

Research on Geological Survey Technology and Stability Assessment of Coal Mine Goafs

Xin Shi

Urumqi Geological Brigade, Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

The disorderly distribution of coal mine goafs is prone to triggering geological disasters such as ground subsidence and rock mass instability, which seriously threaten the safe production of mines and the regional ecological environment. Combining the geological characteristics of coal mine goafs, this paper systematically analyzes the application principles and applicable scenarios of survey technologies including drilling exploration, geophysical prospecting and 3D laser scanning, and compares the survey accuracy and cost-effectiveness of different technologies. On this basis, a stability assessment index system of "geological conditions - goaf morphology - mechanical parameters" is constructed, and the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method are adopted for comprehensive assessment. A case study of the goaf in an old mining area is carried out to verify the feasibility of the method. The research results show that the multi-technology integrated survey mode can improve the accuracy of goaf boundary identification, and scientific stability assessment can provide data support for disaster prevention and control. This research has important practical guiding significance for the comprehensive management of coal mine goafs and the safe exploitation of resources.

Keywords

coal mine goafs; geological survey technology; stability assessment; analytic hierarchy process; geological disaster prevention and control

煤田采空区地质勘察技术与稳定性评估研究

石鑫

新疆维吾尔自治区地质局乌鲁木齐地质大队, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

煤田采空区的无序分布易引发地面塌陷、岩体失稳等地质灾害, 严重威胁矿山安全生产与区域生态环境。本文结合煤田采空区地质特征, 系统分析了钻探勘察、地球物理勘探及三维激光扫描等技术的应用原理与适用场景, 对比不同技术的勘察精度与成本效益。在此基础上, 构建了“地质条件-采空区形态-力学参数”的稳定性评估指标体系, 采用层次分析法与模糊综合评价法开展综合评估, 并以某老矿区采空区为实例验证方法可行性。研究表明, 多技术融合的勘察模式可提升采空区边界识别精度, 科学的稳定性评估能为灾害防治提供数据支撑。该研究对煤田采空区综合治理与资源安全开采具有重要的实践指导意义。

关键词

煤田采空区; 地质勘察技术; 稳定性评估; 层次分析法; 地质灾害防治

1 引言

煤炭资源长期大规模开采形成大量采空区, 其隐蔽性、复杂性特征给矿山地质灾害防控带来严峻挑战。采空区顶板垮塌、地面沉降等问题不仅破坏矿区基础设施, 还能引发地下水渗漏、生态系统退化等连锁反应, 制约煤炭行业绿色发展。目前, 煤田采空区地质勘察存在技术单一、数据精度不足等问题, 稳定性评估方法多依赖经验判断, 难以满足

复杂工况工程需求。基于此, 本文聚焦煤田采空区地质勘察技术与稳定性评估方法, 通过梳理现有技术应用要点, 构建多维度评估体系, 旨在为采空区灾害治理提供理论依据与技术参考, 推动煤炭资源开采与生态环境保护协同发展。

2 煤田采空区地质勘察技术体系

煤田采空区是煤炭资源开采后遗留的地下空间, 其复杂的岩体结构与不稳定的充填状态, 易引发地面塌陷、岩体失稳等地质灾害, 对矿区生态环境、基础设施安全及后续资源开发构成威胁。精准掌握采空区空间分布、形态特征及地质力学参数, 是开展灾害防治与矿区综合治理的前提, 而一

【作者简介】石鑫(1994-), 男, 中国新疆库尔勒人, 本科, 工程师, 从事地质勘察、煤田勘察、煤田灭火研究。

套科学完善的勘察技术体系，则是实现这一目标的核心支撑。^[1]以下将从传统钻探技术、高效物探技术、数字化扫描技术及多技术融合模式四个维度，系统阐述煤田采空区地质勘察的关键技术要点与应用场景。

2.1 钻探勘察技术

钻探勘察是煤田采空区勘察的传统核心技术，通过钻孔取芯可直接获取采空区岩体结构、岩性特征及充填状态等一手资料。实际应用中，需结合采空区分布规律合理布设钻孔位置，采用金刚石钻进工艺提升岩芯采取率，针对采空区充填体松散、易坍塌的特点，可选用套管护壁技术保障钻孔稳定性。钻探技术的优势在于数据精准度高，能明确采空区的垂向深度、厚度及充填物类型，还可通过岩芯试样的室内试验获取岩体抗压强度、变形模量等关键力学指标。缺点是勘察周期长、成本较高，受地形条件限制较大，在山区或植被茂密区域作业难度显著增加，适用于采空区范围较小、地质条件复杂且对数据精度要求严苛的区域。

2.2 地球物理勘探技术

地球物理勘探技术凭借非接触、高效率优势，在煤田采空区大范围勘察中广泛应用，常用方法包括地震勘探、电法勘探及雷达勘探等。地震勘探通过人工激发地震波，依据波速差异识别采空区与完整岩体的边界，适用于深埋、大范围采空区勘察，能快速圈定采空区的平面分布范围；电法勘探利用岩体与充填体、空气的电性差异，划分采空区分布范围，在浅部采空区勘察中性价比突出，设备便携性强且操作流程简便；地质雷达勘探则凭借高分辨率优势，可精准识别采空区顶板厚度、裂隙发育情况，适合近距离精细勘察，为顶板稳定性评估提供直接数据支撑。但地球物理勘探易受地形起伏、地下水体及地层电性不均匀性干扰，勘察结果存在多解性，需结合钻探数据进行验证，以提升勘察结果可靠性。

2.3 三维激光扫描技术

随着数字化技术发展，三维激光扫描技术逐渐应用于煤田采空区勘察领域。该技术通过发射激光束快速获取采空区表面点云数据，经建模软件处理后生成三维可视化模型，可直观呈现采空区空间形态、体积及顶板裂隙分布特征，还能计算垮落高度、围岩变形量等关键参数。三维激光扫描具有高效率、高精度、非接触的特点，能有效解决传统勘察技术难以全面掌握采空区空间形态的问题，尤其适用于采空区顶板稳定性实时监测，可实现变形数据动态追踪与预警。但该技术受环境因素影响较大，在粉尘浓度高、光线昏暗的采空区内部作业时，需配套除尘、照明设备，且数据处理需专业技术支撑，对操作人员能力要求较高^[2]。

2.4 多技术融合勘察模式

单一勘察技术存在局限性，多技术融合的勘察模式成为煤田采空区勘察的发展趋势。例如，采用“地质雷达+钻探”模式，先通过地质雷达圈定采空区大致范围，减少钻孔布设数量，再针对异常区域布设钻孔精准验证，实现效率

与精度双重提升；采用“三维激光扫描+地震勘探”模式，结合地震勘探深部探测与三维激光扫描表面建模优势，实现采空区全空间特征刻画。此外，可引入无人机航测技术，为勘察方案设计提供基础地理信息。多技术融合可实现优势互补，提升勘察效率与精度，为后续工作提供全面准确的基础数据。

3 煤田采空区稳定性评估方法

煤田采空区稳定性直接关乎矿区生产安全与生态环境安全，其评估工作需建立在精准勘察数据的基础之上，是连接地质勘察与灾害治理的关键纽带。不同于单一的定性判断，科学的稳定性评估需综合考量地质、力学、几何等多维度影响因素，通过构建系统化的指标体系、选取适配的评价方法，实现对采空区稳定状态的定量分级。这一过程不仅能明确采空区的风险等级，更能为后续治理方案的制定提供针对性的技术依据，从而避免治理措施的盲目性与资源浪费。

3.1 评估指标体系构建

煤田采空区稳定性受地质条件、采空区形态、岩体力学性质等多因素影响，需构建科学的评估指标体系。本文选取地层岩性、地质构造、采空区埋深、采空区跨度、顶板厚度、岩体抗压强度、地下水赋存状态 7 项核心指标，其中地层岩性与地质构造决定岩体基本稳定性，采空区埋深、跨度及顶板厚度反映采空区几何特征，岩体抗压强度体现岩体力学性能，地下水赋存状态则通过软化岩体降低稳定性。指标体系采用层次分析法划分目标层、准则层与指标层，确保评估的系统性与合理性^[3]。

3.2 模糊综合评价法的应用

模糊综合评价法适用于多因素、模糊性问题的评估，契合煤田采空区稳定性评估的需求。首先，通过现场勘察与室内试验获取各指标参数，采用专家打分法确定指标权重；其次，将各指标划分为“稳定”“较稳定”“不稳定”三个等级，建立模糊评判矩阵；最后，通过矩阵运算得到采空区稳定性综合评分，依据评分结果划分稳定性等级。该方法的优点在于能有效处理定性指标与定量指标的融合问题，降低主观因素影响，提升评估结果的客观性。

3.3 实例分析

以某老矿区煤田采空区为例，该区域采空区埋深 20-50m，跨度 5-15m，顶板厚度 3-8m，地层岩性以砂岩、页岩为主，地下水较为发育。采用“电法勘探+钻探+三维激光扫描”的融合勘察技术，获取采空区空间形态与岩体力学参数；运用模糊综合评价法开展稳定性评估，结果显示该区域采空区综合评分 3.2 分，处于“较稳定”等级，需采取锚杆支护、注浆加固等防治措施。实践表明，该评估方法与工程实际相符，可为采空区治理提供科学依据。

4 煤田采空区治理对策

基于地质勘察与稳定性评估结果，煤田采空区治理需

遵循“因地制宜、综合治理、源头防控、动态管理”的原则，结合采空区的稳定等级、空间形态、地质环境等实际情况，制定差异化、精细化的治理方案，从根本上消除采空区引发的地质灾害隐患，保障矿区可持续发展。

对于稳定等级较高的采空区，其岩体完整性较好，顶板变形速率缓慢，暂不具备突发塌陷的风险，可采用“监测预警为主、工程治理为辅”的防控策略。

具体而言，需在采空区上方关键点位布设高精度位移监测站、应力监测传感器及地下水动态监测井，实时跟踪顶板沉降量、岩体应力变化及地下水位波动情况。同时，借助物联网技术搭建智能化监测平台，将采集到的数据实时传输至监控中心，通过大数据分析模型预判采空区稳定性变化趋势。一旦监测数据超出预警阈值，系统可自动触发声光报警与短信通知，提醒相关人员及时采取应急处置措施。此外，还需对采空区上方的土地利用进行严格管控，禁止修建高层建筑、重型厂房等荷载较大的设施，避免人为因素加剧采空区失稳风险。

对于较稳定采空区，其岩体存在局部裂隙发育、顶板轻微变形等问题，若长期受地下水侵蚀或外部荷载影响，稳定性可能进一步恶化，因此需以注浆加固为核心手段，辅以地表防渗处理。

注浆加固技术的关键在于选取适配的注浆材料与合理的注浆工艺，针对采空区充填体松散、渗透性强的特点，可采用水泥-粉煤灰双液浆作为主注浆材料，该材料兼具流动性好、凝结强度高、成本低廉等优势；对于裂隙较细微的岩体区域，则可选用化学浆液，实现对微小裂隙的精准填充。在施工过程中，需根据采空区的埋深与跨度，采用“分段注浆、分层加固”的方式，通过钻孔将浆液均匀注入采空区的空洞与裂隙中，待浆液凝固后，可形成高强度的固结体，有效填充采空区空间，提升岩体整体承载能力。同时，需在采空区上方地表铺设防渗膜与排水网格，构建地表防渗排水系统，阻断雨水、地表水渗入岩体内部，避免地下水软化岩体结构，进一步巩固注浆加固效果^[4]。

对于不稳定采空区，其往往存在顶板破碎、垮落风险高、地下水发育等问题，是矿区地质灾害防控的重中之重，需采取“注浆加固+锚杆支护+防水帷幕”的综合治理方案。

首先，实施深孔注浆作业，选用高强度的超细水泥浆液，对采空区深部的空洞与裂隙进行填充，形成稳定的岩体骨架；其次，在采空区顶板关键部位施工预应力锚杆支护，通过锚杆的锚固力将破碎的顶板岩体与深部稳定岩体紧密连接，限制顶板岩体的变形与垮落，锚杆的布设间距与锚固深

度需通过岩体力学计算确定，确保支护强度满足工程要求；最后，在采空区周边施工防水帷幕，采用高压旋喷桩技术形成连续的隔水墙，阻断地下水向采空区内部的补给通道，从源头解决地下水对岩体的软化问题。此外，还需在不稳定采空区周边设置警示围栏与应急避难通道，严禁无关人员进入危险区域，并制定专项应急预案，定期组织应急演练，确保在突发塌陷事故时，能够快速、高效开展人员疏散与抢险救援工作。

除了针对不同稳定等级采空区的差异化治理措施，还需建立采空区动态监测与长效管理体系。

一方面，将治理后的采空区纳入常态化监测范畴，持续跟踪其稳定性变化，及时调整后续管控策略；另一方面，加强矿区生态修复工作，对治理后的土地进行复垦绿化，种植耐贫瘠、根系发达的植被，利用植被根系的固土作用进一步稳固地表，改善矿区生态环境。通过工程治理、监测预警与生态修复的有机结合，实现煤田采空区的全生命周期管理，推动矿区资源开发与生态保护协同发展^[5]。

5 结论

煤田采空区地质勘察与稳定性评估是矿山灾害防控的关键环节，直接关系到煤炭资源安全开采与区域生态稳定。本文系统梳理了钻探、地球物理勘探、三维激光扫描等勘察技术的应用要点，提出多技术融合的勘察模式，有效提升了采空区地质数据的全面性与精准度。构建的“地质条件-采空区形态-力学参数”评估指标体系，结合模糊综合评价法实现了采空区稳定性的科学分级。实例验证表明，该技术方法具有较高的可行性与实用性。未来研究需进一步结合人工智能技术，优化勘察数据处理算法与稳定性评估模型，推动煤田采空区治理向智能化、精细化方向发展。煤田采空区治理是一项系统工程，需统筹勘察、评估、治理全流程，才能实现煤炭行业的绿色可持续发展。

参考文献

- [1] 煤田地质勘查管理信息化平台建设研究[J]. 刘东亮.现代商贸工业,2022(17)
- [2] 煤田地质勘查工程施工技术探讨[J]. 邹勇;黄艳君.世界有色金属,2017(01)
- [3] 煤田地质勘探野外综合地质数据的自动化整理. 欧涛;朱建刚.内蒙古煤炭经济,2024(19)
- [4] 煤田地质勘探工作中的问题与策略研讨. 张丽阁;高旭.内蒙古煤炭经济,2024(17)
- [5] 煤田地质勘探的影响因素及对策探讨. 谢鸿.内蒙古煤炭经济,2024(10)