

花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制

苗金丽^{1,2}, 何满潮^{1,2}, 李德建^{1,2}, 曾凡江^{1,2}, 张 茜¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083, 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对真三轴应力状态下的突然卸载应变岩爆试验监测到的声发射原始波形数据进行频谱分析和时频分析。根据三亚花岗岩岩爆试验前后样品 SEM 微观结构照片, 岩爆过程的声发射频谱特性及声发射参数 RA 值(声发射撞击上升时间/幅度)的不同, 分析其破坏过程的微观机制。在试件相对稳定阶段, 产生以低幅、低能量释放为特征的波, 对应微裂纹的滑移或局部的微裂纹开裂; 在岩爆发生时声发射波除低频部分的幅值明显增大之外, 高频幅值也有增大趋势, 表明有高能释放, 试件内产生宏观破裂; 岩爆前 RA 值增加, 岩爆时降低。高 RA 值是张裂纹形成产生的波, 低值是剪切裂纹形成的波。试验结果揭示岩爆过程中同时产生大量的高频低幅特征的波和低频高幅特征的波, 分别对应形成穿晶或解理微裂纹, 以张裂纹为主及沿晶或穿晶宏观裂纹, 以剪切裂纹为主, 显示高能释放及低 RA 值特征。

关键词: 岩石力学; 岩爆; 声发射; 频谱分析; 微观机制

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)08 - 1593 - 11

ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS OF GRANITE UNDER STRAIN ROCKBURST TEST AND ITS MICRO-FRACTURE MECHANISM

MIAO Jinli^{1,2}, HE Manchao^{1,2}, LI Dejian^{1,2}, ZENG Fanjiang^{1,2}, ZHANG Xi¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The frequency-spectrum and time-frequency characteristics of acoustic emission original wave data are analyzed, which are obtained through monitoring strain rockburst test under true triaxial stress state with special characteristics of unloading one side of the specimen suddenly. The micromechanism of rock failure process is analyzed based on the microstructure SEM(scanning electronic microscope) images of Sanya granite samples before and post failure, frequency-spectrum and RA(rise time/amplitude) characteristics of AE waveform obtained during rockburst. When the rock sample is relatively stable, AE waves with the feature of low-amplitude and low-energy are formed, and microcracks slip or split in local zone correspondingly. However, the amplitudes of AE waves increase not only in low-frequency range but also in high-frequency during rockburst, which implies that high energy is releasing and macrocracks in the rock specimen are generated. The RA values increase before rockburst and decrease during rockburst. High RA value is wave generated by tensile cracks and low RA value is wave generated by shear cracks propagation. The test results reveal that many relative high-frequency-low-amplitude waves and low-frequency-high-amplitude waves generated during rockburst are related to transgranulation/cleavage tensile microcracks and intergranular shear macrocracks respectively, which shows the

收稿日期: 2009-01-14; 修回日期: 2009-04-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50490270); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB202200); 教育部创新团队发展计划项目(TRT0656)

作者简介: 苗金丽(1968-), 女, 1990年毕业于南京建筑工程学院工程地质及水文地质专业, 现为博士研究生、高级工程师、注册土木工程师(岩土), 主要从事深部岩体力学实验与岩体工程灾害方面的研究工作。E-mail: miaojinli@163.com

characteristics of high energy releasing and low RA value.

Key words: rock mechanics; rockburst; acoustic emission; frequency-spectrum analysis; micro-mechanism

1 引言

应变岩爆是在地下岩体开挖过程中围岩发生破坏的一种形式。由于岩爆时经常伴随着岩石碎屑的弹射, 抛出, 对施工人员造成伤害, 因此备受关注。目前关于应变岩爆的研究进行了大量的室内外研究工作, 并积累了丰富的现场资料。

对岩爆机制方面的认识, 研究者们持有不同的态度。R. Simon^[1]认为岩爆也是一种破坏现象, 理解岩爆的机制就是要研究其破坏机制, 可以采用典型的岩石力学原理解释岩爆。认为岩爆是岩体不同刚度体因应力的不均匀分布而发生的局部突然破坏现象。对于采用静态岩石破坏准则如Mohr-Coulomb或Hoek-Brown对应变岩爆进行分析时, H. S. Mitri^[2]认为到目前为止没有只用来评价由于岩爆引起的岩体破坏准则, 并且指出采用静态破坏准则分析矿柱时是稳定的, 但实际有可能发生岩爆危险。关于岩爆破坏的细观及微观机制, 很多学者进行了大量的研究工作。谭以安^[3]对现场的岩爆碎片进行了SEM微观分析, 认为岩爆碎片断口有压致张裂和剪切两种形成机制, 进而认为岩爆破坏过程经历了劈裂成板、剪断成块和块片弹射的动力学过程。张梅英等^[4]进行了大量岩石单轴压缩条件下的实时SEM扫描试验, 获得了不同载荷下试件的破坏过程: 首先是由于压密产生的裂纹闭合; 其次是微裂纹的产生及闭合, 呈不均匀分布特征, 有的裂纹闭合, 有的裂纹开裂; 最后是突然的断裂破坏。认为发生岩爆的微观机制是局部的应力集中并瞬间释放, 产生多余能量提供给岩石碎块导致岩爆发生, 是一种压剪断裂的破坏机制。冯涛等^[5]对冬瓜山岩爆碎片进行了SEM试验, 并详细分析了形成不同断口的断裂力学机制, 认为岩爆断裂的微观机制主要是在拉伸、剪切作用下岩石发生低应力脆断。

采用声发射技术对岩石破坏过程进行的研究, 也取得了很多成果。潘长良等^[6]对单轴压力下岩爆倾向性岩石进行了声发射特征研究, 在荷载增加时, 声发射主频有变化, 在接近破坏时的声发射信号频

率集中; 认为声发射频率与岩石组成和结构有关, 但基本稳定, 同时也与受力状态有一定关系; 声发射主频可能反应了裂纹扩展的特征, 波形前沿变陡可能是裂纹出现了分叉。逢焕东等^[7]对岩石类材料的声发射波谱特征进行了分析, 声发射活动弱时频率成分靠近低频, 而声发射强时频率域向中部集中。朱波等^[8]对声发射与材料的断裂韧性相关性进行了研究, 断裂时发生的应力波的能量在稳态与失稳两种情况下与宏观断裂能均有相同的关系, 而与断裂机制无关。

脆性岩石破坏是一个微裂纹形成、发展和汇合的过程, 该过程伴随着不同类型裂纹的开裂损伤演化, 有穿晶的、沿晶的和它们耦合的。M. Cai等^[9]分析了室内试验的岩石声发射特征, 根据声发射事件分析岩石的初始裂纹开裂时间及岩石的破坏过程与应力的关系。

岩石室内试验表明, 发生岩爆的岩石具有典型的脆性破坏特征。无论是单轴压缩还是三轴压缩, 试件内各点的应力状态都是不一致的。岩石材料是一种典型的非均质脆性材料, 其抗拉强度低于抗压强度约1个数量级。脆性破坏主要表现为低应力下的脆断。岩石的脆性断裂的微观机制主要是研究微裂纹的形核、生长和扩展直至整体破坏。室内试验用于分析岩石在力的作用下的力学行为最基本的参数是施加于试件表面的平均应力和试件的整体平均变形。实际试件表面受到外力的作用后, 其内部应力的分布是不均匀的, 并由此使试件产生损伤并最终导致整体破坏。目前还没有直接的方法用于研究岩石试件内部的应力变化, 采用多点应力测量也只是对试件表面信息的反映。CT实时扫描能反映在不同应力作用下试件密度变化及裂纹开裂特征; 红外热像技术可以反映试件表面的温度场信息; AE定位技术可以进行声发射源定位, 对声发射数据的进一步分析可以获得不同应力载荷下的频谱特征。CT实时扫描和红外热像用于岩爆试验研究还未见报道。虽然AE定位技术用于室内岩爆试验研究未见报道, 但AE技术用于岩爆试验的研究已经取得了大量结果, 如杨健和王连俊^[10]利用声发射试验技术研究岩

爆机制, 对比了在单轴和三轴压缩条件下岩石的声发射特征, 并依据声发射特征的不同划分了岩性与岩爆类型的对应关系。

由此可见, 基于试验的岩爆破坏微观机制的研究主要集中在两个方面, 一是现场岩爆碎片及室内单轴压缩试验条件下的实时或破坏碎块的电镜扫描分析; 二是对岩爆试验的声发射特征进行的分析, 主要是结合应力与应变特征, 总结岩爆破坏前的 AE 基本参数特征以及不同加载条件下不同岩性的岩爆声发射特征, 但对声发射频谱特征及岩爆破坏碎屑微观破坏特征与岩爆破坏过程的微观机制的关系还没有完善的研究报道。

基于真三轴岩爆试验系统, 本文对三亚花岗岩进行了应变岩爆过程模拟试验研究。通过对监测到的声发射数据进行频谱及时频分析, 结合岩爆破坏特征, 对照岩爆后碎屑的SEM形貌特征, 综合分析了三亚花岗岩岩爆过程的微观破坏机制。

2 岩爆试验

2.1 岩爆试验系统及试验方法

应变岩爆过程模拟试验系统由真三轴主机(附加岩爆试验的特殊装置, 可单面卸载暴露试件表面)、控制加卸载的液压设备和采集试验过程中的岩爆信息仪器, 主要采集三向力、监测声发射及对破坏过程进行摄像。试验系统用于加载的框架见图 1。

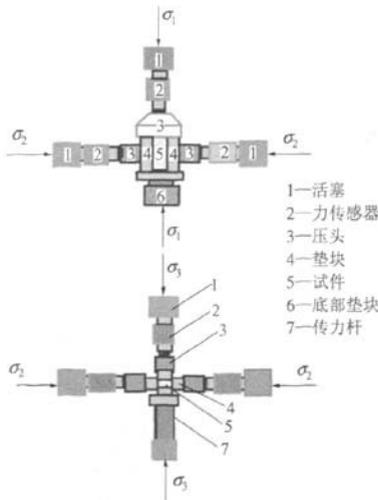


图 1 试验系统加载框架
Fig.1 Loading frame of test system

试验样品为花岗岩, 取自海南三亚一海下工程。X 衍射分析其矿物组成为石英 25.8%, 钾长石 42.9%, 斜长石 21%, 方解石 1.7%, 黄铁矿 1.3%, 黏土矿物 7.3%。单轴抗压强度为 91 MPa, 弹性模量为 48.1 GPa。岩爆试验采用三向均匀分级加载, 单面突然卸载的岩爆试验方法。岩爆试验前三亚花岗岩试件见图 2, 尺寸为 149.90 mm×62.66 mm×30.84 mm。试件致密, 密度为 2.61 g/cm³, 纵波波速为 5 670 m/s, 没有肉眼可见裂纹。

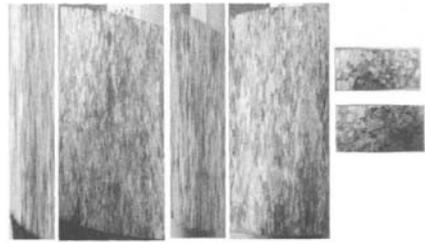


图 2 岩爆试验前三亚花岗岩试件
Fig.2 Sanya granite sample before rockburst test

2.2 岩爆试验过程及结果

岩爆试验过程中采集力和声发射波形数据。力的采样频率分别为加载 1 次/(10 s), 卸载和岩爆 1×10⁴ 次/s。声发射波形数据的采样率为 1×10⁶ 次/s, 采用的声发射传感器响应频率为 150 kHz, 前放 40 dB 增益, 调理箱 10 倍放大。

试件共经历了 7 次反复加卸载最小主应力方向的载荷后岩爆, 每次的应力增加对应着原岩应力增加或深度的增加。第 7 次卸载后约为 3 min, 在试件左下部有小颗粒弹射, 在其附近局部开裂, 断续声响持续 16 s。卸载后 16 min 24 s 在试件中下部有颗粒弹射并瞬间产生片状弯折破坏。试件岩爆破坏特征见图 3。在试件中部弯折弹射的部位附近可以看

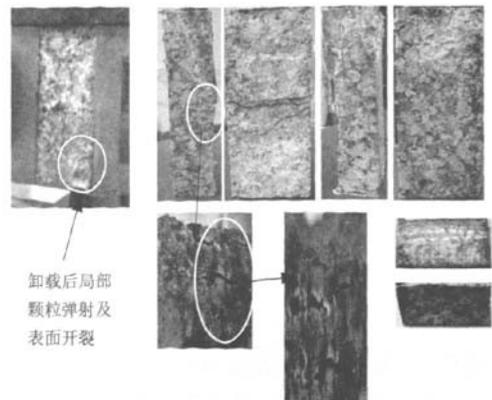
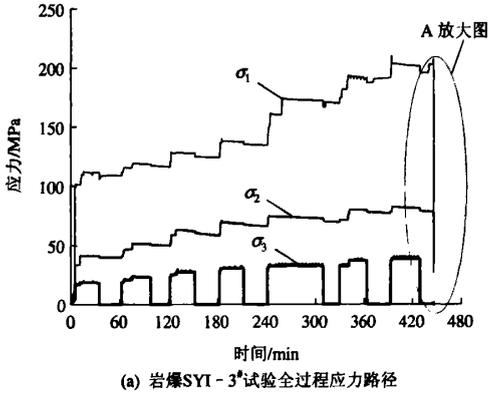


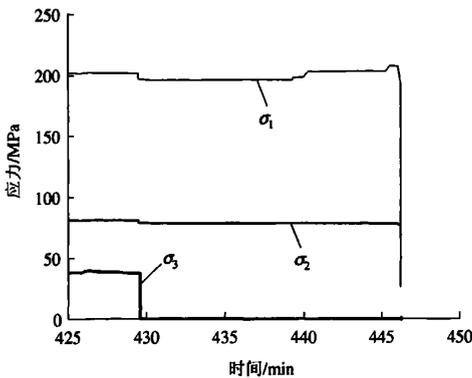
图 3 三亚花岗岩试件岩爆破坏特征
Fig.3 Features of rockburst of Sanya granite samples

到板裂特征。

图 4(a)是三亚花岗岩岩爆试件整个试验过程的应力路径。图 4(b)是最后 1 次卸载至岩爆发生的应力路径。卸载前三向应力分别为 202, 81, 38 MPa, 卸载后应力分别为 197, 80, 0 MPa, 最后岩爆前应力分别为 207, 78, 0 MPa。



(a) 岩爆SYI - 3[#]试验全过程应力路径



(b) 岩爆破坏SYI - 3[#]最后卸载至岩发生的爆应力路径(A放大图)

图 4 三亚花岗岩试验应力路径

Fig.4 Stress paths of rockburst test of Sanya granite sample

最后一次单面卸载后的岩爆破坏过程表明在该应力状态下卸载后试件达到了发生岩爆的临界状态,局部有颗粒弹射及开裂特征,对应轻微岩爆破坏。当现场围岩表面产生破坏后,高应力向完好的深部围岩转移,应力会略有降低。已经存在大量微损伤的硬脆岩体,在微扰外力作用下,就有可能形成岩爆灾害,如图4(b)中所示,最大主应力的小幅增加就导致了试件最后突然的岩爆发生。现场工程开挖后,洞室围岩应力表现为卸载后的切向应力增加,径向应力降低。围岩体内的应力重分布可以持续较长时间,表现为裂纹稳定扩展过程,在此期间应力基本保持不变,甚至会缓慢降低,导致岩体最万方数据

后破坏可在瞬间内完成。

3 岩爆过程的声发射反应

岩爆破坏是伴随着能量突然释放的岩石脆性拉伸-剪切破坏。是微观裂纹成核、稳定扩展、失稳扩展的结果。在裂纹的形成、扩展及试件破坏过程中,都会有能量的释放,部分能量会以弹性波的形式向外传播。利用声发射传感器可以检测到的岩石中的声发射信号频率范围为 $10^4 \sim 10^6$ Hz^[11, 12]。

3.1 声发射用于岩爆试验的物理基础

声发射是材料内部正在发生形变或断裂而自发产生的应力波。材料受到力的作用后都会产生声发射。声发射源主要有塑性变形声发射源(滑移变形、孪生变形)、断裂声发射源(裂纹形成和扩展、第二相质点断裂和纤维增强复合材料断裂)和相变声发射源(结晶、马氏体形成)^[13]。岩石中声发射源主要是前两种,对于岩爆过程的声发射源则主要是断裂产生的,也有少量塑性变形产生的。

声发射源不同,则声发射强度不同。声发射强度是用来衡量声发射源强度的指标,通常用声发射事件(或每个试件的能量)的平均幅度来表示^[13]。塑性变形产生较弱强度的声发射,断裂产生较强的声发射。对于岩石材料,相对高强度、高应变速率、各向异性、不均匀、解理型断裂、内部有缺陷、裂纹扩展和粗晶粒都会产生高强度声发射。当裂纹扩展形成屈服区时产生的声发射振幅小,裂尖突进产生新的显微裂纹时伴随的声发射振幅大。

根据声发射参数可判断声发射源产生机制^[14, 15],声发射 RA 值(上升时间与幅度的比值,单位为 ms/V)常用来判定裂纹的开裂方式。

当采用声发射参数来分析脆性岩石的裂纹开裂方式时往往考虑两种方式,分别为张开裂纹和剪切裂纹。T. Shiotani等^[14]对弯曲和剪切试验岩石的声发射 RA 值进行了计算,认为低 RA 值对应剪切裂纹,高值对应张开裂纹。

声发射信号是典型的非平稳信号,单个波形的发生具有随机性,并且是多分量信号(由两个以上的频率成分组成)。在岩爆过程中,不同成分频率的波对应不同类型的声发射源。对声发射波形信号进行傅里叶变换,可以获得声发射的频率信息。对所有声发射波形进行变换,就可以获得不同时刻主频及幅值信息。当对声发射波形数据进行二次型时频变换时,就可以将原始波形数据转化为三维时频图,观察在时域和频域内幅值的变化。二次型变换为非

线性变换, 其物理意义是信号能量在时域和频域的分布^[16]。

3.2 岩爆试验过程的声发射特征

当试件在较低载荷作用下或处于相对稳定状态时, 声发射一般以突发型信号为主。在突然单面卸载时, 产生连续的声发射或非常密集的突发型声发射信号, 幅值明显增加; 在岩爆前及岩爆过程中声发射信号最强, 两种类型的声发射都有发生。图 5 为 2 种典型的突发型和连续型的声发射波形图。

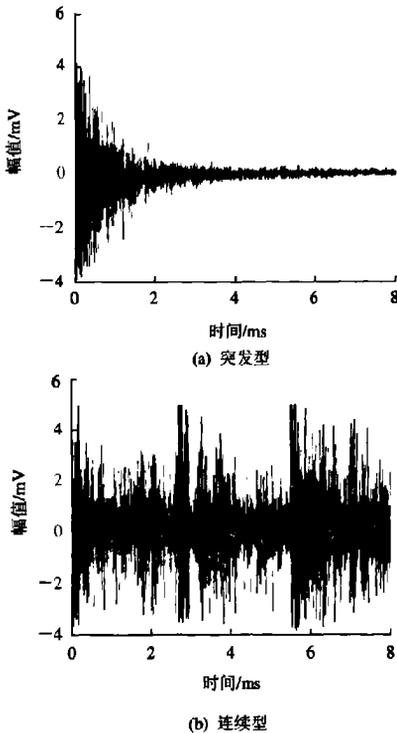


图 5 2 种典型声发射波形图
Fig.5 Two classical types of AE waves

对于室内岩爆过程模拟试验, 主要研究在三向应力状态下的岩石试件单面卸载产生临空面后的岩爆过程。本文对于声发射的分析就是针对试件在最后一次卸载至岩爆结束这一段时间内的声发射信号进行的。

图 6 为 3[#]三亚花岗岩卸载至岩爆过程的声发射能率曲线及三向应力变化图。从 AE 能率的变化曲线上可以看出有两个较高峰值, 分别与岩石试件的破坏过程相对应。第一个高峰对应试件局部颗粒弹射及开裂, 属于轻微岩爆, 因没有引起试件的整体破坏, 故没有明显的应力降低。第二个高峰对应最后岩爆破坏, 释放能率大于第一次的。

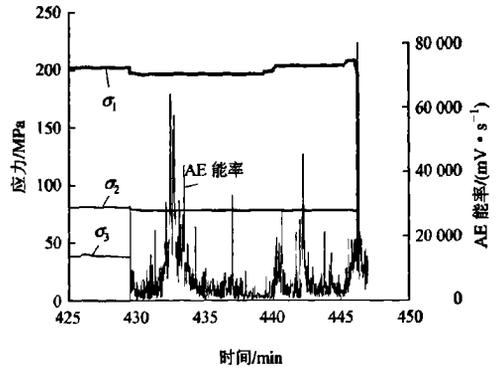
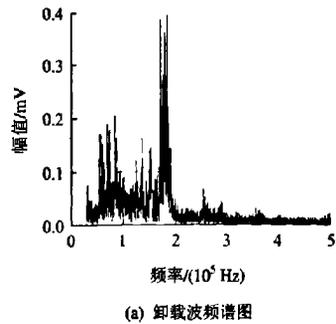


图 6 3[#]三亚花岗岩岩爆过程声发射能率及应力路径
Fig.6 Curves of AE energy ratio and stress paths of Sanya granite No.3 during rockburst

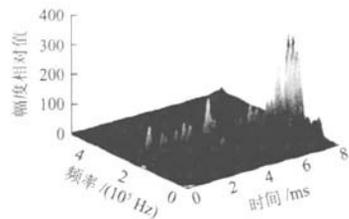
3.3 声发射频谱及时频变换结果

对岩爆过程从卸载至岩爆结束的所有声发射波形原始数据(共计 6 158 个波形文件, 每个波形文件采集 8 ms, 由 8 192 个数组成)进行了傅里叶变换。考虑到机械噪声等的影响, 只对频率范围为 30~400 kHz 范围内的波形参数进行统计分析。

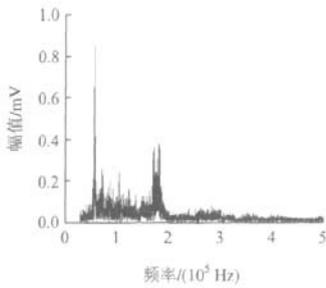
首先对每个波形文件进行频谱变换及时频变换。图 7 为典型的滤波后频谱图和三维时频图。根据频谱图的特征(见图 7(a)), 发现高幅值在频域内集中在几个频段上, 尤其是 <200 kHz 的低频成分幅值较高。三维时频图可以非常直观地观测到高幅值所对应的频率及发生的时间, 这在频谱图中是无法观测到的。



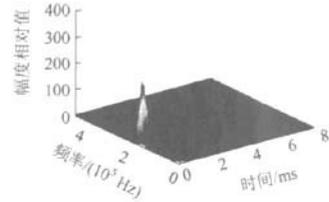
(a) 卸载波频谱图



(b) 卸载波时频图



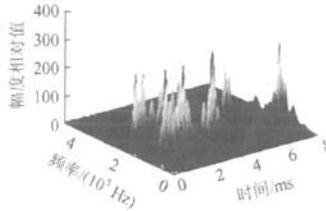
(c) 轻微岩爆波频谱图



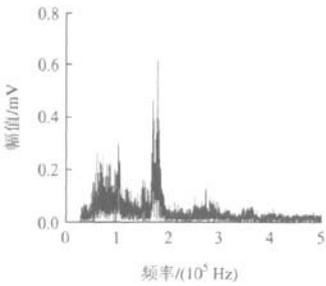
(h) 岩爆后波时频谱

图7 典型声发射波形的频谱图和时频谱

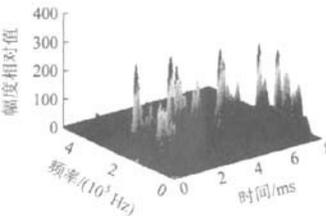
Fig.7 Graphs of amplitude-frequency and time-frequency of typical AE waveform



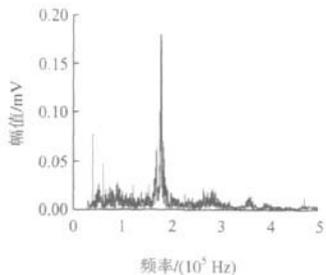
(d) 轻微岩爆波时频谱



(e) 岩爆时波频谱图



(f) 岩爆时波时频谱



(g) 岩爆后波频谱图

根据声发射频谱分布特征，同时为获得较高频率成分的变化趋势，将30~400 kHz 频率范围分成4个区间，分别为30~150，150~230，230~330和330~400 kHz。

对每一波形文件的频谱变换结果，在4个频段内分别记录下最大幅值所对应的频率，则每个波形文件有4个点，那么6 158个波形文件则共计24 632个点，将所有的数据点绘于幅值-频率点图上，见图8。可以清楚地看出最大幅值集中分布在180 kHz左右，说明该频率是三亚花岗岩岩爆试验破坏过程中产生的声发射的一个主频。其次较大幅值分布在50~100 kHz区间内，所对应的频率较发散。在高于180 kHz的频段内，幅值相对较小，分散地分布在两个区间内。

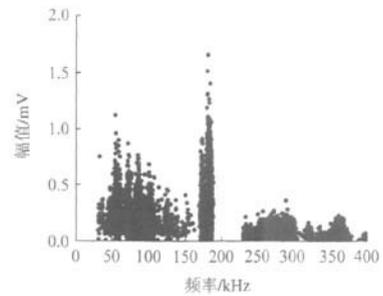


图8 岩爆过程声发射幅值-频率分布点图

Fig.8 Pots of amplitude-frequency of AE waveform during rockburst

图9是声发射波形数据频谱变换后不同频率段的最大幅值随波形序列变化曲线(声发射波形序列与岩爆过程时间相对应)。

从图9可以看出不同的频段幅值都具有波动特征。图9(a), (b)为第1, 2频段, 纵坐标相同, 图9(c), (d)为第3, 4频段, 纵坐标也相同。试件宏观破坏的主频直接与声发射的高幅值对应, 且在宏观破

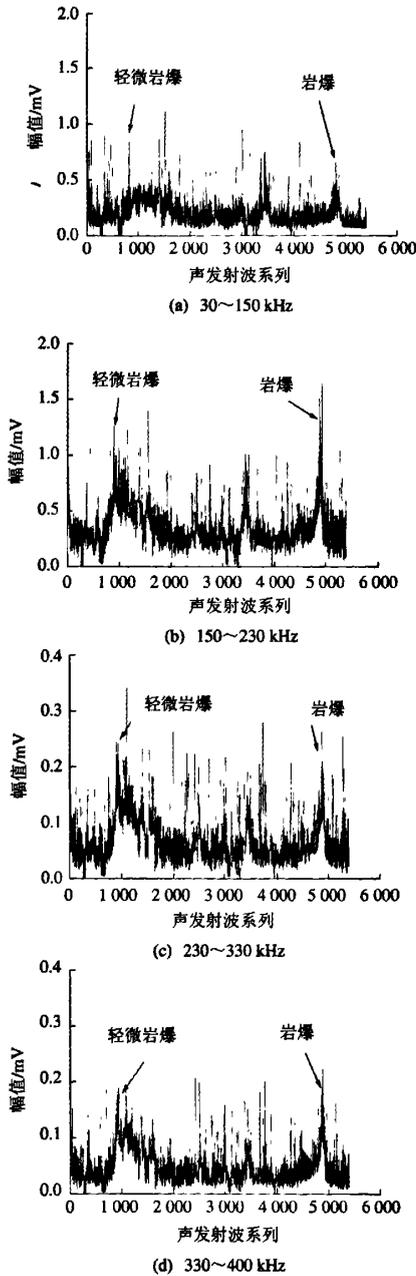


图 9 岩爆过程声发射波形序列最大幅值变化图

Fig.9 Variation tendency of the maximum amplitude of AE waveform during rockburst

坏前有明显的幅值增大趋势。无论试件发生的是颗粒弹射及开裂的轻微岩爆, 还是最后片状弹射及崩落等的岩爆破坏, 都是岩石发生宏观破坏的一种形式。在发生宏观破坏前, 细观及微观的脆性断裂形式主要有两种, 张裂及剪切断裂。根据 J. M. Ramsey 和 F. M. Chester^[17] 试验研究结果, 还有一种在拉应力

和压应力共同作用下产生的耦合断裂。就岩石的脆性破坏机制而言, 无论是裂纹开裂, 还是岩爆, 主要是断裂破坏。根据声发射源定位数据, 目前采用 MT(moment tensor) 分析方法可以判定声发射源的类型是张裂、剪切还是它们的耦合^[18], 还可以提供详细的断裂形核及生长区域甚至是预测灾害性事件, 如地震, 火山喷发等^[19, 20], 以上分析方法可以用于岩爆预测。本文中由于声发射监测还没有进行定位试验, 因此从能率及幅值的变化可以定性判定试件在外力作用下发生了损伤, 高幅值声发射源与宏观的破坏相对应, 但要判定是否会发生非稳定的岩爆破坏, 还必须建立能率释放率与应力变化的关系, 才可以更准确预测岩爆。

本文尝试根据一段时间内声发射的频谱变化趋势预测可能即将发生的岩爆破坏。为了对声发射波形幅值变化进行定量评价, 根据图 9 中不同频率段的幅值变化特征, 结合岩爆过程现象, 对岩爆过程划分了 8 个时间段, 见表 1。

表 1 岩爆过程声发射波形幅值分段统计

Table 1 AE waveforms statistics range during rock burst

序号	时间/min	特征
1	429.5~432.4	单面突然卸载, 试件稳定
2	432.4~432.7	试件声响, 局部开裂
3	432.7~435.5	应力保持, 试件稳定
4	435.5~440.5	应力保持, 试件稳定
5	440.5~443.0	试件稳定, 最大主应力略有增加
6	443.0~446.0	试件稳定, 最大主应力略有增加
7	446.0~446.3	临近岩爆前及岩爆
8	446.3~446.9	岩爆后

根据每个时间段内的所有声发射波形文件的频谱变换结果, 按如下标准分别计算其概率: 对第 1, 2 频段内的幅值, 分别统计 $>0.15 \text{ mV}$ 的个数 $N_{>0.15}$, 根据该时间段内的波形文件数 $N_{\text{总}}$, 计算幅值大于 0.15 mV 的概率 $P = N_{>0.15}/N_{\text{总}} \times 100\%$; 对第 3, 4 频率段内的幅值, 分别统计 $>0.03 \text{ mV}$ 的个数, 并按如上方法计算其概率。

计算结果见图 10。图中显示两个峰值, 分别对应着试件两次岩爆破坏。第一次是卸载后很快产生的轻微岩爆, 表现为局部颗粒弹射, 伴随着开裂; 第二次是最后的岩爆破坏, 比第一次强烈。对于本文确定的统计计算标准, 卸载后发生轻微岩爆产生的声发射其幅值在不同频段都很高, 最后岩爆时则

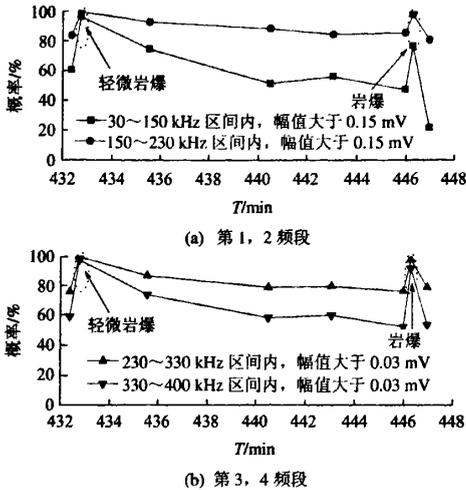


图 10 岩爆过程幅值变化概率趋势图

Fig.10 Probability of amplitude variation of AE waveform during rock burst

4 个频段内的幅值概率值略有差异。从单面卸载后出现局部的轻微岩爆到最后岩爆前的时间内，不同频段内声发射幅值总体趋势是降低。在临近岩爆前除 150~230 kHz 范围的幅值略有增加外，其他都降低。结合图 9, 10, 幅值增大预示着破坏发生。突然的幅值增加更可能是岩爆破坏的特征。

处于较高三向应力状态下的试件，单面卸载后瞬间的应力重分布很可能会导致试件的破坏，因为有瞬间的能量释放过程及单面凌空有利于局部产生破坏的条件。本例中卸载后很快产生的大量高幅值声发射是试件发生轻微岩爆的反应，表现为局部开裂及小颗粒的弹射。最后的岩爆破坏是在最大主应力有所增加后产生的。

岩爆的强度应考虑瞬间释放能量及能率的大小，从声发射幅值变化特征上还不能确定岩爆的强烈程度(见图 10)，图 6 的能率变化曲线上反应了最后岩爆时的释能率比卸载后发生的弱岩爆的释能率高一些。声发射高幅值增加是试件发生宏观破坏的一个征兆，与现场采用声发射大事件预测围岩可能发生破坏的预警标准相对应。

4 岩爆微观破坏特征

4.1 试验前后样品微观结构

选取试验前的花岗岩样品进行 SEM 扫描，观察其结构特征。从图 11 试验前的样品 SEM 图片中，可以看出样品致密，不同晶体矿物间紧密接触。石英晶体表面可见溶孔，片状黑云母与周围的矿物接

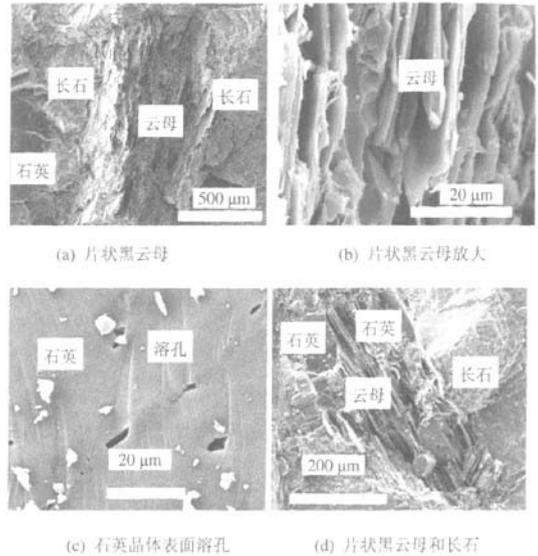


图 11 试验前碎屑扫描图片

Fig.11 SEM images of fragments before test

触带有冲填物。

岩爆破坏的断裂基本形式与一般的岩石力学破坏断裂机制一样。岩爆试验过程中大量的损伤是在单面卸载后至发生岩爆破坏过程中产生的，因此可以认为从卸载到发生最后的岩爆破坏过程中产生了大量的裂纹并扩展贯通演化形成最后宏观岩爆破坏。通过观察岩爆破坏后碎屑的 SEM 图片中的裂纹分布特征，可以理解岩爆过程的破坏机制。

根据裂纹开裂时受力的不同，可以分为张开裂纹(I 型)、滑移裂纹(II 型)和撕开裂纹(III 型)3 种类型；根据裂纹扩展所在的位置不同，可以分为穿晶裂纹、沿晶裂纹和耦合裂纹 3 种类型^[21]。

岩爆试验破坏后中粒碎屑 SEM 图片见图 12。图 12(a)是在低放大倍数下的 SEM 图片，可见石英晶体表面有一条清晰的弯折状裂纹，不平直，为穿晶张性裂纹；图 12(b)是一条剪切裂纹，从裂纹形态分析，该裂纹是撕开裂纹(III 型)；图 12(c)是沿晶粗糙状的张裂纹，断裂表面破碎，可见平行于观察表面的剥离状层裂裂纹；图 12(d)是以穿晶为主的张性裂纹；图 12(e)是沿晶张裂纹，云母片与其它矿物接触处开裂；图 12(f)是具有明显不同晶格结构的矿物中，在结构较紧密的矿物中产生了穿晶裂纹，而丝状矿物没有破坏迹象。从上面的裂纹特征可以看出，主要有张开裂纹(I 型)和撕开裂纹(III 型)两种裂纹，断口面上的台阶往往是滑移裂纹(II 型)形成的痕迹。

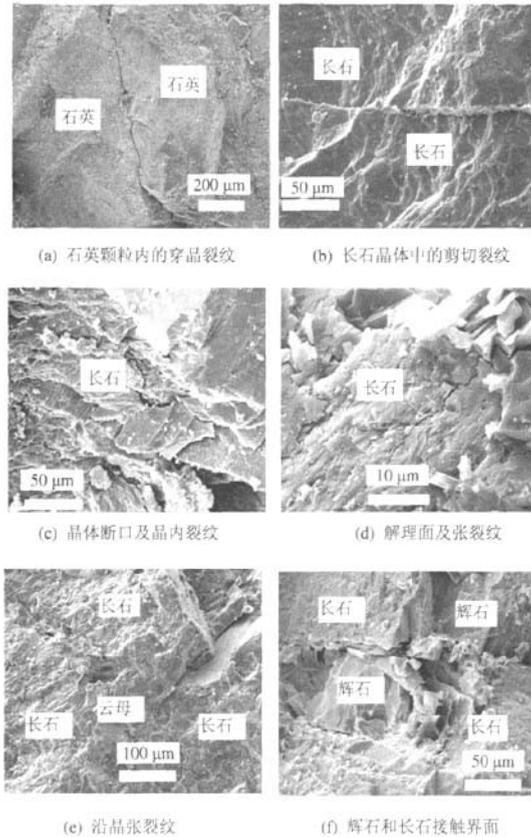


图 12 试验后碎屑 SEM 图片

Fig.12 SEM images of fragments after test

通过上面对中粒碎屑的 SEM 照片观察, 试件经历岩爆试验破坏后, 其矿物晶体内裂纹增加, 不同矿物晶体间胶结物开裂或相对滑移, SEM 图像上可见层裂纹。

4.2 不同声发射源波形特征

声发射源类型不同, 其声发射波形特征不同。对于花岗岩这种多晶矿物组成的岩石, 在外力作用下声发射源主要是裂纹的扩展及断裂产生的。

根据微观裂纹开裂时的受力特点, 可以进行声发射源特征分析。张开型裂纹是在张应力作用下形成的, 在裂尖开裂的过程中, 主要是一种快速开裂形成大量的微观裂纹的过程, 由此产生的声发射大部分是突发型的, 振幅大小依据裂纹开裂尺度不同而变化。滑移型裂纹是沿着解理、弱面滑移时形成的, 以 II 或 III 型裂纹较多。由于滑移裂纹在裂尖处除产生裂纹的开裂外, 还伴随着沿着裂纹面的滑动, 因此产生很多连续型的声发射, 声发射波形振幅可能不是很大, 当同时伴随着大尺度的细观或宏

观的快速断裂发生时, 则会产生幅度较大且连续发生的声发射。声发射源及声发射波形特征见表 2。

表 2 不同类型声发射源和声发射波形特征

Table 2 Waveform characteristics of different AE sources

AE 源	幅值描述	频率描述	主要波形描述
位错、滑移	低	中	连续型
开裂、扩展	高	高	突发型
剪切	中	低	连续型

由表 2 可以看出, 产生高幅值的声发射源往往是裂纹扩展和断裂。试件在外力的作用下达一定载荷后裂纹开始扩展, 当扩展稳定发生时, 对应声发射源的波形是一种突发型的。在非稳定扩展及断裂阶段, 会有大量的类似连续发生的声发射波, 对应着大量裂纹同时开裂, 声发射释放能率增加, 在临近最后破坏前可能产生大量该类型的声发射波形, 且幅值明显增加。

限于目前试验中采用的声发射系统还没有达到空间定位的程度, 因此本文还不能根据试验不同阶段的声发射定位信息采用 MT 方法对声发射源破坏力学机制进行分析, 但可以通过波形的幅值大小, 对声发射源进行定性评价, 今后将在现有研究的基础上, 进一步完善试验手段, 继续开展该方面的工作。

4.3 微观耦合裂纹开裂力学模式

根据典型裂纹的开裂特征, 可以分析引起裂纹开裂的力学模型。图 12(b)是非常典型的剪切型撕开裂纹, 是 II 和 III 型的剪切复合形式, 表面的解理台阶是张开型的裂纹断口, 其力学模型见图 13, 在该断面形成后沿原来的裂隙填充带由于滑移及撕开共同作用, 产生了图示的裂纹形态。现在看到的断裂表面的解理面是 I 型张裂纹形成的。图中的解理平面垂直于卸载方向。

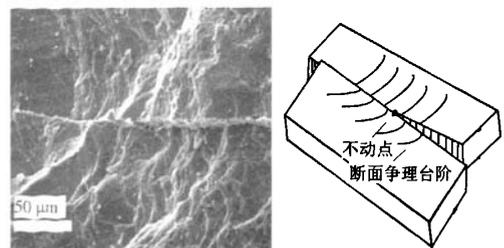


图 13 剪切型裂纹(II+III)

Fig.13 Model of shear cracks(II and III)

4.4 声发射 RA 值分布及破坏机制

图 14 是三亚花岗岩能反应岩爆过程(三向应力状态下的试件突然单面卸载至岩爆结束)破坏特征的声发射 RA 值和能率释放随时间变化的曲线。初步结果与 T. Shiotani 研究结论基本相符。为了与该过程的能率变化做比较,同时将声发射能率释放曲线也列于图上。图中弱岩爆和岩爆时的声发射能率最高,对应的 RA 值最低,并且发现在发生破坏前有较为明显的高 RA 区出现。

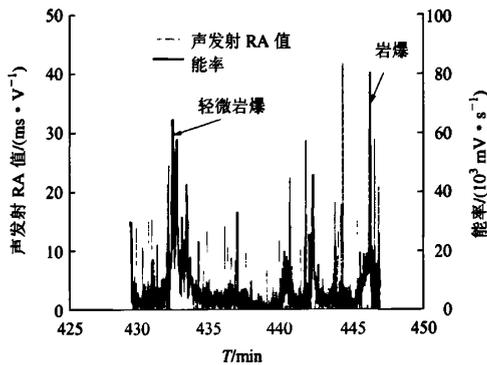


图 14 声发射 RA 值及能率释放曲线

Fig.14 Curves of RA value and energy ratio releasing of AE

岩爆过程的 RA 变化特征说明,在试件处于相对稳定状态时,主要产生大量的以张裂为主的裂纹,宏观可见或可以听到开裂的声音时,试件产生以剪切破坏为主的裂纹。据此可以推断在稳定裂纹扩展阶段,以局部分散的张裂纹为主,在最后的岩爆阶段或产生阶段性岩爆破坏阶段(具有宏观岩爆破坏特征,如颗粒弹射,片状弹射等),以剪切破坏形式为主。RA 值降低表明剪切裂纹大量形成,并使裂纹贯通,形成宏观破坏。

试验前岩石样品电镜扫描图片表明岩石具有初始损伤-微、细观裂纹、孔洞等,且由不同矿物组成,具有不同结构,极不均匀。岩爆过程声发射 RA 值及能率释放曲线揭示了岩石试件在外界条件发生变化时的微观破坏过程。在突然卸载时,岩石内细小裂纹可能在裂尖产生开裂及小尺度的剪切滑移,对应的 RA 值有大有小;当局部应力超过材料强度产生裂纹贯通及剪切破坏时,RA 值是降低的,且在其前有高 RA 值出现。岩石试件在适宜的应力作用下,单面突然卸载产生临空面有利于试件破坏损伤产生岩爆破坏,弹性能瞬间释放及介质材料弹性恢复所具有的方向性,可使试件产生大量的穿晶解理裂纹及沿晶裂纹,裂纹贯穿形成宏观裂纹,产生断

万方数据

裂碎屑并携带能量弹射出来。上述破坏过程产生不同频率成分的高幅值声发射弹性波,在能率曲线上则表现为高能率释放特征。

5 结论

通过分析三亚花岗岩样品岩爆试验前后的 SEM 结构特征变化及试件在真三轴应力状态下突然单面卸载岩爆过程的声发射频谱及时频变换结果,以及声发射 RA 参数变化特征,得出如下结论:

(1) 三亚花岗岩存在很多微观缺陷。岩爆破坏后的碎屑中有大量的微裂纹出现,包括 I 和 II 型裂纹及其耦合形式。就裂纹的断裂机制而言,岩爆破坏包括了所有裂纹开裂方式。

(2) 尽管目前还没有对声发射进行定位试验,但通过检测岩爆试验过程中的声发射信号,可以记录试件内部的损伤过程。大量连续发生的突发型及连续型高幅值声发射波是试件产生宏观破坏的前兆。

(3) 声发射信号幅值-频率分布揭示了三亚花岗岩岩爆过程声发射主频大致为 180 kHz。高幅值主要集中在 180 kHz 左右,其次是 50~100 kHz 范围,较发散。宏观破坏前不同频段声发射幅值增大较明显,对应高能率释放。

(4) 声发射参数 RA 值的变化特征说明了岩爆过程的裂纹形成机制。高 RA 值对应张裂纹,低 RA 值对应剪切裂纹。对于三亚花岗岩,试件表面局部颗粒弹射并开裂产生弱岩爆以及应力略有增加产生片状碎屑弹射的岩爆破坏都对应着较低的 RA 值。对于张开型及剪切型裂纹的临界 RA 值或其耦合形式的 RA 值范围,以及根据 MT 方法确定岩爆过程的力学破坏机制有待今后继续研究。

(5) 岩爆试验的突然卸载会产生大量的张裂纹,局部宏观开裂伴随着剪切破坏。岩爆破坏是张-剪联合作用的结果,首先是大量张裂纹形成,以沿晶裂纹或穿沿晶耦合形式为主;其次是剪切破坏,以穿晶及穿沿晶耦合为主。

不同频段高幅值波的大量出现,对应现场监测的大事件;声发射高 RA 值随后的低值,可以预示裂纹的贯通、剪切破坏及可能引起的岩爆。

参考文献(References):

[1] SIMON R. Analysis of fault-slip mechanisms in hard rock mining[Ph.

- D. Thesis[D]. Montreal: McGill University, 1999.
- [2] MITRI H S. Numerical modeling of mining-induced energy in rock burst problems[C]// Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium, NARMS. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996: 1 - 20.
- [3] 谭以安. 岩爆岩石断面扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微学报, 1989, 8(2): 41 - 48.(TAN Yian. Analysis of fractured face of rock burst with scanning electron microscope and its progressive failure process[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1989, 8(2): 41 - 48.(in Chinese))
- [4] 张梅英, 李廷芥, 尚嘉兰, 等. 岩爆形成机制的细观力学实验分析[J]. 内蒙古工业大学学报, 1997, 16(3): 112 - 117.(ZHANG Meiyong, LI Tingjie, SHANG Jialan, et al. A meso-mechanical experimental analysis of the mechanism of rockburst[J]. Journal of Inner Mongolia Polytechnic University, 1997, 16(3): 112 - 117.(in Chinese))
- [5] 冯涛, 谢学斌, 潘长良, 等. 岩爆岩石断裂机理的电镜扫描分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 1999, 30(1): 14 - 17.(FENG Tao, XIE Xuebin, PAN Changliang, et al. Fracture mechanism analysis for rockburst with electron scanning microscope[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 1999, 30(1): 14 - 17.(in Chinese))
- [6] 潘长良, 祝方才, 曹平, 等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2001, 32(4): 336 - 339.(PAN Changliang, ZHU Fangcai, CAO Ping, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2001, 32(4): 336 - 339.(in Chinese))
- [7] 逢焕东, 张兴民, 姜福兴. 岩石类材料声发射事件的波谱分析[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 540 - 544.(PANG Huandong, ZHANG Xingmin, JIANG Fuxing. The spectrum analysis of acoustic emission signal in rock materials[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 540 - 544.(in Chinese))
- [8] 朱波, 蔡珣, 王成国, 等. 声发射特性与材料断裂韧性相关性研究[J]. 物理学报, 2003, 52(8): 1960 - 1964.(ZHU Bo, CAI Xun, WANG Chengguo, et al. Studies on the relationship between acoustic emission characteristics and fracture toughness of materials[J]. China Physics Society, 2003, 52(8): 1960 - 1964.(in Chinese))
- [9] CAI M, MORIOKA H, KAISER P K, et al. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 538 - 549.
- [10] 杨键, 王连俊. 岩爆机制声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3796 - 3802.(YANG Jian, WANG Lianjun. Study on mechanism of rockburst by acoustic emission testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3796 - 3802.(in Chinese))
- [11] HARDY H R. Applications of acoustic emission techniques to rock and rock structures: a state-of-the-art review[J]. ASTM Special Technical Publication, 1981, 750: 4 - 92.
- [12] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 550 - 564.
- [13] 杨明伟. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.(YANG Mingwei. Acoustic emission detecting[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.(in Chinese))
- [14] SHIOTANI T, OHTSU M, IKEDA K. Detection and evaluation of AE waves due to rock[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(5): 235 - 246.
- [15] CHRISTIAN U G, MASAYASU O. Acoustic emission testing[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [16] 葛哲学, 陈仲生. MATLAB 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.(GE Zhexue, CHEN Zhongsheng. Technical analysis and application of MATLAB time-frequency[M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2006.(in Chinese))
- [17] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. Nature, 2004, 428: 63 - 66.
- [18] CHANG S H, LEE C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 1069 - 1086.
- [19] LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSENKO V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350: 39 - 42.
- [20] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH PHILIP G, et al. Laboratory simulation of volcano seismicity[J]. Science, 2008, 322: 249 - 252.
- [21] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.(ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.(in Chinese))

花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制

作者: [苗金丽](#), [何满潮](#), [李德建](#), [曾凡江](#), [张茜](#), [MIAO Jinli](#), [HE Manchao](#), [LI Dejian](#),
[ZENG Fanjiang](#), [ZHANG Xi](#)

作者单位: [苗金丽, 何满潮, 李德建, 曾凡江, MIAO Jinli, HE Manchao, LI Dejian, ZENG Fanjiang \(中国矿业大学, 力学与建筑工程学院, 北京, 100083; 中国矿业大学, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京, 100083\)](#), [张茜, ZHANG Xi \(中国矿业大学, 力学与建筑工程学院, 北京, 100083\)](#)

刊名: [岩石力学与工程学报](#) **ISTIC EI PKU**

英文刊名: [CHINESE JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND ENGINEERING](#)

年, 卷(期): 2009, 28(8)

引用次数: 0次

参考文献(21条)

1. [SIMON R Analysis of fault-slip mechanisms in hard rock mining](#) 1999
2. [MITRI H S Numerical modeling of mining-induced energy in rock burst problems](#) 1996
3. [谭以安 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程\[期刊论文\]-电子显微学报](#) 1989(02)
4. [张梅英, 李廷芥, 尚嘉兰 岩爆形成机制的细观力学实验分析](#) 1997(03)
5. [冯涛, 谢学斌, 潘长良 岩爆岩石断裂机理的电镜扫描分析](#) 1999(01)
6. [潘长良, 祝方才, 曹平 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征\[期刊论文\]-中南大学学报\(自然科学版\)](#) 2001(04)
7. [逢焕东, 张兴民, 姜福兴 岩石类材料声发射事件的波谱分析\[期刊论文\]-煤炭学报](#) 2004(05)
8. [朱波, 蔡珣, 王成国 声发射特性与材料断裂韧性相关性研究\[期刊论文\]-物理学报](#) 2003(08)
9. [CAI M, MORIOKA H, KAISER P K Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data](#) 2007(04)
10. [杨键, 王连俊 岩爆机制声发射试验研究\[期刊论文\]-岩石力学与工程学报](#) 2005(20)
11. [HARDY H R Applications of acoustic emission techniques to rock and rock structures: a state-of-the-art review](#) 1981
12. [CAI M, KAISER P K, MORIOKA H FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations](#) 2007(04)
13. [杨明伟 声发射检测](#) 2005
14. [SHIOTANI T, OHTSU M, IKEDA K Detection and evaluation of AE waves due to rock](#) 2001(05)
15. [CHRISTIAN U G, MASAYASU O Acoustic emission testing](#) 2008
16. [葛哲学, 陈仲生 MATLAB时频分析技术及其应用](#) 2006
17. [RAMSEY J M, CHESTER F M Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture](#) 2004
18. [CHANG S H, LEE C I Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission](#) 2004(04)
19. [LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSENKO V Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite](#) 1991
20. [BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH PHILIP G Laboratory simulation of volcano seismicity](#) 2008
21. [钟群鹏, 赵子华 断口学](#) 2005

相似文献(10条)

1. 期刊论文 李振,王兰生 二郎山隧道岩爆岩石力学试验研究 -公路2000,“(12)

试验研究表明,二郎山隧道岩石(体)只有在岩爆倾向性指数 W_{et} 和高地应力这两个内、外因条件均满足要求时才有可能发生岩爆活动,单轴压缩试验结果则表明,发生岩爆的岩石峰值后区变形阶段均出现了非稳定的II型破坏,此为岩爆预测提供了重要的科学依据。

2. 期刊论文 何满潮,苗金丽,李德建,王春光,HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, WANG Chunguang 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究 -岩石力学与工程学报2007, 26(5)

利用自行设计的深部岩爆过程实验系统,对深部高应力条件下的花岗岩岩爆过程进行实验研究。岩爆实验过程可模拟实际工程的开挖条件:对加载至三向不同应力状态下的板状花岗岩试样,快速卸载一个方向的水平应力,保持其他两向应力不变或保持其中一向应力不变增加另外一向应力。实验过程中采集3个方向应力随时间的变化数据,获得花岗岩岩爆全过程应力曲线。根据实验结果,将花岗岩岩爆全过程分为平静期、小颗粒弹射、片状剥离随着颗粒混合弹射及全面崩塌4个阶段;将花岗岩岩爆的破坏形式分为颗粒弹射破坏、片状劈裂破坏和块状崩落破坏;分析发生岩爆后花岗岩试样的微观结构破坏特征;根据卸载后发生岩爆的最大主应力与岩石单轴抗压强度的比值对岩爆强度进行分类;根据卸载后至发生岩爆现象的时间,将岩爆分为滞后岩爆、标准岩爆和瞬时岩爆,并对花岗岩岩爆发生机制进行初步探讨。

3. 期刊论文 徐林生,王兰生 岩爆形成机理研究 -重庆大学学报(自然科学版)2001, 24(2)

岩爆是高应力区地下工程洞室开挖施工中常见的一类动力失稳地质灾害现象。作者根据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,详细地描述了岩爆破坏的几何形态特征,并通过岩爆岩石断口扫描电镜分析和岩爆岩石力学测试等研究,总结出岩爆形成的力学机制主要有压致拉裂、压致剪切拉裂、弯曲鼓折(胀屈)等3种基本类型。

4. 会议论文 任鹏 牦牛山隧道岩爆的机理分析 2006

本文根据对雅砻江锦屏一、二级水电站对外专用公路牦牛山隧道中的岩爆实例调研,通过现场记录及室内岩石力学试验研究,归纳了岩爆的力学条件,并简要分析了牦牛山隧道岩爆的形成条件和影响因素、岩爆的破坏形式及其破坏过程,得出了牦牛山隧道岩爆的产生机理,对今后的预测及防治岩爆都有重要意义。

5. 期刊论文 梁志勇,刘汉超,石豫川,单治钢 岩爆预测的概率模型 -岩石力学与工程学报2004, 23(18)

基于岩石单轴抗压破坏特征和强度概率分布规律,首次引入岩爆烈度是岩石概率破坏表现的观点,建立岩爆烈度与岩石单轴压缩强度概率密度函数的对应关系,进而确定不同应力强度比条件下各级岩爆烈度发生概率的计算式。该预测模型能够反映洞室岩爆发生的基本规律,并可以预测不同应力条件下的各级岩爆的发生概率。工程实例分析表明该预测模型是有效的。

6. 期刊论文 徐则民,黄润秋,罗杏春,李睿,孙静怡 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析 -岩石力学与工程学报2003, 22(8)

对围岩切应力与单轴抗压强度的比值、岩爆事件的空间分布、TBM掘进隧道的围岩稳定及超深井并壁稳定等问题的分析表明,静荷载理论在岩爆研究中的局限性是明显的。对于钻爆法开挖的硬岩隧道,岩爆应该是处于非均匀应力状态的围岩在爆炸加载波、卸载应力波及岩爆应力波多次扰动的作用下,裂纹发生大规模瞬时动力扩展的结果,这可以概括为岩爆的岩石动力学机理。卸载扰动在已开挖围岩表面附近将产生P波、S波和Rayleigh波,对围岩扰动最大的是P波和Rayleigh波。P波和Rayleigh波的性质、分布及衰减规律可以较好地解释地应力量级对岩爆的控制及岩爆事件的空间分布等。

7. 期刊论文 汪波,何川,吴德兴,周卫滨, WANG Bo, HE Chuan, WU Dexing, ZHOU Weibin 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究 -岩石力学与工程学报2007, 26(4)

从岩峰隧道的构造应力场特征入手,结合现场开挖后岩爆实际发生状况,在前期研究资料的基础上,利用有限元计算分析,模拟现场实际施工步骤的同时不断改变模型边界上的构造应力来拟合实际岩爆区,以最接近实际破坏范围的计算结果界定区段构造应力值,据此对隧道各区段的构造应力进行修正。运用修正后的构造应力计算得出的理论值与现场实测值进行比较后认为,修正后的构造应力值基本符合正常规律。同时利用修正后的地应力场对后续未开挖段的岩爆状况进行重新预测,并通过与现场实际开挖后岩爆状况进行比较证实二者较为相近,从而证实文中分析在岩爆预测分析中的可行性、合理性。

8. 期刊论文 许博,谢和平,涂扬举, XU Bo, XIE Heping, TU Yangju 瀑布沟水电站地下厂房开挖过程中岩爆应力状态的数值模拟 -岩石力学与工程学报2007, 26(z1)

瀑布沟水电站地下厂房赋存于复杂的地质环境中,厂房开挖过程中岩爆活动频繁。为分析围岩应力对岩爆活动的影响,研究初始地应力理论和计算方法,对厂房区域的地应力实测值进行线性回归,并在ANSYS中实现初始地应力的加载,得到与实际勘测结果相接近的初始地应力场。在此基础上,对地下厂房的开挖过程进行三维有限元数值模拟,根据岩爆判别准则对岩爆危险区域进行预测,并给出危险等级分类。岩爆模拟结果和现场监测结果基本吻合。研究结果表明,瀑布沟水电站地下厂房围岩区域的构造应力显著,且具有较强的方向性。地下厂房围岩整体上稳定,拱脚、洞室交口处围岩容易发生高等级岩爆。

9. 期刊论文 陈卫忠,吕森刚,郭小红,乔春江, CHEN Weizhong, LU Senpeng, GUO Xiaohong, QIAO Chunjiang 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究 -岩石力学与工程学报2009, 28(8)

岩爆是高应力区地下工程开挖卸荷产生的地质灾害现象。按照地下洞室开挖过程中围岩的实际受力状态,开展脆性花岗岩常规三轴、不同控制方式、不同卸围压速率条件下峰前、峰后卸围压试验,研究岩石破坏的全过程,从能量的原理探讨岩石破坏过程能量积聚-释放的全过程,研究岩石的变形破坏特征、能量集聚-耗散-释放特征和基于能量原理的岩爆判据。试验结果表明:无论是峰前还是峰后卸围压,岩样都表现脆性破坏的特征,峰前卸围压时岩样破坏表现出的脆性比峰后卸围压更为强烈;且无论是加载还是不同控制方式卸围压条件下,岩石在破坏前所能够储存的最大应变能受围压和卸围压速率的控制。从能量的观点和工程应用的角度出发,提出一种新的能量判别指标:岩体实际储存能量与极限能量之比为 U/U_0 ,该指标真实合理地反映地下工程开挖卸围压过程中围岩的能量变化过程,围岩能量的积聚程度以及岩爆的发生程度,通过数值仿真计算可以更合理地定量预测高应力下地下工程开挖过程中岩爆发生的强度和位置。

10. 会议论文 肖建华 岩爆的几何力学描述 2006

随着平均开采深度和水平开采范围的增大,岩爆逐步地成为矿井地质灾害的主要起因。运用理性力学的理论,本文用变形运动方程从理论上探讨岩爆的变形力学机制。研究揭示,动态的非对称变形和静态的对称性变形间的矛盾演化是岩石变形失稳前的力学机制。本研究表明:岩爆是由不可逆的内禀局部转动产生的,它可用局部整旋角参数和转动方位表示,当出现多次临界加载时,这种不可逆的内禀局部转动会增大;当局部整旋角参数增大到临界值时,将在转动方位方向出现破裂或岩爆。

