



花岗岩裂隙注水诱发滑移的声发射频谱特性

南翰墨 冯子军 赵鹏 高祺 李玉彬

引用本文：

南翰墨, 冯子军, 赵鹏, 等. 花岗岩裂隙注水诱发滑移的声发射频谱特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 84–96.
NAN Hanmo, FENG Zijun, ZHAO Peng. Acoustic emission frequency spectrum characteristics of granite fissure water-induced slip[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 84–96.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates
煤炭科学技术. 2021, 49(7): 79–84 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ea7aa91e-b245-4bb9-b864-e9d98b13f723>

预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征

Stick-slip meta-instability of coal under uniaxial loading and AE and EMR response characteristics
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 72–81 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021-1015>

不同高径比煤样巴西劈裂声发射特征及能量演化机制研究

Study on acoustic emission characteristics and energy evolution of Brazilian splitting tests of coal samples with different height-diameter ratio
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 63–77 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1288>

冲击倾向性煤不同损伤程度声发射分形特征研究

Fractal characteristics of acoustic emission in different damage degrees of impact coal
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 38–46 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b137ebb9-3dda-4059-b421-ee1fc0746db3>

水对含孔煤体蠕变声发射特性影响的试验研究

Experimental study on effect of water on creep acoustic emission characteristics of coal containing pores
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 152–160 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/28bc483e-0021-4869-a4dc-591d12a94ffa>

不同加载速率下胶结充填体声发射及裂纹演化特征

Acoustic emission and crack evolution characteristics of cemented tailings backfill under different loading rates
煤炭科学技术. 2025, 53(6): 250–262 <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0299>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

南翰墨, 冯子军, 赵鹏, 等. 花岗岩裂隙注水诱发滑移的声发射频谱特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 84–96.

NAN Hanmo, FENG Zijun, ZHAO Peng, et al. Acoustic emission frequency spectrum characteristics of granite fissure water-induced slip[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 84–96.

花岗岩裂隙注水诱发滑移的声发射频谱特性

南翰墨^{1,2}, 冯子军^{1,2}, 赵鹏^{1,2}, 高祺^{1,2}, 李玉彬³

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 西藏大学 工学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 水力剪切是干热岩地热开发的重要方式, 研究干热岩热储断层滑移过程中, 无流体介入和有流体介入时的声发射频谱差异, 对于干热岩地热开采中水力剪切工程的影响范围的确定及生产井的选址有重要意义。为深入了解不同水力耦合作用下, 花岗岩裂隙剪切滑移过程中的声发射频谱特征, 利用自主研发的高围压大位移实时动态剪切-渗流试验装置, 对干燥和注水裂隙花岗岩试样进行剪切试验, 观察和分析了干燥和注水试样在滑移过程中声发射信号频谱特征, 其中注水压力梯度设为5、6、8 MPa。结果表明: 归一化主频率值与振铃计数率能有效表征注水滑移特性, 干燥裂隙面在黏滑过程中所产生的声发射信号, 其归一化主频率值和振铃计数率显著大于注水裂隙面, 并且随着注水压力增大, 这2个参数显示出与注水压力的负相关趋势; 频谱分析结果显示, 注水使得声发射信号的频谱分析包括声发射信号的主频及其所对应的幅值减小, 注水摩擦的声发射信号在这2个参数上普遍小于干摩擦, 且随着注水压力增大, 主频和幅值均呈减小趋势; 低幅声发射信号的频数与主频均受注水压力的影响, 其中声发射信号频数随注水压力增大而上升, 主频则呈减小趋势。可以将声发射信号主频与主频率值减小、低幅声发射信号增多作为判断断层滑移有无流体介入的条件。

关键词: 干热岩地热; 声发射; 频谱特征; 注入诱发地震; 断层黏滑

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)10-0084-13

Acoustic emission frequency spectrum characteristics of granite fissure water-induced slip

NAN Hanmo^{1,2}, FENG Zijun^{1,2}, ZHAO Peng^{1,2}, GAO Qi^{1,2}, LI Yubin³

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of In-situ Property Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. College of Engineering, Xizang University, Lhasa 850000, China)

Abstract: Hydraulic shearing is an important method in the development of hot dry rock geothermal energy. Studying the differences in the acoustic emission spectrum during fault slip in hot dry rock reservoirs with and without fluid involvement is of great significance for the impact range of hydraulic shearing engineering in hot dry rock geothermal exploitation and the site selection of production wells. To gain a deeper understanding of the acoustic emission frequency spectral characteristics during the shear slip process of granite fractures under different hydraulic coupling effects, a self-developed high-confining pressure large-displacement real-time dynamic shear-seepage testing device is used to conduct shear tests on dry and water-injected granite fracture samples, with the water injection pressure gradient set to 5, 6, and 8 MPa. The results indicate that normalized main frequency amplitude and ring count rate can effectively characterize the sliding characteristics during water injection. The acoustic emission signals produced by the dry fracture surfaces during the stick-slip process have significantly higher normalized main frequency amplitude and ring count rate compared to those of water-injected fracture surfaces. Moreover, as the water injection pressure increases, these two parameters show a negative correlation with the water injection pressure.

收稿日期: 2024-08-20 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2024-1193

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52122405); 西藏自治区重大科技专项资助项目(XZ202201ZD0004G); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”

资助项目(202101060301024)

作者简介: 南翰墨(2000—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生。E-mail: a15191098767@163.com

通讯作者: 冯子军(1983—), 男, 安徽阜阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: fengzijun@tyut.edu.cn

Spectral analysis results indicate that water injection reduces the main frequency and amplitude of the acoustic emission signals. The acoustic emission signals of water-lubricated friction are generally lower in these two parameters compared to dry friction, and both the main frequency and amplitude decrease as the water injection pressure increases. The frequency of low-amplitude acoustic emission signals and the main frequency are both affected by the water injection pressure, with the frequency of acoustic emission signals increasing as the water injection pressure increases, while the main frequency shows a decreasing trend. The reduction in the intensity of AE signals and the increase in the number of low-amplitude AE signals can be used as criteria to determine whether there is fluid involvement in fault slip.

Key words: hot dry rock geothermal energy; acoustic emission; spectrum signature; injection-induced seismicity; fault stick-slip

0 引言

干热岩是指地下高温但孔隙度和渗透性低的岩体^[1],因此干热岩热储层的渗流特性是决定其开采效率的关键因素,为提高干热岩热储层的渗透性,通常采用水力压裂技术。但水力压裂形成的裂隙面单一且易闭合,这也是至今限制干热岩地热商业化的主要原因。实际上干热岩热储层的岩体并非是完整的,通常含有节理与断层,也会有胶质填充^[2-4]。这些地质结构有较好的渗流特性,即使干热岩裂隙愈合较好,在流体注入的条件下,会减小施加于裂隙面上的有效应力,激活原有或新生的裂隙网络,使裂隙在地应力、孔隙压力和热应力等作用下发生剪切滑动,并利用裂隙的粗糙表面实现自支撑^[5-7],从而永久性增大裂隙水力传导系数,这种方式称为水力剪切(Hydro-Shearing)。例如,美国的 Los Alamos、日本的肘折地区试验、英国 Cornwall 和法国的 Soultz 等干热岩开发工程^[8-11],注水引起了热储层内的节理或裂隙发生滑移,从而增大了热储层的渗透率。水力剪切工程在提高干热岩热储层渗透率及换热效率的同时,造成节理与断层的滑动可能会诱发地震^[12-14]。例如:2016年,美国俄克拉荷马州发生的 M_w 5.8级 Pawnee 地震和 M_w 5.1级 Fairview 地震均是由于将废水注入深部地层引发的^[15-16];2017年,韩国浦项 M_w 5.5级地震也被认为与附近增强型地热工程(EGS)的流体注入有关。在地震学中认为,地层中的裂隙岩体在地应力作用下一般发生速度较小慢的缓慢滑移或者速度突然增大的不稳定滑移,缓慢滑移称为蠕滑^[17],速度突然增大的不稳定滑移称为黏滑^[18],黏滑是裂隙面滑移过程中,剪切应力出现瞬间增大与减小的过程,是不稳定的滑动。黏滑分为规则黏滑与混沌黏滑^[19],混沌黏滑表现为剪应力小范围的无规则振荡;规则黏滑表现为应力降大小与周期相差不大。BRACE 等^[20]通过对含有预制断层的试件进行剪切试验,观察到载荷长期呈现积累与瞬间释放,指出黏滑可能是导致地震的原因,黏滑伴随着滑移速率周期性的突增与突减,这与地震行为有很高的相似性,

因此可以通过研究实验室裂隙花岗岩试样的滑移行为来分析断层的滑移行为。

天然地震的研究是以干摩擦为基础^[21-24]研究断层失稳滑移及其与地震运动之间的关系^[25-27]。但在干热岩地热开发中,断层滑移有高压流体介入。学者在干热岩开采诱发地震的研究上提出了注水诱发地震的机制:孔隙压力增大、应力改变、摩擦因数改变和流体水化作用等,其中水力剪切诱发地震的机制为水-力耦合作用下岩石应力扰动和摩擦系数改变。因此,在研究注入诱发地震时,仍采用水力剪切试验^[28-32]。CAPP 等^[33]通过增大实验室模拟断层的注水压力发现,注水压力增大首先引起地层蠕变和断层张开,随着注水压力持续增大断层滑移速率增大;NEMOTO 等^[34]使用预制裂隙花岗岩体进行了一系列注入诱导滑动试验,研究了裂隙在水力增产中动态力学响应;CEBRY 等^[35]研究了快速流体注入低渗断层岩体引发的地震群特征;吕征等^[36]研究了水对颗粒断层黏滑运动特征的影响,得出了水有利于激励颗粒断层发生不稳定黏滑的作用;牛露等^[37]通过研究水对大理石断层滑动稳定性的影响,发现相同温度和压力条件下,孔隙流体能有效降低大理石断层摩擦强度;康建旗^[38]对注水诱发断层的滑动机制进行了数值模拟,得出断层的抗剪强度随孔隙水压力增大而降低。

研究认为,在黏滑过程中,断层面上凹凸体在围压作用下闭锁啮合,随着剪应力增大凹凸体发生脆性破坏导致断层失稳^[39],凹凸体破坏过程中以弹性波的形式释放应变能,断层在黏滑失稳、变形破裂时会产生声发射信号^[40-43],可以通过安装在结构表面的声发射传感器接收并转换为电信号,目前主要的研究方法是在颗粒剪切过程中同时进行力学和声发射试验,并建立声发射参数与力学行为之间的关系。缪阿丽等^[44]对断层黏滑及稳滑过程中声发射活动特征的初步分析发现,黏滑过程中的小声发射事件的优势频率包括了低、中、高频,稳定滑动过程中,小声发射事件的优势频率仅有低频和中频;常新科等^[45]开展了细砂岩声发射全波形特征及频谱分析,发现

主频、次频的分布特征与演化规律,表明了高频率和中频率的信号分别对应岩石剪切破坏模式与剪切滑移过程;许江等^[46]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;姜耀东等^[47]开展了对煤岩组合结构失稳滑动过程的研究,发现试件在滑移失稳前声发射能量和频度都较高。

综上可知,水力剪切增透是干热岩地热开发的必要步骤,但注入诱发地震不可避免。大量学者在研究注入诱发地震(即注水摩擦)时,并未对比研究在相同试验条件下自然地震(即干摩擦),且未结合声发射频谱特性解释二者滑移行为的区别,而这对于研究注入引发地震是十分重要的。基于以上问题,笔者利用自主创新研制的高围压大位移动态剪切-渗流试验装置^[48],对干燥和注水条件下的单一裂隙花岗岩试样进行剪切试验,并同时检测剪切过程中声发射信号,从频域的角度研究不同水力耦合作用下干热岩热储断层滑移声发射频谱特征,以期为干热岩地热开采中注水压力与速率的确定,以及水里剪切工程的影响范围提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试样和试验系统

花岗岩试样:选用中细粒二长花岗岩,矿物质量分数主要为石英(22%)、黑云母(2%)、斜长石(35%)和钾长石(40%)、其他矿物(1%)。试样制备首先在方形花岗岩钻取50 mm的圆柱体再切取125 mm并且打磨试样,用砂线切割机通过圆柱轴心横向锯开,最后使用120目(125 μm)砂纸打磨,得到φ50 mm×125 mm的单裂缝试样(图1)。

核心试验系统是太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室自主研发的一种高围压大位移动态剪切-渗流试验装置,该装置可以模拟不同深度裂隙岩体在不同场景下的滑移演化规律。其核心部件如图2所示,剪切渗流装置整体采用三段式结构:上段为非剪切接触部分,用于施加剪切力;中段为剪切接触部分,利用耐高温橡胶套密封试样,并施加法向应力;下段同样为非剪切接触部分,是试样中非剪切滑移部分的承载底座,这些部分通过螺纹连接方式紧固。如图2所示,当施加围压时,橡胶套与试样紧密贴合,因此孔隙流体只能沿剪切试样的剪切面流动,而不会从试样侧面流出。同时,橡胶套仅密封剪切接触部分,两端非剪切接触部分的空白处没有橡胶



图1 单裂隙花岗岩试样

Fig.1 Single fractured granite samples

套覆盖,因此在整个剪切滑移过程中,橡胶套始终包裹试样,确保橡胶套不破损,围压加载过程中不会漏水。

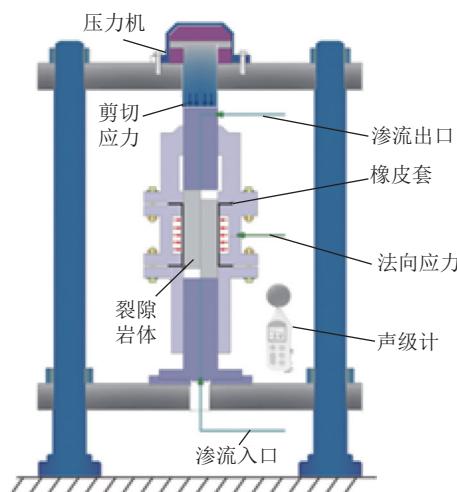


图2 高围压大位移实时剪切-渗流装置及声发射系统

Fig.2 Experimental system of real-time large-displacement shearing-flow and Acoustic Emission system

试验加载系统:驱动试样滑移变形的剪切应力由IMT-HTP-100F多功能伺服控制岩石力学试验机提供,该试验机可实现恒位移速率介于 $10^{-2} \sim 10^4 \mu\text{m/s}$ 、恒载荷速率介于 $10^{-2} \sim 10 \text{ MPa/s}$ 的加载。

声发射采集装置由美国声学物理PAC制造。该系统主要包括传感器、前置放大器、数据采集设备和分析软件。试验使用2个声发射传感器对裂隙花

岗岩试样进行测试。AE 系统阈值设为 45 dB, 放大倍数为 34 dB, 采样频率为 1 MSPS, 利用声发射系统记录干摩擦和注水摩擦剪切滑移过程中声发射原始波形。

1.2 试验方案

在进行干摩擦和注水摩擦试验前, 会将试样放置于真空烘干箱, 在 85 °C 条件下烘干 12 h, 确保在不改变力学特性的前提下, 每组试样的裂隙面干燥条件能保持一致。在进行干燥裂隙岩体剪切试验时, 先施加法向应力至预设值, 并向裂隙面通入恒定的注水压力, 等待出口流体稳定连续无气泡后, 施加剪切应力使试样按照设定速率滑移, 记录剪切应力、变形、流量等参数; 在进行注水剪切试验时, 使试样在恒定法向应力下先达到临界滑移状态, 然后将剪切应力减至略小于临界剪切应力, 再向裂隙面注入流体, 使注入压力逐步增大, 记录裂隙岩体滑移失稳时的剪切应力、变形和声发射参数。

由于试验条件限制, 声发射传感器无法布置在裂隙面上, 因此将声发射传感器布置在剪切接触部分下端上表面距离裂隙面最近位置(图 2), 确保采集的声发射信号能量损失降至最低, 每次试验确保裂隙面与声发射探头相对位置保持不变。预留剪切距离 18 mm, 在进行注水试验时, 预加载阶段和注水阶段会导致裂隙面发生滑移, 实际剪切距离约 12 mm。

注水压力选取 5、6、8 MPa, 前期大量试验结果证实当注水压力大于 8 MPa 后, 会诱导裂隙产生显著的失稳滑移, 黏滑特征减弱甚至消失, 声发射信号极其微弱, 这将导致无法分析水压升高对裂隙黏滑过程中能量释放信号的影响; 在高围压下, 过小的注

水压力(注水压力小于 5 MPa)会导致液体无法注入裂隙面; 当注水压力小于 8 MPa 且大于 5 MPa 时, 随着注水压力增大, 裂隙的滑动特征不仅展现了力学特性的弱化特征, 而且还能保留一定幅度的黏滑特征, 试验条件控制参数见表 1。

表 1 试验条件控制参数

Table 1 Conditional control parameters in the test

试验编号	围压 σ_c/MPa	剪切速率 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	裂隙面条件	注水压力 σ_p/MPa
G1	35	0.01	干燥	5、6、8
G2	35	0.01	注水	5、6、8
G3	25	0.01	干燥	5、6、8
G4	25	0.01	注水	5、6、8

2 试验结果

2.1 声发射波形及频谱获取方法

使用检测装置检测到的声发射信号, 常用的声发射特征参数包括声发射事件数、振铃计数、上升时间、能量、幅值、主频值和持续时间等。声发射波形信号包含了大量丰富的微量裂纹信息, 以及波形的不同频率特性和幅值特性, 有利于分析岩体的微观破裂机制。换能器记录的声发射信号是典型的非平稳信号, 快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT), 是一种经典频谱分析方法, 通过 FFT 可掌握信号全局的频谱特征。基于快速傅里叶分析方法, 可将声发射信号由时域转移到频域, 结果如图 3 所示。定义最高峰幅值对应的频率为主频, 脱离主频能量区域, 且幅值仅次于主频值所对应的频率为次主频^[49]。

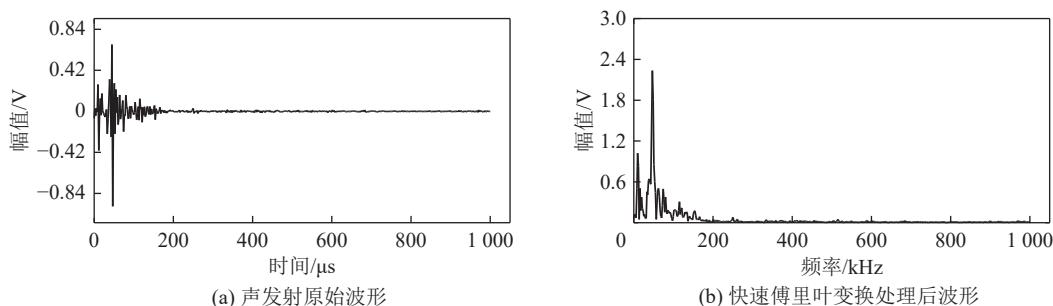


图 3 声发射原始波形和快速傅里叶变换结果

Fig.3 Acoustic emission waveform and fast Fourier change results

2.2 不同水力耦合作用下裂隙面滑移归一化主频幅值特性

在裂隙面滑移过程中会产生大量声发射信号, 声发射信号的幅值分布较为离散, 因此对 G1 和 G2

中所有声发射信号进行整体归一化处理(同样对 G3 和 G4 所有声发射信号进行整体归一化处理)。这样做的目的是为了能够更清楚地观察到声发射信号的整体趋势, 便于对声发射信号进行分类。

将主频幅值归一化至[0,1], 归一化计算式为

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式中: X 为归一化后的幅值; X_i 为处理前的值; X_{\min} 和 X_{\max} 分别为幅值最小及最大值。

图4展示了剪切载荷、归一化主频幅值、振铃计数率随时间增加和注水压力增大的分布特点。以图4a为例,当试件完成预加载后,轴向开始以恒速 $V=10 \mu\text{m}/\text{s}$ 加载,剪切载荷持续增至46.72 MPa后裂隙面摩擦强度无法抵抗剪切载荷时,剪切载荷突降至37.76 MPa,降低幅度为20%,断层发生滑移,黏滑发生后才出现高值振铃计数率和高值归一化主频幅值。随着荷载继续增大,剪切载荷达到新的强度,断层再次发生滑移。在上述过程中剪切载荷会呈现锯齿状增大,每个锯齿代表一次黏滑发生。研究认为断层发生黏滑的机制为:断层表面凹凸体闭锁导致断层处于黏滞状态,随着剪应力增大,闭锁的凹凸体发生脆性破坏导致断层失稳滑移^[50]。

由图4可观察到归一化主频幅值、振铃计数率与剪切载荷存在较好对应关系。黏滑的发生总伴随高值归一化主频幅值及振铃计数率。加载过程中干摩擦试验黏滑伴随的归一化主频幅值普遍大于注水摩擦试验,且在注水摩擦试验中,随着注水压力的增大,归一化主频幅值及振铃计数率降低,与注水压力高度负相关(图5)。振铃计数表示超过阈值电压的脉冲数,能在一定程度上反映声发射信号的强弱,这初步表明注水会降低裂隙面黏滑强度,且注水压力越大影响越大。

由图4可观察到归一化主频幅值、振铃计数率与剪切载荷存在较好对应关系。黏滑的发生总伴随高值归一化主频幅值及振铃计数率。加载过程中干摩擦试验黏滑伴随的归一化主频幅值普遍大于注水摩擦试验,且在注水摩擦试验中,随着注水压力的增大,归一化主频幅值及振铃计数率降低,与注水压力高度负相关(图5)。振铃计数表示超过阈值电压的脉冲数,能在一定程度上反映声发射信号的强弱,这初步表明注水会降低裂隙面黏滑强度,且注水压力越大影响越大。

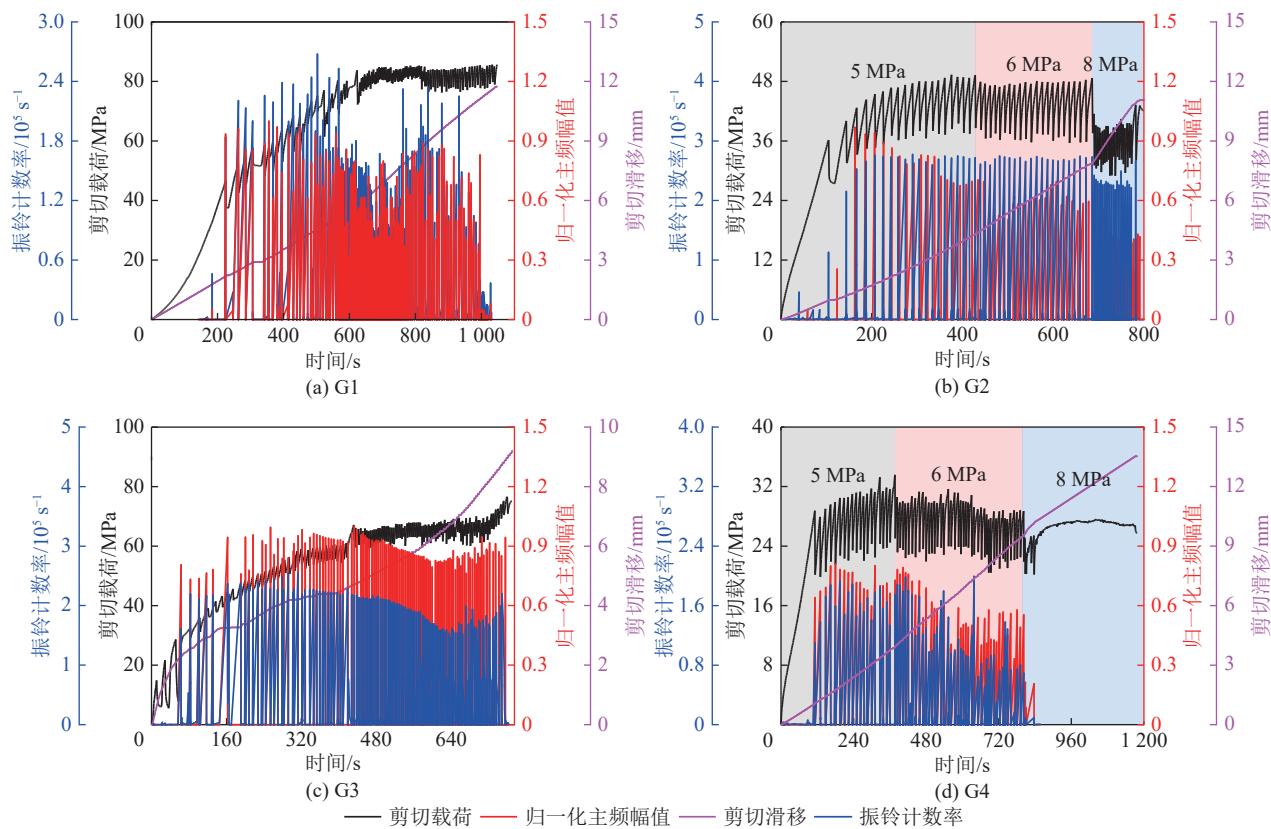


图4 归一化主频幅值、振铃计数率及剪切载荷随注水压力增大的演化曲线

Fig.4 Evolution curves of normalized peak amplitude, ringing count rate and shear load with the increase of water injection pressure

2.3 不同水力耦合作用下裂隙面滑移力学特征

大量学者针对流体注入对断层滑移产生的影响进行研究。FAULKNER等^[51]使用嵌入试验断层中的微型压力传感器,展示了破裂过程中流体压力的变化,结果表明,随着滑动速率的增大,孔隙流体压力无法及时排出则会导致摩擦强度逐渐减弱; VILOLAY等^[52]进行了弹性流体动力润滑效率对诱发地

震的参数分析,使用Sommerfeld数作为效率的无量纲衡量标准,研究分析了8个案例,得出高黏性流体在地震事件期间的动摩擦与弹性流体动力润滑理论预测的断层减弱相一致; YE等^[53]通过注入诱导花岗岩裂缝剪切滑移试验发现,在低注水压力下,裂隙呈现黏滞状态,剪切滑移缓慢,随着注水压力增大,有效法向应力逐渐减小,导致剪切载荷轻微减小,且随

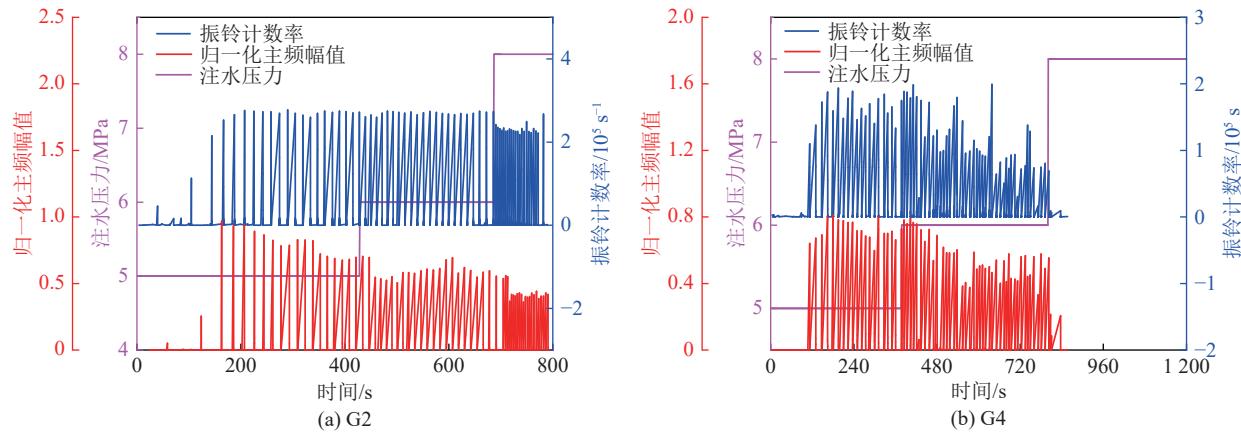


图 5 归一化主频幅值、振铃计数率随注水压力增大的演化曲线

Fig.5 Evolution curves of normalized main frequency amplitude and ringing count rate with increasing injection pressure

着注水压力增大, 裂缝滑移速度增大。综上所述, 流体的注入对断层滑移产生的影响包括注水弱化裂隙力学特性、注水对裂隙的润滑作用和水压降低裂隙有效法向应力等。以 G2 试验为例, 绘制黏滑特征参数图并求均值, 如图 6 所示。

阶段 1(注水压力 5 MPa): 在加载初期, 随着黏滑次数增加, 临界剪切载荷及剪切载荷降增大, 这是由于断层在黏滑过程中总优先破坏裂隙面上强度较低的区域。加载至 320 s 时, 剪切载荷降达到最大值 11.472 MPa, 并且在阶段 1 内平均剪切载荷降最大, 为 10.6 MPa。剪切载荷降的高低代表断层黏滑释放能量的大小, 表明在该阶段内裂隙面黏滑释放能量最多。

阶段 2(注水压力 6 MPa): 注水压力增至 6 MPa 后, 剪切载荷降突减至 9.728 MPa, 减小幅度为 14.6%, 随着加载的继续, 剪切载荷降稍有升高, 峰值剪切载荷降为 10.88 MPa, 均值剪切载荷降为 10.30 MPa, 略小于阶段 1。此外, 在阶段 2 内黏滑周期由 16.75 s 缩短至 11.36 s, 降低约 32%, 表明随着注水压力升高裂缝滑移加速, 黏滑发生的临界剪切载荷略有减小。

阶段 3(注水压力 8 MPa): 注水压力升高至 8 MPa 后, 临界剪切载荷及剪切载荷降大幅减小, 峰值剪切载荷降仅为 7.68 MPa, 相比阶段 2 减小约 25%, 均值剪切载荷降为 7.30 MPa。黏滑周期缩短至 4.1, 裂隙面滑移速率进一步增大。

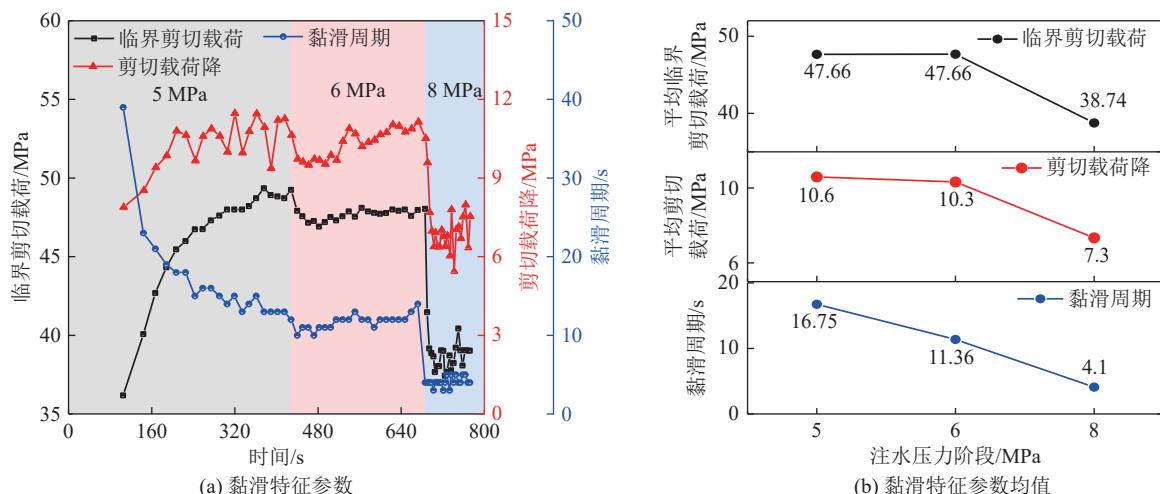


图 6 剪切载荷降、临界剪切载荷及滑移速率随注水压力和时间演化关系

Fig.6 Evolution of shear load drop, critical shear load and slip rate with water injection pressure and time

上述现象表明随着注水压力增大, 黏滑所需的剪切载荷减小, 裂隙面黏滑释放的能量减小, 因此减小了黏滑发生时声发射事件主频幅值, 并且剪切载

荷降与注水压力高度负相关。

2.4 峰值频率与归一化幅值耦合特性

为进一步探究剪切滑移过程中注水对于声发

射信号的影响,将归一化后的主频幅值与主频进行耦合,得主频-归一化主频幅值分布图(图7)。声发射低频和中频事件占据了绝大多数,中频信号数量最多,高频信号数量最少,且不存在高归一化主频幅值(>0.1)信号。低归一化主频幅值(<0.1)事件数远多于高归一化主频幅值事件数,这种差异是由于高频波的波长较短,与材料内部结构的相互作用更频繁,导致更多的能量被材料吸收,从而衰减更快;高频波在传播过程中更容易被材料内部的微观结构(如晶粒、孔隙和裂纹等)散射,所以导致高频声发射波形分量会相对衰减^[54]。

为了能够更好反映注水对于裂隙面滑移行为的影响,根据归一化峰值幅值所在的3个峰值频段,将声发射信号分为5类(表2):①低主频低归一化幅值(LL);②低主频高归一化幅值(LH);③中主频低

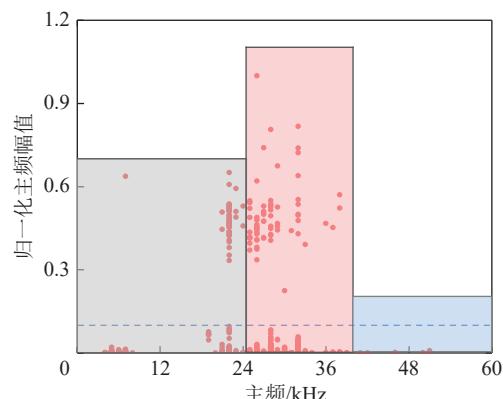


图7 试验G1、G2主频与归一化主频幅值分布
Fig.7 Experiment G1, G2 main frequency and normalized main frequency amplitude distribution

归一化幅值(ML);④中主频高归一化幅值(MH);⑤高主频低归一化幅值(HL)。

表2 AE信号波形的5种类型范围
Table 2 Five types of AE signal waveform range

信号类型	LL	LH	ML	MH	HL
主频/kHz	0~20	0~20	20~40	20~40	>40
归一化主频幅值	0~0.1	0.1~1.0	0~0.1	0.1~1.0	0~0.1

2.5 不同水力耦合作用下裂隙面滑移声发射频谱特征

研究者针对颗粒黏滑过程中的声发射波形信号进行了研究,普遍认为低幅值信号是由凹凸体摩擦产生的低能量、短时间的摩擦信号^[55],且由于每次应力降时试样体积变化较大,重组后粒子结构不稳定,粒子重新接触并挤压产生大量低能信号;凹凸体破坏引起的高能声发射信号,高能信号只发生在应力降过程中,并且能量级远大于低能信号,当发生剪切滑移时,黏滞的凹凸体被破坏同时释放大量能量;高频信号代表应力下降后产生的高能弹性波逐渐耗散,在应力下降后,由于高频松弛时间的增加,高能弹性波的衰减减弱^[56]。绘制5种声发射波形信号、应力与时间关系(图8)。2组试验的声发射信号类型表现出相似演化特征,以G1和G2试验为例。

在干摩擦试验(图8a)中,可观察到LL与ML等低幅信号贯穿整个试验过程,随着加载进行260 s后发生首次黏滑,凹凸体发生脆性破坏出现高幅信号LH和MH,高幅值信号持续至试验结束,同时LL与ML信号数激增,这是由于重构后粒子不稳定接触并滑移导致。

在注水摩擦试验(图8b)中:阶段1,声发射信号类型演化规律与干摩擦类似,表现为黏滑发生前仅

有LL和ML等低幅信号,黏滑发生后高幅信号与低幅信号数量增加,内高幅信号以MH信号为主。阶段2,加载初期高幅值信号以MH信号为主,随着流体持续注入,导致声发射信号频率降低,高幅值信号以LH信号为主;阶段3,声发射信号浓度大幅增大,MH信号彻底消失,LH信号主频进一步减小,在阶段3初期出现80 kHz的高频信号,这可能是由于注水压力在短时间内快速增大引起的裂隙面急速滑移导致。

综上所述,声发射频谱特性能很好地反映注水对于裂隙面滑移造成的影响,注水会降低裂隙面滑移过程中声发射信号的主频率,且与注水负相关。

在裂隙面发生黏滑时,除去与其对应的高幅声发射信号外,在黏滑前后会伴随多次低幅信号发生,低幅信号能量级微弱,仅为最大能级信号的 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 。为了研究注水对裂隙面滑移产生的低幅信号的影响。统计干摩擦试验和注水压力5、6、8 MPa阶段内不同类型声发射信号数量及占比(图9),以试验G1和G2为例。

如图9和表3所示,注水压力阶段1内,共计698个声发射信号,LL信号数为95,占比约13.7%,ML信号数为585,占比约84.2%;注水压力阶段2内,共出现972个声发射信号,LL信号数为176个,占

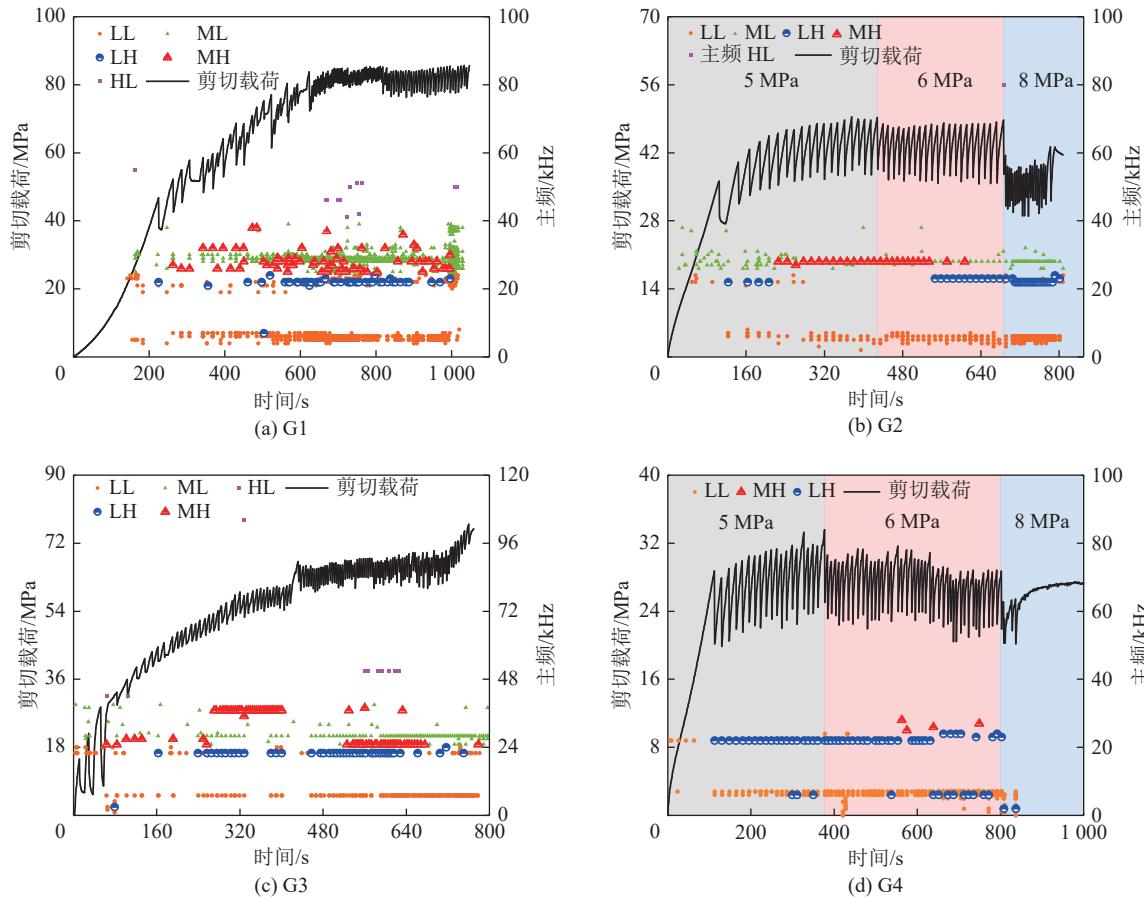


图 8 5 种波形信号与剪切载荷随注水压力变化的演化

Fig.8 Evolution diagram of five waveform signals and shear load with water injection pressure

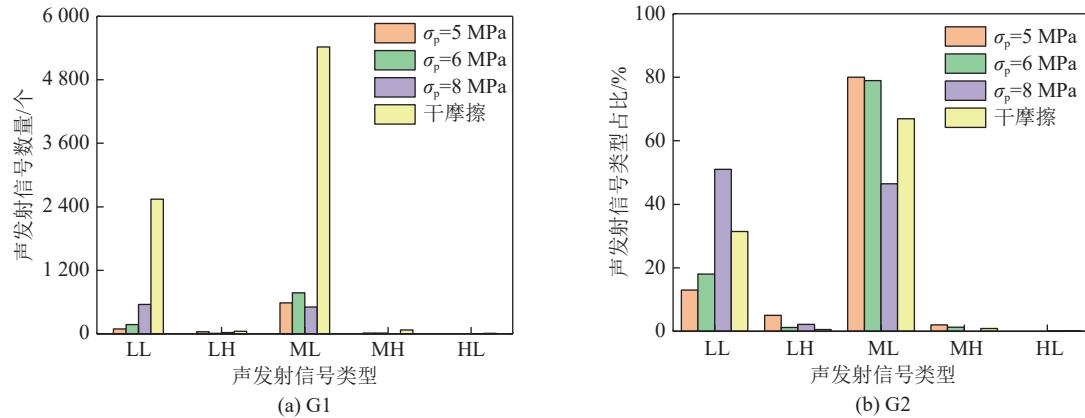


图 9 不同水力耦合作用下各阶段声发射信号类型数量与占比

Fig.9 Number and proportion of acoustic emission signal types at each stage under different hydraulic coupling

比约为 18%, ML 信号数为 774, 占比约为 79%; 注水压力阶段 3 内, 共计 1 083 个声发射信号, LL 信号数为 555, 占比约 51.2%, ML 信号数为 506, 占比约 46.6%。

综上所述, 可将低幅声发射信号激增及主频值降低作为判断裂隙面滑移有无流体介入的条件。

2.6 不同水力耦合作用下声发射波形特征

为了更直观地分析注水对裂隙面滑移造成的影响,

对从干摩擦试验和注水摩擦试验 3 阶段内选取的典型声发射信号进行信号处理获得频谱图(图 10—图 11), 观察信号在频域上的特征。

典型声发射信号取自裂隙在干摩擦及注水摩擦滑移过程中黏滑参数响应最剧烈时的声发射信号。在不同试验场景中, 裂隙干摩擦和注水摩擦过程中裂隙能量释放信号强度不同, 可以体现在相应试验条件下的频谱特征差异上, 这种思想在类似的研究

表3 不同水力耦合阶段加载过程中声发射信号类型数量
Table 3 Number of acoustic emission signal types during loading in different hydraulic coupling stages

信号类型	G1与G2				G3与G4			
	干摩擦	$\sigma_p=5$ MPa	$\sigma_p=6$ MPa	$\sigma_p=8$ MPa	干摩擦	$\sigma_p=5$ MPa	$\sigma_p=6$ MPa	$\sigma_p=8$ MPa
LL	2 542	95	176	555	2 511	707	2 610	102
LH	50	3	12	21	45	23	40	2
ML	5 422	585	774	506	145	—	—	—
MH	72	15	10	—	72	—	4	—
HL	12	—	—	1	17	—	—	—
总数	8 098	698	972	1 083	2 790	730	2 650	104

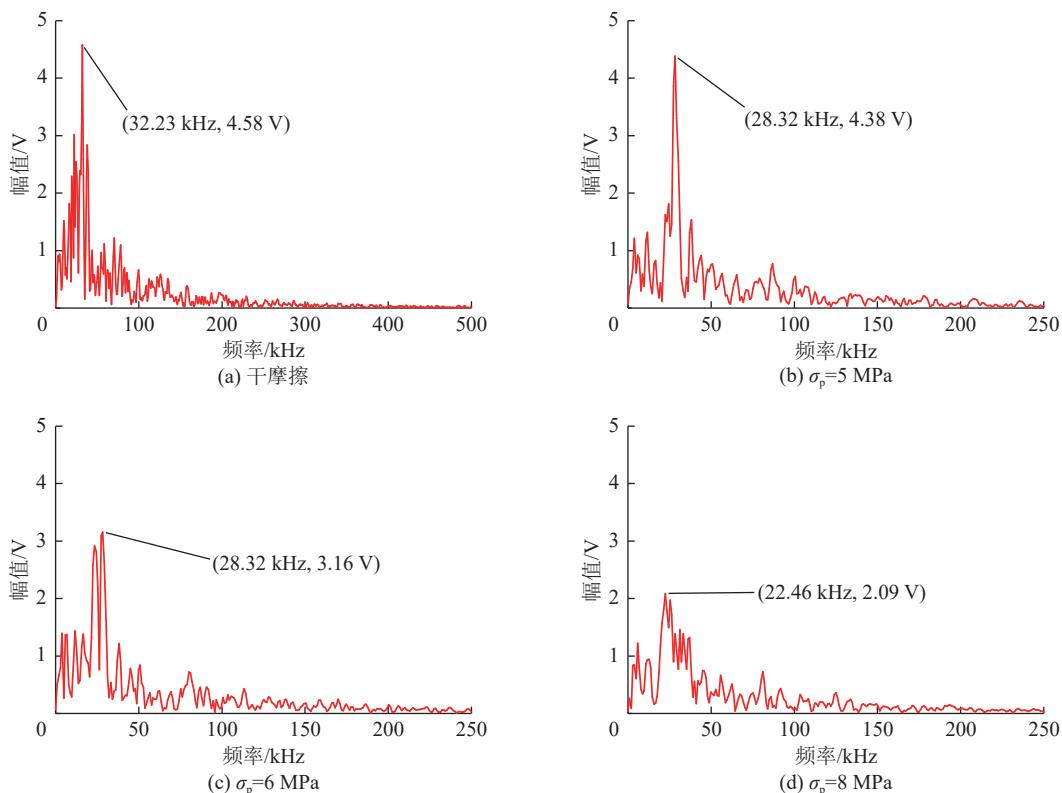


图10 G1与G2试样的典型声发射频谱特征
Fig.10 Typical acoustic emission spectrum characteristics of G1 and G2 samples

中也有体现。例如,侯志强等^[57]进行了直接拉伸荷载下大理岩和砂岩的Kaiser效应与频谱特性试验,得出岩石拉伸破裂存在着4种声发射微观机制,并且选取4种典型声发射信号和频谱特征进行分析。

由图10—图11可见,处于干摩擦阶段和注水压力5、6、8 MPa阶段的主频与主频幅值存在明显差异。

以图10为例,在干摩擦试验中(图10a),声发射信号的主频最高大,32.23 kHz对应幅值为4.58 V,并且在主频两侧分布有较宽的高幅频带;在注水压力为5 MPa阶段内(图10b),声发射信号虽然为高频信

号,但主频值降低至28.32 kHz,对应幅值减小至4.38 V,高幅值频带大幅缩短,频谱成分朝向低频转移;注水压力升高至6 MPa后(图10c),主频保持不变,但主频幅值大幅降低至3.16 V;注水压力升高至8 MPa后(图10d),主频值与主频幅值大幅减至22.46 kHz和2.09 V,声发射信号由MH降至LH。进一步证明注水会降低裂隙面滑移产生的声发射信号频谱成分。典型声发射信号的频谱特征参数见表4。

3 工程意义

ZHANG等^[58]对花岗岩试样进行了直接与间接

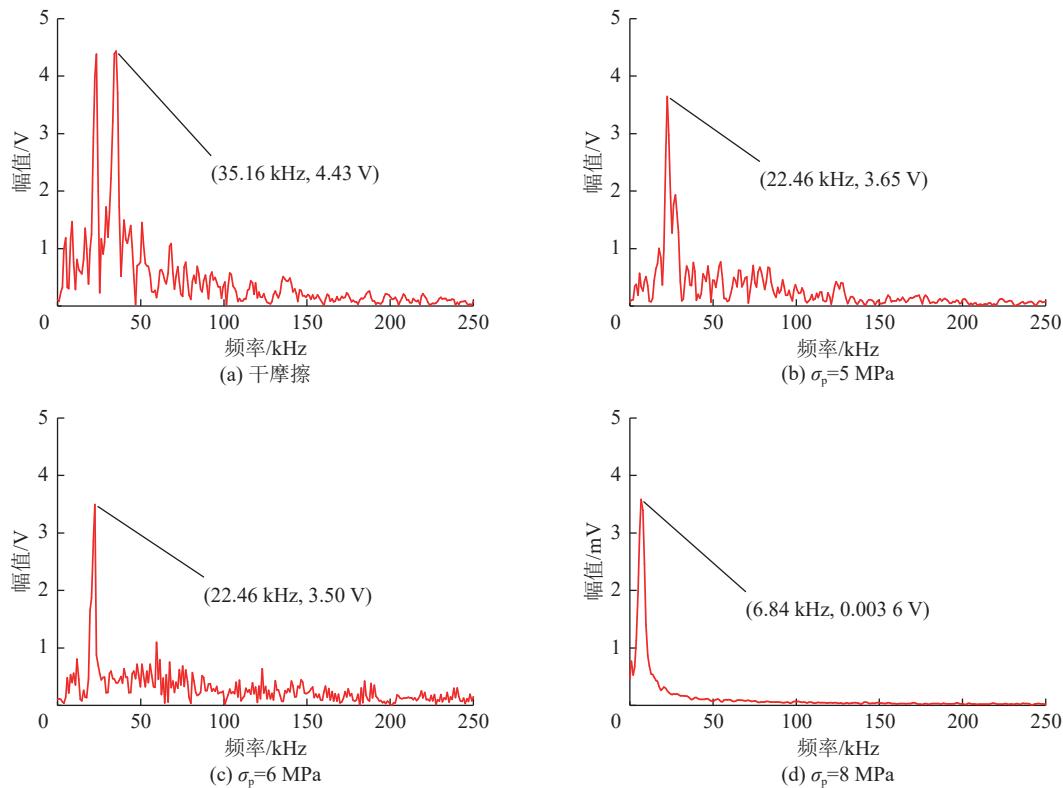


图 11 G3 与 G4 试样的典型声发射频谱特征
Fig.11 Typical acoustic emission spectrum characteristics of G3 and G4 samples

表 4 典型声发射信号的频谱特征参数

Table 4 Frequency spectrum characteristic parameters of typical acoustic emission signals

选取阶段	G1与G2			G3与G4		
	主频/kHz	主频幅值/V	信号类型	主频/kHz	主频幅值/V	信号类型
干摩擦	32.23	4.58	MH	35.16	4.43	MH
$\sigma_p=5$ MPa	28.32	4.38	MH	22.46	3.65	LH
$\sigma_p=6$ MPa	28.32	3.16	MH	22.46	3.50	LH
$\sigma_p=8$ MPa	22.46	2.09	LH	6.84	0.003	LL

试验,结果表明,除了将流体直接入住断层外,间接注入同样会诱发地震。因此了解花岗岩裂隙在干燥以及注水状态下滑移的声发射频谱特征,对于划分水力剪切工程的影响范围和生产井的选址具有重要意义。在高围压下对单裂花岗岩试验进行干燥以及注水剪切试验,分别模拟干热岩热储断层在无流体和有流体介入下的滑移模式,检测并记录滑移过程中的声发射信号。根据试验结论,断层滑移无流体介入(干摩擦)时,断层黏滑释放的能量会高于注水摩擦,声发射信号主频和幅值较高,并且不会随着时间的增加而消失;断层滑移有流体介入(注水摩擦)时,声发射信号主频、主频幅值均低于无流体介入的断层滑移,并且随着注水压力的升高,声发射频

谱成分会向低频转移。同时随着注水压力的升高,断层滑移产生的低幅声发射信号数量增多,且低幅声发射信号的主频也会随着注水压力的升高而降低,这与 CHEN 等^[59]试验有相似结果。因此,可以将声发射信号强度减弱及低幅声发射信号增多作为判断断层滑移有无流体介入的条件。但由于地层结构复杂,断层渗透率、断层胶质填充及断层表面粗糙程度对于断层滑移造成的影响,需要进一步分析。此外,声发射技术监测的声发射信号可能随着仪器分辨率的不同而变化^[60]。

4 结 论

1) 归一化主频幅值与振铃计数率能有效表征注

水滑移特性,干燥裂隙面在黏滑过程中产生的声发射信号,其归一化主频幅值和振铃计数率显著高于注水裂隙面,并且随着注水压力增大,这2个参数显示出与注水压力的负相关性。

2) 频谱分析结果显示,注水减小了声发射信号的主频及其幅值,注水摩擦的声发射信号在这2个参数上普遍小于干摩擦,且随着注水压力增大,主频和幅值均呈下降趋势。

3) 在注水试验时,低幅声发射信号的频数与主频均受注水压力的影响,其中声发射信号频数随注水压力增大而上升,主频则呈下降趋势。

参考文献(References):

- [1] 陆川,王贵玲.干热岩研究现状与展望[J].科技导报,2015,33(19):13-21.
LU Chuan, WANG Guiling. Current status and prospect of hot dry rock research[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(19): 13-21.
- [2] YIN W T, ZHAO Y S, FENG Z J. Experimental research on the rupture characteristics of fractures subsequently filled by magma and hydrothermal fluid in hot dry rock[J]. Renewable Energy, 2019, 139: 71-79.
- [3] GENTER A, EVANS K, CUENOT N, et al. Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS)[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(7-8): 502-516.
- [4] 杨吉龙,胡克.干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J].世界地质,2001,20(1):43-51.
YANG Jilong, HU Ke. A review of hot dry rock(HDR) research and development in the world[J]. World Geology, 2001, 20(1): 43-51.
- [5] 张洪伟,万志军,赵毅鑫,等.深层地热储层水力剪切增透机制研究进展[J].煤炭学报,2021,46(10):3172-3185.
ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHAO Yixin, et al. A review of the research on the mechanism of hydro-shearing in geothermal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3172-3185.
- [6] CLADOUHOS T, PETTY S, LARSON B, et al. Toward more efficient heat mining: A planned enhanced geothermal system demonstration project[C]//Geothermal Resources Council Annual Meeting, 2009. Davis: Geothermal Resources Council, 2009: 165-170.
- [7] BARIA R, JUNG R, TISCHNER T, et al. Creation of an HDR reservoir at 5000 m depth at the European HDR project[C]//31st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford Geothermal Program, 2006: SGP-TR-179 .
- [8] PETTITT R A, BECKER N M. Mining geothermal energy from hot dry rock[J]. Journal of Technical Topics in Civil Engineering, 1984, 110(1): 70-83.
- [9] SAWADA M, HORII H, YOSHIDA H. Analysis of hydraulic fracturing and circulation test in hot dry rock project[J]. Doboku Gakka Ronbunshu, 2001, 2001(680): 109-121.
- [10] NATHENSON M. The dependence of permeability on effective stress from flow tests at hot dry rock reservoirs at Rosemanowes (Cornwall) and Fenton Hill (New Mexico)[J]. Geothermics, 1999, 28(3): 315-340.
- [11] BÉRARD T, CORNET F H. Evidence of thermally induced bore-hole elongation: A case study at Soultz, France[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7-8): 1121-1140.
- [12] 马瑾,张渤海,袁淑荣,等.影响断层带再活动的一些因素的实验研究[J].西北地震学报,1981,3(2):18-24.
MA Jin, ZHANG Botao, YUAN Shurong, et al. Experimental research on some factors affecting the reactivation of faults[J]. Northwestern Seismological Journal, 1981, 3(2): 18-24.
- [13] KERANEN K M, WEINGARTEN M. Induced seismicity[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2018, 46: 149-174.
- [14] BAO X W, EATON D W. Fault activation by hydraulic fracturing in western Canada[J]. Science, 2016, 354(6318): 1406-1409.
- [15] KOLAWOLE F, JOHNSTON C S, MORGAN C B, et al. The susceptibility of Oklahoma's basement to seismic reactivation[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(10): 839-844.
- [16] WOO J U, KIM M, SHEEN D H, et al. An in-depth seismological analysis revealing a causal link between the 2017 MW 5.5 po-hang earthquake and EGS project[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(12): 13060-13078.
- [17] 曾佐勋,樊光明.构造地质学[M].3版.武汉:中国地质大学出版社,2008.
- [18] 齐庆新,刘天泉,史元伟,等.冲击地压的摩擦滑动失稳机理[J].矿山压力与顶板管理,1995,12(S1):174-177.
QI Qingxin, LIU Tianquan, SHI Yuanwei, et al. Friction and sliding instability mechanism of rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 1995, 12(S1): 174-177.
- [19] 马胜利,王凯英,陈顺云,等.应力扰动对摩擦滑动影响的实验研究[C]:中国地球物理学会.中国地球物理学会第22届年会论文集.2006: 765.
- [20] BRACE W F, BYERLEE J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes[J]. Science, 1966, 153(3739): 990-992.
- [21] 崔国建,张传庆,韩华超,等.CNL及CNS条件下结构面剪切特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2): 3384-3392.
CUI Guojian, ZHANG Chuanqing, HAN Huachao, et al. Experimental study on shear characteristics of structural plane under CNL and CNS conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3384-3392.
- [22] 韩文梅.岩石摩擦滑动特性及其影响因素分析[D].太原:太原理工大学,2012.
HAN Wenmei. The study of frictional sliding characterd[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [23] 王泽利,何昌荣,周永胜,等.断层摩擦实验中的应力状态及摩擦强度[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23): 4079-4083.
WANG Zeli, HE Changrong, ZHOU Yongsheng, et al. Stress

- state and frictional strength obtained with frictional experiments of fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4079–4083.
- [24] 马胜利, 刘力强, 马瑾, 等. 均匀和非均匀断层滑动失稳成核过程的实验研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(S1): 45–52.
MA Shengli, LIU Liqiang, MA Jin, et al. Experimental study on nucleation process of sliding instability of homogeneous and heterogeneous faults[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2003, 33(S1): 45–52.
- [25] 郭玲莉, 刘力强, 马瑾. 黏滑实验的震级评估和应力降分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 867–876.
GUO Lingli, LIU Liqiang, MA Jin. The magnitude estimation in stick-slip experiments and analysis of stress drop[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(3): 867–876.
- [26] 姚路, 马胜利. 断层同震滑动的实验模拟: 岩石高速摩擦实验的意义、方法与研究进展[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 607–623.
YAO Lu, MA Shengli. Experimental simulation of coseismic fault sliding-significance, technological methods and research progress of high-velocity frictional experiments[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 607–623.
- [27] 缪阿丽, 马胜利. 岩石高速摩擦实验与地震物理过程[J]. 西北地震学报, 2009, 31(4): 385–392.
MIAO Ali, MA Shengli. High-velocity rock frictional experiment and physical process of earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2009, 31(4): 385–392.
- [28] RUBEY W W, KING HUBBERT M. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: Reply[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(4): 469.
- [29] SEGALL P, BÜRGMANN R, MATTHEWS M. Time-dependent triggered afterslip following the 1989 Loma Prieta earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B3): 5615–5634.
- [30] JEANNE P, RUTQVIST J, DOBSON P F, et al. The impacts of mechanical stress transfers caused by hydromechanical and thermal processes on fault stability during hydraulic stimulation in a deep geothermal reservoir[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 72: 149–163.
- [31] 黄元敏, 马胜利, 李晓慧. 注水诱发地震的研究进展[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 387–400.
HUANG Yuanmin, MA Shengli, LI Xiaohui. Research progress on injection-induced earthquakes[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2023, 45(2): 387–400.
- [32] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 109–113.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 109–113.
- [33] CAPPA F, SCUDERI M M, COLLETTINI C, et al. Stabilization of fault slip by fluid injection in the laboratory and in situ[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaau4065.
- [34] NEMOTO K, MORIYA H, NIITSUMA H, et al. Mechanical and hydraulic coupling of injection-induced slip along pre-existing fractures[J]. *Geothermics*, 2008, 37(2): 157–172.
- [35] CEBRY S B L, MCLASKEY G C. Seismic swarms produced by rapid fluid injection into a low permeability laboratory fault[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 557: 116726.
- [36] 吕征, 杨强, 王守光. 颗粒断层黏滑运动特征及水对其影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2636–2645.
LYU Zheng, YANG Qiang, WANG Shouguang. Experimental study on the characteristics of stick-slip motion of particle fault and the influence of water on it[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2636–2645.
- [37] 牛露, 周永胜, 徐锡伟, 等. 水对Carrara大理岩断层激活及滑动稳定性影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(5): 1927–1943.
NIU Lu, ZHOU Yongsheng, XU Xiwei, et al. Experiments of water effects on fault stability and reactivation of Carrara marble[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(5): 1927–1943.
- [38] 康建旗. 注水诱发断层滑动机制的试验和数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
KANG Jianqi. Experimental and numerical study of the mechanism of fault slip induced by water injection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [39] CHEN X F, CARPENTER B M, RECHES Z. Asperity failure control of stick-slip along brittle faults[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, 177(7): 3225–3242.
- [40] 樊艺. 断层黏滑过程声发射特征试验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
FAN Yi. Experimental study on AE characteristics in the process of fault stick-slip[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [41] BELOV V Z, KONSTANTINOV L K. Application of acoustic emission for monitoring the quality of glass granules and ceramic samples[J]. *Atomic Energy*, 1994, 77(1): 512–514.
- [42] COULAIS C, BEHRINGER R P, DAUCHOT O. How the ideal jamming point illuminates the world of granular media[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(10): 1519–1536.
- [43] DALTON F, CORCORAN D. Self-organized criticality in a sheared granular stick-slip system[J]. *Physical Review E*, 2001, 63(6): 061312.
- [44] 缪阿丽, 马胜利, 郭彦双, 等. 岩盐断层带黏滑及稳滑过程中声发射活动特征的初步分析[J]. 地球物理学报, 2023, 66(11): 4597–4608.
MIAO Ali, MA Shengli, GUO Yanshuang, et al. Preliminary analysis of acoustic emission characteristics during stick-slip and stable sliding of halite gouge fault zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(11): 4597–4608.
- [45] 常新科, 吴顺川, 程海勇, 等. 细砂岩声发射全波形特征及频谱分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(7): 118–125.
CHANG Xinke, WU Shunchuan, CHENG Haiyong, et al. Full-waveform characteristics and frequency spectrum of acoustic emission for fine sandstone[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(7): 118–125.
- [46] 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[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2013, 40(1): 12–16.
- [47] 姜耀东, 王涛, 宋义敏, 等. 煤岩组合结构失稳滑动过程的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(2): 177–182.
- JIANG Yaodong, WANG Tao, SONG Yimin, et al. Experimental study on the stick-slip process of coal-rock composite samples[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(2): 177–182.
- [48] 冯子军, 毛瑞彪, 赵阳升. 一种高温高压下测量岩石剪切渗流的装置: CN104596857A[P]. 2015-05-06.
- [49] 贾雪娜. 应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- JIA Xuena. Experimental study on acoustic emission eigen-frequency spectrum of strainbursts[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013.
- [50] LEEMAN J R, SAFFER D M, SCUDERI M M, et al. Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11104.
- [51] FAULKNER D R, SANCHEZ-ROA C, BOULTON C, et al. Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(1): 226–241.
- [52] CORNELIO C, VIOLAY M. Parametric analysis of the elastohydrodynamic lubrication efficiency on induced seismicity[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 222(1): 517–525.
- [53] YE Z, GHASSEMI A. Injection-induced shear slip and permeability enhancement in granite fractures[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(10): 9009–9032.
- [54] MENG F Z, ZHOU H, LI S J, et al. Shear behaviour and acoustic emission characteristics of different joints under various stress levels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(12): 4919–4928.
- [55] LIU Z M, JIANG Y, WANG D J, et al. Four types of acoustic emission characteristics during granular stick-slip evolution[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(1): 276–288.
- [56] 王礼立, 任辉启, 虞吉林, 等. 非线性应力波传播理论的发展及应用[J]. *固体力学学报*, 2013, 34(3): 217–240.
- WANG Lili, REN Huiqi, YU Jilin, et al. Development and application of the theory of nonlinear stress wave propagation[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 34(3): 217–240.
- [57] 侯志强, 袁瑞甫, 李长洪, 等. 直接拉伸荷载下大理岩和砂岩的Kaiser效应与频谱特性分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S1): 41–51.
- HOU Zhiqiang, YUAN Ruifu, LI Changhong, et al. Analysis of Kaiser effect and frequency spectrum of marble and sandstone under direct tensile load[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 41–51.
- [58] ZHANG S P, JI Y L, HOFMANN H, et al. A laboratory study on fault slip caused by fluid injection directly versus indirectly into a fault: Implications for induced seismicity in EGSSs[J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2024, 382(2275): 20230186.
- [59] CHEN G Q, SUN X, WANG J C, et al. Detection of cracking behaviors in granite with open precut cracks by acoustic emission frequency spectrum analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(6): 258.
- [60] DRESEN G, KWIATEK G, GOEBEL T, et al. Seismic and aseismic preparatory processes before large stick-slip failure[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2020, 177(12): 5741–5760.