

正长花岗岩破坏过程声发射特征试验研究

刘玉春¹, 赵扬锋², 王进铭², 樊艺²

(1. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 利用16个通道全波形声发射监测系统对粗晶正长花岗岩开展了单轴压缩声发射试验,得到岩石变形全过程应力和声发射信号波形,计算获得声发射事件数和声发射能量,并对声发射事件进行定位。结果表明:在粗晶正长花岗岩变形破坏过程中,岩石失稳破坏阶段的声发射事件率最大,裂纹快速扩展阶段声发射事件率次之,裂纹压实阶段和裂纹稳定扩展阶段声发射事件率基本相等,线弹性变形阶段声发射事件率最小;从线弹性变形阶段到裂纹快速扩展阶段,直至岩石失稳破坏阶段产生最大应力降时,声发射事件率快速增长,声发射信号的主频快速降低,高频成分逐步减少,主频幅值和时域幅值均快速增大,信号持续时间增长;在最大应力降时,声发射事件率达到最大值,声发射信号的主频最低,主频幅值、时域幅值和信号持续时间均达到最大值,可以认为进入了岩石失稳破坏阶段,岩石有发生破坏的危险,需采取防治措施。

关键词: 正长花岗岩; 失稳破坏; 声发射; 声发射事件率; 主频; 波形特征

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0202-07

Experiments on characteristics of syenogranite acoustic emission in the failure process

LIU Yuchun¹, ZHAO Yangfeng², WANG Jinming², FAN Yi²

(1. School of Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Uniaxial compression acoustic emission (AE) experiments were carried out on coarse-grained syenogranite using 16 channel full-wave AE monitoring system. The stress and AE signal feature in the whole process of rock deformation were obtained, based on which the events and energy of AE were calculated, and the locations of AE events were ascertained. The results show that in the process of deformation and failure of coarse-grained syenogranite, the AE event count rate was the highest during the instability failure stage, followed by the crack rapid development stage. It was basically the same at the crack compaction stage and crack stable development stage, and it was lowest at linear elastic deformation stage. From the linear elastic deformation stage to the crack rapid development stage, then to the instability failure stage when the maximum stress drop occurred, the major frequency of AE signal decreased sharply, the high frequency of AE signal decreased gradually, whereas the AE event count rate, the amplitude of major frequency and time domain increased rapidly, so did the signal duration. The AE event count rate reached the maximum value when the maximum stress drop occurred, so did the amplitude of major frequency, time domain amplitude and signal duration, whereas the major frequency of AE signal reached the lowest. It indicates that the rock had entered the stage of instability failure by then, and the rock was in the fringe of failure, so preventive measures should be considered.

Key words: syenogranite; instability failure; acoustic emission (AE); AE event count rate; major frequency; signal feature

收稿日期: 2021-02-19; 修回日期: 2021-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074142、51974150); 辽宁省高校创新人才支持计划项目(LR2019032)

作者简介: 刘玉春(1977-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 讲师, 主要从事矿山灾害力学的研究工作。

通讯作者: 赵扬锋(1979-), 男, 河南三门峡人, 博士, 教授, 主要从事矿山灾害力学的研究工作。

1 研究背景

随着采深的增加,岩爆^[1]在硬岩矿井和地下水电站泵房等工程中发生的频次快速增加,严重危害了生产安全,而在一些硬岩矿井和地下水电站泵房等工程中的岩石主要为正长花岗岩。研究正长花岗岩破裂过程中声发射参数与力学特征以及岩石裂缝的产生、扩展和演变之间的关系,有助于认识岩石破坏机制,进一步为预测正长花岗岩破裂乃至岩爆提供有效依据^[2-3]。因此,探究正长花岗岩的变形破裂过程及其声发射特征对于硬岩矿井工程中岩爆的预测具有重要意义。

在花岗岩加载声发射试验方面,纪洪广等^[3-4]研究了常规三轴压缩下和围压效应下二长花岗岩声发射特征;张志镇等^[5-6]研究了温度对花岗岩冲击倾向性、微细观机制和声发射的影响;曾鹏等^[7]研究了不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前的特征信息,探究了岩石 Kaiser 点信号频谱中的主频特征及变化规律;何满潮等^[1]研究了瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩的主频特征演化规律;李安强等^[8]研究了花岗岩单轴压缩全过程声发射的时空演化行为及破坏前兆;张艳博等^[9-10]研究了花岗岩巷道岩爆声发射信号的主频特性及破裂特征,获取了岩爆全过程的波形信号,为优选声发射监测频段提供了方法和依据;赵扬锋等^[11-13]对单轴压缩下完整花岗岩、含断层带花岗岩和预制裂纹花岗岩变形破裂过程声发射信号的变化规律进行了研究;孙雪等^[14]研究了北山花岗岩在不同围压下的力学特征和损伤演化机制,揭示了北山花岗岩三轴压缩下的声发射特征;赵菲等^[15]研究了不同高度花岗岩岩爆试验的声发射特征,发现花岗岩岩爆试验过程声发射主频值总体呈“从低频向高频再向低频”转变迁移的趋势,频谱特征中的高频部分受试件高度的影响而有所不同;张艳博等^[16]探索了岩石破裂过程不同模式声发射波形信息的特征规律;陈炳瑞等^[17]研究了西南地区某深埋隧道花岗岩的破坏机制与前兆特征;刘鹏飞等^[18]研究了不同卸围压速率下花岗岩的力学性质及声发射特征;刘亮等^[19]对北山花岗岩试样开展了静态加载和循环加载两种加载方式的人字形切槽巴西圆盘试验,获得了不同加载方式下北山花岗岩的声发射特征;王浩^[20]对采动应力路径下岩石变形破坏的声发射进行了研究,获得了红砂岩在单、三轴压缩和不同应力路径下的时空演化规律;裴向军等^[21]在加卸载条件下对大光包滑坡含脉

状缺陷结构岩石声发射响应特征进行了研究。

综上所述,在岩石声发射信号研究方面缺乏对正长花岗岩变形破坏过程声发射信号特征的探索,因此本文对正长花岗岩单轴压缩下变形破坏过程的声发射信号进行全程实时监测,对声发射信号进行时域和频域分析,并对声发射事件进行定位,获得了正长花岗岩变形破坏过程的声发射信号特征。

2 试验系统与试样

正长花岗岩破坏过程声发射特征试验测试系统如图1所示,该试验系统包括加载系统和声发射数据采集系统。

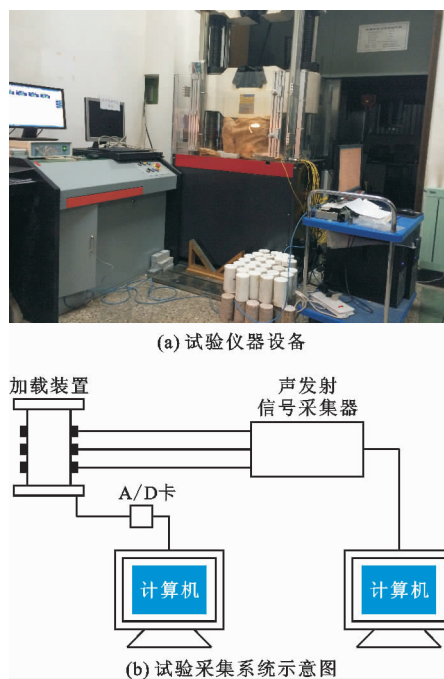


图1 试验测试系统

加载系统采用中国地震局地质研究所的 CTM 微机伺服控制液压万能试验机 WAW - D1000。声发射数据采集系统和声发射传感器由中国地震局地质研究所研制,该系统采样频率为 3 MHz,可实现连续采集、声发射自动定位等功能。试验时所有监测设备时间调为一致,并同时开始记录,声发射数据采集器和试验机通过网络取得时间同步。

图2为试验中16个声发射传感器在试样圆柱面布置位置的展开图。

16个声发射传感器(图2中1#~16#为声发射传感器编号,声发射传感器编号与采集通道编号一致)均匀分布于样品表面,涂抹凡士林耦合剂粘贴于样品表面,保证传感器与试件耦合完好。图2中每列声发射传感器至试样底面的距离分别为20、

55、90、125 mm。

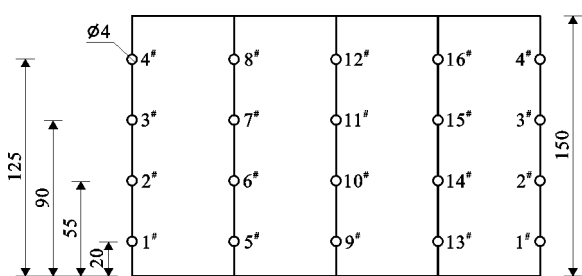


图2 试验中声发射传感器布置示意图(单位:mm)

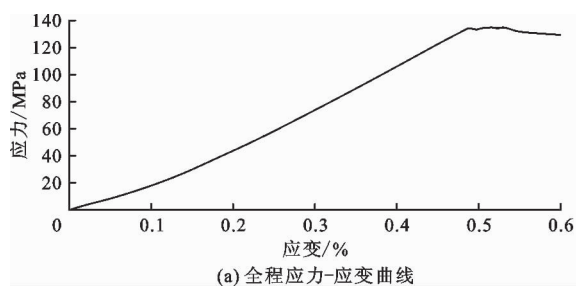
试验所用岩石为北京房山粗晶正长花岗岩,风化面呈浅肉红色,新鲜面为肉红色,晶粒主要为正长石,主要矿物为正长石(49%)、石英(31%)、斜长石(18%)及少量黑云母等,呈斑状结构和粗粒结构,正长花岗岩试样密度为 2.8 g/cm^3 ,单轴抗压强度为130~160 MPa,所有岩样均取自同一块正长花岗岩母体,共6块,处于自然干燥状态,通过切割机获得尺寸为 $\Phi 75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的试样,加工后的试样如图3所示。



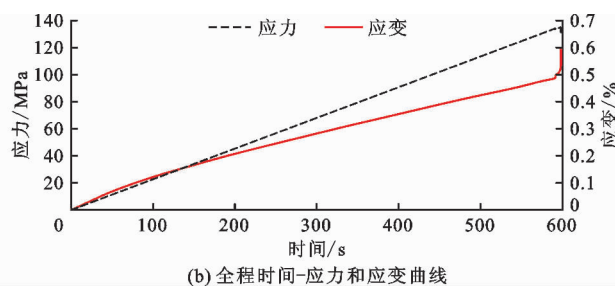
图3 正长花岗岩试样实物图

3 试验结果与分析

本次试验共对6组完整花岗岩进行监测研究,

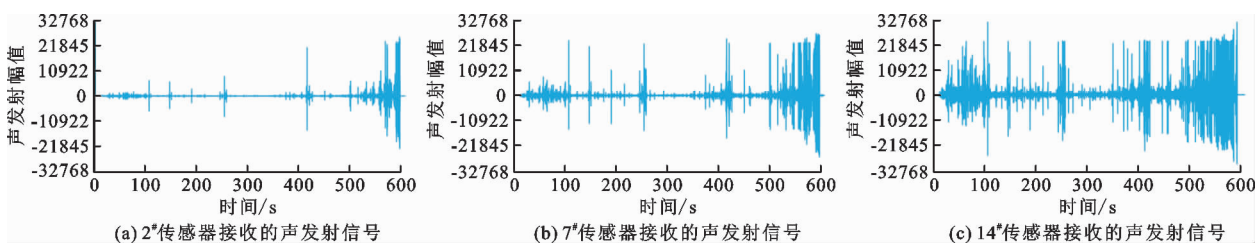


(a) 全程应力-应变曲线



(b) 全程时间-应力和应变曲线

图4 单轴压缩下正长花岗岩变形破裂全程应力-应变曲线及全程时间-应力和应变曲线



(a) 2#传感器接收的声发射信号

(b) 7#传感器接收的声发射信号

(c) 14#传感器接收的声发射信号

图5 单轴压缩下正长花岗岩变形破裂全程时间-声发射全波形信号(2#、7#、14#传感器)

试验机采用力控制方式加载,加载速率为 1 kN/s ,选取1组具有代表性的试样结果进行分析。试验数据处理中涉及较大工作量,声发射信号数据量可达60 G。进行数据处理时,通过各自监测设备的系统时间来对齐数据处理的时间点,各系统时间误差可控制在 0.001 s 内,满足时间精度要求,可以通过以时间为横坐标进行对比分析。

3.1 声发射特征参数分析

图4为单轴压缩下正长花岗岩变形破裂全程应力-应变曲线及全程时间-应力和应变曲线。图5为2#、7#、14#传感器的声发射全波形信号,其中声发射信号幅值为无量纲相对值,数值范围为 ± 32768 。图6为单轴压缩下正长花岗岩变形破裂过程应力曲线和声发射累计能量曲线(定位计算后每个声发射事件的能量)。图7为单轴压缩下正长花岗岩变形破裂过程应力曲线和声发射能量图。图8为单轴压缩下正长花岗岩变形破裂全程应力曲线和声发射事件数曲线图。

由图4~8可见,正长花岗岩试样的峰值应力为134.9 MPa(图4),试样在变形破裂前应力-应变曲线斜率变化不明显,全程难以划分为不同的阶段。而根据正长花岗岩试样变形破裂过程的时间-声发射能量图和时间-声发射事件数曲线,可以找到4个关键拐点A、B、C、D,4个关键拐点所对应的岩石应力分别为试样抗压强度的16.5%、67.5%、84.9%、99.0%,对应的时间分别为97.49、400.50、504.80和590.15 s,根据这4个关键拐点可以较好地划分试样变形破裂过程的各个阶段(图7(a)、8)。

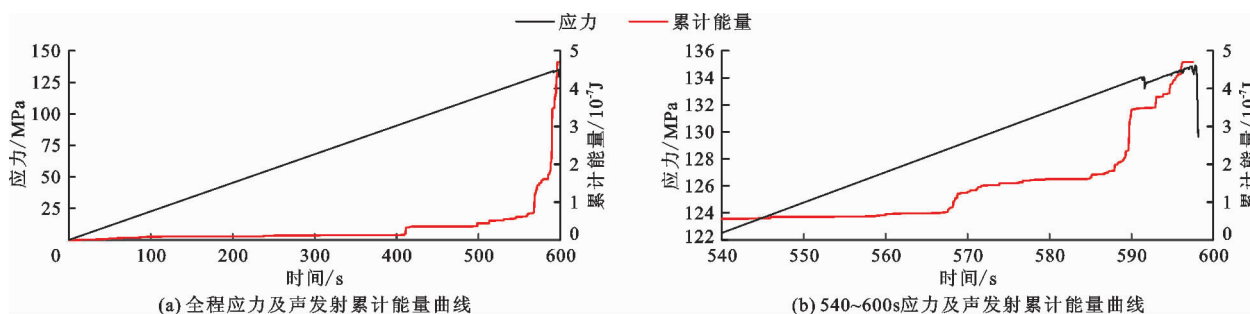


图6 单轴压缩下正长花岗岩变形破裂过程应力曲线和声发射累计能量曲线

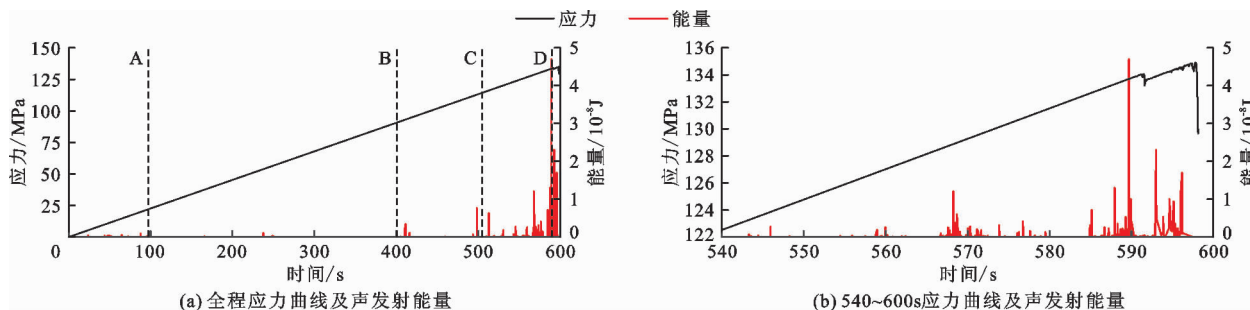


图7 单轴压缩下正长花岗岩变形破裂过程应力曲线和声发射能量

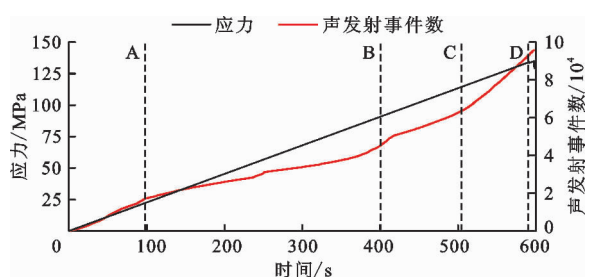


图8 单轴压缩下正长花岗岩变形破裂全程应力曲线和声发射事件数曲线

对图7(a)、8综合分析如下:从初始加载至A点为试样的裂纹压密阶段,A点试样应力达到22.3 MPa,该阶段试样内部原有微裂纹、孔隙被不断压缩,岩石内部的微裂纹压密弹性能释放产生声发射信号,此阶段各通道的声发射信号较多,声发射事件数也快速增加,声发射事件数达到17 052次,占声发射事件总量的17.8%,声发射事件率为174.91次/s,但各通道的声发射信号幅值及能量均较小,声发射能量基本都在 1×10^{-10} J以下。A点至B点为试样的线弹性变形阶段,B点试样应力达到91.1 MPa,此阶段试样中的微裂隙、空洞和弱节理面进一步被压缩,但不再发展。该阶段声发射事件数为28 294次,占声发射事件总量的29.5%,声发射事件率为93.37次/s,该阶段声发射能量和声发射事件率最小。B点至C点为试样的裂纹稳定扩展阶段,C点试样应力达到114.5 MPa,岩石内部裂纹开始扩展,该阶段声发射事件数比前一阶段增速加快,也有较大能量的声发射事件产

生,此阶段声发射事件数为18 298次,占声发射事件总量的19.1%,声发射事件率为175.44次/s,是线弹性变形阶段声发射事件率的1.88倍且声发射事件能量较大。C点至D点为裂纹快速扩展阶段,声发射信号密集发生,声发射事件数曲线陡升,能量也迅速增大,在578~585 s声发射能量出现一段低值期,在578 s时试样的应力为131.0 MPa,达到了试样抗压强度的97%,随后声发射能量快速增加,在试样临近破坏时声发射事件的能量达到最大值。在此阶段岩石内部微裂纹扩展、演化、汇合,宏观裂纹逐渐形成、贯穿、能量释放,在590.15 s时试样应力达到133.8 MPa,达到了试样抗压强度的99%。此阶段的声发射事件数最多,达到29 039次,占声发射事件总量的30.3%,声发射事件率为340.24次/s,裂纹快速扩展阶段声发射事件率是裂纹稳定扩展阶段声发射事件率的1.94倍,声发射能量显著增大。从D点继续加载直至岩石破坏为岩石失稳破坏阶段,在此阶段试样发生多次应力降,试样变形也以岩石裂隙的错位滑移为主。此阶段声发射事件数为3 087次,占声发射事件总量的3.2%,声发射事件率为415.98次/s,在各阶段中最大,在该阶段初期的591.562 s时有一次最大的应力降发生,应力降达到了0.8 MPa,而在590.201 s时产生了最大能量的声发射信号,通过定位程序计算声发射源的坐标为(-0.43, 110.15, -30.43),能量为 4.7×10^{-8} J,同时在590.201 s时14#发射传感器崩落,经观察是由于该处表面岩石发生劈裂所致;在

593.016 和 596.185 s 也产生了高能量的声发射信号,通过定位程序计算声发射源的坐标分别为(-6.04, 52.46, -7.18)和(-6.52, 125.04, 20.52),能量分别为 2.3×10^{-8} 和 1.7×10^{-8} J,随后岩石完全破坏,发生岩爆现象并伴随剧烈声响。

在岩石变形破坏过程中,岩石失稳破坏阶段的声发射事件率最大,达到 415.98 次/s,裂纹快速扩展阶段声发射事件率次之,为 340.24 次/s,裂纹压密阶段和裂纹稳定扩展阶段声发射事件率基本相等,分别为 174.91 和 175.44 次/s,线弹性变形阶段声发射事件率最小,仅为 93.37 次/s。显然,声发射事件率和声发射能量并结合应力可作为岩石加载过程 5 个发展阶段的判断因素,也是判断正长花岗岩破坏前兆的重要指标,从岩石的线弹性变形至失稳破坏的各阶段的转换过程中,声发射事件率都会快速增长,当声发射事件率达到最大值、声发射能量也突然增大时,可认为进入了岩石失稳破坏阶段,岩石有发生破坏的危险,需对其采取防治措施。

从正长花岗岩试样破裂进程的各阶段来看,在初始裂纹压密阶段,声发射事件数快速上升,声发射能量相对较低;在线弹性变形阶段,声发射事件率相对较小,声发射能量也相对较低;进入裂纹稳定扩展阶段后,岩石内部裂纹开始发展,此阶段声发射事件数虽然与岩石裂纹压密阶段的声发射事件数相差不

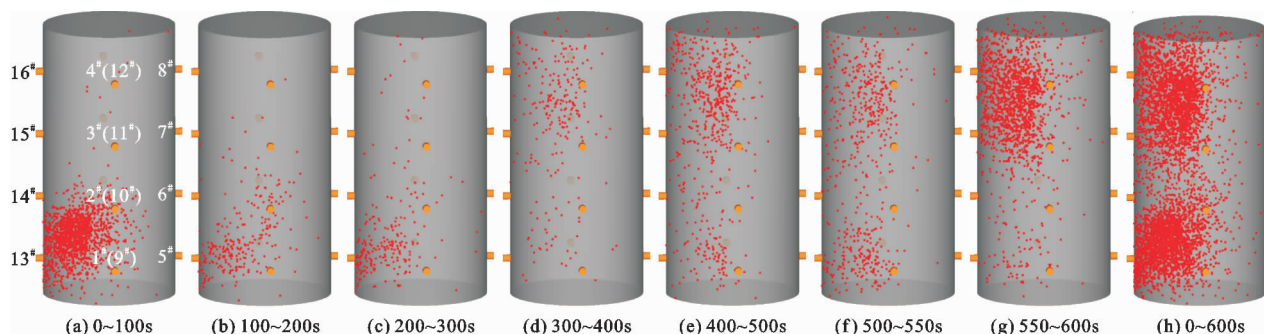
大,但声发射能量却大于岩石裂纹压密阶段;进入裂纹快速扩展阶段和岩石失稳破坏阶段后,声发射事件数急剧增多,声发射能量也急剧增大,但在正长花岗岩试样应力达到抗压强度的 97% 时,声发射能量突然降低,出现一段声发射“平静期”,随后声发射事件数和声发射能量快速增大,在临近破坏时出现声发射事件能量峰值。

3.2 声发射定位

图 9 为单轴压缩下正长花岗岩试样破坏图;图 10 为单轴压缩下正长花岗岩试样变形破裂过程中不同时间段的声发射监测定位结果(3D 视图)。



图 9 单轴压缩下正长花岗岩破坏图



注:声发射传感器编号(从下到上)为左 13[#]、14[#]、15[#]、16[#];前 1[#]、2[#]、3[#]、4[#];右 5[#]、6[#]、7[#]、8[#];后 9[#]、10[#]、11[#]、12[#]

图 10 单轴压缩下正长花岗岩试样变形破裂过程中不同时间段的声发射监测定位结果(3D 视图)

试验中 6 块正长花岗岩试样的破坏形式均与图 9 中所示的破坏形式相似,当破坏发生时,试样突然爆裂,声音大而沉闷,岩样内部完整性好,在加载过程中主要表现为拉剪破坏,试样达到峰值应力后立即整体破坏,这些现象与现场发生的即时性岩爆特征基本一致^[22]。由图 10 可看出,正长花岗岩试样在变形破裂过程中的声发射事件主要集中在试样的左侧,试样也是在左侧发生破裂,在加载初期即裂纹压密阶段声发射事件较多,但能量较小,且声发射事

件主要集中在试样的左下方;随着荷载的增加,试样进入线弹性变形阶段,在此阶段声发射事件较少,声发射事件源从试样的左下方逐渐向左上方移动,但能量增加不大,试样右侧声发射事件数远远小于试样左侧;在裂纹稳定扩展阶段,声发射事件数增多,能量大的声发射事件主要集中在试样的左上方;在裂纹快速扩展阶段,声发射事件数急剧增多,主要集中在试样的左上方,声发射的能量也显著增大,在接近岩石失稳破坏阶段时,声发射事件增加的速率和

声发射能量均达到最大值;在岩石失稳破坏阶段,声发射事件数和能量均减小,但却大于其他阶段。

3.3 声发射波形和频谱特征

图 11 为在正长花岗岩试样变形破裂过程各阶段选取的 1[#]、2[#]、3[#]通道典型声发射事件的波形和频谱

谱图,在声发射波形图中,声发射信号最大幅值为 $\pm 32\ 768$,对声发射幅值进行了归一化处理,为了清晰地辨析出 1[#]、2[#]、3[#]通道声发射波形,对 1[#]和 3[#]通道的波形进行了上下平移,而在声发射频谱图中采用原始数据对其进行了处理。

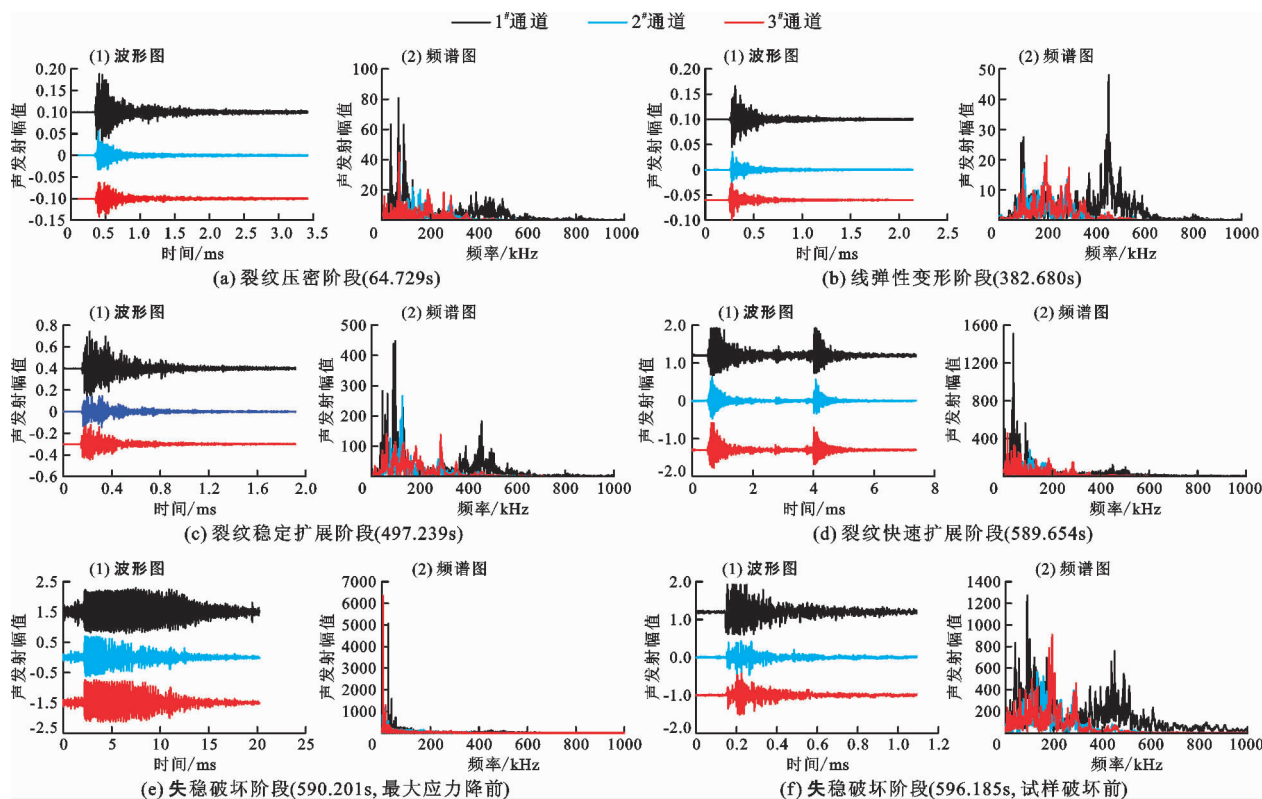


图 11 正长花岗岩试样变形破裂过程各阶段典型声发射事件的波形和频谱图(1[#]、2[#]、3[#]通道)

以 1[#]通道声发射信号为例对图 11 进行分析,在裂纹压密阶段(图 11(a)),声发射信号在时域的幅值为 0.088 38,信号的持续时间为 1.780 0 ms,主频为 67.02 kHz(幅值为 80.77),根据幅值大于或等于主频值对应幅值 80% 的频率为次主频判断,该信号存在次主频,次主频为 36.99 kHz(幅值为 63.47)和 89.36 kHz(幅值为 63.20);在线弹性变形阶段(图 11(b)),声发射信号在时域的幅值为 0.065 92,信号的持续时间为 1.149 0 ms,该信号仅存在主频,主频为 451.20 kHz(幅值为 48.04);在裂纹稳定扩展阶段(图 11(c)),声发射信号在时域的幅值为 0.340 80,信号的持续时间为 1.769 7 ms,主频为 98.88 kHz(幅值为 448.20);在裂纹快速扩展阶段(图 11(d)),波形图显示,在较短时间内出现了两个声发射事件,其在时域的幅值分别为 0.797 70 和 0.728 00,信号的持续时间分别为 2.107 7 和 1.905 0 ms,主频为 39.28 kHz(幅值为 1 510);在岩石失稳破坏阶段,图 11(e)为花岗岩试样变形破裂

过程最大能量、最大震级的声发射信号,该声发射信号在岩石最大应力降发生前产生,声发射信号在时域的幅值为 0.796 90,信号的持续时间为 18.195 0 ms,主频为 3.80 kHz(幅值为 6 061),次主频为 26.09 kHz(幅值为 5 066),图 11(f)为岩石破坏前的一个较大声发射事件,该信号在时域的幅值为 0.723 10,信号的持续时间为 1.009 0 ms,主频为 90.09 kHz(幅值为 1 275),次主频为 40.28 kHz(幅值为 835.1)。

将上述岩样变形破裂过程各阶段的 1[#]通道声发射时域频域参数进行归纳,列于表 1。

综上所述并结合表 1 可知,在裂纹压密阶段,岩石受压内部孔隙和原生裂隙闭合、压密,该阶段典型声发射事件主频较低,但主频幅值、时域幅值、信号持续时间均略大于线弹性变形阶段的主频幅值、时域幅值、信号持续时间;在线弹性变形阶段和裂纹稳定扩展阶段,频谱特性复杂,既有低频又有高频,频谱形状呈现多峰性质,但在线弹性变形阶段主频为

451.20 kHz,高频成分较多,在裂纹稳定扩展阶段主频在低频,高频部分含量大幅减少;在裂纹快速扩展阶段直到最大应力降时,高频成分进一步降低,且声发射信号频域主要集中在主频附近;从线弹性变形阶段到裂纹快速扩展阶段,直至岩石失稳破坏阶段产生最大应力降时,声发射信号的主频快速降低,高频成分逐步减少,主频幅值和时域幅值均快速增大,信号持续时间增长;在裂纹快速扩展阶段和产生最大应力降时,声发射信号时域幅值相差不大,但主频、主频幅值和信号持续时间却相差较大,在最大应力降时声发射信号的主频幅值和信号持续时间均远大于裂纹快速扩展阶段;在最大应力降时声发射信号的主频最低,仅为 3.80 kHz,高频部分含量大幅减少,主频幅值、时域幅值和信号持续时间均达到最大值,岩石发生劈裂,预示着宏观破坏即将发生。

表 1 岩样变形破裂过程各阶段 1[#]通道声发射时域频域参数

岩石变形阶段	主频/ kHz	主频 幅值	时域 幅值	信号持续 时间/ms
裂纹压密阶段	67.02	80.77	0.08838	1.7800
线弹性变形阶段	451.20	48.04	0.06592	1.1490
裂纹稳定扩展阶段	98.88	448.20	0.34080	1.7697
裂纹快速扩展阶段	39.28	1510	0.79770	2.1077
岩石失稳破坏阶段 (最大应力降时)	3.80	6061	0.79690	18.1950
岩石失稳破坏阶段 (岩石破坏前)	90.09	1275	0.72310	1.0090

4 结 论

(1)声发射事件率可作为判断粗晶正长花岗岩加载过程 5 个阶段的重要因素,在粗晶正长花岗岩变形破坏过程中,岩石失稳破坏阶段的声发射事件率最大,裂纹快速扩展阶段声发射事件率次之,裂纹压密阶段和裂纹稳定扩展阶段声发射事件率基本相等,线弹性变形阶段声发射事件率最小。

(2)声发射事件率可作为判断正长花岗岩破坏前兆的一个重要指标,从线弹性变形到岩石失稳破坏的各阶段转换过程中,声发射事件率均会快速增大,当声发射事件率达到最大值、声发射能量也突然增大时,可以认为进入了岩石失稳破坏阶段,岩石有发生破坏的危险,需采取防治措施。

(3)在加载初期,声发射事件主要集中在试样一侧下方;随着荷载的增加,声发射事件源从试样的一侧下方逐渐向上方移动;在进入裂纹快速扩展阶

段时,声发射事件主要集中在试样一侧上方;在接近岩石失稳破坏阶段时,声发射事件增加的速率和声发射能量均达到最大值;在岩石失稳破坏阶段,试样达到峰值应力后立即整体破坏。

(4)从线弹性变形阶段到裂纹快速扩展阶段,直至岩石失稳破坏阶段产生最大应力降时,声发射信号的主频快速降低,高频成分逐步减少,主频幅值和时域幅值均快速增大,信号持续时间增长。最大应力降时声发射信号的主频最低,主频幅值、时域幅值和信号持续时间均达到最大值,岩石发生劈裂,预示着宏观破坏即将发生。

(5)声发射事件率结合声发射信号的主频、主频幅值、时域幅值和信号持续时间可作为判断粗晶正长花岗岩变形破坏的前兆信息。

参考文献:

- [1] 何满潮,赵 菲,张 昱,等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学,2015,36(1):1-8+33.
- [2] 张 茹,谢和平,刘建锋,等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2584-2588.
- [3] 纪洪广,卢 翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(4):694-702.
- [4] 纪洪广,张月征,金 延,等. 二长花岗岩三轴压缩下声发射特征围压效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1162-1168.
- [5] 张志镇,高 峰,刘治军. 温度影响下花岗岩冲击倾向及其微细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1591-1602.
- [6] 张志镇,高 峰,徐小丽. 花岗岩单轴压缩的声发射特征及热力耦合模型[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1):70-74.
- [7] 曾 鹏,纪洪广,孙利辉,等. 不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前兆特征信息试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(7):1333-1340.
- [8] 李安强,张 茹,艾 婷,等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(S2):306-311.
- [9] 张艳博,于光远,田宝柱,等. 花岗岩巷道岩爆声发射信号主频特性试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(5):1258-1266.
- [10] 张艳博,杨 震,姚旭龙,等. 花岗岩巷道岩爆声发射信号及破裂特征实验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(1):95-103.
- [11] 赵扬锋,刘力强,潘一山,等. 岩石变形破裂微震、电荷感应、自电位和声发射实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(1):107-123. (下转第 214 页)

- 效果评价[J]. 江苏水利, 2013(12): 21-23.
- [5] 王力波, 岑威钧, 郑长海. 土工膜修复浆砌石重力坝渗漏的效果分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(6): 107-111.
- [6] 雷进生, 程爽, 李美云, 等. 基于非均质地层模型的围堰注浆防渗数值计算[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 88-94.
- [7] 汪海洋, 谢新生. 土石坝渗流安全的有限元法应用研究[J]. 吉林水利, 2008(12): 1-4.
- [8] 李维朝, 梁铎, 蔡红, 等. 堤坝帷幕灌浆效果评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(3): 214-218.
- [9] 李少明. 防渗墙质量缺陷对土石坝渗流控制的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 174-177+169.
- [10] 张博, 李伟. 混凝土面板堆石坝三维渗流场特性分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 223-226.
- [11] 冷爱国. 垂直防渗在堤防防渗加固中的比较应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [12] 杨松. 泰山抽水蓄能电站上库帷幕灌浆时效性分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [13] 朱殿芳, 陈建康, 张立勇. 下斜墙坝筑坝材料渗透特性对坝坡稳定的影响[J]. 四川水利, 2001(6): 14-16.
- [14] 杨敏. 某土石坝渗流稳定有限元分析研究[J]. 陕西水利, 2021(6): 31-33.
- [15] 朱积军, 简鸿福, 吕辉. 反滤土工布淤堵对土坝渗流稳定影响分析[J]. 水利规划与设计, 2019(6): 99-101.
- [16] 徐升, 胡强, 王娇, 等. 某水库排水棱体工作性态及淤堵原因分析[J]. 水利水电快报, 2018, 39(9): 48-50.
- [17] 党发宁, 田红梅, 王振华. 基于平衡防渗原理的土石坝防渗帷幕优化设计[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 44-48+64.
- [18] 曾海艳, 张建海, 王震洲, 等. 某堆石坝帷幕缺陷处理后渗流稳定敏感性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6): 118-122.
- [19] 李志平, 彭振斌, 何忠明, 等. 透镜体影响尾矿坝安全性的规律及其简化方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1326-1334.
- [20] 袁维, 白冰, 李小春, 等. 透镜体对尾矿坝安全性影响的参数敏感性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1174-1183.
- [21] 尹光志, 陈鹏, 魏作安, 等. 尾矿坝内透镜体对浸润线影响的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(3): 64-67.
- [22] 霍思远, 靳孟贵, 梁杏. 包气带弱渗透性黏土透镜体对降雨入渗补给影响的数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1579-1587.

(上接第 208 页)

- [12] 赵扬锋, 刘力强, 潘一山. 单轴压缩下含断层带花岗岩声发射、微震和电荷感应实验[J]. 地震地质, 2017, 39(5): 964-980.
- [13] 赵扬锋, 张超, 刘力强, 等. 预制裂纹花岗岩单轴压缩全过程声发射特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 44-49+138.
- [14] 孙雪, 李二兵, 段建立, 等. 北山花岗岩三轴压缩下声发射特征及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 4234-4244.
- [15] 赵菲, 王洪建, 何满潮, 等. 不同高度花岗岩岩爆试验的声发射特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 135-146.
- [16] 张艳博, 张行, 梁鹏, 等. 花岗岩破裂过程声发射横、纵波时频特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3554-3564.
- [17] 陈炳瑞, 魏凡博, 王睿, 等. 西南地区某深埋隧道花岗岩破坏机制与前兆特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 469-479.
- [18] 刘鹏飞, 郭佳奇, 范俊奇, 等. 不同卸围压速率下花岗岩的力学性质及声发射特征[J]. 高压物理学报, 2021, 35(1): 61-69.
- [19] 刘亮, 杜广印, 李二兵, 等. 北山花岗岩断裂力学行为及其声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3237-3244.
- [20] 王浩. 采动应力路径下岩石变形破坏的声发射研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [21] 裴向军, 朱凌, 崔圣华, 等. 加卸载条件下含缺陷岩石声发射响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2602-2611.
- [22] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433-444.