

文章编号: 1006-6616 (2000) 02-0045-8

# 声发射法古应力测量问题讨论

丁 原 辰

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 本文针对声发射法古应力测量的地质应用, 归纳为 14 个问题, 给出回答和讨论。重点阐述声发射法古应力测量在地质应用方面的创新性、可行性、局限性、实用性和可持续发展性。

**关键词:** 声发射; 古构造应力场; 古应力

**中图分类号:** P554

**文献标识码:** A

## 0 引言

自从笔者提出测量古应力的声发射(以下将声发射简称为 AE)法以来, 已为众多地质工作者所关注, 并且已经为不少研究项目作了测试。关注者或送测者常有这样或那样的疑虑。为此, 作者从地质应用的角度, 归纳一些主要问题予以讨论。为了便于讨论以求集思广益, 作者采用逐题问答的讨论形式。

## 1 问题讨论

### 1.1 AE 法古应力测量所测的应力值是否为差应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )?

否! 目前 AE 法古应力测量所测得的各应力值是岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值, 是不包含当时孔隙压力的最大主应力值, 实际是当时的最大主应力与当时孔隙压力之差, 也即是当时的有效最大主应力值。从这个意义上说, 也可以认为测的是差应力。鉴于无法知道当时的孔隙压力, 通常将该有效最大主应力值视为最大主应力值。该法基于作者发现的岩石声发射“广义抹录不净现象”。运用此法虽然能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<sup>[1,2]</sup>, 但尚不能给出岩石记忆的古应力状态全貌。各国学者已提出多种三维古构造应力场量化描述方法, 其中两种方法较受关注: 一种是通过位错密度和亚颗粒大小或重结晶颗粒大小估算差应力, 即最大主应力  $\sigma_1$  与最小主应力  $\sigma_3$  之差 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sup>[3,4]</sup>, 另一方法为 Angelier<sup>[5]</sup> 提出经 Reches<sup>[6]</sup> 改进的断层擦痕反演古构造应力场法, 该法只能估计

收稿日期: 1999-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (49572144)

作者简介: 丁原辰 (1940—), 男, 研究员, 从事地应力测量、岩石力学和声发射测试方面的研究。

形成断层时三个主应力方向及主应力差比值  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  (式中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为三个主应力, 并且  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ), 尚不能给出三个主应力的大小, 加之多不考虑构造序次问题, 因而又难给出其时代定位。时至今日, 国内外尚无测定古构造应力场的理想方法。

### 1.2 目前 AE 法只测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值, 那有何用?

其用处可有下列几方面: (1) 不同时代岩石记忆的主要构造运动期幕不同。时代晚的岩石不可能记忆时代老的岩石所经历的主要构造运动期幕, 而时代老的岩石却可记忆时代晚的岩石所经历的主要构造运动期幕。比较不同时代岩石记忆的主要构造运动期幕, 可确定某一地质时代经历的主要构造运动期幕。对于时代不明地层, 通过比较岩石记忆的主要构造运动期幕, 可予以推断。(2) 由于岩石经历的某一主要构造运动期幕最大主应力值, 是通过比较岩石记忆的各应力值所出现的几率 (通常大于 55% 才予以考虑) 确定的。显然, 出现几率最高的应力值对应最重要的一期 (或一幕) 构造运动期的最大主应力值。于是, 某一地块经历的占主导地位的一期 (幕) 构造运动, 及其所属时代可予以判定。(3) 从理论上讲, 由本法求得  $\sigma_1$ , 与 1.1 中所述的另外两种方法相结合, 由求得的  $\sigma_1 - \sigma_3$  值可得  $\sigma_3$  值, 再将求得的  $\sigma_1$  值和  $\sigma_3$  值代入断层擦痕法主应力差比值的公式  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ , 由于  $R$  已知, 于是可求得  $\sigma_2$  值, 而断层擦痕法本身可求得三个主应力方向, 故理应可求得测点断层形成时的三维应力状态。事实上, 由于各个方法, 特别是后两种方法的不确定性, 使三种方法相结合产生一定困难。尽管如此, 笔者认为随着各方法技术水平的提高, 今后值得尝试和探索。(4) 由 AE 法测岩石记忆的各主要构造运动期幕的  $\sigma_1$ , 由所测岩石的抗拉强度可估计某期幕的  $\sigma_3$  (见后面 1.4 所述)。由于地质上的一些方法可判断古构造运动最大主应力方向<sup>[3]</sup>, 于是, 为数值模拟计算古构造应力场提供了一定依据。(5) 王连捷<sup>[7]</sup>归纳我国地应力测量结果 (在 400m 深度范围以内), 得出现今地应力的最大水平主应力  $S_1$  随深度变化的规律:  $S_1 = 7.36 + 0.0225H$  (MPa), 式中  $H$  为深度, 单位为 m。王建平<sup>[8]</sup>认为, 若由测点岩石测得某一期幕古构造应力的最大水平主应力值, 那么, 当时该值随深度变化的规律, 也应符合王连捷的这一关系式。于是, 测点岩石在古构造运动发生时, 其当时的埋深可以估计。结合古构造分析、各地层沉积厚度、风化剥蚀厚度和当时古地貌特征可推断矿体埋深范围。值得注意的是, 王建平将 AE 法测得的最大三维主应力值视为最大水平主应力值。笔者认为, 由于世界各国地应力测量结果<sup>[9,10]</sup>证实, 现今三维空间的地应力最大主应力方向与水平面夹角绝大多数都在 30° 以内, 其中 20° 以内者又占主导地位; AE 法测得的古构造运动最大三维主应力值, 是不考虑当时孔隙压力的有效最大三维主应力值; 况且, 模拟实验显示 AE 法测得的古构造运动最大三维主应力值, 本身就有近 10% 的测量误差<sup>[2]</sup>。鉴于上述诸多原因, 王建平以最大水平主应力值取代最大三维主应力值, 结合一些地质上的分析, 所得出的矿体埋深范围作为一个大致估计值似乎无可厚非。但是有一点特别值得注意, 王建平的观点基于这样一个隐含的概念, 即地层某一期幕的古应力状态的最大主应力随深度变化, 与现今地应力的最大水平主应力随深度变化完全一致。笔者认为这是一个尚有疑问的观点。

### 1.3 不同时代岩石记忆同一幕构造运动的最大主应力值有差别吗? 如何确定各时代经历的主要构造运动期的最大主应力值?

有差别! 国内外实测表明, 现今地应力的最大主应力值随深度加深而线性变大。试想一般时代较老的岩石处于时代较新岩石的底下, 若认为古今地应力最大主应力值随深度变化规律类同, 那么, 经历同一幕古构造运动时, 处于较深处的岩石所承受的最大主应力值显然高于浅处者。既然如此, 自然会产生这样的疑问: 在同一地区, 如何由较老岩石记忆的各个最

大主应力统计值中，找出与较新岩石记忆的各个最大主应力统计值相对应的值？例如，塔里木盆地北部油田地区，由 AE 法测得中生代岩石记忆的各主要构造运动期幕的最大主应力统计值，由小到大排列，依次为 33.4、50.0、71.1、90.7 和 111.5 MPa，即可划分为记忆 5 期（或者称为 5 幕）主要构造运动。而测得新生代岩石记忆的各主要构造运动期幕的最大主应力统计值，依次为 49.4 和 88.8 MPa，即可划分为记忆 2 期主要构造运动<sup>[11]</sup>。尽管可以由此判断出中生代岩石记忆中生代的主要构造运动为 3 期。那么这 3 期中生代的主要构造运动，其相应应力状态的最大主应力值，如何与新生代岩石记忆的 2 期新生代主要构造运动期的最大主应力值相比较而确定呢？如果单纯从数值上进行比较，应从中生代岩石记忆的 5 期主要构造运动的最大主应力值中，剔除 50.0 和 90.7 MPa，得到该地区中生代期间经历 3 期主要构造运动的最大主应力值是 33.4、71.1 和 111.5 MPa。那么能否这样单纯从数值上进行比较呢？下面分两种情况进行讨论。塔北地区现今地应力的 AE 法测量结果表明，在 3845~5860 m 深度范围内，现今地应力最大主应力  $\sigma_1$  随深度变化规律为  $\sigma_1 = 86.11 + 0.0141(Z - 3845)$  (MPa)<sup>[12]</sup>，式中  $Z$  为深度，单位为 m。这说明在该地区，深度超过 400m 达数千米时，王连捷归纳的经验公式已不再适用。按照本关系式，若两个时代沉积岩层的总厚度之差  $\Delta Z$  达 1500 m 左右，那么由中生代岩石记忆的 5 期中，剔除新生代记忆的 2 期主要构造运动期的最大主应力值，就不是 50.0 和 90.7 MPa，而应是 71.1 MPa 和 111.5 MPa。这样，该地区中生代期间主要经历 3 期主要构造运动的最大主应力值则为 33.4、50.0 和 90.7 MPa。另一种考虑，如果所测的各有效最大主应力值在水平面内（如前所述通常多近于水平面），其值包含有岩石自重引起的水平等应力，那么对喜马拉雅期各幕古构造运动最大主应力值的记忆，中生代岩石与新生代岩石应无多大差别。理由如下：岩石自重引起的水平等应力为  $\sigma_0\nu/(1-\nu)$ ，式中  $\nu$  为泊松比， $\sigma_0$  为岩石自重应力<sup>[13]</sup>。由于油田地区沉积岩多为砂岩， $\nu$  值为 0.2~0.25，容重为 2.40~2.69 g/cm<sup>3</sup><sup>[14]</sup>，若  $\nu$  值和容重皆按高值考虑，则即使中、新生代岩石埋深相差 1500 m 深（通常新老主要古构造运动相差一幕的不同时代岩石，在埋深上的差别远小于 1500 m），由岩石自重引起的水平等应力为  $1500 \times 0.0269 \times 0.25 / (1 - 0.25) = 13.4$  MPa，而皆按低值考虑，则只有 9 MPa（计算从略）。对于后者，与单纯从数值上分期相比并无多大差别。笔者认为中、新生代经历同一幕主要构造运动时，只有无一遗漏地获得各个地层岩石经历的主要构造运动期最大主应力值，或者获得新生代构造运动时所测中生代岩石与所测新生代岩石深度差，才能可靠地估计中生代岩石对这幕新生代主要构造运动最大主应力的记忆值，从而获得中生代岩石对中生代各主要构造运动最大主应力的记忆值。

1.4 为什么 AE 法所测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值，比其他方法估计的差应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 还低？

如前所述，AE 法所测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力统计值，是不考虑孔隙压力的有效最大主应力值（如果测点孔隙压力可以忽略不计，那么可认为所测值就是最大主应力值）。以塔北实测值为例，喜马拉雅期最高一幕最大主应力统计值  $\sigma_1$  为 88.8 MPa，而万天丰等以位错密度等法估计喜马拉雅期平均  $\sigma_1 - \sigma_3$  值为 92.6 MPa<sup>[15]</sup>。库伦-摩尔破坏包络线预测，只有当差应力超过岩石抗拉强度的 4 倍时，剪切破裂才会发生<sup>[16]</sup>。通常完整、新鲜的石英砂岩抗拉强度也仅为 6.6 MPa<sup>[14]</sup>，故可引起其剪切破坏的差应力应为 26.4 MPa。按此，可由作者估计的  $\sigma_1$  值推出  $\sigma_3$  值： $\sigma_3 = 88.8 - 26.4 = 62.4$  MPa。这里之所以用石英砂岩抗拉强度，是因为位错密度法主要以石英颗粒为研究对象。这样估算下来，笔者所用方法  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  的比值为  $88.8/62.4 = 1.4$ （未考虑孔隙压力），这一比例关系与一般现今地应力现场测量结果较

为相近。需要指出,除了两种方法本身的差别以及笔者所测的是一个别地区之外,岩性也是一个主要问题。

### 1.5 AE 法所测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值有无时序性?

所谓时序性是指,各主要构造运动期由新到老排列顺序与最大主应力值由小到大排列顺序一致。有的送测者将提交测试报告中测得的由小到大排列的各个最大主应力统计值,依次与地质上由新到老各个主要构造运动期幕一一对应,而并未给出可靠的分析。这实际上就是错误地认为有时序性,这可由上述塔北地区测量和分析结果予以否定。如果送测者由于某种原因仅测了一两个地层的岩石,则只能比较各期幕主要构造运动的最大主应力值的记忆出现率,确定记忆出现率最高的一期(幕),该期(幕)在所测地点起主导作用。

### 1.6 AE 法所测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值是相应的残余应力吗?

否!岩石残余应力的定义:岩石在无外载荷和无温度梯度时所存在的应力。残余应力是由于材料均匀而应力作用不均匀,或应力作用均匀而材料不均匀,或这两种情况同时存在,使岩石局部屈服产生塑性变形,当卸去外载荷后产生的。如当板弯曲时,若其上下表面附近达到了屈服点而产生塑性变形,在外力去掉后,板中间的弹性部分力图恢复到变形前的状态,而塑性变形部分限制其恢复,这就出现了残余应力。在弯板内靠近上表面处产生残余压应力,而靠近下表面处产生残余张应力<sup>[17]</sup>。AE 法古应力测量所测的是岩石对它过去长时间(以地质时间为时间尺度)经受的应力的记忆值,就某一期幕构造运动来说,其最大主应力值相对另两个主应力和取样方向正应力而言,岩石试样记忆出现率较高<sup>[2]</sup>,故笔者等人以高于一定记忆出现率为准,给出某一期幕构造运动的最大主应力统计值。从微观机制上考虑,AE 法古应力测量所测应力总是材料内部微裂纹活动的反映<sup>[18]</sup>,是对造成材料内部损伤时原有应力的一种记忆,或者简单地说,是对材料损伤的一种记忆。

### 1.7 AE 法所测岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值与所测岩石的岩性有关否?

有关!各种现今地应力的现场测量法都证实,地应力测值与岩性有关。众所周知,松软岩体内所测的现今地应力值低于坚硬岩体。这通常解释为松软岩体对应力有所释放。固体材料都会发生松弛现象,岩石也不例外。所谓松弛(又称弛豫)是指物体的应变保持不变时,其内部应力随时间的延长而逐渐减小的现象。笔者认为松软岩体对应力的释放,实际上就是松弛现象。岩石和地块又都存在蠕变现象:物体在大小和方向都保持不变的外力作用下,其变形随时间增长而不断增加的现象。有许多地质现象表明,即使温度和围压都不高、应力差也不很大,但由于应力作用时间很长,岩石也会发生蠕变,从而导致相当大的变形<sup>[17]</sup>。体现岩石记忆应力能力的声发射测量法,是通过岩石损伤变形来实现的,因而岩石应变也存在凯瑟效应(Kaiser effect)。引起岩石损伤变形的温度也同样有凯瑟效应(凯瑟效应定义见文献[1],恕不赘述)。实验室中对力学性质相差颇大的岩石试样以同一方式施加相同的外加压应力,再以相同施压方式对这一人为先存应力作声发射法测量,通过表观凯瑟效应(什么是表观凯瑟效应见后述)和声发射抹录不净现象所测得的记忆应力是一致的。这看起来好象声发射法对先存应力的测量与岩性无关,其实不然,如果考虑到岩石的松弛现象或蠕变现象,则 AE 法所测应力就偏低或偏高。这是因为实验室内无法模拟那种漫长而又缓慢增加的构造应力作用方式,只能将各种构造应力作用方式归一化为一定等应力或等应变加载方式而已。笔者认为其他古应力测量方法也存在类似问题。但是,声发射法古今地应力测量有一个优点,无论哪种岩石,即使是破碎岩石(当然最好是坚硬、新鲜的岩石),只要能取得岩石试样,就可作测试。即声发射法不受岩石破碎与否的限制。

### 1.8 声发射法与声波法有何不同？能否将二者结合起来测量古应力状态？

声波法也是研究岩石力学性质的声学方法。它是通过声波发射装置经附着在岩石或岩体表面的发射探头向岩石内发射声波信号，信号在岩石中经直射、折射和反射等方式传播至另一表面，再由附着在另一表面的接收探头所接收。依据比较发射信号与接收信号的到达时间、相位和振幅，来了解岩石或岩体的情况。声发射技术与声波测试技术不同之处在于它不向岩石发射声信号，只接收岩石在受力变形过程中本身产生的声信号。声波法常用来确定爆破开挖巷道时，所形成的巷道壁岩石松动圈。近年来，一种以声波法确定古应力最大主应力方向的方法被提出<sup>[19]</sup>。方法是以待测地点业已定向的岩石，制成厚度约 1 cm、两面平行的定向岩片，在其直径方向两端分别安装一个声波发射探头和一个声波接收探头。在 180°范围内每隔一定角度作一次重复性测量，由比较接收信号，确定古构造应力的最大和最小平面主应力方向。显然，这一方法仅能测最高古构造应力状态的相应平面应力的主应力方向。然而，有一种与此截然相反的观点，认为钻孔中取出定向岩心作这种测量，由于钻孔取心过程中，岩心发生应力卸载，岩心上出现了与卸载程度成比例的微裂隙，在最大水平主应力方向上卸载程度最大，这使沿原最大水平主应力方向有最小的波速，原最小水平主应力方向有最大的波速，因而所测得的是现今平面地应力状态的主应力方向<sup>[20]</sup>。看起来，若认为所测古应力最大主应力处于水平面内，测古应力的声发射法与这一声波法相结合（当然，其前提是文献<sup>[19]</sup>的方法成立），可以获得古构造应力的平面应力状态，事实上，由于这种声波测古应力方向的方法，对于经历多期古构造运动的岩石来说，无法确定岩石记忆的是哪一期古构造运动的主应力方向，因而笔者认为二者难以结合。

### 1.9 国内外文献报导利用声发射的凯瑟效应可测三维现今地应力状态，难道利用声发射广义抹录不净现象就不能测三维古应力状态吗？

能！金川忠（Kanagawa）<sup>[21]</sup>提出利用岩石声发射凯瑟效应测现今地应力的方法：从现场取回定向大岩心，室内在定向大岩心上从 6 个以上方向取定向试样，每方向至少取 10 个（常取 30 个）试样，以岩石声发射凯瑟效应测得各取样方向正应力的统计值，进而计算测点现今三维地应力状态。该法有两个前提。第一认为岩石声发射凯瑟效应对应岩石经历的历史最高应力；第二认为岩石声发射凯瑟效应有方向性，即岩石对应于凯瑟效应的应力是岩石记忆取样方向的正应力。对于第一个前提，Michihero<sup>[22]</sup>予以否定，他认为岩石声发射凯瑟效应对应引起岩石产生饱和和残余应变的应力，也正因为如此，才可用岩石声发射凯瑟效应测量地应力。笔者认为，引起岩石产生饱和和残余应变的应力所对应的凯瑟效应，不应算是凯瑟效应，而应称为表观凯瑟效应。真正的岩石声发射凯瑟效应还是对应于岩石经历的历史最高应力<sup>[2,18]</sup>。Hardy<sup>[23]</sup>认为，声发射累计数与外加压力响应曲线上第一个斜率陡增点与取样方向正应力无明显对应关系，倒是第二个斜率陡增点与测点的最大主应力相对应。笔者等人的实验结果证实，响应曲线上有多个陡增点，与最高应力相对应的陡增点是凯瑟效应，其余陡增点是表观凯瑟效应的反映。大多数情况下，响应曲线上第一个陡增点与取样方向正应力无明显对应关系。尽管金川忠由响应曲线第一个陡增点对应应力出现几率统计出取样方向正应力，但由于其前提不可靠，故笔者认为只有在特殊的情况下才有适用性<sup>[18]</sup>。笔者等人以模拟实验证实，对应于岩石经历的历史最高应力状态的取样方向正应力，在响应曲线上存在陡增点，只不过该陡增点隐藏于诸多陡增点之间难以辨认<sup>[2]</sup>。笔者提出以“AE 反演搜索法”可将其搜索出来，并以准平面应力状态的模拟实验初步证实该法求古平面应力状态的可行性<sup>[24]</sup>。若该法一经付诸实践，那么逐层剥离出不同时代岩石各自经历的最高古应力状态，一个地区不同时代的古

应力即可求得。无疑, 所测各岩石在某一幕古构造运动时, 由于当时埋深不同以及岩性不同, 测值会有些差别, 但主应力方向在相当大的范围内将不会有明显差别。之所以如此说, 是因为若干实测结果显示, 现今地应力水平主应力的方向, 如果排除地形等因素的影响, 则随深度变化不大<sup>[25]</sup>。笔者相信随着声发射技术的发展, 测量三维古应力状态的声发射法必然可持续发展而日臻完善。

#### 1.10 变质岩或有岩脉充填的岩石, 对其变质前或岩脉充填前的古应力还有记忆吗?

变质岩是已发生蚀变或在高温高压下已发生变质的岩石, 赖以体现记忆应力的变质前的原有损伤多已不复存在, 既然如此, 变质前的古应力理应失去记忆。笔者等人已经采集了同一地方同一时代变质与非变质的岩石, 以求通过实测得出结论, 但遗憾的是因经费和人员变动等原因, 工作中途告停。笔者认为这是今后必须要作的工作。对于有岩脉充填的岩石, 若充填前的抗压强度高于充填后者, 因测试过程中岩石提前沿充填处破裂故无法测得充填前的古应力, 反之, 充填后强度反而提高则可以测得。另外, 若能取得无充填的岩石试样也可测得充填前的古应力。尽管这一分析看似有理, 但还缺乏强有力的实验支持。

#### 1.11 能否以同一期幕古应力最大主应力等值线找矿?

笔者等已尝试在油田地区, 比较出油井与非出油井现今地应力最大主应力值随深度变化规律, 初步得出结论, 在同一深度上前者低于后者, 并由此可给出油田各个井位产油贫富的估计<sup>[12,26]</sup>。对于古应力而言, 因不同测点在古构造运动时岩石的埋深难以得知, 故无法比较。目前声发射法古应力测量精度还不够高, 加上积累资料不足, 即使得知不同测点在古构造运动时岩石的埋深一致, 也难由测值上的差别来寻找矿体, 但笔者认为这是今后声发射法古应力测量的重要研究方向之一。

#### 1.12 在什么情况下古今应力的最大主应力值声发射法都能测, 在什么情况下只能测古或只能测今?

一般说来, 从钻孔不同深度上取出的岩心, 既可作现今应力测量又可作古应力测量。但钻孔深度太浅现今地应力值太低则无法同时测现今应力。这是由于古应力值远高于现今地应力值时, 若二者都测因需加载挡位不同而受技术条件的限制, 致使在测量过程中又不便更换挡位。这正像用一个能称 100 斤的大秤既称几十斤又称几两, 显然, 称几两时称不准甚至无法称。如果地表露头采集的石块, 虽然地表也有地应力, 因其很小, 如上所述无法在测古应力的同时又测现今地应力, 事实上即使能测也无多少意义, 故只可用来测古应力。对于那些只要求测现今地应力的工程而言, 即使取自浅孔的岩心, 由于无需测古应力可采用低档位加载, 正如用最多能称一斤的秤去称几两一样, 故可获得相对较高的现今地应力最大主应力测量精度。

#### 1.13 为什么一个测点至少要 10 个试样, 难道 3 个或 5 个试样不行吗?

声发射法古今地应力的最大主应力值测量, 要求在空间三个任意方向上取样, 每个方向至少取三个试样, 每个测点至少 10 个试样。之所以至少 10 个而不是至少 9 个, 因为第一个用于测试的试样, 是探路者, 用它选定测试参数, 使后面 9 个试样以最恰当的参数进行测试。每个空间方向 3 个试样已是最低限度。前已有述, 在特殊情况下试样的记忆应力会显示方向性, 即显示对取样方向正应力的记忆, 而每个试样又都记忆测点现今的和主要古构造运动的最大主应力。当每个方向只取一两个试样时, 在这一情况下, 一旦取样方向接近最大主应力方向, 则取样方向正应力值就可能接近最大主应力值, 于是, 这一方向所测测点的最大主应力值就难以选定。另一方面, 针对岩石的力学性质分散性较大这一特征, 国际岩石力学方法

委员会指出, 凡室内通过试样测试提供一个岩石力学测试结果, 试样数量应不少于 10 个。

### 1.14 巷道壁上取的岩块作 AE 法古应力测试, 是否会受岩体炮崩冲击压应力影响?

无明显影响! 笔者以山东省原瞳金矿花岗岩岩体内炮崩后从巷道壁上敲下的岩块取样, 又以同一地段的水平钻孔所取岩心取样, 二者最高古应力的最大主应力测量结果基本一致。

## 2 结束语

建立在声发射广义抹录不净现象基础上的古应力测量法, 就地质应用而言, 还存在不少有待深入和拓展的研究领域。笔者感谢孙宝珊研究员、张国铎研究员等诸多同志的关心和指教, 感谢新、老领导所给予的支持。

### 参 考 文 献

- [1] 丁原辰, 王红才, 汪西海. 声发射估计岩石古应力的实验研究 [A]. 地质力学与地壳运动——地质力学开放研究实验室 1991~1992 年年报 [C]. 北京: 地震出版社, 1994. 43~55.
- [2] 丁原辰, 任希飞, 邵兆刚. 以三轴三期模拟应力检验 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]. 中国. 北京. 怀柔, 1997. 156~164.
- [3] 万天丰. 古构造应力场 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [4] Max Wyss. 地球的应力 [M]. 马瑾等译. 北京: 科学出版社, 1984. 18~30.
- [5] Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets [J]. JGR, 1984, 89: 5835~5845.
- [6] Ze'ev Reches. Determination of the tectonic stress tensor form slip along faults that obey the Coulomb yield condition [J]. Tectonics, 1987, 6 (6): 849~861.
- [7] 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等. 地应力测量及其在工程中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1991. 148~149.
- [8] 王建平, 刘永山, 董法先, 等. 内蒙古金厂沟梁金矿构造控矿分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. 77~86.
- [9] Hudson J A and Cooling C M. In situ rock stresses and their measurement in the U. K. —Part 1: The current atate of Knowledge [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1988, 25 (6): 363~370.
- [10] 廖椿庭, 崔鸣铎, 任希飞, 等. 金川矿区地应力测量与构造应力场 [M]. 北京: 地质出版社, 1985. 31.
- [11] 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.
- [12] 丁原辰, 孙宝珊, 汪西海, 等. 塔北油田现今地应力的 AE 法测量 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22 (2): 215~218.
- [13] 王 仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [14] 叶金汉. 岩石力学参数手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. 488~489.
- [15] 万天丰, 曹秀华. 中国三叠纪中晚期—早更新世构造应力值的估算 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22 (2): 145~152.
- [16] Atkinson B K. 岩石断裂力学 [M]. 尹祥础, 修济刚, 等译. 北京: 地震出版社, 1992. 65.
- [17] 许 杰. 地质辞典 (一), 普通地质、构造地质分册下册 (构造地质、地质力学) [M]. 北京: 地质出版社, 1983. 280, 18~19.
- [18] 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 [A]. 现代力学测试技术 (第九届全国实验力学学术会议论文集) [C]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998. 545~551.
- [19] 吴淦国, 周竟平. 变形岩石的超声波研究 [A]. 地球科学进展 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [20] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 138~140.
- [21] Kanagawa T, Hayashi M and Nakasa H. Estimation of spatial geostress component in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission [J]. proc. Japan. Soc. Civil Eng., 1977, (258): 63~75.
- [22] Michihiro K, Fujiawara T, Yoshioka H. Study on estimating geostress by the Kaiser effect of AE. [A]. 26th US Sym-

posium on Rock Mechanics [C]. /Rapid City, SD/26-28, June, 1985. 557~564.

- [23] Hardy H R Jr, Zhang D and Zelanko J C. Recent study of the Kaiser effect in geologic materials[M]. Clausthal (West Germany): Trans. Tech. Publication, 1989. 27~55.
- [24] 丁原辰, 邵兆刚. 测定岩石经历的最高古应力状态实验研究 [A]. 第八届全国声发射学术交流会论文集 [C]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999. 1~7.
- [25] 李方全. 地应力测量、构造应力场与工程 [A]. 工程地质·水文地质·环境地质 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 32~38.
- [26] 丁原辰, 孙宝珊, 邵兆刚, 等. AE 法油田最大主应力值的测量及其与油产关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17 (3): 315~321.

## DISCUSSION ON PALEOSTRESS MEASUREMENT BY AE METHOD

DING Yuan-chen

*(Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** Some 14 problems relating to the application of AE paleostress measurement to geological studies are discussed in this paper, in which the creativeness, the feasibility, limitations, the applicability and the continued development of the method are emphasized.

**Key words:** acoustic emission; paleotectonic stress field; paleostress