

片麻岩三轴压缩试验下的力学响应研究

李仕超 陈辉 张兴航 石彬

新疆大学地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830047

摘要: 片麻岩是矿山开采中常用的岩体材料, 其力学特性直接影响工程岩体稳定性, 现有研究对其三轴应力下的力学特性探究仍有不足。本文通过室内三轴压缩试验, 设置 5、10、15、20MPa 围压, 系统研究片麻岩的应力 - 应变曲线、峰值强度及破坏特征。结果表明, 围压对片麻岩峰值偏应力呈先增后减的影响, 10MPa 为试验条件下的临界围压, 此时岩样承载与变形能力最优; 不同围压下片麻岩破坏模式存在差异, 低围压下呈脆性破坏特征, 高围压下呈现脆塑性转化趋势。本研究为片麻岩赋存区矿山井下巷道支护、采场围岩控制等工程提供了可靠的试验数据支撑。
关键词: 三轴压缩; 片麻岩; 力学响应; 围压效应

Study on Mechanical Response of Gneiss Under Triaxial Compression

Li Shichao, Chen Hui, Zhang Xinghang, Shi Bin

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, China Xinjiang Urumqi 830047

Abstract: Gneiss is a common rock mass material widely encountered in mining engineering, and its mechanical properties directly affect the stability of engineering rock masses. However, existing studies are still insufficient on its mechanical behavior under triaxial stress conditions. In this paper, a series of laboratory triaxial compression tests were conducted with confining pressures set at 5, 10, 15, and 20 MPa to systematically investigate the stress-strain curves, peak strength, and failure characteristics of gneiss. The results show that the confining pressure has an effect of first increasing and then decreasing on the peak deviatoric stress of gneiss. The critical confining pressure under the test conditions is 10 MPa, at which the bearing and deformation capacities of the rock specimens are optimal. The failure modes of gneiss differ under various confining pressures: it shows brittle failure under low confining pressure, and a trend of brittle-plastic transition under high confining pressure. This study provides reliable experimental data support for underground roadway support, stope surrounding rock control, and other engineering practices in gneiss-bearing mining areas.

Keywords: Triaxial compression; Gneiss; Mechanical response; Confining pressure effect

0 引言

片麻岩作为广泛分布于地壳中的变质岩, 是矿山开采中常用岩体材料, 其力学特性直接决定工程岩体的稳定性与安全性, 尤其在煤矿工程中, 片麻岩作为井下巷道、采场的主要围岩, 其力学稳定性直接关系到煤矿生产安全^[1]。实际工程中, 片麻岩常处于复杂三向应力状态, 而三轴压缩试验能精准模拟其实际受力环境, 是揭示岩体力学响应规律的核心手段^[2]。然而现有研究多侧重片麻岩单轴力学特性, 对三轴应力下其强度、变形及破坏机制的系统探究仍存在不足, 且片麻岩的片状构造导致其力学响应具有明显各向异性, 进一步增加了研究复杂性^[3,4]。基于此, 本文通过室内三轴压缩试验, 系统研究片麻岩在不同围压条件下的应力 - 应变曲线、峰值强度及破坏特征, 揭示其力学响应规律与围压影响机制^[5], 为煤矿井下巷道支护、采场围岩控制及矿山工程稳定性评估提供可靠的试验数据与理论支撑。

1 试验准备与试验方法

1.1 岩样制备

对矿区现场所取的片麻岩岩块依据《工程岩体试验方法标准》(GBT 50266—2013) 中规定, 精细加工制备成直径 50mm、高度 100mm 的圆柱标准试件, 直径允许偏差小于 0.2mm, 两端面允许偏差小于 0.05mm 的不平整度。剔除外观缺陷明显试件, 同时利用声波测速方法选取波速相近岩样, 制备岩样如图 1 所示。经过 XRD 衍射分析片麻岩的主要矿物成分含石英 (65.2%)、长石 (27.7)、黑云母 (7.1%) 等。



图1 实验样品

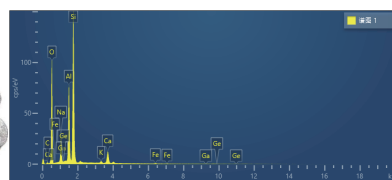


图2 XRD衍射分析

1.2 试验设备与方案

本次常规三轴试验采用的是美国 GCTS,RTR-1000 型号高温高压岩石力学测试系统。最大轴向荷载 1000kN 和 140MPa 的最大围压，加载速率范围 0.001 ~ 10mm/min。参考本次取样岩体所处的地层环境以及现场地应力测试结果，岩体内部并不存在明显的地热温度和构造应力。设定围压为 5、10、15、20MPa。再以 0.05mm/min 速率加载并记录数据至试样破坏，重复完成不同围压试验。

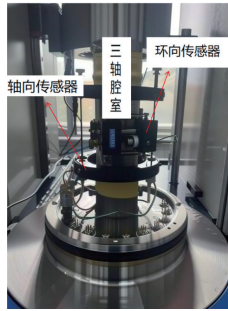
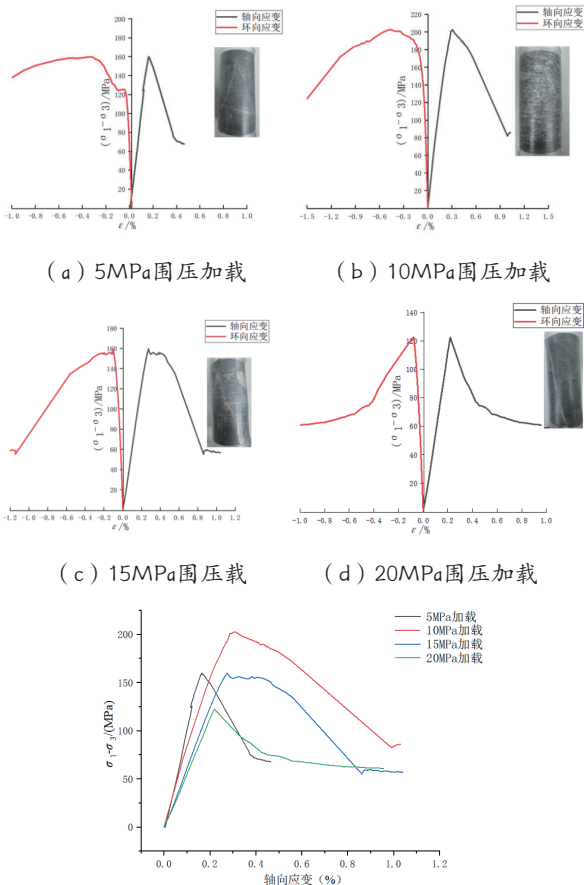


图3 常规三轴测试设备试验图

2 结果与讨论

三轴压缩试验应力 - 应变曲线图结果见图所示，三轴抗压强度见表 1 所示。



(e) 轴向应力-应变曲线图
图4 三轴压缩应力-应变曲线图

表1 岩石三轴压缩试验数据表

试件编号	围压 σ_3 (MPa)	偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	偏应力最大时 横向应变 ϵ_1 (%)	偏应力最大时 轴向应变 ϵ_2 (%)
1	5	160.03	0.345	0.165
2	10	202.73	0.471	0.309
3	15	159.53	0.104	0.274
4	20	122.28	0.087	0.221

从偏应力数据来看，围压对片麻岩峰值偏应力呈现先增后减的影响特征，5MPa 围压下偏应力为 160.03MPa，10MPa 围压时达到峰值 202.73MPa，而 15MPa、20MPa 围压下偏应力依次降至 159.53MPa、122.28MPa，整体呈下降趋势。

在破坏变形特性方面，围压设置为 5MPa 时呈现共轭剪切破坏（X 型剪切），可见两组交叉的剪切裂纹，形成典型的 X 形断裂面，是脆性岩石在三轴压缩下的常见剪切破坏形式。围压增加为 10MPa 时表现为单斜面剪切破坏，存在一条贯穿性的主剪切面，裂纹相对集中，属于典型的剪切滑移破坏。围压继续增加到 15MPa 为剪切 - 劈裂混合破坏，既有明显的剪切主裂纹，又伴随多条次生张性裂纹，是剪切与拉伸共同作用的结果。围压设置为 20MPa 属于单斜剪切破坏（近轴向劈裂），主裂纹沿轴向方向延伸，兼具剪切与拉伸特征，与岩石各向异性或围压条件相关。

片麻岩的横向与轴向应变随围压变化同样表现出明显规律性。5MPa 至 10MPa 围压阶段，横向应变从 0.345% 升至 0.471%、轴向应变从 0.165% 升至 0.309%，应变均显著增大，说明低围压提升阶段片麻岩塑性变形能力增强；当围压继续增至 15MPa、20MPa 时，横向和轴向应变均持续减小，反映出高围压下片麻岩变形受到明显约束，变形量逐步降低。

从应力 - 应变曲线形态来看，不同围压下片麻岩的力学阶段特征存在差异，低围压下岩样破坏前塑性阶段较短，破坏形式更接近脆性，高围压下塑性阶段有所延长，岩样呈现出脆塑性转化的趋势。整体而言，围压是影响片麻岩力学特性的关键因素，10MPa 为本次试验中片麻岩力学性能的临界围压，此围压下岩样的承载能力和变形能力均达到最优，而围压超过该值后，片麻岩的抗压承载能力呈逐步衰减趋势。

3 结语

(1) 本次通过 5~20MPa 围压下的片麻岩常规三轴压缩试验，明确了围压对片麻岩力学特性的显著调控作用，其偏应力、横向与轴向应变均随围压呈现先增后减的变化规律，10MPa 围压为本次试验条件下片麻岩力学性能的临

界值, 此围压下岩样承载与变形能力均达最优。

(2) 不同围压下片麻岩应力 - 应变曲线特征差异显著, 低围压下岩样破坏前塑性阶段短, 呈脆性破坏特征, 高围压下塑性阶段延长, 表现出脆塑性转化趋势, 围压的约束作用改变了片麻岩的破坏模式与变形演化规律。

(3) 试验所得片麻岩力学响应数据, 为片麻岩赋存区矿山井下巷道支护、采场围岩稳定性控制等工程设计提供了试验支撑, 后续可结合片麻岩各向异性开展不同加载角度的三轴试验研究。

参考文献:

[1] 唐永志, 唐彬, 程桦等. 煤矿复杂地层 TBM 掘进巷道新型装配式支护结构工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2024,52(09):68-75.

[2] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红等. 能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报,

2009,28(08):1530-1540.

[3] 王晓雷, 蒋鹏程, 闫顺玺等. 层状片麻岩力学性质与变形场演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1255-1262.

[4] 刘贵, 周永胜, 石耀霖. 先存组构对各向异性岩石流变强度的影响[J]. 地震地质, 2014,36(03):918-928.

[5] 张希巍, 杨成祥, 张柬等. 红透山铜矿深部片麻岩力学行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(S2): 3228-3237.

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅自治区科技计划项目 - 重大专项, 超高海拔区战略性金属矿产绿色安全高效露天开采关键技术研发, 编号: 2024A03001。

作者简介: 李仕超 (1999.11-), 男, 汉族, 四川南充人, 硕士研究生在读。研究方向: 矿山爆破及安全方向的研究。