

测定岩石经历的最高古应力状态实验研究

丁原辰 邵兆刚

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 当前国内外尚无测定三维古构造应力场的理想方法, 提出了一种新方法: 从待测地点取大岩心或新鲜石块, 从6个以上方向取岩石试样, 每方向至少10个试样, 以声发射的广义抹录不净现象, 测定岩石经历的主要构造运动期的最大主应力值, 而后, 统计出岩石记忆的最高古应力状态的最大主应力值 σ_{m} . 由于岩石对最高古应力状态在各取样方向的正应力 σ_{m} 尚有记忆, 只不过隐藏于各期较低古应力状态的最大主应力值之间, 不易区分, 故以 σ_{m} 为目标, 通过“AE反演搜索法”, 则可将隐藏的各 σ_{m} 搜索出来, 从而计算出岩石经历的最高古应力状态, 以准平面应力状态模拟实验检验了该新方法的可行性.

关键词: 声发射; 古应力; 古构造应力场; 地应力.

中图分类号: P554

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)01-0099-06

作者简介: 丁原辰, 男, 研究员, 1940年生, 1964年毕业于山东大学, 现主要从事地应力、岩石力学和声发射测试方面的研究.

0 引言

各国学者已提出多种三维古构造应力场量化描述方法, 其中断层擦痕反演古构造应力场法^[1,2]较受青睐. 但该法所求三维古构造应力状态, 既不能给出其全貌(三个主应力 σ_1 , σ_2 和 σ_3 的大小以及它们各自的方位角和倾角), 又难给出其时代定位. 丁原辰等^[3~6]发现的岩石声发射(声发射的英文简称为AE)广义抹录不净现象, 虽然能用于估计不同时代岩石各自经历的主要构造运动期最大主应力记忆值, 但也不能给出岩石记忆的古应力状态全貌. 时至今日, 国内外尚无测定古构造应力场的理想方法.

1 “AE反演搜索法”的提出

声发射法可测定岩石记忆的与各主要构造运动期相应的应力状态的最大主应力值, 其中记忆的古构造应力状态中那期属于最高值的最大主应力值与岩石声发射的凯瑟效应(Kaiser effect)相对应; 而那些属于非最高值的各期最大主应力值与岩石声发

射的表现凯瑟效应相对应^[6]. 最大主应力属于最高值的那期古构造应力状态(以下简称为“最高古构造应力状态”)在岩石取样方向上的正应力, 也有相应的表现凯瑟效应, 即表现在声发射累计数与外加压应力响应曲线上也有不十分明显的相应斜率陡增点^[5]. 由于该正应力处于响应曲线上诸多陡增点之间, 极难辨认, 若将其辨认出来, 则可由该古构造运动期6个(或多于6个)方向的正应力, 计算出其应力状态.

由此, 笔者构想: 用声发射法以6个以上不同空间方向所取定向试样, 测得岩石记忆的最高古构造应力状态的最大主应力值(由于每个试样都记忆的最高古构造应力状态最大主应力值, 相应于岩石声发射的凯瑟效应, 而较低古构造应力状态最大主应力值, 相应于岩石声发射的表现凯瑟效应, 故前者较易从初压、复压响应曲线上判断, 求得试样记忆的最高古构造应力状态最大主应力值可靠性高, 因而可获得较精确的统计值), 以之作为目标; 以各试样的各个较低记忆应力值之一, 作为各试样取样方向正应力试算值, 建立众多的试算组(在6个方向上, 每次每方向取一个记忆应力值, 排列出一系列数据组); 试算岩石记忆的古构造应力状态, 即试算三个主应力各自的大小以及它们各自的方向(即方位角

和倾角)这一张量;而后,将各试算组计算出的各应力张量中的最大主应力值,与实测统计出的最高古构造应力状态的最大主应力值作比较,在选定误差范围内,求得一系列相应三维应力张量;再将各张量中各不同方向值在选定角度范围内作出现率统计,找出优势方向,则其相应各向记忆的正应力取值数组,即可认定为各向正应力确定值,从而可获得岩石记忆的三维最高古构造应力状态,即它的三个主应力大小、方位角和倾角,及其相应误差范围.笔者将这一方法简称为“AE 反演搜索法”.

2 可行性初步实验检验

2.1 实验测试概述

为了检验上述构想成立与否,笔者取一砂岩大石块,在其上取 5 个直径 50 mm,高 100 mm 大试样.先抽取其中一个,以等压力率加载直至将该试样压破,同时作声发射全过程测量,然后绘出声发射累积数与外加压应力响应曲线,如图 1 所示.由全过程响应曲线上可求得该砂石大试样(No. 1)产生裂纹稳定扩展的临界点(C 点)、裂纹非稳定扩展的临界点(D 点)和出现破裂的临界点(F 点)^[7].由图 1 所示响应曲线求得我们所关心的 C 点应力为 53.5 MPa,响应曲线上最接近 C 点的斜率陡增点对应应力为 50.2 MPa,即为这一试样记忆的岩石经历最高古构造应力状态的最大主应力值 σ_{mi} .按理应取 10 个这样的大试样,以岩石声发射“广义抹录不净现象”测量岩石经历的主要构造运动期最大主应力值(测量方法在文献[3~6]中已作介绍,并已证实其

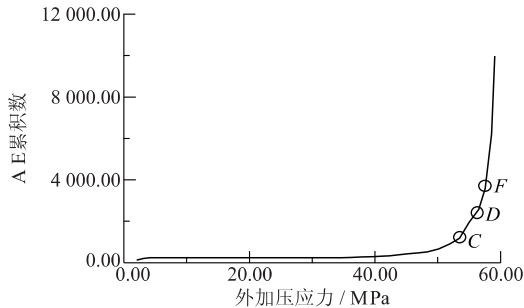


图 1 砂石大试样(No. 1)单轴加载至破坏的全过程 AE 累积数与外加压应力响应曲线

Fig. 1 Response curve of total AE counts versus applied stress for sandstone specimen (No. 1) during loading till failure

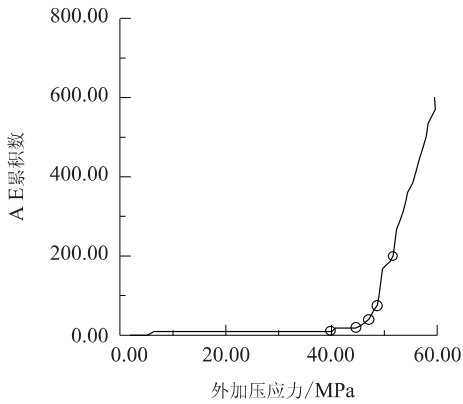


图 2 小试样(Mn30)的复压响应曲线

Fig. 2 Response curve of total AE counts versus applied stress for small specimen (Mn30) during reloading

实用性,兹不赘述),而后统计出 σ_{mi} .由于只作了一个大试样测量,所以 50.2 MPa 的应力并非统计值,然而,这个值是选取实验所用模拟保压值的参考值,因而存在一定误差无关紧要.取其余 4 个砂岩大试样,依据上述测得的 σ_{mi} ,分别对各试样作相同的三轴模拟保压($\sigma_1 > \sigma_2 \equiv \sigma_3$);取轴压 49.95 MPa、围压 29.42 MPa.所谓模拟保压,是指对每一个大试样加压至保压值而后退压至 0,循环 50 次以上(实际本实验多未退压至 0 即升压至保压值,为此,循环了 62 次).Michihiro 等^[8]指出,这样的保压方式与施加同样压力维持二周保持不变效果一致.再后,分别在各大试样上取与轴向成不同角度的小试样(直径 20 mm,高 45 mm),将其置入研制的专用加载装置,用压力机作单轴加载,使外加压应力超过 53.5 MPa (C 点),并同时作声发射测试.绘出声发射累积数与外加压应力响应曲线,求得曲线上各斜率陡增点的相应应力,即为用于试算的小试样记忆应力.图 2 给出一个小试样(试样号 Mn30)的复压(在特定技术条件下作的第二次加压)响应曲线作为示例.各小试样记忆应力如表 1 所示.一般说来,这些应力值中,包含所取小试样记忆大试样保压的轴向应力(即模拟的最高古构造应力状态的最大主应力值)和该砂岩较低的古构造应力状态的最大主应力记忆值,以及相应于模拟的最高古构造应力状态的取样方向正应力记忆值.由表 1 中最右边的一列 10 个测值,求得最高古构造应力状态的最大主应力统计值(加权平均值有“*”者取权为 1,无“*”者取权为 0.5) σ_{mi} 为 50.4 MPa.

表 1 各向小试样的记忆应力

Table 1 Memorized stresses of the differently directional small specimens

样号	条件	记忆应力测值/MPa					
Mn60—1	c	16.2	23.7*,28.0	31.2*,35.0*,38.0*	42.7*	51.2	
Mn60—2	c	15.6*,19.1	21.6,26.1*	28.8*,32.3*,38.5	43.9	49.7*	
	f	—	23.6*	31.1*,32.9,38.8*	41.4,43.4	49.3	
Mn45	c	12.1,16.6		29.5*,34.7,37.3*,39.8	42.2*	50.9*	
	f					48.7*,50.3*	
Mn15	c	19.0	25.5	34.4*,35.7	41.7*,43.5,45.8*,48.4	49.7*	
	f					49.3*,50.9*	
	z					7.4,49.7,50.7*	
Mn30	c		26.9	30.2,32.8,34.1*,37.9*	41.4*,44.6*	50.2*	
	f				40.1*,44.6*,47.1*,48.7*	51.1	

注:(1)表 1 中“*”表示响应曲线上斜率陡增点相当明显的记忆应力。(2)“c”、“f”和“z”分别表示对该小试样作初压、复压和再压(在特定技术条件下作的第三次加压)测量。一般只作初压和复压测试;但当测试系统总增益达最高而声发射信号仍较少时,这种情况下仅作初压测试;当复压时测试系统增益等参数选择不当,而使声发射信号较少时,这时多作再压。(3)表 1 中斜体数值为响应曲线上勉强可辨认的记忆应力。(4)与大试样轴向成夹角为 60°的方向上取了两个小试样 Mn60—1 和 Mn60—2;其余 Mn45,Mn15 和 Mn30 分别为与大试样轴向成夹角 45°,15°和 30°所取试样。

表 2 三个不同方向的试样组成的平面应力状态计算组

Table 2 Calculating groups of stress state consist of specimens cored from three different directions

计算组 序号	与大试样轴向成不同方向夹角的 3 个试样组合	
	顺时针夹角/(°)	逆时针夹角/(°)
1	60,45	15
2	60,45	30
3	60	15,30
4	45	15,30

2.2 数据处理方法及结果

将这组大试样模拟保压的假三轴应力状态,视为准平面应力状态. 将各试样记忆应力值逐一取其取样方向正应力记忆值的试算值. 由于这不是真正的平面应力状态,为了将上述假三维应力状态“AE 反演搜索法”简化为平面应力状态“AE 反演搜

索法”,可任意选定各个取样方向中既有与轴向成顺时针夹角(这里取 60°,45°)者,又有与轴向成逆时针夹角(这里取 15°,30°)者. 取与大试样轴向成三个不同方向夹角的试样为一组,组成若干组,如表 2 所示共 4 组. 每组中所有各测值按文献[9]计算公式,编程序逐一试算出一系列平面应力状态. 将前三组试算出的诸多平面应力状态的最大主应力值与实测各试样最大主应力统计值(50.4 MPa)作比较,剔除误差超过 1.0%者,共计留下 345 个试算出的平面应力状态. 从-90°至 90°每隔 10°作最大主应力方向(指由最大主应力方向转至第一个取样方向的转角,逆时针为正)出现率统计,求得-60°至-50°角度范围出现率最高,达 21.4%,如图 3 所示. 于是确定出现率相对最高的(-55±5)°为实测平面应力状态的最大主应力方向. 其角度绝对误差为(5±5)°. 而后,

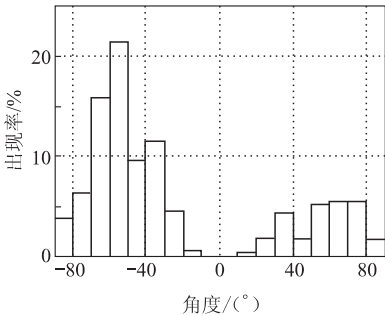


图 3 前三组最大主应力方向出现率直方图

Fig. 3 Histogram of occurrence frequency of the first three groups for direction of maximum principal stress

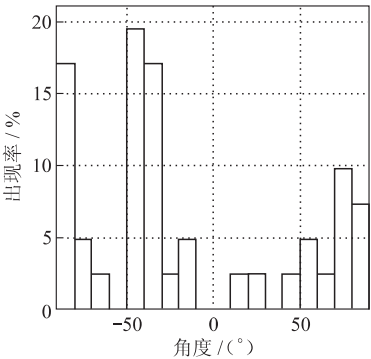


图 4 第 4 组最大主应力方向出现率直方图

Fig. 4 Histogram of occurrence frequency of the fourth group for direction of maximum principal stress

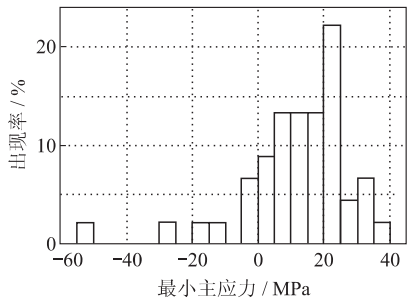


图 5 最小主应力出现率直方图

Fig. 5 Histogram of occurrence frequency for the minimum principal stress

以第 4 组再作试算,求得试算出的平面应力状态共计有 41 个符合误差要求,其中最大主应力方向出现率相对最高的角度范围为 $-50^{\circ}\sim-40^{\circ}$,如图 4 所示.但所求得的该方向是由最大主应力方向转至更换了的第一个取样方向(与大试样轴向成顺时针夹角 45°)的逆时针转角,其角度绝对误差为 $(0\pm5)^{\circ}$.

将前三组最大主应力优势方向($-60^{\circ}\sim-50^{\circ}$)和第 4 组最大主应力优势方向($-50^{\circ}\sim-40^{\circ}$)相应的最小主应力合并统计(共计有 45 个),以 5 MPa 为间隔,作其出现率频度直方图,如图 5 所示,求得出现率最高者为 22.2%,其相应最小平面主应力值的取值范围为 (22.5 ± 2.5) MPa.于是,以“AE 反演搜索法”求得模拟的最高古应力状态(准平面应力状态)为: $\sigma_1=50.4$ MPa, $\sigma_2=\sigma_3=(22.5\pm2.5)$ MPa,最大主应力方向与前三组的第一个取样方向(顺时针 60°)成顺时针夹角 $(55\pm5)^{\circ}$,与第 4 组的第一个取样方向(顺时针 45°)成顺时针夹角 $(45\pm5)^{\circ}$.

3 结果讨论

3.1 模拟保压实验

上述假三轴模拟保压实验并非真正的平面应力模拟实验,取样方向与大试样轴向的夹角也不存在上述假设的顺时针和逆时针方向.实验的真正效果是从众多的测值中找到了各取样方向的正应力.事实上实际应用中只要搜索到的各取样方向的正应力测值可靠,那么就就可求得测点可靠的应力状态.既然如此,我们可从模拟保压的轴压和围压应力值计算各取样方向的理论正应力,看看各取样方向的所有实测值中与理论正应力最接近的测量误差,从而也可间接证明“AE 反演搜索法”的可行性.

按照弹性力学,在假三轴应力状态($\sigma_1>\sigma_2\equiv\sigma_3$)

中,任一与轴向成 θ 角方向上的正应力值可按下式计算:

$$\sigma_{\theta}=\sigma_w+(\sigma_z-\sigma_w)\cos^2\theta.$$
 (1)

式中: σ_{θ} 为取样方向正压应力; σ_w 为围压应力; σ_z 为轴向压应力.

将轴压 49.95 MPa,围压 29.42 MPa 代入(1)式,并分别将各取样方向与大试样轴向所成夹角也代入(1)式,可得各取样方向正压应力(表 3).表 3 中也列出了相应各方向试样实测各值中与取样方向理论正应力最接近者(可由表 1 查得),并给出它们与理论值的误差.取样方向与轴向夹角 60° 的两个试样 Mn60-1 和 Mn60-2,其实测值(35.0 MPa 和 32.9 MPa)与理论值(34.6 MPa)的相对误差有较大差别,可见任一取样方向多取试样测试,则可获得该取样方向最接近理论值的实测值.因此,实际应用中每一取样方向取 10 个试样进行测试,是十分必要的.

表 3 各取样方向正应力理论值

Table 3 Theoretical values of normal stresses for specimens cored in different directions

取样方向与大试样轴向夹角/ $^{\circ}$	60	45	15	30
取样方向理论正应力/MPa	34.6	39.7	48.6	44.8
接近理论值的实测值/MPa	35.0*, 32.9	39.8	48.4	44.6*
实测值与理论值的相对误差/%	1.5, -4.9	0.25	-0.41	-0.45

* 意义同表 1.

3.2 可靠性

3.2.1 可靠性依据 一般说来,岩石试样即使取自同一石块(或由钻孔中取出的大岩心),其单轴抗压强度 σ_c 也多不一致,于是使得所测岩石裂纹稳定扩展的临界应力点(C 点),各试样相互不同.但实践证明,只要岩石是同一时代、并处于同一层位,分别邻近不同 C 点的各试样最大主应力记忆值,从统计意义而言,仍存在一致性.由于最高古构造应力状态最大主应力值相应于岩石声发射的凯瑟效应,而较低古构造应力状态最大主应力值相应于岩石声发射的表观凯瑟效应,因而前者较易从响应曲线上判断,故试样记忆的最高古构造应力状态最大主应力值可靠性高.于是就为“AE 反演搜索法”奠定了较可靠的基础.不容否认,当前测试技术,C 点的精确判断尚有一定难度.好在“AE 反演搜索法”需要数量较多的小试样,由众多 σ_c 相近的小试样统计出的 C 点

值,终归是较为可靠的。

3.2.2 主应力测量误差 实验中模拟保压的轴压为 (49.95 ± 0.25) MPa、围压 (29.42 ± 0.49) MPa,即轴压、围压的实际到位准确度分别为0.5%和1.7%。以“AE反演搜索法”求得的最大主应力值($\sigma_{\text{mt}} = 50.4$ MPa)与模拟保压的轴压上限(50.2 MPa)相比,误差为0.4%;而最小主应力值($\sigma_2 = \sigma_3 = (22.5 \pm 2.5)$ MPa)上限(25 MPa)与模拟保压的围压下限(28.93 MPa)相比,误差为-13.6%。当然这是指最好的情况而言。由此可见,“AE反演搜索法”所求得的实测平面应力状态,其最小主应力值相对误差偏高。至于最大主应力方向的测量误差,见前文2.2节所述。

3.3 主应力方向

“AE反演搜索法”求得岩石经历的最高古构造应力状态,其各主应力的方向是现今地理坐标方向,实际应表示为那个时代的地理坐标方向,因此有一个确定相应时代的问题。譬如,已经确定经历过燕山期构造运动的中侏罗世岩石,经历的最高古构造应力状态属于燕山期,那么由古地磁测定的燕山期南北方向,可将其各主应力的现今地理坐标方向变换为燕山期地理坐标方向。

3.4 最高古构造应力状态的时代

众所周知,时代老的岩石经历的主要构造运动期次包含时代较新岩石经历的主要构造运动期次。而时代较新岩石经历的主要构造运动期次,不可能包含时代较老岩石经历的主要构造运动期次。比较由新到老各时代岩石各自记忆的主要构造运动期次^[6,7],或各自经历的最高古构造应力状态,则可进而确定某一时代岩石经历的该时代最高古构造应力状态。

4 结语

“AE反演搜索法”的可行性已为初步实验所证实。由于该法可用于测定某一地点、某一时代岩石经历的该时代最高古构造应力状态,因而对于构造地质学、地质力学、地球动力学和环境地质学等是一项重要的基础性工作,对于地质学由定性向量化发展意义重大。笔者认为,进一步改进和完善以“AE

反演搜索法”为主体的测试和数据处理技术,可以摒弃国际上关于AE法地应力测量中凯瑟效应(笔者认为这里所谓的凯瑟效应实际是表观凯瑟效应)有无方向性的争论,由此可见,这一技术方法的深入研究和充分的实践检验,无疑十分必要,其应用前景相当广阔。

上海应用数学和力学研究所潘立宙教授对本文提出了宝贵的修改建议,并帮助作者全面修改了英文摘要,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets [J]. JGR, 1984, 89: 5835~5845.
- [2] Zé'ev Reches. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition [J]. Tectonics, 1987, 6 (6): 849~861.
- [3] Ding Y C, Sun B S, Wang X H, et al. Evaluation of maximum principal stress of different phases and episodes of tectonic movements by means of acoustic emission and its application [A]. In: Geological Society of China, ed. Progress in Geology of China (1993—1996) — Papers to 30th IGC [C]. Beijing: China Ocean Press, 1996. 380~384.
- [4] 丁原辰,孙宝珊,汪西海,等.塔里木盆地北部油田古应力的AE法测量[J].地质力学学报,1996,2(2): 18~25.
- [5] 丁原辰,任希飞,邵兆刚.以三轴三期模拟实验检验AE法测古应力可行性[A].中国第七届声发射学术研讨会论文集[C]. [s.l.]: [s.n.], 1997. 156~164.
- [6] 丁原辰,徐和聆,邵兆刚,等. AE法测量岩石记忆应力机理的初步探讨,现代力学测试技术[M]. 广州:华南理工大学出版社,1998. 545~551.
- [7] Boyce G M, McCabe W M, Kerner R M. Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression [A]. In: Drnerich V P, Gray R E, eds. Acoustic emission in geotechnical engineering practice ASTM 750 [C]. [s.l.]: [s.n.], 1981. 142~154.
- [8] Michihiro K, Fujiwara T, Yoshioka H. Study on estimating geostress by the Kaiser effect of AE [A]. 26th US Symposium on Rock Mechanics/Rapit City, SD/26—28, June [C]. [s.l.]: [s.n.], 1985. 557~564.
- [9] 丁原辰. 声发射法地应力测量中任意角度取样的计算方法[J]. 煤炭工程师, 1989, (5): 26~27.

AN EXPERIMENTAL RESEARCH INTO DETERMINATION OF HIGHEST PALEOTECTONIC STRESS STATE EXPERIENCED BY ROCK THROUGH GEOLOGICAL AGES

Ding Yuanchen Shao Zhaogang

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100081, China*)

Abstract: Until now there has been no perfect method for the determination of three-dimensional paleotectonic stress field. In this paper, a new method for this determination is shown in the following steps: Firstly, rock specimens are drilled in six or more different directions out of the large rock cores or fresh rock blocks in the testing site. For each direction, ten or more specimens should be obtained. Secondly, the maximum principal stresses of the main tectonic movements experienced by the rock specimens to be measured are determined by means of the “Acoustic Emission Incomplete Erase Phenomenon in the General Sense”. Thirdly, the maximum principal stress value (σ_{mt}) of the highest paleotectonic stress state left in the rock specimens is obtained via statistical analysis. It has been found that the rock specimens still contain the normal stresses (σ_{mn}) induced by the highest paleotectonic stress state in different sampling directions. However, these normal stresses are hidden between the maximum main stress values induced by the relatively low paleotectonic stress states in different phases, so that they are not easy to differentiate from each other. In this paper, these hidden normal stresses σ_{mn} can be located by means of the “AE inversion searching method” with σ_{mt} as a target. Therefore, the highest paleotectonic stress state experienced by the rock specimens can be calculated. The feasibility of this new method has been confirmed by a simulation experiment in the pseudo-plane stress state.

Key words: acoustic emission; paleotectonic stress; paleotectonic stress field; geostress.