

ICS 73.020
CCS D98

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 132—2026

**金属矿山地下开采岩层与地表移动变形监
测技术规范**

Technical specification for the monitoring of strata and surface movement and
deformation in underground mining of metal mines

2026-06-11 发布

2026-06-11 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	2
4.1 监测目的	2
4.2 工作内容	2
4.3 监测流程	2
4.4 基本要求	3
5 监测项目和监测频率	4
5.1 一般规定	4
5.2 监测项目	4
5.3 监测频率	6
6 地表采动裂缝监测	6
6.1 一般规定	6
6.2 简易监测	6
6.3 专业监测	7
6.4 数据分析	8
7 地表移动变形监测	8
7.1 一般规定	8
7.2 GNSS 监测	9
7.3 水准监测	10
7.4 全站仪监测	10
7.5 InSAR 监测	11
7.6 激光雷达扫描监测	13
7.7 无人机倾斜摄影测量	15
7.8 数据分析	16
8 岩层深部位移监测	16
8.1 一般规定	16
8.2 钻孔测斜监测	16
8.3 轴向位移监测	17
8.4 数据分析	18
9 地表移动范围关键参数确定	18
9.1 一般规定	18
9.2 陷落角确定	18
9.3 移动角确定	19
9.4 边界角确定	19

9.5 矿体开采建议	19
10 成果编制与提交	19
10.1 一般规定	19
10.2 成果报告编制	20
10.3 成果图件提交	20
10.4 资料存储	20
附录 A (资料性) GNSS 测量手簿记录格式	21
附录 B (资料性) 现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征表	22
附录 C (资料性) InSAR 监测工作条件分类表	24
附录 D (资料性) 监测报告提纲	25
参 考 文 献	27

前　　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院武汉岩土力学研究所、河南大学、贵州大学、中南大学、武汉大学、香港理工大学、武钢资源集团程潮矿业有限公司、深圳飞马机器人股份有限公司、武汉科技大学、中石化石油工程技术研究院有限公司、鞍山五矿陈台沟矿业有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、鲁中矿业有限公司。

本文件主要起草人：夏开宗、张伟、杨括宇、王田龙、杜坤、潘玉丛、沈明轩、庞汉松、肖波、郑先伟、梁万、赵国良、马红军、彭胜、缪秀秀、周志伟、郝风才、宋许根、唐方元、赵双。

金属矿山地下开采岩层与地表移动变形监测技术规范

1 范围

本文件规定了金属矿山地下开采时岩层和地表移动变形监测的总则、监测项目和监测频率、地表采动裂缝监测、地表移动变形监测、岩层深部位移监测、成果编制与提交等内容。

本文件适用于金属矿山地下开采岩层和地表移动变形监测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 12897 国家一、二等水准测量规范
- GB/T 12898 国家三、四等水准测量规范
- GB/T 18314 全球导航卫星系统（GNSS）测量规范
- GB/T 28588 全球导航卫星系统连续运行基准站网技术规范
- GB/T 39610 倾斜数字航空摄影技术规程
- GB 50497 建筑基坑工程监测技术标准
- GB 50771 有色金属采矿设计规范
- CH/Z 3005 低空数字航空摄影规范
- DG/TJ 08-2051（J 11371）地面沉降监测与防治技术标准
- DZ/T 0154 地面沉降测量规范
- DZ/T 0283 地面沉降调查与监测规范
- JGJ 8 建筑变形测量规范
- T/CAGHP 008 地裂缝地质灾害监测规范
- T/CAGHP 013 地质灾害 InSAR 监测技术指南
- T/CAGHP 014 地质灾害地表变形监测技术规程
- T/CAGHP 046 地质灾害地下变形监测技术规程
- T/CAGHP 052 地质灾害深部位移监测技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩层与地表移动 strata and surface movement

指因地下开采引起围岩应力重分布，致使岩体产生垮落、断裂和弯曲变形，并逐步向上传递，最终在地表形成移动盆地的动态过程。

3.2

变形监测 deformation monitoring

利用专用的仪器和方法，对岩土体变形现象（位移、沉降、隆起、倾斜、裂缝等）进行持续或周期性观测、分析和预报等的各项工作。

3.3

无人机倾斜摄影 UAV-based oblique aerial photography

是指在无人机平台上搭载多镜头传感器（通常由一个下视镜头和四个倾斜镜头组成），从垂直及多个倾斜方向同步获取地表影像，并基于该影像集自动生成高真实感、可量测实景三维模型的一种航空摄影测量技术。

3.4

工作基点 working reference point

工作基点是为便于现场变形观测作业而布设的测量点。根据其所服务的观测技术手段，主要可分为两类：全站仪测量工作基点与三维激光扫描测量工作基点。

3.5

角反射器 corner reflector (CR)

能将雷达入射信号沿原路径反射回，并在 SAR 图像上形成高强度信号的人工装置。

[来源：T/CAGHP 013，3.1.11]

3.6

采动地表裂缝 mining-induced ground fissure

由于地下矿产资源（如金属矿）被开采后，引起岩体原始应力平衡状态遭到破坏，造成地表岩上体开裂、差异错动，在地面形成一定长度和宽度的裂缝并造成危害的现象。

4 总则

4.1 监测目的

4.1.1 监测地下开采引起的岩层与地表移动变形，掌握其演化规律，为移动变形的预警预报、灾害防治和科学的研究提供基础数据支撑。

4.1.2 根据监测数据进行地表移动分区，确定岩层边界角、移动角和陷落角等关键参数，为保护地表重要建（构）筑物及生态环境提供科学依据。

4.2 工作内容

4.2.1 在地下开采的采动影响区内，应在岩层内部、地表以及塌坑和裂缝带建立相应的岩层与地表变形监测系统。

4.2.2 采用简易或专业监测设备，按规定频率开展周期观测，准确测定地表监测点的空间三维位移及岩层内部的相对位移（钻孔水平位移和轴向位移）。

4.2.3 对采集的监测数据进行处理与分析，阐明地下开采引起的岩层与地表移动变形的空间分布特征及时间演化规律，并据此评估岩层和地表的稳定状态及其发展趋势。

4.2.4 依据变形特征确定地表移动关键参数，为矿区地表重要建（构）筑物安全及生态环境保护提出相应的控制和防护措施建议。

4.2.5 编制系统完整的监测成果报告，形成配套的图件和数据附表，按规定提交相关单位并进行规范归档、备份和保存。

4.3 监测流程

4.3.1 应按照资料收集-野外踏勘-方案设计-监测网布设和建造-监测-数据解算与整理-数据分析-报告编制的流程开展工作，监测工作流程见图 1。

4.3.2 资料收集应当收集矿区采矿设计，矿区水文地质条件与工程地质的条件，地下采空区和地表塌陷的空间分布特征，矿区已有的测量与监测工作成果，以及需要予以保护的地表建（构）筑物等方面资料。

4.3.3 野外踏勘应复核已有资料的准确性，评估监测方案现场可行性，调查地表塌陷、地裂缝的发育特征。

4.3.4 监测方案编制应以相关主管部门或委托单位下达的任务书或合同为依据，方案内容应包括监测项目、监测方法及监测频率等。

4.3.5 监测网布设和建造过程中，应对监测点和监测孔实施全过程质量检查与控制。

4.3.6 监测工作应包括监测数据的采集、处理与分析反馈，以及监测点和监测系统的运行与维护。

4.3.7 监测成果报告应按照合同要求及时提交，必要时应补充提交日报、警报和专题报告等。

4.3.8 矿山闭坑后,当判定岩层和地表移动已处于稳定状态时,可结束监测工作。

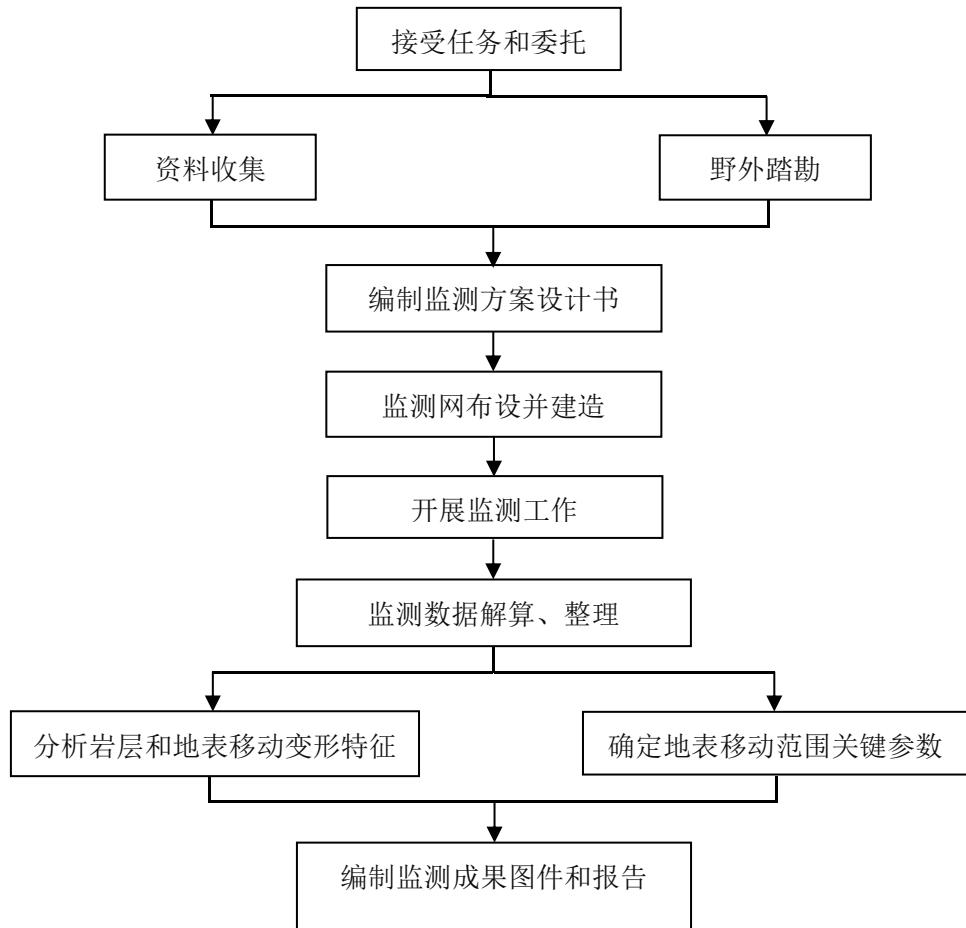


图 1 监测工作流程图

4.4 基本要求

4.4.1 监测设计书的编制应在系统分析矿体分布特征、已形成采空区情况、设计的地表移动范围以及岩层移动灾害特点和地质成因的基础上,结合具体监测目的、任务要求和测区条件进行。

4.4.2 监测设计书内容应完整涵盖监测目的与任务、矿体分布特征和采空区分布情况、地表建(构)筑物及周边环境条件、监测项目、测网布设和监测方法、监测周期和频率、数据整理与分析、地表移动范围关键参数确定、成果图件与报告的要求等。

4.4.3 监测频率和监测周期既要系统反映岩层和地表移动的重要变化过程,不遗漏关键变化时段,又应综合考虑单位时间内的变形量及其变化特征、观测精度要求以及外界因素的影响。

4.4.4 对同一监测项目以及监测仪器与设备的管理,按照T/CAGHP 014中相关规定执行。

4.4.5 在变形监测期间,应定期对基准点、工作基点、监测点、参考点和标靶等监测网点进行巡视检查;发现异常时,应及时查明原因并采取相应处置措施。巡视检查宜重点核查下列内容:

- a) 监测网点的结构完好与稳固状态。
- b) 监测元器件的完整程度、工作状态及防护措施落实情况。
- c) 是否存在人为扰动、外力破坏等非变形因素导致的监测网点倾斜、沉降或位移。
- d) 监测网点周边环境状况,包括是否存在遮挡、干扰或影响测量与信号传输的障碍物。

4.4.6 在变形监测期间,须严格依据设计书要求对地表进行全面巡查。巡查内容应重点关注以下方面:

- a) 地表塌陷坑的形成、扩展及其演化动态。

- b) 地表裂缝的出现、发展过程及扩展趋势。
- c) 地表建(构)筑物是否发生开裂、变形或结构损坏。
- d) 地表移动区外侧排水沟的修筑完整性及其变化情况。
- e) 山体是否存在滑坡、开裂等不稳定迹象。

5 监测项目和监测频率

5.1 一般规定

- 5.1.1 监测项目应根据岩层和地表移动灾害的特点、发生机理、可能的变形破坏形式等综合确定；
- 5.1.2 监测项目应构成一个完整的系统，能全面反映采动下从岩层内部到地表的整个移动变形过程。各监测项目之间应相互补充、验证。
- 5.1.3 监测频率的确定，应综合考虑灾害类别、岩层与地表的稳定状态、可能受危害的建(构)筑物以及自然条件等因素，应满足岩层稳定性预测与灾害防治的要求，并确保有充足的应急响应时间。

5.2 监测项目

- 5.2.1 监测项目包括地表裂缝监测、地表移动变形监测和岩层深部位移监测三类，具体见表1。
- 5.2.2 各监测项目宜配套选用相应类型的监测仪器，其具体类型宜根据监测内容及仪器技术特点按表1确定。

表1 监测项目和仪器选型

监测项目	监测仪器		监测内容	技术特点
地表裂缝监测	简易式观测仪	钢尺/卷尺	张开/闭合	精度较低(通常为1mm)，但操作极其简便，测量速度快。
		游标卡尺	张开/闭合	精度高，可达0.02~0.1mm，使用方便，测量快捷。
	机械式裂缝计	钢丝牵引式大量程裂缝计	主要测量张开	其量程可以从几十厘米到几十米甚至上百米，安装简便，但易受外界干扰。
		百分表/千分表式裂缝计	安装三个表可测张开、错动和沉降	量程可达10cm，性能稳定，精度极高(百分表0.01mm，千分表0.001mm)。
	电测式传感器类裂缝计	电振弦式裂缝计	张开/闭合	量程可达50cm，性能稳定、精度高(0.01mm)、抗干扰能力强，传输距离长，适于长期自动监测。
		电阻式裂缝计	张开/闭合	电阻式裂缝计量程可达20cm，测量精度通常为满量程的0.05%~0.1%，输出信号强、测量电路简单，但对温度和湿度较为敏感，长期稳定性略逊于振弦式。
		差动变压器式(LVDT)裂缝计	张开/闭合	量程可在2.5~500mm范围内选择，测量分辨率可达0.001mm，线性范围广、寿命长，但不适合高频动态测量。
		MEMS(微机电系统)传感器裂缝计	张开、错动和沉降	量程主要在±2mm~±50mm之间，体积小、便于安装、可批量布设，适合物联网监测，但易受环

				境干扰。
光纤传感类裂缝监测技术	光纤光栅(FBG)裂缝计	张开/闭合	量程可达30 cm, 高精度、抗干扰、耐腐蚀, 可实现一根光纤串联多个传感器。	
	分布式光纤传感裂缝监测系统(BOTDA/BOTDR等)	全线应变	监测长度可达数百米至数千米, 无需预先知道裂缝位置, 可实现“线”监测, 能发现隐伏裂缝, 监测范围大。	
地表移动变形监测	大地测量技术	全站仪	水平位移和竖向位移	精度可达毫米级, 但受通视条件和天气影响, 人工测量效率较低。
		水准仪	竖向位移	精度非常高(可达亚毫米级, 如0.3~0.5 mm/1 km往返), 但效率较低, 需要逐站测量。
		GNSS(全球导航卫星系统, 如GPS、北斗等)	水平位移和竖向位移	全天候, 可实现自动化实时监测, 适合大范围、长距离监测。精度达毫米级, 但竖向精度通常略低于水平精度。
	摄影测量技术	主要为无人机倾斜摄影测量	大范围三维变形	精度一般为厘米级, 作业效率高、覆盖范围广、成本较低, 非接触测量, 受天气和环境制约。
	遥感测量技术	激光雷达扫描仪(主要为三维激光扫描仪和机载激光雷达扫描仪)	地表形态、体积变化	在规范作业条件下, 地面三维激光扫描测量的点位精度一般可达毫米级; 机载激光雷达扫描获取的点云精度通常为厘米级。该类技术数据量大、信息全面, 属非接触式测量手段, 但易受天气和现场环境条件影响, 且设备及数据处理成本较高。
		InSAR(合成孔径雷达干涉测量)	大范围沉降场	精度一般为厘米级, 监测范围广、具备全天候非接触测量能力, 但难以捕捉突发性或极快速变形, 对地表散射条件(地表环境)要求较高
岩层深部位移监测	钻孔测斜仪	活动式测斜仪	水平位移	定期在测斜管内逐段(如0.5 m间隔)测量, 精度高, 需人工操作, 非连续监测。
		固定式测斜仪		将传感器(MEMS、振弦式、电阻式、LVDT等)固定于管内, 可实现自动、实时监测, 但成本较高, 测点间距固定。
	轴向位移监测仪	多点位移计	轴向位移	通过连接杆或钢丝, 将钻孔内不同深度锚固点的位移传递至孔口测量装置。它可采用百分表进行人工读数, 也可连接LVDT或振弦式传感器实现自动采集。该仪器精度高、可靠性好, 适用于测量和监测各锚固点所在位置地层的相对位移或差异沉降。
		滑动测微计		精度高, 通过滑动探头测量测管球座间距, 可获得沿整个钻孔深度连续的竖向位移(沉降/隆起)剖面, 能够精确定位移发生的深度与大小。
		光纤传感技术(FBG、BOTDA等)		FBG通过串联的光栅传感器进行准分布式点式测量, BOTDA利用布里渊散射进行真正分布式连续测量, 整根光纤即为传感器。两者均可实现自动

				化监测，其中 BOTDA 尤其适合大范围、长距离的全面扫描，而 FBG 更侧重于关键点的高精度测量。
--	--	--	--	--

5.3 监测频率

- 5.3.1 在初次进行观测时，应对整个监测网进行至少 2 次独立观测，取平均值作为稳定初始值。
 5.3.2 初次观测结束后，后续的重复性观测监测频率应按表 2 确定。

表 2 各类监测项目的监测频率

监测项目	监测频率
地表采动裂缝监测	1 次/2 月
地表变形监测	1 次/2 月
岩层深部位移监测	1 次/4 月

- 5.3.3 当现下列情况之一时，应提高监测频率，地表采动裂缝、地表变形和岩层深部位移宜每月 1 次。
 a) 监测数据达到预警值。
 b) 监测数据变化较大或者速率加快。
 c) 汛期、雨季等特殊气候时期。
 d) 地表出现大规模塌坑期间或者地表已有明显的滑移迹象。

6 地表采动裂缝监测

6.1 一般规定

- 6.1.1 裂缝的变形观测包括垂直位错及水平位错。水平位错包括垂直于裂缝走向的张开/闭合量和平行于裂缝走向的错动量。
 6.1.2 裂缝变形监测方法应根据地裂缝的规模、变形量与速率，并兼顾方法的量程与精度综合确定，可选用简易观测法或专业观测法进行测量。
 6.1.3 简易观测可采用钢尺、卷尺、游标卡尺等简便量测工具，对裂缝张开量、闭合量等参数进行人工测量。
 6.1.4 专业观测宜采用机械式（如百分表/千分表裂缝计、钢丝牵引式大量程裂缝计）、电测式（如振弦式、电阻式、LVDT 裂缝计）、微机电系统（MEMS）裂缝计及光纤光栅（FBG）裂缝计等专业监测仪器进行观测；必要时，可在矿区外缘潜在裂缝发育区布设分布式光纤传感监测系统，对隐伏裂缝进行连续监测与精确定位。
 6.1.5 为准确测量裂缝变形，裂缝两侧监测标志的连线或传感器测杆轴线应垂直于裂缝走向布设。

6.2 简易监测

6.2.1 监测网布设

- 6.2.1.1 应根据裂缝的规模和发展性质确定监测断面，并将监测断面布设在裂缝的代表性部位。
 6.2.1.2 针对规模和变形量较大的裂缝，应沿裂缝布设不少于 3 对监测点，其中在裂缝最宽处和两端部位各布置 1 对。

- 6.2.1.3 针对矿区地表最外侧等关键区域的裂缝，应布设不少于 1 对监测点，其中至少 1 对应布置在裂缝最宽处。

6.2.2 选点和埋设

- 6.2.2.1 监测点宜分别布设在裂缝两侧较为稳定的岩土体上；监测点距裂缝边缘的水平距离不应小于 30 cm；埋入地下的深度不宜小于 50 cm。

6.2.2.2 监测点应结合岩土性质选用相应的型式。基岩区可采用钻孔植入金属钩、钢钉作为监测点；土层区宜埋设混凝土桩或金属杆作为监测点，并应采用水泥砂浆或混凝土对桩基部位进行加固。

6.2.2.3 监测标志应安装牢固，并具备便于量测的清晰端面、中心标志或固定接触点。土层区可在混凝土桩内预埋金属钩或带十字丝的钢钉作为监测标志。

6.2.3 观测前准备

6.2.3.1 在观测前，应确保所选监测仪器学性能完好，并满足本工程所需的测量精度要求。

6.2.3.2 检查观测环境，确认监测点的稳定状况，确保监测点之间无遮挡物及其他干扰因素，以保证数据的准确性。

6.2.4 观测技术要求

6.2.4.1 观测过程中应采用标准化的测量方法，确保各次观测条件一致，避免因方法不当引入观测误差。

6.2.4.2 裂缝简易观测时，观测精度误差不应超过 2 mm，或监测周期内平均变化值的 1/5，以较大者为准。

6.2.5 数据处理

6.2.5.1 监测数据记录应符合 T/CAGHP 008 的规定。

6.2.5.2 对测量所得的原始数据，应按裂缝编号或位置进行分类整理，并系统地录入电子数据库或电子表格中。

6.2.5.3 应计算本次测量值与上次测量值的差值，得到该时间段内的单期变化量；计算本次测量值与初始值（或基准值）的差值，得到累计变化量，形成裂缝变形基础数据库。

6.3 专业监测

6.3.1 监测网布设

6.3.1.1 规模和变形量较大的裂缝区域，以及地表最外侧的关键裂缝区域，监测网布设应符合 6.2.1 条的规定。

6.3.1.2 在矿区最外侧潜在裂缝区，上下盘区域应布设不少于 2 条垂直矿体走向的裂缝监测剖面；矿体端部区域应布设不少于 1 条平行矿体走向的裂缝监测剖面。监测剖面长度宜控制在 60~100 m 之间。

6.3.2 选点和埋设

6.3.2.1 裂缝专业观测的安装与埋设应符合下列规定：

- a) 各类裂缝计安装宜遵循“一体固定、一测联动”原则，即将仪器本体可靠锚固于相对稳定一侧，通过位移传递构件与变形侧联动。
- b) 机械式裂缝计安装时，应将表体（或主机）牢固固定于相对稳定一侧；百分表/千分表式裂缝计的测头（测杆）应与变形侧结构表面保持可靠顶紧接触；钢丝牵引式大量程裂缝计的钢丝牵引端应与变形侧结构可靠连接，并保持适当张力。
- c) 电测式裂缝计（振弦型、电阻应变型、LVDT 型等）安装时，应将传感器基座或壳体可靠固定于相对稳定一侧，位移传递构件（如测杆、拉杆或钢丝等）宜通过万向接头等柔性连接件与变形侧结构连接，避免附加弯曲和剪切作用，确保变形侧位移能有效传递；MEMS 裂缝计宜整体跨越裂缝布设，两端分别可靠锚固于裂缝两侧岩土体或结构表面。
- d) 光纤光栅（FBG）裂缝计宜跨缝布设，两端应牢固锚固于裂缝两侧稳定基面，并施加适当预拉力；光纤引出段应沿基面固定并采取防护措施，避免过度弯折、挤压和机械损伤。
- e) 锚固方式：在基岩区，宜采用膨胀螺栓或化学锚栓将传感器基座、支座或固定端锚固于预钻孔的岩体或混凝土基面；在土层区，应现场浇筑混凝土桩或设置预制混凝土基础块，并将传感器基座、支座或固定端可靠植入或锚固于其中。

6.3.2.2 分布式光纤传感裂缝监测的安装应符合下列要求：

a) 基岩区安装：安装面应清理、打磨平整，并沿监测路径开凿浅槽；将传感光缆采用环氧树脂粘贴或通过锚固点分段固定于槽内，确保其与岩体变形协调，最后用水泥砂浆回填保护。

b) 土体区安装：需先浇筑混凝土桩或连续梁作为传力基床。将光缆铺设在基床上，或开挖浅沟后回填混凝土进行埋设，形成稳固的光缆-土体协同变形体。

6.3.3 观测前准备

6.3.3.1 在观测前，应对应采用的机械式、电测式、MEMS 及光纤类裂缝计逐一进行检查，包括：

- a) 检查表体、传感器基座及支架安装是否牢固，测杆、钢丝或光纤引出段连接是否可靠、活动是否顺畅，无明显松动、卡阻和外力干扰。
- b) 检查电源、传感器及电缆（或光纤及接头/熔接点）的完好状况，确认数据采集系统通道配置、量程、采样频率和时间设置符合监测方案要求。
- c) 对需采用基准读数的仪器，应进行零点检查和必要的现场标定，确认读数稳定后方可开展观测。

6.3.3.2 应检查现场环境，确保监测区域内无明显干扰因素（如强电磁干扰、温度剧烈波动等），避免影响观测数据的准确性。

6.3.4 观测技术要求

6.3.4.1 观测技术要求应符合 T/CAGHP 014 有关规定。

6.3.4.2 应根据裂缝变形状态合理设定数据采集频率。对于裂缝稳定期，可采用定时采集（如 1 次/天或 1 次/周）；对于裂缝活动期，应将采集频率提高至 1 次/小时或更高，或采用连续实时采集模式。

6.3.4.3 应定期进行人工比测，使用游标卡尺等简易测量工具对布设自动监测仪器的裂缝监测点观测结果进行现场核对，并与自动采集数据进行对比，以验证监测系统的可靠性。

6.3.5 数据处理

6.3.5.1 监测数据记录应符合 T/CAGHP 008 的规定。

6.3.5.2 应对导入并转换后的数据进行初步校验，检查其完整性和合理性，并剔除明显的异常或无效数据。

6.3.5.3 应将数据按编号或位置分类归档，以清晰呈现各监测点处裂缝的张开、错动与沉降变形过程，形成裂缝变形基础数据库。

6.3.5.4 对于分布式光纤监测，应将采集的光信号准确解译为沿光纤的连续应变分布数据。

6.4 数据分析

6.4.1 应基于监测数据库，绘制裂缝位移（或位移速率）—时间曲线，通过对比不同时期的数据，分析裂缝的动态发展趋势。

6.4.2 应基于光纤传感获得的应变数据，分析沿线应变分布及其变化特征，以精准定位并判定隐伏裂缝的位置、宽度及变化速率，揭示裂缝动态扩展的时空演化规律，并据此确定地表最外侧裂缝的位置，绘制裂缝边界分布图。

7 地表移动变形监测

7.1 一般规定

7.1.1 地表移动变形监测应覆盖塌坑区及其周边区域，其中塌坑区主要监测竖向位移（沉降），周边区域还应同时监测水平位移。

7.1.2 塌坑区地表变形宜采用 InSAR、激光雷达扫描与无人机倾斜摄影等非接触式技术进行测量。

7.1.3 塌坑周边地表移动变形应沿矿体走向及其倾向方向布设观测线进行监测，以掌握整体变形场分布特征。对于关键建（构）筑物和敏感部位，应布设高精度水准精密观测网，实施重点监测。

7.1.4 监测网布设应综合考虑矿体分布、地质条件、变形特征、影响范围，以及地形地貌、通视条件和施测要求，并确保能够反映岩层与地表的整体变形趋势。

7.1.5 监测方法的选择应综合考虑精度要求、环境条件和变形速率等因素，并参考表 1 所列技术特点合理确定。

7.1.6 全球导航卫星系统（GNSS）监测宜采用静态测量技术，以在地表移动变形监测中实现毫米级精度的精密相对定位。

7.1.7 激光雷达扫描监测可采用地面三维激光扫描仪和机载激光雷达扫描仪两种方式。前者精度可达毫米级，但需进行相对或绝对拼接，作业效率较低；后者数据自带统一坐标系，无需拼接，作业效率较高。

7.1.8 应对各类测量基准点、工作基点、参考点及像控点执行下列工作：

- a) 稳定性评估：根据监测数据确认其是否仍处于稳定区域，并未受地表移动变形影响。
- b) 坐标校核：定期（宜每年不少于两次）对其坐标进行复测与校验。

7.2 GNSS 监测

7.2.1 监测网点布设

7.2.1.1 监测点布设应符合以下要求:

- a) 观测线位置及条数的确定: 一般应在预计移动盆地的走向和倾向主断面上, 分别设置一条观测线。当未来采空区走向长度大于 $1.4H_0+50$ m (H_0 为平均采深) 时, 可沿倾向方向增设多条观测线, 其间距不小于 50 m。
- b) 观测线长度的确定: 观测线长度宜大于地表移动变形预计的边界线范围, 并超出预计边界线 30 m~50 m; 可根据监测到的实际边界线范围及时调整观测线长度。
- c) 测点间距的确定: 测点间距应符合 T/CAGHP 014 中相关规定, 并在移动盆地边缘附近适当加密。

7.2.1.2 基准点布设应符合以下要求:

- a) 矿区上盘、下盘及两端部宜各设置 1 个基准点; 当矿区范围较大时, 可在上盘和下盘分别增设 1~2 个基准点。
- b) 基准点应选在长期稳定、不受采动及其他外界扰动影响的位置, 布设于监测网外的安全地带, 其距最近监测点的水平距离宜为 100~150 m。

7.2.2 选点和埋设

7.2.2.1 GNSS 监测点和基准点选点作业应符合 GB/T 18314 的规定。

7.2.2.2 监测点采用混凝土标石, 埋设要求如下:

- a) 标石基底应埋置于原状土层内, 埋深不宜小于 0.60 m。标石顶部应安装监测标志头, 其顶端宜高出地面 5 cm~10 cm。标石中心应埋设中心标志, 宜采用铜或不锈钢材料制作, 中心刻清晰、精细的十字线。
- b) 在冻土地区, 混凝土标石基底应埋置于最大冻土深度线以下, 其向下超出部分不宜小于 0.50 m。标石外露部分以下至最大冻土深度线范围内, 宜设置厚度不小于 0.60 m 的粗砂、砾石等非冻胀性回填层, 以削弱作用于标石侧壁的切向冻胀力。
- c) 混凝土标石可采用现场浇筑或预制后现场埋设的方式。标石埋设后应经过必要的稳定期方可使用: 在一般地区, 应经历一个雨季; 在季节性冻土地区, 除经历一个雨季外, 还应经历一个完整的冻融周期。

7.2.2.3 GNSS 基准点采用混凝土观测墩, 埋设要求如下:

- a) 墩体基底应埋置于原状土层内, 埋深不宜小于 1.20 m, 墩体高度不宜低于 1.50 m。
- b) 观测墩顶部应整平, 并预埋强制对中装置, 其对中误差不应大于 0.5 mm。

7.2.3 观测前准备

7.2.3.1 GNSS 观测前, 接收机应按产品说明书进行预热和静置。观测架设流程符合 GB/T 18314 中的规定。

7.2.3.2 天线高应在测前、测中和测后各量测一次, 其量测方法及要求应符合本规范附录 A 的规定。三次量测的最大互差不应大于 2.0 mm; 在互差范围内时, 取三次量测值的平均值作为天线高最终结果; 当差值超限时, 应对该测站进行重测。

7.2.4 观测技术要求

7.2.4.1 观测工作宜以完整测线为基本作业单元。作业前应编制观测作业计划, 并严格按“完成一条测线后方可开展下一条测线”的顺序组织实施。

7.2.4.2 为确保矿区基准点能有效控制监测区域并实现相互检核, 每次监测时宜同时架设不少于 2 个基准站; 为提高监测效率, 流动站数量宜不少于 3 台。

7.2.4.3 GNSS 变形监测网按用途和精度分为 A、B、C、D、E 五个等级。A 级 GNSS 网的观测技术要求应符合 GB/T 28588 的有关规定; B、C、D、E 级 GNSS 网观测的基本技术规定应符合 GB/T 18314 相关要求。

7.2.5 数据处理

7.2.5.1 将原始观测数据导入后处理软件, 依据外业记录簿输入天线高, 并正确选择天线类型与量高方式(垂直量高或倾斜量高)。

7.2.5.2 在完成上述参数设置后，应进行基线处理。基线处理前应设置卫星截止高度角，选择星历类型（如精密星历或广播星历），并确定解算模式。基线处理完成后，应对各条基线进行质量检核，重点检查比率、参考方差和均方根误差等指标，确认其满足精度要求。

7.2.5.3 在各条基线均通过质量检核后，应进行网平差。平差前应将坐标系设定为当地工程坐标系，并导入基准点坐标作为约束条件。平差完成后，应对成果进行质量检核，检查单位权误差（UWE）及基准点残差，综合判断网平差结果的可靠性；当发现 UWE 或基准点残差异常时，应查明原因，并进行必要的外业复测或内业调整。

7.2.5.4 处理完成后，从输出报表中提取各监测点在指定坐标系下的坐标及其精度信息，据此计算每个点的水平和垂直位移量，作为后续分析的基础数据集。

7.2.5.5 其他外业成果记录和数据处理应符合 GB/T 18314 中的有关规定。

7.3 水准监测

7.3.1 监测网点布设

7.3.1.1 水准测线的布设应按 7.2.1.1 条 GNSS 测线布设的要求执行。

7.3.1.2 在矿区上盘、下盘测线及端部测线外侧均应布设基准点，每个区域设置基准点不少于 3 个。基准点应选在监测网外的安全地带，其距最近监测点的水平距离宜为 100 m~150 m。

7.3.2 选点和埋设

7.3.2.1 监测点与基准点的选点作业应符合 DZ/T 0283 的有关规定。

7.3.2.2 监测点和基准点宜采用混凝土标石，其埋设要求应符合 7.2.2.2 条的规定。

7.3.3 观测前准备

7.3.3.1 交通安全：观测前应评估作业路线的交通状况，制定交通安全防护预案；在道路附近作业时，应设置明显的警示标志，作业人员应穿戴反光背心等安全防护用品。

7.3.3.2 现场踏勘：应提前踏勘观测路线，确保通行条件良好，清除或标识视线障碍物，检查并确认所有测点标志完好、位置明确。

7.3.3.3 应检查水准仪、水准仪三脚架、水准尺以及尺垫及其半球形测头等设备是否完好，重点核查各接触面有无磨损或松动，并确认水准仪三脚架稳固可靠。

7.3.3.4 其他观测前准备工作应符合 DZ/T 0154 的有关规定。

7.3.4 观测技术要求

7.3.4.1 作业前应编制观测作业计划。观测工作宜以“测线区域”和“关键建（构）筑物区域”为基本作业单元组织实施，完成一个作业单元后方可开展下一作业单元。若测线区域被塌陷区分割，则上盘与下盘的测线应分别布设为独立的闭合环。

7.3.4.2 水准测量等级应根据监测对象的重要性确定：关键建（构）筑物区域应采用一、二等水准测量；测线区域可根据实际精度要求，在一~四等水准测量中选取相应等级。

7.3.4.3 水准观测的技术要求应符合 GB/T 12897 和 GB/T 12898 的有关规定。

7.3.4.4 往返测高差不符值、环闭合差、检核高差之差的限差、测站观测限差等应符合 GB/T 12897 和 GB/T 12898 的规定。

7.3.5 数据处理

7.3.5.1 应将外业水准观测数据从电子水准仪或存储介质导入内业处理软件，及时在软件中核对测站编号、点号、观测时间、前后视距等关键信息；对非观测值的记录错误（如点号笔误），应在软件中予以说明并更正，但不得修改原始观测读数。

7.3.5.2 应利用内业软件对观测数据进行高差计算、闭合差检核和平差处理，求取各测点高程；复核无误后，生成并导出高程成果表及相关报告。

7.3.5.3 应在最终高程成果的基础上，以基准期或上一监测期高程为参考，计算各监测点的单次及累计沉降位移值，形成后续分析所需的基础数据集。

7.3.5.4 其他外业成果记录和数据处理应符合 GB/T 12897 和 GB/T 12898 的有关规定。

7.4 全站仪监测

7.4.1 监测网点布设

- 7.4.1.1 全站仪监测点测线的布设可参照 7.2.1.1 条 GNSS 测线布设的有关要求执行。
- 7.4.1.2 在矿区上盘、下盘测线及端部测线外侧均应布设基准点，每个区域设置的基准点数量不应少于 3 个。基准点应位于监测网外的安全地带，其距最近监测点的水平距离宜为 100 m~150 m。
- 7.4.1.3 每条测线宜布设 1~2 个工作基点，工作基点数量应根据测量范围和监测点通视条件确定。工作基点宜布设在通视条件良好且相对稳定的位置，必要时可布设在变形区边缘，并应加强稳定性检核。

7.4.2 选点和埋设

- 7.4.2.1 基准点、工作基点和监测点之间应保持良好通视条件，观测视线应开阔、无遮挡，并尽量避免强光直射及镜面反射等不利于照准和测距的环境光干扰。
- 7.4.2.2 监测点和工作基点宜采用混凝土标石，其埋设要求应符合 7.2.2.2 条的规定。
- 7.4.2.3 基准点宜采用混凝土观测墩，其埋设要求应符合 7.2.2.3 条的规定，照准标志的型式应符合 JGJ 8 规定，并应通过基座与观测墩可靠连接。

7.4.3 观测前准备

- 7.4.3.1 全站仪观测前，应校核棱镜常数设置是否正确，清洁棱镜镜面，并检查棱镜（或棱镜架）在基准点观测墩上的安装是否牢固、无晃动，以保证观测数据的准确性。
- 7.4.3.2 为保证测量精度，仪器高和棱镜高均应在观测前、观测后各量测一次，且两次量测应相互独立。两次量测值之差不应大于 2.0 mm；在限差范围内时，取两次量测值的算术平均作为该测站的最终仪器高或棱镜高结果；当差值超限时，应判定该测站观测存在粗差，作废该测站的高程观测成果并重新进行观测。

7.4.4 监测技术要求

- 7.4.4.1 监测宜采用“基准点—工作基点—监测点”分级控制模式。每一监测期应以稳定基准点网为控制，采用自由设站法结合后方交会解算本期工作基点的三维坐标，再以工作基点为测站，采用极坐标法或边角测量法观测各监测点。
- 7.4.4.2 可采用前方交会法对关键部位监测点进行检核观测，或在工作基点与监测点之间局部不通视时作为补充测量方法。
- 7.4.4.3 位移观测所用全站仪的标称精度应符合 JGJ 8 相关要求。
- 7.4.4.4 当采用全站仪边角测量法进行基准点与工作基点间联测时，基准点和工作基点宜组成多边形控制网，控制网的边长宜符合 JGJ 8 相关要求。
- 7.4.4.5 当采用全站仪极坐标法或前方交会法进行位移观测时，其观测技术要求应符合 JGJ 8 相关要求。

7.4.5 数据处理

- 7.4.5.1 应根据测站信息（坐标、坐标方位角）及原始观测值（水平角、竖直角、斜距），结合棱镜常数、气象改正等各项改正数，经计算解算得到各监测点的平面坐标（X、Y）及高程（H）。
- 7.4.5.2 应将全站仪中解算得到的监测点坐标成果导出为通用数据格式（如 CSV、TXT、DXF 等），供专业软件读取和处理。导出前应认真核对点号、编码、X、Y、H 等数据列的对应关系，防止数据错位和遗漏，确保数据完整、准确。
- 7.4.5.3 应将软件中展绘的点位与野外测绘草图进行一一比对，核验点号、地物属性及几何关系是否正确，发现异常时应及时查明原因并更正。
- 7.4.5.4 应根据多期监测获得的坐标成果，计算各监测点相对于基准期或上一监测期的水平位移量和垂直位移量（沉降量），并在此基础上形成可靠的位移基础数据集。

7.5 InSAR 监测

7.5.1 监测网点布设

- 7.5.1.1 角反射器监测点测线的布设宜参照 7.2.1.1 条 GNSS 测线布设的有关要求执行。
- 7.5.1.2 为提高 InSAR 形变解算精度及坐标转换的可靠性，应在矿区上盘、下盘及两端部布设角反射器基准点，每个区域设置的角反射器基准点数量不宜少于 3 个，并在稳定区内设置不少于 3 个转换参考点。上述基准点和转换参考点应位于预测变形影响范围以外的安全稳定地带，其距最近监测点的水平距离宜为 100 m~150 m。

7.5.1.3 为检验 InSAR 监测成果的精度,应专门布设 GNSS 检验点。检验点宜布设在变形较为显著的区域,并在矿区上盘、下盘及两端部等关键位置各设置不少于 2 个,其具体数量应根据所采用的精度验证方法和监测精度要求合理确定。

7.5.2 选点和埋设

7.5.2.1 检验点和转换点选点作业应符合 GB/T 18314 的规定。

7.5.2.2 角反射器监测点与基准点的选点应符合 T/CAGHP 013 的规定。

7.5.2.3 检验点、转换点和角反射器监测点与基准点的观测墩参照 GNSS 墩设计与埋设,角反射器的设计和安装应符合 T/CAGHP 013 的规定。

7.5.3 观测前准备

7.5.3.1 应根据地面塌坑的沉降幅值、空间范围、演化特征及周边环境条件,结合表 3,选择适宜的 InSAR 监测方法。

表 3 InSAR 技术方法及适用地质灾害类型和条件表

InSAR 方法	应用环境		SAR 数据频率 (景/a)	SAR 数据数量	最高监测速率精度	检测幅度 (年累计变形量)
D-InSAR	单 D-InSAR	适用于 SAR 数据时间间隔短和天气/季节接近的环境。以避免受到过多的时间去相干和大气的影响。高相干、中短空间基线	无限制	2	cm	cm~dm
TS-InSAR	PS -InSAR	适用于 SAR 数据时间间隔长、监测区天气条件差异大的环境。可以获取 PS 点的变形时间序列、DEM 改正值和所有 SAR 影像的大气延迟量。点相干、短空间基线	≥4	≥16	mm	mm~dm
	SBAS-InSAR	短时间基线高相干、长时间基线低相干,通过较多的 SAR 干涉组合,获取灾害变形时间序列信息	≥4	≥5	cm	mm~dm
	IPTA-InSAR	适用于 SAR 数据时间间隔长、监测区天气条件差异大的环境。可以获取 PS 点的变形时间序列、DEM 改正值和所有 SAR 影像的大气延迟量	≥4	≥8	mm	mm~dm
CR-InSAR	低相干, CR 需提前布设		无限制	≥2	亚毫米	mm~dm
Offset-SAR	适用于 SAR 数据时间间隔长、监测区天气条件差异大、地质灾害体变形量大、变形梯度大的环境		无限制	≥2	亚像素分辨率	米至百米

7.5.3.2 综合考虑塌坑区地形地貌、地表植被覆盖类型及预期变形速率,选取合适的 SAR 卫星数据源,并提前落实数据订购或获取计划。常用 SAR 数据源及其主要参数可参见附录 B。

7.5.4 监测技术要求

7.5.4.1 InSAR 对地表塌陷的监测宜分为两个层次：一是塌陷群发区识别，二是塌陷区的变形特征与演化过程监测。

7.5.4.2 检验点应采用高精度 GNSS 静态观测技术进行测量，以获取其精确的三维坐标及位移时间序列，为 InSAR 监测成果的精度验证提供基准。

7.5.4.3 InSAR 形变反演应优先选用精度高、时效性好的数字高程模型（DEM），如 TanDEM-X 12 m 等。对于历史 SAR 数据的回溯分析，应选用获取时间与 SAR 数据最接近的 DEM，并应避免在地形变化较快区域采用陈旧 DEM。

7.5.4.4 开展地面塌陷识别、小变形区的塌坑变形监测、大变形区的塌坑变形监测时，其技术要求应符合 T/CAGHP 013 中相关规定。

7.5.5 数据处理

7.5.5.1 InSAR 数据处理流程及技术要求应符合 DZ/T 0283 相关规定。

7.5.5.2 形变信息应采用内符合精度和外符合精度两种方法进行精度评定。InSAR 数据处理结果的内符合精度应符合表 4 的要求；监测工作条件分类参见附录 C。

表 4 各灾种 InSAR 监测技术方法及内符合精度参考表

技术方法	不同工作条件下应达到的监测内符合精度 (mm/a)				
	I	II	III	IV	V
D-InSAR	10	20	30	40	100
PS-InSAR	2	3	5	8	10
SBAS-InSAR	3	4	6	8	20
Offset-SAR	500	1000	1000	-	-

7.5.5.3 外符合精度验证数据宜与 InSAR 监测成果在时间上尽量同步、在空间上相对应，并在区域内分布均匀。可选用最临近法、区域半径法、区域融合法和形变格局法等对获取的形变信息进行检校和解译，其评价宜符合表 5 的要求。

表 5 InSAR 监测结果检校解译方法

评价方法	评价要求	适用范围
最临近法	选择在实测点 3 个像元等同的地面实距范围内与之最接近的点目标作为评价的验证点	PS -InSAR
区域半径法	对实测点一定半径范围的所有点目标形变值进行平均，验证其与实测点的形变值	PS-InSAR
区域融合法	在整个区域上用所有点目标形变值生成等值线面，验证与实测点位置相同的形变值	D-InSAR、PS-InSAR
形变格局法	用实测结果与解译结果分别生成形变等值线面，进行空间分布上的格局分析	D-InSAR、PS-InSAR

7.5.5.4 其他数据处理和精度评定要求应符合 T/CAGHP 013 中的有关规定。

7.6 激光雷达扫描监测

7.6.1 监测网点布设

7.6.1.1 激光雷达扫描监测点测线的布设宜参照 7.2.1.1 条 GNSS 测线布设的有关要求执行。

7.6.1.2 激光雷达扫描时应布设参考点，参考点分为不参与坐标转换的检验点和参与坐标转换的转换点。检验点数量不应少于 5 个，并应确保在矿区上盘、下盘及两端部均有分布；转换点数量不应少于 3 个（采用绝对拼接的地面三维激光扫描方法时可不另设转换点）。

7.6.1.3 当采用标靶拼接法进行地面三维激光扫描时，应布设用于站间拼接的标靶，其数量应根据实际测站数量和扫描范围合理确定，但不应少于 3 个。

7.6.1.4 地面三维激光扫描仪进行测量时，每个测站处应布设 1~2 个工作基点；当采用绝对拼接地面三维激光扫描方法时，每个测站处还应布设 1~2 个后视基准点，用于测站定向。

7.6.1.5 参考点、拼接标靶、工作基点和基准点应布设于矿区范围内稳定、通视良好的安全地带，其距最近监测点的水平距离宜为 100 m~150 m。

7.6.2 选点和埋设

7.6.2.1 后视基准点、工作基点和参考点的选点作业应符合 GB/T 18314 的规定。监测点选点时应确保与地面三维激光扫描仪之间通视条件良好，视线开阔无遮挡。

7.6.2.2 拼接标靶应布设在相邻测站的重叠区域内，确保在空间上三维分布均匀，避免共面或共线。

7.6.2.3 所有监测点、参考点、拼接标靶、工作基点与后视基准点，均应设置混凝土观测墩，其埋设要求应符合第 7.2.2.3 条的规定。

7.6.2.4 监测点、参考点和拼接标靶均须使用配套的专用标靶（如球形标靶、平面标靶），其要求如下：

- a) 标靶应布设在稳固的观测墩上，平面或球形标靶须通过基座与观测墩可靠连接。
- b) 所有标靶应布设牢固，宜采用遮光、防水材料进行保护，观测结束后应及时遮盖。
- c) 当激光雷达采用平面标靶时，激光束与靶面的入射角不宜大于 50°。

7.6.2.5 后视基准点标志的型式应符合 JGJ 8 的规定，标志应通过强制对中基座与观测墩可靠连接。

7.6.3 观测前准备

7.6.3.1 基于机载激光雷达扫描的观测前准备

- a) 应检查飞行平台（如无人机）的运行状态，确保动力、电源和通信等系统正常，并确认机载激光雷达与 POS（GNSS/IMU 集成定位定姿系统）的集成状态良好，完成时间同步及系统标定。
- b) 应根据监测区域范围、地形条件和变形监测精度要求合理规划并上传飞行航线，并结合对空间分辨率和覆盖质量的要求，合理设置激光扫描参数（如点云密度、扫描频率、扫描线重叠度）及飞行参数（如飞行高度和飞行速度）。

7.6.3.2 基于地面三维激光扫描的观测前准备

- a) 当地面三维激光扫描仪架设在设有强制对中装置的永久性观测墩基准点上作业时，观测前可按仪器说明书要求进行整平和开机自检。
- b) 对扫描仪器高的量测应严格遵循“测前、测中、测后”三次量测的原则。三次量测值的最大互差不应大于 2.0 mm；在满足限差要求时，应取三次量测值的平均值作为仪器高的最终结果；若互差超限，则该测站应予以重测。
- c) 其他地面三维激光扫描仪观测前准备工作应符合 JGJ 8 规定。

7.6.4 观测技术要求

7.6.4.1 采用激光扫描测量方法可进行四等沉降观测以及三等、四等位移观测。所用激光扫描仪的性能和观测要求应符合表 JGJ 8 的规定。

7.6.4.2 地面三维激光扫描通常需设置多个测站，测站数量应根据目标物体的复杂程度、尺度大小、预期扫描精度和现场遮挡情况综合确定，并应保证扫描范围充分重叠，尽量避免点云出现明显空洞和盲区。

7.6.4.3 选择地面三维激光扫描的拼接方法时，应综合考虑精度要求和现场条件。大范围、高精度的变形监测建议采用绝对拼接方法。

7.6.4.4 采用绝对拼接方法进行地面三维激光扫描时，应满足下列技术要求：

- a) 扫描仪应精确架设在工作基点上，并按仪器说明书要求完成整平及自检。
- b) 在扫描前，应通过十字丝或视准系统精确照准本测站对应的后视基准点标志，以确定仪器的空间方位。

c) 应利用 GNSS 等技术手段获取工作基点和后视基准点的精确三维坐标，并据此将各测站点云转换到同一坐标系中，按统一坐标约束进行绝对拼接。

7.6.4.5 在采用机载激光雷达扫描和基于相对拼接方法的地面三维激光扫描时，需要利用在测区内布设多个地面检验点为其精度提供验证。检验点应采用高精度 GNSS 静态观测技术进行测量。

7.6.4.6 机载激光雷达进行扫描作业时，除机载 GNSS 接收机外，还应在测区附近架设地面 GNSS 基准站。飞行结束后，通过联合处理机载与地面基准站的 GNSS 观测数据，可提高飞行轨迹解算精度，为生成高精度点云数据提供可靠保障。

7.6.4.7 其他地面三维激光扫描测量作业应符合 JGJ 8 有关规定。

7.6.5 数据处理

7.6.5.1 机载激光雷达数据解算与点云生成：在测区附近架设 GNSS 基准站，并对机载 GNSS 与 IMU（惯性测量单元）观测数据进行联合处理，解算飞行期间各观测时刻的三维位置和姿态轨迹。将该轨迹与机载激光测距数据结合，可生成带有真实地理坐标的原始机载三维激光点云；随后通过点云分类与滤波处理，分离地面点与非地面点。

7.6.5.2 地面扫描数据配准与拼接：将地面三维激光扫描数据导入内业处理软件，获取各测站点云并进行预处理，包括剔除明显飞点噪声、过滤冗余数据等；随后根据选用的相对拼接方法和绝对拼接方法，对各测站点云进行精确配准与拼接，形成统一坐标系下的完整三维点云数据。

7.6.5.3 点云后处理与建模：在完整点云数据基础上开展进一步后处理，包括精细剔除残余噪声、按对象对点云进行分类与提取，并根据需要生成可供其他专业软件调用的三维地形或构筑物模型成果。

7.6.5.4 监测点三维坐标提取：在拼接完毕并经过处理的三维点云及由其构建的三维模型中，准确识别各监测点位置并提取其三维坐标；采用标靶观测的，应以标靶中心为提取坐标的位置。

7.6.5.5 监测点变形量计算：以基准期或上一监测期的监测点坐标为参考，计算各监测点的单期及累计水平位移量和垂直位移量（沉降量），并整理形成规范、可靠的变形监测基础数据集。

7.7 无人机倾斜摄影测量

7.7.1 监测网点布设

7.7.1.1 监测点测线的布设应按 7.2.1.1 条 GNSS 测线布设的有关要求执行。

7.7.1.2 为满足精度要求，应在预测变形影响范围以外的安全稳定地带布设参考点和像控点，其距最近监测点的水平距离宜为 100 m~150 m。参考点的数量及具体作用应符合 7.6.1.2 条的规定。每条测线应布设不少于 2 个像控点，并宜分别布设于测线两端。

7.7.2 选点和埋设

7.7.2.1 监测点选点时应保证通视条件良好，视线开阔无遮挡，并应尽量减少环境光对观测的干扰。

7.7.2.2 参考点和像控点的选点作业应符合 GB/T 18314 的规定。

7.7.2.3 监测点、参考点和像控点均应采用混凝土观测墩，其埋设要求应符合 7.2.2.3 条的规定。

7.7.2.4 监测点、参考点宜采用配套的专用标靶（如球形标靶、平面标靶），其布设及安装要求应符合 7.6.2.4 条的规定。

7.7.3 观测前准备

7.7.3.1 应根据测区范围提前向空管部门申请飞行空域许可，并获取计划飞行日期的气象资料，确保作业条件符合安全飞行要求。

7.7.3.2 应根据任务精度要求和地形条件，合理设计飞行高度、飞行速度以及航向和旁向重叠度。

7.7.3.3 抵达现场后，应对测区进行实地踏勘，检查地形、净空条件及主要地物分布，重点识别并规避高压线等安全风险。

7.7.4 观测技术要求

7.7.4.1 无人机相对航高一般不宜超过 1500 m，最大不应超过 2000 m。不得在雨天、雪天或大风（风速超过无人机安全飞行风速）等不利气象条件下开展航摄影像采集作业。

7.7.4.2 在陡峭山区和高层建筑物密集区，宜将航摄时间安排在当地正午前后各 1 h 内。航摄时间、影像重叠度要求、飞行质量要求和影像质量要求应符合 GB/T 39610 中相关规定。

7.7.4.3 影像重叠度要求、飞行质量要求和影像质量要求应符合 GB/T 39610 中的有关规定。

7.7.4.4 地面像控点的三维坐标应采用 GNSS 或全站仪进行精确测量，其精度等级应高于最终模型精度等级至少一个等级。

7.7.4.5 每个架次飞行结束并降落后,应立即对采集的影像进行快速检查,确认无漏拍、模糊、过曝或欠曝等问题,同时检查 POS 数据的完整性;发现问题时,应及时补飞,确保外业数据质量可靠。

7.7.5 数据处理

7.7.5.1 IMU/GNSS 数据处理要求应符合 GB/T 39610 的规定。

7.7.5.2 应对获取的影像及 POS 数据进行初步检查与整理,剔除模糊、过曝等不合格影像,并依据 POS 信息为每张影像提供高精度的初始外方位元素。

7.7.5.3 应通过自动匹配连接点,并引入像控点的精确坐标,采用光束法区域网平差,优化解算所有影像的高精度外方位元素及加密点坐标,建立影像间的精确几何模型。

7.7.5.4 应在空三加密成果的基础上,通过密集匹配生成高密度三维点云,并构建带真实纹理的三角网模型;经必要的模型优化与纹理修饰后,形成可用于量测分析的高质量实景三维模型。

7.7.5.5 应利用检验点对实景三维模型进行精度验证,检查模型的几何精度和纹理质量。根据项目需求,输出 DSM(数字表面模型)、实景三维模型等满足规定格式和精度要求的成果。

7.7.5.6 应在输出的高精度实景三维模型中准确识别各监测点标靶,并以标靶中心为取点位置提取监测点的三维坐标。

7.7.5.7 以基准期或上一监测期的监测点坐标为参考,计算各监测点的单期及累计水平位移量和垂直位移量(沉降量),并整理形成规范、可靠的变形监测基础数据集。

7.8 数据分析

7.8.1 对于同一监测区域,当采用多种监测技术或方法获取监测数据时,应对各类成果进行交叉比对和相互验证,并根据验证结果对异常数据进行必要修正,以实现监测成果的综合、有效利用。

7.8.2 在完成数据验证与修正后,应绘制各监测点的位移(或位移速率)—时间曲线,以直观反映各监测点变形的时空演化规律。

7.8.3 应绘制各监测测线的曲率、倾斜及水平变形分布图,为评估地表弯曲开裂风险并界定拉张或压缩破坏区域提供依据。

7.8.4 宜借助专业分析软件,生成水平位移、沉降位移及其速率等值线图,水平位移矢量图,以及地表形变速率和累计形变分布图,直观反映变形场的空间分布特征,识别变形集中区和最大变形区,为岩层和地表稳定性评价提供定量依据。

7.8.5 可在等值线的基础上,绘制多期变形边界扩展图,以揭示矿区变形范围的动态演化过程,掌握变形边界的时序扩展规律。

8 岩层深部位移监测

8.1 一般规定

8.1.1 岩层深部位移监测主要针对采空区顶部及矿体上下盘岩层。采空区顶部以竖向位移(沉降)监测为主;矿体上下盘区域则应同时监测深部水平位移和竖向位移。

8.1.2 深部岩层水平位移宜采用钻孔测斜仪进行监测,钻孔测斜仪可分为活动式和固定式两类。

8.1.3 深部岩层竖向位移一般宜采用钻孔轴向位移监测仪进行监测,监测仪器类型包括多点位移计、滑动测微计以及光纤传感技术(如 FBG、BOTDA 等)。

8.1.4 深部位移钻孔观测线宜沿矿体走向及其垂直方向布设;在关键建(构)筑物所在区域及其他敏感部位,应适当加密监测点布设,并实施重点监测。

8.2 钻孔测斜监测

8.2.1 监测网布设

8.2.1.1 钻孔测斜观测线宜布设在预计地表移动盆地主断面内,一般沿矿体走向和垂直走向方向各设置 1 条;当预计采空区走向长度较大时,可在主断面的左右两侧各增设 1 条沿走向的观测线。

8.2.1.2 观测线长度宜覆盖预计地表移动变形边界线范围,并视需要向边界线外延伸 30 m~50 m,以确保覆盖全部可能发生变形的区域。

8.2.1.3 每条观测线的上盘和下盘均应各布设不少于 2 个钻孔测斜测点,其中至少 1 个宜布设在预计变形边界线附近,另 1 个宜布设在预计移动线位置附近(移动线位置定义见 9.3.5)。

8.2.2 选点和埋设

8.2.2.1 选点应综合考虑施工可达性和长期安全性，并统筹供电、通信及数据采集系统等配套设施的布设条件。

8.2.2.2 采用钻孔测斜仪进行监测前，应在竖向钻孔中预埋测斜管。

8.2.2.3 固定式钻孔测斜仪在测斜管安装完成后，应将传感器（如 MEMS 倾角传感器、振弦式或电阻式倾角传感器等）通过环形支架或其他专用固定装置牢固安装于测斜管内壁，并根据监测需求合理确定传感器间距。

8.2.2.4 孔口宜浇筑混凝土基座，并安装坚固、防水的保护箱（或保护墩），加装锁具并设置清晰标识；保护结构应具备防水、防撞和防人为破坏功能，以保证监测孔的长期完好，便于后期观测和维护管理。

8.2.3 观测前准备

8.2.3.1 应检查传感器、数据采集系统和通信系统的工作状态，确认设备运行正常；将传感器与数据采集系统正确连接，进行数据采集联调测试，核实数据传输通畅、记录完整且无异常。

8.2.3.2 应核查设备的环境适应性（如温度、湿度、防水、防尘等级等），确认其满足现场工况和长期监测要求，能够在预期监测周期内稳定运行。

8.2.4 监测技术要求

8.2.4.1 活动式钻孔测斜监测技术要求：

- a) 在钻孔内插入测斜仪探头时，应使探头导向轮沿测斜管导向槽上下平稳、均匀移动，保持探头轴线与测斜管轴线基本一致，避免晃动或受力不均而影响测量精度。
- b) 为减小仪器零点漂移及系统误差，应进行双向观测：先按 A 导向自孔底向孔口测量，再将探头旋转 180°，按 B 导向自孔底向孔口重复测量。
- c) 其他监测技术要求应符合 T/CAGHP 052 的规定。

8.2.4.2 固定式钻孔测斜监测频率应根据监测对象的重要性、变形发展速率和监测阶段等因素合理确定，一般宜定期进行数据采集，以保证监测数据的时效性和连续性。

8.2.4.3 在所有安装与锚固工序完成且注浆材料强度达到设计要求后，方可进行首次观测。首次观测宜连续进行 2~3 次，当各次观测成果的差值满足仪器精度要求时，可取其平均值作为本孔的初始基准值。

8.2.5 数据处理

8.2.5.1 应将测斜仪外业观测数据由采集设备导出并导入内业处理软件，逐项核对孔号、测点深度、导向标记或传感器编号、观测（采样）时间及监测频率等信息，检查是否存在漏测、重测、缺测或通信中断等情况；对于点号、备注等非观测值类记录错误，可在软件中更正并加注说明，原始观测读数应保持不变。

8.2.5.2 应利用内业软件对各测点（传感节点）的观测数据开展质量检查与预处理，识别并剔除明显异常值。对活动式测斜仪 A、B 导向的双向观测资料应进行配对组合处理，以减弱仪器零点漂移和系统误差；对固定式测斜仪数据宜实施噪声滤波以及零点和温度漂移修正，以提高数据的精度与稳定性。

8.2.5.3 在预处理基础上，应通过相邻测点、相邻时段对比检查两类测斜数据的变化幅度和变化趋势，分析位移曲线的连续性与平滑性，结合现场情况，判断数据是否合理，及时识别疑似异常时段或异常测段并进行回溯核查。

8.2.5.4 对经检查确认准确、完整的数据集，应以首次稳定观测期的观测值为基准，按测点和观测期计算各期相对位移量测值，形成用于孔内位移计算和变形分析的基础数据成果。

8.3 轴向位移监测

8.3.1 监测网布设

8.3.1.1 轴向位移监测观测线的布设（包括位置、条数及长度）应按 8.2.1.1 和 8.2.1.2 条钻孔测斜观测线布设的有关要求执行。

8.3.1.2 各观测线上、下盘钻孔测点的布设应符合 8.2.1.3 条钻孔测斜测点布设的有关要求；在地表尚未塌陷前，每条观测线宜在采空区上方地表的观测线中心位置布设 1 个轴向位移钻孔测点。

8.3.2 选点和埋设

8.3.2.1 选点应按 8.2.2.1 条中钻孔测斜选点的有关规定执行。

8.3.2.2 多点位移计应在地面完成锚固器、测量杆及护管的整体组装和检查，确认各连接、密封及标识无误后，再将组装好的量测单元平稳下放至设计深度，不得与孔壁发生剧烈碰撞或卡阻。

8.3.2.3 滑动测微计须采用带定位键耦合器的专用 PVC 测管，安装时应保证各节导槽精确对准、连接可靠；下管过程中应保持平稳，严禁扭转和强行弯折，以保证测量探头在测管内能够全程顺畅滑动。

8.3.2.4 光纤传感监测宜选用铠装传感光缆。孔口与孔底处应预留适当余量并盘绕成缓冲环，以防止因围岩变形或施工扰动导致光缆被拉断；在关键岩层或重要部位，可根据监测需求采用 U 型或环绕式布设，以形成多条测量路径，提高监测数据的冗余度与可靠性，并利用该段光缆已知的几何关系直接反演对应层间位移。

8.3.2.5 上述三种监测方法的孔内回填均应采用反向注浆法。

8.3.2.6 上述三种监测孔的孔口均应统一设置保护结构，其要求应符合 8.2.2.4 条的有关规定。

8.3.3 观测前准备

8.3.3.1 轴向位移监测的观测前准备工作应符合 8.2.3 条钻孔测斜观测前准备的有关规定。

8.3.3.2 滑动测微计观测前，应人工全程往返滑动测头，检查测管内壁是否光滑、导槽是否连续对中，有无卡阻或异物，确保测量过程顺畅可靠。

8.3.4 观测技术要求

8.3.4.1 多点位移计与滑动测微计观测时，应按规定的测点顺序和读数间距依次量测，滑动测头（探头）移动应平稳、连续，无冲击和卡阻。

8.3.4.2 光纤观测时，应根据监测目的和变形速率合理控制采样间距和积分时间，避免频繁拔插接头和过度弯折光缆，以减小信号衰减和机械损伤。

8.3.4.3 其他监测方法的监测频率设置及初次读数的要求，应符合 8.2.4.2 和 8.2.4.3 条的有关规定。

8.3.5 数据处理

8.3.5.1 多点位移计和滑动测微计观测数据，应通过相邻测点（或测段）位移差计算各层间相对位移，并以选定的参考测点为零位，计算各测点的累计位移。

8.3.5.2 其他数据处理要求应符合 8.2.5 条的有关规定。

8.4 数据分析

8.4.1.1 根据钻孔测斜监测成果绘制深度—水平位移曲线，分析位移突变带和曲线拐点的位置与范围，识别潜在滑动面及变形集中带，判定岩层侧向变形模式。

8.4.1.2 根据多点位移计、滑动测微计和光纤传感等轴向位移（或应变）监测成果，分析位移（或应变）沿深度的分布特征，识别主要的压缩、拉伸和剪切主控带。

8.4.1.3 将测斜仪获得的水平位移变化特征与轴向位移监测结果及其他地表变形资料进行对比与交叉验证，综合评估深部岩层整体稳定性及变形破坏特征。

9 地表移动范围关键参数确定

9.1 一般规定

9.1.1 为评价金属矿山地表建（构）筑物的安全性并制定合理保护措施，应确定地表移动范围的关键参数，通常包括陷落角、移动角和边界角等。

9.1.2 依据确定的地表移动范围关键参数，可开展矿区建（构）筑物受采动影响分析和安全性评价，并为矿体开采方案优化提供依据。

9.2 陷落角确定

9.2.1 陷落角可采用公式（1）确定。是指采空区边界与其上方地表最外侧裂隙点连线，在采空区外侧与水平线所成的夹角。亦可采用采空区边界与地表陷落临界变形点连线在采空区外侧与水平线所成的夹角表征陷落角。陷落临界变形点是指其变形值达到下列任一临界变形条件的地表点：

$$T = 10 \text{ mm/m}, \varepsilon = 6 \text{ mm/m}, k = 0.6 \times 10^{-3}/\text{m}$$

其中： T 为地表倾斜，是指相邻两点在竖直方向的相对移动量与两点间水平距离的比值； ε 为地表水平变形，是指相邻两点的水平移动差值与两点间水平距离的比值； k 为地表曲率变形，是指两相邻线段的倾斜差与两线段中点间水平距离的比值。应从分别按 T 、 ε 和 k 三类临界变形值确定的陷落角中，选

取最小值作为矿区的陷落角。

9.2.2 采空区上方地表最外侧裂缝的位置,应根据第6.4条地表采动裂缝监测成果予以确定。

9.2.3 在整个变形区域内,将变形值等于所适用于确定矿区陷落角的临界变形值的各地表点连成曲线,该曲线即为地表陷落线。

9.3 移动角确定

9.3.1 移动角是指移动主断面上地表临界变形点与采空区边界连线在采空区外侧与水平线所成的夹角。本条所述临界变形值,是指在无须维修的条件下,建(构)筑物及各种设施仍能保持正常使用所允许的地表最大变形值。

9.3.2 应从分别按 T 、 ε 和 k 三类临界变形值确定的移动角中,选取最小值作为矿区的移动角。

9.3.3 建(构)筑物及各种设施正常使用所允许的地表变形值、地表建(构)筑物的保护等级划分可参照 GB 50771 中规定。

9.3.4 在整个变形区域内,将变形值等于所适用于确定矿区移动角的临界变形值的各地表点连成曲线,该曲线即为地表移动线。

9.4 边界角确定

9.4.1 边界角是指在移动盆地主断面上,采空区边界与地表变形边界点连线在采空区外侧与水平线所成的夹角。

9.4.2 在金属矿山中,变形边界位置的水平位移通常大于竖向沉降位移,边界点一般可按水平位移达到 10 mm 时确定。

9.4.3 在整个变形区域内,将变形值等于变形边界控制值的各地表点连成曲线,该曲线即为地表变形边界线。

9.5 矿体开采建议

9.5.1 符合下列条件之一者,矿体允许开采:

- a) 预计的地表变形值小于建筑物允许地表变形值。
- b) 预计的地表变形值超过建筑物允许地表变形值,但本矿区已取得试采经验,经维修能够满足安全使用要求。
- c) 预计的地表变形值超过建筑物允许地表变形值,但经采取本矿区已有成功经验的开采措施和建筑物加固保护措施后,能满足安全使用要求。

9.5.2 符合下列条件之一者,矿体允许进行试采:

- a) 预计地表变形值虽然超过建筑物允许地表变形值,但在技术上可行、经济上合理的条件下,经过对建筑物采取加固保护措施或者有效的开采措施后,能满足安全使用要求。
- b) 预计的地表变形值虽然超过建筑物允许地表变形值,但国内外已有类似的建筑物和地质、开采技术条件下的成功开采经验。
- c) 开采的技术难度虽然较大,但试验研究成功后对于矿山企业或者当地的工农业生产建设有较大的现实意义和指导意义。

10 成果编制与提交

10.1 一般规定

10.1.1 各类成果应以真实、完整的原始监测资料为基础,并应保证数据来源可靠、处理方法合理、计算结果正确,图表表达直观清晰、结论客观准确。

10.1.2 监测成果中采用的坐标、高程系统及时间基准应保持统一,并在成果中予以明确说明;量和单位的选用与表示应符合国家现行有关标准和规范。

10.1.3 成果应系统反映监测区地表与深部岩层变形的空间分布特征及时间演化规律,并结合矿体开采情况,提出对安全生产和工程布置具有指导意义的分析评价结论。

10.1.4 监测成果的提交形式一般包括文字报告及附件(图件、数据表格等),纸质与电子文件应兼备,其格式、份数和提交时限应符合合同或委托文件的约定。

10.2 成果报告编制

10.2.1 监测报告应简明扼要、结构清晰，突出监测重点和主要结论，客观反映变形发展规律。文字报告提纲可参见附录D，并可根据工程实际进行适当补充或删减。

10.2.2 应根据监测成果，结合区域及矿区地质背景条件和矿体开采情况，分析与评价矿区地表与深部岩层变形的空间分布特征及其时间演化过程和发展趋势。

10.2.3 应依据监测成果，准确圈定矿区地表移动及其影响范围，并针对矿区关键建（构）筑物及重要工程设施，提出具有针对性的工程防护和风险控制措施建议，为矿山安全运营提供可靠依据。

10.2.4 在明确地表与深部岩层移动规律的基础上，应对潜在灾害风险进行综合评估，提出监测体系优化和采矿方案调整的建议，为规避矿山安全风险和优化资源开发提供有效的技术支撑。

10.3 成果图件提交

10.3.1 成果图件包括监测点分布图、地裂缝监测成果图、地表移动变形监测成果图、岩层深部位移监测成果图和地表移动分区图，用于系统反映监测网布设情况及变形特征。各类图件应图面清晰、要素完整，便于对比分析和归档保存。

10.3.2 监测点分布图包括地裂缝监测网布设图、地表移动变形监测网点布设图和岩层深部位移网点布设图。图件应采用统一的坐标系统和比例尺，清晰标明各类监测点的编号和类型。

10.3.3 地裂缝监测成果图包括监测点累计位移（或位移速率）—时间曲线图和地裂缝最外层裂隙分布图。曲线图应规范设置时间和位移（或位移速率）坐标轴及其单位，可对重要时间节点和突变时段进行标注说明；裂隙分布图应标明裂缝宽度、长度，清晰绘出最外层裂隙边界。

10.3.4 地表移动变形监测成果图包括监测点累计位移（或位移速率）—时间曲线图，监测测线曲率、倾斜及水平变形的空间分布图，水平位移与沉降位移（及其速率）等值线图，水平位移矢量图，以及地表形变速率平面分布图和地表累计形变分布图。图件中应标注最大沉降、最大水平位移及变形集中区的位置和数值；等值线图应标明等值线间距，矢量图应按比例绘制并给出矢量比例尺。

10.3.5 岩层深部位移监测成果图包括深度—水平位移曲线以及轴向位移（或应变）随钻孔深度变化的分布曲线图。图中应规范标注深度方向，明确位移（或应变）的正负方向约定和单位，标出不同观测期次的曲线并加以区分（如采用不同线型或颜色），必要时标识地层分界、关键结构面和异常变形集中带。

10.3.6 地表移动分区图包括边界线、移动线和陷落线的平面分布图，移动主断面上岩层移动角、陷落角和边界角的分布图，以及多期监测的边界线、移动线和陷落线及其在移动主断面上岩层移动角、陷落角和边界角的扩展对比图。编制时应采用不同线型或颜色区分不同监测期次，并在图例中予以说明；主断面图应标明断面位置，并清晰标注采空区与地表建（构）筑物在该断面上的位置及空间关系。

10.4 资料存储

10.4.1 各类原始纸质资料（如现场观测记录表、原始图件等）应按监测项目和时间顺序及时分类整理、编号编目并规范存档，确保资料真实、完整、连续且可追溯。

10.4.2 在保存纸质资料的同时，应同步建立地表和岩层移动变形监测数据库，采用统一的数据格式和编码规则，对各阶段监测原始数据及处理成果实施电子化管理，实现数据的快速检索、备份和共享利用。

10.4.3 监测数据库宜包括监测点基本信息（如坐标、高程、类型等）、历次监测原始数据、内业软件处理成果及相关图表成果，并记录数据更新时间和责任人，以便后续追踪、复查和综合应用。

10.4.4 项目完成后，应将监测成果中间报告、总报告、合同文件及与委托方往来文件等项目管理类资料，按有关档案管理规定统一归档管理，并与监测数据库等技术资料一并妥善保管。

附录 A (资料性)

GNSS测量手簿记录格式见表A.1

表A.1 GNSS测量手簿记录格式

注：记载有效观测卫星数、PDOP值，B级每4h记录一次，C级每2h记录一次，D、E级观测开始与结束时各记录一次。

附录 B

(资料性)

现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征表

现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征表B.1

表B.1 现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征

星载 SAR 系统	ERS-1/2	JERS-1	RADAR SAT-1	ENVISAT-ASA R	ALOS-P ALSAR	RADARSAT-2	TerraSAR-X/TanDEM-X 星座(2)	COSMO-SkyMed 星座(4)	Sentinel-1A(1B) 星座(2)	ALOS-2 (PALSAR-2)
所属国家/机构	欧空局	日本	加拿大	欧空局	日本	加拿大	德国	意大利	欧空局	日本
运行时间(开始年份一终止年份)	1:1991-2000 2:1995-2012	1992-1998	1995-2013	2002-2012	2006-2011	2007-	2007-	2007-	2014.4-	2014.5-
轨道高度(km)	790	568	780	800	691	798	514	619	693	628
波长(cm)	C(5.6)	L(23.5)	C(5.6)	C(5.6)	L(23.6)	C(5.6)	X(3.1)	X(3.1)	C(5.6)	L(23.6-25.0)
极化方式	VV	HH	HH	HH/VV	全极化	单板化/双极化/全极化	全极化	HH, VV, HV, VH, HH/VV, HH/HV, VV/VH	HH+HV, VV+VH	全极化
侧视角(°)	23	35	23~65	14~45	8~50.8	23~65	20~55	16.36~52.06	20.0~45.0	8.0~70.0
轨道倾角(°)	98.49	98.16	98.6	98.55	98.16	98.6	97.44	97.86	98.18	97.9
最短观测时间间隔(d)	35	44	24	35	46	24	11(单星) 5.5(双星)	单星重返周期 16 天, 其中 2 号星和 3 号星为 1 天间隔的 tan-dem 模式, 每 17 天 4 颗星以 8 天、1 天、3 天和 4 天的间隔获取干涉数据	12(单星) 6(双星)	14
地面分辨率(m)	25	25	8~30	25~100	7~100	聚焦模式 1 超级条带模式 3 条带模式 5 其他模式>5	凝视模式 0.25 聚束模式 1 条带模式 3 扫描模式 18.5 宽扫描模式 40	聚束模式 1 条带模式 3、15 扫描模式 30 宽扫描模式 100	聚束模式 5 条带模式 5×20 扫描模式 20 宽扫描模式 20	聚束模式 1×3 条带模式 3、6、10 扫描模式 100

表B.1 现有可用星载 SAR 传感器基本参数及应用特征表 (续)

星载 SAR 系统	ERS-1/2	JERS-1	RADARSA T -1	ENVISAT -ASAR	ALOS-PALSAR	RADARSAT -2	TerraSAR -X/ TanDEM -X 星座(2)	COSMO-SkyMed 星座(4)	Sentinel-1A (1B)星座(2)	ALOS-2(PALSAR -2)
是否提供原始 raw 数据	是	否	是	是	是	否	否	否	否	否
测量变形精度	厘米级	厘米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级	毫米级
不同数据模式 单景市场报价 (万元)	0.5~1.0	0.5~1.0	0.8~1.5	0.5~1.0	0.5~1.0	1.5~3.5	1.5~3.5	1.6~3.75	0.5~2.5	2.4~4.0
存档数据情况	全球覆盖 20 次以上	全球覆盖 5 次以上	部分地区覆盖	全球覆盖 25 次以上	全球覆盖 15 次以上	有中国东部 2007-2013 年间多期存档数据	大部分地区需要编程观测	大部分地区需要编程观测	有全球观测计划，不少于 48 天 ScanSAR 同轨观测一次，目前有 30 次以上存档数	有全球观测计划
影像幅宽(km)	100	80	50~500	100~400	30~350	聚焦模式 18 超级条带模式 20 条带模式 50 其他模式 50~500	凝视模式 10 聚束模式 20 条带模式 30~40 扫描模式 150 宽扫描模式 270	聚束模式 7~10 条带模式 30~40 扫描模式 100~200	聚束模式 20 条带模式 80 扫描模式 250 加宽扫描模式 400	聚束模式 25 条带模式 50~50 扫描模式 350~490
可否编程定制	否	否	否	否	否	是	是	是	需协商	是
主要优点	具有较早的存档数据	具有较早的一批存档数据	为 2007 年前唯一的高分辨率、中短波数据	存档数据多、价格低、覆盖历史时段长	覆盖范围广、存档数据丰富、波段长，适合高山峡谷区地质灾害监测	数据质量较好，高分辨率单景数据覆盖范围大，有计划全球拍摄	轨道精度高、数据质量好、重返周期短	存档数据丰富、数据质量好、重返周期最短	覆盖范围广、重复周期短、存档数据丰富	覆盖范围较大，重返周期适中，波长长，对植被茂密区观测有利
主要缺点	稳定性较差，处理技术难度大	分辨率低，轨道精度低，干涉质量较差	与其他中分辨率 SAR 数据相比轨道精度较低	在高山峡谷区干涉效果差	空间基线较长，且有系统变化	编程数据价格较高	存档数据较少	空间基线较长	主要是低分辨率模式，一般不接受编程预定，方位向配准难度较大	价格相对较高

附录 C
(资料性)
InSAR 监测工作条件分类表

地质灾害InSAR监测工作条件分类依据地表复杂程度、数据质量、单位面积观测次数、监测精度和地质分析程度综合确定，具体标准参照表C.1执行。

表 C.1 InSAR 监测工作条件分类表

监测工作条件	地表复杂程度	数据质量	单位面积观测次数
I	无植被覆盖的戈壁和基岩区、建(构)筑物密集的城镇，且地形舒缓平坦	TerraSAR、ALOS/PALSAR -2、Cosmo-SkyMed、RadarSat-2 等基线精度高、信噪比大的条带模式和聚束模式 SAR 数据	20~30 次或 2 次
II	低矮植被覆盖的中低丘陵区、荒漠区、植被较多的建(构)筑物区	Sentinel-1 TOPS、TerraSAR Scan、ALOS/PALSAR-2 Scan、Cosmo-SkyMed Scan、RadarSat-2 Scan 等基线精准、信噪比大、数据结构复杂的中低分辨率 SAR 数据	10~20 次或 30~40 次
III	季节性生长的灌木中低丘陵区、村庄密集分布的农业区	ALOS/PALSAR、RadarSat-1 等轨道精度不稳定的条带模式 SAR 数据	5~10 次或 40~50 次
IV	乔灌木季节性生长的高丘、中山区	ERS、Envisat/ASAR 等轨道精度较低、信噪比较小、分辨率中等的 SAR 数据	3~5 次或大于 50 次
V	植被、冰雪等易变地物密集覆盖的高山峡谷区	绝大部分 2010 年前的扫描模式低分辨率 SAR 数据	2 次大于 1 年间隔或平均间隔大于 6 个月

注 1：有 2 项及 2 项以上因素满足时即为该类条件；
注 2：条件分类就高不就低。

附录 D
(资料性)
监测报告提纲

D.1 前言

本部分宜简要说明项目来源和建设背景,阐明监测目的、任务及监测服务年限,列出主要编制依据(相关法律法规、技术标准以及设计文件和生产技术资料等)。

D.2 矿区概况

- a) 区域位置及自然地理概况。
- b) 矿区工程地质条件。
- c) 矿区水文地质条件。
- d) 矿体分布和采矿情况。
- e) 矿区地表建(构)筑物及周边环境条件。

D.3 监测网建设与监测方案

- a) 监测项目及监测指标。
- b) 监测方法和技术路线。
- c) 监测网布设原则及监测点分布情况。
- d) 监测设备及系统组成与精度等级。
- e) 监测周期、频次安排。

D.4 监测实施与成果概况

- a) 各阶段监测实施情况(观测时间、频次、现场条件及异常情况记录等)。
- b) 监测数据预处理和质量控制(外业检查、内业审核、异常值处理等)。
- c) 监测成果汇总(详细成果列于附表和附图)。

D.5 监测成果分析

- a) 地表采动裂缝监测成果分析。
- b) 地表移动变形监测成果分析。
- c) 岩层深部位移监测成果分析。
- d) 多源监测成果的综合分析与相互印证,形成对矿区整体变形与稳定性的综合评价。

D.6 地表变形扩展情况分析

- a) 陷落线及陷落角扩展特征分析。
- b) 移动线及移动角扩展特征分析。
- c) 边界线及边界角扩展特征分析。
- d) 变形影响范围及发展趋势分析。

D.7 关键建(构)筑物区域监测成果分析

- a) 关键建(构)筑物区域地表变形特征(测点变形特征、移动线和边界线分布特征等)。
- b) 关键建(构)筑物区域深部岩层变形特征。

- c) 关键建（构）筑物稳定状况评估及风险分级评价。

D.8 结论和建议

本部分应系统归纳：矿区地表和深部岩层变形特征，陷落线、移动线、边界线等关键参数及其分布特征，关键建（构）筑物稳定性评估结论，并提出后续监测、治理与保护措施建议。

D.9 附表和附图

- a) 附表：监测数据成果表及必要的统计汇总表。
- b) 附图：包括第 10.3 条规定的各类成果图件及其他必要的示意图和辅助图件。

参 考 文 献

- [1] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
 - [2] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制 (第3版) [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
 - [3] 古德生, 赵文, 陈从新. 采矿手册 (第二卷 矿山岩体力学) [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2023.
 - [4] 王运敏. 现代采矿手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
 - [5] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
 - [6] 庞汉松. 基于监测数据的分段崩落法采矿地表变形分析与建筑物损坏评估方法 [硕士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2020.
 - [7] 程关文, 陈从新, 沈强, 等. 程潮铁矿地下开采引起岩层移动机制初探 [J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1421-1429.
-