

正交异性岩体水力压裂应力 测量原理和方法

安欧

(国家地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要 本文根据岩体力学性质的各向异性, 以岩体正交异性弹性理论为基础, 提出用水力压裂法测算水平方向两主应力大小和方向的原理及测量有关岩体弹性参数的方法。

关键词: 水压致裂 应力测量 主应力方向 岩体 弹性参数

1 序言

在半无限空间水平正交异性岩体中打一垂直水平表面的铅直钻孔, 在孔内加各向均匀水压, 若岩体受水平方向两个主压应力 σ_1 和 σ_2 作用, 则所产生的孔壁上的水平周向应力 σ_θ , 在哪个方向先达到岩体此方向的水平抗张强度, 便在哪个方向先发生铅直方位的张性断裂。因而, 此种张性断裂所在水平方向, 不一定是水平最大主压应力方向^[1]。只有当岩体力学性质为水平各向同性时, 此张性断裂所在水平方向, 才是水平最大主压应力方向, 而水平最大主压应力也才满足关系式

$$\sigma_1 = 3\sigma_2 - p + \sigma_z$$

式中 p 为破裂压力, σ_z 为岩体抗张强度。这是一种极特殊的情况^[1]。一般岩体的力学性质, 都具有不同程度的水平各向异性^[1-2]。为此, 从地壳岩体水平各向异性的实际情况出发, 来研究普遍存在的水平正交异性岩体中的水力压裂应力测量原理和方法, 是提高地应力测量准确性的重要基础工作。

若把各向异性岩体一律视为各向同性体, 则在其中所测得水平二主应力大小和方向的误差, 都是惊人的^[1]。阿玛戴也算得如此引起的误差, 在主应力大小上达 50—80%, 在主应力方向上达 90—100^[2]。

2 岩体正交异性弹性参数测算

在测量钻孔的拟测孔深段岩芯钻取之前, 先将孔底磨光, 在其表面上用钻头内壁上安装的小砂轮, 在正南或正北方向的靠边一侧钻取一条痕, 或用井下电视对孔底表面定向照相后, 再钻取这下一深度段的定向岩芯。

用此岩芯,测水平各方向的弹性模量,得水平二弹性主方向 X、Y, 以及此二方向的弹性模量 E_x 、 E_y 。并用之测得水平方向的剪切模量 G_{xy} 和泊松比 ν_{yx} 。

将 E_x 、 E_y 、 G_{xy} 和 ν_{yx} 代入下列弹性参量关系式^[1]

$$\left. \begin{aligned} \rho_x \rho_y &= -\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \\ \rho_x^2 + \rho_y^2 &= 2\nu_{yx} - \frac{E_x}{G_{xy}} \\ n &= \sqrt{2\left(\frac{E_x}{E_y} - \nu_{yx}\right) + \frac{E_x}{G_{xy}}} \end{aligned} \right\}$$

联立解得 ρ_x 、 ρ_y 和 n 。

3 主应力大小和方向计算

在测量深度段的边端加封隔器,用水力压裂孔壁,得破裂压力 p 。并用井下电视照得铅直张裂缝的水平方位。由此,可得张裂缝与岩体弹性主轴 X 的交角 θ (图 1)。此角,从 X 轴起,以逆时针方向为正。

岩体受与 x 轴成 α_1 角的远处水平最大主压应力 σ_1 作用所引起的孔壁周向应力(图 2)^[1]

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{\sigma_1}{E_x W} \{ [\cos^2 \alpha_1 (\rho_x \rho_y - n) \sin^2 \alpha_1] \rho_x \rho_y \cos^2 \theta + [(1+n) \cos^2 \alpha_1 + \rho_x \rho_y \sin^2 \alpha_1] \cdot \sin^2 \theta - (1+n - \rho_x \rho_y) \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \sin \theta \cos \theta \} \quad (1)$$

岩体受与 x 轴成 $(90^\circ + \alpha_1)$ 角的远处水平最小主压应力 σ_2 作用所引起的孔壁周向应力(图 2)^[1]

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{\sigma_2}{E_x W} \{ [\cos(90^\circ + \alpha_1) (\rho_x \rho_y - n) \sin^2(90^\circ + \alpha_1)] \rho_x \rho_y \cdot \cos^2 \theta + [(1+n) \cos^2(90^\circ + \alpha_1) + \rho_x \rho_y \sin^2(90^\circ + \alpha_1)] \cdot \sin^2 \theta - n(1+n - \rho_x \rho_y) \sin(90^\circ + \alpha_1) \cos(90^\circ + \alpha_1) \cdot \sin \theta \cos \theta \} \quad (2)$$

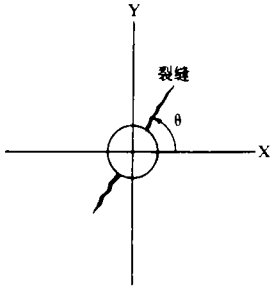


图 1 钻孔围岩水平弹性主轴与水力压裂的裂缝

Fig. Horizontal elastic principal axes in adjoining rock of borehole and hydraulic fracturing rift.

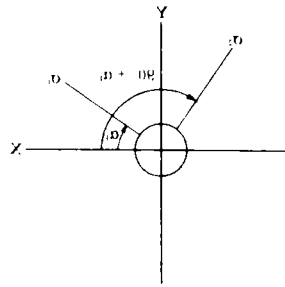


图 2 钻孔围岩水平弹性主轴与水平二主应力方向的关系

Fig. 2 Relation between horizontal elastic principal axes in adjoining rock of borehole and directions of two horizontal principal stresses.

α_1 角从 x 轴量起,以逆时针方向为正。 σ_1 和 σ_2 以压为正,以张为负。

岩体受孔内各向均匀水压 p 作用所引起的孔壁周向应力^[1]

$$\sigma_{\theta p} = \frac{p}{E_x W} [\rho_x \rho_y + n(\sin^2 \theta - \rho_x \rho_y \cos^2 \theta) + (1 + \rho_x^2)(1 + \rho_y^2) \sin^2 \theta] \quad (3)$$

由于^[1]

$$W = \frac{\sin^4 \theta}{E_x} + \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{yx}}{E_x} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{\cos^4 \theta}{E_y} \quad (4)$$

代入(3)式,可解得 $\sigma_{\theta p}$ 的大小。

当孔壁受孔内水压 p 作用而发生张裂时,岩体在破裂方位的水平周向抗张强度

$$\sigma_t = \sigma_{\theta 1} + \sigma_{\theta 2} + \sigma_{\theta p} \quad (5)$$

σ_t 的大小可用定向岩芯在张裂的方位测得。

将(4)式代入(1)式和(2)式后,并将 σ_1 、 $\sigma_{\theta p}$ 、(1)式和(2)式一并代入(5)式,由于 σ_2 为封闭压力,则此时(5)式中的未知量,只有 σ_1 和 α_1 。于是,这个式子可简化表示为

$$\sigma_1 = f(\alpha_1) \quad (6)$$

上述的 σ_1 和 σ_2 是水平二主压应力,而不是任意二正交方向的正应力,故 σ_1 还须满足水平最大主压应力的条件,即在应力主轴 1 的方向角 α_1 , (6)式对 α 的偏导数

$$\frac{\partial \sigma_1(\alpha_1)}{\partial \alpha} = \frac{\partial f(\alpha_1)}{\partial \alpha} = 0 \quad (7)$$

同时,在左右邻域的 $\alpha \neq \alpha_1$ 角域, $\sigma_1(\alpha) < \sigma_1(\alpha_1)$ 。(7)式中,只含有一个未知量 α_1 。由之,可求得 α_1 ,以逆时针方向为正。将 α_1 代入(5)式,可得 σ_1 值。

(本文 1994 年 5 月 23 日收到)

参考文献

- 1 安欧. 构造应力场. 北京:地震出版社,1992. 26—32, 358—367
- 2 B Amadei. Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 13—81, 216—239

PRINCIPLE AND METHOD OF HYDRAULIC FRACTURING STRESS MEASUREMENT IN ORTHOGONAL ANISOTROPY ROCK MASS *

Au Ou

(Institute of Earth Crust Dynamics, SSB, Beijing 100085)

Abstract

On the basis of anisotropy of mechanical property of rock mass and based on the orthogonal anisotropy elastic theory of rock mass, this treatise has advanced the principle measuring magnitudes and directions of two horizontal principal stresses by hydraulic fracturing method and the method measuring and calculating elastic parameters of rock mass relating to the stress measurement in rock mass.

Key words: Hydrofracturing, Stress measurement, Principal stress orientation, Elastic parameters of rock mass

* Sponsored by the Earthquake Science Foundation under Contract No. 91046