

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 183—2026

深部金属矿山高阶阶段矿柱稳定性监测与预警技术规范

Technical specification for stability monitoring and early warning of high-level
pillars in deep metal mines

2026 - 07 - 05 发布

2026 - 07 - 06 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 1

5 监测项目和监测频率 3

6 位移监测 4

7 应力监测 8

8 损伤破裂监测 10

9 监测预警技术 13

10 监测报告 16

附 录 A（资料性） 深部金属矿山分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿过程 18

附 录 B（资料性） 监测项目与仪器选型 20

附 录 C（资料性） 微震监测系统组成及监测设备技术指标 21

附 录 D（资料性） 预警信息发布通知单 22

附 录 E（资料性） 监测和预警报告提纲 23

参 考 文 献 25

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、贵州大学、河南大学、中南大学、武汉大学、北京科技大学、中国矿业大学、武汉科技大学、鞍山五矿陈台沟矿业有限公司、武钢资源集团程潮矿业有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中石化石油工程技术研究院有限公司、华东交通大学、广西大学。

本文件主要起草人：夏开宗、王田龙、杨括宇、杜坤、孙朝燚、潘玉丛、沈明轩、刘力源、吴疆宇、邬忠虎、彭胜、郝风才、周志伟、肖波、郑先伟、梁万、赵国良、张礼仁、缪秀秀、张海娜、郑志、宋许根。

本文件为首次发布。

深部金属矿山高阶阶段矿柱稳定性监测与预警技术规范

1 范围

本文件规定了深部金属矿山高阶阶段矿柱稳定性监测与预警的技术要求，包括监测项目和监测频率、位移监测、应力监测、损伤破裂监测、监测预警技术和监测报告等。

本文件适用于深部金属矿山高阶阶段矿柱在形成及回收等过程中的稳定性监测与预警。

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 50497 建筑基坑工程监测技术标准

DL/T 5807 水电工程岩体稳定性微震监测技术规范

DZ/T 0460 地质灾害自动化仪器监测预警规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

深部金属矿山 deep underground metal mines

矿体开采深度一般超过 800 m 的地下金属矿山。

3.2

高阶阶段矿柱 high-level pillar

深部金属矿山在采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法条件下，通过分段凿岩回采矿房，在多个分段之间沿垂向连续保留的、高度一般为 80~120 m 的矿柱，是充填开采条件下的主要承载结构。

3.3

稳定性监测 stability monitoring

通过对高阶阶段矿柱受力、变形及损伤破裂等状态的连续或定期观测与分析，判识稳定性状况及发展趋势，为安全评价和预警提供依据的监测活动。

3.4

位移监测 displacement monitoring

对高阶阶段矿柱位移的连续或定期观测、记录与分析工作。

3.5

应力监测 stress monitoring

对高阶阶段矿柱内部岩体应力状态的连续或定期观测、记录与分析工作。

3.6

损伤破裂监测 damage and fracture monitoring

对高阶阶段矿柱内部岩体损伤与破裂状况的连续或定期观测、记录和分析工作。

3.7

预警阈值 warning threshold

对反映高阶阶段矿柱稳定性劣化和失稳危险趋势的监测指标设定的控制值。

3.8

预警等级 early warning level

根据高阶阶段矿柱稳定性状况和危险程度对预警的分级。

4 总则

4.1 工作内容

4.1.1 深部金属矿山在采用分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法过程中（采矿过程详见附录 A），应在高阶矿柱内部分段巷道表面及内部建立位移、应力和损伤破裂等监测系统。

4.1.2 应采用专业监测设备，按监测方案规定的频率开展监测，获取高阶矿柱内部位移、应力和损伤破裂等原始监测数据。

4.1.3 应对采集的监测数据进行分析处理，阐明高阶矿柱位移、应力和损伤破裂的时空变化规律，并给出充填开采下高阶矿柱的稳定性变化趋势。

4.1.4 应构建高阶矿柱稳定性预警方法，明确预警指标体系、预警阈值确定原则及预警等级划分方法等内容。

4.1.5 应依据预警等级发布高阶矿柱稳定性预警信息，提出相应的分级响应措施，并开展反馈与优化。

4.1.6 应编制监测与预警成果报告，提供相应的数据附表和图件，并按规定将成果提交给项目的委托单位。

4.1.7 监测和预警资料应规范化整理并归档，同时做好数据备份工作。

4.2 工作流程和要求

4.2.1 监测和预警实施流程应符合图 1 的规定。

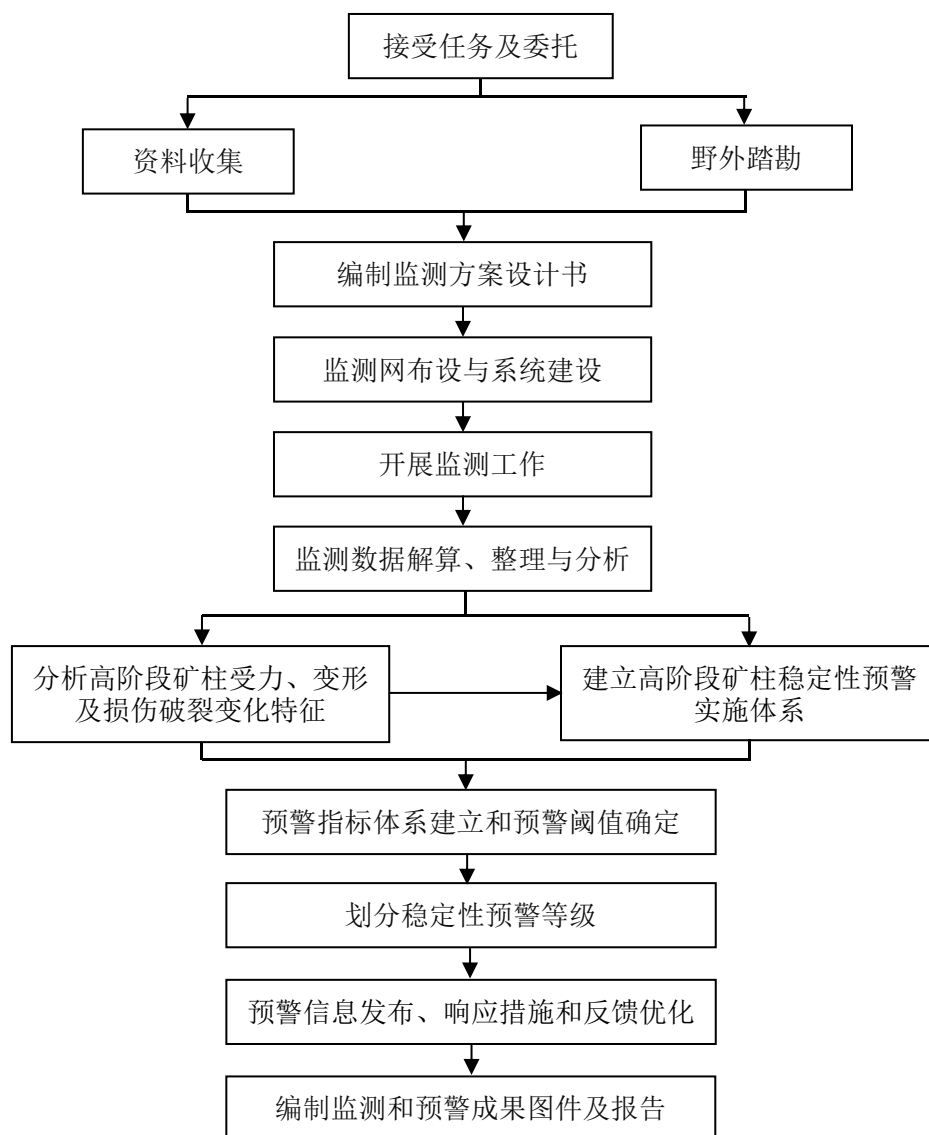


图 1 监测与预警实施流程图

4.2.2 资料收集应包括以下内容：

- a) 盘区开采顺序、盘区矿块开挖顺序；
- b) 高阶阶段矿柱尺寸和形状；
- c) 矿区水文与工程地质条件；
- d) 矿区已有的观测与监测成果。

4.2.3 野外踏勘应包括：对现有资料的准确性复核；现场调查高阶阶段矿柱表面以及其内部的分段巷道宏观破坏情况，并对高阶阶段矿柱稳定性密切相关的采场围岩及充填体的宏观破坏特征开展调查；基于现场条件对监测方案的可行性进行综合评估。

4.2.4 监测设计书应包括下列内容：

- a) 监测目标与任务；
- b) 充填采矿设计方案；
- c) 监测项目及监测方法；
- d) 监测网布设方案与监测系统建设；
- e) 监测周期与监测频率；
- f) 监测数据整理、处理与分析；
- g) 监测成果图件及成果报告的编制要求。

4.2.5 在监测网布设以及系统建设中，应按监测方案对监测点位及其配套的设施实行全流程的质量控制管理。

4.2.6 监测工作应涵盖数据采集、传输、处理与结果反馈等环节，并做好监测点位及监测系统的运行维护管理。

4.2.7 在监测期间，应按监测设计书要求，对高阶阶段矿柱及其采场进行巡视检查。巡查宜包括下列内容：

- a) 高阶阶段矿柱表面裂隙、掉块、剥落及整体变形破坏情况；
- b) 高阶阶段矿柱内部分段巷道两帮、底板、拱顶及拱肩（拱脚）等围岩表面裂隙、片帮、冒落、剥落等局部破坏情况；
- c) 高阶阶段矿柱内部分段巷道支护结构的完好状态；
- d) 充填体开裂、塌落和离层等破坏情况；
- e) 采场围岩的变形与破坏情况。

4.2.8 在观测过程中，出现下列任一情形时，应立即报告委托单位，并视情况对变形监测方案进行动态调整：

- a) 监测变形量显著增大或变形速率持续加快；
- b) 监测数据达到或超过预警阈值；
- c) 采场顶板发生严重冒落等险情；
- d) 采场周边围岩出现严重破坏；
- e) 充填体出现大范围破坏或整体稳定性明显恶化。

4.2.9 高阶阶段矿柱稳定性预警体系应基于监测数据建立，明确预警指标体系及预警阈值，规定预警等级划分方法，并制定预警信息发布的具体程序，以及与之匹配的分级响应措施。

4.2.10 监测与预警工作成果编制及报送应按合同约定和设计要求执行。成果内容应包含监测与预警分析报告、图件以及数据表等，必要情况下，还应提交日常监测记录、预警通知及专项分析材料，并按要求完成文档整理及数据存储。

5 监测项目和监测频率

5.1 基本要求

5.1.1 监测项目的设置应全面反映高阶阶段矿柱由内部至表面的整个变形破裂过程，各监测项目之间应相互补充、相互验证。

5.1.2 监测频率应按高阶阶段矿柱的稳定状态和变形破裂发展特征确定，并应满足高阶阶段矿柱稳定性预警与灾害防治要求。

5.2 监测项目与仪器选型

5.2.1 监测项目包括高阶段矿柱分段巷道表面和内部位移监测、应力监测和损伤破裂监测。监测项目与仪器选型按附录 B 确定。

5.2.2 位移监测应作为高阶段矿柱稳定性监测的基本项目；应力监测和损伤破裂监测可根据矿柱埋深、地压条件、围岩等级及工程重要性进行选用。当高阶段矿柱具有岩爆倾向性时，应增设应力监测和损伤破裂监测。

5.3 监测频率

5.3.1 高阶段矿柱的监测应从回采邻近矿房形成高阶段矿柱开始，持续进行，直到回采该高阶段矿柱时结束。

5.3.2 电测式线性位移计、光纤传感类位移监测系统、多点位移计、振弦式和液压式岩体应力计以及微震监测系统，宜接入自动数据采集与远程传输系统，实现长期连续自动监测。位移和应力监测采样间隔宜为 10 min~1 h；微震监测宜实施 24 h 连续自动监测，并对事件波形实时记录。

5.3.3 激光收敛、三维激光扫描和超声波层析成像等监测手段宜采用定期观测方式，监测频率应符合下列规定：

- a) 在矿房开采形成高阶段矿柱过程中及矿房充填过程中，监测频率宜为每月 1~2 次；
- b) 在回采高阶段矿柱过程中，监测频率宜为每半月 1~2 次；
- c) 当出现 4.2.8 条规定的异常变形或灾害征兆时，监测频率宜调整为每周 2~3 次。

6 位移监测

6.1 基本要求

6.1.1 深部金属矿山高阶段矿柱位移监测宜依托布置于矿柱内部的凿岩分段巷道和出矿分段巷道开展，分段巷道在矿柱内部布置见图 2。通过监测分段巷道围岩表面及内部位移，综合反映高阶段矿柱内部的变形特征及其时空变化规律。

6.1.2 分段巷道表面收敛位移监测可采用断面收敛测量、三维激光扫描等方法；分段巷道内部离层变形监测宜采用多点孔内位移监测方法。

6.1.3 电测式线性位移计和光纤光栅（FBG）位移监测系统可作为巷道内部位移监测的传感单元，也可用于巷道表面局部位移监测。

6.1.4 采用 6.4 条和 6.5 条所述的电测式线性位移计或光纤光栅（FBG）位移监测系统进行岩体内部位移监测时，宜以单点孔内位移监测为主。

6.1.5 在同一钻孔内分层布设多支电测式线性位移计，或在同一根光纤上布设多个 FBG 位移传感单元，并以统一孔口基准为参考时，应归为多点孔内位移监测，其测点布设与数据处理宜按 6.6 条有关规定执行。

6.1.6 位移监测方法的选择应根据监测精度要求、现场环境条件和预期变形速率等因素，并结合附录 B 监测方法的技术特点合理确定。

6.1.7 监测系统中传感器电缆宜沿巷道帮壁或顶板有序敷设，采用卡具定距固定，并采取防水、防拉拽、防机械损伤等措施；电缆线路宜避开运输设备、装药作业区和通风设施，并与其保持安全距离。

6.1.8 监测点及其基座周围宜设置防护罩或防护凹槽。

6.2 断面收敛位移监测

6.2.1 监测点布设和埋设

6.2.1.1 巷道表面位移收敛监测宜沿巷道走向布设若干具有代表性监测断面，宜选择位于高阶段矿柱中部及应力集中、围岩结构突变或已有明显变形破坏征兆的路段。监测断面沿巷道走向的间距宜为 6 m~10 m，可根据地质条件和变形复杂程度适当加密。

6.2.1.2 每个监测断面宜对称设置 5 个测点，包括左右帮部、左右拱肩以及拱顶中心处各设置 1 个测点。布置方式见图 2。

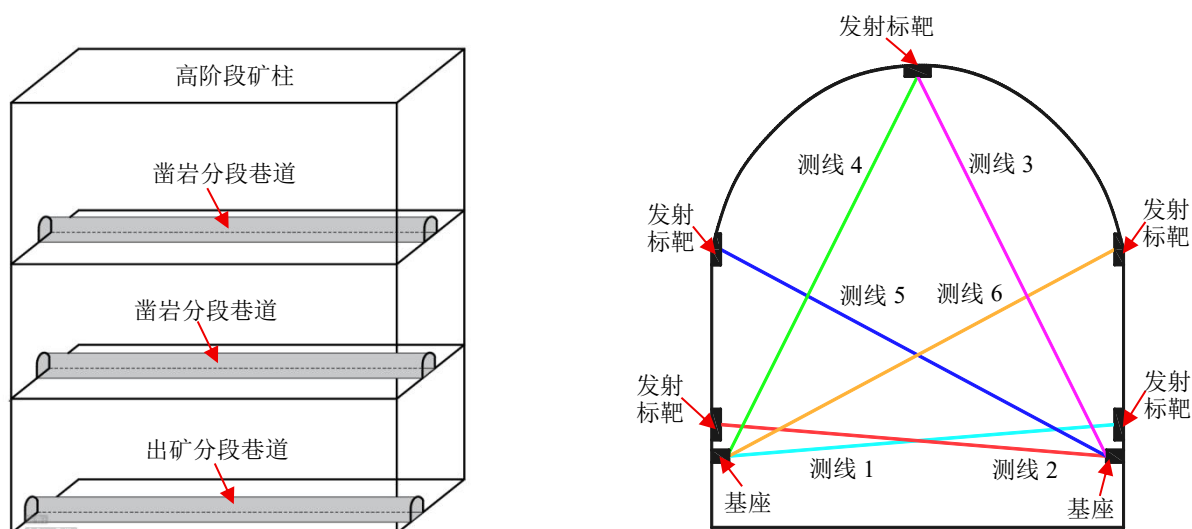


图2 高阶段矿柱内部凿岩和出矿分段巷道位置和断面收敛位移监测点布置示意图

6.2.1.3 测点应采用钻孔预埋金属膨胀螺栓或锚钉安装在围岩或支护结构上。安装时，应确认外露长度符合反射标靶安装要求，并使用砂浆或树脂封固处理。

6.2.1.4 激光收敛计基座宜安装于靠近左右帮测点下方且方便操作处。基座锚固部位应在围岩上预先钻孔，埋设金属膨胀螺栓或锚杆，并采用砂浆或树脂封固。

6.2.2 观测要求

6.2.2.1 观测过程应采用标准化测量方法，确保观测条件一致。

6.2.2.2 同一测线在一次观测中应连续测量至少3次，各次读数相差不超过1.0 mm，可取3次读数的算术平均值作为该测线此次观测的结果；超出1.0 mm，应查明原因并重新观测。

6.2.3 数据处理

6.2.3.1 测量数据应及时录入电子数据库或电子表格，并按监测断面、测点编号及观测期分类整理。应检查数据是否存在漏测、重测情况。点号、备注等非观测值类记录错误，可在数据库中更正并加注说明，原始观测数据不应修改。

6.2.3.2 计算每次测量值与上一期测量值之差，得到该时间段内的单期巷道收敛变化量；计算每次测量值与初始值（基准值）之差，得到累计收敛变化量。

6.3 三维激光扫描监测

6.3.1 监测点布设和埋设

6.3.1.1 三维激光扫描监测宜同时布设基准控制点和扫描控制点。基准控制点宜设置在高阶段矿柱外部稳定运输大巷内，数量不应少于3个；扫描控制点宜布设于高阶段矿柱内部分段巷道内两帮等变形相对较小且具有代表性的部位，数量不应少于3个。

6.3.1.2 分段巷道围岩表面应按断面布设固定拼接标靶。断面选择和间距应符合6.2.1.1的规定；标靶布设方式应与巷道断面收敛位移监测测点布设一致，并应符合6.2.1.2的规定。

6.3.1.3 扫描控制点和拼接标靶应采用锚固可靠的永久性观测标志，可预埋金属膨胀螺栓，并在外露端固定球形标靶、平面标靶或棱镜座等反射标靶。

6.3.1.4 安装时，反射标靶中心和棱镜中心宜与预埋螺栓轴线同心布置，在竖向高度上宜重合；当存在已知偏心时，应在坐标计算中对三维偏心改正。

6.3.2 观测要求

6.3.2.1 每次扫描前宜采用全站仪对外部基准控制点和内部扫描控制点联测，将统一坐标系统准确传递至扫描控制点。三维激光扫描及其多期配准应以该统一坐标系统为基准进行点云拼接和变形分析。

6.3.2.2 扫描时应设置多个测站，实现对巷道围岩表面的连续覆盖。测站数量应按分段巷道实际长度、断面具体形态以及现场客观条件等因素确定，重叠率不应小于 30%。

6.3.2.3 测站设置时应避开强反射特性的物体及可能造成遮挡的障碍物，挑选视野开阔且方便仪器安放的位置。

6.3.2.4 扫描分辨率及点云点距应按仪器性能状况、预期能识别的最小变形量等因素确定。监测区域中，有效点云平均点距应控制在 10 mm 以内；在关键变形部位，应采用分辨率更高的扫描方式。

6.3.3 数据处理

6.3.3.1 进行扫描数据配准及拼接时，应将三维激光扫描得到的数据导入处理软件，获取各测站的点云数据并开展预处理；再借助拼接标靶以及相关控制点对各测站的点云数据实施配准与拼接，形成统一坐标系下的完整三维点云数据。

6.3.3.2 在完整点云基础上进行点云后处理及建模，包括剔除残余噪声、根据对象进行点云分类及提取，并生成高阶矿柱内部巷道围岩三维表面或实体模型。

6.3.3.3 应在构建的三维模型中识别出监测点位置（以拼接标靶中心作为提取位置），并从中提取三维坐标。

6.3.3.4 监测点变形量计算应以基准期或上一监测期的监测点坐标为参考，按监测断面、测点编号和观测期分别计算监测点单期与累计的水平位移、垂直位移，同时计算如图 2 所示测线单期与累计的巷道断面收敛量。

6.4 电测式线性位移计监测

6.4.1 监测点布设和埋设

6.4.1.1 进行巷道表面位移监测时，应选择具有代表性的监测断面，断面选择和测点布设应符合 6.2.1.1 和 6.2.1.2 的规定。

6.4.1.2 进行表面位移监测时，位移计的一端应通过膨胀螺栓或锚杆牢固地锚固在围岩或支护结构上，而另外一端应固定于刚性基座或钢梁上，同时应保证测杆能够在全量程范围内顺畅移动，无卡阻现象。

6.4.1.3 进行内部位移监测时，应选择有代表性的巷道断面，宜位于高阶矿柱中部或应力集中路段，以及围岩结构突变或已出现变形破坏迹象的路段。每个代表性断面处，宜在巷道两侧帮部各布置一个水平钻孔，同时在拱顶中央布置一个钻孔；监测断面之间的距离宜为 15 m~20 m。

6.4.1.4 钻孔孔深可按矿柱厚度的 0.3~0.4 倍确定，孔底宜设置深部锚固点，孔口设置刚性基准环、基准板或等效刚性基座。

6.4.1.5 传感器轴线应通过支撑杆、中央器或护套等方式保持居中，并采用水泥浆或树脂对孔内空隙进行封固。

6.4.2 观测要求

6.4.2.1 位移计在安装前，应先进行外观检查及零点校准，确认型号、量程和接线方式的正确性。

6.4.2.2 位移计在正式监测前应进行短期稳定性复核。可在 1 d~2 d 内进行多次观测，对异常测点，应及时查明原因，必要时做修复或更换处理。

6.4.2.3 经稳定性复核确认测点工作状态正常后，应进行不少于 3 次的连续观测，并以 3 次观测数据的平均值作为测点初始读数（后续位移计算的基准值）。

6.4.3 数据处理

6.4.3.1 传感器采集的数据应及时导出并导入电子记录簿或数据库，逐条核对测点编号及深度、传感器编号、观测时间和监测频率等信息，检查是否存在漏测、重测或通信中断等情况。对点号、备注等非观测值类记录错误，可在数据管理软件中更正并加注说明，原始观测读数不应修改。

6.4.3.2 应以上一观测期为基准计算各期单期位移量，并以首次稳定观测期为基准计算累计位移量；计算结果应按监测断面、测点编号及观测期整理。

6.5 光纤传感类位移监测

6.5.1 表面位移监测点布设和埋设

6.5.1.1 采用光纤光栅位移计（FBG）进行巷道表面位移监测时，应选取具有代表性的巷道监测断面；断面选择及测点布置宜按 6.2.1.1 和 6.2.1.2 的规定执行。

6.5.1.2 采用光纤光栅位移计（FBG）监测时，传感器一端应采用膨胀螺栓或锚杆牢固锚固在围岩或支护结构上，另一端应固定在刚性底座或钢梁处。

6.5.1.3 采用 BOTDR、BOTDA 等分布式光纤位移监测技术进行巷道表面位移监测时，应在具有代表性的监测区段沿巷道走向布置监测线，巷道左右帮和拱顶分别布置 1 条监测线，长度 5 m～8 m；监测区段间距宜为 20 m～25 m。

6.5.1.4 分布式光纤安装时，应先对拟布置区域进行清理并打磨找平，按预定监测线路开凿浅槽；将传感光缆敷设入槽内，采用环氧树脂粘贴或在锚固点处分段固定，并采用水泥砂浆等材料回填并封护。

6.5.2 内部位移监测点布置和埋设

6.5.2.1 进行巷道内部位移监测时，应选取具有代表性的巷道监测断面；断面选择、测点布置和孔深宜按 6.4.1.3 和 6.4.1.4 的规定执行。

6.5.2.2 采用光纤光栅位移计（FBG）对孔内位移监测时，孔底宜设置深部锚固点，孔口宜设置刚性基准环、基准板或等效刚性基座；位移计两端应分别与深部锚固点和孔口基准可靠连接，并应保证光纤及测杆在全量程内受力均匀、运行顺畅，无明显折角、偏心及卡阻。

6.5.2.3 分布式光纤传感监测宜选用铠装传感光缆。在孔口以及孔底处，应预留适当余量并盘绕成缓冲环。

6.5.2.4 钻孔内宜采用支撑杆、中央器或护套等方式，使传感器或传感光缆保持居中，并采用水泥浆或树脂对孔内环隙封固处理。

6.5.3 观测要求

6.5.3.1 进行分布式光纤观测时，应根据监测目的和预期变形速率合理确定采样间隔和积分时间。

6.5.3.2 光纤位移监测的稳定性复核及基准值确定等，应符合 6.4.2 的有关规定。

6.5.4 数据处理

6.5.4.1 采集数据的记录、检查和存档应符合 6.4.3.1 的有关规定。

6.5.4.2 分布式光纤监测数据，应按仪器及软件说明，将采集的光学信号解译为沿光纤路径的连续应变分布，并结合光纤实际布置位置完成空间配准。

6.5.4.3 应以上一观测期为基准计算各期单期位移量，并以首次稳定观测期为基准计算累计位移量；计算结果应按监测断面、测点编号及观测期整理。

6.6 多点孔内位移监测

6.6.1 监测点布置和埋设

6.6.1.1 采用多点位移计监测方法对巷道内部位移监测时，应选取具有代表性的巷道监测断面；断面选择、测点布置和孔深宜按 6.4.1.3 和 6.4.1.4 的规定执行。

6.6.1.2 多点位移计宜在同一钻孔内沿孔深方向布置 3～5 个测点（锚固点），各测点宜等间距布置，并可结合节理、层面及预期变形集中部位对个别测点深度调整。测点（锚固点）布置示意图 3，图中 P1～P4 为钻孔内各锚固点编号。

6.6.1.3 各深度锚固点应按设计深度布置，并采用树脂锚固剂或水泥浆牢固锚固于围岩中；孔口应设置刚性基准环、基准板或等效刚性基座。

6.6.1.4 钻孔内宜设置中央器或护套，宜使测杆、套筒或光纤位移链在孔内基本居中布置。孔内环隙应采用水泥浆或专用灌浆材料分段封固。

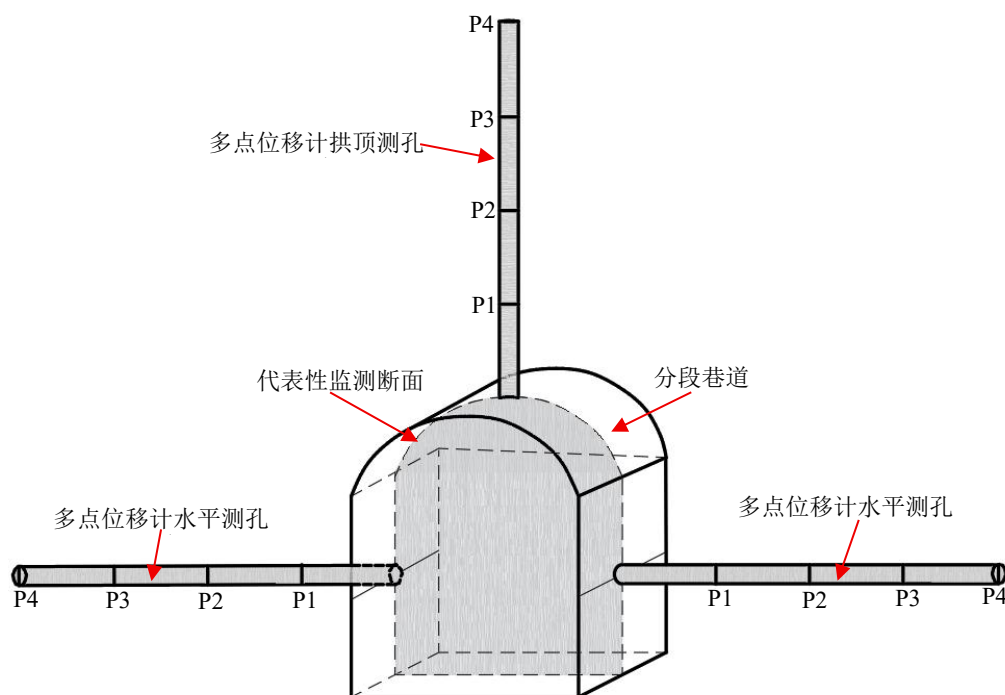


图3 多点位移计测点布置示意图

6.6.2 观测要求

- 6.6.2.1 多点位移计观测时，应按预先编号的测点顺序依次量测，避免漏测或重复测量。
- 6.6.2.2 多点位移计监测的稳定性复核以及基准值确定，应符合 6.4.2 的规定。
- 6.6.2.3 多点位移计在运行期间，应定期检查电缆连接部分、接线端子以及防护构造的完好状况，如果发现松动、进水或机械损坏等状况，应采取加固、封堵或更换等措施。

6.6.3 数据处理

- 6.6.3.1 多点位移计采集数据的记录、检查和存档应符合 6.4.3.1 的规定。
- 6.6.3.2 应以上一个观测期作为基准对各个时期的单期位移量计算，同时还应以首次达到稳定状态的观测期作为基准计算累计位移量。将得到的计算结果按监测断面、测点编号以及观测期整理。
- 6.6.3.3 采用光纤光栅传感单元的多点位移计，应按仪器以及解调软件给出的技术说明，把光学信号或应变数据换算成各测点的位移量，并结合孔口基准和锚固点位置统一位移基准。

6.7 数据分析

- 6.7.1 应基于巷道表面收敛监测成果绘制监测断面测点累计收敛位移—时间曲线，分析高阶阶段矿柱内部分段巷道收敛变形特征及其变化过程。
- 6.7.2 应基于三维激光扫描成果进行巷道多期断面形态及空间形态变化的对比分析，评价高阶阶段矿柱内部分段巷道变形的时空变化趋势。
- 6.7.3 应基于光纤传感类和电测式巷道表面位移监测成果，分析巷道表面开裂及相对错动特征，识别变形集中区和潜在危险部位。
- 6.7.4 应基于分布式光纤和多点孔内位移监测成果分析沿孔深位移分布特征，识别变形集中带、离层带和剪切带等关键部位。
- 6.7.5 应结合采矿工况和充填工况，依据高阶阶段矿柱分段巷道表面与内部位移监测成果，综合研判高阶阶段矿柱稳定性变化趋势。

7 应力监测

7.1 基本要求

7.1.1 深部金属矿山高阶段矿柱应力监测宜依托布置于矿柱内部的凿岩分段巷道和出矿分段巷道，通过在分段巷道围岩内设置应力监测孔，持续观测矿柱内部应力变化，揭示高阶段矿柱应力分布特征及其时空变化规律。

7.1.2 高阶段矿柱内部应力监测宜选用振弦式岩体应力计或液压式岩体应力计，必要时可采用其他类型应力监测装置。在典型监测断面内，宜沿钻孔深度分层布设多个测点。

7.1.3 振弦式岩体应力计可适用于精细分层、长期连续的应力监测；液压式岩体应力计可适用于高应力水平及关键位置、关键深度的代表性应力监测。可根据矿柱受力条件、施工条件及监测精度要求，合理选用或组合选用。

7.1.4 岩体应力监测时，宜以巷道轮廓法向应力监测为主；必要时，可按正交方向成组布置传感器，以获取法向、切向及轴向应力分量；传感器测量方向应与设计受力轴线一致。

7.2 振弦式岩体应力监测

7.2.1 监测点布设和埋设

7.2.1.1 采用振弦式岩体应力计对巷道内部应力监测时，应选取具有代表性的巷道监测断面；监测断面选择、钻孔布设及孔深应符合 6.4.1.3 和 6.4.1.4 的规定，并结合高阶段矿柱受力特征及围岩结构特征综合确定。

7.2.1.2 在同一钻孔内布设多枚应力计对分层应力监测时，每孔宜设置 3~5 个测点，各测点沿孔深方向宜等间距布置，并可结合节理、层面及预期应力集中带对个别测点深度调整。

7.2.1.3 钻孔孔径应满足应力计外形尺寸和灌浆施工要求，宜比应力计外径大 10 mm~20 mm；当采用特殊灌浆材料或处于复杂工况条件时，可根据设计要求适当调整孔径。

7.2.1.4 埋设应力计时，应按设计规定的深度，把仪器缓慢地送进钻孔中。应借助定位套或中心器使得应力计与孔轴方向重合并保持设计要求的姿态。应力计受力轴宜按设计要求定向至孔周指定方位。

7.2.1.5 应力计在必要时可在设计深度处设置短锚杆、金属膨胀螺栓或专用支架等锚固点，且应将应力计牢固固定在锚固点上。

7.2.1.6 回填灌浆操作应从孔底朝孔口的方向分段开展，灌浆材料宜选用水泥浆、速凝砂浆或专用的灌浆材料，应力计周边的灌浆作业应做到密实无隙、连续不断、无明显的空洞以及夹层情况。

7.2.2 观测要求

7.2.2.1 监测的稳定性复核及基准值的确定，应符合 6.4.2 的规定。

7.2.2.2 监测时应同步记录监测点周边的环境温度或应力计温度。

7.2.3 数据处理

7.2.3.1 采集数据记录、检查流程以及存档，应符合 6.4.3.1 的规定。通过采集获得的频率信号、温度信号及辅助数据，均应完整且准确录入至监测数据库中。

7.2.3.2 监测数据应按仪器特性、标定参数及配套软件要求进行处理，将频率信号换算为应力值。

7.2.3.3 对记录的温度数据，应按仪器技术说明及配套软件要求进行温度修正，将温度对应力测量结果的影响折算或扣除，得到经温度修正的应力时程数据。

7.2.3.4 应对经换算和温度修正后的应力时程数据进行平滑、去噪和异常值识别等处理。

7.2.3.5 应以上一观测期为基准计算各期单期应力变化量，并以首次稳定观测期为基准计算累计应力变化量；计算结果应按监测断面、测点编号及观测期整理。

7.3 液压式岩体应力监测

7.3.1 监测点布设和埋设

7.3.1.1 采用液压式岩体应力计对巷道内部应力监测时，应选取代表高阶段矿柱受力状态的巷道监测断面；断面位置、钻孔布设及孔深应按 6.4.1.3 和 6.4.1.4 的规定执行。

7.3.1.2 每一监测孔宜布设 1~3 个测点；各测点沿孔深方向宜等间距布置，并可结合节理、层面及预期应力集中区对个别测点深度调整。

7.3.1.3 钻孔孔径应满足应力计本体、油管安装及灌浆施工要求，宜比应力计本体外径大 10 mm~30 mm；当采用特殊灌浆材料或处于复杂地质条件时，孔径可根据设计要求调整。

7.3.1.4 应力计安装前，应按仪器技术说明完成预充液、排气及密封性检查。在油管接头以及阀件连接处，应经检查并确认可靠性后，才能正式进行下孔安装操作。

7.3.1.5 孔内测点深度位置，应借助中心器或定位套对应力计定位，宜接近孔轴方向并保持设计姿态。应力计的承压面应按设计要求定向至指定方向，测量方向应为承压面法线方向。必要时，还应在设计规定深度位置处设置锚固点或防转支架固定。

7.3.1.6 孔口及沿巷道布置的油管、电缆宜采用金属膨胀螺栓或锚杆等构件固定和保护；固定的锚固构件仅用于固定管线，不可直接介入应力计和围岩之间的受力传递的路径中。

7.3.1.7 其他埋设工艺宜按 7.2.1 的规定执行。

7.3.2 观测要求

7.3.2.1 监测的稳定性复核及基准值确定，应符合 6.4.2 的规定。

7.3.2.2 监测过程中应同步记录监测点附近的环境温度或液压腔工作温度。

7.3.3 数据处理

7.3.3.1 采集数据的记录、检查和存档应符合 6.4.3.1 的规定；采集到的压力信号、温度信号及辅助数据应完整、准确地录入监测数据库。

7.3.3.2 监测得到的压力值应根据液压式岩体应力计的标定系数，换算为岩体应力值；当采用“压力—应力”非线性标定关系时，应按仪器技术说明书采用相应的换算公式或标定曲线进行插值或拟合计算。

7.3.3.3 对 7.3.2.2 记录的环境温度或液压腔工作温度数据，应根据仪器及软件技术说明进行温度修正，将温度影响折算或扣除后获得修正应力值。

7.3.3.4 应以上一观测期为基准计算各期单期应力变化量，并以首次稳定观测期为基准计算累计应力变化量；计算结果应按监测断面、测点编号及观测期整理。

7.4 数据分析

7.4.1 测点应力—时间曲线应基于振弦式和液压式岩体应力计监测成果，按监测断面及埋设深度绘制；宜绘制埋深—应力分布曲线，可多期叠合对比，反映应力沿深度方向的分布及其变化特征。

7.4.2 各测点实测应力水平宜进行综合分析，并与初始应力状态及历次监测结果对比，识别应力集中区、卸荷区及应力重分布带，评价高阶阶段矿柱关键承载部位的受力安全裕度。

7.4.3 应识别应力异常突变与位移突变或加速之间的对应关系及可能的时间滞后关系，判别潜在失稳部位及危险变化过程。

7.4.4 应结合监测时段内的采矿工况和充填工况综合研判，阐明高阶阶段矿柱稳定性变化趋势。

8 损伤破裂监测

8.1 基本要求

8.1.1 深部金属矿山高阶阶段矿柱损伤破裂监测宜依托矿柱内部的凿岩分段巷道和出矿分段巷道布设监测系统，持续获取矿柱微裂隙发育与破裂活动信息，掌握矿柱损伤破裂的空间分布特征及其时空变化规律。

8.1.2 高阶阶段矿柱损伤破裂监测可采用微震监测和超声波层析成像监测。应在分段巷道的典型监测区段布设微震传感器组，形成有效覆盖的监测网；并可在巷道两帮围岩内布设对向监测孔，开展超声波层析成像监测。

8.1.3 微震监测系统适用于矿柱损伤破裂活动的连续、实时监测，可反映破裂事件的发生时间、能级及空间聚集特征；超声波层析成像监测系统可适用于损伤破裂区的空间成像与范围识别，可反映波速异常及其时变特征。

8.1.4 工程应用中可根据矿柱受力条件、施工与布设条件以及监测精度与时效性要求，合理选用或组合上述方法，并宜开展综合分析相互校核。

8.2 微震监测系统

8.2.1 监测网布设和埋设

8.2.1.1 微震监测网应由传感器、通信系统、监测基站、监测中心站和监控中心组成（见附录 C）。

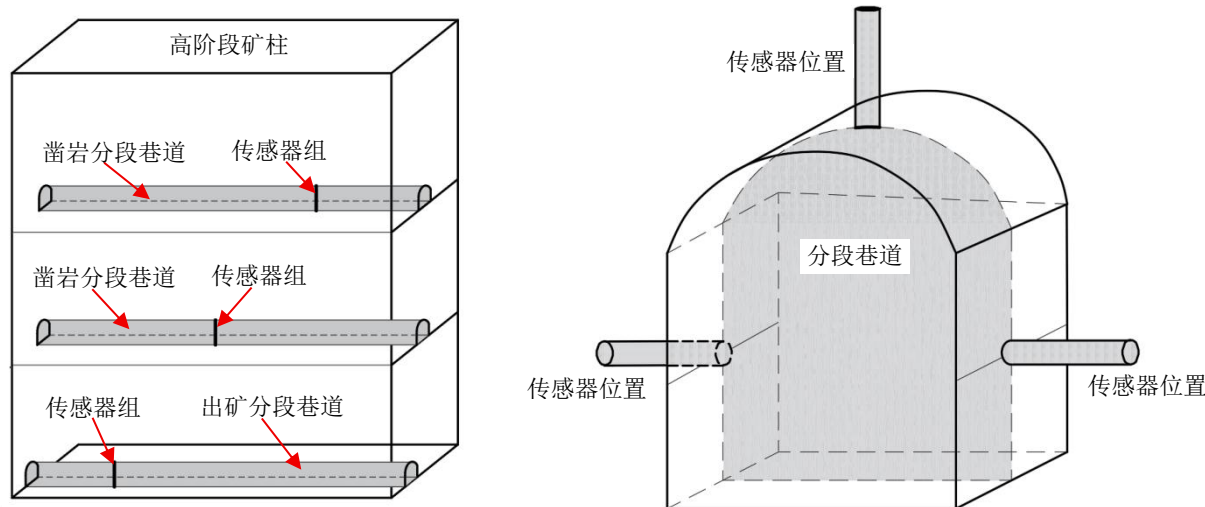


图4 微震传感器组布置示意图

8.2.1.2 监测基站、监测中心站和监控中心布置宜按 DL/T 5807 的规定执行；微震传感器布置宜符合下列规定：

- 微震传感器宜布置在高阶段矿柱的出矿分段巷道和凿岩分段巷道内；
- 每个高阶段矿柱内宜布置 2 组~3 组传感器组；每个分段巷道内最多宜布置 1 组传感器组；
- 传感器组位置宜选择高阶段矿柱中部，以及应力集中、围岩结构突变或已出现明显变形破坏征兆的巷道路段；
- 每组传感器数量宜为 2 个~4 个；分段巷道内传感器组宜采用交叉布置形式，宜避免布置在同一竖直剖面内，布置示意图见图 4；
- 同一组传感器宜分散布置于巷道边墙与顶拱位置。

8.2.1.3 微震传感器宜选用加速度型或速度型，技术指标宜符合附录 C 中表 C.2 的规定；监测基站采集仪采集模块应具备快速数据处理能力，技术指标宜符合附录 C 的规定。

8.2.1.4 微震监测网的通信方案设计、设备选型及安装埋设宜按 DL/T 5807 的规定执行。

8.2.2 观测要求

8.2.2.1 监测系统完成安装后，应开展定位精度的测试以及校核工作，并应符合下列规定：

- 测试布置及激发方式：测试点应布置在较为重要的区域，数量不应少于 3 个，且每个测试点的测试次数不应低于 5 次，激发源可选用小药量爆破、电火花或敲击等方式。
- 精度评定方法：把已知位置激发源的实际测量坐标和系统反演所得的定位坐标对比，测定存在的偏差，宜对水平、垂直以及三维空间中的定位误差统计分析。
- 超限处置与优化：定位误差超过设计允许值时，先从基础条件排查：核对授时同步是否正常、台站坐标是否准确，并复查事件到时拾取是否存在漏拾、误拾或质量偏低等情况。上述检查无异常后，再对速度模型/波速场校核与修正；仍无法满足要求时，可通过优化台网布设、调整台站位置或增设台站降低定位误差。

8.2.2.2 监测基站内采集单元应统一采用同一时标，并配备稳定可靠的授时手段；同时应对时钟漂移跟踪监测，并按需要校正。

8.2.2.3 其他微震观测技术可参照 DL/T 5807 执行。

8.2.3 数据处理

8.2.3.1 数据处理应包括微震信号识别、微震事件定位以及震源参数计算等；数据处理方法应按 DL/T 5807 的规定执行。

8.2.3.2 当发现存在异常微震信号后,应及时开展井下现场核查以及实地踏勘,结合爆破出矿、充填作业等信息,对异常信号出现的能级状况、频次情况、时空维度上的聚集特性以及频谱特征综合分析,辨别可能出现的成因。

8.2.3.3 应对微震事件定位结果的合理性进行校核以及空间解释。应对事件的空间聚集区域与岩体结构突变带、应力集中区域以及已知破坏部位之间的对应关系加以验证。应结合生产作业时序对事件的时空变化特性展开分析。

8.3 超声波层析成像监测系统

8.3.1 监测点布设和埋设

8.3.1.1 超声波层析成像监测位置应选取具有代表性的巷道监测区段,宜选择位于高阶段矿柱中部及应力集中、围岩结构突变或已有明显变形破坏征兆的路段。监测区段沿巷道轴向的间距宜为 15 m~20 m。

8.3.1.2 每个监测区段内,宜在巷道两帮分别布设上仰倾斜钻孔,监测孔布置示意图 5,应符合以下规定:

- 每帮宜设置 2 个钻孔,并沿巷道轴向适当错开布置;
- 同侧两孔间距宜为 4 m~6 m,钻孔倾角宜为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$,形成跨孔对射观测条件;
- 两帮之间的 $L1 \leftrightarrow R1$ 、 $L1 \leftrightarrow R2$ 、 $L2 \leftrightarrow R1$ 、 $L2 \leftrightarrow R2$ 等跨孔孔对宜作为主成像孔对;
- 必要时,可增设 $L1 \leftrightarrow L2$ 、 $R1 \leftrightarrow R2$ 等同侧孔对,用于近场加密与质量控制。

8.3.1.3 钻孔孔径和孔深应满足换能器探头安装、固定要求,并覆盖目标成像区域。孔深宜为矿柱厚度的 0.3~0.4 倍,孔内测点布置深度范围宜与目标监测部位相匹配。

8.3.1.4 宜采用壁面阵列与孔内阵列相结合的观测方式,应符合以下规定:

- 可在巷道壁上沿一定间距布设发射/接收探头形成壁面阵列;
- 可采用固定式或下放逐点式形成孔内阵列,孔内测点间距宜为 0.5 m,重点监测区宜适当加密。

8.3.1.5 发射/接收换能器探头埋设时,应保证与孔壁或围岩介质可靠耦合,宜采用专用耦合介质、膨胀式固定结构或封孔灌浆固结等方式。探头安装方向、极性、固定方式及定位基准应保持一致;埋设完成后应进行通道核对和基线测试,在满足重复性要求后方可投入正式监测。

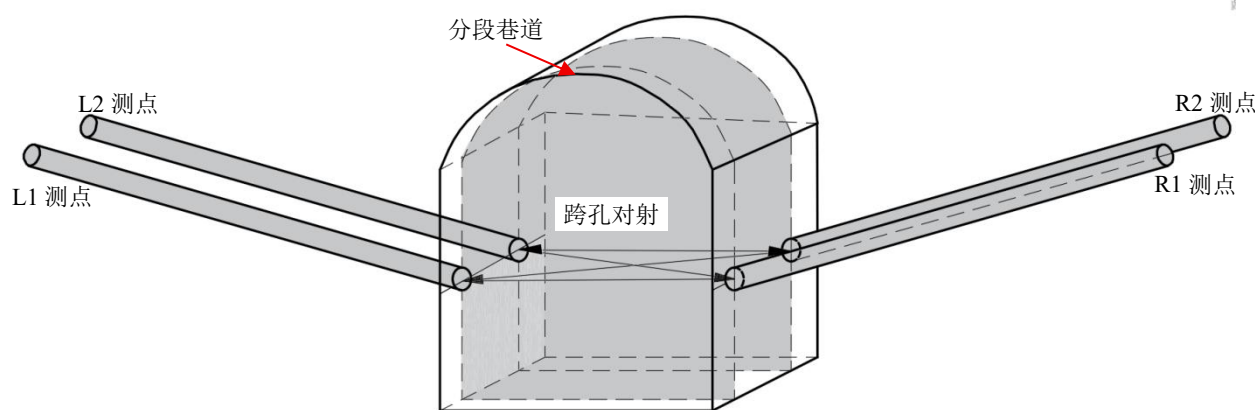


图5 超声波层析成像监测孔布置示意图

8.3.2 观测要求

8.3.2.1 采集系统应具备同步触发以及高精度计时功能。采样率、记录长度、增益和滤波设置应覆盖有效信号频带,并且保证初至波清晰可辨。

8.3.2.2 观测宜以走时数据获取与走时层析反演为主,辅以振幅、频谱及衰减等参数分析。监测系统安装调试完成后,应开展基线测试并形成基线数据集;必要时可基于基线数据集建立波速/慢度场等基线参考模型。

8.3.2.3 激发宜以压电换能器单脉冲或脉冲串激发为主,在传播距离相对较远或介质出现明显衰减情况下,可选用调制激发或电火花放电声源。当探测目标需要较低频率或较高激发能量时,可辅助采用机械冲击源。

8.3.2.4 同一监测区段开展多期观测工作时,应维持激发参数、接收参数以及换能器与岩体之间的耦合介质、接触状态等耦合条件处于一致的状态。

8.3.3 数据处理

8.3.3.1 原始观测数据应进行统一命名以及归档,同时应明确坐标及深度基准,波形数据应开展去直流、滤波以及去噪等预处理。

8.3.3.2 应统一初至波走时拾取原则和质量控制标准,并对拾取结果开展重复性检验工作。初至波走时拾取宜采用较为稳健的阈值法、互相关法等自动拾取方法,并结合人工判读进行抽检以及校正。对信噪比比比较低或初至波不清晰的记录,应将其剔除或在反演中让其权重降低。

8.3.3.3 钻孔空间几何模型应根据孔位、孔斜、测点埋深及孔间距等信息建立,并对模型可能存在的几何偏差进行评估。初始波速模型应以基线监测数据为基础,结合岩芯试验结果及相关地质资料综合确定。

8.3.3.4 开展走时层析反演时,应选用计算过程稳定、收敛性较好的求解方法。反演成果应包括波速或慢度分布图,并应给出残差情况、射线覆盖范围及模型分辨率等质量评估指标。

8.3.3.5 波速异常变化区域宜借助多期成像结果差分分析划定,并应进行定量解释和可靠性综合评估。多期反演时,网格划分方式、正则化设置和评价指标计算方法宜保持一致,或按统一规则调整。

8.4 数据分析

8.4.1 应基于微震监测成果绘制并更新事件时序统计图、事件空间分布图、事件能量、震级及累计能量释放曲线、震级—频次关系图(G-R关系图)以及b值时变曲线等图件。应对上述图件综合分析,识别事件活动强度、能量释放与空间迁移规律,揭示高阶阶段矿柱损伤—裂隙扩展—破裂失稳过程的时空变化特征。

8.4.2 应按超声波层析成像监测结果绘制代表性断面图像,包括波速或慢度成像图、相对波速变化率对比图以及低速异常区分布图。应分析波速时序变化特征,对低速异常区的位置、范围、变化的幅度以及其面积或体积变化进行定量评价,判别出高阶阶段矿柱内部裂隙发育以及损伤变化的空间分布特征和变化规律。

8.4.3 宜将微震监测与超声波层析成像监测成果以及位移监测、应力监测等结果综合对比分析,识别应力异常增长、位移突变、微震事件活跃及超声波波速显著变化等现象之间的对应关系,判别高阶阶段矿柱潜在失稳部位及其危险变化过程。

8.4.4 宜结合监测时段内的采矿工况和充填工况,提出高阶阶段矿柱稳定性评价结论,为预警等级判定提供技术依据。

9 监测预警技术

9.1 基本要求

9.1.1 监测预警应根据隐患风险等级确定与之对应的预警等级,按预警等级发布预警信息,并提出分级响应措施。

9.1.2 在预警实施过程中,应持续跟踪预警效果,根据反馈结果对预警指标、相应阈值和响应措施进行动态调整。

9.2 预警指标体系

9.2.1 深部金属矿山高阶阶段矿柱稳定性预警指标体系应由核心预警指标以及辅助预警指标共同构成。

9.2.2 核心预警指标应依据前期开展的监测成果确定,选取可直接反映高阶阶段矿柱稳定性演变的关键参数,宜包括矿柱的位移、应力、损伤程度以及裂缝扩展等。

9.2.3 辅助预警指标应依靠现场巡查以及宏观观测,对破坏迹象进行定性评估。现场巡查以及宏观观测内容应按照4.2.7执行。

9.3 预警阈值确定

9.3.1 一般要求

确定预警阈值时,应以高阶阶段矿柱稳定性变化的内在机理为基础,运用理论分析、数值模拟、现场试验、历史监测数据对比分析及专家经验等相结合的综合方法开展研判,并通过多源信息交叉验证后最终确定。

9.3.2 核心预警指标阈值分级与设置

9.3.2.1 核心预警指标应构建分级预警阈值体系。应按高阶阶段矿柱稳定性由稳定、渐进变形向加速失稳变化的过程，将预警阈值划分成初级、中等级、高等级以及最高级。

9.3.2.2 核心预警指标的预警阈值应采用多维度控制方式，并可参照 GB 50497 的有关规定确定；具体地，应从累计效应以及变化速率两个层面同步展开设置：

- a) 累计变化阈值：用于表征高阶阶段矿柱较长时间跨度之内的变形、应力演变趋势以及损伤累积的相关特性；
- b) 变化速率阈值：用于识别短时间尺度内变形、破裂或应力响应的加速发展特征。

9.3.3 辅助预警指标判识

辅助预警指标不宜采用数值阈值划分，应按现场巡查以及宏观观测得到的结果，通过分析高阶阶段矿柱及其相邻围岩、充填体及支护结构的开裂、掉块、剥落等破坏现象的出现频次、发展范围以及变化趋势，对异常风险进行分级判识，为核心预警指标定量分析结果提供定性方面的补充以及现场验证。

9.4 预警等级划分

9.4.1 一般要求

9.4.1.1 预警等级的确定应采用“以定量监测作为主要手段、定性判识为辅助方式”的融合决策模式，通过核心预警指标和辅助预警指标协同分析，判定高阶阶段矿柱稳定性状况，确定与之相对应的预警等级。

9.4.1.2 预警等级的确立应以核心预警指标触发的分级预警阈值为基础，参照辅助预警指标的宏观破坏特征对预警等级展开校核以及修正，并应满足下列要求：

- a) 核心预警指标触发的相应预警阈值等级，应作为确定预警等级的首要依据；
- b) 辅助预警指标反映的宏观破坏现象以及后续发展趋势，应作为判定预警等级的重要校核条件，对定量监测结果进行验证或修正；
- c) 当定量监测得到的结果同宏观判识得出的结论出现不一致时，应通过加密监测、现场核查以及综合分析，确定与当前风险状态相匹配的预警等级。

9.4.2 监测预警等级划分

高阶阶段矿柱稳定性监测预警的等级划分如表 1 所示，分别与风险极高、风险高、风险较高和风险一般相对应，并依次运用红色、橙色、黄色以及蓝色标识，其中一级预警等级属于最高等级。

表 1 监测预警等级划分

预警等级	颜色标识	核心监测指标描述	矿柱状态与宏观迹象	可能失稳时间和风险描述
警报级/一级预警	红色	多项核心监测指标已经达到或超过最高预警设定的阈值	矿柱的稳定性恶化迅速，出现了比较明显且持续发展的裂隙贯通、掉块、剥落或局部塌落等宏观破坏迹象	在数小时至数天的短期内发生失稳灾害的可能性非常大
警戒级/二级预警	橙色	多项核心监测指标接近或局部达到了高等级预警设定的阈值	矿柱呈现出了一定程度的宏观破坏或异常征兆	在数天至数周的短期内发生失稳灾害的风险显著提高
警示级/三级预警	黄色	多项监测指标呈现出异常状况或已经达到了中等级预警规定的阈值	矿柱处于不稳定状态，变化进程比较平缓，在此期间并没有出现明显的宏观破坏迹象	失稳灾害发生的潜在风险较高，可能会在数周乃至数月时间段内发生
注意级/四级预警	蓝色	部分监测指标出现了轻微异常状况或达到了初级预警所设定的阈值	矿柱变形以及破坏特征尚不显著，大体上处于相对稳定的状态	数月以上相对较长的时间跨度内，发生失稳灾害的可能性增加，应持续不断地跟踪监测

9.4.3 预警等级提高

在预警发布以及运行进程中，当监测得到的结果显示高阶阶段矿柱稳定性的风险正呈现出快速恶化的趋势，并且还出现下列情形之一时，经过综合分析以及相关技术认定后，可将预警等级提高：

- a) 核心预警指标异常程度显著增强；
- b) 宏观破坏迹象或短临前兆特征明显增强或集中出现；
- c) 短期内发生大规模失稳灾害的概率明显增大。

9.4.4 预警等级降低或解除

9.4.4.1 在预警运行期间，当监测得到的结果显示高阶阶段矿柱失稳灾害的风险明显降低，并符合下列条件时，可将预警等级调低或解除预警：

- a) 核心预警指标趋于稳定或持续回落，未再触发更高等级阈值；
- b) 宏观破坏迹象逐步消退，短临前兆特征减弱或消失；
- c) 高阶阶段矿柱稳定性状态得到有效改善，恢复到安全状态。

9.4.4.2 预警等级降低或解除后，应恢复常态化监测与管理，并持续跟踪稳定性变化情况。

9.5 预警信息发布

9.5.1 发布要求

9.5.1.1 发布预警信息应按“信息透明、及时发布；责任明确、分级管理；有效覆盖、迅速响应”的要求，确保信息准确传达到位，且传递过程可追溯。

9.5.1.2 预警信息面向的发布对象应涵盖矿山管理层、监测与技术人员以及井下作业人员；预警风险存在影响矿区周边或社会公众的可能性时，应依照规定的渠道向相关外部单位发布。

9.5.1.3 预警信息发布内容应与预警级别相互匹配，同时应形成书面或电子形式的发布记录，必要时编制预警信息发布通知单（附录 D），并做好后续跟踪以及归档工作。

9.5.2 发布流程

9.5.2.1 预警信息应由矿山企业安全管理部门牵头组织发布。应依据监测单位给出的预警建议，经综合研判后确定预警等级。

9.5.2.2 预警等级确定后，应立即将情况汇报给矿山管理层以及应急处置小组，并随即启动相应的响应措施。依照矿山应急预案以及相关法规的要求明确是否对外发布并确定发布范围，并按规定完成发布、回执与记录归档等事宜。

9.5.3 发布内容

发布内容应包含失稳风险的位置、影响涉及的范围、预警等级、对井下人员采取的管控举措与注意事项，信息发布相关单位以及时间，联系人员及联络方式等。

9.5.4 发布对象和方式

9.5.4.1 矿山内部（重点针对井下人员）发布方式包括以下形式：

- a) 应采用井下应急广播、语音告警、警报器以及声光报警等方式；
- b) 应借助有线电话、漏泄通信以及对讲或集群通信等井下调度通信系统；
- c) 应通过电子显示屏、调度大屏、班前会以及现场指令等方式传达。

9.5.4.2 矿区地表以及相关责任人（包括矿山管理人员、监测人员和应急处置人员）可通过电话、短信、微信、调度系统推送、邮件等方式通知。

9.5.4.3 当风险存在外溢可能，对矿区周边产生影响或需政府协同处置时，应及时向属地主管部门汇报，并借助网站、广播、电视台等各类渠道向社会公众发布预警信息。

9.6 分级响应措施

9.6.1 蓝色预警响应措施

蓝色预警发布后，项目监测单位应持续关注监测数据，并按预警等级开展现场巡查工作，检查宏观迹象变化。发现任何异常情况应及时向矿山企业安全管理部门汇报。

9.6.2 黄色预警响应措施

黄色预警发布后，项目监测单位应加强监测数据分析，开展中期预警。同时，应加强现场巡查，检查宏观迹象，并结合监测数据分析研判。相关情况应及时反馈给矿山企业安全管理部门。

9.6.3 橙色预警响应措施

橙色预警发布后，项目监测单位应加强监测数据分析，开展短期预警。同时，应加强宏观变形迹象观测等现场巡查。矿山企业井下负责人应会同项目监测单位前往现场核查情况，并根据现场实际情况及时反馈给矿山企业安全管理部门。

9.6.4 红色预警响应措施

红色预警发布后，项目监测单位应强化对宏观变形以及短临前兆的监测工作，开展紧急短期预警，并密切观察矿柱的变形发展情况。应迅速进行现场巡查，监控宏观变形及前兆现象。矿山企业安全管理部门负责人应与项目监测单位共同赴现场展开核查，根据现场实际状况判定是否提前组织地质灾害危险区内的人员实施撤离行动。当风险存在外溢可能时，应及时向属地主管部门汇报。

9.7 预警反馈优化

9.7.1 每次预警处置完成后，应对预警判定过程及处置效果展开复盘与评估。应根据监测数据、现场核查情况以及处置记录等内容，深入剖析其中出现误报、漏报以及预警滞后等原因。必要时，还应组织相关领域的专家开展复核。

9.7.2 预警反馈优化应综合分析预警反馈以及现场核查结果，评价监测网布设的代表性与有效性；对于出现变形破坏的重点区段以及关键部位，应及时对监测点位、监测方法和监测频率进行优化。

9.7.3 预警反馈优化应全面分析宏观破坏迹象和核心预警指标触发之间的对应关联，完善预警等级判定规则以及触发逻辑。

9.7.4 预警反馈优化应对分级预警阈值体系进行优化，结合灾害险情案例以及长期监测数据，定期对阈值适用性展开回溯评估并修订。

9.7.5 其他预警反馈优化要求可参照 DZ/T 0460 的相关规定执行。

10 监测报告

10.1 基本要求

10.1.1 成果应建立在真实、完整的原始数据基础上。数据处理流程应规范、方法适用，计算结果准确。

10.1.2 成果应揭示监测区域内高阶阶段矿柱变形、应力及损伤破裂等关键响应的时空变化规律，并以此为基础，系统构建稳定性监测预警的实施方法。

10.1.3 监测以及预警成果提交形式宜包含文字报告和数据表格、图件等附件。

10.2 成果报告编制

10.2.1 监测和预警报告内容应简明扼要、结构清晰有序、逻辑严谨，准确概括监测工作的整体概况、关键的监测结果、预警实施过程以及主要认识与结论等内容。结论应客观准确、依据充分并且具备可验证性。文字报告提纲可参照附录 E，可根据工程实际状况补充或调整。

10.2.2 成果报告应依据监测取得的成果，结合工程地质背景以及采矿条件，对深部金属矿山分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿过程中的高阶阶段矿柱变形、应力以及损伤破裂等变化过程展开综合分析，评估该高阶阶段矿柱稳定性演变过程及发展趋势。

10.2.3 成果报告应根据监测成果构建高阶阶段矿柱稳定性预警方法体系，阐明预警指标体系构成、阈值确定原则、预警分级标准以及分级响应的措施。

10.2.4 成果报告应结合监测和预警结果，提出监测断面/点位布置、监测频次等监测方案优化建议，同时应给出开采顺序、充填参数等采矿方案调整的建议。

10.3 成果图件提交

10.3.1 成果图件应涵盖位移监测成果图、应力监测成果图、损伤裂隙监测成果图以及预警成果图。图件应图面清晰无误、要素完备，采用统一的标注规则，同类图件应采用统一的比例尺；在图中应明确标明位移的正负号、相应的单位、时间尺度、监测编号以及关键工况。

10.3.2 位移监测成果图件宜包括下列内容：

- a) 监测点（线）布置图：包含高阶阶段矿柱内部巷道平面图、断面图或立面图以及必要的局部放大图。
- b) 累计位移—时间曲线图：依据监测断面绘制测点位移、收敛位移随时间变化曲线，必要时，应同步给出位移变化速率—时间曲线。
- c) 典型断面形态以及空间形态对比图：典型断面实施多期叠合对比，绘制巷道断面形态的变化情况图，同时还应绘制三维空间形态的变化情况图。采用三维扫描监测方式时，还应给出变形差异云图或等值线图，并且提供典型断面的叠合对比图。
- d) 孔内位移成果图：包含运用多期叠合对比等方式呈现的孔深—位移分布图，必要时给出关键深度测点位移—时间曲线以及分段变形分布图。

10.3.3 应力监测成果图件应包括下列内容：

- a) 监测点布置图：包括高阶阶段矿柱内部巷道的平面图、断面图或立面图以及必要的局部放大图。
- b) 应力成果曲线图：按监测断面以及埋设深度分别绘制测点应力—时间曲线，必要时同步给出应力变化速率—时间曲线；并且宜绘制埋深—应力分布曲线图，可采用多期叠合对比方式。
- c) 典型测点对比图：选取不同埋深、不同部位、不同方向等代表性点，绘制同图对比曲线，反映断面内部差异情况以及不对称特性，包括左右两帮、拱顶和拱肩之间的差异等。

10.3.4 损伤破裂监测成果图件应包括下列内容：

- a) 传感器/钻孔等测点布置图：包含微震传感器布置平面图、典型剖面图以及超声层析成像钻孔/测线布置平面图、断面图/剖面图等。
- b) 微震事件活动时序图：绘制按统一时间窗统计的事件数、滑动窗口或单位时间事件数等事件活动率以及累计事件数随时间变化曲线；并绘制能量或震级随时间变化曲线，可选用最大值、平均值或者窗内统计值方式，同时绘制累计能量释放曲线，必要时还应给出分阶段统计对比的相关图表。
- c) 微震事件空间分布图：绘制事件空间分布图，包含平面投影图、典型剖面投影图以及三维事件分布图；具备条件时绘制热力图/等值线图等事件空间密度图或事件聚类分布图。
- d) 微震统计特征图件：绘制震级与频次的关系图（G-R 关系）及 b 值时变图，必要时给出能量—频次分布统计图等。
- e) 超声层析成像成果图：绘制代表性的断面波速或慢度成像图、相对波速变化率对比图（ $\Delta V/V_0$ ）及低速异常区的分布图。

10.3.5 预警成果图件应包括下列内容：

- a) 预警等级和关键指标—时间综合图：绘制预警等级随时间变化图表，并把位移、位移速率、应力、应力变化率、微震事件活动率、能量、震级等关键指标曲线和阈值线叠加展示。
- b) 预警统计特征图：汇总并展示预警触发的次数、单次持续时长及解除情况等统计信息，可采用柱状图、折线图或统计表等形式。
- c) 预警响应与效果对比图：对预警处置全过程进行可视化表达，可绘制处置过程时间轴图。同时，应提供处置前后关键指标的对照图或对比表。

10.4 资料存储

10.4.1 现场观测记录表、原始图件、设备安装与校准记录等原始纸质资料，应按监测项目、监测断面、测点及时间顺序分类整理，并按规定规范归档保存。

10.4.2 在保存纸质资料的同时，应同步建立深部金属矿山充填开采高阶阶段矿柱稳定性的监测与预警数据库。应采用统一的数据格式、坐标基准和编码规则，各阶段的监测原始数据、过程数据以及处理成果实施电子化管理，实现对数据快速检索和共享利用。

10.4.3 监测与预警数据库宜包含下列内容：

- a) 监测点、传感器坐标、里程、类型、埋设/安装参数、量程及校准信息等基础信息；
- b) 各期监测原始数据、数据预处理结果及内业软件计算成果；
- c) 成果图表及其时间尺度、计量单位、正负号约定、质量标识等配套元数据；
- d) 数据库应保留数据更新记录，明确更新时间、更新内容及责任人信息。

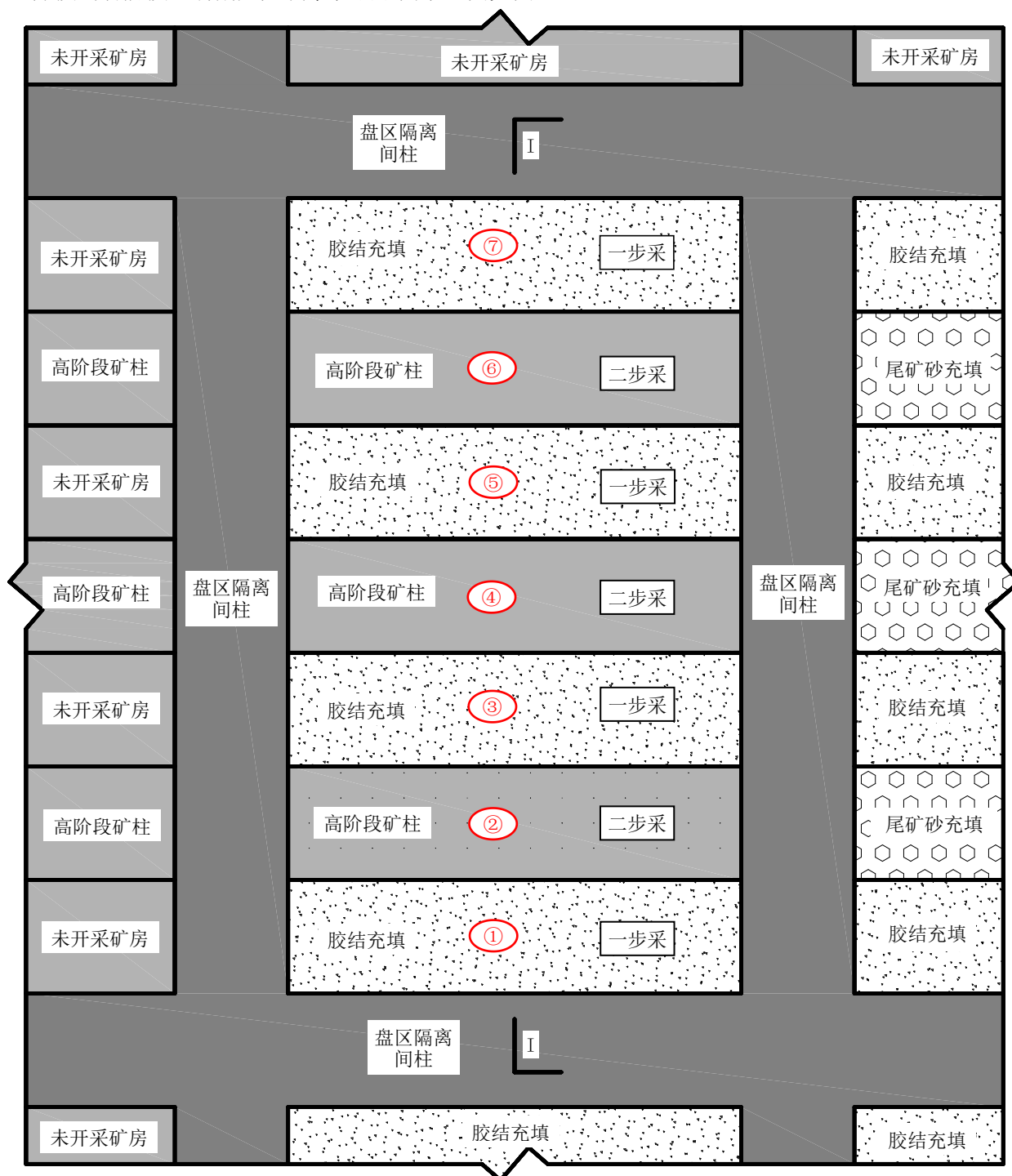
10.4.4 项目结束后，应将监测成果阶段性报告和总报告、合同文件及技术协议、会议纪要、与委托方往来文件等电子和纸质资料，以及现场观测原始纸质记录、监测与预警数据库等，按档案管理规定整理并统一归档。

附录 A

(资料性)

深部金属矿山分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿过程

A.1 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法平面示意图见图A.1。



图A.1 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法平面示意图

附 录 B
(资料性)
监测项目与仪器选型

B.1 监测项目与仪器选型见表 B.1。

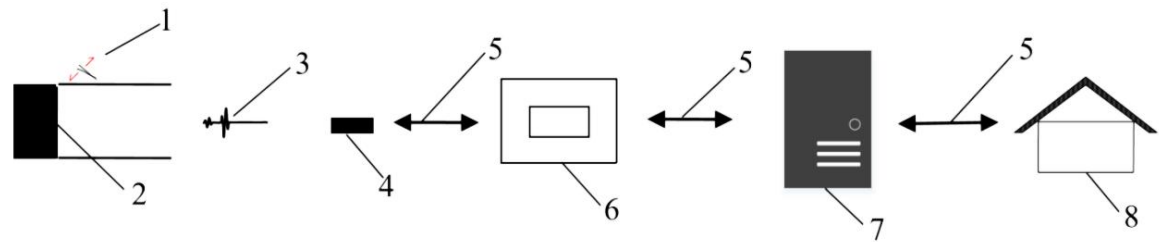
表B.1 监测项目与仪器选型

监测项目	监测内容	监测仪器	技术特点
位移监测	高阶阶段矿柱内部分段巷道表面和内部位移	断面收敛位移监测仪	激光收敛仪，测量精度可优于 1 mm，适用于高阶阶段矿柱内部分段巷道断面收敛位移监测。
		三维激光扫描仪	测距精度为毫米级，可在较大范围内获取高阶阶段矿柱内部分段巷道表面高密度三维点云数据。
		电测式线性位移计	采用线性差动变压器式位移传感器（LVDT）、电阻式或振弦式位移计，在标称量程内位移测量精度可达毫米级甚至亚毫米级，适用于高阶阶段矿柱内部分段巷道表面和内部位移的连续自动监测。
		光纤传感类位移监测系统	包括光纤光栅位移计（主要为Fiber Bragg Grating，简称FBG）和分布式光纤应变监测系统（如Brillouin Optical Time Domain Reflectometry，简称BOTDR，和Brillouin Optical Time Domain Analysis，简称BOTDA）等。FBG位移计适用于局部多点高精度位移监测，精度可达亚毫米级；BOTDR、BOTDA等分布式光纤系统适用于沿线连续应变监测。二者均适用于高阶阶段矿柱内部分段巷道表面及内部变形监测。
		多点位移计	通过在同一钻孔不同深度设置多个锚固点，配合电测式或光纤类等位移传感单元组成一体化多点孔内位移监测系统，总监测深度可达数十米，适用于高阶阶段矿柱内部分段巷道帮壁水平钻孔分层位移监测及顶板仰孔离层监测。
应力监测	高阶阶段矿柱内部应力变化	振弦式岩体应力计	量程和分辨率应根据监测对象应力范围及监测精度要求合理确定；该应力计长期稳定性好，抗漂移和抗电磁干扰能力强，适用于深部岩体应力的长期连续监测；在高应力或应力集中区应用时，宜充分校核量程与过载裕度。
		液压式岩体应力计	量程应根据监测区域应力水平合理选取，可通过选型适应较高应力水平；典型测量精度约为满量程的 1%~2%，结构简单，抗过载能力强，适用于高应力及应力集中区的长期监测。
损伤破裂监测	高阶阶段矿柱内部损伤破裂状态	微震监测系统	监测半径可达数百米，具备三维震源定位能力，时间分辨率可达毫秒级，可实现高阶阶段矿柱内部损伤破裂事件的全天候自动监测。
		超声波层析成像监测系统	成像范围为数米至数十米，空间分辨率与探测尺度、工作频率及阵列设计有关，典型可达探测尺度的 1%~5%；对介质波速约 3%~5% 的相对变化具有分辨能力，可用于高阶阶段矿柱内部裂隙和破碎带的识别及其变化过程监测。

附 录 C
(资料性)
微震监测系统组成及监测设备技术指标

C.1 微震监测系统组成见图C.1，并应满足下列要求：

- a) 监测基站是对传感器感应到的震动信号进行采集与汇集，包括采集设备、通信设备、不间断电源与稳压设备。
- b) 监测中心站主要是对监测基站采集到的数据进行汇集，包括数据服务器、授时服务器、通信设备、不间断电源与稳压设备。
- c) 监控中心主要监测区域围岩的稳定性，同时监控整个微震监测系统运行状况，包括监控服务器、通信设备、不间断电源与稳压设备及办公设施。



图C.1 微震监测系统组成

1——岩体破裂源；2——开挖面；3——微震波；4——传感器；5——通信系统；6——监测基站；7——监测中心站；8——监控中心。

C.2 传感器技术指标应符合表 C.2 的规定。

表C.2 传感器技术指标

技术指标	速度型传感器	加速度传感器
频率范围	10Hz~1000Hz	0.5Hz~5000Hz
灵敏度	$\geq 80V/(m/s)$	$\geq 1V/g$
分辨率	-	$\leq 0.0005g$
谐波失真	$\leq 0.5\%$	-
防护等级	$\geq IP67$	$\geq IP67$

C.3 采集仪技术指标应符合下列规定：

- a) 采样频率不应低于监测对象主要微震信号最高主频的 2 倍，且不宜低于 1000 Hz。
- b) 模数转换位数不宜低于 24 位。
- c) 量程范围不宜小于 $[-2.5V, 2.5V]$ 。
- d) 动态响应范围不宜低于 110dB。
- e) 本底噪声不宜大于 $20\mu V$ 。
- f) 不同采集仪之间的时间同步误差不宜大于 0.1ms。
- g) 防护等级不宜低于 IP55。
- h) 功耗不宜大于 10W。

附 录 D
(资料性)
预警信息发布通知单

D.1 预警信息发布通知单见表D.1。

表D. 1 预警信息发布通知单

发布单位：

发布时间：

预警信息标题			
灾害位置和影响范围			
预警级别及颜色标识			
对井下人员的管控措施			
发布对象及方式			
联络人及联络方式		签发人	
跟踪与记录工作			

附录 E

(资料性)

监测和预警报告提纲

E.1 前言

应简要阐述项目来源以及相关背景情况，明确监测目的、工作任务以及监测与预警服务年限长度；列出主要的编制依据，并对本次监测和预警工作的范围以及成果提交的内容作出概括性说明。

E.2 矿区概况

矿区概况应包括下列内容：

- a) 区域位置及自然地理概况。
- b) 矿区工程条件：矿体及围岩岩性与结构特征、构造发育情况、地应力条件等。
- c) 矿区水文地质条件：含水层分布与特征、补给—径流—排泄条件、涌水条件及对开采影响等。
- d) 矿体赋存与分布情况：矿体产状、厚度、埋深、延伸规模及空间分布特征等。
- e) 开采与充填条件：开采方案与工艺流程、充填工艺流程与参数、高阶阶段矿柱形成方式、矿柱形状及尺寸参数等。

E.3 监测项目与监测方案

监测项目与监测方案应包括下列内容：

- a) 明确监测项目，包括位移、应力、损伤破裂等监测。
- b) 监测实施技术路线：阐述监测系统总体流程，包括采集、传输、存储、预处理及质量控制、数据处理以及分析与解释环节所形成的技术路线。
- c) 监测方案：阐述各项监测项目所采用的监测方法，监测网具体布置及埋设情况，监测设备和系统的构成状况，精度等级的具体情况，监测周期以及频次的安排情况，质量控制的相关要求等内容。

E.4 监测实施与成果概况

监测实施与成果概况应包括下列内容：

- a) 各阶段监测实施情况，包括观测时间、频次执行情况、施工与现场条件、异常情况记录等。
- b) 数据预处理与质量控制，包括外业检查、内业审核、数据筛查、异常值判别与处理、缺测处理等。
- c) 成果概况：汇总监测项目的成果及必要的统计指标，说明阶段性数据的完整性、有效性以及代表性等情况，并说明缺测、异常数据处理结果等。

E.5 监测成果分析

监测成果分析应包括下列内容：

- a) 位移监测成果分析：对高阶阶段矿柱内部分段巷道的围岩表面及内部的位移数据展开分析，揭示变形、变形速率的分布特征和变化规律，识别出高阶阶段矿柱存在异常变形的区段以及关键控制的部位。
- b) 应力监测成果分析：对高阶阶段矿柱内部分段巷道的围岩内部的应力数据展开分析，阐明应力分布特征和变化过程，识别出高阶阶段矿柱应力集中区域以及迁移规律。
- c) 损伤破裂监测成果分析：依据微震以及超声波层析成像等相关监测所获取的数据，分析高阶阶段矿柱损伤破裂空间分布和变化特征，识别出高阶阶段矿柱集中破裂的具体区域，以及损伤累积的状态。

- d) 综合对比分析：上述分析结果宜与矿体开挖推进、爆破作业、支护施工及充填作业等关键工况进行对照，分析高阶阶段矿柱异常响应与关键工况时序对应关系，阐明影响高阶阶段矿柱稳定性的主控因素。

E.6 稳定性综合评价

包括下列内容：

- a) 多源监测成果融合分析与相互印证：开展位移、应力以及损伤破裂等多种维度的监测数据交叉对比和关联分析，验证各项指标之间所具有的协调性及一致性，揭示高阶阶段矿柱稳定性变化过程中的内在力学特征。
- b) 高阶阶段矿柱稳定性的综合评定：依据融合分析的成果，同时根据矿区工程地质状况以及采矿充填条件，对高阶阶段矿柱稳定状态、存在风险的部位以及发展趋势开展系统的综合诊断与评价，给出相关评价结论以及判定的相关依据。

E.7 监测预警实施过程和成果

监测预警实施过程和成果应包括下列内容：

- a) 预警指标体系：预警指标组成和选取依据。
- b) 分级预警阈值体系：核心指标分级阈值取值以及辅助预警指标的判识方法。
- c) 预警等级确定方法：依据预警等级划分原则确定矿区高阶阶段矿柱预警等级。
- d) 预警信息发布：根据确定的预警等级发布预警信息，明确发布内容与发布对象。
- e) 分级响应措施：不同预警等级对应的响应措施与执行要求。
- f) 预警反馈优化：预警效果评估、监测网布设的优化、阈值与规则迭代优化机制，形成监测预警阶段性成果与总结成果。

E.8 结论和建议

结论和建议应包括下列内容：

- a) 归纳高阶阶段矿柱位移、应力以及损伤破裂的分布特性与变化规律；
- b) 给出稳定性综合评价结论以及风险区段的识别成果；
- c) 阐明预警触发与响应实施情况；
- d) 提出监测体系优化和采矿与充填参数优化方面的建议，以及井下安全生产管控建议。

E.9 附表和附图

附表和附图应包括下列内容：

- a) 附表：监测数据成果表、统计汇总表、预警记录与处置记录汇总表等。
- b) 附图：涵盖第 10.3 规定的成果图件，并且还包含采矿方案布置平面图、立面图和剖面图等。

参 考 文 献

- [1] T/CECS 839 岩体工程微震监测技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2021.
- [2] T/GRM 132 煤矿盘区开拓巷道变形监测技术要求[S]. 北京: 中关村绿色矿山产业联盟, 2025.
- [3] T/CAGHP 014 地质灾害地表变形监测技术规程(试行)[S]. 北京: 中国地质灾害防治工程行业协会, 2018.
- [4] T/CAGHP 064 地质灾害监测预警信息发布规程(试行)[S]. 北京: 中国地质灾害防治工程行业协会, 2019.
- [5] 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.
- [6] 王运敏. 现代采矿手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [7] 耿献文, 马全礼. 矿山压力测控技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [8] Xia KZ, Chen CX, Liu XT, et al. Assessing the stability of high-level pillars in deeply-buried metal mines stabilized using cemented backfill[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105489.
- [9] 夏开宗, 梁万, 肖波, 郑先伟, 赵国良, 王田龙, 司志伟. 一种三维激光扫描矿山高阶段矿柱稳定性监测与评估方法, 中国发明专利申请, 申请号 CN202610746085.0[P].
-