

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220426

# 不同中间主应力下花岗岩失稳过程的微震信号演化特征

苏国韶<sup>a,b,c</sup>, 胡诗红<sup>a</sup>, 蒋剑青<sup>a,b,c</sup>, 任泓宇<sup>a</sup>

(广西大学 a. 土木建筑工程学院; b. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室;  
c. 广西岩溶区水安全与智慧调控工程研究中心, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 为探究深埋隧洞围岩失稳破坏的微震演化特征,开展了不同中间主应力( $\sigma_2$ )下的花岗岩双轴压缩试验,运用微震监测系统和高清摄像机实时监测花岗岩破裂失稳过程。分析了不同 $\sigma_2$ 下岩石失稳过程的微震 $b$ 值和主频的演化特征,并提出微震能量释放指标来描述岩石破坏的剧烈程度。结果表明,随着 $\sigma_2$ 的增加,累积微震能量释放、岩石失稳前夕 $\lg N/b$ 的最大值和低频信号占比、岩石失稳时刻的微震能量释放率均增加,而在岩石失稳前夕 $b$ 值最小值减少。此外,岩石失稳的微震前兆有 $b$ 值下降至低于0.8、 $\lg N/b$ 上升至大于3和高幅低频信号出现。岩石出现板裂的前兆是高幅低频信号伴随少量高幅高频信号同时出现;岩石出现岩爆破坏的前兆是 $b$ 值下降至小于0.5、 $\lg N/b$ 上升至大于5,且高幅值的信号只出现在低频带。

**关键词:** 深埋隧洞; 微震; 试验研究; 中间主应力

**中图分类号:** TV223.1; TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0142-05

## 1 引言

随着我国水利、交通、采矿等领域的地下工程向地球深部发展,板裂、塌方甚至岩爆等地质灾害问题日益突出,给现场施工设备和人员的安全造成巨大威胁。随着工程埋深的增加,洞轴向应力(中间主应力 $\sigma_2$ )显著增加,严重影响岩石变形破坏特征<sup>[1]</sup>。因此,通过开展不同中间主应力下岩石双轴压缩试验模拟不同埋深的隧洞开挖边界岩体的破坏过程,获取岩石破坏的前兆信息,对现场施工安全具有重要意义。微震是岩石内部裂纹产生或扩展而释放的弹性波在介质中传播的现象,目前被广泛用于监测工程现场的岩体破裂<sup>[2]</sup>。通过分析现场微震监测数据,探索了 $b$ 值、能量指数、视体积、分形特征等微震参数的演化特征<sup>[3]</sup>,并将其前兆特征运用到岩爆预警中。然而,在工程现场研究岩体失稳的微震信号演化特征时,微震信号往往会受到爆破、锚杆钻机环境噪音的影响。尽管有通过机器学习方法对岩石破裂的微震信号进行识别和去噪研究<sup>[4]</sup>,但研究成果只对特定噪声信号识别效果较好,对工程现场复杂干

扰信号的适用性较差。迄今为止,不同 $\sigma_2$ 下岩石失稳过程的微震演化特征的室内试验研究仍鲜有报道。因此,本文开展不同 $\sigma_2$ 的双轴压缩试验,并采集岩石破裂失稳过程的微震信号,提取岩石失稳的微震前兆信息,以期探究微震预测岩石失稳的可行性提供依据。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设备

采用高压伺服动真三轴试验系统(图1)进行双轴压缩试验,其垂直方向最大静载压力可达5 000 kN,两个水平方向最大静载压力可达3 000 kN,且三个方向均可独立加载。采用中国科学院

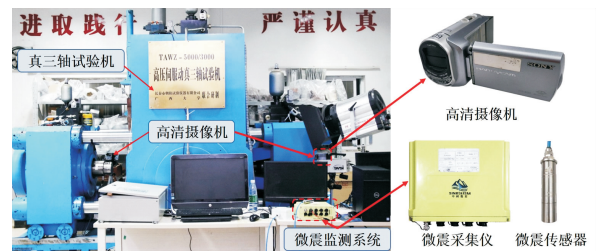


图1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

收稿日期: 2022-03-08, 修回日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169021, 51869003); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划(202006)

作者简介: 苏国韶(1973-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为水工结构安全, E-mail: guoshaosu@gxu.edu.cn

通讯作者: 蒋剑青(1988-), 男, 博士、讲师、硕导, 研究方向为水工结构安全, E-mail: jiangqing880201@163.com

武汉岩土力学研究所研发的高精度智能微震监测系统(图 1)实时监测岩样失稳过程,设置该监测系统的采样率为 4 000 Hz,并选用恒压高精度加速度型微震传感器,其性能参数见表 1。另外,在岩石两个临空面用高清摄像机对岩石失稳过程出现的弹射现象进行实时记录。

表 1 微震传感器性能参数表

Tab. 1 Performance parameters of microseismic sensor

频响范围	灵敏度	分辨率	测量范围
50~5 000 Hz±3 db	30 V/g	0.000 05 g	±0.16 g

### 2.2 岩样制备

选用广西省岑溪县的中粗晶粒花岗岩,岩样切割自同一岩体,完整性和均匀性较好,尺寸为 100 mm×100 mm×200 mm(长×宽×高),纵波波速为 5.5 km/s,密度为 2.63 g/cm<sup>3</sup>,弹性模量为 32.2 GPa,泊松比为 0.29,平均单轴抗压强度为 124 MPa。

### 2.3 试验加载方案

加载路径见图 2(a),在岩样的  $x$ 、 $z$  方向同时加载, $y$  方向上不施加力,以模拟开挖边界岩体径向应力为 0 的情况。加载路径即以 0.5 MPa/s 的加载速率同时加载  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ,当  $\sigma_2$  加载到预定值后保持不变, $\sigma_1$  继续加载至岩石失稳破坏。本次试验选用  $\sigma_2$  分别为 1、30、60 MPa 三种工况进行试验,每种工况重复 3 次试验。微震传感器的布置见图 2(b)。

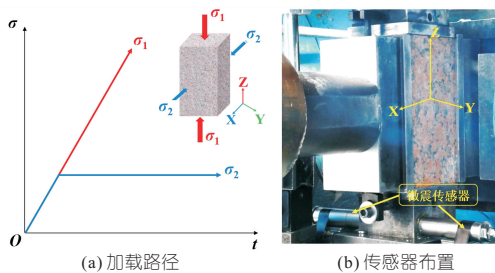


图 2 试验加载方案

Fig. 2 Experimental loading scheme

## 3 试验结果

### 3.1 不同中间主应力下岩样的强度与破坏形态

图 3 为  $\sigma_2$  与岩样峰值强度之间的关系。 $\sigma_2$  分别为 1、30、60 MPa 时岩样强度的平均值分别为 143.3、193.7、177.0 MPa,表明随着  $\sigma_2$  的增加,岩样峰值强度先增加后减小。根据岩样峰值强度选取与平均峰值强度相近的代表岩样分析微震信号。

图 4 为不同  $\sigma_2$  下岩样的失稳形态。当  $\sigma_2=1$

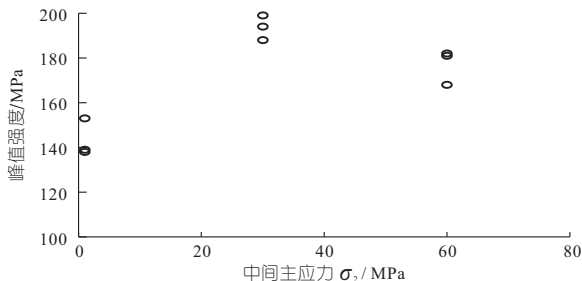


图 3 不同中间主应力下岩石峰值强度

Fig. 3 Peak strength of rock under different  $\sigma_2$  conditions

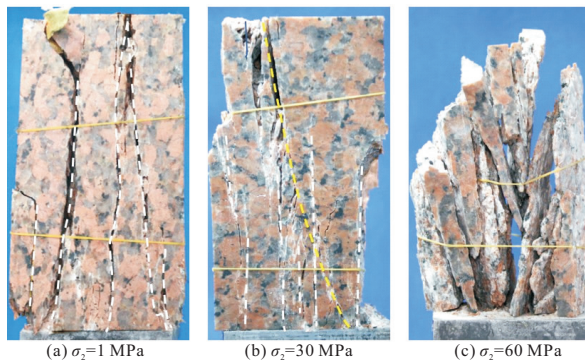


图 4 不同  $\sigma_2$  下岩样失稳形态

Fig. 4 The failure morphology of rock samples under different  $\sigma_2$  conditions

MPa 时(图 4(a)),岩样失稳形成的裂纹大多与  $\sigma_1$  方向平行,失稳模式以张拉板裂破坏为主;当  $\sigma_2=30$  MPa 时(图 4(b)),岩样失稳时出现轻微岩爆现象,不仅形成大量张拉裂纹,而且还形成了一条倾斜的剪切贯穿裂纹,裂缝间有大量白色粉末,故失稳模式为拉剪混合型破坏;当  $\sigma_2=60$  MPa 时(图 4(c)),岩样在失稳瞬间发生剧烈岩爆现象,大部分岩样脱离母岩从两个临空面喷出,且产生大量白色粉末,故失稳模式为剪切岩爆破坏。由此可见, $\sigma_2$  对岩石失稳模式具有重要影响,随着  $\sigma_2$  的增加,岩石失稳模式从板裂破坏向岩爆破坏转变。

### 3.2 不同中间主应力下微震能量释放特征

微震监测系统采集的原始信号为波形信号,不能直观地描述岩石破裂失稳过程。因此,参照声发射能量的定义提出微震能量释放( $M_{MSER}$ )来描述岩石破裂时向外界释放的相对能量,作为反映岩石发生破裂的重要特征参数,计算公式为:

$$M_{MSER} = \int_t^{t+\Delta t} A(t) dt \quad (1)$$

式中, $A(t)$ 为  $t$  时刻的微震幅值。

微震能量释放率指单位时间内的微震能量释放;累积微震能量释放指岩石破裂失稳过程中微震能量释放的总和。微震能量释放率和累积能量释放的演化过程见图 5。根据试验过程中岩样的应力—应变曲线和岩样临空面的录像将岩石失稳

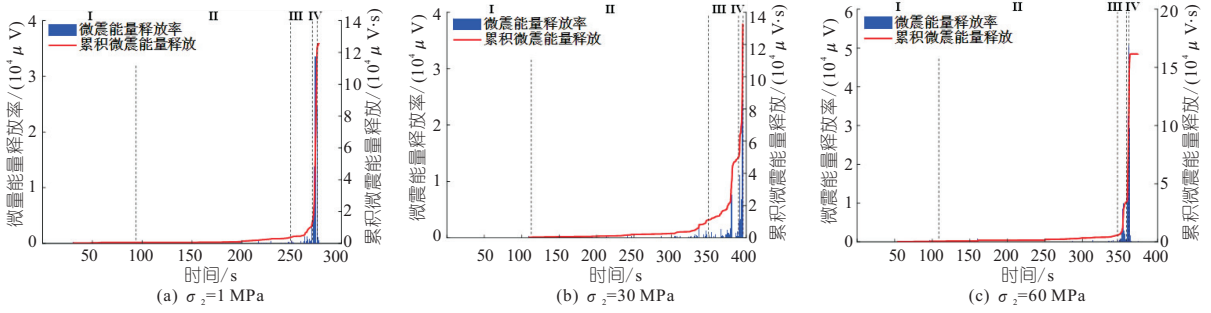


图5 不同  $\sigma_2$  下微震能量释放演化过程

Fig. 5 Evolution process of  $M_{MSER}$  under different  $\sigma_2$  conditions

过程分为压密(I)、弹性变形(II)、弹射(III)和失稳破坏(IV)四个阶段。微震能量释放率在试验的I、II阶段较低,进入III阶段时逐渐变得活跃,且在岩石失稳破坏阶段达到最大值。 $\sigma_2$ 分别为1、30、60 MPa的岩样失稳时的微震能量释放率分别为  $3.36 \times 10^4$ 、 $3.41 \times 10^4$ 、 $5.06 \times 10^4 \mu V$ ,这表明  $\sigma_2$  的增加使更多弹性应变能在岩样失稳瞬间集中释放。此外, $\sigma_2 = 1、30、60$  MPa的岩样失稳过程的累积微震能量释放分别为  $1.26 \times 10^5$ 、 $1.33 \times 10^5$ 、 $1.62 \times 10^5 \mu V \cdot s$ ,可见  $\sigma_2$  的增加使岩样破裂活动增加,这与试验结果中岩样的失稳形态一致。

### 3.3 不同 $\sigma_2$ 下微震 b 值特征

b 值用于表征地震活动中震级与频率的统计关系,其计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$\lg N = a - bm \quad (2)$$

式中, $N$ 为震级在  $m$  范围内变化的地震次数; $a$ 为线性拟合参数; $m$ 为地震震级。

由于岩石脆性破坏产生的弹性波与地震波类似,故室内试验中岩石失稳微震事件频率与震级也遵循相似规律。不同  $\sigma_2$  下微震  $b$  值和  $\lg N/b$  的演化过程见图6。由图6可知, $b$ 、 $\lg N/b$  的演化规律大致相似,即在试验的I、II阶段前期, $b$  值波动较大且处于较高水平,而  $\lg N/b$  波动小且处于较低水平;当加载至岩样峰值强度的70%左右时, $b$  值开始呈下降趋势,而  $\lg N/b$  开始不断上升;在IV阶段, $b$  值下降至低于0.8且达到最小

值,而  $\lg N/b$  上升至高于3且达到最大值。当  $\sigma_2$  分别为1、30、60 MPa时,微震  $b$  值的最小值分别为0.598、0.485、0.405,而  $\lg N/b$  最大值分别为4.33、5.24、5.45。由此可见, $\sigma_2$  对微震  $b$  值演化也具有明显影响。

### 3.4 不同中间主应力下微震主频特征

将时间间隔为0.25 s的微震波形数据通过快速傅里叶变换(FFT)将微震信号从时域变换到频域,通过分析微震主频来探索微震信号在频域方面的演化特征,不同  $\sigma_2$  下微震主频演化过程见图7,图7中散点颜色和大小均代表该时刻的波形幅值大小,并将频率分为低频( $<100$  Hz)、中频( $100 \sim 300$  Hz)、高频( $>300$  Hz)。

在试验的I、II阶段,微震主频主要集中在一个或多个不同频带上;在III阶段,微震主频图中先出现少量中幅低频和中幅中频的信号点,随后主频下降至低于100 Hz;在IV阶段,主频出现最小值。在不同  $\sigma_2$  下,岩样在失稳破坏阶段主频分布存在明显差异:在微震主频下降且出现最小值的同时, $\sigma_2$  分别为1、30 MPa岩样的微震主频图中还分别出现了一个主频分别为567、315 Hz的高幅值信号点,而  $\sigma_2 = 60$  MPa岩样的微震主频图中未出现此类高频高幅值的信号点。此外,在岩石失稳破坏阶段, $\sigma_2$  分别为1、30、60 MPa低频信号所占比例分别为62.50%、71.43%、85.71%,即  $\sigma_2$  越大岩石失稳破坏阶段低频信号占比显著增加。

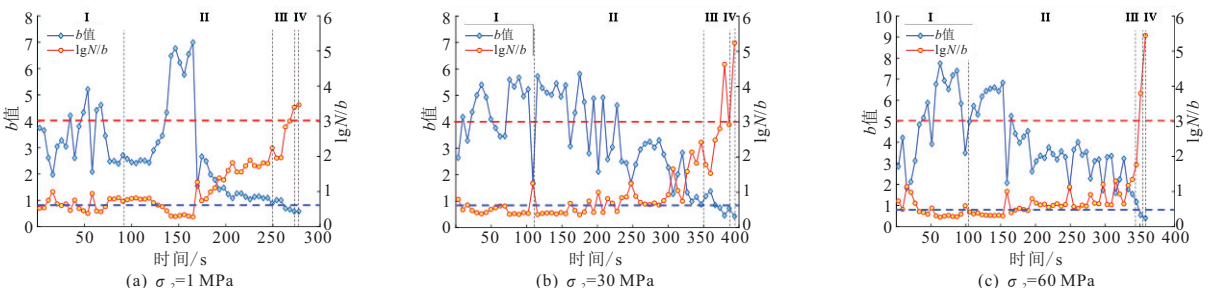


图6 不同  $\sigma_2$  下微震  $b$  值和  $\lg N/b$  演化过程

Fig. 6 Microseismic  $b$  value and  $\lg N/b$  evolution characteristics under different  $\sigma_2$  conditions

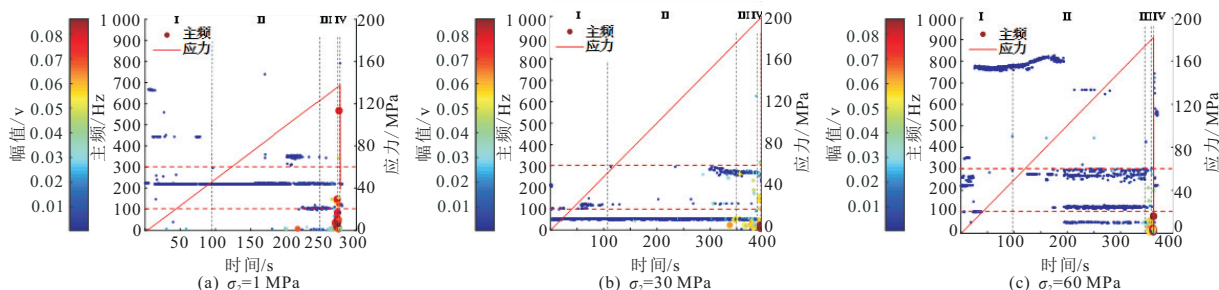


图 7 不同  $\sigma_2$  下微震主频演化特征

Fig. 7 Evolution process of microseismic dominant frequency under different  $\sigma_2$  conditions

## 4 分析与讨论

### 4.1 中间主应力对微震演化特征的影响

分析发现  $\sigma_2$  对岩石峰值强度和失稳模式有重要影响,与文献[6]结论一致。 $\sigma_2$  不仅限制了岩样在  $\sigma_2$  方向发生膨胀,还会在  $\sigma_3$  方向上产生摩擦力阻止岩样在  $\sigma_3$  方向劈裂成板后向外鼓胀,使得岩样储存弹性应变能的能力增强。因此,随着  $\sigma_2$  增加,岩样在失稳破坏前夕储存的弹性应变能增加并在失稳时刻快速释放,导致岩样破坏的剧烈程度增加,微震能量释放率也随之增加,因此本文提出的微震能量释放指标可较好反映岩石破坏的剧烈程度。

$\sigma_2$  对岩石失稳过程的微震  $b$  值的演化特征也具有重要影响。 $b$  值的大小与裂纹扩展产生的信号幅度密切相关,通常当裂纹以较大幅度扩展时,幅度较大的信号成分较大,则  $b$  值较小<sup>[7]</sup>。在试验加载前期,岩样内部的原生裂缝开始闭合,其裂纹尺度较小, $b$  值较大。在岩石失稳破坏阶段,裂纹开始扩展延伸, $b$  值快速下降。从岩样在不同  $\sigma_2$  下的失稳形态可以看出,随着  $\sigma_2$  的增加,岩样形成的宏观裂纹和破坏程度均呈增加趋势,从而导致  $b$  值最小值随着  $\sigma_2$  的增加而减小,而  $\lg N/b$  的最大值随着  $\sigma_2$  的增加而增加。

已有研究表明,岩石发生岩爆前夕,微震主频会出现下降趋势<sup>[8]</sup>。在  $\sigma_2$  为 1、30 MPa 的试验中,岩石失稳前夕微震主频不仅下降,且出现个别高幅高频的信号。此外,在岩石破裂失稳阶段,微震低频信号所占比例随着中间主应力的增加而增加。这可能是由于  $\sigma_2$  增加引起岩样发生岩爆现象,在更短的时间内产生更多剪切裂纹,从而导致低频信号更多。

综上所述, $\sigma_2$  对微震演化特征影响的根本原因在于  $\sigma_2$  改变了岩石的破坏机制,岩石失稳时刻表现为张拉破坏、拉一剪破坏或剪切破坏均会导致岩石微震信号出现不同演化特征。

### 4.2 岩石失稳的微震前兆特征

由试验结果可知,当岩样进入失稳破坏阶段时, $\sigma_2$  分别为 1、30、60 MPa 时岩石微震信号均出现能量释放率增加, $b$  值下降至低于 0.8、 $\lg N/b$  上升至超过 3,以及出现高幅低频信号的现象,说明这些特征可以作为岩石失稳前兆信息,但不能预测岩石失稳模式。

进一步分析  $\sigma_2$  分别为 1、30、60 MPa 时岩石出现板裂、岩爆现象对应的微震  $b$  值和主频演化特征后发现,岩石出现不同失稳模式的微震信号演化特征存在一定差异。在  $\sigma_2$  为 1、30 MPa 出现板裂现象的试验中,微震失稳前夕不仅出现了高幅低频信号,还出现了少量高幅高频信号,而在  $\sigma_2$  为 60 MPa 岩爆试验中却未出现此类信号,其高幅值的信号均分布在低频带。说明高幅高频的微震信号与岩样发生张拉板裂破坏密切相关。此外,在  $\sigma_2$  分别为 30、60 MPa 的试验中,失稳时刻均出现不同程度岩爆,且微震  $b$  值均小于 0.5,  $\lg N/b$  均大于 5。然而, $\sigma_2$  为 1 MPa 的岩样在失稳时刻未发生岩爆破坏,其  $b > 0.5$ ,  $\lg N/b > 5$ ,说明微震信号出现  $b < 0.5$  和  $\lg N/b > 5$  与岩样发生岩爆破坏密切相关。综上所述,通过多个微震特征参数的演化特征可综合预警岩石最终失稳破坏模式(图 8),即岩石发生板裂失稳破坏的微震前兆信息是大量出现高幅低频信号的同时还出现少量高幅高频信号;岩石发生岩爆的微震前兆信息是  $b$  值下降至小于 0.5,  $\lg N/b$  上升至大于 5,且高幅值信号均分布在低频带。

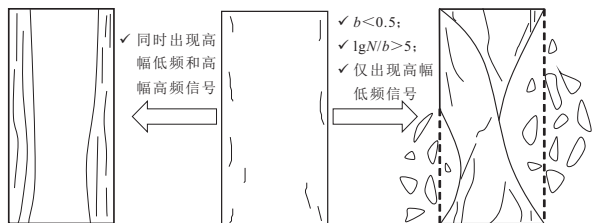


图 8 岩石不同失稳模式的微震前兆示意图

Fig. 8 Schematic diagram of microseismic precursors of different instability modes of rock

## 5 结 论

a. 提出了用于描述岩石破裂失稳过程的微震能量释放指标,其可以较好反映岩石失稳时的剧烈程度。

b. 随着中间主应力的增加,累积微震能量释放、岩石失稳时的微震能量释放率均增加。岩石失稳前夕  $\lg N/b$  的最大值、低频信号的占比随  $\sigma_2$  的增加而增加,而  $b$  值最小值随  $\sigma_2$  的增加而减小。

c. 岩石失稳的微震前兆有  $b$  值下降至低于 0.8、 $\lg N/b$  上升至大于 3 及出现高幅低频的信号。岩石出现板裂失稳的前兆是高幅低频信号伴随少量高幅高频信号同时出现,而岩石出现岩爆破坏的前兆是  $b$  值下降至小于 0.5、 $\lg N/b$  上升至大于 5,且高幅值的信号只出现在低频带。

### 参 考 文 献:

- [1] SONG Z, YIN G, RANJITH P G, et al. Influence of the intermediate principal stress on sandstone failure[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2019, 52: 3033-3046.
- [2] 陈炳瑞,冯夏庭,符启卿,等. 综合集成高精度智能微震监测技术及其在深部岩石工程中的应用[J].

岩土力学,2020, 41(7):2422-2431.

- [3] FENG G L, FENG X T, CHEN B R, et al. Microseismic sequences associated with rockbursts in the tunnels of the Jinping II hydropower station[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2015, 80: 89-100.
- [4] MOUSAVI S M, LANGSTON C A, HORTON S P. Automatic microseismic denoising and onset detection using the synchrosqueezed continuous wavelet transform[J]. Geophysics,2016, 81(4): V341-V355.
- [5] WANG C L, WU A X, LIU X H, et al. Study on fractal characteristics of  $b$  value with microseismic activity in deep mining[J]. Procedia earth and planetary science,2009, 1(1): 592-597.
- [6] DU K, LI X F, YANG C Z, et al. Experimental investigations on mechanical performance of rocks under fatigue loads and biaxial confinements[J]. Journal of central south university,2020, 27(10): 2985-2998.
- [7] 李永靖,张向东,袁世君,等. 抚顺老虎台矿矿山地震活动趋势研究[J]. 中国矿业,2004(11): 64-66.
- [8] 陆菜平,窦林名,吴兴荣,等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3):519-525.

## Evolution Characteristics of Microseismic Signals During Granite Failure Under Different Intermediate Principal Stresses

SU Guo-shao<sup>a,b,c</sup>, HU Shi-hong<sup>a</sup>, JIANG Jian-qing<sup>a,b,c</sup>, REN Hong-yu<sup>a</sup>

(a. College of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education; c. Guangxi Provincial Engineering Research Center of Water Security and Intelligent Control for Karst Region, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** To explore the microseismic evolution characteristics of instability failure of surrounding rock of deep buried tunnel, biaxial compression tests of granite were carried out under different intermediate principal stresses ( $\sigma_2$ ). The microseismic monitoring system and high-definition camera were used to monitor and record the failure of granite in real time. The evolution characteristics of microseismic  $b$  value and dominant frequency of rock failure process under different  $\sigma_2$  conditions were analyzed, and the index of microseismic energy release (MSER) was proposed to describe the degree of rock failure. The results show that with the increase of  $\sigma_2$ , the cumulative microseismic energy release, the maximum value of  $\lg N/b$  and the ratio of low frequency signal before rock failure, and the microseismic energy release rate at rock failure time all increase, while the minimum value of  $b$  value before rock failure decreases. In addition, the microseismic precursor of rock instability lists as follows:  $b$  value drops to less than 0.8;  $\lg N/b$  rises to more than 3; High amplitude and low frequency signal appears. The precursors of rock slabbing are high amplitude low frequency signals accompanied by a small number of high amplitude high frequency signals, while the precursors of rockburst failure are that  $b$  value drops to less than 0.5, and  $\lg N/b$  rises to more than 5, and high amplitude signal only appears in the low frequency band.

**Key words:** deep-buried tunnel; microseismic; experimental study; intermediate principal stress