超星·期刊

第40卷 第6期 湖南大学学报(自然科学版) Vol. 40, No. 6
2013年6月 Journal of Hunan University(Natural Sciences) Jun. 2013

文章编号:1674-2974(2013)06-0059-05

深海采矿提升泵的数值模拟分析*

邹伟生†,卢 勇,李哲奂
(湖南大学 流体力学及其装备研究所,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对深海底矿物粗颗粒浆体在提升泵内的流动问题,提出了一种新型粗颗粒-均质浆体两相流动模型.采用流体动力学软件CFX对两级提升泵内的粗颗粒固-液两相湍流进行了数值模拟.计算获得了粗颗粒在提升泵内的流动特征及其泵工作特性的仿真结果,并与两级提升泵的性能试验结果进行对比,两者能较好地吻合,从而验证了该两相流动模型和数值模拟的有效性和准确性.

关键词:提升泵;两相流;数值模拟;性能预测
中图分类号:TH313 **文献标识码**:A

Numerical Simulation and Analyses of Lift Pump in Deep Sea Mining

ZOU Wei-sheng†, LU Yong, LI Zhe-huan
(Institute of Fluid Mechanics and Equipage, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Deep sea bed mineral coarse particle slurry flow was investigated in lift pump. Based on the new type of coarse particle-homogeneous slurry flow model, simulation to the two-stage lift pump in the solid-liquid two phase turbulent flow was conducted by using the fluid dynamics software CFX, and simulation results of solid-liquid flow characteristic in the pump and pump characteristics were obtained. Numerical simulation results verified the characteristic of two-stage lift pump.

Key words: lift pumps; two phase flow; numerical simulation; performance prediction

矿产资源是人类赖以生存和发展的物质基础.人类对矿产资源的需求量与日增加,开发海洋矿产资源具有十分重要的意义.以提升泵为关键装备的深海底矿物粗颗粒固-液两相流体水力输送系统研发而形成的提升技术是深海矿产资源开发的关键技术之一,因此,对提升泵的研究具有重要的意义.目前德国[1]、日本[2]、中国[3]、国际海洋金属联合组织(IOM)[4]、韩国[5]、印度[6]等国家或国际组织均将提升泵水力管道提升作为其提升方案,但至今为止只有德国KSB公司、日本荏原公司和中国研制加工出深海采矿提升泵.1978年,OMI财团在中太平洋进行的开采试验,使用了德国KSB研制的2台六级潜水提升泵.中国从20世纪90年代开始进行海洋采矿技术的研究,并在"十一五"期间成功研制出深潜硬管提升两级泵.目前需要从理论的角度进一步研究提升泵内粗颗粒固-液两相流动机理,为提升泵的宽流道设计提供理论基础,需要进行提升泵的数值仿真和性能预测等基础研究,来解决管道系统提升

* 收稿日期:2012-11-26
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51079054)
作者简介:邹伟生(1965-),男,湖南浏阳人,湖南大学教授,博士
† 通讯联系人,E-mail: zouweisheng@sina.com

超星·期刊

特性与提升泵工作特性的匹配关系.

本文以中国研制的两级提升泵为研究对象,对粗颗粒固-液两相流在泵内运动情况进行了 CFD 数值模拟与分析,得到泵内流体速度、压力、浓度、颗粒轨迹等流场参数的信息,对提升泵的工作特性进行预测,并通过试验结果加以验证.

1 计算模型

应用计算机对水泵内部的流动进行数值模拟,采用 CFD 预测、计算泵的扬程及效率来检查、预测水力设计的正确性和合理性,为泵的水力设计及其改进提供依据[7]. 对固-液两相流的数值计算大都采用双流体模型,但海底矿物浆体是由固相颗粒(如锰结核、钴结壳、金属硫化物,湿密度为 2 100 kg/m^3 左右)和液相(海水)组成的一种独特的混合两相流体,固相既含有从海底集矿带上来的海底沉积物和集矿机破碎、提升过程矿物粉化、磨损产生的细颗粒,又含有粒径 50 mm 的粗大颗粒,因此矿物的粒级组成十分宽广,不能将此类浆体视为拟流体处理,故双流体模型不适用于计算. 根据海洋采矿提升的实际工艺过程,本文提出了非常适合于海底矿物浆体计算的粗颗粒-均质浆体两相流动模型[8],此模型根据提升速度和矿物粒级组成将颗粒区分为细颗粒和粗颗粒,细颗粒视为拟流体相,与海水形成均质浆体,在欧拉坐标系下研究;粗颗粒视为离散相,以细颗粒与海水形成均质浆体为载体,在拉格朗日坐标下研究粗颗粒的运动. 此模型基于单流体模型和颗粒随机轨道模型,进行了适当的优化,使之更加符合海洋采矿海底矿物浆体流的实际情况,得到较为经济而准确的仿真结果. 因此粗颗粒-均质浆体两相流模型的控制方程与颗粒轨道模型相似. 在与叶轮一同转动的直角坐标系下,两相控制方程如下.

均质介质的连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_{fj}) = 0. \tag{1}$$

均质介质的动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f u_{fi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_{fi} u_{fj}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_f \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_f \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\left[\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) + k\delta_{ij}\right] + \rho_f g_i. \tag{2}$$

式中:$\mu_f = \mu_e + \mu_d$,μ_e 为均质介质黏度,μ_d 为各向同性湍流黏性系数;方程中省去了时均符号.

固体颗粒的运动轨迹通过积分 Lagrangian 坐标系下颗粒作用力的微分方程来求解. 固体颗粒在固-液流场中运动时主要受到重力、扰流阻力、附加质量力、压强梯度力、Basset 力、Saffman 力和 Magnus 力等作用力. 另外,由于流体机械的旋转作用,颗粒运动方程还应该包括由于叶轮旋转施加在颗粒上的离心力和哥氏力. 若旋转轴为 Z 轴,则单个颗粒的动力学方程为[9]:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + C_d \frac{1}{2}\rho_f (u_f - u_p) \mid u_f - u_p \mid \pi r_p^2 + \frac{2}{3}\rho_f \pi r_p^2 \frac{d}{dt}(u_f - u_p) + 6 r_p^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu_f} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{d}{dt}(u_f - u_p) d\tau - \frac{4}{3} r_p^3 \nabla p_f + \pi \rho_f r_p^3 \omega_p (u_f - u_p) + 6.46 \sqrt{\rho_f \mu_f} r_p^2 \sqrt{\mid \nabla u_f \mid} \mid u_f - u_p \mid + \frac{\pi d_p^3}{6}(\rho_p - \rho_f) g + \frac{4}{3}\pi r_p^3 \rho_{pp}\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{pp}}\right)\omega(\omega r_z) + \frac{8}{3}\pi r_p^3 \rho_{pp} \omega \left(u_p - \frac{\rho_f}{\rho_{pp}} u_f\right).$$

式中:C_d 为阻力系数;r_p 为颗粒半径;ω_p 为颗粒旋转角速度;ω 为叶轮旋转角速度;ρ_f 为流体密度;ρ_p 为颗粒材料密度;ρ_{pp} 为颗粒表观密度.

2 提升泵基本结构

中国"十一五"期间研制的深海采矿提升泵为筒装式整体结构的节段多级泵,其整体结构如图 1 所示[3]. 提升泵的叶轮和导叶采用高强度、具有优良抗磨蚀性能及高强度的材料制造,适用于输送强磨蚀、高浓度、大颗粒的矿浆,在最大工作范围内可以多级串联使用. 其主要参数为:提升泵作业水深 400 m,叶片数为 3,导叶数为 4. 当流量 Q=420 m^3/h,转速 n=1 450 r/min 时,单级设计扬程 H=40 m,清水效率 η=50%~60%. 出口直径 D_d =200 mm,要求通过最大颗粒粒径 D_{max} =50 mm,最大通过体积浓度 C_v =10%,通过的锰结核的粒径应满足集矿机破碎后锰结核粒级组成.

海底矿物的粒级组成如表 1 所示. 海底矿物由中国大洋 1 号科考船在太平洋克拉利昂-克里伯顿断裂带中国多金属结核开辟区拖网采集的天然多金属结核经破碎机破碎后的测量结果. 在 CFD 模拟计算中,锰结核的粒径选取各粒级分布的中间值进行计算.

超星·期刊

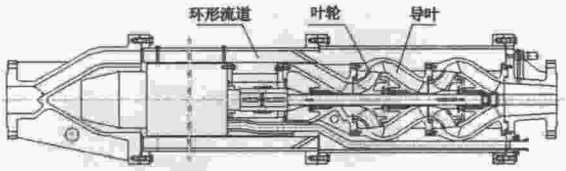


图 1　两级提升泵整体结构平面图
Fig. 1　Two stage electric pump integral structure

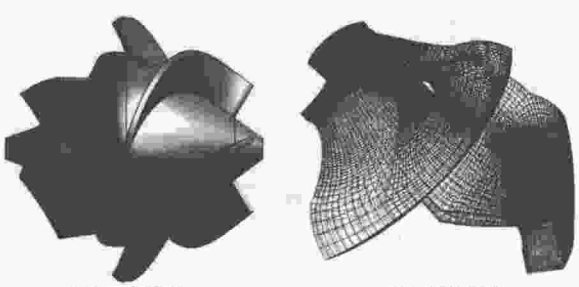
表 1　锰结核粒级组成
Tab. 1　Maganese nodules fraction composition

粒级/mm	质量产率/%
0～5	6.0
5～10	4.9
10～15	10.5
15～25	37.6
25～32	20.6
32～40	20.4

3　CFD 仿真

3.1　建模及网格划分

根据两级提升泵的设计，利用旋转机械造型软件 BladeGen 生成此提升泵的计算模型，在 ANSYS Workbench 中对模型进行处理. 为了减小计算量，选取其中单流道进行计算，其他部分流场情况可以通过旋转周期性得到. 利用旋转机械网格划分工具 TurboGrid 对流道进行全六面体结构化网格划分，并利用 ICEM CFD 进行了网格优化，得到最终的网格如图 2 所示. 单级提升泵的网格节点数为 154 965，单元数为 140 024. 两级提升泵网格数加倍.



(a) 空间结构　　(b) 整体网格
图 2　单级提升泵空间结构和整体网格
Fig. 2　Single-stage pump structure and whole grid

3.2　边界条件及计算参数设置

由于所选工况固-液两相浆体体积浓度小于 10%，且固体颗粒粒径满足表 1 固体颗粒粒级组成，在 CFX 计算时，选用 Particle Transport Solid(固体颗粒运输模型)，便于追踪颗粒轨迹，并选用双向耦合计算方法.

进口采用压力入口边界，根据该泵在石家庄强大泵业集团泵试验中心试验井的安装位置，入口边界给定绝对压力值为标准大气压加 5 m 水柱；出口采用流量出口，分别给定均质介质与粗颗粒的流量参数；采用无穿透无滑移的固体壁面条件，近壁区内涡黏性系数采用衰减函数. 在与其他流道的面连接处，采用旋转周期性边界条件. 叶轮与导叶区域的连接面采用一般连接方式，采用 GGI 网格连接. 提升泵采用多重旋转坐标系. 计算采用的清水与细颗粒组成均质浆体的密度和提升流速、提升浓度与矿物粒级组成相关，均质浆体的黏性采用毛细管流变仪实测和爱因斯坦黏性公式计算，粗颗粒相的密度为 2 000 kg/m^3，叶轮转速为 1 450 r/min，工作流量为 420 m^3/h.

3.3　计算结果及分析

采用 CFX-Post 对计算结果进行处理后得到两级提升泵内流场中心截面速度和流线分布，如图 3 所示.

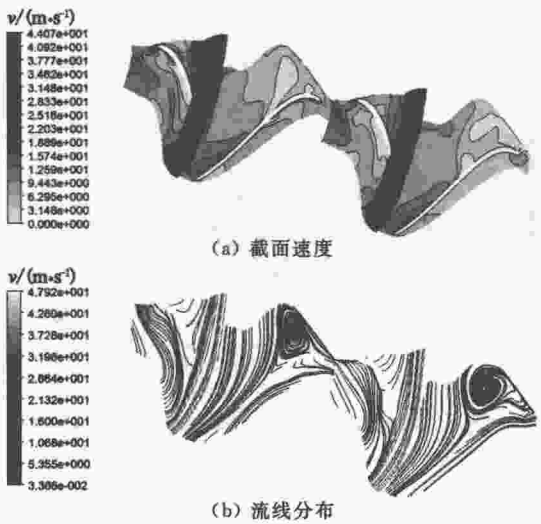


图 3　两级提升泵内流场中心截面速度和流线分布
Fig. 3　Two stage electric pump flow field in the center section velocity and streamline distribution

从图 3 中可以看出内流场中速度及漩涡分布情况. 动叶轮区域的流线较为平顺，没有大的漩涡出现，流体在此区域流动稳定无漩涡，叶轮尾部区域流速较快，叶轮的加速作用较好；静导叶工作面尾部区域存在着较为剧烈的漩涡，这是由于导叶区域的泵外盖板对流体的突然转向作用导致漩涡的必然发生. 漩涡导致能量耗散，也是振动与水动噪声的主要来源.

图 4 为两级提升泵内流场颗粒轨迹分布图. 从

超星·期刊

图 4 可以看出,颗粒在提升泵流道内的运动非常复杂.由于颗粒相的密度大于流体相,受到离心力和哥氏力的作用较为明显,从而使颗粒相在相对靠近提升泵外壳附近流域聚积.较小粒径的颗粒在泵内流道运行较为顺利,分布较为均匀,大致沿着叶片工作面运动,没有漩涡及回流现象出现,同时小颗粒粒径的变化对其运动轨迹的影响很小,提升效果较好.较大粒径的颗粒在叶轮区域,出现了跟随转动的现象,由于离心力与重力的作用,在流道中靠近提升泵外壁运动,并发生一定程度的碰撞,故容易在这附近区域形成磨损.个别粗颗粒在叶轮区域有所滞留,提升效果较差,经过较长时间的旋转提升,最终流出提升泵环形流道.在转轮内固-液两相流动是分离流动,颗粒相速度整体上大于液相速度,这是由于颗粒相直接因转轮旋转而获得更多能量,而不是仅仅从液相的裹挟中获得能量.结果表明:在同一体积浓度下,粒径的变化对固-液两相的离散影响较大,出现粒径越大颗粒越容易聚集、不容易提升的现象;当提升管道系统的阻力发生变化而引起泵流量的波动时,粗颗粒在提升泵内的聚集倾向可能会引起泵的堵塞,同时粗颗粒对叶轮轮轴处的工作面撞击也更严重.

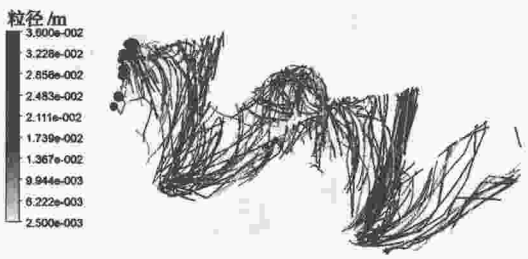


图 4 两级提升泵内流场颗粒轨迹分布图
Fig. 4 Two stage electric pump flow field in the particle trajectory distribution

图 5 为两级提升泵压力分布情况.经过两级提升泵的作用,流体的压力平稳升高,最高可以达到 839.8 kPa.从图 5 中可以看到,图中个别位置压力偏低,低压强的分布直接影响空化的形成,应该进一步优化,制止空化现象的发生.

CFD 仿真不仅可以得到提升泵内流场中流动参数的分布状况,还可以通过进一步的数据分析,得出提升泵在此工况下的性能状况.改变泵流量,转速等相关参数,对提升泵的性能进行了全面的预测分析,图 6 给出了额定转速条件下两级提升泵性能的数值仿真结果.

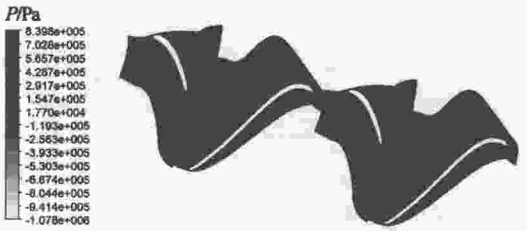


图 5 两级提升泵内流场中心截面压力分布
Fig. 5 Two stage electric pump flow field in the center section pressure distribution

4 试验验证及结果对比

为了验证仿真结果的准确性,按照泵的设计加工两级提升泵并进行了试验,获得两级提升泵完整的工作特性及相关数据,验证了泵的水力计算模型及泵的结构设计.

在石家庄强大泵业集团 30 m 水深的泵试验水池中进行两级提升泵的测试.通过测量泵的转速、流量、扬程、功率、电机电压、电流、功率因素等参数,获得提升泵完整的工作特性曲线及相关数据.

两级提升泵试验将按泵的试验规程在多种转速下进行.提升泵的额定转速是考核提升泵提升工作性能的重要技术参数之一,将两级提升泵额定转速下数值模拟结果与两级提升泵在额定转速下的固-液两相流的试验研究进行对比,如图 6 所示.

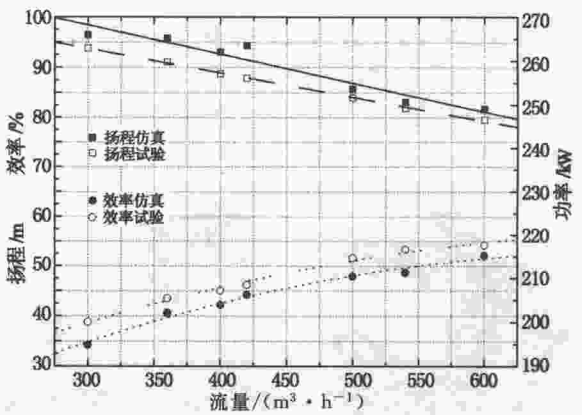


图 6 两级提升泵固-液特性曲线结果对比
Fig. 6 Two stage pump solid-liquid performance parameter results contrast

由图 6 可知,对于提升泵的扬程,CFD 仿真结果与试验结果吻合较好,其相对误差基本在 5% 以内,说明应用合理的流动模型,CFD 能够较为准确地预测提升泵的工作特性.在标准流量 420 m^3/h 下,扬程的仿真结果与试验结果都超过了 80 m 水柱,满足两级提升泵对扬程为 80 m 水柱的设计要

超星·期刊

求,提升泵的扬程曲线较为平坦,能够满足实际运行的条件.提升泵效率在提升泵的工作点(流量 420 m^3/h)附近的仿真结果与试验结果相一致,由于本泵设计采用放大流量的宽流道设计原则,使得泵在偏离设计工作点的低流量和大流量时数值模拟造成偏差,但总体而言,提升泵功率的 CFD 仿真结果与试验结果吻合较好.功率值随着流量的增加而有小幅的增加,功率曲线较为平稳,基本满足了提升泵的等功率设计,以避免电机的过载.总体来说,提升泵的 CFD 预测性能曲线与特性试验曲线基本相一致,均表明泵特性参数完全达到了设计的要求.提升泵的性能试验结果还表明,提升泵的运行非常平稳,性能稳定.

5　结　论

本文根据深海采矿海底矿提升固-液两相流的特征和基于单流体模型和颗粒随机轨道模型,提出了非常适用于海底矿物浆体计算的粗颗粒-均质浆体两相流模型.

采用此模型对我国自主研制的两级提升泵进行了 CFD 数值模拟,对泵内流场中固-液两相流的速度、压力分布和颗粒轨迹进行了分析,找出其分布规律,数值模拟得到的两级提升泵工作特性曲线与两级提升泵的性能试验结果相一致.因此本文研究结果可为提升泵的进一步完善、优化、改进和向多级提升泵发展的研究提供依据.

参考文献

[1] KUNTZ G. The technical advantages of submersible motor pumps in deep sea technology and delivery of manganese nodules [C]// Proc of the 11th Annual OTC Conf. Houston: Tex Press,1979: 85－91.

[2] TRAM. R&D of manganese nodule mining systems[R]. Tokyo: Japan Slurry Transport Association,1991.

[3] 邹伟生. 深潜硬管提升泵的研制[R]. 长沙:长沙矿冶研究院,2006.
ZOU Wei-sheng. Study on motor pump for lifting pipeline [R]. Changsha: Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy,2006. (In Chinese)

[4] SOBOTA J, KOLARCIK W. Conception of nodules feeder to vertical transport pipeline[C]//Jerzy Sobota Proceedings of the Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai: ISOPE,2009: 213－219.

[5] YOON C H, KANG J S, PARK J M. Shallow lifting test for the development of deep ocean mineral resource in korea[C]// Proceeding of the Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium. Maui, Hawaii, USA: ISOPE, 2011: 149－152.

[6] RAJESH S. Qualification tests on underwater mining system with manganese nodule collection and crashing devices[C]// Proceeding of the Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium. Maui, Hawaii, USA:ISOPE, 2011: 110－115.

[7] 唐学林,余欣,任松长. 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: 68－76.
TANG Xue-lin, XU Xin, REN Song-chang. Solid liquid two phase fluid dynamics and its application in hydraulic machinery [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2006: 68－76. (In Chinese)

[8] 邹伟生. 深海采矿提升参数与提升泵的研究[D]. 北京:北京科技大学土木与环境工程学院,2005.
ZOU Wei-sheng. Study on lifting parameters and pump [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, School of Civil and Environmental Engineering, 2005. (In Chinese)

[9] 李哲奂. 扬矿电泵内流场数值模拟及性能预测[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2013.
LI Zhe-huan. Lifting motor pump's internal flow field numerical simulation and performance prediction [D]. Changsha: Hunan University, College of Mechanical and Vehicle Engineering,2013. (In Chinese)