深海采矿水下给料装置设计与试验①

喻光安[1]，曹阳[2]，吕浩[3]，赵睿杰[3]，杜新光[2]
（1.深海技术科学太湖实验室，江苏 无锡 214082；2.中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082；3.江苏大学 流体机械及工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘　要：介绍了深海采矿水下给料装置的工作原理和结构设计方法，采用离散元法对给料装置的动态给料过程进行全流程仿真分析，并采用陆地试验与水池试验进行验证。结果表明：设计的给料装置在35 r/min额定转速下，实际给料速度达到11.1 t/h，满足大于 10 t/h 的设计指标；偏心式进料口设计有效降低了阻力矩；离散元仿真结果与陆地试验误差在 2%以内。水池试验表明，整体矿物收集率超过 90%，进一步验证了给料装置在水下连续运行的可靠性。

关键词：深海采矿；水下给料装置；输送系统；离散元模拟；陆地试验；水池试验；叶轮；液压马达；转速
中图分类号：TD807；TD857　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.009
文章编号：0253-6099(2026)03-0075-07

Design and Test of Underwater Feeder for Deep-Sea Mining

YU Guang'an[1], CAO Yang[2], LYU Hao[3], ZHAO Ruijie[3], DU Xinguang[2]
(1. *Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science*, *Wuxi* 214082, *Jiangsu*, *China*; 2. *China Ship Scientific Research Center*, *Wuxi* 214082, *Jiangsu*, *China*; 3. *Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The working principle and structural design method of the underwater feeder for deep-sea mining is presented in the paper. The discrete element method (DEM) is adopted to conduct a full-process simulation analysis of the dynamic feeding process of the feeder, which has been verified by land-based tests and water tank tests. It is found that at the rated rotational speed of 35 r/min, the actual feeding rate of the designed feeder reaches 11.1 t/h, which satisfies the design index of greater than 10 t/h; an eccentric feed inlet design can effectively reduce the resistance torque; and the error between the DEM simulation results and the land-based test results is controlled within 2%. A water tank test shows that the overall mineral collection rate exceeds 90%, which further verifies the reliability of the device under continuous underwater operation.

Key words: deep-sea mining; underwater feeder; conveying system; discrete element simulation; land-based test; water tank test; impeller; hydraulic motor; rotational speed

随着全球矿产资源需求的不断增长，深海矿产资源的开发利用逐渐成为国际关注的焦点[1-2]。水下给料装置的主要作用是将海底采集的矿物进行均匀化预处理，并将浓度均匀的矿物输送至提升泵，再由提升泵将矿物输送至水面设备。水下给料装置不仅要具有高效的输送能力，还要能够在复杂的海底环境中稳定可靠地工作[3]。因此，深入研究水下给料装置的结构设计，对提高深海采矿效率和安全性具有重要意义。

本文介绍了水下给料装置的功能需求和工作原理，阐述了水下给料装置的结构设计方法，采用离散元数值模拟方法对给料装置的动态给料过程进行全流程仿真分析，并通过陆地试验与水池试验验证设计的有效性，旨在为深海采矿水下给料装置的设计和制造提供理论依据和技术支持。

1　水下给料装置功能需求与工作原理

水下给料装置是矿物输送系统中的核心枢纽设备，其在矿物输送系统中的安装位置如图 1 所示。

① **收稿日期**：2026-02-12
基金项目：上海市科学技术委员会科技创新行动计划项目(24DZ3100102)
作者简介：喻光安(1993—)，男，湖北随州人，工程师，研究方向为海洋矿产资源开发技术。E-mail：yuguangan@cssrc.com.cn

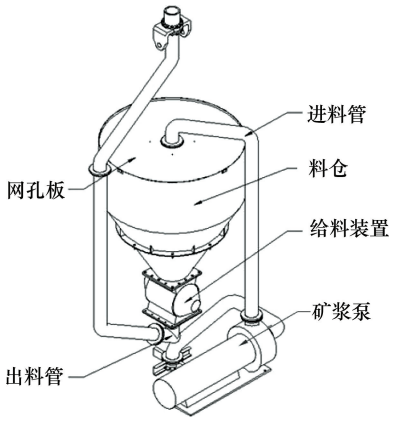


图1 水下给料装置在矿物输送系统中的安装位置

Fig.1 Installation position of underwater feeder in mineral conveying system

水下给料装置需要具备以下功能:① 转速调节能力,以适应不同的矿物输送速度;② 防卡堵功能;③ 转速监测能力,方便监测工作状态和给料速度;④ 耐压和耐腐蚀性。针对以上功能需求,设计水下给料装置中的叶轮给料机和插板阀两部分,给料装置整体示意图如图2所示,给料装置爆炸视图如图3所示。

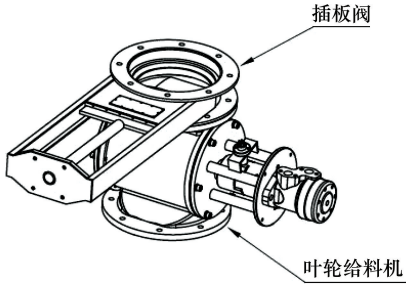
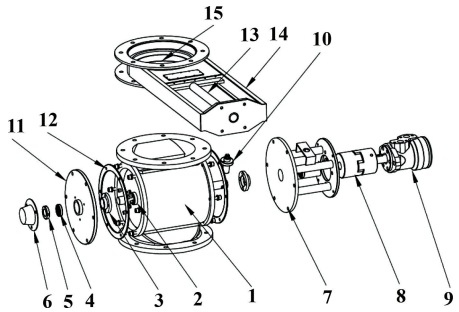


图2 给料装置整体示意图

Fig.2 Overall schematic diagram of feeder



1—壳体; 2—叶轮; 3—滑动轴承; 4—轴端密封圈; 5—锁紧螺母; 6—轴承盖; 7—液压马达支架; 8—联轴器; 9—液压马达; 10—转速传感器; 11—端盖; 12—端盖密封垫片; 13—液压缸; 14—阀体支架; 15—阀门

图3 给料装置爆炸视图

Fig.3 Exploded view of feeder

给料装置的液压马达输出轴通过联轴器与叶轮刚性联接,从而带动叶轮旋转。叶轮上相邻叶片之间形成V形槽结构,其工作原理为:上端物料从壳体上部进料口流入叶轮的V形槽内,通过液压马达带动叶轮旋转到壳体下部出料口处,由于叶轮容积一定,保持驱动件匀速运转,从而实现定量均匀给料的要求[4]。在壳体进料口的上方设置插板阀,可以有效避免因给料装置上方料仓中的矿物压力直接作用于叶轮上造成的启动负载过大从而损害驱动件的问题。此外,通过控制插板阀的开度和给料装置叶轮的旋转速度,可以更加精确地调节矿物输送浓度,避免矿物浓度波动带来的输送管路堵塞问题。

2 给料装置的主要结构参数

2.1 叶轮长度与直径

根据工作要求,水下给料装置用于输送粒径小于20 mm的海底矿物,给料速度不低于10 t/h,工作水深1 000 m。综合考虑给料速度、矿物的松散性和机械性能等因素,初定给料装置叶轮直径 D 为196.5 mm,叶轮长度 L 为193 mm。

2.2 叶轮轴径

确定给料装置叶轮轴径除了要计算叶片刮运矿物所需扭矩外,还要考虑给料装置入料口上方料仓中的矿物对叶轮轴产生的弯矩。该水下给料装置将进料口设计成非对称结构,如图4所示,即 $e_1>e_2$(e_1、e_2 分别为进料口左、右侧壁相对于叶轮轴心的水平偏移距离),当矿物从进料口进入壳体后,该结构减少了给料的阻力矩,同时降低了矿物在进料口堵塞的风险。综合考虑以上因素,通过计算得到叶轮轴径为39.5 mm。

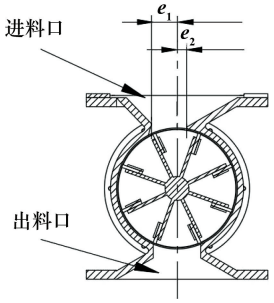


图4 进料口的非对称设计

Fig.4 Asymmetric design of feed inlet

2.3 壳体尺寸

为了使矿物能够顺利进入和排出给料装置,进料口和出料口的宽度应略大于转子相邻两叶片之间的最大间距,取宽度为78.5 mm。为了避免矿物进入叶轮两端圆形挡料板与给料装置端盖的夹缝中,给料口的长度略小于转子长度,为177 mm。考虑到水下给料装

置与其他装置之间的接口,给料装置壳体端面设计成圆形结构,能够更好地匹配输送管道法兰的结构形式,便于与管道装配,并且圆形端面更容易设计密封结构,降低矿物在水下泄漏的风险。综合考虑以上因素,给料装置壳体端面圆内径为 200 mm,外径为 240 mm。为满足水下耐腐蚀的要求,壳体和叶轮均采用不锈钢材料制作。

2.4　给料速度的计算

为了使矿物给料速度能够在一定范围内调节,叶轮设计转速为 10~50 r/min。体积输送量 V 是指给料装置叶轮每转一周能够处理的矿物体积,计算公式为:

$$V = [\pi(R^2 - r^2) - 6 \cdot (R - r)\,t] \cdot L \qquad (1)$$

式中:R 为叶轮半径,98.25 mm;r 为叶轮轴半径,19.75 mm;t 为叶片厚度,5 mm。

根据式(1)可以计算得出体积输送量 V 为 0.005 m^3/r。

给料速度 Q 是指单位时间内给料装置能处理的矿物量,计算公式为:

$$Q = nk\rho V \qquad (2)$$

式中:n 为给料装置的额定转速,初定为 35 r/min;k 为物料充填系数,多金属结核矿物的 k 为 0.8;ρ 为矿物的堆积密度,多金属结核矿物的 ρ 为 1.3 t/m^3[5]。

根据式(2)可以计算得出叶轮额定转速下给料速度 Q 为 11.3 t/h。

3　给料装置驱动件设计与选型

水下给料装置采用液压驱动,首先要确定叶轮负载,计算工作状态下叶轮所需要的扭矩,从而对液压马达型号进行选择[6]。液压马达的输出扭矩要大于给料装置所需的扭矩,在这两个选取原则的基础上根据使用环境选择合适的安全系数[7-8]。

3.1　叶轮的载荷分析

叶轮受力如图 5 所示。

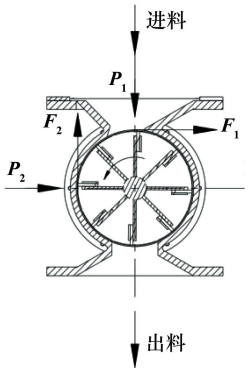


图 5　叶轮受力

Fig. 5　Forces on impeller

给料装置叶轮运转过程中受到的阻力可以简化为入料口处矿物相对运动产生的摩擦力 F_1 以及叶轮左侧部分矿物与壳体内壁的摩擦力 F_2。摩擦力计算公式为:

$$F = fp = fsh\rho g \qquad (3)$$

式中:f 为矿物的摩擦因数,取 0.2;s 为矿物接触的截面积,m^2;h 为矿物的当量高度, m;g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2。

给料装置入口处,s_1 为给料装置入口处的截面积,$s_1 = 0.02\ m^2$,$h_1 = 5$ m,计算得出摩擦力 $F_1 = 254.80$ N。给料装置运行过程中,叶轮左侧 3/8 周受到矿物和壳体内壁的摩擦阻力,根据被输送矿物的物理性质,同时考虑给料装置壳体与叶轮之间的空隙和结构特征,s_2 为给料装置叶轮左侧 3/8 周的面积,$s_2 = 0.047\ m^2$,h_2 取 4 m,计算得出摩擦力 $F_2 = 479.02$ N。叶轮半径 R 为 98.25 mm,不考虑机械传动之间的摩擦力,由此计算叶轮所受的扭矩 $T = (F_1 + F_2) \cdot R = 72.10$ N·m。

3.2　液压马达的选型

输送过程中可能发生卡料从而造成瞬时扭矩增大,取安全系数为 2.5。液压马达与叶轮轴之间采用联轴器进行连接,机械传动效率 η 取 0.98。液压马达的输出扭矩应不小于安全输出扭矩 T_a,$T_a = 2.5 \times T/\eta = 183.93$ N·m。

OMR 系列摆线马达是一种大扭矩液压马达,具备在高压力下工作自动补偿功能[9]。该液压马达可正反转自由换向,转速从低速到高速可调,运行平稳效率高,扭力大。OMR 系列摆线马达选型如表 1 所示。

表 1　OMR 系列摆线马达选型

Table 1　Selection of OMR series cycloidal motor

型号	排量/cm^3	最大转速/(r·min^{-1})	最大扭矩/(N·m)	额定输出功率/kW	最小转速/(r·min^{-1})
OMR50	51.6	775	100	7.0	10
OMR80	80.3	750	195	12.5	10
OMR100	99.8	600	240	13.0	10

由表 1 可知,OMR80 型号的摆线马达最大输出扭矩为 195 N·m,额定输出功率 12.5 kW,具有低速、大扭矩特性,能够较好地满足使用需求。水下给料装置工作水深 1 000 m,为实现压力平衡,液压马达的内部容积均与系统的压力补偿回路相贯通。由此,作用于液压马达壳体内外的压力趋于一致,避免了液压马达壳体发生屈曲或压溃的结构性失效风险。

3.3　给料装置的转速监测

给料装置转速监测用于实时获取叶轮运转状况,

从而调节给料速度。图 6 为转速传感器安装示意图，在液压马达安装法兰处装设接近开关，在联轴器端设置凸起感应物；联轴器带动给料装置叶轮同步转动时，根据接近开关检测的高电平脉冲波形（见图 7）数量，即可计算出装置转速。

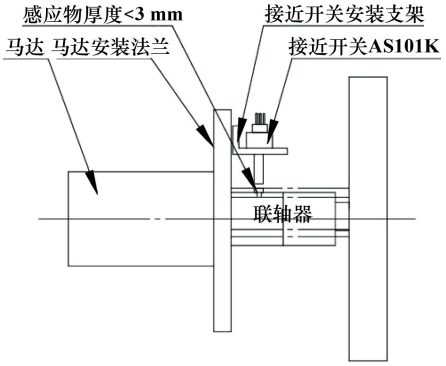


图 6 转速传感器安装示意图

Fig. 6 Installation schematic diagram of rotational speed sensor

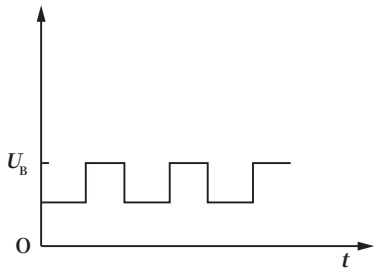


图 7 转速传感器输出的高电平脉冲波形

Fig. 7 High-level pulse waveform output by rotational speed sensor

表 2 为转速传感器电气参数及接线定义，转速传感器感应面距离联轴器表面凸起感应物的距离小于 3 mm。当输入供电电压 24 V（直流）、叶轮轴上的凸起感应物正对转速传感器感应面时，信号输出电压为 23 V 左右，离开时电压下降。

表 2 转速传感器电气参数及接线定义

Table 2 Electrical parameters and wiring definitions of rotational speed sensor

名称	参数及接线定义
工作电压	（10~30）V（直流）
感应距离	0~3 mm
开关频率	20 kHz
带缆插头	MCIL4M
插针定义	1：电源正，2：GND，3：信号
传感器类型	PNP 型

3.4 矿物浓度的调节

初始状态下，给料装置插板阀的阀门处于关闭状态，避免上部料仓中的矿物压力直接作用于叶轮上，造成启动负载过大，损害驱动件。给料装置工作时，首先启动液压马达，液压马达通过联轴器带动叶轮同步转动，开启转速传感器，当监测到叶轮旋转至额定转速时，控制插板阀的液压缸缩短液压杆，带动阀门缓慢开启，料仓中的矿物通过进料口缓慢进入壳体中，叶轮带动矿物旋转到阀体下部出料口处。当给料装置需要停止工作时，控制插板阀的液压缸伸长液压杆，带动阀门缓慢关闭；当阀门完全闭合后，关闭液压马达，当转速传感器监测到叶轮转速为 0 时，给料装置停止工作。通过控制插板阀的开度和给料装置叶轮的旋转速度，可以精确地调节矿物输送浓度，避免矿物输送浓度波动造成输送管路堵塞问题。

假定叶轮每转排出的矿物理论体积为 v_t，叶轮转速为 n，插板阀开度为 k，插板阀流量系数为 C_k（C_k 与插板阀的结构尺寸和矿物的流动性有关，可以通过给料试验测定），可以得到叶轮给料装置的给料速度 v_m 与叶轮转速 n 和插板阀开度 k 之间的关系为：

$$v_m = nv_t\left(1 - e^{-\frac{kC_k}{nv_t}}\right) \tag{4}$$

假设矿物混合前水的流量为 v_w，则混合后的矿物浓度 ε 为：

$$\varepsilon = \frac{v_m}{v_m + v_w} \tag{5}$$

根据式（4）~（5），控制插板阀开度和叶轮转速可精确调节矿物输送浓度。

3.5 整体设计结果

水下给料装置整体模型如图 8 所示，外形尺寸为 580 mm × 300 mm × 300 mm，整体质量约 105 kg。给料装置端盖与叶轮轴之间采用滑动轴承配合，能够较好满足水下使用环境。轴端设计防尘罩，叶轮轴与端盖前设置骨架油封和 O 形圈进行径向密封，避免细小矿物进入轴承部位产生磨损破坏。给料装置安装转速传感器，能够实时监测联轴器的转速，通过液压马达直接驱动叶轮旋转，实现均匀给料，转速在 10~50 r/min 内可调，最大给料速度为 15.4 t/h，满足设计指标要求。

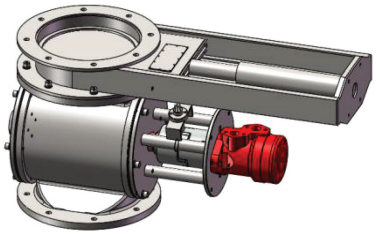


图 8 水下给料装置整体模型

Fig. 8 Overall model of underwater feeding device

4　给料装置数值仿真与试验验证

本文采用数值仿真、陆地试验与水池试验系统验证给料装置的给料性能。采用离散元法对给料装置的动态给料过程进行全流程仿真分析,还原颗粒给料过程的动力学特征,预判运行风险,并为试验提供理论支撑[10-11]。陆地试验旨在完成样机性能标定,与仿真结果校核,优化装置核心参数。水池试验旨在模拟水下作业环境,验证装置水下运行的可靠性,最终完成装置全流程性能验证。

4.1　数值模拟

颗粒物性参数及壁面材料属性详见表 3。整个仿真过程划分为颗粒预堆积与动态卸料两个阶段。在颗粒预堆积阶段,将顶部料仓入口设为虚拟壁面并附加颗粒,按设定的目标总质量生成 40 kg 颗粒。为确保颗粒能在进料口处稳定堆积,预先将顶部料仓与给料装置之间的交界面属性修改为物理壁面,而卸料器与下方料仓间的交界面设为虚拟壁面。在运动与求解器设置方面,给料装置叶片设为旋转壁面,转速恒定为 35 r/min,其余几何边界均设为固定的真实壁面。DEM 计算时间步长取瑞利时间步的 10%~40%,具体设定为 4×10^{-6} s,对应叶轮每个时间步旋转 0.000 84°,充分保证了碰撞计算的收敛性与精度。待进料侧颗粒生成完毕并在重力作用下达到静止沉降状态后,不再加入颗粒,同时将底部的交界面由物理壁面切换回虚拟边界。给料装置样机颗粒堆积如图 9 所示。

表 3　颗粒物性参数及壁面材料属性

Table 3　Particle property parameters and wall material properties

名称	密度/(kg·m^{-3})	粒径/mm	泊松比	杨氏模量/Pa	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
颗粒	2 100	20	0.23	3.0×10^{10}	0.4	0.2	0.01
壁面	7 800	—	0.30	2.0×10^{11}	0.5	0.2	0.01

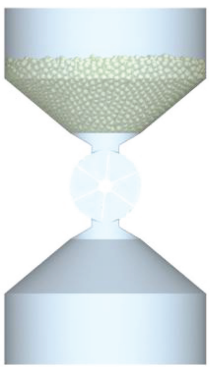


图 9　给料装置样机颗粒堆积示意图

Fig. 9　Particle accumulation schematic diagram of feeder prototype

给料装置样机颗粒运动轨迹如图 10 所示,颗粒在给料装置系统内的运动轨迹呈现显著的“静止堆积-强制截流-加速下落”三阶段动力学特征。在顶部料仓区域,大体量颗粒受壁面支撑与内部挤压作用,形成速度趋近于 0 的准静态滞留床;仅在靠近底部锥形收缩段时受重力牵引产生局部滑移,速度缓慢提升至 0.4~0.8 m/s,并汇聚至给料装置入口。当颗粒落入叶轮的 V 形叶片腔后,其自由落体趋势被物理隔断,速度重新回落至低速区间,完全受控于叶轮的匀速旋转进行定量搬运。随着叶轮向下转动,颗粒脱离机械约束进入下方料仓,在重力作用下呈水滴状发散并经历自由落体加速,速度急剧上升,峰值可达 2.0 m/s,最终撞击底面产生复杂的动能耗散并向两侧铺展。

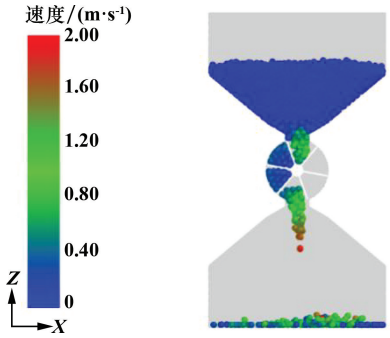


图 10　给料装置样机颗粒运动轨迹

Fig. 10　Particle motion trajectory of feeder prototype

4.2　陆地试验

给料装置陆地试验模型如图 11 所示,模型下部为支撑台架,用于安装给料装置,上部为料斗,用于储备一定量的模拟矿物。给料装置上安装有转速传感器,能够实时获取叶轮转速。给料装置通过液压源提供动力并调节液压马达的转速。

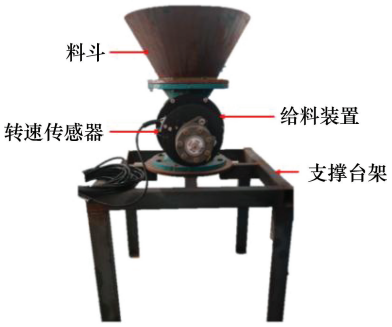


图 11　给料装置陆地试验模型

Fig. 11　Land-based test model of feeder

选用粒径 20 mm 的砾石作为模拟矿物,如图 12 所示,首先称取一定质量的模拟矿物装入试验料斗中。随后,通过液压源驱动给料装置并由传感器实时监测

叶轮转速,记录单次额定负载下的给料周期,进而推算实际给料率。试验过程中观察设备运转是否正常,矿料有无卡堵现象。



图 12 模拟矿物

Fig. 12 Simulated minerals

不同叶轮转速下,给料装置给料速度的理论计算值、数值模拟值、陆地试验实测值对比如表 4 所示。

表 4 不同叶轮转速下给料速度的对比

Table 4 Comparison of feeding rates at different impeller rotation speed

项目		不同叶轮转速下的给料速度/(t·h^{-1})		
		33 r/min	35 r/min	35 r/min
	陆地试验	9.84	11.10	11.35
	理论计算	10.60	11.40	11.40
	数值模拟	9.61	11.01	11.15
相对误差	理论计算-陆地试验	7.72%	1.80%	−0.44%
	数值模拟-陆地试验	−2.34%	−0.81%	−1.76%

结果显示,叶轮转速从 33 r/min 提升至 35 r/min 时,给料速度线性增大。以陆地试验实测值为基准,理论计算的最大相对误差为 7.72%,而数值模拟的最大相对误差绝对值仅为 2.34%,数值模拟结果与试验值的吻合度显著优于理论计算,这是因为在实际给料过程中,受到叶轮转速和矿物流动性等因素影响,矿物在叶轮 V 形空腔的填充率偏低,理论计算过程中的物料填充系数取值偏高,因此理论计算结果相较于陆地试验均偏大,后期可依据试验情况修正物料填充系数,提高理论计算的准确性。两组 35 r/min 叶轮转速的平行试验进一步显示,数值模拟结果与陆地试验的偏差均控制在 2%以内,证明该数值模拟方法具有较高的准确性和可靠性,可用于该设备给料性能的预测与优化。当叶轮转速达到额定转速 35 r/min 时,实际给料速度大于 10 t/h,满足项目任务指标的设计要求。

4.3 水池试验

图 13 为给料性能水池试验装置整体模型,给料装置安装于试验水池内,给料装置上部为料仓 1,用于储备一定量的矿物,矿浆泵的进口通过管路连接到给料装置下方管路,矿浆泵出口通过管路将抽吸的矿物投送到料仓 1 中,整套试验装置形成了矿物给料循环系统,以便进行水下给料连续运行性能试验。在循环主回路的中间段设置支路,通过闸阀控制支路和循环主回路的开闭,从而能够将循环管路中的矿物输送到料仓 2 中,便于称取矿物质量。

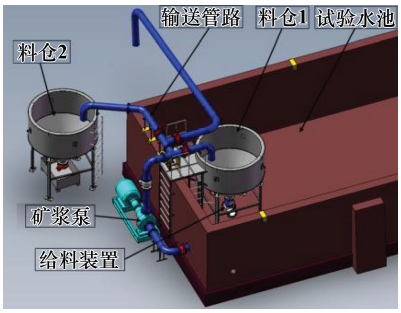


图 13 给料性能水池试验装置整体模型

Fig. 13 Overall model of pool test device for feeding performance

试验用模拟矿物粒径分别 10、15、20 mm,质量均为 70 kg,装置额定转速 35 r/min。在试验水池内注满水后,首先开启矿浆泵和水下给料装置,将预先称重好的矿物倒入料仓 1 中,使矿物在循环管路中持续运行 10 h,观察给料装置是否工作平稳。循环给料试验完成后,关闭主循环管路通往料仓 1 的阀门,打开支路通往料仓 2 的阀门,将矿物输送到料仓 2 中,完成后关闭矿浆泵和给料装置,最后称取料仓 2 中的矿物质量。

表 5 为给料装置水下连续运行试验记录。经试验验证,给料装置在水下连续运行时各部件工作过程良好,满足性能要求。因矿物长期输送过程中发生碰撞磨损,产生的微小矿物粉末被水流带走无法收集,并且矿物在循环输送回到料仓中有少量溢出,最终收集到的矿物质量略低于试验前矿物质量,总体矿物收集率高于 90%。试验过程中通过设备的监测,完成了对水下给料装置的长期运行可靠性的评估,为深海采矿水下中继设备的研制提供了技术支撑。

表 5 给料装置水下连续运行试验记录

Table 5 Testing record of underwater operation of feeder

粒径/mm	给料装置是否正常运行	收集的矿物质量/kg
10	是	63.8
15	是	65.3
20	是	63.5

5 结论

1) 深海采矿水下给料装置通过偏心式叶轮设计以

及和插板阀配合工作,降低了给料的阻力矩,减小了卡料的风险。陆地试验结果表明,在额定转速 35 r/min 下,装置实际给料速度达 11.1 t/h,满足大于 10 t/h 的设计指标;同时,该结构实现了对矿物输送浓度的精确调节,避免矿物浓度波动带来的输送管路堵塞问题。

2) 采用离散元数值模拟方法对给料装置的动态给料过程进行全流程仿真分析,数值模拟结果与陆地试验的偏差均在 2% 以内,证明该数值模拟方法具有较高的准确性和可靠性,可用于该设备给料性能的预测与优化。

3) 该水下给料装置能够适用于多种深海矿物的均匀给料, 设计的给料性能水池试验装置,形成了矿物给料循环系统,能够有效验证给料装置在水下连续运行的可靠性。

参考文献(References):

[1] 李家彪,王叶剑,刘磊,等. 深海矿产资源开发技术发展现状与展望[J]. 前瞻科技, 2022,1(2):92-102.
LI Jiabiao, WANG Yejian, LIU Lei, et al. Current status and prospect of deep-sea mining technology[J]. Science and Technology Foresight, 2022,1(2):92-102.

[2] 王国荣,黄泽奇,周守为,等. 深海矿产资源开发装备现状及发展方向[J]. 中国工程科学, 2023,25(3):1-12.
WANG Guorong, HUANG Zeqi, ZHOU Shouwei, et al. Current status and development direction of deep-sea mineral resource exploitation equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2023,25(3):1-12.

[3] 曹阳,关英杰,杜新光,等. 深海采矿水下中继站料仓防溢料结构数值计算与试验研究[J]. 中国造船, 2022,63(1):28-38.
CAO Yang, GUAN Yingjie, DU Xinguang, et al. Computational and experimental study on anti-overflow structure of bunker at underwater buffer station for deep-sea mining[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(1):28-38.

[4] 樊茂明. GY223/1200 叶轮给料机的研制[J]. 选煤技术, 1998(5):13-16.
FAN Maoming. Development of GY223/1200 impeller feeder[J]. Coal Preparation Technology, 1998(5):13-16.

[5] 赵峰,蒋训雄,冯林永,等. 海底多金属结核理化特性分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(3):8-11.
ZHAO Feng, JIANG Xunxiong, FENG Linyong, et al. Physical and chemical characteristics of ocean polymetallic nodules[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(3):8-11.

[6] 张燕龙. 方形给料机数值模拟及动态仿真分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
ZHANG Yanlong. Square feeder numerical simulation and dynamic simulation analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[7] 魏静姿. 叶轮给料机的功率计算[J]. 工业技术与职业教育, 2010,8(4):38-39.
WEI Jingzi. Power calculation of impeller feeder[J]. Industrial Technology and Vocational Education, 2010,8(4):38-39.

[8] 张锐,刘明红. 刚性叶轮给料机运行中常见问题的改进[J]. 四川水泥, 2013(增刊 1):148-149.
ZHANG Rui, LIU Minghong. Improvement of common problems in operation of rigid impeller feeder[J]. Sichuan Cement, 2013(S1): 148-149.

[9] 陈寅伯,耿晓帆. 浅谈液压马达在重型板式给料机中的应用前景[J]. 科技创新与应用, 2016,6(15):117.
CHEN Yinbo, GENG Xiaofan. Discussion on the application prospect of hydraulic motor in heavy plate feeder[J]. Technology Innovation and Application, 2016,6(15):117.

[10] 关英杰,郑皓,宿向辉,等. 垂直管道内粗颗粒运动特性数值模拟[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):10-14.
GUAN Yingjie, ZHENG Hao, SU Xianghui, et al. Numerical simulation of trajectory of coarse particle motion in vertical pipeline[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(2):10-14.

[11] 宋跃文,朱小军,唐达生. 垂直提升管道中粗颗粒滑移速度试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(4):5-7.
SONG Yuewen, ZHU Xiaojun, TANG Dasheng. Experimental study on slip velocity of coarse particles in vertical lifting pipe[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(4):5-7.

引用本文:喻光安,曹阳,吕浩,等. 深海采矿水下给料装置设计与试验[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):75-81.

YU Guang'an, CAO Yang, LYU Hao, et al. Design and test of underwater feeder for deep-sea mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):75-81.