

# 两种卸荷路径下泥岩流变特性试验研究

任青阳<sup>1</sup>, 张黄梅<sup>1</sup>, 刘佳申<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 武汉地铁集团有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘 要:** 分析岩石流变特性对边坡长期变形稳定性具有十分重要的意义。以贵州省某高速公路为背景, 在施工现场取样, 设计了恒轴压卸围压与等比例卸围压和轴压两种应力路径下的分级卸荷流变试验。试验结果表明, 两种应力路径下泥岩岩样卸荷流变趋势大体一致, 破坏应力下岩样的侧向变形迅速增长并超过了轴向变形, 侧向扩容较显著; 对比恒轴压卸荷, 等比例卸荷历时较长, 岩样轴向变形虽出现了回弹, 但轴向变形量和侧向变形量所占全变形的比例较大, 约为恒轴压卸荷的 2 倍, 说明等比例卸载围压和卸轴压应力路径下岩样破坏可预见性更小, 但其破坏影响更大。等比例卸荷实验参照实际边坡开挖坡度选取比例设计实验, 对实际边坡工程长期稳定性分析极具参考价值。

**关 键 词:** 恒轴压卸荷; 等比例卸荷; 流变

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 增 1-0127-08

## Rheological properties of mudstone under two unloading paths in experiments

REN Qing-yang<sup>1</sup>, ZHANG Huang-mei<sup>1</sup>, LIU Jia-shen<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** The rheological properties of rock are of great significance to the analysis of long-term deformation and stability of slopes. Based on the sampling of construction site at a highway in Guizhou province, the graded unloading rheological tests under two stress paths including constant axial stress and unloading confining pressure, and equal proportional unloading of confining pressure and axial stress were designed. The test results show that under the two stress paths, the rheological trend of the mudstone specimen under unloading is basically the same. Under the failure stress, the lateral deformation of the mudstone sample increases rapidly and it exceeds the axial deformation, and the lateral expansion is more significant. Compared with the constant axial stress unloading condition, the equal proportional unloading requires a much longer time, and the axial deformation of the mudstone sample rebounds. However, axial and lateral deformation account for a large proportion of the total deformation, which is about twice of that in unloading of constant axial stress. It shows that under the equal proportional unloading of confining pressure and axial stress, the predictability in failure of rock sample is smaller, but its damage effect is much greater. The proportional design experiment refers to the actual slope excavation gradient is designed to carry out the proportional unloading test, which has great reference for the long-term stability analysis of the actual slope engineering.

**Keywords:** constant axial stress unloading; equal proportional unloading; rheology

## 1 引 言

岩石流变特性一直是岩石工程研究的重点, 工程实践表明岩石开挖后的变形具有显著的时间效应, 对岩石工程的长期稳定性影响很大, 无论是地下洞室工程还是边坡工程, 随着时间的变化, 围岩变形不断发展, 最终可能导致工程坍塌, 因此岩石

流变特性的研究是亟待发展的。

研究岩石流变特性主要手段是室内实验, 已经取得了大量成果, 邱贤德等<sup>[1]</sup>对长山盐矿和乔后盐矿进行蠕变试验研究, 由试验结果分析得出岩盐蠕变模型。杨圣奇等<sup>[2]</sup>对饱和状态下坚硬大理岩和绿片岩进行三轴压缩流变试验, 研究了硬岩在不同围压作用下的轴向应变以及侧向应变随时间的变化规

收稿日期: 2018-11-17

基金项目: 国家重点研发计划重点专项子课题 (No.2016YFC0802206-3); 国家自然科学基金项目 (No. 41472262)。

This work was supported by the National Key Research and Development Plan Key Special Sub-Project(2016YFC0802206-3) and the National Natural Science Foundation of China (41472262).

第一作者简介: 任青阳, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土本构关系和滑坡防治研究。E-mail: 115598097@qq.com

律。朱杰兵等<sup>[3]</sup>选取乌江彭水水电站地下厂房新鲜页岩进行恒轴压、逐级卸围压应力路径下的卸荷流变试验,对岩石的三轴卸荷流变特性进行初探。赵延林等<sup>[4]</sup>采用分级增量循环加卸载方式,对金川有色金属公司 III 矿区软弱节理矿岩进行蠕变试验。闫子舰等<sup>[5]</sup>结合锦屏水电站引水隧洞的工程实际,采用恒轴压分级卸围压的应力路径对锦屏大理岩开展了室内三轴压缩蠕变试验。朱杰兵等<sup>[6]</sup>以锦屏二级水电站引水隧洞绿砂岩为研究对象,采用恒轴压、逐级卸围压的应力路径开展室内流变试验,研究卸荷条件下的轴向及侧向变形特征。杨尚阳等<sup>[7]</sup>依托某在建大型水电站,采用保持轴向应力不变、分级卸围压方式,对硬脆性花岗岩进行蠕变试验,分析了硬脆性岩石的卸荷蠕变变形特性及宏观和微细观破裂形式。张龙云等<sup>[8]</sup>用岩石全自动三轴伺服流变仪对硬脆性花岗岩进行了三轴卸荷流变试验,重点分析了硬脆性岩石在卸荷条件下的蠕变规律及蠕变特性,并根据试验结果分析了硬脆性岩石的卸荷长期强度的确定方法。黄兴等<sup>[9]</sup>开展砂质泥岩恒轴压逐级卸围压三轴卸荷蠕变试验,研究了软岩轴向、侧向和体积蠕变规律和卸荷流变过程中偏应力-应变关系特性。邓华锋等<sup>[10]</sup>以砂质泥岩为试验研究对象,进行了加轴压卸围压和恒轴压卸围压条件下的分级卸荷流变试验。王者超等<sup>[11]</sup>开展了水平层理试样和竖直层理试样的三轴压缩蠕变试验,研究了不同层理的炭质板岩在不同加载路径下的蠕变特性,分析了蠕变流动方向特征。

目前岩石卸荷流变特性研究主要采用的恒轴压逐级卸围压和加轴压卸围压这两种应力路径,而采用卸围压的同时以相同的速率卸载轴压这种应力路径的研究少有。等应力比路径,即径向应力和轴向应力之比  $\sigma_3 / \sigma_1$  基本为常数的应力路径是岩土工程中几种重要的应力路径之一,主要存在于边坡、大坝(堤)和地下工程中,在此类工程的施工期和蓄水期岩体大部分区域主应力比保持为常数,即垂直方向应力  $\sigma_1$  增加,水平方向应力  $\sigma_3$  (及  $\sigma_2$ ) 也随着增加,  $\sigma_3 / \sigma_1$  基本为常数,在卸荷的时候同样如此。以往的应力路径与边坡真实开挖的应力变化情况存在一定的差异,等比例卸荷更能准确地模拟边坡开挖应力变化情况,能更好地掌握开挖后边坡岩体的力学特性。

## 2 三轴流变试验

本次以贵州某高速公路边坡为研究背景,在施工现场取样,在室内制作成 50 mm×100 mm 标准圆

柱体泥岩试样,开展卸围压的同时以相同的速率卸载轴压(等比例卸荷)流变试验,研究该应力路径下的岩石流变破坏规律。

### 2.1 岩石特性

研究区域边坡起止里程桩号 K93+700 ~ K93+970,长约 270 m,设计公路路基宽 24.50 m,全段为挖方区,左侧最大开挖深度约为 37.65 m,中心挖方最大高度为 19.93 m,右侧最大开挖深度约为 16.21 m。试验所需岩石由该边坡施工现场取回,岩性为侏罗系中统遂宁组泥岩,为红褐色,泥质结构,层状构造见图 1。主要矿物为黏土矿物,节理较发育,裂隙面可见泥质充填,岩芯呈碎块状一短柱状,节长约 5~25 cm,最长约 55 cm,岩质新鲜,遇水易软化、崩解。



图 1 泥岩试样

Fig.1 Mudstone sample

### 2.2 试验仪器

本次试验所用的仪器是 Rock 600-50 HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统,见图 2。该系统主要进行岩石等地质材料的温度-流体-化学-应力等多场耦合试验,由控制部分、加载部分与变形测量三部分组成,可提供的最大轴向荷载为 1 000 kN,最大周围压力为 60 MPa,最大孔隙压力为 60 MPa;轴向变形范围为 0~20 mm,径向变形范围为 0~5

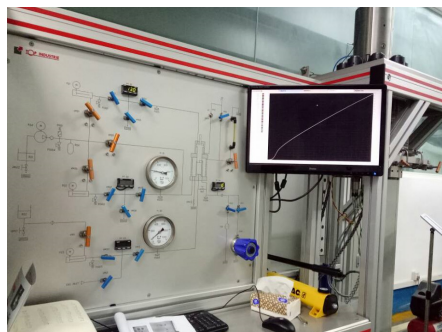


图 2 Rock 600-50HT PLUS 型多功能岩石三轴测试系统

Fig.2 Multi-functional triaxial rock testing system-  
Rock 600-50HT PLUS

mm, 轴向加载速度为 0.01~10 kN/s, 围压加载速度为 0.001~20 MPa/s。

### 2.3 试验方案

开展流变试验前先对泥岩开展常规三轴压缩试验, 得到不同围压下的三轴抗压强度, 结果见表 1。

表 1 泥岩三轴压缩试验结果  
Table 1 Triaxial compression test results of mudstone

| 岩样编号 | 围压 $\sigma_3$ /MPa | 轴压 $\sigma_1$ /MPa | 均值/MPa |
|------|--------------------|--------------------|--------|
| S-1  | 0                  | 32.88              | 30.16  |
| S-2  | 0                  | 27.44              |        |
| S-3  | 20                 | 102.47             | 107.8  |
| S-4  | 20                 | 112.74             |        |

本次设计了两种应力路径, 路径 I 为恒轴压卸围压试验方案, 应力路径 II 为卸围压的同时以相同速率卸载轴压即等比卸荷试验方案, 两种方案分 4 级卸荷。

应力路径 I, 恒轴压逐级卸围压流变试验的初始围压为 20 MPa, 初始轴压为该围压下三轴极限抗压强度的 70% (50%) 即约 75.5 MPa (53.9 MPa), 分 4 级卸荷, 每级卸载 4 MPa, 步骤为: ① 按静水条件, 以 0.05 MPa/s 的速率加载  $\sigma_1 = \sigma_3$  至预设值 (20 MPa)。② 待静水压力  $\sigma_3$  达到预设值稳定后保持  $\sigma_3$  不变, 以 0.05 MPa/s 的速率加载  $\sigma_1$  至预设值 75.5 MPa (53.9 MPa)。③  $\sigma_1$  达到预设值后观察岩样轴向和侧向位移, 待岩样位移达到稳定标准后 (轴向位移增量小于等于 0.001 mm/h), 同样以 0.05 MPa/s 的速率卸载围压至 16 MPa, 然后记录岩样的位移变化情况, 至岩样流变变形趋于稳定后继续保持轴压  $\sigma_1$  不变开始卸载围压至下一级应力水平即 12 MPa, 如此逐级卸载围压, 直至岩样破坏为止。

应力路径 II, 等比卸荷流变试验初始围压为 20 MPa, 初始轴压为该围压下三轴极限抗压强度的 70% (50%) 即约 75.5 MPa (53.9 MPa), 分 4 级卸荷, 卸荷比例取 0.7 即围压每级卸载 4 MPa, 轴压每级卸载 5.7 MPa, 步骤为: ① 按静水条件, 以 0.05 MPa/s 的速率加载  $\sigma_1 = \sigma_3$  至预设值 (20 MPa)。② 待静水压力  $\sigma_3$  达到预设值稳定后, 保持  $\sigma_3$  不变, 以 0.05 MPa/s 的速率加载  $\sigma_1$  至预设值 75.5 MPa (53.9 MPa)。③  $\sigma_1$  达到预设值后观察岩样轴向和侧向位移, 待岩样位移达到稳定标准后 (轴向位移增量小于等于 0.001 mm/h), 以 0.05 MPa/s 的速率卸载围压至 16 MPa, 同时以相同的速率卸载轴压

至 69.8 MPa, 然后记录岩样的位移变化情况, 至岩样流变变形趋于稳定后开始卸载围压和轴压至下一级应力水平即围压至 12 MPa 轴压至 64.1 MPa, 如此逐级卸载, 直至岩样破坏为止。

两种应力路径共做了 4 个试样包含三轴极限抗压强度的 50% 和 70%, 限于篇幅, 本文应力路径 I、II 分别只选取了 1 个典型试样 S-5 和 S-7 (三轴极限抗压强度的 70%) 的数据作图分析, 应力路径 I、II 的围压、轴压值见表 2。

表 2 泥岩三轴卸荷流变试验应力水平  
Table 2 Stress values in triaxial unloading rheological tests of mudstone

| 岩样编号                                        | 轴压 $\sigma_1$<br>/MPa | 围压 $\sigma_3$<br>/MPa | 偏应力<br>$(\sigma_1 - \sigma_3)$<br>/MPa | 瞬时应变/mm |       | 流变应变/mm |       |       |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------|---------|-------|---------|-------|-------|
|                                             |                       |                       |                                        | 轴向      | 侧向    | 轴向      | 侧向    |       |
| S-5<br>恒轴压<br>卸围压                           | 75.5                  | 20                    | 55.5                                   | 1.578   | 1.061 | 0.629   | 0.665 |       |
|                                             |                       | 16                    | 59.5                                   | 1.587   | 1.088 | 0.710   | 0.788 |       |
|                                             |                       | 12                    | 63.5                                   | 1.593   | 1.105 | 0.800   | 0.938 |       |
|                                             |                       | 8                     | 67.5                                   | 1.673   | 1.125 | 1.257   | 1.277 |       |
| S-6<br>恒轴压<br>卸围压                           | 53.9                  | 20                    | 33.9                                   | 0.878   | 0.615 | 0.322   | 0.319 |       |
|                                             |                       | 16                    | 37.9                                   | 0.885   | 0.634 | 0.369   | 0.351 |       |
|                                             |                       | 12                    | 41.9                                   | 0.894   | 0.656 | 0.441   | 0.473 |       |
|                                             |                       | 8                     | 45.9                                   | 0.907   | 0.677 | 0.593   | 0.652 |       |
| S-7<br>等比例卸荷<br>$\sigma_3 / \sigma_1 = 0.7$ | 64.1                  | 4                     | 49.9                                   | 0.965   | 0.703 | 0.972   | 1.071 |       |
|                                             |                       | 75.5                  | 20                                     | 55.5    | 0.189 | 0.097   | 0.123 | 0.021 |
|                                             |                       | 69.8                  | 16                                     | 53.8    | 0.195 | 0.112   | 0.134 | 0.031 |
|                                             |                       | 58.4                  | 8                                      | 50.4    | 0.202 | 0.164   | 0.136 | 0.055 |
| S-8<br>等比例卸荷<br>$\sigma_3 / \sigma_1 = 0.7$ | 36.8                  | 52.7                  | 4                                      | 48.7    | 0.199 | 0.184   | 0.295 | 0.269 |
|                                             |                       | 53.9                  | 20                                     | 33.9    | 0.115 | 0.061   | 0.078 | 0.013 |
|                                             |                       | 48.2                  | 16                                     | 32.2    | 0.118 | 0.069   | 0.085 | 0.021 |
|                                             |                       | 42.5                  | 12                                     | 30.5    | 0.123 | 0.085   | 0.098 | 0.035 |
|                                             | 31.1                  | 36.8                  | 8                                      | 28.8    | 0.126 | 0.105   | 0.117 | 0.047 |
|                                             |                       | 4                     | 27.1                                   | 0.133   | 0.117 | 0.207   | 0.194 |       |

## 3 试验结果分析

### 3.1 不同应力水平对卸荷流变特性的影响

岩样 S-6 共经历 4 级卸荷, 表 2 显示每级卸荷后直到变形稳定其轴向流变变形增量依次为 0.047、0.072、0.152、0.379 mm, 单位偏应力引起的应变增量分别为  $1.2 \times 10^{-5}$ 、 $1.7 \times 10^{-5}$ 、 $3.3 \times 10^{-5}$ 、 $7.6 \times 10^{-5}$  MPa<sup>-1</sup>, 恒轴压卸围压时每级卸荷后偏应力增大, 且单位偏应力引起的应变增量也随着增大, 即围压水平越低时岩样的流变变形更大, 需经更长时间趋于稳定。岩样 S-8 在 4 级卸荷中单位偏应力引起的应变增量分别为  $2.2 \times 10^{-6}$ 、 $4.3 \times 10^{-6}$ 、 $6.5 \times 10^{-6}$ 、 $3.8 \times 10^{-5}$  MPa<sup>-1</sup>, 随着围压的逐级减小, 岩样初始的衰减流变速率逐渐增大, 变形需要经过更长时间趋

于稳定。

### 3.2 轴向及侧向流变变形规律分析

试验所得数据处理结果如图3(岩样S-5)和图4(岩样S-7)所示,图3为恒轴压逐级卸围压应力路径下轴向和侧向应变随时间变化曲线,图4为等比卸荷应力路径下轴向和侧向应变随时间变化曲线。

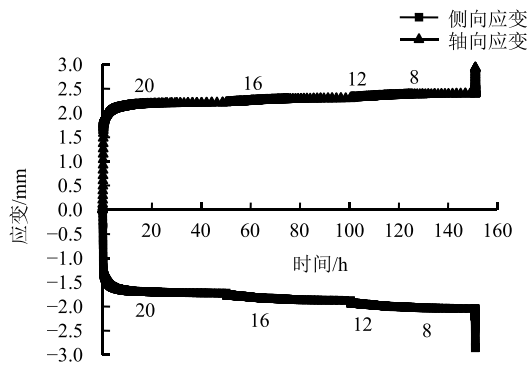


图3 恒轴压卸荷流变曲线(单位: MPa)

Fig.3 Rheological curves under constant axial stress unloading condition (unit: MPa)

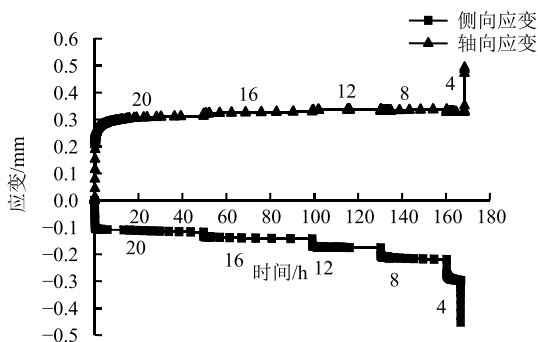


图4 等比例卸荷流变曲线(单位: MPa)

Fig.4 Rheological curves of equal proportional unloading condition (unit: MPa)

对应力路径 I, 可见图 3 在各级恒定轴压应力条件下泥岩岩样表现出显著的流变变形特征, 泥岩轴向和侧向应变均由瞬时应变和流变应变组成, 泥岩流变曲线均呈现出减速流变阶段和稳定流变阶段; 在破坏围压应力下(从 12 MPa 卸载至 8 MPa)泥岩变形不仅经历了减速和稳定流变阶段, 并从稳定流变阶段过渡到了非线性加速流变阶段, 岩样从进入加速流变阶段到开始破坏历时极短, 与传统的流变特性一致。另外, 应力路径 I 在达到破坏围压之前泥岩轴向应变为  $2.393 \times 10^{-2}$ , 侧向应变为  $0.651 \times 10^{-2}$ ; 在破坏围压应力下侧向应变从  $0.651 \times 10^{-2}$  迅速增大至  $0.906 \times 10^{-2}$ , 增大了  $0.255 \times 10^{-2}$ , 而

轴向应变从  $2.393 \times 10^{-2}$  增大至  $2.93 \times 10^{-2}$ , 增大了  $0.537 \times 10^{-2}$ , 即加速流变阶段岩样侧向变形占总变形的 28.1%, 轴向变形占总变形的 18.6%, 侧向应变比轴向应变变化大, 说明试样在加速流变阶段侧向应变显著增大, 侧向扩容较轴向扩容明显。

对应力路径 II, 可见图 4 在等比卸荷应力路径下泥岩仍然表现出显著的流变特征, 泥岩轴向和侧向应变同样由瞬时应变和流变应变组成, 泥岩流变曲线均呈现出减速流变阶段和稳定流变阶段; 在破坏围压应力(从 8 MPa 卸载至 4 MPa)下, 泥岩变形经历减速和稳定流变阶段, 并最终过渡到非线性加速流变阶段, 岩样轴向及侧向变形显著发生变化并迅速发生破坏。与恒轴压卸荷不同的是, 应力路径 II 在围压由 8 MPa 卸载至 4 MPa 时轴向应变出现了瞬时回弹, 由  $3.37 \times 10^{-3}$  回弹至  $3.27 \times 10^{-3}$ , 减小了  $0.1 \times 10^{-3}$ , 而后由  $3.27 \times 10^{-3}$  迅速增大到  $4.92 \times 10^{-3}$ , 最终变化了  $1.65 \times 10^{-3}$ ; 侧向应变并未出现回弹由  $0.69 \times 10^{-3}$  迅速增大至  $1.44 \times 10^{-3}$ , 变化了  $0.75 \times 10^{-3}$ , 即加速流变阶段岩样侧向变形占总变形的 52.1%, 轴向变形占总变形的 15.2%, 说明试样在等比卸荷应力路径下侧向扩容较轴向扩容明显。

如图 5 所示, 应力路径 I、II 的泥岩在两种不同应力路径下流变曲线特征大致相同, 均表现为卸荷时发生瞬时弹性变形, 历经衰减流变后进入稳定流变阶段, 最后发展为非线性加速流变阶段直至岩样发生破坏即在破坏阶段侧向应变增长幅度大于轴向应变, 侧向扩容较轴向扩容明显, 但由于等比卸荷应力路径在卸围压的同时以相同的比例卸载了轴压, 因而轴向和侧向单位应变增量与恒轴压卸荷相比均更小, 如第二级应力下(围压为 16 MPa)恒轴压卸荷轴向和侧向单位应变增量分别为  $4.06 \times$

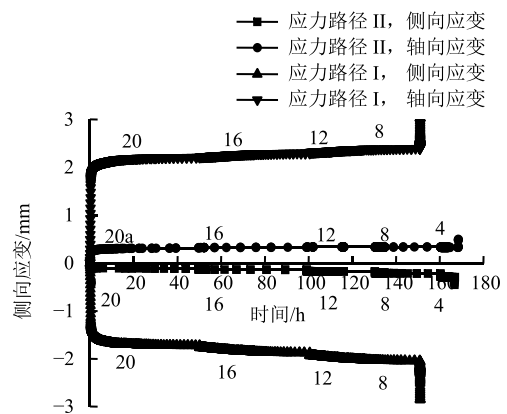


图5 两种卸荷路径流变曲线对比(单位: MPa)

Fig.5 Comparison of rheological curves between two unloading paths(unit: MPa)

$10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  和  $1.01 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ , 等比例卸荷轴向和侧向单位应变增量分别为  $0.611 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  和  $0.85 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 。各级荷载应力下单位应力引起的瞬时应变和流变应变也更小, 如第二级应力下 (围压为 16 MPa) 恒轴压卸荷轴向瞬时应变和流变应变分别为  $2.67 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  和  $1.19 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ , 等比例卸荷轴向瞬时应变和流变应变分别为  $0.362 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  和  $0.249 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。等比卸荷应力路径下岩样轴向应变出现回弹, 而侧向应变并未出现回弹, 说明轴向应力的减小对岩样的应变有显著影响, 其影响对侧向变形更为显著。

4 组泥岩试样的破坏形态见图 6, 主要表现为剪切破坏, 但局部破坏形态存在一定差异。由表 2 可知, 岩样 S-5、S-7、S-6、S-8 初始应力状态相同, 两种不同应力路径下岩样初始应力状态相同, 在第一级应力状态下蠕变曲线表现出的规律一致, 施加轴压时首先岩样内部的孔隙开始闭合, 然后进入弹性变形阶段, 最后进入裂纹稳定扩展阶段。由于轴压值未达到岩样的屈服强度, 当轴压恒定时, 随着时间的推移, 岩样内部的应力进行不断地调整与转移, 微裂隙不断产生并扩展直至蠕变变形稳定, 裂纹不再扩展。

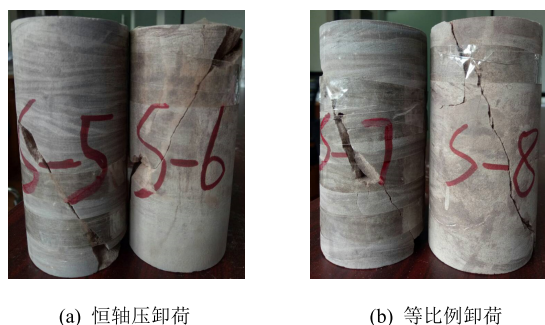


图 6 不同应力路径下岩样破坏状态

Fig.6 Failure state of rock samples under different stress paths

对于应力路径 I, 轴压保持不变, 围压逐级减小, 即偏应力水平不断增加, 岩样内部产生竖向裂纹, 不断积累与扩展, 因而围压卸载时产生较为明显的扩容现象, 随着岩样内部损伤的劣化积累, 裂纹逐渐扩展贯通直至产生宏观的破裂面, 岩样出现加速蠕变阶段达到破坏极限。对于应力路径 II, 岩样的轴压与围压同时减小, 即岩样的侧向约束能力与偏应力同时减小, 岩样虽同样表现为竖向裂纹的产生与扩展, 但更快进入稳定蠕变阶段, 内部损伤积累相对较小。当围压卸载至 4 MPa 时, 偏应力值相对较小, 岩样轴向应变出现瞬时回弹, 但围压对

其强度的影响更为显著, 岩样侧向约束能力较弱, 扩容现象明显, 内部裂纹相对快速扩展并贯通, 直至岩样出现加速蠕变达到破坏极限, 岩样更为破碎。

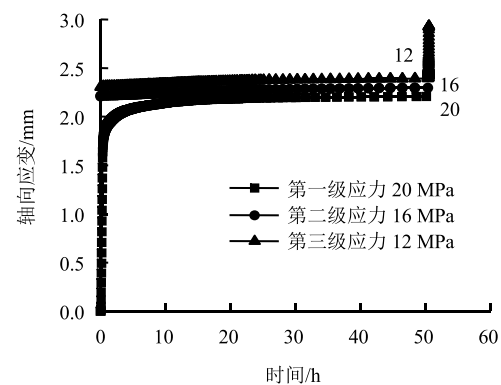
岩样 S-5 破坏时围压为 8 MPa、岩样 S-6、S-7、S-8 破坏时围压为 4 MPa, 而高围压对岩样侧向约束能力较强, 因此破坏时岩样 S-5 较完整。对于岩样 S-7、S-8, 破坏时围压均为 4 MPa, 但岩样 S-7 初始应力水平较高, 每级卸载后岩样 S-7 进入稳定蠕变所需时间更长, 内部微裂纹的损伤与扩展更多, 损伤积累更大, 因而岩样 S-7 破坏时更为破碎。

恒轴压逐级卸荷或等比卸荷流变条件下得到的是一条随偏应力变化逐级变化的流变曲线, 为进一步分析两种应力路径下变形的差异性, 综合叠加原理和岩石试验规范<sup>[12]</sup>提出的分级增量加载蠕变试验数据处理方法, 把整条曲线转化为各级荷载下的流变曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 等比卸荷应力路径对泥岩岩样变形影响较为显著。对应力路径 I 恒轴压应力路径下, 随着围压的逐级减小, 偏应力的逐级增大, 岩样轴向应变和侧向应变都在增大, 岩样达到稳定的时间更长岩样也越难稳定; 图 7(a)、7(b)显示各级荷载应力下随偏应力的增大, 岩样轴向瞬时应变大于侧向瞬时应变, 而轴向的流变应变小于侧向流变应变, 说明侧向扩容较轴向显著。对于应力路径 II, 随围压的逐级卸载同时以相同的比例卸载轴压, 各级荷载应力下, 偏应力在逐级减小, 但岩样的轴向应变和侧向应变都在增加; 在临近破坏应力时, 轴向应变虽出现了回弹但短暂的回弹后仍迅速增大直至破坏。表 2 和图 7(c)、7(d)表明, 虽偏应力的减小岩样达到稳定阶段所需时间更短, 岩样更易稳定。

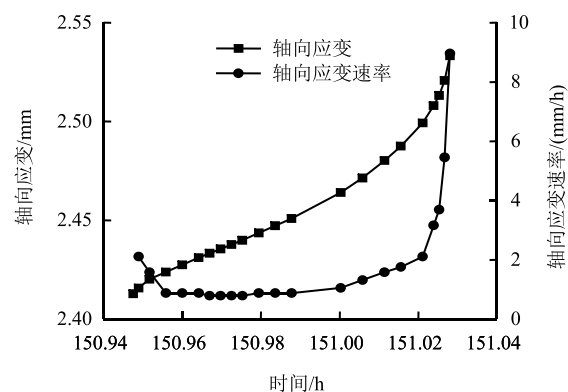
### 3.3 非线性加速流变阶段规律分析

从泥岩试样的卸荷流变曲线可以看出, 在达到破坏围压之前两种应力路径下岩样变形逐渐趋于稳定, 主要表现出衰减流变和稳态流变阶段; 在破坏围压水平下试样的流变变形表现出明显的非线性加速流变阶段, 这一阶段历时较短, 但变形却较大, 岩样在该阶段迅速达到破坏, 这是实际工程中研究的重点及热点问题, 对工程的长期稳定性具有深远影响, 研究对于该阶段试样变形特征极必要。

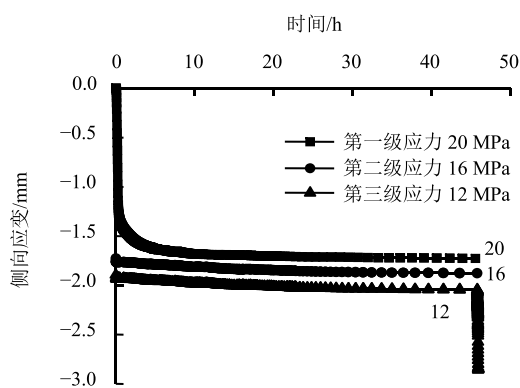
为详细分析泥岩试样在加速流变阶段的特点, 这里列出了两种试验方案下岩样在破坏围压水平的轴向及侧向流变速率变化曲线, 如图 8 (图 7(a)中岩样流变三阶段历史极短, 图 8(a)轴向应变由图 7(a)放大比例而得)。对应力路径 I, 当围压从 16 MPa 卸到 8 MPa 时岩样迅速进入非线性加速流变阶段,



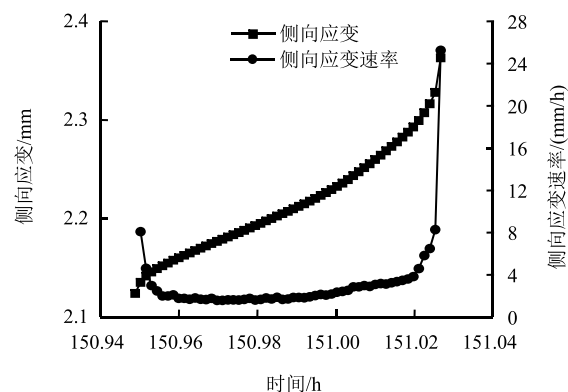
(a) 恒轴压卸荷轴向



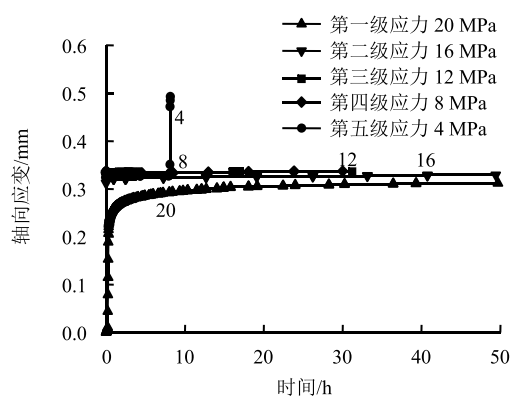
(a) 恒轴压卸荷轴向加速阶段



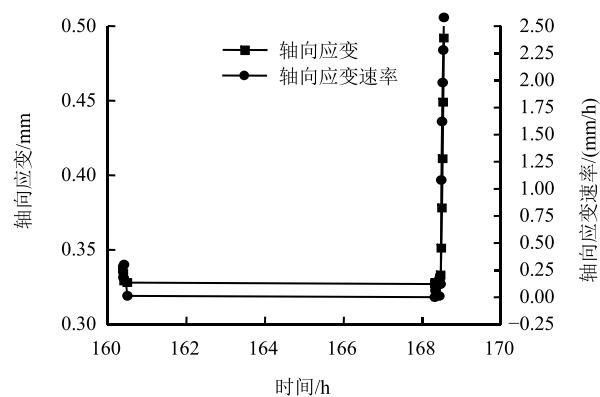
(b) 恒轴压卸荷侧向



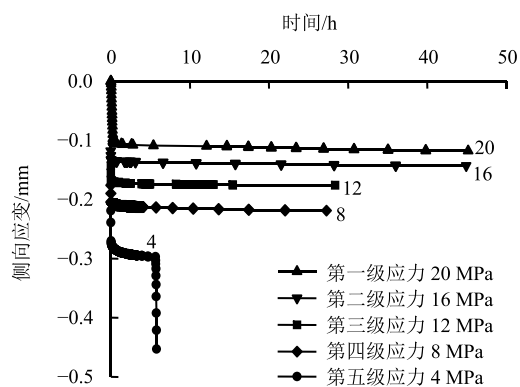
(b) 恒轴压卸荷侧向加速阶段



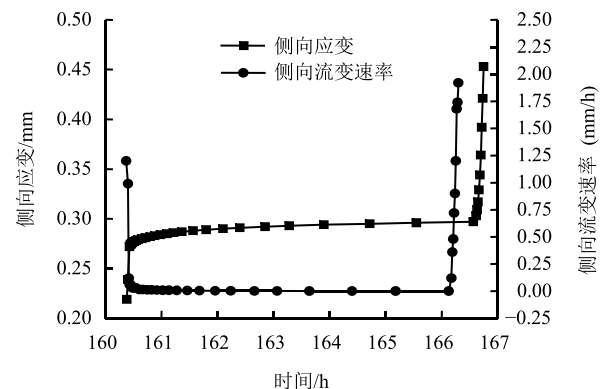
(c) 等比卸荷轴向



(c) 等比卸荷轴向加速阶段



(d) 等比卸荷侧向



(d) 等比卸荷侧向加速阶段流变曲线

图7 流变曲线簇 (单位: MPa)  
Fig.7 Rheological curve clusters (unit: MPa)

图8 流变曲线  
Fig.8 Rheological curves

整个阶段历时特别短, 大约 8 min, 不到全过程的 1/1 000, 但岩样的轴向变形量和侧向变形量却达到了全变形量的 18%和 28%, 表明岩石开挖卸荷达到破坏应力水平时, 岩石的变形是非常大的, 工程实际中需要我们及时监测。从图 8(a)、8(b)可以看出, 破坏应力水平下岩样非线性加速流变阶段的侧向应变增长特别快其速率大约是轴向应变增长速率的 3 倍, 表明侧向扩容现象更为显著。对应力路径 II, 当围压从 8 MPa 卸到 4 MPa, 同时轴压从 58.2 MPa 卸到 52.7 MPa 时岩样应力达到了破坏应力水平, 整个阶段岩样在经历了衰减流变和稳态流变阶段后迅速进入非线性流变阶段, 历史较短, 大约 8 h, 占总历史约 5%, 岩样的轴向变形量和侧向变形量分别占了全变形的 32%和 52%, 表明岩样在这一阶段的变形非常大。从图 8(c)、8(d)可以看出, 岩样的轴向应变出现了回弹, 之后迅速增加, 而侧向应变一直在增长, 其增长速率大约为轴向增长速率的 1.3 倍, 侧向扩容更为显著。

对比应力路径 I (见图 8(a)、8(b))、II (见图 8(c)、8(d)), 两种应力路径下破坏阶段的历史均很短, 变形占总变形的比例均很大, 均表现出更为显著的侧向扩容现象。不同的是应力路径 II 应力路径下破坏阶段历时更长, 轴向和侧向应变增长速率都较应力路径 I 应力路径下更小, 且该应力路径下轴向应变出现了回弹, 岩样破坏可预见性较小, 但在该应力路径下岩样的变形量却非常大, 大约是恒轴压应力路径下的 2 倍, 尤其侧向变形量更是占到了全变形量的 1/2, 表明等比卸荷开挖卸荷岩样破坏可预见性虽小, 但其破坏影响却是非常大的。

### 3.4 长期强度的确定

岩石的长期强度只是时效强度的一种, 岩石长期强度定义为岩石在长期的应力场或者变形场的作用下能保持岩体稳定的最大应力, 即在这一应力值时材料将发生破坏而并没有发生破坏。采用等时曲线法所确定的泥岩长期强度见表 3。

表 3 泥岩三轴卸荷流变长期强度  
Table 3 Long-term strengths of triaxial unloading rheological of mudstone

| 岩样<br>编号 | 应力<br>路径 | 轴压 $\sigma_1$<br>/MPa | 围压 $\sigma_3$<br>/MPa | 长期强度<br>/MPa | 破坏强度<br>/MPa |
|----------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| S-5      | I        | 75.5                  | 20                    | 63.5         | 67.5         |
| S-6      |          | 53.9                  | 20                    | 41.9         | 45.9         |
| S-7      | II       | 75.5                  | 20                    | 52.1         | 48.7         |
| S-8      |          | 53.9                  | 20                    | 32.2         | 28.8         |

由表可见, 应力路径 II 由于卸载围压的同时以

相同的比例卸载了轴压, 岩样的长期强度比应力路径 I 小了约 11.5 MPa, 说明等比例卸荷岩样更早进入屈服状态。

## 4 结 论

(1) 在恒轴压卸围压和卸围压的同时, 以相同的速率卸载轴压 (等比卸荷) 两种应力路径下泥岩岩样卸荷的流变趋势大体一致, 破坏前应力水平前均经历衰减流变和稳态流变阶段, 达到破坏应力水平后在经历衰减流变和稳态流变阶段后迅速进入非线性加速流变阶段。随着应力的逐级卸载两种试验方案岩样的应变曲线均由瞬时变形和流变变形组成。

(2) 由于轴向应力对岩样变形影响较大, 与恒轴压卸荷相比, 等比卸荷岩样在各级荷载作用下岩样的轴向变形量和侧向变形量及瞬时应变量和流变应变均更小, 但试验初期两种卸荷路径下岩样的轴向变形均大于侧向变形, 临近破坏时岩样侧向变形迅速增加甚至超过轴向变形, 直到岩样破坏, 说明两种应力路径下岩样的侧向扩容更为显著。

(3) 与恒轴压卸荷相比, 等比卸荷虽然也在卸荷, 随着围压和轴压的逐级卸载偏应力在逐级减小, 临近破坏时岩样的轴向变形出现了回弹, 回弹之后迅速增长直到破坏, 而侧向变形随偏应力的减小仍在增加, 进一步说明轴向应力对岩样侧向影响更为显著, 侧向变形虽回弹但其回弹后的影响仍不可忽略。

(4) 破坏围压下两种方案岩样经历的时长均很短, 但轴向变形量和侧向变形量占总变形量的比例却很大。相比之下, 等比卸荷破坏阶段历时更长, 轴向和侧向应变增长速率较恒轴压卸荷更小, 并且轴向应变出现了回弹, 岩样破坏可预见性较小, 但在该应力路径下岩样的变形量却非常大却较恒轴压卸荷大很多约为其 2 倍。

(5) 两种卸载应力路径下岩样的破坏形态均为压剪破坏, 等比例卸荷侧向约束能力与偏应力同时减小更快进入稳定蠕变阶段, 内部损伤积累相对较小, 但等比例卸荷破坏时围压值相对较小, 对岩样的侧向约束能力较弱, 其岩样更为破碎。

不同的卸载路径下岩石的流变特性是不同的, 尤其在破坏围压应力水平下岩石的破坏特征、变形量, 速率差异较大。等比卸荷应力路径参照实际边坡开挖坡度选取卸荷比例进行试验, 试验所得泥岩流变特性对实际边坡工程围岩长期变形稳定性的分析极具参考价值, 单纯的恒轴压卸围压或加轴压卸

围压流变试验已不能满足实际工程需要,应当尽量丰富其他卸荷路径来研究岩石的卸荷流变特性,才能更好地满足实际工程需求。

### 参 考 文 献

- [1] 邱贤德, 姜永东, 张兰. 岩盐流变特性与卸荷损伤本构关系研究[J]. 中国井矿盐, 2003, 34(4): 21—23.  
QIU Xian-de, JIANG Yong-dong, ZHANG Lan. Study on rheological characteristics and unloading damage constitutive relationship of rock salt[J]. **China Well and Rock Salt**, 2003, 34(4): 21—23.
- [2] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 962—969.  
YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, XIE Shou-yi, et al. Studies on triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(8): 962—969.
- [3] 朱杰兵, 汪斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4552—4556.  
ZHU Jie-bing, WANG Bing, YANG Huo-ping, et al. Experimental study on rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 4552—4556.
- [4] 赵延林, 曹平, 陈沅江, 等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 748—753.  
ZHAO Yan-ping, CAO Ping, CHEN Yuan-jiang, et al. Creep properties experiment and model of jointed soft rocks under step load and unload[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(7): 748—753.
- [5] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2153—2159.  
YAN Zi-jian, XIA Cai-chu, LI Hong-ze, et al. Study on rheological rules of marble in jinping hydropower station under condition of step unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2153—2159.
- [6] 朱杰兵, 汪斌, 邬爱清. 锦屏水电站绿砂岩三轴卸荷流变试验及非线性损伤蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 528—534.  
ZHU Jie-bing, WANG Bing, WU Ai-qing. Study of unloading triaxial rheological tests and its nonlinear damage constitutive model of jingping hydropower station green sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 528—534.
- [7] 杨尚阳, 张龙云. 硬脆性岩石卸荷流变特性及本构模型研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(10): 53—53.  
YANG Shang-yang, ZHANG Long-yun. Study on unloading rheological characteristics of hard brittle rock and its constitutive model[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2015, 46(10): 53—53.
- [8] 张龙云, 张强勇, 李术才, 等. 硬脆性岩石卸荷流变试验及长期强度研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2399—2407.  
ZHANG Long-yun, ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, et al. Unloading rheological tests of hard brittle rock and its long-term strength analysis[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(10): 2399—2407.
- [9] 黄兴, 刘泉声, 康永水, 等. 砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2653—2662.  
HUANG Xing, LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 2653—2662.
- [10] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 砂质泥岩三轴卸荷流变力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 315—322.  
DENG Hua-feng, ZHOU Mei-ling, LI Jian-lin, et al. Experimental research on unloading triaxial rheological mechanical properties of sandy mudstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 315—322.
- [11] 王者超, 宗智, 乔丽苹, 等. 横观各向同性岩石蠕变性质与本构模型研[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 65—73.  
WANG Zhe-chao, ZONG Zhi, QIAO Li-ping, et al. Creep behaviors and constitutive model of transversely isotropic rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(7): 65—73.
- [12] 长江科学院. DL/T 5368—2007 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
Changjiang River Scientific Research Institute. DL/T 5368—2007 Code for rock test of hydroelectric and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2007.