

## 中华人民共和国地震行业标准

DB/T 14—2018  
代替 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

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

(报批稿)

(本稿完成日期：2018-05-10)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

---

中国地震局 发布

# 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语、定义和符号 .....	1
4 基本要求 .....	4
5 水压致裂法二维应力测量 .....	5
6 水压致裂法三维应力测量 .....	7
7 套芯解除法 .....	9
8 测量报告建议内容 .....	11
附 录 A（规范性附录） 水压致裂二维应力测量计算方法 .....	14
附 录 B（规范性附录） 多孔交汇法水压致裂三维地应力测量计算方法 .....	17
附 录 C（规范性附录） 单孔水压致裂三维地应力测量计算方法 .....	20
附 录 D（规范性附录） 套芯解除法地应力计算方法 .....	22
参考文献 .....	27

## 前 言

本标准按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准代替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》，与DB/T 14—2000相比，主要技术变化如下：

- a) 增加了水压致裂法三维应力测量方法，包含多孔交汇法和单孔裂隙重张法两部分；
- b) 附录增加了水压致裂法二维、三维应力计算方法。

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SAC/TC 225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：郭啟良、杨树新、丁立丰、王成虎、李兵、张彦山、王建新、包林海、周龙寿、张策、许俊闪、胡秀宏。

本标准于2000年11月首次发布，本次为第一次修订。

# 原地应力测量 水压致裂法和套芯解除法技术规范

## 1 范围

本标准规定了水压致裂法和套芯解除法进行原地应力测量的技术方法和要求。

本标准适用于地下工程中获取原地应力资料的场点测量，水压致裂法二维测量用于获知钻孔轴横截面上的平面应力大小和方向；水压致裂法三维测量与套芯解除法用于获知三维主应力大小和方向。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准

DL/T 5331—2005 水电水利工程钻孔压水试验规程

## 3 术语、定义和符号

### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1.1

**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。

#### 3.1.2

**水压致裂** hydraulic fracturing

向封隔段内注压使封隔段孔壁产生破裂的过程。

#### 3.1.3

**初始破裂压力** initial breakdown pressure

使封隔段孔壁产生张性破裂的液压，即临界破裂压力。

#### 3.1.4

**瞬时闭合压力** instantaneous shut-in pressure

封隔段被张裂停止注压后，保持压裂回路密闭，破裂缝停止延伸，破裂面张开度逐渐减小并趋于闭合的瞬间，与岩层破裂面上的正应力保持平衡的封隔段液体压力。

#### 3.1.5

**破裂重张压力** fracture re-opening pressure

再次对封隔段注压使破裂重新张开瞬间封隔段内的液体压力。

### 3.1.6

**孔隙水压力** pore water pressure

存在于岩体孔隙中水的压力。

### 3.1.7

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

液体压力通过单一管线(如钻杆)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进行压裂的测量系统。

### 3.1.8

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

液体压力通过两条管线(钻杆、高压胶管),分别向封隔器注压座封以及向封隔段注压进行压裂的测量系统。

### 3.1.9

**印模** impressing

将带有定向装置的印模器置于已压裂的孔段,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。

### 3.1.10

**原生裂隙闭合压力** shut-in pressure of pre-existing fracture

原生裂隙被张裂停止注压后,保持回路密闭,裂隙面由张开逐渐趋于闭合的瞬间,与裂隙面法向应力相平衡的液体压力。

### 3.1.11

**套芯解除** overcoring

将测量传感器安装于钻孔孔底的测量小钻孔中,然后在测量小钻孔外同心套钻取岩芯,使岩芯与围岩脱离并观测读数的过程。

### 3.1.12

**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的过程。

### 3.1.13

**围压率定试验** confining pressure test

通过对内含测量传感器的套孔岩芯加围压,获得围压-测量值的变化曲线,来确定岩石弹性模量和泊松比。

### 3.1.14

**钻孔孔径变形法** borehole diametral 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。

## 3.1.15

**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。

## 3.1.16

**水压致裂法二维应力测量 two dimensional stress measurement by hydraulic fracturing**

在单一钻孔(多为垂直孔)中采用水压致裂方法获取钻孔轴线横截面上二维应力的过程。

## 3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$E$ : 岩石弹性模量，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$H$ : 地面下测段的深度或钻孔内测段的深度,单位为米(m)。

$K_b$ : 孔径变形计标定系数。

$P_b$ : 初始破裂压力，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$P_r$ : 破裂重张压力，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$P_s$ : 瞬时闭合压力，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$P_{sj}$ : 原生裂隙瞬时闭合压力，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$P_0$ : 孔隙水压力，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$T$ : 原地抗拉强度，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$s_i$ : 压磁应力计内不同方向元件的记录应力值，单位为兆帕斯卡(MPa)。

$t$ : 时间，单位为秒(s)。

$\Delta V_i$ : 解除前后压磁应力计读数的变化值。

$\alpha_1$ : 最大主应力的倾角，单位为度( $^\circ$ )。

$\alpha_2$ : 中间主应力的倾角，单位为度( $^\circ$ )。

$\alpha_3$ : 最小主应力的倾角，单位为度( $^\circ$ )。

$\beta_1$ : 最大主应力的方位角，单位为度( $^\circ$ )。

$\beta_2$ : 中间主应力的方位角，单位为度( $^\circ$ )。

$\beta_3$ : 最小主应力的方位角，单位为度( $^\circ$ )。

$\gamma$ : 岩体的重力密度(或重度)，单位为牛[顿]每立方米( $N/m^3$ )。

$\delta_{0^\circ}$ : 钻孔变形计 $0^\circ$ 方向的变形值。

$\delta_{45^\circ}$ : 钻孔变形计 $45^\circ$ 方向的变形值。

$\delta_{90^\circ}$ : 钻孔变形计 $90^\circ$ 方向的变形值。

$\varepsilon_k$ : 第 $k$ 电阻片解除应变测定值。

$\varepsilon_n$ : 最终稳定应变值。

$\varepsilon_{nk}$ : 解除后第 $k$ 电阻片应变仪读数。

$\varepsilon_0$ : 初始应变值。

$\varepsilon_{0k}$ : 解除前第 $k$ 电阻片应变仪读数。

$\zeta_i$ : 压磁元件记录应力值计算系数。

$\eta_i$ : 压磁应力计测量方向元件的标定曲线的斜率。

$\mu$ : 岩石泊松比。

$\sigma_A(\sigma_{s1})$ : 垂直于钻孔轴线平面内的最大主应力,在平、斜孔中也称大次主应力,单位为兆帕斯卡(MPa)。

$\sigma_B(\sigma_{s2})$ : 垂直于钻孔轴线平面内的最小主应力,在平、斜孔中也称小次主应力,单位为兆帕斯卡(MPa)。

- $\sigma_H$ : 最大水平主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_h$ : 最小水平主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_v$ : 垂直主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_x$ : X方向的正应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_y$ : Y方向的正应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_z$ : Z方向的正应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_1$ : 三维应力中的最大主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_2$ : 三维应力中的中间主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\sigma_3$ : 三维应力中的最小主应力, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\tau_{xy}$ : XY方向的剪应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\tau_{yz}$ : YZ方向的剪应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。
- $\tau_{zx}$ : ZX方向的剪应力分量, 单位为兆帕斯卡(MPa)。

## 4 基本要求

### 4.1 测量点位

- 4.1.1 测量点位宜布置于岩性单一、结构完整的地段, 避开岩体破碎松动的地块。
- 4.1.2 测量点位宜布置在水电连接便捷、作业方便的位置。
- 4.1.3 了解测量点位所属地理位置及行政区划, 所处平原、山顶、峡谷、山坡等地貌特征, 附近是否存在断层等地质特征。

### 4.2 测量钻孔

- 4.2.1 易垮塌的软土段与基岩风化段应下套管护孔。
- 4.2.2 根据勘测要求, 在选定部位进行钻孔。孔壁应光滑, 孔深宜超过预定最深测试部位 10 m, 钻孔应符合 GB/T 50266-2013 的规定。
- 4.2.3 倾斜度每百米应不超过设计要求  $1^\circ$ , 最大孔径应不超过设计孔径 5 mm。
- 4.2.4 测试孔应全部取芯并记录地理位置、孔口高程、开孔与完孔时间、钻孔事故等信息, 了解覆盖层、基岩、套管深度及孔径变化位置。
- 4.2.5 了解造孔过程中使用泥浆、化学浆情况, 检查孔底沉淀厚度。
- 4.2.6 孔壁和孔内水质不够清洁可用压水法洗孔, 钻具应下到孔底, 最大泵量泵入, 至孔口回水清洁时结束。如无回水洗孔时间不少于 15 min。压水法洗孔的具体操作应遵循 DL/T 5331—2005 的规定。
- 4.2.7 多孔交汇法水压致裂三维应力测量的测点各钻孔宜集中布置, 钻孔数量在 3 个或 3 个以上, 常用 1 个垂直孔和 2 个平孔或 1 个垂直孔、1 个平孔以及 1 个斜孔组成。多孔钻进方向应呈空间棱锥状发散。平孔与垂直孔、平孔与斜孔(平孔)夹角  $90^\circ$  左右。地下开挖体内测点各孔深度宜达到 3 倍洞径尺寸, 宜在 25 m~30 m, 视围岩完整程度、洞室跨度大小等因素, 钻孔深度可适当加深。
- 4.2.8 单孔裂隙重张法水压致裂三维应力测量钻孔的孔壁岩体应存在独立的、不同产状的、闭合的原生裂隙面或软弱结构面。

### 4.3 测段

- 4.3.1 查看钻孔岩芯, 以及地球物理测量记录(如钻孔井下电视资料、井径测量资料、声波测量、岩石密度等), 了解钻孔完整段分布情况以及裂隙或破碎带的分布深度。
- 4.3.2 了解重点部位(如拟建地下洞室的顶底板)在钻孔的深度位置。

- 4.3.3 水压致裂测段应布置于基岩风化带以下的完整岩体内。
- 4.3.4 水压致裂测段长度应大于 6 倍孔径。
- 4.3.5 原生裂隙水压致裂法测段内包含的裂隙应紧密闭合，多个测段宜分布于 50 m 范围内。应选择不同产状的原生裂隙段，避免测段含有多条裂隙。

## 5 水压致裂法二维应力测量

### 5.1 测量设备安装检查调试

#### 5.1.1 压裂系统

根据钻孔深度、钻孔口径、钻孔静止水位等选择单回路或双回路测量系统。

#### 5.1.2 封隔器与印模器

- 5.1.2.1 应根据测段孔径选用相应尺寸的封隔器、印模器。
- 5.1.2.2 胶面光滑无破损且长度不小于 1 m, 胶筒面上下端与紧固接口连接应正常。
- 5.1.2.3 应清除连接螺纹、中心管的污泥铁屑；通水管孔应畅通。
- 5.1.2.4 封隔器最大耐压强度宜达到 60 MPa, 印模器最大耐压强度宜达到 40 MPa。

#### 5.1.3 水路电路

- 5.1.3.1 水源应清洁，测量设备水路连接及管控通道进出水应正常。
- 5.1.3.2 压力泵、测量仪器的电路连接与接入电源应正常。

#### 5.1.4 工作泵

- 5.1.4.1 压力泵额定工作压力宜不小于 25 MPa, 较深钻孔(大于 500 m)或高应力地区，额定工作压力宜大于 40 MPa, 高压泵的稳定流量宜为 10 L/min~15 L/min。
- 5.1.4.2 调控液压管路开关，检查压力泵的工作压力与工作流量能达到额定值。

#### 5.1.5 传感器及其校准

- 5.1.5.1 使用计量检定合格的标准压力表、标准流量计，校准压力传感器、流量传感器，获得各传感器的零值初始数、单位输出值变换率。
- 5.1.5.2 压力传感器精度优于 0.5%，量程范围宜为 0 MPa~60 MPa。
- 5.1.5.3 流量传感器量程不小于 20 L/min, 记录精度优于 $\pm 0.5$  L/min。
- 5.1.5.4 深孔测量时，压力传感器宜放置于测孔压裂段内。

#### 5.1.6 数据记录仪器

- 5.1.6.1 数据记录优先采用数据采集器，可配备 X-Y 记录仪。
- 5.1.6.2 数据采集及记录系统在使用前接入压力、流量传感器进行试采集。

#### 5.1.7 定向器

- 5.1.7.1 定向器按工作原理分回转式、磁式、重锤式：非磁性岩石垂直孔使用磁式，平孔、斜孔中用重锤式；磁性岩石垂直孔中使用回转式。
- 5.1.7.2 定向器的记录精度应优于 $\pm 3^\circ$ 。

### 5.1.8 压力管路密封性检测

压裂试验前应对测量所用的压力泵、压力和流量传感器、传送泵压的钻杆及连接件进行高压密封性检测，试验压力应不小于15 MPa。对合格的钻杆进行编号并记录长度。

### 5.1.9 井下压裂设备检测

检测按以下步骤进行：

- a) 井下压裂设备装配完毕，将两只封隔器套上相应尺寸的钢质套管；
- b) 缓慢注压使封隔器膨胀并紧贴套管壁，关泵并观察设备不存在渗漏等异常情况；
- c) 切换注压通道至封隔段位置，开泵观察出水是否顺畅；
- d) 关泵并缓慢放水卸去封隔器内压力。

## 5.2 水压致裂操作

### 5.2.1 观测静水位

每5分钟观测一次静水位，水位下降速度连续两次均小于5 cm/min时，最后的观测值视为稳定静水位，静水位观测应遵循DL/T 5331—2005的规定。

### 5.2.2 井下压裂设备放置

将水压致裂压裂设备放至预选的测段深度，压力管线连接需高压密封。对双回路系统，每隔3 m~5 m用铁丝将高压胶管绑紧固定于钻杆上。

### 5.2.3 座封

座封按以下步骤进行：

- a) 对封隔器加压，压力开始增大时放慢增压速度，缓慢升压至座封压力2 MPa~4 MPa；
- b) 关泵，观察座封压力是否稳定，略放松提升绳后系统稳固不滑动表明座封正常。

### 5.2.4 压裂

压裂按以下步骤进行：

- a) 注压：启动高压泵以恒定流量向封隔段注压，记录监测压力变化过程；
- b) 关泵：依据测段压力-时间记录曲线判断破裂已经产生或原生裂隙已张开后即可关泵，观测破裂面渐趋闭合过程中的压力变化；
- c) 卸压：破裂缝闭合后，压力下降渐趋缓慢，并最终保持稳定后完全卸压，使压力管路与大气连通，完成压裂循环。

### 5.2.5 破裂缝重张

重张按以下步骤进行：

- a) 再次开泵对测段加压，观测压力随时间的变化情况。当压力上升速率减慢，继而压力开始降低，表明裂缝重新张开并扩展，即可关泵，并继续观测压力下降过程。当压力下降非常缓慢并趋稳定后，可完全卸压，使测段压力管路与大气连通，完成破裂缝的重张；
- b) 每次破裂缝的重张均包含注压、关泵、卸压三个步骤，重复3~4次。每次重张的间隔时间不小于1 min。

### 5.2.6 水压致裂缝印模

#### 5.2.6.1 地面设置

地面设置按以下步骤进行：

- a) 检查印模器表面软橡胶层是否清洁、柔软；
- b) 将印模器与钻杆、定向器外壳相连接；
- c) 按照印模深度、设备下放速度估算并设置定向器参数。

#### 5.2.6.2 印模装置安放

将印模装置从孔口逐渐放至预定深度，压力管线连接须高压密封。

#### 5.2.6.3 印模

开泵向印模器注压，压力值应大于水压致裂缝的重张压力，使印模器胶面紧贴孔壁，保压时间至少 30 min；裂缝被印模胶筒张开，胶筒表面的软橡胶挤入裂缝，使胶筒表面留下裂缝印痕。

#### 5.2.6.4 印模装置提出

卸压后印模器收缩脱离孔壁，提出地表后素描记录胶筒面上的印痕形状，并标注基线位置、钻孔名称、测段深度、孔径等参数；获取定向器在印模期间的工作数据。

#### 5.2.6.5 清理印模痕迹

一次印模完成后清理掉印模器表面的印模痕迹，检查印模器表层胶面情况。

### 5.2.7 测量资料处理

#### 5.2.7.1 压裂参数及其确定

压裂参数及其确定符合下列要求：

- a) 压裂参数应包括初始破裂压力  $P_b$ 、重张压力  $P_r$ 、瞬时闭合压力  $P_s$  以及孔隙水压力  $P_0$ ；
- b) 破裂压力  $P_b$  宜取压裂过程中第一循环的峰值压力；
- c) 重张压力  $P_r$  通常取压力-时间曲线上上升阶段明显偏离线性关系处的压力值。为克服岩石在第一、二循环可能未充分破裂所带来的影响，和后续随着裂缝开合次数增加造成重张压力逐次变低的趋势，根据经验通常从第三循环的升压记录曲线上选取；
- d) 确定裂缝瞬时闭合压力  $P_s$  有多种方法，如拐点法、单切线法、 $dt/dP$ - $P$  法、流量-压力法、马斯卡特法，每一测试段至少采用两种方法确定  $P_s$  值；
- e) 孔隙水压力  $P_0$  值以测段静水位压力值代替。

#### 5.2.7.2 主应力值计算

主应力值计算如下：

- a) 压裂参数中的瞬时闭合压力  $P_s$  数值上等于垂直裂缝面的最小水平主应力  $\sigma_{\min}$ 。
- b) 结合破裂压力  $P_b$  以及重张压力  $P_r$  值，计算出最大水平主应力值  $\sigma_{\max}$ 、岩石原地抗张强度  $T$ 。
- c) 垂直主应力  $\sigma_v$  值可按上覆岩石重力估算。

具体计算方式参见附录 A。

#### 5.2.7.3 破裂方位计算

由水压致裂缝隙形状与基线相对位置，结合井下定向器测得的基线数据，得到破裂缝的方位。

## 6 水压致裂法三维应力测量

## 6.1 多孔交汇法

### 6.1.1 测量准备

测量准备按以下要求进行：

- a) 测量前应素描好测点及各孔在巷道或探洞内的示意图；
- b) 测量垂直孔、斜孔中的静水位，测量平、斜孔的钻进方位、钻孔倾角；
- c) 选定各孔测段。

### 6.1.2 设备检查

测量前检查、校准设备，操作与二维测量相同，应符合5.1的规定。

### 6.1.3 各孔水压致裂法测量

各孔分别进行压裂、印模，操作与二维测量相同，应符合5.2.1、5.2.2、5.2.3、5.2.4、5.2.5和5.2.6的规定。

### 6.1.4 数据处理

数据处理包含以下要点：

- a) 各测段压裂参数确定、平面应力计算、破裂缝角度计算与单孔二维测量相同，应符合5.2.7的规定。平孔、斜孔破裂角度计算：观测者面对钻孔孔底，以水平右侧为 $0^\circ$ ，逆时针旋转到破裂面的角度(在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 间)；
- b) 绘制各孔平面应力值随孔深分布图，判断整个深度范围内是否有应力扰动带(多个测段出现应力释放、应力集中现象)。若存在可划分扰动深度带、正常深度带；
- c) 参与计算的各孔平面应力取值：带内各测段应力测值变化不大，取其均值；如个别测值(单一测段)明显异常，可先予以剔除；
- d) 参与计算的各孔平面应力破裂方位，优先参考本孔测段印模数据。

### 6.1.5 三维应力计算

三维应力计算按以下要求进行：

- a) 1个钻孔具有破裂角度的测段大、小次主应力测值可建立3个观测值方程，3孔或3个以上钻孔得到至少9个观测值方程；
- b) 各孔数据参考钻孔坐标系表示： $Z_i$ 轴方向为钻孔轴线方向，指向孔口为正， $X_i$ 轴位于水平方向，从孔口向内看，右侧为正(垂直孔为便于计算，取正北向为 $X_i$ 轴正向)；轴 $Y_i$ 按右手坐标系确定；
- c) 计算参数包含钻孔孔口指向的方位角、倾角、大、小次主应力值、破裂面角度；
- d) 对计算参数进行数学运算，获得大地坐标系下 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 向的各应力分量 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$ ，换算得到最大主应力 $\sigma_1$ 、中间主应力 $\sigma_2$ 、最小主应力 $\sigma_3$ 。

具体计算方式参见附录B。

## 6.2 单孔原生裂隙重张法

### 6.2.1 测量准备

测量前应了解测点、测孔相关信息，选定准备测量的原生裂隙测段和完整岩石测段。

### 6.2.2 设备检查

设备及其检查、校准与水压致裂法二维应力测量相同，应符合5.1的规定。

### 6.2.3 测量程序

6.2.3.1 对确定的完整岩石测段、原生裂隙测段进行单孔水压致裂法三维应力测量，操作包括完整岩石测段水压致裂、原生裂隙重张两类。

6.2.3.2 完整岩石测段水压致裂测量应符合 5.2.1、5.2.2、5.2.3、5.2.4、5.2.5 和 5.2.6 的规定。

6.2.3.3 原生裂隙的分级压力重张步骤如下：

- a) 先以较低流量向测段注压，使测段压力维持在一稳定水平，持续 5 min；再增大流量使压力增大到一个新的稳定值。如此重复几次，获得一组不同流量下的稳定压力值。当流量突然增大，表明裂隙被张开，关泵停止注压，保持液压管路密闭，继续监测测段压力的衰减变化；
- b) 重复这样的分级压力重张测量至少一次；
- c) 可选步骤：当达到最大注压流量后，也可以采用分级降压方式，观测裂隙闭合过程中测段压力-流量变化，来确定裂隙面的瞬时闭合压力；
- d) 测量完成后，利用印模、钻孔电视等方法，确定裂隙的产状或检查孔壁有无新裂隙产生。

### 6.2.4 数据处理

6.2.4.1 完整岩石测段水压致裂后的压裂参数确定、平面应力计算、破裂缝角度计算，应符合 5.2.7 的规定。

6.2.4.2 原生裂隙闭合压力  $P_{sj}$  的确定有两种方法：

- a) 当采用常规水压致裂法在关泵后观测压力下降过程时，与水压致裂  $P_s$  确定方法一样， $P_{sj}$  特征值可根据测量曲线的形态选用拐点法、单切线法、 $dt/dP$ - $P$  法、马斯卡特法等获取。同一钻孔宜采用同一种或同几种方法；
- b) 当采用分级压力观测原生裂隙的压力下降过程时，绘制测量过程中的压力-流量变化曲线，寻找曲线拐点，或寻求不同斜率的两组趋势线交点，对应的压力值作为原生裂隙闭合压力值  $P_{sj}$ 。

6.2.4.3 考虑应力梯度时的假设与处理按以下要求进行：

- a) 原生裂隙间的分布距离超过 50m 后，需考虑地应力场的变化；
- b) 相似岩层测点可假设地应力场沿着空间三个方向为不同应力梯度的线性变化；
- c) 垂直孔中的测点，由于原生裂隙组在孔轴的上、下分布，可不考虑水平方向的应力梯度，只需计算垂直应力梯度；
- d) 根据不同位置处多条裂隙的测量数据，联立求得参考深度处的应力分量与应力梯度。

### 6.2.5 三维应力计算

三维应力计算按以下要求进行：

- a) 使用原生裂隙段的分级压力重张数据，或结合完整岩石段常规水压致裂测量数据，计算测点三维应力；
- b) 全部采用原生裂隙分级压力重张测段数据时，需要 6 个或 6 个以上原生裂隙测段数据；
- c) 原生裂隙分级压力重张与完整段水压致裂相结合，完整段有破裂压力时，需 3 个或 3 个以上原生裂隙测段数据；完整段没有破裂压力时，需 5 个或 5 个以上原生裂隙测段数据；
- d) 数学运算得到三维地应力状态下的 6 个应力分量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$ 、 $\tau_{zx}$  以及最大主应力  $\sigma_1$ 、中间主应力  $\sigma_2$ 、最小主应力  $\sigma_3$  的大小、方位、倾角等结果。

具体计算方式参见附录 C。

## 7 套芯解除法

## 7.1 现场测量要求

### 7.1.1 设备

#### 7.1.1.1 设备准备

利用空心包体孔壁应变计或者压磁应力计，进行套芯应力解除岩体应力需要的测量设备如下：

- a) 前导孔钻孔设备，包括常规钻孔设备、刨削加工工具和研磨钻头；
- b) 装有钻孔清洁刷的检测设备(测量探测仪)；
- c) 孔壁或者孔径应变计；
- d) 粘合剂(用于将空心包体孔壁应变计粘贴在孔壁上)或者元件加力装置(主要用于压磁应力计)；
- e) 应变计安装设备，包括安装杆和定向仪；
- f) 双轴测量设备，包括加载缸、压力计、液压泵等；
- g) 数据记录系统，包括应力应变记录仪和便携式电脑。

#### 7.1.1.2 关键设备的参数要求

关键设备的参数要求如下：

- a) 应变计应设有温度补偿应变片；
- b) 应采用数字式应力应变记录仪；仪器读数稳定指连续三次读数相差不大于 5 微应变或基本不变；
- c) 数据采集器采样频率宜大于每秒 1 个数据点；
- d) 围压标定机额定工作压力宜不小于 60 MPa；
- e) 手动油压泵额定工作压力宜不小于 80 MPa；
- f) 压力表量程宜为 0 MPa~60 MPa；
- g) 定向设备的定向精度应在 $\pm 3^\circ$ 以内；
- h) 测量小钻孔造孔钻头直径宜用 $\varnothing 26$  mm 和 $\varnothing 36$  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；
- i) 便携式电脑在使用前对相关应用软件进行试运行检查。

#### 7.1.1.3 设备的检查与校准

设备的检查与校核按以下要求进行：

- a) 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；
- b) 压力表或压力传感器在使用前应校准；
- c) 定向器在使用前应采用经计量检定的罗盘标定定向器的测量误差。

### 7.1.2 测量步骤及要求

#### 7.1.2.1 测量小钻孔造孔

在测点的预定方向上打直径为 $\varnothing 75$  mm~130 mm的钻孔到预定测段的深度后，应磨平孔底，孔底应无残留岩芯；再用锥形尖钻头钻一漏斗状深度50 mm起导正作用的喇叭口；取小钻头钻出测量小钻孔，深度为350 mm~500 mm，钻孔应为正圆形，孔壁光滑，孔位不偏斜，孔内应擦拭干净，没有岩屑岩粉。

#### 7.1.2.2 传感器安装要求

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。

#### 7.1.2.3 套芯解除操作

套芯解除按下列步骤操作：

- a) 钻进准备：宜使用金刚石钻头，岩芯管长度应大于 1 m，孔口应安装钻杆导向装置；
- b) 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 min~10 min 的稳定读数；
- c) 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；
- d) 冲水：套芯钻进前应向钻孔内冲水 15 min 以上至仪器读数稳定后开始钻进；
- e) 钻进：以匀速钻进 400 mm~500 mm 后，采出包含传感器的完整岩芯；
- f) 钻进停止后，继续冲水至少 5 min~10 min，取芯前停止作业至少等待 5 min~10 min；
- g) 数据记录：应每钻进小于 10 mm 记录 1 次传感器各元件的仪器读数，宜采用自动记录。

### 7.1.3 现场围压率定

现场围压率定按以下要求进行：

- a) 应在现场将含有传感器的完整岩芯放入围压率定机中进行率定；
- b) 一般情况下率定压力宜大于预估的岩体最大主应力，或根据围压率定机的设计压力确定，高应力区可视岩性及岩芯情况增大率定压力；
- c) 率定宜采用升压和降压两个循环，压力宜分为 5~10 级，宜按 0 至最大压力等分施加，记录 0 及各级压力时传感器各元件的读数。

### 7.1.4 现场数据记录内容

记录内容包括：

- a) 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；
- b) 测量段岩芯的长度、同心度、岩性及节理、劈理、微裂隙情况；
- c) 传感器上各元件方位、倾角测定记录；
- d) 测量中遇到的异常情况和事故。

### 7.1.5 实测数据个数

用于地应力计算的有效实测数据个数应满足以下要求：

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

## 7.2 测量数据处理

### 7.2.1 有效数据筛选

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。

### 7.2.2 地应力计算

由现场实测数据计算原地应力方法参见附录D。

## 8 测量报告建议内容

### 8.1 前言

前言部分宜包括：测量任务来源；工作内容；技术要求；完成任务情况；测量结果的用途；协助完成单位个人等基本信息。

## 8.2 基本原理和测量方法

该部分宜包括测量原理、测量方法以及相应的计算公式，如水压致裂二维（或三维）测量方法的假设前提、理论公式与压裂参数确定方法等。

## 8.3 地理地质信息

地理地质信息部分宜包括：

- a) 测量地点归属的行政区划；
- b) 测孔所在地理位置；
- c) 测量地点的地形、地貌、地层岩性特点；
- d) 测区主要地质构造、区域应力场分布特点、地震区划等级等。

## 8.4 现场测量与数据计算分析

现场测量数据计算分析部分宜包括：

- a) 现场测量的起止时间；
- b) 测点所在工程位置示意图、测孔所在周围坑道、洞室布置及断面尺寸、钻孔布置；测孔造孔过程、孔径结构、孔斜数据、静水位测量数据；
- c) 测孔钻探岩芯描述、柱状图、节理裂隙分布层段、完整岩石段、各层段的弹性模量与泊松比；
- d) 测量设备描述，宜配以图表和照片说明；
- e) 预选测段的位置及长度；
- f) 测量各步骤描述：如设备安装调试，下放到预定测段位置，座封、压裂、卸压、重张等操作；
- g) 描述各测段的测量概况及测量过程中遇到的问题；给出各测段流量、压力随时间的变化曲线；
- h) 将破裂压力  $P_b$ 、破裂重张压力  $P_r$ 、瞬时闭合压力  $P_s$  等压裂参数，以及各测段测量深度  $H$ 、孔隙水压力  $P_0$ ，与计算得到的最大水平主应力  $\sigma_H$  的大小和方向、最小水平主应力  $\sigma_h$ ，以及岩石原地抗张强度值  $T$ 、估算垂直主应力  $\sigma_v$ ，以表格汇总列出；
- i) 孔壁压裂印模展开图，标注印模段的深度、基线位置、破裂产状等参数。利用钻孔电视进行破裂定向的，给出破裂段照片，照片标注深度、破裂产状；
- j) 对所有测段的测量结果归纳总结，给出各主应力随深度的变化图，若分布较为规则可进行线性回归，给出回归方程式；
- k) 测量区域有 2 个以上测点时应给出主应力大小量级、方向范围及规律性分析；
- l) 对于多孔交汇法水压致裂三维应力测量，根据各孔不同深度应力分布规律，划分正常应力区的分段深度，列出各钻孔方向、倾角，以及参与计算的平面大、小次主应力值及大次主应力的破裂方位等参数。三维计算完成后列出各主应力的方向、倾角等参数以及各应力分量；
- m) 对于套芯应力解除法，描述各测点、孔、段的位置、钻孔方位和倾角、岩性及解除次数，宜列表说明；各次解除数据列表，图示解除及标定曲线；描述测量数据参与计算的取舍情况，各测点(段)原始测量数据质量分析；各个测段应力计算结果，应给出 6 个应力分量大小及三个主应力的方向、大小、方向和倾角。

## 8.5 结论

结论部分宜包括：

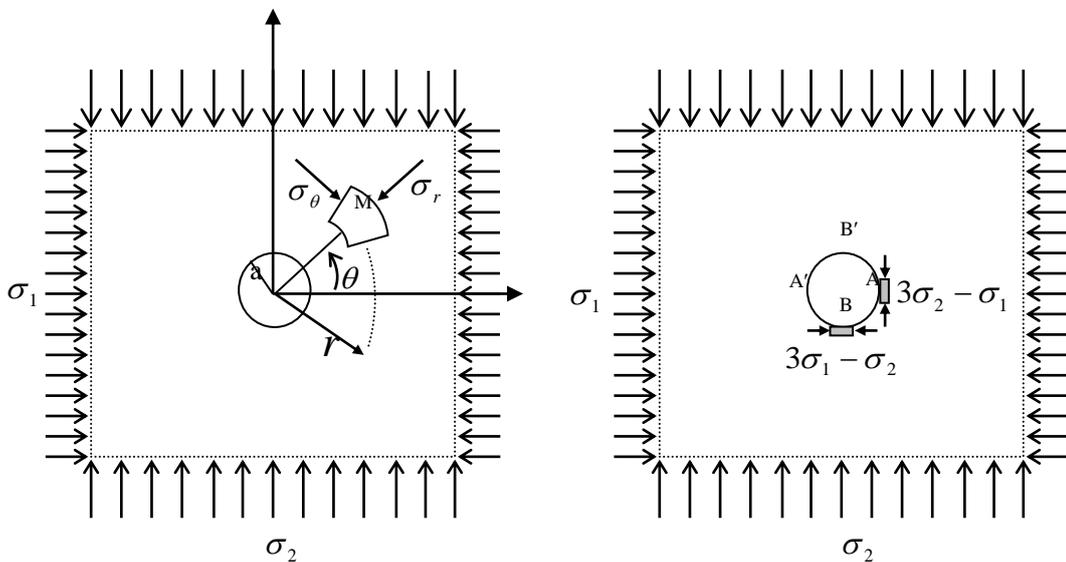
- a) 就原地应力测量结果总结概括测点地应力特征，并就某些地应力相关的具体问题进行适度讨论；
- b) 概括测孔各测段平面应力的量值水平，分析测段数据间的差异性；

- c) 测孔应力测值随深度分布的线性回归公式，便于不同深度应力值的分析；
- d) 判断各主应力的大小关系，确定测区主要应力作用方式；
- e) 垂直孔最大水平主应力的优势方向；
- f) 水压致裂法地应力测量得到的岩石原地破裂压力范围、原地抗张强度范围、应力比值的分析等，以了解测孔附近岩体力学性质；
- g) 三维应力测量获得的应力分量的量值，以及最大主应力、中间主应力、最小主应力的大小、方向和倾角；
- h) 测区若有其它途径获取的地应力资料，可与本次测量结果进行比较，分析差异和原因。

附录 A  
(规范性附录)  
水压致裂二维应力测量计算方法

A.1 计算原理与公式推导

水压致裂原地应力测量是以弹性力学为基础，并以下面三个假设为前提：(1)岩石是线弹性和各向同性的；(2)岩石是完整的，压裂液体对岩石来说是非渗透的；(3)岩层中有一个主应力的方向和孔轴平行。在上述理论和假设前提下，水压致裂的力学模型可简化为一个平面应力问题，如图 A.1 所示。



a) 有圆孔的无限大平板受到应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 作用

b) 圆孔壁上的应力集中

图A.1 水压致裂应力测量的力学模型

这相当于有两个主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 作用在有一半径为 $a$ 的圆孔的无限大平板上，根据弹性力学分析，圆孔外任何一点M处的应力为：

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots (A.1) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \end{aligned}$$

式中：

$\sigma_r$ ——径向应力；

$\sigma_\theta$ ——切向应力；

$\tau_{r\theta}$ ——剪应力；

$R$ ——M 点到圆孔中心的距离。当 $r=a$ 时，即为圆孔壁上的应力状态。

这相当于有两个主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 作用在有一半径为 $a$ 的圆孔的无限大平板上，根据弹性力学分析，

圆孔外任何一点的应力为:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= (\sigma_1 + \sigma_2) - 2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \dots\dots\dots (A.2) \\ \tau_{r\theta} &= 0\end{aligned}$$

由式(A.2)可得出如图 A.1 所示的孔壁 A、B 两点及其对称处(A', B')的应力集中分别为:

$$\sigma_A = \sigma_{A'} = 3\sigma_2 - \sigma_1 \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\sigma_B = \sigma_{B'} = 3\sigma_1 - \sigma_2 \dots\dots\dots (A.4)$$

若 $\sigma_1 > \sigma_2$ , 由于圆孔周边应力的集中效应则 $\sigma_A < \sigma_B$ 。因此, 在圆孔内施加的液压大于孔壁上岩石所能承受的应力时, 将在最小切向应力的位置上, 即 A 点及其对称点 A'处产生张破裂。并且破裂将沿着垂直于最小主应力的方向扩展。此时把孔壁产生破裂的外加液压  $P_b$  称为临界破裂压力。临界破裂压力  $P_b$  等于孔壁破裂处的应力集中加上岩石的抗拉强度  $T$ , 即:

$$P_b = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T \dots\dots\dots (A.5)$$

再进一步考虑岩石中所存在的孔隙压力  $P_0$ , 式(A.5)为

$$P_b = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T - P_0 \dots\dots\dots (A.6)$$

## A.2 应力参数与应力值计算

在垂直钻孔中测量地应力时, 常将最大、最小水平主应力分别写为 $\sigma_H$ 和 $\sigma_h$ , 即 $\sigma_1 = \sigma_H$ ,  $\sigma_2 = \sigma_h$ 。当压裂段的岩石被压破时,  $P_b$ 可用下列公式表示:

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + T - P_0 \dots\dots\dots (A.7)$$

孔壁破裂后, 若继续注液增压, 裂缝将向纵深处扩展。若马上停止注液增压, 并保持压裂回路密闭, 裂缝将停止延伸。由于地应力场的作用, 裂缝将迅速趋于闭合。通常把裂缝处于临界闭合状态时的平衡压力称为瞬时闭合压力  $P_s$ , 它等于垂直裂缝面的最小水平主应力, 即:

$$P_s = \sigma_h \dots\dots\dots (A.8)$$

再次对封隔段增压, 使裂缝重新张开时, 即可得到破裂重新张开的压力  $P_r$ 。由于此时的岩石已经破裂, 抗拉强度  $T=0$ , 这时即可把(A.7)式改写成:

$$P_r = 3\sigma_h - \sigma_H - P_0 \dots\dots\dots (A.9)$$

根据(A.7)、(A.8)、(A.9)式又可得到求取最大水平主应力 $\sigma_H$ 的公式:

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \dots\dots\dots (A.10)$$

用(A.7)式减(A.9)式即可得到岩石的原地抗拉强度:

$$T = P_b - P_r \dots\dots\dots (A.11)$$

测量段上覆岩层岩性均一, 垂直应力可用同一岩体密度 $\rho$ 计算:

$$\sigma_v = \rho g H \dots\dots\dots (A.12)$$

式中： $\rho$ 为岩石密度， $g$ 为重力加速度， $H$ 为上覆岩层厚度。

若上覆岩层分层明显，需要按照不同岩层厚度叠加计算：

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \rho_i g D_i \dots\dots\dots (A.13)$$

式中： $\rho_i$ 为岩层 $i$ 的平均密度； $g$ 为当地重力加速度； $D_i$ 为岩层 $i$ 的厚度； $n$ 为上覆岩层数目。

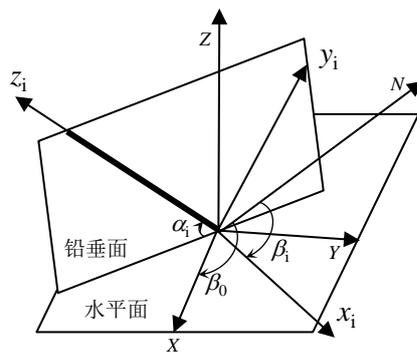
附录 B  
(规范性附录)

多孔交汇法水压致裂三维地应力测量计算方法

B.1 计算原理与公式推导

以水压致裂法对完整围岩进行的单孔应力测量，由于破裂沿轴向发展，因此只能获得垂直于孔轴的平面应力。要想得到三维应力，需要对交汇的多个钻孔分别进行水压致裂应力测量。

为了计算方便，首先以大地坐标系  $o-XYZ$  为固定坐标系， $Z$  轴垂直向上， $X$  轴可根据需要设定一方向(一般情况  $X$  轴指向正南或正北)，其方位角为  $\beta_0$ ，以实际钻孔(编号为  $i$ )坐标系  $o-X_iY_iZ_i$  为活动坐标系， $Z_i$  轴方向为钻孔轴线方向，指向孔口为正，轴  $X_i$  为水平方向，从孔口向内看，指向右为正，轴  $Y_i$  按右手坐标系确定，如图 B.1 所示。



图B.1 固定坐标系和钻孔坐标系空间位置示意图

通过对  $i$  号钻孔进行实测，可获得垂直于钻孔的平面内的应力状态  $\sigma_{A_i}$ 、 $\sigma_{B_i}$  和  $A_i$  (即大次主应力、小次主应力、裂缝与  $X_i$  轴之间夹角)。若已知活动坐标系表示的应力分量  $\sigma_{x_i}$ 、 $\sigma_{y_i}$  和  $\tau_{x_i y_i}$ ，通过应力分量坐标变换，求得它们与固定坐标系表示的应力分量关系为：

$$\begin{aligned} \sigma_{x_i} &= \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2\tau_{xy} l_1 m_1 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 + 2\tau_{zx} n_1 l_1 \\ \sigma_{y_i} &= \sigma_x l_2^2 + \sigma_y m_2^2 + \sigma_z n_2^2 + 2\tau_{xy} l_2 m_2 + 2\tau_{yz} m_2 n_2 + 2\tau_{zx} n_2 l_2 \\ \tau_{x_i y_i} &= \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \tau_{xy} (l_1 m_2 + l_2 m_1) + \tau_{yz} (m_1 n_2 + n_1 m_2) + \tau_{zx} (n_1 l_2 + l_1 n_2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

钻孔倾角为  $\alpha_i$ ，方位角  $\beta_i$ ，活动坐标系各坐标轴相对于固定坐标系的方向余弦见表 B.1。

表B.1 活动坐标系各坐标轴相对于固定坐标系的方向余弦

	X	Y	Z
$X_i$	$l_1 = -\sin(\beta_0 - \beta_i)$	$m_1 = \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$n_1 = 0$
$Y_i$	$l_2 = -\sin \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_2 = -\sin \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_2 = \cos \alpha_i$
$Z_i$	$l_3 = \cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$m_3 = \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)$	$n_3 = \sin \alpha_i$

将表中方向余弦代入式(B.1)得

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xi} &= \sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\
 \sigma_{yi} &= \sigma_x \sin^2 \alpha_i \cos^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \sin^2 \alpha_i \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_z \cos^2 \alpha_i \\
 &\quad + \tau_{xy} \sin^2 \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{yz} \sin 2\alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \sin 2\alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
 \tau_{xiyi} &= 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\
 &\quad + \tau_{yz} \cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i)
 \end{aligned}
 \tag{B.2}$$

式中： $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$ 和 $\tau_{xiyi}$ 为对*i*号钻孔实测得出的观测值，它们与钻孔横截面内次主应力 $\sigma_{Ai}$ 、 $\sigma_{Bi}$ 存在如下关系：

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xi} + \sigma_{yi} &= \sigma_{Ai} + \sigma_{Bi} \\
 \sigma_{xi} - \sigma_{yi} &= (\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \cos 2A_i \\
 2\tau_{xiyi} &= (\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \sin 2A_i
 \end{aligned}
 \tag{B.3}$$

式中  $A_i$  仍为从  $X_i$  轴逆时针量至压裂缝的角度，将式(B.2)代入(B.3)得观测值方程组如下：

$$\sigma_k^* = D_{K1}\sigma_x + D_{K2}\sigma_y + D_{K3}\sigma_z + D_{K4}\tau_{xy} + D_{K5}\tau_{yz} + D_{K6}\tau_{zx} \tag{B.4}$$

式中  $K=3(i-1)+j$ ， $i$  为测孔编号， $i=1, 2, \dots, n$ ； $n$  为测孔总数，等于或大于 3； $j$  为每个测孔中相应于式(B.3)观测值第一、第二和第三式的编号， $j=1, 2, 3$ ； $\sigma_k^*$  为观测值， $D_{K1}$  至  $D_{K6}$  为观测值方程的应力系数，当  $j=1, 2, 3$  时其相应值见下表。

表B.2  $j=1\sim 3$  时的应力系数和观测值

	$3(i-1)+1$	$3(i-1)+2$	$3(i-1)+2$
$D_{k1}$	$1-\cos^2\alpha_i \cdot \cos^2(\beta_0-\beta_i)$	$1-(1+\sin^2\alpha_i) \cdot \cos^2(\beta_0-\beta_i)$	$\sin\alpha_i \cdot \sin 2(\beta_0-\beta_i)$
$D_{k2}$	$1-\cos^2\alpha_i \cdot \sin^2(\beta_0-\beta_i)$	$1-(1+\sin^2\alpha_i) \cdot \sin^2(\beta_0-\beta_i)$	$-\sin\alpha_i \cdot \sin 2(\beta_0-\beta_i)$
$D_{k3}$	$\cos^2\alpha_i$	$-\cos^2\alpha_i$	0
$D_{k4}$	$-\cos^2\alpha_i \cdot \sin^2(\beta_0-\beta_i)$	$-(1+\sin^2\alpha_i) \cdot \sin 2(\beta_0-\beta_i)$	$-2\sin\alpha_i \cdot \cos 2(\beta_0-\beta_i)$
$D_{k5}$	$-\sin 2\alpha_i \cdot \sin(\beta_0-\beta_i)$	$\sin 2\alpha_i \cdot \sin(\beta_0-\beta_i)$	$2\cos\alpha_i \cdot \cos(\beta_0-\beta_i)$
$D_{k6}$	$-\sin 2\alpha_i \cdot \cos(\beta_0-\beta_i)$	$\sin 2\alpha_i \cdot \cos(\beta_0-\beta_i)$	$-2\cos\alpha_i \cdot \sin(\beta_0-\beta_i)$
$\sigma_k^*$	$\sigma_{Ai} + \sigma_{Bi}$	$(\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \cos 2A_i$	$(\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \sin 2A_i$

这样，一个钻孔可列出三个方程式，三个钻孔便有九个方程式，多于未知量(6个应力分量)的数目，用数理统计最小二乘法原理，得到求解应力分量最佳值的正规方程组：

$$\begin{bmatrix}
 \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k1} & \Lambda & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k1} \\
 \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k2} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \Lambda & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k2} \\
 M & M & M & M \\
 M & M & M & M \\
 \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k6} & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k6} & \Lambda & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 \sigma_x \\
 \sigma_y \\
 M \\
 M \\
 \tau_{xy}
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 \sum_{k=1}^n A_{k1} \sigma_k^* \\
 \sum_{k=1}^n A_{k2} \sigma_k^* \\
 M \\
 M \\
 \sum_{k=1}^n A_{k6} \sigma_k^*
 \end{Bmatrix}
 \tag{B.5}$$

### B.2 应力参数与应力值计算

由式(B.5)求得地应力场中六个应力分量以后，再根据下式求解三个主应力值。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W+2\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \dots\dots\dots (B.6) \\ \sigma_3 &= 2\sqrt{-\frac{P}{3}} \cos \frac{W+4\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1 \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} \omega &= \cos^{-1} \left( -\frac{Q/2}{\sqrt{-(P/3)^3}} \right) \dots\dots\dots (B.7) \\ P &= -J_1^2/3 + J_2 \\ Q &= -2J_1^3/27 + J_1J_2/3 - J_3 \end{aligned}$$

式(B.7)中:  $J_1$ 、 $J_2$ 和 $J_3$ 为应力张量的第一、第二和第三不变量, 如下:

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ J_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} \end{aligned}$$

主应力方向由下式(B.8)中任二式:

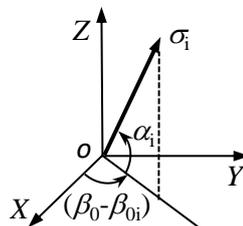
$$\begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_i)l_i + \tau_{xy}m_i + \tau_{zx}n_i &= 0 \\ \tau_{xy}l_i + (\sigma_y - \sigma_i)m_i + \tau_{yz}n_i &= 0 \dots\dots\dots (B.8) \\ \tau_{zx}l_i + \tau_{yz}m_i + (\sigma_z - \sigma_i)n_i &= 0 \end{aligned}$$

和方向余弦式(B.9)联立解得。

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1 \dots\dots\dots (B.9)$$

根据图 B.2 得主应力的倾角 $\alpha_{0i}$ 和方位角 $\beta_{0i}$ 为:

$$\begin{aligned} \alpha_{0i} &= \sin^{-1} n_i \\ \beta_{0i} &= \beta_0 - \sin^{-1} \frac{m_i}{\sqrt{1-n_i^2}} \dots\dots\dots (B.10) \end{aligned}$$

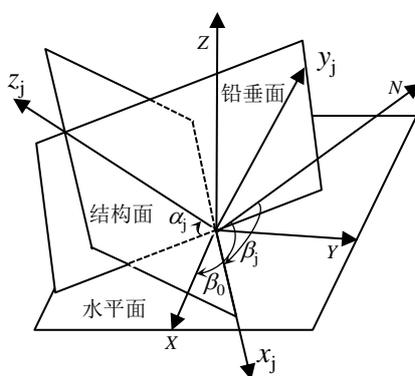


图B.2 主应力的倾角和方位角

附录 C  
(规范性附录)  
单孔水压致裂三维地应力测量计算方法

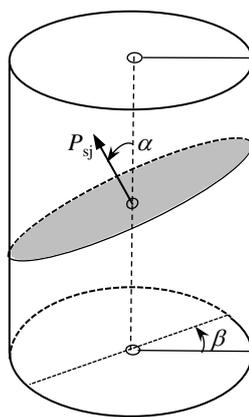
C.1 计算原理与公式推导

以原生裂隙结构面(序号为 $j$ )走向为轴 $x_j$ ,倾向为轴 $y_j$ 与走向垂直的线为轴 $z_j$ 建立活动坐标系 $o-x_jy_jz_j$ ,结构面倾角为 $\alpha_j$ ,走向为 $\beta_j$ 。钻孔坐标系与大地坐标系之间的关系如图 C.1 所示。



图C.1 结构面坐标系与大地坐标系的相对位置

选取钻孔原生裂隙段进行测量,当裂隙重张时,裂隙面上法向应力 $\sigma_{yj}$ 与瞬时闭合压力 $P_{sj}$ 平衡,如图 C.2 所示。



图C.2 原生裂隙重张示意图

得到应力平衡基本公式(C.1):

$$\sigma_{yj} = P_{sj} \dots\dots\dots (C.1)$$

经应力分量坐标转换到大地坐标系, 可得以下关系式:

$$\begin{aligned} \sigma_{yj} = & \sigma_x \sin^2 \alpha_j \sin^2(\beta_0 - \beta_j) + \sigma_y \sin^2 \alpha_j \cos^2(\beta_0 - \beta_j) + \sigma_z \cos^2 \alpha_j \\ & - \tau_{xy} \sin^2 \alpha_j \sin 2(\beta_0 - \beta_j) + \tau_{yz} \sin 2\alpha_j \cos(\beta_0 - \beta_j) - \tau_{xz} \sin 2\alpha_j \sin(\beta_0 - \beta_j) \end{aligned} \dots\dots\dots (C.2)$$

由此可将式(C.1)改写为式(C.3)，其应力系数见下表。

$$P_{sj} = A_{j1}\sigma_x + A_{j2}\sigma_y + A_{j3}\sigma_z + A_{j4}\tau_{xy} + A_{j5}\tau_{yz} + A_{j6}\tau_{xz} \dots\dots\dots (C.3)$$

表C.1 原生裂隙水压致裂应力系数和观测值

$A_{j1}$	$A_{j2}$	$A_{j3}$	$A_{j4}$	$A_{j5}$	$A_{j6}$	$P_{sj}$
$\sin^2\alpha_j$ $\cdot \sin^2(\beta_0-\beta_j)$	$\sin^2\alpha_j$ $\cdot \cos^2(\beta_0-\beta_j)$	$\cos^2\alpha_j$	$-\sin^2\alpha_j$ $\cdot \sin 2(\beta_0-\beta_j)$	$\sin 2\alpha_j$ $\cdot \cos(\beta_0-\beta_j)$	$-\sin 2\alpha_j$ $\cdot \sin(\beta_0-\beta_j)$	$\sigma_{yj}$

分析上式可知，每进行一段不同产状的原生裂隙水压致裂测量，可获得1个独立的观测方程，只需对6段或6段以上不同产状的原生裂隙进行重张，即可确定三维地应力状态，实际计算中选用7~9段数据计算，得到的结果可靠性较高。

在原生裂隙水压致裂法的基础上，实际测量过程中又发展出采用钻孔完整岩体段的经典压裂试验与原生裂隙段的重张试验相结合的测量方法。

钻孔完整岩体段的常规水压致裂采用 $o-x_iy_iz_j$ 钻孔坐标系为活动坐标系，获得该坐标系下钻孔横截面上二维应力状态后，再坐标变换至大地坐标系，其观测方程仍用式(B.4)表示。原生裂隙水压致裂试验的观测值方程仍由式(C.3)表示，两种观测方程联立即为此方法的观测方程。

### C.2 应力参数与应力值计算

当独立的观测方程数超过6个时，可采用式(B.5)至式(B.7)最小二乘法求解应力分量的最佳值。

若钻孔为铅垂孔，取钻孔坐标 $o-x_iy_iz_j$ 与大地坐标系 $o-XYZ$ 重合，可由完整段水压致裂数据先求解 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 三个未知量，剩余三个未知量可由三个以上不同产状的原生裂隙水压致裂确定，此时式(C.3)可改写为：

$$P_{sj}^* = A_{j4}\tau_{xy} + A_{j5}\tau_{yz} + A_{j6}\tau_{xz} \dots\dots\dots (C.4)$$

式中： $P_{sj}^* = P_{sj} - (A_{j1}\sigma_x + A_{j2}\sigma_y + A_{j3}\sigma_z)$ 。

当其独立观测方程数超过3个时，式(C.4)中三个未知量通过下面的正规方程(C.5)求得：

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n A_{j4}^2 & \sum_{j=1}^n A_{j5}A_{j4} & \sum_{j=1}^n A_{j6}A_{j4} \\ \sum_{j=1}^n A_{j4}A_{j5} & \sum_{j=1}^n A_{j5}^2 & \sum_{j=1}^n A_{j6}A_{j5} \\ \sum_{j=1}^n A_{j4}A_{j6} & \sum_{j=1}^n A_{j5}A_{j6} & \sum_{j=1}^n A_{j6}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{j=1}^n A_{j4}P_{sj}^* \\ \sum_{j=1}^n A_{j5}P_{sj}^* \\ \sum_{j=1}^n A_{j6}P_{sj}^* \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (C.5)$$

通过近些年的理论发展，该方法对裂隙赋存条件的依赖度有所降低，由最初需要至少6条原生裂隙，发展到1个完整测段的水压致裂和3条原生裂隙的重张测量数据来计算三维应力。但在改良过程中也加入了一些新的假设，为减小误差，建议尽量增加原生裂隙测段数据。

附 录 D  
(规范性附录)  
套芯解除法地应力计算方法

D.1 钻孔孔径变形计法 (径向变形元件相互交角为 45°时)

D.1.1 计算孔径变形

$$\delta = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{K_b} \dots\dots\dots (D.1)$$

D.1.2 计算与钻孔轴垂直的平面内的大、小主应力及其方向:

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

$$\sigma_{s2} = \frac{E}{4d} [(\delta_{0^\circ} + \delta_{90^\circ}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\delta_{0^\circ} + \delta_{45^\circ})^2 + (\delta_{45^\circ} - \delta_{90^\circ})^2}] \dots\dots\dots (D.3)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2\delta_{45^\circ} - \delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}}{\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}} \frac{\cos 2\alpha}{\delta_{0^\circ} - \delta_{90^\circ}} > 0 \text{ (判别式)} \dots\dots\dots (D.4)$$

进行多组测量, 可进行组合计算, 求出  $\sigma_{s1}$ 、 $\sigma_{s2}$  的平均值。

D.1.3 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:

$$E(\delta_k / d) = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:  $k$ ——观测值方程序号  $k = v(i-1) + j$ ,  $i = 1 \sim w$ ,  $j = 1 \sim v$ ;

$i$ ——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  $v = 4$ ;

$\delta_k$ ——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:  $a_i$ ,  $b_i$ ——交汇测量钻孔的倾角和方位角;

$\theta_j$ ——变形计内触头的布置角；

$\beta_0$ ——大地坐标系轴X的方位角。

## D.2 三分量压磁应力计法(三组压磁元件相互交角为 60°时)

### D.2.1 确定传感器每一元件的记录应力值

$$s_i = \eta_i \xi_i \Delta V_i (i=1\sim 3) \dots\dots\dots (D.6)$$

### D.2.2 计算与钻孔轴垂直平面内的最大、最小主应力及其方向

$$\sigma_{s1} = \frac{1}{2} \left\{ s_1 + s_2 + s_3 + \sqrt{\frac{1}{2} [(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]} \right\} \dots\dots\dots (D.7)$$

$$\sigma_{s2} = \frac{1}{2} \left\{ s_1 + s_2 + s_3 - \sqrt{\frac{1}{2} [(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2]} \right\} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$\tan 2\alpha = -\sqrt{3} \frac{s_2 - s_3}{2s_1 - s_2 - s_3}, \quad \frac{s_2 - s_3}{\sin 2\alpha} < 0 \text{ (判别式)} \dots\dots\dots (D.9)$$

式中： $\alpha$ —— $s_1$ 与 $\sigma_1$ 的夹角。当判别式大于0时， $\alpha$ 则为 $s_1$ 与 $\sigma_2$ 的夹角。

### D.2.3 计算三维地应力(用三孔交汇法进行测量时)

$$\begin{aligned} s_i = & \frac{1}{3} \{ (f_1 l_1^2 + f_2 l_2^2 + f_3 l_3^2 + f_4 l_1 l_3) \sigma_x \\ & + (f_1 m_1^2 + f_2 m_2^2 + f_3 m_3^2 + f_4 m_1 m_3) \sigma_y \\ & + (f_1 n_1^2 + f_2 n_2^2 + f_3 n_3^2 + f_4 n_1 n_3) \sigma_z \\ & + [2f_1 l_1 m_1 + 2f_2 l_2 m_2 + 2f_3 l_3 m_3 + f_4 (l_1 m_3 + l_3 m_1)] \tau_{xy} \\ & + [2f_1 m_1 n_1 + 2f_2 m_2 n_2 + 2f_3 m_3 n_3 + f_4 (m_1 n_3 + m_3 n_1)] \tau_{yz} \\ & + [2f_1 n_1 l_1 + 2f_2 n_2 l_2 + 2f_3 n_3 l_3 + f_4 (n_1 l_3 + n_3 l_1)] \tau_{zx} \} \end{aligned} \dots\dots\dots (D.10)$$

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；

$\theta$ ——测量直径与位于X-Y平面内的钻孔坐标轴的夹角。

## D.3 八分量压磁应力计法(元件相互交角 45°，斜向元件与应力计轴线夹角 45°)

D. 3. 1 确定每一测量方向元件的记录应力值

$$s_i = \eta_i \xi_i \Delta V_i (i=1\sim 8) \dots\dots\dots (D.11)$$

D. 3. 2 计算六个应力分量

$$s_1 = \frac{Eu_1}{3a} = f_1\sigma_x + f_2\sigma_y + f_3\sigma_z + f_4\tau_{xy} + f_5\tau_{yz} + f_6\tau_{zx} \dots\dots\dots (D.12)$$

$$s_{45} = \frac{Eu_{45}}{3a} = h_1\sigma_x + h_2\sigma_y + h_3\sigma_z + h_4\tau_{xy} + h_5\tau_{yz} + h_6\tau_{zx} \dots\dots\dots (D.13)$$

式中：s<sub>1</sub>、s<sub>45</sub>——压磁应力计径向、45°斜向元件的“记录应力值”，MPa；

u<sub>1</sub>、u<sub>45</sub>——压磁应力计径向、45°斜向元件的变形值，mm；

a——钻孔半径，mm；

f<sub>1</sub>=(1+2cos2θ)/3, f<sub>2</sub>=(1-2cos2θ)/3, f<sub>3</sub>=-μ/3, f<sub>4</sub>=(4sin2θ)/3, f<sub>5</sub>=f<sub>6</sub>=0；

h<sub>1</sub>= $\frac{\sqrt{2}}{6}(1-2\mu+2\cos 2\theta)$ , h<sub>2</sub>= $\frac{\sqrt{2}}{6}(1-2\mu-2\cos 2\theta)$ , h<sub>3</sub>= $\frac{\sqrt{2}}{6}(2-\mu)$ , h<sub>4</sub>= $\frac{2\sqrt{2}}{3}\sin 2\theta$ ；

h<sub>5</sub>= $\frac{2\sqrt{2}}{3}(1+\mu)\sin \theta$ , h<sub>6</sub>= $\frac{2\sqrt{2}}{3}(1+\mu)\cos \theta$ 。

当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：

$$A\{\sigma\} = G \dots\dots\dots (D.14)$$

式中：A=[a<sub>ij</sub>]——方程组的系数矩阵；

G=[g<sub>i</sub>]——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。

D. 4 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从布置及应变从内应变片的位置如图D.1和图D.2所示。

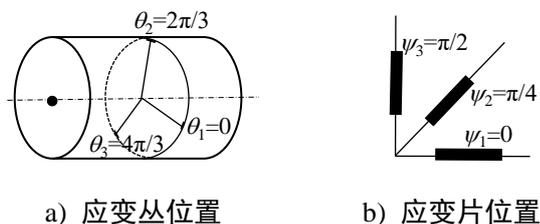
D. 4. 1 计算各应变片解除应变测定值

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{nk} - \varepsilon_{0k} \dots\dots\dots (D.15)$$

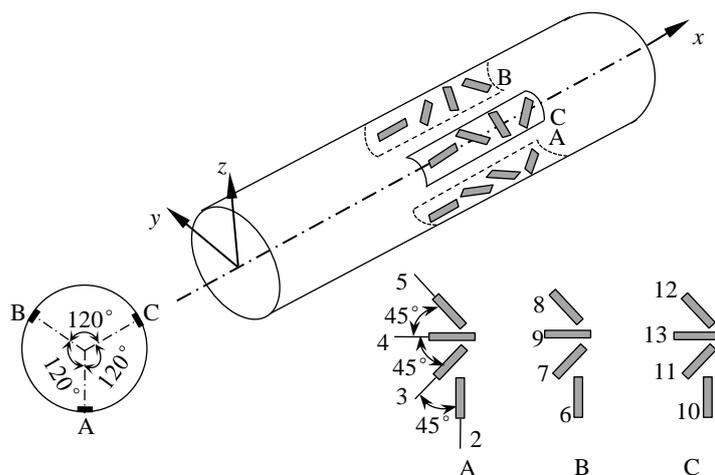
D. 4. 2 确定地应力分量

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：

$$\begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k1} \Lambda & \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k1} \\ \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k2} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \Lambda \sum_{k=1}^n A_{k6} A_{k2} \\ M & M & M \\ \sum_{k=1}^n A_{k1} A_{k6} & \sum_{k=1}^n A_{k2} A_{k6} \Lambda & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ M \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1} \varepsilon_k \\ \sum_{k=1}^n A_{k2} \varepsilon_k \\ M \\ \sum_{k=1}^n A_{k6} \varepsilon_k \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (D.16)$$



图D.1 三叉式应变计应变丛布置示意图



注：A、B、C为三组应变丛。

图D.2 空腔包体应变计应变丛布置示意图

钻孔孔壁应变测量法三维地应力测量的观测方程组为：

$$E\varepsilon_k = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \dots\dots\dots (D.17)$$

式中： $k$ ——观测值方程序号， $k=v(i-1)+j$ ， $i=1\sim q$ ， $j=1\sim v$ ；

$i$ ——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 $4$ ；

$\varepsilon_k$ ——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： $\theta_i$ ——应变丛位置与钻孔坐标轴 $x$ 的夹角；

$\psi_{ij}$ ——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。

计算三维主应力的大小、方向可参考附录B中(B.6)~(B.10)等计算公式求得。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 50266-2013 工程岩体试验方法标准
- [2] 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
- [3] DL/T 5331-2005 水电水利工程钻孔压水试验规程
- [4] 国际岩石力学学会关于岩石应力估算的建议方法——水压致裂法及原生裂隙水压致裂法. 地壳构造与地壳应力. 2009年第2期
- [5] 刘允芳, 刘元坤. 单钻孔中水压致裂法三维地应力测量的新进展. 岩石力学与工程学报. 25卷增2, 2006
- [6] 景锋. 原生裂隙水压致裂法三维地应力测量研究. 岩土工程学报. 31卷11期, 2009
- [7] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量在工程中的应用. 长江科学院院报. 2003年4月第20卷第2期
- [8] 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. 岩石力学与工程学报. 2003年4月第22卷第4期
- [9] 王成虎. 地应力主要测量和估算方法回顾与展望. 地质论评. 2014年9月, 第60卷第5期
- [10] ASTM: standard test method for determination of in-situ stress in rock using hydraulic fracturing method
- [11] ISRM suggested methods for rock stress estimation-part3: Hydraulic fracturing(HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures(HTPF)
- [12] F. H. Cornet and B. Valette, In Situ Stress Determination from Hydraulic Injection Test Data, Journal of geophysical research, 1984, VOL. 89, NO. B13
-