doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.020

基于 DEM – CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验

施卫东[1]　施　亚[2]　高雄发[2]　张德胜[2]　郎　涛[2]　赵　婷[2]

(1. 南通大学机械工程学院, 南通 226019; 2. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 鉴于抗堵塞性能较优的旋流泵在输送污水时,其过流部件仍存在磨损、半堵塞等问题,将 DEM – CFD 方法引入旋流泵数值模拟中,研究旋流泵在输送不同粒径、体积分数颗粒时的颗粒运动物理特性,以及颗粒与液相、固壁多向耦合的运动特征,并进行了试验验证。结果表明,由旋流泵输送油菜籽试验可知,外特性计算结果与试验结果基本一致;在该旋流泵模型特征下,进口管与无叶腔区域由循环流引起的颗粒旋转流动现象较为严重,从无叶腔沿着进口壁面螺旋式逆向回流,与进口顺向来流相混达到平衡,试验拍摄结果与数值模拟结果较为相符,说明 DEM – CFD 耦合方法具有一定可靠性;旋流泵内部存在 3 种不同的颗粒运输方式,第 1 种为颗粒随贯通流经由叶轮进入蜗壳,第 2 种为受循环流影响经由无叶腔直接甩入蜗壳,第 3 种为颗粒从叶轮前端面区域进入叶轮,再经叶轮进入蜗壳;对蜗壳内流特性进行分析,发现颗粒主要分布在蜗壳后侧,在扩散段到蜗壳出口区域,颗粒随液体以螺旋的方式流出,蜗壳断面叶轮侧形成大小不等的螺旋涡。

关键词: 旋流泵; 大颗粒; DEM – CFD; 高速摄影; 涡动力学; 数值模拟

中图分类号: TH311　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0176-10　　**OSID**:

Simulation and Experiment on Flow Characteristics of Large Particles in Vortex Pump Based on DEM – CFD

SHI Weidong[1]　SHI Ya[2]　GAO Xiongfa[2]　ZHANG Desheng[2]　LANG Tao[2]　ZHAO Ting[2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Nantong University*, *Nantong* 226019, *China*

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

Abstract: In recent years, because the anti-clogging ability of swirl pump is better than that of ordinary pumps, it is gradually applied to more fields. However, when transporting sewage contains solids, it will still encounter problems such as half clogging, overwork wear, etc., so it is particularly important to master the flow characteristics of solid particles in the vortex pump. DEM – CFD coupling method was introduced into the numerical simulation of vortex pump. The movement law of particles in the pump was compared and analyzed when the vortex pump transported solid phase with different particle sizes and concentrations. The results showed that according to the experiment of rapeseed transportation by vortex pump, the calculated results of external characteristics were basically consistent with the experimental results. It was found that under the characteristics of the pump model, the particle rotation and flow caused by the circulation flow were more serious in the inlet pipe and the bladed area. The spiral flow from the chamber was reversed along the inlet wall, and the inlet flow was mixed with the reverse spiral flow to reach a balance. The experimental results were consistent with the numerical simulation results. It can be seen from the experiment that the calculation results of the pump performance were basically consistent with the experimental results, and it was found that the particle circulation and rotation phenomenon caused by the circulation flow existed in the inlet pipe, which was also one of the characteristics of the vortex pump and was consistent with the simulation phenomenon, which proved that the DEM – CFD coupling method had a certain reliability. It was found that there were three different modes of particle transportation in the swirl pump, the first was that particles flowed through the impeller and entered the volute, the second was that particles were directly thrown into the volute through the bladed cavity under the influence of circulation flow, and the third was that particles entered the impeller

收稿日期: 2019 – 12 – 16　修回日期: 2020 – 01 – 06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909108、51579118)和江苏省“六大人才高峰”高层次创新人才团队项目(JNHB – CXTD – 005)

作者简介: 施卫东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及工程理论研究,E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

通信作者: 高雄发(1985—),男,助理研究员,主要从事水泵技术及理论研究,E-mail: gaofangjia@163.com

from the front end face area of the impeller and then entered the volute through the impeller. Through the analysis of internal flow characteristics of volute, it was found that the particles were mainly distributed at the back of the volute. From the diffusion section to the outlet area of the volute, the particles flowed out in a spiral way with the liquid, and the spiral vortices of different sizes were formed at the impeller side of the volute section.

Key words: vortex pump; large particles; DEM－CFD; high-speed photography; vortex dynamics; numerical simulation

0　引言

旋流泵叶轮布置偏缩于泵腔一侧，其工作原理异于一般离心泵，主要通过内部循环流与贯通流的共同作用达到输送介质的目的。因其半开式叶轮结构及无叶腔体的存在，旋流泵的抗堵塞性能优于一般泵种。然而，旋流泵效率通常不超过 50%，低于传统离心泵，还有很大的上升空间[1－3]。目前，关于泵内固体颗粒运动的研究还不够完善，特别是针对旋流泵这种两相流泵仍采用基于清水泵的水力设计方法，对其在不同工况下泵内两相流特性的研究也不深入，从而导致输送复杂介质时的效率略低，其过流部件也未针对颗粒运动作出优化设计，从而导致磨损、堵塞问题突出[4－6]。

根据 Lagrange 和 Euler 法划分，目前应用较多的固液两相方法有双流体模型（Two-fluid model，TFM）和离散颗粒法（Discrete particle method，DPM）。其中 TFM 中采用混合模型研究泵内两相流问题较多，文献[7－8]在不同叶轮外径下的双流道泵中加入颗粒，研究其内部压力脉动的分布及变化。文献[9]运用 Mixture 多相流模型对双流道泵进行了模拟，并与清水单相流动试验进行对比，结果表明，该方法能够用于预测双流道泵的外特性。文献[10]运用欧拉算法研究了离心泵泥沙磨损特性，分析了湍流强度和颗粒动态尺度对固相分布的影响，结果表明，考虑湍动效应更符合离心泵的实际磨损情况。文献[11－12]运用 DPM 模型、结合半经验磨损模型研究了离心泵内的磨损现象。文献[13]采用 DPM 模型对螺旋离心泵进行模拟，结果表明，低密度细颗粒的运动轨迹较长，与过流部件的碰撞次数较多，能量损失较大。

由于泵内两相流试验难度大，且成本较高，现阶段主要通过数值模拟进行研究。TFM 假设颗粒为拟流体与真实流体共同占据空间，相互贯穿并产生相间力，虽然计算速度较快且可不限制颗粒量，但颗粒拟流体后丢失关键信息，难以接近真实的物理现象[14]。DPM 模型假设，以颗粒为质点运动于流体中，颗粒不占据体积，故不考虑颗粒间的碰撞，因此只适合模拟稀相流，难以准确反映泵内颗粒运动情况。而通过 DEM 与 CFD 耦合，采用离散元求解器计算颗粒，可以追踪系统内每个离散颗粒的受力情况和运动轨迹，充分考虑各种作用力以及颗粒间、颗粒与壁面间的碰撞，能够更加直观地分析颗粒在泵内的流动规律，这更接近真实的物理现象[15－16]。文献[17－20]对 DEM－CFD 耦合进行理论研究和工程分析，分析了颗粒属性对混合动力学的影响，并在搅拌器应用中取得一定的成果，通过试验证明该方法在旋转机械模拟中具有一定可靠性。文献[21]通过 DEM－CFD 耦合计算了深海采矿泵内固液两相流动，结果表明，当转速增加时，泵内固体运动更具有规律，且碰撞减少，有助于减少叶轮和导叶间的堵塞。

针对旋流泵输送固体颗粒介质的情况，本文采用基于 DEM－CFD 模拟方法，研究球形颗粒在旋流泵蜗壳内的流动规律。假设 3 种粒径的颗粒模型，模拟不同体积分数下蜗壳内部颗粒的流动特性，以期得到固体颗粒对水力性能的影响，从涡动力学角度分析蜗壳内部流场涡结构和流动分离规律。

1　计算模型

1.1　物理模型

本文研究模型如图 1 所示，泵设计参数为：流量 Q_d = 23.5 m^3/h，扬程 H = 3.5 m，额定转速 n = 1 485 r/min，效率 η = 46%，模型几何尺寸如表 1 所示。

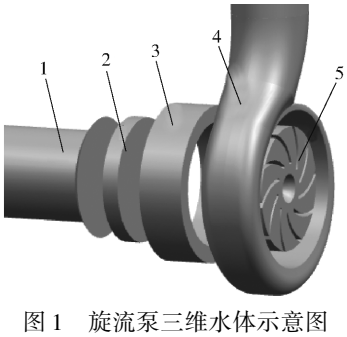


图 1　旋流泵三维水体示意图

Fig. 1　Three-dimensional model of vortex pump

1. 泵进口　2. 无叶腔　3. 泵腔水体　4. 蜗壳及出口管　5. 叶轮

1.2　数学模型

1.2.1　颗粒运动模型

近期对旋流泵固液两相流的研究都是基于 CFD，

表 1 叶轮和蜗壳几何尺寸

Tab. 1 Geometric dimension of impeller and volute

部件名称	参数	数值
叶轮	叶片进口安放角 β_1/(°)	60
	叶片出口安放角 β_2/(°)	45
	叶片包角 ψ/(°)	45
	叶轮外径 D_2/mm	128
	叶片宽度 b_2/mm	22
蜗壳	进口宽度 b_3/mm	47
	基圆直径 D_3/mm	160

只考虑双向耦合,而与实际情况相接近的四向耦合较少采用[17]。在 DEM - CFD 的耦合中,颗粒的运动轨迹是由在流场中的受力以及颗粒-颗粒、颗粒-壁面间的相互碰撞决定的。颗粒在流场中的受力情况采用 Fluent 中力的模型计算。公式为

$$F = f_{d,i} + f_{\nabla p,i} + f_{\nabla \tau,i} + f_{Ar,i} + f_{vm,i} + f_{Saff,i} + f_{Mag,i} \quad (1)$$

式中 $f_{d,i}$——曳力

$f_{\nabla p,i}$——压力梯度力

$f_{\nabla \tau,i}$——粘性阻力

$f_{Ar,i}$——浮力

$f_{vm,i}$——虚拟质量力,当颗粒加速运动影响周围流体所受到的力

$f_{Saff,i}$——萨尔曼升力,由非旋转粒子在非均匀流场下的压差引起,本研究中颗粒体积较大需要考虑

$f_{Mag,i}$——马格努斯升力,是由颗粒旋转而使周围流体速度产生差异,导致非对称压力分布而引起的,本研究中雷诺数较大,需考虑颗粒自旋

1.2.2 颗粒接触模型

根据接触方式的不同,可以分为软球、硬球两种模型。因硬球模型只考虑两个颗粒间的碰撞,只能用于模拟库特流、剪切流中颗粒运动较快的情况。软球模型应用较广,其将颗粒间的接触过程简化为弹簧振子的阻尼运动,利用牛顿第二定律,根据球体之间的交叠量可以计算得到颗粒的受力。

仿真过程中,不考虑颗粒变形,颗粒表面也无粘结力,因此接触模型选用 Hertz - Mindlin (no slip) with RVD Rolling Friction,此模型是在基本的 Hertz - Mindlin 接触模型基础上调整了滚动摩擦力的计算方式,适用于强旋转体系对物料滚动特性有严格要求的问题。颗粒间的法向力计算需要颗粒的弹性模量以及泊松比,法向阻尼力需要材料间的恢复系数,颗粒间的切向力及力矩需要定义摩擦因数,即物性参数和接触参数直接影响颗粒运动的模拟,本文所用材料仿真参数及接触参数见表 2、3[22]。

表 2 材料仿真参数

Tab. 2 Materials simulation parameters

物料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})
菜籽	0.50	1×10^6	950
有机玻璃	0.39	4×10^9	1 200

表 3 接触参数

Tab. 3 Contact parameters

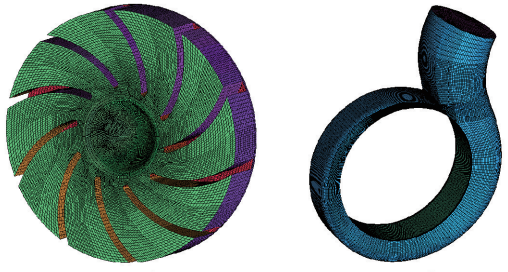
物料	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
菜籽-菜籽	0.1	0.54	0.01
菜籽-有机玻璃	0.2	0.50	0.01

本文重点研究固体颗粒在旋流泵蜗壳内部的流动规律,颗粒采用油菜籽,泵体为有机玻璃。

2 数值计算方法及验证

2.1 网格划分及网格无关性验证

使用 ICEM 软件对模型水体进行结构化网格划分,如图 2 所示。为了验证网格数对计算结果的影响,本文采用 3 组不同网格数的泵模型,如表 4 所示。通过监测点观察泵外特性的变化以及叶轮中某点的压力和速度的变化情况,该监测点设于叶轮水体域进口面中点,最终选取 2 号网格进行数值计算。



(a) 叶轮 (b) 蜗壳

图 2 叶轮和蜗壳的网格划分

Fig. 2 Mesh of impeller and volute

表 4 网格无关性验证

Tab. 4 Grids independence test and verification

参数	1	2	3
网格数	9.0×10^5	1.3×10^6	1.7×10^6
监测点压力/Pa	-3.92×10^4	-4.00×10^4	-4.07×10^4
监测点速度/(m·s^{-1})	2.88	2.95	2.94
扬程/m	3.89	4.01	4.04

2.2 数值计算方法及边界条件

对于连续流体,采用 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型并运用 SIMPLE 算法,利用二阶迎风格式来离散 N - S 方程。本文重点研究较大颗粒在泵内的运动,所以需考虑粒子之间的碰撞和粒子自身的旋转而产生的作用,因而选用 Euler - Lagrange 方法,用离散相模型进行数值计算。考虑到本文所研究的固相体积分数较低,且根据文献[22]对不同曳力模型适用性的模

拟对比，采用 Wen－Yu 曳力模型。

在 Fluent 中采用非定常计算，时间步长为 $8.978\,4\times10^{-4}$ s，即叶片旋转 8°的时间，模拟总时长为叶轮旋转 50 圈，收敛精度为 10^{-4}。EDEM 中时间步长一般小于 Fluent 的时间步长，控制其在 Rayleigh 时长的 10% ～40% 之间，叶轮每旋转 4°保存一次颗粒信息。

2.3　时间无关性分析

为了确保泵内颗粒运动情况趋近平稳，分析具有可靠性，故对模拟时间进行无关性分析。提取不同时间下，蜗壳出口截面上的颗粒信息，结果如图 3 所示。结果显示，在 1 s 之前，出口处颗粒数变化较大，这可能是由于部分颗粒在泵内尚未完成一个完整的循环过程，而在 1.212 1 s 后，蜗壳出口截面颗粒数逐渐稳定。考虑到计算时间等问题，分析时选用 1.212 1 s 的模拟数据，虽然该时间点的数据也不能完全表征旋流泵内部颗粒流动规律，但是已具有一定稳定性，可以用来体现不同粒径、浓度下旋流泵输送固体介质的差异。

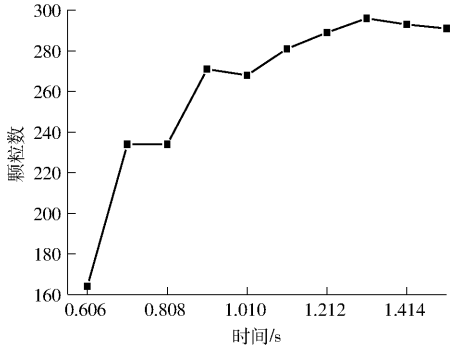


图 3　时间无关性验证结果

Fig. 3　Time independence test and verification

2.4　样本点选取

关于蜗壳内的颗粒分布，主要通过蜗壳各个断面附近以及蜗壳进出口处的颗数来分析，在各位置处建立 10 mm 宽小区域，并统计区域内的所有颗粒信息。截面 1 选取了靠近蜗壳的进水管段，用以测量进入旋流泵的颗粒量；截面Ⅰ～Ⅷ对应蜗壳水力设计中的断面Ⅰ～断面Ⅷ，可以分析颗粒在蜗壳内部的运动；截面 2 取在蜗壳出口处，与截面 1 对比可以直观看出颗粒在蜗壳中的滞留量。

图 4 显示了各截面位置，示意图在 2 mm 粒径颗粒体积分数 5% 的工况下截取，同时也直观地反映了颗粒在泵内的分布情况。

3　结果与分析

3.1　颗粒运动轨迹

通过颗粒在 5% 颗粒体积分数下的运动轨迹，可以明显观察出固体颗粒在旋流泵内部存在 3 种典型的运动轨迹，具体如图 5～7 所示。

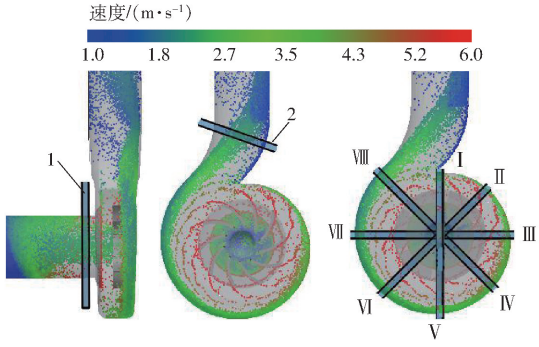


图 4　截面示意图

Fig. 4　Secton diagram

1. 蜗壳进口截面　2. 蜗壳出口截面　Ⅰ～Ⅷ. 蜗壳 8 个断面

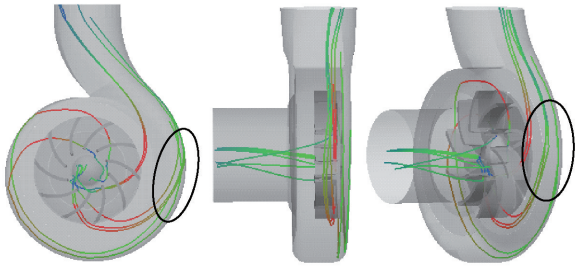


图 5　颗粒轨迹 A

Fig. 5　Particle trajectory A

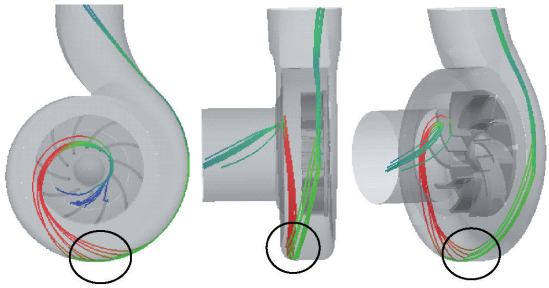


图 6　颗粒轨迹 B

Fig. 6　Particle trajectory B

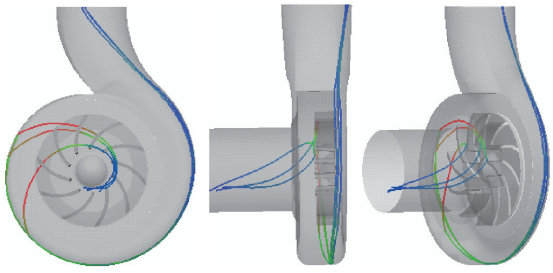


图 7　颗粒轨迹 C

Fig. 7　Particle trajectory C

轨迹 A 是颗粒由贯通流作用而输送出旋流泵的运动过程。该运动特点是颗粒从进水管的中心部位进入无叶腔，受进水管内循环流影响较小，其轴向速度主导颗粒运动，故颗粒穿过无叶腔直接进入叶轮，经由与叶片撞击以及颗粒间的碰撞，最终进入蜗壳，且在蜗室中靠近蜗壳后壁面运动。由图 5 可得，

图中颗粒较多地在蜗壳断面Ⅶ位置处进入蜗室,由于随机取样,因此可推断出轨迹 A 中颗粒由断面Ⅲ以及断面Ⅶ进入蜗壳的概率较大。

轨迹 B 主要是受循环流作用。该轨迹运动特点是颗粒在进水管中受预旋流影响较大,其自身运动除了受轴向速度的影响,还具有较大的周向圆周速度,进入无叶腔后圆周速度占主导地位,因此没有直接进入叶轮,而是随着叶轮引起的漩涡流进入蜗壳。由图 6 可以看出,轨迹 B 中的部分颗粒从断面Ⅴ进入叶轮,且颗粒的速度大小、运动方向都发生了变化,这是由于断面Ⅴ聚集着颗粒,轨迹 B 中的颗粒以较高速度运动碰撞而造成的。

轨迹 C 受循环流和贯通流的共同影响。该运动轨迹的特点是颗粒在穿过无叶腔后能够进入到叶轮,但由于循环流的影响,颗粒并没有运动到叶轮后盖板处,而是在其前盖板区域处有重新回到无叶腔的趋势,最后在该交界处进入蜗壳。

3.2 不同粒径、体积分数下蜗壳内颗粒分布

在各工况下提取截面颗粒数,并创建无量纲量绝对颗粒浓度 N_N,表征某区域内的颗粒浓度,公式为

$$N_N = \frac{N_x}{N_1} \tag{2}$$

式中 N_x——待测区域的颗粒数

N_1——截面 1 的颗粒数

具体结果如图 8 所示,分别为粒径 1、2、3 mm 在体积分数 1%、5% 共 6 个工况下的绝对颗粒浓度分布,均为额定流量。图 9 为各区域内颗粒平均速度分布。

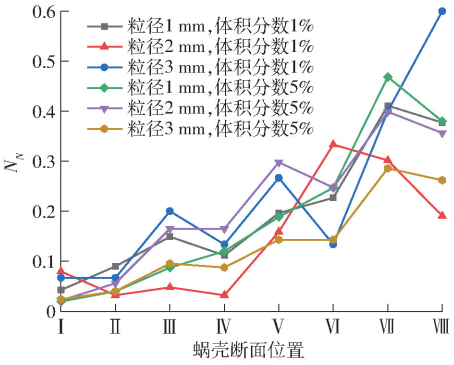


图 8 不同粒径、体积分数下绝对颗粒浓度分布

Fig. 8 Particle concentration distribution with different valves of particle diameter and concentration

从图 8 中可以看出,随着蜗壳断面Ⅰ~Ⅷ面积的增大,各断面区域内颗粒数逐步上升的趋势基本一致,其中 3 mm 粒径工况下颗粒分布波动最剧烈,说明随着粒径的增大,颗粒在蜗壳内不再一直顺着蜗室运动,变得更加无序。

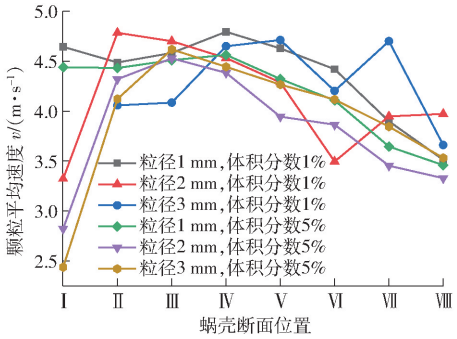


图 9 不同粒径、体积分数下颗粒平均速度

Fig. 9 Particle velocity with different valves of particle diameter and concentration

在断面Ⅴ,颗粒数有明显的激增,断面Ⅵ颗粒数也产生波动,这主要是因为上文提到的轨迹 B,基本都在断面Ⅴ处进入蜗壳,直接导致了颗粒的增多。经无叶腔输送后的颗粒,即轨迹 B,拥有较大动能,在断面Ⅴ处存在发生碰撞后远离该区域的现象,同时颗粒的自重影响和颗粒数量的激增减缓颗粒在该处区域的流动速度,这从图 9 能看出,蜗壳断面Ⅴ、Ⅵ处颗粒的速度比起之前断面区域有明显的下滑。其中 2 mm 粒径、5% 体积分数和 1 mm 粒径、5% 体积分数工况在断面Ⅴ处颗粒数增加最多,说明颗粒数量的增多导致更多粒子沿着轨迹 B 运动,而 3 mm 粒径工况下,这种颗粒激增现象不再明显,说明大颗粒受进口管中旋流影响较小。在断面Ⅵ区域内,2 mm 工况下的粒子浓度下降较多,这是由颗粒数的增多和重力作用共同导致,3 mm 颗粒由于颗粒数较少,堆积影响不大,而 1 mm 颗粒由于自重小,跟随性较好,在断面Ⅵ处颗粒数下降小。

断面Ⅶ靠近蜗壳出口又因断面面积最大,因此各工况下该区域的颗粒数都是最大的,而断面Ⅷ区域的颗粒数产生了不同程度的降低,这主要是因为部分颗粒在中间断面区域进入蜗室或者是因为碰撞而损失了部分能量,不具备足够的动能进入出口段而被隔舌阻挡重新进入蜗室循环。其中可以明显看出 3 mm 工况下,颗粒数下降最为明显,这表明 3 mm 颗粒更容易被隔舌阻挡,重新进入蜗壳,但这并不表示 3 mm 颗粒在蜗壳中通过性不佳,再经过蜗壳重新循环后,3 mm 粒径颗粒能获得更大速度。

3.3 不同粒径、体积分数下旋流泵输送性

按照 3.2 节同样的方法分析截面 2,可以看出不同工况下旋流泵在输送固相介质时颗粒在蜗壳内的滞留量,可以为评估整泵输送性能提供参考。粒径 1 mm、1% 体积分数时 N_N 为 0.892,体积分数增加到 5% 后,N_N 降低为 0.87;粒径为 2 mm 时,1% 体积分数下 N_N 为 0.696,5% 体积分数下 N_N 为 0.782;粒

径为 3 mm 时，1% 体积分数下颗粒数量较少，N_N 为 1，5% 体积分数下 N_N 为 0.77。

可以分析出，当旋流泵在 3 mm 粒径、1% 体积分数工况下工作时，能够很好地将固体颗粒送出蜗壳，而在粒径 2 mm、体积分数 1% 工况下，则有部分颗粒留在蜗壳中，这主要是因为该工况下颗粒数量增多且受重力影响也大于 1 mm 粒径颗粒，多数颗粒经由相互挤压碰撞而损失动能造成速度不足而被隔舌阻挡重新进入蜗室循环，因此导致截面 2 颗粒浓度较低，而当浓度增加时，这种现象又有所好转。总体来说，在输送小粒径颗粒时，固体颗粒通过性较好，能及时被泵送出蜗壳，这主要因为小颗粒的跟随性好，主要受流场作用力影响，当体积分数增大时，颗粒间的碰撞概率变大，泵内颗粒变得更加杂乱会降低泵的输送性能，可以明显看出 3 mm 粒径颗粒受碰撞影响较大。

3.4　不同粒径、体积分数下颗粒通过时间

各工况下，取截面 1 区域内的颗粒为样本，统计颗粒运动至截面 2 所用时间，即颗粒通过蜗壳所用时间，其中 t_1 代表首个颗粒到达截面 2 的时间，t_2 表示所选样本都通过截面 2 的时间，如图 10 所示。

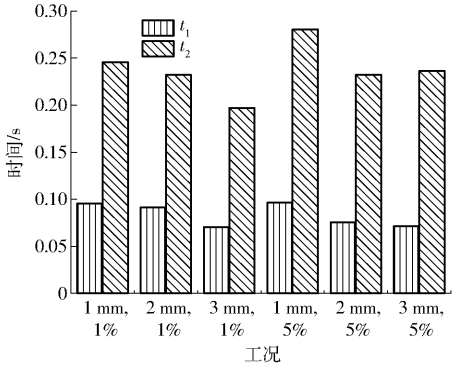


图 10　不同工况颗粒运动时间分析

Fig. 10　Particle movement time with different valves of particle diameter and concentration

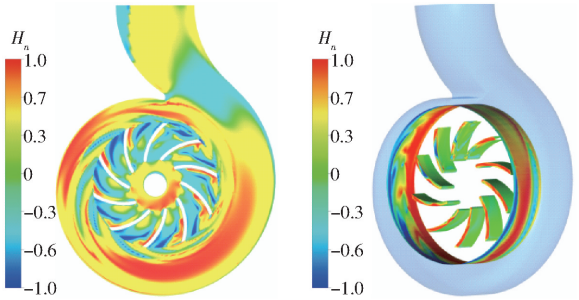
从图中可以看出，各工况下，首个颗粒通过蜗壳时间相差不大，大粒径颗粒所用时间相对更少；而总通过时间与颗粒数量关系更大，如粒径 1 mm、体积分数 5% 工况所用时间最长，粒径 3 mm、体积分数 1% 工况所用时间最短，而与粒径关系不大。

3.5　蜗壳内流态分析

本文共涉及 3 种不同粒径、2 种颗粒体积分数共 6 个模拟算例，选取一个大颗粒典型工况，即粒径 2 mm、体积分数 5% 的算例，分析其在 1.212 1 s 蜗壳断面上速度分布。以正则化螺旋度 H_n 判断涡核[23]，该方法根据速度矢量与涡量的夹角捕捉涡核位置，定义为速度与涡量点积的模化，用来判断涡核旋转方向，其值在 −1 ~ 1 之间，公式为

$$H_n = \frac{V_\omega}{|V||\omega|} \tag{3}$$

以普通离心泵蜗壳为参考[24]分析旋流泵蜗壳流内部流场。图 11a 为叶轮中截面正则化螺旋度分布，以流动方向为正方向。H_n 为负值，涡为顺时针旋转方向；H_n 为正值，涡为逆时针旋转方向，从图 11 可以看出，叶轮流道靠近出口处存在着一对旋向相反的漩涡，其中靠近叶片吸力面的漩涡旋向与流动方向一致，流道中部存在与流动方向相反的漩涡。从图 11b 中可以发现，由于无叶腔中叶轮直接作用的减弱，会在与蜗壳交界处形成与叶轮旋转方向相反的漩涡结构。



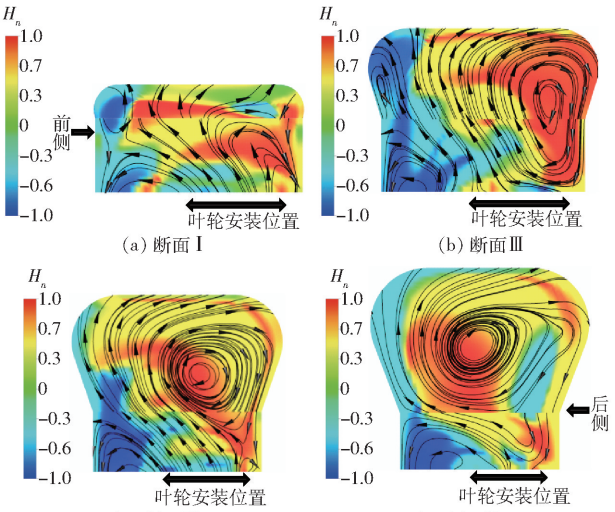
(a) 叶轮中截面　　(b) 叶片与蜗壳交界面

图 11　叶轮中截面与叶片蜗壳交界面正则化螺旋度

Fig. 11　H_n of blades, interface and middle plane

图 12 为蜗壳 4 个断面的正则化螺旋度以及截面流线分布。可以从流线看出速度分布呈明显的非对称性，在所选 4 个截面上存在 2 个方向相反的漩涡，其中靠近蜗壳前侧的漩涡存在于无叶腔内并不属于蜗壳断面内，靠近蜗壳后侧的漩涡区域较大、位置存在于蜗室之内，这是与普通离心泵相异的地方，主要归结于旋流泵叶轮偏置一侧的布置方式，前侧的漩涡主要是由循环流所引起。随着蜗壳断面的面积增大，蜗室内的漩涡逐渐移动至蜗室中心并占据主体位置。

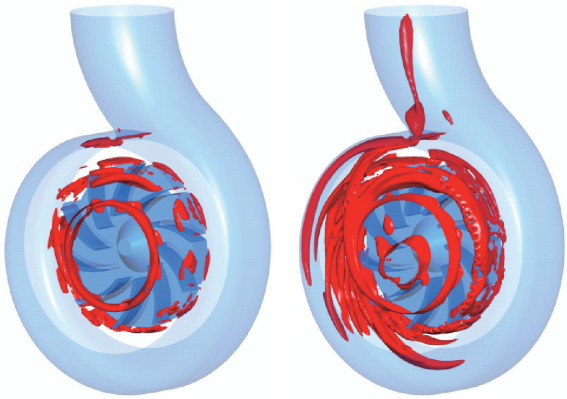
漩涡可用 Q 准则判断，即认为在泵内漩涡区域的流体的旋转起决定作用，而非流体的应变率，即 $\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 > \|\boldsymbol{E}\|^2$，其中 $\boldsymbol{\Omega}$ 表示涡量，$\boldsymbol{E}$ 表示流体的应变张量。图 13 展示了泵腔中涡结构演化过程。当 $Q = 54\,288\ \mathrm{s}^{-2}$ 时，叶轮出口位置以及隔舌处出现漩涡结构，在无叶腔靠近进口管处出现完整的漩涡，且呈对称分布。随着 Q 减小到 $5\,301\ \mathrm{s}^{-2}$ 时，蜗壳蜗形段出现了一束长度较大的漩涡，这是由于靠近蜗壳前侧流体缺少叶轮约束，仅依靠循环流带动，该处流体易受阻于隔舌处的逆压梯度而发生流动分离，形成的涡流与叶轮旋转方向相异，在蜗壳前侧的蜗形段区域逆流经过隔舌与来流相混进入扩散段，可以预知蜗壳断面Ⅰ、Ⅱ附近有颗粒受此影响在隔舌



(a) 断面Ⅰ (b) 断面Ⅲ (c) 断面Ⅴ (d) 断面Ⅶ

图 12 蜗壳断面正则化螺旋度涡与流线

Fig. 12 H_n and velocity curves of volute section



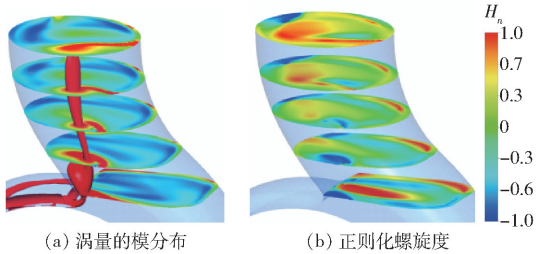
(a) Q=54288 s^{-2} (b) Q=5301 s^{-2}

图 13 泵腔中涡结构

Fig. 13 Votex structures of pump cavity

处进入蜗壳扩散段,且扩散段中的颗粒将会以较为明显的螺旋形态上升流出蜗壳。

图 14a 为 Q = 5 301 s^{-2}蜗壳扩散段涡结构,间隔 22 mm 做截面,通过涡动力学分析发现,蜗壳扩散段有一块漩涡强度较大的区域,其位置靠近蜗壳前侧,在整个扩散段上涡量的模值偏于平稳并没有较大波动,漩涡中心的位置也没有较大转移,且可看出主涡是来自蜗形段产生的一束回流涡,在隔舌处有明显的拉伸撕裂变形。通过正则化螺旋度(图 14b)提取的涡核分布较为杂乱,可以看出在隔舌附近的截面上存在着两对旋向相反的漩涡,而蜗壳出口截面上只剩下一束正向旋转的漩涡和一个反向涡核聚集区,该反向涡核处于截面边缘没有主导扩散段内介质流动,可以推测出是该束回流涡与主流相互作用并且对主流产生扰动,从 Q 准则显示的漩涡结构也能看出,该处涡结构发生了明显的变形。



(a) 涡量的模分布 (b) 正则化螺旋度

图 14 蜗壳扩散段涡结构

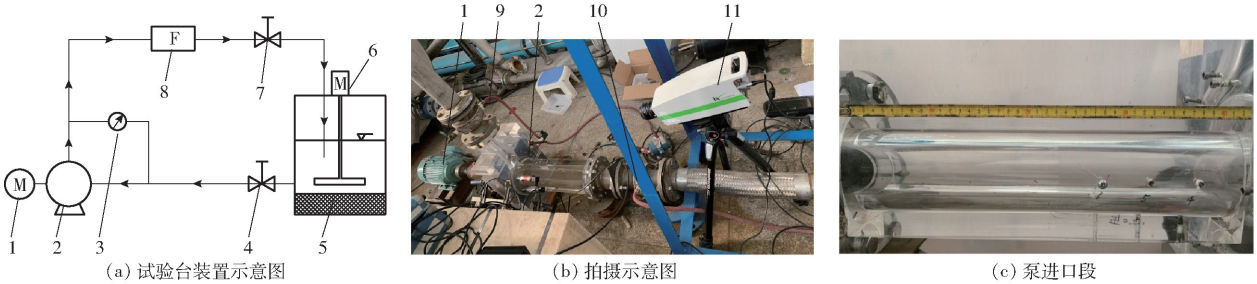
Fig. 14 Votex structures of volute diffusion section

4 试验验证

为了验证模拟的合理性,建立了一套可视化试验台装置,试验台如图 15 所示。i-SPEED 3 型高速摄像机的采样频率为 1 000 Hz;泵出口流量采用 LBBE-80S-M2X100-80 型电磁流量计测量;电机功率测量采用 8962C1 型三相电参数测试仪;进口压力变送器范围 -100 ~ 100 kPa;出口压力变送器范围 0 ~ 100 kPa。验证试验选用颗粒为油菜籽,约 2 mm 的球形颗粒,体积分数为 5%,为了与实际应用贴合,同时缩短计算时间,模拟均选择额定工况。

为了验证模拟可靠性,选择进行外特性校验;同时由于旋流泵工作原理相异于普通离心泵,进口管中的流动现象有所区别,因此采用高速摄像捕捉进口管中旋流现象对模拟进行校验,进口管总长为 42 cm,用标尺比对以确定旋流现象位置。

图 16(图中 Q_{des}表示设计流量)为模拟外特性与试验值的对比,试验选用体积分数 5% 的油菜籽进行外特性试验。由图 16 可知,重复 3 次外特性试



(a) 试验台装置示意图 (b) 拍摄示意图 (c) 泵进口段

图 15 试验台装置

Fig. 15 Experiment system

1. 电机 2. 试验泵 3. 测压管路 4. 进口阀门 5. 开式水箱 6. 搅拌器 7. 出口阀门 8. 流量计 9. 出口压力传感器 10. 进口压力传感器 11. 高速摄像装置

验且试验误差均在 5% 以内，通过外特性试验值与模拟值的对比可以发现，外特性试验值与模拟值较为吻合，大流量工况下偏差较大，模拟值略高于试验值，这是由于数值计算时没有考虑系统的机械损失和管路沿程损失。图 17 为额定工况下通过高速摄像所记录的进口管中颗粒运动现象，由图 17 可以看出，在进口管中靠近泵腔的位置试验颗粒运动状态与模拟所得现象对比结果。

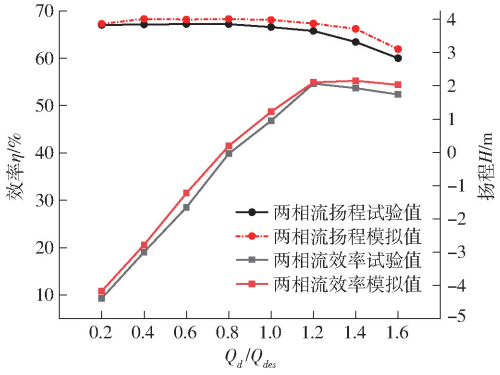


图 16　泵性能模拟值与试验值误差分析

Fig. 16　Analysis of error between calculated and tested values

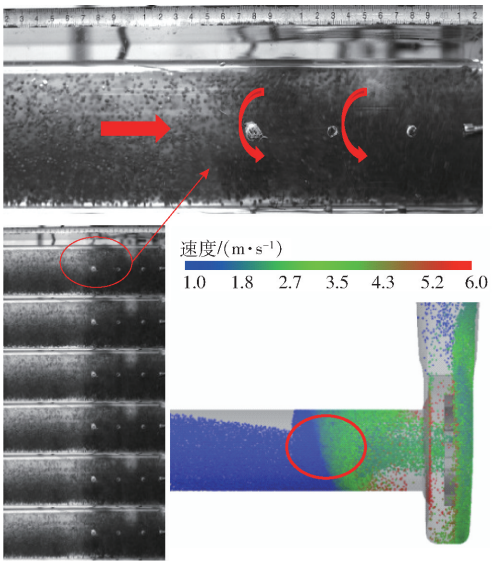


图 17　泵进口处颗粒分布

Fig. 17　Particle distribution at pump inlet

由图 17 可知，额定工况下，高速摄像能够捕捉到在进口管 28 cm 标记处开始出现颗粒旋转现象，颗粒贴着进口管壁作螺旋式回流运动，旋转方向与叶轮旋向一致，由无叶腔内开始向外作回流运动，大流量工况下旋流平衡位置向泵腔靠近，小流量工况下远离泵腔逐渐充满整个进口管。该现象主要是受循环流影响，部分颗粒没有在无叶腔中进入蜗壳，而是被循环流裹挟回流至进口管中，在离心作用下该部分颗粒只贴着进口管壁面处作旋转运动，与进口顺向来流相混并在该位置处保持平衡，该部分介质被来流影响重新从进口管的中部进入泵腔，与模拟现象较为吻合。

通过快照 POD 法对通过高速摄像所拍得进口管中旋流现象进行模态分解，图 18 为进口管段中第 1 阶空间模态。可以明显看出能量占比较高的第 1 阶模态呈现出周期性大尺度漩涡结构，来流由平稳顺流状态变化到剧烈的圆周旋转状态，这也是对高速摄像图像无法直观看出泵内旋流现象的补充。

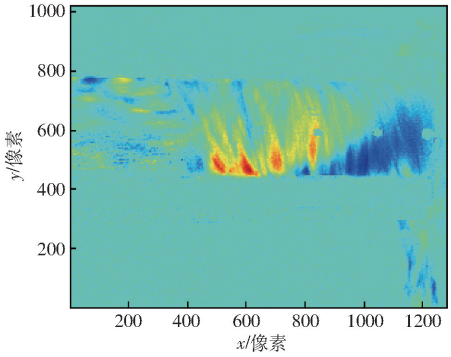


图 18　泵进口处 1 阶模态

Fig. 18　The first mode at pump inlet

5　结论

(1)该旋流泵模型在进口处出现颗粒旋转现象，颗粒沿着进口管壁作螺旋式运动，从无叶腔逆向回流，并与进口顺向来流相混达到平衡，旋转方向与叶轮旋向一致，这也是旋流泵效率偏低的主要原因。对外特性以及进口管中内部流动现象进行验证，表明 DEM－CFD 耦合方法适于旋流泵中固液两相流的模拟。

(2)颗粒在旋流泵内部存在 3 种典型的运动轨迹，轨迹 A 为在进口段受预旋流影响较小，以轴向速度为主导穿过无叶腔流入叶轮，再经叶轮进入蜗壳；轨迹 B 则受循环流影响较大，带有较大周向旋转速度进入无叶腔，而后直接进入蜗壳；轨迹 C 为受循环流和压力面与吸力面压差的共同作用，颗粒从叶轮前端面区域进入叶轮，再经叶轮进入蜗壳。因此，旋流泵适合输送含大颗粒的介质。

(3)颗粒在无叶腔内作螺旋运动后(轨迹 B)，一部分颗粒在蜗壳下方即断面Ⅴ附近进入蜗壳，这导致断面Ⅴ附近的绝对颗粒浓度略有升高。而更多颗粒经由叶轮作功(轨迹 A)，在断面Ⅶ、Ⅷ附近进入蜗壳蜗形段，而后进入扩散段流出蜗壳。

(4)在额定工况下对 3 种不同粒径的颗粒模拟对比发现，小粒径颗粒的输送性能较好；对于相同粒径颗粒，浓度增加，颗粒输送时间略有增加；在同一浓度下，大粒径颗粒速度较小，颗粒通过蜗壳时间较长。

(5)在贯通流和循环流的作用下，较大部分颗

粒向蜗壳后侧流动;在扩散段到蜗壳出口区域,颗粒随液体介质以螺旋的方式流出;在蜗壳第Ⅰ断面叶轮侧形成螺旋涡,随着断面的增大,螺旋涡向蜗壳中部区域移动。

(6)在无叶腔和蜗壳区域存在较多大小不等的漩涡,使得泵内部流动比较紊乱;由于隔舌和无叶腔的存在,隔舌处形成较大的螺旋涡,并且螺旋涡向蜗壳出口扩散。

参 考 文 献

[1] 沙毅, 侯丽艳. 旋流泵叶轮位置对性能影响与无叶腔流场测定[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):57 - 62.
SHA Yi, HOU Liyan. Effect of impeller position on performance and measurement of vaneless cavity flow field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 57 - 62. (in Chinese)

[2] ANGELA G,PAUL T, SEBASTIAN W, et al. Design parameters of vortex pumps: a meta-analysis of experimental studies[J]. Energies, 2017, 10(1):58 - 61.

[3] 高雄发, 施卫东, 张德胜,等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5): 101 - 106.
GAO Xiongfa,SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Optimum design and test of cyclone pump based on CFD orthogonal test [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 101 - 106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140516&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.016. (in Chinese)

[4] GERLACH A, PERLITZ D, LYKHOLT-USTRUP F, et al. The clogging behavior of a vortex pump: an experimental study on the influence of impeller designs [C] // ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers, 2017: V01AT05A002.

[5] GERLACH A, WULLF S, PERLITZ D, et al. The optimal vortex pump impeller-an experimental study on clogging behaviour [C]//Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Stockholm, 2017: 3 - 7.

[6] 沙毅, 刘祥松. 旋流泵固液两相流输送特性试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 76 - 82.
SHA Yi, LIU Xiangsong. Experiment on solid-liquid two-phase flow transport characteristics of swirl pump [J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(22): 76 - 82. (in Chinese)

[7] 谈明高, 廉益超, 吴贤芳,等. 双流道泵内瞬态动力学特性[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12):1024 - 1029.
TAN Minggao, LIAN Yichao, WU Xianfang, et al. Transient dynamic characteristics in double-channel pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35 (12): 1024 - 1029. (in Chinese)

[8] 谈明高, 丁荣, 刘厚林,等. 不同叶轮外径下双流道污水泵压力脉动特性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13):53 - 59.
TAN Minggao, DING Rong, LIU Houlin, et al. Analysis of pressure fluctuation characteristics of double-channel sewage pumps with different impeller diameters [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 53 - 59. (in Chinese)

[9] 赵斌娟,袁寿其,刘厚林,等. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流[J]. 农业工程学报,2008, 24(1):7 - 12.
ZHAO Binjuan, YUAN Shouqi, LIU Houlin, et al. Simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in double-channel pump based on Mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):7 - 12. (in Chinese)

[10] 张自超, 王福军, 陈鑫, 等. 基于改进欧拉算法的双吸离心泵泥沙磨损特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 124 - 133.
ZHANG Zichao, WANG Fujun, CHEN Xin, et al. Erosion characteristics of double suction centrifugal pump based on modified Eulerian algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 124 - 133. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170316&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.016. (in Chinese)

[11] 黄思,邹文朗,周锦驹,等. 基于 DPM 模型的离心泵非定常固液两相流及磨损计算[J]. 中国农村水利水电,2016(7): 103 - 106.
HUANG Si, ZOU Wenlang, ZHOU Jinju, et al. Unsteady numerical simulation on solid-liquid flows and wear in a centrifugal pump based on DPM model[J]. China Rural Water and Hydropower,2016(7):103 - 106. (in Chinese)

[12] 赵伟国, 郑英杰,刘宜, 等. 沙粒体积分数对离心泵磨损特性影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(2): 93 - 98.
ZHAO Weiguo, ZHENG Yingjie, LIU Yi, et al. Numerical analysis of effect of sand volume fractions on erosion characteristics of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(2): 93 - 98. (in Chinese)

[13] SHEN Z J, LI R N, HAN W, et al. The research on particle trajectory of solid-liquid two-phase flow and erosion predicting in screw centrifugal pump[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 129:012052.

[14] ASKARIPOUR H, DEHKORDI A M. Simulation of 3D freely bubbling gas-solid fluidized beds using various drag models: TFM approach[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2015, 100:377 - 390.

[15] 施卫东, 张铃杰, 周岭, 等. 基于 DEM 的流化床气固两相流瞬态数值模拟与验证[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 404 - 409.

SHI Weidong, ZHANG Lingjie, ZHOU Ling, et al. Transient numerical simulation and verification of gas-solid two-phase flow in fluidized bed based on DEM [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 404－409. (in Chinese)

[16] ARAOYE A A, BADR H M, AHMED W H, et al. Erosion of a multistage orifice due to liquid-solid flow[J]. Wear, 2017, 390: 270－282.

[17] NOROUZI H R, ZAYGHAMI R, SOTUDEH-GHAREBAGH R, et al. DEM formulation[M]// Coupled CFD－DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows. John Wiley & Sons,2016.

[18] BLAIS B, BERTRAND F. CFD－DEM investigation of viscous solid-liquid mixing: impact of particle properties and mixer characteristics[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 118:270－285.

[19] BLAIS B, BERTRAND O, FRADETTE L, et al. CFD－DEM simulations of early turbulent solid-liquid mixing: prediction of suspension curve and just-suspended speed[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 123:388－406.

[20] BLAIS B, LASSAIGNE M, GONIVA C, et al. Development of an unresolved CFD－DEM model for the flow of viscous suspensions and its application to solid-liquid mixing[J]. Journal of Computational Physics, 2016, 318: 201－221.

[21] LI Y, LIU S, HU X. Research on rotating speed's influence on performance of Deep-Sea lifting motor pump based on DEM－CFD[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019,37(8): 1－10.

[22] ZHOU L, ZHANG L, BAI L, et al. Experimental study and transient CFD/DEM simulation in a fluidized bed based on different drag models[J]. RSC Advances, 2017, 7(21):64－74.

[23] 王维军, 王洋, 黎义斌, 等. 基于涡动力学的离心泵内部流动诊断[J]. 中国农村水利水电, 2019(4):172－177.
WANG Weijun,WANG Yang,LI Yibin, et al. Internal flow diagnosis of centrifugal pumps based on vortex dynamics[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(4):172－177. (in Chinese)

[24] 施卫东, 徐磊, 王川, 等. 蜗壳式离心泵内部非定常数值计算与分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):49－53.
SHI Weidong,XU Lei,WANG Chuan, et al. Calculation and analysis of unsteady internal value of volute centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):49－53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140309&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.009. (in Chinese)

(上接第 175 页)

[16] GOTTLOBER D. Bale-density measuring system for baler: US 6248963(B1)[P]. 2001－06－19.

[17] VERHAEGHE O M. Baler with a weighing system: US 8635950(B2)[P]. 2014－01－28.

[18] 韩江,周宏平,王金鹏. 农林业打捆机的发展概况及趋势探讨[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43(8): 10－13.
HAN Jiang, ZHOU Hongping, WANG Jinpeng. Development and trend of agricultural and forestry bundling machines[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2015, 43(8): 10－13. (in Chinese)

[19] 刘超. 圆捆机草捆密度实时监测系统设计与试验[D]. 镇江:江苏大学,2017.
LIU Chao. Design and experiment of real-time bale density monitoring system of round baler[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[20] 刘超,尹建军,陈树人,等. WDB800 圆捆机草捆称量系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(7): 169－174.
LIU Chao, YIN Jianjun, CHEN Shuren, et al. Design and test of bale weighing system of WDB800 round baler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(7): 169－174. (in Chinese)

[21] 高国民,郭辉,吕全贵,等. 方捆打捆机草捆动态称量试验台设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 139－144.
GAO Guomin, GUO Hui, LÜ Quangui, et al. Design and experimental research on baling dynamic weighing test rig for square baler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 139－144. (in Chinese)

[22] 万其号,布库,焦巍,等. 一种打捆机监测显示系统: 203661663(U)[P]. 2014－06－25.

[23] 肖章,刘亮东,王光辉,等. 基于 PLC 的青贮圆草捆打捆机控制系统设计[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 175－179.
XIAO Zhang, LIU Liangdong, WANG Guanghui, et al. Control system design of silage round baer based on PLC[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 175－179. (in Chinese)

[24] 高东明,王德成,王光辉,等. 圆草捆自动缠网装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):99－104.
GAO Dongming,WANG Decheng,WANG Guanghui, et al. Self-wrapping net mechanism for round baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):99－104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120819&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.019. (in Chinese)