

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.05.006

# 受拉加载速度变化对砂岩 Kaiser 效应影响

傅翔<sup>1</sup>, 黄平<sup>1</sup>, 班宇鑫<sup>2</sup>, 谢强<sup>2</sup>, 曾晶<sup>2</sup>, 涂义亮<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为分析受拉加载速度变化下的岩石破坏过程 Kaiser 效应特征, 获取其机理和判断标准, 通过 3 种加载速度的三点弯曲声发射试验, 研究了受拉应力状态下砂岩 Kaiser 点的应力值与加载速度、声发射特征参数间的相互联系。运用 RFPA2D 从微裂纹开展角度, 对试验过程中 Kaiser 效应随加载速度变化呈现的差异进行了机理分析。最后, 运用小波分析方法获取了不同加载速度的砂岩 Kaiser 点频谱分布区间, 量化了其宏观现象的判断标准。结果表明: 砂岩的 Kaiser 效应特征参数与加载速度正相关, 各参数的 Kaiser 点明显程度存在差异, 累计事件参数最明显。加载速度越快, 岩石裂纹扩展路径的规律性越弱。因裂纹竞争起裂趋势难度的变化, 造成开裂能量分布均匀性降低, 影响 Kaiser 效应的准确度和明显程度。Kaiser 点的频率主要集中在 0~312.50 kHz 范围, 占比为 40.54%, 最大值在 300 kHz 附近, 呈现正态分布, 并且 Kaiser 点的频率区间随加载速度的变化呈现不断紧缩趋势, 这一规律可以作为反演辨识岩石受荷冲击强度变化的依据。

**关键词:** Kaiser 效应; 加载速度; 三点弯曲; 受拉破坏; 频谱特征

**中图分类号:** TE371

**文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2019)05-046-10

## Effect of loading rate on Kaiser effect of sandstone under tensile stress

FU Xiang<sup>1</sup>, HUANG Ping<sup>1</sup>, BAN Yuxin<sup>2</sup>, XIE Qiang<sup>2</sup>, ZENG Jing<sup>2</sup>, TU Yiliang<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The paper aims at recognizing the Kaiser effect characteristics of rock tensile failure process with the change of loading rate and acquiring the mechanism and criteria. Firstly, the relationship between Kaiser point stress, loading rate, acoustic emission (AE) parameters were studied. Then, the RFPA2D software was used to simulate the test process from the perspective of micro-crack development. The mechanism of the difference between the Kaiser effect induced by the change of loading rate during the test

**收稿日期:** 2018-12-17

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51008319, 5177902, 51808083); 国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金 (SLK2018B04); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201802501, KJQN201800745)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51008319, 5177902, 51808083), the National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation Open Fund of Chongqing Jiaotong University (SLK2018B04), and Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJQN201802501, KJQN201800745).

**作者简介:** 傅翔 (1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与声发射技术研究, (E-mail) fmsx2000@163.com。

班宇鑫 (通讯作者), 女, 博士研究生, (E-mail) banyuxin@163.com。

was analysed. Finally, the spectral characteristics of the Kaiser point under tensile stress was obtained by wavelet analysis and the judging criteria for macroscopic phenomena was quantified. The results show that the KE characteristic parameters of sandstone positively correlated with loading rate. There are great differences in Kaiser point of each parameter, especially in that of the cumulative energy. The faster the loading speed, the weaker the regularity of the rock crack propagation path. Changes of the trend of the crack competition results in the uniformity of the cracking energy distribution, which affect the obviousness and identification accuracy of the Kaiser effect. The frequency of the Kaiser point is mainly concentrated within the range of 0 kHz to 312.50 kHz with normal distribution, accounting for 41.73%, and the maximum value distributes around 300 kHz. The frequency range of Kaiser point shows a constant tightening trend with the change of loading rate, which can be used as the basis for reasonable selection of experimental loading rate for different rocks. The results can provide reference for the stability monitoring, early warning and forecasting work of rock mass roof or compartment rock under bending stress.

**Keywords:** Kaiser effect; loading rate; three-point bending; tensile failure; spectrum characteristics

随着浅埋资源逐渐耗尽,大型深部能源勘探在全球范围正变得越来越重要<sup>[1-2]</sup>,深部工程中的岩体力学问题成为当前研究中的热点,尤其是岩石受拉破坏机理。岩石抗拉特性是岩石的重要特性。在地下巷道周边经常存在拉应力,岩石抗压强度明显高于抗拉强度,拉伸破坏成为岩石损伤中最常见的类型之一<sup>[3]</sup>。地下矿产开采等地下工程中也存在大量拉伸破坏现象,比如,顶板岩石冒落,已成为施工安全事故中最重要的原因之一<sup>[4]</sup>。研究拉伸破坏过程中的声发射特性,通过判断岩体顶板或隔层岩石在弯曲状态下的 Kaiser 效应特征,对于巷道顶板的稳定性监测、预警及预报具有重要的科学价值和工程意义<sup>[5]</sup>。

早在 1950 年,德国科学家 Kaiser 便发现了著名的凯撒效应现象,即受单向拉伸力作用的金属材料,当应力达到材料所受过的最大先期应力时,会有明显的声发射现象出现<sup>[6-7]</sup>。而 Goodman 等将其运用到岩石压缩试验中,并成功证实了岩石存在 Kaiser 效应现象。不少学者对不同岩石在各种条件下,对 Kaiser 效应的影响进行了研究,比如,应力水平<sup>[9-12]</sup>、湿度<sup>[13-14]</sup>、时间延迟<sup>[15-22]</sup>、受荷状态<sup>[23]</sup>等。而加载速度对岩石 Kaiser 效应的影响与岩石损伤过程中的声发射信号特征直接相关,但该问题研究较少,Lavrov A<sup>[24]</sup>和陈勉<sup>[25]</sup>分别研究了砂岩单轴受压试验和砂岩、泥岩有围压受压试验的加载速度对 Kaiser 效应影响,但不够深入。而受拉应力状态下的加载速度对岩石 Kaiser 效应影响及机理,几乎未有相关研究。文中将从 3 种加载速度下的三点弯曲声发射试验出发,研究加载速度变化下,受拉应力状态砂岩 Kaiser 效应特征。借助 RFPA2D 从微裂纹开展角度,对试验过程中 Kaiser 效应随加载速度变化呈现的差异进行了机理分析。最后,运用小波分析方法获取不同加载速度的砂岩 Kaiser 点频谱分布区间,量化其宏观现象的判断标准。

## 1 试验系统和试件制备

### 1.1 试验系统

声发射采集系统为 PCI-2 声发射仪,AE 硬件参数设置为前置放大 40 dB,阈值值设置为 45 dB,探头谐振频率为 100~400 kHz,采样频率为 1 MSPS。加载系统采用 WAW-1000 型微机控制电液伺服万能试验机。试验过程中收集 AE 事件、能量等参数信息和波形信息。试验装置如图 1 所示。

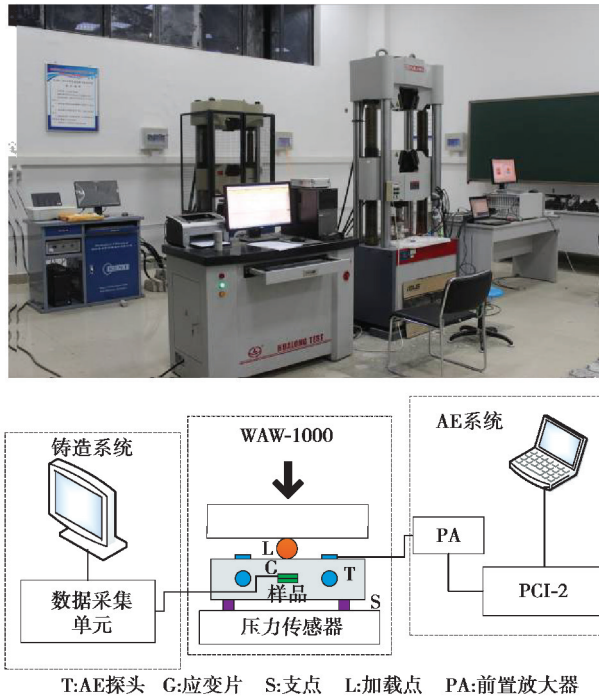


图 1 试验系统

Fig. 1 Test system

### 1.2 试件制备

砂岩采自重庆市某矿区,按照国际岩石力学学会试验建议方法 (ISRM),将砂岩母料加工成标准试件。棱柱体试件尺寸为  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ,端面平整度误差控制在  $0.02\text{ mm}$  以内,端面平整度允许偏差范围为  $\pm 0.25^\circ$ 。每个试验中试件固定 6 个探头,如图 2 所示,棱柱体试件除支承面外,每个表面左右对称布置 2 个,探头表面耦合剂采用凡士林。为减少砂岩表面岩石颗粒破碎错动产生的噪音,在试压设备与试件接触面之间增加 1 层橡胶垫片,使加载初期声发射振铃累计计数曲线变得平缓。

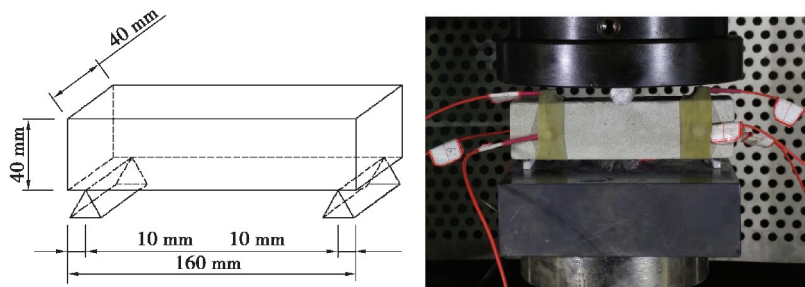


图 2 三点弯曲试验加载方式

Fig. 2 Loading ways of the three-point bending test

### 1.3 试验分组及加载方案

试验加载速度分 3 组,分别为  $10\text{ N/s}$ 、 $20\text{ N/s}$ 、 $40\text{ N/s}$ ,每组 5 个试件(平行试验),均采用连续循环加卸载方式。每次循环加载至指定荷载时稳载  $10\text{ s}$ ,每次加载完成后以  $40\text{ N/s}$  的速度卸载至  $0.1\text{ kN}$ 。试验过程中采集应力、声发射特征参数和波形数据。

## 2 加载速度变化对 Kaiser 效应影响

每组分别选取其中 1 个试件为代表进行分析说明,编号分别为 B5、B10、B17,试验结果如图 3~图 5 所

示。通过声发射特征曲线图可发现:1)砂岩在连续循环加载条件下的 Kaiser 现象存在,加载速度越高,试样产生总的累计声发射事件数、累计 AE 振铃数和累计声发射能量越大,试件在破坏时的累计 AE 声发射事件、累计 AE 振铃数和累计能量与加载速度成正比关系。2)从能量-时间关系曲线可知,加载速度越高,Kaiser 效应越明显,拐点也越清晰。3)从累计声发射事件数-时间关系曲线可知,加载速度为 20 N/s 的 Kaiser 效应比 10 N/s 和 40 N/s 的 Kaiser 效应明显,说明加载速度与 Kaiser 效应明显程度并非一定正相关。

由此可见,砂岩破坏时的声发射事件数多少可以用于评价岩石破坏过程的发展程度,但判断过程中最好采用能量-时间关系曲线进行分析。同时表明,加载速度变化对岩石的受拉破坏模式有重要影响。

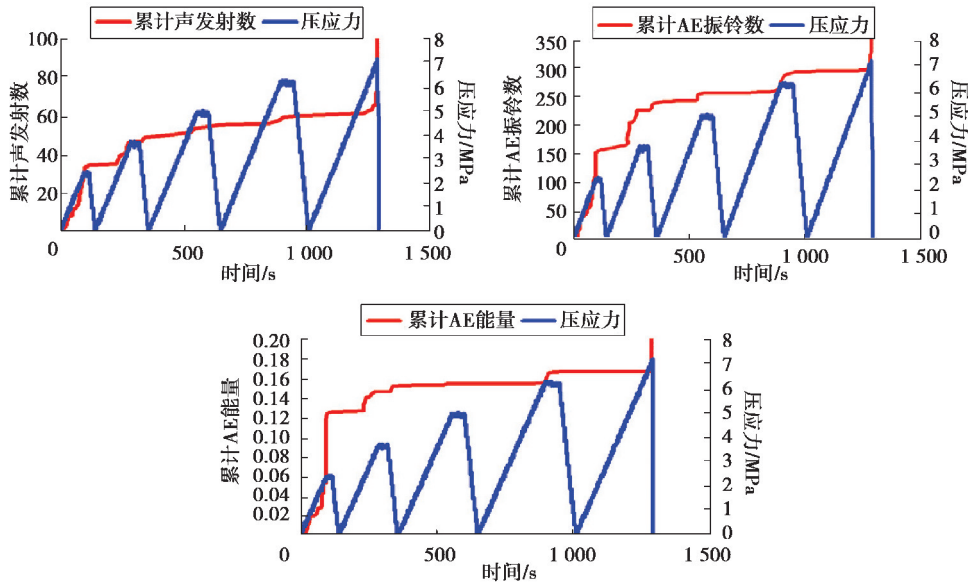


图 3 试件 B5 声发射特征曲线 (10 N/s)

Fig. 3 AE characteristic curve of B5 (10 N/s)

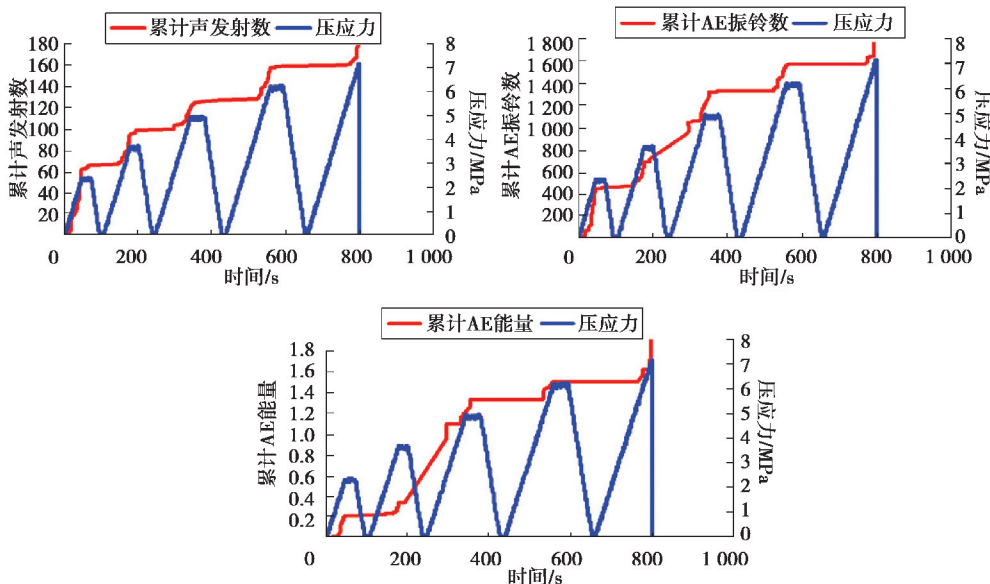


图 4 试件 B10 声发射特征曲线 (20 N/s)

Fig. 4 AE characteristic curve of B10 (20 N/s)

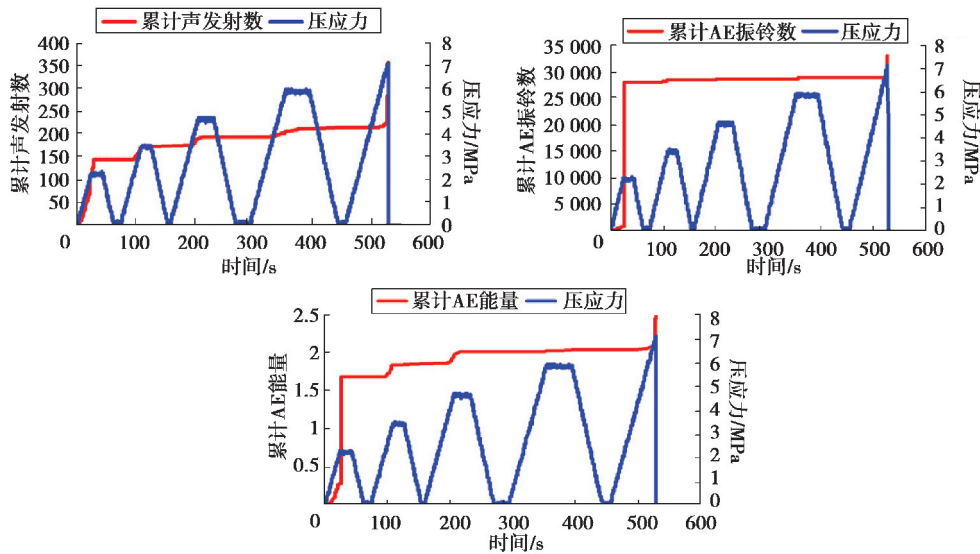


图 5 试件 B17 声发射特征曲线 (40 N/s)

Fig. 5 AE characteristic curve of B17 (40 N/s)

### 3 受拉条件 Kaiser 效应机理分析

为研究加载速度变化对岩石 Kaiser 效应的影响,基于 Kaiser 效应源于裂纹发展过程中所产生的应力波原理,裂纹发展过程、数量与声发射参数特征有一一对应关系,将通过加载速度变化下,裂纹演化规律的差异来对其机理进行研究。因裂纹扩展能量显著高于裂纹错动,故假定 Kaiser 效应由裂纹扩展引起<sup>[26]</sup>。模拟方法采用 RFPA2D,RFPA2D 是一种基于有限元理论和统计损伤理论,能准确模拟材料非线性断裂破坏的数值试验工具<sup>[27]</sup>。

#### 3.1 模拟参数设定

试件尺寸与试验一致为:160 mm×40 mm×40 mm,材料参数设定,如表 1 所示。材料参数只有加载速度即单步增量 1 个变量,其他参数均一致。

1)当单步增量为 1 μm/步时,第 1 次先加载 40 步,然后卸载 5 步,第 2 次再加载 25 步,然后卸载 5 步,以后每次都按照第 2 次加载方式循环至试件破坏。

2)当单步增量为 2 μm/步的时候,第 1 次先加载 20 步,然后卸载 5 步,第 2 次再加载 15 步,然后卸载 5 步,以后每次都按照第 2 次加载方式循环至试件破坏。

3)当单步增量为 4 μm/步的时候,第 1 次先加载 10 步,然后卸载 5 步,第 2 次再加载 10 步,然后卸载 5 步,以后每次都按照第 2 次加载方式循环至试件破坏。

表 1 材料参数设定

Table 1 Material parameter setting

材料参数项	参数值		
加载速度/(μm/步)	1	2	4
网格数	300×90	300×90	300×90
均质度	1.5	1.5	1.5
弹性模量	45 000	45 000	45 000
泊松比	0.25	0.25	0.25
强度准则	摩尔-库伦准则	摩尔-库伦准则	摩尔-库伦准则
压拉比	10	10	10
压变系数	200	200	200

续表1

材料参数项	参数值		
拉变系数	1.5	1.5	1.5
残余强度百分比	0.1	0.1	0.1
残余泊松百分比	1.1	1.1	1.1
单轴抗压强度细观平均值/MPa	80	80	80

3.2 模拟过程与结果分析

计算结果如图 6~图 9 所示,3 种速度条件下的三点弯曲试验破坏现象均较明显。

1)单步增量为 1  $\mu\text{m}$ /步的试样在第 28 步时出现声发射现象(有裂纹出现),在第 141 步进入裂纹贯通破坏阶段。

2)单步增量为 2  $\mu\text{m}$ /步试样在第 15 步开始出现声发射现象(有裂纹出现),在第 75 步进入裂纹贯通破坏阶段。单步增量为 1  $\mu\text{m}$ /步和单步增量为 2  $\mu\text{m}$ /步的破坏形式基本一致,裂纹延展方向均由试件中下部向上延伸。

3)单步增量为 4  $\mu\text{m}$ /步的试件在第 9 步出现声发射现象(有裂纹出现),在第 54 步进入裂纹贯通破坏阶段,裂纹延展方向总体由试件中下部向上延伸,但出现了偏转。

将裂纹数等价衡量声发射数,加载速度越快,声发射事件数越大,如图 6 所示,加载速度为 1  $\mu\text{m}$ /步,120 加载步总声发射数约 560 个,而 4  $\mu\text{m}$ /步,60 加载步总声发射数达 700 个。3 种加载速度下的 Kaiser 效应明显程度为 4  $\mu\text{m}$ /步高于 1  $\mu\text{m}$ /步,表明加载速度越快,Kaiser 效应越明显,但 Kaiser 点的精度会降低,岩石破坏过程中的裂纹开展规律性会变得越不明显。

深入分析加载速度变化下,Kaiser 效应差异性的影响机理,发现在较低加载速度下,试件处于纯拉应力状态,微裂纹可充分扩展后贯通为竖直裂缝。而随着加载速度的增加,试件应变能在局部快速聚集并至裂纹增生,微裂纹没有充分时间发育,裂纹会沿着开裂难度最小方向扩展,裂纹发展随机性增强,破坏强度加大,受荷状态可能向复合应力状态转化。加载速度变化,会引起裂纹竞争起裂趋势的变化,进而改变体内裂纹面方向与受力单元体远场应力方向的夹角大小,使裂纹开裂应力随之减小或增大,即减弱或增强裂纹开裂难易程度。导致裂纹发展方向向着开裂难度最小方向偏转,造成声发射事件出现时间提前或延迟,影响 Kaiser 效应反映岩石记忆先期荷载值的准确度。因此,加载速度越快,由于岩石裂纹开展的随机性变大,Kaiser 效应明显程度会呈非线性变化,这样与试验结论相吻合。

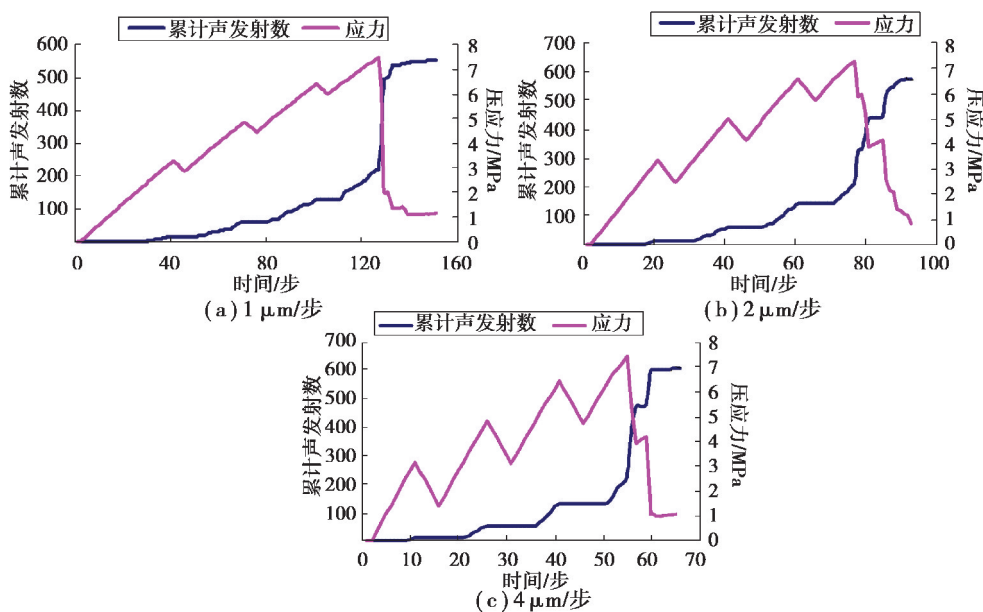
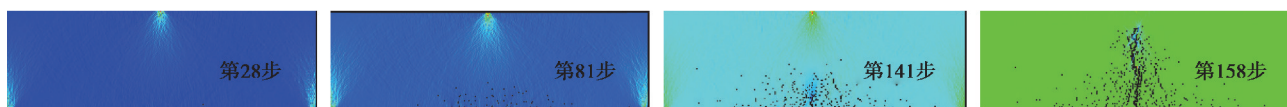
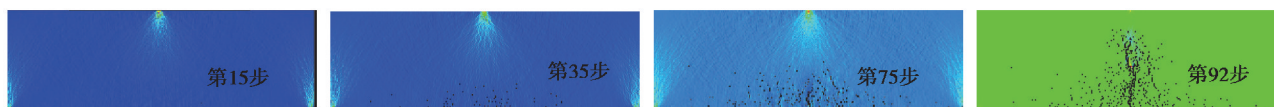


图 6 Kaiser 效应模拟图(1  $\mu\text{m}$ /步、2  $\mu\text{m}$ /步、4  $\mu\text{m}$ /步)

Fig. 6 Simulation of Kaiser effect(1  $\mu\text{m}$ /step, 2  $\mu\text{m}$ /step, 4  $\mu\text{m}$ /step)

图 7 破坏过程图(1  $\mu\text{m}/\text{步}$ )Fig. 8 Failure process renderings(1  $\mu\text{m}/\text{step}$ )图 8 破坏过程图(2  $\mu\text{m}/\text{步}$ )Fig. 8 Failure process renderings(2  $\mu\text{m}/\text{step}$ )图 9 破坏过程图(4  $\mu\text{m}/\text{步}$ )Fig. 9 Failure process renderings(4  $\mu\text{m}/\text{step}$ )

#### 4 Kaiser 点的频谱变化规律

加载速度变化会影响 Kaiser 效应辨识度。为更好地认识和识别加载速度不同的 Kaiser 点特征,进而正确评价 Kaiser 效应,将通过对试件 B5、B10、B17 在第二循环中的 Kaiser 点波形数据进行小波分析,以确定受拉应力状态下的砂岩 Kaiser 点频谱变化规律。B10 波形数据,如图 10 所示,

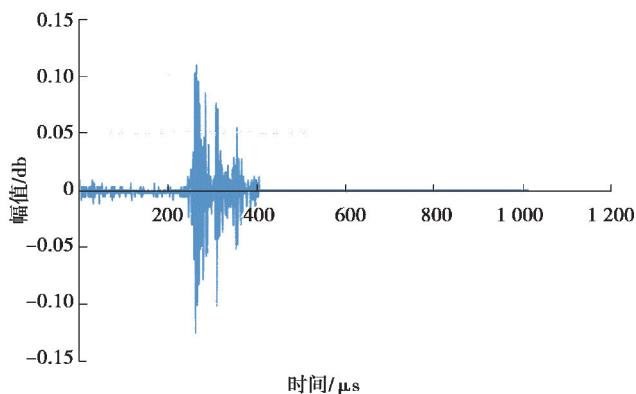


图 10 B10 样本 Kaiser 点信号图

Fig. 10 Kaiser point signals of sample B10

由于岩石破裂声发射频率范围主要集中在 20~1 000 kHz 间,故只对 B5、B10、B17 号样本信号图以构造小波函数为基础函数,作频带宽度 1 250 kHz 的 2 层小波分解,共 4 个频段。B10 频带能量,如图 11 所示,各试件能量比重占比,如表 2 和图 12 所示。

由表 2 可知,样本声发射信号频谱范围主要集中在 0~315.50 kHz 频率,能量最大段范围为 40.54%,而频带范围 315.50~605.50 kHz 的能量占比达到 33.12%,同时,605.50~925.50 kHz 频带能量占比也接近 23%。说明受拉应力状态下的砂岩 Kaiser 点频谱特征以高频为主,并且集中在 300 kHz 附近,低频声发射能量并不占有绝对优势。

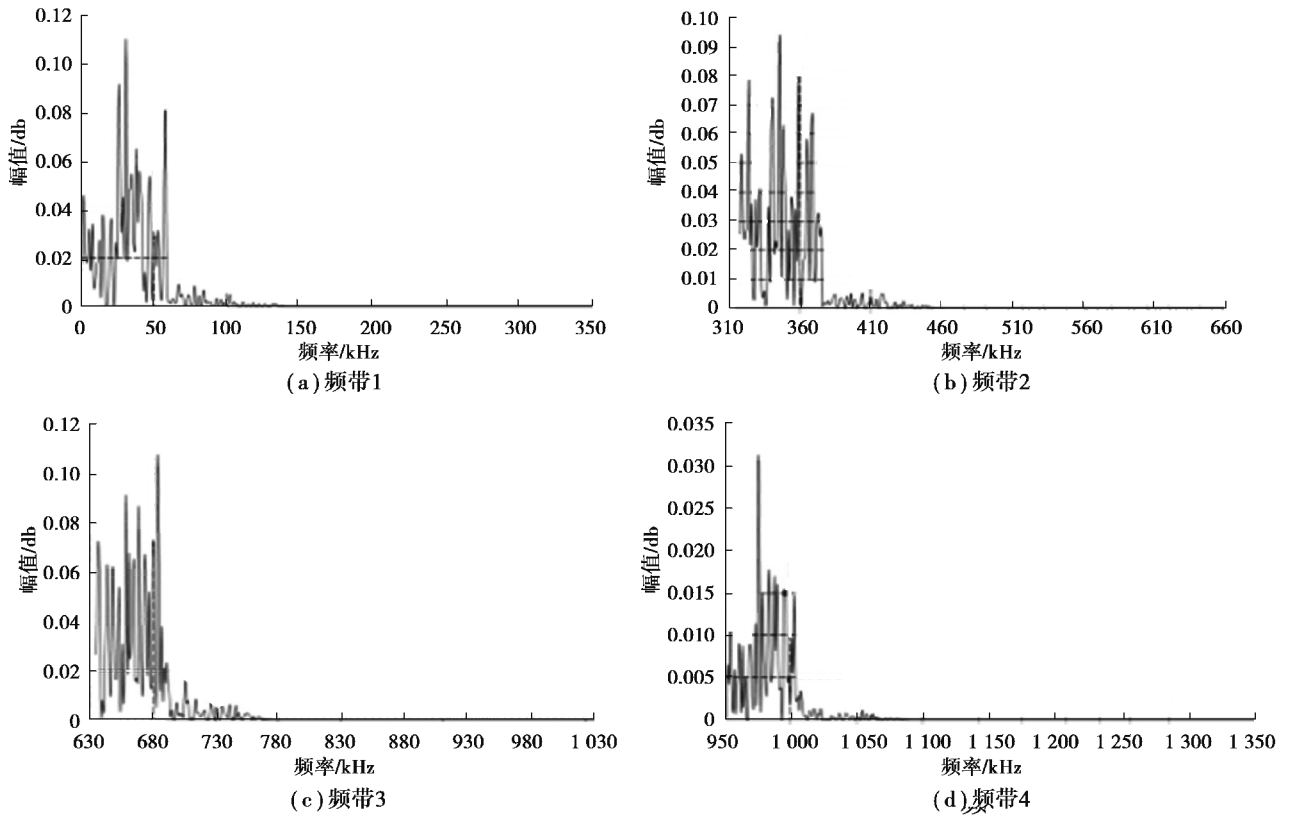


图 11 B10 样本两次小波分解

Fig. 11 Two layer wavelet decomposition of sample B10

表 2 样本 B7 试验 Kaiser 点小波包分解各频段能量百分比汇总表

Table 2 Energy percentage summary for Kaiser point wavelet decomposition of sample B10

试件编号	分解系数	频带范围/kHz	能量百分比/%
B5	频带 1	0~315.50	37.23
	频带 2	315.50~605.50	31.43
	频带 3	605.50~925.50	22.31
	频带 4	925.50~1250.00	2.02
B10	频带 1	0~315.50	40.54
	频带 2	315.50~605.50	33.12
	频带 3	605.50~925.50	23.71
	频带 4	925.50~1250.00	0.63
B17	频带 1	0~315.50	42.86
	频带 2	315.50~605.50	31.12
	频带 3	605.50~925.50	23.71
	频带 4	925.50~1250.00	0.63



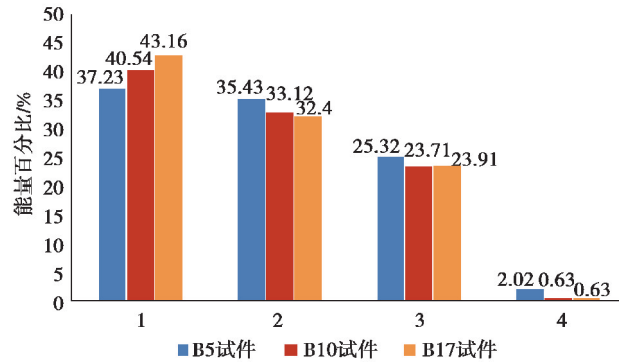


图 12 不同加载速度 Kaiser 点能量百分比分布图

Fig. 12 Energy percentage distribution of Kaiser point with different loading rates

由图 12 可知,不同加载速度 Kaiser 点能量百分比,在同频段范围的数值大小不同,整体趋势为:频带 1 (0~315.50 kHz)的能量百分比随着加载速度的增加而增加,频带 2(315.50~605.50 kHz)、频带 3(605.50~925.50 kHz)、频带 4(925.50~1 250.00 kHz)的能量百分比均递减。说明加载速度的增加,Kaiser 点能量分布会向着高频集中,这主要是由于能量在短时间内增大,微裂纹无法充分扩展所致,这一规律也可以用于反演辨识岩石受荷冲击强度变化。

## 5 结 论

通过 3 种加载速度下的三点弯曲声发射试验,观测了加载速度变化下的受拉应力状态砂岩 Kaiser 效应变化规律;并通过 RFPA2D 数值模拟,探讨了该 Kaiser 效应变化规律机理;同时,借助小波分析手段,获得了其可控因素,具体结论如下:

1)从试验现象表明,加载速度越高,Kaiser 效应越明显,拐点也越清晰,但并非一定正相关。

2)通过 RFPA2D 数值模拟发现,受拉加载速度变化对砂岩 Kaiser 效应影响机理为:加载速度变化影响了裂纹扩展路径。裂纹加载速度越快,声发射事件数越大,岩石破坏规律性越不明显,纯拉应力状态可能向复合应力状态转化。由于加载速度增大,会引起裂纹竞争起裂趋势的改变,岩石裂纹开展的随机性变大,Kaiser 效应明显程度呈现非线性特征。

3)运用小波分析,获得了加载速度变化对砂岩 Kaiser 效应影响的频率可控因素,递增加载速率下的 Kaiser 点频带分布特征呈现一致性变化规律。随着加载速度的增加,Kaiser 点能量分布会向着高频集中,这主要是由于能量在短时间内增大,微裂纹无法充分扩展所致,这一规律也可用于反演辨识岩石受荷冲击强度变化。

### 参考文献:

- [1] Sellers E J, Klerck P. Modelling of the effect of discontinuities on the extent of the fracture zone surrounding deep tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 463-469.
- [2] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017(2): 1-16.  
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017(2): 1-16.(in Chinese)
- [3] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137-142.  
YU Xianbin, XIE Qiang, LI Xinyi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, brazilian and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137-142.(in Chinese)
- [4] 李果, 艾婷, 于斌, 等. 不同岩性巴西劈裂试验的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 870-881.  
LI Guo, AI Ting, YU Bin, et al. Acoustic emission characteristics of different lithologies under Brazilian splitting[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 870-881.(in Chinese)
- [5] 谢强, 王志委, 余贤斌, 等. 四点弯曲试验条件下页岩的声发射特性[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(6): 72-76,90.

- XIE Qiang, WANG Zhiwei, YU Xianbin, et al. Acoustic emission behavior of shale under four-point bending test[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2010, 33(6): 72-76,90.(in Chinese)
- [6] Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen[J]. Archiv Für Das Eisenhüttenwesen, 1953, 24(1/2): 43-45.
- [7] Barr S P, Hunt D P. Anelastic strain recovery and the kaiser effect retention span in the carmenellis granite, U.K.[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(3): 169-193.
- [8] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(4): 487.
- [9] Feerineis N. Anwendung der schallemissionanalyse(SEA) als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Beton[J]. Dissertation TH Darmstadt, 1982: 511-524.
- [10] 纪洪广, 李造鼎. 混凝土材料凯塞效应与 Felicity 效应关系的实验研究[J]. 应用声学, 1997, 16(6): 30-33.  
JI Hongguang, LI Zaoding. Experimental study on the relationship of kaiser and felicity effect in concrete material[J]. Applied Acoustics, 1997, 16(6): 30-33.(in Chinese)
- [11] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147-152.  
LI Shulin, TANG Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 147-152.(in Chinese)
- [12] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 碳酸盐岩声发射地应力测量方法实验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1192-1196.  
LU Yunhu, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on stress measurement for sound emission in carbonate formation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1192-1196.(in Chinese)
- [13] Kurita K, Fujii N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission[J]. Geophysical Research Letters, 1979, 6(1): 9-12.
- [14] Yoshikawa S, Mogi K. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: Laboratory study in the case of uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 1981, 74(3/4): 323-339.
- [15] Li C, Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(4): 333-351.
- [16] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74(4): 487.
- [17] Holcomb D J. Using acoustic emission to determine in situ stress: problems and promise[J]. Geomechanics, 1983, 57: 11-21.
- [18] Yoshikawa S, Mogi K. Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity—a possibility for estimation of rock stress[J]. J Acoust Emission, 1989, 8(4): 113-123.
- [19] Koerner R M, Lord A E. AE detection of prestress in soil and rock[C]//Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. ClausthalZellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 73-86.
- [20] Filimonov Y L, Lavrov A V, Shkuratnik V L. Prospects of memory effects for stress measurement applications in rock salt[C]//Proceedings of EUROCK'2001 Symposium. Rotterdam: A A Balkema, 2001: 59-63.
- [21] Shin K, Kanagawa T. Kaiser effect of rock in acousto-elasticity, AE and DR[C]//Proceedings of the Fifth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1995: 197-204.
- [22] Michihiro K, Hata K, Yoshioka H, et al. Determination of the initial stresses on rock mass using acoustic emission method[J]. J Acoust Emission, 1991/1992, 10(1/2): 63-76.
- [23] Fu X, Xie Q, Liang L. Comparison of the Kaiser effect in marble under tensile stresses between the Brazilian and bending tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 535-543.
- [24] Lavrov A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(11): 669-677.
- [25] 陈勉, 张艳, 金衍, 等. 加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 2599-2604.  
CHEN Mian, ZHANG Yan, JIN Yan, et al. Experimental study of influence of loading rate on kaiser effect of different lithological rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2599-2604.(in Chinese)
- [26] 傅翔, 谢强, 江小城, 等. 受拉加载方向变化对 Kaiser 效应点准确度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1365-1370.  
FU Xiang, XIE Qiang, JIANG Xiaocheng, et al. Influence of tensile loading direction on accuracy of determining Kaiser effect point[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1365-1370. (in Chinese)
- [27] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA2D[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507-508.  
TANG Chunan, ZHAO Wen. RFPA2D system for rock failure process analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 507-508. (in Chinese)