

氧化沟反应器流体力学特性的 数值模拟与实验研究

许丹宇¹ 张代钧^{1,2*} 艾海男¹ 陈 钊³ 杨胜发⁴

(1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400030; 2. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030;

3. 重庆大学光电工程系, 教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030;

4. 重庆交通大学河海系, 重庆 400074)

摘 要 采用CFD数值计算和体视PIV测试相结合的方法研究卡鲁塞尔氧化沟反应器流场特性。探索复杂边界条件下反应器流场的模拟方法, 采用体视PIV技术分别测量了反应器直道、弯道处三维全场流速; 研究不同位置处纵、横、垂三向的流动结构和沿程分布特点。结果表明, 模拟与实验结果较吻合; 纵、垂两向的流动分布是决定沟内水力特性的主要因素; 横、垂两向的流动是决定污泥沉积位置的主要因素; 外沟靠近曝气叶轮直道段的流速分布上大下小, 在低速区底部易发生污泥沉积; 外沟远离曝气叶轮直道段流速分布上小下大, 利于防止泥水分离; 弯道段受横比降和横向环流的影响, 内侧容易形成低速区或停滞区而发生污泥沉积。

关键词 氧化沟反应器 计算流体力学(CFD) 体视PIV技术 三维流场

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2007)12-0020-07

Numerical simulation and experimental study of hydrodynamic characteristic in the carrousel oxidation ditch reactor

Xu Danyu¹ Zhang Daijun^{1,2} Ai hainan¹ Chen Zhao³ Yang Shengfa⁴

1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Key Laboratory of Southwest-China Resources' Exploitation & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing 400030;

3. Key Laboratory for Opto-electronic Technology and System, Ministry of Education, Department of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030;

4. Department of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

Abstract The CFD and the stereoscopic PIV (particle image velocimetry) were combined to investigate hydrodynamic characteristics in the carrousel oxidation ditch reactor. The method to simulate in complex boundary conditions was explored. The stereoscopic PIV (particle image velocimetry) was applied to measure the 3-dimensional whole-flow-field velocities in the straight and flexural channel-sections of carrousel oxidation ditch reactor. Flow structures in different sections were analyzed and the distribution characters of longitudinal, lateral, vertical velocity along the course of the reactor were compared and discussed. The results show that the velocity simulation results agree well with the experimental results. Longitudinal and vertical flows are the determinative factors of hydraulic characteristic in the reactor. The position of sludge sediment primarily depends on lateral and vertical velocity. In the outboard section near the impeller, the flow rate in the surface is larger than that in the bottom, which would lead to sludge sediment in the low speed section. In the outboard section far away from the impeller, the flow rate in surface is smaller than that in the bottom, which would benefit to prevent sludge separate from wastewater. Because of effects of lateral slope and its circulation flow in the flexural section, low speed and/or stagnancy would occur easily in the inboard section with resulting to sludge sediment.

Key words oxidation ditch reactor; computational fluid dynamics; stereoscopic PIV technology; 3D flow field

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50778183)

收稿日期: 2007-04-09; **修订日期**: 2007-07-01

作者简介: 许丹宇(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 废水处理反应器多相流模拟与测试。

* 通讯联系人, E-mail: dzhang@cqu.edu.cn

反应器内部流动规律研究是废水处理工程设计与技术开发的关键问题。作为水处理工艺热点之一的氧化沟反应器, 其独特的水力特性直接关系着最

终的处理效率和出水水质。目前对该类反应器的设计特别是水力学参数的选取主要是依据相关设计手册和规范中的经验或半经验公式,其性能的优劣很难进行理论预测。由于以串联式完全混合反应器(CSTR)替代整个系统的方法不能反映出沟内混合液的推流特性^[1],Stamou 等^[2,3]、魏辉^[4]利用一维河流水质模型预测了稳态条件下氧化沟内流速变化和污染物降解情况,该方法只考虑水流的纵向离散作用,忽略了横向与垂直方向上湍流对污染物扩散的影响,模拟值与实际结果仍存在较大的差距。采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)进行分析,能使工程技术人员准确掌握和预测反应器内部的液流运动、混合传质等各方面信息,实现反应器的优化设计和运行。CFD 技术已在氧化沟反应器流场模拟方面得到了初步的应用,张宗才等^[5]模拟了装有转刷氧化沟内的水力学特性;罗麟等^[6]、尚应奇^[7]和李媛^[8]分别对一体化氧化沟和 Orbal 型氧化沟的三维流场进行模拟和分析。由于受测试手段所限,上述工作模拟结果仅与一维流场的实测结果进行过对比,对高维流动状况的分析缺乏足够有效的实测数据进行验证,大大降低了 CFD 模拟结果的说服力和可信度。PIV (particle image velocimetry) 技术由于采用的是光学检测方法,避免了机械探头对流场的干扰,并且可得到全场瞬时流动的同步信息,特别是体视 PIV (stereoscopic particle image velocimetry) 能够准确测量三维流场。国外现已开始将其应用于水射流^[9]、航天航空^[10]等领域的流速场测量。本文将采用 CFD 数值计算和体视 PIV 测试相结合的方法研究该类氧化沟三维流场特性,探索复杂边界条件下反应器流场的模拟与实验方法,为氧化沟的水力学优化提供依据。

1 数值模拟

卡鲁塞尔氧化沟本质上属于一个固液两相流反应器,固相与液相密度非常接近,故研究流态时将其简化为单相流场,采用 Fluent 进行计算。

1.1 数学模型

连续方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (U_i U_j)}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] \quad (2)$$

紊动动能 k 方程:

$$U_i \frac{\partial (k)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial X_i} \right) + G - \varepsilon \quad (3)$$

其中 G 为紊动动能的产生项,公式如下:

$$G = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (4)$$

$$v_t \text{ 为湍动粘度, } v_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$U_i \frac{\partial (\varepsilon)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

上述方程组成 k - ε 模型封闭方程组,模型中的常数 C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 的取值为: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 边界条件

(1) 计算区域的网格划分:为了提高计算机的计算速度和效率,针对该氧化沟计算区域的特点,采用不同的单元体分别对直道段(六面体)、弯道段(楔形)和曝气叶轮段(四面体与楔形混合网格)进行划分,进口、出口和叶轮附近适当加密网格以提高计算的精度,不同类型网格的直接接触面上采用网格间界面(interface)进行设置。

(2) 进水口:由质量守恒定律和无旋假设,采用流速均匀分布的假定,压力、紊动动能 k 及其耗散率 ε 在进水口截面上也假设为均匀分布。

(3) 自由水面:上部开口表面为自由面,不考虑水面波动,采用刚盖假定,压力为大气压力值。水面垂向流速为零,其他变量的法向梯度为零。

(4) 底面和固壁面:垂向壁面的水平流速的法向梯度为零;底部壁面的垂向流速的法向梯度为零,使用标准的壁面函数,满足壁面质量通量为零的条件。

(5) 出水口:采用溢流假定,出口压力为一个大气压,近似设为自由出流的形式。

(6) 曝气叶轮:在叶片半径范围内的流体区域建立独立的旋转参考系并定义其转速,叶轮与该区域内流体的相对速度为零,此外的其他流体区域设为静止坐标系。

2 仪器设备及试验方法

氧化沟液流控制系统由储液槽、水泵、流量计、曝气叶轮(倒伞型)和氧化沟反应器模型组成,如图 1 所示。该反应器由有机玻璃加工而成,尺寸($L \times W \times H$)为:1.8 m $\times$ 0.6 m $\times$ 0.2 m,曝气叶轮由无级

调速电机带动。因实际氧化沟中 Re 数很大(约为 10^5), 水流为完全紊流状态, 处在自动模型区^[11], 故在模型试验中, 考虑佛汝德准则即可保证模型流和原型流相似, 实验时进水流量是 0.27 L/min 。采用 TSI 公司的 PIV 系统对模型直道和弯道段上、中、下 3 个不同深度处的流场进行测试, 测试段分区见图 1。该系统由计算机、激光器、CCD 相机、透镜组和同步控制器组成, 如图 2 所示。测量时在流场中布撒直径 $7.5 \sim 15 \mu\text{m}$ 、比重 0.999 的空心玻璃珠作为示踪粒子, 激光器功率 175 mW , 采用两部相机两光轴的布局形式, 模仿人眼双目测距原理, 同时采集流场图像(俯拍方式), 使用 Insight6.0(互相关法)对流场图像进行处理, 计算得到三维速度大小。

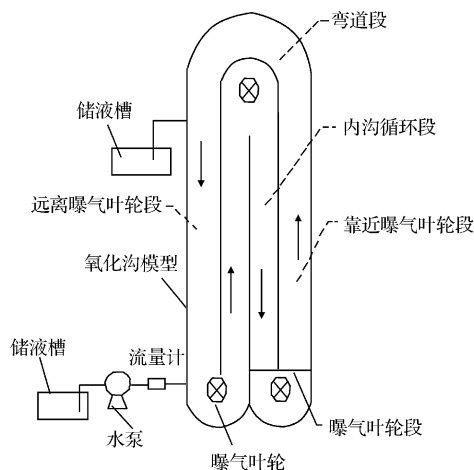


图1 氧化沟液流控制系统示意图

Fig.1 Flow control system of oxidation ditch

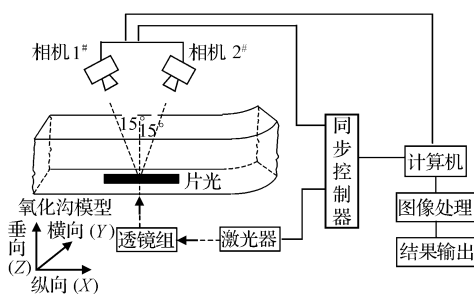


图2 三维PIV系统结构图

Fig.2 Experimental configuration of stereoscopic PIV measurement

3 结果分析

图3~图8为该反应器不同位置处水流三维流速分布的模拟值与实验值对照图, 其中图3~图5为直道段同一横断面上各点流速平均值沿主流方向

(纵向 X) 的分布结果(沿横向分布规律另文阐述); 图6~图8为弯道段(入口、弯顶、出口)各点流速沿径向的分布结果。可以看出模拟结果与实验值吻合较好, 空间分布和变化趋势上一致, 但仍有一定的偏差, 主要由 PIV 测试误差、氧化沟模型系统误差以及数学模型的计算误差造成。反应器不同位置处失真原因各异:

(1)直道外沟 靠近曝气叶轮段(图3), 因叶轮扰动, 水面形成波纹, 使采集到粒子图像产生形变, 一定程度上影响了测量的精度; 远离曝气叶轮段(图4), 由于水流刚经过弯道后形成三维环流, 受其作用, 粒子在垂直片光源的方向上翻转扰动较大, 相邻两幅图像相关性的降低影响了 PIV 处理软件计算的准确。

(2)直道内沟 激光需透过外沟水流射入测试区, 光强的减弱影响图像的质量, 降低了相邻两幅图像的相关性和最终处理结果的准确性; 此外, 该段前后两端均受叶轮扰动, 水面起伏较大, 不仅使采集到的粒子图像产生形变, 而且干扰了视差角的判定和计算, 对准确测定垂向速度造成影响。因此, 该段中垂向速度(图5(c))模拟与实验结果偏差较大。

(3)弯道处 采用标准的 $k-\varepsilon$ 方程进行流场模拟, 该模型对于 Reynolds 应力的各个分量, 假定粘度系数是相同的, 即应该是各向异性的张量, 耗散方程未能较好地模拟出旋转或弯曲流线的影响, 特别是不能对弯道外侧(凹边)二次环流进行有效的模拟, 这是造成该段垂向流速(图6(c)、7(c)、8(c))失真的主要原因; 另一方面, 有机玻璃热压后晶体结构改变导致弯曲处透光性分布不均, 使测试区内激光片光的强度与厚度存在差异, 图像质量大受影响; 受弯道螺旋流的影响, 粒子的上翻扰动也对结果造成了一定的偏差。

除上述因素外, 实验测试时壁面效应会使图像边缘出现较多曝光过度的空白区域、搅拌叶轮的不稳定引起反应器内真实流场的非定常等因素也会造成最终模拟与实测结果的差异。

4 讨论

4.1 直道段

4.1.1 外沟靠近曝气叶轮段

在曝气叶轮(倒伞型)的带动下水流被加速, 上层的流动速度总体大于中层和下层。纵向流速分布, 如图3(a)所示, 上层的流速逐渐减小; 中层液体

同时受上、下两层的剪切力的作用,一方面与上层液体进行动量和能量的交换,流速逐渐增加,另一方面与底部进行流速的均布;下层液体此方向上的流速变化不是很大,基本保持恒速。横向流速分布方面,如图 3(b)所示,上下两层流动方向互异,其中上部流速的起伏变化要比底层大得多,而中层液体受到它们及池壁折射的影响,沿程呈“蛇”型分布。垂向流速分布,如图 3(c)所示,上层沿程逐渐减低,中层平缓,下层逐渐增高,三层流速的大小总体趋于一致。

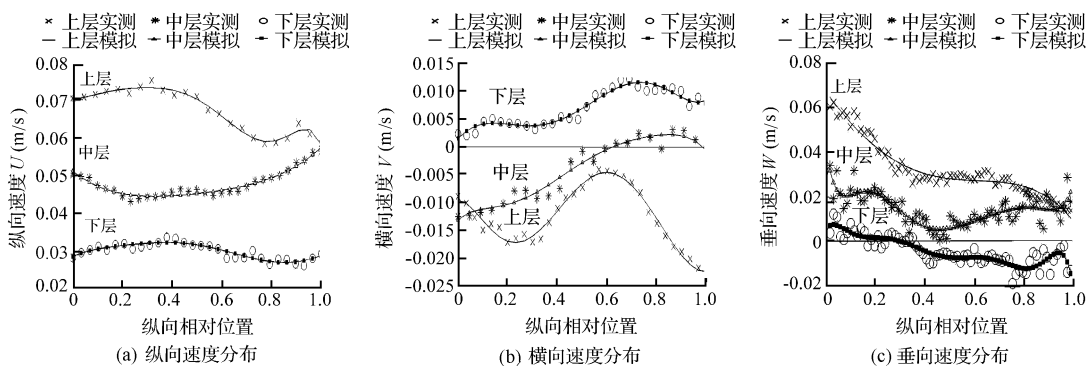


图 3 外侧靠近叶轮段流场沿程分布图

Fig. 3 Distribution graph of flow rate in outboard section near impeller

4.1.2 外沟远离曝气叶轮段

由于受粘滞力、池底和壁面摩擦等阻力的作用,水流在该段的流动比较稳定。同一横断面上的水流在不同深度流速大小趋于相同,湍流在横、纵、垂 3 方向的紊动作用明显减弱。邓荣森等^[12]、孙卫东^[15]、傅中见^[16]等认为:该段水流内、外壁之间的流速梯度越来越小,但受直段长度的限制,流速仍难以得到完全均衡。测试结果表明,纵向速度在各层沿程起伏变化都不大,见图 4(a),其中上层流速最低,中层次之,底层流速经弯道流场的重整作用略高于其他两层,这与前述靠近曝气叶轮直道段处的流场分布相反;上下两层水流横向流速方向互异,中部沿程仍为“蛇”型分布,如图 4(b)所示;垂向流速在各层的分布比较均匀,如图 4(c)所示。虽然此段的整体流速较低,且个别地方的垂向流速竖直向下,但由于底层水体具有较大的动能,横、垂方向上的对流作用依然很强,使污泥与底面发生碰撞后仍有足够能量返回液流中并随之运动,故污泥不易沉积,该段水力条件有利于阻止泥水分离现象的发生。

4.1.3 内沟循环段

内沟循环段水体因前后两端同时受曝气叶轮的

致。综上所述,这一段内中上层水体在横、纵、垂 3 个方向上的流速及其变化与底层相比较,其分布趋势与在此区段内邓荣森等^[12]、俞天明^[13]的中试试验以及孙伟民^[14]的生产性试验结果相一致,说明该段上部有利于污染物的扩散与混合;同时该段底部在流速小、垂向流速竖直向下的地方会造成污泥的沉积,特别是横向速度的影响使污泥在内侧区较其他地方更容易出现淤积。

影响,集中了较高的能量,总体的流速大小也要高于氧化沟其他位置(除曝气叶轮处),水流翻滚起伏,并且向前推进的过程中伴有涡旋出现。不同水深处同一断面上的纵向流速沿主流方向递增,如图 5(a)所示,其中上层流速增加得最快,下层最慢,说明在该段表层与底部存在较大的流速梯度;横向流动方面,整段水体沿横向周期性变化,全部呈现“蛇”型分布,中上部高能量的液体紊动剧烈,因此速度大小及方向的变化频率都比较高,反之,下层液体相对较低,如图 5(b)所示;受曝气叶轮搅动的影响,各层液体垂向流速分布趋势均为两端速度大、中间速度小,如图 5(c)所示,流场梯度变化使活性污泥、溶解氧与污水组分之间充分混合,有利于提高污泥的沉降性能以及促进气、液、固三相的传质与反应。

4.2 弯道段

4.2.1 入口处

直道水流在入口处与弯道外侧(凹边)壁发生冲撞,受横向压差的作用,流速在内壁侧逐渐增加,外壁侧明显减小。入口表层水流的纵向流速较其他两层要高,说明上游直线段的水流在此处仍未完成垂向均布,如图 6(a)所示;不同深度水流的横向流

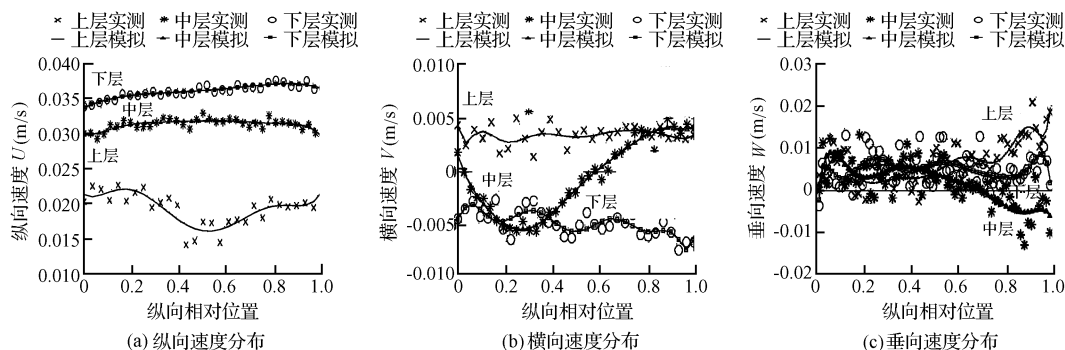


图4 外侧远离叶轮流场沿程分布图

Fig. 4 Distribution of flow rate in outboard section far from impeller

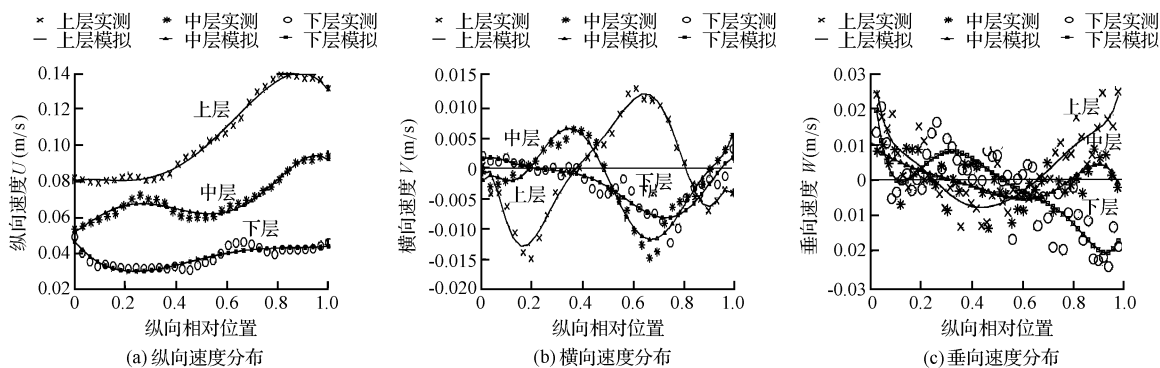


图5 内侧段流场沿程分布图

Fig. 5 Distribution of flow rate in inboard section

速分布均沿径向衰减,变化趋势为内侧大外侧小,如图6(b)所示,在接近外侧(凹边)壁处,各层流速都降到最小,其中底层流速的速度方向发生改变,开始趋向于内侧运动,直道水流的结构也由此开始发生改变;垂向速度方面,受横比降水压的作用,各层的速度沿径向先增大后减小。由于横比降水压与水深成正比,并且在同一平面上越靠外侧压力越大,因此对不同深度与位置产生的影响各异。其中上层的流速下降得最慢,下层最快,中下部水流速度降至最小后方向发生改变,如图6(c)所示,由于接近外侧的水流受壁面摩擦的作用,水流方向随后又发生二次改变,通常这一位置处并不易出现污泥的沉积。相反,由于弯道内壁附近垂向速度过小,加之底层的横向速度是由外侧(凹边)趋于内侧(凸边)流动,使得弯道入口的内侧成为污泥沉积的多发区。说明横向流速决定了污泥沉积可能发生位置,垂向流速决定污泥的沉降性能,二者对整个沟中污泥发生沉积有着决定性的影响。

4.2.2 弯顶处

受向心力的作用,弯顶处同一深度水流的纵向(切向)速度随半径的加大而增长,但表层水流和底层水流的向心加速度各不相同,表层的加速度要大于底层,导致其纵向流速和梯度也相应高于中下层,如图7(a)所示,说明水流调整到弯顶处时表层流体内部仍然蓄积着相对较高的能量;该处横向流速的分布为:上层水流由内侧(凸边)向外侧(凹边)流动,下层与之相反,这一结果证明了弯道横向环流的存在,如图7(b)所示,它是造成弯道外侧被冲刷内侧污泥沉积的主要因素^[12,17,18];各层垂向速度在弯顶处总体趋向一致,速度沿径向逐渐减小并发生方向的改变,表现为在内侧(凸边)速度方向朝上,外侧(凹边)朝下,如图7(c)所示,不仅表明了弯道环流对弯顶液流垂向速度分布的影响,同时也说明此处横比降引起的压力要高于入口处,因此使包括表层在内的所有流体的垂向速度都在近外侧(凹边)处发生方向和大小的改变。

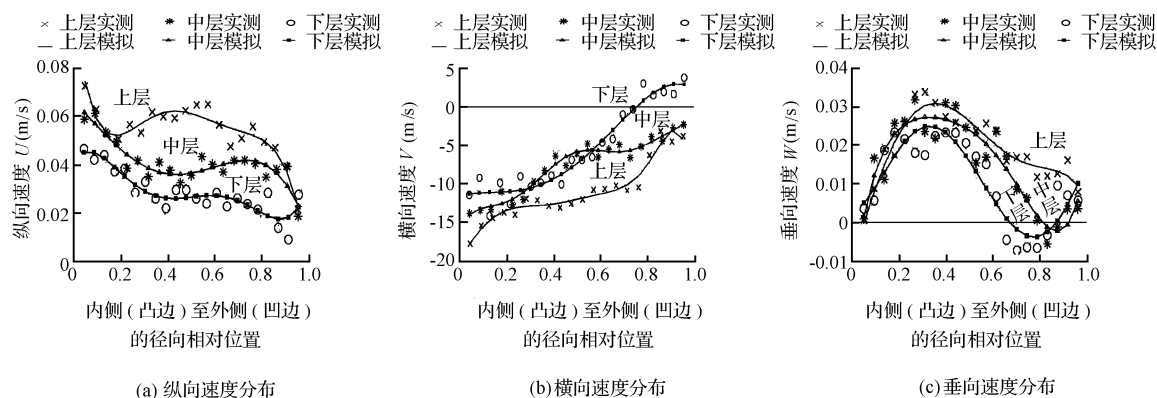


图 6 入口弯道段流场沿程分布图

Fig. 6 Distribution of flow rate in inlet of flexual section

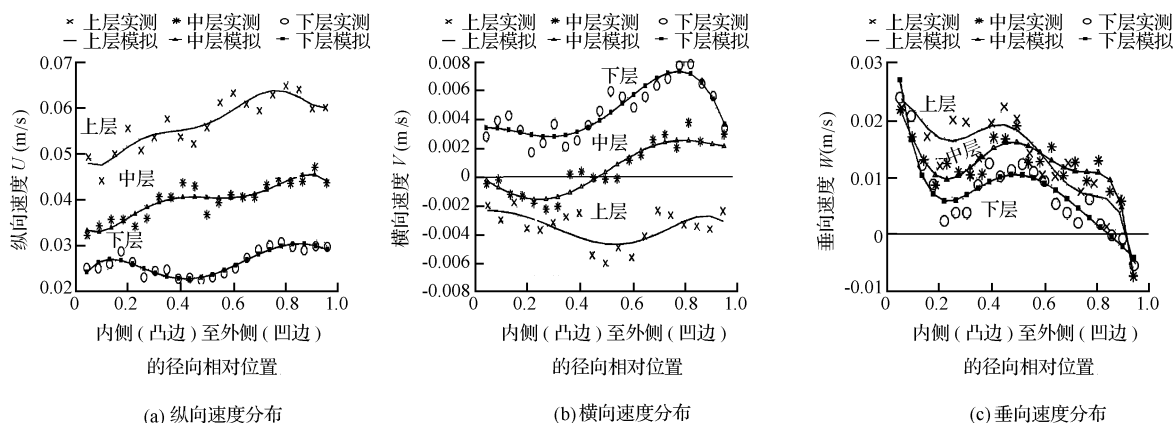


图 7 弯道拐弯段流场沿程分布图

Fig. 7 Distribution of flow rate in crook of flexual section

4.2.3 出口处

水流流经弯道后,流速在横、纵、垂 3 个方向全部发生改变,到出口处时弯道流场的重分布已基本完成。在纵向,如图 8(a)所示,由于出口水流与弯道外壁(凹边)发生强烈的冲刷,使该处的流速骤降。除此以外的其他位置受离心力和惯性力的同时作用,流速依然沿径向上升,说明出弯后的液流在一定距离内最大流速仍然靠近外侧(凹边),层层之间流速大小的差距越来越小,并且下层流速要高于中层和表层;横向速度方面,如图 8(b)所示,各层流动都趋向弯道外侧(凹边),并在近壁面处被折射,使得方向发生改变。出口断面垂向流速为上下脉动分布,如图 8(c)所示,该实验结果既说明了弯道出口各层垂向均布作用依然很强,又反映了此处已不再受横比降压差的影响^[19,20],因此沿径向没有形成有规律分布趋势。

5 结 论

(1)采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对卡鲁塞尔氧化沟反应器流场进行模拟,并通过体视 PIV (stereoscopic PIV) 技术对三维流场的实测,验证了高维方向上的模拟结果,这是传统实验手段无法实现的。虽然该模型不能有效地模拟出强弯条件下产生的二次环流,使计算与实验结果之间存在着一定的偏差,但模拟结果能很好地抓住了实测值分布和变化的总体特征,表明将该模型用于预测和优化实际卡鲁塞尔氧化沟等复杂反应器的流场是可行的,具有工程应用价值。

(2)实验条件下,除曝气叶轮段外,氧化沟不同位置处的横向流速远小于其他两个方向,纵、垂两向的流动分布是决定沟内水力特性的主要因素。横向流速决定了可能发生污泥沉积的位置,垂向流速决

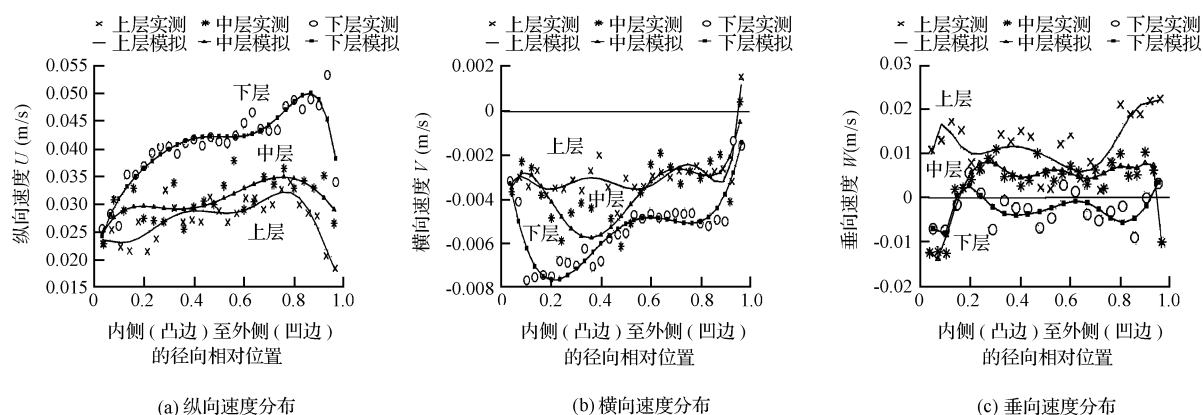


图8 弯道出口处流场沿程分布图

Fig. 8 Distribution of flow rate in outlet of flexural section

定发生污泥沉降的可能性,污泥沉积是横、垂两向流速与该处水体动能共同作用下的结果。

(3) 外沟靠近曝气叶轮处直线段的流速上部大、底部小,由于底层垂向流速较低,应采取措施防止污泥沉积;外沟远离曝气叶轮处直线段受弯道流速重分布的影响,上部流速小、底部流速大。虽然水流速度整体较小,但此段水力条件有利于阻止泥水分离;弯道水流沿程分布主要是受离心力的影响,入口处产生横比降压差,该差值沿水流方向逐渐增加至弯道顶点处后,开始逐渐减小,弯道出口处两岸水面差基本为零。横向环流的存在使内侧更容易形成低速区或停滞区而发生污泥沉积。

参考文献

- [1] Clercq B. D., Coen F., Vanderhaegen B., *et al.* Calibrating simple models for mixing and flow propagation in wastewater treatment plants. *Wat. Sci. Tech.*, **1999**, 39 (4): 61 ~ 69
- [2] Stamou I. Modeling oxidation ditches using the IAWPRC activated sludge model with hydrodynamic effects. *Wat. Sci. Tech.*, **1994**, 30 (2): 185 ~ 192
- [3] Stamou I. Modeling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-dispersion equation and ASM1 process description. *Wat. Sci. Tech.*, **1997**, 36 (5): 269 ~ 276
- [4] 魏辉. 氧化沟数学模型初步研究[硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, **2002**
- [5] 张宗才, 张新申, 张铭让. 氧化沟水力学分析及流场计算. *中国皮革*, **2004**, 33 (11): 22 ~ 25
- [6] 罗麟, 李伟民, 邓荣森, 等. 一体化氧化沟的三维流场模拟与分析. *中国给水排水*, **2003**, 19 (12): 15 ~ 18
- [7] 尚应奇. 深沟转刷型一体化氧化沟水力特性试验研究[硕士学位论文]. 重庆: 西南交通大学, **2004**
- [8] 李媛. AIRE- O_2 充氧机性能浅析与 Orbal 氧化沟流态测试及三维模拟[硕士学位论文]. 重庆大学, **2005**
- [9] Calcgin Guido, Di Felice F., Few M., *et al.* A stereo-PIV investigation of a propellers wake behind a ship model in a large free-surface tunnel. *Marine Technology Society Journal*, **2005**, 112 (39): 94 ~ 102
- [10] Kahler C. J. Investigation of the spatio-temporal flow structure in the buffer region of a turbulent boundary layer by means of multiplane stereo PIV. *Experiments in Fluids*, **2004**, 36 (1): 114 ~ 130
- [11] 景思睿, 等编著. 流体力学. 西安交通大学出版社, **2001**.
- [12] 邓荣森, 张贤彬, 潘江浚, 等. 一体化氧化沟混合液循环流动情况试验研究. *给水排水*, **1998**, 24 (2): 12 ~ 19
- [13] 俞天明. 合建式一体化氧化沟水力特性和节能特点研究[硕士学位论文]. 重庆大学, **2001**
- [14] 孙伟民. 一体化氧化沟的生产性试验研究[硕士学位论文]. 西安建筑科技大学, **2004**
- [15] 孙卫东. 一体化氧化沟流动状况与固液分离效果研究[硕士学位论文]. 哈尔滨工业大学, **2000**
- [16] 傅中见. 氧化沟水力性能试验研究[硕士学位论文]. 上海: 同济大学, **2000**
- [17] 董耀华. 弯道水流的基本特性及数值模拟. *长江科学院院报*, **1996**, 13 (1): 25 ~ 29
- [18] 孙东坡, 朱岐武, 张耀先, 等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究. *水科学进展*, **2006**, 17 (1): 61 ~ 66
- [19] 张耀先, 焦爱萍. 弯曲型河道挟沙水流运动规律研究进展. *泥沙研究*, **2002**, (2): 53 ~ 58
- [20] 李治勤, 田淳, 高恩恩. 连续急流弯道的数值模拟. *太原理工大学学报*, **1999**, 30 (6): 629 ~ 632