

# 金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术现状与展望

王晨

河南省自然资源监测和国土整治院

DOI：10.12238/jpm.v5i7.7021

**[摘要]** 近年来，随着金属矿山开采规模的不断扩大，地质灾害频发，给矿山安全生产和周边环境带来了严重威胁。智能监测预警技术作为应对地质灾害的重要手段，受到了广泛关注。本文综述了当前金属矿山地质灾害智能监测预警技术的研究现状，涵盖了传感器技术、遥感技术、物联网、大数据分析及人工智能等方面的进展。通过分析现有技术的应用案例和效果，总结了技术应用中存在的挑战和不足，并对未来发展方向进行了展望，提出了多技术融合、数据共享与平台建设等建议，以期为矿山地质灾害防治提供理论依据和技术支持。

**[关键词]** 金属矿山；地质灾害；监测；预警

## Status quo and prospect of intelligent monitoring and early warning technology of geological disaster risk in metal mine

Wang Chen

Henan Provincial Natural Resources monitoring and land Improvement Institute

**[Abstract]** In recent years, with the continuous expansion of metal mining scale, frequent geological disasters, to a serious threat to the safety of mine production and surrounding environment. Intelligent monitoring and early warning technology, as an important means to deal with geological disasters, has attracted wide attention. This paper summarizes the current research status of intelligent monitoring and early warning technology for geological disasters in metal mines, covering the progress of sensor technology, remote sensing technology, Internet of things, big data analysis and artificial intelligence. By analyzing the application cases and effects of existing technologies, the challenges and deficiencies in the application of technologies are summarized, the future development direction is discussed, and suggestions on multi-technology integration, data sharing and platform construction are put forward, in order to provide theoretical basis and technical support for the prevention and control of mine geological disasters.

**[Key words]** metal mine; geological disaster; monitoring; early warning

### 引言：

金属矿山地质灾害包括滑坡、崩塌、泥石流等，严重威胁着矿山工人的生命财产安全和矿山周边环境的稳定。随着矿山开采深度和规模的增加，地质灾害的频发性和破坏性显著增强。传统的监测和预警方法已难以满足现代矿山安全管理的需求，因此，发展智能化、实时化、精确化的地质灾害监测预警技术成为必然趋势。本文旨在综述当前金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术的研究现状，探讨各类技术手段的应用效果，并提出未来的研究方向，以期为矿山地质灾害的防治提供参考和借鉴。

### 一、金属矿山地质灾害风险概述

#### (一) 金属矿山地质灾害风险定义与主要特征

针对金属矿山领域，不同学科的研究者对其地质灾害风险的关注点不一，导致目前尚未建立统一的地质灾害风险定义标准，通常情况下，金属矿山地质灾害风险可视为，在金属矿山生产过程中，地质构造、地质体形态、岩性等自然因素与采矿、

废料堆放、排水等人为作业相互作用下，可能引起破坏、危害和损失的概率与严重性，其中，破坏（易发性）代表灾害可能的产生概率及其发生频次；危害（危险性）描述灾害事件对人和财产的威胁程度；损失（易损性）则是指灾害事件造成的人员、财产及环境损害的实际状况。地面灾害种类繁多，包括但不限于山体滑坡、岩石爆裂、顶部石块坠落等。金属矿山地质灾害风险主要具备以下三个性质：

1. 普遍性，金属矿山由于地质复杂，岩体在天然和人为因素的持续作用下，发生逐渐的变形和损伤，最终导致地质灾害的发生，因此，在某种意义上，金属矿山地质灾害是广泛存在的。

2. 随机性，尽管金属矿山地质灾害的潜在风险广泛存在，但其具体形成与演变受制于诸多自然和生产相关的影响因素，这使得地质灾害的发生时机、地点、破坏程度以及由此造成的损害结果都呈现出不可预知性，这一现象主要是由岩石的内部结构和性质的不均匀性、在不同方向上的性质差异，以及外部

环境影响的不可预测性共同造成的。

3. 时滞性，在金属矿山中，地质灾害的发生通常与采矿作业的进行紧密相关，随着开采的深入，地质构造和地层压力会受到影响和改变，进而影响灾害发生的时间，然而，实际工程案例显示，地质灾害往往在爆破等采矿作业之后出现，呈现出明显的时间延迟特点，这主要是因为灾害的发生是一个渐进的过程，涉及材料的蠕变损伤累积以及裂隙网络的逐渐形成。

## (二) 金属矿山地质灾害类型及影响

1. 滑坡，边坡的岩土体，受自重、地表及地下水活动、雨水浸泡、爆破振动、人工切坡等因素影响，在重力作用下，会沿着一定的软弱面或软弱带，整体或分散地沿坡向下滑动，这就是滑坡现象，露天矿区深受滑坡灾害的困扰，该灾害几乎横亘在整个矿山生产流程之中，露天矿场运营中，为了提升经济效益，通常会采取尽可能使边坡更加陡峭的方式来减少剥离与开采的比率，但是，边坡如果过于陡峭，便会提升发生滑坡的可能性，这无疑会提高维护边坡的费用<sup>[1]</sup>。

2. 顶部岩层失稳大片坍塌，伴随侧壁滑坡，采动地压作用下，巷道与采场顶板及边帮围岩出现冒落和破坏现象，称为冒顶片帮，随着地下通道的开辟与采出作业不断向前延伸，揭露的表面积逐步扩大，围岩因承受力重新分配而发生形变与破坏，其中，由于顶部围岩受损导致的顶部岩层坠落现象称为冒顶，若此坠落发生在巷道的两侧，则称为片帮现象。地下开采作业中，顶部岩层脱落所导致的伤亡事件，占到了矿难总数的约三成，矿井中顶板坍塌常常出现在断层带、松散的第四系岩层、不稳定的岩层接触面、侵入岩与围岩交界处及岩体结构缺陷多的区域，特别是在稳定性较差的矿岩区域，以及那些含有软弱夹层的位置，大规模的塌方事故易于发生。

3. 突涌水，地下开采作业中，断裂带或松散岩体地带，常常遭遇大量地下水突然涌入作业区域的现象，这就是所谓的突涌水，其破坏力巨大，违规或非正常采矿活动常常是导致矿井突水的主要原因，与采矿过程有着紧密的联系，在进行矿产资源挖掘过程中，人为干扰常常导致围岩遭受损伤与断裂，这可能会与前方的水层建立水力联系，从而增加了突发性涌水的风险。

4. 岩爆，在高应力作用下，脆性围岩的弹性变形能迅速释放，导致岩石突发破裂，伴随着物体飞出、声响产生，甚至可能引发地震等剧烈破坏现象，地下深井开采领域中，岩爆现象已成为一项全球性的技术挑战，开采深度增加导致地压活动加剧，其强度明显提升，并展现出能量瞬间大量释放的特性，这体现了其突发性及巨大的破坏力量。

## 二、金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术现状

随着金属矿山开采活动的加剧，地质灾害的频发性和严重性日益增加，传统监测手段已不能满足当前需求。智能监测预警技术的出现，为金属矿山地质灾害的监测与预警提供了新的解决方案。本文从传感器技术、遥感技术、物联网、大数据分析及人工智能等方面，详细探讨当前金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术的现状。

### (一) 传感器技术

地质灾害的智能监测预警，离不开传感器技术的支撑，这

项技术能即时捕捉地质体的物理和化学变动，并供应精确的灾害信息，目前，普遍应用的感应器主要涵盖应变感应器，其功能在于监测矿体应变的变动，从而评估潜在的滑坡风险或地面塌陷状况，比如，采用高灵敏度且能抵御电磁干扰的光纤布拉格光栅传感器，在矿山区域对地质灾害进行有效监测。用于跟踪矿山斜坡与堤坝稳定性指标的仪器，能够精确捕捉这些结构物的倾斜状态的变化程度，实时跟踪地质倾斜的变化，以此提前预报可能发生的土体滑动灾害<sup>[2]</sup>。在矿山区域，部署用于监测微小地震波动的传感设备，以掌握地震活动情况，采用高灵敏度传感器对岩石承受压力时产生的细微波动进行监测，据此提前发出警报，预防地壳运动带来的灾害，矿井中用以检测有害气体如甲烷、二氧化碳等浓度的传感器，矿井中这类气体的浓度异常波动，往往是矿井内部诸如煤尘爆炸等突发灾害即将来临的征兆。

### (二) 遥感技术

采用卫星和无人机等高科技手段，遥感技术能迅速广泛地获取矿山及其地质环境的信息，主要遥感技术涵盖合成孔径雷达 (SAR)，它通过发射及接收微波信号，具备穿透云层和植被的能力，从而获取高分辨率的地表形变监测数据，采用差分合成孔径雷达干涉测量 (DInSAR) 技术，对多个时相的合成孔径雷达图像进行干涉处理，能够精确地测定地表形变情况，这项技术在监测矿山区域的地面沉降及滑坡现象中，有着广泛的应用。采用光学遥感技术，借助光学卫星捕捉矿山区域的高清图像，通过对这些图像的深入分析，实时监控地面形变，诸如滑坡、崩塌等自然灾害，利用高时间分辨率的光学遥感技术，适宜于开展持续性的监测工作，利用装有高清晰度相机或激光探测与测距系统的无人机，能迅速捕获矿山区域立体的地形信息，无人机遥感技术以其低成本、高灵活性著称，特别适合于小规模、高频率的灾害观察工作。

### (三) 物联网技术

通过将不同类型的传感器接入网络，物联网技术能够对数据进行即时的搜集、传送与加工，在矿业领域，物联网技术扮演着至关重要的角色，尤其是在地质灾害的监测与预警方面，其核心关键技术之一的无线传感器网络，是由众多传感器节点构成的复杂体系，它们能够对矿山环境进行实时监测，捕捉各种关键参数，无线传感网络以其低能耗和自组网特性，非常适合在矿山场景中使用。将数据处理和分析的任务分散至接近数据生成地的边缘节点，边缘计算这种方式在物联网体系中得以应用，可以提升数据处理的速度，同时显著降低数据传输所造成的延时，边缘计算技术能使矿山地质灾害的监控实现即时报警，像 LoRa、NB-IoT 这样的低功耗广域网技术，适合于广阔区域内进行能耗低的数据发送，在矿区地质灾害的监控实践中，LPWAN 通讯技术能有效地实现远距离的数据传输，其广泛的信号覆盖特别适用于多变的地形条件。

### (四) 大数据分析

随着矿区地质灾害预警设备及感测器的增多，矿区地质灾害监测领域数据的量级出现了爆发性增长，利用先进的大数据分析手段，可以对这些庞杂的数据进行深入挖掘，提炼出关键信息，进而为灾害预防和警报系统提供坚实的数据支撑，关键

的大数据分析手段涵盖了数据挖掘等技术,通过深入分析历史监测数据,可以发掘出潜在的危害模式和规律<sup>[3]</sup>。频繁的小规模地壳运动或许意味着重大地质灾害的即将来临,借助机器学习技术,通过特定的算法对检测得到的数据进行构建模型与未来趋势推断,常见的计算机解题方法有支持向量机(SVM)、随机森林、神经网络等,这些计算机程序能自行分析并辨认数据里的异常迹象,从而达到高效地进行灾害防范的目的,开展基于空间与时间双重维度的数据分析,能够帮助我们辨识灾害在时间和空间上的变化规律,通过对时空数据的深度分析,可以有效提升灾害预测的精准度和信赖度。

#### (五) 人工智能技术

在矿业领域,人工智能技术正日益凸显其在地质灾害监测预警工作中的关键角色,借助深度学习等前沿算法,智能化监测预警能力得到显著增强,具体运用范围涵盖了利用深度学习的方法,对大量监测数据进行自动化的特征筛选与归类处理,例如,运用卷积神经网络(CNN)可以从遥感影像自动辨别出滑坡区域,这样极大地提升了监测工作的效率和精准度。以人工智能为核心的决策系统,能够汇总并分析来自多个渠道的数据,进而对灾害进行预警并给出紧急应对的策略,利用传感器收集的数据、气象信息以及历史上的灾害资料,智能决策系统能够即时评估灾害的可能性,并给出相应的解决策略,自动化监测工具,比如无人机和自动驾驶汽车,搭载了智能感应器和人工智能技术,可以独立完成监测工作,搜集精确的灾害信息,在高风险地带,自动化驾驶系统能够发挥其监测方面的独到之处。

### 三、矿山地质灾害风险智能监测预警技术的未来展望

#### (一) 多技术融合

未来的地灾防范将着重于多样技术的整合,依托各种技术方法,构建更为广泛和立体的灾害监控与预警网络,融合传感器与遥感技术,开展地表及地下信息的同步监测,通过整合地面与卫星数据实现全面观测,融合光纤传感器的精确数据和合成孔径雷达(SAR)影像的广泛覆盖能力,可以更精确地捕获地质灾害的初期迹象,物联网与边缘计算的结合,拓宽了物联网技术的应用范围,边缘计算的加入提升了数据处理的实时性和智能化程度<sup>[4]</sup>。身处矿区这一多变场景,边缘计算能迅速处理监测数据,实时发出灾害预警,将无人机与机器人技术进行整合,未来的无人机与地面机器人将携手合作,打造一个空中与地面相结合的监测体系。

#### (二) 人工智能的深入应用

在地质灾害的监测和预警领域,人工智能的应用展现出极大的潜力,将来,我们将会更深入地探索和运用人工智能技术,以提升监测预警系统的智能程度,将来的研究着力于精进深度学习算法,以更好地匹配地质灾害监测的特定要求,构建更复杂神经网络,增强模型预测的准确度和适应力,未来,以人工智能为基础的智能决策支持系统将普遍被投入使用。这些工具能汇总各类数据进行分析,进而给出科学的灾害预报和紧急应对计划,结合气象、地质以及历史灾祸信息,打造智能化判断框架,为防灾工作提供精准方向。

#### (三) 大数据与云计算

将来,大数据与云计算技术将更上一层楼,推进地质灾害的监测与预警工作,通过这两种技术的结合应用,能够实现灾害预警的高效率,未来的灾害监控体系,将依托大数据挖掘技术,探究并揭示灾害的本质特征与运行规律,分析大量监测数据,发现可能发生的灾害迹象,从而给出初步警报,依托云技术的平台,能展现出卓越的数据处理和储存功能,能够应对大规模数据的即时解析与加工<sup>[5]</sup>。在将来,众多监测结果将被传送至远程服务器,通过远程服务器计算能力进行高效处理,以此提升预警系统的反应速度和准确度。

#### (四) 5G 及下一代通信技术

5G 及其后续通信技术的运用,将为地质灾害预警监测带来更快速、稳定的通信支持,助力监测系统向实时和智能化的转型升级,5G 技术以其大带宽和短时延的优势,能够承载广泛的传感器网络数据传送需求,利用 5G 技术,能在矿山地质灾害监测领域实现数据的即时传递,从而极大提升监测数据即时性和精确度,边缘计算与 5G 技术相结合,使得 5G 网络更有效地支撑边缘计算的应用,通过把数据处理任务分配到接近数据源的边缘节点,降低了数据传输的延时,从而提高了监测预警的实时性能,物联网设备间的互联互通,依托 5G 网络的高效支持,能够确保矿山环境中各类传感器的通信稳定,进而促进智能监测设备的广泛应用和推广。

#### 结语:

近年来,针对金属矿山地质灾害的智能监测预警技术得到了长足发展,该技术集成了传感器、遥感、物联网、大数据分析以及人工智能等多个领域的先进方法,技术的持续进步及应用,为矿山地质灾害的预防与治理带来了更科学、更高效的策略,然而,随着矿产资源的深度挖掘与生态环境的变迁难以预料,资源勘探领域的监控与预警技术正遭遇众多考验的同时,亦迎来了发展的新时机。未来进步的方向在于多项技术的整合,最大限度地发挥人工智能和大数据分析的长处,进一步提高监测预警的智能化程度,随着 5G 及未来通信技术、增强现实、虚拟现实等尖端科技的融入,地质灾害监测预警系统将迎来革新与升级,打造一个全面整合的数据处理系统,使得来自不同来源的数据能够即时混合并接受智能化的处理,从而显著增强对预警信号的精确识别与信赖度。

#### [参考文献]

- [1]唐勤.水工环地质技术在矿山地质灾害防治中的应用[J].工程建设与设计,2021,(14):97-99.DOI:10.13616/j.cnki.gcsysj.2021.07.230.
- [2]刘雷.甘肃玉门市矿山地质灾害防治工程方案设计[J].中国金属通报,2020,(09):148-149.
- [3]程力,刘焕新,朱明德,等.金属矿地下采空区问题研究现状与展望[J].黄金科学技术,2020,28(01):70-81.
- [4]咎军,雷刚.矿山设备综合智能预警控制系统研发应用[J].工业安全与环保,2017,43(04):44-47.
- [5]朱万成,徐晓冬,李磊,等.金属矿山地质灾害风险智能监测预警技术现状与展望[J].金属矿山,2024,(01):20-44.DOI:10.19614/j.cnki.jsks.202401003.