地矿测绘
Geological and Mineral Surveying and Mapping
第 8 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

复杂地质条件下矿山开采对地表沉降的测量分析及控制对策

刘建平
国电建投内蒙古能源有限公司
DOI:10.12238/gmsm.v8i4.2234

[摘　要] 矿山开采导致的地表沉降是影响矿区安全和生态环境的重要问题,特别是在复杂地质条件下,地表沉降表现出非线性和不确定性特点。本文研究了复杂地质矿区开采导致的地表沉降机理和时空演化规律,结合沉降测量数据与数值模拟结果进行定量分析。根据不同地质条件,提出了相应的控制与治理策略,包括开采工艺优化、地压控制、监测体系建设及预警机制。研究表明,地表沉降与采空区规模、埋深、岩体结构等因素密切相关,通过综合监测与动态分析模型可实时掌握沉降过程,为矿山安全和生态保护提供支持。
[关键词] 矿山开采；地表沉降；复杂地质；监测分析；控制对策
中图分类号：X830.2　文献标识码：A

Measurement, analysis and control countermeasures of surface settlement in mining under complex geological conditions

Jianping Liu
State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., LTD

[Abstract] Surface subsidence caused by mining is an important issue affecting the safety and ecological environment of mining areas. Especially under complex geological conditions, surface subsidence exhibits nonlinear and uncertain characteristics. This paper studies the surface settlement mechanism and spatio-temporal evolution law caused by mining in complex geological mining areas, and conducts quantitative analysis in combination with settlement measurement data and numerical simulation results. According to different geological conditions, corresponding control and governance strategies have been proposed, including the optimization of mining processes, ground pressure control, the construction of monitoring systems and early warning mechanisms. Research shows that surface subsidence is closely related to factors such as the scale of goaf areas, burial depth, and rock mass structure. Through comprehensive monitoring and dynamic analysis models, the subsidence process can be grasped in real time, providing support for mine safety and ecological protection.
[Key words] Mining;Surface subsidence; Complex geology; Monitoring and analysis; Control countermeasures

引言

矿山开采是资源开发的重要支撑,但地表沉降已成为影响矿区可持续发展的隐患,可能导致裂缝、建筑物倾斜和水系破坏。复杂地质条件下,岩体特性差异、断裂构造和地下水变化使沉降更为复杂,传统的分析方法难以满足精细化监测需求。随着GNSS监测、InSAR技术和三维建模等技术的发展,矿区沉降分析精度得到了提高,本文结合实践案例分析沉降机理、测量技术和防控措施,为矿山安全管理和生态修复提供依据。

1 复杂地质条件下地表沉降的形成机理分析

1.1地质构造与岩体性质的影响

地质构造乃是决定地表沉降形态以及规模的关键根本性要素,于地质条件复杂、断裂发育状况明显或者岩层倾角比较大的矿区之中,地应力分布大多时候呈现出较大的非对称性,致使岩层在采动扰动的情况下出现非均匀位移以及破裂带分布不均衡的现象,断层、褶皱以及节理裂隙等这类构造弱面充当了应力集中以及能量释放的通道,使得地表沉降区的空间分布有十分突出的差异性。

岩体自身性质会对其在采动作用时的变形模式产生直接影响,硬岩层有强度高以及脆性大的特点,在采动扰动的情况下,大多呈现以断裂破坏为主的情况,沉降曲线较为陡峭,峰值相对集中,而软岩体因可塑性较强,容易出现蠕变以及流变效应,致使地表沉降过程有延时性与缓变性的特征。不同岩性形成的互层结构会让应力传递以及变形过程变得更为复杂,容易产生层间剪切变形、波状下沉以及局部塌陷等非线性响应,在存在软弱

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

夹层或者可压缩层的区域,采动扰动大多时候会诱发层间错动与压实固结,形成复合型沉降曲线,由此可以看出,地质构造的不连续性和岩体的非均质性共同决定了沉降的时空分布特征,是地表变形预测与防控的关键因素。

1.2采动方式与空间结构的作用

不同的采矿方式以及开采布局对于地表沉降所产生的影响存在着差异,长壁采矿由于采掘面积较大、采空区范围较为广泛,当顶板失稳之后容易形成大范围的集中沉降带,其沉降曲线有十分突出的“槽形”特征,分层回采借助逐步开采并且控制顶板垮落的方式,可有效地释放应力,减缓沉降的速率同时降低地表破坏的风险。充填开采是在采空区及时地回填材料,以此维持围岩应力的平衡,大幅度减小顶板下沉以及地表变形的幅度,是控制沉降的有效手段之一。

开采深度、采区布局以及煤柱设计对于沉降特征有着关键影响,深埋矿体由于覆盖层厚度较大,岩层变形传递路径较长,沉降发展较为缓慢,不过其影响范围更为广泛,浅部开采时沉降速率较快,形变较为集中,容易引发地表裂缝与塌陷,采区间距过小或者煤柱留设不合理,有可能导致应力叠加,引发局部地表隆起或者不均匀沉降。采掘速度过快同样会破坏岩体的渐近平衡,致使顶板无法形成有效的自支撑拱,使得地表沉降加剧,采动方式决定了地应力释放路径以及围岩响应机制,是控制地表沉降的主导工程因素。

1.3地下水动力与地应力重分布的影响

一方面,地下水于地表沉降的形成以及发展进程中发挥着“催化”和“放大”的功效,采矿活动致使含水层结构遭受破坏,渗流路径发生改变,地下水位下降使得孔隙水压力减小,岩层有效应力增大,由此引发土体或者岩层固结压缩,造成地表沉降,当采掘范围内地下水补给不足时,地层收缩以及塌陷趋势加剧,引发裂缝扩展以及次生塌陷。处于松散层厚且含水性强的地区,水位变化跟沉降速率呈现出高度正相关的关系。

另外一方面,开采活动所带来的扰动致使地应力出现重分布,这同样是沉降现象产生的关键机制,当局部地区出现应力集中状况时,原本存在的结构面有可能会被激活或者扩展,产生新的断裂以及剪切滑移,最终使得岩层的支撑能力有所降低,随着采空区域持续不断地扩大,周围的岩石会历经从弹性压缩、塑性变形直至失稳塌落这样一个完整的过程,而地表的变形也会从起初较为缓慢的沉降转变为快速下沉。借助监测研究可发现,地下水动力以及地应力重分布大多时候呈现出协同效应：在水流侵蚀以及应力集中这二者共同作用的情况下,岩体的孔隙率会增大,结构也会变得松弛,形成一种“水力—力学”耦合破坏的模式。

在地表沉降防治工作中,要全面考量采动扰动、水文地质状况以及岩体结构特性,借助构建热—水—力多场耦合模型达成动态预测与风险评估,对于含水层发育且断裂密集的矿区,需加强地下水监测以及回灌调控,优化采矿布局和支护策略,以此在源头把控地表沉降的发展态势。

2 地表沉降的测量与分析方法

2.1传统测量技术与现代监测手段的结合

对地表沉降展开监测以及进行分析,乃是评估矿山安全以及生态风险的一项基础性工作,传统的水准测量方式尽管有较高的精度,然而其受到地形的限制较为较大,监测周期比较长,而且所需成本也相对较高,随着技术不断向前发展,GNSS动态监测以及InSAR遥感测量已然成为了主流的测量方法。GNSS技术可达成毫米级精度的连续位移监测,比较适合用于矿区长期的变形跟踪,InSAR技术可借助雷达干涉成像来获取大范围的地表形变信息,在山区以及无人区有着独特的优势,把这两者相互结合起来,可构建起高精度、多时相的沉降监测体系,地面激光扫描以及无人机航测可实现矿区三维地形的重建,将其与数值模拟结果相结合,可直观地呈现出地表形变的特征。

2.2沉降数据处理与变形规律分析

在复杂的地质状况之下,沉降数据呈现出十分突出的空间异质性以及时间波动性,借助时间序列分析可提取沉降速率的变化规律,运用多元回归模型或者灰色系统理论可识别主要的影响因子,统计结果显示,沉降速率和采深、采宽、地层倾角以及地下水位变化有着较大的相关性,运用数值模拟方法比如FLAC3D或者UDEC可对采动过程中的岩层应力与位移场展开动态演化分析,揭示不同地质构造下沉降发展的阶段性规律。监测结果说明,沉降一般会经历缓慢发展、加速下沉以及趋稳这三个阶段,而且峰值沉降滞后于采动结束的时间。

3 地表沉降控制的工程技术对策研究

3.1优化开采设计与工艺参数

科学且合理的开采设计乃是控制地表沉降的首要途径,借助在设计阶段对地质、地应力以及岩体结构展开系统勘查,可为制定高效又安全的开采方案提供科学依据,展开来说,应当依据矿体的埋深、岩层的厚度以及结构特征,合理地确定采区的布置以及开采顺序,把控采深与采宽的比例,防止大面积连续采空引发应力集中以及顶板坍塌。煤柱的留设需要兼顾安全性与经济性,要保证围岩稳定,又要减少煤炭资源的浪费。

在地表建筑密集或者生态敏感区域,分层开采以及条带开采这类控制性技术有着一定优势,分层开采借助逐层剥离以及逐步回采的方式,可以有效地分散地表沉降量,让变形呈现出渐进的特征,条带开采是依靠保留未采条带形成天然支撑结构,以此减缓地表下沉速度,充填开采技术是控制沉降较为有效的方式之一,凭借在采空区及时充填高强度、低收缩率的固化材料,可维持顶板稳定,避免大范围塌陷。充填材料的配比以及密实度直接决定支撑效果,当前多采用高强度固化充填料、粉煤灰-水泥浆体或者废石膏复合材料,这样做可以提高支撑强度,还可实现矿区固废资源化利用,兼顾环境保护与经济效益。

3.2地压控制与顶板加固技术

在断裂发育或者软弱围岩的区域,地压控制对于防止沉降扩展而言是非常关键的环节,借助锚杆、锚索、喷射混凝土以及钢拱架等组合起来的支护方式,可有效地提高顶板以及围岩的

整体性,提高抗剪强度以及抗变形的能力,锚杆支护适用于稳定性相对较好的围岩,高预应力锚索以及钢拱架则更适合深部高应力区域或者结构破碎的地带。在采动扰动比较强烈的地段,应当采用柔性支护以及刚柔组合的结构,要保证支撑强度,又要有一定的变形吸收能力,适应围岩的动态变形特性。

注浆加固技术在控制地表沉降方面有着意义,向顶板裂隙以及采空区注入高黏度或者高强度浆液,可提高岩体结构稳定性,封堵渗流通道,避免地下水渗透引发固结沉降与地表塌陷,注浆材料可依据地质条件选择水泥浆、化学浆或者复合浆体,注浆范围和压力控制要依据岩体渗透性以及断裂分布精确计算,防止二次扰动致使新的裂隙扩展。

3.3地表与地下联合防控措施

地表沉降的防治属于一项系统工程,需要在“地下治理—地表防护—生态恢复”这三个层面协同推进,在地下治理层面,开采结束后要马上实施采空区充填、注浆固结以及地压监测等工作,以此防止采空区在长期演化过程中,由于结构松弛而出现二次沉降,对于已经形成沉降区的情况,要开展地应力再分布分析,制定分区加固与补强的方案。

在地表治理工作当中可采取的措施有很多,比如可以设置防沉降隔离带或者控制屏障,以此来阻断沉降影响的横向扩展,另外在关键建筑物或者交通设施附近设置防护基座或者地基加固层,这样可以减少差异沉降带来的影响,还需要强化地表排水以及植被恢复措施,合理规划排水坡度以及管网系统,防止地表水渗入采空区造成地层软化或者塌陷。借助植被覆盖可提高地表土体稳定性,减少水土流失以及次生滑塌现象的发生。

整体而言,对于地表沉降的有效控制而言,应当遵循“预防为主、监测为辅、治理结合”这一原则,去构建一个把设计优化、支护加固、生态修复以及动态监测整合在一起的综合防控体系,唯有把开采设计、施工工艺和地质环境治理进行深度融合,才可达成矿区地表沉降的长期稳定控制以及资源开发的可持续发展。

4 监测预警与信息化管理体系的构建

4.1地表沉降动态监测与预警系统

在复杂地质条件下,仅依靠定期测量难以及时掌握沉降变化,应建立动态监测系统。通过布设GNSS监测站、倾斜传感器、应力计及地下水位观测孔,形成多参数实时监测网络。监测数据经无线传输至中心数据库,通过数据融合与机器学习算法识别异常趋势,实现沉降风险的早期预警。监测实践表明,位移速率的持续上升往往预示沉降区进入加速阶段,此时应及时调整采掘计划或采取加固措施。

4.2信息化管理与智能决策支持

将地表沉降监测数据与矿山生产调度系统集成,可实现安全决策的智能化。基于BIM和GIS技术,可构建矿区地质—采动—沉降的三维信息模型,实现多源数据的可视化分析与风险区域自动识别。利用人工智能算法对历史沉降数据进行模式识别与趋势预测,可为管理者提供科学决策依据。此外,应建立矿区地质数据库与信息共享平台,实现部门协同与应急联动,提高矿区安全监管效率。

5 结语

复杂地质条件下的矿山开采对地表沉降的影响具有显著的空间差异性与时间延迟性,其形成机制涉及岩体力学、地下水动力学及地应力场重分布等多种因素。研究表明,科学的监测体系与合理的开采设计是控制地表沉降的核心。通过地质信息化技术与智能监测手段的综合应用,可实现沉降的动态感知与精准预测,为矿山安全开采提供技术保障。同时,应强化政策与技术标准建设,完善矿山地质环境治理体系,实现资源开发与生态保护的协同发展。只有建立“预测—监测—控制—修复”的全周期管理体系,才能在复杂地质背景下实现矿山开采的安全、绿色与可持续。

[参考文献]

[1]宋晶.复杂地质条件下矿山工程开采管理技术[J].世界有色金属,2023,(09):55-57.

[2]钱民国,李田丰.复杂地质条件下矿山工程开采管理技术研究[J].中国金属通报,2021,(09):203-204.

[3]李永林.复杂地质条件下矿山掘进支护技术研究[J].中国金属通报,2020,(10):36-37.

[4]王小霞.刍议复杂水文地质条件对矿山开采顺序的影响[J].世界有色金属,2019,(23):142+144.

[5]张晨,石强,沈华.大型矿山复杂地质条件的安全高效开采关键技术研究[J].世界有色金属,2019,(04):132-133.

[6]韩小虎,敖前勇,仇世邦.复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律研究[J].资源信息与工程,2017,32(05):81-82.

作者简介：

刘建平(1993--),男,汉族,内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗人,专科,国电建投内蒙古能源有限公司,测量班长,中级,研究方向：测绘。