

辐流式沉淀池温差异重流特性的数值模拟

刘玉玲, 张振, 魏文礼

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 用计算流体力学的方法对某辐流式沉淀池异重流现象进行数值模拟。选用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 设初始时刻沉淀池内充满水, 通过设置池内水与进水的不同温度, 对沉淀池冬夏季不同时刻各工况下异重流的演变规律进行二维数值模拟。结果表明: 夏季产生逆时针的下异重流, 低温水自底部向表面蔓延, 池内最大流速在沉淀池底部附近; 冬季产生顺时针的上异重流, 高温水自表面向下部蔓延, 池内最大流速在沉淀池表面附近。温差导致的异重流, 使沉淀池内产生较大的回流区, 影响了沉淀池的流态及污水处理效率。

关键词: 辐流式沉淀池; 温度差; 异重流; 数值模拟

中图分类号: TV145.21

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0142-05

Numerical simulation of density current caused by temperature on the hydraulic characteristics in the radial flow sedimentation tank

LIU Yuling, ZHANG Zhen, WEI Wenli

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The paper employed computational fluid dynamics (CFD) method to simulate the density current on the hydraulic characteristics in radial flow sedimentation tank. It used Realizable $k-\varepsilon$ model and set up full water in a sedimentation tank at initial time to simulate the property of density current by setting the different temperature between inflow water and water in tank in summer and winter. The results show that the density current with counterclockwise vortexes is generated on bottom in summer, low-temperature water flows from bottom to surface, and the maximum velocity appears near bottom of tank; the density current with clockwise vortexes is generated near top in winter; high-temperature water flows from surface to bottom and the maximum velocity appears near top of the tank. The temperature difference result in density current and produced larger recirculation region in sedimentation tank and affected the water flow property and the efficiency of wastewater treatment in sedimentation tank.

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

1 研究背景

沉淀池是城市污水处理系统的重要组成部分, 为保证出水质量和提高污水处理效率, 有必要对其进行深入的研究。辐流式沉淀池由于其排泥性能好, 可保证沉淀过程连续进行, 具有出水水质高、用地面积少等优点, 在现代污水处理厂有着广泛的应用。

异重流的形成对沉淀池的性能具有显著影响^[1-3]。国内外研究者大多采用计算流体力学 (CFD) 方法来模拟辐流式二沉池的运行情况^[4-5]; 刘跃等^[6]选取 Mixture 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型

对平流式沉淀池内的异重流现象进行数值模拟, 研究发现异重流本质上是产生了密度上的差异。李博等^[7]采用二维 $k-\varepsilon$ 紊流模型, 在清水状态下对二沉池内的温差异重流现象进行数值模拟, 结果表明夏秋季产生的异重流使平流式二沉池产生较大回流, 对池内流态影响不容忽视。肖尧等^[8]对辐流式二沉池进行模拟研究, 发现颗粒粒径、密度对泥水分离效果影响较大, 且漩涡等特殊流动现象对固相颗粒行为有直接影响, 尤其对小颗粒的影响更大。McCorquodale 等^[9]通过对进水温度与池内温度相同及不同两种工况时沉淀池内的水力特征的数值模拟,

收稿日期: 2015-01-05; 修回日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178391); 陕西省科学研究计划项目 (2014K15-03-05)

作者简介: 刘玉玲 (1969-), 女, 陕西渭南人, 博士, 教授, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

得出了沉淀池稳定性与温度梯度相关的结论,并且发现恒定流下伴随着密度 Fr 的减小,出口区域向上的流速会增加。Well 等^[10] 现场考察了俄勒冈州 3 个无盖的圆形沉淀池,研究发现异重流和不稳定的温度梯度有关,冬季异重流的上浮现象与进水动量的减小,悬浮固体稳定后的进水浮力,澄清池的几何体型有关。Athanasia 等^[11] 利用计算流体力学的方法评估进水温度变化对沉淀池沉淀效率的影响,研究表明进水和沉淀池内仅 1℃ 温差就足以产生异重流。进水温度升高时,沉淀池呈现的上升浮力羽流改变了池内旋流的方向。这个过程使颗粒悬浮导致流出物颗粒浓度较高,不利于沉降。随着温差的减小,池内旋流恢复原来的状态,悬浮物浓度降低。

夏秋季进水与池内水的温度差异,会在沉淀池内产生异重流现象,对沉淀池的运行效果有明显的影响,有必要对其进行研究。本文采用 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型对某市辐流式沉淀池冬夏季的水力特性进行了二维数值模拟,以期改善沉淀池沉降效率提供理论支持。

2 数学模型

2.1 控制方程

描述水流的时均控制方程如下^[12]:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i \quad (2)$$

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

式中: t 是时间, x_i 是沿 i 方向的空间坐标($i = 1, 2, 3$), u_i 是沿 i 方向的速度分量, μ_t 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_i 为 i 方向的重力加速度。

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

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

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

式中: k 为紊动动能; ε 为紊动动能耗散率。其中经验系数的取值及各系数的计算公式如下:

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2, C_2 = 1.9$$

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k / \varepsilon}, A_0 = 4.0, A_s = \sqrt{6} \cos \phi,$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{ki}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}},$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k。$$

2.2 能量方程

将密度定义为温度的函数,引入能量方程计算温度场,考虑水流由温差引起的密度变化。能量方程表达形式为下式^[12]:

其中 k_{eff} 是有效热传导率,计算表达式为式:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff}) + S_E \quad (6)$$

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

式中: k_t 是湍流热传导系数,上式右侧第一项表示由于传导而造成的能量输移, S_E 包括了所有体积热源。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:

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

这里 h 代表液体的焓值。

3 数值模拟

3.1 计算区域与网格划分

某沉淀池中心深 5.9 m,周边深 4.0 m,泥斗设在池中央,池底向中心倾斜,进水处有一垂直长挡板用于把入流引向池底。模型尺寸如图 1 所示。初始计算网格由 GAMBIT 软件生成,网格划分采用结构化网格,网格总单元数为 7444 个。计算网格如图 2 所示。

3.2 边界条件

假设初始时刻池内充满清水(夏季池内水温为 25℃,冬季池内水温为 8℃),引入能量方程,边界条

件设置:进口边界给定速度值,入流速度 $v = 0.085$ m/s,温度为 18°C ;出水口采用自由出流;沉淀池固体壁面(包括挡板)上的边界条件按“壁面函数”法给定;自由水面按“刚盖”假定给出边界条件,时间计算步长为 0.005 s。

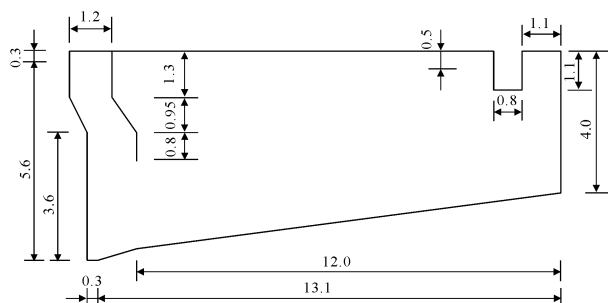


图1 沉淀池模型尺寸图(单位:m)

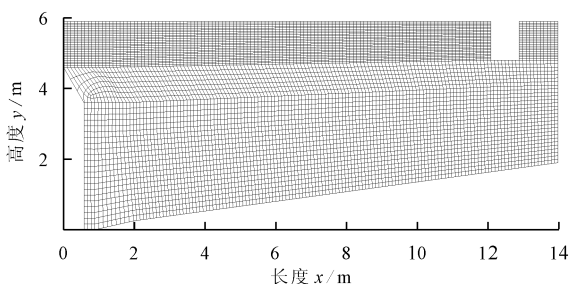


图2 沉淀池计算网格图

4 结果与分析

4.1 流场结构及温度场分析

图3(a)~图3(d)显示了夏季不同时刻的流线图。进水沿着长挡板,向下流动,到达长挡板倾斜部分后,脱离挡板,继续向下运动,由于挡板的作用,挡板后端有旋流出现;整个过程中,沉淀池下部产生了较大的逆时针旋流,随着计算时间的增加,水流沿着沉淀池底部向后推移至沉淀池末端便随旋流上扬,同时逆时针旋流中心向后移动,影响范围逐渐扩大,形成下异重流;由图3(d)可知沉淀池末端底部水流随旋流上扬现象明显。夏季,由于下异重流的产生,进水直接潜入池底,能够促进进水中颗粒的沉淀;但是出口位置的上扬现象,会使部分进水未经过沉淀直接从出口排出,影响出水水质。

图4(a)~图4(d)显示了冬季不同时刻的流线图,水流进入沉淀池,绕过挡板后沿挡板上浮,在沉淀池上部形成较大的顺时针旋流,产生上异重流。随着计算时间的推移,水流沿着沉淀池表面继续后移,顺时针旋流中心逐渐后移,沉淀池下部会产生较小的旋流,这主要由于沉淀池体型因素产生的。由

图4(d)可知,进水浮于表面随旋流流动,部分水流会直接从出口流出。冬季,产生上异重流,导致进水浮在池子表面,不利于颗粒的沉淀,部分进水会未经充分沉淀直接流出出口,影响出水水质。

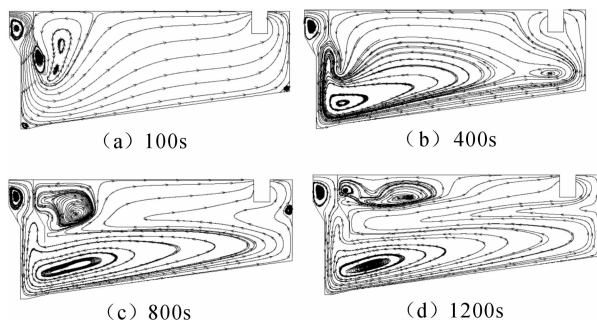


图3 夏季不同时刻流线分布图

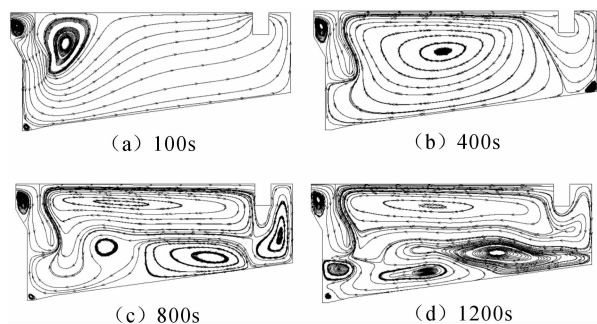


图4 冬季不同时刻流线分布图

图5(a)~图5(b)为夏季400 s和1 000 s时的温度分布云图。研究发现:夏季沉淀池上部温度高,下部温度低,低温水自下向上蔓延,入流形成了下异重流。这是由于夏季入流温度低于池内温度,导致入流密度大于池内水密度,密度大的低温水顺着挡板继续向下流动,之后再由下部向上部扩散混合。

图5(c)~图5(d)为冬季400 s和1 000 s时的温度分布云图,因为冬季进水温度高,密度小的高温水入流后,受到的浮力作用大于重力作用,过挡板后上浮于池子表面,然后向下蔓延。表现为,沉淀池池内形成上部温度高,下部温度低的温度梯度层,高温水自上向下蔓延,形成上异重流。

4.2 流速分布分析

图6(a)为夏季1000s时的流速分布云图,图6(b)为冬季1000s时的流速分布云图。冬夏两季沉淀池内速度场分布有很大区别。由于夏季下异重流的影响,池内最大流速在底部附近,秋季由于产生上异重流,池内最大流速场分布在表面附近。

为更精确地分析冬夏两季流速大小的差异,在沉淀池截面上布设4条垂线,如图7所示。提取1 000 s时冬夏季两种工况下测线上的流速分布,如图8所示。

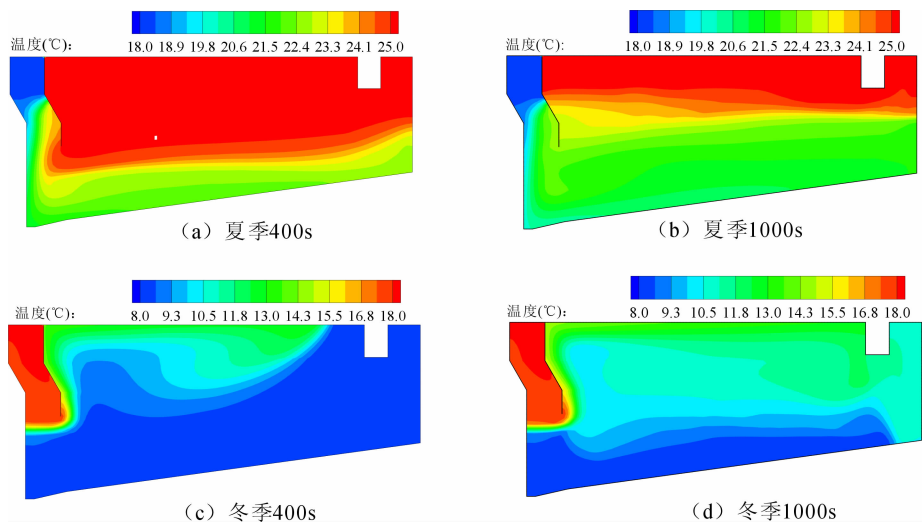


图5 冬夏季不同时刻温度分布图

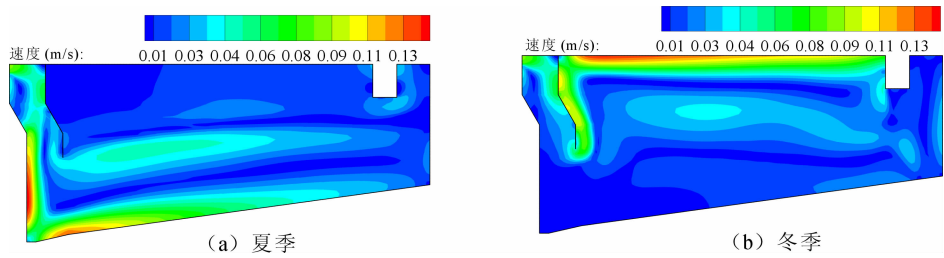


图6 冬夏季1 000 s时流速分布云图

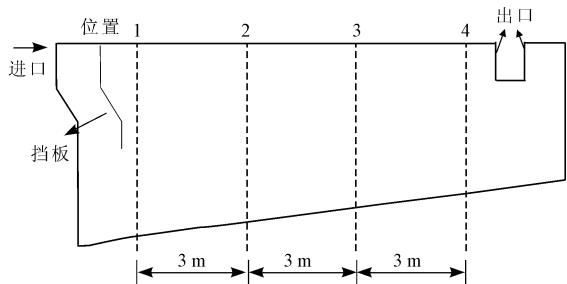


图7 流速测线布设

图8(a)~图8(d)为沉淀池内位置1~4垂线上的流速分布图。图8(a)~图8(b)显示了夏季垂线流速在底部流速很大,表面流速小的特征。这是由于夏季低温水流入后,水流沿着长挡板下流沉底,未发生明显的扩散和混合,到沉淀池底部附近才有了明显扩散混合现象,呈现出典型的下异重流形态。相反,图中冬季流速分布呈现为表面速度较大,底部流速小的特征。

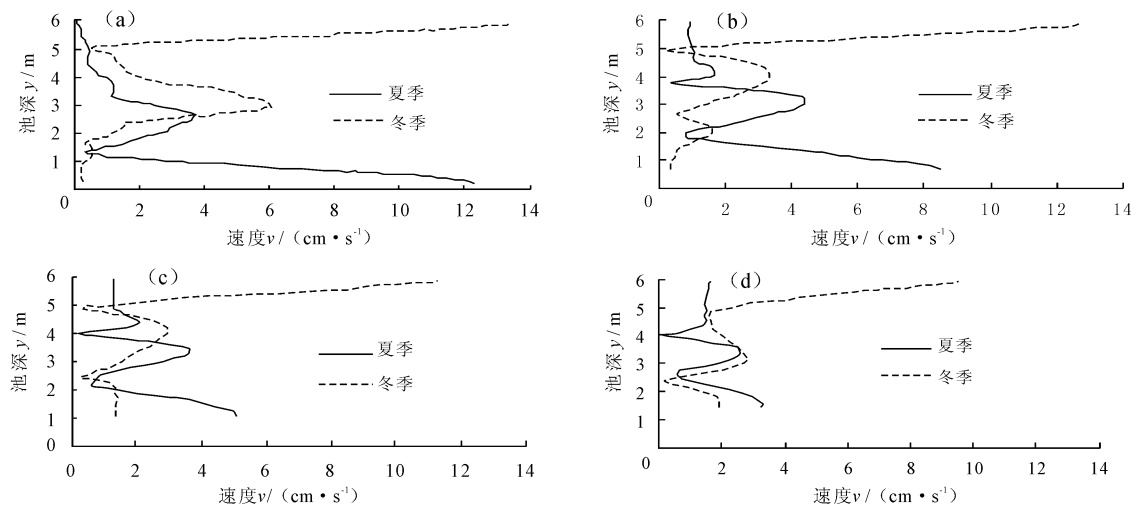


图8 速度分布图

冬季由于进水温度高,池内水温较低,产生了密度差,进水密度较小,导致所受浮力作用大于重力作用,出现了高温水上浮现象,形成上异重流。通过对图 8(a)~图 8(c)的比较发现,沉淀池由于下部旋流影响,各垂线上的速率自沉淀池底部向上,逐渐减小,然后再次变大,再逐渐减小,越往上速率趋于稳定。这种速率的变化趋势和冬季不同,冬季底部流速变化趋势不大,随着沉淀池高度的增加,各流线流速呈现增大、减小、再次增大的趋势,表面速度很大。这是因为异重流导致池内中下部产生旋流,中层存在一个过渡区,且随着回流区域逐渐扩大。图 8(d)可以发现,夏季沉淀池位置 4 处的垂线流速趋于稳定,而冬季上表面流速仍然很大。

5 结 语

本文通过对辐流式沉淀池的异重流现象进行数值模拟,探讨异重流对沉淀池内水力特征的演变规律,得出以下结论:

(1)流场分析结果表明,温差异重流引起的旋流作用影响辐流式沉淀池的水流流态。夏季沉淀池内逆时针旋流作用明显,进水沉底沿底面向出口方向流动,末端底部水流会随旋流上扬,部分进水直接从出口排出;冬季则形成较大的顺时针旋流,进水过挡板上浮沿表面向出口方向流动,部分上浮水流直接从出口处流出。

(2)温度场分析结果表明,温差引起的密度差导致沉淀池产生异重流现象。夏季入流温度高于沉淀池内水温度,产生下异重流,低温水自底部向表面蔓延;冬季进水温度高,池内温度低,产生上异重流,高温水自表面向下部蔓延。

(3)流速分析结果表明,夏季池内最大流速在底部附近,秋季池内最大流速场分布在表面附近。夏季沉淀池近出口垂线流速趋于稳定,而冬季上表面流速一直很大。

(4)异重流产生的旋流对沉淀池内的水力特性作用显著,影响沉淀池沉淀效率。

参考文献:

- [1] Deininger A, Holthausen E, Wilderer P A. Velocity and solids distribution in circular secondary clarifiers: Full scale measurements and numerical modelling [J]. Water Research, 1998, 32(10): 2951–2958.
- [2] Peter Krebs. Success and shortcomings of clarifier modelling [J]. Water Science and Technology, 1995, 31(2): 181–191.
- [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(6): 846–852.
- [4] 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): 410–412.
- [5] Fan Long, Xu Nong, Ke Xiyong, et al. Numerical simulation of secondary sedimentation tank for urban wastewater [J]. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 2007, 38(5–6): 425–433.
- [6] 刘跃, 谭立新. 平流二沉池中计及温差影响的异重流数值模拟 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 221–228.
- [7] 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.
- [8] 肖尧, 施汉昌, 范尧. 基于计算流体力学的辐流式二沉池数值模拟 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(19): 100–104.
- [9] Mccorquodale J A, Zhou Siping. Effects of hydraulic and solids loading on clarifier performance [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, 31(4): 461–478.
- [10] Wells S A, LaLiberte D M. Winter temperature gradients in circular clarifiers [J]. Water Environment Research, 1998, 70(7): 1274–1279.
- [11] Athanasia M G, Margaritis K, Thodoris D K, et al. The effect of influent temperature variations in a sedimentation tank for potable water treatment – a computational fluid dynamics study [J]. Water Research, 2008, 42(13): 3405–3414.
- [12] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.