

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.01.003

辐流式沉淀池挡板尺寸对温差异重水力特性影响的三维模拟

魏文礼, 白朝伟, 刘玉玲

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 在冬季或夏季, 沉淀池内进水与池内水的温差将导致异重流现象, 从而影响池内流态及流速。本文选取 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 通过设置池内水与进水的不同温度, 对进口处两种不同挡板形式的辐流式沉淀池冬季与夏季工况下异重流的演变规律进行三维数值模拟。结果表明: 夏季低温水进入池内产生下异重流, 而冬季高温水进入池内产生上异重流; 夏季高流速水流在沉淀池底部, 产生逆时针旋流, 冬季高流速水流在沉淀池上部, 产生较大的顺时针旋流。长挡板形式下的辐流式沉淀池对冬季产生的上异重流的影响更为明显, 使得池内速度场更加均匀。

关键词: 辐流式沉淀池; 温度; 异重流; 数值模拟

中图分类号: TV131.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)01-0012-06

3D simulation for the influence of a feed baffle on the density current behaviors caused by temperature in a radial sedimentation tank

WEI Wenli, BAI Zhaowei, LIU Yuling

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In summer or winter, temperature differences between the inflow water and the water in a pool will cause density flow phenomenon, whereby affecting flow pattern and flow speed in a Radial Sedimentation Tank. The Realizable $k-\epsilon$ model is used to carry out 3D numerical simulation of density current evolution regulation under the operational conditions by setting different temperatures between the inflow water and the water in the tank with two different forms of feed baffles near the inlet in summer or winter. The results show that: low-temperature inflow water can produce gravity flow in bottom region in summer while high-temperature inflow water produces the gravity flow in top region in winter; the higher velocity water is in bottom region of sedimentation pond, and counterclockwise vortex is obviously formed in summer, while higher velocity water is in top region of sedimentation pond, clockwise vortex is obviously formed in winter. The impact of the longer baffle on the density currents in winter is more obvious, and make velocity field more uniform in the tank.

Key words: radial sedimentation tank; temperature; density current; numerical simulation

沉淀池是常规水处理系统中的重要组成部分, 高效的处理效能与沉淀池的设计与运行有着密切的关系。本文研究两种不同形式的进口挡板对冬夏季池内异重流的影响。

国内外许多专家学者应用计算流体力学(CFD)技术对各种污水处理反应器流场进行了数值模拟,

并取得了非常有价值的研究成果^[1-3]。Long Fan^[1]采用 CFD 软件计算沉淀池中的速度场和固体的浓度分布, 并发现在同一沉淀池中设置不同的挡板高度和位置对其固体浓度的分布有很大影响。Mahdi Shahroki^[4-5]等对平流式初沉池中不同数量的挡板及挡板位置进行实验研究, 结果表明适当增加挡板

收稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578452, 51178391); 陕西省科学研究计划资助项目(2014K15-03-05); 中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科资助项目(106-00X101)

作者简介: 魏文礼, 男, 教授, 博士, 研究方向为环境水力学、水污染控制理论与技术研究。E-mail: wei_wenli@126.com

数量以及合理设置挡板位置可以得到回流区域的最小体积。Tom Bajcar^[6]等通过试验和模拟沉淀池内悬浮液流动模式和速度场,认为进口流量是沉淀池污泥悬浮高度的函数。Roza Tarpagkou^[7]利用具有双向耦合计算的拉格朗日方法模拟初相和次相之间的动量交换,通过追踪计算粒子轨迹,发现能量互换会影响流体速度的变化。王欣^[8]通过研究发现在异重流的形成过程中,进水污泥浓度对污水密度的影响远大于温度对污水密度的影响。詹咏^[9]通过研究指出,水流流型的稳定性是防止沉淀池中出现异重流的有利措施,并据此对沉淀池进行了合理改造,取得了较稳定的水流流型。刘百仓^[10]提出密度弗劳德数 Fr ,并对其大小的影响因素和如何减轻异重流的产生进行了研究。Wells S A^[11]发现冬季池内温度是水池的径向位置和池子深度的函数,且因受到的浮力大于重力,将会形成上异重流。

本文以中心进水的辐流式沉淀池为研究对象,经过分析后适当简化,只考虑进水口处垂直挡板不同长度对沉淀池温差异重流的影响,建立两个模型:一个进水口处设有一短挡板,另一个进水口处设有一长挡板,采用 CFD 中的 FLUENT6.3 软件进行数值模拟。模拟分析了挡板的尺寸和形式对两种模型中的流场、温度场和速度场的影响。

1 数学模型

1.1 控制方程

描述水流的时均控制方程为^[12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) - \rho g \quad (2)$$

$$- \rho \overline{u_i u_j} = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: t 是时间, x_i, x_j 是沿 i, j 方向的空间坐标, u_i, u_j 是沿 i, j 方向的速度分量, μ_i 为湍动粘度, ρ 和 μ 分别为流体密度和分子粘性系数, p 为压强, g 为重力加速度, k 表示紊动动能, u'_i, u'_j 分别为 i, j 方向的脉动速度, δ_{ij} 是 Kronecker 函数: $\delta_{ij} = 1, (i = j); \delta_{ij} = 0, (i \neq j)$ 。

采用 Realizable $k-\epsilon$ 两方程来封闭上述方程组,其形式为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} \quad (5)$$

式中, ϵ 为紊动动能耗散率, v 为湍动粘滞率, $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别是与湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数, C_1, C_2 为模型常数, G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, E 为主流的时均应变率,这些参数的取值及其计算方法见文献[12]。

1.2 能量方程

将密度作为温度的函数,引入能量方程计算温度场,考虑温差引起的水流密度的变化。能量方程的表达式为^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho e + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E \quad (6)$$

式中, k_{eff} 是有效热传导率,计算表达式为:

$$k_{\text{eff}} = k + k_t \quad (7)$$

式中, k_t 是湍流热传导系数,根据所使用的湍流模型来定义。 \mathbf{v} 为流体的速度矢量, T 为温度, S_E 是能量方程的源项,包括了所有的体积热源, e 为流体的能量,对于可压缩相 e 的表达式为:

$$e = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

对于不可压缩相 e 的表达式为:

$$e = h \quad (9)$$

式中, h 代表液体的焓值。

以上方程组构成了求解流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况添加相应的边界条件后,构成该方程组的定解问题。

2 模型和材料

2.1 沉淀池模型

本文以中心进水的辐流式沉淀池为模拟对象,进口处的垂直挡板用于把入流引向池底,四周是环形的围堰。污泥斗设在池中央,池底向中心倾斜。它的处理能力大约是 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,池子容积是 $2.96 \times 10^3 \text{ m}^3$,为了研究进口处挡板形式对沉淀池异重流的影响,本文经过适当的简化,建立两种模型:一种是进水口处只有 1.3 m 的垂直短挡板;另一种是进水口处有一长挡板,挡板走势跟外墙接近,高为 3.05 m。沉淀池进水口区域半径 $r = 3.75 \text{ m}$ 。考虑到辐流式沉淀池模型的对称性,为了减少计算的网格数,取 1/4 区域进行数值模拟,如图 1 所示。两种模型只有进口挡板尺寸不同,模型沿径向的断面尺寸如图 2 所示。

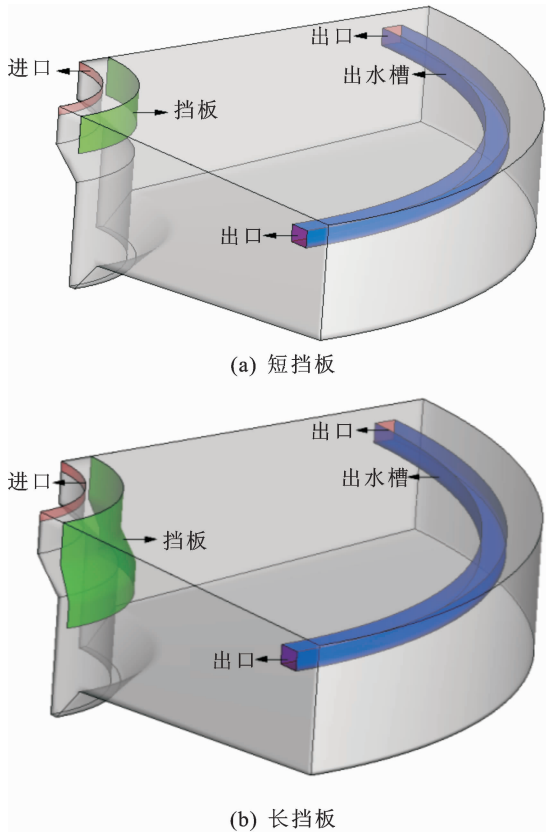


图 1 90°圆弧段沉淀池区域图

Fig. 1 Region of the sedimentation tank of 90° arc

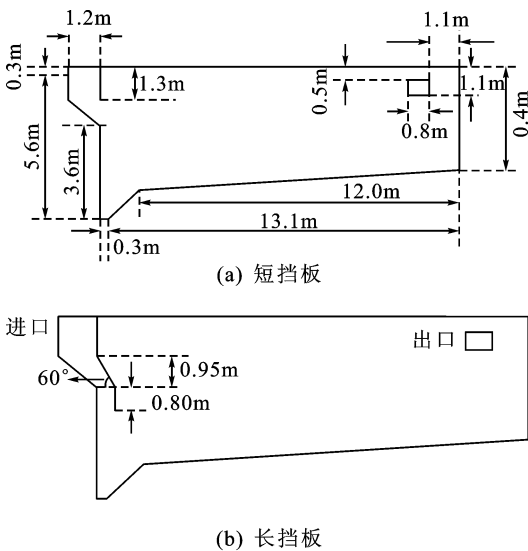


图 2 沉淀池横断面尺寸图

Fig. 2 Transverse section size of the sedimentation tank

2.2 网格划分

计算区域的网格由 GAMBIT 软件生成, 网格划分采用了结构化网格。

两种计算模型的网格划分方法相同, 网格总单元数为 70 707 个, 计算网格如图 3 所示。

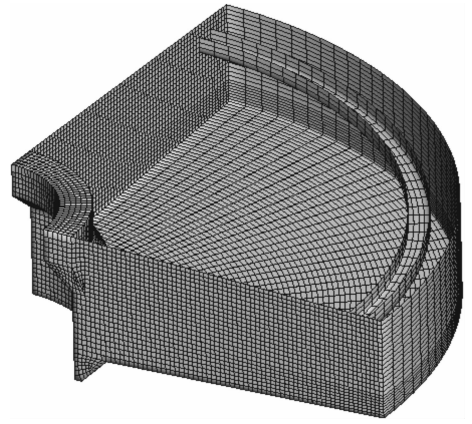


图 3 沉淀池三维计算网格图

Fig. 3 Three-dimensional computational mesh of the sedimentation tank

2.3 边界条件和求解方法

计算初始时刻池内充满水, 夏季池内水温为 25 °C, 冬季池内水温为 8 °C。引入能量方程, 进行边界条件设置: 进口定义为速度进口, 入流速度 $v = 0.085 \text{ m/s}$, 温度为 18 °C; 出口为压力出口, 出口压力为大气压; 速度与压力的耦合方程组求解时使用了半隐式 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 算法; 沉淀池固体壁面 (包括挡板) 的边界条件按“标准壁面函数”给定; 自由水面采用“刚盖假定”, 计算时间步长为 0.005 s。

3 结果分析与讨论

3.1 流场结构分析

图 4(a)~(d) 显示了冬、夏季 500 s 池内 45° 截面水流的流场结构分布。通过池内流线的变化, 反映出异重流及其进口处挡板对池内流态的影响。

如图 4(a)、(b), 在夏季由于入流温度小于池内水温, 导致入流密度大于池内水密度, 从而使进水顺着池壁一直向下流动, 到达污泥斗后沿着池底向池子的中后方流动, 再向上方流动进入出水槽, 自池底附近至水面区域形成逆时针旋流。短挡板模型在出口位置附近有一个小漩涡, 而长挡板模型在出口附近流线平顺, 无漩涡产生。在图 4(c)、(d) 中, 冬季入流在进口处形成一个小漩涡, 水流顺着挡板向下流动, 到达挡板底端后径直向上流动, 然后顺着池子表面流入出水槽, 整个池内形成自池子表面至池底的顺时针旋流。从流线图可以发现, 进水到达挡板末端后径直向上, 并向出口处流动, 这样会使一部分入流没有经过沉淀就直接从出口流出, 因此, 短挡板模型与长挡板模型相比, 其入流更易较快的流向出口。

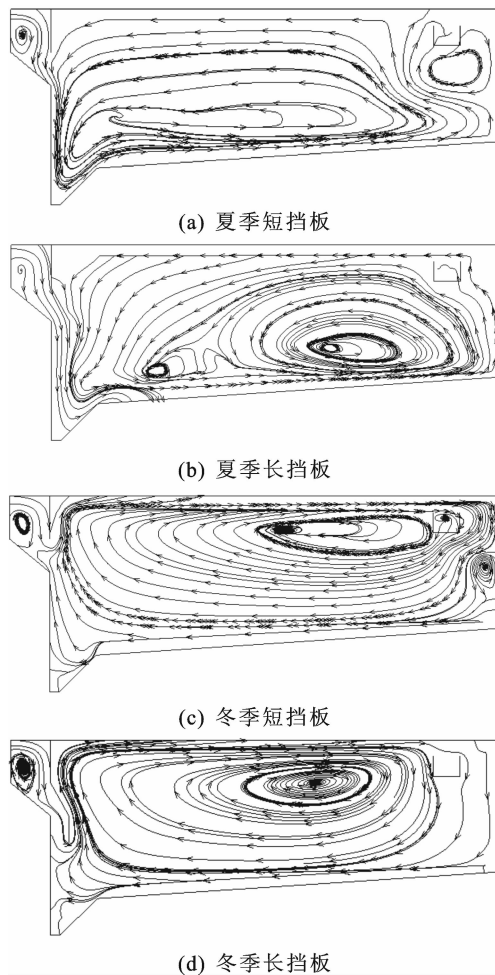


图4 冬夏季流线分布图

Fig. 4 Streamlines distribution in summer and winter

3.2 断面温度分布分析

图5(a)~(d)显示了冬、夏季500 s池内45°截面的温度分布。由于本文假定冬季池内水温为8℃,夏季池内水温为25℃,入流温度为18℃,从图5(a)、(b)可以发现,夏季池内水温度明显高于入流温度。入流顺着挡板和池壁一直向下流动,在到达污泥斗中后慢慢的沿着池底向后方推移(没有向池子的上部扩散,一直在池子的底部流动),这说明夏季入流形成了明显的下异重流。总体来讲,长短挡板在夏季对温度场的影响甚微,但在长挡板模型中,有更多的低温水流向污泥斗,这说明长挡板能将更多的入流导入污泥斗中。从图5(c)、(d)可以看出,冬季进水温度明显高于池内水温,进口入流沿着挡板行至挡板底端后迅速上浮,高温水一直浮于表面,并向出口方向流动,在流动过程中与低温水进行热量交换。温度差产生的密度差使得高温水受到的浮力大于重力作用,形成明显的温度梯度层,这说明冬季入流形成了明显的上异重流。长挡板能将入流导入池子底部,从而使入流与池水混掺得更充分,入流

在池中的扩散更明显,而短挡板模型入流一直浮在池子表面,从而有一部分入流直接从出水槽流出。

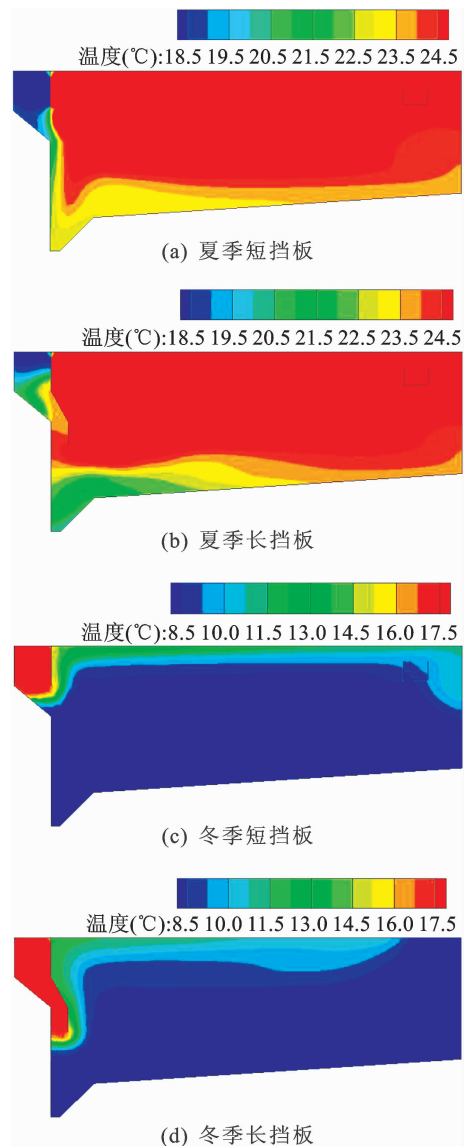


图5 冬夏季温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution in summer and winter

3.3 断面流速分布分析

图6(a)~(d)显示了冬、夏季500 s池内45°截面的流速分布。如图6(a)、(b),夏季进水顺着池壁向下流动,到达污泥斗后向后推移扩散,高流速水流一直在池子底部流动。相较于长挡板模型,短挡板模型污泥斗中高流速区域面积较大,这并不利于污泥的沉淀,所以长挡板模型结构更加合理。在图6(c)、(d)中,冬季入流行至挡板底端后迅速上浮,池子表面流速明显大于中下方流速,高速水流浮在池子表面。短挡板模型入流仅在池子表面流动,池子中下部流速很小,一部分进水直接流出。长挡板对整个沉淀池内速度场的影响大于短挡板,可使池内的流速分布更加均匀。

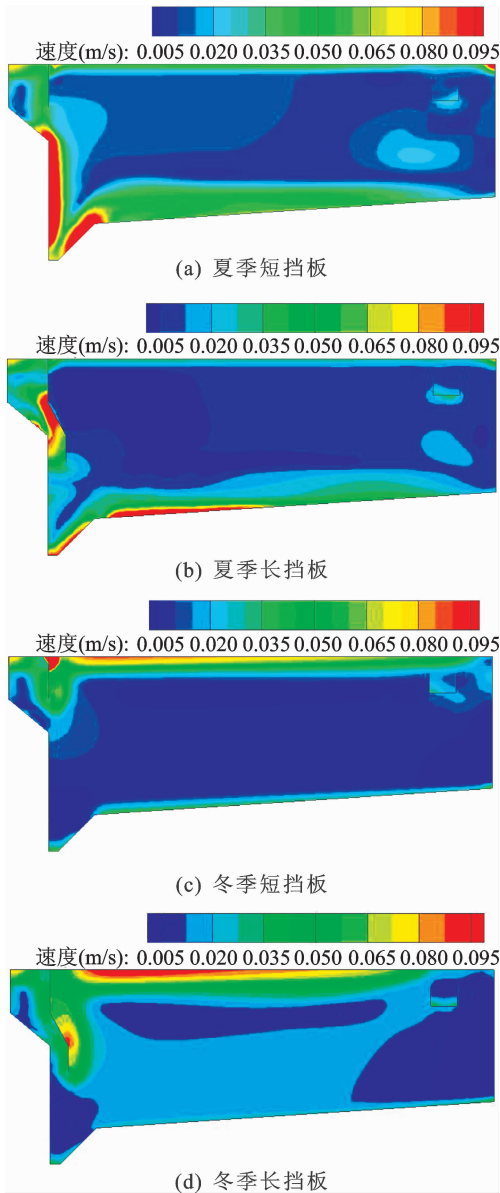


图 6 冬夏季速度分布云图

Fig. 6 Velocity contour in summer and winter

3.4 测线流速分析

温度对沉淀池内流速沿水深方向的分布有着重要影响。为了能够更加直观的观察和分析沉淀池内水流流速分布受温度差的影响,取计算时间为 500 s,在 45°截面距入口处 2 m、5 m、8 m、11 m 处共设置 4 条竖线,测定其流速沿水深方向的分布,测线分布如图 7 所示。

图 8 为四条测线的冬、夏季流速比较图。由图可知,夏季沉淀池底部流速较大,冬季沉淀池表面流速较大,这说明夏季高速水流在池子的底部形成下异重流,冬季高速水流在沉淀池的上部形成上异重流。同时,发现测线 1、2 比测线 3、4 的流速差异大,这是由于入流刚冲入池内时受重力作用流速较大,流入池中后方时流速减小,污泥慢慢开始沉降所

致。测线 3、4 由于在池子的中后方,则流速差异较前部的两条线小,稍趋稳定,这也有利于流出。

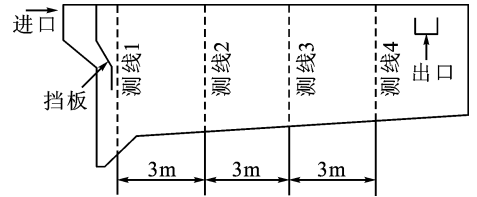


图 7 沉淀池流速测线布置图

Fig. 7 Diagram of measuring lines for velocity distribution in sedimentation tank

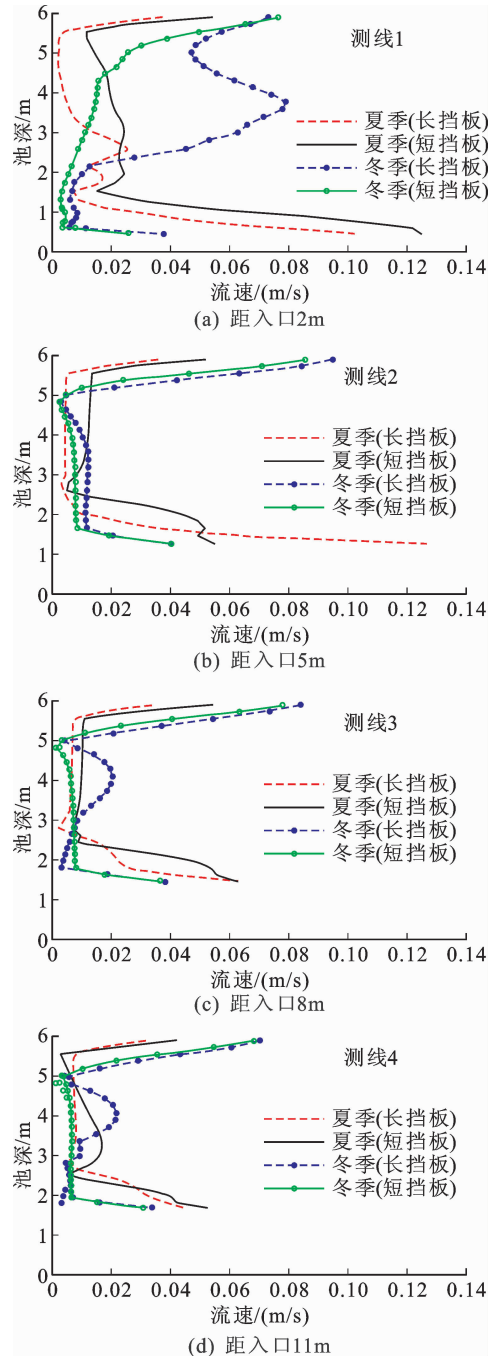


图 8 四条测线的冬、夏季流速比较图

Fig. 8 Compare the velocity of the four measuring lines in summer and winter

4 结 论

本文借助 CFD 软件 fluent6.3, 选取 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 并加入能量方程, 研究进口处不同挡板形式下辐流式沉淀池内的流场、速度场和温度场, 结果发现: 冬夏季沉淀池内的温度差异导致的池内水流密度差异, 均会使沉淀池内水体产生异重流现象。夏季池内水温较高, 入流进入池内易产生下异重流现象, 而冬季池内水温较低, 易产生上异重流现象。

流场的分析结果表明, 温差导致的异重流现象, 使得夏季沉淀池内形成明显的逆时针旋流, 冬季池内形成较大的顺时针旋流。对温度场和速度场的模拟同时说明, 冬季流速较高的高温水流浮于池子表面并向出口处流动, 而夏季则是从池子底部向后推移。

考虑进口处垂直挡板长度不同这一因素对流场、温度场及其速度场的影响, 发现长挡板模型对冬季产生的上异重流影响更明显, 使池内速度场更加均匀, 因此, 长挡板模型是更加合理的沉淀池结构, 有利于提高沉淀池效率。

参考文献:

- [1] FAN L, XU N, KE X, et al. Numerical simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater[J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2007, 38(5): 425-433.
- [2] 刘玉玲, 张振, 魏文礼. 辐流式沉淀池温差异重流特性的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015 26(3): 142-146.
LIU Yuling, ZHANG Zhen, WEI Wenli. Numerical simulation of density current caused by temperature on the hydraulic characteristics in the radial flow sedimentation tank[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015 26(3): 142-146.
- [3] 魏文礼, 蔡亚希. 淹没丁坝三维水流数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 43-47.
WEI Wenli, CAI Yaxi. Research on 3D numerical simulation of flow on submerged spur dike[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(3): 43-47.
- [4] SHAHROKHI M, ROSTAMI F, MD SAID M A, et al. The effect of number of baffles on the improvement efficiency of primary sedimentation tanks[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(8): 3725-3735.
- [5] SHAHROKHI M, ROSTAMI F, MD SAID M A. Numerical modeling of baffle location effects on the flow pattern of primary sedimentation tanks [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(6): 4486-4496.
- [6] BAJCAR T, GOSAR L, ŠIROK B, et al. Influence of flow field on sedimentation efficiency in a circular settling tank with peripheral inflow and central effluent[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49(5): 514-522.
- [7] TARPAGKOU R, PANTOKRATORAS A. CFD methodology for sedimentation tanks: the effect of secondary phase on fluid phase using DPM coupled calculations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(5): 3478-3494.
- [8] 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.
- [9] 詹咏, 吴文权, 王惠民. 沉淀池中的异重流运动特性[J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 43-45.
ZHAN Yong, WU Wenquan, WANG Huimin. Density current motion characteristics in sedimentation pool[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 43-45.
- [10] 刘百仓. 沉淀池工况的数值模拟及流场测量[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LIU Baicang. Modelling and flow field measurement of sedimentation tanks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [11] WELLS S A, LALIBERTE D M. Winter temperature gradients in circular clarifiers [J]. Water Environment Research, 1998, 70(7): 1274-1279.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2004.

(责任编辑 周 蓓)