

深海泥浆举升泵设计与水力特性研究

秦如雷^{1,2,3}, 高洁云^{1,2,3}, 于彦江⁴, 陈浩文^{1,2,3},
李强⁵, 和国磊^{1,2,3}, 宿向辉⁶, 许本冲^{1,2,3}

- 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;
- 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 河北 廊坊 065000;
- 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 河北 廊坊 065000;
- 广州海洋地质调查局, 广东 广州 511458;
- 中国冶金地质总局山东正元地质勘察院, 山东 济南 250101;
- 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018

摘要: 泥浆举升离心泵作为无隔水管泥浆循环钻井的核心功能单元, 作用是驱动储存在吸入模块中的泥浆携带岩屑沿上返管线回流至钻井平台。以往的无隔水管泥浆循环系统以圆盘泵作为举升单元, 围绕圆盘泵做了具体的结构设计和理论分析, 对于水力性能更好的多级离心泵研究较少。以多级离心泵作为研究对象, 介绍其设计的理论依据及具体的参数, 采用CFD-DEM耦合计算的方法构建离心泵的计算模型, 进行了全尺度流场模拟, 对离心泵的叶轮设计、流场和内颗粒分布规律、泥浆携岩运移规律进行了探讨。计算结果验证了离心泵在设计工况下具有较好的颗粒通过性。基于泥浆举升试验台, 对离心泵样机进行了水力性能试验, 测试结果表明该泵具有较好的工作特性, 其水力性能达到设计要求, 可以应用于深海无隔水管钻井作业。

关键词: 泥浆举升泵; 多级离心泵; RMR技术; CFD-DEM双向同步耦合; 水力性能试验; 深海钻探
中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0077-08

Study on the design and hydraulic characteristics of the submarine mud lift pump

QIN Rulei^{1,2,3}, GAO Jieyun^{1,2,3}, YU Yanjiang⁴, CHEN Haowen^{1,2,3},
LI Qiang⁵, HE Guolei^{1,2,3}, SU Xianghui⁶, XU Benchong^{1,2,3}

- Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
- Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Langfang Hebei 065000, China;
- Technology Innovation Center for Deep Exploration Drilling Equipment, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China;
- Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 511458, China;
- Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, Jinan Shandong 250101, China;
- Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: As the core functional unit of riserless mud recovery system, the mud lifting centrifugal pump drives the mud stored in the suction module to carry rock cuttings recirculate back to the drilling platform through the return pipeline.

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-05-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.009

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海钻井泥浆回收安全应急关键装备研发”课题“高可靠多功能泥浆举升系统研制”(编号: 2023YFC2813102)

第一作者: 秦如雷, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事大洋钻探与天然气水合物勘查开发装备的研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, qrlei@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 秦如雷, 高洁云, 于彦江, 等. 深海泥浆举升泵设计与水力特性研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 77-84.

QIN Rulei, GAO Jieyun, YU Yanjiang, et al. Study on the design and hydraulic characteristics of the submarine mud lift pump[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 77-84.

Previous designs of the riserless mud recovery system primarily employed disc pumps as the lifting unit, with specific structural design and theoretical analysis conducted around them. However, there has been limited research on multi-stage centrifugal pumps, which offer superior hydraulic performance. In this study, we focus on the theoretical basis and specific parameters of a multi-stage centrifugal pump, and develop a computational model using CFD-DEM coupling calculation to conduct a full-scale flow field simulation. This simulation investigates the impeller design, flow field characteristics, internal particle distribution patterns, and mud rock transport patterns within the pump. The results validate the centrifugal pump's good particle permeability under design conditions. Furthermore, we conducted hydraulic performance tests on a centrifugal pump prototype using a mud lifting test bench. The test results indicate that the pump exhibits satisfactory operational working characteristics and hydraulic performance, meeting the design requirements for application in deep-sea riserless drilling operations.

Key words: mudlift pump; multi-stage centrifugal pump; RMR technology; CFD-DEM bidirectional synchronous coupling; hydraulic performance test; deep sea drilling

0 引言

使用无隔水管泥浆循环钻井(Riserless Mud Return,以下简称RMR)工艺施工时,钻井平台上的钻井泥浆泵通过钻杆将泥浆输送到钻头,钻进时产生的岩屑被泥浆携带通过环空返回到井口吸入模块^[1-6]。泥浆举升泵作为RMR的核心功能单元,负责驱动储存在吸入模块中的含屑泥浆沿上返管线回流至钻井平台,经固控系统进行清洁后返回泥浆系统再利用^[7-9]。

国内外对深海环境的流体举升泵进行了大量的理论研究,秦如雷等^[10]提出了深海泥浆举升泵的选型方法;陈国明等^[11-12]对泥浆提升用叶片式圆盘泵进行了结构设计、压力特性等方面的研究,提出了叶片式圆盘泵的设计方法,计算了其应用于RMR钻井时的水力学特性;邹伟生等^[13-14]对深海采矿离心泵从结构设计、数值计算等方面展开了一定的研究,提出了八级提升电泵的设计方法和特性预测。但是,上述研究还较少涉及到离心泵作为泥浆举升泵的相关方面,本文以离心泵为研究对象,采用CFD-DEM方法构建离心泵的数值分析模型,开展全尺度流场模拟,对离心泵的叶轮设计、流场和内颗粒分布规律、泥浆携岩运移规律以及离心泵样机水力性能参数测试等方面进行研究,以验证离心式泥浆举升泵整体设计方案的可行性、设计参数的合理性及其性能参数是否满足实际应用要求等^[15-18]。深海钻探中,井底泥浆举升循环系统原理如图1所示。

1 理论基础

为了设计出具有优异水力性能和颗粒通过性能的离心式泥浆举升泵,首先需要针对离心泵研究

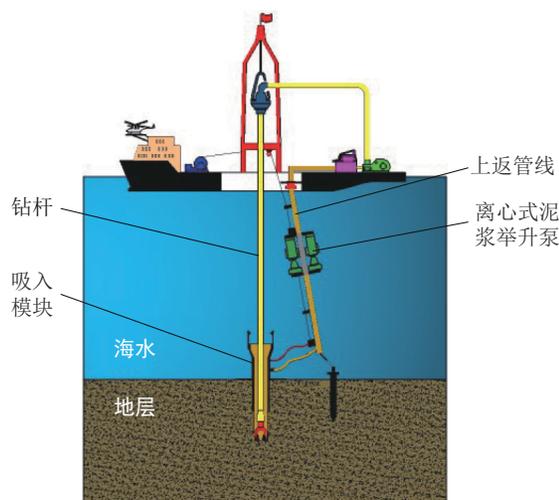


图1 井底泥浆举升循环系统

Fig.1 Bottom hole mud lifting and circulation system

其内部复杂流场作用下固液两相流的分布特性,特别是要深入分析固相颗粒与流体的相互作用机理,研究固液两相流输送泵中的颗粒运动规律,提高颗粒在泵中的通过性,降低泵输送固液两相流时叶轮堵塞的概率^[19-25]。

1.1 固液两相流计算模型

固液两相流是指在流体流动中同时存在固体颗粒的现象。在进行固液两相流的数值模拟时,可以采用多种计算模型,这些模型根据不同的应用场景和计算需求有所区别。在欧拉-欧拉模型(Eulerian-Eulerian Model)中,固体和液体都被视为连续相,各自有其速度和压力场,适用于固体颗粒浓度较高、颗粒间相互作用显著的情况;此时需要为每个相分别求解Navier-Stokes方程。在欧拉-拉格朗日模型(Eulerian-Lagrangian Model)中,液体作为连

续相采用欧拉方法,而固体颗粒作为离散相采用拉格朗日方法,适用于颗粒浓度不高,颗粒可以在流体中自由运动的情况。

根据 Pagalthivarthi^[26]的研究结论,当固体颗粒的体积稠度不超过12%时,可选用基于欧拉-拉格朗日方法的DPM模型计算固液两相流体的运动规律。进一步采用基于离散元技术的粒子动力学基本原理与CFD技术相结合,可以表征泵叶轮中固液两相流体间相互的耦合作用。

流体连续相的运动特性符合雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS),可选用基于欧拉坐标系的 SST $k-\epsilon$ 湍流模型用于流场数值分析,其流体动力学特征可表示为公式(1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m^3 ; t ——时间, s ; v_i ——笛卡尔直角坐标系 i 方向的速度矢量, m/s ; v_j ——笛卡尔直角坐标系 j 方向的速度矢量, m/s ; P ——静压, N ; ρg_i 、 F_i ——分别是重力和外部体积力, N ; τ_{ij} ——由流体运动引起的粘性应力张量, N/m^2 。

离散相的求解主要是通过接触模型求解粒子碰撞过程中的力,利用牛顿第二定律计算粒子的加速度,然后更新粒子的速度和位移。粒子上的力在图2中进行了分析,相应的动量守恒和角动量守恒方程分别为公式(2)以及公式(3):

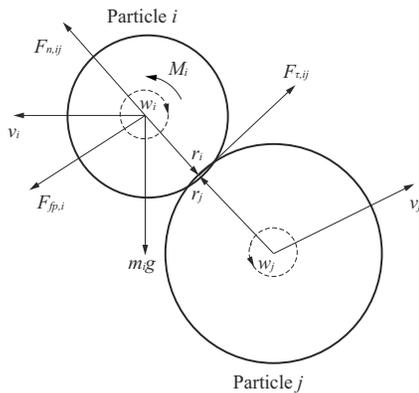


图2 粒子碰撞的受力分析

Fig.2 Force analysis of particle collision

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{n,ij} + F_{t,ij}) + F_{f,p,i} + m_i g \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} I_i \omega_i = \sum_j (r_i \times F_{t,ij} + M_i) \quad (3)$$

式中: m_i ——质量, kg ; v_i ——颗粒的速度, m/s ; g ——重力加速度, m/s^2 ; $F_{n,ij}$ ——颗粒之间的法向接触力, N ; $F_{t,ij}$ ——切向接触力, N ; I_i ——粒子的惯性矩, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; ω_i ——粒子的角速度, rad/s ; r_i ——粒子的半径, m ; $F_{f,p,i}$ ——液相施加在颗粒上的力, N ; M_i ——滚动摩擦扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

1.2 CFD-DEM双向同步耦合方法

采用CFD-DEM耦合的固液两相流理论,对模型泵进行水-颗粒两相流数值计算,旨在掌握颗粒在泵流场内的运动和迁移规律,以便分析泵内颗粒的运动和堵塞情况,为样泵的设计研发提供技术支撑。

采用CFD-DEM双向同时耦合方法,求解连续相和离散相,不同相之间的边界满足相容性方程。采用欧拉方法计算连续相,根据连续相流场的计算结果,在悬浮于连续相中的粗颗粒上施加局部载荷。采用拉格朗日跟踪法计算离散相位,根据力平衡和动量守恒原理,通过积分粒子在轨道上的力平衡方程,可以获得粒子轨迹拉格朗日方程坐标。轨迹方程通过在独立的时间步长内逐步积分求解,然后重新计算连续相的流场。通过这种方式,反复使用迭代方法,直到连续相和离散相都达到运动平衡。最后,实现双向耦合计算。

2 举升泵型设计及输送特性数值分析

2.1 泵叶轮几何参数和数值条件

根据前述的多级泵设计思路,结合常规钻进的环境条件,设计工况条件:举升泥浆岩屑粒径10 mm、固相体积稠度为10%、密度为1.2 g/cm^3 ,泵排量 $Q=120 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=110 \text{ m}$,效率为30%,电机轴功率与泵输出功率的计算分别为公式(4)与公式(5):

$$P_{\text{电机}} = P_{\text{泵}} / \eta \quad (4)$$

$$P_{\text{泵}} = Q \times H \times \rho \times g \quad (5)$$

式中: $P_{\text{电机}}$ ——电机轴功率,等于泵输入功率, W ; $P_{\text{泵}}$ ——泵输出功率, W ; Q ——泵的排量, m^3/s ; H ——泵的扬程, m ; ρ ——流体的密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 。

经过计算,得到 $P_{\text{泵}} = 44.3 \text{ kW}$, $P_{\text{电机}} = 147.67 \text{ kW}$ 。

在此基础上,确定泵的水力参数,具体参数见表1。设计了离心泵叶轮轮型和流道形状,借助二

维和三维设计软件绘制了泵头的流道形状和叶片轮廓(如图3所示)。

表1 离心泵几何参数

Table 1 Geometric parameters of centrifugal pump

叶轮几何参数	
泵进口直径 D_s/mm	140
泵进口速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.83
泵出口直径 D_d/mm	140
泵出口速度 $v_d/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.77
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1450
流量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	120
数量	4
导叶几何参数	
叶轮外径 D_2/mm	480
出口宽度 b_2/mm	30
叶片数 $Z/\text{枚}$	4
叶片出口角 $\beta_2/(\text{°})$	5.1~5.3
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1450
流量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	120
数量	4

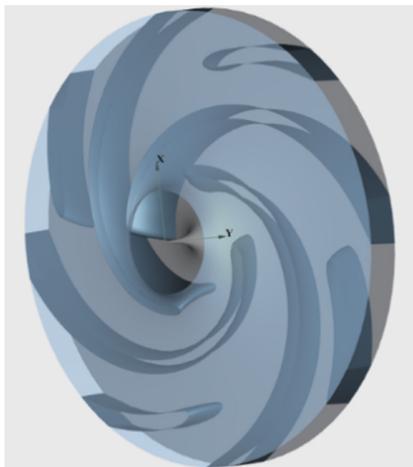


图3 四叶泵叶轮三维模型

Fig.3 3D model of four-blade pump wheel

该结构特征为:4片大叶片再加上4个导流叶片。设计采用的流道相对较宽,有利于颗粒的运动,降低了泵内堵塞的风险。而且叶片较厚,尤其是靠近入口的叶片,有利于提高叶片的强度,对抗颗粒碰撞和磨损的能力更强。增加小叶片的目的是确保叶轮流道的体积变化不会太大,流场更加均匀,这有利于提高颗粒的输送能力。

2.2 泵中流场和岩屑颗粒的通过性能分析

采用 EDEM-FLUENT 软件耦合计算泵中的三维非定常固液两相流。数值分析的边界条件如表2所示。

表2 CFD设置和边界条件

Table 2 CFD settings and boundary conditions

湍流模型	SST $k-\omega$
入口边界	质量流量入口
出口边界	自由出口
壁面边界	无滑移壁面
壁面函数	可放缩壁面函数
接触力	Hertz-Mindlin无滑移模型

流体是 4°C 海水与密度为 2000 kg/m^3 的钻屑颗粒混合的浆液。在泵的入口处,固体颗粒的体积浓度为 10% ,颗粒为球形,直径为 10 mm 。接触力采用 Hertz-Mindlin 无滑移模型。泵体由密度为 7800 kg/m^3 的双相不锈钢制成。

考虑到计算的准确性、计算机的计算能力以及粒径,确定4叶片泵的网格总数为385315。网格独立性检查结果如图4所示,泵全局生成的网格如图5所示。

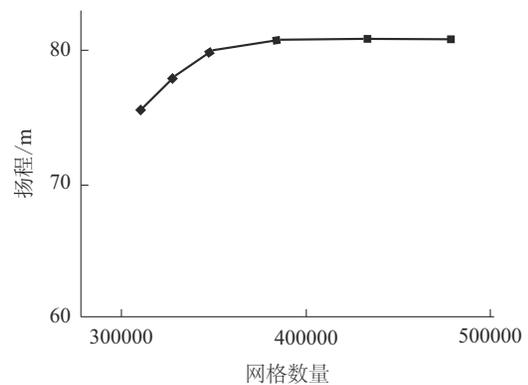


图4 泵网格独立性检查

Fig.4 Mesh independent check of pump

根据泵头流线分布图(图6),当粒径为 10 mm 时四叶轮泵中流体的最大速度为 20 m/s ,出现在叶轮出口区域;泵中流体的最小速度为 0 m/s ,出现在泵叶轮间包络区域。泵中出现速度突变主要由于在该区域内流体的运动方向发生改变,由与泵轴线平行方向转向与泵相切方向。在全域流线分布方面,泵叶轮的外缘处流体速度为 10 m/s ,低于靠近

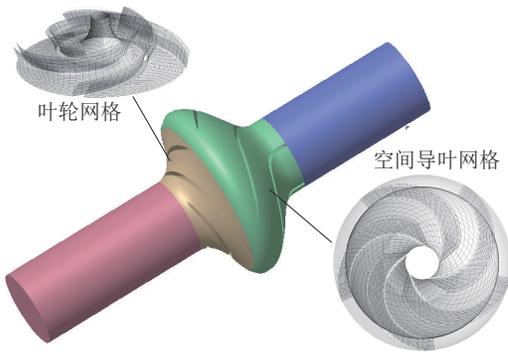


图5 计算域三维图和网格图

Fig.5 3D model and mesh grid of computational domain

叶轮出口端处,这也是与定性分析的结果相符,主要是因为远离叶轮处的流体没有叶轮的直接驱动且需克服泥浆间的流动阻力。总体上来说,四叶泵适合输送含固相的泥浆。

图7显示了举升泵中钻屑颗粒的运动速度与空间分布。颗粒被注入流体域,在叶轮的旋转作用下加速,在导叶中流速降低,然后通过出口段流出。叶轮通道中颗粒的速度沿流动方向增加,一些颗粒的速度突然增加,系与颗粒之间的碰撞和颗粒与壁之间的碰撞有关。根据颗粒通过流体域的时间统

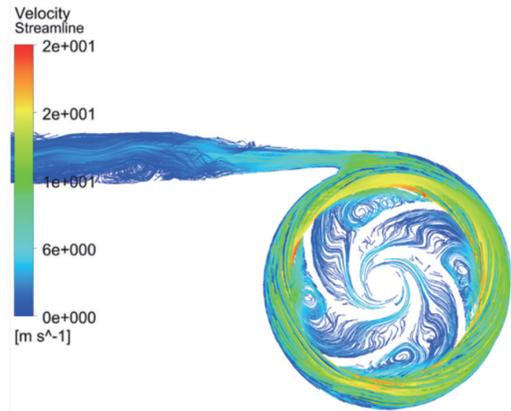


图6 泵叶轮流线分布

Fig.6 Streamline distribution of pump impeller.

计计算(详见表3),颗粒在泵体中最长停留时间约为0.37 s,最短时间为0.09 s,颗粒可以快速地通过叶轮。对划分4个区域中的颗粒体积浓度定量分析可知,区域4(泵出口)的颗粒体积浓度9.93%与区域1(泵入口)的浓度12.6%接近,固相颗粒大部分均已通过输送空间,分布较为均匀,且未出现区域聚集情况,显示此设计具有较好的颗粒通过性,发生堵泵的几率较小。

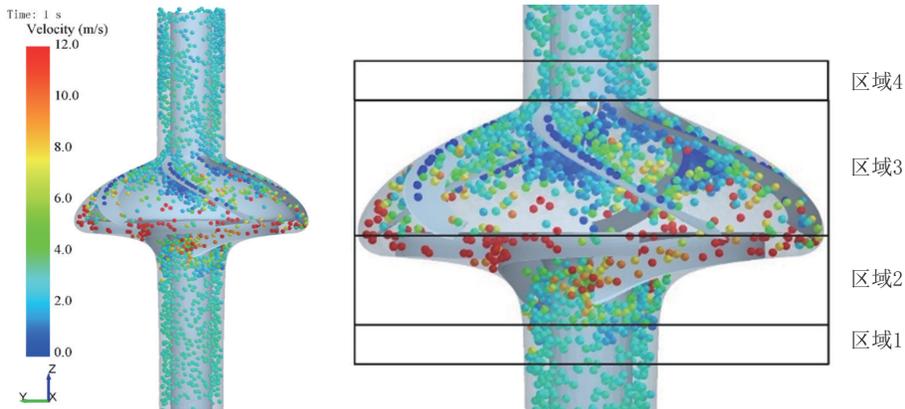


图7 泵叶轮中颗粒的速度分布

Fig.7 Velocity distribution of particles in the pump impellers

3 样泵水力性能试验

在数值模拟的基础上,试制了两级模型泵用于开展水力性能试验,以验证泵型设计的合理性。将模型泵与现场管线系统连接,开展了清水工况下的泵性能测试。图8为模型泵试验台原理。

3.1 基本的运行情况

本次试验将对模型泵在不同介质、不同转速下

的泵扬程、轴功率和效率,以及颗粒通过性进行测试。两级泵的扬程 $\le 110\text{ m}$。其中关键的物理量测量依据如下:

扬程和效率的测量。泵的进口压力和出口压力分别由进口压力变送器和出口压力变送器测量,其测量误差 <math>< 0.1\%</math>。流量由电磁流量计记录,其测量误差 <math>< 0.5\%</math>,实际在颗粒工况下,通过标定装置

表3 泵中颗粒运动特性统计
Table3 Statistical characterization of particle motion in pump

区域	颗粒数量	颗粒平均速度/(m·s ⁻¹)	颗粒停留时间/s	颗粒碰撞次数	颗粒体积浓度/%
区域1	122	3.13	0.0937	11	12.6
区域2	441	9.48	0.1396	397	
区域3	1094	3.62	0.3539	526	
区域4	96	2.61	0.3724	23	9.93

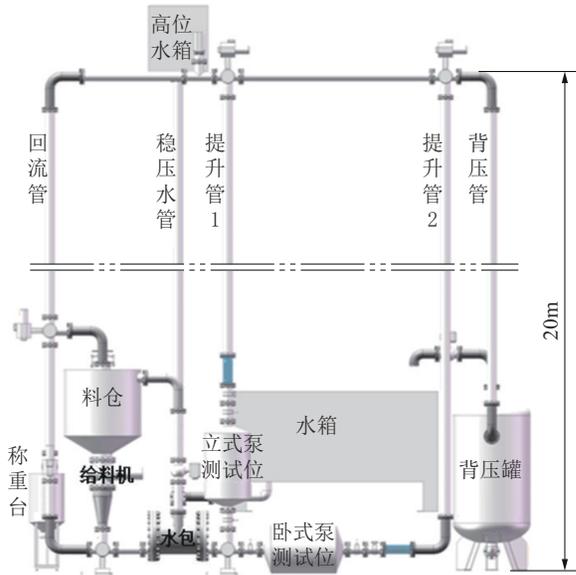


图8 举升试验台原理

Fig.8 Principle of lifting test bench

对管路系统内的颗粒量进行物理标定,确定两相流量数值。驱动泵的电机最大功率为160 kW,泵的功率将通过电测法进行测量。轴功率可通过在电机与两级泥浆泵的连接处设置扭矩仪进行测量。

在背压工况下,介质为清水,电机转速为1450 r/min,流量分别为90、100、110、120和130 m³/h共5个工况下进行水力性能试验,测试两级泵的扬程和效率特性。将管线的阀门关闭,开启电源,通过软启动方式开启泵,待泵运行稳定后,监测泵的流量、扬程和轴功率,并进一步改变阀门的开度,获得不同工况下泵的性能参数。现场测试发现,该泵在设计流量点运行,泵的参数平稳,振动和噪声均在可控范围内,电机也没有异常声响。

3.2 水力性能数据

对监测的泵扬程和功率、效率数据进行分析,发现该泵性能曲线较为平稳,设计点120 m³/h,泵的

扬程113.3 m,轴功率102 kW,效率36.5%;小流量点90 m³/h时,泵的扬程117 m,轴功率100 kW,效率28.78%(参见图9~11)。该泵水力特性呈现出几点显著的特征:

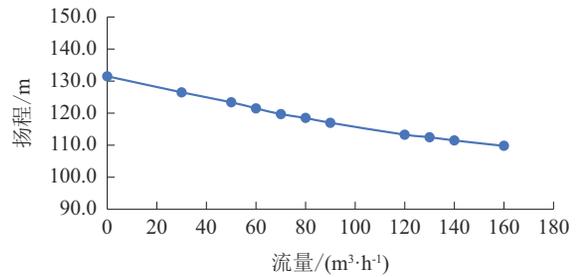


图9 泵的扬程-流量性能特征

Fig.9 Lift-flow performance of pump

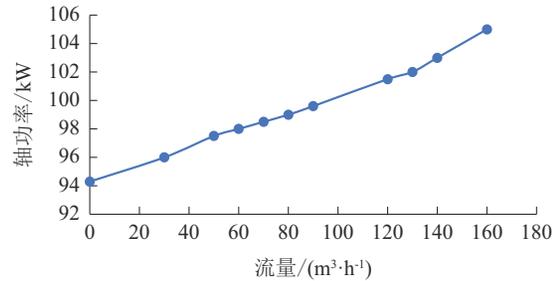


图10 泵的轴功率-流量性能特征

Fig.10 Shaft power-flow performance of pump

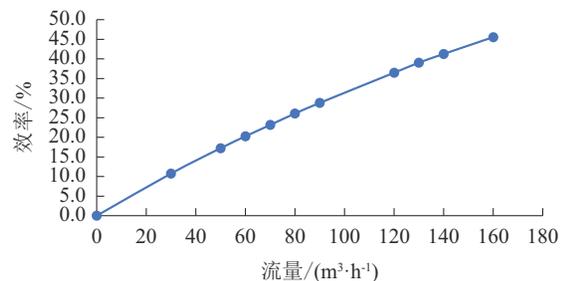


图11 泵的效率-流量性能特征

Fig.11 Efficiency-flow performance of pump

(1)扬程曲线比较平坦,尤其在设计运行区间(90~120 m³/h),泵的扬程变化较小,可使水下钻井获得恒定的出口压力。

(2)轴功率曲线起点较高,关死点扬程很大,在运行区间(90~120 m³/h),泵的轴功率变化较小,因此泵的轴功率不容易突增,可保障电机运行可靠。

(3)泵的效率曲线是典型的放大设计效果,泵在大流量点的效率显著高于小流量点。设计工况120 m³时,泵的效率36.5%,90 m³/h时,泵的效率

28.8%。

4 结论

本文基于欧拉坐标系的 SST $k-\epsilon$ 湍流模型和 CFD-DEM 双向流固耦合分析,进行了用于深海泥浆举升的离心泵内部流场和岩屑颗粒运移特性的研究,验证了离心泵叶轮结构设计方案及参数的合理性和可行性。

应用水力提升模拟试验台进行了离心式泥浆举升泵样机的水力特性测试,通过对试验数据和原始数据的对比分析,清水工况下,泵的效率曲线是典型的放大设计效果,大流量点泵的效率显著高于小流量点。验证了该泵具有更好的工作特性,其水力性能达到了设计的要求。

对照深海 RMR 系统的设计标准,离心式泥浆举升泵的数值模拟和样机试验结果均表明所设计的离心泵可应用于深海无隔水管钻井作业中,并且该泵的设计方法和试验过程是科学合理的。

参考文献(References):

- [1] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.
CHEN Haowen, YU Yanjiang, WANG Yanli, et al. Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep-sea riserless mud recovery drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):9-15.
- [2] 陈浩文,刘晓林,王林清,等.无隔水管泥浆回收钻井技术控制系统功能设计[J].钻探工程,2021,48(S1):375-380.
CHEN Haowen, LIU Xiaolin, WANG Linqing, et al. Functional design of the control system of riserless mud recovery drilling technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):375-380.
- [3] 高本金,陈国明,殷志明,等.深水无隔水管钻井液回收钻井技术[J].石油钻采工艺,2009,31(2):44-47.
GAO Benjin, CHEN Guoming, YIN Zhiming, et al. Deepwater riserless mud recovery drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2):44-47.
- [4] Cohen J H, Kleppe J, Grønås T, et al. Gulf of Mexico's first application of riserless mud recovery for top-hole drilling—A case study [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2010: OTC-20939-MS..
- [5] 王偲,谢文卫,张伟,等.RMR 技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):17-23.
WANG Cai, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Adaptability of RMR for Marine gas hydrate drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):17-23.
- [6] Aird P. Deepwater well planning and Design—Science Direct [M]//Deepwater Drilling, 2019:257-283.
- [7] 王江帅,李军,柳贡慧,等.基于井下分离的深水双梯度钻井参数优化[J].石油勘探与开发,2019,46(4):776-781.
WANG Jiangshuai, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Parameters optimization in deepwater dual-gradient drilling based on downhole separation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4):776-781.
- [8] 于洋,钱则刚,张和平,等.多列往复式压缩机轴系扭振特性研究[J].流体机械,2013,41(7):14-18.
YU Yang, QIAN Zegang, ZHANG Heping, et al. Research on the crankshaft torsional vibration of multi-row reciprocating compressor [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(7):14-18.
- [9] 唐斌,刘广彬,许海平,等.大型工艺往复压缩机系统振动分析[J].中国机械工程,2014,25(7):873-877.
TANG Bin, LIU Guangbin, XU Haiping, et al. Vibration analysis of large scale process reciprocating compressor system [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(7):873-877.
- [10] 秦如雷,于彦江,陈浩文,等.无隔水管泥浆循环举升泵选型及性能参数计算方法[J].钻探工程,2021,48(S1):381-385.
QIN Rulei, YU Yanjiang, CHEN Haowen, et al. Selection and calculation of parameters of the mud lifting pump for RMR [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):381-385.
- [11] 解永超,陈国明,张叶,等.叶片圆盘泵压力脉动及叶轮径向力特性分析[J].石油机械,2015(10):63-67.
XIE Yongchao, CHEN Guoming, ZHANG Ye, et al. Numerical analysis on pressure fluctuation and radial force of disc pump with straight blade [J]. China Petroleum Machinery, 2015(10):63-67.
- [12] 陈永超,陈国明,周昌静,等.圆盘泵叶片结构形式对泵外特性影响分析[J].机械设计,2014,31(9):93-96.
CHEN Yongchao, CHEN Guoming, ZHOU Changjing, et al. Analysis on the influence of blade structure on exterior characteristics of disc pump [J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(9):93-96.
- [13] 邹伟生,刘瑞仙,刘少军.粗颗粒海底矿石浆体提升电泵研究[J].中国机械工程,2019,30(24):2939-2944.
ZOU Weisheng, LIU Ruixian, LIU Shaojun. Study on lifting motor pumps for coarse particle slurry in sea bed mining [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24):2939-2944.
- [14] 邹伟生,卢勇,李哲旻.深海采矿提升泵的数值模拟分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(6):59-63.
ZOU Weisheng, LU Yong, LI Zhehan. Numerical simulation and analyses of lift pump in deep sea mining [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(6):59-63.
- [15] Li X, Zhang J, Tang X, et al. Study on wellbore temperature of riserless mud recovery system by CFD approach and numerical calculation [J]. Petroleum, 2020, 6(2):163-169.
- [16] 黄思,杨富翔,宿向辉.运用 CFD-DEM 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(27):28-31.
HUANG Si, YANG Fuxiang, SU Xianghui. Unsteady numerical simulation for solid-liquid two-phase flow in centrifugal

- pump by CFD-DEM coupling[J]. *Science & Technology Review*, 2014,32(27):28-31.
- [17] Zhou M M, Wang S, Kuang S B, et al. CFD-DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. *Powder Technology*, 2019,354:893-905.
- [18] 夏铖,赵睿杰,施卫东,等.基于DEM-CFD耦合的泵内颗粒流动特性研究[J].*工程热物理学报*,2021,42(2):357-369.
XIA Cheng, ZHAO Ruijie, SHI Weidong, et al. Numerical investigation of particle induced erosion in a mixed pump by CFD-DEM coupled method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021,42(2):357-369.
- [19] 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.
WANG Jiaqiong, JIANG Wanming, KONG Fanyu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow and wear characteristics of centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (11) : 53-60.
- [20] Zhu Z C, Xie P, Ou G F, et al. Design and experimental analyses of small-flow high-head centrifugal-vortex pump for gas-liquid two-phase mixture[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008,16(4):528-534.
- [21] Ariely S, Khentov A. Erosion corrosion of pump impeller of cyclic cooling water system[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006,13(6):925-932.
- [22] Llewellyn R J, Yick S K, Dolman K F. Scouring erosion resistance of metallic materials used in slurry pump service[J]. *Wear*, 2004,256(6):592-599.
- [23] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972,55(2):193-208.
- [24] 李昉.离心泵内部固液两相流动数值模拟与磨损特性研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.
LI Die. The research on numerical simulation and abrasion property of solid-liquid two-phase-flow centrifugal pump[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-tech University, 2014.
- [25] Zhang Z, Sun B J, Wang Z Y, et al. Intelligent well killing control method driven by coupling multiphase flow simulation and real-time data[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022,213:110337.
- [26] Pagalthivarthi K V, Gupta p K, Tyagi V, et al. CFD prediction of erosion wear in centrifugal slurry pumps for dilute slurry flows[J]. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 2011,3(4):225-245.

(编辑 荐华)