

# 单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展

刘允芳, 刘元坤

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 由于测量深度深和其他突出优点, 水压致裂法地应力测量已被国内外广泛应用, 但以往只能测量钻孔横截面上的二维地应力状态。长江科学院在国内率先提出在 3 个不同方向钻孔中和单钻孔中进行三维地应力测量的原理和方法, 扩大其应用范围, 并已在工程中得到广泛应用。近期, 长江科学院又提出新的单钻孔水压致裂法三维地应力测量原理, 只需选择 2 个或 2 个以上原生裂隙段进行重张试验的测量, 或者在完整岩体段常规压裂试验的同时, 选择 1 个或 1 个以上原生裂隙段进行重张试验的测量, 就可确定岩体的三维地应力状态, 并且可以应用到深钻孔的测量中, 在工程上有广泛的应用前景。对该测量方法资料整理的计算公式严格进行推导, 在实例中, 三维地应力测量的测量成果, 不仅得到水压致裂法钻孔横截面上实测的二维应力状态的检验, 还得到同一钻孔对应深度的套芯应力解除法实测的三维地应力状态的印证。

**关键词:** 岩石力学; 水压致裂法; 三维地应力测量; 原生裂隙; 套芯应力解除法

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 2 - 3816 - 07

## NEW ADVANCE IN 3D GEOSTRESS MEASUREMENT BY HYDRAULIC FRACTURING TECHNIQUE IN ONE BOREHOLE

LIU Yunfang, LIU Yuankun

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Hydraulic fracturing as a technique of geostress measurement has been widely used both at home and abroad due to its many outstanding merits. But this measuring method is only used to the 2D stress state in a plane normal to the borehole axis previously. The principle and method of 3D geostress measurement in three boreholes with different directions and one borehole have been suggested by YRSRI at home for the first time, expanding its applied scope, and it has been widely applied in engineering. Recently, a new measuring principle has been suggested by taking conventional hydraulic fracturing tests, at the same time taking reopening tests at one or more preexisting fractures, the 3D geostress state can be determined. It can be applied to measurement in depth borehole, and has wide prospects of engineering appliance. The calculating formulas of measured data processing of this method have been derived strictly. In the example, the results of 3D conventional hydraulic fracturing tests geostress measurement are checked not only by 2D stress state measured by conventional hydraulic fracturing technique in a plane normal to the borehole, but also by the 3D geostress states to be measured by over-coring stress relief method in corresponding depth in the same borehole.

**Key words:** rock mechanics; hydraulic fracturing technique; 3D geostress measurement; preexisting fissures; over-coring stress relief method

**收稿日期:** 2006 - 01 - 24; **修回日期:** 2006 - 05 - 16

**作者简介:** 刘允芳(1936 -), 男, 1961 年毕业于上海交通大学工程力学系固体力学专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事地应力测量及地下洞室围岩稳定性方面的研究工作。E-mail: yuankunliu@yeah.net

### 1 引言

在水工、矿山、军工、交通等岩石工程的建设中，尤其在工程稳定性分析和支护衬砌的设计计算中，地应力场实测资料是必不可少的。水压致裂法地应力测量具有突出的优点，尤其是测量深度很深，可达地下数千米(美国已达 5 105 m)，是其他测量方法无法比拟的。因此，水压致裂法测量地应力技术，近 20 a 在美国、德国、日本、瑞典、中国等十几个国家中得到广泛的应用和发展。

尽管水压致裂法地应力测量有如此突出的优点，又在世界各国得到推广，但是传统的水压致裂法地应力测量只能测得钻孔横截面上的二维地应力状态，应用范围受到了限制。为了扩大这种测量方法的应用范围，F. H. Cornet<sup>[1]</sup>就三维地应力测量作了大量的研究，得到了可喜的成果。

长江科学院于 20 世纪 90 年代初，在国内率先提出在 3 个不同方向钻孔中进行水压致裂法三维地应力测量的原理和方法<sup>[2~4]</sup>，并已在十几个水利工程中得以推广应用；20 世纪 90 年代末，在上述测量原理和方法的基础上，引入钻孔原生裂隙段重张试验的测量，又在国内率先提出在单钻孔中进行水压致裂法三维地应力测量的原理和方法<sup>[5, 6]</sup>，并建议了两种测量方法：原生裂隙段重张试验测量法和完整岩体段常规压裂试验与原生裂隙段重张试验相结合测量法，也在工程中得到了应用。但是，这种单钻孔三维地应力测量方法对原生裂隙段的数量要求较多，前者需要 6 段或 6 段以上，后者需要 3 段或 3 段以上。由于原生裂隙及其走向、倾向的确定比较麻烦，因此限制了这种测量方法的工程应用。

近期，作者对原生裂隙段重张试验时裂隙面上受力条件作了进一步研究，发现还有 2 个应力平衡条件可以利用，这样就大大减少了对原生裂隙段重张试验数量的要求。对于原生裂隙段重张试验测量法，只需选择 2 个或 2 个以上原生裂隙段的重张试验，就可确定岩体的三维地应力状态；对于完整岩体段常规压裂试验与原生裂隙段重张试验相结合测量法，只需选择 1 个或 1 个以上原生裂隙段的重张试验和 1 个或 1 个以上完整岩体段有裂缝记录的常规压裂试验，就可确定岩体的三维地应力状态。这样大大扩大了在单钻孔中进行水压致裂法三维地应力测量的可行性及其应用范围，在工程上有了广泛的应用前景。

### 2 原生裂隙段重张试验测量法

应力分量在不同坐标系中有不同表达形式，为了实测数据整理的方便，观测值方程中应力分量都以大地坐标系表达的形式建立。为此，建立大地坐标系  $o-xyz$ ：轴  $x$  为水平方向，取某工程建筑物的轴向，设它的方位角为  $\beta_0$ ；轴  $z$  为铅垂向上方向；轴  $y$  按右手坐标系定向。

设原生裂隙段的序号为  $i$ ，原生裂隙结构面走向为  $\beta_i$ ，倾角为  $\alpha_i$ 。根据原生裂隙结构面的走向、倾向和倾角建立结构面坐标系  $o-x_i y_i z_i$ ：取结构面走向为轴  $x_i$ ，结构面倾向为轴  $y_i$ ，结构面上与走向相垂直的线为轴  $z_i$ 。结构面坐标系与大地坐标系的相对关系如图 1 所示。

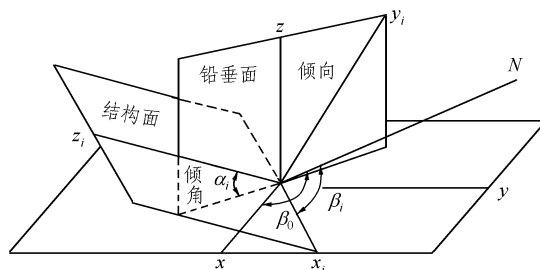


图 1 结构面坐标系与大地坐标系的相对关系  
Fig.1 Relative relation between structural plane coordinate system and earth coordinate system

水压致裂法在钻孔原生裂隙段进行测试，当裂隙重新张开时，由裂隙面上力学平衡条件得到：法向应力  $\sigma_{y_i}$  与瞬时关闭压力  $P_{s_i}$  得到平衡，而剪应力  $\tau_{x_i y_i}$  和  $\tau_{y_i z_i}$  为 0，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{y_i} &= P_{s_i} \\ \tau_{x_i y_i} &= 0 \\ \tau_{y_i z_i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

原生裂隙面上法向应力  $\sigma_{y_i}$  和剪应力  $\tau_{x_i y_i}$ ， $\tau_{y_i z_i}$ ，通过应力分量坐标变换转换到由大地坐标系表达，应力分量坐标变换公式为

$$\sigma_{i'j'} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \sigma_{mn} L_{m_i'} L_{n_j'} \quad (2)$$

式中： $i', j'$  为结构面坐标系  $o-x_i y_i z_i$  坐标轴的序号， $i' = 1 \sim 3, j' = 2$ ，相应表示轴  $x_i, y_i, z_i$ ； $m, n$  为大地坐标系  $o-xyz$  坐标轴的序号， $m, n = 1 \sim 3$ ，相应表示轴  $x, y, z$ ； $L_{m_i'}, L_{n_j'}$  为结构面坐标系各坐标轴相对于大地坐标系各坐标轴的方向余弦，为简

便起见, 分别记为  $l_{i_1}, m_{i_1}, n_{i_1}, l_{i_2}, m_{i_2}, n_{i_2}$  和  $l_{i_3}, m_{i_3}, n_{i_3}$ , 例如  $l_{i_1}, m_{i_1}, n_{i_1}$  为  $L_{m_1}(m = 1 \sim 3)$  的方向余弦, 其表达式列于表 1。

表 1 结构面坐标系  $o-x_i y_i z_i$  相对于大地坐标系  $o-xyz$  的方向余弦

Table 1 Direction cosines of structural plane coordinate system  $o-x_i y_i z_i$  with respect to earth coordinate system  $o-xyz$

坐标	方向余弦		
	$x$	$y$	$z$
$x_i$	$l_{i_1} = \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i_1} = \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i_1} = 0$
$y_i$	$l_{i_2} = -\sin \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i_2} = \sin \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i_2} = \cos \alpha_i$
$z_i$	$l_{i_3} = \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$m_{i_3} = -\cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$n_{i_3} = \sin \alpha_i$

另外, 为符号统一, 对  $\sigma_{i'j'}$  和  $\sigma_{mm}$  中的“ $\sigma$ ”作如下规定: 当  $i' = j'$  和  $m = n$  时, “ $\sigma$ ”仍记为“ $\sigma$ ”, 并省略重复的一个下标, 否则“ $\sigma$ ”记为“ $\tau$ ”。

将表 1 中的表达式代入式(2), 可得原生裂隙段重张试验的观测值方程如下:

$$\left. \begin{aligned}
 & \{\sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \\
 & \quad \tau_{xy} \sin[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \sin^2 \alpha_i + \sigma_z \cos^2 \alpha_i + \\
 & \quad [\tau_{yz} \cos(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \sin(\beta_0 - \beta_i)] \sin(2\alpha_i) = P_{s_i} \\
 & \{-0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin[2(\beta_0 - \beta_i)] + \tau_{xy} \cos[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \cdot \\
 & \quad \sin \alpha_i + [\tau_{yz} \sin(\beta_0 - \beta_i) + \\
 & \quad \tau_{zx} \cos(\beta_0 - \beta_i)] \cos \alpha_i = 0 \\
 & -0.5\{\sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \\
 & \quad \sigma_z - \tau_{xy} \sin[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \sin(2\alpha_i) - \\
 & \quad [\tau_{yz} \cos(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \sin(\beta_0 - \beta_i)] \cos(2\alpha_i) = 0 \\
 & \quad (i = 1 \sim n_0, n_0 \geq 2)
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $n_0$  为原生裂隙段重张试验的测段数。

分析式(3)可知, 对钻孔原生裂隙段进行重张试验, 每个原生裂隙段可获得 3 个观测值方程。只要不同产状的原生裂隙段的重张试验数量为 2 次或 2 次以上, 就可确定三维地应力状态。

### 3 完整岩体段常规压裂试验与原生裂隙段重张试验相结合的测量法

在水压致裂法实际测量中, 完整岩体段的常规

压裂试验是理所当然要进行的, 因此这种三维地应力测量方法是最简捷的。采用完整岩体段常规压裂试验与原生裂隙段重张试验相结合的测量方法测定三维地应力, 可归纳为测量钻孔是非铅垂向和铅垂向的两种情况。

#### 3.1 测量钻孔为非铅垂向情况

设测量钻孔的倾角为  $\alpha_i$ , 方向角为  $\beta_i$ 。由此建立钻孔坐标系  $o-x_1 y_1 z_1$ : 取钻孔方向为轴  $z_1$ , 指向孔口为正; 取水平方向为轴  $x_1$ , 以右手坐标系确定的轴  $y_1$  位于上半空间的指向为正。钻孔坐标系与大地坐标系的相对关系如图 2 所示。

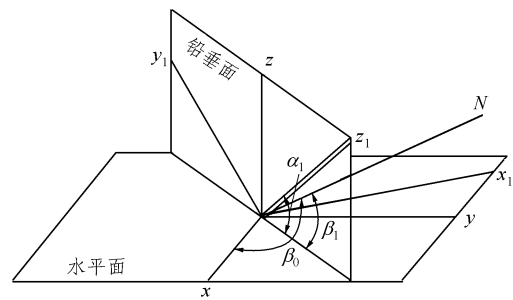


图 2 钻孔坐标系与大地坐标系的相对关系

Fig.2 Relative relation between borehole coordinate system and earth coordinate system

设钻孔完整岩体段的序号为  $j$ , 采用常规压裂试验可获得钻孔横截面上的二维应力状态: 大次主应力  $\sigma_{A_j}$  和小次主应力  $\sigma_{B_j}$  以及  $\sigma_{A_j}$  的方向  $A_j$ ,  $A_j$  为在横截面上以钻孔坐标系水平轴  $x_1$  起始逆时针向到破裂缝的夹角。钻孔横截面上二维应力状态与钻孔坐标系表达的应力分量关系为

$$\left. \begin{aligned}
 & \sigma_{x_1} + \sigma_{y_1} = \sigma_{A_j} + \sigma_{B_j} \\
 & \sigma_{x_1} - \sigma_{y_1} = (\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}) \cos(2A_j) \\
 & 2\tau_{x_1 y_1} = (\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}) \sin(2A_j)
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由钻孔坐标系表达的二维应力分量  $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}, \tau_{x_1 y_1}$  通过应力分量坐标变换公式(式(2))转换到由大地坐标系表达, 这时  $i', j'$  为钻孔坐标系  $o-x_1 y_1 z_1$  坐标轴的序号,  $i', j' = 1 \sim 2$ , 相应表示轴  $x_1, y_1$ ;  $L_{m_{i'}}$ ,  $L_{n_{j'}}$  为钻孔坐标系轴  $x_1$  和轴  $y_1$  相对于大地坐标系各坐标轴的方向余弦, 也分别记为  $l_1, m_1, n_1$  和  $l_2, m_2, n_2$ , 其表达式列于表 2。

将表 2 中表达式代入式(2), 并注意到式(4), 可得完整岩体段常规压裂试验的观测值方程为

表2 钻孔坐标系  $o-x_1y_1z_1$  轴  $x_1$  和轴  $y_1$  相对于大地坐标系  $o-xyz$  的方向余弦

Table 2 Direction cosines of axis  $x_1$  and axis  $y_1$  of borehole coordinate system with respect to earth coordinate system

坐标	方向余弦		
	$x$	$y$	$z$
$x_1$	$l_1 = -\sin(\beta_0 - \beta_1)$	$m_1 = \cos(\beta_0 - \beta_1)$	$n_1 = 0$
$y_1$	$l_2 = -\sin\alpha_1 \cos(\beta_0 - \beta_1)$	$m_2 = -\sin\alpha_1 \sin(\beta_0 - \beta_1)$	$n_2 = \cos\alpha_1$

$$\left. \begin{aligned}
 &\sigma_{A_j} + \sigma_{B_j} = \sigma_x [1 - \cos^2 \alpha_1 \cos^2(\beta_0 - \beta_1)] + \\
 &\quad \sigma_y [1 - \cos^2 \alpha_1 \sin^2(\beta_0 - \beta_1)] + \sigma_z \cos^2 \alpha_1 - \\
 &\quad \tau_{xy} \cos^2 \alpha_1 \sin[2(\beta_0 - \beta_1)] - [\tau_{yz} \sin(\beta_0 - \beta_1) + \\
 &\quad \tau_{zx} \cos(\beta_0 - \beta_1)] \sin(2\alpha_1) \\
 (\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}) \cos(2A_j) = &\sigma_x [1 - (1 + \sin^2 \alpha_1) \cos^2(\beta_0 - \beta_1)] + \\
 &\sigma_y [1 - (1 + \sin^2 \alpha_1) \sin^2(\beta_0 - \beta_1)] - \sigma_z \cos^2 \alpha_1 - \\
 &\tau_{xy} (1 + \sin^2 \alpha_1) \sin[2(\beta_0 - \beta_1)] + \\
 &[\tau_{yz} \sin(\beta_0 - \beta_1) + \tau_{zx} \cos(\beta_0 - \beta_1)] \sin(2\alpha_1) \\
 (\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}) \sin(2A_j) = &\{(\sigma_x - \sigma_y) \sin[2(\beta_0 - \beta_1)] - \\
 &2\tau_{xy} \cos[2(\beta_0 - \beta_1)]\} \sin\alpha_1 + 2[\tau_{yz} \cos(\beta_0 - \beta_1) - \\
 &\tau_{zx} \sin(\beta_0 - \beta_1)] \cos\alpha_1 \quad (j = 1 \sim n + n_1)
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $n$ ， $n_1$  分别为有裂缝记录的和没有裂缝记录的常规压裂试验的个数。

分析式(5)可知，对钻孔完整岩体段进行测试，有裂缝记录的和没有裂缝记录的常规压裂试验，每个测段可获得3个观测值方程和1个观测值方程。只要有裂缝记录的常规压裂试验的数量为1次或1次以上，就可确定钻孔横截面上的二维地应力状态。再加上原生裂隙段重张试验的数量为1次或1次以上，就可测定三维地应力状态。

### 3.2 测量钻孔为铅垂向情况

一般情况测量钻孔为铅垂向<sup>[7, 8]</sup>，其倾角 $\alpha_1 = 90^\circ$ ，方位角 $\beta_1$ 要根据钻孔坐标系轴 $x_1$ (度量裂缝方位的起始轴)的方位确定： $\beta_1$ 为钻孔坐标系轴 $z_1$ 在水平面上投影的方向，即水平轴 $x_1$ 的方位角为 $\beta_1 - 90^\circ$ 。为方便运算，把轴 $x_1$ 取在大地坐标系轴 $x$ 的方向上，即钻孔坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 与大地坐标系 $o-xyz$ 重合，轴 $x$ 的方位角 $\beta_0$ 和轴 $x_1$ 的方位角 $\beta_1 - 90^\circ$ 重合， $\beta_0 = \beta_1 - 90^\circ$ ，因此取 $\beta_1 = \beta_0 + 90^\circ$ 。

测量钻孔为铅垂向时，钻孔横截面上的大次主应力 $\sigma_{A_j}$ 和小次主应力 $\sigma_{B_j}$ 分别为最大水平主应力 $\sigma_{H_j}$

和最小水平主应力 $\sigma_{h_j}$ 。 $\sigma_{H_j}$ 的方位角(也即裂缝方位)记为 $B_j$ ，即 $A_j = \beta_0 - B_j$ ，以此代入式(5)，得到完整岩体段常规压裂试验的观测值方程就变得相当简单，也即复原式(4)为

$$\left. \begin{aligned}
 &\sigma_x + \sigma_y = \sigma_{H_j} + \sigma_{h_j} \\
 &\sigma_x - \sigma_y = (\sigma_{H_j} - \sigma_{h_j}) \cos 2(\beta_0 - B_j) \\
 &2\tau_{xy} = (\sigma_{H_j} - \sigma_{h_j}) \sin 2(\beta_0 - B_j)
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

观测值方程组包含了完整岩体段常规压裂试验的观测值(式(6))和原生裂隙段重张试验的观测值(式(3))，对它们有两种解法：综合计算法和分解计算法。前者为把式(6)与(3)编列在一起，进行统计计算；后者则为首先根据式(6)推求出钻孔横截面上二维地应力状态，即 $\sigma_x$ ， $\sigma_y$ 和 $\tau_{xy}$ 由下式给出：

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x = &\frac{1}{2(n + n_1)} \sum_{j=1}^{n+n_1} (\sigma_{H_j} + \sigma_{h_j}) + \\
 &\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (\sigma_{H_j} - \sigma_{h_j}) \cos[2(\beta_0 - B_j)] \\
 \sigma_y = &\frac{1}{2(n + n_1)} \sum_{j=1}^{n+n_1} (\sigma_{H_j} + \sigma_{h_j}) - \\
 &\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (\sigma_{H_j} - \sigma_{h_j}) \cos[2(\beta_0 - B_j)] \\
 \tau_{xy} = &\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (\sigma_{H_j} - \sigma_{h_j}) \sin[2(\beta_0 - B_j)]
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

然后再根据原生裂隙段重张试验的成果推求出其他3个空间应力分量 $\sigma_z$ ， $\tau_{yz}$ 和 $\tau_{zx}$ 。这时式(3)变为

$$\left. \begin{aligned}
 &\sigma_z \cos^2 \alpha_i + [\tau_{yz} \cos(\beta_0 - \beta_i) - \\
 &\quad \tau_{zx} \sin(\beta_0 - \beta_i)] \sin^2(2\alpha_i) = P_{s_i}^* \\
 &[\tau_{yx} \sin(\beta_0 - \beta_i) + \tau_{zx} \cos(\beta_0 - \beta_i)] \cos\alpha_i = P_{s_{i1}}^* \\
 &0.5\sigma_z \sin(2\alpha_i) - [\tau_{yz} \cos(\beta_0 - \beta_i) - \\
 &\quad \tau_{zx} \sin(\beta_0 - \beta_i)] \cos(2\alpha_i) = P_{s_{i2}}^*
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned}
 P_{s_i}^* = &P_{s_i} - \{\sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \\
 &\sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \sin^2 \alpha_i \\
 P_{s_{i1}}^* = &\{0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin[2(\beta_0 - \beta_i)] - \\
 &\tau_{xy} \cos[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \sin \alpha_i \\
 P_{s_{i2}}^* = &0.5\{\sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \\
 &\sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin[2(\beta_0 - \beta_i)]\} \sin \alpha_i
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

建立了观测值方程组以后，联立这些代数方程组解题，就可确定三维地应力状态的 6 个应力分量，最大和最小水平主应力及其方位角，3 个主应力及其倾角和方位角<sup>[9]</sup>。

### 4 实例

深圳抽水蓄能电站位于广东省深圳市盐田区和龙岗区交界处，毗邻香港，距深圳市中心约 20 km。上库为位于盐田河上游的小三洲，为一山顶盆地，初拟正常蓄水位 525.4 m，最大坝高 44 m。下库为位于响水河上的已建的铜锣径供水水库，初拟正常蓄水位 80.0 m，最大坝高 47 m。输水系统全长约 4 696 m，输水管道主洞直径 9.3 m，支管直径 4.8 m，设上、下游调压井。地下厂房初拟尺寸为 167 m×24 m×52.5 m(长×宽×高)，总装机容量为 4×300 MW，为 I 等大型工程<sup>[10]</sup>。

2004 年 9 月~2005 年 8 月，长江科学院根据勘探工作的进度，共 5 次进场进行现场测试。在工程调压井、中平洞、地下厂房、高压岔管等部位的 10

个钻孔中进行了地应力测量和水力劈裂试验。其中，位于地下厂房区的 ZK307 钻孔(铅垂钻孔)，2005 年 6~7 月在同一钻孔中采用水压致裂法和深孔套芯应力解除法的两种测量方法进行地应力对比测量。在该钻孔中孔深 45.9 m 处发现了一条高倾角的原生裂隙，开展了重张试验，紧挨该原生裂隙孔深 43.5 m 测段，开展了有破裂缝记录的常规压裂试验，在其上下附近测段，也开展了无破裂缝记录的常规压裂试验，具体实施了单钻孔水压致裂法三维地应力测量。

#### 4.1 ZK307 钻孔中常规水压致裂法测量

ZK307 钻孔中共进行了 11 个测段的水压致裂法测量，最深测量深度为 120 m。取原生裂隙重张试验测段和有破裂缝记录的常规压裂试验测段以及它们上下各 2 个无破裂缝记录的常规压裂试验测段，测量深度为 35.4~66.0 m，共 6 个测段为分析计算对象，其测试结果列于表 3。

#### 4.2 ZK307 钻孔中水压致裂法三维地应力测量

根据这些实测数据和式(7)~(9)进行计算，所得三维地应力测试结果列于表 4。在表 4 中列出 2 组成果：第 1 组为包含原生裂隙重张试验测段和有

表 3 ZK307 钻孔水压致裂法地应力测量测试结果

Table 3 Measuring results of geostress by hydraulic fracturing technique at borehole ZK307

测段编号	测量深度 H/m	破裂压力 $P_b$ /MPa	重张压力 $P_r$ /MPa	关闭压力 $P_s$ /MPa	孔隙水压力 $P_o$ /MPa	最大水平主应力 $\sigma_H$ /MPa	最小水平主应力 $\sigma_h$ /MPa	原生裂隙产状或最大水平应力方位
1	35.4	12.10	9.20	7.50	0.65	13.35	7.85	
2	42.3	13.20	10.30	8.40	0.72	15.02	8.82	
3	43.5	14.00	11.00	6.90	0.74	9.84	7.34	122°
4	45.9	-	16.60	8.50	0.76	-	-	150°/NE/74.5°
5	63.5	15.00	6.40	5.20	0.94	9.54	5.84	
6	66.0	14.00	9.30	6.50	0.96	10.56	7.16	

表 4 ZK307 钻孔单钻孔水压致裂法三维地应力测试结果

Table 4 Measuring results of 3D geostress by hydraulic fracturing technique in one borehole at borehole ZK307

试验组编号	$\sigma_x$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_z$ /MPa	$\tau_{xy}$ /MPa	$\tau_{yz}$ /MPa	$\tau_{zx}$ /MPa	$\sigma_1$ /MPa	$\alpha_1$ /°	$\beta_1$ /°	$\sigma_2$ /MPa	$\alpha_2$ /°	$\beta_2$ /°	$\sigma_3$ /MPa	$\alpha_3$ /°	$\beta_3$ /°	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	$\beta_H$ /°
1	8.98	10.08	12.83	1.12	2.91	2.64	15.85	52.5	308.9	8.50	15.5	60.0	7.54	33.2	160.4	10.78	8.28	301.9
2	8.85	9.95	11.11	1.12	2.50	2.87	14.63	47.1	312.6	8.50	15.5	59.9	6.78	38.6	162.7	10.65	8.15	301.9

注：(1) 第 1 组为表 3 中序号为 1~6 测段实测值的统计计算结果，第 2 组为表 3 中序号为 2~5 测段实测值的统计计算结果；(2)  $\sigma_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别为大、中、小主应力的量值、倾角、方位角； $\beta_H$  为最大水平主应力的方位角；(3) 应力分量采用的坐标系：轴  $x$  为正北向，轴  $y$  为正西向，轴  $z$  为铅垂向上，以下同。

破裂缝记录的常规压裂试验测段及其上下各 2 个无破裂缝记录的常规压裂试验测段, 共 6 个测段实测数据统计计算的三维地应力实测成果; 第 2 组为包含原生裂隙重张试验测段和有破裂缝记录的常规压裂试验测段及其上下各 1 个无破裂缝记录的常规压裂试验测段, 共 4 个测段实测数据统计计算的三维地应力实测成果。

单钻孔水压致裂法三维地应力测量成果的检验: 判断三维地应力测量成果是否正确, 可采用钻孔横截面上由实测三维地应力推算的与其实测的二维地应力状态是否一致来判断。对照表 4 右边最后 3 列和表 3 可知, 最大和最小水平主应力及其方位, 由三维地应力推算的结果与常规水压致裂法实测的结果非常接近。第 1, 2 组计算的最大水平主应力量值的标准差分别为 2.33 和 2.65 MPa, 最小水平主应力量值的标准差分别为 1.31 和 1.47 MPa, 最大水平主应力方位角差值均为 0.1°。由此可知, 单钻孔水压致裂法三维地应力测量是成功的。

**4.3 ZK307 钻孔套芯应力解除法三维地应力测量**

ZK307 钻孔在水压致裂法测量前已经进行了套芯应力解除法测量, 套芯应力解除法测量元件采用深孔的空心包体式钻孔三向应变计, 共获得了 6 个测段 11 个测点的三维地应力实测资料, 最深测量深度达 122.7 m。与单钻孔水压致裂法三维地应力测量对应深度的有 4 个测点, 测量深度为 33.7~65.6 m, 其测试成果列于表 5。

**4.4 单钻孔水压致裂法与套芯应力解除法三维地应力测量实测成果的比较**

虽然从表 4, 5 中已经可以看到单钻孔水压致裂法与套芯应力解除法的三维地应力测量能够得到相互吻合的成果, 但对两者更进一步的比较还需要再深究一下。水压致裂法的三维地应力测量是某一区段范围内地应力信息的综合计算结果, 而套芯应力解除法的三维地应力测量是对该测量点地应力信息的计算结果。为了相互一致, 把套芯应力解除法的测量成果, 也用相应测段的几个测点实测值的平均值表示。相对水压致裂法的第 1 组和第 2 组计算的测段位置, 套芯应力解除法为深度 33.7~65.6 m 的 4 个测点和深度 46.8~55.7 m 的 2 个测点, 其平均值列于表 5 中的第 5 行和第 6 行中。

比较表 4 与表 5 的第 5, 6 行可知: 两种三维地应力测量方法的实测成果相当一致, 3 个正应力分量和 3 个主应力量值的均方差, 第 1 组计算的分别为 1.58 和 2.38 MPa, 第 2 组计算的分别为 0.96 和 1.90 MPa; 水平主应力量值的平均值和最大水平主应力方位角差值, 第 1 组计算的分别为 1.41 MPa 和 13.7°, 第 2 组计算的分别为 0.61 MPa 和 6.8°。由以上数据分析可知, 两种三维地应力实测成果第 2 组比第 1 组的计算结果更接近, 这是由于水压致裂法三维地应力测量第 2 组计算所包含测段的距离(约 21.2 m)比第 1 组计算所包含测段的距离(约 30.6 m)短, 第 2 组计算的综合测量状态更能代表套芯应力解除法三维地应力测量的技术要求。由以上分析可知, 这种单钻孔水压致裂法三维地应力测量是可行的, 其实测成果得到了传统的套芯应力解除法三维地应力测量的充分印证。

表 5 ZK307 钻孔套芯应力解除法地应力测量部分测试成果表

Table 5 Partial measuring results of 3D geostress by overcoring stress relief method at borehole ZK307

测点 编号	孔深 /m	$\sigma_x$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_z$ /MPa	$\tau_{xy}$ /MPa	$\tau_{yz}$ /MPa	$\tau_{zx}$ /MPa	$\sigma_1$ /MPa	$\alpha_1$ /(°)	$\beta_1$ /(°)	$\sigma_2$ /MPa	$\alpha_2$ /(°)	$\beta_2$ /(°)	$\sigma_3$ /MPa	$\alpha_3$ /(°)	$\beta_3$ /(°)	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_h$ /MPa	$\beta_H$ /(°)
1 <sup>#</sup>	33.7	6.51	7.69	10.54	0.27	-1.28	-2.19	11.90	61.8	142.0	7.34	12.1	255.4	5.51	25.1	351.2	7.75	6.45	282.2
2 <sup>#</sup>	46.8	6.99	12.63	9.19	2.28	2.96	-2.02	14.48	26.0	279.7	10.04	45.7	159.7	4.28	33.0	28.1	13.43	6.18	289.5
3 <sup>#</sup>	55.7	8.05	7.51	11.05	0.77	-3.19	-2.23	13.85	54.2	129.4	7.24	10.5	24.4	5.51	33.8	287.3	8.60	6.96	324.7
4 <sup>#</sup>	65.6	7.53	8.07	13.27	-0.79	2.28	-2.49	15.03	62.4	225.0	7.24	16.1	101.5	6.60	21.8	4.9	8.64	6.97	234.5
第 1 组		7.27	8.98	11.01	0.63	0.19	-2.23	12.05	64.7	175.8	9.12	7.0	280.8	6.08	24.2	13.9	9.19	7.06	288.2
第 2 组		7.52	10.07	10.12	1.53	-0.12	-2.13	11.82	43.6	136.0	9.97	36.0	269.6	5.92	25.1	19.5	10.79	6.80	295.1

注: 第 1 组为表中序号为 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>测点实测值的平均值, 第 2 组为表中序号为 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>测点实测值的平均值。

## 5 结 语

(1) 水压致裂法地应力测量具有很多突出的优点,尤其是测量深度深,这是其他地应力测量方法无法比拟的,该方法目前已在国内外得到广泛应用。但是以往这种测量方法只能测量钻孔横截面上二维地应力状态。水压致裂法三维地应力测量扩大了这种测量方法的应用范围。

(2) 采用3个不同方向钻孔的水压致裂法三维地应力测量,由于需要3个以上不同方向的钻孔分别测量,施钻和测量工作量较大,并且各钻孔的测段之间相隔较远,需要假设各钻孔处于均匀应力场,不太符合实际,这样限制了其应用范围。

(3) 单钻孔中水压致裂法三维地应力测量,在以前研究基础上又作了进一步探讨研究。进行钻孔原生裂隙段重张试验时在裂隙面上又发掘了2个剪应力的平衡条件,这样大大减少了对原生裂隙段重张试验数量的要求:原生裂隙段重张试验测量法,只需要2个原生裂隙段的重张试验,就可确定岩体的三维地应力状态;完整岩体段常规压裂试验与原生裂隙段重张试验相结合测量法,只需要1个原生裂隙段的重张试验和1个完整岩体段有裂缝记录的常规压裂试验,就可确定岩体的三维地应力状态,这样大大扩大了在单钻孔中进行水压致裂法三维地应力测量的可行性及其应用范围,并且可在深钻孔中进行测量,在工程上有广泛的应用前景。为了提高测量成果的精度,原生裂隙段重张试验的数量应尽可能多。

(4) 本文实例是近期在深圳抽水蓄能电站地下厂房区的1个钻孔的测试结果,在同一钻孔中采用了水压致裂法和套芯应力解除法的两种三维地应力测量方法,得到了非常一致的测试结果。单钻孔水压致裂法三维地应力测量的测试结果,不仅得到了水压致裂法钻孔横截面上实测的二维应力状态的检验,还得到了传统套芯应力解除法实测的三维应力状态的印证,证明了其可行性和可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] Cornet F H, Valette B. In-situ stress determination from hydraulic injection test data[J]. Journal of Geophys. Res., 1984, 89(13): 11 527 - 11 537.
- [2] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 246 - 256.(Liu Yunfang. In-situ 3D stress measurements by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(3): 246 - 256.(in Chinese))
- [3] 刘允芳, 罗超文, 景 锋. 水压致裂法地应力测量及其修正和工程应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 465 - 470.(Liu Yunfang, Luo Chaowen, Jing Feng. 3D geostress measurement by hydrofracturing technique and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 465 - 470.(in Chinese))
- [4] 刘允芳, 钟作武, 汪 洁. 水压致裂法三维地应力测量资料整理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 833 - 838.(Liu Yunfang, Zhong Zuowu, Wang Jie. Interpretation of 3D geostress results measured by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 833 - 838.(in Chinese))
- [5] 刘允芳. 在单钻孔中水压致裂法的三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 192 - 196.(Liu Yunfang. 3D geostress measurement by hydraulic fracturing technique in one borehole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 192 - 196.(in Chinese))
- [6] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量在工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 37 - 41, 49.(Liu Yunfang. Application of 3D geostress measurement by hydraulic fracturing technique[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(2): 37 - 41, 49.(in Chinese))
- [7] 刘允芳, 尹健民. 在一个铅垂钻孔中水压致裂法三维地应力测量的原理和应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 615 - 620.(Liu Yunfang, Yin Jianmin. Principle and application of 3D geostress measurements by hydraulic fracturing technique in a vertical borehole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 615 - 620.(in Chinese))
- [8] 尹健民, 刘元坤, 罗超文, 等. 原生裂隙水压法三维地应力测量原理及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 706 - 1 709.(Yin Jianmin, Liu Yuankun, Luo Chaowen. Three-dimensional geostress determination by hydraulic test on preexisting fractures and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 1 706 - 1 709.(in Chinese))
- [9] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(Liu Yunfang. Geostress and Engineering Construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [10] 韩晓玉, 艾 凯, 王法刚. 深圳抽水蓄能电站地应力测试与分析报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2005.(Han Xiaoyu, Ai Kai, Wang Fagang. The report on measurement and analysis of geostress for Shenzhen pumped storage power station[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2005.(in Chinese))