

考虑孔隙水压的岩体蠕变本构模型

欧阳蕊灿¹, 王卫军^{1,2}, 袁超^{1,2*}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:采用理论与试验相结合的方法,提出了一个能够反映岩石蠕变全阶段过程的非线性弹黏塑性模型,建立了能够考虑孔隙水压的岩体蠕变本构方程,研究了孔隙水压对岩石蠕变的影响规律.研究表明:随着孔隙水压的增大,岩石出现加速蠕变的时间缩短,且加速蠕变阶段对应的加载应力减小;随着孔隙水压的增大,岩石加速蠕变过程曲线斜率增大,说明其蠕变加速度随着孔隙水压的增大而增大.结合三轴蠕变试验所得数据,利用 MATLAB 软件得到了孔隙水压作用下岩石加速蠕变的整个过程曲线,通过对比拟合曲线和试验曲线,验证了该模型的准确性.

关键词:孔隙水压;蠕变试验;本构方程;加速蠕变;非线性弹黏塑性模型

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)02-0001-08

On Constitutive Model of Rock Mass Creep Considering Pore Water Pressure

OUYANG Ruican¹, WANG Weijun^{1,2}, YUAN Chao^{1,2}

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In this paper, a combination of theory and experiment is used to propose a nonlinear elasto-viscoplastic model that can reflect the full-stage process of rock creep, a constitutive equation for rock mass creep that can consider pore water pressure is established and the influence of pore water pressure over rock creep is studied. The research shows that, the time for accelerated creep of rock is shortened, and the loading stress corresponding to the accelerated creep stage decreases with the increase of pore water pressure; the slope of the accelerated creep curve of the rock increases, indicating that the creep acceleration increases with the increase of pore water pressure. Combining the data obtained from the triaxial creep experiment, MATLAB software is used to obtain the whole process curve of the accelerated creep of the rock under the action of pore water pressure, and the accuracy of the model is verified by comparing the fitted curve with the test curve.

Keywords: pore water pressure; creep experiment; constitutive equation; accelerated creep; nonlinear elasto-viscoplastic model

随着浅层煤炭资源的开挖殆尽,越来越多的深层煤矿开采在中东部地区展开,从共同资源开发的意义上讲,深层煤炭资源开采必将成为资源开发新趋势^[1].由于煤矿开挖深度的不断增加,绝大部分煤炭所在的地质环境错综复杂,深部岩石的力学特性与浅部有着本质的不同,主要表现为岩石由脆性向流变性质转变^[2-3].对于深层岩石来说,岩爆与围岩大变形是巷道破坏的主要原因,而蠕变是引起深部围岩大变形的重要原因之一^[4].因此,研究围岩蠕变特性对控制深部围岩大变形有着重要意义.

目前,国内外对岩石蠕变方面的研究已经取得了丰富的成果.赖荣辉等^[5]通过蠕变试验分析了分级加载过程中岩石的能量耗散和岩石弹性应变能特性;董恩远等^[6]建立了可以描述加速蠕变的锚固体本构模型,分析得到围岩的变形与锚固基础位置之间存在一定的关系;张树光等^[7]通过分级加载蠕变试验,对西原模型进行改进得到了改变参数的蠕变方程;杨红伟等^[8-9]通过蠕变试验分析了孔隙水压力和渗流水压力对岩石的应变、等效孔隙体的影响;黄书岭等^[10]通过流固耦合作用下的三轴蠕变试验,分析了岩石变形与时间的关系、等时曲线特征和岩石的时效破坏机制;江宗斌等^[11]研究了多种不同地质条件下岩石蠕变的力学特性,分析得到了各种地质环境对岩石蠕变过程影响规律的机理;刘东燕等^[12]构建了一个五元非线性黏弹塑性蠕变模型,通过分析得到了砂岩在高围压与高孔隙水压条件下岩石加速蠕变的全过程曲线;蒋海飞^[13]通过构建新的蠕变模型,研究了当深部岩体开挖时孔隙水压对围岩时效变形的影响.

本文结合三轴蠕变试验提出了一个新的非线性黏塑性体,将新的非线性黏塑性体与 Hook 体、Kelvin 体、Bingham 体串联构成一个可以描述蠕变加速阶段的新非线性黏弹塑性蠕变模型.结合试验结果对串联构成的新蠕变模型进行了验证,结果表明新非线性黏弹塑性蠕变模型可以较好地反映含有孔隙水压的岩石加速蠕变阶段.

1 三轴蠕变试验方法及结果

本次试验采用 MTS815 岩石力学测试系统,如图 1 所示.该设备具有劈裂、单轴压缩实验、循环加载实验、三轴压缩实验、渗流实验等功能,满足本次试验机械的需求.

本次试验试样所需岩体主要成分为石英、长石、白云母等.按照国际岩石力学学会(ISRM)试验规程对岩样进行加工,制成直径 50 mm,高度 100 mm 的砂岩圆柱体.试样干密度为 2.28~2.71 g/cm³,孔隙率为 0.68%~0.74%,粒径为 0.012~0.540 mm.对岩石进行了单轴压缩试验,通过试验得到岩石的单轴抗压强度值为 62.3 MPa,弹性模量为 26.18 GPa,泊松比为 0.136.常规三轴压缩试验得到了不同孔隙水压条件下岩石的峰值强度 $(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$,对应屈服应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_s$,其中 σ_1 为最大主应力值, σ_3 为最小主应力值.试验结果如表 1 所示.



图 1 试验装置

表 1 常规三轴压缩试验结果

试件编号	围压/MPa	孔隙水压/MPa	$(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$ /MPa	$(\sigma_1-\sigma_3)_s$ /MPa
1	36	5	263.18	201.10
2	36	10	255.43	197.16
3	36	15	234.14	177.94

使用 MTS815 岩石力学测试系统对岩石试样进行三轴蠕变试验,三轴蠕变试验采用分级加载方式,将其偏应力强度值分为 6 级(如表 2 所示),分级时保证每级荷载增量近似相同,每一级加载时间为 36 h,加载速率为 0.1 MPa/s,直到每一级荷载下砂岩达到稳定蠕变或者试件破坏为止,当观测位移小于 0.002 m/h 时,则可以进行下一级荷载的加载试验,若试件没有达到预定最后一级的加载荷载就出现了加速蠕变导致试样破坏,此时以上一级荷载为准,下一级荷载将不再进行.

表 2 蠕变试验应力加载分级表

单位:MPa

级数	一级	二级	三级	四级	五级	六级
应力强度	62.83	93.12	123.88	154.02	183.58	223.18

试验步骤:

- 1) 进行准备工作.
- 2) 在具有孔隙水压力的岩石蠕变测试中,第一步先施加围压,然后在围压达到设定值后施加孔隙

水压.

3) 油压恒定后,以 0.1 MPa/s 的加载速度施加轴向荷载,当在第一级应力荷载下砂岩变形基本保持不变,则可以进行下一级荷载的施加.

4) 重复步骤(3),按照分级加载的应力设定值依次对岩石进行加载应力,直至岩样发生蠕变破坏.

通过本次试验可以获得砂岩在不同加载条件下的加载蠕变曲线,分析不同孔隙水压对岩石蠕变的影响.

2 孔隙水压对蠕变曲线的影响

根据上述的蠕变试验步骤以及表 2 的分级加载方案,对不同孔隙水压下的岩石进行了蠕变试验,并通过陈氏加载法^[14]进行了数据处理,得到了不同孔隙水压下的轴向应变与时间的关系曲线,如图 2~图 4 所示.

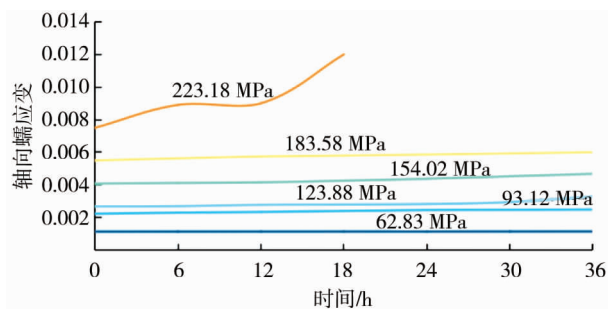


图 2 围压 36 MPa,孔隙水压 5 MPa 砂岩蠕变轴向应变-时间曲线

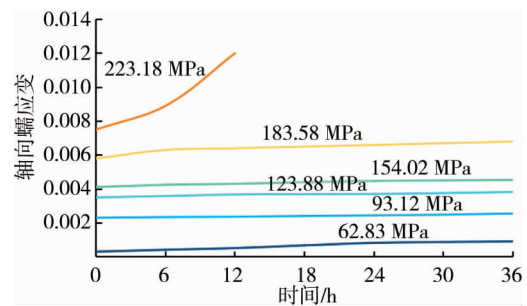


图 3 围压 36 MPa,孔隙水压 10 MPa 砂岩蠕变轴向应变-时间曲线

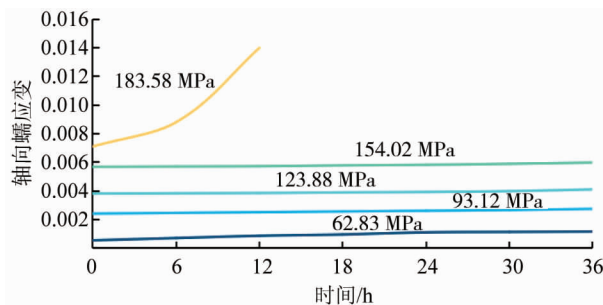


图 4 围压 36 MPa,孔隙水压 15 MPa 砂岩蠕变轴向应变-时间曲线

由砂岩蠕变的轴向应变-时间曲线可知,砂岩具有显著的瞬时蠕变.当岩石的加载应力小于岩石屈服应力,砂岩经过了蠕变的前 3 个阶段,但没有发生加速蠕变.

砂岩在进行一段蠕变速率逐渐减小的减速蠕变后,进入到蠕变速率为常数的稳定蠕变.试件 1 加载应力为第六级时,砂岩发生了加速蠕变,并且岩石是在经过了一段稳定蠕变期后才开始进入加速蠕变阶段;试件 2 加载应力为第六级时,砂岩经过瞬时蠕变、减速蠕变和短暂的稳定蠕变后进入加速蠕变,此时稳定蠕变与加速蠕变之间没有明显的过渡期;试件 3 加载应力加载到第五级时,砂岩经过短时间蠕变后突然破坏,表现出脆性破坏的特征.

此外,在第一级应力加载时,孔隙水压为 10 MPa 时的瞬间应变值最小,由于刚刚开始加载,加载的应力水平还比较小,砂岩内部的孔隙基本上是相互隔离的,当砂岩受到的围压较高时,砂岩的孔隙水排泄非常缓慢,岩石裂缝面上产生一个孔隙水产生的反向作用力,抵抗其轴向变形,所以岩石的变形弹性模量在短时间内会有所提高.

随着孔隙水压的增大,同一加载应力级别下试件的瞬间蠕变增大,试件破坏时间缩短,加速蠕变过程出现的时间提前,描述加速蠕变过程的曲线越来越陡表示其蠕变速度越来越快.

3 非线性黏弹塑性体蠕变模型

广义开尔文体可以描述岩石蠕变的前2个阶段:瞬时蠕变与减速蠕变.当应力水平大于某一值时出现稳定蠕变,此时可用宾汉姆体来描述,所以本文采用广义开尔文体与宾汉姆体串联描述砂岩的瞬时变形,减速蠕变,稳定蠕变这3个阶段.广义开尔文体力学模型如图5所示,一维应力状态下广义开尔文体与宾汉姆体串联的蠕变方程如下.

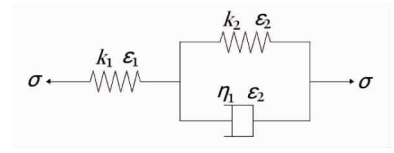


图5 广义开尔文体力学模型

1) $\sigma_0 < \sigma_{s1}, \sigma_0 = \sigma$ 时,蠕变模型可以使用广义开尔文体表示,其蠕变方程如式(1):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{k_1} + \frac{(1 - e^{-\frac{k_2 t}{\eta_1}}) \sigma_0}{k_2} \quad (1)$$

2) $\sigma_{s1} \leq \sigma_0 < \sigma_{s2}, \sigma_0 = \sigma$ 时,蠕变模型可以使用广义开尔文体与宾汉姆体串联表示,其力学模型如图6所示,蠕变方程如式(2).

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{k_1} + \frac{(1 - e^{-\frac{k_2 t}{\eta_1}}) \sigma_0}{k_2} + \frac{(\sigma_0 - \sigma_{s1}) t}{\eta_2} \quad (2)$$

式中: σ_0 为加速蠕变之前的应力; σ 为应力; k_1, k_2 为弹性元件的弹性模量; η_1, η_2 为黏性元件的黏滞系数; t 为蠕变时间; σ_{s1} 为岩石破裂或者进入塑性状态的阈值; σ_{s2} 为岩石的屈服应力.

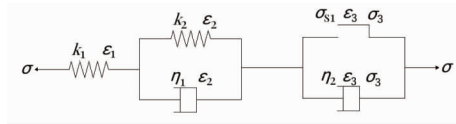


图6 广义开尔文体与宾汉姆体串联力学模型

广义开尔文体与宾汉姆体串联无法描述加速蠕变阶段的运动规律,在加速蠕变阶段中应变与时间之间的关系是非线性的.非线性蠕变模型的建立一般分为两类,第一类是将线性元件用变参数的非线性元件代替,第二类是采用损伤力学、断裂力学和能量耗散等新理论来解释蠕变的加速过程,从而建立非线性蠕变模型.本文采用第一类方法,通过将变参数的非线性黏塑性体与广义开尔文体串联起来,描述岩石蠕变的全阶段过程.

通过使用幂函数和指数函数混合方程拟合岩石在孔隙水压作用下的加速蠕变曲线,其表达式为式(3).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha(t^n + \beta e^{nt}) \quad (3)$$

式中: ε 为蠕变模型的应变值; ε_0 为产生加速蠕变过程之前的应变值; α, β 为方程的拟合参数,假设 α, β 均大于0; n 为加速蠕变指数.

图7所示为应用式(3)得到的孔隙水压为15 MPa下的砂岩三轴蠕变试验加速蠕变段曲线与理论曲线的对比拟合曲线,对应拟合参数 $\varepsilon_0, \alpha, \beta, n$ 分别为0.007 1, 0.007 62, $1.850 5E^{-5}$, 3.412, 曲线拟合相关系数平方 R^2 为0.958.

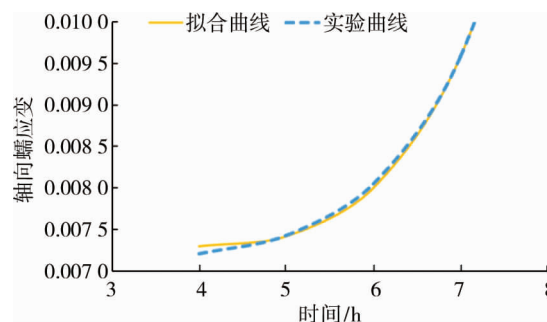


图7 加速蠕变曲线与拟合曲线

从拟合结果可以看出:采用幂函数和指数函数混合方程拟合孔隙水压下砂岩三轴蠕变的加速蠕变曲线是可行的.

当 $\sigma > \sigma_{s2}$ 时,线性黏塑性元件的本构关系可以表示为式(4):

$$\sigma - \sigma_{s2} = \eta \dot{\varepsilon}. \tag{4}$$

式中: σ_{s2} 为岩石的屈服应力; η 为黏滞系数.

对式(4)进行积分,得蠕变方程:

$$\varepsilon = \frac{(\sigma - \sigma_{s2})}{\eta} t + C. \tag{5}$$

式中: C 为常数.

令式(3)等于式(4),取 $\alpha = (\sigma - \sigma_{s2})/\eta_0, C = \varepsilon_0$, 通过下列计算可得到黏滞系数 η 的表达式.

由于 $C = \varepsilon_0$, 则由式(5)可得到式(6):

$$\varepsilon = \frac{(\sigma - \sigma_{s2})}{\eta} t + \varepsilon_0. \tag{6}$$

由于 $\alpha = (\sigma - \sigma_{s2})/\eta_0$, 则由式(3)可得到式(7):

$$\varepsilon - \varepsilon_0 = \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{\eta_0} (t^n + \beta e^{nt}). \tag{7}$$

令式(6)等于式(7)可得式(8):

$$\eta = \frac{\eta_0 t}{t^n + \beta e^{nt}}. \tag{8}$$

式中: n 为加速蠕变系数; η_0 为加速蠕变黏滞系数的初始值.

对宾汉姆体进行非线性改进后得到非线性黏塑性体力学模型如图 8 所示.

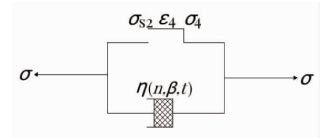


图 8 非线性黏塑性体力学模型

不同应力状态下的岩石加速蠕变特性可以通过该模型描述,该模型对应的蠕变本构方程可表示如式(9):

$$\varepsilon = \frac{H(\sigma - \sigma_{s2})}{\eta_0} (t^n + \beta e^{nt}). \tag{9}$$

式中: $H(\sigma - \sigma_{s2})$ 为塑性开关函数,可表示如式(10):

$$H(\sigma - \sigma_{s2}) = \begin{cases} 0 (\sigma \leq \sigma_{s2}); \\ \sigma - \sigma_{s2} (\sigma > \sigma_{s2}). \end{cases} \tag{10}$$

将相关的参数代入到式(9)与式(10)中,通过 Origin9.0 软件拟合可以得到加速蠕变指数 n 对非线性黏塑体的蠕变曲线的影响,如图 9 所示.

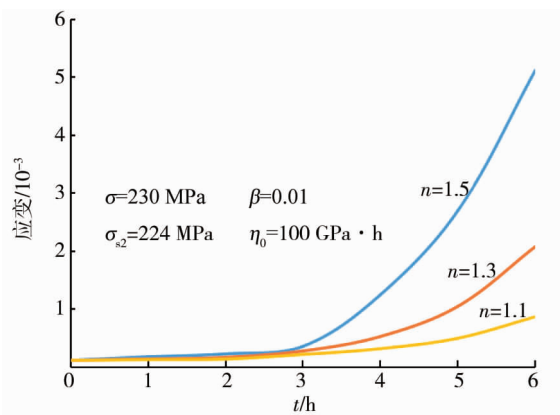


图 9 参数 n 对非线性黏塑性体蠕变曲线的影响

将得到的非线性黏塑性模型与 Hook 体、Kelvin 体、Bingham 体串联构成一个新非线性黏弹塑性蠕变

体力学模型如图 10 所示.

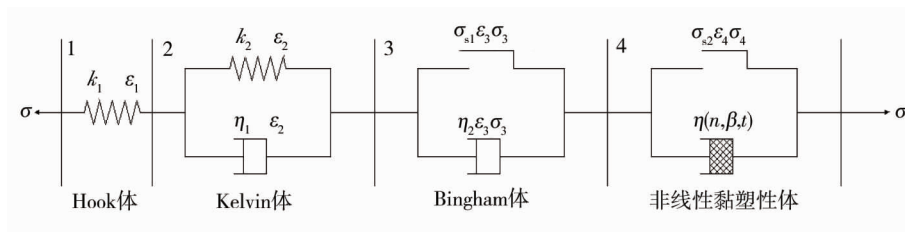


图 10 非线性黏弹塑性体力学模型

一维应力条件下,当 $\sigma \leq \sigma_{s2}$ 时,模型的 1,2,3 部分参与蠕变,第 4 部分达不到蠕变条件继而不参与蠕变过程,此时的蠕变力学模型为广义 Kelvin 与 Bingham 模型串联,当 $\sigma \geq \sigma_{s2}$ 时,第 4 部分达到蠕变条件参与蠕变过程,此时的蠕变模型即为图 10 所示的力学模型,所对应状态方程为式(11)和式(12):

$$\begin{cases} \sigma_1 = k_1 \varepsilon_1; \\ \sigma_2 = k_2 \varepsilon_2 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_2; \\ \sigma_3 = \sigma_{s1} + \eta_2 \dot{\varepsilon}_3; \\ \sigma_4 = \sigma_{s2} + \frac{\eta_0 \varepsilon_4}{t^n + \beta e^{nt}}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4; \\ \varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4; \\ \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon}_3 = \dot{\varepsilon}_4; \\ \ddot{\varepsilon} = \ddot{\varepsilon}_1 = \ddot{\varepsilon}_2 = \ddot{\varepsilon}_3 = \ddot{\varepsilon}_4. \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ 与 ε 为蠕变模型的总应力与总应变; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 与 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 为蠕变模型中胡克体,开尔文体,宾汉姆体和非线性黏塑性体的应力与应变.

通过整理式(11)与式(12)可得该模型蠕变本构方程如式(13):

$$\left(1 + \frac{k_2}{k_1} + \frac{k_2}{\eta_2} + \frac{k_2(t^n + \beta e^{nt})}{\eta_0} + \frac{2(nt^{n-1} + n\beta e^{nt})}{\eta_0}\right) \dot{\sigma} + \left(\frac{\eta_1}{k_1} + \frac{\eta_1(t^n + \beta e^{nt})}{\eta_0}\right) \ddot{\sigma} + \left(\frac{2k_2(nt^{n-1} + n\beta e^{nt})}{\eta_0} + \frac{\eta_1(n(n-1)t^{n-2} + \beta n^2 e^{nt})}{\eta_0}\right) (\sigma - \sigma_{s2}) = \eta_1 \ddot{\varepsilon} + k_2 \dot{\varepsilon}. \quad (13)$$

在常应力作用下,通过式(13)假设 $t=0$ 时, $\sigma = \sigma_0$;将边界条件代入式(13),解方程得到一维情况下的七元非线性黏弹塑性蠕变方程:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{k_1} + \frac{\sigma_0}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{\eta_1} t}\right) + \frac{(\sigma_0 - \sigma_{s1})}{\eta_2} t + \frac{(\sigma_0 - \sigma_{s2})}{\eta_0} (t^n + \beta e^{nt}). \quad (14)$$

然而,在实际情况下,深部巷道通常处于错综复杂地质力学环境中.在高应力的作用下其浅部围岩三向受力,若只采用一维情况下的蠕变模型难以描述其蠕变状态,所以在弹塑性理论的基础上,通过将一维蠕变方程扩展成三维表达式来表示围岩蠕变过程更加符合实际状况.

当岩石处于三向受力状况下时,内部任意点的应力状态可以分为导致元件体积变化的球应力张量 σ_m 和改变元件形状的偏应力张量 s_{ij} ,应变张量可以分为元件变形的偏应变张量 e_{ij} 与体积改变的球应变张量 ε_m .其应力和应变状态张量表达式可表示为式(15):

$$\begin{cases} s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m; \\ e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_m. \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 函数,对于弹性体来说,其对应的三维应力表达式如式(16):

$$\begin{cases} \sigma_m = 3K\varepsilon_m; \\ s_{ij} = 2Ge_{ij}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量.

因此常应力作用下三维情况下的七元非线性黏弹塑性蠕变方程如式(17):

$$\varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \right) \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_2} \right) t + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_{s2}}{\eta_0} \right) (t^n + \beta e^{nt}). \quad (17)$$

蠕变速度:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} \right) e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_{s2}}{\eta_0} \right) (nt^{n-1} + n\beta e^{nt}). \quad (18)$$

蠕变加速度:

$$\ddot{\varepsilon}(t) = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_3) G_2}{3\eta_1^2} e^{-\frac{G_2}{\eta_1} t} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_{s2})}{\eta_0} [n(n-1)t^{n-2} + n^2\beta e^{nt}]. \quad (19)$$

由式(18)与式(19)可知:当 $n=1$ 时, $\dot{\varepsilon}(t)$ 大于 0, $\ddot{\varepsilon}(t)$ 小于 0, 此时, 蠕变模型只能在整个岩石蠕变过程曲线上反映岩石蠕变的前 3 个阶段而加速蠕变阶段不能被解释出来; 当 $n>1$ 时, $\dot{\varepsilon}(t)$ 恒大于 0, $\ddot{\varepsilon}(t)$ 可以小于 0、等于 0、大于 0, 可以描述蠕变过程中的加速蠕变.

4 参数识别与曲线拟合

最小二乘法在岩石蠕变模型参数的估计中被广为使用. 但是, 在解决非线性问题上最小二乘法存在一定局限性, 效果不尽人意. 通过基于 Quasi-Newton 非线性优化算法 (BFGS) 的 Matlab 编程, 获得岩石在孔隙水作用下的完整加速蠕变过程曲线, 辨识得到的模型参数如表 4 所示. 本次参数辨识只辨识了围压 36 MPa, 孔隙水压 10 MPa 下的蠕变曲线. 由表 4 可知, 拟合相关系数平方 R^2 为 0.97, 拟合效果良好, 说明本文所提模型可以较好地描述孔隙水压作用下的岩石蠕变特性.

表 4 非线性蠕变模型参数

应力水平/MPa	G_1 /GPa	G_2 /GPa	η_0 /(GPa·h)	η_1 /(GPa·h)	η_2 /(GPa·h)	n	β	R^2
223.18	12.56	103.68	1.90×10^{12}	878.68	1 687.28	2.14	318.24	0.97

图 11 为砂岩在围压 36 MPa, 孔隙水压 10 MPa 条件下的蠕变模型试验曲线与拟合曲线的对比图. 由拟合对比曲线图可知吻合效果良好, 验证了本文提出的模型能较好地反映孔隙水压下岩石蠕变的瞬时蠕变, 减速蠕变, 稳定蠕变和加速蠕变过程.

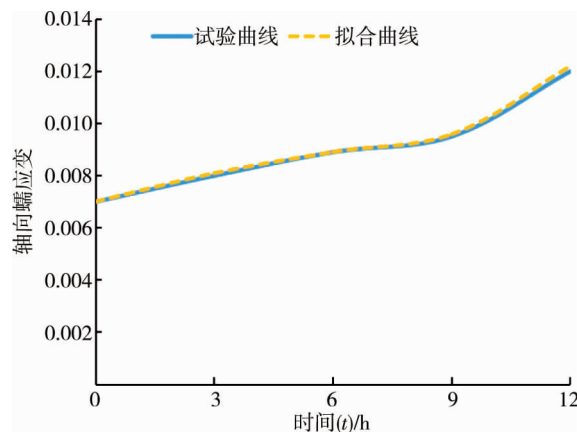


图 11 蠕变试验曲线与拟合曲线对比

5 结论

1) 随着孔隙水压的增大, 岩石出现加速蠕变所需的加载应力减小, 岩石进入加速蠕变的时间减短, 此外孔隙水压越大岩石加速蠕变过程曲线斜率越大, 说明其蠕变加速度越大.

2) 采用幂函数与指数函数相结合的函数方程可以较好描述岩石的加速蠕变, 并且蠕变系数 n 值越

大,非线性黏塑性体的加速蠕变越明显.

3)通过将改进的宾汉姆体与基本元件串联构成了可以描述岩石加速蠕变的力学模型.使用 MATLAB 软件辨识了孔隙水压作用下岩石加速蠕变过程曲线,辨识曲线与实验曲线吻合度较高,验证了本文所提出的非线性弹黏塑性力学模型的准确性.

参考文献:

- [1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
- [2] 侯朝炯.深部巷道围岩控制的关键技术研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):970-978.
- [3] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [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.
- [5] 赖荣辉,陈亚南,陈自海.分级加卸载下红砂岩蠕变破坏能量耗散特征研究[J].煤炭科学技术,2016,44(6):200-204.
- [6] 董恩远,王卫军,马念杰,等.考虑围岩蠕变的锚固时空效应分析及控制技术[J].煤炭学报,2018,43(5):1238-1248.
- [7] 张树光,孙成鑫,王有涛,等.海棠山隧道砂岩变参数蠕变特性研究[J].公路交通科技,2016,33(10):104-110.
- [8] 杨红伟,许江,聂闻,等.渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1613-1619.
- [9] 杨红伟,许江,聂闻,等.渗流水压力分级加载岩石蠕变模型[J].宜宾学院学报,2015,15(6):1-5.
- [10] 黄书岭,冯夏庭,周辉,等.水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J].岩土力学,2010,31(11):3441-3446.
- [11] 江宗斌.多场环境作用岩石蠕变特性试验及力学模型研究[D].大连:大连海事大学,2016.
- [12] 刘东燕,蒋海飞,李东升,等.高围压高孔隙水压作用下岩石蠕变特性[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):1916-1923.
- [13] 蒋海飞.高围压高孔隙水压作用下岩石卸荷蠕变特性研究及其工程应用[D].重庆:重庆大学,2014.
- [14] 陈宗基,康文法,黄杰藩.岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J].岩石力学与工程学报,1991,10(4):299-312.
- [15] 蒋昱州,张明鸣,李良权.岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究及其参数识别[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):832-839.
- [16] 张宇.深部巷道蠕变大变形失稳机理与控制技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [17] 林韩祥,张强勇,张龙云,等.大埋深隧洞泥质粉砂岩的三轴蠕变试验与理论分析[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1552-1561.
- [18] 刘文博,张树光,陈雷.基于非定常分数阶的岩石时效性蠕变模型[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):388-395.
- [19] 薛东杰,路乐乐,易海洋,等.考虑温度和体积应力的分数阶蠕变损伤 Burgers 模型[J].岩石力学与工程学报,2021,40(2):315-329.
- [20] 刘东燕,谢林杰,鹿晓峰,等.不同围压作用下砂岩蠕变特性及非线性黏弹塑性模型研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(s2):3705-3712.