

深部三场环境下页岩蠕变模型的建立与试验

王艳春, 王永岩

青岛科技大学机电工程学院, 青岛 266061

摘要 针对深部环境的复杂性,建立了温度-应力-化学三场共同作用下页岩试样蠕变模型,并探讨了其作用机制。研究表明:页岩在复杂环境下蠕变特性的温度效应和pH值化学效应明显,同一级应力水平下温度越高或者化学酸碱性越强,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。pH值对蠕变特性影响程度比温度的影响更明显。采用非线性元件代替常规线性元件,得到了页岩在深部环境下非线性黏弹塑性蠕变模型,该模型符合深部实际情况,能较好地模拟页岩在深部复杂环境下蠕变,从而求出模型参数。通过试验数据和拟合曲线吻合情况,验证了本模型的正确性。

关键词 深部环境;页岩;温度-应力-化学三场共同作用;蠕变特性;非线性蠕变模型

中图分类号 TU454,TD311

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.010

Creep Model Establishment and Experimental Study of Shale Under Three Field Deep Environment

WANG Yanchun, WANG Yongyan

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

Abstract Due to the complexity of the deep environment, a creep model is built and the experimental study is conducted of the shale under the thermal-mechanical-chemical joint actions, and the corresponding mechanisms are investigated. The experimental study reveals that both the temperature and the chemical pH value play a promoting role in the process of creep under this complex environment, and the higher the temperature or the chemical pH value, the larger the instantaneous strain, the creep strain and the creep rate will be, and the longer it will take to reach the steady-state creep stage; the impact of the chemistry pH value on the creep properties of the shale is more significant than that of the temperature. With the method of replacing the conventional linear component with a nonlinear one to describe the nonlinear rheological part, a nonlinear viscoelasto-plastic creep model of the shale under the deep complex environment is built, which agrees well with the actual deep situation and can better simulate the creep properties under the deep complex environment. The model parameters are obtained, and the correctness of the model is verified by comparing the experimental curves with the theoretical ones. This model can be used for the shale creep behavior prediction at various temperatures and pH values within the range discussed in this paper.

Keywords deep environment; shale; thermal-mechanical-chemical joint action; creep properties; nonlinear creep model

随着地下开采不断向纵深发展,高温、高应力及化学腐蚀共同作用下的复杂环境^[1]使深部岩体表现出强流变特性、大变形等特点,对深部岩体工程稳定性造成威胁越来越严重,甚至可能带来严重工程事故。

目前国内外开展温度场,特别是加入化学场的三轴应力岩石蠕变规律试验研究较少。李荣等^[2]进行了泥页岩三轴蠕

变实验研究,泥页岩三轴蠕变产生了过渡蠕变和稳态蠕变两个阶段,主要表现为稳态蠕变阶段,还得出蠕变量与时间相关、蠕变中起强化作用的主要因素是蠕变变形等结论。王永岩等^[3]进行了渗流对泥质页岩蠕变影响研究,表明蠕变量和蠕变速率都随渗流量的增加呈现非线性增大。目前为止,国内岩石的蠕变试验大都集中在单一应力场^[4-6]及两场如温

收稿日期:2014-05-09;修回日期:2014-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51374134)

作者简介:王艳春,讲师,研究方向为深部软岩流变理论及其力学行为,电子信箱:wangyanchun0603@126.com

引用格式:王艳春,王永岩.深部三场环境下页岩蠕变模型的建立与试验[J].科技导报,2014,32(27):60-65.

度场与应力场^[7-9]、化学场与应力场^[10-12]共同作用下岩石蠕变特性研究。随着地下开采深度的逐渐加大,深部复杂环境对岩石蠕变特性影响研究尤显重要。目前为止,对深部环境下即温度-应力-化学三场共同作用下岩石蠕变特性研究较欠缺。因此,开展深部环境即温度-应力-化学三场共同作用下页岩蠕变特性的试验分析及模型研究,可为深部实际工程提供试验依据。

1 深部环境下页岩蠕变试验

1.1 试验概况

试样为页岩,采自山东唐口煤矿深1000 m的副井巷道,试样完整致密,硬度低,黑色,不染手,为黑色页岩。由于岩芯从唐口煤矿矿区运回路途颠簸而出现大量断开,在试验前加工成圆柱体,其尺寸为 $\phi 55 \times 80$ mm。图1为本文所有试验用页岩试样。试验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三轴蠕变试验机,其核心装置——三轴环境试验箱为本课题组设计(图2)。围压范围为0~25 MPa,温度范围0~80℃,轴向和径向应变片精度达 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。计算机自动记录试验数据。



图1 试验所有页岩试样

Fig.1 All shale samples for testing

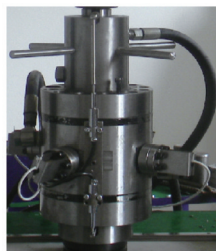


图2 温度-压力三轴环境试验箱

Fig. 2 Triaxial environment testing chamber under temperature and pressure

实际地下水是一种复杂化学溶液,其溶解组分以各种形式存在,并且具有不同离子浓度及不同pH值。本文主要研究处于不同pH值化学溶液的岩石试样蠕变特性。每一岩石试样浸泡在相同体积的不同pH值化学溶液中(表1),严格密封。浸泡15 d,达到自然饱和,取出后用保鲜膜密封保存。

表1 试验过程中所考虑的水化学环境

Table 1 Hydro-chemical environments during testing

编号	水化学环境	pH值
1	HCl 溶液	4
2	蒸馏水	7
3	NaOH 溶液	10

为保护页岩化学场和避免液压油对试样影响,用耐热胶带缠上,再套上热缩膜,用电吹风热烘以进行严格密封。本次试验开展3种不同pH值(4、7、10)和温度(30、50、70℃)下页岩蠕变试验。将试验箱内液压油加热到所需温度,保持2 h左右,以使试样内部形成均匀温度场,然后加围压到所需压力值并保持在误差 ± 0.1 MPa范围内,再施加轴压,轴向载荷加载方式采用分级加载,以应力差为 $\Delta\sigma=7.76$ MPa为第1级应力载荷,在同一试样上由小到大以7.76 MPa的应力差值逐级加载,共施加5级载荷,各级载荷持续24 h,之后施加下一级荷载。每施加1级荷载,观测瞬时应变,加载后数据采样频率为1次/20 min。

1.2 试验结果及分析

1.2.1 温度对页岩蠕变特性影响效应

图3为pH=4、不同温度、各级应力水平下页岩三轴压缩蠕变试验轴向应变 ϵ 随时间 t 的变化关系。

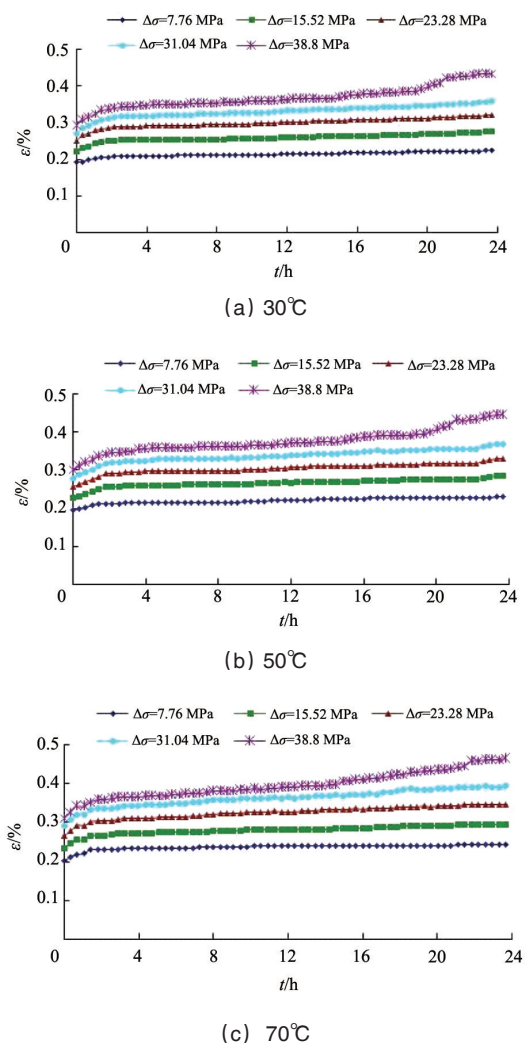


图3 相同pH值、不同温度条件下,页岩三轴压缩蠕变轴向应变随时间的变化

Fig. 3 Triaxial compressive axial strain variation with time of shale under the same pH value, different stress levels and temperatures

从图3可看出,加载完成时,页岩发生瞬时弹性变形,且温度的升高增大了其瞬时弹性变形。在应力差为31.04 MPa条件下,温度30℃时页岩瞬时应变为0.00269,而当温度为50℃和70℃时,瞬时应变分别为0.00278和0.00290。24 h产生的蠕变应变量也随着温度的升高而增大,如应力差为23.28 MPa条件下,温度30℃时,页岩24 h产生的蠕变应变量为0.00069,而当温度为50℃和70℃时,其蠕变应变量分别为0.00073和0.00082。而且从轴向应变曲线可以看出页岩表现出清晰的衰减、稳态及加速蠕变阶段。

1.2.2 pH值对页岩蠕变特性影响效应

图4分别给出了温度 $T=30℃$ 、不同pH值、各级应力水平下页岩三轴压缩蠕变试验轴向蠕变应变随时间的变化关系。

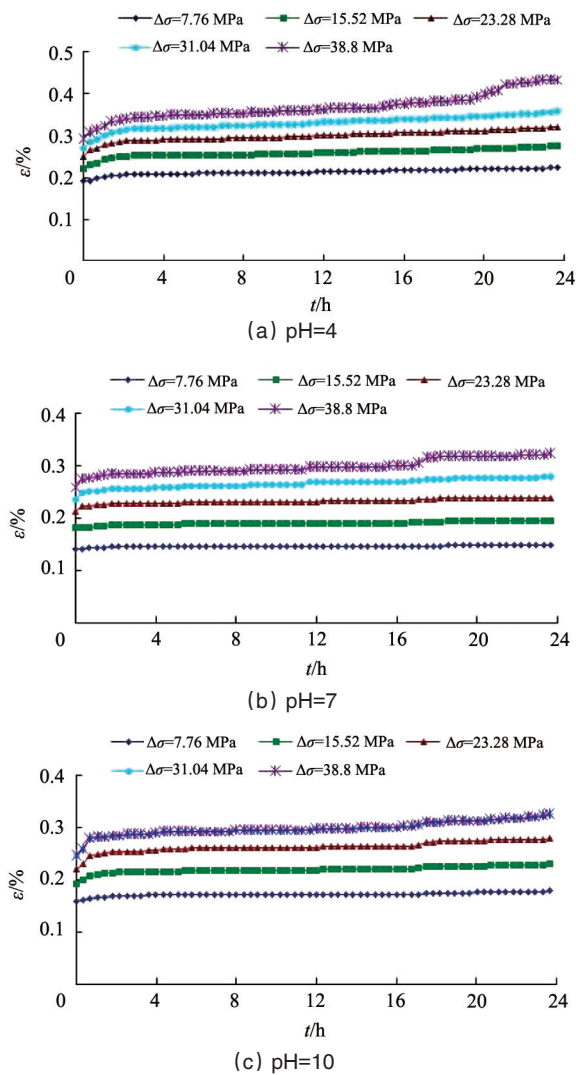


图4 相同温度、不同pH值下,页岩三轴压缩蠕变轴向应变随时间的变化

Fig. 4 Triaxial compressive axial strain variation with time of shale under the same temperature, different stress levels and pH values

从图4可以看出,加载完成瞬间,化学溶液酸碱性越强,页岩化学腐蚀作用效应越显著,页岩初始损伤也越大,因此

页岩瞬时弹性应变也越大。如应力差为31.04 MPa条件下, pH=7时,瞬时弹性应变为0.00235,而pH=4和pH=10时瞬时弹性应变分别为0.00269和0.00245。24 h产生的蠕变应变量也随着化学酸碱性增强而增大,如应力差为23.28 MPa, pH=7时,页岩24 h产生的蠕变应变量为0.00027,而当pH=4和pH=10时,其蠕变应变量分别为0.00069和0.00058。化学酸碱性越强,页岩的初始蠕变阶段越明显,进入稳定蠕变阶段所需时间也越长。如应力差为23.28 MPa, pH=7时,页岩进入稳定蠕变阶段所需时间很短,仅为30 min,而当pH=4和pH=10时进入稳定蠕变阶段的时间有所增长,分别为72和165 min。化学酸碱性增强,使得加速阶段的蠕变速率明显增大。

从图4的轴向变形曲线的形态可以看出,页岩表现出清晰的衰减、稳定和加速蠕变阶段。

2 温度和化学腐蚀作用下页岩蠕变机制

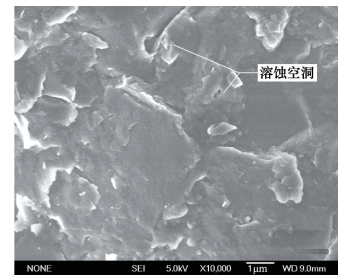
2.1 温度作用下页岩蠕变机制

温度通过改变岩石的物理性质改变岩石的蠕变特性。研究温度与岩石蠕变特性的关系时,需结合温度变化和岩石性质。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。

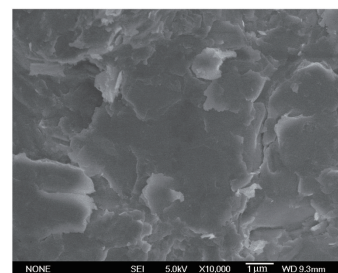
温度升高造成每个载荷级别下加载完成瞬间的瞬时弹性应变变大。温度越高,裂纹也越明显,使其在恒定应力下,页岩的可压缩性越大,因而进入稳定蠕变阶段所需时间也越长,相应的24 h的蠕变量也越大。

2.2 化学腐蚀作用下页岩蠕变机制

图5为pH=4、7下化学水环境作用15 d时页岩试样的显



(a) pH=4



(b) pH=7

图5 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. 5 Micrographs of secondary species of minerals shale induced by water-rock interaction for 15 days

微结构薄片鉴定结果。由图5可以看出,pH=7状态下的页岩颗粒致密且分布均匀,没有明显的孔洞;pH=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。这是由于本文试验所用山东唐口煤矿页岩主要由石英、长石的碎屑等物质组成,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情况较为普遍,页岩由于水化学溶液腐蚀作用溶蚀产生粒内空洞。

pH值越高,各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,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。

3 深部环境下页岩蠕变模型

3.1 线性流变模型

从蠕变试验结果发现,具有不同温度和不同化学腐蚀作用的轴向蠕变具有如下特点。

1) 试样加载后产生的变形,有瞬时弹性变形和随时间而产生的衰减蠕变变形。可以用广义 Kelvin 模型描述。蠕变方程为

$$\varepsilon_t^1 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) \quad (1)$$

式中, ε_t^1 为 Kelvin 模型产生的黏弹性应变; σ 为应力; E_1 、 E_2 和 η_1 分别为 Kelvin 模型中元件的弹性模量和黏滞系数。

2) 稳态蠕变曲线线段反映出应变随时间延长而逐渐增大的趋势,表明模型结构中应用黏性元件描述页岩的黏性蠕变规律。蠕变方程为

$$\varepsilon_t^2 = \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (2)$$

式中, ε_t^2 为黏性元件产生的黏性应变; η_2 为黏性元件的黏滞系数。

将黏弹性阶段蠕变模型和黏性阶段蠕变模型组合(即为 Burgers 体模型),得到页岩的黏弹性蠕变模型,如图6所示。

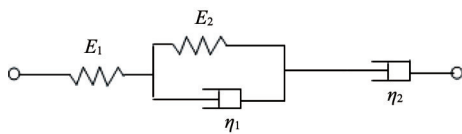


图6 页岩的线性黏弹性蠕变模型

Fig. 6 Linear viscoelastic creep model of shale

结合式(1)和式(2),可得到页岩的黏弹性蠕变模型的本构关系

$$\varepsilon_t = \varepsilon_t^1 + \varepsilon_t^2 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t \quad (3)$$

其中, ε_t 为岩石总的线性应变。

3.2 非线性流变模型

本文采用半线性元件改进半理论的方法,即采用模型理论描述线性流变部分,非线性元件代替常规的线性元件描述

非线性流变部分。

将黏性系数 η 值作为随时间变化的非定常变数值,采用蠕变经验方程与二元件黏塑性模型中的黏性系数进行非线性处理如下。

岩石蠕变经验方程中的幂函数方程表达式为

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 + at^n \quad (4)$$

式中, ε_n 为非线性应变; ε_0 为加速蠕变之前的应变值; a 代表应力历时状态; n 为加速蠕变参数,反映岩石加速流变速率的快慢程度。

对于二元件黏塑性蠕变模型,当 $\sigma > \sigma_s$ 时,其蠕变方程表达式为

$$\varepsilon_n = \varepsilon_0 + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta} t \quad (5)$$

式中, σ_s 为岩石的屈服强度。

联立式(4)与式(5),并令 $a = (\sigma - \sigma_s) / \eta_0 t_0$, t_0 为参考时间,此处设定为1。最后得出黏滞系数 η 的非线性表达式为

$$\eta(n, t) = \frac{\eta_0}{t^{n-1}} \quad (6)$$

式中, η_0 为加速蠕变初始黏性系数。

图7为经处理之后的非线性黏塑性模型,相应的蠕变本构方程表达式为

$$\varepsilon_n(t) = \frac{H(\sigma - \sigma_s)}{\eta_0} t^n \quad (7)$$

式中,开关函数 H 的表达式为

$$H(\sigma - \sigma_s) = \begin{cases} 0 & \sigma \leq \sigma_s \\ \sigma - \sigma_s & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (8)$$

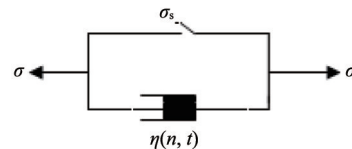


图7 非线性黏塑性模型

Fig. 7 Nonlinear viscoplastic model

当应力水平较低时或环境因素影响较小时,仍用 Burgers 模型描述页岩的黏弹性蠕变规律。因此页岩非线性黏塑性蠕变模型为如图8所示。

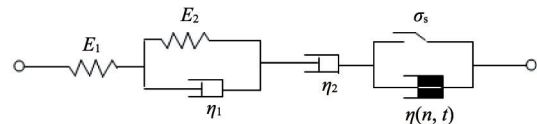


图8 页岩的非线性黏弹性蠕变模型

Fig. 8 Nonlinear viscoelastic-plastic creep model of shale

页岩的非线性黏塑性模型蠕变方程为

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \varepsilon_n = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n \quad \sigma > \sigma_s \quad (9)$$

式中, ε 为岩石总应变; η_3 为非线性黏塑性模型的黏滞系数。

页岩的三轴蠕变方程为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t & \sigma \leq \sigma_s \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_3} t^n & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (10)$$

4 蠕变模型参数的确定

以最小二乘法确定模型参数。表2和表3分别为不同条件深部页岩轴向蠕变模型参数。图9为应力差为38.80 MPa时,页岩蠕变的试验曲线和理论曲线,从图9可见,蠕变试验数据点和本文模型的理论曲线较为吻合。

表2 相同pH值,不同温度条件下页岩轴向蠕变模型参数

Table 2 Axial creep model parameters of deep shale under the same stress status and pH value but different temperature

应力/ MPa	E_1/GPa			$E_2/10 \text{ GPa}$			$\eta_1/(10 \text{ GPa}\cdot\text{h})$			$\eta_2/(10 \text{ GPa}\cdot\text{h})$		
	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C
7.76	4.12226	4.0167	3.8687	4.8866	4.8390	2.7481	3.8200	3.7206	2.5104	1.0865	0.9419	1.0826
15.52	7.0873	6.9829	6.7223	5.7741	5.0495	4.3664	4.0094	3.9871	3.6387	1.4979	1.4381	1.3004
23.28	9.3233	9.2380	8.8121	7.1362	6.4504	5.9072	6.7546	6.5931	5.5101	1.6509	1.6547	1.2330
31.04	11.5980	11.2260	10.695	7.5562	7.3645	7.2894	7.1729	6.8952	6.0032	1.6847	1.6170	1.2076
38.80	13.477	13.195	12.931	9.585	8.6519	6.8332	7.4414	4.6109	4.2638	2.4399	1.7491	1.8329

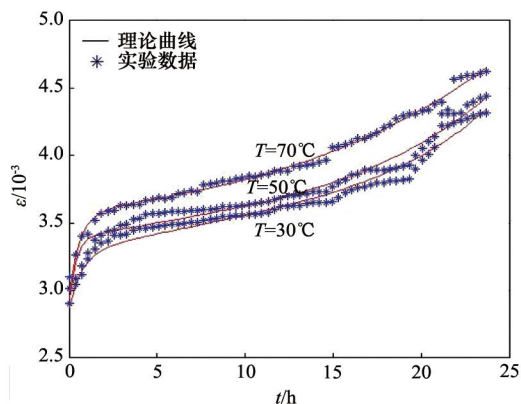
应力/ MPa	σ/MPa			$\eta_3/(10^3 \text{ GPa}\cdot\text{h})$			n		
	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C	30°C	50°C	70°C
38.80	38.799	38.788	38.745	36.0128	9.2178	1.3411	5.2313	4.0753	3.0208

表3 相同温度、不同pH值条件下页岩轴向蠕变模型参数

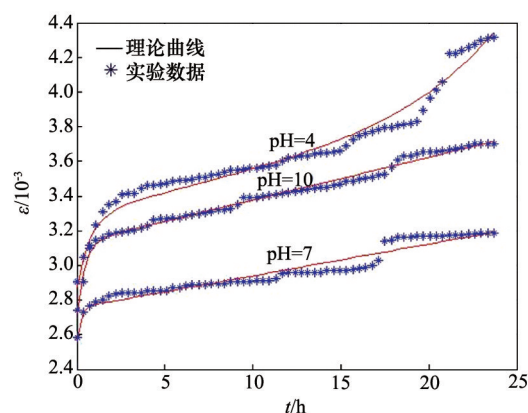
Table 3 Axial creep model parameters of shale under the same stress and temperature but different pH value

应力/ MPa	E_1/GPa			$E_2/10 \text{ GPa}$			$\eta_1/(10 \text{ GPa}\cdot\text{h})$			$\eta_2/(10 \text{ GPa}\cdot\text{h})$		
	pH=4	pH=7	pH=10	pH=4	pH=7	pH=10	pH=4	pH=7	pH=10	pH=4	pH=7	pH=10
7.76	4.1226	5.5546	4.9153	4.8866	21.247	8.3240	3.8200	23.4990	7.3646	1.0865	4.5675	2.3895
15.52	7.0873	8.5688	8.1282	5.7741	57.398	7.6610	4.0094	30.629	3.9236	1.4979	3.2569	2.4072
23.28	9.3233	11.029	10.636	7.1362	16.6610	7.2695	6.7546	6.7472	4.0739	1.6509	4.4374	2.2465
31.04	11.5980	13.177	12.772	7.5562	18.0400	8.4821	7.1729	7.2121	3.9960	1.6847	2.8649	1.9733
38.80	13.477	15.038	14.216	9.585	22.137	9.6849	7.4414	4.5320	4.4254	2.4399	2.1150	1.5729

应力/ MPa	σ/MPa			$\eta_3/(10^3 \text{ GPa}\cdot\text{h})$			n		
	pH=4	pH=7	pH=10	pH=4	pH=7	pH=10	pH=4	pH=7	pH=10
38.80	38.7	—	—	36.0	—	—	5.23	—	—



(a) pH值相同,温度不同



(b) 温度相同,pH值不同

图9 页岩在应力差为38.80 MPa条件下,蠕变的试验及理论曲线

Fig. 9 Experimental and theoretical creep curves of shale under stress deviation of 38.80 MPa

5 结论

根据实际深部复杂环境,进行了温度-应力-化学三场共同作用下页岩蠕变试验,通过对蠕变试验结果和数据进行分析,并进行了温度和化学腐蚀作用下蠕变机制分析。

1) 页岩在温度-应力-化学三场共同作用下蠕变特性的温度效应和pH值的化学效应明显,且pH值对蠕变特性影响程度要比温度对其影响更明显。因此,对于相关深部岩体工程的长期稳定性问题而言,考虑深部实际复杂环境下岩体蠕变特性的是必要的。

2) 对于同一应力水平下,温度越高,页岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率越大,其差异正好体现了页岩在深部环境下蠕变特性的温度效应。本试验所做试验数目有限,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1000 m深地下,其实际地温范围为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。

3) 同一应力水平,化学酸碱性越强,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酸碱性越高则其蠕变特性越显著的规律。

4) 通过电子显微结构扫描并进行机制分析得出,具有不同pH值的水化学溶液自然饱和后,对于同一应力水平,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,这与蠕变试验得出的结论是一致的。pH值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。

5) 通过对蠕变曲线分析,得到了页岩非线性蠕变模型,非线性部分采用非线性元件代替常规线性元件的方法。该模型能较好地模拟页岩在深部环境即温度-应力-化学三场共同作用下的蠕变行为,求出了模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 、 σ_c 、 η_3 和 n 。并且理论曲线和试验曲线能较好地吻合,验证了模型的正确性。

参考文献(References)

- [1] 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 Manchao, 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.
- [2] 李荣,孟英峰,罗勇,等.泥页岩三轴蠕变实验及结果应用[J].西南石油大学学报,2007,29(3):57-59.
Li Rong, Meng Yingfeng, Luo Yong, et al. Triaxial creep experiments and results application of shale[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(3): 57-59.
- [3] 王永岩,罗帅,岳彩虹,等.渗流对泥质页岩蠕变规律的影响[J].煤矿安全,2009(1):85-87.
Wang Yongyan, Luo Shuai, Yue Caihong, et al. Study on seepage on creep law effect on shale[J]. Safety in Coal Mine, 2009(1): 85-87.
- [4] 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.

- [5] 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.

- [6] 李剑光,王永岩,王皓.深部岩体多孔介质流变模型的研究[J].岩土力学,2008,29(9):2355-2364.

Li Jianguang, Wang Yongyan, Wang Hao. Study of rheological model of porous medium of deep rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2355-2364.

- [7] Yang C H, Daemen J J. Temperature effects on creep of tuff and its time-dependent damage analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 383-384.

- [8] 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.

- [9] 胡其志,冯夏庭,周辉.考虑温度损伤的盐岩蠕变本构关系研究[J].岩石力学与工程学报,2009,30(8):2245-2248.

Hu Qizhi, Feng Xiating, Zhouhui. Study of creep model of rock salt with thermal damage considered[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 30(8): 2245-2248.

- [10] 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.

- [11] 崔强.化学溶液流动-应力耦合作用下砂岩的孔隙结构演化与蠕变特征研究[D].沈阳:东北大学,2009.

Cui Qiang. Study on creep characteristics and the pore structure of sandstone evolution of chemical solution flow-stress coupling effect[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.

- [12] 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.

Lü Yimei. Research on the effects of chemical erosion on creep of deep soft rock[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2010.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。