

复杂环境下软岩蠕变特性试验研究

王艳春, 王永岩

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 对处于复杂环境下深部页岩蠕变特性进行试验研究, 考察了在温度-应力-化学三场耦合作用下深部页岩蠕变特性的温度效应和 pH 值化学效应, 并探讨了作用机理。研究表明, 深部页岩的温度效应和 pH 值化学效应是明显的, 而且 pH 值化学效应比温度效应更为显著; 温度越高, 页岩蠕变特性越明显, 试验结果对当地煤矿井下的安全生产有参考价值; pH 值越高, 其蠕变特性越显著。

关键词: 岩石力学; 深部软岩; 温度-应力-化学耦合; 蠕变特性

中图分类号: TD315.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)03-0054-06

Experimental Research on Creep Behavior of Soft Rock Under Complex Environment

Wang Yanchun, Wang Yongyan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: Experimental research on creep behavior of deep shale under complex environment was conducted. Based on the test results, temperature effect and pH value chemical effect on creep behavior of deep shale under thermal-mechanical-chemical coupling effect were revealed, and corresponding mechanisms were investigated. The research shows that temperature and pH value chemical effect of creep behavior on deep shale are obvious, and pH value chemical effect is more obvious than that of temperature effect; the higher temperature, the more obvious creep behavior. The research results have reference value for local coal mine safety production environment. The higher pH value is, the more obvious creep behavior becomes.

Key words: rock mechanics; deep soft rock; thermal-mechanical-chemical coupling; creep behavior

深部工程是一类复杂工程, 深部环境不仅存在工程软岩的特殊性, 还是一个高温度、高应力以及化学腐蚀共同作用的复杂环境^[1]。软岩在深部特殊环境下表现出强流变特性, 是岩体长期应变积累而导致流变破坏的主要因素, 对深部岩体工程稳定性造成严重威胁。地应力随着开采深度加大而不断加大, 使岩体也易出现大变形及强流变特性^[2-3]; 开采深度加大, 地温随之升高, 从而使得岩体流变特性发生变化^[4]; 地下水是一种具有不同酸碱度的化学溶液, 长期处于这种水环境中, 岩体受其影响非常严重。在井壁坍塌、出砂、断层滑移等蠕变破坏现象的漫长孕育过程中, 地下水的化学作用起着决定性的作用^[5]。众多学者进行了单一应力物理场^[6-8]以及两场如温度场与应力场^[9-11]、化学场与应力场^[12-14]耦合作用下岩石蠕变特性研究。而随着地下开采深度的逐渐加大, 深部实际地下环境对深部岩石蠕变特性影响的研究尤显重要。目前为止, 关于对深部软岩的温度-应力-化学三场耦合作用下蠕变特性的研究尚未见报道。因此, 开展温度-应力-化学三场耦合

收稿日期: 2013-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074094, 51374134); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLG DUEK1022)

作者简介: 王艳春(1974-), 女, 吉林磐石人, 讲师, 博士, 主要从事材料固流转化理论及其力学行为研究。

E-mail: wangyanchun0603@126.com

作用下深部软岩蠕变特性的试验研究,能为深部实际工程提供试验依据,具有一定的工程实际意义。

1 试验概况

1.1 试验设备

采用青岛科技大学和山东烟台力尔设备有限公司共同研制的高温高压三轴蠕变试验机(图1),其中高温高压三轴环境试验箱为青岛科技大学自行设计,是整个蠕变试验机的核心装置,为岩石试样起到保温保压的作用。加热装置为温度可控的加热仪,最高温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,其误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最大围压 25 MPa ,其误差为 $\pm 0.1\text{ MPa}$ 。实验数据由微机自动采集。



图1 高温高压三轴环境试验机系统

Fig.1 High temperature and pressure triaxial testing system

1.2 试样制备

页岩试样全部采自山东唐口煤矿地下 $1\ 000\text{ m}$ 深处副井巷道,致密,硬度低,颜色为黑色,不染手,为黑色页岩。由于岩样来自于钻孔岩芯,而且在岩芯从唐口煤矿矿区运回路途颠簸而出现大量断开,加工试样成品规格为 $\phi 55\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的圆柱体。岩芯两端面先用锯石切割机按要求切平整,然后在磨石机上进行研磨,达到试验规程要求。

1.3 试验方案

地下水是一种化学溶液。每一个岩石试样浸泡在相同体积的不同pH值化学溶液中,严格密封。浸泡时间为 15 d ,达到自然饱和。此外,为防止在试验过程中高压液压油浸入试样而影响试样蠕变特性,试验前在岩石试样外套缠耐热胶带,再套上热缩膜并用电吹风热烘数分钟,使之收缩至与试样密贴,与热油隔离。

试验研究方案与基本思路为:每组为2个试样。为了测试页岩在实际地下环境蠕变特性的化学效应,开展了pH值为4,7和10共三种不同化学酸碱度溶液浸泡状态下页岩蠕变试验。为测定不同温度对页岩蠕变特性的影响效应,根据所采页岩试样的深度,确定该页岩所在地下深度的温度,变化的温度场为 $30, 50$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了方便对比分析,试样蠕变试验在相同应力水平加载条件下、围压均在 3 MPa 下进行。

蠕变试验采用分级增量加载方式。根据不同化学环境下岩石试样的抗压强度值,以此作为蠕变试验加载分级的依据。最后确定 $7.76, 15.52, 23.28, 31.04, 38.80\text{ MPa}$ 。各级载荷持续的时间为 24 h ,每施加一级载荷,立即观测瞬时应变,设定每隔 20 min 测读轴向应变。

2 试验结果及分析

2.1 温度对深部页岩蠕变特性的影响效应

图2为pH值为4,不同温度下的各级应力水平下页岩三轴压缩蠕变试验轴向应变-时间试验曲线。从图中所示蠕变曲线的形态来看,加载完成时,页岩发生瞬时变形,继而产生随时间而增长的蠕变变形,随后,蠕变变形随时间延长而逐渐趋缓。当达到一定时间后,在轴向应力差较小时,变形不再增长,岩石的最终变形趋向于一个稳定值,即进入稳定蠕变阶段;当所施加的应力差值较大时,岩石的最终变形急剧加大,出现加速蠕变阶段。

表1和表2分别对比列出了不同温度下各级应力水平的瞬时应变值和 $t=24\text{ h}$ 时的轴向蠕变应变值。

由表1可见,对于同一应力水平,当轴向加载完成时,温度越高,瞬时应变值越大, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,分别增长到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的1.036倍和1.042倍。

由表2可见,在同一恒定应力水平下, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的蠕变应变量(24 h),分别增长到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的1.02倍和1.14倍。

对比分析图3中在不同温度下页岩轴向蠕变速率-时间曲线(以 $\Delta\sigma = 31.04\text{ MPa}$ 为例),可发现如下特点:对于同一恒定应力水平,温度越高,同一时刻的稳态蠕变速率越大;温度越高,页岩蠕变速率下降越快,进

入稳定蠕变阶段需要的时间越短。分析表明,在相同应力水平和 pH 值下,温度越高,页岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率越大,显然,其差异正好反映了页岩蠕变特性中温度效应的存在。

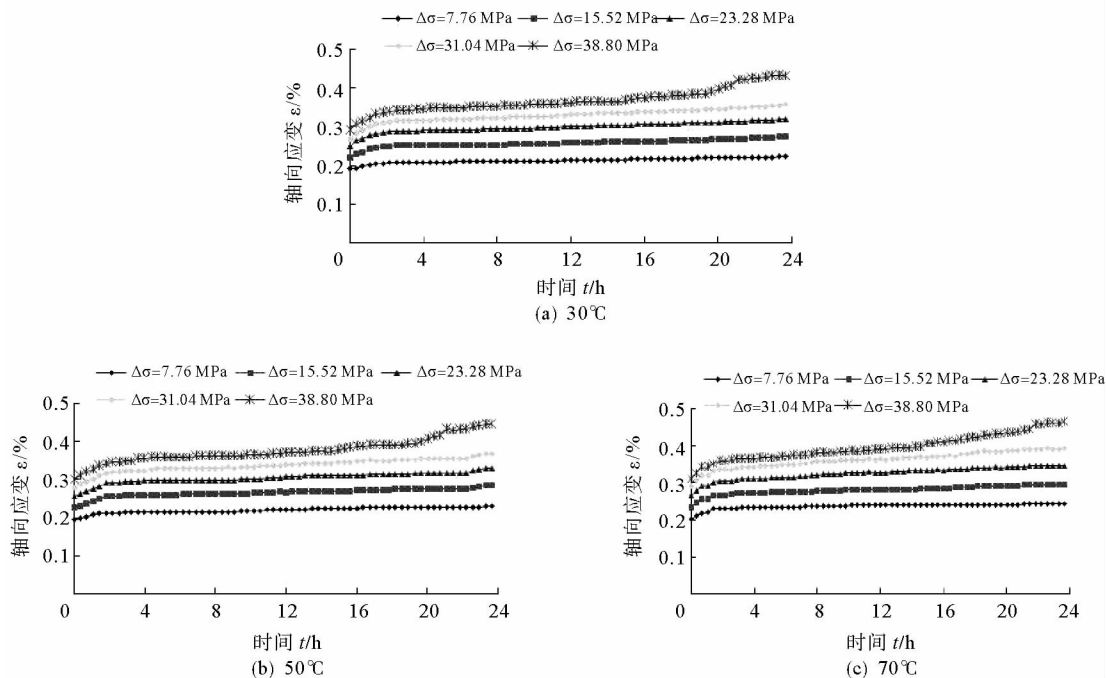


图 2 pH 值相同、各级应力水平下不同温度的页岩三轴压缩蠕变轴向应变-时间关系曲线

Fig. 2 Triaxial compressive axial creep-time curves of shale under same pH value, different stress levels and temperature

表 1 各级应力水平下不同温度试件的瞬时应变值

Tab. 1 Instantaneous strain of different temperature under different level stress

应力/MPa	温度/°C				
	7.76	15.52	23.28	31.04	38.80
30	0.190	0.220	0.250	0.269	0.291
50	0.195	0.226	0.256	0.278	0.301
70	0.201	0.231	0.263	0.290	0.311

表 2 各级应力水平下不同温度试件的轴向蠕变应变值($t=24$ h)

Tab. 2 Axial creep strain ($t=24$ h) of different temperature different under different level stress

应力/MPa	温度/°C				
	7.76	15.52	23.28	31.04	38.80
30	0.032	0.054	0.069	0.087	0.141
50	0.034	0.058	0.073	0.089	0.143
70	0.041	0.063	0.082	0.102	0.152

2.2 pH 值对深部页岩蠕变特性的影响效应

图 4 分别给出了相同应力水平和温度 ($T=30^{\circ}\text{C}$), 而不同 pH 值下页岩三轴压缩蠕变试验轴向蠕变应变-时间曲线。表 3 和 4 分别对比列出了各级应力水平下的瞬时应变值和 $t=24$ h 时的轴向蠕变应变值。

从图 4、表 3 和表 4 可以看出,在相同应力水平和温度、不同 pH 值条件下,页岩三轴压缩蠕变的轴向应变呈现如下特征:①化学溶液的酸性越强,页岩瞬时应变也越大。pH 值分别从 7 到 4 和 10,瞬时应变达到原来中性溶液时的 1.14 倍和 1.043 倍。

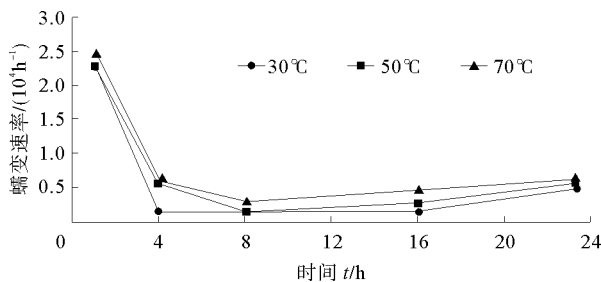


图 3 相同 pH 值,不同温度页岩轴向蠕变速率时间曲线 ($\Delta\sigma=31.04$ MPa)

Fig. 3 Creep rate-time curves of shale under same pH value, different temperature ($\Delta\sigma=31.04$ MPa)

②水环境酸性越强,页岩的初始蠕变阶段越明显,进入稳定蠕变阶段所需要的时间也越长。③水化学环境的酸碱度降低岩石试件的蠕变初始强度。④pH 值分别从 7 到 4 和 10,蠕变应变量(24 h)达到原来中性溶液时的 2.00 倍和 1.80 倍。

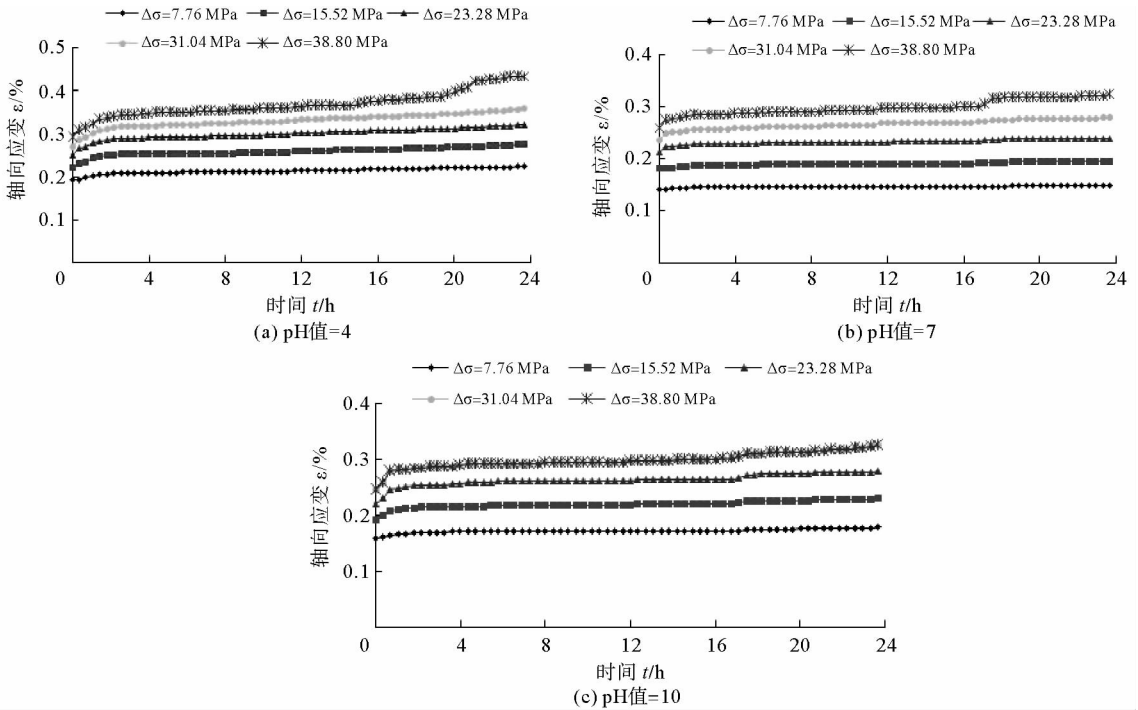


图 4 相同温度、各级应力水平下不同 pH 值页岩蠕变轴向应变-时间关系曲线

Fig. 4 Axial creep-time curves of shale under same temperature, different pH value under different stress levels

表 3 各级应力水平下不同 pH 值试件的瞬时应变值

Tab. 3 Instantaneous strain of different pH value under different level stress

应力/MPa	7.76	15.52	23.28	31.04	38.80
pH 值					
4	0.190	0.220	0.250	0.269	0.291
7	0.140	0.181	0.211	0.235	0.258
10	0.158	0.191	0.220	0.245	0.274

表 4 各级应力水平下不同 pH 值试件的轴向蠕变应变值(t=24 h)

Tab. 4 Creep strain (t=24 h) of under different pH value under different level stress

应力/MPa	7.76	15.52	23.28	31.04	38.80
pH 值					
4	0.032	0.054	0.069	0.087	0.141
7	0.007	0.014	0.027	0.044	0.063
10	0.019	0.039	0.058	0.079	0.106

图 5 中为不同 pH 值下页岩轴向蠕变速率-时间曲线,可以发现:

①对于同一恒定应力水平, pH 值越高,试件的稳态蠕变速率也增大。pH 值分别从 7 到 4 和 10,稳态蠕变速率是原来中性溶液时的 3.50 倍和 1.06 倍。

②pH 值越高,页岩蠕变速率下降越快,进入稳定蠕变阶段需要的时间越短。

上述蠕变试验结果和分析表明,相同应力水平和温度下,化学酸性越强,页岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率越大。显然,其差异正好反映了页岩蠕变特性中

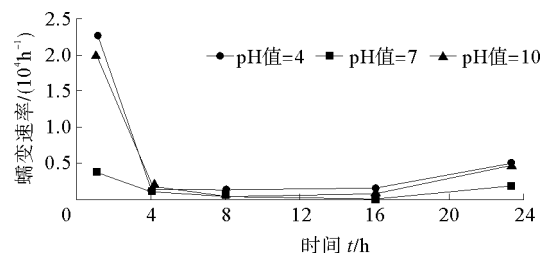


图 5 相同温度不同 pH 值页岩轴向蠕变速率-时间曲线(Δσ=31.04 MPa)

Fig. 5 Creep rate-time curves of shale under same temperature, different pH value (Δσ=31.04 MPa)

化学腐蚀效应的存在,而且效果明显。

3 温度和化学腐蚀作用下页岩蠕变机理分析

3.1 温度作用下页岩蠕变机理分析

温度改变岩石蠕变特性是通过改变其物理性质来实现的。研究温度与岩石蠕变特性之间关系时,必须结合温度变化和岩石的性质。本文研究页岩致密,颗粒较小,孔隙率较低,施加温度范围较小,温度升高,岩石因膨胀使得周围形成微裂纹。

温度升高造成每个载荷级别下在加载完成瞬间的瞬时弹性应变也越大。温度越高,裂纹也越明显,在恒定应力下,页岩的可压缩性越大,因而进入稳定蠕变阶段所需时间也越长,相应的 24 h 蠕变量也越大。

3.2 化学腐蚀作用下页岩蠕变机理分析

图 6 为 pH 值为 4 和 7 化学水环境经过 15 d 的水化学作用时页岩试样的显微结构薄片鉴定结果。由图 6 可以看出,pH 值=7 状态下的页岩颗粒致密且分布均匀,没有明显的孔洞;pH 值=4 水环境中经过 15 d 水化学作用后的页岩出现明显的溶蚀现象。这是由于试验所用山东唐口煤矿页岩主要由石英、长石的碎屑以及其他化学物质组成,其中长石发生不同程度高岭石化,表面高岭石化及完全高岭石化仅保留长石外形的情况较为普遍,页岩由于水化学溶液溶蚀作用产生粒内空洞。

pH 值越高,每个载荷级别下瞬时弹性应变越大。水化学腐蚀作用对页岩造成不同程度初始损伤,并在此过程中对页岩蠕变特性产生了后效作用,初始损伤越大,页岩空隙越大,使其可压缩空间也就越大,因此进入稳定蠕变阶段时间也越长,相应发生 24 h 蠕变量也越大。

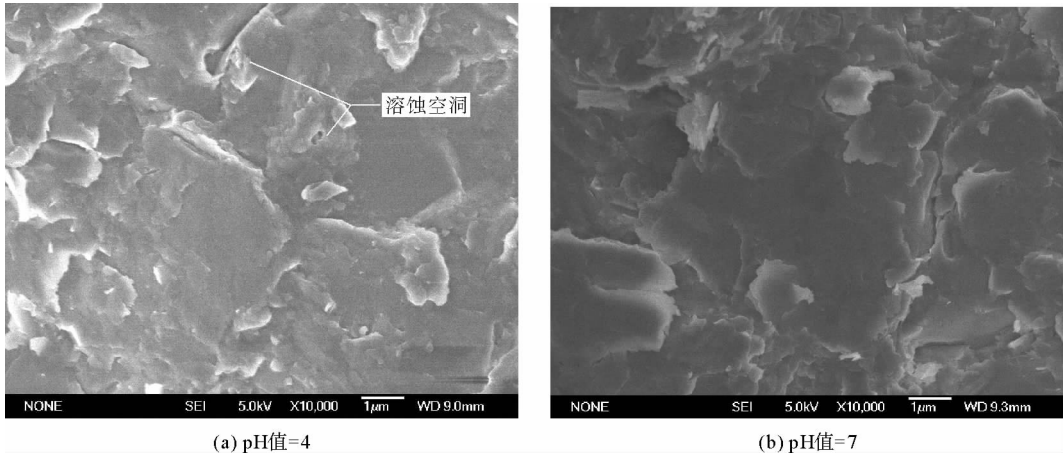


图 6 化学水环境作用 15 d 时页岩试样的显微结构薄片鉴定结果

Fig. 6 Micrographs of secondary spaces minerals shale induced by water-rock interaction for 15 days

4 结论

1) 试验研究表明,深部页岩在温度-应力-化学三场耦合作用下蠕变特性的温度效应和 pH 值化学效应是明显的,因此,对于相关深部岩体工程的长期稳定性问题而言,考虑地下实际复杂环境下岩体蠕变特性是必要的。

2) 对于同一应力水平,温度越高,页岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率越大,其差异正好体现了深部页岩在实际复杂的地下环境下蠕变特性的温度效应。本研究所做试验数目有限,以上结论还有待进一步验证其普遍性,但由于本实验所用页岩试样来自唐口煤矿在地下 1 000 m,其实际地温为 20~70℃,试验结果对当地煤矿井下环境的安全生产有借鉴价值。本文研究的深部页岩致密,颗粒较小,孔隙率较低,温度的升高,

岩石因膨胀使得周围形成微裂纹而影响其蠕变特性。

3)具有不同 pH 值的水溶液自然饱和后,对于同一应力水平,化学 pH 值越高,页岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率越大,达到稳态蠕变阶段的时间也明显延长。页岩蠕变特性的 pH 值化学效应呈现出化学 pH 值越高则其蠕变特性越显著的规律。水化学溶液对本文研究页岩的蠕变特性影响主要是长石溶解,溶蚀等化学作用引起的。

参考文献:

- [1]周宏伟,谢和平,左建军.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 Hongwei,Xie Heping,Zuo Jianjun.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.
- [2]陈勉.我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(14):2455-2462.
Chen Mian.Study of deep rock mechanics and application in petroleum engineering[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(14):2455-2462.
- [3]何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
He Mancao,Xie Heping,Peng Suping,et al.Study on rock mechanics in deep mining engineering[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(16):2803-2813.
- [4]翟新献,李化敏.深井软岩巷道围岩变形特性的研究[J].煤,1995,4(5):24-26.
Zhai Xinxian,Li Huamin.Study of deformation characteristics of deep soft rock roadway[J].Coal,1995,4(5):24-26.
- [5]仵彦卿.地下水与地质灾害[J].地下空间,1999,19(4):303-310.
Chu Yanqing.Groundwater flow and geological hazards[J].Underground Space,1999,19(4):303-310.
- [6]王永岩,齐珺,杨彩虹,等.深部岩体非线性蠕变规律[J].岩土力学,2005,26(1):117-121.
Wang Yongyan,Qi Jun,Yang Caihong,et al.A study of nonlinear creep law in deep rocks[J].Rock and Soil Mechanics,2005,26(1):117-121.
- [7]王永岩,魏佳,齐珺,等.深部岩体非线性蠕变变形预测的研究[J].煤炭学报,2005,30(4):409-413.
Wang Yongyan,Wei Jia,Qi Jun,et al.Study on prediction for nonlinear creep deformation of deep rocks[J].Journal of China Coal Society 2005,30(4):409-413.
- [8]李取生,薄福利,丁希阳,等.深部软岩巷道变形特性及其控制支护技术研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2010,29(4):8-14.
Li Qusheng,Bo Fuli,Ding Xiyang,et al.Deformation characteristics of soft rock roadway in deep mines and supporting control technology[J].Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2010,29(4):8-14.
- [9]邵保平,赵阳升,赵金昌,等.层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):90-96.
Xi Baoping,Zhao Yangsheng,Zhao Jinchang,et al.Study on coupled thermo-mechanical creep properties of bedded rock salt [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(1):90-96.
- [10]高小平,杨春和,吴文,等.盐岩蠕变特性温度效应的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2054-2059.
Gao Xiaoping,Yang Chunhe,Wu Wen,et al.Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(12):2054-2059.
- [11]李剑光,王永岩.软岩蠕变的温度效应及实验分析[J].煤炭学报,2012,37(1):81-85.
Li Jianguang,Wang Yongyan.Experimental analysis of temperature effect in creep of soft rock[J].Journal of China Coal Society,2012,37(1):81-85.
- [12]刘建,李鹏,乔丽苹,等.砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12):2540-2550.
Liu Jian,Li Peng,Qiao Liping,et al.Experimental research on creep behavior and mechanism of sandstone with hydro-physico-chemical effects[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(12):2540-2550.
- [13]王永岩,吕宜美,肖志娟,等.化学腐蚀下砂岩蠕变模型的研究[J].煤炭学报,2010,35(7):1095-1098.
Wang Yongyan,Lü Yimei,Xiao Zhijuan,et al.Research on sandstone creep models under chemical corrosion[J].Journal of China Coal Society,2010,35(7):1095-1098.
- [14]吕宜美.化学腐蚀对深部软岩蠕变特性的影响研究[D].青岛:青岛科技大学,2010:39-61.