

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.036

# 基于 CFD 的循环生物絮团系统涡旋分离器结构参数优化

史明明<sup>1</sup> 朱松明<sup>1</sup> 叶章颖<sup>1</sup> 韩志英<sup>1</sup> 李建平<sup>1</sup> 阮贇杰<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 康奈尔大学生物与环境工程系, 伊萨卡 NY 14853)

**摘要:** 为提高循环生物絮团系统涡旋分离器分离效率,以欧拉-欧拉多相湍流模型为理论框架,运用计算流体力学技术,对3种不同筒径比 $\alpha$ 涡旋分离器内固液两相三维流动进行了数值模拟,并分析了相关速度云图、速度矢量云图、流体迹线云图、内部固相分布以及出口处固相体积分数变化等。模拟结果表明:在进水口进水速度为0.36 m/s时,随着筒径比 $\alpha$ 的增大,3种涡旋分离器套筒外侧以及进水口以下部分速度流场差别较小,但套筒内流场湍流逐渐加剧,同时,套筒外侧附近和套筒内部,涡旋逐渐加剧,增加能耗,且不利于固体颗粒的沉积,总体而言,涡旋分离器在 $\alpha$ 为1.5之后分离效率下降,并保持相对稳定,具体表现为,当涡旋分离器 $\alpha$ 为1.5时,内部固相体积分数相对较高,而出口处固相体积分数较低,随着 $\alpha$ 增大,其分离效率由 $\alpha$ 为1.5时的27%降至 $\alpha$ 为2.0时的17%,并随着 $\alpha$ 再次增至2.5时,分离效率保持基本不变。涡旋分离器流速的实测结果与模拟结果基本一致,而分离效率存在一定差异,但是变化规律相同,表明数值模拟在优化涡旋分离器结构方面是可行的。

**关键词:** 循环生物絮团系统; 涡旋分离器; 计算流体力学; 多相流; 数值模拟

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0287-08

## Structural Parameter Optimization of Hydraulic Vortex Separator in Recirculating Biofloc Technology System Based on Computational Fluid Dynamics

SHI Mingming<sup>1</sup> ZHU Songming<sup>1</sup> YE Zhangying<sup>1</sup> HAN Zhiying<sup>1</sup> LI Jianping<sup>1</sup> RUAN Yunjie<sup>1,2</sup>

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

2. Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca NY 14853, USA)

**Abstract:** With the aim to improve the separation efficiency of hydraulic vortex separator (HDVS) in recirculating biofloc technology (RBFT) system, three HDVSs with different structural parameters were studied by using numerical method of computational fluid dynamics (CFD). The simulations of the solid-liquid phase flow in HDVSs were conducted based on an Eulerian-Eulerian multi-phase turbulence 3-D model combined with the kinetic theory of granular flow, which specifically analyzed the velocity contours, vector contours, streamlines of liquid phase, inner and outlet distribution characters of solid phase. The simulation results showed that with the increase of  $\alpha$ , the velocity field below the inlet part and surrounding area of the sleeve had small difference at the inlet velocity of 0.36 m/s. But the difference of results of inner region of sleeve was stark and the turbulence was enhanced in this regions. In addition, some swirls occurred in the inner zone of the sleeve, which added energy waste and had negative effect on the flocs separation. The separation efficiency of HDVS had a negative correlation with the increase of  $\alpha$ . When  $\alpha$  was 1.5, the removal efficiency was 27%, which was more effective than 17% ( $\alpha$  was 2.0). But when  $\alpha$  was increased from 2.0 to 2.5, the HDVSs almost had the same solid phase volume fraction at the outlet and the separation efficiencies only had a small change. To validate the accuracy of simulation results, the simulation values and experimental data were compared. The good agreement of the flow velocity and change law of the separation efficiency proves that the mentioned two fluid model (TFM) can be used to optimize the structure of HDVS.

**Key words:** recirculating biofloc technology system; hydraulic vortex separator; computational fluid dynamics; multiphase flow; numerical simulation

收稿日期: 2017-01-18 修回日期: 2017-02-17

**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)、中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所重点实验室开发基金项目(2015)和中国博士后科学基金项目(2014M551747)

**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,主要从事高密度设施养殖工程研究,E-mail: ruanyj@zju.edu.cn

## 引言

我国是世界第一水产养殖大国,其产量约占世界水产养殖总量的70%。据统计,2015年国内养殖鱼类水产品总量为2 846万t,约占鱼类水产品生产总量的71.7%<sup>[1]</sup>。然而,我国水产养殖业在产能大幅提升的同时,其粗放式和掠夺式的生产方式与当前海洋资源匮乏、环保压力增大以及土地成本上升等矛盾也逐渐凸显。近年来,生物絮团养殖技术(Biofloc technology, BFT)因具有维持水环境稳定、降低换水率、提高幼苗成活率以及促进产品高产优质等特点,已成为我国水产养殖解决资源环境刚性约束问题的重要手段<sup>[2-4]</sup>。

传统原位生物絮团系统在操作过程中,由于营养盐输入日渐增加,养殖池内固体颗粒物浓度逐渐上升,而针对常见养殖对象(如南美白对虾和罗非鱼等),其往往有适宜的总悬浮固体浓度(Total suspended solid, TSS)范围。因此,就需要适时适量地排出养殖水体内的生物絮团<sup>[5-6]</sup>。目前常用的降低总悬浮固体物浓度的方式包括换水、增设沉降池或泡沫分离器等<sup>[7-9]</sup>。其中,换水工作量大且浪费水资源,泡沫分离器能耗较高,沉降池占地面积大且可控性较差,而涡旋分离器(Hydraulic vortex separator, HDVS)由于具有操作方便,精确度相对高且工作稳定等特点,有利于实现养殖池总悬浮固体的精确调控。

计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)广泛应用于农业工程领域的过程装置优化和放大定量设计,具有效率高、成本低以及可重复性强的优点<sup>[10-12]</sup>。目前,针对涡旋分离器的模拟可分为气固、液固以及液液3种类型,并以气固涡旋分离器研究为主<sup>[13-15]</sup>。由于套筒结构广泛应用于气固涡旋分离器和液固涡旋分离器设计之中<sup>[16-17]</sup>,套筒与外筒壁之间的相对间隙直接影响着涡旋分离器的效率,是涡旋分离器设计的关键参数之一,而该相对间隙可用套筒直径与外筒直径之比进行评价。本文针对循环生物絮团系统固液涡旋分离器分离效率低的问题,对3种结构涡旋分离器内部流场和絮团颗粒分离过程进行模拟,以期对循环生物絮团系统内过量絮团颗粒的高效分离提供理论依据。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 几何模型

针对不同的分离对象,涡旋分离器结构往往存在一定差异,本文所研究的涡旋分离器结构简图如图1所示。

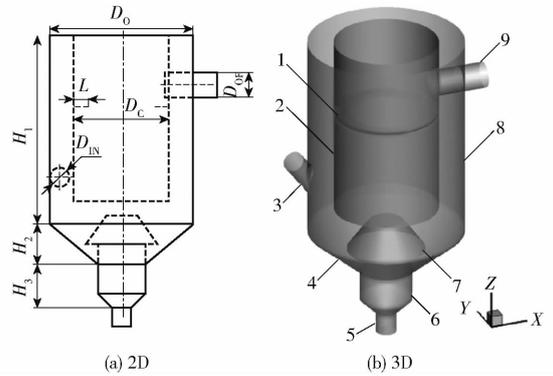


图1 涡旋分离器结构简图

Fig. 1 Structure sketch of hydraulic vortex separator

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

为便于开展试验验证工作,本文建模采用中试规模大小,因此设置外筒壁直径 $D_o$ 为0.3 m,外筒壁高 $H_1$ 为0.4 m,出水口直径 $D_{OF}$ 为0.05 m;在相同流量下,为提高进水口流速,进水口直径 $D_{IN}$ 应小于 $D_{OF}$ ,但考虑到安装方便, $D_{IN}$ 不能过小,设置 $D_{IN}$ 为0.04 m;针对中试规模0.8 m<sup>3</sup>的有效养殖水体,在外排生物絮团时,为确保养殖水体生物絮团分布均匀性,根据相关研究结果,选取水力停留时间为0.5 h<sup>[9]</sup>,则进水口流量为1.6 m<sup>3</sup>/h,即进水口流速 $v_{IN}$ 为0.36 m/s。为避免进水口水体沿套筒两侧流动影响涡旋效果,则有

$$D_{IN} \leq \frac{D_o - D_c}{2} \quad (1)$$

式中  $D_c$ ——套筒直径,m

涡旋分离器内只有在湍流状态下才能形成足够强烈涡旋,进而获得良好的离心分离效果。雷诺数是表征流体流动特性的一个重要参数,是惯性力与粘性力的比值,则有<sup>[18]</sup>

$$Re_w = \frac{\rho v_{IN} D_{IN}^3}{\mu H_2^2} \geq 2000 \quad (2)$$

式中  $Re_w$ ——进水口雷诺数

$\rho$ ——流体密度,kg/m<sup>3</sup>

$\mu$ ——流体粘性系数,kg/(m·s)

$H_2$ ——锥体高度,m

当 $Re_w$ 小于2 000时为层流,则 $Re_w$ 最小为2 000,为确保湍流, $H_2$ 约取0.85 m。

套筒与外筒壁之间的相对间隙是本文结构参数优化的内容,其对涡旋分离器整体流场影响较大,进而影响分离效率。套筒与外筒壁之间相对间隙用外筒壁直径与套筒直径比 $\alpha$ 作为评价指标,显然 $\alpha$ 越大相对间隙越大,则有

$$\alpha = \frac{D_o}{D_c} \quad (3)$$

其中 
$$\frac{D_o}{D_o - 2D_{IN}} < \alpha < \frac{D_o}{2L + D_{OF}}$$

式中  $L$ ——扰流盘宽, m

扰流盘的设计参照文献 [16], 其宽度  $L$  取 0.03 m, 可得  $\alpha$  的范围为  $1.36 < \alpha < 2.72$ 。本文研究 3 种不同  $\alpha$  的涡旋分离器, 考虑到  $\alpha$  的取值范围, 3 种涡旋分离器 (结构 A、结构 B 和结构 C) 的  $\alpha$  分别为 1.5、2.0 和 2.5。忽略套筒及锥体等壁厚对涡旋分离器体积的影响, 三者体积  $V$  均为 28 L。

### 1.2 数学模型

涡旋分离器内部为固液两相混合流动, 且视生物絮团为拟流体, 为简化计算, 采用欧拉-欧拉多相流模型<sup>[19-20]</sup>。多相流主要包括: VOF 模型、Mixture 模型和 Eulerian 模型。由于混合液内固相体积占比相对较大, 且在涡旋分离器内分布相对广泛, 因此选择 Mixture 模型, 并考虑滑流速度, 另外, 视涡旋分离器内部流动为常温下定常流动, 将连续相视为粘性不可压缩的流体, 忽略升力、虚拟质量力、压力梯度力以及 Magnus 力等, 仅考虑作用较大的曳力和重力。相关控制方程表述为<sup>[21-22]</sup>

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (4)$$

其中 
$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \rho_i \mathbf{v}_i}{\rho_m} \quad \rho_m = \sum_{i=1}^n k_i \rho_i$$

式中  $t$ ——时间, s  $\mathbf{v}_i$ ——各相速度, m/s

$\mathbf{v}_m$ ——质量平均速度, m/s

$\rho_m$ ——混合相质量密度, kg/m<sup>3</sup>

$k_i$ ——各相体积分数

$\rho_i$ ——各相质量密度, kg/m<sup>3</sup>

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] - \nabla P + \rho_m \mathbf{g} + \sum \mathbf{F} + \nabla \cdot (k_i \rho_i \mathbf{v}_{d,i} \mathbf{v}_{d,i}) \quad (5)$$

其中 
$$\mu_m = \sum_{i=1}^n k_i \mu_i \quad \mathbf{v}_{d,i} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_m$$

式中  $\mu_m$ ——混合相粘性系数, Pa·s

$\mu_i$ ——各相粘性系数, Pa·s

$P$ ——静压强, Pa  $\mathbf{F}$ ——体积力, N

$\mathbf{g}$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>

$\mathbf{v}_{d,i}$ ——第二相  $i$  的飘移速度, m/s

滑移速度方程为

$$\mathbf{v}_{lp} = \frac{\rho_l (\rho_p - \rho_m) d_p^2 (\mathbf{g} - \mathbf{v}_m \cdot \nabla \mathbf{v}_m)}{18 \mu_l \rho_l f_{drag}} \quad (6)$$

其中 
$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & (Re_p \leq 1000) \\ 0.0183 Re_p & (Re_p > 1000) \end{cases}$$

$$Re_p = \frac{\rho_l d_p |v_{lp}|}{\mu_m}$$

式中  $v_{lp}$ ——滑移速度, m/s

$d_p$ ——固相颗粒直径, m

$\mu_l$ ——液相粘性系数, Pa·s

$\rho_l$ ——液相质量密度, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_p$ ——固相质量密度, kg/m<sup>3</sup>

$f_{drag}$ ——曳力系数

$Re_p$ ——雷诺数

### 1.3 网格划分及边界条件

理论而言, 网格越密则计算结果越精确。但随着网格加密, 计算量将增加, 进而计算机浮点运算造成的误差也会增大。因此, 合适的网格数量是实现精确模拟的前提, 尽量避免网格过密造成的计算资源浪费。基于 Fluent 前处理软件 Ansys meshing, 对 3 种结构参数涡旋分离器进行混合网格划分。网格划分结果如图 2 所示。通常在模拟工作中要进行网格无关性的验证, 即随着网格数量的增加, 计算结果不再有显著变化为止, 并以此确定模拟的进一步开展所需的网格数量<sup>[23]</sup>。本文考虑到 3 种涡旋分离器的结构和网格数量相似, 因此仅针对涡旋分离器结构 A 进行网格无关性验证, 相对于当前  $2.6 \times 10^5$  的网格, 更精细的网格数为  $4.1 \times 10^5$  和  $7.8 \times 10^5$  的模拟结果无显著变化, 最终, 本文 3 种涡旋分离器结构 A、结构 B 和结构 C 分别采用  $2.6 \times 10^5$ 、 $3.0 \times 10^5$  和  $3.1 \times 10^5$  的网格数进行模拟研究。

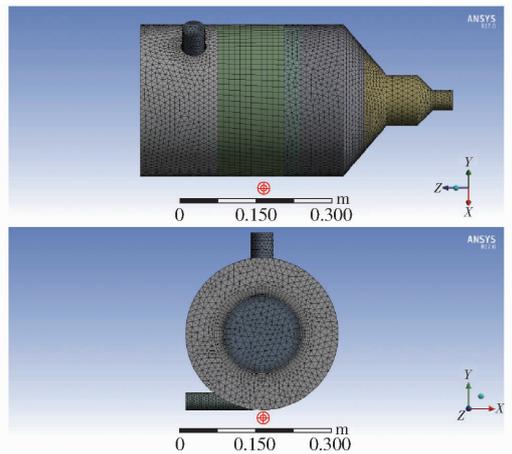


图 2 涡旋分离器混合网格图

Fig. 2 Mixture-frame gridding of hydraulic vortex separator

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或一阶导数随地点及时间的变化规律, 是解数学方程前提, 也是模拟分析关键部分<sup>[24-25]</sup>。由于已知涡旋分离器进水流量, 故将涡旋分离器进水口设置为 Velocity-inlet; 生产中涡旋分离器出口往往连接其他水处理装置, 此处试验验证过程中涡旋分离器出口是直接通入大气的, 故此处涡旋分离器出口边界条

件设置为常压的 Pressure-outlet。另外,涡旋分离器上表面无封盖,故将其上表面设置为 Symmetry,并将套筒、锥体以及进出水管壁和外筒壁等设置为 Wall 壁面边界条件,其中,壁面采用固壁,在近壁面采用加强壁面函数。

1.4 模拟参数

压力插值方式的方法只在使用压力基求解器中出现。一般情况下可选择标准压力基,其适用于含有高回旋数的流动、高 Rayleigh 数的自然对流、高速旋转流动、多孔介质流动、高曲率计算区域等流动情况。对于含有大体力的流动,则需选择 Body Force Weighted。基于 CFD 仿真软件 Fluent 17.0 平台和戴尔服务器,根据试验及实际情况采用有限体积法离散化的三维 N-S 方程及非耦合隐式方案,选择标准 RSM 七方程湍流模型<sup>[23]</sup>,选用分离式压力修正法中的 SIMPLE 算法作为流场数值求解方法,速度校正方程中压力项选用默认的 standard 格式。为便于收敛,扩散项、源项和对流项均采用一阶迎风差分格式离散,进行数值求解。其它相关物性参数和初始参数的设定如表 1 所示。

表 1 参数设定

Tab. 1 Parameter setting

参数	数值
固相颗粒直径/mm	0.06
固相颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 060
进水口固相体积分数/%	60
液相密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 000
液相粘性系数/(kg·(m·s) <sup>-1</sup> )	0.001
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.81
压强/Pa	101 325
松弛因子:动量	0.5
松弛因子:湍动能	0.5
松弛因子:湍消散率	0.5
进水口速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.36
湍流强度/%	5

2 模拟结果与分析

通过 Fluent 的计算模拟,得到了不同结构涡旋分离器相关速度云图、涡量云图、速度矢量云图、液相流线和固相(生物絮团)的分布情况等结果。同时结合涡旋分离器中心监测线和进水口位置横截面 Z=0.315 m 处径向监测线,如图 3 所示,对其速度场和固相体积分数分布进行分析。

2.1 计算与试验结果对比分析

模型试验在浙江大学农业生物环境工程研究所实验室中完成,中试规模的涡旋分离器(结构 A)如图 4 所示。为验证模拟结果的可靠性,设置图 3 中

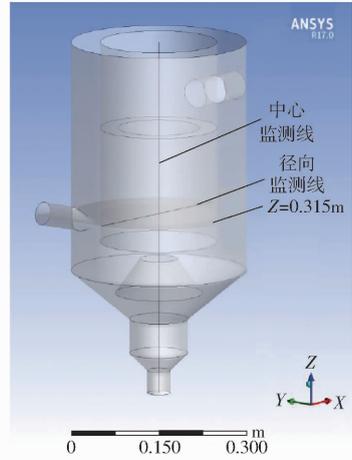


图 3 监测线位置图

Fig. 3 Monitoring lines position



图 4 涡旋分离器实物图

Fig. 4 Picture of hydraulic vortical separator

Z=0.315 m 平面上 S1 ~ S5 5 个监测点,其坐标分别为 (-0.125, 0, 0.315)、(-0.088, -0.088, 0.315)、(0.088, -0.088, 0.315)、(0.088, 0.088, 0.315)和(-0.088, 0.088, 0.315)。

用便携式测速仪对监测点位置流速进行测量,实测结果与模拟结果对比如图 5 所示。其中,临界点为实测值误差为 ±20% 分别对应的值,实测值为多次测量各点的实测平均值。由图 5 可知,监测点模拟值与实测值存在一定误差,且 S1 和 S2 模拟值相对实测值误差较大。该误差除了由于 S1 和 S2 处

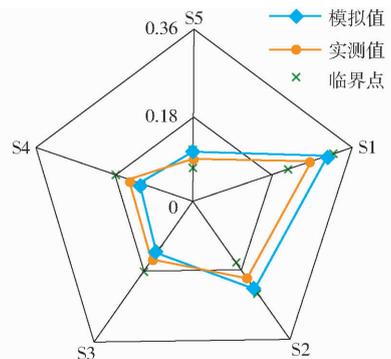


图 5 监测点速度模拟值与实测值对比(单位:m/s)

Fig. 5 Comparison of CFD results with experiment data of magnitude velocity at monitoring points (m/s)

流速变化梯度较大,仪器放置测量点位置出现偏差造成之外,最主要的是因为模拟过程中简化了生物絮团碰撞形式,以及未考虑生物絮团对液相流场影响和 Fluent 17.0 软件模型自身的缺陷造成的,但由图 5 可以清晰看到各监测点模拟值均在实测值临界点之间,因此,模拟结果在 20% 可接受误差范围内,模拟结果可靠。

### 2.2 速度分析

针对 3 种不同结构涡旋分离器,对横截面和纵截面混合相速度进行比较分析。在相同显示范围、配色方案和视角条件下,涡旋分离器代表性截面处的液相速度等值线图如图 6 所示。其反映了 3 种涡旋分离器流场模拟相同时间的速度分布情况。由图 6 可知,随着  $\alpha$  的增大,涡旋分离器外筒

壁处速度变化不大,而套筒内速度均匀性降低且湍流逐渐加剧,最终导致影响涡旋分离器分离效率的沉积仓内部流场湍流加剧,不利于固相颗粒的沉积。

图 7 为典型位置速度分布曲线,由图 7a 可知,涡旋分离器径向在内套筒处速度发生阶跃式变化,且在进口一侧速度高于另一侧,涡旋分离器结构 B 和结构 C 相对结构 A 在套筒内速度较高。由图 7b 可知,在沉积仓中心处 3 种结构速度基本相同,仅在沉积仓中心位置,涡旋分离器结构 B 和结构 C 高于结构 A,这也与图 6 分析结果相同。而在沉积仓至扰流盘位置涡旋分离器结构 A 的速度大于结构 B 和结构 C,这主要是因为内套筒筒径大,中心处流场湍流变化不大。

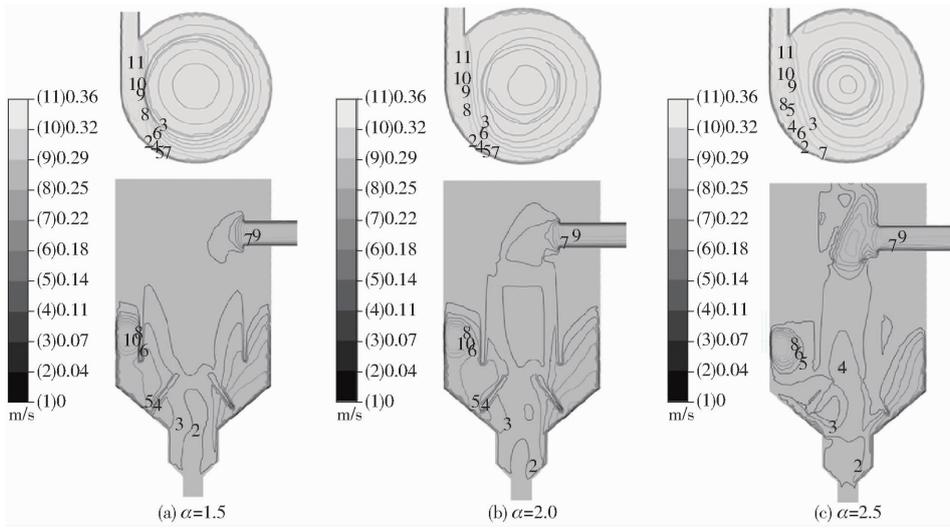


图 6 涡旋分离器速度云图

Fig. 6 Velocity magnitude contours of hydraulic vortex separator

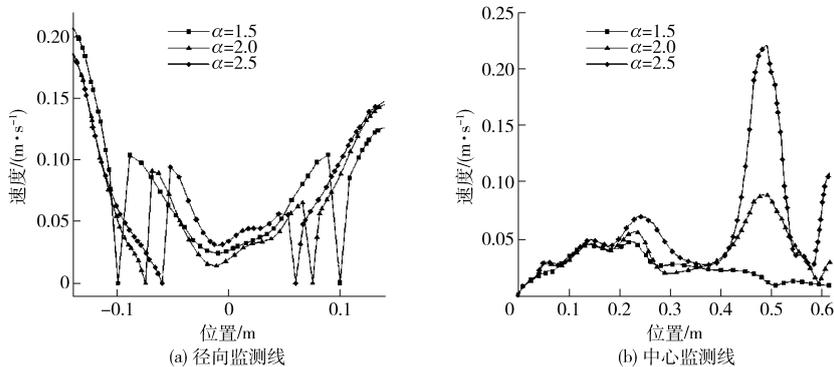


图 7 速度分布曲线

Fig. 7 Velocity distribution curves of radial line and central line

在相同显示范围、配色方案、视角和速度矢量稀疏程度的条件下,3 种结构典型截面处速度矢量云图如图 8 所示。由图 8 可知,3 种结构涡旋分离器在进水口以下位置速度矢量相似,三者的区别主要体现在扰流盘以上部分,随着  $\alpha$  的增大,3 种结构参数内部流场流速增大,而外侧趋势与之相反,综合以

上分析可知,结构  $\alpha = 1.5$  的流场理论上有利于固相颗粒的分离和沉积。

### 2.3 流体迹线分析

迹线是同一质点在连续时间过程内的流动轨迹线。迹线是拉格朗日法描述流动的一种方法。迹线只与流体质点有关,分析迹线的形状可以对流体的

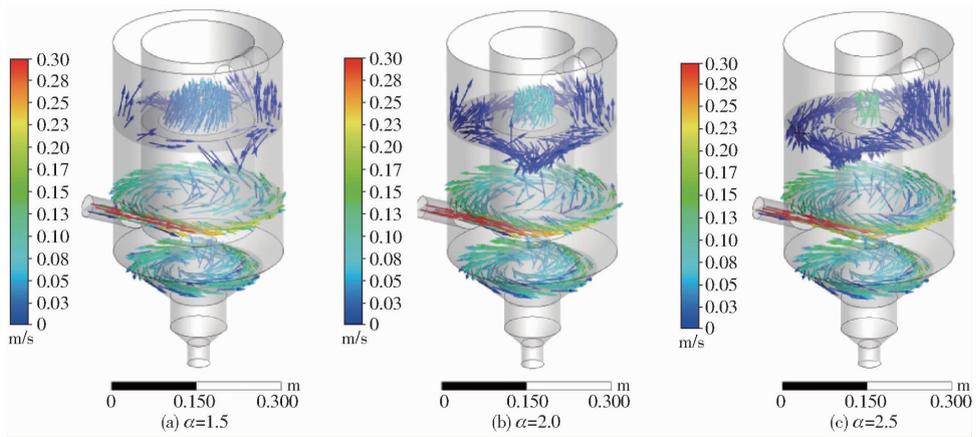


图8 横截面速度矢量云图

Fig.8 Vector contours of cross section

流动状态进行更详尽的描述,可以说是对速度的分析进行的补充。图9给出了3种结构涡旋分离器内部流场的迹线图,迹线的颜色是以液相的速度为标准的。结合前文速度场的分析,对于3种结构涡旋分离器,由于结构 $\alpha = 1.5$ 外侧流场速度相对较大,

因此流体迹线在此处迹线较为繁密。进水口流入的液相流至相应池壁一部分向上旋转一部分向下旋转,此处结果与图8速度矢量结果相同。由于结构 $\alpha = 1.5$ 旋转流速较强,故在一定范围内将提高涡旋分离器整体分离效率。

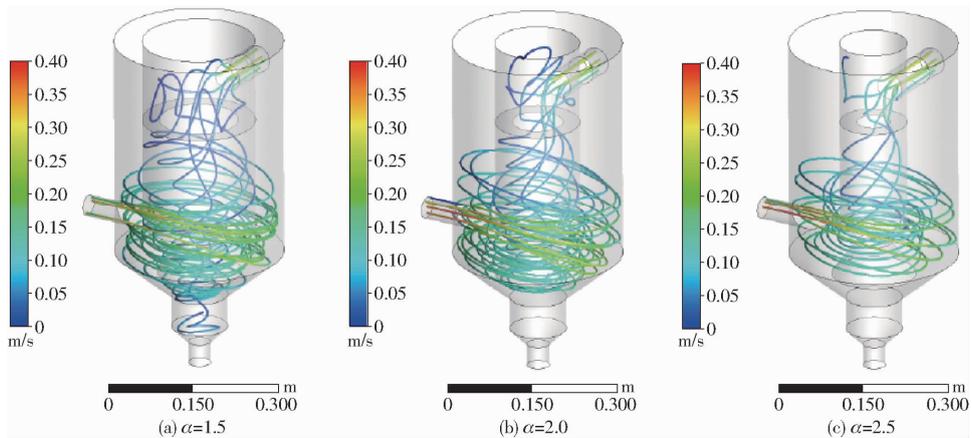


图9 流体迹线云图

Fig.9 Streamlines contours of hydraulic vortex separator

## 2.4 涡旋和涡量分析

涡量表示涡向量大小,它是流体微元在流场中运动时旋转程度的量度。涡量反映的是流体的循环流动情况,当涡量为正时,绝对值越大,则逆时针循环量越大,为负时,绝对值越大顺时针循环量越大(俯视视角)。而涡旋有时也称旋涡,是流体团的旋转运动。

从图10涡量云图可以得出,3种结构涡旋分离器的涡量分布规律相似,在水口一侧涡量较大,流体循环流动趋势较强。结合图11横截面归一化螺旋度云图可知,随着 $\alpha$ 的增大,涡旋分离器的涡旋加剧,而涡旋的产生伴随着机械能的耗损,不利于节约能耗。

## 2.5 分离效率分析

由图12典型位置处固相体积分数分布曲线可知,结构A固相体积分数总体高于结构B和C,特

别是在套筒内部,此趋势更为明显,同时,结构B和C的体积分数相似。由此可以得出,当 $\alpha > 1.5$ 时,其涡旋分离器分离效率降低,并保持基本稳定。生产中以 $\alpha = 1.5$ 效果较好。图13反映了3种结构涡旋分离器在涡旋分离器出口处面平均固相体积分数。在 $t = 85$  s时,初步估计出口处结构B和结构C固相体积分数均约为50%,而结构A约为44%。涡旋分离器的分离效率 $\eta$ 计算公式为<sup>[26]</sup>

$$\eta = \frac{f_{IN} - f_{OF}}{f_{IN}} \times 100\% \quad (7)$$

式中  $f_{IN}$ ——进口处面平均固相体积分数

$f_{OF}$ ——出口处面平均固相体积分数

经计算可得涡旋分离器结构A分离效率约为27%,而结构B和结构C约为17%。

为进一步验证模拟结果的可靠性,对本文 $\alpha$ 取1.5、2.0和2.5的涡旋分离器进行分离效率试验,

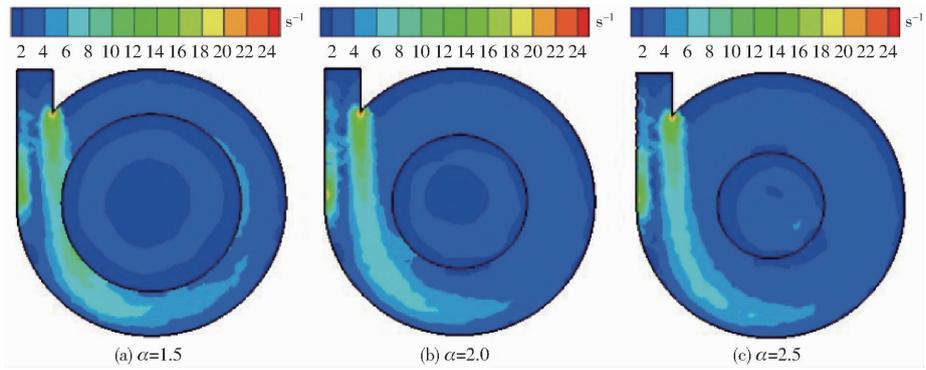


图 10 横截面涡量云图

Fig. 10 Magnitude vorticity contours of cross section

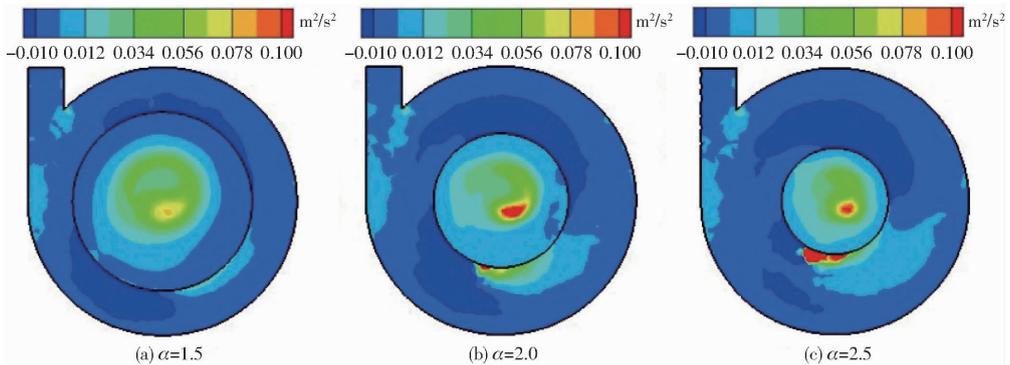


图 11 横截面螺旋度云图

Fig. 11 Swirl contours of cross section

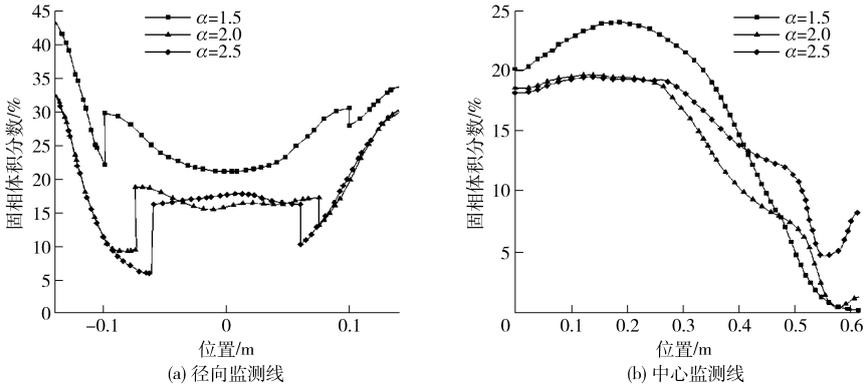


图 12 固相体积分数分布曲线

Fig. 12 Solid phase distribution curves

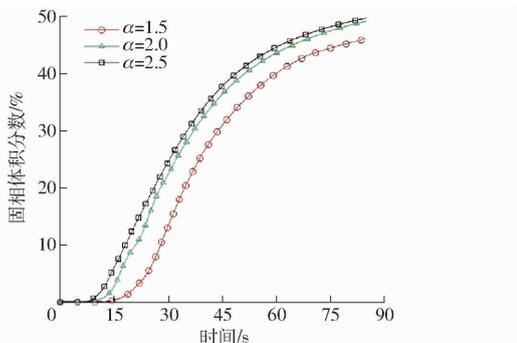


图 13 出口处平均固相体积分数曲线

Fig. 13 Average solid phase volume fraction curves of outlet

在模拟的工况下，试验测得分离效率分别为 7.32%、3.78% 和 2.55%。由此可见虽然速度场实

测值与模拟值吻合较好，但生物絮团分离效率的实测值与模拟值差异较大，主要是因为模拟过程中简化了生物絮团间的碰撞和摩擦，但模拟结果反映了实测分离效率随  $\alpha$  的变化规律，故可用 CFD 模拟优化涡旋分离器结构，从而减少试验次数，降低试验成本。

### 3 结束语

基于 CFD 软件 Fluent 对 3 种结构涡旋分离器流场数值计算表明，将其内部流场视为连续的两相流，并采用欧拉-欧拉模型进行模拟，能够很好地获得其速度场信息。涡旋分离器进水口以下部分速度

流场受结构变化的影响较小。在一定条件下,随着内外筒径比 $\alpha$ 的增加,套筒内流场湍流加剧,且在进水口相对位置和套筒内部涡旋加剧。总体而言,涡旋分离器模拟结果表明在 $\alpha$ 大于1.5后分离效率由27%下降至 $\alpha$ 为2.0时的17%,并当 $\alpha$ 大于2.0

后,分离效率基本保持不变。实测值虽同模拟值有一定差异,但二者关于分离效率和 $\alpha$ 的变化规律是一致的。故在本文给出的生物絮团密度、粒径和体积分数条件下,设计循环生物絮团系统涡旋分离器时 $\alpha$ 取1.5效果较好。

#### 参 考 文 献

- 1 农业部渔业局. 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- 2 TACON A G J, FOSTER I P. Aqua-feeds and the environment; policy implications[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1-4): 181-189.
- 3 AVNIMELECH Y, VERGEGEM M C J, KUMP P. Sustainable land-based aquaculture; rational utilization of water, land and feed resource[J]. *Mediterranean Aquaculture Journal*, 2008, 1(1): 45-55.
- 4 史明明, 刘晃, 龙丽娜, 等. 碳源供给策略对水产养殖废水生物絮团处理效果的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 317-323. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160642&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160642&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.042.  
SHI Mingming, LIU Huang, LONG Li'na, et al. Effect of carbon source supply tactics on treatment of aquaculture wastewater with biofloc technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 317-323. (in Chinese)
- 5 CRAB R, DEFOIRD T, BOSSIER P, et al. Biofloc technology in aquaculture; beneficial effects and future challenges[J]. *Aquaculture*, 2012(356-357): 351-356.
- 6 RAY A J, LEWIS B L, BROWDY C L, et al. Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, super intensive culture systems[J]. *Aquaculture*, 2010, 299(1-4): 89-98.
- 7 DE SCHRYVER P, CRAB R, DEFOIRD T, et al. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 277(3-4): 125-137.
- 8 MISHRA J K, SAMOCHA T M, PANTNAIK S, et al. Performance of an intensive nursery system for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited discharge condition[J]. *Aquacultural Engineering*, 2008, 38(1): 2-15.
- 9 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.
- 10 程秀花, 毛罕平, 倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 173-179.  
CHENG Xiuhua, MAO Hanping, NI Jun. Numerical prediction and CFD modeling of relative humidity and temperature for greenhouse-crops system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 173-179. (in Chinese)
- 11 宁国鹏, 王德成, 王光辉, 等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 84-90.  
NING Guopeng, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and CFD simulation of quad-pass rotary drum dryer-separator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 84-90. (in Chinese)
- 12 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 79-84. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120217&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120217&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017.  
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 79-84. (in Chinese)
- 13 SAKURA G B, ANDREW Y T L. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution[J]. *Powder Technology*, 2015, 286: 488-506.
- 14 JAYEN P V, BRIAN J L, Michel F C. Design methodology for the swirl separator[J]. *Aquacultural Engineering*, 2005, 33(1): 21-45.
- 15 ZHAO Chuanwei, SUN Haoyu, LI Zengliang. Structural optimization of downhole oil-water separator[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 148: 115-126.
- 16 ALKHADDAR R M, HIGGINS P R, PHIPPS D A, et al. Residence time distribution of a model hydrodynamic vortex separator[J]. *Urban Water*, 2001, 3(1-2): 17-24.
- 17 SONALI S, SWATI M. A 3-dimensional Eulerian-Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2013, 37(5): 2921-2932.
- 18 周理. 旋风分离器基本理论与最佳设计[J]. *化工炼油机械通讯*, 1979(5): 18-31.
- 19 Fluent Inc. *Fluent user's guide*[M]. Lebanon: Fluent Inc., 2013.
- 20 DIVYAMAAN W, RANJEET P U, MOSES O T, et al. CFD simulation of solid-liquid stirred tanks[J]. *Advanced Powder Technology*, 2012, 23(4): 445-453.

- cfD simulation and field measurements[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(5):1493 - 1500.
- 16 CAMBRA-LOPEZ M, AARNINK A J A, ZHAO Y, et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: a review of an air pollution problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1):1 - 17.
- 17 HEBER A J, STROIK M, NELSEN J L, et al. Influence of environmental-factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing buildings[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(3):875 - 881.
- 18 张师帅. CFD 技术原理与应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- 19 NORTON T, SUN D, GRANT J, et al. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12):2386 - 2414.
- 20 GB/T 17824.3—2008 规模猪场环境参数及环境管理[S]. 2008.
- 21 SARAZ J A O, VELASQUEZ H J C, BEDOYA A E. Thermal evaluation and validation of a computational model to unrefined sugar (panela) burner GP150[J]. Dyna, 2010, 77(162):237 - 247.
- 22 AARNINK A J A, STOCKHOFE-ZURWIEDEN N, WAGEMANS M J M. Dust in different housing systems for growing-finishing pigs[C]//Engineering the Future, AgEng Conference, 2004.
- 23 VIEGAS S, MATEUS V, ALMEIDA-SILVA M, et al. Occupational exposure to particulate matter and respiratory symptoms in portuguese swine barn workers[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health-part a-current Issues, 2013, 76(17):1007 - 1014.
- 24 VAN RANSBEECK N, VAN LANGENHOUE H, VAN WEYENBERG S, et al. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(3):280 - 289.
- 25 COSTA A, BORGONOVO F, LEROY T, et al. Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1):118 - 124.

(上接第 294 页)

- 21 周大庆, 米紫昊, 茅媛婷. 基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1):48 - 52. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130110&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130110&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.010.
- ZHOU Daqing, MI Zihao, MAO Yuanting. 3-D numerical simulation of inlet structure flow in pumping station based on Eulerian solid liquid two-phase flow model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):48 - 52. (in Chinese)
- 22 喻黎明, 邹小艳, 谭弘, 等. 基于 CFD - DEM 耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 46(1):126 - 132. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160117&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160117&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.017.
- YU Liming, ZOU Xiaoyan, TAN Hong, et al. 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydro-cyclone based on coupled CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 46(1):126 - 132. (in Chinese)
- 23 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2):1 - 11. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160201&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160201&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
- WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):1 - 11. (in Chinese)
- 24 李骅, 张美娜, 尹文庆, 等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2):12 - 16. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2013s203&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s203&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.003.
- LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, et al. Optimization of airflow field on air and screen cleaning device based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):12 - 16. (in Chinese)
- 25 陈晋南. 传递过程原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 26 ANDOH R Y G, SAUL A J. The use of hydrodynamic vortex separators and screening systems to improve water quality[J]. Water Science and Technology, 2003, 47(4):175 - 183.