

用声发射法测定唐山地区历史地壳应力

祁英男 刘建中 毛吉震

(国家地震局地壳应力研究所)

摘要

在承压状态下岩石产生的发射kaiser效应对其在历史时期所承受过的最大应力有记忆功能。利用这种性能可以求取岩石在地质历史时期所经历过的最高应力水平。本文假定kaiser效应对岩石这种脆性物质是在差异应力作用下所表现出来的一种特性，从而提出声发射kaiser效应法。采用重复加载法，求出唐山地区水压致裂地应力测量钻孔中的红色砂岩历史上所承受过的最大水平差异应力为3兆帕。比现今地壳水平差异应力高3倍。由此求出唐山7.8级地震应力降为8.7巴，与天然地震记录的计算结果一致。说明利用声发射kaiser效应法求取历史最大差异应力是可行的。由顺岩芯轴向采取的岩样所估算的最大历史差异应力为5兆帕，高于垂直应力。说明唐山地区曾经承受过28—30巴的引张应力的作用。

一、前言

当前，绝对应力测量已成为研究现今地壳应力状态的重要手段。地壳的应力状态对

于地震预报，尤其对中长期地震预报是很有意义的资料。随着地震学的发展，人们逐渐认识到要想提高地震预报水平，不仅需要了解一个地区的现今地壳应力状态，而且还应掌握在地质历史时期内这一地区所经历过的最高应力水平。分析、对比现今与历史的应力状态，用来讨论现今地壳应力场的变化规律，预测发展趋势，从而对一个地区的地壳稳定程度做出正确的估价。

以往讨论历史地壳应力状态，一般偏重于宏观定性分析历史地壳应力场的作用方式。本文试图利用一种能够推断历史地壳应力大小的室内测定方法——声发射(AE)凯瑟(kaiser)效应

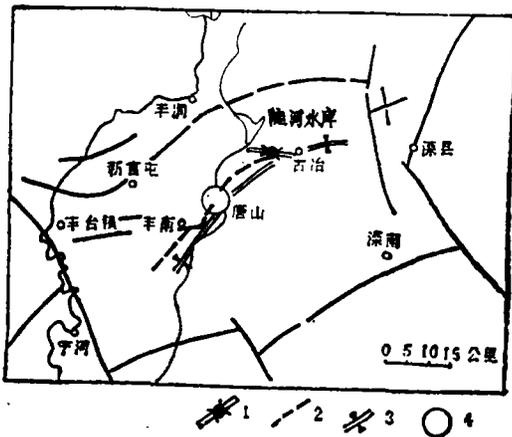


图1 岩芯采取点位置图

1—岩芯采取点，水压致裂应力测量点和最大水平主应力方向；2—活动断层；3—唐山开平向斜；4—唐山7.8级地震

法，探讨唐山地区（图1）的应力历史。

二、实验方法及技术

1、原理：

1953年德国科学家J·kaiser在研究金属材料声发射现象时曾发现，一度受过应力变化的材料再次被加载时，当所加应力达到原来承受过的最大应力之前，基本上不产生或很少产生声发射，只有当再次加载的应力超过材料承受过的最大应力时，声发射次数才会急剧增加，这种现象被称为声发射现象的kaiser效应。后来Goodman⁽¹⁾首先在单向

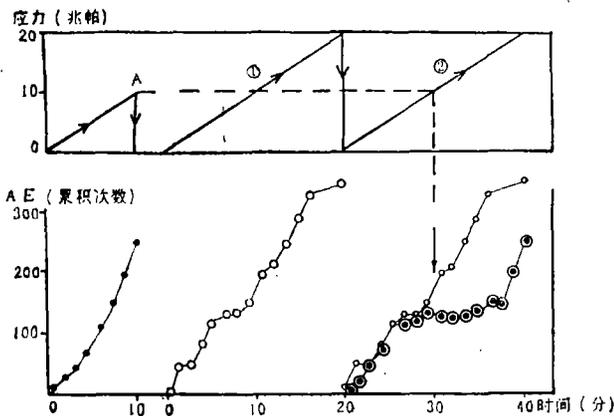


图2 估算历史最大差异应力原理图

图中上半部为应力加载曲线；下半部为声发射曲线。由原点至A段为岩石原来承受过的最大应力值。

①：第一次重复加载应力曲线；②第二次重复加载应力曲线。
●：与原来承受过的最大应力对应的声发射曲线。
○：第一次重复加载时的声发射曲线。

⊙：第二次重复加载时的声发射曲线。声发射曲线中黑色箭头所指处为第一次重复加载时声发射与第二次重复加载时声发射的差值开始增大的位置。

某一应力值时开始增大，这一应力值就是岩石原来所承受过的最大应力值，即最大差异应力值（图2）。本文根据这一方法对现场采取的岩石求取历史上所承受过的最大水平差异应力值。

这种方法的物理基础是，在一般情况下岩石在承压时产生的微破裂多数是由于增压而产生的。因而由新的微破裂活动状态就可以确定历史最大差异应力。

实验证明⁽²⁾，岩石在单调增压情况下，其声发射活动是由新的微破裂和内部晶格摩擦滑动这两种活动产生的。周期性重复加载时由内部晶格摩擦滑动产生的声发射活动是相同的。因此删除这种相同的声发射活动成分（采用第一次与第二次加载产生的声发射

加载条件下证明了岩石材料同样存在这一效应。kaiser效应的存在说明，金属和岩石对历史上所承受过的最大应力均有记忆的功能。为研究在三向应力作用下的地下深部岩石的历史应力状态，我们假定kaiser效应对于岩石这种脆性物质，是在差异应力作用下所表现出来的一种特性*。这样我们就可以利用岩石在加载过程中的声发射kaiser效应推断某一地区历史上的最大差异应力。

然而有一些情况，岩石在承压过程中的kaiser效应不太明显，采用上述方法确定历史最大差异应力有困难。对此我们采取一种新的方法——重复加载法⁽²⁾。对于所取岩样在持续零围压条件下单轴加载到一定荷量，卸载后进行重复加载。两次加载所产生的声发射次数之差在

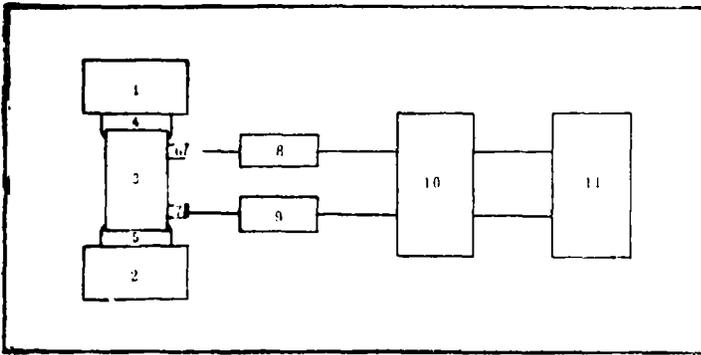


图3 实验装置方框图

1, 2—压力机压头；3—试件；4, 5—柱帽；6, 7—声发射传感器；8, 9—前置放大器；10—SF—02A双通道声发射综合参数测试仪；11—XY函数记录仪

次数相减的方式)就可以精确地确定与新的微破裂相对应的应力值。这就是岩石在历史上所承受过的最大差异应力。

2、实验装置、设备及试件准备

实验装置、设备如图3所示。

选取唐山市以东20公里东矿区黄坨苗圃内深度356米水压致裂地应力测量钻孔中, 156—200米井段

的二叠系紫红色岩芯, 制作了15个试件。其中11个与岩芯轴向垂直, 即水平方向随机取样。余下的4个是沿岩芯轴向取样。试件规格有两种, 一种为直径45毫米、高120—130毫米的圆柱形, 另一种为直径30毫米, 高90—100毫米的圆柱形。

接收装置: 配备两个可接收岩体声发射信号的压电陶瓷传感器, 其中心谐振频率为120千赫, 特性曲线表明在60千赫至180千赫段信号接收灵敏度较高。

另外, 配置60—150吨压力机一台, SF—02A双通道声发射综合参数测试仪及x—y函数记录仪各一台。

3、实验方法及技术

实验前, 首先将已加工好的岩石试件置于压力机上, 为有效地排除试件端部效应及杂散干扰, 采取定区监测方式。按图3方式将仪器联接完毕, 即可进行实验。

实验过程中, 保持匀速增压, 加压速度为10兆帕/分钟。加压程序: (1) 对于直径45毫米试件沿轴向第一次加压平均为21兆帕, 待卸压归零后, 进行第二次加压, 压力平均达到38.4兆帕; (2) 对于直径30毫米试件, 第一次加压平均为46兆帕, 第二次为65兆帕。

三、岩石历史最大差异应力室内测定

结果与现场实测地应力比较

图4(1—5)为室内岩石试件声发射kaiser效应法测定历史最大差异应力的部分结果。由图可见, 第一次加载时岩石声发射曲线拐点不清晰。第二次加载时, 当载荷超过某一应力值时声发射曲线与第一次加载时的声发射曲线的差值开始增大, 两条曲线出现明显分叉。这一分叉点所对应的应力值就是岩石曾经承受过的最大差异应力值。每个试

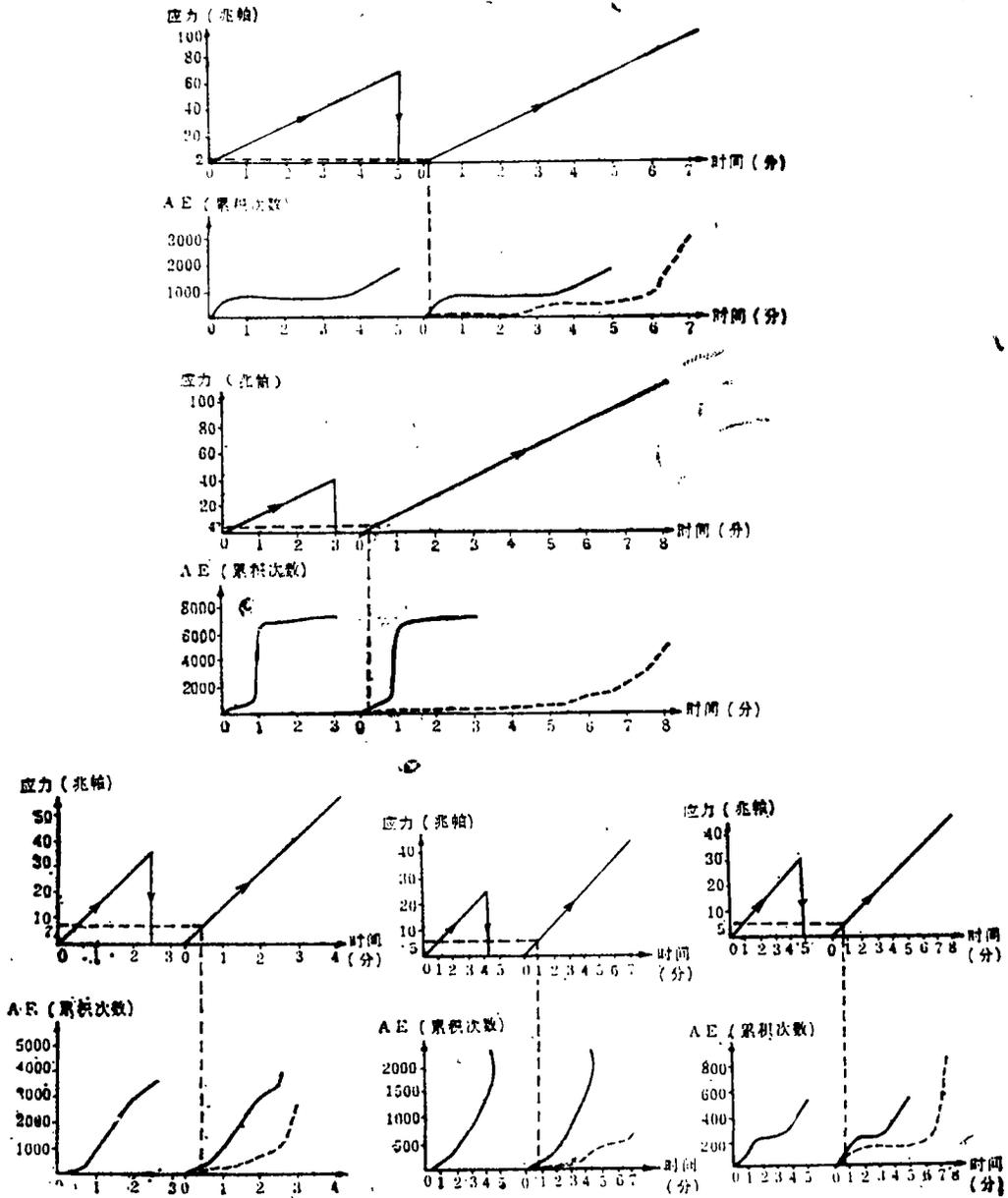


图4 (1—5)，加载应力与声发射关系曲线。声发射曲线中实线为第一次加载时所得曲线，虚线为第二次加载所得曲线。

件每次加载的平均应力值及其对应的估算历史最大差异应力值列于表格中。需要指出，由于第一至第六组岩石试件取向是水平随机的，这就涉及到哪个方向的测定值最接近野外实际水平差异应力值的问题。

岩石在低应力条件下的声发射是结构弱点破坏的结果，在这些结构弱点破坏过程中，可能不存在任何相对滑动的趋势，内摩擦力的影响可以忽略，这时破坏点的应力条件遵守最大剪切应力准则，为：

$$\tau_1 = \frac{S_1 - S_2}{2}$$

声发射kaiser效应法测定历史地壳差异应力结果

编号	取样方式	试件数目	试件直径 (厘米)	平均轴向压力(兆帕)		平均差异应力 (兆帕)
				第一次	第二次	
1	水平随机取样	2	3.0	43.0	63.0	4.5
2	同上	2	3.0	56.0	105.4	3.0
3	同上	8	3.0	38.5	5.65	6.3
4	同上	1	4.2	18.5	26.0	4.5
5	同上	1	4.2	26.0	44.0	5.5
6	同上	2	4.5	18.5	45.0	6.5
7	沿岩芯轴向取样	4	4.5	21.0	38.5	5.0

破坏点的分布方向与最大水平主应力方向的夹角为 45° 。这里 S_1 、 S_2 分别为最大、最小主应力。

在实验室测定声发射kaiser效应时，由于钻孔深部岩芯没有定向，所加两向应力可能偏离原来的主应力方向，这时在原来破坏点分布方向上作用的剪应力可以写为：

$$\tau_2 = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2(\alpha + \Delta\alpha) \right|$$

$$= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \Delta\alpha$$

这里， σ_1 、 σ_2 是实验室所加的两向应力； $\Delta\alpha$ 是实验室内所加应力方向与野外实际主应力方向偏离的角度。根据kaiser效应原理，当

$$\tau_2 \geq \tau_1 \text{ 时,}$$

声发射数目才会急剧增加，即

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \Delta\alpha \geq \frac{S_1 - S_2}{2}$$

$$\cos \Delta\alpha \geq \frac{S_1 - S_2}{\sigma_1 - \sigma_2} \dots\dots (1)$$

由(1)式可以看出,声发射kaiser效应法在实验室测出的差异应力大于等于野外实际差异应力。如果岩样是水平随机取样,所测差异应力最小值可能更接近野外实际应力值,这时 $\Delta\alpha$ 也趋近于零。由此我们估算历史上野外差异应力值等于实验室测定的差异应力最小者,即3兆帕。

唐山地区现场地应力测量结果表明^[3],水压致裂深部地应力测量得到现今地壳应力值为:深度155~189米井段最大水平主应力值平均为3.7兆帕,水平差异应力为1兆帕。由此可见历史最大差异应力值是现今地壳差异应力值的3倍,这反映了本区历史上发生过剪应力集中。

本区地处华北地震区的阴山—燕山地震亚区中的三河—滦县地震带。自1069年以来整个华北地震区出现了三个地震活动期^[4]。在第二、第三个活动期内,三河—滦县地震带相应地出现两个地震活动期。第一个活动期是在1484—1730年,第二个活动期是从1731年到现在。至今本区共记录到4 $\frac{1}{2}$ 级以上地震29次。最大的一次是发生在第一个活动期内的1679年三河—平谷8级地震,其次是在第二个活动期内的1976年唐山7.8级地震。虽然从地震的震级、应变能量的积累和释放来看,1679年三河—平谷8级地震大于1976年唐山7.8级地震,但是由于本次实验所用钻孔岩芯离三河—平谷8级地震震中以东100公里,烈度小于7度。相反,却处于唐山7.8级地震的极震区附近。因而实验点钻孔中的岩石受到唐山地震之前应变积累过程的影响应该是最大的。实验室测定的历史最大差异应力平是反映了这一应变积累过程中的最高差异应力水平。参考该点的现场实际应力测量结果^[3],可以看到,唐山地区极震区历史上最大的水平差异应力是唐山震后的三倍。

如果认为kaiser效应法测定的差异应力值就是唐山地震的差异应力值,那么由应力降定义有:

$$\begin{aligned}\Delta\tau &= \tau'_1 - \tau'_2 \\ &= \left(\frac{\sigma_1}{2} - \frac{s_1 - s_2}{2} \right) \sin 2\alpha_1 \quad \dots\dots (2)\end{aligned}$$

这里, $\tau'_1 = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\alpha_1$, $\tau'_2 = \frac{s_1 - s_2}{2} \sin 2\alpha_1$; s_1 、 s_2 分别是在野外岩样采集点,由水压致裂法地应力测量得到的实测应力值; σ_1 是实验室测试时所加轴压。(2)式的右边括号中第一项、第二项分别表示实验室、野外现场测定的差异应力值的一半; α_1 是最大水平主应力方向与断层走向的夹角,通常在30°左右。这时 $\Delta\tau = 8.7$ 巴,与《一九七六年唐山地震》一书^[5]中给出的结果一致。这表明由kaiser效应法测定野外差异应力是可行的。

四、结束语

综上所述,岩石试件在单轴加压情况下产生的声发射kaiser效应对于岩石曾承受过的最大应力有记忆功能。利用这一原理估算地壳历史最大水平差异应力是可行的。

实验室测定得到唐山地区历史最大水平差异应力为3兆帕,高于唐山现今地壳应力场水平差异应力3倍。说明这一地区目前地壳处于基本稳定状态中,这种认识与文献〔4〕关于本区处于应变能量剩余释放阶段的观点一致。

还需指出,由垂直取样的岩石试件测得的平均差异应力为5兆帕(图4—5),高于垂向应力。比较合理的解释就是取芯点曾经承受过20—30巴的引张应力的作用。

为深入研究历史地壳应力场,在单个绝对应力测量钻孔中不同深度上或在平面上不同的应力测量钻孔中选取定向岩芯进行实验室岩石的加载试验是很有必要的。这对于探索历史地壳应力场水平和垂直方向上的变化规律是非常有意义的。

参 考 文 献

- 〔1〕 Goodman, R. E. 1963, Subaudible noise during compression of rock, Geological Society of America Bulletin, Vol. 74.
- 〔2〕 Yoshikawa, S. et al. 1981, A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples; laboratory study in the case of uniaxial compression, tectonophysics, 74 (1981) 323—339.
- 〔3〕 李方全等,唐山地区深部应力测量,华北地震科学, 3, 3, 1985.
- 〔4〕 国家地震局,中国地震烈度区划工作报告,地震出版社,1981.
- 〔5〕 国家地震局1976年唐山地震编辑组,一九七六年唐山地震,1982.