

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.091



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 分级循环卸-加围压下粉砂岩的力学特征

苗胜军, 段懿轩, 刘春康, 卢新爱  
(北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:**针对不同的实际工程,开展不同应力路径的试验来研究岩体的力学特性是解决实际问题的关键。为研究粉砂岩在围压循环卸-加载特殊应力路径下的力学特征,采用MTS815岩石力学测试系统开展不同轴力水平下分级循环卸-加载围压试验,研究不同轴力水平下轴、环向塑性应变及弹性模量的演化特征,并结合耗散能量的计算,分析能量演化与试件变形破坏之间的关系。结果表明:随着循环次数的增加,滞回环向应变增大方向移动,卸-加围压下应力-应变曲线逐渐闭合,滞回环间距整体表现为由“疏”到“密”的变化特征;单一变量时,围压卸载等级越低弹性模量越低,轴力水平越低弹性模量越高,弹性模量受轴力水平和围压卸载等级两种参量共同作用;单次循环中环向塑性应变在数值上总是大于对应的轴向塑性应变,循环卸-加围压特殊应力路径下,高轴力水平下岩石抵抗塑性变形的能力要强于低轴力水平;岩石破坏最终所耗散的总能量与轴力水平一定程度上呈线性正相关。

**关键词:**粉砂岩;循环卸-加围压;塑性应变;耗散能量;岩石力学;应力路径

**中图分类号:**TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)06-0001-08

## Mechanical characteristics of siltstone under staged cyclic unloading-loading confining pressure

MIAO Shengjun, DUAN Yixuan, LIU Chunkang, LU Xinai

(School of Civil and Resources Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** For engineering practice, conducting experiments with different stress paths to study the mechanical characteristics of rock masses is essential. In order to study the mechanical characteristics of siltstone under the special stress path of cyclic unloading-loading of confining pressure, the MTS815 rock mechanics testing system was used to conduct staged cyclic unloading-loading confining pressure tests at different axial force levels, and the evolution characteristics of axial and circumferential plastic strain and elastic modulus at different stress levels were analyzed. The relationship between the energy evolution and the deformation as well as the damage of the specimens was also analyzed via calculation of dissipated energy. The results show that the hysteresis loops move in the direction of strain increase as the number of cycles increases, and the stress-strain curves of unloading-loading confining pressure gradually close, and the overall change of hysteresis loop spacing is from “sparse” to “dense”. The lower the unloading level is, the lower the modulus of elasticity is, while the lower

**收稿日期:**2022-05-14

**基金项目:**国家自然科学基金(51974014,51574014)

**作者简介:**苗胜军(1979-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程及地质灾害监测与测试技术研究,E-mail:miaoshengjun@163.com。

**Received:** 2022-05-14

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 51974014, 51574014)

**Author brief:** MIAO Shengjun (1979-), professor, doctoral supervisor, main research interests: geotechnical engineering and geohazard monitoring and testing technology, E-mail: miaoshengjun@163.com.

the stress level is, the higher the modulus of elasticity is. Modulus of elasticity is affected by both the axial force level and the unloading level; the circumferential plastic strain is generally larger than the axial value in a single cycle, and the resistance to plastic deformation at high axial force levels is stronger than that at low force levels under the special stress path; the total energy dissipated in the final damage of the rock is positively correlated with the axial force level to some extent.

**Keywords:** siltstone; cyclic unloading-loading confining pressure; plastic strain; dissipation energy; rock mechanics; stress paths

弱胶结岩石主要分布在中国西部的侏罗系和白垩系地层,具有强度低、胶结性差、易崩解等特点<sup>[1]</sup>。对西部矿区弱胶结岩层力学性能认识不清是开采过程中灾害性事故频发的根本原因<sup>[2]</sup>。地下矿产的开采是一个复杂的过程,围岩体会受到多种形式的应力<sup>[3-5]</sup>。为更准确地反映采矿过程中的应力演化规律,必须考虑采矿是一个挖掘和支护循环交替进行的过程,周围岩石不可避免地会经历周期性的围压卸载再加载的过程<sup>[6-8]</sup>。因此,研究围压循环卸-加载条件下岩石的变形及破坏特征对进一步认识扰动对岩层的变形、破坏以及动力灾害发生的机理具有重要的指导作用<sup>[9]</sup>。针对不同的实际工程,开展不同应力路径的试验来研究岩体的力学特性是解决实际问题的关键<sup>[10-11]</sup>。

在分析不同应力路径下岩石的力学特性方面,众多学者开展了大量工作。王军祥等<sup>[12]</sup>研究了分级循环荷载下裂隙岩石的疲劳破坏特性与能量演化机制。黄达等<sup>[13]</sup>基于不同卸荷应力路径和常规三轴压缩试验,研究了加-卸载条件下花岗岩的变形破坏及应力脆性跌落特征。Li等<sup>[14]</sup>为研究不同加-卸载路径下饱和灰岩细观结构损伤演化特征,开展了不同加载速率和初始峰值应力的加卸-载试验。刘婕等<sup>[15]</sup>通过开展真三轴加-卸载破坏试验探究不同应力路径花岗岩变形破坏机制,得到卸载路径下花岗岩破坏时各能量变化幅度比加载路径更大的结论。袁曦等<sup>[16]</sup>通过开展恒定轴压卸围压、增大轴压卸围压、轴压围压同时卸载等3种不同加卸-载条件下的分阶段卸围压试验,发现各分阶段卸载条件下煤样的变形都具有明显的阶梯状特性。张云龙等<sup>[17]</sup>通过开展不同应力路径下卸围压流变试验,发现随着围压的不断卸载,岩体变形逐渐由弹性向塑性转变并最终破裂。朱泽奇等<sup>[18]</sup>研究了花岗岩卸围压破坏过

程的能量耗散规律,得出了能量耗散随施加围压的增大而增大的结论。Li等<sup>[19]</sup>在各种加-卸载应力路径下对细粒度到中等粒度的花岗岩试样进行三轴压缩试验发现,总应变能、弹性应变能和耗散应变能的时间历史曲线具有显著的阶段性特征。苗胜军等<sup>[20]</sup>通过开展粉砂岩循环加-卸载转单调加载试验和疲劳破坏试验,提出了循环荷载的“薄弱结构断裂效应”和“压密嵌固效应”。彭瑞东等<sup>[21]</sup>通过岩石三轴循环加-卸载试验,分析了不同围压作用下煤岩的损伤演化行为。

上述试验研究大多集中在单调的卸载或循环加-卸载路径下,关于卸-加围压应力路径下的岩石力学研究很少,尤其对循环围压条件下粉砂岩变形破坏的内在机理缺乏必要的研究。基于此,笔者以典型多孔弱胶结岩石粉砂岩为研究对象,进行分级循环卸围压条件下三轴压缩试验。为控制变量,采取围压卸载上限固定的方法,旨在探究不同卸载量及不同轴力水平循环卸-加围压条件下粉砂岩的变形、力学参数及能量演化特征,并探讨其内在关系,从而揭示循环围压路径对岩石力学特性的影响,为后续研究提供相应的参考依据。

## 1 试验

### 1.1 试验材料及设备

试验采用北京科技大学MTS815岩石力学测试系统进行加载,如图1所示。粉砂岩试样与苗胜军等<sup>[20]</sup>研究中用的多孔弱胶结粉砂岩相同。样品在烘箱中烘干24 h,然后用保鲜膜包好备用。试验前对岩石试件的尺寸、密度、孔隙率、含水率和波速进行测量,试件如图2所示,选取物理力学参数相似的3个岩石试件进行试验,其基本参数如表1所示。

表 1 粉砂岩岩石试件基础参数

Table 1 Basic parameters of siltstone rock specimens

编号	直径/mm	高/mm	质量/g	波速/(m/s)	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率/%	天然含水率/%
D-1	49.99	100.13	419.34	2 632.41	2.13	19.98	2.27
D-2	49.95	100.05	418.52	2 621.31	2.14	20.06	2.32
D-3	50.00	100.05	421.39	2 619.02	2.15	19.85	2.18



图1 MTS815岩石力学试验系统

Fig. 1 MTS815 rock mechanics testing system



图2 粉砂岩岩石试件

Fig. 2 Siltstone rock specimen

## 1.2 试验方案

西部矿山普遍工作深度为地下300~500 m,为

对应西部矿山开采深度的围压状况,将围压上限设置为16 MPa。为探究不同轴力水平下粉砂岩力学状况并且获得更多的循环,轴力水平设置为围压16 MPa粉砂岩三轴试验破坏时峰值应力的73%、53%、33%,即编号为D-1、D-2、D-3的试件轴力水平分别为99.1、76.8、45.0 MPa。

按照静水压力条件( $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=16$  MPa)对岩石试件施加预定的轴向应力和围压,然后将轴向应力提高到目标轴力。之后保持轴力不变,进行以16 MPa为上限围压,围压卸载下限逐级降低的围压分级循环卸载再加载。每级围压卸载下限按4 MPa递减(定义围压卸载下限越低,围压卸载等级越低),同一级别的循环次数为10次,直到岩石试件被破坏,循环停止。之后更换试件,依次完成不同轴力水平下围压卸-加载试验,具体控制步骤如表2所示,应力路径如图3所示。

表2 分级循环卸-加围压试验控制步骤

Table 2 Graded cycle unloading-loading confining pressure experimental control procedures

阶段	控制模式	控制速率	下限水平/MPa	上限水平/MPa
I	围压加载	0.1 MPa/s		16
II	轴压加载	0.5 kN/s		目标轴力
III			12	16
IV	围压循环卸-加载	至上限切换为-0.1 MPa/s,至下限切换为+0.1 MPa/s	8	16
V			4	16
VI			0	16

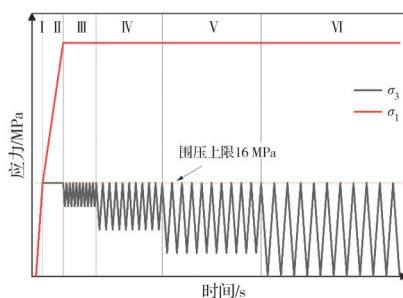


图3 粉砂岩循环卸-加围压实验应力路径

Fig. 3 Stress path of siltstone cyclic unloading-loading confining pressure experiment

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线特征

各轴力水平下分级循环卸-加围压试验轴向、环向应变随围压的变化曲线如图4所示。由图4可知,在循环卸-加围压的早期,围压处于较高水平,随着围压卸载等级的降低,岩石试件偏应力逐渐增加。当偏应力超过岩石的峰值强度时,试件发生破坏,此时轴向应力急剧下降,轴向应变急剧增加、环向应变急剧下降。试件D-1在围压卸载等级降至4 MPa的第一个循环内发生破坏,试件D-2在围压

卸载等级降至0时的第一个循环内发生破坏,试件D-3在围压卸载下限为0时这一等级经历多次循环后破坏。卸围压起始轴力水平越低,试件破坏所经历的循环次数越多。

在同一循环内,围压卸载曲线和围压加载曲线通常不重合,应力-应变曲线形成多样式的滞回环。恒定轴力循环卸-加围压条件下,以围压为纵坐标的围压-应变曲线形成的滞回环开口向上。由图4可知,随着循环次数的增加,同一围压卸载等级滞回环向应变增大方向移动,卸-加围压曲线逐渐闭合,整体表现为由“疏”到“密”的过程。随着围压卸载等级的降低,3个岩石试件的滞回环均发生显著变化,环的宽度和面积均增加。在起始围压卸载等级中,滞回环都具有相似的“窄尖叶”形状。但随着围压卸载等级的下降,所形成的滞回环曲线内凹现象越来越明显,滞回环渐变为“香蕉”形状,此现象与Yang等<sup>[7]</sup>开展的分级循环卸-加载围压试验中应力-应变曲线变化情况一致。且卸载曲线非线性特征越强,说明围压卸-加载翻转时岩石试件应变滞后应力的现象越不显著。



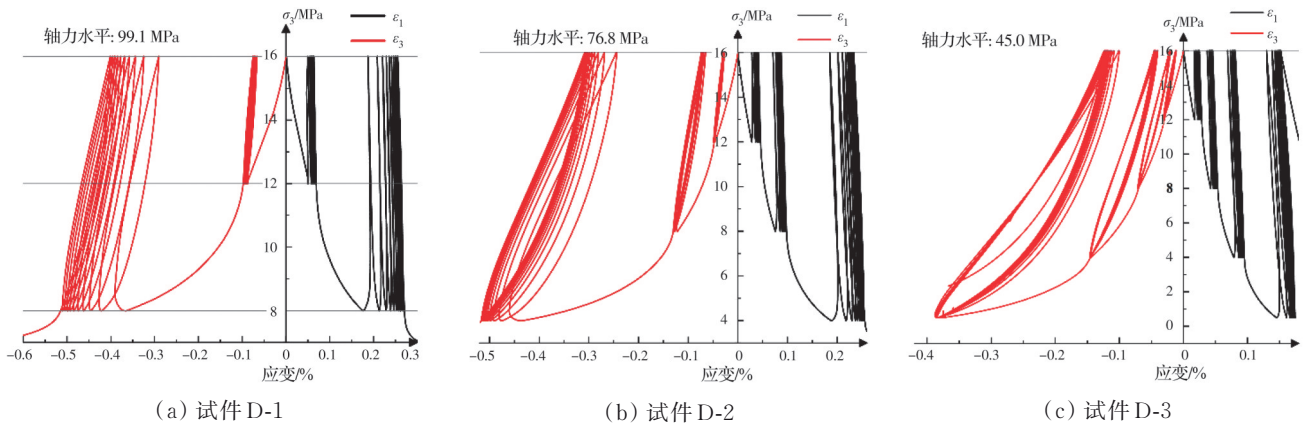


图 4 不同轴力水平下循环卸-加围压应力-应变曲线

Fig. 4 Cyclic unloading-loading confining pressure stress-strain curves under different axial force levels

## 2.2 破坏模式

编号为 D-1、D-2、D-3 的 3 个岩石试件破坏时偏应力分别为 92.00、73.51、57.90 MPa, 均发生脆性破坏, 如图 5 所示(试件反面为试件正面沿轴向旋转 180°)。三者的宏观破裂面均伴随有明显的摩擦痕迹, 破裂面内岩石被压碎成粉末及颗粒状, 主破裂面两侧局部伴随有剪切破裂面。

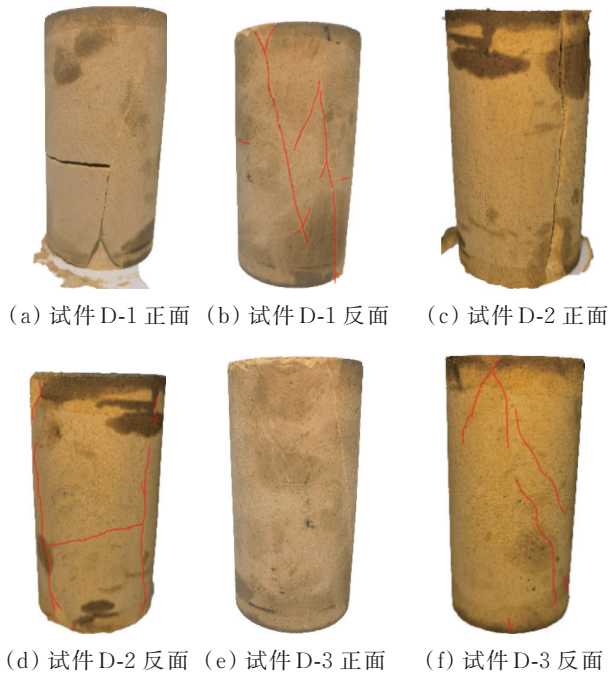


图 5 循环卸-加围压下岩石试件破坏图

Fig. 5 Damage diagrams of rock specimen under cyclic unloading-loading confining pressure

从试验粉砂岩试样的破坏模式来看, 相比于常规卸-围压试验和常规三轴试验破裂面单一及内部损伤较为集中的特征, 其破坏形态更为复杂, 经过循环卸-加载破坏后的岩石试件产生的细裂纹与散落的碎屑更多, 且边缘拉裂纹更为发育。这是由于相对于单调的卸围压或加载, 多次的围压加卸载作

用会使得试件的局部受拉区域增多, 从而造成更多次生裂隙及软弱颗粒断裂。

## 2.3 弹性模量变化特征

弹性模量是反映岩体刚度大小的重要参数, 从宏观角度来说, 弹性模量是衡量物体抵抗弹性变形能力的重要尺度<sup>[22]</sup>。弹性模量  $E$  是偏应力加-卸载时轴向应力增量和轴向应变增量的比值, 即滞回环两交点的斜率。

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\epsilon_1} \quad (1)$$

式中:  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  为滞回环两端点之间的轴向应力增量;  $\Delta\epsilon_1$  为滞回环两端点之间的轴向应变增量<sup>[23]</sup>。

图 6 为分级循环卸-加围压试验中粉砂岩在不同轴力水平下弹性模量随着循环次数的变化情况。随着围压卸载等级的降低, 各轴力水平下单次循环的弹性模量总体呈减小趋势。但首次围压卸-加载循环存在着较大的弹性模量, 轴力水平为 99.1、76.8、45.0 MPa 的分级循环卸-加围压试验首次循环的弹性模量分别为 13.0、18.0、25.3 GPa。随着试验的进行, 弹性模量曲线逐渐趋于平缓, 在临近破坏的前一个围压卸载等级, 弹性模量几乎成一条直线。由于岩石内部存在孔隙, 首次循环中轴向应变远大于其他循环。随着循环次数的增加, 轴向抗变形能力相对较稳定, 因此, 弹性模量变化不大。变量唯一时, 围压卸载等级越低, 单次循环的弹性模量越低, 轴力水平越低, 单次循环的弹性模量越高。由此发现弹性模量受轴力水平和围压卸载等级两种参量共同作用。

## 2.4 塑性应变演化特征

物体在外力作用下会发生变形, 当外力撤走后, 物体逐步恢复变形, 表现出弹性特征。然而, 由于岩土类材料内部包含孔隙和断裂等各类缺陷, 卸载后去除外力变形不能完全恢复, 会出现塑性变形。

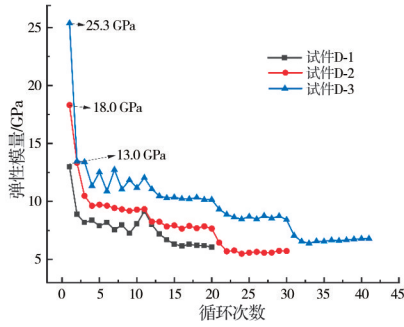
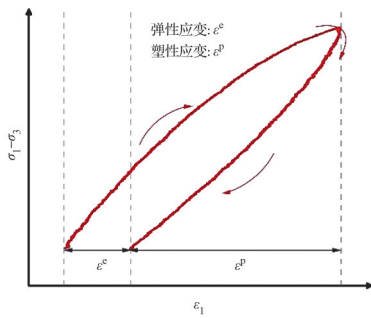
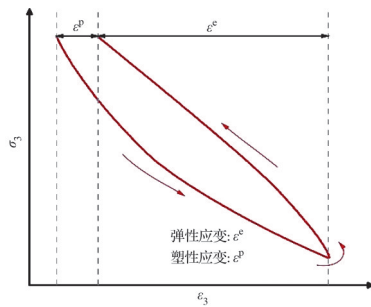


图 6 不同轴力水平下弹性模量-循环次数曲线  
Fig. 6 Modulus of elasticity-cycle number curves at different axial force levels

岩石试件在循环卸-加载围压下的塑性应变是指一次循环结束时的应变与循环开始时的应变之差,如图 7 所示。



(a) 偏应力-轴向应变曲线



(b) 围压-环向应变曲线

图 7 塑性应变计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of plastic strain calculation

单次循环的环向塑性应变可按式(2)计算<sup>[7]</sup>。

$$\Delta \epsilon_{3(n)}^{irr} = \epsilon_{3,h}^n - \epsilon_{3,q}^n \quad (2)$$

式中:  $\Delta \epsilon_{3(n)}^{irr}$  和  $n$  分别为单次循环内环向塑性应变的增量和该周期的序号;  $\epsilon_{3,h}^n$  为在第  $n$  个周期的最后一个采样点记录的环向应变;  $\epsilon_{3,q}^n$  为在第  $n$  个周期的第一个采样点记录的环向应变。

因此,通过叠加,累积的环向塑性应变计算为

$$\epsilon_3^{irr} = \sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_{3(n)}^{irr} \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_3^{irr}$  为环向塑性应变的累加值;  $N$  为周期总数。轴向塑性应变也按相同方式计算。

$$\Delta \epsilon_{1(n)}^{irr} = \epsilon_{1,h}^n - \epsilon_{1,q}^n \quad (4)$$

$$\epsilon_1^{irr} = \sum_{n=1}^N \Delta \epsilon_{1(n)}^{irr} \quad (5)$$

式中:  $\Delta \epsilon_{1(n)}^{irr}$  和  $n$  分别为单次循环内的轴向塑性应变的增量和该周期的序号;  $\epsilon_{1,h}^n$  为在第  $n$  个周期的最后一个采样点记录的轴向应变;  $\epsilon_{1,q}^n$  为在第  $n$  个周期的第一个采样点记录的轴向应变;  $\epsilon_1^{irr}$  为轴向塑性应变的累积值。对于破坏时的循环不进行分析,选取环向应变变化速率突增点为止。累积环向、轴向塑性应变与循环周期数的关系分别可以通过式(3)、式(5)确定,如图 8 所示。

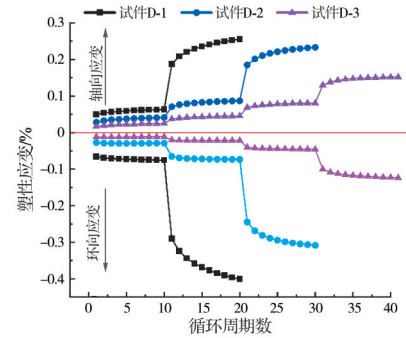


图 8 轴向及环向累积塑性应变随循环次数曲线  
Fig. 8 Axial and circumferential cumulative plastic strain versus number of cycles

由图 8 可见:整体而言,在分级循环卸-加载围压过程中,随着循环次数的增加,轴向及环向塑性应变持续增加,并且环向塑性应变在数值上总是大于轴向塑性应变。

对每个岩石试件而言,在前期围压卸载等级的循环过程中,塑性应变仅表现出一个很小的增量或几乎为零,说明此阶段岩石试件仍处于黏弹性响应阶段。在破坏前的围压卸载等级中,塑性应变明显增加。随着围压卸载等级的降低,塑性应变的增量呈“稳定”→“凸增”的变化特征。这主要是由于随着围压的降低,偏应力逐渐增大,对岩石试件轴向的压缩作用增强。同时,应力改变而导致的内部微观破坏逐渐发育累积也会使岩石试件逐渐损坏,降低其承载能力。在这两种效应的共同作用下,岩石试件最终产生了上述现象。

在同一围压卸载等级下,第一次循环产生的轴向和环向塑性应变远大于之后同等级的循环,并且随着循环次数的增加,轴向和径向塑性应变的增加幅度逐渐减小。上述现象与 Yang 等<sup>[7]</sup>研究的卸载量一定分级循环卸围压试验的现象相同,表明岩石试件在第一次循环中总是具有较大的塑性应变能。而随着围压的循环卸-加载,塑性应变的变化趋于稳定。这一现象也与常规循环加-卸载路径下的结果相似<sup>[24]</sup>,两者均呈现这一现象可能是由于两种加载

路径下岩石试件的偏应力变化情况相同。

对比发现,岩石试件破坏时累积的环向和轴向塑性应变与循环次数间具有很强的关联性。3个岩石试件轴力水平依次下降,破坏时的围压卸载等级依次降低并且累积的轴向塑性应变和环向塑性应变也依次减少。由此发现:分级循环卸-加围压路径下,岩石试件达到破坏时所需循环次数越多,累积的轴向和环向塑性应变越小。此特殊应力路径下,高轴力水平下岩石抵抗塑性变形的能力要强于低轴力水平。此外,该特殊应力路径下粉砂岩试验结果与朱泽奇等<sup>[18]</sup>研究的中部常见花岗岩试验结果相比,弱胶结粉砂岩破坏时的轴向及环向塑性变形特征均更为显著。

## 2.5 耗散能量分析

岩石加载过程中,输入的机械能会转化为弹性应变能和耗散能,其中弹性应变能储存在岩石中,而耗散能在岩石破坏过程中不断释放<sup>[25]</sup>。

根据能量守恒定律,假设岩石受载变形过程与外界没有热交换,岩石与试验机为一个封闭系统。由热力学第一定律,单位体积岩石试件内外力功所产生的总输入能量可表示为

$$W = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (6)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\epsilon_1$ 分别为轴向应力、应变; $\sigma_3$ 、 $\epsilon_3$ 分别为环向应力、应变。

岩石常规三轴循环加-卸载试验加载过程中围压在轴向做正功,环向做负功,卸载过程中围压在轴向做负功,环向做正功。试验不同于常规的循环加卸载试验<sup>[26]</sup>,试验过程中围压相对较高且不是固定不变,故分析中不可忽略围压的做功。因为能量是一个标量,为了计算方便,假设总耗散能量由两部分组成,即轴向耗散能量和环向耗散能量。但轴向耗散能量和环向耗散能量的物理意义只代表某一个值,只有把这两个值叠加起来才能得到粉砂岩实际的耗散能量。在围压卸载和加压的过程中,轴向耗散能量可以表示为式(7)。

$$U_{d1} = W_3 - E_{\epsilon_3} = \int \sigma_1 d\epsilon_1^{\text{unload}} - \int \sigma_1 d\epsilon_1^{\text{load}} \quad (7)$$

式中: $\epsilon_1^{\text{unload}}$ 和 $\epsilon_1^{\text{load}}$ 分别为卸载和加载阶段的轴向应变值。由于轴向应力在试验中保持不变,有效的轴向应力可以被认为是一个常数。同样地,环向耗散的能量可以表示为式(8),单次循环的总耗散能表示为式(9)。

$$U_{d3} = W_3 - E_{\epsilon_3} = \int \sigma_3 d\epsilon_3^{\text{unload}} - \int \sigma_3 d\epsilon_3^{\text{load}} \quad (8)$$

$$U_d = U_{d1} + U_{d3} \quad (9)$$

计算并绘制每个围压卸载等级每次循环的耗散能量和总的累积耗散能量,如图9、图10所示。

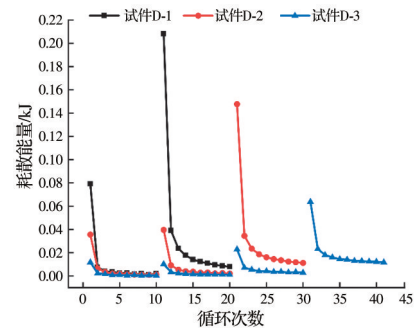


图9 不同轴力水平每次循环的耗散能量

Fig. 9 Energy dissipated per cycle for different axial force levels

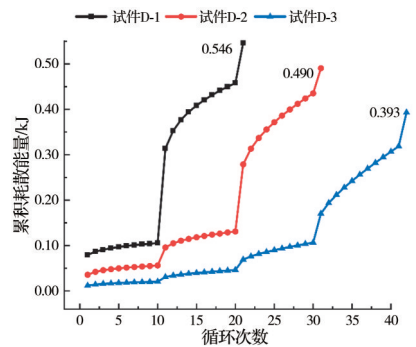


图10 不同轴力水平累积耗散能量

Fig. 10 Cumulative dissipation of energy at different axial force levels

综合分析图9、图10可见:恒定轴力分级循环卸-加围压实验中,随着循环次数的增加,累积耗散能量不断增加,说明岩石试件的破坏程度不断加剧。轴力水平分别为99.1、76.8、45.0 MPa的岩石试件破坏时累积耗散能量依次为0.546、0.490、0.393 kJ。轴力水平越高,通过分级循环卸-加载围压使得岩石试件破坏所耗散能量越大,表明岩石最终破坏所耗散能量的量值与轴力水平一定程度上呈正相关。当岩石试件进入下一个围压卸载等级时,耗散能量会大幅增加,增加幅度随着围压卸载等级的下降而逐级增大。并且轴力水平越高,进入对应下一个围压卸载等级时所耗散的能量越多。此外,与常规分级加卸载耗散能随循环次数的变化相比,分级循环卸-加围压路径下破坏前一级会出现耗散能突增的先兆特征。各试件破坏前的围压卸载等级中,首次循环耗散的能量尤为明显,依次占总耗散能量的38.1%、30.1%、22.1%,而在卸载量一定的分级循环卸围压试验中,能量耗散在试件破坏时的循环最明显<sup>[7]</sup>。这是由于应力状态在试件变形过程中发生改变,系统不断调整内部结构以抵抗外力的扰动,能量则不断耗散,裂纹向局域集中的有序方向发展<sup>[27]</sup>。

在同一围压卸载等级下,随着循环次数的增加,每次循环的耗散能量逐渐减少。在不同围压卸



载等级下,随着围压卸载等级的降低,每次循环的耗散能量越大。在不同轴力水平相同围压卸载等级下,轴力水平越高,每次循环的耗散能量越大。此特征与塑性应变的变化特征一致。

### 3 结论

以典型胶结岩石粉砂岩为研究对象进行分级循环卸围压条件下三轴压缩试验,研究不同轴力水平下弹性模量、塑性应变及耗散能的演化特征,得到以下结论:

1)循环卸-加围压条件下,随着循环次数的增加,滞回环往应变增大的方向移动,卸-加围压应力-应变曲线逐渐闭合,滞回环间距整体表现为由“疏”到“密”的变化特征。

2)在分级循环卸-加载围压过程中,单一变量下,围压卸载等级越低单次循环的弹性模量越低,轴力水平越低单次循环的弹性模量越高。弹性模量受轴力水平和围压卸载等级两种参量共同作用。

3)在分级循环卸-加围压过程中,随着循环次数的增加,轴向及环向塑性应变持续增加,并且环向塑性应变在数值上均大于对应的轴向塑性应变。对比结果表明,弱胶结粉砂岩破坏时的塑性变形远大于一般结晶岩,因此,弱胶结岩层区域巷道开挖时需额外支护。

4)根据能量守恒定律,采取了适合于循环卸围压实验的耗散能量计算方式。在分级循环卸-加围压条件下,粉砂岩最终破坏的所耗散能量一定程度上与轴力水平呈正相关,因此地应力测试环节非常关键,建议在西部矿山工程中依据原岩应力去选取施工方式。

### 参考文献

- [1] 孙利辉,纪洪广,杨本生.西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J].煤炭学报,2019,44(3):866-874.  
SUN L H, JI H G, YANG B S. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in western representative mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 866-874. (in Chinese)
- [2] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.  
XIE H P. Research framework and anticipated results of “deep rock mechanics and mining theory” [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16. (in Chinese)
- [3] 赵阳升.岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J].岩石力学与工程学报,2021,40(7):1297-1336.  
ZHAO Y S. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(7): 1297-1336. (in Chinese)
- [4] 李夕兵,姚金蕊,宫凤强.硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J].中国有色金属学报,2011,21(10):2551-2563.  
LI X B, YAO J R, GONG F Q. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563. (in Chinese)
- [5] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.  
CAI M F, XUE D L, REN F H. Current status and development strategy of metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426. (in Chinese)
- [6] 涂敏,付宝杰.关键层结构对保护层卸压开采效应影响分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(4):536-541.  
TU M, FU B J. Analysis of the effect of key strata structure on relief-pressure mining in protective seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(4): 536-541. (in Chinese)
- [7] YANG Y, JIANG C B, GUO X W, et al. Experimental investigation on the permeability and damage characteristics of raw coal under tiered cyclic unloading and loading confining pressure [J]. Powder Technology, 2021, 389: 416-429.
- [8] ZHANG D M, YANG Y S, CHU Y P, et al. Influence of loading and unloading velocity of confining pressure on strength and permeability characteristics of crystalline sandstone [J]. Results in Physics, 2018, 9: 1363-1370.
- [9] CHAO Z M, MA G T, WANG M. The investigation of seepage model for columnar jointed rock masses during cyclic loading and unloading of confining pressure [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 1-12.
- [10] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.  
ZHOU H W, XIE H P, ZUO J P. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91-99. (in Chinese)
- [11] 何满潮.深部软岩工程的研究进展与挑战[J].煤炭学报,2014,39(8):1409-1417.  
HE M C. Progress and challenges of soft rock engineering in depth [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417. (in Chinese)
- [12] 王军祥,赵会敏,郭连军,等.分级循环荷载下裂隙岩石疲劳破坏特性与能量演化机制[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(3):103-114.  
WANG J X, ZHAO H M, GUO L J, et al. Fatigue failure characteristics and energy evolution mechanism of fractured rock under graded cyclic loading [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(3): 103-114. (in Chinese)
- [13] 黄达,黄润秋,张永兴.三轴加卸载下花岗岩脆性破坏及应力跌落规律[J].土木建筑与环境工程,2011,33

- (2): 1-6.  
HUANG D, HUANG R Q, ZHANG Y X. Characteristics of brittle failure and stress drop under triaxial loading and unloading [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 1-6. (in Chinese)
- [14] LI J L, HONG L, ZHOU K P, et al. Mechanical characteristics and mesostructural damage of saturated limestone under different load and unload paths [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 8831247.
- [15] 刘婕, 丛宇, 张黎明, 等. 花岗岩真三轴加、卸载破坏的细观损伤机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2677-2688.  
LIU J, CONG Y, ZHANG L M, et al. Mesoscopic damage mechanism of granite under true triaxial loading and unloading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2677-2688. (in Chinese)
- [16] 袁曦, 张军伟. 分阶段卸载条件下突出煤变形特征与渗流特性[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1451-1457.  
YUAN X, ZHANG J W. Deformation and permeability characteristic of outburst coal under step unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1451-1457. (in Chinese)
- [17] 张龙云, 张强勇, 杨尚阳, 等. 大岗山坝区辉绿岩卸围压三轴流变试验及分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 1034-1042.  
ZHANG L Y, ZHANG Q Y, YANG S Y, et al. Analysis of unloading confining pressure triaxial rheological tests of diabase in Dagangshan Dam side [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 1034-1042. (in Chinese)
- [18] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(Sup1): 2675-2681.  
ZHU Z Q, SHENG Q, XIAO P W, et al. Analysis of energy dissipation in process of unloading confining pressure failure of rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup1): 2675-2681. (in Chinese)
- [19] LI D Y, SUN Z, XIE T, et al. Energy evolution characteristics of hard rock during triaxial failure with different loading and unloading paths [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 270-281.
- [20] 苗胜军, 王辉, 黄正均, 等. 不同循环上限荷载下泥质石英粉砂岩力学特性试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 75-85.  
MIAO S J, WANG H, HUANG Z J, et al. Experimental study on the mechanical properties of argillaceous quartz siltstone under different upper limit cyclic loadings [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 75-85. (in Chinese)
- [21] 彭瑞东, 鞠杨, 高峰, 等. 三轴循环加卸载下煤岩损伤的能量机制分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 245-252.  
PENG R D, JU Y, GAO F, et al. Energy analysis on damage of coal under cyclical triaxial loading and unloading conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 245-252. (in Chinese)
- [22] 倪智伟, 吴小刚, 陈浩, 等. 分级循环加卸载试验下砂岩的力学特性研究[J]. 金属矿山, 2021(10): 21-27.  
NI Z W, WU X G, CHEN H, et al. Study on mechanical properties of sandstone under grading cyclic loading and unloading test [J]. Metal Mine, 2021(10): 21-27. (in Chinese)
- [23] 赵军, 郭广涛, 徐鼎平, 等. 三轴及循环加卸载应力路径下深埋硬岩变形破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1521-1530.  
ZHAO J, GUO G T, XU D P, et al. Experimental study of deformation and failure characteristics of deeply-buried hard rock under triaxial and cyclic loading and unloading stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1521-1530. (in Chinese)
- [24] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1810-1814.  
JIANG Y, GE X R, REN J X. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810-1814. (in Chinese)
- [25] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(2): 26-31.  
ZHAO Z H, XIE H P. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(2): 26-31. (in Chinese)
- [26] 苗胜军, 刘泽京, 赵星光, 等. 循环荷载下北山花岗岩能量耗散与损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 928-938.  
MIAO S J, LIU Z J, ZHAO X G, et al. Energy dissipation and damage characteristics of Beishan granite under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 928-938. (in Chinese)
- [27] 周翠英, 张乐民. 岩石变形破坏的熵突变过程与破坏判据[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2506-2510.  
ZHOU C Y, ZHANG Y M. Research on entropy catastrophic regularity and failure criterion in the deformation and failure process of rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2506-2510. (in Chinese)