



Research Efficient Exploitation of Deep Mineral Resources—Review

深部金属矿山岩爆监测、预警和控制

冯夏庭^{a,b,*}, 刘建波^a, 陈炳睿^b, 肖亚勋^b, 冯光亮^b, 张凤鹏^a

^a Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China

^b State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 July 2017

Revised 13 July 2017

Accepted 14 July 2017

Available online 16 August 2017

关键词

深部金属矿

岩爆

监测

预警

防治

摘要

本文综述了我们团队近期在防治岩爆危险方面取得的进展, 包括为南非深部黄金矿山研发的岩爆危险性评估神经网络模型, 智能微震监测系统 and 传感器, 采用室内与现场实验和监测认识岩爆演化过程, 建立对不同类型岩爆发生位置和强度的定量预警方法, 以及岩爆动态调控措施。展示了红透山铜矿岩爆治理实例。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

由于中国对金属矿产资源需求的增加, 许多金属矿山, 如红透山铜矿、冬瓜山铜矿、夹皮沟金矿、三山岛金矿、矾口铅锌矿、玲珑金矿等, 开采深度已经接近1000 m [1]。深部采矿不可避免地产生地压集中, 某些金属矿采场最大主应力可超过50 MPa [2]。在这些条件下, 动态破坏如岩爆造成的事故近年来在中国金属矿山急剧攀升。

诱发岩爆的因素包括强爆破扰动、叠加开采和构造面导致的高应力集中。例如, 中国北方大型铅锌复合金属矿藏——白音诺尔铅锌矿, 采空区体积高达几百万立方米。由于该矿山存在这种巨大采空区, 在一些采区围

岩中地应力高度集中。此种条件下, 在地下开采深度仅为300 m时, 掘进巷道便发生动力灾害, 如岩石弹射和顶板冒落。这严重影响了矿山的正常生产安全, 如图1所示。巷道破坏模式清楚地表明最大主应力方向受到采空区影响。在冬瓜山铜矿, 自1996年至1999年, 发生了10余起因岩爆致死事故。2006年4月, 二道沟金矿岩爆导致许多工人受伤和大量矿石损失, 且使下面几个水平的采矿工作更加困难。2013年1月, 山东省玲珑金矿两名矿工因岩爆震动波受伤, 大量电机设备损毁。据不完全统计, 在2001—2007年间, 中国金属矿山共发生了13 000起事故, 导致16 000矿工受伤, 严重地威胁了矿山安全生产。此外, 大量有价值的资源不能得到开采。

为降低岩爆危险性, 提出了一些对策, 包括研发新

* Corresponding author.

E-mail address: xtfeng@whrsm.ac.cn, xia.ting.feng@gmail.com



图1. 白音诺尔铅锌矿巷道顶板岩石弹射。

一代微震监测系统，采用室内和现场实验与监测，提高当前对岩爆演化过程的认识，建立对不同类型岩爆发生位置和强度的定量预警和危险性评价，研发岩爆动态调控措施。研发出具有神经网络模型的专家系统评价煤矿[3]和南非深部金矿[4]的岩爆危险性。本文综述了在防治岩爆危险性方面取得的进展，通过实例阐述这些新对策的实用性。

2. 智能微震监测系统和方法研发

2.1. 智能微震监测系统

随着计算机和通信技术的发展，现代微震监测技术广泛地运用于岩石和采矿工程领域。然而，一些关键技术障碍影响着微震技术的应用。例如，在缺少全球定位系统（GPS）信号时，采集器定时服务精确性将大大影响微震源的准确定位。在传感器阵列以外，微震源的位置难以确定。为解决这些问题，进一步改进微震检测系统的功能来捕捉弱信号，为灾害预警提供更可靠的技术支撑，研发出新一代微震监测系统（图2）。

系统硬件由传感器、信号保真盒、数据采集仪、定时服务器、数据服务器以及数据通信设备构成。软件系统包括基于采集器网络浏览器的微震采集仪组合（MAC）系统，微震系统组合与监测的微震系统监测-诊断-组合编码（MMC）软件，波形的实时波形动态监测系统。另外，针对地质灾害发展期间的微震信息，运用了实时地质灾害微震信号识别与分析系统（GMS）软件和地质灾害微震信号三维动态显示（GMD）可视化软件。MAC系统规范和管理采集元件，而MMC软件检测和管理微震系统。GMS监视器提供微震活动的分析和预警，GMD软件显示三维微震信息和灾害风险。

该系统的特点和优点归纳如下：

（1）该系统实现了32位模拟信号到数字信号（AD）的转换，且改善了微震系统捕捉软岩微弱断裂信号的能力。

（2）该系统采用精准时间协议更新时间同步策略。此外，在没有GPS信号时，测站的时间协同准确度可以达到亚微秒级，可高精度确定断裂源方位。

（3）该系统可以24 h采集所有信号，避免了由于不当阈值造成的信号丢失。

（4）基于人工神经网络（ANN）和粒子群优化（POS）算法，可以有效和准确识别传感器阵列之外的微震源信号，使得操作者可以快速和准确地定位断裂源。

（5）运用互联网技术，系统错误可随时被诊断，以保证早期预警并发送信息到指定的手机、电子邮箱或服务器中心。

（6）采用公共平台，激发和连续数据是原始的且可公开获取。因此，用户可以进行第一手资料的科学研究，也可根据用户的特殊需要进行二次开发。

该系统主要硬件的技术参数如下。

2.1.1. 传感器技术参数

速度传感器。采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的GU(T)10传感器。传感器的灵敏度、线圈电

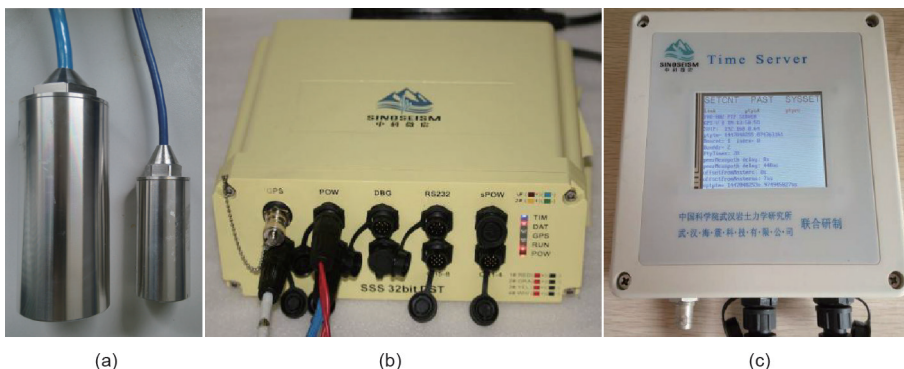


图2. 新一代微震监测系统。(a) 传感器；(b) 数据采集器；(c) 即时服务器。

阻、频域和量程分别为： $100 (\pm 5\%) \text{ V} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$ 、 $4000 (\pm 5\%) \Omega$ 、 $10 \sim 1000 (\pm 10\%) \text{ Hz}$ 和 $10 \sim 2000 \text{ Hz}$ 。单向和三向传感器的特征尺寸分别是： $\phi 33 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 和 $\phi 58.5 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。

恒电流加速传感器。采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的AU(T)2000传感器。传感器灵敏度、分辨率、频域和量程分别为： $2 \text{ V} \cdot \text{g}^{-1}$ ($\text{g} = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、 0.04 mg 、 $0.2 \sim 3000 (\pm 10\%) \text{ Hz}$ 和 $\pm 2.5 \text{ g}$ 。它们提供的电压、恒流源、偏压和适宜温度分别是： $18 \sim 30 \text{ V}$ 、 $2 \sim 10 \text{ mA}$ 、 $9 \sim 14 \text{ V}_{\text{DC}}$ 和 $-40 \sim 120^\circ \text{C}$ 。单向和三向传感器的特征尺寸是： $\phi 33 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 和 $\phi 58.5 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。

恒电压加速传感器。采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的AU(T)30000传感器。传感器灵敏度、分辨率、频域和频率响应分别为： $30 (\pm 5\%) \text{ V} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 0.00005 g 、 $\pm 0.16 \text{ g}$ 和 $50 \sim 5000 \text{ Hz} \pm 3 \text{ dB}$ 。传感器供电压、偏压和适宜温度分别是： $24 \sim 28 \text{ V}_{\text{DC}}$ 、 $19 \text{ V}_{\text{DC}} \pm 1.5 \text{ V}_{\text{DC}}$ 和 $-20 \sim 55^\circ \text{C}$ 。单向传感器的特征尺寸是： $\phi 24.8 \text{ mm} \times 122 \text{ mm}$ ，重量为156 g。

2.1.2. 采集器参数

由于采集器能够实现32位交直流转换，信号采集器可在频率4 kHz、2 kHz、1 kHz、500 Hz和250 Hz 采样。动态范围不小于120 dB，且可通过GPS或时间服务器即

时实现。此外，采集器有8个通道，电耗小于5 W。采集器几何尺寸为 $245 \text{ mm} \times 192 \text{ mm} \times 92 \text{ mm}$ ，重量为3 kg，可在温度为 $-20 \sim 80^\circ \text{C}$ 的环境中工作。

2.1.3. 定时服务器同步参数

(1) 通过GPS定时和网络传输，监测点时间同步精度可达到亚毫秒级。

(2) 通过GPS定时和长距离数字用户线(DSL)传输，监测点时间同步精度可达到亚毫秒级。

(3) 利用时间服务器进行定时和网络传输，监测点时间同步精度可达到亚毫秒级。

(4) 利用时间服务器进行定时和长距离DSL传输，监测点时间同步精度可达到毫秒级。

2.2. 智能现场微震监测方法

采矿中，必须考虑在整个采区和特定采面的微震监测，以揭示岩体破裂的演化。图3[5]显示在金属矿典型的传感器网络。传感器布置可在开挖硐室下水平，以便监测整个采区的稳定性[图3 (a)]。这种监测半径可达数百米甚至更远。采矿进程中采空区不断扩展，在这些采空区周围将发生微震系统的严重监测现象缺失。可是，在这些区域岩爆发生概率很高。为解决这个问题，采空区周围的传感器密度必须增加，以便提高敏感性，

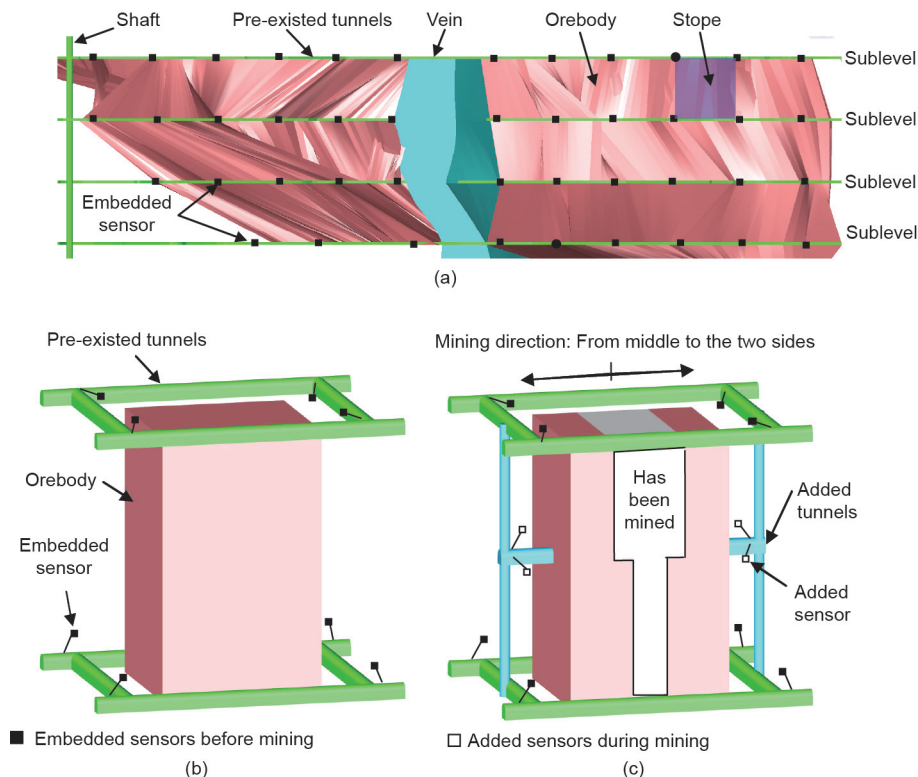


图3. 金属矿典型传感器网络[5]。(a) 整个监测区域；(b) 和 (c) 采场局部传感器。

减少定位误差。同时,在这些采空区附近定位岩体破裂事件必须采纳岩体各向异性波速(即P波和S波从破裂源到每个微震传感器传播的速度不同)。总之,在部分采面的传感器布置大致符合空区格局,如图3(b)和图3(c)所示。部分传感器布置在监测工作面附近开挖出的巷道内。其余传感器设置在岩爆危险性关注的区域。此外,采用传感器可重复利用方法,建立基于监测微震和岩爆危险性评估的动态监测网络。

在深部矿山建议采用地音而不是加速仪来监测岩爆。对整个开采区域而言,加速仪的监测距离还不够远。对于特定的采场,加速仪有时记录不到从岩爆源完整发出的波。微震系统的信息通信和监测参数定位可参见文献[5]。

充分的噪声过滤和微震源定位是微震数据分析的基础。基于远场微震源的传统数据分析适用于区域监测。对于局部采场,由于强烈的噪声,岩体破裂信号的信噪比低;同时,噪声种类变化并且部分噪声的相关特征与岩体破裂信号相似。其结果是传统人为的和信号指标噪声过滤方法并不可靠。多重指标噪声过滤方法,如神经网络,则应运而生[6]。由于传感器布置的局限性,有时岩体破裂源在传感器阵列之外。传统线性事件定位方法存疑,如Geiger、共轭梯度和最速下降法。对于此种情况,更好的选择是采用完备的非线性方法,如蒙特卡罗方法、人工神经网络法、坡降法和PSO法[6]。标定激发应经常进行以确保定位准确,且事件位置的恒速模型需谨慎使用。对于地质条件复杂的采场,各向异性和层状速度模型是基本的要求。

3. 不同类型岩爆机理

现场微震监测表明大多数监测到的岩爆具有微震前兆[5,6]。这种微震可以视为支撑岩爆的岩体断裂过程。

如果能够识别相关岩体破裂模式(拉、混合和剪切),可以解译岩爆机理。基于实际微震信息的能量率、矩张量分析以及P波递进方法(表1)[6-9]被广泛应用于识别岩体破裂模式。应当指出,这些方法的可靠性必须根据监测情况的变化来检查。综合运用这些方法可以有效改善判别精度[9]。通过现场实地观察岩爆的宏观破坏特征,结合扫描电镜检测爆破岩块断裂表面的破断模式(拉或剪),作为确定岩爆演化机理的辅助信息。

图4显示典型岩爆在发展过程中的演化特征。由图可见:

(1) 对于应变型岩爆,记录的岩爆事件大部分为拉破裂机理,该类岩爆只有一小部分可以通过岩爆发展过程辨识为混合型和剪切型。

(2) 在应变-结构滑动型岩爆初期,无论是单一、一组还是两组刚性结构,有若干个为拉破裂机理的低射震动能事件发生。其后,三种机理类型事件交替出现。

(3) 除了应变型和应变-结构滑动型岩爆外,大多数断裂事件是拉伸机理。然而,岩爆的最终发生呈现剪切破坏机理。

(4) 主事件($\lg E > 4.8$)的出现取决于岩爆类型。对于大多数应变-结构滑动型岩爆,主事件在各个阶段都有发生。然而,只有在应变型岩爆演化的中后期才能看到主事件。

对典型深部巷道的应变型岩爆机理分析表明,超过92.5%的破裂事件呈现出拉伸机理,混合型和剪切事件平均仅占5%。随着刚性结构的增多,拉破裂事件的比率迅速降低。如果存在单一刚性结构或一组刚性结构,拉破裂事件通常少于86%。当存在两个刚性结构或两组刚性结构,拉破裂比率下降到68%。简而言之,刚性结构是岩爆演化机制中的一个主要控制因素。但在岩爆发展过程中,超过70%的事件呈现出拉破裂机理。

表1 微震法识别岩体破裂类型

Method	Judgement index	Judgement criteria	Example
Energy ratio	Ratio of the S- and P-wave energies (E_s/E_p)	$\begin{cases} E_s/E_p < 10 & \text{Tensile failure} \\ 10 \leq E_s/E_p \leq 20 & \text{Mixed failure} \\ E_s/E_p > 20 & \text{Shear failure} \end{cases}$	Ref. [7]
Moment tensor analysis	Percentage shear component of moment tensor ($DC\%$)	$\begin{cases} DC\% \leq 40\% & \text{Tensile failure} \\ 40\% < DC\% < 60\% & \text{Mixed failure} \\ DC\% \geq 60\% & \text{Shear failure} \end{cases}$	Refs. [8,9]
P-wave development	Development degree of P-waves (P_D)	$\begin{cases} P_D \geq 0.047 & \text{Tensile failure} \\ P_D < 0.047 & \text{Shear failure} \end{cases}$	Refs. [6,9]

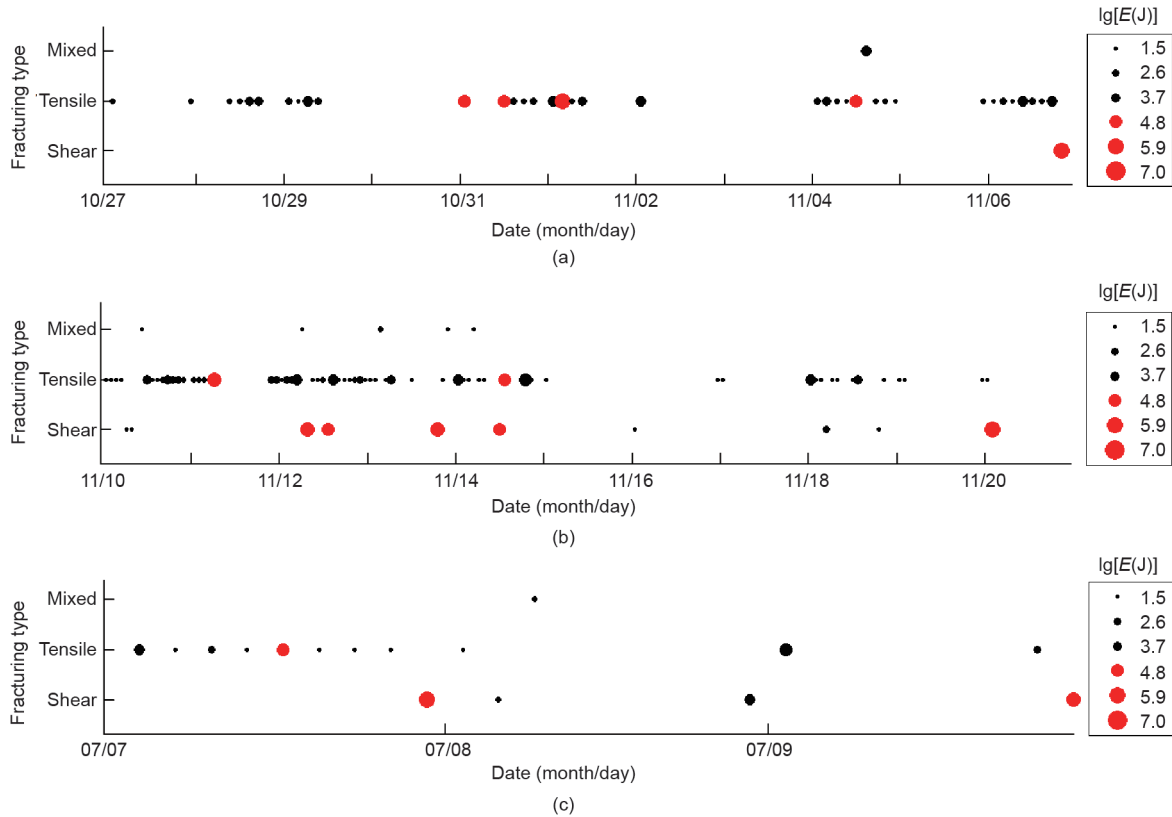


图4. 典型岩爆类型演化机制。(a) 中度应变型岩爆；(b) 具有一组刚性结构的强应变-结构滑动型岩爆；(c) 具有两组刚性结构的中度应变-结构滑动型岩爆。

4. 岩爆预警

4.1. 岩爆预警的定义

本文中，“岩爆预警”一词用来表示预警岩爆发生的位置、强度和概率，不是预警岩爆发生时间。预警结果用于岩爆防治。

4.2. 岩爆预警基础

研究表明，岩爆在孕育发展阶段具有以下主要特征：

(1) 岩爆在演化中，微震事件由空间分布向聚集发展。研究表明，岩爆发展过程中微震事件的空间分布呈现空间分形行为[10]。微震时间的空间分布呈现出分形的自相似性。微震事件的聚集和空间分布自相似性表明：监测到的微震活动可用来预警在该区域潜在岩爆发生的位置。

(2) 多数临近岩爆在发展过程中，微震事件的能量呈现暂时的分形行为[10]。能量暂时分布和微震事件的数量呈现出分形自相似性。此外，微震活动与岩爆强度之间存在相关性。一般来讲，微震活动越活跃（即能量较高和微震事件量大），岩爆的强度越大[11]。表明监测到的能量和微震事件数量的暂时分布可以用来预警在

该区域潜在岩爆发生的强度。

4.3. 岩爆预警方法

根据现场微震和岩爆案例研究，可以建立岩爆预警公式并可对岩爆做出某种预警[11]。为提高岩爆预警准确性，应考虑如下特征：

(1) 如上所述，就发展机理和地质构造影响而言，岩爆可以划分成不同类型，每种类型对应不同的微震[9,12]。因此，对于不同类型岩爆应研发不同的公式。

(2) 微震活动随施工方法而变化，如钻爆法、盾构法(TBM)[6]。因此，针对不同的施工方法应研发不同的公式。

(3) 微震活动和岩爆危险随地质条件、地应力、岩体性质、开挖和支护方式而变化。因此，应基于微震的变化做出动态岩爆预警。

考虑到这些因素，基于现场微震和案例研究研发了预警公式，介绍如下[11]：

$$P_i^{mr} = \sum_{j=1}^6 W_j^{mr} P_{ji}^{mr} \quad (1)$$

式中， m 为施工方法； r 为岩爆类型； i 为岩爆强度（极

强、强、中等、轻微或无)； j 为微震参数，总共有6个； w 为权重； P_{ji} 为微震活动与岩爆之间的函数关系(图5给出了一个例子)。每个岩爆事件的概率从0变到100%。概率越大，岩爆危险越大[11]。

5. 岩爆防治措施

为降低岩爆危险研发出几种方法，例如，掘进(开采)区尺寸和顺序优化以便降低因掘进或采矿引起的应力集中，爆破附加高应力；卸压释放部分能量；以及支护吸收能量。这里，介绍利用原岩应力增加爆破效果以降低岩爆危险的方法。

5.1. 方法原理

深部岩体处于高应力(高能量)环境。采用钻爆法进行深部采矿过程中，在爆破引起的高静、动应力组合作用下岩石产生破碎。爆破震动是围岩产生动力灾害(如岩爆)的主要诱发因素之一。在深部高能量岩石爆破过程中，爆破的动应力可能引起岩体中高能量的无序释放。其结果，出现轻度的超挖和欠挖，影响掘进轮廓的形成，严重情况下会发生岩爆。众所周知，爆破产生的动应力可以诱发岩体高能量释放，优化工程部署和爆破程序可以实现高能量的有序释放。这样，能量被用到岩石破裂过程以增加爆破效率和爆破效果，降低岩爆的危险性。新方法包含高应力诱导岩石破裂，提高岩石爆

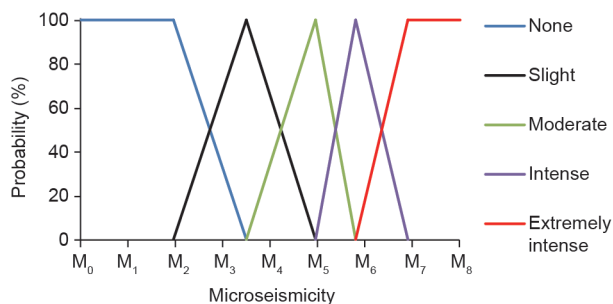


图5. 微震活动和岩爆的函数关系[11]。

破效果，控制岩爆危险。本方法的核心思想是：爆破岩石区的能量用于提高岩石破碎，降低炸药消耗，提高爆破效果；非爆破岩体能量被吸收和控制，与此同时，岩石能量级别和岩爆危险降低；最终，降低爆破震动，实现岩爆控制。

5.2. 方法运用

本方法的第一步包括调查深部高应力和爆破动应力耦合作用下岩石破碎机理以及爆破震动诱发的动力灾害机理。这里，通过数值分析和实验研究在高应力下聚能岩体的破坏规律；爆破过程中岩体静能量活动、迁移和致灾机理；以及爆破震动导致高应力岩体的影响因素。实验结果表明：静态应力对存在自由表面爆破区的形状和体积具有显著影响，如图6所示[13]。深部岩石工程的钻爆工艺设计必须考虑静态应力的影响。

第二步包括在钻爆掘进过程中对掌子面和围岩进行应力场的实时监测。通过微震监测、应力测量和数值模拟，获得掌子面和围岩体的应力和能量分布特征，作为钻爆工艺设计的基础。

最后一步，运用考虑应力场差别的钻爆设计理论和方法。根据应力转移规律，应力场和能量场由切割位置、垮落顺序和每个冒落区域做出调节。这样，应力场更有益于爆破的岩石破碎和岩爆控制。

根据应力分布特征，优化和规范爆破参数、装药结构和延迟时间。爆破区形状和岩石破碎得到控制，爆破震动降低。

6. 案例研究

红透山铜矿是中国最深的有色金属矿，采深超过1300 m。地下灾害(如冒顶和岩爆)的发生频率迅速增加，威胁人员生命和造成财产损失。例如，1999年5月18日，在-647 m水平矿房附近斜坡道内发生了一起强岩爆，导致10 m长岩体损坏，大约60 m³岩石被抛到对面。

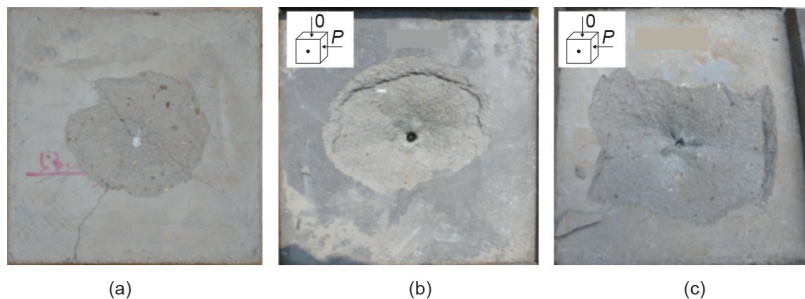


图6. 单轴侧向应力下爆破破坏区形状[13]。(a) 0 MPa；(b) 5 MPa；(c) 10 MPa。

2008年1月8日,一起岩爆造成大量岩石从矿房帮部和顶板抛出,如图7所示。此外,由于地质条件十分复杂,采矿过程中遇到地质构造面时极易引发冲击冒落。例如,-767 m水平10号矿房,采用上向分层充填采矿法,暴露面积超过2400 m²。当开采到最顶层时,矿房帮部和顶板间揭露出结构面,导致大面积矿体从顶板冒落,冒落面积约400 m²,高度超过3 m,矿石量约3500 t。为应对这种情况,2007年在-647 m水平下方运用了微震监测技术,采用了若干岩爆预防措施,来加强危险管理。

6.1. 岩爆预测

有许多因素影响微震数据的准确性,包括传感器数量、微震事件位置准确度和数据的精准处理。因此,应用微震多重参数,包括直观体积、空间相关长度、能量指数、分形维数和**b**值[14],进行岩爆预测。在大型破裂或岩爆发生前,这些微震多重参数显示出前兆特征。这种方法可以显著改善岩爆预测精度。

6.2. 利用高应力优化采矿顺序和爆破参数

深部开采实践中,引导现场应力使坚硬岩体产生破裂[15,16]。若将储存应变能方法用在爆破时的破坏岩石方面,可减少炸药用量,达到高效安全采矿的目的。根据微震数据计算出的等价应力用于优化采矿顺序和爆破参数。能量指标**EI**是指震动能量**E**与相同时刻震动事件

平均释放能量 $\bar{E}(M_0)$ 之比,由下式表示[17]:

$$EI = \frac{E}{\bar{E}(M_0)} \quad (2)$$

能量指标**EI**越高,在震源位置发生事件时的驱动应力越高。本文中使用的等价应力,定义为每立方米岩体的平均应力。当准备开采至少两个区域时,比较它们的等价应力,选择开采具有较高等价应力的区域,如图8所示。在这种情况下,爆破时改变爆破参数,减少炸药用量,利用储存的应变能破岩。爆破孔排距由1.3 m变到1.2 m,孔底间距由1.7 m变到2.2 m。根据等价应力分布,优化采矿顺序和爆破参数,不仅减少了岩体的超爆和欠爆,即矿石贫化和损失(图9),而且减少了炸药用量和爆破震动,有利于保持岩体稳定。

6.3. 支护措施

对于现场微震监测,应注意岩体变形和应力没有线性相关性。据此,对易发生岩爆的岩体应该采取完整性更好和高应力的动态支护;对于很差的易膨胀和剥落岩体,可以采用普通的锚网支护。根据地压灾害采取与发生机理相对应的控制措施,可以降低对人员和设备造成的危险性。

在红透山铜矿,通过实施上述的预测和预防措施,采矿过程中的炸药消耗量由0.308 kg·t⁻¹减少到

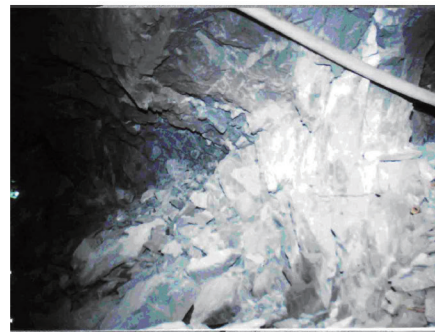
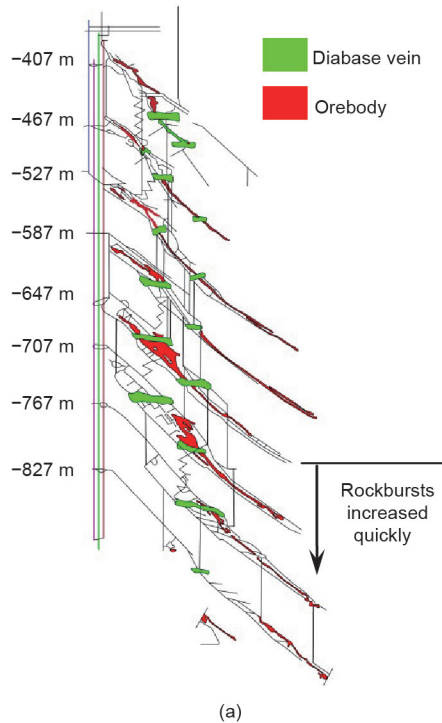


图7. 红透山铜矿开采扰动诱发的岩爆。(a) 矿体形状; (b) 1999年5月18日斜坡道内的岩爆; (c) 2005年1月8日在矿房内发生的岩爆。

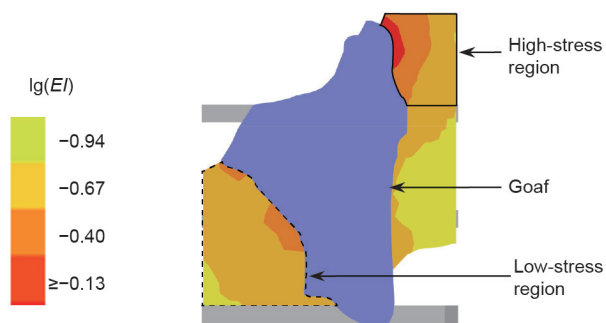


图8. 根据 $\lg EI$ 分布确定的采矿顺序。

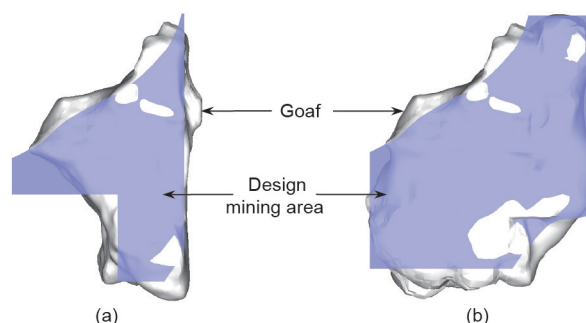


图9. 设计采矿和采空区对比。(a)爆破参数优化前；(b)优化后。

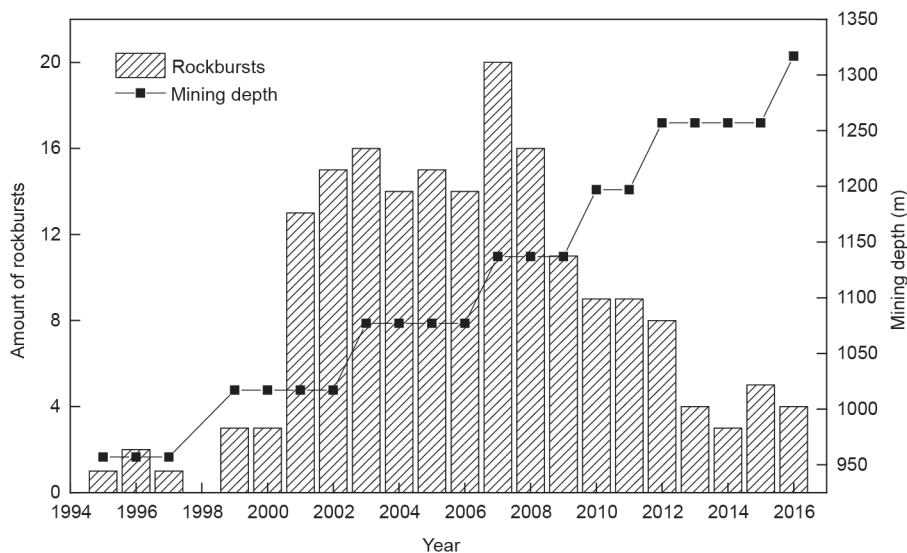


图10. 岩爆发生频率与深度的关系。

$0.255 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 超破碎和欠破碎体积 (即矿石贫化和损失) 显著降低。更重要的是, 岩爆发生次数由2007年的20多起, 下降到近年不足5起, 如图10所示。岩爆预测和预防措施对红透山铜矿危险管理提供了有力的技术支撑, 特别是对未来深部采矿将继续提供支撑作用。

7. 结论

深部采矿的一个主要挑战是消减岩爆危险。对于大多数深部采矿岩爆, 可以监测到岩爆演化过程中的微震。然后, 由于岩爆演化过程中的自相似性, 可利用监测到的微震预警岩爆的强度和位置。现场实验和监测有助于认识岩爆的演化机理。大数据 (包括岩爆历史案例) 可被提取出来用于深度学习技术。动态和主动措施 (包括动态调整采矿参数和开采顺序)、卸压技术 (如钻爆孔和微波破裂)、吸能和振动波技术等, 可用于降低岩爆危险。这些技术可用于不同类型的岩爆。通过红透山铜矿的实例, 验证了这些措施的有效性。虽然如此, 还

需要做大量的工作, 如预测岩爆发生时间以及研究断层滑动性岩爆的机理和监测方法。

致谢

作者衷心感谢国家自然科学基金 (项目编号: 51621006, 413200104005和11232014) 的资助。

Compliance with ethics guidelines

Xia-Ting Feng, Jianpo Liu, Bingrui Chen, Yaxun Xiao, Guangliang Feng, and Fengpeng Zhang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] He M, Xie H, Peng S, Jiang Y. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chin J Rock Mech Eng* 2005;24(16):2803–13. Chinese.
- [2] Wu M, Liao C, Zhang C, Ou M. Research on *in-situ* stress measurement and its distribution law in Hongtoushan copper mine. *Chin J Rock Mech Eng* 2004;23:3943–7. Chinese.
- [3] Feng X, Wang Y, Yao J. A neural network model for real-time roof pressure

- prediction in coal mines. *Int J Rock Mech Min Sci* 1996;33(6):647–53.
- [4] Feng X, Webber S, Ozbay M. Neural network assessment of rockburst risks for deep gold mines in South Africa. *Trans Nonferrous Met Soc China* 1998;8(2):335–41.
- [5] Xiao Y, Feng X, Hudson JA, Chen B, Feng G, Liu J. ISRM suggested method for *in situ* microseismic monitoring of the fracturing process in rock masses. *Rock Mech Rock Eng* 2016;49(1):343–69.
- [6] Feng X, Chen B, Zhang C, Li S. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes. Beijing: Science Press; 2013. Chinese.
- [7] Xiao Y, Feng X, Feng G, Liu H, Jiang Q, Qiu S. Mechanism of evolution of stress-structure controlled collapse of surrounding rock in caverns: A case study from the Baihetan hydropower station in China. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;51:56–67.
- [8] Ming H, Feng X, Chen B, Zhang C. Analysis of rockburst mechanism for deep tunnel based on moment tensor. *Rock Soil Mech* 2013;34(1):163–73. Chinese.
- [9] Xiao Y, Feng X, Li S, Feng G, Yu Y. Rock mass failure mechanisms during the evolution process of rockburst in tunnels. *Int J Rock Mech Min Sci* 2016;83:174–81.
- [10] Feng X, Yu Y, Feng G, Xiao Y, Chen B, Jiang Q. Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockburst in deep, hard rock tunnels. *Tunn Undergr Space Technol* 2016;51:98–107.
- [11] Feng G, Feng X, Chen B, Xiao Y, Yu Y. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels. *Rock Mech Rock Eng* 2015;48(5):2061–76.
- [12] Feng G, Feng X, Chen B, Xiao Y. Microseismic sequences associated with rockbursts in the tunnels of the Jinping II hydropower station. *Int J Rock Mech Min Sci* 2015;80:89–100.
- [13] Zhang F, Peng J, Qiu Z, Chen Q, Li Y, Liu J. Rock-like brittle material fragmentation under coupled static stress and spherical charge explosion. *Eng Geol* 2017;220:266–73.
- [14] Liu J, Feng X, Li Y, Xu S, Sheng Y. Studies on temporal and spatial variation of microseismic activities in a deep metal mine. *Int J Rock Mech Min Sci* 2013;60:171–9.
- [15] Li X. Dynamics problems of hard rock during mining in metal mine. In: Proceedings of the 1st Sino-Russian Joint Scientific-Technical Forum on Deep-level Rock Mechanics and Engineering. 2011 Apr 16–17; Fuxin, China. Novosibirsk: IGD SO RAN; 2011. p. 67–85.
- [16] Zhang F, Peng J, Fan G, Li S, Li Y. Mechanisms of blasting-induced rock fractures under different static stress and joint properties condition. *Rock Soil Mech* 2016;37(7):1839–46. Chinese.
- [17] Mendecki A, editor. Seismic monitoring in mines. London: Chapman & Hall; 1997.