文章编号：1006-6616（2011）03-0249-13

差应变法地应力测量
——以汶川地震断裂带科学钻探 WFSD-1 钻孔为例

彭 华[1,2]，马秀敏[1,2]，姜景捷[1,2]
（1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室，北京 100081；
2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081）

摘 要：岩心差应变分析法是汶川地震断层科学钻探（WFSD）项目地应力测量的主要手段之一，该技术通过高压容器对取之于钻孔不同深度的实验样品施加围压，观察先前由于失去地层应力而膨胀产生的裂纹重新闭合，并通过裂纹闭合过程差应变曲线分析，确定主应力大小和方向。WFSD-1 孔 12 个岩心样品的 DSA 测试结果表明：断层上下盘的应力状态有明显差异，区域地应力不仅随深度增加，还与地质结构和岩石的物理性质等因素有关。

关键词：汶川地震断裂带科学钻探；映秀—北川断层；差应变分析法（DSA）；地应力测量；滑动准则
中图分类号：P315 **文献标识码**：A

0 引言

地应力是存在于地壳岩体中的天然应力，地应力测量是了解地应力赋存状态和获取地应力参数的主要方法，受深度、温度、空间、钻探技术的限制和地质条件的影响，在深钻孔中直接测量应力涉及复杂的岩石力学试验和微电子技术，成功率低，且成本较高。基于定向岩心差应变分析（DSA）技术，仅需要 30 mm × 30 mm × 30 mm（正方体）或 Φ25 mm × 30 mm（圆柱体）定向实验样品，通过实验室的围压试验和应力张量分析计算，即可得出地应力的大小和方向。没有深度的限制，既适合于浅钻孔，也适合深孔。与钻孔直接法测量地应力相比，DSA 法具有速度和成本优势[1~8]。

汶川地震断裂带科学钻探（WFSD）项目是由国土资源部、中国地震局联合组织的科学钻探工程，其目的是通过一系列穿越汶川地震断裂带的科学钻孔，了解汶川地震发生的物理化学过程；通过钻孔实验和测试，揭示地震发生的规律。WFSD-1 钻孔位于成都市都江堰虹口乡，属于 WFSD-2 的先导孔，钻孔揭示在映秀—北川断层带上盘的彭 - 灌杂岩中，岩性以元古界火山岩和花岗岩为主，在 590 m 穿越地震断层主界面，终孔于 1201. 15 m 三叠系变质砂板岩中。钻孔地应力是项目研究的主要内容之一，为了进一步了解地震发生机制和断层破

收稿日期：2011-05-30
基金项目：科技部“汶川地震断裂带科学钻探”项目和地调项目（编号：1212010916064）联合资助。
作者简介：彭华（1964-），男，研究员，主要从事地应力测量及相关测量仪器研制、地壳稳定性调查与评价、地质灾害、岩稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作。E-mail：ph68486797@ yahoo. com. cn

裂扩展规律，首先应确定地应力的空间展布，尤其是断层滑动和发震断层面上的剪应力和正应力。由于较为岩心破碎，本文采用 DSA 技术开展原地地应力测试研究。

1 差应变分析（DSA）法及试验技术

1.1 差应变分析（DSA）法概述

岩心在地下深处受地应力作用处于压缩状态，本身含有的天然裂隙也处于闭合状态。岩心自地下深处取出后，原先受压条件下的应力完全解除，各卸压方向有张力微裂隙产生（见图 1），致使岩心体积发生膨胀。微裂隙的空间分布形态与原岩应力方向有关，微裂隙的数量和发育强度与原岩应力大小成正比。通常岩石压缩变形是由岩石固体颗粒变形和空隙变形两部分组成，空隙变形又由岩石天然孔隙变形和岩石受力释放后所产生的次生裂隙变形及孔隙变形组成，只有后部分变形才包含岩石先前的受力信息，如何分离出岩石受力释放后所产生的次生裂隙变形及孔隙变形是差应变法地应力测量的关键。如果将岩石样品置于压力容器中逐步加围压，在加压过程中微裂隙逐步闭合，将引起岩石应变率的改变；当试样表面压力大于原岩应力时，微裂隙将完全闭合。测量微裂隙闭合前后岩石的应变变化，与标准样品试验数据进行比较，或直接用补偿的方法消除温度、围压以及弹性应变，获取微裂隙闭合过程引起的样品不同方向上的应变，用最小二乘法回归计算其对应的 9 个独立应变张量，计算出 3 个主应变比和主轴方向随围压的变化，将不同围压下主应变轴投影到吴氏网上，分析差应变主轴极密的随围压变化的稳定性，判断裂缝的期次和极序。在已知 3 个主应变比值和空间方位时，用微裂隙闭合点的压力作为最大主应力或根据样品岩心所在的深度推算铅直应力的大小，就可以计算出该处三维地应力大小和方位角。

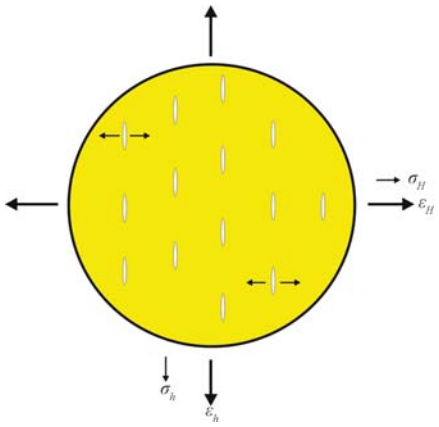


图 1 岩心应力释放卸载产生的微裂隙及其分布示意图

Fig. 1 Distribution and generated micro-cracks by the unloading of core stress

差应变分析法由斯特里克兰、雷恩、罗吉尔等人在 20 世纪 80 年代初首先提出，并用于德国 KTB 科学钻探等项目的岩石现场地应力测量[9~11]。

差应变分析法有以下 4 点假设：①岩心地应力释放将在岩石内产生微小裂隙；②这些裂隙的排列受原地应力场影响；③裂隙的体积与所受的原地应力大小成比例；④受卸压膨胀后的试件，在施加静水压力后，某一方向上的压缩量，与该方向的膨胀应变量有关。

图 2 为裂隙岩石在围压下的应力—应变过程曲线，*OAB* 为实际试验测得的应力—应变曲

线，p_{max}是裂隙闭合时的围压，点 A 为裂隙闭合（crack closure）与弹性段的边界点，大部分的岩石在初始受轴向应力作用情况下，岩石中的微裂隙与孔隙便会开始闭合，弹性模量（E）亦会随之增加；在 A 点，裂隙完全闭合，应力—应变行为就会开始转变成弹性状态。

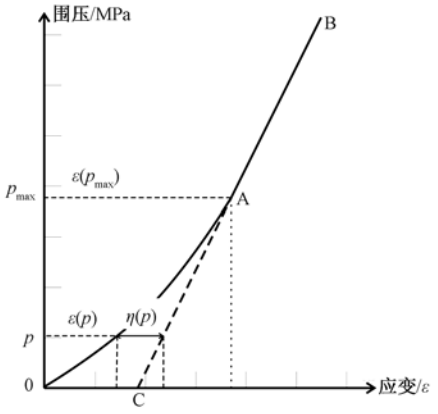


图 2　岩石受压微裂纹闭合过程围压 – 应变曲线

Fig. 2　Pressure-strain curve of confining pressure rock during micro-crack closure

CAB 为无裂隙固体产生的应力—应变曲线，应变 $\eta(p)$ 差应变为在围压 p 作用下无裂纹固体产生的应变与实际测量应变 $\varepsilon(p)$ 之差。

在 DSA 测量过程中是恒温的，由于温度变化引起的热膨胀应变可以忽略。围压中的岩石应变主要为岩石固体颗粒应变 $\varepsilon^s(p)$、天然孔隙压缩应变 $\varepsilon^p(p)$ 及裂纹闭合引起的应变 $\varepsilon^c(p)$，试样的差应变 $\eta_{ij}(p)$ 与围压 p 的方程为：

$$\eta_{ij}(p) = \varepsilon^s_{ij}(p) - \varepsilon_{ij}(p) = \varepsilon^p_{ij}(p) + \varepsilon^c_{ij}(p)(i,j = 1,2,3;0 \leq p \leq p_{max}) \tag{1}$$

式（1）中，$\varepsilon_{ij}(p)$ 为实际测得的围压—应变曲线，在应变曲线 A 点及以上微裂隙完全闭合，岩石为弹性状态，设 E 为试样弹性模量，则有：

$$E_{ij} = \left.\frac{\mathrm{d}\varepsilon_{ij}(p)}{\mathrm{d}p}\right|_{p=p_{max}} \quad (i,j = 1,2,3,0 \leq p \leq p_{max}) \tag{2}$$

无裂隙固体应变 $\varepsilon^s_{ij}(p)$ 为：

$$\varepsilon^s_{ij}(p) = \frac{p - p_{max}}{E_{ij}} + \varepsilon_{ij}(p_{max}) \quad (i,j = 1,2,3;0 \leq p \leq p_{max}) \tag{3}$$

据式（1）和式（2），可得到试样在围压 p（$0 \leqslant p \leqslant p_{max}$）作用下的差应变曲线方程：

$$\begin{aligned}\eta_{ij}(p) &= \varepsilon^p_{ij}(p) + \varepsilon^c_{ij}(p)\\ &= \frac{p - p_{max}}{E_{ij}} + \varepsilon_{ij}(p_{max}) - \varepsilon_{ij}(p) \quad (i,j = 1,2,3;0 \leq p \leq p_{max})\end{aligned} \tag{4}$$

显然，式中 p_{max}，E_{ij}，$\varepsilon_{ij}(p_{max})$ 等参数是常量，可以通过实际测试曲线分析得到，如果通过无微裂隙的标样补偿掉随围压变化的参量 p/E_{ij}，即可从实际测量数据 $\varepsilon_{ij}(p)$ 中分离出由微裂隙和原生随机孔隙所产生的围压—应变部分 $\varepsilon^p_{ij}(p) + \varepsilon^c_{ij}(p)$。由于原生孔隙$\varepsilon^p_{ij}(p)$与地应力无关，大小和方向分布随机，可以用数学统计方法剔除。

无裂纹标样（Crack-free solid）通常采用熔凝石英加工成方样，其热膨胀系数为 5.5×10^{-7}/℃，20 ℃弹性模量为 77.8 GPa，泊松比为 0.17，性能稳定，围压—应变曲线有极好的重复性。

1.2 DSA 样品制备和试验技术

在 WFSD-1 钻孔施工期间，按大致 100 m 间隔选取无明显裂纹和层理、长度大于150 mm 的完整岩心，映秀—北川断层的上盘火山岩和下盘砂板岩各取 6 个样（见图 3）。岩心定向采用超声波测井的定向影像与岩心滚动圆周扫描图像对比确定。

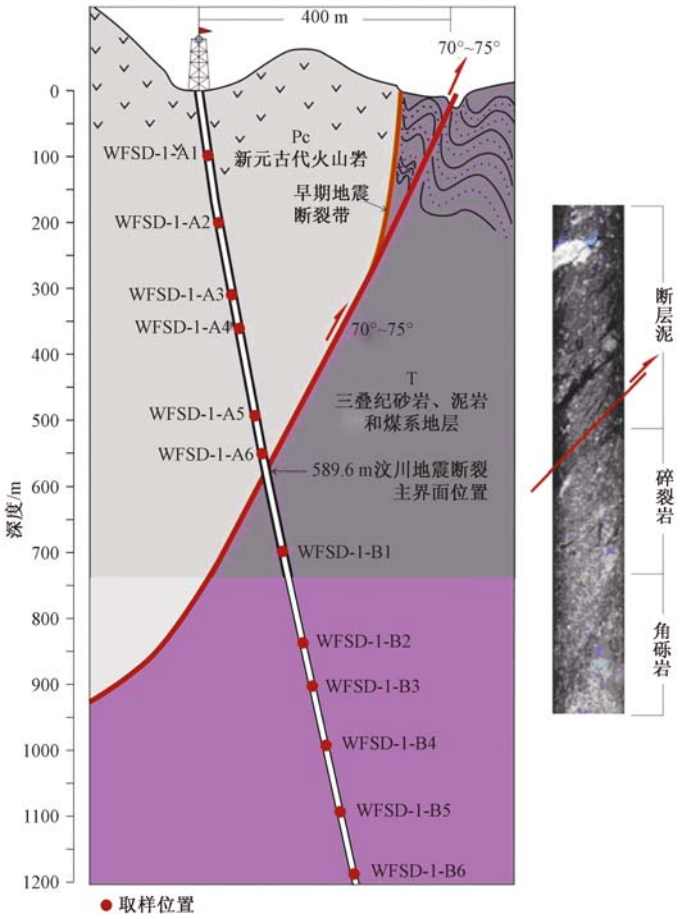


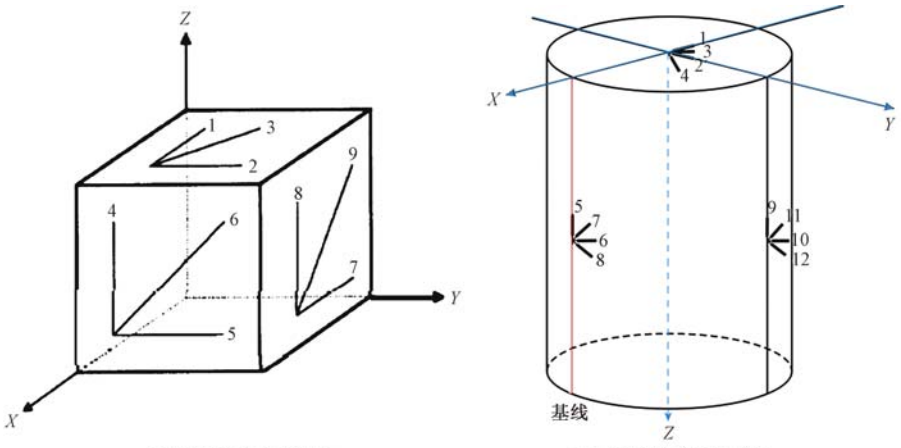
图 3 WFSD-1 钻孔示意图及采样位置

Fig. 3 Diagram of WFSD-1 drilling hole and sampling location

岩心差应变分析实验需要在高压容器中进行，实验样品尺寸为 30 mm × 30 mm × 30 mm 的方样或 Φ30 × 30 mm 的圆柱样，并按地理坐标定向。

岩心样品采用金刚石钻头和金刚石锯片切割，避免磕碰损伤表面而产生与差应变不相干的微裂隙；样品经过 105 ℃干燥 3 h，以去除微裂隙中的水汽；采用环氧树脂胶粘贴应变花（4 分向，0°，90°，45°和 135°），按相互垂直的 3 个面（见图 4a）或 120°方向（见图 4b）排列；真空干燥和氩气充填微裂隙（避免实验过程中高温高压条件下裂隙中矿物与空气发生反应）；最后覆盖硅橡胶涂层防止样本被实验液体侵入（注意涂胶前应变片的引线要用接线端子板固定，防止测试过程中线的位置发生变化而干扰测量）。

试验过程应变测量采用共用补偿片的 1/2 桥接方式，公共补偿采用与实验样品同处高压舱的无裂隙石英玻璃应变补偿试件，采用水晶熔融后缓慢冷却，经过切割成型和高温退火，在表面粘贴与试样同型号、同批次的应变片，再涂覆硅胶防水处理（见图 5、图 6）。所有应变片引线通过出线塞连接到应变仪，其带有串行接口连接到电脑。



(a) 9个定向应变片试件　　(b) 12个定向应变片试件

图 4　DSA 试验岩心试件贴片方式

Fig. 4　Chip mode of core in DSA examination

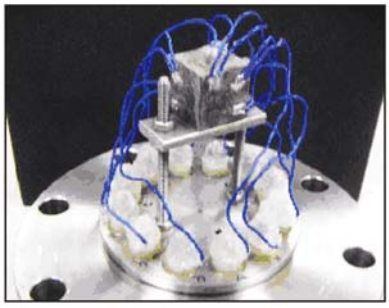


图 5　贴 12 个应变片的 DSA 试样

Fig. 5　Specimen in the confining pressure chamber

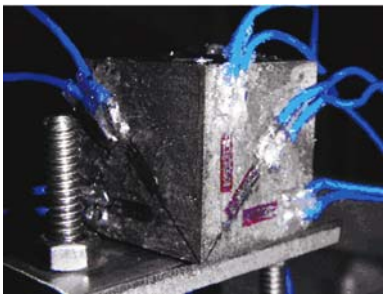


图 6　熔凝石英补偿块

Fig. 6　Compensation block of the fused quartz

试验采用高温钢制作的耐高压容器（见图 7），设计耐压 300 MPa 和耐温 400 ℃（满足 10000 m 深孔岩心试验要求），内腔高 2000 mm，直径 60 mm，由于普通液压油在高压下粘度急剧增大，不适合高压条件下工作，同时还要考虑到绝缘，试验高压液体采用无水乙醇或变压器油。

将试样和补偿块一起放入压力容器中，并加静水压至 100 ~ 140 MPa，加压大小取决于原来岩心所在的深度。围压试验最高压力取裂隙闭合（差应变曲线变直）点 1.5 倍。在加压过程中裂隙逐步闭合，加压和卸压重复 3 次以上。实验过程和相关的温度、压力、应变数据被记录下来，绘制出应力—应变曲线。

试验证明，裂隙闭合过程与加载压力之间有迟滞现象，即压力不变时，差应变还会缓慢继续增加（漂移）。因此，DSA 试验加载要缓慢地进行，试验压力逐步增加，连续加载速度最好小于 0.01 MPa/s，慢速加载也有利于精确判断所有微裂隙被关闭的特定压力值（围压—应变曲线线性部分开始点）。

为保证试验结果的一致性，必须保证仪器有足够高的分辨率和试样加工精度，确保各个试样的试验环境条件一致。

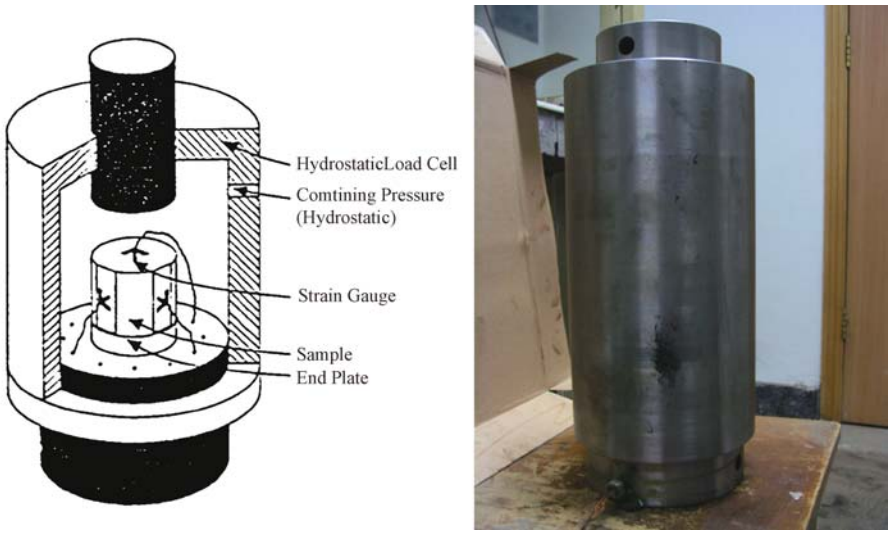


图 7 试验高压容器

Fig. 7 Diagram of the high pressure vessel

2 数据处理

通过记录数据与标样数据之差获得差应变数据（见图 8），按压力闭合点 p_c 补偿弹性模量后的差应变 $\eta(p_c)$ 曲线见图 9。确定微裂隙闭合压力是 DSA 试验的关键，利用围压—应变曲线对围压 p 求导，得到差应变微分方程（见图 10），其曲线的 0 点就是裂隙完全闭合点，相应的围压即是微裂隙闭合压力，与岩样所在地层的最大主应力相对应。

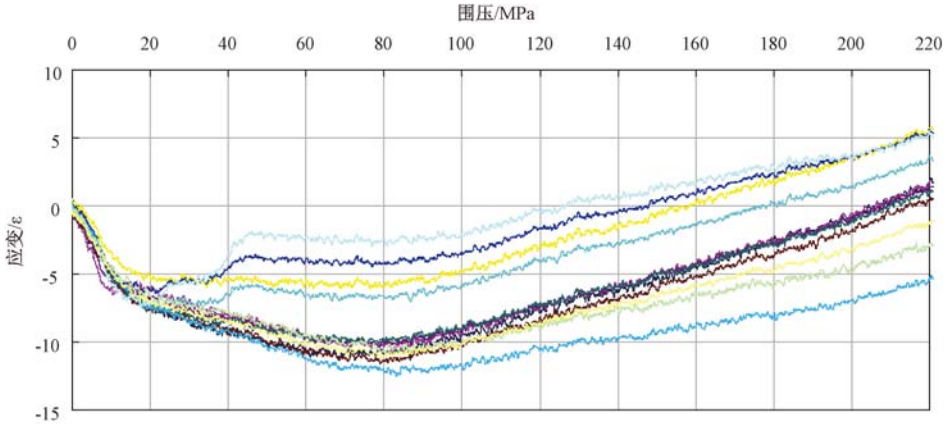


图 8 数字应变仪记录的用标样作为桥臂的实验过程的围压-应变（$\varepsilon(p)$）曲线（原始数据）

Fig. 8 Recorded pressure-strain curves by a digital gauge during experiment (raw data)

2.1 主应力轴方向

在差应变数据中获取 9 或 12 个差应变分量，按围压 p 的不同，通过最小二乘法拟合（12 个差应变分量）或直接（9 个差应变分量）计算相对于地理坐标系的 6 个独立的应变

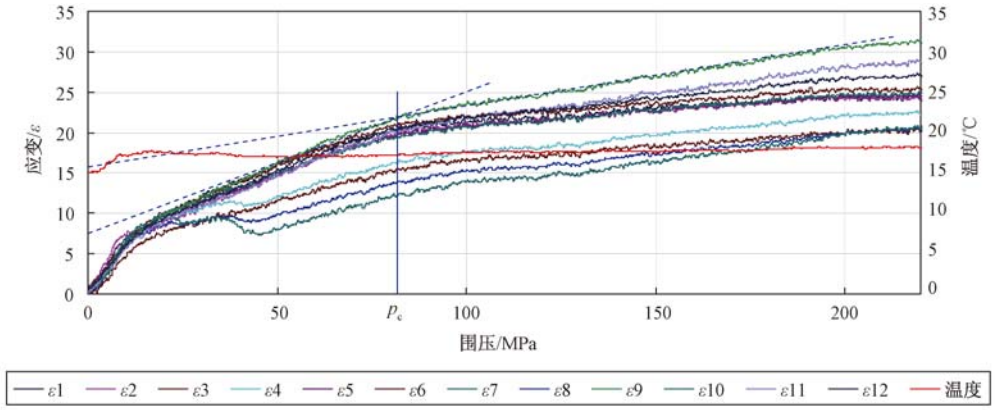


图 9　压力闭合点 p_c 补偿弹性模量后的差应变 $\eta(p_c)$ 曲线（WFSD-1-B6 砂岩试样，深度 1190 m）

Fig. 9　Different strain curve after the compensated elastic modulus by pressure closing point

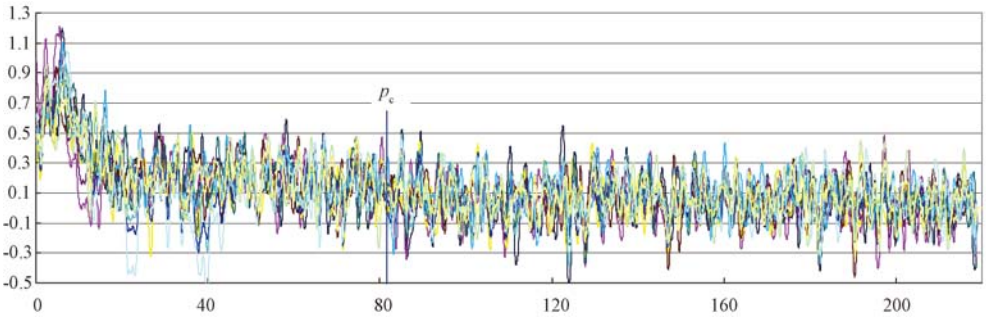


图 10　差应变数据 $\eta(p_c)$ 对 p 求导后的 $\dfrac{\mathrm{d}\eta(p_c)}{\mathrm{d}p}$ 曲线

Fig. 10　The obtained curve of derivative difference strain data on p_c

分量：

$$\begin{aligned}
\varepsilon_Y &= \varepsilon'_3 \\
\varepsilon_X &= \varepsilon'_1 \\
\varepsilon_Z &= \varepsilon'_6 \\
\gamma_{XY} &= 2\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1 - \varepsilon'_3 \\
\gamma_{YZ} &= 2\varepsilon'_5 - \varepsilon'_4 - \varepsilon'_6 \\
\gamma_{XZ} &= 2\varepsilon'_8 - \varepsilon'_7 - \varepsilon'_9
\end{aligned} \tag{5}$$

再通过式（5）中 6 个应变分量计算出 3 个主差应变分量 ε_1，ε_2，ε_3 和主应变轴的方向：

$$\begin{aligned}
&\varepsilon_i^3 - (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)\varepsilon_i^2 + (\varepsilon_x\varepsilon_y + \varepsilon_y\varepsilon_z + \varepsilon_x\varepsilon_z - \gamma_{xy}^2/4 - \gamma_{yz}^2/4 - \gamma_{xz}^2/4)\varepsilon_i - \\
&(\varepsilon_x\varepsilon_y\varepsilon_z - \varepsilon_x\gamma_{yz}^2/4 - \varepsilon_y\gamma_{xz}^2/4 - \varepsilon_z\gamma_{xy}^2/4 + \gamma_{yz}^2\gamma_{xz}^2\gamma_{xy}^2/4) = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

式（6）的 3 个解为主差应变分量 ε_1，ε_2，ε_3，由下式可计算其主轴的方向余弦：

$$\begin{aligned}
l &= A_i/\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2} \\
m &= B_i/\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2} \\
n &= C_i/\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}
\end{aligned} \tag{7}$$

在式（7）中：

$$\begin{aligned} A_i &= (\varepsilon_y - \varepsilon_i)(\varepsilon_z - \varepsilon_i) - \gamma_{zy}\gamma_{yz}/4 \\ B_i &= \gamma_{zy}\gamma_{xz}/4 - \gamma_{xy}/2(\varepsilon_z - \varepsilon_i) \\ C_i &= \gamma_{xy}\gamma_{yz}/4 - \gamma_{xz}/2(\varepsilon_y - \varepsilon_i) \end{aligned} \tag{8}$$

由于地应力活动、矿物排列、层理等因素的影响，岩石裂隙形成有一定的取向追踪现象，即微裂隙的形成除了与最大主应力有关外，还与岩石中存在的原生裂隙、弱面有关，多期微裂隙交织在一起，使其闭合过程有一定的离散性。本文主应变方向计算采用下半球投影（吴氏网），部分试样围压下裂缝闭合过程 3 个主差主应变轴合并投影在吴氏网上（见图 11），根据主应变轴极密确定其方向和倾角。图 11 中红色点代表裂隙闭合过程其法线游动，图 11a 和图 11b 轨迹沿北西方向形成线状分布，反映出岩石经历了北西方向动力连续作用进程，遗留了一系列的微裂隙。因此，DSA 法不仅可分析岩石微裂隙分布的规律，进而还可探知岩石受力历史的信息。

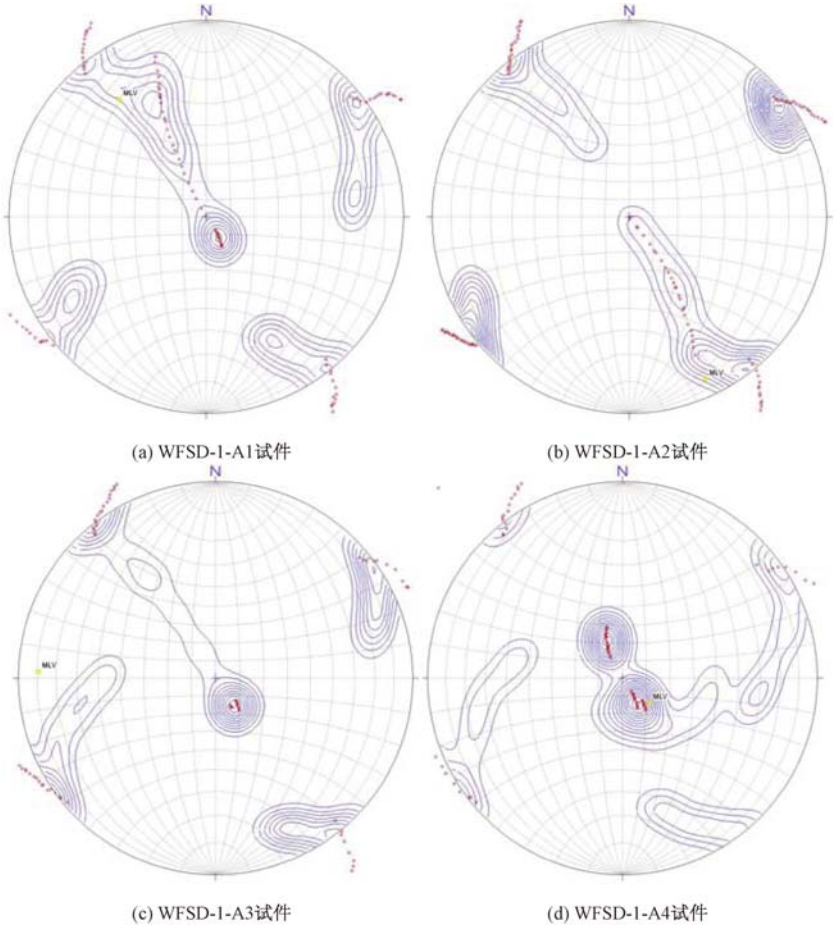


图 11 部分试样围压下裂缝闭合过程主差主应变轴极密图

Fig. 11 The pole dense of principal strain axis during fracture closure under confining pressure difference

2.2 主应力大小

由多个方向的裂隙闭合应变率可求得 3 个主裂隙应变。主裂隙应变大小与 3 个主应力有

关，同时它们对应着 3 个主应力的方向。在考虑孔隙压和材料各向同性时，主应力比值为：

$$(\sigma_1 - p_0) : (\sigma_2 - p_0) : (\sigma_3 - p_0) =$$
$$[\mu(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) + (1-\mu)\varepsilon_1] : [\mu(\varepsilon_3 + \varepsilon_1) + (1-\mu)\varepsilon_2] : [\mu(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + (1-\mu)\varepsilon_3] \quad (9)$$

式中：μ 为泊松比，p_0 为孔隙压，MPa。

由于差应变分量只能计算出主应力比值，假定岩石铅直应力为上覆岩层的重量，或取微裂隙完全闭合时的围压作为最大主应力值，则根据主应力比值可计算出三维主应力值。

3　实验结果分析

对 WFSD-1 孔 12 个岩心样品进行了 DSA 测试，根据测试记录差应变分析，得到了主应力轴比率和主轴方位、倾角（见表 1）。将微裂隙闭合压力导入主应力比值，计算出三维主应力值（见表 2），图 12 是钻孔中应力随深度变化曲线。

从表 1 和表 2 中可以看出，WFSD-1 钻孔 110 ~ 560 m 和 710 ~ 1190 m 两孔段测量结果显示最大主应力为水平方向，最小主应力为铅直方向，中间主应力为水平方向，为逆断层应力状态；从 110 ~ 1190 m 深度，最大主应力大小为 7.1 ~ 69.1 MPa，最小主应力大小为 4.5 ~ 35.3 MPa，最大与最小主应力比值接近 2.0，属于中偏高的逆断层应力状态。

根据上覆地层重量估算铅直应力（σ_v）大小为 2.7 ~ 31.1 MPa 之间，与根据微裂隙闭合压力 p_c 计算的最小主应力相比，误差小于 10%，可见两种方法所计算的应力值差别不大。

表 1　差应变法应变椭球主应变轴比率

Table 1　Ratio of strain ellipsoid principal strain axes in DSA

岩心编号	主应变轴 ε_1		主应变轴 ε_2		主应变轴 ε_3		$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 : \varepsilon_3$
	方位/（°）	倾角/（°）	方位/（°）	倾角/（°）	方位/（°）	倾角/（°）	
WFSD-1-A1	322.2	-6.0	52.2	8.1	320.1	87.2	1.58∶1.51∶1
WFSD-1-A2	323.1	-4.0	53.1	5.2	352.3	88.7	2.18∶1.67∶1
WFSD-1-A3	324.6	2.1	55.2	1.7	330.2	87.4	1.62∶1.21∶1
WFSD-1-A4	325.2	0.8	55.8	0.2	329.8	89.9	1.80∶1.76∶1
WFSD-1-A5	322.8	-4.2	55.3	2.4	355.3	86.4	1.72∶1.51∶1
WFSD-1-A6	315.2	-12.6	85.7	0.7	355.2	82.8	1.71∶1.46∶1
WFSD-1-B1	314.7	6.4	86.1	8.1	340.4	84.2	1.75∶1.45∶1
WFSD-1-B2	309.1	8.7	88.3	6.2	335.8	88.9	1.84∶1.60∶1
WFSD-1-B3	312.4	2.1	83.6	0.1	312.1	86.3	1.89∶1.59∶1
WFSD-1-B4	311.1	11.8	81.1	0.8	350.2	80.4	1.86∶1.48∶1
WFSD-1-B5	304.2	22.1	87.1	2.6	312.5	88.1	1.95∶1.54∶1
WFSD-1-B6	298.5	8.8	83.6	12.2	326.1	79.4	1.96∶1.69∶1

水平最大主应力方向为 325.2° ~ 298.5° 之间，大致与映秀—北川地震断层垂直。断层上盘火山岩方位角 315.2° ~ 325.2° 和倾角 2.1° ~ -12.6° 与下盘砂板岩方位角 298.5° ~ 314.7° 和倾角 2.1° ~ 22.1° 分别有约 20° 和 18° 的差异，表明断层是一个明显不连续的应力边界。

表 2 WFSD-1 井差应变法地应力测量结果比较

Table 2 The compared results of DSA stress measurement in WFSD-1 hole

岩心编号	岩性	采样深度/m	根据上覆地层重量估算铅直应力 σ_V/MPa	根据微裂隙闭合压力 p_c 计算			σ_1/σ_3
				最大主应力 σ_1/MPa	中间主应力 σ_2/MPa	最小主应力 σ_1/MPa	
WFSD-1-A1	火山岩	110	2.7	7.1	6.8	4.5	1.76
WFSD-1-A2	火山岩	210	5.4	13.0	10.0	6.0	2.83
WFSD-1-A3	火山岩	330	8.1	16.5	12.4	10.2	1.91
WFSD-1-A4	火山岩	360	9.7	19.6	19.3	10.9	2.19
WFSD-1-A5	火山岩	500	13.5	26.3	23.1	15.3	2.08
WFSD-1-A6	火山岩	560	15.9	29.0	24.9	17.0	2.05
WFSD-1-B1	砂岩	710	18.6	37.5	31.1	21.4	2.12
WFSD-1-B2	砂岩	850	21.1	45.0	39.1	24.4	2.30
WFSD-1-B3	砂岩	909	23.6	53.0	45.0	28.1	2.31
WFSD-1-B4	砂岩	1010	26.1	59.4	47.5	32.0	2.25
WFSD-1-B5	砂岩	1105	28.6	64.4	51.1	33.1	2.42
WFSD-1-B6	砂岩	1190	31.1	69.1	59.8	35.3	2.44

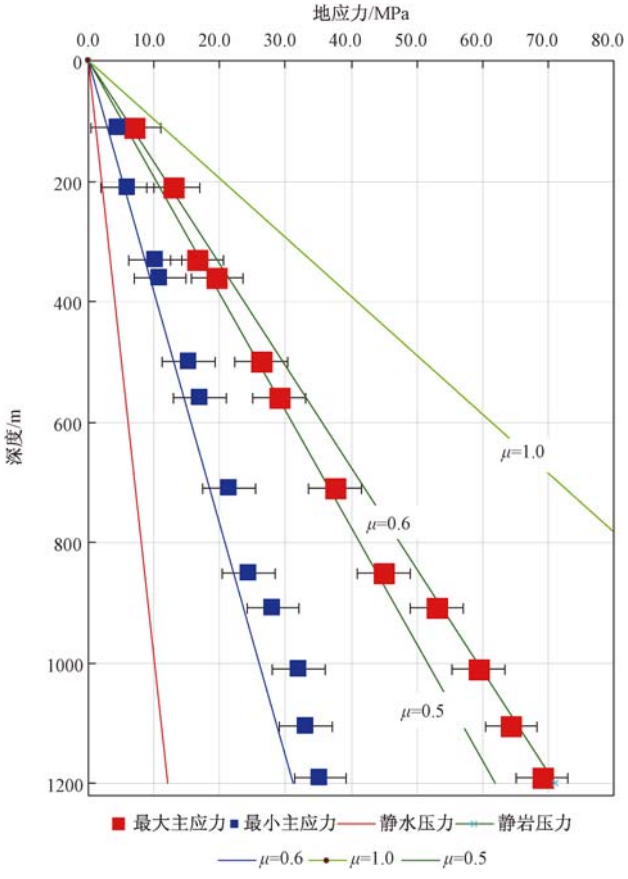


图 12 WFSD-1 钻孔应力随深度变化曲线

Fig. 12 Stress curve with depth in WFSD-1 borehole

为了分析断层的稳定性，逆断层滑动准则（摩擦强度）选取库仑准则，最大有效应力（$s_1 - p_0$）与最小有效主应力（$s_3 - p_0$）之比值可表示为摩擦系数的函数，用 k 表示：

$$k = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{s_1 - p_0}{s_3 - p_0} \geqslant [(\mu^2 + 1)^{0.5} + \mu]^2$$

式中：p_0 为孔隙水压力，MPa。

对逆断层：

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{s_{H\max} - p_0}{s_V - p_0} = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2$$

综合各种不同类型岩石的实验室摩擦实验资料表明：大部分岩石的 μ 值均在 0.6 ~ 1.0 之间。若最大、最小有效主应力之比小于此值，则断层稳定，不发生滑动；如果比值等于此值，就会在方位合适的断层上发生滑动。

根据 DSA 测试的 WFSD-1 各个测点的应力状态，计算 σ_1/σ_3 的比值 k 在 1.5 ~ 2.6 之间（两种计算第三主应力的方法中取最小比值与最大比值），断层上盘（580 m 以上）大部分在 $\mu = 0.5$ 之线上，岩石稳定性好，上盘应力释放较充分，逆断层处于稳定状态；而断层下盘（600 m 以下）大部分在 $\mu = 0.6$ 之线上，岩石稳定性差。

4　结论

（1）差应变法通过室内定向岩心试验确定三维应力方向及应力值。根据微裂隙是应力卸荷产生，其裂隙面法向为最大主应力方向，裂隙孔隙度大小与地应力大小有关以及裂隙闭合压力为最大主应力值的原理，在围压室中同时测量 9 ~ 12 道应变，通过数据分析，分离出由于微裂隙闭合而产生的差应变，并计算出得出地应力大小和方向。该方法理论上严密、可靠，降低了岩心连续完整性的要求，是一种行之有效的地应力测量方法，同时还可以进行微裂隙量化分析。

（2）DSA 试验技术难度大。由于试验过程需数百兆帕的高围压，对压力容器、施加和维持压力控制要求严格；同时，对试样密封、应变片绝缘也有较高的要求，应变仪不同通道之间要有较好的一致性；另外岩石试样均一也是试验成败的关键。

（3）DSA 技术适合各种钻孔的岩心，不受深度和场地的限制，尤其适合油田和矿山等不便进行直接地应力测量的场所。

（4）通过 WFSD-1 钻孔岩心 DSA 测试，成功获得了汶川地震后映秀—北川断层上、下盘的地应力状态。DSA 试验测出 12 组平均最大水平主应力的方向为北东 330.58°断层上、下盘差异明显，地应力方向有明显变化；大小为 7.1 ~ 69.1 MPa，最大与最小主应力比值接近 2.0，属于中偏高的逆断层应力状态。

参 考 文 献

[1] Tanimoto K, Nakamura J, Fudo R. Application of acoustic emission in in-situ test [C] //Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: A A Balkema, 1981: 573 ~ 576

[2] Hardy H R Jr, Zhang D, Zdlanko J C. Recent studies of the Kaiser effect in geologic materials [C] //Drnevich V P, Gray R E. Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission: Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials. American Society for Testing and Materials, 1989: 27 ~ 55.

[3] Yoshikawa S, Mogi K. Experimental studies on the Kaiser effect of stress history on acoustic emission activity: A possibility for estimation of rock stress [J]. Journal of Acoustic Emission, 1990, 8 (4): 113 ~ 123.

[4] Michadl J F. Stress determination in rock using the Kaiser Effect [M]. Washington: Bureau of Mines, United States Department of the Interior, 1990.

[5] 石林, 张旭东, 金衍, 等. 深层地应力测量新方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (14): 2355 ~ 2358.
SHI Lin, ZHANG Xu-dong, JIN Yan, et al. New method for measurement of in-situ stresses at great depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (14): 2355 ~ 2358.

[6] 邓金根, 黄荣樽, 田效山. 油田深部地层地应力测定的新方法 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21 (1): 32 ~ 35.
DENG Jin-gen, HUANG Rong-zun, TIAN Xiao-shan. A new method for measuring in-situ stresses in deep formation [J]. Journal of Petroleum University: Natural Science Edition, 1997, 21 (1): 32 ~ 35.

[7] 张广清, 金衍, 陈勉. 围压下利用凯泽效应测量地应力 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (3): 360 ~ 363.
ZHANG Guang-qing, JIN Yan, CHEN Mian. Measurement of in-situ stresses by Kaiser Effect under confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (3): 360 ~ 363.

[8] 刘建中, 张金珠, 张雪. 油田应力测量 [M]. 北京: 地震出版社, 1993.
LIU Jian-zhong, ZHANG Jin-zhu, ZHANG Xue. In-situ stress measurement in oilfield [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1993.

[9] White J E. The hula log: A proposed acoustic tool [C] //Proceedings of the 8th Annual Logging Symposium. Houston: Society of Professional Well Log Analysts, 1967: 125.

[10] Sinha B K, Kostek S. Stress-induced azimuthal anisotropy in borehole flexural waves [J]. Geophysics, 1996, 61 (6): 1899 ~ 1907.

[11] Sinha BK, Plona T J. Wave propagation in rocks with elasto-plastic deformations [J]. Geophysics, 2001, 66 (3): 772 ~ 785.

IN-SITU STRESS MEASUREMENT BY DIFFERENTIAL STRAIN ANALYSIS METHOD IN WFSD-1

PENG Hua[1,2], MA Xiu-min[1,2], JIANG Jing-jie[1,2]

(1. *Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazrds, Ministry of Land and Resources, Beijing* 100081, *China*;
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Core differential strain analysis method is one of the primary means of in-situ stress measurement in WFSD. Through the pressure vessel, the experimental samples taken from different depths are pressured. And it is observed that the produced cracks are re-closed due to the previously loss stratum stress. The technology is that the size and direction of principal stress are determined by differential stain analysis in the process of crack closure. This article describes the principle and data processing method of in-situ stress measurement by differential strain analysis (DSA) in WFSD-1. And the stress profile is established with depth in the hole. Test results show that the stress states of the upper and lower plate in the Yingxiu-Beichuan fault are significant differences. Regional in-situ stress not only increases with depth, but also concerns with the geological structure, rock physical properties and other factors.

Key words: Wenchuan Fault Scientific Drilling (WFSD); Yingxiu-Beichuan fault; differential strain analysis; in-situ stress measurement; sliding criterion

(上接第 248 页)

CRETACEOUS DEFORMATION HISTORY DETERMINED BY RESTORATION OF THE BALANCED SECTION ACROSS THE LANPING-JINDING REGION, YUNNAN, CHINA

LIU Li-jie, GUO Fu-sheng, JIANG Yong-biao, ZHU Zhi-jun

(*East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi* 344000, *China*)

Abstract: The Nanping Basin, located between the India and Eurasian plates, was a large Mesozoic-Cenozoic basin and deposited huge thick continuous Cretaceous strata, which recorded well the regional tectonic movement characteristics. Based on field survey and indoor data sorting, a technique of balanced section across the Lanping-Jinding region was applied to a NW-SN geological profile to reconstruct the crust shortening history from Cretaceous and to understand the nature of the basin and to check up its geological structure explained correctly and to make a digital analysis. The results showed that the total length about the Cretaceous crust shortening was 2. 938 km from the under section of Jingxing Formation to Nanxin Formation, and Nanxin Formation had the most strongest tectonic movement.

Key words: Lanping-Jinding region; Cretaceous; shortening length; technique of balanced section