

ICS 91.120.25
P 15
备案号：7888-2001

DB

中华人民共和国地震行业标准

DB/T 14-2000

**原地应力测量
水压致裂法和套芯解除法
技术规范**

Code of hydraulic fracturing and overcoring method
for in-situ stress measurement

**本标准文本为报批稿。稿件未包括出版编校结果。
与纸介质的出版物可能存在局部的差别。请注意！**

2000-11-29 发布

2001-05-01 实施

中国地震局 发布

目 次

前 言.....	III
1 范 围.....	1
2 定 义.....	1
3 符 号.....	2
4 总 则.....	3
5 水压致裂法.....	4
6 套芯解除法.....	6
附录 A （标准的附录）套芯解除法地应力计算建议方法.....	9

前 言

本标准根据我国原地应力实测技术现状、参考国际岩石力学学会（ISBM）试验方法委员会确定岩石应力的建议方法、岩土工程试验监测手册以及国内外原地应力实测经验和成果制定。

本标准包括水压致裂法和套芯解除法两种测量方法。

本标准由中国地震局提出。

本标准由全国地震标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：中国地震局地壳应力研究所。

本标准主要起草人：王建军、李方全、陈群策、苏恺之、杨树新。

中华人民共和国地震行业标准

原地应力测量

水压致裂法和套芯解除法

DB/T 14-2000

技术规范

Code of hydraulic fracturing and overcoring method for in-situ stress measurement

1 范围

本标准规定了用水压致裂法和套芯解除法测量原地应力的技术方法和技术要求。

本标准适用于各类岩体工程需要原地应力资料场点的测量，水压致裂法适用于测量深度大于 50 m 的情况，套芯解除法适用于需要获知三维主应力大小和方向的情况。

2 定义

本标准采用下列定义。

2.1 原地应力 in-situ stress

未经人类活动扰动存在于地壳内部的应力。

2.2 封隔器 packer

用于封隔孔段的圆柱形器具。

2.3 封隔段 test interval

一对跨接式封隔器密封形成的测量孔段。

2.4 座封 packer setting

向一对跨接式封隔器注液加压（简称注压），使之膨胀，紧贴孔壁形成封隔段的过程。

2.5 水压致裂 hydraulic fracturing

向封隔段内注压致使封隔段孔壁产生破裂的过程。

2.6 初始破裂压力 initial breakdown pressure

使封隔段孔壁产生张性破裂的液压或泵压，即临界破坏压力（见图 1）。

2.7 瞬时关闭压力 instantaneous shut-in pressure

在孔壁破裂后停止注压并保持压裂回路密闭的情况下裂缝停止延伸趋于闭合时，封隔段内保持裂缝张开时的平衡压力（见图 1）。

2.8 破裂重张压力 fracture reopening pressure

再次对封隔段注压使破裂重新张开的压力（见图 1）。

中国地震局 2000-11-29 批准

2001-05-01 实施

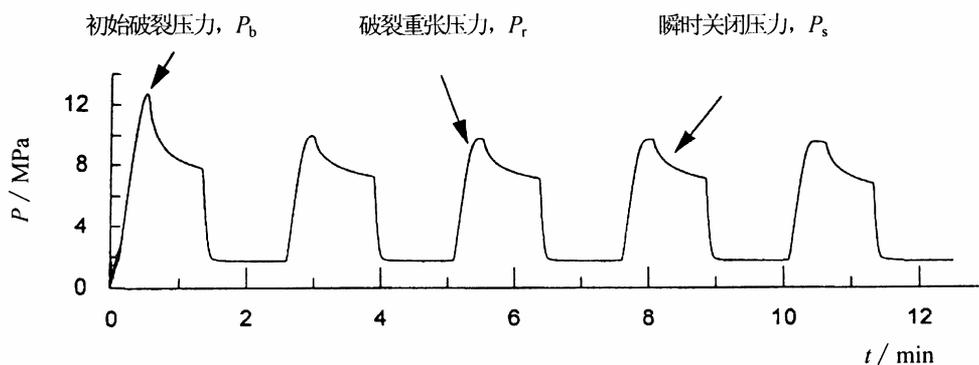


图 1 水压致裂压力—时间记录曲线

2.9 孔隙水压力 pore water pressure

存在于岩体孔隙中水的压力。

2.10 岩体抗张强度 tension strength of rock

封隔段围岩抵抗拉张破坏的强度。

2.11 单回路压裂系统 single circuit hydraulic fracturing system

由一个高压泵通过单一的管线（钻杆）向封隔器注压座封后，经井下转换开关转换为向封隔段注压压裂的测量系统。

2.12 双回路压裂系统 double circuits hydraulic fracturing system

由高压泵通过两条管线（钻杆和高压胶管），分别向封隔器注压座封及向封隔段注压压裂的测量系统。

2.13 印模 impressing

将带有定向装置的印模器置入已压裂的孔段，注压膨胀印模器使水压致裂产生的破裂在印模器上留下印痕的过程。

2.14 套芯解除 overcoring

将测量传感器安装在钻孔孔底的测量小钻孔中并观测读数，然后在测量小钻孔外同心套钻钻取岩心，使岩心与围岩脱离的过程。

2.15 元件定向 component orienting

确定应力测量时传感器上各元件在钻孔中的方位和倾角。

2.16 钻孔孔径变形法 borehole deformation method

通过套钻钻进测量套芯解除前后小钻孔孔径变形，确定地应力的一种方法。

2.17 孔壁应变法 borehole wall strain method

借助粘贴在钻孔孔壁上的电阻应变片，根据套钻钻进测量套芯解除前后小钻孔孔壁表面应变变化，由弹性理论计算岩体中某点的地应力状态的方法。

3 符号

本标准采用下列符号。

H ——地面下测段的深度或钻孔内测段的深度；

γ ——岩体的容重；

P_0 —孔隙水压力；
 P_b —破裂压力；
 P_s —瞬时关闭压力；
 P_r —破裂重张压力；
 T —岩石原地抗张强度；
 σ_v —垂直向应力；
 σ_H —最大水平主应力；
 σ_h —最小水平主应力；
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ —三个主应力值；
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ —三个主应力的倾角；
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ —三个主应力的方位角；
 σ_{s1}, σ_{s2} —垂直钻孔轴线平面内的最大、最小主应力；
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ —应力张量的六个独立分量；
 E —岩石弹性模量；
 μ —岩石泊松比；
 t —时间；
 K_b —孔径变形计标定系数；
 ε_n —最终稳定应变值；
 ε_0 —初始应变值；
 $\delta_{0^\circ}, \delta_{45^\circ}, \delta_{90^\circ}$ —钻孔变形计 0° 、 45° 、 90° 三个方向的变形值；
 s_i —压磁应力计内不同方向元件的记录应力值；
 η_i —压磁应力计测量方向元件的标定曲线的斜率；
 ξ_i —压磁元件记录应力值计算系数；
 ΔV_i —解除前后压磁应力仪读数的变化值；
 ε_k —第 k 电阻片解除应变测定值；
 ε_{nk} —解除后第 k 电阻片应变仪读数；
 ε_{0k} —解除前第 k 电阻片应变仪读数。

4 总 则

4.1 原地应力测量的测点应按下列原则选择：

- 测点应根据项目的目的和要求进行选择；
- 测点的位置应避免岩体破碎的地块；
- 测点的位置应避免应力扰动区。

4.2 原地应力测量的测段应按下列原则选择：

- 地面钻孔第一测段深度应在基岩风化带以下；
- 洞内钻孔第一测段深度应超过岩洞断面直径（或最大宽度或高度）的 2~3 倍；
- 测段应选在岩石完整且无孔壁崩落孔段，应避免原生裂隙密布的孔段；
- 测段设置应兼顾研究需要和工程布置设计。

4.3 原地应力测量的钻孔应满足以下要求：

- 地表钻孔表土段和易塌孔的基岩风化段应下套管；
- 钻孔倾斜度每百米应不超过 1° ，孔径变化应不超过设计孔径 3 mm；

——全钻孔取岩心并进行准确编录，编录内容应包括钻进回次、深度、岩心采取率、岩性描述等；

——应详细记录钻进过程中遇到的缩径、塌孔、涌水量突变及钻孔事故；

——测量前应进行钻孔检查，检出缩径、超径和孔壁崩落孔段，测定终孔深度。

4.4 现场测量技术人员应满足以下要求：

现场测量工作应由地应力测量高级专业技术人员负责，确定专人记录测量数据，仪器设备操作人员应经专业技术培训和安全培训。

5 水压致裂法

5.1 水压致裂法现场测量技术要求

5.1.1 测量设备配置及要求

1) 封隔器的长度宜为 1 m。两个跨接式封隔器相连构成的封隔段长度应不小于测量钻孔孔径的 5 倍；

2) 压力泵的额定工作压力宜不小于 25 MPa。对于深部（深度大于 500 m）或高应力地区，其额定工作压力应大于 35 MPa。高压泵在额定工作压力下应保持不小于 4 L/min 的稳定流量；

3) 压力传感器的精度应优于 0.5%，量程范围宜为（0~60）MPa；

4) 流量传感器的量程应不小于 20 L/min，记录精度优于 0.5 L/min；

5) 印模器的胶筒长度应不小于 1 m。采用磁罗盘定向器，记录精度应优于 3°；

6) 数据记录应采用 X-Y 记录仪，宜配备数字式数据采集器。

5.1.2 测量设备的检查与标定

5.1.2.1 连接件、钻杆检查与试压及测量设备渗漏检查

在压裂试验之前，应对测量所用的压力泵、压力和流量传感器、钻杆及连接件进行渗漏试验。试验压力应大于 12 MPa。合格的钻杆应进行编号并记下长度。

5.1.2.2 测量设备标定

1) 压力传感器使用前应采用计量检定合格的标准压力表校准，在预定达到的压力范围内完成升压及降压两个循环的标定；

2) 流量传感器使用前应采用计量检定合格的标准流量计校准，在预定流量范围进行两个回次的标定；

3) 数据采集及记录系统使用前应连接压力及流量传感器，进行两次数据采集及记录系统的检查。

5.1.3 压裂系统选择及测段选定

1) 钻孔孔径和测量深度适宜时，应优先选用双回路压裂系统；

2) 应依据 4.2 和工程实际需求，结合钻孔检查结果和岩心观察（或钻孔井下电视测量）确定各测段深度。每个钻孔宜不少于 5 个测段，或每 100 m 不少于 2 个测段，在重要的深度范围宜适当加密测段。

5.1.4 测量步骤及技术要求

5.1.4.1 测量系统连接检查

在进行测量操作之前，应检查测量设备、电路的连接是否正确，核对下入测量钻孔的钻杆编号。

5.1.4.2 座封

用一对封隔器（孔底可采用单封隔器）座封形成封隔段。座封压力视岩体条件和地应力大小而定，初始座封压力宜不小于 6 MPa。压裂过程中应跟踪监测座封压力，测量精度

宜优于 0.2 MPa。

5.1.4.3 压裂操作

1) 注压: 在整个测量系统安装及检查完毕后开始注压, 在注压过程中宜保持不小于 4 L/min 的恒定流量;

2) 关泵: 水压致裂过程中, 依据现场记录的应力—时间曲线判断孔壁破裂产生或破裂重张后即可关泵, 观测关闭压力;

3) 卸压: 在每个压裂回次完成后应完全卸压, 使压力管路与大气连通。

5.1.4.4 破裂重张循环的操作

1) 重张时刻的判断: 应力—时间曲线上, 应力上升速率减慢, 应力开始降低、裂缝重张时即可关泵;

2) 每个重张循环含注压、关泵和卸压三个步骤, 每个循环时间宜不少于 2 min;

3) 每个测段重张循环应不少于 3 次, 两个循环之间的时间间隔宜不少于 1 min;

4) 钻孔深度超过 500 m 时, 每个循环时间、循环间隔时间、卸压时间应延长 1 min。

5.1.4.5 测量破裂裂缝方位和倾角

采用印模器或钻孔电视测量破裂裂缝方位和倾角。印模器应准确安放到先前压裂位置, 印模器膨胀的应力应接近破裂应力, 印模器应紧贴井壁 30 min 以上。取出印模器后应立即描下其印出的破裂印模, 在印模展开图上标注基线位置。使用钻孔电视时, 在压裂测量前、后皆应进行观测, 拍摄测段孔壁照片。

5.1.5 现场测量记录应包括以下内容:

— 测量地点、钻孔坐标或经纬度、编号、方位、倾角及终孔深度;

— 测段深度、注压应力—时间曲线、流量—时间曲线;

— 印模形态素描、破裂倾角及方位定向记录;

— 测量中遇到的异常情况和事故。

5.2 水压致裂法测量数据处理

5.2.1 压裂参数的确定

5.2.1.1 关闭压力 P_s 的确定

可根据测量曲线形态选用拐点法、单切线法、双切线法、流量压力法以及应力—时间的平方根法 ($P-t^{1/2}$)、低流量泵进法等。对同一钻孔宜采用同一种确定关闭压力 P_s 的方法。

5.2.1.2 重张压力 P_r 的确定

应力—时间曲线上明显偏离线性关系处的应力值可定为重张压力 P_r , 宜以第三次重张循环的重张应力值为准。

5.2.1.3 初始破裂压力 P_0 的确定

第一回次的峰值应力确定为初始破裂压力 P_0 。

5.2.1.4 孔隙压力 P_0 的确定

宜以测段处的钻孔静水位应力代表其孔隙应力。

5.2.2 主应力计算

垂直主应力平行于钻孔轴时, 主应力可按下式计算:

$$\sigma_{\text{H}} = P_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{\text{H}} = 3P_s - P_r - P_0 + T \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{\text{H}} = 3P_s - P_r - P_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{\text{V}} = \gamma \cdot H \quad \dots\dots\dots (4)$$

注

1 公式 (2) 用于初始压裂循环;

2 公式 (3) 用于重张压裂循环。

5.3 水压致裂法原地应力测量报告内容

- 5.3.1 任务来源，工作内容和技术要求，测量结果的用途及测量完成情况。
- 5.3.2 测量方法。
- 5.3.3 测量地点描述。应详细描述测量地点的地理位置，测点附近的地形及主要地质构造，测点周围坑道、峒室布置及断面尺寸，测点钻孔布置及附近工程施工背景。应附图件说明。
- 5.3.4 钻孔孔径测量和钻孔检查结果。应提供全部已取得的相关资料，包括记录下来的不连续面的特性和钻孔孔壁条件。
- 5.3.5 测段岩石的地质描述。应包括岩性，胶结情况，岩心采取率。应附钻孔柱状图。
- 5.3.6 各测段深度和封隔段长度。
- 5.3.7 测量步骤及所用设备描述，宜配以图表和照片说明。
- 5.3.8 测量数据与结果描述
- 1) 用图给出各测段流量、压力随时间的变化，用文字准确描述选定 P_0 、 P_s 和 P_r 的方法；
 - 2) 用表格列出各测段 H 、 P_0 、 P_b 、 P_s 、 P_r 的数值，最大和最小水平主应力 σ_H 、 σ_h 的大小和方向，以及由公式（4）计算得到的垂直应力大小；
 - 3) 应给出孔壁压裂印模展开图，并标注印模段深度、基线和破裂方位、破裂倾角等参数。用钻孔电视进行破裂定向的，应给出破裂段照片及孔壁崩落段照片，照片中应标注深度、破裂方位和破裂倾角；
 - 4) 应分别描述各测段测量完成情况，测量中遇到的问题。简述各测段测量结果并对测量结果进行简要评价和判别。
- 5.3.9 对全部测量结果归纳总结，一个垂直钻孔内完成3个以上测段的测量时应给出三个主应力大小随深度变化图示。测量区域有2个以上测点时应给出主应力大小量级和方向范围及规律性分析。
- 5.3.10 应将本次测量结果与本次测量区域内其它途径获取的地应力资料进行比较，分析存在的差异和原因。

6 套芯解除法

6.1 套芯解除法现场测量技术要求

6.1.1 测量设备配置及要求

- 应变计应设有温度补偿应变片；
- 应力（或应变）仪应采用数字式应力（变）仪；
- 围压标定机额定工作压力宜不小于60 MPa；
- 手动油压泵额定工作压力宜不小于80 MPa；
- 压力表量程宜为（0~60）MPa，灵敏度0.2 MPa；
- 定向设备的定向误差应在 $\pm 3^\circ$ 以内；
- 测量小钻孔造孔钻头直径宜用 $\phi 26$ mm和 $\phi 36$ mm两种规格，视套芯钻孔的直径大小确定（套芯钻孔直径应为小钻孔直径的2.5倍以上），钻头直径误差应不超过1.5 mm。

6.1.2 测量设备检查与标定技术要求

- 读取传感器各元件的电阻和仪器初始读数及检查绝缘状况；
- 压力表在使用前应采用计量检定合格的标准压力表校准；
- 定向器在使用前应采用计量检定合格的罗盘标定定向器的测量误差。

6.1.3 测量步骤及技术要求

6.1.3.1 测量小钻孔造孔

在测点的预定方向上打直径为 ϕ （75~130）mm的钻孔到预定测段的深度后应磨平

孔底，孔底应无残留岩心；再用锥形尖钻头钻一漏斗状起导正作用深 50 mm 的喇叭口；取小钻头钻出测量小钻孔，深度为（350~500）mm，钻孔应为正圆形，孔壁光滑、孔位不偏斜。

6.1.3.2 地应力测量传感器的安装要求

地应力测量传感器应准确进入测量小钻孔至预定深度并位于小钻孔的中心。装有触头的传感器，触头应与孔壁紧密接触。采用粘结剂安装的传感器应与孔壁胶结紧密。

6.1.4 套芯解除操作及要求

- 1) 钻进准备：宜使用金刚石钻头，岩心管长度应大于 1 m，孔口应安装钻杆导向装置；
- 2) 测量电缆连接：套芯钻进前将测量电缆穿过钻具引出钻机，与跟踪监测的仪器相连；不进行跟踪监测的，在提出信号电缆前应有（5~10）min 的稳定读数；
- 3) 仪器准备：在套芯钻进前仪器应预热 15 min 以上至仪器读数稳定；
- 4) 冲水：套芯钻进前应向钻孔内冲水至仪器读数稳定后开始钻进；
- 5) 钻进：以匀速钻进（400~500）mm 后，采出包含传感器的完整岩心；
- 6) 数据记录：每钻进（10~20）mm 记录一次传感器各元件的仪器读数，宜采用自动记录。

6.1.5 现场围压标定

应在现场将含有传感器的完整岩心放入围压标定机中进行标定。标定最大压力宜不低于 6 MPa，可视岩性及岩心情况增大标定压力。标定宜采用升压和降压两个循环，除记录压力为 0 时传感器各元件的读数外，压力每变化 1 MPa 记录一次各元件的仪器读数。

6.1.6 现场数据记录内容及要求

- 测量地点、钻孔坐标或经纬度、编号、方向、倾角及每次套芯解除深度；
- 传感器上各元件方位、倾角测定记录；
- 测量中遇到的异常情况和事故。

6.1.7 用于地应力计算的有效实测数据个数应满足以下要求：

- 用于计算二维地应力的有效实测数据应不少于 5 个；
- 用于计算三维地应力的有效实测数据应不少于 9 个。

6.2 套芯解除法测量数据处理

6.2.1 有效数据筛选

负责现场测量的高级技术人员应严格审查根据现场记录数据绘制的仪器读数——钻进进尺曲线即应力解除曲线及仪器读数——压力标定曲线，剔除曲线异常的数据和受裂隙及其它因素干扰的不可靠数据（即无效数据），确定参与地应力计算的有效数据。

6.2.2 地应力计算

由现场实测数据计算原地应力的建议见附录 A。

6.3 套芯解除法原地应力测量报告内容

6.3.1 基本内容

- 任务来源、测点地理位置、测点附近地形和地质构造、工程施工背景、测点所在巷道或峒室的尺寸；
- 测量方法；
- 测量中遇到的问题、完成套芯解除次数和测量成功次数。

6.3.2 测量数据处理

测量数据参与计算的取舍及说明，各个测点（段）原始测量数据的描述和数据质量分

析。

6.3.3 测量结果的描述

- 1) 各个测点、孔、段的位置，钻孔方位和倾角，岩性及解除次数，宜列表说明；
- 2) 各次解除数据列表，图示解除及标定曲线；
- 3) 各个测段的应力计算结果，应给出 6 个应力分量大小及三个主应力的大小、方向和倾角。

6.3.4 测量结果的综合分析

- 1) 测量区域有 2 个以上测点时应给出主应力大小量级和方向范围及规律性分析；
- 2) 应将本次测量结果与本次测量区域内由其它途径获取的地应力资料进行比较，分析存在的差异和原因。

附录 A

(标准的附录)

套芯解除法地应力计算建议方法

A1 钻孔孔径变形计法 (径向变形元件相互交角为 45°)

A1.1 计算孔径变形

$$\delta = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{K_b} \dots\dots\dots (5)$$

A1.2 计算与钻孔轴垂直的平面内的大、小主应力及其方向:

$$\sigma_{s1} = \frac{E}{4d} [(\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ}) + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\delta_{0^\circ} + \delta_{45^\circ})^2 + (\delta_{45^\circ} - \delta_{90^\circ})^2}] \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_{s2} = \frac{E}{4d} [(\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\delta_{0^\circ} + \delta_{45^\circ})^2 + (\delta_{45^\circ} - \delta_{90^\circ})^2}] \dots\dots\dots (7)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2\delta_{45^\circ} - \delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}}{\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}} \quad \frac{\cos 2\alpha}{\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}} > 0 \text{ (判别式)} \dots\dots\dots (8)$$

如果进行多组测量, 可进行组合计算, 求出 σ_{s1} 、 σ_{s2} 的平均值。

A1.3 计算测点的六个应力分量

用三孔交汇法测量三维地应力的观测方程组为

$$E (\delta_k/d) = A_{k1} \sigma_x + A_{k2} \sigma_y + A_{k3} \sigma_z + A_{k4} \tau_{xy} + A_{k5} \tau_{yz} + A_{k6} \tau_{zx} \dots\dots\dots (9)$$

$$K = v(i-1) + j, i=1 \sim w, j=1 \sim v$$

式中: k ——观测值方程序号; i ——交汇测量钻孔序号; j ——变形计内触头序号; w ——交汇测量钻孔个数, 一般 $w=3$; v ——变形计内触头对数, 一般 $v=4$; δ_k ——第 k 对触头孔径变形观测值; $A_{k1} \sim A_{k6}$ 为应力系数, 具体表达如下:

$$A_{k1} = 1 - (1 + \mu) \cos^2 a_i \cos^2 (\beta_0 - b_i) + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 a_i) \cos^2 (\beta_0 - b_i)] + 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin a_i \sin 2(\beta_0 - b_i)$$

$$A_{k2} = 1 - (1 + \mu) \cos^2 a_i \sin^2 (\beta_0 - b_i) + 2(1 - \mu^2) \cos 2\theta_j [1 - (1 + \sin^2 a_i) \sin^2 (\beta_0 - b_i)] - 2(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin a_i \sin 2(\beta_0 - b_i)$$

$$A_{k3} = (1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \cos^2 a_i - \mu$$

$$A_{k4} = - (1 + \mu) [\cos^2 a_i + 2(1 - \mu) (1 + \sin^2 a_i) \cos 2\theta_j] \sin 2(\beta_0 - b_i) - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \sin a_i \cos 2(\beta_0 - b_i)$$

$$A_{k5} = - (1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2a_i \sin (\beta_0 - b_i) + 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos a_i \cos 2(\beta_0 - b_i)$$

$$A_{k6} = - (1 + \mu) [1 - 2(1 - \mu) \cos 2\theta_j] \sin 2a_i \cos (\beta_0 - b_i) - 4(1 - \mu^2) \sin 2\theta_j \cos a_i \sin 2(\beta_0 - b_i)$$

式中: a_i ——交汇测量钻孔的倾角; b_i ——交汇测量钻孔的方位角;

θ_j ——变形计内触头的布置角；

β_0 ——大地坐标系轴X的方位角。

A2 三分量压磁应力计法（三组压磁元件相互交角为 60° ）

A2.1 确定传感器每一元件的记录应力值

$$s_i = \eta_i \xi_i \Delta V_i \quad (i=1\sim 3) \quad \dots\dots\dots (10)$$

A2.2 计算与钻孔轴垂直平面内的最大、最小主应力及其方向

$$\sigma_{s_1} = \frac{1}{2} \{s_1 + s_2 + s_3 + \sqrt{\frac{1}{2} [(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]}\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma_{s_2} = \frac{1}{2} \{s_1 + s_2 + s_3 - \sqrt{\frac{1}{2} [(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]}\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\tan 2\alpha = -\sqrt{3} \frac{s_2 - s_3}{2s_1 - s_2 - s_3}, \quad \frac{s_2 - s_3}{\sin 2\alpha} < 0 \quad (\text{判别式}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中： α —— s_1 与 σ_1 的夹角。当判别式大于0时， α 则为 s_1 与 σ_2 的夹角。

A2.3 计算三维地应力（用三孔交汇法进行测量时）：

$$\begin{aligned} s_i = & \frac{1}{3} \{ (f_1 l_1^2 + f_2 l_2^2 + f_3 l_3^2 + f_4 l_1 l_3) \sigma_x \\ & + (f_1 m_1^2 + f_2 m_2^2 + f_3 m_3^2 + f_4 m_1 m_3) \sigma_y \\ & + (f_1 n_1^2 + f_2 n_2^2 + f_3 n_3^2 + f_4 n_1 n_3) \sigma_z \\ & + [2f_1 l_1 m_1 + 2f_2 l_2 m_2 + 2f_3 l_3 m_3 + f_4 (l_1 m_3 + l_3 m_1)] \tau_{xy} \\ & + [2f_1 m_1 n_1 + 2f_2 m_2 n_2 + 2f_3 m_3 n_3 + f_4 (m_1 n_3 + m_3 n_1)] \tau_{yz} \\ & + [2f_1 n_1 l_1 + 2f_2 n_2 l_2 + 2f_3 n_3 l_3 + f_4 (n_1 l_3 + n_3 l_1)] \tau_{zx} \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中： $f_1 = 1 + 2 \cos 2\theta$

$$f_2 = -\mu$$

$$f_3 = 1 - 2 \cos 2\theta$$

$$f_4 = 4 \sin 2\theta$$

(l_1, m_1, n_1) 、 (l_2, m_2, n_2) 、 (l_3, m_3, n_3) ——三个测量钻孔坐标分别对大地坐标X、Y、Z的方向余弦；

θ ——测量直径与位于X-Y平面内的钻孔坐标轴的夹角。

A3 八分量压磁应力计法（元件相互交角为 45° ，斜向元件与应力计轴线夹角 45° ）

A3.1 确定每一测量方向元件的记录应力值

$$s_i = \eta_i \xi_i \Delta V_i \quad (i=1\sim 8) \quad \dots\dots\dots (15)$$

A3.2 计算六个应力分量

$$s_1 = \frac{Eu_1}{3a} = f_1 \sigma_x + f_2 \sigma_y + f_3 \sigma_z + f_4 \tau_{xy} + f_5 \tau_{yz} + f_6 \tau_{zx} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$s_{45} = \frac{Eu_{45}}{3a} = h_1 \sigma_x + h_2 \sigma_y + h_3 \sigma_z + h_4 \tau_{xy} + h_5 \tau_{yz} + h_6 \tau_{zx} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中： s_1 、 s_{45} ——压磁应力计径向、 45° 斜向元件的“记录应力值”，MPa；

u_1 、 u_{45} ——压磁应力计径向、 45° 斜向元件的变形值，mm；

a ——钻孔半径，mm。

$$f_1 = \frac{1}{3}(1+2\cos 2\theta), \quad f_2 = \frac{1}{3}(1-2\cos 2\theta), \quad f_3 = -\frac{\mu}{3};$$

$$f_4 = \frac{4}{3}\sin 2\theta, \quad f_5 = f_6 = 0;$$

$$h_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}(1-2\mu+2\cos 2\theta), \quad h_2 = \frac{\sqrt{2}}{6}(1-2\mu-2\cos 2\theta);$$

$$h_3 = \frac{\sqrt{2}}{6}(2-\mu), \quad h_4 = \frac{2\sqrt{2}}{3}\sin 2\theta;$$

$$h_5 = \frac{2\sqrt{2}}{3}(1+\mu)\sin \theta, \quad h_6 = \frac{2\sqrt{2}}{3}(1+\mu)\cos \theta。$$

如果得到一组径向和斜向的测量数据（“记录应力值”），利用最小二乘法可建立求解应力分量的正态方程组：

$$A\{\sigma\} = G \dots\dots\dots (18)$$

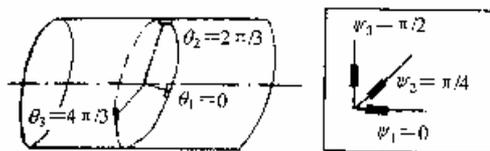
式中： $A=[a_{ij}]$ ——方程组的系数矩阵；

$G=[g_i]$ ——观测向量。

求解该正态方程组可确定 6 个应力分量大小，由此计算测段三维主应力大小、方向及倾角。

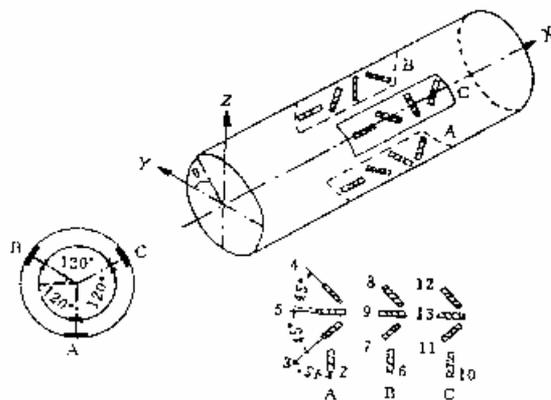
A4 钻孔孔壁应变法

三叉式应变计和空腔包体式应变计的应变丛布置及应变丛内应变片的位置如图 2 和图 3 所示。



(a) 应变丛位置 (b) 应变片位置

图 2 三叉式应变计应变丛布置示意图



A、B、C 为三组应变丛
图 3 空腔包体应变计应变丛布置示意图

A4.1 计算各应变片解除应变测定值

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{nk} - \varepsilon_{0k} \dots\dots\dots (19)$$

A4.2 确定地应力分量

采用最小二乘法原理计算，地应力分量的最佳值由下列方程组求解得到：

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k1} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k1} \\ \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k2} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k6} & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k6} & \dots & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \vdots \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1} \varepsilon_k \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} \varepsilon_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} \varepsilon_k \end{pmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

钻孔孔壁应变测量法三维地应力测量的观测方程组为

$$E \varepsilon_k = A_{k1} \sigma_x + A_{k2} \sigma_y + A_{k3} \sigma_z + A_{k4} \tau_{xy} + A_{k5} \tau_{yz} + A_{k6} \tau_{zx} \dots\dots\dots (21)$$

$$k = v(i-1) + j, \quad i = 1 \sim q, \quad j = 1 \sim v$$

式中：k——观测值方程序号；

i——应变丛序号；

j——每一应变丛中应变片序号；

q——应变丛个数，一般 q=3；

v——每一应变丛中应变片个数，一般 v=3 或 4；

ε_k ——第k应变片观测值（解除应变值）；

$A_{k1} \sim A_{k6}$ 为应力系数，具体表达如下：

$$A_{k1} = [k_1 + \mu - 2(1 - \mu^2) k_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \psi_{ij} - \mu$$

$$A_{k2} = [k_1 + \mu + 2(1 - \mu^2) k_2 \cos 2\theta_i] \sin^2 \psi_{ij} - \mu$$

$$A_{k3} = 1 - (1 + \mu k_4) \sin^2 \psi_{ij}$$

$$A_{k4} = -4(1 - \mu^2) k_2 \sin 2\theta_i \sin^2 \psi_{ij}$$

$$A_{k5} = 2(1 + \mu) k_3 \cos \theta_i \sin 2 \psi_{ij}$$

$$A_{k6} = -2(1 + \mu) k_3 \sin \theta_i \sin 2 \psi_{ij}$$

其中： θ_i ——应变丛位置与钻孔坐标轴x的夹角；

ψ_{ij} ——应变丛上应变片与应变计轴线的夹角；

k_1, k_2, k_3, k_4 ——应变片是否直接粘贴在钻孔壁上的修正系数。对于三叉式应变计， $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$ ；对空腔包体式应变计，修正系数 $k_i (i=1\sim 4)$ 由钻孔半径、应变计内半径、应变丛嵌固部位半径和围岩以及环氧树脂层的弹性模量和泊松比计算确定或查表插值得到。

A4.3 计算主应力

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W + 2\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \dots\dots\dots (22) \\ \sigma_3 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W + 4\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \end{aligned}$$

式中： $W = \arccos\left(-\frac{Q}{2\sqrt{-\left(\frac{P}{3}\right)^3}}\right)$

$$P = -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2$$

$$Q = -\frac{2}{27} J_1^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3$$

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$J_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

$$J_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}$$

A4.4 计算主应力 σ_i 的倾角 α_i 和方位角 β_i

$$\alpha_i = \arcsin n_i \dots\dots\dots (23)$$

$$\beta_i = \beta_0 \arcsin \frac{m_i}{\sqrt{1 - n_i^2}} \dots\dots\dots (24)$$

式中： β_0 ——大地坐标系轴X的方位角；

m_i, n_i ——主应力矢量相对大地坐标系轴Y、轴Z的方向余弦，其表达式为：

$$m_i = B / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$

$$n_i = C / \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$

其中

$$A = \tau_{xy} \tau_{yz} - (\sigma_y - \sigma_i) \tau_{zx}$$

$$B = \tau_{xy} \tau_{zx} - (\sigma_x - \sigma_i) \tau_{yz}$$

$$C = (\sigma_x - \sigma_i) (\sigma_y - \sigma_i) - \tau_{xy}^2$$