

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

# T/GRM

## 中关村矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—2026

### 高温高压岩石（真）三轴直剪实验规程

Technical specification for (true) triaxial direct shear test under high-temperature and high stress of rock specimen

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前 言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 一般要求 ..... 2

    4.1 岩样采集 ..... 2

    4.2 试件加工 ..... 2

5 实验设备与试件封装 ..... 2

    5.1 基本要求 ..... 2

    5.2 实验设备 ..... 2

    5.3 试件装配和密封 ..... 3

    5.4 声发射传感器安装 ..... 4

    5.5 变形传感器安装 ..... 4

    5.6 温度传感器安装 ..... 5

6 实验内容 ..... 5

    6.1 基本要求 ..... 5

    6.2 岩石三轴直剪实验 ..... 5

    6.3 岩石高温高压三轴直剪实验 ..... 6

    6.4 岩石真三轴直剪实验 ..... 7

    6.5 岩石高温高压真三轴直剪实验 ..... 7

7 数据整理与实验结果 ..... 8

    7.1 基本要求 ..... 8

    7.2 应力及强度参数计算 ..... 8

    7.3 应变及变形参数计算 ..... 8

    7.4 误差计算 ..... 9

    7.5 实验结果 ..... 9

附 录 A （资料性） 采样记录表 ..... 12

附 录 B （资料性） 试件制备记录表 ..... 13

附 录 C （资料性） 实验记录表 ..... 14

附 录 D （资料性） 实验报告提纲 ..... 18

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟标准工作委员会归口。

本文件起草单位：东北大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、清华大学、中国矿业大学、山东黄金集团有限公司、天津大学、中机试验装备股份有限公司。

本文件主要起草人：刘造保、胡大伟、王厚宇、赵志宏、周宏源、刘江峰、刘斌慧、张玉、杨福见、陈林、姚伟、汪昕、谷春华、张玉龙、青克尔、杨强、徐建宇、黄睿智

# 高温高压岩石（真）三轴直剪实验规程

## 1 范围

本文件规定了高温高压岩石（真）三轴直剪实验的一般要求、实验设备与试件封装、实验内容、数据整理与实验结果等。

本文件适用于高温高压（真）三轴条件下岩石直剪特性（参数）的测定。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 23561.1 煤和岩石物理力学性质测定方法 第1部分：采样一般规定

GB/T 23561.11 煤和岩石物理力学性质测定方法 第11部分：煤和岩石

GB/T 15406 岩土工程仪器基本参数及通用技术条件

GB/T 50266 工程岩体试验方法标准

NB/T 11697 干热岩力学参数实验测试方法

SL/T 264 水利水电工程岩石试验规程

TB 10115 铁路工程岩石试验规程

T/CSRME 007 岩石真三轴试验规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**试件 specimen**

由岩样加工制成的，符合一定尺寸标准并用于实验的样品。

### 3.2

**试件封装体 specimen assembly**

试件和金属传载压块装配密封后的组合体。

### 3.3

**柔性传载体 flexible transmission carrier**

用于与剪切传载压块结合形成剪切荷载传载结构的柔韧材料构件。

### 3.4

**岩石高温高压三轴直剪实验 triaxial direct shear test under high temperature and high stress for rock**

岩石试件在高温（温度范围：室温~300℃）与高静水压力（应力范围：0~70MPa）共同作用下，承受剪切荷载并沿单一预设面剪断的直接剪切实验。

### 3.5

**岩石高温高压真三轴直剪实验 true triaxial direct shear test under high temperature and high stress for rock**

岩石试件在高温（温度范围：室温~300℃）、高法向荷载和侧向荷载（应力范围：0~800MPa）共同作用下，承受剪切荷载并沿单一预设面剪断的直接剪切实验。

## 4 一般要求

### 4.1 岩样采集

岩样采集按GB/T 23561.1、T/CSRME 007中规定执行, 采样记录可参照附录A。

### 4.2 试件加工

#### 4.2.1 试件形状与尺寸

4.2.1.1 三轴直剪实验试件宜采用直径为 50mm, 高度为 50mm 的圆柱体。

4.2.1.2 真三轴直剪实验试件形状应为立方体。试件尺寸宜为 50mm×50mm×50mm 或 100mm×100mm×100mm。特殊实验条件下, 试件尺寸和形状可根据实验设备和实验要求确定, 试件长宽高宜为 1:1:2 的比例, 且剪切应力方向的边长应是其他方向边长的 2 倍。

4.2.1.3 试件边长应大于矿物最大颗粒尺寸的 10 倍。

#### 4.2.2 试件加工要求

4.2.2.1 试样的加工应按照岩样同一方向切割, 并标记区分正交的切割方向。

4.2.2.2 试件边长允许偏差应为 $\pm 0.1\text{mm}$ , 试件端面不平整度允许偏差应为 $\pm 0.02\text{mm}$ ; 试件相邻两面应相互垂直, 允许偏差应为 $\pm 0.25^\circ$ ; 试件相对端面应相互平行, 允许偏差应为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。

4.2.2.3 对于亲水性较强的岩石, 宜采用干磨或干冰冷却等方式加工。

#### 4.2.3 试件记录与描述

4.2.3.1 试件加工时应进行试件编号并做好记录, 记录内容应符合附录 B 的规定, 包括岩样编号、岩样类型、试件编号、试件尺寸、加工方式等。

4.2.3.2 试件制备完毕后对试件进行物性参数测量和描述, 宜包括下列内容:

- a) 试件的编号、名称、颜色、岩性、矿物成分、均质性、试件尺寸、试件相对密度和波速等。
- b) 若试件含结构面, 宜描述结构面填充物(胶结物)的性质及其厚度。
- c) 试件的初始缺陷及含水状态。

## 5 实验设备与试件封装

### 5.1 基本要求

5.1.1 在实验开始前, 应对试件的岩相及结构进行详细的素描或拍摄照片。

5.1.2 实验前应完成试件的装配与密封, 并安装变形传感器、声发射传感器和温度传感器等相关设备。

5.1.3 实验测试过程所使用的仪器、传感器、测试仪表及计量器具均应按照仪器设备检验、检定规定进行周期性的检定和校准, 并认真记录仪器设备的使用和维护台账。

### 5.2 实验设备

5.2.1 应依据实验目的选用适配加载方式的岩石伺服控制(真)三轴实验机, 且实验机应符合下列要求:

- a) 实验机应配置安全防护装置及急停操控按钮。
- b) 实验机刚度应显著大于试件最大刚度, 且不应低于 5 GN/m。
- c) 实验机可采用双作动器同步对中加载模式或可移动框架结构的单作动器对中补偿加载模式。
- d) 实验机的测力传感器精度应优于 0.1%FS。
- e) 在温度加载过程中, 实验舱内不同位置的温度差值宜小于 5℃。
- f) 在高温高压实验过程中, 实验机温度控制系统精度宜不大于 0.1℃。
- g) 符合 GB/T 15406 中的规定

5.2.2 实验前应完成对实验机的全面检查, 检查内容应包括以下项目:

- a) 检查液压管路、阀门、电路及气路的连接状态, 以及作动器的运行情况。
- b) 检查数据采集线路的屏蔽效果, 排除外界因素对数据采集信号的干扰。
- c) 测试控制器对三个应力方向加载轴的控制精度。

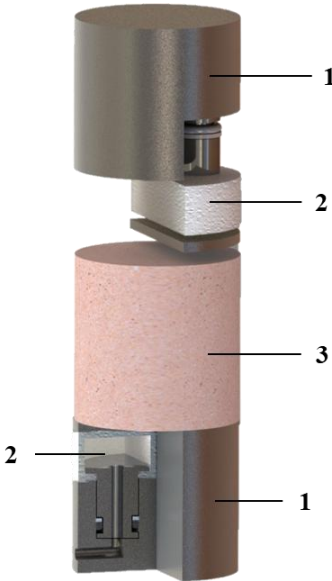
d) 检查加热以及冷却设备的运行情况。

5.3 试件装配和密封

5.3.1 试件装配

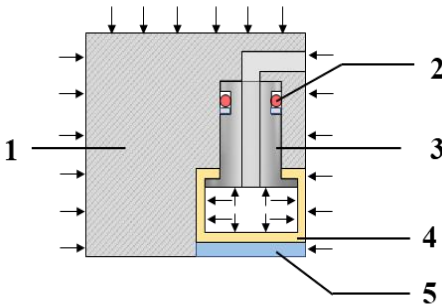
5.3.1.1 试件装配前，试件和传载构件间应使用减摩材料来降低端部摩擦效应。减摩材料的摩擦系数应小于 0.02，宜采用膏状脂类减摩材料。

5.3.1.2 岩石高温高压三轴直剪/三轴直剪实验的传载构件（参见图 1）由剪切压块和柔性传载体两部分组成，柔性传载体安装在剪切压块的密封装配孔中，其中柔性传载体宜采用围压自平衡体（参见图 2）。



标引序号说明：  
1——剪切压块  
2——柔性传载体  
3——试件

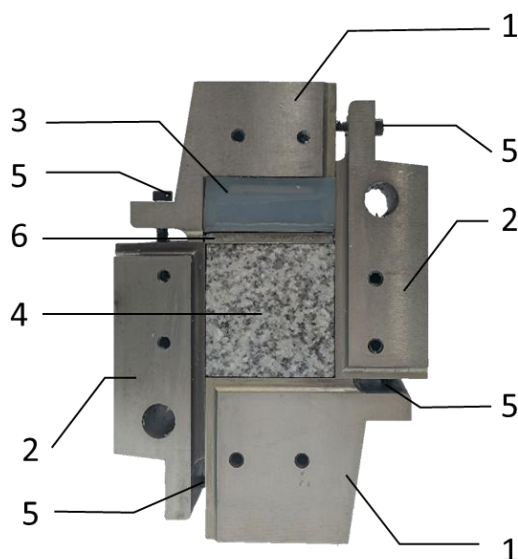
图 1 高温高压三轴/三轴直剪实验传载构件示意图



标引序号说明：  
1——剪切压块  
2——密封圈  
3——活塞组件  
4——橡胶气囊  
5——金属垫板

图 2 围压自平衡体结构示意图

5.3.1.3 高温真三轴/真三轴直剪实验的传载构件由剪切传载压块、压缩传载压块和柔性传载体三部分组成，柔性传载体安装在剪切传载压块的密封装配孔中，其中柔性传载体宜采用围压自平衡体。剪切传载压块和压缩传载压块宜采用互扣式装配（参见图 3）。



标引序号说明:

- 1——剪切传载压块
- 2——压缩传载压块
- 3——柔性传载体
- 4——试样
- 5——紧固螺丝
- 6——金属垫片

图3 高温真三轴/真三轴直剪实验传载装置构件示意图

5.3.1.4 传载装置的刚度和强度应远大于试件的最大刚度和强度。

#### 5.3.2 试件密封

5.3.2.1 三轴直剪实验中,应对试件采取防油措施,宜采用塑胶套或耐油薄橡皮套密封。

5.3.2.2 真三轴直剪实验中,采用液压油等液体直接对试件进行柔性加载时,柔性加载面宜选用密封胶密封。

5.3.2.3 高温三轴或高温真三轴直剪实验中试件的密封应采用耐高温密封材料密封。

#### 5.4 声发射传感器安装

5.4.1 声发射传感器的频响带宽应与试件破裂时的声发射特征相匹配。

5.4.2 在试件装配和密封的过程中,应同步进行声发射传感器的安装,并确保其通过耦合剂与试件表面紧密贴合。

5.4.3 声发射传感器应与试件保持良好的电绝缘,并具备一定的电磁干扰屏蔽功能。

5.4.4 在高液压实验环境下,声发射传感器的耐压能力应高于最大液压压力。

5.4.5 在高温实验环境下,声发射传感器的耐温能力应大于最高实验温度。

5.4.6 进行岩石破裂定位监测时,声发射传感器数量不宜少于8个。

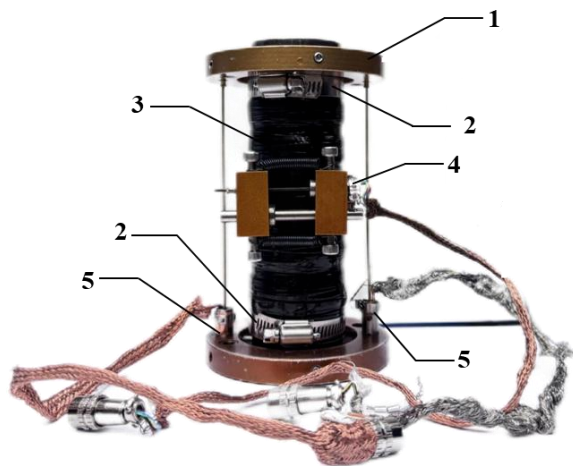
#### 5.5 变形传感器安装

5.5.1 试件的变形测量宜采用LVDT式传感器。变形传感器的测量分辨率应达到 $1\mu\text{m}$ ,测量精度应大于0.1%FS,且其量程应大于试件的最大变形值。

5.5.2 试件装配和密封完毕后,每个加载轴方向上应至少安装一个变形传感器。传感器可固定在试件或试件的装配压块上,且应保证测量轴线与试件中心轴线平行。在试件剪切方向宜沿剪切平面对称布置两个变形传感器。

5.5.3 实验前可通过螺旋测微器或标准量块进行变形传感器的校准。

5.5.4 在高温实验中,变形传感器应选用耐高温传感器,其耐温能力须高于实验设定的最高温度。



- 标引序号说明：
- 1——固定框架
  - 2——喉箍
  - 3——耐油薄橡皮套密封试件
  - 4——环向 LVDT 变形传感器
  - 5——轴向 LVDT 变形传感器

图 4 三轴直剪实验传感器安装示意图

5.6 温度传感器安装

- 5.6.1 宜布设 2 个以上温度传感器，保证温度均匀度，避免温差的产生。
- 5.6.2 温度传感器的耐温能力应大于最高实验温度。

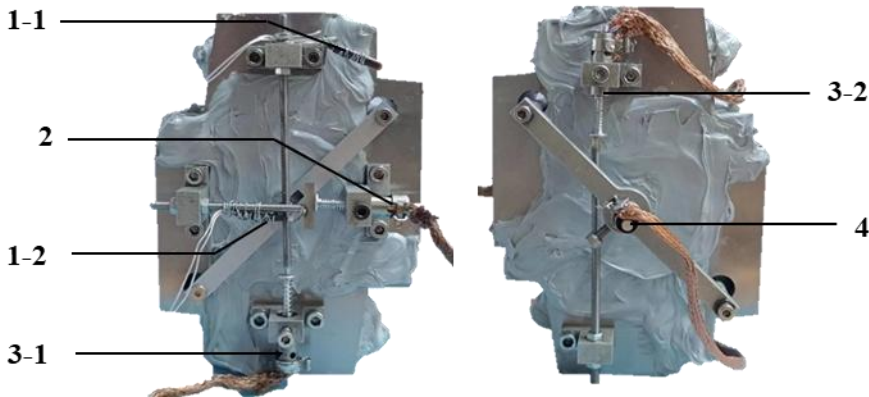


图 5 高温真三轴直剪实验传感器安装示意图

6 实验内容

6.1 基本要求

- 6.1.1 应按照研究目的制定好具体的实验方案。
- 6.1.2 实验应严格按照实验机操作规程进行，并做好个人防护。
- 6.1.3 实验前后应做好实验记录，实验记录格式应符合附录 C 的规定。
- 6.1.4 同一实验，试件的数量不宜少于 3 个。如果实验结果离散性较大，试件数量应进行增加。

6.2 岩石三轴直剪实验

6.2.1 试件封装体安装

岩石三轴直剪实验中，试件封装体的安装应遵循下列步骤：



- a) 将试件封装体放置在加载台上。
- b) 加载压头与剪切压块间进行减摩处理。
- c) 连接好变形传感器，并调节变形传感器初始值，保证岩石变形量在传感器量程范围内。
- d) 调节试件封装体的位置，使试件中心轴线与加载压头的中心线重合。

### 6.2.2 声发射监测

6.2.2.1 宜采用声发射系统监测试件破裂过程，且应遵循下列步骤：

- a) 按顺序连接声发射传感器、前置放大器及主处理器。传感器与前置放大器之间的连接线长度应控制在 2m 以内。声发射监测线路及通道应与实验机的测量线路相互绝缘，并采取屏蔽措施。
- b) 通过敲击测试对声发射传感器的工作状态及通道灵敏度进行检测，同时排除噪声干扰。
- c) 合理设置声发射监测参数。

6.2.2.2 声发射监测参数设置应符合下列规定：

- a) 监测门槛和滤波器频带应根据环境噪声、预期监测灵敏度、岩石类型及实验条件进行设定，门槛值宜设定在 35dB~45dB 之间。
- b) 波形采样频率不应低于试件破裂信号最高频率的两倍，宜为最高频率的 5 倍至 10 倍。

### 6.2.3 应力施加

6.2.3.1 实验加载宜采用高频闭环伺服控制，其控制频率宜大于 1kHz。

6.2.3.2 岩石三轴直剪实验宜遵循下列步骤：

- a) 控制加载压头对剪切压块施加 1kN~3kN 的预紧力。
- b) 采用应力控制，以 0.1MPa/s 速率施加围压，直到设定的目标应力。
- c) 保持围压不变，采用位移控制方式，以 0.01mm/min~0.02mm/min 的速率单独加载剪切应力。
- d) 当实验进入残余强度阶段时，停止实验并按照加载路径的反向顺序依次将施加的应力卸掉。实验过程中应避免应力卸载造成附加的试件破坏。

6.2.3.3 实验过程中试件不宜偏心加载。可通过监测同轴方向加载压头的位移确定试件偏心加载程度，同轴方向加载压头的位移偏差不得超过 0.05mm。

6.2.3.4 实验结束后，应维持试件破裂形态，避免试件封装体拆卸造成附加的试件破坏。

6.2.3.5 实验结束后，应观察试件表面，不宜有液压油侵入，如有液压油侵入，应判断实验结果是否有效。

### 6.2.4 数据采集

6.2.4.1 实验过程中应实时采集应力和变形的数据，数据采集速率不应小于 10 次/s。

6.2.4.2 声发射信号、应力信号、变形信号的采集时间应保持同步。

## 6.3 岩石高温高压三轴直剪实验

### 6.3.1 试件封装体安装

6.3.1.1 岩石高温三轴直剪实验中，试件封装体安装步骤应符合 6.2.1 的规定。

6.3.1.2 岩石高温三轴直剪实验中，试件封装体安装还应连接温度传感器，并测试温度传感器处于正常工作状态。

### 6.3.2 声发射监测

岩石高温三轴直剪实验中，声发射监测应符合 6.2.2 的规定。

### 6.3.3 应力与温度施加

6.3.3.1 高温三轴直剪实验宜遵循下列步骤：

- a) 控制加载压头对剪切压块施加 1kN~3kN 的预紧力。
- b) 采用应力控制，以 0.1MPa/s 速率施加围压，直到设定的目标应力。
- c) 通过温控系统对实验环境加热至目标温度，达到目标温度后，宜保温 2h 以上，以保证试件内部受热均匀。

- d) 保持围压和温度不变,采用位移控制方式,以 0.01mm/min~0.02mm/min 的速率单独加载剪切应力。
  - e) 当实验进入残余强度阶段时,停止实验,关闭温控系统。并按照加载路径和温度施加的反向顺序依次将施加的应力和温度卸掉。实验过程中应避免应力卸载造成附加的试件破坏。
- 6.3.3.2 高温三轴直剪实验步骤 6.3.3.1 中 b) 和 c) 两者顺序可根据实验目的,进行调整。
- 6.3.3.3 温度施加过程中,升温速率不应过快,避免试样内外温差过大,形成热应力集中效应,影响实验数据的可靠性,不宜超过 8°C/min。
- 6.3.3.4 温度施加过程中,应严格监测实验舱内温度场的均匀性,避免因温差过大导致实验数据失真;若监测到实验舱内存在显著温差或存在非正常漏热现象,应终止实验,对实验舱密封性进行检查。
- 6.3.3.5 实验过程中还应符合 6.2.3.1、6.2.3.3~6.2.3.5 的规定。

#### 6.3.4 数据采集

应符合 6.2.4 的规定。

### 6.4 岩石真三轴直剪实验

#### 6.4.1 试件封装体安装及声发射监测

岩石真三轴直剪实验中,试件封装体安装及声发射监测应分别符合 6.2.1 和 6.2.2 的规定。

#### 6.4.2 应力施加

##### 6.4.2.1 岩石真三轴直剪实验宜遵循下列步骤:

- a) 控制加载压头对剪切传载压块施加 1kN 的预紧力,接着控制加载压头对压缩传载压块施加 1kN 的预紧力。
  - b) 采用应力控制,以 0.1MPa/s 速率分别施加侧向应力和法向应力,直到设定的目标应力水平。
  - c) 保持侧向应力和法向应力不变,采用位移控制方式,以 0.01mm/min~0.02mm/min 的速率单独加载剪切应力。
  - d) 当实验进入残余强度阶段时,停止实验并按照 6.2.3.2 d) 规定执行。
- 6.4.2.2 实验过程中还应符合 6.2.3.1、6.2.3.3~6.2.3.5 的规定。

#### 6.4.3 数据采集

应符合 6.2.4 的规定。

### 6.5 岩石高温高压真三轴直剪实验

#### 6.5.1 试件封装体安装及声发射监测

岩石高温高压真三轴直剪实验中,试件封装体安装及声发射监测应分别符合 6.3.1 和 6.2.2 的规定。

#### 6.5.2 应力与温度施加

##### 6.5.2.1 高温高压真三轴直剪实验宜遵循下列步骤:

- a) 控制加载压头对剪切传载压块施加 1kN 的预紧力,接着控制加载压头对压缩传载压块施加 1kN 的预紧力。
  - b) 采用应力控制,以 0.1MPa/s 速率分别施加侧向应力和法向应力,直到设定的目标应力水平。
  - c) 通过温控系统对实验环境加热至目标温度,达到目标温度后,宜保温 2h 以上,以保证试件内部受热均匀。
  - d) 保持侧向应力、法向应力和温度不变,采用位移控制方式,以 0.01mm/min~0.02mm/min 的速率单独加载剪切应力。
  - e) 当实验进入残余强度阶段时,停止实验并按照 6.3.3.1 e) 规定执行。
- 6.5.2.2 高温高压真三轴直剪实验步骤 6.5.2.1 b) 与 c) 两者顺序可根据实验目的,进行调整。
- 6.5.2.3 实验过程中还应符合 6.2.3.1、6.2.3.3~6.2.3.5、6.3.3.3、6.3.3.4 的规定。

#### 6.5.3 数据采集

应符合 6.2.4 的规定。

## 7 数据整理与实验结果

### 7.1 基本要求

实验结束后应对岩石破坏过程的应力、应变（变形）及相关参数进行计算，并对实验结果进行整理。应力、应变等变量应以压为正进行计算。

### 7.2 应力及强度参数计算

7.2.1 三轴直剪实验和高温高压三轴直剪实验的剪切应力应按公式（1）计算：

$$\tau_T = \frac{F_{t,T}}{A_n} \quad (1)$$

式中：

$\tau_T$ ——不同温度下作用在岩石上的剪切应力，单位为 MPa；

$F_{t,T}$ ——不同温度下作用在岩石上的剪切荷载，单位为 N；

$A_n$ ——岩石的剪切面面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$T$ ——实验设定温度，单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.2 真三轴直剪实验和高温高压真三轴直剪实验的剪切应力应按公式（2）计算，法向应力应按公式（3）计算，侧向应力应按公式（4）计算：

$$\tau_T = \frac{F_{t,T}}{A_n} \quad (2)$$

$$\sigma_{n,T} = \frac{F_{n,T}}{A_n} \quad (3)$$

$$\sigma_{l,T} = \frac{F_{l,T}}{A_l} \quad (4)$$

式中：

$F_{t,T}$ ——不同温度下作用在岩石上的剪切荷载，单位为 N；

$F_{n,T}$ ——不同温度下作用在岩石上的法向荷载，单位为 N；

$F_{l,T}$ ——不同温度下作用在岩石上的侧向荷载，单位为 N；

$A_n$ ——岩石的剪切面面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$A_l$ ——岩石的侧向面积，单位为  $\text{mm}^2$ ；

$\tau_T$ ——不同温度下作用在岩石上的剪切应力，单位为 MPa；

$\sigma_{n,T}$ ——不同温度下岩石的法向应力，单位为 MPa；

$\sigma_{l,T}$ ——不同温度下岩石的侧向应力，单位为 MPa；

$T$ ——实验设定温度，单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.3 岩石高温高压（真）三轴直剪实验的粘聚力和内摩擦角应按公式（5）计算：

$$\tau_T = \sigma_{n,T} \tan \varphi_T + c_T \quad (5)$$

式中：

$\varphi_T$ ——不同温度下岩石的粘聚力，单位为 MPa；

$c_T$ ——不同温度下岩石的内摩擦角，单位为  $^{\circ}$ 。

### 7.3 应变及变形参数计算

7.3.1 三轴和高温高压三轴直剪实验中岩石的剪切位移应按公式（6）计算，环向膨胀率应根据公式（7）（8）计算：

$$\delta_s = (\delta_{s1} + \delta_{s2}) / 2 \quad (1)$$

$$\Delta D = \Delta L / \pi \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = \Delta D / D \quad (3)$$

式中：

$\delta_s$ ——剪切位移，单位为mm

$\delta_{s1}, \delta_{s2}$ ——岩石剪切方向变形量，单位为mm

$\Delta D$ ——试样直径变形增量，单位为mm；

$D$ ——试件初始直径，单位为mm

$\Delta L$ ——试样环向变形增量，单位为mm；

$\varepsilon_c$ ——环向膨胀率，%

7.3.2 真三轴直剪实验和高温高压真三轴直剪实验中岩石的法向位移应按公式（9）计算，剪切位移应按公式（10）计算，侧向位移应按公式（11）计算

$$\delta_{n,T} = L_{n,T} - L_{n0} \quad (4)$$

$$\delta_{\tau,T} = L_{\tau,T} - L_{\tau0} \quad (5)$$

$$\delta_{p,T} = L_{p,T} - L_{p0} \quad (6)$$

式中：

$\delta_{n,T}$ ——不同温度下岩石的法向位移，单位为mm；

$\delta_{\tau,T}$ ——不同温度下岩石的剪切位移，单位为mm；

$\delta_{p,T}$ ——不同温度下岩石的侧向位移，单位为mm；

$L_{n,T}$ ——不同温度下某一时刻法向位移的瞬时示值，单位为mm；

$L_{n0}$ ——法向位移初始示值，单位为mm；

$L_{\tau,T}$ ——不同温度下某一时刻剪切位移的瞬时示值，单位为mm；

$L_{\tau0}$ ——剪切位移初始示值，单位为mm；

$L_{p,T}$ ——不同温度下某一时刻侧向位移的瞬时示值，单位为mm；

$L_{p0}$ ——侧向位移初始示值，单位为mm；

7.3.3 岩石的剪切刚度应按公式（12）计算，剪胀角应按公式（13）计算：

$$k_s = \left| \frac{dt}{d\delta_s} \right| \quad (7)$$

$$\psi = \arctan \left| \frac{d\delta_n}{d\delta_s} \right| \quad (8)$$

式中：

$k_s$ ——剪切刚度，单位为GPa/m；

$\psi$ ——剪胀角，单位为°

## 7.4 误差计算

重复性实验应给出实验结果的离散系数，可根据公式（14）进行计算：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中：

$S$ ——标准差；

$n$ ——样本总数；

$X_j$ ——第  $j$  个样本实测值；

$\bar{X}$ ——样本平均值。

## 7.5 实验结果

### 7.5.1 试件的变形特征

7.5.1.1 真三轴直剪或高温高压真三轴直剪实验中，宜给出岩石的剪切应力-剪切位移、剪切应力-法向位移和剪切应力-侧向位移的关系，其示意图参见图6。三轴直剪或高温高压三轴直剪实验中，宜给出岩石的剪切应力-剪切位移、环向膨胀率-剪切位移的关系。

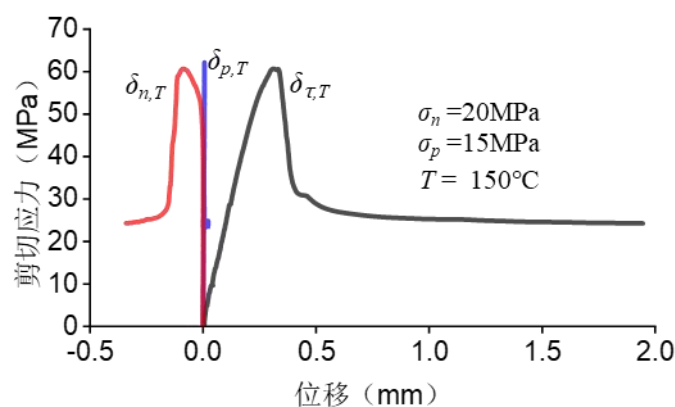


图6 岩石高温真三轴剪切应力-位移关系示意图

## 7.5.2 试件的破裂特征

7.5.2.1 实验宜给出声发射计数率、声发射累积计数与应力的关系，其示意图参见图7。进行岩石破裂定位监测时，宜给出声发射事件的定位结果。

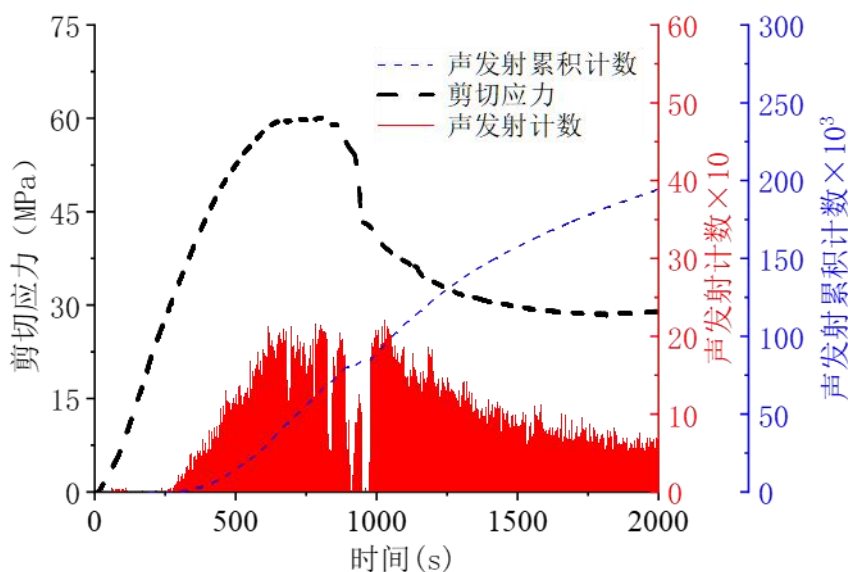


图7 高温高压真三轴直剪实验中岩石破裂的声发射计数特征示意图

7.5.2.2 实验后应对试件的最终破坏形态进行素描，并绘制出试件表面的裂纹发育情况，以及测量主破裂面的破坏角。在表达试件的破裂面信息时，可借助扫描电子显微镜(SEM)、CT扫描仪以及光显微镜等仪器，分析破裂面上的微细观破坏模式、微裂纹发育情况等。

## 7.5.3 试件的强度特征

高温高压(真)三轴直剪实验中，宜给出岩石的剪切强度随法向应力或侧向应力或温度变化的关系，其示意图参见图8、图9。

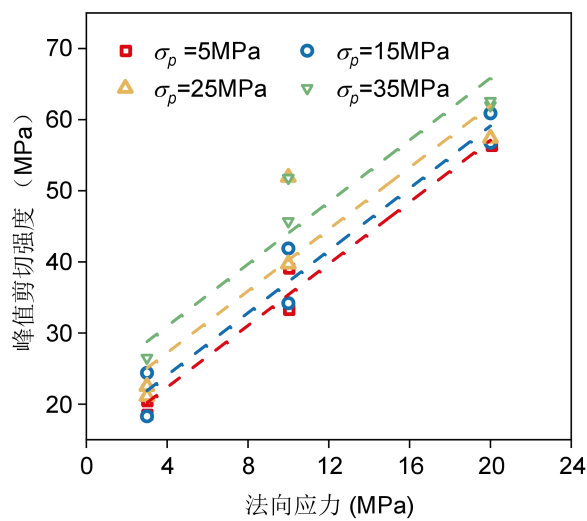


图 8 岩石剪切强度随法向应力变化关系示意图

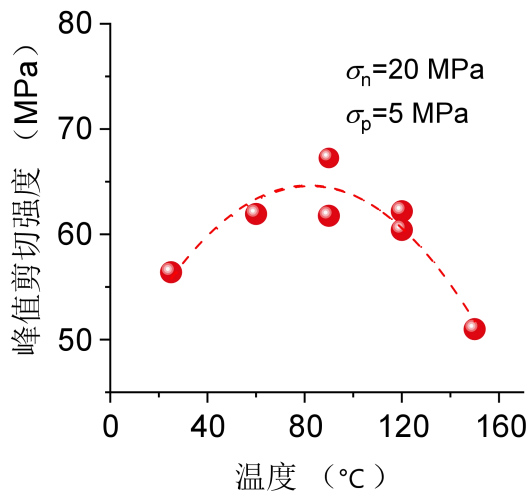


图 9 岩石剪切强度随温度变化关系示意图

7.5.4 实验报告

实验数据整理完毕后应编制实验报告，报告提纲格式可参见附录D。报告中宜包含实验背景、实验目的、实验描述、实验原理和方法、实验内容及结果等。

附录 A  
(资料性)  
采样记录表

表 A.1 采样记录表

采样日期：\_\_\_\_\_ 工程名称：\_\_\_\_\_ 采样单位：\_\_\_\_\_

| 岩样编号 | 岩样类型 | 采样地点<br>地层代号 | 采样方法 | 岩层产状 | 采样埋深 | 采样岩温 | 岩性描述 | 岩样规格 | 工程问题<br>描述 | 封固情况 | 备注 |
|------|------|--------------|------|------|------|------|------|------|------------|------|----|
|      |      |              |      |      |      |      |      |      |            |      |    |
|      |      |              |      |      |      |      |      |      |            |      |    |
|      |      |              |      |      |      |      |      |      |            |      |    |
|      |      |              |      |      |      |      |      |      |            |      |    |

注1：工程问题描述主要描述工程灾害类型，例如岩爆、片帮、塌方、大变形等。  
注2：岩性描述主要包括矿物成分、颗粒尺寸、颜色、风化情况、节理裂隙发育情况等。

记录：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_

附录 B  
(资料性)  
试件制备记录表

图 B.1 试件制备记录表

制备单位：\_\_\_\_\_

制备日期：\_\_\_\_\_

| 岩样编号 | 岩样类型 | 试件编号 | 试件尺寸mm | 形状尺寸偏差<br>mm | 含水状态 | 最大主应力<br>加载角° | 中间主应力<br>加载角° | 加工方式 | 备注 |
|------|------|------|--------|--------------|------|---------------|---------------|------|----|
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |
|      |      |      |        |              |      |               |               |      |    |

记录：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_



附 录 C  
(资料性)  
实验记录表

实验记录表见表C.1~表C.4。

表 C.1 岩石三轴直剪实验记录表

实验单位：\_\_\_\_\_ 工程名称：\_\_\_\_\_ 制备日期：\_\_\_\_\_

| 试件编号 | 岩石种类 | 试件尺寸<br>mm | 剪切面积<br>mm <sup>2</sup> | 围压水平<br>MPa | 控制方式 |                           | 实验结果        |             |      | 备注 |
|------|------|------------|-------------------------|-------------|------|---------------------------|-------------|-------------|------|----|
|      |      |            |                         |             | 加载方式 | 加载速率<br>MPa/s<br>(mm/min) | 峰值强度<br>MPa | 残余强度<br>MPa | 破坏模式 |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |      |                           |             |             |      |    |

记录：\_\_\_\_\_

计算：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_

表 C. 2 岩石高温高压三轴直剪实验记录表

实验单位：\_\_\_\_\_ 工程名称：\_\_\_\_\_ 制备日期：\_\_\_\_\_

| 试件编号 | 岩石种类 | 试件尺寸<br>mm | 剪切面积<br>mm <sup>2</sup> | 温度℃ | 围压水平<br>MPa | 控制方式 |                           | 实验结果        |             |      | 备注 |
|------|------|------------|-------------------------|-----|-------------|------|---------------------------|-------------|-------------|------|----|
|      |      |            |                         |     |             | 加载方式 | 加载速率<br>MPa/s<br>(mm/min) | 峰值强度<br>MPa | 残余强度<br>MPa | 破坏模式 |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |     |             |      |                           |             |             |      |    |

记录：\_\_\_\_\_

计算：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_

表 C.3 岩石真三轴直剪实验记录表

实验单位：\_\_\_\_\_ 工程名称：\_\_\_\_\_ 制备日期：\_\_\_\_\_

| 试件编号 | 岩石种类 | 试件尺寸<br>mm | 剪切面积<br>mm <sup>2</sup> | 侧向应力<br>MPa | 法向应力<br>MPa | 控制方式 |                           | 实验结果        |             |      | 备注 |
|------|------|------------|-------------------------|-------------|-------------|------|---------------------------|-------------|-------------|------|----|
|      |      |            |                         |             |             | 加载方式 | 加载速率<br>MPa/s<br>(mm/min) | 峰值强度<br>MPa | 残余强度<br>MPa | 破坏模式 |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |
|      |      |            |                         |             |             |      |                           |             |             |      |    |

记录：\_\_\_\_\_

计算：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_

表 C.4 岩石高温高压真三轴直剪实验记录表

实验单位：\_\_\_\_\_ 工程名称：\_\_\_\_\_ 制备日期：\_\_\_\_\_

| 试件<br>编号 | 岩石<br>种类 | 试件<br>尺寸<br>mm | 剪切<br>面积<br>mm <sup>2</sup> | 侧向<br>应力<br>MPa | 法向<br>应力<br>MPa | 温度<br>℃ | 控制方式 |                           | 实验结果        |             |          | 备注 |
|----------|----------|----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------|------|---------------------------|-------------|-------------|----------|----|
|          |          |                |                             |                 |                 |         | 加载方式 | 加载速率<br>MPa/s<br>(mm/min) | 峰值强度<br>MPa | 残余强度<br>MPa | 破坏<br>模式 |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |
|          |          |                |                             |                 |                 |         |      |                           |             |             |          |    |

记录：\_\_\_\_\_

计算：\_\_\_\_\_

校核：\_\_\_\_\_

附 录 D  
(资料性)  
实验报告提纲

一、实验概况

- 1) 实验背景
- 2) 实验目的

二、试件描述

- 1) 取样点及取样点的地质条件
- 2) 岩性描述, 包括颜色、矿物成分、结构、粒径、均质性、胶结物及胶结类型等。
- 3) 岩石的物理性质, 如密度、波速、孔隙度、导热系数、比热容、热膨胀率等。
- 4) 试件节理、裂隙及各向异性与加载方向描述等。

三、实验设备、原理及方法

- 1) 实验设备  
包括实验设备的名称、规格型号、量程和精度。
- 2) 实验原理  
包括计算公式、公式说明和参数取值说明。
- 3) 实验方法  
包括应力路径、加载速率、控制方式和实验方案。

四、实验结果与分析

- 1) 岩石的应力-位移关系曲线。
- 2) 岩石的破坏模式。
- 3) 基本指标和参数, 如剪切强度、残余强度、剪切模量等。
- 4) 温度、侧向应力和法向应力效应, 如温度对岩石剪切强度的影响。

五、结论