

文章编号: 1000-7598-(2013)06-1716-07

# 基于微震信息的硬岩新生破裂面方位特征矩张量分析

明华军, 冯夏庭, 张传庆, 肖亚勋

(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:** 为了更清晰直观地了解高应力下硬岩破坏(岩爆、片帮、应力型塌方等)孕育过程中岩石破裂演化过程, 根据岩石破裂面的特点, 依据微震监测数据的矩张量结果, 推导并得到了岩体破裂面空间方位计算方法, 在此基础上给出了根据运动夹角 $\theta$ 来判断岩石破裂类型的确定方法。借助此方法, 在实例研究中进一步证明了深埋隧洞矩张量分解判断破裂类型分析方法的可靠性。依托锦屏二级水电站深埋引水隧洞这一典型工程, 依据破裂面的方位角、倾角特征和岩爆宏观破坏情况, 初步探究了即时性应变-结构面滑移型岩爆的孕育过程: 在岩爆孕育初期, 以张拉破裂为主, 由于硬性结构面的存在, 在开挖扰动应力调整初期, 破裂面由岩体浅层往岩体较深层硬性结构面扩展, 张拉破裂面尖端接近硬性结构面时, 硬性结构面上发生剪切滑移, 若较深层岩体内部还有其他硬性结构面存在, 则在该硬性结构面尖端, 除随着岩体浅层切向应力的持续增大, 往开挖面扩展外, 继续以张拉破裂面型式往深层扩展, 至较深层硬性结构面上剪切破裂产生, 最终以剪切滑移面为破坏面边界往开挖面发展, 并最终将岩体抛掷而出。

**关键词:** 岩石破裂; 破裂面; 运动夹角; 矩张量; 应变-结构面滑移型岩爆; 孕育过程; 微震监测

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

## Moment tensor analysis of attitude characterization of hard rock newborn fracture surface based on microseismic informations

MING Hua-jun, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, XIAO Ya-xun

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

**Abstract:** For understanding rock crack initiation, propagation and development in hard rock destruction (rockburst, spalling, collapse etc.) pregnant process under high in-situ stress clearly, according to the observation and description of the characteristics of rock fracture surface, a method for calculating its attitude is presented here based on the moment tensor theory. The estimation of the fracture type using the motion angle is also conducted in this method. This method is applied to analyzing the formation mechanism of rockbursts encountered in the deep headrace tunnels in the Jinping II hydropower station. In the case study, in the estimation of rock fracture type, the technology of moment tensor decomposition is proved accurate. Based on the comprehensive study of the strikes and dips of rock fracture surfaces and the representation features of the pit of rockburst, it is concluded that strain-structure slip rockburst forms tension crack firstly; and cracks develop from the shallow into the deep in rock mass at the beginning of the excavation disturbance because of the surface of the rigid structure. When tensile crack tip is close to the surface of the rigid structure, the surface of the rigid structure will slide; and if there is the surface of the other rigid structure in the relative deeper rock mass, the first surface will continue to the deeper rock mass based on tensile cracks, except continuing to the excavation wall because of the tangential stress increase in the shallow rock mass. When tensile cracks deepen into the second surface, the surface slides. At last, the damaged rock mass is thrown out from the failure boundary which is assembled by the shear slip planes.

**Key words:** rock fracture; fracture surface; movement direction; moment tensor; strain-structural plane slip rockburst; pregnant process; microseismic monitoring

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目 (No. 2010CB732006); 中国科学院重点部署项目 (No. KZZD-EW-05); 国家自然科学基金面上项目 (No. 51079144)。

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

# 1 引言

破裂面方位的时空特征研究是了解岩石破裂萌生、扩展、聚集和破坏的一种清晰直观的方法和手段。对岩爆发生后破坏面的描述是从宏观上了解岩体破坏的一种手段，但纯粹从破坏面无法得到岩石破坏全过程的演化。

矩张量是描述岩石破裂震源等效力的概念，表述的是震源破裂过程，因此，可以通过矩张量获得岩石破裂时的破裂面和运动方向，同时岩石破裂微震事件是一种时空二维变量，所以，通过对隧洞掘进过程微震监测数据的矩张量分析，可以获得破裂面方位的时空特征。

已有的确定破裂面特征研究几乎全部来源于地震学，而地震学破裂面的确定建立在剪切破裂的基础之上。但在深埋隧洞工程中，岩体的破坏既有剪切破坏，也有张拉破坏，还有拉剪/压剪破坏，破裂面的运动方向与破裂面不共面。

Gross 等<sup>[1]</sup>在使用声发射理论研究岩石破裂时，介绍了矩张量 3 个特征值矢量与运动方向矢量以及破裂面法向矢量的定性关系，但未给出定量结果。在确定岩石破裂面和运动方向的基础上，Ouyang 等<sup>[2]</sup>使用运动方向和破裂面的夹角  $\theta$ （如图 1 所示）来进行岩石破裂类型的判断，但其采用的是固定的破裂类型判别指标，而不同的岩石在不同应力条件下发生剪切破坏的抗剪强度是不同的，因此，不能采用固定的阈值进行破裂类型的判断。

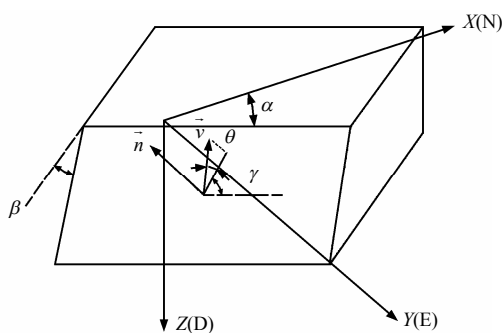


图 1 破裂面空间示意图

Fig.1 Diagram of fracture surface in 3D coordinate system

在基于微震监测数据的深埋隧洞矩张量分析判别破裂类型的方法<sup>[3]</sup>研究基础上，本文根据深埋隧洞岩石破裂面的特点，推导得到了基于矩张量分析结果的岩体破裂面方位的确定方法，并介绍了使用运动方向与破裂面的夹角  $\theta$  来进行岩体破裂类型的判断方法，进一步验证了基于矩张量分解判断岩石

破裂类型的可靠性。最后，将这些理论方法应用到对应变-结构面滑移型岩爆孕育过程岩石破裂面时空特征的研究中。

# 2 破裂面方位的确定方法

## 2.1 坐标系统建立

以隧洞北侧边墙为正北方向 N，隧洞大桩号方向为正东方向 E，如图 2 所示。以 N 方向为 X 轴正方向；E 方向为 Y 轴正方向，垂直向下(D)为 Z 轴正方向，坐标系满足右侧定律。

如图 1 所示，方位角  $\alpha$  以正北方向为  $0^\circ$ ，顺时针旋转为正，取值范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ；倾向方向始终位于方位角右侧；倾角  $\beta$  以水平方向顺时针旋转为正，取值范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

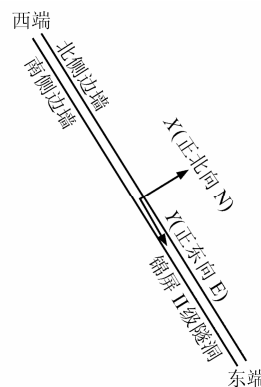


图 2 相关研究的隧洞坐标系

Fig.2 Coordinate system of tunnel in the research

## 2.2 破裂面方位确定

各向同性介质下，微震源的矩张量可通过下式计算<sup>[4]</sup>：

$$M_{ij} = uS \begin{bmatrix} (\lambda + \mu)\bar{n} \cdot \bar{v} + \mu & 0 & 0 \\ 0 & \lambda\bar{n} \cdot \bar{v} & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + \mu)\bar{n} \cdot \bar{v} - \mu \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $u$  为破裂面运动方向的位移量； $S$  为破裂面表面积； $\lambda$  和  $\mu$  为拉梅常数； $\bar{v}$  为运动方向； $\bar{n}$  为破裂面法向方向。

进一步推导可得其特征值表达式：

$$\left. \begin{aligned} M_1 + M_3 - 2M_2 &= 2\mu u S \bar{n} \cdot \bar{v} \\ M_1 - M_3 &= 2\mu u S \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

基于矩张量的对称性，且根据矩张量特征值的大小关系，其特征矢量可表达为（见图 3）：

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{n} + \vec{v}}{|\vec{n} + \vec{v}|}, \vec{e}_2 = \frac{\vec{n} \otimes \vec{v}}{|\vec{n} \otimes \vec{v}|}, \vec{e}_3 = \frac{\vec{n} - \vec{v}}{|\vec{n} - \vec{v}|} \quad (3)$$

式中： $\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2 \perp \vec{e}_3$ ，绝对值符号表示矢量大小； $\otimes$ 为矢量乘法； $\vec{e}_1$ 、 $\vec{e}_2$ 、 $\vec{e}_3$ 分别为矩张量的最大特征值、中间特征值和最小特征值对应特征矢量。

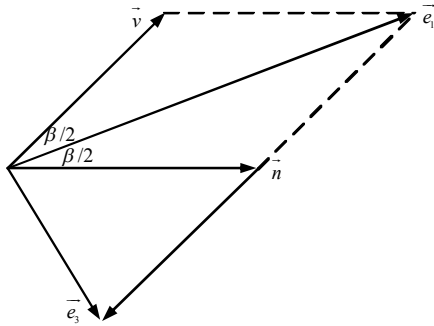


图 3 矩张量特征矢量与破裂面滑动方向和法向方向  
Fig.3 Eigenvectors of moment tensor, movement and normal direction of fracture surface

假设矢量  $\vec{v}$  和  $\vec{n}$  的夹角为  $\beta$ ，因此， $\vec{v}$  和  $\vec{e}_1$  的夹角以及  $\vec{n}$  和  $\vec{e}_1$  的夹角均为  $\beta/2$ ，如图 3 所示。

根据式 (2)，有

$$\vec{n} \cdot \vec{v} = \cos \beta = \frac{M_1 + M_3 - 2M_2}{M_1 - M_3} \quad (4)$$

由此可推导出破裂面的运动方向和法向方向应为：

$$\vec{n} = \cos \frac{\beta}{2} \vec{e}_1 + \sin \frac{\beta}{2} \vec{e}_3 = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} \vec{e}_1 + \sqrt{\frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3}} \vec{e}_3 \quad (5)$$

$$\vec{v} = \cos \frac{\beta}{2} \vec{e}_1 - \sin \frac{\beta}{2} \vec{e}_3 = \sqrt{\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_3}} \vec{e}_1 - \sqrt{\frac{M_2 - M_3}{M_1 - M_3}} \vec{e}_3 \quad (6)$$

根据破裂面法向方向的空间矢量值可得到其几何方程表达式，进而确定破裂面的方位角和倾角。

当定位误差较小时，Angus<sup>[5]</sup>的矩张量结果敏感性研究表明，矩张量的  $P$  轴和  $T$  轴是可靠的，由此推导的矩张量特征值和特征矢量是稳定可靠的。因此，上述基于张量的特征值和特征矢量求解破裂面方位的方法在有限定位误差下也是相对可靠的。

### 2.3 基于运动夹角的破裂类型判别方法

在深埋隧洞中，破裂面的运动方向与破裂面往往不共面。由此定义运动夹角为破裂面运动矢量方向  $\vec{v}$  和破裂面之间的夹角  $\theta$ ，如图 1 所示。据图 1

可知，满足下式时的岩体将发生张拉破坏：

$$\tan \theta < \frac{F_s}{F_t} \quad (7)$$

式中： $F_s$  为完整岩体的抗剪强度， $F_t$  为岩石的抗拉强度。

从几何学的角度，运动夹角是一种较好的判断岩石破裂类型的方法。但岩体抵抗剪切破坏的能力和抵抗张拉破坏的能力不同，通常表征为受应力环境的影响明显。因此，抗剪强度的取值应视地应力条件、岩石力学参数和开挖条件而异。

作者给出下述方法用于近似确定岩体的抗剪强度。在开挖卸荷作用下洞室围岩的切向应力将增大，而法向应力则降低。由于地下工程开挖，形成应力集中，通常的应力集中系数为 2~3，即开挖卸荷作用下洞室围岩的切向应力一般为原来的 2~3 倍<sup>[6]</sup>。假设沿平行隧洞轴线方向的原始地应力场中两个正应力中的最大值为  $\sigma$ ，围岩浅层岩体切向应力采用 2 倍的应力集中系数，则根据摩尔-库仑准则，采用下面公式可得到岩体的抗剪强度近似值：

$$F_s = 2 \cos \varphi \frac{\sigma}{2} = \sigma \cos \varphi \quad (8)$$

式中： $\varphi$  为内摩擦角。

### 2.4 破裂面圆半径确定

震源的空间产状由震源空间坐标、破裂面的方位角和倾角及破裂面大小组成。一般地，破裂面被假设为圆形平面，通过用圆形半径来表征其大小。

Cai 等<sup>[7]</sup>通过张拉破裂过程中能量演化形式，给出了张拉破裂情况下破裂圆半径的计算公式，但需借助于连续性介质力学数值模拟方法，然而深埋隧洞中富含硬性结构面，连续介质力学方法并不完全适用，这种方法也将基于微震的破裂面圆半径计算复杂化。因此，本文采用 Madariaga<sup>[8]</sup>模型参数计算方法，其计算公式为

$$r = \frac{1.32v_s}{2\pi f_s} \quad (9)$$

式中： $r$  为破裂面圆半径； $v_s$  为 S 波波速； $f_s$  为 S 波角频率。

虽然式 (9) 建立的模型基础与实际有所出入，但是 Trifu 等<sup>[9]</sup>结合微震监测与现场调查发现，在采矿与地下工程中，Madariaga 模型提供了一个相对可靠的破裂面圆半径的大小。考虑到深埋隧洞中微震定位结果的不精确性，破裂面圆半径的大小误差是可以接受的。

### 3 基于实例的破裂面特征分析

2010 年 6 月 11 日 0:30 左右, 3#TBM 开挖洞段引(3)K11+045~054 段南侧边墙至拱肩发生强烈岩爆, 最大坑深达 1.2 m。岩爆破坏图如图 4 所示。

从岩爆宏观破坏面来看, 岩体完整, 破裂面新鲜。在南侧边墙可见 V 形破坏面, 破坏面上可见明显擦痕, 附近其他区域则凹凸不平、台阶状, 周围岩体表面有部分微张裂纹。留在 TBM I 区平台的爆块呈块状, 表面一侧有明显擦痕, 另一侧可见鱼纹状张拉裂纹。因此, 该岩爆孕育过程中既受高应力作用影响, 又受结构面控制, 同时该岩爆发生位置及时间均在隧洞开挖扰动影响范围以内, 属于即时性应变-结构面滑移型岩爆。



图 4 2010 年 6 月 11 日即时性应变-结构面滑移型岩爆造成岩体宏观破坏情况

Fig.4 Pit figure from immediate strain-structural plane slip rockburst in Jun. 11th, 2010

根据施工资料, 6 月 11 日 3#引水隧洞 TBM 掘进洞段掌子面桩号为引(3)11+038。该区域埋深约 1 900 m, 岩性为 T<sub>2b</sub> 白色巨厚状中粗晶大理岩。其临近 4#引水隧洞东端掌子面与 3#TBM 开挖掌子面掘进较近, 认为 4#引水隧洞开挖对 3#TBM 掘进有一定的影响。因此, 选择隧洞轴线方向为引(3)11+028~068 段; 垂直隧洞中心线方向向北 35 m, 向南 25 m 作为岩爆相关微震事件的选择范围。

#### 3.1 破裂类型

根据三维地应力反演推算得到该岩爆段附近岩体的地应力情况为<sup>[10]</sup>: 最大主应力为 48.05 MPa, 近似平行垂直方向; 中间主应力为 44.97 MPa, 近似平行隧洞掘进方向; 最小主应力为 42.95 MPa, 近似平行于隧洞边墙方向。

对锦屏 T<sub>2b</sub> 大理岩进行的常规岩石力学试验得到初始内摩擦角为 22.4°<sup>[11]</sup>。于是根据式 (8), 计算得到开挖卸荷作用下围岩浅层岩体的抗剪强度  $F_s$

为 44.42 MPa。由岩石力学试验结果可知, T<sub>2b</sub>大理岩的单轴抗压强度为 107.08 MPa<sup>[12]</sup>。而岩石的抗拉强度一般为抗压强度的 1/4~1/25, 平均为 1/10<sup>[13]</sup>。T<sub>2b</sub>大理岩的抗拉强度应约为 10.71 MPa。

因此, 根据式 (7) 可以得到, 当运动夹角  $\theta > 13.56^\circ$  时, 岩体会发生张拉破坏。

依据深埋隧洞矩张量分解岩石破裂类型判别标准<sup>[3]</sup>和运动夹角判别准则, 生成了岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图, 如图 5 所示。图中各点表示对应时刻的微震事件, 其大小表示该微震事件所释放能量  $E$  对数值的相对大小 (如图例), 横坐标是日期时间轴, 纵坐标表示微震事件表征的岩石破裂类型。图 5(a)矩张量破裂类型判别方法和图 5(b)运动夹角破裂类型判别方法得到的破裂类型基本一致, 从另一个角度证明了基于微震信息的深埋隧洞矩张量分解判断岩石破裂类型分析方法<sup>[3]</sup>的可靠性。

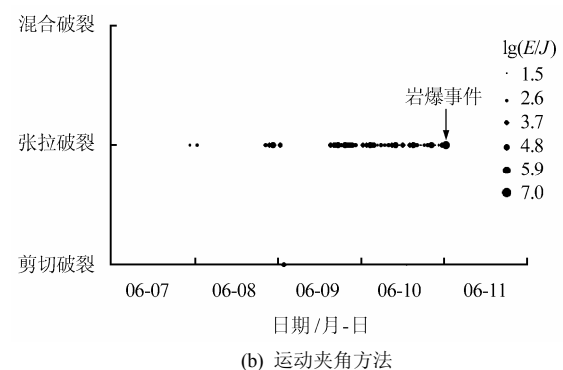
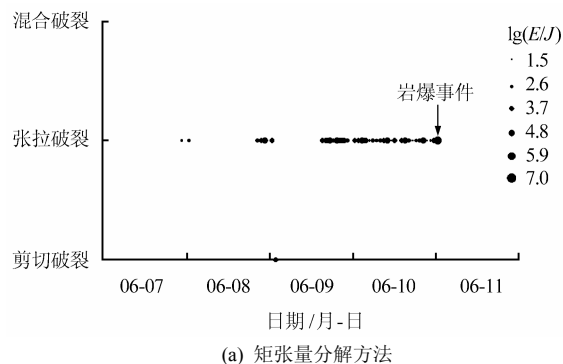


图 5 2010 年 6 月 11 日即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程中不同破裂类型事件演化规律图

Fig.5 Evolution chart of different fracture types on the immediate strain-structural plane slip burst pregnant process in Jun. 11th, 2010

#### 3.2 破裂面产状时空特征

据式 (5)、(6) 和式 (9) 计算得到如表 1 所示的岩爆孕育过程中岩石破裂面的方位角、倾角、运动夹角和破裂面圆半径。

表1 2010年6月11日即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程中相关微震事件破裂面方位特征信息表

Table 1 Orientation of fracture surface about events on the immediate strain-structural plane slip rockburst pregnant process in Jun. 11th, 2010

日期 /年-月-日	时刻 /h-min-s	走向 /(°)	倾角 /(°)	运动夹角 /(°)	震源半径 /m
2010/6/7	12:41:15	258.80	87.49	84.56	1.55
2010/6/8	4:12:13	261.90	88.11	86.24	1.01
2010/6/8	17:42:53	74.75	89.15	81.15	2.25
2010/6/8	18:16:13	76.14	89.62	82.84	1.90
2010/6/8	18:51:14	278.26	89.98	79.32	3.55
2010/6/9	0:08:24	267.00	89.90	84.83	3.25
2010/6/9	1:06:54	82.40	88.88	8.91	4.79
2010/6/9	17:05:54	257.54	89.84	81.74	1.16
2010/6/9	18:06:55	277.65	86.03	82.23	1.46
2010/6/9	20:44:19	259.76	86.32	82.86	1.80
2010/6/9	21:06:26	275.97	89.78	77.85	1.45
2010/6/9	21:30:43	229.41	78.29	43.36	2.03
2010/6/9	22:51:16	255.11	89.94	80.65	1.95
2010/6/9	23:16:12	260.74	87.27	82.93	1.68
2010/6/9	23:42:30	90.89	88.72	87.10	1.54
2010/6/10	0:08:18	254.25	89.91	74.97	2.69
2010/6/10	0:57:23	80.96	89.98	84.56	2.56
2010/6/10	2:19:30	248.58	89.97	80.12	3.89
2010/6/10	2:30:18	93.91	82.72	63.37	3.01
2010/6/10	2:36:36	94.48	83.04	73.41	0.93
2010/6/10	3:55:12	81.50	88.10	85.71	1.34
2010/6/10	4:02:53	238.17	88.90	70.32	1.43
2010/6/10	4:18:33	261.47	81.79	71.34	1.88
2010/6/10	4:49:33	95.59	88.78	76.86	2.34
2010/6/10	4:55:49	72.44	88.16	72.10	2.80
2010/6/10	5:37:18	253.18	89.24	78.86	0.45
2010/6/10	5:44:27	258.77	82.70	74.57	1.60
2010/6/10	6:19:33	348.34	83.92	1.01	2.05
2010/6/10	6:30:04	264.58	85.61	83.04	1.33
2010/6/10	6:32:26	83.76	86.30	82.09	3.94
2010/6/10	7:23:45	60.39	88.80	71.33	1.49
2010/6/10	11:08:08	264.54	86.66	81.71	0.63
2010/6/10	14:13:53	272.27	89.79	87.46	1.85
2010/6/10	15:28:04	83.29	87.13	84.44	1.33
2010/6/10	15:38:39	79.04	83.02	76.64	1.97
2010/6/10	18:09:13	94.99	89.47	81.15	0.70
2010/6/10	18:13:36	67.26	79.07	67.19	0.60
2010/6/10	22:43:34	256.85	89.57	71.41	6.27
2010/6/11	0:27:41	269.82	88.82	87.57	7.12

由表 1, 岩爆孕育过程中两个剪切破裂事件的产状信息可以发现, 6 月 9 日 1:06:54 的剪切破裂面与图 4 岩爆破坏“V”型爆坑南侧边墙左半部破坏面产状较为一致; 6 月 10 日 6:19:33 的剪切破裂面则与图 4 岩爆破坏“V”型爆坑南侧边墙右半部破坏面产状较为一致, 可见, 岩爆破坏“V”型爆坑的边界由剪切破裂面构成, 这从图 4 岩爆破坏面揭露的剪切划痕也可看出。

同时, 将表 1 所示微震事件岩体破裂面空间位置信息, 依据微震事件发生的时间顺序绘制如图 6 所示的破裂面随时间演化图。图中水平轴正方向为隧洞大桩号方向; 以竖直轴正方向为北侧边墙方向。为了更好地表示破裂面的方位角、倾角和大小, 采用同等长度短线表示破裂面及其方位角; 垂直于破裂面箭头方向为破裂面倾向; 箭头前方数字表示破裂面倾角; 箭头线段长度表示破裂面相对大小。

由图 6 可以看出, 岩爆孕育整个过程中, 岩石破裂面几乎都是与隧洞洞壁近似平行的, 这与图 4 的岩爆破坏面情况, 以及洞壁围岩表现出来的微张裂纹形态较为类似。

为了更直观的了解破裂面的空间演化特征, 根据微震监测破裂面特征信息和定位结果, 将该次即时性应变-结构面滑移型岩爆相关岩体破裂面从隧洞掘进方向的正视和俯视图两个视角, 得到了图 7 所示的该岩爆孕育过程岩体破裂面时空演化图。

由图 7(a), 6 月 9 日 01:06:54 剪切破裂面出现之前, 在隧洞开挖同一侧出现的全部张拉破裂面产状与该剪切破裂面产状一致, 剪切破裂由裂纹尖端起始, 因此, 可以推测该剪切破裂是追踪其产生之前集中出现的一系列张拉破裂面尖端出现。

根据图 7(b), 6 月 10 日 06:19:33 剪切破裂面产生之前, 都是出现张拉破裂, 而且这些张拉破裂面的产状与 6 月 9 日 01:06:54 剪切破裂面产状接近, 可见, 在 6 月 10 日 06:19:33 剪切破裂面产生之前, 在局部地应力的作用下, 岩体内部沿着剪切破裂面尖端或平行于剪切破裂面出现压致拉裂。

从图 7(c)来看, 6 月 10 日 06:19:33 剪切破裂面产生之后, 岩爆发生之前, 岩体内部的破裂依然是在局部地应力作用下的, 平行于剪切破裂面出现的压致拉裂。由图 4 中“V”形爆坑两侧的擦痕可知, 岩爆是在平行于隧洞壁的弹性能释放的作用下, 沿着由剪切破裂面形成的破坏面向外抛掷而出的。

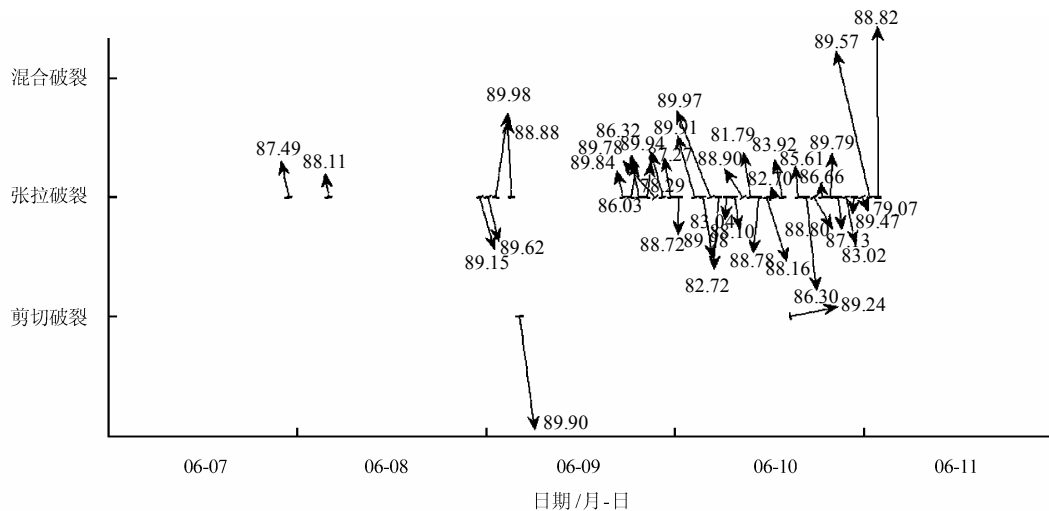


图 6 2010 年 6 月 11 日即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程中岩石破裂面随时间演化图  
 Fig.6 Evolution chart of fracture surfaces on the immediate strain-structural plane slip rockburst pregnant process in Jun. 11th, 2010

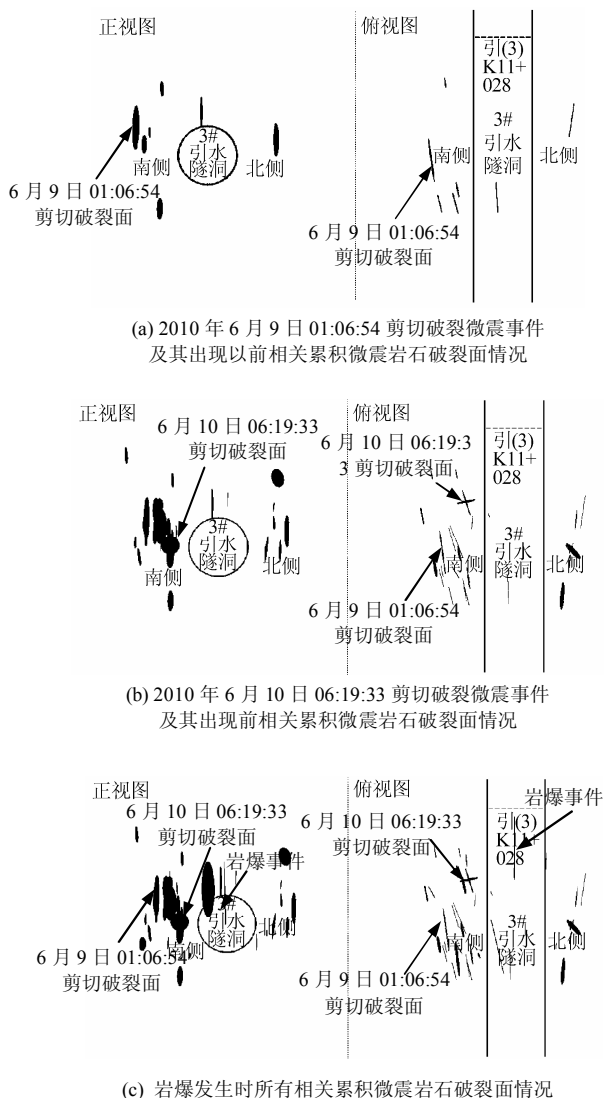


图 7 2010 年 6 月 11 日即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程中破裂面时空演化图  
 Fig.7 Diagrams of fracture surfaces site of events on strain-structural plane slip rockburst pregnant process in Jun. 11th, 2010

根据上述典型应变-结构面滑移型岩爆矩张量分析研究可以推测出，其整个孕育过程为：在孕育初期，以张拉破裂为主，由于硬性结构面的存在，在开挖扰动应力调整初期，破裂面由浅层往岩体较深层硬性结构面扩展，张拉破裂面尖端接近硬性结构面时，硬性结构面上发生剪切滑移，若较深层岩体内部还有其他硬性结构面存在，则在该硬性结构面尖端，除随着岩体浅层切向应力的持续增大，往开挖面扩展外，继续以张拉破裂面形式往深层扩展，至较深层硬性结构面上剪切破裂产生，最终以剪切滑移面为破坏面边界往开挖面发展，并最终将岩体抛掷而出。其孕育过程概念图如下图 8 所示。

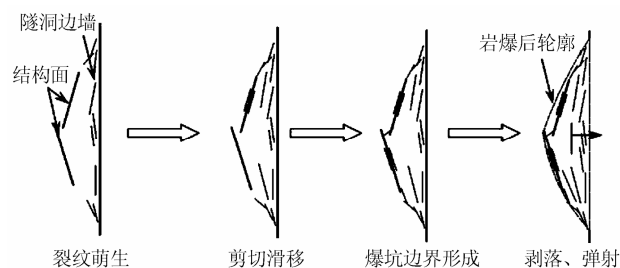


图 8 即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程概念图  
 Fig.8 Conceptual graphs of immediate strain-structural plane slip rockburst pregnant process

### 4 结 论

(1) 考虑在不同应力条件下，岩体的抗剪强度不同，给出了根据岩石力学强度参数和应力条件得到的依据运动夹角的破裂类型判别方法。借助此方法在实例研究中，进一步证明了基于微震监测数据的深埋隧洞岩爆机制矩张量分析方法的可靠性。

(2) 针对深埋隧洞岩石破裂非剪切形式的大量存在, 使用破裂面法向矢量、运动方向矢量和矩张量特征矢量之间的关系, 定量推导了岩石破裂面产状的求解方法。

(3) 根据岩爆孕育过程中岩石破裂面产状的时空演化特征, 结合岩爆破坏面揭露出的破坏特征及爆出物形式, 详细地分析了即时性应变-结构面型岩爆的岩石破裂面产状特征演化过程, 以此直观地描述了岩爆孕育全过程。即时性应变-结构面滑移型岩爆, 在岩爆孕育初期, 以张拉破裂为主; 在开挖扰动应力调整初期, 破裂面由浅层往较深层硬性结构面扩展, 当张拉破裂面尖端接近硬性结构面时, 硬性结构面上发生剪切滑移, 若较深层岩体内部还有其他硬性结构面存在, 则在该硬性结构面尖端, 除随着岩体浅层切向应力的持续增大, 往开挖面扩展外, 继续以张拉破裂面型式往深层扩展, 至较深层硬性结构面上剪切破裂产生, 以剪切滑移面为破坏面边界往开挖面发展, 并最终将岩体抛掷而出。

(4) 岩爆孕育过程其实是岩石破裂演化过程。对于即时性应变-结构面滑移型岩爆, 其发生除了受掌子面附近应力集中程度过高作用外, 还受岩体内部硬性结构面控制。因此, 针对这类岩爆的施工支护除了采用即时性应变型岩爆措施外, 还需要针对微震监测结果得到的剪切滑移面的方位信息进行相应方向的锚杆加固, 以阻止硬性结构面在岩爆孕育过程中形成岩爆破坏面边界的作用。

(5) 本文基于微震信息对深埋隧洞即时性应变-结构面滑移型岩爆的孕育过程进行了初步的探讨和研究。但岩爆是非常复杂的动力现象, 仅仅通过微震信息很难清晰认识其孕育机制。因此, 仍需结合其他手段开展进一步的探究。

### 参 考 文 献

- [1] GROSS C U, OHTSU M. Acoustic emission testing[M]. New York: Springer, 2008.
- [2] QUYANG C, LANDIS E, SHAH S. Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission[J]. *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, 1991, 117(11): 2681—2698.
- [3] 明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 163—172.  
MING Hua-jun, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, et al. Rockburst mechanism analysis for deep-buried tunnel based on moment tensor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 163—172.
- [4] AKI K, RICHARD P. Quantitative seismology, 2nd edition[M]. CA: University Science Books, 2002.
- [5] DOUGLAS A A. Applicability of moment tensor inversion to mine-induced microseismic data[D]. Kingston: Queen's University, 1998.
- [6] 李广平. 岩体的压剪损伤机理及其在岩爆分析中的应用[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(1): 49—55.  
LI Guang-ping. The mechanism of compression-shear damage for rock mass with its application to rockburst[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(1): 49—55.
- [7] CAI M, KAISER P K, MARTIN C D. A tensile model for the interpretation of microseismic events near underground openings[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1998, 153(2): 67—92.
- [8] MADARIAGA R. dynamics of an expanding circular fault[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976, 66(3): 639—666.
- [9] TRIFU C, URBANCIC T I, YOUNG R P. Source parameters of mining-induced seismic events: An evaluation of homogeneous and inhomogeneous faulting models for assessing damage potential[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145(1): 3—27.
- [10] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H, et al. Estimation of in-situ stress state at the maximum depth of the Jinping tunnels, China[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on In-situ Rock Stress. Beijing: [s. n.], 2010: 345—350.
- [11] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 2063—2068.  
ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2063—2068.
- [12] 黄书岭, 冯夏庭, 张传庆. 脆性岩石广义多轴应变能强度准则及试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1): 124—134.  
HUANG Shu-ling, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing. A new generalized polyaxial strain energy strength criterion of brittle rock and polyaxial test validation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 124—134.
- [13] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.