

文章编号：1006-6616(2001)04-0346-05

AE 法岩石应力测量中试机晃动量问题

丁原辰，汪西海，何培元

(中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081)

摘要：声发射法岩石记忆应力测量中，定区测试的对称干扰信号来自试样端面的摩擦。通过测量试样加压过程中试台晃量及其变化，可了解试样端面摩擦引起 AE 干扰信号的相应大小及其变化。实测结果显示试样加压的初始阶段，试台晃量及相应干扰信号皆最为显著。结合当前测试水平，笔者给出了克服对称干扰信号的方法和见解。

关键词：声发射；古应力；地应力；凯瑟效应；液压式万能试验机

中图分类号：O421+.5

文献标识码：B

1 问题的提出

声发射（简称 AE）法岩石应力测量中，对岩石试样施加外加压应力时，试样与压力机（或万能试验机——简称试机）上下压头的高同轴度是对试样施加均匀外加压应力的保证。为此，笔者曾经在岩石试样中部同一水平面上粘贴互成 180° 的两个电阻应变计，并在与岩石试样同一岩性的岩石上粘贴温度补偿用的电阻应变计作半桥连接，用数字式动态应变仪测量试样两边在加载时的应变量，用以判断试样是否承受均匀外加压应力。若不均匀，调整带有半球面的下压头使之尽量均匀。在此基础上，为保证同轴度又便于压头调整，专门研制了同轴度调整器（简称扶正器），使得岩石试样较好的承受均匀轴向载荷。

但是，总是发现施加一个人为先存应力后，接着观凯瑟效应^[1]（即 Holcomb^[2]所称的室内凯瑟效应“laboratory Kaiser effect”）测量，即使使用扶正器并采用定区测试的方法，在对岩石试样作测试时，第二次加载的初始阶段，有时还会出现较明显的声发射信号；另外，卸载时常常会突然出现相当强的声发射信号，而周围环境并不存在干扰源。由于定区测试虽然能排除定区外的噪声干扰，却不能排除定区外对称信号的干扰，分析对称干扰信号的来源，尽管采取了一些减小端面摩擦的有效措施，是否仍然为上下压头与试样上下端面的摩擦所产生？因为扶正器上下端面不平行度误差是 $2\mu\text{m}$ ，自然上下压头不平行度误差不可能优于 $2\mu\text{m}$ ，而岩石试样一般只能加工到上下端面不平行度误差 $3\sim 4\mu\text{m}$ 的水平（最高水平也已达

收稿日期：2001-09-20

作者简介：丁原辰（1940—），男，1964年毕业于山东大学物理系，研究员，主要从事地应力测量、岩石力学及 AE 法岩石应力测试研究。

到 $2\mu\text{m}$), 当试样上端面接触到上压头开始加压时, 试样上端面与上压头面的不平行度误差上限可达 $5\sim 6\mu\text{m}$ 。故当试样开始加上压力时, 处在试台上的下压头的半球面必然会调整其在球面座中的位置, 力图使试样轴线与上下压头同轴。于是, 导致下压头的半球面在球面座内产生移动直接引起试样端面与压头端面产生摩擦。试机工作时液压油的波动会引起震动, 尽管试机采用了多种防震措施, 作者分别以声发射探头附着于上压头和试台上, 接收到的 AE 信号仍超过通常岩石试样在加载过程中产生的 AE 信号强度。说明震动的低频噪声虽然通过声发射仪的参数选择可予以排除, 然而震动引起 AE 探头接触面的摩擦仍然存在。由此推知, 这震动必然反映为试台晃动, 从而间接引起试样端面的摩擦。另外, 工作油缸内的工作活塞与缸壁间隙在工作过程中不可能保持不变。同样会造成试机在加载过程中试台产生晃动, 又间接导致试样端面的摩擦。

于是提出这样的问题, 既然在对试样加载作 AE 法岩石记忆应力测量的过程中, 诸多因素反映为试机试台的晃量, 那么晃动量究竟有多大? 在加载过程中如何变化? 而该变化又是否存在一定的规律? 该变化与 AE 信号变化是怎样的对应关系?

2 试验机试台的晃动量测试

2.1 测试前的准备

2.1.1 千分表触头触压位置处不平整度测量 测试是在 WE-30 型液压式万能试验机上进行的。该机有 300kN、150kN 和 60kN 三个量程, 实验选用 60kN 档。将一个直径 30mm 高 60mm 上下两端面不平行度误差 $3\mu\text{m}$ 的岩石试样, 安放在试机下压头的中心部位, 经扶正器扶正后试样轴线与上下压头轴线有较好的同轴度。将试台升高到试样上端面与上压头接触并显示有 0.2kN 压力, 立柱刻度显示指针处在 246mm 处。开启回油阀使试台下落一定尺寸关闭回油阀, 取下试样, 起动试机, 打开送油阀使试台位置升至立柱刻度显示指针处在 248mm 处, 关闭送油阀、关闭试机 (即停止油泵电机) 使试台位置暂时锁定。将一只千分表安装在一个磁力表座的卡杆上。磁力表座卡在试机的右支柱上, 位置恰靠在右支柱上的操作电机的电钮盒上方。表座上面再加压一个磁力表座, 以防止表座有任何移动。调节表座卡杆位置使千分表触头触压到试台夹持装置的钳口板 (右侧板) 上, 调整千分表使表盘处于水平, 并使千分表指针与一刻度线重合。在关机情况下开启回油阀使试台位置由 248mm 处下降至 245mm 处, 对千分表触头触压位置处 3mm 范围内的不平整度进行测量, 千分表读数无任何变化, 故可估计其不平整度小于 $0.1\mu\text{m}$ 。起动试机使送油阀的送油量与通常测试时的送油量近于一致, 让试台在 245mm~248mm 范围升降, 则原与千分表刻度线重合的指针显示有可辩的左右移动, 即约有 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 的变化。这说明试机空载过程中试台自身就产生晃量, 只不过试样承受压力后, 试样加压测量过程中试台升高范围远小于 1mm, 并且已对试样施加压力致使其晃量更低于 $0.1\mu\text{m}$ 的变化而已。

2.1.2 加力范围选定 由于作者主要使用 60kN 这一档位, 虽然根据计量部门对作者所用试机检定结果, 准予该机作计量使用。但显示该档位的变动性 10kN 时为 0.8%, 20kN 时为 0.45%, 30kN~60kN 范围不超过 0.1%, 测试范围选定在 0~20kN。

2.2 测试

将 $\phi 30 \times 60\text{mm}$ 花岗岩试样由 0kN 加压至 20kN, 此后压力降至 0kN (试样与上压头脱开, 间隙 1mm 左右), 再升至 20kN 反复 3 次, 对加载和卸载过程试台晃动量进行测量, 测值列

于表 1。

注意：表 1 中加载力为 0 时，指试样已与上压头脱开，离上压头约 1mm 间隙；表中“ - ”表示该压力未测。为保证千分表有适当的触点加载力，起始读数选为 40.0 (μm)，表中某正值（如 1.8），指 40.0 加上该值（如 40.0 + 1.8）；表中某负值（如 -1.8），指 40.0 减去该值（如 40.0 - 1.8）。

表 1 试台晃动量测值表

Table 1 The measured swaying magnitude for test rig of universal testing machine

加载力 (kN)	千分表读数： $40 \pm x/\mu\text{m}$					
	第一次测量		第二次测量		第三测量	
	加载	卸载	加载	卸载	加载	卸载
0	0	1.8	0	2.3	0	-1.7
0.2	-0.1	1.8	-0.1	2.3	-1.8	-
0.4	-0.2	1.8	-0.1	2.3	-1.8	-2.2
2	-0.2	1.8	-0.1	2.3	-1.8	-
5	-0.2	1.8	-0.1	2.2	-1.8	-0.7
10	-0.2	0.8	-0.1	1.5	-1.8	-0.8
15	-0.2	0.3	-0.1	0.4	-1.8	-0.8
20	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-1.8	-1.8

2.3 测试结果说明

在第一和第二次升高加载力测量时，加载力由 0kN 升至 0.2kN 时，虽然设备所限估测的 $0.1\mu\text{m}$ 晃量不够准确，但晃量的产生是确凿的，因为千分表指针处在 $40\mu\text{m}$ 刻度线上稍有偏离较易辨别。第三次作升高加载力测量时，加载力控制不当由 0 突升至 1.2kN，此时千分表读数由 0 突变到了 -1.8，把加载力退回到 0.2kN 后以较均匀的速率加载至 20kN，千分表读数保持 $-1.8\mu\text{m}$ 不变。由表 1 可见，三次测量皆显示加载力由 0.2 ~ 20kN 时，试台无明显可辨的晃量。其中第一次加载测量时，由 0.2kN 升至 0.4kN 千分表读数由 -0.1 变为 -0.2，在误差范围内。

然而，卸载测量时情况就不同了。由 20kN 降至 0kN 过程中，千分表读数变化（即试台晃量）起伏显著，似乎无明显规律可言。其实不然，分析卸载时操作回油阀的过程，可以察觉每当打开回油阀，加载力从 20kN 降至 15kN 过程时，试台晃量较大。每当卸载至一定程度卸载降落太慢或不再降落，为了使力进一步降落而开大回油阀时，试台晃量又出现一次突变。表 1 中第一和第二次卸载测量结果，就是因为由 15kN 降至 5kN 每 5kN 将回油阀调大一次所导致。5kN 降至 0kN 未再动回油阀，加载力缓慢降落，试台无可辨晃量。第三次卸载测量时，回油阀回油量故意一下子开大，降至 5kN 以前不再动它，于是就出现了与第一次和第二次卸载测量相反的结果，只在加载力从 20kN 降至 15kN 过程时，试台晃量较大，而 15kN 降至 5kN 过程中试台无明显可辨的晃量，5kN 降至 0kN 时，由于又将回油阀调大、调小各一次，使得在这一卸载范围内，试台又呈现较大晃量。

3 测量结果讨论

测量结果显示由 0kN 升至 0.2kN 时，试台有可辨晃量。因此，无论对试样作第几次加载

时,在这一加载范围内出现的声发射信号绝不能排除试台晃量的影响因素。但此后从 0.2kN 升至 20kN,千分表读数保持不变,即试台无明显可辨的晃量。应该指出由于位移测量设备精度的限制,作者的实验测试还是粗糙的。因为千分表每变一小格表示变化 0.001mm 即 $1\mu\text{m}$,而测得的变化量多在 $1\mu\text{m}$ 以内。尽管作者使用放大镜仔细辨别一小格以内指针的位置变化,但毕竟肉眼辨别误差也只能控制在 0.3 格 ($0.3\mu\text{m}$) 左右,究竟 $0.1\mu\text{m}$ 甚至更低的试台晃量对岩石试样声发射信号存在多大的影响,由于作者当前对这样的微小晃量无法测量,故其与岩石试样声发射信号的对应关系无法建立,因而尚不能判断其相应影响程度。就目前测量精度而言,其相应影响程度尚难察觉。由于试样上下端面的不平行,对试样加载时特别是加载的初始阶段,下压头的半球面在球面座内位置的调整对 AE 信号影响是存在的,反映在一定程度上试台的晃量也在所难免。否则 Momayez 等^[3]也不会给出试样不平行度误差 0.001mm ($1\mu\text{m}$),这样高的指标。显然 0.2~20kN 这一加载范围内,岩石试样声发射信号受试台晃量的影响,相对 0~0.2kN 范围时大为减小;并且实验证实若测试时特意使某加载力保持一段时间(例如几分钟)不变,则这段时间内仪器接收不到 AE 信号,这说明对一般情况而言,震动的影响从测试技术上可减少到予以忽略的程度。就声发射法岩石记忆应力测量精度而言,加载力的变动性起重要作用。

基于上述测试结果,为尽量降低端面摩擦产生的对称干扰信号,笔者提出下述方法和见解:(1) 不管使用试机哪个档位,先将试样压至 2 格再退回至 0.5~1 格以内(不可退至 0,尤其不可使试样与压头脱开),反复多次直至 AE 信号不再出现,然后开始加载测量。这样可使下压头在半球面座内调整到最佳的状态,从而大大减小反映为试台晃量的试样上下端面的摩擦,进而极大地减小定区测量时加载初始阶段来自试样上下端面摩擦导致的对称干扰信号。(2) 提高试样加工精度,降低试样端面不平行度和不垂直度误差也是减小端面摩擦的有效途径。(3) 由于试样不平行度误差不可避免,使用“二点五通道”不论对排除加载时产生的还是来自外界的对称干扰信号都是最有效的措施。然而笔者所用国产 4010 系列声发射仪的“二点五通道”,在岩石试样长度(50~70mm)范围内不起作用。限于篇幅对此不再讨论。(4) 卸载测量结果可以得到这样的启示:减小送油量或回油量的波动,可降低试机试台的晃量,由此引起的试样上下端面摩擦导致的对称干扰信号也就随之降低。因此作声发射法岩石记忆应力测量时,对试样缓慢而又均匀的加载是十分必要的,尤其使用液压式试机更是必须如此。据文献^[4]得知,对白云质大理岩试样而言,匀加载速率取 $(0.065 \pm 0.002) \text{MPa/s}$ 为好。匀加载速率越低,减小压力波动的影响越有保障。Rudajev 等^[5]为减小压力波动的影响,作砂岩的声发射研究时,所取匀加载速率低达 0.0000833MPa/s ,可见为保障测量精度而言可不必过多考虑匀加载速率的下限。

另外,近年来国内已批量生产的电子万能试验机,由于加载无需液压,故根本不存在液压波动问题,并且加载过程中变换档位也较方便,用于声发射法岩石记忆应力测量应该是理想的设备之一。

4 结束语

为了克服试机试台晃量对 AE 测量的影响,笔者曾研制了专用消晃扶正器,与使用一般扶正器,压 2 格退回至 0.5~1 格间再加载的测试方法相比,就现有测试水平而言,虽有效果但并不明显。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Holcomb D J. General theory of the Kaiser effect [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993 : 30 (7): 929 ~ 935.
- [3] Momayez M, Hassani F P, Hardy Jr. H R. Stress memory measurement in geological materials using the Kaiser effect of Acoustic Emission [A]. Proc. 10th Int. AE Sympo. [C]. [s. l.]: [s. n.], 1990. 476 ~ 483.
- [4] 丁原辰, 张大伦, 傅芳才. 岩石试样凯瑟效应的实验研究 [A]. 地质力学研究所刊第 12 号 [C]. 北京: 地质出版社, 1989. 171 ~ 183.
- [5] Rudajev V, Vilhelm J, Kozak J, et al. Statistical precursors of Instability of loaded rock samples based on Acoustic Emission [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1996 : 33 (7): 743 ~ 748.

THE SWAYING PROBLEM OF UNIVERSAL TESTING MACHINE IN THE MEASUREMENT OF ROCK STRESS BY AE METHOD

DING Yuan-chen, WANG Xi-hai, HE Pei-yuan

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

Abstract : In the measurement for memorized rock stress by AE method, the symmetrical disturbance for AE in limited receiving scope comes from the fraction between endsurfaces of specimen and pressure heads of universal testing machine. The magnitude and change of the disturbance for AE can be obtained by the measurement of swaying magnitude and change of test rig of universal testing machine in the process for uniaxial compression test. The measuring results show that the sway and the corresponding disturbance for AE are all remarkable in the beginning stage of compressing specimen. The methods and the viewpoints for overcoming the symmetrical disturbance for AE are given by authors on the basis of the level for the measurement at present.

Key words : acoustic emission ; paleotectonic stress ; geostress ; Kaiser effect ; universal testing machine