

# 深海采矿中继站底部 Y 形管流动状态研究<sup>①</sup>

吴卓<sup>1</sup>, 郑皓<sup>1</sup>, 吉成才<sup>1</sup>, 关英杰<sup>2</sup>, 黎宙<sup>1</sup>

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用国家重点实验室,湖南长沙 410012; 2.湖南大学 机械与运载工程学院,湖南长沙 410082)

**摘要:** 针对深海采矿泵管输送试验系统中 Y 形管内流场复杂和矿石泄露风险等问题,采用 CFD-DEM 方法,对不同速度、不同体积浓度和不同粒径的矿石颗粒进行数值模拟计算,分析了 Y 形管内颗粒群的运动特性和流场分布规律。结果表明,Y 形管内流场分布受弯管曲率和 Y 形管入口流量分配影响;颗粒群在弯管内贴壁流动,受到上升流作用后颗粒向上偏移;当上升流流速不足、颗粒体积浓度高及颗粒粒径较大时,会造成颗粒沿着底部管道流失,随着上升流速减小、颗粒体积浓度增大及颗粒粒径增大,颗粒通过底部管道流失不断增大;颗粒流的存在导致 Y 形管内低压漩涡区强度和尺度均减弱。

**关键词:** 深海采矿; 管道输送; CFD-DEM; Y 形管; 颗粒流; 数值模拟

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.001

文章编号: 0253-6099(2023)01-0001-05

## Flow State of Y-shaped Pipe at Bottom of Buffer Station in Deep-Sea Mining

WU Zhuo<sup>1</sup>, ZHENG Hao<sup>1</sup>, JI Chengcai<sup>1</sup>, GUAN Yingjie<sup>2</sup>, LI Zhou<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China; 2.College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** Aiming at complicated flow field of Y-shaped pipe in pump piping system and risk of ore leakage in conveying test for deep sea mining, numerical simulation was performed by using CFD-DEM method for ore particles with different velocities, different volume concentration and different particle sizes. Based on that, the movement features of particle groups and flow field distribution pattern in Y-shaped pipe were all analyzed. It is found that the flow field distribution in Y-shaped pipe is influenced by the curvature of pipe elbow and the flow distribution in the inlet of Y-shaped pipe. The particle groups flow against the inner wall of elbow, and deflect upward under the influence of upward flow. If upward flow with lower velocity, particles with large grain size and high volume concentration will hit the bottom of pipe, leading to some losses. As the upward velocity decreases and both particle volume concentration and grain size increase, more and more particles will be continuously lost on the bottom of pipe. Due to the existence of particle flow, both intensity and scale of the low-pressure vortex region in Y-shaped pipe become weaken.

**Key words:** deep-sea mining; pipeline conveying; CFD-DEM; Y-shaped pipe; particle flow; numerical simulation

随着深海采矿技术的高速发展,深海采矿泵管输送系统变得尤为重要。常见的深海采矿系统主要由集矿车、软管、中继站、提升硬管、矿浆泵和试验母船等组成。海底锰结核经集矿车收集到料仓内,结核在中继站软管泵的作用下经软管进入到中继站内的 Y 形管,在矿浆泵的作用下从 Y 形管的另一分支流入提升硬管最终进入试验母船上。在整个输送系统中,Y 形管

内部流场极其复杂,并对整个系统的输送效率有重要影响。正常工况下,结核经 Y 形管进入提升硬管,当遇到堵塞等紧急状况时,结核可通过 Y 形管下端管路流入海底,亦避免了堵塞导致设备无法运行或炸管等危险。因此 Y 形管是试验系统中的重要组成部分,其性能直接决定了整个输送系统的高效性及安全性。

目前,国内外学者对 Y 形管输送问题进行了数值

① 收稿日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2801700); 湖南省自然科学基金(2021JJ40552)

作者简介: 吴卓(1997—),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为深海采矿水下装备。

通信作者: 郑皓(1981—),男,江西人,硕士,正高级工程师,主要研究方向为深海矿产资源开发利用。

模拟和实验研究<sup>[1-8]</sup>。由于Y形管结构的特殊性,其内部流场的研究是十分必要的。在深海采矿管道输送方面,也有学者对提升硬管内颗粒沉降<sup>[9-10]</sup>、悬浮<sup>[11-12]</sup>、滑移<sup>[13]</sup>、旋转<sup>[14]</sup>、压力损失<sup>[15]</sup>等运动现象进行了一定的研究。但通过数值模拟方法分析Y形管内颗粒运动规律的研究比较少。本文根据深海采矿输送系统在试验中的实际需求,采用CFD-DEM耦合算法,充分考虑了流体的流动速率、不同颗粒形状、颗粒的体积效应和碰撞作用,对中继站底部Y形管流动情况进行数值模拟,分析底部Y形管存在矿石泄露的原因,为深海采矿矿石输送提供理论依据。

## 1 模型与方法

### 1.1 Y形管模型介绍

如图1所示,Y形管是试验系统中下行溢水管与上行输送管的连接体,同时海水也通过Y形管进入上行管道。Y形管①号口与料仓溢水管相连,使得混流器内上端颗粒可以顺利流入Y形管中,减少上端颗粒的堆积;料仓内的溢流海水和可能夹杂其中的部分颗粒由①号口进入1号管,②号口与管道底部海水连通,海水通过②号口进入Y形管,③号口为给料机给料入口,其中经软管提升上来的颗粒需要经给料机重新分配颗粒量进入料仓,这样可以保证有恒定的颗粒进入Y形管;④号口与输送硬管连通,将颗粒输送到水面母船上。由①号口、②号口及③号口进入Y形管的海水和颗粒通过2号管到④号口进入输送硬管,当②号口的海水流速过低时,颗粒将通过②号口流出管道,造成矿石颗粒损失。

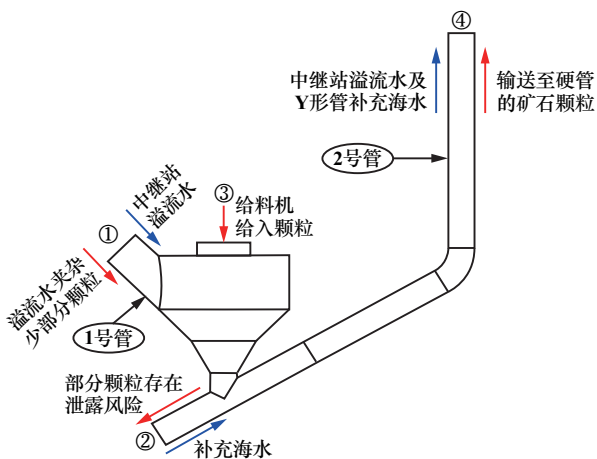


图1 Y形管输送结构

### 1.2 网格划分与无关性验证

对Y形管计算域进行网格划分,网格为非结构四面体网格,为保证数值模拟的高效性与准确性,由粗糙

到超精细划分4套不同数量的网格,具体参数如表1所示。经过观察④号口平均流量,最终选取编号为3的网格进行数值模拟。

表1 网格无关性检验

网格编号	网格质量	网格数量	④号口平均流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	粗糙	538 299	2.256
2	中等	847 448	2.354
3	精细	1 175 598	2.362
4	超精细	1 457 567	2.366

### 1.3 计算模型

CFD-DEM耦合算法的求解策略是由CFD求解器求解连续相,DEM求解器求解离散相,因此CFD-DEM求解主要分为3个部分:连续相求解、离散相求解和两相间耦合求解。

流体连续相求解主要应用连续性方程和动量方程(Navier-Stokes方程)。其中连续性方程又称为质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (1)$$

式中 $\rho$ 为流体密度; $t$ 为时间; $v_i$ 为速度矢量在笛卡尔直角坐标系中 $i$ 方向的分量。

动量守恒方程也称作Navier-Stokes方程, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中 $P$ 为静压; $\rho g_i$ 和 $F_i$ 分别为 $i$ 方向上的重力体积力和外部体积力; $\tau_{ij}$ 为由流体运动引起的黏性应力张量。

求解离散相主要是通过接触模型求解颗粒碰撞过程的受力,并运用牛顿第二定律计算颗粒的加速度,然后更新颗粒的速度和位移。对粒子的受力进行分析<sup>[16]</sup>,其对应的动量守恒和角动量守恒方程为:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{n,ji} + F_{\tau,ij}) + F_{fp,i} + m_i g \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} I_i \omega_i = \sum_j (r_i \times F_{\tau,ij} + M_i) \quad (4)$$

式中 $m_i$ 、 $v_i$ 分别为颗粒的质量和速度; $F_{n,ji}$ 为颗粒间的法向接触力; $F_{\tau,ij}$ 为切向接触力; $I_i$ 为颗粒的转动惯量; $\omega_i$ 为颗粒的角速度; $r_i$ 为颗粒半径; $F_{fp,i}$ 为来自液相对颗粒的作用力; $M_i$ 为滚动摩擦力矩。

在每个时间步长中,首先由CFD求解器计算出连续相流场,当仿真迭代至收敛时,将网格单元中流体边界条件传递给DEM求解器,计算出作用在颗粒上的阻力,并将此阻力代入颗粒运动方程,求解离散相的位

置、速度等信息。DEM 迭代计算结束后,估计出计算单元内的孔隙率并连同各相间作用力传递回 CFD 求解器。CFD 求解器利用这些数据求解连续相流场,更新流动区域,以此循环进入下一个时间步长。

#### 1.4 边界条件

连续相边界条件:Y形管①号口、②号口为速度入口,③号口为自由出口,④号口为压力出口;颗粒相边界条件:Y形管③号口为速度入口,①号口、②号口和④号口为自由出口。边界条件如表2所示。

表2 边界条件设置

工况编号	清水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )		颗粒给入量/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
	①号口	②号口	③号口
1	360	60	11.67
2	240	180	11.67
3	120	300	11.67
4	0	420	11.67

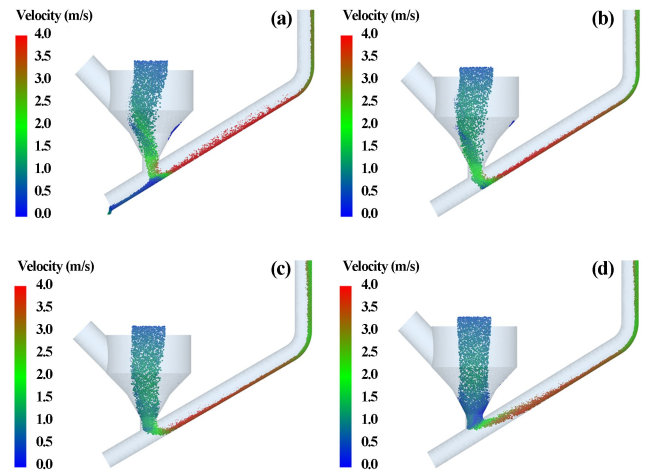
## 2 计算结果与分析

### 2.1 不同速度颗粒流场分析

不同速度颗粒流动状态如图2所示。由图2可得,颗粒在运动过程中具有相同的运动规律,混流器内颗粒速度较低,当颗粒进入Y形管后与②号口中的海水汇合,在重力作用下,颗粒在2号管下端始终贴着壁面流动,产生摩擦,但在海水作用下,颗粒速度不断增加,摩擦力相对于海水的拖拽力来说弱得多,因此颗粒速度提升得很快,随后颗粒到达2号管的弯管肘部与管壁发生碰撞和摩擦,此段的摩擦力远大于Y形管倾斜段重力产生的摩擦,一方面海水的拖拽力使颗粒产生对壁面的压力远大于重力作用下产生的对壁面的压力,另一方面在弯管处产生的离心力也增加了颗粒对外侧壁面的压力。因此,颗粒速度迅速减小后过渡到2号管的上升段,同时在离心力作用下,颗粒始终贴近壁面上升,之后在提升力作用下,颗粒又开始逐渐增速最终以恒定速度离开④号口。由此可以看出不同速度下颗粒在2号管肘部的速度呈现出高、低、高的分布情况,颗粒始终是贴壁运动的。

工况1条件下,②号口给定了 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 的海水,流入Y形管的颗粒在自身重力作用下贴壁流动,部分颗粒在提升力作用下经过2号管肘部进入提升管道后经④号口流出,还有部分颗粒在重力作用下直接从②号口流入海水中,造成颗粒大量损失,由于给定了少量海水,在海水拖拽力作用下颗粒流失减少,且脱离管道壁面,摩擦阻力减小,使得颗粒速度得到一定提升;流入

Y形管的颗粒,部分经②号口流入到海水中,流失速度约为 $0.27 \text{ kg/s}$ ,在未给定海水时颗粒的流失量约为 $3.87 \text{ kg/s}$ ,相对于未给定海水时颗粒的损失明显减少。工况2、工况3和工况4中②号口的海水给到 $180 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $420 \text{ m}^3/\text{h}$ ,由于海水流量较大,流入Y形管的颗粒在②号口海水拖拽力作用下全部流入2号管的倾斜段,相对于拖拽力,颗粒的重力几乎可以忽略,因此不存在颗粒沿倾斜管下滑流失现象。颗粒在2号管倾斜段的运动状态相对工况1有明显不同,工况2和工况3时倾斜段颗粒速度几乎相同,颗粒的整体分布也相对均匀,即都是贴壁运动,出现这一现象的原因是工况2和工况3中的海水及①号口流入的海水对颗粒的运动起到决定性作用,而④号口的提升力对颗粒的运动影响小。对于工况1来说,由于海水流量相对较小,④号口的提升力对颗粒的运动起到决定性作用,导致颗粒在2号管倾斜段分布不均匀。针对以上4种工况可以看出,不同工况下颗粒的堆积现象也是不同的,低速工况下颗粒进行间歇式推移运动,高速工况下颗粒采用滑动推移或滚动推移的方式运动。



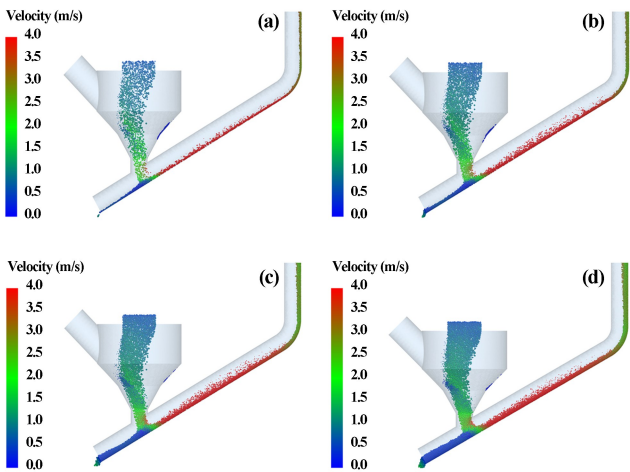
(a) 工况1; (b) 工况2; (c) 工况3; (d) 工况4

图2 不同速度颗粒流动状态

### 2.2 不同体积浓度颗粒流场分析

不同体积浓度颗粒流动状态如图3所示。由图3可以看出,颗粒在管道中整体具有相同的运动规律,随着颗粒浓度增大,颗粒经②号口的流失量逐渐增大。当体积浓度达到7.5%时,颗粒的流失量和提升到④号口的颗粒量相差不大,接近50%,对于整个输送系统来说该工作效率无法满足实际需求;当体积浓度达到10%时,颗粒经②号口的流失量超过了提升到④号口的颗粒量,颗粒存在严重泄露现象,超出设计需求,体积浓度的增大不仅导致颗粒大量流失,也使得管道磨

损加剧,产生这一现象的原因是大量的颗粒堆积在一起沿着管道下滑,颗粒间的相互碰撞及挤压作用加剧了颗粒对管道壁面的摩擦,因此高浓度颗粒的输送将大大缩短管道的使用寿命。体积浓度 2.5% 时,颗粒泄露量相对较少,但对于整个输送系统来说输送效率较低,整个输送系统的输送能力不能充分发挥;体积浓度 5.0% 时,既可以充分发挥输送系统的工作能力,又可以保证颗粒的泄露量在可接受的范围内,颗粒自身的相互碰撞及对管道的磨损也相对较小。

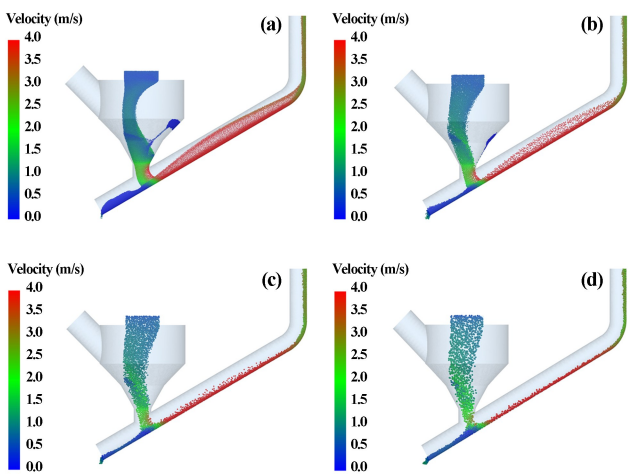


(a) 体积浓度 2.5%; (b) 体积浓度 5.0%;  
(c) 体积浓度 7.5%; (d) 体积浓度 10.0%

图3 不同体积浓度颗粒流动状态

### 2.3 不同粒径颗粒流场分析

不同粒径颗粒流动状态如图 4 所示。由图 4 可以看出,颗粒在管道中整体具有相同的运动规律,随着颗粒粒径减小,颗粒经②号口的流失量逐渐增多。颗粒粒径增大的同时,混流器内部漩涡逐渐减小,出现该现象的原因是水流冲击混流器壁面反射形成漩涡,颗粒



(a) 粒径 5 mm; (b) 粒径 10 mm; (c) 粒径 15 mm; (d) 粒径 20 mm

图4 不同粒径颗粒流动状态

粒径越小,其自身重力越小,在受到水流冲击时越容易改变原有运动状态;颗粒粒径越小,受到 2 号管竖直段提升力的作用后越容易脱离壁面运动,脱离壁面运动的颗粒将部分动能用来克服重力势能,此时颗粒个体的能量损失全部是颗粒间的相互碰撞及颗粒间的摩擦所致;随着颗粒粒径增大,颗粒贴壁运动现象越明显,在 Y 形管底部弯角处产生的漩涡逐渐减小,颗粒粒径达到 20 mm 时,该处的漩涡几乎可以忽略,产生这一现象的原因是颗粒粒径较小时可以将小颗粒看作是拟流体,因此粒径较小的颗粒可明显看出产生漩涡的状态,而大颗粒很难看出。

### 2.4 试验验证

在实验室建成了模拟提升试验系统,这是一种 45° 倾角的 Y 形管模拟提升试验系统结构,如图 5 所示。该试验系统垂直高度 10 m、提升管内径 50 mm。整个输送管道采用透明塑料管,以便观察颗粒输送过程中的流动状态。在提升管上部安装了两极离心泵和电磁流量计,通过变频器调节泵的转速,对提升管道内流速进行调节,采用电磁流量计测量水流速度。在提升管和泵进出口处安装压力计,提升管上部安装流量计以测量相关数据,在稳压水箱中安装透明玻璃窗口,利用 DV 观察管道内颗粒运动状态。

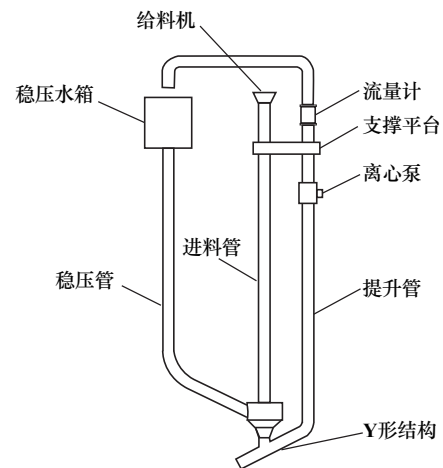


图5 Y形管模拟提升试验系统结构

试验用颗粒为人工模拟结核,粒径分别为 5 mm、10 mm、15 mm,经测定模拟结核平均形状系数 0.9,湿密度 2 000 kg/m<sup>3</sup>,5 mm、10 mm、15 mm 结核的沉降速度分别为 0.457 m/s、0.526 m/s、0.591 m/s,试验体积浓度 5%,每组试验投料量保持一致,调节离心泵转速,可控制管道内流速,从而得到不同输送速度下粗颗粒在 Y 形管内的流动状态。经过对不同工况进行试验分析,可以得出在满足矿石颗粒不泄露的情况下采

用表2中的工况2且体积浓度5%、颗粒粒径10 mm时为最佳输送工况,矿石不存在泄露现象、整体工作效率较高且系统的损耗相对较小。

### 3 结 论

1) 在Y形管底端未给定海水时,矿石颗粒存在大量的泄露,泄露量达到3.87 kg/s,随着给定海水流量逐渐增加,矿石泄露量逐渐减少至最后消失,低速工况下颗粒进行间歇式推移运动,高速工况下颗粒采用滑动推移或滚动推移的方式运动。

2) 随着给定海水速度提升,Y形管倾斜处的流体流动速度明显减小;在海水拖拽力作用下逐渐减小了颗粒的堆积;在Y形管弯折处压力分布相对复杂,流体经Y形管底端流出的压力较大,导致上部出现较大低压漩涡区,随着给定海水流量增加,低压漩涡区逐渐减小。

3) 在输送过程中,随着颗粒体积浓度增大,颗粒经Y形管底端的流失量逐渐增加。

4) 在输送过程中,矿石颗粒粒径越小,水流冲击壁面反射形成的漩涡对其影响越大。

#### 参考文献:

- [1] 薛超. 基于Solidworks的Y形岔管应力变形和流场特性分析及体型优化[J]. 南水北调与水利科技, 2019,17(3):177-184.
- [2] 李松波,周知进,熊雄,等. 海浪冲击对Y形输液管道流固耦合振动的影响分析[J]. 机床与液压, 2019,47(13):117-122.
- [3] Bibhuti Bhusan Nayak, Dipankar Chatterjee. Convective heat transfer in slurry flow in a horizontal Y-shaped branch pipe[J]. Powder Technology, 2017,318:46-61.
- [4] Guangbin D, Zongming L, Guangli C, et al. Experimental investigation of gas-solid two-phase flow in Y-shaped pipeline[J]. Advanced Powder Technology, 2010,21(4):468-476.
- [5] LIU Z M, DUAN G B, CHEN G L. Pressure drop of Y-shaped branch pipe in gas-solids flow [C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2011;2246-2249.
- [6] Hirani A A, Kiran C U. CFD simulation and analysis of fluid flow parameters within a Y-Shaped Branched Pipe[J]. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013,10(1):31-34.
- [7] CHEN J, SUN Y, ZHANG H, et al. Large Eddy Simulation of Cross Flow in Pipe Junction[C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2018,51210;V002T08A031.
- [8] Anand R B, Chandrababu A, Richards X J A, et al. Flow and performance characteristics of a Y-shaped diffusing duct using CFD[J]. International Journal of Aerodynamics, 2010,1(2):115-129.
- [9] 陈光国,阳宁,唐达生,等. 垂直管道颗粒及颗粒群沉降运动规律研究[J]. 泥沙研究, 2010(4):16-21.
- [10] 吉成才,关英杰,郑皓,等. 颗粒粒径对深海采矿矿浆泵性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):1-6.
- [11] 唐达生,肖红,宋跃文,等. 深海粗颗粒矿石浮游速度的试验研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(3):1-5.
- [12] 王忠昶,王彦文,夏洪春. 不同角度弯管输送料浆不淤流速的研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):41-45.
- [13] 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.
- [14] 唐达生,宋跃文,朱小军,等. 粗颗粒矿石在提升管道内的旋转特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017(7):1831-1838.
- [15] SONG Y, ZHU X, SUN Z, et al. Experimental investigation of particle-induced pressure loss in solid-liquid lifting pipe[J]. Journal of Central South University, 2017,24(9):2114-2120.
- [16] 李亚林. 变曲率流道内固液两相CFD-DEM方法及在大型脱硫酸泵中的应用[D]. 镇江:江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2015.

引用本文: 吴卓,郑皓,吉成才,等. 深海采矿中继站底部Y形管流动状态研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):1-5.

### 版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部  
2023年2月