



T/CECS XXX—20XX

中国工程建设标准化协会标准

铁路工程地应力测量技术规程

Technical regulations for In-situ Stress Measurement of Railway Engineering
(征求意见稿)

(在提交反馈意见时，请将知道的相关专利和支持性文件一并附上)

Xxxx 出版社

中国工程建设标准化协会标准

铁路工程地应力测量技术规程

Technical regulations for In-situ Stress Measurement of Railway Engineering
(征求意见稿)

T/CECS XXX—20XX

主编单位：中铁二院工程集团有限责任公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：xx 年 xx 月 xx 日

Xxxx 出版社

2023 年 · 北京

中国工程建设标准化协会公告

第 XXX 号

关于公布《铁路工程地应力测量技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2021 年第一批协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字〔2021〕11 号）的要求，由中铁二院工程集团有限责任公司等单位编制的《铁路工程地应力测量技术规程》，经本协会铁道分会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS** -2023，自 2023 年*月*日起施行。

中国工程建设标准化协会

XXX 年 XX 月 XX 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2021 年第一批协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字〔2021〕11 号）的要求，为满足铁路隧道建设和发展需要，统一铁路工程地应力测量标准，保障铁路隧道安全与质量，编制组经广泛调查研究，认证总结实践经验，参考有关国内外标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 7 章，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、水压致裂法、空心包体应力解除法、滞弹性应变恢复法、声发射法，另有 7 个附录及条文说明。

请注意本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中铁二院工程集团有限责任公司负责具体技术内容的解释。本标准在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：四川省成都市金牛区通锦路 3 号，邮政编码：610031），并抄送中国工程建设标准化协会铁道分会（北京市海淀区三里河路 9 号，邮政编码：100038），以供修订时参考。

主编单位：中铁二院工程集团有限责任公司

参编单位：中国地质科学院地质力学研究所

西南交通大学

中铁西南科学研究院有限公司

青海省交通规划设计研究院有限公司

地泰科学仪器（武汉）有限公司

主要起草人：张广泽、张小林、徐正宣、冯涛、张夏临、柴春阳、赵冬安、陈明浩、吴俊猛、江云、邓宏科、应黎、张营旭、赵鹏、张强、吕泽君、边兆鑫、余行健、唐开强、张重远、李阿伟、孟文、孙东生、李冉、杨跃辉、凌斯祥、巫锡勇、廖昕、马宁、蔡建华、史永跃、于维刚、王冬、钟闻华、刘渭宁、包晓峰、李靖、刘文秀、刘博、崔显鹏

主要审查人（按章节顺序排序）：

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术 语	2
2.2	符 号	3
3	基本规定	7
3.1	测量测点选择	7
3.2	测量测段选择	7
3.3	地应力测量钻孔技术要求	7
4	水压致裂法	9
4.1	一 般 规 定	9
4.2	测 量 系 统	9
4.3	测量步骤及技术要求	11
4.4	数 据 处 理	13
4.5	成 果 报 告	14
4.6	三维水压致裂法地应力测试	16
5	空心包体应力解除法	18
5.1	一 般 规 定	18
5.2	测 量 系 统	19
5.3	测量步骤及要求	20
5.4	数 据 处 理	22
5.5	成 果 报 告	22
6	滞弹性应变恢复法	25
6.1	一 般 规 定	25
6.2	测 量 系 统	25
6.3	测量步骤及技术要求	26

6.4	数据处理	26
6.5	成果报告	27
7	声发射法	30
7.1	一般规定	30
7.2	测量系统	30
7.3	测量步骤及技术要求	31
7.4	数据处理	32
7.5	成果报告	32
附录 A	地质描述内容	35
附录 B	水压致裂法的计算方法	37
附录 C	三维水压致裂法的计算方法	41
附录 D	空心包体应力解除法的计算方法	46
附录 E	滞弹性应变恢复法的计算方法	48
附录 F	声发射法的计算方法	51
附录 G	岩体初始应力场评估	54
	本规范用词说明	56

Contents

1	General	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terminology	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Provisions	7
3.1	Selection of measuring points	7
3.2	Selection of measuring section	7
3.3	Technical requirements for geostress measurement boreholes	7
4	Hydrofracturing	9
4.1	General provisions	9
4.2	Measuring system	9
4.3	Measurement steps and technical requirements	11
4.4	Data processing	13
4.5	Achievement report	14
4.6	Three dimensional hydrofracturing in-situ stress test	16
5	Hollow inclusion stress relief method	18
5.1	General provisions	18
5.2	Measuring system	19
5.3	Measurement steps and requirements	20
5.4	Data processing	22
5.5	Results report	22
6	Anelastic strain recovery method	25
6.1	General provisions	25
6.2	Measuring system	25
6.3	Measurement steps and technical requirements	26
6.4	Data processing	26

6.5	Results report	27
7	Acoustic emission method	30
7.1	General provisions	30
7.2	Measuring system	30
7.3	Measurement steps and technical requirements.....	31
7.4	Data processing	32
7.5	Results report	32
Appendix A	Geological Description.....	35
Appendix B	Calculation Method of Hydrofracturing	37
Appendix C	Calculation Method of Three Dimensional Hydrofracturing.....	41
Appendix D	Calculation Method of Hollow Inclusion Stress Relieving Method.....	46
Appendix E	Calculation method of anelastic strain recovery method	48
Appendix F	Calculation Method of Acoustic Emission Method.....	51
Appendix G	Evaluation of initial stress field of rock mass	54
	Description of words used in this specification	56

1 总 则

- 1.0.1 为统一铁路工程地应力测量技术要求，保障地应力测量质量，为工程设计和施工提供可靠地参数，制定本规程。
- 1.0.2 本规程适用于新建、改建铁路工程的地应力测量工作。
- 1.0.3 铁路工程地应力测量方法的选择时应与铁路工程所处阶段相适应，符合铁路工程勘察、设计、施工的基本要求和特性，还应考虑测点地质条件、测量条件、技术要求等，并尽可能采用两种以上测量方法，对测量结果进行比对，分析差异及原因。
- 1.0.4 地应力测量的位置应根据铁路工程的地质条件、岩体条件等综合确定。
- 1.0.5 铁路工程地应力测量前应综合分析工程区的地形地貌、地质构造、岩体质量及工程要求，编写地应力测量工作计划。
- 1.0.6 本规程采用的仪器、设备，应按规定进行检定、校准或校验。
- 1.0.7 铁路工程地应力测量工作应积极采用新技术和新方法。
- 1.0.8 铁路工程地应力测量工作应注重环境保护和安全生产工作。
- 1.0.9 铁路工程地应力测量除应符合本规程外，尚应符合国家现行的有关强制性标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 初始地应力 in-situ stress

岩体未经受人工扰动的天然状态应力，也称岩体初始应力或原岩应力。

2.1.2 封隔段 test interval

一对跨接式封隔器密封形成的测量孔段。

2.1.3 封隔器 packer

用以封隔测量孔段的圆柱形器具。

2.1.4 座封 packer setting

向一对跨接式封隔器注液加压，使封隔器膨胀紧贴孔壁，形成封隔段的过程。

2.1.5 印模器 moulage appliance

用以置入封隔段复印水压致裂产生的破裂的印痕，并带有定向装置的圆柱形器具。

2.1.6 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。

2.1.7 孔隙水压力 pore water pressure

存在于岩体孔隙中水的压力。

2.1.8 岩体初始破裂压力 initial breakdown pressure of rock

使封隔段孔壁岩体产生张性破裂的液压或泵压。

2.1.9 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。

2.1.10 破裂重张压力 reopening pressure

再次对封隔段注压使破裂重新张开的压力。

2.1.11 岩体抗拉强度 tension strength of rock

封隔段岩体抵抗拉张破坏的强度。

2.1.12 套芯解除 overcoring

将测量传感器安装在钻孔孔底，然后在测量小钻孔外同心套钻钻取岩芯，在岩芯与围岩脱离的过程中的记录传感器的变形信息。

2.1.13 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。

2.1.14 应变片 Strain gauge

由敏感栅等构成的用于测量应变的元件。

2.1.15 应变丛 Combining strain gauges

由数个应变片按一定排列方式组成的应变片组合。

2.1.16 围岩率定 Calibration of Surrounding Rock

将岩芯放在围岩率定机中，通过在岩芯上施加围压，而得到压力与仪器读数关系曲线的试验。根据围岩率定试验可计算岩芯的弹性模量和泊松比。

2.1.17 滞弹性应变恢复法 Anelastic strain recovery

岩芯被钻出后，即脱离应力场作用，岩芯卸荷。由于岩石的黏弹性特性，岩芯除了立即发生弹性应变恢复外，还随时间发生滞弹性应变恢复，滞弹性应变恢复法即根据岩芯表面不同方向的滞弹性应变恢复量确定三维地应力的方法。

2.1.18 岩石的滞弹性应变恢复柔量 Anelastic strain recovery flexibility of rock

岩石的固有力学属性，表示单位应力引起的随时间变化的滞弹性恢复应变，可分为剪切变形模式和体积变形模式两部分。

2.1.19 岩石声发射 Acoustic emission of rock

岩石在受力变形破坏过程中，微裂纹的产生、扩展和贯通所释放的能量产生的瞬态弹性波现象。

2.2 符 号

σ_h —最小水平主应力；

σ_H —最大水平主应力；

σ_v —垂向主应力；

P —压力；

P_s —瞬时关闭压力；

P_r —破裂重张压力；

P_b —初始破裂压力；

P_0 —孔隙水压力；

T —岩石原位抗拉强度；

γ —岩体容重；

H —测段深度；

σ_r —径向应力；

σ_θ —环向应力；

σ_x — x 面上沿 x 向正应力；

σ_y — y 面上沿 y 向正应力；

σ_z — z 面上沿 z 向正应力；

τ_{xy} — x 面上沿 y 向切应力；

τ_{yz} — y 面上沿 z 向切应力；

τ_{zx} — z 面上沿 x 向切应力；

σ_1 —第一主应力值；

σ_2 —第二主应力值；

σ_3 —第三主应力值；

ε_1 —第一主应变值；

ε_2 —第二主应变值；

ε_3 —第三主应变值；

σ_m —平均主应力；

ε_m —平均主应变；

E —弹性模量；

ν —泊松比；

d —岩芯内径；

D —岩芯外径；

P_c —围压；

ε_{θ} —周向应变；

ε_z —轴向应变；

K_1 —实验修正系数；

l, m, n —应变轴的方向余弦；

l_p, m_p, n_p —垂直应力与三个应变轴的方向余弦；

α_T —热膨胀系数；

ΔT —温度增量；

$Jas(t)$ —剪切变形模式的滞弹性应变恢复柔量；

$Jav(t)$ —体积变形模式的滞弹性应变恢复柔量；

S_1 —第一主应力偏量值；

S_2 —第二主应力偏量值；

S_3 —第三主应力偏量值；

e_1 —第一主应变偏量值；

e_2 —第二主应变偏量值；

e_3 —第三主应变偏量值；

e_m —非弹性体应变；

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；

δ_{0° —钻孔变形计 0° 方向的变形值；

δ_{45° —钻孔变形计 45° 方向的变形值；

δ_{90° —钻孔变形计 90° 方向的变形值；

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。

1Lu—当试段压力为 1MPa 时，每米试段的压入流量为 1L/min。

$\mu\varepsilon$ —微应变的单位符号， $\varepsilon = 10^6 \mu\varepsilon$ ，即微应变是应变的百万分之一。

D_i —主应变方位角；

V_i —主应变倾角；

β_i —主应力方位角；

α_i —主应力倾角；

σ_k —Kaiser 效应特征点应力；

P_k —Kaiser 效应特征点对应荷载；

F —试件横截面积；

3 基本规定

3.1 测量测点选择

3.1.1 测试人员测试前应充分搜集测区地质资料，了解测点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。具体内容可参考附录 A。

3.1.2 勘察阶段应选择代表性高地应力地段开展孔内地应力测试，地应力测试孔宜布置在下列位置：

- 1 深埋长大隧道。
- 2 高烈度地震区。
- 3 活动断裂附近。
- 4 深切河谷地带应力增高区，谷底高应力区。

3.1.3 施工揭示的强烈至极强岩爆、大变形地段，宜开展洞内地应力测试。

3.1.4 测点应根据工程测量目的和要求进行选择，其位置应符合下列规定：

- 1 测点的位置应具有代表性。
- 2 测点的位置应避开岩体破碎区，位于完整的岩体中。
- 3 测点的位置应避开应力扰动区。
- 4 测点的位置的地层岩性宜单一。
- 5 测点宜布置在水电连接便捷、作业方便的位置。

3.2 测量测段选择

3.2.1 选择测段时应查看钻孔岩芯，以及钻孔井下成像、井径测量、声波测量等资料，了解钻孔完整段分布情况、裂隙或破碎带的分布深度及孔径变化、孔底沉渣厚度。

3.2.2 地面钻孔第一测段深度应位于基岩弱风化带及以下。

3.2.3 测段应选在岩石完整且无孔壁崩落孔段，应避开原生裂隙密布的孔段。

3.2.4 测段设置应兼顾研究需要和工程布置设计。

3.2.5 同一测量孔内测点的数量，应根据地形地质条件、岩芯变化、测量孔孔深而定。两测点间距宜大于 5m。

3.3 地应力测量钻孔技术要求

3.3.1 钻孔口径和钻具规格应满足国家有关的强制标准，钻孔上覆表土层和易塌孔的基岩风化带应下套管护壁。

3.3.2 钻孔应全孔取岩芯并进行准确编录，内容应包括钻孔位置、钻进回次的深度、岩芯采取率、岩性、地下水位稳定高程。

3.3.3 钻探人员应详细记录钻进过程中遇到的缩径、塌孔及钻孔事故。

4 水压致裂法

4.1 一般规定

4.1.1 水压致裂法地应力测量适用于完整或较完整岩体地应力测量。

4.1.2 水压致裂法可分为常规水压致裂法和三维水压致裂法。

4.1.3 勘察阶段地应力测试宜选用水压致裂法，需测试三维地应力大小和方向时，可采用三维水压致裂法。

4.1.4 隧道内水压致裂法测量终孔深度宜超过隧道断面最大尺寸（宽度或高度）的3~5倍。

4.1.5 采用水压致裂法时岩体应符合下列假定：

- 1 岩石是均匀和各向同性的线弹性体。
- 2 岩石为多孔介质时，注入的流体依据达西（Darcy）定律在岩石孔隙中流动。
- 3 岩体应力场三个主应力中有一个与钻孔轴线平行。

4.1.6 采用水压致裂法时测段的选择除满足3.2节要求外还应符合下列规定：

1 应根据工程需求，结合钻孔检查结果和岩芯观察（或钻孔孔壁成像资料）确定各测段深度，应选在岩石完整段。

2 最深测段位置应充分考虑孔底沉渣厚度及工程埋深。

3 钻孔条件允许的情况下应尽可能多选试验段。每个钻孔宜不少5个测段，或每100m不少于2个测段。

4 在工程埋深附近宜适当加密测段，但相邻测段不能有相互重叠。

5 加压段长度应不小于测量孔直径的6倍。加压段的岩性应均一、完整。

6 加压段与封隔段岩体的透水率不宜大于1Lu。

7 若钻孔井径变化较大或岩芯较破碎，适于测量位置较少时，宜在可能的测段加密测量。

8 印模的次数宜为2次（含）以上。

4.2 测量系统

4.2.1 试验应采取下列仪器设备：

- 1 钻机及钻具。

- 2 高压泵站。
- 3 数据采集记录仪。
- 4 三维电子定向仪。
- 5 井下换向装置。
- 6 井下压裂段。
- 7 封隔器。
- 8 印模器或钻孔井下成像设备。
- 9 标准压力表、压力变送器和井下压力计。
- 10 标准流量表和流量变送器。
- 11 连接配件。
- 12 安装工具等。

4.2.2 主要仪器设备的技术指标应符合下列规定：

- 1 钻机及钻具应与所采用的地应力设备相配套。
- 2 封隔器胶筒的长度宜大于 1m，规格尺寸及工作性能应与钻孔孔径、孔壁质量及地应力水平相匹配。
 - 3 压力泵的额定工作压力宜不小于 25MPa。对于深部（深度大于 500m）或高应力地区，其额定工作压力应大于 35MPa。高压泵在额定工作压力下应保持不小于 4L/min 的稳定流量；
 - 4 数据采集记录仪宜采用电池供电，多路通道设置，具有数据自动采集、实时曲线显示、数据存储及事后查询功能，采集频率不宜小于 20Hz。
 - 5 三维电子定向仪应符合防水耐压耐温的要求，外壳材质应为无磁不锈钢、铜质或铝质，内置电子罗盘与铁质配件的距离应大于 80cm，具有数据采集、存储和查询功能，其分辨率宜大于 1°。
 - 6 井下换向装置（单回路压裂系统）能够保证封隔器座封加压与试验段水力压裂的正常切换，密封强度应与高压泵站的额定工作压力一致。
 - 7 压力传感器和井下压力计的精度应优于 0.5%，量程范围宜为（0~60）MPa；
 - 8 流量表的量程应不小于 20 L/min，记录精度优于 0.5 L/min。

9 印模器的胶筒长度应不小于 1 m。采用电子罗盘定向器，记录精度应优于 1°。

10 数据记录应采用 X—Y 记录仪，宜配备数字式数据采集器。

4.2.3 测量设备的检查与标定应符合下列规定：

1 在压裂试验之前，应对测量所用钻杆及连接件进行细致的质量检查和检漏试验。试验压力宜大于 12 MPa。钻杆应多次高压清洗，合格的钻杆应进行编号并记下长度。

2 检漏试验应在与封隔器规格配套的两个厚壁套管中进行。缓慢注压使封隔器膨胀并紧贴套管壁，关泵并观察设备是否存在渗漏等异常情况。检漏试验压力根据估算的钻孔破裂压力确定。

3 连接电路设备，调试高压泵站及采集系统工作状态。

4 切换转换开关至压裂段位置，开泵观察出水是否顺畅。

5 压力传感器和压力计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至少两个循环的标定。

6 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至少两个回次的标定。

7 数据采集及记录系统使用前应连接压力及流量传感器，进行至少两次数据采集及记录系统的检查。

4.2.4 压裂系统分为单回路压裂系统和双回路压裂系统，压裂系统选择时应符合下列规定：

1 测量深部无地下水且钻孔孔径和测量深度适宜时，可选用双回路压裂系统，第一管路宜采用绑扎在钻杆外侧的高压软管作为加压通道，用于封隔器座封，加压方式可选择液压或气压；第二管路宜采用钻杆作为加压通道，用于试验段压裂。

2 双回路压裂系统，每隔 3~5m 用铁丝将高压胶管绑紧固定于钻杆上。

3 单回路压裂系统宜用于深孔，且钻孔深度超过 500 m 时，建议使用存储式井下压力计记录压力数据，避免管路摩擦阻力等对测量结果的影响。

4.3 测量步骤及技术要求

4.3.1 水压致裂法地应力测量应包括测量系统连接检查、下放设备、坐封、压裂操作、破裂重张循环操作、测量破裂裂缝方位和倾角等步骤。

4.3.2 测量系统连接检查应符合 4.2.3 要求。

4.3.3 下放设备时应记录下放钻杆数量，保证设备下放至选定测量深度。

4.3.4 座封操作应符合下列规定：

- 1 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 6MPa。
- 2 若采用双回路加压系统，应跟踪监测压裂过程中封隔器的座封压力变化。

4.3.5 压裂操作包括注压、关泵、卸压，应符合下列规定：

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，依据现场记录的压力—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。在关泵的瞬間，压力将急剧下降。关泵后，随着液体向地层的渗入，压力将缓慢下降。在岩体应力的作用下，裂缝趋于闭合。当裂缝处于临界闭合状态时记录到的压力即为瞬时关闭压力。

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。

4.3.6 破裂重张循环操作应符合下列规定：

1 重张时刻的判断：压力—时间曲线上，压力上升速率减慢，压力开始降低、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；

3 每个测段重张循环应不少于 4 次，取得合理的应力参量以及准确判断岩石的破裂和裂缝的扩展状态。此时的峰值压力值即为岩体的重张压力值。

4 钻孔深度超过 500 m 时，每个循环时间、循环间隔时间、卸压时间应适当延长。

5 解封：破裂重张循环完毕后，通过控制系统解除封隔器内压力，封隔器收缩恢复原状，提至地面。

4.3.7 可采用印模器或孔壁成像测量破裂裂缝方位和倾角，两种方法测裂缝方位和倾角时步骤及要求应符合下列规定：

1 采用印模器时，首先将接有定向仪的印模器放到压裂测量段的深度，然后通过管汇系统加压使印模器保持膨胀 30 min，印模器的压力宜保持大于重张压力 2 MPa，以使印模器表面能够清晰地印制与裂缝相对应的凸起印迹。待保压时间结束后，卸去

印模器的压力并将其提出钻孔。现场读取电磁罗盘确定的印模器上的基线方位角。同时用透明塑料薄膜将印模器围起，绘下印模器表面凸起的印痕和基线标志。据电磁罗盘确定的基线方位值和印痕与基线之间的关系即可算出破裂面的方位，该方位值就是最大水平主压应力的方向。

2 采用钻孔孔壁成像测量时，诱发裂隙破裂面的方位为最大水平主应力的方向，宜在压裂测量前、后皆进行观测以对比。

4.3.8 现场测量记录内容应包括下列各项：

- 1 测量地点、钻孔坐标或经纬度、编号、方位、倾角及终孔深度；
- 2 测段深度、注压压力—时间曲线、流量—时间曲线；
- 3 印模形态素描、破裂倾角及方位定向记录；
- 4 测量中遇到的异常情况和事故。

4.4 数据处理

4.4.1 现场测量记录内容应包括下列各项：

- 1 测量地点、钻孔坐标或经纬度、编号、方位、倾角及终孔深度；
- 2 测段深度、注压压力—时间曲线、流量—时间曲线；
- 3 印模形态素描、破裂倾角及方位定向记录；
- 4 测量中遇到的异常情况和事故。

4.4.2 压裂参数的确定应符合下列规定：

1 瞬时关闭压力 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、压力—流量法、压力—时间的平方根 $P-t^{1/2}$ 法、低流量泵进法、马斯卡特法、 dt/dP 法、 dP/dt 法等。为保证数据质量，应结合实际水压致裂地应力测量压裂曲线选取适用的两种以上取值方法。对同一钻孔宜采用同一种确定瞬时关闭压力 P_s 的方法。

2 破裂重张压力 P_r 的确定：压力—时间曲线上明显偏离线性关系处的压力值可定为重张压力 P_r ，宜以第三次重张循环的重张压力值为准。

3 初始破裂压力 P_b 的确定：应将第一回次的峰值压力确定为初始破裂压力 P_b 。

4 孔隙水压力 P_0 的确定：可用测段处的钻孔静水位压力代表其孔隙水压力，也可采用孔隙水压力计测量确定。

4.4.3 主应力确定包括主应力大小和方向的确定，应符合下列规定：

1 垂向主应力平行于钻孔轴向时，主应力按下式计算，具体计算步骤应符合附录 B 的规定。

$$\sigma_h = P_s \quad (4.4.3-1)$$

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - P_0 \quad (4.4.3-2)$$

$$\sigma_v = \gamma H \quad (4.4.3-3)$$

式中： σ_h —最小水平主应力（Mpa）；

σ_H —最大水平主应力（Mpa）；

σ_v —垂向主应力（Mpa）；

P_s —瞬时关闭压力（Mpa）；

P_r —破裂重张压力（Mpa）；

P_0 —孔隙水压力（Mpa）；

γ —岩体容重（MN/m³）；

H —测段深度（m）；

2 印模或者孔壁成像中诱发裂隙破裂面的方位应定为最大水平主应力的方向。

4.5 成果报告

4.5.1 水压致裂法地应力测量成果报告应包括下列类容：

- 1 测量任务概况
- 2 测量方法
- 3 测量地点描述
- 4 钻孔孔径测量和钻孔检查结果
- 5 测段岩石的地质描述
- 6 各测段深度和封隔段长度
- 7 测量过程
- 8 测量数据与结果描述
- 9 地应力数据分析与应用。
- 10 结论与建议

4.5.2 测量任务概况应说明任务来源，工作内容和技术要求，测量结果的用途及测量完成情况。

4.5.3 测量地点描述应包括测量地点的地理位置，测点附近的地形及主要地质构造，宜描述测点周围坑道、峒室布置及断面尺寸，测点钻孔布置及附近工程施工背景。宜附图件说明。

4.5.4 应提供全部已取得的钻孔孔径测量和钻孔检查结果相关资料，包括记录下来的不连续面的特性和钻孔孔壁条件。

4.5.5 测段岩石的地质描述应包括岩性，胶结情况，岩芯采取率等，具体内容可参考附录 A，宜附钻孔柱状图。

4.5.6 测量过程应包括测量步骤及所用设备，宜配以图表和照片说明。

4.5.7 测量数据与结果描述应符合下列规定：

1 应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_b 、 P_s 和 P_r 的方法。

2 应用表格列出各测段 H 、 P_o 、 P_b 、 P_s 、 P_r 、 σ_v 的数值，最大和最小水平主应力 σ_H 、 σ_h 的大小和方向。

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。用孔壁成像进行破裂定向时，应给出破裂段及孔壁崩落段成像，并标注深度、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。

4.5.8 地应力数据分析与应用宜包括下列内容：

1 概括钻孔各测段平面应力的量值水平，分析测段数据间的差异性。

2 对所有测段的测量结果归纳分析，给出三个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。

3 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。

4 计算并分析钻孔地应力侧压力系数。

5 给出岩体原位抗拉强度。

- 6 分析地应力场与区域地质构造的关系。
- 7 进行工程初始地应力状态评估（附录 G），给出高地应力区隧道岩爆等级或高地应力区隧道软岩大变形等级，并提出预案措施。
- 8 地下隧道开挖时，隧道横截面上的最大切向应力的计算，分析最大水平主应力方向与隧道轴线的角度对隧道稳定性的影响。
- 9 分析测点地应力特征，结合相关工程问题进行讨论。
- 10 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。

4.5.9 结论与建议应包括下列内容：

- 1 钻孔地应力大小随深度分布的线性回归公式。
- 2 判断测量孔不同测点三向主应力大小关系及应力结构。
- 3 实测主应力量值及分布范围。
- 4 实测最大水平主应力方向及与区域现今构造运动的关系。
- 5 岩体抗拉强度范围、测压系数。
- 6 测区地应力状态、岩爆或大变形等级。
- 7 工程设计或施工建议。

4.6 三维水压致裂法地应力测试

4.6.1 三维水压致裂法地应力测量一般在开挖隧道内进行，依据隧道场地情况布设近正交的 3 个钻孔，宜一个铅直孔，两个水平孔，钻孔宜采用小孔径，一般为 75mm。

4.6.2 三维水压致裂法宜采用双回路测量系统，主要仪器设备及技术要求应符合 4.2 节规定。

4.6.3 三维水压致裂法测量步骤及技术要求应符合 4.3 节规定。

4.6.4 三维水压致裂法测量中需使用罗盘等设备确定钻孔方位，同时需使用定向仪确定水平和垂直孔压裂缝的倾角及孔壁裂缝的空间位置。

4.6.5 三维水压致裂法各测段压裂参数确定、垂直钻孔平面应力计算、破裂缝角度计算与常规单孔测量相同。

4.6.6 三维水压致裂法参与计算的各孔应力取值时，单孔内各测段应力值差异不

大可取其均值；如个别测值（单一测段）明显异常，可先予以剔除。

4.6.7 三维地应力的大小和方向应按附录 C 中三维水压致裂法地应力计算方法计算，不同于常规水压致裂计算方法。

4.6.8 测量报告内容同 4.5 节，计算结果应包括空间 6 个应力分量的大小、3 个主应力的大小、方位角和倾角。

5 空心包体应力解除法

5.1 一般规定

5.1.1 空心包体应力解除法适用于完整或较完整岩体地应力测量。

5.1.2 空心包体应力解除法适用于开挖隧道内的三维地应力测量。

5.1.3 空心包体应力解除法测量应符合下列假定：岩石是均值、各向同性的线弹性体。

5.1.4 测点布置前应搜集工程资料，除附录 A 中 A.0.1 条包含的内容外，还宜包括下列内容：

- 1 隧道的设计资料。
- 2 隧道的施工进度、爆破时间等。
- 3 钻探岩样的物理力学性质试验报告。

5.1.5 测点布置时除满足 3.1.2 条要求外，还应符合下列原则：

- 1 远离较大开挖体。
- 2 测点应位于未受工程扰动的原岩应力区。
- 3 为研究地应力状态随深度变化的规律，测点应尽量布置在多个高程。
- 4 为研究地应力对特定隧道布置的影响，测点应尽量靠近该区域。
- 5 测点位置应充分考虑施工进度、爆破、排渣、支护、防水等影响，避免交叉作业。

5.1.6 测量钻孔除满足 3.3 节要求外还应符合下列要求：

1 隧道测量钻孔数量应根据区域地应力水平、地质构造复杂程度、隧道长度、埋深、工程问题等因素综合确定。

2 测量钻孔应垂直隧道边墙，离底板高度宜 1.6m 左右，深度应大于 1~2 倍隧道断面最大尺寸。

3 测量钻孔应全程取芯，观察岩芯完整性，控制钻孔平直度、孔径偏差及大小孔同心度，要求孔壁光滑、干燥。

4 成孔后钻孔仰角宜为 $3\sim 5^\circ$ ，便于排水排渣。

5 套芯钻成孔后，孔底应无残留岩芯。

- 6 用导向钻头磨平孔底并钻取导向孔，精确量测钻孔深度。
- 7 换用小实心钻头钻出测量用小孔，用水冲洗干净，再用酒精或丙酮擦洗。
- 8 小孔深度应与应力计长度相匹配。
- 9 若由钻杆进尺确定大孔和小孔深度时，应停止钻进，打开夹具，使钻杆处于自由状态，避免钻杆挠度变形影响量尺精度。
- 10 若取出岩芯破碎不能满足测量要求时，应继续打钻直到取得完整岩芯。

5.2 测量系统

5.2.1 试验应采取下列仪器设备：

- 1 钻机及钻具。
- 2 岩芯围压率测定仪。
- 3 智能数字应变仪。
- 4 空心包体应变计。
- 5 钻孔定向仪。
- 6 安装杆。
- 7 地应力钻头。
- 8 洗孔器、扶正器等配件。

5.2.2 主要仪器设备的技术指标应符合下列规定：

- 1 钻机应采用履带式钻机或坑道钻机，根据隧道轮廓尺寸及施工技术选择钻机型号，配备 $\phi 42$ 或 $\phi 50$ 地质钻杆和 $\phi 130$ 取芯管。
- 2 岩芯围压率测定仪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 70 MPa；压力表或压力传感器量程宜为 0~60 MPa，灵敏度 0.1 MPa。
- 3 智能数字应变仪应具有实时采集、监测、显示、存储、查询和采集频率可调的功能，满足防水、防尘要求，采用 16 路设计，采样频率大于 1Hz，分辨率大于 1 个 $\mu \varepsilon$ 。
- 4 空心包体应变计宜由环氧树脂分层浇注，中间部位沿同一圆周以 120° 间距嵌入 3 组应变从，每组应变从由 4 个方向的应变片构成，每片与应力计轴线夹角分别为 0°、45°、90° 和 135°，应变计内宜设温度补偿应变片，应变计外径宜为 36mm。

- 5 钻孔定向仪分辨率宜高于 1° ，具有防水绝缘功能。
- 6 安装杆应具有高强、轻便和快接特点，每根长度宜 1m。
- 7 地应力钻头直径误差应小于 1.5mm，套芯钻孔直径应为小钻孔直径 3 倍以上，取芯钻头和导向钻头外径宜为 130mm，小实心钻头外径宜为 37mm，应根据地层岩性选用地应力钻头。

5.2.3 测量系统的标定应符合下列规定：

- 1 智能数字应变仪应由国家计量检定单位定期标定。
- 2 使用前查验应力计各元件的标准阻值及性能参数。
- 3 率定用压力表或压力传感器应依据相关规范采用标准压力表校准或标定。
- 4 定向仪在使用前应采用经计量检定的罗盘标定误差。

5.2.4 测量系统的检查应符合下列规定：

- 1 按合格证书检查应力计的技术参数。
- 2 将应力计与智能数字应变仪连接，设置各通道的电桥类型、灵敏系数并调零，检查采集系统工作状态。
- 3 小孔钻头经多次使用后应更换或检查其外径是否满足孔径或应力计要求。

5.3 测量步骤及要求

5.3.1 空心包体应力解除法应包括开孔、钻大孔、钻喇叭口、钻小孔、洗孔、空心包体应力计的安装、套芯应力解除、围压率定实验等步骤。

5.3.2 为了防止钻头乱晃，开始打孔前宜用电锤和凿子在预先画好的打孔位置凿 5—10 mm 深的孔。

5.3.3 钻大孔时宜用直径 130 mm 的钻头沿开孔的位置钻孔，钻至 1—2 倍隧道断面最大尺寸。

5.3.4 钻喇叭口时宜用尖钻头在钻孔中磨出一个喇叭形状的缺口，以方便之后的小孔成形以及空心包体应力计的安装，同时还能保证大孔和小孔的同心度。喇叭孔的进尺宜为 5 cm，钻机的钻速开始时为一档，压力为 2 MPa，进尺 1 cm 后，钻速增加到二档，压力增加到 4 MPa。

5.3.5 钻小孔时宜用直径约 36 mm 的小钻头顺着喇叭形缺口向下钻进约 27cm，并取

出小岩芯。钻机的钻速开始时为一档，压力为 2MPa，进尺 1cm 后，钻速增加到三档，压力增加到 5MPa。因为小孔的质量会影响测量结果，因此在钻小孔时尽量保持同一个钻速和压力。

5.3.6 小孔钻好后，宜将民用纱布缠绕在擦孔器上，用丙酮或酒精浸湿纱布，反复擦洗小孔油污。再换上干纱布反复擦小孔直至无明显粉岩屑，保证粘结剂将包体与小孔壁粘牢。

5.3.7 空心包体应力计的安装时，应用砂纸将空心包体应力计外侧圆柱面打磨干净，按比例配制好粘结剂，在空心包体的空腔内倒入适量的粘结剂，固定好销钉，将空心包体应力计安装在定向器上。慢慢地将其送入大孔中，在将要把空心包体应力计送入小孔时要特别注意慢推，以保证空心包体应力计能够完好地进到小孔中。前端进入小孔 20 cm 左右时，应注意将空心包体应力计筒体部分缓慢推入。再向前推进时应注意固定销的剪断，固定销剪断后向前推进 8 cm（活塞工作长度），此时空心包体应力计就成功地安装于小孔中。

5.3.8 安装空心包体应力计 24h 后，粘结剂固化。记下定向器所显示的空心包体应力计的偏角，并用罗盘测量出钻孔的方位和倾角，然后将推杆和定向器小心地从钻孔中拔出。用铁丝将空心包体的电绳线从 130mm 的钻头和岩芯套筒、钻杆中穿出，将钻头、岩芯套筒和钻杆送入孔中。接通应变仪，每隔 10min 读数一次，连续三次读数相差不超过 $5\mu\varepsilon$ 时，即认为稳定，并将此读数作为初始值。

5.3.9 套芯地应力解除时，为了预防钻机的转速和压力的变化导致的岩芯直径的变化，解除时应尽量保持统一的温度和压力。钻机的钻速开始时为一档，压力为 3MPa，进尺 1cm 后，钻速增加到三档，压力增加到 9MPa。套孔解除至一定深度后，应变计读数趋于稳定。之后可每隔 5min 读数一次，连续三次读数之差不超过 $5\mu\varepsilon$ ，可认为读数稳定，不再解除。钻机停止后继续采集两次数据。

5.3.10 围压率定实验目的是测量弹性模量和泊松比，该实验操作应符合下列规定：

1 将套孔岩芯置于圆筒油压缸中，使应变片位于油缸中间位置，将应力计上的导线连接到电桥转换装置中，在压力为 0MPa 的情况下，读取应力计的两组数据作为初始读数；

2 用手动油压泵对套孔岩芯加压，围压引起的空心包体应变计的应变值由数据采集器根据指令自动采集和记录。压力每增加 2MPa 记录一次读数，直至压力增加到 10 MPa。然后卸压，同样每卸压 2MPa 记录一次读数；

3 待完全卸压后，将第 2 步的加压—卸压过程再重复数遍，该过程的卸压曲线用来计算岩石弹性模量和泊松比的值。

5.3.11 可采用以下方法消除应力解除过程中温度变化对应力测量的影响：

- 1 使用附加的补偿应变片进行湿度补偿；
- 2 循环水湿度补偿法；
- 3 完全温度补偿法；
- 4 直接完全温度补偿法；

5.4 数据处理

5.4.1 现场数据记录内容应包括下列各项：

- 1 测试地点、钻孔坐标、钻孔方位及倾角、钻孔深度。
- 2 应力计安装方位、倾角、转角。
- 3 应力解除数据及岩芯围压率定数据。

5.4.2 现场技术人员应严格审查应力解除曲线、岩芯围压率定曲线，剔除受节理裂隙及其他因素干扰的不可靠数据。

5.4.3 应按以下步骤计算地应力，具体计算方法应符合附录 D 的规定。

- 1 求解钻孔坐标系下地应力分量。
- 2 将钻孔坐标系下的地应力分量转换为大地坐标系下的地应力分量。
- 3 求解主应力大小及方向。

5.5 成果报告

5.5.1 空心包体应力解除法地应力测量成果报告应包括下列类容：

- 1 测量任务概况
- 2 测量方法
- 3 测量地点描述
- 4 测点岩石的地质描述

- 5 钻孔孔径测量和钻孔检查结果
- 6 测量过程
- 7 测量数据与结果描述
- 8 地应力数据分析与应用。
- 9 结论与建议

5.5.2 测量任务概况应说明任务来源，工作内容和技术要求，测量结果的用途及测量完成情况。

5.5.3 测量地点描述应包括测量地点的地理位置，测点附近的地形及主要地质构造，宜描述测点周围坑道、峒室布置及断面尺寸，测点钻孔布置及附近工程施工背景。宜附图件说明。

5.5.4 测点岩石的地质描述应包括岩性，胶结情况，岩芯采取率，具体内容可参考附录 A，宜附钻孔柱状图。

5.5.5 测量过程应包括测量步骤及所用设备，宜配以图表和照片说明。

5.5.6 测量数据与结果描述应包括下列内容：

- 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。

5.5.7 地应力数据分析与应用宜包括下列内容：

- 1 分析地应力场与区域地质构造的关系。
- 2 进行工程初始地应力状态评估（附录 G），给出高地应力区隧道岩爆等级或高地应力区隧道软岩大变形等级，并提出预案措施。
- 3 地下隧道开挖时，隧道横截面上的最大切向应力的计算，分析最大主应力方向与隧道轴线的角度对隧道稳定性的影响。
- 4 分析测点地应力特征，结合相关工程问题进行讨论。
- 5 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。

5.5.9 结论与建议应包括下列内容：

- 1 三个主应力的大小、方向、倾角。
- 2 地应力水平、隧道岩爆或大变形等级。
- 3 地应力优势方向及与区域现今构造运动的关系。
- 4 工程设计或施工建议。

6 滞弹性应变恢复法

6.1 一般规定

6.1.1 滞弹性应变恢复法可用于破碎-完整岩体地应力测量，适用于较大埋深的较软岩、软岩、硬岩的地应力测量。

6.1.2 滞弹性应变恢复法地应力测量应遵循以下原理：

1 岩芯在原始条件下受地应力的作用产生变形，岩芯被钻出后，即脱离应力场的作用，岩芯卸荷。当应力释放后，岩芯的弹性变形瞬时恢复，随后发生滞弹性恢复变形，有时也称非弹性恢复变形。

2 可根据卸荷后岩芯表面不少于六个独立方向的滞弹性应变恢复量，确定岩芯所处位置的三维地应力状态。

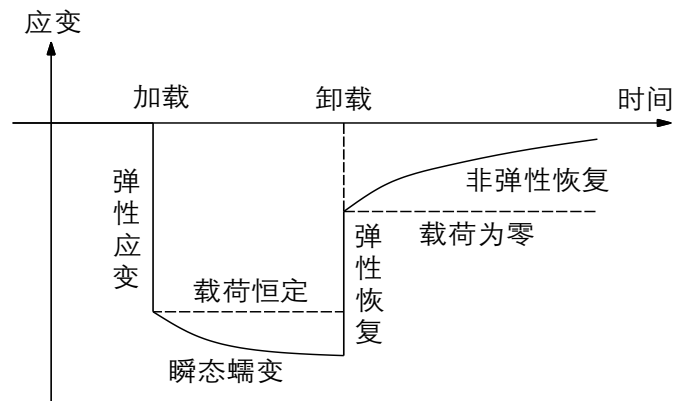


图 6.1.2 岩石流变性模式图

6.1.3 滞弹性应变恢复法测量应符合下列假定：岩石是均质、各项同性的黏弹性体。

6.1.4 测点布置前应搜集工程资料，若在隧道内开展测试，除附录 A 中 A.0.1 条包含的内容外，还宜包括下列内容：

- 1 隧道的设计资料。
- 2 隧道的施工进度、爆破时间等。
- 3 钻探岩样的物理力学性质试验报告。

6.2 测量系统

6.2.1 试验应采取下列仪器设备：

- 1 用于采集应变及温度数据的应变仪和外接扫描箱。
- 2 天平。

- 3 UPS 电源。
- 4 恒温水浴循环控制器或温度标定系统
- 5 变压器。
- 6 地应力岩芯滞弹性标定系统。
- 7 其他辅助和消耗性材料等。

6.2.2 主要仪器设备的技术指标应符合下列规定：

- 1 应变仪通道数应满足采集要求，精度应大于 $1 \mu \varepsilon$ 。
- 2 UPS 电源供电时间应大于 5 天。
- 3 恒温水浴循环控制器或温度标定系统精度应大于 0.1°C 。

6.3 测量步骤及技术要求

6.3.1 滞弹性应变恢复法地应力测量应包括钻取岩心、粘贴应变片、滞弹性恢复应变采集、滞弹性应变恢复柔量确定等步骤。

6.3.2 钻取岩心时应进行岩心定向，定向岩心长度应大于 15cm，如果无法定向可采用后期钻孔摄像定位，或根据地应力计算结果结合构造特征进行主应力方向判别。从岩芯被钻取到开始测量的时间宜小于 5h，且越快越好。

6.3.3 粘贴应变片前应清洗、擦干、打磨岩心，应选择不少于六个独立方向进行应变片的粘贴，可根据情况每个方向粘贴 2 个应变片，以保证数据的可靠性。

6.3.4 贴好应变片后应将岩芯包裹密封，然后放入恒温环境并开始测量，宜间隔 10 min 采集 1 组数据，也可用连续 10 组数据的平均值，一个样品的测量时间为 5-7 天。

6.3.5 滞弹性应变恢复柔量确定时，可对所测量岩芯样品进行单轴和三轴应力环境加载，待应变长期稳定后进行卸载，得到对应岩芯样品的滞弹性应变恢复柔量。由于滞弹性应变恢复柔量实验比较困难，也可根据前人研究成果，取剪切与体积模式非弹性应变恢复柔量的比值为定值的假设，计算 ASR 法地应力测量结果。

6.4 数据处理

6.4.1 现场技术人员应严格审查岩心滞弹性应变恢复曲线，剔除受节理裂隙及其他因素干扰的不可靠数据。

6.4.2 对于常规三轴压缩实验（ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 围压）岩石剪切和体积模式的滞弹性应变恢

复柔量 $Jas(t)$ 和 $Jav(t)$ 可通过下式计算：

$$Jav(t) = \frac{\varepsilon_{1a} + 2\varepsilon_{3a}}{\sigma_1 + 2\sigma_3}, Jas(t) = \frac{\varepsilon_{1a} - \varepsilon_{3a}}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6.4.2)$$

式中： $Jas(t)$ —剪切变形模式的非弹性应变恢复柔量（ Mpa^{-1} ）；

$Jav(t)$ —体积变形模式的非弹性应变恢复柔量（ Mpa^{-1} ）；

ε_{1a} —轴向滞弹性恢复应变；

ε_{3a} —径向滞弹性恢复应变；

σ_1 —轴向应力（ Mpa ）；

σ_3 —径向应力（ Mpa ）。

6.4.3 获取应变观测值时，应选取测试后期滞弹性恢复应变的稳定数值作为计算采用的应变观测值。

6.4.4 施 6.3 节测量步骤可得到应变观测值，通过最小二乘法计算可得岩心坐标系下的应变张量。

6.4.5 应按以下步骤计算地应力，具体计算方法应符合附录 E 的规定。

1 将岩心坐标系中的应变分量向地理坐标系转换，得到地理坐标系下的应变张量。

2 求解三个主应变，并结合钻孔方位和岩芯表面标志线的方向计算得到主应变的方位角和倾角。

3 由滞弹性应变计算主应力 σ_i 的（ $i=1, 2, 3$ ）的表达式如下：

$$\sigma_i = e_i(t) / Jas(t) + e_m(t) / Jav(t) + p_0 \quad (6.4.5)$$

式中： $e_i(t)$ —滞弹性偏应变， $i=1, 2, 3$ ；

$e_m(t)$ —平均正应变；

$Jas(t)$ —剪切变形模式的非弹性应变恢复柔量（ Mpa^{-1} ）；

$Jav(t)$ —体积变形模式的非弹性应变恢复柔量（ Mpa^{-1} ）；

p_0 —孔隙压力（ Mpa ）。

4 主应力方位与主应变方位相同。

6.5 成果报告

6.5.1 滞弹性应变恢复法地应力测量成果报告应包括下列类容：

- 1 测量任务概况
- 2 测量方法
- 3 测量地点描述
- 4 测点岩石的地质描述
- 5 现场应变片布置方式和计算方法
- 6 测量过程
- 7 测量数据与结果描述
- 8 地应力数据分析与应用。
- 9 结论与建议

6.5.2 测量任务概况应说明任务来源，工作内容和技术要求，测量结果的用途及测量完成情况。

6.5.3 测量地点描述应包括测量地点的地理位置，测点附近的地形及主要地质构造，宜描述测点周围坑道、峒室布置及断面尺寸，测点钻孔布置及附近工程施工背景。宜附图件说明。

6.5.4 测点岩石的地质描述应包括岩性，胶结情况，岩芯采取率，测段岩芯深度、埋深、长度、直径，具体内容可参考附录 A，宜附钻孔柱状图。

6.5.5 应用图描述现场应变片布置方式及应变片通道数，应描述岩芯坐标系建立方式；应用表列出应变片各通道对应岩芯坐标系方向余弦，并列出主要计算公式。

6.5.6 测量过程应包括测量步骤及所用设备，宜配以图表和照片说明。

6.5.7 测量数据与结果描述应包括下列内容：

- 1 用图给出各测段不同应变通道及测试时环境温度随时间变化关系；
- 2 用表格列出计算采用的应变观测值；
- 3 用表格列出计算得出的最大主应力，中间主应力，最小主应力大小、方位、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。

6.5.8 地应力数据分析与应用宜包括下列内容：

- 1 概括钻孔各测段最大主应力的量值水平，分析测段数据间的差异性。
- 2 对所有测段的测量结果归纳分析，给出三个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。
- 3 分析地应力场与区域地质构造的关系。
- 4 进行工程初始地应力状态评估（附录 G），给出高地应力区隧道岩爆等级或高地应力区隧道软岩大变形等级，并提出预案措施。
- 5 地下隧道开挖时，隧道横截面上的最大切向应力的计算，分析最大主应力方向与隧道轴线的角度对隧道稳定性的影响。
- 6 分析测点地应力特征，结合相关工程问题进行讨论。
- 7 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。

6.5.9 结论与建议应包括下列内容：

- 1 三个主应力的大小、方向、倾角。
- 2 地应力水平、隧道岩爆或大变形等级。
- 3 地应力优势方向及与区域现今构造运动的关系。
- 4 工程设计或施工建议。

7 声发射法

7.1 一般规定

7.1.1 声发射法适用于完整、较完整的硬质岩地应力测量。

7.1.2 声发射法地应力测量应遵循以下原理：

1 材料受外力作用会出现变形或裂纹扩展，在其破坏过程中产生瞬时应变能将以弹性波的形式快速释放而产生声发射。

2 运用检测设备采集单轴压缩试验下岩石声发射信号特征参数，通过分析试样内部裂纹的发展情况，可利用 Kaiser 效应点确定岩石所承受过的最大应力。

7.1.3 测点布置前应搜集工程资料，若在隧道内开展测试，除附录 A 中 A.0.1 条包含的内容外，还宜包括下列内容：

- 1 隧道的设计资料。
- 2 隧道的施工进度、爆破时间等。
- 3 钻探岩样的物理力学性质试验报告。

7.2 测量系统

7.2.1 试验应采取下列仪器设备：

- 1 钻机及钻具。
- 2 定向设备。
- 3 岩石切割机。
- 4 声发射传感器。
- 5 加载设备。
- 6 记录仪。

7.2.2 主要仪器设备的技术指标应符合下列规定：

- 1 定向设备应能确定岩样原始方位和倾角。
- 2 岩石试样可采用圆柱形或方柱形试样，试样大小应满足测试元件安装和加载设备要求。
- 3 声发射传感器宜选用中低频传感器，外壳宜选用不锈钢材料。

4 加载设备应能控制加载速率。

7.3 测量步骤及技术要求

7.3.1 声发射法地应力测量应包括取定向岩样、试验样品制备、试验准备、加载试验等步骤。

7.3.2 取定向岩样时需保证岩样定向及大小和数量满足制样和试验要求，若采用钻孔取芯采取岩样，应根据前一次岩芯完整度预测测点岩芯完整度，若岩芯完整，则可开展测点定向岩芯钻取，如果无法定向可采用后期钻孔摄像定位或古地磁法确定岩芯原始方位。

7.3.3 试验样品制备时应按照定向岩样的原始方位和倾向，将岩样恢复到现场原始状态，并在岩样上寻找一个近似的水平面，以正北作为 X 方向，建立 X、Y、Z 空间坐标系，在 X、Y、Z、 $X45^\circ Y$ 、 $Y45^\circ Z$ 、 $Z45^\circ X$ 六个方向切取试样，为了获得测试数据的统计规律，每个方向宜制备 5~10 个试样。

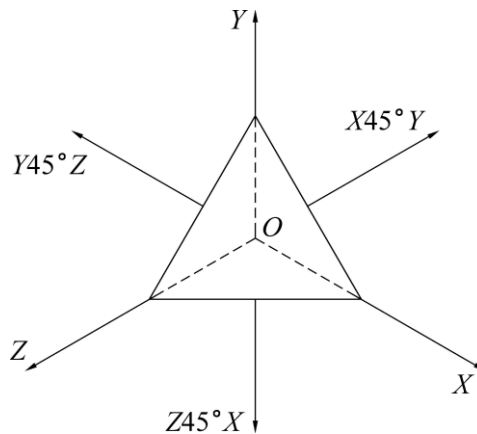


图 7.3.3 试样定向制取方向

7.3.4 试验准备宜按下列步骤及要求进行：

1 试样端部处理：试验前应在试样上、下端涂抹一层硬脂酸和凡士林的混合物(1:1)，以消除试样加载过程中上、下端摩擦和应力集中产生的端部效应及所处环境的背景噪声对试样本身声发射信号的干扰。

2 传感器布置：传感器应布置于试样中部位置，以避免试样顶、底面缺陷及不平行度对试件承受均匀应力的影响。传感器与试样之间宜采用凡士林作为耦合剂，并排除二者之间的空气，再用橡胶圈将传感器在该位置处固定。

3 仪器参数设置：将声发射前置放大器增益值设置为 40dB，以接收试样产生的全

部声发射信号，同时有效排除背景噪声干扰信号。

7.3.5 加载试验宜按下列步骤及要求进行：

- 1 在加载设备上分别对空间 6 个方向的所有试样进行单轴加载，加载时应控制加载速率恒定，直至试样破坏；
- 2 加载过程中计算机全程记录声发射信号、荷载大小和试验时间，并生成时间与荷载、时间与声发射特征值关系曲线。

7.4 数据处理

7.4.1 宜按下列要求确定 Kaiser 效应特征点：

- 1 不应选取试样初始声发射信号出现点作为 Kaiser 效应特征点，以消除由试样制备产生的裂纹和本身内部存在裂纹在受压闭合时产生声发射信号的影响。
- 2 宜结合声发射能量、振铃计数等多种特征参数确定声发射信号激增点，作为 Kaiser 效应特征点。

7.4.2 应按以下步骤计算地应力，具体计算方法应符合附录 F 的规定。

- 1 计算每个试样 Kaiser 效应特征点对应的应力值。
- 2 根据每个试样 Kaiser 效应特征点对应的应力值计算 X、Y、Z、 $X45^\circ$ Y、 $Y45^\circ$ Z、 $Z45^\circ$ X 六个方向的应力分量。
- 3 根据六个方向的应力分量求解主应力大小和方向。

7.5 成果报告

7.5.1 声发射法地应力测量成果报告应包括下列类容：

- 1 测量任务概况
- 2 测量方法
- 3 测量地点描述
- 4 测点岩石的地质描述
- 5 测点加工后试样尺寸
- 6 测量过程
- 7 测量数据与结果描述
- 8 地应力数据分析与应用。

9 结论与建议

7.5.2 测量任务概况应说明任务来源，工作内容和技术要求，测量结果的用途及测量完成情况。

7.5.3 测量地点描述应包括测量地点的地理位置，测点附近的地形及主要地质构造，宜描述测点周围坑道、峒室布置及断面尺寸，测点钻孔布置及附近工程施工背景。宜附图件说明。

7.5.4 测段岩石的地质描述应包括岩性，胶结情况，岩芯采取率，测段岩芯深度、埋深、长度、直径，具体内容可参考附录 A。

7.5.5 测量过程应包括测量步骤及所用设备，宜配以图表和照片说明。

7.5.6 测量数据与结果描述应包括下列内容：

- 1 用图给出各试样的声发射特征参数曲线；
- 2 用表格列出各试样 Kaiser 效应特征点、主应力大小、方向、倾角；
- 3 应描述各试样加载过程，测量过程中遇到的问题。简述各测点测量结果并对测量结果进行简要评价和判别。

7.5.7 地应力数据分析与应用宜包括下列内容：

- 1 分析地应力场与区域地质构造的关系。
- 2 进行工程初始地应力状态评估（附录 G），给出高地应力区隧道岩爆等级或高地应力区隧道软岩大变形等级，并提出预案措施。
- 3 地下隧道开挖时，隧道横截面上的最大切向应力的计算，分析最大主应力方向与隧道轴线的角度对隧道稳定性的影响。
- 4 分析测点地应力特征，结合相关工程问题进行讨论。
- 5 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。

7.5.8 结论与建议应包括下列内容：

- 1 三个主应力的大小、方向、倾角。
- 2 地应力水平、隧道岩爆或大变形等级。
- 3 地应力优势方向及与区域现今构造运动的关系。

4 工程设计或施工建议。

附录 A 地质描述内容

A.0.1 收集工程区的有关资料，宜包括下列内容：

- 1 区域地质构造图。
- 2 工程区工程地质图。
- 3 工程区地形图，并附典型剖面图。
- 4 工程布置图。
- 5 主要建筑物位置、尺寸、轴线方向。
- 6 工程区岩体成层建造或产出状态，重要结构面产状及特性。
- 7 工程区内岩体应力特征。

A.0.2 测量洞资料宜包括下列内容：

- 1 测量洞编号、位置、洞口高程、轴线方向。
- 2 测量洞展示图，并附典型剖面图。
- 3 岩石名称、结构、构造，主要矿物成分、颜色。
- 4 各类结构面产状、性质、延伸长度、充填物性质。
- 5 断层位置、产状、宽度、断层带性质。
- 6 地下水出露位置、类型、性质、渗水量。
- 7 岩体分类。
- 8 风化、卸荷带类型。
- 9 岩体应力特征。

A.0.3 井、坑、边坡资料参照 A.0.2 内容。

A.0.4 测量钻孔段地质描述应包括下列内容：

- 1 测量钻孔的编号、位置、高程。
- 2 测量钻孔段桩号、测量孔布置。
- 3 岩石名称、岩体分类、结构，主要矿物成分、颜色、风化程度。
- 4 各类结构面位置、产状、性质、连续性。

A.0.5 测点地质描述应包括下列内容：

- 1 测量钻孔位置、孔口高程、轴线方向。

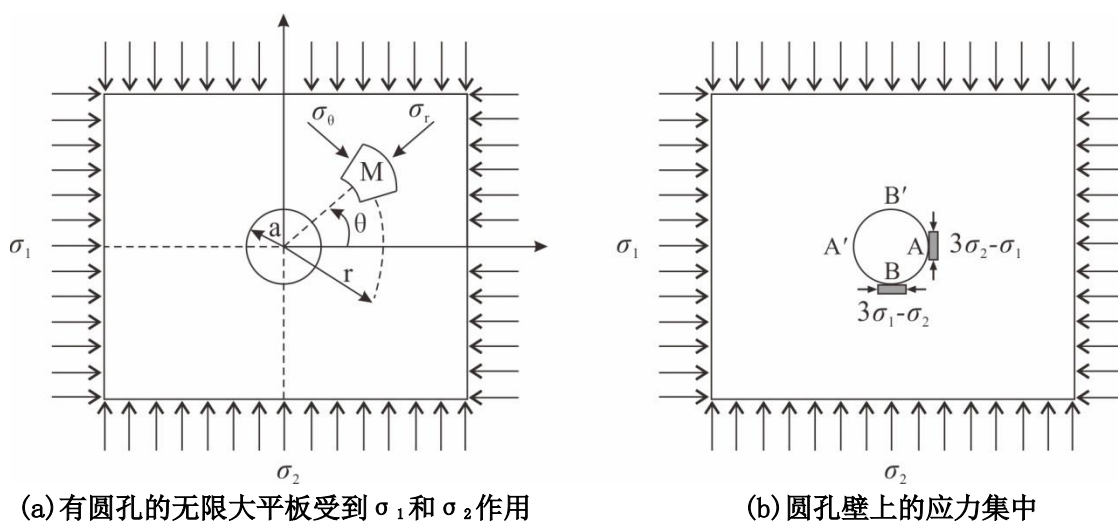
- 2 测点位置。
- 3 岩石名称、结构。
- 4 结构面位置、产状、性质、充填物性质。
- 5 测量钻孔柱状图及岩体质量指标（RQD）。水压致裂法测量钻孔应有透水性指标。
- 6 测量钻孔内岩体应力特征。
- 7 测量钻孔钻进过程中的情况。

附录 B 水压致裂法的计算方法

B.0.1 水压致裂法地应力测量以弹性力学为理论基础，基于三个基本假定：

- 1 岩体为各向同性、均质、线弹性；
- 2 岩体完整性好，压裂液体对岩石来说是非渗透性的；
- 3 假设岩体中有一个主应力方向与孔轴平行，一般为垂向主应力。

B.0.2 在 B.0.1 理论和假设前提下，水压致裂的力学模型通常可以简化为无限大薄板中的平面应力问题，如图 B.0.2 所示：



(a)有圆孔的无限大平板受到 σ_1 和 σ_2 作用

(b)圆孔壁上的应力集中

图 B.0.2 水压致裂法应力测量的力学模型

B.0.3 当最大水平主应力 σ_1 和最小水平主应力 σ_2 作用在有一半径为 a 的圆孔的无限大平板上，根据弹性力学理论，圆孔外任意一点 M 处的应力大小为：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (\text{B.0.3-1})$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (\text{B.0.3-2})$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (\text{B.0.3-3})$$

式中： σ_r —点 M 的径向应力；

σ_θ —切向应力 (MPa)；

$\tau_{r\theta}$ —剪应力 (MPa)；

r —点 M 到圆孔中心点的距离 (m)。

θ —从 σ_1 方向逆时针偏转至 M 的角度 ($^\circ$)。

B.0.4 水平主应力 σ_1 和 σ_2 在圆孔孔壁处，即 $r=a$ 处引起的应力状态为：

$$\sigma_r = 0 \quad (\text{B.0.4-1})$$

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_1 + \sigma_2) - 2(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \quad (\text{B. 0. 4-2})$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (\text{B. 0. 4-3})$$

式中： σ_r —点 M 的径向应力（MPa）；

σ_{θ} —切向应力（MPa）；

$\tau_{r\theta}$ —剪应力（MPa）；

θ —从 σ_1 方向逆时针偏转至 M 的角度（°）；

σ_1 —最大水平主应力（MPa）；

σ_2 —最小水平主应力（MPa）。

B. 0. 5 此时图 B. 0. 2(b)所示的孔壁 A、B 两点及其对称处 A'，B' 的应力集中分别为：

$$\sigma_A = \sigma_{A'} = 3\sigma_2 - \sigma_1 \quad (\text{B. 0. 5-1})$$

$$\sigma_B = \sigma_{B'} = 3\sigma_1 - \sigma_2 \quad (\text{B. 0. 5-2})$$

式中： σ_A —A 点的应力集中（MPa）；

$\sigma_{A'}$ —A 点对称点 A' 的应力集中（MPa）；

σ_B —B 点的应力集中（MPa）；

$\sigma_{B'}$ —B 点对称点 B' 的应力集中（MPa）；

σ_1 —最大水平主应力（MPa）；

σ_2 —最小水平主应力（MPa）。

B. 0. 6 由于 $\sigma_1 > \sigma_2$ ，当圆孔内施加的钻井液压大于孔壁上岩石所能承受的极限压力值时，在最小切向应力的位置上将产生张破裂，即点 A 与其对称点 A' 处。并且破裂将沿着平行于最大主应力的方向扩展。此时将导致孔壁产生破裂的钻井液压称为初始破裂压力 P_b ，孔壁产生破裂的条件为：

$$P_b = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T - P_0 \quad (\text{B. 0. 6})$$

式中： P_b —初始破裂压力（MPa）；

σ_1 —最大水平主应力（MPa）；

σ_2 —最小水平主应力（MPa）；

T —岩体抗拉强度（MPa）；

P_0 —孔隙压力 (MPa)。

B. 0. 7 当孔壁破裂产生后, 若继续对压裂段注液增压, 裂缝将向纵深处扩展。此时马上停止注液增压, 并保持压裂回路为密闭状态, 裂缝将停止扩展。

B. 0. 8 在地应力场的作用下, 张开的裂缝将迅速趋向闭合。裂缝处于临界闭合状态时的平衡压力称为瞬时关闭压力 P_s , 数值上它等于垂直裂缝面的最小水平主应力, 即:

$$P_s = \sigma_2 \quad (\text{B. 0. 8})$$

式中: P_s —瞬时关闭压力 (MPa);

σ_2 —最小水平主应力 (MPa)。

B. 0. 9 当再次对封隔段增压, 使闭合裂缝重新张开时, 即可得到破裂重张压力 P_r 。由于此时的岩石已经破裂, 岩石抗拉强度 T 为零, 则:

$$P_r = 3\sigma_2 - \sigma_1 - P_0 \quad (\text{B. 0. 9})$$

式中: P_r —破裂重张压力 (MPa);

σ_1 —最大水平主应力 (MPa);

σ_2 —最小水平主应力 (MPa);

P_0 —孔隙压力 (MPa)。

B. 0. 10 由式(B. 0. 9)和式(B. 0. 6)可得岩体的抗拉强度为:

$$T = P_b - P_r \quad (\text{B. 0. 10})$$

式中: T —岩体抗拉强度 (MPa);

P_b —初始破裂压力 (MPa);

P_r —破裂重张压力 (MPa)。

B. 0. 11 垂向应力可近似于上覆岩体的重量:

$$\sigma_v = \gamma H \quad (\text{B. 0. 11})$$

式中: σ_v —垂向应力 (MPa);

γ —上覆岩体容重 (MN/m^3);

H —岩体埋深 (m)。

B. 0. 12 一般情况下测量钻孔为垂直孔, 此时常将最大水平主应力表示为 σ_H 、最小水平主应力表示为 σ_h 。则水压致裂法地应力测量经典公式可表示为:

$$\begin{aligned}\sigma_h &= P_s \\ \sigma_H &= 3P_s - P_r - P_0 \\ \sigma_v &= \gamma H\end{aligned}\tag{B. 0. 12}$$

式中： σ_H —最大水平主应力 (Mpa)；
 σ_h —最小水平主应力 (Mpa)；
 σ_v —垂向应力 (Mpa)；
 P_s —瞬时关闭压力 (Mpa)；
 P_r —破裂重张压力 (Mpa)；
 P_0 —孔隙压力 (Mpa)；
 γ —上覆岩体容重 (MN/m^3)；
 H —岩体埋深 (m)。

B. 0. 13 水压致裂全过程所得到的典型压力—时间曲线如图 B. 0. 13 所示。

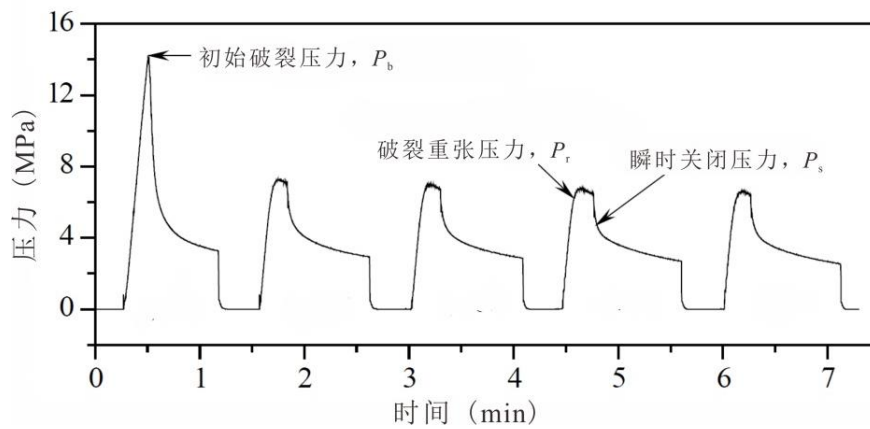


图 B. 0. 13 水压致裂应力测量典型压裂过程曲线

附录 C 三维水压致裂法的计算方法

C.0.1 以水压致裂法对完整围岩进行的单孔应力测试，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试。

C.0.2 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 β_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 C.0.2 所示。

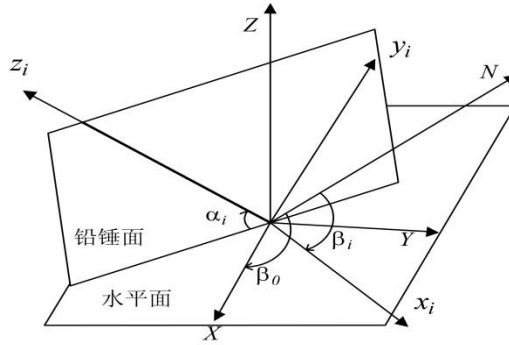


图 C.0.2 固定坐标系和钻孔坐标系空间位置示意图

C.0.3 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 σ_{A_i} 、 σ_{B_i} 和 A_i （即平面最大主应力、最小主应力、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 σ_{x_i} 、 σ_{y_i} 和 $\tau_{x_iy_i}$ ，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：

$$\begin{aligned} \sigma_{x_i} &= \sigma_x l_1^2 + \sigma_y m_1^2 + \sigma_z n_1^2 + 2\tau_{xy} l_1 m_1 + 2\tau_{yz} m_1 n_1 + 2\tau_{zx} n_1 l_1 \\ \sigma_{y_i} &= \sigma_x l_2^2 + \sigma_y m_2^2 + \sigma_z n_2^2 + 2\tau_{xy} l_2 m_2 + 2\tau_{yz} m_2 n_2 + 2\tau_{zx} n_2 l_2 \\ \tau_{x_iy_i} &= \sigma_x l_1 l_2 + \sigma_y m_1 m_2 + \sigma_z n_1 n_2 + \\ &\tau_{xy}(l_1 m_2 + l_2 m_1) + \tau_{yz}(m_1 n_2 + n_1 m_2) + \tau_{zx}(n_1 l_2 + l_1 n_2) \end{aligned} \quad (C.0.3-1)$$

式中： σ_{x_i} 、 σ_{y_i} 、 $\tau_{x_iy_i}$ —活动坐标系的应力分量（Mpa）。

σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} —固定坐标系的应力分量（Mpa）。

l、m、n—方向余弦。

钻孔倾角为 α_i ，方位角 β_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 C. 0. 3-1。

表 C. 0. 3-1 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 (C. 0. 3-1) 得：

$$\begin{aligned} \sigma_{xi} &= \sigma_x \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \cos^2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin 2(\beta_0 - \beta_i) \\ \sigma_{yi} &= \sigma_x \sin^2 \alpha_i \cos^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_y \sin^2 \alpha_i \sin^2(\beta_0 - \beta_i) + \sigma_z \cos^2 \alpha_i + \\ &\tau_{xy} \sin^2 \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{yz} \sin 2 \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \sin 2 \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) \quad (\text{C. 0. 3-2}) \\ \tau_{xiyi} &= 0.5(\sigma_x - \sigma_y) \sin \alpha_i \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{xy} \sin \alpha_i \cos 2(\beta_0 - \beta_i) \\ &\quad + \tau_{yz} \cos \alpha_i \cos(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \cos \alpha_i \sin(\beta_0 - \beta_i) \end{aligned}$$

式中： σ_{xi} 、 σ_{yi} 和 τ_{xiyi} —对 i 号钻孔实测得出的观测值。

α_i —钻孔倾角 (°)；

β_i —钻孔方位角 (°)；

β_0 —X 轴方位角 (°)。

σ_{xi} 、 σ_{yi} 和 τ_{xiyi} 与钻孔横截面内次主应力 σ_{Ai} 、 σ_{Bi} 存在如下关系：

$$\begin{aligned} \sigma_{xi} + \sigma_{yi} &= \sigma_{Ai} + \sigma_{Bi} \\ \sigma_{xi} - \sigma_{yi} &= (\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \cos 2A_i \\ 2\tau_{xiyi} &= (\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \sin 2A_i \end{aligned} \quad (\text{C. 0. 3-3})$$

式中： A_i —从 X_i 轴逆时针量至压裂缝的角度 (°)；

σ_{Ai} 、 σ_{Bi} —钻孔横截面内次主应力 (Mpa)。

将式(C. 0. 3-2)代入(C. 0. 3-3)得观测值方程组如下:

$$\sigma_K^* = D_{K1}\sigma_x + D_{K2}\sigma_y + D_{K3}\sigma_z + D_{K4}\tau_{xy} + D_{K5}\tau_{yz} + D_{K6}\tau_{zx} \quad (\text{C. 0. 3-4})$$

式中: $K = 3(i - 1) + j$, i 为测孔编号, $i = 1, 2, \dots, n$;

n —测孔总数, 等于或大于 3;

j —每个测孔中相应于式(C. 0. 3-3)观测值第一、第二和第三式的编号, $j = 1, 2, 3$;

σ_K^* —观测值 (Mpa) ;

D_{K1} 至 D_{K6} —观测值方程的应力系数, 当 $j = 1, 2, 3$ 时其相应值见说明表 C. 0. 3-2。

表 C. 0. 3-2 $j = 1 \sim 3$ 时的应力系数和观测值

	$3(i - 1) + 1$	$3(i - 1) + 2$	$3(i - 1) + 3$
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}	$-\sin 2\alpha_i \cdot \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$\sin 2\alpha_i \cdot \cos(\beta_0 - \beta_i)$	$-2\cos\alpha_i \cdot \sin(\beta_0 - \beta_i)$
σ_K^*	$\sigma_{Ai} + \sigma_{Bi}$	$(\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \cos 2A_i$	$(\sigma_{Ai} - \sigma_{Bi}) \sin 2A_i$

C. 0. 4 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:

$$\left[\begin{array}{ccc} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k1}A_{k2} & \dots \sum_{k=1}^n A_{k6}A_{k1} \\ \sum_{k=1}^n A_{k1}A_{k2} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \dots \sum_{k=1}^n A_{k6}A_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k1}A_{k6} & \sum_{k=1}^n A_{k2}A_{k6} & \dots \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \vdots \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}\sigma_K^* \\ \sum_{k=1}^n A_{k2}\sigma_K^* \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6}\sigma_K^* \end{Bmatrix} \quad (\text{C.0.4-1})$$

由式 (C.0.4-1) 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。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1} \\ \sigma_2 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W + 2\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1} \\ \sigma_3 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W + 4\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1} \end{aligned} \quad (\text{C.0.4-2})$$

式 (C.0.4-2) 中:

$$\omega = \cos^{-1} - \frac{Q/2}{\sqrt{-(P/3)^3}}$$

$$P = -J_1^2/3 + J_2 \quad (\text{C.0.4-3})$$

$$Q = -2J_1^3/27 + J_1J_2/3 - J_3$$

式 (C.0.4-3) 中: ω 、 P 、 Q 为计算过程中的中间变量;

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:

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

$$J_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (\text{C.0.4-4})$$

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

主应力方向由下式 (C.0.4-5) 中任二式

$$\begin{aligned}
 (\sigma_x - \sigma_i)l_i + \tau_{xy}m_i + \tau_{xz}n_i &= 0 \\
 \tau_{xy}l_i + (\sigma_y - \sigma_i)m_i + \tau_{yz}n_i &= 0 \\
 \tau_{zx}l_i + \tau_{yz}m_i + (\sigma_z - \sigma_i)n_i &= 0
 \end{aligned}
 \tag{C.0.4-5}$$

和方向余弦式 (C.0.4-6) 联立解得。

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1 \tag{C.0.4-6}$$

根据图 C.0.4 得主应力 σ_i 的倾角 α_i 和方位角 β_i 为

$$\begin{aligned}
 \alpha_i &= \sin^{-1}n_i \\
 \beta_i &= \beta_0 - \sin^{-1} \frac{m_i}{\sqrt{1 - n_i^2}}
 \end{aligned}
 \tag{C.0.4-7}$$

式中： α_i —主应力倾角 ($^\circ$)；

β_i —主应力方位角 ($^\circ$)；

n_i 、 m_i —主应力方向余弦；

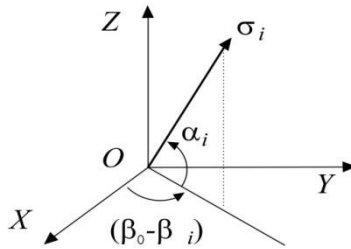
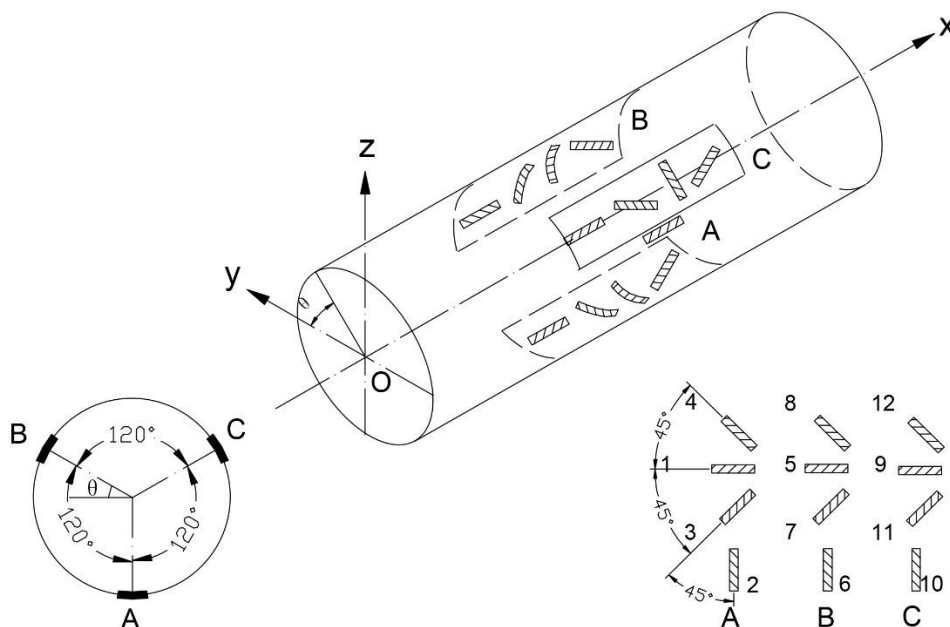


图 C.0.4 主应力的倾角和方位

附录 D 空心包体应力解除法的计算方法

D. 0. 1 空心包体应变计应变花的布置及应变花内应变片的位置如图 D. 0. 1 所示：



注：A、B、C 为三组应变花，1-12 为各应变片的编号

图 D. 0. 1 空心包体应变计应变花布置示意图

D. 0. 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：

$$\begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^n A_{k2}A_{k1} & \cdots & \sum_{k=1}^n A_{k6}A_{k1} \\ \sum_{k=1}^n A_{k1}A_{k2} & \sum_{k=1}^n A_{k2}^2 & \cdots & \sum_{k=1}^n A_{k6}A_{k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k1}A_{k6} & \sum_{k=1}^n A_{k2}A_{k6} & \cdots & \sum_{k=1}^n A_{k6}^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \vdots \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = E \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^n A_{k1}\epsilon_k \\ \sum_{k=1}^n A_{k2}\epsilon_k \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n A_{k6}\epsilon_k \end{Bmatrix} \quad (D. 0. 2-1)$$

三维地应力测试的观测方程组为：

$$E\epsilon_k = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \quad (D. 0. 2-2)$$

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 ；

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：

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

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

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

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

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

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

θ_i ——应变丛位置与钻孔坐标轴 x 的夹角 ($^\circ$)；

ψ_{ij} ——应变丛上应变片与应变计轴线的夹角 ($^\circ$)；

k_1, k_2, k_3, k_4 ——应变片修正系数。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。

D.0.3 计算三维主应力的大小、方向可参考附录 C 中(C.0.4-2)~(C.0.4-7)等计算公式求得。

附录 E 滞弹性应变恢复法的计算方法

E. 0.1 岩心应变观测值与岩心坐标系中应变分量的关系：设岩芯坐标系为 $o - x'y'z'$ 其中 z' 轴与岩芯长轴平行，应变观测值 b 与岩芯坐标系中应变分量 $\varepsilon'_x, \varepsilon'_y, \varepsilon'_z, \varepsilon'_{xy}, \varepsilon'_{yz}, \varepsilon'_{zx}$ 的关系式如下：

$$A\varepsilon' = b \quad (\text{E. 0.1})$$

式中： $\varepsilon' = [\varepsilon'_x, \varepsilon'_y, \varepsilon'_z, \varepsilon'_{xy}, \varepsilon'_{yz}, \varepsilon'_{zx}]^T$ 为岩芯坐标系中的应变分量；

A —系数矩阵；

b —应变观测值；

E. 0.2 以布置 9 个轴向的应变计为例，则 $b = [b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9]^T$ 为岩芯滞弹性应变恢复观测值。系数矩阵 A 的展开式如下：

$$A = \begin{bmatrix} l_1'^2 & m_1'^2 & n_1'^2 & 2l_1'm_1' & 2m_1'n_1' & 2n_1'l_1' \\ l_2'^2 & m_2'^2 & n_2'^2 & 2l_2'm_2' & 2m_2'n_2' & 2n_2'l_2' \\ l_3'^2 & m_3'^2 & n_3'^2 & 2l_3'm_3' & 2m_3'n_3' & 2n_3'l_3' \\ l_4'^2 & m_4'^2 & n_4'^2 & 2l_4'm_4' & 2m_4'n_4' & 2n_4'l_4' \\ l_5'^2 & m_5'^2 & n_5'^2 & 2l_5'm_5' & 2m_5'n_5' & 2n_5'l_5' \\ l_6'^2 & m_6'^2 & n_6'^2 & 2l_6'm_6' & 2m_6'n_6' & 2n_6'l_6' \\ l_7'^2 & m_7'^2 & n_7'^2 & 2l_7'm_7' & 2m_7'n_7' & 2n_7'l_7' \\ l_8'^2 & m_8'^2 & n_8'^2 & 2l_8'm_8' & 2m_8'n_8' & 2n_8'l_8' \\ l_9'^2 & m_9'^2 & n_9'^2 & 2l_9'm_9' & 2m_9'n_9' & 2n_9'l_9' \end{bmatrix} \quad (\text{E. 0.2})$$

式中： $l_i', m_i', n_i' (i = 1, \dots, 9)$ 是轴 a_1 到轴 a_9 相对 $o - x'y'z'$ 轴的方向余弦。方向余弦的具体数值与岩心表面应变计的布置方式有关。

E. 0.3 方程组 (E. 0.1) 中未知数 $n=6$ ，而方程数 $m=9$ ，可用最小二乘法求解，得出最可信答案。按最小二乘法原理，可按下式求解：

$$\varepsilon' = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (\text{E. 0.3})$$

E. 0.4 设地理坐标系为 $o - xyz$ ， x 轴指向北， y 轴指向东， z 轴垂直向下。因为岩芯坐标系是任意设定的，钻孔（岩芯）有时是倾斜的，而且岩芯坐标系的 $o - x'$ 轴的方向

位也不一定是向北的。因此岩芯坐标系与地理坐标系通常是不重和的。为了计算主应变（主应力）的方向、倾角和大小，需要将岩芯坐标系中的应变分量向地理坐标系转换。坐标转换的表达式如下：

$$\varepsilon = l\varepsilon'l \quad (\text{E. 0. 4})$$

式中： $l = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}$ 为岩芯坐标轴与地理坐标轴之间的方向余弦 ε' 为岩芯坐标

系中的应变张量， $\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$ 为地理坐标系中的应变张量。

E. 0. 5 由应变分量求主应变可通过解下列方程组得到：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x - \lambda & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y - \lambda & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z - \lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l \\ m \\ n \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{E. 0. 5-1})$$

上述方程组为齐次线性方程组，方程组非零解的必要和充分条件是系数行列式为零，即：

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x - \lambda & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y - \lambda & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{E. 0. 5-2})$$

行列式展开后为一元三次方程式，解该方程式可得到三个根 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ，它们是三个主应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ，将三个主应变逐个代回方程组（E. 0. 5-1）可求出三个主应变的方向余弦 $l_i, m_i, n_i (i = 1, 2, 3)$ ，且 $l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1$ 。

E. 0. 6 主应变的方位角 D_i 和倾角 v_i 可由方向余弦 $l_i, m_i, n_i (i = 1, 2, 3)$ 按下式求得，若 $l_i < 0$ ，则将 D_i 增加 180° 。在均匀各向同性的黏弹性介质中，主应变的方位与主应力的方位相同。

$$D_i = \arctan\left(\frac{m_i}{l_i}\right) \quad (\text{E. 0. 6-1})$$

$$v_i = \arcsin(n_i) \quad (\text{E. 0. 6-2})$$

式中： $l_i, m_i, n_i (i=1, 2, 3)$ — 三个主应变的方向余弦；

D_i — 主应变方位角 ($^\circ$) ；

V_i — 主应力方位角 ($^\circ$) 。

E. 0. 7 由滞弹性应变计算主应力 σ_i 的 ($i=1, 2, 3$) 的公式如下：

$$\sigma_i = e_i(t) / J_{as}(t) + e_m(t) / J_{av}(t) + p_0 \quad (\text{E. 0. 7-1})$$

式中： $e_i(t)$ — 非弹性偏应变， $i = 1, 2, 3$ ；

$e_m(t)$ — 平均正应变；

$J_{as}(t)$ — 剪切变形模式的非弹性应变恢复柔量 (Mpa^{-1}) ；

$J_{av}(t)$ — 体积变形模式的非弹性应变恢复柔量 (Mpa^{-1}) ；

P_0 — 孔隙压力 (Mpa) 。

设剪切与体积模式下岩石的非弹性应变恢复柔量比值为 k 即：

$$J_{as}(t) / J_{av}(t) = k \quad (\text{E. 0. 7-2})$$

则垂直应力可表示为：

$$\sigma_v = \left\{ \left[l_p^2 e_1(t) + m_p^2 e_2(t) + n_p^2 e_3(t) \right] / k + e_m(t) \right\} / J_{av}(t) + p_0 \quad (\text{E. 0. 7-3})$$

式中： $e_i(t)$ — 非弹性偏应变， $i = 1, 2, 3$ ；

$e_m(t)$ — 平均正应变；

$J_{av}(t)$ — 体积变形模式的非弹性应变恢复柔量 (Mpa^{-1}) ；

K — 柔量比；

l_p, m_p, n_p — 垂直应力与三个主应变之间的方向余弦。

P_0 — 孔隙压力 (Mpa) 。

同时，垂直应力可按上覆岩层自重计算：

$$\sigma_v = \gamma H \quad (\text{E. 0. 7-4})$$

式中： σ_v — 垂直应力 (Mpa) ；

γ — 上覆岩体容重 (MN/m^3) ；

H — 岩体埋深 (m) 。

联立 (E. 0. 7-1)、(E. 0. 7-2)、(E. 0. 7-3)、(E. 0. 7-4) 即可计算三位主应力大小。

附录 F 声发射法的计算方法

F.0.1 根据下式计算每个试样 Kaiser 效应特征点对应的应力值：

$$\sigma_k = 10P_k / F \quad (\text{F.0.1})$$

式中： σ_k —Kaiser 效应特征点应力 (Mpa)；

P_k —Kaiser 效应特征点对应的荷载 (KN)；

F —试件横截面积 (cm^2)。

F.0.2 基于每个试件 Kaiser 效应特征点对应的应力，根据下式计算 X、Y、Z、 $X45^\circ$ Y、 $Y45^\circ$ Z、 $Z45^\circ$ X 六个方向的应力分量。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_X = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X_i}}{n} \quad \sigma_{X45^\circ Y} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,X45^\circ Y_i}}{n} \\ \sigma_Y = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y_i}}{n} \quad \sigma_{Y45^\circ Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Y45^\circ Z_i}}{n} \\ \sigma_Z = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z_i}}{n} \quad \sigma_{Z45^\circ X} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{K,Z45^\circ X_i}}{n} \end{array} \right. \quad (\text{F.0.2})$$

式中： σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 为 X、Y、Z、 $X45^\circ$ Y、 $Y45^\circ$ Z、 $Z45^\circ$ X 六个方向的应力分量；

$\sigma_{K,X}$ 、 $\sigma_{K,Y}$ 、 $\sigma_{K,Z}$ 、 $\sigma_{K,X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{K,Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{K,Z45^\circ X}$ 为 X、Y、Z、 $X45^\circ$ Y、 $Y45^\circ$ Z、 $Z45^\circ$ X 六个方向各试件的 Kaiser 效应特征点对应的应力；

n —每个方向的试件数量。

F.0.3 根据 X、Y、Z、 $X45^\circ$ Y、 $Y45^\circ$ Z、 $Z45^\circ$ X 六个方向的应力分量，利用下列公式计算空间最大、中间、最小主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。即由三次方程得：

$$\sigma^3 - J_1 \sigma^2 + J_2 \sigma - J_3 = 0 \quad (\text{F.0.3-1})$$

求得各主应力，即

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_2 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \left(\frac{W+2\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} J_1 \\ \sigma_3 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \left(\frac{W+4\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} J_1 \end{cases} \quad (\text{F. 0. 3-2})$$

其中:

$$P = -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2; W = \arccos \left[-\frac{\theta}{2} \left(\frac{-P}{3} \right)^{-3/2} \right] \quad (\text{F. 0. 3-3})$$

$$\theta = -\frac{3}{27} J_1^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3 \quad (\text{F. 0. 3-4})$$

J_1 、 J_2 、 J_3 为应力状态得三个不变量, 分别为:

$$\begin{cases} J_1 = \sigma_X + \sigma_Y + \sigma_Z \\ J_2 = \sigma_X \sigma_Y + \sigma_Y \sigma_Z + \sigma_Z \sigma_X - \tau_{XY}^2 - \tau_{YZ}^2 - \tau_{ZX}^2 \\ J_3 = \sigma_X \sigma_Y \sigma_Z - \sigma_X \tau_{YZ}^2 - \sigma_Y \tau_{ZX}^2 - \sigma_Z \tau_{XY}^2 + 2\tau_{XY} \tau_{YZ} \tau_{ZX} \end{cases} \quad (\text{F. 0. 3-5})$$

τ_{XY} 、 σ_{YZ} 、 σ_{ZX} 按下式计算:

$$\begin{cases} \tau_{XY} = \sigma_{X45^\circ Y} - \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} \\ \tau_{YZ} = \sigma_{Y45^\circ Z} - \frac{\sigma_Y + \sigma_Z}{2} \\ \tau_{ZX} = \sigma_{Z45^\circ X} - \frac{\sigma_Z + \sigma_X}{2} \end{cases} \quad (\text{F. 0. 3-6})$$

σ_X 、 σ_Y 、 σ_Z 、 $\sigma_{X45^\circ Y}$ 、 $\sigma_{Y45^\circ Z}$ 、 $\sigma_{Z45^\circ X}$ 六个应力分量即为通过声发射试验确定得应力分量。

F. 0. 4 主应力的方向与坐标轴 X、Y、Z 夹角的方向余弦分别为 m_1 、 n_1 、 l_1 , 按下式计算:

$$\begin{cases} m_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) \tau_{YZ} + \tau_{XY} \tau_{XZ}}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}} l_i \\ n_i = \frac{(\sigma_i - \sigma_X)(\sigma_i - \sigma_Y) - \tau_{XY}^2}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}} \\ l_i = \frac{1}{\sqrt{1+A^2+B^2}} \end{cases} \quad (\text{F. 0. 4-1})$$

其中：

$$A = \frac{(\sigma_i - \sigma_X) \tau_{YZ} + \tau_{XY} \tau_{XZ}}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}}, B = \frac{(\sigma_i - \sigma_X)(\sigma_i - \sigma_Y) - \tau_{XY}^2}{(\sigma_i - \sigma_Y) \tau_{XZ} + \tau_{XY} \tau_{YZ}}, \quad i=1,2,3 \quad (\text{F. 0. 4-2})$$

主应力的倾角 α_i （仰角为正、俯角为负）和方位角 β_i （逆时针为正，顺时针为负）

按下式计算：

$$\begin{cases} \alpha_i = \arcsin n_i \\ \beta_i = \arcsin \frac{m_i}{\cos \alpha_i} \end{cases} \quad (\text{F. 0. 4-3})$$

式中： α_i —主应力与 XOY 平面的夹角，即倾角（°）；

β_i —主应力在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角，即方位角（°）；

附录 G 岩体初始应力场评估

G.0.1 没有岩体初始应力实测成果时，可根据地形和地质勘察资料，按下列方法对初始应力场作出评估：

1 较平缓的孤山体，一般情况下，初始应力的铅直向应力为自重应力，水平向应力不大于 $\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H$ 。

2 通过对历次构造形迹的调查和对近期构造运动的分析，以第一序次为准，根据复合关系，确定最新构造体系，据此确定初始应力的最大主应力方向。

3 当铅直向应力为自重应力，且是主应力之一时，水平向主应力较大的一个，可取 $0.8\gamma H \sim 1.2\gamma H$ 或更大。

4 在平原、丘陵地段，埋深大于 1000m，随着深度的增加，初始应力场逐渐趋向于静水压力分布；大于 1500m 以后，可按静水压力分布确定。

5 在峡谷地段，从谷坡至山体以内，可划分为应力松弛区、应力过渡区、应力稳定区和河底应力集中区。峡谷的影响范围，在水平方向一般为谷宽的 1 倍~3 倍。在谷底较深部位，最大主应力趋于水平且多垂直于河谷。

6 地表岩体剥蚀显著地区，水平向应力应按原覆盖层厚度计算，其覆盖层厚度应包括已剥蚀的部分。

G.0.2 有实测资料时，围岩初始地应力状态应根据地应力和岩石强度实测资料，结合隧道工程埋深、地形地貌、地层岩性、地质构造、新构造运动与开挖过程中出现的岩爆、岩芯饼化等特殊地质现象，按表 G.0.2 划分。

表 G.0.2 初始地应力状态划分基准表

岩性	初始地应力状态	主要现象	划分基准	
			最大初始地应力 σ_{max} (MPa)	岩石强度应力比 R/σ_{max}
硬质岩	极高地应力	岩芯常有饼化现象，开挖过程中时有岩爆发生，有岩块弹出，洞壁岩体发生剥离，新生裂缝多	$\sigma_{max} \geq 20$	$R/\sigma_{max} \leq 2$
	高地应力	岩芯时有饼化现象，开挖过程中可能出现岩爆，洞壁岩体有剥离和掉块现象，新生裂缝较多		$2 < R/\sigma_{max} \leq 4$
	中等地应力	开挖过程中洞壁岩体局部有剥离和掉块现象	$\sigma_{max} < 20$	$4 < R/\sigma_{max} \leq 7$
	低地应力	无上述现象		$R/\sigma_{max} > 7$
软质岩	极高地应力	岩芯时有饼化现象或缩径现象，开挖过程中洞壁岩体有剥离，易发生大变形，位移极为显著，持续时间长，不易成洞	$\sigma_{max} \geq 10$	$R/\sigma_{max} \leq 2$

高地应力	岩芯有饼化现象，开挖过程中洞壁岩体位移明显，成洞性差	$\sigma_{max} < 10$	$2 < R/\sigma_{max} \leq 4$
中等地应力	开挖过程中洞壁岩体有一定的位移，成洞性尚好		$4 < R/\sigma_{max} \leq 7$
低地应力	无上述现象		$R/\sigma_{max} > 7$

注：表中 R 为岩石单轴抗压强度（MPa）； σ_{max} 为岩体最大初始地应力（MPa）。地应力状态划分一般应同时满足两项指标。

本规范用词说明

1 执行本规范条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2) 表示严格，在正常情况均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为“应符合....的规定”或“应按....执行”。

中国工程建设标准化协会标准

铁路工程地应力测量技术规程

Technical regulations for In-situ Stress Measurement of Railway Engineering

T/CECS XXX—20XX

(条文说明)

目 次

1 总 则	1
3 基本规定	4
4 水压致裂法	5
4.1 一般规定.....	5
4.2 测量系统.....	5
4.3 测量步骤及技术要求.....	5
4.4 数据处理.....	6
4.6 三维水压致裂法地应力测试.....	6
5 空心包体应力解除法	7
5.1 一般规定.....	7
5.2 测量系统.....	7
5.3 测量步骤及要求.....	7
6 滞弹性应变恢复法	8
6.1 一般规定.....	8
6.2 测量系统.....	8
6.4 数据处理.....	8
7 声发射法	10
7.1 一般规定.....	10
7.2 测量系统.....	10
7.3 测量步骤及技术要求.....	10
7.4 数据处理.....	10
附录 G 岩体初始应力场评估	12

(本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题以及在执行中应注意的事项等予以说明,不具备与规范正文同等的效力,仅供使用者作为理解和把握暂行规范的参考。为了减少篇幅,只列条文号,未抄录原条文。)

1 总 则

1.0.1 地应力是铁路深埋隧道工程围岩稳定性评价和支护设计等领域的重要基础参数,高地应力是硬质岩岩爆和软质岩变形灾害的控制性因素。由于地应力的成因十分复杂,包括重力作用、构造运动、热应力、地形等多种因素,因此地应力大小和方向不能通过数学计算或模型分析获取,要了解一个地区的地应力状态,唯一的方法就是进行地应力测量。目前地应力测量方法包括水压致裂、应力解除、滞弹性应变恢复、钻孔崩落、震源机制解分析、断层滑动擦痕分析、岩石声发射、声波各向异性和差应变法等多种方法,每种方法的测量原理、测量设备、测量要求、测量技术及工艺各不相同,获取地应力的精确度也不一样。编制本规程的目的,是使地应力测量工作在铁路勘测设计及施工中达到规范化和行业标准化,使地应力测量报告编制有据可依。

根据测量基本原理的不同,绝对应力测量方法又可分为直接测量法和间接测量法。所谓直接测量法就是利用测量仪器直接测量和记录各种应力或应变分量,并由这些应力或应变分量和原岩应力的相互关系直接换算得到原岩应力值。间接测量法则是借助某些传感元件或媒介,测量和记录与岩体相关物理量的变化(如密度、泊松比、弹性波速等变化),然后通过相应的公式换算间接得到原岩应力值。目前,较为常用的绝对应力测量方法主要有水压致裂法、套芯应力解除法、应变恢复法、声发射法、钻孔崩落法、地球物理探测法等。

相对应力测量方法包括压磁法、压容法、体应变法及分量应变法等。

2003年国际岩石力学学会试验方法委员会推荐了三种地应力的测试方法,依次为应力解除法、水压致裂法和声发射法。另外,滞弹性应变恢复法是近年来发展起来的基于定向岩芯的深孔地应力测量方法。每种方法的测试原理、测试设备、测试要求、测试技术及工艺各不相同。

应力解除法是指利用电阻应变片作为传感元件,测量套钻解除后钻孔孔壁应变,根据弹性力学理论求解岩体内的三维地应力状态。应力解除法假定岩石是均质、连续

和各向同性的线弹性体，适用于各向同性的完整、较完整岩体。可分为孔径变形法、孔壁应变法、孔底应变法。通常所说的应力解除法一般指空心包体应力解除法，属于孔壁应变法的一种，为间接法，测试技术成熟，国内外广泛应用于工程的施工阶段。最大的优点是单孔单点可测量岩体的三维地应力，精度高。缺点是钻孔质量要求严格，在岩体破碎或岩芯饼化情况下难以安装传感器、难以解除完整岩芯。

常规水压致裂法假定地应力的三个空间主应力一个为竖直方向，即自重应力的方向，另外两个则为水平方向。因此，往钻孔里注入高压水使孔壁开裂，根据弹性力学的理论便可求得水平面内的最大主应力和最小主应力的大小和方向。本质上，它是一种二维地应力测量方法，为直接法，特别适用于隧道的勘察阶段。其突出优点是可连续测试深部岩体地应力状态，缺点是要求钻孔岩体完整，精度偏低。

滞弹性应变恢复法（ASR）假定岩石为黏弹性体，基于流变模型，建立测试和求解地应力的理论和技术。岩芯被钻出后，即脱离应力场的作用，岩芯卸荷。由于岩石的黏弹性特性，岩芯除了立即发生弹性应变恢复以外，还会随时间发生滞弹性应变恢复，根据获取岩芯表面不同方向滞弹性应变恢复量，可以确定三维地应力状态。ASR法与其他地应力测量方法相比具有成本低、效率高且不受钻孔深度和温度的限制，可进行三维应力测量等优点，只要能够获取定向岩芯，就可进行ASR法的测量，确定主应力的方向。该方法的缺点是非直接测量，需要实验确定岩石的滞弹性应变恢复柔量才能够计算地应力大小。在国内已成功获取地应力相关数据，并与其他测量方法进行对比，已充分证明此方法数据的正确性，可靠性，可用于针对地应力的结构设计。

声发射法地应力测量是基于岩石具有一定压力条件下的Kaiser效应来建立相关测试和分析理论的，即岩石试样在重复加载过程中，如果没有超过先前的最大应力，很少或者没有声发射产生，只有当加载应力超过先前最大应力后，才有大量声发射产生。该法是直接测量法的一种，并且属于辅助分析方法。其测量时利用数字声发射检测系统和岩石压力试验机联合进行了岩石声发射Kaiser效应测量，确定不同方向加载时岩石试样的Kaiser点，然后计算原岩应力大小。声发射法测量地应力需配合钻孔定向取芯技术。岩芯取出后，根据岩芯原位方向，进行正交独立6个方向的二次取样。该法的优点是经济、便捷，仅利用钻探岩芯即可获取工程地应力状态。

基于上述原因，本规程规定了水压致裂法、空心包体应力解除法、滞弹性应变恢复法、声发射法地应力测量的技术要求。

3 基本规定

3.2.1 孔底沉渣会影响测试深度，测试前需了解其厚度，以免设备埋入其中难以提升。

3.3.1 水压致裂法封隔器、印模器及空心包体应力解除法的应变计均是根据钻孔口径预制，若钻孔口径不标准，将会造成封隔器、印模器爆裂或无法坐封、应变计安装困难等情况发生，导致测试失败。

3.3.2 水压致裂法地应力计算所需的孔隙水压力参数一般依据钻孔内地下水位高程计算。

3.3.3 记录缩径、塌孔及钻孔事故可使地应力测量人员能对测量过程中发生设备下放、提升困难等事故提前预判。

4 水压致裂法

4.1 一般规定

4.1.1 水压致裂法是以弹性力学为基础的，根据其基本假定，测试段落岩体要完整，尽量避免原生节理裂隙段落，以保证测试成功。

4.1.6 由于水压致裂法需对测试孔压裂段加压直至岩壁破裂，故要求试验段岩体渗透性等级为微透水或极微透水，根据计算公式的假定及目前工程实例统计岩体透水率不宜大于 1Lu。

4.2 测量系统

4.2.2 根据水压致裂法地应力测试经验，钻孔倾斜时，孔壁易发生掉块现象，导致封隔器卡钻，提升困难。成孔直径与设计孔径或钻头直径相差较大时，易导致受压膨胀封隔器破裂，测量失败，因此在钻孔过程中，需严格控制成孔质量。压力泵站宜选小流量和高压力的 高压水泵，考虑到测试设备的轻便化和适用性，本方法建议高压泵的选型应根据钻孔深度、估算的应力水平和工作场地综合评估，流量宜为 15 L/min 左右。

4.2.4 压裂系统的选择。单回路测量系统的封隔器供压与封隔段加压均经由同一管道（一般为钻杆）通过井下转换阀切换实现；双回路测量系统的封隔器供压与封隔段加压采用独立的两个压力通道；单回路和双回路测量系统各有所长，前者适用于深钻孔和小口径钻孔测量，而后者多用于浅孔和大口径钻孔，其测量结果都是可靠的。在测量深度与孔径合适的条件下，建议采用双回路测量系统，能实时监测并控制封隔器压力，以确保整个压裂过程中试验段封隔良好。双回路系统每隔 3~5m 用铁丝将高压胶管绑紧固定于钻杆。其作用是防止胶管松脱或在钻杆提拉过程中缠结造成事故，一般可以每根钻杆捆绑一次，长度在 3m~5m，视钻杆等情况可以加密。

4.3 测量步骤及技术要求

4.3.4 座封压力的确定：需大于橡胶封隔器的扩张压力，但小于测试岩体压裂缝的破裂压力和重张压力，一般在现场通过试验或用同类岩体测试的经验确定。国际岩石力学学会建议建议封隔器压力为 2MPa~4MPa，考虑到钻杆内的水柱压力以及较高水压对软弱岩体的破坏作用，结合实际操作中 4MPa 满足大多数测试过程中的座封要求，座封压力宜不小于 4MPa，当然较高强度的岩石中进行水压致裂测量时可适当提高座封压力。

关系泵后，略微放松提升绳后系统稳固不滑动表明座封正常。

4.3.5 压裂操作注压过程记录监测压力变化。在增压过程中，采集记录仪上的压力值将随高压液体的泵入而迅速增高。由于钻孔周边的应力集中，压裂段内的岩石在足够大的液压作用下，将会在最小切向应力的位置上产生破裂，也就是在垂直于最小水平主应力的方向开裂。此时所记录的临界压力值，就是岩石的破裂压力，岩石一旦产生裂缝，在高压液体来不及补充的瞬间，压力将急剧下降。若继续保持排量加压，裂缝将保持张开并向深处扩展，压力变化平稳。

4.3.7 关于水压致裂缝印模手段。目前获取水压致裂缝或原生裂隙缝的方位，有多种手段，如井下超声波扫描法、井下光学成像扫描法、微地震检测的压裂缝成像法等，但由于印模法操作容易、结果可靠、设备轻便，最为常用，因此标准中介绍的印模过程专指印模法。

记录压裂缝：压裂缝的记录通常采用定向印模器，即利用扩张印模胶筒外层的生橡胶和能自动定向的定向器来记录裂缝的形状及方位。印模器的加压时间至少 30 min，必要时根据生橡胶的性能现场试验确定。印模器加压量值应大于压裂缝的重张压力，小于破裂压力。

4.4 数据处理

4.4.1 在测试中若记录压裂曲线的压力传感器放在地面，在确定破裂压力、重张压力和闭合压力是需考虑钻杆内的水头压力，同时考虑管路摩擦阻力的影响。水压致裂法地应力计算所需的孔隙水压力参数一般依据钻孔内地下水位高程计算。

4.6 三维水压致裂法地应力测试

4.6.1 本规程中的三维水压致裂法是指利用三个互为近正交的钻孔分别进行常规水压致裂测量，然后利用每个钻孔获取的最大和最小次主应力量值和方向计算得到测量位置附近的三维地应力量值和方向。

5 空心包体应力解除法

5.1 一般规定

5.1.6 在隧道内进行岩体初始应力状态测试时，为保证测试成果的可靠性，测点深度应超过应力扰动影响区。假定隧道为圆形断面，根据岩体力学和弹性力学理论，从隧道圆心算起，3-5 倍半径范围外即为原岩应力区，理论误差分别为 $1/9\sim 1/25$ ，因此从隧道边墙算起 1~2 倍断面最大尺寸范围外即为原岩应力区。

5.2 测量系统

5.2.1 空心包体式三轴地应变计是一种先进高效的地应力测量元件。该元件由三组应变丛（每组应变丛含有 4 个应变片，相邻间隔为 45° ）沿环氧树脂筒粘接相隔 120° 排列组成，共含有 12 个应变片，三个应变丛上的应变片角度对应相同。

5.3 测量步骤及要求

5.3.10 围压率定实验测量弹性模量和泊松比，宜在现场将含有应力计的完整岩芯放入围压标测定仪中进行标定，获取测点岩芯的弹性模量和泊松比。岩芯围压宜大于预估的岩体最大主应力。解除后的岩芯如不能在 24h 内进行围压加载试验，立即对其密封，防止干燥。在进行围压试验时，不允许移动测试元件位置，以保证测试成果的准确性。岩石弹性模量和泊松比也可以参考室内岩块试验成果。

5.3.11 应力解除过程中，钻头与岩石的摩擦会产生很大的热量，同时钻进时使用水的温度也会对实验结果造成很大的影响，因此消除应力解除过程中温度变化对应力测量的影响成为提高空心包体应力解除法测量精度的关键。

6 滞弹性应变恢复法

6.1 一般规定

6.1.1 岩芯滞弹性应变恢复法是近年来发展起来,比较经济有效的深部地应力测量方法,汶川 5.12 地震后,我国大陆首次将该方法应用于汶川地震断裂带科学钻的地应力测量。滞弹性应变恢复法具有较大的实用价值,特别是在较大深度的钻孔和地层较破碎的复杂地质条件下,应力解除法、水压致裂法等难以实施时,此方法仍有可能获得较可靠的地应力数据,适应性更强。ASR 法与其他地应力测量方法相比具有成本低、效率高且不受钻孔深度和温度的限制,可进行三维应力测量等优点,只要能够获取定向岩芯,就可进行 ASR 法的测量,确定主应力的方向。该方法的缺点是非直接测量,需要实验确定岩石的滞弹性应变恢复柔量才能够计算地应力大小。埋深越大岩石应力释放后的滞弹性应变恢复量越大,相同地应力环境下,软岩的滞弹性应变恢复柔量大于硬岩。

6.2 测量系统

6.2.1 应变仪和扫描箱组成的数据记录系统,可同时进行多个样品的滞弹性应变恢复测量,以满足钻探过程中不同深度样品的连续测量(因为每个样品的测量周期为 7~10 天,故需多个样品同时测量才能与钻进取心速度相匹配)。

UPS 不间断电源的主要作用是保证现场实验室电源不稳定的情况下,仍可不间断的进行测量。

由于岩芯的滞弹性恢复应变受环境温度影响,因此测试时需保持样品温度恒定,采用恒温水浴循环控制器和水箱组成的恒温控制单元,保证密封的岩芯样品处于恒温状态(温度变化范围在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内),这样可消除温度的影响。若没有恒温水浴循环控制器,则需待现场滞弹性恢复应变测试完成后在室内进行温度标定,可一定程度上剔除温度的影响。

由于现场实验条件的限制,在测量过程中难免会出现停电等事故,为保证测量结果的可靠性,测量中采用均质各向同性的样品作为补偿参考样品,必要时可作为数据修正的参考。

6.4 数据处理

6.4.2 当施加在各向同性黏弹性材料单位应力瞬间解除时，应变恢复随时间变化的函数称为滞弹性应变恢复柔量，包括剪切模式和体积模式两部分，岩石的滞弹性应变恢复柔量与岩性有关。

7 声发射法

7.1 一般规定

7.1.1 声发射法需制备多个固定规格的岩样并完成单轴加载试验，若岩体软弱破碎，则无法完成试验。

7.1.2 自然界大部分的材料内部或多或少都存有缺陷，在外界条件改变的情况下，内部缺陷状态改变的同时发出声音。从微观上看，声发射是由于材料内部晶体产生位错，微裂纹萌生并且逐渐闭合、扩展；从宏观上看，声发射是由于材料内部出现大面积损伤或结构单元之间产生大幅度的相对运动而产生的。材料破坏失效的根本原因就是内部微裂纹的扩展与贯通。

1950年，Kaiser发表博士论文，他运用常规拉伸试验研究了金属材料的应力从其历史最高水平释放后，再次重新加载，当应力未达到先前最大应力值时，很少有声发射产生，而当应力达到和超过先前经受过的应力水平，会产生大量声发射活动。由此发现了声发射的不可逆现象，即Kaiser效应。Kaiser效应是材料重复加载过程中，在达到原来所受最大荷载前无明显声发射而在达到原来所受最大荷载时产生大量声发射活动的现象，也即是对先前所承受过的最大应力的记忆能力。而后Goodman在岩石压缩试验中证实了岩石材料同样具有Kaiser效应。

7.2 测量系统

7.2.2 中低频传感器广泛运用于岩土、泄露等声发射检测领域中，试验质量较好；不锈钢外壳材料的传感器可有效降低外界干扰。

7.3 测量步骤及技术要求

7.3.3 为了确定一点的三维应力状态，需知道该点六个独立方向的应力分量，因此在测点岩样中沿六个不同方向制备试样；每个方向制备多个试样并试验，将同方向试样的试验结果取平均值，从而提高测试数据的可靠性。

7.3.5 若加载速率不恒定，如采用人工加载，由于声发射速率和加载速率有关，在声发射速率曲线上可能出现多个峰值，很难判断真正的Kaiser点。

7.4 数据处理

7.4.1 岩石本身是天然的复杂地质体，需考虑到在试验过程中受制样加工应力和加载初期试样内部原生微裂纹被压密实发生闭合及微结构面错动的影响。产生的声发射信号较多，因此一般不选取初始声发射点作为 Kaiser 效应特征点。

准确选定 Kaiser 效应特征点是利用岩石声发射 Kaiser 效应测试地应力方法的关键所在。在声发射试验过程中，仪器自动记录声发射到达时间、持续时间、事件数、振铃计数和能量等声发射基本参数。声发射能量以幅度平方计数表示，代表了岩石的声发射强度；声发射振铃计数是岩石内部结构变化的外在声学表现，反映声发射活动的强弱程度和岩石内部损伤的演化过程。结合声发射能量、振铃计数两种特征参数所对应的突变点，即表示 Kaiser 效应最明显的点，对 Kaiser 效应特征点的确定更加有效、精确。

7.4.2 通过对 X、Y、Z、X45° Y、Y45° Z、Z45° X 空间六个方向的多个试件进行单轴压缩试验，同时采集每个试件在加载过程中的声发射信号，可以得到每个试件的试验时间与所受荷载、试验时间与声发射特征参数的关系曲线。在整理试验成果时，利用每个试件的关系曲线确定声发射信号突变点即岩石 Kaiser 效应特征点对应的荷载值，由此计算该试件所在方向的应力分量，每个方向的应力分量为该方向多个试件应力分量的算术平均值。通过应力分量计算得到最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 的大小和方位，再结合取样点地质环境最终确定该处地应力状态。

附录 G 岩体初始应力场评估

G.0.2 针对高地应力状态，国内外各行业大多以强度应力比（ R_c/σ_{\max} ，岩石饱和单轴抗压强度与最大初始地应力之比）来划分，也有少数学者和行业把最大地应力绝对值作为地应力环境高低的判据之一，如《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287—2016 规定 $R_c=20\sim 40$ MPa、 $R_c/\sigma_{\max}=2\sim 4$ MPa 为高地应力， $R_c\geq 40$ MPa、 $R_c/\sigma_{\max} < 2$ 为极高地应力。但即使都采用岩石强度应力比划分，各国之间以及行业之间的标准也并不统一。

本规程对岩体初始地应力状态的划分基准主要参照我国水电勘察国家标准，通过对我国发生高地应力问题的 78 个铁路、公路隧道和水电站引水隧洞工程案例的统计分析，分别界定软、硬岩所处高地应力环境所形成的分级方案。以岩体初始最大地应力 σ_{\max} 和岩石强度应力比 R/σ_{\max} （ R 为岩石单轴抗压强度）双指标进行判定，认为硬岩 σ_{\max} 在 20MPa 以上、软岩 σ_{\max} 在 10MPa 以上进入高地应力环境，其中 $2\leq R/\sigma_{\max} < 4$ 为高地应力， $R/\sigma_{\max} < 2$ 为极高地应力。分级方法以大量工程案例为依托，综合考虑了铁路隧道在常规支护条件下显现的高地应力问题特征，所形成的分级方案更为合理、更符合铁路隧道工程实际。

在极高地应力环境下，地下水一般不发育或无水。因此，高地应力状态判别时采用岩石天然抗压强度，确定高地应力状态时采用最大初始地应力（最大主应力）绝对值。