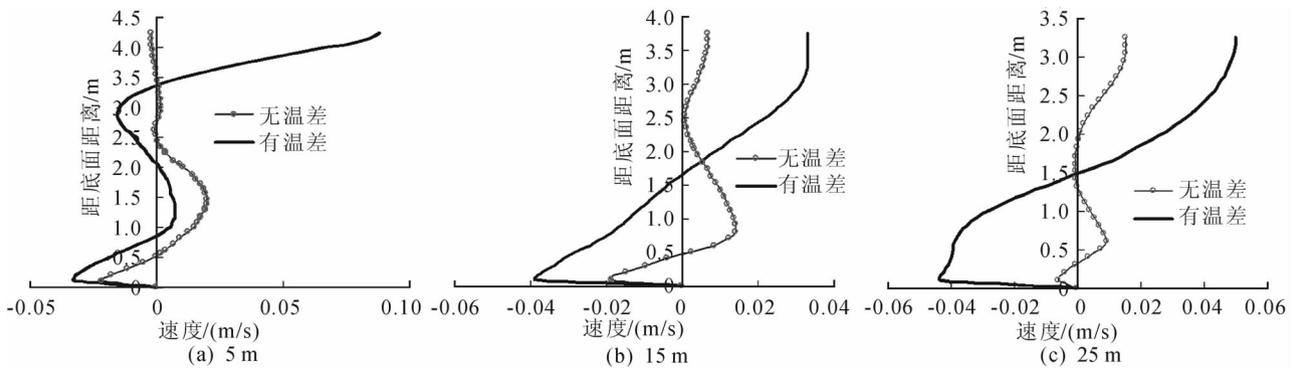


图8 冬季水流入10 min时刻距入口5 m、15 m及25 m处底面中垂线上的流速分布图
Fig.8 Velocities comparison at 5 m, 15 m and 25 m downstream from inlet in winter at 30 min

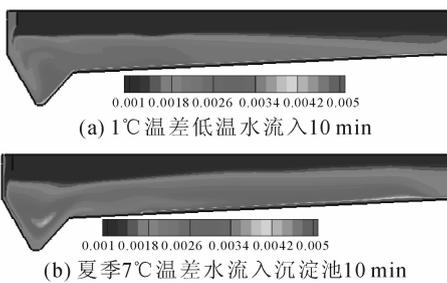


图9 1°C温差低温水流入与夏季7°C温差时的悬浮物浓度

Fig.9 Contours of volume fraction of 1°C difference in temperature and 7°C difference in temperature in summer

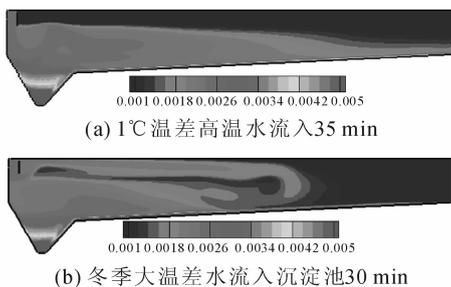


图10 1°C温差高温水流入与冬季大温差时的悬浮物浓度
Fig.10 Contours of volume fraction of 1°C difference in temperature and large difference in temperature in winter

3 结论

本文采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程紊流模型和 Mixture 模型,通过二维数值模拟,研究了温差对平流二沉池中的异重流的影响。结果表明,夏季低温水流入二沉池会进一步产生下异重流,使得异重流得到加强;冬季高温水流入二沉池产生上异重流,则会减弱浓度差引起的下异重流。温差越大,影响越明显;随着温度达到平衡,温差的影响渐趋消失。

参考文献:

[1] 朱炜,马鲁铭,屈强. PHOENICS 数值模拟平流式二次沉淀池流场[J]. 水处理技术,2005,31(12):63-66.
Zhu Wei, Ma Luming, Qu Qiang. Numerical simulation for the rectangular sedimentation tank by PHOENICS [J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(12):63-66.

[2] 蔡金榜,朱亮,段祥宝. 平流式沉淀池数值模拟分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004,32(1):27-31.
Cai Jinbang, Zhu Liang, Duan Xiangbao. Numerical simulation for rectangular settling tanks[J] Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004,32(1):27-31.

[3] 蒋成义,吴春笃,黄卫东,等. 辐流式二沉池中异重流的计算流体力学模型研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(11):846-852.

- Jiang Chengyi, Wu Chundu, Huang Weidong, et al. Computational sludge secondary clarifier[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(11): 846-852.
- [4] 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.
- Qu Qiang, Ma Luming, Wang Hongwu. Solid-liquid two-phase flow simulation in a circular secondary clarifier[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34(9): 1212-1216.
- [5] 邓云, 李嘉, 罗麟, 等. 水库温差异重流模型的研究[J]. *水利学报*, 2003, (7): 7-11.
- Deng Yun, Li Jia, Luo Lin, et al. Temperature prediction model for reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, (7): 7-11.
- [6] 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.
- Wang Xin, Huang Libin, Liu Yongliang. Research on density current phenomenon in rectangular sedimentation tank [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2007, 20(2): 24-26.
- [7] 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.
- Liu Baicang, Luo Lin, Ma Jun, et al. Numerical simulation of gravity flow and buoyant flow caused by temperature difference in circular settling tanks[J]. *Journal of Sichuan University*, 2009, 41(1): 34-40.
- [8] 谭立新, 李开展, 李博. 平流二次沉淀池两相流二维数值模拟[J]. *西安理工大学学报*, 2009, 25(2): 197-201.
- Tan Lixin, Li Kaizhan, Li Bo. Two-dimensional numerical simulation of the two-phase flow in rectangular secondary settling tanks[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2009, 25(2): 197-201.
- [9] 李博, 谭立新, 胡钟林. 平流二次沉淀池中温差异重流的数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(1): 38-43.
- Li Bo, Tan Lixin, Hu Zhonglin. Numerical simulation of gravity flow caused by temperature difference in rectangular sedimentation tank [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(1): 38-43.
- [10] David R, Saucez P, Vassel J L. Modeling and numerical simulation of secondary settlers: A method of lines strategy [J]. *Water Research*, 2009, 43: 319-330.
- [11] 李博. 平流式二次沉淀池中异重流的数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- Li Bo. Numerical simulation of gravity flow in rectangular secondary settling tanks[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.
- [12] Imam E, McCorquodale J A, Bewtra J K. Numerical modelling of sedimentation tanks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109(12): 1740-1754.
- [13] Jeriffa De Clercq, Filip Jacobs, David J Kinnear. Detailed spatio-temporal solids concentration profiling during batch settling of activated sludge using a radiotracer[J]. *Water Research*, 2005, 39: 2125-2135.

(责任编辑 王卫勋)