

基于CFD – DEM耦合的水力旋流器水沙运动三维数值模拟

喻黎明^{1,2} 邹小艳^{1,2} 谭弘^{1,2} 严为光^{1,2} 陈立志³ 熊子维⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410004; 2. 长沙理工大学水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410004;
3. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083; 4. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128)

摘要: 针对水力旋流器内流场运动复杂、沙粒运动规律难以掌握的问题,运用基于颗粒动力学理论的欧拉-拉格朗日液固多相湍流模型,对水力旋流器内的水沙两相三维流动进行了 CFD – DEM 耦合数值模拟研究,分析了水力旋流器内单个沙粒的轨迹线、速度和沙粒群的运动规律、分布特性等。模拟结果表明,沙粒粒径越小,沙粒向下运行的距离越短,越容易从下降流中进入到上升流中,越难以分离。粒径为 40 μm 的沙粒,在圆柱体与圆锥体交界面处出现沙粒峰值,分离效果易受影响,而 50 μm 和 60 μm 沙粒在圆锥体部分出现峰值,具有较好的分离效果。通过跟踪单个沙粒和沙粒群的运动可知,沙粒在圆柱体内主要作圆周运动,进入到圆锥体部分,沙粒既有圆周运动,又有明显的进入沉沙口的直线运动。分析大量沙粒个体和群体运动以及群体分布情况能从微观角度了解水力旋流器的分离效率,是水力旋流器性能研究的有效手段。

关键词: 水力旋流器; 水沙运动; 离散元法; 计算流体力学; 耦合; 数值模拟

中图分类号: S275.6; TQ028.5⁴ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0126-07

3D Numerical Simulation of Water and Sediment Flow in Hydrocyclone Based on Coupled CFD – DEM

Yu Liming^{1,2} Zou Xiaoyan^{1,2} Tan Hong^{1,2} Yan Weiguang^{1,2} Chen Lizhi³ Xiong Ziwei⁴

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
4. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Due to the complexity of the fluid field in hydrocyclone and the difficulty of mastering the law of sediment motion, an Eulerian – Lagrange liquid – solid multiphase turbulence model combined with the kinetic theory of granular flow was used to carry out simulation based on coupled CFD – DEM water-sediment two-phase flow in a hydrocyclone, which analyzed the trochoid and speed of single sediment, speed of sediment group, the moving pattern and distribution of sediment group. The simulation results show that the smaller the sediment size was, the closer the distance was, the more easily uprising from downward trend to upstream, and the more difficult to be separated. For the particles of 40 μm in diameter, sediment peak appeared in the interface of cylinder and cone and the separation effect of sediment was easy to be affected. But for the particles of 50 μm and 60 μm, sediment peak appeared in cone part and sediment had a better separation effect. Through tracking single sediment and sediment group, it can be found that the sediment almost stay in circular motion in cylinder. In cone part, sediment not only stays in circular motion but also obviously runs in line movement when they enter in

收稿日期: 2015 – 07 – 23 修回日期: 2015 – 08 – 30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379024)、国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100507)和湖南省水利科技项目(湘水科计[2013]243 – 21)

作者简介: 喻黎明(1976—),男,副教授,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: liming16900@sina.com

sediment settling. Analyzing the moving pattern and distribution of single sediment and sand group provides a microscopic method for understanding separation efficiency and also provides an effective research method for the further study of the hydrocyclone performance.

Key words: hydrocyclone; water and sediment flow; discrete element method; computational fluid dynamics; coupling; numerical simulation

引言

水力旋流器是利用离心力分离固液两相流体的高效分离设备,其结构简单、操作方便、分离效率高、占地面积小,目前被广泛应用于农业灌溉、水利等领域的水沙分离处理。

近几年,计算流体力学(CFD)在水力旋流器的研究运用已较为普遍。采用计算流体力学技术对水力旋流器进行模拟的研究越来越多。研究内容涵盖水力旋流器内部流场探索^[1-4]、优化结构以提高分离性能^[5-8]、空气柱的形成机理以及空气柱对流场的影响等^[9],通过各种方式提高 CFD 模拟水力旋流器内部流场和流体固体颗粒(浓度、直径及密度等)分布的准确度和精度^[10-13]。但是,上述 CFD 数值模拟过程中,均把沙粒和水流当成 2 种流体进行计算,且拉格朗日坐标系下采用离散相模型(Discrete phase mode, DPM)的 CFD 计算,是在流场计算结束后投入沙粒,不考虑沙粒对流场的作用,也未考虑沙粒与沙粒、沙粒与边壁之间的碰撞等因素,故脱离沙粒实际运动情况,导致随机性很强。随着 CFD-DEM(Discrete element method)耦合软件的发展,通过软件模拟计算沙粒之间及沙粒与边壁的碰撞已成为现实。离散单元方法(EDDEM)是通过应用牛顿运动定律分析离散相沙粒个体运动和群体分布,而 CFD 是通过流体体积和混合多相流模型的协助,在数值上求解流体力学方程,从而模拟水沙介质的运动。本文应用计算流体力学与离散单元法相结合的方法,从微观角度分析水力旋流器内沙粒的运动情况与水沙分离过程,以指导水力旋流器的选择和结构优化设计。

1 数值模拟方法

1.1 网格划分及边界条件

表 1 为本文采用的水力旋流器几何参数,图 1 为水力旋流器结构示意图。溢流管采用厚壁形式,既可以抑制短路流,又可以减少预分离区的能量损耗,壁厚应满足入口射流不冲击到溢流管。网格划分对数值模拟至关重要,并且会直接影响计算的精确度以及时间。考虑到水力旋流器内部的流场属于气液和固液构成的高速旋转准自由涡状态的复杂流

场^[11,14],因此选择了 RSM 湍流模型,采用六面体进行网格划分,整个计算域共有 46 009 个网格,并进行了网格无关性检验,如图 2 所示,图 2 中截面 1、2、3、4、5 分别表示与溢流口顶端距离为 12、30、48、93、120 mm 的截面。

表 1 水力旋流器几何参数
Tab. 1 Geometrical parameters of a hydrocyclone

圆柱 粒径/ mm	矩形 入口直 径/mm	溢流口 直径/ mm	沉沙口 直径/ mm	圆柱体 高度/ mm	溢流管 插入深 度/mm	锥角/ (°)	总 高度/ mm
10	2	3.4	2.2	40	8	4	160



图 1 水力旋流器结构示意图
Fig. 1 Structural skematic of hydrocyclone

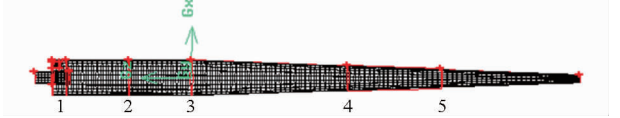


图 2 计算网格划分和分析截面选择
Fig. 2 Computational grid and cross-sections for analysis

进口为速度入口条件,水相和沙粒相速度均为 5 m/s,湍流强度 I 为 5%,水力粒径 D 为 2 mm,溢流口和沉沙口均采用压力出口条件,压力为大气压,回流湍流强度均为 5%,沙粒回流体积分分数均为零。壁面采用标准壁面函数法。

1.2 数学模型及模拟方法

水力旋流器内水流可视为粘性不可压缩的流体,常温下定常流动,考虑重力和水力旋流器壁面粗糙度的作用,忽略表面张力影响。

水相连续性方程和动量方程^[15]分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\alpha_c \rho_c}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\alpha_c \rho_c \tilde{v}_{cj}}) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\alpha_c \rho_c \tilde{v}_{ci}}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\alpha_c \rho_c \tilde{v}_{cj} \tilde{v}_{ci}}) = \\ - \overline{\alpha_c} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{cij}}{\partial x_j} + F_{dci} + \\ \overline{\alpha_c \rho_c} g - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\alpha_c \rho_c v''_{ci} v''_{cj}}) \end{aligned} \tag{2}$$

其中

$$F_{dci} = - \sum_d F_{dc, di}$$

式中 $\bar{p}$ ——水相与沙粒相的总压力
 ρ_c ——水相质量密度 g ——重力加速度
 $\tilde{v}_{ci}、\tilde{v}_{cj}$ ——水相湍流粘性系数
 $\bar{\alpha}_c$ ——水相体积分数
 $\tilde{\tau}_{cij}$ ——水相粘性应力
 F_{dci} ——水相作用于沙粒相的阻力
 $\bar{\alpha}_c \rho_c v''_{ci} v''_{cj}$ ——水相雷诺应力
 $F_{dc,di}$ ——水相作用于沙粒相的阻力

沙粒相连续性方程和动量方程^[15]分别为

$$\frac{\partial \bar{\alpha}_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\alpha}_d \tilde{v}_{di}) = 0$$

(3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\alpha}_d \rho_d \tilde{v}_{di}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\alpha}_d \rho_d \tilde{v}_{dj} \tilde{v}_{di}) = \\ - \bar{\alpha}_d \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{p}_d}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{dji}}{\partial x_j} + \\ F_{dc,di} + F_{d,si} + \bar{\alpha}_d \rho_d g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\alpha}_d \rho_d \overline{v''_{di} v''_{dj}}) \end{aligned}$$

(4)

其中 $F_{dc,di} = \beta_{dc}(\tilde{v}_{ci} - \tilde{v}_{di})$

$$F_{d,si} = \sum_s \beta_{ds}(\tilde{v}_{ci} - \tilde{v}_{di})$$

式中 $\bar{p}_d$ ——沙粒碰撞引起的固体压力
 β_{dc} ——水相与沙粒相阻力系数
 $F_{d,si}$ ——沙粒相 d 与沙粒相 s 之间的碰撞阻力
 β_{ds} ——沙粒相阻力系数
 $\tilde{\tau}_{dji}$ ——沙粒碰撞和位置平移引起的沙粒粘性应力
 $\bar{\alpha}_d \rho_d \overline{v''_{di} v''_{dj}}$ ——沙粒相雷诺应力
 $\bar{\alpha}_d$ ——沙粒相体积分数
 $\tilde{v}_{di}、\tilde{v}_{dj}$ ——沙粒相湍流粘性系数
 ρ_d ——沙粒相质量密度
 g_i ——沙粒相加速度

在水力旋流器中可忽略沙粒相所受的升力和虚拟质量力,所以方程中没有考虑。

采用欧拉-拉格朗日耦合方法,结合文献[16-17]中相关系数的设置,本文具体参数设置如表2~4所示。沙粒的移动、沙粒与沙粒之间的碰撞、沙粒与壁面之间的碰撞以及沙粒运动对周围连续相的作用,能量、动量交换,均采用离散方法模拟,沙粒之间及沙粒与壁面之间的碰撞不会发生显著的塑性形变,属于硬沙粒接触,是湿沙粒接触模型,为简化计

表 2 材料力学特性

Tab.2 Physical property of material mechanics

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
壁面	0.394	220	1 050
颗粒	0.400	20	2 500

算,设定颗粒为球形,颗粒与颗粒、颗粒与壁面间的碰撞采用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型。

表 3 接触参数

Tab.3 Contacting parameters

碰撞形式	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.3	0.3	0.005
颗粒-壁面	0.3	0.3	0.005

表 4 模型中使用的参数

Tab.4 Parameters used in model

相	参数	数值
固	密度/(kg·m ⁻³)	2 500
	粒径/ μm	40,60,80
	滚动摩擦因数	0.005
	静摩擦因数	0.3
	泊松比	0.4
	弹性模量/(N·m ⁻²)	2×10^7
	恢复系数	0.3
	颗粒入口速度/(m·s ⁻¹)	1.02
液	密度/(kg·m ⁻³)	998.2
	泊松比	0.394
	弹性模量/(N·m ⁻²)	2×10^8
	粘度/(Pa·s)	0.001
	入口速度/(m·s ⁻¹)	5

计算过程中,主要考虑离心力、曳力和重力,其他附加力如压力梯度力、虚假质量力升力等与前者相比数量级小,故不予考虑^[18]。

沙粒间法向力 F_n 计算式为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* R^* \frac{1}{2} \alpha^{\frac{3}{2}}$$

(5)

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}$$

式中 E^* ——等效弹性模量
 R^* ——等效沙粒半径
 E_1 ——沙粒 1 的弹性模量
 v_1 ——沙粒 1 的泊松比
 E_2 ——沙粒 2 的弹性模量
 v_2 ——沙粒 2 的泊松比

法向阻尼力 F_n^d 计算式为

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_n^{rel}$$

(6)

其中

$$m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

式中 m^* ——等效质量
 m_1 ——沙粒 1 质量
 m_2 ——沙粒 2 质量
 v_n^{rel} ——法向相对速度
 β ——阻力系数

S_n ——法向刚度

沙粒间切向力 F_t 计算式为

$$F_t = -S_t \delta$$

其中

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \alpha} \quad (7)$$
$$G^* = \frac{2 - v_1^2}{G_1} + \frac{2 - v_2^2}{G_2} \quad (8)$$

式中 δ ——切向重叠量

G_1 ——沙粒 1 的剪切模量

G_2 ——沙粒 2 的剪切模量

R ——沙粒半径

α ——重叠量

S_t ——切向刚度

G^* ——等效剪切模量

则沙粒间的切向力 F_t 计算式可转换为

$$F_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_t^{rel} \quad (9)$$

式中 v_t^{rel} ——切向相对速度

计算滚动摩擦是非常重要的,它可以通过接触表面上的力矩来说明,即

$$T_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (10)$$

式中 μ_r ——滚动摩擦因数

R_i ——质心与接触点间的距离

ω_i ——接触点处物体的单位角速度矢量

CFD 与 DEM 双向耦合过程为:CFD 求解连续相,获得的流场信息通过曳力模型转化为作用在沙粒上的流体曳力;DEM 计算沙粒受力情况,给出沙粒新的位置和速度等信息及对流场的反作用;CFD 更新流场并产生对沙粒新的受力情况,二者通过一定的模型进行质量、动量和能量的传递,实现耦合[19-20]。

2 结果与分析

2.1 流场分析

水力旋流器内截面压力分布如图 3a 所示,压力整体呈中心轴对称分布,横截面最小值在中心轴线上,最大值在壁面上。纵剖面水力旋流器中部压力高,溢流口和沉沙口压力最小,形成压力梯度。水力旋流器内液相切向速度分布如图 3b 所示,中心轴线上较小速度为 0.14 m/s,越靠近旋转器壁面,则速度越大,为 1.85 m/s,靠近器壁,由于摩擦力致使切向速度下降为 0 m/s,文献[21]验证了分析结果。

2.2 沙粒群运动分析

按沙粒体积分数 0.08% 计算,计算时间为 2 s。图 4 是不同时刻下水力旋流器内的沙粒数,0.6 s 时,水力旋流器内沙粒最多,0.8 s 后,水力旋流器内沙粒数趋向平衡稳定,粒径为 40、50、60 μm 的沙粒

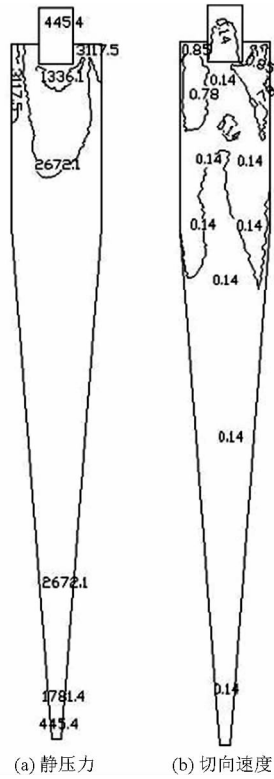


图 3 截面分布图

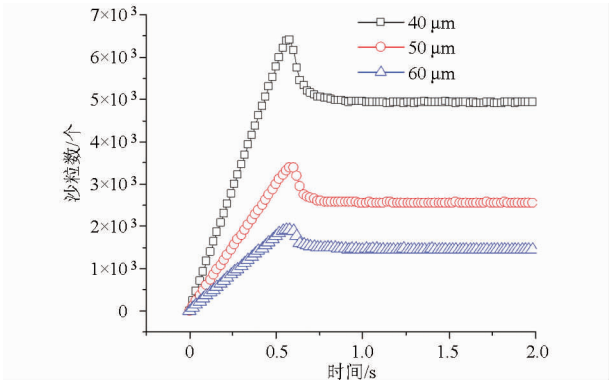


图 4 不同时刻不同粒径水力旋流器内沙粒数

Fig.4 Number of particles in a hydrocyclone at different times and different sediment particle sizes

在水力旋流器内个数分别为 5 059、2 591、1 491 个,且存在一定的波动,2 s 内,沙粒分别有 23 886、12 230 和 7 078 个进入水力旋流器,流出水力旋流器的沙粒分别为 18 960、9 686、5 637 个,流出沙粒运行平均时间分别为 0.423、0.415、0.413 s,即随着沙粒粒径的增加,沙粒在水力旋流器内停留时间减少,没有排出的沙粒中有一部分进入了内循环,超过平均运行时间没有排出的沙粒分别为 565、257、135 个。表明沙粒粒径越小,受流体运动影响越大,跟随性越强,由于水力旋流器内流体运动复杂,因而运动时间越长,越容易进入死循环状态而难以排出。这与文献[22]试验测试结果相似。说明沙粒只要在水力旋流器分离粒径范围内,沙粒在离心力、自身

重力、压力梯度力和拽力等合力作用下,能快速地分离。图 5 是不同时刻 40、50、60 μm 沙粒群分布图, $t=0.1\text{ s}$ 时,沙粒刚进入水力旋流器, $t=0.8\text{ s}$ 和 $t=2.0\text{ s}$,沙粒进入平衡状态,在流体旋流运动下,大部分沙粒运动轨迹也类似于流体旋转,与代表性沙粒运动轨迹接近。

2.3 沙粒群分布分析

不同位置沙粒数量稳定后 ($t>0.8\text{ s}$),40、50、60 μm 沙粒个数变化分别如图 6a、6b、6c 所示。截面 3 和 4 处 40 μm 沙粒峰值均距离壁面 0.5 mm,而截面 1、2 和 5 峰值都在水力旋流器内壁上;只有截面 4 处 50 μm 和 60 μm 沙粒峰值距离壁面 0.5 mm,截面 1、2、3 和 5 峰值都在水力旋流器内壁上。截面 1 和 2 为圆柱体部分,靠近入口,较高的切向速度将沙粒分离到靠近内壁处。结合图 3,截面 3、4、5 切向速度大小接近,相同位置上沙粒离心力主要决定于沙粒直径,截面 3 是圆柱和圆锥的交界面,在离心力和压力梯度等作用下,离心力小于压力梯度力,粒径较小的沙粒(40 μm)易向中心靠拢,较易进入向上的流体中,从而从溢流口排出,而粒径较大的沙粒

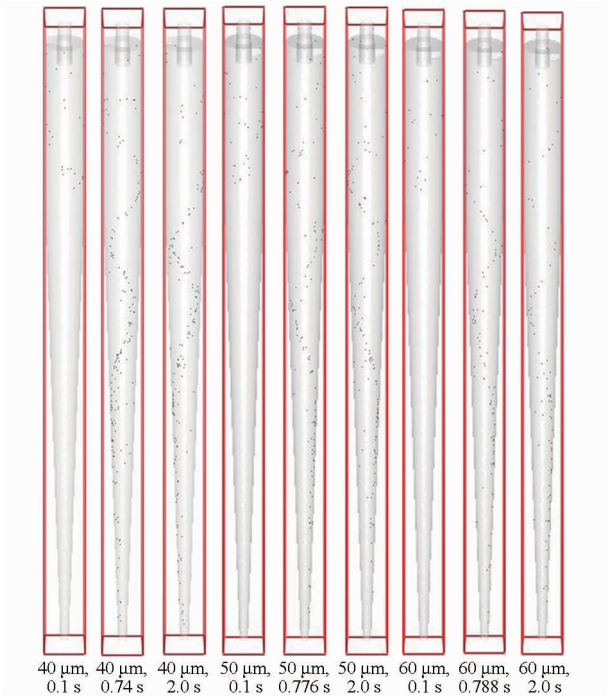


图 5 不同时刻沙粒粒径为 40、50、60 μm 的沙粒群分布图

Fig. 5 Distribution of sediment particles groups at different moments

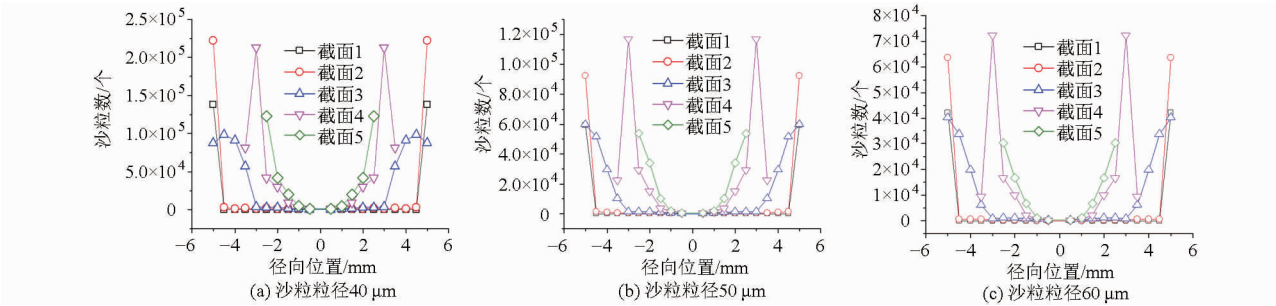


图 6 水力旋流器内分析截面不同位置处沙粒个数分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of number of sediment particles on different positions of cross-section in a hydrocyclone

(50、60 μm) 具有更大的离心力,不易进入上升流中,直到截面 4 位置,才出现峰值,截面 4 处于锥体部分,40、50、60 μm 的沙粒在距离壁面 0.5 mm 处均出现了峰值,在压力梯度下,有部分沙粒进入了上升流中,可能从溢流口排出,而截面 5 处于锥体下端,此时水力旋流器内压力梯度主要表现为从中部往沉沙口的方向,因而沙粒的峰值出现在内壁上。

2.4 代表性沙粒运动分析

从图 5 中取出部分具有类似运动轨迹沙粒群的代表性沙粒,其运动轨迹线如图 7 所示,图 7a、7b、7c 中左图为沙粒从溢流口排出,右图为沙粒从沉沙口排出。

从图 7 各左图可见,随着沙粒粒径的增大,从溢流口排出的沙粒向下运动距离越大,越难从下降的趋势中脱离再进入向上运动的水流中。图 8、图 9 是图 7 中代表性沙粒运动速度,沙粒以 5 m/s 速度

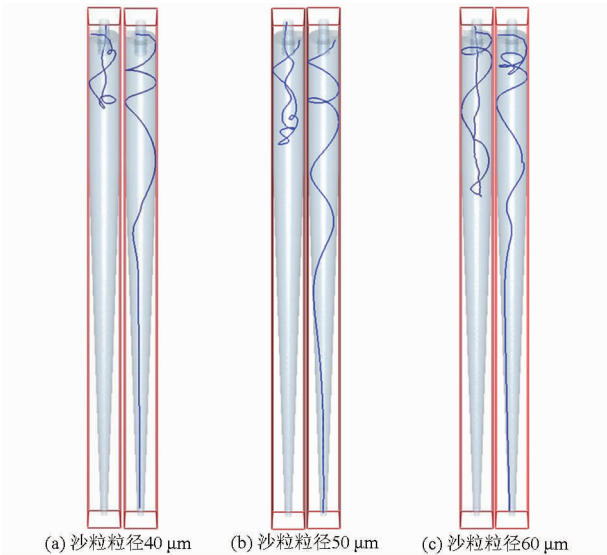


图 7 代表性沙粒运动轨迹线

Fig. 7 Numerically obtained sediment particles trajectories in hydrocyclone

由入口处切向进入水力旋流器内部作旋转运动,在离心力作用下被运动至水力旋流器内壁,运动速度明显下降,从沉沙口排出的沙粒其运动速度与沙粒粒径关系不明显,沙粒的切向速度主要分布在圆柱体附近,进入圆锥体后,尤其是在圆锥体下部,主要呈现垂直向下运动趋势,如图 7 中从沉沙口排出沙粒的运动情况,沙粒几乎呈直线下降趋势,最终以 2 m/s 左右的速度从沉沙口流出。而从溢流口排出

的沙粒,随着沙粒粒径的减小,沙粒越靠近水流中部,粒径越小速度越大,越远离横坐标,最终以 1.5 m/s 左右的速度溢出。沙粒在水力旋流器中主要受压力梯度力和曳力,在沉沙口和溢流口附近,压力梯度力明显大于曳力,从而使沙粒在此 2 个位置上趋向于直线运动,而在其他位置上,压力梯度力和曳力处于均衡状态,沙粒以圆周运动为主,在靠近圆柱和圆锥壁面产生了摩擦,因此速度较低。

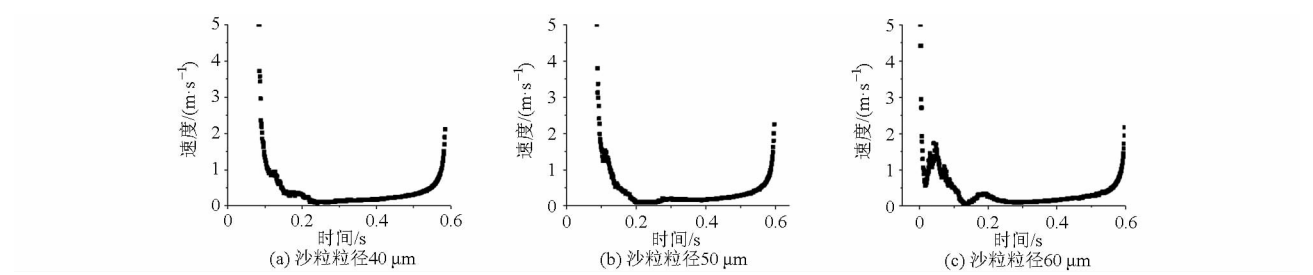


图 8 从沉沙口流出的代表性沙粒运动速度

Fig. 8 Velocity condition of representative sediment particles from underflow mouth

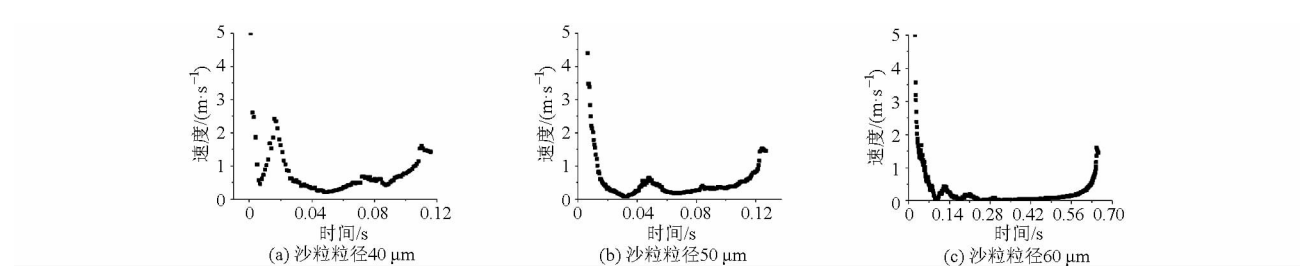


图 9 从溢流口溢出的代表性沙粒运动速度

Fig. 9 Velocity condition of representative sediment particles from overflow mouth

3 结论

- (1)水力旋流器水沙两相流中沙粒在圆柱体段主要作圆周环绕下降运动,在圆锥体段,沙粒既有圆周运动,又有直线运动。沙粒粒径越小,沙粒向下运行的距离越短,越易从下降趋势中转变为上升趋势。
- (2)随着粒径的增大,沙粒在水力旋流器内运行时间变短,粒径越小,跟随性越强,越难实现水沙分离。
- (3)40 μm 沙粒在圆柱体与圆锥体交界面处出

- 现沙粒峰值,分离效果易受压力梯度力影响,50 μm 和 60 μm 沙粒在圆锥体部分出现峰值,分离效果较好。
- (4)CFD-DEM 计算沙粒群运动规律能从微观角度了解水力旋流器分离情况,跟踪单个沙粒和沙粒群的运动规律,对于辅助提高水力旋流器结构设计具有重要作用。
 - (5)由于多相流计算的困难性,只采用了 3 种粒径的沙粒,但能够较正确分析出水力旋流器内沙粒运动规律,为下一步试验工作打下了基础。

参 考 文 献

1

Cullivan J C,Williams R A,Dyakowski T,et al. New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics[J]. Minerals Engineering,2004,17(5):651-660.

2

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,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,2013,39(1):1-7. (in Chinese)

3

蒋基安,赵天彪,杨兴华,等. 基于 CFD 的多锥段水力旋流器内部流场的数值模拟[J]. 现代矿业,2013,535(11):21-24.
Jiang Ji'an,Zhao Tianbiao,Yang Xinghua,et al. Numerical simulation of flowing field in polyconical cyclone based on CFD[J]. Modern Mining,2013,535(11):21-24. (in Chinese)

4

Amini S,Mowla D,Golkar M, et al. Mathematical modelling of ahydrocyclone for the down-hole oil-water separation(DOWS) [J]. Chemical Engineering Research and Design,2012,90(12):2186-2195.

5

张丹,陈晔. 锥角对固-液水力旋流器流场及其分离性能的影响[J]. 流体机械,2009,37(8):11-16.

- Zang Dan, Chen Ye. Effect of the cone angle on flow field and separation performance of solid-liquid hydrocyclones [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8): 11 – 16. (in Chinese)
- 6 钟声. 新型多孔溢流管式水力旋流器的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
Zhong Sheng. Research on a new type porous overflow hydrocyclone [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012. (in Chinese)
- 7 Zhao Lixin, Jiang Minghu, Xu Baorui, et al. Development of a new type high-efficient inner-cone hydrocyclone [J]. Chemical Enginee-ring Research and Design, 2012, 90(12): 2129 – 2134.
- 8 Narasimha M, Brennan M, Holtham P N. Large eddy simulation of hydrocyclone-prediction of air-core diameter and shape [J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 80(1): 1 – 14.
- 9 Doby M J, Nowakowski A F, Yiu I, et al. Understanding air core in hydrocyclone by studying pressure distribution as a function of viscosity [J]. International Journal of Mineral Processing, 2008, 86(1 – 4): 18 – 25.
- 10 Udaya Bhaskar K, Rama Murthy Y, Ravi Raju M, et al. CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone [J]. Minerals Engineering, 2007, 20(1): 60 – 71.
- 11 Delgadillo J A, Rajamani R K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem [J]. International Journal of Mineral Process, 2005, 77(4): 217 – 230.
- 12 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵性能的影响 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 64 – 68.
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan. Influence of the offset of labyrinth channels of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 64 – 68. (in Chinese)
- 13 喻黎明, 梅其勇. 迷宫流道灌水器抗堵塞设计及 PIV 试验验证 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 155 – 160.
Yu Liming, Mei Qiyong. Anti-clogging design and experimental investigation of PIV for labyrinth-channel emitters of drip irrigation emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 155 – 160. (in Chinese)
- 14 刘海生, 贺会群, 艾志久, 等. 雷诺应力模型对水力旋流器内流场的数值模拟 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(9): 243 – 245, 271.
Liu Haisheng, He Huiqun, Ai Zhijiu, et al. Numerical simulation of inner flow field in hydrocyclone with RSM model [J]. Computer Simulation, 2006, 23(9): 243 – 245, 271. (in Chinese)
- 15 陈景仁. 流体力学及传热学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- 16 Tong Z B, Yang R Y, Chu K W, et al. Numerical study of effect of particle size and polydispersity on the agglomerate dispersion in a cyclonic flow [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 164(3): 432 – 441.
- 17 Chu K W, Wang B, Yu A B, et al. CFD – DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones [J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 235 – 247.
- 18 唐学林, 余欣, 任松长, 等. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- 19 Qiu Liuchao, Wu Chuanyu. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19 – 25.
- 20 黄思, 杨富翔, 宿向辉. 运用 CFD – EDEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动 [J]. 科技导报, 2014, 32(37): 28 – 31.
Huang Si, Yang Fuxiang, Su Xianghui. Unsteady numerical simulation for solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump by CFD – EDEM coupling [J]. Science and Technology Review, 2014, 32(37): 28 – 31. (in Chinese)
- 21 王伟. 水力旋流器固-液分离的 CFD 模拟研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
Wang Wei. Simulation of solid – liquid separation in hydrocyclone by applying CFD [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- 22 刘新阳, 罗金耀, 高传昌. 水力旋流器中水沙两相流动三维数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 224 – 229.
Liu Xinyang, Luo Jinyao, Gao Chuanchang. 3D numerical simulation of water and sediment two-phase flow in a hydrocyclone [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 224 – 229. (in Chinese)