

金属矿山微震风险管理实践综述

Summary of Microseismic Risk Management Practice in Metal Mines

张少杰, 刘育明, 张爱民, 郭雷, 杨志国(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:随着我国金属矿山开采深度的不断增加, 开采引发的微震风险问题变得十分突出。本文对国外微震风险管理实践方面的经验进行了综述, 简要介绍了实践活动中的一些细节问题, 期望能为我国金属矿山微震风险管理实践提供借鉴和参考。

关键词:金属矿山; 微震风险; 微震响应; 风险评估

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)03-0043-04

Abstract: With the increasing mining depth of metal mines in China, the micro-seismic risk caused by mining has become significantly prominent. This paper summarizes the experience of micro-seismic risk management in foreign countries and briefly introduces some details in practical implementation in the hope of providing reference for the practice of micro-seismic risk management in metal mines in China.

Key words: metal mines; micro-seismic risk; micro-seismic response; risk evaluation

1 前言

在地压显现剧烈的地下矿山中, 微震风险通常被归类为极端风险, 严重时可能导致多人伤亡和矿山长时间的关闭, 因此, 微震风险的主动管理对于在地压显现剧烈条件下生产作业的矿山至关重要^[1-6]。本文主要对国外微震风险管理实践方面的经验进行概述和介绍, 为国内深井矿山微震风险管理实践提供借鉴参考。

2 微震风险及其管理过程

澳大利亚学者 Owen 等提出微震风险可用下式表示: 微震风险 = 微震灾害 × 岩体损伤概率 × 暴露, 式中, 微震灾害是指某震源在给定时间段内发生某一震级微震事件的平均概率, 包含三个要素: 微震事件发生的位置、微震事件的等级和微震事件的发生概率。

岩体损伤概率是指考虑到局部场地特征和微震灾害的邻近性, 在给定位置岩体发生损伤的可能性。

暴露是指处于风险中的采矿元素, 通常指的是矿山劳动力, 但也可能包括矿山设备和资源储量等。

澳大利亚学者 Potvin 和 Wesseloo 等将微震风险

管理过程划分为四个层次: (1) 数据收集。(2) 开采微震响应。(3) 控制措施。(4) 微震风险评估。每一个层次包含若干个单元, 每一单元再包含若干实践活动(进一步细分为标准实践活动和高级实践活动)。

矿山的微震风险管理实践是矿山现场微震事件强度和复杂性等众多因素的函数。对于微震风险较低的矿山来说, 实施标准实践活动即可。对于微震风险较高的矿山, 则宜实施高级实践活动。以数值模拟分析为例, 其标准实践活动和高级实践活动的汇总表见表 1。数值模拟分析主要包含三个方面: ①对比模型; ②反分析; ③预测模型。

2.1 数据收集

需要注意的是, 采矿诱发微震风险的管理需要来自不同数据源、不同类型的多种数据, 而不仅仅是微震数据。数据收集层有四个组成部分: 地质、采矿、岩土和微震。除微震数据外, 所有其他数据通常以某种形式在大多数矿区已经存在。由于收集这些现有数据的目的是微震管理, 因此, 要充分利用这些数据, 通常需要解决许多挑战。

例如, 为了探明矿体储量和资源, 在矿山开发的勘探和早期阶段开发了地质模型。构造地质学家在矿山现场时, 他们的工作通常致力于新的勘探目标, 对于已有的开采矿体模型的更新、细化工作则往往容易忽视。许多矿山井下巷道广泛使用喷射混凝土支护, 不仅妨碍了岩体条件调查的可视性, 而且妨碍

[作者简介] 张少杰(1984-), 男, 博士后, 高级工程师, 主要从事矿山工程咨询与设计研究工作。

[引用格式] 张少杰, 刘育明, 张爱民, 等. 金属矿山微震风险管理实践综述[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 43-46.

表1 数值模拟分析的标准实践活动和高级实践活动汇总表

	标准实践活动	高级实践活动
对比模型	采用3D弹性模型,对比不同开采顺序下的主要构造的剪切应力。 获得不同开采顺序下的应力、能量和位移准则。	对比不同开采顺序下的预期微震响应。 基于不同的开采设计对岩体和暴露工作面在不同加载顺序下的影响作用进行评估
反分析	揭示导致先前的微震事件的应力条件。 考虑观察到的岩体力学行为和预期是否匹配;如果需要的话,对输入的参数进行评述	基于记录的无论是否导致破坏的大的微震事件,对断层强度特性进行反分析。 通过子模型取证确认岩体破坏机理
预测模型	利用建立的关系对随着开采过程的潜在条件进行评估。 在模型结果中识别和观测到的行为相关的触发水平	在弹塑性模型中对将来开采顺序的应力、破坏和释放能量进行评估。 使用 Salamon-Linkow 模型对将来的微震响应、频率和事件大小分布进行评估

了生产矿山结构模型的持续细化和验证。地质模型被开发和维护仅是从矿化角度出发的,而岩土特性(结构、宽度、填充物特性)则通常被忽略了。

采矿数据可能不完整,缺乏一些细节,这些细节对微震分析十分重要,但生产人员并不十分重视。对于高级实践活动来说,则需要记录每次爆破的坐标、精确启动时间、使用的炸药吨数、爆破类型(天井、切割槽、一步或二步采场、拉底和放矿漏斗)。这些数据对于研究爆破微震响应和爆破后作业人员撤出时间的优化至关重要,但由于其对生产目的来说并不重要,因此往往并没有被完整记录。

除了爆破信息记录不完整外,生产停滞数据很少以有用的方式存储以供分析。生产停滞率通常被用作微震活动的潜在解译,但该数据并未被记录,未能被用来正确分析微震活动性和开采率之间的关系。

开采区域的几何信息通常未被完整记录存档。当前的掘进尺寸和空区的几何信息基本上会被记录存档,但前几个月和前几年的开采区域的几何信息则并没有被普遍地记录存档。矿山开采区域的几何状态信息不仅对微震活动的发生具有关键的影响作用,而且对岩爆孕育、发生机理的研究分析也具有相当重要的作用。

微震数据的质量保证/质量检查(QA/QC)对于微震风险管理至关重要。由于微震数据的质量保证/质量检查对微震分析结果的影响并不总是显而易见的,因此,微震数据的质量保证/质量检查经常被忽视。Morkel 和 Wesseloo 发现,他们调查的20个地点中有19个由于微震系统设置的变化,导致微震震源参数值发生了较大变化。这些变化不是由岩体的自然变化引起的,而是由较差的QA/QC实践引入的。微震事件的记录是一个复杂的过程,该过程

可分为以下步骤:(1)波在岩体中的传播。(2)波被微震传感器拾取到。(3)波被记录、传送至微震服务器。(4)通过算法和人工波形处理计算震源参数。(5)对震源参数进一步可视化和分析。上述每一个步骤都为错误和不确定性留有若干空间。因此,微震系统管理人员在确保微震数据质量方面面临着诸多挑战,记录的微震数据的系统误差也并不少见。

拥有一个共同的平台来实现不同数据库间的交互和比较也是一个挑战。数据收集方面的高级实践将拥有广泛的数据,在数据库中进行合理的组织,具有良好的可视化效果,便于在所有数据库的多个分析中轻松访问和定期使用。

2.2 开采微震响应

开采微震响应是在采取控制措施将微震风险降低到可接受的水平之前,对矿山现场的震源进行识别、理解,对微震灾害进行定量化研究。开采微震响应研究的主要方法有:(1)数值模型分析。(2)地震学模型分析(震源位置、震源参数、震源机制、层析成像)。(3)日常的观测分析和先前的开采微震响应案例研究。

数值模型分析和地震学模型分析都属于高度专业化的领域。矿山企业非常依赖外部专家顾问来完成这些分析任务。日常观测和案例研究调查主要由矿山现场人员完成。因此,我们三个信息来源,通常由三个不同的群体产生,需要整合并转化为知识。其中两个来源是模型的结果,第三个来源是观测结果。由于微震监测的间接性质,包括根据理论模型和假设进行的多层次的处理和解释,因此必须认识到,微震监测过程产生的是模型,而不是数据。微震风险管理实践中常会出现的情况:对微震灾害的理解和预测,由三个信息源中的一个主导,而其他两个

信息源的输入不足。在许多情况下,对微震危险的解释要么由数值模型主导,要么由地震学模型主导。由于缺乏矿山现场的观测资源,从案例研究中获得的观察结果和经验教训通常也相对较差。理想情况是,这两种模型应该相互比较,更重要的是,与现实(观测和案例研究)深度关联,以便在一定程度上了解微震震源以及这些震源对开采的影响。只有这样,微震危险性的预测才能有一定的可信度。这种情况只能在矿山人员既对数值模拟、地震学分析技术有充分了解,而且对现场观测也非常熟悉的情况下才会发生。另外这样的人员还必须有专门的时间来研究模型,并产生这些基本认知、判断和模型预测。

采用高级微震风险管理实践的操作往往强调定期进行调查,并作为对微震事件变化的响应。当发生重大微震事件时,将使用所有可用数据和分析技术进行辩证分析,以调查微震事件的根本原因,以及根据最近的事态发展,判断当前的控制措施是否足够。

2.3 控制措施

微震风险控制措施主要有:(1)支护加固。(2)减少作业人员暴露于危险区域。(3)矿山设计变更。(4)改善岩体条件。

2.3.1 支护加固

动态载荷下的支护加固被视为减轻微震事件后果的主要措施。新的支护加固产品被不断地研发出来并在矿山现场试验应用,以提高对动态载荷下支护加固措施的认识,但动态载荷下支护加固的理论基础和设计方法仍不够完善,仍有待进一步的研究。需要指出的是,微震风险控制的高级实践应包括在大型微震事件后,必要时对支护加固进行评估和修复。矿山越来越普遍的做法是使用三维激光扫描仪测量大型微震事件发生前后的位移数据,并将这些测量数据用于估计支护加固系统性能的消耗和残余,以及重大微震事件后是否需要主动修复。此外,潜在影响支护加固性能的一个重要因素是腐蚀。然而,大多数矿山没有工具来量化腐蚀对支护加固性能的影响。

2.3.2 减少作业人员暴露于危险区域

绝大多数微震活跃矿山防范风险的措施之一是在微震活动加剧期间减少人员暴露于危险区域,制定人员撤出危险区域和重返工作面的准则,从而降低风险。有些矿山根据经验,在时间上将掘进爆破

后的重返工作面时间限定为3 h,在空间上限定为从爆破位置延伸半径30 m。更高级的实践为基于历史微震响应的统计分析确定受限时间和受限空间,受限时间和受限空间在矿井的不同区域可以根据分析研究结果调整变化,并且可以准实时评估后再返回工作面。减少人员暴露于危险区域的其他做法还包括改变矿井布局,以尽量减少高危险区域的通道,增加远程或全自动设备的使用。对工作人员进行更好的教育和培训,通过提高他们对微震危险加剧迹象的认识来减少暴露于危险区域。

2.3.3 矿山设计变更

矿山设计变更的目的是通过减少微震危害或后果来降低微震风险。常规情况下,矿山设计变更中的控制措施通常较难被应用,但在某些情况下,可以非常有效地降低微震风险。矿山设计变更可能直接影响微震灾害,例如,通过设计形成有利的应力条件,或者通过创造更多的灵活性,减少人员暴露于危险区域来间接影响微震风险,减小微震事件带来的后果。总体降低微震风险应是矿山设计微震控制措施的目标,而不是局部或短期收益。在某些情况下,经历过非常严重微震反应的矿山将成为微震控制矿山,这意味着与最小化微震风险的设计布局相比,矿山设计的传统驱动因素,成本、生产效率、品位和回收率将成为次要因素。

开采顺序优化是微震风险控制的常用手段之一。岩土工程师为矿山规划提供设计原则,并对拟定的开采计划进行审查。与微震活动构造相关的风险通常通过开采顺序优化来减轻。例如,一般远离断层而不是朝向断层进行采矿,并对开采顺序进行优化,以减小采矿引起的断层等地质构造上的剪切应力。

2.3.4 改善岩体条件

改善岩体条件的主要措施有卸压爆破和水力压裂。通过卸压爆破或水力压裂等预处理技术来改变岩石的性质,以改变其对采矿引起的应力变化和微震响应,减小微震事件发生的可能。可以在巷道上实施卸压爆破,也可以在崩落法矿山使用较大范围的水力压裂或限制爆破。

2.4 微震风险评估

微震风险评估可分为三个层次:(1)个人主观风险评估。(2)采用专家意见的正式主观风险评估。(3)定量风险评估。

个人主观风险评估:岩土工程师采用正式的风

险评估技术(如事故树)进行风险评估,并为事故树的组成部分分配主观概率。该风险评估记录在文档中,并列出了主观概率。该文档支持对风险评估进行审计和专家评估。针对特定场景的事故树被初始开发之后,微震风险评估的过程则不再繁重。

采用专家意见的正式主观风险评估:在岩土工程文档中被充分记录的采用专家意见来推导主观概率的正式风险评估。选择一个专家小组,并由一名主持者根据完善的流程管理风险评估。

定量风险评估:在基于事故树的正式风险评估中采用概率论对微震风险进行计算,并对计算过程和风险评估过程进行记录。

微震风险评估还可以分为短期微震风险评估、中期微震风险评估和长期微震风险评估。

由于微震活动的短期波动性,短期微震风险评估最具挑战性。短期微震风险通常用于评估未来几个小时或几天内微震事件发生的潜在可能性。短期微震风险评估是在研究各种微震参数随时间变化的基础上进行的,有效地寻找“异常”或前兆行为,并将这些异常或前兆行为整合到一个评级系统中。一般可通过对地震密度和频度分布的空间评估来评估当前的微震风险状态。

中期微震风险大约每月评估一次,使用震源参数的趋势来确定某区域发生大型微震事件的潜在可能性。中期微震风险评估的关键在于,从过去的微震事件中得出的中期微震危险如何被用来识别将来的高震级微震风险。

长期微震灾害受矿区地质特征和开采参数的控制。长期微震灾害通常考虑特定规模事件发生的统计意义上的可能性,或特定规模事件的预期重现期。长期微震风险通常使用根据过去采矿微震响应校准的数值模型进行评估。

3 结论

矿山微震风险管理是一个复杂的过程,最佳实践由矿山现场具体条件决定。本文对国外微震风险管理实践方面的研究进行了概述和介绍,简要讨论

了实践活动中一些细节问题,可为国内矿山微震风险管理实践提供参考,为制定和评估矿山现场风险管理提供一个有价值的框架。

[参考文献]

- [1] POTVIN Y, WESSELOO J, MORKEL G, et al. Seismic Risk Management practices in metalliferous mines: Proceedings of the Ninth International Conference on Deep and High Stress Mining, June 123 - 132, 2019 [C]. Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019.
- [2] POTVIN Y, WESSELOO J. Improving Seismic Risk Management in Hardrock Mines: proceedings of the 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, September 371 - 386, 2013 [C]. Russia: Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 2013.
- [3] OWEN M, HUDYMA M, POTVIN Y. Risk analysis for mining induced seismicity: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium Mining and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, July 1079 - 1086, 2002 [C]. Toronto: University of Toronto Press, 2002.
- [4] HUDYMA M, BROWN L, CORTOLEZZIS D. Seismic Risk in Canadian Mines: CIM MEMO-Maintenance Engineering and Mine Operations, October 1 - 14, 2016 [C]. Sudbury: Laurentian University, 2016.
- [5] DURRHEIM R, CICHOWICS A, EBRAHIM-TROLLOPE R, et al. Guidelines, Standards and Best Practice for Seismic Hazard Assessment and Rockburst Risk Management in South African Mines: Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining, November 249 - 261, 2007 [C]. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007.
- [6] MORKEL I G, WESSELOO J. A technique to determine systematic shifts in microseismic databases: Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, March 105 - 116, 2017 [C]. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2017.