

DOI: 10.11779/CJGE201810013

# 受不同加载偏转角影响的含裂纹砂岩劈裂声发射 试验研究

谢强<sup>1,2</sup>, 唐家辉<sup>1</sup>, 鲁鲲鹏<sup>1</sup>, 傅翔<sup>3</sup>, 班宇鑫<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;  
3. 重庆大学城市科技学院, 重庆 402167)

**摘要:** 目前, 岩石声发射方向性存在与否尚无定论, 岩石中裂纹的存在对岩石声发射方向性是否存在影响也无深入的研究。针对完整的和含有一条预制裂纹的砂岩圆盘试件, 分别偏转 $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $60^\circ$ 角进行岩石声发射方向性验证劈裂试验, 对比分析了不同加载偏转角度下完整砂岩和含预制裂纹砂岩的声发射特征。研究表明: ①偏转角度的不同对砂岩声发射 Kaiser 效应确有影响, 随着偏转角度的增大, 砂岩声发射 Kaiser 效应逐渐模糊直至消失, 证明在此试验条件下砂岩的声发射 Kaiser 效应方向性随着偏转角度的增大而愈加明显。②含裂纹砂岩的 Kaiser 效应方向性比完整砂岩的 Kaiser 效应方向性更明显, 具体表现为含裂纹砂岩的声发射 Kaiser 效应比完整砂岩在偏转过程中消失得更快。研究成果可为利用 Kaiser 效应测量地应力的可行性和准确性提供试验论证。

**关键词:** 偏转角; 声发射; Kaiser 效应; 裂纹

中图分类号: TU459

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)10-1862-09

**作者简介:** 谢强(1975-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事与岩土工程领域相关的科研和教学工作。E-mail: xieqiang2000@163.com。

## Acoustic emission characteristics of cracked sandstones affected by different rotating angles of loading under splitting tests

XIE Qiang<sup>1,2</sup>, TANG Jia-hui<sup>1</sup>, LU Kun-peng<sup>1</sup>, FU Xiang<sup>3</sup>, BAN Yu-xin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. City College of Science and Technology, Chongqing University, Chongqing 402167, China)

**Abstract:** At present, whether the acoustic emission possesses directionality or not is still inconclusive. Besides, the influences of cracks on the acoustic emission directionality are not intensively studied. The cleavage experiments are respectively carried out at rotating angles of  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $35^\circ$  and  $60^\circ$  by using the intact disc sandstone and disc sandstone containing a prefabricated crack. The acoustic emission characteristics of the complete sandstone and the prefabricated cracked sandstone under different loading rotating angles are compared and analyzed. The results show: (1) The difference of rotating angles has an effect on the Kaiser effect of acoustic emission of sandstone. With the increase of rotating angles, the Kaiser effect of acoustic emission of sandstone gradually blurs until it disappears, verifying that the directionality of acoustic emission of rock becomes more obvious with the increase of rotating angle in this experimental condition. (2) The Kaiser effect directionality of cracked sandstone is more obvious than that of intact sandstone, for the Kaiser effect disappears faster in cracked sandstone than in the intact sandstone in the process of rotating. The results of the study can provide experimental proofs for the feasibility and accuracy of using the Kaiser effect to measure geostress.

**Key words:** rotating angle; acoustic emission; Kaiser effect; crack

## 0 引 言

自 Goodman 在岩石中发现了声发射 Kaiser 效应<sup>[1-3]</sup>以来, Kaiser 效应就被用作测量地应力的手段之一<sup>[4-5]</sup>, 但是岩石声发射 Kaiser 效应的方向性是否存在到目前

基金项目: 重庆市教委 2015 年度科学技术研究项目 (KJ1502201); 国家自然科学基金项目 (51008319, 51478065); 中央高校基本科研业务费 (2018CDJDTM0006)  
收稿日期: 2017-08-21

为止尚无定论,这使得人们对利用岩石的 Kaiser 效应测量地应力的准确性产生了怀疑。

岩石声发射 Kaiser 效应的方向性是指受过应力作用的岩石,必须在与其先前所受应力的方向上再加载才能观察到 Kaiser 效应,而在与先前应力垂直的其他方向上则观察不到 Kaiser 效应<sup>[6]</sup>。1977 年 Kanagawa 等<sup>[7]</sup>曾提出岩石 Kaiser 效应具有方向独立性。Holcomb<sup>[8]</sup>通过试验研究认为偏转前和偏转后的偏转角度在  $10^\circ$  内时,可以观察到 Kaiser 效应,大于  $10^\circ$  时, Kaiser 效应消失。谢强等<sup>[9]</sup>通过试验得出了重复加载时加载方向变化越大,其 Kaiser 效应越弱,傅翔等<sup>[10]</sup>也得出了类似结论。但是也有学者认为岩石 Kaiser 效应的方向性并不存在。赵兴东等<sup>[11]</sup>通过对花岗岩单轴压缩循环荷载下的 Kaiser 效应进行研究,发现偏转  $90^\circ$  后 Kaiser 效应依然存在,即 Kaiser 效应不存在方向性。黄志鹏等<sup>[12]</sup>通过对三轴预加载的重庆砂岩进行三轴压缩试验也得出同样结论。两种结论均有试验论证,所以目前并无定论。

在已有的针对岩石 Kaiser 效应方向独立性的研究中,试验对象大多为完整试件。江小城<sup>[13]</sup>和杨卫<sup>[14]</sup>使用的是多边形试件,杨卫<sup>[14]</sup>还使用了大直径薄圆盘;阎南<sup>[15]</sup>使用了 ISRM 推荐的圆柱体试件。结合以上学者的试验方案,参考巴西圆盘劈裂试验<sup>[16]</sup>以及相关的试验研究方案<sup>[17-18]</sup>,本文选择采用圆盘试件进行劈裂试验<sup>[19]</sup>。考虑到天然岩石往往不是完整岩石,岩石内部存在节理裂隙等缺陷,所以本文同时展开对含裂纹砂岩的岩石声发射特性试验研究,对比分析完整岩石与含预制裂纹岩石在不同加载角度下的声发射特性,以期利用 Kaiser 效应测量地应力的可行性和准确性提供试验论证。

本文试验基本思路为:通过加载的方式对岩石试件施加一个初始应力,然后沿原加载方向偏转一定角度再进行加载,通过获取声发射特征参数以检验是否存在 Kaiser 效应,进而判定 Kaiser 效应方向性是否存在。若 Kaiser 效应存在,则 Kaiser 效应方向性不存在;反之若 Kaiser 效应不存在,则 Kaiser 效应方向性存在。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试件制备

试件为重庆砂岩,采集自同一地,同一批次。该砂岩位于浅表地层,埋深浅,初始应力小,从工程角度来讲可以忽略,故在本试验中不考虑初始应力的影响。试件密度为  $2.32 \text{ g/cm}^3$ ,试件的直径  $175 \text{ mm}$ ,厚度  $30 \text{ mm}$ ,如图 1。试件直径与厚度的比值约为 5.83,跟 ISRM 推荐的厚径比为 1.0 不一致。主要是考虑到

选择大尺寸薄圆盘可以减少三维尺寸效应的影响,使试验可以当成一个二维平面问题来处理<sup>[20]</sup>。试件分为两组,分别为完整试件,含有一条预制裂纹的试件。其中裂纹的长度为  $30 \text{ mm}$ ,宽度为  $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 。预制裂纹通过水刀切割的方式制成,预制裂纹位于试件的正中,试件的圆心也为裂纹的中心,如图 1 (b)。本次试验分为 A、B 两组,A 组为完整试件,B 组为含预制裂纹试件。每组试件 15 个,15 个试件分成 5 小组,每小组 3 个试件,每小组对应 1 个加载方向偏转角(试验设计  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $35^\circ$  和  $60^\circ$  五种偏转),如图 2。从文献[8~10]可知,在小偏转角下 Kaiser 效应较为明显,大偏转角下 Kaiser 效应不明显甚至消失,为验证偏转角对 Kaiser 效应的影响,在小偏转角( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ )时设置较小且均匀的间隔,大偏转角度( $35^\circ$ ,  $60^\circ$ )时角度间隔逐渐加大。试件编码规则:以“A32”为例,表示完整试件(A 组)偏转角为  $15^\circ$  的第 2 块试件。详细编号如表 1。

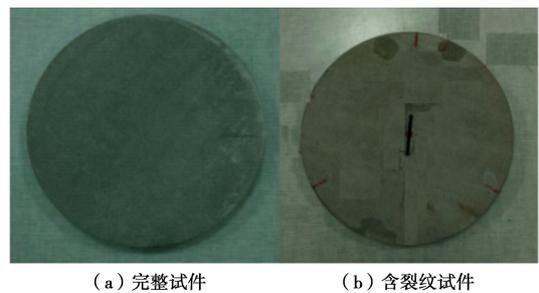


图 1 砂岩试件加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sandstone specimens

### 1.2 试验设备

试验加载系统为 WAW-1000 型微机控制电液伺服万能试验机,声发射仪采用美国物理声学公司生产的 DISP 系列 2 通道 PCI-2 全数字化声发射监测系统。试验设定声发射仪的主放为  $40 \text{ dB}$ ,门槛值为  $45 \text{ dB}$ ,探头型号为 NANO-30,谐振频率为  $125 \sim 750 \text{ kHz}$ ,采样频率为  $10^6 \text{ s}^{-1}$ 。

### 1.3 加载方案

由于圆盘试件的特殊性,笔者采用两块垫块分别放置于加载试件的受压部位。采用 6 个声发射探头分别放置在试件两侧,如图 2。

#### (1) 加载方向

对完整试件,确定圆盘的某一直径方向为初始加载方向,施加初始应力,然后按预定的偏转角度进行偏转后加载直至破坏,如图 2 (a);对含预制裂纹试件,以穿过裂纹的直径方向为偏转前的加载方向,然后按预定的偏转角度进行偏转后加载直至破坏,如图 2 (b)。

#### (2) 荷载等级



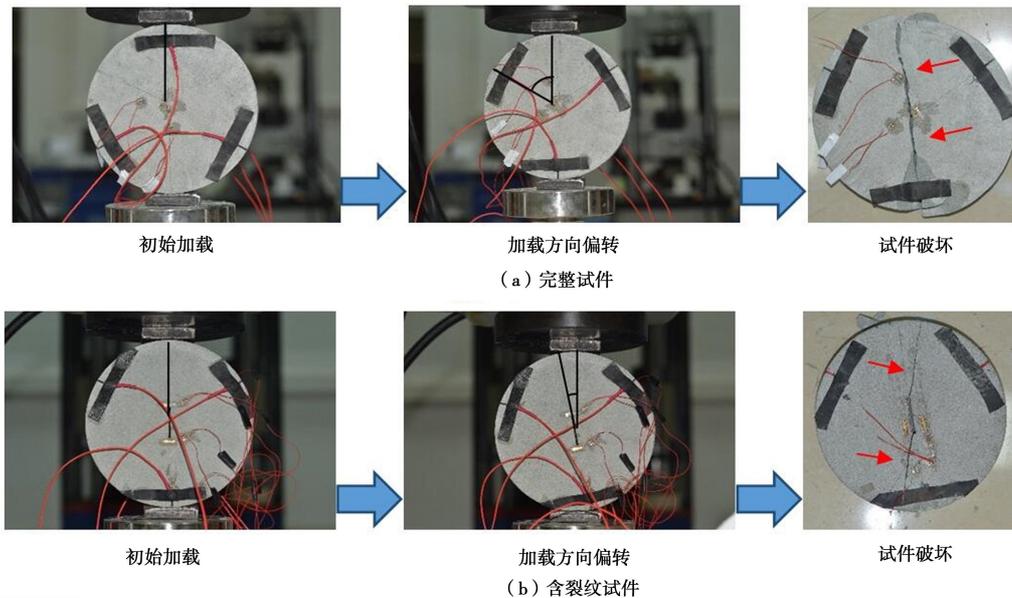


图 2 声发射探头布置及试验过程

Fig. 2 Layout of acoustic emission sensors and loading process

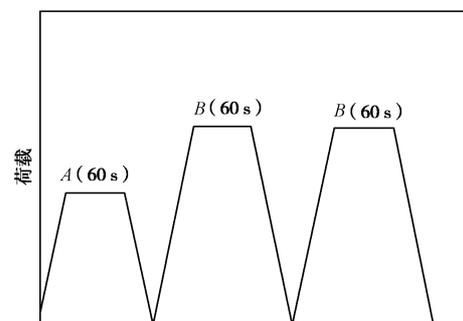
设计偏转前的最大荷载值约为试件破坏强度的 50%，偏转后的第二次循环的荷载值大致为破坏荷载的 80%。在对完整试件和含预制裂纹砂岩试件进行的劈裂强度试验中：测得完整砂岩试件的破坏荷载值为 30~40 kN，偏转前最大荷载值设置为 15 kN，偏转后的第一次循环的荷载值设置为 20 kN，第二次循环的荷载值设置为 26 kN；测得含预制裂纹试件的破坏荷载值为 20~25 kN，偏转前最大荷载值设约为 10 kN，偏转后的第一次循环的荷载值设置为 13 kN，第二次循环的荷载值设置为 17 kN。

(3) 加载方式

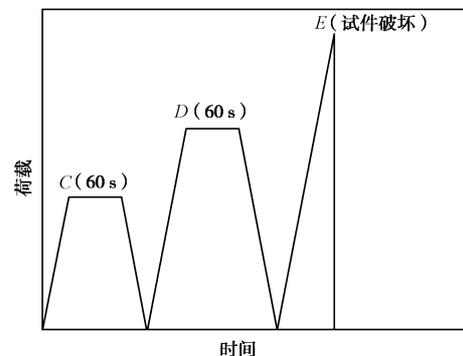
偏转前，循环加卸载三次，每次加载到目标荷载值之后，保持荷载 60 s 以加强砂岩对荷载的记忆性。如图 3 (a) 所示，第一次加载时加载到破坏荷载值的 30%~40%左右，即荷载 A，主要作用是赋予岩石试件一个初始应力，并为第二次加载时判断 Kaiser 点的荷载值做参考。第二次加载时加载到破坏荷载值的 50%左右，即荷载 B，目的有两个：第一是为了使得试件所受的最大荷载变为此荷载值；第二是通过声发射特征参数检验是否存在 Kaiser 点，若存在，说明试件有效，即砂岩对 A 荷载值记忆成功，若不存在，说明试件不可用，即砂岩对 A 荷载值记忆失败。第三次循环加载的荷载值和第二次荷载值一样，目的是使试件中的缺陷得到充分的发展，并进一步加强试件对 B 荷载值的记忆。

偏转后同样循环加卸载三次，每次达到目标值后保持 60 s，如图 3 (b)。偏转后的第一次加载目标值大于偏转前的最大荷载值，即 C 大于 B，目的是为检验方向偏转后是否存在 Kaiser 效应。此步骤为本次试验的核心步骤，通过检验偏转不同偏转角后是否存在

Kaiser 效应即可判断 Kaiser 效应方向性是否存在。第二次加载到破坏荷载值的 80%左右，即荷载 D，目的是检验是否有更清晰的 Kaiser 点，并考虑方向偏转前后加载对试件 Kaiser 效应的影响。第三次循环加载到试件破坏。试验偏转角分别为 5°，10°，15°，35° 和 60°。



(a) 偏转前的加载示意图



(b) 偏转后的加载示意图

图 3 分级循环加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of step cyclic loading

试验采用位移控制的加载方式进行，加载速率为 1.0 mm/min。通过对试验噪音频率的分析，决定对信号采用 100~400 kHz 的带通滤波。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 数据处理

试验发现, 重复加载时, 砂岩的声发射特征参数 (累计能量、累计 AE 计数) 在声发射 Kaiser 点处并不是都有明显的陡增现象, 需要对首次加载的最大荷载值前后的一定范围进行搜索比较以确定岩石声发射 Kaiser 点。结合文献, 本文采用跳跃点法和相对斜率门槛法<sup>[13]</sup>相结合的方式来判断岩石 Kaiser 点。具体操作方法为:

首先规定搜寻范围为偏转后开始加载到第一次加载目标值之间。取声发射累计曲线  $f(t)$  上任意一点  $P(t_p, y_p)$ , 对其进行如下操作 (式中  $P$  表示声发射累计曲线上的一点;  $k$  表示计算点数;  $th$  表示门槛值;  $m$  表示斜率值;  $t$  表示时间;  $y$  表示累计能量计数;  $mn$  表示相对斜率值):

(1) 取  $k=10$ , 门槛值取  $th=0.2$ 。

(2) 计算曲线上  $P$  点处的左右 10 点割线斜率值:

$$m = \frac{f(p+k) - f(p-k)}{t_{p+k} - t_{p-k}} \quad (1)$$

(3) 计算曲线上所有点的斜率后, 以下式定义  $mn$  值:

$$mn = \frac{m - \min(m)}{\max(m) - \min(m)} \quad (2)$$

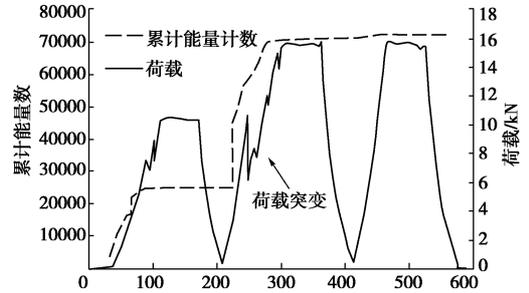
(4) 将整个曲线中, 第一个超过  $th$  值的  $mn$  所对应的  $P$  点视为 Kaiser 点。

文献<sup>[13]</sup>表明用声发射特征参数判定岩石 Kaiser 点时, 累计能量计数曲线中 Kaiser 点相对更清晰, 故本文使用累计能量计数曲线来判定岩石 Kaiser 点。累计能量计数是指声发射事件信号检波包络线下的面积, 反映事件的相对能量或强度<sup>[21]</sup>。如图 4, 5 所示, 分别为完整试件和含裂纹试件在不同偏转角度下偏转前后的累计能量计数 - 时间 - 荷载曲线图。其中红色虚线表示的是时间 - 累计能量计数曲线, 黑色实线表示的是时间 - 荷载曲线。图中  $A$  点表示偏转前最大荷载值对应点, 图中绿色圆圈对应点;  $B$  点表示偏转后的 Kaiser 点, 图中红色三角形对应点, 图中蓝色虚线表示的是  $B$  点即 Kaiser 点所对应的坐标值。

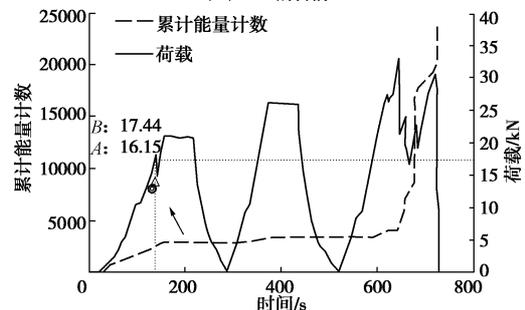
### 2.2 完整砂岩试件的声发射特性

如图 4 所示, 无论是偏转前还是偏转后, 都能明显地看到时间 - 荷载曲线呈锯齿状的突变现象 (图中箭头所指位置), 该现象主要出现在偏转前的第二次加载以及偏转后的第一次和第三次加载。结合累计能量计数曲线发现, 荷载突变时也大多是累计能量计数曲线出现拐点处, 即为可能的 Kaiser 点处。出现此现象

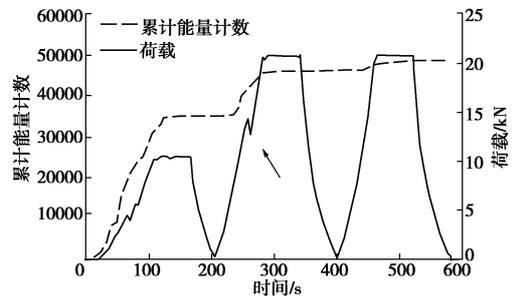
的原因就是因为 Kaiser 效应的存在, 此时新裂纹开始扩展, 累计能量计数猛增, 圆盘开始产生细微变形, 产生瞬间的卸荷, 不过随着裂纹的闭合, 荷载又开始回升。由图 4 可知, 这 5 组试件在偏转前第二次加载均有明显的 Kaiser 点, 故试件均有效。



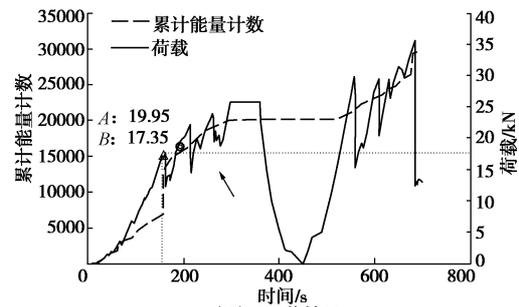
(a) A13偏转前



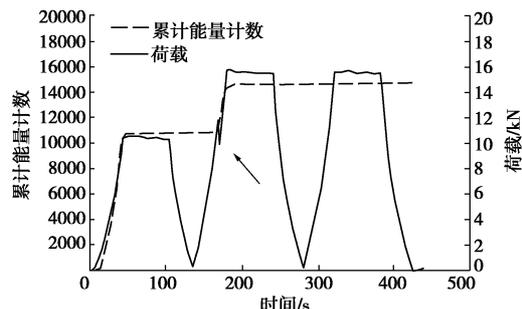
(b) A13偏转5°



(c) A21偏转前



(d) A21偏转10°



(e) A32偏转前

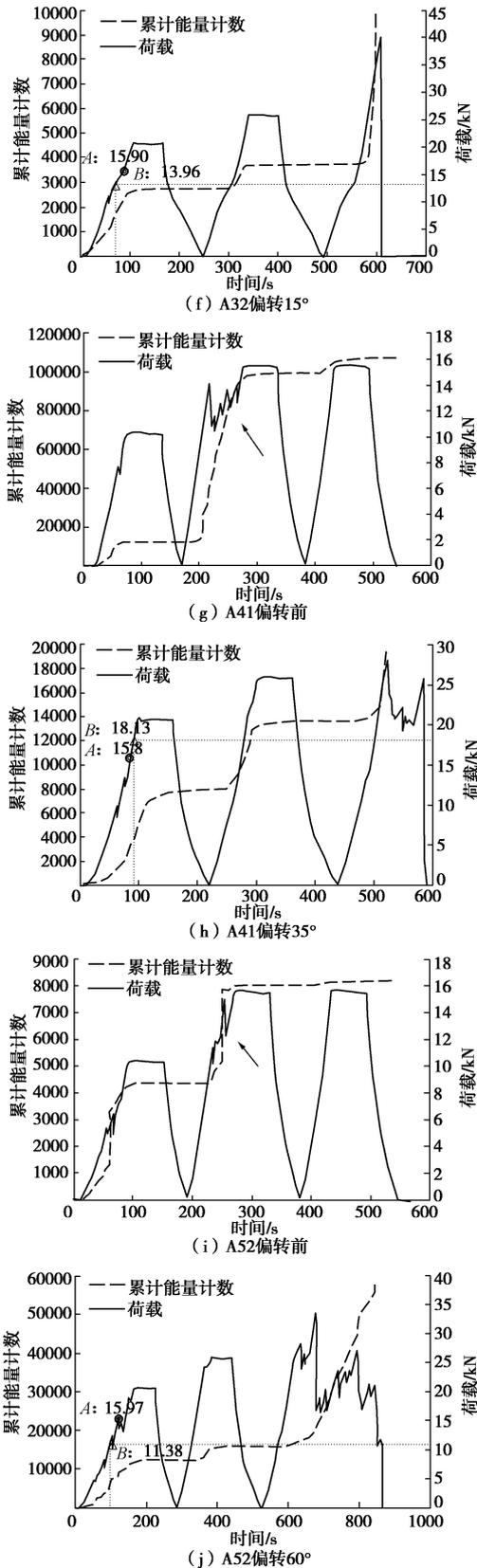


图4 完整试件在不同偏转角下偏转前后的累计能量计数-时间-荷载曲线

Fig. 4 Accumulated energy counting-time-load curves of intact specimens with different rotating angles before and after rotating

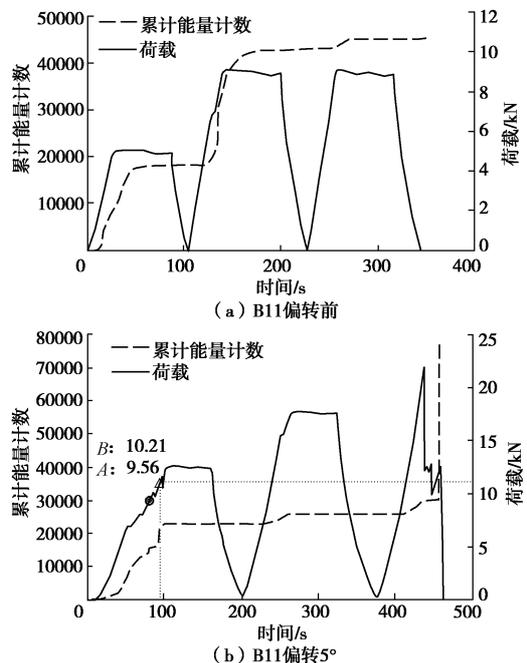
如图4(d), A21偏转10°时, 试件在第二次加载时直接被破坏, 此试件的理论破坏荷载值应该是30

kN左右, 但是在荷载值为20 kN时直接被压坏。其原因是此试件偏转前加载设置了较大的初始加载值(20 kN)。同一组的另外两个试件也设置了相同的偏转前最大初始荷载, 与偏转5°的试件组比较可知, 加大偏转前最大荷载会造成试件的疲劳破坏, 导致在未达到破坏荷载值时就已经破坏, 但是通过时间-累计能量计数曲线可知, 此试件的Kaiser效应存在, 说明此问题并不会影响岩石的Kaiser效应, 故并未排除。但是为了避免可能引起的误差, 后续岩石偏转前的最大荷载值均设置为15 kN。

总的来说, 完整试件在偏转5°, 10°, 15°时, Kaiser效应较为明显, 累计能量计数曲线上拐点也较为清晰; 偏转35°时, Kaiser效应模糊, 无法准确判定, 如图4(h); 偏转60°时, 如图4(j), Kaiser效应点明显不在对应的偏转前最大荷载处, 即Kaiser效应已经不存在。此现象表明完整试件的Kaiser效应随偏转角度的增大逐渐消失, 但是在偏转角度为15°以内时Kaiser效应存在。说明在小偏转角度下完整试件的Kaiser效应方向性不存在, 但大偏转角度下的Kaiser效应方向性存在。

### 2.3 含一条预制裂纹砂岩试件的声发射特性

如图5所示, 偏转后加载时也出现了明显的荷载突变现象, 原因与完整试件相同。可以看出随着偏转角的增大, 偏转后对应偏转前最大荷载的点与累计能量计数曲线的拐点之间的偏差越来越大, 直到Kaiser效应消失。偏转前的第二次加载并没有出现如完整试件所示的明显的荷载突变, 原因是预制裂纹的存在导致圆盘的破坏荷载降低, 试验时使用了较低的先期荷载, 使得新裂纹的产生数量大大减少, 未产生明显形变, 即荷载变化相对不明显。



(b) B11偏转5°

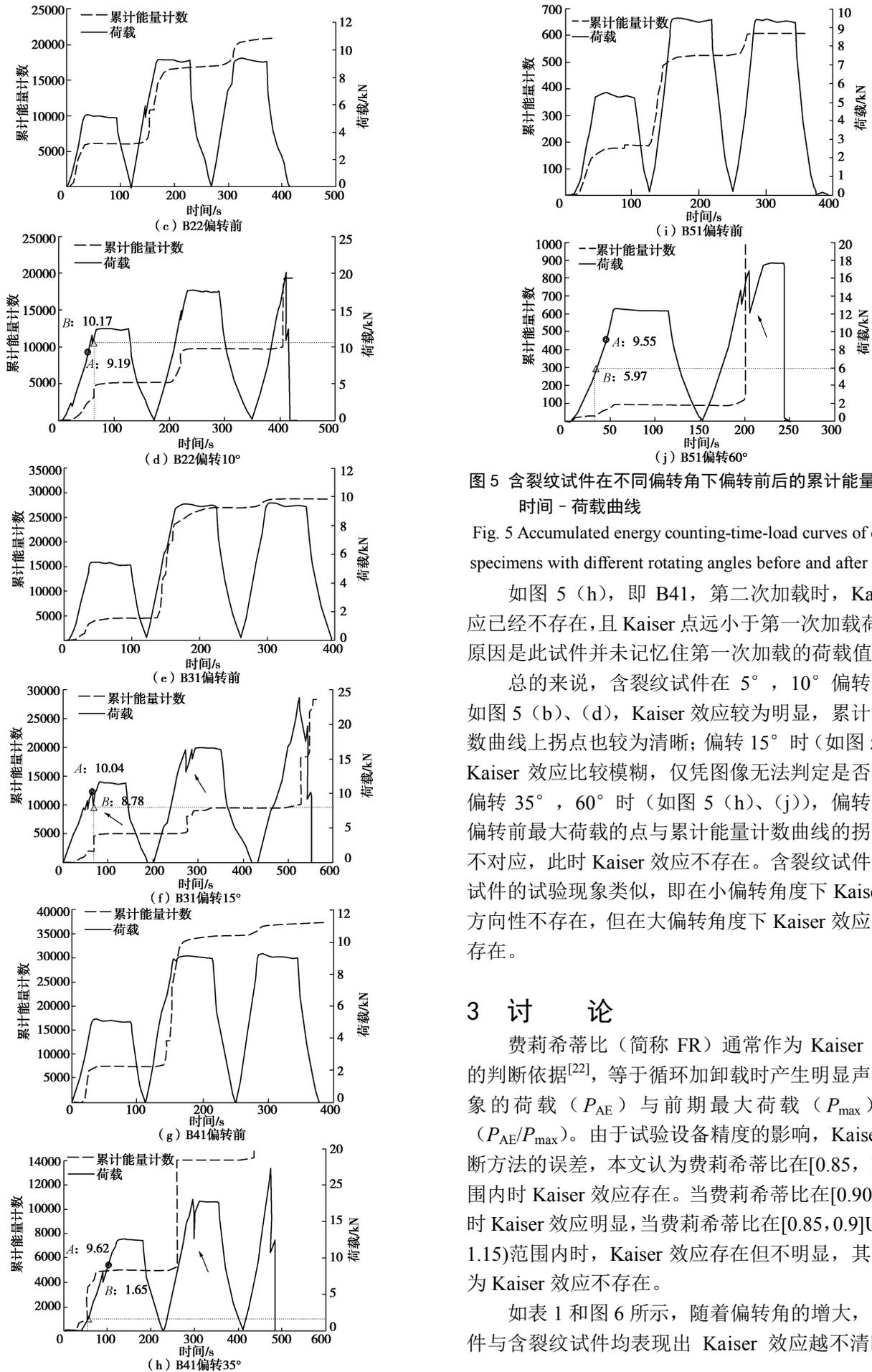


图 5 含裂纹试件在不同偏转角下偏转前后的累计能量计数 - 时间 - 荷载曲线

Fig. 5 Accumulated energy counting-time-load curves of cracked specimens with different rotating angles before and after rotating

如图 5 (h), 即 B41, 第二次加载时, Kaiser 效应已经不存在, 且 Kaiser 点远小于第一次加载荷载值, 原因是此试件并未记住第一次加载的荷载值。

总的来说, 含裂纹试件在 5°, 10° 偏转角时, 如图 5 (b)、(d), Kaiser 效应较为明显, 累计能量计数曲线上拐点也较为清晰; 偏转 15° 时 (如图 5 (f)), Kaiser 效应比较模糊, 仅凭图像无法判定是否存在; 偏转 35°, 60° 时 (如图 5 (h)、(j)), 偏转后对应偏转前最大荷载的点与累计能量计数曲线的拐点明显不对应, 此时 Kaiser 效应不存在。含裂纹试件与完整试件的试验现象类似, 即在小偏转角度下 Kaiser 效应方向性不存在, 但在大偏转角度下 Kaiser 效应方向性存在。

### 3 讨 论

费莉希蒂比 (简称 FR) 通常作为 Kaiser 效应点的判断依据<sup>[22]</sup>, 等于循环加卸载时产生明显声发射现象的荷载 ( $P_{AE}$ ) 与前期最大荷载 ( $P_{max}$ ) 之比 ( $P_{AE}/P_{max}$ )。由于试验设备精度的影响, Kaiser 点判断方法的误差, 本文认为费莉希蒂比在 [0.85, 1.15] 范围内时 Kaiser 效应存在。当费莉希蒂比在 [0.90, 1.10] 时 Kaiser 效应明显, 当费莉希蒂比在 [0.85, 0.9] U (1.10, 1.15) 范围内时, Kaiser 效应存在但不明显, 其余情况为 Kaiser 效应不存在。

如表 1 和图 6 所示, 随着偏转角的增大, 完整试件与含裂纹试件均表现出 Kaiser 效应越不清晰的趋

表1 岩石试件的FR值

Table 1 FR values for all rock specimens

试件状态	偏转角度	试件编号	偏转前的最大荷载 $P_{max}/kN$	偏转后 Kaiser 点荷载 $P_{AE}/kN$	FR 值	平均 FR 值	Kaiser 点明显程度
完整	5°	A11	15.95	16.49	1.03	1.00	明显
		A12	16.35	14.36	0.88		存在
		A13	16.15	17.44	1.08		明显
	10°	A21	19.95	17.35	0.87	0.93	存在
		A22	20.22	18.25	0.90		明显
		A23	19.83	20.35	1.03		明显
	15°	A31	15.22	14.35	0.94	0.95	明显
		A32	15.91	13.96	0.88		存在
		A33	16.01	16.70	1.04		明显
	35°	A41	15.88	18.13	1.14	0.86	存在
		A42	15.64	13.25	0.85		存在
		A43	16.02	9.36	0.58		不存在
	60°	A51	16.12	10.95	0.68	0.67	不存在
		A52	15.97	11.38	0.71		不存在
		A53	15.65	9.76	0.62		不存在
含一个预制裂纹	5°	B11	9.56	10.21	1.07	0.95	明显
		B12	9.74	8.85	0.91		明显
		B13	10.21	9.02	0.88		存在
	10°	B21	9.19	10.17	1.11	1.12	存在
		B22	9.35	11.12	1.19		不存在
		B23	9.67	10.15	1.05		明显
	15°	B31	8.78	10.04	1.14	0.93	存在
		B32	9.45	8.04	0.85		存在
		B33	9.58	7.54	0.79		不存在
	35°	B41	9.62	1.65	0.17	0.53	不存在
		B42	9.89	6.36	0.64		不存在
		B43	9.96	7.78	0.78		不存在
	60°	B51	9.55	5.97	0.63	0.66	不存在
		B52	10.23	6.95	0.68		不存在
		B53	9.66	6.43	0.67		不存在

势，通过 FR 值的对比可以看出：

(1) 完整试件在偏转角为 5°，10°，15° 时具有明显的 Kaiser 效应；在偏转角为 35° 时仅有 A43 试件的 Kaiser 效应不存在，另外的 A41、A42 的 Kaiser 效应均存在；当偏转角为 60° 时，所有试件的 Kaiser 效应均不存在。

(2) 含有一个预制裂纹的试件在偏转角为 5° 时 Kaiser 效应明显；当偏转角为 10° 和 15° 时，各有一组 Kaiser 效应不存在，分别为 B22 和 B33；当偏转角度达到 35° 和 60° 时，Kaiser 效应均不存在。

(3) 如图 6，蓝色实线之间的范围表示 Kaiser 效应存在。从平均 FR 值可以看出，完整试件在偏转角为 35° 时 Kaiser 效应还存在，在偏转角为 60° 时 Kaiser 效应消失；含裂纹试件在偏转角为 15° 以内时 Kaiser 效应存在，在偏转角为 35° 和 60° 时均表现为 Kaiser 效应消失。

综上，随着偏转角度的增大，Kaiser 效应逐渐模糊直至消失，但是在小偏转角度下 Kaiser 效应依然明显，由此可知偏转后砂岩对偏转前的历史荷载有记忆

性，随着偏转角度的增大，这种历史记忆性的影响不断地减弱，直至消失。含裂纹试件 Kaiser 效应随偏转角度的增加消失的规律更加明显，且均表现为偏转后的 Kaiser 点荷载远小于其偏转前的最大荷载。

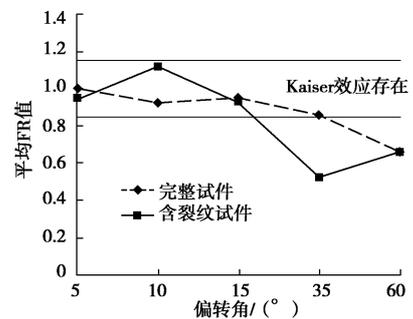


图6 不同偏转角度下完整试件和含裂纹试件的平均FR值  
Fig. 6 FR average values of complete and cracked specimens with different rotating angles

#### 4 结论与建议

对重庆砂岩圆盘试件进行不同荷载方向偏转下

的声发射试验研究, 对比分析了完整试件和含一条预制裂纹试件的砂岩声发射 Kaiser 效应方向性变化规律。主要结论如下:

(1) 无论是完整圆盘试件还是含裂纹试件, 随着第二次荷载偏转角度的增大, Kaiser 点的清晰程度逐渐降低, 直至消失。表明荷载偏转角度对砂岩 Kaiser 点确有明显的影响, 即砂岩 Kaiser 效应方向性随偏转角度的增大而逐渐显现。

(2) 完整试件在偏转角度为  $15^\circ$  及其以下时, Kaiser 效应存在; 偏转角为  $35^\circ$  时, 只有一个试件的 Kaiser 效应不存在; 偏转角为  $60^\circ$  时, Kaiser 效应消失。含有一条预制裂纹试件在偏转角度为  $5^\circ$  时, Kaiser 效应存在, 偏转角为  $10^\circ$  和  $15^\circ$  时, 分别有一个试件的 Kaiser 效应不存在; 偏转角为  $35^\circ$  和  $60^\circ$  时, Kaiser 效应消失。相对于完整圆盘试件来说, 含裂纹试件的 Kaiser 效应消失得更快更明显, 笔者认为可能的原因为预制裂纹的扩展先于试件中新裂纹的扩展。

岩石 Kaiser 效应的方向性问题存在与否影响岩石 Kaiser 效应测地应力的准确性判断。通过本文的试验研究证明了砂岩 Kaiser 效应方向性确实存在。但是由于材料与方法的局限性, 并不能说明其他种类岩石的 Kaiser 效应方向性也一定存在, 还需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, **74**(4): 487 - 490.
- [2] KAISER J. Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von gerauschen bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen[J]. Archiv Für Dassenhüttenwesen, 1953, **24**(1/2): 43 - 45.
- [3] BARR S P, HUNT D P. An elastic strain recovery and the Kaiser effect retention span in the carmenellisgranite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, **32**(3): 169 - 193.
- [4] 姜永东, 鲜学福, 许 江. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(6): 946 - 950. (JANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, XU Jiang. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial stress in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(6): 946 - 950. (in Chinese))
- [5] 赵 奎, 闫道全, 钟春晖, 等. 声发射测量地应力综合分析方法与试验验证[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1403 - 1410. (ZHAO Kui, YAN Dao-quan, ZHONG Chun-hui, et al. Comprehension analysis method and experimental verification for in-situ stress measurement by acoustic emission tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1403 - 1410. (in Chinese))
- [6] MICHIIHIRO K, FUJIWARA T, YOSHIOKA H. Study on estimating geostresses by the Kaiser effect of AE[C]// The 26th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Rapid City: American Rock Mechanics Association, 1985: 557 - 564.
- [7] KANAGAWA T, HAYASHI M, NAKASA H. Estimation of spatial geostress components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission[C]// Proceedings of the Third Acoustic Emission Symposium. Tokyo, 1976: 229 - 248.
- [8] HOLCOMB D J. Using acoustic emission to determine in situ stress: problems and promise[J]. Geomechanics, ASME, AMD, 1983, **57**: 11 - 21.
- [9] 谢 强, 江小城, 余贤斌, 等. 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, **35**(10): 1627 - 1632. (XIE Qiang, JIANG Xiao-cheng, YU Xian-bin, et al. Influence of rotation angle of principal stress axes between loading cycles on aplite granite's Kaiser effect[J]. Journal of the China Coal Society, 2010, **35**(10): 1627 - 1632. (in Chinese))
- [10] 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 Xiao-cheng, 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))
- [11] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 花岗岩 Kaiser 效应的试验验证与分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, **28**(2): 254 - 257. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-fu, et al. Experimental verification /analysis of Kaiser effect in Granite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2007, **28**(2): 254 - 257. (in Chinese))
- [12] 黄志鹏, 朱可善, 郭映忠. 岩石 Kaiser 效应方向独立性试验研究[J]. 长江科学院院报, 1998, **15**(2): 9 - 10, 46. (HUANG Zhi-peng, ZHU Ke-shan, GUO Ying-zhong. Experimental study on rock Kaiser effect's direction independence[J]. Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, **15**(2): 9 - 10, 46. (in Chinese))

- [13] 江小城. 加载方向对岩石 Kaiser 效应的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. (JIANG Xiao-cheng. Effect of rotation of the second loading cycle on Kaiser effect of rock acoustic emission[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese))
- [14] 杨卫. 加载方向变化对 Kaiser 效应影响的试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013. (YANG Wei. Experimental research about effect of loading direction on Kaiser effect[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [15] 阎南. 岩石 Kaiser 效应方向独立性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008. (YAN Nan. Study on rock Kaiser effect's direction independence[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [16] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 308 - 316. (LIU Kai-de, LIU Quan-sheng, ZHU Yuan-guang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under Brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 308 - 316. (in Chinese))
- [17] 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 Xiao-qiong, GE Hong-kui, SONG Li-li. Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and Kaiser effect point recognition approach[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(3): 580 - 588. (in Chinese))
- [18] 侯鹏, 高峰, 杨玉贵, 等. 考虑层理影响页岩巴西劈裂及声发射试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(6): 1603 - 1612. (HOU Peng, GAO Feng, YANG Yong-gui, et al. Effect of bedding plane direction on acoustic emission characteristics of shale in Brazilian tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(6): 1603 - 1612. (in Chinese))
- [19] LAVROV A, VERVOOTR A, WEVERS M, et al. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, **39**(3): 287 - 302.
- [20] 向宝山. 巴西试验改进方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (XIANG Bao-shan. Research on improvement of brazilian test[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [21] 李核归, 张茹, 高明忠, 等. 岩石声发射技术研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(增刊 1): 1794 - 1804. (LI He-gui, ZHANG Ru, GAO Ming-zhong, et al. Advances in technology of Acoustic emission of rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(S1): 1794 - 1804. (in Chinese))
- [22] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(4): 333 - 351.