

劈裂荷载下的岩石声发射及微观破裂特性

刘希灵^{1)✉}, 刘 周¹⁾, 李夕兵¹⁾, 韩梦思¹⁾, 杨柳青²⁾

1) 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083 2) 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083

✉通信作者, E-mail: lxenglish@163.com

摘 要 通过开展花岗岩和大理岩巴西圆盘声发射试验, 结合扫描电镜进行破裂面微观形貌分析, 探讨了劈裂荷载下岩石声发射特性与微观破裂机制的关系. 结果表明: 基于 RA(上升时间与幅值的比值)和 AF(平均频率)的变化趋势, 不同裂纹模式(拉伸裂纹、剪切裂纹以及复合裂纹)的分布和破坏强度受岩石结构影响, 但岩石裂纹演化过程不受其影响. 相应地, 两种岩样破裂信号均以 400 ~ 499 kHz 为主, 100 ~ 199 kHz 的信号次之, 但不同破裂阶段的峰值频率变化趋势显著不同. 在微观形貌上, 花岗岩劈裂面的微观形貌以层叠状、台阶状及平坦状为主; 而大理岩以光滑多面体状为主. 此外, 结合频率-尺度缩放关系可推测, 400 ~ 499 kHz 的信号应主要来自钾长石、大理岩矿物颗粒内部的破裂; 100 ~ 199 kHz 的信号应主要来自石英矿物颗粒内部不连续分离以及压密阶段矿物颗粒之间的滑移.

关键词 巴西劈裂; 扫描电镜; RA 值; 频率特性; 微观形貌

分类号 TD76

Acoustic emission and micro-rupture characteristics of rocks under Brazilian splitting load

LIU Xi-ling^{1)✉}, LIU Zhou¹⁾, LI Xi-bing¹⁾, HAN Meng-si¹⁾, YANG Liu-qing²⁾

1) School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2) School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lxenglish@163.com

ABSTRACT Considering the polycrystalline and anisotropic features of rock, its mechanical failure actually involves the generation, propagation, and penetration of internal micro-cracks until an ultimate macro-fracture is achieved. The nucleation and propagation of cracks emits energy outward as elastic waves referred to as acoustic emission (AE). The close relationship between AE signals and the rock fracture mechanism has been demonstrated. Many instability and failure processes in underground engineering are induced by the effects of tensile stress on tunnels and chambers or local damage to the rock structure. Several compression experiments show that the main fracture mode of rock is tensile failure. Thus, investigations of rock AE characteristics under tensile failure and the effects of the rock fabric on crack propagation patterns are of great significance. This study assesses the signal characteristics AE and its relationship with the micro-rupture mechanisms in granite and marble under tensile stress. Herein, an MTS-322 rock mechanical test system was employed to carry out Brazilian split tests, and a scanning electron microscope was employed to carry out micro-morphological analysis of rupture surfaces. According to the trends of RA and AF, the distribution of crack modes-tensile and shear or mixed patterns in both rock types and its fracture strength depend on the rock fabric. By contrast, the evolution process of crack propagation appears to depend on the softening process. Although the rock fracture signals are mainly in the range of 400–499 kHz and 100–199 kHz, the variation trend of peak frequency shows significant differences at different failure stages. At the microtopographic level, granite mainly shows

收稿日期: 2018–11–29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600706); 中南大学研究生自由探索创新资助项目(2018zzts757)

three micro-morphologies, including laminated, stepwise, and smooth planar patterns. Marble is mostly smooth polyhedrals. The signals at 400–499 kHz may be inferred to be mainly generated by fractures in the k-feldspar and marble minerals, while those at 100–199 kHz are mainly produced by discontinuous separation among quartz mineral particles and slipping among mineral particles in the compaction stage.

KEY WORDS Brazilian splitting tests; scanning electron microscope; RA values; frequency characteristic; micro morphology

在采矿和矿山地下开采实践中,下向胶结充填法是一种常用的金属矿山采矿方法,充填顶板的稳定性至关重要,而研究表明,充填顶板的稳定性很大程度上是受张拉破坏影响^[1],而且在实际地下工程中,大多数隧道、矿井巷道及硐室由于结构本身局部损伤或整体承受较大的拉应力致使发生破坏或失稳。因此分析岩石的抗拉特性对实际工程应用具有指导意义^[2]。

岩石受力破坏是其内部微观裂纹破裂萌生、扩展和贯通,直至最终发生宏观断裂的过程,由于其多晶、各向异性特征,内部含有天然的结构面(节理、夹层等),当岩石内部或外部应力达到一定程度时,会发生矿物颗粒、结构面的滑移和分离。这些微观层面上的位错、晶体孪生、晶界面移动以及宏观层面上的矿物颗粒、结构面的滑移和分离,都会以弹性波的形式向外辐射能量,伴随其破坏过程中会产生声发射(AE)信号,其信号特征与岩石破裂机制具有密切关系^[3-5]。不同的力学响应特性,释放的AE信号理应具有显著差异,其中振铃计数、持续时间、上升时间、能量、幅值等作为AE特征参数被广泛用于揭示岩石破裂机制。然而,研究已表明^[6]岩石加载前期AE活动较低,事件率和累积能量都处于较低水平,随着载荷的增加,由于裂纹聚集、成核,甚至贯通,AE事件大量增加,接近峰值时,事件率和累积能量瞬间突升,不同岩性的岩石所表现出来的参数特征均比较相似,给岩石的破裂预测带来了困难,也无法揭示岩石内部裂纹扩展特性。基于此,Shiotani等^[7]引进了新的参数RA值(上升时间与幅值的比值),通过此参数可以衡量岩石破坏模式,高RA值对应剪切破坏,低RA值对应拉伸破坏;而在混凝土材料中,往往结合AF值(平均频率)一起衡量其破裂模式,AF值的降低说明破裂模式由拉伸模式转变为剪切模式,也可能与大裂纹张拉破坏有关^[8]。后来肖福坤等^[9]和Wang等^[10]利用RA值和AF值对砂岩在拉伸和剪切荷载下破裂模式进行了分析,均得出剪切破坏对应高RA值、低AF值;拉伸破坏对应低RA值、高AF值。与上述参数特征相比,AE频谱特性携带有岩石受力状态、结构、物理力

学性质等全部信息,更能全面地揭示岩石破坏机制及破坏前兆^[11],Bucheim^[12]指出岩石试样在剪切斜面上破坏产生的AE信号具有频谱宽的特征,而在拉伸破坏下产生的信号则具有频谱窄的特征;张艳博等^[6]在煤矸石试验中发现AE信号始终有两个主频带,在岩石破坏前主频值会发生突变。而在频谱分析中,峰值频率最为典型,更能评判岩石破裂特性^[5]。据此,Rodríguez和Celestino^[13]结合AE参数和时频特性分析对花岗岩和大理岩展开研究,进一步表明RA值能较好评判岩石裂纹扩展特性,相应的频率特性也具有显著差异,其中以大理岩最为典型。

上述研究成果增进了人们对岩石破坏过程中AE信号特征的认识,但对张拉破坏下岩石声发射特性的研究较少,且一般采用同一岩性的试样,囊括性较差,而岩石AE信号特征很大程度上受其内部结构影响,同时还与其所处的应力状态有关,不同岩性的岩石由于结构的差异性,在同种加载条件下,声发射特性也应具有一定区别。正是由于岩石结构的复杂性,受力后岩石最终宏观破裂往往与其内部的微观结构及其微观裂纹扩展紧密相关,不同结构的破裂就会产生不同类型的声发射信号,从而在破裂断口处留下的微观形貌也就不尽相同,而对断口处形貌分析须结合扫描电镜(SEM)来实现,如梁昌玉等^[14]以及Zhang和Zhao^[15]利用扫描电镜研究了单轴压缩下岩石的微观破裂特性,均发现岩石的破裂机制取决于加载速率和岩石的微观结构。另外Manthei^[16]和Alkan等^[17]也认为岩石受压后其破裂模式主要是I型张拉破坏,90%的AE事件来自这种张拉作用下沿晶界的破坏,主要是因为岩石内部由不同的矿物颗粒组成,矿物颗粒又是由无数晶体聚集而成,一般来说,单个完整晶体的强度最高,晶体之间耦合的强度次之,而矿物颗粒之间耦合的强度和结构面的强度最小。而且在压缩荷载下,由于岩石的不均质性和内部缺陷,应力集中也会导致拉伸裂纹的产生^[13],由此研究拉应力作用下岩石内部裂纹扩展特性具有重要意义,不同结构中的张拉破裂究竟会释放出何种特征的弹性波信号,如

果结合 AE 测试和扫描电镜实验深入了解岩石微观破裂机制和 AE 参数特性, 将有利于认识岩石从起裂发展至宏观破坏的裂纹演变过程以及张拉破裂特性。

据此, 本文分别对花岗岩和大理岩进行巴西劈裂声发射实验, 同时结合扫描电镜分析不同岩石结构下断口形貌特征, 利用 RA-AF 变化趋势及峰值频率特性探讨张拉破坏下岩石的声发射特性与对应的裂纹扩展规律, 以及不同岩石结构对声发射特性的影响, 为实际地下工程声发射监测提供丰富的理论依据。

1 试验设计

1.1 试样制备

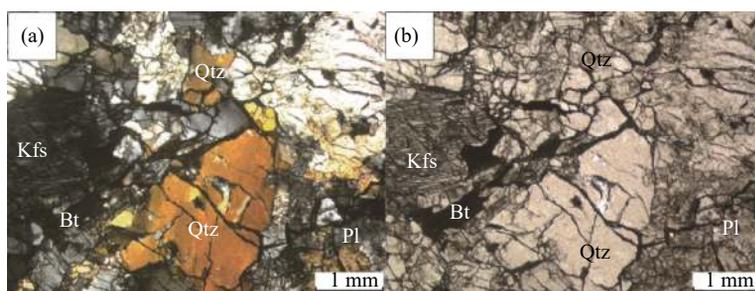
本文试验选用花岗岩 (G 系列) 和大理岩 (M 系列) 作为研究对象, 制成直径和长均为 50 mm 的圆柱形试样, 同时利用岩石声波参数测试仪 (HS-YS4A) 对各岩样进行了纵波测量, 结果见表 1。试

表 1 岩样基本参数

Table 1 Basic parameters of the rock samples

试样编号	直径/mm	高/mm	密度/(g·cm ⁻³)	波速/(m·s ⁻¹)
G1	48.41	49.95	2.61	4197.83
G2	48.57	50.36	2.63	4272.61
G3	48.33	50.62	2.62	4211.35
M1	50.99	49.32	2.85	3825.41
M2	50.35	48.19	2.78	3901.74
M3	50.79	48.57	2.85	3857.66

验前, 通过透明薄片折射率实验对花岗岩和大理岩的组成进行了测定, 如图 1 所示, 该花岗岩的主要矿物成分为石英、钾长石、斜长石以及少量的黑云母; 大理岩的主要矿物成分为白云石和少量的方解石, 图 1(a) 中可以明显的看出多种矿物颗粒之间耦合, 以及单一矿物颗粒内部的缺陷、空隙等; 而图 1(b) 中可以明显看出粒状变晶结构, 白云石和方解石颗粒之间成紧密镶嵌结构。



Qtz—石英; Kfs—钾长石; Dol—白云石; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Cal—方解石

图 1 两种岩石微观结构图。(a)花岗岩; (b)大理岩

Fig.1 Micro-structures of rock samples in the transparent refractive index experiment: (a) granite; (b) marble

1.2 试样方案及参数设置

试验所用的加载设备是 MTS-322 型加载系统, 加载速率设为 30 kN·min⁻¹, 采样率设为 50 Hz。声发射测试设备为美国 PAC 公司的 PCI-2 声发射仪, 参数设置如表 2 所示。另外传感器选用两个谐振频率为 550 kHz 的 PICO 型传感器, 分别粘贴于试样断面靠近劈裂中心位置, 如图 2 所示。

表 2 声发射设备参数设置

Table 2 Parameter settings of the acoustic emission device

门槛值/ dB	前置增益/ dB	采样长度/ kb	采样频率/ MHz	PDT/ μs	HLT/ μs	HDT/ μs
40	40	5	10	50	300	200

其中门槛值 40 dB 是基于前期开展的大量声发射实验, 发现门槛值较低会有电流噪声, 一般情况下在 35 dB 以上就能抑制电流噪声, 同时考虑到

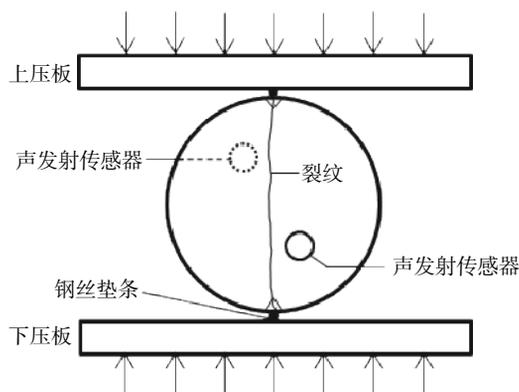


图 2 巴西劈裂传感器布置示意图

Fig.2 Layout of AE sensors in the Brazilian split tests

由于劈裂试样较小, 声发射信号在边界处的反射也会被传感器采集到, 因此将门槛值提高至 40 dB。此外, 在室内声发射实验中, 通常震源的持续时间要大于声发射信号在试样边界反射回传的时间,

因此,即使反射波信号超过了阈值,也会与震源信号一起被传感器采集,但是反射信号的能量在整个信号中占比较小.虽然反射信号对整个信号的能量、计数等参数有影响,但对整个信号的幅值、峰值频率没有影响.而且在加载后期裂纹成核并形成宏观破裂面时,会有不同信号叠加,但是这在声发射实验中是不可避免的.并且由于传感器距破裂优势面较近,信号传播过程中衰减较小,则撞击信号波形持续时间较长,选择较高的 HLT(一个撞击(hit)闭锁时间)可以采集到单个完整撞击信号, HDT(一个撞击(hit)定义时间)的正确设置将确保一个 AE 信号反映到系统中的是一个且仅为一个 hit,而且劈裂荷载下岩石破裂信号具有明显地突发性特征,信号峰值的间隔时间较短,选择较低的 PDT(信号峰值定义时间),可以避

免单个撞击信号中包含其他撞击信号,影响分析结果.鉴于劈裂荷载下岩石破裂高频特性,根据奈奎斯特采样定律,选取较高的采样频率,可以避免高频信号的缺失.另外,本文是通过声发射设备本身具有的带通滤波器进行高频降噪处理,以达到信号有效采集的目的.

2 试验结果分析

2.1 声发射信号的 RA-AF 特性

一般情况下,岩石的抗拉强度远低于抗压强度.在巴西劈裂实验过程中,两种岩石试样均沿加载方向岩样中心面形成对径拉伸破坏,破裂面明显分离成两块,在表面间没有错动,且无小碎片及碎屑产生,其破坏效果如图 3 所示,属于典型的拉伸破坏,符合线弹性叠加原理^[18].

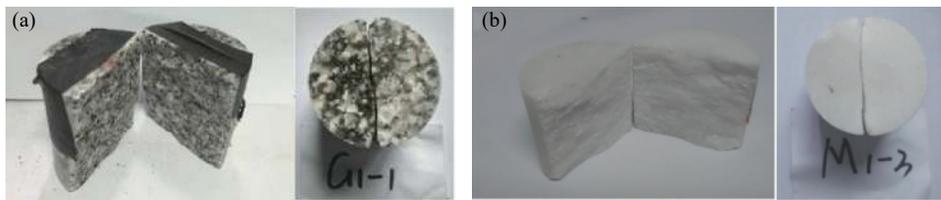


图 3 巴西劈裂实验中两种岩石的破坏形态. (a)花岗岩; (b)大理岩

Fig.3 Failure form of granite and marble in the Brazilian split test: (a) granite; (b) marble

在声发射特性研究中,特征参数分析是信号处理常用的方法,其中,RA 值(上升时间与幅值的比值,单位 $\text{ms} \cdot \text{V}^{-1}$)常用来表征声发射源的产生机制.在混凝土材料的声发射实验中,RA 值已经成为破裂类型评判的重要参数^[19],并且 RA 值常与平均频率(AF,计数与持续时间的比值,单位 kHz)一起来分析岩石的破裂模式^[7-10,13],这说明 RA 值同样可以作为衡量岩石破裂模式的指标,高 RA 值、低 AF 值对应剪切破坏,低 RA 值、高 AF 值对应拉伸破坏.RA 值的大小一定程度上反应了信号的突发性(突发型的还是持续型的),RA 值是上升时间段信号包络线梯度的倒数,RA 值越小说明信号波形的梯度越大,波形越具有突发型信号的特征,这种脉冲就越窄,从而频率会较高,这种信号正符合拉伸破坏产生的信号特征,当然 RA 值也不能完全确定脉冲有很大的突发性或较窄.而另外一个参数 AF 值是计数与持续时间的比值,如果计数固定,持续时间越长则脉冲越宽,信号的频率就越低,而此时的 AF 值也越小;如果持续时间固定,计数越多则信号频率越高,而此时 AF 值也越大.因此,AF 值的大小可在一定程度上衡量整个脉冲的频率特性,这就弥补了 RA 值只关注上升时间段的

波形而丧失整个波形信息的缺陷,于是,RA-AF 的分布特征可以很好的衡量波形的特征,拉伸破坏产生的信号一般具有低 RA 值、高 AF 值的特征,而剪切破坏产生的信号一般具有高 RA 值、低 AF 值的特征.

图 4 表示了巴西劈裂荷载下两种岩石 RA 和 AF 参数随时间变化的典型趋势.在压密阶段,由于压应力的作用,裂纹的闭合和滑移致使产生较高 RA 值和较低 AF 值的信号,随拉应力的主导作用,微观裂纹开始起裂,RA 值随之减小,AF 值逐渐增大,即拉裂纹起主导地位.其中大理岩的 RA 值和 AF 值变化幅度高于花岗岩,这可能源于花岗岩中的石英颗粒更容易发生剪切滑移现象^[20],然而在临界破坏时,由于岩石的软化作用,RA 值却迅速增大,AF 值迅速减小,如此趋势类似于其他文献^[13].这主要是因为,在劈裂荷载下,未破坏区域的裂纹首先扩展,当微裂纹开始合并形成平行于加载方向的宏观裂纹时,由于内部损伤的加剧,微裂隙界面彼此相互移动,因裂纹具有弯曲和非对称性特点,微裂隙界面间会发生摩擦,致使较短时间内产生剪切裂纹或复合裂纹,导致 RA 值增加、AF 值降低.值得注意的是,当应力达到 60%

时,大理岩出现 RA 值小幅度增加, AF 值小幅度减小的趋势,这可能由于大理岩的软化作用早于花岗岩所致,从花岗岩的抗拉强度高于大理岩中可以体现,但由于在裂纹扩展中,拉伸破坏占据主导地位,导致此处大理岩 RA 值和 AF 值变化幅度不明显.另外根据密度云图可知,红色区域代表数据分布的高密度集中带,随着颜色由红变蓝,数据分布也由密集变得逐渐分散稀疏,也明显发现大理岩的低 RA 值、高 AF 特性更显著(见图 5 和对应的表 3),而且从图 4 中 RA 值下降趋势也可知,大理岩中拉伸破坏更显著,由此说明岩石结构的差异性会影响不同裂纹模式(拉伸裂纹、剪切裂纹以及复合裂纹)的分布情况.而两种岩石的

RA-AF 整体变化趋势基本一致,裂纹扩展过程中,均是先产生拉伸裂纹,后伴随产生剪切裂纹或复合裂纹,这与 Backer 等^[21]的结论也类似.这说明岩石结构的差异不会影响其从加载初期至最终破坏中裂纹演化过程,这是因为相比岩石结构的差异性,受力条件对岩石裂纹模式的影响更大,这也是许多研究表明不同岩性岩石所表现出来的声发射参数特性均比较相似的原因^[6].另外文献^[13]也对岩石结构对裂纹模式的影响进行了相应分析,发现裂纹模式并不取决于岩石结构,而是取决于岩石的软化过程.据此,上述结果验证了通过 RA 值和 AF 值的变化趋势来研究岩石材料破裂机制的可行性.

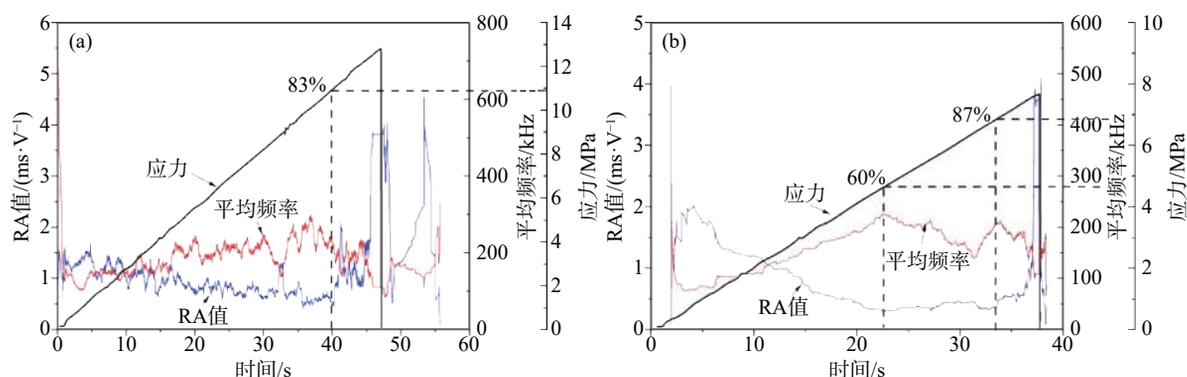


图 4 劈裂荷载下花岗岩和大理岩 RA 和 AF 参数随时间的变化趋势(通过移动平均线实现^[13]). (a) 花岗岩; (b) 大理岩

Fig.4 Trends of the mean RA and average frequency parameters under a splitting load (the two AE parameters are obtained by using moving averages^[13]): (a) granite; (b) marble

2.2 声发射信号主频特征分析

在以上 RA-AF 的分布关系中, AF 代表平均频率,是计数和持续时间的比值,并不是声发射信号的真实频率,而信号的真实频率也可以反映震源的特征.一般来说,地震信号的频率在几赫兹以下,微震信号的频率在几赫兹到数千赫兹之间,而声发射信号的频率则在几千赫兹到数兆赫兹之间,而且频率是表征弹性波震源特性的一个重要参数.对于岩石声发射而言,不同类型的震源产生不同尺度的破裂,不同尺度的破裂则产生不同频率的信号,大尺度裂纹产生的信号含有较显著的低频率成分,而小尺度裂纹产生的信号含有较显著的高频成分^[22-25].在频谱分析中,峰值频率是分析信号频谱特征的一个重要参数,峰值频率即最大能谱点的频率,在震源评估中,峰值频率是震源频谱特征的重要表现,可将其近似看作信号的主频,通过分析不同参数值大小进行震源类型识别^[5].

两种岩石的峰值频率分布正如图 6 所示,具

有明显的带状分布特征,主要分布于 100 ~ 199 kHz 之间以及 400 ~ 499 kHz 之间,详情见表 4.从表中可以看出,劈裂荷载下两种岩石峰值频率在 400 ~ 499 kHz 区间的声发射信号最多,100 ~ 199 kHz 之间的信号次之.在劈裂荷载下,岩样以拉伸破坏为主,拉伸裂纹产生的声发射信号具有衰减快、高频特征,而剪切裂纹释放的声发射信号具有衰减慢、低频特征^[26],由此也表明拉伸破坏下岩石破裂信号包含更多高频成分.此外,在试验中,由于拉应力的作用,岩样通常会沿着试样轴向中心面破裂,从而使得沿着岩样内部不连续面(节理、夹层等)破裂的几率大大降低,在这种情况下破裂主要来自岩样轴向中心面上矿物颗粒的分离或者矿物颗粒内部的破坏,这些破坏尺度较小、产生的声发射信号的频率较高.因此,花岗岩和大理岩中峰值频率在 400 ~ 499 kHz 区间的信号居多.

2.3 不同加载阶段峰值频率变化规律

正如 2.2 节所述,峰值频率在 100 ~ 199 kHz 以

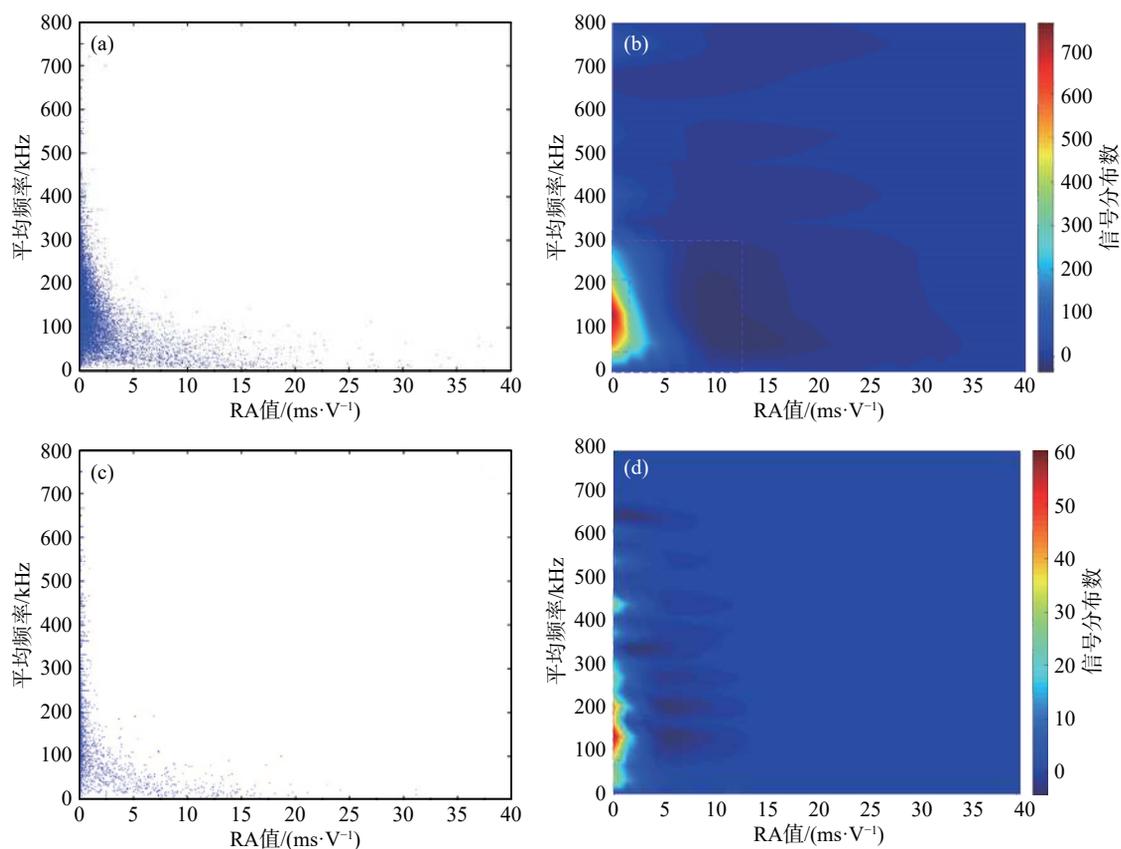


图5 劈裂荷载下岩石声发射信号 RA 值与 AF 值的关系分布图。(a)花岗岩 RA 值与 AF 值分布图; (b)花岗岩 RA 值与 AF 值数据密度云图; (c)大理岩 RA 值与 AF 值分布图; (d)大理岩 RA 值与 AF 值数据密度云图

Fig.5 RA and average frequency distribution diagrams of granite and marble under a splitting load: (a) RA versus AF distribution diagram in granite; (b) RA versus AF data density map in granite; (c) RA versus AF distribution diagram in marble; (d) RA versus AF data density map in marble

表3 不同岩石声发射 RA-AF 分布差异

Table 3 Differences in RA-AF distribution obtained from Fig. 5

岩石类型	编号	RA值/(ms·V ⁻¹)	AF值/kHz
花岗岩	G1	0 ~ 1.36	75 ~ 184
	G2	0 ~ 1.22	80 ~ 177
	G3	0 ~ 1.13	82 ~ 186
	平均值	0 ~ 1.24	79 ~ 182
大理岩	M1	0 ~ 0.52	100 ~ 174
	M2	0 ~ 0.71	93 ~ 167
	M3	0 ~ 0.86	97 ~ 185
	平均值	0 ~ 0.70	97 ~ 175

及 400 ~ 499 kHz 区间的信号可以看作其主频信号。为进一步分析主频信号在不同加载阶段的分布特性,图7表示了两种岩石在不同应力阶段主频信号分布趋势,图中波击数指对应岩石三个试样的平均值。当应力水平(当前应力与峰值应力的比值)为 0.8(加载后期)时,花岗岩的声发射比率(高频信号(400 ~ 499 kHz)数量与较低频信号(100 ~ 199 kHz)数量之比)突然降低,而大理岩的

声发射比率在缓慢上升,这主要是因为当微裂纹扩展、贯通时,虽然拉伸裂纹作为主裂纹模式,但随着岩石内部损伤的加剧,由于裂纹的偏转和不对称特性,摩擦滑移容易出现在颗粒边界,致使剪切模式或复合模式的出现,从而释放较低频信号,这与在临界破坏时 RA 和 AF 值的变化趋势相一致(见图4),另外从岩样的微观结构可知(见图1),石英颗粒包括更多不连续结构面,更容易发生剪切滑移,从而导致花岗岩声发射比率突降。而对于大理岩来说,其矿物颗粒小且均质,随着应力水平的增长,矿物颗粒之间的分离持续增多,且少有如花岗岩石英矿物颗粒分离产生的低频信号,因此该比率缓慢增长,而此破裂机制的差异性也恰好说明了花岗岩的抗拉强度及声发射能量高于大理岩。

当应力水平为 0.2 时,即处于加载初期的压密阶段时,较低频信号比高频信号占比多,这是因为加载初期,受钢丝垫条和岩石内部微裂隙结构的影响,垫条的错动和岩石中的矿物颗粒在压应力作用下发生滑移,产生的声发射信号频率较低^[27]。

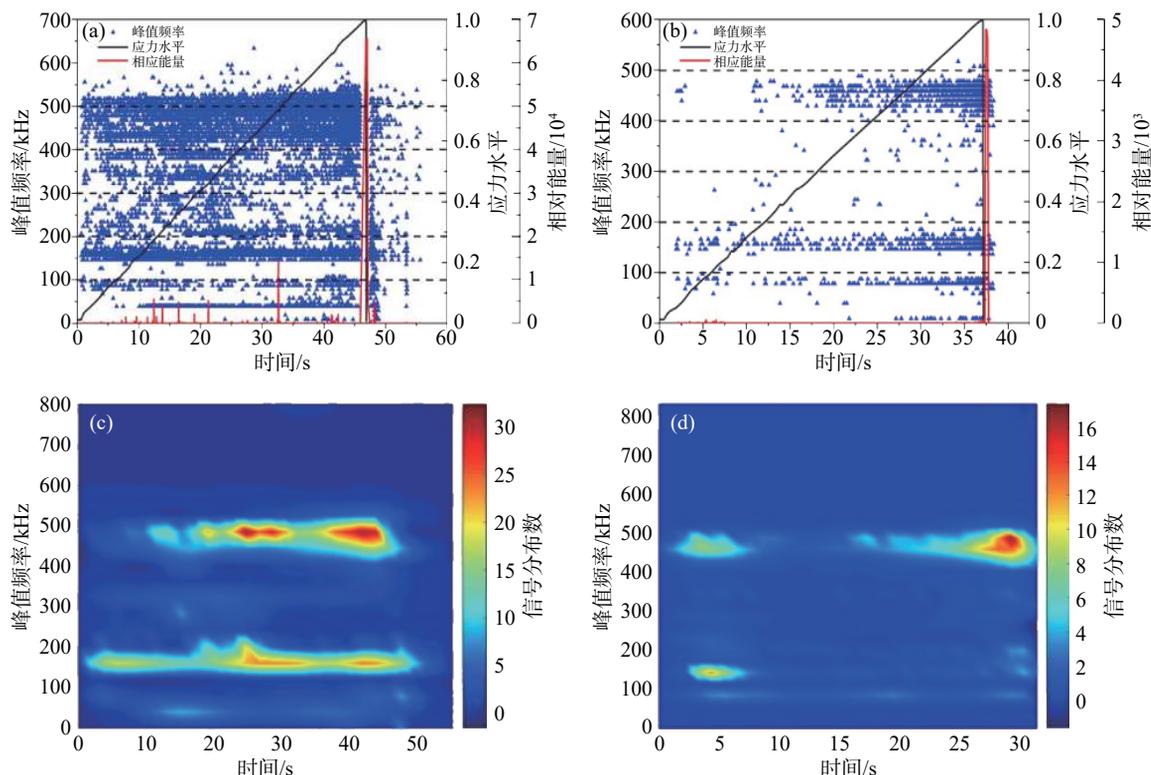


图 6 两种岩石的峰值频率随加载时间的变化。(a)花岗岩;(b)大理岩;(c)花岗岩峰值频率随时间变化的密度云图;(d)大理岩峰值频率随时间变化的密度云图

Fig.6 Temporal peak frequency distribution under different splitting loads: (a) granite and (b) marble; (c) peak frequency versus time data density maps in granite; (d) peak frequency versus time data density maps in marble

表 4 巴西劈裂荷载下岩石声发射峰值频率分布

Table 4 Distribution percentages of AE peak frequency for four rock types in the Brazilian split test

试样编号	峰值频率占比/%				
	<100 kHz	100 ~ 199 kHz	200 ~ 299 kHz	300 ~ 399 kHz	≥400 kHz
G1	5.92	29.33	6.84	8.04	49.86
G2	4.85	14.15	4.18	6.24	70.58
G3	4.35	19.92	7.83	8.41	59.50
平均值	5.04	21.13	6.28	7.56	59.98
M1	7.19	26.87	11.35	3.56	51.03
M2	15.64	32.21	0.88	1.75	49.52
M3	6.97	20.40	0.01	2.40	60.21
平均值	9.93	26.49	7.41	2.57	53.58

而从声发射比率的曲线走向可知,花岗岩的声发射比率先增后减,即在加载后期,较低频的声发射信号要比高频信号增加明显,说明在加载后期不仅产生大量的小尺度裂纹,大尺度裂纹增加幅度更显著,但对于大理岩而言,其声发射比率持续增加,即高频信号比较低频信号增加更显著,说明大理岩在加载过程中主要产生小尺度裂纹.而且从上述的结果可以总结出,在巴西劈裂加载条件下,两种岩石在压密阶段产生的声发射信号的来源主

要源于矿物颗粒之间的滑移,产生大量较低频的信号,而在弹塑性以及最后的破坏阶段,各岩石产生的声发射信号主要源于新裂纹的萌生与扩展,而由于内部结构的差异性,花岗岩产生的新裂纹虽然以小尺度裂纹为主,但临界破坏时大尺度裂纹相对增加更显著,而大理岩产生的新裂纹却以小尺度裂纹为主,但大尺度裂纹相对增加并不显著.如果从更微观的层面分析这些破裂特性,则需借助电镜对断裂面进行扫描.

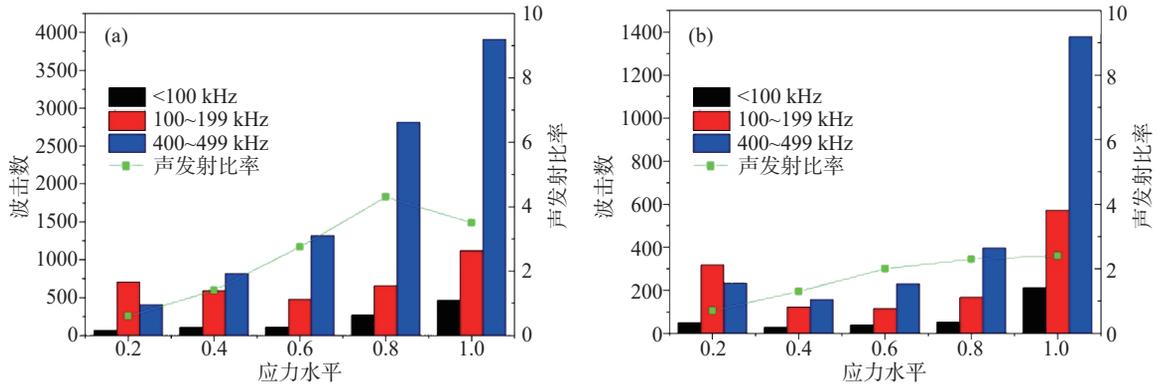


图7 不同应力水平下的峰值频率变化。(a)花岗岩;(b)大理岩

Fig.7 AE peak frequencies at different stress levels: (a) granite; (b) marble

3 劈裂面断口形貌特征

扫描电镜(SEM)采用聚焦电子束在试样表面逐点扫描成像,本试验选用的设备型号为FEI Quanta-200.加载试验完成后,对试样劈裂面进行超声波清洗及喷金处理,之后将试件放入电镜中进行观测.

通过对两种岩石岩样破裂面进行全面扫描后

发现,花岗岩断口形貌主要有三种类型(如图8(a)~(c)),通过能谱可以得到各形貌的矿物成分(如图8(d)~(f)),其中图8(b)~(c)的形貌源自钾长石矿物颗粒,图8(a)的形貌源自石英矿物颗粒,图中IG表示沿晶破裂,TG表示穿晶破裂;大理岩断口形貌主要有两种类型(如图9(b)~(c)),通过能谱可以得到各形貌的矿物成分(如图9(d)~(e)).

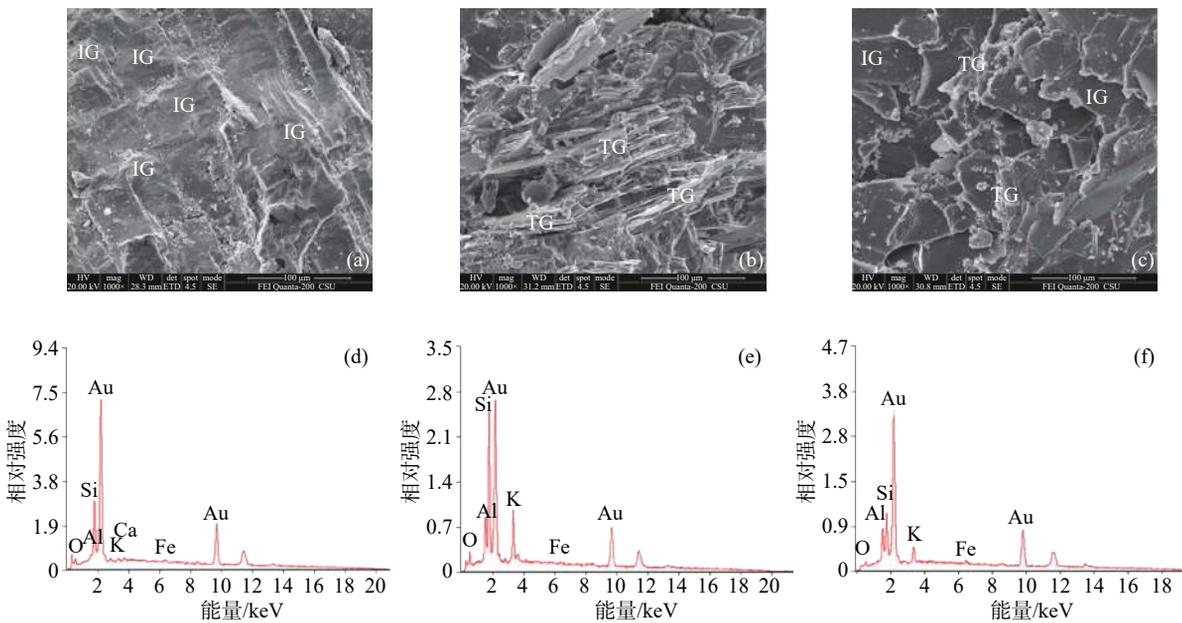


图8 花岗岩劈裂面电镜扫描形貌图。(a)石英颗粒层平坦状形貌图;(b)钾长石台阶状形貌图;(c)钾长石颗粒叠状形貌图;(d)石英颗粒能谱图;(e)台阶状钾长石颗粒能谱图;(f)层叠状钾长石颗粒能谱图

Fig.8 SEM images of the splitting surfaces of granite: (a) “smooth planar” morphology of quartz; (b) “sidestep” morphology of k-feldspar; (c) “stack-up” morphology of k-feldspar; (d) energy spectrum diagram of quartz; (e) energy spectrum diagram of “sidestep” morphology of k-feldspar; (f) energy spectrum diagram of “stack-up” morphology of k-feldspar

从图1中可知花岗岩主要由石英、钾长石、斜长石以及少量的黑云母组成,并且可以明显的看出多种矿物颗粒之间耦合,以及单一矿物颗粒内部的缺陷、空隙等,这些都是决定岩石宏观物理力学特性的重要因素.其中,石英、斜长石的完整性

较好,而钾长石则呈层状破碎结构,且钾长石层间由钾离子键相对较弱的库仑力吸引连接^[28],这些都很大程度上降低了钾长石的强度,在外力作用下,当钾长石的层面平行于受力方向时会形成图8(b)所示的形貌,当钾长石的层面垂直于受力方向会

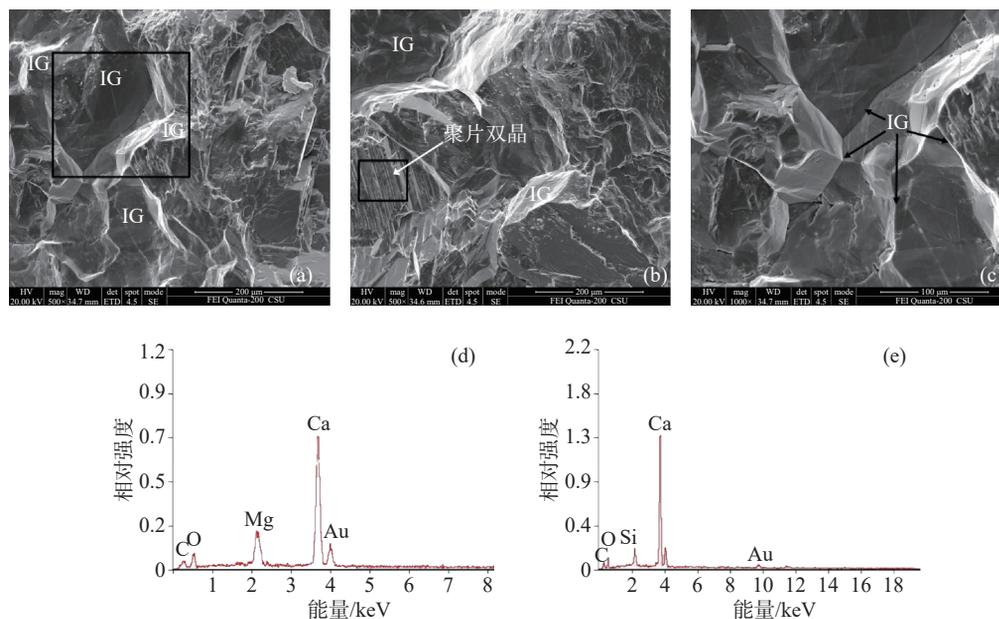


图9 大理岩劈裂面电镜扫描形貌图。(a)白云石颗粒光滑多面体状形貌图; (b)方解石聚片双晶结构形貌图; (c)图(a)黑圈区域高分辨率下的形貌图; (d)白云石颗粒能谱图; (e)方解石颗粒能谱图

Fig.9 SEM photos of the fracture surfaces of marble in the Brazilian split test: (a) “smooth polyhedrals” morphology of dolomite; (b) “polycrystalline” morphology of calcite; (c) high-magnification morphology of the black square in (a); (d) energy spectrum diagram of dolomite; (e) energy spectrum diagram of calcite

形成图 8(c) 所示的形貌。Zang 等^[29] 在对砂岩的加压实验中认为, 砂岩的微观破裂取决于弱矿物颗粒的数量和分布, 也就是说岩样受力后更容易在弱矿物颗粒中发生断裂。对于本次实验的花岗岩来说, 钾长石就属于典型的弱矿物颗粒, 岩样受劈裂荷载后内部的微观破裂更容易发生在钾长石中, 这也是在电镜试验中常见图 8(b)~(c) 形貌的原因。相比于钾长石, 石英矿物颗粒较完整, 但其中也存在明显的不连续面, 岩样在劈裂荷载的作用下, 石英矿物颗粒会沿着其内部的不连续面或者其边界破裂, 这些破裂面通常较平坦且光滑(如图 8(a) 所示), 是石英断口形貌的典型特征^[15], 同时, 由于石英是花岗岩的主要矿物成分, 破裂面经过石英矿物颗粒的机会较大, 因此, 电镜实验中图 8(a) 所示的形貌也较常见; 对于大理岩而言, 一般具有典型的粒状变晶结构, 如图 1(b) 所示, 岩石主要由白云石和方解石组成, 白云石和方解石颗粒之间成紧密镶嵌结构。图 9(a)~(b) 的形貌分别源自白云石和方解石, 由于白云石和方解石有着相似的晶体结构, 晶形为菱面体, 多呈块状或粒状集聚, 因此图 9(a)~(b) 的形貌也相似, 主要沿着矿物颗粒边界破裂。并且, 由于白云石和方解石在变质作用后紧密镶嵌, 无论是矿物颗粒之间还是矿物颗粒内部晶粒间界的破裂, 在形貌图中都常见光滑的晶界面。此外, 形貌图 b 中也出现方解石常

见的聚片双晶结构。

钾长石颗粒内部的破裂无论呈图 8(b) 所示的层叠状或呈图 8(c) 所示的台阶状, 都是小尺度破裂, 释放高频低幅值信号。按照震源频率-尺度的缩放关系, 峰值频率分布中占比最多的 400~499 kHz 之间的信号应主要来自于钾长石矿物颗粒内部的破裂。对于 8(a) 所示大尺度石英颗粒内部的破裂, 无论是界面的摩擦滑移还是张拉分离, 都会释放较低频信号, 而由于石英颗粒抗拉强度远大于钾长石弱矿物颗粒, 所以在加载后期才会有较多大尺度破裂信号产生, 致使花岗岩声发射比率突然降低。因此, 推断 100~199 kHz 区间的信号应主要来自于石英矿物颗粒内部的破裂; 对于大理岩而言, 正如图 9 所示的光滑多面体形状, 形貌单一, 主要沿着矿物颗粒边界分离持续产生高频信号, 这也说明大理岩在加载过程中高频信号变化稳定, 致使其声发射比率持续增加。

4 结论

(1) 劈裂荷载下, 岩样虽然都以拉伸破坏为主, 产生低 RA 值、高 AF 值的声发射信号, 但在裂纹萌生、扩展过程中, 随着内部损伤的加剧, 微裂隙界面彼此相互移动, 由于裂纹具有弯曲和非对称性特点, 微裂隙界面间会发生摩擦, 裂纹形式由拉伸裂纹变为剪切裂纹或复合裂纹, 致使 RA 值逐渐

变大, AF 值逐渐减小. 然而石英颗粒更易发生剪切滑移, 促使花岗岩中剪切裂纹比大理岩中更明显. 因此, 尽管岩石结构的差异性会影响不同裂纹模式(拉伸裂纹、剪切裂纹以及复合裂纹)的分布情况和破坏强度, 但不会影响岩石从加载初期至最终破坏中裂纹演化过程.

(2) 由于拉伸破坏过程中也伴随有少量剪切破坏或复合破坏形式, 对应的声发射主频信号以 400 ~ 499 kHz 居多, 100 ~ 199 kHz 次之. 在压密阶段, 破裂信号主要以 100 ~ 199 kHz 为主, 随着裂纹起裂、扩展, 400 ~ 499 kHz 区间的信号显著增加, 而至临界破坏时, 由于花岗岩中剪切裂纹比大理岩中更明显, 花岗岩中 100 ~ 199 kHz 之间的信号增加更显著, 从而导致其声发射比率突然降低, 而大理岩的声发射比率缓慢增加, 即在破裂过程中, 相比结构单一的大理岩, 花岗岩中裂纹扩展更不稳定.

(3) 从微观结构来看, 花岗岩主要分为石英颗粒的平坦状形貌、钾长石颗粒的层叠状和台阶状形貌. 相比石英颗粒, 钾长石抗拉强度较低, 属于弱矿物颗粒, 裂纹更多会在钾长石颗粒中扩展, 形成小尺度破裂, 如果受力方向平行于层面则形成层叠状的形貌, 反之产生台阶状的形貌; 大理岩主要产生光滑多面体形貌, 随着应力水平的增长, 矿物颗粒之间的分离持续增多, 且少有如花岗岩大尺度矿物颗粒分离产生的低频信号. 从而, 推测占比最多的 400 ~ 499 kHz 的信号应主要来自于钾长石及大理岩矿物颗粒内部的破裂. 而对于石英颗粒, 其在花岗岩中占比较多, 在劈裂荷载下产生特定的破裂面穿过石英颗粒的机会也较大, 并且其破裂尺度都较大且更易发生摩擦滑移, 因此, 100 ~ 199 kHz 之间的信号应主要来自石英矿物颗粒内部不连续分离以及压密阶段矿物颗粒之间的滑移.

参 考 文 献

- [1] Wang X J, Feng X, Zhao K. Numerical simulation on acoustic emission of roof fill failure of mining drift with different cross-section. *Min Res Dev*, 2011, 31(1): 9
(王晓军, 冯潇, 赵康. 不同回采断面顶板充填体破裂声发射数值模拟研究. *矿业研究与开发*, 2011, 31(1): 9)
- [2] Zhang S W, Shou K J, Xian X F, et al. Fractal characteristics and acoustic emission of anisotropic shale in Brazilian tests. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2018, 71: 298
- [3] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1993, 30(7): 883
- [4] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajiček T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37(4): 699
- [5] Yang L, Kang H S, Zhou Y C, et al. Frequency as a key parameter in discriminating the failure types of thermal barrier coatings: cluster analysis of acoustic emission signals. *Surf Coat Technol*, 2015, 264: 97
- [6] Zhang Y B, Liang P, Liu X X, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy. *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34(Suppl 1): 2959
(张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 2959)
- [7] Shiotani T, Ohtsu M, Ikeda K. Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation. *Construction Building Mater*, 2001, 15(5-6): 235
- [8] Carpinteri A, Corrado M, Lacidogna G. Heterogeneous materials in compression: correlations between absorbed, released and acoustic emission energies. *Eng Fail Anal*, 2013, 33: 236
- [9] Xiao F K, Liu G, Qin T, et al. Acoustic emission (AE) characteristics of fine sandstone and coarse sandstone fracture process under tension-compression-shear stress. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(Suppl 2): 3458
(肖福坤, 刘刚, 秦涛, 等. 拉-压-剪应力下细砂岩和粗砂岩破裂过程声发射特性研究. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊2): 3458)
- [10] Wang H J, Liu D A, Cui Z D, et al. Investigation of the fracture modes of red sandstone using XFEM and acoustic emissions. *Theor Appl Fract Mech*, 2016, 85: 283
- [11] Zeng P, Liu Y J, Ji H G, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression. *Chin J Geotech Eng*, 2017, 39(3): 509
(曾鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征. *岩土工程学报*, 2017, 39(3): 509)
- [12] Bucheim W. Geophysical methods for the study of rock pressure in coal and potash salt mining//*International Strata Control Congress*. Leipzig, 1958: 222
- [13] Rodríguez P, Celestino T B. Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks. *Eng Fract Mech*, 2019, 210: 54
- [14] Liang C Y, Wu S R, Li X. Research on micro-meso characteristics of granite fracture under uniaxial compression at low and intermediate strain rates. *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34(Suppl 1): 2977
(梁昌玉, 吴树仁, 李晓. 中低应变率范围内单轴压缩下花岗岩断口细-微观特征研究. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 2977)

- [15] Zhang Q B, Zhao J. Quasi-static and dynamic fracture behaviour of rock materials: Phenomena and mechanisms. *Int J Fract*, 2014, 189(1): 1
- [16] Manthei G. Characterization of acoustic emission sources in a rock salt specimen under triaxial compression. *Bull Seismological Soc Am*, 2005, 95(5): 1674
- [17] Alkan H, Cinar Y, Pusch G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2007, 44(1): 108
- [18] Li S Y, He T M, Yin X C. *Rock Fracture Mechanics*. Beijing: Science press, 2015
(李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学. 北京: 科学出版社, 2015)
- [19] Ohno K, Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction Build Mater*, 2010, 24(12): 2339
- [20] Zang S X. Earthquake stress drop and the stress drops of rock fracture. *Acta Seismologica Sinica*, 1984, 6(2): 182
(臧绍先. 地震应力降与岩石破裂应力降. 地震学报, 1984, 6(2): 182)
- [21] Backers T, Stanchits S, Dresen G. Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: the effect of loading rate. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2005, 42(7-8): 1094
- [22] Mogi K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena. *Bull Earthquake Res Inst Univ Tokyo*, 1962, 40: 125
- [23] Scholz C H. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull Seismological Soc Am*, 1968, 58(1): 399
- [24] Burlini L, Vinciguerra S, Toro G D, et al. Seismicity preceding volcanic eruptions: new experimental insights. *Geology*, 2007, 35(2): 183
- [25] Benson P M, Vinciguerra S, Meredith P G, et al. Laboratory simulation of volcano seismicity. *Science*, 2008, 322(5899): 249
- [26] Eaton D W, van der Baan M, Birkelo B, et al. Scaling relations and spectral characteristics of tensile microseisms: evidence for opening/closing cracks during hydraulic fracturing. *Geophys J Int*, 2014, 196(3): 1844
- [27] Mao W W, Towhata I. Monitoring of single-particle fragmentation process under static loading using acoustic emission. *Appl Acoustics*, 2015, 94: 39
- [28] Hull D. *Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [29] Zang A, Wagner C F, Dresen G. Acoustic emission, microstructure, and damage model of dry and wet sandstone stressed to failure. *J Geophys Res*, 1996, 101(B8): 17507