

文章编号: 1001-4888(2021)01-0123-10

不同循环加载应力下花岗岩 Kaiser 效应特征的试验研究^{*}

张延新^{1,2}, 曹龙辉¹, 李泽杰¹, 陈天星¹

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 河北省土木工程绿色建造与智能运维重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 为了更准确地获取花岗岩的 Kaiser 效应点对应的应力值 σ^{AE} , 利用 RMT-100B 岩石力学伺服试验机和 Micro-II Express 型声发射监测系统, 研究不同循环加载应力 σ_c^i 下岩石 Kaiser 效应特征。结果表明: 相比单次加载, 在循环加载作用下, 试样的应力—应变曲线在加载初期下凸减弱, 压密阶段变短; 由于试样的加卸载曲线不能重合而形成的滞回环, 随着循环次数和循环应力水平的增大, 朝着应变增大的方向移动; 当 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 时, 摩擦型声发射现象被有效地减弱, 这有利于后续加载过程中 Kaiser 效应点的识别; 当 $\sigma_c^i > \sigma_m$ 时, 振铃累计计数曲线呈台阶状上升, 岩石内部发生裂纹的扩展或新裂纹的孕育, 该循环应力成为新的记忆应力。当 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 时, Felicity 比小于 1, 反之大于 1, 因此, 在地应力测试中, 可以采用低应力、小梯度的循环加卸载方式, 并结合 Felicity 比, 进而缩小 Kaiser 效应点的识别范围, 提高地应力测量精度。

关键词: 循环加载; Kaiser 效应; Felicity 比; 声发射; 地应力

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-039

0 引言

地应力通常称为原岩应力^[1], 是指岩土体内一点固有的应力状态, 也是实现岩土工程科学设计和安全施工的必要基础。目前, 国内外常用的地应力测试方法^[2]包括水压致裂法、应力解除法, 都存在测量条件差、测量成本高、费用高等限制。声发射法利用岩石材料的 Kaiser 效应^[3,4], 直接对岩石进行钻孔取芯测量, 弥补了传统测量方法的不足。Kaiser^[5]发现了多晶金属的声发射应力记忆功能。Goodman^[6]证明了岩石在加载过程中同样存在 Kaiser 效应。Boyce^[7]利用声发射方法分析了各类岩石的历史最大应力。彭冠英等^[8]依据岩石非 Kaiser 点能量分布与声发射真实 Kaiser 点能量分布之间的差别特征, 结合理论推导, 得出能量与声发射振铃计数、应力的函数关系。齐消寒等^[9]对米仓山隧道围岩分别利用空心包体应力解除法和声发射法两种方式进行了地应力测试, 结果表明两种测试结果大小和方向接近。杨东辉等^[10]对不同沉积岩进行了单轴循环加载试验, 研究了循环加载峰值应力 σ_p 、含水率和加载速率对 Kaiser 效应的影响。张昕等^[11]利用声发射方法对取自岩石块体空间 6 个方向的试件进行测试, 分析能量—时间曲线并结合现场确定地应力。陈宇龙等^[12]对砂岩进行了等幅循环加载和分级循环加载试验, 分析了损伤破坏全过程的 AE 规律, 探讨了 Felicity 效应中声发射事件“明显增多”的尺度界定问题。杨小林等^[13]通过花岗岩试件单轴循环加卸载试验研究了岩石材料在循环加卸载过程中的声发射特征与非均匀变形的对应关系。石凯等^[14]依据声发射特征曲线及变形率分析法(DRA), 参考水

^{*} 收稿日期: 2020-02-28; 修回日期: 2020-06-21

通信作者: 张延新(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土力学及地应力测试的研究工作。Email: zyx382@163.com

压致裂法测得的地应力值,拾取了不同加载阶段的 AE 点。王小琼等^[15]对不同岩性岩石进行声发射试验,分析了岩性、AE 参数和加载模式对 AE 点拾取的影响。谢强^[16]等进行了单轴压缩试验条件下重复加载时加载方向变化对细晶花岗岩 Kaiser 效应影响的试验研究。张东明等^[17]对顶板含层理沉积岩系岩石试件进行单轴压缩声发射试验,分析了 Kaiser 点的综合识别方法及基于声发射的地应力计算方法。鲁会军^[18]对花岗岩试样进行单轴加载试验,研究了第一次加载方向与再次加载方向之间的夹角对 Kaiser 点判断的影响。刘海涛等^[19]为了分析砂岩循环加卸载路径下的声发射 Kaiser 效应特征和损伤特性,开展了砂岩在不同围压下的循环加卸载声发射试验。马春德等^[20]采用大理岩进行了不同压头直径下的 Kaiser 效应激发显现的试验验证,分析了压头直径及端部效应影响试件 Kaiser 效应的机理。

综上所述,目前大多数研究主要关注于加载速率、方向及循环加载方式等因素对岩石 Kaiser 效应特征的影响,实际上,不同循环加载应力也会引起不同的 Kaiser 效应特征,从而影响 Kaiser 效应点的识别^[21,22]。为此,本文采用不同循环加载应力对取自攀枝花冉家弯隧道深覆花岗岩进行试验研究,探讨加载循环应力对花岗岩 Kaiser 效应特征的影响,从而确定合理的循环应力水平,为声发射法准确地测量地应力提供合理的加载模式。

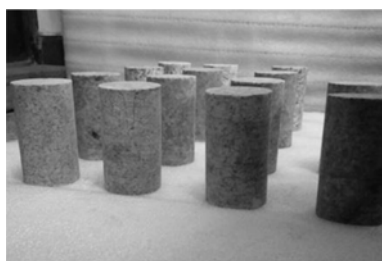


图 1 标准试样

Fig. 1 Standard rock specimen

1 试样制作及试验方法

1.1 试验材料

试验所用的深覆花岗岩取自攀枝花冉家弯隧道,埋深约 500m,致密,宏观均匀一致,经过锯、磨工序加工成 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准圆柱体试样,如图 1 所示,几何精度满足岩石试验规程要求。为确保试验结果的可靠性,试验前,对试样进行细致的表面观察,筛选出无明显节理、自然密度在 $2.64\text{g}/\text{cm}^3 \sim 2.67\text{g}/\text{cm}^3$,平均值为 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$,方差为 0.15% 范围内的

16 个试样,并分为 6 组,依次编号为 H1~H6。

表 1 试样的基本参数(均值)

Tab. 1 Basic parameters of rock specimen (average value)

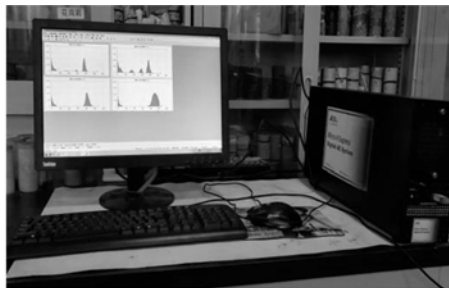
峰值强度	泊松比	弹性模量	密度	波速
201.5MPa	0.263	71.7GPa	$2.65\text{g}/\text{cm}^3$	5.17km/s

1.2 试验设备

试验采用 RMT-100B 岩石力学伺服试验机和美国物理声学公司的 Micro-II Express 型声发射监测系统,试验系统如图 2 所示。试验过程中声发射系统设置采样频率为 3MHz,门槛值为 40dB。试验采用 6 个传感器分 3 层错位分布,使用黄油进行耦合。同时,在试样两端加上与岩样直径匹配的刚性垫块,以减少端面摩擦对试验结果的影响。



(a) RMT-100B 岩石力学伺服试验机



(b) Micro-II Express 型声发射仪

图 2 试验系统

Fig. 2 Test system

1.3 试验方案

当利用 AE 法测地应力(即岩石先前所受最大应力 σ_m)时,加载方式通常采用单次加载,但是,单次加载过程中,Kaiser 点的识别容易受岩石内部原生微裂隙的摩擦闭合所产生的声发射现象干扰。为研究不同循环加载应力对岩石 Kaiser 点拾取的影响,设计试验的加载路径如图 3 所示。首先对第一组试样进行单次加载,利用作图法和多参数法初步确定 Kaiser 点及所对应的应力为 $\sigma^{AE}=44\text{MPa}$,并在其上下等梯度取 5 组值分别作为剩余 5 组试样的循环应力值,分别进行 5 次循环加卸载试验,前 4 次加载均采用力控制,以 2kN/s 的速率加载至循环应力 σ_c^i ,各组试样的 σ_c^i 分别为 16MPa 、 30MPa 、 44MPa 、 58MPa 、 72MPa ,保证了 σ_c^i 处于 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 和 $\sigma_c^i > \sigma_m$ 两种情况,再以相同的速率卸载至 5MPa 。为避免力控制造成试样破坏时的突然爆炸,且保证与前 4 次加载速率大致相同,第 5 次加载采用位移控制方式,加载速率为 0.002mm/s 。

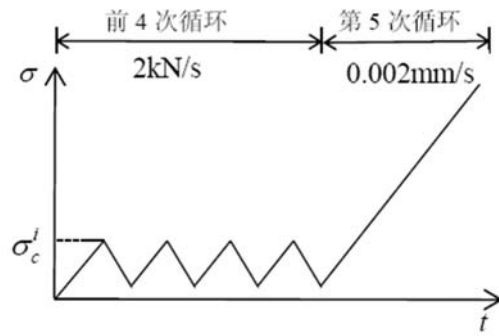


图 3 加载路径

Fig. 3 Loading path

2 试验结果及分析

2.1 应力—应变曲线

岩石内部含有微裂纹、空隙等破裂面,应力—应变曲线能够反映出岩石的力学性质和破坏特性。加载过程中,典型花岗岩的应力—应变曲线如图 4(a)所示,大致分为 5 个阶段:压密闭合阶段、线弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹快速发展阶段、峰后破坏阶段。不同循环应力条件下,试样的应力—应变曲线如图 4(b)~(f)所示。

由图 4 可以看出,花岗岩的应力—应变曲线均呈下凸形,峰值前曲线光滑,峰值后,曲线呈直线跌落,试样强度迅速下降;说明花岗岩破坏时,试样内部产生贯通破裂面,破裂面间摩擦作用不明显,多表现为脆性破坏。循环加卸载下的峰值强度与单次加载下的峰值强度相差不大。相比单次加载,循环加卸载条件下,试样的应力—应变曲线在加载初期下凸减弱,压密阶段变短,这是由于岩石内部缺陷在外荷载作用下逐渐闭合,且随着循环次数的增加,岩石内部结构变得更加紧密,试样强度增大,曲线斜率增大。随着循环加载应力的逐渐增大,平均峰值轴向应变分别为 0.003614 、 0.003592 、 0.003612 、 0.004045 、 0.004524 ,总体变化不大,但仍有快速增大的趋势,这说明循环应力水平的增大,对试样的破坏特征影响也逐渐严重。由于岩石内部存在缺陷,试样受荷载后,将发生不可逆的塑性变形,导致加卸载曲线不能重合,形成封闭的滞回环;且随着循环次数和应力水平的增大,滞回环朝着应变增大的方向移动,形状也逐渐变得清晰。

2.2 全局声发射特征分析

岩石的 Kaiser 效应说明了其对过去变形和受力历史有着“记忆能力”。从微观上看,岩石损伤是岩体内部晶体颗粒产生了错动,裂纹起裂、闭合、扩展的过程;从宏观上看,是岩体内部出现大面积损伤,裂纹贯通,形成破坏面。根据试验结果,绘制出单次加载和循环加卸载条件下试样破坏过程的应力—时间—声发射特征曲线,如图 5 所示。本文采用切线交汇法拾取 Kaiser 点,做出水平段和线性突增段的切线,两切线的交点即为 Kaiser 点^[23],结合能量曲线和 Felicity 比,综合推测岩石先前所受的最大应力。

由图 5 可以看出,振铃累计计数曲线和能量曲线变化趋势基本一致,在加载初期都出现少量的声发射事件,之后随着荷载的逐渐增大,先后经历了稳定增长和迅速增长 2 个阶段。相比单次加载,循环加卸载条件下,当 $\sigma_c^i < 44\text{MPa}$ 时,第 1 次循环加载阶段有少量声发射事件,第 2~4 次循环加载过程比较平静,最后一次加载过程中声发射现象激烈,振铃累计计数曲线有明显的拐点,能量曲线相应突增,试样的 Kaiser 效应更为明显;说明此时循环应力小于先期最大应力,试样经过第 1 次循环后内部已有的缺

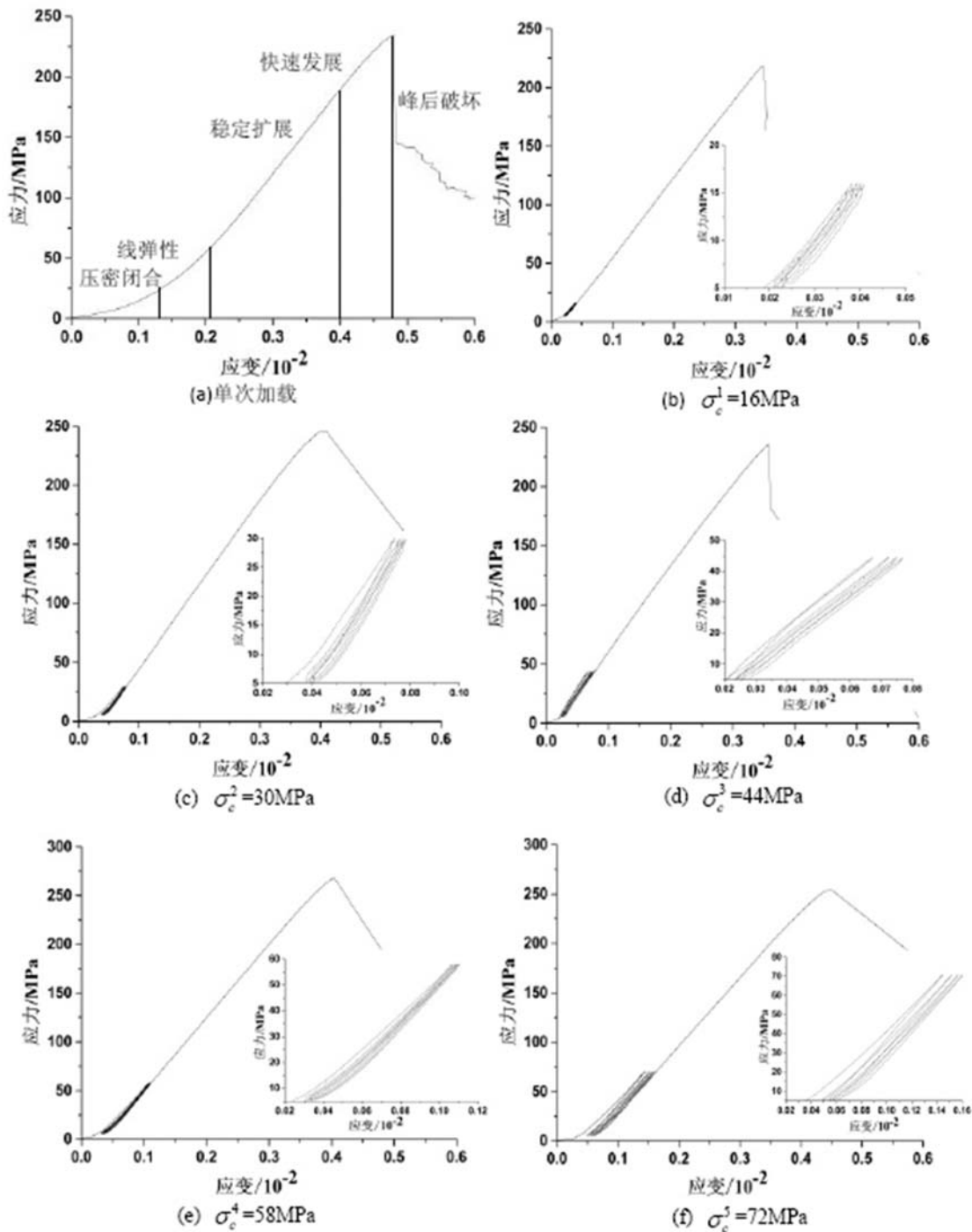


图 4 试样的应力—应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of rock specimen

陷在外荷载的作用下被压密,微裂纹表面颗粒的摩擦滑移产生了声发射事件,随后几乎不发生声发射现象,最后加载阶段随着应力的增加,裂纹起裂产生大量的声发射事件,因此,可以判定低应力循环加载方式能够减弱摩擦型声发射现象,有利于 Kaiser 效应点的识别。当 $\sigma_c \geq 44\text{MPa}$ 时,第 1 次循环之后的每次循环均发生大量的声发射现象,其振铃累计计数曲线呈台阶状上升,且循环应力越大,声发射现象越剧烈。从图 5(d)~(f) 可以发现,第 2~4 次循环的振铃累计计数曲线拐点位置和能量曲线剧增的位置均在 σ_c 附近,且卸载后,仍出现大量的声发射现象,这说明此时循环应力超出先期最大应力,试样在第 1 次循环过程中岩石内部发生了裂纹的扩展或新裂纹的孕育,裂纹表面颗粒在加卸载下反复搓动,不断发

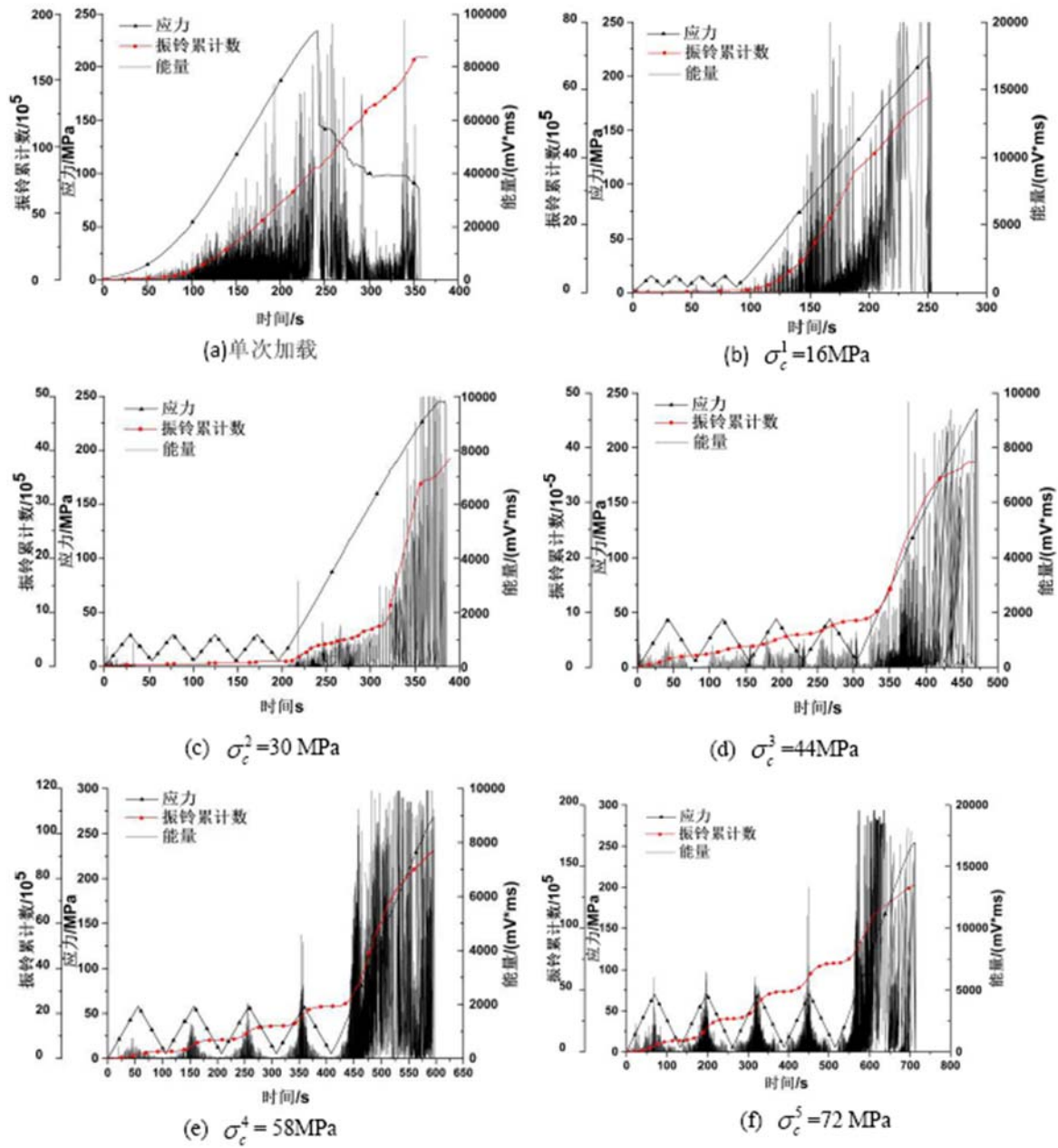


图 5 花岗岩试件应力—时间—声发射特征曲线

Fig. 5 Stress-time-AE characteristic curve of granite specimen

生声发射现象,且随着循环次数的增加该现象越显著,该循环应力成为新的记忆应力。当加载应力达到 80% 峰值应力左右时,振铃计数累计曲线增长平缓,能量曲线也相应变得稀疏,此时,主裂缝初步形成,试样仍具有一定的承载能力,裂缝继续扩展。

2.3 循环加卸载过程中的 Felicity 效应

由图 5(d)~(f) 不难看出,第 2~5 次声发射突增现象明显出现在第 1 次循环应力之前,这种现象称为 Felicity 效应^[24]。Felicity 比是对材料记忆程度的直观表达,常用来衡量 Kaiser 效应的有效程度,Felicity 比值越接近于 1 表明 Kaiser 效应越可靠,通常认为 Felicity 比值属于 $[-1, 1]$,Kaiser 效应有效。Felicity 比定义为

$$F_i = \sigma_i^{\text{AE}} / \sigma_{i-1}^m \quad (1)$$

式中: F_i 表示第 i 次循环中的 Felicity 比; σ_i^{AE} 表示第 i 次加载过程中声发射突增时对应的应力值; σ_{i-1}^m

表示第 $i-1$ 次加载过程中所受最大应力。根据应力—时间—声发射参数曲线特征,结合作图法,我们识别出不同循环应力下各循环过程中的 σ_i^{AE} 值,做出 Felicity 比值与循环次数的关系图,如图 6 所示。

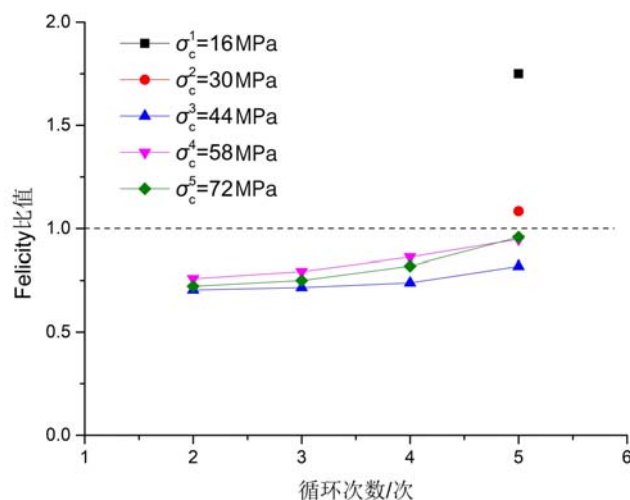


图 6 循环加载条件下试样的 Felicity 比值变化曲线

Fig. 6 Felicity ratio curve of rock specimen under cyclic loading conditions

从图 6 可以看出:当 $\sigma_c^i < 44 \text{ MPa}$ 时,在 2~4 次循环过程中没有识别出 σ_i^{AE} 值,最后循环的 Felicity 比大于 1,表现为明显的 Kaiser 效应,这说明在该应力水平下,前 4 个循环岩石试样内部没有出现新的微破裂,循环应力未超过先期最大应力;当 $\sigma_c^i \geq 44 \text{ MPa}$ 时,2~5 次循环过程均识别出 σ_i^{AE} 值,但 Felicity 比小于 1, Kaiser 效应失效,此时表现出明显的 Felicity 效应,且随着循环次数的增加, Felicity 比值逐渐接近 1,这说明循环应力已经超过先期最大应力,岩石试样内部发生不可逆转的损伤,出现新的微裂纹,且循环次数越多,岩石损伤越严重, σ_c^i 成为新的记忆应力。表 2 给出了各试样 5 次加载过程的 Felicity 比值。

表 2 5 次加载过程的 Felicity 比值

Tab. 2 Felicity ratio of 5 loading processes

试样 编号	σ_c^i / MPa	$\sigma_i^{\text{AE}} / \text{MPa}$				Felicity 比值			
		循环次数							
		2	3	4	5	2	3	4	5
H2	16	—	—	—	28.0	—	—	—	1.75
H3	30	—	—	—	32.5	—	—	—	1.08
H4	44	31.0	31.5	32.5	36.0	0.70	0.71	0.73	0.82
H5	58	44.0	46.0	50.1	55.0	0.76	0.79	0.86	0.95
H6	72	52.2	54.0	59.0	69.0	0.72	0.75	0.82	0.96

注: H2、H3 只有在第 5 次循环过程中出现 Kaiser 效应。

由表 2 看出, Felicity 比值在 30 MPa 时为 1.08, 在 44 MPa 时为 0.70, 由大于 1 变为小于 1, 即发生了 Kaiser 效应由有效到失效的转变。由此可以推断该花岗岩试样的先期应力在 32.5 MPa~36 MPa 之间, 且临近 32.5 MPa, 相比单次加载识别的 $\sigma^{\text{AE}} = 44 \text{ MPa}$, 有效程度提高了 $\frac{|\sigma^{\text{AE}} - \sigma_3^{\text{AE}}|}{\sigma^{\text{AE}}} \times 100\% = 26.1\%$, 表明低应力循环加卸载能够有效地提高拾取 Kaiser 效应点的准确率。

3 讨论

3.1 循环加载对 Kaiser 效应特征的影响

不同循环应力会引起不同的 Kaiser 效应特征,当 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 时,多发生摩擦型声发射现象,振铃计数和释放的能量较低,岩石内部只是发生了微裂隙的闭合和滑动,并未改变原始裂纹的尺寸,对岩石应力的记忆影响不大,反而能够减少后续循环在压密阶段产生的声发射事件,Kaiser 效应点更为明显;当 $\sigma_c^i > \sigma_m$ 时,引起了裂纹的扩展或新裂纹的产生,改变了原始裂纹尺寸,岩石试样发生了损伤,严重改变了岩石对先期应力的记忆。总之,当 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 时,Felicity 比小于 1,反之大于 1,可以用来筛选 Kaiser 效应失效的应力区间,从而缩小 Kaiser 效应点的识别范围。结合上文分析,可以得出:低应力、小梯度增长的循环加卸载方式不仅能够滤除压密阶段产生的噪音,还能结合 Felicity 比,精确缩小 Kaiser 点的拾取范围,提高地应力测量精度。在实测时,循环应力需要结合现场岩石实际情况进行试验确定。

3.2 破坏形态分析

试验后,对破坏后的岩石破坏形态图进行处理,根据试样破坏后形态素描裂缝绘制出岩石破坏后的裂缝素描图,如图 7 所示。

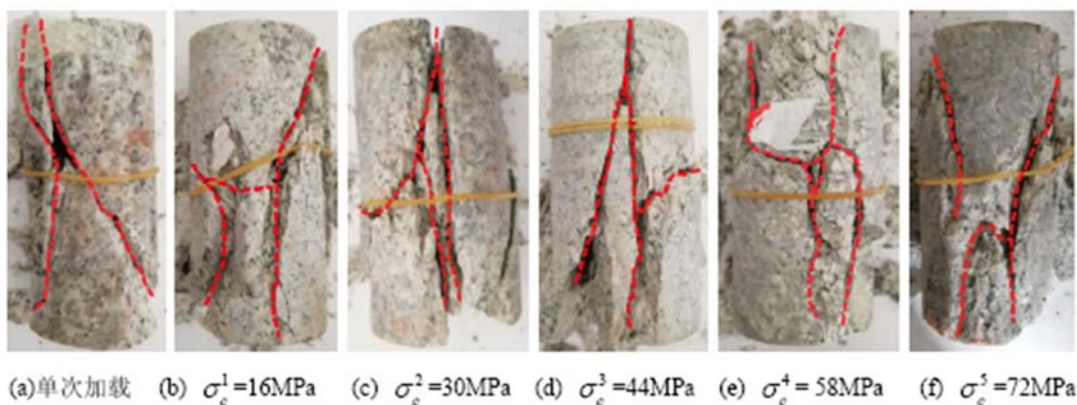


图 7 试样的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of specimen

从图 7 可以看出,不同循环应力下,花岗岩试件的最终破坏形态大致相似。单次加载下,有一个明显的剪切破裂面,破裂面沿着最大剪应力方向从顶面贯穿到底面,附近伴有少量的次剪切和拉断裂纹;而循环加卸载条件下,产生近似 X 状的共轭破坏面,试样破坏较为严重,试样同时受到剪切和拉伸作用。根据破坏断面形貌可以判断试样的破坏类型^[25-27],仔细观察破坏后的断面图可以看出:单次加载下,断面毛糙,呈现小颗粒状花样,摩擦痕迹明显,岩石颗粒在剪应力和摩擦力作用下形成白色粉末;循环加载下,摩擦作用相对减弱,断面出现台阶花样,伴有大量的粉末和碎片,且随着循环应力和循环次数的增加,损伤愈发严重。

4 结论

通过室内试验,研究了不同循环加载应力对花岗岩 Kaiser 效应特征的影响,主要结论如下:

(1) 相比单次加载,在循环加卸载作用下,加载初期试样的应力-应变曲线下凸减弱,压密阶段变短。由于岩石内部存在缺陷,试样的加卸载曲线不能重合,形成封闭的滞回环,且随着循环次数和应力水平的增大,滞回环朝着应变增大的方向移动。

(2) 当 $\sigma_c^i < \sigma_m$ 时,循环加卸载能够使岩石试件滤除压密阶段产生的噪音,有效减弱摩擦型声发射现象的产生;当 $\sigma_c^i > \sigma_m$ 时,每次循环均发生大量的声发射现象,其振铃累计计数曲线呈台阶状上升,岩石内部发生了裂纹的扩展或新裂纹的孕育,该循环应力逐渐成为新的记忆应力。

(3) 针对循环加载条件下岩石的声发射特性,可以利用 Felicity 比来定量地反映 Kaiser 效应的有

效程度。当 $\sigma_i < \sigma_m$ 时, Felicity 比小于 1, 反之大于 1; 利用这一规律可以筛选 Kaiser 效应的有效应力区间。在地应力测试中, 可以采用低应力、小梯度的循环加卸载方式, 结合 Felicity 比, 进而缩小 Kaiser 效应点的识别范围, 提高地应力测量精度。

(4) 单次加载下, 有一个明显的剪切破裂面, 附近伴有少量的次剪切和拉断裂纹, 断面毛糙, 摩擦痕迹明显, 剪切作用更为明显; 循环加载条件下, 产生近似 X 状的共轭破坏面, 伴有大量的粉末和碎片, 摩擦作用相对减弱, 试样破坏更为严重, 拉伸作用增强。

参考文献:

- [1] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕, 等. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002 (CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan, et al. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese))
- [2] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000 (CAI Meifeng. Principle and technology of in-situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese))
- [3] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭 译. 北京: 冶金工业出版社, 1996 (Katsuyama K. Application of AE techniques[M]. Translated by FENG Xiating. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1996 (in Chinese))
- [4] 沈功田. 声发射检测技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015 (SHEN Gongtian. Acoustic emission testing technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese))
- [5] Kaiser J. A study of acoustic phenomena in tensile tests[D]. Germany, Technische Hochschule München, 1950.
- [6] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74 (4):487—490.
- [7] Boyce G M. A study of the acoustic emission response of various rock types[D]. Drexel University, 1991:46—70.
- [8] 彭冠英, 许明, 谢强, 等. 基于能量原理的岩石声发射伪 Kaiser 点修正[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5):1165—1172 (PENG Guanying, XU Ming, XIE Qiang, et al. Pseudo Kaiser point rectification of rock acoustic emission based on energy principle[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5):1165—1172 (in Chinese))
- [9] 齐消寒, 张东明. 空心包体应力解除法与声发射法在岩爆危害隧道地应力测定中的对比应用[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(1):216—223 (QI Xiaohan, ZHANG Dongming. Contrast and application of the hollow inclusion stress relief method and acoustic emission method to the in-situ stress measurement in tunnels with rockburst hazards[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(1):216—223 (in Chinese))
- [10] 杨东辉, 赵毅鑫, 张村, 等. 循环加载对沉积岩岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 37 (12):2697—2708 (YANG Donghui, ZHAO Yixin, ZHANG Cun, et al. Experimental study on the effect of cyclic loading on Kaiser effect of sedimentary rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2018, 37 (12):2697—2708 (in Chinese))
- [11] 张昕, 付小敏, 沈忠, 等. 利用岩石声发射 Kaiser 效应测试地应力的方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(10):18—23 (ZHANG Xin, FU Xiaomin, SHEN Zhong, et al. Study on the method of in-situ stress measurement with Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. China Measurement & Test, 2017, 43(10):18—23 (in Chinese))
- [12] 陈宇龙, 魏作安, 张千贵. 等幅循环加载与分级循环加载下砂岩声发射 Felicity 效应试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2):226—230 (CHEN Yulong, WEI Zu'an, ZHANG Qiangui. Experimental study on Felicity effect of acoustic emission in rock under cyclic loading and tiered cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (2):226—230 (in Chinese))
- [13] 杨小林, 韩心星, 刘恩来, 等. 循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8):2732—2739 (YANG Xiaolin, HAN Xinxing, LIU Enlai, et al. Experimental study on the acoustic emission characteristics of non-uniform deformation evolution of granite under cyclic loading and unloading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8):2732—2739 (in Chinese))
- [14] 石凯, 梅甫定, 程明胜, 等. 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, 2017, 36(12):2906—2916 (SHI Kai, MEI Fuding, CHENG Mingsheng, et al. Experimental study on the effect of high stress cyclic loading on Kaiser effect in marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2017, 36

- (12):2906—2916 (in Chinese))
- [15] 王小琼, 葛洪魁, 宋丽莉. 两类岩石声发射事件与 Kaiser 效应点识别方法的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3):580—588 (WANG Xiaoqiong, GE Hongkui, SONG Lili. Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and Kaiser effect point recognition approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2011, 30(3):580—588 (in Chinese))
- [16] 谢强, 江小城, 余贤斌. 加载方向变化对细晶花岗岩凯塞效应的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 10(35):1627—1632 (XIE Qiang, JIANG Xiaocheng, YU Xianbin. Influence of rotation angle of principal stress axes between loading cycles on aplite granite's Kaiser effect[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 10(35):1627—1632 (in Chinese))
- [17] 张东明, 白鑫, 齐消寒, 等. 含层理岩石的 AE 特征分析及基于 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1):87—97 (ZHANG Dongming, BAI Xin, QI Xiaohan, et al. Acoustic emission characteristics and in-situ stresses of bedding rock based on Kaiser effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2016, 35(1):87—97 (in Chinese))
- [18] 鲁会军. 不同加载路径对岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[D]. 云南: 昆明理工大学, 2017 (LU Huijun. Experimental study on multiple effects of different loading paths on Kaiser effect scene of rock[D]. Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2017 (in Chinese))
- [19] 刘海涛, 秦涛. 砂岩循环加卸载下损伤特性及声发射 Kaiser 效应研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6):73—80 (LIU Haitao, QIN Tao. Study on damage characteristics and acoustic emission Kaiser effect of sandstone under cyclic loading and unloading conditions[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6):73—80 (in Chinese))
- [20] 马春德, 龙珊, 胡顺喜, 等. Kaiser 效应激发验证中的压头尺寸效应研究[J]. 实验力学, 2020, 35(1):91—99 (MA Chunde, LONG Shan, HU Shunxi, et al. Investigation on indenter size effect in Kaiser effect excitation verification[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1):91—99 (in Chinese))
- [21] 王伟超, 刘希亮, 张五交, 等. 不同应力路径下盐岩破坏声发射时序特征研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3):348—354 (WANG Weichao, LIU Xiliang, ZHANG Wujiao, et al. Study of acoustic emission timing features of salt rock subjected to different stress path loadings[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):348—354 (in Chinese))
- [22] 纪洪广, 侯昭飞, 张磊, 等. 载荷岩石材料在加载—卸荷扰动作用下声发射特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1):1—5 (JI Hongguang, HOU Zhao-fei, ZHANG Lei, et al. Acoustic emission character of loaded rock under load-unload disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1):1—5 (in Chinese))
- [23] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993 (QIN Siqing, LI Zaoding, ZHANG Zhuoyuan, et al. Introduction to rock acoustic emission technology[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993 (in Chinese))
- [24] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004:134—158 (JI Hongguang. Research and application of acoustic emission performance in concrete materials[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2004:134—158 (in Chinese))
- [25] 曹龙辉, 张盛, 焦振国. 含预制裂缝大理岩试样单轴压缩实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5):800—808 (CAO Longhui, ZHANG Sheng, JIAO Zhenguo. Experimental study on uniaxial compression of marble samples with prefabricated cracks[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):800—808 (in Chinese))
- [26] 郭静芸. 岩石拉伸剪切变形破坏特征与破坏准则[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013 (GUO Jingyun. Characteristics and failure criterion of tensile deformation and failure of rock[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese))
- [27] 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机理分析[J]. 煤炭学报, 1989, 2:57—67 (XIE Heping, CHEN Zhida. Analysis of rock fracture micro-mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 1989, 2:57—67 (in Chinese))

Experimental study on Kaiser effect characteristics of granite under different cyclic loading stresses

ZHANG Yanxin^{1,2}, CAO Longhui¹, LI Zejie¹, CHEN Tianxing¹

(1. College of Civil Engineering & Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Maintenance for Civil Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: In order to obtain the stress value σ^{AE} corresponding to the Kaiser effect point of granite more accurately, the influences of different cyclic loading stress σ_c^i on the Kaiser effect characteristics are studied by the RMT-100B rock mechanics servo testing machine and the Micro-II Express acoustic emission monitoring system. The results show that, under the cyclic loading the stress-strain curve of the specimen becomes less convex at the initial loading stage and shorter at the compaction stage, in comparison with that under the single loading. When $\sigma_c^i < \sigma_m$, the frictional acoustic emission is effectively weakened, conducive to the identification of Kaiser effect points in the subsequent loading process. When $\sigma_c^i > \sigma_m$, the cumulative ringing count curve rises in steps, the extension of cracks and the initiation of new cracks occur inside the rocks, and the cyclic stress becomes a new memory stress. When $\sigma_c^i < \sigma_m$, the Felicity ratio is less than 1. Otherwise it is more than 1. Therefore, in the in-situ stress test, a cyclic loading and unloading method with low stress and small gradient can be adopted, and the effective stress interval of the Kaiser effect can be screened by the Felicity ratio, reducing the recognition range of the Kaiser effect point and improving the accuracy of the in-situ stress measurement.

Keywords: cyclic loading; Kaiser effect; Felicity ratio; acoustic emission; in-situ stress