

地下矿山采空区围岩移动、顶板下沉与地表沉降测量

陈程方

山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司 山东 烟台 264000

摘要:针对山东鑫泰公司花岗岩型金矿中深埋采空区围岩失稳、顶板垮落及地表沉降灾害问题,依托岩体力学与联动变形机理,布设井下围岩、顶板及地表立体监测网络,开展长周期变形实测。通过数据降噪、模型拟合剖析围岩收敛、顶板分层下沉与地表沉降空间演化规律,明确三者强联动滞后响应特征,划定变形风险等级,结合矿区地质隐患,提出充填加固、联合支护与地表综合治理方案。研究可为同类黄金矿山采空区变形监测、灾害预警及围岩防控提供实测参考与工程依据。

关键词:地下矿山;采空区;围岩移动;顶板下沉;地表沉降测量

引言:地下金矿开采形成大量采空区,打破原岩应力平衡,诱发围岩收敛、顶板离层垮落与地表沉降裂缝灾害,威胁井下采掘安全与地表建构筑物稳定性。当前矿区老旧空区叠加主采空区扰动,覆岩变形加速发育,灾害防控难度提升。为厘清采动覆岩多级变形联动机制,精准把控变形演化规律,本文结合矿区赋存地质条件,设计全域监测方案,完成实测数据分析与风险研判,针对性制定防控措施,破解金矿井下采空区变形监测与灾害治理工程难题。

1 采空区岩体变形基础理论与测量原理

1.1 地下矿山采空区岩体力学基础特性

(1)采空区围岩岩体结构与裂隙分布特征:采空区围岩以花岗岩为主,为典型裂隙-孔隙双重介质,受原岩结构面(节理、裂隙、断层)与开采扰动共同控制,裂隙呈非均匀、各向异性分布,主导岩体力学响应。花岗岩中发育多组高角度节理,局部蚀变带裂隙密集,构成潜在滑移面。(2)原岩应力与采动应力重分布演化机理:原岩应力为自重应力与构造应力叠加场;采空形成后,应力向两侧矿柱或围岩转移,顶板出现卸压区、应力集中区与原岩应力区,引发塑性屈服与破裂。花岗岩脆性显著,应力集中易诱发岩爆型片帮。(3)采空区围岩失稳主控影响因素:关键因素包括采空区跨高比、顶板岩体完整性、节理发育程度、地下水沿裂隙软化作用及开采速率,其中蚀变软弱带与高构造应力区易诱发大面积失稳。

1.2 围岩移动-顶板下沉-地表沉降联动变形机理

(1)井下采空区围岩侧向移动变形机理:侧向移动源于采动引起的水平应力释放与剪切破坏,表现为两帮收敛、矿柱压缩出现碎裂,位移量随距采空区距离增大而减小。花岗岩体破坏常沿既有节理面发生,位移呈阶

梯式突增。(2)采空区顶板弯曲、断裂下沉演化机制:顶板视作弹性或弹塑性板,随跨度增大拉应力超限产生弯曲下沉,进而出现离层、断裂(初次来压)和周期冒落,下沉量呈台阶式增长^[1]。花岗岩顶板抗拉强度较高,断裂周期相对较长,但垮落冲击力更大。(3)井下岩体变形传导至地表的沉降联动规律:顶板垮落—覆岩冒落带、裂隙带、弯曲带逐层传递至地表,形成下沉盆地;井下变形量与地表沉降呈非线性滞后关系,取决于覆岩刚度与断裂角。

1.3 三类变形监测核心测量原理

(1)围岩收敛位移测量基础原理:采用收敛计或激光测距仪,基于两点间距离变化反演巷道断面变形,通过固定基点消除仪器与参考系位移误差,精度可达亚毫米级。(2)井下顶板岩层分层下沉测量原理:利用多点位移计(锚固头位于不同深度),差动变压或钢带传感测量各层相对移动,分离离层量与总下沉量,监测顶板失稳前兆。(3)地表水准沉降、水平位移测量原理:水准测量基于闭合或附合路线,采用精密水准仪与因瓦尺获取高程变化;水平位移通过全站仪极坐标法或GNSS静态观测,建立固定监测网测定三维位移向量。

2 工程监测方案设计与现场实测实施

2.1 工程矿区概况与采空区赋存条件

(1)矿区地质条件、岩体物理力学参数:矿区位于山东省烟台市海阳市郭城镇,围岩以花岗岩为主,上覆岩层自上而下为第四系松散层(厚15~22m)、花岗岩风化层及完整花岗岩。经室内试验测定:新鲜花岗岩单轴抗压强度118.6MPa,弹性模量52.3GPa;蚀变花岗岩抗压强度64.2MPa,弹性模量28.7GPa;内摩擦角36°~48°,黏聚力3.5~6.2MPa,岩体质量等级为Ⅱ~Ⅲ类,局部蚀变带为Ⅳ类。(2)目标采空区空间形态、开采工艺与埋深参

数:采空区平面呈不规则多边形,走向长420m,倾向宽200m,采高3.0~4.5m(矿体厚度),采用全面发采矿方法和浅孔留矿法采矿,结合嗣后充填工艺,局部采用自然崩落法管理顶板。采空区埋深240~280m,基岩厚度与松散层厚度之比约5:1,属中深埋采空区,垮落带与裂隙带预测高度分别为8~15m和30~45m^[2]。(3)矿区原有灾害隐患与前期变形发育情况:矿区内存在2处历史民采空区,地表已有明显下沉洼地,最大下沉深度0.3m,地裂缝宽度0.05~0.25m,处于加速发展阶段。

2.2 全域监测点布设规划

(1)采空区侧壁围岩移动监测点布设方案:沿主运输巷和回风巷每40m布设一个监测断面,共布设10个断面。每个断面在两帮及顶底板中心位置安装4个收敛锚点,锚入深度1.5m,形成四边形收敛测线。在断层带及蚀变破碎带加密至20m一个断面,确保捕捉局部突变变形。(2)采空区顶板分层、表层下沉监测剖面布设:沿倾向和走向各布设3条主剖面,倾向剖面线间距30m,走向剖面线间距20m。每条剖面设5个垂直钻孔,孔深分别为6m、12m、22m,对应安装3层多点位移计,分别监测直接顶板、基本顶和上覆关键层的离层量与下沉速率。

(3)地表沉降监测网分区、分级点布置:以采空区投影中心为原点,将影响范围划分为核心区(0~1.2倍埋深)、缓冲区(1.2~2.0倍埋深)和边缘区(2.0~3.0倍埋深)。核心区布设20m×20m网格,缓冲区40m×40m,边缘区80m×80m。共布设基准点4个(位于稳定基岩),工作基点8个,地表监测点62个,形成“点—线—面”立体监测网络^[3]。

2.3 监测设备选型与作业工艺

(1)围岩收敛仪、岩层位移计选型与适配性分析:收敛仪选用YJ-W型钢尺收敛计,量程0~30m,分辨率0.05mm,具备温度自动补偿功能,适用于高湿、低照度井下环境。位移计选用BGK-4450型振弦式多点位移计,量程0~300mm,精度0.1%F.S,具备抗干扰和长电缆传输能力,适配硬脆花岗岩顶板变形监测。(2)顶板下沉专用监测设备安装施工工艺:采用φ75mm金刚石钻头开孔,孔深超过最深锚固头1m。清孔后依次推送浅层(6m)、中层(12m)、深层(22m)锚固头,注浆材料为早强微膨胀水泥砂浆,水灰比0.45。孔口安装保护盖及读数基座,24h后测定初始值,并记录孔口标高。

(3)GNSS、水准仪地表沉降监测设备作业规范:GNSS采用华测测绘i89双频接收机,静态相对定位模式,观测时段≥90min,数据采样间隔10s,基线解算采用LGO软件,平面精度优于±3mm+0.5ppm。水准仪采用天宝

DINI03电子水准仪,配合2m钢钢条码尺,每站视线长度≤30m,前后视距差≤1.0m,闭合差限差±1.0√Lmm(L为km数)^[4]。

2.4 现场监测实施与数据采集

(1)分周期监测时间频次设定:采动影响期(前60天)每日监测1次;稳定观测期(60~180天)每3日1次;后期蠕变期(180~540天)每周1次。当顶板下沉速率连续3日超过5mm/d或地表沉降速率超过2mm/d时,立即加密为每日2次,并启动预警。(2)井下、地表同步监测作业流程:每日上午8:00~12:00统一作业,井下由3人组完成收敛计和多点位移计读数,地表由2人组同时进行水准和GNSS观测。数据通过手持终端录入矿山监测云平台,实现井下一地表数据的时空匹配与动态比对,确保联动分析时效性。(3)原始监测数据标准化采集与归档:制定《采空区变形监测数据采集表》,包含测点编号、测量时间、仪器型号、示值、温度、湿度、观测人及备注。现场两人独立读数核对,异常值当场复测。原始记录每周刻盘归档,同时上传至服务器,加密备份,保存期不少于5年。

3 监测数据处理、规律分析与工程防控对策

3.1 监测数据预处理与拟合分析

(1)异常监测数据剔除、降噪处理:采用3σ准则识别粗大误差,剔除因震动、断电或人为误读产生的异常值;对剩余序列应用小波阈值降噪(db4小波,分解5层),分离真实变形趋势与高频随机噪声,信噪比提升至12dB以上。(2)围岩移动时序数据拟合分析:利用指数平滑与灰色GM(1,1)模型拟合收敛位移时序曲线,识别初始变形、等速变形和加速变形阶段,计算变形速率与加速度特征参数,判定围岩趋于稳定或失稳。(3)顶板、地表沉降数据归一化处理:采用极差归一化方法将不同量纲和量级的下沉数据映射至[0,1]区间,消除钻孔深度、测点位置差异影响,便于跨区域、跨层位对比分析。

3.2 三类岩体变形时空演化规律分析

(1)采空区围岩水平移动速率、空间分布规律:水平移动速率在采空区中部边缘最大(可达2.5~4.5mm/d),向两帮深部递减;空间上呈“中间大、两端小”分布,断层带附近速率突增1.5~2.0倍,方向指向采空区中心。(2)顶板下沉时序变化、分层沉降差异特征:顶板下沉呈“快—缓—稳”三阶段,初次来压前下沉速率达7~10mm/d;分层沉降差异明显,直接顶板下沉量占总下沉55%~65%,基本顶及关键层依次递减,离层发育高度约12~18m。(3)地表沉降盆地发育特征与边界沉降规律:沉降盆地呈非对称椭球状,最大下沉点位于采空区

中心偏上山方向,边缘沉降速率小于0.5mm/d;边界角约58°~68°,滞后角28°~38°,影响半径达1.5~2.0倍埋深。

(4)三者变形协同联动相关性分析:井下围岩收敛、顶板下沉与地表沉降呈显著正相关,相关系数 >0.85 ;顶板下沉超前地表沉降8~18天,可作为地表沉降预警的前兆指标,建立滞后响应传递函数^[5]。

3.3 变形超标风险评价与隐患判定

(1)矿山岩体变形安全阈值标准选取:参照《矿山测量规程》及类似黄金矿山经验,取围岩收敛速率 $>2.5\text{mm/d}$ 持续5天、顶板累计下沉 $>45\text{mm}$ 或离层 $>12\text{mm}$ 、地表最大沉降 $>50\text{mm}$ 或倾斜 $>5\text{mm/m}$ 作为预警阈值。(2)采空区顶板失稳、围岩垮塌风险评级:建立三级风险矩阵(低、中、高)。累计下沉超过70mm且加速变形判定为高风险;下沉速率突增2倍以上且离层持续扩大为中风险;变形量低于阈值70%为低风险。

(3)地表沉降诱发建筑物损毁风险评估:基于临界应变和差异沉降指标,对地表建筑物进行四级评估:I级(安全)、II级(轻度影响)、III级(中度损坏)、IV级(严重坍塌)。采空区上方已有1栋选厂厂房和2栋民房处于III级风险,需立即加固或搬迁。

3.4 采空区变形控制与沉降防控工程措施

(1)采空区充填加固围岩控移技术方案:采用分级尾砂胶结充填或高水材料充填,充填率 $\geq 85\%$;对重点区段实施注浆加固(针对裂隙发育带),注浆压力1.8~2.5MPa,扩散半径 $\geq 3\text{m}$,充填体28d强度不低于2.5MPa,有效约束围岩侧向移动。(2)顶板锚杆锚索支护下沉抑制优化策略:在变形剧烈区段增加锚索密度至3根/排,锚固深度由6m延长至10m;施加预应

力 $\geq 120\text{kN}$,配合W钢带和金属网,形成“锚杆—锚索—网”联合支护,顶板下沉量降低40%~55%。(3)地表沉降隐患区域治理与长效监测方案:对沉降盆地内高风险区采取挖沟回填、注浆抬升措施,回填高度不低于地裂缝深度1.2倍;建立自动化监测预警系统,布设静力水准仪和GNSS连续站,数据实时传输至矿调度中心,设置分级报警阈值,确保长效安全运行。

结束语

本次研究完成金矿采空区围岩、顶板及地表沉降全维度监测与规律分析,证实覆岩自上而下变形传导规律与时序变形特征,确定区域变形预警阈值,甄别地表建筑中损毁风险隐患。配套围岩充填、顶板优化支护、地表裂缝治理措施可有效抑制岩体变形,防控效果显著。后续需结合自动化监测设备优化监测体系,深究地下水、断层及蚀变带耦合扰动下变形演化机理,完善动态预警模型,进一步提升黄金矿山采空区灾害长效防控能力。

参考文献

- [1]贾会会.空天地一体化监测技术在采空区围岩及地表沉降测量中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):69-82.
- [2]孙万明.金属矿山多中段采空区顶板下沉及地表沉降监测分析[J].中国矿业,2024,33(7):216-225.
- [3]李刚.地下矿山采空区覆岩围岩移动规律与顶板变形监测技术优化[J].金属矿山,2023,9(6):172-177.
- [4]迟凤妹.采空区顶板-围岩-地表沉降联动监测模型构建与实测分析[J].地球物理学进展,2025,40(2):484-494.
- [5]张磊.深部地下矿山采空区多点位移计顶板下沉原位测量技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):112-116.