doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.015

基于 CFD – DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究

高雄发[1,2]　郜　聪[1]　张德胜[1]　施卫东[1,3]　施　亚[1]　王家斌[4]

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 江苏大学流体机械温岭研究院, 温岭 317500;
3. 南通大学机械工程学院, 南通 226000; 4. 山东双轮股份有限公司, 威海 264200)

摘要: 为了探究折叶片旋流泵固液两相输送机理,基于 CFD – DEM (Computational fluid dynamics – discrete element method)耦合算法,选用油菜籽和黄豆颗粒等比例混合,在不同流量工况和体积分数下对旋流泵进行固液两相流数值模拟和试验研究。同时也研究了折叶片旋流泵内部流动规律及颗粒分布特征。小流量工况下,进口管内螺旋回流长度较长,对进口来流扰动较大。随着流量增大,进口管回流长度逐渐缩短。叶轮前端面旋涡随流量增大,数量先增加后减少,且逐渐向折点方向聚拢。泵内颗粒受循环流和贯通流的共同作用,进口管中心部颗粒主要受贯通流影响,直接穿过无叶腔,冲击叶轮进口;靠近管壁的颗粒受循环流影响较大。无叶腔内颗粒分布呈现出:中心部最高,中间部随外径增大浓度逐渐降低,外缘部浓度稍有上升。叶轮前半部颗粒数量明显少于叶轮后半部,颗粒沿叶片第 1 段折边运动,在折点处开始发生分离,不再跟随第 2 段折边。不同工况下,泵进口有不同程度的螺旋回流现象,导致进口过流面积减小。循环流的存在,使得无叶腔和进口管的颗粒充分旋起,泵送能力增强,不易发生堵塞。

关键词: 离心泵; CFD – DEM 耦合算法; 折叶片; 混合颗粒; 进口螺旋回流高速摄影试验

中图分类号: TH311　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2023)08-0163-08　　**OSID:**

Solid-liquid Two-phase Flow of Mixed Particles in Vortex Pump Based on CFD – DEM

GAO Xiongfa[1,2]　GAO Cong[1]　ZHANG Desheng[1]　SHI Weidong[1,3]　SHI Ya[1]　WANG Jiabin[4]

(1. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Wenling Fluid Machinery Technology Institute, Jiangsu University, Wenling* 317500, *China*
3. *School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong* 226000, *China*
4. *Shandong Shuanglun Group Co., Ltd., Weihai* 264200, *China*)

Abstract: In order to explore the mechanism of solid-liquid two-phase flow in the folded-blade vortex pump, based on the computational fluid dynamics – discrete element method (CFD – DEM) coupling algorithm, the rapeseed and soybean particles were mixed in equal proportion, and the solid-liquid two-phase flow numerical simulation and experimental research of the vortex pump were carried out under different flow conditions and volume concentrations. The internal flow law and particle distribution characteristics of the folded blade vortex pump were also studied. Under the condition of small flow rate, the rotating reflux length in the inlet pipe was longer, and the disturbance to the inlet flow was greater. As the flow rate was increased, the reflux length of the inlet pipe was decreased gradually. With the increase of flow rate, the number of vortices on the front surface of the impeller was increased first and then decreased, and gradually gathered towards the turning point. The particles in the pump were affected by the combined action of circulating flow and through flow. The particles in the center of the inlet pipe were mainly affected by the through flow, directly passing through the vaneless cavity and impacting the impeller inlet. The particles near the pipe wall were greatly affected by the circulating flow. The particle distribution in the leafless cavity showed that the concentration in the center was the highest, the concentration in the middle was decreased gradually with the increase of the outer diameter, and the concentration in the outer edge was increased slightly. The number of particles in the front half of the

收稿日期: 2023 – 02 – 20　修回日期: 2023 – 03 – 16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909108)和泰山产业领军人才工程专项经费项目(tscy20200225)

作者简介: 高雄发(1984—),男,副研究员,主要从事水泵技术及理论研究,E-mail: gxfyq@ujs.edu.cn

impeller was significantly less than that in the rear half of the impeller. The particles moved along the folding edge of the first section of blade, and began to separate at the folding point, and no longer followed the folding edge of the second section. Under different working conditions, the pump inlet had different degrees of rotational reflux, resulting in a decrease in the inlet flow area. The existence of circulating flow made the particles in the vaneless cavity and the inlet pipe fully rotated, the pumping capacity was enhanced, and the blockage was not easy to occur.

Key words: centrifugal pump; CFD - DEM coupling algorithm; folded blade; mixed particle; high-speed photography experiment of inlet rotating backflow

0 引言

随着工农业的发展,伴随着城镇化进程,工业、农业和生活污水的排放量越来越多,因此,无堵塞泵的需求越来越大[1]。旋流泵,作为一种无堵塞泵,其结构不同于一般离心泵,叶轮位于泵腔一侧,或退缩至泵腔后方的腔体内,没有叶轮的一侧称为无叶腔。由于无叶腔的存在,叶轮旋转时,泵腔内同时形成循环流和贯通流。这使得泵内涡结构变得较为复杂,而且循环流会影响进口来流。循环流的存在,使得大部分介质随着循环流从无叶腔侧流出,不经过叶轮,因此通过性能较好[2-5]。但是,旋流泵的工作效率远低于其他型式的叶片泵,且在输送含有较多大颗粒和长纤维介质时,容易出现半堵塞现象[6-7]。近年来,国内外学者对固液两相流泵进行了大量研究,尤其是在固液两相 CFD(计算流体力学)数值模拟和试验研究方面。文献[8-10]结合理论与工程实际,将 CFD - DEM(计算流体力学-离散单元法)算法应用在搅拌器中,分析了颗粒属性对混合动力学的影响,并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[11]将 DEM - CFD 方法应用在旋流泵的数值模拟中,结合固液两相流试验,研究固体颗粒在泵内的运动特征,发现有以下 3 种典型的运动轨迹:随贯通流经叶轮进入蜗壳;受循环流影响由无叶腔进入蜗壳;从叶轮前端进入叶轮,随叶轮旋转进入蜗壳。文献[12-14]选用油菜籽、小麦、黄豆作为试验颗粒进行固液两相流试验,得到了旋流泵在输送不同浓度固液两相流时的性能曲线,并解释了性能曲线变化与泵内部流动之间的因果关系。文献[15]对多级离心浆料泵进行试验,发现泵的扬程和效率很大程度上取决于浆料中固相浓度。文献[16]运用 CFD - DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动,得到了 1.0 ~ 3.0 mm 颗粒群在离心泵内运动轨迹和固相体积率分布。文献[17]基于 CFD - DEM 方法,采用多组分密度颗粒,研究不同固相颗粒在叶轮和蜗壳内部的运动轨迹及其分布规律,发现大质量颗粒的运动轨迹更加靠近叶片工作面,而小质量颗粒在叶轮内部总体分布比较均匀。文献[18]对不同包角叶轮进行固液两相数值模拟,发现颗粒主要在叶轮吸力面中间与前盖板交界的位置处发生碰撞,造成磨损。虽然,国内外学者已将 CFD - DEM 耦合方法广泛应用于固液两相流泵中,但研究大多集中于单一粒径颗粒[19-22]。尤其在目前的数值模拟与试验中,大多以单一粒径颗粒作为研究对象,研究结果与工程应用中泵实际输送介质的情况有所不同。为此,本文选取一款经典的旋流式固液两相流泵,配以折叶片叶轮。基于 CFD - DEM 耦合方法,采用两种不同粒径颗粒等比例混合,按不同体积分数对此旋流泵进行固液两相流数值模拟,并通过试验进行验证。探索不同粒径颗粒在旋流式固液两相流泵内的内流特征,揭示固相颗粒的运动分布规律,为旋流泵的优化设计提供一定的理论依据。

1 模型参数及分析方法

1.1 几何模型

以一台典型旋流泵为研究对象,流体域三维模型如图 1 所示,其基本设计参数为:流量 Q_{des}(Q)为 23.5 m^3/h,扬程 H_{des} 为 3.5 m,转速 n_{des} 为 1 485 r/min。旋流泵主要结构参数如表 1 所示。

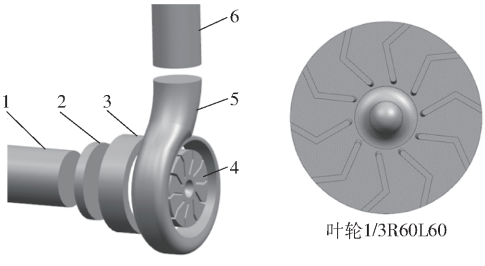


图 1 旋流泵三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional sketch of vortex pump

1. 进口段 2. 无叶腔 3. 间隙 4. 叶轮 5. 蜗壳 6. 出口段

1.2 网格划分

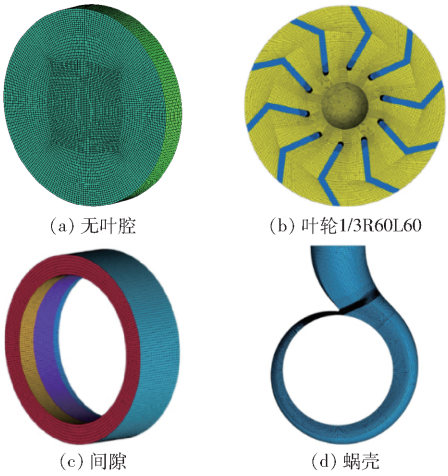
采用 ICEM 对旋流泵计算域进行网格划分,各部分网格质量均在 0.33 以上。由于本文采用的颗粒粒径较大,同时考虑颗粒体积分数的影响,所以网格数量不能过多。在满足计算精度的要求下,设置 3 套网格,网格数分别为 8×10^5、1.3×10^6 和 1.8×10^6。对这 3 套网格进行网格无关性验证,在

表 1　旋流泵结构参数

Tab. 1　Structural parameters of vortex pump

结构	参数	数值
叶轮	叶片第 1 段倾角 α/(°)	60
	叶片第 2 段倾角 β/(°)	60
	叶轮外径 D_2/mm	128
	叶片宽度 b_2/mm	22
	叶片厚度 h/mm	4
蜗壳	蜗壳进口宽度 b_3/mm	47
	蜗壳基圆直径 D_3/mm	160

设计工况下，采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型，对单相清水介质进行仿真计算。对比这 3 套网格下计算所得扬程发现，第 1 套网格和第 2 套网格之间的误差为 1.6%，第 2 套网格和第 3 套网格之间的误差为 0.61%。综合考虑计算精度和计算资源，选取第 2 套网格进行数值计算。部分计算域网格如图 2 所示。



(a) 无叶腔　(b) 叶轮1/3R60L60　(c) 间隙　(d) 蜗壳

图 2　计算域网格划分

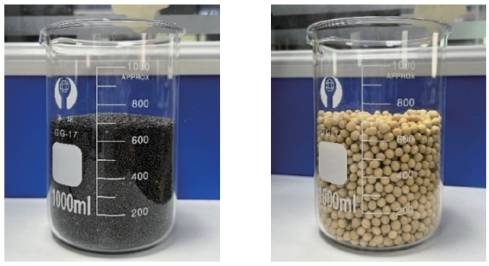
Fig. 2　Computational domain meshing

1.3　边界条件

在数值模拟之前，需要对 Fluent 和 EDEM 进行相关参数设置。考虑泵内存在涡流和旋流，选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。Fluent 中计算域进口边界条件采用速度进口，出口边界条件为压力出口，参考静压为 1×10^5 Pa。设置 Fluent 时间步长为 1×10^{-4} s，总步数为 16 000 步，每计算 200 步保存一次数据，收敛精度设置为 10^{-4}。EDEM 中颗粒间接触计算选用 Hertz－Mindlin（no slip）模型，EDEM 的时间步长一般小于 Fluent 的时间步长，且与 Fluent 时间步长成整数倍关系，同时需控制其 Rayleigh 时长在 20% 左右。因此，设置 EDEM 时间步长为 5×10^{-6} s，每计算 0.005 s 保存一次数据，总计算时间为 1.6 s。

1.4　试验颗粒及物性参数

本文采用油菜籽、黄豆作为计算颗粒，根据对这两种实物颗粒的观察与测量结果，在 EDEM 中进行等比例建模，试验颗粒如图 3 所示。其中油菜籽等效粒径为 1.6 mm，黄豆等效粒径为 4 mm。



(a) 油菜籽　(b) 黄豆

图 3　试验颗粒

Fig. 3　Test particle

在离散元仿真计算时，为确保数值模拟的准确性，同时最大限度贴合实际试验，需要在 EDEM 中设置仿真材料的物性参数。所需的物性参数包括颗粒和材料固有物性参数以及不同材料之间的接触参数，如：颗粒–颗粒碰撞恢复系数、颗粒–有机玻璃碰撞恢复系数、颗粒–有机玻璃静摩擦因数、颗粒–有机玻璃滚动摩擦因数[23]。根据仿真试验，结合真实试验结果，得到上述 4 种接触参数。完整参数见表 2。

表 2　试验颗粒物性参数及接触参数

Tab. 2　Property parameters and contact parameters of test particles

参数	油菜籽	黄豆
密度 ρ/(kg·m^{-3})	1 010	1 300
泊松比	0.27	0.25
剪切模量 G/MPa	11.5	11.2
颗粒–颗粒碰撞恢复系数	0.483	0.457
颗粒–有机玻璃碰撞恢复系数	0.535	0.567
颗粒–有机玻璃静摩擦因数	0.532	0.487
颗粒–有机玻璃滚动摩擦因数	0.023 6	0.023 4

1.5　时间无关性分析

为确保分析的可靠性，需要对数值模拟进行时间无关性分析。在蜗壳出口截面设置统计区域，统计不同时间下，通过此区域的颗粒数量，统计结果如图 4 所示。0.9 s 前颗粒数量波动较大，这是由于泵刚启动，流动介质在泵内未完成完整的循环。1.3 s 后，颗粒通过数量趋于稳定。同时考虑到计算时长，选定 1.4 s 时的数据进行分析。

1.6　正则化螺旋度

正则化螺旋度定义为速度与涡量的点积和速度与涡量的模的比值，可用于判断涡核旋转方向，其表达式为

$$H_n=\frac{\boldsymbol{\nu}\boldsymbol{\omega}}{|\boldsymbol{\nu}||\boldsymbol{\omega}|}$$

式中　$\boldsymbol{\nu}$——速度矢量　　$\boldsymbol{\omega}$——涡量矢量

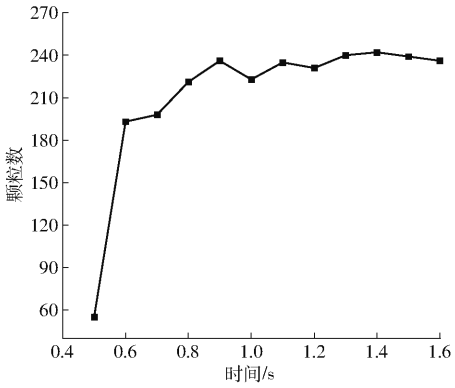


图 4 时间无关性验证

Fig. 4 Time independence test and verification

在涡核区域,速度矢量方向与涡量矢量方向近乎平行,正则化螺旋度 H_n 值趋近于 ±1。其中正负表明涡旋转方向,以流动方向为正方向,H_n 为正,涡旋转方向为逆时针方向;H_n 为负,涡旋转方向为顺时针方向[24-25]。

2 结果与分析

2.1 进口管内流动分析

本研究型号旋流泵工作原理与常规离心泵有所不同,其工作时,从无叶腔产生一股回流延伸至进口管,并在进口管内与进口来流相互作用,在某一位置处达到平衡状态,进口的螺旋回流,导致进口来流过流面积减小,整泵能量损失较大。因此,对进口流态的研究,弄清进口的流动特性尤为重要。如图 5 所示,以进口管与无叶腔交界处为初始截面,间隔 60 mm 取截面,对进口管内流态进行分析。

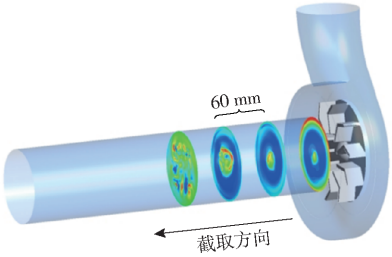


图 5 进口管截面示意图

Fig. 5 Section diagram of inlet pipe

图 6、7 分别为 Q 工况下,进口管内涡量云图和正则化螺旋度云图。从图 6 中可以发现,进口管近壁面处存在较大的涡量,而中心区域涡量较小。从进口侧向无叶腔侧的过程中,进口管近壁面涡量逐渐增大,影响区域也逐渐增大,中心区域受影响范围逐渐减小。这是因为靠近无叶腔侧,受到无叶腔内循环流影响最为严重,随着与无叶腔距离增加,循环流的影响逐渐减弱。

为进一步分析进口管内旋涡结构,引入正则化螺旋度。它可以准确地反映主涡与二次涡流动,描

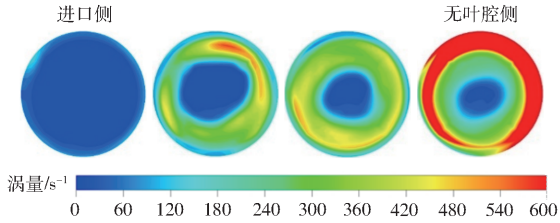


图 6 进口管不同截面涡量云图

Fig. 6 Vortex cloud diagram of different sections of inlet pipe

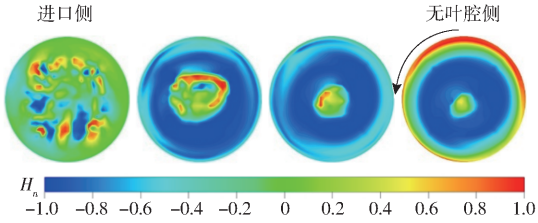


图 7 H_n 云图

Fig. 7 H_n cloud diagram of different sections of inlet pipe

述旋涡形态及其变化规律。如图 7 所示,从进口侧至无叶腔侧,截面上涡核分布较为分散,向无叶腔侧靠近,涡核分布开始向中心聚拢。在无叶腔侧截面上,中心涡核最小,但是近壁面区域开始产生较大的旋涡结构,并且此旋涡旋转方向与叶轮旋转方向相同。

2.2 不同工况下叶轮前端面流态分析

为研究流体从无叶腔至叶轮输送过程中的流动状况,在混合体积分数为 5% 情况下,对 0.6Q ~ 1.6Q 工况进行研究。截取叶轮进口前端面向内 1 mm 处截面,绘制二维速度流线图。如图 8 所示,在小流量工况(0.6Q),叶轮进口处出现了不同大小的旋涡,增大流量至 Q,叶轮中的旋涡逐渐向叶片折角处靠近。继续增大流量至 1.4Q,叶轮中旋涡数量继续减少,影响范围进一步缩小,旋涡位置稳定在叶片压力面折角处附近。当流量增大至 1.6Q 时,叶轮内旋涡基本消失。

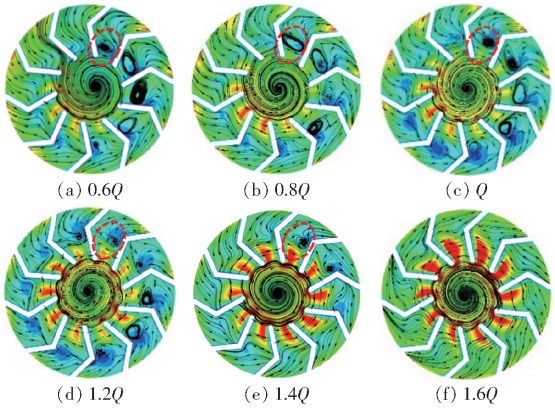


图 8 不同工况叶轮前端面流动特征

Fig. 8 Flow characteristics of impeller front face under different working conditions

由于此截面靠近无叶腔,受无叶腔中循环流的

影响较大，流道内流线出现不同程度的紊乱，发生流动分离，小流量工况下尤其明显。这是由于小流量工况下，泵腔内循环流占主导，在进口管内产生回流，紧贴进口管壁面旋转，占据进口过流面积。同时与进口来流发生相互作用，而此时进口来流速度较小，轴向旋涡较大，部分流体从流道中脱落。随着流量增大至 Q，进口管内回流与来流相互作用增强，同时因流量增大，进口来流对泵腔内的冲击作用增强，抑制了无叶腔中的部分旋涡，但是叶轮第 2 段折角过大，流体跟随性较差，因此流道内产生了较多旋涡。流量增至 1.6Q 时，进口管内螺旋回流被抑制，进口流速增大，进口来流对泵腔内的冲击达到最强。无叶腔中的绝大部分旋涡被抑制，因此叶轮流道内无明显旋涡。

2.3　无叶腔侧固相颗粒分布

由于输送的颗粒为油菜籽和黄豆混合的颗粒，为探究其在输送过程中无叶腔侧混合颗粒的浓度分布情况，以无叶腔及其外缘部分为研究对象，以距离无叶腔前端面 1 mm 处为基准，指向叶轮前端面。沿轴向等截距切分，截距为 6 mm，划分为 C1、C2、C3 3 部分。切分示意图如图 9 所示。

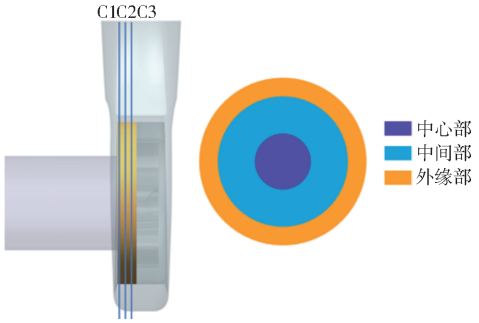


图 9　截面及切分示意图

Fig. 9　Cross-section and segmentation diagram

将这 3 组切片按照 6 mm 为增量，由内向外切分为 14 份同心圆环（图 10）。按照不同的径向尺寸，将圆环分为中心部、中间部和外缘部 3 个区域。如图 9 所示（中心部：对应吸入口范围 0 ~ 54 mm；中间部：对应叶轮影响范围 54 ~ 126 mm；外缘部：叶轮外径至压水室边缘范围 126 ~ 162 mm），提取各个切片和不同圆环内的颗粒数。以无量纲量 N_N 表征某个区域内的颗粒浓度，公式为

$$N_N = \frac{N_x}{N_i}$$

式中　N_x——切片圆环内的颗粒数

N_i——切片内颗粒总数

如图 11 所示，旋流泵在输送混合颗粒时，各切片中心部浓度均为最高。随着径向距离增加，颗粒浓度开始下降，并在中间部与外缘部交界处达到浓度最低点。从交界处开始，向外缘部方向，颗粒浓度逐渐上升。这是因为颗粒从进口段进入到无叶腔内，一部分受循环流影响从无叶腔回流到进口管，再随进口来流进入泵腔。一部分直接随进口来流，流向叶轮方向，冲击叶轮进口，所以中心部颗粒浓度较高。而外缘部由于靠近压水室近壁面，颗粒容易在此积聚，因此浓度稍有上升。从 C3 至 C1 切片，颗粒整体浓度呈递减趋势，而黄豆颗粒尤为明显。

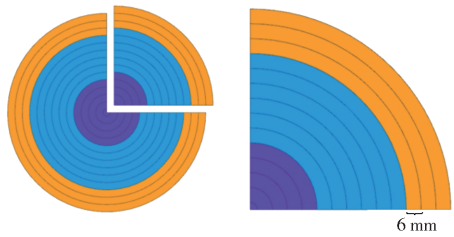


图 10　同心圆环示意图

Fig. 10　Concentric ring diagram

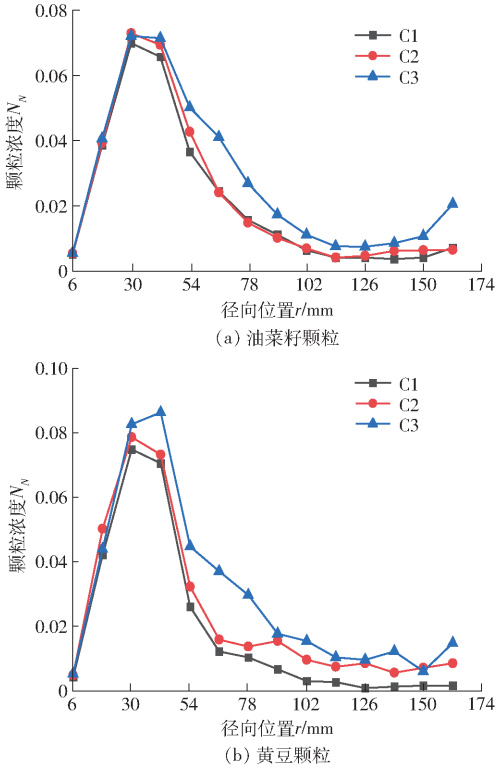


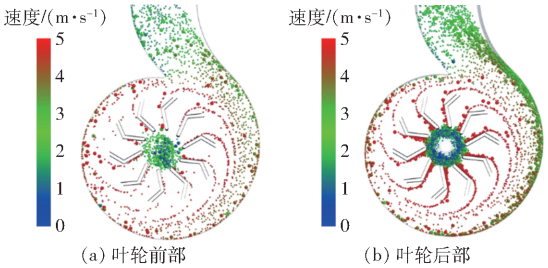
图 11　无叶腔不同切片处颗粒浓度

Fig. 11　Particle concentration at different sections of vaneless cavity

2.4　叶轮内部固相颗粒分布

图 12 为额定转速和额定流量时，输送体积分数 5% 混合颗粒的叶轮内颗粒分布图，以速度梯度对颗粒进行染色。为分析折叶片旋流泵叶轮内部混合颗粒分布情况，同时考虑到黄豆颗粒的体积较大，故将叶轮沿叶片宽度对半切分，分成前半部分和后半部分，每部分厚度均为 11 mm。观察图 12 可知，叶轮前半部分整体颗粒要少于后半部分。其中黄豆颗粒在前半部分叶轮流道中分布较少，大部分集中于叶

轮进口中下部。油菜籽颗粒在叶轮流道中沿第 1 段折边压力面分布,紧贴第 1 段折边运动。而叶轮后半部分颗粒数量较多,黄豆颗粒和油菜籽颗粒均沿第 1 段折边压力面分布并沿其运动,叶轮进口处颗粒局部聚集明显。同时观察到,叶轮无论前半部分抑或后半部分,颗粒在其第 2 段折边处并未紧贴叶片运动,而是从折角处开始,沿着第 1 段折边以抛物线形式甩出叶轮,进入到蜗壳内部。造成这种分离现象,主要原因为颗粒进入叶轮随叶轮旋转,从叶轮获得能量,速度逐渐增大。当颗粒运动至折点处,由于第 2 段折边向后偏折角度过大,颗粒不能继续从中叶轮获得能量。同时受到液流的影响,因此开始沿抛物线向后运动。



(a) 叶轮前部 (b) 叶轮后部

图 12 叶轮前后部混合颗粒分布

Fig. 12 Distribution of mixed particles in front and rear of impeller

2.5 试验外特性

为得到折叶片旋流泵实际性能,同时验证仿真结果的准确性,开展了相应的固液两相流试验。试验泵采用有机玻璃制作,便于可视化试验的拍摄。本试验在开式试验台进行,如图 13 所示,试验台由开式水箱、搅拌器、试验泵、进出口阀门及相应管路组成。采用转矩转速传感器测量转速和轴功率。转矩量程为 20 N·m,转速量程为 6 000 r/min。进口压力变送器测量范围 -50 ~ 50 kPa,出口压力变送器测量范围 0 ~ 150 kPa,泵出口流量由电磁流量计实时显示。试验颗粒选用油菜籽与黄豆按照各 50% 进行混合后的混合颗粒,在颗粒体积分数 3%、5% 下进行不同流量工况的试验。

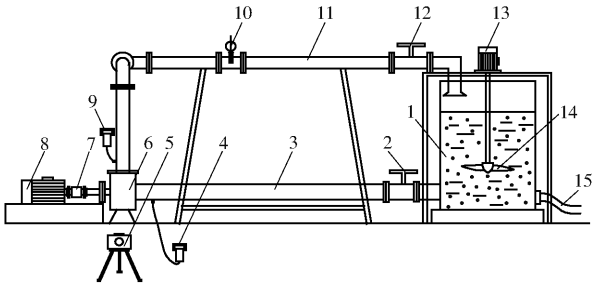


图 13 试验台示意图

Fig. 13 Diagram of test bench

1. 开式水箱 2. 进口阀门 3. 进口管路 4. 进口压力传感器 5. 高速摄影机 6. 试验泵 7. 转矩转速传感器 8. 三相电机 9. 出口压力传感器 10. 流量计 11. 出口管路 12. 出口阀门 13. 搅拌电机 14. 搅拌器 15. 颗粒排出口

采用高速摄影技术对进口管中的螺旋回流现象进行拍摄。高速摄影机型号为 MotionPro Y4,试验时设置拍摄速率为 1 500 f/s,每个工况拍摄 3 s,重复拍摄 3 次。

图 14 为折叶片旋流泵输送清水,体积分数 3%、5% 混合颗粒时的试验外特性曲线。与清水工况相比,加入混合颗粒后,扬程和效率均明显下降。且扬程和效率随混合颗粒体积分数增大而下降。加入混合颗粒后,流体与颗粒间的粘性摩擦力加大,泵内的摩擦损失较大,这导致泵内产生较大的流动损失。同时,颗粒在泵内运动,需要流体不断提供能量,随着颗粒体积分数增加,所需的能量也增大,因此,旋流泵输送固体颗粒的性能比清水的低。

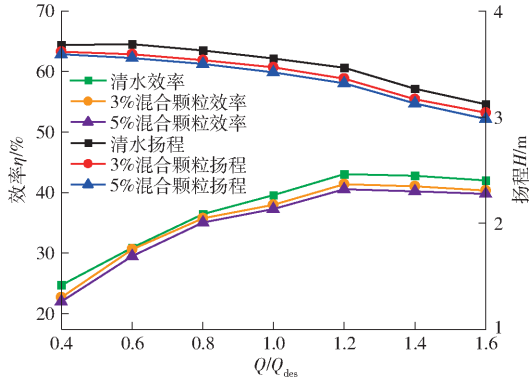


图 14 试验旋流泵外特性曲线

Fig. 14 External characteristic curves of vortex pump

2.6 不同工况下进口管螺旋回流试验对比

旋流泵结构简单,但是内部流动复杂。由于无叶腔中循环流的存在,其运行时,进口管内会出现一定长度的螺旋回流,导致进口过流面积减小,水力损失较大。因此,本试验采用高速摄影技术捕捉进口管中的螺旋回流现象,对比数值模拟结果,并验证了数值模拟结果的可行性。图 15 为试验泵进口段,进口管总长 42 cm,上方设有标尺,方便观察比较不同工况下进口管内螺旋回流长度。

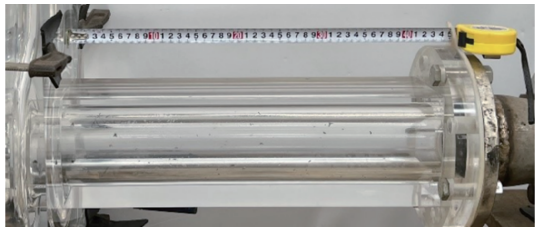


图 15 试验泵进口段

Fig. 15 Test pump inlet section

图 16 为 0.6Q ~ 1.6Q 工况,折叶片旋流泵输送混合颗粒时的进口管拍摄结果。由图 16 可以看出,

不同流量工况下，进口管中始终存在一股流体介质从泵腔回流至进口段。该股回流的旋转方向与叶轮旋转方向一致。将进口管中的大部分颗粒卷起，绕着进口管壁面做螺旋回转运动，其中，体积较小的油菜籽颗粒尤为明显。其与进口来流相互作用，在某一位置达到平衡。从试验结果发现，在 0.6Q 工况下，回流长度最长，达到 37 cm，几乎占据整个进口管；增大流量至 0.8Q，回流长度回缩至 30 cm 处，并与进口来流的对冲下达到平衡；继续增大流量至 Q，回流与进口来流激烈对冲碰撞并在 20 cm 处趋于平衡，进口管内回流长度回缩明显；当流量达到 1.2Q 时，回流长度进一步缩短，长度为 15 cm；当流量加大至 1.4Q 时，进口来流速度较大，其与回流平衡位置进一步向无叶腔侧靠近，此时回流长度为10 cm；当流量加大至 1.6Q 时，进口来流速度已达试验最大值，进口管中回流已不明显，仅在靠近无叶腔侧存在一小段，长度仅 4 cm。这是因为随着流量增大，贯流速度增大，在转速不变的情况下，泵内轴向旋涡被削弱，进口螺旋回流被无叶腔压缩，因此螺旋回流长度不断缩短。

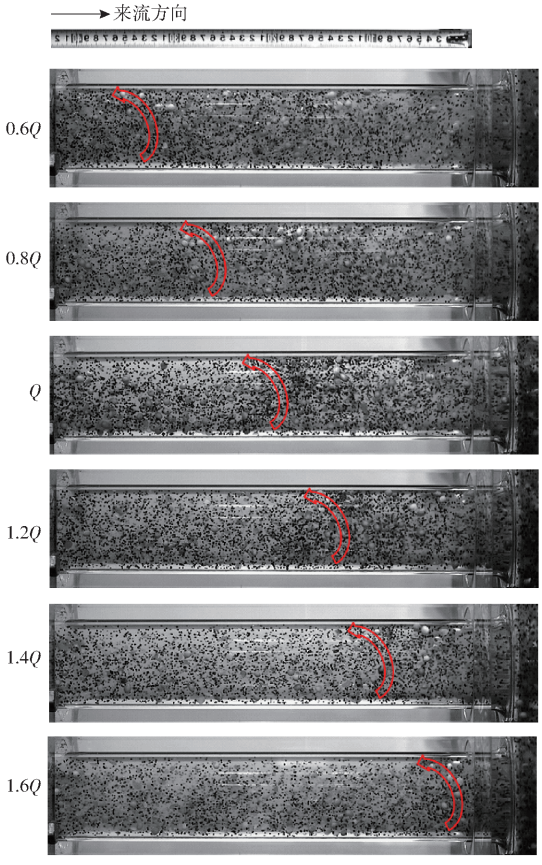


图 16　不同流量工况下混合颗粒试验进口旋流长度

Fig. 16　Swirl length of mixed particle test under different flow conditions

2.7　进口管旋流现象验证

为验证仿真模拟的可靠性，选取模拟结果进口管中旋流现象与高速摄影试验进行对比。图 17 为 Q 工况下，体积分数 5% 混合颗粒模拟结果与试验结果对比图。分析发现，数值模拟的进口螺旋回流平衡位置与旋转特征，与试验结果大致吻合，基于 CFD－DEM 数值模拟结果具有一定的可靠性，能够较好地展示泵内固相颗粒运动分布情况。

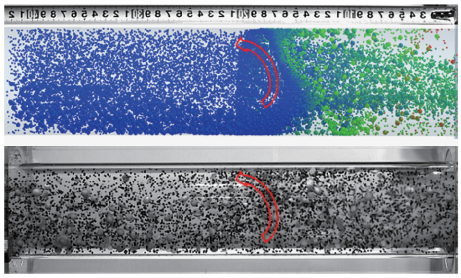


图 17　混合颗粒旋流现象验证

Fig. 17　Verification of swirling phenomenon of mixed particles

3　讨论

本文基于 CFD－DEM 耦合模型，采用油菜籽与黄豆等比例混合作为颗粒介质，在不同流量工况及体积分数下，对旋流泵进行了固液两相流计算及试验验证研究。获得不同工况下旋流泵进口管内的流动特性、叶轮前端面速度分布特征；分析旋流泵主要过流部件内颗粒分布情况；开展对数值模拟结果的试验验证。

由于本文在数值计算和试验验证时采用黄豆和油菜籽等比例混合，未设置不同混合比例的对照组，而实际情况下旋流泵输送的介质中固相组成较为复杂。因此，后续的试验和数值计算可设置多组不同混合比例的对照组，研究混合颗粒在泵内的输送情况。同时，在试验时发现，黄豆颗粒在长时间浸泡后变得松散，容易破裂，需尽快更换试验介质颗粒。后期可以根据实际情况，定制不同尺寸颗粒，以达到最佳拍摄效果。

4　结论

（1）折叶片叶轮流道内的旋涡主要存在于叶片第 1 段折边处，从小流量工况到额定工况，再到大流量工况，流道内旋涡数量先增加后减少，最终消失。且随着流量增大，旋涡逐渐向叶片工作面折角处靠拢。

（2）折叶片旋流泵在输送混合颗粒时，循环流和贯通流共同作用，颗粒浓度在无叶腔中呈现出中心部向中间部逐渐降低、在外缘部略上升的趋势。

（3）输送混合颗粒时，由于黄豆颗粒密度较大，在进口管内贴近管底向前运动，油菜籽颗粒密度与

水相近,均匀分布于进口管内。在循环流的作用下,固相颗粒沿进口管壁面旋转进入泵进口。随着流量增大,进口管内螺旋回流长度逐渐减小。循环流的存在,导致进口过流面积减小,能量损失增大,但是泵的抗堵塞性能和通过性能提高。

(4)基于离散元单元法的 CFD - DEM 耦合算法能够较为准确地计算混合颗粒在旋流泵内的复杂流动问题,数值模拟结果与试验结果吻合较好。

参 考 文 献

[1] 王秀礼,朱荣生,苏保稳,等. 无过载旋流泵正交设计数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(1):48 - 52.
WANG Xiuli, ZHU Rongsheng, SU Baowen, et al. Numerical simulation and experiment of latin square design on non-overload vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 48 - 52. (in Chinese)

[2] 权辉,程静,彭国义. 螺旋离心式诱导轮对旋流泵力学特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2021,39(4):345 - 350,357.
QUAN Hui, CHENG Jing, PENG Guoyi. Effect of screw centrifugal inducer on mechanical characteristics of vortex pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(4): 345 - 350, 357. (in Chinese)

[3] 王晶晶. 清淤船用旋流式泥浆泵内流分析与优化设计[D]. 扬州:扬州大学,2014.
WANG Jingjing. Internal flow analysis and optimization of vortex sludgy pump for dredge ship[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese)

[4] GERLACH A, THAMSEN P U, WULFF S, et al. Design parameters of vortex pumps: a Meta-analysis of experimental studies [J]. Energies, 2017, 10(1): 58.

[5] GAO X F, ZHAO T, SHI W D, et al. Numerical investigation of an open-design vortex pump with different blade wrap angles of impeller[J]. Processes, 2020, 8(12): 1601.

[6] 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]// Proceedings of the ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York: Amer. Soc. Mechanical Engineers, 2017.

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

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 施卫东,施亚,高雄发,等. 基于 DEM - CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):176 - 185.
SHI Weidong, SHI Ya, GAO Xiongfa, et al. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 176 - 185. (in Chinese)

[12] 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. Performance test on solid-liquid two-phase flow hydrotransport of vortex pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 76 - 82. (in Chinese)

[13] 沙毅,朱颖,武鹏,等. 旋流泵菜籽-水两相流浓度特性实验与流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2019,50(5):173 - 180.
SHA Yi, ZHU Ying, WU Peng, et al. Hydrotransport test with variable rapeseed concentration and flow field numerical simulation of vortex pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 173 - 180. (in Chinese)

[14] 沙毅,李金磊,刘祥松,等. 自吸旋涡泵变转速性能与内部流场试验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):119 - 124.
SHA Yi, LI Jinlei, LIU Xiangsong, et al. Self-priming vortex pump variable speed performance and internal flow test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 119 - 124. (in Chinese)

[15] SATISH K, GANDHI B K, MOHAPATRA S K. Performance characteristics of centrifugal slurry pump with multi-sized particulate bottom and fly ash mixtures[J]. Particulate Science and Technology, 2014, 32(5): 466 - 476.

[16] HUANG S, SU X H, QIU G Q. Transient numerical simulation for solid - liquid flow in a centrifugal pump by DEM - CFD coupling[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2015, 9(1): 411 - 418.

[17] 张帆. 基于 CFD - DEM 的离心泵内部颗粒运动规律及磨损特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
ZHANG Fan. Study on the motion law and wear characteristics of particles in centrifugal pump based on CFD - DEM[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021. (in Chinese)

[18] 刘栋,黄凯,倪子建,等. 叶片包角对离心泵水力性能及磨损特性的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(10):973 - 980.
LIU Dong, HUANG Kai, NI Zijian, et al. Effects of blade wrap angle on hydraulic performance and erosion characteristics of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(10): 973 - 980. (in Chinese)

[19] WANG R, GUAN Y, JIN X, et al. Impact of particle sizes on flow characteristics of slurry pump for deep-sea mining[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1 - 13.

[20] 王田田,池晓清,杨具瑞,等. 颗粒特性对离心泵叶轮叶片的磨损分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2022,37(2):181 - 189.
WANG Tiantian, CHI Xiaoqing, YANG Jurui, et al. Wear analysis of impeller blade of centrifugal pump by particle characteristics[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(2): 181 - 189. (in Chinese)

(下转第 248 页)