第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

矿山地质安全隐患识别及预警模型构建

陈楠[1] 舒立论[2] 谭培[1]
1 四川省冶金设计研究设计院
2 内蒙古自治区矿山安全技术服务中心
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2507

[摘 要] 矿山开采过程受地质条件、工程扰动、气象环境等多重因素耦合影响,使得矿山地质安全隐患具有隐蔽性、突发性、链式衍生性特征,传统人工排查、静态评估模式难以适配现代化矿山安全生产监管需求。因此为解决矿山地质安全隐患识别精准度低、预警滞后、管控针对性不足等行业痛点,本文依托矿山工程设计与安全生产监管工作实践,系统梳理露天、地下矿山典型地质安全隐患类型与致灾机理,建立适配矿山生产全周期的隐患识别体系。通过工程实例验证模型的可行性与实用性,有效提升矿山地质安全风险主动防控能力。
[关键词] 地质安全；隐患识别；预警模型；安全生产监管
中图分类号：P642 文献标识码：A

Identification and Construction of Warning Model for Geological Safety Risks in Mines

Nan Chen[1] Lilun Shu[2] Pei Tan[1]
1 Sichuan Metallurgical Design Research Institute
2 Inner Mongolia Autonomous Region Mine Safety Technology Service Center
[Abstract] The mining process is influenced by multiple factors such as geological conditions, engineering disturbances, and meteorological environments. Geological safety hazards have characteristics of concealment, suddenness, and chain-like derivation. The traditional manual inspection and static assessment methods are difficult to meet the modern requirements for safety production supervision in mines. To address the industry pain points such as low accuracy of hazard identification, delayed early warning, and insufficient targeted control, this paper, based on the practical work of mine engineering design and safety production supervision, systematically classifies typical geological safety hazard types and disaster-causing mechanisms in open-pit and underground mines, and establishes a hazard identification system suitable for the entire production cycle of mines. The feasibility and practicality of the model are verified through engineering examples, effectively enhancing the active prevention and control ability of geological safety risks in mining areas.
[Key words] Geological safety; Hazard identification; Early warning model; Safety production supervision

当前中国矿山开采逐步向规模化、深部化方向发展,开采作业持续扰动矿山岩体结构、水文条件与地应力状态,显著提升了地质安全风险[1]。矿山地质构造复杂、岩体性质差异大,开挖、爆破等工程作业极易诱发各类地质灾害,安全生产管控难度较大。目前中小型矿山普遍沿用传统人工巡查与静态评估模式,难以精准识别隐蔽、缓变的地质隐患,风险预警存在明显滞后。同时,现有预警模型贴合现场设计与监管场景的适配度不足,落地应用效果较差。对此,本文结合矿山工程设计与安全监管工作实际,分析地质隐患成因演化规律,搭建专属隐患识别与动态预警体系,构建完整风险闭环管控模式,为矿山智能化、精细化安全管理提供参考。

1 矿山地质安全隐患类型及致灾机理

1.1露天矿山核心地质隐患

露天矿山开采以边坡开挖为核心作业形式,地质安全隐患集中体现为边坡稳定性失效问题,主要包括边坡滑坡、危岩落石、坡面坍塌、地表开裂变形四类[2]。一是边坡滑坡隐患,多因矿山边坡设计坡度过大、台阶参数不合理、开挖顺序不规范导致,叠加降雨入渗软化岩体、爆破振动扰动、岩体风化侵蚀等因素,造成边坡岩体抗剪强度大幅下降,岩体结构面发生滑移失稳,是露天矿山最频发的地质灾害。二是危岩落石隐患,矿山岩体节理、裂隙发育,长期受风化、雨水冲刷、爆破振动影响,零散岩体脱离母体,形成危岩体,具有突发性强、随机性高的特点,对作

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

业平台、运输通道安全威胁极大。三是地表塌陷与开裂隐患，矿山持续开挖改变原有地质应力平衡，下部岩体掏空后上部地层沉降变形，引发地表裂缝、局部塌陷，破坏矿山地形地貌与生产设施。

1.2地下矿山核心地质隐患

地下矿山巷道掘进、采空区形成过程中，地质环境扰动更剧烈，隐患隐蔽性更强，主要包括围岩垮落、顶板冒落、巷道片帮、突水溃砂、采空区塌陷五类。围岩与顶板灾害是地下矿山高频隐患，巷道掘进破坏原始岩体应力状态，周边岩体出现应力集中，若支护设计不合理、支护施工不到位，极易出现岩体破碎、顶板脱落、巷道片帮等灾害[3]。突水溃砂隐患多发育于岩溶发育区、断层破碎带、含水层富集区域，矿山掘进施工贯通含水构造后，地下水携带泥沙涌入巷道，造成巷道淹没、设备损毁、人员被困等重大事故。采空区塌陷隐患具有滞后性，矿山开采遗留的采空区长期处于应力失衡状态，随着时间推移岩体逐步失稳，易引发大面积地表塌陷，威胁矿山整体安全。

2 矿山地质安全隐患识别体系构建

针对传统隐患识别覆盖面窄、精准度低、主观性强的问题，结合矿山设计标准与安全生产监管要求，构建“现场勘察+动态监测+数据研判”三位一体的隐患识别体系，实现显性隐患全面排查、隐性隐患精准识别。

2.1多维度隐患识别方法

矿山地质隐患识别可采用工程勘察、动态监测与大数据研判三类手段。工程勘察识别主要借助既有地质勘察成果与工程设计文件开展静态风险研判，核对边坡、巷道、采空区等关键设计参数是否满足安全规范，提前发现设计层面带来的安全缺陷，再配合现场实地踏勘，调查岩体构造、裂隙、地下水以及断层分布状况，排查现场已经显现出来的地质隐患。动态监测识别依靠自动化监测设备布设在边坡、巷道与采空区区域，持续采集位移、应力、渗流、沉降等实测数据，依据数据异常变化捕捉岩体微变形、应力集中等不易察觉的早期灾害征兆，辅以视频、遥感手段完成矿山全域可视化排查。大数据研判则归集事故档案、隐患台账、监测及气象资料，挖掘隐患发展规律，锁定高风险区域与灾害易发时段，做到隐患提前预判，结合监管记录分析管理疏漏带来的安全风险，由此构建多维度的矿山隐患识别模式[4]。

2.2隐患分级分类标准

结合《矿山安全规程》《金属非金属矿山安全标准化规范》及监管工作实际，将识别出的地质安全隐患划分为一般隐患、较大隐患、重大隐患三个等级。一般隐患为风险较低、短期不会引发灾害，可立即整改的隐患，如局部岩体轻微风化、微小裂隙发育；较大隐患为风险中等，若持续发展可能引发局部灾害，需限期整改、加强监测的隐患，如边坡局部微小变形、巷道局部支护松动；重大隐患为风险极高，极易引发坍塌、滑坡、突水等重大事故，需立即停产整改的隐患，如边坡大幅开裂、巷道围岩大面积破碎、采空区悬空未治理、含水层突水预兆明显等。隐患分级分类为后续预警模型阈值设定、分级处置提供核心依据。

3 矿山地质安全预警模型构建

基于隐患识别体系，结合矿山地质安全风险演化特征，构建多指标融合的动态分级预警模型，通过指标筛选、权重赋值、模型运算、阈值划分，实现矿山地质安全风险量化评估与精准预警。

3.1模型指标体系构建

遵循科学性、可量化、针对性原则，从地质基础、工程扰动、环境诱因、安全管控四个维度，筛选12项核心指标，构建矿山地质安全预警指标体系，涵盖定性指标与定量指标，全面覆盖隐患致灾核心因素。

地质基础指标包含岩体完整性、裂隙发育程度、水文地质复杂度、地质构造发育情况，反映矿山先天地质风险水平；工程扰动指标包含边坡设计合规度、巷道支护稳定性、开采扰动强度、采空区治理情况，体现矿山工程设计与施工对地质环境的扰动影响；环境诱因指标包含降雨强度、风化程度，是地质灾害的主要外部触发因素；安全管控指标包含隐患整改率、监测设备完好率[5]，反映矿山安全管理水平对风险的防控能力。

3.2指标权重赋值

为规避单一赋值方法的主观性缺陷，采用层次分析法结合现场监管经验综合确定指标权重。首先构建层级结构模型，通过专家打分、工程实践验证，对比各维度指标的相对重要程度，构建判断矩阵，计算各指标权重并完成一致性检验，确保权重科学合理。最终确定工程扰动指标权重最高，占比42%，其中边坡合规度、支护稳定性、采空区治理为核心关键指标，契合矿山人为工程扰动主导地质风险的特征；地质基础指标权重28%、环境诱因指标权重18%、安全管控指标权重12%，权重分布贴合矿山安全生产实际。

3.3预警模型运算公式

采用加权综合评分法构建预警模型，对各指标进行无量纲化处理，统一指标量化标准，消除量纲差异影响。模型综合风险评分计算公式如下：

$$S=\sum_{i=1}^{n} W_i X_i$$

式中：S为矿山地质安全综合风险评分，取值范围0~100；W_i为第i项指标权重；X_i为第i项指标标准化得分；n为指标总数。

根据综合评分结果，结合隐患分级标准与监管要求，划分四级预警等级，实现精准分级预警。Ⅰ级（绿色安全预警）：S≥80，地质条件稳定，无安全隐患，正常生产；Ⅱ级（黄色关注预警）：60≤S＜80，存在一般隐患，风险可控，需加强日常监测与常态化排查；Ⅲ级（橙色预警）：40≤S＜60，存在较大隐患，风险持续上升，需限期整改、加密监测频次、落实专项防控措施；Ⅳ级（红色预警）：S＜40，存在重大地质安全隐患，灾害风险极高，需立即停产，全面排查整治隐患，整改验收合格后方可恢复生产。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

3.4模型运行流程

模型采用“数据采集-数据预处理-指标评分-模型运算-预警发布-闭环处置”的全流程运行模式。首先通过现场勘察、自动化监测、台账统计完成多源数据采集；对原始数据进行清洗、滤波、归一化预处理，剔除异常数据；对照指标评分标准完成各项指标量化打分；代入模型公式计算综合风险评分；根据评分结果匹配预警等级，发布对应预警信息；最后结合预警等级落实分级管控、隐患整改、动态复查措施，形成闭环管理。同时模型支持数据实时更新，可根据矿山开采进度、环境变化动态修正风险评分，实现动态预警。

4 矿山地质安全防控对策建议

结合隐患识别体系与预警模型应用成果，立足矿山设计优化与安全生产监管视角，从源头防控、动态监管、应急处置、体系建设四个方面，提出针对性防控对策。

4.1优化工程设计，从源头规避地质风险

在矿山前期设计阶段，强化地质勘察深度，精准掌握矿山岩体结构、水文地质、构造分布等核心参数，优化边坡坡度、台阶高度、巷道支护、采空区预留等核心设计指标，杜绝不合理设计引发的地质隐患。严格遵循“分层开挖、逐级放坡、边开挖边支护”的设计原则，针对断层破碎带、风化严重区域、含水层富集区等高危区域，优化专项支护设计与排水设计，从源头降低地质灾害发生概率。

4.2完善动态监测，落实常态化预警管控

推动矿山智能化监测体系建设，在边坡、巷道、采空区等高危区域布设自动化监测设备，构建“空天地”一体化监测网络，实现岩体位移、应力、渗流、沉降等数据实时采集、动态分析。全面推广本文构建的预警模型，建立常态化风险评估机制，定期开展地质安全隐患识别与风险研判，根据预警等级落实分级管控措施，实现风险早识别、早预警、早处置。

4.3规范矿山生产行为，提升灾害处置能力

为规范矿山生产作业，应当完善安全生产监管机制，覆盖设计、施工、开采及隐患整改全流程，严肃处置各类违规作业问题。加强基层监管队伍业务培训，提高隐患辨识、模型运用和风险分析水平，推动监管由经验式检查转向数据化精准管控，压实企业主体责任，落实隐患闭环治理。还要依据矿山风险特点修订灾害应急预案，细化各类地质灾害处置流程，常态化组织应急演练，搭建高效预警信息推送渠道，提升现场响应能力，减少灾害带来的损失。

5 结语

本文结合矿山设计与安全监管现场工作实际，开展矿山地质安全隐患识别及预警模型构建研究。研究明确矿山地质隐患分为露天与地下两类，其发育演化由地质条件、工程扰动、外部环境共同耦合作用，工程施工与设计不合理是隐患爆发的主导诱因。研究搭建的三位一体隐患识别体系与分级标准，可全面排查各类隐蔽及显性风险，适配矿山监管工作需求。所构建的多指标动态预警模型，能够精准量化地质安全风险、预判隐患发展规律，经工程应用证实可靠性较强。同时，现有模型仍存在智能化、通用性不足的问题，后续可依托大数据、人工智能等技术优化算法与指标阈值，持续完善矿山风险防控体系，助力矿山安全管理精细化、智能化升级。

[参考文献]

[1]应急管理部.金属非金属矿山安全规程(GB16423-2020)[S].北京:中国标准出版社,2020.

[2]张婴,李亮.露天矿山隐蔽致灾探测技术发展现状及演进路径[J].工程科学学报,2025(06):89-98.

[3]王智能.非煤地下基建矿山井巷致灾因素辨识及分级[J].中国矿业,2024,33(02):112-117.

[4]董陇军.矿山顶板灾害地声监测预警与防控[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,33(05):78-85.

[5]李荟,王浩.基于多源信息融合的矿山边坡滑坡灾害研究现状与展望[J].工矿自动化,2024,50(04):34-41.

作者简介：

陈楠(1987--),男,汉族,宁夏银川人,硕士研究生,高级工程师,研究方向：非煤矿山设计及研究。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.