

引用格式:

谢訥之, 喻黎明, 王田田, 杨具瑞, 李娜. 基于计算流体动力学与离散元法耦合的磁力泵水沙运动的数值模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 370–378.

XIE R Z, YU L M, WANG T T, YANG J R, LI N. Numerical simulation of hydrodynamic and sediment movement in magnetic pump based on CFD-DEM coupling[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(3): 370–378.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于计算流体动力学与离散元法耦合的磁力泵 水沙运动的数值模拟

谢訥之, 喻黎明*, 王田田, 杨具瑞, 李娜

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 应用计算流体动力学与离散元法耦合的方法, 对 MP6-R 微型磁力泵 3 种进口流速(0.5、1.0、1.5 m/s)和 3 种含沙量(0.5%、1.0%、2.0%)水沙运动进行数值模拟。结果表明: 当进口流速为 0.5 m/s 时, 磁力泵出口管道与蜗壳衔接段出现回流区, 其最大回流速度为 1.07 m/s, 随着进口流速的加大, 回流速度逐渐降低, 当进口流速达到 1.5 m/s 时, 回流现象消失, 水流速度方向稳定指向出口, 磁力泵过流性能最佳; 叶轮轴面附近存在大量低速沙粒汇聚的滞留区, 滞留区沙粒相互碰撞产生初始切速度; 当进口流速一定时, 改变颗粒体积分数对滞留区沙粒平均速度的影响较小; 进口流速低于 1.0 m/s 时, 增加颗粒体积分数会降低颗粒残留比, 进口流速高于 1 m/s 后, 颗粒残留比非常接近; 当颗粒体积分数一定时, 提升进口流速会降低颗粒残留比, 增加滞留区沙粒平均速度, 进口流速达到 1 m/s 后, 颗粒残留比和滞留区沙粒平均速度随进口流速的变化不明显, 磁力泵输送性能最佳。结合磁力泵的过流性能、输送性能与叶轮表面的载荷强度, 建议磁力泵最佳运行状态下进口流速保持在 1.0 m/s 以上。

关 键 词: 磁力泵; 水沙运动; 进口流速; 颗粒体积分数; 滞留区; 颗粒残留比

中图分类号: S277.9⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)03-0370-09

Numerical simulation of hydrodynamic and sediment movement in magnetic pump based on CFD-DEM coupling

XIE Ruizhi, YU Liming*, WANG Tiantian, YANG Jurui, LI Na

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: The hydrodynamic and sediment movement of MP6-R micro-magnetic pump under three inlet flow rates(0.5, 1.0, 1.5 m/s) and three sediment concentrations(0.5%, 1.0%, 2.0%) were numerically simulated by the method of computational fluid dynamics coupled with discrete element method. The results show that when the inlet flow rate is 0.5 m/s, a backflow zone with the maximum backflow velocity of 1.07 m/s appears in the interface section between the outlet pipeline and the volute of the magnetic pump. With the increase of the inlet flow rate, the backflow velocity gradually decreases. When the inlet flow rate reaches 1.5 m/s, the backflow phenomenon disappears, and the magnetic pump has the best flow performance with the stable flow velocity direction pointing to the outlet. There are a large number of retention areas where low velocity sand particles converge near the axial surface of blade wheel. When the inlet velocity is constant, the change of particle volume fraction has little effect on the average velocity of sand particles in the retention area. When the inlet flow rate was lower than 1.0 m/s, the increase of the particle volume fraction significantly reduced

收稿日期: 2020-12-30

修回日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769009)

作者简介: 谢訥之(1995—), 男, 四川渠县人, 硕士研究生, 主要从事水动力学与水利涡轮机械的研究, 873725970@qq.com; *通信作者, 喻黎明, 博士, 教授, 主要从事排灌设备的研究, liming16900@sina.com

the particle residual ratio, but when the inlet flow rate was higher than 1.0 m/s, the particle volume fraction was very close. When the volume fraction of particles is constant, increasing the inlet velocity decreases the particle residual ratio and increases the average velocity of sand particles in the stagnant area. When the inlet velocity reaches 1.0 m/s, the particle residual ratio and the average velocity of sand particles in the stagnant area do not change significantly with the inlet velocity, and the magnetic pump has the best transport performance. The maximum pressure and the area on the high pressure surface of the impeller can be reduced by increasing the inlet velocity, which led to the lower load intensity on the impeller surface. Considering the overflow performance, conveying performance and the load intensity of the impeller surface, it is suggested that the inlet flow rate of the magnetic pump should be kept above 1.0 m/s under the optimal running state.

Keywords: magnetic pump; water-sediment movement; inlet velocity; particle volume fraction; stagnant area; particle residue ratio

磁力泵被广泛应用于石油、化工、制药、食品、环保、国防等领域,是输送易燃、易爆、有毒和贵重液体的理想设备。一般地,磁力泵的设计以清水为介质,当输送含泥沙颗粒的介质时,会破坏过流部件的表面,导致磁力泵水力性能减弱、稳定性降低、机组效率下降、振动和噪声加重,需频繁检修,严重时导致隔离套材料剥落^[1]。研究磁力泵内固体颗粒的运动规律,使磁力泵在最优工况下运行,对于磁力泵的使用维护和优化设计有重要意义。

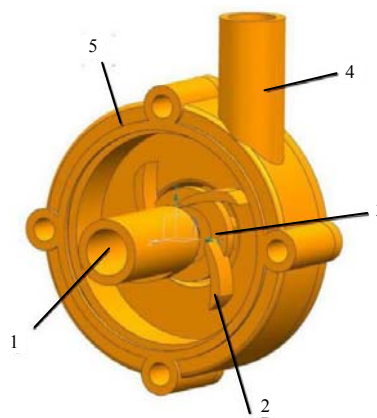
刘少军等^[2]基于 DEM-CFD 耦合方法,以深海扬矿电泵为研究对象,发现增加颗粒体积分数会导致泵内两相流混合不均匀,导致泵的扬程和效率下降;施卫东等^[3]使用 DEM-CFD 耦合方法,研究了旋流泵内大颗粒的主要运输方式及内流动特性,并使用 PIV 技术验证了 CFD-DEM 耦合方法的可行性。VIJAYAN 等^[4]通过 CFD 和 DEM 的耦合来模拟流体辅助的二元颗粒系统的混合,发现颗粒堆积顺序、密度比、粒径比等参数对混合过程有显著影响。ZHANG 等^[5]提出了一种基于 CFD-DEM 的流化床恒定壁流边界条件的数值计算方法,可以反映颗粒壁面热流密度、流体壁面热流密度和壁面温度随时间和空间的变化程度。

笔者基于 CFD-DEM 耦合的方法,模拟单级单吸式微型磁力泵中的水沙运动,使用混合网格与滑移网格相结合的方式,分析进口流速和沙粒体积分数对沙粒和水流及叶轮的影响,并使用示踪法追踪不同时刻沙粒的分布情况,以期获得从过流能力、输送能力、叶轮表面载荷强度 3 个角度评估磁力泵最佳运行工况的方法。

1 单级单吸式微型磁力泵计算模型的确定

1.1 几何模型

选取 MP6-R 微型磁力泵,几何模型如图 1 所示。泵的进口内径为 10 mm,出口内径为 10 mm,叶轮直径为 34 mm,额定转速为 3000 r/min,额定流量为 2.8 L/min,最大流量为 8 L/min,额定功率为 3 W,额定扬程为 0.8 m,最高扬程为 1 m,叶片数为 4 片。



1 进口; 2 叶轮; 3 叶轮轴面; 4 出口管道; 5 蜗壳。

图1 单级单吸式微型磁力泵的三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of single stage single suction type micro-magnetic pump

1.2 网格模型

使用 ICEM 软件对磁力泵流场进行网格划分,进出口管道选用结构网格,蜗壳及叶轮使用非结构网格^[6]。采用交界面连接非结构网格与结构网格,实现不同网格类型间的数据传递。蜗壳内采用滑移网格法^[7],通过实现体网格的转动来计算蜗壳内高雷诺数的湍流流动。参照王超越等^[8]的方法,选取环绕叶轮的圆带为滑移界面,其位置如图 2 所示。

其中,蓝色表示交界面,交界面3内为圆环内滑移网格旋转区,其余区域均为静止域。网格数分别为32 979、63 157、102 487时,出口流量无明显变化,最终选定网格数为32 979。

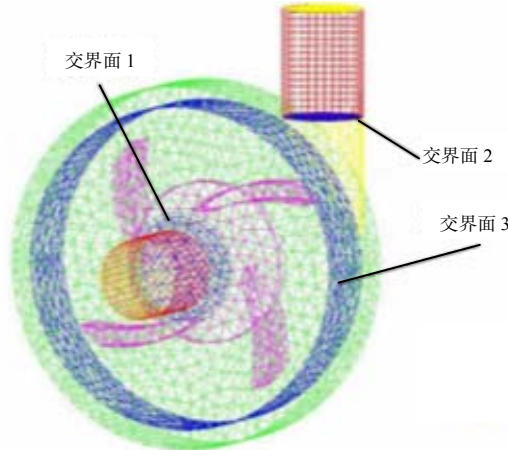


图2 单级单吸式微型磁力泵的网格模型

Fig.2 Grid model of single stage single suction type micro-magnetic pump

1.3 数学模型

1.3.1 颗粒相

选用 0.2 mm 粒径泥沙颗粒,因其体积较小,故不考虑虚拟质量力、压力梯度力、Basset 力、Saffman 升力的影响;又因未给定初始自旋速度,在忽略速度与压力梯度力的条件下,沙粒的自旋速度由沙粒间的碰撞产生且自旋速度很小,同样可忽略 Magnus 升力。依据文献[9-10],沙粒的受力 F 可简化为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

式中: F_1 为重力; F_2 为浮力; F_3 为曳力。

$$F_1 = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_1 g \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_2 g \quad (3)$$

式中: d 为颗粒直径; ρ_1 为颗粒密度; ρ_2 为流体密度; g 为重力加速度。

$$F_3 = \frac{\pi}{8} d \mu C_D Re |u_1 - u_2| \quad (4)$$

式中: μ 为流体的动力黏度系数; C_D 是曳力系数; u_1 为颗粒速度; u_2 为流体速度; Re 为颗粒雷诺数。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re}, & Re < 1 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.667}), & (1 \leq Re < 400) \\ 0.44, & (Re \geq 400) \end{cases} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho d}{\mu} |u_1 - u_2| \quad (6)$$

颗粒相选择 Hertz-Mindlin 碰撞接触模型。将颗粒间的接触过程简化为弹簧振子的阻尼运动,通过球体之间的交叠量计算出颗粒的受力^[11]。

1.3.2 流体相

依据文献[12-13],水沙两相流中的基本控制方程——连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho)}{\partial t} + \nabla \varepsilon \rho u = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho u)}{\partial t} + \nabla \varepsilon \rho u = -\nabla p + \nabla \varepsilon \mu \nabla u + \varepsilon \rho g + F_s \quad (8)$$

式中: ε 为体积分数项; ρ 为流体密度; p 为压力。

磁力泵内水流流态为高雷诺数湍流,并且流量较小,故采用 SST K- ω 湍流模型^[14]。

1.3.3 双向耦合

选择 Euler-Lagrange(欧拉-拉格朗日)耦合方法^[15],对磁力泵内的水沙两相流进行数值模拟。

流体相采用非定常计算,进口采用速度进口条件,出口采用自由出流出口条件,进出口水力直径与进出口管径一致,湍流强度为 5%,磁力泵转速设置为逆时针方向 3000 r/min,仿真时间步长为 1×10^{-4} s,泵内与流体接触壁面采用无滑移壁面条件,近壁面区域采用标准壁面函数。

颗粒与流体在同一进口以相同速度流入,在进口处均匀分布,设置颗粒粒径为 0.2 mm, EDEM 计算时间步长取瑞利时间步长的 30%,为 2×10^{-6} s。

1.3.4 时间无关性验证

设定沙水沙粒体积分数为 0.5%、入口流速为 1.5 m/s, 1 s 内磁力泵沙粒数目变化如图 3 所示。结

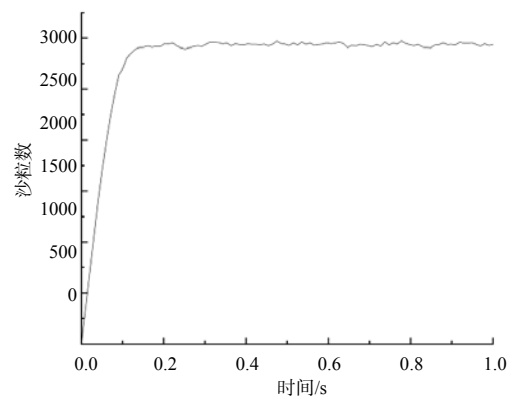


图3 时间无关性验证

Fig.3 Independent verification of time

果表明,磁力泵运行 0.15 s 后,沙粒数接近 3000,此时可认为进入磁力泵内的沙粒与排出磁力泵的沙粒数相当,达到动态平衡,此后磁力泵内流态和颗粒分布趋于稳定。

1.4 颗粒残留比

分布在蜗壳壁面和叶轮迎水面上的沙粒会对过流部件造成磨损,运转时留在磁力泵内的固体颗粒越少,则磁力泵的磨损就会越小,因而定义无量纲数颗粒残留比 η ,通过统计相对平衡状态时残留

在磁力泵内的颗粒数量 N_b 与每秒内进入磁力泵内的颗粒 N_s 的比值,以其表示磁力泵的输送性能。 $\eta=N_b/N_s$ 。

2 结果与分析

2.1 进口流速对磁力泵内流场压力的影响

沙粒体积分数为 0.5%、进口流速分别为 0.5、1.0、1.5 m/s,运行时间为 1 s 时磁力泵中截面的压力云图如图 4 所示。

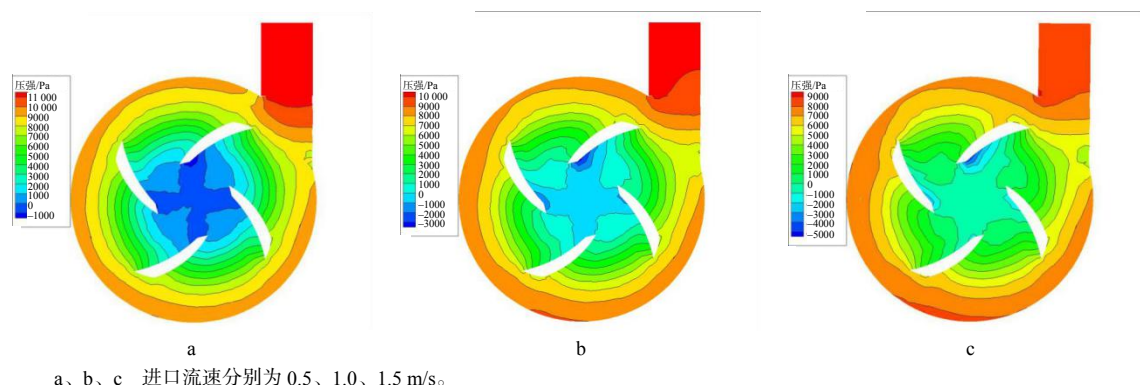


图4 不同进口流速的含沙水流中截面压力云图

Fig. 4 Cross section pressure cloud image of sand-containing water flow with different inlet velocities

水流自中心管道进入蜗壳内冲击叶轮轴面,随后在叶轮的转动下甩向蜗壳壁面,压力逐渐增大,在蜗壳壁面和出口管道处压力最大。当进口流速由 0.5 m/s 增加到 1.5 m/s 时,流场最大压强从 11 000 Pa 下降到 9000 Pa,最低压强由-1000 Pa 降低至-5000 Pa;进口流速 0.5 m/s 时,4 片叶轮中心与边缘的平均压差约为 6000 Pa,1.0 m/s 时平均压差约为 7000 Pa,1.5 m/s 时平均压差达到了 9000 Pa,说明叶轮区水流压力梯度会随着进口流速的增大而减小。

2.2 进口流速对磁力泵内流场速度的影响

磁力泵中截面水流速度云图如图 5 所示。水流速度从中心管道到蜗壳壁面逐渐增大,叶轮边缘附近速度最大,为 5 m/s,受叶轮转速影响,与水流初始速度无关;叶轮背水面尾部出现速度略低于最大速度的拖拽区,其形状近似三角形(图 5-a),当进口流速升高时,拖拽区逐渐收缩成半圆形(图 5-b),面积缩小近一半;水流离开叶轮区后,失去叶轮驱动力,速度逐渐降低,在蜗壳壁面附近降低至约 2

m/s,随后沿蜗壳壁面进入出口管道。Y 轴左侧出口管道壁面附近出现低于右侧壁面的低速区,由于蜗壳射流的影响,随后低速区逐渐减小。进口流速为 0.5 m/s 时,Y 轴左侧出口管道首端壁面未出现低速区,推测该处存在回流,导致速度分布异常。出口管道末端在蜗壳射流的作用下,使得 Y 轴左侧速度升高,低速区的速度减小。

放大图 5-a 所示区域,可得到出口管道速度矢量图(图 6)。进口流速为 0.5 m/s 时,出口管道上壁面与蜗壳连接处至出口中心管道间出现回流区,其高度约为出口管径的 30%,近壁面区回流速度最大,约为 1.07 m/s,水流混乱形成涡旋;进口流速提升至 1.0 m/s 后,回流区大幅收缩,仅在蜗壳管道连接处出现,高度约为出口管径的 5%,最大回流速度降低至 0.79 m/s;当进口流速达到 1.5 m/s 后,回流区消失,水流速度稳定指向出口,过流性能最佳。提示磁力泵应尽可能在进口流速大于 1 m/s 的工况下运行,以避免出口管道内产生大量回流,降低磁力泵的过流性能。

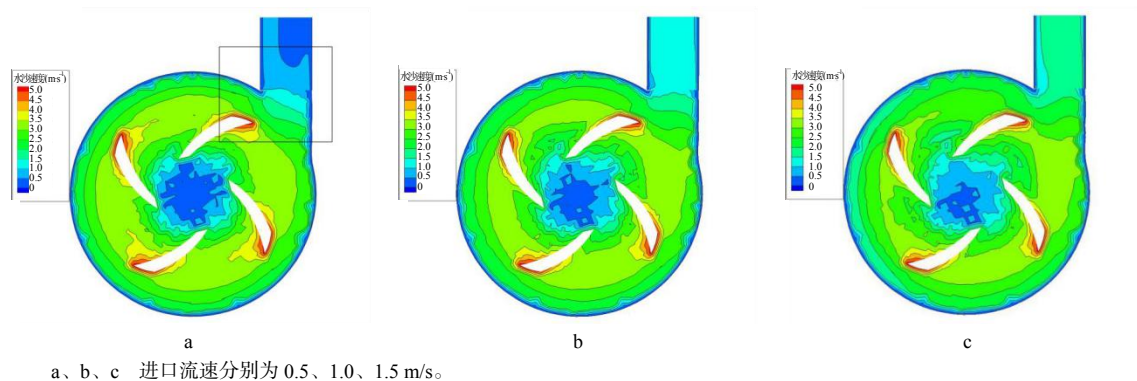


图5 不同进口流速的含沙水流中截面速度云图

Fig. 5 Cross sectional velocity cloud image of sand-containing water flow with different inlet velocities

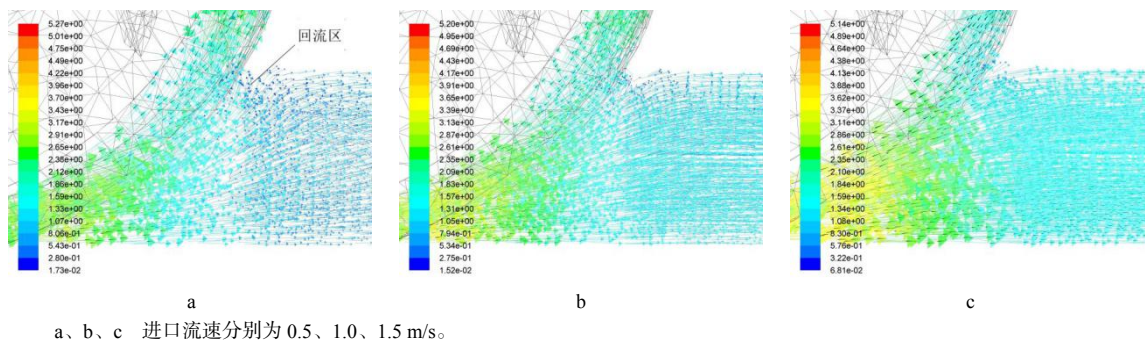


图6 不同进口流速的含沙水出口管道速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of sand-containing water flow at outlet pipe with different inlet velocity

2.3 不同时刻磁力泵泥沙的分布

沙粒首次接触叶轮轴面(0.02 s)、沙粒首次到达出口(0.04 s)、沙粒数首次达到平衡状态(0.15 s)、仿

真试验终止(2.00 s)时,沙粒在磁力泵内的分布如图 7 所示。

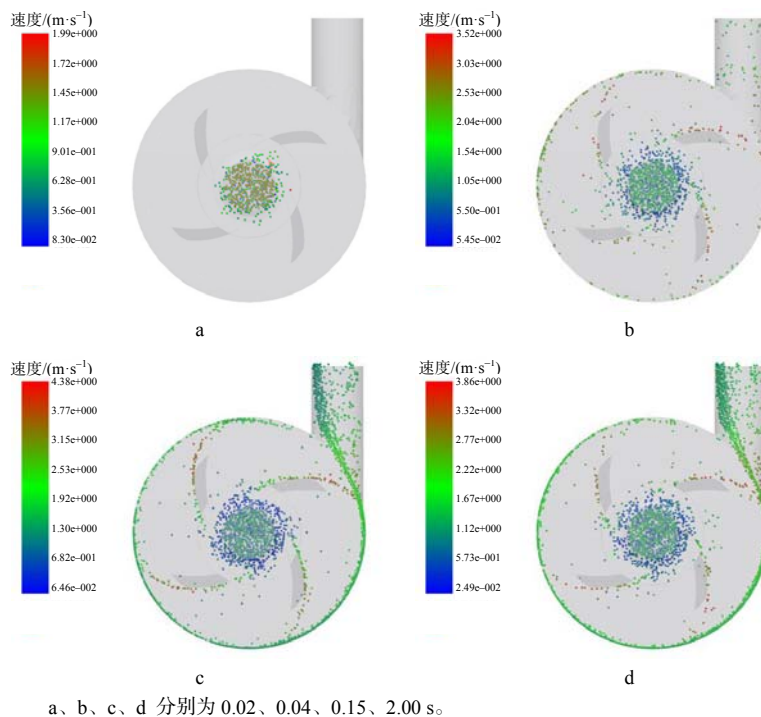


图7 不同时刻磁力泵沙粒分布

Fig. 7 Sand particle distribution of magnetic pump at different times

沙粒首次接触叶轮轴面(0.02 s)时,水流速度差异很小,曳力可忽略不计,先进入的沙粒沿轴向运动至叶轮轴面,与轴面发生撞击后与随后进入的沿轴向运动的沙粒发生碰撞,由于是随机均匀分布的,碰撞大多数为斜向碰撞,从而产生指向蜗壳壁面方向的切向速度。选取靠近叶轮轴面区的沙粒,通过 EDEM 计算出其在 0.019 s 至 0.021 s 的平均速度约为 0.652 m/s,平均曳力约为 3.3×10^{-6} N,重力和浮力的合力为 3.08×10^{-7} N,故沙粒在曳力和重力的影响下,以略偏离初始切速度方向的螺旋线轨迹进入叶轮区。

沙粒进入叶轮区后,在高速旋转的叶轮带动下,在叶轮边缘处速度达到最大,约为 3.77 m/s,随后脱离叶轮飞向蜗壳壁面,此刻最先进入的沙粒已进入出口管道抵达出口(0.04 s)。叶轮转速为 3000 r/min,距离上个时间节点经过了 0.02 s,叶轮已旋转 1 周,所以这部分沙粒未在蜗壳内转动 1 圈,就被转动时靠近出口管道的叶轮直接甩出进出口管道。沙粒刚进入出口管道时速度大约为 3.03 m/s,出口管道内水流流速约为 1.5 m/s,水流对沙粒的作

用力为阻力。在阻力、重力和浮力的作用下,沙粒的速度逐渐降低,直到低于水流流速时,水流对沙粒的阻力转变为曳力,当速度降低至约 1.43 m/s 时,沙粒所受曳力约等于重力与浮力的合力,此后沙粒速度趋于稳定。

至 0.15 s 时,叶轮、蜗壳壁面和出口管道内均分布有大量沙粒,叶轮附近沙粒达到最大速度,约为 4.38 m/s;蜗壳壁面颗粒作变速圆周运动,速度在 1.92~2.52 m/s 变化。

2.0 s 时,沙粒分布情况与在 0.15 s 时的差异不大。沙粒在磁力泵内的主要运动轨迹有 2 种,如图 8 所示。轨迹 I,沙粒沿蜗壳壁面作圆周运动流入出口管道,撞击出口管道壁面后沿壁面流出;轨迹 II,沙粒则不经过蜗壳壁面,由叶轮直接甩入出口管道,在出口管道内中心区域形成散点状分布的轨迹。由于沙粒相对分散且未与壁面发生碰撞,降低了因颗粒与壁面以及颗粒之间相互碰撞导致的动能损耗,使得轨迹 II 沙粒在出口管道内的速度更快,通过时间更短。

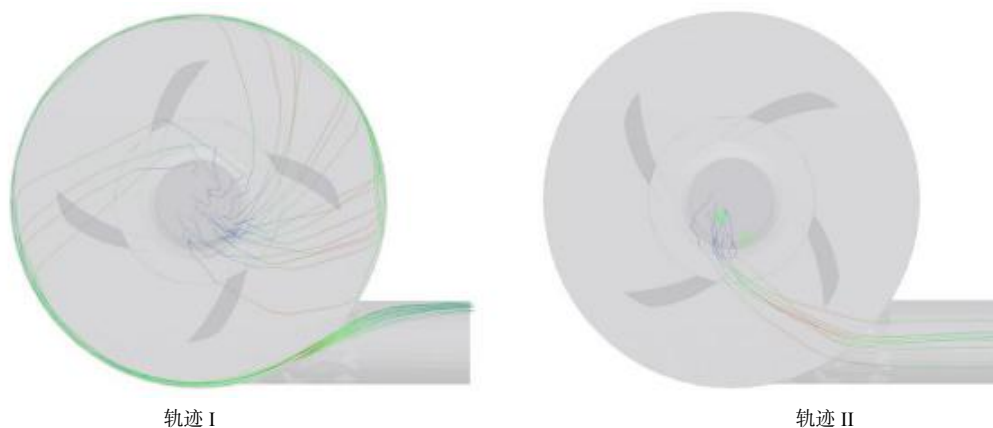


图8 磁力泵内沙粒的运动轨迹

Fig. 8 Sand particle trajectory of sand in magnetic pump

2.4 磁力泵泥沙的输送性能

2.4.1 进口流速和颗粒体积分数对滞留区沙粒平均速度的影响

由图 9 可发现近叶轮轴面附近出现大量低速沙粒(蓝色颗粒)。该区域流场流速较低,沙粒受到的曳力作用较弱。由于沙粒之间的碰撞频繁,使得沙粒动能损失,形成滞留区。滞留区的存在延长了沙粒残留在磁力泵内的时间,降低了沙粒的输送性能。

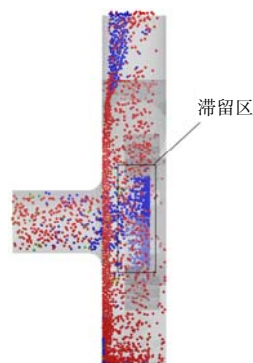


图9 叶轮轴面滞留区

Fig.9 Stagnant area of blade wheel axle surface

如图 10 所示,选取每种工况下沙粒初次到达进口管道 0.003 m 处时进入磁力泵内的全部沙粒作为研究对象,统计沙粒与叶轮轴面发生碰撞前后 0.02 s 内的最低平均速度。该速度在一定程度上可以表示沙粒在滞留区中的平均速度,体现了沙粒通过滞留区时的快慢程度,是影响磁力泵沙粒输送性能的主要因素。

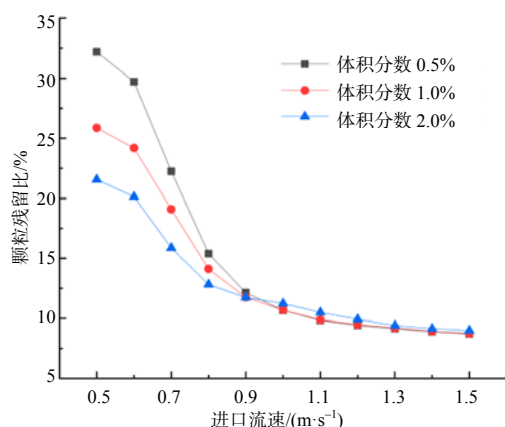


图10 不同颗粒体积分数的颗粒残留比

Fig. 10 Particle residual ratio curves under different working conditions

表 1 结果表明,进口流速由 0.5 m/s 增加到 1.0 m/s 时,滞留区沙粒的平均速度增加了约 0.205 m/s;至 1.5 m/s 时,滞留区沙粒平均速度仅变化了约 0.009 m/s,说明当进口流速达到 1.0 m/s 后,进口速度对滞留区沙粒平均速度的影响较弱。当进口速度为 0.5 m/s 时,改变颗粒体积分数对滞留区平均速度的影响不大,均约为 0.36 m/s;当进口速度为 1.0 和 1.5 m/s 时,颗粒体积分数由 0.5%增加到 1%时,滞留区平均速度降低了约 0.045 m/s,颗粒体积分数由 1.0%增加到 2.0%时,滞留区平均速度变化不大。

表1 不同进口流速和不同含沙量下滞留区沙粒的平均速度

Table 1 Average velocity of sand grains in the stagnant area with different inlet velocity and different sediment concentration

| 进口流速 | 滞留区沙粒平均速度 | | |
|------|-----------|-------|-------|
| | 0.5% | 1.0% | 2.0% |
| 0.5 | 0.363 | 0.366 | 0.362 |
| 1.0 | 0.598 | 0.552 | 0.557 |
| 1.5 | 0.608 | 0.564 | 0.561 |

2.4.2 进口流速和颗粒体积分数对颗粒残留比的影响

在颗粒体积分数分别为 0.5%、1.0%、2.0%,进口流速在 0.5 m/s 至 1.5 m/s,共计 33 种工况下进行仿真试验,取每种工况下颗粒数量达到平衡状态后的数值绘制颗粒残留比曲线。

对 3 条曲线进行拟合,得到颗粒体积分数分别为 0.5%、1.0%、2.0%的颗粒残留比(Y_1 、 Y_2 、 Y_3)与进口流速(x)的曲线方程。

$$Y_1 = 555.13x^5 - 2913.9x^4 + 5904.8x^3 - 5706x^2 + 2569.1x - 399.02;$$

$$Y_2 = 385.74x^5 - 2026.9x^4 + 4113.8x^3 - 3984.5x^2 + 1799x - 277.01;$$

$$Y_3 = 291.03x^5 - 1485.8x^4 + 2924.4x^3 - 2742.4x^2 + 1196x - 172.48。$$

3 条曲线的拟合优度 R^2 均为 0.998,基本符合实际仿真情况。

由图 10 可知,当颗粒体积分数一定时,进口流速从 0.5 提升至 1 m/s 时,颗粒残留比下降 21.52%;继续提升至 1.5 m/s 时,颗粒残留比仅降低 1.96%,变化不明显。可见进口流速对泥沙残留比的影响会随流速的增加而逐渐减弱,达到 1 m/s 后,可忽略其影响。1.5 m/s 进口流速下,颗粒体积分数由 0.5%提升至 2%时,颗粒残留比仅升高 0.3%;但 0.5 m/s 进口流速下颗粒体积分数由 0.5%增至 2%时,颗粒残留比下降了 10.63%。

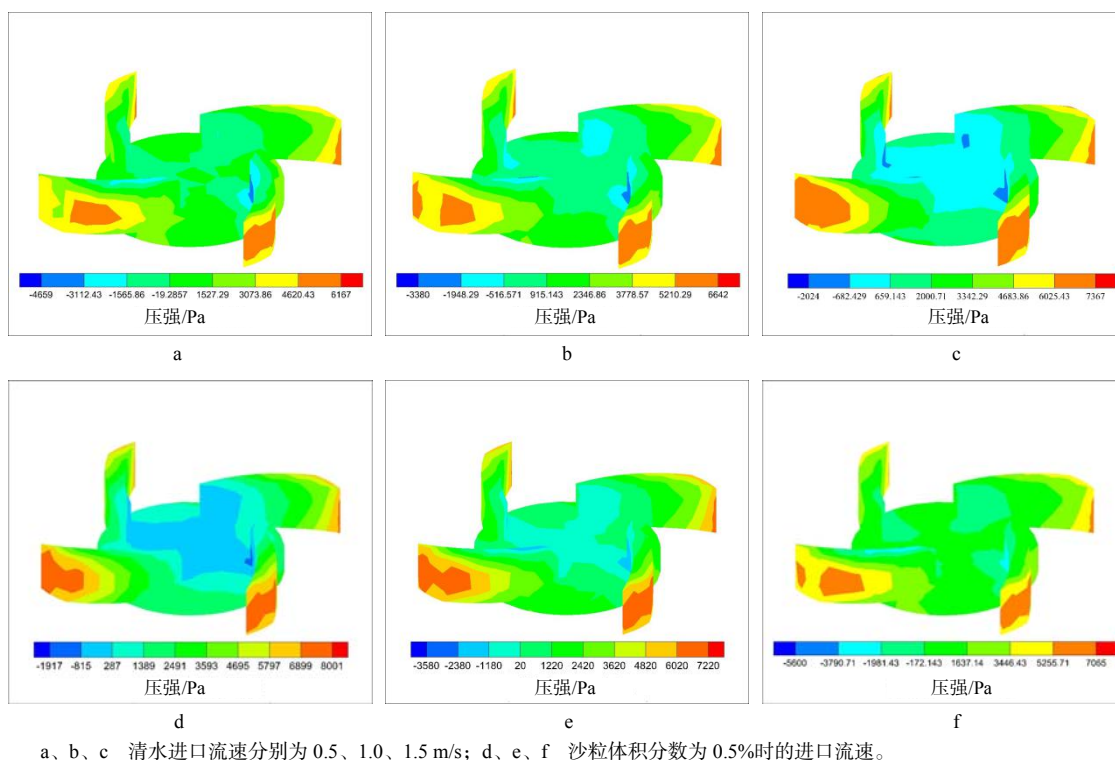
低速工况下的沙粒在与叶轮轴面碰撞后的速度很低,容易留在滞留区,此时增加颗粒的体积分数能有效增加沙粒间的相互碰撞,从而容易产生切向速度,使得沙粒滞留区平均速度升高,容易离开滞留区进入叶轮区,从而降低了颗粒残留比;高速工况下沙粒数更多,滞留区产生的有效碰撞已达到饱和,此时再增加颗粒体积分数反而会产生过多无效碰撞,使沙粒切向速度降低,从而增大其留在滞留区的时间,颗粒残留比反而会略微增大。

磁力泵在实际运行过程中应尽量使进口速度达到 1 m/s 以上,从而增大沙粒在滞留区内的平均速度,降低颗粒残留比,使磁力泵具有较高的输送性能。

2.5 进口流速对叶轮压力的影响

图 11 是清水和颗粒体积分数为 0.5%磁力泵内叶

轮的压力分布图。从图中可以得知,叶片迎水面压力均大于背水面的,压力均是从叶片根部至尾部逐渐增大,其中迎水面尾部尖端至中段处的压力最大。



a、b、c 清水进口流速分别为 0.5、1.0、1.5 m/s; d、e、f 沙粒体积分数为 0.5%时的进口流速。

图11 磁力泵叶轮压力云图

Fig.11 Impeller pressure cloud diagram under clear water condition and sand-containing water condition

当进口流速由 0.5 m/s 增加到 1.5 m/s 时,清水条件下叶轮最大压强由 7367 Pa 降低到 6167 Pa,含沙水条件下叶轮最大压力由 8001 Pa 降低到 7065 Pa,因此提升进口流速可以降低叶片高压面的最大压力,同时缩小高压面面积;当进口流速为 0.5、1.0、1.5 m/s 时,颗粒体积分数为 0.5%的含沙水使得叶轮表面最大压力分别增加了 634、578、898 Pa。含沙水中的泥沙颗粒对叶片的冲击会导致叶轮最大压力升高、高压面扩大,使得其比清水更易发生磨损。

叶轮在磁力泵内高速旋转,是最易磨损的过流部件。进口速度越高,叶轮表面受到的压力越低,高压面越小,因此,在运行时应尽量使磁力泵达到 1.0 m/s 以上的进口流速,以延长叶轮的使用寿命。

3 试验验证

筛选 0.2 mm 石英砂颗粒,额定流速 2.8 L/min,分别设置石英砂体积分数为 0.5%、1.0%、2.0%和进口流量为 2.36、4.71、5.89、7.07 L/min 时进行试验,测定磁力泵的运行效率。

比较图 12 中试验和数值模拟的运行效率和流量得知,试验和数值模拟整体趋势一致。曲线中段误差越小,两端误差较大,效率误差均在 10%以内,同时由于该泵的性能曲线为驼峰形曲线,应使其在驼峰最高点右侧稳定工作区运行,因此其运行工况应大于 4.71 L/min,即进口流速为 1.0 m/s。

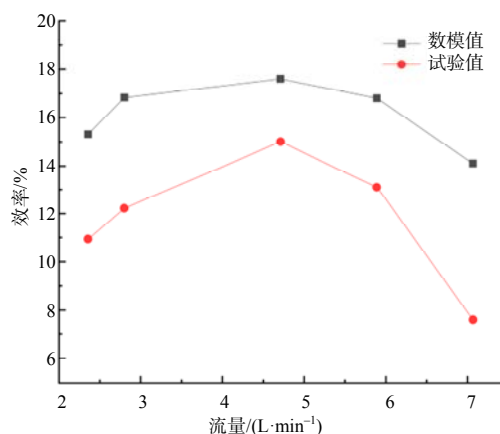


图12 磁力泵性能曲线

Fig.12 Performance curve of magnetic pump

4 结论

叶轮轴面附近存在大量低速沙粒汇聚的滞留

区, 滞留区沙粒相互碰撞产生初始切速度, 在曳力作用下以螺旋线轨迹进入叶轮区, 大多数沙粒沿蜗壳壁面作圆周运动流进出口管道, 少部分沙粒则由叶轮直接甩入出口管道, 在出口管道内中心区域形成散点状分布的轨迹。

进口流速为 0.5 m/s 时, 磁力泵出口管道与蜗壳衔接段出现回流区, 其最大回流速度为 1.07 m/s, 当进口流速增大时, 回流区和最大回流速度均会减小, 当进口速度达到 1.5 m/s 时, 回流现象消失, 水流速度方向稳定指向出口, 磁力泵过流性能最佳。

当进口流速低于 1.0 m/s 时, 增加颗粒体积分数会增加滞留区的有效碰撞, 使得颗粒残留比降低; 进口流速高于 1.0 m/s 后滞留区的有效碰撞达到饱和, 增加颗粒体积分数会增加颗粒间的无效碰撞, 使得滞留区沙粒平均速度降低, 颗粒残留比升高, 磁力泵输送性能降低; 当进口流速一定时, 改变颗粒体积分数对滞留区沙粒平均速度的影响较弱; 进口流速低于 1.0 m/s 时, 增加颗粒体积分数会降低颗粒残留比, 但进口流速高于 1 m/s 后, 颗粒残留比非常接近; 当颗粒体积分数一定时, 提升进口流速会降低颗粒残留比, 会增加滞留区沙粒平均速度, 但进口流速达到 1 m/s 后, 颗粒残留比和滞留区沙粒平均速度随进口流速的变化不明显, 磁力泵输送性能最佳。

磁力泵叶片迎水面和背水面的压力均是从叶片根部至尾部逐渐增大, 其中高压面出现在迎水面尾部尖端处至中段。提高进口流速可以降低叶轮高压面的最大压力, 减少高压面的面积, 使叶轮表面的载荷强度更低。

结合磁力泵的过流性能、输送性能与叶轮表面的载荷强度, 建议磁力泵最佳运行状态下进口流速保持在 1.0 m/s 以上。

参考文献:

- [1] 张广, 魏显著. 泥沙浓度及粒径对水轮机转轮内部流动影响的数值分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 94-100.
- [2] 刘少军, 李渊文, 胡小舟. 基于 DEM-CFD 颗粒体积分数对深海扬矿电泵工作性能的影响[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 257-264.
- [3] 施卫东, 施亚, 高雄发, 等. 基于 DEM-CFD 的旋流泵大颗粒内流特性数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 176-185.
- [4] VIJAYAN A, JOY B, ANNABATTULA R K. Fluid flow assisted mixing of binary granular beds using CFD-DEM[J]. Powder Technology, 2021, 383: 183-197.
- [5] ZHANG T N, LU Y J. A method to deal with constant wall flux boundary condition in a fluidized bed by CFD-DEM[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406: 126880.
- [6] 黄先北, 杨硕, 刘竹青, 等. 基于颗粒轨道模型的离心泵叶轮泥沙磨损数值预测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 35-41.
- [7] 张凌新, 胡龙兵, 邵雪明. 滑移网格下泵内流场的非定常流计算[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(1): 10-16.
- [8] 王超越, 王福军. 离心泵瞬态模拟中滑移界面形状和位置研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 81-88.
- [9] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 53-60.
- [10] 周毓佳, 赵陈儒, 薄涵亮. 气泡曳力系数模型分区研究[J]. 化工学报, 2019, 70(S2): 108-116.
- [11] 王明年, 江勇涛, 于丽, 等. 重载铁路隧道隧底围岩劣化的 CFD-DEM 模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(7): 63-68.
- [12] 喻黎明, 徐洲, 杨具瑞, 等. CFD-DEM 耦合模拟网式过滤器局部堵塞[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 130-137.
- [13] 伍吉富, 孙宏发, 张静. 基于 CFD-DEM 耦合的条缝出流自由下落流场特性研究[J]. 建筑热能通风空调, 2020, 39(9): 29-34.
- [14] 任芸, 吴登昊, 牟介刚, 等. 考虑旋转和曲率的湍流模型修正及应用[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 25-30.
- [15] 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): 98-103.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立