近底层深海环境长期监测平台设计与海试应用①

王建华[1,2], 郑皓[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: 针对深海多金属结核开采对近底层(离底高度小于 1 m)生态环境影响评估中缺乏长期连续监测手段的难题,设计并研制了一种新型近底长期监测平台。该平台采用"上浮下重"被动式自扶正结构,解决了无缆布放着底姿态不受控的问题;提出了一种全新的"休眠-唤醒"间歇式工作模式,在电池容量有限的情况下实现长时间连续监测。在东太平洋 A-5 区块成功完成了深海海试,海试结果表明,平台着底姿态稳定,成功获取了海试期间近底层海水 pH 值(均值 7.50)、流速(平均流速0.003 3 m/s)及浊度(浊度值 1.17~1.25 FTU),验证了平台在极端深海环境下的可靠性与有效性。

关键词: 深海采矿; 环境监测; 监测装置; 监测平台; 近底监测; 自扶正结构; 低功耗; 原位观测; 海试; 水文参数
中图分类号: TD857 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.015
文章编号: 0253-6099(2026)03-0117-05

Design and At-Sea Test of a Long-Term Monitoring Platform for Near-Bottom Deep-Sea Environment

WANG Jianhua[1,2], ZHENG Hao[1,2]
(1.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Exploration and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*)

Abstract: To address the lack of long-term continuous monitoring methods for evaluating the impact of deep-sea polymetallic nodule mining on the near-bottom (with height less than 1 m above the seafloor) ecological environment, a novel near-bottom long-term monitoring platform has been designed and developed. It adopts a passive self-righting design by a "upward-buoyancy and downward-gravity", and has solved the problem of uncontrolled landing attitude during untethered deployment. A novel "sleep-wake" intermittent working mode was proposed to achieve long-term continuous monitoring under limited battery capacity. Deep-sea tests were successfully completed in Block A-5 of the Eastern Pacific. The at-sea test results show that the platform maintained a stable landing attitude and successfully acquired the pH value (average 7.50), flow velocity (average 0.003 3 m/s), and turbidity (1.17-1.25 FTU) of the near-bottom seawater during the testing period, verifying the reliability and effectiveness of the platform in the extreme deep-sea environment.

Key words: deep-sea mining; environmental monitoring; monitoring device; monitoring platform; near-bottom monitoring; self-righting structure; low power consumption; in-situ observation; sea trial; hydrological parameter

深海多金属结核富含锰、镍、铜、钴等战略金属,成为全球关注的重点开发资源[1]。然而,深海采矿作业(如集矿机行走、矿物提升)将不可避免地扰动海底沉积物,形成高浓度的悬浮泥沙羽流。现有研究表明,离底高度小于 1 m 的近底层是羽流扩散的源头区域,也是底栖生物生存的关键微环境[2-3]。该区域的水文参数(流速、流向、浊度)及化学参数(pH 值、溶解氧浓度)的微小变化,直接关系到沉积物再悬浮通量及生态系统的响应机制,是界定国际海底管理局关注的"严重伤害"的关键科学依据[4]。

目前,深海观测基本依靠着陆器、锚系及遥控/自主水下机器人(ROV/AUV)等装备。这些装备存在各种不足:传统着陆器多侧重于生物诱捕或沉积物采样,缺乏针对近底微环境的高频连续监测能力;锚系系统易受洋流冲击,导致仪器离底高度发生变化;AUV 受限于续航时间,只能进行短时观测,无法长时间连续监

① **收稿日期**: 2026-03-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2803605)
作者简介: 王建华(1968—),男,湖南常德人,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为深海采矿技术。E-mail:wjianh@minmetals.com

测环境参数,ROV 则受限于脐带缆作业半径,难以进行大范围布放[5-6]。此外,深海复杂地形可能导致着底姿态达不到预期目标,容易出现传感器失效或数据失真等问题。现有的姿态校正多依赖主动推进或复杂机械臂,这种处理方式增加系统功耗与故障率[7]。近期,尽管智能化监测技术已取得一定进展[8],但针对极端环境下低成本、长周期且具备自适应能力的专用监测装备仍显匮乏。

针对目前深海探测现状,本文设计了一种专用于监测近底微环境(离底0.5~0.8 m)的长期监测平台。通过结构创新实现自适应姿态校正,通过能源管理策略突破长时监测瓶颈,并于2024年在东太平洋5 000 m级水深海域完成了原位试验,填补了该深度区间长期观测空白,为深海采矿环境影响评估提供可靠的数据支撑。

1 系统设计

近底水文长期监测平台由浮球、配重块、电池、释放器及传感器等组成,如图1所示,平台总体参数见表1。平台采用模块化设计,核心功能包括:姿态自适应调整、定时数据采集、本地存储及长时低功耗运行。平台搭载的传感器包括光学浊度计、pH计、海流计,所有传感器均固定在距底部支架0.5~0.8 m不等的位置。相较于现有装备,平台能最大程度接近海底监测层。

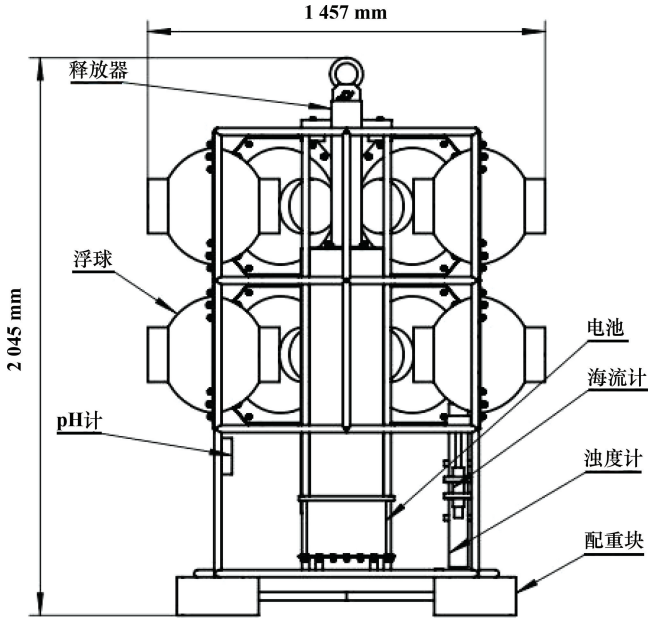


图1 近底水文长期监测平台

Fig. 1 Long-term monitoring platform for near-bottom hydrology

表1 平台总体参数

Table 1 Overall parameters of platform

序号	名称	数值	单位
1	最大高度	2 045	mm
2	最大宽度	1 457	mm
3	重量(空气中,带配重)	850	kg
4	重量(水中,带配重)	150	kg
5	浮力(水中,抛弃配重后)	145	kg

2 被动式姿态校正

深海无缆布放时着底地形随机性大,易导致平台侧翻,本文提出了一种基于静力学稳定原理的被动式自扶正方案,避免了主动控制带来的高能耗与高风险。在深海着底后平台承受外部载荷很小,平台整体可视为一个刚体。根据刚体静力学平衡条件,通过优化浮心与重心的相对位置,构建回复力矩。理论研究与海试验证结果表明,此类被动机制在深海复杂底质条件下具有极高的可靠性[9]。以平台底部配重体几何中心为基点,用“上浮下重”构型,顶部布置大体积浮球组以抬高浮心,底部设置高密度配重以压低重心,确保浮心点(B)始终位于重心点(G)的垂直上方。

以平台底部配重体几何中心为基点,建立坐标系。设重心坐标为 $G(X_g, Y_g, Z_g)$,浮心坐标为 $B(X_b, Y_b, Z_b)$。静水中,平台的平衡方程为:

$$\begin{cases} W = F_b \\ X_g = X_b \\ Y_g = Y_b \end{cases} \tag{1}$$

式中:W 为平台重力;F_b 为浮力。

当平台受到外界干扰发生倾斜(横倾角为 θ)时,浮心位置发生移动,产生回复力矩 M_r。根据刚体转动动力学方程,平台的运动方程[7]可表示为:

$$I\ddot{\theta} + C(\dot{\theta}) + M_r(\theta) = M_{ext} \tag{2}$$

式中:I 为转动惯量;$\ddot{\theta}$ 为角加速度;$C(\dot{\theta})$ 为阻尼项;M_{ext}为外部干扰力矩。基于初稳性理论计算回复力矩 M_r:

$$M_r = \Delta \times G_Z \tag{3}$$

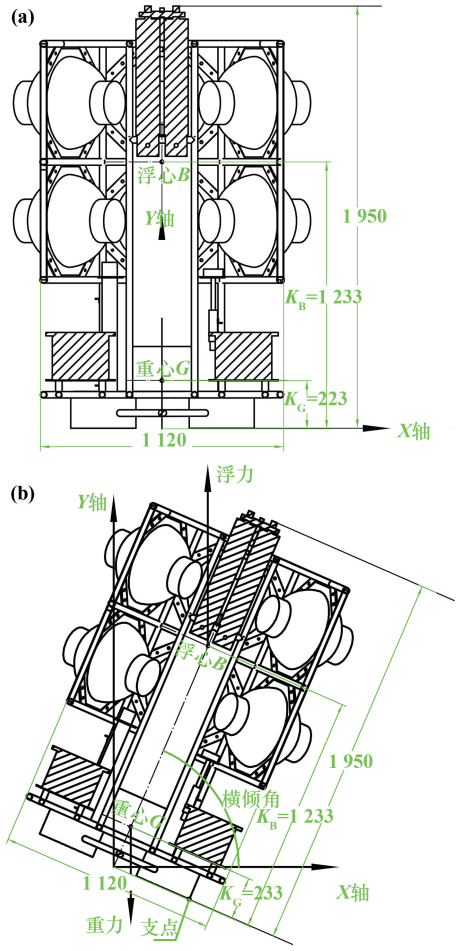
$$G_Z = (G_M + B_M/2 \times \tan^2\theta) \times \sin\theta \tag{4}$$

式中:G_Z 为回复力臂;G_M 为稳性初高,$G_M = K_B + B_M - K_G$,K_B 为基线至浮心高度,B_M 为浮心半径,K_G 为基线至重心高度;Δ 为平台排水量。

为了保证平台在极端工况下仍能复原,需满足 $G_M>0$,即浮心必须高于重心。

平台受力分析如图2所示。其中图2(a)展示了装置的重量分布与重心/浮心位置关系,通过配重计算,使得 K_G 尽可能小,而 K_B 保持在较高位置;图2(b)模拟了平台处于极端倾斜工况时的受力情况,随着平台倾斜角增加,浮力力臂和回复力矩均相应增加,保证

了平台在非常极端情况下也能自动扶正,不需要借助外部干涉。此时,计算得出的回复力矩 M_r 仍大于倾覆力矩 M_t(主要由侧向海流和底质摩擦力矩构成)。平台回复能力计算结果见表 2。



(a) 平台垂直受力;(b) 平台倾斜受力

图 2　平台受力分析(单位:mm)

Fig. 2　Force analysis of platform

表 2　平台回复能力计算结果

Table 2　Calculation results of platform's self-righting capability

参数	计算值	备注
W	8.5×10^3 N	空气中
F_b	3.5×10^3 N	水中
G_Z	0.35 m	
M_r	1 225 N·m	
流速	0.1 m/s	海底最大流速
M_t	300 N·m	

表 2 表明,$M_r/M_t\approx4.08>1$,满足安全系数要求,确保了平台在极端海况下能自动回正。

为了进一步确认理论计算结果的有效性,本文设计了一个人为制造的极端倾斜角工况,倾斜角接近 90°,公式(4)在极大角度下不再适用。水池长宽高为 15 m × 10 m × 5 m,水池底部为水泥底质,沉积物为膨润土,厚度为 30 mm。

被动式姿态校正试验分为 3 个阶段。第 1 阶段:试验开始后首先抽水至沉积物完全裸露,将平台通过起吊设备缓慢吊装到水池底部,保持垂直状态。第 2 阶段:试验人员进入水池底部,利用人力和起吊设备,使平台倾斜直到浮球配重侧面均与沉积物接触,此时平台倾斜角基本接近 90°,如图 3 所示。第 3 阶段:平台倾斜到位后,试验人员开始往水池注水,同时观察平台姿态变化情况,当水面淹没过平台浮心时,平台开始朝垂直方向缓慢旋转,随着水面升高,平台完全回复到开始的垂直状态,10 s 内完成自动扶正,保持传感器垂直向上,确保了数据采集的有效性。通过理论计算和极限条件检验,平台具备极大的稳性范围。被动式姿态校正试验结果证实,即使在布放过程中受到剧烈扰动,平台仍能依靠强大的被动复原力矩,迅速消除大角度倾斜。



图 3　被动式姿态校正试验

Fig. 3　Passive attitude correction test

3　智能能效管理

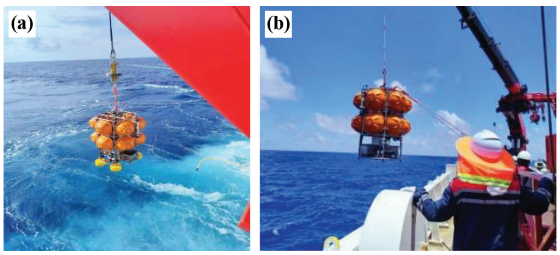
为实现监测周期为跨年度的目标,系统采用了“休眠-唤醒”智能能效管理策略。主控单元处于微安级低功耗监听模式;传感器及数据采集模块仅在预设时间窗口开启(设定为每日唤醒 2 次,每次持续 1 min)。系统日均能耗大约为 5.58 Wh。配置 5 kWh 大容量锂电池组,扣除安全余量后,理论连续工作时间可达 716 d(约 2 年),满足跨年度原位监测需求。针对深海极端环境下的传感器长期可靠性问题,系统还采用了其他多重防护与自检机制。

4　深海海试验证

4.1　试验概况

2024 年 8 月 25 日至 9 月 4 日,科考船赴东太平洋 A-5 区块(多金属结核勘探合同区)开展深海海试,水

深约5 300 m,监测平台布放、回收过程见图 4。监测平台通过船载绞车自由下放,触底后自动进入工作程序,试验结束后通过声学指令释放配重块上浮得以回收。



(a) 平台布放;(b) 平台回收

图 4 监测平台布放、回收过程

Fig. 4 Launch and recovery process of monitoring platform

回收后发现平台所有搭载仪器均完好,平台本身桁架无结构性损伤或变形。平台回收到船上甲板后,操作人员下载数据日志,并进行分析,整个过程未出现因姿态倾斜导致的数据中断,证明了被动式校正方案在复杂海床条件下的鲁棒性。

4.2 监测数据分析

海试期间,监测平台共获取有效数据 52 组,得出以下关键参数的分析结论。

1) pH 值变化:监测期间近底层海水 pH 值时序变化如图 5 所示。在 5 300 m 深海原位监测过程中,一组数据显示海水 pH = 10.0,结合深海作业条件分析,深海高静水压、低温环境会改变 pH 电极膜的响应特性,造成单次读数失真。该异常值为深海原位探测的偶发工况误差,原始数据完整存档,对该异常值进行单独备注。剔除该异常数据后,依据常态数据分析深海水体 pH 值分布规律,近底层海水 pH 值基本保持在 7.5 左右,该数值略低于上层海水,符合深海碳酸盐系统特征。其余测量数据序列无明显突变,表明试验期间该海域未受突发地质活动或人为扰动影响,为后续采矿活动提供了重要依据。

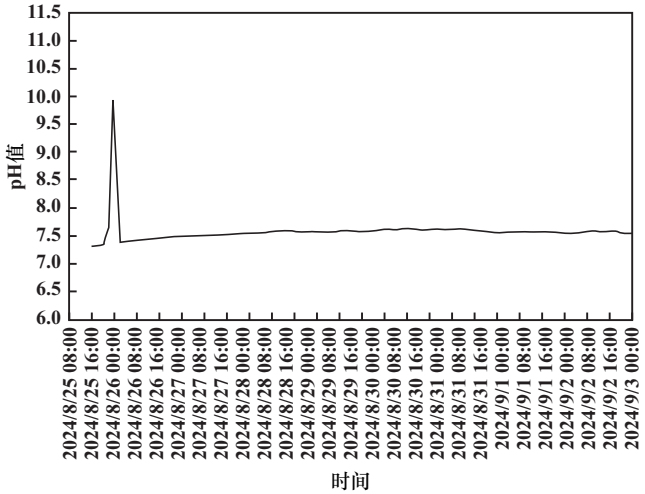


图 5 近底层海水 pH 值时序变化

Fig. 5 Time-series variation of near-bottom seawater pH value

2) 流速特征:监测期间近底层海水流速时序变化如图 6 所示,剔除着底瞬间的无效噪点后,测得近底流速范围为 0.002 ~ 0.009 8 m/s,平均流速为 0.003 3 m/s。流速呈现明显的半日潮周期性波动,反映了深层潮汐动力对近底层环境的控制作用。该流速数据可为临界剪切应力计算、结核开采引发的沉积物再悬浮范围预测提供直接参考。突发性动力事件及其后续能量耗散过程会形成流速极值尖峰,近底流速变化可划分为两个阶段。第一阶段为初始突发高流速(约 0.01 m/s)阶段,主要由底边界层内的湍流或间歇性涡旋扰动所致;此类瞬时强剪切流将上层水体动能传递至海底,造成流速骤然升高。第二阶段为初始突发高流速衰减后的平稳流阶段,流速介于 0.002 ~ 0.004 m/s,主要原因是受海底摩擦作用,高能水体能量逐步耗散。流速曲线后期呈现微小锯齿状波动,主要是受深层潮汐流周期性变化的调制作用影响。

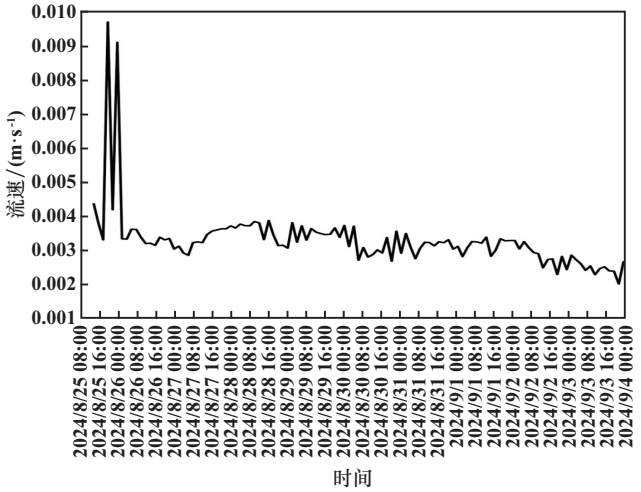


图 6 近底层海水流速时序变化

Fig. 6 Time-series variation of near-bottom seawater flow velocity

3) 浊度值:近底层浊度值时序变化如图 7 所示。光学浊度计读数维持在 1.17 ~ 1.25 FTU 的低值区间,表明该海域背景水体清澈,悬浮颗粒物浓度极低。这一低背景值为后续识别采矿产生的微弱羽流信号提供了理想的信噪环境。图 7 中,海水浊度值出现明显的脉冲式升高,主要是因为底层强流诱发沉积物再悬浮。浊度峰值与图 6 中的流速突增在时间上存在一定延迟,但总体对应,表明当底层流速超过临界剪切应力时,海底表层松散沉积物被卷起并扩散至水体中,导致悬浮颗粒物浓度瞬时升高。随后浊度快速回落并伴随次级波动,反映出沉积物在重力作用下发生沉降,同时

微弱底流持续扰动细颗粒物质。这也是深海边界层动力过程调控沉积物输运的直接体现。

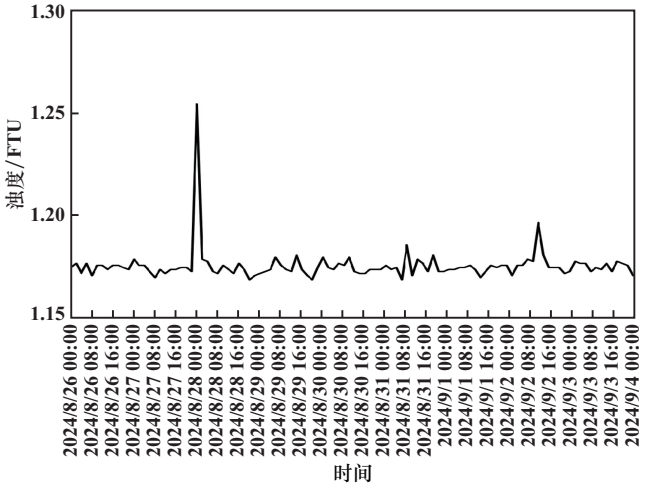


图 7　近底层浊度值时序变化

Fig. 7　Time-series variation of near-bottom turbidity value

数据结果表明,平台在约 5 300 m 水深、低温(约 2 ℃)及高腐蚀环境下,传感器工作正常,数据采集连续且可信,达到了设计指标。

5　讨论

本次海试获取了离底距离小于 1 m 的长时间高频连续监测数据,填补了该深度区间长期观测的空白。与传统离底 10 m 以上的观测装备相比,近底数据更能敏锐捕捉到沉积物-水界面的交换过程。平均流速 0.003 3 m/s 的数据结合浊度值,可用于校准数值模型,更精准预测采矿羽流的扩散路径与沉降范围。

相较于传统的有线观测网[8]和短航时 AUV[5],本平台在成本、部署灵活性和长期连续性方面具有显著优势。特别是其被动式自扶正设计,解决了复杂地形下传统着陆器易倾倒的痛点,而超低功耗策略使跨年度监测成为可能,这与当前深海观测装备小型化、长效化及智能化的发展趋势一致[9-13]。

尽管本次海试取得了成功,但仍存在以下改进空间。

1) 实时性不足:当前方案依赖事后回收读取数据,无法实时预警。未来可集成低功耗水声通信模块,实现关键阈值数据的实时上传。

2) 参数维度单一:目前仅涵盖基础水文参数。未来计划集成原位质谱仪或环境 DNA(eDNA)采样器,以同步监测化学及生物多样性指标,构建多维度的环境影响评估体系。

3) 长周期验证:本次海试时长较短,需进一步开展半年至年级别的长周期布放试验,以全面评估电池衰减及生物附着对传感器的长期影响。

6　结论

1) 设计了一种深海采矿环境监测的近底层水文长期监测平台,提出了“上浮下重”被动式自扶正结构,成功解决了复杂地形下的姿态稳定性难题,保证了传感器在极端着底条件下的正常工作。

2) 采用“休眠-唤醒”超低功耗策略,显著降低了系统能耗,使常规电池组能够支撑年尺度的连续监测任务,理论续航约 2 年。

3) 东太平洋 5 000 m 级水深海试结果表明,该平台能稳定获取高分辨率的近底 pH 值、流速及浊度数据,在极端深海环境下具有较好的可靠性与有效性。

参考文献(References):

[1] HEIN J R, KOSCHINSKY A, KUHN T. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020,1(3):158-169.

[2] 吴海燕,罗阳,傅世锋,等. 深海多金属结核采矿对底栖生物影响的评价指标体系研究[J]. 应用海洋学学报, 2024,43(3):485-494.
WU Haiyan, LUO Yang, FU Shifeng, et al. Study on evaluation indicatorsystem of deep-sea polymetallic nodule mining impact on benthos[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024,43(3):485-494.

[3] LEVIN L A, ETTER R J, REX M A, et al. Environmental influences on regional deep-sea species diversity[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001,32(2001):51-93.

[4] THURBER A R, SWEETMAN A K, NARAYANASWAMY B E, et al. Ecosystem function and services provided by the deep sea[J]. Biogeosciences, 2014,11(14):3941-3963.

[5] 张同伟,秦升杰,唐嘉陵,等. 典型 ROV/AUV 在深海科学考察中的丢失过程及原因[J]. 船舶工程, 2018,40(6):89-94.
ZHANG Tongwei, QIN Shengjie, TANG Jialing, et al. Procedure and cause of typical ROV/AUV lost in deep ocean scientific exploration[J]. Ship Engineering, 2018,40(6):89-94.

[6] KANASHIRO R A, PIAI PAIVA J C, NUNES W R B M, et al. Remotely operated and autonomous underwater vehicles in offshore wind farms: A review on applications, challenges, and sustainability perspectives[J]. Sustainability, 2026,18(1):2.

[7] 程燕平. 理论力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2019:122.
CHENG Yanping. Theoretical mechanics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2019:122.

[8] MIRIMIN L, DESMET S, ROMERO D L, et al. Don't catch me if you can: Using cabled observatories as multidisciplinary platforms for marine fish community monitoring: An in situ case study combining underwater video and environmental DNA data[J]. Science of the Total Environment, 2021,773:145351.　(下转第 129 页)

[3] 史红,姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(18):3066-3069.
SHI Hong, JIANG Fuxing. Mechanical analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(18):3066-3069.

[4] 谭宝会,胡颖鹏,张志贵,等. 无底柱分段崩落法采场结构参数:发展现状、确定方法及存在的问题[J]. 化工矿物与加工, 2022,51(11):52-64.
TAN Baohui, HU Yingpeng, ZHANG Zhigui, et al. Development status and determination method and existing problems of stope structure parameters in sublevel caving without sill pillar[J]. Industrial Minerals & Processing, 2022,51(11):52-64.

[5] 来兴平,蔡美峰,张冰川. 神经网络计算在采场结构参数分析中的应用[J]. 煤炭学报, 2001,26(3):245-248.
LAI Xingping, CAI Meifeng, ZHANG Bingchuan. Application of nonlinear neural network to analyze the stope structure parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2001,26(3):245-248.

[6] 叶海旺,常剑,周磊. 基于 FLAC^{3D}的采场结构参数优化[J]. 金属矿山, 2010(12):6-8.
YE Haiwang, CHANG Jian, ZHOU Lei. Parameters optimization of stope structure based on FLAC^{3D}[J]. Metal Mine, 2010(12):6-8.

[7] 朱志岗,侯克鹏,孙华芬,等. 基于 3 种计算方法的采空区顶板稳定性综合分析[J]. 化工矿物与加工, 2020,49(5):11-14.
ZHU Zhigang, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Comprehensive analysis of roof stability in goaf based on three calculation methods[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020,49(5):11-14.

[8] 罗周全,汪伟,谢承煜,等. 倾斜中厚矿体采场宽度优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015,46(10):3865-3871.
LUO Zhouquan, WANG Wei, XIE Chengyu, et al. Optimization of stope width of inclined medium thick ore body[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(10):3865-3871.

[9] 赵兴东,周鑫,田斌,等. 西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):12-15.
ZHAO Xingdong,ZHOU Xin,TIAN Bin,et al. Optimization of stope structure parameters for Bangzhong zinc-copper mine in Xizang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):12-15.

[10] 周科平. 采场结构参数的遗传优化[J]. 矿业研究与开发, 2000,20(3):7-10.
ZHOU Keping. Genetic optimization of stope structure parameters[J]. Mining Research and Development, 2000,20(3):7-10.

[11] 马春德,徐家庆,刘焕新,等. 基于 ANSYS-FLAC^{3D}的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(1):20-23.
MA Chunde, XU Jiaqing, LIU Huanxin, et al. Optimization of structure parameters of deep stope based on ANSYS-FLAC^{3D}[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(1):20-23.

[12] MILNE D, PAKALNIS R, GRANT D, et al. Interpreting hanging wall deformation in mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(7):1139-1151.

[13] R.特鲁曼,C.莫德利,N.哈里斯,等. 应用 Mathews 方法进行空场采矿法设计的经验[J]. 国外金属矿山, 2002(1):24-30.
TRUMAN R, MODLEY C, HARRIS N, et al. Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design[J]. Foreign Metal Mining Magazine, 2002(1):24-30.

[14] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978,15(4):211-215.

引用本文:钱兆明,郑斌,张来鑫,等. 废弃露天坑下深部复杂矿体采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):122-129.
QIAN Zhaomming, ZHENG Bin, ZHANG laixin, et al. Optimization of stope structural parameters for deep complex orebodies beneath abandoned open pits[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):122-129.

(上接第 121 页)

[9] 赵羿羽,孟德鑫,王传荣,等. 我国深海装备技术发展研究[J]. 船舶工程, 2024,46(7):128-135.
ZHAO Yiyu, MENG Dexin, WANG Chuanrong, et al. Research on the development of deep-sea equipment technology in China[J]. Ship Engineering, 2024,46(7):128-135.

[10] CHEN Y H, YANG C J, LI D J, et al. Study on 10 kVDC powered junction box for a cabled ocean observatory system[J]. China Ocean Engineering, 2013,27(2):265-275.

[11] 陈旭光,寇海磊,牛小东,等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024,26(2):1-14.
CHEN Xuguang, KOU Hailei, NIU Xiaodong, et al. Development of deep-sea underwater technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2024,26(2):1-14.

[12] 张来斌,武胜男,林蓉. 深水水下生产系统损伤监测及预警技术现状与发展趋势[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025,49(2):1-15.
ZHANG Laibin, WU Shengnan, LIN Rong. Status and development trends of damage monitoring and early warning technologies for deep-water subsea production systems[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025,49(2):1-15.

[13] 王彪,罗瑞龙,王芳,等. 深海无人装备控制系统研究现状与发展趋势[J]. 水下无人系统学报, 2025,33(3):390-399.
WANG Biao, LUO Ruilong, WANG Fang, et al. Research status and development trends of deep-sea unmanned equipment control system[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2025,33(3):390-399.

引用本文:王建华,郑皓. 近底层深海环境长期监测平台设计与海试应用[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):117-121.
WANG Jianhua, ZHENG Hao. Design and at-sea test of a long-term monitoring platform for near-bottom deep-sea environment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):117-121.