

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.10.016

矿山注浆帷幕渗水通道形成过程

刘洪磊, 周靖人, 杨天鸿, 张鹏海

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 根据张马屯铁矿注浆帷幕漏水实例及排水试验结果,通过帷幕及其周围岩体破裂诱发的微震活动研究了渗水通道的形成过程.结果表明:渗水通道的发展主要受采矿活动与帷幕间距离的影响,采矿活动周期性接近与远离帷幕引起帷幕及其周围岩体受力状态的阶段性变化导致渗水通道上微震活动呈现出交替的活跃与沉寂.渗水通道的形成、发展伴随着大量微震活动,利用微震监测方法可分析渗水通道的形成过程及形成原因,确定潜在渗水通道的空间位置,所以微震监测方法是一种极具发展前景的注浆帷幕稳定性监测方法.

关键词: 微震监测;注浆帷幕;渗水通道;排水试验;岩体破坏

中图分类号: TD 325

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)10-1447-06

Seepage Channel Formation Process of Mine Grout Curtain

LIU Hong-lei, ZHOU Jing-ren, YANG Tian-hong, ZHANG Peng-hai

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Hong-lei, E-mail: liuhonglei@mail.neu.edu.cn)

Abstract: According to the curtain leakage phenomenon and the drainage test results in Zhangmatun iron deposit grout curtain, the seepage channel formation process was studied through the microseismic activities induced by the collapse of the curtain and its surrounding rock masses. Results showed that the formation of seepage channel is mainly affected by the distance between mining activities and the grout curtain. The periodically mining activities, close or away from the grout curtain, lead to periodical stress changing in the curtain and the surrounding rock masses, thus resulting in the periodical activation of microseismic activities surrounding the curtain. Because the formation of water seepage channel and its development are accompanied by a large number of microseismic events, the location of the seepage channel, its formation process and related mechanism can be well determined and understood by microseismic monitoring technique, which is a promising method for the stability assessment of the grouting curtain.

Key words: microseismic monitoring; grout curtain; seepage channel; drainage test; rock failure

水害防治一直是制约大水矿山安全生产的重大技术难题.据统计,60%的矿井事故与地下水作用有关,且随着开采深度的增加,水害日趋严重,矿山涌、突水已成为制约矿山安全生产的主要灾害之一^[1].注浆帷幕是一种被广泛用于水害防治的技术.通过构筑帷幕减小矿区水压和水量,不仅可以节省大量排水费用、保障矿区安全,还可以降低矿山疏干排水对地下水环境的破坏,产生良好的经济效益.水口山铅锌矿、大红山矿及张马屯铁矿等均采用了注浆帷幕技术来防治水害.

注浆帷幕属隐蔽工程,竣工后的帷幕可能存

在未知的薄弱区域.随着帷幕服役时间的增加及开采扰动的影响,薄弱区域极易开裂、漏水.轻则造成堵水效果下降,大幅度增加矿山疏干成本;重则导致堵水功能失效,发生突水事故.因此,注浆帷幕的稳定性和堵水效果直接关系到矿山的安全生产,对注浆帷幕进行实时监测十分必要.

传统的注浆帷幕稳定性监测方法是基于监测水位、水压或水温等参数.虽然这些参数的异常变化与帷幕破坏的发生密切相关,但通过传统的监测方法很难预测帷幕破坏及提前采取防治措施.

微震监测是利用受载材料产生的弹性波来研

究材料破裂失效过程的一种技术. 煤矿及金属矿山使用微震技术进行监测已有较为广泛的应用^[2-5]. 基于“采动压力和水压力扰动应力场诱发微破裂(微震活动性)是矿山突水前兆本质特征”的学术观点^[6], 本文结合张马屯铁矿注浆帷幕漏水实例, 通过事后分析的方法对漏水区域的微震活动进行研究, 揭示渗水通道的形成过程及成因.

1 工程概况及堵水效果

1.1 张马屯铁矿概况

张马屯铁矿位于济南市东郊, 水文地质条件复杂, 为国内少见的大水矿床. 该矿属矽卡岩型磁铁矿床, 矿体主要埋藏于标高 -100 ~ -400 m, 矿区地层主要为闪长岩、大理岩和第四系覆盖层(图 1). 其中大理岩岩溶裂隙发育、富水性强、透水性较好, 为含水层. 闪长岩含水弱、透水差, 可视作相对隔水层. 该矿采用嗣后全尾砂胶结充填的分段空场法采矿, 矿房回采后用全尾砂胶结体充填采空区, 充填体凝固达到强度后对间柱进行回采.

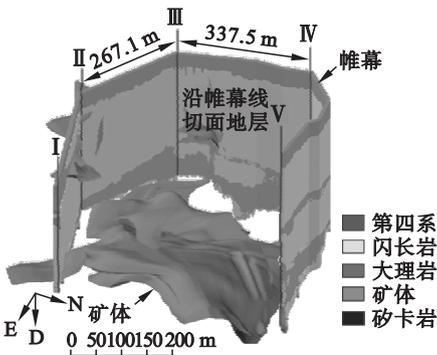


图 1 张马屯铁矿岩层分布

Fig. 1 Strata distribution in Zhangmatun iron mine

该矿于 1996 年进行了大帷幕钻孔注浆堵水工程, 整个帷幕堵水工程共施工 241 个钻孔, 全长 1 410 m, 深 330 ~ 560 m, 厚 10 m 左右, 形成一个“匚”字型将矿体整体包围, 帷幕位置及其岩层分布如图 1 所示. 帷幕按照方位被分为南区帷幕(I-II)、西南区帷幕(II-III)、西区帷幕(III-IV)以及北区帷幕(IV-V). 其中, II-III 段长 267.1 m, III-IV 段长 337.5 m. 该矿区主要含水层为 -280 ~ -500 m 大理岩层, II-III 段岩性最弱, 富含溶洞、裂隙, 且距离采场最近, 为重点监测区域.

1.2 帷幕堵水效果

注浆帷幕竣工后, 在 -324 m 水平靠近西南

区帷幕(II-III)的 2 个放水硐室进行放水试验, 以测试帷幕的堵水效果. 试验历时 20 d, 放水量约 16.5 万 m³, 矿坑总排水量约 50 万 m³. 放水试验得到的等水位线如图 2 中黑色曲线所示, 经计算帷幕堵水效果为 82.14%. 经过几年的采矿生产, 矿山于 2003 年再次进行了放水试验, 经计算帷幕堵水效果在 83.46% 以上. 可见 1997—2003 年间, 帷幕堵水效果基本保持不变, 说明该时间段内帷幕处于十分稳定的状态.

然而, 随着开采活动的继续进行, 开采位置逐渐靠近西南区帷幕, 矿山涌水量自 2009 年 6 月开始明显增加, 如图 3 所示. 为了确定帷幕漏水的具体位置, 2010 年在西南区帷幕附近进行了第三次放水试验, 获得的水位线如图 2 所示^[7]. 对比 1997 年及 2010 年的水位曲线可以发现, 西南区帷幕(II-III)中段的水力梯度发生了十分明显的变化, 2010 年的 -180 m 水位线较 1997 年的 -180 m 水位线延伸至帷幕内近 60 m, 表明该区域帷幕的堵水效果降低. 根据水力梯度的变化可确定西南区帷幕中段出现了连接帷幕内外的渗水通道, 如图 2 中浅蓝色箭头所示.

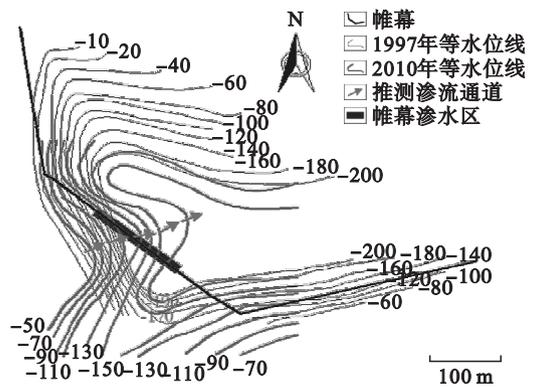


图 2 1997 年及 2010 年 -324 m 水平放水试验水位线
Fig. 2 Contours of water level in drainage tests on -324 m level in 1997 and 2010

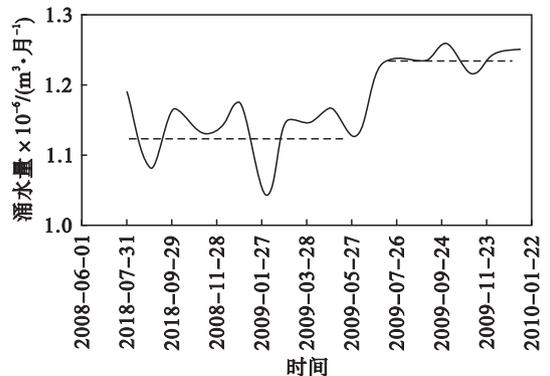


图 3 涌水量随时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of discharge rate with time

2 微震监测系统的建立及数据处理

2.1 微震监测系统的建立

为了监测帷幕稳定性及标定潜在漏水区域的位置,该矿引进 ESG 微震 (MS) 监测系统,对帷幕进行实时连续监测,该系统于 2007-07-24 开始运行. 系统的模数转换为 24 位,信号采样率为 50 Hz ~ 10 kHz,信号增益为 0, 6, 20, 40 dB 四种,动态响应范围大于 115 dB. 17 个微震传感器的安装位置如图 4 所示,其中在 -200 m 水平布置 3 个、-240 m 水平布置 3 个、-300 m 水平布置 6 个及 -360 m 水平布置 5 个.

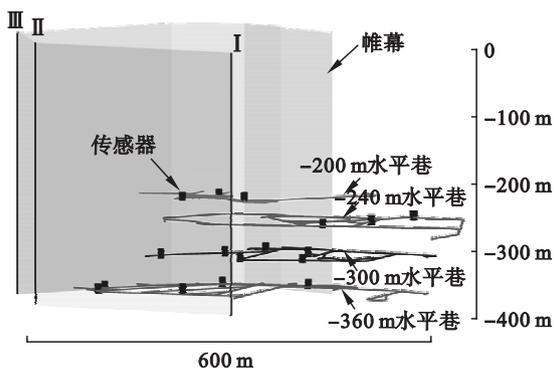


图 4 微震监测传感器分布

Fig. 4 Sensor arrangements of MS monitoring system

2.2 信号去噪

矿山生产过程中会产生大量噪声,混合在微震信号中,影响对微震信号的到时拾取及频谱分析. 矿山中的噪声信号主要来源有铲运设备作业、监测系统电路中的冲击电压、凿岩爆破及传感器背景白噪声. 噪声信号和微震信号在波形上有较大区别,通过人工拾取方法,能较容易将带有噪声信号的微震信号识别出^[8]. 通常情况下,噪声与微震信号在频域上有明显区别,通过数字滤波可有效消除噪声. 相对于噪声,微震信号频域低而宽,成分丰富,为更好地保留微震信号(此处首先将加速度信号通过积分转变为位移信号),采用通带平缓的 Butterworth 低通滤波器^[9],其幅度特性为

$$|H_{\alpha}(j\Omega)|^2 = 1 / (1 + (\Omega / \Omega_c)^{2N}) \quad (1)$$

式中: $|H_{\alpha}(j\Omega)|$ 为滤波器单位脉冲响应; j 为复数, Ω_c 为幅值衰减为 -3 dB 时的频率; N 为滤波器阶数.

根据对微震信号频谱的分析,确定频谱主要集中在 0 ~ 255 Hz, 超过 500 Hz 的极少. 因此可将 Ω_c 设置为 250 Hz, 到 500 Hz 时幅值至少衰减至

-60 dB. 阶数 N 过大影响计算效率,导致通带震荡,太小则过渡带较长,通过对比选 $N = 10$. 滤波之后的波形高频波动减少,显得更加平滑,如图 5 所示.

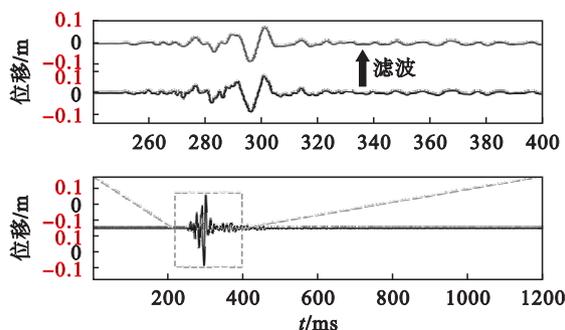


图 5 微震信号滤波示意图

Fig. 5 Filtering diagram of MS signal

2.3 微震波形初至时刻的自动拾取

波形初至时刻的拾取是定位微震事件的前提. 根据文献[10],设波形序列为 $x[n]$, 通过 Hilbert 变换 $\tilde{x}[i]$ 构建特征函数:

$$CF[i] = \sqrt{x[i]^2 + \tilde{x}[i]^2}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中: n 为波形采样点数; $\tilde{x}[i]$ 为第 i 个 Hilbert 变换值.

短时窗均值 (STA) 和长时窗均值 (LTA) 之比定义为

$$\text{Thr}[i] = \frac{\text{STA}[i]}{\text{LTA}[i]} = \frac{\sum_{j=i}^{i+L_{\text{STA}}-1} CF[j] \cdot \frac{1}{L_{\text{STA}}}}{\sum_{j=i+L_{\text{STA}}-L_{\text{LTA}}}^{i+L_{\text{STA}}-1} CF[j] \cdot \frac{1}{L_{\text{LTA}}}} \quad (3)$$

式中: $CF[j]$ 为第 j 个特征函数值; L_{STA} 与 L_{LTA} 分别为短、长时窗长度.

当 P 波未到时, STA 与 LTA 均反映噪声均值,因此其比值接近 1. 当有信号到达时, STA 相对 LTA 更加敏感,预先发生突变,导致 Thr 明显增大. 当 Thr 超过预设阈值 Thr_0 时则视为有 P 波信号到达,由此可根据 Thr 拾取 P 波到达时间. 张马屯微震信号拾取选取 $L_{\text{STA}} = 20, L_{\text{LTA}} = 120$, P 波预设阈值为 2.5, 其结果如图 6 所示.

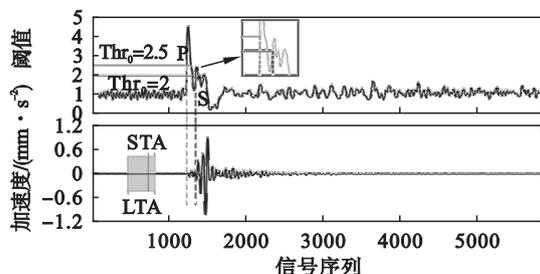


图 6 微震波到时拾取

Fig. 6 MS wave onset picking

2.4 微震事件定位误差

得到 P 波到时后,采用 Geiger 法进行微震事件的空间定位. 设求得震源发生时间为 t_0 , 被触发传感器 P 波到时间为 t_i , 传感器与定位点之间的距离为 R_i , 则定位误差 l_e 的计算式为^[11]

$$l_e = v_p \cdot t_e = v_p \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_0 - t_i + R_i/v_p)^2} \quad (4)$$

式中: v_p 为 P 波波速; t_e 为时间误差; n 为震源触发传感器个数. 根据爆破测试结果, 在进行定位误差计算时, P 波波速设定为 5 450 m/s.

利用式(4)计算自微震监测系统运行以来帷幕西南区所有微震事件的定位误差, 计算结果见图 7. 可知, 帷幕外侧的定位误差相对较大, 约为 30 ~ 40 m. 帷幕内侧的定位误差较小, 多为 20 m 左右.

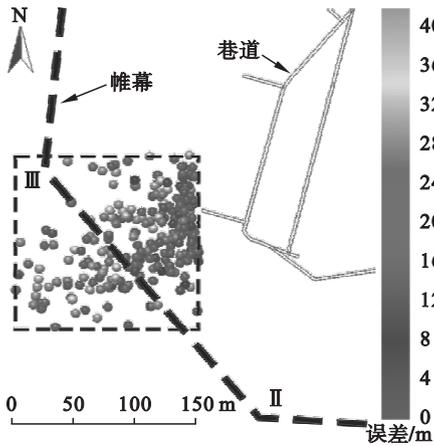


图 7 微震事件定位误差

Fig. 7 Locating error of MS events

3 微震事件的空间分布特征

2007-07-24 ~ 2009-03-27 的微震事件空间分布如图 8 所示, 图中小球代表微震事件的空间位置, 不同颜色代表不同的震级, 灰色实心矩形代表已完成开采的矿房, 红色空心矩形代表正在开采的矿房.

由图 8 可知, 随着开采活动的进行, 微震事件形成了多个在空间上较为密集的微震事件簇. 根据空间分布特征, 微震事件簇可分成两种类型: 一类呈团状聚集于帷幕内处于生产状态的矿房附近, 并随采矿过程的发展在空间上不断迁移, 主要由采矿活动引起; 第二类则呈带状贯穿西南区帷幕, 如图 8 中虚线圈定区域所示, 这类微震事件簇的存在说明帷幕西南区出现了裂隙带, 若这些裂隙相互贯通则很有可能在帷幕内外巨大水力压力差的作用下成为渗流通道, 使帷幕外的水大量渗入帷幕内. 对比图 2 和图 8, 发现第二类微震事件

的位置与通过水位线推测的渗水通道基本一致 (仍存在 20 m 左右的误差), 一方面说明利用微震监测技术标定帷幕破坏渗水区位置具有一定可靠性, 另一方面也说明渗水通道的形成过程伴随着微震活动. 因此, 渗水通道的形成过程可以通过分析微震事件的时空演化过程来理解.

由图 8 可知, 第二类微震事件首先在靠近帷幕的一个矿房(图 8a 中红色空心矩形)周围开始出现, 然后分布范围不断扩大直至延伸至帷幕之外(图 8b). 当靠近帷幕的矿房停止开采后, 微震事件也停止出现(图 8c). 当采矿活动在另一个靠近帷幕的矿房重新开始时(图 8d), 微震事件再次出现.

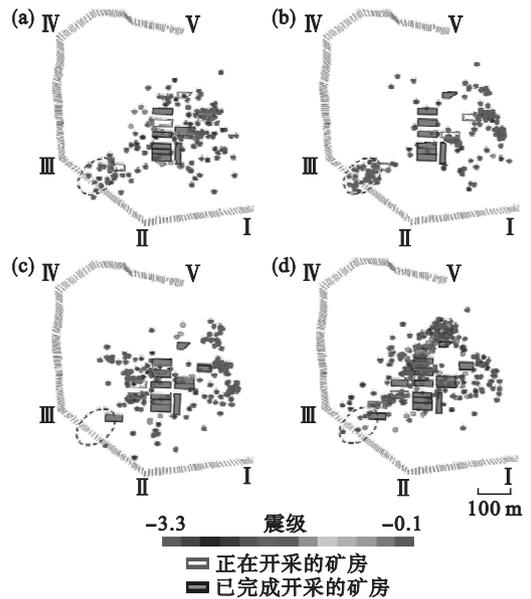


图 8 2007-07-24 ~ 2009-03-27 -240 ~ -360 m 水平微震事件的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of MS events between -240 m and -360 m level from 2007-07-24 to 2009-03-27

- (a) — 2007-07-24 ~ 2007-11-30;
- (b) — 2007-12-01 ~ 2008-01-31;
- (c) — 2008-02-01 ~ 2008-06-20;
- (d) — 2008-06-21 ~ 2009-03-27.

4 微震事件随时间的变化过程

在确定微震事件与渗水通道空间对应关系的基础上, 通过分析微震事件参数随时间的变化可以了解渗水通道随时间的演化过程.

4.1 微震事件率和累积能量释放

图 9 为渗流通道上微震活动的事件率和累积能量释放随时间的变化. 依据微震活动的活跃程度可将渗水通道的形成过程分为 4 个阶段.

第一阶段是 2007-07-24 ~ 2008-01-31, 对应图 8a 及图 8b, 事件率较高且有随时间增加的趋势, 平均事件率约 1.6 次/天, 最高为 10 次/天, 累积能量释放量也随着事件率的增加而不断增加。

第二阶段是 2008-02-01 ~ 2008-06-20, 对应图 8c, 无微震事件, 累积能量释放量不变。

第三阶段是 2008-06-21 ~ 2008-09-09, 微震活动重新开始活跃起来, 但活跃程度低于第一阶段。平均事件率约 0.5 次/天, 最高为 4 次/天。

第四阶段是 2008-09-10 ~ 2009-03-27, 微震活动明显减少。第三、第四阶段对应图 8d。

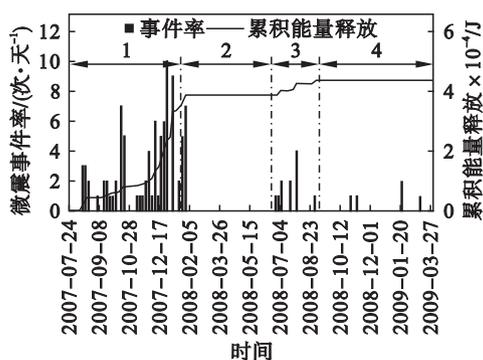


图 9 微震事件率和累积能量释放随时间变化
Fig. 9 Change of MS event rate and accumulated energy release with time

基于微震事件率和累积能量释放随时间的变化, 可发现西南区帷幕 (II - III) 的微震活动呈阶段性的活跃与沉寂。活跃阶段对应采矿活动距帷幕较近的时期 (图 8a, 图 8b 及图 8d), 沉寂阶段对应采矿活动远离帷幕的时期 (图 8c)。在活跃阶段中, 采矿活动与帷幕的距离越近, 诱发的微震事件越多, 这表明帷幕的破坏过程受采矿活动与帷幕间距的影响显著。

4.2 视应力及累积视体积

视应力为震源单位非弹性应变区岩体的辐射微震能, 视体积为震源非弹性变形区岩体的体积。虽然利用微震波形不能直接获得绝对的应力和应变值, 但是视应力及累积视体积的可靠估计值可以作为衡量应力、应变相对水平的指标。视应力 σ 及视体积 V 计算如下:

$$\sigma = E/P; \quad (5)$$

$$V = \mu P^2/E. \quad (6)$$

式中: μ 为岩石刚度; P 为微震势能; E 为微震辐射的能量。

根据应力和应变之间的关系, 可以推断承载材料的受力状态^[12]。图 10 为西南区帷幕视应力

及累积视体积随时间的变化过程。依据其变化特征可将西南区帷幕的受力过程分为 4 个阶段。

第一阶段, 应力积累期: 2007-07-24 ~ 2008-01-31。视应力波动式上升, 而累积视体积则在此期间不断增加, 说明西南区帷幕的应力和变形均在增加。视应力在该阶段的后期明显高于前期, 对比图 9 中第一阶段发现该阶段后期的事件率也高于前期, 应力与事件率有正相关关系, 这与许多声发射试验现象一致^[13]。

第二阶段, 相对稳定期: 2008-02-01 ~ 2008-06-20。视应力及累积视体积基本为常数, 说明该阶段的受力状态基本不变。该阶段对应图 9 中的阶段 2, 即第一个微震活动沉寂期。

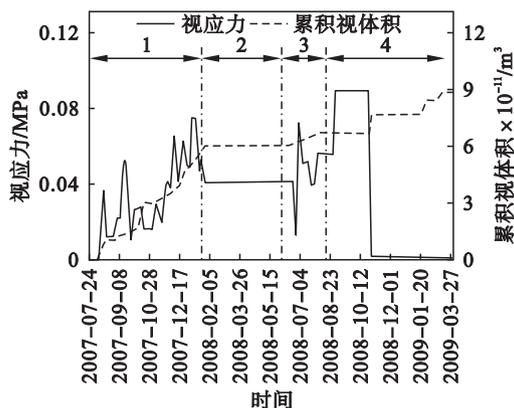


图 10 视应力与累积视体积随时间变化
Fig. 10 Change of apparent stress and cumulative apparent volume with time

第三阶段, 应力二次积累期: 2008-06-21 ~ 2008-09-09。视应力及累积视体积再次升高, 视应力达到最大值。该阶段对应图 9 中的阶段 3, 即第二个微震活动活跃期, 说明视应力的升高再次引起微震事件的出现。

第四阶段, 破坏期。视应力迅速降低而累积视体积阶梯式上升。这种变化行为说明发生了一次较为剧烈的破坏。破坏后, 视应力降至最低水平, 而累积视体积的增量却高于第三阶段。这种较低应力产生较大变形的现象说明破坏前后的力学性质发生了极大的变化。对比图 9 可发现帷幕的破坏发生于微震事件的第二个沉寂阶段, 破坏前的近一个月内没有微震事件发生, 出现了明显的微震“平静期”。一些试验发现平静期与岩石塑性变形阶段的持续时间有密切关系, 具有一定延性的岩石会在临近峰值应力时出现声发射平静期。由于工程岩体内存在大量节理、裂隙, 加之水对岩体力学性质的弱化作用, 帷幕区岩体的塑性变形能力优于岩石试件, 所以帷幕破坏前的“平静期”现

象十分明显。

综上所述,微震活动的活跃程度与帷幕及周围岩体的受力状态密切相关,应力状态阶段性的变化特征导致微震活动活跃与沉寂阶段的交替出现。微震事件于2008年1月前已在潜在的渗水通道上大量聚集(图8b),而根据微震事件参数的推测,西南区帷幕在2008年10月经历了一次较大破坏(图10),这两种监测结果分别提前17个月及10个月出现于涌水量明显增加(2009年6月,图3)之前。由此可见,渗水通道的形成存在一个长时间的孕育、发展过程,利用微震技术监测预警潜在的渗水通道在时间上具有充足的提前量。另外,2008年10月出现的破坏并未立即引起涌水量的增加,也暗示了帷幕内外的裂隙带相互贯通并形成完整的渗水通道可能经历了不止一次较大的破坏。

5 结 论

1) 微震事件的空间位置与放水试验推测的渗流通道基本一致,说明渗水通道的形成过程确实伴随着微震活动;同时,也证明了利用微震监测技术标定帷幕破坏渗水区位置具有一定可靠性。

2) 渗水通道的形成过程主要受采矿活动与帷幕间距的影响,采矿活动与帷幕间距的变化引起帷幕及周围岩体受力状态的阶段性变化,并导致微震事件率呈现出交替的活跃与沉寂期。

3) 渗水通道的形成经历长时间的孕育、发展过程,利用微震技术监测预警潜在的渗水通道在时间上具有充足的提前量。

参考文献:

- [1] 仵彦卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
(Wu Yan-qing, Zhang Zhuo-yuan. An introduction to rock mass hydraulics [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.)
- [2] Zhang K, Yang T, Bai H, et al. Longwall mining-induced damage and fractures; field measurements and simulation using FDM and DEM coupled method [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(1): 121 - 127.
- [3] Liu H L, Li L C, Li Z C. Numerical modeling of mining-

- induced inrushes from subjacent water conducting karst collapse columns in Northern China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2017, DOI:10. 1007/s10230 -017 -0503 -z.
- [4] Zhou J, Wei J, Yang T, et al. Damage analysis of rock mass coupling joints, water and microseismicity [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 366 - 381.
- [5] Li Y, Yang T H, Liu H L, et al. Effect of mining rate on the working face with high-intensity mining based on microseismic monitoring: a case study [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(2): 350 - 358.
- [6] 杨天鸿,唐春安,谭志宏,等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268 - 277.
(Yang Tian-hong, Tang Chun-an, Tan Zhi-hong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of ground water inrush [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 268 - 277.)
- [7] 韩伟伟,李术才,张庆松,等. 矿山帷幕薄弱区综合分析方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 512 - 519.
(Han Wei-wei, Li Shu-cai, Zhang Qing-song, et al. A comprehensive analysis method for searching weak zones of grouting curtain in mines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(3): 512 - 519.)
- [8] Malovichko D. Discrimination of blasts in mine seismology [C]//Deep and High Stress Mining. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2012: 161 - 171.
- [9] Mitra S K. Digital signal processing: a computer-based approach [M]. Hamilton: McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- [10] 王李管,汪辉,赵君杰. 单分量微地震信号的P波S波到时自动拾取方法[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 184 - 189.
(Wang Li-guan, Wang Hui, Zhao Jun-jie. An automatic P- and S-wave onset-picking designed for single-component microseismic signals [J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(2): 184 - 189.)
- [11] 姜福兴,叶根喜,王存文,等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932 - 1938.
(Jiang Fu-xing, Ye Gen-xi, Wang Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1932 - 1938.)
- [12] Liu J P, Feng X T, Li Y H, et al. Studies on temporal and spatial variation of microseismic activities in a deep metal mine [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 60(8): 171 - 179.
- [13] Cai M, Kaiser P K, Tasaka Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 833 - 847.