

# 基于真三轴试验条件的岩爆模拟声发射特征研究

黄湛焜<sup>1</sup>, 张 俊<sup>2\*</sup>, 聂华伟<sup>1</sup>, 李郴娟<sup>1</sup>

(1. 贵州交通职业大学; 2. 贵州装备制造职业学院)

**摘要:**为研究矿山高应力环境下深埋硐室开挖后因应力集中引发岩爆显现的声发射特征,采用TRW-3000型岩石真三轴电液伺服试验系统配合PCI-II型声发射监测系统,对大理岩试件模拟深埋硐室围岩体单面临空三向-五面应力环境开展三向独立加载和单面突然卸载试验研究。研究表明:声发射特征的振铃计数和 $b$ 值能反映岩石内部裂隙孔洞的发育、发展及贯通情况,临爆阶段振铃计数密集出现并达到峰值,同时声发射 $b$ 值骤降,岩样内部孔洞裂隙迅速扩展发育形成大尺度裂纹,随后试件出现强烈的整体失稳破坏。因此,声发射振铃计数密集增长现象可作为判断矿山深埋硐室围岩体存在岩爆发生可能的关键阶段,声发射 $b$ 值的突然降低现象可作为岩爆即将发生的前兆特征,为深部矿区开采实践提供理论指导。

**关键词:**高应力;深部开采;深埋硐室;应变型岩爆;真三轴加卸载;声发射特征

中图分类号:TD315

文章编号:1001-1277(2025)02-0018-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250203

## 引 言

在矿山领域,随着矿产资源的大量采挖,逐渐由浅入深、由短距单通道向超长超宽多通道工程开辟,其中面临诸多工程难题,岩体动力灾害明显增多,尤其随着埋深的加大,地应力也随之增大,高应力硬质围岩受到外界动力扰动荷载作用而发生失稳破坏,甚至诱发围岩动力弹射性破裂的岩爆灾害等,目前已引起岩石力学界的高度重视<sup>[1-3]</sup>。岩爆是由于高地应力地区硬质围岩体受到开挖卸荷或施工扰动等因素,岩体内积聚的大量弹性势能瞬间释放,引发围岩弹射性破裂的现象,岩爆一般烈度大且弹射岩块具有一定动能,因此给工程设备及作业人员带来了巨大威胁<sup>[4-5]</sup>。岩爆灾害的演化机理复杂模糊,室内模拟试验是分析其演化过程的一个十分重要的研究手段。

李郴娟等<sup>[6]</sup>通过对圆柱形大理岩试件开展单轴压缩声发射岩爆模拟试验,从而深入地研究了大理岩的变形破坏特征及声发射活动规律,研究表明,声发射振铃计数和声发射 $b$ 值可作为岩爆灾害即将发生的特征参数。张国凯等<sup>[7]</sup>通过对花岗岩开展单轴压缩试验,研究了裂纹扩展不同阶段声发射演化规律,发现声发射测试可反映微裂纹的初始萌生,并将声发射能量在破坏前呈突发性增长现象作为灾害性破坏的前兆。刘健等<sup>[8]</sup>对不同埋藏深度的灰岩岩芯

试样开展单轴加载声发射试验及单轴加卸载试验,结合声发射RA-AF值演化特征及宏观破裂形貌识别不同岩爆倾向灰岩的破裂特征。姜德义等<sup>[9]</sup>通过对页岩开展单轴状态下的压缩试验,研究了脆性岩石破坏过程中的能量变化规律。研究结果显示:子时间区间与全过程区间具有相同的临界指数,因此可以通过试验前期的声发射情况了解破裂和破裂中能量释放的状态。

上述研究均采用单轴加卸载方式对非均质岩石类材料开展压缩变形试验,试验过程中配合声发射监测手段研究声发射参数信息与岩石试件变形破坏之间的关联性,并取得了一定成果。然而,深部围岩体常处于高地应力环境下,围岩在开挖前处于三维应力状态,其中,2个方向主应力较大,另一个方向主应力较小,开挖后围岩体则处于二维应力状态,并在开挖卸载瞬间原岩应力超过因围压卸除急剧下降的围岩承载能力,导致围岩集聚弹性应变能急剧释放,进而导致岩爆发生,岩爆常发生在硬质脆性岩体内<sup>[10]</sup>。与单轴、常规三轴、真三轴等常规试验相比较,深部围岩体开挖后形成的临空面,其附近围岩单元受力状态为单面临空的三向-五面受力状态,因此单面临空的真三轴加卸载试验更能够模拟开挖后围岩体的应力状态<sup>[11-16]</sup>。

为研究矿山高应力环境下地下深埋硐室因局部

收稿日期:2024-08-05; 修回日期:2024-10-08

基金项目:贵州省科技厅科学技术基金(黔科合基础[2020]1Y280);贵州装备制造职业学院院级科研项目(ZBKY2024-Y031)

作者简介:黄湛焜(1993—),女,讲师,硕士,从事岩土安全研究工作;E-mail:95697437@qq.com

\*通信作者:张 俊(1994—),男,助教,硕士,从事矿山安全方向的研究工作;E-mail:772865274@qq.com

应力集中诱导的应变型岩爆灾害全过程声发射特征,利用TRW-3000型岩石真三轴电液伺服试验系统进行三向独立加卸载,配合PCI-II型声发射监测系统,实时采集岩爆模拟试验全过程应力、位移及声发射等参数数据。将从某铜矿深部区域硐室获取的大理岩制成标准正方体试件,通过开展三向独立加载、单面突然卸载、中间主应力及最小主应力加载至初始地应力水平后应力保持的加卸载方式,最大程度还原深部围岩体单面临空三向-五面应力环境下的应变型岩爆发生条件。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 试验设备

真三轴加卸载条件下岩爆模拟试验采用中南大学自主研制的TRW-3000型岩石真三轴电液伺服试验系统进行加载,并配合美国物理声学公司的PCI-II型声发射监测系统对试验全过程进行监测。其中,PCI-II型声发射系统最高采样频率为40 MHz,具有18位数模转换能力,能够记录声发射振铃计数、能量、幅值等多个特征参数和完整波形。TRW-3000型岩石真三轴电液伺服试验系统能够模拟加载系统三向( $x$ 、 $y$ 、 $z$ )独立的高压真三轴状态,垂直方向最大载荷3 000 kN、前后方向最大载荷2 000 kN、左右方向最大载荷2 000 kN,并且能够模拟单向或双向突然卸载,很好地契合了本次试验模拟深部采掘活动形成临空面环境下的应变型岩爆发生状态。

### 1.2 试验方案

真三轴加载条件下岩爆模拟试验用大理岩采自某铜矿深部区域硐室,原岩块经密封被带回实验室后及时进行切割、打磨后制成50 mm×50 mm×50 mm的标准正方体待测试件,加工过程严格按照GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》执行,待测试件外表面平整光滑,从而有效避免因偏压导致局部应力集中影响试验结果。

将待测试件按照操作规程安装于试验台上,试件夹持方式及载荷方向见图1,垫块夹持位置见图2。对50 mm×50 mm×50 mm的标准正方体待测试件采取应力控制下的加载方式,加载速率为2 kN/s; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 同时加载, $\sigma_1$ 为上下垂直载荷( $z$ 方向), $\sigma_2$ 为左右水平载荷( $y$ 方向), $\sigma_3$ 为前后水平载荷( $x$ 方向); $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 加载至初始地应力水平后,应力保持;保持一段时间待应力重分布后,操作卸载杠杆,迅速(0.05 s)卸载 $x$ 方向前端的主应力,形成临空面,以模拟人为采掘后留下的裸露岩;随后, $\sigma_2$ 应力保持,临空面对向应力不变, $\sigma_1$ 以2 kN/s的加载速率继续加载,直至发生明显岩爆现象后停止。三轴岩爆模拟试验加载方式及路

径见图3、图4。

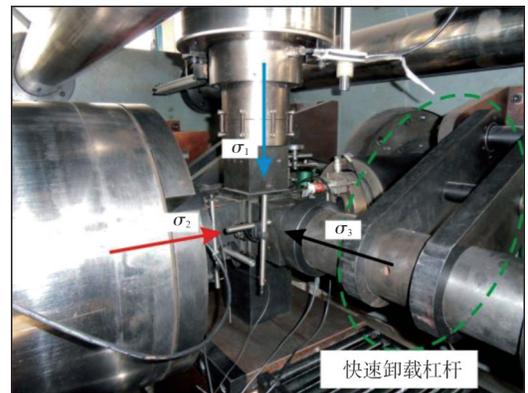


图1 试件夹持方式及载荷方向

Fig. 1 Specimen clamping method and loading direction

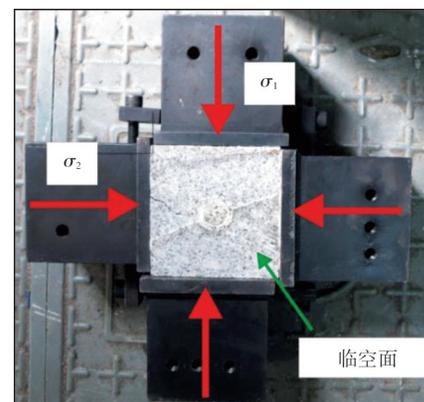


图2 垫块夹持位置

Fig. 2 Clamping position of spacers

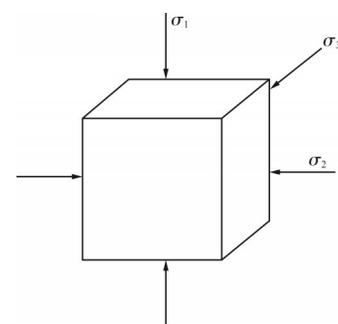


图3 三轴岩爆模拟试验加载方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading method in triaxial rockburst simulation test

## 2 声发射特征研究

### 2.1 声发射振铃计数特征

真三轴加载条件下岩爆模拟试验选取具有典型岩爆特征的试件G1及G3进行分析,通过对声发射原始监测数据进行收集处理,提取其中参数信息,绘制时间-声发射振铃计数关系,并结合应力演变过程,研究真三轴加载条件下岩爆的声发射特征。试件G1和试件G3的时间-应力-声发射振铃计数关系见图5、图6。

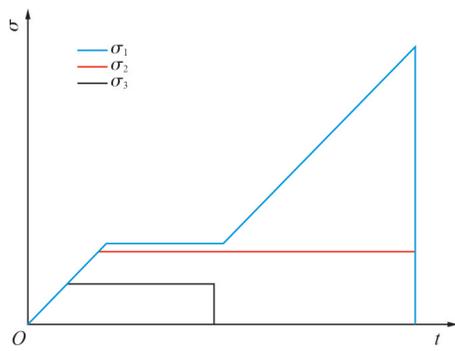


图4 三轴岩爆模拟试验加载路径示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading path in triaxial

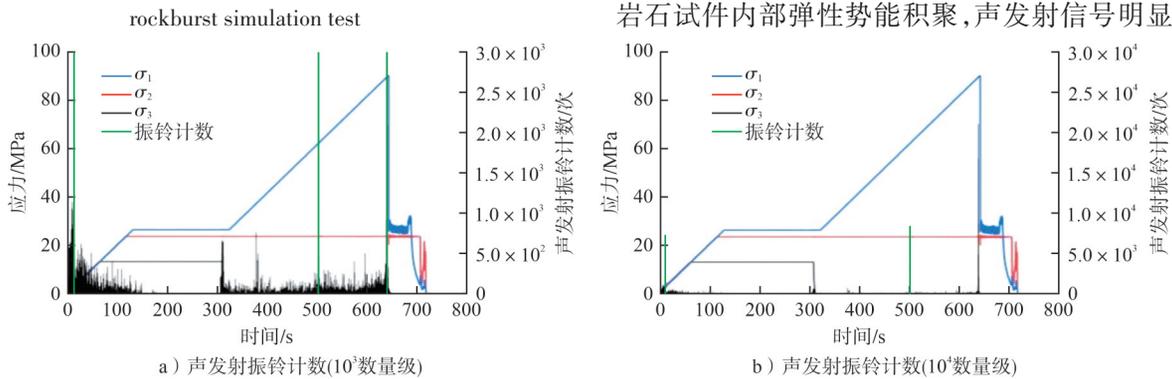


图5 试件G1时间-应力-声发射振铃计数关系

Fig. 5 Time-stress-acoustic emission ring count relationships for specimen G1

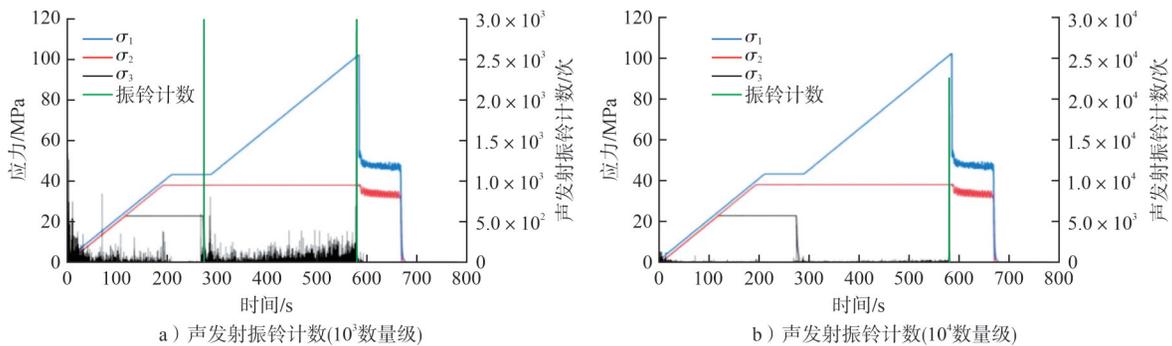


图6 试件G3时间-应力-声发射振铃计数关系

Fig. 6 Time-stress-acoustic emission ring count relationships for specimen G3

并在 500 s 附近达到一次峰值,声发射振铃计数表现出密集丛生现象;临近抗压强度时,可清晰听见轻微爆裂声响,声发射信号非常活跃,声发射振铃计数达到峰值,随后(5 s)岩爆发生,岩石试件临空面崩碎,大量岩块、岩粉喷出。通过对比图 5-a)与图 5-b)不同数量级的声发射振铃计数峰值规律,虽然加载中期(500 s)与临爆时(579 s)声发射振铃计数均达到峰值,但后者峰值明显高于前者,说明临爆时岩石试件内部出现了大规模的裂隙孔洞扩展、贯通形成宏观破裂,最终在外界微小扰动下内部积聚的大量弹性势能瞬间释放导致岩爆发生。

从试件 G3 时间-应力-声发射振铃计数关系中可以看出:首次加载时,岩石试件内部孔洞裂隙闭合,此过程向外释放大量的声发射信号,声发射振铃计数高耸

从试件 G1 时间-应力-声发射振铃计数关系中可以看出:刚开始加载时,岩石试件由于处于压密阶段,内部孔洞裂隙在外界载荷作用下逐渐闭合,声发射信号活跃,声发射振铃计数高耸密集;待  $\sigma_1$  应力保持后,声发射信号逐渐平稳,声发射振铃计数底伏稀疏;在三向应力均处于应力保持阶段,岩石试件处于应力重分布状态,声发射信号归于寂静,声发射振铃计数基本为零;随着单面卸载完成临空面出现后,垂直应力继续加载,声发射信号出现短暂活跃,声发射振铃计数表现出先密集增长后稀疏低伏;随着加载的进行,岩石试件内部弹性势能积聚,声发射信号明显活跃,

密集出现;三向应力保持阶段前后,除单面卸载时释放大量的声发射信号,声发射振铃计数达到峰值外,其余时段内声发射振铃计数均维持在较低水平;三向应力保持阶段内,基本无声发射活动,声发射振铃计数近乎为零;随着垂直载荷的加大,岩石内部微裂隙进一步发育,声发射活动变得活跃,声发射振铃计数开始密集增长;岩爆发生前,声发射信号活跃程度达到顶峰,声发射振铃计数突增至最大值,不久后(6 s),岩爆剧烈发生,岩石试件整体损坏崩裂。通过对比图 6-a)与图 6-b)不同数量级的声发射振铃计数峰值规律,临爆时(579 s)的声发射振铃计数峰值现象显著,其与岩石内部裂隙孔洞的发展、贯通形成宏观破裂关系紧密,而单面卸载时(274 s)的声发射振铃计数峰值则与岩石内部应力重分布及机械干扰有关。

综上所述,在真三轴加载条件下岩爆模拟试验过程中,声发射信号活跃程度与三向载荷之间规律明显,能够很好地反映岩石内部微裂隙孔洞的发育、发展及贯通情况,从而反映出岩石内部局部应力集中程度。通过真三轴加载条件下岩爆模拟试验发现,声发射振铃计数在加载前期、应力保持阶段、加载后期及临爆阶段特征各有不同。其中,临爆阶段声发射振铃计数达到峰值,且显著高于其他各阶段,此现象可作为岩爆即将发生的前兆特征,并以声发射振铃计数密集增长现象作为判断岩体存在岩爆发生可能性的关键预防阶段,为工程实践提供理论指导。

### 2.2 声发射 b 值特征

b 值的概念最早起源于地震学,由 Gutenberg 和 Richter 研究世界地震活动时提出,即著名的地震震级与频度的 G-R 关系式(见式(1)),它可以用来表征裂纹扩展的尺度。因此,分析声发射 b 值特征对于加载过程中岩样的破坏模式具有重要的物理意义。学者在研究岩石声发射 b 值时,通常将 G-R 关系式中的震级 M 由幅值  $M_L$  替换<sup>[17-18]</sup>,即 G-R 关系式可由式(2)与式(3)替代。

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

$$M_L = m_s/20 \quad (2)$$

$$\lg N = a - bM_L \quad (3)$$

式中: N 为震级在  $\Delta M$  范围内地震频度; M 为地震震

级;  $M_L$  为加载过程中的“震级”; a, b 为常数,其中, b 值为相对震级分布的函数,也为裂纹扩展尺度的函数;  $m_s$  为加载过程中监测到的声发射振幅。

脆性岩石的破坏模式与内部裂纹的演化过程与地震发生机制一致,即 b 值的大小可以反映岩石内部裂隙发育的尺度。一般来说, b 值处于相对低值时,声发射事件以高幅值居多,岩石内部裂隙发育以大尺度破裂为主; b 值降低则表示大声发射事件的比例在增加。相反亦然,高声发射 b 值预示着岩石内部破裂以小尺度裂隙孔洞发育占据主导。

计算声发射 b 值的常用方法可分为最小二乘法 and 最大似然法,本文采用线性最小二乘法进行 b 值计算。在 b 值计算时,参考三轴受载过程中声发射振铃计数特征,采样窗口分别获取 500 个声发射事件和 1 000 个声发射事件为一组,步长选取 100 个声发射事件,按声发射事件时间顺序滑动窗口进行取样计算,结果见图 7。同时,为了进一步研究声发射事件是否符合 G-R 关系,需要对试件的声发射振幅-频度分布进行线性分析。试件声发射振幅-频度分布见图 8。由图 8 可知,试件 G1 和 G3 的拟合度  $R^2$  分别达到 0.955 9 和 0.979 2,拟合度  $R^2$  均高于 0.95,说明试件 G1 和试件 G3 的声发射振幅-频度分布都具有良好的线性关系,符合 G-R 关系式。

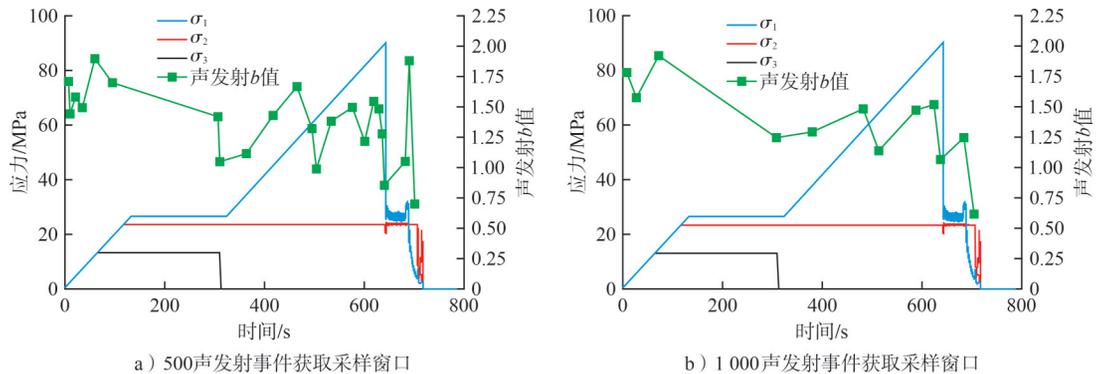


图7 试件G1时间-应力-声发射 b 值关系

Fig. 7 b-value relationships of time-stress-acoustic emission for specimen G1

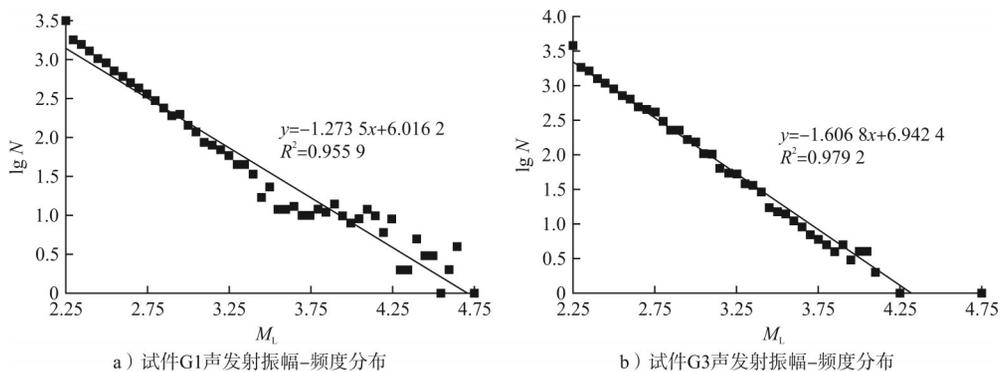


图8 试件声发射振幅-频度分布图

Fig. 8 Acoustic emission amplitude-frequency distribution for specimens

### 3 结论

1)真三轴加载条件下岩爆模拟试验通过三向-五面独立加载,能够最大程度还原深部因采掘活动下单面临空围岩体内局部应力集中导致的应变型岩爆现象,模拟试验结果显示,声发射信号活跃程度与三向载荷之间规律明显。

2)声发射振铃计数能够反映不同应力状态下岩石试件内部裂隙孔洞的发育、发展、贯通情况,各阶段声发射振铃计数特征为:加载初期高耸密集,应力保持阶段近乎归零,单面临空时出现短暂增长,加载后期密集增长,临爆时达到峰值。

3)根据岩爆不同时期的声发射特征研究结果:临爆阶段声发射振铃计数达到峰值,且显著高于其他各阶段,此现象可作为岩爆即将发生的前兆特征;并以声发射振铃计数密集增长现象作为判断岩体存在岩爆发生可能性的关键预防阶段。

4)声发射 $b$ 值可以衡量岩石内部微裂隙的发育情况,较低的 $b$ 值说明岩石内部发生大尺度破裂,而较高的 $b$ 值则反映以小尺度裂隙发育为主。在高应力条件下,声发射 $b$ 值的突然降低可作为岩爆即将发生的前兆特征,为工程实践提供理论指导。

#### [参考文献]

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803-2 813.
- [2] 万荣基,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆刚度理论研究进展与趋势展望[JOL].金属矿山,1-18[2024-08-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20230322.1718.006.html>.
- [3] 孙晓明,任超,刘冬桥,等.基于岩爆碎屑研究的高楼山隧道岩

爆机理分析与类型判定[J].工程科学学报,2023,45(3):337-348.

- [4] 朱金养,郭浩森,罗文俊.深埋硬岩隧洞岩爆风险与结构面倾角关系探讨[J].防灾减灾工程学报,2023,43(1):60-69.
- [5] 杨玲,魏静.基于支持向量机和增强学习算法的岩爆烈度等级预测[J].地球科学,2023,48(5):2 011-2 023.
- [6] 李郴娟,胡嘉,黄湛焜.基于室内模拟试验的公路隧道岩爆预测技术[J].公路,2021,66(2):335-339.
- [7] 张国凯,李海波,夏祥,等.单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1 133-1 144.
- [8] 刘健,王晓军,徐莎莎,等.基于声发射RA-AF值识别不同岩爆倾向性灰岩破裂特征[J].金属矿山,2022(10):16-23.
- [9] 姜德义,谢凯楠,蒋翔,等.页岩单轴压缩破坏过程中声发射能量分布的统计分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3 822-3 828.
- [10] 陈景涛,冯夏庭.高地应力下岩石的真三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1 537-1 543.
- [11] 苏国韶,胡李华,冯夏庭,等.低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1 309-1 322.
- [12] 苏国韶,蒋剑青,冯夏庭,等.岩爆弹射破坏过程的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):1 990-1 999.
- [13] HE M C, JIA X N, COLI M, et al. Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carrara marble [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 1-8.
- [14] 马艾阳,伍法权,沙鹏,等.锦屏大理岩真三轴岩爆试验的渐进破坏过程研究[J].岩土力学,2014,35(10):2 868-2 874.
- [15] 温晓东,马庆山,李进鹏,等.闪长岩破裂的声发射前兆现象及其裂纹路径演化规律[J].黄金,2024,45(4):9-12.
- [16] 姜海涛,刘明淳,蒋加森,等.基于声发射指标的常规卸压机制分析与预测信度应用[J].黄金,2023,44(8):10-14.
- [17] 梁进乐,梅甫定,高飞雁,等.真三轴岩爆试验下三类岩石力学特性及声发射特性研究[J].河南科学,2023,41(3):374-382.
- [18] 王桂林,杨证钦,张亮,等.干湿循环节理砂岩单轴压缩声发射演化特征[J].长江科学院院报,2023,40(2):81-86, 94.

## Study on acoustic emission characteristics of rockburst simulation under true triaxial test conditions

Huang Zhanying<sup>1</sup>, Zhang Tan<sup>2</sup>, Nie Huawei<sup>1</sup>, Li Chenjuan<sup>1</sup>

(1. Guizhou Communications Polytechnic University; 2. Guizhou Equipment Manufacturing Polytechnic)

**Abstract:** To investigate the acoustic emission characteristics of rockburst caused by stress concentration during excavation in deep-buried chambers under high-stress mining environments, true triaxial tests were performed using the TRW-3000 true triaxial apparatus coupled with the PCI- II acoustic emission monitoring system. Three-way and five-face stress environments with one side of the deep-buried chamber surrounding rocks facing air are simulated by carrying out triaxial independent loading and sudden single-sided unloading on marble specimens. The results show that the ringing count and  $b$ -value of acoustic emissions effectively reflect the initiation, propagation, and coalescence of internal cracks and voids in the rock. During the pre-failure stage, the ringing count rapidly increases and reaches its peak, while the  $b$ -value sharply drops, indicating the rapid expansion of internal voids and cracks into large-scale fractures, leading to severe instability and failure of the specimen. The dense growth of ringing counts can serve as a key indicator of the likelihood of rockburst occurrence in the deep-buried chamber surrounding rocks, while the sudden decrease in the  $b$ -value is a precursor to imminent rockburst. These findings provide theoretical guidance for mining practices in deep underground areas.

**Keywords:** high stress; deep mining; deep-buried chamber; strain-type rockburst; true triaxial loading and unloading; acoustic emission characteristics