

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 01 - 0163 - 11

基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析

明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 以锦屏二级水电站微震监测数据为基础, 将矩张量引入到深埋隧洞岩爆机制分析研究中。对分析过程中遇到的 2 个关键问题提出了针对性的建议: 隧洞工程为线性工程, 传感器布置空间有限, 难以形成良性传感器阵列, 矩张量分析结果的可靠性受到很大的影响, 为此, 提出了数值计算过程中的坐标系空间旋转法。该方法按最优路径旋转隧道坐标系, 使对于同一个事件的每个传感器, 源-传感器射线到新坐标系的 3 个方向余弦差值在 10 倍数值范围以内, 在数值计算过程中, 可以得到较理想的矩张量结果。针对 Ohtsu 使用矩张量分解判断岩石破裂类型的方法中, 提出的各分量比重计算公式, 仅适用于各分量均为受拉的情况。考虑快速掘进条件下隧洞工程受力方向的不确定性, 扩展其分量比重计算公式到更一般适用状态。在此基础上, 建立了一套完整的岩爆孕育过程矩张量分析方法。利用该方法对锦屏二级水电站典型岩爆微震数据进行分析, 结果表明, 该方法可以较好地解释岩爆孕育过程岩石破裂演化机制。

关键词: 深埋隧洞; 微震监测; 矩张量; 岩石破裂类型; 判别准则; 岩爆机制; 锦屏二级水电站

中图分类号: TD 351

文献标识码: A

Analysis of rockburst mechanism for deep tunnel based on moment tensor

MING Hua-jun, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing

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

Abstract: Moment tensor method is introduced to analyze rockburst mechanism for deep tunnel, based on microseismic monitoring data of Jinping hydropower station. And some recommendations are proposed for two key issues in the analysis process: Restricted by the construction environment in the tunnels, tunnels are excavated in a straight line, and sensors can only be installed at the wall of tunnel or in the shallow boreholes. The calculation reliability of moment tensor is affected greatly on the numerical calculation; the coordinate rotation method is given to improve it. This method rotates the tunnel coordinate system to the new coordinate system, which makes the value of the direction cosine between the source-sensor vector and every coordinate axis less than 10 times, for every waveforms in the event. The ideal results can be got from a large number of moment tensor calculation. To get rockburst nucleation process, which calculates the moment tensor firstly, and decompose the moment tensor to the components of basic type, judge the rock fracture type based on the rule from the percentage of the components. But the rule proposed by Ohtsu is only applicable to all components by pulling, which is not suitable to tunnels of fast drilling; therefore, one rule is proposed to extend a more generally applicable state. Lastly, the complete method is established which used to research rockburst nucleation process by the moment tensor method. Analyzed microseismic data of Jinping hydropower station before rockburst happened by this method, the results show that the method can explain the evolution of rock failure mechanism better.

Key words: deep tunnel; microseismic monitoring; moment tensor; rock fracture type; criterion; rockburst nucleation mechanism; Jinping hydropower station

1 引 言

作为一种严重威胁人员和设备安全以及施工进度地质灾害, 岩爆越来越受到国内外岩石力学工作者的重视。但是导致岩爆形成的机制却一直认

识不清, 同时其作为研究岩爆不可绕过的步骤, 又是正确认识岩爆的重要过程。因此, 进行岩爆机制的研究就是一个尤为重要的工作。

现在关于岩爆机制的研究, 主要从室内试验和现场试验两个方面开展。

收稿日期: 2011-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2010CB732006)。

第一作者简介: 明华军, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石破裂与岩爆灾害控制方面的研究工作。E-mail: hjming@ctgu.edu.cn

杨健等^[1]通过研究不同岩性岩石分别在单轴压缩和三向应力状态下的声发射特性,并根据声发射特性划分为 4 种不同的类型:群发型、集发型、突发型和散发型。许迎年等^[2]选取了最具岩爆倾向的材料制作含孔试件来进行含洞室岩体的岩爆模拟试验,并在试验中考察了加载条件、开孔方式、几何特性等诸因素的影响,探讨了岩爆发生机制,得到了一些规律性的结果。徐林生等^[3]通过对川藏公路二郎山隧道和雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞勘探中的岩爆实例调研,结合岩爆断口扫描电镜分析和室内力学试验,总结出了岩爆形成的 3 种基本类型:压致拉裂、压致剪切拉裂和弯曲鼓折。Li 等^[4]在锦屏二级水电站辅助洞试验洞通过钻孔摄像监测到了隧洞开挖过程中围岩损伤至岩爆发生的整个过程。通过现场钻孔摄像试验对岩爆发生机制进行研究,得到了一些规律性的认识。

室内岩石力学试验是研究现场岩体破坏和规律的一种途径,但室内岩石与现场岩体有所不同。同时,研究是为工程服务,因此,在认识规律的同时,希望这种规律能够应用到工程中,并对工程有所帮助。

微震/声发射监测作为一种无损的实时被动监测手段越来越得到岩石力学工作者的重视。其监测岩石破裂过程的原理与岩爆机制研究有类似之处。但现有的声发射/微震研究大部分属于定性分析。矩张量作为表示岩石破裂过程中震源一般性的力学系统的概念,具有量化分析功能,通过它能够认识岩体破裂过程,同时可以根据演化规律和微震数据统计规律来更好地服务于工程。

Gilbert^[5]首先引进了矩张量的概念,定义为作用在一点上的等效体力一阶矩。现在,人们对矩张量源很感兴趣,因为用矩张量表示震源,无需事先对震源机制作什么假定,并且远场位移用矩张量表达是线性关系式^[6]。但地震学中使用矩张量研究震源机制和岩石工程所谓的震源机制还是有所不同。地震学中的震源机制指的是断层面在空间的方位、滑动方向等等,而岩石工程中的震源机制指的是岩石的破裂类型:张拉、剪切、混合型。

国外已有部分学者将矩张量应用于岩石工程与岩石力学试验中,来研究岩石的破裂类型。Feignier 等^[7]为了解释加拿大地下实验室在机械凿岩法掘进过程中拱肩形成的张拉裂隙,引入了矩张量的方法分析震源破裂类型,并通过分解矩张量为各向同性部分(M^{ISO})和偏部分(M^{DEV}),根据各向同性部分(M^{ISO})占矩张量的比重来量化震源破

裂类型。Ohtsu^[8]在进行室内声发射量化分析时,引入矩张量分析方法,根据矩张量的本征值中剪切分量所占比重大小,来进行声发射事件破裂类型的判断,并确定了声发射事件破裂面的方位。Hazzard 等^[9-10]通过 PFC 和 PFC^{3D} 模拟了岩石断裂失效过程并计算了矩张量,使用 Feignier 等^[7]介绍的破裂类型判别标准来描述微震事件的破裂源机制。

国内由于高精度微震监测系统起步较晚,故使用矩张量进行岩石破裂类型的研究还较少。曹安业^[11]介绍了矩张量在判断岩石破裂类型中的应用,并根据基于相同最大主轴方向的矩张量分解方法^[12]的结果,通过人工合成的 2 种采动煤岩破裂模型,用理论方法模拟并探讨了矩张量在矿山采动煤岩破裂类型分析中的可靠性和适用性。

虽然矩张量应用在岩石工程中已有近 20 年,但其在岩石工程中的应用依然较少,尤其是在深埋线性隧洞工程中几乎没有相关的研究工作。

同时,通过在线性隧洞工程中使用矩张量研究破坏机制,发现以下两个关键问题。

(1) 如图 1 所示,隧洞工程独特的线性开挖方式和受限的传感器布置方式,使得传感器相对于震源在洞轴线方向的坐标差 ΔX 远远大于在垂直于洞轴线两个方向的坐标差 ΔY 和 ΔZ ,这将使得在数值计算过程中,容易产生相对较差的矩张量结果。

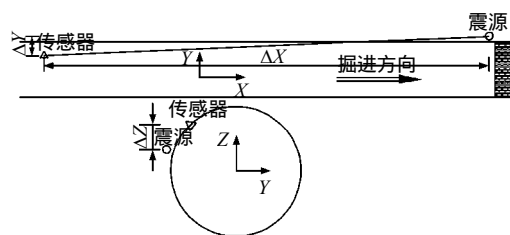


图 1 隧洞微震监测中震源-传感器平面示意图
Fig.1 Diagram between source and sensor in tunnel

(2) 在一定的矩张量结果下,不同的破裂类型判别方法有可能得到不同的结果,而不同的破裂类型判别方法又有其不同的适用条件,针对深埋隧洞工程具体情况,考虑了 Ohtsu^[8]提出的矩张量分解方法中各分量比重计算上的局限性进行了改进,使其更普遍适用于深埋隧洞工程。

在给出解决上述两个关键问题建议的基础上,建立了一套完整的岩爆孕育过程矩张量分析方法,并利用该方法对锦屏二级水电站典型岩爆微震数据进行分析,讨论了其在锦屏二级水电站引水隧洞中岩爆机制研究方面的适用性。

2 深埋隧洞围岩破裂机制

矩张量类似于应力张量。在一定的破坏准则前提下，不同的应力张量达到破坏时表达了不同的破坏类型。但矩张量不能像应力张量一样用某一数值来量化其破裂类型，因为尽管把岩体的微破裂近似为点源，但其始终还是有大小的，不同破裂大小的微震事件会有不同大小的矩张量。如果考虑用归一化思想来量化，又违背了点源的矩张量计算假设。因此，首先需要将其按照基本破裂类型进行分解，并计算各基本破裂类型在该事件矩张量中所占有的比重，用以判断该事件的破裂类型。就其实质而言，矩张量的分解不是一个数学问题，而是一个物理问题。在进行矩张量分解时必须引入一些物理上合理的假定^[13]。

因此，使用矩张量方法研究深埋隧洞围岩破裂机制主要包括隧道范围、滤波与定位、矩张量计算、破裂类型判别等 4 个步骤，下面将分别论述。

2.1 确定用于研究的隧洞范围

使用数值模拟与微震定位结果相结合的方法来确定用于研究的隧洞岩体范围。

经过大量统计研究，隧洞开挖时微震监测系统监测到的有效微震事件的定位结果基本处于岩体破坏接近度 EAI ^[14] 大于或等于 0.5 的岩体范围内。

当进行数值模拟时，需要考虑真实的现场开挖情况，比如：是否只有单洞在开挖，是否周围已有隧洞完成开挖，是否周围已有隧洞正在开挖等实际施工情况。

2.2 滤波与定位

2.2.1 滤波

分析 TBM 掘进过程中微震信号时，可以采用综合滤波方法^[15]进行微震监测系统监测到微震事件过滤。

而分析钻爆法施工洞段微震信号时，采用下列滤波手段进行综合微震事件过滤：根据前期试验结果，设置采集仪滤波参数，进行硬件滤波；利用传感器对噪音信号的差异反映和敏感性进行协同滤波；根据试验阶段建立的噪音数据库，利用人工神经网络方法进行滤波；最后，通过监测系统示波窗进行噪声滤除。

2.2.2 定位

在微震事件定位方面，采用针对隧洞工程震源多发生在传感器阵列范围外的特点而提出的粒子群微震源分层定位^[16]算法进行震源定位。

2.3 矩张量计算

2.3.1 隧洞掘进状态下微震事件的矩张量计算

在隧洞工程中，为了简化问题，假定震源为点源，震源与传感器之间的距离相对波长而言是远场，震源与传感器之间的介质是均匀、连续、各向同性的无限空间介质，同时考虑微震事件破裂过程是瞬间发生的，且矩张量所有分量具有相同的时间依赖性。

在此基础上，由下面的使用震源矩张量表示的远场位移场计算公式。在传感器接收位移波形信息已知的情况下，可以通过反计算得到震源的矩张量表达式。

对于单向传感器，震源与传感器传播射线方向 P 波远场位移可以表示为

$$pol(P) \cdot u_p = \frac{\gamma_i \gamma_j}{4\pi\rho v_p^3 r} M_{ij} \quad (1)$$

式中 i 和 j 均表示所建立的隧洞坐标系的坐标分量； $pol(P)$ 为考虑传感器相对震源位置的 P 波初动方向，其取值如式 (2)； ρ 为岩体密度； v_p 为震源与传感器之间岩体 P 波波速； r 为震源到传感器的距离； γ 为震源到传感器传播射线到各坐标轴的方向余弦； M_{ij} 为震源矩张量，为 3×3 矩阵。

$$pol(P) = \begin{cases} 1, & \text{传感器位于震源上方, 且波形初动向上} \\ -1, & \text{传感器位于震源上方, 且波形初动向下} \\ 1, & \text{传感器位于震源下方, 且波形初动向下} \\ -1, & \text{传感器位于震源下方, 且波形初动向上} \end{cases} \quad (2)$$

对于三向传感器，为了更清晰识别 P、S 波到时，往往会进行偏振分析，即将该传感器记录的波形振幅信息从隧洞坐标系转换到局部射线坐标系下。偏振分析转化之后的三向传感器远场位移可以表示为

$$\left. \begin{aligned} pol(P) \cdot u_p &= \frac{1}{4\pi\rho v_p^3 r} R^P M_{ij} \\ pol(SH) \cdot u_{SH} &= \frac{1}{4\pi\rho v_s^3 r} R^{SH} M_{ij} \\ pol(SV) \cdot u_{SV} &= \frac{1}{4\pi\rho v_s^3 r} R^{SV} M_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中：

$$\left. \begin{aligned} R^P &= (\gamma_1\gamma_1, 2\gamma_1\gamma_2, 2\gamma_1\gamma_3, \gamma_2\gamma_2, 2\gamma_2\gamma_3, \gamma_3\gamma_3) \\ R^{SH} &= (\varphi_1\gamma_1, \varphi_1\gamma_2 + \varphi_2\gamma_1, \varphi_1\gamma_3 + \varphi_3\gamma_1, \varphi_2\gamma_2, \\ &\quad \varphi_2\gamma_3 + \varphi_3\gamma_2, \varphi_3\gamma_3) \\ R^{SV} &= (\theta_1\gamma_1, \theta_1\gamma_2 + \theta_2\gamma_1, \theta_1\gamma_3 + \theta_3\gamma_1, \\ &\quad \theta_2\gamma_2, \theta_2\gamma_3 + \theta_3\gamma_2, \theta_3\gamma_3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

γ_i 、 φ_i 、 θ_i 分别对应局部射线坐标系中 3 个矢

量方向的各自分量,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha) \\ \varphi &= (-\sin \beta, \cos \beta, 0) \\ \theta &= (\cos \alpha \cos \beta, \cos \alpha \sin \beta, -\sin \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: α 为传感器相对震源位置的倾角、 β 方位角。如图2所示,方位角 β 在 XOY 平面内,且以 X 轴正向为0,以 X 轴正向向 Y 轴正向旋转为正,取值范围为 $0 \sim 360^\circ$;倾角 α 以 Z 轴正向为0,以 Z 轴正向向 XOY 平面旋转为正,取值范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。

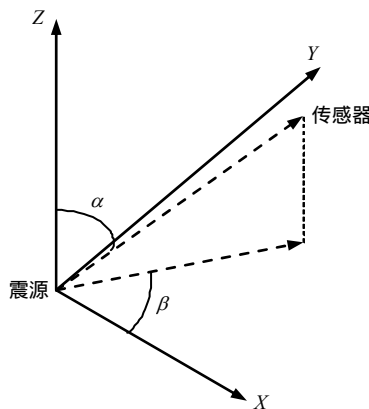


图2 传感器-震源的相对空间位置图

Fig.2 Diagram of sensor-source relative spatial location

由式(1)~(5)可以看出,在得到初动方向、远场位移值、震源-传感器射线的方位角和倾角之后,就可以计算得到震源的矩张量解。

2.3.2 矩张量计算过程中注意事项

进行矩张量计算前,确定远场位移有以下几点值得注意:

(1) 确认使用的传感器种类,是加速度计、速度计还是位移计。由于初动振幅受噪音影响较大,因此,这里的远场位移值并不是初动振幅,而是根据P波、SH波、SV波波形信息以及到时计算得到的低频位移幅值,Urbancic等^[17]给出了根据时间域波形的计算公式。

(2) 监测波形得到的振幅是所有P波、S波在传感器安装方向的投影,因此,由于单向传感器不能进行偏振分析,且在S波到时之前接收到的只是P波信息,所以在确定单向传感器P波方向远场位移时,可以直接将S波到时之前的波形振幅除以传感器安装方向和震源-传感器方向的方向余弦来得到。

(3) 用于矩张量计算的远场位移值需要考虑相应体波的初动方向,初动方向并不是微震波形初始方向简单的向上或者向下,而是应该同时考虑传感

器相对震源的空间位置。

2.3.3 矩张量计算中出现的问题和修改建议

由式(1)可以看出,如果震源与传感器的位置一定,且震源-传感器射线方向P波位移振幅一定的前提下,矩张量分量只与震源-传感器射线在隧洞坐标系的3个方向余弦有关:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{\Delta X}{r} \\ \gamma_2 &= \frac{\Delta Y}{r} \\ \gamma_3 &= \frac{\Delta Z}{r} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由图1可以了解到,隧洞工程中, ΔX 往往远远大于 ΔY 和 ΔZ ,有时甚至会产生超过100倍的差别,根据式(1)得到的矩张量结果中, M_{22} 和 M_{33} 理论上会产生超过10000倍的 M_{11} 结果,尤其是 ΔY 和 ΔZ 中有一个特别小时,由于计算机数值误差会产生较差的矩张量结果。

针对这个问题,提出了在数值计算中,采用的坐标系空间旋转法的建议方案:由于隧洞现场施工条件有限,传感器往往安装在隧洞表面或者较浅的钻孔中。因此,难以形成良性传感器阵列,那么可以通过将坐标系合适的旋转来减小 γ_i 之间的差别。

根据式(6)可以看出,在传感器和震源坐标一定的条件下,传感器-震源射线到3个坐标轴方向的方向余弦值唯一依赖于传感器和震源坐标差 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 。若 ΔY 与 ΔZ 相对 ΔX 较小,且 ΔY 和 ΔZ 也有倍数差,则可以先绕着 X 轴旋转 YOZ 平面,使 ΔY 与 ΔZ 接近,然后反复绕着 Y 轴旋转 XOZ 平面和绕着 Z 轴旋转 XOY 平面。根据大量矩张量计算得到,使每个传感器-震源射线的3个方向余弦差值在10倍差别以内,可以得到较理想的矩张量结果。经过证明,理论上在点源、远场、各向同性均匀无限空间介质、相同的时间依赖性的假设前提下,坐标轴的变换不会改变矩张量的本征值结果,因此,也就不会对破裂类型和标量地震矩的结果产生影响。简要证明过程如下。

如图3所示,将 XYZ 坐标系绕着 Z 轴顺时针旋转 θ 角度,得到新的坐标系 $X'Y'Z'$ 。

假设原始坐标系下,震源-传感器射线方向与3个坐标系的方向余弦是 γ_i ,旋转坐标系后的方向余弦是 γ'_i ;坐标轴旋转之前的矩张量为 M_{ij} ,坐标轴旋转之后的矩张量为 m_{ij} 。于是,可以得到:

$$\left. \begin{aligned} \gamma'_1 &= \gamma_1 \cos \theta + \gamma_2 \sin \theta \\ \gamma'_2 &= -\gamma_1 \sin \theta + \gamma_2 \cos \theta \\ \gamma'_3 &= \gamma_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

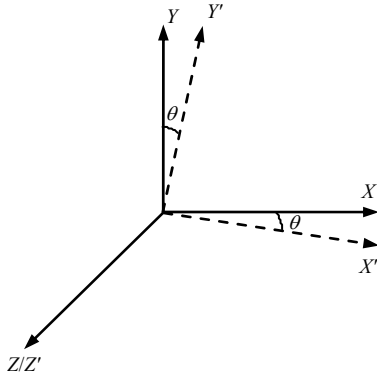


图 3 旋转坐标系示意图

Fig.3 Old and new coordinate system from rotating

由于传感器接收波形振幅信息是一定的，因此，式 (8) (9) 成立：

$$\begin{aligned} &\gamma_1 \gamma_1 M_{11} + 2\gamma_1 \gamma_2 M_{12} + 2\gamma_1 \gamma_3 M_{13} + \gamma_2 \gamma_2 M_{22} + \\ &2\gamma_2 \gamma_3 M_{23} + \gamma_3 \gamma_3 M_{33} = \\ &\gamma'_1 \gamma'_1 m_{11} + 2\gamma'_1 \gamma'_2 m_{12} + 2\gamma'_1 \gamma'_3 m_{13} + \gamma'_2 \gamma'_2 m_{22} + \\ &2\gamma'_2 \gamma'_3 m_{23} + \gamma'_3 \gamma'_3 m_{33} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= m_{11} \cos^2 \theta - m_{12} \sin 2\theta + m_{22} \sin^2 \theta \\ M_{12} &= m_{11} \sin 2\theta + 2m_{12} \cos 2\theta - m_{22} \sin 2\theta \\ M_{13} &= 2m_{13} \cos \theta - 2m_{23} \sin \theta \\ M_{22} &= m_{11} \sin^2 \theta + m_{12} \sin 2\theta + m_{22} \cos^2 \theta \\ M_{23} &= 2m_{13} \sin \theta + 2m_{23} \cos \theta \\ M_{33} &= m_{33} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

同时，可以通过式 (10) 求解矩张量本征值：

$$\begin{aligned} &\begin{vmatrix} M_{11} - \lambda & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} - \lambda & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} - \lambda \end{vmatrix} = \\ &-\lambda^3 + (M_{11} + M_{22} + M_{33})\lambda^2 + \\ &[-M_{11}(M_{22} + M_{33}) - M_{22}M_{33} + M_{12}^2 + \\ &M_{13}^2 + M_{23}^2]\lambda + \\ &(M_{11}M_{22}M_{33} + 2M_{12}M_{13}M_{23} - M_{13}^2M_{22} - \\ &M_{23}^2M_{11} - M_{12}^2M_{33}) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (10)，有下式成立：

$$\begin{aligned} &M_{11} + M_{22} + M_{33} = m_{11} + m_{22} + m_{33} - \\ &M_{11}(M_{22} + M_{33}) - M_{22}M_{33} + M_{12}^2 + M_{13}^2 + M_{23}^2 = \\ &-m_{11}(m_{22} + m_{33}) - m_{22}m_{33} + m_{12}^2 + m_{13}^2 + m_{23}^2 \\ &M_{11}M_{22}M_{33} + 2M_{12}M_{13}M_{23} - M_{13}^2M_{22} - \\ &M_{23}^2M_{11} - M_{12}^2M_{33} = m_{11}m_{22}m_{33} + 2m_{12}m_{13}m_{23} - \\ &m_{13}^2m_{22} - m_{23}^2m_{11} - m_{12}^2m_{33} \end{aligned} \quad (11)$$

因此，可以得到坐标轴的变换不会改变矩张量的本征值结果的结论。

2.4 破裂类型判别

在矩张量结果一定的情况下，不同的矩张量分解计算方法有可能会得到不同的破裂类型结果。如何针对工程研究对象的情况，对矩张量进行合理分解，并得到破裂类型的合理识别，是使用矩张量进行岩石破裂类型研究最关键的一步。

在得到矩张量结果之后，进行矩张量分解之前，为了便于计算各分解分量的比重，需要首先将矩张量进行本征值化，得到其 3 个本征值 M_1 、 M_2 、 M_3 ，将矩张量结果表达成其本征值矩阵的形式，然后将本征值化后的矩张量进行分解。

根据 Aki 等^[18]提出的剪切破裂和张拉破裂的矩张量本征值表达式，考虑岩石破裂过程中主矩方向和大小一定的条件，认为剪切破裂和张拉破裂的矩张量形式具有相同的主轴方向。使用 M^{DC} 为矩张量剪切破裂部分的大小，将矩张量的张拉破裂部分分解为 M^{CLVD} 和 M^{ISO} 两部分，如图 4 所示。

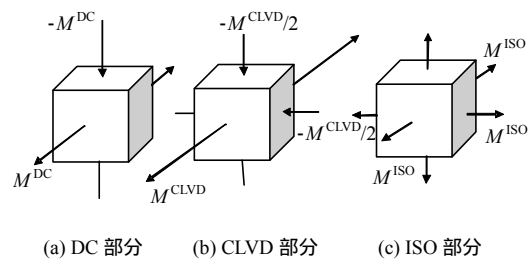


图 4 基于相同主轴方向原理的矩张量分解

Fig.4 Moment tensor decomposition method based on principle of same moment direction

使用 Ohtsu^[8]中提出的根据剪切破裂部分所占矩张量的比重来进行破裂类型的判断：

$$\left. \begin{aligned} P_{DC} &60\%, \text{ 剪切破裂} \\ P_{DC} &40\%, \text{ 张拉破裂} \\ 40\% &< P_{DC} < 60\%, \text{ 混合破裂} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 P_{DC} 为微震事件矩张量中剪切破裂分量(M^{DC})

所占有的比重。

Ohtsu^[8]的各分量计算公式是建立在对水压致裂试验的研究基础上,其仅考虑 M^{ISO} 、 M^{CLVD} 和 M^{DC} 都是正值的情况。但在隧洞工程中,岩石破裂过程中的力学状态并不是完全的受拉,矩张量分解各分量的主轴方向的正负性是不定的,因此,该方法在隧洞工程中的使用具有一定的局限性。

如 2011 年 1 月 17 日 23:30:57, 微震仪器监测到一个微震事件,经过计算得到如下的矩张量结果:

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 251 & 226 & 624 & 147 & 098 & 320 & -123 & 722 & 864 \\ & 147 & 098 & 320 & 17 & 879 & 852 & -194 & 765 & 680 \\ -123 & 722 & 864 & -194 & 765 & 680 & 1 & 233 & 346 & 816 \end{bmatrix} \quad (13)$$

将该矩张量结果进行本征值化,得到 3 个特征值分别为: -1 346 092 160、77 707 224、36 965 344。根据 Ohtsu^[8],该矩张量的最大特征值为 77 707 224,中间特征值为 36 965 344,最小特征值为 -1 346 092 160,于是有

$$\left. \begin{aligned} 1.00 &= X + Y + Z \\ 0.48 &= 0 - 0.5Y + Z \\ -17.32 &= -X - 0.5Y + Z \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} X &= 17.80 \\ Y &= -11.52 \\ Z &= -5.28 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

但 X 、 Y 、 Z 的取值范围应该是 $[0, 1]$ 。可见,其在一般性分析时存在其弊端。

针对这种情况,在上述合理的剪切和张拉破裂假定的前提下,建立更具通用性和理论性的各分量以及其权重的计算公式。

由于 $M^{ISO} = (M_1 + M_2 + M_3)/3$ 在各方向的大小都是相同的,因此,可以根据偏矩张量部分 M'_1 、 M'_2 、 M'_3 来研究 M^{DC} 和 M^{CLVD} 大小。由于 M^{DC} 的力学状态具有对称性,因此假定 $M^{DC} > 0$ 。

定义 $|M'_1|$ 、 $|M'_2|$ 、 $|M'_3|$, 根据图 4 可知:

如果 $M^{CLVD} = 0$, 则有

$$M'_1 = M^{DC} + M^{CLVD} \quad (15)$$

当 $M'_2 = M'_3$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} M'_2 &= 0 - M^{CLVD} / 2 \\ M'_3 &= -M^{DC} - M^{CLVD} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

当 $M'_2 < M'_3$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} M'_3 &= 0 - M^{CLVD} / 2 \\ M'_2 &= -M^{DC} - M^{CLVD} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

如果 $M^{CLVD} < 0$, 则有

$$M'_1 = -M^{DC} + M^{CLVD} \quad (18)$$

当 $M'_2 = M'_3$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} M'_2 &= M^{DC} - M^{CLVD} / 2 \\ M'_3 &= 0 - M^{CLVD} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

当 $M'_2 < M'_3$ 时,有

$$\left. \begin{aligned} M'_3 &= M^{DC} - M^{CLVD} / 2 \\ M'_2 &= 0 - M^{CLVD} / 2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

由上述式子可以求得 M^{DC} 和 M^{CLVD} 大小。为了使该方法与 Ohtsu 研究的水压致裂试验中结果相匹配,使用 $P_{DC} = M^{DC} / (|M^{DC}| + |M^{CLVD}| + |M^{ISO}|)$ 来计算得到微震事件矩张量中剪切破裂分量 (M^{DC}) 所占有的比重,并进一步根据式 (12) 来确定岩石破裂类型。

将确定用于研究的隧洞范围内岩爆发生前出现的所有微震事件按照发生时间的先后顺序,生成岩爆破裂类型演化表。

接着,计算以上所有微震事件的微震释放能量,并根据其微震释放能量的相对大小,来表示岩爆破裂类型演化表中微震事件的大小,以生成岩爆孕育演化中不同破裂类型事件演化规律图。

最后,在宏观上生成所有微震事件破裂面的示意图。不同的破裂类型的破裂面相对主轴方向是不同的。张拉破坏类型,破裂面垂直于最大主轴方向;剪切破坏类型,可以参考地震学中确定节面的方法。

综合上述基于微震监测数据的深埋隧洞岩爆机制的矩张量分析过程,设计了如图 5 所示的建议的分析方法流程图。

3 案例分析

按照图 5 所示的基于微震监测数据的深埋隧洞岩爆机制的矩张量分析方法,编写了基于矩张量的岩爆机制计算分析程序,并使用该程序进行了实际岩爆案例的矩张量分析研究。

3.1 岩爆案例 1

2011 年 8 月 10 日 9:10 左右在锦屏二级水电站 3[#]引水隧洞引(3)K8+700~728 北侧边墙至拱肩发生强烈岩爆,最大爆坑深度达 1.2 m,岩石被抛掷最远距离超过 8 m。爆坑图如图 6 示。

首先,使用基于破坏接近度的数值模拟方法研究确定了用于研究的隧洞岩体范围为:沿隧洞轴线方向,引(3)K8+680~750;垂直隧洞轴线方向,隧洞中心线往北侧边墙 36 m,往南侧边墙 15 m,往拱顶和拱底各 27 m。

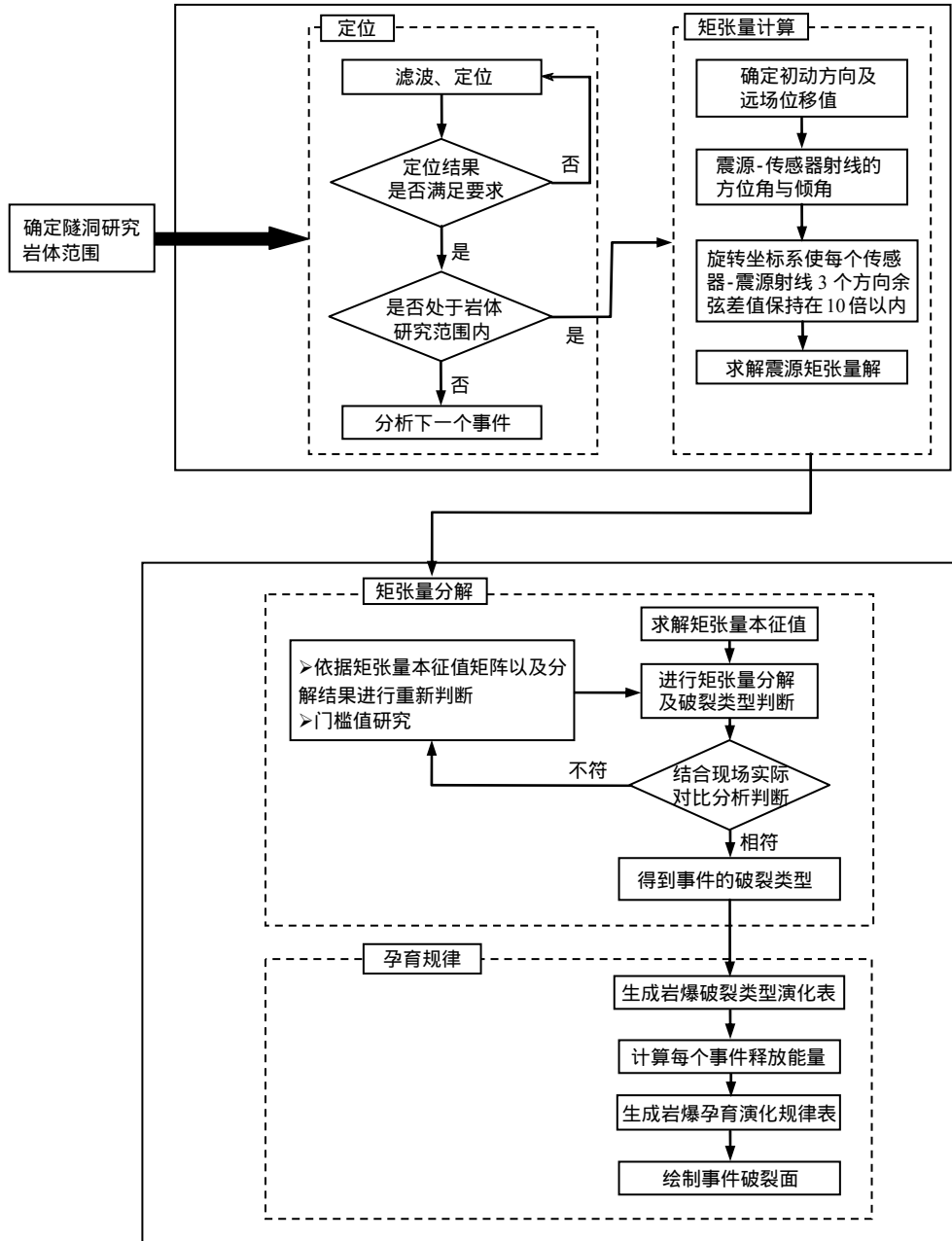


图 5 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析方法流程图

Fig.5 Flow chart of analysis method of rockburst mechanism for deep tunnel based on moment tensor



图 6 岩爆案例 1 的爆坑图

Fig.6 Pit figure of rockburst in case 1

然后，选取这一岩体范围内隧洞掘进过程中岩爆发生前所有的微震事件作为研究对象。

将上述微震事件进行矩张量计算，并根据修正的深埋隧洞矩张量分解方法得到各分解分量的比重，其结果如表 1 所示。其中 P_{DC} 为矩张量中 M^{DC} 分量所占有的比重； P_{CLVD} 为矩张量中 M^{CLVD} 分量所占有的比重； P_{ISO} 为矩张量中 M^{ISO} 分量所占有的比重； $\lg Energy$ 为该微震事件所释放能量的对数值。

根据表 1 中的计算结果，依据式 (12) 得到每个微震事件的破裂类型，生成岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律如图 7 所示，图中各点表示每一个微震事件，而其大小表示该微震事件所释放

能量的对数值(如图例所示),横坐标表示微震事件发生时间和相对先后顺序,纵坐标为微震事件表示岩体的破裂类型。

表 1 案例 1 相关事件各分量相对比重表
Table 1 Events weight table by rule based on moment tensor in case 1

日期/月-日	时间	$P_{DC}/\%$	$P_{CLVD}/\%$	$P_{ISO}/\%$	$\lg Energy$
08-01	17:53:21	21.04	-38.74	-40.21	1.52
08-01	22:56:56	55.61	32.64	-11.75	1.14
08-03	11:45:12	35.47	-44.85	-19.69	3.08
08-03	16:02:45	27.09	52.86	20.05	1.87
08-03	16:02:46	29.35	58.51	12.14	2.04
08-03	20:58:26	49.66	-12.66	37.68	2.32
08-05	6:29:49	41.09	-21.07	-37.83	1.02
08-05	6:49:24	34.07	-42.54	-23.39	0.34
08-05	8:16:42	67.11	-0.32	-32.56	0.45
08-05	8:16:51	55.25	-12.00	-32.74	1.53
08-05	8:16:53	24.00	41.00	35.00	0.94
08-05	8:16:55	19.60	-55.88	-24.52	1.10
08-05	8:16:59	56.23	-36.53	7.24	0.96
08-05	8:17:05	68.19	28.94	2.86	1.16
08-05	8:17:20	34.38	-40.39	-25.23	0.66
08-05	8:17:22	2.65	-81.34	16.02	0.93
08-05	8:17:26	59.55	3.83	-36.63	1.01
08-05	8:17:27	20.67	-64.99	-14.34	1.05
08-05	11:54:21	42.57	-15.51	-41.93	3.34
08-05	14:33:24	22.40	52.35	25.26	4.45
08-07	3:16:12	22.74	30.63	46.63	0.94
08-07	3:16:24	22.66	57.82	19.52	3.57
08-07	10:04:01	27.93	-42.98	29.10	0.67
08-07	22:23:47	64.11	8.70	-27.20	2.97
08-07	22:23:50	41.39	30.38	28.24	2.53
08-09	23:11:28	52.59	12.54	-34.87	0.46
08-09	23:12:13	34.78	44.69	20.54	0.84
08-10	4:46:21	46.35	17.15	-36.50	1.13
08-10	8:32:53	3.57	-80.16	-16.28	2.25
08-10	8:47:32	1.71	-72.19	-26.09	0.91

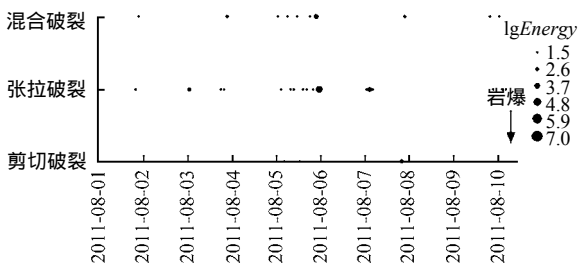


图 7 岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图(案例 1)

Fig.7 Evolution chart of different fracture types in rockburst pregnant process (case 1)

从图 6 所示该岩爆宏观破坏面来看,可以将这次岩爆的破坏分成 区和 区, 区岩体完整,破裂面新鲜,起伏不平,未见结构面发育、岩粉和明显错动滑移痕迹。 区破坏面几乎全部充斥着软弱填充物。因此,该次岩爆可能为 区的应变型岩爆首先发生,同时在 区岩爆震动力的巨大能量冲击作用下,使 区岩体发生崩塌。

该岩爆孕育发展过程应该是以拉伸破坏为主,其中 区可能包含部分剪切滑移,但由于存在软弱填充物,所以 区的剪切破坏类型的事件释放能量应该较低。

从基于微震数据的矩张量计算分解得到的岩爆孕育演化规律的结果来看,其岩爆孕育演化规律与实际岩爆破裂面揭露出来的结果较为相符。

3.2 岩爆案例 2

2011 年 8 月 12 日 0 时左右在锦屏二级水电站 4#引水隧洞引(4)K8+812~837 北侧边墙至拱肩发生强烈岩爆,最大爆坑深度接近 1.5 m,部分锚杆被拉断、锚杆尾端垫片飞出。爆坑图如图 8 所示。



图 8 岩爆案例 2 的爆坑图
Fig.8 Pit figure in case 2 of rockburst

使用基于破坏接近度的数值模拟方法确定了用于研究的隧洞岩体范围为:沿隧洞轴线方向,引(4)K8+790~860;垂直隧洞轴线方向,隧洞中心线往北侧边墙 38 m,往南侧边墙 12 m,往拱顶和拱底各 35 m。

选取这一岩体范围内隧洞掘进过程中岩爆发生前所有的微震事件作为研究对象。

将上述微震事件进行矩张量计算,并根据修正的深埋隧洞矩张量分解方法得到各分解分量的比重,结果如表 2 所示。

根据表 2 中的计算结果,依据式(12)得到每个微震事件的破裂类型,生成岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律如图 9 所示,图中各点表示每一个微震事件,而其大小表示该微震事件所释放

能量的对数值(如图例所示), 横坐标表示微震事件发生时间和相对先后顺序, 纵坐标表示微震事件表示岩体的破裂类型。

表 2 案例 2 相关事件各分量所占比重表
Table 2 Events weight table the rule based on moment tensor in case 2

日期/年-月-日	时间	$P_{DC}/\%$	$P_{CLVD}/\%$	$P_{ISO}/\%$	$lgEnergy$
2011-08-04	1:21:02	9.76	-60.16	-30.07	0.85
2011-08-04	1:21:21	24.25	-40.79	-34.95	2.38
2011-08-06	8:31:11	15.29	-50.60	-34.11	4.44
2011-08-07	1:16:56	7.96	-64.40	-27.64	4.76
2011-08-07	14:59:19	7.22	61.83	30.96	1.35
2011-08-08	10:54:33	96.15	-3.45	0.39	5.53
2011-08-08	14:09:14	66.90	-28.23	-4.87	4.04
2011-08-10	4:16:08	1.14	-67.57	-31.29	1.31
2011-08-10	4:31:55	1.60	-65.12	-33.28	1.67
2011-08-10	13:44:43	6.32	63.32	30.36	0.44
2011-08-10	13:45:21	62.99	17.15	19.86	2.55
2011-08-10	17:11:05	2.21	-68.29	-29.50	0.97
2011-08-10	22:17:23	53.40	-7.00	-39.60	1.31
2011-08-11	18:33:32	8.19	-55.13	-36.68	3.02
2011-08-12	0:00:09	9.93	-60.65	-29.42	6.87

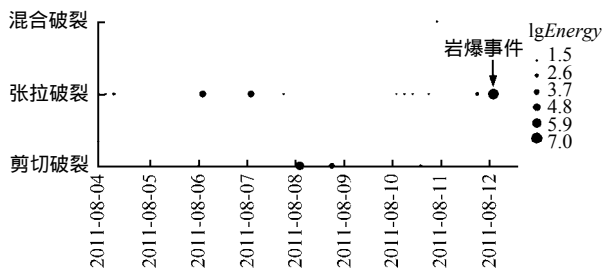


图 9 岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图(案例 2)

Fig.9 Evolution chart of different fracture types in rockburst pregnant process (case 2)

从图 8 该次岩爆的宏观破坏面来看, 岩体完整, 破裂面新鲜, 结构面不发育, 其中大部分破裂面起伏不平, 未见岩粉和明显错动滑移痕迹。另外, 存在少量结构面, 结构面平滑, 没有填充物, 属于硬性结构面。硬性结构面附近有部分岩粉存在, 且结构面上有明显的擦痕。

因此, 该岩爆以拉伸破裂为主, 以有较大释放能量的剪切破裂为辅。

由图 9 得到的岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图可以看出, 其首先以拉伸破裂为主, 在拉伸破裂过程中伴随 3 个剪切破裂微震事件产生, 其中有两个剪切破裂微震事件释放能量较大, 最终以拉伸破坏表现出来。其整个岩爆孕育演化过程与从岩爆宏观破坏面得到的信息基本一致。

本文作者还对锦屏二级水电站引水隧洞超过 7 km 的微震监测施工洞段发生的 78 次中等以上岩

爆进行基于微震数据的矩张量分析, 矩张量分析得到的破裂类型演化规律分析结果与岩爆破裂面揭露的结果较为相符, 能够较好地解释岩爆孕育演化机制。

4 讨论

(1) 以微震监测对象的实际破裂类型为基本模型, 进行针对性的分解和分量计算是使用矩张量方法进行岩石破裂类型判别的关键。

上面已介绍了 Ohtsu 提出分量计算方法的局限性, 下面针对 Feignier 和 Young^[7]为了解释加拿大地下实验室(URL)在低扰动机械凿岩法开挖过程中在拱肩形成的张拉裂隙, 而引入的分析震源破裂类型的矩张量分析方法作为讨论对象, 研究其在深埋隧洞中的适用性。

由于偏矩张量部分有很多种分解方法, 并不惟一的对应于上述的 M^{DC} 和 M^{CLVD} 的分解, 不同的分解有不同的物理意义考虑, 例如: Wallace^[19]根据具有相同 T 轴以及剪切破裂方式, 将偏矩张量部分分解为大小两个 M^{DC} 分量, 因此 Feignier 等^[7]将 M^{DEV} 认为是剪切破裂有一定的道理, 但是各向同性矩张量部分解释为张拉/压缩破裂在快速掘进条件下的深埋隧洞中有一定值得商榷的地方。图 10 为岩爆案例 1 相关微震数据按照此方法计算得到的破裂类型事件演化规律图。

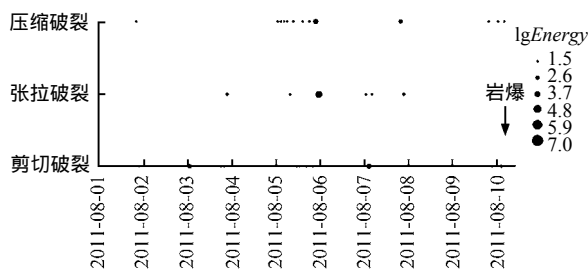


图 10 基于 Feignier 等^[7]提出的方法的岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图(案例 1)

Fig.10 Evolution chart of different fracture types in rockburst pregnant process based on the method proposed by Feignier et al^[7] (case 1)

从图 6 所示的岩爆破裂面揭露的情况来看, 岩爆案例 1 以拉伸破坏为主, 但图 10 中 Feignier 等提出的方法^[7]得到的岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图中剪切破裂类型却占有相当大的比重。这一点从矩张量分解方式上也可以看出, 因此, Feignier 等提出的方法^[6]不太适用于快速掘进条件下的锦屏二级水电站引水隧洞工程的岩爆分析。

(2) 本文在岩石破裂类型判别时, 直接使用

Ohtsu 给出的门槛值。但不同种类的岩石、不同的原岩条件、不同的应力路径表现出来的破裂方式不同,同时岩爆的特征也不同。因此,在研究不同工程时,可以针对该工程的赋存岩石类别,进行一系列不同的室内试验来确定判别破裂类型的门槛值。

(3) 微震事件破裂面的绘制可以加深对岩爆孕育演化过程的认识。岩石工程中微震事件存在张拉和剪切破裂等不同破裂类型,其破裂面相对于主轴方向是有所不同的,这一点要分开考虑。同时,要使破裂面的演化能更好地说明问题,微震事件的精确定位是很重要的一步,精确的定位精度是微震数据后续分析前至关重要的一步。

(4) 不管是对于岩爆机制的认识还是岩爆预测、声波、应变、钻孔摄像等其他监测手段的加入,可以更好地加强对岩体损伤及岩爆孕育演化进行理解,因此,结合多手段、多方法的综合研究应当是岩爆机制研究开展的方向。

5 结 论

以锦屏二级水电站微震监测数据为基础,将矩张量引入到深埋隧洞岩爆机制分析研究中,并针对在深埋隧洞岩爆机制研究中的 2 个关键问题提出了解决建议:

(1) 隧洞工程为线性工程,同时有限的隧洞现场施工条件,使得传感器往往安装在隧洞表面或者较浅的钻孔中,难以形成良性的传感器阵列,矩张量计算结果在有些情况下会受到很大的影响。为此,提出了数值计算过程中的坐标系空间旋转法。通过旋转空间坐标系到合适的坐标系统下,使对于同一个事件的每个传感器源-传感器射线到新坐标系的 3 个方向余弦差值在 10 倍数范围以内。

(2) 针对 Ohtsu 使用矩张量计算分解判断岩石破裂类型的方法中,提出的各分量比重计算公式仅适用于各分量均为受拉的情况。考虑隧洞工程受力方向的不确定性,扩展其分量比重计算公式到更一般适用状态。

在此基础上,建立了一套完整的岩爆孕育过程矩张量分析方法并设计了相关流程图。同时,利用该方法研究了锦屏二级水电站引水隧洞 78 次中等以上岩爆案例。结果表明,该方法可以较好地解释岩爆孕育过程岩石破裂演化机制。

致谢:感谢中国科学院武汉岩土力学研究所锦屏二级水电站微震监测项目部的肖亚勋博士、丰光亮硕士、李广宽硕士、赵周能博士等同仁对现场微震监测设备维护、数据分析和岩爆信息收集方面所作出的贡献。

参 考 文 献

- [1] 杨健, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3796 - 3802.
YANG Jian, WANG Lian-jun. Study on mechanism of rock burst by acoustic emission testing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3796 - 3802.
- [2] 许迎年, 许文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462 - 1466.
XU Ying-nian, XU Wen-sheng, WANG Yuan-han, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1462 - 1466.
- [3] 徐林生, 王兰生. 岩爆形成机理研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(2): 115 - 118.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Study on the mechanism of rockburst[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2001, 24(2): 115 - 118.
- [4] LI SHAOJUN, FENG XIATING, LI ZHANHAI, et al. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping hydropower station[J]. **Engineering Geology**, 2002, (137 - 138): 85 - 96.
- [5] GILBERT F. Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources[J]. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, 1971, 22(2): 223 - 226.
- [6] 陈培善. 地震矩张量及其反演[J]. 地震地磁观测与研究, 1995, 16(5): 19 - 53.
CHEN Pei-shan. Seismic moment tensor and its inversion[J]. **Seismological and Geomagnetic Observation and Research**, 1995, 16(5): 19 - 53.
- [7] FEIGNIER B, YOUNG R P. Moment tensor inversion of induced microseismic events: evidence of non-shear failures in the $-4 < M < 2$ moment magnitude range[J]. **Geophysical Research Letters**, 1992, 19(14): 1503 - 1506.
- [8] OHTSU M. Acoustic emission theory for moment tensor analysis[J]. **Research in Nondestructive Evaluation**, 1995, 6(3): 169 - 184.
- [9] HAZZARD J F, YOUNG R P. Moment tensors and micromechanical models[J]. **Tectonophysics**, 2002, 356(1 - 3): 181 - 197.
- [10] HAZZARD J F, YOUNG R P. Dynamic modeling of induced seismicity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1365 - 1376.

- of **Highway and Transport**, 2003, 16(2): 31 - 34.
- [5] 夏江, 严平, 庄一舟, 等. 基于遗传算法的软土地基沉降预测[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1131 - 1134.
XIA Jiang, YAN Ping, ZHUANG Yi-zhou, et al. Prediction of soft soil foundations settlements based on genetic algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1131 - 1134.
- [6] 黄亚东, 张士乔, 俞亭超, 等. 公路软基沉降预测的支持向量机模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1987 - 1990.
HUANG Ya-dong, ZHANG Tu-qiao, YU Ting-chao, et al. Support vector machine model of settlement prediction of road soft foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1987 - 1990.
- [7] 王穗辉, 潘国荣. 基于 MATLAB 多变量灰色模型及其在变形预测中的应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 24 - 27.
WANG Sui-hui, PAN Guo-rong. A MATLAB-based multi-variate grey model and its application in deformation prediction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2005, 38(5): 24 - 27.
- [8] 何习平, 华锡生, 何秀凤. 加权多点灰色模型在高边坡变形预测中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1187 - 1191.
HE Xi-ping, HUA Xi-sheng, HE Xiu-feng. Weighted multi-point grey model and its application to high rock slope deformation forecast[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1187 - 1191.
- [9] 崔立志, 刘思峰, 吴正朋. 基于向量连分式理论的 MGM(1, n)模型[J]. 系统工程, 2008, 26(10): 47 - 51.
CUI Li-zhi, LIU Si-feng, WU Zheng-peng. MGM(1, n) based on vector continued fractions theory[J]. **Systems Engineering**, 2008, 26(10): 47 - 51.
- [10] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 潘国荣, 刘大杰. 顾及邻近点变形因素项的动态模型辨识及预测[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 32 - 35.
PAN Guo-rong, LIU Da-jie. Dynamic modeling identification and predication in consideration of the adjacent point deformation[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 2001, 30(1): 32 - 35.
- [12] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002.
- [13] 郑雅楠, 李庚银, 周明. 大用户模糊优化购电组合策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 98 - 104.
ZHENG Ya-nan, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Studies of electricity procurement strategy for large consumers based on fuzzy optimization[J]. **Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering**, 2010, 30(10): 98 - 104.

上接第 172 页

- [11] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [12] KNOPOFF L, RANDALL M J. The compensated linear-vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1970, 75(26): 4957 - 4963.
- [13] 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [14] 张传庆, 周辉, 冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 888 - 894.
ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, FENG Xia-ting. Stability assessment of rockmass engineering based on failure approach index[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 888 - 894.
- [15] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275 - 283.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 275 - 283.
- [16] 陈炳瑞, 冯夏庭, 李庶林, 等. 基于粒子群算法的岩体微震源分层定位方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 740 - 749.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, LI Shu-lin, et al. Microseism source location with hierarchical strategy based on particle swarm optimization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 740 - 749.
- [17] URBANCIC T I, TRIFU C I, MERCER R A, et al. Automatic time-domain calculation of source parameters for the analysis of induced seismicity[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1996, 86(5): 1627 - 1633.
- [18] AKI K, RICHARD P G. Quantitative seismology: theory and methods[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1980.
- [19] WALLACE T. A re-examination of the moment tensor solutions of the 1980 Mammoth Lakes earthquakes[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1985, 90(B13): 11171 - 11176.