

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.033

基于PIV的循环式生物絮团系统涡旋分离器内流场研究

史明明^{1,2} 孙先鹏³ 朱松明¹ 刘 晃² 龙丽娜² 阮贇杰^{1,2}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092;
3. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为分析循环式生物絮团系统涡旋分离器的内流场特性, 基于非接触式流场测试 PIV (Particle image velocimetry) 技术对试验规模涡旋分离器内流场进行测量, 分析了该涡旋分离器在不同水力停留时间工况下 (248、83、49 s) 涡旋分离器内部流场的合速度、分速度和涡量等分布情况。结果表明: 不同水力停留时间条件下, 涡旋分离器内套筒内部区域的左下角和上部区域均表现一定的涡旋, 同时随着水力停留时间的加快, 中间内套筒内的颗粒速度方向大致相同, 仅在筒壁附近产生小的二次流, 同时沉积仓内的颗粒速度方向趋于一致; 虽然水力停留时间加快, 但轴向和径向的合速度变化不大, 且不同速度占据的比例基本相同; 不同工况下顺时针和逆时针涡量基本相同, 且水力停留时间越慢, 流场的涡量相对越小, 并随着水力停留时间加快涡量分布趋向均匀, 即高涡量区域逐渐增加; PIV 试验由于激光能量一定, 其穿透能力有限, 因此, 对于复杂结构的 PIV 试验所获得的结果有待改进。

关键词: 循环式生物絮团系统; 涡旋分离器; 流场; PIV 测量

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0299-08

Investigation on Flow Field in Hydraulic Vortex Separator of Recirculating Biofloc Technology System Based on PIV

SHI Mingming^{1,2} SUN Xianpeng³ ZHU Songming¹ LIU Huang² LONG Li'na² RUAN Yunjie^{1,2}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China

3. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming to analyze the flow field characteristics of the vortex separator in the circulating biological flocculation system, the test scale vortex separator was taken as the research object. The non-contact flow field test technique, particle image velocimetry (PIV) technology, was used to measure the flow field in the test scale vortex separator and analyze different hydraulic powers of vortex separator. The distribution of velocity, velocity and vorticity in the flow field of cyclone separators (248 s, 83 s and 49 s) under residence time condition was analyzed. The results showed that under different HRT conditions, the lower left corner and upper region of the inner region of the vortex separator showed a certain vortex. At the same time, with the acceleration of the HRT, the velocity direction in the inner sleeve was approximately the same, only a small two flow was produced near the wall of the cylinder, and the velocity direction of the particle in the silo was also tending to be the same. Although HRT was accelerated, the axial and radial velocity was changed little, and the proportion of different size and velocity was basically the same; the clockwise and clockwise vortices were basically the same under different conditions, and the slower the HRT was, the smaller the vorticity of the flow field was, and the higher vorticity distribution tended to be uniform with the fast vorticity distribution of the HRT, that was, the high vorticity. The region was gradually increased; the PIV test limited penetration ability because of the certain laser energy. Therefore, the results of the complex structure to the PIV test still needed to be improved. The research results had important reference value for improving the structure of vortex separator and selecting the best working condition.

Key words: recirculating biofloc system; hydraulic vortex separator; flow field; particle image velocimetry

收稿日期: 2018-07-02 修回日期: 2018-10-16

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B09)、国家自然科学基金青年基金项目(31402348)、农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室开放基金项目(2014005)和浙江省重点研发计划项目(2018C02037)

作者简介: 史明明(1988—),男,博士生,主要从事设施水产装备研究,E-mail: shimgmg@163.com

通信作者: 阮贇杰(1983—),男,副研究员,博士,主要从事循环水养殖技术与装备研究,E-mail: ruanyj@zju.edu.cn

0 引言

涡旋分离器(Hydraulic vortex separator, HDVS)因其结构紧凑、操作简单及运行成本低等优点而广泛应用于环境工程、农业工程等相关领域^[1-3]。其中,在水产养殖过程中,生物絮团养殖系统需要适时适量地排出养殖水体中多余生物絮团,以确保总悬浮固体浓度处于适宜养殖对象生长的范围之内。涡旋分离器作为国内外循环水养殖系统固液分离的关键部件之一,为养殖水体中生物絮团颗粒的分离提供了新的途径^[4-7]。涡旋分离器清水流场的研究对于间接分析其絮团颗粒分离能力十分必要^[8]。目前关于涡旋分离器清水流场的研究主要包括理论分析、试验研究和数值模拟3方面^[9]。

通过理论分析往往可以定性获取涡旋分离器内部流场的一定规律,但这部分经验公式仅适用于特定的工况条件,具有一定的局限性^[10];而数值模拟需要求解复杂的方程,同时存在建模误差和计算误差等问题,其结果的可靠性往往受到质疑^[11]。随着试验分析手段的不断提高,涡旋分离器内部流场相关参数的测量已经不受传统接触式测量方法的限制,非接触式精确测量方面已取得较大进展^[12-13]。本文设计满足粒子图像测速法(PIV)测量要求的HDVS模型,测量并分析新型HDVS结构的流场分布特性以及水力停留时间对其清水流场的影响,进而为HDVS结构的改进以及高效的运行提供一定的理论依据。

1 试验装置

1.1 PIV 试验系统

图1所示为涡旋分离器流场测试PIV试验系统简图,该系统主要由PIV测量装置和自循环装置两部分组成,其中,PIV测量装置包括计算机(计算装置)、激光发生器、PIV同步控制器和相机(数据采集装置),而自循环装置由循环泵、流量监测器、流量控制器(阀门)、涡旋分离器和蓄水箱构成。其中流量监测器采用MIK-200H型便携式超声流量计(杭州美控自动化技术有限公司)替代。

系统工作过程:蓄水箱里装有一定量的带有示踪粒子的水体,在水泵的作用下水体以定速度从涡旋分离器入口切向射入涡旋分离器内。采用钢尺对涡旋分离器进行标定,以提高拍摄结果的准确度。激光产生的片状光源从涡旋分离器柱段过中心轴截面射出。通过流量监测器获得当前涡旋分离器的入射水流流量,并进一步换算获得涡旋分离器的水力停留时间。另外,改变流量控制器,进而获得其他所

需研究的涡旋分离器水力停留时间。

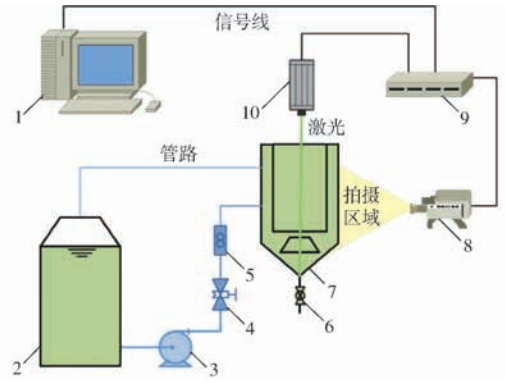


图1 涡旋分离器流场测试PIV试验系统简图

Fig. 1 Schematic of PIV experiment system of flow field in HDVS

1. 计算机
2. 蓄水箱
3. 循环泵
4. 流量控制器
5. 流量监测器
6. 球阀
7. 涡旋分离器
8. 相机
9. PIV同步控制器
10. 激光发生器

1.2 PIV 测量装置

本试验设备采用美国TSI公司生产的PIV系统,系统实物装置如图2所示,该系统具有较高的性价比和集成稳定性。具体包括:

PIV01134型双脉冲激光器:由英国LITRON公司生产,输出能量高达22.5 mJ/脉冲,脉冲频率为1 000 Hz,而最大频率可以达到20 kHz,出射波长为527 nm的可见绿光,设备稳定性良好,无需外部冷却。

630083-12GB型CMOS相机:由美国Phantom公司生产,单幅采集1 280像素×800像素,分辨率为1 M像素,动态范围12位,3 200帧/s的满帧频,并配有12 GB内存。

610026型片光源透镜组:由美国TSI公司生产,片光焦距0.3~3 m可调,柱面镜焦距为-10 mm和-20 mm。

610036型外置同步器:由美国TSI公司生产,



图2 试验用PIV系统实物图

Fig. 2 Real shot of PIV system applied in this experiment

LaserPuls 计算机控制同步器, 时间分辨率最低为 0.25 ns, 主要控制相机和激光发生器的工作时间轴序。

PIV 软件采集分析平台: 包括采样和处理软件 Insight4G 和 DELL 工作站(内存 16GB, 硬盘 2TB), 软件为美国 TSI 公司研发的专业的 PIV 测试用软件 Insight4G - UP (Insight4G, Module4G - 2DPIV)。Insight4G 图像采集、分析及显示软件平台是基于 .NET 技术设计, 且具有并行处理功能的分布式二维 PIV 图像采集、分析和显示专用数据处理软件。

10089 - SLVR 型种子颗粒: 美国 TSI 公司生产的直径 10 μm 镀银空心玻璃球, 密度为 1 150 kg/m^3 。

610015 型导光臂: 由美国 TSI 公司生产, 包括多关节导光臂一套(每关节均可 360° 旋转, 全展开长度可达 1.8 m) 和镜头基座一套, 导光率 95%。

其他部件: 610070 型窄带滤镜, 由美国 TSI 公司生产, 三脚架和轴编码器型号分别为 Tripod 和 Shaft encoder, 另外, 为保护激光器等试验仪器, 安装空调对室内环境的湿度和温度进行严格控制。

1.3 HDVS 模型

本文所研究的涡旋分离器结构简图如图 3 所示^[5]。

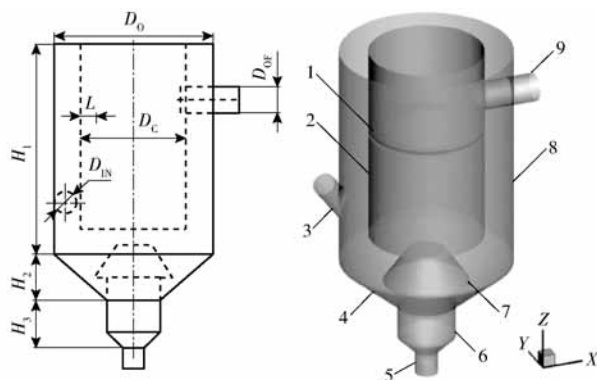


图 3 涡旋分离器结构简图

Fig. 3 Geometric model of HDVS

1. 扰流板 2. 套筒 3. 进水口 4. 锥体 5. 排空口 6. 沉积仓
7. 中心锥体 8. 外筒壁 9. 出水口

涡旋分离器的内套筒内部设计有扰流板, 以便改善内套筒内部流场, 提高其内部的颗粒沉降性能。为便于开展 PIV 试验, 本试验涉及的模型用有机玻璃加工^[14]。同时, 为降低涡旋分离器圆柱壁面对光的折射影响, 在涡旋分离器的外围加工一个正方体护罩, 关键尺寸 D_0 、 D_{OF} 、 D_{IN} 、 H_1 、 H_2 、 H_3 、 L 分别为 0.15、0.025、0.02、0.2、0.042 5、0.035、0.015 m, 具体模型如图 4 所示。

2 试验方案

2.1 测量工况

水力停留时间是环境工程中水处理装置的重要



图 4 PIV 试验用涡旋分离器实物模型

Fig. 4 Model of HDVS for PIV experiment

指标, 本文主要指养殖水体在涡旋分离器内的平均停留时间。由于涡旋分离器的有效体积一定, 则进水口进水速度越快其相应的水力停留时间越短。针对水力停留时间为 248、83、49 s (即较慢、中等和相对较快) 3 种典型涡旋分离器工况进行 PIV 试验测量^[7], 所研究的区域如图 5 所示, 其中, 纵截面与涡旋分离器出水口方向垂直。

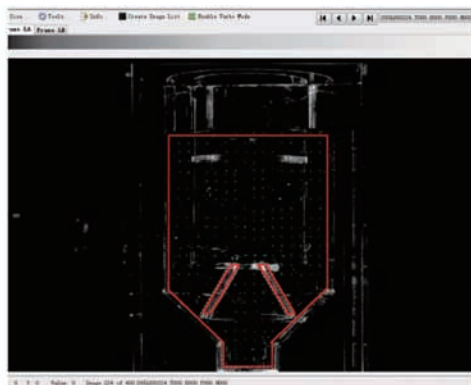


图 5 研究区域设置

Fig. 5 Region of interest extract

由于涡旋分离器内部流动比较复杂且受到随机脉动和周期性运动的影响, 其中, 对于后者可运用轴编码器进行消除, 而对于前者其主要表现为, 测试结果随着采用时刻变化而改变, 故可对测量结果取平均来削弱此因素的影响。主要采用相位平均法, 即在同一工况下相同相位处拍摄 N 幅流场, 将这 N 幅流场按坐标进行相平均得到流场的平均流速。其具体过程为: 试验过程中, 对各个工况采样 1 000 帧, 随后在其后处理时, 对各工况相应的 1 000 帧的瞬时速度分量直接进行算术平均计算, 进而可获得各工况相应的轴向平均速度、径向平均速度及流量等物理量^[7]。

2.2 相关设置

2.2.1 查询区

查询区越小, 对应所获得的矢量图就越能够代

表研究对象内部的真实流动^[15]。这主要是因为查询区中心的瞬时速度是用查询区内流场的平均速度来近似表征的,进而由中心瞬时速度来表示相应流场当前位置的速度矢量,故查询区过大必将导致中心瞬时速度的结果误差过大,特别是对于速度梯度较大的流动,相关峰的位移也将变大,峰值将降低,进而造成一定的测量噪声,影响测量精度。另外,为了获得更精确的流动细节,有学者认为查询区内通常要包含 10 个以上的示踪粒子^[16]。虽然查询区域面积的增加可以大大增加查询区域内粒子的数量,但一定要确保查询区足够小,综合当前学者研究结果及试验测试,本试验设置查询分辨率率为 48 像素 × 48 像素^[17]。

2.2.2 脉冲激光时间间隔

粒子示踪技术是 PIV 技术粒子识别的主要原理依据,因此,在对粒子识别过程中存在可识别速度的极限值,当位移大于一定阈值时,粒子的识别过程会产生一定的误差。脉冲激光时间直接影响示踪粒子的移动范围,原则上要求粒子单次测量的移动极限位移应小于查询区域大小的 1/4,同时,其在垂直方向上的移动极限位移应小于片光源厚度 1/4。从四分之一准则出发,国内相关研究人员认为利用系数增量叶端线速度估算速度最大值,可以根据试验标定文件中的成像空间分辨率和选择的待用查询区间大小计算出粒子物象在 1/4 个区间宽度中所需要的估算时间,然后再计算出粒子运动 1/4 个片光厚度所需要的时间,取二者最大值为时间间隔值最大值,试验过程可以设置极大值作为设置初始值^[15]。经计算和实测,最终图像采集时脉冲激光时间间隔设置为 1 400 μs。

2.2.3 示踪粒子

示踪粒子是试验开展的基础,流场的速度就是通过测量不同时刻粒子的位置来获得的。常见的示踪粒子有聚苯乙烯、荧光粒子、尼龙粒子和镀银空心玻璃珠等,本文选择 TSI 公司配备的镀银空心玻璃

珠,其次粒子的跟随性直接影响测量精度,对选取的镀银空心玻璃珠跟随性情况进行分析,则有

$$\tau_s = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu}$$

式中 μ ——水粘度, kg/(m·s)

d_p ——示踪颗粒的直径, m

ρ_p ——示踪颗粒的密度, kg/m³

τ_s ——示踪颗粒时滞时间, s

根据公式得出停留时间约为 0.6 μs,与激光脉冲延迟时间 1 800 μs 和时间间隔 1 400 μs 相比很小,则可以认为该示踪粒子在水中跟随性较好。粒子大小确定后需要确定粒子的数量,如前文所述,图像采集过程中要保证每个查询区内粒子数量不少于 10 个,可通过试验测试拍摄调节粒子浓度,在保证相机相对位置合理,获取的每个粒子成像饱满清晰时,适量逐步增加粒子投放量,且保证每个查询区的粒子数量均匀且适量,如果粒子出现膨胀或者团聚等现象时,试验就必须重新换用新的工作流体。

2.3 数据处理

通过服务器机组内接数据采集卡和外置同步器,实现对整套硬件系统的远程可视化控制,并具有 Mask 多种提取方式和内嵌算法,同时,外接 Tecplot 程序实现流场矢量图像显示。通过后处理可获得各点平均速度、分速度和涡量特性参数等。

3 结果与分析

3.1 速度矢量分布分析

涡旋分离器速度场分布的分析有助于间接评价涡旋分离器分离性能。不同水力停留时间下涡旋分离器内颗粒的速度矢量分布如图 6 所示,其中,不同水力停留时间下的速度矢量进行归一化处理,即速度矢量图中箭头大小相同,以便于观测涡旋分离器内二次流等现象。将涡旋分离器研究区域划分为 a、b、c、d、e 5 个区以便进行对比分析。

由图 6 可知,d 区是涡旋分离器的中心锥体,正

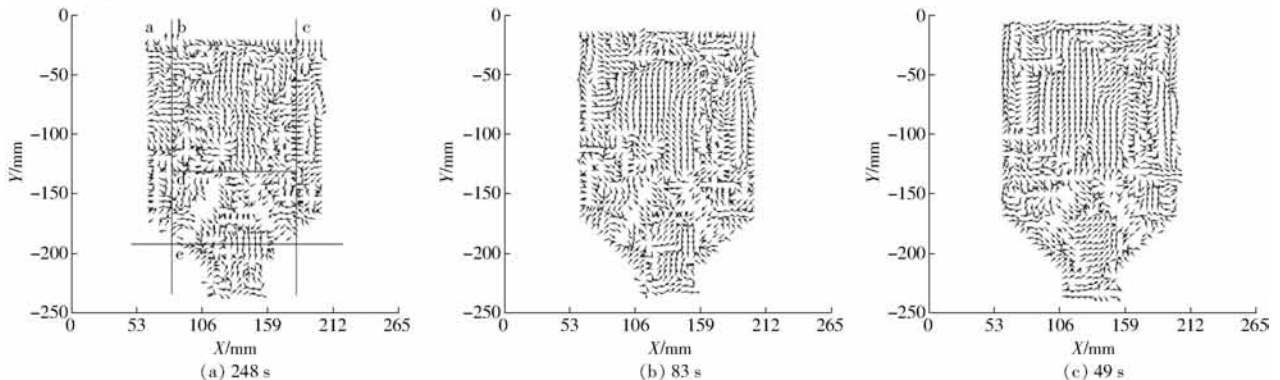


图 6 不同水力停留时间下速度矢量分布

Fig. 6 Velocity vector distributions at different HRTs

如图 2 所示,该区由于其结构复杂,壁面较多,切表面为弧形,虽然切除了中心锥体壁面存在的区域,但其周边由于光散射较强,速度矢量结果依然有一定误差,此处不做过多分析。a 和 c 区域为涡旋分离器内套筒外部流场区域,该区 3 种水力停留时间下的速度方向大致相似,由此可知,对于本文研究的涡旋分离器其外流场的旋流功能相对较强,而颗粒的分离需要依据该部分旋流,一定范围的旋流作用下对于生物絮团颗粒的分离是有利的。同时,也可以清楚看到内套筒筒壁的影响随着水力停留时间的加快而更加明显。对于涡旋分离器沉积仓 e 区,当水力停留时间较长时流场相对杂乱,但通过实际观察,该区湍流并不强,这也主要是由于该图仅反映了速度方向,其速度相对较小,因此采用固定的脉冲时间间隔测得速度方向误差较大些。由图 6b 和图 6c 清晰看到,e 区流场速度方向分布基本相似。对于研

究重点 b 区,由图可知,不同水力停留时间下,b 区左下角和上部区域均表现一定的涡旋,同时随着水力停留时间加快,中间内套筒内的颗粒速度方向大致相同,只在筒壁附近产生小的二次流,理论上讲,该区流速也是逐渐增大的,随着此处速度增加,由伯努利原理可知,该处动压降低,导致沉积仓内混合液向该区流动的趋势,不利于颗粒的沉积,进而影响分离效率。

图 7(图中 u 表示横坐标轴方向速度, v 表示纵坐标轴方向速度)为颗粒分速度分布的散点图,该图与图 6 反映出的 3 种水力停留时间下速度分布的规律相似,同时,由图可清晰看到,右侧散点要多于左侧,即表示向横坐标轴正向速度的颗粒分布较多,而两分速度相差较大的颗粒点的数量较少,说明颗粒处于旋流向上或向下的状态,并且旋流向下的颗粒多于向上的颗粒。

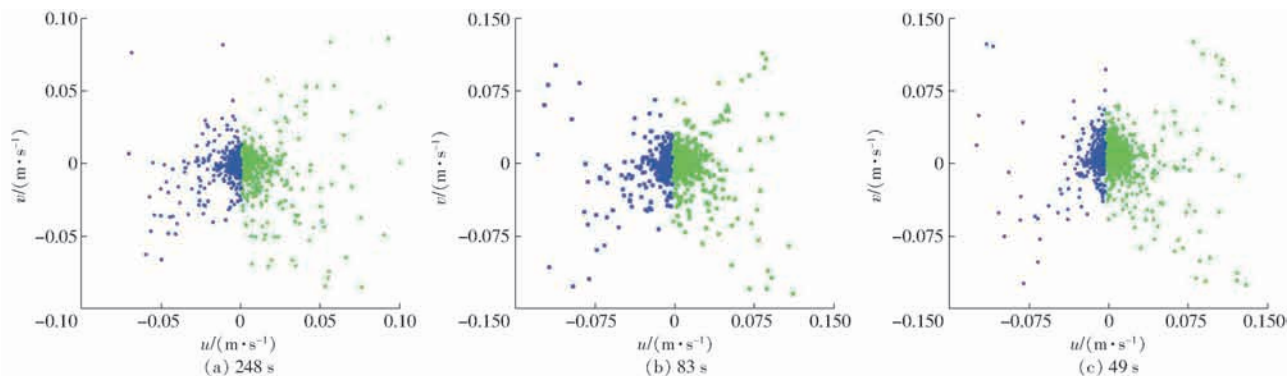


图 7 不同水力停留时间分速度分布散点图

Fig. 7 Velocity probability distributions at different HRTs

3.2 速度分布分析

图 8 为颗粒在该平面的合速度概率统计图,图中主纵轴坐标表示某一速度的颗粒数量。

由图 8 可知,对于 3 种水力停留时间的涡旋分离器,在所观察截面处颗粒速度分布规律相似,速度分别集中在 0.035、0.045、0.050 m/s 之内,并分别在 0.014、0.018、0.020 m/s 处的速度量占据比例最高,由此可以看出,虽然三者水力停留时间是 1:0.33:0.2 的

比例,但它们的最大速度以及占据最大比例的速度均与水力停留时间的比例有一定差距,这主要是因为随着水力停留时间的减小,涡旋分离器内整体速度加快,因此湍动能耗增加,但三者最大速度与占据最大比例的速度之间的比例基本一致。由此可为分析流场内颗粒速度提供参考。

通过轴向速度的分布可以分析流体质点或分散相颗粒进入涡旋分离器后的运动轨迹,并根据轨迹

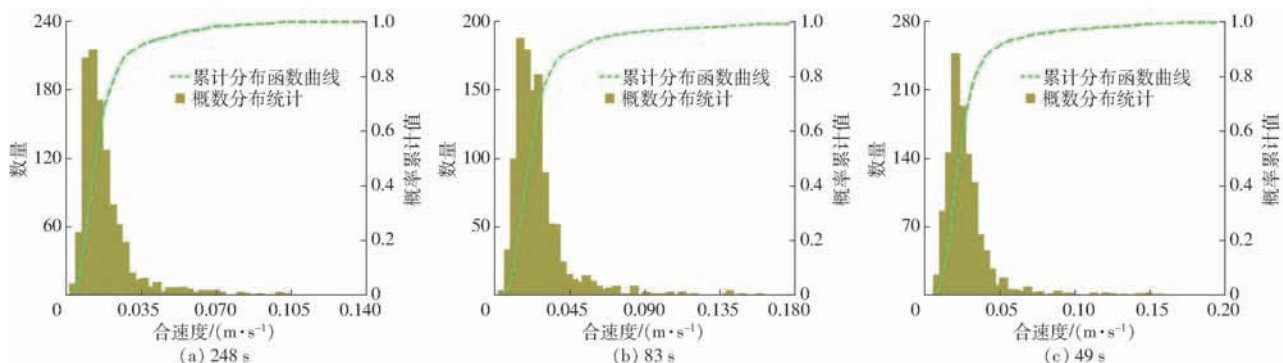


图 8 不同水力停留时间合速度概率分布图

Fig. 8 Velocity probability distributions at different HRTs

变化的规律来预测涡旋分离器的分离效率,分析流场和分离效率的影响因素等^[18]。图9为不同水力停留时间下涡旋分离器的轴向速度概率分布图,由图9可知,3种工况下,轴向速度分布相似,均表现出速度最小的颗粒占比最高,且累计分布函数曲线

相似。另外,随着水力停留时间加快,当水力停留时间小于83 s时,上行颗粒和下行颗粒数量相近,此时速度的进一步增大将对分离效率的影响逐渐降低,但随着水力停留时间加快能耗将会增大,因此水力停留时间选择应大于49 s。

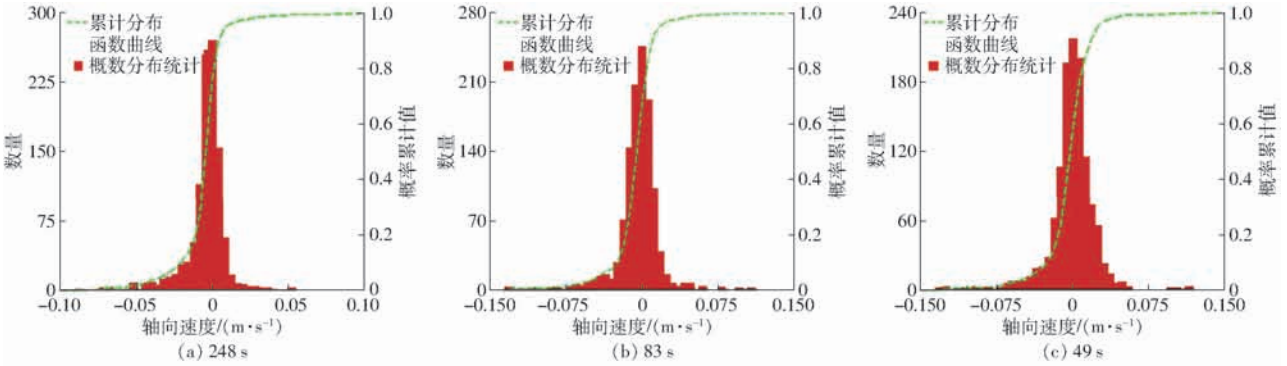


图9 不同水力停留时间轴向速度概率分布图

Fig.9 Axial velocity component probability distributions at different HRTs

在涡旋分离器内的流场中,径向速度与其他两个方向的速度相比较小,因此其对分离效率的影响也相对弱些^[7,19]。图10给出了不同水力停留时间条件下,径向速度的概率统计图。由图10可知,相对于图9的轴向速度分布,径向速度多集中在速度

较小区域,且随着水力停留时间降低,较小速度的占比增大,这和其他常规水力旋流器表现出的现象相似。同时,对于3种水力停留时间,颗粒速度沿中心和壁面方向的速度占比大致相同,这和其他研究学者的结论相同^[20]。

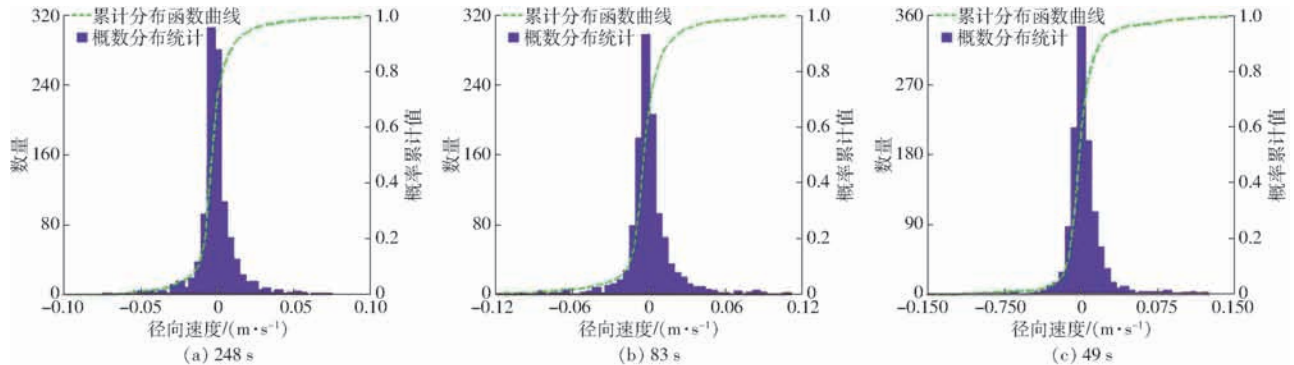


图10 不同水力停留时间径向速度概率分布图

Fig.10 Radial velocity component probability distributions at different HRTs

3.3 涡量分布分析

涡量又是一个重要的整体参数,它表示测量面上各个位置涡的强弱,涡量也是唯一人为规定的矢量,它的构成基于一个涡流(也许是一个微小的元涡),可称其为复合型运动流体矢量的集合。为与转动方向相区别,涡量的方向可通过右手定则确定,它是微涡的轴线方向,与该涡流运动元的运动趋向完全无关。

图11表示不同水力停留时间条件下涡量概率分布图。从图11中可以看出,水力停留时间为248 s时,流场涡量均比较小, $-12 \sim 0 \text{ s}^{-1}$ 或 $0 \sim 12 \text{ s}^{-1}$ 之间涡量区域占了大约50%,而在83 s时50%的区间范围有所扩大,当水力停留时间为49 s时,涡量分布趋向均匀。另外,对于各种工况下顺时针和逆时

针涡量基本相同。总体而言,随着水力停留时间加快,涡量的分布趋向均匀,即高涡量区域逐渐增加。而涡旋的产生伴随着机械能损耗^[21]。故在保证一定分离效率情况下不利于节约能耗,同时,高强涡旋会使颗粒悬浮其中,虽然增加了颗粒停留时间,但并不能将其分离,对于分离效率的提高意义不大^[5]。

4 结论

(1) 经过 PIV 的测量表明:对于涡旋分离器的图像采集时脉冲激光时间间隔设置为 $1\ 400 \mu\text{s}$ 时,效果相对较好,但由于激光能量一定,其穿透能力有限,因此,对于复杂结构,PIV 试验所获得的结果依然有待改进。

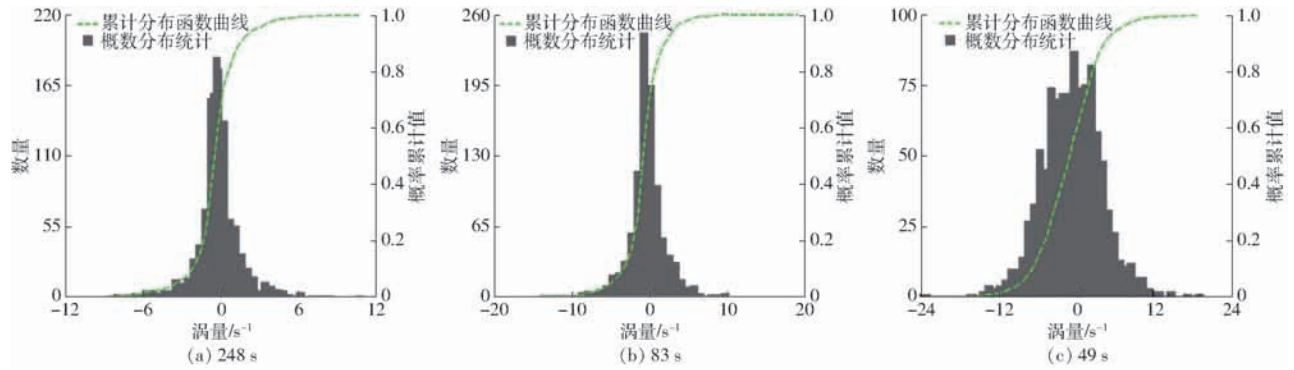


图 11 不同水力停留时间涡量概率分布图

Fig. 11 Vorticity probability distributions at different HRTs

(2) 不同水力停留时间条件下, 涡旋分离器内套筒内部区域的左下角和上部区域均表现一定的涡旋, 同时随着水力停留时间的加快, 当水力停留时间达到 49 s 时, 中间内套筒内的颗粒速度方向大致相同, 只在筒壁附近产生小的二次流, 同时沉积仓内的颗粒速度方向趋于一致, 而轴向和径向的合速度变

化并不大, 且不同速度占据的比例相同。

(3) 对于不同工况下顺时针和逆时针涡量基本相同。另外, 水力停留时间越慢, 流场的涡量就相对越小, 并随着水力停留时间加快, 相应的高涡量区域也逐渐增加, 当水力停留时间为 49 s 时, 涡量分布趋向均匀。

参 考 文 献

- [1] SHA Jie, LEI Hening, WANG Mengdie, et al. Comparison of separation performance of liquid-solid fluidized bed separator and dense medium cyclone for cleaning coal [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2018, 38(2): 98 - 106.
- [2] JOHNSON W, CHEN S L. Performance evaluation of radial/vertical flow clarification applied to recirculating aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(1): 47 - 55.
- [3] JAWARNEH A M, AL-SHYAB A, TLILAN H, et al. Enhancement of a cylindrical separator efficiency by using double vortex generators[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(6): 1625 - 1633.
- [4] ZHU Songming, SHI Mingming, RUAN Yunjie, et al. Applications of computational fluid dynamics to modeling hydrodynamics in tilapia rearing tank of recirculating biofloc technology system[J]. Aquacultural Engineering, 2016, 74: 120 - 130.
- [5] 史明明, 朱松明, 叶章颖, 等. 基于 CFD 的循环生物絮团系统涡旋分离器结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 287 - 294, 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170936&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.036.
SHI Mingming, ZHU Songming, YE Zhangying, et al. Structural parameter optimization of hydraulic vortex separator in recirculating biofloc technology system based on computational fluid dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 287 - 294, 278. (in Chinese)
- [6] SHI M, RUAN Y, WU B, et al. Performance evaluation of hydrodynamic vortex separator at different hydraulic retention times applied in recirculating biofloc technology system[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(5): 1737 - 1747.
- [7] SHI M M, RUAN Y J, LI J P, et al. Numerical study of dense solid-liquid flow in hydrodynamic vortex separator applied in recirculating biofloc technology system[J]. Aquacultural Engineering, 2017, 79: 24 - 34.
- [8] 崔瑞. 双锥旋流器内流场与颗粒运动模拟及其工业应用研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
CUI Rui. Simulation of flow field and particle motion inside dual-cone hydrocyclone and its industrial application research[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 董勇. 液固分离器多相流仿真研究与结构优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
DONG Yong. Research on simulation of multiphase flow & structural optimization design of liquid-solid separator[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] 王定标, 杨丽云, 于艳, 等. 双层桨叶搅拌器流场的 CFD 模拟与 PIV 测量[J]. 郑州大学学报(工学版), 2009, 30(2): 1 - 5.
WANG Dingbiao, YANG Liyun, YU Yan, et al. CFD simulation and PIV measurement of flow fields in stirred vessel with double-flat agitator[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2009, 30(2): 1 - 5. (in Chinese)
- [11] 何有世, 袁寿其, 黄良勇. 流体机械叶轮内部流场测试技术进展[J]. 流体机械, 2004, 32(12): 36 - 40.
HE Youshi, YUAN Shouqi, HUANG Liangyong. Development on measurement technology in internal flow field of fluid machinery[J]. Fluid Machinery, 2004, 32(12): 36 - 40. (in Chinese)
- [12] 许妍霞, 唐波, 宋兴福, 等. 水力旋流器内部流场模拟分析与 PIV 验证[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2013, 39(1): 1 - 7.
XU Yanxia, TANG Bo, SONG Xingfu, et al. Computational study and PIV validation of flow field in a hydrocyclone[J].

- Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 39(1): 1-7. (in Chinese)
- [13] 汪显东, 陈晔. 水力旋流器内部流场 PIV 测试与分析[J]. 价值工程, 2011, 14(2): 51-52.
WANG Xiandong, CHEN Ye. PIV test and analysis on the flow field in hydrocyclone[J]. Value Engineering, 2011, 14(2): 51-52. (in Chinese)
- [14] 李伟, 季磊磊, 施卫东, 等. 导叶式混流泵多工况内部流场的 PIV 测量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 82-88.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. PIV measurement of internal flow in mixed-flow pump under different flow rate conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 82-88. (in Chinese)
- [15] SCARANO F, RIETHMULLER M L. Advances in iterative multigrid PIV image processing[J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(Supp. 1): 51-60.
- [16] KEANE R D, ADRIAN R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images[J]. Applied Scientific Research, 1992, 49(3): 191-215.
- [17] 宋戈. 涡轮桨搅拌槽内湍流特性的三维 PIV 试验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
SONG Ge. The experiment investigation of fluid characteristics in the stirrer tank using stereo PIV [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
- [18] 李慧. 固-液分离用水力旋流器的三维数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
LI Hui. The 3D numerical simulation study on solid-liquid hydrocyclone[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006. (in Chinese)
- [19] 梁政, 任连城, 张梁, 等. 水力旋流器流场径向速度分布规律研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(1): 106-108.
LIANG Zheng, REN Liancheng, ZHANG Liang, et al. The distribution law of radial velocity of flow field in hydrocyclone[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(1): 106-108. (in Chinese)
- [20] 王文立. 基于旋流原理的固液分离设备及性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
WANG Wenli. Hydrocyclone-based solid-liquid separation equipment and separating performance [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [21] 刘心洪, 闵健, 潘春妹, 等. 采用大涡 PIV 方法研究搅拌槽内湍流动能耗散率[J]. 过程工程学报, 2008, 8(3): 425-431.
LIU Xinhong, MIN Jian, PAN Chunmei, et al. Investigation of turbulence kinetic energy dissipation rate in a stirred tank using large eddy PIV approach[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(3): 425-431. (in Chinese)