

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.12

# 峰前卸荷损伤泥岩再加载力学特性研究

赵景锋<sup>1</sup>, 车德龙<sup>2,3</sup>, 赵二平<sup>2,3</sup>, 张聪<sup>2,3</sup>, 魏宇航<sup>2,3</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 地下储能硐库围岩再加载力学性能是决定地下储能工程安全的关键。本文开展了泥岩三轴加载、卸载试验及卸荷损伤泥岩再加载试验, 利用核磁、SEM等测试分析技术, 研究了卸荷效应对泥岩再加载力学特性的影响规律, 揭示了卸荷损伤泥岩再加载劣化机理。结果表明, 随卸荷损伤程度的增加, 泥岩试样内部小尺寸微孔隙向中孔隙发展, 内部孔隙率越来越大; 初始卸荷损伤程度越大, 泥岩再加载强度降低幅度越大; 卸荷损伤程度对岩样再加载破坏模式产生了逐渐显著的影响, 随卸荷损伤程度增加, 试样逐渐由剪切破坏过渡到剪张破坏, 最终转变为张剪破坏。建立了卸荷损伤程度、孔隙率、再加载强度之间的本构关系, 为卸荷损伤泥岩微观结构损伤到宏观强度劣化搭起了桥梁。研究成果可为卸荷损伤区划分、卸荷区内岩体的再加载强度预测预报提供参考。

**关键词:** 岩石力学; 开挖卸荷; 再加载; 耗散能; 分形维数

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0506-11

## Study on the Re-Loaded Mechanical Properties of Pre-Peak Unloading Damage Mudstone

Zhao Jingfeng<sup>1</sup>, Che Delong<sup>2,3</sup>, Zhao Erping<sup>2,3</sup>, Zhang Cong<sup>2,3</sup>, Wei Yuhang<sup>2,3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, P. R. China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, P. R. China)

**Abstract:** The reloading mechanical properties of the surrounding rock in an underground energy storage cavern are crucial for determining the safety of underground energy storage projects. This study conducted triaxial loading and unloading tests on mudstone, as well as reloading tests on unloaded damaged mudstone. By employing testing and analysis techniques such as nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM), the research investigated the impact of unloading effects on the reloading mechanical properties of mudstone and revealed the deterioration mechanisms of reloading damaged mudstone. The results indicate that the fractal dimension ultimately decreases as confining pressure increases, and the confining pressure's control over internal micro-cracks in the mudstone becomes more pronounced. With increasing unloading damage, small-size micro-pores inside the mudstone samples develop into medium-sized pores, resulting in a higher internal porosity. The greater the initial unloading damage, the larger the reduction in reloading strength of the mudstone. The degree of unloading damage progressively affects the failure mode of rock samples, transitioning from shear failure to shear-tensile failure, and eventually to tensile-shear failure with increasing unloading damage. A correlation between unloading damage degree,

收稿日期: 2025-04-05 (修改稿)

**作者简介:** 赵景锋 (1981—), 男, 河南许昌人, 高级工程师, 主要从事铁路工程、地下工程岩土体勘察、岩土体力学特性方面的研究工作。E-mail: 18407097@qq.com

**通讯作者:** 车德龙 (1997—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士生, 主要从事岩土工程理论基础及离散元数值应用方面的研究。E-mail: chedelong@ctgu.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金高铁联合基金项目 (U2034203)

porosity, and reloading strength has been established, bridging the gap between microstructural damage and macro-strength deterioration in unloaded damaged mudstone. This finding provides a reference for delineating unloading damage zones and predicting reloading strength within unloading areas.

**Keywords:** rock mechanics; excavation unloading; reloading; dissipated energy; fractal dimension

## 0 引言

深部地下能源储存,作为一种安全、高效的贮存方式深受青睐。深部地下能源储存过程中,大规模储能硐库的安全是保障储能工程正常运营的关键。在硐室开挖完成后,硐室周边会形成不同程度的卸荷损伤区,受卸荷效应影响,卸荷损伤区内岩体的力学特性将发生变化,当高压气体或液体填充于硐库后,卸荷损伤围岩将再次经受加荷作用<sup>[1-4]</sup>。这种卸荷-再加荷过程,对岩体力学特性的影响不容忽视。

20世纪60年代 Jaeger<sup>[5]</sup>在国际上首次提出应力路径的改变会对岩石力学性质产生根本的影响,之后 Lau 等<sup>[6]</sup>、Shimatoto 等<sup>[7]</sup>对岩石在不同应力路径下的试验结果进行比较,同样指出卸载路径的改变对岩石的力学性能会产生严重的影响,在实际工况中考虑岩石卸荷效应的影响更有实际的工程应用价值。而在国内,20世纪70年代陈旦熹、吴玉山等针对大理岩开展了三轴卸围压试验,初步探讨了卸荷对岩石强度和形变的影响<sup>[8-9]</sup>;1995年哈秋龄教授<sup>[10]</sup>首次提出了“卸荷非线性岩体力学”这一概念,并指出在加载和卸荷两种不同的力学条件下,岩体的力学特性存在着根本的差异,就此卸荷岩体力学这一学科得到了快速发展;以李建林、黄润秋、伍法权、邱士利等教授为代表的国际著名专家对岩石卸荷力学特性、破坏机理、卸荷分区方面的研究,均取得了丰硕的成果<sup>[11-16]</sup>。但对于岩石卸荷再加载后的劣化特征及破坏机制的研究仍需进一步完善及深入探索,为此本文在前人的研究成果上,就岩石卸荷损伤后再加载过程中岩石劣化特征进行了相关研究,建立了卸荷损伤程度、孔隙率、再加载强度之间的本构关系,为卸荷损伤泥岩细观结构损伤到宏观强度劣化搭起了桥梁。

同时,就岩石卸荷后再加载的研究已有诸多学者进行了相关研究,如:邓华锋等<sup>[17]</sup>研究指出初始卸荷损伤对岩石的变形和承载性能均会产生严重影响;魏明星等<sup>[18]</sup>、朱子涵等<sup>[19]</sup>、李景龙等<sup>[20]</sup>同样指出损伤后岩体的单轴抗压强度低于未损伤岩体,均表明卸荷损伤再加载后力学特性会发生变化。但是上述学者主要针对硬岩卸荷再加载后的力学性能进行了相关探索,而软岩的物理力学性能

较硬岩有较大的差异,其卸荷再加载后的力学性能及劣化特征仍需进一步探索,为此本文针对软岩卸荷再加载后力学性能及劣化特征进行了相关研究,并就卸荷造成的软岩细观结构损伤与宏观再加载力学特性之间的关系进行了相关分析,可为软岩卸荷损伤区分、卸荷区内软岩的再加载强度预测预报提供参考。

基于此,本文以巴东组泥岩为研究对象,开展了三轴加载、卸载试验以及卸荷损伤泥岩再加载试验,并利用核磁测试、SEM扫描电镜等细观分析技术,研究了卸荷损伤对泥岩再加载力学特性的影响,建立了卸荷损伤程度、孔隙率、再加载强度之间的本构关系,以期能为能源储存安全提供参考。

## 1 试验方案

### 1.1 取样、制样及试样筛选

试验所取岩样为巴东组泥岩,对取回的泥岩岩块,严格按照国际岩石力学学会(ISRM)推荐标准制成直径50mm、高100mm的标准试件,再通过密度测试、声波测试,进行试样筛选,如图1。最终选取泥岩试样平均密度为 $2.70\text{ g/cm}^3$ ,纵波波速均值为 $3.7\text{ km/s}$ 。

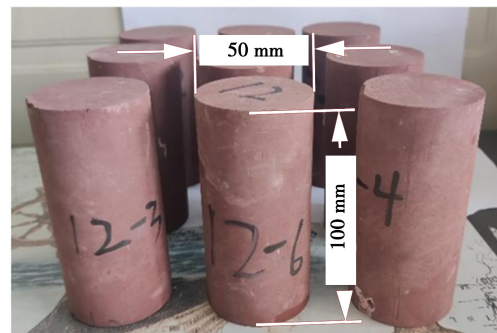


图1 泥岩试样

Fig. 1 Mudstone samples

### 1.2 三轴加卸载试验方案

通过实际埋深确定泥岩围压为 $5\text{ MPa}$ ,故本文设置三轴卸荷试验围压为 $5\text{ MPa}$ ,加载试验围压为 $0, 2.5, 5, 10$ 及 $15\text{ MPa}$ 。三轴加卸载试验所用仪器为自适应全自动岩石三轴试验机(如图2),试验过程中均采用应力控制方式,加载速率 $0.02\text{ MPa/s}$ 。核磁共振试验所用仪器为Macro MR12-150H-I型核磁共振成像分析仪(如图3),SEM扫描电镜测试所用仪器为Prisma E环境扫描电镜(见图4)。

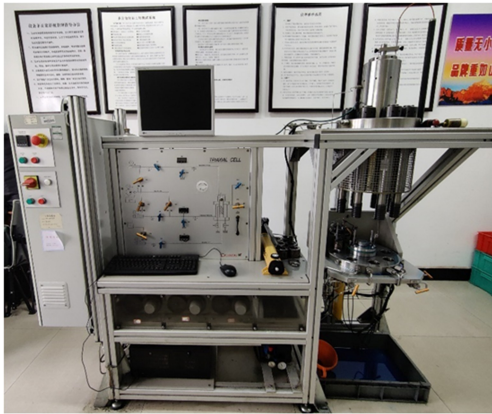


图 2 自适应全自动岩石三轴试验机

Fig. 2 Adaptive automatic rock triaxial testing machine

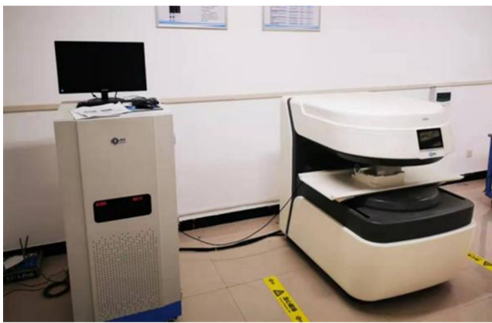


图 3 核磁共振成像分析仪

Fig. 3 Magnetic resonance imaging analyzer

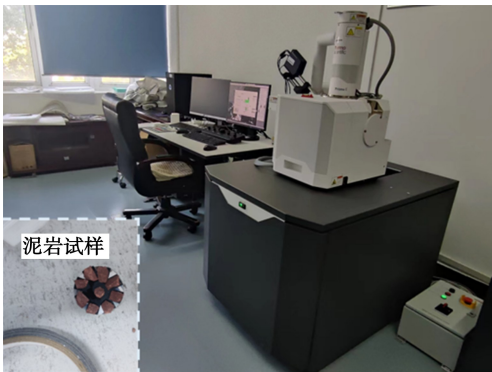


图 4 环境扫描电镜

Fig. 4 Environmental SEM

(1) 三轴加载试验

①以 0.02 MPa/s 的加载速率按静水压力方式施加轴压  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$  至预定值, 维持围压  $\sigma_3$  不变; ②继续以相同加载速率, 施加轴压  $\sigma_1$  直至试样破坏。试验为基础性试验, 为后续卸荷试验做准备。

(2) 卸荷及再加载试验

①按静水压力方式施加轴压  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$  至预定值 5 MPa, 维持围压  $\sigma_3$  不变, 施加轴压  $\sigma_1$  至对应围压下峰值强度  $\sigma_p$  的 80%。

②维持偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  不变, 卸载围压  $\sigma_3$ , 直至岩样破坏, 停止试验。此时的破坏围压即为  $\sigma_{3p}$ , 总卸荷量记为  $(\sigma_3 - \sigma_{3p})$ 。

③制备卸荷损伤为  $U$  的岩样, 即当围压卸至  $U \times (\sigma_3 - \sigma_{3p}) + \sigma_{3p}$  时, 卸除应力取出岩样。此时泥岩试样卸荷损伤程度即为  $U$ ,  $U$  取 30%、50%、70% 和 90% 共 4 种。对不同卸荷损伤程度岩样进行 NMR 核磁共振测试。

④对不同卸荷损伤泥岩以 0.02 MPa/s 的加载速率按静水压力方式施加轴压  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$  至预定值, 然后继续以相同速率施加轴压  $\sigma_1$  直至试样破坏, 试验结束, 对破裂面进行 SEM 扫描电镜分析。

1.3 三轴加载、卸荷及再加载试验内在联系

(1) 三轴加载试验: 主要用于确定岩石的峰值强度、弹性模量、内摩擦角和黏聚力等基本力学参数。通过应力-应变曲线, 可以了解岩石在加载条件下的变形和破坏特性, 为岩石的强度设计和稳定性分析提供依据。

(2) 卸荷试验: 此部分试验主要是可以反映应力卸除后岩石变形和内部结构变化, 模拟卸荷效应的影响, 为后续探讨岩石卸荷损伤后再加载过程中力学劣化特征及结构损伤特征提供必要条件。

(3) 再加载试验: 通过模拟岩石在经历卸载后的再加载过程, 可以研究岩石的残余强度、再加载强度和变形模量等参数。这些参数有助于了解岩石在复杂应力历史下的力学性能变化, 为岩石的循环加载、重复使用和长期稳定性分析提供参考。

2 泥岩三轴压缩力学特性

2.1 泥岩三轴压缩能量转化特性

不同围压下泥岩三轴压缩应力应变关系曲线如图 5。

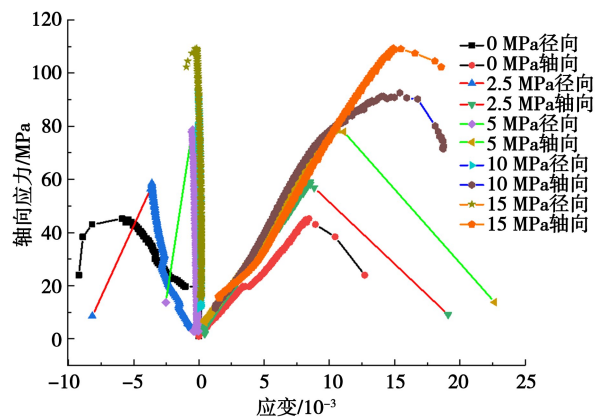


图 5 应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves

由应力应变关系曲线获得泥岩试样基本力学参数值如下:黏聚力  $c$  为 12.27 MPa,内摩擦角  $\varphi$  为 37.02°。峰值强度、弹性模量与围压的关系见图 6、图 7。由图可知,随着围压的增加,泥岩峰值强度、弹性模量逐渐增加。

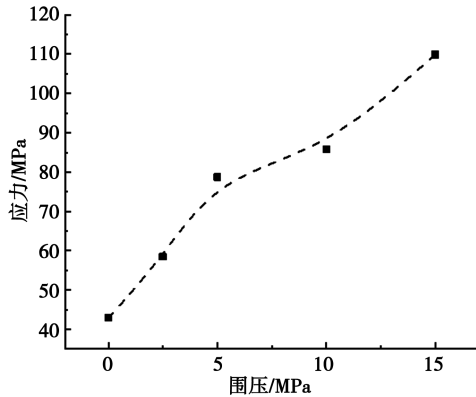


图 6 不同围压下泥岩峰值强度

Fig. 6 Peak strength of mudstone under different confining pressures

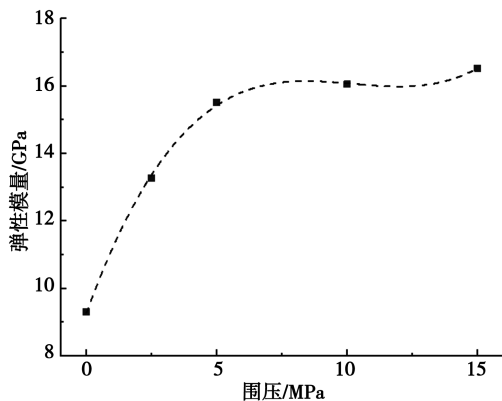


图 7 不同围压下泥岩弹性模量

Fig. 7 Elastic modulus of mudstone under different confining pressures

岩石材料的破坏与能量的变化密切相关<sup>[21]</sup>,假设整个试验过程为一个封闭的系统,未与外界发生热能的交换,根据热力学第一定律<sup>[22]</sup>,可得岩石能量关系为:

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

式中: $U$  为试验过程中外力输入的总应变能; $U_e$  为可释放弹性应变能; $U_d$  为耗散能。

在三轴压缩即围压  $\sigma_2 = \sigma_3$  试验中,岩石封闭系统的总能量  $U$  等于轴压对岩石做正功  $U_1$  加上围压对岩石做负功  $U_3$  的和,即:

$$U = U_1 + U_3 \quad (2)$$

轴压对岩石做正功  $U_1$  和围压对岩石做负功  $U_3$  分别为:

$$U_1 = \int \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i}) (\sigma_{i} + \sigma_{i+1}) \quad (3)$$

$$U_3 = 2 \int \sigma_3 d\varepsilon_3 = \sum_{i=0}^n (\varepsilon_{3i+1} - \varepsilon_{3i}) (\sigma_{3i} + \sigma_{3i+1}) \quad (4)$$

$$U_e = \frac{1}{2E_u} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_3)] \quad (5)$$

式中: $E$  为初始弹性模量; $\mu$  为泊松比。

基于上述能量计算原理,得到泥岩三轴压缩试样能量转化关系曲线,如图 8。据图可知,三轴加载过程中泥岩的能量转化曲线可分为 4 个阶段:压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段和破坏阶段。随围压的增加,泥岩破坏峰值提升,轴压所做的正功越多,相应的围压越大,其增围压时间越长,围压对其做的负功也越多,但是围压的增加量小于峰值应力,且径向应变小于轴向应变,所以峰值点的总应变能  $U$  呈现出上升的趋势,岩样储存的能量也越多。

热力学定律表明,岩样从初始损伤到最终破坏,是在能量的驱动下表现出的宏观演化现象。在处于压密阶段和弹性变形阶段时,不同围压水平下的加载试验岩样的能量转化曲线走势基本相同。岩样屈服前吸收的能量几乎都以弹性应变能的形式储存,因此总应变能和弹性应变能增长迅速。在屈服阶段,偏应力应变曲线开始表现为非线性增长,随着轴向应力的进一步加大,耗散能开始显著增长且增加速率逐渐加快,说明岩样损伤程度逐渐加深,同时岩样内部产生的微裂隙逐渐增多。破坏阶段不同围压水平下的加载试验岩样的能量转化曲线走势及其变化相似,均表现出弹性应变能曲线开始急剧下降,耗散能曲线迅速增加。从能量转化的角度来说,岩样储存的大量弹性应变能在短时间内以动能、摩擦能等形式急剧释放。

## 2.2 泥岩三轴压缩破坏特征分析

为研究泥岩三轴压缩破坏形态特征,通过 MATLAB 软件对泥岩破坏图片进行二值化提取,并引入分形维数对泥岩裂纹进行定量分析。盒维数分形是由法国数学家 Mandelbrot 提出的一门数学科学<sup>[23]</sup>,当前,在损伤裂纹的研究中,盒维数作为一种有效的计算图形分形维度的方法,其计算公式为:

$$F = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\lg N(L)}{\lg(1/L)} \quad (6)$$

式中: $F$  代表了所需的盒维数,用来描述损伤裂纹

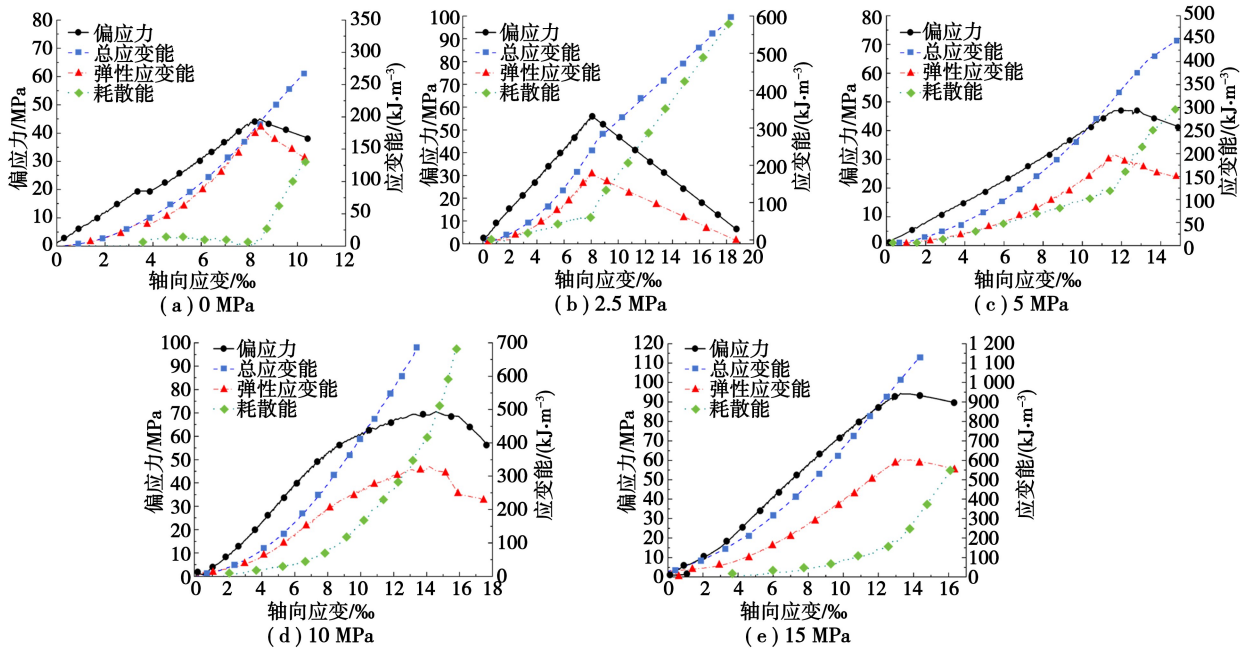


图 8 不同状态下泥岩能量变化指标

Fig. 8 Variation index of mudstone energy under different states

分布的特征;  $L$  代表了正方形盒子的边长, 按照  $1/L_k$  的变化率 (其中  $k=0, 1, 2, \dots$ ) 进行变化; 而  $N(L)$  则表示了用边长为  $L$  的盒子去覆盖损伤裂纹分布所需的盒子数目。分形维数的增加反映泥岩试件的受损程度和裂纹分布的复杂程度。分形维数越大, 试样损伤程度越严重, 裂纹分布也越复杂。将不同围压下泥岩破坏裂纹图片进行分形维数计算, 结果如表 1 及图 9。据图可知, 随着围压的增大, 泥岩试样破坏时产生微裂纹的数量明显减小。在围压等于零时, 其破坏面与底面的角度接近  $90^\circ$  垂直, 张拉裂纹较多, 表面有块状脱落; 随着围压的增大, 泥岩破坏时的破坏面夹角逐渐减小, 裂隙数量也减小。

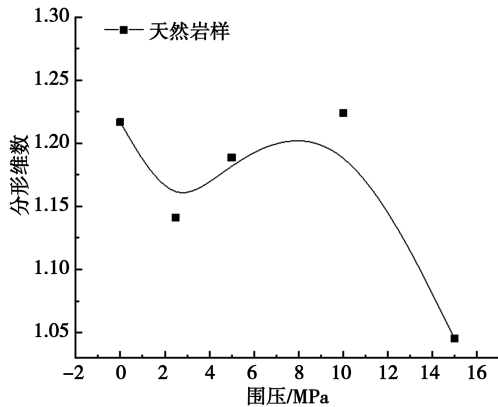


图 9 不同围压下泥岩破坏裂隙分形维数图

Fig. 9 Fractal dimension diagram of fracture fracture of mudstone under different confining pressures

表 1 泥岩破坏裂隙

Table 1 Fracture fractures of mudstone

围压/MPa	破坏裂纹图(侧面(右)、正面、侧面(左))	分形维数
0		1.216 7
2.5		1.141 2
5		1.188 7
10		1.223 9
15		1.045 2

### 2.3 不同卸荷损伤程度泥岩微观特征

将不同卸荷损伤程度岩样置于真空饱和仪中进行饱水处理后取出, 再放置到 MacroMR12-150H-I 型核磁共振成像分析仪 (如图 2) 进行岩样孔隙率测量。不同卸荷损伤程度岩样核磁共振测试后的  $T_2$  谱如图 10。据图可知, 泥岩的  $T_2$  谱表现为一个主峰伴随着 2 个次峰, 其中主峰主要分布在

0.01~10 ms 的范围内,说明泥岩内部的微观孔隙主要以小尺寸为主,从而导致其致密性高,因此小尺寸微观孔隙是泥岩物理特性的重要特征。对于经历卸荷损伤的泥岩试样,主峰的位置向右和向上偏移,并且 3 个主峰的总面积逐渐增大,表明样品内部孔隙可以容纳更多水分,岩样内部小尺寸微孔隙向中孔隙发展。卸荷损伤程度越高的试样其内部孔隙数量越多,试验测得的结果与理论相符。

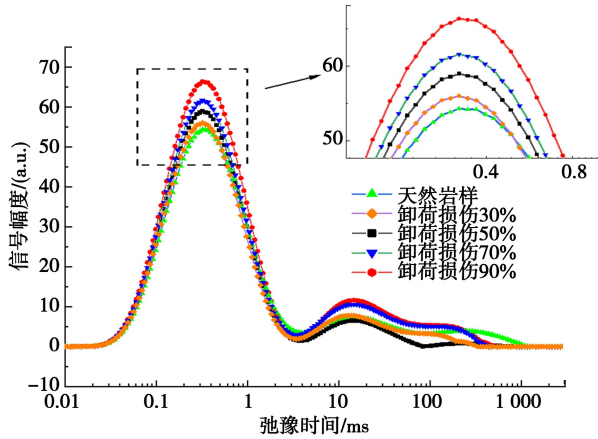


图 10 不同卸荷损伤程度泥岩  $T_2$  谱

Fig. 10  $T_2$  spectrum of mudstone with different unloading damage degree

不同损伤程度泥岩试样孔隙率变化特征如图 11。据图可知,随着卸荷损伤程度的增加,试样孔隙率呈现上升趋势,卸荷损伤程度为 90% 的试样其孔隙率最大,达到 1.78%,卸荷损伤程度为 0% 时,试样的孔隙率最小为 1.40%,二者孔隙率相差 0.38%。对不同卸荷损伤程度试样的孔隙率进行非线性曲线拟合,发现指数函数对其拟合效果较好,拟合度高达 0.99。

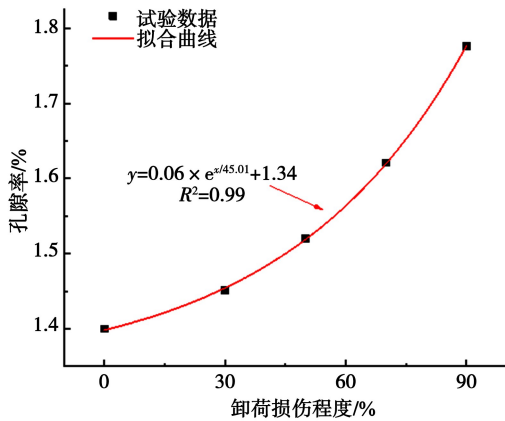


图 11 不同卸荷损伤程度泥岩孔隙率

Fig. 11 Mudstone porosity with different unloading damage degrees

定义卸荷损伤后泥岩的微观损伤度为  $\eta_u$  为:

$$\eta_u = \frac{(n_u - n_{min})}{(n_{max} - n_{min})} \quad (7)$$

式中: $n_u$  为卸荷量为  $u$  时的孔隙率; $n_{min}$  为未卸损伤泥岩的孔隙率; $n_{max}$  理论上为卸荷量为 100% 时泥岩的孔隙率,但由于卸荷破坏后岩样核磁测试较困难,因此,以卸荷量为 90% 的孔隙率作为近似最大孔隙率进行计算。卸荷量与微观损伤度之间的关系如图 12。从图中可以看出,随着卸荷量的增加,泥岩的微观损伤度逐渐增加,卸荷量越大,后期损伤度增加速度越快,说明卸荷量越大,泥岩内部损伤越大。

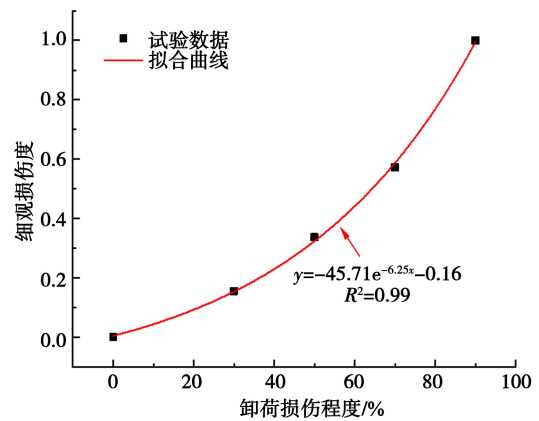


图 12 卸荷量与微观损伤度之间的关系

Fig. 12 Relationship between unloading amount and microscopic damage

根据核磁共振弛豫机制,  $T_2$  谱分布可以反映孔隙大小及孔径分布特征<sup>[24]</sup>, 其计算式为:

$$r = 10 \times T_2 \quad (8)$$

式中: $r$  为孔隙半径; $T_2$  为横向弛豫时间。

根据式(8),分别计算不同卸荷损伤程度下的孔径分布,按照 1~100  $\mu\text{m}$  范围为小孔隙、100~1000  $\mu\text{m}$  范围为中尺寸孔隙、大于 1000  $\mu\text{m}$  范围为大尺寸孔隙,各尺度孔隙占比结果如图 13。据图可知,随着卸荷损伤程度的增加,试样内部孔隙在不同尺度之间相互转化,小孔隙占比呈现逐渐减小的趋势,中孔隙占比逐渐上升,大孔隙占比呈先减小后上升的趋势。在卸荷损伤程度为 30%、50% 时,主要是小孔隙向中孔隙的转化,前期中孔隙增加较大,从而导致大孔隙占比下降;在卸荷损伤程度为 70%、90% 时,中孔隙逐步开裂,向大孔隙转化数量较多,在图中表现为大孔隙占比骤升。同时,此现象也证明了试样渐进破坏过程就是内部损伤加剧,裂隙萌生、扩展,进而产生大裂隙的过程。

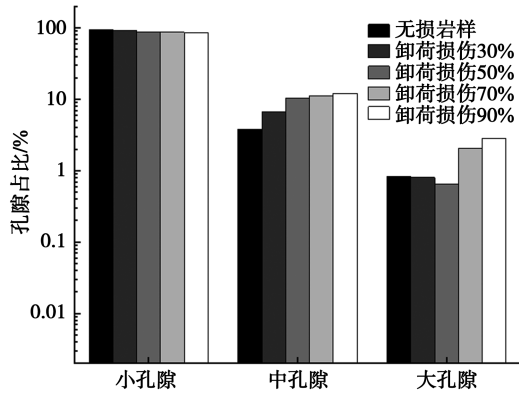


图 13 卸荷损伤泥岩不同尺度孔隙占比

Fig. 13 Porosity ratio of different scales in damaged mudstone by unloading

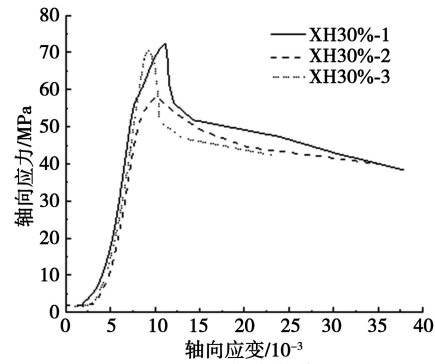
### 3 卸荷损伤泥岩再加载力学特性

#### 3.1 卸荷损伤泥岩再加载应力-应变曲线

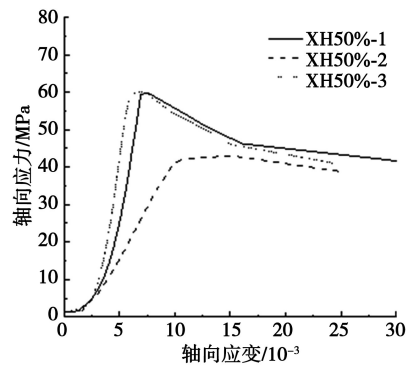
卸荷损伤泥岩在围压 5 MPa 下三轴压缩应力-应变关系曲线如图 14。据图可知,随卸荷损伤程度的增加,泥岩峰值强度呈降低趋势,且随着卸荷损伤程度的加剧,其压密段应变变形量也逐渐变大,其中 90%卸荷损伤泥岩表现得尤为明显,即在加载前期,施加较小的应力,泥岩试样便发生明显的变形,这是因为卸荷损伤加剧了泥岩表面以及内部裂隙的产生,使得泥岩内部的孔隙增多,因此初始加载阶段的压密段十分明显。同样说明了卸荷效应对泥岩的劣化是从泥岩内部开始,逐渐向外扩展。同时,随着卸荷损伤程度的加剧,泥岩的破坏过程出现由脆性破坏向延性破坏转变的趋势,且破坏后的应力-应变曲线变得更加平缓。

#### 3.2 卸荷损伤泥岩再加载强度特征

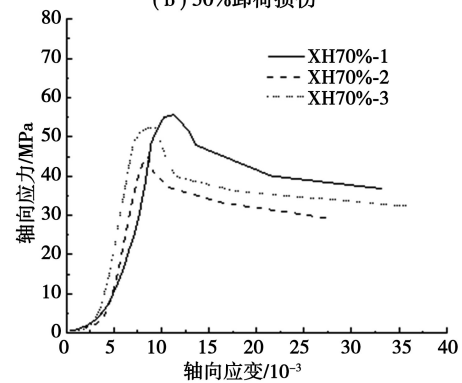
天然状态下的泥岩在围压 5 MPa 下,峰值抗压强度约为 75 MPa,在试样经历不同程度卸荷损伤后,强度均发生了劣化。如表 2 所示,30%卸荷量试样的平均强度为 66.783MPa,与无损状态相比下降了 11.2%;50%卸荷量试样的平均强度为 54.23 MPa,强度下降幅度为 27.6%;70%卸荷量试样的平均强度为 50.849 MPa,强度下降幅度为 32.2%;90%卸荷量试样的平均强度为 44.616 MPa,强度下降幅度为 40.5%。随着卸荷损伤程度由 30%增加至 90%,弹性模量也从 13.26 GPa 降至 10.716 GPa,可见卸荷损伤程度越大,损伤累积越多,强度降低幅度越大。这是因为在卸荷过程中,试样内部便由于应力重分布产生了大量裂隙,这些裂隙的存在一方面降低了岩石内部



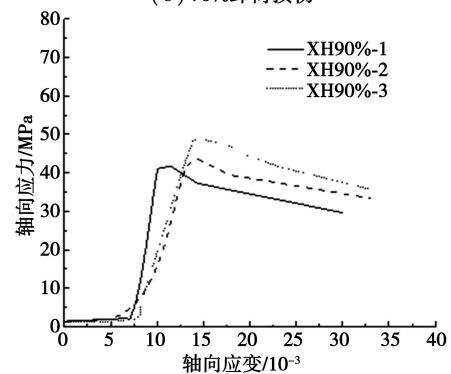
(a) 30%卸荷损伤



(b) 50%卸荷损伤



(c) 70%卸荷损伤



(d) 90%卸荷损伤

图 14 不同卸荷损伤程度泥岩三轴压缩应力-应变曲线

Fig. 14 Triaxial compressive stress-strain curves of mudstone with different unloading damage degrees

矿物的胶结程度;另一方面,各个裂隙在应力作用后更容易发生贯通进而产生更宽更深的大裂隙,两

种因素互相影响最终导致试样发生破坏,峰值强度降低。

表 2 卸荷损伤泥岩力学参数

**Table 2 Mechanical parameters of unloading damaged mudstone**

参数	卸荷损伤程度/%			
	30	50	70	90
损伤后破坏峰值均值/MPa	66.783	54.230	50.849	44.616
弹性模量/GPa	13.260	11.900	11.176	10.716

将不同卸荷量泥岩峰值抗压强度均值绘制成图并进行线性拟合,如图 15。据图可知,曲线拟合效果较好,该公式可以较好地预测各个卸荷量对应的泥岩峰值强度。

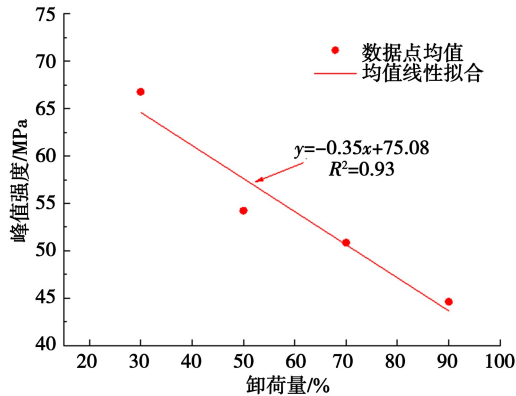


图 15 不同卸荷量泥岩再压缩峰值强度 (围压 5 MPa)

Fig. 15 Peak recompression strength of mudstone with different unloading damage degrees (confining pressure 5 MPa)

定义卸荷损伤泥岩宏观损伤度  $D_u$  为:

$$D_u = \frac{(E_0 - E_u)}{E_0} \quad (9)$$

式中:  $E_0$  为未卸荷损伤试样的弹性模量;  $E_u$  为卸荷量为  $U$  时的弹性模量。则卸荷量  $U$  与宏观损伤程度之间的关系见图 16。

不同围压下卸荷损伤泥岩三轴再压缩峰值强度、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  的变化情况如图 17、图 18。据图可知,随着卸荷量的增加,泥岩试样黏聚力和内摩擦角均有不同程度劣化,内摩擦角随着卸荷量的增加呈现线性减小的趋势,黏聚力也随着卸荷量增加呈现类似趋势。将不同围压下各卸荷损伤程度泥岩的破坏峰值强度利用最小二乘法进行曲面拟合,如图 18,数据点大多位于曲面上,拟合度为 0.97,拟合效果良好。

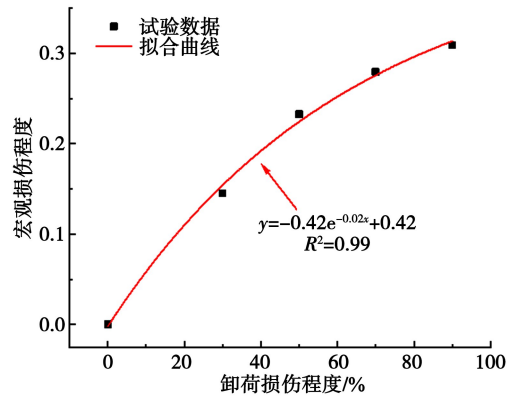


图 16 卸荷量与宏观损伤度关系

Fig. 16 Relationship between unloading quantity and macroscopic damage degree

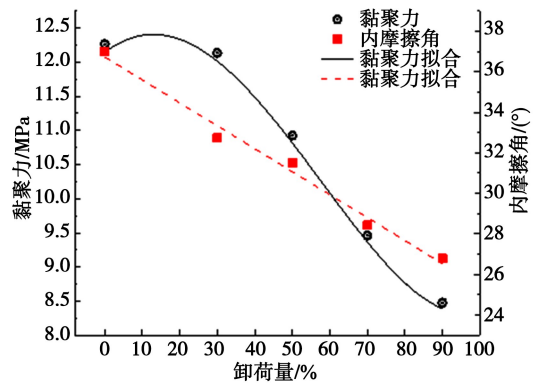


图 17 卸荷损伤泥岩黏聚力和内摩擦角

Fig. 17 Unloading damages mudstone cohesion and internal friction angle

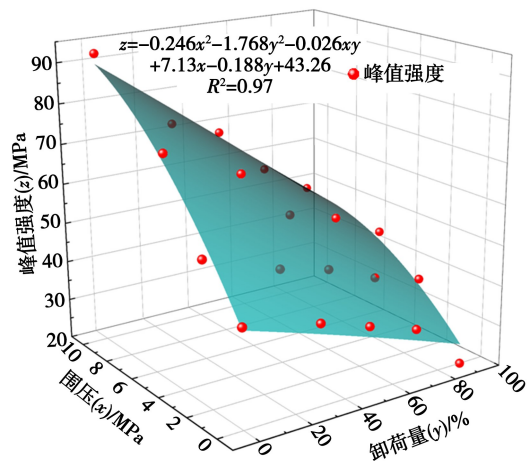


图 18 卸荷损伤泥岩不同围压峰值强度

Fig. 18 Peak strength of different confining pressures of damaged mudstone under unloading

### 3.3 卸荷损伤泥岩再加载破坏特征分析

卸荷损伤泥岩再加载破坏特征如图 19。据图可知,在试样破坏时,受损试样的破坏程度较无损试样更高。随卸荷损伤程度的增加,泥岩破坏时的

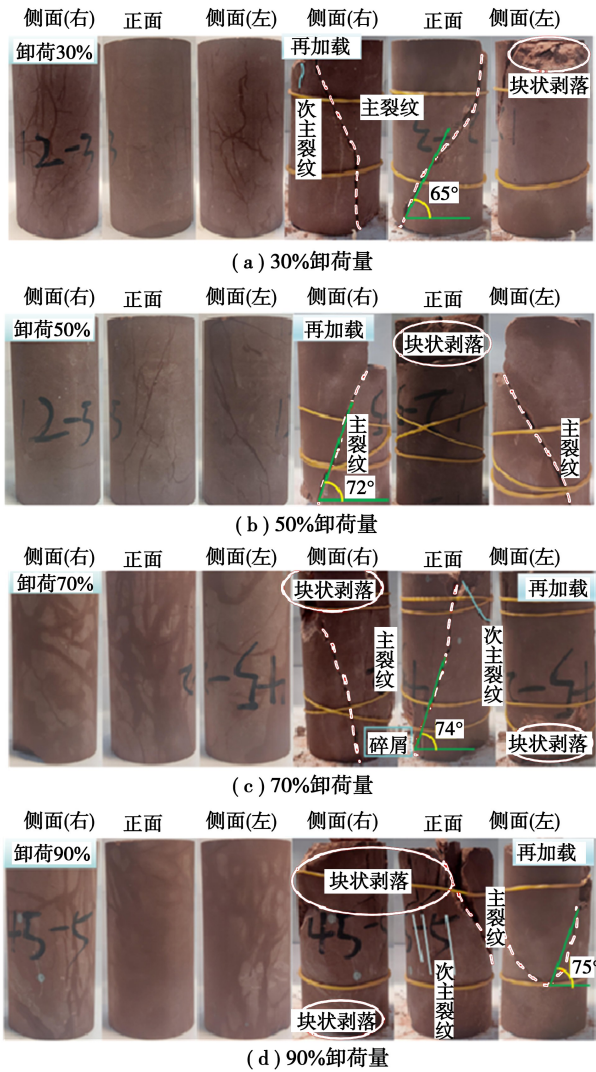


图 19 不同卸荷损伤泥岩再加载破坏图片  
Fig. 19 Damage picture of mudstone reloading under different unloading damage

碎裂程度变得更加剧烈。在 5 MPa 围压下,所有试样破坏时都出现了贯通裂缝,破坏形式均大致表现为剪切破坏,并且试样表面都有不同程度的块状碎石剥落。试样的剪切破坏模式在不同卸荷损伤程度下呈现出逐渐变化的趋势。当卸荷损伤程度介于 30% 至 50% 之间时,试样呈现出少量块状岩石剥落,并且只存在一条贯通的控制性破裂面,张拉裂纹较为稀少。然而,随着损伤程度增加至 70% 至 90%,控制性破裂面两侧的次生张拉裂纹数量逐渐增多,且开始出现较多近轴向的次生张拉破裂面。这表明卸荷过程对岩样的损伤及破坏模式产生了逐渐显著的影响,试样的破坏模式也由剪切破坏过渡到剪张破坏,并最终转变为张剪破坏,加剧了沿着卸荷方向的扩容特性。随着卸荷损伤的增加,试样的剪切破坏角逐渐增大,从 65° 上升到 75°。

### 3.4 SEM 电镜扫描结果分析

对不同卸荷损伤程度泥岩试样破坏面进行 SEM 电镜扫描,结果如图 20。据图可知,自然状态下泥岩表面相对平整,整体性较好,矿物颗粒清晰,颗粒间结合紧密,无明显裂隙。随着卸荷损伤程度的增加,泥岩试样表面裂隙增加,微裂纹的数量也逐渐增多。在卸荷损伤程度为 50% 时,裂隙扩展,开始出现裂隙块剥落,进而导致表面凹陷;在卸荷损伤程度为 70% 时,试样表面出现形态更加宽长的贯通裂隙,岩石基本失稳破坏。在卸荷损伤程度为 90% 时,试样已经出现明显的岩石块状错位。这说明,卸荷损伤程度越大,试样内部的损伤越大,内部损伤的加剧,使得裂隙增加。试样在加载和卸载过程的共同作用下,颗粒间的胶结结构遭到破坏,造成颗粒错位。此外,加卸荷作用时微裂纹数量明显增加,这一阶段还包括微裂纹不断增生

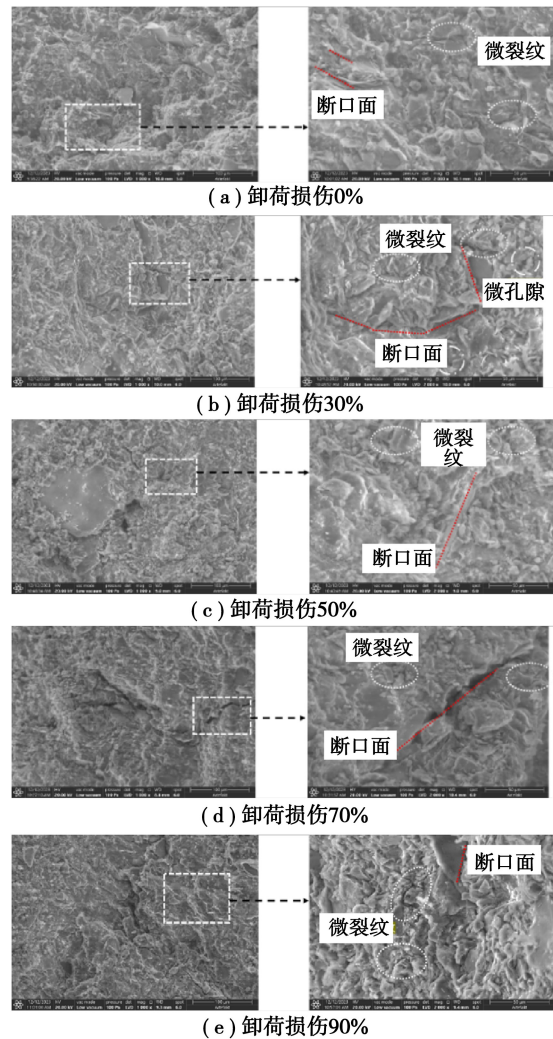


图 20 不同卸荷损伤程度岩样 SEM 电镜扫描图  
Fig. 20 SEM scanning images of rock samples with different unloading damage degrees

的过程。由此可见,在不同损伤程度下,破裂面均会出现剪切错动微台阶,表明岩石在微观上呈现剪切断裂的形态。

### 3.5 泥岩的细观损伤与宏观力学指标之间的关系

为分析卸荷损伤条件下泥岩的细观损伤与宏观力学指标之间的关系,对 5 MPa 围压下不同初始卸荷损伤程度泥岩试样的孔隙率、再压缩峰值强度、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  之间的关系进行计算,结果如图 21。

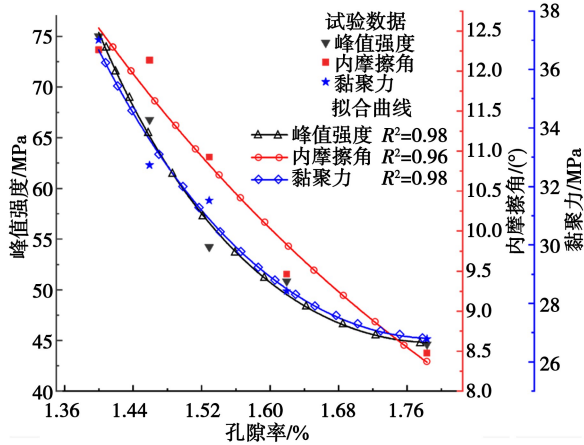


图 21 泥岩的峰值抗压强度、黏聚力、内摩擦角与孔隙率之间的关系

Fig. 21 Relationship between peak compressive strength, cohesion, internal friction angle, and porosity of mudstone

从式(10)—(12)中可以看出,不同卸荷损伤程度泥岩的抗压强度、内摩擦角、黏聚力与孔隙率之间存在良好的相关性,所以通过试样孔隙率的变化特征,基本可以初步预测这几种指标的变化趋势。

$$\sigma = e^{3.39n^2 - 12.16n + 14.69}, R^2 = 0.98 \quad (10)$$

$$c = e^{0.31n^2 - 2.04n + 4.78}, R^2 = 0.96 \quad (11)$$

$$\varphi = e^{2.02n^2 - 7.24n + 9.78}, R^2 = 0.98 \quad (12)$$

式中:  $\sigma$  为 5 MPa 围压下再压缩峰值抗压强度;  $c$  为黏聚力, MPa;  $\varphi$  为内摩擦角, °;  $n$  为孔隙率, %。

将卸荷损伤程度与孔隙率之间的关系式(见图 13),代入式(10)—(12)可获得初始卸荷损伤程度—强度之间的关系式,式(13)—(15):

$$\sigma = e^{\left(8475 \left(\frac{U-1.34}{0.06}\right)^2 - 608 \ln\left(\frac{U-1.34}{0.06}\right) + 14.69\right)} \quad (13)$$

$$c = 119.46 e^{\left(628.04 \frac{(\ln(U-1.34))^2}{0.0036} - 91.82 \ln\left(\frac{U-1.34}{0.06}\right) + 4.78\right)} \quad (14)$$

$$\varphi = e^{\left(5050 \ln\left(\frac{U-1.34}{0.06}\right)^2 - 362 \ln\left(\frac{U-1.34}{0.06}\right) + 9.78\right)} \quad (15)$$

式中:  $U$  为卸荷量,即初始卸荷损伤程度。

同时,由图 13 中细观损伤度、图 17 中宏观损伤度可获得细观损伤度和宏观损伤度之间的关系曲线,见式(16)。

$$D_u = -0.42e^{-0.000064 \ln(\eta_u + 0.16)} + 0.42 \quad (16)$$

式中:  $\eta_u$  为卸荷损伤岩样细观损伤度;  $D_u$  为卸荷损伤岩样宏观损伤度。由式(16)可建立宏细观损伤之间的对应关系,由细观损伤度直接预测宏观损伤劣化程度。

## 4 结论

(1) 未损伤泥岩在三轴加载过程中,内部储存的总应变能逐渐增加,屈服阶段前,岩样吸收的能量几乎均以弹性应变能的形式储存;进入屈服阶段以后,耗散能开始显著增长,弹性能增速变小;峰值点后耗散能增加速度加快,弹性应变能急剧释放;破坏后泥岩内部裂隙分形维数随围压的增加呈波浪型变化,并最终越来越小,说明围压对泥岩内部微裂隙的控制作用越来越显著。

(2) 卸荷损伤泥岩  $T_2$  谱表现为 1 个主峰伴随着 2 个次峰的特征,随初始卸荷损伤程度增加,主峰的位置逐渐向右和向上偏移,并且 3 个主峰的总面积逐渐增大,表明随卸荷损伤程度的增加,试样内部孔隙在不同尺度之间相互转化,卸荷损伤泥岩内部孔隙率呈指数形式上升,细观损伤程度逐渐增加。

(3) 卸荷损伤加剧了泥岩表面以及内部裂隙的产生,使得泥岩内部的孔隙增多,使得卸荷损伤泥岩再加载时,初始加载阶段压密段十分明显,且随卸荷损伤程度的增加,其压密段应变变形量也逐渐变大;卸荷损伤泥岩再加载峰值强度、黏聚力、内摩擦角均随卸荷量的增加呈线性递减;卸荷过程对试样的破坏模式产生显著的影响,加剧了沿着卸荷方向的扩容特性;卸荷损伤试样再加载破坏程度更高。

(4) 不同卸荷损伤程度泥岩试样的再加载峰值强度、内摩擦角、黏聚力与孔隙率之间存在良好的相关性,通过孔隙率的变化特征,可以初步预测泥岩再加载强度特性变化趋势;通过建立泥岩试样细观损伤度与宏观损伤度之间的关系,可对开挖后卸荷区的划分提供一定参考;该研究也可为地下油气储存硐库开挖卸荷损伤后围岩再次承受荷载的能力进行预测。

## 参考文献 (References)

[1] 孙冠华,朱开源,纪文栋等.压缩空气储能电站地下硐库

- 的基本概念、设计理念与方法[J].隧道与地下工程灾害防治,2024,6(1):14-23. (Sun Guanhua, Zhu Kaiyuan, Ji Wendong, et al. Basic concepts, design principles, and methods of compressed air energy storage underground caverns [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(1): 14-23. (in Chinese))
- [2] 孙冠华,王章星,王娇,等.压缩空气储能电站地下硐库安全埋深计算的极限平衡方法[J].土木工程学报,2023,56(增2):67-77. (Sun Guanhua, Wang Kaixing, Wang Jiao, et al. Limit equilibrium method for calculating the safe burial depth of underground caverns in compressed air energy storage [J]. China Civil Engineering Journal, 2023,56(Supp. 2):67-77. (in Chinese))
- [3] 吴祥业,王婧雅,陈世江,等.重复采动巷道塑性区调控原理与稳定控制[J].岩土力学,2022,43(1):205-217. (Wu Xiangye, Wang Jingya, Chen Shijiang, et al. Regulation principle and stability control of plastic zone in repeated mining roadway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(1):205-217. (in Chinese))
- [4] 池小楼,杨科,付强,等.大倾角煤层分层综采再生顶板应力分布规律研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(5):891-900. (Chi Xiaolou, Yang Ke, Fu Qiang, et al. Study on stress distribution law of regenerated roof in fully-mechanized slicing mining of steeply dipping coal seam [J]. Science of the Total Environment, 2022,39(5):891-900. (in Chinese))
- [5] Jaeger J C. Brittle fracture of rocks [R]. Minneapolis: The 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics, 1966.
- [6] Lau J S O, Chandler N A. Innovative laboratory testing [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004,41(8):1427-1445.
- [7] Shimamoto T. Pressure reduction experiments: A new method for measuring frictional strength over a wide range of normal stress [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985,22(4):227-336.
- [8] 陈旦熹,戴冠一.三向应力状态下大理岩压缩变形试验研究[J].岩土力学,1982(1):27-44. (Chen Danxi, Dai Guanyi. Experimental study on compressive deformation of marble under triaxial stress states [J]. Rock and Soil Mechanics, 1982(1): 27-44(in Chinese))
- [9] 吴玉山,李纪鼎.大理岩卸载力学特性的研究[J].岩土力学,1984(1):29-36. (Wu Yushan, Li Jiding. Unloading properties of marble [J]. Rock and Soil Mechanics, 1984(1):29-36. (in Chinese))
- [10] 哈秋龄.岩体工程与岩体力学仿真分析——各向异性开挖卸荷岩体力学研究[J].岩土工程学报, 2001(6):664-668. (Ha Qiling. Simulation analysis for rock mass engineering and rock mass mechanics—The study on anisotropic excavation unloading rock mass mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(6):664-668. (in Chinese))
- [11] 李建林,王乐华.节理岩体卸荷非线性力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):1968-1975. (Li Jianlin, Wang Lehua. Study on unloading nonlinear mechanical characteristics of jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10):1968-1975. (in Chinese))
- [12] 王瑞红,李建林,蒋昱州,等.考虑岩体开挖卸荷边坡岩体质量评价[J].岩土力学,2008,29(10):2741-2746. (Wang Ruihong, Li Jianlin, Jiang Yuzhou, et al. Quality evaluation of unloaded slope rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10):2741-2746. (in Chinese))
- [13] 黄润秋,黄达.高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):21-33. (Huang Runqiu, Huang Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1):21-33. (in Chinese))
- [14] 谢和平,周宏伟,刘建锋,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067-1074. (Xie Heping, Zhou Hongwei, Liu Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(7):1067-1074. (in Chinese))
- [15] 伍法权,刘彤,汤献良,等.坝基岩体开挖卸荷与分带研究——以小湾水电站坝基岩体开挖为例[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1091-1098. (Wu Faquan, Liu Tong, Tang Xianliang, et al. Research on unloading and zonation of rock mass dam foundation excavation—a case study of Xiaowan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(6):1091-1098. (in Chinese))
- [16] 邱士利,冯夏庭,张传庆,等.不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1807-1817. (Qui Shili, Feng Xiating, Zhang Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(9):1807-1817. (in Chinese))

- Effect on Microwave Fracturing of Diorite Using a Dielectric-Loaded Converging Waveguide Antenna[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(8): 5677-5691.
- [18] Ma Z, Zheng Y, Li J, et al. Enhancing rock breakage efficiency by microwave fracturing: A study on antenna selection[J]. *Energy*, 2024, 288: 129876.
- [19] Hassani F, Nekoovaght P, Gharib N. The influence of microwave irradiation on rocks for microwave-assisted underground excavation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(1):1-15.
- [20] Ali A Y, Bradshaw S M. Bonded-particle modelling of microwave-induced damage in ore particles [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23: 780-790.
- [21] 张志强, 李铎辰, 陈方方, 等. 强吸波矿物对微波辅助破岩效果影响规律及机制研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(8): 1308-1315. (Zhang Zhiqiang, Li Huachen, Chen Fangfang, et al. Influence Law and Mechanism of Stong Wave-Assisted Rock-Breaking Effect[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(8): 1308-1315. (in Chinese))
- [22] Liang C, Guo Z, et al. Microwave-assisted breakage of basalt: A viewpoint on analyzing the thermal and mechanical behavior of rock[J]. *Energy*, 2023.
- [23] Xu T, Yuan Y, Heap M J. Microwave-assisted damage and fracturing of hard rocks and its implications for effective mineral resources recovery [J]. *Minerals Engineering*, 2021, 160(1): 106663.
- [24] Yang C, Hassani F, Zhou K, et al. SPH-FEM simulations of microwave-treated basalt strength [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32(6): 2003-2018.
- [25] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021. (Wu Shunchuan. *Rock mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021. (in Chinese))
- [26] Hu X, Song X, Liu Y, et al. Experiment investigation of granite damage under the high-temperature and high-pressure supercritical water condition [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 180: 289-297.
- [27] 王石, 魏美亮, 陶铁军, 等. 含 APAM 的高浓度全尾砂砂浆内部结构演化特征[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(11): 3553-3566. (Wang Shi, Wei Meiliang, Tao Tiejun, et al. Internal structure evolution characteristics of high concentration unclassified tailings mortar containing APAM[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(11): 3553-3566. (in Chinese))

### (上接第 516 页)

- [17] 邓华锋, 陈天楠, 李建林, 等. 峰前卸荷损伤灰岩的再加载力学性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(6): 1301-1311. (Deng Huafeng, Chen Tiannan, Li Jianlin, et al. Reloading experimental research on the mechanical properties of limestone considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1301-1311. (in Chinese))
- [18] 魏明星, 朱永建, 任恒, 等. 三轴卸荷损伤砂岩单轴再承载力学特性及其破坏机制 [J]. *岩土力学*, 2024(10): 1-11. (Wei Mingxing, Zhu Yongjian, Ren Heng, et al. Uniaxial load-bearing mechanical characteristics and failure mechanism of triaxial unloading-damaged sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024(10): 1-11. (in Chinese))
- [19] 朱子涵, 蔚立元, 孟庆彬, 等. 峰前卸荷损伤大理岩的动静力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(4): 747-756. (Zhu Zihan, Yu Liyuan, Meng Qingbin, et al. Experimental study on dynamic and static characteristics of marble considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(4): 747-756. (in Chinese))
- [20] 李景龙, 朱子涵, 蔚立元, 等. 大理岩峰前卸荷损伤表征及再承载破坏耗能特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(12): 2429-2438. (Li Jinglong, Zhu Zihan, Yu Liyuan, et al. Dissipative characteristics investigation of marble during reloading process considering pre-peak unloading damage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2429-2438. (in Chinese))
- [21] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002(6): 778-781. (You Mingqing, Hua Anzeng. Energy analysis on failure process of rock specimens [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002(6): 778-781. (in Chinese))
- [22] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(9): 1729-1740. (Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(9): 1729-1740. (in Chinese))
- [23] Mandelbrot B B, Aizenman M. Fractals: form, chance, and dimension [J]. *Physics Today*, 1979, 32(5): 65-66.
- [24] 李杰林, 刘汉文, 周科平, 等. 冻融作用下岩石微观结构损伤的低场核磁共振研究[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(2): 266-272. (Li Wenlin, Liu Hanwen, Zhou Keping, et al. An LF-NMR study of the micro-structural deterioration of rocks under the effect of freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(2): 266-272. (in Chinese))