

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.01.012

不同应力路径下绢云母片岩粗粒料声发射特征

秦尚林¹, 杨兰强^{1,2}, 高 惠¹, 陈善雄¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315000)

摘 要:粗粒料在变形和颗粒破碎过程中伴随着明显的声发射(AE),通过监测粗粒料在外力作用下的声发射信号特征用来研究其力学机制。为探讨不同应力路径下绢云母片岩粗粒料声发射规律,采用改装设计的大型三轴试验机,对绢云母片岩粗粒料分别开展了常规三轴固结排水、等 p (体应力)和等 q (偏应力)应力路径试验,同时监测其声发射信号。研究表明,对于粗粒料的声发射必须考虑颗粒间的滑动摩擦、翻滚摩擦、颗粒破碎这3种细观机制。不同围压、不同应力水平对颗粒间的滑动、翻滚以及颗粒破碎活动影响较大,因此,在不同阶段,摩擦型AE与破碎型AE所占比例各不相同。在等 p 路径下,当累计声发射信号出现拐点时,可判断其为应变软化点。等 q 试验产生的累计AE计数与累计AE能量计数要比等 p 试验的累计AE计数和累计AE能量计数少一个量级,说明等 p 试验状态下的声发射要比等 q 试验活跃。等 p 试验中,随着体应力逐渐增大,累计AE参量增长率逐渐增大,而等 q 试验中,随着偏应力逐渐增大,累计AE参量增长率逐渐降低。

关 键 词:绢云母片岩粗粒料;声发射;应力路径;滑动;翻滚;颗粒破碎

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 01 - 0089 - 08

Acoustic emission characteristics of sericite schist coarse aggregates under different stress paths

QIN Shang-lin¹, YANG Lan-qiang^{1,2}, GAO Hui¹, CHEN Shan-xiong¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) will evidently accompany in the process of deformation and grain crushing of the coarse aggregates. Monitoring the acoustic emission signal characteristics of the coarse aggregates under the action of external force can be used to study the crushing mechanism. This paper studies the acoustic emission characteristics of sericite schist coarse aggregates. It uses the coupled acoustic emission large-scale triaxial test apparatus to carry out the conventional consolidated drained triaxial tests, the constant volumetric stress p and the constant deviatoric stress q tests on sericite schist coarse aggregates. The acoustic emission signals are monitored. The test results show that the acoustic emission of coarse aggregates is mainly from the particle breakage, sliding friction and rolling friction. The activities of inter-particle sliding, rolling and particle breakage are severely affected by different confining pressures and different stress levels. So the proportions of frictional AE and fractured AE are different at different stress levels. Under the constant p stress path test, the inflection point of accumulative acoustic emission signals appears, which can judge the strain softening point. The acoustic emission during the constant q test is obviously lower than that during the constant p test. The growth rate of accumulative acoustic emission parameters is gradually increased with the volumetric stress increasing in the constant p test. However, the growth rate of accumulative AE parameters is gradually decreased with the deviatoric stress increasing in the constant q test. It can be deduced that the acoustic emission of coarse aggregates is greatly influenced by shear stress.

Key words: sericite schist coarse aggregate; acoustic emission; stress path; slippage; rolling; particle breakage

1 引 言

利用声发射(AE)技术对岩石、混凝土等破坏机制方面的研究已取得了不少有价值的成果^[1-3]。

相比于在岩石力学领域中的广泛应用,声发射技术在土体中的应用比较少见。以美国 Koerner 等^[4-6]为代表的一批学者最早将声发射技术应用到土工试验,他们于 20 世纪 70 年代开始对土的声发射特性

收稿日期: 2013-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51079142); 湖北省谷城至竹溪高速公路科技项目(No. GZL-KJ-02-01); 中国科学院重点部署项目(No. KZZD-EW-05)。

第一作者简介: 秦尚林, 男, 1973 年生, 博士, 副研究员, 主要从事特殊土工程特性与处治方法及灾害防治技术等方面研究工作。

E-mail: qinshlin@sina.com

及检测做了一系列的工作,得出含水率、不均匀系数、围压、塑性指数等参数对土体声发射的影响规律。国内很少有关于声发射用于土工领域的报道,最早徐炳锋等^[7]做过相关的试验研究,在发展声发射技术的应用领域方面论证了土体渗透变形及拉裂声发射监测的可能性;陈清运等^[8]在不同围压下,对不同初始孔隙比和级配的南沙群岛永暑礁钙质砂进行室内三轴排水剪切试验,同时监测其声发射信号,认为钙质砂声发射机制必须同时考虑颗粒破碎和滑移两种细观机制,并描述了其声发射特征与围压、级配和初始孔隙比的关系。

目前,声发射技术用于粗粒料中的研究并不多见,主要是由于与岩石、混凝土相比,粗粒料的声发射源更加复杂;另外,试验技术上也受到限制。目前,关于岩石方面的声发射研究主要还是集中在单轴压缩试验上^[3,9-10]。由于AE信号衰减等问题的存在^[11],对于大型三轴试验研究首要解决的是AE信号衰减问题。

鉴于此,本文拟通过对大型三轴试验仪器的局部改造设计,使得声发射传感器可直接粘贴在试样表面,以实现近距离监测三轴试验的声发射信号。并通过改进的仪器开展不同应力路径下的大型三轴试验,同时监测其声发射。可望通过控制应力路径来研究粗粒料的声发射规律,为进一步探讨粗粒料的强度变形的演化规律奠定基础。

2 试验方案

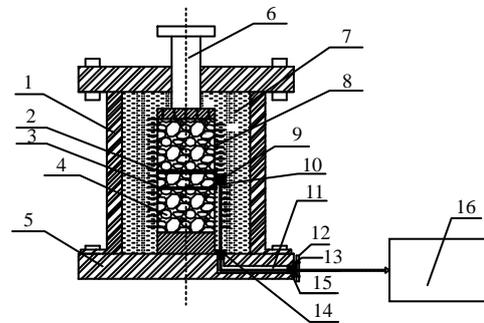
2.1 近距离监测三轴试验的AE装置设计

大型三轴试验机的压力室尺寸较大,其缸壁厚实,而且试验时压力室内充满水,如果将声发射传感器粘贴在三轴压力室的外侧,声发射信号能量损失将非常严重。为了减小信号的衰减,保证采集的声发射信号的真实性和完整性,对大型三轴试验机进行局部改装,使得传感器可直接粘贴在试样的表面,在一定程度上可避免声发射信号的大量损失,同时不影响大型三轴仪本身功能。

为此,对2000 kN大型多功能静动三轴试验机进行局部改装设计。在其底座上开了一个L型的导通管道,传感器通过弹性橡皮圈和防护罩直接固定在试样的乳胶膜外侧。其传感器信号线穿过L型管道从压力室内连接至声发射采集系统,如图1所示。L型管道两端通过橡胶塞和预压力板共同作用,起到了密闭性的效果。试验表明,采用图1所示的防渗系统可承受2 MPa以上的水压力。

声发射监测系统采用美国物理声学公司生产的

声发射仪(AEwin for DiSP E3.52),可对声发射事件自动计数、存储,可与计算机通讯,实现对声发射的实时监测。试验选用了美国物理声学公司生产的防水型传感器R6I-UC,其传感器可承受2 MPa水压力。



1—室体;2—上弹性橡皮圈;3—下弹性橡皮圈;4—试样;5—底座;6—活塞杆;7—围压水;8—乳胶膜;9—声发射传感器;10—防护固定罩;11—L型导通管道;12—预压力板;13—紧固螺栓;14—内防水橡胶塞;15—外防水橡胶塞;16—声发射采集系统;17—声发射信号线

图1 耦合声发射的大型三轴试验装置

Fig.1 Large-scale triaxial test apparatus coupled with acoustic emission

由于声发射信号受环境噪音的影响很大,常采用阈值设置方式进行降噪处理^[12]。在试验前期,使三轴仪空转一段时间,同时进行声发射监测。通过不断调整阈值发现,要完全剔除环境噪音,至少需将阈值设置到30 dB以上。将阈值分别设置为20、25、30、35、40、45 dB时,启动三轴试验机,不对试样加载,收集声发射信号。经多次重复试验发现,当取阈值为35 dB时,传感器收到的机械声发射信号能量计数为0,且没有事件数出现,因此,阈值为35 dB且未加载时,机械噪声全部被滤除。为保守起见,本文推荐设置固定阈值为37 dB,基本可屏蔽环境噪音。有必要指出,在屏蔽环境噪音的同时,不可避免也屏蔽了37 dB以内的粗粒料的AE信号。但本文主要通过声发射技术研究粗粒料的颗粒破碎对强度、变形的影响,粗粒料在颗粒破碎过程中主要还释放出高幅值、高能量的声发射信号。对于屏蔽37 dB以内的低幅值、低能量信号,并不影响对试样宏观性质的判断。同时,试验中也参考了岩石方面的做法,主要通过较高幅值的声发射来反映粗粒料内部损伤演化的机制。

2.2 试验用料

试验材料采用绢云母片岩粗粒料,取自谷竹高速公路现场。绢云母片岩呈片状,鳞片变晶结构,是一种极软岩,其主要矿物成分为绿泥石、云母和石英,如图2所示。



图 2 绢云母片岩粗粒料

Fig.2 Photograph of sericite schist coarse aggregates

试件高度 $H = 60$ cm, 直径 $D = 30$ cm, 粗粒土三轴试验中, 要求试件直径应等于或大于最大土料直径的 5 倍以上^[13]。由于试验仪器的尺寸限制, 试样粒径不能大于 60 mm, 而用于路基填筑的绢云母片岩粗粒料粒径有一部分在 60 ~ 100 mm 范围内, 大约占 15%。根据文献[13]的规定, 采用等质量替代法对现场绢云母片岩料进行缩尺, 即采用 $5 \text{ mm} < d < 60 \text{ mm}$ (d 为粒径) 的粒径颗粒对现场绢云母片岩按比例等质量替换 60 ~ 100 mm 粒径的颗粒, 以尽可能地模拟现场力学性质, 如图 3 所示。

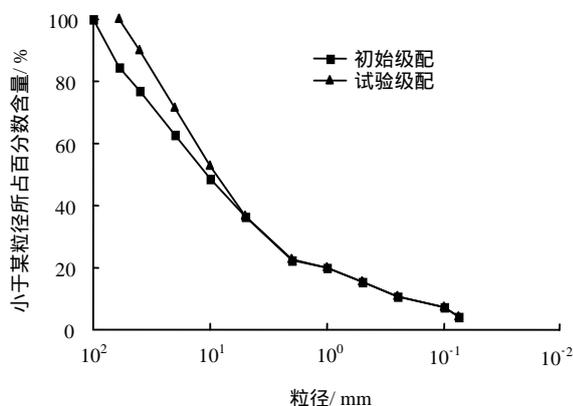


图 3 绢云母片岩粗粒料的级配曲线

Fig.3 Gradation curves of sericite schist coarse aggregates

2.3 试验应力路径及其过程

对绢云母片岩粗粒料进行常规三轴固结排水试验、等 p 以及等 q 等应力路径试验。制样初始干密度控制为 1.98 g/cm^3 , 装样完毕后, 把声发射传感器布置在套有乳胶膜试样高度的中间位置。试验时, 保持三轴加载过程与声发射监测同步。

(1) 常规三轴固结排水试验 (CD): 选取 3 种围压, 分别为 200、400、600 kPa。采用位移控制, 轴向剪切速率为 1.0 mm/min 。当轴向应变达到 17% 时, 结束试验。试验期间上、下孔隙水阀始终打开, 保持排水顺畅。

(2) 等 p 试验: 选取 4 种球应力, 分别为 400、600、800、1 000 kPa。试验采用应力控制, 轴向力保持增长速率为 0.035 kN/s , 围压降低速率保持在 -0.001 MPa/s , 当试验轴向应变达 15% 时结束试验。试验期间上、下孔隙水阀始终打开, 保持排水顺畅。

(3) 等 q 试验: 选取 3 种偏应力, 分别为 0、200、400 kPa。试验采用应力控制, 围压增长速率保持在 0.01 MPa/min , 同时, 轴向力增长速率保持在 0.012 kN/s 。直至加载至 1 000 kPa 时, 结束试验。其中 $q = 0$ 试验, 在围压达到 400 kPa 时, 原路返回, 卸载至 200 kPa 后, 再按上述速率加载至结束。试验期间上、下孔隙水阀始终打开, 保持排水顺畅。

通过不同应力路径试验结果对比, 探讨粗粒料加载条件下的声发射特性以及应力与声发射参数之间的关系等。

3 试验结果与讨论

3.1 CD 试验下的 AE 特征

图 4 分别为不同围压下的 CD 试验的偏应力、轴向应变与 AE 计数率的关系图。由图可知, 绢云母片岩粗粒料在剪切初期就伴随着大量的声发射。围压为 200 kPa 时 AE 计数率主要集中在 250 左右, 围压为 400 kPa 时的 AE 计数率主要集中在 280 左右, 围压为 600 kPa 时, 则 AE 计数率主要集中在 400 左右。说明随着围压的增大, 绢云母片岩粗粒料的声发射信号变得越来越密集。

目前, 关于岩石方面的声发射研究认为, 岩样初始阶段, 也就是压密阶段基本不存在声发射事件数^[2]; 岩石在单轴加载过程中产生的 AE 信号, 主要来自于原有裂隙闭合和颗粒摩擦引起的摩擦型 AE 和新裂隙扩张引起的破裂型 AE^[14]。岩土粗粒料作为一种散体材料, 其颗粒内部缺陷较为严重, 边部棱角丰富, 没有岩石那么完整、均质, 因此, 需要考虑颗粒间滑动摩擦、翻滚摩擦以及颗粒破碎, 这 3 种微观机制产生的声发射。对于粗粒料而言, 初始阶段就出现了大量的 AE 信号。研究分析认为, 粗粒土的应力-应变曲线在初始阶段的弹性现象并不明显, 实际上初始阶段土体由于在载荷作用下, 就会出现颗粒镶嵌、压密、土中水的排出等行为, 应力-应变曲线就表现出明显的非线性。另外, 绢云母片岩粗粒料属于极度软岩堆石料, 棱角丰富, 缺陷较多, 易颗粒破碎。因此, 在初始阶段, 即使很小的应力, 也会造成一定程度的颗粒破碎和滑移翻滚等, 从而造成初始阶段出现了大量的声发射现象。

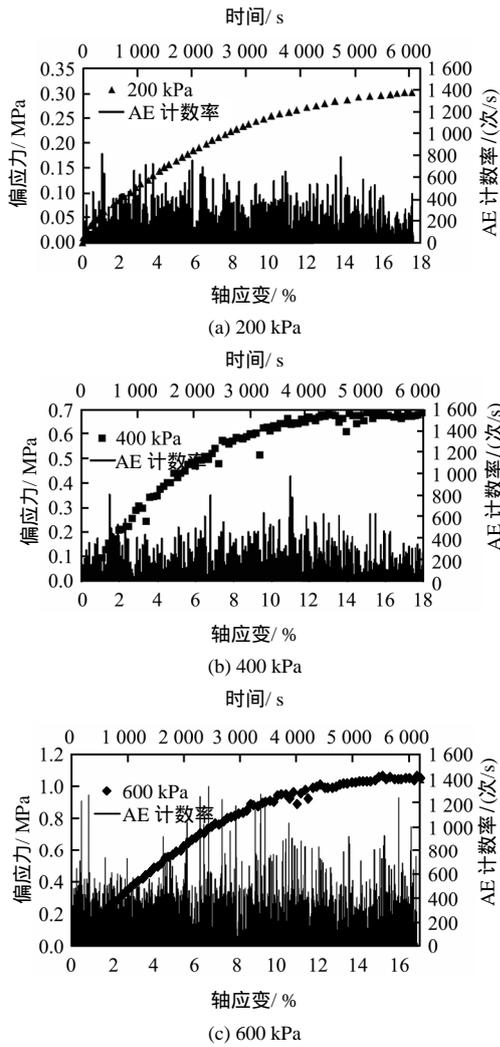


图4 CD条件下偏应力-应变-AE计数关系
Fig.4 Variations of deviatoric stress and AE counts with axial strain under consolidated drained triaxial tests

图5、6分别为不同围压下的累计声发射计数、累计声发射能量计数与时间的关系。由图可知，围压为600 kPa时的累计计数与累计能量计数明显大于200、400 kPa围压产生的声发射。围压为200、400 kPa时，随着时间的变化，增长率大体一致。

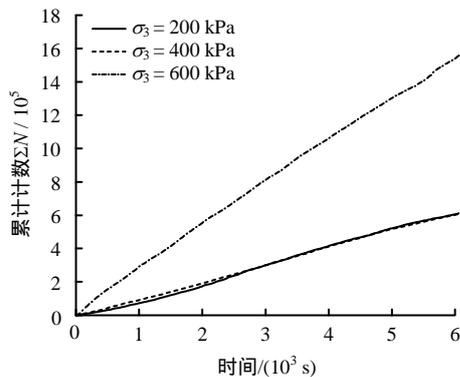


图5 CD条件下声发射累计计数与时间的关系
Fig.5 Variation of accumulative AE counts with time under consolidated drained triaxial tests

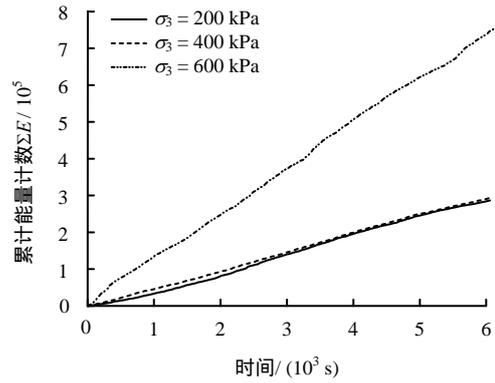


图6 CD条件下声发射累计能量计数与时间的关系
Fig.6 Variation of accumulative AE energy counts with time under consolidated drained triaxial tests

实际上，颗粒间滑移和翻滚活动受孔隙率影响较大。就某一围压而言，随着偏应力逐渐增大，粗粒料体积变形逐渐缩小（绢云母片岩粗粒料在不同围压下没有出现剪胀现象），孔隙率逐渐减小，颗粒滑移、翻滚越来越困难，造成的声发射逐渐减少。由于绢云母片岩粗粒料易颗粒破碎，在整个加载过程中出现了大量的跳跃信号，即某一时刻AE计数率较高。

为了更好地说明问题，采用Hardin定义的相对破碎率 B_r ^[15]来描述颗粒破碎随轴向应变的变化关系。Hardin定义了破碎势和破碎量以及试验前后颗粒分布曲线与粒径 $d = 0.074$ mm竖线所围面积，分别为初始破碎势 B_{pi} 和试验后破碎势 B_{pf} ，并且认为，粒径小于0.074 mm的细颗粒对颗粒破碎的影响不大，破碎量 B_t 为上述两面积的差值，即

$$B_t = B_{pi} - B_{pf} \tag{1}$$

再定义相对颗粒破碎率为

$$B_r = B_t / B_{pi} \tag{2}$$

图7为围压600 kPa下的相对破碎率随轴向应变的关系。由图可知，在本次试验应变范围内，随着轴向应变的逐渐增大，相对破碎率增长速率逐渐增大，亦即说明随着偏应力的逐渐增大，颗粒破碎造成的破碎型AE越来越多。

就某一轴向应变而言，随着围压增大，试样内孔隙率逐渐减小，造成颗粒间滑移、翻滚越来越困难，而颗粒破碎随着围压增大越来越严重，因此，随着围压增大，由滑移摩擦、翻滚摩擦造成摩擦型AE越来越小，颗粒破碎造成的破碎型AE越来越多。

综上所述，粗粒料在荷载作用下产生的声发射需要考虑颗粒间的滑移、翻滚和颗粒破碎这3种细

观机制。对于 CD 条件下的粗粒料声发射规律受围压与偏应力的共同作用。不同围压、不同应力水平对颗粒间的滑移、翻滚以及颗粒破碎活动影响较大，因此，在不同阶段，摩擦型 AE 与破碎型 AE 所占比例各不相同。对于图 5、6 所示情况而言，600 kPa 围压下的累计 AE 计数和累计 AE 能量计数最大，增长率最高。主要是由于该条件下的颗粒破碎非常严重，产生的破碎型 AE 相对较高。而围压为 200、400 kPa 时，滑移、翻滚造成的摩擦型 AE 与颗粒破碎造成的破碎型 AE 大体一致，因此，造成这两种围压下累计 AE 计数和累计 AE 能量计数的增长率大体一致。

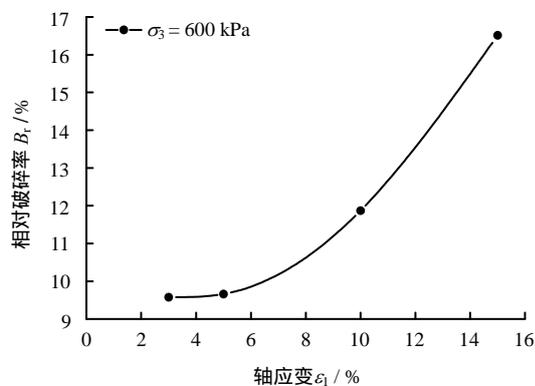


图 7 CD 条件下相对破碎率与轴向应变的关系
Fig.7 Variation of relative breakage with axial strain under consolidated drained triaxial test

3.2 等 p 路径下的 AE 特征

图 8 分别是等 p 试验的偏应力、轴向应变与 AE 计数率的关系图。

由图可知，不同体积应力 p 条件下，初始轴向应变阶段均仅有很少的声发射。随着轴向应变的增加，声发射信号越来越密集，越来越多。 $p = 400$ kPa 时，从声发射信号大量开始到结束，AE 水平基本一样，在轴向应变达到 15% 时，出现了大量的跳跃信号。而 p 从 600 ~ 1 000 kPa，声发射信号在峰值差应力的位置出现了最大值，并随着轴向应变的继续增加，伴随着声发射大量出现。

等 p 路径下的声发射特征与 CD 试验表现的不太相同。等 p 路径下 AE 信号初始阶段很少，随着轴向应变的增加，出现了大量的 AE 信号，在整个加载过程中，均有大量的跳跃值出现，当偏应力达到峰值应力时，声发射计数率达到最大值，当加载继续时，AE 信号依然大量出现。

图 9、10 分别是等 p 条件下累计 AE 计数、累计 AE 能量计数与时间的关系。由图可知，初始阶段，累计 AE 计数与累计 AE 能量计数的变化斜

率较小，说明初始阶段仅有很少的声发射。随着时间的增长，其变化斜率越来越大。在最后阶段，即试样的软化阶段，累计 AE 计数与累计 AE 能量计数出现了明显的拐点。

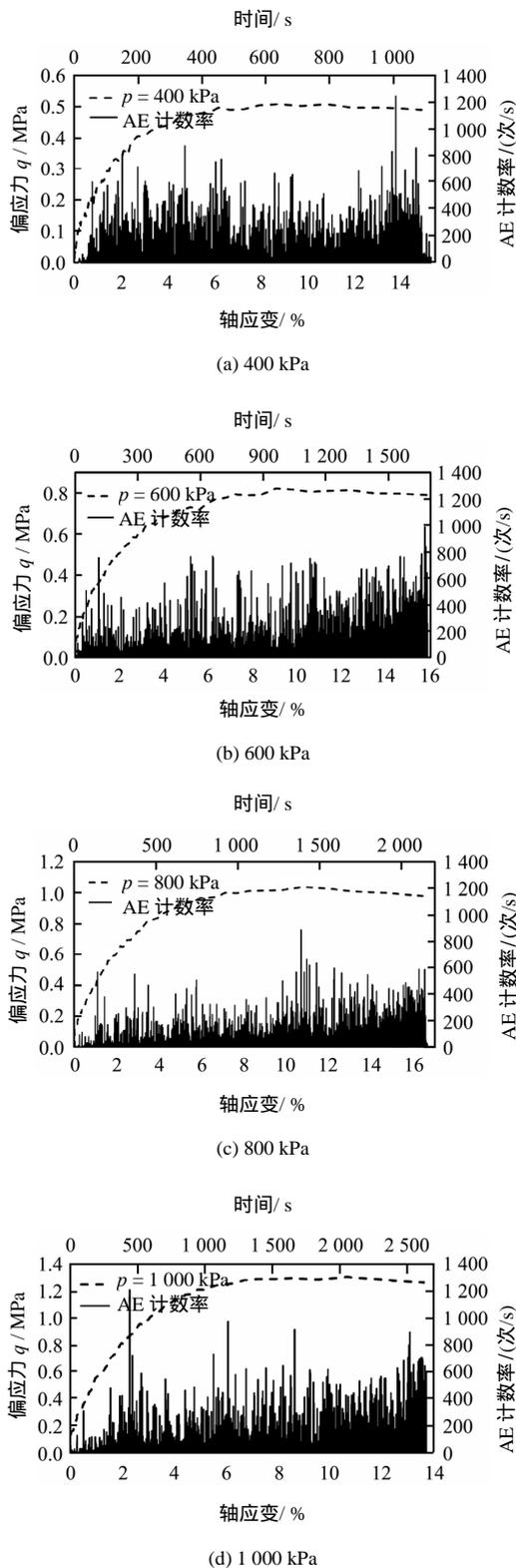


图 8 等 p 条件下偏应力-应变-AE 计数关系
Fig.8 Variations of deviatoric stress, and AE counts with axial strain under constant p tests

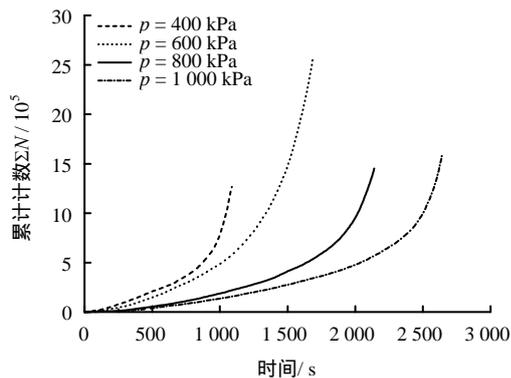


图9 等 p 条件下声发射累计计数与时间的关系
Fig.9 Variation of accumulative AE counts with time under constant p tests

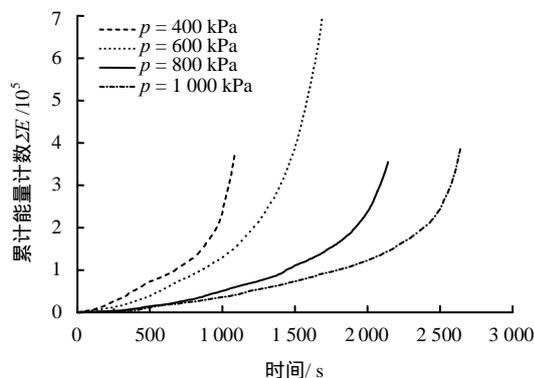


图10 等 p 条件下声发射累计能量计数与时间的关系
Fig.10 Variation of accumulative AE energy counts with time under constant p tests

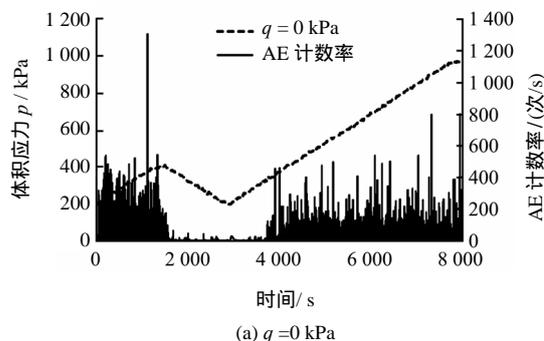
分析认为，等 p 路径是模拟纯剪切应力状态，因此，相比于常规固结排水试验，其剪切面更容易形成，当 p 从 600 ~ 1 000 kPa 时，应变出现了微软化，说明此时剪切面形成。由于剪切面内的形成更加促进了颗粒间滑移、翻滚和颗粒破碎，出现了异常多的声发射。由此可见，在等 p 路径下，当累计声发射信号出现拐点时，则可判断其为应变软化点，也就说明试样内部剪切面已形成。

3.3 等 q 路径下的 AE 特征

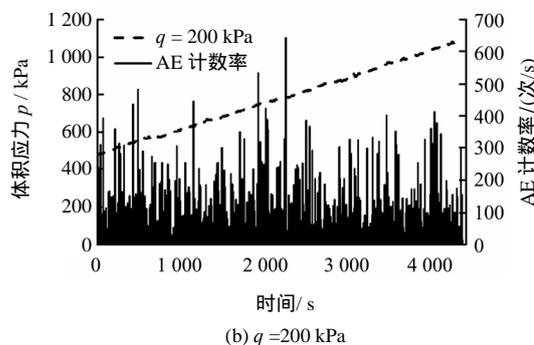
图 11 为等 q 试验的体积应力与 AE 计数率随时间变化的关系图。

由图可知，加载初期就伴随着大量的声发射。 $q=0$ kPa 时，AE 计数水平在 200 左右； $q=200$ kPa 时，AE 计数水平在 150 左右；而 $q=400$ kPa 时，AE 计数水平大致在 100 附近。说明随着初始偏应力 q 的增加，声发射计数水平反而降低。等 q 路径试验中，偏应力不变，仅在体积应力的影响之下，相比等 p 试验，声发射计数率明显比等 p 路径中的计数要低。说明体积应力的变化造成的声发射没有偏应力造成的声发射活跃。前面分析认为，粗粒料

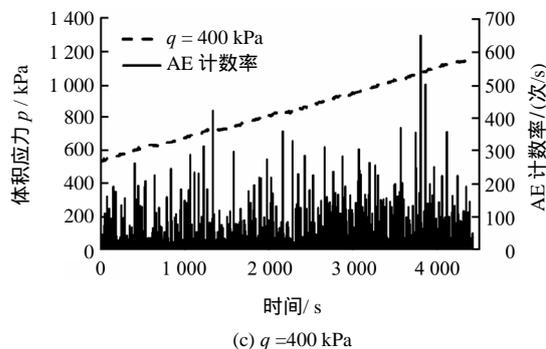
产生的声发射主要源自颗粒间滑移、翻滚和颗粒破碎。因此，从声发射活跃程度上分析，试样内部的大量滑移、翻滚、颗粒破碎行为主要由偏应力主导。



(a) $q=0$ kPa



(b) $q=200$ kPa



(c) $q=400$ kPa

图 11 等 q 条件下体积应力、AE 计数-时间关系
Fig.11 Variation of volumetric stress and AE counts with time under constant q tests

图 12、13 分别是等 q 条件下累计 AE 计数、累计 AE 能量计数与时间的关系。

由图可知，随着偏应力 q 的增加，其累计 AE 计数与累计 AE 能量计数越来越小。累计 AE 计数与累计 AE 能量计数的初始斜率随着 q 逐渐增大反而下降。主要是由于 q 越大，说明试样在进行仅受体积应力加载之前，已经受到偏应力的加载变形，造成大量的颗粒破碎，从而产生大量的声发射。因此，在体积应力的环境中，颗粒间滑移、翻滚、颗粒破碎就显得不太活跃。相较等 p 试验而言，等 q 试验产生的累计 AE 计数与累计 AE 能量计数要比等 p 试验小一个量级，也说明等 p 试验状态下的声

发射要比等 q 试验活跃。

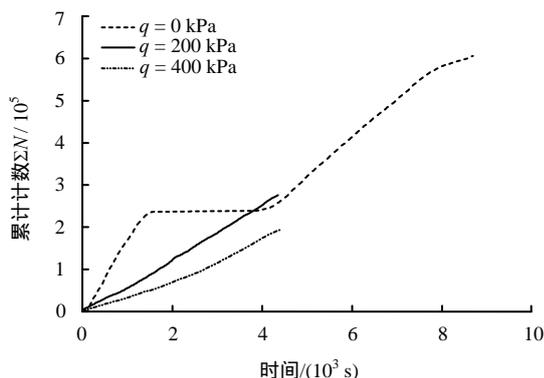


图 12 等 q 条件下声发射累计计数与时间的关系
Fig.12 Variation of accumulative AE counts with time under constant q tests

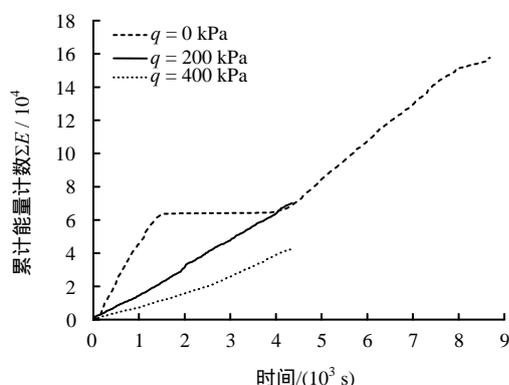


图 13 等 q 条件下声发射累计能量计数与时间的关系
Fig.13 Variation of accumulative AE energy counts with time under constant q tests

3.4 不同应力路径下绢云母片岩粗粒料声发射特征对比分析

从 CD 试验、等 p 试验、等 q 试验等应力路径试验对比来看，CD 试验中加载初始阶段便伴随着大量的声发射，如图 4 所示。而等 p 试验初始阶段的声发射却很少，如图 8 所示。等 q 试验也在初始阶段伴随着大量的声发射，如图 11 所示。可以认为，初始阶段的声发射主要是由体积应力造成的，而偏应力不造成影响。随着加载的进行，偏应力对土体造成剪切变形，形成剪切面，在该阶段将伴随着大量的声发射，而 CD 试验中，由于体积应力随着偏应力相应的增加，使得偏应力造成的剪切面受到围压的抑制，从而抑制了颗粒破碎、滑移以及翻滚。因此，在 CD 试验中，没有出现等 p 试验中明显的、大量的密集的跳跃信号。

4 结 论

(1) 通过对大型三轴试验仪器的局部改造设计，

实现了在三轴压力室内监测试验过程中产生的声发射信号，并通过试验确定了合理的声发射阈值。

(2) 对于粗粒料的声发射必须考虑颗粒间的滑移、翻滚、颗粒破碎这 3 种微观机制。就某一围压而言，随着偏应力逐渐增大，体积逐渐缩小（绢云母片岩粗粒料在不同围压下没有出现剪胀现象），孔隙率逐渐减小，颗粒滑移、翻滚越来越困难，造成的 AE 计数逐渐减少，相应的颗粒破碎率增加，颗粒破碎造成的破碎型 AE 也逐渐增多。由于绢云母片岩粗粒料易颗粒破碎，在整个加载过程中出现了大量的跳跃信号，即某一时刻 AE 计数率较高。就某一偏应力水平而言，随着围压增大，试样颗粒间滑移、翻滚越来越困难，而颗粒破碎随着围压增大越来越严重，因此，随着围压增大，由滑移摩擦、翻滚摩擦造成摩擦型 AE 越来越小，颗粒破碎造成的破碎型 AE 越来越多。

(3) 等 p 路径是模拟纯剪切应力状态。因此，相比较常规固结排水试验，其剪切面更容易形成，当 p 从 600 kPa ~ 1 000 kPa 时，出现了应变微软化，说明此时剪切面已形成。而剪切面又促进了颗粒间滑移、翻滚和颗粒破碎的活动，因此，该阶段出现了大量的声发射。由此可见，在等 p 路径下，当累计声发射计数或累计声发射能量计数出现明显的拐点，则可判断其为应变软化点，也就说明试样内部的剪切面形成。

(4) 相较等 p 试验而言，等 q 试验产生的累计 AE 计数与累计 AE 能量计数要比等 p 试验的累计 AE 计数与累计 AE 能量计数小一个量级，说明等 p 试验状态下的声发射要比等 q 试验活跃。随着初始偏应力 q 的增加，声发射计数率水平反而降低。等 q 路径中，偏应力不变，仅在体积应力的影响下。相比等 p 试验，声发射计数率明显比等 p 路径中的计数率要低，说明体积应力的变化造成的声发射没有偏应力造成的声发射活跃。

参 考 文 献

- [1] 纪洪广, 王宏伟, 曹善忠, 等. 花岗岩单轴受压条件下声发射信号频率特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, (增刊 1): 2900 - 2905.
JI Hong-guang, WANG Hong-wei, CAO Shan-zhong, et al. Experimental research on frequency characteristics of acoustic emission signals under uniaxial compression of granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.1): 2900 - 2905.
- [2] 吴贤振, 刘祥鑫, 梁正召, 等. 不同岩石破裂全过程的

- 声发射序列分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3561 - 3569.
- WU Xian-zhen, LIU Xiang-xin, LIANG Zheng-zhao, et al. Experimental study of fractal dimension of AE serials of different rocks under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3561 - 3569.
- [3] 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.
- ZHANG Ru, XIE He-ping, LIU Jian-feng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2584 - 2588.
- [4] KOERNER R M, CURRAN J W, MCCABE W M, et al. Acoustic emission behavior of granular soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1976, 102(7): 761 - 773.
- [5] KOERNER R M, LORD A E, DEUTSCH W L, et al. Determination of prestress in granular soils using AE[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 1984, 110(3): 346 - 358.
- [6] DEUTSCH W L, KOERNER R M, et al. Determination of prestress in in-situ soils using acoustic emissions[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 115(2): 228 - 245.
- [7] 徐炳锋, 钱家欢, 朱正亚, 等. 流土声发射监测实验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1995, 19(1): 32 - 36.
- XU Bing-feng, QIAN Jia-huan, ZHU Zheng-ya, et al. Laboratory study of acoustic emission monitoring of flow soil[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1995, 19(1): 32 - 36.
- [8] 陈清运, 孙吉主, 汪稔. 钙质砂声发射特征的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2027 - 2030, 2036.
- CHEN Qing-yun, SUN Ji-zhu, WANG Ren. Triaxial experiment study of acoustic emission laws of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2027 - 2030, 2036.
- [9] 赵勇刚, 朱宝龙, 王英杰. 风化后红砂岩单轴压缩变形及声发射特性试验[J]. 西南科技大学学报, 2012, 27(4): 44 - 48, 57.
- ZHAO Yong-gang, ZHU Bao-long, WANG Ying-jie. Weathering red sandstone uniaxial compression deformation and acoustic emission characteristic test research[J]. **Journal of Southwest University of Science and Technology**, 2012, 27(4): 44 - 48, 57.
- [10] 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 Shu-lin, YI Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2499 - 2503.
- [11] 邹银辉, 文光才, 胡千庭, 等. 岩体声发射传播衰减理论分析与试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(6): 663 - 667.
- ZOU Yin-hui, WEN Guang-cai, HU Qian-ting, et al. Theory analysis and experimental study of the spread and attenuation of acoustic emission in rock body[J]. **Journal of China Coal Society**, 2004, 29(6): 663 - 667.
- [12] 欧阳利军, 陆洲导, 赵艳林, 等. 混凝土结构声发射检测参数设置研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 37 - 41.
- OUYANG Li-jun, LU Zhou-dao, ZHAO Yan-lin, et al. The setting of acoustic emission detecting parameters in concrete structure[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2008, 30(5): 37 - 41.
- [13] 中华人民共和国交通部. JTG E40 - 2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 王小琼, 葛洪魁, 宋丽莉, 等. 两类岩石声发射事件与 Kaiser 效应点识别方法的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 580 - 588.
- WANG Xiao-qiong, GE Hong-kui, SONG Li-li, et al. Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and Kaiser effect point recognition approach[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 580 - 588.
- [15] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1985, 111(10): 1177 - 1192.