

分级加载下深部粉砂岩单轴压缩蠕变试验研究*

马芹永, 郁培阳, 袁璞

(安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为研究深部硬岩的蠕变特性, 采用分级加载方式对深部粉砂岩进行了单轴压缩蠕变试验。试验结果表明, 分级加载作用下深部粉砂岩产生瞬时的轴向应变和侧向应变后随即进入蠕变阶段, 深部粉砂岩的侧向蠕变发展较轴向蠕变快; 在蠕变过程中存在一个应力阈值, 其中轴向蠕变的应力阈值比侧向蠕变的大。随轴向分级荷载的提高, 岩石的瞬时弹性模量呈先增加后减小的变化趋势, 瞬时泊松比呈上凹型增长, 轴向蠕变应变先减小后增大, 侧向蠕变应变呈前期增长平缓的上凹型增长; 根据试验过程中的等时应力-应变曲线的变化趋势, 可以看出深部粉砂岩蠕变过程具有非线性特征, 且侧向蠕变较轴向蠕变更明显。

关键词: 深部粉砂岩; 单轴压缩蠕变; 分级加载; 轴向蠕变; 侧向蠕变

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0339-06

Experimental Study on Uniaxial Compressive Creep of Deep Siltstone under Step Loading

Ma Qinyong, Yu Peiyang, Yuan Pu

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China)

Abstract: To investigate the creep characteristic of deep hard rock, the uniaxial compressive creep tests of deep siltstone were carried out under step loading condition. The test results show that creep stage is occurred after instantaneous axial strain and lateral strain caused by step loading, and the deformation rate of lateral creep is faster than that of axial creep under step loading condition. There is a stress threshold for deep siltstone during the process of creep test, and the stress threshold of axial creep is higher than that of lateral creep. With the increase of axial loading pressure, the instantaneous elastic modulus firstly increases and then decreases, and the instantaneous Poisson's ratio increases in the shape of concave. The axial creep strain firstly decreases and then increases, and the lateral creep strain increases in the shape of concave with a slow growth at the early stage. Nonlinear characteristics of deep siltstone are also observed by analyzing the isochronous stress-strain curve, and the nonlinear characteristic of lateral creep is more obvious than that of axial creep.

Keywords: deep siltstone; uniaxial compressive creep; step loading; axial creep; lateral creep

0 引言

岩石蠕变与岩石工程的长期稳定性和安全性

紧密相关^[1]。随着地下工程向深部发展, 大型地下硐室、巷道围岩的变形、失稳以及破坏并不是立即发生的, 而是随着时间的推移逐渐出现的。例如

* 收稿日期: 2018-10-26(修改稿)

作者简介: 马芹永(1964-), 男, 安徽宿州人, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事深部岩石力学特性及岩石爆破机理与控制研究工作。E-mail: qymaah@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51774011); 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放课题基金(MDPC201603)

巷道由于围岩随时间变形可能引起支护破坏甚至可能导致巷道丧失使用,对于这种现象需要研究深部岩石的蠕变特性。

国内外学者对岩石蠕变特性开展的研究工作主要集中在对软弱岩石如煤岩、盐岩等蠕变特性进行试验研究。Mishra 等^[2]对煤系页岩进行单轴和三轴蠕变试验,探究了煤系页岩蠕变破坏机制;付志亮等^[3]采用分级加载方式对含油泥岩进行三轴蠕变试验,发现其侧向蠕变具有明显的各向异性,瞬时泊松比变化明显,瞬时泊松比的最大值为常规试验泊松比的 2.5 倍;杜超等^[4]对湖北云应盐岩和江苏金坛盐岩进行单轴和三轴试验,指出盐岩的蠕变变形是应变硬化和回复效率等共同作用的结果;王军保等^[5]对灰质泥岩开展三轴蠕变试验,得出偏应力与稳态蠕变率的关系符合幂函数变化;宋勇军等^[6]对干燥和饱水状态下的炭质板岩开展蠕变试验,发现瞬时弹性变形受水的影响较小,而粘弹性变形受水影响变化显著;左清军等^[7]对泥质板岩进行三轴压缩蠕变试验,得出应力状态和吸水率对泥质板岩蠕变特性的影响规律,并引入水劣化因子,建立了考虑吸水率的泥质板岩粘弹塑性蠕变本构模型;王树英等^[8]对出现流变大变形的粘土岩隧道提出优化支护结构方案,为粘土岩层隧道施工和设计提供借鉴。相比于软弱岩石而言,坚硬岩石(如砂岩、花岗岩等)蠕变特性研究成果相对较少。石振明等^[9]对锦屏绿片岩开展三轴蠕变试验,发现岩石在平行和垂直片理两个方向上的蠕变差异较大;赵宝云等^[10]对红砂岩进行单轴压缩蠕变试验,建立了非线性粘弹塑性蠕变模型;周先奇等^[11]对砂岩开展不同围压下的流变试验,利用改进的粒子群优化算法得出不同围压下砂岩整体流变参数;蒋昱州等^[12]对三峡库区典型砂岩开展分级加、卸荷的蠕变试验和弹性后效试验,发现岩样的时效变形特征明显,并给出三维状态下的 Burgers 模型的蠕变方程及弹性后效本构方程;杨红伟等^[13]开展三轴压缩条件下细粒砂岩的渗流水压分级加载蠕变试验,发现分级加载渗流水压力作用下细粒砂岩的蠕变曲线特征与蠕变演化三阶段的特征相符;张素敏等^[14]对全风化花岗岩进行流变试验,得出流变参数的差异受加载方法与应力水平的影响。随着对深部资源的开发,岩石工程的结构形式趋于多样化,其所面临的时效作用问题也越来越复杂,因

此从安全角度考虑,迫切需要对深部岩石蠕变特性进行研究。

开展岩石室内蠕变试验是目前研究岩石蠕变特性的主要途径。为此,借助本单位的蠕变仪设备,采用分级加载方式对朱集东煤矿深部粉砂岩开展单轴压缩蠕变试验,分析不同应力水平对煤矿深部粉砂岩的蠕变特性的影响。

1 深部粉砂岩单轴压缩蠕变试验方案

1.1 深部硬岩特性

试验岩样取自淮南矿业集团朱集东煤矿西-13-1 煤底板轨道大巷(南),岩性为粉砂岩,岩石埋深为-906.0 m,岩样呈浅灰色,密度为 2.61 g/cm^3 ,测得其单轴抗压强度为 115.88 MPa。

1.2 蠕变试验设备

深部粉砂岩单轴压缩蠕变试验在长春机械研究院研制 ZYSS2000 型岩石高温高压蠕变仪上进行。该设备主要由轴向加载系统、围压加载系统、孔隙水压系统、加温系统、数据采集系统组成,可进行岩石单轴压缩蠕变试验、三轴压缩蠕变试验、高温高压环境下轴向压缩蠕变试验^[15-16]。控制系统采用德国 DOLI 公司研制的 EDC 数字控制系统。内置轴向引伸计和链式环向引伸计对蠕变过程中岩石的轴向和侧向变形进行测量,变形测量精度在 $\pm 1\%$ 以内,试验时,轴向引伸计安装于岩样侧面,链式环向引伸计安装于岩样中部。图 1 为变形测试系统。



图 1 变形测试系统

Fig. 1 Deformation measurement system

1.3 深部粉砂岩单轴压缩蠕变试验分级加载方案

为避免外界环境的影响,试验在恒温恒湿的蠕变实验室内进行。室内温度控制在 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。采用分级加载的方式,第一级荷载为 45.46 MPa,分

级加载的荷载增量为 10.10 MPa,加载速率为 0.2 MPa/s。试验过程中自动采集数据,加载期间采样间隔为 0.1 s,稳压期间采样间隔为 30 min。每级荷载稳压时间为 24 h,最后一级荷载持续时间由深部砂岩试件的具体破坏情况决定。试验加载过程如图 2 所示。

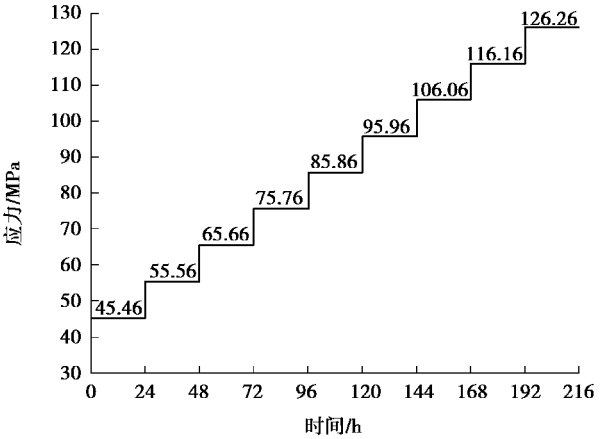


图 2 分级加载方案

Fig. 2 Step loading program

2 单轴压缩蠕变试验结果

深部粉砂岩单轴压缩蠕变试验曲线如图 3 所示,试件在各级荷载作用下的应变见表 1,最后一级荷载加载完成,试件经历了 1 min 后发生破坏。

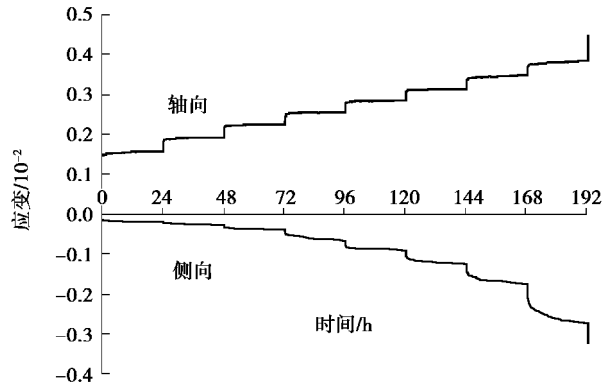


图 3 深部粉砂岩单轴压缩蠕变应变-时间曲线

Fig. 3 Creep strain-time curves of uniaxial compression for deep siltstone

在单轴压缩蠕变试验过程中,深部粉砂岩试件的轴向和侧向变形具有如下特点:

(1)在分级加载作用下,瞬时施加分级荷载后,试件产生瞬时的轴向应变和侧向应变,且瞬时应变较大;随后进入蠕变阶段,蠕变应变增长缓慢,

相对于瞬时应变要小的多。

表 1 分级加载作用下深部粉砂岩应变

Table 1 Strain of deep siltstone under step loading

应力/MPa	瞬时轴向应变 $\times 10^{-2}$	轴向蠕变应变 $\times 10^{-2}$	瞬时侧向应变 $\times 10^{-2}$	侧向蠕变应变 $\times 10^{-2}$
45.46	0.146	0.012	0.014	0.005
55.56	0.184	0.009	0.021	0.005
65.66	0.219	0.007	0.033	0.005
75.76	0.252	0.004	0.052	0.015
85.86	0.279	0.008	0.077	0.015
95.96	0.308	0.007	0.105	0.020
106.06	0.337	0.012	0.143	0.033
116.16	0.37	0.016	0.207	0.067
126.26	0.45	—	0.324	—

(2)随轴向分级荷载的提高,侧向不仅出现较大的瞬时应变,而且伴有较大的蠕变应变。在荷载稳定时,侧向蠕变较轴向蠕变增长较大,表明侧向蠕变发展比轴向蠕变快。如试件在荷载 65.66 MPa 时,轴向和侧向蠕变应变分别占各自总应变的 3.1%和 12.72%;而加载至 85.86 MPa 时,轴向蠕变应变占 2.79%,侧向蠕变应变占 15.60%;加载至 106.06 MPa 时,轴向和侧向蠕变应变分别占各自总应变的 3.44%和 19.06%;当荷载为 116.16 MPa 时,轴向蠕变应变占 4.15%,侧向蠕变应变占 24.56%。

(3)深部粉砂岩蠕变过程中存在一个应力阈值,当荷载低于应力阈值时,蠕变应变趋于某一定值,表现出衰减蠕变的特性;当荷载高于应力阈值时,蠕变应变随时间的增长而增大,呈现出稳定蠕变段的特性,且轴向蠕变的应力阈值比侧向的大。侧向蠕变在荷载大于 75.76 MPa 时,表现出稳定蠕变段的特性,轴向蠕变在荷载达 86.86 MPa 时,才出现稳定蠕变。

(4)随轴向分级荷载的提高,深部粉砂岩的侧向稳态蠕变速率增长较快,且比轴向稳态蠕变速率大。如在第五级荷载作用下,轴向稳态蠕变速率为 $2 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,侧向为 $5.13 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$;在第六级荷载作用

下,轴向稳态蠕变速率与侧向稳态蠕变速率分别为 $2 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 和 $4.85 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; 在第七级荷载作用下,轴向稳态蠕变速率为 $4 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,侧向为 $8.63 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$; 在第八级荷载作用下,轴向稳态蠕变速率与侧向稳态蠕变速率分别为 $4 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 和 $10.86 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。

3 单轴压缩蠕变试验分析

3.1 瞬时弹性模量与应力的关系

深部粉砂岩瞬时弹性模量^[17]与应力的关系如图4所示。可以看出,在第一级荷载作用下,瞬时弹性模量为 31.14 GPa,而后随应力的增大,整体出现先增大后减小的变化趋势,其中最大值在第五级荷载作用时出现,为 37.41 GPa。总体而言,瞬时弹性模量基本上在 26~35 GPa 之间波动,其平均值为 31.86 GPa,但在最后一级荷载作用下瞬时弹性模量下降至 12.63 GPa,相比瞬时弹性模量的平均值,其下降幅度达 60.36%,表明深部粉砂岩开始破碎。

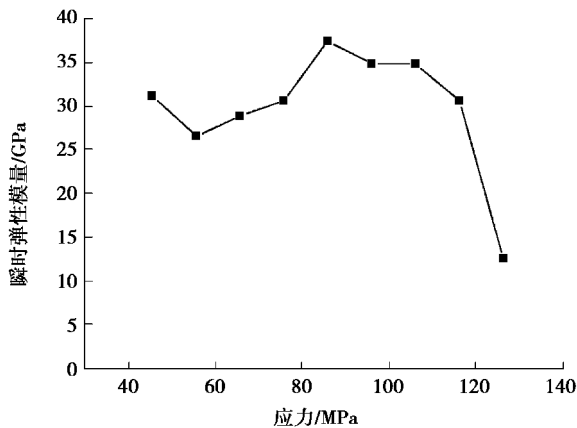


图4 瞬时弹性模量-应力曲线

Fig. 4 The curve of instantaneous elastic modulus vs. stress

3.2 瞬时泊松比与应力的关系

图5为深部粉砂岩瞬时泊松比^[17]与应力的关系。从图中可以看出,粉砂岩的瞬时泊松比随应力的增大呈上凹型增长趋势,从第一级荷载作用下的 0.09 增大到最后一级荷载作用下的 0.72,增长幅度达 87.50%,远远大于常规试验的泊松比数值,这与付志亮等^[3]、范庆忠等^[17]得出的试验结果类似。由于在蠕变过程中,岩石试件总体表现为轴向硬化、侧向软化^[18],因此,随时间增长及分级荷载的提高,岩石试件内部的裂纹逐渐扩展同时损伤不断

累积,从而产生较大的塑性形变,其中侧向塑性形变远远超过轴向,所以泊松比越来越大。

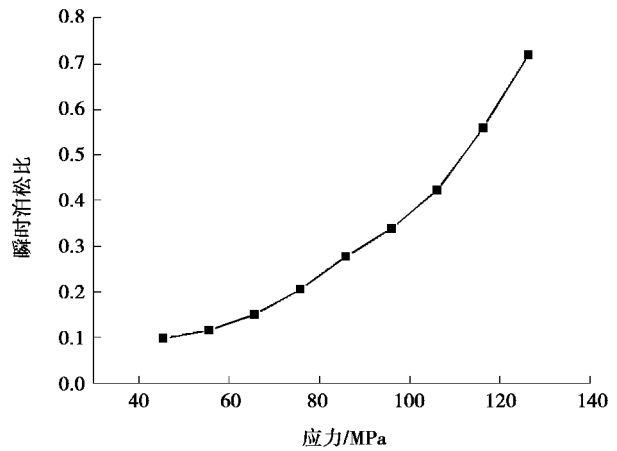


图5 瞬时泊松比-应力曲线

Fig. 5 The curve of instantaneous Poisson's ratio vs. stress

3.3 蠕变应变与应力的关系

图6为深部粉砂岩蠕变应变与应力关系曲线。从图中可以看出,随应力的增加,粉砂岩的轴向蠕变应变、侧向蠕变应变呈现出不同的变化趋势,轴向蠕变应变呈先减小后增大的趋势,侧向蠕变应变呈上凹形增长,初期曲线平缓,当应力达 65.66 MPa 时曲线斜率开始上升。当应力达 116.16 MPa 时,轴向蠕变应变和侧向蠕变应变分别增大至最大值 0.016×10^{-2} 和 0.067×10^{-2} ,相比各自蠕变应变的最小值 0.004×10^{-2} 和 0.005×10^{-2} ,分别增长了 3 倍和 12.4 倍,表明相对于轴向蠕变,荷载的增加对粉砂岩侧向蠕变的影响更大。

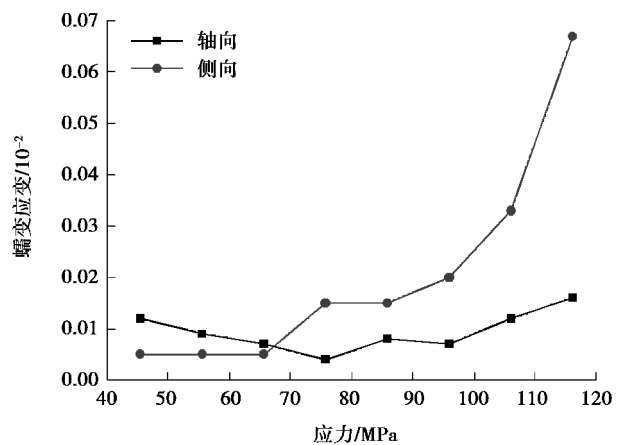


图6 蠕变应变-应力曲线

Fig. 6 The curves of creep strain vs. stress

3.4 等时应力-应变关系

图7为深部粉砂岩蠕变过程中的等时应力-应变曲线。可以看出,轴向等时应力-应变曲线簇的间距较小,而侧向的间距随应力的增加而逐渐增大,表明蠕变过程中侧向的时效变形较轴向显著;轴向与侧向的等时应力-应变曲线随应力及时间的增长均呈现朝应变轴方向发展的趋势,轴向等时应力-应变曲线逐渐由近似直线转为折线,侧向等时曲线由直线转为曲线,且曲线的斜率越来越小。由此可见,蠕变过程中具有非线性特征,且侧向较轴向更明显。

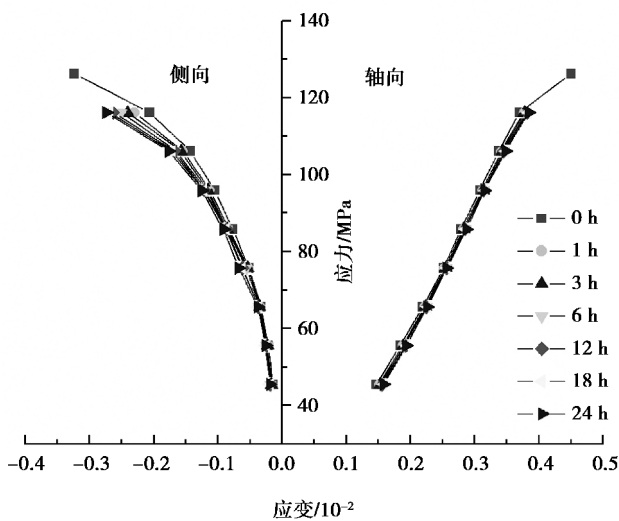


图7 等时应力-应变曲线

Fig. 7 The curves of isochronous stress vs. strain

4 结论

(1) 煤矿深部粉砂岩单轴压缩蠕变曲线,表明侧向蠕变发展较轴向蠕变快,但轴向蠕变的应力阈值较侧向蠕变大。

(2) 随应力的增大,煤矿深部粉砂岩瞬时弹性模量呈先增大后减小的变化趋势,且其值在 26~35 GPa 之间波动;瞬时泊松比呈上凹型增长趋势。

(3) 煤矿深部粉砂岩蠕变应变-应力曲线表明,随应力的增大,轴向蠕变应变先减小后增大,侧向蠕变应变呈上凹型增长;相对于轴向蠕变,应力的增大对煤矿深部粉砂岩侧向蠕变的影响更大。

(4) 由试验过程中的等时应力-应变曲线的变化趋势可以看出,深部粉砂岩蠕变过程具有非线性特征,且侧向较轴向更明显。

参考文献 (References)

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106. (Sun Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106. (in Chinese))
- [2] Mishra B, Verma P. Uniaxial and triaxial single and multistage creep tests on coal-measure shale rocks[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 137: 55-65.
- [3] 付志亮, 高延法, 宁伟, 等. 含油泥岩各向异性蠕变研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 353-356. (Fu Zhiliang, Gao Yanfa, Ning Wei, et al. Creep of anisotropic oil shale[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 353-356. (in Chinese))
- [4] 杜超, 杨春和, 马洪岭, 等. 深部盐岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. (Du Chao, Yang Chunhe, Ma Hongling, et al. Study of creep characteristics of deep rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. (in Chinese))
- [5] 王军保, 刘新荣, 王铁行. 灰质泥岩蠕变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 770-775. (Wang Junbao, Liu Xinrong, Wang Tiexing. Experimental study on creep property of lime mudstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 770-775. (in Chinese))
- [6] 宋勇军, 雷胜友, 邹翀, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 619-625, 664. (Song Yongjun, Lei Shengyou, Zou Chong, et al. Study on creep characteristics of carbonaceous slates under dry and saturated states[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 619-625, 664. (in Chinese))
- [7] 左清军, 吴立, 李波, 等. 富水泥质板岩隧道围岩蠕变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2047-2056. (Zuo Qingjun, Wu Li, Li Bo, et al. Creeping properties of water-rich argillaceous slate surrounding tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2047-

2056. (in Chinese))
- [8] 王树英, 阳军生, 肖小文, 等. 乔家山隧道粘土岩大变形及支护结构稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1545-1551. (Wang Shuying, Yang Junsheng, Xiao Xiaowen, et al. Study on large deformation of claystone and support stability in Qiaojiaoshan tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1545-1551. (in Chinese))
- [9] 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): 756-762. (Shi Zhenming, Zhang Li. Study on rheological rules of green schist in Jinping hydropower station under condition of step unloading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 756-762. (in Chinese))
- [10] 赵宝云, 刘东燕, 郑颖人, 等. 红砂岩单轴压缩蠕变试验及模型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 744-747. (Zhao Baoyun, Liu Dongyan, Zheng Yingren, et al. Uniaxial compressive creep test of red sandstone and its constitutive model [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 744-747. (in Chinese))
- [11] 周先齐, 王洁, 陈自力. 黏塑流变本构模型力学参数辨识研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 632-641. (Zhou Xianqi, Wang Jie, Chen Zili. Study on identification of mechanical parameters of viscoplastic rheological model[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 632-641. (in Chinese))
- [12] 蒋昱州, 王瑞红, 朱杰兵, 等. 砂岩的蠕变与弹性后效特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2010-2017. (Jiang Yuzhou, Wang Ruihong, Zhu Jiebing, et al. Experimental study of creep and elastic aftereffect of sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2010-2017. (in Chinese))
- [13] 杨红伟, 许江, 聂闻, 等. 渗透水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1613-1619. (Yang Hongwei, Xu Jiang, Nie Wen, et al. Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1613-1619. (in Chinese))
- [14] 张素敏, 朱永全, 高炎, 等. 全风化花岗岩流变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 904-911. (Zhang Sumin, Zhu Yongquan, Gao Yan, et al. Experimental investigation on rheological properties completely weathered granite [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 904-911. (in Chinese))
- [15] 马芹永, 郁培阳, 袁璞. 干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 593-600. (Ma Qinyong, Yu Peiyang, Yuan Pu. Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 593-600. (in Chinese))
- [16] 郁培阳, 马芹永. 饱水状态下煤矿粉砂岩蠕变特性试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 24-28. (Ma Qinyong, Yu Peiyang. Experimental study on creep properties of siltstone in coalmine under water-saturated condition[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 38(3): 24-28. (in Chinese))
- [17] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1273-1276. (Fan Qingzhong, Gao Yanfa. Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1273-1276. (in Chinese))
- [18] 高延法, 范庆忠, 崔希海, 等. 岩石流变及其扰动效应试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Gao Yanfa, Fan Qingzhong, Cui Xihai, et al. Experimental study on the perturbation effect of rock rheology [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))