

# 基于围压增量的损伤砂岩三轴蠕变试验

刘圣<sup>1</sup>,李树清<sup>2,3</sup>,袁越<sup>2,3</sup>

(1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为研究岩石峰后轴向与径向蠕变特性,采用MTS815岩石力学试验系统,进行了三轴压缩下红砂岩峰后蠕变试验,获取了不同性态的峰后轴向与径向蠕变曲线,探讨了岩石峰后轴向与径向蠕变特征,研究了损伤程度、围压增量对峰后轴向与径向蠕变特性的影响规律.试验结果表明:岩石峰后轴向与径向蠕变曲线主要由等速蠕变阶段和加速蠕变阶段组成,峰后径向蠕变特征相比轴向蠕变特征更显著;轴向和径向蠕变量与损伤程度呈正相关,径向蠕变相比轴向蠕变对损伤程度的敏感性更高,损伤程度的变化对径向蠕变的影响程度更强;施加围压增量,轴向与径向蠕变速率大大降低,蠕变失稳时间延长;围压增量对径向蠕变的影响明显强于轴向蠕变,工程实践中应重点控制围岩的径向变形.

**关键词:**岩石力学;峰后蠕变;损伤程度;围压增量;试验研究

中图分类号:TU452

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)03-0047-07

## Experimental study on triaxial creep of damaged sandstone based on confining pressure increment

Liu Sheng<sup>1</sup>, Li Shuqing<sup>2,3</sup>, Yuan Yue<sup>2,3</sup>

1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the axial and radial creep characteristics of rock post-peak, creep test of red sandstone post-peak under uniaxial compression was carried out to obtain the axial and radial creep curves of different states of rock post-peak, the axial and radial creep features of rock post-peak were discussed, by using MTS815 rock mechanics test system, the influence regular pattern of the damage degree was researched, and confining pressure increment on the axial and radial creep characteristics of rock post-peak were discussed. The experimental results show that the axial and radial creep curves of rock post-peak are mainly formed by the constant creep stage and the accelerated creep stage, the radial creep has a more obvious characteristic than the axial creep feature. The amount of the axial and radial strain is positively correlated with the damage degree, and the radial creep is more sensitive to the damage degree than axial creep. With Exerting the confining pressure increment, the axial and radial creep rate is greatly reduced and the creep instability time is prolonged. The effect of confining pressure increment on radial creep is stronger than that of axial creep, and the radial deformation of surrounding rock should be focused on controlling in engineering practice.

**Keywords:** rock mechanics; post - peak creep; damage degree; confining pressure increment; experimental research

收稿日期:2017-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374104;51434006);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2058);湖南省教育厅一般科研资助项目(15C0551)

通信作者:李树清(1970-),男,湖南湘阴人,博士,教授,主要从事矿井瓦斯抽采与巷道围岩控制研究.E-mail:lsq-hnust@163.com

蠕变作为重要的岩石流变力学特性之一,与工程岩体的稳定性密切相关.在深部高地应力作用下,巷道围岩的流变既有完整围岩的流变,也有破裂围岩的流变,由此造成了深部围岩的长期持续性变形,加大了深部巷道围岩稳定性控制的难度<sup>[1-4]</sup>.鉴于此,研究岩石峰后蠕变特性,对正确认识破裂围岩蠕变的时效性特征,采取更有效的支护维护措施具有重要的实际意义.

开展岩石峰后蠕变试验是了解破裂围岩蠕变特性的有效途径<sup>[5]</sup>.很多学者对完整岩石蠕变特性开展了大量的研究<sup>[6-13]</sup>,但关于峰后蠕变特性研究很少,尤其是岩石峰后轴向蠕变与径向蠕变的差异研究上鲜见于文.李亚丽<sup>[14]</sup>进行了分级加载下粉砂质泥岩的三轴压缩蠕变试验,指出各级应力下岩石的横向蠕变效应相比轴向蠕变更显著;徐慧宁等<sup>[15]</sup>开展了粉砂质泥岩不同围压下的三轴压缩蠕变试验,以轴向应变和横向应变蠕变曲线分析了黏土岩类软岩的力学特性;杜超等<sup>[16]</sup>通过盐岩蠕变特性试验,发现围压越大对稳定蠕变速率的影响越小;Z. T. Bleniawski<sup>[17]</sup>认为破裂岩石蠕变破坏的时间随围压按指数规律增加,在大于一定值时,破裂岩石能保持长期稳定.刘传孝等<sup>[18]</sup>对深井泥岩采用分级加/卸载方式进行峰前峰后单轴短时蠕变试验,表明峰后横向蠕变特性明显强于轴向蠕变特性;牛双建等<sup>[19]</sup>深入探究了破裂岩样的单轴蠕变特性,结果显示各级应力水平下的蠕变量随应力的增大而增大;江玉生<sup>[20]</sup>在峰后蠕变试验的基础上,认为峰后流变是一个变形过程,与时间及周围环境(如支护状态、约束应力、外部扰动等)紧密相关.为了更深入地了解岩石峰后轴向与径向蠕变特性,本文采用 MTS815 岩石力学试验系统,进行红砂岩峰后蠕变试验研究,分析峰后轴向与径向蠕变的一般规律,讨论不同损伤程度、围压增量对岩石峰后轴向与径向蠕变特性的影响机理,为岩石峰后流变力学特性研究提供一定的参考作用.

## 1 试验概述

### 1.1 试验岩样与设备

试验取样为红砂岩,呈褐红色,质地均匀,无层理、裂隙.根据岩石力学试验标准,经过钻取、切割以及打磨后,制备成高度和直径为 100 mm×50 mm 圆柱体状试样.试验采用 MTS815 多功能电液伺服岩石力学实验系统(图 1),该试验机具备轴压、围压、孔隙水压和温度 4 套独立的闭环伺服控制功能,能进行单轴压缩、三轴围压、渗透压、孔隙压等试验,轴向载荷最大可达 4 600 kN,围压最大可达 140 MPa.试验全程由程序控制,自动完成数据的采集,具有试验精度高、处理数据方便等优点,可以满足试验的需要.试验后岩样破裂形态如图 2 所示.



图 1 MTS815 电液伺服试验系统

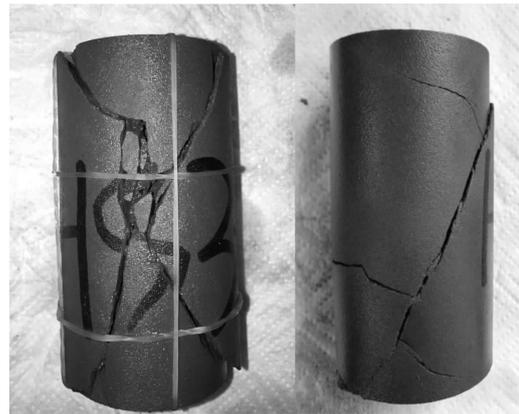


图 2 岩样的破裂形态

### 1.2 试验方法

首先根据常规三轴压缩试验,对岩样施加轴压进入峰后阶段,加载路径为预加载→位移加载→固定变形→增加围压→蠕变,加载路径如图 3 所示.

在预加载阶段,轴压与围压等时施加,施加一定的轴向预应力,增加围压至预设值.在位移加载阶段,采用位移加载控制模式,以恒定应变速率施加轴向位移至峰后预设值(如峰值强度的 85%),如图中加载路径 OAB 段.在固定变形阶段,恒定轴向位移直至荷载基本稳

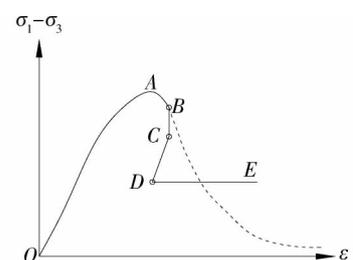


图 3 峰后蠕变试验加载路径示意图

定,如图 BC 段.在增加围压阶段,逐渐提高围压到某一目标值(围压增量),如图 CD 段.在蠕变阶段,然后将伺服机切换为载荷控制方式,进行蠕变,如图 DE 段.试验采用单体分级加载的方式,全程计算机自动采集数据,采集方式分为时间采集和位移采集,峰前至峰后松弛阶段采用时间采集,峰后蠕变阶段采用位移采集.峰前阶段位移变化量大,峰后松弛阶段位移量不变,采用时间间隔的方式采集更加合理;峰后蠕变阶段位移变化量较小,特别是加速蠕变阶段,试件往往在很短的时间内失稳,采用位移变化量的方式可以采集到加速蠕变阶段的数据,相比全程通过时间间隔的方式采集,取得了良好的效果.

## 2 试验结果分析

### 2.1 峰后轴向与径向蠕变特征

对岩样 HS5-1 进行了峰后蠕变试验,绘制了 HS5-1 峰后轴向与径向蠕变曲线和经 Boltzmann 叠加原理处理后的分别加载蠕变曲线如图 4,整理试验结果在表 1 中,每级轴压增量为 1 MPa.

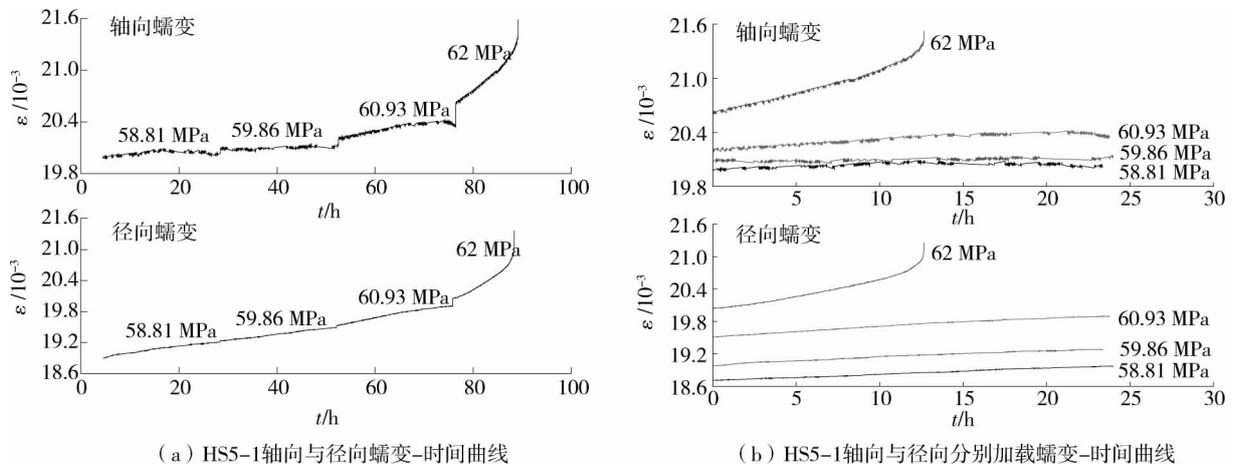


图 4 HS5-1 峰后蠕变曲线(荷载比为 75%)

表 1 HS5-1 峰后蠕变试验参数(荷载比为 75%)

蠕变级数	轴向蠕变			径向蠕变		
	蠕变量/ $10^{-3}$	总蠕变量/ $10^{-3}$	各级蠕变量与总蠕变量比值/%	蠕变量/ $10^{-3}$	总蠕变量/ $10^{-3}$	各级蠕变量与总蠕变量比值/%
第一级	0.017	1.109	1.55	0.261	2.172	12.02
第二级	0.038		3.46	0.310		14.27
第三级	0.166		15.00	0.382		17.59
第四级	0.888		79.99	1.219		56.12

由图 4 知,轴向和径向蠕变曲线主要由等速蠕变阶段和加速蠕变阶段组成.随着应力水平的增大,各级轴向和径向蠕变量随之增大,最后一级应力水平下蠕变量明显变大.比较轴向和径向蠕变试验结果,径向总蠕变量近似于轴向总蠕变量的 2 倍.在各级应力水平下,径向蠕变速率均大于轴向蠕变速率,径向蠕变量明显大于轴向蠕变量.在蠕变前两级,各级径向蠕变量百分比远远大于轴向蠕变量百分比.在蠕变第三、四级,各级径向蠕变量与轴向蠕变量百分比接近,第四级应力水平下径向蠕变量百分比小于轴向蠕变量百分比.为了更直观显示数据特点,比较相同应力水平下轴向蠕变与径向蠕变的差异,根据

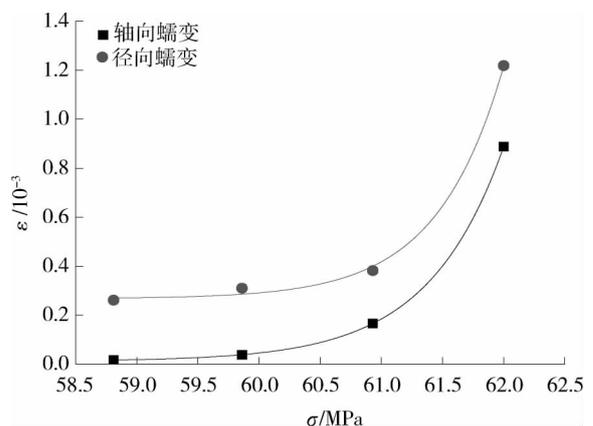


图 5 轴向与径向应力水平-蠕变量关系曲线

试验数据拟合了轴向与径向的应力水平-蠕变量关系曲线,如图5所示.

对于轴向蠕变,相同应力水平下的轴向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.011\ 55 + 1.676\ 66E-44 \exp(1.623\ 63\sigma), \quad R^2 = 0.999\ 59.$$

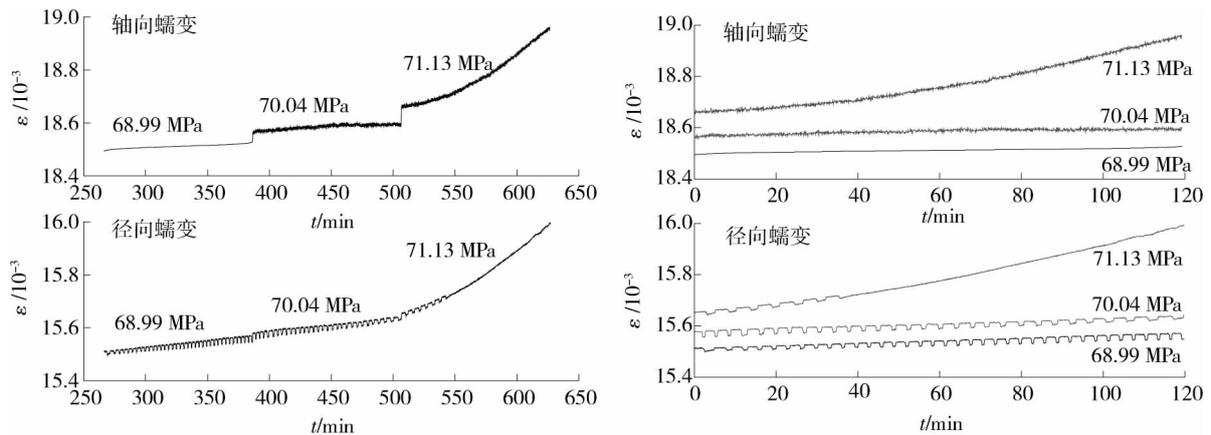
对于径向蠕变,相同应力水平下的径向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.267\ 05 + 2.722\ 36E-50 \exp(1.839\ 94\sigma), \quad R^2 = 0.995\ 18.$$

从图5可知,径向应力水平-蠕变量关系曲线始终在轴向应力水平-蠕变量关系曲线上方,随着应力水平的逐渐加大,曲线之间的间距逐渐缩短,曲线中前三级应力水平对应于等速蠕变阶段,最后一级应力水平对应于加速蠕变阶段.这说明,径向蠕变特征相比轴向蠕变特征更显著,径向蠕变速率高于轴向蠕变速率,径向总蠕变量大于轴向总蠕变量,径向蠕变效应更强.在等速蠕变阶段,径向蠕变量占总蠕变量的比值相比轴向蠕变量更大,蠕变程度更大;在加速蠕变阶段,轴向蠕变量占总蠕变量的比值相比径向蠕变量更大,蠕变程度更高.因此,对于破裂围岩的支护加固,总体上径向形变量大,要加强岩石径向变形的控制工作.从形变程度上看,根据不同的蠕变阶段特性采取针对性措施,等速蠕变阶段径向蠕变程度更高,要加强控制岩石径向变形,加速蠕变阶段轴向蠕变程度更剧烈,较易失稳破坏,要加强控制岩石轴向变形.

### 2.2 损伤程度对峰后蠕变的影响

深部巷道的开挖造成了巷道周围岩的破损程度不一,不同损伤程度的围岩轴向与径向蠕变特性也存在较大差异.为此,进行了不同损伤程度岩样的峰后蠕变试验,峰后蠕变试验曲线如图6.本次试验由于对岩样施加轴压至峰后预设值(如峰值强度的75%)进行蠕变,则峰后恒载时岩样的承载能力可以间接地反映其损伤程度.峰后蠕变荷载占峰值荷载的百分比越大即越接近峰值,损伤程度越小;百分比越小即越远离峰值,损伤程度越大,取该百分比为荷载比.



(a) HS3-2轴向与径向蠕变-时间曲线 (b) HS3-2轴向与径向分别加载蠕变-时间曲线

图6 荷载比85%时HS3-2峰后蠕变曲线

试验结果如表2.图6b中,径向蠕变曲线等速蠕变阶段呈现周期性上下波动的上升趋势,而不是一条平滑的曲线,这是由于伺服加载装置中加压油缸油压的波动.由图6可知,轴向和径向峰后蠕变曲线依然没有出现衰减蠕变阶段,各级径向蠕变速率仍然大于轴向蠕变速率,径向总蠕变量大于轴向总蠕变量,轴向与径向蠕变规律与上节所述规律相符.对比不同荷载比下试验结果,荷载比85%时,轴向总蠕变为 $0.376 \times 10^{-3}$ ,径向总蠕变为 $0.44 \times 10^{-3}$ ,轴向总蠕变与径向总蠕变之间比值接近于1;荷载比为75%时,轴向总蠕变为 $1.109 \times 10^{-3}$ ,径向总蠕变为 $2.172 \times 10^{-3}$ ,轴向总蠕变与径向总蠕变之间比值接近于1/2.前后轴向总蠕变之比约为1/3,前后径向总蠕变之比约为1/5.减小损伤程度,轴向和径向总蠕变都变小,但径向应蠕减小程度更大,减少量更大;加大损伤程度,轴向总蠕变和径向总蠕变都增大,且径向总蠕变增大幅度更大,增加量更多.在各级蠕变量上,减小损伤程度后,对于轴向蠕变,前两级轴向蠕变量变大,蠕变量百分占比更加均衡.对于径向蠕变,第一级应力水平下蠕变量减小.这说明,减小损伤程度,轴向总蠕变量减小,等速蠕变阶段轴向蠕变量差值减小,蠕变量较平均,轴向蠕变特性较径向蠕变更加稳定.由上述可知,损伤程度对峰后蠕变特性有重要影响,随着损伤程度的加大,轴向和径向总蠕变量都增大,反之减小.径向蠕变相

比轴向蠕变对损伤程度的敏感性更高,损伤程度的变化对径向蠕变的影响程度更强.就稳定性而言,减小损伤程度,不同应力水平下轴向蠕变量更接近,轴向蠕变更稳定;加大损伤程度,不同应力水平下轴向蠕变量差值加大,轴向蠕变稳定性变差,岩样容易失稳破坏,但对径向蠕变稳定性影响相对较小.

表2 荷载比85%时HS3-2蠕变试验参数

蠕变级数	轴向蠕变			径向蠕变		
	蠕变量/ $10^{-3}$	总蠕变量/ $10^{-3}$	各级蠕变量与总蠕变量比值/%	蠕变量/ $10^{-3}$	总蠕变量/ $10^{-3}$	各级蠕变量与总蠕变量比值/%
第一级	0.034		9.04	0.035		7.95
第二级	0.039	0.376	10.37	0.064	0.44	14.55
第三级	0.303		80.59	0.341		77.50

### 2.3 围压增量对峰后蠕变的影响

在巷道开挖过程中,岩石进入破裂状态,对破裂围岩的支护加固相当于增加了围压.在上述试验基础上,进行了施加围压增量下的峰后蠕变试验,峰后蠕变曲线如图7和图8,汇总试验结果如表3.

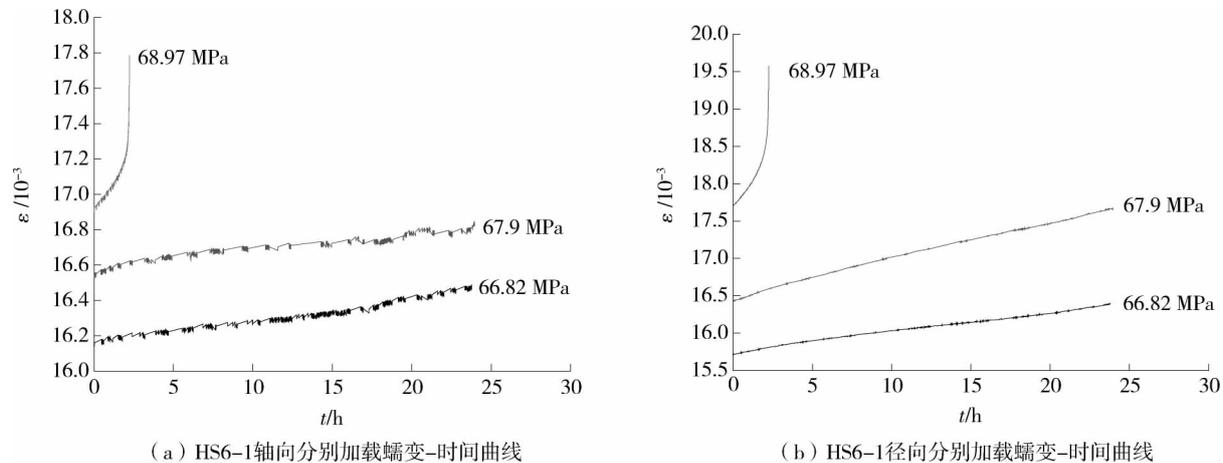


图7 HS6-1 分别加载峰后蠕变曲线( $\Delta\sigma_3 = 0$  MPa)

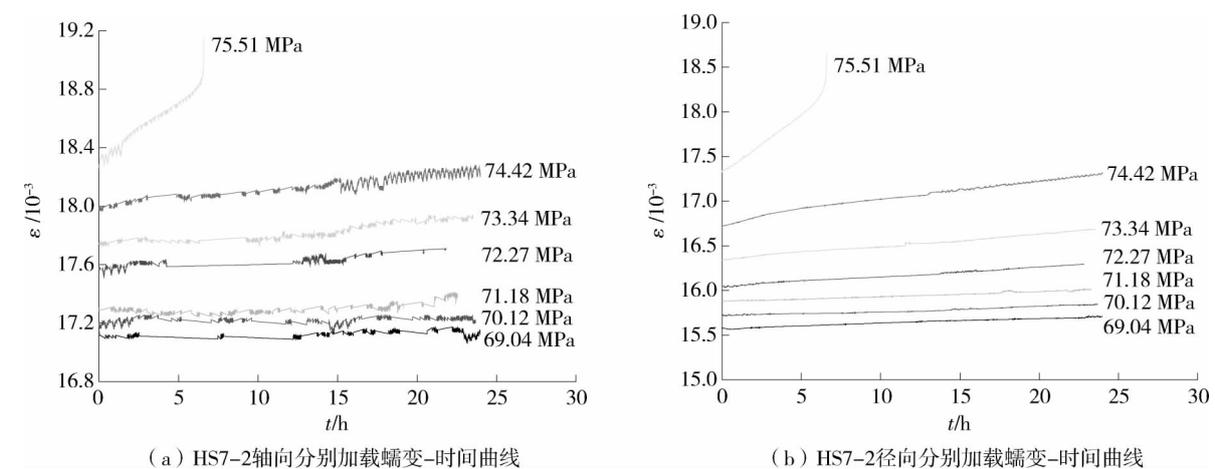


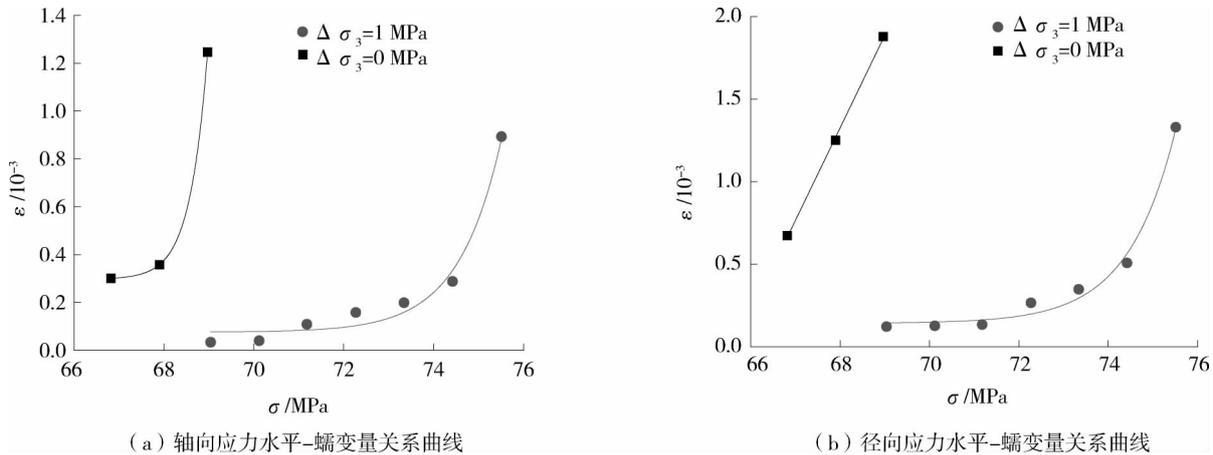
图8 HS7-2 分别加载峰后蠕变曲线( $\Delta\sigma_3 = 1$  MPa)

根据表3的试验结果,施加围压增量后,对于轴向蠕变,总蠕变量减小 $0.184 \times 10^{-3}$ ,前五级应力水平下,各级蠕变量百分占比均小于施加围压增量前的第一级应力水平下蠕变量百分占比,最后一级应力水平下蠕变百分占比减小13.52%;对于径向蠕变,总蠕变量减小 $0.967 \times 10^{-3}$ ,相当于轴向总蠕变量减少量的5倍多.前五级应力水平下规律与轴向蠕变类似,但前三级应力水平下蠕变量百分占比之间差值较小,径向

蠕变量增长较平均.最后一级应力水平下蠕变量百分占比减小 2.49%,约为轴向蠕变的 1/6.基于以上分析,分别拟合了施加围压增量前后轴向与径向应力水平-蠕变量关系曲线,如图 9 所示.

表 3 施加围压增量前后蠕变试验参数

试样编号	应力水平 /MPa	轴向蠕变			径向蠕变		
		蠕变量 /10 <sup>-3</sup>	总蠕变量 /10 <sup>-3</sup>	各级蠕变量与总蠕变量比值/%	蠕变量 /10 <sup>-3</sup>	总蠕变量 /10 <sup>-3</sup>	各级蠕变量与总蠕变量比值/%
HS6-1	66.82	0.301		15.80	0.673		17.70
	67.9	0.358	1.905	18.79	1.251	3.802	32.90
	68.97	1.246		65.41	1.878		49.40
HS7-2	69.04	0.034		1.99	0.122		4.30
	70.12	0.040		2.32	0.127		4.48
	71.18	0.109		6.33	0.134		4.73
	72.27	0.158	1.721	9.18	0.266	2.835	9.38
	73.34	0.199		11.56	0.348		12.28
	74.42	0.288		16.73	0.508		17.92
	75.51	0.893		51.89	1.330		46.91



(a) 轴向应力水平-蠕变量关系曲线

(b) 径向应力水平-蠕变量关系曲线

图 9 施加围压增量前后应力水平-蠕变量拟合曲线

对于轴向蠕变,当  $\Delta\sigma_3 = 0$  MPa 轴向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.29716 + 1.61053E-77 \exp(2.563\sigma), \quad R^2 = 0.99856.$$

当  $\Delta\sigma_3 = 1$  MPa 轴向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.07609 + 3.23886E-35 \exp(1.0489\sigma), \quad R^2 = 0.97001.$$

对于径向蠕变,当  $\Delta\sigma_3 = 0$  MPa 径向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.56043\sigma - 36.78371, \quad R^2 = 0.99863.$$

当  $\Delta\sigma_3 = 1$  MPa 径向应力水平-蠕变量函数关系式为

$$\varepsilon = 0.14263 + 1.59385E-31 \exp(0.94129 * \sigma), \quad R^2 = 0.9832.$$

由图 9 可知,施加围压增量前,径向应力水平-蠕变量曲线呈线性关系,施加围压增量后,关系曲线由线性向曲线关系转化,不仅蠕变级数增多,蠕变失稳时间延长,在应力水平增大的情况下,前六级应力水平下径向蠕变速率明显小于施加围压增量前的径向蠕变速率,这说明,施加围压增量,大大减小了蠕变速率,轴向与径向蠕变量都减小,且围压增量对径向蠕变的影响程度相比轴向蠕变更大,明显改善了岩样的蠕变特性.由此可知,施加围压增量,有效地控制了围岩的蠕变变形.

### 3 结论

1) 等速蠕变阶段和加速蠕变阶段是岩石峰后轴向与径向蠕变曲线的主要组成部分.总体上,峰后径向

蠕变特征相比轴向蠕变特征更显著.在蠕变量百分占比上,等速蠕变阶段径向蠕变量百分占比较大,蠕变程度更高,要加强岩石的径向变形控制工作;加速蠕变阶段轴向蠕变量百分占比较大,蠕变程度更大,较易失稳破坏,要着重控制岩石的轴向变形.

2) 损伤程度对峰后蠕变特性有重要影响.随着损伤程度的加大,轴向和径向总蠕变量都增大,反之减小.径向蠕变相比轴向蠕变对损伤程度的敏感性更高,损伤程度的变化对径向蠕变的影响程度更强.

3) 施加围压增量,轴向与径向蠕变速率大大降低,总蠕变量减小,蠕变失稳时间延长,峰后蠕变特性得到了明显的改善,围压增量对径向蠕变的影响显著强于轴向蠕变.

#### 参考文献:

- [1] 谢和平,陈忠辉.岩石力学[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 胡波,王宗林,梁冰,等.岩石蠕变特性试验研究[J].实验力学,2015,30(4):438-446.
- [3] Zhang Y, Xu W Y, Gu J J, et al. Triaxial creep tests of weak sandstone from the deflection zone of high dam foundation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 20(9): 2528-2536.
- [4] Gudmundsson A, Simmenes T H, Larsen B, et al. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(11): 1643-1655.
- [5] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6): 1081-1106.
- [6] Li Y S, Xia C C. Time - dependent tests on intact rocks in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(3): 467-475.
- [7] 王如宾,徐卫亚,王伟,等.坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律[[J].岩石力学与工程学报,2010, 29(5): 960-969.
- [8] Meng Z P, Pan J N. Correlation between petrographic characteristics and failure duration in elastic rocks [J]. Engineering Geology, 2007, 89(3/4): 258-265.
- [9] 李树清.深部煤巷围岩控制内-外承载结构耦合稳定原理的研究[D].长沙:中南大学,2008:18-30.
- [10] 宗义江.深部破裂围岩蠕变力学特性与本构模型研究[D].北京:中国矿业大学,2013:2-10.
- [11] 梁卫国,徐素国,赵阳升,等.盐岩蠕变特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006, 25(7): 1386-1390.
- [12] 熊诗湖,周火明,钟作武,等.岩体载荷蠕变试验方法研究[J].岩石力学与工程学报,2009, 28(10): 2121-2127.
- [13] 韩庚友,王思敬,张晓平,等.分级加载下薄层状岩石蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010, 29(11): 2239-2247.
- [14] 李亚丽.三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变力学特性试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(s1): 14-19.
- [15] 徐慧宁,庞希斌,徐进,等.粉砂质泥岩的三轴蠕变试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(1): 69-74.
- [16] 杜超,杨春和,马洪岭,等.深部岩盐蠕变特性研究[J].岩土力学,2012,33(8): 2451-2456.
- [17] Bleniewski Z T. Time-dependent behavior of fractured rock[J]. Rock Mechanics, 1970, 2(3): 123-137.
- [18] 刘传孝,黄东辰,张秀丽,等.深井泥岩峰前/峰后单轴蠕变特性实验研究[J].实验力学,2011,26(3): 267-273.
- [19] 牛双建,党元恒,冯文林,等.损伤破裂砂岩单轴蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2016,37(5): 1249-1258.
- [20] Jiang Y S. Post-Failure Rheological Properties of Rockmass--An important object of study for engineering rockmass mechanics [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 10(2): 143-146.