

结构面剪切过程中声发射特性的试验研究

周 辉, 孟凡震, 张传庆, 卢景景, 徐荣超

(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)

摘要: 为研究结构面岩体在压剪荷载作用下的声发射特征和规律, 利用水泥砂浆作为模型材料制作具有不同起伏高度的不规则锯齿形结构面, 研究不同起伏高度、不同剪切速率和不同法向压力下声发射参数的变化规律和发生机制。试验结果表明: 结构面剪切时理想的累积撞击曲线可以划分为平静期、缓慢上升期和急剧上升期 3 个阶段; 随结构面起伏高度的增大, 发生宏观剪切破坏时能量率峰值变大、累积撞击数变小; 随剪切速率的增大, 能量率曲线和撞击率曲线在剪切过程中波动性增强, 能量率峰值、撞击率峰值和累积能量随剪切速率的增大有减小的趋势; 声发射参数随法向压力变化规律性不强, 但随法向压力的增大, 破坏时对应的能量率峰值和累积能量有减小的趋势, 撞击率峰值和累积撞击数有增大的趋势。研究成果可为声发射技术用于监测和预报现场结构面岩体的静力或动力剪切破坏提供指导。

关键词: 岩石力学; 结构面; 直剪试验; 声发射能量率; 声发射撞击率; 起伏高度; 法向压力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增 1-2827-10

EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTIC OF DISCONTINUITY UNDER SHEARING CONDITION

ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, LU Jingjing, XU Rongchao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To investigate the acoustic emission(AE) characteristics and laws of rock discontinuity under compression-shear stress, irregular serrated discontinuities with different asperity height were made of cement mortar and change laws of AE parameters and their mechanism of the discontinuities at different asperity height, shearing velocity and different normal stress are studied. Experimental results indicate that the ideal cumulative hits of discontinuity during shearing can be divided into three stages—quiet period, slow rise period and sharp growth period. It can be found that the peak energy rate increases while cumulative hits decrease with the increase of discontinuity asperity height when macroscopic shear failure occurs. With increase of shearing velocity, curves of energy rate and hit rate become higher volatility and peak energy rate, peak hit rate and cumulative energy tend to decrease. Change laws of AE parameters is not very obvious with the change of normal stress, but peak energy rate and cumulative energy tend to decrease while peak hit rate and cumulative hits increase with the increase of normal stress. Research results can provide guidance for applications of acoustic emission techniques into monitoring and prediction of the static or dynamic shear failure of in-situ rock discontinuities.

Key words: rock mechanics; discontinuity; direct shear test; acoustic emission energy rate; acoustic emission hit rate; asperity height; normal stress

收稿日期: 2014-03-24; **修回日期:** 2014-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字(2012)119号); 国家自然科学基金资助项目(41172288)

作者简介: 周 辉(1972-), 男, 1994年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0335

1 引言

岩体是由结构面和被结构面切割而成的完整岩石块体组成的复杂地质体,根据结构面的规模可将其划分为 I~V 级。岩块沿结构面(断层、节理、层理、裂隙等)的剪切破坏是工程岩体最主要的破坏方式之一,结构面的存在很大程度上决定了岩体的力学特性、渗透特性和热力学特性,如低应力下坝基滑移^[1]、隧洞围岩沿结构面的掉块塌方^[2]等静力灾害和高应力下的断层滑移型冲击地压^[3]、滑移型岩爆^[4]等动力冲击灾害都是沿结构面的剪切破坏引起的。S. C. Bandis 等^[5-8]就不同条件下结构面的力学特性、本构模型、结构面形貌表征方法等进行了卓有成效的研究。

声发射是指材料或结构在受力变形或破坏过程中以弹性波的形式释放应变能的现象。每一个声发射信号都对应一个损伤或破裂事件产生,可以通过对声发射计数、能量和振幅等参数的分析确定岩石内部破裂的程度和位置,因此声发射技术在岩石的室内试验和现场的微震监测等方面获得了广泛的应用^[9-11]。相比于声发射技术在岩石单、三轴压缩试验的测试中广泛而成熟的应用,在剪切荷载作用下完整岩体或节理岩体的声发射特征和规律的研究并不多。周小平和张永兴^[2]研究了原岩结构面在剪切荷载作用下声发射事件数和能率的变化规律,认为大部分试件剪切过程根据能率的变化规律可划分为活跃、平静、再次活跃、主破裂和主破裂后等几个阶段,能率的持续高水平可以作为主破坏前兆,但是准确的破坏时间较难预测;许江等^[12]研究了完整砂岩试样在不同含水率(0%, 50%, 100%)下的抗剪强度和声发射特征,发现随含水率增加,抗剪强度减小,累计 AE 数减小,峰值附件的 AE 事件率最大值也减小;许江等^[13]研究了完整砂岩在不同剪切速率下的强度、变形和声发射特征,发现随剪切速率增大,强度降低,峰值剪切位移减小,累计撞击数减小;聂百胜等^[14]研究了圆柱形煤样沿不同倾角剪切时的声发射和电磁辐射特性,认为在低倾角时声发射和电磁辐射经历了加载初期的强度升高、中期的相对平静、主破坏前逐渐增强、破坏时的较高强度和破坏后逐渐减弱。倾角较高时随应力增大持续增强直至破坏,破坏时急剧增强,破坏后减弱;李西蒙等^[15]研究了圆柱型煤沿不同倾角剪切时的强度规律和声发射特征,认为声发射伴随于整

个型煤压剪破坏的过程,低剪切角条件下的声发射事件高于高剪切角条件下;徐东强^[16]研究了含天然弱面、人工弱面和完整岩石在真三轴加载条件下发生滑移破坏时的声发射特性,认为含弱面岩石滑移破坏过程中,在极限应力的 80% 时,声发射率和能率出现前兆峰值。结构面胶结程度、连续性、起伏度、夹层物质及倾角对岩石沿弱面滑移破坏时的声发射都有重大影响。岩石试件主破裂面附近的次生破裂对高频信号的衰减起着重大作用;曾正文等^[17]研究了含石膏夹层的不同倾角的单节理岩体(节理面与竖直压力夹角)在单轴压缩应力下发生剪切破坏的声发射事件的能量特征,研究表明倾角越大,强度越高、AE 能量越分散、中强度 AE 事件的数目及所占 AE 能量的比例相对增大;Z. A. Moradian 等^[18]研究了坝体的岩-岩节理,岩-混凝土节理和混凝土-混凝土节理在直剪试验过程中的声发射事件和能量的特性,认为黏接的和未黏接的节理剪切变形可分为四个阶段:峰前线性阶段、峰前非线性阶段、峰后阶段和残余阶段;黏接节理应力施加后并没有立刻产生剪切变形也没有声发射信号,未黏接节理一开始剪切就有声发射信号,因此从开始检测到 AE 信号到峰值破坏有一段时间可以做出补救措施;陆丽丰^[19]研究完整砂岩和型煤在不同剪切速率、不同含水率和不同法向应力下的 AE 事件率、累计 AE 事件和能率的变化规律及剪切裂纹的扩展,认为砂岩和型煤声发射撞击率峰值相对于剪应力峰值在时间上有一定的滞后,两者时间差随着加载速率增加而减小,随着含水率和法向应力的增加而增大;范雷等^[20]进行了现场岩体的原位直剪试验和声发射测试,根据定位的声发射事件将岩体破坏过程分为弹性变形阶段、起裂阶段、扩展阶段和破坏阶段。

剪切破坏(包括常规的静力破坏和结构面滑移造成的动力冲击)是工程岩体主要的破坏方式之一,因此本文拟通过对水泥砂浆制作的锯齿形结构面进行直剪试验,研究在不同起伏高度、剪切速率和法向压力下结构面剪切过程中的声发射特性,以期声发射监测更好地应用于岩体剪切破坏的监测、预测提供借鉴。研究成果可为相关岩石力学试验及岩石工程变形破坏机制研究提供参考。

2 试验准备

试验前通过选取的一定配比的水泥砂浆作为模

型材料，制作了具有 3 种不同起伏高度(1, 3, 5 mm, 起伏高度指锯齿波峰至波谷的垂直距离)的不规则锯齿形结构面，即每种结构面面壁锯齿高度相同但起伏角度不同。制作结构面的模板及制成的试样如图 1 所示，图中从左到右起伏高度依次为 1, 3, 5 mm。结构面上下盘制成并自然养护 30 d 后，将上盘顶面和下盘底面切割至各自高度 7.5 cm，并磨至相互平行，最终拼接成中间为锯齿结构面的 15 cm×15 cm×15 cm 的立方体试件。

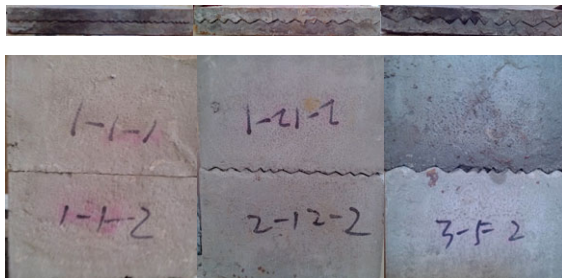


图 1 3 种不同起伏高度的结构面钢模和与之对应的试件
Fig.1 Three steel moulds of different roughness and their corresponding specimens

本文的具体研究内容可通过图 2 表述。首先对 3 种不同起伏高度的不规则锯齿形结构面，在相同剪切速率下，分别进行 4 种不同法向压力的剪切和声发射测试，分析每种法向压力下不同起伏高度的结构面直剪过程中的声发射规律；通过对 3 mm 高度的结构面以 3 种不同的剪切速率分别进行 4 种法向压力的剪切和声发射测试，分析每种法向压力下不同剪切速率的结构面直剪过程中的声发射特性；同时根据上述的两组剪切试验，分析起伏高度恒定或剪切速率恒定时，结构面在 4 种不同法向压力下

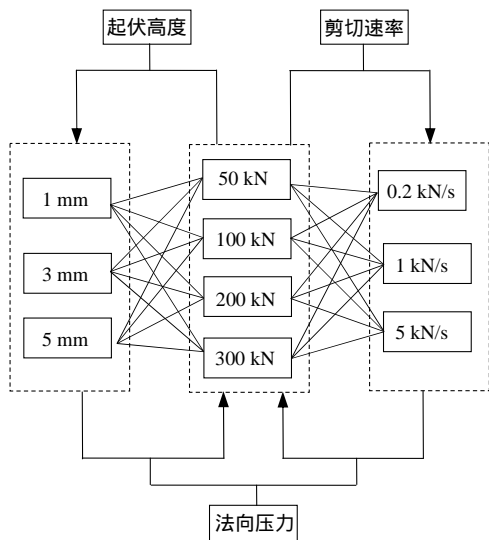


图 2 试验方案的技术路线图

Fig.2 Technology roadmap of the experimental scheme

的声发射特性。通过以上 3 种分析方法分别研究起伏高度、剪切速率和法向压力对结构面处于压剪应力状态下声发射特性的影响。

本次直剪试验在中国科学院武汉岩土力学研究所自行研制的 RMT-150C 试验机上进行，根据 RMT-150C 多功能试验机最大水平加载能力和水泥砂浆材料的单轴压缩强度，设计了 50, 100, 200 和 300 kN 四级法向压力。声发射测试采用美国 PAC 公司生产的 16 通道声发射仪，门槛值为 40 dB。声发射探头，黏贴在结构面下盘的前方，利用耦合剂和试件表面耦合，其布置如图 3 所示。

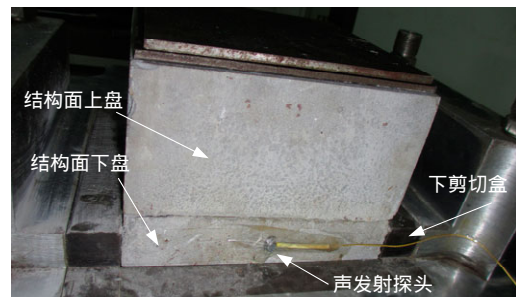


图 3 试验前试样和声发射传感器照片

Fig.3 Photo of acoustic emission sensor and rock specimen before shearing experiment

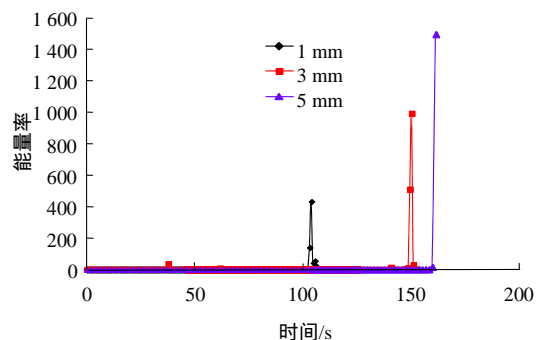
本试验不对破裂位置进行定位，因此只用一个声发射探头，主要通过分析能量率、撞击率、累积能量和累积撞击这 4 个参数来研究不同条件下结构面剪切过程的声发射特性和规律。

3 试验结果

下面分别就起伏高度、剪切速率和法向压力影响下的结构面剪切过程中的声发射特性依次进行分析。

3.1 不同起伏高度的结构面剪切声发射特性

图 4 为剪切速率为 1 kN/s 时，法向压力为 100



(a) 能量率

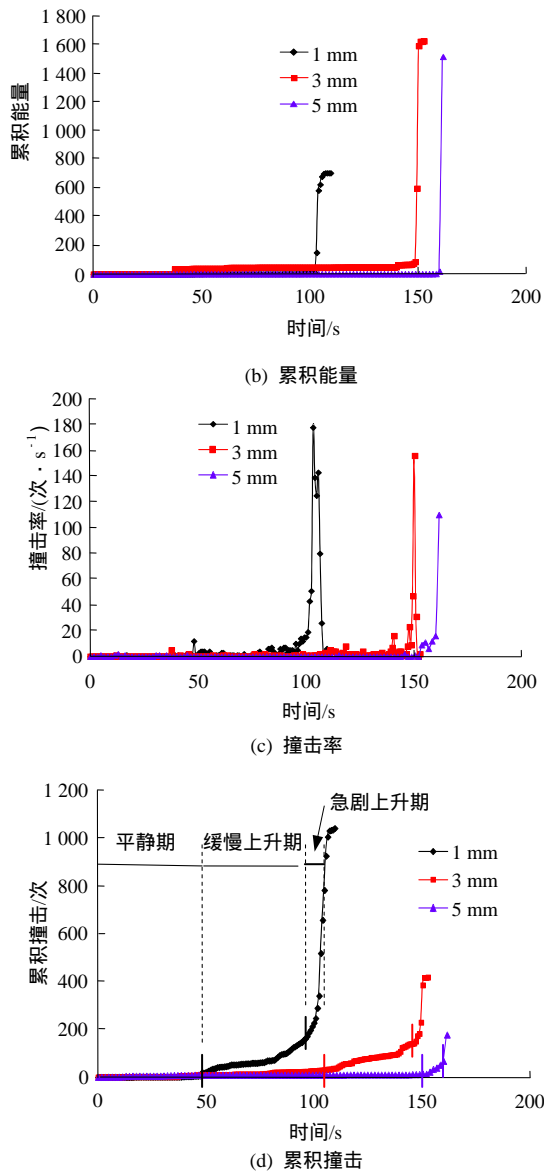


图4 结构面不同起伏高度条件下声发射参数随时间的变化规律

Fig.4 Change laws of acoustic emission parameters with time of joints with different asperity heights

kN 时不同起伏高度的结构面剪切时的声发射能量率、累积能量、撞击率和累积撞击随时间的变化规律。

从能量率可见, 3 个不同起伏高度的试件基本都是在接近破坏的时候能量率出现陡增, 从开始加载至破坏之前这段时间, 能量率变化不大。比较图 4(a)和(c)可以看出, 两者在相同的时间点内达到峰值, 但撞击率在达到峰值前一段时间内已经开始增加, 这尤其可以从图 4(d)累计撞击曲线看出(图中用竖线标记处)。声发射撞击可以表征试件内部的损伤, 因此可以判定, 从图 4(d)累积撞击图的标记点处开始, 在逐渐增加的剪切荷载作用下试件内部损伤开始产生并逐渐加剧并最终导致试件破坏, 在快

要到达峰值时撞击急剧增大, 在极短的时间内迅速到达峰值。这种根据一个声发射探头获得的累计撞击数的变化规律与范雷等^[20]利用 3 个声发射探头定位的现场原位剪切的声发射事件数的规律相似。根据这一变化规律, 可将结构面岩体剪切过程中的声发射累积撞击曲线划分为 3 个阶段: 平静期、缓慢上升期和急剧上升期。以 1 mm 起伏高度的结构面为例, 各个阶段的划分如图 4(d)所示。因此声发射累积撞击可以用来预测结构面岩体是否会发生剪切破坏, 当累积撞击从平静期变化至缓慢上升期时, 说明试件内部损伤开始产生并在累积, 当从缓慢上升期到急剧上升期时, 说明内部损伤急剧增加、某些位置可能已经发生断裂, 预示着宏观破坏的即将来临。由于急剧上升期的起始点离宏观破坏发生的时间极短, 因此可能来不及采取措施控制结构面岩体可能发生的剪切破坏, 但急剧上升期之前的一段缓慢上升期内则有充足的时间采取措施抑制或减弱岩体沿结构面发生的剪切破坏。同时通过图 4(d)还可以看出, 随着起伏高度的增加, 平静期经历的时间变长, 而缓慢上升期经历的时间则逐渐变短。

随着结构面起伏高度的增加, 破坏瞬间对应的能量率、撞击率和累积撞击均具有较好的规律性, 即对于不规则锯齿形结构面, 起伏高度越大, 破坏时的能量率峰值越大, 撞击率峰值越小, 累积撞击数越少。由于篇幅所限本文只列出了法向压力为 100 kN 时不同起伏高度的结构面声发射撞击和能量随时间的变化规律图。对于法向压力为 200 和 300 kN 时, 同样也是随起伏高度的增加, 破坏时的能量率峰值依次变大, 但 50 kN 时是 3 mm 起伏高度的结构面能量率峰值最大。对于累积撞击而言, 同 100 kN 时一样, 法向压力为 200 和 300 kN 时, 1 mm 起伏高度时累积撞击数最多, 5 mm 起伏高度时累积撞击数最少, 但 50 kN 时是 3 mm 起伏高度的结构面累积撞击数最多。4 个法向压力下的累积能量都是 1 mm 起伏高度时最小。

从以上分析可见, 除了法向压力为 50 kN 之外, 在其余 3 个法向压力下, 随结构面起伏高度变大, 破坏时能量率峰值逐渐变大, 累积撞击数变小。4 个法向压力下的累积能量都是在起伏高度 1 mm 时候最小。其他法向压力下的撞击率并不像图 4(c)中 100 kN 时候那样具有良好的规律性。

3.2 不同剪切速率的结构面剪切声发射特性

选取起伏高度为 3 mm 的结构面, 进行了 0.2, 1 和 5 kN/s 三种剪切速率的直剪试验和声发射测试,

每种剪切速率下分别进行 4 组法向压力(50, 100, 200 和 300 kN)。图 5 为起伏高度为 3 mm, 法向压力为 100 kN 时的不同剪切速率的结构面剪切时的声发射能量率、累积能量、撞击率和累积撞击率随时间的变化规律。

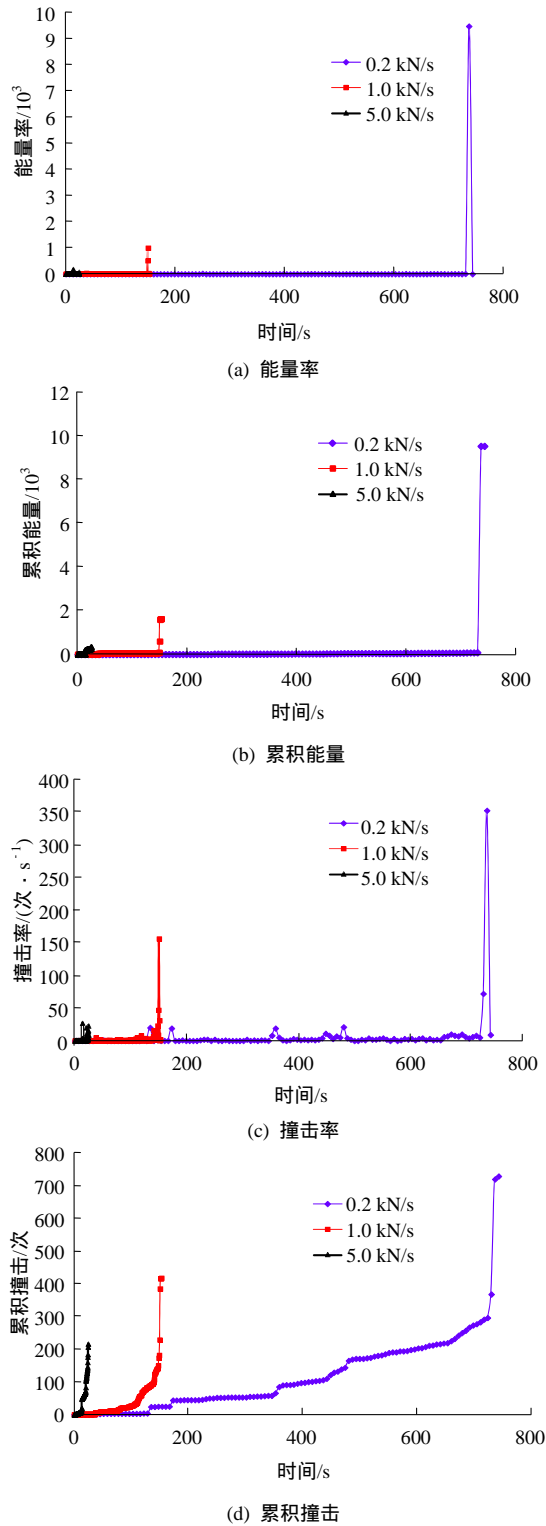


图 5 结构面不同剪切速率条件下声发射参数随时间的变化规律

Fig.5 Change laws of acoustic emission parameters with time of joints at different shearing velocities

100 kN 法向压力下 4 个声发射参数均具有极好的规律性, 随着剪切速率的增大, 破坏时的声发射能量率、累积能量、撞击率和累积撞击数均依次减小。

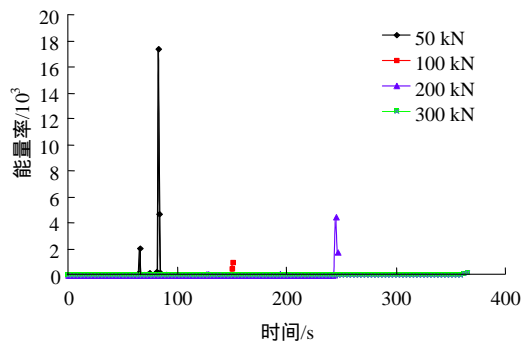
对于其他法向压力, 当法向压力为 300 kN 时, 破坏时的声发射能量率、累积能量、撞击率的规律性与 100 kN 时一样, 均随剪切速率增大而减小; 法向压力为 50 和 200 kN 时, 上述的 3 个声发射参数都是在 1 kN/s 时取得最大值, 5 kN/s 时取的最小值, 即 5 kN/s 时的取值小于 1 kN/s 时的取值。

从以上分析可见不论何种法向压力下, 破坏时对应的撞击率峰值和能量率峰值都是在最大剪切速率即 5 kN/s 时最小。除去 50 和 200 kN 法向压力下 1 kN/s 时外, 随着剪切速率的减小, 破坏时对应的撞击率峰值和累积能量有逐渐变大的趋势, 如在 100, 300 kN 法向压力的 3 种剪切速率, 和 50, 200 kN 法向压力下的 5 和 0.2 kN/s 时均是这种规律, 但在 50 和 200 kN 法向压力下却是在 1 kN/s 时取得的最大值。许江等^[13]对完整砂岩采用位移控制方式进行直剪试验得出“剪切速率越小, 累积撞击数越多”的结论, 与本文的结论具有较好的一致性。

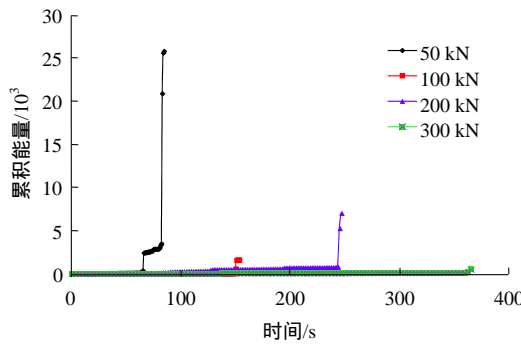
3.3 不同法向压力的结构面剪切声发射特性

根据节 3.1 和 3.2 的试验内容, 可进一步分析在同一剪切速率下, 当起伏高度恒定时, 不同法向压力条件下结构面剪切过程的声发射规律(这里剪切速率都是 1 kN/s, 起伏高度为 1 或 3 或 5 mm); 也可以研究同一起伏高度下, 当剪切速率恒定时, 不同法向压力条件下结构面剪切过程的声发射规律(这里起伏高度都是 3 mm, 剪切速率为 0.2 或 1 或 5 kN/s)。

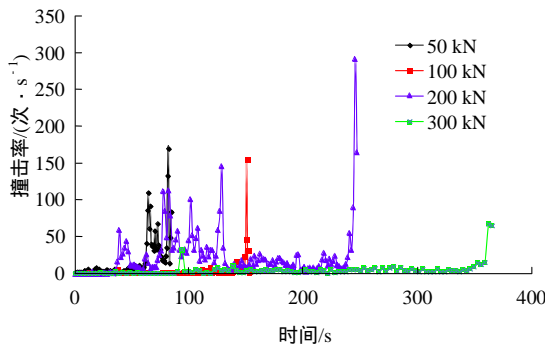
图 6 为 1 kN/s 剪切速率下 3 mm 起伏高度的结构面在四级法向压力下的声发射参数的变化规律。分析可见, 无论是能量参数还是撞击参数, 不同法向压力下它们都没有明显的规律性, 同样的对于 1 kN/s 剪切速率下 1 和 5 mm 起伏高度的结构面声发射参数的规律性也不强。尽管如此, 仔细分析还是可以发现一些趋势: 对于破坏时的峰值能量率而言, 起伏高度 1 mm 时, 50 kN > 100 kN > 200 kN > 300 kN, 起伏高度 3 mm 时, 50 kN > 200 kN > 100 kN > 300 kN, 起伏高度 5 mm 时, 200 kN > 50 kN > 100 kN > 300 kN, 可见随着法向压力的增大, 能量率峰值有减小的趋势; 破坏时的累积能量峰值与上述的能量率具有一致的变化趋势; 对于破坏时的峰值撞



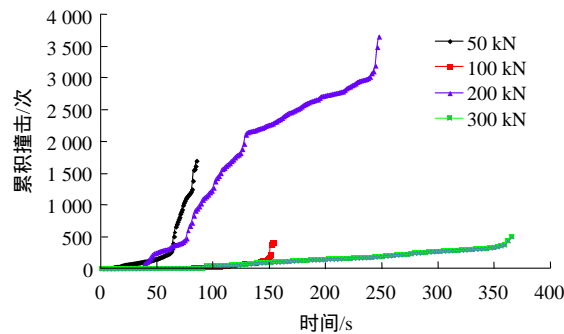
(a) 能量率



(b) 累积能量



(c) 撞击率



(d) 累积撞击

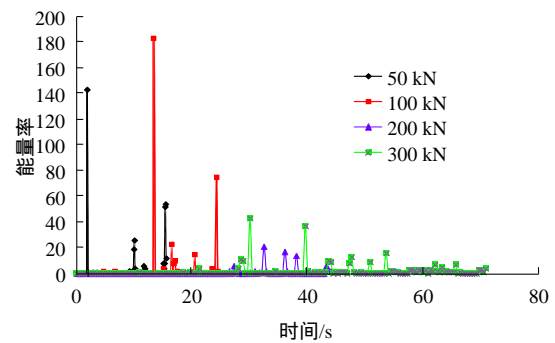
图6 1 kN/s 时 3 mm 起伏高度不同法向压力下结构面剪切声发射参数随时间的变化规律

Fig.6 Change laws of acoustic emission parameters with time of 3 mm asperity height joint and 1 kN/s at different normal pressures

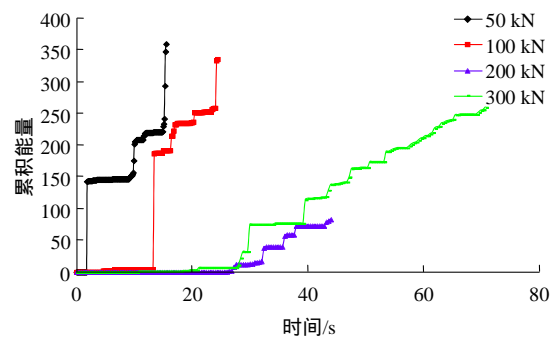
击率来说,3 和 5 mm 起伏高度的结构面都是在 200 kN 法向压力时最大,1 mm 起伏高度的撞击率最大值也是在 200 kN 时取得,但是在宏观破坏发生前某

一时间时达到的;到达破坏时的累积撞击,3 个起伏高度下均是在法向压力为 200 kN 时最大。从上述分析可见,随法向压力的增大,破坏时的能量率峰值和累积能量有减小的趋势;撞击率和累积撞击都是在相对较高的法向压力(200 kN)时取得,但并没有“随法向压力的增大,撞击参数变大或变小”这种很强的规律。

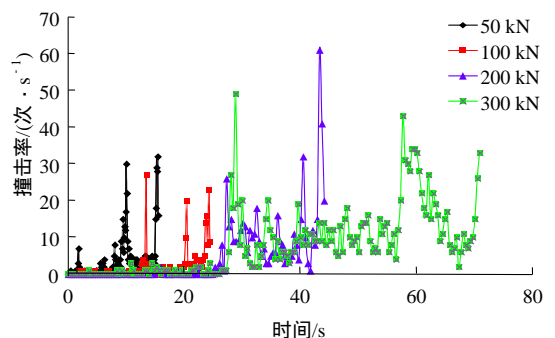
图7 为 3 mm 起伏高度时,剪切速率为 5 kN/s 时的声发射参数随时间的变化特征。可见能量率和撞击率的峰值并不都是在最后试件发生宏观破坏时发生的,而是在剪切过程中发生的。在整个剪切过程中,能量率和撞击率出现多个突增点,波动性很大,以法向压力为 300 kN 时为例,剪切时可以听到剪切盒内不断有劈啪的响声传出,每一次响声都对应着能量或撞击曲线的一次突跳。相比于 5 kN/s 剪切速率时的这种特点,1 kN/s 时能量率和撞击率曲线突增点和波动点减少,0.2 kN/s 时能量率只在最终的宏观破坏发生时急剧增加到最大值,撞击率则



(a) 能量率



(b) 累积能量



(c) 撞击率

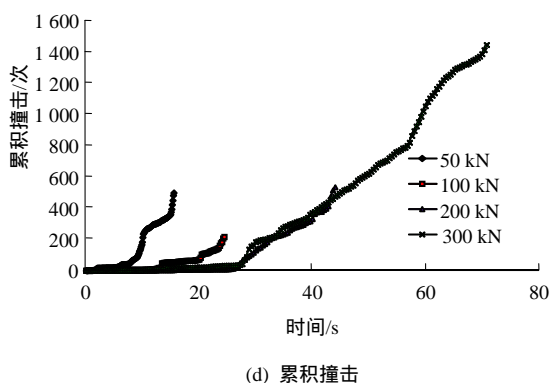


图 7 5 kN/s 剪切速率下 3 mm 起伏高度的结构面在不同法向压力下的声发射参数变化规律

Fig.7 Change laws of acoustic emission parameters with time of 3 mm asperity height joints under different normal pressure at a shearing velocities of 5 kN/s

在接近宏观破坏发生时出现波动式的增加并最终到达最大值，因此随剪切速率的减小，剪切过程中能量率和撞击率的突跳现象在减少，逐渐演变为只在宏观破坏时(接近宏观破坏)出现急剧增加。

从图 7 可知，在 3 mm 起伏高度、5 kN/s 剪切速率条件下，累积能量有 50 kN > 100 kN > 300 kN > 200 kN 的规律，50 和 100 kN 时的能量率峰值大于 200 和 300 kN 时的能量率峰值，200 kN 和 300 kN 时的撞击率峰值大于 50 kN 和 100 kN 时，累积撞击数 300 kN > 200 kN > 50 kN > 100 kN。可见随法向压力的增大，能量率峰值和累积能量有减小的趋势，撞击率和累积撞击数有增大的趋势。

相同起伏高度下、0.2 kN/s 剪切速率时，能量率和累积能量率最大值都是在 100 kN 时取得，宏观破坏时的对应的撞击率峰值和累积撞击数 300 kN > 100 kN > 50 kN；1 kN/s 剪切速率时(见图 5)的能量率峰值和累积能量：50 kN > 200 kN > 300 kN，撞击率峰值和累积撞击数都是在 200 kN 时取得最大。所以在 3 种不同剪切速率下，随法向压力的增大，能量率峰值和累积能量有减小的趋势，撞击率和累积撞击数有增大的趋势。

从上述的 1 kN/s 剪切速率下的 3 种起伏高度下、每种起伏高度进行的 4 种法向压力的试验数据分析以及 3 mm 起伏高度下的 3 种剪切速率下、每种剪切速率进行的 4 种法向压力的试验数据分析可知，虽然不同法向压力下声发射的 4 个参数并没有非常完美的规律可循，但可寻找到一些趋势：随法向压力的增大，破坏时对应的能量率峰值和累积能量有减小的趋势，即低法向压力下能量率和累积能

量可能比高法向压力时大；撞击率和累积撞击数随法向压力增大有增大的趋势，即高法向压力下撞击率和累积撞击数可能比低法向压力时大。这些变化趋势还需要进行更多的试验来验证和确认。聂百胜等^[14-15]分别利用圆柱形的型煤研究其沿不同倾角剪切时的声发射特性，都得到了剪切角越小声发射事件越多的结论。加载装置和试件的受力^[15]如图 8 所示，将试验机的压力 F_N 分解为垂直于剪切面的压力 F_n 和平行于剪切面的剪力 F_t ，剪切角越小，垂直于剪切面的分量 F_n 越大($F_n = F_N \cos \varphi$)，平行于剪切面的剪力分量 F_t 就越小， F_n 越大即相当于本文中法向压力越大。因此本文得到的结论一定程度与上述其他学者的试验结果一致。

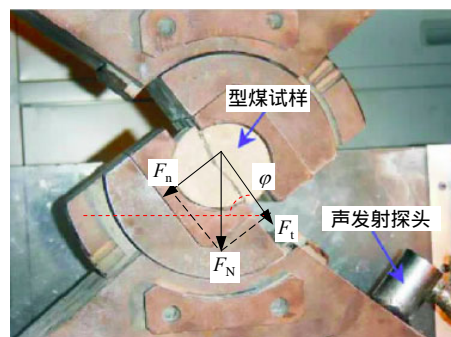


图 8 圆柱形煤岩压剪照片及受力示意图^[15]

Fig.8 Photo of cylindrical mould coal under compression-shear conditions and its stress schematic diagram^[15]

4 机制分析

要分析不同条件下结构面剪切时声发射参数具有某种规律的具体原因，首先应明确声发射信号的来源。在此次研究中，不同工况下结构面剪切破坏时主要有 3 种破坏机制，分别是锯齿的滑移错断机制、结构面上下盘的拉伸断裂机制和上盘前端下盘后端的冲击断裂机制，每一次断裂都可能是一个被接收的撞击事件。为了能更准确地模拟实际岩体中的结构面，试验采用的是不规则锯齿形结构面，即每种结构面的各个锯齿的高度相同，但倾角是随机的。对 3 种不同起伏高度的结构面，1 mm 起伏高度的结构面含有 26 个小锯齿，3 mm 的含有 13 个中型锯齿，5 mm 的含有 10 个大锯齿并且中间 6 个为大倾角的锋利锯齿。当 5 mm 起伏高度的结构面发生剪切时，大尺寸的锯齿发生滑移错动需要较大的外力，且断裂的尺度较大，因此破坏时释放的能量多，但因其齿数少，所以破坏时撞击数就少；而对于 1

mm 起伏高度的结构面,其锯齿的尺寸都很小,因此强度相对较低,破坏时释放的能量少,又由于锯齿的数量较多,每个锯齿被剪断时都会发生小尺度的断裂,都会产生撞击,因此破坏时累积撞击数越多。除了这种滑移错断机制影响声发射参数外,冲击断裂机制同样产生影响。试验中发现锯齿的高度影响冲击断裂的规模和程度,锯齿尺寸越大,冲击的规模和程度越大,释放的能量越大;锯齿尺寸越小,冲击的规模和程度越小(可能只冲击下边缘的一个小锯齿),释放的能量越小。这种锯齿的尺寸和锋利程度的差异导致的破坏机制的不同是造成声发射参数不同的根本原因。

剪切速率大意味着试件在更短的时间内发生破坏,试件被加载直至破坏的过程是内部断裂发展和损伤不断累积的过程。当剪切速率较小时,从锯齿状结构面波谷处萌生的拉伸断裂裂纹或锯齿错动裂纹有充足的时间孕育扩展,在裂纹扩展过程中遇到障碍物时,还会在障碍物处朝不同方向萌生出更多的翼裂纹,因此可能的断裂会多,发出的撞击和能量数可能就大;当剪切速率很大时,试件内部裂纹不能得到充分的扩展,而是快速的形成并发生破坏,因此发出的撞击和能量值可能就小。

随法向压力增大,锯齿的破坏由剪切滑移过渡到剪断错动。当法向压力较小时,结构面上下盘发生相对位移时更容易从锯齿的起伏面滑过,法向压力的进一步增加可能从锯齿的棱角处剪断,当压力增大到一定程度,则会将锯齿从根部剪断。低法向压力下剪断的锯齿棱角、碎块尺度小,而高法向压力时,上下锯齿之间的摩擦更强,会产生更多的撞击信号,剪断的棱角和碎块尺度更大而且剪断瞬间可能会在结构面面壁之间滚动,之后在高压下被碾碎成细粒或粉末状,进一步增大摩擦效应,因此高法向压力下撞击参数有增大的趋势。

法向压力越高,结构面剪切强度越大,这是众所周知的规律。强度大意味需要更大的外力才能克服其抗剪强度,因此在推力增加的过程中会积聚更多的能量,破坏时释放的能量可能会更多。但本次试验却获得了与这种常规想法相反的结论,即法向压力越小的时候释放的能量可能越大,如果这个结论是正确的,或许可以这样解释:压力低时,结构面不论是滑移错断破坏还是拉伸断裂破坏,更容易发生脆性断裂,而压力高时更容易发生延性的裂纹形成和扩展,可能导致低法向力时释放的能量比高

法向力时多。但正如下文讨论的那样,人工制作的结构面上下盘锯齿能否完全吻合以及由于不完全吻合导致的在某些位置可能产生应力集中对断裂的位置和数量有很大影响,因此需要更多的试验数据来验证这一结论。

5 讨 论

在节 3.1 中 100 kN 法向压力不同起伏高度的声发射累积撞击数曲线可划分为平静期、缓慢上升期和急剧上升期的这一规律,与周辉等^[21]所研究的花岗岩在单轴压缩条件下的累积撞击非常相似。正如在周辉等^[21]所描述的那样,声发射撞击受很多因素的影响,如界面摩擦、结构特征、试件均匀程度等,因此有的试件累积撞击曲线的形态可能并不是完全的能够划分上述的 3 个阶段或者 3 个阶段的分界点不明显。但对这一规律的提出、总结和完善的有助于岩石力学工作者认识结构岩体沿弱面发生剪切破坏时的声发射特征和规律,并利用声发射监测技术了解断层、节理、结构面等剪切破坏时内部损伤演化过程、预测结构岩体可能沿弱面发生的静力破坏或动力冲击破坏。

试验过程中剪切荷载的施加采用力控制,前人在研究结构面力学特性时大多采用位移控制方式,在位移控制方式下是否也具有文中所述的特点和规律还有待于进一步研究。这一部分工作笔者正在开展中。

起伏高度和剪切速率影响下的声发射能量和撞击的规律性要稍好于各种工况下不同法向压力影响下的。试件内部每产生一次破裂,都会发出弹性波,如果弹性波的幅值大于系统设置的门槛值,该声波信号就可以被探头接受,就是一个撞击事件。有的撞击携带的能量大,有的撞击携带的能量小,这就是为什么加载时某些阶段撞击数很多,但对应的能量率却很小。所以试件内部破裂的多少和破裂的程度决定了声发射撞击和能量的多少和规律,而结构面的受力情况(压力或拉力)直接决定了破裂的位置、多少、程度等。试验中的结构面是通过上、下完全吻合的刻有锯齿形的钢模为底面,在立方体磨具中分别制作 15 cm×15 cm×7.5 cm 的半截试块,待其完全硬化后将与结构面相对的一侧切割磨平,试验时 2 个相互吻合的半截试块组合成中间的锯齿形结构面,这种人为制作的的的结构面面壁的吻合程度

不可能达到 100%，可能有的地方稍微高一些而有的锯齿稍微低一些，当在法向压力和剪应力作用下那些因为稍有突起而没有完全吻合的地方就会受到很大的集中应力(压力或拉力)，破裂可能在这样的位置先产生，这种结构面加工的误差会对声发射结果产生一定影响。同时上下盘结构面分别制作完硬化达到一定强度后，将锯齿面相对的那一面切割磨平，上下盘拼接后这 2 个面的平行程度也会对声发射测试的结果产生一定影响。

6 结 论

为研究在压-剪荷载作用下，结构面岩体在剪切过程中的声发射特征和规律，进行了不同结构面起伏高度，不同剪切速率和不同法向压力作用下的直剪试验和声发射测试，主要获得如下有益的结论：

(1) 结构面剪切时理想的累积撞击曲线可以划分为平静期、缓慢上升期和急剧上升期。这一规律与岩石单轴压缩时理想的声发射累积撞击曲线非常相似，因此可以通过撞击参数了解结构面岩体沿着弱面发生剪切破坏时内部损伤演化过程、预测结构岩体可能沿弱面发生的静力破坏或动力冲击破坏。

(2) 随结构面起伏高度的增大，发生宏观剪切破坏时能量率峰值变大、累积撞击数变小。4 个法向压力下都是 1 mm 起伏高度时的累积能量最小。

(3) 随剪切速率的增大，能量率曲线和撞击率曲线在整个剪切过程中出现多个突增点、产生较大的波动性，伴随着剪切盒内传来劈啪响声；随剪切速率的减小，剪切过程中能量率和撞击率的突跳现象在减少，逐渐演变为只在宏观破坏时(接近宏观破坏)出现急剧增加。

(4) 随剪切速率的增大，结构面宏观剪切破坏时对应的能量率峰值、撞击率峰值和累积能量减小。不论何种法向压力下，撞击率峰值和能量率峰值均是在最大剪切速率即 5 kN/s 时取得最小。

(5) 随法向压力的变化，结构面剪切时的声发射参数并没有完美的规律可循但仍然可以发现一些变化趋势：随法向压力的增大，破坏时对应的能量率峰值和累积能量有减小的趋势，即低法向压力下能量率和累积能量可能比高法向压力时大；撞击率和累积撞击数随法向压力增大有增大的趋势，即高

法向压力下撞击率和累积撞击数可能比低法向压力时大。

参考文献(References)：

- [1] 蔡耀军, 徐福兴. 大坝建基岩体抗剪强度取值[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 040 - 1 044.(CAI Yaojun, XU Fuxing. Determination of the rockmass shear strength on the dam foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1 040 - 1 044.(in Chinese))
- [2] 周小平, 张永兴. 大厂铜坑矿细脉带岩石结构面直剪试验中声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 724 - 727.(ZHOU Xiaoping, ZHANG Yongxing. Study on the property of acoustic emission straight shearing test of rock joint in Dachang Tongken mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 724 - 727.(in Chinese))
- [3] 潘一山, 王来贵, 章梦涛, 等. 断层冲击地压发生的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 642 - 649.(PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642 - 649.(in Chinese))
- [4] ZHANG C, FENG X T, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(3): 275 - 288.
- [5] BANDIS S C, LUMDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249 - 268.
- [6] 李海波, 刘 博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1 741 - 1 746.(LI Haibo, LIU Bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1 741 - 1 746.(in Chinese))
- [7] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 713 - 719.(SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713 - 719.(in Chinese))
- [8] 唐志成, 夏才初, 宋英龙, 等. 人工模拟节理峰值剪胀模型及峰值抗剪强度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 1): 3 038 - 3 044.(TANG Zhicheng, XIA Caichu, SONG Yinglong, et al. Model of peak dilation angle and peak shear strength of artificial joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1): 3 038 - 3 044.(in Chinese))
- [9] 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): 2 499–2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499–2 503.(in Chinese))
- [10] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1 564–1 570.(ZUO Jianping, PEI Jianliang, LIU Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1 564–1 570.(in Chinese))
- [11] 陈炳瑞, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1 562–1 569.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, XIAO Yaxun et al. Acoustic emission test on damage evolution of surrounding rock in deep tunnel during TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1 562–1 569.(in Chinese))
- [12] 许江, 吴慧, 陆丽丰, 等. 不同含水状态下砂岩剪切过程中声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 914–920.(XU Jiang, WU Hui, LU Lifeng, et al. Experimental study of acoustic emission characteristic during shearing process of sandstone under different water content[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 914–920.(in Chinese))
- [13] 许江, 刘义鑫, 吴慧, 等. 剪切荷载条件下岩石细观破坏及声发射特性研究[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(1): 12–16.(XU Jiang, LIU Yixin, WU Hui, et al. Research on microscopic failure and acoustic emission characteristics of rock under shear load, Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40(1): 12–16.(in Chinese))
- [14] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤体剪切破坏工程电磁辐射与声发射研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 609–611.(NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan et al. Study on electromagnetic radiation and acoustic emission in shearing process of coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2002, 31(6): 609–611.(in Chinese))
- [15] 李西蒙, 黄炳香, 刘长友, 等. 压剪破坏条件下型煤的声发射特征研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2010, 25(1): 22–26.(LI Ximeng, HUANG Bingxiang, LIU Changyou, et al. Study on acoustic emission characteristics of mould coal under compression-shear conditions[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 25(1): 22–26.(in Chinese))
- [16] 徐东强. 采场围岩沿结构面滑移破坏时的声发射特征[J]. 金属矿山, 1996, (1): 22–25.(XU Dongqiang. Sound projection characteristic in sliding failure of enclosing rock within stop along structure plane[J]. Metal Mine, 1996, (1): 22–25.(in Chinese))
- [17] 曾正文, 马瑾, 吴秀全, 等. 单节理岩体变形与破坏过程中声发射能量的特征及意义[J]. 地震地质, 1994, 16(1): 71–77.(ZENG Zhengwen, MA Jin, WU Xiuquan, et al. Characteristics and implications of acoustic emission energy in the process of deformation and failure of single-joint rockmass[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(1): 71–77.(in Chinese))
- [18] MORADIAN ZA, BALLIVY G, RIVARD P et al. Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emission[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(4): 590–598.
- [19] 陆丽丰. 煤岩细观剪切破坏及其声发射特性的试验研究[学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2011.(LU lifeng. Experimental research on microscopic shear failure and acoustic emission characteristics of coal or rock[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.(in Chinese))
- [20] 范雷, 周火明, 熊诗湖. 现场岩体直剪试验声发射特征及其破坏机制[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(8): 29–32.(FAN Lei, ZHOU Huoming, XIONG Shihu. Acoustic emission characteristics and failure mechanism of rock mass in field shear test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 29–32.(in Chinese))
- [21] 周辉, 孟凡震, 卢景景, 等. 硬岩裂纹起裂强度和损伤强度取值方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 913–918.(ZHOU Hui, MENG Fanzhen, LU Jingjing, et al. Discussion on methods for calculating crack initiation stress and crack damage stress for hard rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 913–918.(in Chinese))