

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—XXXX

深海多金属硫化物采矿系统设计指南

Guidelines for the design of deep-sea polymetallic sulfide mining systems

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	2
4.1 设计原则	2
4.2 设计基础与环境条件	2
4.3 系统组成	3
5 子系统设计要求	3
5.1 水面支持系统	3
5.2 海底集矿系统	4
5.3 提升输送系统	5
5.4 控制通信系统	5
5.5 辅助系统	5

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件首次发布。

深海多金属硫化物采矿系统设计指南

1 范围

本文件规定了深海多金属硫化物采矿系统的设计原则、总体要求、各子系统设计、环境适应性设计、安全设计。

本文件适用于深海多金属硫化物采矿系统（以下简称“采矿系统”）的规划、方案设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 44310—2024 海上固定平台总体设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

深海 deep sea

海水深度超过1000米的区域。

3.2

多金属硫化物 polymetallic sulfide

指海底由热液作用形成的富含铜、铅、锌等成矿元素的硫化物及金、银伴生矿物的集合体。

3.3

采矿系统 mining system

用于深海多金属硫化物资源勘探、采集、输送、提升至水面平台，并完成初步分选的一体化成套装备系统。

3.4

沉积物羽流 sediment plume

深海采矿过程中，集矿设备扰动海底沉积物，使细颗粒再悬浮于水体中形成的高浓度悬浮颗粒物云团，包括近场羽流（集矿机尾流区）和远场羽流（水体扩散区），以及采矿平台尾矿排放形成的中层羽流。

3.5

水面支持平台 water surface Support platform

为深海采矿系统作业提供水面支持的作业平台，具备深海采矿作业过程中的协同控制、定位导航、人员居住、矿物仓储等作业支持功能。

3.6

采矿车 massive polymetallic sulfides mining vehicle

一种可在海底多金属硫化物矿床上行驶，用于开采海底多金属硫化物的装置。

3.7

集矿机构 ore collecting mechanism

集矿机构是采矿车的主体作业机构，用于海底多金属硫化物破碎后矿石的收集

3.8

破碎机构 ore crushing mechanism

破碎机构是采矿车的主体作业机构，用于海底多金属硫化物矿床矿石的破碎。

3.9

扬矿系统 lifting System

深海采矿作业中将海底采集到的多金属硫化物矿石或矿浆，从海底输送到水面支持平台的专用提升装置与作业系统的总称。

4 总体要求

4.1 设计原则

4.1.1 可靠性原则：采矿系统设计应优先考虑人员安全、设备安全及环境安全，充分考虑深海极端环境的影响，确保系统在全生命周期内稳定运行，具备抗极端海况、抗设备故障、抗突发灾害的能力。关键设备需采用冗余设计，设置多重安全保护装置，制定完善的应急处置方案，最大限度降低采矿作业风险，避免发生人员伤亡、设备损毁及环境污染事故。

4.1.2 环保优先原则：采用“预防性办法”和“最佳环保做法”，最大限度降低采矿活动对深海生态环境的扰动，减少羽流扩散、沉积物再悬浮及噪声污染，保护深海生物多样性。

4.1.3 可维护性原则：采矿系统各设备、部件的设计需考虑深海环境下的可维护性，采用模块化、标准化设计，便于设备的安装、调试、检修及更换。关键设备需预留检修接口和通道，制定完善的维护方案，减少水下维护作业量和难度，降低维护成本和作业风险，确保系统在长期运行过程中能够及时完成维护保养，保障系统持续稳定运行。

4.2 设计基础与环境条件

4.2.1 矿产资源条件

设计前需完成目标区域深海多金属硫化物矿床的详细勘查，获取以下基础数据，作为设计的核心依据：

- a) 矿床位置、范围、水深及海底地形地貌数据；
- b) 矿床的赋存形态、厚度、分布密度及矿体规模；
- c) 矿石的化学成分、矿物组成、物理性质（密度、硬度、抗压强度、耐磨性等），明确铜、锌、金、银等主要金属的品位；
- d) 矿床周边的地质构造及地质稳定性评价；
- e) 矿床区域的热液活动强度、温度分布及流体成分，评估热液活动对采矿设备的影响。

4.2.2 海洋环境条件

应详细收集目标海域的海洋环境数据，包括但不限于：

- a) 表层至海底的温度分布，年平均温度及季节变化；
- b) 对应水深的静压力，考虑海流波动产生的动压力；
- c) 表层及海底的海流速度、流向及季节变化，重点关注海底区域海流对采矿单元及输送管道的影响；
- d) 海水盐度、pH值、溶解氧、浊度等化学参数，评估海水的腐蚀性；
- e) 目标区域的生物种类、分布密度、活动范围，重点保护珍稀濒危生物及关键生态群落。

4.2.3 设计参数

应明确采矿系统的核心设计参数，包括但不限于：

- a) 开采规模：年开采量（万 t/a）、日开采量（t/d），明确设计产能的上下浮动范围；
- b) 开采水深：设计水深范围，明确最大作业水深；
- c) 矿石处理要求：破碎后矿石的粒径范围，海面矿石处理的纯度要求；
- d) 输送距离：海底采矿单元至海面支持平台的输送距离，明确管道敷设路径的长度及坡度；
- e) 系统设计寿命：不少于 20 年，其中关键设备（采矿车、输送泵、控制系统等）的设计寿命不少于 15 年。

4.3 系统组成

采矿系统应采用模块化设计，各子系统协同工作，实现硫化物从采集到水面分选的全流程作业，具体构成如下：

- a) 水面支持系统：包括水面平台、矿物分选装置、动力系统、水处理系统、仓储系统、人员生活保障系统等，用于承载设备、提供动力、处理矿物及保障人员生活；
- b) 海底集矿系统：包括采矿车、集矿机构、破碎机构、海底输送管道等，用于完成硫化物的采集、破碎及短途输送；
- c) 提升输送系统：包括扬矿系统、采矿立管等，用于将海底矿浆垂直提升至水面支持平台；
- d) 控制通信系统：包括海底控制单元、水面控制单元、通信系统、导航定位系统等，用于实现全系统的远程控制、监测、调度及故障预警；
- e) 辅助系统：包括设备布放与回收系统、环境监测系统等，保障采矿系统安全、稳定运行。

5 子系统设计要求

5.1 水面支持系统

5.1.1 水面平台

水面平台的设计可参照GB/T 44310—2024执行，宜选用采矿船或半潜式平台，并与块状多金属硫化物的破碎方式相适应，为机械破碎设备提供足够的动力支持。具备稳定的停泊能力、充足的承载能力和完善的配套设施，能够适应海上复杂海况，设计应满足安全可靠、功能齐全、舒适便捷的要求，具备抗台风、风暴潮等极端海况的能力，并减少对海洋环境的扰动。宜按以下方式进行设计：

- a) 宜根据采矿系统设备重量、人员数量、矿物仓储量确定平台规模，需考虑具备足够的稳定性；
- b) 需具备良好的动力定位（DP）能力，确保平台在采矿区域稳定停泊；
- c) 甲板需考虑预留采矿设备布放与回收区域、矿物分选区域、仓储区域、维护区域，布放与回收区域应配备起重机，确保设备安全布放与回收；甲板载荷需考虑设备安装、作业要求；
- d) 需考虑配备人员生活舱、餐厅、医务室、休息室等设施，满足人员的生活需求，确保人员在海上长期作业的舒适性和安全性；
- e) 宜配备海水处理系统、污水处理系统、垃圾处理系统，用于处理提升上来的海水，去除悬浮物、重金属后排放；污水处理系统处理人员生活污水，达标后排放或回收利用；垃圾处理系统对船上垃圾进行分类、处理，避免污染海洋环境。

5.1.2 矿物分选装置

矿物分选装置用于将提升至水面的矿浆进行初步分选，分离出硫化物精矿与海水、杂质，设计应满足分选效率高、能耗低、环保的要求，宜按以下方式进行设计：

- a) 宜采用重力分选、浮选或磁选相结合的方式，根据硫化物矿物组成、品位确定分选工艺，确保分选效率不低于 90%；
- b) 分选装置处理能力需考虑与提升系统提升能力匹配，可根据矿浆浓度、品位自适应调节分选参数；
- c) 矿物分选装置宜具备废水处理能力，分选过程中产生的废水经处理后，重金属含量符合环保标准，可循环利用或排放；
- d) 宜配备自动化控制系统，可实时监测分选过程中的矿浆浓度、品位、流量等参数，自动调节分选设备运行状态，确保分选效果稳定；配备故障监测装置，故障时自动停机并发出预警。

5.1.3 仓储系统

仓储系统用于储存分选后的硫化物精矿，设计应满足储存量大、防潮、防腐蚀、便于转运的要求，宜按以下方式进行设计：

- a) 仓储容量宜根据采矿系统产能及转运周期确定，可满足至少 3 天的采矿量储存需求；
- b) 宜采用封闭式仓储仓，仓体采用耐腐蚀钢材，表面采用防腐涂层，防止精矿受潮、氧化；仓体底部采用倾斜设计，便于精矿排出，避免堆积；
- c) 宜配备皮带输送机或螺旋输送机，输送机速度可调节，输送能力应确保精矿可快速转运至运输船，输送机采用密封设计，避免精矿粉尘飞扬，污染环境；
- d) 宜配备料位传感器，实时监测仓储仓内精矿储量，当储量达到上限或下限时，发出预警信号，便于及时转运或补充。

5.1.4 动力与供电系统设计

动力与供电系统为整个采矿系统提供动力和电能，设计应满足稳定、可靠、节能的要求，宜按以下方式进行设计：

- a) 水面平台提供主电力，通过脐带缆输送至水下设备。脐带缆需具备足够的强度、抗扭转与耐环境应力特性；
- b) 水下设备配电系统应具有短路、过载、漏电等保护功能，并考虑冗余设计；
- c) 优先采用节能技术，降低燃油消耗。

5.2 海底集矿系统

5.2.1 采矿车

采矿车应具备行驶、破碎、采集、精准定位、轨迹跟踪及按规划路径行驶的功能，具有安全、高效、可靠、耐抗腐蚀等特点，宜按以下方式进行设计：

- a) 宜适应作业水深为 4000m 及浅、海底坡度不大于 20° 的作业环境；
- b) 采矿车上所有配管、密封件应能承受作业水深对应的水压，密封无渗漏；
- c) 采矿车上各个部件之间通过连接件连接。连接件应满足强度和稳定性的要求，确保连接稳固可靠；
- d) 与海水直接接触的部件应采用抗海水腐蚀的材料；
- e) 采矿车整体结构应具备抵抗海浪拍击、水面支持系统颠簸等因素引起的动载荷的强度。

5.2.2 破碎机构

破碎机构用于将采集到的大块硫化物破碎至符合提升输送要求的粒径，设计应满足破碎效率高、能耗低、磨损小的要求，宜按以下方式进行设计：

- a) 采掘头在作业过程中实现矿石的破碎功能；
- b) 采掘头应具备抗磨损能力，宜采用旋转铣削头、机械臂式抓取头或水力集矿头。需配备传感器实时调节采集深度，防止过度采集基岩；
- c) 采矿头需考虑具备高度调节装置，适应硫化物矿区地形的起伏；
- d) 需考虑设置过载保护装置，当遇到无法破碎的硬物时，可自动停机并发出预警信号，避免设备损坏；
- e) 需考虑在作业过程中减少对环境的扰动，如设置密封罩，防止破碎过程中矿浆飞溅。

5.2.3 集矿机构

集矿机构宜按以下方式进行设计：

- a) 宜采用附壁射流式、机械-水力混合式采集方式；宜具备离地高度测控功能，根据海底地形的变化自动调节离地高度，保持合适的离地高度；
- b) 采集速度与采矿车行走速度匹配；
- c) 采集通道宜采用流线型设计，配备反冲洗装置，定期清理通道内的堵塞物，确保采集顺畅；
- d) 宜考虑采用环境友好型设计，减少对海底沉积物的扰动。

5.2.4 海底输送管道

海底输送管道用于将破碎后的矿浆从采矿车输送至提升系统入口，设计需考虑满足耐压、耐腐蚀、防堵塞、低阻力的要求，宜按以下方式进行设计：

- a) 采用耐腐蚀合金管道或高强度复合管道，管道直径根据矿浆流量、粒径确定，需考虑确保矿浆流动顺畅，避免矿浆沉淀堵塞管道；
- b) 密封材料宜选用耐低温、耐腐蚀、耐磨损材料，如氟橡胶或聚四氟乙烯等，确保无泄漏；
- c) 海底输送管道需考虑沿海底地形布置，避免跨越陡峭地形；宜设置缓冲装置，吸收采矿车移动及海流带来的冲击力；
- d) 管道表面宜采用防腐涂层，防止海水腐蚀。

5.3 提升输送系统

5.3.1 扬矿系统

5.3.1.1 水下扬矿系统中可设置一台或多台与采矿立管相连接的水下扬矿泵。水下扬矿泵的形式可为离心泵、混流泵或隔膜泵等。根据矿物浆体特性、提升高度与流量，选择合理的提升方式。

5.3.1.2 若设有水下中继站，则该中继站本体和与采矿立管的连接应具有足够的强度，结构框架应考虑由于触底、物体碰撞、海浪的拍击、水面支持平台上的颠簸等因素引起的载荷，并保证其内部空间完全可浸没和排空。

5.3.2 采矿立管

5.3.2.1 根据特定的应用情况，采矿立管可采用刚性管或挠性管。刚性管的连接方式可包括但不限于螺纹连接、法兰连接、快速插拔式接头连接等，连接部位采用高强度密封件，确保连接牢固、无泄漏。

5.3.2.2 管道应进行疲劳强度校核，考虑矿浆冲击、海流作用、平台升沉等因素，确保管道在设计寿命内不发生疲劳断裂。

5.3.2.3 管道表面需考虑采用防腐涂层，具备耐高压、耐腐蚀、抗疲劳特性，并设计有应急脱离与回收功能，海底垂直段管道还可采用阴极保护措施，进一步提高耐腐蚀性能，延长使用寿命。

5.4 控制通信系统

控制通信系统宜按以下方式进行设计：

- a) 通信系统用于实现各子系统、设备之间的信息传输，设计应满足通信稳定、速率高、抗干扰、覆盖范围广的要求；
- b) 控制通信系统应能对整个采矿系统进行控制和操作，并与水面支持平台上的其他重要处所（如驾驶室/中控室、DP 操作站、消防控制站）之间设有可靠的通信设备，确保采矿系统与水面支持平台之间保持协同，以保证作业安全；
- c) 应建立水声、光纤复合通讯网络，确保水面与水下设备间数据、指令、视频的高带宽、低延时传输；
- d) 水声定位系统需提供全天候、高精度的水下设备位置信息；
- e) 控制通信系统需具备完整的传感器网络，实时监测设备状态、作业参数及环境参数。

5.5 辅助系统

5.5.1 布放与回收系统

布放与回收系统用于完成采矿车、海底输送管道、采矿立管等水下设备的海上布放、安装与回收作业，设计应满足载荷能力强、操作精准、安全可靠的要求，适配深海作业的复杂工况，宜按以下方式进行设计：

- a) 塔架提升系统的最大许用工作载荷应参照载荷路径中最薄弱部件的工作载荷加以确定，且预留一定的安全系数，满足最大水下设备的起吊、布放需求；
- b) 应急停车和自动停车动作不应引起系统不能承受的动载荷；
- c) 安装在塔架上的设备应适当地加以固定、系固和/或紧固以防坠落；

- d) 系统应配备专用的导向与扶正装置，在水下设备布放和回收过程中，引导设备沿预定路径运动，防止设备与平台、立管等发生碰撞，同时对柔性管道、脐带缆等进行扶正，避免缠绕、打结。

5.5.2 环境监测系统

5.5.2.1 采矿系统的环境保护设计需遵循“环保优先”原则，降低采矿活动对深海生态环境的扰动，保护深海生物多样性，确保采矿作业符合海洋环境保护相关法律法规和标准要求。

5.5.2.2 环保设计需结合目标海域的生态环境基线数据，制定采矿作业的环境影响管控指标，明确羽流扩散范围、沉积物再悬浮高度、水下噪声分贝值、重金属排放浓度等关键管控限值，所有环保措施的设计均需满足管控指标要求。

5.5.2.3 采矿过程中需考虑采取专用的防羽流扩散装置，在采矿车采集、破碎部位设置密封罩和羽流收集装置，减少矿浆飞溅和海水扰动。

5.5.2.4 采矿系统的设备设计需考虑采用低噪声结构，对高噪声设备设置专用的隔声、减振装置，降低设备运行产生的水下噪声，避免对海洋生物的听觉系统和行为习性造成影响。

