

矿井开采中岩石稳定性监测与预警技术

王斌

山西平定古州东升阳胜煤业有限公司, 中国·山西 平定 045200

摘要: 本研究探讨了矿井开采中岩石稳定性监测与预警技术的关键发展方向和实际应用。通过分析传统与现代监测方法的结合, 展示了微震监测、光纤传感及人工智能技术在矿井岩体失稳预警中的作用。研究还展望了未来智能化、自动化监测系统的发展趋势, 强调大数据与人工智能在提高预测精度和风险控制中的潜力。此技术的应用将为矿井安全提供更精准的保障, 推动矿山作业向智能化管理转型。

关键词: 岩石稳定性; 预警技术

Monitoring and Early Warning Technology for Rock Stability in Mining Operations

Bin Wang

Shanxi Pingding Guzhuo Dongsheng Yangsheng Coal Industry Co., Ltd., Pingding, Shanxi, 045200, China

Abstract: This study explores the key development directions and practical applications of rock stability monitoring and early warning technology in mining. By analyzing the combination of traditional and modern monitoring methods, the role of microseismic monitoring, fiber optic sensing, and artificial intelligence technology in early warning of mine rock instability is demonstrated. The study also looks forward to the development trend of intelligent and automated monitoring systems in the future, emphasizing the potential of big data and artificial intelligence in improving prediction accuracy and risk control. The application of this technology will provide more accurate guarantees for mine safety and promote the transformation of mining operations towards intelligent management.

Keywords: rock stability; warning technology

0 前言

在矿井开采过程中, 岩石稳定性是保证矿山安全运营的关键因素之一。岩体的稳定性直接关系到矿工的生命安全、设备的正常运转以及矿井的经济效益。如果岩体出现不稳定情况, 如局部塌方、地表沉降或大型岩层滑移, 不仅会严重威胁矿井生产活动, 还可能导致重大人员伤亡事故。因此, 如何有效监测和预测矿井岩体的稳定性, 成为矿井安全管理中的重要议题。

矿井开采, 特别是在深部开采过程中, 岩体处于高应力状态, 长期承受采矿活动带来的扰动效应, 极易出现应力集中、裂缝扩展和岩体失稳等问题。随着开采深度的增加, 岩体的力学特性会发生显著变化, 导致其稳定性受到更大的威胁。矿井内外部条件的变化, 如地下水渗透、地震影响等, 也会对岩石稳定性产生重大影响。因此矿井开采活动中的岩石失稳具有突发性和不可预测性, 增加了管理和安全监控的难度。

1 岩石稳定性监测的基础

岩石稳定性监测的基础建立在对岩石力学特性及其失稳机理的深入理解之上。岩石力学是研究岩体在外力作用下的应力—应变行为的学科, 它为监测和分析矿井岩石稳定性提供了理论依据。矿井中的岩体结构通常是复杂的, 由于地

下压力、岩体本身的性质以及矿井开采活动的影响, 岩体内部的应力场会发生变化。这种变化可能导致局部应力集中, 诱发裂缝扩展和岩体破裂, 从而引发岩石失稳。因此, 理解岩体在不同应力条件下的力学行为, 对有效监测岩石稳定性具有重要意义。

岩体的失稳过程通常是渐进的, 经历了弹性变形、塑性变形和最终破裂的阶段。每个阶段都有不同的物理表现, 如变形速度的变化、裂缝的扩展以及微震活动的频率和强度增加。这些特征为监测岩体稳定性提供了重要参考。通过分析岩体变形和破裂的阶段性特征, 可以识别潜在的失稳风险, 并在岩体发生明显破坏前采取预防措施。

岩石的稳定性受岩体结构特征的显著影响, 尤其是岩体中存在的节理、裂缝和层理等不连续面的分布和发展情况。这些不连续面削弱了岩体的整体强度, 并可能成为失稳的起点。在开采过程中, 岩体结构中的应力集中区域可能引发裂缝的扩展, 进而导致失稳。

为了确保矿井岩体稳定性的有效监测, 需要在岩体中布设传感器以实时跟踪应力、变形和裂缝的发展。岩石的应力变化、变形行为以及微震活动都可以作为岩体失稳的早期信号, 通过这些监测数据的积累和分析, 可以形成对岩体稳定性变化的深入理解, 并为失稳风险的预警提供依据。

2 监测技术与方法

岩石稳定性监测技术涵盖了从传统的物理监测手段到现代化的智能系统,目标是通过实时数据采集和分析,掌握矿井开采过程中岩体的变化状态。传统的监测方法依然在矿井安全管理中发挥着基础性作用^[1]。应变计和应力传感器是最常用的工具,它们能够直接测量岩体中的应力和应变变化,从而评估岩石的稳定性。这些设备通常布设在矿井的关键区域,通过连续的数据采集,监控岩体的物理响应。与此同时,裂缝监测和表面位移观测也常用于检测岩体的表层变化,通过测量岩石表面的细微位移和裂缝扩展,提前发现潜在的失稳风险。

除了传统手段,现代监测技术为岩体稳定性监控提供了更为精确和高效的工具。微震监测系统是当前广泛应用的技术之一,它通过捕捉岩体内部的微震活动,分析岩石在开采过程中因应力集中而发生的微破裂。微震信号的频率、强度和空间分布能够反映岩体的应力变化情况,为预测岩石失稳提供了早期预警信号。地下实时成像技术也已广泛应用于矿井监测中,它通过对地下岩层的成像,提供岩体变形的三维可视化信息,帮助矿山管理者直观了解岩体的变形模式及发展趋势。

光纤传感技术也逐渐成为岩石稳定性监测的重要手段。光纤传感器具有灵敏度高、抗干扰能力强的特点,能够对岩体应变、温度和振动等参数进行精确测量,特别适用于复杂环境中的大规模监测。在矿井开采过程中,光纤传感器可以沿着巷道布设,实时记录岩体的微小变化,并通过数据分析识别潜在的稳定性问题。

无线传感网络技术近年来也逐渐得到广泛应用,它通过在矿区布置大量无线传感器,形成一个实时监测网络。这种技术克服了传统有线监测的局限性,能够在更广泛的区域内采集数据。无线传感器网络不仅提高了数据传输的效率,还能够实现多源数据的同步采集与融合,为岩体稳定性评估提供了更多的实时数据支持。通过多源数据的融合分析,监测系统能够更精确地预测岩体的变形和失稳,显著提升了预警系统的准确性和响应速度。

现代监测技术与方法的结合,使得矿井岩石稳定性的监控变得更加高效、全面和智能化。通过不断优化监测手段,并结合多源数据和实时分析,矿井管理者能够对岩体的稳定性变化做出更加精准的评估,并为潜在的风险提供及时的预警。

3 岩石稳定性预警技术

岩石稳定性预警技术的核心在于通过对监测数据的分析,预测岩体失稳的可能性和时间,从而为矿井管理者提供足够的时间采取应急措施。现代预警技术结合了数据分析、模型预测和人工智能方法,能够有效提高对岩体失稳的预测准确性与及时性。

基于数据分析的预警模型是当前矿井岩石稳定性预警的主流方法之一。通过对岩石应力、应变、微震活动等多种监测数据的长期积累和分析,建立预测模型,评估岩体在不同应力条件下的变化趋势。应力—应变模型可以模拟岩石在外部荷载作用下的变形行为,识别出岩体从弹性变形向塑性变形和最终失稳破坏的过渡过程。多参数数据的整合分析则通过将应力、应变、微震、温度等数据进行综合处理,寻找岩石失稳前的典型信号,形成多维度的预警依据。

随着人工智能技术的快速发展,机器学习和深度学习算法也逐渐应用于岩石稳定性预警中。通过训练深度学习模型,AI 可以从海量监测数据中识别出岩体失稳的早期信号,并预测其发展趋势。例如,微震监测数据可以通过卷积神经网络等深度学习模型进行处理,分析微震活动的频率和空间分布,预测岩体是否接近失稳状态。基于人工智能的预警系统可以不断自我学习和优化,随着监测数据的积累,系统的预测精度和响应速度逐步提升。

预警系统的关键在于合理设定预警阈值和响应机制。岩体失稳的预警通常基于关键参数的监测结果,如应力水平、裂缝扩展速度、微震活动强度等。当这些参数达到预定的阈值时,预警系统会发出不同级别的预警信号。预警阈值的设定必须基于大量历史数据和经验,通过对岩体失稳过程的深入分析,确定不同阶段的预警指标和相应的阈值范围。此外,预警级别的划分也非常重要。通常情况下,预警级别可以分为低、中、高三个级别,分别对应岩体的不同稳定状态。每个预警级别都有对应的应急响应措施,如低级别预警可能只需加强监测,而高级别预警则可能需要立即停止开采活动并撤离人员。

为了确保预警系统的有效性,预警技术不仅需要精准的监测数据和科学的阈值设定,还需要灵活的应急响应机制。预警系统一旦触发,矿井管理者必须快速评估情况并作出决策,实施必要的防范措施,如加固岩体、调整开采计划或疏散人员等。现代化的预警系统能够通过无线网络将预警信号实时传输至指挥中心,使矿井管理人员能够迅速掌握岩体状况并采取应对措施^[2]。通过不断优化模型、引入更多数据源以及提升系统的自我学习能力,预警系统将能够更加准确地预测岩体失稳,并为矿井安全管理提供更有力的支持。

4 技术应用与案例分析

在中国,某大型煤矿率先应用了微震监测系统与光纤传感技术相结合的监测网络。该矿井处于深部开采阶段,岩体应力复杂,传统监测手段难以准确掌握地下岩体的变化状态。通过布设微震监测设备,矿井管理者能够实时捕捉到岩体内部的微震信号,分析应力集中区域的裂缝扩展情况。光纤传感技术则沿着矿井巷道布设,监测巷道内的变形与位移情况。这一系统通过多参数监测数据的融合,实现了对岩体稳定性的全方位实时监测。当系统发现某一区域的微震活动

频率显著上升时,立即触发预警,矿井管理者在预警发出后快速调整了开采计划,避免了岩体失稳带来的潜在风险。

在国外,智利某铜矿由于深部开采引发了多次岩体失稳风险。为了提高矿井安全,该矿井引入了基于人工智能的岩石稳定性预警系统。该系统利用地震波监测、微震信号和地下成像数据,结合深度学习算法进行智能分析。通过对历史监测数据的学习,系统能够提前识别岩体失稳的潜在信号并预测其发生时间。预警系统在一次地下采矿活动中检测到微震活动的显著增强,并通过 AI 模型预测出岩体失稳的可能性。基于预警信息,矿井管理人员立即暂停了开采作业并撤离了现场人员,最终成功避免了一次重大事故。

另一个成功案例来自南非的一个金矿。该矿井面临着复杂的地质条件和极高的开采深度,岩石破裂风险极高。通过部署地下雷达系统与无线传感网络,矿井对地下岩层进行了长期监控。地下雷达系统能够实时提供岩层变形的三维成像数据,而无线传感器则采集了地下不同深度的温度、应力和应变等数据。这些数据通过无线网络传输至指挥中心,结合地震波分析和位移监测,管理者能够对岩层的稳定性做出及时判断。该系统成功预测了一次岩层滑移,并通过提前采取加固措施,确保了矿井的持续安全运行。

虽然岩石稳定性监测与预警技术取得了显著成效,但在实际应用中依然存在一些挑战。矿井地质条件的复杂性使得数据采集和分析的难度增大,尤其是在深部开采环境下,监测设备的布设和维护成本较高。监测数据的精准性和时效性也是技术应用中的重要难题。面对庞大的监测数据,如何快速分析并做出准确的预警决策是现有系统需要持续优化的方面。

为了应对这些挑战,许多矿井正在采用更加智能化的监测系统,并通过引入大数据分析和自动化预警机制来提高系统的响应速度和预测准确性。例如,一些矿井通过增强传感器网络的覆盖范围,提高数据采集的密度,同时引入更为精细的数据分析模型,以确保岩体失稳风险能够被尽早识别。

5 未来发展趋势

随着科技的快速进步,岩石稳定性监测与预警技术在矿井开采中的应用将呈现智能化、自动化和数据驱动的趋势。未来的监测系统将更加依赖于先进的传感技术、大数据分析和人工智能的深度融合,推动矿井安全管理向全方位、实时化的方向发展。

智能化监测系统的广泛应用是未来发展的重要方向。随着传感技术的不断进步,矿井中的传感器网络将更加密集和多样化,能够捕捉岩体内部和外部的更多物理参数。这

些传感器不仅会覆盖矿井的关键区域,还会实现更高精度的应力、应变、位移和微震活动的监测。同时,智能传感器可以通过自我校准和自我维护,减少人力的干预,保证长期稳定运行。智能监测系统将通过边缘计算技术和物联网实现实时数据处理,确保监测结果的即时性和准确性。

大数据与人工智能的结合将大幅提升预警系统的预测能力。未来,岩石稳定性预警系统将通过更复杂的算法和模型来处理大量的监测数据。大数据分析能够帮助系统从海量数据中提取有价值的模式和趋势,通过历史数据的积累,系统会不断优化其预警阈值和算法,提供更加精准的风险预测。人工智能,特别是深度学习技术,将进一步应用于岩石失稳的早期信号识别中。通过对多维数据的训练,AI 将能识别出人类无法直接感知的微小变化,并提前预测岩体失稳的可能性和时间。这种数据驱动的预警系统将具备高度的灵活性和自我学习能力,能够根据新的监测数据自动调整模型,提高预警的准确性。

自动化预警与实时响应系统也将在未来的矿井安全管理中占据重要地位。随着无人化技术的发展,自动化监测设备将能自主完成数据采集、传输和初步分析。未来的矿井监测系统将与矿井管理平台无缝集成,一旦检测到岩体稳定性出现异常,系统将自动触发预警机制并执行相应的应急措施,如停止开采、撤离人员或调整设备运行状态。通过引入自适应控制机制,监测系统可以根据不同的风险等级自动调整矿井作业计划,确保矿工安全和矿井运行效率的平衡。

未来的岩石稳定性监测与预警系统将更具协作性,推动矿井管理向全球化和标准化发展。各矿井之间将能够共享监测数据和预警经验,形成一个全球化的矿井安全信息网络。这种协作方式不仅能提高个体矿井的风险预测能力,还能形成一个全球的安全预警平台。通过标准化的数据接口和分析方法,跨国矿业企业能够统一管理不同地区的矿井安全,并通过全球经验分享和数据对比,进一步提升系统的精确度和适应性。

同时,绿色矿山和可持续发展理念将进一步推动监测与预警技术的发展。未来的矿井安全系统将不仅关注岩石稳定性,还将与环保监测相结合,全面评估矿井开采对环境的影响。这种系统不仅能降低岩体失稳风险,还能减少矿井对生态环境的破坏,从而实现矿山开采的可持续发展。

参考文献:

- [1] 沈宁,宗亮,李萌,等.岩体扰动对岩石边坡稳定性影响[J].粉煤灰综合利用,2024,38(4):40-46+58.
- [2] 贾住平,郑禄璟,金开玥,等.超大断面破碎软岩硐室围岩稳定性及控制技术研究[J].黄金,2024,45(9):1-7.