

深海多金属结核开采过程中脱泥预处理装置研究^①

吴冬华^{1,2}

(1.长沙矿冶研究院有限责任公司,湖南长沙410012; 2.深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南长沙410012)

摘要:海底采矿车在采集深海多金属结核时携带大量沉积物,为减少采矿尾水对海洋环境的影响,开发了双螺旋滚筒结构和直排拦阻网结构的两种高效、低扩散脱泥预处理装置,并集成射流输送辅助试验设备、配备在线监测系统。采用计算流体力学仿真和实验室试验对该装置的脱泥效果 and 环境保护性能进行评估。结果显示,直排拦阻网结构脱泥预处理装置脱泥率超过98%,它能迅速分离泥沙,并在较短时间内使泥沙沉降,有效控制采矿车羽流,提高采矿输送效率,从源头减少采矿尾水的污染。

关键词:深海多金属结核;海底采矿车;脱泥;浊度监测;海洋环境保护;深海采矿;计算流体力学

中图分类号:TD857

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.002

文章编号:0253-6099(2024)06-0006-05

Desliming Device for Pretreatment of Polymetallic Nodules in Deep-Sea Mining

WU Donghua^{1,2}

(1. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: A seabed collector vehicle usually carries a large amount of sediments during mining seabed polymetallic nodules. For reducing the environmental impact caused by tail water discharged in the mining, two kinds of high efficiency and low diffusion desliming pretreatment devices, with twine-drum spiral structure and a direct discharge device with arresting mesh structure, respectively, have been developed, which integrates a jet-assisted transport testing equipment, and is also equipped with an online monitoring system. The desliming effect and environmental performance of the developed device was evaluated by performing computational fluid dynamics simulations and laboratory tests. It is found that the direct discharge device with arresting mesh can pretreat tails with desliming rate over 98%, and this pretreatment device can make quick separation of nodules from sediment, and also lead to subsequent quick settlement of the separated sediment, thus effectively controlling the plume caused by collector in the mining. It is concluded that this developed pretreatment device can improve the lifting efficiency in the mining and mitigate the pollution of tails in the deep-sea mining from the source.

Key words: deep-sea polymetallic nodules; seabed collector vehicle; desliming; turbidity monitoring; ocean environmental protection; deep-sea mining; computational fluid dynamics

海洋矿产资源绝大部分位于深海地带^[1-2]。多金属结核也叫锰结核,其中富含锰、铁、镍、钴、铜等多种元素,主要分布在太平洋、大西洋和印度洋的海底,具有极高的开采价值,也是全球关注度高、勘探程度较为完善的矿种^[3]。然而,受技术、环境等因素限制,多金属结核采集面临诸多挑战。首先,深海无光、强腐蚀、高压等条件增加了开采技术难度^[3];其次,多金属结核多与海底沉积物混合在一起,采集后会携带大量泥状沉积物^[4]。为有效减少锰结核的泥沙,需在采集前

对锰结核进行脱泥;锰结核脱泥过程会影响海水清洁度,甚至会对海岸生态环境产生影响^[5-6]。因此,在锰结核开采过程中,亟须创新设备技术,在减少海洋开采对环境的影响的基础上提高锰结核脱泥效果。

传统脱泥预处理装置在脱泥效率和环境保护方面存在一定的局限性。例如,机械搅拌和筛分方法易导致泥沙扩散,增加后续处理负担,并对海洋环境造成负面影响。本文设计了双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置和直排拦阻网结构脱泥预处理装置,用于深海多金属

① 收稿日期:2024-05-09

基金项目:国家重点研发计划(SH6700-01)

作者简介:吴冬华(1980—),男,湖南长沙人,工程师,主要研究方向为深海采矿技术与水下装备。E-mail:kyy_wudh@minmetals.com

结核脱泥预处理,并通过计算流体动力学仿真模拟和实验室试验对其性能进行评估。

1 深海多金属结核低扩散脱泥预处理装置简介

深海多金属结核低扩散脱泥预处理装置主要由脱

泥预处理装置核心组件、分流输送通道、尾部扩散排放装置、射流输送辅助试验装置、称重料仓、安装框架和在线监测浊度计等组成,如图1所示。其中对脱泥预处理装置核心组件设计了2种结构,分别为双螺旋滚筒结构和直排拦阻网结构,不同核心组件结构的脱泥预处理装置如图2所示。

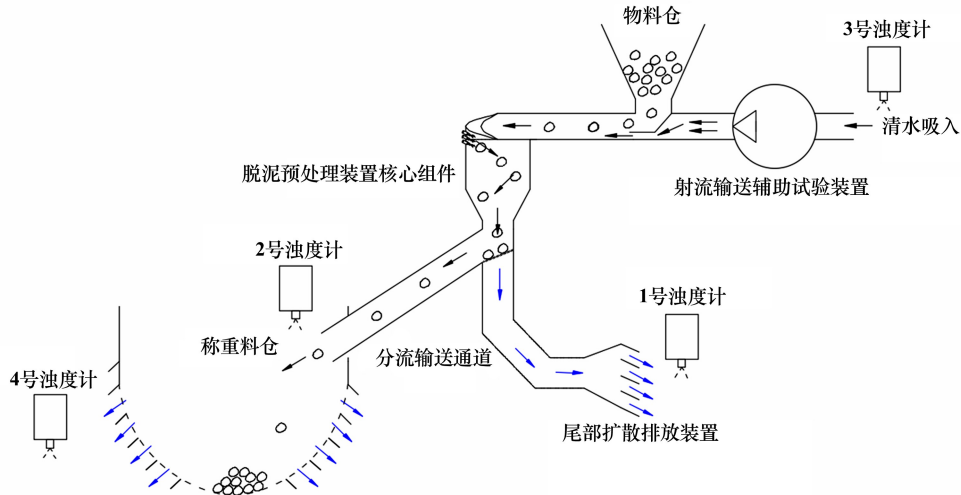
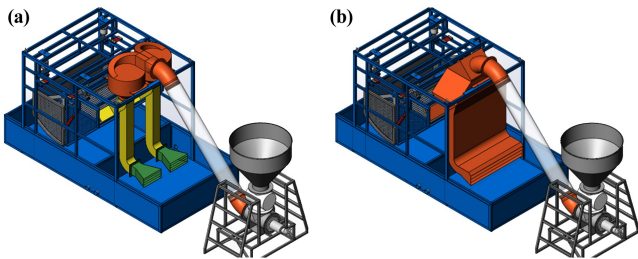


图1 深海多金属结核低扩散脱泥预处理装置组成图



(a) 双螺旋滚筒结构; (b) 直排拦阻网结构

图2 深海多金属结核低扩散脱泥预处理装置

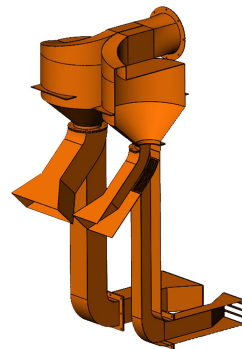


图3 双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置核心组件

1.1 脱泥预处理装置核心组件

1.1.1 双螺旋滚筒结构

双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置核心组件是一种用于分离和除去固体颗粒(如砂粒)的设备,如图3所示。该组件基于重力螺旋选料机构原理,通过旋转运动将固体颗粒从液体中分离出来。含有多金属结核的混合流进入设备后,在双螺旋滚筒作用下,会进行强烈的旋转运动。旋转运动可以产生离心力、向心力、浮力和流体曳力等效应,在旋转运动作用下,固体颗粒(如砂粒)和液体(如水)发生分离。砂粒由于密度较大,在向心力和流体曳力的共同作用下,会向设备底部移动,并通过排污口排出设备。在该组件底部增加隔离网,较小泥沙通过泥沙分流输送通道排出,处理后的多金属结核通过排料口进入料仓。

1.1.2 直排拦阻网结构

直排拦阻网结构脱泥预处理装置核心组件是一种利用冲击水流和旋流效应的设备,如图4所示。在冲

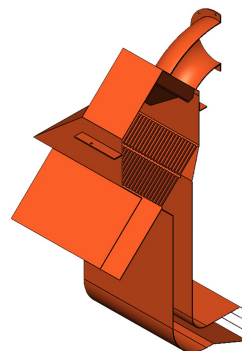


图4 直排拦阻网结构脱泥预处理装置核心组件

击水流的作用下,该组件会形成一个上下翻滚的旋流,使泥沙和杂质更容易与水分离,从而方便排出。

在旋流底部位置设置排泥口,排泥口方向与旋流切线方向一致。这样,旋流中泥沙和杂质会随着旋流运动被带到排泥口处。在排泥口处设置一个拦阻网,拦截进入排泥口的多金属结核。拦截下来的多金属结核被收集至料仓中。

1.2 分流输送通道

多金属结核混合流经过脱泥预处理后,含有污泥的浑浊水体通过脱泥预处理装置进入输送通道。输送通道被设计成朝下的方向,以确保浑浊水体有序流动,最后浑浊水体由尾流扩散排放管排放,如图5所示。经过处理的多金属结核无法进入输送通道中,沿拦阻网进入相应的料仓。

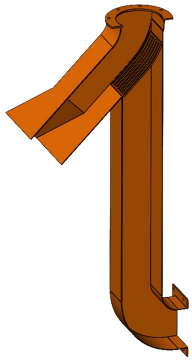


图5 分流输送通道

1.3 尾部扩散排放装置

通过脱泥预处理装置排出的水体仍含有一定浓度的泥沙。为最大程度减小泥沙排放对环境的影响,在每个脱泥预处理装置上增设尾部扩散排放装置,如图6所示,以此降低排放速度及调整排放方向。尾部扩散排放装置包括一个扩散锥管和位于锥管尾部的下压导流板。其中扩散锥管使水流从小头向大头逐渐扩散,可有效降低排放水体的压力和速度;下压导流板可进一步消耗水流能量,促使其发生转向,并最终向下排放。尾部扩散排放装置能够使排放水体更均匀、更分散地流向周围水域,减缓了水体流速。

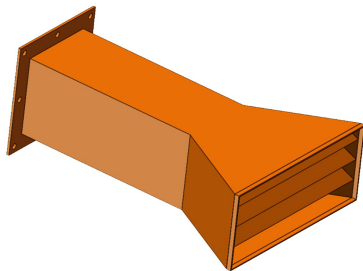


图6 尾部扩散排放装置

1.4 射流输送辅助试验装置

辅助试验装置进料斗下端采用电动泵喷射高速水流,在进料斗口形成吸力,将多金属结核输送至脱泥预处理装置核心组件,如图7所示。

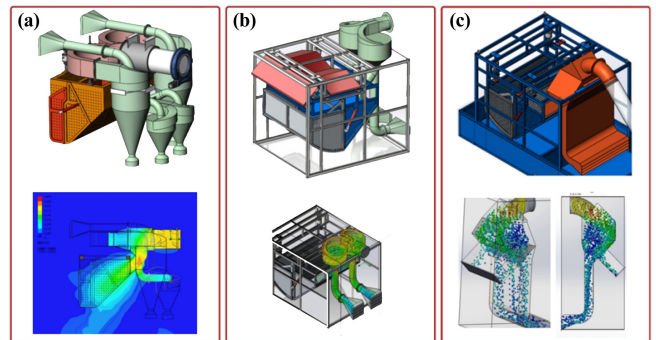


图7 射流输送辅助试验装置

2 模拟仿真优化

2.1 模型建立

为了深入分析深海多金属结核低扩散脱泥预处理装置的扩散效果,采用三维绘图软件建立了不同结构的脱泥预处理装置模型,如图8所示。



(a) 原始预处理装置; (b) 双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置;
(c) 直排拦阻网结构脱泥预处理装置

图8 脱泥预处理装置模型

2.2 仿真结果及分析

仿真试验中,初选输入管口径 25 cm,总输入流量 $0.0556 \text{ m}^3/\text{s}$ ($200 \text{ m}^3/\text{h}$), 输送速度 1.13 m/s ^[7]。不同流态下低扩散脱泥预处理模型仿真结果如表1所示。对比分析可知,总输入流量 $0.0556 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,各类脱泥预处理模型在流体流入料仓的体积量和速度上存在显著差异。原始预处理装置的流体流入料仓体积量平均值为 $0.0178 \text{ m}^3/\text{s}$, 占总输入流量的 32.01%, 流入料仓速度为 0.38 m/s , 表明该装置中流体对料仓的冲击最大; 双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置的流体流入料仓速度为 0.21 m/s , 约为原始预处理装置的 55.26%; 直排拦阻网结构脱泥预处理装置的流入料仓速度为 0.13 m/s ,

约为原始预处理装置的 34.21%,其对料仓的冲击最小。从趋势来看,脱泥预处理装置运行时,料仓排放口对料仓存在冲击力,料仓排放水流速度越小,冲击力越小,对料仓计量影响越小。

表 1 不同流态下低扩散脱泥预处理模型仿真结果

模型名称	流入料仓 体积量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流入料仓 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	底部排泥 出口体积量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	底部排泥 出口速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
原始预处理装置	0.017 8	0.38	0.012 9	0.21
双螺旋滚筒结构 脱泥预处理装置	0.023 5	0.21	0.032 1	0.27
直排拦阻网结构 脱泥预处理装置	0.015 0	0.13	0.040 6	0.22

在海底采矿中,沉积物悬浮扩散与流体冲击流速相关。通常流体冲击流速增大,沉积物悬浮扩散范围和强度增大^[8]。较小的流体冲击能够有效减少对沉积物颗粒的扰动,从而降低沉积物的再悬浮。从表 1 可知,原始预处理装置底部排泥出口体积量最小,双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置的底部排泥出口体积量约为原始预处理装置的 2.49 倍,直排拦阻网结构脱泥预处理装置的底部排泥出口体积量最大,达到 0.040 6 m^3/s ,约为原始预处理装置的 3.15 倍,表现出大量泥沙能有效通过底部排放。此外,直排拦阻网结构预处理装置底部排泥出口速度为 0.22 m/s ,虽然略高于原始预处理装置,但低于双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置。虽然直排拦阻网结构脱泥预处理装置的排泥出口体积量最大,但其相对较低的排泥出口速度有助于减少对水体的扰动,有利于沉积物的沉降和水体生态环境的保护。这表明在设计 and 选择海底采矿脱泥预处理装置时,需要综合考虑排泥出口体积量和排泥速度,以达到较好的环境保护效果。

2.3 试验验证与结果分析

2.3.1 试验方法

为了评估多金属结核样品低扩散脱泥预处理效果,在实验室进行了脱泥预处理试验。首先对多金属结核样品进行处理,具体流程如下:先将样品在水中浸泡以达到充分吸附饱和状态,随后进行滤水操作以除去样品表面附着的自由水,并对其进行初次称重;然后,加入已知质量的泥土,使样品达到预定的泥土含量(如图 9 所示);接着,通过进料口将含泥多金属结核样品置入低扩散脱泥预处理装置,进行清理操作,目的是去除样品中夹杂的非固结泥质物质;脱泥处理后,将样品置于称重料仓内称重,对比前后 2 次称重结果,计算样品脱泥率 D :

$$D = \left(\frac{C_{\text{原}} - C_{\text{脱}}}{C_{\text{原}}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_{\text{原}}$ 为脱泥前多金属结核含泥量; $C_{\text{脱}}$ 为脱泥后多金属结核含泥量。

若脱泥率超过 90%,则认为该低扩散脱泥预处理装置符合技术设计要求。



图 9 模拟多金属结核(含泥)

2.3.2 双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置试验结果

双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置脱泥试验过程出现了以下情况:

- 1) 进料射流的水流量较小,设备在水下阻力大,导致输送不理想;
- 2) 机构内的空气导致排空后进料斗口喷出大量水,无法形成持续输送;
- 3) 输送通道容易堵塞,处理过程不顺畅;
- 4) 处理后多金属结核样品表面仍存在大量泥沙,未能达到预期的除泥效果。

双螺旋滚筒结构预处理装置存在进料不稳定、堵料以及脱泥效果不理想的问题,难以满足试验要求。

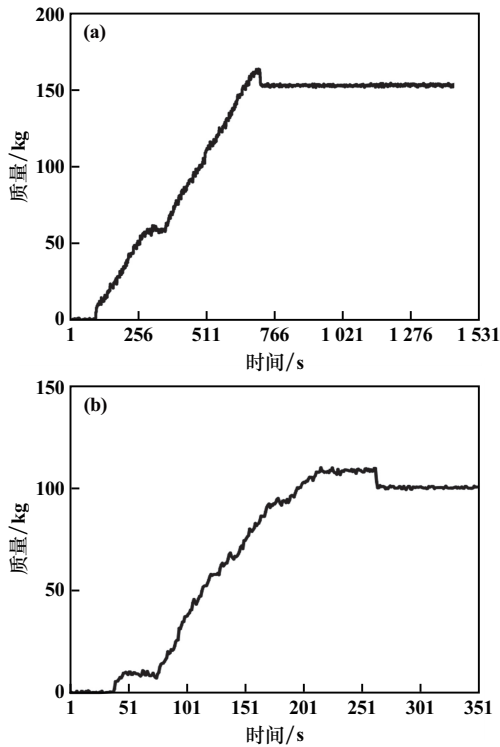
2.3.3 直排拦阻网结构脱泥预处理装置试验结果

直排拦阻网结构脱泥预处理装置脱泥试验结果如图 10 所示,脱泥率计算结果见表 2。试验 1 含泥率从 23.30%降至 0.46%;试验 2 含泥率从 17.40%降至 0.24%。试验 1 和试验 2 的脱泥率分别为 98.04%和 98.62%,表明在这 2 组试验条件下,直排拦阻网结构脱泥预处理装置处理极为有效,能够显著降低物料含泥量,验证了该装置的高效性和稳定性。

2.4 低扩散浊度监测

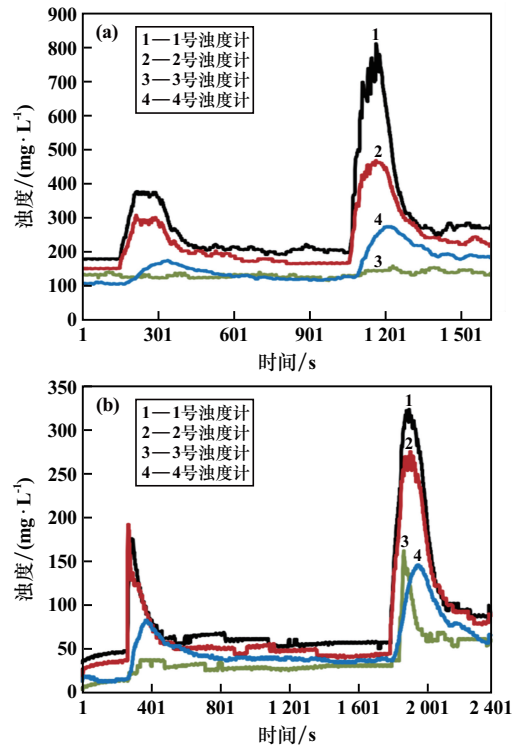
在直排拦阻网结构脱泥预处理装置上安装浊度计,以监测流体浊度变化,1 号浊度计安装在装置底部排泥口,2 号浊度计安装在多金属结核出料口,3 号浊度计安装在泵吸入口(环境),4 号浊度计安装在料仓尾部,如图 1 所示。

试验过程中不同位置浊度监测结果见图 11。



(a) 试验 1; (b) 试验 2

图 10 直排拦阻网结构脱泥预处理称重料仓测量曲线



(a) 试验 1; (b) 试验 2

图 11 不同位置浊度监测结果

表 2 直排拦阻网结构脱泥预处理装置试验结果

试验编号	带泥样品质量/kg	样品质量/kg	清洗后样品质量/kg	初始含泥率/%	最终含泥率/%	脱泥率/%
1	197.20	151.20	152.10	23.30	0.46	98.04
2	121.00	100.00	100.29	17.40	0.24	98.62

1号浊度计的浊度值最高,表明大部分泥沙能够通过直排拦阻网结构脱泥预处理装置从底部排放。2号浊度计的浊度值次于1号浊度计,表明直排拦阻网结构脱泥预处理装置在带泥样品进入料仓前已起到良好的脱泥效果。

从脱泥开始后的180 s内,浊度迅速升高,表明大量泥沙在该阶段被迅速分离并进入水中,使得水的浊度急剧上升。大概360 s后,浊度逐渐降低并最终趋于平衡,表明大部分泥沙在这期间迅速沉降到底部,从而导致水中悬浮颗粒减少,浊度下降并趋于稳定。

3号和4号浊度计位于料仓1 m处,浊度值变化较小,表明泥沙扩散范围较小,装置能够有效控制泥沙扩散,减少对周围环境的影响。

试验结果与仿真结果基本一致,说明直排拦阻网结构脱泥预处理装置脱泥效果在理论和实际应用中具有较高的一致性和可预测性,进一步证明了仿真模型在指导实际脱泥过程中的有效性和可靠性。

3 结论

针对深海多金属结核脱泥预处理过程,创新性地设计了双螺旋滚筒结构和直排拦阻网结构的2种深海多金属结核脱泥预处理装置。采用仿真模拟对2种脱泥预处理装置的流体动力学行为及脱泥性能进行深入分析。结果表明,直排拦阻网结构脱泥预处理装置在脱泥效率和流体冲击方面显著优于原始预处理装置和双螺旋滚筒结构脱泥预处理装置,具体表现为直排拦阻网结构脱泥预处理装置能更加有效地分离泥沙,减小对料仓的冲击力,降低设备的能耗和磨损。实验室试验结果表明,直排拦阻网结构脱泥预处理装置脱泥率98%以上,达到了脱泥率90%的要求,进一步证明了直排拦阻网结构脱泥预处理装置的高效性能。浊度变化趋势表明,直排拦阻网结构脱泥预处理装置能在初始阶段迅速分离泥沙,并在较短时间内使泥沙沉降,从而有效降低水中浊度。

参考文献:

- [1] 陈新明,吴鸿云. 深海底矿产资源开采技术及装备的发展与展望[J]. 矿业装备, 2011(8):24-27.
- [2] 张翼飞,杨金鹏,吕美东. 中国海底矿物资源现状及前景[J]. 南方农机, 2018,49(13):63.

(下转第15页)

- 矿冶工程, 2020, 40(1):16-21.
- [2] 丁祥. 互层岩体隧道爆破超欠挖控制技术[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3):75-80.
- [3] 赵勳, 肖明, 陈俊涛, 等. 考虑互层状岩体接触状态的地下洞室围岩稳定分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(2):243-250.
- [4] 张林. 砂岩泥岩互层地质隧道变形分析及控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1):1080-1085.
- [5] 任家苇, 左宇军, 林健云, 等. 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):39-43.
- [6] 吴博文. 软岩巷道围岩裂纹演化机制与大变形控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [7] 叶海旺, 韦文蓬, 周汉红, 等. 裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟[J]. 爆破, 2023, 40(4):44-51.
- [8] 楚博. 基于切槽孔的光爆层对边坡爆破效果的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2024.
- [9] 林杰, 刘少光, 李广斌, 等. 基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):6-10.
- [10] 宋俊生, 王雁冰, 高祥涛, 等. 定向断裂控制爆破机理及应用[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(1):16-28.
- [11] 李清, 郭洋, 刘航, 等. 切槽定向断裂控制爆破的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(12):79-83.
- [12] 石祥超, 陶祖文, 孟英峰, 等. 致密砂岩 Johnson-Holmquist 损伤本构模型参数求取及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2):3750-3758.
- [13] WANG Z, HUANG J, CHEN Y, et al. Dynamic mechanical properties of different types of rocks under impact loading[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):19147.
- [14] BORNSTEIN H, KUZNETSOV V, LU J P, et al. Characterisation and validation of the JWL equation of state parameters for PE4[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 164:104190.
- [15] 刘玉丰, 方芳, 李海谦, 等. 不耦合装药结构爆炸孔壁压力分布特性的数值模拟[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5):30-33.
- 引用本文:** 熊成宇, 张建, 刘向阳, 等. 互层状围岩隧道切槽爆破破岩规律研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):11-15.

(上接第5页)

- [8] 龙建辉, 赵邦强, 李坤. 顺层岩质边坡多级滑动模式及成因机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6):1156-1163.
- [9] 戴维森. 某高速公路多级边坡稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(2):51-55.
- [10] 王玉松. 岩质高陡边坡开挖稳定性分析及支护优化设计[D]. 贵阳:贵州大学, 2021.
- [11] 李山存. 露天矿边坡稳定性分析与数值模拟[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(3):26-33.
- [12] 李鑫, 苏有文, 王宽宽, 等. 采空区群条件下某露天矿高陡边坡稳定性分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(4):66-71.
- [13] 李书敏. 露天矿开采过程中边坡稳定性分析[J]. 世界有色金属, 2023(7):40-42.
- [14] 彭岩岩, 宋南, 刘宇航, 等. 南芬露天铁矿边坡开挖稳定性实验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6):18-23.
- [15] 高峰, 吴晓东, 周科平. 基于主成分分析和 PSO-ELM 算法的排土场稳定性预测模型[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(5):658-668.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [17] 邓东平, 石柱, 彭耀文. 卸荷损伤效应下开挖边坡稳定性极限平衡分析[J/OL]. 工程地质学报:1-12[2024-07-08].
- 引用本文:** 卢栋, 富国凯, 董贤阳, 等. 不同开挖状态下高陡边坡破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):1-5.

(上接第10页)

- [3] 邬长斌, 刘少军, 戴瑜. 海底多金属硫化物开发动态与前景分析[J]. 海洋通报, 2008, 27(6):101-109.
- [4] 阳宁, 王英杰. 海底矿产资源开采技术研究动态与前景分析[J]. 矿业装备, 2012(1):54-57.
- [5] JONES D O B, KAISER S, SWEETMAN A K, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Plos One, 2017, 12(2):e0171750.
- [6] 岳发强, 朱永楷, 胡宪铭. 海底采矿技术的研究与进展[J]. 黄金, 2013, 34(1):35-37.
- [7] 彭建平, 李俊, 程阳锐, 等. 深海多金属结核集矿装置水力输送流场分析与试验[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2):1-4.
- [8] 张东宽, 刘美麟, 夏建新. 深海多金属结核采集过程对沉积物扰动试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3):20-23.
- 引用本文:** 吴冬华. 深海多金属结核开采过程中脱泥预处理装置研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):6-10.