

基于卸荷试验路径的泥岩变形特征及数值计算

李栋伟^{1,2,3},汪仁和^{1,2,3},范菊红³

(1. 教育部矿山地下工程研究中心,安徽淮南 232001;2. 安徽省矿山建筑重点实验室,安徽淮南 232001;3. 安徽理工大学 土木建筑学院,安徽淮南 232001)

摘要:通过先固结后径向卸载的三轴剪切试验方法模拟煤矿泥岩巷道开挖过程中应力状态变化,在试验围压内,径向卸荷条件可以用 Drucker-Prager 强度准则较好地描述软岩破坏过程。蠕变试验结果表明:随偏应力水平的降低,蠕变速率明显减小,当偏应力水平较低时(1.0 MPa),轴向蠕变无变化,蠕变速率几乎为0;当轴应力较高时(3.5 MPa),泥岩蠕变过程经历减速、定常和加速蠕变3个阶段。根据试验提出了泥岩的弹黏塑流变本构模型,将泥岩的蠕变试验结果与计算值进行对比:两者变形规律完全一致且数值较吻合,从而验证了泥岩本构模型的正确性。

关键词:卸载;软岩巷道;三轴剪切试验;蠕变;泥岩本构模型

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A

The deformation properties of mudstone and numerical calculation based on unloading path

LI Dong-wei^{1,2,3}, WANG Ren-he^{1,2,3}, FAN Ju-hong³

(1. Research Center of Mining Underground Engineering, Ministry of Education, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Mine Building of Anhui Province, Huainan 232001, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The stress state in coalmine mudstone roadway excavation process was simulated by the triaxial shear test through the method of first consolidation then radial unloading. The radial unloading conditions of the test in the confining pressure can use the Drucker-Prager strength criterion, it can well describe the soft-rock failure process. The creep test results show that the creep rate reduce obviously with the deviatoric stress level decrease, the axial creep unchanged when the deviatoric stress level is lower(1.0 MPa), the creep rate is almost zero; the mudstone creep process goes through deceleration, steady and acceleration these three stages when the axial stress is higher(3.5 MPa). The elasto-viscoplastic rheological constitutive model of mudstone was proposed based on the test. Compared the test results and the calculated value, it shows that their deformation laws are complete consistency and their values are more anastomosis, thus the correctness of the constitutive model of mudstone is verified.

Key words: unloading; soft-rock roadway; triaxial shear test; creep; the constitutive model of mudstone

软岩流变是矿山深部岩石工程中不可忽视的重要力学特征之一,巷道的破坏与软岩的流变特性关系紧密。目前在我国的华东华北地区,浅部煤层已充分开采,新建矿井巷道座落在深厚不稳定岩层中。有关软岩流变机理也日渐丰富和完善,国内外科研工作者基于试验和理论建立了众多的流变模型。同济大学

朱合华教授^[1]通过试验获得含水状态是影响岩石蠕变力学性质的一个重要因素,探讨了岩石蠕变受含水状态影响的规律,并根据广义 Kelvin 模型求得岩石蠕变的模型参数。范庆忠和高延法^[2-3]通过室内三轴蠕变试验获得泥岩存在一个起始蠕变应力阈值和一个蠕变破坏临界应力,并且随围压的增加而增加,

通过单轴压缩条件下软岩蠕变特性的分析,引入损伤变量和硬化函数,建立软岩轴向和横向非线性蠕变模型。邓荣贵^[4]根据岩石加速蠕变阶段的变形特性,提出了一种非牛顿流体黏滞阻尼元件,将该阻尼元件与描述岩石减速蠕变和等速蠕变特性的传统模型结合,构成了新的综合流变力学模型。王来贵^[5]采用微分方程描述方法,建立了单轴和三轴情况下岩石全程应力应变过程中的非线性蠕变损伤模型,分析了岩石的蠕变损伤过程和稳定性。李刚、梁冰^[6]利用带有压力密封仓的三轴蠕变仪进行了不同孔隙水压力条件下软岩蠕变试验,通过最小二乘回归分析对蠕变方程进行了参数识别,孔隙水压力对软岩蠕变影响显著,主要体现在初始应变量和弹性参数的变化。李栋伟等^[7-9]采用应力路径试验方法,模拟人工冻结法凿冻结壁受力变化过程,通过推导获得冻砂土非线性流变本构力学模型及双屈服面流变本构模型,给冻土数值计算带来了方便。

近年来,国内外许多科研工作者在对软岩的蠕变本构关系研究中取得了可喜的成果,但基于卸荷应力路径高地应力软岩的流变特性试验研究及数值模拟方面鲜见报道。本文主要以深埋软岩巷道开挖过程中卸载状态为研究背景,以固结卸载的三轴剪切和蠕变试验结果为基础获得了软岩弹黏塑本构力学模型。

1 试验方案

1.1 试验条件

室内试验的试块来源于淮南某矿井深部巷道泥质软岩样,试件加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体,试样上下表面平整度保持在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 以内,侧面平面度在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内,试样加工和精度均符合《工程岩体力学试验方法标准》(GB/ 50266 - 99)中的试样制备要求。将加工好的试件进行检测,筛选出一致性好的试件 27 个,其中取 3 个作物理性质指标,其余 24 个作蠕变和卸载的三轴剪切试验。实验室测得试样的含水率为 26.3%,天然密度为 2.2 g/cm^3 ,饱和单轴抗压强度为 4.65 MPa,饱和度为 96.7%。

1.2 软岩三轴卸载应力路径

为模拟煤矿巷道开挖与支护过程,采用的三轴剪切试验步骤如下:

(1)将加工好的试样在预定围压 σ_3 进行固结,当试样的变形不大于 0.005 mm/h 时认为固结完成,预定固结围压是根据取样深度确定;

(2)逐渐卸载围压,直至试件变形稳定或破坏。

三轴蠕变试验方法步骤为:

(1)施加围压;

(2)逐渐增加轴压至一预定值的蠕变试验,当试样变形已稳定 ($d\varepsilon/dt \leq 0.0005 \text{ h}^{-1}$) 24 h 以上或已破坏时,试验结束。

2 软岩试验结果及分析

2.1 试验结果

用 12 个试样做蠕变试验,获得轴向蠕变变形与时间的关系曲线,如图 1 所示。

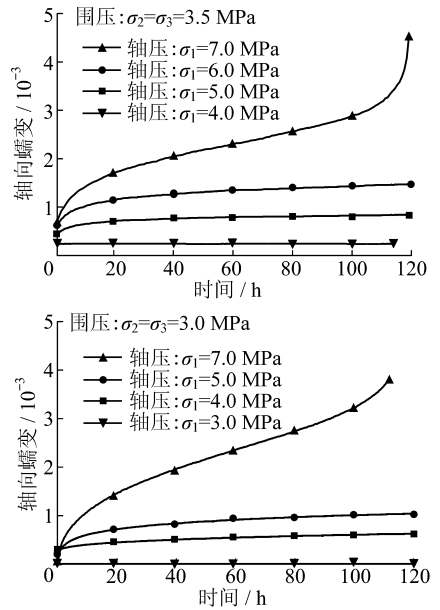


图 1 软岩典型蠕变曲线

Fig. 1 Typical creep curves of mudstone by unloading

通过图 1 轴向蠕变对时间求导获得蠕变变形速率与时间的关系,如图 2 所示。

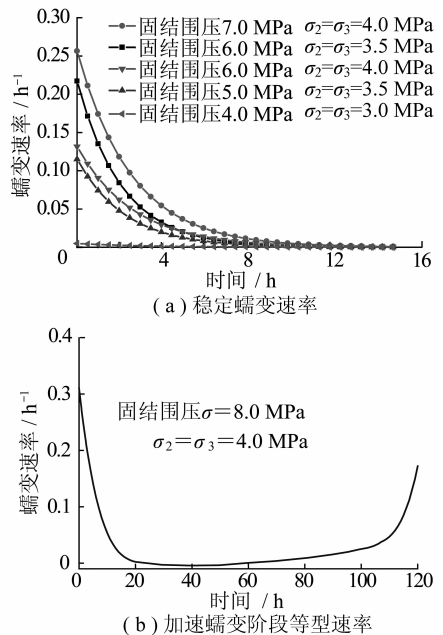


图 2 蠕变速率与时间的关系

Fig. 2 Relations between axial creep rate and creep time

卸载三轴剪切试验共计 12 个试样,固结围压分别取:3.0、4.0、5.0 和 6.0 MPa,每一围压下进行 3 个剪切试验,通过试验结果获得不同偏应力下泥岩应力-应变关系曲线,如图 3 所示。

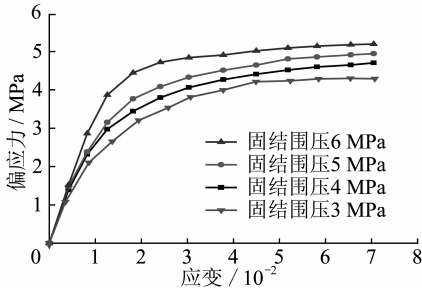


图3 卸荷三轴剪切试验

Fig. 3 Complete stress-strain curves of unloading mudstone

2.2 泥岩卸载强度准则

屈服准则是用来确定泥岩开始产生塑性变形时的应力大小,为使实验室的条件和现场复杂应力相联系,屈服准则可以采用应力不变量函数来表示。根据图 4,在试验围压范围内可以用 Drucker-Prager 强度准则来描述泥岩的屈服^[7],即

$$F_1 = \alpha \sigma_m + \sqrt{J_2} - \beta \quad (1)$$

其中,系数 α 、 β 可以通过泥岩蠕变强度包络线拟合确定。三轴抗剪强度试验是轴对称三相应力状态下,公式可以简化为

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (3)$$

2.3 试验结果分析

泥岩三轴卸载剪切和蠕变试验结果具有很好的 consistency,试验较为有效可靠,通过分析获得如下试验结论。

(1)通过大量三轴蠕变试验研究表明:泥质软岩存在起始蠕变应力阈值和蠕变破坏临界应力。

(2)由图 1 可知,当偏应力水平较低时(起始蠕变应力阈值为 1.0 MPa),轴向应变随时间没有变化,泥岩表现为瞬时弹性变形性质,可以用弹性模型来描述泥岩的应力-应变关系。

(3)当 $1.0 \text{ MPa} < \sigma_1 - \sigma_3 < 3.5 \text{ MPa}$ 时,泥岩呈现减速稳定蠕变变形规律,从图 2(a)蠕变速率与时间的关系可以看出,大约历经 8 h 蠕变速率为 0;当偏应力水平 $\sigma_1 - \sigma_3 \geq 3.5 \text{ MPa}$ 时为加速蠕变阶段,如图 2(b)所示,此时蠕变过程经历减速、定常和加速蠕变 3 个阶段,在试验条件下,泥岩蠕变破坏临界应力为 3.5 MPa。

(4)由图 3 可知,泥岩为应力-应变强化型曲线,Drucker-Prager 强度准则能很好的描述其破坏过程,拟合曲线相关系数到达 0.97 以上,如图 4 所示。

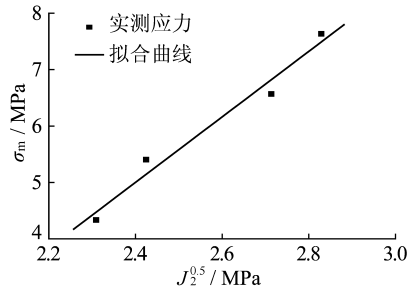


图4 强度破坏拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve about mudstone strength failure

3 泥岩本构模型及有限元方法

根据试验结果分析,选用弹、黏弹和黏塑基本元件组合可以很好的描述卸载下软岩变形性质^[7],如图 5 所示。

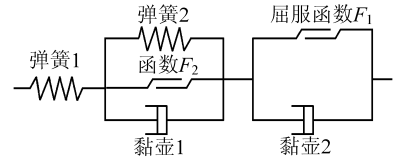


图5 泥岩弹黏塑本构元件模型

Fig. 5 Elasto-viscoplastic model of mudstone

根据流变元件模型基本特征,通过相关推导获得径向卸载下泥岩蠕变方程,用增量表示^[7]为

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta \sigma}{E_1} + \frac{1}{E_2}(1 - e^{-bt}) \left\langle \frac{F_2}{F_0} \right\rangle + \gamma \left\langle \frac{F_1}{F_0} \right\rangle \Delta t \quad (4)$$

式中, E_1 为泥岩的瞬时弹性模量,MPa; E_2 为泥岩阻尼变形模量,MPa; b 为参数,且 $b = \frac{E_2}{\eta_1}$, η_1 为弹性黏滞系数,MPa·min; γ 为流变参数; t 为时间增量,min;对于岩土材料 $F_0 = 1$; F_1 为黏塑性屈服函数,根据泥岩强度包络线采用 Drucker-Prager 强度准则,见式(1); F_2 为黏弹性起始临界应力函数,根据试验结果选用简单的 MISES 强度函数^[7],见式(5)。

$$F_2 = \sqrt{J_2} - k_1 \quad (5)$$

式中, k_1 为蠕变起始临界应力,可以通过一系列蠕变试验获得,本文试验为 1.0 MPa。

在有限元计算中,材料非线性问题一般采用增量法来表述一种行之有效的办法,本构方程式(4)可以分解为黏弹性和黏塑性应变增量之和^[7]。

(1)当 $F_2 = \sqrt{J_2} - k > 0$,且 $F_1 \leq 0$ 时,泥岩发生黏弹性变形,对于三维问题,假设应力边界条件保持不变,泊松比不随时间变化,可将黏弹性质视为弹

性变形性质,则有

$$\{\varepsilon_{i+\Delta t}^{ce}\} = \{\varepsilon_i^{ce}\} \exp(-b\Delta t) + \frac{R\{\sigma\}}{E_2} \times [1 - \exp(-b\Delta t)] \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, μ 为泥岩的泊松比,通过单轴压缩试验确定。

(2) 当 $F_2 > 0$ 时,泥岩发生黏塑蠕变变形,在有限元计算中一般采用增量法确定黏塑性应变与应力分量之间的关系,即

$$\left\{ \frac{d\varepsilon_i^{cp}}{dt} \right\} = \gamma F \left(\frac{\alpha P}{9\sigma_m} + \frac{3Q}{2\sqrt{J_2}} \right) \{\sigma\} \quad (8)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$$

式(7)和式(8)是完整的泥岩黏弹塑增量本构模型,根据不同的应力状态取不同的本构方程式进行有限元计算。为便于数值计算,通过有限元程序的二次开发技术,将本构模型的柔度矩阵写成计算机语言嵌入到 ADINA 有限元程序中^[8-11]。

4 本构模型的验证

对某矿井深部泥岩三轴恒应力条件下进行了蠕变试验,试验条件和 1.2 节软岩三轴应力路径相同,蠕变试验结果如图 6 中的试验值所示。采用本文的本构模型进行理论计算,为了说明本构模型的正确性,将试验蠕变曲线和蠕变计算曲线对比(图 6)。从图 6 可看出:软岩蠕变前 II 阶段试验值和计算值十分吻合,第 III 阶段试验值和计算值误差在 5.0% 以内,表明用提出的本构模型来描述软岩蠕变变形是合理的。

淮南某煤矿巷道断面形状为直墙半圆拱形,采用

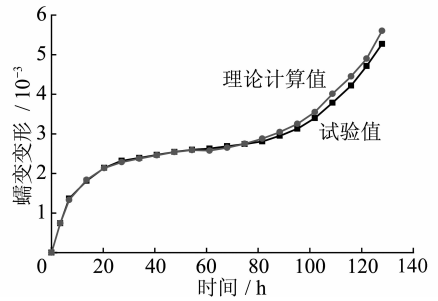


图 6 泥岩三轴蠕变实测值和理论值

Fig. 6 The measured values and the theoretical values of triaxial creep

喷射混凝土锚杆加锚索联合支护,巷道位于泥质软岩地层中。通过数值模拟获得锚杆、锚索最大拉力分别为 6.95、51.80 kN;实测锚杆和锚索内力值分别为 6.80、46.20 kN;巷道两帮收敛位移模拟和实测值分别为 55.6、46.7 mm。

5 结 论

(1) 泥质软岩存在起始蠕变应力阈值和蠕变破坏临界应力。

(2) 基于卸载三轴剪切试验和蠕变试验结果和对线性组合流变模型的分析,将 MISES 和 Drucker-Prager 强度准则引入到组合模型中,建立了泥岩的非线性蠕变方程,可以很好地描述泥岩蠕变的各个阶段。

(3) 通过泥岩蠕变试验、理论计算和泥岩蠕变数值模拟得出:计算值和试验值、数值模拟和现场实测变化规律完全一致且值较为吻合,因此,建立的泥岩本构模型是合理的。

参考文献:

- [1] 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):1 791-1 796.
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): 1 791-1 796.
- [2] 范庆忠,高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):391-396.
Fan Qingzhong, Gao Yanfa. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391-396.
- [3] 范庆忠,李术才,高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1 381-1 385.
Fan Qingzhong, Li Shucai, Gao Yanfa. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 381-1 385.
- [4] 邓荣贵,周德培,张俾元,等. 一种新的岩石流变模型[J]. 岩石

力学与工程学报,2001,20(6):780-784.

Deng Ronggui,Zhou Depai,Zhang Zhuoyuan, et al. A new rheological model for rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2001,20(6):780-784.

[5] 王来贵,赵娜,何峰,等. 岩石蠕变损伤模型及其稳定性分析[J]. 煤炭学报,2009,34(1):64-67.

Wang Laigui,Zhao Na,He Feng, et al. Rock creep damage model and its stability analysis[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(1):64-67.

[6] 李刚,梁冰. 孔隙水压力对软岩蠕变规律影响的实验研究[J]. 煤炭学报,2009,34(8):1068-1070.

Li Gang,Liang Bing. Experimental research on the effect of pore water pressure on the creep laws of soft rock[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(8):1068-1070.

[7] 孙钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

Sun Jun. Rheology of geomaterial and its engineer application[M]. Beijing:China Architecture and Building Press,1999.

[8] 李栋伟,汪仁和,赵颜辉,等. 抛物线型屈服面人工冻土蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1943-1948.

Li Dongwei,Wang Renhe,Zhao Yanhui, et al. Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(9):1943-1948.

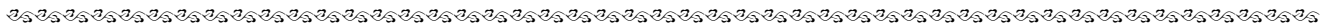
[9] 李栋伟,汪仁和,胡璞,等. 冻结黏土卸载状态下双屈服面流变本构关系研究[J]. 岩土力学,2007,28(11):2337-2342.

Li Dongwei,Wang Renhe,Hu Pu, et al. Study on two yield-surface rheological model of frozen soil by unloading state[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(11):2337-2342.

[10] 李栋伟,汪仁和. 应力路径下人工冻砂土非线性流变本构模型研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(10):1451-1456.

Li Dongwei,Wang Renhe. Nonlinear rheological constitutive model for frozen sand under complex stress paths and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(10):1451-1456.

[11] Elton Avenue. Theory and Modeling Guide (Volume I, II): ADINA[M]. Watertown, USA,2002.



煤炭行业 9 个项目获得 2009 年度国家科学技术进步奖二等奖

项目名称	主要完成人	主要完成单位
基于科技资源整合模式的煤炭开发利用技术创新工程		神华集团有限责任公司
高效洁净煤制甲醇与联合循环集成系统的研发和示范	肖云汉,耿加怀,王信,等	兖矿集团有限公司,中国科学院工程热物理研究所
深井煤与瓦斯突出煤层区域性瓦斯灾害防治关键技术及应用	程远平,李伟,胡千庭,等	淮北矿业(集团)有限责任公司,中国矿业大学,煤炭科学研究总院重庆研究院,等
低透气性煤层群无煤柱煤与瓦斯共采关键技术	袁亮,张农,卢平,等	煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,淮南矿业(集团)有限责任公司,安徽建筑工业学院,等
年产 600 万 t 大采高综采成套技术与装备	宁宇,王金力,王国法,等	煤炭科学研究总院,中国神华能源股份有限公司,天地科技股份有限公司,等
600 m 特厚表土层冻结法凿井关键技术	杨维好,蒲耀年,李功洲,等	中国矿业大学,中煤第一建设公司,煤炭科学研究总院北京建井研究所,等
自动化放顶煤关键技术与装备研发及其在国内外的应用	金太,黄福昌,王国法,等	兖矿集团有限公司,天地科技股份有限公司,兖州煤业股份有限公司
两淮矿区复杂地层条件下深大井筒特殊法凿井关键技术与应用	刘谊,程桦,赵时运,等	国投新集能源股份有限公司,中煤特殊凿井(集团)有限责任公司,安徽理工大学,等
矿山大功率高性能电力传动关键技术与应用	谭国俊,何晓群,刘建功,等	中国矿业大学,开滦(集团)有限责任公司,邯郸矿业集团有限公司,等

摘自“煤炭网”