矿柱破裂失稳演化特征与监测预警应用研究*

彭府华[1,2,3],王卫军[1],胡静云[2,3],潘懿[2,3],黄英华[2,3]

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭市 411100;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对矿柱稳定性问题进行了岩石试件破坏声发射试验、矿柱破坏PFC模拟与稳定性监测预警研究。开展了简单加载和增量循环加卸载工况下岩石试件声发射试验和矿柱破坏PFC模拟,分析了矿柱破坏过程应力-声发射演化特征,提出了矿柱破坏初始孕育期、矿柱破坏低速孕育期、矿柱破坏加速孕育期和矿柱破坏期4个阶段。利用矿柱破坏应力-声发射演化特征,提出了增压稳声模式、稳压稳声模式、降压稳声模式、增压增声模式和降压增声模式的矿柱破坏判别准则。基于矿柱破坏判别准则,建立了矿柱稳定性分期监测预警方法,并开发了矿柱稳定性监测预警平台。矿柱破坏分期监测预警方法和矿柱稳定性监测预警平台在现场工程应用的效果较好,2-45#矿柱在进入增压增声阶段后,矿山发出红色预警,39 d后矿柱出现纵向裂缝,90 d后矿柱出现整体破坏;2-105#矿柱在进入增压稳声阶段后,矿山发出黄色预警,38 d后矿柱中间部位局部发生片冒。研究结果对量化评估矿柱稳定性、保障矿山安全生产具有重要意义。

关键词:矿柱稳定性;声发射;PFC模拟;失稳判别准则;分期预警

中图分类号:TD853.391 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0142-10

Study on Evolution Characteristics of Pillar Failure and Instability and Its Application in Monitoring and Early Warning

PENG Fuhua[1,2,3], *WANG Weijun*[1], *HU Jingyun*[2,3], *PAN Yi*[2,3], *HUANG Yinghua*[2,3]

(1.School of Resources, Environment and Safety Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the problem of pillar stability, acoustic emission (AE) tests of rock specimen failure, PFC simulation of pillar failure, and pillar stability monitoring and early warning research were carried out. AE tests of rock specimens under simple loading and incremental cyclic loading-unloading conditions and PFC simulation of pillar failure were carried out. The stress-AE evolution characteristics during pillar failure were analyzed, and four stages of pillar failure were proposed, namely initial incubation stage, low-speed incubation stage, accelerated incubation stage and failure stage. Based on the stress-AE evolution characteristics of pillar failure, the pillar failure instability criteria of increased stress-stable AE, stable stress-stable AE, reduced stress-stable AE, increased stress-increased AE and reduced stress-increased AE modes were proposed. Based on the pillar failure criteria, a staging monitoring and early warning method for pillar stability is established, and a pillar stability monitoring and early warning platform was developed. The staging monitoring and early warning method for pillar failure and the pillar stability monitoring and early warning platform show good performance in field engineering applications. After pillar 2-45# enters the increased stress-increased AE stage, the mine issues a red warning. Longitudinal cracks appear in the pillar 39 days later, and overall failure occurs 90 days later. After pillar 2-105# enters the increased stress-stable AE stage, the mine issues a yellow warning. Local spalling occurs in the middle of the pillar 38 days later. The research results are of great significance for quantitatively evaluating pillar stability and ensuring safe production in mines.

Key words: Pillar stability, Acoustic emission, PFC simulation, Instability criterion, Staging early warning

---

* **收稿日期**:2025-09-08
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907204);中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ03)
作者简介:彭府华(1987—),男,江西井冈山人,博士研究生,高级工程师,主要从事矿山岩土灾害防治研究工作。E-mail:fuhuapeng@126.com

0　引言

全面采矿法是开采缓倾斜矿体时较为常用的采矿方法，在开采过程中往往会留设大量矿柱来支撑采场。然而，在长期开采扰动和自然风化等因素影响下，局部矿柱会发生失稳破坏，并可能导致矿柱群发生“多米诺骨牌”失稳，造成大面积矿柱和采空区破坏，甚至引起较大能量的矿震[1-2]。因此，矿柱稳定性问题是这类矿山安全生产管理的重中之重。

国内外学者在矿柱稳定性研究方面做了大量工作，主要包括安全系数理论分析、数值计算、室内试验和现场监测等。在矿柱安全系数理论分析方面，主要集中在矿柱安全系数的计算方法、矿柱强度与安全系数的影响因素等。王金安等[3]建立了采空区矿柱-顶板体系流变力学模型，得出矿柱支撑下采空区顶板受流变作用的位移控制方程，依此对采空区顶板破坏的不同阶段进行分析讨论。宋卫东等[4]从矿柱载荷、强度、失稳形式及影响因素四方面推导出两种矿柱形式的安全系数计算公式，采用6因素5水平正交试验对矿柱稳定性影响因素进行敏感性分析，并研究主要影响因素与矿柱安全系数之间的函数关系。尹升华等[5]采用正交极差分析方法对矿柱稳定性影响因素敏感性进行了评价，在分析矿柱荷载、强度、失稳势函数、破坏形式的基础上，总结了影响矿柱稳定性的主要因素。王在泉等[6]以矿柱破裂面上节点的塑性应变或位移突变为矿柱整体失稳的标志，采用有限元强度折减法计算了矿柱的抗剪安全系数，通过与传统方法所得的安全系数进行分析比较，提出判断矿柱稳定性的抗剪安全系数标准。王连国等[7]采用突变理论建立了矿柱失稳的尖点突变模型，对矿柱失稳破坏发生机理进行了分析。JINDRICH等[8]研究了矿柱强度与宽高比的关系，确定了矿柱变形模量随宽高比的变化规律，计算了矿柱的竖向变形量和安全系数。WATTIMENA等[9]采用多项逻辑回归方法(MLR)对矿柱稳定性进行预测。ESTERHUIZEN等[10]通过分析失效矿柱数据库建立了矿柱强度的经验公式，结合Bieniawski岩体分级、室内试验和数值模拟的结果，提出了一种考虑岩石强度、矿柱尺寸和潜在不连续面影响的矿柱设计方法。在矿柱数值计算方面，研究内容主要集中在矿柱的破坏特征模拟、矿区开采影响下矿柱的稳定性等。李夕兵等[11]采用FLAC3D有限差分程序对深部开采圆形矿柱进行高应力下动力扰动数值计算，研究高径比为4的圆形矿柱在承受不同静载作用时对动力扰动的力学响应特性。AKSOY等[12]通过数值模拟确定了土耳其某采石场房柱开采的最佳参数，估算了矿柱中的垂直应力，并进行了多矿柱系统的稳定性分析。GRIFFITHS等[13]基于蒙特卡洛模拟方法，运用随机场理论和弹塑性有限元算法分析了地下矿柱的稳定性。在室内试验方面，研究内容主要集中矿柱破坏的相似模拟试验。来兴平等[14]采用岩石破裂声发射和红外热像综合监测方法，开展了急倾斜坚硬岩柱动态破裂“声-热”演化特征模型试验，揭示了开采扰动作用下岩柱破裂过程中的声发射与温度演化规律。卢宏建等[15]运用VIC-3D非接触全场应变测量设备、应力与声发射监测系统，开展大尺度二维相似物理模拟试验，模拟了多次开挖扰动下硬岩矿柱破裂失稳演化规律。在矿柱稳定性现场监测方面，赵奎等[16]将光应力计观测、声发射监测两种手段联合用于某铜矿矿柱稳定性监测，将这两种信息置于同一时序中，进行耦合分析，可更加合理地评价矿柱的稳定性。彭府华等[17]利用微震监测技术，对降雨入渗诱发矿柱失稳的典型案例和采场地压活动影响规律进行微震监测量化分析。王培武等[18]采用微震监测系统对特大矿柱稳定性进行监测，掌握了矿柱的稳定性情况，并对矿柱的开裂进行了有效预警。

目前对矿柱在复杂开采扰动应力条件下破坏过程的演化特征研究不足，特别是矿柱稳定性现场监测预警的准确性不高，容易出现误报和漏报的情况。针对矿柱破坏演化特征和监测预警难题，本文的研究开展了岩石试件声发射室内试验和矿柱破坏PFC模拟，以揭示矿柱在复杂应力条件下断裂(声发射)-应力-时间演化特征，并在此基础上开展矿柱稳定性现场监测，对矿柱微震和应力监测结果进行耦合分析，提出矿柱破坏的判别准则，以期实现矿柱失稳破坏的精准预警。

1　矿柱破坏试验研究

1.1　试验方案

1.1.1　岩样制备

为模拟矿柱受力破坏特征，进行了岩石单轴压缩破坏声发射试验，选择花岗岩作为试验对象，将岩样加工成尺寸为50 mm×50 mm×100 mm的长方体试样，岩样如图1所示。



图 1 花岗岩试样

Fig.1 Granite rock samples

1.1.2 试验设备

加载系统采用液压式万能材料试验机。监测系统包括声发射传感器、声发射前置放大器、声发射卡、声发射主机系统、声发射处理软件。声发射采集仪采用 MICRO-Ⅱ声发射系统,传感器采用 R6 型传感器,响应频率范围为 35～100 kHz,试验系统如图 2 所示。

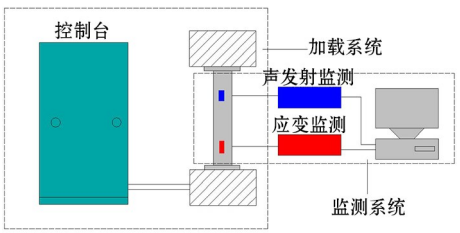


图 2 试验系统

Fig.2 Test system

声发射监测采用 6 个传感器对称布置在试样上下端左右两侧及中部的前后位置。传感器与试件之间涂抹适量黄油,以增加耦合效果,并用橡胶带将探头牢牢固定在试件上。

1.1.3 试验加载方式

为模拟矿柱在采动应力作用下应力增加的工况,本试验的加载方式分为 2 种:一种是简单加载方式,加载速率为 0.1 MPa/s,直到试样破坏为止;另一种是增量循环加卸载控制加载方式,加载速率为 0.1 MPa/s,以每循环 20 MPa 的增量循环加卸载,直到试样破坏为止。增量循环加卸载曲线如图 3 所示。

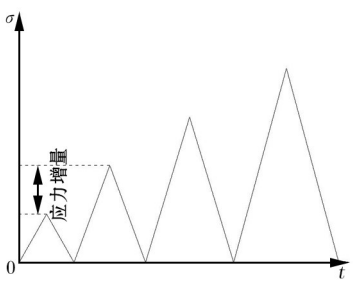


图 3 增量循环加卸载曲线

Fig.3 Curves of incremental cyclic loading-unloading

1.2 试验结果分析

1.2.1 简单加载声发射特征分析

图 4 为典型试样 Hg-5 的简单加载声发射事件-应力-时间变化曲线,可以看出,试样 Hg-5 从开始加载到破坏共持续 1 360 s,峰值强度为 88 MPa,试样破坏过程中声发射表现出以下特征。

(1) 事件活跃期:第 204.8 秒,试样在应力增加到 20 MPa 时,声发射事件开始突增,持续到 332.8 s,平均事件率为 36 个/s;从 819.2 s 开始,应力增加到 76 MPa 时,事件开始突增,事件率最大达到 763 个/s,平均事件率为 311 个/s,活跃期持续到 998.4 s。

(2) 相对平静期:试件在 332.8～819.2 s 这段时间事件相对较少,事件率在 4～40 个/s。

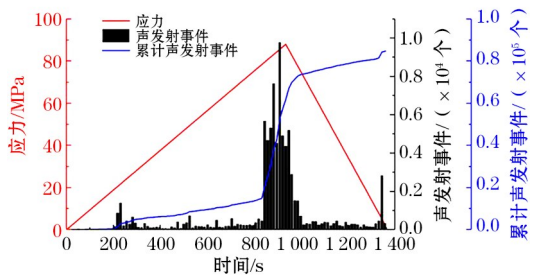


图 4 简单加载声发射事件-应力-时间变化曲线

Fig.4 AE event-stress-time curves under simple loading

1.2.2 增量循环加卸载声发射特征分析

图 5 为典型试样 Hg-7 的增量循环加卸载声发射事件-应力-时间变化曲线,可以看出,试样经历了 5 次循环加卸载过程,持续时间 3 863 s,峰值强度为 86 MPa,试样破坏过程中声发射表现出以下特征。

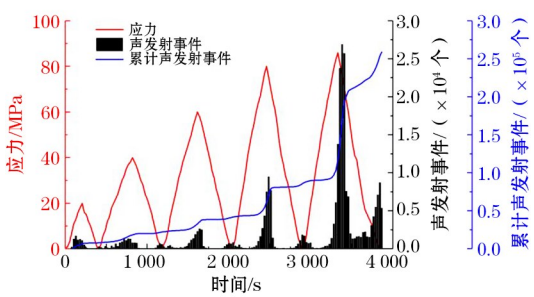


图 5 增量循环加卸载声发射事件-应力-时间变化曲线

Fig.5 AE event-stress-time curves under incremental cyclic loading-unloading

(1) 事件活跃期:5 次加卸载过程均出现了声发射事件突发现象,第 101.3 秒,当第 1 次加载到 6 MPa 时,声发射事件突增,持续到第 231.1 秒,此时应力增加到 20 MPa,这一阶段平均事件率较低,为 46.6 个/s;第 659.8 秒,第 2 次加载到 22 MPa,事件

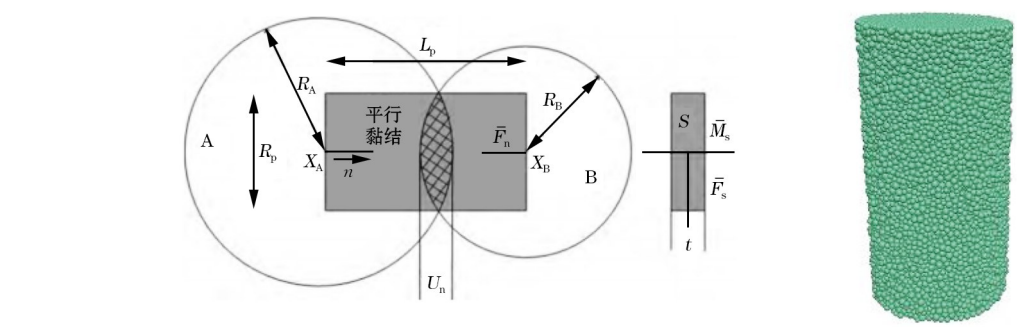
突增，在加载到 22 MPa 之前，声发射事件相对较少，平均事件率为 8.3 个/s，第 2 次加载出现了明显的 Kaiser 效应，第 2 次加载中事件突增持续到第 878.2 秒，此时加载到 40 MPa，然后开始卸载到 38 MPa，这一阶段平均事件率较低，为 40.3 个/s；第 1 506.1 秒，第 3 次加载到 42 MPa 时声发射事件开始突增，持续到第 1 680.4 秒，平均事件率为 64.1 个/s，和第 1 次和第 2 次加载相比，事件率明显提高，这一阶段也出现明显的 Kaiser 效应；第 2 355.3 秒，第 4 次加载到 58 MPa 时事件突增，持续到第 2 505 秒，此时应力加载到 80 MPa 后开始卸载到 78 MPa，这一阶段平均声发射事件率为 192.5 个/s，事件率水平比第 3 次加载显著提高，该阶段仍存在明显的 Kaiser 效应；第 3 236.7 秒，第 5 次加载到 64 MPa 时声发射事件开始突增，此时 Kaiser 效应消失，说明在第 4 次加载过程中试样内部已经出现了不可逆的破裂，事件突增持续到第 3 377.7 秒，该阶段平均事件率为 490.3 个/s，事件率在这一阶段达到最高峰 1 050.7 个/s，此时应力超过试件峰值强度后下降到 82 MPa，试件出现了明显的宏观破坏。

(2) 相对平静期：声发射事件相对平静期有 4 个阶段，第 1 阶段为 231.1～659.8 s，即第 1 次开始卸载至第 2 次加载到 20 MPa，平均事件率为 8.1 个/s；第 2 阶段为 878.2～1 506.1 s，即第 2 次开始卸载至第 3 次加载到 40 MPa，平均事件率为 8.6 个/s；第 3 阶段为 1 680.4～2 355.3 s，即第 3 次开始卸载至第 4 次加载到 58 MPa，平均事件率为 9.8 个/s；第 4 阶段为 2 505～3 236.7 s，即第 4 次开始卸载至第 5 次加载又卸载到 64 MPa，平均事件率为 18.1 个/s。

2　矿柱破坏颗粒离散元模拟研究

2.1　数值模型

为更真实地模拟现场矿柱破坏过程，采用 PFC 建立矿柱三维数值模型，模型高 10 m，直径 5 m，如图 6 所示。PFC 模型中最基本的单元是球，称为颗粒，通过给颗粒赋予微观物理力学参数，以模拟材料的宏观力学行为，颗粒最小粒径为 0.08 m，模型粒子个数为 33 233 个。通过在颗粒的接触处施加平行黏结模型将颗粒散体黏结为一个具有强度的宏观物体，将颗粒间一次破坏定义为一个声发射事件。表 1 为矿柱 PFC 模型参数。



(a) 平行黏结模型　　(b) 矿柱模型

图 6　矿柱 PFC 模型

Fig.6　PFC model of pillars

表 1　矿柱 PFC 模型参数

Table 1　Parameters of PFC model of pillar

最小粒径/m	粒径比	颗粒接触模量/GPa	颗粒刚度比	颗粒摩擦因数
0.08	1.66	73.0	2.0	0.58
黏结模量/GPa	**黏结刚度比**	**黏结摩擦因数**	**黏结抗拉强度/MPa**	**黏聚力/MPa**
73.0	2.0	45.0	11.5	46.0

2.2　结果分析

2.2.1　简单加载结果分析

图 7 为简单加载声发射数-应力-应变计算结果。由图 7 可知，随着轴向应力的增加，矿柱内部断裂数(声发射数)逐渐增多，根据矿柱内部断裂数(声发射数)变化特征，整个过程可分为两个阶段。

(1) 断裂(声发射)相对平静期：在加载初期，矿柱无断裂与声发射，这是由于计算模型未考虑矿柱自身存在的内部节理裂隙等不连续性，在加载初期，矿柱内部受力未超过颗粒间的黏结力；当矿柱轴向应力超过 30 MPa 后，矿柱内部断裂开始缓慢增加。

(2) 断裂(声发射)活跃期：当应力达到 60 MPa 后，内部断裂数(声发射数)快速增加，此时断裂数为 596 个；加载到 80 MPa 时，矿柱断裂数为 3 958 个；直到超过矿柱的峰值应力(93.2 MPa)后，断裂数

(声发射数)达到最大值 29 548 个。

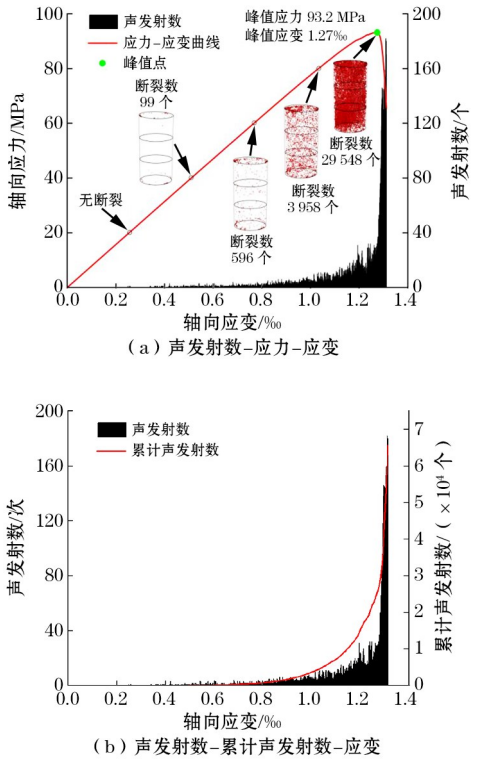


图 7 矿柱简单加载声发射数-应力-应变计算结果

Fig.7 Calculation results of AE count-stress-strain of pillars under simple loading

2.2.2 增量循环加卸载结果分析

图 8 为矿柱增量循环加卸载声发射数-应力-应变/时间计算结果。由图 8 可知,矿柱经历了 5 次循环加卸载过程,在整个加卸载过程中,矿柱内部断裂数(声发射数)呈现相对平静-活跃-相对平静-活跃的交替变化。

第 1 个加卸载循环,矿柱断裂数为 0,同样是因为模拟过程不考虑内部的节理裂隙,此时矿柱受力未超过颗粒间的黏结力;第 2 个加卸载循环,矿柱断裂数开始少量增加,在最大应力 40 MPa 时,断裂数为 107 个,卸载过程无断裂;第 3 次加载到 40 MPa 前,矿柱几乎无断裂发生,呈现典型的 Kaiser 效应,之后矿柱断裂数开始低速增加,在最大应力 60 MPa 时,断裂数增加到 658 个,卸载过程几乎无断裂发生;第 4 次加载到 60 MPa 之前,仍呈现 Kaiser 效应,当应力大于 60 MPa 后,矿柱断裂数开始快速增加,加载到 80 MPa 时,断裂数升高到 4 482 个,卸载过程有少量的断裂事件发生;第 5 次加载到 80 MPa 前出现了少量的断裂事件,之后断裂数开始突增,在峰值强度 90.83 MPa 时,断裂数达到 26 856 个,之后应力开始下降,断裂事件在应力下降过程中仍持续增加,直至矿柱完全破坏。

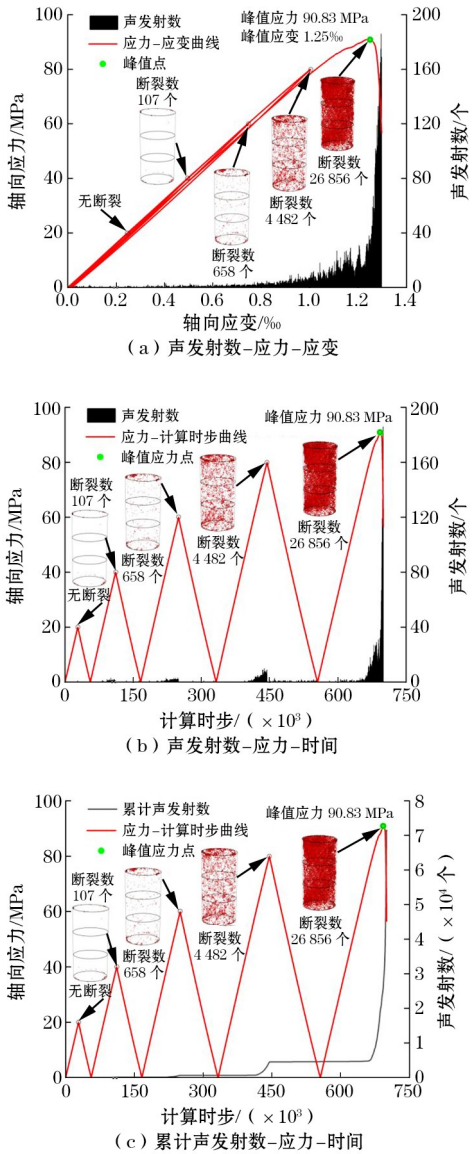


图 8 矿柱增量循环加卸载声发射数-应力-应变/时间计算结果

Fig.8 Calculation results of AE count-stress-strain/time of pillars under incremental cyclic loading-unloading

3 矿柱破坏判别准则与监测预警方法

3.1 矿柱破坏演化特征分析

由岩石试件破坏声发射试验和矿柱破坏颗粒离散元模拟结果可知,矿柱破坏过程均存在断裂(声发射事件)活跃期和相对平静期。简单加载过程中矿柱破坏断裂(声发射事件)演化特征表现为事件活

跃-相对平静-事件活跃。增量循环加卸载过程中矿柱破坏断裂(声发射事件)演化特征表现为事件活跃-相对平静-事件活跃的循环，每次循环加载至上次峰值应力后声发射事件会明显升高，特别是加载到临近峰值强度时声发射事件会快速提高。矿柱破坏声发射事件变与破坏孕育阶段如图 9 所示。由图 9 可知，矿柱破坏过程中声发射事件整体呈现从低速增加至加速增加的演化特征。

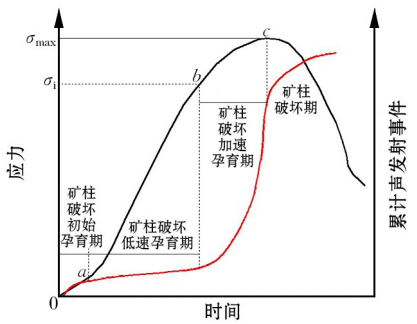


图 9　矿柱破坏声发射事件变化与破坏孕育阶段

Fig.9　Variation of AE events and failure incubation stages of pillars

根据矿柱破坏过程声发射事件的演化特征，可将矿柱破坏孕育过程分为 4 个阶段。

(1) 矿柱破坏初始孕育期。在该阶段矿柱轴向应力开始增加，内部不连续面开始压密，这个过程会产生声发射事件。

(2) 矿柱破坏低速孕育期。随着矿柱轴向应力继续增加，此时矿柱内部会出现局部小破裂，声发射事件增加速率较低，声发射事件整体相对平静。

(3) 矿柱破坏加速孕育期。随着矿柱轴向应力继续增加(大于 σ_i)，此时矿柱内部会出现大量的破裂，即声发射事件加速阶段。该时期矿柱内部破裂会扩展并产生大量的宏观破坏，根据本次试验及前期试验结果[19]，岩性不同，则 σ_i 的大小有所不同，σ_i 为峰值强度的 0.64～0.89 倍。

(4) 矿柱破坏期。当矿柱轴向应力超过矿柱强度后，矿柱随时会发生整体破坏。

3.2　矿柱破坏判别准则

根据矿柱在复杂应力条件下破坏过程中应力和声发射演化特征，提出矿柱破坏判别准则。

(1) 增压稳声模式。矿柱应力开始增加，声发射事件相对平静，或者短期增加后趋于稳定，这种模式出现在矿柱破坏初始孕育期，矿柱稳定性较好。

(2) 稳压稳声模式。矿柱应力增加后趋于稳定，声发射事件相对平静，这种模式出现在矿柱破坏低速孕育期。这个时期内矿柱可能产生了局部小破裂，不过矿柱整体稳定性较好，矿柱稳定性表现为一般。

(3) 降压稳声模式。矿柱应力增加后降低，声发射事件相对平静，这种模式出现在矿柱破坏低速孕育期。这个时期内矿柱可能产生了局部小破裂，不过矿柱整体稳定性较好，矿柱稳定性表现为一般。

(4) 增压增声模式。矿柱应力增加至 σ_i 时，声发射事件突增，且异常活跃，这种模式出现在矿柱破坏加速孕育期。这个时期内矿柱可能会发生开裂、片冒等较明显的宏观破坏，矿柱稳定性差。

(5) 降压增声模式。矿柱应力下降，声发射事件活跃，这种模式出现在矿柱破坏期。这一时期矿柱随时会发生整体失稳破坏，矿柱稳定性差。

3.3　矿柱破坏监测预警方法

矿柱破坏监测预警的整体思路为对矿柱应力和声发射监测结果进行耦合分析，判断矿柱破坏孕育阶段及稳定性状态，实现矿柱稳定性的精准分期监测预警。结合矿柱破坏判别准则，确定了矿柱稳定性分期监测预警方法，见表 2。

表 2　矿柱稳定性分期预警方法

Table 2　Staging early warning method of pillar stability

判别模式	应力特征	声发射特征	破坏阶段	稳定性	预警级别
增压稳声模式	增加	相对平静或增加后趋于平静	初始孕育期	一般	黄色
稳压稳声模式	增加	相对平静	低速孕育期	一般	黄色
降压稳声模式	降低	相对平静	低速孕育期	一般	黄色
增压增声模式	增加	突增且异常活跃	加速孕育期	差	红色
降压增声模式	降低	活跃	破坏期	差	红色

3.4　监测预警系统开发

针对矿柱稳定性监测预警，本研究开发了矿柱稳定性监测预警平台，如图 10 所示。该平台将微震、声发射和应力监测数据进行耦合分析，具有实时在线监测和自动监测预警功能，目前已在多个矿山推广应用，并取得了较好的监测效果。

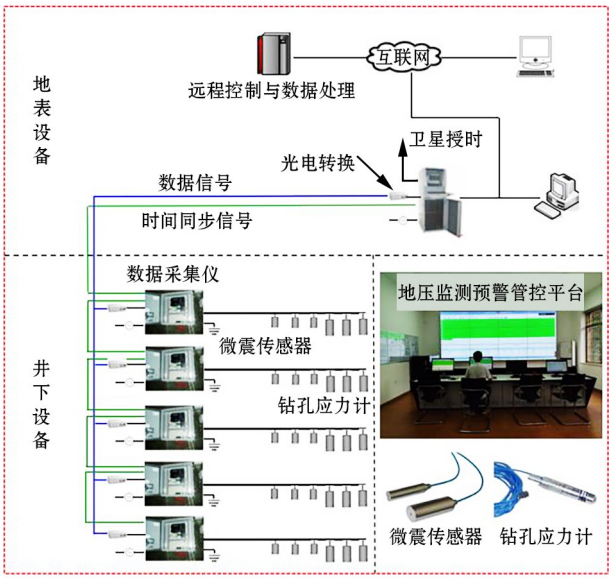


图 10 矿柱稳定性监测预警平台

Fig.10 Monitoring and early warning platform for pillar stability



图 11 典型矿柱照片

Fig.11 Photograph of typical pillars

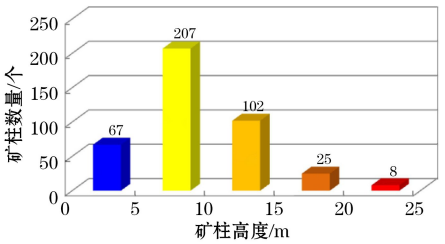


图 12 矿柱高度分布统计结果

Fig.12 Statistical results of pillar height distribution

4 工程应用

4.1 工程背景

某钨矿为我国大型优质白钨矿床,该矿具有储量大、矿石品位高、矿体厚度大、矿体倾角缓及顶底板围岩稳固、工程地质和水文地质条件简单等特点。矿体赋存于燕山晚期细粒黑云母花岗岩体与杨柳岗组含炭硅泥质灰岩的接触带上,呈似层状产出,矿体埋深 40～230 m,矿体厚度 5.98～45.59 m,平均厚度为 12.35 m,矿体沿走向和倾向方向均呈缓坡状,属局部膨大的似层状矿体。

该钨矿采用平硐开拓方式、全面法开采。自 19 世纪 90 年代投产以来,井下形成未处理的不规则采空区约 350 万 m^3,采区开采面积达到 25 万 m^2。空区群为空场法回采后形成的,各采空区相互贯通,留有不规则点柱,如图 11 所示。采空区高度 5～25 m,跨度 10～35 m。图 12 为矿柱高度分布统计结果。根据统计,矿柱总计有 409 个,其中高度小于 5 m 的矿柱有 67 个,占矿柱总数的 16%,高度介于 5～10 m 之间的矿柱有 207 个,占矿柱总数的 51%,高度介于 10～15 m 之间的矿柱有 102 个,占矿柱总数的 25%,高度介于 15～20 m 之间的矿柱有 25 个,占矿柱总数的 6%,高度大于 20 m 的矿柱有 8 个,占矿柱总数的 2%。

该钨矿地压问题严重,矿柱破坏和采空区冒顶等现象时有发生。针对该矿的地压问题,在井下建立了一套融合微震、声发射和应力监测的综合地压监测预警系统。该系统可以有效地对矿柱失稳等前兆信息进行监测,从而实现对地压灾害的预警。目前该系统已成为矿山地压管理和安全生产的重要技术手段。

4.2 案例分析

综合地压监测预警系统在该矿应用效果良好,多次成功监测预警矿柱失稳垮塌。现对该钨矿 2-45# 和 2-105# 矿柱稳定性监测预警案例进行分析。

图 13 为 2-45# 矿柱在 2020 年 4 月 2 日至 2021 年 10 月 19 日期间的微震与应力监测结果。由图 13 可知,2-45# 矿柱整体经历了两次来压活动,第一次是 2020 年 6 月 9 日至 2020 年 10 月 7 日,2020 年 8 月 5 日矿柱应力增量达到最大值 2.97 MPa,2020 年 6 月 17 日微震事件数开始突增,2020 年 6 月 22 日达到了 91 个,之后微震事件数开始下降,2020 年 7 月 29 日至 2020 年 8 月 10 日又开始增加;第二次来压周期是 2021 年 4 月 17 日至 2021 年 10 月 14 日,2021 年 4 月 17 日矿柱应力开始增加,2021 年 7 月 27 日矿柱应力增量达到最大值 17.72 MPa,2021 年 4 月 17 日至 2021 年 6 月 10 日微震事件水平较低,为相对平静期,2021 年 6 月 10 日微震事件开始增加,2021 年 8 月 29 日达到最大值 83 个。

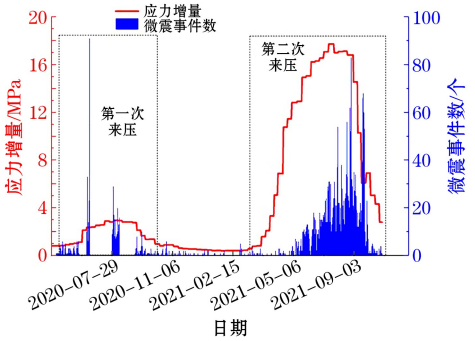


图 13　2-45# 矿柱微震与应力监测结果

Fig.13　Microseismic and stress monitoring results of pillar 2-45#

2-45# 矿柱监测预警分析如图 14 所示。

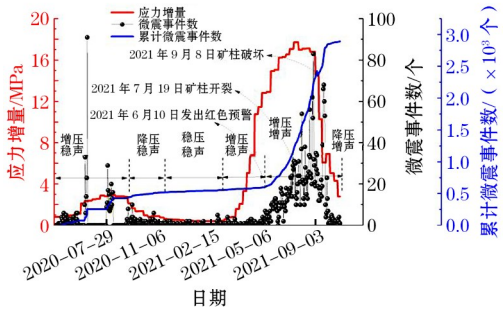


图 14　2-45# 矿柱监测预警分析

Fig.14　Monitoring and early warning analysis of pillar 2-45#

由图 14 可知，2-45# 矿柱在 2020 年 4 月 21 日至 2021 年 10 月 19 日期间经历了增压稳声、降压稳声、稳压稳声、增压增声、降压增声 5 个阶段。根据矿柱稳定性分期监测预警方法，矿柱于 2021 年 6 月 10 日开始进入增压增声阶段，微震事件数和应力异常升高，矿山随即发出了红色预警，对该区域进行了封闭处理。2021 年 7 月 19 日现场发现矿柱出现少量纵向裂缝，2021 年 7 月 27 日矿柱应力开始下降，微震事件数仍持续升高，开始进入降压增声阶段，2021 年 9 月 8 日矿柱出现多条纵向贯通裂缝，同时矿柱与顶板交界处发生较大范围的冒落，如图 15 所示。

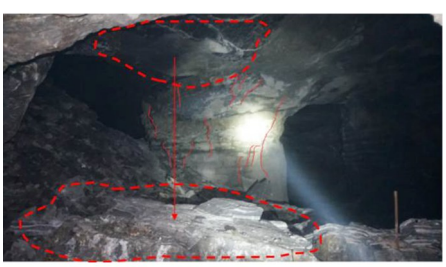


图 15　2-45# 矿柱失稳垮塌照片

Fig.15　Photograph of instability and collapse of pillar 2-45#

图 16 为 2-105# 矿柱在 2021 年 12 月 1 日至 2022 年 6 月 30 日期间的微震与应力监测结果。2021 年 12 月 8 日矿柱应力开始增加，2022 年 1 月 11 日应力增量达到最大值 7.85 MPa，2021 年 12 月 17 日微震事件数开始增加，2021 年 12 月 22 日微震事件数下降到非常低的水平，2022 年 1 月 8 日微震事件数又开始升高，2022 年 1 月 16 日达到峰值 34 个，之后应力和微震事件数均开始下降，下降过程中微震事件数较低，进入 2022 年 5 月后应力增量稳定在 0.75 MPa 左右，这时期几乎没有微震事件。

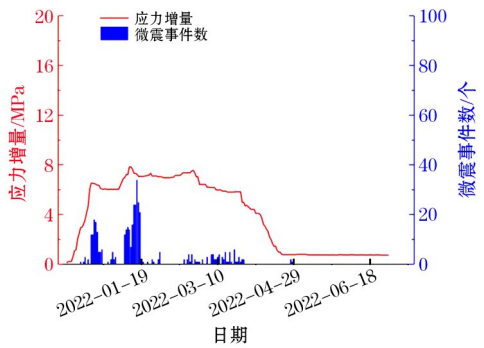


图 16　2-105# 矿柱微震－应力监测结果

Fig.16　Microseismic and stress monitoring results of pillar 2-105#

2-105# 矿柱监测预警分析如图 17 所示。由图 17 可知，在 2021 年 12 月 1 日至 2022 年 6 月 30 日期间，2-105# 矿柱经历了增压稳声、降压稳声、稳压稳声 3 个阶段。可以看出，在监测期内，2-105# 矿柱经历了一次小范围的地压活动，并未出现增压增声和降压增声这两个阶段，应力和微震事件数相对较低，说明经过来压和应力调整后，矿柱应力和微震事件数趋于稳定。2021 年 12 月 19 日矿山发出了黄色预警信息，并对该矿柱所在区域进行了封闭处理，2022 年 1 月 26 日矿柱中间部位局部发生片冒，如图 18 所示。

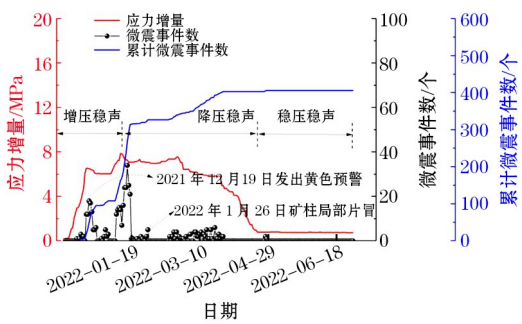


图 17　2-105# 矿柱监测预警分析

Fig.17　Monitoring and early warning analysis of pillar 2-105#



图 18 2-105# 矿柱片冒照片

Fig.18 Photograph of spalling of pillar 2-105#

5 结论

(1) 矿柱简单加载破坏过程断裂(声发射事件)演化特征表现为事件活跃-相对平静-事件活跃。矿柱增量循环加卸载破坏过程断裂(声发射事件)演化特征表现为事件活跃-相对平静-事件活跃的循环,每次循环加载至上次最大应力后,声发射事件率会明显升高,特别是加载到临近峰值强度时声发射事件率会快速提高,矿柱破坏过程断裂(声发射事件)整体呈现从低速增加至加速增加的演化特征。

(2) 根据应力-声发射演化特征,矿柱破坏过程分为矿柱破坏初始孕育期、矿柱破坏低速孕育期、矿柱破坏加速孕育期和矿柱破坏期 4 个阶段。

(3) 本文提出了基于应力和声发射特征的增压稳声模式、稳压稳声模式、降压稳声模式、增压增声模式和降压增声模式的矿柱破坏判别准则。增压增声模式和降压增声模式下矿柱易发生整体失稳破坏。基于矿柱破坏演化特征和矿柱破坏判别准则,建立了矿柱稳定性分期监测预警方法,并开发了矿柱稳定性监测预警平台。

(4) 矿柱破坏判别准则和分期监测预警方法在现场工程应用效果较好。2-45# 矿柱在进入增压增声阶段后,矿山发出红色预警 39 d 后矿柱出现纵向裂缝,90 d 后矿柱出现整体破坏;2-105# 矿柱在进入增压稳声阶段后,矿山发出黄色预警 38 d 后,矿柱中间部位局部发生片冒。

(5) 后续研究可利用数值计算等技术手段模拟开挖过程中矿柱应力分布特征,将现场监测和数值计算结果在同一平台进行耦合分析,进一步提高矿柱监测预警精度。

参考文献(References):

[1] 刘沐宇,徐长佑.地下采空区矿柱稳定性分析[J].矿冶工程,2000,20(1):19-22.
LIU Muyu, XU Changyou. Stability analysis of pillars in mined-outarea[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000,20(1):19-22.

[2] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(10):1945-1956.

[3] 王金安,李大钟,马海涛.采空区矿柱-顶板体系流变力学模型研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):577-582.
WANG Jin'an, LI Dazhong, MA Haitao. Study of rheological mechanical model of pillar-foof system in mined-out area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(3):577-582.

[4] 宋卫东,曹帅,付建新,等.矿柱稳定性影响因素敏感性分析及其应用研究[J].岩土力学,2014,35(增刊 1):271-277.
SONG Weidong, CAO Shuai, FU Jianxin, et al. Sensitivity analysis of impact factors of pillar stability and its application [J],Rock and Soil Mechanics,2014,35(Suppl.1):271-277.

[5] 尹升华,吴爱祥,李希雯.矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J].煤炭学报,2012,37(增刊 1):48-52.
YIN Shenghua, WU Aixiang, LI Xiwen. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(Suppl.1):48-52.

[6] 王在泉,李华峰.矿柱抗剪安全系数的数值计算方法及分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):277-280.
WANG Zaiquan, LI Huafeng. Numerical calculation method for shear safty coefficient of mine pillar[J].Journal of Mining and Safety Engineering,2010,27(2):277-280.

[7] 王连国,缪协兴.基于尖点突变模型的矿柱失稳机理研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(2):137-140.
WANG Lianguo, MIAO Xiexing. Study of mechanism of destabilization of the mine pillar based on a cusp catastrophic model[J].Journal of Mining and Safety Engineering,2006, 23(2):137-140.

[8] JINDRICH S, VLADIMIR P, VLASTIMIL H, et al. Strength and deformation of pillars during mining in the shaft pillar[J].Applied Sciences. 2024,14:5003.

[9] WATTIMENA R K, KRAMADIBRATA S, SIDI I D, et al. Developing coal pillar stability chart using logistic regression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2013,58:55-60.

[10] ESTERHUIZEN G S, DOLINAR D R, ELLENBERGER J L. Pillar strength in underground stone mines in the united states[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2011,48(1):42-50.

[11] 李夕兵,李地元,郭雷,等.动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):922-928.
LI Xibing, LI Diyuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(5):922-928.

[12] AKSOY C O, ONARGAN T. Sizing room and pillar by numerical modeling for underground marble quarries in turkey[J]. Journal of Mining Science,2006,42(5):483-489.

[13] GRIFFITHS D V, FENTON G A, LEMONS C B. Probabilistic analysis of underground pillar stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2002,26(8):775-791.

[14] 来兴平,孙欢,单鹏飞,等.急倾斜坚硬岩柱动态破裂"声-热"演化特征试验[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2285-2292.
LAI Xingping, SUN Huan, SHAN Pengfei, et al. Acoustic emission and temperature variation in failure process of hard rock pillars sandwiched between thick coal seams of extremely steep[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(11):2285-2292.

[15] 卢宏建,梁鹏,甘德清,等.动态扰动下硬岩矿柱破裂失稳演化特征试验[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊2):3713-3722.
LU Hongjian, LIANG Peng, GAN Deqing, et al. Crack and destabilization evolution characteristics test on hard rock pillars under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Suppl. 2):3713-3722.

[16] 赵奎,胡京涛,王晓军.矿柱稳定性联合监测与预测研究[J],江西理工大学学报,2010,31(3):5-8.
ZHAO Kui, HU Jingtao, WANG Xiaojun. Research on the combined monitoring and prediction of pillar stability[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2010,31(3):5-8.

[17] 彭府华,李庶林,冷修宁,等.降雨入渗对浅埋采场稳定性影响的微震监测分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4154-4163.
PENG Fuhua, LI Shulin, LENG Xiuning, et al. Study of influence of rainfall permeation on shallow stope stability by microseismic Monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Suppl.2):4154-4163.

[18] 王培武,王贤伟,杨顺.基于微震监测的特大型矿柱破裂机理及安全系数分析[J].矿业研究与开发,2016,36(10):85-89.
WANG Peiwu, WANG Xianwei, YANG Shun. Analysis on the rupture mechanism and safety factors of large pillar based on microseismic monitoring[J].Mining Research and Development,2016,36(10):85-89.

[19] 李庶林,周梦婧,高真平,等.增量循环加卸载下岩石峰值强度前声发射特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):724-735.
LI Shulin, ZHOU Mengjing, GAO Zhenping, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics before the peak strength of rocks under incrementally cyclic loading-unloading methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(4):724-735.