

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.02.022

# 基于结构化网格的两级矿浆泵数值模拟分析

杨放琼<sup>1,2</sup>, 周卓<sup>1</sup>, 徐海良<sup>1,2</sup>, 吴波<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 为了研究深海采矿两级矿浆泵泵内固液流体流动规律及工作性能, 采用计算流体动力学软件 CFD 对两级矿浆泵泵内的固液两相湍流进行了数值模拟和性能预测. 阐述了矿浆泵计算流道区域的拓扑块划分方法和结构化网格生成方法; 采用 RNG  $\kappa-\varepsilon$  湍流模型和多参考坐标系, 进行全三维流场数值模拟, 分析了矿浆泵内流场的压力分布、流速分布和湍动能分布, 进而计算出不同颗粒属性的泵的特性曲线. 研究表明, 颗粒属性对矿浆泵工作性能有重要影响, 在颗粒体积分数相同的条件下, 泵的扬程和效率均随颗粒粒径的减小而增大. 颗粒的体积分数适宜控制在 5%~10% 左右.

**关键词:** 深海采矿; 两级矿浆泵; 结构化网格; 数值模拟; 计算流体动力学

中图分类号: TH 313 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)02-0260-05

## Numerical Simulation of Two-Stage Slurry Pump Based on Structural Mesh

YANG Fang-qiong<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhuo<sup>1</sup>, XU Hai-liang<sup>1,2</sup>, WU Bo<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Changsha 410083, China. Corresponding author: ZHOU Zhuo, E-mail: 545038182@qq.com)

**Abstract:** In order to investigate the solid-liquid fluid flowing law and work performance of two-stage slurry pump for deep-sea mining, numerical simulation and performance prediction to the two-stage slurry pump were conducted by using the computational fluid dynamics software. The methods of topological blocking and structural meshing in the domain of the slurry pump were described. A three-dimensional turbulent flow simulation was performed with a RNG  $\kappa-\varepsilon$  turbulence model and multiple reference frame to obtain pressure, velocity and kinetic energy distribution. Furthermore, the performance curve of the slurry pump with different particle properties was determined based on the simulation results. The research shows that the particle properties have an important influence on the working performance of slurry pump. With the same particle concentration, the head and efficiency of the pump are increased with the decrease of particle size. It is appropriate to control the particle concentration of 5% - 10%.

**Key words:** deep-sea mining; two-stage slurry pump; structural mesh; numerical simulation; computational fluid dynamics

深海蕴藏着丰富的矿产资源, 也被称为 21 世纪陆地资源最可接替的资源. 深海多金属矿产中含有钴、锰、银、铜、钨、金、铁等 70 多种元素<sup>[1]</sup>. 深海采矿系统主要包括集矿系统(采集海底多金属矿石)、扬矿输送系统(输送矿藏到海面)、测控子系统(对采矿过程控制)、水面支持系统(采矿船定位及支持)<sup>[2]</sup>. 扬矿技术是整个采矿系统的核

心技术, 其提升方法是采用多台多级离心式矿浆泵将矿石从海底送到海面. 国外学者已经对矿浆泵进行了大量研究. 21 世纪初, 韩国地质资源研究院开始对陆地式离心泵进行了模拟和试验<sup>[3]</sup>, 研究结果表明陆地式离心固液泵难以达到深海水力管道提升系统的工作要求. 然后 Yoon 等开始对带空间导叶的离心式两级矿浆泵进行固液两相

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375498); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20130162110004).

作者简介: 杨放琼(1966-), 女, 湖南长沙人, 中南大学教授; 徐海良(1965-), 男, 湖南湘乡人, 中南大学教授, 博士生导师.

流的数值模拟,成功研制出两级矿浆泵,在 100 m 水深的韩国东海港进行近海试验<sup>[4-5]</sup>. 2012 年 12 月,美国与澳大利亚合作,联合研制出了 1 500 m 深海多金属硫化物采矿系统<sup>[6]</sup>. 中国应抓住商业开采时机,加速矿浆泵研发进程,争取早日进入商业开采. 国内外对带蜗壳式离心固液泵做了大量研究<sup>[7-9]</sup>,而对带空间导叶式的深海采矿多级离心泵研究较少. 国内大多数学者对泵进行模拟研究时通常采用非结构网格,只有极少的国内外学者对复杂结构化网格划分作了部分分析<sup>[10]</sup>. 本文采用 PROE 软件进行建模,采用 ICFM 软件对矿浆泵单流道水力模型进行结构化网格划分,导入 CFD 软件,对两级矿浆泵进行流场数值模拟计算.

## 1 基本假设和控制方程

为保证计算的可行性及结果的准确性,作如下假设:固液两相流为连续的和不可压缩的流体,物理特性为常数,第一相为水,第二相为锰结核颗粒,并且不考虑相变.

矿浆泵泵内的固液流态属于湍流流动,为了得到连续相和离散相比较真实的流动特征,可以采用欧拉-欧拉流体模型模拟固液两相的湍流. 欧拉-欧拉流体模型假定离散固相为拟流体,与连续液相具有相同的力学特性,拟流体的流动仍然采用宏观连续介质原理中守恒方程进行描述<sup>[11-12]</sup>.

### 1.1 液相控制方程

在旋转坐标下固液两相湍流的液相连续性方程为

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_j)}{\partial x_j} = 0. \quad (1)$$

液相动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_l u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_c \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_{li}. \quad (2)$$

式中:下标  $i, j$  表示坐标方向; $\rho_l$  为液相密度; $u_i, u_j$  为液相速度分量; $\mu_c$  为等效黏性系数; $p$  为压力; $F_{li}$  为液相包括哥氏力和离心力的附加力; $t$  为时间; $x_i, x_j$  为坐标分量.

### 1.2 固相控制方程

在旋转坐标下固液两相湍流的固相连续性方程为

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_s u_{sj})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_s}{\sigma_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial x_j} \right). \quad (3)$$

固相动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_s u_{si})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_s u_{sj} u_{si}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_s \left( \frac{\partial u_{si}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{sj}}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\rho_s}{\tau_{rs}} (u_i - u_{si}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\nu_s}{\sigma_j} \left( \frac{\partial \rho_s}{\partial x_j} u_{si} + \frac{\partial \rho_s}{\partial x_i} u_{sj} \right) \right] + F_{si}. \quad (4)$$

式中: $u_{si}$  和  $u_{sj}$  为固相速度分量; $\tau_{rs}$  为颗粒运动的松弛时间; $\rho_s$  为固相密度; $\mu_s$  为固相动力黏度; $\nu_s$  为涡黏性系数; $F_{si}$  是固相包含哥氏力和离心力的附加力.

### 1.3 湍流模型

由于 RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型既考虑了涡旋流动和分离流动的效应,同时可以较准确地预测近壁区固液流体的流动状态,所以矿浆泵内的液相采用 RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型.

RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型液相湍动能  $\kappa$  方程为

$$\frac{\partial(\rho_l \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\kappa \mu_c \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_\kappa + G_p - \rho_l \varepsilon. \quad (5)$$

式中: $\kappa$  为湍动能; $\varepsilon$  为湍动能耗散率; $\alpha_\kappa$  为模型系数,  $\alpha_\kappa = 1.39$ ;  $G_p$  为湍动能  $\kappa$  附加生成项; $G_\kappa$  为由平均速度梯度引起的湍动能  $\kappa$  产生项.

RNG  $\kappa - \varepsilon$  湍流模型液相耗散率  $\varepsilon$  方程为

$$\frac{\partial(\rho_l \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_l u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_c \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{1\varepsilon}^* G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho_l \varepsilon). \quad (6)$$

式中: $\alpha_\varepsilon$  为模型系数,  $\alpha_\varepsilon = 1.39$ ;  $C_{1\varepsilon}^*$  为  $G_\kappa$  项模型系数; $C_{2\varepsilon}$  为  $\varepsilon$  项模型系数,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ .

固相湍流采用代数  $A_p$  模型 (Hinze - Tchen 颗粒湍流黏性系数模型),其涡黏性系数  $\nu_s$  为

$$\frac{\nu_s}{\nu_l} = \frac{\kappa_s}{\kappa} = \left( 1 + \frac{\tau_{rs}}{\tau_T} \right). \quad (7)$$

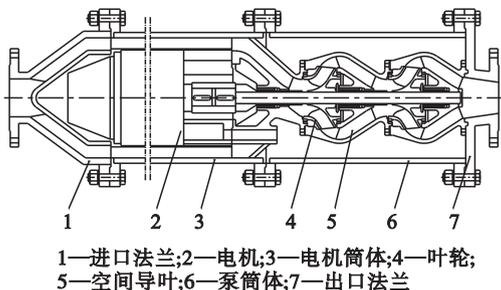
式中: $\nu_l$  为流体运动黏度,  $\kappa_s$  为固相湍动能; $\tau_T$  为连续相流体脉动特征时间.

## 2 计算模型

### 2.1 矿浆泵整体结构

长沙矿冶研究院已设计出两级矿浆泵结构图<sup>[13]</sup>,如图 1 所示. 两级矿浆泵设计为筒装式整体结构. 通过螺栓将电机筒体与进口法兰相连,将泵筒体与出口法兰相连并固定在同一轴线上. 矿浆泵为节段式两级泵,矿浆泵与电动机连接,电机提供动力. 外筒体承受外加动载荷与静载荷,泵压力、泵和电机的重力由空间导叶承受,法兰一端

与泵连接,一端与硬管连接,实现泵与管道的串联。



1—进口法兰;2—电机;3—电机筒体;4—叶轮;  
5—空间导叶;6—泵筒体;7—出口法兰

图 1 两级矿浆泵结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of two-stage slurry pump

## 2.2 计算采用的矿浆泵的设计参数

根据深海采矿矿浆泵的特殊使用环境及工作特点,矿浆泵必须具有高扬程、能输送较大粒径颗粒的特性,所以采用放大流量水力设计方法对矿浆泵进行设计以增加流道宽度,并且在较低流量下工作。根据《现代泵技术手册》<sup>[14]</sup>对叶轮和空间导叶进行水力设计,矿浆泵的设计参数为:流量  $Q_v = 800 \text{ m}^3/\text{h}$ , 扬程  $H = 35 \text{ m}$ , 转速  $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$ ; 导叶进口直径  $D_1 = 240 \text{ mm}$ , 叶轮外径  $D_2 = 390 \text{ mm}$ , 出口宽度  $b_2 = 75 \text{ mm}$ , 叶片数  $Z_1 = 3$ ; 导叶内流线直径  $D_3 = 370 \text{ mm}$ , 导叶外流线直径  $D_4 = 506 \text{ mm}$ , 导叶片数  $Z_2 = 4$ , 级数为 2 级。矿浆泵 PROE 造型如图 2 所示。

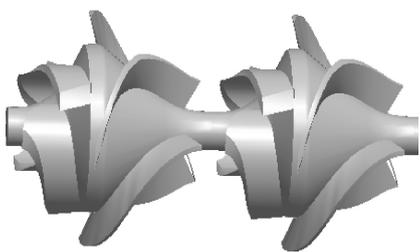


图 2 两级矿浆泵的实体模型

Fig. 2 Solid model of two stage slurry pump

## 2.3 内流场实体建模

两级矿浆泵计算区域包括首级叶轮区域、首级导叶区域、次级叶轮区域、次级导叶区域及进出口流道区域,固液流体以一定的速度流进进口区域,通过首级叶轮加速作用流入首级导叶,在导叶的导流作用下流入次级叶轮,在次级叶轮的旋转加速作用下流入次级导叶,在导叶的稳流作用下从出口流道流出。

本文研究对象的模型有 2 级叶轮,每级叶轮包括 3 片叶片,考虑到矿浆泵叶轮的复杂性,每个特征采用从底向上的构造方式。遵循“点—线—面—体”,并在此基础上,通过曲面修剪、阵列等

命令绘制叶轮。采用布尔运算获得叶轮流道。通过复制、平移可获得次级叶轮流道。导叶的作用是将流体引入下一级,建模方法与叶轮类似,见图 3。

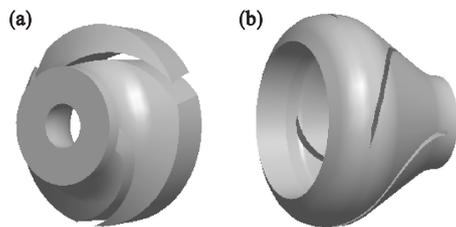


图 3 矿浆泵流道

Fig. 3 Slurry pump fluid channel

(a)—叶轮流道; (b)—导叶流道。

## 2.4 网格生成

相对于非结构化网格,结构化网格生成的网格质量好,与实际的模型更接近,模拟更准确。ICEM 六面体结构化网格划分首先要生成不同区域,区域间采用交界面(interface)进行连接。交界面两边分别是静止区域和旋转区域。静止区域和旋转区域通过交界面传递数据信息,交界面两侧的网格节点不要求相互重合。矿浆泵计算区域包括:进、出口延伸段(静区域),叶轮流道(旋转区域)和导叶流道(静区域)。本例的叶轮结构具有对称性,所以可以对 1/3 的流道模型进行网格划分。首先创建矩形块,然后采用“自底向上”的拓扑创建思想,经过一系列的延伸和切割,点、线、面关联后得到与实体相似的块结构,由块生成结构网格。然后调整节点数目,控制网格数量,调节节点密度,调整近壁面的网格间隔。一个单流道叶轮网格数量是  $18 \times 10^4$ , 网格质量 0.6 以上。单流道导叶的结构化网格数量是  $23 \times 10^4$ , 质量也达到 0.6 以上,见图 4。进、出口段采用 O 型网格,“O”型拓扑块由内部的主块和外围的环绕块组成,网格质量可以达到 0.85 以上。将单流道网格在 ICEM 中进行组装可得到全流道网格。



图 4 单流道结构网格

Fig. 4 Structure grid of single channel

(a)—叶轮单流道; (b)—导叶单流道。

## 2.5 边界条件

进口采用速度进口,根据工作流量算出进口处速度值,出口采用自由出流,假设出口边界上流动充分发展,固体壁面采用无滑移条件,在近壁区采用标准壁面函数处理.采用动静双坐标参考系处理各级流道流动问题.叶轮流道区域采用旋转坐标系,沿 $z$ 轴旋转,遵循右手法则,转速 $n$ 为 $1\,450\text{ r/min}$ ;进出流道、导叶流道区域为静止坐标系.相邻区域采用交界面来保持模拟的连续.计算域及网格如图5所示.

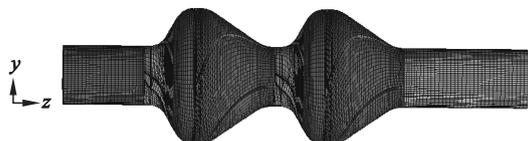


图5 计算域及网格划分

Fig. 5 Calculation region and meshing

## 3 计算结果分析

采用 Fluent 软件对计算结果进行处理,得到矿浆泵的压力分布云图如图6所示:流场的压力从进口到出口平稳升高.第一级矿浆泵叶轮进口处出现低压区,流体通过圆柱管道流到第一级叶轮时,叶轮对流体突然加速,导致此位置出现压力负值.叶轮叶片前缘低压区的存在会使液体汽化,影响空化的初生.此空化现象被称为旋转空化,类似于旋转失速.空化会使设备性能下降,产生振动和噪声,但此处的空化又不可避免.如图可知压力平稳均匀升高,没有出现较大的负压区,最大值达到 $898\,753\text{ Pa}$ ,出口压力大于 $810\,600\text{ Pa}$ ,总体来说效果不错.

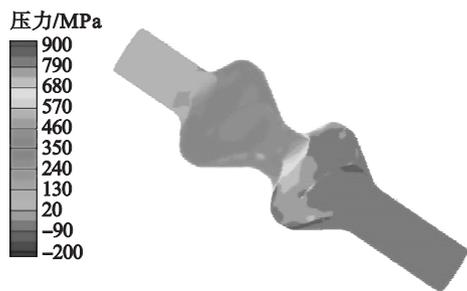


图6 两级矿浆泵固液内流场静压分布

Fig. 6 Static pressure distribution of two-stage slurry pump solid-liquid flow field

流域的速度云图如图7所示:固液流体经过叶轮的旋转加速后,速度急剧上升,在叶轮尾部区域达到最高的 $40.5\text{ m/s}$ ;经过外盖板转向作用,固液流体减速平稳地进入导叶,与导叶压力面作用后,速度进一步降低,在导叶流道内产生漩涡,

漩涡将引起振动和噪声.此泵叶片已经经过多次优化,可以看出漩涡很小.固液流体经过叶轮的旋转加速作用,流速达到最大值.拥有最大流速的流体经过流道外盖板的转向作用,流入到导叶区域,流速下降,动能转化为势能.对照图6可以看出,内流场的压力分布呈均匀升高态势,且出口压力超过 $810\,600\text{ Pa}$ ,可知,导叶很好地将动能转化为压力能.



图7 两级矿浆泵固液内流场绝对速度分布

Fig. 7 Absolute velocity distribution of two-stage slurry pump solid-liquid flow field

矿浆泵湍动能分布云图如图8所示.湍动能分布反映湍流强度,由图可以看出,在叶轮进口处,流体突然加速,出现流动分离现象,产生剧烈的湍动.经过叶轮的旋转作用,在叶片的尾部区域,流体高速流出.由于外壳的作用,流体突然转向,湍动特别剧烈,湍动能最大处也发生在叶轮尾部.固液流体流入导叶区域后,湍动能平稳下降,流动平稳,说明导叶起到了很好的稳流作用.

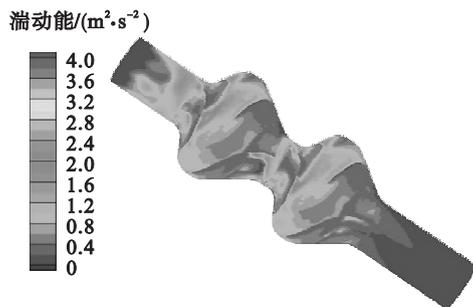


图8 两级矿浆泵固液内流场湍动能分布

Fig. 8 Turbulent kinetic energy distribution of two-stage slurry pump solid-liquid flow field

## 4 外特性分析

颗粒属性对矿浆泵工作性能有重要影响,颗粒属性包括粒径、体积分数、密度等.矿物质的密度一般是固定的.在工作流量 $Q = 420\text{ m}^3/\text{h}$ ,转速 $n = 1\,450\text{ r/min}$ 的工况下,分别对颗粒体积分数为 $10\%$ , $8\%$ 和 $5\%$ ,不同颗粒粒径的矿浆泵流道

进行数值模拟. 颗粒粒径越大, 维持颗粒运动的能量越大, 流体的跟随性也越差. 由图 9 可知, 在同一体积分数下, 泵的扬程和效率均随颗粒粒径的减小而增大. 粒径从 1 mm 增加到 15 mm 时, 扬程下降了约 9.0 m, 效率下降了约 16.3%. 所以, 颗粒直径对矿浆泵性能影响显著.

对于相同粒径的颗粒, 颗粒含量越低, 则流体黏度越小, 流体摩擦减弱, 水利损失减小, 扬程和效率都有所增加. 颗粒含量越高, 则颗粒相互碰撞的几率越大, 运动更为复杂, 流动更加紊乱, 流动损失也越大. 颗粒的体积分数由 10% 下降到 5%, 扬程最大增加了 4.9 m, 效率只增加了 5.5%. 所以颗粒含量对矿浆泵工作性能影响比较小. 但是, 颗粒含量过低将影响整个采矿效率, 含量过高管道可能会堵塞, 所以颗粒的体积分数适宜控制在 5% ~ 10% .

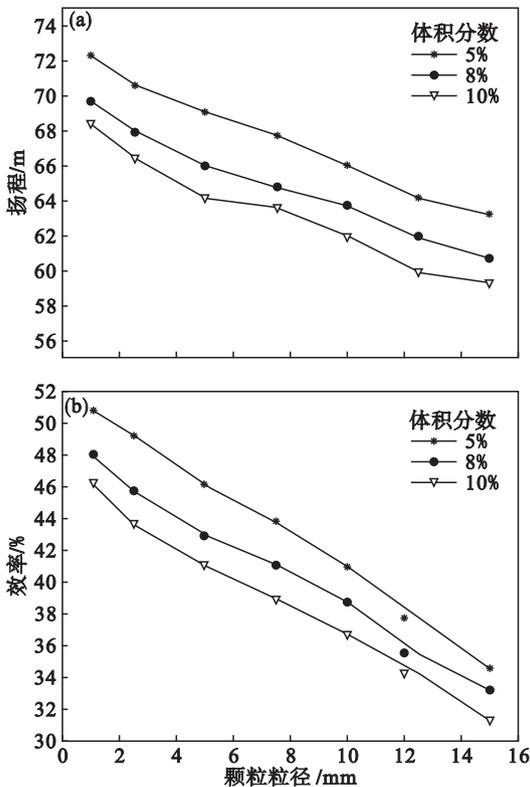


图 9 颗粒属性对矿浆泵性能的影响

Fig. 9 Effect of particle properties on the performance of slurry pump

(a) —扬程曲线; (b) —效率曲线.

## 5 结 论

1) 首级叶轮入口处出现了局部低压区, 容易发生空化现象. 叶轮入口处的流动规律最为复杂, 容易发生逆流现象. 导叶起到了很好的稳流作用, 不仅消除了流体的旋转分量, 还能将动能转化为

压力能. 研究对于多级泵的优化有一定参考价值.

2) 颗粒属性对矿浆泵工作性能有重要影响. 在颗粒含量相同时, 泵的扬程和效率均随颗粒粒径的减小而增大. 颗粒直径对矿浆泵性能影响显著; 对于相同粒径的颗粒, 颗粒含量越低, 矿浆泵的扬程和效率都越高. 颗粒的体积分数适宜控制在 5% ~ 10% .

## 参考文献:

- [1] 唐达生, 阳宁. 深海粗颗粒矿石垂直管道水力提升技术 [J]. 矿冶工程, 2013, 33(5): 1-8.  
(Tang Da-sheng, Yang Ning. The vertical pipeline hydraulic lifting technology of deep-sea coarse particle [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(5): 1-8.)
- [2] 唐达生, 邹伟生. 深海扬矿硬管系统设备可行性分析 [J]. 矿冶工程, 2004, 24(4): 16-19.  
(Tang Da-sheng, Zou Wei-sheng. The feasibility analysis of deep-sea lifting equipment system [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(4): 16-19.)
- [3] Yoon C H, Park Y C, Lee D K, et al. Hydraulic pumping test system of KIGAM for deep-sea manganese nodules [C]// Proceedings of 33rd Underwater Mining Institute Annual Meeting. Wellington, 2003: 131-135.
- [4] Yoon C H, Park Y C, Kim Y J, et al. A study on flow analysis of lifting pump and flexible hose for sea-test [J]. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 2007, 44(4): 1-6.
- [5] Yoon C H, Park J M, Kang J S, et al. Shallow lifting test for the development of deep ocean mineral resources in Korea [C]// Ninth ISOPE Ocean Mining Symposium. Hawaii, 2011: 149-152.
- [6] Rogers S. Seafloor resource production [R]. Toronto: Nautilus Minerals Limited Research Report, 2012: 8-45.
- [7] Yoon C H, Kang J S, Park J M, et al. Flow analysis by CFD model of lifting system for shallow sea test [C]// Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai, 2009: 225-228.
- [8] Hong S, Kim H W, Choi J S. A way to accomplish the mining technology for polymetallic nodules [C]// ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology. Chennai, 2008: 141-148.
- [9] Park J, Yoon C H, Kang J S. Numerical prediction of a lifting pump for deep-sea mining [C]// Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium. Chennai, 2009: 229-332.
- [10] Rantakokko J. Partitioning strategies for structured multiblock grids [J]. *Parallel Computing*, 2000, 26(12): 1661-1680.
- [11] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3(2): 269-289.
- [12] 陈奇. 深海采矿矿浆泵内固液两相流数值模拟及性能预测研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
(Chen Qi. Numerical simulation on solid-liquid two-phase flow and performance prediction of slurry pump for deep-sea mining [D]. Changsha: Central South University, 2014.)
- [13] Zou W. COMRA's research on lifting motor pump [C]// Seventh ISOPE Ocean Mining Symposium. Lisbon, 2007: 177-180.
- [14] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 339-346.  
(Guan Xing-fan. Modern pump theory and design [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2011: 339-346.)