

卡鲁塞尔氧化沟反应器两相流 PIV 图像处理研究及实验分析

许丹宇¹ 张代钧¹ 陈 钊² 郭永彩² 戴 巍¹

(1. 重庆大学环境科学系, 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;

2. 重庆大学光电工程学院, 教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030)

摘 要 在单相数字粒子图像测速度(PIV)技术的基础上,研究了PIV两相流动的测试及图像处理方法。利用数学形态学的原理以及互相关法,对两相粒子图像进行标定、识别、区分和流场分析,编辑了相应的软件。并采用此技术对卡鲁塞尔氧化沟模型直道及弯道段二维液固两相流速进行测量,克服了传统点测量方法无法获取全场流动同步信息的缺陷,较好地反映了不同位置处固液流动分布的基本特性。结果表明,沟内径向流速远小于轴向,流速大小相差约一个数量级;同一断面上轴向流动分布是决定水力特性的主要因素;径向流速和水体动能是决定污泥沉积位置的主要因数,固相总体流速小于液相。

关键词 PIV 氧化沟 液-固两相流 数学形态学

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2007)08-0078-08

Research on the particle image velocimetry for two-phase flow and experiment analysis in Carrousel oxidation ditch reactor

Xu Danyu¹ Zhang Daijun¹ Chen Zhao² Guo Yongcai² Dai Wei¹

(1. Key Laboratory for Resource Exploitation and Environmental Disaster Control Engineering in Southwest China,
Ministry of Education, Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Key Laboratory for Opto-electronic Technology and System of Ministry of Education, College of Opto-Electronic Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract On the basis of the single phase PIV investigation, liquid-solid two-phase flow field particle image velocimetry technique was studied. The two-phase particle image was demarcated, identified, distinguished and the flow field was analyzed by using mathematical morphology theories and cross-correlation method. The software was designed, then it was applied to investigate in 2-dimensional liquid-solid two-phase flow velocity of straight channel and flexural channel of Carrousel oxidation ditch reactor. The limitations of traditional measurement only to get velocities at single-point and not to acquire the synchronic information of whole-flow-field were overcome, the preliminary results have fairly well reflected basic characteristics of the liquid-solid movement in different positions. The result show that the radial velocity is less than the axial about decuple, the axial flows are the determinative factors of hydraulic characteristic at the same face. The positions of sludge sediment are primarily depended on radial velocity and kinetic energy. The flow rate of solid is generally smaller than that of liquid.

Key words PIV; oxidation ditch; liquid-solid two-phase flow; mathematical morphology

污水处理工艺中的氧化沟技术重要特征之一在于其独特的混合性能,因此对氧化沟流速及活性污泥絮体分布情况进行分析研究,探明沟内水力混合条件,保证沟内良好混合状态在理论和工程实践上都具有十分重要的意义。但是液-固两相流的流动特性(流型、两相界面作用力、相对速度、物性变化等)与数学描述远比单相流复杂。正因如此,多年

来液-固流动系统的设计主要基于经验或半经验数据进行的,所以有必要开发能够获得两相流动的定性和定量数据的测量技术,为理论模型的建立及数值模拟技术的检验提供实验参考。

收稿日期:2006-10-12; 修订日期:2007-04-11

作者简介:许丹宇(1979~),男,博士研究生,主要从事环境流体力学的研究。E-mail:danyu079@yahoo.com.cn

在测量技术上,建立在传感器等硬件基础上的单相流仪表(如旋桨流量计、差压式流量计、涡轮流量计、靶式流量计等)进行两相流的测试,至今难以获得令人满意的结果。断层成像技术(电容断层成像技术、X 或 γ 射线断层成像)虽是无干扰测量,但空间分辨率偏低,再现算法复杂,测量所需时间较长。激光多普勒测速仪(LDV)和相位多普勒风速仪(PDA)都是单点测速技术,常会遇到对颗粒相信息和流动相信息无法区分的难题,且不能同时提供每一相的瞬时的、全场的流速数据,很难将测得的数据和控制相间动力学特性的物理机理联系起来^[1]。由于测试手段所限,目前国内主要对氧化沟主流方向上一维流场的分布进行研究^[2,3]。在实际运行的氧化沟中,主流方向以外的流速对污泥的空间分布和沉降性能仍有很大的影响。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速的分布,特别是两相流的粒子图像测速(PIV)技术不仅能提供两相二维流动的定量信息,还能给出粒子粒径与浓度的分布,为研究两相流动特性提供了新的有力工具。但两相 PIV 技术比单相困难得多,不但要分辨代表同一相的颗粒在已知时间间隔里移动位移,并且要将代表不同相的颗粒区分开来,故该技术尚处于起步阶段^[4]。目前只有少数学者通过采用荧光标记^[5,6]、粒径分辨^[7,8]、亮度分辨^[9]、相间动力特性分辨^[10]等方法在气-液、液-固等低速简单流动中进行可行性研究,因此探索简单实用的两相流 PIV 粒子图像处理方法并将其应用于氧化沟水力学特性的研究中,不仅能够掌握沟内流体的运动结构和流动机理提供重要信息,而且可以清楚地反映发生污泥沉积的水力条件及可能位置。

1 PIV 原理

PIV 技术的基本原理就是向流场撒播示踪粒子,以粒子速度代表其所在流场内相应位置处流体的运动速度。将强光(片形光束)照射到流场中的测试平面,用摄像机记录下两次或多次曝光的粒子位置,对图像进行分析后得到各点粒子的位移,由位移和曝光时间的间隔计算出流场中各点的流速。在进行两相流速测量时,分别采用不同粒径的示踪剂代表液-固两相,根据固相与液相粒子颗粒大小之间的差异来进行相分离。首先对原始 PIV 图像进行二值化处理,使固、液两相的示踪粒子从背景中分离;

然后计算粒径(或面积),选取适当的阈值区分不同相的粒子;最后对不同相的粒子灰度图像进行 PIV 相关分析。

2 两相流 PIV 测速中粒子图像处理

2.1 算法的实现

2.1.1 图像分割

图像分割是将两相流原始图像中的像素按照灰度值不同分割成前景像素(粒子)和背景像素(流体)。最基本的思路是取阈值,将灰度值大于某个阈值的像素划分为前景像素,小于该阈值的像素划分为背景像素。阈值 T 的选取起关键作用,决定了分离的准确性,直接影响了最终的测量结果。由于实验中得到的大多数图像对比度较大,文中应用自动阈值算法:

- ①计算直方图,统计出不同灰度所对应的像素个数;
- ②计算以像素个数为权值的加权平均灰度 g_1 ;
- ③以 g_1 为界,计算 $[0, g_1]$ 和 $[g_1, 255]$ 范围内的加权平均灰度 g_2 和 g_3 ;
- ④取 $(g_2 + g_3)/2$ 为最终阈值。

2.1.2 对象的标记

即将每一个连通的像素区域做上标记,一个连通区域记为一个对象,对每个对象依次进行记录,返回值为经过标记后的标记矩阵及其元素中的最大值。按照数学形态学连通性的定义^[11],可分为 4 连通区域标记和 8 连通区域标记,对于 PIV 获得的流动图像,因粒子浓度较大,若采用 8 连通方式进行标记可能会把某些靠的较近的两个粒子标记为一个粒子,分析时会带来较多的伪矢量,因此采用 4 连通方式进行标记。

2.1.3 粒子的标定

对二值化处理后的模板图进行对象标记,得到对象个数。采用面积提取法得出图中灰度值为 1 的像素总个数,通过平均粒径的处理方法求出模板图中每个对象(即模板颗粒)平均所占的像素个数 M 。其定义方法如下:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N} \rightarrow M = \frac{A_1}{n}$$

式中: $\bar{d}$ —颗粒的平均粒径; d_i —单个颗粒的直径; N —所测截面采集的粒子数; M —对象所占的平均像素; A_1 —对象所占的总像素; n —总对象数。

2.1.4 粒子识别与区分

对经过图像分割后的两相流原始图像,以 T 为阈值进行对象移除。即把所占像素个数小于 T 的对象去掉,得出原始图像中固相示踪粒子的图像。反之,得到液相固相示踪粒子的图像。

2.2 算法验证

程序采用 matlab7.0 作为开发平台进行编辑,对由美国明尼苏达大学复杂流动实验室提供的一幅两相流粒子图像进行了处理,并和他们的处理结果进行了对比。图1所示为原始的两相粒子图像,图2和图3所示分别为明尼苏达大学复杂流动实验室和论文处理的结果。可见论文所采用的方法达到了比较好的识别和区分,相对于明尼苏达大学复杂流动实验室的区分结果保留了更多的固相粒子的信息。

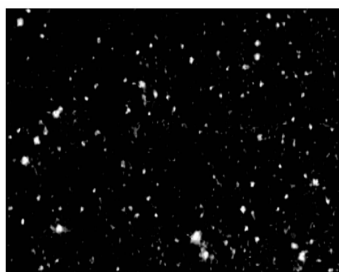


图1 原始的两相粒子图像

Fig.1 Original two-phase particle image



图2 明尼苏达大学的区分颗粒相结果

Fig.2 Specification result of Minnesota university

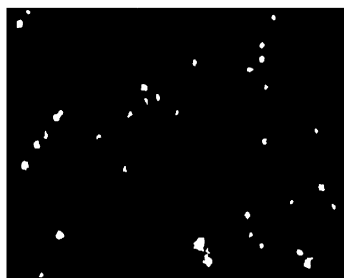


图3 论文的区分结果

Fig.3 Specification result of this paper

3 实验研究

3.1 实验装置与系统

如图4所示为氧化沟混合液控制系统框图,由储液槽、水泵、曝气叶轮、氧化沟反应器模型组成。曝气叶轮与氧化沟反应器模型按照流体力学相似准则分别由尼龙和有机玻璃加工而成,反应器的尺寸为长 $1.4\text{ m} \times 0.65\text{ m} \times 0.23\text{ m}$,曝气叶轮由无极调速电机控制,功率 200 W ,转速 $0 \sim 3000\text{ r/s}$ 。PIV系统如图5所示。半导体激光器的波长为 510 nm ,最大输出功率 50 mW ,光束直径 1 mm 。圆柱透镜产生片光源,透镜直径 8 mm ,片光厚度不超过 2 mm 。采用美国 Redlake 高速摄像机 HG-100K,帧率最高可到 1000 帧/s 。

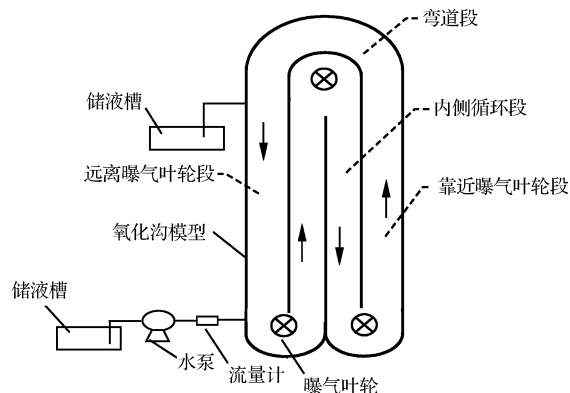


图4 氧化沟液流控制系统示意图

Fig.4 Flow control system of oxidation ditch

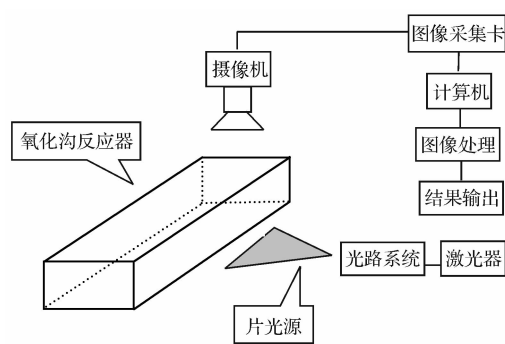


图5 PIV系统示意图

Fig.5 Sketch of PIV experiment

3.2 实验方法

该实验分别对氧化沟模型弯道及直道段不同位置处的流场进行测试,测试段分区见图4。实验中固相示踪粒子采用直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 聚苯乙烯颗粒,比

重为 $1.001 \sim 1.003 \text{ g/cm}^3$, 氧化沟混合液的比重一般为 $1.002 \sim 1.003 \text{ g/cm}^3$, 且活性污泥颗粒粒径在 0.1 mm 左右, 二者体积、密度十分接近, 可用于模拟活性污泥实验^[12]。液相示踪粒子为球形空心玻璃珠, 直径为 $30 \mu\text{m}$, 比重为 0.999 。模型的流量为

0.22 L/min , 实验时在转刷附近布撒示踪粒子, 将激光片光源平行底面照射在水槽中部, 摄像机采取俯拍方式对两相流场进行图像采集。具体过程见图 6。

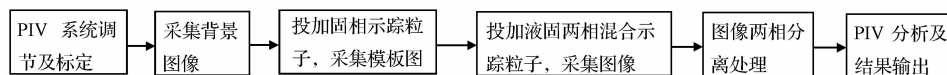


图 6 实验流程

Fig.6 Flow chart of experiment

4 结果与讨论

按照标定图, 确定图像与实物比例系数, 把像素的移动值转化为实际流速, 并对矢量图内轴向上同一位置处各点的轴向速度 U 、径向速度 V 流速取平均, 得到流速的沿程分布。以实验中外侧远离叶轮直道段为例, 图 7~图 9 是两相粒子图的分离结果, 图 10 和图 11 为经过 PIV 软件处理后所得的矢量图。

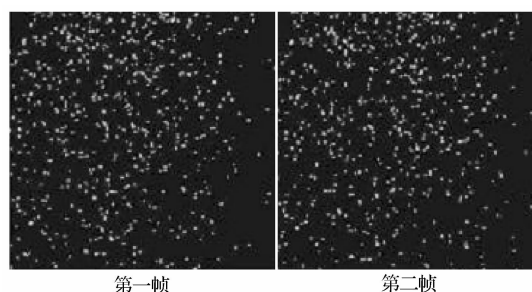


图 9 分离后的固相原始粒子图像

Fig.9 Solid original particle image after separation

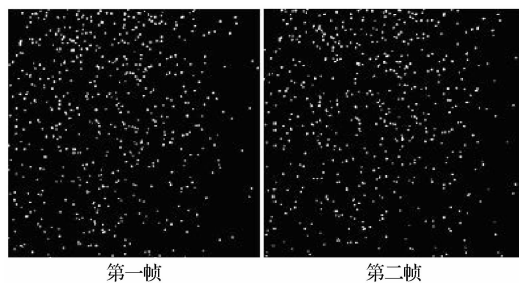


图 7 两相流原始粒子图像

Fig.7 Two-phase flow original particle image

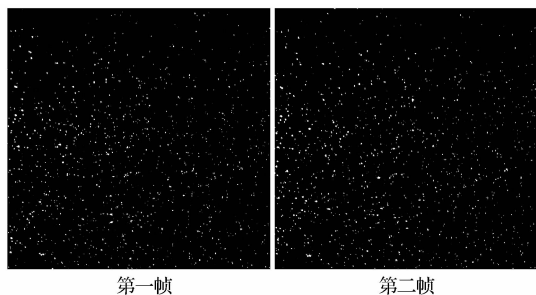


图 8 分离后的液相原始粒子图像

Fig.8 Liquid original particle image after separation

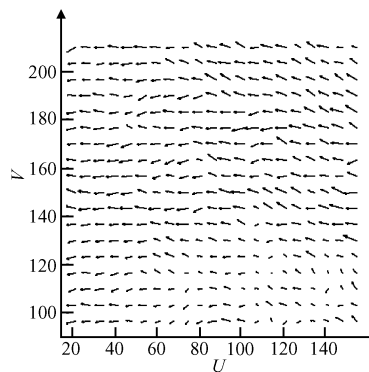


图 10 液相速度矢量图

Fig.10 Liquid velocity vectors

4.1 直道段

在曝气叶轮(倒伞型)的带动下外沟靠近叶轮直道段中的水流被加速, 水体动能大大增加, 上下紊动剧烈, 正是通过湍流垂向的作用使得上部高速液体向中部和底部进行均布。受曝气叶轮转动的影响, 混合液将机械能转化为动能, 轴向速度迅速增加并在向前推进的过程中逐渐进行流速均布, 动能的

降低使得固液两相之间的流速大小出现了差异,特别是在流速较低的地方,该差异变得更加明显,如图12(a)所示。径向流速在此段起伏变化较大,受池壁折射的影响,方向发生改变,沿程呈“蛇”型分布,并在该段末端动能较低的地方固液两相出现分离,如图12(b)所示。在此区段内流速总的分布趋势与邓荣森等^[13]、俞天明^[14]的中试试验以及孙伟民^[15]的生产性试验结果相一致,说明该段前端高能水流的紊动有利于污染物的扩散与混合;同时也表明在末端流速小的地方会造成污泥的沉积,特别是径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。

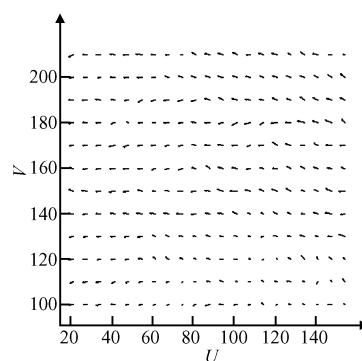


图11 固相速度矢量图

Fig. 11 Solid velocity vectors

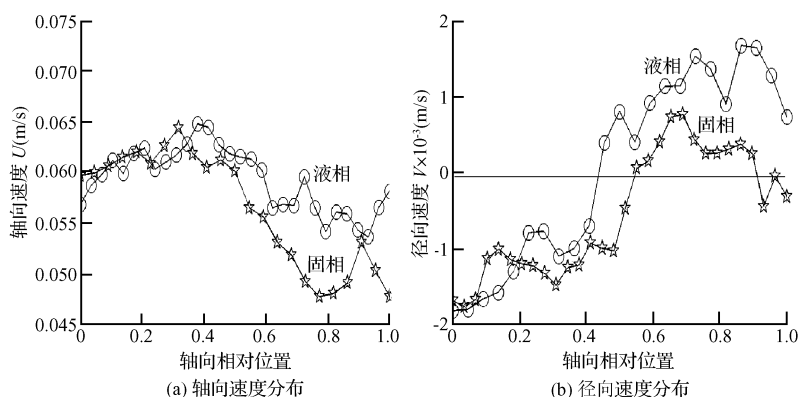


图12 外沟靠近叶轮段流场沿程分布图

Fig. 12 Distribution graph of flow rate in the outboard section near the Impeller

由于受粘滞力、池底和壁面摩擦等阻力的作用,水流在外沟远离叶轮段的流动比较稳定。同一径向断面上的水流在不同深度流速大小趋于相同,湍流的紊动作用明显减弱。邓荣森等^[13]、孙卫东^[16]、傅中见^[17]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,轴向速度沿程起伏变化不大,如图13(a)所示,径向流速在该段前、后两端的方向互异,沿轴向仍呈“蛇”型分布,如图13(b)所示;虽然此段的整体流速比较低,但固液两相的流速差异并不十分明显,说明此段对流作用依然很强,此水力条件有利于阻止泥水分离现象的发生。

内沟循环段的水体因前后两端同时受曝气叶轮的影响,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,水流翻滚起伏,并在向前推进的过程中伴有涡旋出现。同一断面上的轴向流速沿程递增,如图14(a)所示,径向流动沿轴向周期性变化,如图14(b)所示。受曝气叶轮搅动,该段高能混合液中两相流速的分布变化趋势较为一致,水流湍动使固相粒子翻滚起伏剧烈,个别位置处出现了固相流速等于甚至大于液相流速的情况,说明该区域活性污泥、溶解氧与污水组分之间混合比较充分,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。

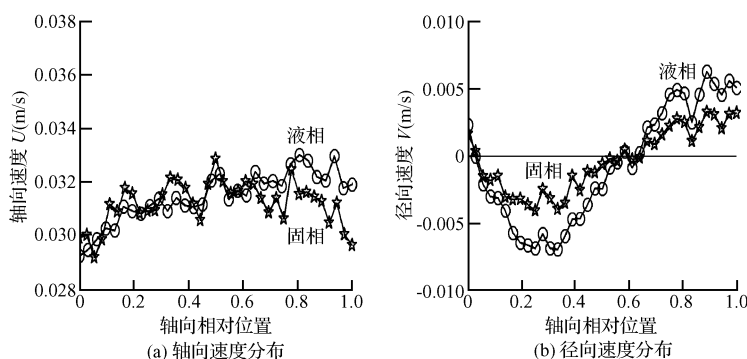


图 13 外沟远离叶轮段流场沿程分布图

Fig. 13 Distribution of flow rate in the outboard section far from the Impeller

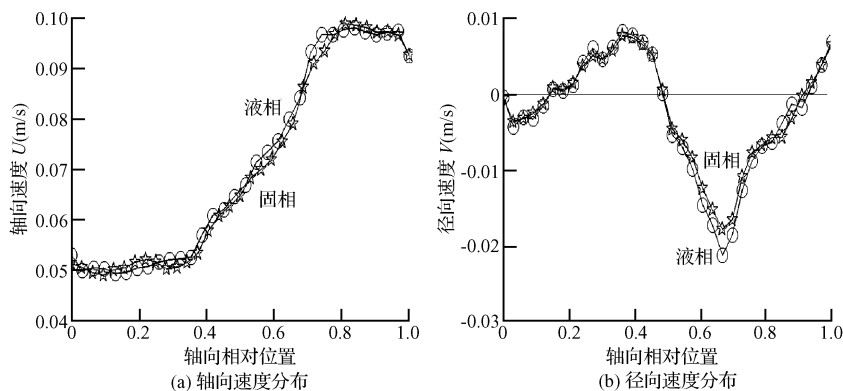


图 14 内沟段流场沿程分布图

Fig. 14 Distribution of flow rate in the inboard section

4.2 弯道段

水流进入弯道后受离心力和水面横比降的作用,导致了弯道断面横向环流的出现,与纵向水流一起构成了弯道水流所特有的螺旋流^[18]。鉴于弯道段结构及流动的特殊性,仅对实验中入口处、弯顶处和出口处流场沿径向的结果进行分析。

在入口处直道水流与弯道外侧(凹边)壁发生冲撞,水体的动能骤减。横向压差的作用使轴向(切向)流速在近内壁侧逐渐增加,靠外壁侧明显减小,如图 15(a)所示。同一断面上水流的径向流速的变化趋势为内侧大外侧小,如图 15(b)所示,在接近外侧(凹边)壁处,流速降到最小,液固两相流速出现差异,固相流速明显低于液相;到弯顶处时,同一深度水流受向心力的作用轴向(切向)速度随半径的加大而增长,如图 16(a)所示。径向流速的分

布为:内侧(凸边)处的水流趋向外侧(凹边)流动,外侧(凹边)处的水流运动趋势与之相反,该趋势反映了横向环流在弯道中的作用,它是造成外侧被冲刷内侧污泥沉积的主要因素^[13,17];水流流经弯道在出口处时流态已经发生了很大的改变,由于出口水流与弯道外壁(凹边)发生强烈的冲刷,轴向速度在该处的流速骤降。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),如图 17(a)所示。径向速度在出口处趋向弯道外侧(凹边),在近壁面处被折射并发生方向的改变,如图 17(b)所示。由于出口段内侧附近水流动能较低,固液两相流速差异明显,因此出口内侧区仍是污泥沉积的多发区。

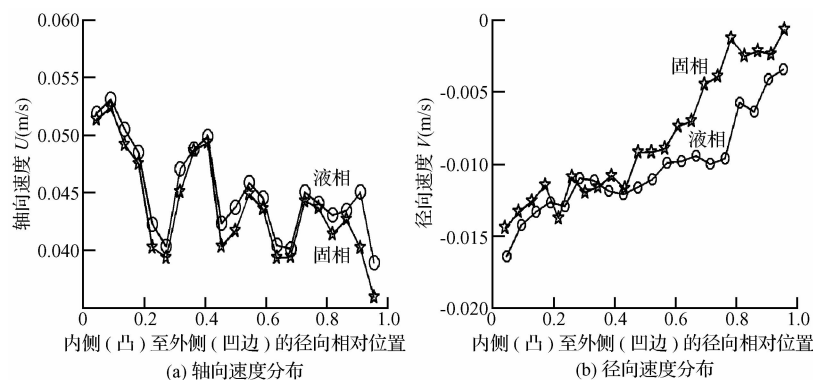


图15 入口弯道段流场沿程分布图

Fig. 15 Distribution of flow rate in the inlet of the flexural section

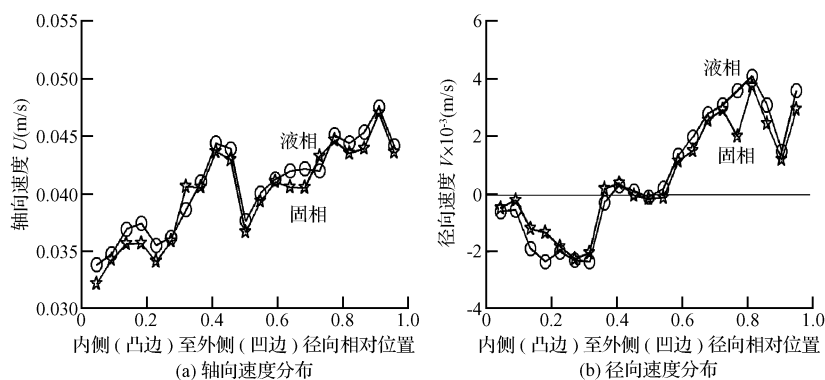


图16 弯道拐弯段流场沿程分布图

Fig. 16 Distribution of flow rate in the crook of the flexural section

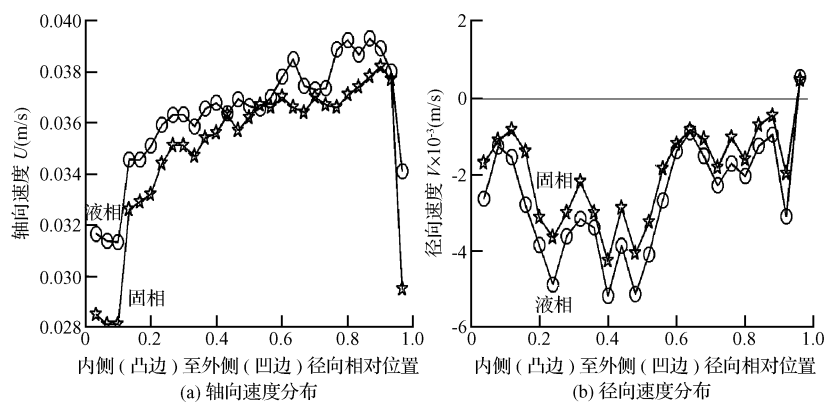


图17 弯道出口处流场沿程分布图

Fig. 17 Distribution of flow rate in the outlet of the flexural section

5 结论

采用灰度加权标定法和粒径匹配法对液-固两相粒子进行了识别、区分和标定,编制了相应的程

序,并利用标准粒子图像进行了验证,表明该方法实用有效。通过对卡鲁塞尔氧化沟模型实验测试,初步结果较好地反映了沟中不同位置处轴、径方向上固液流动分布的基本特性。实验结果表明:氧化沟

不同位置处的径向流速远小于轴向,流速大小相差约一个数量级;同一水平断面上轴向流动分布是决定其水力特性的主要因素;径向流速和水体动能决定了可能发生污泥沉积的位置,固相流速总体小于液相。总之,PIV 及其两相流分析技术为深入研究氧化沟内部的混合液流动结构和相间动力学特性提供了新的有力工具。

参考文献

- [1] 许联峰. 水气两相流动的数字图像测量方法及应用研究[博士学位论文]. 西安理工大学, 2004
- [2] 李伟民, 邓荣森, 王涛, 等. 水下推动器单独运行时一体化氧化沟流态研究. 给水排水, 2001, 27(12): 19 ~ 22
- [3] 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]. 成都: 西南交通大学, 2004
- [4] 王希麟, 张大力, 常辙, 等. 两相流场粒子成像测速技术(PTV-PIV)初探. 力学学报, 1998, 3(1): 121 ~ 125
- [5] Tokuhiro A., Maekawa M., Iizuka K., et al. Turbulent flow past a bubble and an ellipsoid using shadow-image and PIV techniques. International Journal of Multi-Phase Flow, 1998, (24): 1383 ~ 1406
- [6] Kosiwczuk W., Cessou A., Trinite M., et al. Simultaneous velocity field measurements in two-phase flows for turbulent mixing of sprays by means of two-phase PIV. Experiments in Fluids, 2005, 39(5): 895 ~ 908
- [7] 邵雪明, 颜海霞, 辅浩明. 两相流 PIV 粒子图像处理方法的实验研究. 实验力学, 2003, 18(3): 445 ~ 451
- [8] 潘晓辉, 罗锐, 杨献勇, 等. 悬浮颗粒两相流图像处理方法. 清华大学学报, 2002, 42(5): 680 ~ 683
- [9] Khalitov D. A., Longmire E. K. Simultaneous two-phase PIV by two-parameter phase discrimination. Experiments in Fluids, 2002, 32(2): 252 ~ 268
- [10] Delnoij E., Kuipers J. A. M., Van Swaaij W. P. M., et al. Measurement of gas-liquid two-phase flow in bubble columns using ensemble correlation PIV. Chemical Engineering Science, 2000, 55: 3385 ~ 3395
- [11] 罗军辉编著. MATLAB7.0 在图像处理中的应用. 北京: 机械工业出版社, 2005. 68 ~ 115
- [12] 汪诚文, 陈吕军, 钱易. 一体化氧化沟试验研究. 环境污染与防治, 1994, 13(6): 20 ~ 25
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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
- [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