

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1709

层状含水页岩蠕变特性试验研究

唐建新^{1,2}, 腾俊洋^{1,2}, 张 闯^{1,2}, 刘 姝^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 为分析层理和水对页岩的蠕变特性影响, 室内制取 0°、30°、60°、90°和不含层理 5 种页岩, 每种层理页岩均处理成干燥、自然、不饱水、饱水 4 种含水状态, 对其进行单轴压缩下的蠕变试验。试验结果表明, (1) 层理角度和含水率对页岩的蠕变特性均有较大影响。同一含水率下随层理角度的增大, 页岩的初始瞬时弹性呈指数式减小, 瞬时弹性模量呈指数式增加。相同层理角度下, 随含水率升高, 页岩的初始瞬时弹性应变线性增长, 瞬时弹性模量线性下降; (2) 采用含有弹性元件、黏性元件及开尔文体的“伯格斯”蠕变模型对页岩的蠕变过程进行描述, 并对模型的参数进行了反演和验证, 表明该模型能够较好地反映页岩的蠕变特征。根据试验所得层理和水对页岩蠕变变形的影响规律, 通过瞬时弹性模量和黏性系数与层理角度和含水率的拟合关系, 将蠕变模型中的瞬时弹性模量和黏性系数替换为层理倾角和含水率的函数, 构建了能够反映页岩层理和含水率的蠕变模型。

关 键 词: 单轴蠕变试验; 页岩; 含水率; 层理; 蠕变模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0033-09

Experimental study of creep characteristics of layered water bearing shale

TANG Jian-xin^{1,2}, TENG Jun-yang^{1,2}, ZHANG Chuang^{1,2}, LIU Shu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to analyze the influence of bedding and water on the creep characteristics of shale, five kinds of shale are prepared in the laboratory, including 0, 30, 60, 90 degrees and no bedding. Each kind of bedding shale is treated with 4 kinds of water bearing state, which is dry, natural, water unsaturated and water saturated. The results show that: (1) The bedding angle and water content have great influence on the creep characteristics of shale. At the same moisture content, with the increase of the angle of stratification, the initial instantaneous elasticity of shale decreases exponentially and the instantaneous elastic modulus increases exponentially. At the same layer angle, with the increase of moisture content, the initial instantaneous elastic strain linear growth of shale and linear decrease of instantaneous elastic modulus. (2) The creep of shale is described by Burgers creep model with elastic elements, viscous elements and Kelvin body, and the parameters of the model inversion and the verification. The results show that the model can better reflect the features of the shale creep. According to the law of the influence of the bedding and water on the creep deformation of shale and based on the fitting relationship between the instantaneous elastic modulus, the viscosity coefficient and the bedding angle, water content, the instantaneous elastic modulus and viscosity coefficient of the creep model are replaced by a function of the bedding angle and moisture content; thus a creep model which can reflect shale bedding and water content is constructed.

Keywords: uniaxial creep test; shale; moisture content; bedding; creep model

1 引 言

岩石流变是岩石矿物颗粒(骨架)随着时间的增加而不断调整重组, 使其应力、应变状态随时间增加而不断发生变化的过程, 只要工程岩体的受力水平达到或超过其流变下限, 都将产生随时间而增

长的流变变形^[1], 因此隧道等工程开挖问题需将岩体的流变性考虑进去才能合理地解释隧道围岩的持续变形、滞后性破坏、失稳等现象。

岩石的蠕变特性研究始于 20 世纪 30 年代, Griggs^[2]于 1939 年对灰岩、页岩和砂岩等岩石进行了一系列蠕变试验, 认为岩石在荷载达到其抗压强

收稿日期: 2017-08-16

第一作者简介: 唐建新, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山压力及地下工程围岩稳定性的教学与研究工作。E-mail: jtxtang@cqu.edu.cn

度的 12.5%~80.0%时就发生蠕变。国内外学者通过对现场岩体^[1, 3-4]或室内岩石^[5-8]进行流变试验分析了岩体或岩石的蠕变特性, 根据试验得到的蠕变数据建立了各种能够反映岩石弹、黏、塑性的流变模型, 孙钧^[1]、Brantut 等^[5]对这方面工作做了较为详尽地回顾和总结。已有成果对均质或完整岩石的蠕变特性研究较为充分, 并取得了较为丰富的成果^[9-14], 但对于层状或含节理岩石(体)的蠕变研究较为欠缺, 比较典型的研究成果有沈明荣等^[15]通过双轴蠕变试验, 研究了规则齿形结构面的剪切蠕变特性。杨松林等^[16]推导了节理岩体的蠕变模型一般表达式。韩庚等有^[17]对 0°、30°和 90°层理石英云母片岩进行了单轴压缩蠕变试验, 研究加载方向和片理面对蠕变规律的影响。肖明砾等^[18]通过三轴压缩蠕变试验进一步对 0°和 90°层理石英云母片岩进行了试验研究, 结果表明石英云母片岩具有明显的各向异性特性。Dubey 等^[19]通过单轴压缩蠕变试验研究了含水平、竖直和斜交层理结构的盐岩在不同应力水平下的蠕变特性, 指出应力水平越高, 层理对盐岩蠕变特性的各向异性影响越小。熊良宵等^[20]研究了轴向荷载方向与层理间角度对绿片岩的应力-应变关系、瞬时应变、轴向应变速率等的影响。吴创周等^[21]对层状脆性绿片岩试件进行单轴压缩蠕变试验, 研究了脆性层状岩石材料的各向异性蠕变规律。另外, 水的作用会使围岩体的力学性质劣化^[22], 尤其是矿物成分中含黏土矿物比例较高的岩石, 其遇水软化、膨胀、崩解等特性会严重影响围岩的稳定性, 正是基于这一认识, 水对岩石蠕变特性的影响也越来越受到研究者的关注^[22-26]。对于含节理、裂隙、层理等结构面的岩体, 水对结构面的劣化作用则远大于其对岩石内部的矿物组分的影响, 因此水对含结构面岩体的蠕变特性影响也更为显著, 目前尚未见这方面的研究。

本次室内钻取 4 种层理角度页岩, 一组不含层理页岩, 将每种含层理页岩通过浸水处理制作成干燥、自然、不饱水、饱水 4 种含水状态层理页岩, 对处理过的试件进行单轴压缩蠕变试验, 研究不同层理、不同含水状态下页岩的蠕变特性, 建立了相应的蠕变模型, 以描述层理和水作用下页岩的蠕变变形规律。

2 试件制备及试验过程

2.1 试件制备过程

试样取自重庆南川马嘴隧道, 系志留系下统龙马溪组页岩, 呈黄灰色、黑色, 页理状构造。现场

选取隧道内同一掌子面完整新鲜岩块带回实验室进行取芯。取芯前先将现场带回的岩块在切割机上切割成如图 1 所示的水平层理长方岩体, 再用 SC-300 型自动取芯机进行取芯。取芯机可调整钻取速度, 由于页岩取芯率较低, 钻取速度不宜过高, 一般取 2 mm/min。取芯时钻头钻取方向分别与岩块层面呈 0°、30°、60°、90°夹角以分别得到层理角度为 90°、60°、30°、0°, 直径为 50 mm 的岩芯, 另选取现场层理较厚的岩块钻取一组不含层理的岩芯作为对比。取芯后对试件进行分组摆放并切割打磨, 最后加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 试件, 两端面平行度 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。试样制备过程及制取的试样见图 1。

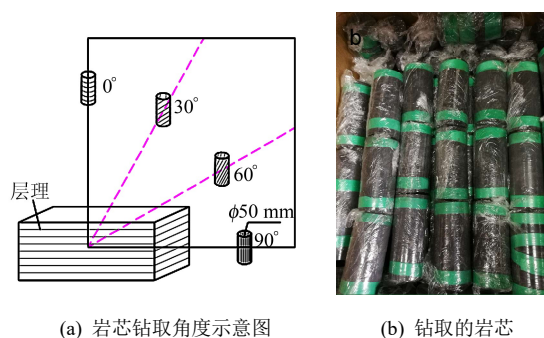


图 1 含层理页岩取芯过程
Fig.1 Core taking process of bedding shale

将试件分组分别作如下处理: ① 烘干机内 105℃下烘 24 h 作为烘干岩样。② 自然晾干作为天然岩样。③ 烘干机内 105℃下烘 24 h 后在水中浸泡 48 h 作为不饱水岩样。④ 烘干机内 105℃下烘 24 h 后在水中浸泡 120 h 作为饱水岩样。处理后测得上述 4 种情况的试件平均含水率 ω 分别为 0%、1.8%、2.7%、3.4%。

2.2 试验方案

岩石的蠕变试验加载方式可分为加载和分级加载两种, 分别加载能直接得到岩样的蠕变全过程曲线, 但需要保证仪器、试验条件、试件等条件完全相同, 在实际操作中往往难以做到。分级加载是对同一试件加载不同级别的应力, 既能保证试件性质的均匀性又能节省大量的时间, 本次试验采取分级加载的方式。

Griggs 于 1939 年对灰岩、页岩和砂岩等岩石进行了一系列蠕变试验, 认为岩石在荷载达到其抗压强度的 12.5%~80.0%时就发生蠕变^[2]。本次试验根据单轴压缩试验所得的结果, 将第一级荷载设定为 $10\% \sigma_c$, 后按 $20\% \sigma_c$ 、 $30\% \sigma_c$ 、 $40\% \sigma_c$... 的比例分级加载。加载至高应力阶段, 蠕变轴向变量大于 0.001 mm/h 时下一应力级别按提高 $5\% \sigma_c$ 进行加

载。各级荷载持续时间不小于 12 h 且当应变增量小于 0.001 mm/h 时, 认为该级荷载所产生的蠕变已基本稳定。每级荷载加载速率为 30 N/s , 加载过程中数据采集频率为 100 次/分钟, 加载后 30 min 内 1 次/分钟, 之后 0.1 次/分钟。试验在 RLW-2000 M 微机控制煤岩流变仪上进行, 见图 2。



图 2 RLW-2000 M 微机控制煤岩流变仪

Fig.2 RLW-2000 M coal and rock computer-controlled rheological testing machine

3 试验结果

3.1 层理角度对页岩蠕变规律影响

为分析定含水率下层理角度对页岩的蠕变特

性的影响, 各含水率下不同层理页岩的轴向应变-时间曲线如图 3 所示。页岩在加载瞬间即产生瞬时弹性变形, 瞬时弹性变形是页岩在轴向荷载作用下轴向压缩变形的结果, 对于不含层理的页岩主要是岩石内部矿物颗粒及原生微孔隙、裂隙压实的结果。对于含层理页岩则还包括层理面的压密和闭合, 瞬时弹性应变与页岩含层理与否及层理角度密切相关, 试件初始瞬时弹性应变随角度变化规律如图 4 所示。从图中可以看出, 层理角度越大, 页岩的初始瞬时弹性模量越小。以自然含水状态页岩为例, 0° 层理页岩的初始瞬时弹性应变最大, 为 0.4512×10^{-2} , 不含层理页岩的初始瞬时弹性应变最小, 为 0.0358×10^{-2} 。 30° 层理页岩的初始瞬时弹性应变为 0.1969×10^{-2} , 相比 0° 页岩减小了 56.36%, 60° 层理页岩的初始瞬时弹性应变为 0.1122×10^{-2} , 相比 30° 页岩减小了 43.02%, 90° 层理页岩的初始瞬时弹性应变为 0.0481×10^{-2} , 与不含层理页岩相比增加了 25.57%, 因此可以通过对比含层理页岩与不含层理页岩的初始瞬时弹性应变分析层理面的压密、闭合对弹性变形的贡献率, 如自然含水状态下 0° 、 30° 、 60° 、 90° 页岩相对不含层理页岩的初始瞬时弹性应变分别增加了 92.07%、81.82%、68.09%、25.57%,

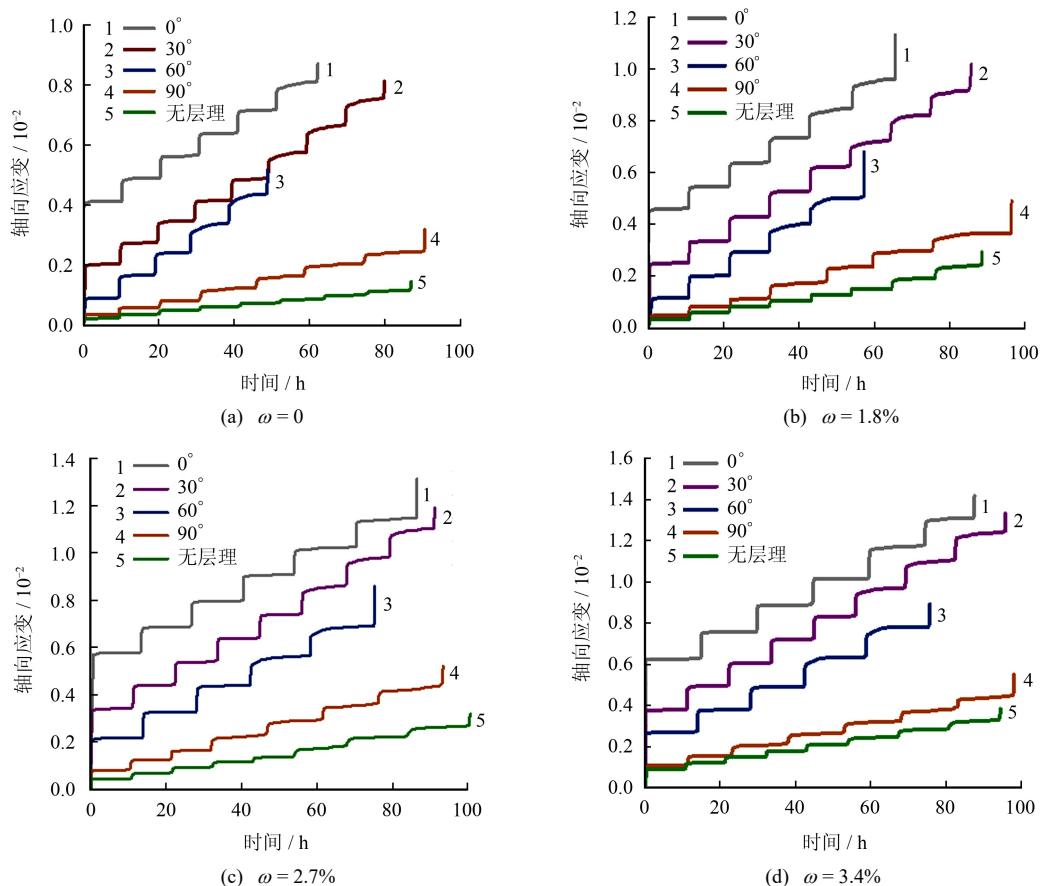


图 3 定含水率不同层理页岩应变-时间曲线

Fig.3 Strain-time curves of shale with different beddings and same water content

可以认为该增加比例是对层理面压密的结果。

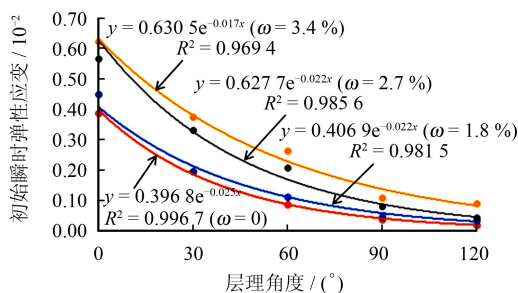


图4 页岩初始瞬时弹性应变-层理角度拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of initial instantaneous elastic strain and stratification angle of shale

同一含水状态下不同层理页岩在各级应力水平下的瞬时弹性应变与加载应力水平大致呈线性关系,以自然含水状态页岩为例,其瞬时弹性应变-应力水平曲线如图5所示。各层理页岩的线性拟合方程相关系数均在0.9以上,表明瞬时弹性应变与应力水平线性相关性较好。通过该线性拟合方程可以看出,不同角度页岩的瞬时弹性应变随应力水平的增值速率不同,30°和60°页岩的拟合方程斜率分别为1.141 5和1.154 7,瞬时弹性应变随应力水平的增长速率最快,而不含层理页岩拟合方程的斜率为0.275 9,增长速率最慢,这说明层理面倾角与试件的破裂角越相近,其瞬时弹性应变随应力水平的增长速率越快。

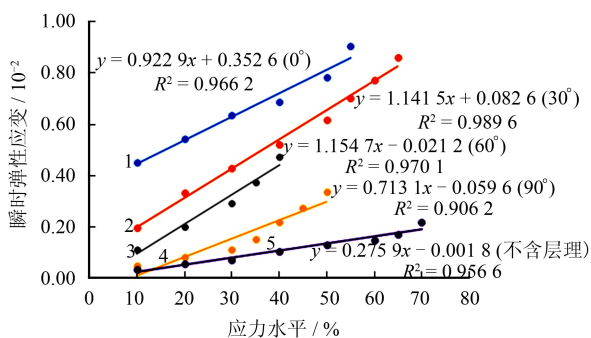


图5 自然含水页岩瞬时弹性应变-应力水平拟合曲线

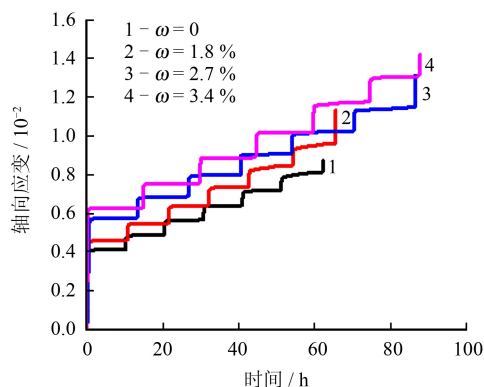
Fig.5 Fitting curves of instantaneous elastic strain-stress level of natural water bearing shale

对比图3中不同层理页岩在各级应力水平下所经历的总蠕变时间发现,60°页岩总历时最短,90°或不含层理页岩总历时最长,仍以自然含水状态页岩为例,60°页岩从加载开始至最终发生脆性破坏共用时57.30 h,而90°页岩的用时则为96.48 h。

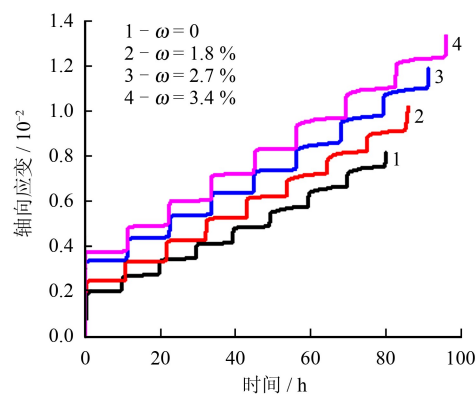
3.2 含水率对页岩蠕变规律影响

定层理角度不同含水率页岩的应变与时间曲线如图6所示。从图中可以看出,含水率越高,页岩的初始瞬时弹性应变越大,这一点也可以通过图4发现,0°页岩在4种含水率下的初始瞬时弹性应变分别为 $0.388 6 \times 10^{-2}$ 、 $0.451 1 \times 10^{-2}$ 、 $0.568 7 \times 10^{-2}$

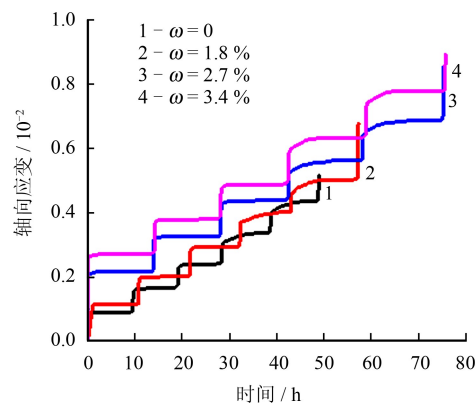
岩的初始瞬时弹性应变越大,这一点也可以通过图4发现,0°页岩在4种含水率下的初始瞬时弹性应变分别为 $0.388 6 \times 10^{-2}$ 、 $0.451 1 \times 10^{-2}$ 、 $0.568 7 \times 10^{-2}$



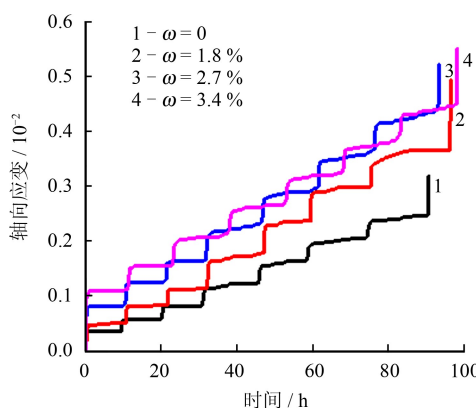
(a) 层理角度 0°



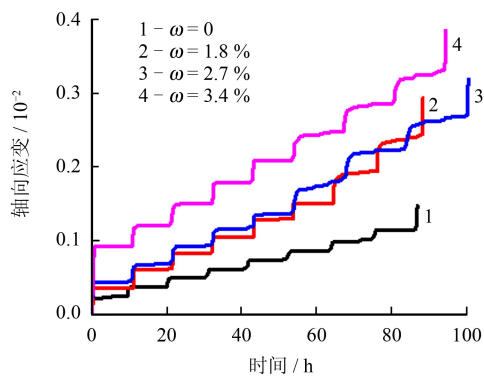
(b) 层理角度 30°



(c) 层理角度 60°



(d) 层理角度 90°



(c) 不含层理

图 6 定层理角度不同含水率页岩蠕变-时间曲线
Fig.6 Creep strain-time curves of shale with different water contents and same bedding

和 0.623×10^{-2} , 近似呈线性增长, 对不同层理角度的初始瞬时弹性应变随含水率的变化规律进行拟合如图 7 所示。从图中可以看出, 各角度层理页岩的初始瞬时弹性应变均随含水率的增加而线性增长, 其拟合方程分别为 $y = 0.07x + 0.03697$, $y = 0.0548x + 0.1671$, $y = 0.0515x + 0.0670$, $y = 0.0208x + 0.0279$, $y = 0.0178x + 0.0127$ 。分析其相关系数不难发现, 相关系数在 $0.73 \sim 0.92$ 间浮动, 并非所有角度的页岩均表现出较高的相关性。对比 4 种含水状态页岩的初始瞬时弹性应变可知, 其在由自然含水状态向不饱水状态过渡时变化幅度是最大的, 之后在由不饱水向饱水过渡时变化幅度明显减小, 因此页岩的初始瞬时弹性应变增长幅度是一个先增加后减小的过程, 其变形曲线应大致符合负指数或对数增长方式, 由于本次试验只考虑了 4 种含水率情况, 数据较少, 未能精确地拟合出相关性较高的拟合方程。

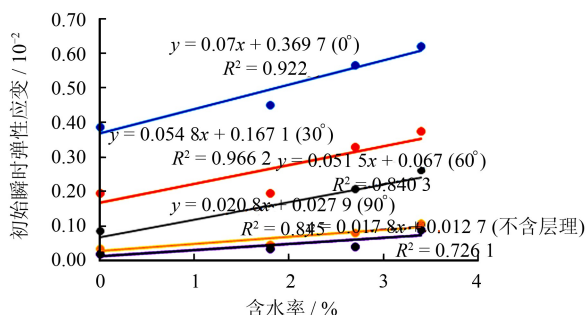


图 7 页岩初始瞬时弹性应变-含水率拟合曲线
Fig.7 Fitting curves of initial instantaneous elastic strain-water content of shale

页岩的瞬时弹性应变在各级应力水平下均随含水率的增加而增加, 以 30° 页岩为例, 其在不同含水状态下瞬时应变与加载应力等级曲线如图 8 所示。随应力水平的增加, 任意含水状态下 30° 页岩

的瞬时应变变量近似呈指数函数增长, 且含水率越高, 各级的瞬时应变变量越大。

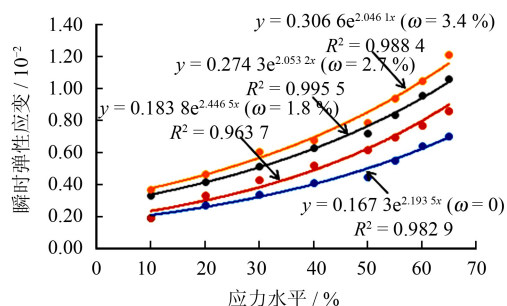


图 8 30° 含水页岩瞬时弹性应变-应力水平拟合曲线
Fig.8 Fitting curves of instantaneous elastic strain-stress level of 30 degree shale with water

4 页岩蠕变模型建立

4.1 页岩蠕变模型

从章节 3.1、3.2 中页岩的应变-时间曲线可以发现, 页岩蠕变具有如下特点: (1) 页岩在各级应力水平下均产生瞬时弹性应变, 页岩的蠕变模型中应含有反映瞬时弹性变形的弹性元件。(2) 从应变-时间曲线可以看出, 在应力加载结束保持稳定后, 试件的应变速率随时间的增加出现逐渐减小的现象, 页岩的蠕变模型应能反映减速蠕变的特点。减速蠕变又可通过开尔文体来实现, 该模型中应包含开尔文体。(3) 由应变-时间曲线可知, 在恒定应力水平条件下试件的变形有随着时间的增加而增加的趋势, 并且变形速率逐渐趋于稳定, 故蠕变模型中还应包含反映稳定蠕变的黏性元件。

综上分析, 本文选用伯格模型 (见图 9) 反映页岩的蠕变情况, 伯格模型由马克斯威尔模型 (Maxwell) 和开尔文模型 (Kelvin) 串联而成, 具有 4 个流变参数: E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 , 其中 E_1 、 E_2 分别为两弹性元件的弹性模量, η_1 、 η_2 分别为两黏性元件的黏滞系数。

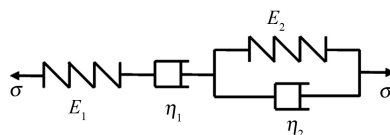


图 9 蠕变模型
Fig.9 Model of creep

模型总应变:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (1)$$

瞬时弹性应变:

$$\varepsilon_1 = \sigma / E_1 \quad (2)$$

黏性应变速率:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \sigma / \eta_1 \quad (3)$$

开尔文体应变:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_2} - \frac{\eta_2}{E_2} \dot{\varepsilon}_3 \quad (4)$$

联立式 (1) ~ (4) 得该模型的本构方程:

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon} \quad (5)$$

式中: $\dot{\sigma}$ 、 $\ddot{\sigma}$ 分别为应力对时间 t 的一次求导和二次求导; $\dot{\varepsilon}$ 、 $\ddot{\varepsilon}$ 分别为应变对时间 t 的一次求导和二次求导。

求解式 (5) 即可得模型的蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (6)$$

4.2 模型参数的确定

蠕变模型参数的确定较为复杂, 目前较为常用的方法是根据试验数据进行曲线拟合, 很多商业软件, 如 Excel、Origin、Matlab 等都提供了较为强大的拟合功能或拟合工具包, 通过这些软件对蠕变模型参数进行回归分析, 本文应用 Matlab 的拟合工具对模型参数进行反演。由于试件较多, 不同角度层理的应力加载水平也不同, 只列出 60°干燥页岩的蠕变参数反演结果, 见表 1。

表 1 60°干燥页岩的蠕变参数反演结果

Table 1 Inversion results of creep parameters of 60 degree dry shale

应力水平 /MPa	模型参数				相关 系数 R^2
	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·h)	η_2 /(MPa·h)	
2.20	31.01	118.69	26 487.62	43.44	0.991
4.40	42.79	73.11	7 609.59	3.10	0.984
6.60	30.68	277.58	26 588.07	64.75	0.897
7.70	25.61	189.05	31 787.76	68.55	0.951
8.80	21.91	288.90	13 963.37	78.98	0.982

为了验证上述模型及其参数的合理性, 将试验数据与理论模型结果进行对比如图 10 所示。

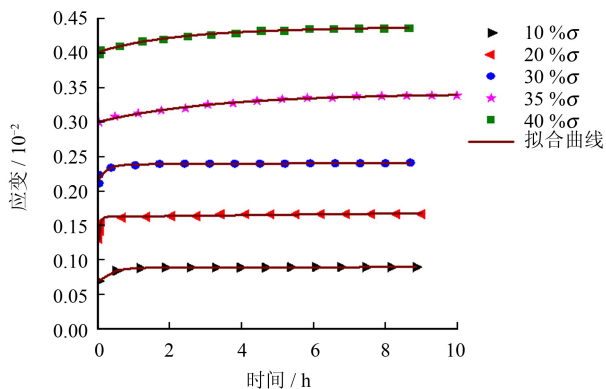


图 10 蠕变模型与试验结果对比

Fig.10 Comparison of creep model and experimental results

从图中可以看出, 二者吻合效果较好, 说明上述模型能够很好地描述页岩的蠕变特征。

5 含层理角度和含水率的蠕变模型

根据章节 3.1、3.2 的分析, 页岩的弹性变形受层理角度和含水率影响较为显著, 需在蠕变模型中体现出层理和水的影响。通过试验所得瞬时弹性模量与层理角度、含水率的拟合关系可以将层理和水的影响反映到蠕变模型参数中。由于试验试件较多, 这里只以自然含水和 30°页岩为例分析其拟合结果。自然含水页岩的瞬时弹性模量与层理角度的拟合曲线如图 11 所示。由于不同层理页岩的加载路径不同, 只对应力水平为 10%σ、20%σ、30%σ、40%σ、50%σ 几组数据进行拟合, 可见各级瞬时弹性模量与层理角度近似呈指数关系, 则可以将二者的关系表达为

$$E(\beta) = ae^{b\beta} \quad (7)$$

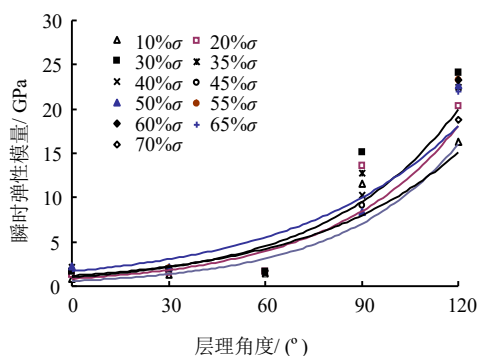


图 11 自然含水页岩瞬时弹性模量与层理角度拟合曲线

Fig.11 Fitting curves of instantaneous elastic modulus and bedding angle of natural water bearing shale

30°页岩在各级荷载下的瞬时弹性模量与含水率的拟合曲线如图 12 所示。从图中可以看出, 各应力水平下的瞬时弹性模量均随含水率的增加而线性减小, 因此可以将瞬时弹性模量 $E(\omega)$ 与含水率 ω 的关系通过线性关系式表达:

$$E(\omega) = c\omega + d \quad (8)$$

式中: c 、 d 为拟合系数。

此处认为试件的弹性模量对层理角度和含水率的响应是相互独立的, 忽略二者之间的耦合作用, 同时考虑层理角度和含水率对试件弹性模量的影响程度, 可得瞬时弹性模量与层理角度和含水率的关系:

$$E_1 = eE(\beta) + fE(\omega) = ae^{b\beta} + cf\omega + fd \quad (9)$$

式中: e 、 f 分别为层理角度、含水率对弹性模量

的贡献率, 并且 $0 < e, f < 1$ 。

令 $A = ae$, $B = cf$, $C = fd$, 则

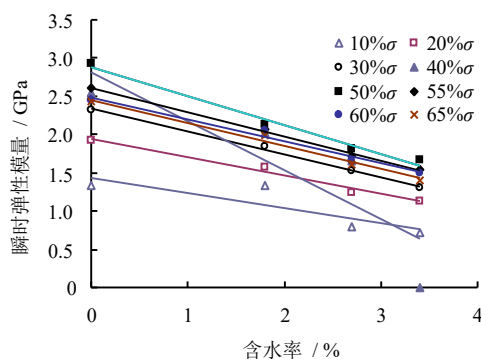


图 12 30°页岩瞬时弹性模量与含水率拟合曲线

Fig.12 Fitting curves of instantaneous elastic modulus and moisture content of shale with 30 degree bedding

$$E_t = Ae^{b\beta} + B\omega + C \quad (10)$$

由式 (3) 可知, 岩石的蠕变速率与其黏性系数 η_1 成反比, 因此可以通过页岩的蠕变速率与层理、水的关系来求得黏性系数 η_1 与二者的关系式。图 13 为自然含水状态下页岩的蠕变速率与层理角度的拟合曲线, 图中仍只对应力水平为 10%σ、20%σ、30%σ、40%σ、50%σ 几组数据进行拟合。

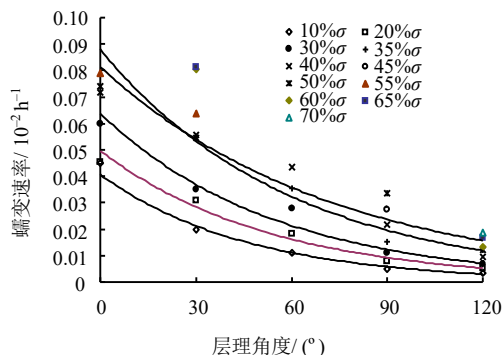


图 13 自然含水页岩蠕变速率与层理角度拟合曲线

Fig.13 Fitting curves of creep strain rate and bedding angle of natural water bearing shale

从图 13 中可以看出, 页岩蠕变速率与层理角度呈指数关系, 30°页岩的蠕变速率与含水率的拟合曲线如图 14 所示。从图中可以看出, 页岩的蠕变速率随含水率的增加而线性增加。类似式 (10) 的推导过程, 可得黏性系数 η_1 的表达式:

$$\frac{1}{\eta_1} = De^{m\beta} + E\omega + F \quad (11)$$

将式 (10) 和式 (11) 代入式 (6) 即可得能够

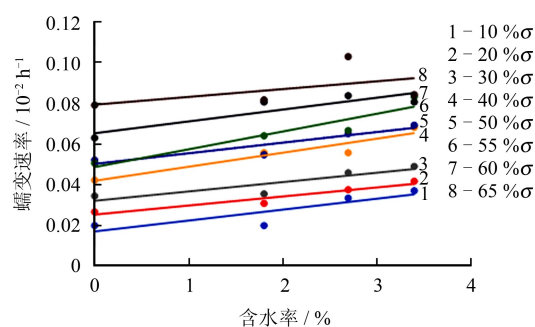


图 14 30°页岩蠕变速率与含水率拟合曲线

Fig.14 Fitting curves of creep strain rate and moisture content of shale with 30 degree bedding

反映出层理和含水率的影响的蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{Ae^{b\beta} + B\omega + C} + \sigma(De^{m\beta} + E\omega + F)t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) \quad (12)$$

6 结 论

(1) 层理角度和含水率对页岩的蠕变特性均有较大影响, 同一含水率下层理角度越大, 页岩的瞬时弹性应变越小, 瞬时弹性模量越大, 且瞬时弹性模量与层理角度的关系服从指数函数分布。相同层理角度下含水率越高, 页岩的瞬时弹性应变越大, 瞬时弹性模量越小, 且瞬时弹性模量与含水率的关系服从线性函数分布。

(2) 页岩在恒定应力水平下的蠕变具有瞬时弹性变形、衰减蠕变和等速蠕变三方面的性质, 采用伯格斯蠕变模型对描述单轴压缩下的层状页岩的蠕变情况, 通过试验数据对伯格斯模型中的参数进行了反演及验证, 结果表明运用伯格斯模型对本文的蠕变进行描述是可靠的。

根据试验所得层理和水对页岩蠕变变形的影响规律, 通过瞬时弹性模量和黏性系数与层理角度和含水率的拟合关系, 将蠕变模型中的瞬时弹性模量和黏性系数替换为层理倾角和含水率的函数, 从而构建了能够反映页岩层理和含水率的蠕变模型。

参 考 文 献

- [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 applications[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081—1 106.
- [2] GRIGGS D T. Creep of rocks[J]. **Journal of Geology**, 1939, 47(3): 225—251.
- [3] 熊诗湖, 周火明, 钟作武. 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.
- XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming, ZHONG Zuo-wu. Study of methodology of plate-loading creep test of rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28 (10): 2121—2127.
- [4] SONE H, ZOBACK M D. Time-dependent deformation of shale gas reservoir rocks and its long-term effect on the in situ state of stress[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 69: 120—132.
- [5] BRANTUT N, HEAP M J, MEREDITH P G, et al. Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review[J]. **Journal of Structural Geology**, 2013, 52: 17—43.
- [6] CHANG C, ZOBACK M D. Viscous creep in room-dried unconsolidated Gulf of Mexico shale (II): Development of a viscoplasticity model[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2010, 72 (1-2): 50—55.
- [7] TSANG C F, STEPHANSSON O, JING L, et al. DECOVALEX project: from 1992 to 2007[J]. **Environmental Geology**, 2009, 57(6): 1221—1237.
- [8] CHANG C, ZOBACK M D. Viscous creep in room-dried unconsolidated Gulf of Mexico shale(I): Experimental results[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2009, 69(3-4): 239—246.
- [9] 冒海军, 杨春和, 刘江, 等. 板岩蠕变特性试验研究与模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1204—1209.
- MAO Hai-jun, YANG Chun-he, LIU Jiang, et al. Testing study and modeling analysis of creep behavior of slates[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1204—1209.
- [10] 朱杰兵, 汪斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4552—4556.
- ZHU Jie-bing, WANG Bin, YANG Huo-ping, et al. Experimental study on rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 4552—4556.
- [11] NADIMI S, SHAHRIAR K, SHARIFZADEH M, et al. Triaxial creep tests and back analysis of time-dependent behavior of Siah Bisheh cavern by 3-dimensional distinct element method[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26(1): 155—162.
- [12] 张忠亭, 罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 218—222.
- ZHANG Zhong-ting, LUO Ju-jian. Study on creep properties of rock under step load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 218—222.
- [13] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 37—40.
- DING Zhi-kun, LÜ Ai-zhong. Parameter identification of non-stationary creep equation of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.): 37—40.
- [14] 沈振中, 徐志英. 三峡大坝地基花岗岩蠕变试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1997, 25(2): 1—7.
- SHEN Zhen-zhong, XU Zhi-ying. Creep test of granite for three Gorges dam foundation[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 1997, 25(2): 1—7.
- [15] 沈明荣, 朱根桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223—226.
- SHEN Ming-rong, ZHU Yin-qiao. Test study on creep characteristics of regular teeth-shaped structure faces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 223—226.
- [16] 杨松林, 张建民, 黄启平. 节理岩体蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1225—1228.
- YANG Song-lin, ZHANG Jian-min, HUANG Qi-ping. Analysis of creep model of jointed rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1225—1228.
- [17] 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.
- HAN Geng-you, WANG Si-jing, ZHANG Xiao-ping, et al. Study of creep properties of thinly laminated rock under step loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(11): 2239—2247.
- [18] 肖明砾, 卓莉, 谢红强, 等. 三轴压缩蠕变试验下石英云母片岩各向异性蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 2): 73—80.
- XIAO Ming-li, ZHUO Li, XIE Hong-qiang, et al. Anisotropic rheological properties of quartz-mica schist under triaxial compression creep test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.2): 73—80.
- [19] DUBEY R K, GAIROLA V K. Influence of structural anisotropy on creep of rocksalt from Simla Himalaya, India: An experimental approach[J]. **Journal of Structural Geology**, 2008, 30(6): 710—718.
- [20] 熊良宵, 杨林德, 张尧. 绿片岩的单轴压缩各向异性蠕变试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 1568—1574.
- XIONG Liang-xiao, YANG Lin-de, ZHANG Yao. Anisotropic creep test of greenschist under uniaxial compression[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2010, 38(11): 1568—1573.
- [21] 吴创周, 石振明, 付昱凯, 等. 绿片岩各向异性蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 493—499.
- WU Chuang-zhou, SHI Zhen-ming, FU Yu-kai, et al. Experimental investigations on structural anisotropy on creep of greenschist[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 493—499.
- [22] 杨彩红, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 698—702.
- YANG Cai-hong, WANG Yong-yan, LI Jian-guang, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(7): 695—699.
- [23] 杨红伟, 许江, 彭守建, 等. 孔隙水压力分级加载砂岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 26(增刊 2): 365—370.
- YANG Hong-wei, XU Jiang, PENG Shou-jian, et al. Study of sandstone creep characteristics under stepwise loading pore water pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 26(Supp.2): 365—370.
- [24] 黄小兰, 杨春和, 刘建军, 等. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3477—3482.
- HUANG Xiao-lan, YANG Chun-he, LIU Jian-jun, et al. Experimental study on mudstone's creep behavior under different water contents and its effect on casing damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.2): 3477—3482.
- [25] 王俊光, 梁冰, 田蜜. 含水状态下油页岩非线性损伤蠕变特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1): 112—118.
- WANG Jun-guang, LIANG Bing, TIAN Mi. Study of creep characteristics produced by nonlinear damage of oil shale in hydrous state[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2014, 29(1): 112—118.
- [26] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1248—1256.
- JIANG Hai-fei, LIU Dong-yan, HUANG Wei, et al. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1248—1256.