

智能化海下顶板监测技术的现状与展望

张皓钦, 吴钦正

山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 烟台

收稿日期: 2024年12月11日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月21日

摘要

随着海下矿产资源开发的深入, 顶板监测技术成为保障开采安全的重要手段。本文从海下开采顶板的特点出发, 系统分析顶板失稳的主要机理以及当前监测技术的现状。结合典型案例(新立矿区和龙口煤矿), 总结监测技术的成效和不足, 并提出提高监测精度、构建智能化分析平台等优化建议。本文通过文字、数据展示顶板监测技术在实际应用中的发展和改进方向, 为海下资源的高效、安全开采提供了技术支持。

关键词

海下开采, 顶板监测, 顶板失稳, 监测技术, 智能化平台, 高精度传感器, 安全预警

Current Status and Prospects of Intelligent Subsea Roof Monitoring Technology

Haoqin Zhang, Qinzhen Wu

Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Yantai Shandong

Received: Dec. 11th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 21st, 2025

Abstract

As the development of subsea mineral resources progresses, roof monitoring technology has become a crucial measure to ensure mining safety. This paper explores the characteristics of roof structures in subsea mining, systematically analyzes the primary mechanisms of roof instability, and reviews the current state of monitoring technologies. By examining typical cases (such as the Xinli Mining Area and Longkou Coal Mine), this study summarizes the achievements and shortcomings of monitoring technologies. Optimization recommendations are proposed, including improving monitoring precision and building intelligent analysis platforms. Through text, data, and charts, this paper illustrates the development and advancements in the practical application of roof monitoring technologies, providing

technical support for the efficient and safe exploitation of subsea resources.

Keywords

Subsea Mining, Roof Monitoring, Roof Instability, Monitoring Technology, Intelligent Platform, High-Precision Sensors, Safety Warning

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 海下矿产资源的开发逐步加快。海下开采因其独特的地质条件(如断裂构造发育、岩层稳定性差、渗流压力大), 对顶板的监测提出了更高的要求[1][2]。顶板失稳可能引发隔水层破裂、岩层冒顶甚至海水涌入矿井, 危及矿井安全[3][4]。

顶板监测技术作为矿山安全管理的重要环节, 通过对顶板岩层变形和应力的实时监测和动态预警, 能够及时发现潜在的失稳问题[5]。本文系统分析了海下开采顶板监测技术的现状及优化方向, 结合典型案例, 提出了未来发展建议, 为相关研究和工程实践提供参考。

2. 海下开采顶板稳定性分析

2.1. 地质与水文条件

海下开采区域的地质条件因岩层结构复杂、节理发育等因素而显得尤为复杂, 同时水文条件如海水压力和渗流特性也显著影响顶板稳定性。以新立矿区为例, 该矿区顶板岩层主要由黄铁绢英岩化碎裂岩和绢英岩化花岗岩构成, 节理裂隙发育, 倾角范围集中在 45° 至 75° 之间, 其中大倾角节理占据主要比例[6]。节理的延伸方向和分布特性不仅使岩层整体性较差, 还显著增加了顶板失稳的可能性。同时, 矿区存在的 F_1 断层上盘节理密集, 延伸距离较大, 进一步削弱了岩层的承载能力[6]。这些复杂的地质条件为顶板监测和安全开采带来了严峻挑战。

水文条件是影响海下顶板稳定性的另一重要因素。在海下开采中, 隔水层通常由钙质泥岩和泥灰岩等构成, 其厚度较薄, 且抗渗透能力有限, 容易受到开采扰动的破坏[3][4]。在开采过程中, 随着采空区逐步扩大, 上覆海水的静压力和渗流压力会直接作用于隔水层及顶板裂隙, 促使裂隙向隔水层扩展。特别是在采空区应力集中区域, 裂隙的扩展速度加快, 当裂隙贯通隔水层后, 可能形成导水裂隙带, 引发海水涌入矿井的灾害。

应力的重新分布是采空区形成后顶板失稳的关键诱因。在开采扰动下, 岩层应力由均匀分布转变为局部集中, 进一步加剧了顶板裂隙的发育[2]。这一过程不仅破坏了顶板岩层的原始结构, 还削弱了岩体的整体承载能力[5]。当顶板裂隙逐渐贯通时, 隔水层的屏障作用被破坏, 顶板的稳定性随之显著下降。

总之, 海下开采区域的地质条件和水文条件对顶板稳定性具有重要影响。复杂的岩层结构与发育的节理裂隙, 加上海水压力的侵蚀作用, 使顶板更加脆弱。针对这些问题, 合理的顶板监测方案和安全评估体系对于保障开采工作的顺利进行具有重要意义。

2.2. 顶板失稳机理

顶板失稳是海下开采过程中最为常见且危害最大的工程地质问题, 其形成过程复杂, 主要受岩层力

学行为、裂隙发育特性和采空区应力重分布的共同作用影响。顶板失稳机理的研究对于海下采矿的安全保障具有重要意义。

首先，岩层力学特性是顶板稳定性的决定性因素。在采空区形成后，顶板岩层的力学平衡被打破，导致岩层应力重新分布。在开采初期，采空区上方岩层承受拉应力作用，逐渐发生弯曲和下沉。如果应力超过岩层的抗拉强度，岩层开始出现裂纹，并沿着节理或弱面扩展[2] [5]。例如，在新立矿区， F_1 断层面上盘的节理密集且延伸距离大，在采空区应力集中作用下，这些节理裂隙容易贯通，最终引发局部冒顶[6]。

其次，裂隙扩展与导水裂隙带的形成是顶板失稳的关键过程。在采空区应力作用下，顶板裂隙逐渐发育并向上延伸，最终可能贯穿隔水层，形成导水裂隙带。导水裂隙带的出现使上覆海水能够直接渗透至采空区，进一步削弱了顶板的稳定性[4]。这一过程不仅加速了岩层的破坏，还可能导致海水涌入矿井的灾难性后果。

此外，采空区上覆岩层的结构特性对顶板失稳的模式具有重要影响。一般而言，海下开采中顶板岩层可以分为可垮落岩层和隔水岩层两部分。对于可垮落岩层，其在采空区扩展时逐层垮落，形成冒落带；而隔水岩层的存在则对顶板起到一定的支撑作用。但如果隔水岩层厚度不足或裂隙发育严重，其隔水功能和力学稳定性将显著下降[3] [4]。

最后，开采扰动和动态应力是诱发顶板失稳的重要外因。在开采过程中，机械振动、爆破作业和设备运行都会产生周期性动态应力。这些应力对顶板岩层的累积作用可能加速裂隙扩展并引发失稳[2] [5]。例如，龙口矿区的研究表明，在设备运行过程中，顶板应力波动显著增加，这种动态应力极大地提高了顶板失稳的风险[7]。

综上所述，海下开采顶板失稳是多种因素综合作用的结果，包括岩层力学特性、裂隙扩展行为、导水裂隙带的形成以及动态应力的叠加效应。深入研究顶板失稳机理，不仅能够为灾害预测和预警提供理论依据，还能为优化支护设计和顶板监测技术指明方向。

3. 顶板监测技术的现状

3.1. 传统监测技术

传统的顶板监测技术以钻孔测量和现场观测为主，传统方法主要依赖机械式仪器，如顶板离层指示仪(图 1)、钻孔伸长仪、钻孔测斜仪等，这种仪器通过人工定期读取顶板离层量，判断顶板稳定性，这些设备通过监测顶板位移、倾斜和裂隙发育情况，初步评估顶板的稳定性[2] [5]。由于结构简单且操作便捷，这些方法广泛应用于早期矿山监测工作。然而，这种方法存在数据采集不连续、人工读数误差大等问题，难以及时预警顶板失稳风险。特别是在海下开采复杂环境中，难以满足快速响应的需求。此外，这些方法主要依赖人工观测，数据采集效率较低，难以实现大范围、长时间的连续监测。

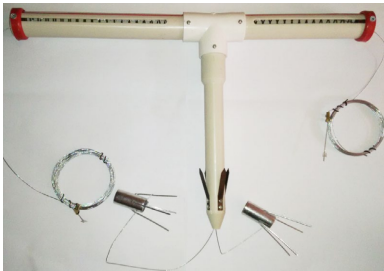


Figure 1. Roof separation indicator
图 1. 顶板离层指示仪

3.2. 现代监测技术

随着科技的发展,现代化监测技术逐渐成为顶板监测的主流。高精度传感器设备,如光纤光栅传感器和多功能位移监测仪,能够实时采集顶板岩层的应力、位移和变形数据[4][7]。这些设备具有高灵敏度和抗干扰能力,尤其适用于复杂水文地质条件下的监测需求。此外,无线传感器网络的应用显著提升了数据传输的效率,实现了远程传输与动态监控,为顶板的稳定性评估提供了强有力的技术支撑[5]。

3.3. 智能化数据分析

数据分析技术的智能化发展为顶板监测技术注入了新的活力。通过引入混沌理论、神经网络等人工智能技术,能够对监测数据进行深入分析,揭示顶板失稳的潜在规律[2][6]。例如,在新立矿区的顶板监测中,基于混沌时序分析的智能系统成功识别了顶板失稳的前兆信息,为采矿设计和支护优化提供了重要参考。此外,智能分析平台还能够结合历史数据和实时监测数据,构建动态预测模型,显著提升了风险预警的准确性和及时性。

3.4. 当前技术的局限性

尽管现代监测技术取得了长足进步,但仍存在一定的不足。首先,在深部海下开采环境中,监测设备的耐久性和适应性面临挑战;其次,智能分析平台对高质量数据的依赖性较强,如果数据采集存在盲区或误差,分析结果的可靠性将受到影响[4]。此外,监测网络的布点科学性和覆盖范围也需要进一步优化,以应对更复杂的地质条件[5][6]。

4. 顶板监测技术的应用案例

4.1. 新立矿区监测系统

新立矿区作为我国首个硬岩海下矿山,在顶板监测系统的构建和应用方面具有重要示范意义。矿区顶板岩层节理裂隙发育,局部地质条件复杂,监测系统以多点位移传感器和应力传感器为核心,实现了顶板位移与应力的动态监测[1][6]。系统通过在关键构造部位布置监测点,形成覆盖采空区及周边的监测网络,实时采集顶板岩层的变形数据。这些数据通过无线传输至中央监控平台,结合混沌理论的时序分析模型,揭示了顶板岩层的变形规律及潜在失稳趋势[2]。

在监测过程中,新立矿区的系统成功捕捉到多次顶板失稳的前兆信息,并通过监控平台发出预警,指导现场采取加固支护等防控措施,从而有效避免了重大安全事故的发生。监测系统的实践表明,通过高精度设备和科学布点相结合,可以在复杂地质条件下实现顶板稳定性的精确评估[6]。同时,智能化数据分析技术为采矿设计优化和支护参数调整提供了可靠依据,显著提升了矿区开采的安全性和效率。

4.2. 龙口煤矿监测系统

龙口煤矿是我国海下煤炭资源开采的重要示范矿区,其顶板监测系统在机械化海下采煤工作面应用中表现出卓越的成效。该监测系统以矿压监测和瓦斯浓度监测为核心,通过无线传感器网络构建了一套动态监测平台[4][7]。在矿压监测方面,传感器实时记录顶板压力变化,将数据通过无线网络传输至监控中心,用于分析顶板活动与采空区变形之间的关系。通过压力数据的时序分析,系统能够提前识别顶板失稳的高风险区域,并发出预警,指导现场作业[7]。

同时,龙口煤矿将瓦斯浓度监测与顶板监测联动,探索瓦斯浓度波动与顶板活动的耦合关系。在采空区发生变形的初期,瓦斯浓度的变化往往能够为顶板失稳提供重要线索[4]。通过这一联动监测系统,龙口煤矿在实际操作中显著降低了顶板失稳引发瓦斯爆炸的风险。此外,该监测系统的成功应用还为国

内其他海下采煤项目提供了宝贵经验和技術示范。

5. 优化顶板监测技术的建议

为进一步提升顶板监测技术的效能, 优化方案应着眼于监测精度、智能化分析能力和系统覆盖范围的整体提升。首先, 引入高精度的监测设备, 如光纤光栅传感器和激光扫描仪, 以捕捉顶板的微小变形和应力变化, 提升数据的灵敏度与可靠性。其次, 利用大数据和人工智能技术开发动态分析与预测模型, 通过结合历史数据与实时监测信息, 建立智能化监测平台, 实现对顶板失稳的提前预警。此外, 监测网络的科学布局也是关键, 应在矿区关键构造部位合理布点, 确保采空区及周边区域的全面覆盖, 避免监测盲区的存在。在此基础上, 加强对设备的定期维护和技术人员的专业培训, 以保证监测系统的长期稳定运行和应急响应能力的提升。通过这些系统性优化措施, 顶板监测技术能够更好地应对复杂地质环境下的开采需求, 为海下矿产资源的安全高效开发提供坚实保障。

6. 结论

海下开采因其特殊的地质与水文条件, 对顶板稳定性提出了极高的要求, 而顶板监测技术在保障矿井安全和高效开采中发挥着关键作用。本文通过分析海下开采的地质特性和顶板失稳机理, 总结了岩层力学特性、应力重新分布、裂隙扩展及导水裂隙带形成等对顶板稳定性的影响, 并结合新立矿区和龙口煤矿的实际应用, 探讨了现代监测技术的现状与成效。当前, 光纤光栅传感器、动态数据分析平台和科学布局的监测网络在顶板稳定性评估和失稳风险预警中取得了良好的效果。

然而, 现有顶板监测技术仍存在一定的局限性, 例如在复杂环境中的适应性、实时性和精度需要进一步提升; 智能分析平台对高质量数据的依赖性, 以及监测网络覆盖盲区的问题尚未完全解决。未来的研究和技术开发应聚焦于提升监测设备的精度和稳定性, 推动大数据与人工智能技术的深度融合, 构建智能化、全覆盖的监测系统。此外, 应注重监测系统的动态适应性, 以应对海下开采中岩层环境的不断变化, 从而提高风险评估和预警的准确性。

综上所述, 顶板监测技术的持续优化是海下开采实现高效、安全、可持续发展的核心保障。通过引入更加精准的监测设备、开发智能化的分析平台以及优化监测网络布局, 海下采矿将能够更好地应对复杂的地质和水文条件, 显著降低顶板失稳风险, 推动矿山工程的技术进步和资源开发的可持续性。

参考文献

- [1] 刘广成. 海下开采区域不稳定采场支护技术的研究与应用[J]. 矿山工程, 2012, 16(2): 138-139.
- [2] 刘超. 海下开采岩层变形混沌时序重构与安全预警系统研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [3] 王辉, 张建平, 李涛. 海下开采深部取消点柱影响地表沉陷数值分析[J]. 地质力学学报, 2012, 18(1): 144-145.
- [4] 常颖, 柳玉兴, 王文波, 等. 龙口海下煤炭安全开采保障关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 34(12): 15-18.
- [5] 赵国彦, 王海涛, 李国强. 基于模糊-理想点法的海下采场顶板稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4): 64-71.
- [6] 王德全, 王辉, 王平, 等. 新立矿区海下开采矿岩结构面统计与分析[J]. 采矿技术, 2012, 12(4): 46-52.
- [7] 杨轩峰. 我国最大海下采煤面完成回采[J]. 煤炭工程, 2009(12): 34.