

文章编号: 1001-4888(2021)02-0250-09

高径比对砂岩单轴压缩声发射特性的影响研究^{*}

耿志伟¹, 苏占东^{1,2}, 王磊^{1,2}, 田钰琛³

(1. 防灾科技学院, 河北三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北三河 065201; 3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 岩石尺寸效应对声发射特性的影响对于利用声发射技术监测岩石失稳破坏具有重要的实践意义。本文选择不同高径比的长石细砂岩试样开展单轴压缩声发射试验, 探讨尺寸效应对岩石声发射事件数、振铃计数、峰值频率等声发射特性参数的影响。研究表明: 根据岩石试件撞击数的增长速率, 将试件破坏阶段分为突变期、平静期、爆发期三个阶段, 随着岩石试件高径比增加, 声发射的撞击数相应增加, 增加趋势与试件高径比的增加呈近似线性相关关系; 随着岩石试件高径比的减小, 振铃计数突变期时间占比相应减小, 平静期振铃计数也相应减小; 岩石试件的加载破坏的峰值频率主要呈现高频和低频两个集中分布区, 随着高径比减小, 岩石试件加载破坏的峰值频率逐渐由低频区向高频区过渡, 同时峰值频率的离散性也在增加。试验成果丰富了岩石声发射特性的基础数据, 并可为实际工程中声发射技术的实践应用提供参考。

关键词: 高径比; 砂岩; 单轴压缩; 声发射事件数; 振铃计数; 峰值频率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-080

0 引言

岩体等脆性材料加载变形时沿原有裂隙和新生裂隙扩展产生破坏, 变形破坏产生的部分能量扩散形成弹性波, 引发声发射(acoustic emission, AE)现象^[1]。20 世纪 70 年代开始, 声发射技术引入国内, 用于检测各种材料的裂纹开裂^[2]。岩石声发射现象蕴含岩石变形和破坏过程的诸多物理现象^[3,4], 同时可以反映岩石内部裂隙发展的动态变化^[5]。付小敏^[6]研究发现不同类型的岩体声发射初始应力状态各不相同, 主要受岩体的结构影响。姜永东等^[7]、尹贤刚等^[8]利用凯塞效应借助声发射技术为测量地应力提供了一种新方法, 但关于凯塞点的确定目前仍存在争论。赵兴东等^[9,10]、李庶林等^[11]利用声发射体定位技术研究岩体失稳破坏时裂隙的孕育、扩展情况, 为研究岩体的破坏模式、失稳破坏机理的研究提供了技术参考。吴永胜等^[12]、王创业等^[13]、俞缙等^[14,15]对岩体破坏时声发射特征参数的变化规律进行研究, 发现岩体破坏时, 各项参数产生突变时呈现规律性, 可为岩体失稳破坏提供预警。吴成龙等^[16]、苏占东等^[17]研究冻融损伤对岩石声发射特性的影响, 发现随着损伤程度的加深, 岩石的声发射特征产生显著差异。

事实上, 岩石是一种非均质材料, 不同尺寸岩石的力学性质也会存在较大的差异, 即尺寸效应^[18]。岩石受到尺寸效应影响, 破坏形式有显著差异性。刘宝琛等^[19]对多种岩体破坏强度进行研究, 总结出不同尺寸岩体的强度经验公式。吕兆兴等^[20]模拟岩体的非均质对于尺寸效应的影响结果, 发现岩体不

^{*} 收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41807270)

通信作者: 苏占东(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事构造应力场与断裂活动性以及岩土工程抗震等方面的教学和科研工作。

Email: szdchris@163.com

均匀程度和尺寸效应影响程度呈现负相关。赵康等^[21,22]对不同尺寸效应的岩石进行时空特性数值模拟,发现不同尺寸的岩体声发射的能量和数量增长模式不同。通过上述文献可知,研究尺寸效应影响下岩体破坏的差异性、破坏机理和动态变化,为岩体的安全性、稳定性评价提供参考,有切合实际的工程意义。目前对岩石声发射特性的尺寸效应影响研究较少,国内仅少量学者开展了相关研究,如石永奎等^[23]、王创业等^[24]做了岩体在尺寸效应影响下声发射能量、事件率变化特征的研究,然而缺少对声发射其他特征参数变化规律的研究。

本文选取高径比不同的长石砂岩,进行单轴加载状态下的全过程声发射试验,重点探讨高径比对岩石的撞击数、振铃计数以及峰值频率的影响,所得结果可为声发射技术的工程应用提供试验参考。

1 试验过程

1.1 岩样制作

试验所选用的岩样为长石细砂岩,块状构造,粒度多为 0.1mm~1mm 的细粒结构,粒度均匀,分选性好,磨圆度多为圆状。天然密度为 2.4g/cm³,岩样纵波波速平均值约为 2150m/s。试验所选用的长石细砂岩试样都钻取自同一块完整长石细砂岩,按照岩石试验规范与标准采用圆柱体试件,本次试验准备不同高径比的砂岩试样,制样方法和标准满足《工程岩体试验方法标准》^[25]要求。

1.2 试验方案

将试样分为 5 组,组号分别标记为 A、B、C、D、E,每组 2 个试样,改变试样直径、高度,使高径比分别为 2.86、2.00、1.43、1.00 和 1.60 (见表 1)。对上述试样分别进行单轴压缩试验,并同步采集声发射特征参数,包括振铃计数、撞击数和频率。

表 1 长石细砂岩试样尺寸及高径比

Tab. 1 Specimen size and the ratio of height to diameter of fine arkose

组号	A	B	C	D	E
尺寸($d \times h$)/mm	35×100	50×100	70×100	100×100	50×80
高径比	2.86	2.00	1.43	1.00	1.6

1.3 试验设备

试验所使用的试验设备主要包括微控电液伺服压力机和声发射测试仪(见图 1)。ZYSS-2000 微控电液伺服压力机为全数字计算机控制,可设定试验流程并实时对应力变化进行采集。轴向最大荷载为 2000kN,加载速率为 0.01kN/s~20kN/s,加载分辨率为 20N,加载测量精度值 $\leq \pm 1\%$ (显示值);位移测量值分辨率为 0.001mm,测量值范围为 1mm~100mm,测量值精度 $\leq \pm 5\%$ (显示值)。声发射信号的采集采用 DS5-16B 全信息声发射监测仪,最多可采用 16 通道同时对声发射信号进行连续采集监测,非线性误差为 $\pm 0.5\text{LSB}$,传感器型号为 RS-2A,采集中心频率为 150kHz。控制计算机可对声发射试件的波形自动记录、存储,后期回放时可同步获得到达时间、通道号、能量、振铃计数以及通道撞击数等 14 个声发射特征参数。

1.4 试验步骤

试验准备期,用砂纸将声发射传感器接触面的岩石抛光,酒精擦拭干净,减少因岩石空隙产生的干扰,使声发射传感器更加准确地接收岩石试件内部破裂时发出的声发射信号。为固定传感器,用热熔胶将传感器转换器固定于抛光岩石表面,待热熔胶冷却凝固后,将传感器表面涂抹凡士林置于转换器中,使传感器与岩石试件有效耦合。为提高采集数据的准确性,传感器采用对称布置,8 个传感器分为上、下 2 组,其中上部 4 个传感器中心点距试件顶端 20mm,1~4 号传感器顺时针布置,转换器之间夹角为 90°;下部 4 个传感器中心点距离试件底端 20mm,5~8 号传感器顺时针布置,传感器之间的夹角为 90°(见图 2)。试验开始前,首先设置声发射系统参数,声发射采样频率设定为 3.0MHz,然后对试件安装、声发射传感器耦合情况进行检查,确认无误后,将微控电液伺服压力机、声发射检测设备同时启动,同步采集数据,加载控制方式选择位移加载,加载速率为 0.1mm/min,直至岩石破坏,停止加载。

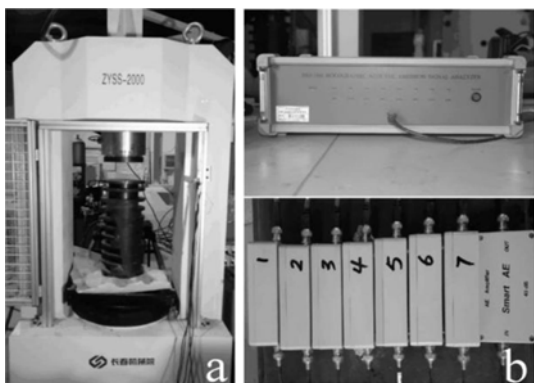


图 1 (a)微控电液伺服压力机和(b)声发射检测仪
Fig. 1 (a)Micro servo-control electro-hydraulic press and
(b) acoustic emission detector

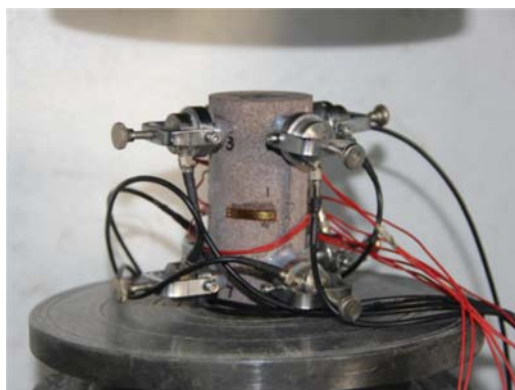


图 2 试验试样及传感器分布
Fig. 2 Test specimen and sensor distribution

2 砂岩的声发射特性分析

2.1 声发射撞击数和振铃计数

撞击数是声发射信号累计触发事件的触发次数,而振铃计数是单位时间内声发射撞击信号超过声发射系统采集强度的次数,振铃计数是岩石内部结构破裂程度物理指标量化的体现,反映了声发射事件的触发程度,其变化规律反映出岩石内部结构破坏的实时状态。

图 3 为声发射撞击数、声发射振铃计数与时间的关系,撞击数的增长变化曲线反映了声发射事件累积触发次数、声发射事件触发的增长速率,根据曲线的增长速率可以将整个声发射事件分为三个阶段即突变期、平静期、爆发期。突变期的声发射曲线减速上升,振铃计数开始触发;平静期的声发射曲线匀速上升,振铃计数的触发处于一个平稳区间;爆发期的声发射曲线增速上升,形成明显的爬升曲线,振铃计数大量触发。撞击声的数量反映了加载期整个试件内部裂隙发育的数量,对研究试件内部裂隙的发展规律具有重要意义,5 组试样撞击数总数的变化规律如图 4 所示,随着试件高径比的增加,撞击数的总数存在逐渐增加的趋势。用 N 表示撞击数,用 D_r 表示试件的高径比,可以得到拟合曲线方程: $N = 26399 D_r - 22116$,拟合相关系数 $R^2 = 0.8287$ 。根据线性拟合方程可初步得出,随着试件高径比逐渐增加,试件破坏时撞击数整体呈现增加的趋势。

如图 3 所示,振铃计数在突变期、平静期、爆发期 3 个阶段呈现出不同的变化规律。试验开始时,振铃计数的突变性增加,振铃计数的峰值数量与平静期平均数量相比数值较大,但持续时间较短。这可能是由于一方面压力机开始加载时,压力机与岩石不能完全接触,初始加压过大,岩石突然产生少许裂隙触发声发射信号,产生部分振铃计数;另一方面岩石本身内部原有的少许微裂隙被压密,触发声发射信号导致振铃计数突增。随试件高径比的增加,接触时突变期持续时间的比例增加(见表 2),这主要是因为压力机未与岩石完全接触前初始加载相同,高径比小的岩石内部单位面积应力较小,试件内部微裂隙压实速度较慢,产生的声发射信号数量较小,声发射的信号强度较弱,信号特征不明显,导致突变期振铃计数的时间占比小。

表 2 突变期持续时间占比
Tab. 2 Duration of abrupt period

编号	A	B	C	D	E
突变期占比/%	19.00	17.63	14.98	13.47	14.69

试件的平静期持续时间较长,期间振铃计数虽然持续触发,但是一直保持在较稳定的区间,可以看成破坏能量内部累积的阶段。初始的裂隙被压密后,试件处于密实状态,继续加载时微裂隙开始萌生,此时的裂隙较小,声发射信号触发强度较小并处于稳定期,持续加载的过程中裂隙逐渐发育,一直处于扩展阶段,没有贯通裂隙的出现^[26]。高径比逐渐增加时,平静期激发的振铃计数数量持续增加,随着试

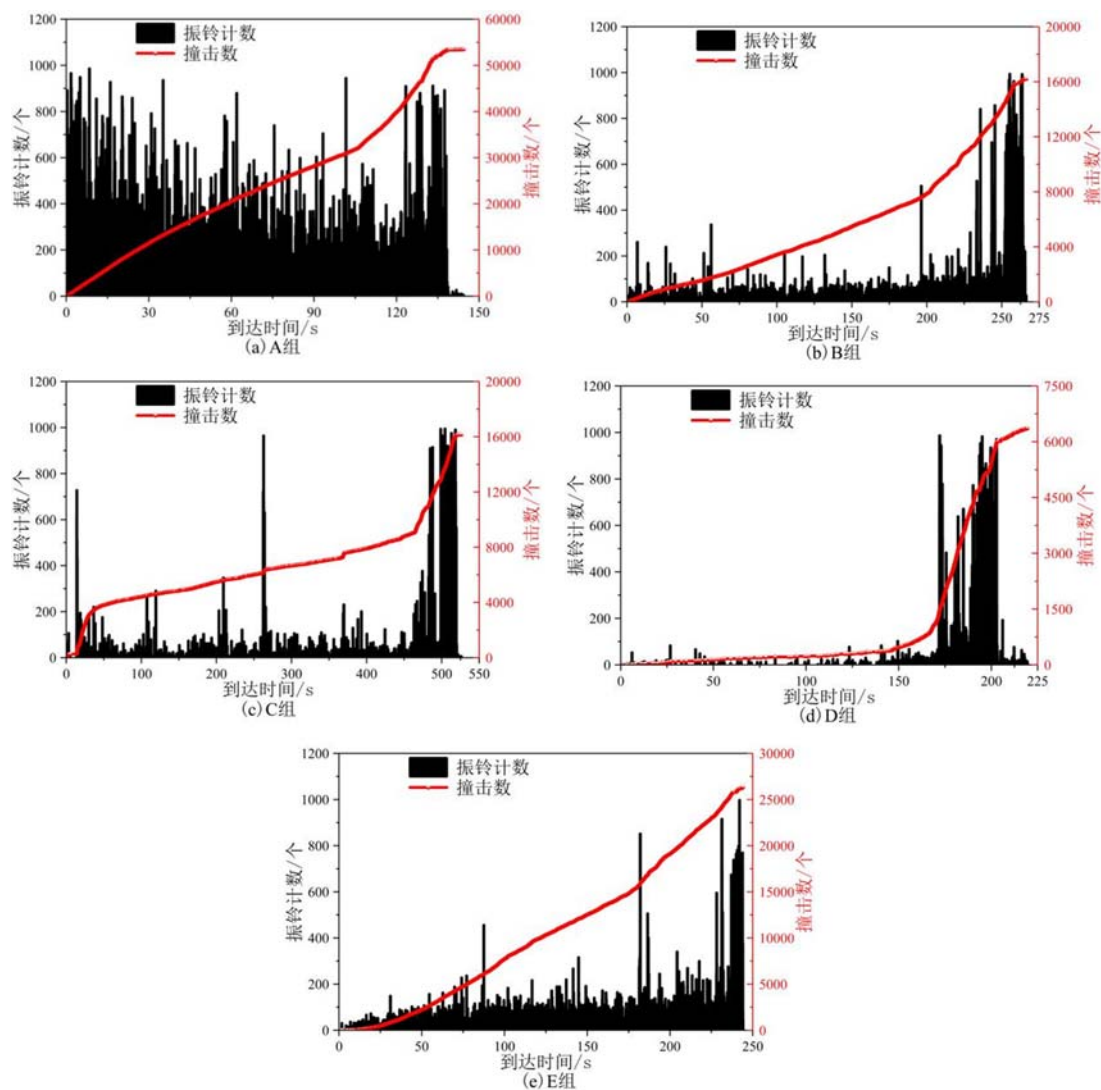


图3 单轴压缩下不同尺寸试件的振铃计数、荷载、撞击数和时间的关系

Fig. 3 Relationship of ringing counts, load, number of AE counts and time of different size specimens under uniaxial compression

件高径比减小,试件A与试件D相比,其振铃计数数量增加了100倍(见表3)。其原因可能是由于高径比大的岩石直径相对较小,横向微裂隙由于尺寸效应微裂隙发育数量多,导致平静期激发的振铃计数数量较多。

进入爆发期后,振铃计数陡然增加,高径比越小的试样陡增趋势越明显。试件在经过平静期后,内部微裂隙较多,缺少贯通裂隙。试件继续加载,微裂隙开始扩展、贯通,触发大量的振铃计数^[27],振铃计数数量开始陡增。相比之下,高径比小的岩石直径较大,横向贯通裂隙较长,产生的振铃计数多,陡增趋势较为明显,特别是破坏期平均振铃计数与平静期平均振铃计数的比值一直增加(见表3),在5组试件中,随着高径比减小,该比值由1.88增加到60.22,增加约30倍,比值仍呈现逐渐增加的趋势。

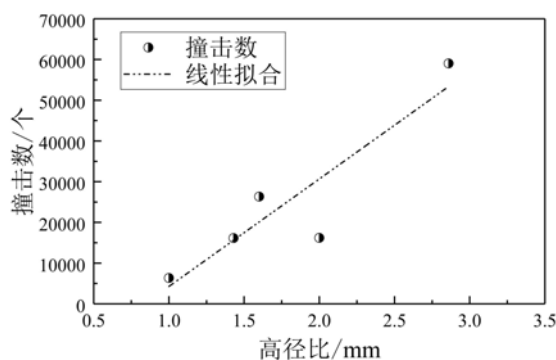


图4 试件破坏时的撞击数与试件高径比的关系

Fig. 4 Number of AE counts vs. the aspect ratio of specimens at the failure point

表 3 平静期与破坏期的振铃计数及其平均比值

Tab. 3 Ring counts and average ratio during quiet period and destruction period

编号	A	B	C	D	E
平静期	1782302	216641	91240	16498	470285
破坏期	441400	185828	235983	226640	303346
比值/%	1.88	6.99	16.08	60.22	2.65

2.2 声发射峰值频率

利用傅里叶变换,将采集的时间域信号转换为频率域信号,频率域中振幅最大点对应的频率即峰值频率(峰频)。对不同尺寸岩石试件的声发射峰频进行分析,得到声发射信号到达时间与峰频的关系,如图 5 所示。由于岩石试件内部结构和外部形态尺寸的影响,岩石试件在加载过程中会出现不同的频率特征。

如表 4 所示,在加载过程中,峰频密集带较低值基本上集中在 2kHz~20kHz 这一区域内,试件峰频密集带较高值主要集中在 94kHz~140kHz 区域,频率分布为高低两个主频带,这与文献[28,29]的研究成果一致。

表 4 不同主频带峰值频率占比

Tab. 4 Peak frequency ratio of different main frequency bands

编号	A	B	C	D	E
低频区/%	75.84	54.71	34.27	13.03	72.90
过渡区/%	0.88	4.70	8.20	11.99	1.10
高频区/%	17.29	33.32	48.22	65.82	20.81

如图 5(a)所示,试件 A 在受压初期产生大量声发射信号,峰值频率主要分布在 3kHz~13kHz 和 113kHz~130kHz 两个频段内,分布较为集中。当试件持续受压进入微裂隙扩展阶段时,声发射信号的峰频开始呈现扩散趋势,表现为高频频段范围扩散到 94kHz~138kHz,但高频信号区边界不明显。当试件到达受压极限失稳破坏时,高频信号区仍为 94kHz~138kHz,却出现明显边界,其他区域声发射信号量显著提升。如图 5(b)所示,试件 B 在受压初期产生的声发射信号小于试件 A,峰值频率主要分布在 2kHz~9kHz 和 110kHz~130kHz 两个频段内,较试件 A 离散性较大。当试件持续受压进入微裂隙扩展阶段时,声发射信号的峰频同样呈现扩散趋势,表现为高频频段范围扩散到 94kHz~140kHz,高频信号区边界也不明显,离散性却大幅度增加。当试件到达受压极限失稳破坏时,高频信号区为 94kHz~140kHz,出现相对明显的边界,相较于试件 A,其他区域声发射信号量大幅度增加。如图 5(c)所示,试件 C 在受压初期产生的声发射信号峰频主要分布在 2kHz~13kHz 和 93kHz~123kHz 两个频段内,较试件 B 离散性更大。当试件持续受压进入微裂隙扩展阶段时,声发射信号峰频的离散性出现减小趋势,表现为高频频段范围减小到 99kHz~123kHz,高频信号区边界几乎无法判断。当试件到达受压极限失稳破坏时,高频信号区再次出现明显边界,为 88kHz~142kHz,相较于试件 B,声发射信号离散性再次大幅度增加,呈现出信号由低频过渡到高频的迁移性。如图 5(d)所示,试件 D 在受压初期产生的声发射信号较少,信号分散,高低峰频大致确定在 8kHz~12kHz 和 117kHz~130kHz 两个频段内。当试件持续受压进入微裂隙扩展阶段时,声发射信号量进一步减少,但峰频高频频段界限可以确定在 117kHz~130kHz。当试件到达受压极限失稳破坏时,声发射信号量明显增加,离散性过大导致峰频信号区边界模糊,大致确定在 2kHz~20kHz 和 94kHz~140kHz,对比试件 A,可以清晰地看到峰频集中带由低频区过渡到高频区。如图 5(e)所示,试件 E 在受压初期产生的声发射信号较为集中,主要集中在低频区,高频区信号较少,高低峰频大致确定在 2kHz~16kHz 和 112kHz~118kHz 两个频段内。当试件持续受压进入微裂隙扩展阶段时,声发射信号高频区数量增加,离散性增大,前后部分分布不均匀,峰频高频区位于 110kHz~140kHz。当试件到达受压极限失稳破坏时,声发射高频区信号量再次增加,离散性大于试件 A,小于试件 B、C,信号分布在 2kHz~18kHz 和 94kHz~140kHz。

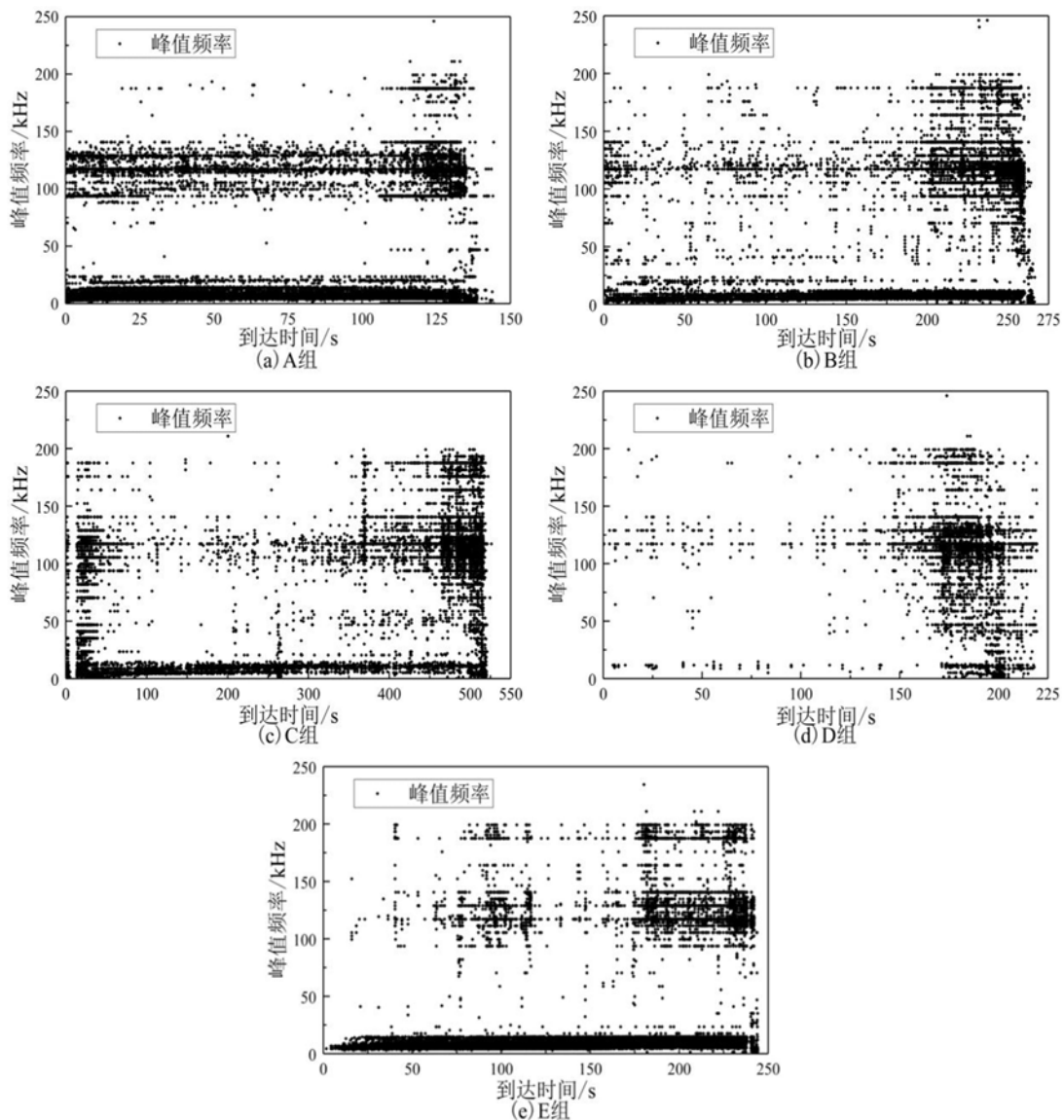


图5 不同尺寸试件声发射峰值频率与时间的关系

Fig. 5 Peak AE frequency of different size specimens vs. loading time

综上所述,不同高径比的试件在失稳破坏过程中,峰频主要集中在高频区和低频区两个区域内,不同高径比的试件优势分布区存在差异,反映了不同高径比试件在内部裂隙发育时的差异。在5组试件中,A试件高径比最大,峰频主要集中在低频区域内,高频区域内峰频值较少,基本不存在过渡区,但随着试样的高径比逐渐减小,峰频的主要分布区开始转移,峰频由低频区向过渡区移动,最后转移到高频区,特别是高径比最小的D试件,峰频主分布区已经为高频区。由试件的峰频分布占比可以发现,随着高径比的减小,试件峰频较小值集中区的占比逐渐减少,峰频过渡区、峰频较大值集中区的占比逐渐增加(见表4),离散性也在增加,同时,峰频的主要分布区也在逐渐升高。

当岩体试件高径比较小时,试件趋近于各向等长,缺陷分布相对均匀,在单轴受压时,能承受较大的荷载,内部裂隙类型及数量较多。随着高径比的增加,试件由各向等长趋近于单向伸长,试件缺陷分布不均匀度增加,骤然失稳破坏的概率大大增加,破坏时裂隙种类有所减少。何满潮等^[30]对岩石的上述现象进行了研究,认为岩体内部存在裂隙发育、扩展甚至剪切等多种断裂模式,因而拥有不同的声发射源,高低频均有分布。试件破坏时,随着高径比减小,裂隙种类增加,破坏模式相应增加,导致高低频的离散性相对较高,峰值频率的集中分布区由低频区过渡至高频区。在试件失稳破坏峰频信号到达爆发期时,岩体内部裂隙种类和破坏模式显著增加,微裂隙发育、贯通,峰频信号出现密集分布,在微裂隙持

续发育后,形成主破裂带贯通,岩体失稳破坏,在失稳破坏的过程中,试件高径比主要影响峰频信号单位时间内的离散程度,高径比越小,离散程度越大。

3 结 论

通过对不同高径比的长石砂岩进行单轴压缩的声发射试验,重点分析了尺寸效应对岩石撞击数、振铃计数以及峰值频率的影响,得出以下主要结论:

(1) 根据岩石试件撞击数的增长速率,将试件破坏阶段分为突变期、平静期、爆发期 3 个阶段,撞击数受尺寸效应影响的变化趋势呈现出线性相关关系,撞击数随着岩石试件高径比的增加而增加。

(2) 振铃计数随着试件高径比的减小,突变期时间占比相应减小,平静期激发振铃计数相应减小,爆发期振铃计数与平静期振铃计数的平均比值增加明显。

(3) 岩石试件在破坏的过程中,峰频呈现集中分布的现象,分为 2kHz~20kHz 和 94kHz~140kHz 高低 2 个主频区。岩石试件受到尺寸效应的影响,随着试件高径比的减小,峰频集中分布区由低主频区逐渐向高主频区过渡,同时,峰频分布区的离散性也在增加。

参考文献:

- [1] 尹贤刚,李庶林. 声发射技术在岩土工程中的应用[J]. 采矿技术, 2002, 2(4):39—42 (YIN Xiangang, LI Shulin. Application of AE techniques to geotechnical engineering[J]. Mining Rechnology, 2002, 2(4):39—42 (in Chinese))
- [2] 沈功田,戴光,刘时风. 中国声发射技术进展——学会成立 25 周年纪念[J]. 无损检测, 2003, 19(6):302—307 (SHEN Gongtian, DAI Guang, LIU Shifeng. Acoustic emission testing progress in China: celebration for the 25th anniversary of Chinese Society for NDT[J]. Nondestructive Testing, 2003, 19(6):302—307 (in Chinese))
- [3] Lockner D A. The role of acoustic emission in the study of rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1993, 30(7):883—899.
- [4] Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350(7):39—42.
- [5] 陈颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 机械强度, 1978(5):139—148 (CHEN Yong. Application of AE techniques in rock mechanism study[J]. Journal of Mechanical Strength, 1978(5):139—148 (in Chinese))
- [6] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1):17—21 (FU Xiaomin. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2005, 32(1):17—21 (in Chinese))
- [7] 姜永东,鲜学福,许江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6):946—950 (JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, XU Jiang. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial stress in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6):946—950 (in Chinese))
- [8] 尹贤刚,李庶林. 用岩石声发射凯塞效应量测地应力研究[J]. 采矿技术, 2006, 6(3):278—280 (YIN Xiangang, LI Shulin. Research on measuring field stress with Kaiser effect of acoustic emission of rock[J]. Mining Technology, 2006, 6(3):278—280 (in Chinese))
- [9] 赵兴东,刘建坡,李元辉,等. 岩石声发射定位技术及其实验验证[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10):1472—1476 (ZHAO Xingdong, LIU Jianpo, LI Yuanhui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10):1472—1476 (in Chinese))
- [10] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5):944—950 (ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):944—950 (in Chinese))
- [11] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15):2499—2503 (LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Study on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2499—

- 2503 (in Chinese))
- [12] 吴永胜, 余贤斌. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 金属矿山, 2008(10): 25—28 (WU Yongsheng, YU Xianbin. Experimental study on the acoustic emission characteristics of rocks at uniaxial compression[J]. Metal Mine, 2008(10): 25—28 (in Chinese))
- [13] 王创业, 常新科, 刘沂琳. 花岗岩破裂全过程声发射时频域信号特征及前兆识别信息[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 82—89 (WANG Chuangye, CHANG Xinke, LIU Yilin. Time and frequency domain characteristics and damage precursor identification information of acoustic emission signals during granite loading[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(3): 82—89 (in Chinese))
- [14] 俞缙, 李宏, 陈旭. 等砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 69—79 (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 69—79 (in Chinese))
- [15] 俞缙, 傅国锋, 陈旭, 等. 冻融循环后砂岩三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2001—2009 (YU Jin, FU Guofeng, CHEN Xu, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone after freezing-thawing cycles under triaxial confining pressure unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2001—2009 (in Chinese))
- [16] 吴成龙, 苏占东, 夏京, 等. 基于 Felicity 效应的砂岩损伤特性的试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(4): 721—728 (WU Chenglong, SU Zhandong, XIA Jing, et al. Experimental study on damage characteristics of sandstone based on Felicity effect[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4): 721—728 (in Chinese))
- [17] 苏占东, 孙进忠, 夏京, 等. 冻融循环对花岗岩声发射特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 865—874 (SU Zhandong, SUN Jinzhong, XIA Jing, et al. Experimental research of the effect of freezing-thawing cycles on acoustic emission characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 865—874 (in Chinese))
- [18] Hudson J A, Crouch S. Soft, Stiff and servo-controlled testing machines[J]. Engineering Geology, 1972, 6(3): 155—189.
- [19] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(6): 611—614 (LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(6): 611—614 (in Chinese))
- [20] 吕兆兴, 冯增朝, 赵阳升. 岩石的非均质性对其材料强度尺寸效应的影响[J]. 煤炭学报, 2007(9): 917—920 (LÜ Zhaoxing, FENG Zengchao, ZHAO Yangsheng. Influence of rock inhomogeneity on strength-size effect of rock materials [J]. Journal of China Coal Society, 2007(9): 917—920 (in Chinese))
- [21] 赵康, 王金安, 赵奎, 等. 岩石尺寸效应对其声发射影响的数值模拟研究[J]. 中国钨业, 2009, 24(3): 14—18 (ZHAO Kang, WANG Jinan, ZHAO Kui, et al. Numerical studies of the influence of scale effect on rock acoustic emission[J]. China Tungsten Industry, 2009, 24(3): 14—18 (in Chinese))
- [22] 赵康, 王金安. 基于尺寸效应的岩石声发射时空特性数值模拟[J]. 金属矿山, 2011, 24(6): 46—51 (ZHAO Kang, WANG Jinan. Numerical simulation on AE temporal and spatial characteristics of rock based on scale effect [J]. Metal Mine, 2011, 24(6): 46—51 (in Chinese))
- [23] 石永奎, 马源鸿, 尹延春. 尺寸效应对煤层冲击倾向性测试结果的影响[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 23—26 (SHI Yongkui, MA Yuanhong, YIN Yanchun. Research on size effect affected to seam bump-prone test results [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 23—26 (in Chinese))
- [24] 王创业, 杜晓娅, 张琪. 不同高径比砂岩破裂机制与声发射特性对比研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(5): 36—39 (WANG Chuangye, DU Xiaoya, ZHANG Qi. Comparative study on rupture mechanism and acoustic emission characteristics of sandstone with different ratios of height to diameter [J]. Industrial Minerals and Processing, 2018, 47(5): 36—39 (in Chinese))
- [25] GB/T 50266—2013, 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013 (GB/T 50266—2013, Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2013 (in Chinese))
- [26] 赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3673—3678 (ZHAO Xingdong, TANG Chunan, LI Yuanhui, et al. Study on AE activity characteristics under

- uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2):3673–3678 (in Chinese))
- [27] 吴贤振, 刘建伟, 刘祥鑫, 等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1):28–34 (WU Xianzhen, LIU Jianwei, LIU Xiangxin, et al. Study on the coupled relationship between AE accumulative ring-down count and damage constitutive model of rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(1):28–34 (in Chinese))
- [28] 邓建辉, 李林芮, 陈菲, 等. 大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5):12–17 (DENG Jianhui, LI Linrui, CHEN Fei, et al. Twin-peak frequencies of acoustic emission due to the fracture of marble and their possible mechanism[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2018, 50(5):12–17 (in Chinese))
- [29] 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 (ZHANG Yanbo, YU Guangyuan, TIAN Baozhu, et al. Experimental study of acoustic emission signal dominant-frequency characteristics of rockburst in a granite tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5):1258–1266 (in Chinese))
- [30] 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 (HE Mancao, ZHAO Fei, ZHANG Yi, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1):1–8 (in Chinese))

Experimental study on the effect of height-to-diameter ratio on acoustic emission characteristics of sandstone under uniaxial compression condition

GENG Zhiwei¹, SU Zhandong^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, TIAN Yuchen³

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The study of rock size effect on the acoustic emission (AE) characteristics is of great significance for the use of acoustic emission technology to monitor rock damage. Fine arkose samples with different height-to-diameter ratios are selected for uniaxial compression and acoustic emission test to analyze the effect of size effect on acoustic emission characteristics, including the number of AE events, AE ringing counts, and AE peak frequency. The results show that the AE events can be divided into three stages including abrupt phase, calm phase, and failure phase based on the increasing rate of AE events. With the height-to-diameter ratio of rock specimen increasing, the number of AE events accordingly increases, and the increasing trend is approximately linearly related to the height-to-diameter ratio. As the height-to-diameter ratio decreases, the proportion of time associated with the AE ring counts during the abrupt phase decreases, and the number of AE ring counts during the calm phase accordingly decreases. The peak frequency distribution of the rock specimens mainly shows two concentrated distribution bands, that is, the high frequency band and the low frequency band, respectively. As the height-to-diameter ratio decreases, the peak frequency near rock failure gradually shifts from the low frequency band to the high frequency band, and the dispersion of peak frequency increases as well. The experimental results enrich the basic data of the AE rock characteristics and provide a reference for the practical application of AE technology in actual engineering.

Keywords: height-to-diameter ratio; sandstone; uniaxial compression; AE events; ring counts; peak frequency