

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0781

岩石摩擦滑动变形演化及声发射特征研究

宋义敏¹, 邓琳琳¹, 吕祥锋², 许海亮¹, 赵泽鑫¹

(1. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144; 2. 北京市市政工程研究院 岩土工程技术研究中心, 北京 100037)

摘 要: 进行岩石摩擦滑动变形演化过程的声发射特征试验研究。以数字散斑相关方法和声发射系统为试验监测手段, 采用双面剪切模型试验方法, 开展界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数、界面摩擦滑动位移与声发射累计能量、试件变形能密度与声发射 b 值的对应关系研究。结果表明: (1) 声发射振铃计数演化受岩石界面摩擦滑动速率影响, 界面摩擦滑动速率的突变与声发射振铃计数激增有较好对应关系; (2) 界面摩擦滑动位移与摩擦滑动过程中声发射累计能量演化趋势具有较好的对应关系, 可以利用声发射累计能量对岩石摩擦滑动位移的变化趋势进行定性判断; (3) 通过声发射 b 值演化分析可以得出, 在剪应力缓慢增长阶段, 界面摩擦滑动以随机分布的小尺度微破裂为主; 在剪应力线性增长阶段后期, 界面摩擦滑动以锁固段的大尺度微破裂为主; 在剪应力波动增长阶段, 岩石摩擦滑动失稳既可能是由小尺度微破裂为主引发的状态转化, 又可能是由锁固段大尺度微破裂为主引发的稳定状态转换。

关 键 词: 岩石摩擦滑动; 数字散斑相关方法; 变形场; 声发射; 声发射 b 值

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 08-2899-09

Study of acoustic emission characteristics and deformation evolution during rock frictional sliding

SONG Yi-min¹, DENG Lin-lin¹, LÜ Xiang-feng², XU Hai-liang¹, ZHAO Ze-xin¹

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. Geotechnical Engineering Research Center, Beijing Institute of Municipal Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: The acoustic emission characteristics of deformation evolution during rock frictional sliding is studied in the present work. Digital speckle correlation method and acoustic emission system were adopted to measure deformation and AE information in the experiment process. The corresponding relationship between the interface frictional sliding rate and the acoustic emission ringing count, the interface frictional sliding displacement and the acoustic emission cumulative energy, the specimen deformation energy density and the AE b -value were studied. The results show that: the evolution of acoustic emission ringing count was influenced by frictional sliding rate of rock interface. There was a close correlation between the sudden change of acoustic emission ringing count and surge of rock interface frictional sliding rate. The acoustic emission cumulative energy was related to the frictional sliding displacement of rock interface. The change trend of frictional sliding displacement of rock interface could be qualitatively identified by the evolution characteristics of the acoustic emission cumulative energy. Based on the evolution characteristics of AE b -values, the interface frictional sliding was dominated by small-scale microcracks of random distribution during the period of slowly increasing shear stress, while the interface frictional sliding was dominated by large-scale microcracks of locking area during the period of shear stress linear growth stage late. The failure of rocks frictional sliding might be caused by small-scale microcracks, and might be also caused by large-scale microcracks of locking area during the fluctuation process of shear stress.

Keywords: rock frictional sliding; digital speckle correlation methods; deformation field; acoustic emission (AE); b -value of AE

1 引 言

近年来, 随我国高应力、大空间和快速施工的

岩土及采矿工程建设不断增加, 由岩石摩擦滑动失稳引发的工程地质灾害时有发生, 对工程安全建设造成巨大威胁^[1-3]。因此, 开展岩石摩擦滑动灾害的

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51474013)。

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (51474013).

第一作者简介: 宋义敏, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学实验和理论方面的教学与研究工作。E-mail: ssymymok@sina.com

预测预警及防治相关研究工作具有重要的实践价值。

声发射是一种应用较为广泛的岩石变形破坏监测手段^[4-9],国内外学者针对岩石摩擦滑动的声发射演化特征开展了大量的研究工作。如王煜曦等^[10]对两种不同破坏形式的断裂岩石在不同蠕剪阶段声发射能量和蠕变剪切位移关系进行研究,并通过声发射定位系统对蠕剪过程中断裂岩石的双翼啮合和磨损进行定位;蒋海昆等^[11]在双轴压缩条件下,利用岩石单剪摩擦滑动模型,对岩石摩擦滑动过程中声发射 b 值的演化特征进行试验研究;缪阿丽等^[12]通过单剪摩擦试验模型,研究了岩石摩擦稳定性的转换及其对应的应变变化及微破裂特征,并通过声发射指标对岩石摩擦滑动的速度依赖性进行分析;李普春等^[13]通过多通道声发射采集系统研究了岩石黏滑过程中沿滑动面的声发射信号的初动到时和初动方向空间分布,对黏滑过程中的震源错动行为进行了分析;刘力强等^[14]对比分析了不同岩石摩擦滑动试验模型在变形过程中的声发射 b 值和频谱随时间的演化特征,进一步研究提出了岩石摩擦滑动过程中声发射 b 值和频谱变化的物理机制;宋波等^[15]研究了岩石摩擦滑动过程中声发射时间序列特征,提出了岩石摩擦滑动过程中声发射参数的危险临界值;马胜利等^[16]通过声发射事件的能级演化特征,分析岩石摩擦滑动界面阶区的微破裂对岩石摩擦滑动失稳的作用效应;姜耀东等^[17]通过砂岩-煤组合试样在不同轴向荷载下的滑动摩擦试验,研究了煤岩组合样本失稳滑动的产生条件,特定条件下的滑动类型,位移演化规律以及滑动过程所伴随的声发射特征。虽然,学者们的研究取得了很多有意义的成果,但是,声发射信息与岩石摩擦滑动位移场演化、界面摩擦滑动状态变化及能量演化等过程密切相关,深入细致地开展岩石摩擦滑动变形演化与声发射特征关系研究对进一步的岩石摩擦滑动演化机制探讨及声发射预测预警指标建立具有指导价值和意义。

本文采用双面剪切模型试验,通过数字散斑相关方法对试验全过程岩石摩擦滑动变形演化进行观测,结合声发射系统采集到的试验过程中声发射信号,分析岩石摩擦滑动过程中位移场、界面摩擦滑动位移及试件变形能密度、声发射振铃计数、声发射累计能量及声发射 b 值演化特征,开展岩石摩擦滑动过程中界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数、界面摩擦滑动位移与声发射累计能量、试件变形能密度与声发射 b 值对应关系研究。

2 试验概况

2.1 试验模型及试验系统

双面剪切模型试件由 3 块岩块构成,材料为花岗岩,弹性模量约 60 GPa,上、下两端为固定岩块,尺寸为 300 mm×50 mm×50 mm,中间为滑动岩块,尺寸为 350 mm×50 mm×100 mm。模型试件包含由人工切割而成的上、下两个滑动面,面积分别为 0.015 m² (300 mm×50 mm),试验开始前用 300# 金刚砂纸将其打磨光滑。模型尺寸、边界条件、坐标轴设置、声发射探头布置、数字散斑相关方法的位移场分析区域及变形能密度分析区域如图 1 所示。其中,图 1 中坐标轴为位移场等值线图绘制坐标轴;红色虚线标示区域为位移场计算区域,尺寸为 300 mm×70 mm,包括下滑动面和滑动岩块、固定岩块部分区域,滑动岩块部分尺寸为 300 mm×50 mm,固定岩块部分尺寸为 300 mm×20 mm,位移场具体分析结果见 3.1 节;白色斜线标示区域 1~4 为变形能密度分析区域,各区域尺寸为 45 mm×45 mm,间隔 40 mm,变形能密度详细分析结果见 3.2 节。

试件的位移边界及加载条件如下:限制两个固定岩块的左侧面水平方向位移,右侧保持自由状态,施加 25 MPa 的竖向荷载并保持恒定。滑动岩块左侧面保持自由状态,右侧面采用位移控制加载方式进行加载。试件前后两面作为数字散斑相关方法观测面,不设置约束。

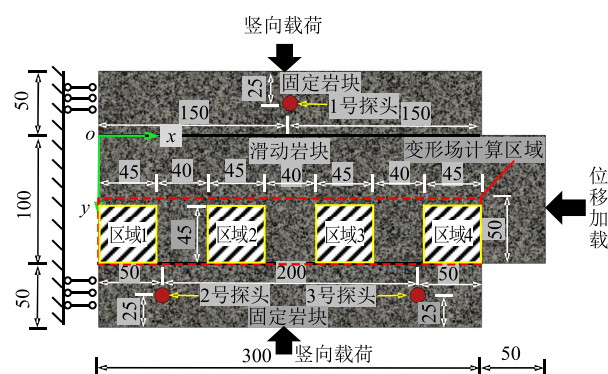


图 1 试件尺寸和分析区域 (单位: mm)

Fig.1 Specimen size and analysis area (unit: mm)

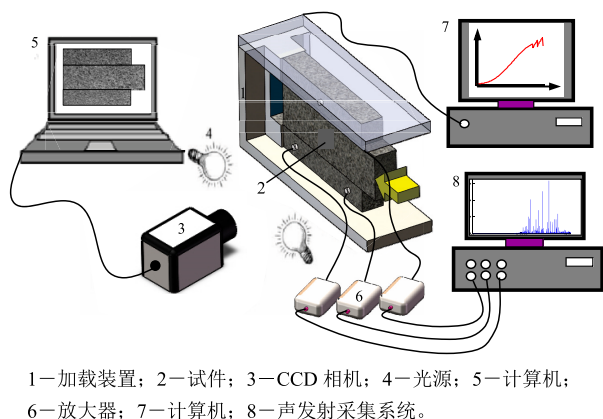
试验系统包括加载系统和数据采集系统两部分,试验系统布置如图 2 所示。试验加载系统选用 RLJW-2000 液压伺服试验机,其承担载荷施加及加载全程应力-应变数据采集。数据采集系统包括图像采集和声发射信号采集,其中,利用 CCD 相机采

集试件加载全程表面散斑图像,采集速率为 5 帧/s,物面分辨率为 0.20 mm/像素。声发射系统对加载全过程的声发射信号进行采集,阈值值设为 40 dB。

本文的位移及应变数据是通过数字散斑相关方法计算得到,其中数字散斑相关方法原理是将 CCD 相机采集到的参考图像及试件变形后的散斑图像,通过模数转换变为数字灰度场,基于灰度不变假设,通过两幅数字灰度场的相关识别来达到位移及应变测量的目的。

2.2 试验过程及结果

试验前,对加载装置、图像采集系统和声发射信号采集系统进行对时,保证系统时间一致,同时,进行图像采集系统的调试,使相机与试件表面正对,试件几乎占据整个相机靶面,保证拍摄的散斑图像清晰。试验中,先对试件施加竖向载荷,当竖向载荷达到预先设定的 25 MPa 时,保持其量值恒定,然后,以 $5\text{ }\mu\text{m/s}$ 的位移控制加载速率对滑动岩块进行水平方向加载,同时启动 CCD 相机及声发射数据采集系统,进行散斑图像及声发射数据采集,直至试验结束。



1—加载装置; 2—试件; 3—CCD 相机; 4—光源; 5—计算机;
6—放大器; 7—计算机; 8—声发射采集系统。

图2 试验系统布置图
Fig.2 Sketch of test system

选取一组代表性试验结果进行分析说明,试验加载曲线如图 3 所示。根据加载曲线中的剪应力随时间演化趋势,将加载过程分为以下 3 阶段:一是在加载 0~80.0 s 时间范围内,剪应力随时间缓慢地非线性增加,称此阶段为剪应力缓慢增长阶段;二是在加载 80.0~213.8 s 时间范围内,剪应力随时间近似线性增加,称此阶段为剪应力线性增长阶段;三是在加载大于 213.8 s 至试验结束的时间范围内,试件进入周期黏滑状态,剪应力随时间呈波动变化,称此阶段为剪应力波动增长阶段。

图中标识点给出了数字散斑相关方法分析变形

场对应的加载时刻,其中以参考点对应时刻的试件表面散斑图像作为参考图像,标识点 1 对应剪应力缓慢增长阶段,标识点 2、3 对应剪应力线性增长阶段,标识点 4、5 对应剪应力波动增长阶段。

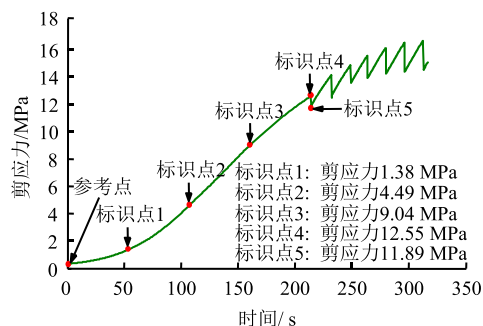


图3 加载曲线

Fig.3 Loading curves

3 岩石摩擦滑动位移场演化特征研究

3.1 岩石摩擦滑动位移场演化特征

采用数字散斑相关方法对 CCD 相机采集的岩石摩擦滑动试验过程中的试件表面散斑图像进行计算,得到试件表面各像素点位移数据。取图 1 中红色虚线标示区域作为位移场分析区域,绘制分析区域 x 方向位移等值线图,对岩石摩擦滑动位移场演化特征进行研究。

图 4 给出了不同加载时刻试件分析区域水平方向 (x 方向) 位移场等值线图,其中,位移场等值线图坐标轴如图 1 所示,位移方向与坐标轴正向相同为正,反之为负。图 4(a)的标识点 1 时刻位于剪应力缓慢增长阶段,该阶段位移场等值线呈非均匀随机分布特征,位移量值较小。图 4(b)的标识点 2 时刻位于剪应力线性增长阶段,该时刻位移场呈现出由非均匀随机分布向均匀性演化的特征,且位移等值线在近滑动面区域发生明显转折,表现为趋向平行滑动面的演化趋势。图 4(c)的标识点 3 时刻位于剪应力线性增长阶段,该时刻滑动岩块位移量值大于固定岩块位移量值,靠近滑动面区域位移等值线平行于滑动面,且滑动岩块、固定岩块位移场呈现等值线稀疏和稠密的分布特征,其中,等值线稀疏且呈曲线形状区域对应着界面“锁固”段,可将曲线状位移等值线类比为水流对于固体阻碍物的绕流,在岩石摩擦滑动过程中,等值线均匀稠密区域对应界面滑动段。图 4(d)的标识点 4 时刻位于剪应力线性增长阶段和剪应力波动增长阶段的分界点,与标识点 3 时刻对比分析可以得出,标识点 3、4 时刻位移场演化特征为:从位移场空间分布上看,

滑动岩块位移量值大于固定岩块位移量值, 界面分布有锁固段和滑动段, 滑动段的位移场等值线呈现均匀分布, 等值线近似直线且平行, 锁固段的位移场等值线呈非均匀分布, 等值线呈曲线状。从位移场时间分布上看, 锁固段和滑动段区域随载荷增长呈动态变化。图 4(e) 的标识点 5 时刻位于剪应力波动增长阶段, 此时刻试件发生黏滑, 与标识点 4 时刻对比可知, 位移场整体位移量值有较大增加。

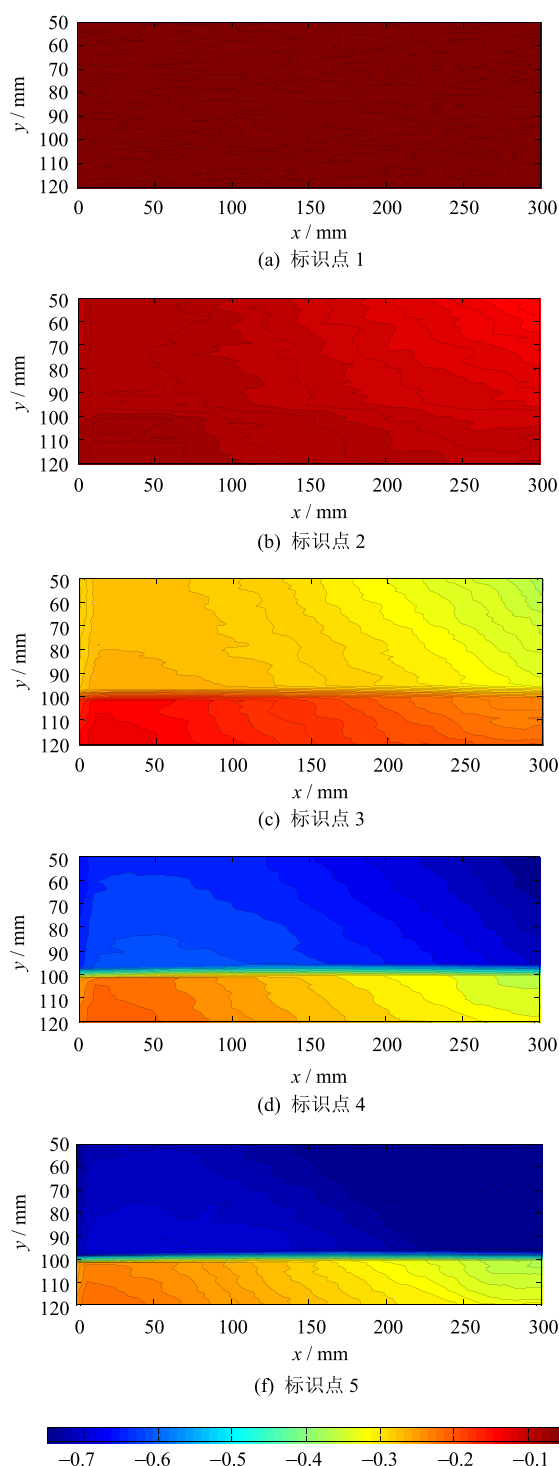


图 4 位移场演化云图 (单位: mm)

Fig.4 Evolutions of deformation field (unit: mm)

由上述岩石摩擦滑动位移场演化分析可知, 在剪应力缓慢增长阶段, 位移场等值线呈非均匀随机分布特征; 在剪应力线性增长阶段, 位移场呈现出由非均匀随机分布向均匀性演化的特征, 从位移场空间分布上看, 试件受滑动面凸体非均匀分布的影响, 界面分布有锁固段和滑动段, 滑动段的位移场等值线呈现均匀分布, 等值线近似直线且平行, 锁固段的位移场等值线呈非均匀分布, 等值线呈曲线状。从位移场时间分布上看, 在加载过程中, 滑动面上凹凸体的几何形状、接触形态、咬合程度、力学性质等都将发生变化, 使得锁固段和滑动段区域随载荷增长呈动态变化。在剪应力波动增长阶段, 滑动岩块发生突跳, 呈现出整体滑动特征, 位移量值有较大增加。

3.2 岩石摩擦滑动变形能密度演化特征

引入描述岩石摩擦滑动过程中能量积累和释放的指标——变形能密度, 根据对试验过程中试件变形能密度演化规律, 进一步分析岩石摩擦滑动变形能演化特征。

变形能密度计算方法如下: 通过数字散斑相关方法对试件表面散斑图像进行计算得到各像素点主应变, 取图 1 中白色虚线标示区域 1~4 作为变形能密度演化规律分析区域。以分析区域中各像素点主应变量的平均值表示该区域的主应变变量值, 分别将各分析区域的主应变变量值带入变形能密度计算式, 如式(1)所示, 得出各分析区域变形能密度^[18-19]。

$$U = \frac{E}{2} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - 2\varepsilon_1\varepsilon_2) \quad (1)$$

式中: U 为变形能密度; E 为弹性模量; ε_1 、 ε_2 为分析区域主应变。

图 5 为滑动岩块不同分析区域的变形能密度演化曲线。由图中区域 1~4 变形能密度演化曲线的共性特征分析可见, 在剪应力缓慢增长阶段, 变形能密度处于缓慢积累状态, 变形能密度量值较小。在剪应力线性增长阶段, 变形能密度曲线演化分两种状态: 一是剪应力线性增长阶段前期 (80.0~126.5 s 时间段), 变形能密度曲线呈线性缓慢增加特征; 二是剪应力线性增长阶段后期 (126.5~213.8 s 时间段), 变形能密度曲线呈波动增加特征。在剪应力波动增长阶段, 在黏滑期间, 区域 1~4 变形能密度突降; 间黏滑期, 区域 1~4 变形能密度随着剪应力增加而增加。

由区域 1~4 变形能密度演化曲线的差异性分析可见, 在空间分布上, 不同分析区域的变形能密度演化趋势相似, 但量值不同; 在时间分布上, 在

剪应力线性增长阶段, 当变形能密度出现波动变化过程中, 不同分析区域体现出明显的变形能密度演化的时间差异, 变形能密度的积累和释放存在明显的不同步特征; 在剪应力波动增长阶段, 黏滑期, 不同分析区域的变形能密度演化曲线同时发生突降, 间黏滑期, 不同区域的变形能密度演化曲线均处于线性增加状态。

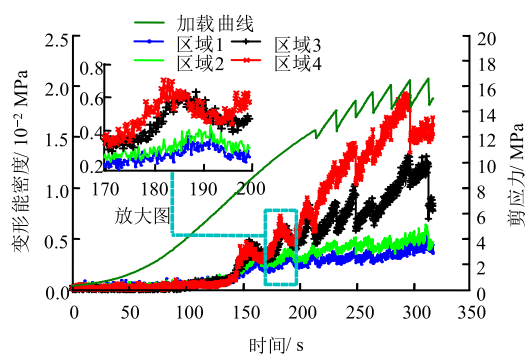


图5 不同区域变形能密度演化

Fig.5 Evolutions of deformation energy density of different areas

分析认为, 在剪应力缓慢增长阶段, 试件处于静摩擦状态, 位移主要为试件自身缺陷及界面上随机分布的凹凸体微小弹性变形, 在此阶段变形能密度小幅度积累。在剪应力线性增长阶段前期, 位移由非均匀向均匀性特征演化, 此时段变形能密度在不同区域积累量值存在差异, 但量值较小。在剪应力线性增长阶段后期, 锁固段和滑动段产生, 当锁固段处于静摩擦状态, 阻碍了界面位移的发展, 变形能密度积累。当锁固段发生损伤破裂处于滑动状态, 试件变形能密度发生释放, 因此, 锁固段的静摩擦和滑动的交替状态改变, 引起此阶段的变形能密度积累和释放的波动变化。在剪应力波动增长阶段, 黏滑期, 试件整体变形能密度处于释放状态, 间黏滑期, 试件整体处于能量积累状态。

4 岩石摩擦滑动声发射演化特征研究

声发射信息与岩石摩擦滑动位移场演化、界面摩擦滑动状态变化及能量演化等过程密切相关。通过开展岩石摩擦滑动速率与声发射振铃计数、摩擦滑动位移与声发射累计能量及变形能密度与声发射 b 值对应关系研究, 为进一步的岩石摩擦滑动演化机制探讨及声发射预测预警指标建立提供借鉴。

4.1 岩石摩擦滑动声发射振铃特征

图6给出了岩石摩擦滑动加载全过程的声发射振铃计数演化曲线。由图中可见, 在剪应力缓慢增

长阶段, 声发射振铃计数较少; 在剪应力线性增长阶段, 声发射振铃计数明显增加, 且呈波动变化; 在剪应力波动增长阶段, 在黏滑期, 声发射振铃计数随着应力突降而激增, 但激增量值与应力降量值无相关性。在间黏滑期, 声发射振铃计数呈波动变化。

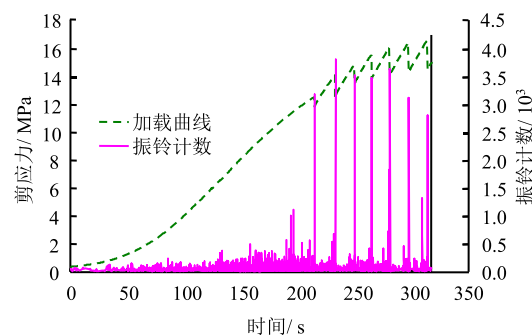


图6 声发射振铃计数演化

Fig.6 Evolutions of AE ringing counts in the test

在声发射振铃计数演化分析的基础上, 开展界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数对应关系研究。界面摩擦滑动速率计算方法如下: 首先, 通过数字散斑相关方法计算 $a \sim e$ 5 点的摩擦滑动位移, $a \sim e$ 5 点的位置如图7所示, 参考图像为试验开始前采集的试件表面散斑图像。以 a 点摩擦滑动位移计算为例, 在 a 点上下 $L = 5 \text{ mm}$ 距离处分别选取大小为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 计算窗口, 如图7中虚框放大图所示。将计算窗口中各散斑点位移的平均值代表计算窗口中心点的位移, 两计算窗口中心点 x 向的位移分量差值即为 a 点滑动位移; 然后, 计算相邻两张散斑图像上 $a \sim e$ 5 点的摩擦滑动位移增量, 并代入式(2)计算 $a \sim e$ 5 点位置处界面摩擦滑动速率。

$$v = \Delta L / \Delta t \quad (2)$$

式中: ΔL 为相邻两张散斑图像中摩擦滑动位移增量; Δt 为相邻两张散斑图像的时间间隔; v 为摩擦滑动速率。

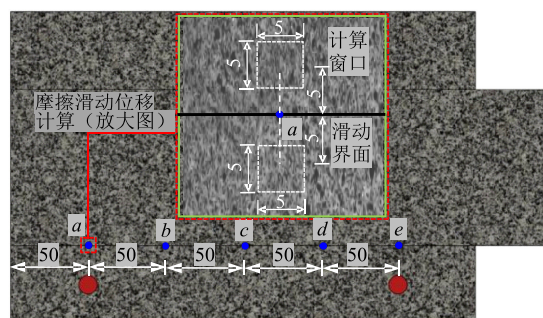


图7 界面摩擦滑动速率分析方法 (单位: mm)

Fig.7 Analysis method of interface sliding rate (unit: mm)

图8为界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数对应关系曲线,结合岩石摩擦滑动加载全过程的声发射振铃计数演化曲线(见图6)和界面摩擦滑动速率演化曲线(见图8)分析可知,在剪应力缓慢增长阶段和剪应力线性增长阶段,岩石摩擦滑动速率处于较小的波动演化状态,对应阶段的声发射振铃计数量值较小。在剪应力波动增长阶段,黏滑期对应的界面摩擦滑动速率大幅增加,对应声发射振铃计数激增,受摩擦滑动启动位置随机性的影响,不同位置处界面摩擦滑动速率增加量值与观测点距加载端的距离不具有相关规律性;间黏滑期界面摩擦滑动速率变化幅度较小,对应声发射振铃计数变化不明显。由声发射振铃计数与滑动速率对应关系分析可知,岩石摩擦滑动过程中声发射振铃计数受界面摩擦滑动速率影响,滑动速率的改变与界面区域接触点的滑动、损伤及破坏相关,因此,摩擦滑动速率变化将引起声发射事件发生。虽然由于受摩擦滑动速率量值、发生摩擦滑动区域尺寸及损伤破坏程度的多种因素影响,目前还无法给出摩擦滑动速率与声发射振铃计数量值间明显对应关系,但在实际工程中,可以利用声发射振铃计数对岩石摩擦滑动速率的变化进行定性判断。

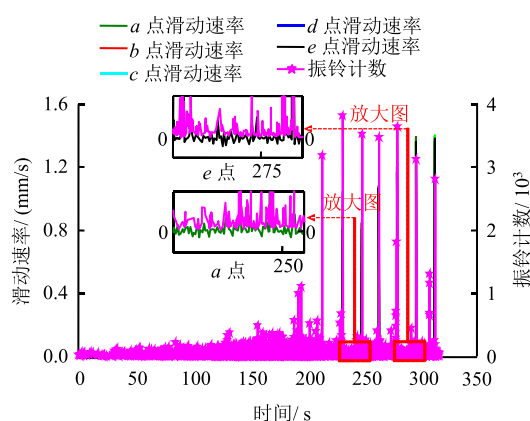


图8 界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数的对应关系

Fig.8 Relationships between AE ringing count and interface sliding rate

4.2 岩石摩擦滑动声发射累计能量特征

根据前述加载过程的不同阶段变形能密度演化特征分析,表明了位移场演化与能量变化具有相关性。下面在声发射累计能量与界面摩擦滑动位移分析的基础上,开展界面摩擦滑动位移与声发射累计能量对应关系研究。其中,界面摩擦滑动位移为图7中a~e 5点的位移的平均值。

图9为声发射累计能量与界面摩擦滑动位移演

化对应关系曲线,由图可见,在剪应力缓慢增长阶段,界面处于静摩擦状态,摩擦滑动平均位移量值近似为0,对应的声发射累计能量量值较小;在剪应力线性增长阶段前期(80.0~126.5 s时间段),界面处于静摩擦状态与稳定滑动的过渡期,摩擦滑动平均位移量值近似线性增长,声发射累计能量也呈线性增长趋势,在剪应力线性增长阶段后期(126.5~213.8 s时间段),界面处于稳定滑动期,摩擦滑动平均位移量值非线性增长,声发射累计能量也相应呈非线性增长;在剪应力波动增长阶段,黏滑期,摩擦滑动位移量值发生突增,声发射累计能量曲线发生突变,以前3次黏滑为例,摩擦滑动增加量值分别为0.10、0.21、0.17 mm,声发射累计能量增加量值分别为0.38、0.43、0.50 V·s,间黏滑期,摩擦滑动位移量值累计增加量值小于0.01 mm,界面处于静摩擦状态,声发射累计能量增加量值小于0.01 V·s,从曲线看基本无变化。由上述界面摩擦滑动位移与声发射累计能量对应关系分析可知,界面摩擦滑动位移与摩擦滑动过程中声发射累计能量演化趋势具有较好的对应关系,在实际工程中,可以利用声发射累计能量对岩石摩擦滑动位移的变化趋势进行定性判断。

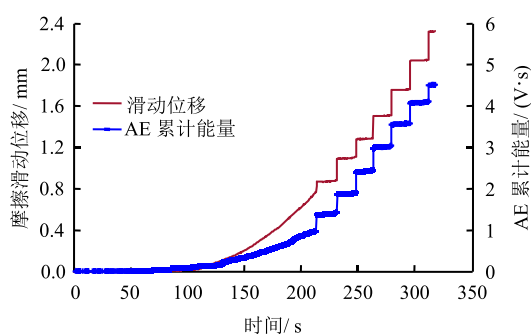


图9 声发射累计能量与摩擦滑动位移关系

Fig.9 Relationships between AE accumulated energy and sliding displacement

4.3 岩石摩擦滑动声发射b值特征

通过上述界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数和界面摩擦滑动位移与声发射累计能量对应关系研究表明,声发射信息能较好地反映出岩石摩擦滑动过程中界面位移的变化特征和趋势。下面采用声发射b值指标,结合变形能密度演化特征,对加载过程中界面接触损伤破裂尺度特征开展进一步分析探讨。

声发射震级及最大振幅关系式^[20]为

$$M = \lg A \quad (3)$$

式中: M 为单个声发射事件震级; A 为单个声发射

事件的最大振幅 (dB), 由声发射软件回放波形信号得到。

根据试验过程中声发射数据采集频率, 设置单个声发射 b 值计算样本为 50 个声发射事件, 采用线性最小二乘法^[9]计算 b 值, 即

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m M_i \lg N_i - m \sum_{i=1}^m M_i \sum_{i=1}^m \lg N_i}{\sum_{i=1}^m M_i^2 - m \left(\sum_{i=1}^m M_i \right)^2} \quad (4)$$

式中: M_i 为第 i 档震级; N_i 为第 i 档震级的事件数; m 为震级分档总数, 震级分档间隔为 0.5。

图 10 给出了岩石摩擦滑动加载全过程的声发射 b 值演化曲线。由图可见, 在加载过程中声发射 b 值演化可以分为 3 个阶段, 第 1 阶段为 0~126.5 s 时间范围内, 声发射 b 值曲线稀疏, 量值较大, 量值波动区间为 0.59~0.31; 第 2 阶段为 126.5~213.8 s 时间范围内, 声发射 b 值曲线稠密, 量值较小, 量值波动区间为 0.42~0.19; 第 3 阶段为 213.8 s 到试验结束时间范围内, 声发射 b 值曲线稀疏, 量值波动幅度较大, 波动区间为 0.59~0.16, 范围涵盖第 1、2 阶段波动区间。

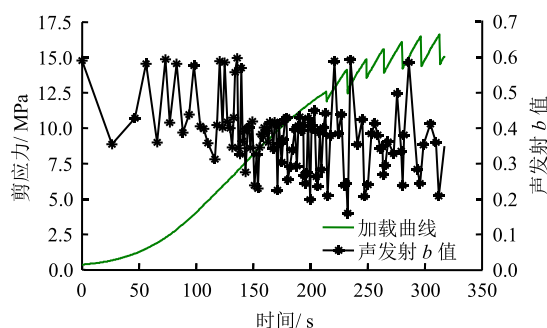


图 10 声发射 b 值演化

Fig.10 Evolution of b -value of AE

据文献研究表明^[21], 声发射 b 值不同的演化规律反映了加载过程中对应的小尺度和大尺度微破裂的主导特征, 其中, 声发射 b 值增大意味着以小尺度微破裂为主, 声发射 b 值减小表明大尺度微破裂增多。结合岩石摩擦滑动加载全过程的声发射 b 值演化曲线 (见图 10) 和声发射 b 值与变形能密度关系曲线 (见图 11), 研究表明, 声发射 b 值与变形能密度在加载过程中声发射 b 值演化第 1 阶段, 对应剪应力缓慢增长和剪应力线性增长阶段前期, 界面摩擦滑动处于静摩擦及静摩擦与滑动状态转换阶段, 变形能密度积累较小, 界面摩擦滑动以随机分布的小尺度微破裂为主; 声发射 b 值演化第 2 阶段,

对应剪应力线性增长阶段后期, 锁固段对应的大尺度微破裂是该阶段界面摩擦滑动及变形能呈阶段性积累与释放演化状态的主要原因; 声发射 b 值演化第 3 阶段, 对应剪应力波动增长阶段, 岩石摩擦滑动失稳及变形能的突发释放既可能是由小尺度微破裂为主引发, 又可能是由锁固段大尺度微破裂为主引发。

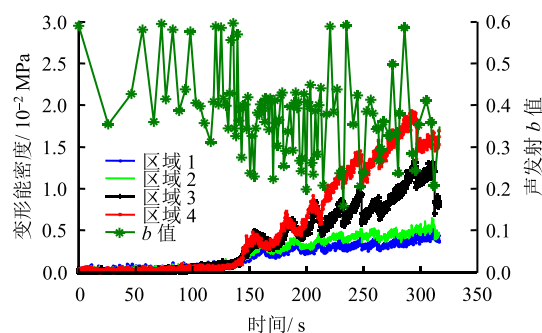


图 11 声发射 b 值与变形能密度关系

Fig.11 Relationships between b -values of AE and deformation energy density

5 结 论

(1) 在剪应力缓慢增长阶段, 位移场等值线呈非均匀随机分布特征; 在剪应力线性增长阶段, 界面分布有锁固段和滑动段, 锁固段和滑动段区域随载荷增长呈动态变化; 在剪应力波动增长阶段, 黏滑期对应的位移量值有较大增加。

(2) 岩石摩擦滑动过程中声发射振铃计数受界面摩擦滑动速率影响, 界面摩擦滑动速率变化将引起声发射事件发生, 界面摩擦滑动速率与声发射振铃计数数量值间无明显对应关系。

(3) 界面摩擦滑动位移与摩擦滑动过程中声发射累计能量演化趋势具有较好的对应关系, 可以利用声发射累计能量对岩石摩擦滑动位移的变化趋势进行定性判断。

(4) 通过声发射 b 值演化分析可以得出, 在剪应力缓慢增长阶段, 界面摩擦滑动以随机分布的小尺度微破裂为主; 在剪应力线性增长阶段后期, 界面摩擦滑动以锁固段的大尺度微破裂为主; 在剪应力波动增长阶段, 岩石摩擦滑动失稳既可能是由小尺度微破裂为主引发的状态转化, 又可能是由锁固段大尺度微破裂为主引发的变形能突发释放及稳定状态转换。

参 考 文 献

- [1] 卜万奎, 茅献彪. 断层倾角对断层活化及底板突水的影

- 响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 386—394.
- BU Wan-kui, MAO Xian-biao. Research on effect of fault dip to fault activation and water inrush of coal floor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(2): 386—394.
- [2] 于广明, 谢和平, 杨伦, 等. 采动断层活化分形界面效应的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(4): 396—399.
- YU Guang-ming, XIE He-ping, YANG Lun, et al. Numerical simulation of fractal effect induced by activation of fault at extraction[J]. **Journal of China Coal Society**, 1998, 23(4): 396—399.
- [3] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机制分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191—1196.
- JIANG Fu-xing, WEI Quan-de, WANG Cun-wen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1191—1196.
- [4] 张朝鹏, 张茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 770—778.
- ZHANG Zhao-peng, ZHANG Ru, ZHANG Ze-tian, et al. Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(4): 770—778.
- [5] COX S J D, MEREDITH P G. Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(1): 11—24.
- [6] LOCKNER D A, BYERLEE J D. Acoustic emission and creep in rock at high confining pressure and differential stress[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1977, 67(2): 247—258.
- [7] 姚旭龙, 张艳博, 刘祥鑫, 等. 岩石破裂声发射关键特征信号优选方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 375—384.
- YAO Xu-long, ZHANG Yan-bo, LIU Xiang-xin, et al. Optimization method for key characteristic signal of acoustic emission in rock fracture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 375—384.
- [8] 陈颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报, 1977, 20(4): 312—322.
- CHEN Yong. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1977, 20(4): 312—322.
- [9] 张黎明, 马绍琼, 任明远, 等. 不同围压下岩石破坏过程的声发射频率及 b 值特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2057—2063.
- ZHANG Li-ming, MA Shao-qiong, REN Ming-yuan, et al. Acoustic emission frequency and b value characteristics in rock failure process under various confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(10): 2057—2063.
- [10] 王煜曦, 王金安, 唐君. 断裂岩石在蠕变过程中的声发射特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 2948—2958.
- WANG Yu-xi, WANG Jin-an, TANG Jun. Acoustic emission characteristics of fractured rocks during creep shear[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.2): 2948—2958.
- [11] 蒋海昆, 马胜利, 周焕鹏, 等. 双向压缩条件下非均匀断层标本变形过程中的声发射活动特征[J]. 地震学报, 2006, 28(3): 295—304.
- JIANG Hai-kun, MA Sheng-li, ZHOU Huan-peng, et al. Spatial and temporal characteristics of acoustic emission activity during deformation of rock samples with inhomogeneous fault under biaxial compression[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2006, 28(3): 295—304.
- [12] 缪阿丽, 马胜利, 周永胜. 硬石膏断层带摩擦稳定性转换与微破裂特征的试验研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2671—2680.
- MIAO A-li, MA Sheng-li, ZHOU Yong-sheng. Experimental study on frictional stability transition and micro-fracturing characteristics for anhydrite fault zones[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2010, 53(11): 2671—2680.
- [13] 李普春, 刘力强, 郭玲莉, 等. 黏滑过程中的多点错动[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 125—137.
- LI Pu-chun, LIU Li-qiang, GUO Ling-li, et al. Multi-point dislocation in stick-slip process[J]. **Seismology and Geology**, 2013, 35(1): 125—137.
- [14] 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 不同结构岩石标本声发射 b 值和频谱的时间扫描及其物理意义[J]. 地震地质, 2001, 23(4): 481—492.
- LIU Li-qiang, MA Sheng-li, MA Jin, et al. Temporal scanning of b -value and spectrum of ae activity for samples with different textures and their physical implications[J]. **Seismology and Geology**, 2001, 23(4): 481—492.