

当代钻孔地应力测量的主要问题*

安 欧

(国家地震局地壳应力研究所)

摘 要

近半个世纪以来,钻孔法地应力测量中尚未解决的主要问题是:假定岩石在力学性质上各向同性;没有考虑钻孔效应;忽视了测量的时间效应;简化了岩石力学性质的多变性。由于这些问题的存在,使得主应力测值的误差可达100%,主应力方向的测量误差可达90°,还可以引起主应力性质的正负变换。要进行高水平的地应力测量,必须把测量建立在岩石力学性质各向异性的基础上,减少或避开钻孔效应的影响,考虑或避开测量的时间效应,避开岩石力学性质多变性的影响,分别测量各种地应力成份,进行定点长期连续观测。

一、序 言

自美国利尤兰斯于1932年提出岩体中应力测量的解除法以来,至今已有半个世纪的历史了。世界上许多国家都已开展了地应力测量,并将其结果用于研究一些实际问题。但至今在原理和方法上,仍有一些根本性问题未得到解决。本文讨论了其共同性的问题,并提出了进行高水平地应力测量的标志和解决问题的途径。

二、当代钻孔地应力测量的主要问题

在当代地应力测量的全过程中,存在的共同性问题的范围是很广泛的。本文只讨论其根本性的原理和方法问题。

1. 关于岩石在力学性质上的各向同性问题

在现代地应力测量中,从原理到方法以及计算主应力大小和方向的公式,都是建立在以假定岩石是各向同性体为前提的理论基础上的。但是,由于岩石内含有大量孔隙、裂隙、节理以及沉积环境和岩浆流动所造成的矿物成份和组织结构的不均匀,实际岩石的力学性质是各向异性的。其中二正交方向某一力学参量之比值,为此参量的正交异性系数。从表1—3的实验结果可知,岩石压缩弹性模量、压缩强度极限和张伸强度极限的正交异性系数依次为1.15—3.10、1.10—3.70和1.23—2.80。

*地震学联合科学基金会资助课题

表1 岩石压缩弹性模量正交异性系数

岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向	岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向
厚层石灰岩	1.17—1.80	1.56—2.01	细砂岩	1.27—1.50	1.68—1.80
薄层石灰岩	1.27—2.05	1.79—2.36	花岗岩	1.34—2.07	1.52—2.63
大理岩	1.15—1.87	1.22—1.93	花岗斑岩	1.25—1.93	1.20—2.10
石英岩	1.16—1.41	1.20—1.50	页岩	1.26—2.24	1.59—3.10
粗砂岩	1.21—1.45	1.57—1.61	玄武岩	1.30—2.00	1.45—2.11

表2 岩石压缩强度极限正交异性系数

岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向	岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向
玄武岩	1.19—1.90	1.10—2.30	石灰岩	1.41—2.20	1.70—2.60
石英岩	1.47—1.80	1.68—1.90	砂页岩	1.33—2.10	1.84—3.70
花岗岩	1.50—2.10	1.61—2.40	砂岩	1.60—1.90	1.90—2.50
大理岩	1.32—1.98	1.38—1.29	花岗斑岩	1.61—2.09	1.58—2.36

表3 岩石张伸强度极限正交异性系数

岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向	岩石种类	层(流)面上任二正交方向	层(流)面法向与面上一方向
玄武岩	1.30—2.01	1.23—1.90	石灰岩	1.56—2.08	1.67—2.00
石英岩	1.50—1.90	1.75—1.84	砂页岩	1.23—2.00	1.33—2.90
花岗岩	2.06—2.60	1.50—2.00	砂岩	1.60—2.40	1.35—1.91
大理岩	1.44—1.87	1.40—1.80	花岗斑岩	1.70—2.80	1.80—2.60

把各向异性的岩石假定为各向同性体,将会给测量结果带来误差。我们假设在正交异性岩体中,坐标面与正交异性对称面重合,用“应变丛法”和“圆钻孔法”进行讨论。

(1) 应变丛法:即用钻孔或钻槽测得岩石中三个方向的原地弹性正应变绝对值,求应力。

在平面应力状态下,对等角应变丛,测得相间60°角的三个正应变 e_a, e_b, e_c 后,取 $E = E_x, \beta = \frac{E_y}{E_x}, \nu' = \frac{E_x}{2G} - 1$,得垂直孔轴平面(x, y)上的最大、最小主应力及主方向

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{M异} \\ \sigma_{m异} \end{aligned} \right\} = \frac{E}{6(1-\beta\nu'^2)} \left\{ 2(1+\beta\nu')(e_a+e_c) - (1-3\beta-2\beta\nu')e_b \pm \left[2(1-\beta\nu')(e_a+e_c) - (1+3\beta-4\beta\nu')e_b \right]^2 + 12 \left(\frac{1-\beta\nu'^2}{1+\nu'} \right)^2 (e_a-e_c)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\tan(2\theta_{M异}) = \frac{2\sqrt{3}(1-\beta\nu'^2)(e_a-e_c)}{(1+\nu')[2(1-\beta\nu')(e_a+e_c) - (1+3\beta-4\beta\nu')e_b]} \circ$$

若 $\beta = 1, \nu' = \nu$,则得各向同性体的 $\sigma_{M同}, \sigma_{m同}$ 和 $\theta_{M同}$ 的相应公式。

下面,把正交异性岩体作为各向同性体处理,比较所引起的偏差的大小。

设 $e_a = e_b = e_c$,取 $\nu = \nu' = 0.25$ 。当 $\beta = 2$ 时, σ_{M} 的偏差为110%, σ_{m} 的偏差为30%;随 $\beta \rightarrow \nu^{-2}$, σ_{M} 和 σ_{m} 的偏差增大;当 $\beta > \nu^{-2}$ 时, $\sigma_{M异}$ 和 $\sigma_{m异}$ 都是压应力,而 $\sigma_{M同}$ 和 $\sigma_{m同}$ 则都是张应力; $\sigma_{M异}$ 和 $\sigma_{m异}$ 方向明确,但 $\sigma_{M同}$ 和 $\sigma_{m同}$ 相等而无明确的方向。

设 $\varepsilon_a = \varepsilon_c$, $\varepsilon_b = -2\varepsilon_a$, 取 $\nu = \nu' = 0.25$ 。当 $\beta = 2$ 时, σ_M 的偏差为 30%, σ_m 的偏差为 110%; 当 $\nu^{-1} < \beta < \nu^{-2}$ 时, $\sigma_{M异}$ 和 $\sigma_{m异}$ 都是压应力, 而 $\sigma_{M同}$ 和 $\sigma_{m同}$ 却是一张一压; 当 $\beta > \nu^{-2}$ 时, $\sigma_{M异}$ 和 $\sigma_{m异}$ 又都是张应力, $\sigma_{M同}$ 和 $\sigma_{m同}$ 却仍为一张一压; 在主应力的方向上, $\theta_{M异} = \theta_{M同} + 90^\circ$, 即两种情况的最大主应力方向差 90° 。

(2) 圆钻孔法: 即测孔壁三个方向的径向弹性相对形变, 求应力。

对平面应力问题, 对等角形变测量探头, 测得相间 60° 角的三个径向相对形变 ε_a 、 ε_b 、 ε_c 后, 取 $E = E_x$, 得垂直孔轴方向的应力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2E}{3(1+\alpha_1)(1+\alpha_2)(\alpha_1+\alpha_2)} [(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_1\alpha_2)(\varepsilon_a+\varepsilon_c) - \frac{1}{2}(\alpha_1+\alpha_2+\alpha_1\alpha_2 - 3)\varepsilon_b], \\ \sigma_y &= \frac{2E}{3(1+\alpha_1)(1+\alpha_2)(\alpha_1+\alpha_2)} [(\varepsilon_a+\varepsilon_c) + \frac{1}{2\alpha_1\alpha_2}(3\alpha_1+3\alpha_2-\alpha_1\alpha_2+3)\varepsilon_b], \\ \tau_{xy} &= \frac{2E}{\sqrt{3}(1+\alpha_1)(1+\alpha_2)(\alpha_1+\alpha_2)} (\varepsilon_a - \varepsilon_c). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

取正交异性系数函数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 即为各向同性体的解。

若把正交异性岩体作各向同性体处理, 设 $\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon_c$ 。当 $\beta = 2$ 时, σ_M 的偏差为 53%; 在主应力方向上, $\sigma_{M异}$ 和 $\sigma_{m异}$ 方向明确, 但 $\sigma_{M同}$ 和 $\sigma_{m同}$ 相等而无明确方向。

设 $\varepsilon_a = \varepsilon_c$, $\varepsilon_b = -2\varepsilon_a$ 。当 $\beta = 2$ 时, σ_m 的偏差为 84%¹⁾。

文献[1]算得, 将正交异性岩石作各向同性体处理, 所引起地应力测量的误差, 在主应力大小上达 50~80%, 在主应力方向上达 $90^\circ \sim 100^\circ$ 。与前述结果相近。

综上所述, 将实际的弹性模量各向异性的岩石, 简化为各向同性体来进行地应力测量, 会使测得的主应力大小、方向和性质, 均能与实际情况产生严重的偏差。

另外, 由于岩石强度极限的各向异性, 使钻孔压裂法所测得的孔壁破裂方向, 并不是垂直孔轴的最大主压应力方向(水压致裂法)和最小主压应力方向(孔壁破坏法), 而应是由岩石强度极限最低方向和测点岩体应力状态所共同决定的一个方向。如果岩石的最低强度极限值超过垂直孔轴主应力的方向, 则孔壁破裂方向主要反映岩石强度极限最低的方位。

2. 关于钻孔效应问题

在以往的地应力测量中, 没有考虑钻孔的效应。实际上当打钻孔和钻槽时, 由于钻头和钻杆在钻进中强烈的机械振动和高载荷的撞击, 使距孔壁几厘米至几十厘米内的围岩中发生了大量的微破裂, 其数量随与孔壁距离的减小而增加, 因而围岩的压缩弹性模量和强度极限随之明显降低(图1), 并引起它们的各向异性系数的增大(图2)。因此, 钻孔周围岩石力学性质不是均匀分布的, 若不考虑钻孔效应, 将使测量结果严重失真。

由图1可知, 钻孔周围岩石弹性模量降低了 40~70%, 强度极限降低了 40~80%。由于在计算主应力的方程组(1)、(2)中, 弹性模量是乘积项, 故由于其变化所引起的影晌, 将直接进入误差。

从图2可知, 近孔壁围岩弹性模量正交异性系数增加到 2.4~3.2, 强度极限正交异性系

1) 黄荣璋, 各向异性介质应力测量的力学机理, 1982。

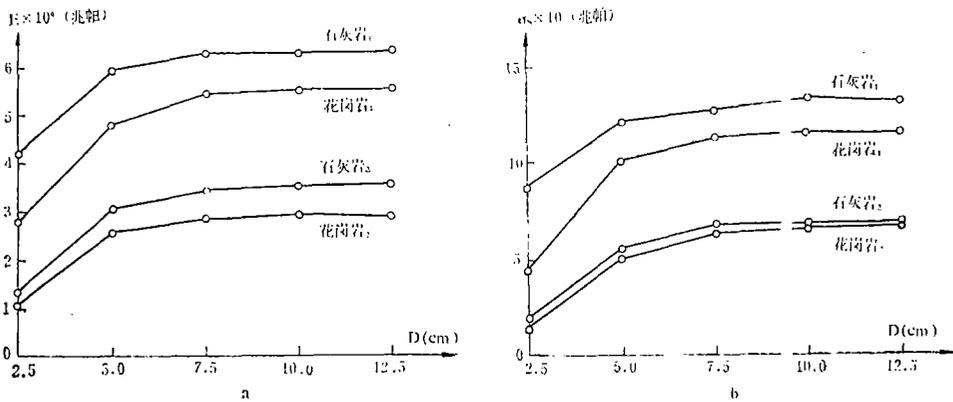


图1 钻孔围岩中压缩弹性模量 (a) 和压缩强度极限 (b) 随与孔壁距离的变化
Fig. 1 The changing of compressive elastic modulus (a) and compressive strength (b) of surrounding rock of borehole versus the distance to borehole wall

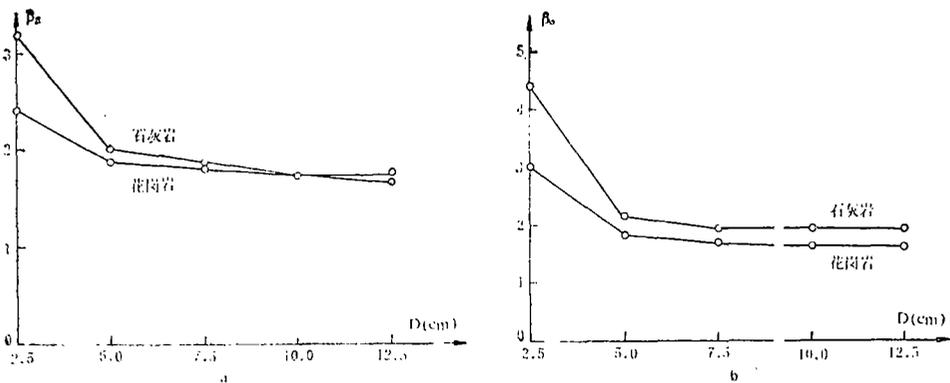


图2 钻孔围岩的压缩弹性模量正交异性系数 (a) 和压缩强度极限正交异性系数 (b) 随与孔壁距离的变化

Fig. 2 The changing of orthogonal anisotropic coefficients of compressive elastic modulus (a) and compressive strength (b) of surrounding rock of borehole versus the distance to borehole wall

数增加到 3~4.4。这又增大了岩石各向异性所引起的误差，并增加了孔壁破裂方向受围岩强度各向异性影响的程度。此时取 $\beta = 3$ ，当 $e_a = e_b = e_c$ 时，用对等角应变丛法计算， σ_M 偏差达 250%， σ_m 偏差达 60%；用对等角钻孔形变法计算， σ_M 偏差达 80%。

3. 关于测量的时间效应

在当代地应力测量中，都假定了被测的岩石是线弹性的。但对于岩石，严格地讲，虎克定律只适用于在极短时间内加卸载的情况，当受力时间延长时，由于岩石发生了蠕变，并且在蠕变第一阶段其塑性形变量相当大，因而已不遵从线弹性规律。

地应力测量中的钻孔法和钻槽法均使原地应力状态在测点遭到破坏而发生变化。地应力

本身由于动力来源、断层活动、震前各种物理场异常或地表环境的变化（水库蓄水和放水、筑坝、大型地下施工开挖）也会改变。在这些地应力变化过程中，随着时间的延长，由于岩石发生了蠕变，其各种力学参量也必然随之改变。又由于岩石是有孔隙和裂隙的多晶体，其随所受压应力的增大而被压密，因而其力学性质也随应力的大小而变，并且在低应力下变化较大，只有高应力下由于岩石被压密而趋向稳定。而实际地应力的量值也不大，在所测量深度范围内均小于100兆帕，正处于低载荷范围。

表 4 岩石在常温常围压下低载荷单轴压缩蠕变实验结果

岩石种类	载荷〔兆帕〕	蠕变时间	蠕变应变	实 验 者	发表时间
砂 岩	8.5	4 小时	2×10^{-3}	Evans	1936
板 岩	8.5	2 小时	1.3×10^{-3}		
花 岗 岩	16.5	4 小时	5×10^{-5}		
页 岩	1.0	50天	2×10^{-2}	Griggs	1939
蛇 纹 岩	10.0	13天	10^{-3}	Lichaetel	1960
玄 武 岩	10.0	6 天	10^{-4}	Robertson	1963
流 纹 岩	10.0	2100小时	10^{-4}		
白 云 岩	51.7	1 小时	10^{-5}	Muttel	1965
大 理 岩	36.9	1 小时	10^{-5}		
石英千枚岩	10.0	4.2天	10^{-3}	Rummel	1965
辉长岩	47.5	1 小时	10^{-5}		1969
粉 砂 岩	2.6	3000小时	1.8×10^{-3}	Hobbs	1970
石 灰 岩	2.4	52天	10^{-4}		
方解石石灰岩	2.5	1 小时	2.2×10^{-5}	Harvey	1974
致密石灰岩	5.8	60天	1×10^{-5}	安欧	1980

表 5 岩石在高温高围压下低载荷单轴压缩蠕变实验结果

岩石种类	载荷〔兆帕〕	蠕变时间	温度(℃)	围压〔兆帕〕	蠕变应变	实 验 者	发表时间
石 灰 岩	100	1 天		100	10^{-2}	Kendal	1958
白 云 岩	26	1 分钟	700		10^{-4}	Murrell	1965
砂 岩	27.6	1 分钟	550		10^{-4}		
大 理 岩	61.7	1 分钟	600		10^{-3}		
花 岗 岩	87	1 小时	400		10^{-3}	Rummel	1969
辉长岩	90	55分钟	860	600	2.5×10^{-3}	Goete	1972
辉绿岩	80	16小时	620		9×10^{-4}	Murrell	1973
纯橄辉岩	50	10小时	830		10^{-4}		
橄 榄 岩	38.8	1 分钟	1540		1.3×10^{-3}	Kohlstedt	1974
花岗岩长岩	10	1 分钟	860	420	10^{-1}	Aucretel	1981
片 麻 岩	50	1 小时	1000	850	3×10^{-3}	安欧	1982
云 煌 岩	2	5 小时			2×10^{-1}		

在地表浅层，岩石处于常温常围压条件下。在深层，岩石处于高温高围压条件下。岩石在这两种物理条件下，低载荷的蠕变实验结果示于表4、5中〔2〕。岩石在常温常围压低载荷下，经过1~4小时，便可发生 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 的蠕变应变。在高温高围压低载荷下，经过1分钟，便可发生 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 的蠕变应变。若把这种蠕变应变全部都误归为弹性应变，则引起的应力误差，在浅层可达几到几十兆帕，在深层可达几十至几百兆帕。

蠕变使得岩体中的应力和应变关系，已不遵从弹性规律。由几十分钟到几天的实验测得的岩石和岩体中的应力~应变升降关系曲线出现了滞后环〔3〕〔4〕。因此，应力与应变之间失去了线弹性关系，说明应力和应变的变化趋势并不一定相同。岩石经过多个滞后环后，由于我们不知道所测岩石正处于什么应力状态，因而一个应变值可对应多个应力值，同样一个应力值也可对应多个应变值，使得应力与应变之间已无单值关系〔5〕。可见，在常温常围压下，完成一个应力升降过程所需的时间超过几小时，运用虎克定律所引起的误差，已掩盖了地应力的变化量级，并可达到地应力绝对值。因之，若地应力测量过程中，由于解除和恢复等测量方法所造成的原地应力发生一个升降变化的时间或地应力场本身完成一个升降变化的时间，在地表浅层超过几小时，在地壳深层超过几分钟，如果还使用线弹性定律，那么，所引起的误差将会使得测量结果无意义。

4. 关于岩石力学性质的多变性

岩石是结构复杂的多晶体，其弹性模量是应力增加速度（图3）、增加级量（表6）、应力大小（图4）、加载次数（表7）和卸载后恢复时间（图5）的综合函数。而且也只有当受载时间极短时，联系其应力和应变关系的模量才是弹性的，即其所联系的应力和应变升降变化可逆。图5是有关岩石的压缩弹性模量的实验曲线。把同一种岩石制成五块相同的试件。第一次全部各加同样载荷（标在岩石名称后），测得五个压缩弹性模量，取其平均值为第1次测值。3分钟后，再用同样载荷测第1号试件的弹性模量，为第2次测值。20天后，再用同样载荷测第2号试件的弹性模量，为第3次测值。70天后，再用同样载荷测第3号试件，依次测完第5号试件，得到图5所示的各曲线。由图5可见，不同岩石受载后弹性模量的恢复速度不同，同一种岩石所受载荷大小不同恢复速度也不同，所受载荷越小恢复得越快。但在当前的地应力测量中，却把岩石的弹性模量假定为某一岩石的恒量，而忽略了岩体中应力大小、变化速度、变化量级、变化次数和受各种量级应力作用后的恢复时间的影响。

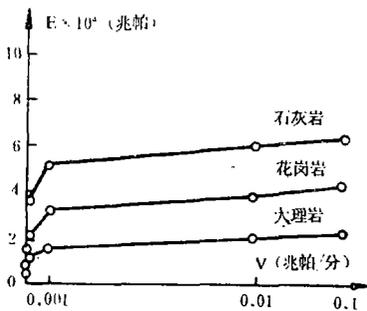


图3 岩石压缩弹性模量与加载速度的关系

Fig. 3 Relation between the compressive elastic modulus of rocks and the loading velocity

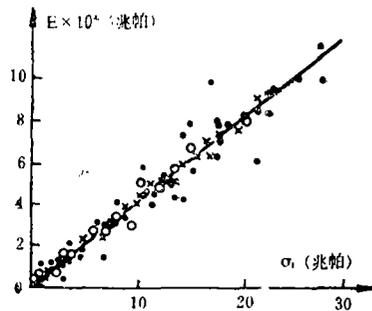


图4 岩体压缩弹性模量与最大水平主应力的关系

Fig. 4 Relation between the compressive elastic modulus of rocks and the horizontal maximum principal stresses

表 6 岩石在不同加载量级下的压缩弹性模量 (据吴筱朋)

岩石种类	压缩弹性模量 (兆帕)		E ₁ E ₂
	急剧加小力 (E ₁)	缓慢加巨力 (E ₂)	
花岗岩	52332	16366	3.2
大理岩	79674	29890	2.7
黑黝岩	115542	54194	2.1
橄榄辉绿岩	152438	83398	1.8

表 7 花岗岩、变质岩压缩弹性模量与测量次数的关系 (据 W.S. Johnson 等)

试件号	压缩弹性模量 (兆帕)		
	第一次测量	第二次测量	二次差 (%)
32-1	8480	11721	38
32-2A	9927	14271	44
32-2B	4826	10755	123
33-1	3103	4519	49
33-2	28955	31713	10
35-1	3240	5929	83
35-2	2551	6618	159
36-1	18545	21371	15
36-2	55635	5496	8

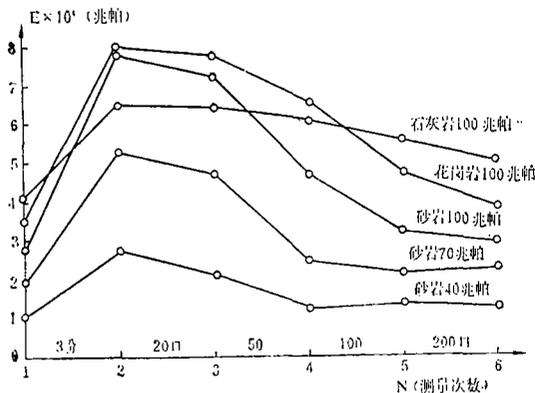


图 5 岩石一次加载后压缩弹性模量的增大和恢复过程

Fig. 5 The increase in quantity of compressive elastic modulus of rocks and its recovering course after once loading

综上所述，把岩石的各种力学性质，假定为各向同性的、均匀的、线弹性的、恒定的，这是地应力测量中所用各种方法的共同性问题。由于这些假定，可使测量结果与客观真值的最大综合误差，在主应力大小上达到或超过100%，在主应力方向上达到90°，并可引起主应力性质的正负变换。

三、高水平地应力测量的标志

为要从根本上解决当代地应力测量中的主要问题，必须做到下述几点：

(1) 把测量建立在岩石力学性质各向异性的基础上，并在应力测量过程中于原地同时测得必要的岩石各向异性力学参量。

(2) 减小或避开钻孔效应的影响。建立非均匀各向异性地应力测量理论，同时测量钻孔周围非均匀分布的各向力学参量，或用化学灌浆及预压来部分恢复钻孔围岩的力学性质，或不用钻孔。

(3) 考虑或避开测量的时间效应。在流动地应力测量中，可尽量减短时间，在定点长期连续观测中，可使用弹性选测法，如x射线法，或使用应力平衡法，如高刚度实孔法或液压平衡法，以使用各向异性线弹性理论计算地应力。

(4) 避开岩石力学性质多变性的影响。在地应力测量的同时于原位测量围岩的有关力学参量，而不再取样或取岩芯续测或标定；也可选测力学性质稳定的矿物的有关参量，算得应力，来取代直接测量。

(5) 分测各种地应力成份。地应力由古构造残余应力、现代构造应力、热应力、重

应力、湿应力等多种应力成份所组成。

古构造残余应力是古构造运动的应力场残留至今的应力，分区域残余应力和嵌镶残余应力两种。测量方法有x射线法、矿物光性法和显微光弹法。在中国、日本、美国、英国和葡萄牙测得区域残余应力约为10~20兆帕，在中国测得嵌镶残余应力约为0.5~1.6兆帕。

热应力是由于地温变化而产生的应力，可通过测量岩体的热胀系数 α 、弹性模量E和各种深度的地温T计算而得。如，对 $\alpha=27 \times 10^{-6} (\text{℃}^{-1})$ 的石灰岩， $E=1 \times 10^5$ (兆帕)，若地温变化 $\Delta T=1 (\text{℃})$ ，当边界固定时，所引起的单轴热应力 $\sigma_t = \alpha E \Delta T = 2.7$ (兆帕)。

重应力是由上覆岩体重力引起的，在地球表层随深度的增加而增大。通过测量各种岩体的密度 ρ_i 、层厚 d_i 、测点的重力加速度g，可算得第n层下边界深度处的铅直重应力 $\sigma_w = \sum_{i=1}^n \rho_i d_i$ ，由其所引起的同深度处水平重应力 $\sigma_a = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_w$ ，式中 μ 为岩体的平均泊松比。

湿应力是由于岩体中含水量不同所造成的湿胀干缩引起的，包括湿胀压力和干裂张力，前者约为0.2~1.5兆帕，后者约为0.5~8兆帕。可通过测量岩石吸水率和吸水时间确定湿胀应变，再由湿胀应变和湿胀模量算得湿胀压力。

这样从总的地应力中减去这几种成份，便可测得现代构造应力。

(6) 进行定点长期连续观测。地震预报、矿井支护、石油开采以及一些工程设计等，除要了解地应力的空间分布外，还要了解其随时间的变化趋势，以推测未来，进行预报和使用设计。这就要求用地应力绝对值观测台网长期连续观测，以得到地应力场的时空分布的结果。

(本文1988年2月20日收到)

参 考 文 献

- [1] B. Amadei, Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements, 1983.
- [2] R. D. Lama, Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. 8, 1978.
- [3] 安歌, 岩石在不同温度下的形变蠕变和滞后, 地震地质, Vol. 2, No. 4, 1980.
- [4] 安歌, 台站压磁应力仪原理质疑, 地震战线, No. 6, 1980.
- [5] 安歌, 试论地震前兆, 地震学刊, No. 1, 1976.

PRINCIPAL QUESTIONS OF GEOSTRESS MEASUREMENT IN
BOREHOLE AT THE PRESENT TIME

An Ou

(*Earth Crust Dynamics Institute, SSB*)

Abstract

Since half century, the unsolved principal questions in geostress measurement using borehole method are hypothesizing that the mechanical property of rocks is isotropic, unthinking the borehole effect, unconsidering the measuring time effect and simplifying the changeful mechanical property of rocks. The maximum synthetic error caused by them can be up to 100% of principal stress value and 90° in principal stress orientation and the error can result in that the principal stress property may change from positive to negative. For purpose of high level geostress measurement, the measurement must be based on anisotropy of mechanical property of rocks; the borehole effect must be subtracted or avoided; the time effect in measurement be avoided or considered; the effect of changeability of mechanical property of rocks be avoided in the geostress measurement. The each component of geostress must be measured respectively and the fixed longterm continuous observation be made.