

砂岩蠕变模型及参数演化规律*

张院成, 邓飞

(江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州市 341000)

摘要:为更深入认识岩石黏弹性力学行为,建立了改进的Maxwell模型,以砂岩蠕变试验结果为依据,检验了模型的可行性,并在此基础上,提出了获得不同加载时刻该模型参数的方法,对采用该法得到的结果进行拟合及敏感性分析。研究表明,改进的Maxwell模型可以描述砂岩黏弹性特性,且弛豫时间对应力水平较为敏感,而分数阶导数恰恰相反;分数阶导数与岩石内裂纹发育情况呈正相关;岩石稳态蠕变变形过程就是由黏弹性过渡到弹黏性的过程;分数阶演化方程中,系数 a 主要调控分数阶导数衰减速率,系数 b 反映分数阶导数衰减方式。该研究成果为明确模型参数物理意义,揭示岩石蠕变全过程提供了参考。

关键词:改进 Maxwell 模型;敏感性分析;分数阶导数;分数阶演化方程

中图分类号: TU45; TD315 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)03-0136-07

0 引言

地下岩石工程中常出现岩石蠕变现象,即一种与时间相关的岩石变形过程^[1-2]。为准确地预测和有效控制岩石的蠕变变形破坏,许多学者提出并利用大量的元件模型去表征岩石的蠕变力学行为,如 Burgers 模型、Nishihara 模型等^[3-4]。然而,元件模型从本质而言为整数阶模型,无法反映出变形的历史依赖性。因分数阶微积分具有时间记忆性的优点,大量学者基于该理论建立了各式各样的分数阶蠕变模型,取得了一定的研究成果^[5-8]。KOELLER^[6]基于 R-L 分数阶理论,提出了弹壶元件,并将其替换传统模型中的 Newton 元件。WU 等^[7]为描述盐岩蠕变全过程,建立了一个新的分数阶蠕变损伤模型。LIU 等^[8]根据 Caputo 分数阶理论,建立了一个含有变系数分数阶元件的蠕变模型,并应用于表征砂岩的蠕变力学行为。

在岩石实际蠕变过程中,岩石的性质将会发生改变。为了反映该特征,文献[7]和[9]认为应将分

数阶导数视为时间的函数。如今,许多学者将变阶分数阶理论引进岩石蠕变领域^[9-11]。例如,ZHANG 等^[9]根据 Gamma 函数的性质,建立了变阶分数阶蠕变模型,并将其应用于预测隧道围岩的变形规律。苏腾等^[10]根据岩石材料蠕变特性,并结合变阶分数阶理论,建立了一个三维状态下的变阶分数阶蠕变模型,之后,基于煤体室内蠕变结果,检验了该模型的科学性、合理性。WU 等^[11]考虑了岩石蠕变全过程的劣化效应,提出了一个修正的变阶分数阶元件,并建立了能够模拟岩石蠕变力学行为的蠕变模型。李德建等^[12]基于岩石流变理论中的等效黏弹性,建立了含弛豫时间的变阶分数阶蠕变模型,该模型能很好地表征重庆砂岩蠕变特性。

综上所述,如今采用分数阶理论构建能够模拟岩石材料蠕变特征的本构方程的研究颇多,而探讨所建模型参数随加载时间的演化规律的较少。研究模型参数的演化规律,对于确定该参量的物理含义,深入认识岩石蠕变全过程具有重要的理论意义及现实价值。为此,基于分数阶理论,将 Maxwell 模型中黏性元件替换为 Koeller 弹壶元件,从而建立了改进的 Maxwell 模型,并依据砂岩蠕变试验结果,检验了模型的合理性。之后,在该模型基础上,提出了一种获得蠕变全过程参数演化规律的方法,分析得出各模型参数随加载时间的变化规律,并拟合得到分数阶演化方程。最后,对分数阶演化方程进行敏感性分析。研究成果为明确模型参数的物理意义,揭示岩石蠕变全过程提供了参考意见。

1 蠕变模型

1.1 分数阶元件

目前,给分数阶微积分下定义的方式有多种^[13],其中最著名的为 R-L 微积分,其含义为:若函数 f 在 $(0, +\infty)$ 上连续,且在 $[0, +\infty]$ 的任一子

* 收稿日期:2023-05-19

作者简介:张院成(1997—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事矿业工程及岩土工程方面的研究,E-mail:3502434771@qq.com。

通信作者:邓飞(1966—),男,江西赣州人,副教授,主要从事采矿方法、控制爆破方面的研究,E-mail:dengfeijx@163.com。

区间上可积,则:

$$\frac{d^{-\alpha} f(t)}{dt^{-\alpha}} = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1)} \int_0^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中, α 为函数 $f(t)$ 的分数阶导数且 $\text{Re}(\alpha) > 0$; $\Gamma(\alpha + 1)$ 为 Gamma 函数; t 为加载时间, $h, t > 0$ 。

为突出弛豫时间的作用,采用 Koeller 提出的弹壶元件,其本构关系为^[6]:

$$\sigma(t) = E_1 \tau^\alpha \frac{d^\alpha \varepsilon(t)}{dt^\alpha} \quad (2)$$

式中, E_1 为弹壶元件弹性模量, GPa; τ 为元件弛豫时间, h , 用于描述材料内部弛豫现象的时间尺寸, 且 $\tau = \eta/E_1$; σ 为应力, MPa; ε 为应变。

根据分数阶算子的 Laplace 变换可知, 弹壶元件的蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1 \tau^\alpha} \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \quad (3)$$

1.2 改进的 Maxwell 模型

用弹壶元件来表征岩石稳定蠕变变形, 用弹性元件来描述岩石瞬时变形。综上, 本文建立了一个改进的 Maxwell 模型, 如图 1 所示, 该模型由弹性元件与弹壶元件串联而成。

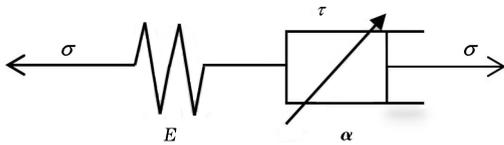


图 1 改进的 Maxwell 模型

根据流变元件的串并联法则, 并结合弹壶元件的本构关系, 同时为简化计算, 本文参照文献^[6], 令弹壶元件的 E_1 与弹性元件的 E 相等。则改进的 Maxwell 模型的蠕变方程为:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) + \frac{\varepsilon(t_0)}{\tau^\alpha} \times \frac{t^\alpha}{\Gamma(\alpha + 1)} \quad (4)$$

其中,

$$\varepsilon(t_0) = \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon(t_0)$ 为岩石材料产生的瞬时应变; E 为弹性元件的弹性模量, GPa。

2 模型验证

2.1 蠕变试验

本次试验采用的红砂岩试样源自江西赣州, 呈褐色, 细粒结构, 无明显层理、裂纹, 外观完整且均匀性良好, 试件的基本参数见表 1, 其单轴抗压强度为 60.148 MPa, 相应的应变为 0.7335%。根据岩石力

学试验的试样标准要求, 将试样加工成标准圆柱形试样。试验仪器为 GDS-VIS 三轴流变仪, 该设备主要由荷载架、轴向稳压系统、数字控制系统和微机系统构成, 最大轴压为 400 kN。先在 RMT-150C 岩石试验系统上进行常规单轴试验获得试样的单轴抗压强度, 并将其作为试样蠕变试验分级荷载的依据, 结果如图 2 所示。蠕变试验的加载方式为分级加载, 即根据单轴抗压强度将预加的荷载分为若干级, 随后在同一试件上从小到大依次施加荷载, 采用该方式能够有效地研究分析岩石的长期力学性质。一般而言, 岩石的长期强度与单轴抗压强度之比为 0.4~0.8^[14]。将荷载分为 4 个水平, 分别为单轴抗压强度的 40%、50%、60%、70%。加载时, 加载速率为 100 kN/s, 参考文献^[15], 将每级持续时间控制为 4 h。基于陈氏加载法, 对砂岩分级加载试验结果进行处理, 得到不同应力水平下试样的单级蠕变曲线, 结果如图 3 所示。

表 1 试件基本参数

直径/ mm	高度/ mm	密度/ (kg/m ³)	弹性 模量/GPa	泊松比
49.02	100.15	2298	11.474	0.231

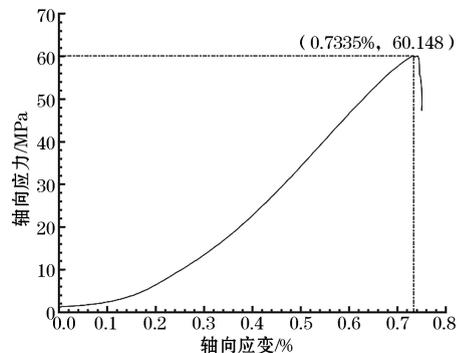


图 2 红砂岩单轴应力-应变曲线

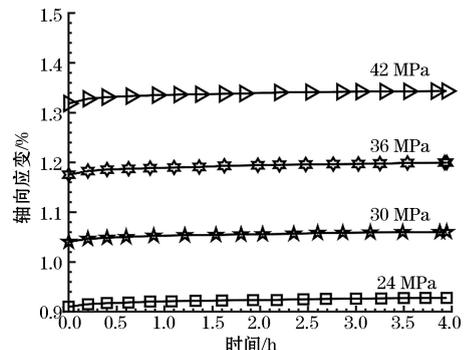


图 3 各分级蠕变曲线

2.2 参数反演及分析

为探究改进的 Maxwell 模型是否能够科学地

表征岩石类材料的蠕变特征,采用的参数反演过程如下。

对于整个蠕变阶段,采用式(4)有:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) + \frac{\varepsilon(t_0)}{\tau_1^{\alpha_1}} \times \frac{t^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1 + 1)} \quad (6)$$

式中, α_1 为整个蠕变阶段的分数阶导数,且 $0 \leq \alpha_1 \leq 1$; τ_1 为整个蠕变阶段的弛豫时间, h。

对式(6)两边作对数运算,可得:

$$\lg \left[\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t_0)} - 1 \right] = \alpha_1 \lg t - \lg [\tau_1^{\alpha_1} \Gamma(\alpha_1 + 1)] \quad (7)$$

将式(7)简化,可得:

$$\lg \left[\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t_0)} - 1 \right] = \alpha_1 \lg t - \alpha_1 \lg \tau_1 - \lg \Gamma(\alpha_1 + 1) \quad (8)$$

令 $x = \lg t$, $y = \lg \left[\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t_0)} - 1 \right]$, 式(8)可写成:

$y = ax + b$ 。整个蠕变阶段,改进 Maxwell 模型的分数阶导数、弛豫时间可通过式(9)获得,即:

$$\begin{cases} \alpha_1 = a \\ \tau_1 = 10^{-\frac{b + \lg \Gamma(\alpha_1 + 1)}{a}} \end{cases} \quad (9)$$

采用式(8)、式(9)对砂岩蠕变全过程的数据进行回归分析,计算得到的改进 Maxwell 模型相关参数值,见表 2。改进 Maxwell 蠕变模型理论曲线与试验结果的对比见图 4。从图 4 可知,模型理论曲线与试验结果较为吻合,说明改进 Maxwell 模型能够反映砂岩的蠕变特性。从表 2 可看出,分数阶导数都处在 0.34~0.44 之间,其变化区间较窄,可认为保持不变,故而可推断出岩石材料的应力水平对分数阶导数无影响。弛豫时间主要控制蠕变曲线的形态,从表 2 可知,弛豫时间随应力水平的提高呈现指数增加,这意味着随着外荷载的升高,蠕变曲线更易发生改变,进入蠕变第三阶段的可能性越大。

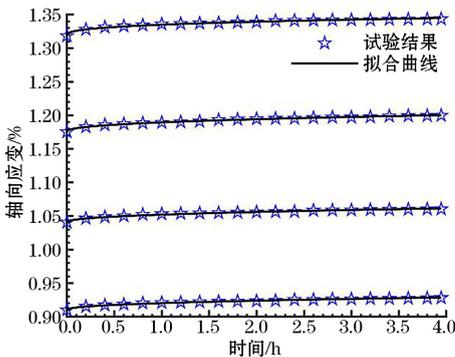


图 4 模型曲线与试验结果对比

采用指数函数对弛豫时间与轴向应力的关系进行拟合,结果如图 5 所示,拟合相关系数为 0.999,拟

合方程为:

$$\tau = 1610 \exp(0.03554 \sigma_1) + 2.533 \cdot 10^{-10} \exp(0.779 \sigma_1) \quad (10)$$

式中, σ_1 为轴向应力, MPa。

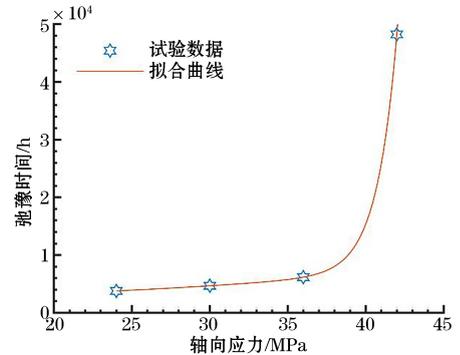


图 5 弛豫时间与轴向应力的关系

根据式(10)可知,当 σ_1 逐渐增大,弛豫时间 τ 明显增大。由此可见,弛豫时间对应力水平较为敏感。

表 2 模型参数反演结果

应力水平/MPa	分数阶导数	弛豫时间/h	相关系数
24	0.437	3779.403	0.993
30	0.430	4681.355	0.990
36	0.411	6173.079	0.996
42	0.343	48 239.940	0.991

3 模型参数演化规律

3.1 得到不同时刻模型参数的方法及结果

目前,建立蠕变模型的思路为:根据室内蠕变试验,得到岩石材料的蠕变力学行为;并基于此,结合数学理论,建立蠕变方程。该方法能够从宏观上反映出岩石材料的蠕变特性,但无法从微观的角度了解岩石蠕变全过程。为此,本文以建立的改进 Maxwell 模型为例,探讨了模型各参数随蠕变时间的变化规律,对佐证模型参数物理意义具有重要的价值,对日后从微观层面上分析蠕变全过程具有积极的推动作用。

一般情况下蠕变模型的分析思路为,在如图 6 所示的典型岩石稳态蠕变曲线中,在 $0 \sim t_3$ 时间段内,基于试验结果,对蠕变模型相关参数反演辨识,并将反演得出的参数结果视为能够反映该阶段岩石材料固有属性的参量;之后,对各蠕变参数进行各种分析。基于上述分析蠕变模型的思路,假设在 $0 \sim t_i$ 内辨识得到的蠕变参数只能够表征 t_i 时刻岩石的

性质,即用 $0 \sim t_1$ 时间内蠕变数据进行反演,便可得到 t_1 时刻的蠕变模型相关参数;反演 $0 \sim t_2$ 时间段的蠕变结果,可获得 t_2 时刻的蠕变参数。如此,便可计算得出各级不同蠕变时间下的蠕变参数,进而得到各蠕变参数随加载时间的演化规律。

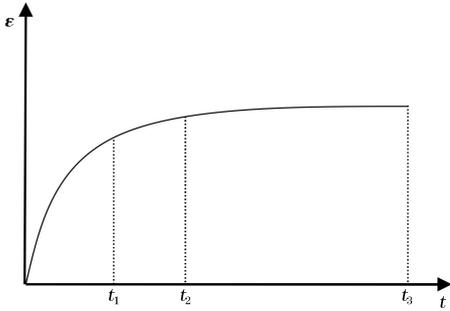


图6 岩石典型稳态蠕变曲线

采用上述方法,并基于上文建立的蠕变模型及反演方法,以0.1 h为时间间隔,基于 $0 \sim 0.1$ h、 $0 \sim 0.2$ h、 $0 \sim 0.3$ h等时间段的砂岩蠕变试验结果,依次反演出0.1 h、0.2 h、0.3 h等时刻改进Maxwell模型相关参数,结果如图7、图8所示。

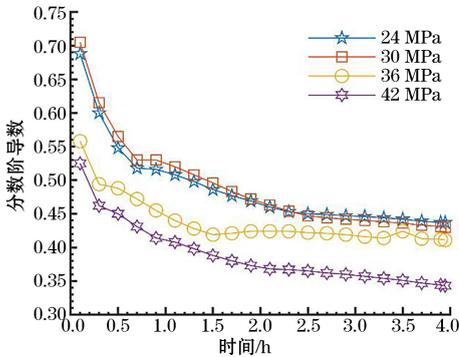


图7 分数阶演化规律

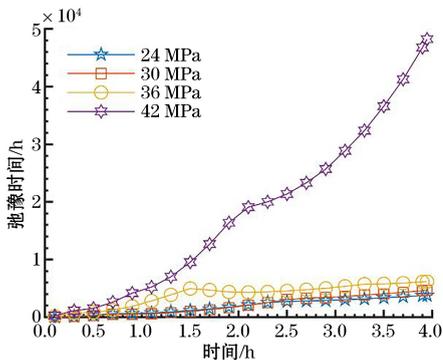


图8 弛豫时间演化规律

(1) 从图7可以看出,不同应力水平下的分数阶演化曲线为一簇形状类似的曲线。每一级荷载

下,随着加载时间的推移,分数阶导数逐渐减小,而岩石材料的蠕变过程就是其内微裂纹进行闭合等活动的过程。由此可见,分数阶导数与岩石材料内裂纹密切相关。加载初始阶段,因取样过程等外在扰动造成试件内裂纹发育较为充足,此时分数阶导数较大;随着加载时间的推移,裂纹逐渐闭合,此时分数阶导数渐渐变小。由此可推出,分数阶导数与材料内裂纹发育情况呈正相关性。

(2) 由图7可知,加载初期,当应力为24 MPa时,其分数阶导数为0.688,加载末期其值为0.437;而当应力为30 MPa时,加载初期其值为0.750,加载末期其值为0.430;应力为36 MPa、42 MPa时,加载初期其值分别为0.558、0.525,加载末期其值依次为0.411、0.343。PAOLA等^[16]研究了加载缓坡对拟合分数阶本构方程参数的影响,并指出,当研究对象的分数阶导数在 $0 \sim 0.5$ 时,为弹黏性介质;而当分数阶导数在 $0.5 \sim 1$ 时,为黏弹性介质。由此便可认为,在任一级荷载下,加载初期,岩石体现出黏弹性性质;而加载末期,表现为弹黏性特性;岩石的稳态蠕变变形过程就是岩石由黏弹性逐渐过渡到弹黏性的过程。同时,从整体来看,随着荷载的增加,无论是加载初期还是加载末期,分数阶导数均随应力的增大而减小,意味着随着荷载的增大,砂岩逐渐呈弹性。

(3) 从图7可知,分数阶导数演化曲线可分为两个阶段,依次为快速衰减阶段与稳定阶段,即分数阶导数快速减小、分数阶导数基本保持不变。在快速衰减阶段,应力越小,分数阶导数演化曲线越陡,应力越大,分数阶导数曲线就越缓;而在稳定阶段,各级应力下的分数阶导数虽有所不同,但波动较小,这点与文献^[17]得出的结论相一致,也间接佐证了本文获得分数阶导数演化曲线方法的正确性。

(4) 从图8可知,随着加载时间的推移,各级加载下的弛豫时间均逐渐增大,但若应力越大,弛豫时间增加的幅度也就越明显。可见,弛豫时间对应力水平十分敏感,这点与2.2节的结论相同。

采用以下函数对分数阶导数与加载时间的关系进行拟合:

$$\alpha = a \exp(-bt) + c \quad (11)$$

式中, a 、 b 、 c 为待拟合参数。

拟合结果如图9所示,拟合参数见表3。从相关系数来看,式(11)可以描述分数阶导数演化规律,且效果较佳。

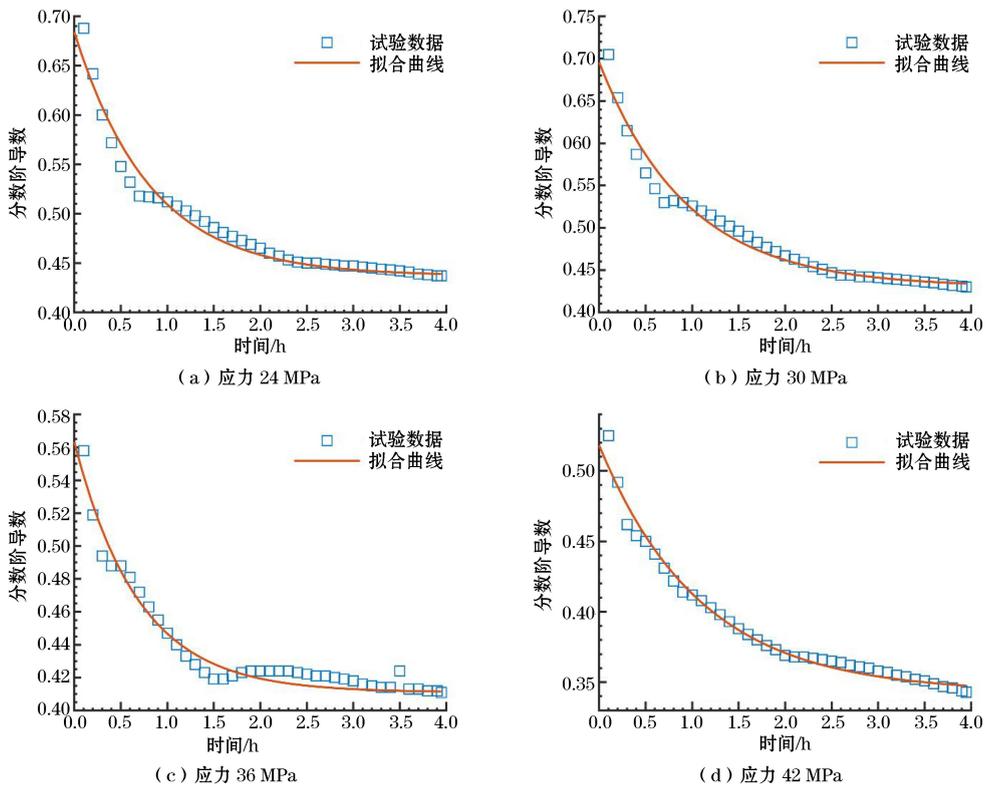


图9 分数阶导数演化曲线拟合

表3 分数阶导数拟合结果

应力水平/MPa	拟合系数 a	拟合系数 b	拟合系数 c	相关系数
24	0.247	1.227	0.437	0.967
30	0.266	1.060	0.430	0.971
36	0.152	1.450	0.411	0.963
42	0.175	0.920	0.343	0.984

3.2 敏感性分析

为探究分数阶导数演化方程中各参数对演化曲线的影响,基于表3中应力为42 MPa时反演获得的结果,对各参数进行敏感性分析。

系数 a 的影响:根据表3的拟合结果,将参数 $b=0.920, c=0.343$ 代入式(11)中,只改变系数 a 的大小,即选取 $a=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$,可获得一簇曲线,如图10所示。从图10可知,分数阶演化曲线为一簇形状相似的曲线,随着系数 a 的增大,分数阶导数值的衰减速率也更快,但对最终的分数阶导数值无影响。

系数 b 的影响:保持其他系数不变,只改变系数 b ,可得到不同 b 值下对应的曲线,如图11所示。从图11可以看出,系数 b 对曲线的形态影响较大。当 b 值较小时,如 $b=0.1, 0.3$,分数阶导数几乎呈线性衰减;而当 b 值较大时,如 $b=0.5, 0.7$,分数阶导数明显呈指数形式衰减。由此可见,通过调控系数 b ,可控制分数阶的衰减方式,但两种衰减方式转换的

临界值还需进一步探讨。与此同时,还可以看出,最终的分数阶导数与系数 b 值呈线性负相关。

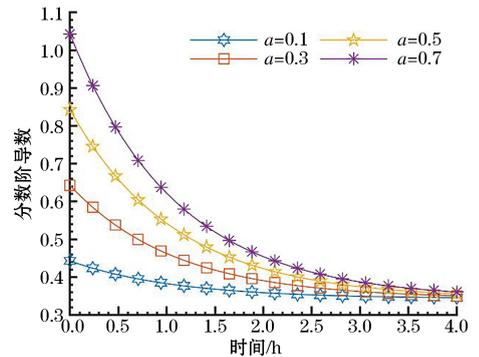


图10 系数 a 对分数阶演化曲线的影响

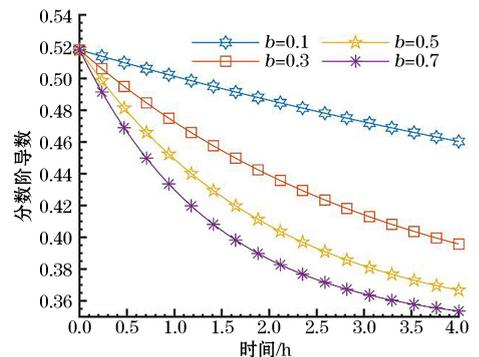


图11 系数 b 对分数阶演化曲线的影响

参数 c 的影响:保持式中其他参数不变,仅改变 c ,获得的曲线如图 12 所示。从图 12 可以看出,不同系数 c 下的曲线也为一簇形状类似的曲线。参数 c 对分数阶演化曲线的影响与应力对蠕变模型曲线的影响相同,都只对初始值、最终值有影响。

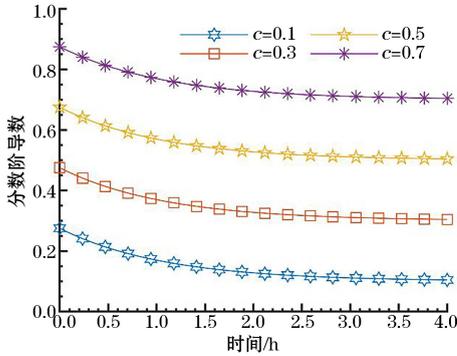


图 12 系数 c 对分数阶演化曲线的影响

综合分析,各系数的作用见表 4。对分数阶演化曲线影响较大的参数主要有 2 个,分别为系数 a 、 b ,系数 a 主要影响分数阶初始值及分数阶衰减速率,系数 b 的大小直接影响到分数阶演化曲线的形状,可反映出分数阶导数的衰减方式。从本次研究结果发现, b 值较小时,分数阶表现出线性衰减,而当 b 值较大时,呈现指数衰减。

表 4 分数阶演化方程各系数的影响

参数	发挥的作用
系数 a	影响到分数阶衰减速率。
系数 b	反映出分数阶衰减方式。
系数 c	只对分数阶的值有影响,对曲线形状无影响。

4 结论

基于分数阶理论,提出了一个改进的 Maxwell 模型,并根据室内砂岩蠕变试验结果,验证了该模型的合理性。在此基础上,提出了获得不同加载时刻的模型参数的方法,得到分数阶导数演化曲线及方程,并对得到的分数阶导数演化方程进行了敏感性分析。主要结论如下。

(1) 基于砂岩试验结果,不同应力状态下,改进 Maxwell 模型的拟合优度均高于 0.9,因此,可以认为改进 Maxwell 模型能够模拟砂岩的黏弹性性质。

(2) 根据改进 Maxwell 模型反演辨识结果发现,随着外荷载的增大,分数阶导数在很窄的范围内

波动,而弛豫时间明显增大。由此可推断出,分数阶导数对应力水平较为迟钝,而弛豫时间对应力水平较为敏感。

(3) 从分数阶导数演化曲线可知,若岩石内裂纹发育较为充足,此时分数阶导数较大,反之亦然。可见,分数阶导数与岩石材料内裂纹发育情况息息相关,且呈正相关性。且整个稳态蠕变变形过程就是岩石由黏弹性过渡到弹黏性的过程。

(4) 分数阶导数演化方程中,系数 a 、 b 的影响较大,其中,系数 a 主要调控分数阶导数的衰减速率,而系数 b 主要反映出分数阶导数的衰减方式。

因本次试验未出现加速蠕变阶段,加上建立模型的局限性,并未探讨可以描述完整蠕变曲线的蠕变模型相关参数的演化规律。

本文只探讨了各蠕变模型各参数随加载时间的变化规律,并未研究该过程中岩石材料内部结构的变化。若能够探讨蠕变各时刻内部结构变化规律,加上宏观上模型参数演化规律,对揭示各蠕变模型参数的物理意义具有重要的现实价值。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 朱赛楠,殷跃平,李滨.二叠系炭质页岩软弱夹层剪切蠕变特性研究[J].岩土力学,2019,40(4):1377-1386.
- [3] 杨秀荣,姜谱男,江宗斌.含水状态下软岩蠕变试验及损伤模型研究[J].岩土力学,2018,39(增刊1):176-183.
- [4] YU J, LIU G Y, CAI Y Y, et al. Time-dependent deformation mechanism for swelling soft-rock tunnels in coal mines and its mathematical deduction [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(3): 4019186.
- [5] 殷德顺,任俊娟,和成亮,等.一种新的岩土流变模型元件[J].岩石力学与工程学报,2007,26(9):1899-1903.
- [6] KOELLER R C. Application of fractional calculus to the theory of viscoelasticity[J]. Journal of Applied Mechanics, 1984, 51(2): 299-307.
- [7] WU F, CHEN J, ZOU Q L. A nonlinear creep damage model for salt rock [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2019, 28(5): 758-771.
- [8] LIU X L, LI D J, HAN C. A nonlinear damage creep model for sandstone based on fractional theory[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(1): 460-481.
- [9] ZHANG J Z, ZHOU X P, YIN P. Visco-plastic deformation analysis of rock tunnels based fractional derivatives [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 209-219.

- [10] 苏腾,周宏伟,赵家巍,等.基于变阶分数阶导数的岩石蠕变模型[J].岩石力学与工程学报,2019,38(7):1355-1363.
- [11] WU F, GAO R B, LIU J, et al. New fractional variable-order creep model with short memory [J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 380: 125278.
- [12] 李德建,刘校麟,韩超.基于等效黏弹性的变阶分数阶岩石损伤蠕变模型[J].岩土力学,2020,41(12):3831-3839.
- [13] KILBAS A A, SCRIVASTAVA H M, TRUJILLO J J. Theory and Applications of fractional differential equations [M]. Amsterdam; Elsevier, 2006.
- [14] 孙均.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.
- [15] 赵宝云,刘东燕,郑颖人,等.红砂岩单轴压缩蠕变试验及模型研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):744-747.
- [16] PAOLA M D, FIORE V, PINNOLA F P, et al. On the influence of the initial ramp for a correct definition of the parameters of fractional viscoelastic materials[J]. Mechanics of Materials, 2014, 69(1): 63-70.
- [17] 赵金洲,彭瑀,李勇明.页岩储层黏弹性力学行为表征及数值模拟技术[M].北京:科学出版社,2019.

Creep Model and Parameter Evolution Law of Sandstone

ZHANG Yuancheng, DENG Fei

(School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to gain a deeper understanding of the viscoelastic mechanical behavior of rocks, an improved Maxwell model was established. According to the results of sandstone creep tests, the feasibility of the model was verified. On this basis, a method was proposed to obtain the model parameters at different loading times, then, fitting and sensitivity analysis were carried out on the results obtained by the proposed method. The research results indicate that the improved Maxwell model can characterize the viscoelastic properties of sandstone, and the relaxation time is sensitive to the stress level, while the fractional derivative is just the opposite. The fractional derivative is positively correlated with the development of internal cracks in rocks. The steady-state creep deformation process of rock is the process of transition from viscoelasticity to elastic viscosity. In fractional order evolution equations, coefficient a mainly regulates the decay rate of fractional derivative, while coefficient b reflects the way in which the fractional derivative decayed. This research findings provide a reference for clarifying the physical significance of model parameters and revealing the entire process of rock creep.

Key words: Improved Maxwell model, Sensitivity analysis, Fractional derivative, Fractional order evolution equation