2021 年 第 21 卷 第 31 期
2021, 21(31): 13469-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:王空前, 谢东武. 不同卸荷路径下的页岩蠕变特性试验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13469-13475.
Wang Kongqian, Xie Dongwu. Experimental study on creep characteristics of shale under different unloading paths[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13469-13475.

不同卸荷路径下的页岩蠕变特性试验研究

王空前[1], 谢东武[2]

(1. 郑州财经学院土木工程学院, 郑州 450000; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要 地下硐室围岩流变现象显著,对硐室开挖与运营造成巨大威胁。以某深埋矿井巷道页岩为例,参照地下硐室实际开挖情况设计轴压与围压等比卸荷应力路径,同时开展恒轴压卸围压、等比卸荷两种应力路径下的蠕变试验,研究页岩在不同卸荷路径下的蠕变力学特性。试验结果显示:①页岩在两种卸荷路径下的蠕变特性十分明显,轴向应变量值始终高于侧向应变;②岩石在破坏应力水平下的轴向应变增长程度小于侧向应变,岩石的侧向扩容较为明显;③等比卸荷和恒轴压卸围压条件下的岩石长期强度分别为 47.69 MPa 和 62.85 MPa,等比卸荷应力条件下岩石更易屈服破坏。研究成果可为地下硐室长期稳定性研究提供一定参考。

关键词 卸荷; 页岩; 蠕变; 扩容; 长期强度
中图法分类号 TU452; **文献标志码** A

Experimental Study on Creep Characteristics of Shale under Different Unloading Paths

WANG Kong-qian[1], XIE Dong-wu[2]

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou Institute of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, China;
2. Department of Underground Architecture and Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[**Abstract**] The rheological phenomenon of surrounding rock of underground chamber is remarkable, which poses a great threat to the excavation and operation of underground chamber. Taking a deep mine roadway shale as an example, the stress path with equal ratio of axial pressure and confining pressure unloading was designed according to the actual excavation of underground chamber. Creep tests under two stress paths of constant axial pressure unloading confining pressure and equal ratio unloading were carried out at the same time to study the creep mechanical properties of shale under different unloading paths. The results show these as follows. Firstly, the creep behavior of shale under two unloading paths is very obvious, and the axial strain is always higher than the lateral strain. Secondly, the axial strain increases less than the lateral strain under the failure stress level, and the lateral dilatancy of the rock is obvious. Thirdly, the long-term strength of rock under the condition of constant axial pressure unloading and constant axial pressure unloading confining pressure is 47.69 MPa and 62.85 MPa, respectively, and the rock under the condition of constant axial pressure unloading is more likely to yield failure. The research results provide some reference for the long-term stability study of underground chamber.

[**Keywords**] unloading; shale; creep; capacity expansion; long-term strength

岩石流变力学与地下硐室设计、施工和运营安全紧密关联,同时也是当下的研究热点内容之一[1-2]。地下硐室围岩在受扰动前处于三向应力状态,工程实践表明硐室开挖后岩体时效变形显著,围岩随着时间发展,变形位移不断累积,最终可能导致硐室坍塌,因此研究岩石三轴卸荷蠕变特性具有重要意义[3-4]。本研究背景为某深埋矿井巷道,巷道开挖后围岩蠕变现象显著,最终导致塌方,故而研究岩石的卸荷蠕变力学特性很有必要。

目前关于岩石卸荷蠕变特性的研究已取得一定成果:张龙云[5]以花岗岩为研究对象,开展三轴卸荷流变试验,研究其卸荷流变变形、速率和强度等变化;石振明等[6]以绿片岩为试验对象,设计恒定轴压分级卸围压应力路径下,开展蠕变试验,分析轴向、侧向蠕变规律;黄兴等[7]开展砂质泥岩恒轴压逐级卸围压蠕变试验,研究卸荷流变中偏应力-应变关系及流变应变变化规律,分析砂质泥岩的扩容效应;杨超等[8]针对裂隙大理岩试样,开展恒轴压分级卸围压三轴卸荷蠕变试验,研究试样在不同

收稿日期: 2021-04-19; **修订日期**: 2021-08-06
基金项目: 国家自然科学基金(41977227)
第一作者: 王空前(1986—),男,河南商丘人,硕士,讲师。研究方向:岩土及地下工程。E-mail:505475413@qq.com。

裂隙倾角下的卸荷蠕变应变,探索完整岩石与裂隙岩体间卸荷蠕变的相关关系。目前卸荷应力路径下的岩石蠕变特性研究相比常规加载应力路径下较少,开展岩石卸荷蠕变试验是系统性认识岩石流变特性的有效途径之一。

由于目前的岩石卸荷流变试验多为恒轴压卸围压的应力路径,与工程实践中应力释放方式存在一定偏差,故设计轴压与围压等比卸荷的应力路径,与传统应力路径进行对比试验。其中,等比卸荷即径向应力 σ_3 与轴向应力 σ_1 之比 σ_3/σ_1 为常数,该应力路径多见于高边坡、地下硐室,此类工程大部分区域内岩体开挖期间主应力比为常数[5]。现依托于某深埋矿井巷道工程实践,以顶板页岩为研究对象,开展不同卸荷路径下的蠕变试验,对比分析页岩的轴向和侧向应变特征、应变速率及长期强度,研究成果可为地下硐室长期稳定性研究提供一定参考。

1 页岩卸荷蠕变试验设计

1.1 试样制备及基本力学参数

试样取自某深埋矿井巷道顶板新鲜页岩,岩层为志留系上统沙帽组,岩块呈黑褐色层状,岩样基本物理力学参数如表 1 所示。

为了研究页岩在三向应力强度特性,采用 TLW-2000 型岩石三轴流变试验仪,将岩样加工成 ϕ50 mm×100 mm 的圆柱样(图 1),开展三轴压缩试验,围压设置为 20 MPa,轴向应力 σ_1 与轴向应变 ε_1 关系曲线如图 2 所示。

由图 2 可看出,页岩试样 A-1 和 A-2 在围压 20 MPa 下的最大轴向应力分别为 106.46 MPa 和 99.42 MPa,其平均值为 102.94 MPa。

表 1 岩样基本物理力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of rock samples

容重/(kN·m^{-3})	孔隙率/%	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
24.84	0.67	19.78	38.65

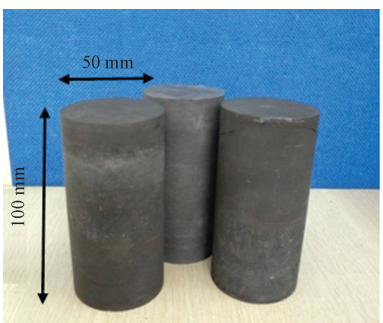


图 1 岩石试样照片

Fig. 1 Photos of rock samples

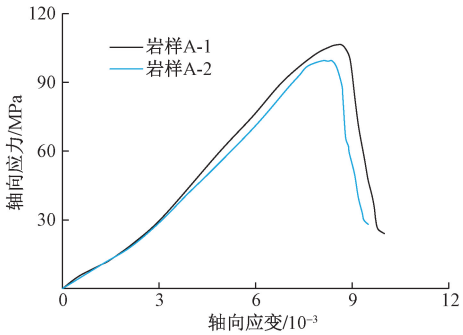


图 2 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves

1.2 卸荷蠕变试验设计

卸荷蠕变试验采用与三轴压缩试验相同的 TLW-2000 型岩石三轴流变试验仪,设计两种应力路径:应力路径Ⅰ为恒轴压卸围压,应力路径Ⅱ为轴压和围压等比卸荷。应力路径示意图如图 3 所示。

应力路径Ⅰ:初始围压设置为 20 MPa,初始轴压取页岩三轴试验中最大轴向应力平均值的 70%,即 72.1 MPa。初始轴压保持不变,围压以 4 MPa 为应力梯度进行卸载,直至试样破坏。步骤为:首先以 0.1 MPa/s 的速率加载围压 σ_3 到 20 MPa,应力稳定后以 0.1 MPa/s 的速率加载轴压 σ_1 到 72.1 MPa。轴压 σ_1 达到目标值后,观察岩样的轴向、侧向位移,当其稳定后,保持轴压恒定,以 0.1 MPa/s 的速率卸

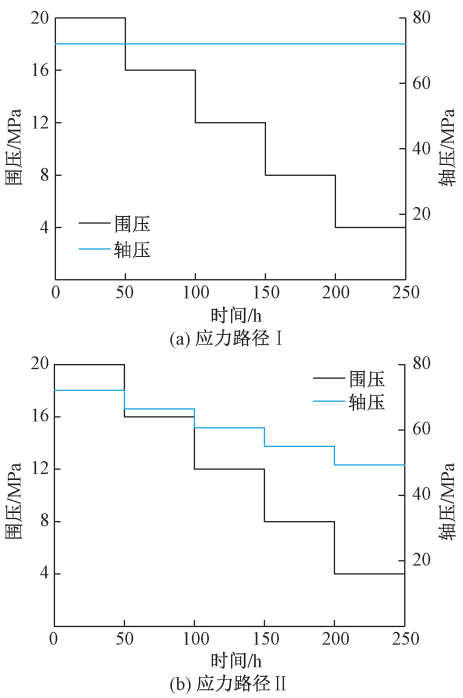


图 3 应力路径图

Fig. 3 Stress path diagrm

载围压,每 4 MPa 为一个应力梯度,每卸一级围压,至少保持 50 h 时间使蠕变变形充分发展,然后再继续卸载,直至岩样破坏。

应力路径Ⅱ:初始围压设置为 20 MPa,初始轴压取页岩三轴试验中最大轴向应力平均值的 70%,即 72.1 MPa。围压以 4 MPa 为应力梯度进行卸载,轴压以同样比例(σ_3/σ_1 = 70%)进行卸载,即 5.7 MPa,围压和轴压等比卸荷,直至试样破坏。步骤为:首先以 0.1 MPa/s 的速率加载围压 σ_3 到 20 MPa,应力稳定后以 0.1 MPa/s 的速率加载轴压 σ_1 到 72.1 MPa。轴压 σ_1 达到目标值后,观察岩样的轴向、侧向位移,当其稳定后,保持轴压恒定,以 0.1 MPa/s 的速率同时卸载围压和轴压,围压以 4 MPa 为应力梯度进行卸载,轴压以 5.7 MPa 为应力梯度进行卸载,每一级卸载后至少保持 50 h 时间使蠕变变形充分发展,然后再继续卸载,直至岩样破坏。

1.3　卸荷蠕变试验结果

两种应力路径下的页岩卸荷蠕变试验结果如图 4、图 5 所示,其中图 4 为页岩在应力路径Ⅰ下的(恒轴压卸围压)轴向、侧向应变随时间累积曲线,图 5 为页岩在应力路径Ⅱ下的(等比卸荷)轴向、侧向应变随时间累积曲线。

由图 4 可看出,在轴压恒定(72.1 MPa)的条件下,从 20 MPa 开始逐级卸载围压(4 MPa 为应力梯度),至第 5 级应力水平时岩石屈服破坏。此时,历经 234.52 h 轴向应变达到最大值 3.481×10^{-2},侧向应变达到最大值 -2.549×10^{-2}。

由图 5 可知,轴压从 72.1 MPa 开始逐级卸载(应力梯度为 5.7 MPa),围压从 20 MPa 开始逐级卸载(4 MPa 为应力梯度),至第 5 级应力水平时岩石屈服破坏。此时,历经 217.55 h 轴向应变达到最大值 0.683×10^{-2},侧向应变达到最大值 -0.345×10^{-2}。

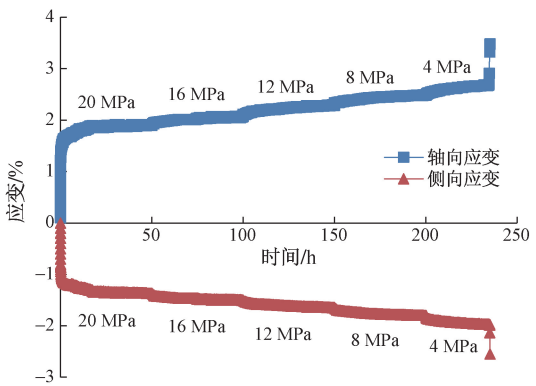


图 4　恒轴压卸围压蠕变曲线

Fig. 4　The creep curves of constant axial pressure unloading confining pressure

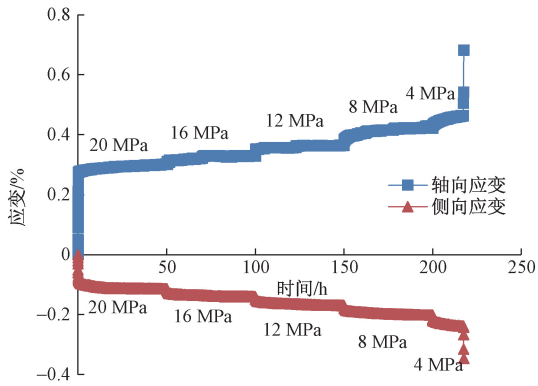


图 5　等比卸荷蠕变曲线

Fig. 5　Equal ratio unloading creep curves

综合图 4、图 5 可知,页岩在应力卸荷条件下具有显著的流变特性,在应力路径Ⅰ、Ⅱ下的卸荷蠕变曲线形态基本一致。页岩的轴向、侧向应变均由瞬时应变和蠕变应变组成,在第 1~4 级加卸载等级下,页岩蠕变出现衰减及稳定蠕变阶段,直至最后一级应力,页岩发生加速蠕变行为,岩石宏观破坏。

2　试验结果分析

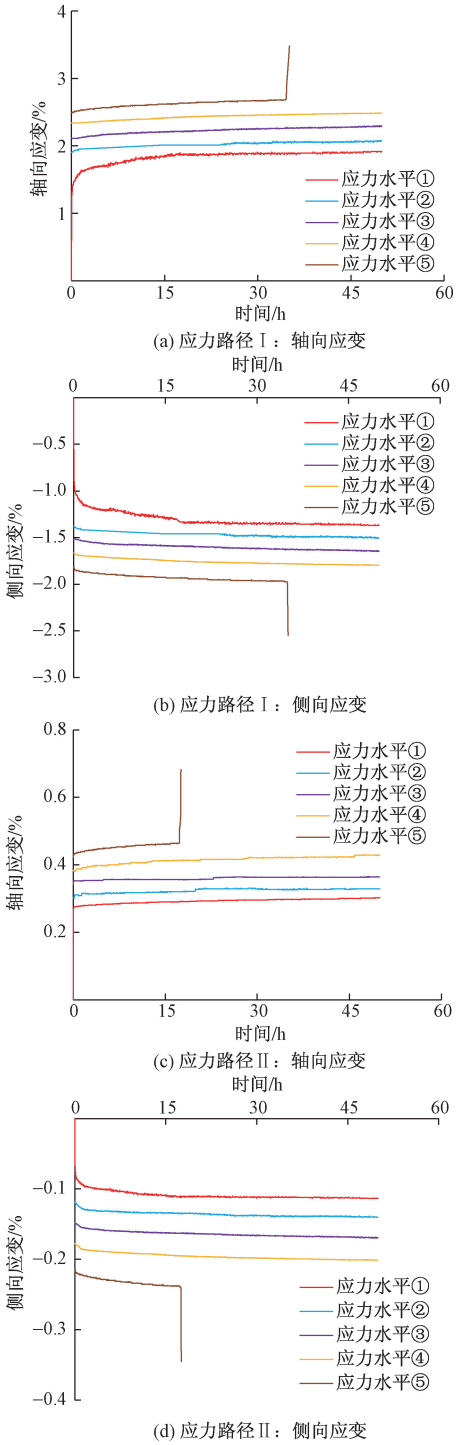
2.1　卸荷蠕变曲线分析

通过 Boltzmann 线性叠加[9-10]处理图 4、图 5 后得到分别卸载蠕变曲线,如图 6 所示。

分析图 6(a)、图 6(b),应力路径Ⅰ下的轴向、侧向应变差异在 1.5 倍以内,每一级轴向应变量值皆大于侧向应变。在应力路径Ⅰ条件下,岩石到达最后一级应力水平前,轴向应变为 2.488×10^{-2},侧向应变为 -1.797×10^{-2},在破坏围压应力下分别增长为 3.481×10^{-2} 和 -2.549×10^{-2},增长部分分别占轴向和侧向总应变的 28.53% 和 29.50%。侧向应变的变化程度大于轴向应变,体现出页岩卸荷蠕变的扩容现象,侧向扩容相较轴向扩容更为明显。

再分析图 6(c)、图 6(d),等比卸荷条件下的轴向和侧向应变量值相差不大,差异在 2 倍以内,每一级轴向应变量值皆大于侧向应变。在应力路径Ⅱ条件下,岩石到达最后一级应力水平前,轴向应变为 0.429×10^{-2},侧向应变为 -0.201×10^{-2}。与应力路径Ⅰ不同之处在于轴向应变发生瞬时卸荷回弹,轴向应变在第 5 级卸载瞬间从 0.458×10^{-2} 变为 0.445×10^{-2},随即累积直至 0.683×10^{-2},侧向应变未见卸荷回弹现象,直接从 -0.201×10^{-2} 变为 -0.345×10^{-2}。最后一级应力水平下,轴向、侧向应变的增长分别占轴向、侧向总应变的 38.31% 和 41.74%,侧向扩容相比轴向扩容更为显著。

综合图 6 分析,两种应力路径下的分别卸载蠕变曲线特征大致相同,均在卸载瞬间产生瞬时轴向和侧向应变,且第 1 级卸载产生的瞬时应变最大。分析两种应力路径下的第 1 级衰减蠕变阶段,应力路径Ⅰ下的衰减蠕变阶段形态总体上相比应力路径Ⅱ更为显著,且历时更长。在第 1 级卸载下,瞬时应变远大于第 2 ~ 5 级,分析其原因可能为:页岩自身发育一定微裂纹,微裂纹在应力场作用下处于较稳定的阶段,当卸去部分荷载后,岩石弹性骨架的弹性变形性质得到发挥,微裂纹瞬间扩展,导致瞬时应变显著增大。



(a) 应力路径Ⅰ:轴向应变

(b) 应力路径Ⅰ:侧向应变

(c) 应力路径Ⅱ:轴向应变

(d) 应力路径Ⅱ:侧向应变

图 6 分别卸荷蠕变曲线

Fig. 6 Unloading creep curves

2.2 瞬时、蠕变应变特征

将两种应力路径下的页岩瞬时、蠕变应变进行统计,如表 2 所列。图 7、图 8 分别为岩石瞬时应变和蠕变应变对比曲线,由图 6 可知在两种应力路径下,第 1 级轴向、侧向瞬时应变远大于第 2 ~ 5 级,为了便于观察第 2 ~ 5 级瞬时应变变化规律,图 7 中省去第 1 级瞬时应变。

表 2 两种应力路径下页岩瞬时、蠕变应变

Table 2 The transient and creep strain of shales under two stress paths

应力路径	轴压/MPa	围压/MPa	偏应力/MPa	瞬时应变/%		蠕变应变/%	
				轴向	侧向	轴向	侧向
路径Ⅰ(恒轴压卸围压)	72.1	20	52.1	1.281	-0.862	0.335	-0.308
		16	56.1	0.156	-0.126	0.086	-0.054
		12	60.1	0.163	-0.152	0.097	-0.072
		8	64.1	0.165	-0.158	0.120	-0.095
		4	68.1	0.173	-0.169	0.906	-0.553
路径Ⅱ(等比卸荷)	72.1	20	52.1	0.292	-0.078	0.010	-0.025
	66.4	16	50.4	0.018	-0.011	0.012	-0.007
	60.7	12	48.7	0.019	-0.021	0.015	-0.009
	55	8	47	0.025	-0.025	0.022	-0.013
	49.3	4	45.3	0.032	-0.033	0.238	-0.123

由表 2 可知,应力路径Ⅰ第 1 级轴向、侧向瞬时应变分别为 1.281×10^{-2} 和 -0.862×10^{-2},再结合图 7(a)中第 2 ~ 5 的应变节点可知,在同一卸载等级下,应力路径Ⅰ下的页岩的轴向瞬时应变量值均大于侧向,轴向瞬时应变的线性增长趋势略小于侧向瞬时应变。应力路径Ⅱ第 1 级轴向、侧向瞬时应变分别为 0.292×10^{-2} 和 -0.078×10^{-2},图 7(b)中第 2 ~ 5 级侧向瞬时应变量值均小于轴向,侧向瞬时应变的线性增长趋势大于轴向瞬时应变。综合图 7 可得,第 2 ~ 5 级轴向、侧向瞬时应变均随卸载等级的增加呈线性增大趋势。

由图 8 可看出,在恒轴压卸围压条件下,轴向、侧向蠕变应变从第 1 ~ 2 级先减小,第 2 ~ 4 级缓慢递增,最后一级急剧增大。而在等比卸荷条件下,第 1 ~ 4 级轴向、侧向蠕变应变缓慢递增,最后一级显著增大。再由图 2 和表 3 可知,应力路径Ⅰ的偏应力递增,应力路径Ⅱ的偏应力递减,故而在两种应力路径下,岩石轴向、侧向蠕变应变从第 1 ~ 2 级的变化规律差异显著。

2.3 蠕变速率

张春阳等[11]针对逐级增量加载蠕变试验提出蠕变速率求取方法,由于本文中卸荷蠕变试验亦是

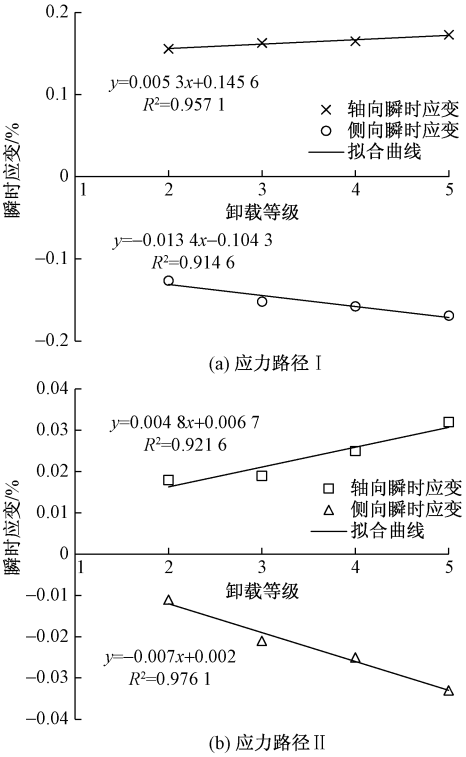


图 7　瞬时应变对比曲线

Fig. 7　Contrastive curves of instantaneous strain

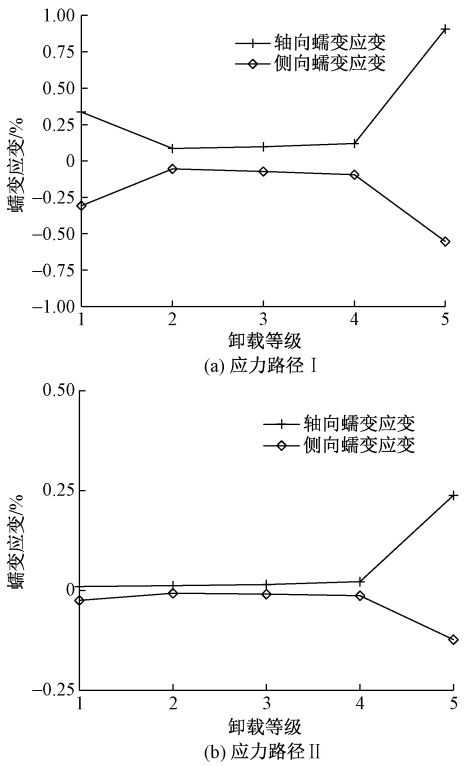


图 8　蠕变应变对比曲线

Fig. 8　Contrastive curves of creep strain

逐级卸载,所以可参考张春阳等[11]提出的求取方法,即

$$\begin{cases}\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2 + \cdots + \Delta\varepsilon_{n-1}\\ \Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1, \Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_3 - \varepsilon_2, \cdots, \Delta\varepsilon_{n-1} = \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}\\ \Delta\varepsilon = (\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \cdots + \varepsilon_n) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_{n-1}) = \varepsilon_n - \varepsilon_1\\ v_i = \Delta\varepsilon/\Delta t_i\end{cases} \tag{1}$$

式(1)中:ε 为蠕变应变;Δt_i为蠕变时间;n 为蠕变试验数据个数;v_i为应变速率。

由于图 5、图 6 中的蠕变曲线簇性态较为相似,第 1 ~4 级加卸载等级未发生加速蠕变,故以最后一级应力水平下的蠕变曲线为研究对象,通过式(1)的方法计算蠕变速率并绘制成图,如图 9 所示,限于篇幅,仅给出应力路径Ⅰ下的第 5 级蠕变速率曲线。

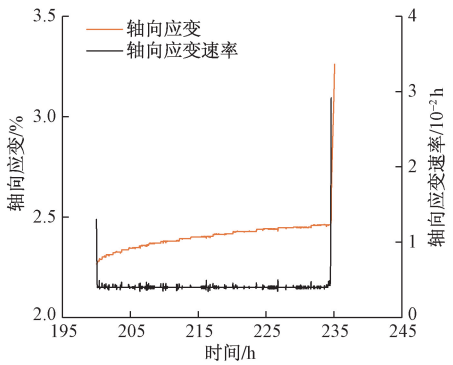


图 9　应力路径Ⅰ:轴向蠕变速率曲线

Fig. 9　Stress path Ⅰ: Axial creep rate curves

由图 9 可看出,应力路径Ⅰ下的最后一级轴向蠕变速率先由某一数值(初始蠕变速率为 1.302 × 10^{-2} h)快速降低,接着在较长时间内保持恒定(稳态蠕变速率为 0.409 × 10^{-2} h),最后急剧升高至一个最大值(极限加速蠕变速率为 2.916 × 10^{-2} h),岩样破裂。为了细致观察页岩加速蠕变阶段及其与稳定蠕变阶段的“过渡区间”[12]的蠕变速率变化规律,选取两种应力路径的轴向、侧向蠕变速率局部节点绘制成图,如图 10 所示。

由图 10 可看出,在岩石加速蠕变阶段及其与稳定蠕变阶段的“过渡区间”,蠕变速率先微降,再保持相对稳定,最后急剧增加。应力路径Ⅰ中,这个过程仅持续 0.71 h,轴向、侧向应变分别达到 0.778 × 10^{-2}和 0.575 × 10^{-2}。而在应力路径Ⅱ中,“过渡区间”和加速蠕变阶段仅持续 5.66 h,轴向、侧向应变分别达到 0.215 × 10^{-2} 和 0.099 × 10^{-2}。这说明岩体开挖卸荷后,当达到破坏应力水平后,

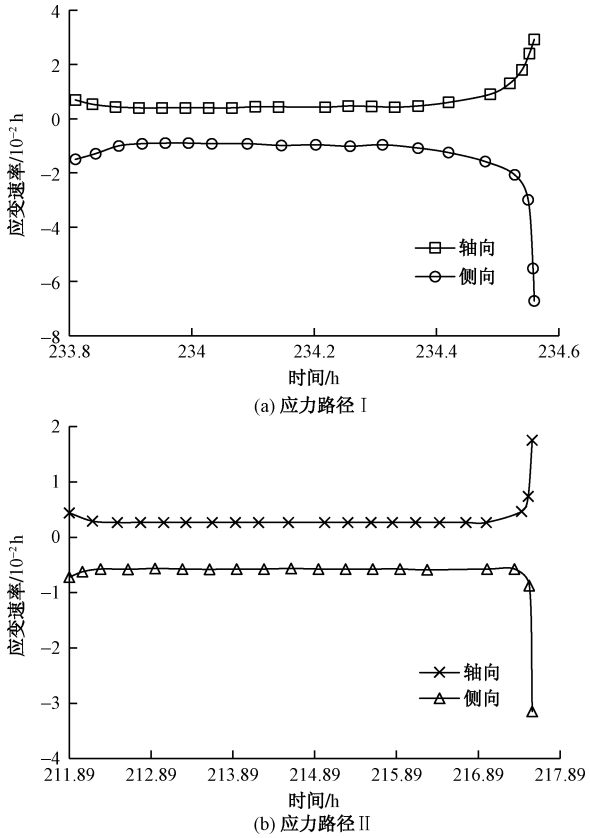


图 10 蠕变速率局部曲线

Fig. 10 Local curves of creep rate

围岩可能发生大变形等不良现象,工程实践中应做好监测工作。

两种应力路径中,侧向蠕变速率都高于轴向,是轴向的 2 ~ 2.5 倍,岩石侧向扩容不可忽视。等比卸荷的蠕变速率及蠕变变形皆不及恒轴压卸围压,且等比卸荷的轴向应变在从第 4 ~ 5 级应力水平下发生回弹,这说明岩石在应力路径Ⅱ(等比卸荷)中发生卸荷蠕变破坏的可预见性较小,围岩监测时应引起重视。

2.4 长期强度

岩石逐级增量加载蠕变研究中,等时应力-应变曲线簇法是一种应用广泛的长期强度求取方法[13-15],由于本文中卸载蠕变试验也是逐级进行应力卸载,且通过 Boltzmann 线性叠加原理进行数据处理,得到了分别卸载蠕变曲线(图 6),所以亦可通过等时应力-应变曲线簇法基于图 6 确定页岩卸载蠕变的长期强度。选取 0 ~ 50 h 共 6 个时间节点,其中 0 h 为时间趋近于 0 的某一节点,以应力路径Ⅰ为例,等时偏应力-应变曲线如图 11 所示。

在图 11 蠕变曲线簇中取拐点,确定应力路径Ⅰ条件下页岩卸载蠕变长期强度为 62.85 MPa。通过同样的方法,确定应力路径Ⅱ中长期强度为 47.69 MPa,相比应力路径Ⅰ低 15.16 MPa,页岩三

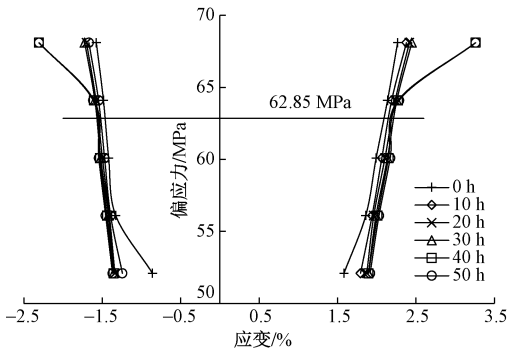


图 11 应力路径Ⅰ:等时偏应力-应变曲线

Fig. 11 Stress path Ⅰ: isochronous deviatoric stress-strain curves

轴压缩强度为 102.94 MPa,长期强度在应力路径Ⅰ和Ⅱ条件下分别折减了 38.95% 和 53.67%,这说明岩石在等比卸荷应力条件下更易屈服破坏。

3 结论

(1)岩石在轴压、围压等比例卸荷及恒轴压卸围压应力条件下,岩石蠕变发展趋势基本一致,岩石屈服破坏前均经历衰减、稳定蠕变阶段,当应力条件达到破坏应力水平时,岩石发生加速蠕变行为。

(2)在两种应力路径下,页岩每一级应力水平的轴向应变量值皆大于侧向应变。在达到最后一级应力水平前,侧向应变的变化程度大于轴向应变,体现出页岩卸荷蠕变的扩容现象,侧向扩容相较轴向扩容更为明显。

(3)两种应力路径中,侧向蠕变速率都高于轴向,是轴向的 2 ~ 2.5 倍。等比卸荷的轴向、侧向蠕变速率和变形量都不及恒轴压卸围压,且等比卸荷的轴向应变在从第 4 ~ 5 级应力水平下发生回弹,这说明岩石在应力路径Ⅱ(等比卸荷)中发生蠕变破坏的可预见性较小,围岩监测时应引起重视。

(4)页岩在恒轴压卸围压和等比卸荷应力路径中,长期强度分别为 62.85 MPa 和 47.69 MPa,岩石在等比卸荷应力条件下更易屈服破坏,工程实践中应考虑长期强度折减问题。

(5)本文研究背景为流变现象显著的深埋矿井巷道围岩,建议施工过程采取必要的支护及监测手段,削弱岩体卸荷引起的时效变形,以维持地下硐室的长期稳定性。

参 考 文 献

[1] 陈 卓, 邓金根, 蔚宝华, 等. 深水低固结软泥岩蠕变特性及其工程应用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 100-105.
Chen Zhuo, Deng Jingen, Wei Baohua, et al. Creep characteristics of low consolidated soft mudstone in deep water and its engineering application[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19): 100-105.

[2] 张强星, 刘建锋, 廖益林, 等. 层状盐穴储库中三种典型岩石蠕变特征[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(28): 297-303.
Zhang Qiangxing, Liu Jianfeng, Liao Yilin, et al. Creep characteristics of three typical rocks in layered salt cavern reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(28): 297-303.

[3] Phillipson S E. Texture, mineralogy, and rock strength in horizontal stress-related coal mine roof falls[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 75(3): 175-184.

[4] 李　畅, 任光明, 孟陆波, 等. 红层砂岩高温后效蠕变试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 71-78.
Li Chang, Ren Guangming, Meng Lubo, et al. Experimental study on high temperature post-effect creep of red sandstone[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 71-78.

[5] 张龙云. 硬脆性岩体卸荷非线性流变模型及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
Zhang Longyun. Nonlinear rheological model of unloading hard brittle rock mass and its engineering application[J]. Jinan: Shandong University, 2016.

[6] 石振明, 张　力. 锦屏绿片岩分级卸荷流变规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 100-106.
Shi Zhengming, Zhang Li. Study on graded unloading rheological law of green rock in Jinping[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 100-106.

[7] 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(S1): 2653-2662.
Huang Xing, Liu Quansheng, Kang Yongshui, et al. Triaxial unloading creep test of sandy mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2653-2662.

[8] 杨　超, 黄　达, 蔡　睿, 等. 张开穿透型单裂隙岩体三轴卸荷蠕变特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 53-62.
Yang Chao, Huang Da, Cai Rui, et al. Test of creep characteristics of triaxial unloading load in open-penetrating single-fracture rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 53-62.

[9] 刘开云, 薛永涛, 周　辉. 基于改进 Bingham 模型的软岩参数非定常三维非线性黏弹塑性蠕变本构研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 249-256.
Liu Kaiyun, Xue Yongtao, Zhou Hui, et al. Non-constant three-dimensional nonlinear viscoelastic creep constitutive study based on modified Bingham model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 249-256.

[10] 赖远超, 李朋伟, 邓　辉, 等. 饱水-失水循环下泥岩的剪切蠕变特性研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 195-201.
Lai Yuanchao, Li Pengwei, Deng Hui, et al. Shear creep characteristics of mudstone under saturated-water loss cycle[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(7): 195-201.

[11] 张春阳, 曹　平, 汪亦显, 等. 自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1587-1595.
Zhang Chunyang, Cao Ping, Wang Yixian, et al. Creep characteristics of deep plagioclase in natural and saturated water[J]. Journal of Central South University(Science and Technology) 2013, 44(4): 1587-1595.

[12] 梁小勇, 薛晓辉, 王虎妹, 等. 岩石时间硬化损伤蠕变特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 509-512.
Liang Xiaoyong, Xue Xiaohui, Wang Humei, et al. Time-hardening damage creep characteristics of rock[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition), 2013, 32(4): 509-512.

[13] 李良权, 徐卫亚, 王　伟, 等. 基于流变试验的向家坝砂岩长期强度评价[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 127-136.
Li Liangquan, Xu Weiya, Wang Wei, et al. Long-term strength evaluation of xiangjiaba sandstone based on rheological test[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 127-136.

[14] 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): 53-58.
Yang Shangyang, Zhang Longyun. Study on unloading rheological characteristics and constitutive model of hard brittle rock[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(10): 53-58.

[15] 张强勇, 杨文东, 陈　芳, 等. 硬脆性岩石的流变长期强度及细观破裂机制分析研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1910-1918.
Zhang Qiangyong, Yang Wendong, Chen Fang, et al. Study on rheological long-term strength and meso-fracture mechanism of hard brittle rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1910-1918.