

# 声发射测量地应力方法中 Kaiser 点确定方法的 优选与分析

倪纯博<sup>1</sup> 张广清<sup>1</sup> 贾久波<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京),北京 102249; 2. 新疆油田公司工程技术处,新疆克拉玛依 834000)

**【摘要】** 准确确定 Kaiser 点是研究声发射测量地应力的关键。通过对模拟岩心的水泥块进行单轴受压破坏过程的声发射试验,得到了试件在试验过程中的应力-应变曲线、应力、声发射强度、声发射累积数与时间的关系图。分别对试样用突变点法、最大曲率法、双切线法、重加载法(抹录不尽现象、两次加载相减法)、多方面综合判定法以及声发射强度信号的统计分析法进行了分析。从不同的方面认识了试样的 Kaiser 点的特性,总结并分析了确定 Kaiser 点的方法以及各自的适应性,并进行了优选。研究表明,试验确定了试样的物理特性,各种方法都能从不同角度和机理上解释 Kaiser 点现象,综合判定法能相对更加全面、准确地确定 Kaiser 点。

**【关键词】** 地应力;测量;声发射;Kaiser 效应

**【中图分类号】** TU 455

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2014.03.007

## Optimization and Analysis of the Method to Determine Kaiser Point of the Method to Measurement to Stress by Acoustic Emission

Ni Chunbo<sup>1</sup> Zhang Guangqing<sup>2</sup> Jia Jiubo<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Engineering and Technology Department of Xinjiang Oilfield Company, Kelayi 834000, Xinjiang, China)

**【Abstract】** The key of the study of acoustic emission measurement of in-situ stresses is to properly determine the Kaiser point. Through the simulation of core concrete in uniaxial compression failure process of acoustic emission test, the stress-strain curve, the relationships between stress, intensity and cumulant of acoustic emission with time of the specimens in the test process are obtained. The specimens are analyzed respectively with mutation point, maximum curvature method, double tangent method, again loading method (incomplete erasion phenomenon, two loading phase subtraction) various comprehensive judgement method and statistical analysis method of acoustic emission signal intensity. Understands the characteristics of Kaiser point of the specimens, summarizes and analyzes the methods to determine the Kaiser point and their adaptability, and was optimized. Research shows that the test can determine the sample physical properties, various methods can explain the phenomenon of Kaiser point from different angle, various comprehensive analysis will be more comprehensive to determine Kaiser point.

**【Key words】** in-situ stresses; measurement; acoustic emission; Kaiser effect

### 0 引言

地下工程的破坏和失稳大都是由原岩应力引起的,因此原岩应力对地下工程的稳定及其安全性评价具有重要意义。地应力测量的理论方法及其在实际情况中的应用现在都得到了高速地发展。目前测量地应力方法有液压盒法、扁千斤顶法、应力或应变解除法、钻孔崩落法、声发射法和水压致裂法等<sup>[1]</sup>,其中应力(应变)解除和水压致裂法是目前应用较广

泛的测量方法。但是这些方法(声发射除外)都是在现场完成的,需要较大的工作量和较为复杂的工艺,在一定程度上限制了其在测量地应力过程中的使用。声发射测量地应力是一种操作简便、速度快、成本低、现场作业量少的方法,在地应力的测量中得到广泛应用<sup>[2-4]</sup>。岩石声发射技术还是一门理论研究落后于工程实际的少数学科之一<sup>[5]</sup>。掌握声发射的原理,更为准确地确定 Kaiser 点对研究声发射测量

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51322404/51274216); 优秀青年科学基金项目(51322404); 国家科技重大专项(2011ZX05037-004, 2011ZX05044, 2011ZX05013-004); 中国石油大学(北京)基金资助(OIJB0186)

**作者简介:** 倪纯博, 1988 年生, 男, 汉族, 湖北孝感人, 2012 年毕业于中国石油大学(北京), 在读硕士研究生, 从事岩石力学研究。E-mail: nichunbocup@126.com

地应力尤为重要。

岩石对所受载荷的最大值具有“记忆”效应,将取自地下的岩样在实验室条件下进行加载,当外力增加到一定程度时,在有裂纹的缺陷区域会产生微观屈服和变形,同时释放出部分能量,声发射强度可以反映岩样破坏的全过程<sup>[6-7]</sup>,观察实验中声信号的变化,可以确定突变点,即 Kaiser 点。可以以此来确定岩样在地下所受的地应力<sup>[8]</sup>。对于较深地层,可以利用围压作用下岩石的 Kaiser 效应来测量地应力<sup>[9]</sup>。

1950年德国学者凯泽首先发现了多晶金属的 Kaiser 效应<sup>[10]</sup>现象,1963年著名的岩石力学专家 Goodman 首次提出了岩石也具有 Kaiser 效应,即岩石具有记忆先前应力的能力,由此拉开了岩石 Kaiser 效应研究的序幕。国外学者 G. M. Boyce 用声发射方法研究了各类岩石中的历史最大应力<sup>[11]</sup>。Kaiser 现象在大多数岩石中表现得并不明显,1995年 H. W. Shen<sup>[12]</sup>提出了支点法,并且在 Kaiser 点附近的近似直线段作两条切线,把交点作为 Kaiser 点,即双切线法。M. Momayez<sup>[13]</sup>提出了最大曲率法,即声发射响应曲线的最大曲率点作为 Kaiser 点。Y. L. Filimonov 等<sup>[14]</sup>提出了重复加载法,在实验中在应力较低的阶段进行重复加载,Kaiser 点会得到较为明显地显现。薛亚东<sup>[15]</sup>提出了 R/S 统计分析法,通过对岩石声发射信号重标区间(R/S)分析,将赫斯特指数  $H=0.5$  为确定声发射试验中的 Kaiser 点。赵奎<sup>[16]</sup>利用小波分析对岩石声发射 Kaiser 点信号进行频谱分析,通过分析 Kaiser 点声发射信号的波形来确定 Kaiser 点。丁原辰等<sup>[17]</sup>提出了“视 Kaiser 效应”的概念,声发射试验中可以得到两个 Kaiser 点,一个 Kaiser 点对应于引起岩石饱和和残余应变的应力,它与当前的应力场相一致,因此称为视 Kaiser 点,在视 Kaiser 点之后,还可得到另外一个真正的 Kaiser 点,它对应于岩石历史最高的应力。

上述确定 Kaiser 点的方法有一定的局限性和适应条件。突变法具有较大的个人主观性,误差会比较大。由于得到的信号比较直接,适用于对 Kaiser 点进行初步判断;最大曲率法对于拐点不明显的曲线会出现比较大的误差;对于双切线法,对曲线进行拟合以及作曲线的切线都会存在较大的误差;对于不同的岩石,其抹录不尽现象的强弱不同,在某些岩样的声发射曲线中很难找出抹录不尽点。对不同确定 Kaiser 点的方法的机理进行总结和研究,由此提出更为全面、准确地确定 Kaiser 点的方法具有重要的意义。

本文通过用水泥块模拟地层岩心做单轴声发射

的试验,对试验数据进行了分析,将确定 Kaiser 点的方法进行了分析、总结和优选。较为全面地认识了声发射的 Kaiser 点的特点,运用更为综合、全面的方法确定 Kaiser 点。

## 1 实验方案设计

实验使用水泥和石英砂浇筑外形尺寸一定的正方体模拟试样,然后钻取圆柱状试样,其直径为 25 mm,高 50 mm(国际岩石力学实验标准)。加砂比按 1:1(质量比)进行,水泥牌号为 425 建筑水泥,砂子为细河砂。

实验所使用的装置如图 1 所示:包括三轴试验架、声发射探头、围压装置、Locan-AT14 声发射仪、MTS 电液伺服控制加载系统以及其他辅助装置。声发射探头用于探测试样受载过程中产生的声发射信号。Locan-AT14 声发射仪可将接收的声发射信号进行处理,并可以给出声发射数、声发射能量的变化曲线。

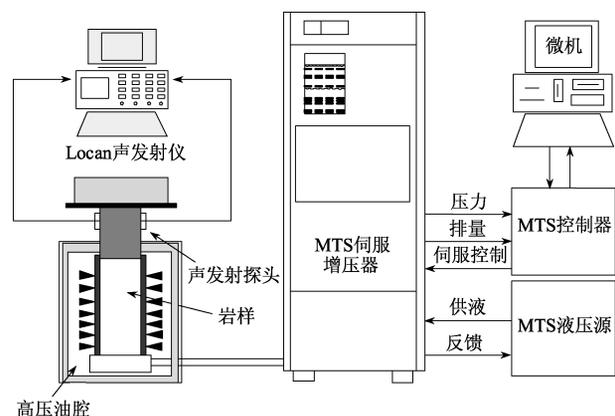


图 1 实验装置图

实验所需要得到的实验参数为 6 组对应关系,即加载时间和振铃计数率的关系、加载时间和轴向力之间的关系、加载时间和应力之间的关系、加载时间和声发射累积次数之间的关系、应力与轴向应变和径向应变的关系,以及声发射强度对时间的统计关系。

首先对试样进行不同应力大小和加载条件下的预加载,加载的形式分为一次加载、两次加载和循环加载。用以模拟处于不同地应力情况下地层中的岩石试样。然后再对加载后的试样做声发射实验,加载形式也分为一次加载和两次加载,最后加载至试件破坏。在对试样进行预加载前通过对两块试件做加载至破坏的试验来确定相关参数,如加载速率、岩石的强度等,以便确定试样的前期加载应力。加载、卸载速率为(控制变形)为 0.035 mm/s,加载方式为单轴加载。实验的具体方案见表 1。

表 1 实验方案

预加载		声发射实验过程			
加载条件	加载应力 /MPa	加载条件	试件个数	卸载时应力 /MPa	试件编号
一次加载	至破坏	一次加载	2		1,2
	22		2		3,4
	12	二次加载	2	22	10,11
	22		2	28	5,6
32	2	33	7,8		
二次加载	32	一次加载	1		9
	22	二次加载	1	33	12
循环加载	32~22	一次加载	1		14
		二次加载	1	33	15

注:①试件 13 在前期加载过程中失败导致破坏;试件 7 在声发射实验过程中加载失败;  
②循环加载的循环次数为 10 次

## 2 Kaiser 点的确定

### 2.1 突变点法

试件 3 声发射强度应力、轴向力和时间的关系曲线见图 2—图 4。

试件 3 的预加载方式为一次加载,载荷为 22.01 MPa。图 2 为试件加载过程中的声发射强度和时间的关系曲线,从图中可以观察到在 54.2 s 前产生的声发射次数相对较少,此后声发射强度突然变强并且随后的声发射活动不断增强,声发射次数增加,即在 54.2 s 时出现了一个突变点,由此确定该点为 Kaiser 点,在对应的时间和应力的曲线上能够找到对应的应力为 18.03 MPa。

图 3、图 4 分别对应的是试件 3 应力、轴向力和时间的关系曲线,在图 3 中可以看到,曲线在 56.52 s 对应的应力为 20.28 MPa 时有一个突变点,即对应的 20.28 为其 Kaiser 点。图 4 中的曲线在 56.52 s 时也有突变点,此时刻对应的应力为试件的 Kaiser 点 20.28 MPa。这种方法是对直接信号进行的处理,主观性较大,可以用来对 Kaiser 点进行初始判断。

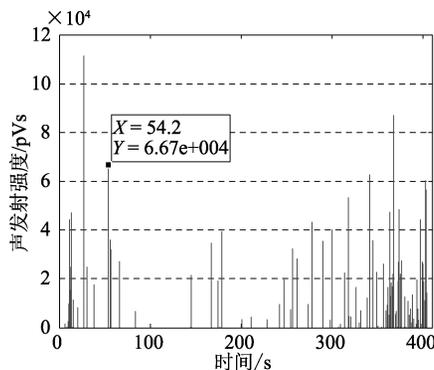


图 2 试件 3 声发射强度-时间的关系图

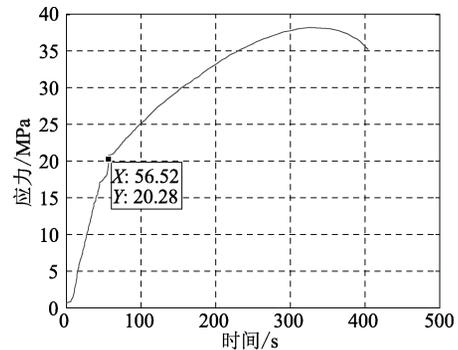


图 3 试件 3 时间-应力关系曲线图

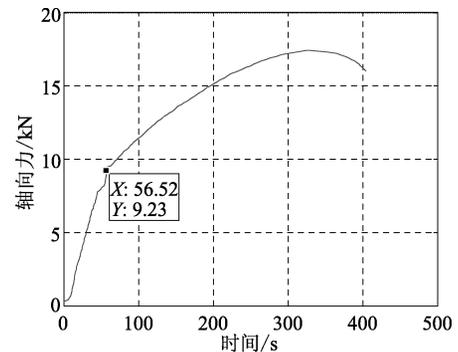


图 4 试件 3 时间-轴向力关系曲线图

### 2.2 最大曲率确定法

该方法是根据声发射的某个参数或累积参数与时间或应力之间的关系曲线,通过曲率的变化,判定最大曲率处的点即为声发射 Kaiser 点。例如,试件 11 的前期加载为一次加载,加载应力为 12 MPa。声发射实验过程中的加载为二次加载,如图 5 所示,试件 11 在加载过程中的声发射累积数和时间的关系曲线图的一部分(第一次加载),曲线上 26.27 s 时对应的声发射累积数为 58,且为曲线的最大曲率处,其所对应的时间-应力曲线上

的应力为 11.23 MPa,即为所确定的 Kaiser 点。该方法对于实验中拐点不明显的曲线在判定 Kaiser 点时会出现较大的误差。

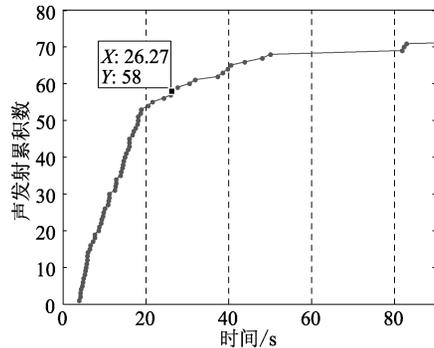


图5 试件 11 声发射累积数-时间关系曲线图

2.3 双切线法

试件 15 的前期加载方式为循环加载,应力在 22 MPa 和 32 MPa 之间循环,循环次数为 10 次。如图 6 所示,其声发射累积数和时间的关系曲线,并且作两条拟合的切线: $y=0.0039x+16.5807$  和  $y=46.15+0.5602(x-446.8)$ ,切点所对应的时间为 397.4 s,查找对应的应力应变曲线,所对应的应力值为 35.74 MPa,即为所对应的 Kaiser 点。该方法在做曲线的两条切线时会存在较大的误差。

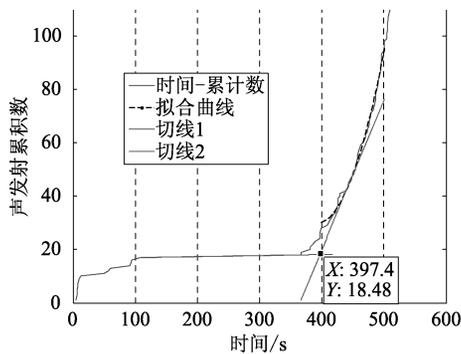
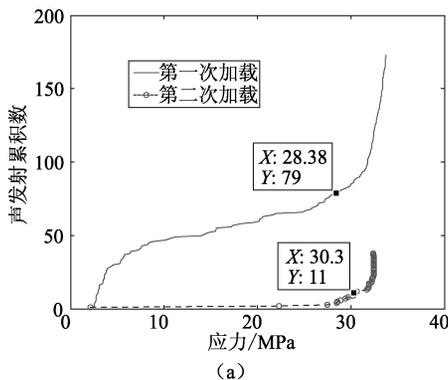


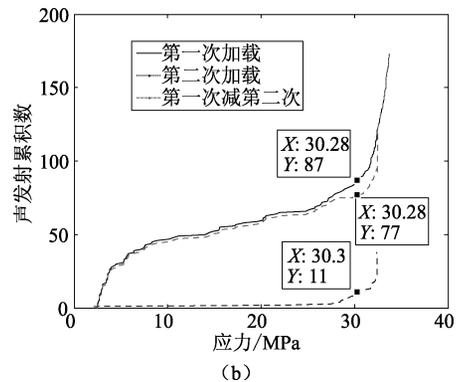
图6 试件 15 切线法确定 Kaiser 点

2.4 重加载法

试件 8 的重加载试验曲线图见图 7。



(a)



(b)

图7 试件 8 声发射累积数-应力关系曲线图

对试样进行第二次加载时,在第一次加载的 Kaiser 点处也会出现一个显著的突变信号,这种现象称为声发射抹录不尽现象。这个突变点更为明显,也更便于分辨。

试件 8 的预加载方式为一次加载,加载载荷为 32 MPa。图 7 为用重加载法确定试件 8 的 Kaiser 点。图 7(a)是用抹录不尽现象确定 Kaiser 点。在图中可观察到在第一次加载应力达到 30.28 MPa 时出现了 Kaiser 点,但该点不能很清楚地判断出来,在第二次加载载荷达到 30.3 MPa 时出现了该点的抹录不尽点,由此可以较为清楚地判断出试件的 Kaiser 点,即为 30.3 MPa。

图 7(b)是用两次加载相减法确定 Kaiser 点。图中所描绘的也是试件 8 的两次加载的声发射累积数和应力的关系曲线图,通过将第一次加载所得到的曲线减去第二次加载所得曲线,可以得到新的曲线图。在新的曲线图上能够更加清楚地判定该试件的 Kaiser 点为 30.28 MPa。

2.5 Kaiser 点的综合判定法

如上述,就某种方法而言,它可以确定试件的 Kaiser 点,但在很多情况下,如地质资料较少,地层应力情况比较复杂,这是用某种方法去判定 Kaiser 点时往往就不是很准确,有时还会出现很多个理论上的 Kaiser 点。这种情况下,使用其中的某种确定方法只能大致确定 Kaiser 点的范围,还不能精确地确定试件的 Kaiser 点。

图 8、图 9、图 10 是用来说明综合分析试件 3 的 Kaiser 点的方法。从图 8 中可以观察到声发射强度随时间的变化在 54.2 s 时有一个突变,并且以后的声发射活动也频繁起来,对应相应的应力时间曲线在这段时间刚好也有一个突变点,这是共同控制两种突变情况来确定 Kaiser 点,故可以更加充分和

准确地判定出这个时刻对应的应力是试件 3 的 Kaiser 点。

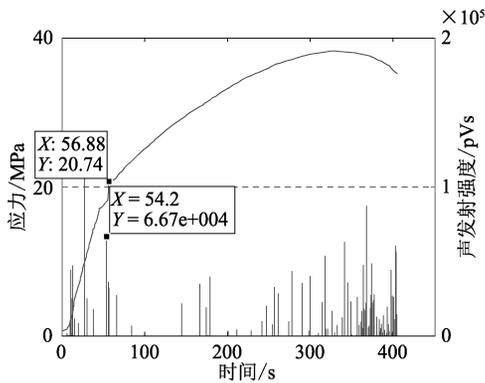


图 8 试件 3 应力、声发射强度-时间关系图

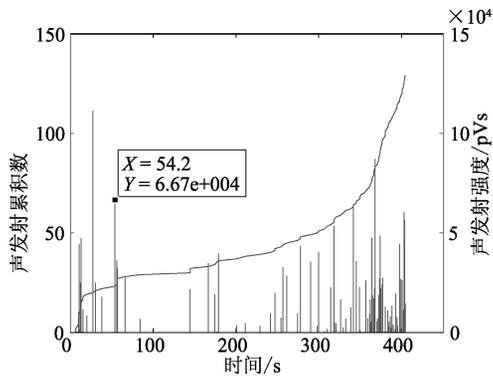


图 9 试件 3 声发射累积数、声发射强度-时间关系图

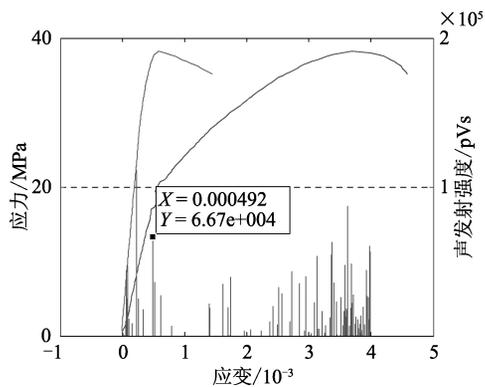


图 10 试件 3 应力、声发射累积数-应变关系图

图 9 中声发射强度在这点发生突变时,声发射累积数随时间的变化曲线的斜率也在这个时刻有一个突变,这应用声发射累积数的曲率最大和声发射强度的突变来判定 Kaiser 点。

图 10 所对应的是轴向应力应变、径向应力应变以及轴向应变和声发射累积数之间的关系图,轴向应力应变曲线上有个突变的时刻(对应轴向应变为  $4.92 \times 10^{-4}$ )时声发射强度在该应变处也有个突变的较大值,即可以确定为试件 3 的 Kaiser 点。以上的分析方法就是基于前面对声发射实验曲线中 Kaiser 点的特征,从声发射强度、累积数、应力、时间和应变等不同的方面进行综合对比分析,从多方面出发确定 Kaiser 点。

### 2.6 声发射强度信号统计分析法

声发射不同时间段内声发射强度的统计特点可以在一定程度上反映 Kaiser 点的分布范围。将试样的整个声发射试验过程分为不同的时间段,把声发射强度按强度大小分为不同的等级,然后依次统计不同时间段内不同等级声发射强度出现的次数,得到如表 2 和表 3 的统计表。由此可以得到声发射强度的大小在不同时间段内的分布情况,根据 Kaiser 点对应声发射强度的分布的特点,可以判断 Kaiser 点所在的时间区域,为 Kaiser 点的确定又提供了一个新的判定方法。

如表 2 所示,在 300~450 s 的时间段内强度大小居中,在  $(2 \sim 5) \times 10^4$  和  $(0.5 \sim 1) \times 10^5$  范围内的声发射较多,在大于  $1 \times 10^5$  的强度范围内的声发射相对较少,可以初步判定试样 8 的 Kaiser 点出现在 300~450 s 这一时间段内。表 3 中也可以看出类似的规律,试件 15 在 300~480 s 的时间段内,在  $(2 \sim 4) \times 10^4$  和  $(0.5 \sim 2) \times 10^4$  范围内的声发射较多,在大于  $4 \times 10^4$  的强度范围内的声发射相对较少,同理可以判定试件 15 的 Kaiser 点出现在 300~480 s 这一时间段内。根据统计分析结果可以对岩石的 Kaiser 点确定一个大致的时间点。

表 2 试件 8 的声发射信号统计表

时间段 /s	声发射强度/pVs			
	$> 1 \times 10^5$	$(0.5 \sim 1) \times 10^5$	$(2 \sim 5) \times 10^4$	$< 2 \times 10^4$
0~300	5	6	35	167
300~450	1	5	8	49
>450	1	0	5	65

表3 试件15的声发射信号统计表

时间段 /s	声发射强度/pVs			
	$> 4 \times 10^4$	$< 0.5 \times 10^4$	$(2 \sim 4) \times 10^4$	$(0.5 \sim 2) \times 10^4$
0~300	0	1	4	12
300~480	8	7	20	19
>480	4	3	19	13

### 3 结论

1)地应力测量的方法有很多种,声发射测量地应力的方法有着操作简便、速度快、成本低、现场的作业量少的优点。在地应力的测量中得到了广泛地应用。

2)确定 Kaiser 点的方法有突变点法、最大曲率法、双切线法、重加载法、R/S 统计分析法、小波分析法、综合分析和声发射强度统计法。在实验过程中通过对试件采用不同的方法确定其 Kaiser 点,确定了各种方法的适用性,并且提出了利用声发射强度的统计法和综合分析法,为确定 Kaiser 点提供了更为有利的判定方法。

3)根据实际判定 Kaiser 点的需要,可以选用不同的方法对试件的 Kaiser 点进行分析和确定。

### 参 考 文 献

- [1] 李利峰,邹正盛,张庆. 声发射 Kaiser 效应在地应力测量中的应用现状[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(1):41-45.
- [2] 李曼,秦四清,马平,等. 利用岩石声发射凯塞效应测定岩体地应力[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 833-838.
- [3] 吴满路,廖椿庭,张春山,等. 红透山铜矿地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23):3943-3947.
- [4] 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.
- [5] Holcomb D J. General Theory of Kaiser Effect[J]. Int J Rock Mech Sci and Geomech Abstr, 1993, 30(7): 929-935.
- [6] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15):2499-2503.
- [7] 左建平,裴建良,刘建锋,等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8):1564-1570.
- [8] 赵奎,金解放,赵康,等. 声发射测量原岩应力研究现状及进展[J]. 矿业快报, 2005(12):4-6.
- [9] 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.
- [10] Goodman R E. Subaudible noise during compression of rock[J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74:487-490.
- [11] Boyce G M A. Study of the acoustic emission response of various rock types [D]. Master Thesis, Drexel: Drexel Univ, 1991:46-70.
- [12] Shen H W. Objective Kaiser stress evaluation in rock [C] // Proceedings of the Fifth Conference. AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal - Zellerfeld; Trans Tech Publications, 1995:177-196.
- [13] Momayez M, Hassani F P, Hardy J R H R. Maximum curvature method: a technique to estimate Kaiser-effect load from acoustic emission data [J]. Journal Acoustic Emission, 1991/1992, 10(3-4):61-65.
- [14] 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.
- [15] 薛亚东,高德利. 声发射地应力测量中凯塞点的确定[J]. 石油大学学报, 2000, 24(5):1-3.
- [16] 赵奎,邓飞,金解放,等. 岩石声发射 Kaiser 点信号的小波分析及其应用初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z2):3854-3858.
- [17] 丁原辰,张大伦. 用于地应力实测的一种声发射凯泽效应辨别法[C]//武汉:地应力场测试及其应用讨论会论文集, 1991:129-136.

收稿日期:2014-02-24