

# 节理岩体损伤破裂中的渗透性演化与能量耗散<sup>\*</sup>

杨韬,唐春安,梁正召

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘 要:**根据损伤力学和统计强度理论,在真实破坏分析方法(RFPA)的基础上建立了损伤过程渗透模型,基于离散裂隙网络(DFN)模型生成随机正交节理岩体数值试样,对岩体损伤-渗流-能量耗散的完整过程以及渗流通道的形成变化进行了精细模拟。数值试验表明,节理岩体在峰后软化和残余变形阶段依然存在大量的新生裂隙持续发育,同时也伴随能量的不断耗散。渗透性的激增显著滞后于峰值荷载,往往在峰后数倍峰值应变处才形成贯穿岩体的完整渗流通道,渗透性瞬间阶跃到极大值。利用渗流的滞后性,可以通过微震监测手段对矿山突水灾害进行有效的监控预警,在张马屯铁矿地下防水帷幕突水预警的工程实践中取得了良好效果。

**关键词:**节理岩体;破坏分析;渗流滞后性;声发射;有限元

中图分类号:O346.5

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)03-0622-07

## Research on Permeability Evolution and Energy Dissipation Law During Damage and Fracturing of Jointed Rock Masses

Yang Tao, Tang Chunan, Liang Zhengzhao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, PR China)

**Abstract:** According to the damage mechanics and statistical strength theories, a seepage model for the damage process was established by using the Real Failure Process Analysis (RFPA) program. A numerical rock core with random orthogonal joints was generated based on the Discrete Fracture Network (DFN) model, and the full damage-seepage-energy dissipation process and the formation of seepage channels were described elaborately. The simulation results indicate that a great amount of new fractures are continuously developed in the jointed rock mass during the post-peak softening and residual deformation stages, accompanied by continuous energy dissipation. The rapid increase of seepage obviously lags behind the peak loading. Complete seepage channels cross the rock mass are usually formed when the strain is a few times of the peak strain. Correspondingly, the seepage coefficient jumps to a very large value instantaneously. By utilizing the seepage lagging effect, the microseismic monitoring technique can be applied for monitoring and early-warning of geological hazards in ore mines. This method has been successfully applied in early-warning of water inrush hazards in Zhangmatun Iron Ore.

**Keywords:** jointed rock mass; damage analysis; seepage lagging; acoustic emission; finite element

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-12-21(修改稿)

作者简介:杨韬(1983-),男,辽宁大连人,博士生,主要从事岩石损伤与破裂、流固耦合问题的研究与开发工作。

E-mail:361721644@qq.com

基金项目:973 国家重点基础研究发展计划(2014CB047100);国家自然科学基金(51579031)

## 0 引言

在地下资源开采和地下工程建设的过程中,岩体与地下水存在复杂的流固耦合问题。尤其是岩体在外荷载作用下发生损伤破裂时,伴随着裂隙的发育,积蓄的应变能以声发射形式向外耗散,应力场不断转移,渗流通道不断改变,导致渗流场发生动态变化。与此同时,渗流场的改变又进一步影响应力场分布,在应力-渗流相互作用下,共同决定了岩体的破裂形式和渗流通道的发育形态。

以济南张马屯铁矿防水帷幕突水灾害预警项目为例,由于矿区水文地质条件复杂,溶孔、溶洞密布,岩溶裂隙发育。矿山历经多年防治水工作建立起全长1 410 m,深度为330~560 m,包围南、西、北三面的大型地下防水帷幕<sup>[1]</sup>。为了对地下帷幕区域的岩体破裂状态进行有效监控,引进了加拿大ESG公司生产的矿山微震监测设备,在此基础上开发了远程数据无线传输系统,实现在恶劣网络条件下现场数据的实时采集及连续传输到远程数据中心,再进一步进行参数反演和突水预警。

然而对于富含大量跨尺度缺陷的工程岩体,如何根据监测的微震信息,反演出渗流缝网的发育贯通形态,以及如何定量地表征岩石损伤过程中能量耗散和渗透性的耦合关系,尚需要进一步深入研究。本文从损伤力学出发,基于真实破坏分析方法(RFPA)获得岩体的破坏形态,建立损伤过程渗透模型,充分考虑单元的损伤历史和当前应力应变水平的综合影响,完整再现了渗流条件下节理岩体损伤全过程的应力应变-能量耗散-渗透性的变化规律,得出结论:节理岩体渗透性激增明显滞后于能量耗散和损伤破裂过程,并从机理上验证了通过微震监测进行突水灾害预警的有效性。

## 1 损伤-渗透-能量耗散模型

对于尚未发生损伤、没有新生宏观破裂发育岩体的流固耦合问题,国内外学者进行了大量的现场勘查和试验研究。Boit<sup>[2]</sup>最早提出有效应力与渗流场之间的耦合关系;Louis<sup>[3]</sup>通过试验得出渗透系数随着正应力的升高呈负指数关系下降;Snow<sup>[4]</sup>、Mackee等<sup>[5]</sup>、刘继山<sup>[6]</sup>、刘建军等<sup>[7]</sup>基于不同的试验装置和方法,各自总结出岩体渗透特性与有效应力之间相互耦合的经验公式;刘新荣等<sup>[8-9]</sup>进一步讨论了温度、含水率、化学侵蚀、应力水平多场耦合作用下的岩石劣化效应,并通过大量

物理实验给出了循环载荷作用下岩体周期饱水-风干造成的岩性劣化规律。

一旦超过强度极限岩体损伤破裂以后,试验结果往往差异巨大,数据极其离散。Zoback等<sup>[10]</sup>的试验中,花岗岩达到峰值应力的80%时渗透率增加2/3;Oda等<sup>[11]</sup>发现花岗岩破裂后渗透性比完整时增大2~3个量级;彭苏萍等<sup>[12]</sup>的研究表明,即使是同一种类的岩石在相同试验条件下,压裂后渗透性增幅也会从数倍到近千倍不等,表现出极大的随机性;朱珍德等<sup>[13]</sup>对脆性岩石全应力-应变过程渗流特性的试验研究表明,渗透峰值形成于破坏之后,并且在塑性压密阶段仍表现较强的渗透性。

以往对岩体损伤渗流的研究更多的集中在峰前,对峰后软化和残余变形阶段的持续变化关注较少。唐春安<sup>[14]</sup>提出真实破坏过程分析方法,在微观层次上采用弹脆性破坏准则。每个单元初始状态从线弹性出发,当应力水平增加到满足摩尔-库伦准则或最大拉应力准则时,单元开始损伤,强度跌落到损伤强度。单元物理特性的随机性和非均匀性导致了宏观材料破坏过程的非线性。通过调整损伤、破坏、分离过程中单元的力学参数,可以对岩石破坏全过程进行较为真实细致的描述。梁正召等<sup>[15]</sup>将其推广至三维岩石破裂过程的分析,杨天宏等<sup>[16]</sup>、李根等<sup>[17]</sup>将其用于岩体流固耦合问题的分析,均取得与真实物理实验破坏形态较为接近的效果。

对于岩体渗流问题,渗透性对节理损伤程度和裂隙开度变化极其敏感,压裂过程中材料可能反复损伤,裂隙可能多次张开闭合,这就必须考虑荷载历史对单元当前损伤状态的影响。因此,本文对RFPA方法进行扩展。定义5种单元的基本状态:弹性、拉破坏、压破坏、拉分离、压接触,当前单元状态由单元损伤历史、当前应力应变水平以及当前材料特性三类因素共同决定。对于曾经受到损伤、接触、分离的单元,分别扩展出新的破坏路径,用以考虑复杂荷载路径下单元损伤状态对渗透性的影响。

### 1.1 材料特性的概率分布

岩石内部存在大量无序、随机、跨尺度的缺陷,导致了岩石材料特性空间上的不均匀性。岩体损伤过程正是这些缺陷和微裂隙发育、贯通形成宏观裂隙,最终破裂失稳的过程。Freudenthal<sup>[18]</sup>通过研究微裂纹分布的概率模型,从理论上证实了岩石材料特性满足Weibull分布;唐春安<sup>[14]</sup>建议在单元生成过程中使用具有门槛值的Weibull分布来描

述弹模、强度、泊松比等材料参数的空间分布,基本方程为:

$$\varphi(s,m)=\frac{m}{s_0}\left(\frac{s}{s_0}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{s}{s_0}\right)^m-1\right] \tag{1}$$

式中: $s$  为单元的力学特性参数; $s_0$  为单元力学性质参数的平均值; $m$  为岩石介质的均质度系数,随着均质度系数的升高材料越均匀; $\varphi(s,m)$  为岩石单元力学性质的统计密度函数。

Ghislain<sup>[19]</sup>对材料的渗透概率的研究表明,岩石的渗透特性适合采用对数正态分布进行描述,其概率密度函数为:

$$\ln N(\mu,\sigma^2)=\frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left[-\frac{(\log x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{2}$$

式中: $\mu$  为渗透性对数均值; $\sigma$  为对数标准差。  
在程序对单元材料的具体生成中,超出材料特性合理值上下限范围的数据将被截断,并重新参与随机散布,直到不再越界为止。图 1 中实际值在理论值附近微小的波动则反映出岩石类介质独特的离散特性。

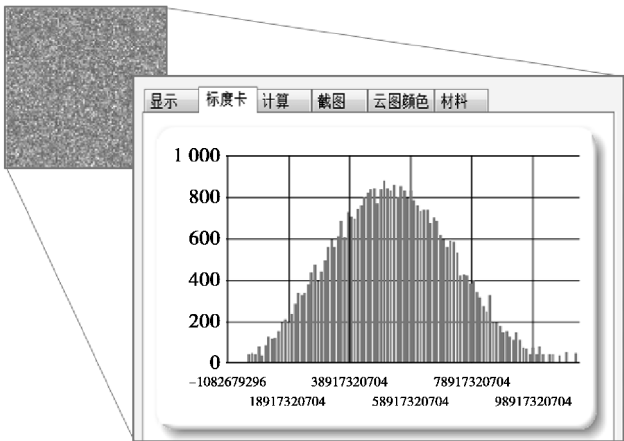


图 1 单元材料特性的概率分布(RFPA 软件强度分布)  
Fig. 1 Probabilistic distribution of element material properties (intension distribution in the RFPa program)

1.2 单元损伤渗透性的计算

岩体变形损伤的过程中,渗透性也同步剧烈变化。唐春安等<sup>[20]</sup>建议采用突跳系数来表征破坏后渗透系数的增幅,渗透系数和应力水平呈负指数关系为:

$$k=k_0e^{-\zeta(\sigma'_{ii}/3-\alpha p)} \tag{3}$$

式中: $k$  为渗透系数; $k_0$  为初始渗透系数; $\zeta$  为耦合参数; $\sigma'_{ii}/3$  为平均有效应力; $p$  为孔隙水压力; $\alpha$

为孔隙水压力系数。

在损伤过程渗透模型中,一旦超过单元材料的强度极限进入损伤状态,则跃升到损伤渗透性,拉裂分离后通过平板立方定律换算出当前渗透系数。

1.3 相变过程的能量耗散

岩石破裂过程中通常伴随着声、光、力、热、电等多种形式的能量释放,随着裂隙尖端损伤的发育,应变能不断积累、转移、耗散,局部应力场不断重新调整分布。谢和平等<sup>[21]</sup>给出了三维应力状态下单元应变能公式:

$$U^e=\frac{1}{2E}[\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2-2\bar{v}(\sigma_1\sigma_2+\sigma_2\sigma_3+\sigma_1\sigma_3)] \tag{4}$$

式中: $\bar{E}$  为单元当前弹模; $\bar{v}$  为单元泊松比; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为 3 个主应力。一旦单元在第  $i$  步发生相变,应力脆性跌落,则单元相变前后两个荷载步应变能之差  $\Delta U_i$  即为本步相变释放的耗散能:

$$\Delta U_i=U_i-U_{i-1} \tag{5}$$

式中: $U_i$ 、 $U_{i-1}$  为前后两步能量水平。对于反复损伤多次释放声发射(AE)的单元,还需统计累计能量释放。

2 节理岩体渗流阶跃的滞后性

工程岩体往往被大量裂隙、结构面切割,裂隙节理的发育程度对整体渗透性起到主导作用。通过概率分布来描述节理的产状,基于 Long 等<sup>[22]</sup>提出的离散裂隙网络(DNF)模型建立数字试样。模型边长为 3 m,两个相互正交的方向分别生成 108 条随机节理,采用弱介质单元表征填充型节理,具有一定的承载能力;节理迹长服从正态分布,倾角服从均匀随机分布<sup>[23]</sup>,在正负 5 度内变化,以此来反映缺陷分布整体的有序性和局部的随机性(表 1);基岩和节理的材料参数遵循 Weibull 分布,渗透系数满足对数正态分布,单元的初始细观材料特性如表 2 所示,单元饱水状态时参考刘新荣等<sup>[24]</sup>对岩石材料参数的劣化规律的研究结果,单轴抗压/抗拉强度下降 10%,内摩擦角劣化 3%,泊松比增加 10%。生成的节理岩体为图 2 所示。上下表面保持恒定 100 m 水头差,逐步增加轴向荷载,每步位移增量为边长的 0.01%,并假设渗流液为无黏滞性、不可压缩的理想流体,采用常水头法通过测量截面流量换算出渗透系数。



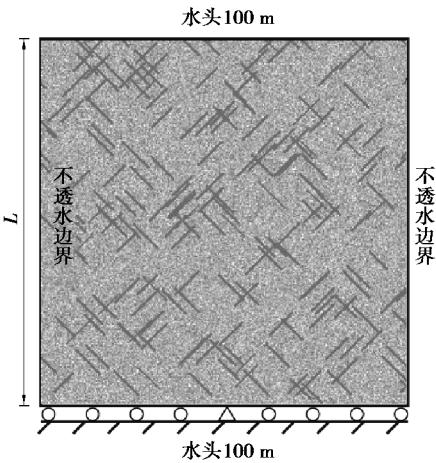


图 2 正交节理岩体模型与边界条件

Fig. 2 Numerical model and boundary conditions for the orthogonal jointed rock mass

表 1 节理产状的几何统计信息

Table 1 Statistical geometric information of joint sets

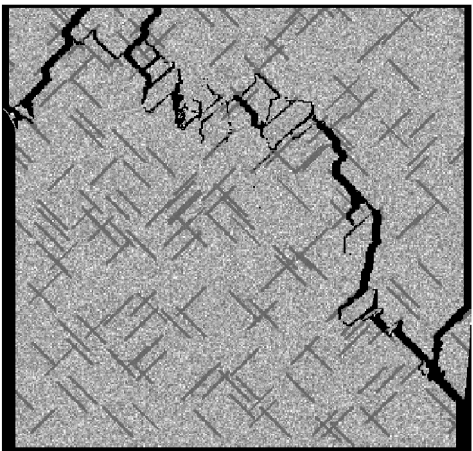
倾角均值/(°)	45	135
倾角区间/(°)	±5	±5
倾角分布	均匀分布	均匀分布
迹长均值/m	0.25	0.25
迹长方差	1	1
迹长分布	正态分布	正态分布
节理条数	108	108

表 2 材料参数

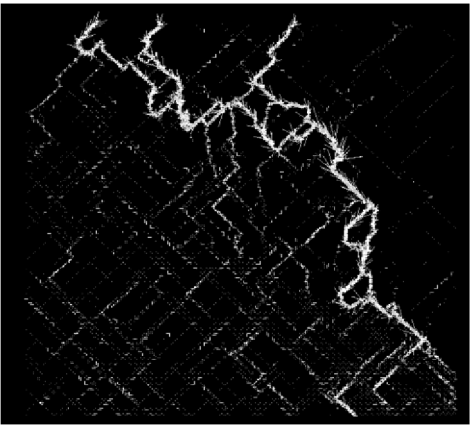
Table 2 Material parameters

均质度	3	2
弹模均值 $E_0$ / GPa	30	10
抗压强度均值 $\sigma_0$ / MPa	200	30
摩擦角 $\varphi$ /(°)	37	30
压拉比 $\frac{C}{T}$	15	15
泊松比 $\mu$	0.25	0.25
残余强度系数 $\xi$	0.1	0.1
渗透系数 $K$ /( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$0.864 \times 10^{-3}$	$0.864 \times 10^{-1}$

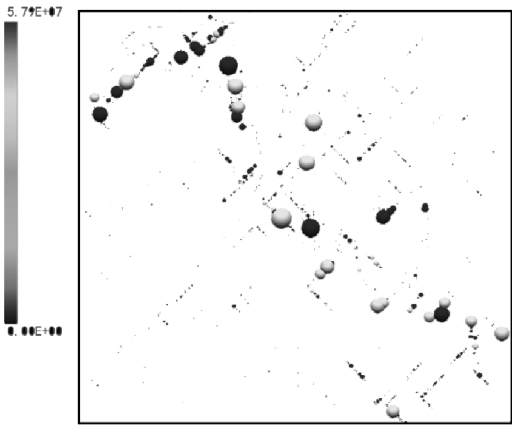
压裂后最终形成的裂隙网络如图 3(a) 所示, 图 3(b) 显示了形成的渗流通路, 主干渗流通道的



(a) 岩体破裂形态



(b) 岩体压裂形成的渗流通道



(c) 声发射事件分布

图 3 岩体的破裂形态、渗流通道和声发射

Fig. 3 Fracturing pattern, seepage channels and AE of rock mass

空间位置与图 3(c) 中微破裂通道及高能级的声发射事件基本吻合。

从图 4 的全应力-应变-渗透性曲线中可以看到, 随着位移荷载的增加岩体变形可分为弹性

(*o-a*)、峰后软化(*a-b*)、残余变形 3 个阶段(*b-d*)，对应的渗透特性也可分为初始稳定渗透性(*O-A*)、峰后渗透缓步增加(*A-B*)、渗透性阶跃(*B-C*)到损伤渗透性(*C-D*) 3 个阶段。渗透变化与变形各阶段密切相关却又并非完全同步。

在 *O-A* 线弹性阶段,仅有少量弱单元发生零散的破坏,少数低能级的声发射能量为  $10^5\text{J}$  级别;初始裂隙的压密以及零散单元的损伤对渗透性的影响非常不明显,渗透性基本保持稳定的低水平不变。

荷载继续增加接近 *A* 点峰值荷载时,节理弱材料首先大量张性破坏,损伤带基本沿着节理发育。从图 5 的声发射图中可以看到,能量耗散迎来第一个高峰,但应力跌落瞬间该仅占总能量释放的 3.16%。

在 *A-B* 峰后软化阶段,随着裂隙进一步发育贯通,流量和渗透性近似于负指数规律缓步上升,但增幅逐步趋缓;同时单步能量释放呈迅速上升趋势,到第 18 步时,声发射能量达到顶峰。整个峰后软化阶段释放了总能量的 90.6%,是节理岩体能量耗散的主要时期。

进入残余变形阶段后,在此之前累积的损伤单元大量张开成裂隙并相互贯通,微裂纹大量产生并扩展合并成主干裂纹,到 41 步时贯穿上下表面的裂隙完全形成,渗透性瞬间发生阶跃,如图 4 中 *B* 点所示。

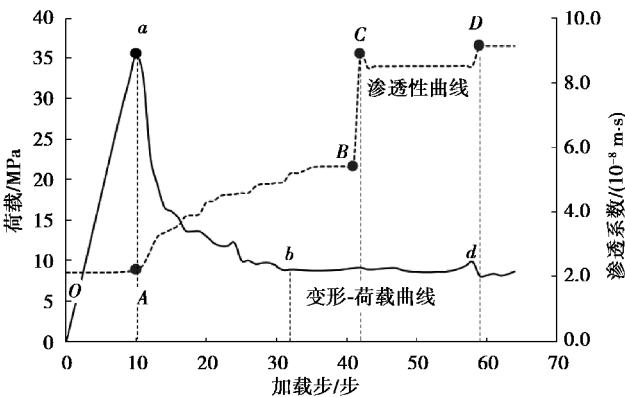


图 4 压裂过程的全应力-应变-渗透性曲线

Fig. 4 Full stress-strain-seepage curve during fracturing process

此后岩石的残余变形同时存在两种倾向,一方面裂隙继续扩展、连通,使得渗透性增强;另一方面,部分裂隙由于承载面积的降低,裂纹面的有效应力增加,已张开裂隙重新闭合<sup>[25]</sup>。占主导的倾向决定了整体渗透性的发展,并导致了渗透性在

43 步小幅回落,以及 58 步的上升。在残余变形阶段局部裂隙的闭合和贯通诱发渗透性小幅波动,但总体趋于稳定。

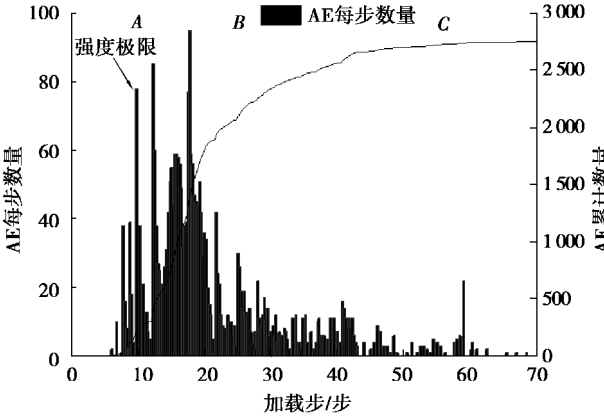


图 5 节理岩体破裂过程的声发射能量

Fig. 5 AE energy during fracturing of jointed rock mass

对比的渗透-变形曲线(图 4)和声发射曲线(图 5)可以发现,节理岩体在峰后有较长一段渗透缓慢增加区,渗透性阶跃明显滞后于峰值荷载以及声发射多发时期。

对于完好无节理的脆性岩石,朱珍德等<sup>[26]</sup>的试验表明,岩块破裂与渗透性阶跃比较接近,渗透率峰值仅略微滞后于峰值强度;而本算例中富含缺陷的节理岩体,其渗透性峰值的应变大于荷载峰值时应变的 4 倍,渗透性阶跃显著滞后于荷载和能量耗散峰值。由于岩体破裂形成裂隙缝网的连通程度是影响渗透性的决定因素,岩体中弱节理损伤后,整体承载能力显著下降,但局部渗流通道尚未充分张开联通,整体渗透性变化尚不显著。随着变形的持续增加,裂隙缝网在峰后软化阶段继续扩展,直到充分发育形成贯穿岩体上下表面的完整渗流通道后,宏观渗透性才急剧增加到峰值,因此,其渗透性显著滞后于荷载峰值。

大量工程建设和矿山开采所处的地质条件往往是缺陷密布,裂隙、结构面充分发育。以深埋隧道的岩爆监测预警为例,如果用微震事件表征裂隙孕育和局部岩石失稳前兆,将岩爆发生的时刻视为该区域裂隙缝网完全贯穿,围岩完全丧失承载能力,则根据锦屏二级水电站深埋隧道的微震监测经验,岩爆高发期通常滞后于微震前兆 24 到 48 小时,高能级的岩爆孕育时间可能会长达数周甚至更长。此外,岩体损伤渗透性滞后的具体时间,以及是否发生渗透性阶跃,还与节理裂隙产状、围岩应

力水平、开挖进度和支护状态等复杂因素密切相关。利用渗透的滞后性,可为微震监测手段进行工程灾害预警赢得了宝贵的时间,具有实际的工程应用价值。

### 3 在矿山突水微震监测中的应用实例

济南张马屯铁矿所处地质结构以及监测获取的微震事件如图 6 所示。

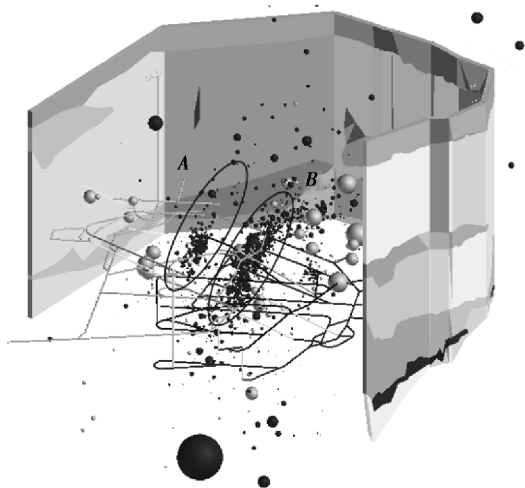


图 6 济南张马屯铁矿防水帷幕声发射监测数据

Fig. 6 AE monitoring data for water-sealing curtain in Zhangmatun Iron Ore, Jinan

根据微震事件的激增判断出裂隙集中开裂的区域,一旦频繁发生在防水帷幕周边并有持续增长的趋势,则需要建立地质构造模型进行反演计算,依据危险程度发出突水预警。

监测结果表明裂隙损伤开裂主要集中于图 6 工作面所在的 A、B 区域,微震事件密集发生但单次释放能量较小,单位时间累积应力降和能量耗散都较小,与开采活动良好吻合,远离防水帷幕。大帷幕区域微震事件稀少,岩层较为稳定,说明突水活动较弱。基于损伤过程渗透模型,采用微震监测数据对渗流场进行反演计算,在矿山突水灾害安全监测中发挥了良好的效果。

### 4 结论

(1)采用 RFPA 方法和损伤过程渗透模型,研究了渗流条件下节理岩体损伤全过程的渗透性-应力应变-能量耗散的变化规律。

(2)正交节理岩体裂隙发育不仅仅发生在峰值应力处,还贯穿了峰后软化到残余变形的全过程。在峰值荷载节理开始损伤,峰后软化阶段节理

形成张开裂隙并相互贯通,最终在残余变形阶段形成完全贯穿上下表面的渗流通道。

(3)节理岩体渗透性主要由裂隙贯通程度决定,压裂后渗透性阶跃明显滞后于峰值应力和声发射峰值。

(4)利用渗流的滞后性,将声发射激增作为渗透性突跳前兆,从机理上验证了通过微震监测预防突水事故的有效性。在济南张马屯铁矿防水帷幕微震监测项目中,微震监测对突水灾害进行了有效的监控和预测,具有实际的工程价值。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘超,唐春安,张省军,等.微震监测系统在张马屯帷幕区域的应用研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(3):349-353. (Liu Chao, Tang Chunan, Zhang Shengjun, et al. Application of microseismic monitoring system in Zhangmatun curtain region [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(3): 349-353. (in Chinese))
- [2] Boit M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [3] Louis C. Rock Hydraulics in Rock Mechanics[M]. New York: Verlay Wien, 1974.
- [4] Snow D T. Anisotropic permeability of fractured media [J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [5] Mckee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(1): 81-91.
- [6] 刘继山.单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J].水文地质工程地质,1988(2):22-28. (Liu Jishan. Seepage formula in single fracture under the effect of normal stress [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1988(2): 22-28. (in Chinese))
- [7] 刘建军,刘先贵.有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J].地质力学学报,2001,7(1):41-44. (Liu Jianjun, Liu Xiangui. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44. (in Chinese))
- [8] 刘新荣,傅晏,郑颖人,等.水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):77-82,88. (Liu Xinrong, Fu Yan, Zheng Yingren, et al. A review on deterioration of rock caused by water-rock interaction [J]. Chinese Journal of

- Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 77-82,88. (in Chinese))
- [9] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302. (Liu Xinrong, Fu Yan, Wang Yongxin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. (in Chinese))
- [10] Zoback M D, Byerlee J D. The effect of microcrack dilatancy on the permeability of westerly granite [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 80(5): 752-755.
- [11] Oda M T, Takemura T, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite [J]. Mechanics of Materials, 2002, 34(6): 313-331.
- [12] 彭苏萍, 屈洪亮, 罗立平, 等. 沉积岩石全应力应变过程的渗透性试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 113-116. (Peng Suping, Qu Hongliang, Luo Liping, et al. An experimental study on the penetrability of sedimentary rock during the complete stress-strain path [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 133-116. (in Chinese))
- [13] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 555-558, 563. (Zhu Zhende, Zhang Aijun, Xu Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 555-558, 563. (in Chinese))
- [14] Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249-262.
- [15] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 931-936. (Liang Zhengzhao, Tang Chunan, Zhang Yongbin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 931-936. (in Chinese))
- [16] 杨天鸿, 徐涛, 刘建新, 等. 应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2900-2905. (Yang Tianhong, Xu Tao, Liu Jianxin, et al. Coupling model of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2900-2905. (in Chinese))
- [17] 李根, 唐春安, 李连崇, 等. 水压致裂过程的三维数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1875-1881. (Li Gen, Tang Chunan, Li Lianchong, et al. Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1875-1881. (in Chinese))
- [18] Freudenthal A M. Statistical approach to brittle fracture [M]. New York: Academic Press, 1968.
- [19] Ghislain D M. Quantitative hydrogeology-groundwater hydrology for engineers [M]. San Diego: Academic Press, 1986.
- [20] Tang C A, Tham L G, Leeb P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 477-489.
- [21] Xie H P, Li L Y, Peng R D, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1): 11-20.
- [22] Long J C S, Remer J S, Wilson C R, et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures [J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 645-658.
- [23] Annavarapu S, Kemeny J, Dessureault S. Joint spacing distributions from oriented core data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52(3): 40-45.
- [24] 刘新荣, 姜德义, 余海龙. 水对岩石力学特性影响的研究[J]. 化工矿物与加工, 2000(5): 17-20. (Liu Xinrong, Jiang Deyi, Yu Hailong. Study of the effect of water to rock mechanics characteristics [J]. Chemical Mineral and Manufacturing, 2000(5): 17-20. (in Chinese))
- [25] 韩国锋, 王恩志, 刘晓丽. 岩石损伤过程中的渗流特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 41-50. (Han Guofeng, Wang Enzhi, Liu Xiaoli. Seepage characteristics of rock during damage process [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2011, 33(5): 41-50. (in Chinese))
- [26] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 555-558, 563. (Zhu Zhende, Zhang Aijun, Xu Weiya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 555-558, 563. (in Chinese))