

## 考虑节理影响的岩体非线性流变模型

曹平, 黄磊, 陈瑜, 周科平, 邓红卫

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 为研究节理岩体蠕变全过程, 引入非线性黏性元件和节理裂隙塑性体, 并将其与传统的伯格斯模型串联, 得到一种新的复合流变模型。推导该模型一维和三维蠕变本构方程, 并运用该复合模型及传统伯格斯模型分别对岩石试样蠕变实验全过程曲线进行辨识, 得到模型的各项蠕变参数。研究表明: 复合流变模型对试验数据的拟合结果明显优于传统伯格斯模型的拟合结果。该模型不仅能充分反映岩石试样的初期蠕变和稳定蠕变过程, 而且能很好地描述加速蠕变过程, 同时又能体现节理裂隙对蠕变的影响。

**关键词:** 岩石力学; 复合流变模型; 加速蠕变; 节理裂隙; 蠕变参数

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)02-0401-06

## Nonlinear rheological model of rock considering the effects of joints

CAO Ping, HUANG Lei, CHEN Yu, ZHOU Keping, DENG Hongwei

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To study the whole creep process of jointed rock, nonlinear viscous element and joint fissures plastic body were introduced, and then combined with classical Burgers model in series to gain a new composite creep model. 1D and 3D creep constitutive equation of the composite creep model were deduced. By using the composite creep model and the classical Burgers model to fit with the whole process of rock specimen creep curve, creep parameters of the models were derived. The results show that the composite creep model produces better fitting results than the classical Burgers model. It can not only fully reflect the early and steady creep process, but also well present the accelerating creep process of the rock specimen. Meanwhile, it can also reflect the influence of joint fissures on creep.

**Key words:** rock mechanics; the composite creep model; accelerating creep; joint fissures; creep parameters

岩体流变理论研究的是岩石或岩体在外力、水、温度、地质特征及施工扰动等各种环境、地质与工程因素作用下, 岩体材料、结构与时间相关的力学行为、本构关系、失稳与破坏规律。在岩石工程中, 大多数失稳现象都与岩石的流变特性有关。岩石常常因受到外荷载长期的恒定作用而最终失稳, 从而引发工程事

故的发生, 因此, 对岩石流变力学特性的理论研究一直受到人们的重视。目前, 已有一套较为完整的理论系统来表述岩石的流变特性, 即通过基本变形元件(弹簧、阻尼器和摩擦元件)的不同串并联组合模型来建立岩石的流变本构方程, 常见的有麦克斯韦模型、开尔文模型、伯格斯模型、宾汉姆模型、西原模型等<sup>[1]</sup>,

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-05-30

**基金项目(Foundation item):** 国家自然科学基金资助项目(11772358, 51604299, 51774323, 51274249); 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B069); 中国博士后科学基金资助项目(2016M600636); 中南大学博士后科学基金资助项目(2017); 国家重点研发计划项目(2016YFC0600706) (Projects(11772358, 51604299, 51774323, 51274249) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(CX2012B069) supported by the Postgraduate Innovative Research Project of Hunan Province; Project(2016M600636) supported by China Postdoctoral Science Foundation; Project(2017) supported by Central South University Postdoctoral Science Foundation; Project (2016YFC0600706) supported by the National key Research and Development Program)

**通信作者:** 曹平, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石力学与工程领域的教学和科学研究工作; E-mail: pcao\_csu@sohu.com

国内外研究者也对此进行了大量的研究<sup>[2-5]</sup>。然而, 这些传统的流变模型只能描述岩石的稳态蠕变, 而不能描述加速蠕变过程, 因此, 具有一定的局限性。随着岩体工程规模的不断扩大和深部采矿的迅速发展, 为保证工程的安全性, 就需要能更好地反映岩石真实流变过程的新流变模型, 因此, 人们对流变理论的研究进入了非线性阶段。目前, 人们对于非线性流变理论的研究已经取得了不少成果, 如: 康永刚等<sup>[6-7]</sup>用分数单元代替伯格斯模型中并联的黏壶, 建立分数伯格斯模型, 用来描述岩石的加速蠕变; 宋勇军等<sup>[8-9]</sup>将含分数阶微积分的软体元件与弹簧元件串联, 结合幂函数黏塑性体, 提出一种新的四元件非线性黏弹塑性流变模型; 曹树刚等<sup>[10]</sup>将黏滞系数视作随时间变化的变量, 改进了西原模型; 徐卫亚等<sup>[11-13]</sup>提出一种非线性黏塑性体(NVPB 模型), 并将其与五元件线性黏弹性流变模型串联起来, 从而建立一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型; ZHOU 等<sup>[14]</sup>将传统西原模型中的 2 个线性黏壶均以非线性黏壶替代, 并建立其微分形式的本构方程; BOUKHAROV 等<sup>[15]</sup>提出用应力触发的虎克体与应力触发的非线性黏性元件组合而成的模型来描述加速蠕变。尽管人们在非线性流变方面取得了很大进展, 但对一些问题的研究还不够深入, 如对节理岩体流变特性的研究还较少。节理岩体作为岩石工程中的常见研究对象, 其强度、变形和破坏等特征直接影响到工程的稳定性, 而这些特征往往体现出与时间的相关性, 因此, 节理岩体流变特性的研究对岩石工程具有重大意义。本文作者在伯格斯模型的基础上, 提出一种新的流变模型, 用于描述岩石的加速蠕变过程, 体现节理对岩石流变的影响。

### 1 新模型的建立

#### 1.1 伯格斯模型

传统伯格斯模型由虎克体、黏性体及黏弹性体组成, 如图 1 所示。其中:  $\sigma$  为该模型的总应力;  $E_0$  为弹性模量;  $E_1$  为黏性模量;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为黏壶的黏滞

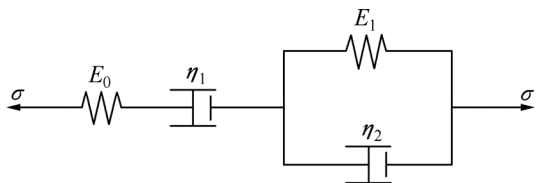


图 1 伯格斯模型  
Fig. 1 Burgers model

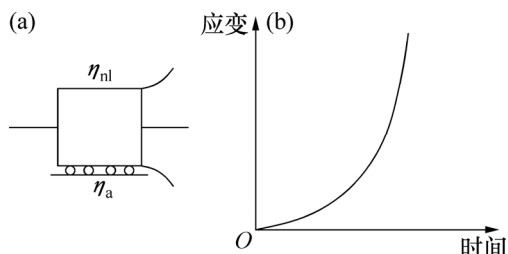
系数。该模型可以很好地模拟当应力小于屈服应力时岩石的流变特性, 但不能描述岩石的加速蠕变。

#### 1.2 非线性黏性元件

为描述岩石的加速蠕变过程, 现引入 1 个非线性黏性元件<sup>[16]</sup>, 如图 2 所示。其中:  $\eta_{nl}$  为非线性黏性元件的黏滞系数。该元件具有应变触发特性, 即当应变  $\varepsilon$  小于  $\varepsilon_a$ (即岩石结束稳态蠕变而开始进入加速蠕变时对应的应变)时, 该元件呈现刚体的性质, 而当应变大于  $\varepsilon_a$  时, 该元件开始发挥作用。定义该非线性黏性元件的本构关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_{nl} = 0, & \varepsilon < \varepsilon_a \\ \sigma = \eta_{nl} \dot{\varepsilon}_{nl}, & \varepsilon \geq \varepsilon_a \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\varepsilon_{nl}$  为该元件进入加速蠕变后的应变。



(a) 非线性黏性元件; (b) 非线性元件蠕变曲线

图 2 非线性黏性元件及其蠕变曲线

Fig. 2 Nonlinear viscous component and its creep curve

#### 1.3 节理裂隙塑性体

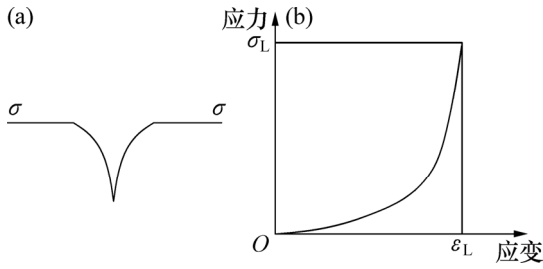
节理岩石中由于有大量微裂隙的存在, 故其在受压时存在一个微裂隙闭合的阶段, 该阶段在宏观上表现为岩石的塑性变形。夏才初<sup>[17]</sup>的研究结果表明: 当实验所加荷载达到某一特定值(应力门槛值)时, 岩石试件因微裂隙闭合而产生的塑性变形开始显现, 而后随荷载增加而逐渐增加, 最终趋于稳定。为描述这种岩石蠕变过程中因节理微裂隙闭合而产生的塑性变形, 现引入裂隙塑性体元件<sup>[18]</sup>, 其结构如图 3 所示。其中: 裂隙塑性体由 2 条曲率按回旋线变化的单位长度等截面悬臂梁组成, 2 条梁相连于 0 曲率处, 荷载作用于梁的末端, 两梁之间的间隙随所加应力  $\sigma$  的增大而减小, 当应力趋于无穷大时, 间隙趋于 0, 此时, 应变达到最大  $\varepsilon_L$ , 对应的应力为  $\sigma_L$ , 此裂隙塑性体的本构关系为

$$\varepsilon = \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\sigma}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] \quad (2)$$

或

$$\sigma = \sigma_L \left[ \left( 1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_L} \right)^{-1/2} - 1 \right] \quad (3)$$

将该裂隙体与圣维南体并联, 用圣维南体的屈服强度  $\sigma_s$  代替裂隙体的应力门槛值, 如图4所示。



(a) 裂隙塑性体; (b) 裂隙塑性体本构曲线

图3 裂隙塑性体及其本构曲线

Fig. 3 Fissures plastic body and its constitutive curve

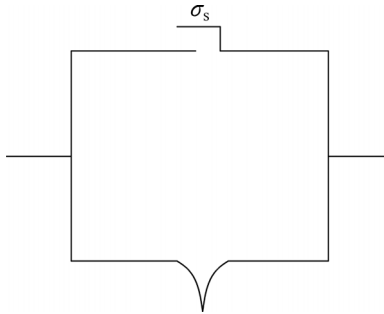


图4 新型裂隙塑性体

Fig. 4 New fissures plastic body

### 1.4 节理岩体复合流变模型的建立

将非线性黏性元件、裂隙塑性体与传统伯格斯模型串联形成复合流变模型, 以描述节理岩体的蠕变过程, 如图5所示。

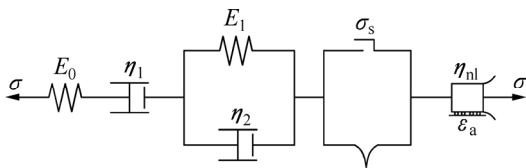


图5 复合流变模型

Fig. 5 Composite creep model

当  $\sigma < \sigma_s$  时, 非线性黏性元件表现为刚体, 节理裂隙塑性体也未达到其应力门槛值, 故均不发挥作用, 此时复合流变模型退化为传统伯格斯模型, 其一维本构方程为

$$\sigma + \left( \frac{\eta_1}{E_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_0 E_1} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1} \ddot{\varepsilon} \quad (4)$$

蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_0} \quad (5)$$

当  $\sigma \geq \sigma_s$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_a$  时, 裂隙塑性体开始发生塑性变形, 而非线性黏性元件仍表现为刚体, 此时复合流变模型为传统伯格斯模型与裂隙塑性体的串联, 由串、并联关系可得

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \sigma_1 = \varepsilon_1 E_0 \\ \sigma_2 = \eta_1 \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_1 \varepsilon_3 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 = \sigma_L \left[ \left( 1 - \frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_L} \right)^{-1/2} - 1 \right] \\ \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 + \dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为流变模型的总应力和总应变;  $\varepsilon_1(\sigma_1)$ ,  $\varepsilon_2(\sigma_2)$ ,  $\varepsilon_3(\sigma_3)$  和  $\varepsilon_4(\sigma_4)$  分别为虎克体、黏性体、黏弹性体、裂隙塑性体的应变(应力);  $E$  和  $\eta$  分别为相应元件的弹性系数和黏性系数。

对上述各式进行 Laplace 变换, 整理后再进行 Laplace 逆变换, 可得在  $\sigma \geq \sigma_s$ ,  $\varepsilon < \varepsilon_a$  条件下该流变模型的本构方程为

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{\eta_1} \sigma + \left[ \frac{2E_1 \varepsilon_L}{\sigma_L} \left( 1 + \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_L} \right)^{-3} + \frac{E_1}{E_0} + \frac{\eta_2}{\eta_1} + 1 \right] \dot{\sigma} - \\ \frac{6\eta_2 \varepsilon_L}{\sigma_L^2} \left( 1 + \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_L} \right)^{-4} \dot{\sigma}^2 + \frac{2\eta_2 \varepsilon_L}{\sigma_L} \left( 1 + \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_L} \right)^{-3} \ddot{\sigma} + \\ \frac{\eta_2}{E_0} \ddot{\sigma} = E_1 \dot{\varepsilon} + \eta_2 \ddot{\varepsilon} \end{aligned} \quad (7)$$

由串、并联关系, 并引入边界条件  $t=0, \sigma=\sigma_0$ , 可得模型的蠕变方程为

$$\begin{aligned} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_0} + \\ \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

当  $\sigma \geq \sigma_s$ ,  $\varepsilon \geq \varepsilon_a$  时, 非线性黏性元件开始发挥作用, 此时复合流变模型为传统伯格斯模型、裂隙塑性体以及非线性黏性元件串联而成的模型。

先单独看非线性黏性元件, 施加恒定荷载  $\sigma=\sigma_0$ , 当  $\varepsilon \geq \varepsilon_a$  时, 由

$$\sigma = \eta_{nl} \ddot{\varepsilon}_{nl} \quad (9)$$

可得

$$\sigma_0 = \eta_{nl} \ddot{\varepsilon}_{nl} \quad (10)$$

对式(10)进行积分, 并由初始条件  $t=t_a$  (即岩石开始进入加速蠕变阶段对应的时刻),  $\varepsilon_{nl}=0$  可得该黏性元件的蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{2\eta_{nl}} \langle t \rangle^2 \quad (11)$$

式中:

$$\langle t \rangle = \begin{cases} 0, & t < t_a \\ t - t_a, & t \geq t_a \end{cases} \quad (12)$$

再由各元件之间的串联关系可得复合流变模型的蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_0} + \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] + \frac{\sigma_0}{2\eta_{nl}} \langle t \rangle^2 \quad (13)$$

## 2 复合模型的三维蠕变本构关系

在实际工程中, 岩石一般都处于复杂的三维应力作用下, 而在室内试验中也一般采用三轴压缩试验机进行岩石强度的测定, 因此, 建立岩石在三维应力作用下的蠕变本构关系具有重要的工程意义。

该复合流变模型可以看成是由虎克体、黏性体、黏弹性体、裂隙塑性体和非线性黏性体 5 部分串联而成, 在三维应力作用下, 模型的总应变可以表示为

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v + \varepsilon_{ij}^{ve} + \varepsilon_{ij}^l + \varepsilon_{ij}^{nl} \quad (14)$$

式中:  $\varepsilon_{ij}^e$ ,  $\varepsilon_{ij}^v$ ,  $\varepsilon_{ij}^{ve}$ ,  $\varepsilon_{ij}^l$  和  $\varepsilon_{ij}^{nl}$  分别为虎克体、黏性体、黏弹性体、裂隙塑性体和非线性黏性体的应变张量。

对于虎克体, 由广义虎克定律可知, 虎克体的三维本构关系为

$$e_{ij} = \frac{1}{2G_0} S_{ij}, \varepsilon_{ii} = \frac{1}{3K} \sigma_{ii} \quad (15)$$

式中:  $e_{ij}$ ,  $S_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ii}$  和  $\sigma_{ii}$  分别为应变偏量、应力偏量、应变和应力第一不变量的张量形式;  $G_0$  和  $K$  分别为弹性剪切模量和弹性体积模量。

由此可得虎克体的应变为

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G_0} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \quad (16)$$

式中:  $\sigma_m$  为平均应力;  $\delta_{ij}$  为单位张量。

对于黏性体, 在一维应力下, 其本构方程为

$$\sigma = \eta_1 \dot{\varepsilon} \quad (17)$$

进而可得其蠕变方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_1} t \quad (18)$$

三维情况下的应变可表示为

$$\varepsilon_{ij}^v = \frac{t}{\eta_1} S_{ij} \quad (19)$$

对于黏弹性体, 假设该黏弹性体的体积变化是弹性的, 其蠕变主要体现在剪切变形上, 由此可知其三维本构关系为

$$\varepsilon_{ij}^{ve} = \frac{1}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} \quad (20)$$

对于裂隙塑性体, 将一维情况下的应变推广到三维状态下可得

$$\varepsilon_{ij}^l = \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{S_{ij}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] \quad (21)$$

对于非线性黏性体, 由于在室内的单轴或三轴压缩蠕变试验中, 试样在进入加速蠕变阶段时大都体现在轴向变形急剧增大, 因此, 在三维应力状态下, 可以选择第一主应力  $\sigma_{11}$  与屈服强度  $\sigma_a$  的关系来判断非线性黏性体是否发生应变, 当  $\sigma_{11} \geq \sigma_a$  时, 非线性黏性体开始触发, 试样开始进入加速蠕变阶段。由此, 三维状态下非线性黏性体的本构关系可以表示为

$$\varepsilon_{ij}^{nl} = \begin{cases} 0, & \sigma_{11} < \sigma_a \\ \frac{\langle t \rangle^2}{4\eta_{nl}} S_{ij}, & \sigma_{11} \geq \sigma_a \end{cases} \quad (22)$$

将式(14)~(21)代入式(13), 可得三维应力状态下该复合模型的蠕变方程为

$$\varepsilon_{ij}(t) = \begin{cases} \left( \frac{1}{2G_0} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \right) + \frac{t}{\eta_1} S_{ij} + \frac{1}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij}, & \sigma < \sigma_s, \sigma_{11} < \sigma_a \\ \left( \frac{1}{2G_0} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \right) + \frac{t}{\eta_1} S_{ij} + \frac{1}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} + \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{S_{ij}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right], & \sigma \geq \sigma_s, \sigma_{11} < \sigma_a \\ \left( \frac{1}{2G_0} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \right) + \frac{t}{\eta_1} S_{ij} + \frac{1}{2G_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\eta_2} t\right) \right] S_{ij} + \varepsilon_L \left[ 1 - \left( 1 + \frac{S_{ij}}{\sigma_L} \right)^{-2} \right] + \frac{\langle t \rangle^2}{4\eta_{nl}} S_{ij}, & \sigma \geq \sigma_s, \sigma_{11} > \sigma_a \end{cases} \quad (23)$$

## 3 实验数据拟合与验证分析

本文作者根据文献[19]中的实验数据, 对复合流变模型的蠕变方程进行拟合, 以验证该模型描述节理岩石蠕变全过程的合理性。将软弱节理矿岩试样加工

成直径×高度为 50 mm×100 mm 的标准圆柱形试件, 利用剪切流变仪进行蠕变试验。加载方式为循环加卸载, 从小到大依次逐级施加荷载, 荷载作用时间由试件应变率确定。当试件轴向应变在 48 h 内小于 0.01 mm 时, 可认为其达到稳定状态, 完全卸载, 卸载后记录其应变恢复; 当试件在 24 h 内无应变恢复时再施加下一级荷载, 依此类推, 直至试件破坏为止。本文着重体现蠕变过程中的加速蠕变阶段, 故引用最高级荷载时的蠕变数据, 此时荷载为 33.8 MPa。

图 6 所示为岩石试样在实验过程中的轴向应变-时间曲线。由图 6 可知试样的蠕变过程分为 3 个阶段: 0~ $t_1$  时间段为初期蠕变阶段,  $t_1$ ~ $t_a$  为稳定蠕变阶段,  $t_a$  之后为加速蠕变阶段。 $t_1=12.4$  h,  $t_a=190$  h,  $t_a$  所对应的应变可以看成是非线性黏性元件的应变触发值  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_a=9.92$  mm。

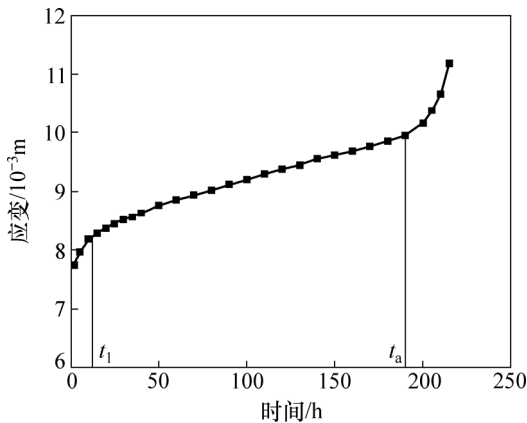


图 6 岩石试样轴向应变-时间曲线  
Fig. 6 Axial strain-time curve of rock specimen

根据复合模型的蠕变方程以及试样应变-时间曲线, 可将上述曲线分为 2 个部分: 0~ $t_a$  时段曲线为第 1 部分,  $t_a$  之后的加速蠕变曲线为第 2 部分。对于第 1 部分曲线, 对式(8)采用非线性最小二乘法, 可以确定蠕变参数  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $\eta_1$  和  $\eta_2$ 。对于第 2 部分曲线, 将确定好的  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  及裂隙塑性体元件的流变阈值参数<sup>[20]</sup> $\sigma_s=4.05$  MPa,  $\sigma_L=56.80$  MPa 和  $\varepsilon_L=3.351$  mm 代入式(13), 并对其进行非线性最小二乘法可得蠕变参数  $\eta_{nl}$ 。以上拟合过程可利用 Origin 软件中自带程序完成。

表 1 所示为复合模型对岩石试样蠕变曲线辨识的所有蠕变参数。图 7 所示为复合模型对岩石试样蠕变过程曲线的拟合结果。由图 7 可知: 传统伯格斯模型能较好地拟合稳定蠕变阶段, 但在拟合初期蠕变阶段出现很大的偏差, 尤其是在初始应变处, 拟合值明显低于试验值, 这是因为试件中含有节理裂隙, 在受压瞬间产生瞬时塑性变形, 而传统伯格斯模型中并没有

能描述这种因节理裂隙而造成的瞬时塑性变形的元件, 同时, 传统伯格斯模型的拟合曲线中也并没有体现出加速蠕变阶段。而复合流变模型结果与实验结果吻合良好, 不仅能够充分反映岩石的初期和稳定蠕变过程, 而且能描述加速蠕变过程, 同时, 又能体现节理裂隙对蠕变的影响。

表 1 复合流变模型参数

Table 1 Parameters of composite creep model

$\sigma_0/$ MPa	$E_0/$ GPa	$E_1/$ GPa	$\eta_1/$ (GPa·h)	$\eta_2/$ (GPa·h)	$\eta_{nl}/$ (GPa·h <sup>2</sup> )
33.8	5.969 6	45.418 9	3 904.69	429.832	11 459.71

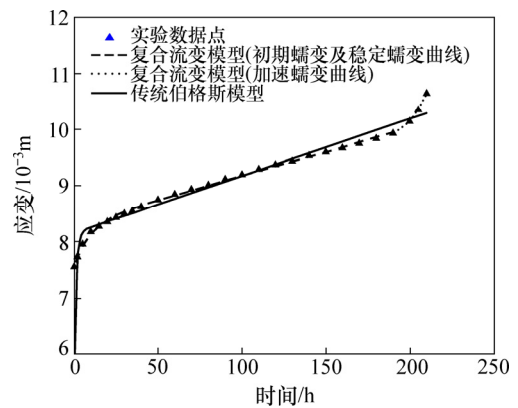


图 7 复合流变模型与伯格斯模型拟合曲线对比  
Fig. 7 Comparison between fitting curves of composite creep model and Burgers model

## 4 结论

- 1) 引入 1 个非线性黏性元件, 并将其与传统伯格斯模型串联, 形成改进的伯格斯模型, 以描述岩石蠕变的全过程。
- 2) 引入一种节理裂隙闭合体, 用闭合体在外力作用下的变形来描述岩石中因节理裂隙闭合而引起的宏观上的塑性变形, 将其与改进的伯格斯模型串联, 形成新的复合流变模型, 并推导出该模型在一维和三维应力状态下的蠕变本构方程。
- 3) 新的复合流变模型的拟合结果明显优于传统伯格斯模型的拟合结果, 不仅能充分反映岩石蠕变过程中的初期蠕变、稳态蠕变, 而且能很好地描述加速蠕变, 同时, 也能体现节理裂隙对岩石蠕变的影响。

## 参考文献:

[1] 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: 6-9.
- WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Rock mass rheological theory and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6-9.
- [2] LI Wenquan, LI Xiangdong, HAN Bing, et al. Recognition of creep model of layer composite rock mass and its application[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 17(1): 329-331.
- [3] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(6): 950-960.
- [4] LIU Lang, WANG Geming, CHEN Jianhong. Creep experiment and rheological model of deep saturated rock[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 478-483.
- [5] 张春阳, 曹平, 汪亦显, 等. 自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(4): 1587-1595.
- ZHANG Chunyang, CAO Ping, WANG Yixian, et al. Creep characteristics of plagioclase hornblende rock under natural and water-saturated conditions in deep underground[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(4): 1587-1595.
- [6] 康永刚, 张秀娥. 岩石蠕变的非定常分数伯格模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3237-3241.
- KANG Yonggang, ZHANG Xiue. Nonstationary parameter fractional Burgers model of rock creep[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3237-3241.
- [7] 康永刚, 张秀娥. 基于 Burgers 模型的岩石非定常蠕变模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 424-427.
- KANG Yonggang, ZHANG Xiue. A non-stationary model for rock creep based on Burgers model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 424-427.
- [8] 宋勇军, 雷胜友, 韩铁林. 一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2076-2080.
- SONG Yongjun, LEI Shengyou, HAN Tielin. A new nonlinear viscoelasto-plastic rheological model for rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2076-2080.
- [9] 宋勇军, 雷胜友. 基于分数阶微积分的岩石非线性蠕变损伤力学模型[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 91-95.
- SONG Yongjun, LEI Shengyou. Mechanical model of rock nonlinear creep damage based on fractional calculus[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 91-95.
- [10] 曹树刚, 边金, 李鹏. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 632-634.
- CAO Shugang, BIAN Jin, LI Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modified model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 632-634.
- [11] 徐卫亚, 杨圣齐, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433-447.
- XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (HoHai model) of rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433-447.
- [12] 徐卫亚, 杨圣齐, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531-537.
- XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531-537.
- [13] 徐卫亚, 杨圣齐, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693-698.
- XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693-698.
- [14] ZHOU Hongwei, WANG C P HAN B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 116-121.
- [15] BOUKHAROV G N, CHANDA M W, BOUKHAROV N G. The three processes of brittle crystalline rock creep[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(4): 325-335.
- [16] 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.
- [17] 夏才初. 软岩的流变性及其尺寸效应的研究[D]. 长沙: 中南工业大学资源环境与建筑工程学院, 1987: 33-34.
- XIA Caichu. Research on rheology of soft rock and its size effect[D]. Changsha: Central South University of Technology. College of Resources, Environment and Civil Engineering, 1987: 33-34.
- [18] 陈浣江, 潘长良, 曹平, 等. 一种软岩流变模型[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(1): 16-20.
- CHEN Yuanjiang, PAN Changliang, CAO Ping, et al. A new rheological model for soft rocks[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2003, 34(1): 16-20.
- [19] ZHAO Yanlin, CAO Ping, WEN Weijun, et al. Viscoelasto-plastic rheological experiment under circular increment step load and unload and nonlinear creep model of soft rocks[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(3): 488-494.
- [20] 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.

(编辑 伍锦花)