

基于两相流的氧化沟推流器分布特性研究

王启瑞¹, 荣红², 郑源¹, 陈小翠¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对氧化沟污水处理技术中可能存在的能耗大、污泥淤积的问题, 将活性污泥的黏度和沉降速率通过用户自定义函数导入 Fluent 软件, 对某污水处理厂的标准氧化沟进行水-活性污泥两相流数值计算, 得到氧化沟中推流器功率、速度分布情况及污泥分布情况, 并对其进行分析比较, 选出最优电机功率及推流器分布。对氧化沟内流场特性进行深入分析, 将数值模拟及试验测得断面流速进行比较, 结果表明各测点数据吻合程度较好, 因此认为数值模拟能够较好地预测出真实流场中各点的流速, 且速度死区率大的区域污泥质量浓度一般较高。

关键词: 氧化沟; 推流器; 计算流体力学; 两相流; 流速场

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)02-0042-05

Study on distribution characteristics of thruster in oxidation ditch based on two-phase flow//WANG Qirui¹, RONG Hong², ZHENG Yuan¹, CHEN Xiaocui¹ (1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. NARI Water Conservancy and Hydropower Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the problem of high energy consumption and sludge deposition that could occur in oxidation ditch sewage treatment technology, the viscosity and settling rate of activated sludge was imported into Fluent software through a user-defined function, and then the numerical simulation for water-activated sludge two-phase flow calculation of standard oxidation ditch in a sewage treatment plant was conducted. The power of thruster, the distribution of velocity and sludge in the oxidation ditch could be obtained. Compared with each other, the optimal motor power and velocity distribution was selected. The flow field characteristics of the oxidation ditch were further analyzed and compared the section flow velocity obtained by numerical simulation with the experiment measurements, showing that the data from the measuring points has good performance of consistency, and the velocity of each point in the real flow field can be well predicted by numerical simulation. The sludge mass concentration is generally higher in the area with high velocity dead zone rate.

Key words: oxidation ditch; thruster; computational fluid dynamics; two-phase flow; velocity field

随着我国水环境污染的形势越来越严峻, 污水处理厂的数量也在不断增加, 氧化沟处理技术得到了广泛应用, 该技术出水水质较好、运行稳定、管理方便且抗冲击负荷能力较强^[1]。但氧化沟在使用过程中存在能量消耗较大、处理成本较高等问题。推流器是氧化沟内的重要动力设备, 污水处理过程中的能耗也主要来自推流器^[2-3]。因此, 合理布置推流器对于减少氧化沟能量消耗和防止沟内污泥沉积具有重要意义^[4]。

为解决氧化沟能耗问题, 许多学者对氧化沟进行了内部流场分析, 在不影响氧化沟处理效果的前提下, 对其进行优化配置, 使其能耗降低^[5-7]。张志政等^[8]在计算流体软件 Fluent 下, 对立体循环一体化氧化沟进行二维流场模拟分析, 探究下沟道底部

推流器安装方式对整个流场的影响。Xia 等^[9]从节约用地的角度出发, 开发了一种新型的集成式垂直循环氧化沟 (IODVC) 系统处理生活和工业废水。Karpinska 等^[10]通过计算流体力学方法进行污水处理模拟试验, 来评估水力射流在氧化沟中的具体应用, 分析氧化沟的水动力学和停留时间分布情况。Fan 等^[11]对氧化沟的水动力学进行了研究, 模拟了反伞式表面曝气器曝气氧化沟的三维流场。

然而, 上述研究都局限在单相流数值模拟上, 单相流数值模拟的优点是可以简化模型, 缩短计算时间, 但也带来模拟结果和真实情况偏差过大的风险。因此, 部分专家学者对氧化沟的两相流模拟进行了研究。Xie 等^[12]提出一种用于模拟卡鲁塞尔 (Carrousel) 氧化沟内流场和污泥沉降的两相计算流

作者简介: 王启瑞 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事流体机械工程研究。E-mail: 3103460884@qq.com

通信作者: 陈小翠 (1989—), 女, 讲师, 博士, 主要从事流体机械结构仿真分析研究。E-mail: xixizu@163.com

体力学(CFD)模型,采用双指数沉降速度函数模拟两相流,提出了优化的氧化沟运行方案,并与试验对比后发现吻合情况较好。杨亚红等^[13]引入群平衡模型(PBM),建立 CFD-PBM 气液两相流模型,对微孔曝气氧化沟工艺的气液两相流进行 Fluent 模拟分析。许丹宇等^[14]利用 Fluent 软件进行了氧化沟的污水-污泥两相流的模拟,展现了氧化沟内混合液流场和污泥的分布情况。

本文以某污水处理厂氧化沟的布置为原型,使用 Fluent 软件,采用三维湍流数值模拟方法,通过对活性污泥的黏度及沉降速率进行用户自定义函数(UDF)定义,建立活性污泥-污水的两相流模型并进行仿真计算。按照氧化沟所需能量进行推流器选型,通过改变推流器分布得到不同的流场特性,分析比较后确定最优方案并对最优方案流场特性进行研究,对比分析氧化沟断面平均污泥质量浓度与平均流速的关系。

1 数值模拟

1.1 氧化沟模型参数

本文研究对象为某污水处理厂的氧化沟,平面布置如图 1 所示,长、宽、深分别为 49.0、12.3、6.6 m,容积为 1 908 m³,中心导流墙长度为 37 m,环形导流墙半径为 3 m,墙厚为 0.3 m。额定流量为 4 800 m³/h,叶轮直径为 2.5 m,原型中推流器 A 与推流器 B 之间的距离为 25 m。图中 1~12 为断面编号,I、II、III 为监测线编号。

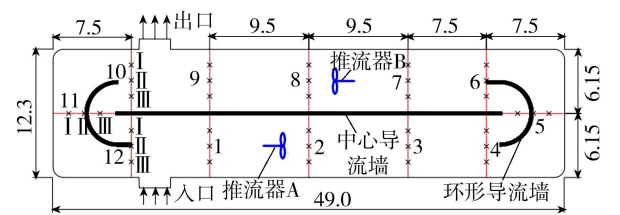


图 1 氧化沟平面结构(单位:m)

氧化沟竖直断面测点布置如图 2 所示。为了与数值模拟结果进行对比,得到流速分布的情况,在 12 个断面进行测量,单个断面测点数量为 9 个,即每个断面设置 3 条监测线(I、II、III),每条监测线分别设置 3 个监测点。其中,流速测量仪器采用 LJ20A 型便捷式流速仪,配套新型 OA 型光纤流速旋桨传感器,直径为 15 mm,测量范围为 0.01~4.00 m/s,启动流速不大于 1 cm/s,测流误差不大于 1.5%。流速仪并列安装,每排 9 个固定在测流支架上,流速仪配有 3 m 长的标准定位测杆以及加长杆,可通过改变测流支架的位置来测量不同断面、不同测点的流速情况。在每种工况下,固定完流速仪平

面后需等待流速稳定在某一直值后再开始记录数据,记录 20 组数据后将支架移至另一平面继续测量。

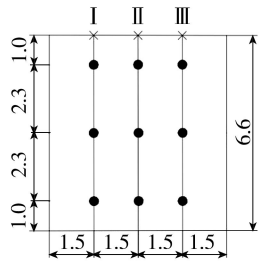


图 2 竖直断面测点分布(单位:m)

本文使用建模软件 UG 构建三维模型。轮毂半径为 0.1 m,叶片半径为 1.25 m,叶片根部厚为 0.04 m,叶片顶部厚为 0.036 m。给每个叶轮各创建一个半径为 1.4 m、高为 0.89 m 的旋转区域,流体在旋转区域得到能量并按照能量方程将能量传递给其余液体。

1.2 数学模型

使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对氧化沟内的旋流和弯道二次流现象进行数值模拟。两相流模型采用 Mixture 模型^[15],设置清水和活性污泥液-固两相。清水的密度为 998.2 kg/m³、黏度为 0.001 003 Pa·s,活性污泥的密度为 1 050 kg/m³。鉴于活性污泥的黏度与温度及污泥质量浓度都有较大关系,选用对活性污泥的适用性和符合程度较高的指数模型,其表达式为^[16]

$$\mu_s = 0.63e^{(\frac{120}{T} + 0.078C_{MLSS})} \tag{1}$$

式中: μ_s 为污泥黏度; T 为绝对温度; C_{MLSS} 为污泥的悬浮质量浓度(为简化计算,用污泥质量浓度替代污泥悬浮质量浓度)。

污泥在清水中的沉降速率通过下式进行拟合:

$$v_s = 0.004(e^{-0.46\rho_s} - e^{-1.86\rho_s}) \tag{2}$$

式中: v_s 为污泥沉降速率; ρ_s 为污泥质量浓度。

将式(1)和式(2)通过用户自定义函数 UDF 导入 Fluent 软件中,对活性污泥的黏度及沉降速率进行定义,其中污泥项的颗粒直径设为 0.4 mm。在进行两相流计算前,先将单相流动的计算结果作为全流场的初始条件导入 Fluent 软件中再进行计算。

1.3 模型建立及网格划分

采用四面体网格对计算区域进行网格划分,网格数量依次为 350 万、390 万、430 万和 500 万。当网格数不断变大时,推流器的功率不断减小。当网格数为 390 万时,推流器功率减小的趋势变得不明显;同时,网格数量越多,计算机性能要求也会随之提高,综合考虑选取网格数量为 388.5 万。

1.4 计算边界条件

数值计算过程中,计算域的进口选用氧化沟的进水口,按流量进口边界进行仿真分析,进口流量为

1 329.68 kg/s,出口为自由出流,自由液面取对称边界条件,转轮体区域采用旋转坐标参考系,其他过流区域采用静止坐标系统,底面、边壁、支架、导流墙采用无滑移边界条件,壁面为水泥壁面,壁面粗糙度设为0.5 mm。

数值计算使用有限体积法进行离散,扩散项使用二阶中心差分格式,对流项使用二阶迎风格式^[17]。采用SIMPLE算法进行速度和压力耦合计算,在监视的变量残值不超过10⁻⁵时完成计算。

2 数值模拟结果与分析

2.1 电机功率选择

根据能量方程,推流单位液体的能量表示为

$$H_f = \frac{1}{2} \left(\sum \xi + \lambda \frac{UL}{S} \right) v^2 \quad (3)$$

根据丹麦Lind Jensens Maskinfabrik (LJM)公司提供的方法^[18],其能量损失和功率分别为

$$W_r = H_f Q_p \quad (4)$$
$$P_R = W_r / \eta \quad (5)$$

式中: $\sum \xi$ 为总局部阻力因数,该模型共6个直角转角,每个直角转角为1,故取为6; S 为水流面积; λ 为沿程阻力因数,取0.03; L 为氧化沟中线长度; U 为渠道湿周; v 为速度; Q_p 为流量; η 为螺旋桨的效率,取60%。计算得出 $H_f=0.43$ J/kg, $W_r=4.64$ kW, $P_R=7.73$ kW。流道内设有2台推流器,每台推流器功率不小于3.86 kW,因此正式使用时选用额定功率为4 kW的电机。

2.2 流场特性分析

通过改变推流器A与推流器B之间的距离 d

来控制推流器分布。推流器与环形明渠进口处距离应不小于10 m,因此 $|d| \leq 10$ m,由于 L 为49.0 m,考虑0.2 L 在10 m以内,故而将 d 分别定为-0.2 L 、-0.1 L 、0 L 、0.1 L 、0.2 L ,共计5种方案。

以-0.1 L 方案为例进行流场特性分析,断面1~6的流速数值模拟结果如图3所示,图中离散点为试验测得数据。比较图3中数值模拟结果及试验数据,可以发现两者吻合较好,这说明数值模拟能够较好地预测出真实流场中各点的流速。

2.3 推流器分布选择

2.3.1 底部污泥分布云图分析

给定进口污泥质量浓度为3.5 g/L,推流器转速为81 r/min。将计算结果中的污泥相体积分数换算成污泥质量浓度,绘制成污泥质量浓度云图如图4所示。可以看出,-0.2 L 方案和-0.1 L 方案中的污泥淤积的区域较小,主要发生在中心导流墙的两端,即水流转弯处。而其余方案除了这些区域,在进口下方及推流器B后方均存在一部分污泥淤积的区域。

2.3.2 氧化沟流道整体污泥分布情况分析

不同方案下,氧化沟在0.3 m水平截面处的污泥质量浓度极值如图5所示。从图5可以看出,-0.1 L 、0.1 L 、0.2 L 方案0.3 m水平截面的污泥质量浓度极值较小,污泥分布较为均匀,而-0.2 L 方案的污泥质量浓度极值最大,在2 m深度以上的污泥质量浓度变化较快,污泥分布不太均匀,这会降低活性污泥对污水中BOD、COD的处理效果。

在给定污泥沉降速率以及推流器的推流作用下,氧化沟中污泥分布从上至下呈逐渐增大趋势,而

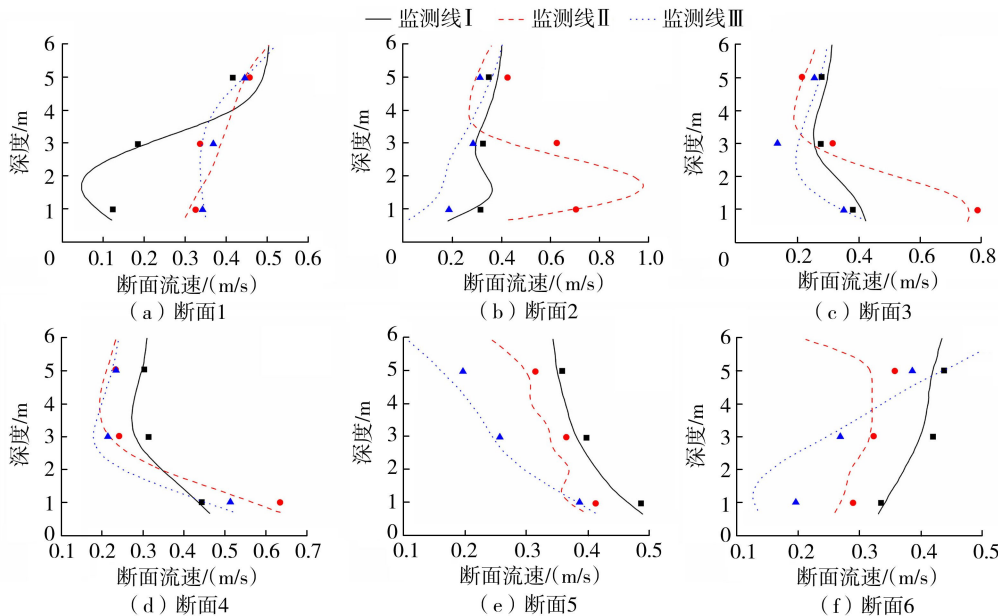


图3 $d=-0.1L$ 时不同断面流速分布

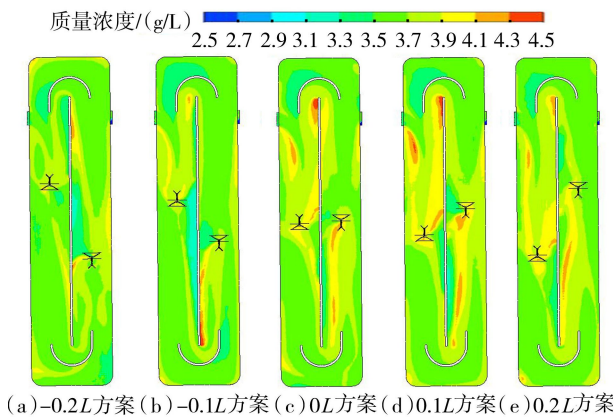


图4 氧化沟底部污泥质量浓度云图

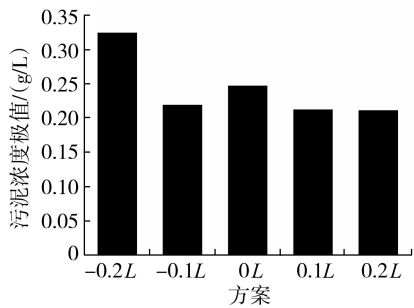


图5 氧化沟 0.3 m 水平截面处污泥质量浓度极值

污泥沿 Z 轴方向分布越均匀,推流器的推流效果越好。选用受推流器影响较大的 0.3 ~ 6.3 m 水深范围内污泥质量浓度变化极值来量化污泥分布的均匀程度,如图 6 所示。结合图 4 ~ 6 可知,当 $d = -0.1L$ 时氧化沟污泥质量浓度分布均较为均匀,死区率较小,且流道整体的污泥质量浓度极值较小,因此这种布置方案最为合理。

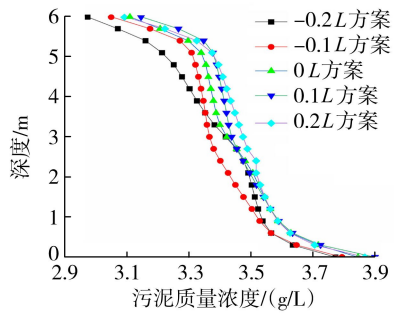


图6 不同方案的污泥质量浓度分布

2.3.3 不同断面污泥质量浓度与平均流速分析

考虑 $d = -0.1L$ 时,分别计算图 1 中各断面的平均流速及污泥平均质量浓度,结果如表 1 所示,可以看出流速与污泥质量浓度并非简单的流速越大、污泥质量浓度越高的关系:①断面 1 位于水流入口下方,在入口来流和推流器的作用下流速较高,但流态较为紊乱,且入口侧底部存在部分污泥淤积,因此该处的污泥质量浓度最高;②断面 2、3、4 位于推流器 A 前方第一直道上,与推流器之间的距离越来越

大,因此平均流速越来越小,但由于推流范围也在逐渐扩大,因此污泥质量浓度也逐渐减小;③断面 5、11 均位于环形导流墙转弯处,经过导流墙的强制导流作用,水流在此处流动较快,因此污泥质量浓度也较低;④经第一环形导流墙改变方向后的水流经过断面 6 流速较高,但流态较不稳定,因此污泥质量浓度较大;⑤断面 7、8、9 位于第二直道上,由于距推流器较近,平均流速均较大,污泥质量浓度较小,而断面 9 由于离出口较近,水流改变方向造成部分水流流速降低,因此该处污泥质量浓度相对较大;⑥断面 10 由于位于出口后侧,部分水流及污泥从出口流出,故而该处水流平均流速较小,污泥质量浓度也较小;⑦断面 12 处于第二环形导流墙的出流处,但由于入口来流的作用阻碍了水流运动,因此平均流速较低,污泥质量浓度较大。

表 1 氧化沟各断面的平均流速及污泥平均质量浓度

断面编号	平均流速/(m/s)	污泥平均质量浓度/(g/L)
1	0.316	3.482
2	0.324	3.386
3	0.298	3.372
4	0.296	3.365
5	0.327	3.379
6	0.316	3.428
7	0.291	3.417
8	0.305	3.381
9	0.293	3.392
10	0.256	3.348
11	0.306	3.361
12	0.283	3.393

3 结 语

a. 根据丹麦 LJM 公司提供的能量公式,计算出氧化沟内所需能量,选出合适电机功率为 4 kW,通过数值模拟得出的推流器功率能够满足氧化沟中的能量要求。

b. 通过对数值模拟及试验测得的断面流速进行比较,发现各测点数据吻合程度较好,表明数值模拟方法能够很好地预测出真实流场中各点的流速。

c. 当两推流器的距离 $d = -0.1L$ 时,氧化沟污泥质量浓度分布较为均匀,为推流器最佳布设位置;各断面的平均流速及平均污泥质量浓度两者并非简单的流速越大、污泥质量浓度越高的关系,死区率大的区域污泥质量浓度一般都较高。

参考文献:

[1] 谢浩. 氧化沟液-固两相 CFD 模拟及 ASM 模型耦合研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
[2] 周大庆,吴思源,郑源. 基于 CFD 的氧化沟推流器能量配置计算[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(5):422-

427. (ZHOU Daqing, WU Siyuan, ZHENG Yuan. Determining in stallation position and number of submerged propellers in oxidation ditch by CFD [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013,31(5):422-427. (in Chinese))
- [3] 郑源,李城易,张付林. 基于 CFD 的氧化沟中推流器转速与分布特性[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(11):953-959. (ZHENG Yuan, LI Chengyi, ZHANG Fulin. Study on characteristics of rotational speed and installation position of submerged propellers in oxidation ditch by CFD [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(11):953-959. (in Chinese))
- [4] ZHANG Yuquan, LI Chengyi, XU Yanhe, et al. Study on propellers distribution and flow field in the oxidation ditch based on two-phase CFD model [J]. Water, 2019, 11 (12):1-14.
- [5] 蒋成义,黄卫东,王淦,等. 氧化沟流场的计算流体力学数值模型研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(8):135-140. (JIANG Chengyi, HUANG Weidong, WANG Gan, et al. Numerical computation of flow fields in an oxidation ditch by computational fluid dynamics model [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33 (8): 135-140. (in Chinese))
- [6] 宋怀辉,何建京,李志杰,等. 氧化沟流场的三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展,2012(2):62-70. (SONG Huaihui, HE Jianjing, LI Zhijie, et al. Three-dimensional numerical simulation of flow fields in oxidation ditch[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012(2):62-70. (in Chinese))
- [7] 唐瑜谦. 氧化沟流场特性数值模拟的现状与展望[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(5):107-112. (TANG Yuqian. Present situation and prospect of numerical simulation for flow field characteristics in oxidation ditch [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2012,10(5):107-112. (in Chinese))
- [8] 张志政,鄢俊波,雷蓓,等. 立体循环一体化氧化沟二维流场模拟分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):166-171. (ZHANG Zhizheng, YAN Junbo, LEI Bei, et al. Analysis on 2D numerical simulation for integrated oxidation ditch with vertical circle[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2018,29(1):166-171. (in Chinese))
- [9] XIA Shibin, LIU Junxin. An innovative integrated oxidation ditch with vertical circle (IODVC) for wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Sciences,2004,16(3):367-370.
- [10] KARPINSKA A M, DIAS M M, BOAVENTURA R A R, et al. Modeling of the hydrodynamics and energy expenditure of oxidation ditch aerated with hydrojets using CFD codes [J]. Water Quality Research Journal of Canada,2015,50(1):83-94.
- [11] FAN Long, XU Nong, WANG Zhiqiang, et al. PDA experiments and CFD simulation of a lab-scale oxidation ditch with surface aerators [J]. Chemical Engineering Research and Design,2010,88(1):23-33.
- [12] XIE Hao, YANG Jiakuan, HU Yuchen, et al. Simulation of flow field and sludge settling in a full-scale oxidation ditch by using a two-phase flow CFD model [J]. Chemical Engineering Science,2014,109(2):296-305.
- [13] 杨亚红,刘林刚,招扬,等. 基于 PBM 模型的微孔曝气氧化沟气液两相流分析[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(7):607-612. (YANG Yahong, LIU Lingang, ZHAO Yang, et al. Analysis of gas-liquid two-phase flow in oxidation ditch with fine bubbles based on PBM model [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2018,36(7):607-612. (in Chinese))
- [14] 许丹宇,张代钧,艾海男,等. 氧化沟反应器流体力学特性的数值模拟与实验研究[J]. 环境工程学报,2007(12):22-28. (XU Danyu, ZHANG Daijun, AI Hainan, et al. Numerical simulation and experimental study of hydrodynamic characteristic in the carrousel oxidation ditch reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2007(12):22-28. (in Chinese))
- [15] 李贵吉,张建民. 前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):46-52. (LI Guiji, ZHANG Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(4):46-52. (in Chinese))
- [16] 张鹏,吴志超,敖华军. 污泥的黏度与浓度、温度三者关系式的实验推导[J]. 环境污染治理技术与设备,2006(3):72-74. (ZHANG Peng, WU Zhichao, AO Huajun. Experimental deduction of the relationship between sludge viscosity, concentration and temperature. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2006 (3): 72-74. (in Chinese))
- [17] 毛颂平,朱海,王玲玲,等. 90°等宽明渠交汇水流污染物混合规律数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):64-69. (MAO Songping, ZHU Hai, WANG Lingling, et al. Numerical simulation on pollutant mixing law at a 90° open-channel confluence of equal width[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3):64-69. (in Chinese))
- [18] DENG R. Theory and technology of sewage treatment in oxidation ditch [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

(收稿日期:2023-06-20 编辑:骆超)