

煤矿采空区地球物理探测与地质灾害安全评价研究

郭晓东¹ 郭子轩²

1 山东省煤田地质局物探测量队, 山东省济南市, 250104;

2 山东诚懿数字科技有限公司, 山东省泰安市, 271000;

摘要: 本文聚焦煤矿采空区地球物理探测与地质灾害安全评价。阐述了常见地球物理探测方法的原理、优缺点及适用范围, 分析了煤矿采空区引发的各类地质灾害。构建了包含采空区特征、地质环境和诱发因素的地质灾害安全评价指标体系, 介绍了模糊综合评价法、层次分析法等评价方法。指出目前研究存在探测精度受限、评价指标不完善等问题, 对未来多方法联合探测、高精度评价模型构建等发展方向进行了展望, 旨在为煤矿采空区地质灾害防治提供参考。

关键词: 煤矿采空区; 地球物理探测; 地质灾害; 安全评价

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 09. 049

引言

煤矿采空区是煤炭开采活动遗留的特殊区域, 其存在会引发地面塌陷、地裂缝等地质灾害, 严重威胁周边环境、工程建设和居民生命财产安全。地球物理探测技术能有效获取采空区的空间分布、规模等信息, 地质灾害安全评价则可为灾害防治提供科学依据。深入研究煤矿采空区地球物理探测与地质灾害安全评价, 对保障煤矿区可持续发展具有重要现实意义。

1 煤矿采空区地球物理探测方法概述

1.1 电法探测

电法探测以不同地质体的电学性质差异为原理, 通过人工建立电场或电磁场反演采空区信息, 分直流电法与交流电法。

直流电法向地下供入稳定直流电流, 测电位差建电场模型推断地质结构。优势是原理易懂、设备成本低、操作便捷, 对低阻异常体探测效果好——采空区积水会形成低阻区, 可据此判断积水情况。但探测深度有限, 地形起伏还会干扰电场, 降低精度。

交流电法利用交变电磁场传播特性探测, 分辨率更高, 能清晰刻画采空区边界, 探测深度更大, 适配复杂地形。不过设备造价高, 数据采集易受工业电磁干扰, 后期处理需复杂理论与数值模拟, 对技术人员要求高^[1]。

1.2 地震波探测

地震波探测借地震勘探原理, 人工激发地震波, 接收波信号结合波的参数反演地质结构, 确定采空区信息。

其优势是精度与分辨率高——采空区与完整岩层波阻抗差异大, 地震波遇界面强反射, 可清晰还原采空区形态; 且探测范围广, 适用于大面积普查与详查。

但对场地要求高, 区域有松散堆积物、复杂地形或密集建筑会致波传播紊乱、产生干扰, 工业噪音也影响数据质量。此外, 数据采集需密集布设检波器, 野外工作强度大, 后期处理复杂, 成本高于直流电法^[2]。

1.3 电磁法探测

电磁法探测是一种利用地下介质电磁特性差异进行探测的地球物理方法, 通过分析人工或天然电磁场的分布与变化, 推断地下地质体的结构与属性。该方法中, 瞬变电磁法具有较强的探测深度, 受地形影响较小, 并对低阻体反应灵敏, 能够高效、准确地识别采空区及积水区域。然而, 该方法对高阻覆盖层的穿透能力较差, 且在强电磁干扰环境下, 数据质量易受干扰, 解释难度增加。

1.4 重力探测

重力探测利用地下不同密度地质体产生的重力异常来探测采空区。采空区由于其内部物质被采出, 密度相对周围正常地层较低, 会引起重力场的变化。通过高精度重力仪测量重力异常, 并进行数据处理和反演, 可推断采空区的位置和规模。重力探测不受地形和电磁干扰的影响, 能进行大面积的快速普查。但该方法分辨率较低, 对采空区边界的确定精度有限, 且容易受到区域地质背景的影响。

2 地球物理探测方法的应用与对比

2.1 不同探测方法的应用实例

地球物理探测方法需结合地形、地质条件及探测目标选择, 确保适配性与实用性。在地形平坦、地质结构简单的区域, 直流电法应用广泛: 其通过探测地下介电性差异判断异常区域, 操作简便、数据采集快, 适合

作为初步探测手段,快速圈定采空区的大致分布范围,为后续精细探测奠定基础。针对探测深度要求高、地形复杂(如山地、丘陵)的区域,瞬变电磁法与地震波探测更具优势:瞬变电磁法受地形影响小,能穿透复杂地层,精准探测深部采空区的位置;地震波探测则通过分析波的传播速度与反射信号,清晰反映地下岩体结构,适合深部采空区勘察。若需精细掌握采空区边界、内部充填情况等细节,需采用多方法综合探测,例如将直流电法的初步圈定与地震波探测的精细成像结合,或搭配电磁法补充深部信息,实现“大范围普查+重点区域精查”的探测目标^[3]。

2.2 探测方法的对比分析

从核心性能指标对比,各探测方法的优势与局限差异显著。在探测精度上:地震波探测与电磁法精度较高,能精确定位采空区的平面位置、埋深及形态,甚至识别内部小尺度空洞;重力探测精度较低,仅能通过重力异常反映大范围密度差异,多用于大面积普查,无法精确定位单个采空区。在探测深度上:电磁法(尤其是瞬变电磁法)与地震波探测优势明显,可探测数百米深的采空区,满足深部煤矿勘察需求;直流电法受介质电性影响大,探测深度较浅,通常适用于浅层采空区探测。在成本与效率上:直流电法与重力探测设备轻便、操作简单,成本较低且数据处理快,效率高,适合大面积快速普查;地震波探测与高精度电磁法需复杂设备与专业团队,设备投入与人力成本高,数据采集与处理周期长,效率相对低,但能提供更详细的采空区结构信息,适合重点区域精查。

3 煤矿采空区地质灾害类型及成因

3.1 地面塌陷

地面塌陷是煤矿采空区最常见灾害,源于采空区上方岩体受力失衡。开采后煤层形成空洞,上覆岩层重量转移至周边岩体,初期岩体凭自身强度维持稳定;但长期重力作用下,岩体会蠕变、破裂,当承载能力无法支撑上覆岩层时,会出现“垮落带-裂隙带-弯曲下沉带”分层破坏,最终传导至地表形成塌陷。塌陷规模与采空区面积、深度及顶板岩性相关:面积越大、深度越浅,塌陷范围越广;软弱顶板(如泥岩)抗变形能力弱,塌陷更快更严重;坚硬顶板可能“悬顶”延迟塌陷,但垮落时灾害更剧烈。地面塌陷会破坏建筑、道路与农田,改变地表径流,影响生态^[4]。

3.2 地裂缝

地裂缝常伴随地面塌陷发生,是岩体变形的地表表现,成因与岩体受力密切相关。采空区上方岩体垮落移

动时,内部产生拉张或剪切应力:拉张应力超岩石抗拉强度,会形成张开型地裂缝;岩体相对错动导致剪切应力超抗剪强度,会形成剪切型地裂缝。地裂缝多分布于塌陷区边缘或采空区边界上方,长度数米至数百米,宽度几厘米至数十厘米。虽单独破坏力较弱,但会破坏地表完整性,导致耕地无法耕种,还会成为水体渗透通道,引发地下水位下降、土壤盐碱化,威胁建筑基础安全。

3.3 山体滑坡和泥石流

山区煤矿采空区易发生山体滑坡与泥石流,成因是采空区破坏与外部因素叠加。开采形成的采空区打破山体应力平衡,使岩体裂隙、松动,山体处于“临界稳定”状态。遭遇降雨、地震等诱因时,平衡被打破:持续降雨增加岩土体重量、软化岩性,降低抗剪强度,引发山体滑坡;强降雨冲刷松散堆积物,会形成泥石流;地震震动也会加剧岩体松动,触发失稳。这类灾害突发性强、冲击力强,会冲毁村庄、设施,威胁生命财产安全,还可能堵塞河道引发次生洪水。

4 地质灾害安全评价指标体系构建

4.1 采空区特征指标:核心风险源的基础评价

采空区自身特征直接决定稳定性,是评价核心。面积与深度是关键:面积越大,上方岩体无支撑范围越广,坍塌风险越高;深度越深,岩体压力越大,灾害影响与救援难度也随之增加。形状影响显著:规则形状采空区受力均匀,应力集中弱;不规则形状易在边角形成应力集中点,更易出现裂缝、变形甚至坍塌。充填情况至关重要:未充填或充填不密实的采空区,内部空隙多,岩体缺乏支撑,易受扰动位移;充填密实的采空区可通过充填材料分担压力,降低风险,充填体强度与密度需作为子指标纳入。

4.2 地质环境指标:风险传导的载体评价

地质环境是灾害发生与扩散的载体,需从三方面构建指标。地层岩性决定抗灾能力:坚硬岩层(如花岗岩)力学强度高,能长期保持稳定;软弱岩层(如页岩)强度低、易风化,在采空区影响下易变形剥落,加速灾害。地质构造放大风险:断层、褶皱破坏岩体完整性,形成软弱结构面,在采空区应力扰动下,易引发滑动坍塌;活动性断层还可能因外界触发震动,加剧采空区失稳。地下水活动催化风险:地下水渗透岩体裂隙,软化岩性、降低强度,尤其影响软弱岩层与充填体;水位升降产生的动水压力会改变岩体受力,诱发地面塌陷、涌水等次生灾害,地下水位埋深、水流速度等需重点监测。

4.3 诱发因素指标:风险触发的外部评价

外部诱发因素是打破平衡的“导火索”。降雨是常见自然因素：持续降雨增加岩土体重量、降低抗剪强度，在采空区松散覆盖层厚的区域，易引发塌陷、滑坡；暴雨形成的地表径流还会冲刷边坡，加剧失稳。地震是高强度触发因子：地震波强烈震动采空区及周边岩体，破坏结构，使临界稳定的采空区瞬间失稳坍塌，还可能激活断层扩大灾害范围。人类工程活动是重要人为因素：采空区周边采矿会改变应力分布，干扰原有平衡；建筑、道路施工若靠近采空区，可能因开挖、堆载或施工震动破坏岩体稳定，工程类型、规模、与采空区距离需作为核心子指标。

5 地质灾害安全评价方法

5.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法以模糊数学为理论基础，适用于处理地质灾害安全评价中因信息不完整、概念模糊而带来的不确定性难题。该方法通过系统构建评价因素集、评语集以及符合实际的隶属函数，实现对地质灾害危险性的多维度量化评估。具体步骤包括：首先依据专家意见或实际数据确定各评价指标的权重，以科学反映不同因素在灾害形成过程中的贡献程度；随后借助隶属函数，计算每一指标对应于不同评价等级（如高风险、中风险、低风险）的隶属度，用以刻画指标的模糊属性；最后通过模糊合成算子，将各指标的隶属度信息进行集成，生成综合性的安全评价结果。这一方法不仅有效处理了传统二值逻辑难以描述的模糊现象，还能够适应复杂多变的地质环境，为区域地质灾害风险评估提供有力的理论工具。

5.2 层次分析法

层次分析法（AHP）是一种将复杂系统分解为层次结构的经典决策分析方法，广泛用于多目标、多准则的地质灾害安全评价。该方法首先将评价问题划分为目标层、准则层与指标层，建立起清晰而有逻辑的层次框架；在此基础上，通过两两比较方式，由专家对各层级内元素的相对重要性进行评判，构造判断矩阵，进而计算得出各要素的权重向量，并需通过一致性检验以保证判断的合理性。最终，通过层次合成将各项指标的实测数据与权重整合，形成对地质灾害安全性的总体评价。层次分析法的核心优势在于能够统筹主观经验与客观数据，将难以直接量化的地质因素转化为可操作的结构化模型，显著提升评价过程的系统性和结果的可靠性，尤其适用于具多层次、多影响因素的地质安全评估场景^[5]。

5.3 数值模拟评价法

数值模拟评价法利用计算机软件对采空区的力学行为和地质灾害的发生过程进行模拟。通过建立采空区的数值模型，输入相关的地质参数和边界条件，模拟采空区在不同工况下的应力分布、变形情况和破坏过程。数值模拟评价法能直观地反映采空区的稳定性和地质灾害的发展趋势，为地质灾害的防治提供理论依据。但该方法对模型的准确性和参数的可靠性要求较高，计算过程复杂，需要专业的软件和技术人员。

6 结论与展望

6.1 研究结论

通过对煤矿采空区地球物理探测与地质灾害安全评价的研究，我们明确了不同地球物理探测方法的优缺点和适用范围，构建了地质灾害安全评价指标体系，并介绍了多种评价方法。地球物理探测技术能为地质灾害评价提供基础数据，而科学合理的安全评价方法能准确评估地质灾害的危险性，为灾害防治提供决策依据。

6.2 研究展望

未来的研究方向主要包括：一是发展多方法联合探测技术，充分发挥不同地球物理探测方法的优势，提高采空区探测的精度和可靠性；二是进一步完善地质灾害安全评价指标体系和评价方法，考虑更多的影响因素和不确定性，构建更加高精度的评价模型；三是加强地球物理探测和地质灾害评价的信息化建设，实现数据的快速处理和共享，提高地质灾害防治的效率和水平。

参考文献

- [1] 吴曾锐, 陈杨. 综合物探技术在城市供排水工程中的运用及展望[J]. 科技资讯, 2025, 23(12): 107-109.
- [2] 郭晨. 物探技术在煤矿地质探测中的应用分析[J]. 能源与节能, 2025, (07): 266-268.
- [3] 李添乐, 张义平, 胡洁. 基于综合物探在煤矿超前探水预报的应用研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(05): 229-236.
- [4] 李攀, 袁莉, 柯军, 等. 煤矸石固废多途径资源化利用研究进展[J]. 再生资源与循环经济, 2025, 18(03): 12-15.
- [5] 伍小刚, 龙海涛, 朱锐杰, 等. 基于层次分析法的超前地质预报体系在西藏某隧道中的应用[J]. 四川地质学报, 2025, 45(02): 306-312.

作者简介: 郭晓东, 出生年月: 1972.08, 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 河南省叶县, 学历: 本科, 职称: (现目前的职称) 高级工程师, 研究方向: 安全工程。