

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—XXXX

层状结构岩石力学实验技术规程

Technical Specification for Layered Structured Rock Mechanics Testing

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

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 基本规定	1
5 岩样采集与试件制作	2
6 试验设备	4
7 试验	5
8 试验数据整理与试验报告	6
附录 A （资料性） 采样记录表	13
附录 B （资料性） 试件制备记录表	14
附录 C （资料性） 层状结构岩石试验记录表	15
附录 D （资料性） 试验报告提纲	16

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并归口。

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、武汉理工大学、长沙理工大学、广西大学、成都理工大学、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司、中国水利水电第十一工程局有限公司、内蒙古科学技术研究院、隧道掘进机与智能运维全国重点实验室、铜陵有色金属集团控股有限公司、北方矿业有限责任公司。

本文件主要起草人：周扬一、刘旭锋、潘鹏志、徐鼎平、王兆丰、陈东方、牛文静、梅诗明、辜良杰、赵彬、高要辉、王刚、张宇、徐怀胜、张九雨、徐鸿、卢高明、熊志朋、李西凡、封雨捷、韩勇、郑青松、杜德伟、王雅歌。

本文件为首次发布。

层状结构岩石力学实验技术规程

1 范围

本文件规定了层状结构岩石力学试验的岩样采集、试件制作、试验设备、试验方法、数据处理和试验报告的要求。本文件适用于层理构造发育的沉积岩（页岩、砂岩、泥岩等）、变质层状结构岩石（板岩、片岩、千枚岩等）的各向异性力学性能测试。不适用于遇水崩解、极度松软的泥化夹层、散体破碎状层状碎屑岩体。

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 23561.1-2024 煤和岩石物理力学性质测定方法 第1部分：采样一般规定

GBT 50266-2013 工程岩体试验方法标准

SL/T264-2020 水利水电工程岩石试验规程

T/CSRME 007—2021 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

层状结构岩石 layered structured rock

原生沉积作用或变质作用形成、内部发育近平行片状或层状构造，且沿层理面力学性质显著弱化的岩石。

3.2

层理 bedding

由矿物组分、颗粒粒度、颜色、结构构造差异产生的平行或近平行的层状构造。

3.3

层面 bedding plane

分隔相邻岩层的自然分界面，是层理构造的基本组成单元。

3.4

层厚 layer thickness

层状结构岩石中相邻两组层理面之间的垂直法线距离。

3.5

层理倾角 bedding dip angle

层理面与水平面之间的最大夹角（锐角）。

3.6

层理走向角 bedding strike

真三轴应力条件下，层理面走向与中间主应力之间的夹角。

4 基本规定

4.1 层状结构岩石力学试验应依据工程勘察资料、设计需求编制专项试验大纲，明确取样位置、目标层位、特征层理角度、试验项目、应力水平与试件数量。

- 4.2 无特殊要求时，层状结构岩石力学试验与分析宜采用横观各向同性假定，即平行层理面内各方向力学性质相同，垂直层理面方向力学性质与平行层理面方向存在显著差异。
- 4.3 同一工程、同一岩性岩体，宜配套开展多层理角度对比试验，特征层理倾角宜选取 0°、30°、45°、60°、90°，特征层理走向角宜选取 0°、45°、90°；特殊地质条件可根据现场层理产状调整层理角度并在报告中说明。
- 4.4 试验环境温度宜为 20℃±2℃，相对湿度宜为 40%~60%；有特殊环境要求时，应按相关规定执行，并在试验报告中说明。
- 4.5 试验设备和计量器具应经法定计量机构检定或校准合格，并在有效期内使用。试验前应对设备进行全面检查，确认其运行状态满足试验要求。
- 4.6 试验全过程应严格保护岩样及试件的原生层理构造，不应采用可能造成层理错动、开裂、层面剥离的作业方式。
- 4.7 试验原始数据应实时记录，不应事后补记或篡改。所有数据、曲线、影像资料应同步归档，保存期限应符合工程档案管理要求。
- 4.8 本文件未作规定的内容，应符合现行国家、行业相关标准的规定。

5 岩样采集与试件制作

5.1 一般规定

- 5.1.1 采样前应收集采样地点的地质资料，依据层理发育程度、岩性组合及围岩完整性进行地质分区。采样点应具有代表性，宜选择层理连续完整、原生结构未受破坏的区段，并调查记录层理产状特征及顺层滑移、顶板离层、层间开裂等与层理构造直接相关的工程地质问题。
- 5.1.2 采样、运输和储存过程应保持岩样原始含水状态，采取密封保湿措施，防止层面遇水软化、泥化或失水干裂导致层理胶结强度改变。
- 5.1.3 试件宜采用钻孔获取完整岩芯加工，也可采用层理连续完整的块状岩体切割制备，不应采用层理破碎、层面张开、风化严重的岩块制作试件。
- 5.1.4 试件加工设备应配备可控制层理走向角和倾角的定位夹具，角度定位误差不应超过±0.5°。
- 5.1.5 试件加工宜采用湿式切割、湿式打磨工艺，对于遇水崩解、溶解或干缩湿胀的岩石，应采用干法制备试件。
- 5.1.6 试件几何尺寸、形状公差、外观质量应逐件检测，并核查层理连续性、层面有无人为张开或错动损伤。
- 5.1.7 试件加工完成后，应在非承压、非剪切的侧面标注试件统一编码、层理走向角、层理倾角数值，标识应清晰，不应在试件受力区域刻画或打磨。

5.2 岩样采集

- 5.2.1 岩样采集应依据工程地质勘察资料与审定后的试验大纲实施。单批次取样量应预留充足余量，满足全部特征层理倾角及走向角的试件加工需求。
- 5.2.2 采样全过程应采取防护措施保护原生层理构造，避免采用锤击、爆破等易造成层理错动、开裂的作业方式。
- 5.2.3 所有现场获取的块状岩样、钻探岩芯应在原位完成层理走向、倾角实测与方位标记。
- 5.2.4 岩样封装、运输、存放阶段应做好防潮、防碰撞、防振动保护；需水饱和状态测试的岩样应全程保湿密封。
- 5.2.5 采样后应采用记号笔对岩样进行编号，并在岩样上标注箭头符号标明层理方向，箭头指向为垂

直层理向上；记录内容应符合附录 A 的规定，包含采样日期、工程名称、采样单位、岩样编号、岩样类型、层理产状、层理与工程之间的空间关系描述等。

5.3 试件制作

5.3.1 单轴压缩试验试件应符合下列规定：

- 采用圆柱体作为标准试件时，试件高径比宜为 2.0—2.5；同批次试件应采用统一公称直径，宜为 50mm，也可根据试验设备及层理发育特征选用其他形状尺寸；
- 直径或边长应大于试件的最大矿物颗粒粒径的 10 倍；
- 直径或边长应大于试件的最大层厚的 10 倍；
- 层理倾角应按照 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 进行定向切割加工；
- 同一层理倾角、同一工况下，加工试件数量不应少于 5 件；
- 端面不平整度允许偏差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ；高度、直径或边长允许偏差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ；端面应垂直于试件轴线，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

5.3.2 常规三轴压缩试验试件几何尺寸、高径比、端面精度等要求与本文件 5.3.1 中单轴压缩试验圆柱体试件一致。

5.3.3 层面抗拉强度试验试件应符合下列规定：

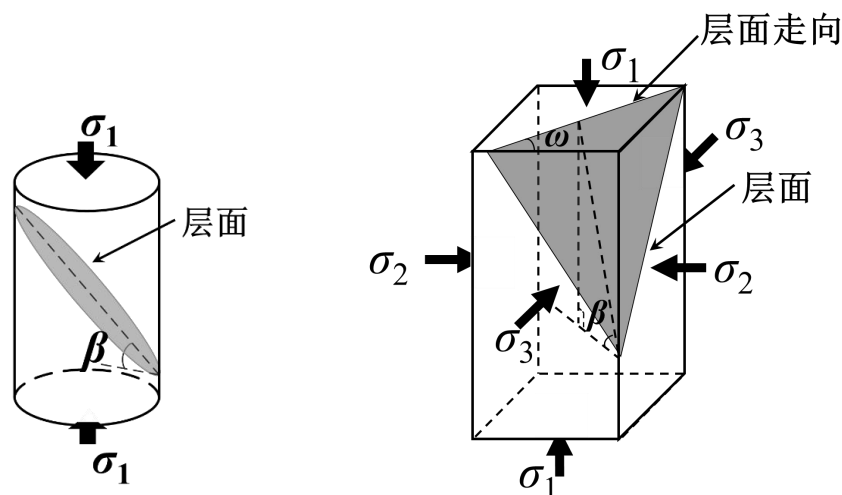
- 层面抗拉强度试验采用巴西劈裂试验，试件为圆盘状，直径宜为 48mm~54mm，试件厚径比宜为 0.5—1.0，试件层厚宜小于直径的 1/10；
- 试件的轴线方向平行于层理，允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ ；
- 同一层理加载方向下，加工试件数量不应少于 5 件；
- 试件加工尺寸偏差、端面精度等要求应符合本文件 5.3.1 的规定。

5.3.4 层面直剪试验试件应符合下列规定：

- 直剪试验试件的直径或边长不应小于 50mm，试件高度宜与直径或边长相等，试件外形尺寸应匹配直剪仪夹具规格，同批次试件外形尺寸保持统一；
- 试件的尺寸、平整度、垂直度等加工误差应符合本文件 5.3.1 的规定；
- 同一法向压力工况下，加工试件数量不应少于 3 件。

5.3.5 真三轴试验试件应符合下列规定：

- 应采用方柱体，长、宽、高比例为 1:1:2，尺寸宜为 50mm×50mm×100mm；特殊试验条件下，尺寸和形状可根据试验设备和层理发育特征确定；
- 层理走向角 ω 应按照 0° 、 45° 、 90° 设置，层理倾角 β 应根据试验和工程需求设置，见图 1。
- 尺寸、平整度、垂直度等加工误差应符合本文件 5.3.1 的规定。



(a) 单轴及常规三轴应力状态

(b) 真三轴应力状态

图 1 层理角度定义： β 为层理倾角， ω 为层理走向角

5.4 试件记录与描述

5.4.1 试件加工时应进行试件编号并做好记录，记录内容应包含岩样编号、岩石种类、试件编号、试件尺寸、含水状态、层理倾角、层理走向角及加工方式等，见附录 B。

5.4.2 试件制备完毕后应对试件进行物性参数测量和宏观结构描述，应包括下列内容：

- a) 编号、名称、颜色、岩性、矿物成分、试件尺寸、试件密度和波速等；
- b) 层厚、层理角度及结构特征；
- c) 初始缺陷及含水状态。

6 试验设备

6.1 一般规定

6.1.1 本文件所用试验设备、计量器具均应符合现行国家、行业相关技术标准。

6.1.2 试验设备应建立常态化维护、保养、检修制度，定期检查油路、电路、传动及加载系统，保证设备运行稳定、动作灵敏，无渗漏、卡滞、异响等故障。

6.1.3 试验设备应具备应力控制、位移控制两种加载模式，加载速率连续可调，尤其应具备稳定的位移伺服控制能力，以满足层状结构岩石破坏后阶段变形演化及残余强度的测试需求。

6.1.4 所有加载设备、剪切设备均应装设可靠安全防护装置，应能有效阻挡层状结构岩石试件沿层面崩裂飞溅的碎块。试验期间防护装置不应拆除、挪用。

6.1.5 试验设备应建立使用台账，如实记录使用时间、试验项目、操作人员、设备故障及维保情况，做到试验全程可追溯。

6.2 加载设备

6.2.1 通用伺服液压试验机

通用伺服液压试验机适用于单轴压缩试验、常规三轴压缩试验、层面抗拉强度试验，应符合下列规定：

- a) 设备采用伺服液压驱动系统，额定加载力不应小于 2000kN，整机刚度宜不小于 5GN/m；
- b) 配备标准化承压垫块、劈裂压头、三轴压力室等可更换组件，垫块、压头工作面平整；
- c) 设备可连续采集荷载、位移数据，直至试件完全破坏，完整输出全过程应力应变曲线，数据采集频率不应低于 10Hz，荷载及位移传感器测量精度应高于 0.1%FS。

6.2.2 直剪试验设备

直剪试验设备适用于层状结构岩石层面抗剪强度试验，应符合下列规定：

- a) 可同步独立伺服控制施加法向压力与水平剪切力，法向压力、剪切力分级连续可调，剪切过程中法向应力应保持恒定，波动范围不大于 $\pm 1\%$ ；
- b) 剪切盒内腔尺寸应匹配本文件规定的直剪试件规格，可定位剪切面，保证试件层理面位于标准剪切区域内；
- c) 设备整机刚度、荷载及位移传感器精度等技术要求应符合本文件 6.2.1 的规定。

6.2.3 真三轴试验设备

真三轴试验设备适用于层状结构岩石在真三向应力状态下的各向异性力学试验，应符合下列规定：

- a) 可对试件三个正交方向独立施加主应力，三向加载系统互不干扰，各向应力、位移可单独伺服控制与数据采集；

- b) 设备标准夹持腔体尺寸适配 50mm×50mm×100mm 方柱试件，也可根据特殊试验要求更换非标夹具；
- c) 设备整机刚度、荷载及位移传感器精度、数据采集性能等技术要求应符合本文件 6.2.1 的规定。

7 试验

7.1 一般规定

7.1.1 试验开展前，应对试验设备、量测器具进行全面检查，确认设备运行正常、传感器校准无误且在计量检定有效期内。

7.1.2 正式试验前逐件核查试件，核对试件编号、岩性、外形尺寸、含水状态及外观质量，存在尺寸超差、层理开裂、崩角掉块、新生裂隙的试件不应用于试验。

7.1.3 试验过程应及时、准确、完整地记录原始数据，不应事后补记、涂改或伪造，记录内容应符合附录 C 的规定。

7.1.4 试验加载宜采用位移伺服控制模式。试验过程中若出现设备故障、试件意外破损、加载偏心等异常情况，该组试件试验数据作废，应重新试验。

7.1.5 试验结束后，应对破坏试件进行拍照留存，并对试件进行必要的捆扎固定，避免对试件造成附加破坏。详细记录试件破坏形态，重点区分沿层理面滑移破坏、沿层面张拉破坏、穿层剪切破坏、穿层张拉破坏及复合破坏等类型。

7.2 层状结构岩石单轴压缩试验

7.2.1 清理试验机上下承压垫块工作面，保证垫块表面平整、无杂物、无明显磨损。

7.2.2 核查试件层理方位，确认层理倾角与试验设计值一致后，将试件放置在下承压垫块的几何中心位置，安装设备安全防护挡板。

7.2.3 对试件施加 1kN—5kN 的预紧力，并保证试件两端面与试验机上下压板接触均匀。

7.2.4 按照 0.5MPa/s—1.0MPa/s 的速率加载，试验全程连续采集数据，同步记录轴向荷载、轴向位移及环向位移原始数据。

7.2.5 加载期间实时观察试件外观变化，重点监测层理面是否出现开裂、错动、分离等现象，同步关注荷载、位移实时数值变化。

7.2.6 当荷载达到峰值后快速下降、试件出现整体失稳或达到残余强度阶段时，停止加载。

7.2.7 单组平行试件应在相同设备参数、相同环境条件下依次完成试验，单一层理倾角工况下有效试件数量宜不少于 3 件，宜按照层理倾角 $\beta=0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ，依次开展单轴压缩试验。

7.2.8 试验结束后取下试件前，应拍摄试件整体及局部破坏特征照片。

7.3 层状结构岩石常规三轴压缩试验

7.3.1 按照 7.2.1—7.2.3 的规定执行试验前的核查与预紧力施加环节。

7.3.2 试件的围压设置可按照等差或等比级数设置。最大围压应根据工程应力条件或岩石强度特性确定，宜覆盖工程可能遇到的全部应力范围。

7.3.3 按照 0.05MPa/s 的加载速率同步施加围压和轴向应力至预定的应力值，随后采用位移伺服控制模式施加轴向应力。当荷载达到峰值后快速下降或达到残余强度阶段停止加载。

7.3.4 试验全程连续采集围压、轴向荷载、轴向位移及环向位移数据。

7.3.5 层理倾角设置应符合本文件 7.2.7 的规定。

7.4 层状结构岩石层面抗拉强度试验

7.4.1 层状结构岩石层面抗拉强度试验采用巴西劈裂法。

7.4.2 试验前清理试验机劈裂压头，将试件水平放置于压头中心位置，调整试件角度，保证压头加载方向与试件层理平行。

7.4.3 设备采用应力伺服控制模式，设定加载速率为 0.3MPa/s—0.5MPa/s，匀速连续加载，直至试件沿预设层理方向劈裂破坏。

7.4.4 试验过程连续采集荷载、位移数据。

7.4.5 试验后拍摄试件劈裂形态，记录张拉破坏位置与层理的相对关系，若破坏面未沿层面贯通，该试件数据作废。

7.4.6 同一工况下有效试件数量宜不小于 5 件。

7.5 层状结构岩石层面直剪试验

7.5.1 层状结构岩石层面直剪试验采用单级平推法。

7.5.2 试验前将试件置于直剪仪剪切盒内部，调整试件位置使试件层理面位于剪切缝中部位置。

7.5.3 控制加载压头对剪切盒施加 1kN—5kN 的预紧力，保证试件与剪切盒接触均匀。

7.5.4 采用应力控制方式，以 0.1MPa/s 速率施加法向应力，直至设定的目标应力水平。

7.5.5 保持法向应力不变，采用位移控制方式，以 0.1mm/min—0.2mm/min 的速率单独施加剪切应力。

7.5.6 当试件沿层面发生明显滑移并且剪切载荷进入稳定残余阶段时，停止试验。

7.5.7 试验全程采集法向荷载、剪切荷载、剪切位移数据，记录各级法向压力对应的层理面抗剪强度，观察并记录层理面剪切滑移特征。

7.5.8 每组试验应至少设置 3 级不同法向压力，每组法向压力下有效试件数量宜不少于 3 件。

7.6 层状结构岩石真三轴压缩试验

7.6.1 试验前应核查试件层理方位，确认层理倾角、层理走向角与试验设计值一致后对试件进行封装。

7.6.2 试验过程宜遵循下列步骤：

- a) 将试件封装体置于加载台上，对三个主应力方向加载压头进行减摩处理；
- b) 调整试件封装体的中心轴线与加载压头的中心线重合，然后连接三个加载方向的位移传感器；
- c) 对试件的三个主应力方向施加 1kN—5kN 的预紧力；
- d) 采用应力控制方式，以 0.5MPa/s—1.0MPa/s 速率同步独立加载 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，直至设定的最小主应力水平；
- e) 保持 σ_3 不变，采用应力控制方式同步加载 σ_1 、 σ_2 ，直至设定的中间主应力水平；
- f) 当 σ_1 — σ_1 变形曲线开始偏离线性或体积变形达到反折拐点时，应采用位移伺服控制方式进行最大主应力方向的加载；
- g) 当岩石达到残余强度阶段，应按照加载路径的反向顺序将所有载荷卸掉。

7.6.3 试验过程中应实时采集三个主应力方向的应力和位移数据。

7.6.4 试验结束后应拍摄试件六个加载面的破坏形态，并标记主应力加载方位与层理角度，记录破坏面空间分布与层理面的关系。

8 试验数据整理与试验报告

8.1 一般规定

8.1.1 层状结构岩石的横观各向同性弹性本构关系的相关变形参数计算应按 8.2.2 执行。

8.1.2 数据处理方法应统一，同一批次试验应采用相同的计算公式、取值规则和统计方法，保证试验

结果的可比性。

8.1.3 试验完成后应编制正式的试验报告，试验报告应内容完整、数据准确、逻辑清晰、结论明确。试验报告内容应符合附录 D 的规定。

8.2 应变及变形参数计算

8.2.1 试件表观变形参数按下述方法计算：

a) 主应变按公式（1）计算：

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i} \quad (1)$$

式中：

i ——1、2、3；

ε_i ——沿 σ_i 方向试件的主应变；

l_i —— σ_i 方向上试件的初始长度，单位：mm；

Δl_i —— σ_i 方向上试件的变形量，单位：mm。

b) 体积应变按公式（2）计算：

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2)$$

式中：

ε_v ——试件的体积应变。

c) 弹性模量按公式（3）计算：

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

式中：

E ——弹性模量，单位：GPa；

$\Delta \sigma$ ——应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应力增量，MPa；

$\Delta \varepsilon_1$ ——应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应变增量。

d) 泊松比按公式（4）计算：

$$\nu = \left| \frac{\Delta \varepsilon_3}{\Delta \varepsilon_1} \right| \quad (4)$$

式中：

ν ——泊松比；

$\Delta \varepsilon_1$ ——应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应变增量；

$\Delta \varepsilon_3$ ——应力应变曲线近似直线段最小主应力方向的应变增量。

8.2.2 层状结构岩石的五个独立变形参数按下述方法计算：

a) 垂直各向同性面的弹性模量（ E_1 ）按照公式（5）计算、泊松比（ ν_1 ）按照式（6）计算，计算层理倾角 $\beta = 0^\circ$ 时试件的弹性模量、泊松比，见图 2；

$$E_1 = \frac{\Delta \sigma_z}{\Delta \varepsilon_z} \quad (5)$$

式中：

E_1 ——垂直各向同性面的弹性模量；

$\Delta\sigma_z$ —— $\beta = 0^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应力增量，MPa；

$\Delta\varepsilon_z$ —— $\beta = 0^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应变增量。

$$\nu_1 = \left| \frac{\Delta\varepsilon_z}{\Delta\varepsilon_x} \right| \cdots \cdots \cdots (6)$$

式中：

ν_1 ——垂直各向同性面的泊松比；

$\Delta\varepsilon_x$ —— $\beta = 0^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段平行各向同性面方向的应变增量。

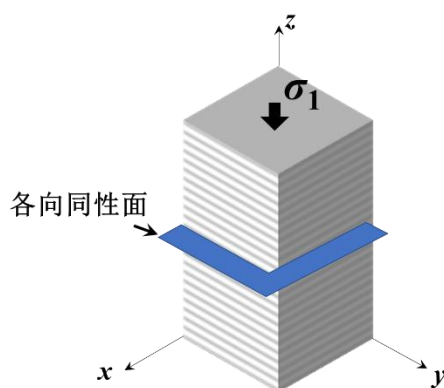


图2 $\beta = 0^\circ$ 试件加载方位示意图

b) 平行各向同性面的弹性模量 (E_2)、泊松比 (ν_2)：分别按照公式 (7) 和 (8)，计算层理倾角 $\beta = 90^\circ$ 时试件的弹性模量、泊松比，见图 3。该层理加载角度时 $\Delta\varepsilon_x \neq \Delta\varepsilon_y$ 。

$$E_2 = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z} \cdots \cdots \cdots (7)$$

式中：

E_2 ——平行各向同性面的弹性模量；

$\Delta\sigma_z$ —— $\beta = 90^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应力增量，MPa；

$\Delta\varepsilon_z$ —— $\beta = 90^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应变增量。····· $\nu_2 = \left| \frac{\Delta\varepsilon_z}{\Delta\varepsilon_x} \right|$

(8)

式中：

ν_2 ——平行各向同性面的泊松比；

$\Delta\varepsilon_z$ —— $\beta = 90^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段最大主应力方向的应变增量。

$\Delta\varepsilon_x$ —— $\beta = 90^\circ$ 时，应力应变曲线近似直线段平行各向同性面方向的应变增量。

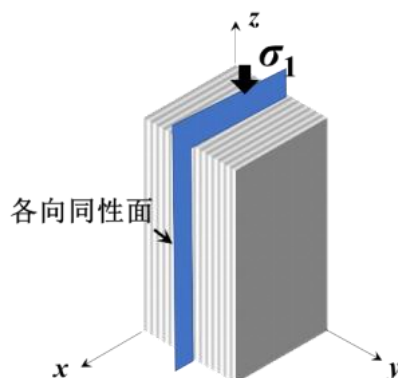


图3 $\beta = 90^\circ$ 试件加载方位示意图

- c) 垂直于各向同性面的剪切模量 (G_2): 宜根据不同层理倾角试件的视弹模确定。根据横观各向同性本构关系, 不同层理倾角试件的视弹模 E_β 与 5 个弹性参数的关系见式 (9)。可依据不同层理倾角试件的弹性模量代入式 (10) 求得 G_2 。以 $\beta = 45^\circ$ 试件为例, 可得 G_2 的表达式见式 (10)。

$$E_\beta = \frac{\sin^4 \beta}{E_2} + \frac{\cos^4 \beta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_2} - \frac{2\nu_1}{E_1} \right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \quad (9)$$

式中:

E_β ——不同层理倾角试件的视弹模; G_2 ——垂直于各向同性面的剪切模量。

$$\frac{1}{G_2} = \frac{4}{E_{45^\circ}} - \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} + \frac{2\nu_1}{E_1} \quad (10)$$

式中:

E_{45° —— $\beta = 45^\circ$ 试件的视弹模。

8.2.3 层面剪切试验中岩石的法向位移、剪切位移应分别按式 (11)、(12) 计算:

$$\delta_n = L_n - L_{n0} \quad (11)$$

式中:

δ_n ——岩石的法向位移, mm;

L_n ——某一时刻法向位移的瞬时示值, mm;

L_{n0} ——法向位移初始示值, mm。

$$\delta_s = L_t - L_{t0} \quad (12)$$

式中:

δ_s ——岩石的剪切位移, mm;

L_t ——某一时刻剪切位移的瞬时示值, mm;

L_{t0} ——剪切位移初始示值, mm。

8.3 应力及强度参数计算

8.3.1 压缩试验中作用在试件表面的主应力应按公式 (13) 计算:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_i} \quad (13)$$

式中:

i ——1、2、3;

σ_i ——岩石试件的第 i 主应力, MPa;

F_i ——第 i 主应力方向的荷载, N;

A_i ——荷载 F_i 对岩石试件的作用面积, mm^2 。

8.3.2 层面抗拉强度应按式 (14) 计算:

$$\sigma_t = \frac{2P_t}{\pi Dt} \quad (14)$$

式中:

σ_t ——抗拉强度, MPa;

P_t ——试件劈裂时的峰值荷载, kN;

D ——试件直径, mm;

t ——试件厚度, mm。

8.3.3 层面剪切试验中试件的法向应力、剪切应力应分别按式 (15)、(16) 计算:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_n} \quad (15)$$

式中:

F_n ——岩石的法向荷载, N;

A_n ——岩石的剪切面面积, mm^2 ;

σ_n ——岩石的法向应力, MPa。

$$\tau = \frac{F_t}{A_n} \quad (16)$$

式中:

F_t ——岩石的剪切荷载, N;

τ ——岩石的剪切应力, MPa。

8.3.4 层面剪切试验中试件的黏聚力和内摩擦角应按公式(17)计算:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (17)$$

式中:

c ——黏聚力, MPa;

φ ——内摩擦角, $^\circ$ 。

8.3.5 层理倾角影响下的强度各向异性系数应按式(18)计算:

$$k_\beta = \frac{\sigma_{\beta 60^\circ}}{\sigma_{\beta 0^\circ}} \quad (18)$$

式中:

k_β ——层理倾角影响下的强度各向异性系数, 无量纲;

$\sigma_{\beta 60^\circ}$ ——层理倾角 60° 试件的单轴抗压强度平均值, MPa;

$\sigma_{\beta 0^\circ}$ ——层理倾角 0° 试件的单轴抗压强度平均值, MPa。

8.3.6 层理走向角影响下的强度各向异性系数应按式(19)计算:

$$k_\omega = \frac{\sigma_{\omega 0^\circ}}{\sigma_{\omega 90^\circ}} \quad (19)$$

式中:

k_ω ——层理走向角影响下的强度各向异性系数, 无量纲;

$\sigma_{\omega 0^\circ}$ ——同一中间主应力下层理走向角 0° 试件的抗压强度平均值, MPa;

$\sigma_{\omega 90^\circ}$ ——同一中间主应力下层理走向角 90° 试件的抗压强度平均值, MPa。

8.4 误差计算

8.4.1 同一工况下, 试件的强度或变形参数算术平均值应按式(20)计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (20)$$

式中:

$\bar{x}$ ——算术平均值;

n ——试件数量;

x_i ——第 i 个试件测试值。

8.4.2 标准差应按式(21)计算:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

式中:

S ——标准差。

8.4.3 变异系数应按式 (22) 计算：

$$C_V = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (22)$$

式中：

C_V ——变异系数。

8.4.4 同一工况下，强度及变形参数的变异系数不应大于 30%，超出上述范围时，应分析原因并增加试件数量重新试验。

8.5 试验报告

8.5.1 层状结构岩石单轴压缩试验报告应包含以下内容：

- 试验基本信息：工程名称、取样位置、岩性描述、试件编号、层理角度、层理性质、含水状态、试验设备等；
- 不同层理倾角试件的全应力-应变曲线，包含轴向应变和环向应变曲线，标注峰值强度及残余强度；
- 单轴抗压强度结果，包含不同层理倾角试件实测值，其示意图参见图 4a、变异系数及层理倾角影响下的强度各向异性系数；
- 弹性模量、泊松比统计结果表，给出层状结构岩石的五个独立变形参数；
- 不同层理倾角试件的破坏模式照片，描述破坏面及裂纹与层面的关系，其示意图参见图 4b。

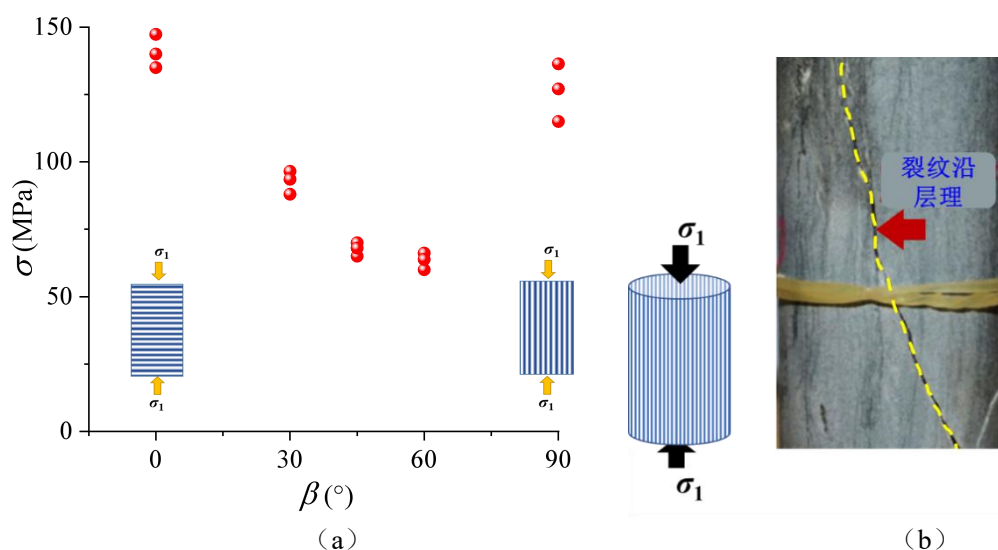


图 4 层状结构岩石试件的强度及破坏模式描述示意图

8.5.2 层状结构岩石常规三轴压缩试验报告应包含以下内容：

- 不同围压、不同层理倾角试件的全应力-应变曲线、三轴抗压强度、变形参数、破坏模式；
- 不同层理倾角试件的强度-围压关系曲线及线性回归方程，给出黏聚力和内摩擦角计算结果，明确围压对强度各向异性的影响；
- 试验基本信息应符合 8.5.1 的规定。

8.5.3 层状结构岩石层面抗拉强度试验报告宜包含以下内容：

- 层面抗拉强度统计结果表，包含各试件实测值、算术平均值、标准差及变异系数；
- 不同层理夹角试件的劈裂破坏照片，标注加载方向与层理面的相对位置，明确劈裂面是否沿层面发育，有无数次生裂纹产生；
- 试验基本信息应符合 8.5.1 的规定。

8.5.4 层状结构岩石层面剪切试验报告应包含以下内容：

- 不同法向压力下的剪应力-剪切位移曲线，标注峰值剪切强度及残余剪切强度；
- 层面抗剪强度统计结果表，按法向压力等级列出各试件实测值、平均值、标准差及变异系数；给出层面黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的计算结果；
- 剪切面破坏照片，标注法向压力值，描述层面剪切擦痕、碎屑分布及胶结物破坏情况；
- 试验基本信息应符合 8.5.1 的规定。

8.5.5 层状结构岩石真三轴压缩试验报告宜包含以下内容：

- 不同中间主应力水平、不同层理倾角及层理走向角下的三方向应力-应变曲线，层理走向角影响下的强度各向异性系数，明确层理走向角对试件强度的影响，其示意图参见图 5；
- 试件的破坏形态照片，明确破坏面与三个主应力方向及层理面的空间关系，其示意图参见图 6；
- 试验基本信息应符合 8.5.1 的规定。

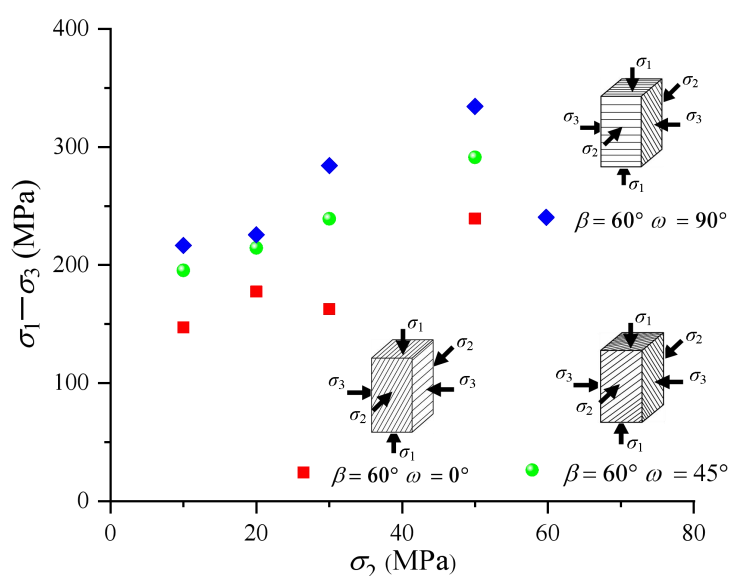


图 5 真三轴压缩下层状结构岩石的层理走向角对试件强度影响的示意图

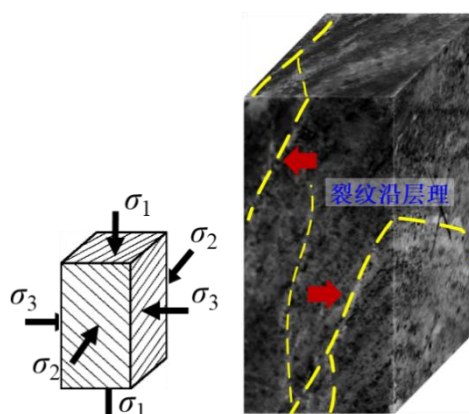


图 6 真三轴压缩下层状结构岩石试件的破坏模式描述示意图

附 录 A
(资料性)
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	采样 方法	层理 产状	岩性 描述	岩层 埋深	层理与洞室之 间的空间关系	工程问题 描述	岩样 规格	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、裂隙发育情况等。						

记录：_____ 校核：_____

附 录 B
(资料性)
试件制备记录表

制备单位: _____ 制备日期: _____

岩样 编号	岩石 类型	试件 编号	试件尺寸 mm	形状尺 寸偏差 mm	含水 状态	层理倾 角。 。	层理走 向角。 。	加工方 式	备注

记录: _____

校核: _____

附 录 C
(资料性)
层状结构岩石试验记录表

送样单位：_____ 工程名称：_____ 试验日期：_____

试件 编号	岩石 种类	试验类型	试件尺寸 mm	应力水平 MPa		试验控制方式 (加载方 式、加载速 率)	试验结果			备注
							强度 参数	变形 参数	破坏 模式	

记录：_____ 计算：_____ 校核：_____

附 录 D
(资料性)
试验报告提纲

一、前言

1) 试验背景

2) 试验目的

二、试件描述

1) 取样点及取样点的地应力大小和方向。

2) 岩性描述，包括颜色、矿物成分、层理特性等。

3) 岩石的物理性质数据，如密度、孔隙度、渗透率、含水饱和度及波速等。

4) 试件层理角度与三个加载方向的关系。

三、试验原理、设备与方法

1) 试验原理

包括计算公式、公式说明和参数取值说明。

2) 试验设备

包括试验设备的名称、规格型号、量程和精度。

3) 试验方法

包括应力路径、加载速率、控制方式、试验步骤和时长。

四、试验结果与分析

1) 岩石的应力-应变（位移）关系曲线。

2) 岩石的破坏模式与层理及主应力之间的关系。

3) 层理倾角及走向角对试件强度的影响；

4) 基本指标和参数，例如破坏强度、残余强度、变形模量、剪切强度、黏聚力和内摩擦角等。

5) 层状结构岩石的五个独立变形参数。

五、结论与建议

- [1] 冯夏庭,刘旭锋,周扬一,龚彦华,辜良杰.一种横观各向同性真三轴岩样制作方法[P].辽宁省:CN110208052B, 2021-04-02.
- [2] 冯夏庭,刘旭锋,周扬一,王春,张文灿,龚彦华,辜良杰.一种层状岩石薄板试样制作及加载方法[P].辽宁省:CN110208053B, 2021-05-25.
- [3] 徐鼎平,周扬一,陈东方,刘旭锋.2026.陡倾薄层围岩开挖卸荷破坏机理与稳定性分析.北京:科学出版社.
- [4] 冯夏庭, 杨成祥,等. 2023. 深部工程硬岩力学. 北京:科学出版社.
- [5] 刘旭锋, 周扬一. 多轴压缩条件下层状硬质片岩的力学特性研究[J]. 岩土力学, 2022,43(08):2213-2221.
- [6] LIU XF, FENG XT, ZHOU YY. Influences of schistosity structure and differential stress on failure and strength behaviors of an anisotropic foliated rock under true triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 1273-1287.
- [7] LIU XF, FENG XT, ZHOU YY. Experimental study of mechanical behavior of gneiss considering the orientation of schistosity under true triaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 04020199.
- [8] ZHOU YY, FENG XT, XU DP, et al. Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Bedded Rocks and Its Implication for High Sidewall Caverns[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016,49(9):3643-3669.