

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.005

# 基于 Kaiser 效应的地应力测试研究

田峰亮, 祝方才, 唐文彪, 刘丙肖

(湖南工业大学 岩土工程研究所, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 通过分析 Kaiser 效应测量地应力时参数的选取, 研究 Kaiser 点测试时表现的模式, 得出了重复加载条件下 Kaiser 点的确定方法, 分析了 Kaiser 点的误差。所得结果与其他方法得出的结果有较好的一致性, 从而验证了 Kaiser 效应测试地应力的可靠性。

**关键词:** 声发射; Kaiser 效应; 地应力; 重复加载

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0021-04

## In-Situ Stress Test Based on Kaiser Effect

Tian Fengliang, Zhu Fangcai, Tang Wenbiao, Liu Bingxiao

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Through the analysis of parameter selection at in-situ stress testing by Kaiser effect, studies the modes of Kaiser point testing and obtains the determination method of Kaiser points under repeated loading. Analyzes the error of Kaiser points, and the achieved results are accordance with the existing ones from other methods, thus verifies the validity of in-situ testing by Kaiser effect.

**Keywords:** acoustic emission; Kaiser effect; in-situ stress; repeated loading

声发射 Kaiser 效应是间接测定地应力的一种代表性方法, 目前对 Kaiser 效应点的确定方法、Kaiser 点的围压效应、测定 Kaiser 点时试样的加载速率和 Kaiser 时间效应等方面的研究较多。A. Lavrov<sup>[1]</sup>对 Kaiser 效应测量地应力进行了较全面的总结, 分析了 Kaiser 效应存在的问题, 提出了研究的方向。一般认为, 脆性岩石具有较好的 Kaiser 记忆效应<sup>[2]</sup>。本文针对某矿山地应力测试过程中, Kaiser 效应测量地应力的相关问题进行研究。

### 1 声发射测试过程相关参数确定

用 Kaiser 效应测试时, 声发射参数的选择是确定 Kaiser 点的关键。声发射的数据统计方法主要有

声发射事件数和声发射振铃数 2 种<sup>[3]</sup>。声发射的统计除以上 2 种方法外, 还有对声发射的能量和频率的研究方法<sup>[4]</sup>。图 1 和图 2 分别为声发射信号的事件计数和振铃计数示意图。

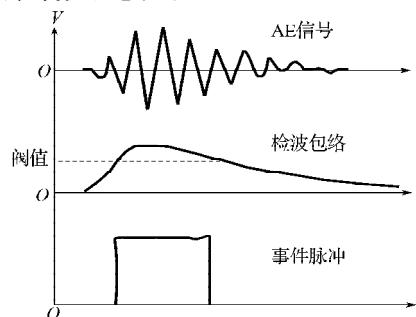


图1 声发射信号的事件计数示意图

Fig. 1 AE events diagram

收稿日期: 2012-07-03

作者简介: 田峰亮 (1987-), 男, 河南省安阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为边坡和隧道稳定, 岩石力学,

E-mail: tfl2010henan@126.com

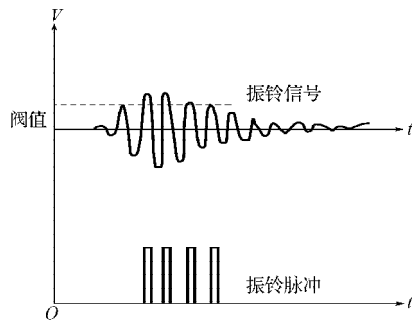


图2 声发射信号的振铃计数示意图

Fig. 2 AE hits diagram

比较图1和图2可知,当进行Kaiser效应测量地应力时,声发射振铃数能更全面地反映声发射信号的强弱程度。

### 1.1 声发射的噪音控制

由于噪音的影响,在声发射测试时需要选择合适的门槛增益和滤波参数等。声发射测试往往要在各种噪音环境中进行,现场测试虽然较实验室测试环境要好(噪音相对较小),但也存在爆破作业,装卸作业,机车运行等带来的机械或电器噪音等。相对来说,室内噪音较大,室内的声发射试验主要有3类噪音:1)机械噪音,主要包括试样与传感器端部摩擦、机械振动,其频率较低,通常在50 kHz以下;2)液体噪音,主要来自液压油脉动,频率在100 kHz~1 MHz之间;3)电器噪音,其频率更高。针对以上问题,特选用中南大学的流变仪为加载仪器,采用机械传动方式,噪音较小,可通过调整声发射仪器的门槛值将其排除;由于其采用机械传动故液体噪音更小,可不予考虑;电器的噪音主要来源于流变仪的控制柜,其柜是全封闭的且距离声发射探头的距离较远,通过调整声发射的门槛值将其排除。

### 1.2 加载参数的选取

声发射测试原岩应力时,可采用位移加载<sup>[3,5]</sup>或力加载2种模式<sup>[3,6-7]</sup>,后者较常用。位移加载速率取为0.008 mm/s。冯英<sup>[3]</sup>按照岩石试验规程<sup>[8]</sup>取力加载速率为0.05 MPa/s,张广清等人<sup>[6]</sup>取力加载速率为0.05 MPa/s,李宏等人<sup>[7]</sup>取力加载速率为0.008 MPa/s。总的说来,力加载速率的选择要结合岩石试验规程<sup>[8]</sup>并考虑声发射测试信号的可辨别性等,还要综合考虑原岩应力大小、岩石强度来确定。加载装置为RYL-600岩石流变仪,声发射探头在100~500 kHz的范围内有较好的灵敏度。本次试验采用前放40 dB、主放40 dB,共计80 dB,模拟滤波器频率为20~100 kHz,AE计数系统采用美国物理声发射仪器,记录声发射采集的数据能精确到纳秒级。

## 2 加载测试过程

根据相关文献<sup>[3,6-7]</sup>,考虑声发射的可辨别性,取力加载为加载控制方式,加载速率为0.05 MPa/s,具体步骤如下:

1) AE试验探头与试样之间的耦合剂选择真空脂,并用胶带将其固定在试件上,在试件两端放置滤纸。

2) 同时启动加载装置和记录装置,专门试验人员在仪器边负责监视,观察试件的变形和破坏的情况。通过位移加载并通过力作为控制指标给试件预压一个力使应力达到0.3 MPa。预压的目的是将加载初期的声发射过滤掉。

3) 初始调整后,将加载装置处于力加载控制状态,在试件中部、端部附近进行断铅测试,达到前述断铅声发射特征,以确保测试系统声发射参数设置较为合理。

4) 确定反复加载方式,反复加载应力是试件采取深度和岩性推定的假想垂直应力的2.0~3.0倍,预压加载力控制在0.3 MPa左右,第一次加载到预估应力的1.0倍,第2次加载到预估应力的1.5倍左右,第3次加载到预估应力的2.5~3.0倍,卸载后的应力值设定为0.3 MPa。

5) 记录声发射发生时刻、振铃数、最大振幅、持续时间和上升时间等,作为Kaiser点判断的依据。

6) 加载结束后,进行AE特性参数分析,根据AE特性参数的变化与加载应力的关系推断原岩应力。以声发射振铃数为主,综合考虑幅值和能量及持续时间等参数,结合试件是否发生局部破坏等综合确定Kaiser点。

## 3 Kaiser点的确定

确定Kaiser点的模式有一次加载法和重复加载法。由于抹录不净等因素常采用循环加载<sup>[5]</sup>等方法来确定Kaiser效应点。

### 3.1 Kaiser点位置的判定

在实际测试过程中,发现并判定Kaiser点是一个复杂的过程。Kaiser认为,在试件达到原岩应力场时,声发射出现突增,因此原则上认为Kaiser效应点应该为一固定值,在重复加载时,由于试件加工及节理、裂隙等因素,导致声发射突增点不完全固定,测出的声发射Kaiser点不完全恒定。解决的方法是,一方面通过设置合适的声发射参数保证有合适数量的声发射,另一方面是综合多种因素确定声发射突增点,分析重复加载时的声发射撞击数、幅值、能量、

持续时间与应力之间的关系。通过多次试验, 相当一部分试件在加载时呈现出如下声发射特征:

模式 1 初次加载和重复加载时都出现比较明显的声发射突增点, 从声发射图形就可以大致地判断出 Kaiser 点, 初次加载的 AE 急剧增点对应的为原岩应力。

模式 2 初次加载声发射不明显, 确定 Kaiser 点较为困难, 需要综合考虑声发射特征, 重复加载时

声发射突增点很明显, 易于确定 Kaiser 点, 并由此综合确定原岩应力。

模式 3 初次加载和重复加载声发射突增点均不明显, 需通过声发射图形和声发射特征综合判定, 推断出每次加载的 Kaiser 点后确定出对应的应力, 取其平均值即为原岩应力估计值。上述 3 种模式的结果见图 3~5, 图中的竖向箭头↓表示判断出的 Kaiser 点。

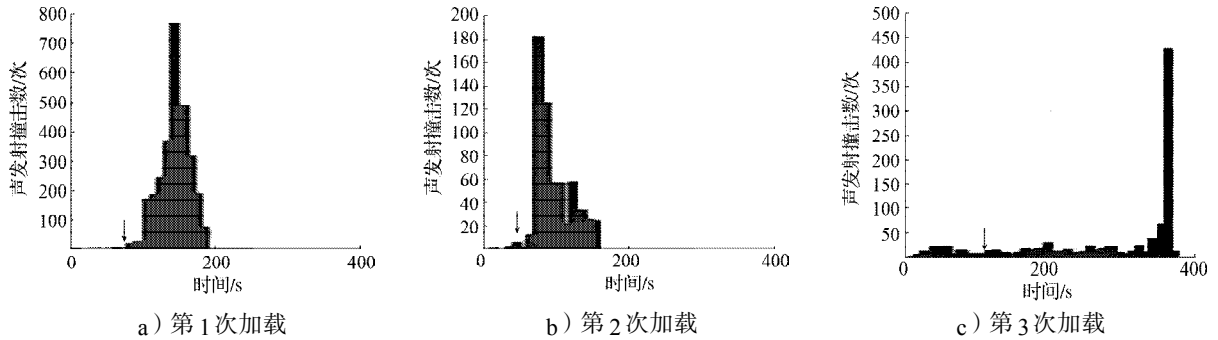


图 3 声发射模式 1

Fig. 3 The 1st mode of acoustic emission

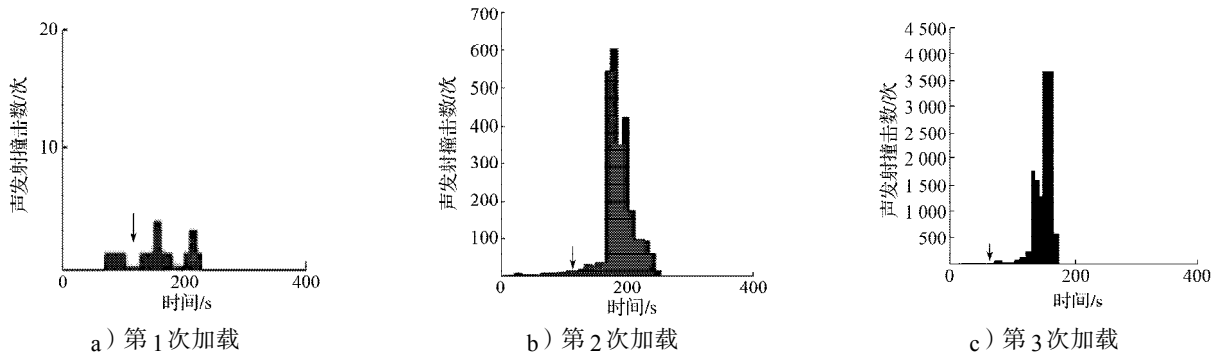


图 4 声发射模式 2

Fig. 4 The 2nd mode of acoustic emission

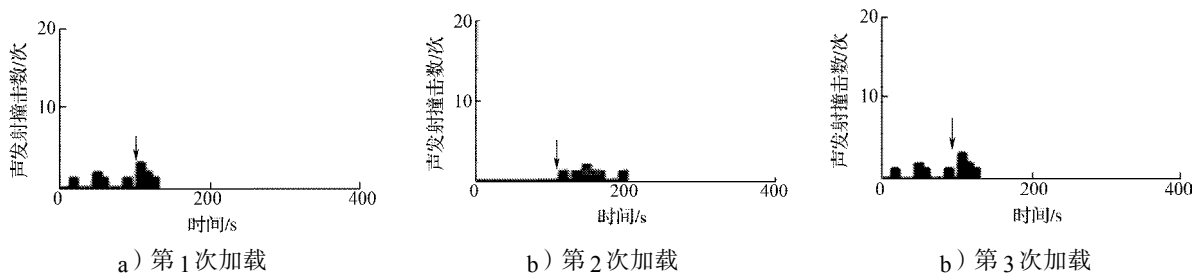


图 5 声发射模式 3

Fig. 5 The 3rd mode of acoustic emission

用声发射 Kaiser 法测试原岩应力时, 由于试件存在本身及加工的缺陷, 导致不容易判断 Kaiser 点。在测试过程中, 为较好地克服试件本身导致的声发射, 在加载过程中, 一方面通过判断是否为试件局部破裂导致的声发射来避免误判; 另一方面通过多个试件重复加载的方法得出对应的原岩应力值依此进行

平均, 从而得出大致准确的原岩应力。

一般认为, 竖直应力为原岩应力场中的其中一个主应力, 因此 1 个主应力方向已确定, 三维问题简化为平面问题, 水平方向的主应力即可按照岩芯定位来确定, 并可根据平面应力状态解析法确定 2 个主应力。

### 3.2 Kaiser 点的误差分析

在确定 Kaiser 点时,采用重复加载方式,采用振铃数和能量激增来判断 Kaiser 点,因此在重复加载情况下,一般来通过 Kaiser 对应应力的平均值来确定地应力,如图 6 所示。

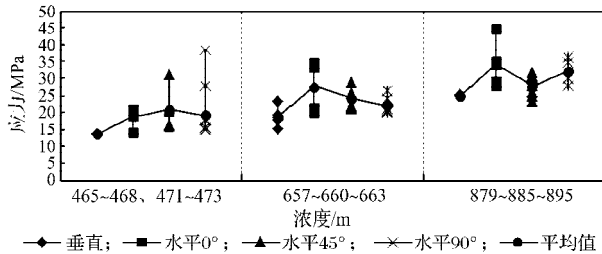


图6 某测点的应力误差分析

Fig. 6 Analysis of in-situ stress error through Kaiser effect

## 4 结论

基于 Kaiser 效应测量地应力是目前常用的地应力测试方法,测试过程中,声发射参数的确定以及试样加工的质量对测试结果有较大影响。笔者结合某矿山的地应力测试项目对 Kaiser 效应确定地应力进行了研究,得出了与实际相吻合的结果。该矿区的 3 个主应力均随深度增大呈现出逐渐增大的趋势,但不是直线增大,带有波动不定特征,这可能与局部构造的影响有关。大部分数据表明,垂直应力为最小主应力,在 2 个水平主应力中,中间主应力与最大主应力的差别并不悬殊,结果与相关文献研究的定性结果相似<sup>[9-10]</sup>。需要指出的是,笔者对于声发射的围压效应尚未进行深入研究。

由于 Kaiser 效应测量地应力具有可在室内测量等优越性,从而被人们重视。Kaiser 效应点的确定是这一方法成功的关键,本文通过近 300 余块试样的测试,得出了某矿区的地应力测试结果,具体如下:

1) 重复加载相对一次加载来说更适合确定 Kaiser 点,主要原因是试样加工精度不够、初始压密及表面裂缝等。

2) Kaiser 点应力的确定采用平均方式效果更好,原因是 Kaiser 点的判别存在一定的人为因素和仪器影响。

3) 在 Kaiser 效应测试时,合理的频宽设置以及前置放大倍数选取和探头与试样的耦合是保障试样成功的重要因素。

### 参考文献:

[1] Lavrov A. The Kaiser Effect in Rocks: Principles and Stress

- Estimation Techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [2] Fuentealba J F, Galleguillosa R, Vargas-Hernández Y, et al. Stress Memory Lasting in Composite Materials[J]. Physics Procedia, 2010, 3(1): 873-881.
- [3] 冯英. 岩石声发射 Kaiser 效应测定地应力研究及工程应用[J]. 焦作工学院学报, 1997, 16(4): 12-16.  
Feng Ying. Research on Measuring Initial Stress by Kaiser Effect of Acoustic Emission and Its Application[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1997, 16(4): 12-16.
- [4] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1593-1603.  
Miao Jinli, He Manchao, Li Dejian, et al. Acoustic Emission Characteristics of Granite Under Strain Rockburst Test and Its Micro-Fracture Mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1593-1603.
- [5] 唐绍辉. AE 法地应力测量技术在金属矿山中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(4): 18-20.  
Tang Shaohui. Application of AE-Based Ground Stress Survey Technology in Metallic Mines[J]. Mining Research and Development, 2002, 22(4): 18-20.
- [6] 张广清, 金衍, 陈勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360-363.  
Zhang Guangqing, Jin Yan, Chen Mian. Measurement of In-Situ Stresses by Kaiser Effect under Confining Pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 360-363.
- [7] 李宏, 张伯崇. 北京房山花岗岩原地应力状态 AE 法估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1349-1352.  
Li Hong, Zhang Bochong. In-Situ Stress Measurement of Fangshan Granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1349-1352.
- [8] 中华人民共和国电力工业部. GB/T50266—1999 工程岩体试验方法标准[S]. 中国计划出版社, 1999: 17.  
The People's Republic of China Ministry of Power Industry. GB/T 50266—1999 Standard for Test Methods of Engineering Rock Mass[S]. China planning press, 1999: 17.
- [9] 董树文, 高锐, 吕庆田, 等. 庐江—枞阳矿集区深部结构与成矿[J]. 地球学报, 2009, 30(3): 279-284.  
Dong Shuwen, Gao Rui, Lv Qingtian, et al. Deep Structure and Ore-Forming in Lujiang-Zongyang Ore Concentrated Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 30(3): 279-284.
- [10] 梁国平, 丁健民. 郯城—庐江断裂带附近的地壳应力场特征[J]. 地壳形变与地震, 1982(4): 51-53.  
Liang Guoping, Ding Jianmin. The Characteristics of Crustal Stress Field Near Tancheng-Lujiang Fault Zone[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1982(4): 51-53.

(责任编辑: 邓光辉)