

文章编号: 1001-4888(2017)06-0865-06

结构面泥岩非线性蠕变特性试验研究^{*}

刘晓林, 苏荣华, 马壮, 沈洪爽, 王莹

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 利用自制蠕变试验装置对含有平直闭合结构面的泥岩试样进行单轴蠕变试验研究。结果表明: 轴向应力为 8~12MPa 时, 结构面泥岩蠕应变与总应变比值呈线性增加; 随着轴向应力增加, 蠕应变与总应变比值突变呈上凹型增加, 继而呈上凸型变化; 结构面泥岩蠕变速率随轴向应力增加衰减显著, 与时间为负指数关系。为描述不同轴向应力下结构面泥岩蠕变规律, 提出一种非线性元件与时间呈负指数关系的非线性黏滞体, 构建结构面泥岩法向非线性蠕变模型, 并进行参数辨识及拟合分析。分析发现改进的 Burgers 模型能很好地描述结构面泥岩的法向非线性蠕变特性。

关键词: 结构面泥岩; 单轴蠕变试验; 非线性黏滞体; 蠕变模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-196

0 引言

结构面泥岩在地下空间中普遍存在, 其蠕变特性与围岩巷道变形问题密切相关。因此, 研究结构面泥岩非线性蠕变特性对地下工程的稳定性及安全性具有十分重要的意义。文献[1—6]研究了在双轴应力作用下岩石规则结构面的剪切蠕变特性, 并建立蠕变方程。文献[7]对节理岩石进行了恒剪切应力不同法向应力作用下的流变试验, 采用老化及遗传理论对节理岩石蠕变特性进行研究。文献[8, 9]采用 FLAC3D 软件建立硬性结构面模型, 分析结构面蠕变特性与切应力大小及其爬坡角度之间的关系。文献[10]采用 FLAC3D 研究了在不同间距、长度、倾角的不连续软弱夹层的流变特性。文献[11]研究了压剪和拉伸破坏产生的结构面的剪切蠕变机理。文献[12]对完整泥岩和结构面泥岩蠕变特性进行对比分析, 并对其模型进行讨论。

以上针对岩石结构面剪切蠕变研究成果较多, 但对含结构面岩石法向蠕变方面的研究显得不足。本文采选含结构面典型泥岩试样进行单轴蠕变试验, 获取结构面泥岩法向蠕变特性; 提出一种非线性元件, 构建结构面泥岩法向非线性蠕变模型。基于试验结果, 采用参数辨识和拟合分析确定了相应的模型参数。

1 试样制备及试验方案

采用沈阳红阳三矿千米以下矿井顶板泥岩, 通过钻芯获取泥岩试件, 并将断裂的泥岩试件断面用手工打磨方法打磨光滑平整, 构成 $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ 含结构面的泥岩若干个。从中选取 5 个表面无明显裂隙含平直型即 β 为 0° 贯通闭合结构面的泥岩试样, 如图 1 所示。

试验利用自主研发的静载油压试验装置进行, 采用力矩平衡法消除水平应力影响, 原理图见图 2。

^{*} 收稿日期: 2016-09-30; 修回日期: 2016-12-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474120)资助

通讯作者: 苏荣华(1965—), 女, 博士后, 教授。研究方向: 岩土力学与工程。Email: suronghua2006@163.com

加载框中的重量经双杠杆放大 34.02 倍作用在泥岩轴向。采用千分表测量泥岩轴向位移,精度可达 0.001,继而计算得到轴向应变。试验在室温下进行,采用单试件法,仅逐级施加轴向应力。试样加载质量 M 与作用在试样轴向应力 σ 的关系式为:

$$M = \frac{\left(\frac{33.17 x_1 \sigma \times 10^{-4}}{9.8} - 45 \right) y_1}{x_2} - 65.58 \quad (1)$$

式中, M 为加载框中加载的总质量; σ 为试件的轴向应力; x_1 、 x_2 、 y_1 、 y_2 为各力矩的力臂,见图 2。

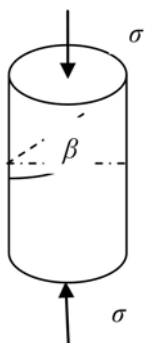


图 1 结构面泥岩试样

(注: σ 为轴向应力, β 为结构面与水平方向夹角)

Fig. 1 Mudstone specimens with structural surface

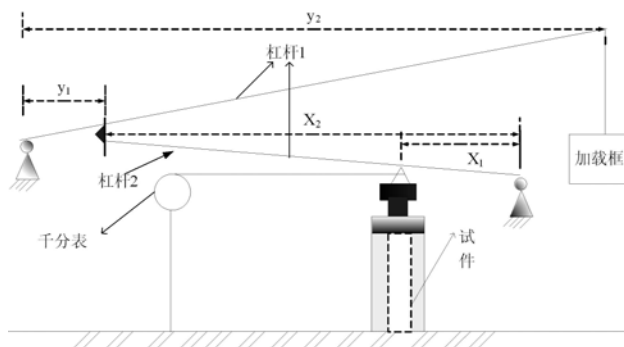


图 2 原理图

Fig. 2 The principle diagram of experimental device

2 试验结果及分析

根据蠕变试验结果,选取具有代表性的一组试验结果进行分析。图 3 为试验蠕变全过程示意图,每一级轴向应力加载瞬时,泥岩发生瞬时变形;逐级增加轴向应力,泥岩变形随之增加。所施加的轴向应力达到 22MPa 时,含平直结构面泥岩总变形为 0.4058mm。文献[12]中完整泥岩总变形为 0.5438mm,约为结构面泥岩变形的 1.3 倍。随着轴向应力增大,结构面与泥岩蠕变特性的相关性增强;完整泥岩试样与结构面泥岩蠕变曲线显著分离。

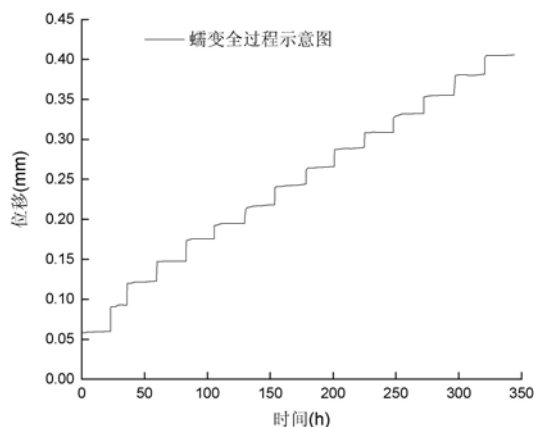


图 3 蠕变全过程示意图

Fig. 3 The creep curves of whole course

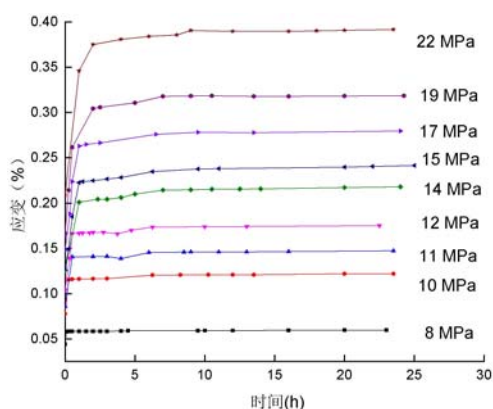


图 4 蠕变曲线

Fig. 4 Creep curves

2.1 蠕变曲线

根据参考文献[13]提出处理数据的方法,得到结构面泥岩试样轴向应力为 8~22MPa 的蠕变曲线,见图 4。因所施加轴向应力未达到发生加速过程的临界值,结构面泥岩仅经历了瞬时应变、衰减蠕变及

稳定蠕变。轴向应力较低时,结构面泥岩仅发生瞬时和衰减蠕变;轴向应力较高时,发生瞬时、衰减及稳定蠕变。由图4分析可知,轴向应力增加,瞬时应变变化较大。结构面泥岩在轴向应力为8MPa时,瞬时应变为0.0442%;轴向应力为10MPa时,瞬时应变为0.0476%;轴向应力为11MPa时,瞬时应变为0.056%;轴向应力为19MPa时,瞬时应变0.082%。参考文献[12]中完整泥岩蠕变曲线在8~18MPa时近似光滑曲线。含有结构面的泥岩试样蠕变曲线,在8MPa时保持水平稳定,在9~22MPa时有小幅度波动。由此,低应力水平下,结构面对泥岩蠕变特性影响较小,随着轴向应力增加,结构面对泥岩蠕变变形规律影响愈发显著。

图5为瞬时应变和蠕应变与总应变比值随轴向应力变化的曲线。由图5分析可得,瞬时应变曲线随轴向应力的变化近似线性。蠕应变与总应变的百分比在8~12MPa范围内,随着应力变化呈线性增加;在12~15MPa范围内,曲线力呈开口向下的上凹型;在15MPa时曲线出现拐点,之后呈开口向下的上凸型。结合图4分析,加载初期,泥岩内部裂隙及结构面发生闭合,瞬时应变较大,蠕变变形不明显,呈线性变化;随应力增加,蠕变变形明显呈非线性变化。

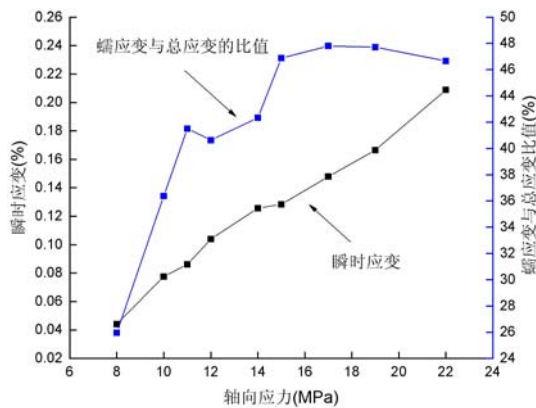


图5 瞬时应变及蠕应变与总应变比值曲线

Fig. 5 The curves of instantaneous strain and ratio for creep strain to total strain

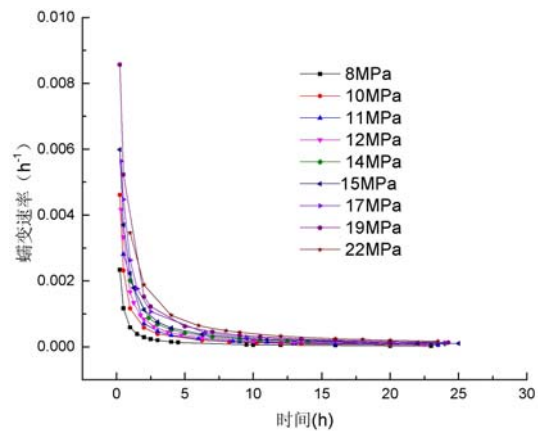


图6 蠕变速率曲线

Fig. 6 The curves of creep rate

2.2 蠕变速率

图6为结构面泥岩蠕变速率曲线。

由蠕变速率曲线可知,蠕变速率 v 随时间 t 的增加而减少,经过拟合发现二者呈负指数关系:

$$v = v_0 + Be^{-t/m} + Ce^{-t/n} + De^{-t/b} \quad (2)$$

式中, B 、 C 、 D 、 m 、 n 、 b 为参数; v_0 为初始值。

结构面泥岩蠕变速率衰减随轴向应力增加明显减缓。低应力水平下,结构面泥岩试样在4个小时进入稳定阶段。随着轴向应力提高,含结构面泥岩趋于稳定阶段的时间有一定延迟。

3 蠕变模型

由图4和图6可知,结构面泥岩瞬时变形为弹性变形;蠕变变形随着轴向应力增加呈非线性增加。为描述结构面泥岩的法向非线性蠕变特性,本文提出一种与时间呈负指数关系的非线性黏滞体替换Burgers模型中的线性黏滞体,得到的改进的Burgers模型,见图7。

改进的Burgers模型由弹性元件、开尔文模型及非线性黏滞体三部分串联组成,则由模型元件串联关系得:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad (3)$$

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (4)$$

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \epsilon_1 \quad (5)$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \epsilon_2 + \eta_1 \cdot \dot{\epsilon}_2 \quad (6)$$

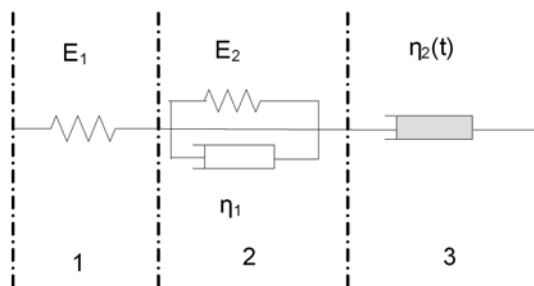


图 7 改进的 Burgers 模型

Fig. 7 Improved Burgers model

$$\sigma_3 = \eta_2 \cdot \dot{\epsilon} / (1 + me^{nt} - ne^{nt}) \quad (7)$$

式中, σ 和 ϵ 分别为总应力和总应变; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 分别为 1、2 和 3 各个部分的应力分量、应变分量; η 为黏滞系数; E 为弹性模量; t 为时间的函数; m 和 n 为蠕变参数, 为常量。

由式(3)~(7)联立, 可得结构面泥岩的本构关系如下:

$$E_1 \ddot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon} = \ddot{\sigma} + \left[\frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_1} + \frac{E_1 (1 + me^{nt} - ne^{nt})}{\eta_1} \right] \dot{\sigma} + \left[\frac{E_1 E_2 (1 + me^{nt} - ne^{nt})}{\eta_1 \eta_2} + \frac{E_1 (m^2 e^{nt} - n^2 e^{nt})}{\eta_1} \right] \sigma \quad (8)$$

单轴压缩试验在 $t=0$ 时, 轴向应力 σ_0 为常量, 则

$$\dot{\sigma}_0 = \frac{d\sigma_0}{dt} = 0, \quad \ddot{\sigma} = \frac{d}{dt}(d\sigma_0) = 0, \quad \epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (9)$$

结构面泥岩法向非线性蠕变方程为:

$$\epsilon = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_2 t}{\eta_2} \right) \right] + \frac{t - e^{nt} - e^{nt}}{\eta_2} \right\} \quad (10)$$

当蠕变参数 $m=n$ 时, 式(10)为经典 Burgers 模型; 当 m 的值与 n 不相等时, 式(10)为描述结构面泥岩法向非线性蠕变特性的蠕变模型。

4 参数辨识

将试验数据代入到式(10)中, 利用数学优化分析软件 1st-opt 辨识结构面泥岩非线性蠕变模型参数。采用 Levenberg-Marquardt 通用全局优化法来求取模型参数最优解^[14], R^2 均大于 0.959, 拟合曲线与试验曲线一致, 如图 8 所示, 表明了本文建立的结构面泥岩非线性损伤蠕变模型的合理性。模型中各参数的最优解见表 1。

表 1 蠕变参数

Tab. 1 Creep parameters

轴压(MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	η_1 (GPa · h)	η_2 (GPa · h)	m	n	R^2
8	181.0	564.2	12.9	70039.7	-1.65	0.107	0.999
9	121.1	620.4	52.2	10610.1	-0.842	0.167	0.996
10	128.7	263.1	15.5	16472.6	-0.07	0.114	0.996
11	127.8	203.5	6.25	14403.2	-1.17	0.114	0.993
12	116.4	186.7	53.28	13843.4	-0.73	0.116	0.959
14	111.4	182.7	54.7	9464.6	-0.007	0.113	0.995
15	122.5	139.7	78.0	17177.6	-0.541	0.101	0.979
17	118.3	130.7	74.2	39135.5	-0.516	0.100	0.979
19	115.4	133.8	66.4	14815.9	-0.008	0.116	0.995
22	105.3	128.0	79.8	22820.4	-14.66	0.109	0.999

5 结论

(1) 结构面与泥岩蠕变特性关系密切。完整泥岩总变形为结构面泥岩变形的 1.3 倍, 随轴向应力变化, 结构面泥岩全程蠕变曲线与完整泥岩全程蠕变曲线显著分离。

(2) 含有结构面的泥岩试样蠕变变形与法向应力水平密切相关, 蠕应变与总应变比值在 8~12MPa 范围内呈线性增加, 在 12MPa 时突变呈非线性增加。蠕应变与总应变比值随着轴向应力增加由 0.26 提高至 0.47。

(3) 提出一种与时间呈负指数关系的非线性黏滞体, 构建了结构面泥岩法向非线性蠕变模型;

采用全局分析方法对蠕变参数进行辨识, 计算结果与试验值高度一致, 拟合曲线 R^2 均大于 0.959。改进的 Burges 模型可以很好地描述结构面泥岩法向非线性蠕变特性。

参考文献:

- [1] 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, 2(2):223—226 (SHEN Mingrong, ZHU Genqiao. Testing study on creep characteristic of regularly dentate discontinuity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 2(2):223—226 (in Chinese))
- [2] 沈明荣, 张清照. 规则岩体结构面的蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2):3973—3979 (SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study on creep characteristics of regular rock mass discontinuity[J]. Chinese journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2):3973—3979 (in Chinese))
- [3] 沈明荣, 张清照. 绿片岩软弱结构面的剪切蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6):1149—1155 (SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study of shear creep characteristics of greenschistdiscontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6):1149—1155 (in Chinese))
- [4] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面的剪切蠕变特性及其本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7):127—132 (ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wengqi. Study on the shear creep characteristics and constitutive model of rock mass discontinuity[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7):127—132 (in Chinese))
- [5] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 绿片岩软弱结构面剪切蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12):3632—3638 (ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Study of shear creep constitutive model of greenschist structural plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12):3632—3638 (in Chinese))
- [6] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面的剪切蠕变特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4):564—569 (ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Laboratory test for shear creep characteristic of rock mass discontinuity[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4):564—569 (in Chinese))
- [7] 闫子舰, 夏才初, 王晓东, 等. 岩石节理流变力学特性及其本构模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(5):601—606 (YAN Zijian, XIA Caichu, WANG Xiaodong, et al. Shear rheological properties and model for rock joints[J]. Journal of Tongji University (Natrual Science), 2009, 37(5):601—606 (in Chinese))
- [8] 熊良霄, 杨林德. 考虑节理面法向蠕变的节理岩体蠕变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(3):814—821 (XIONG Liangxiao, YANG Linde. Creep model for rock mass considering normal creep of rock joint plane [J]. Journal of Central Sourth University (Science and Technology), 2009, 40(3):814—821 (in Chinese))
- [9] 熊良霄, 虞利军, 杨昌斌. 硬性结构面的剪切流变模型及试验数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):2894—2899 (XIONG Liangxiao, YU Lijun, YANG Changbin. Shear rheological model for hard structural surface and test numerical analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2894—2899 (in Chinese))
- [10] 蒋昱州, 徐卫亚, 朱杰兵, 等. 含断续软弱夹层岩石流变力学性质研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12):71—75 (JIANG Yuzhou, XU Weiya, ZHU Jiebing, et al. Rheology characteristics of rock with discontinuously

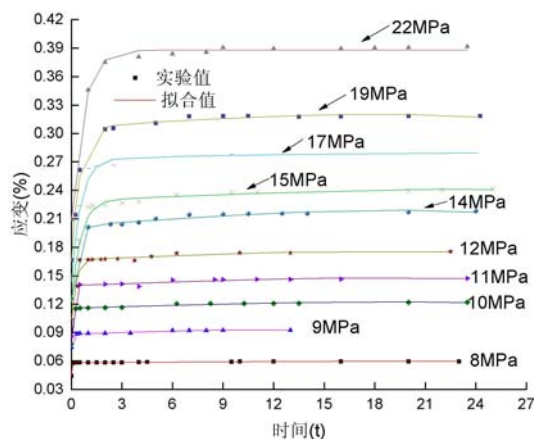


图8 试验值及其拟合曲线

Fig. 8 The experiment data and its fitting curves

- weak intercalation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12):71—75 (in Chinese)
- [11] 王煜曦. 岩石断裂表面细观接触演化与剪切力学模型研究[D]. 北京科技大学, 2015 (WANG Yuxi. Study on micro-contact evolution and shear mechanical model of fractured rock surfaces[D]. University of Science and Technology Beijing, 2015 (in Chinese))
- [12] 刘晓林, 苏荣华, 马壮, 等. 结构面泥岩法向蠕变特性实验研究[C]//第三十五届国际采矿岩层控制会议(中国). 北京: 煤炭工业出版社, 2016:508—516 (LIU Xiaolin, SU Ronghua, MA Zhuang, et al. Experimental study on normal creep properties of mudstone with structural plane [C] // Proceedings of 35th International conference Ground Control in mining (China). Beijing: China Coal Industry Publishing Housing, 2016, 508—516 (in Chinese))
- [13] 杨文东, 张强勇, 陈芳, 等. 辉绿岩非线性流变模型及蠕变加载历史的处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7):1405—1413 (YANG Wendong, ZHANG Qiangyong, CHEN Fang, et al. Research on nonlinear rheological model of dlabase and treatment for creep loading history[J]. Chinese journalof Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7):1405—1413 (in Chinese))
- [14] 程先云. 优化—拟合—建模: 1st-opt 应用详解[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012 (CHENG Xianyun. Optimization-fitting-modeling: 1st-opt application explanation[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2012 (in Chinese))

Experimental Study of Nonlinear Creep Characteristics of Mudstone with Structural Surface

LIU Xiao-lin, SU Rong-hua, MA Zhuang, SHEN Hong-shuang, WANG Ying

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Structural surface has an important influence on rock creep characteristics. Using self-made creep experimental device, uniaxial creep experiment was carried out for mudstone specimens with flat closed structural surface. Experimental results show that when axial stress is 8~12MPa, the ratio of creep strain to total strain of mudstone with structural surface increases linearly. With the increase of axial stress, the ratio of creep strain to total strain varies nonlinearly, exhibiting concave first convex later pattern. Creep rate of mudstone with structural surface obviously decreases with the increase of axial stress, exhibiting negative exponent relation with time. In order to describe creep characteristics of mudstone with structural surface under different axial stresses, a kind of nonlinear element-nonlinear viscous body, which has negative exponential relation with time, was proposed. Combining with Burgers model, a normal nonlinear creep model of mudstone with structural surface was established, based on which, parameter identification and fitting analysis was performed. This improved Burgers model can well describe the creep characteristics of mudstone with structural surface.

Keywords: mudstone with structural surface; uniaxial compressive creep test; nonliner viscous body; creep model