

干燥和饱水炭质板岩流变力学特性与模型研究

宋勇军¹, 雷胜友²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 水是影响岩石流变力学性质的重要因素。采用分级加载方式, 对兰渝铁路木寨岭二期隧道炭质板岩开展干燥与饱水状态下的单轴蠕变试验。结果表明: 饱水岩样的蠕变量和蠕变速率远大于干燥岩样的相应值, 相同应力水平下的蠕变应变可达到干燥岩样的3倍以上, 进入稳定蠕变阶段也需要更长的时间。分析岩石的蠕变规律, 通过在 Burgers 流变模型上串联一个非线性粘塑性体, 提出改进的非线性损伤流变模型, 推导其一维和三维蠕变方程。并对流变模型参数辨识方法进行改进, 采用线性递减权重粒子群算法(PSO)和 Levenberg-Marquid 非线性最小二乘法相结合的方法对试验结果进行参数辨识, 结果表明该模型能够很好地描述炭质板岩在不同应力水平下的蠕变特性。

关键词: 炭质板岩; 干燥和饱水状态; 非线性流变模型; 参数辨识

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0095-06

Study on rheological mechanical properties and model of carbonaceous slates under dry and saturated states

SONG Yongjun¹, LEI Shengyou²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Water is an essential factor to rheological mechanical properties of rock. Creep tests were performed to study the rheological properties of carbonaceous slates in wooden village ridge tunnel of Lan-Yu Railway in dry and saturated state by step load method. The test results indicated that the creep strain and the creep rate of saturated specimens was larger than dry specimens under the same stress level, and its deformation was more than 3 times to dry specimens, and for it get into the stable creep stage also need longer time. Based on the creep characteristics of rock under dry and saturated states, a modified nonlinear damage rheological model is obtained by connecting a nonlinear visco-plastic body with the classical Burgers model in series. Meanwhile, 1D and 3D creep equation for rocks is deduced. Furthermore, the rheological model parameter identification method is improved, combined with linear decreasing weight particle swarm optimization (PSO) and Levenberg-Marquid (L-M) nonlinear least squares method. The fitted results of the test data showed that nonlinear rheological model can effectively describe the creep characteristics of carbonaceous slates under different stress levels.

Key words: carbonaceous slates; dry and saturated; nonlinear rheological model; identification of parameter

近年来,越来越多的岩石工程逐渐向地下深处发展,地下水对岩石工程的长期稳定性的影响越来越突出。地下硐室的开挖支护引起的围岩应力变化致使岩体损伤直至产生裂隙,导致岩体渗流路径的增加,使得围岩体遇水弱化,弱化的岩体在裂隙水作用下进一步产生更大的裂隙,如此往复,随着时间的推移,在一定的条件下甚至会引发围岩失稳、大坝溃坝等重大工程事故。研究表明,水是影响岩石流变特性的重要影响因素^[1]。岩体工程的长期稳定性不仅取决于应力作用下岩石的流变力学响应,还应考虑水环境对流变过程的影响效应。国内外学者在该方面进行了大量的研究,并取得了一定的研

究成果^[2-10]。然而目前对水环境下岩石流变力学特性以及流变模型的研究还比较少见。同时由于岩石种类繁多,不同类别岩石的力学性质差异很大,对炭质板岩在水环境下流变力学特性的研究还较少。

兰渝铁路二期木寨岭隧道洞身通过炭质板岩区,板岩及炭质板岩段合计长8 850 m,占隧道全长的46.53%。炭质板岩岩体层理发育,富含裂隙水,遇水易软化,围岩稳定性较差,极易产生大变形且局部易垮塌^[11]。本文通过对炭质板岩进行干燥和饱水状态下的分级加载单轴蠕变试验,尝试研究炭质板岩在不同含水状态下的流变力学特性,进而构建一个适于炭质板岩流变特性的非线性流变模型;并

收稿日期: 2015-02-05

修改稿日期: 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(11402195); 陕西省教育厅科学研究计划项目(14JK1480); 西安科技大学博士科研启动金(2014QDJ080)

作者简介: 宋勇军(1979—), 博士, 博士后, 讲师, 主要从事岩石力学方面的教学和研究工作。E-mail: songyj79@163.com

在现有算法的基础上对流变模型参数辨识方法进行改进,并应用于炭质板岩的流变参数辨识。

1 蠕变试验与分析

(1) 岩样制备: 岩块按照国际岩石力学学会试验规程加工和制备岩样. 岩样为 $\phi \times h = 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体. 制备完毕后放入烘干机内, 在 $105 \sim 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温下烘烤 24 h 作为干燥岩样; 饱水岩样的制备, 首先淹没试样高度的 $1/4$, 然后每隔 2 h 分别升高水面至试样高度的 $1/3$ 和 $1/2$ 处, 6 h 后全部浸没试样, 再采用真空抽气法强制饱和。

(2) 试验设备: 单轴分级加载蠕变试验是在 RLW-1 000 kN 岩石三轴伺服流变仪上完成的, 试验在恒温恒湿条件的流变实验室内进行, 室温控制在 $(25 \pm 0.5) \text{ }^{\circ}\text{C}$. 按照设定的加载应力, 分别对干燥和饱和岩样加载至某一应力水平, 待试样蠕变进入稳态蠕变阶段或变形趋于稳定时再加下一级荷载。

(3) 蠕变试验数据: 图 1 为炭质板岩在干燥和饱水情况下炭质板岩单轴分级加载蠕变试验曲线, 图中数字为加载应力水平。

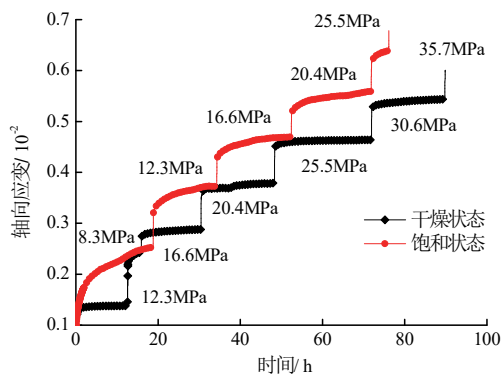


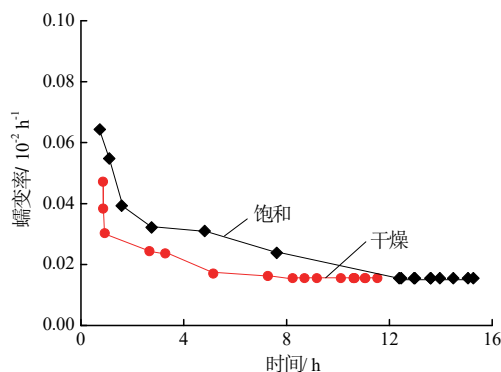
图 1 干燥和饱水岩样单轴蠕变曲线

Fig. 1 Uniaxial creep curves under dry and saturated states

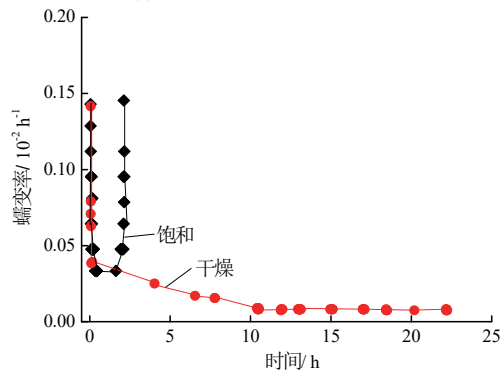
由图 1 可以看出, 每级应力加载瞬时, 岩石产生瞬时变形, 随后产生随时间逐渐增大的蠕变变形. 在相对较低的应力水平下, 蠕变变形的速率随时间而逐渐趋缓, 经过一定时间后, 蠕变变形逐渐趋于稳定. 同时可见, 在相同的应力水平下饱水岩样的蠕变量远大于干燥岩样的蠕变量. 比如, 在 12.3 MPa 加载应力下, 2 种状态下的蠕变曲线均较平稳, 干燥岩样加载后 2 h 岩样蠕变进入稳定状态, 该级应力下的蠕变应变量很小, 只有 0.015% . 而饱水试样直至 12 h 以后蠕变量才趋于平稳. 蠕变应变量也比干燥岩样大得多, 达到 0.052% , 约为干燥岩样的 3 倍以上. 这说明水对岩石蠕变变形的影响是很显

著的, 水极大地增强了岩石的时效蠕变特性. 在 25.5 MPa 加载应力下, 干燥岩样蠕变曲线经历衰减蠕变阶段后逐渐趋于稳定. 而饱水试样在短时间内历经衰减蠕变、稳态蠕变阶段进入加速蠕变阶段, 在不到 0.3 h 的时间内蠕变变形迅速增大, 直至岩样破裂. 可见水对岩石蠕变变形的影响不仅在于增大蠕变变形, 还能够降低蠕变破坏强度。

图 2 给出了加载应力 12.3 MPa 和 25.5 MPa 下的蠕变速率曲线. 干燥试样蠕变速率在很短的时间内迅速降低, 很快进入稳态蠕变阶段, 而饱和试样则要经过较长的时间才逐渐进入稳态蠕变阶段, 而且干燥状态下岩石的蠕变速率要小于饱水状态. 当加载应力增加至 25.5 MPa 时, 饱水岩样蠕变速率历经迅速降低、维持稳定和迅速增大至破坏 3 个阶段, 分别对应于岩石蠕变的衰减、稳态和加速蠕变阶段, 而干燥岩样却只出现了衰减和稳态蠕变 2 个阶段, 充分说明了水对岩石长期强度降低的影响。



(a) 12.3 MPa 时蠕变速率曲线



(b) 25.5 MPa 时蠕变速率曲线

图 2 两种状态蠕变速率曲线

Fig. 2 Uniaxial creep rate curves under dry and saturated states

2 非线性流变模型的建立

根据两种状态下的炭质板岩蠕变试验结果可知, 炭质板岩的蠕变曲线具有如下特征:

(1) 岩样在每级应力加载后立即产生瞬时

变, 因而流变模型中应有弹性元件.

(2) 随着时间的推移, 炭质板岩应变量逐渐增大. 但干燥和饱水状态岩石的蠕变曲线存在一定的差异, 干燥状态下岩石蠕变变形经历衰减蠕变阶段后逐渐趋于稳定, 而饱水状态下岩石呈现出衰减蠕变和稳态蠕变 2 个阶段, 流变模型中应包含粘性元件. 不同状态下流变模型应体现出这种差异, 可将干燥状态下流变模型中粘性元件的粘滞系数设置为较大值.

(3) 饱水状态下当应力水平较高时, 岩石变形呈非线性急剧增长, 出现加速蠕变阶段特征.

可见, 岩石在低应力条件下可用 Burgers 流变模型描述炭质板岩的蠕变特性, 但是高应力状态下饱水炭质板岩表现出加速蠕变特性, 由于 Burgers 模型不能描述该现象, 需对其进行改进. 根据试验可知, 当应力水平高于岩石长期强度时, 岩石呈现出非线性加速蠕变现象, 可通过采用非线性粘塑性元件描述这一现象. 按照损伤力学理论, Kachanov 定义有效应力^[12]:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (1)$$

定义岩石内部损伤变量为^[13]:

$$D = \begin{cases} 1 - e^{-(t-t^*)^n} & (t > t^*) \\ 0 & (t \leq t^*) \end{cases} \quad n > 0 \quad (2)$$

式中: D 为损伤变量; t 为流变时间; n 为常数; t^* 为试样进入非线性加速流变的起始时刻.

当时间 $t \leq t^*$ 时, 岩石试样处于稳态流变阶段, 此时损伤因子 D 趋近于 0; 当 $t > t^*$ 时, 岩样经历稳态流变阶段后进入非线性加速流变阶段, 此时, 损伤变量 D 随时间 t 逐渐增长而趋近于 1. 在 Burgers 流变模型的基础上, 通过串联一个非线性损伤粘塑性元件, 得到能反映炭质板岩三阶段蠕变特性的改进 Burgers 非线性流变模型如图 3 所示, 模型中 σ_∞ 为岩石的长期强度.

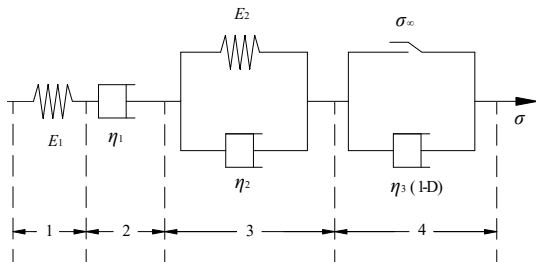


图 3 非线性流变模型

Fig. 3 The nonlinear rheological model

2.1 一维蠕变方程

当加载应力 $\sigma \leq \sigma_\infty$ 时, 模型第 4 部分不起作用, 该模型退化为 Burgers 流变模型, Burgers 模型的一维蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (3)$$

当加载应力 $\sigma > \sigma_\infty$, $t \leq t^*$ 时, 该模型中非线性损伤变量不起作用, 相应的状态方程为

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 = \sigma_\infty + \eta_3 \dot{\varepsilon}_4 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \\ \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 + \dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ 为应力; ε 为模型总应力和应变; E_1 , E_2 为材料的弹性参数; η_1 , η_2 , η_3 为材料的黏性参数.

根据叠加原理^[14]可得相应的一维蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_\infty}{\eta_3} t \quad (5)$$

当加载应力 $\sigma > \sigma_\infty$, $t > t^*$ 时, 模型各部分及损伤变量均起作用, 相应的状态方程为

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 = \sigma_\infty + \eta_3 (1-D) \dot{\varepsilon}_4 = \sigma_\infty + \eta_3 e^{-(t-t^*)^n} \dot{\varepsilon}_4 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \\ \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 + \dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行相应的拉普拉斯变换及其逆变换, 可得相应的一维蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma - \sigma_\infty}{\eta_3} e^{-(t-t^*)^n} t \quad (7)$$

2.2 三维蠕变方程

通常情况下, 岩石在实际工程中处于复杂的三维应力状态, 因而, 建立岩石在三维应力状态下的蠕变本构方程具有重要意义. 在推导三维应力状态下的蠕变本构关系时, 一般仿照弹性理论的方法, 并需符合以下假定^[15]: 材料的体积变形为弹性变形, 且与时间因素无关, 即在加载瞬间完成; 球应力张量不会引起岩石蠕变, 只有应力偏张量才能产生蠕变变形; 在蠕变过程中, 泊松比 ν 不随时间的推移发生改变. 对于三维应力状态下的胡克体:

$$\sigma_m = 3K\varepsilon_m, \quad S_{ij} = 2G_1 e_{ij} \quad (8)$$

式中: G_1 为弹性剪切模量, K 为体积模量.

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E_1}{3(1-2\nu)}$$

因而, 弹性体的应变可以表示为:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \quad (9)$$

其中, δ_{ij} 为 Kronecker 函数.

粘塑性变形部分的三维本构关系可表达为^[16]:

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_3} \left[\phi\left(\frac{F}{F_0}\right) \right] \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (10)$$

其中, ϕ 函数可取为幂函数的形式, 若采用相关联流动法则, 式(10)可表示为

$$\varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_3} \left[\left(\frac{F}{F_0}\right)^m \right] \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (11)$$

$$\text{即} \quad \varepsilon_{ij}^{vp} = \frac{1}{\eta_3} \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t \quad F > 0 \quad (12)$$

式中: m 为试验常数, 通常取 $m=1$ ^[17].

通过和一维状态下的蠕变方程式进行类比可以得到三维应力状态下的改进 Burgers 非线性流变模型的蠕变本构方程为:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2\eta_1} t + \frac{1}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} & (F \leq 0) \\ \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2\eta_1} t + \frac{1}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} + \\ \frac{1}{\eta_3} \left(\frac{F}{F_0}\right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t & (F > 0, t \leq t^*) \\ \frac{1}{2G_1} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2\eta_1} t + \frac{1}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} + \\ \frac{1}{\eta_3(1-D)} \left(\frac{F}{F_0}\right) \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} t & (F > 0, t > t^*) \end{cases} \quad (13)$$

在常规三轴压缩试验条件下有 $\sigma_2 = \sigma_3$, 则

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3), \quad S_{11} = \sigma_1 - \sigma_m = \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (14)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

根据前面的假定, 屈服函数可取为如下形式^[18]:

$$F = \sqrt{J_2} - \frac{\sigma_\infty}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

式中: J_2 为应力偏量第二不变量.

将式(14)、式(15)代入式(16), 并令岩石屈服函数的初始参考值 $F_0=1$, 得到改进 Burgers 非线性流变模型的轴向蠕变方程为:

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] & (\sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_\infty) \\ \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_\infty}{3\eta_3} t & (\sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_\infty, t \leq t^*) \\ \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_\infty}{3\eta_3} e^{(t-t^*)/\eta_3} & (\sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_\infty, t > t^*) \end{cases} \quad (17)$$

3 模型参数辨识

非线性流变模型参数往往较多, 随着待求参数的增多, 研究工作量 and 难度也急剧增大. 然而, 目前发展迅速的智能算法仍存在不少问题, 比如常陷入局部最优解而不能得到全局最优解等问题, 而应用广泛的最小二乘法对初始值的依赖性较高, 若不能有效估计初始值, 参数辨识仍有可能失败. 根据已有算法, 采用线性递减粒子群算法(PSO)和 Levenberg-Marquid 非线性最小二乘法(L-M)相结合的方法对改进非线性流变模型参数进行辨识.

粒子群算法(PSO)是模拟鸟群觅食行为中通过鸟之间的共同协作, 从而使群体达到最优目的的一种全局优化算法^[19]. 关于该算法的具体介绍可参阅相关文献, 本文不再赘述.

将蠕变试验的待求蠕变参数记为 X , 目标函数可采用表达式:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i(X, t_i) - \varepsilon_i)^2 \quad (18)$$

式中: n 为试验点数; $\varepsilon_i(X, t_i)$ 为根据蠕变理论公式求解得到的 t 时刻的计算值; ε_i 为 t 时刻的试验数据.

岩石流变模型参数辨识的目的是通过反复的迭代寻优使目标函数趋于极小.

参数辨识具体做法如下:

(1) 先采用线性递减粒子群算法对各级应力水平下的蠕变参数进行初步辨识.

(a) 在MATLAB中编制适应度函数文件(M文件)存放在工作空间以备调用, 并将试验结果输入该M文件中; 适应度函数(即目标函数)采用式(18), 其中, $\varepsilon_i(X, t_i)$ 为根据蠕变理论公式求解得到的 t 时刻的计算值, 具体公式为式(17);

(b) 在MATLAB中调用线性递减粒子群算法主

程序^[18]初步反演岩石流变参数。

(2) 将第一步中PSO的辨识结果作为初始值,再进行L-M非线性最小二乘法反演.该阶段在数据绘图与分析软件Origin中实现.在Origin的自定义函数拟合界面中,将PSO反演的结果输入,再采用Levenberg-Marqud算法进行精确反演,得到相应的蠕

变参数见表1.据此得到代表性拟合曲线如图4所示.可见,改进Burgers非线性流变模型与试验结果吻合较好,并能够同时反映炭质板岩在低应力情况下的两阶段蠕变特性和高应力情况下的三阶段蠕变特性,证明该模型的是合理和正确的。

表1 模型参数
Tab.1 Parameters of model

| 状态 | 应力/MPa | K/GPa | G_1/GPa | $\eta_1/\text{GPa}\cdot\text{h}$ | G_2/GPa | $\eta_2/\text{GPa}\cdot\text{h}$ | $\eta_3/\text{GPa}\cdot\text{h}$ | n |
|----|--------|----------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| 干燥 | 12.3 | 5.71 | 4.28 | 1534.52 | 25.90 | 8.91 | | |
| | 20.4 | 3.29 | 2.47 | 867.47 | 30.51 | 8.11 | | |
| | 25.5 | 3.18 | 2.39 | 4745.12 | 52.96 | 48.17 | | |
| 饱水 | 12.3 | 2.16 | 1.62 | 238.39 | 12.43 | 18.20 | | |
| | 16.6 | 2.17 | 1.63 | 483.04 | 19.71 | 35.36 | | |
| | 20.4 | 2.21 | 1.66 | 613.79 | 25.91 | 32.94 | | |
| | 25.5 | 2.36 | 1.77 | 114.59 | 34.69 | 3.59 | 0.95E8 | 77.12 |

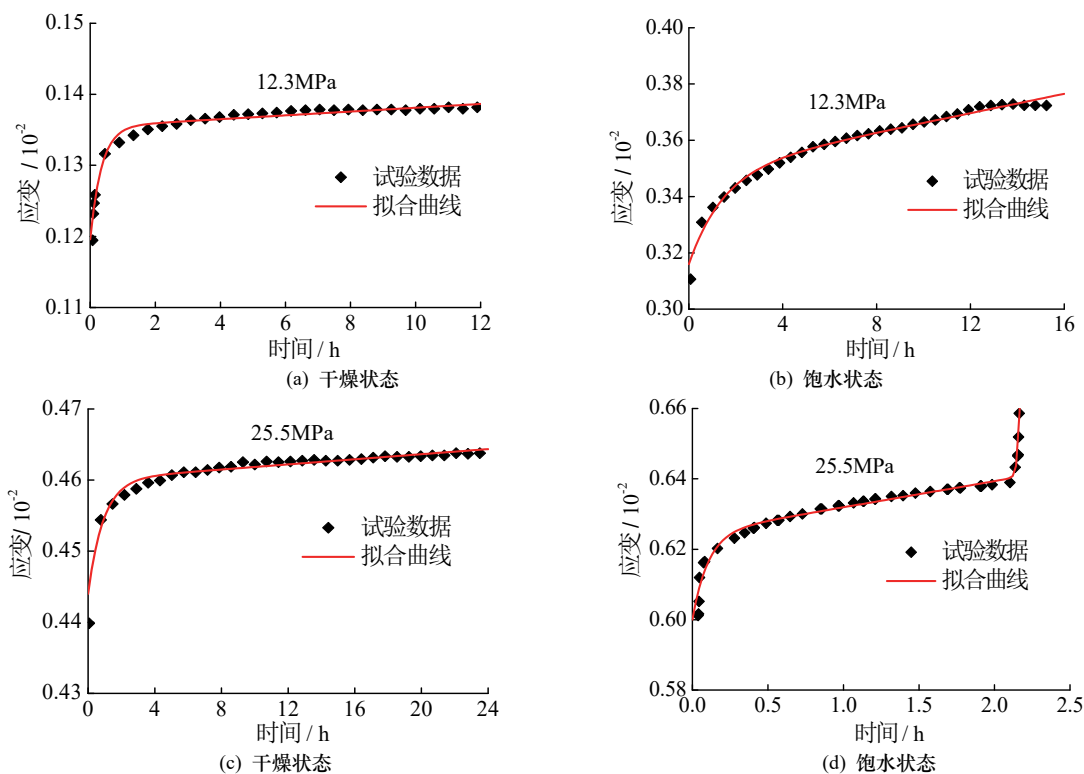


图4 蠕变试验及拟合曲线
Fig.4 The creep tests and fitted curves

4 结论

分析干燥和饱水炭质板岩的单轴蠕变变形特点,在Burgers流变模型的基础上,结合损伤变量,提出一种改进非线性流变模型.并在已有算法的基础上,将线性递减权重粒子群算法与L-M非线性最小二乘法结合,对流变模型参数进行了辨识,主要结论如下:

(1) 在中、低应力水平下,蠕变变形逐渐趋于

稳定.在相同应力水平下饱水岩样的蠕变量和蠕变速率都高于干燥岩样的相应值.水对岩石蠕变变形的影响不仅在于增大蠕变变形,还能够降低蠕变破坏强度.

(2) 干燥试样蠕变变形在很短的时间内就进入趋于稳定,而饱水岩样则要经过较长的时间才逐渐进入稳态蠕变阶段;

(3) 在Burgers流变模型的基础上,引入损伤变量,提出能反映岩石加速蠕变的改进Burgers非线性

流变模型,并导出该模型的一维和三维蠕变方程;

(4) 将线性递减粒子群算法和L-M非线性最小二乘法相结合,改进了流变模型参数辨识方法,先采用粒子群算法对流变模型参数进行初步辨识,将其结果作为初始值,再采用L-M算法进行辨识.利用本文提出的流变模型对蠕变试验数据进行辨识,结果表明本模型与炭质板岩在各种应力水平下的蠕变曲线吻合较好,证明该模型的是合理和正确的,参数辨识方法是可行的.

参考文献 References

- [1] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LIU Xiong. An introduction to rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [2] WAWERSIK Brown. Time-dependent behaviour of rock in compression[Z]. Denver: 1974: 357-363.
- [3] LAJTAL E Z, SCHMLDTKE R H, BTELUS L P. Effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1987, 24(4): 247-255.
- [4] OKUBO S, FUKUI K, HASHIBA K. Long-term creep of water-saturated tuff under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47: 839-844.
- [5] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
SUN Jun. Rheology of geo-materials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [6] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1791-1796.
ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1791-1796.
- [7] 李铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2003, 22(10): 1673-1677.
LI You, ZHU Weishen, BAI Shiwei, et al. Uniaxial experimental study on rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1673-1677.
- [8] 刘光廷, 胡昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报. 2004, 23(8): 1237-1241.
LIU Gangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1237-1241.
- [9] 李江腾, 郭群, 曹平, 等. 低应力条件下水对斜长岩蠕变性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2797-2801.
LI Jiangteng, GUO Qun, CAO Ping, et al. Effects of water on creep mechanical properties of plagioclase[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(9): 2797-2801.
- [10] CAO Ping, WAN Linhui, WANG Yixian, et al. Viscoelasto-plastic properties of deep hard rocks under water environment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 2711-2718.
- [11] 邹翀, 王超朋, 张文新, 等. 兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩段应力控制试验研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 120-124.
ZOU Chong, WANG Chaopeng, ZHANG Wenxin, et al. Experimental study on stress control in carbonaceous slate section of Muzhailing tunnel on Lanzhou-Chongqing railway[J]. Tunnel Construction. 2010, 30(2): 120-124.
- [12] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
YU Shouwen, FENG Xiqiao. Damage mechanics[M]. Beijing: Tsing University Press. 1997.
- [13] 王宇, 李建林, 邓华锋, 等. 软岩三轴卸荷流变力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3338-3344.
WANG Yu, LI Jianlin, DENG Huafeng, et al. Investigation on unloading triaxial rheological mechanical properties of soft rock and its constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics. 2012, 33(11): 3338-3344.
- [14] 夏才初, 金磊, 郭锐. 参数非线性理论流变力学模型研究进展及存在的问题[J]. 岩石力学与工程学报. 2011, 30(3): 454-463.
XIA Caichu, JIN Lei, GUO Rui. Nonlinear theoretical rheological model for rock: a review and some problems [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2011, 30(3): 454-463.
- [15] 阎岩, 王思敬, 王恩志. 基于西原模型的变参数蠕变方程[J]. 岩土力学. 2010, 31(10): 3025-3035.
YAN Yan, WANG Sijing, WANG Enzhi. Creep equation of variable parameters based on Nishihara model[J]. Rock and Soil Mechanics. 2010, 31(10): 3025-3035.
- [16] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
WANG Zhiyin, LI Yunpeng. The rock rheological theory and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [17] 齐亚静, 姜清辉, 王志俭, 等. 改进西原模型的三维蠕变本构方程及其参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报. 2012, 31(2): 347-355.
QI Yajing, JIANG Qinghui, WANG Zhijian, et al. 3D creep constitutive equation of modified nishihara model and its parameters identification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2012, 31(2): 347-355.
- [18] KENNEDY J, EBERHART R. Partical swarm optimization[C]//Proc IEEE Int Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [19] 龚纯, 王正林. 精通MATLAB最优化计算 [M]. (第2版). 北京: 电子工业出版社, 2012.
GONG Chun, WANG Zhenglin. Proficient in MATLAB optimization calculation [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.

(编辑 吴海西)