

多期应力下花岗岩 Kaiser 效应识别及声发射行为研究

姜天乐, 李夕兵, 陈江湛*

中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083



摘要:在深部地下工程中,了解岩石的历史应力记忆能力,对确定岩体原位应力状况至关重要。为研究花岗岩在经历多期应力后所呈现的记忆能力,设置4组先期加载方案,并在先期加载结束后对试样进行单轴压缩试验,观察其声发射现象。结果表明:先期加载结束后立即进行单轴压缩试验,花岗岩 Kaiser 效应明显,在加载应力达到先期最大应力值时有剧烈声发射信号产生;花岗岩对多期应力具有一定记忆能力,当先期加载应力高于裂纹闭合应力(σ_{cc})时,即使其不为先期最大应力,在后续单轴压缩试验中,存在相对孤立且信号较强的声发射事件,花岗岩在该处呈现出低频高幅的声发射信号,反之若先期加载应力低于 σ_{cc} ,花岗岩则难以记忆。

关键词:Kaiser 效应;多期应力加载;声发射信号;裂纹闭合应力;应力记忆特性

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0829-17 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.370

引用格式:姜天乐,李夕兵,陈江湛.多期应力下花岗岩 Kaiser 效应识别及声发射行为研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):829-845. JIANG Tianle, LI Xibing, CHEN Jiangzhan. Identification of the Kaiser Effect and Acoustic Emission Behaviour of Granites Under Multi-Phase Stresses[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 829-845.

随着全球能源和矿产资源需求的不断增加,国内外矿山逐步进入深部开采阶段(Li et al, 2017; Ranjith et al, 2017; 李夕兵等, 2019)。在矿山工程建设中,深部高应力状态显现,引发了岩爆和冲击地压等灾害,使得深部矿产资源开采难度增加,从而影响工程稳定性和施工人员安全。地应力不仅是决定区域构造稳定性的关键因素,也是影响采矿工程等巷道稳定性的重要力源(何满潮等, 2005; 钱七虎, 2012)。因此,开展深部地应力测量是进行围岩稳定性分析和实现金属矿山安全开采的必要前提,开展地应力测试方法及其影响因素与机理方面的研究,具有重要的工程应用价值(谢和平等, 2015; 马春德等, 2020; Li et al, 2022)。

目前,随着地应力测量工作的不断开展,各种直接、间接测量地应力的方法和测量仪器相继问世

并得到应用。例如:水压致裂法、钻孔崩落法、应力解除法、应变恢复法和震源机制分析法等,其中水压致裂法与应力解除法在地下工程中被广泛应用于精确地应力测量(Zou et al, 2018; 王超等, 2022; Wang et al, 2023)。但随着勘探钻孔深度的增加,这些方法在深部测量时,存在施工难度大、测试费用高和有效测量范围小等局限。声发射法是一种基于岩石 Kaiser 效应原理的地应力测量手段,近年来,随着岩石力学测试技术和声发射监测装备的发展,该方法因短耗时、低成本和高灵活性等特点而备受关注(Kramadibrata et al, 2011; Shevchik et al, 2018; Hassani et al, 2023)。Kaiser 效应最初由德国学者 Kaiser 提出, Kaiser 在对金属材料进行拉伸试验时发现,当载荷应力未超过材料先期所受最大应力时,没有明显的声发射现象;当载荷应力超过材

收稿日期:2024-11-22;修订日期:2025-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目“深部多场耦合岩体致灾能量诱变试验系统”(编号:51927808)资助

作者简介:姜天乐(2000—),男,江西南昌人,硕士研究生,从事岩石 Kaiser 效应影响因素研究工作。E-mail: 225511060@csu.edu.cn

*通信作者:陈江湛(1991—),男,湖南长沙人,讲师,从事深部岩石力学试验装备研究工作。E-mail: jiangzhanchen@csu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

料先期所受最大应力时,声发射活动显著增加(Kaiser,1953)。基于此,从20世纪70年代开始,许多学者开始研究地质资料中的Kaiser效应。1963年,Goodman通过试验首次证实了岩石(砂岩)材料在变形破坏过程中也具有明显的Kaiser效应(Goodman,1963)。此后,国内外学者将Kaiser效应应用到测量原岩应力领域,并基于不同工程条件,在实验室对岩石声发射Kaiser效应进行大量研究(Lehtonen et al, 2012; 杨东辉等, 2018; Fu et al, 2021; Dinmohammadpour et al, 2022; 孔政等, 2023)。

相比金属类材料的均质和单一特征,岩石类材料的成分和所处环境更为复杂。尤其是赋存在深部的矿岩在漫长的地质历史演化过程中,往往会经历不同时期、不同强度的地质构造作用,声发射法测得的应力值与历史多期原岩应力之间的关系值得深究。研究人员利用Kaiser效应进行地应力测量时发现,同一岩石可能存在不止一个Kaiser点。例如:丁原辰等(1989)在赋予大理岩2个不同大小预应力后再对其进行加载试验,发现除了在最大应力处存在明显的声发射事件外,在另一个应力值处也有相对孤立的声发射事件发生。近年来,关于Kaiser效应能否反映该岩石所属区域的历史多期应力,也出现了2种观点(赵奎等, 2021):①Kaiser效应仅反映该区域历史上最大原岩应力;②Kaiser效应能够反映历史多期应力,但因岩石对地质构造演化历史中的多期应力的记忆能力存在衰退现象,即Kaiser效应所获得的应力值少于其真实所经历的应力期次。刘峥等(2004)对一电站坝址区华力西期花岗岩进行单轴压缩声发射试验时发现,在30 MPa和55 MPa处出现了集中声发射现象,表明该岩石具有多期记忆能力,但该地区实际经历2期以上构造作用,说明存在记忆衰退。李坤熠等(2018)研究发现岩石试样在200 $\mu\epsilon$ 和800 $\mu\epsilon$ 时均出现声发射累积计数拐点,表明Kaiser效应多期性存在。

然而,也有许多学者对不同岩石进行增量循环加卸载试验,发现加载速率和先期应力值对Kaiser效应存在一定影响,但均未发现岩石的多期应力记忆能力(石凯等, 2017; 杨东辉等, 2018)。针对岩石声发射法测得的应力值与历史多期原岩应力之间的关系,还有待深入分析。以往岩石循环加卸载试验中并未完全贴近多期应力演化后的原位加载状

态,针对原位应力演化过程中应力值大小及应力加载顺序、时间等因素,对花岗岩Kaiser效应多期性产生的影响并不清楚,亟待进行深入探索。

本研究以硬岩矿山常见的花岗岩作为典型代表,开展花岗岩试样多期应力加载下的声发射测试试验,以揭示多期应力下花岗岩声发射Kaiser效应记忆特征。通过设置多期加载应力值、应力加载顺序和持续时间,来模拟岩石经历不同时期、不同强度的构造应力作用,探究多期应力对岩石声发射行为的影响。本研究设置了4组先期加载方案,并采用基于声发射(AE)计数参数的声发射统计方法,对4组加载方案下花岗岩试样的试验结果和声发射信号进行分析,揭示多期应力下花岗岩的声发射行为特征。

1 试验设置

1.1 样品制备

采用取自湖南汨罗团山村地表露天采石场的花岗岩岩样制作标准试样。试样严格按照国际岩石力学与岩石工程学会(ISRM)规定的标准加工研磨,制成直径为50 mm、长度为100 mm的试样。每个试样用砂纸抛光,使得端面垂直于试样轴线,偏差控制在0.001弧度以内,以避免加载时发生应力集中。对花岗岩试样进行编号并测量其尺寸、质量和波速等基本参数。

1.2 试验装置

岩石单轴加载声发射试验采用WHY-200/10伺服材料试验机进行,利用美国PCI-II型多通道声发射仪来采集声发射信号,该仪器采样速率最高达40 MHz,具有连续波形的实时采集记录能力,可记录包括AE事件数、能量、幅值、振铃和上升时间等20多个特征参数。声发射传感器选用Mini300微型声发射传感器,该传感器适合小尺寸被测对象,峰值灵敏度达58 dB,频率范围为100~600 kHz,谐振频率为125 kHz。前置放大器设置为40 dB,噪声阈值设置为45 dB,采样频率为1 MHz。2台试验机的载荷数据均可通过外加参数的方式引入到PCI-II型声发射系统中,即可实现加载过程中的载荷、声发射数据的同步采集与实时显现。试验系统见图1。

1.3 试验方案

(1) 单轴压缩试验与阶段划分。岩石受到外部应力作用后发生变形并渐进破坏的过程中存在几个重要的应力阈值(Xue et al, 2014), 即裂纹闭合应力 σ_{cc} 、起裂应力 σ_{ci} 、损伤应力 σ_{cd} 和峰值应力 σ_r , 其与岩石内部裂纹的发育、发展以及交互贯通

有密切联系。以此对岩石单轴压缩过程进行应力阶段划分, 可划分为裂纹闭合阶段、线弹性变形阶段、裂纹稳定扩展阶段和裂纹不稳定扩展阶段。本文对花岗岩样品进行单轴压缩试验, 获取其应力—应变曲线, 计算各应力阈值并进行阶段划分。

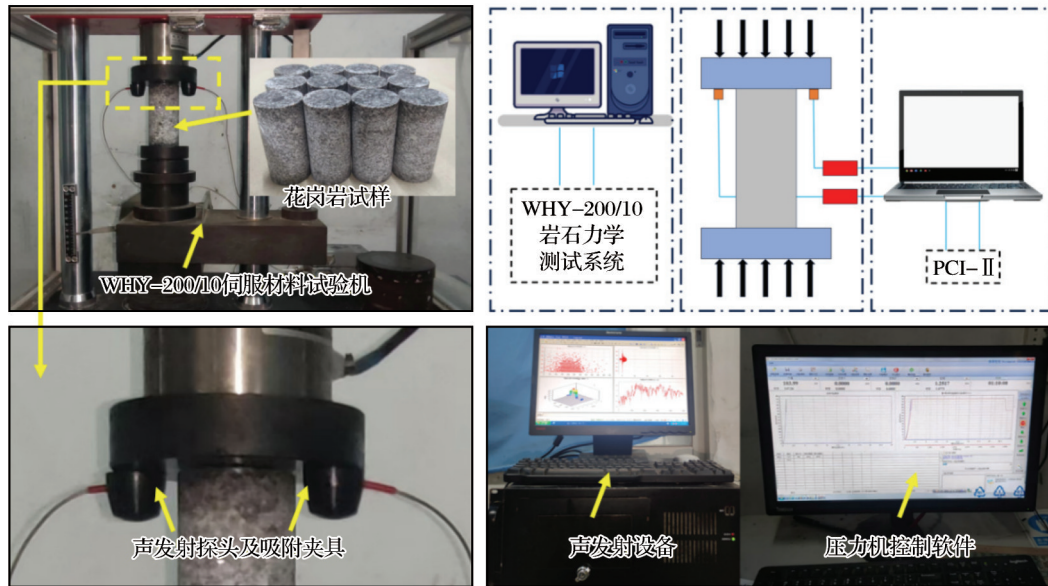


图1 试验设备与声发射系统

Fig. 1 Experimental equipment and acoustic emission system

本研究采用应变响应法(Nicksiar et al, 2012)计算单轴压缩下花岗岩样品的应力阈值。相比于利用体积应变法测量岩石特征应力, 应变响应法无需计算岩石的弹性参数(弹性模量和泊松比), 消除了计算岩石弹性参数时所产生的误差, 避免弹性参数的确定精度对岩石特征应力计算的影响, 且易于编程操作, 有助于消除人为影响(彭俊等, 2015)。

首先获取体积应变—轴向应力曲线, 确定体积应变曲线最高点作为裂纹损伤应力 σ_{cd} , 体积应变 ε_v 计算公式如下:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \quad (1)$$

式中: ε_1 和 ε_3 分别为轴向应变和径向应变, 由试验测定。

在应力—径向应变曲线上选取 σ_{cd} 与零点相连作参考线, 将实际径向应变与参考线相减, 得到径向应变差, 绘制应力—径向应变差曲线, 其最高点所对应的应力即为裂纹起裂应力 σ_{ci} 。同样地, 利用

轴向应变响应方法(彭俊等, 2015)获得裂纹闭合应力 σ_{cc} 。图2给出了花岗岩试样利用应变响应法求得 σ_{cc} 、 σ_{ci} 和 σ_{cd} 。

经测试计算, 该类花岗岩的4个应力阈值平均值如下: 闭合应力 $\sigma_{cc}=46.1$ MPa, 起裂应力 $\sigma_{ci}=75.8$ MPa, 损伤应力 $\sigma_{cd}=127.1$ MPa, 峰值应力 $\sigma_r=149.9$ MPa, 如表1所示。

(2) 试样先期加载试验方案。目前, 以硬岩矿山为例, 我国深部开采已全面进入1 000~2 000 m的深度空间, 基于前人研究(Brown et al, 1978; 景锋等, 2007; 王艳华等, 2012; 李夕兵等, 2019; 刘兵权等, 2022), 该深度下的最大地应力估算值在26.51~77.61 MPa区间, 因此, 本研究将先期应力的加载范围设定为30~75 MPa, 处于上述应力区间内。同时, 也处于本次试验样品峰值应力的20%~80%之间, 该应力加载区间下花岗岩 Kaiser效应的可辨识度已被已有研究确定(Zhao et al, 2024), 有利于保

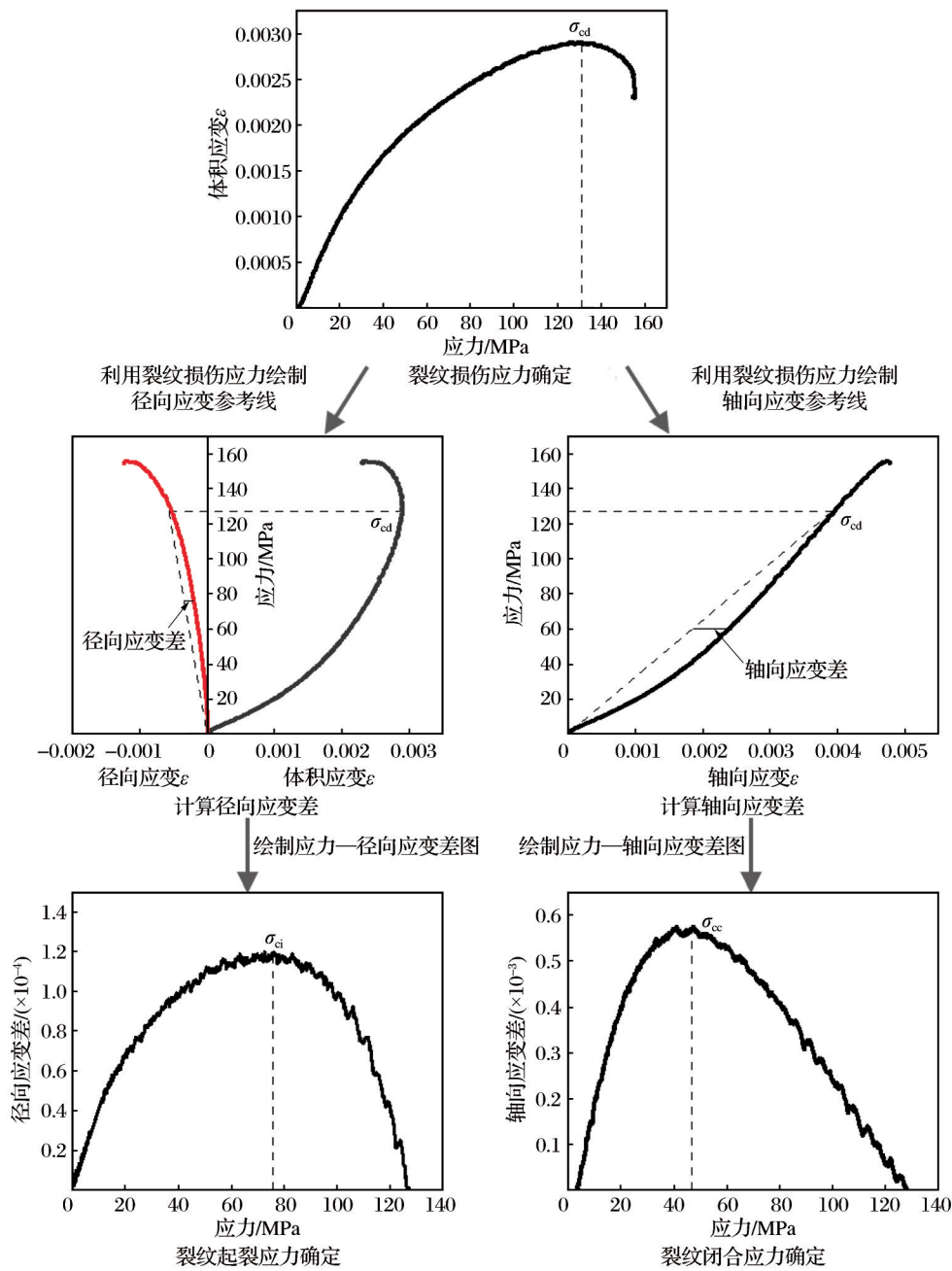


图2 基于应变响应法确定 σ_{cc} 、 σ_{ci} 、 σ_{cd}

Fig. 2 Determine of σ_{cc} , σ_{ci} , σ_{cd} based on strain response method

表1 花岗岩样品各应力阈值

Table 1 Stress thresholds of granite samples

试样编号	σ_{cc} /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{cd} /MPa	σ_f /MPa
U1	44.5	72.2	126.5	146.6
U2	47.1	78.8	127.6	152.8
U3	46.8	76.5	127.3	150.3
平均值	46.1	75.8	127.1	149.9

证试验中 Kaiser 效应识别率和识别精度。此外,为确定本次试验应力保持时间控制,主要从2个方面进行综合考虑。一方面,岩石在地下长期处于一个相对稳定的应力环境,已有试验研究表明常温条件下花岗岩处于弹性加载阶段,在恒定荷载下大致经过1 h的快速变形阶段能够达到变形稳定发展状态(陈亮等,2015; Wang et al, 2017),如图3所示。因

此,在试验中将花岗岩的应力保持时间设定为 1 h,使其达到加载稳定状态,从而模拟花岗岩在经历地质运动后所形成的长期稳定应力状态。另一方面,地应力除了经历稳定缓慢演化过程,还存在突变演化的状态,地质构造突变滑移产生的地震波,或工程开挖爆破冲击波等因素引起岩体应力场快速调整,上述过程的调整时间通常为几毫秒至几秒之间(Zheng et al, 2021; Cao et al, 2024)。

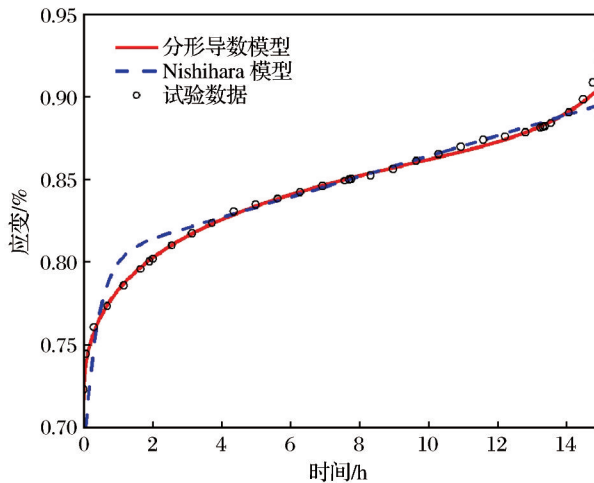


图3 花岗岩蠕变曲线试验数据与分形导数模型、Nishihara 模型(Wang et al, 2017)

Fig.3 Experimental data of granite creep curve and fractal derivative model, Nishihara model(Wang et al, 2017)

基于以上 2 个方面,简化模拟了几种地质活动所造成的应力场变化,具体试验加载方案及模拟的地质场景如下:

方案一:为模拟地质构造突变滑移产生的地震波,或工程开挖爆破冲击波引起岩体应力场快速调整,而后应力降低并处于稳定状态,此时花岗岩对历史多期次应力的记忆能力,对试样依次施加 2 个峰值应力 σ_I ($50\%\sigma_I$) 和 σ_{II} ($30\%\sigma_I$),在 σ_I 处保持荷载 10 s,在 σ_{II} 处保持荷载 1 h。

方案二:为探究经历多期地质构造运动,导致应力产生逐期次递增时,花岗岩对各期次、不同应力的记忆能力,设置 σ_I ($20\%\sigma_I$)— σ_{II} ($35\%\sigma_I$)— σ_{III} ($50\%\sigma_I$) 的递增应力梯度,将试样逐级加载至上述 3 种应力值并各保持荷载 1 h。

方案三:为探究经历多期地质构造运动,导致应力产生逐期次递减时,花岗岩对各期次、不同应

力的记忆能力,设置 σ_I ($50\%\sigma_I$)— σ_{II} ($35\%\sigma_I$)— σ_{III} ($20\%\sigma_I$) 的递减应力梯度,将试样逐级加载至上述 3 种应力值并各保持荷载 1 h。

方案四:为探究经历多期地质构造运动,岩石赋存环境应力场发生先增加后降低的演化过程,花岗岩对各期次、不同应力的记忆能力,设置 σ_I ($30\%\sigma_I$)— σ_{II} ($50\%\sigma_I$)— σ_{III} ($30\%\sigma_I$) 的先递增后递减的应力梯度,将试样逐级加载至每个应力值处并各保持荷载 1 h。各方案先期加载路径如图 4 所示,每种方案施加的各级应力值如表 2 所示。

(3) 声发射试验。试验采用位移控制加载,加载速率为 0.3 mm/min。对每个试样按照各自加载方案进行先期加载试验,加载结束后卸载至 2 kN 以防止试样滑动,而后加载至 200 kN,获得加载过程中的声发射信号,用于识别 Kaiser 效应。在加载过程中,采用双通道声发射数据采集方式,将 2 个声发射探头放置在压头处收集声发射信号,同时防止试样损坏影响探头。在压力机与声发射探头接触面处涂抹凡士林,确保声发射信号能够被良好接收;在压头与试样的交界面处涂上偶联剂,保证试样与压头充分接触,同时降低端部噪声。

2 试验结果与分析

2.1 Kaiser 效应点识别

基于 Kaiser 效应机理, Kaiser 效应点的识别方法有多种。其中常用方法如下:①突跳点法:以时间或应力为横轴,累积声发射计数为纵轴,将所得曲线急剧攀升的点,即累积声发射计数急剧增加的点作为 Kaiser 效应点,若加载前期没有声发射事件产生,将声发射事件开始出现时作为 Kaiser 效应点;②双切线法:因先期应力前后声发射累积计数曲线的切线斜率不同,将 2 条切线交点视为 Kaiser 效应点;③双线性回归法:与前一种方法相同,绘制声发射累积数与加载应力关系图,对声发射累积数与加载应力之间进行线性回归处理,将 2 条回归直线的交点作为 Kaiser 效应点。上述识别方法如图 5 所示。本次试验结合上述方法识别 Kaiser 效应点,对于拐点明显、存在激升点的曲线,可采用第一种方法识别 Kaiser 点;对于相对平滑的曲线则采用其余 2 种方法确定 Kaiser 点。

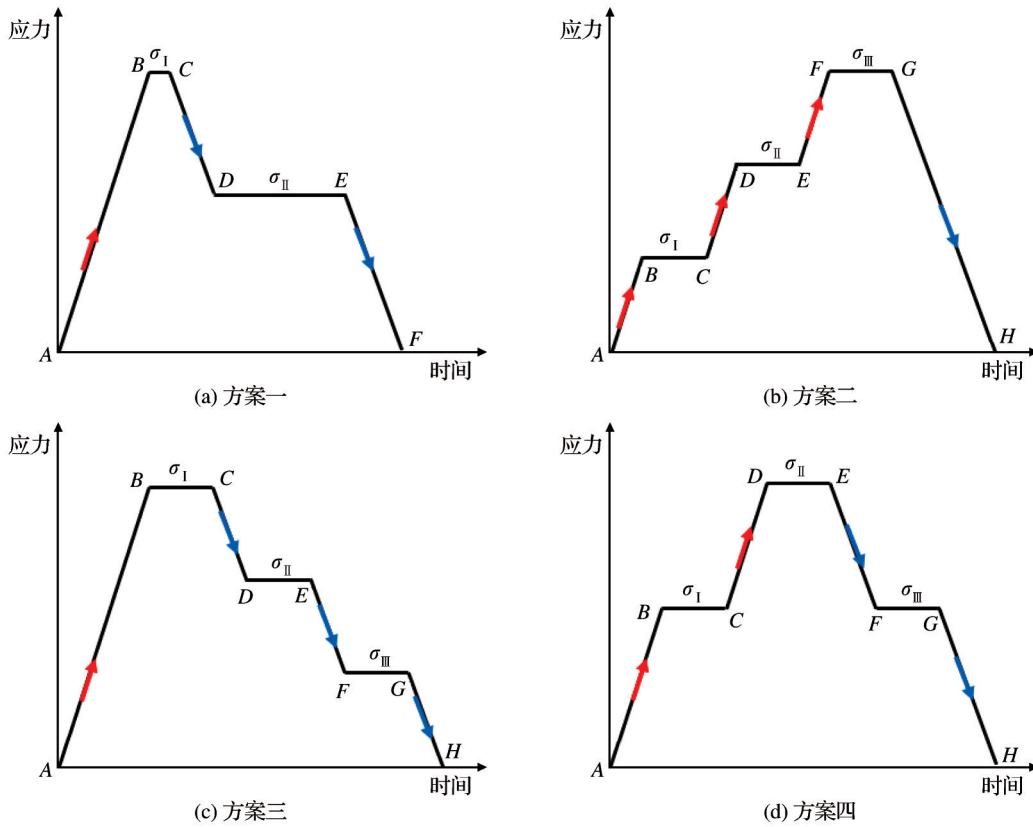


图4 试验方案加载流程图

Fig. 4 Loading flow chart of test scheme

表2 试验方案
Table 2 Test scheme

方案名称	σ_I 及应力持续 时间	σ_{II} 及应力持续 时间	σ_{III} 及应力持续 时间
方案一	75 MPa, 10 s	45 MPa, 1 h	
方案二	30 MPa, 1 h	53 MPa, 1 h	75 MPa, 1 h
方案三	75 MPa, 1 h	53 MPa, 1 h	30 MPa, 1 h
方案四	45 MPa, 1 h	75 MPa, 1 h	45 MPa, 1 h

2.2 多期应力下花岗岩应力记忆特性研究

通常将费利西蒂比(Felicity Ratio, FR)作为评

判 Kaiser 效应是否存在的判据。FR 是指 Kaiser 效应对应的应力值(σ_k)与先期应力(σ_p)的比值,表示为

$$FR = \sigma_k / \sigma_p \quad (2)$$

一般来讲,当 FR 值为 0.9~1.1 时,认为 Kaiser 效应存在,其 Kaiser 点称为有效 Kaiser 点,反之则不存在。图 6 所示为花岗岩在 4 种方案下进行先期加载试验的应力、AE 计数和 AE 累积计数随时间变化的完整图像以及在先期加载结束后单轴加载的应力、

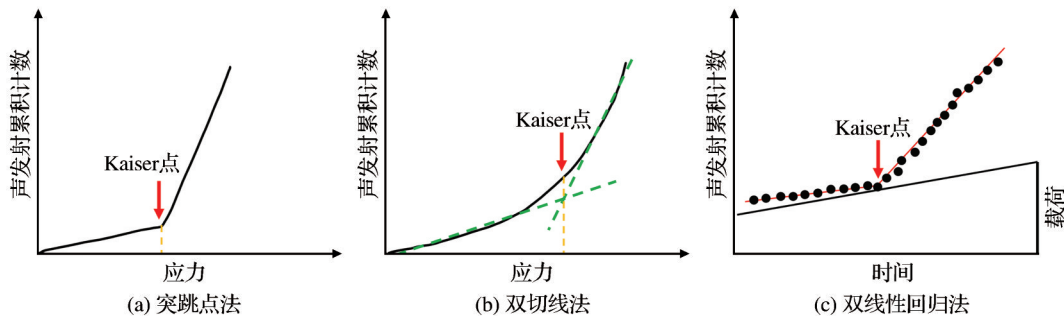
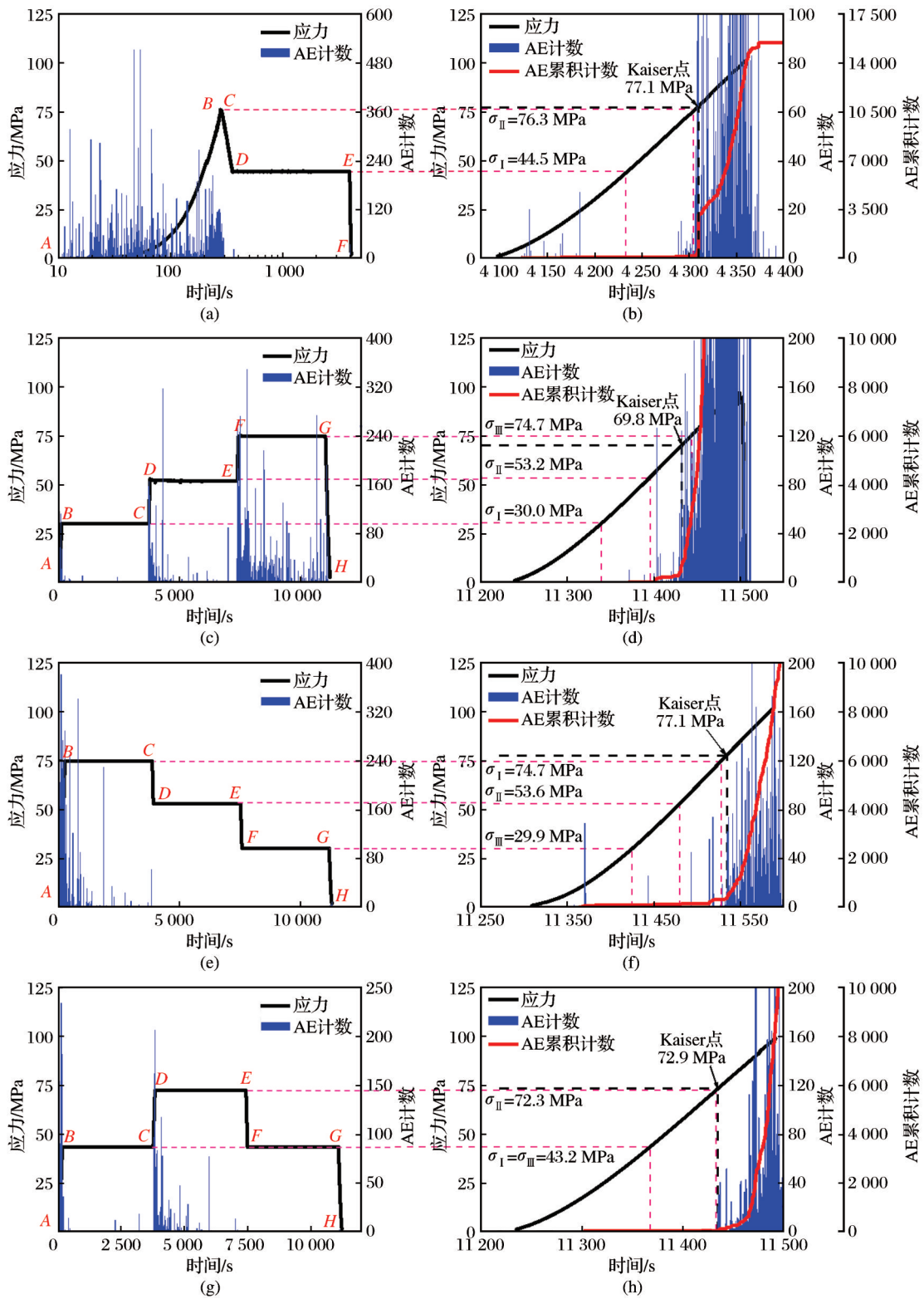


图5 Kaiser 点识别方法

Fig. 5 Recognition method of Kaiser point



(a)、(c)、(e)、(g)分别为方案一至方案四先期加载应力—时间—AE计数图;(b)、(d)、(f)、(h)分别为方案一至方案四二次单轴加载应力—时间—AE计数—AE累积计数图

图6 不同应力水平下花岗岩时间—应力—AE曲线

Fig. 6 Time-stress-AE curves of granite under different stress levels

AE计数和AE累积计数图。

由方案一试样先期加载曲线[图6(a)]可以看出,AB段有持续的声发射事件产生,BC段应力值为75 MPa,此时花岗岩试样已处于线弹性变形阶段,而后对其卸载至D点时,应力值为45 MPa,已低于闭合应力(σ_{cc}),在此时及后续应力保持阶段几乎看不到声发射信号。同样地,方案三[图6(e)]和方案四试样[图6(g)]先期加载的E-H阶段也是进行从高应力到低应力的阶梯卸载方式,与图6(a)相似的是,加载应力值达到最大值后卸载时声发射信号几乎消失。可以发现,方案三[图6(e)]的BC段,即 σ_1 (75 MPa)的应力保持阶段存在少量声发射事件,但数量与信号强度明显弱于前期应力加载阶段,此时处于线弹性变形阶段的花岗岩试样,因岩石内部微裂纹已闭合,声发射信号相比前期闭合阶段骤减;而后续方案一[图6(a)]的C-F阶段和方案三[图6(e)]的C-H阶段没有声发射事件发生,这是因为前期AB段的加载已使试样完成内部微裂纹的闭合,消除了岩石内部的非弹性应变,从而抑制了声发射活动的发生。图6(c)是方案二试样T2-2的先期加载过程中的时间—应力—AE计数图,可以看出其经历三阶段应力逐级加载,每次应力保持阶段结束,开始加载时,声发射事件骤然增加。同时,在三级阶梯上升的应力保持阶段,声发射信号也是逐级增加。

当达到 σ_1 (30 MPa)时,试样处于压密阶段,内部微裂纹逐渐闭合,产生声发射信号,而在随后的

σ_1 保持阶段,应力不再增加,无法使得微裂纹进一步闭合,于是几乎没有声发射事件产生;保持阶段结束后应力继续向上加载,试样逐渐度过压密阶段进入线弹性变形阶段,在 σ_{II} 与 σ_{III} 的应力保持阶段,与 σ_1 的保持阶段不同的是可以看到仍存在少量声发射事件,这是因为线弹性变形阶段的声发射信号主要由裂纹的摩擦滑移所产生,而与 σ_{II} 相比, σ_{III} 更大,试样产生的应变更大,裂纹摩擦滑移更严重,其保持阶段的声发射信号更剧烈。

先期加载试验结束后,对试样进行二次单轴压缩试验,同时观察此过程中花岗岩试样的声发射现象。从图6可以看出,在经历先期加载试验后,声发射事件在前期应力值较小时几乎没有发生。根据Kaiser效应的原理,可以识别每个试样在经历预先加载后,进行二次加载的Kaiser效应应力值,各方案的试样Kaiser效应应力值及FR值如表3所示。由表3可知,每种方案下的花岗岩试样均表现出明显的Kaiser效应,FR值均为0.9~1.1,表明花岗岩在一定时间内能够记忆历史上最大应力值。

为进一步探究花岗岩对历史多期应力的记忆能力,对后续二次单轴压缩试验中的声发射信号进行分析,观察每种方案下的试样在先期加载的各级应力处的声发射现象。发现,方案二和方案三中的花岗岩试样在应力值达到其预先加载的最小应力峰值(30 MPa)时,仍没有声发射事件发生,表示试样并未记忆这一次应力活动。然而,随着应力继续上升,试样T2-2在11 403 s处出现了零星且信号

表3 各方案下Kaiser效应点统计
Table 3 Statistics of Kaiser effect point under each scheme

方案序号	试样编号	先期最大加载应力/MPa	Kaiser点应力值/MPa	FR值	1-FR
方案一	T1-1	74.4	79.2	1.06	0.06
	T1-2	76.3	77.1	1.01	0.01
	T1-3	74.2	76.5	1.03	0.03
方案二	T2-1	74.3	70.6	0.95	0.05
	T2-2	74.7	69.8	0.93	0.07
	T2-3	73.6	75.1	1.02	0.02
方案三	T3-1	74.5	76.8	1.03	0.03
	T3-2	74.8	77.1	1.03	0.03
	T3-3	75.5	78.2	1.04	0.04
方案四	T4-1	72.3	72.9	1.01	0.01
	T4-2	74.3	80.6	1.08	0.08
	T4-3	74.8	78.7	1.05	0.05

相对较强的声发射事件,此时所对应的应力值为 56.8 MPa,与方案二中 σ_{II} (53.2 MPa)相近。若将其视为一个“次 Kaiser 点”,则该点的 FR 值为 1.07。同

样地,试样 T3-2 也可以看到类似现象,在 11 492 s、应力加载至 58.9 MPa 处,发生了较强的声发射事件,如图 7 所示。

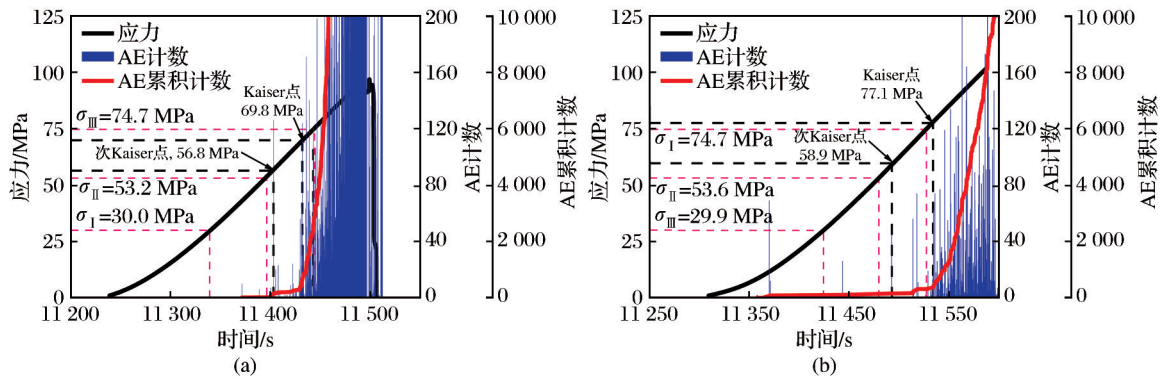


图7 试样 T2-2、T3-2 时间—应力—AE 计数—AE 累积计数图

Fig. 7 Time-stress-AE count-AE cumulative count plot of sample T2-2, T3-2

表 4 所示为方案二和方案三试样对于 σ_{II} 的声发射 Kaiser 效应响应情况,可见花岗岩试样在该应力值处存在较强的声发射信号,出现“次 Kaiser 效应点”现象。

对于方案一和方案四试样,在其各自较低先期应力值处未发现如方案二和方案三试样的类似孤立强信号的声发射事件,方案一和方案四试样均只记忆了历史最大应力。

表 4 方案二和方案三试样“次 Kaiser 点”情况

Table 4 Scheme 2 and Scheme 3 sample “secondary Kaiser effect point” situation

方案序号	试样编号	σ_{II} /MPa	次 Kaiser 点应力值/MPa	FR 值	$ 1-FR $
方案二	T2-1	53.4			
	T2-2	53.2	56.8	1.07	0.07
	T2-3	53.5	58.2	1.09	0.09
方案三	T3-1	53.2	57.4	1.08	0.08
	T3-2	53.6	58.9	1.09	0.09
	T3-3	53.4			

3 讨论

3.1 花岗岩的多期应力记忆能力

根据上述现象,花岗岩的 Kaiser 效应明显,当再加载应力达到先期加载的最大应力值时,声发射事件陡然增多, FR 值均为 0.9~1.1。同时,在经历多期应力加载后,花岗岩对不同应力值有不同的记忆特性。方案二和方案三试样在二次单轴试验中,加载应力达到 σ_{II} (53 MPa)附近时,出现了零星且相对较强的声发射事件,该应力值并非先期最大应力值,而在最低先期加载应力值处 (30 MPa) 没有出现声发射信号。由此可知,花岗岩试样记忆了 σ_{II} ,证

明其 Kaiser 效应多期性存在。这与马春德等 (2024) 研究结果类似,即对花岗岩进行二期单轴压缩试验并在每期应力值处保持 300 s,在第三次加载过程中发现试样记忆了前面 2 次加载的应力值。而李庶林等 (2019) 在进行增量循环加卸载过程中发现,铅锌矿、砂卡岩、花岗闪长岩和钨钼矿在先期应力超过 60% 时, Kaiser 效应逐渐消失, FR 值降低,仅观察到一个 Kaiser 点。对比本研究花岗岩长期加载下声发射测试的研究可知,应力保持时间对岩石 Kaiser 效应多期性存在影响,在长时间应力作用下,岩石对低应力记忆能力得到加强。

同时,刘峥等 (2004) 和王峥嵘 (2015) 分别对花

岗岩和石英砂岩展开相关研究,发现花岗岩记忆了2期地质构造中的原岩应力,而砂岩的多期 Kaiser 效应效果较差。这表明相较于砂岩,花岗岩 Kaiser 效应的多期性更为明显,可以更大程度上反映其所遭受的历史各期应力。这可能是不同岩石的矿物组成、结构特征、形成环境和力学性质等造成的差异。砂岩为沉积岩,主要由石英颗粒(砂粒)组成,并通过硅质胶结剂和碳酸盐胶结剂等结合在一起,其结构松散且孔隙度高。花岗岩为岩浆岩,岩浆在高温高压环境下冷却,外部压力促使晶体之间紧密接触和相互压实,这也有助于降低孔隙率,使花岗岩的质地更加紧密。因此,花岗岩内微裂纹在多期应力状态下,能够保持稳定的闭合—张开行为,记录多期应力历史;而砂岩内胶结物在不同应力状态下,可能产生不同的弹塑性破坏,对历史应力的记忆能力不如花岗岩。此外,方案一和方案四中试样只记忆了历史最大应力(75 MPa),在达到先期加载试验中所受的另一个加载应力(45 MPa)时并无声发射事件发生,尽管低应力保持时间远高于高应力。根据第1.3小节所划分的应力阶段,方案一和方案四中所设置低应力值与方案二和方案三的最低先期加载应力均低于闭合应力(σ_{cc});而方案二和方案三的 σ_{II} 以及每种方案的最大先期加载应力均高于闭合应力(σ_{cc})。

根据上述研究结果可以初步判定,花岗岩对历史多期应力具有记忆能力,只是该能力依赖于先期应力值。若先期应力高于闭合应力(σ_{cc}),即使岩石后期受到超过该先期应力值的应力,对岩石进行再加载时,仍可能在该应力值处观察到孤立且较强的声发射信号;反之若先期应力低于闭合应力(σ_{cc}),尽管应力保持时间更长,花岗岩仍将难以记忆。这是由于花岗岩在受到低于 σ_{cc} 的应力加载时,预加载对岩石内部损伤程度较小,同时未达到新生裂纹形成的能量阈值,导致预加载过程产生的损伤不足以被记忆。当后续加载应力超过前期水平时,微裂纹的扩展与萌发将重构损伤场分布,从而消除前期低应力作用留下的记忆特征。

3.2 声发射信号特征分析

声发射的波形是指材料受力后,局域源快速释放能量产生瞬时弹性波信号的图形显示,从声发射波形中可以提取众多描述波形的声发射特征参数,其中包括幅值、能量、振铃计数、持续时间、门槛值、上升时间和到达时间等。快速傅里叶变换(FFT)是一种常见的波形信号处理算法,FFT将波形信号转变为频率—幅度的频域图,能够更深入理解波形信号特征及其所携带的信息,对于表征岩石内部损伤破坏特征具有重要意义。图8所示为利用波形数据提取声发射特征参数并进行FFT变换后得到频域图。

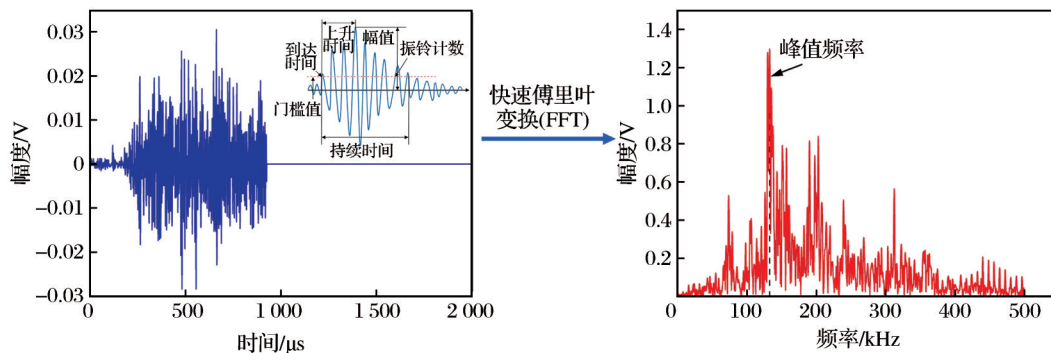


图8 波形数据分析

Fig. 8 Waveform data analysis

将波形信号经FFT变换后得到的声发射峰值频率与幅度能够表征岩石内部损伤情况。根据本试验中花岗岩的声发射信号频率分布特征,将其峰值频率划分为低、中、高3个频带,其中低频带的频率为0~210 kHz,中频带为210~290 kHz,高频带为

290~500 kHz。幅度能够反映能量释放的大小,将变换得到的幅度进行归一化处理,图9所示为归一化后试样T2-2和T3-2的峰值频率—幅度图。根据图中幅度分布情况,将其划分为低幅度(0~0.2)和高幅度(0.2~1.0)。

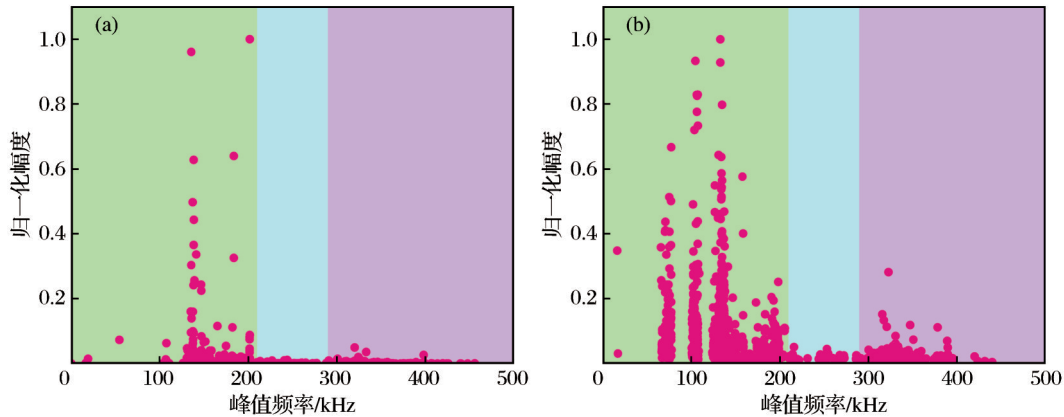


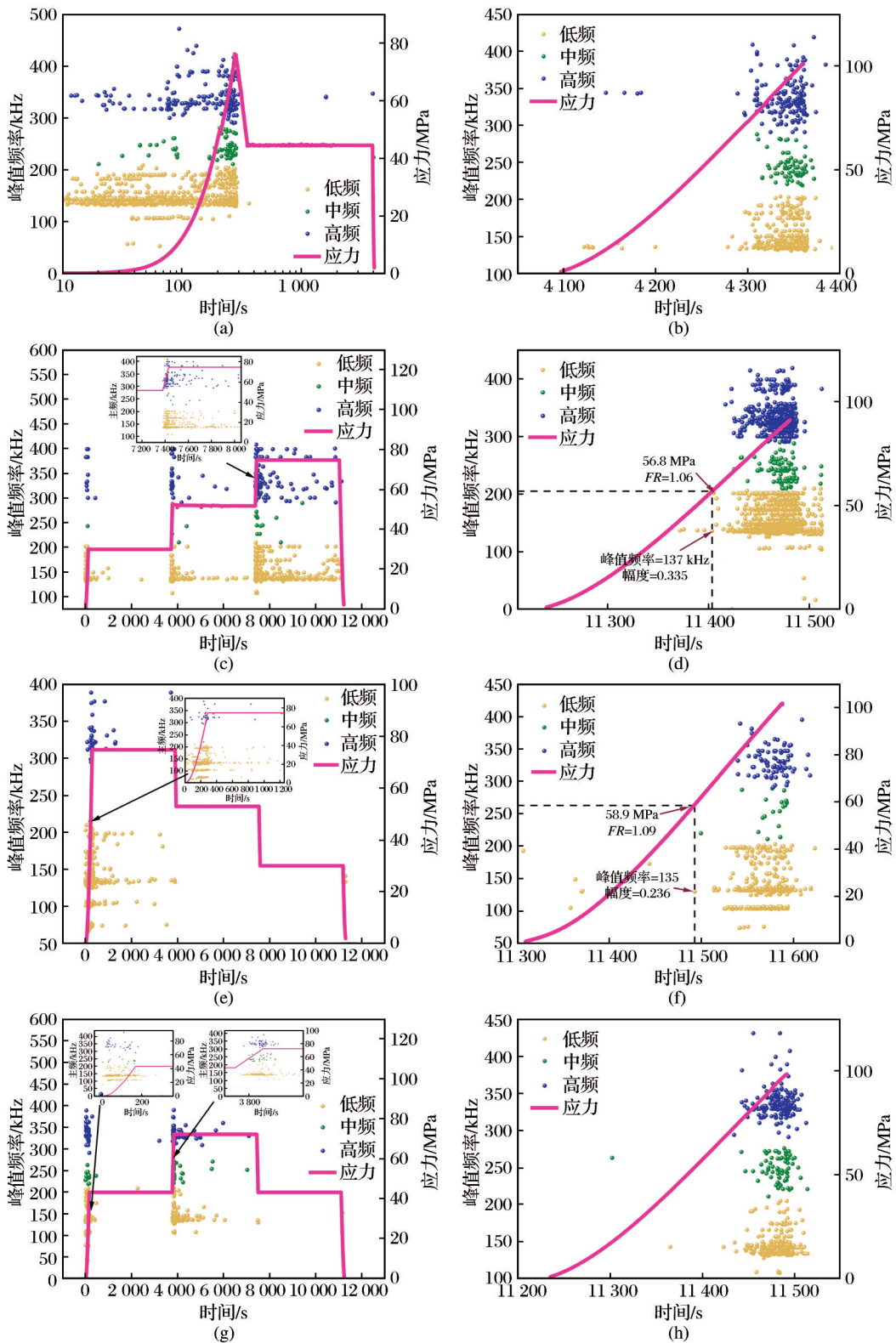
图9 试样 T2-2、T3-2 峰值频率—幅度图

Fig. 9 Peak frequency-amplitude plot of sample T2-2, T3-2

分别绘制先期加载以及后续单轴加载过程的应力—峰值频率—时间关系曲线,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,预应力加载过程中的应力上升阶段,存在明显的高、低频带,高、低频的声发射信号贯穿始终。而在后续单向加载试验中,前期鲜有声发射事件,当应力加载至先期最大应力处时,高、中、低频信号同时大量涌现。可以观察到,在方案二和方案三的试样加载至“次 Kaiser 点”时,出现低频高幅的声发射信号。低频信号通常表示大尺度裂纹活动,而高幅信号表示该活动所释放能量较高,证明试样在此时正经历大尺度裂纹的扩展(Wang et al, 2018)。此时并未出现高频信号,说明并没有新裂纹的产生,而是已有裂纹被激活产生扩展。“次 Kaiser 点”应力对应试验中预加载 σ_{II} (50 MPa) 阶段,在该阶段内岩石加载稳定,但会发生不可逆非弹性应变缓慢蠕变,试样内既存裂纹会在应力作用下沿矿物弱面逐渐扩展。从图 10(e) 可以看出,在 σ_{II} (50 MPa) 应力保持阶段持续出现低频信号,说明此时在应力作用下花岗岩试样内部正在经历裂纹的滑移和扩展。在经历长时间加载后,试样内损伤已经累积到一定程度,且后续 σ_{III} (75 MPa) 没有达到裂纹起裂应力,岩石并未产生大量新生裂纹,以致此时所造成的损伤未被覆盖,经历 σ_{III} 加载后再次加载过程中,应力达到 σ_{II} (50 MPa) 附近时激活该损伤对应的裂纹群,产生声发射信号。这也是“次 Kaiser 点”处出现低频高幅信号的原因。提取上述“次 Kaiser 效应点”及其左右几个波形数据并进行快速傅里叶变换得到频谱图,获取

其峰值频率和幅度。图 11 中的 11 403 s 频率—幅度图 11(c) 和图 12 中的 11 492 s 频率—幅度图分别为试样 T2-2 和 T3-2 的“次 Kaiser 点”处信号的波形图,将其与周围几个声发射信号的波形图进行对比,可以发现这 2 个声发射信号的峰值频率和归一化幅度分别为 137 kHz、0.3350 和 135 kHz、0.2360,均为低频高幅信号,幅度远高于周围其余信号。从图 11 和图 12 中不同时刻声发射频域图及波形信号可以看出,在试样 T2-2 和 T3-2 “次 Kaiser 点”的附近几个声发射信号基本为低频低幅信号,属于摩擦声发射信号或背景噪音,且其电压幅值与持续时间明显低于“次 Kaiser 点”的信号。而对比图 11 和图 12 中 2 个“次 Kaiser 效应点”的频谱图可以发现,在 σ_{II} 相同且保持时间一致的条件下,应力递增至预加载后识别的“次 Kaiser 点”处,声发射信号幅度 (0.3350) 高于应力递减预加载的试样 (0.2360)。即方案三试样在“次 Kaiser 点”的信号弱于方案二试样。上面提到方案二试样在 σ_{II} (50 MPa) 应力保持阶段持续出现低频信号,与之相比,方案三试样 σ_{II} (50 MPa) 的保持阶段声发射信号稀少,这是因为方案三的 σ_{I} (75 MPa) 大于 σ_{II} (50 MPa), σ_{I} 加载保持阶段造成持续损伤,当应力降至 σ_{II} (50 MPa) 时,该阶段蠕变效应对试样产生的损伤程度不足,导致试样对其记忆能力降低。即先期加载应力顺序也会影响花岗岩 Kaiser 效应多期性,若试样先经历高应力,试样已经受到一定程度损伤,后续再加载低应力时更难造成进一步损伤积累,会增加花岗岩 Kaiser 效应多期性识别的难度。



(a)、(c)、(e)、(g)分别为方案一至方案四先期加载峰值频率—时间—应力图；(b)、(d)、(f)、(h)分别为方案一至方案四二次单轴加载峰值频率—时间—应力图

图 10 声发射峰值频率—应力—时间图

Fig. 10 Acoustic emission peak frequency—stress—time graph

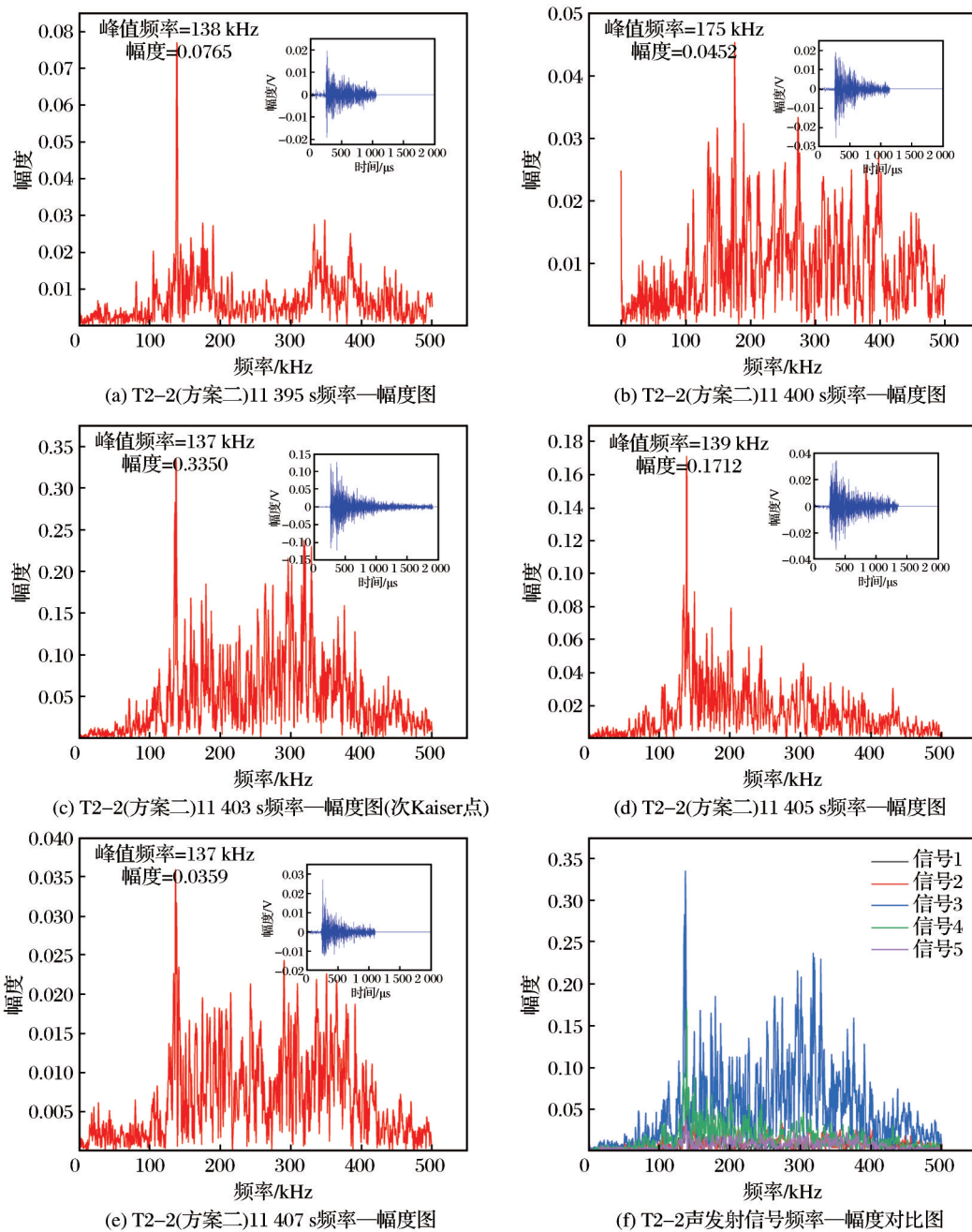


图 11 T2-2 试样在 11 395 s、11 400 s、11 403 s、11 405 s、11 407 s 处 AE 信号的波形图和经 FFT 变换后的频谱图
 Fig. 11 Waveforms and FFT transformed spectrograms of AE signals of T2-2 sample at 11 395 s, 11 400 s, 11 403 s, 11 405 s and 11 407 s

4 结论

针对花岗岩经多期预应力作用后开展单轴加载下的 Kaiser 效应试验研究,通过 Kaiser 点的识别以及声发射信号特征分析,研究了花岗岩 Kaiser 效应与预先多期应力的关系,主要结论如下:

(1) 花岗岩 Kaiser 效应明显,先期加载之后单轴加载过程中 Kaiser 效应点明显,FR 值均为 0.9~1.1,在再加载应力值达到先期最大应力之前,鲜有声发射事件发生。

(2) 花岗岩对其历史经历过的多期应力有记忆能力,但该能力受限于预应力的 大小,若预应力值

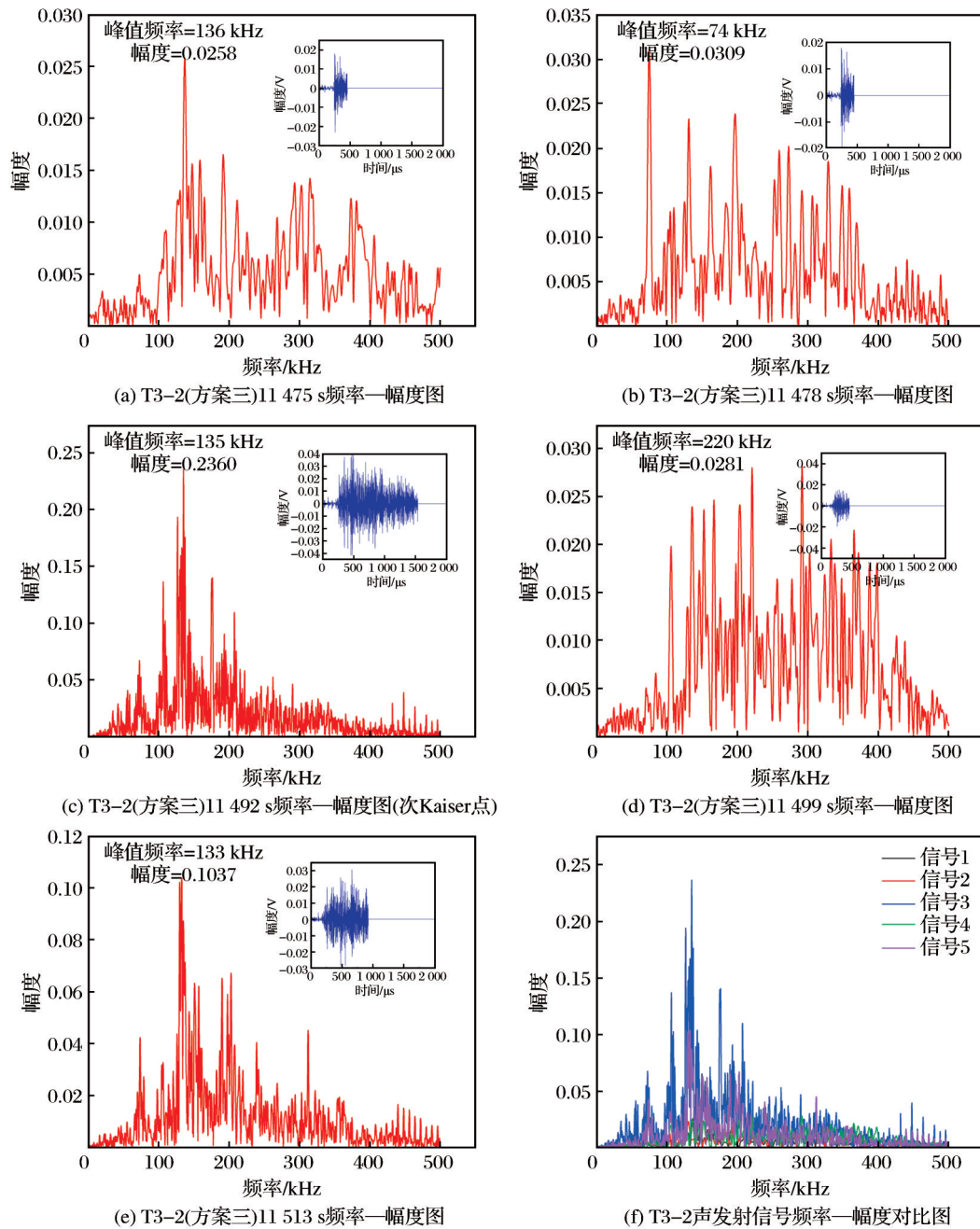


图 12 T3-2 试样在 11 475 s、11 478 s、11 492 s、11 499 s、11 513 s 处 AE 信号的波形图和经 FFT 变换后的频谱图
Fig. 12 Waveforms and FFT transformed spectrograms of AE signals of T3-2 sample at 11 475 s, 11 478 s, 11 492 s, 11 499 s and 11 513 s

处于闭合应力 σ_{cc} 与起裂应力 σ_{ci} 之间,即便该应力值为非先期最大应力,花岗岩对其仍具有一定记忆能力,反之若是低于闭合应力则难以记忆。先期加载应力顺序会影响花岗岩 Kaiser 效应多期性,若试样先经历高应力,会导致其对低应力记忆能力的衰退。

(3)花岗岩在“次 Kaiser 点”处存在较强且相对孤立的低频高幅声发射信号,此时花岗岩试验内部产生大尺度裂纹,表明之前在“次 Kaiser 点”附近保持加载的预应力已对花岗岩试样产生难以恢复的损伤,使得其能够记忆该应力值。

参考文献 (References):

- Brown E T, Hoek E, 1978. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 15(4): 211-215.
- Cao X L, Chang L J, 2024. Variations of shear-wave splitting parameters in the source region of the 2023 Türkiye doublet earthquakes [J]. *Earthquake Science*, 37(2): 174-187.
- Dinmohammadpour M, Nikkhah M, Goshtasbi K, et al, 2022. The mechanism of the Kaiser effect in phyllite under indirect tensile loading [J]. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 37(3): 15-31.
- Fu X, Ban Y X, Xie Q, et al, 2021. Time delay mechanism of the Kaiser effect in sandstone under uniaxial compressive stress conditions [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(3): 1091-1108.
- Goodman R E, 1963. Subaudible noise during compression of rocks [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 74(4): 487.
- Hassani S, Dackermann U, 2023. A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring [J]. *Sensors*, 23(4): 2204.
- Kaiser J, 1953. Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von Geräuschen Bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen [J]. *Archiv Für Das Eisenhüttenwesen*, 24(1/2): 43-45.
- Kramadibrata S, Simangunsong G M, Matsui K, et al, 2011. Role of acoustic emission for solving rock engineering problems in Indonesian underground mining [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(3): 281-289.
- Lehtonen A, Cosgrove J W, Hudson J A, et al, 2012. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect [J]. *Engineering Geology*, 124: 24-37.
- Li X B, Chen J Z, Ma C D, et al, 2022. A novel in situ stress measurement method incorporating non-oriented core ground re-orientation and acoustic emission: a case study of a deep borehole [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 152: 105079.
- Li X B, Gong F Q, Tao M, et al, 2017. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: a review [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4): 767-782.
- Nicksiar M, Martin C D, 2012. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(4): 607-617.
- Ranjith P G, Zhao J, Ju M H, et al, 2017. Opportunities and challenges in deep mining: a brief review [J]. *Engineering*, 3(4): 546-551.
- Shevchik S A, Kenel C, Leinenbach C, et al, 2018. Acoustic emission for in situ quality monitoring in additive manufacturing using spectral convolutional neural networks [J]. *Additive Manufacturing*, 21: 598-604.
- Wang C, Han Z Q, Wang Y T, et al, 2023. Rapid in situ stress measurement in vertical borehole based on borehole diametrical deformation analysis [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(11): 8289-8303.
- Wang R, Zhuo Z, Zhou H W, et al, 2017. A fractal derivative constitutive model for three stages in granite creep [J]. *Results in Physics*, 7: 2632-2638.
- Wang Z L, Ning J G, Ren H L, 2018. Frequency characteristics of the released stress wave by propagating cracks in brittle materials [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96: 72-82.
- Xue L, Qin S Q, Sun Q, et al, 2014. A study on crack damage stress thresholds of different rock types based on uniaxial compression tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(4): 1183-1195.
- Zhao K, Yang D X, Huang Z, et al, 2024. Investigations and new insights on the relation between the valid interval of the Kaiser effect and the characteristic stress [J]. *Earth-Science Reviews*, 249: 104673.
- Zheng T, Shi Y Y, Ding Z F, et al, 2021. Variations of local S-wave splitting in the near field of the 2020 Jinan ML4.4 earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition*, 64(7): 2311-2323.
- Zou X J, Wang C Y, Han Z Q, 2018. A proposed method for estimating in situ stress direction using panoramic stereo-pair imaging and stressed borehole geometric shapes [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 104: 94-99.
- 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等, 2015. 不同温度及应力状态下北山花岗岩蠕变特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 34(6): 1228-1235. Chen Liang, Liu Jianfeng, Wang Chunping, et al, 2015. Creeping behavior of Beishan granite under different temperatures and stress conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(6): 1228-1235.
- 丁原辰, 张大伦, 傅芳才, 1989. 岩石试样凯塞效应的实验研

- 究[J].中国地质科学院地质力学研究所刊,(1):171-83. Ding Yuanchen, Zhang Dalun, Fu Fangcai, 1989. Experimental study on Kaiser effect in rock [J]. Bulletin of The Institute of Geomechanics Cags, (1): 171-183.
- 何满潮,谢和平,彭苏萍,等,2005.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,24(16):2803-2813. He Manchao, Xie Heping, Peng Suping, et al, 2005. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(16): 2803-2813.
- 景锋,盛谦,张勇慧,等,2007.中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,26(10):2056-2062. Jing Feng, Sheng Qian, Zhang Yonghui, et al, 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(10): 2056-2062.
- 孔政,曾溅辉,左名圣,2023. Kaiser效应点识别方法及储层地应力预测[J].油气地质与采收率,30(6):54-60. Kong Zheng, Zeng Jianhui, Zuo Mingsheng, 2023. Kaiser effect point identification method and in situ stress prediction of reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 30(6): 54-60.
- 李坤熠,刘新龙,贾二帅,2018. 试验中的多期 Kaiser 效应现象[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),28(1):34-37. Li Shenyi, Liu Xinlong, Jia Ershuai, 2018. Multiphase Kaiser effect in experiment [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 28(1): 34-37.
- 李庶林,周梦婧,高真平,等,2019.增量循环加卸载下岩石峰值强度前声发射特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,38(4):724-735. Li Shulin, Zhou Mengjing, Gao Zhenping, et al, 2019. Experimental study on acoustic emission characteristics before the peak strength of rocks under incrementally cyclic loading-unloading methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(4): 724-735.
- 李夕兵,黄麟淇,周健,等,2019.硬岩矿山开采技术回顾与展望[J].中国有色金属学报,29(9):1828-1847. Li Xibing, Huang Linqi, Zhou Jian, et al, 2019. Review and prospect of mining technology in hard rock mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 29(9): 1828-1847.
- 刘兵权,黎立云,卫梦希,等,2022.基于球壳模型的地壳应力与深度关系研究[J].矿业科学学报,7(4):474-480. Liu Bingquan, Li Liyun, Wei Mengxi, et al, 2022. A study on relationships between measured crustal stresses and depth based on spherical shell model [J]. Journal of Mining Science and Technology, 7(4): 474-480.
- 刘峥,巫虹,2004.岩石 Kaiser 效应测地应力原理中的若干问题研究[J].上海地质,25(3):38-41,56. Liu Zheng, Wu Hong, 2004. Several key problems research on the crustal stress measuring based on the Kaiser effect [J]. Shanghai Geology, 25(3): 38-41, 56.
- 马春德,刘泽霖,谢伟斌,等,2020.套孔应力解除法与声发射法在新城矿区深部地应力测量中的对比研究[J].黄金科学技术,28(3):401-410. Ma Chunde, Liu Zelin, Xie Weibin, et al, 2020. Comparative study of stress relief method and acoustic emission method in in-situ stress measurement in deep area of Xincheng gold mine [J]. Gold Science and Technology, 28(3): 401-410.
- 马春德,阳文源,刘泽霖,等,2024.花岗岩声发射多期应力记忆方向独立性的试验研究[J].矿冶工程,44(5):1-6. Ma Chunde, Yang Wenyan, Liu Zelin, et al, 2024. Experimental study on directional independence of multistage stress memory in granite acoustic emission [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 44(5): 1-6.
- 彭俊,蔡明,荣冠,等,2015. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J].岩石力学与工程学报,34(6):1091-1100. Peng Jun, Cai Ming, Rong Guan, et al, 2015. Stresses for crack closure and its application to assessing stress-induced microcrack damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(6): 1091-1100.
- 钱七虎,2012.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,31(10):1945-1956. Qian Qihu, 2012. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(10): 1945-1956.
- 石凯,梅甫定,程明胜,等,2017.循环加载高应力对大理岩 Kaiser 效应影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,36(12):2906-2916. Shi Kai, Mei Fuding, Cheng Mingsheng, et al, 2017. Experimental study on the effect of high stress cyclic loading on Kaiser effect in marble [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(12): 2906-2916.
- 王超,王益腾,韩增强,等,2022.垂直孔应力解除法地应力测试技术及工程应用[J].岩土力学,43(5):1412-1421. Wang Chao, Wang Yiteng, Han Zengqiang, et al, 2022. In-situ stress measurement technology for vertical hole based on stress relief method and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 43(5): 1412-1421.
- 王艳华,崔效锋,胡幸平,等,2012.基于原地应力测量数据

- 的中国大陆地壳上部应力状态研究[J].地球物理学报, 55(9):3016-3027. Wang Yanhua, Cui Xiaofeng, Hu Xingping, et al., 2012. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in situ stress measurements [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(9):3016-3027.
- 王峥嵘, 邓辉, 黄润秋, 2015. 川西凹陷新场气田须家河组二段砂岩岩体破裂特征[J]. 石油与天然气地质, 36(1): 80-86. Wang Zhengrong, Deng Hui, Huang Runqiu, 2015. Fracture characteristics of sandstone in the 2nd member of upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang gas field, Western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 36(1):80-86.
- 谢和平, 高峰, 鞠杨, 2015. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 34(11): 2161-2178. Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang, 2015. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11): 2161-2178.
- 杨东辉, 赵毅鑫, 张村, 等, 2018. 循环加载对沉积岩岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(12): 2697-2708. Yang Donghui, Zhao Yixin, Zhang Cun, et al., 2018. Experimental study on the influence of cyclic loading on Kaiser effect of sedimentary rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(12): 2697-2708.
- 赵奎, 项威斌, 曾鹏, 等, 2021. 岩石声发射 Kaiser 效应研究现状及展望[J]. 金属矿山, 50(1):94-105. Zhao Kui, Xiang Weibin, Zeng Peng, et al., 2021. Research status and prospect of Kaiser effect in rock acoustic emission [J]. Metal Mine, 50(1):94-105.

Identification of the Kaiser Effect and Acoustic Emission Behaviour of Granites Under Multi-Phase Stresses

JIANG Tianle, LI Xibing, CHEN Jiangzhan

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Abstract: In the field of deep underground engineering, comprehending the historical stress memory capacity of rocks is essential for determining the in-situ stress conditions of rock formations. To investigate the memory capacity of granite subjected to multiple stress periods, an initial uniaxial compression test was conducted to derive the stress-strain curve of the granite. The threshold values for each stress level were determined using the strain response method. Subsequently, four distinct prior loading schemes were established to simulate the multi-period stress conditions induced by various geological processes on granite. Following the completion of these prior loading schemes, uniaxial compression tests were performed on the specimens, and the Kaiser effect was evaluated. The acoustic emission parameters, including AE counts, cumulative AE counts, peak frequency, and amplitude, were identified and analyzed to assess the Kaiser effect after the uniaxial compression test on the preloaded specimens. The results indicate that when the uniaxial compression test is conducted immediately following the conclusion of preloading, the Kaiser effect in granite is pronounced. This is evidenced by significant acoustic emission signals occurring when the applied stress reaches the value of the previous maximum stress. Granite exhibits a capacity to retain memory of prior multi-period stresses, specifically, when the preloading stress exceeds the crack closure stress (σ_{cc}), even if it does not match the previous maximum stress, a distinct and strong signal is observed in the subsequent uniaxial compression test. During these acoustic emission events, granite generates low-frequency, high-amplitude signals. Conversely, if the preloading stress is below the crack closure stress (σ_{cc}), granite does not retain this memory.

Key words: Kaiser effect; multi-phase stress loading; acoustic emission signal; crack closure stress; stress memory properties