

ICS 点击此处添加 ICS 号  
CCS 点击此处添加 CCS 号



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 深海矿产资源开采系统技术指南

点击此处添加标准名称的英文译名

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

(本草案完成时间：)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	4
2 规范性引用文件 .....	4
3 术语和定义 .....	5
4 基本准则 .....	6
4.1 总体性准则 .....	6
4.1.1 综述 .....	6
4.1.2 绿色 .....	6
4.1.3 经济 .....	6
4.1.4 可靠 .....	6
4.1.5 智能 .....	6
4.1.6 安全 .....	6
4.2 系统构成 .....	6
4.2.1 深海矿产资源开采系统 .....	6
4.2.2 深海矿产资源开采作业系统 .....	7
4.2.3 深海矿产资源开采数字系统 .....	7
4.2.4 深海矿产资源开采维保系统 .....	8
4.3 系统工程 .....	8
4.3.1 系统全生命周期过程 .....	8
4.3.2 基于模型的系统工程 .....	8
4.3.3 系统特性综合 .....	9
4.3.4 系统风险管理 .....	10
4.3.5 全生命周期的综合评价 .....	10
5 绿色 .....	10
5.1 总体要求 .....	10
5.2 海上清洁能源供能系统要求 .....	10
5.2.1 功能系统要求 .....	10
5.2.2 海上可再生能源多能互补供能系统要求 .....	10
5.2.3 海上核能供能系统要求 .....	11
5.2.4 海上氢能供能系统要求 .....	11
5.2.5 深海采矿碳排放测算 .....	11
5.3 绿色装备 .....	11
5.4 绿色作业 .....	11
5.4.1 环境管理体系 .....	11
5.4.2 采矿作业绿色规划 .....	11
5.4.3 工艺环保要求 .....	12
5.4.4 环境监测及安全预警 .....	12

5.4.5	生态修复	13
6	经济	13
6.1	总体要求	13
6.2	深海矿产资源采矿系统采集率	13
6.3	深海矿产资源开采系统回采率	14
6.4	深海矿产资源开采单位能耗	14
6.5	深海矿产资源开采系统成本	14
7	可靠	14
7.1	总体要求	14
7.2	海底集矿系统可靠性	15
7.3	水下提升系统可靠性	15
7.3.1	管道方式水下提升系统	15
7.3.2	水下穿梭式水下提升系统	15
7.3.3	链斗式水下提升系统	16
7.4	水面支持平台/船可靠性	16
7.5	转运系统可靠性	16
7.6	海上矿物加工系统可靠性	16
8	智能	16
8.1	总体要求	16
8.2	系统间协同运行管控	17
8.3	海底集矿系统智能要求	17
8.4	水下提升系统智能要求	18
8.5	水下穿梭提升系统智能要求	18
8.6	水面支持平台/船智能要求	19
8.7	转运系统的智能要求	19
9	安全	20
9.1	总体要求	20
9.1.1	法规符合性要求	20
9.1.2	安全原则	20
9.1.3	风险评估	21
9.1.4	安全应急计划	21
9.2	设施安全	22
9.2.1	海底集矿系统	22
9.2.2	水下提升系统	22
9.2.3	水面支持平台	23
9.2.4	转运系统	25
9.2.5	海上矿物加工系统	26
9.2.6	其他	26
9.3	采矿作业安全	26
9.4	采矿作业人员安全要求	27
	参考文献	28

## 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。

本文件由北京先驱高技术开发有限责任公司提出。

本文件由国家海洋标准计量中心归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 深海矿产资源开采系统技术指南

## 1 范围

本文件提供了海底深海矿产资源采矿系统绿色、经济、可靠、智能、安全的技术准则、以及需考虑的因素，并给出相关技术指南。

本文件适用于“区域”及其他海域海底深海矿产资源采矿系统及相关关键设备的设计、建造、应用、管理等。

## 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 5080.1 可靠性试验 第1部分：试验条件和统计检验原理
- GB/T 19115.1-2018 风光互补发电系统 第1部分：技术条件
- GB T 24001—2016 环境管理体系 要求及使用指南
- GB/T 35050-2018 海洋能开发与利用综合评价规程
- GB/T 37472 潜水器母船升沉补偿系统通用要求
- GB/T 40073 潜水器金属耐压壳外压强度试验方法
- GJB 899 可靠性鉴定和验收试验
- HY/T 0341—2022 人为水下噪声对海洋生物影响评价指南
- ISO 9001 质量保证体系（Quality Management System）
- MSC337(91)决议 船上噪声等级规则（Adoption of the Code on Noise Levels on Board Ships）
- IEC 61703 Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms
- API RP 2RD Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)
- API RP 16Q Design, Selection, Operation, and Maintenance of Marine Drilling Riser Systems
- API RP 17B Recommended Practice For Flexible Pipe
- API RP 1111 Design, Construction, Operation, And Maintenance Of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)
- API Spec 17J Specification for Unbonded Flexible Pipe
- OCIMF 海上系泊设施软管购置和制造指南
- 船舶与海上设施起重设备规范（中国船级社）
- 钢质海船入级规范（中国船级社）
- 海上移动平台入级规范（中国船级社）
- 海上钻井装置检验指南（中国船级社）
- 海洋立管系统检验指南（中国船级社）
- 潜水系统与潜水器入级规范（中国船级社）

潜水器检验指南（中国船级社）  
 钻井补偿系统指南（中国船级社）  
 国际海事组织 MARPOL公约  
 国际海事组织 1978年海员培训、发证和值班标准公约  
 国际海事组织 2006年海事劳工公约  
 国际海事组织 1988年载重线议定书  
 国际海事组织 2008特种用途船安全规则  
 国际海事组织 1974年国际海上人命安全公约  
 国际海事组织 1972年国际海上避碰规则公约  
 国际海事组织 经1978年议定书修订的1973年国际防止船舶造成污染公约  
 国际海事组织 船上噪声等级规则  
 国际安全管理法规

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**区域 area**

国家管辖范围以外的海床、洋底和底土。

[来源：《联合国海洋法公约》]

#### 3.2

**深海矿产资源 deep-sea mineral resources**

一种以结核状形态赋存于海底的多金属矿石，一般富含锰、钴、镍、铜等金属成分。

注：也称为锰结核或铁锰结核。

#### 3.3

**开发 exploitation**

以商业目的回收深海矿产资源和从其中选取矿物，包括建造和操作供生产和销售矿物之用的采矿、加工和运输系统。

[来源：国际海底管理局理事会关于《“区域”内深海矿产资源探矿和勘探规章》修正案及有关事项的决定，有修改]

#### 3.4

**羽流 plume**

含有大量悬浮沉积物颗粒物、矿物和底栖生物碎屑，呈弥散状扩散的水流。

#### 3.5

**水下穿梭器 underwater load-carrier**

在海底与水面支持平台/船之间运行，具有收集和运送海底深海矿产资源功能的水下运行器具。

#### 3.6

**软管 flexible pipe**

水力提升系统中连接集矿机和中继舱的柔性输送管道。

#### 3.7

### 中继舱 buffer station

上端通过输送立管等和水面船连接，下端通过输送软管等和海底集矿系统连接，定量连续地向提升立管给料的装置。

## 4 基本准则

### 4.1 总体性准则

#### 4.1.1 综述

深海矿产资源开采系统在全生命周期内应满足绿色（Green）、经济（Economy）、可靠（Reliability and Robustness）、智能（Intelligence）和安全（Safe）五项基本准则（简称GERIS）。

#### 4.1.2 绿色

深海矿产资源开采系统在全生命周期应符合环境保护要求，对生态环境和人体健康无害或危害小，资源能耗少。

#### 4.1.3 经济

深海矿产资源开采系统全生命周期中全生产链条各个环节的成本最小、效率最高。

#### 4.1.4 可靠

深海矿产资源开采系统应具有在规定的海洋环境条件下，完成规定的开采功能并达到持续稳定作业的设计时长的能力。

#### 4.1.5 智能

深海矿产资源开采系统在复杂海洋环境条件下满足持续生产作业所需的智能协同、智能决策、智能运维等。

#### 4.1.6 安全

深海矿产资源开采系统的设计开发应满足人身安全、环境安全、设备安全、作业安全等的要求。

### 4.2 系统构成

#### 4.2.1 深海矿产资源开采系统

深海矿产资源开采系统包括作业系统、数字系统和维保系统，如图1所示。

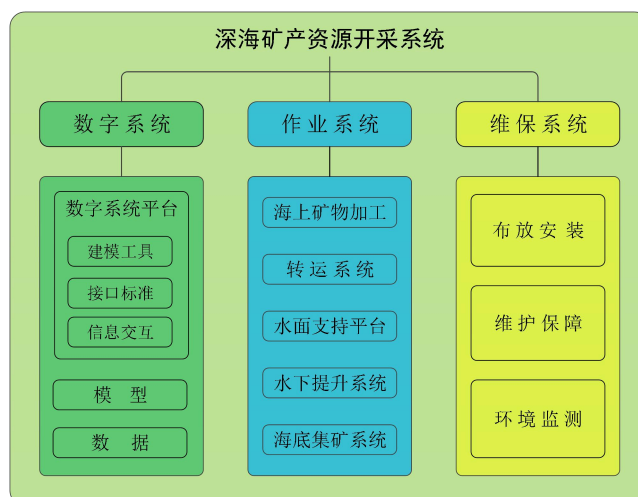


图1 深海矿产资源开采系统构成

## 4.2.2 深海矿产资源开采作业系统

### 4.2.2.1 作业系统

深海矿产资源开采作业系统包含海底集矿系统、水下提升系统（水力提升系统或水下穿梭提升系统）、水面支持平台/船、转运系统、海上矿物加工系统等。

深海矿产资源开采作业系统是一种开放、工业、动态、闭环、作业的复杂大系统，是海底集矿系统、水下提升系统、水面支持平台/船、转运系统、海上矿物加工系统的有效总体组合，通过对它们以及它们之间的相互作用关系进行统筹兼顾、合理的协调组织、合理的配置使用，达到深海矿产资源开采系统的综合效果最优。

#### 4.2.2.2 海底集矿系统

海底集矿系统应具备收集海底表面矿产资源矿石的功能，一般包括行驶机构和集矿机构。

#### 4.2.2.3 水下提升系统

水下提升系统应具备将矿产资源从海底表面运输至水面的功能，通常指水力提升系统或水下穿梭式提升系统。

#### 4.2.2.4 水面支持平台/船

水面支持平台/船应具备开采矿产资源时在现场执行采矿、装卸、存储、中央控制、能源供给或其他相关功能。

#### 4.2.2.5 转运系统

转运系统应具有将所开采的深海矿产资源转运到陆地的功能。

#### 4.2.2.6 海上矿物加工

海上矿物加工是在海底或（和）海面平台通过选矿或冶炼，生产精矿、中间富集物或产品的过程。

## 4.2.3 深海矿产资源开采数字系统



深海矿产资源开采数字系统应具备作业系统全生命周期的数字化表达功能，是对作业系统统筹兼顾、协调组织、配置使用的数字化工具，包含集成的数字系统平台和数字化模型。应积极采用并行工程的方法，同步开展数字系统的构建和作业系统的开发研制工作。

#### 4.2.4 深海矿产资源开采维保系统

深海矿产资源开采维保系统应具备布放安装、维护保障、环境监测等保障作业系统正常工作运转的功能。应积极采用并行工程的方法，将维保系统的规划设计纳入作业系统的开发研制工作中。宜充分借助数字系统发挥维保系统的功能作用。

### 4.3 系统工程

#### 4.3.1 系统全生命周期过程

4.3.1.1 深海矿产资源开采系统全生命周期如图 2 所示。深海矿产资源开采系统作业系统的全生命周期分为系统开发过程和系统使用过程，具体包括总体论证、方案设计、初步设计、详细设计与研制、交付使用、支持维护和系统报废，同时宜运用并行工程开展数字系统和维保系统的设计、研制与运行。



图 2 基于并行工程的深海矿产资源开采系统全生命周期过程

4.3.1.2 在总体论证阶段，对深海矿产资源开采系统的需求进行识别和可行性分析，对系统进行需求分析，确定系统 GERIS 需求，确定系统技术指标，对系统综合论证评审，验证与评价需求的有效性。

4.3.1.3 在方案设计阶段，对深海矿产资源开采系统进行功能分析与分配，将系统功能逐层分解并形成系统方案，制定系统规范、形成顶层技术要求文件体系。

4.3.1.4 在初步设计阶段，对深海矿产资源开采系统各级子系统进行方案设计，对深海矿产资源开采系统各子系统进行设计，制定各子系统及部件方案，制定研制规范。

4.3.1.5 在系统详细设计与研制阶段，对深海矿产资源开采系统各子系统中产品和部件进行设计并产品规范，根据设计要求编制工艺规范和材料规范，指导部件的生产制造并形成样机；同时，编制系统集成测试和海试方案，根据测试计划和测试大纲分别完成部件测试、系统集成调测和试验验证，并通过海试完成最终验收确认。

4.3.1.6 在交付使用阶段，对用户进行培训，交付系统和相应维修工具、资料和备件，经用户确认后完成交付，投入运营和使用。

4.3.1.7 在支持维护阶段，协助用户进行使用和维修保障，在确保同安全生产的同时，收集 GERIS 相关信息来对系统进行综合评价。

4.3.1.8 在系统报废阶段，评估系统健康状态，适时对系统进行报废处置。

#### 4.3.2 基于模型的系统工程

4.3.2.1 深海矿产资源开采系统的开发过程，宜采用如图 2 所示的基于模型的系统工程方法，建立深海矿产资源开采系统的数字化模型，存储系统所有规范化的模型和标准化的数据，增强各工程领域的紧密连接，实现基于模型的正向研发、协同创新。

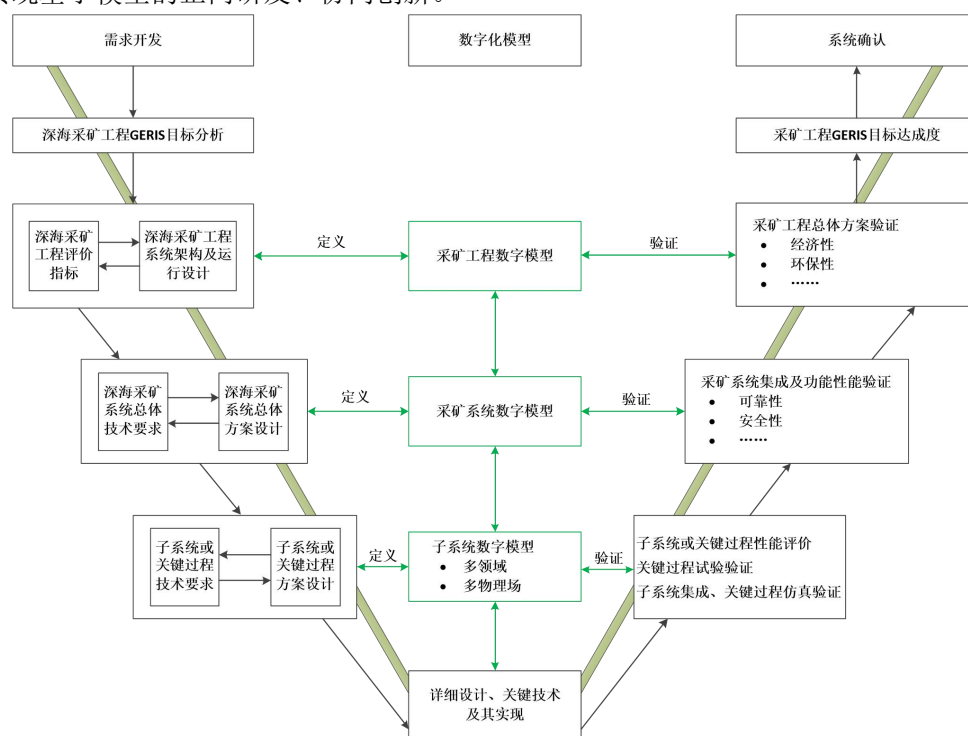


图 3 基于模型的系统工程方法

4.3.2.2 宜对深海矿产资源开采系统的系统需求、设计、分析、验证与确认等活动进行数字化建模应用，这种建模应用从系统概念设计阶段开始并贯穿系统开发及之后的生命周期，并拓展到相关工程领域，如机械工程、电子工程、电气工程、软件工程等。

4.3.2.3 深海矿产资源开采系统的数字化模型包括全生命周期的模型和数据。

4.3.2.4 数字化模型中的模型包括深海矿产资源开采系统全生命周期的技术模型和管理模型，其中技术模型包括系统设计架构模型、机械结构模型、电气电子模型、软件架构模型、计算分析模型、动态行为模型、环境工况模型等；管理模型包括人力团队模型、职责权限模型、风险模型、进度模型、经济模型等。

4.3.2.5 数字化模型中的数据包括深海矿产资源开采系统全生命周期中准确的、实时的数据，包括设计中心数据、计算分析数据、试验验证数据、确认报告数据、使用维护数据等。

4.3.2.6 宜建立与深海采矿工程系统架构设计、深海采矿系统方案设计、子系统或关键过程方案设计、详细设计和关键技术及其实现等对应的数字模型，进行虚拟数字环境下的系统及详细设计、制造、集成、验证等过程，实现方案的主动优化和快速迭代，追求最终实际制造的产品“一次合格”，进而快速顺利完成系统的集成、试验、验证、评价、确认等。

### 4.3.3 系统特性综合

4.3.3.1 深海矿产资源开采系统在整个生命周期过程中，宜对系统进行特性综合，运用各种优化和分析技术对 GERIS 进行权衡和优化，以达到系统最佳目标。

4.3.3.2 在对系统方案择优和选择时，应开展决策分析，例如系统分析、费用-效能分析、权衡优化研究等，宜贯穿于深海矿产资源开采系统生命周期各环节、各领域的方案优化和选定。

4.3.3.3 对系统特性综合时，宜结合系统开发进度在全生命周期中设置相应里程碑或决策点，对各阶段中特性综合情况进行评审，根据 GERIS 目标实现情况进行决策。

#### 4.3.4 系统风险管理

4.3.4.1 应制定并实施风险管理计划，宜采用项目管理方法对风险管理进行整体统筹考虑。

4.3.4.2 对于进度和成本风险，宜采用网络计划、风险评审等技术进行风险分析和控制。

4.3.4.3 对于技术风险，宜采用技术成熟度评估对技术风险进行风险和控制。

#### 4.3.5 全生命周期的综合评价

可基于数字系统模型、数字线程、数字孪生等技术，将系统的多领域、多物理场、多层级分析工具集成，利用模型、数据、工程知识等的数字化表达，实现深海矿产资源开采系统不同环节的高效协同、可追溯性与变更管理，不同系统的集成以及验证与确认，全生命周期的综合评价。

## 5 绿色

### 5.1 总体要求

深海矿产资源开采系统绿色要求如下：

- 绿色深海矿产资源开发系统应综合考虑深海矿产资源开发利用和环境影响，使资源开发效率最高，对深海生态环境影响最小，并使企业经济效益与社会效益协调优化。
- 开采系统应利用清洁能源，减少采矿系统能源消耗过程中的碳排放。
- 开采系统装备设计和制造应从采矿全生命周期进行技术比选，宜采用对环境影响小的材料、技术、工艺。
- 应通过科学设计采矿作业，将深海矿产资源开发活动对环境扰动控制在允许的范围内，以最小的环境扰动获取最大的资源量和经济效益。
- 应建立环境监测预警体系，减少突发性环境污染事故对深海环境的污染和生态的破坏。
- 已开采的矿区应开展生态修复，要遵循自然规律，充分发挥生态系统自我修复功能，通过适度人工措施，改善环境质量，促进生态系统稳定，保护区域生物多样性。

### 5.2 海上清洁能源供能系统要求

#### 5.2.1 功能系统要求

深海采矿系统每吨湿结核开采的能耗宜控制在100千瓦时以内，深海采矿系统宜采用更多地使用海上清洁能源，主要包括但不限于海上可再生能源多能互补供能系统，海上核能供能系统，以及海上氢能供能系统，将每吨湿结核开采的二氧化碳排放控制在35千克以内。

#### 5.2.2 海上可再生能源多能互补供能系统要求

海上可再生能源主要包括海上风能，海上太阳能，波浪能，海洋温差能等，深海采矿系统的海上可再生能源多能互补供能系统宜采用以海上风能和太阳能为主的多能互补系统，需要柴电系统作为应急供能系统。

海上风能和太阳能多能互补电力系统应采用直流离网系统或交流离网系统，系统组成满足GB/T 19115.1-2018《风光互补发电系统 第1部分：技术条件》4.1、4.2的要求，系统推荐使用的资源条件满足5.1的要求。

在应用波浪能、海洋温差能等海洋能电力系统时应先开展资源评价和环境影响评价，参考GB/T 35050-2018《海洋能开发与利用综合评价规程》6.2、6.3的要求。

### 5.2.3 海上核能供能系统要求

海上核能按照反应堆冷却剂类型主要包括水冷堆，气冷堆，液态金属冷却堆，熔盐堆等，深海采矿系统的海上核能供能系统宜采用更加环保和安全的小型化核电技术。

### 5.2.4 海上氢能供能系统要求

深海采矿系统的海上氢能供能系统宜采用海上风能、海上太阳能等海上可再生能源开展海水制氢，通过制氢、储氢、输运一体化，实现海上氢能的就地消纳。

### 5.2.5 深海采矿碳排放测算

深海采矿碳排放测算宜按照《2006年IPCC国家温室气体清单指南2019年修订版》（2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）对船用柴油碳排放因子的计算公式：

缺省二氧化碳排放因子（C）=缺省碳含量（A）×缺省氧化碳因子（B）×44/12

即，船用柴油的有效缺省二氧化碳排放因子为74.1克/百万焦耳。按照船用柴油发电机能量转化效率测算，深海采矿二氧化碳排放介于760~890克/千瓦时。按照每吨湿结核开采能耗100千瓦时计算，在完全采用柴油供电的情况下，每吨湿结核开采的二氧化碳排放为76.2~88.9千克。

## 5.3 绿色装备

5.3.1 深海采矿系统及设备应采用不含石棉的材料支撑。

5.3.2 水面支持平台的压载水的排放及处理系统宜符合国际海事组织制定的《国际船舶压载水和沉积物控制与管理公约》的规定。船东或船舶管理公司还应编制船舶压载水管理计划。

5.3.3 尾水处理系统中应设置能够连续监测排放尾水流量、尾矿粒径和浓度的装置。

5.3.4 尾水排放口的位置和布置宜符合国际海底管理局（ISA）或沿岸国政府法规的规定，并应尽量降低尾水排放后产生的羽状流对海洋环境产生的不利影响。

5.3.5 水下尾水返排放管可设计为立管管束形式，也可独立布置。

5.3.6 对于独立布置的水下尾水排放管，其设计衡准和分析方法应符合采矿立管的相关要求。

5.3.7 对于立管管束形式的水下尾水排放管，管束横截面对流体载荷及载荷效应的不利影响，应在设计分析中予以考虑。

## 5.4 绿色作业

### 5.4.1 环境管理体系

针对深海采矿活动建立环境管理体系，以确保环境保护措施得以执行。环境管理体系应包括为制定、实施、实现、评审和保持环保方针所需的组织机构、规划活动、机构职责、惯例、程序、过程和资源等内容，并满足GB/T 24001-2016的相关要求。

### 5.4.2 采矿作业绿色规划

采矿作业绿色规划要求如下：

——按照因地制宜、因时制宜的原则针对不同区域、不同规模、不同阶段的矿区采矿作业制定绿色规划。

- 对矿区空间的开发战略、开发层次、内容、期限、规模与布局以及实施步骤等进行综合规划以减轻采矿活动对深海生态系统造成的影响。
- 时间规划上应根据区域生物迁移和繁殖习性等确定限制或避免采矿的时期以及采矿活动的最大持续时间。
- 空间规划上应设立保全参照区以及避难和预留区域，保护区域生物多样性。
- 作业过程产生的污染物排放水层规划应综合考虑造成的环境污染、生态破坏程度以及社会影响等因素。

### 5.4.3 工艺环保要求

#### 5.4.3.1 海底集矿系统

海底集矿系统宜满足以下绿色要求：

- 选择采矿羽流扩散范围最小的采集工作方式，评价指标包括采矿引起的羽流初始速度、持续时间、悬浮物含量、水文条件、底质破坏程度等。
- 宜选择非接触式移动和浅接触采集技术。
- 采用接触式移动采集技术时宜采取尽量减少矿车与海底接触面积和接触压力的设计。
- 集矿系统的沉积物扰动深度不宜超过 6cm。

#### 5.4.3.2 水下提升系统

水下提升系统宜满足以下绿色要求：

- 宜采用节水技术，减少从底层提升到海面的海水量，减轻尾水尾矿的环境影响。
- 尽可能减少海底深海矿产资源的破碎和粉化，以降低水面不可分离排入尾水中的细颗粒含量。
- 尾水排放宜选择羽流影响小的尾水排放方式，宜选择海底排放，禁止采用表层排放。

#### 5.4.3.3 海上矿物加工系统

海上矿物加工系统宜满足以下绿色要求：

- 宜采用环保达标的选冶加工与综合利用技术，采用清洁能源和绿色药剂，采用海水作为工艺水。
- 尾水零排放，尾矿需经处理达标后排放。

#### 5.4.3.4 污染物排放

开采系统污染物排放宜满足以下要求：

- 作业过程产生的大气污染物排放应按照《经 1978 年议定书修订的 1973 年国际防止船舶造成污染公约》附则 VI 的相关规定执行。
- 尾水排放温度应不超过排放层年平均水温 3℃。排放尾水中污染物浓度应不超过风险评估低值。
- 采矿系统应安装隔震和消噪设备，以降低作业过程产生的噪音。开采系统水面部分产生的噪音不超过 MSC337(91) 决议第 4 章规定的限值。开采系统水下活动产生噪音不超过 HY/T 034 1-2022 附件 A.3 规定的限值。
- 采矿系统使用人工光源时应考虑工作需求、环境条件和生物活动。应尽可能减少使用人工照明，包括照明数量、强度和持续时间。应避免使用大面积泛光灯，只照亮预定的物体或区域，照明不宜向上或在结构边界之外。宜采用自适应光控制来管理光的时间、强度和颜色。开采系统宜使用不反光的深色表面材质。

### 5.4.4 环境监测及安全预警

环境监测及安全预警要求如下：

- 应在整个项目运营期间定期实施合规性监测，检查特定环境参数是否符合相关规章和合同义务，同时确保采用缓解措施有效地将采矿残留影响降低到环境可接受水平。
- 在闭矿阶段实施后应继续开展长期性监测，评估采矿活动的累积影响和残留影响。
- 应建立环境安全预警系统，结合水质预警和生物预警技术，对环境污染进行早期预警，及时调整开采策略，降低环境风险。

#### 5.4.5 生态修复

矿区资源开采后应开展生态修复。开采区生态修复应以生物群落恢复为主要目标，从传统的物理手段着手，结合生物手段，从布设人工附着基以增强生境重建后生物的定殖和生存开始，逐步开展综合性的生态系统恢复与重建。

## 6 经济

### 6.1 总体要求

以海底深海矿产资源资源节约高效利用和保护保全深海环境为约束条件，提高采矿效率，减小全产业链各环节成本。具体如下：

- 通过提高采集覆盖率和集矿机的采集效率，减少资源流失、降低单位能耗等方式提高采矿效率；
- 控制整个流转过程运行方式，减少中间环节、简化流程，控制采矿的单位成本，获取采矿的经济效益；
- 海底深海矿产资源采矿系统装备设计宜考虑设计寿命与矿区开发周期相适应，考虑循环利用，降低成本。

### 6.2 深海矿产资源开采系统采集率

采集率（ $C$ ）取决于采集覆盖率（ $C_f$ ）和集矿机采集效率（ $C_x$ ），按公式（1）计算采集率。宜通过优化采矿规划，提高采集覆盖率（ $C_f$ ）和采矿机的采集效率（ $C_x$ ）。

$$C = C_x \times C_f \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$C_f$ ——采集覆盖率，是采矿覆盖面积（ $A_c$ ）与设计开采矿区面积（ $A_d$ ）的比值，见公式（2）。

$C_x$ ——采集效率，是单位面积上集矿机采矿量（ $A_m$ ）与单位面积赋存矿量（ $Q_a$ ）的比值，见公式（3）。

$$C_f = \frac{A_c}{A_d} \dots\dots\dots (2)$$

$$C_x = \frac{A_m}{Q_a} \dots\dots\dots (3)$$

海底深海矿产资源采矿系统的采集率宜不低于90%，提高系统采集率宜采取以下措施：

- 通过集矿机位置控制方法设计优化集矿采集规划；
- 保证系统具有精确的定位和导航；
- 提高海底集矿装置行走性能稳定性；
- 采集轨迹规划宜紧密相接，宜推荐集矿机采集面重叠覆盖率不大于10%。

### 6.3 深海矿产资源开采系统回采率

回采率（ $R$ ）是衡量海底深海矿产资源采矿系统开采技术重要指标，取决于开采区块内深海矿产资源矿石生产量（ $R_c$ ）和该区块估算的深海矿产资源矿石储量（ $R_s$ ），按公式（4）计算回采率。

$$R = \frac{R_c}{R_s} \dots \dots \dots (1)$$

$R_c$ ——开采区块内深海矿产资源矿石生产量，单位为吨。

$R_s$ ——该区块估算的深海矿产资源矿石储量，单位为吨。

海底深海矿产资源开采回采率宜大于85%。

### 6.4 深海矿产资源开采系统单位能耗

采矿系统均宜采取以下降耗技术与措施：

——在保证输运通畅前提下，提高海底深海矿产资源输运浓度；

——以连续转运结核方式设计水面平台，缩短平台上的物流流程，按照最简物流流程设计运输船舶，规划运输方式。

每吨湿结核开采耗能不超过100千瓦时，二氧化碳排放量不超过70千克（100%柴电），不超过10千克（100%可再生能源）。

### 6.5 深海矿产资源开采系统成本

海底深海矿产资源采矿系统成本宜通过优化系统设计、提高使用寿命、引入智能管控达到提高经济效益；宜按系统组成，利用以下措施降低系统成本：

——海底集矿系统宜采用以下措施：

- 设计高效能海底深海矿产资源采集方式，确保集矿机无空载运转；
- 控制集矿机建造成本；
- 设计满足采集率要求的集矿机采集规划，提高采矿经济性。

——水下提升系统宜采用节能高效率运转方式，选取高效率水力提升系统经济性或高效能的水下穿梭系统。

——水面支持平台/船宜以连续、规模化转运海底深海矿产资源方式开展设计，缩短平台上的物流流程，提高采矿系统运行经济性。

——转运系统宜按照最简物流、转运流程设计运输船舶，规划运输方式。

## 7 可靠

### 7.1 总体要求

海底采矿系统及其附属生产系统宜满足在复杂海洋环境条件下持续稳定作业的设计时长，系统宜满足ISO 9001，要求可参考GB/T 5080.1的相关规定，具体如下：

——采矿系统生命周期不小于20年；

——采矿系统生存工况满足百年一遇的台风环境；

——采矿系统全年工作时间大于280天（海况允许条件下）；

——采矿全系统宜开展可靠性计算，系统的每个子系统宜具备可靠性数据，可靠性数据获得方式可参考IEC 61703；

——采矿系统宜开展环境适应性评估，针对实际运行环境中存在的摇晃、盐雾、腐蚀等影响因素采取应对措施；

- 采矿全系统宜采用便于维护技术，水下可维修，水面有保障运维船；
- 采矿系统宜采用子系统模块化设计，提高组件的集成度，实现水下原位快速拆装易损部件；
- 采矿系统宜优先选取低损耗的材料设备进行构建；
- 海底集矿系统、水下提升系统和水面支持平台/船和的联动宜通过数值模拟和模型试验的方式进行评估；
- 采矿系统宜充分利用可靠性试验保证系统可靠性，在研制阶段通过试验充分暴露系统故障，在验证鉴定阶段通过统计试验开展系统可靠性评估，可靠性试验方法可参考 GJB 899。

## 7.2 海底集矿系统可靠性

为保证海底集矿系统沿给定路线连续机动、适应地形变化、精准探测、结核采集、结核输运等任务执行能力的可靠性，宜采取以下措施：

- 海底集矿系统的核心部件（如材料、耐压元件、机械设备、管路系统、电气装置、通讯与航行设备等）应符合中国船级社《潜水系统与潜水器入级规范》要求；
- 海底集矿系统宜采用模块化设计和冗余设计，保证作业连续性和可靠性；
- 海底集矿系统易损部件宜预先完成连续工作时间试验，要求不低于系统无故障最低工作时间要求，且同时配备替换件；
- 软管宜符合与压力、温度、侵蚀、腐蚀、老化、磨损、疲劳、几何约束和机械应变相关的设计标准（如 API RP17B）或制造商标准，软管浮力配制满足一定结核矿石浓度变化要求；
- 宜针对高海情或其他可能的意外工况开展应急布防回收方案设计，保障海上作业的可靠性；
- 宜具备系统设备防丢失或自动找回设计；
- 如采用采集机器人，宜具备对微地形、结核丰度以及结核粒径变化的适应性，保证采集顺畅和高采集率，宜有足够数量的备用。

## 7.3 水下提升系统可靠性

### 7.3.1 管道方式水下提升系统

水下提升系统如采用管道方式水力提升形式，系统的可靠性宜满足：

- 管道方式水下提升系统设计宜避免管道堵塞；
- 输送立管设计，结构强度宜参考 API RP 2RD、API RP 16Q、API Spec 17J 和 API RP 1111 相关的行业标准要求；
- 软管宜符合与压力、温度、侵蚀、腐蚀、老化、磨损、疲劳、几何约束和机械应变相关的设计标准（如 API RP17B）或制造商标准，软管浮力配制满足一定结核矿石浓度变化要求；
- 管道设计考虑载荷、腐蚀和磨损等因素，满足系统寿命年限；
- 系统提升泵等动力设备宜具备防堵设计，避免叶轮损坏，设备材料宜采用耐磨损材料；
- 如采用中继舱，其料仓宜具备防溢功能，并设有监测和调节功能；
- 输送立管若存在涡激振动，宜设计减涡装置。

### 7.3.2 水下穿梭式水下提升系统

水下提升系统如采用水下穿梭形式，系统的可靠性宜满足：

- 水下穿梭器的设计应考虑设计参数，包括压力、温度、振动、操作和环境条件等，设计载荷代换可靠；
- 水下穿梭器应考虑吊放操作不当及意外事故，并针对该情况制备应急方案；



- 水下穿梭器的建造宜满足 GB/T 40073、中国船级社《潜水器系统和潜水器入级规范》、中国船级社《潜水器检验指南》；
- 穿梭式提升方式的水面、水下对接机构应具有冗余设计。

### 7.3.3 链斗式水下提升系统

链斗提升方式应具有防缠绕设计，并针对意外缠绕情况制备应急预案。

### 7.4 水面支持平台/船可靠性

水面支持平台/船的设计要求可参考船级社船舶设计相关要求。水面支持平台/船可靠性宜满足：

- 水面支持平台/船符合入级规则和船旗国或担保国的相关国家法律；
- 水面支持平台/船满足海工作业相关标准设计要求，配有必要的应急起吊救援设施；
- 水面支持平台/船的动力系统宜采用采矿作业与航行操控相隔离的方式构建；
- 水面支持平台/船设计有转运货船靠泊时锚泊系统和防撞装置，并有船舶靠泊方案；
- 水面支持平台/船应具有一定的矿物存储功能，满足一定排水量，具有动力定位能力，支持水下长距离链斗提升、管道提升的联动运行；
- 水下提升系统如采用水下穿梭形式，水面支持平台/船航行设备的配备宜满足水下穿梭器设计航行系统功能的需求，至少包括对水下穿梭器深度/高度、航向、速度、姿态、位置的控制，并能实现避碰功能（ROV 不适用），宜满足 GB/T 37472；
- 水下提升系统如采用水下穿梭形式，水面支持平台/船定位通信的配备应能满足水下穿梭器在水面回收时将自身位置信息发送给母船，降低水下穿梭器丢失的风险。

### 7.5 转运系统可靠性

转运系统包括海底多金属结核转运机械设备和转运货船等。转运系统可靠性宜通过以下措施保证：

- 海底多金属结核转运机械设备宜符合工业设计标准，配备足够的机械保护，具有在转运过程中间正常或紧急操作期间保护关键部件的能力；
- 转运系统宜有备用矿物储存设施，保障海底采矿系统连续作业；
- 转运货船按照海上停留天数以及到港口的航行距离，储备足够的燃油储量，宜满足不少于预计海上消耗加上 7 天的航行储备；
- 转运货船通过入籍船级社审核，并备有维修预案；
- 转运货船宜满足水面支持平台/船的靠泊方案要求，宜符合靠泊时装卸海底多金属结核工况稳性的要求。

### 7.6 海上矿物加工系统可靠性

海上矿物加工系统可靠性宜满足：

- 系统宜具有一定选矿、粗加工、脱水的功能；
- 系统采用管道输送、密闭性加工设备；
- 加工设备易于维修，能够适应恶劣海况。

## 8 智能

### 8.1 总体要求

海底深海矿产资源采矿系统智能宜实现：

- 组成深海矿产资源采矿系统各系统间应具备智能化（自主）协同运作能力，保证运行效率，提高安全水平；
- 各子系统应具备状态监测功能，其中内部感知支撑其运维过程中的安全预警，外部感知支撑自主控制决策；
- 各子系统基于状态监测的条件下，可进行故障诊断及健康状态评估，并实现视情维护；
- 各子系统间在智能运行运维作业过程中，应基于先进态势感知能力实现自主决策与控制能力；
- 协同运行管控及各子系统的智能化（自主）运行运维要求详见以下部分。

## 8.2 系统间协同运行管控

海底深海矿产资源开采系统间智能协同运行管控指以信息技术、数据传输技术、电子传感技术、智能控制技术以及计算机处理技术等先进技术手段为依托手段，为实现智能海底集矿、智能水下提升、智能脱水和智能转运四大系统的协同作业提供状态分析与决策支持，实现海底深海矿产资源开采系统的数字化、信息化、智能化管控。

海底深海矿产资源采矿系统的智能协同宜具有以下能力。

- a) 运维：
  - 具有先进感知和场景再现能力，实时分析海底深海矿产资源采矿系统运行的健康程度，提供整个系统实时的运行状态评估信息；
  - 基于大数据技术，结合海底深海矿产资源采矿系统过去的运行状态，综合现在运行状态的发展趋势，对系统的未来发展进行预测，合理避免可能产生的故障；
  - 基于历史数据和模型分析，为海底深海矿产资源采矿系统运行维护、故障点检测等提供依据信息。
- b) 态势预警：
  - 基于大数据技术、预测算法和模型分析手段，对海底深海矿产资源采矿系统运行状态的未来发展态势进行在线预测，提供设备健康状态实时预报、预警信息；
  - 预警系统具有自检功能，即对自身的故障自动进行检测和报警（或指示），自检出故障时，发出视觉和听觉报警信号。
- c) 视情维护：
  - 实现设备运行、效率、维保、能效等设备数据的统计分析，通过大数据分析实现预测性维护；
  - 实时分析安全监测数据，对矿场、供电、设备等进行隐患预警，实现数字化展现。
- d) 自主决策：通过信息融合实现协同化生产和集中化管控，利用大数据分析与管理技术实现科学决策。
- e) 智能监测：
  - 根据地质、测量、采矿等资料和数据，在综合分析、研究的基础上，利用数字孪生技术，创建能反映矿床地质特征、可动态调整的三维可视化模型；
  - 建立以定点监控图像、环境监测数据、遥感数据为核心的生态数据库，实现矿场管理全域、全要素、全过程数字化，可进行历史追溯。
- f) 智能协同管控：实现海底集矿系统、水下提升系统、脱水系统、转运系统四个子系统的智能协同管控，合理路线规划，避免设备发生碰撞，保证作业安全，提高运营经济性。

## 8.3 海底集矿系统智能要求

智能采集指利用人工智能、控制论、信息处理等技术，为海底集矿系统运行提供动态感知、运行轨迹规划和作业效能优化控制方法。

海底深海矿产资源采矿系统的智能采集宜具备以下能力。

- a) 动态感知：基于海底环境，采用不同的传感器在线采集实时的噪声、水、土壤、羽流、水的浊度等指标数据，并进行传输和在线监测，动态、整体地洞悉智能海底集矿系统当前的工作环境，为后面的轨迹规划和智能作业提供先决条件。
- b) 全局轨迹规划：
  - 根据海底深海矿产资源丰度，依据采集率、回采率等指标构建综合评价标准，进行智能化的全局轨迹规划；
  - 根据传感器采集的实时数据进行在线优化，针对智能采集过程对路径进行实时修正，实现智能化的在线快速轨迹优化的能力。
- c) 局部轨迹规划：基于光学传感器、雷达传感器等，通过机械臂，进行局部路径规划，以使对生物多样性的破坏最小，对海床的压实最小，采集成果最大化。
- d) 智能作业：
  - 海底集矿系统根据不同的底质环境、海底深海矿产资源丰度、粒径以及微地形等工况匹配优化采集作业单元的工作参数，提供在线的海底深海矿产资源结核采集效率与精准性的评估结果；
  - 具有在线感知、评估、学习与决策能力，优化迭代作业控制参数，提高作业精确性和采集效能；
  - 可实现采矿作业路线智能规划。
- e) 动态避障：
  - 基于智能海底集矿系统的环境感知系统，对采矿车运动过程中环境中的运动障碍物进行检测；
  - 对运动过程中可能遇到的障碍物进行可能性评级与预测，判断与智能海底采矿车的碰撞关系；
  - 根据不同的碰撞关系制定不同的避障策略，通过智能决策和路径规划，使智能海底采矿车安全避障，由深海采矿决策系统执行。

#### 8.4 水下提升系统智能要求

水下提升系统如采用水力提升，为海底矿产资源输送系统的内部正常流动和安全运行提供优化和决策，宜具备以下智能能力。

- a) 自动监视：在线监测输送流速、压力、结核浓度及提升泵转速、提升效率等信息，显示系统操作状态（操作或未操作）。
- b) 输送状态智能调控：
  - 基于自动监视提供的信息，并根据历史数据在线学习，给出输送状态的智能诊断与预警；
  - 具有故障检查及应急处理等决策能力，保障泵管内部流动通畅。
- c) 作业状态感知与预警：
  - 宜具有水力提升系统位移、力学状态在线监测；
  - 对关键部件工作状态进行判别和预测分析，快速给出调整策略和应对方案，并避免漏报警和过报警。

#### 8.5 水下穿梭提升系统智能要求

水下提升系统如采用水下穿梭形式，智能要求宜具备以下能力。

- a) 精准定位：水下穿梭器应设置水面定位装置和水下定位装置，水下定位装置应与水面支持平台上的导航/定位系统相匹配，以防止水下穿梭器丢失。

- b) 智能避碰：水下穿梭器拥有智能感知系统，可对航向、航速、行走路线等进行智能控制，并具备智能避碰能力。
- c) 协同控制：控制多台水下穿梭器协同作业。

## 8.6 水面支持平台/船智能要求

水面支持平台/船应具备生产集成监控平台，实现集中一体化在线监控；实现数字化管理，可衡量、可追溯，具有高度开放性、兼容性、扩展性的平台架构，通过平台实现图形化展现与空间管理。

水面支持平台/船的智能要求宜具备以下能力。

- a) 智能监测：
  - 通过传感器对水下采矿设备的位置、运行状态和立管张力等进行实时监测，应设有实时摄像装置，并配有足够且可靠的水下照明，使采矿操作人员能够实时、准确、全面地掌握水下采矿设备的状态和安全范围等；
  - 对矿场作业人员、设备、作业环境和作业过程进行实时监控。
- b) 协同控制：
  - 建立远程服务支持平台。对海底集矿系统、水下提升系统、脱水系统、转运系统的工作状态进行智能监控，能够实现对集矿机和水下转运系统装备在线智能远程控制；
  - 建设调度控制中心。设海底深海矿产资源采矿系统中央智能控制中心，能对智能海底集矿、智能水下提升、智能脱水和智能转运四大系统进行协同控制。
- c) 智能接驳转运：水面支持平台/船运输结核至转运船时，实现收发双向独立，全双工运行，满足高效接驳转运需求。
- d) 智能脱水：
  - 智能回收、存储水下提升系统输送的海底深海矿产资源；
  - 将深层海水、沉积物等废弃物排放控制与生产过程控制系统相结合，通过生产控制策略减少废弃物排放，并在线跟踪其传输、回放过程；
  - 建立废弃物管理数据库，利用历史数据和系统的分析功能，评估废弃物的排放结果及其产生的影响；
  - 智能回收过程、智能排放过程实现连锁控制。
- e) 应急响应、预警、报警：提供监测数据接口，依据故障程度自动分级报警和通知。
- f) 跟踪评价：
  - 建立数字统计、跟踪系统，实时提供资源节约与综合利用指标；
  - 建立智能化分析、评价系统，从价值链、供应链、产业链综合分析和评价采矿过程资源价值。

## 8.7 转运系统的智能要求

海底深海矿产资源采矿系统智能转运系统指利用智能路径规划等技术和手段，为船舶航行及结核转运过程提供优化决策，主要涵盖深海矿产资源智能转运和船舶智能航行两方面。

智能转运系统宜具有以下能力：

- a) 自主航行：船舶智能航行能够在不同航行场景和复杂环境条件下实现自主航行，同时可与无人码头柔性衔接。
- b) 智能转运：
  - 建立数字化、智能化转运系统，在结核从水面支持平台/船运输至转运船时，合理采用湿式转运法或干式转运法或其他合理方法，提高结核资源与废料资源的评估、开发和转化能力；

- 资源综合利用加工流程与生产加工主流程实现集成，通过自动化综合控制、数字化统一管理、智能化科学匹配降低综合转运成本。
- c) 储量动态管理：转运系统应具有已脱水结核智能存储的能力，针对转运过程中矿产储量的变化而持续地开展统计，在保证一次转运结核量最大的同时，同时保障结核破碎率最小，结核废料率最小。
- d) 智能路径规划：智能转运系统应具有规划路径能力。
- e) 大数据存储与分析功能：
  - 实现从海底深海矿产资源装载、航运、进港、停靠、无人接驳到空载返航等全链条的无人调度、管理和控制，可按需进行模型、算法迭代更新，提高转运效率和运输安全性；
  - 数据应具备编码、时间、空间、关联、隶属等统一规范，便于数据存储、数据共享和信息融合。

## 9 安全

### 9.1 总体要求

#### 9.1.1 法规符合性要求

- 深海采矿系统的安全设计、建造和营运应符合《国际海上人命安全公约》国际海事安全公约、规则以及船旗国法定规则的有关规定。对于不属于船旗国管辖范围的任何事项，例如非船员的劳动者权利以及与船舶操作以外的采矿过程有关的人身健康和安全的，遵守担保国的国内法。
- 对于在专属经济区以内作业的深海采矿设施的构造安全和作业安全应符合沿岸国法定规则的有关规定。
- 对于在公海作业的深海采矿设施的构造安全和作业安全宜符合国际海底管理局规章、规则的有关规定。

#### 9.1.2 安全原则

采矿系统及设备的设计应能够最大程度保障人命和财产安全。为此在设计中应遵循以下规定的原则。

- a) 系统应按单个误操作或单个故障不至于危及人命安全、导致重大财产损失的原则进行设计。
- b) 系统应设置安全作业和应急操作所必需的仪表。
- c) 对系统及设备应采取适当的保护措施，以防止过载、超压、超温和超速。
- d) 对系统及设备应尽可能通过本质安全设计避免或防止危险的发生。
- e) 针对预计可能发生的安全风险，应有降低风险发生概率和减轻事故后果的措施。
- f) 安全系统宜包括两套独立的保护系统，以防止设备、管路系统及正常过程控制中单个故障或失效所产生的影响或使这种影响降至最低。两级保护一般应由不同功能类型的安全装置构成，以减小因同样原因发生故障的可能性。
- g) 安全系统、控制系统及报警系统应设计成故障安全型。
- h) 当由于发展太快而不能由人工干预消除的故障状态出现时，安全系统应能即刻做出保护动作，使采矿系统及时恢复至安全状态。
- i) 对于系统中可移动、活动的大型设备和工具，应有可靠的固定、系固措施。这些措施的设计应考虑作业、迁航、风暴自存和事故倾斜等工况。这些大型设备主要包括水下采矿车、水下中继舱、水下扬矿泵、采矿立管单根等。
- j) 系统及设备应采取有效的防护措施，并应考虑下列方面：
  - 1) 安装于水面支持平台的系统和设备满足在潮湿、盐雾环境下的防腐要求。

- 2) 安装于水下的系统和设备应符合水下工作防腐、防碰撞、防干涉要求。
- 3) 位于飞溅区的系统和设备应采取有效的防腐和防护措施。

系统及设备中所有的联接件和紧固件应有可靠的防松措施。

### 9.1.3 风险评估

本条所规定的风险评估技术要求为推荐要求，可根据船东的需求自愿开展风险评估工作。

采矿系统的风险评估可分为下列3个层次：

- a) 对系统整体和子系统定性的风险评估，分析的方法可以是HAZID、HAZOP和What-if等方法；
- b) 功能层次的风险评估，可采用FMEA/FMECA的方法；
- c) 设备和/或部件层次的风险评估，可采用FMEA/FMECA的方法。

上述评估工作应相继开展，从对整个设计风险辨识开始。必要时针对前期辨识出的具体风险展开进一步的详细分析。

应开展覆盖采矿系统整体的定性风险评估，以实现下列目标：

- a) 辨识出于采矿系统相关的潜在风险（包括对深海采矿设施上其他系统的影响）；
- b) 证明采矿系统符合本指南所规定的设计原则；
- c) 提出适当的阻止事故和减轻风险后果的措施；
- d) 提出进一步分析、试验或风险评估的需求。

对采矿系统整体风险评估的目的是辨识与系统相关主要危险源，这些危险源包括但不限于：结构失效、机械失效、电气失效、定位失效、失去稳性、设备碰撞、落物、坍塌、直升机碰撞、极端环境。

功能层次的风险评估应当覆盖子系统及其控制系统，并辨识出需要进一步进行风险评估的设备和/或部件。

部件层次的风险评估应与功能风险评估相关联，以全面理清设备失效模式局部影响和系统中控制/安全功能和其他设备/界面失效影响。

FMEA/FMECA的验证。

- a) 应编制并实施一套确认程序以验证选定的关键风险评估结果。例如，对于FMEA/FMECA评估，这包括确认辨识出的系统失效模式的有效性、辨识出的系统失效模式的影响、安全控制的响应和针对失效的其他保护措施的有效性。
- b) 部分验证工作可在产品制造厂进行。如果整体的测试要求组装和在设施上安装，在调试时FMEA/FMECA确认工作可以作为系统完整性试验（SIT）的一部分。
- c) 试验程序及结果应形成文档以保证FMEA/FMECA结论经过确认。
- d) 应邀请第三方机构审查FMEA/FMECA试验程序，并见证FMEA/FMECA试验。

船东应保留风险评估的结果。如果有任何对采矿系统、子系统、设备或部件的后续改建，风险评估成果应进行更新，以覆盖改建内容，并且证明已经适当地减轻了由改建带来的风险。

### 9.1.4 安全应急计划

全应急计划应按照良好行业做法和准则编写，以便为作业者高效应对事故和事件提供有效的行动计划，并应包括：

- a) 控制事故风险的总体目标、具体目标和安排；
- b) 相关规范、标准和协议；
- c) 组织结构及人员职能和责任；
- d) 经授权可启动应对机制的个人详情；
- e) 正常作业过程中的控制机制详情；
- f) 应急设备详情；

- g) 安全管理系统详情；
- h) 采矿作业和设备，包括应急设备的描述；
- i) 对所有可预见事故的说明、事故可能性和后果评估及相关控制措施；
- j) 随时可以在采矿船上出现的人数；
- k) 对保护采矿船上人员和确保他们安全逃生、撤离和获救的安排的说明；
- l) 在发生事故时维护控制系统以监测海洋环境的安排详情；
- m) 应急计划详情；
- n) 可能影响响应设备效率或响应工作成效的已知自然海洋环境条件详情；
- o) 旨在提醒海管局注意的警告机制详情，以及该等警告所载信息类型；
- p) 协调任何应急工作的安排详情；
- q) 人员培训方案详情；
- r) 对计划执行情况监测工作的说明；
- s) 审计和审查流程详情；
- t) 有其他危害/有害物质存在详情。

## 9.2 设施安全

### 9.2.1 海底集矿系统

#### 9.2.1.1 总体要求

海底集矿系统由水下采矿车及其相关系统构成，用于在海床上采集矿石，根据所开采的矿种通常具有矿石剥离、破碎、收集等功能，可以通过履带或螺旋推进器等行走机构在海底行走。

#### 9.2.1.2 框架结构

水下采矿车和相关系统的框架结构应具有足够的强度，设计中应考虑由于触底、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；结构设计应考虑水能够自由的进入和排出，并有防腐、防海生物措施。

#### 9.2.1.3 紧急定位装置

水下采矿车应设置1套水面定位装置（例如频闪灯）和1套水下定位装置（例如声波发生器、声纳反射器或浮标）。

#### 9.2.1.4 通信系统

水下采矿车应设有适当的通信装置，以便能够实现其与水面支持平台上的传感器/设备和采矿控制站之间的数据传输。

### 9.2.2 水下提升系统

#### 9.2.2.1 总体要求

水下提升系统用于将矿石从海底输送至水面支持平台，可以采用水力提升、气体提升、磁感应提升、穿梭提升和连续输送机提升等多种提升方式。一般采用水力提升方式的水下扬矿系统。

水下扬矿系统由采矿立管、立管悬挂装置、水下扬矿泵、水下中继舱、挠性跨接管或水下输送软管、连接器等组成。

#### 9.2.2.2 采矿立管

采矿立管可一般为刚性管或挠性管。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；其材料、焊接及无损检测应满足中国船级社《海上钻井装置检验指南》中关于钻井隔水管的相关规定；挠性采矿立管的材料选择应适用于预期应用条件并满足API RP 17B的相关要求。

采矿立管的设计衡准和分析方法应满足中国船级社《海洋立管系统检验指南》中的相关要求。

采矿立管的设计应根据计划的作业方式（如恶劣海况时是否解脱、预期应用的矿场及周期），满足设计寿命内的疲劳要求和最危险工况的强度要求。如果立管设计为在设计寿命内应用于多个预期的不同海域矿场，立管的累积疲劳损伤应符合设计要求。

### 9.2.2.3 立管悬挂装置

立管悬挂装置应为采矿立管及跨接管提供足够的顶部张力，并满足强度和疲劳的相关要求。

### 9.2.2.4 水下扬矿泵

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，并满足深海采矿的特殊应用条件。

### 9.2.2.5 水下中继舱

水下扬矿系统中如果设有水下中继舱，则该中继舱本体和与采矿立管的连接应具有足够的强度，结构框架应符合本指南要求，并应设有适当的防碰撞保护装置。

### 9.2.2.6 挠性跨接管和水下输送软管

可采用挠性跨接管或水下输送软管将矿浆从海底集矿设备输送至水下扬矿泵、采矿立管或水下中继舱的底部。

## 9.2.3 水面支持平台

### 9.2.3.1 船体

深海采矿水面支持平台一般为船式和柱稳式，柱稳式水面支持平台船体应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》相关适用部分的要求；船式水面支持平台船体应满足中国船级社《钢质海船入级规范》相关适用部分的要求。

深海采矿水面支持平台海上作业的设计寿命应根据开采规模、预期寿命和开采计划等因素确定，海上航行工况的设计寿命应不小于25年。对应的波浪环境条件为无限航区（25年一遇的北大西洋环境，对应于 $10^{-8}$ 的波浪载荷超越概率）。

船式水面支持平台的稳性应满足相关法规的适用要求；柱稳式水面支持平台的稳性应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》有关柱稳式平台相关适用部分的要求。

### 9.2.3.2 轮机

船式深海采矿水面支持平台的轮机系统应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第4篇对于水面式平台的适用要求。

柱稳式深海采矿水面支持平台的轮机系统应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第4篇对于柱稳式（半潜式）平台的适用要求。

### 9.2.3.3 电气装置

#### 9.2.3.3.1 总体要求



深海采矿水面支持平台的电气装置应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第1篇和第5篇中对于电气装置的适用要求。

#### 9.2.3.3.2 水下电气装置

用于水下采矿作业和在正常作业时浸没于水中的电气装置应满足中国船级社《潜水系统与潜水器入级规范》（2018）第10章的适用要求。

电气系统应有机械防护以防止其受到损伤。

当电气系统使用1000V以上的交流电或直流电时，应进一步注意人员的防护。这包括：

- a) 提供更高等级的外壳防护；
- b) 减少可能的接地故障电流；
- c) 设置1套固定的屏障使人员与设备保持安全距离；
- d) 设置双重的绝缘，包括两层绝缘层，中间有导电屏；
- e) 提供防护服。

#### 9.2.3.3.3 水下线缆

水下线缆、电缆一般应经中国船级社认可，并证明其在规定工作条件下能安全使用。对于特殊类型电缆，应证明其在规定工作条件下的适用性。

#### 9.2.3.4 消防

深海采矿水面支持平台的消防应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第7篇对于海上移动工程平台的适用要求。

#### 9.2.3.5 定位系统

定位系泊系统的环境条件的重现期、环境载荷和平台运动计算、设计工况、系泊分析和设计衡准应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第9篇的适用要求。

系泊设备、锚机应满足中国船级社《海上移动平台入级规范》第9篇的适用要求。

#### 9.2.3.6 布放和回收系统

布放和回收系统用于布放、回收采矿立管、水下扬矿泵、水下中继舱和采矿车等水下采矿设备及部件，主要包括以塔架为中心的塔架提升系统和布置于深海采矿水面支持平台舷侧或艏侧的吊放系统，以及用于处理采矿立管单根的管柱处理系统。

a) 塔架提升系统：

- 1) 塔架提升系统是指用于提升和下放采矿立管的系统，包括塔架及其底座、天车总成、游动滑车、大钩、主提升绞车、死绳固定器等主要设备。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 塔架提升系统中的塔架及其底座、主提升绞车、天车、游动滑车和提升大绳、大钩及仪表和控制等主要设备应符合中国船级社《海上钻井装置检验指南》的适用规定。
- 6) 升沉补偿系统应满足中国船级社《海上钻井装置检验指南》和《钻井补偿系统指南》的适用要求。

b) 吊放系统：

- 1) 吊放系统应满足中国船级社《潜水系统与潜水器入级规范》第 14 章对吊放系统的适用要求。
- 2) 吊放系统应具有有效限制被吊放设备水平方向晃荡的功能，或采取等效的措施。
- c) 管柱处理系统：
  - 1) 管柱处理系统主要用于运移和处理采矿立管单根，主要设备包括抓管机、猫道机、吊钳、夹钳等。
  - 2) 管柱处理系统应满足中国船级社《海上钻井装置检验指南》第 3 章第 9 节的相应规定。

## 9.2.4 转运系统

### 9.2.4.1 总体要求

矿石货物转运系统主要包括用于矿石货物转运的起重装置、输送装置、转运装置、控制和监视装置、应急关断装置等。矿石货物转运系统应有足够备用装置以便在单一部件失效时投入使用，宜进行失效模式及影响分析。

### 9.2.4.2 起重装置

矿石货物转运系统中的起重装置应满足中国船级社《船舶与海上设施起重设备规范》的要求。

### 9.2.4.3 输送装置

在正常的作业和紧急状态（例如超速）下，通过采用下列装置，输送装置/传送器应能在额定载荷下安全地从额定速度减速并停止，而不发生过度的冲击：

- a) 1 套用于正常作业的电气的或机械的刹车系统；
- b) 1 套能够在动力中断时自动操作的机械式刹车系统，并用作驻车刹车；
- c) 应设置另外一套附加刹车，它能够在主刹车失效时自动启动并工作。

刹车应能在输送装置/传送器的任一传动装置失效时自动启动并工作。

当由于安全的原因需要较低速度时，输送装置除制动系统外，还应具有自动减速功能。

采用导轨的矿石货物转运系统应设有防止脱轨的装置。该装置应能够在传送轮或导向滚子失效的情况下有效工作。轨道的连接应包括适当的互锁装置以防止脱轨。导轨清扫装置应设置在传送轮和导向滚子的前方。

应设有防止在传送轮或轴失效时矿石货物输送机滑落的装置。

### 9.2.4.4 转运装置

转运装置应能将矿石货物安全、高效地从水面支持平台转运至矿石运输船舶，主要承载部件或设备应能承受操作过程中的最大载荷，并且当在海洋环境条件超出转运作业限值时，及时停止转运作业以保障深海采矿设施和矿石运输船舶的安全。

### 9.2.4.5 控制和监视装置

矿石货物装载和卸载作业应从一处单独的矿石货物控制站进行控制和监视，监视装置应能显示系统操作状态（操作或未操作），动力的可用性、过载报警、空气压力、刹车机构状态、液压介质压力、供电状态或电流、马达运转情况和马达过载等信息（若适用）。

### 9.2.4.6 应急关断装置

应设置应急关断装置用于在紧急状况下停止矿石货物转运系统，而不产生附加的安全风险；应急关断装置应位于每一控制位置；矿石货物转运系统应能在应急关断装置复位至起动位置后，从控制站起动。

动力单元的远程关断操作位置应设置在其所在处所的外部，以便能够在火灾或其他紧急情况下将其停止，同时也应设置就地应急关断装置。

### 9.2.5 海上矿物加工系统

海上矿物加工系统的主要设备包括筛分装置（如振动筛）、重力沉降罐、离心机、水力旋流器和矿浆泵等。

### 9.2.6 其他

#### 9.2.6.1 控制和监视系统

控制和监视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。

水面支持平台上应设有一个集中控制站，对采矿系统及设备进行控制和监测，采矿系统集控站应具有紧急关停水下采矿设备（例如，水下扬矿泵、水下采矿车等）的功能，且紧急关停通信线路应该是独立的；应具有将采矿立管紧急解脱的功能。

水下采矿车位置、及其与采矿立管之间相对位置、安全作业范围的设定等信息应在驾驶室/DP控制站实时显示，以方便驾驶人员和DP操作人员能够随时了解这些信息；采矿系统集控站的紧急操作信息应在驾驶室/DP控制站实时显示；水面支持平台上的紧急操作、安全报警信号应能在采矿系统集控站显示；采矿系统集控站与驾驶室、DP控制站应设有双向可靠语音通信设备。

#### 9.2.6.2 脐带缆

脐带缆应当通过强力构件或应变消除附件附着于水下采矿车等服务的水下设备上，从而使得单独的电接头不承受拉伸载荷。脐带缆的长度应适应于所服务的水下设备的设计深度，并应包括脐带缆重新端接的额外长度。

当脐带缆被考虑作为第二回收装置时，脐带缆的布置应使得所服务的水下设备的重量由脐带缆中的承载部件承受，该承载部件应满足中国船级社《潜水系统与潜水器入级规范》第14章的适用要求。

脐带缆的接头应具有足够的防腐蚀性能和密封性能，能够抵抗事故脱离，并且其额定压力应不低于脐带缆软管的额定压力。

#### 9.2.6.3 应急解脱

水面支持平台/船应设置应急解脱装置，在发生紧急事件、定位系统失效、环境条件突然超过操作阈值等情况时能够安全可控地实现紧急解脱。

系泊定位系统、采矿立管系统、矿物转运系统均应设置应急解脱装置。

采矿立管系统的应急解脱部件包括立管与水面支持平台/船之间的快速解脱连接器、立管底部总成等。在立管底部解脱之前，通常需要先减小立管的顶部张力以防止反冲。立管设计时，应确定此时保证立管稳定性的最小张力要求。

若矿物转运系统采用刚性硬连接方式进行矿石货物的海上过驳，也应设置满足安全要求的应急解脱系统。

## 9.3 采矿作业安全

承包者应当制定采矿作业安全规程,并应保证从事采矿作业的船只和设施具有管理海上作业和采矿作业交叉领域的适当管理系统。

采矿船只和设施在作业期间应遵循船级社、船旗国和担保国的监督方案,并应遵守《国际安全管理法规》。

对于采矿船只和设施的采矿系统部分,应根据适用规则对采矿专用设备进行认证。

采矿作业前应进行安全预评价,并宜按照相关法规和标准设置安全区。

应建立采矿作业过程中的安全巡检制度,制定巡检方案,定期核查巡检记录,并保证系统安全巡检机构定期评价监测方案的准确性和有效性。

采矿作业过程中,应在采矿设施附近设置守护船以便监测预警并能够及时处理安全事故。

应针对采矿作业过程,制定物料管理制度和危险品安全管理责任制。

当电气系统使用1000V以上的交流电或直流电时,应进一步注意人员的防护,这包括:

- a) 为电气装置提供足够的外壳防护,承受海水外压的电气设备外壳应按其最大工作压力的1.5倍进行设计;
- b) 减少可能的接地故障电流;
- c) 设置1套固定的屏障使人员与设备保持足够安全距离;
- d) 设置双重的绝缘,包括两层绝缘层,中间有导电屏;
- e) 为接近电器装置的人员提供防护服。

#### 9.4 采矿作业人员安全要求

采矿作业人员上岗前应具备必要的经验、培训和资质,能够安全地、称职地按照国际海底管理局勘探和开发规章履行职责,参与海底矿产资源的采矿人员应了解其工作可能产生的职业和环境风险,具有处理作业风险能力。

从事与水下作业有关的设备、系统、工具和电气装置操作、安装、改造和维修的人员应了解水下工程作业风险,熟悉安全作业规程,掌握作业程序及风险管控措施。

采矿船船员的资质和能力应符合《1978年海员培训、发证和值班标准公约》(《STCW公约》)和《2006年海事劳工公约》(《MLC公约》)有关规定。

## 参 考 文 献

- [1] IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- [2] 海管局法律和技术委员会编,“区域”内矿物资源开发规章草案, 2019
- [3] 国际海底管理局 采矿船只和设施的安全管理和作业标准和准则草案, 2022
- [4] GOMO Guidelines for Offshore Marine Operations