

弱胶结泥岩真三轴力学特性试验研究

李少梦, 张华磊

安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年5月20日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年7月16日

摘要

我国西部矿区广泛分布弱胶结泥岩, 其胶结性差、结构松散, 在采动扰动下易发生变形破坏, 严重威胁矿井安全。为揭示中主应力对其力学行为的影响机制, 以内蒙古塔拉壕煤矿底板泥岩为研究对象, 开展真三轴加载试验, 分析不同中主应力比(σ_2/σ_3)下岩样的应力-应变演化特征、强度规律及破坏模式。结果表明: 弱胶结泥岩峰值强度与中主应力比呈显著正相关, 随着 σ_2/σ_3 增大, 峰值强度提高了45.43%; 弹性模量随 σ_2/σ_3 增大呈先增后减特征, 并在1.5~2.0区间达到最大; 岩样破裂面规整性随 σ_2/σ_3 增大而降低, 破坏形态趋于复杂化。强度准则对比显示, Mogi-Coulomb准则对试验数据的拟合效果最佳, 其决定系数 R^2 达到0.9793。研究结果可为西部矿区深部巷道支护设计及数值模拟参数选取提供依据。

关键词

弱胶结泥岩, 真三轴试验, 中主应力效应, 强度准则, 破坏特征

Experimental Study on True-Triaxial Mechanical Properties of Weakly Cemented Mudstone

Shaomeng Li, Hualei Zhang

School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 20, 2026; accepted: June 19, 2026; published: July 16, 2026

Abstract

Weakly cemented mudstone is widely distributed in mining areas of western China. It is characterized by poor cementation and loose structure, and is prone to deformation and failure under mining disturbance, which seriously endangers mine safety. To reveal the influence mechanism of intermediate principal stress on its mechanical behavior, true-triaxial loading tests were conducted on floor

mudstone specimens from Talahao Coal Mine in Inner Mongolia. The stress-strain evolution characteristics, strength laws, and failure modes of rock samples under different intermediate principal stress ratios (σ_2/σ_3) were analyzed. The results show that the peak strength of weakly cemented mudstone has a significant positive correlation with the intermediate principal stress ratio, and the peak strength increases by 45.43% with the rise of σ_2/σ_3 . The elastic modulus increases first and then decreases with increasing σ_2/σ_3 , reaching the maximum value in the range of 1.5~2.0. The regularity of fracture surfaces decreases, and the failure pattern becomes more complex as σ_2/σ_3 increases. Comparison of strength criteria indicates that the Mogi-Coulomb criterion presents the best fitting performance for the test data, with a coefficient of determination R^2 of 0.9793. The research results can provide a reference for deep roadway support design and parameter selection for numerical simulation in western mining areas.

Keywords

Weakly Cemented Mudstone, True-Triaxial Test, Intermediate Principal Stress Effect, Strength Criteria, Failure Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国西部侏罗系-白垩系地层广泛发育弱胶结泥岩、砂岩等软岩,具有胶结弱、孔隙裂隙发育、遇水易软化崩解及力学离散性强等特点。随着开采深度增加,深部巷道底臃、大变形及渐进失稳灾害频发,已成为制约西部矿区安全高效开采的关键工程地质难题。深部高地应力环境下,围岩受力逐渐由常规三轴向三维非等向应力状态转化,中主应力 σ_2 对岩体强度、变形及破坏的控制作用日益凸显,亟需从真三轴受力视角揭示其失稳机理。

真三轴试验可实现三个主应力的独立调控,是研究 σ_2 效应的核心手段。自 Mogi (1971)和 Wiebols 等提出中主应力对岩石强度的强化效应及八面体剪应力描述方法以来,真三轴理论迅速发展。李文帅等[1]-[3]系统证实了 σ_2 可显著提升峰值强度与偏应力水平,改变剪切带倾角及声发射演化规律;刘之喜等[4]-[6]进一步指出, σ_2 与卸载路径、节理产状的耦合作用共同控制能量耗散、损伤累积及岩爆烈度;王春来等[7] [8]则实现了岩石损伤演化的三维可视化表征,并揭示了 σ_2 对充填体刚度与强度的提升机制。上述研究构建了“中主应力影响强度-调控变形-控制损伤-建立准则”的完整体系。然而,现有的真三轴研究多聚焦于花岗岩、砂岩等硬岩及煤岩、充填体,针对软岩特别是弱胶结泥岩的研究严重滞后。刘海全等[9]-[11]通过单轴及常规三轴试验指出,该类岩石具低强度、强流变及水理敏感性特征,围压虽能提高强度但加速损伤;张世忠等[12]-[15]亦揭示了其高孔隙、应力-损伤-渗流耦合及层理弱化效应,但均局限于常规三轴应力路径。目前,关于真三轴连续加载下弱胶结泥岩的弹性模量演化规律、中主应力强化阈值及强度准则适用性等关键科学问题,尚未形成统一认识,难以支撑深部软岩工程的精准设计。

为此,本文以内蒙古塔拉壕煤矿底板弱胶结泥岩为对象,开展不同中主应力比 σ_2/σ_3 下的真三轴连续加载试验。重点揭示 σ_2 对全应力-应变曲线特征、弹性模量动态演化及宏观破坏模式的调控机制;系统评价 Mohr-Coulomb、Drucker-Prager 及 Mogi-Coulomb 等经典准则对该类软岩的适用性边界。研究成果旨在阐明弱胶结泥岩的中主应力强化机理,丰富软岩非线性力学理论,为西部矿区深部巷道围岩稳定性控制与支护优化提供科学依据。

2. 试验设备与试验方法

2.1. 试验设备

采用安徽理工大学力学与光电物理学院 TAW-1000 微机控制三轴全自动检测试验平台, 其中 σ_2 、 σ_3 机架固定, σ_1 机架可沿水平导轨移动。试样置于全刚性立方体结构的真三轴加载装置中, 该装置由箱体和加载垫块等组成, 并采用“内错式”加载垫块。通过六面错位布置、接触面设置滚珠垫片并涂抹润滑剂, 有效消除传统垫块间隙引起的异常破裂现象。当试样发生较大变形时, 垫块可随试样同步运动, 从而减少相互挤压带来的干扰。微机控制三轴全自动检测试验平台如图 1 所示。



Figure 1. Microcomputer controlled triaxial fully automatic detection and testing platform
图 1. 微机控制三轴全自动检测试验平台

2.2. 岩样制备

试样选用内蒙古塔拉壕煤矿 3103 工作面底板泥岩的部分岩芯, 岩性以砂质泥岩和泥岩为主, 含石英、长石及蒙皂石、高岭石等粘土矿物, 遇水易膨胀崩解, 局部含植物化石。选取完整度高、无明显裂纹的完整段岩芯及用保鲜膜将试样包裹住, 运回实验室加工成尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的长方体试样, 泥岩试样如图 2 所示。

为保证试验结果的可靠性与代表性, 对制备完成的试样进行了超声波测试与密度测量, 筛选出波速离散性小于 5% 的试样用于试验。泥岩试样基本物理参数统计如表 1 所示, 可知所选试样物理性质均一, 变异系数较小, 满足岩石力学试验对试样均质性的要求。

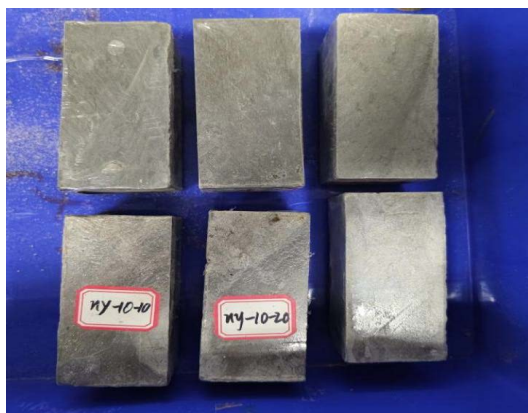


Figure 2. Mudstone specimen
图 2. 泥岩试样

Table 1. Basic physical parameters of mudstone specimens
表 1. 泥岩试样基本物理参数

参数名称	平均值	范围	标准差	变异系数
密度/(kg/m ³)	2290	2260~2310	0.02	0.008
波速/(m/s)	2811.96	2670.89~2836.54	45	0.019
含水率/(%)	4.67	4.40~4.84	0.15	0.071
孔隙度/(%)	18.5	17.3~19.8	0.8	0.043

2.3. 加载路径

试验采用真三轴连续分级加载路径：首先以 0.1 MPa/s 的加载速率施加，待最小主应力 σ_3 加载至 20 MPa 并稳压恒定时继续加载中间主应力 σ_2 ，待轴向应力 σ_1 达到初始静水压力条件后，即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，完成轴向应变和横向应变清零复位，以此还原深部岩体原位围压环境；最终采用位移控制方式，对最大主应力 σ_1 开展单调持续加载，直至试件产生宏观失稳破坏。试样应力加载路径如图 3 所示。

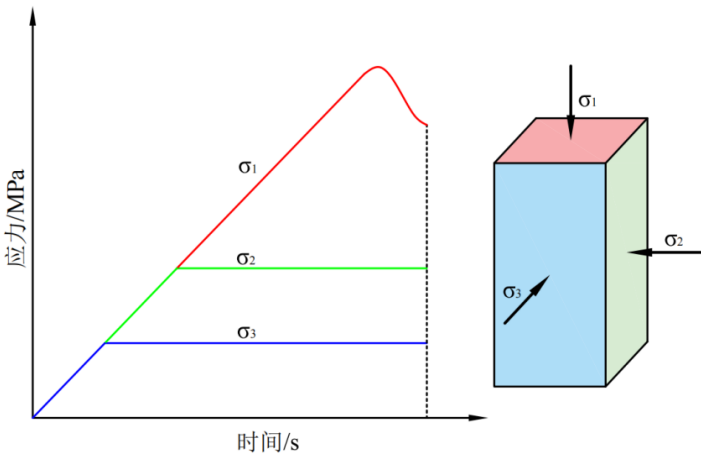


Figure 3. Specimen stress loading path
图 3. 试样应力加载路径

3. 试验结果

3.1. 应力 - 应变曲线特征

图 4 为不同中主应力下泥岩试样的应力 - 应变曲线，由图可知：泥岩应力 - 应变曲线清晰呈现了泥岩在不同应力状态下完整的变形与破坏过程，可划分为四个典型阶段：

1) 压密与线弹性阶段：加载初期，应力 - 应变曲线呈微上凹型非线性增长，表明试样内部孔隙与微裂隙在三向压力作用下逐渐闭合，体积压缩明显。此阶段侧向应变 ε_2 、 ε_3 增长较快，轴向应变 ε_1 较小。随后曲线进入近线性阶段，泥岩骨架开始承担主要荷载，变形以弹性行为为主。由于 σ_2 与 σ_3 对侧向变形约束不同， ε_2 与 ε_3 在加载初期即表现出差异，且随 σ_2/σ_3 增大，侧向变形各向异性增强。

2) 非线性损伤发展阶段：随着轴向应力增加，曲线逐渐偏离线性段，应变速率加快，表明微裂纹开始萌生与扩展，内部损伤持续累积。随着 σ_2/σ_3 提高，峰前曲线趋缓，峰值应变明显增大： $\sigma_2/\sigma_3 = 1$ 时约为 4%~5%，而 $\sigma_2/\sigma_3 = 2.5\sim 3$ 时可超过 6%，说明较高 σ_2 对裂纹扩展具有明显抑制作用。体积应变 ε_v 在峰前由压缩转为扩容，且随 σ_2/σ_3 增大，扩容峰值出现滞后。

3) 峰值破坏阶段: 当微裂纹由稳定扩展转为贯通扩展时, 试样达到峰值强度。随着 σ_2/σ_3 由 1 增至 3, 峰值强度由约 60 MPa 提高至约 80 MPa, 表明中主应力增强可显著提高泥岩在真三轴条件下的承载能力, 并对破坏过程具有抑制作用。

4) 峰后破坏阶段: 峰后应力快速下降, 试样形成贯穿性破裂面, 表现出明显脆性特征。低 σ_2/σ_3 条件下, 应力下降陡峭; 较高 σ_2/σ_3 条件下, 下降趋缓并出现平台特征, 说明高 σ_2 在峰后仍能约束裂纹扩展, 使试样保持一定残余强度。总体而言, 随着 σ_2/σ_3 增大, 泥岩峰值强度与峰值应变提高, 峰前非线性阶段延长, 侧向变形各向异性增强, 峰后脆性减弱, 残余承载能力提升, 中主应力对泥岩变形与破坏全过程具有显著调控作用。

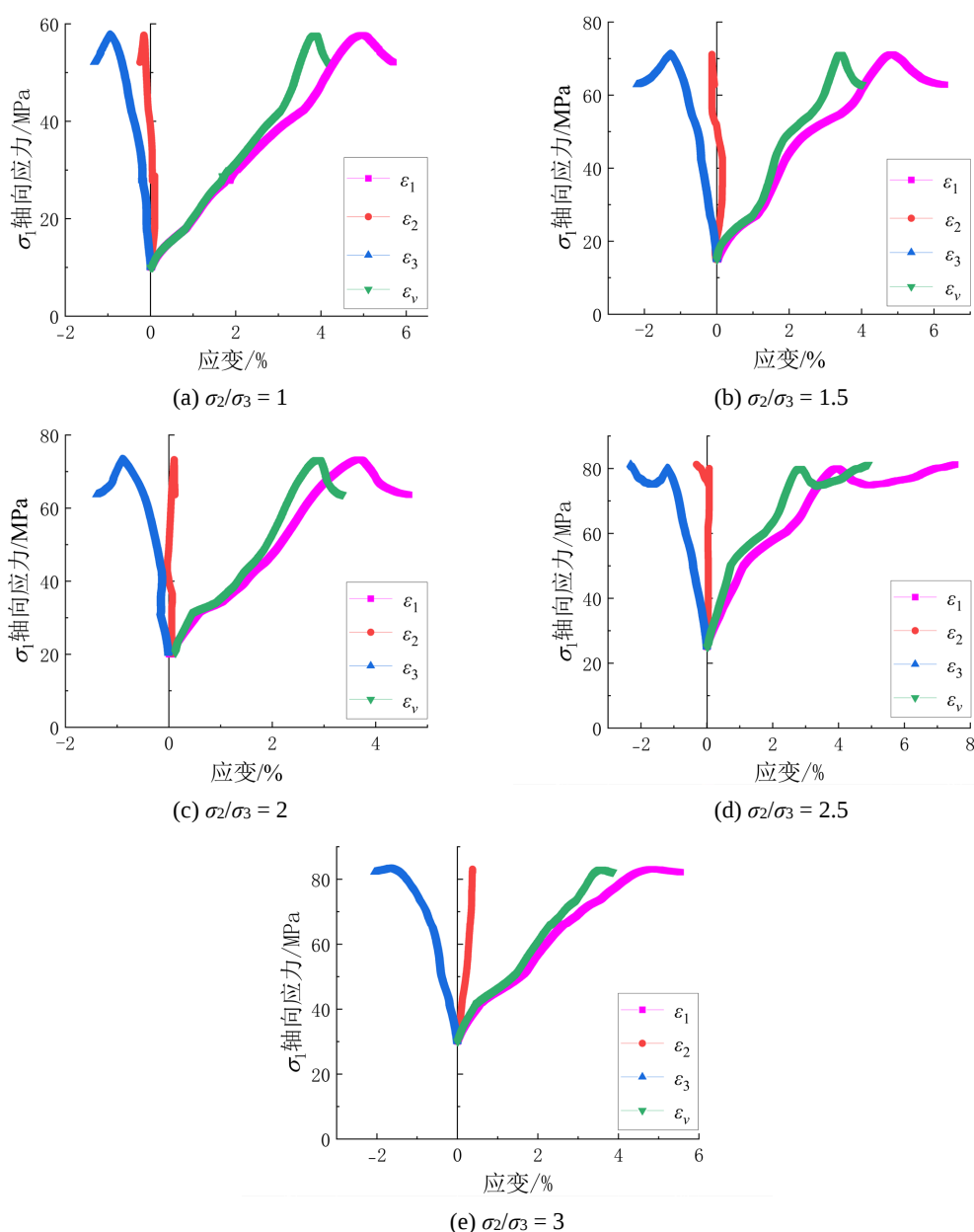


Figure 4. Stress-strain curves of mudstone specimens under different intermediate principal stresses

图 4. 不同中主应力下泥岩试样的应力 - 应变曲线

3.2. 泥岩力学性能参数分析

抗压强度是材料基本力学参数之一, 反映试样其承载能力和在受力过程中能量积累的能力, 当载荷达到应力极值点后, 承载能力急剧下降直至破坏, 随后释放能量。岩体峰值应力随 σ_2/σ_3 比值变化关系曲线如图 5 所示。由图可知: 当 σ_2/σ_3 从 1 增大到 3 时, 峰值应力依次变化为 57.69、71.1、73.72、80.06、83.9 MPa, 升高了 45.43%。随着 σ_2/σ_3 的增大, 岩体峰值强度 σ_1 呈上凸非线性增强特征。在 σ_2/σ_3 较低区间, 强度增长较快; 中间阶段增幅趋缓; 高 σ_2/σ_3 时再次增强, 说明中主应力的侧向约束可抑制裂隙扩展, 可提高岩体承载能力。当 $\sigma_2/\sigma_3 = 1$ 时峰值强度约为 58 MPa, $\sigma_2/\sigma_3 = 3$ 时约为 83.9 MPa。拟合曲线与实验数据吻合良好, 可用于岩体强度预测。

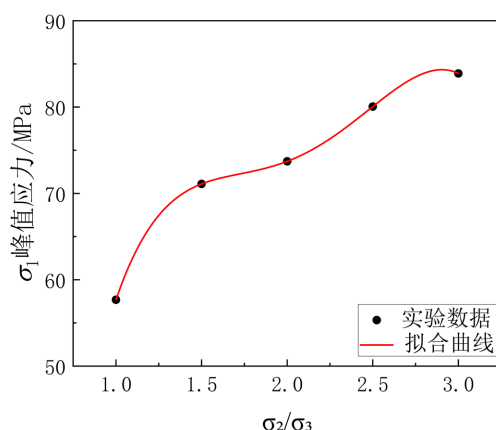


Figure 5. Variation curve of rock mass peak stress with σ_2/σ_3 ratio

图 5. 岩体峰值应力随 σ_2/σ_3 比值变化关系曲线

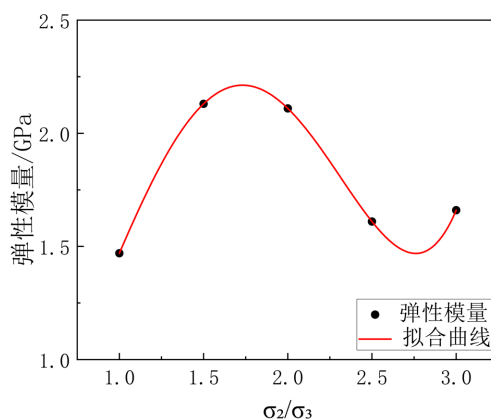


Figure 6. Variation curve of elastic modulus with σ_2/σ_3 ratio

图 6. 弹性模量随 σ_2/σ_3 比值变化关系曲线

图 6 为弹性模量随 σ_2/σ_3 比值变化关系曲线。由图可得: 当 σ_2/σ_3 从 1 增大到 3 时, 弹性模量依次为 1.47、2.13、2.11、1.61 和 1.66 GPa。整体呈现先快速上升、达到峰值后逐渐降低、末期小幅回弹的非线性变化规律, 符合弱胶结泥岩典型的力学响应特征。 σ_2/σ_3 由 1 增至 1.5 的阶段, 弹性模量由 1.47 GPa 显著提升至 2.13 GPa, 增幅显著。当 σ_2/σ_3 继续增至 2.0 时, 弹性模量维持在 2.11 GPa 的高位, 波动幅度极小。这表明在 $\sigma_2/\sigma_3 \in [1.0, 2.0]$ 区间内, 中主应力对试样具有显著的刚度强化效应。其力学机制在于: 适度增大的中主应力增强了侧向约束, 促进了内部原生孔隙与微裂纹的压密闭合, 使颗粒间接触更加致

密, 从而有效提升了材料抵抗变形的能力, 并延长了应力-应变曲线的线弹性阶段。

当 σ_2/σ_3 进一步增至 2.5 和 3.0 时, 弹性模量分别回落至 1.61 GPa 和 1.66 GPa, 呈现明显的“刚度弱化”趋势。这主要归因于弱胶结泥岩的结构敏感性: 过高的中主应力导致局部应力集中显著, 限制了岩石的侧向变形。此时, 试样更早进入非线性变形阶段, 内部损伤的累积速率超过了围压的压密速率, 导致宏观刚度下降。

综上所述, 弱胶结泥岩的中主应力强化效应存在最优区间($\sigma_2/\sigma_3 = 1.5 \sim 2.0$)。在该阈值内, 侧向约束对裂纹闭合的作用最为有效; 超过该范围后, 高应力梯度诱发的损伤机制逐渐占据主导, 导致弹性模量回落。这证实了中主应力对岩石变形机制与损伤演化路径的重要调控作用。

3.3. 强度准则适用性对比

为定量评估不同强度准则对弱胶结泥岩真三轴强度特性的表征能力, 基于实验数据对 Mohr-Coulomb、Drucker-Prager、Mogi-Coulomb 及 Modified Lade 四类经典准则进行了参数拟合与误差分析, 如图 7 所示。不同强度准则拟合结果见表 2。

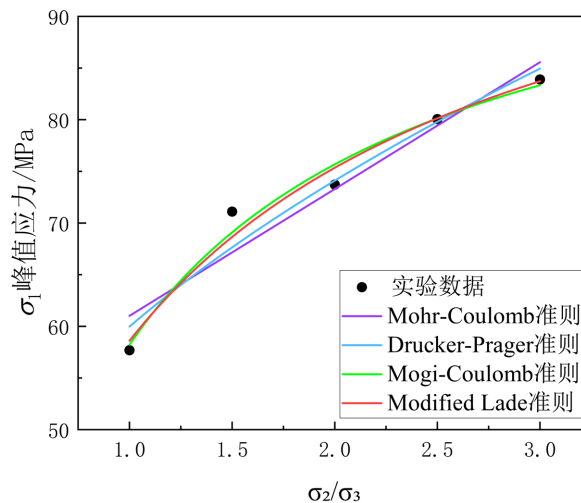


Figure 7. Comparative analysis of experimental data with four strength criteria
图 7. 试验数据与四种强度准则对比分析

Table 2. Table of fitting results of different strength criteria
表 2. 不同强度准则拟合结果表

强度准则	函数关系式	相关系数 R^2
Mohr-Coulomb 准则	$\sigma_1 = 12.276\sigma_3 + 48.74221$	92.62%
Drucker-Prager 准则	$\sigma_1 = 34.12\sqrt{\sigma_2/\sigma_3} + 25.85$	95.45%
Mogi-Coulomb 准则	$\sigma_1 = 2.28\ln(\sigma_2/\sigma_3)^2 + 58.22\ln(\sigma_2/\sigma_3) + 58.22$	97.93%
Modified Lade 准则	$\sigma_1 = 100.49(\sigma_2/\sigma_3)/(\sigma_2/\sigma_3 + 1) + 8.36$	97.66%

各准则拟合效果与适用性分析:

1) Mohr-Coulomb 准则忽略中间主应力效应, 拟合决定系数仅为 0.9262, 难以反映真三轴条件下岩石强度的非线性变化, 适用性最差。

2) Drucker-Prager 准则引入第一应力不变量, 拟合精度提高至 0.9545, 可部分体现静水压力作用, 但

对中主应力抑制剪胀效应考虑不足, 高应力下仍存在偏差。

3) Mogi-Coulomb 准则结合八面体剪应力与正应力关系, 决定系数达到 0.9793, 能够准确描述峰值强度随 σ_2/σ_3 增加的非线性规律, 拟合效果最佳。

4) Modified Lade 准则采用三轴状态变量幂函数形式, 决定系数为 0.9766, 虽略低于 Mogi-Coulomb 准则, 但同样能较好反映真三轴条件下的强度特性。

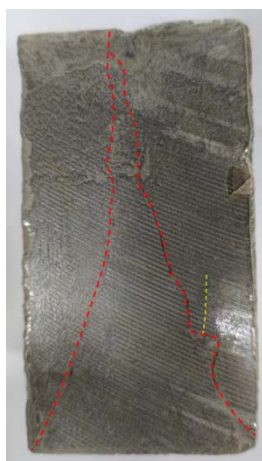
综合来看, 考虑中主应力效应的三维强度准则(Mogi-Coulomb 准则与 Modified Lade 准则)明显优于传统二维准则(Mohr-Coulomb 准则与 Drucker-Prager 准则)。其中, Mogi-Coulomb 准则拟合精度最高, 最适合描述弱胶结泥岩的强度特性; Modified Lade 准则也具有良好适用性, 可作为备选模型, 为深部巷道支护及岩体稳定性分析提供可靠依据。

4. 破坏模式分析

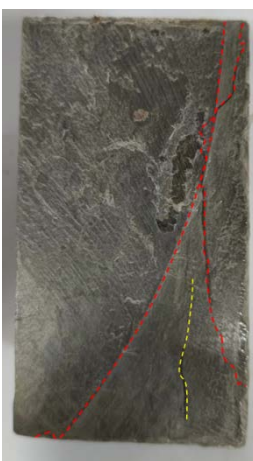
图 8 为真三轴条件下试样破裂面形态与 σ_2/σ_3 的对应关系。由图中可以看出, 所有试样均表现为以剪切破坏为主的宏观特征, 且随着 σ_2/σ_3 的递增, 破裂面形态呈现出从简单到复杂、从单一到多元的规律性演化。从试样破裂面可清晰观察到, 随着 σ_2/σ_3 的增大, 试样破裂面的规整度逐渐降低, 分叉现象愈发明显, 且主破裂面的贯通性逐渐减弱。具体表现为: σ_2/σ_3 越低, 破裂面形态越规整, 平整度越高; σ_2/σ_3 越高, 破裂面形态越复杂破碎, 次生裂纹发育越剧烈。



(a) $\sigma_2/\sigma_3 = 1$



(b) $\sigma_2/\sigma_3 = 1.5$



(c) $\sigma_2/\sigma_3 = 2$

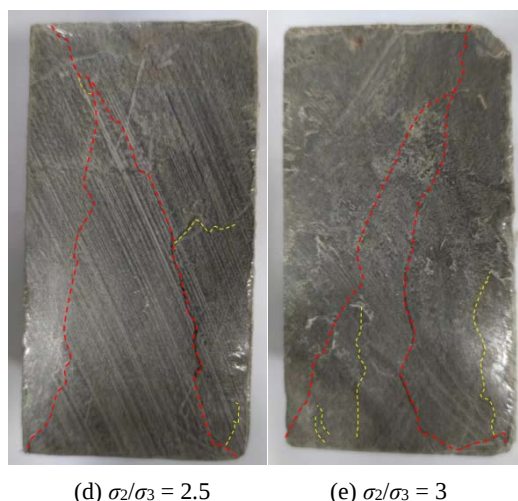


Figure 8. Failure modes of mudstone under true triaxial test
图 8. 泥岩真三轴试验下破坏形式

这一现象主要受控于中主应力 σ_2 提供的侧向约束及其引发的非轴对称效应。当 $\sigma_2/\sigma_3 = 1$ 时, 试样处于轴对称应力环境, 侧向约束均匀, 裂纹扩展方向单一, 因此仅形成单一直线型贯通剪切破裂面, 无明显次生裂纹, 破裂面平整且贯通性极佳; 随着 σ_2/σ_3 增至 1.5~2.0, 非轴对称效应开始显现, 侧向约束呈非均匀分布, 导致主剪切面出现微弱分叉并伴随局部次生裂纹, 破裂面平整度下降, 贯通性略有减弱; 当 σ_2/σ_3 进一步增至 2.5~3.0 时, 中主应力的侧向约束作用显著增强, 非轴对称性加剧, 强烈抑制了单一主剪切面的贯通, 转而发育多条共轭剪切面或劈裂-剪切复合破裂面。此时破裂面分叉密集、形态极不规则, 次生裂纹大量发育并相互交织, 主破裂面贯通性大幅降低, 甚至形成多段不连续的破碎带。

5. 结论

1) 力学响应特征: 真三轴连续加载试验表明, 弱胶结泥岩全应力-应变曲线可划分为压密、弹性、非线性损伤及峰后破坏四个阶段。峰值强度随 σ_2/σ_3 的增大呈显著正相关, 当 σ_2/σ_3 由 1 增大至 3 时, 峰值强度由 57.69 MPa 提升至 83.9 MPa, 增幅达 45.43%; 区别于硬岩的脆性特征, 该类软岩在高 σ_2 作用下表现出显著延性, 峰值应变由 4%~5% 增加至 6% 以上, 且峰后曲线跌落趋缓, 表明 σ_2 通过抑制微裂纹扩展, 有效提升了岩体的承载能力与残余强度。

2) 刚度演化规律: 弱胶结泥岩的弹性模量受 σ_2 调控, 呈现“先增后减”的非线性演化特征, 并存在最优强化阈值。当 σ_2/σ_3 处于 1.5~2.0 区间时, 侧向约束促使孔隙压密与颗粒咬合, 弹性模量达到峰值 2.13 GPa; 超过该阈值后, 过高的非均匀挤压导致局部损伤累积速率超过压密速率, 引发宏观刚度劣化, 证实了弱胶结软岩对高应力的结构敏感性。

3) 强度准则适用性及工程启示: 传统 Mohr-Coulomb 准则因忽略中主应力效应, 拟合精度 ($R^2 = 0.9262$) 最低, 不再适用于此类地层。Mogi-Coulomb 准则拟合优度最高 ($R^2 = 0.9793$), 能精准描述该类岩石的三维强度特性。研究成果揭示了深部巷道围岩“非等向受压”的失稳机制, 建议工程实践中将围岩应力环境控制在 $\sigma_2/\sigma_3 = 1.5 \sim 2.0$ 的最优区间内, 以实现支护效率最大化。

参考文献

- [1] 李文帅, 蒋邦友, 李兆霖, 等. 真三轴应力状态下含预制裂隙煤系泥岩强度与破坏特征[J]. 中南大学学报(英文版), 2024, 31(1): 196-209.

- [2] 王泽, 李文璞, 冯国瑞, 等. 真三轴卸荷条件下砂岩力学特性和剪切变形带预测模型[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3700-3712.
- [3] 范朝涛, 李英明, 董春亮, 等. 真三轴中间主应力循环加卸作用下砂岩损伤与声发射特征研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 862-872.
- [4] 刘之喜, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 真三轴压缩下中、小主应力卸载应力路径与速率对砂岩能量演化特征的影响[J]. 煤炭学报, 2025, 50(8): 3900-3915.
- [5] 蒋剑青, 罗敏华, 胡诗红, 等. 断续节理产状对砂岩破坏特征影响的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(10): 3077-3092, 3103.
- [6] 孙飞跃, 郭佳奇, 刘希亮, 等. 真三轴单面卸荷条件下中间主应力对深埋洞室岩爆影响特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 220-235.
- [7] 王春来, 周宝坤, 朱朝阳, 等. 真三轴应力状态下花岗岩损伤三维可视化及定量表征[J]. 岩土工程学报, 2026, 48(5): 895-906.
- [8] 张少鹏, 李佳建, 寇云鹏, 等. 不同中主应力下充填体真三轴力学特性及损伤特征[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(11): 3974-3989.
- [9] 刘海全, 田竹华, 张月征, 等. 弱胶结顶板砂岩力学特性及声发射演化规律试验研究[J]. 煤矿安全, 2026, 57(3): 85-96.
- [10] 纪洪广, 孙利辉, 宋朝阳, 等. 西部矿区弱胶结地层工程围岩稳定性控制研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 117-127.
- [11] 邱玉铭, 杨杰. 大断面软岩巷道稳定性分析与支护参数优化[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(11): 8-13.
- [12] 张世忠, 范钢伟, 张东升, 等. 应力-损伤-渗流耦合下采动弱胶结覆岩渗透性演化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(6): 1230-1240.
- [13] 赵增辉, 杨鹏, 张明忠, 等. 水环境和非均匀地压联合作用下弱胶结软岩巷道围岩稳定性解析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 126-135.
- [14] 徐佑林, 吴少康, 周波, 等. 强动压破碎软岩巷道再造多重承载结构全空间协同支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(7): 1720-1735.
- [15] 梁明纯, 苗胜军, 蔡美峰, 等. 多孔弱胶结粉砂岩疲劳强度确定方法及疲劳破坏先兆[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1476-1486.