



深海多金属硫化物开采技术

李 艳^{1,2}, 梁科森¹, 李 皓¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2. 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 长沙 410012)

摘 要: 海底块状多金属硫化物大多以三维矿体形式分布于水深 1500~3000 m 范围, 其剥削、采集方法是深海多金属硫化物资源开采利用的关键技术。首先通过对海底多金属硫化物样品开展围压条件下的三轴压缩试验, 获得硫化物的各项物理力学特性参数。针对机械刀具和水射流等不同破碎方式开展对比分析, 确定优先采用螺旋滚筒采掘头切削方式破岩, 进一步开展滚筒推进方式、排布方式研究, 提出高海水围压条件下采掘头设计方案; 以绿色、高效采集为目标, 开展多金属硫化物采集技术研究, 通过对比分析确定采用一体式采集头更具优势。最后提出深海多金属硫化物采-集一体化的采矿车总体设计方案, 为未来海底多金属硫化物采矿机的设计提供技术参考。

关键词: 多金属硫化物; 切削; 采集; 采矿车

文章编号: 1004-0609(2021)-10-2889-13

中图分类号: TD857

文献标志码: A

引文格式: 李 艳, 梁科森, 李 皓. 深海多金属硫化物开采技术研究[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2889-2901. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37998

LI Yan, LIANG Ke-sen, LI Hao. Mining technology of deep-sea polymetallic sulfide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2889-2901. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37998

陆地矿产资源随着航空航天、轨道交通和动力电池等行业的快速发展而急剧消耗, 为了应对我国矿产资源储备严峻的形势和维持社会的可持续发展, 必须开拓新的可替代资源^[1]。在浩瀚的海洋中蕴藏着丰富的深海金属矿产资源, 已经成为各国竞相勘探开发的重要战略目标^[2]。多金属硫化物因为赋存水深较浅, 距离陆地较近, 金属种类丰富及富含大量贵金属, 被认为是有望最先实现商业开采的海底矿物^[3-6]。海底多金属硫化物由火山口岩浆喷冒而出形成烟囱状的矿体堆积于海底, 并且水深越深, 多金属硫化物(Seafloor massive sulfide, SMS)受到的海水围压越大, 从而影响矿体的切屑。在高围压作用下, 如何把矿体从崎岖不平的基岩上剥离下来, 并顺利收集至采矿车内是深海多金属硫化物开采技术的核心难点。

参照陆地成熟的矿物开采技术, 国内外学者提出了不同的 SMS 开采方案。加拿大鸚鵡螺矿业公司提出用辅助采矿机、主采矿机和集矿机三台采集设备进行 SMS 的开采^[7]。辅助采矿机搭载采掘头负责处理粗糙地形, 创建矿物开采工作面; 主采矿机用螺旋滚筒组成的截割部连续切割并破碎矿物; 集矿机负责将破碎好的矿石吸入采矿车, 并通过提升管道系统输送至海面。荷兰 IHC 公司提出了用螺旋滚筒切削, 并在滚筒后方装配抽吸管道的 SMS 采矿概念机^[8]。荷兰学者 SPAGNOLI 等^[9-10]提出了一种螺旋滚筒垂直向下进行开采的设备结构。日本采用挖掘试验机 and 集矿试验机两台水下作业设备于 2017 完成了 SMS 的开采试验, 并成功将水下约 1600 m 深的多金属硫化物输送至采矿船^[11]。刘少军等^[12-13]以高效截割和环境保护为目标, 提出了双滚

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674286); 湖南省科技重大专项(2020GK1020); 湖南省科技计划项目(2019SK2271)

收稿日期: 2021-07-20; **修订日期:** 2021-09-06

通信作者: 李 艳, 教授, 博士; 电话: 13677353895; E-mail: lylsjhome@163.com

筒并搭载收集盖的开采方案。陈新明等^[14]提出了一种使用螺旋滚筒切削,在滚筒下方安装收集板的开采装置。谢超等^[15]则提出在滚筒后方加装传送带进行矿物输送。目前国内外学者提出了众多 SMS 开采方案,但是对于开采技术的深入研究少有报道。

研制对环境扰动小,能够高效切割 SMS 矿体的绿色采集技术对深海矿产资源开采至关重要。本文对 SMS 样品进行了围压条件下的三轴压缩试验,获取硫化物的物理力学特性参数并确立其本构模型。随后对矿物的破碎方式、采掘头结构和集矿方式进行了研究,提出了高效、环保的采-集一体化深海作业采矿车设计方案,对将来的 SMS 开采技术发展具有借鉴意义。

1 多金属硫化物力学特性

本文从中国大洋样品馆申请一块来自西南印度洋合同矿区的天然 SMS 样品,其照片如图 1 所示,样品来自 34IV-SWIR-S035TVG08 航段。为测定其物理力学特性参数,将它加工成尺寸为直径 25 mm×50 mm 的试样成品,如图 2 所示。整个加工



图 1 天然 SMS 样品照片

Fig. 1 Photo of natural SMS samples



图 2 加工成的试样成品照片

Fig. 2 Photo of processed sample finished products

过程如下:先采用圆柱取样机钻取长条,然后采用切割机将其切成 50 mm 长的圆柱体,再采用磨平机将两端磨平,直至规定尺寸。

三轴压缩试验在中南大学力学测试中心的岩石三轴试验系统 MTS815 上进行。试验流程如下:1) 试验前对试样上明显的孔洞进行修补,以防止高围压油液击穿热缩膜造成试验失败;2) 将试样两头对称放置金属压头,然后在试样表面用热缩膜进行包覆;3) 压头上开槽安装密封圈以防止加载过程中油液渗入试样内部;4) 选取 2 MPa、5 MPa、8 MPa、10 MPa 的围压条件进行试样的三轴压缩试验,测定数据如表 1 所示。

表 1 海底多金属硫化物三轴压缩试验测试数据

Table 1 Triaxial compression test data of subsea polymetallic sulfide

Sample No.	Lateral confining pressure/MPa	Maximum failure load/kN	Axial peak compressive stress/MPa
1-1-1	2	21.32	42.61
1-1-2	2	20.08	40.39
1-2-1	5	27.73	55.60
1-2-2	5	21.08	42.94
1-3-1	8	25.53	51.68
1-3-2	8	32.87	66.22
1-4-1	10	41.03	82.54
1-4-2	10	26.52	53.94

试样测试数据取两组轴向峰值压缩应力的均值,通过拟合来计算 SMS 的内摩擦角、内聚力等参数。根据 Mohr-Coulomb 强度准则理论^[16],获得的拟合曲线若为 $y = mx + \sigma_{\mu c}$,则内摩擦角计算公式为

$$\varphi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad (1)$$

内聚力计算公式为

$$c = \sigma_{\mu c} \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (2)$$

如图 3 所示,试样得到的拟合曲线为 $y = 3.2952x + 33.895$, $R^2 = 0.9855$ 表明拟合效果较好。计算得内摩擦角 $\varphi_2 = 32.30^\circ$,内聚力 $c_2 = 9.34$ MPa,同时可获得单轴抗压强度为 33.895 MPa。再用质量

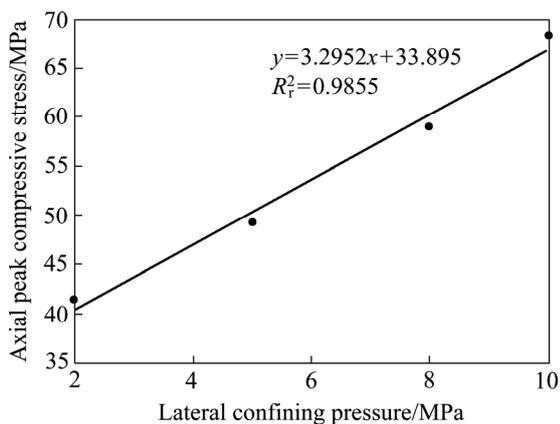


图 3 围压-轴向峰值压缩应力拟合曲线

Fig. 3 Confining pressure-axial peak compression stress fitting curve

体积法测量矿物的干密度、湿密度及孔隙率, 最终得到的天然 SMS 物理力学特性参数, 如表 2 所示。利用获得的 SMS 物理力学特性参数, 计算得到 HJC 材料本构模型参数, 并将其应用到后续矿体破碎和采掘头设计的仿真研究当中。HJC 模型常用于分析大应变非线性动力学中, 还能很好地模拟 SMS 在海底受到的高围压^[17-18]。

2 矿体破碎方式研究

深海多金属硫化物由于其独特的断裂构造造成矿机理, 大多呈现崎岖不平的烟囱体堆积在海底, 采用合适的破碎方式把矿体从基岩上剥离下来, 并尽可能减少破碎基岩时造成的刀具磨损和崩齿状况是开采过程中的关键技术。常用的岩石破碎方式有机械刀具破岩和水射流破岩。考虑到多金属硫化物与陆地煤矿材料相似, 因此采用了水射流冲击破岩和目前采矿/采煤过程中应用广泛的滚压刀具和切削刀具破岩开展 SMS 的破碎研究。矿体的本构模型采用 HJC 模型, 模型中的参数可通过第 1 节测定的 SMS 物理力学特性参数计算获得。

表 2 天然 SMS 样品的力学特性参数

Table 2 Mechanical characteristic properties parameters of natural SMS samples

Dry density/ (g·cm ⁻³)	Wet density/ (g·cm ⁻³)	Uniaxial compressive strength/MPa	Cohesion/ MPa	Internal friction angle/(°)	Porosity/ %
3.050	3.262	33.895	9.34	32.30	20.94

2.1 盘形滚刀切削破碎研究

采用标准 17in 单刃窄型盘形滚刀为原型设计滚压刀具, 忽略刀轴、轴承等结构, 简化滚刀模型为刀圈模型。简化矿体模型为六面体模型, 尺寸为 200 mm×160 mm×100 mm。为了防止刀圈偏斜等危险工况导致模拟失真, 限制刀圈 Y、Z 轴平动自由和 X、Y 轴转动自由。施加刀圈进给速度约束, 矿体和盘刀刀圈之间设置面-面侵蚀接触以描述接触网格的侵蚀破坏, 矿体底面设置为固定约束, 垂直面添加无反射边界条件来拟合矿体真实大小, 垂直面及顶面添加均匀面载荷以模拟矿体在海底受到压力。滚刀破岩仿真示意模型如图 4 所示。

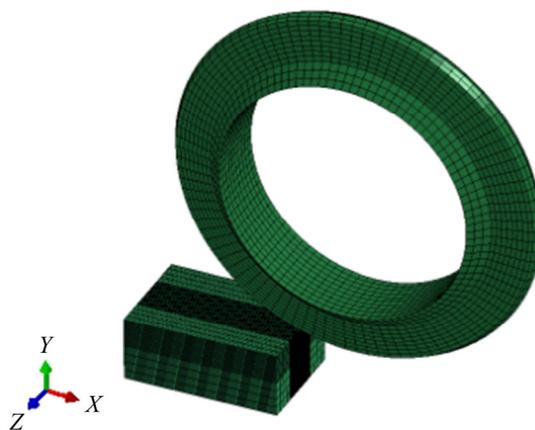


图 4 滚刀破岩仿真示意模型

Fig. 4 Rock breaking simulation schematic model of hob

切削深度和切削速度等工况参数是决定盘形滚刀切削力主要因素, 同时围压对 SMS 矿体切削过程受力影响非常显著。在能耗正交分析中位于第一水平, 本文参照工程施工数据取值, 研究切削深度为 4~10 mm, 切削速度为 2~8 r/min 和围压为 0~30 MPa 时对盘形滚刀破岩的破碎性能影响。

2.2 镐形截齿切削破碎研究

参照 MT/T 246—2006 截齿标准确定镐形截齿尺寸, 忽略合金头焊接等结构, 由于截齿上下侧围

压的不平衡性对破碎过程影响较小, 简化截齿齿座模型为截齿模型, 矿体模型尺寸为 200 mm×160 mm×100 mm。确定镐形截齿和矿体的几何模型如图 5 所示, β 为截齿安装角, 根据工程实际多取 45°。同样在矿体垂直面及顶面添加均匀面载荷以模拟海底压力, 矿体其他约束条件同 2.1 节。镐形截齿破岩仿真模型如图 6 所示。

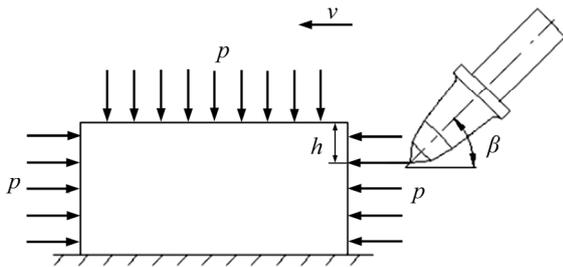


图 5 镐形截齿破岩几何模型示意图
Fig. 5 Schematic diagram of geometric model of rock breaking with pick

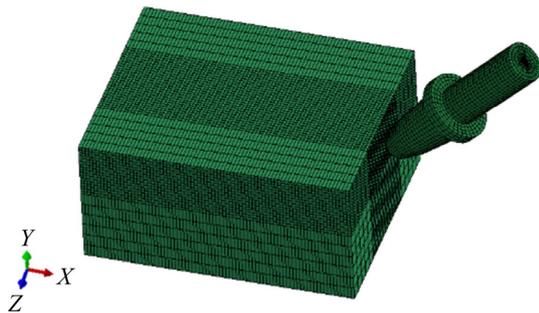


图 6 镐形截齿破岩仿真示意模型
Fig. 6 Rock breaking simulation schematic model of pick

根据对截齿破碎性能影响显著性分析可以得到, 切削深度、切削速度和海水围压在能耗正交分析中位于第一水平。参照工程施工数据取值, 研究当切削深度为 15~30 mm, 切削速度为 1.5~3 r/min, 围压为 0~30 MPa 时对镐形截齿破岩的破碎性能影响。

2.3 水射流冲击破碎研究

水射流在围压下高速冲击破碎多金属硫化物

过程是一种高压大位移问题, 选取 Gruneisen 方程描述射流状态方程, 方程中各参数取值为表 3 所示。

水射流冲击破碎硫化物矿体的几何模型如图 7 所示。采用二维正视图描述水射流圆柱和六面体矿体。矿体几何尺寸为 25 mm×25 mm×10 mm, 水射流几何尺寸为 1 mm×1 mm×17.5 mm。在矿体垂直面及顶面添加均匀面载荷以模拟海底压力。

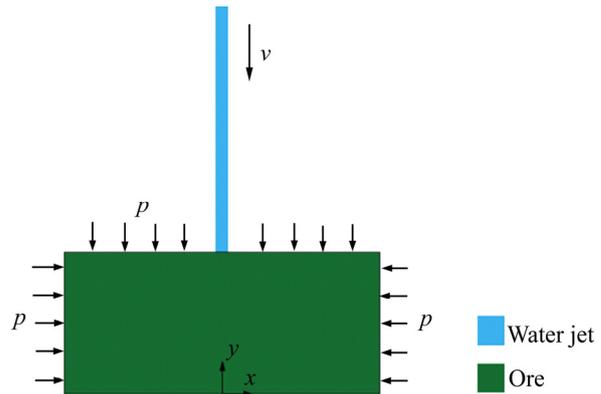


图 7 水射流冲击破岩几何模型
Fig. 7 Geometric model of rock breaking by water jet impact

在工程作业和试验操作中, 水射流主要参数调节分别为加压泵出口压力和喷嘴直径, 两者可以有效控制射流速度和射流半径。由于射流半径在作业过程中调控麻烦, 因此, 本文主要研究在固定水射流靶距和半径的前提下, 研究当水射流压力差为 50~140 MPa, 围压为 0~30 MPa 时对破岩的破碎性能影响。

2.4 破碎方式确定

在不同破碎方式的适用性讨论中, 必须充分了解破碎效果的评价指标, 从而为具体破碎方式的选择和采集设备设计奠定基础。SMS 破碎性能指标可参考陆地采煤机, 主要包括破碎力、破碎能耗、生产率、载荷波动、块度和刀具磨损等。其中, 破碎力均值是判断破碎过程中采矿设备负载能力的一个重要特征量, 峰值反映了设备的负载极限。此外,

表 3 水射流状态方程参数

Table 3 Water jet equation of state parameters

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	α	E/J
1000	1647	1.921	-0.096	0	0.35	0	2.86×10^{-6}

块度和刀具磨损也是判断采矿设备破碎性能的重要特征量, 但因其量化指标难以由目前数值模拟技术获取, 暂不作讨论。

破碎比能耗由破碎能耗体积学说可用下式计算:

$$H_w = \frac{Pt}{3.6V} = \frac{\bar{F}v_j t}{3.6V} \quad (3)$$

式中: P 为不同破碎方式的破碎功率, kW; t 为破碎过程时间, h; V 为 t 时间内多金属硫化物破碎体积, m^3 ; \bar{F} 为平均破碎力, kN; v_j 为破碎速度, m/s; H_w 为截割比能耗, 在仿真模拟中通常可以认为是刀具所做的功与切槽体积的比值。其值越小, 破碎效率越高。

多金属硫化物破碎过程中的年生产率(Q_y)可用下式计算:

$$Q_y = V \times \rho \times \xi \times d_y \times h_d \times 3600 / 1000 \quad (4)$$

式中: ρ 为多金属硫化物平均密度; ξ 为系数; d_y 和 h_d 的乘积为全年生产作业工作时长。单位生产率是衡量破碎性能的重要特征量, 在仿真模拟中, 生产率通常可以简化为剥落矿体质量与仿真时长的比值。其值越大, 破碎效率越高。

载荷波动系数是衡量破碎过程中载荷波动特性的重要特征量, 可对采掘机进行改进和优化, 其值越大, 稳定性越差, 载荷波动越严重。机械刀具破载荷波动系数计算公式为

$$\gamma_F = \sigma_F / \bar{F} \quad (5)$$

载荷的均值如下:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (6)$$

式中: \bar{F} 为机械刀具破岩过程平均受力; F_i 为数值模拟中第 i 个增量步输出刀具反作用力; n 表示增量步数。

表 4 不同破碎方式破碎性能指标直观分析表

Table 4 Intuitive analysis table of crushing performance indexes of different crushing methods

Crushing method	Mean cutting force/kN	Peak cutting force/kN	Cutting specific energy consumption/(MJ·m ⁻³)	Unit productivity/(t·h ⁻¹)	Load fluctuation coefficient
Hob	4.89–47.49	11.65–88.57	17.23–179.36	1.13–4.35	0.39–0.81
Cutting tool (pick)	2.79–37.18	10.16–66.14	2.83–33.21	10.51–30.71	0.40–0.88
Water jet	–	–	118.03–1315.15	16.17–180.18	–

机械刀具载荷标准差 σ_F :

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (7)$$

表 4 所示为机械刀具(分为滚压刀具和镐形截齿切削刀具)以及水射流对 SMS 破碎过程中破碎性能指标的直观分析表。

由表 4 可以看出, 镐形截齿切削刀具在切削力均值、切削力峰值、截割比能耗以及单位生产率上均优于滚压刀具。在载荷波动系数上, 两者相差不大, 这主要是因为滚压刀具主要靠施加在矿体表面的法向载荷来破碎 SMS 矿体, 破碎硬岩能力强。而硫化物矿体相当于陆地上中等硬度的煤, 多适用于切割破碎开采。同时滚压刀具在矿物破碎过程中主要依靠冲击滚压破坏, 对矿物产生和扩展裂纹的能力弱于镐形截齿切削刀具, 导致其单位体积能量消耗水平远大于切削刀具并且破岩能力低于切削刀具。

高速水射流冲击破碎多金属硫化物可以大大增加采矿设备的效率, 即单位生产率远高于其他两种方式, 但由于水射流冲击破碎方式主要依靠高速冲击矿体使其在动态载荷作用下破碎, 一般只能冲击破碎抗压强度低于水射流的矿体。而多金属硫化物抗压强度随围压增加成比例增加, 因此在高围压条件下水射流冲击破碎多金属硫化物所需消耗的能量远大于机械刀具。综合三种多金属硫化物破碎方式, 在围压适应性条件下应该采用镐形截齿切削刀具的破碎方式, 并可将其装载在螺旋滚筒采掘头上。

3 螺旋滚筒采掘头设计

采掘头开采要尽量满足效率高、比能耗低, 切削后所得到的矿体颗粒大小合适, 以及所受到截割阻力和进给阻力比较均衡、振动小等要求。海底

SMS 可参照陆地煤岩采用螺旋滚筒采掘头进行切削,但滚筒的推进方式和排布方式会影响切削的载荷平均值、波动性及比能耗。本文参考德国艾柯夫 CM 系列连续式采煤机和鸚鵡螺采矿车的螺旋滚筒几何参数,建立螺旋滚筒采掘头模型,对滚筒的推进方式和排布方式进行研究,具体参数如表 5 所示。螺旋滚筒采掘头切削仿真分析中的矿体模型同样采用 HJC 模型,模型参数可通过第 1 节中 SMS 三轴压缩试验获得的力学参数计算得到。矿体底面设置为固定约束,垂直面及顶面添加均匀面载荷 10 MPa 以模拟海底压力。

表 5 螺旋滚筒采掘头模型参数

Table 5 Model parameters of spiral drum excavating head

Parameter	Value
Roller width, L / mm	1000
Drum diameter, D / mm	1000
Cutting depth, H / mm	200
Traction speed, v_a /($m \cdot s^{-1}$)	0.1
Rotating speed of drum n /($r \cdot min^{-1}$)	40

3.1 滚筒推进方式研究

螺旋滚筒切削矿石,按其推进方式可分为三种:挖槽式、直进式和横进式。海底多金属硫化物螺旋滚筒的推进方式关系到滚筒受力状态及其振动特性,去掉端盘和叶片,滚筒模型简化如图 8 所示。针对滚筒推进方式开展数值模拟研究。

三种推进方式下截齿运动方式示意图如图 9 所示。

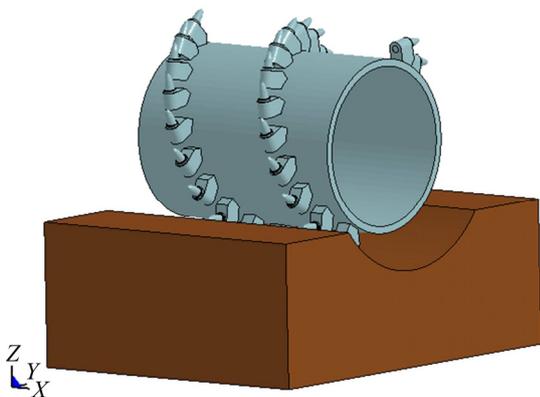


图 8 推进方式研究模型

Fig. 8 Propulsion method research model

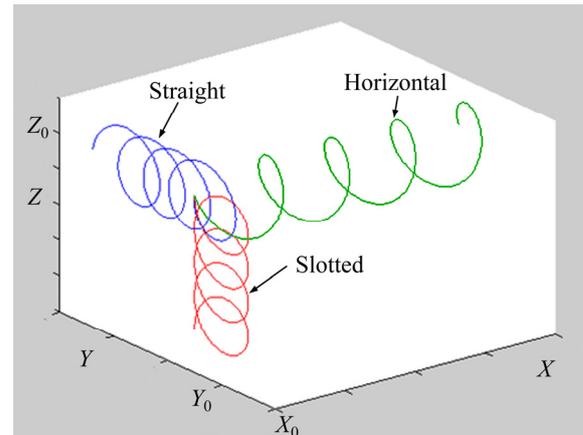


图 9 推进方式研究模型

Fig. 9 Pick movement in different propulsion modes

在切削过程中滚筒受到的截割阻力、进给阻力和侧向阻力的平均值和最大值如表 6 所示。从表 6 中可知,挖槽式滚筒所受三向阻力都为最大值,直进式相比横进式截割阻力大,但进给阻力比横进式略低。横进式滚筒横向进给滚动切削,参与切削的只有进给端前面几个截齿,而直进式滚筒向前滚动切削,同时参与切削的截齿较多,因此,横进式截割阻力是最小的,但滚筒横向进给时,是截齿侧面切入矿体,而不是类似于挖槽式和直进式,截齿齿尖以一定角度切入矿体,所以横进式进给阻力比直进式略高。因此,从截齿的受力状况来看,直进式截齿受力优于另外两种推进方式,另外,直进式通过提升液压缸改变滚筒的切削深度,可以改变截齿的受力大小及受力周期占比。

不同推进方式下滚筒切削海底 SMS 矿体的破碎性能统计量如表 7 所示。由表 7 可知,挖槽式推进方式的滚筒三向阻力波动性相比另外两种推进方式是最小的,即挖槽式切削滚筒的平稳度最好,原因是挖槽式滚筒与矿体接触面积最大,同时与矿体接触的齿数最多。并且挖槽式的单位生产率是最大的,相同时间内挖槽式推进滚筒从硫化物矿体中剥离的破碎块最多;挖槽式比能耗最低,即能量利用率最高。因此,从破碎性能方面分析,采掘头滚筒以挖槽式方式推进优于另外两种推进方式。

3.2 滚筒排布方式研究

单个滚筒在切削 SMS 矿体时会产生较大的侧向力,侧向力不仅对切削矿体没有益处,而且还会

表 6 不同推进方式采掘头滚筒所受三向阻力统计量

Table 6 Three-way resistance statistics of excavating head drum with different propelling modes

Propulsion method	Cutting resistance		Feed resistance		Lateral resistance	
	Average value/kN	Maximum value/kN	Average value/kN	Maximum value/kN	Average value/kN	Maximum value/kN
Slotted	212.58	721.64	211.26	1105.38	38.60	304.34
Straight	174.22	678.93	42.66	356.68	1.10	128.08
Horizontal	59.42	247.24	55.02	236.82	18.90	98.13

表 7 不同推进方式采掘头滚筒切削破碎性能

Table 7 Cutting and crushing performance of excavating head drum with different propelling modes

Propulsion method	Cutting resistance volatility	Feed resistance volatility	Lateral resistance volatility	Unit productivity/(t·h ⁻¹)	Specific energy consumption/(MJ·m ⁻³)
Slotted	0.92	1.13	1.97	471.78	15.16
Straight	1.01	2.41	2.60	187.25	19.14
Horizontal	2.14	1.88	2.75	85.94	22.24

通过截割臂传导至采矿车上, 导致采矿车行走不稳, 严重时甚至产生侧翻。为了保证采矿车在开采途中的安全性, 采掘头的设计应当减小侧向力的影响。采掘头上通常会安装多个螺旋滚筒来提高采矿的单位生产率, 采矿车受到的侧向力可通过合理排布滚筒的位置进行抵消。本文忽略液压设备等结构的影响, 采用只有两个螺旋滚筒的采掘头, 研究滚筒分别在横轴式和纵轴式排布方式下采掘头力学特性及破碎性能, 螺旋滚筒模型所用参数如表 5 所示。

横轴式采掘头的两个螺旋滚筒安装在一根同心传动轴上, 在截割壁两侧呈对称分布, 模型如图 10 所示。滚筒在横轴式排布方式下, 切削 SMS 矿体时, 单个滚筒及截割臂所受到的三向阻力平均值及采集率等如表 8 所示。由表 8 可以看出, 截割臂的截割阻力和进给阻力的平均值约等于单个滚筒的两倍, 而截割臂的侧向力较小, 接近于 0, 这说明两个滚筒在切削时的截割阻力和进给阻力的方向相同, 而侧向阻力的方向相反。因此, 采用横轴排布方式可以使两个滚筒切削的侧向力相互抵消, 有效降低侧向力对截割臂的影响。

纵轴式采掘头的两个螺旋滚筒安装在两条传动轴上, 同样相互对称地部署在截割臂两边, 模型如图 11 所示。纵轴式采掘头切削 SMS 时, 单个滚筒及截割臂所受到的三向阻力平均值及采集率等

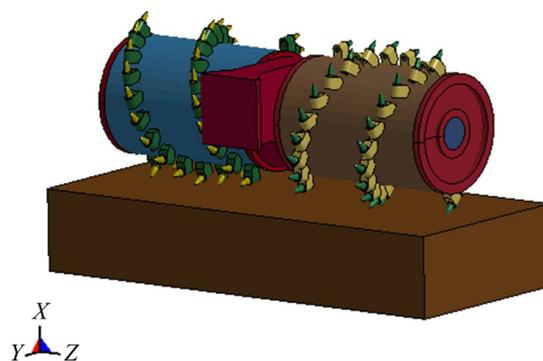


图 10 横轴排布方式滚筒研究模型

Fig. 10 Research model of roller with horizontal axis arrangement

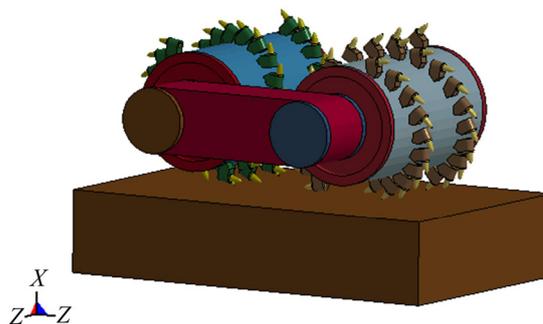


图 11 纵轴排布方式研究模型

Fig. 11 Research model of vertical axis arrangement

如表 9 所示。由表 9 可以看出, 截割臂的进给阻力和侧向阻力的平均值约等于单个滚筒的两倍, 而截割臂的截割阻力明显减小, 这说明两个滚筒在切削时的进给阻力和侧向阻力的方向相同, 而截割阻力

表8 横轴式排布滚筒及截割臂受到的三项阻力及破碎性能统计量

Table 8 The three resistances and crushing performance statistics of transverse axis roller and the cutting arm

Horizontal axis	Average cutting resistance/kN	Average value of feed resistance/kN	Average lateral resistance/kN	Acquisition rate/(t·h ⁻¹)	Specific energy consumption/(MJ·m ⁻³)
Roller	109.19	147.21	66.53	—	—
Cutting arm	214.21	308.33	0.34	414.95	27.62

表9 纵轴式排布滚筒及截割臂受到的三项阻力及破碎性能统计量

Table 9 The three resistances and crushing performance statistics of the longitudinal axis roller and the cutting arm

Vertical axis	Average cutting resistance/kN	Average value of feed resistance/kN	Average lateral resistance/kN	Acquisition rate/(t·h ⁻¹)	Specific energy consumption/(MJ·m ⁻³)
Roller	106.32	186.56	66.53	—	—
Cutting arm	6.72	357.00	105.38	335.53	17.82

的方向相反。若使采掘头侧向与滚筒截割方向一致，则采掘头受到的侧向力也趋于0。

比较两种排布方式下采掘头受到的三向阻力，可见横轴式和纵轴式都能减小侧向力。比较采掘头的破碎性能，横轴式采掘头因为两个滚筒破碎区域相互重叠少，不会受另外一个滚筒的影响，所以横轴式采集率高；纵轴式采掘头的破碎区域有部分重叠，导致采集率较低，但两个滚筒彼此产生的应力波有助于加快矿体的破碎，从而减少比能耗。

4 集矿方式研究

深海矿物的收集一直是各国深海矿产开发研究的重点，如何高效地将螺旋滚筒破碎后的矿石收集起来是研究的难点所在。集矿头需将矿物颗粒和海水组成的混合物抽吸至采矿车内，是一个固液两相流的运动过程。从深海矿物开采方案来看，矿物的收集可分为独立式和一体式采集方案。独立式采集方案即先用螺旋滚筒对矿物进行破碎，并将其堆积于海底地面，然后再单独使用抽吸系统进行收集。一体式采集方案则对破碎后的矿物直接进行收集，采矿机同时具备切削和收集的功能。根据集矿头的收集方式，可分为机械式、水力式和复合式。机械式采用机械装置收集矿物，但集矿阻力大、效率低，且容易造成堵塞；水力式利用抽吸水流带动矿物周围流场进而达到收集矿物的目的，但同样存在能耗高、效率低下的问题；复合式是将机械式和

水力式整合起来使用，这种方式适适应性强，能有效提高集矿效率，被认为更适合深海矿物的收集^[19-21]。本文基于复合式集矿法，并分别对独立式和一体式的两种不同集矿头抽吸特性进行研究。

4.1 独立式集矿头

在使用采掘头对海底 SMS 进行破碎后，下一步就是要使用集矿头对矿物进行收集。借鉴挖泥船铰刀的设计经验^[22]，构建多金属硫化物铰刀式集矿头三维模型，如图 12 所示。根据铰刀式集矿头的工作原理，建立铰刀式集矿头抽吸流域模型，如图 13 所示。运用 Fluent 软件对铰刀式集矿头流域进行固液两相流数值模拟，通过分析不同铰刀转速(0~50 r/min)和颗粒粒径大小(5~40 mm)，验证铰刀式集矿头的抽吸特性。

4.2 一体式集矿头

多金属硫化物一体式开采方案中，矿物的收集需要利用螺旋滚筒对破碎后的矿物产生的带动作用，并结合抽吸管道的水流作用进行收集，总体上属于复合式收集方案。而抽吸系统的布置将由螺旋滚筒的排布方式决定，当螺旋滚筒“纵轴式”排布时，破碎后的多金属硫化物多集中于两螺旋滚筒中间，因此抽吸入口可布置于两滚筒中间空隙上方；当螺旋滚筒“横轴式”排布时，破碎后的多金属硫化物多集中于螺旋滚筒后方，因此抽吸入口可布置于螺旋滚筒后方。由第 3 节可知，相对于“纵轴式”

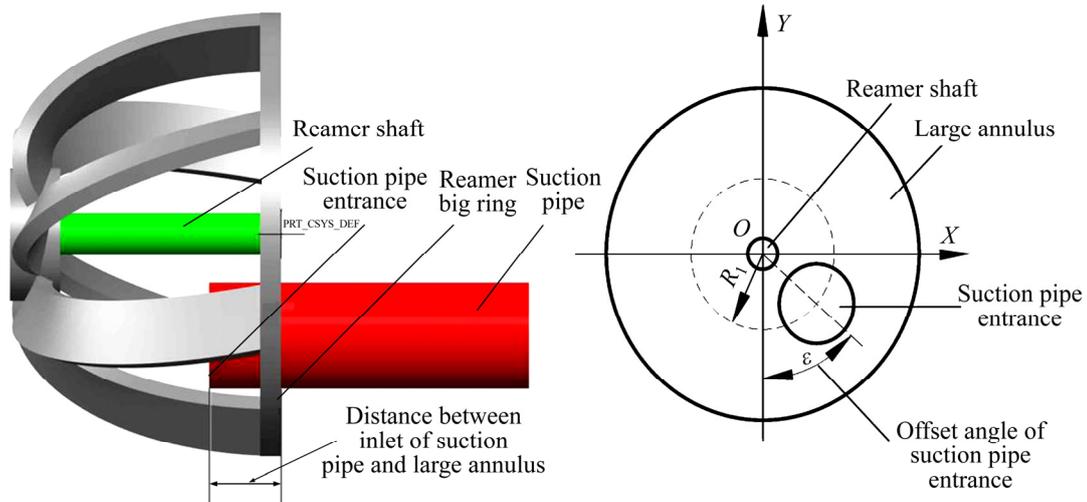


图 12 铰刀集矿头三维模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of 3D model of reamer gathering head

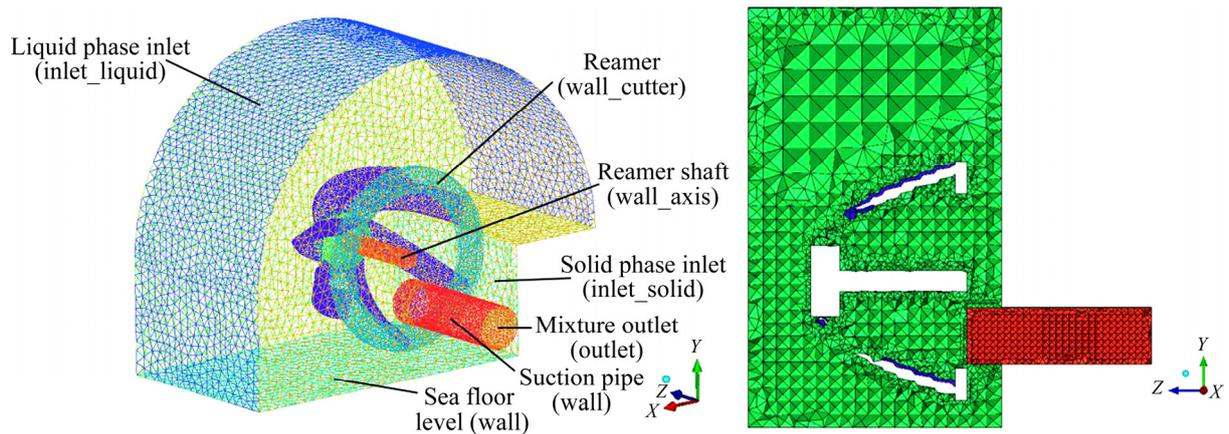


图 13 铰刀抽吸流域网格模型

Fig. 13 Reamer suction watershed grid model

排布, “横轴式”排布的螺旋滚筒生产率更高, 因此, 本文将抽吸管道布置在螺旋滚筒后方。抽吸管道入口中心点尽可能靠近螺旋滚筒, 距螺旋滚筒中心点横向距离 510 mm, 竖直距离 370 mm。对一体式集矿头流域进行矿物粒径 5~40 mm 和不同抽吸入口结构(有无导流罩)的固液两相流数值模拟, 分析一体式集矿头的抽吸特性。整体流域模型和流场网格模型如图 14 和图 15 所示。

对比独立式和一体式集矿头抽吸特性, 两种采集方案都能有效地收集矿物, 但为了避免管道堵塞和过小粒径的颗粒扩散导致羽流, 应该控制破碎后矿物的粒径范围在 10~30 mm。其中铰刀式集矿头在考虑抽吸效率和颗粒溢散的情况下, 铰刀的转速

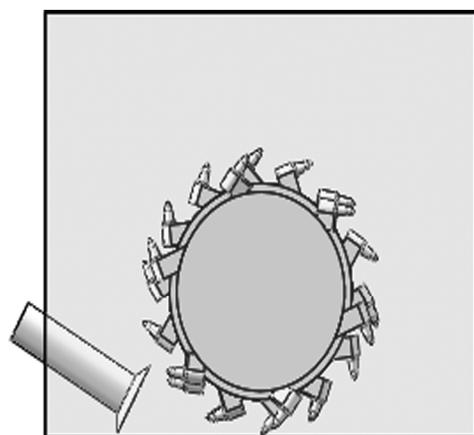


图 14 整体流域几何模型

Fig. 14 Overall watershed geometry model

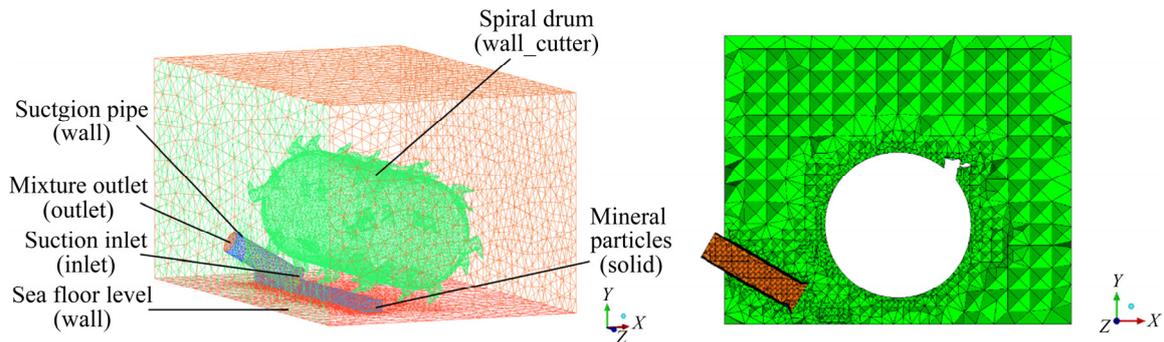


图 15 螺旋滚筒整体网格模型

Fig. 15 Integral mesh model of spiral drum

范围应控制在 20~40 r/min。一体式集矿头加装导流罩后,抽吸管道的入口处速度比无导流罩更加均匀、稳定,有利于 SMS 的收集。由于深海矿产资源其特有的赋存环境导致开采过程具有很多不可控性,将多金属硫化物的破碎和收集集于一体,可减少采矿机械数量,降低开采成本。另外,一体式采集方案借助螺旋滚筒的带动作用和水流作用将矿物颗粒送至集矿口附近,再通过配置导流罩能抑制较小切削碎片向外扩散形成羽流,减少采集装置对周围海域生态环境的扰动。因此,相比独立式开采方案,采用一体式开采方案更具有优势,但一体式集矿头主要靠水流作用将矿石碎片收集,能耗较大,需要合理设置抽吸口形状、数目以及位置等降低能耗。

5 硫化物采矿车设计

海底多金属硫化物采矿车是海底矿物开采系统开展采矿作业的基础核心装备,主要承担矿物的破碎与收集作用。但是海底采矿作业环境复杂且恶劣,开采过程中的多台作业装备联合协同作业难度较大,因此考虑集破碎与收集于一体的采矿车方案。综合 SMS 的分布特征、微地形特征以及 SMS 矿物的物理力学特性,采矿车应满足如下基本要求:① 根据西南印度洋中脊 SMS 合同矿区的微地形特征,采矿车应能越过 50 cm 的障碍,跨过 60 cm 的沟壑,爬坡能力达到 20°以上;② 采矿车要能保证海底行驶及采矿作业时保持平稳,重心合理,整机不能有过大的俯仰和侧倾;③ 根据 SMS 的分布水深,重量和整机尺寸应满足水深 4000 m 的作业

能力,以覆盖达 97.4% 的 SMS 矿区开采。参照目前国内外已经开展并完成的试验的深海采矿车参数,并结合采矿车应满足的基本要求,初步确定 SMS 采矿车设计所需的基本性能指标,如表 10 所示。

表 10 SMS 采矿车设计基本性能指标

Table 10 Basic performance indicators for SMS mining car design

Parameter	Value
Overall dimensions (length×width×height)/m	≈10×6×4
Total mass/t	≤ 50
Walking speed/(m·s ⁻¹)	0.02 ¹⁾ –0.5 ²⁾
Obstacle clearance height/mm	500
Ditch width/mm	600
Slope angle/(°)	≥20

1) During homework; 2) Maximum walking

滚筒是采掘头中截齿的安装和承载部分,滚筒的结构参数将直接影响采掘头的整体破碎性能,从而影响采矿车的产量,进而影响整个深海硫化物开采项目的经济指标和商业盈利性。假设 SMS 的年产能(干质量)为 270 万 t,根据之前对镐形截齿切削和螺旋滚筒的研究成果,确定采矿车螺旋滚筒采掘头整体的技术参数,并与陆地采煤机和鸚鵡螺的切削参数对比,如表 11 所示。再根据第 4 节对集矿头抽吸特性的研究,将集矿头置于螺旋滚筒后下方。每个螺旋滚筒后配置抽吸管道与集矿口,并在滚筒外部装配集矿罩,减少开采过程中矿物的飞溅,最终得到 SMS 采矿机的总体方案,如图 16 所示。

表 11 螺旋滚筒整体技术参数

Table 11 Overall technical parameters of spiral drum

Parameter	Eickhoff CM series	Nautilus master mining machine	Roller model used in this article
Drum diameter/mm	1100	1300	1000
Cutting width of single drum/mm	1200	2000	2000
Drum cutting depth/mm	0-1200	500	400
Number and arrangement of drum	Three drums arranged horizontally	Three drums arranged horizontally	Three drums arranged horizontally
Rotating speed of drum/(r·min ⁻¹)	42	35	35
Drum traction speed/(m·s ⁻¹)	0.08-0.3	0.017	0.02
Pick	-	-	U84-20D

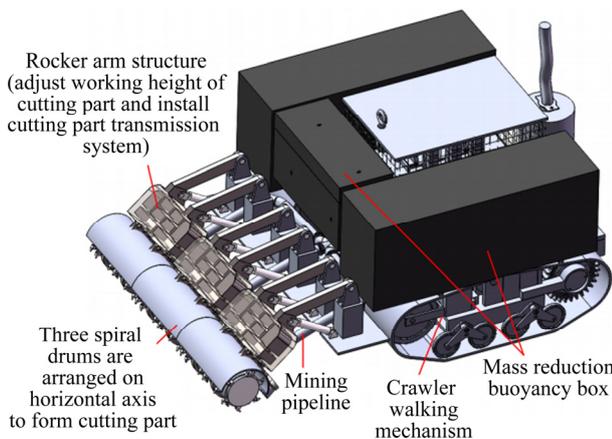


图 16 采矿车机构总体方案

Fig. 16 Overall scheme of mining vehicle

6 结论与展望

1) 开展了西南印度洋矿区多金属硫化物样品的三轴压缩试验, 获得了 SMS 的物理力学特性参数。

2) 采用切削力均值、切削力峰值、截割比能耗、单位生产率以及载荷波动系数作为矿体破碎的评价指标, 通过分析得到多金属硫化物在围压条件下破碎时, 优先采用装载镐形截齿刀具的螺旋滚筒采掘头破岩。

3) 在螺旋滚筒推进方式上, 从截齿受力情况分析, 直进式截齿受力最小; 从破碎性能来看, 挖槽式破碎性能相较于另外两种方式更好。在螺旋滚筒排布方式上, 横轴式两个滚筒相互影响的区域较小, 采集率较高; 纵轴式两个滚筒切削区域有重叠, 但相互传递的应力波有助于破碎矿体, 所以比能耗

更低, 两种排布方式都能减小采矿车的侧向力。

4) 对比独立式和一体式的两种不同集矿头抽吸特性, 在考虑开采成本和绿色环保的情况下, 采用一体式采集方案更具有优势。

5) 根据 SMS 采矿车的工作特点和工作要求, 确定了 SMS 采矿车的设计技术指标, 提出了采-集一体化采矿机总体设计方案。

REFERENCES

[1] U.S. Mineral Commodity Summaries 2021[R]. U.S: Department of the Interior, Geological Survey, 2021.

[2] CLLAE F, LBA B, MCA C, et al. Development of physical modelling tools in support of risk scenarios: A new framework focused on deep-sea mining[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650: 2294-2306.

[3] YAMAZAKI T. Past, present, and future of deep-sea mining[J]. Journal of MMIJ, 2015, 131(12): 592-596.

[4] 曹 亮, 杨 振, 廖时理, 等. 现代海底多金属硫化物矿床控矿因素分析研究进展[J]. 现代矿业, 2019, 35(7): 6-11, 42.
CAO Liang, YANG Zhen, LIAO Shi-li, et al. Research progress on ore-controlling factors of modern submarine polymetallic sulfide deposits[J]. Modern Mining, 2019, 35(7): 6-11, 42.

[5] 吴鸿云, 陈新明, 高宇清. 海底多金属硫化物开采系统及装备研究现状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 209-213.
WU Hong-yun, CHEN Xin-ming, GAO Yu-qing. Research status of seabed polymetallic sulfide mining system and

- equipment[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(2): 209–213.
- [6] MILLER K A, THOMPSON K F, JOHNSTON P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 4(418): 1–24.
- [7] 方陵生. 海底采矿机器人热液喷口挖金——海底采矿机器人测试将在 2016 年揭开序幕[J]. *世界科学*, 2016, 447(3): 25–26.
- FANG Ling-sheng. Hydrothermal vent mining—Subsea mining robot testing will kick off in 2016[J]. *The world of science*, 2016, 447(3): 25–26.
- [8] WIJK J V. Blue mining final public report 2018[R]. Delft: Royal INC, 2018.
- [9] SPAGNOLI G, MIEDEMA S A, HERRMANN C, et al. Preliminary design of a trench cutter system for deep-sea mining applications under hyperbaric conditions[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, 41(4): 930–943.
- [10] SPAGNOLI G, RONGAU J, DENEGRE J, et al. A novel mining approach for seafloor massive sulfide deposits[C]// *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: [s.n.], 2016: 1–13.
- [11] 李江海, 宋珏琛, 洛 怡. 深海多金属硫化物采矿研究进展及其前景探讨[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(11): 29–37.
- LI Jiang-hai, SONG Yue-chen, LUO Yi. Research progress and prospect of deep-sea polymetallic sulfide mining[J]. *Marine development and management*, 2019, 36(11): 29–37.
- [12] 刘少军, 黄中华. 一种海底多金属硫化物切削装置: CN, 102434164A[P]. 2012–05–02.
- LIU Shao-jun, HUANG Zhong-hua. A submarine polymetallic sulfide cutting device: CN, 102434164A[P]. 2012–05–02.
- [13] LIU Shao-jun, HU Jian-hua, ZHANG Rui-qiang, et al. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(5): 863–870.
- [14] 陈新明, 高宇清, 吴鸿云, 等. 一种海底热液硫化物矿的开采方法与装置: CN, 101519967[P]. 2009–09–02.
- CHEN Xin-ming, GAO Yu-qing, WU Hong-yun, et al. A mining method and device for submarine hydrothermal sulfide ore: CN101519967[P]. 2009–09–02.
- [15] 谢 超, 陈宇翔, 陈 为, 等. 一种集矿机. CN, 105673016A[P]. 2016–06–15.
- XIE Chao, CHEN Yu-xiang, CHEN Wei, et al. An ore collector. CN, 105673016A[P]. 2016–06–15.
- [16] 尹幸乐, 苏华友, 雷国荣, 等. 基于 RMR 与 Hoek-Brown 准则的矿岩力学参数估算[J]. *化工矿物与加工*, 2020, 49(6): 15–18.
- YIN Xing-le, SU Hua-yu, LEI Guo-rong, et al. Mechanical parameter estimation of ore rock based on RMR and Hoek-Brown criterion[J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2020, 49(6): 15–18.
- [17] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]// *14th International Symposium on Ballistic*. Quebec City, 1993: 593–600.
- [18] 李 艳, 陆 鹏, 李钰晴. 端盘截齿切削海底块状硫化物载荷特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(11): 2712–2721.
- LI Yan, LU Peng, LI Yu-qing. Load characteristics of transverse flange pick cutting seafloor massive sulfide under high confining pressure[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(11): 2712–2721.
- [19] 杨建民, 刘 磊, 吕海宁, 等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(6): 1–6.
- YANG Jian-min, LIU Lei, LÜ Hai-ning, et al. Current situation and prospect of development equipment for deep-sea mineral resources in China[J]. *Engineering Sciences China*, 2020, 22(6): 1–6.
- [20] 刘少军, 刘 畅, 戴 瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(2): 8–18.
- LIU Shao-jun, LIU Chang, DAI Yu. Current situation and progress of deep-sea mining equipment research and development[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8–18.
- [21] YUE Z, ZHAO G, XIAO L, et al. Comparative study on collection performance of three nodule collection methods in seawater and sediment-seawater mixture[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 110(102606): 1–13.
- [22] 朱文亮, 倪福生, 张德新. 挖泥船绞刀的三维建模方法[J]. *船海工程*, 2007, 36(1): 45–48.
- ZHU Wen-liang, NI Fu-sheng, ZHANG De-xin. Three-dimensional modeling method of dredger reamer[J]. *Shipbuilding and Sea Engineering*, 2007, 36(1): 45–48.

Mining technology of deep-sea polymetallic sulfide

LI Yan^{1,2}, LIANG Ke-sen¹, LI Hao¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. National Key Laboratory of Deep-Sea Mineral Researches Development and Utilization Technology, Changsha 410012, China)

Abstract: The seafloor massive sulfide (SMS) mostly distributes in the form of three-dimensional orebodies at water depth of 1500–3000 m, and its exploitation and collection methods are key technologies for the exploitation and utilization of deep-sea polymetallic sulfide resources. Firstly, the triaxial compression test under confining pressure was carried out on the submarine polymetallic sulfide sample to obtain various physical and mechanical properties of the sulfide. A comparative analysis was carried out for different crushing methods, such as mechanical tools and water jets, and it was determined that the spiral drum mining head cutting method should be used to break the rock. Further research on the drum propulsion mode and arrangement mode was carried out, and the mining head design scheme under the conditions of high seawater confining pressure was proposed. At the same time, with the goal of green and efficient collection, the research on the polymetallic sulfide collection technology was carried out, and the advantages and disadvantages of different mining methods were compared and analyzed. Finally, an overall design scheme of a mining vehicle integrating deep-sea polymetallic sulfide mining and collection was proposed, which provides a technical reference for the design of future seabed polymetallic sulfide mining machines.

Key words: polymetallic sulfide; cutting; gathering; mining vehicle

Foundation item: Project(51674286) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020GK1020) supported by the Major Science and Technology Project of Hunan Province, China; Project(2019SK2271) supported by the Science and Technology Plan Program of Hunan Province, China

Received date: 2021-07-20; **Accepted date:** 2021-09-06

Corresponding author: LI Yan; Tel: +86-13677353895; E-mail: lylsjhome@163.com

(编辑 龙怀中)