

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.04.011

限制性剪切蠕变的渐进式破坏发育模式与本构方程分析

赵洪宝, 李华华, 胡桂林

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要:以标准红砂岩方形试样为研究对象,运用自行研制开发的软弱煤岩剪切蠕变试验设备和煤岩细观力学特性测控软件、超声波检测设备,对红砂岩限制性剪切、限制性剪切蠕变过程的破坏过程、破坏模式、渐变特性进行了分析。结果表明:红砂岩试样在限制性剪切、限制性剪切蠕变条件下表现出明显的渐变破坏特性;大部分试验过程中试样内部的超声波速减小幅度较小,仅在临近破坏处有明显减小;红砂岩限制性剪切蠕变破坏发育过程表现为先形成主控破裂面,又在其附近区域形成丰富微裂隙,并发育、相互贯通,最后克服剪切面摩擦力并发生突发式破坏,且伴有较大断裂声;其破坏模式发育过程呈渐进式,破坏模式呈突发式;建立了一种可以表征红砂岩剪切蠕变渐进式破坏发育过程的本构模型。

关键词:红砂岩;限制性剪切蠕变;超声波;渐进式破坏;本构模型

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)04-088-08

Study on progressive destruction model and constitutive model of red sandstone under limiting shear creep

ZHAO Hongbao, LI Huahua, HU Guilin

(School of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, P.R.China)

Abstract: Taking square rock block of red sandstone as research object, we studied all of progressive properties, process and model of destruction of red sandstone under restrictive shear and restrictive shear creep with a self-designed shear creep experimental device of coal or weak rock, a monitor software of coal or rock micromechanics properties and ultrasonic test equipment. The results show that apparent progressive property of red sandstone samples is shown under condition of restrictive shear and restrictive shear creep. The decrease extent of ultrasonic wave velocity in red sandstone samples is smaller than those in most of the testing process, and the significantly decrease extent is only shown near the destruction of the sample. The destruction process contains four stages: key fracture plane forms firstly, then abundant secondary micro-fractures forms, and these secondary micro-fractures develop and interconnect, and finally the friction on shear plane is overcome and burst destruction occurs and the main large crack appears in beneath of samples. The development process of destruction is progressive, and the destruction model is burst. A constitutive model that can be used to express the properties of progressive destruction of red

收稿日期:2016-01-05

项目基金:国家自然科学基金资助项目(51474220,51034005);中央高校基本科研业务费资助项目(2009QZ03)。

Supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China (51474220, 51034005) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2009QZ03).

作者简介:赵洪宝(1980-),男,博士,中国矿业大学(北京)副教授、博士生导师,主要从事矿山岩体力学方面的教学与科研工作,(E-mail)hongbaozhao@126.com。

sandstone is proposed.

Keywords: red sandstone; restrictive shear creep; ultrasonic wave; progressive destruction; constitutive model

随着露天煤矿开采技术的不断发展,其产量占中国煤炭年产量的比重不断升高。截至2012年,这一比例已升高至15%。这在不断催生大型露天矿的同时,也使得露天矿的工作帮、非工作帮明显地向着高陡化的趋势发展,导致这些人工边坡的维护更加困难,发生滑移的危险性也越来越大。因此,准确了解露天煤矿高陡边坡的滑移失稳规律和掌握其失稳机理尤为重要。高陡边坡的滑移失稳孕育过程,实际上是边坡体在上覆岩土体自重应力作用下,逐渐克服岩土体间的粘聚力、滑移面上的摩擦阻力发生失稳破坏的过程;如果将滑移面附近岩土体看作一个整体,则边坡体的滑移失稳力学模型可近似简化为一种限制性剪切蠕变模型。因此,掌握露天矿高陡边坡的滑移失稳规律与机理,就必须掌握滑移面附近岩土体的限制性剪切蠕变特性。

在露天矿边坡体稳定性维护与滑移机理研究方面,国内外学者进行了大量的研究工作^[1-8],并且成果丰硕。如芮勇勤等^[9]进行了开挖引起大规模倾倒滑移边坡变形、破坏分析研究,以抚顺西露天矿为例分析了引起此类边坡变形、失稳灾害的主要影响因素,得到了该类边坡的变形、破坏发展以及其破坏机制;尹光志等^[10]进行了边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟试验研究,得到了露天转地下开采过程中的边坡和采场围岩变形破裂响应特征;戴自航等^[11]进行了边坡失稳机理的力学解释研究,指出了摩尔-库伦剪切屈服准则在边坡稳定分析中存在的问题,并采用摩尔-库伦屈服准则和张拉-剪切复合屈服准则对边坡内部最危险滑动面的形成机理进行了解释;陈有亮^[12]进行了岩体高边坡滑移与失稳的力学分析研究,指出岩体高边坡的滑移与失稳过程是一个既具有随机性又受诸多因素制约的复杂过程;才庆祥等^[13]进行了大型近水平露天煤矿端帮边坡时效性分析及应用研究,提出露天矿采场和排土场推进速度是影响暴露时间的重要因素,利用内排压帮方法完全可以提高端帮边坡角;陈仕阔等^[14]进行了平朔安家岭露天矿地下采动条件下的边坡稳定性研究,提出水压和地下开采扰动是影响边坡稳定性的重要因素,等等。尽管如此,对于高陡边坡体内的岩体,特别是滑移面附近岩体的渐变式破坏特征与规律研究涉及不多。因此,笔者以自行研制开发的实验设备,对红砂岩在限制性剪切、剪切蠕变过程中表现出的渐变式破坏特征与本构方程进行了分析研究。

1 试验设备与方案

1.1 试验设备

为了能够系统、深入地研究煤岩材料在限制性剪切、限制性剪切蠕变条件下的渐变特性,笔者自行研制开发了一套可从细观角度研究这一问题的试验设备,一种“软弱煤岩材料剪切蠕变实验装置”,该设备可提供的最大剪切应力为60 MPa,精度为 ± 0.1 MPa,可以完成软弱煤岩材料的剪切试验研究、蠕变试验研究和剪切蠕变试验研究;自行编制的数据采集软件“煤岩细观力学特性测控软件”可自动设定数据采集时间间隔、自动处理数据,且该软件可与放大0~1 000倍显微镜配合,观测煤岩类材料表面裂纹的动态演化规律;试验系统与超声波检测仪配合,在垂直于剪切方向上动态检测煤岩材料变形过程中的超声波传播规律。主要试验设备如图1所示,试验原理如图2所示。

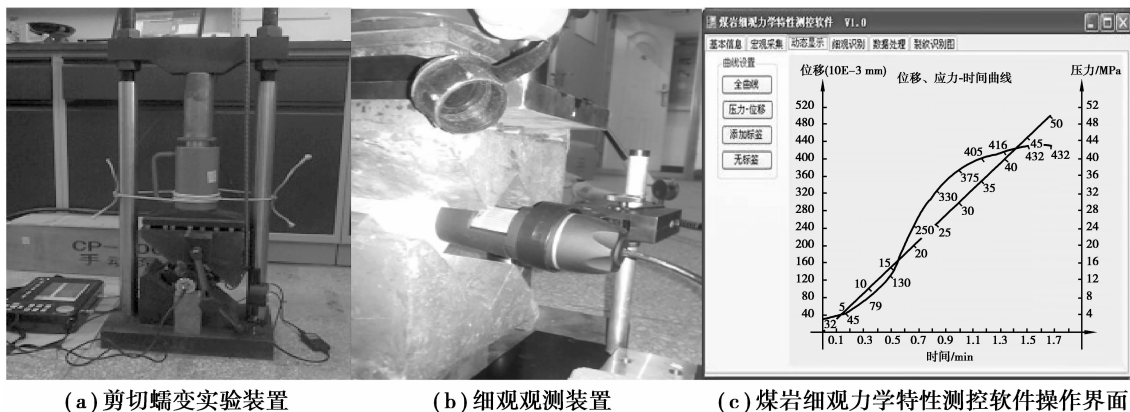


图1 主要实验装置

Fig.1 Main experimental device

1.2 试验方案

以安家岭露天矿边坡为工程背景,选取边坡坡脚处具有代表性的岩层中的岩样为试验对象,即红砂岩,试样规格为符合国际岩石力学学会规定的标准方形试样;实验前,先用超声波检测仪检测每个试样超声波传播速度,剔除波速变化较大的试样,取超声波速在 2 450 m/s 左右的试样为试验用样,如图 3 所示。为了能够获得反映煤岩类材料限制性剪切蠕变特性的规律曲线,必须确定合理的剪切蠕变试验载荷。首先,在与限制性剪切蠕变相同的条件下进行红砂岩试样的剪切试验,获得剪切应力-应变曲线,然后再结合全应力应变曲线预测蠕变破坏经验,确定合理限制性剪切蠕变试验载荷水平,如图 4 所示。

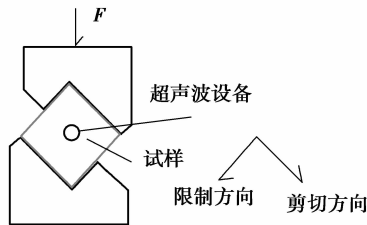


图 2 试验原理

Fig.2 Experimental principle

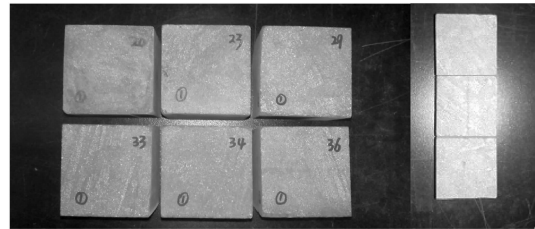


图 3 试验用样

Fig.3 Test specimens

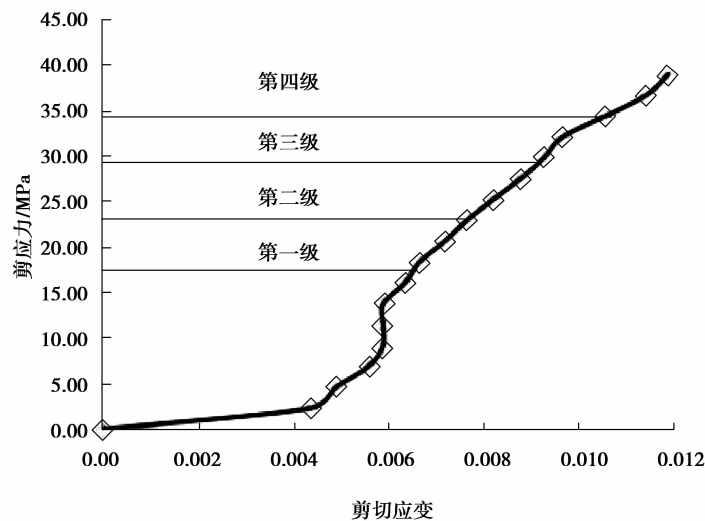


图 4 选取的剪切蠕变载荷水平

Fig.4 Shear creep stress levels of the test

2 限制性剪切的渐进破坏特征分析

2.1 限制性剪切的超声波检测

利用超声波在介质内传播速度的变化来研究介质内部结构变化,特别是孔隙、裂隙结构的发育,是一种可靠的技术手段。为了获得红砂岩限制性剪切过程中试样内部结构的变化特点,对选定的试样进行了限制性剪切过程的超声波检测研究,获得了限制性剪切过程的试样内部超声波传播速度变化规律,如图 5 所示。

分析图 5 可知:

1)限制性剪切过程中,试样内超声波传播变化规律可分为两个阶段,即缓慢减小阶段和急剧减低阶段,反映在试样内部结构变化上的规律即为渐进发育阶段和突然破坏阶段。限制性剪切实际是一种存在外界约束的剪切,试样平行于剪切面的平面上受到的正应力将增加试样产生剪切变形的难度,而这一正应力又是与试样受到的剪应力呈恒定正向关系,导致试样内部在限制性剪切开始阶段相对固定,超声波传播速度变化不大。

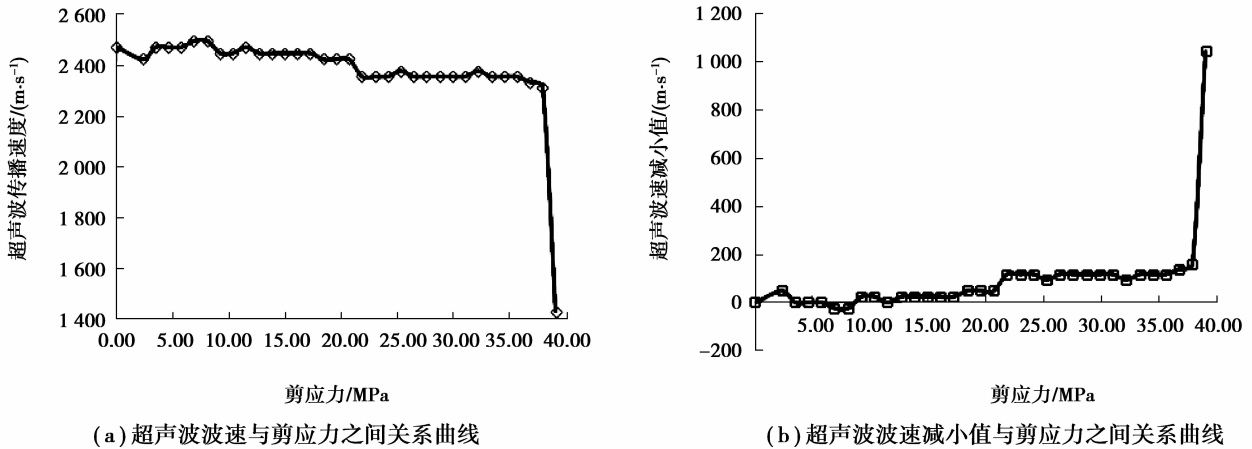


图 5 限制性剪切过程超声波传播变化规律

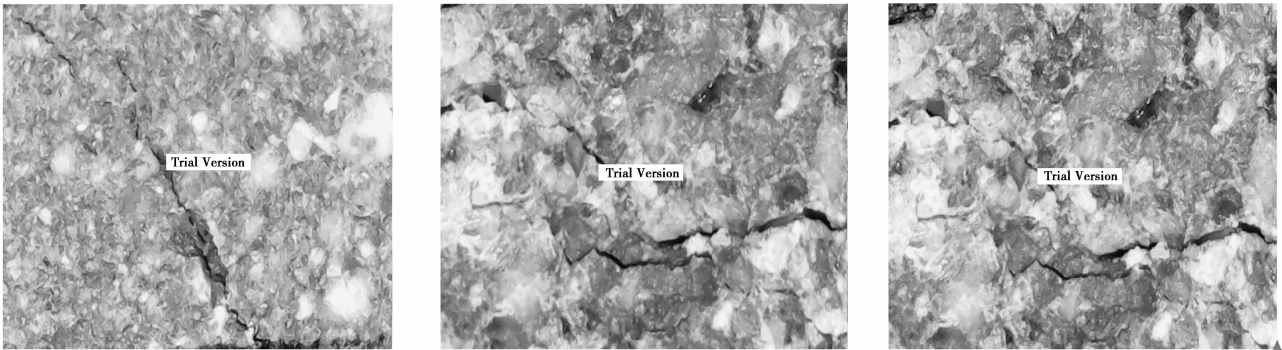
Fig.5 The change of ultrasonic propagation in the process of restrictive sheer creep

2) 限制性剪切过程中, 试样内部超声波传播速度有一小段波速增加区域, 反映在试样内部变化上即为内部结构向密实方向发展。由于该区域位于限制性剪切的起始位置附近, 极有可能是正应力对试样垂直剪切方向的压缩作用与剪应力对试样剪切方向的挤压作用共同作用的结果。

3) 限制性剪切过程中, 当剪应力超过剪切强度的 50% 时, 试样内超声波速才开始变化, 但总体变化仍较小, 直至试样发生破坏的瞬间, 反映出的试样内部结构发育特点为渐进式发育模式; 虽然这一过程占到整个限制性剪切过程的 95%, 但试样内的超声波波速仅降低了 160 m/s, 约为破坏时超声波波速降低的 10%。

4) 限制性剪切过程中, 试样表面在未达到超声波速急剧降低处就产生了细微裂纹, 但发育相对较缓慢, 这表明试样内部结构变化也是一个缓慢发展的过程, 如图 6 所示。

5) 限制性剪切过程中, 试样内部先形成主控破裂面, 然后在主控面附近形成丰富的次级裂隙结构, 并逐级贯通形成破裂带, 最终发生失稳破坏。



(a) 测点a加载60 min时裂纹

(b) 测点b加载62 min时裂纹

(c) 测点b加载245 min时裂纹

图 6 试验过程中试样表面产生的明显裂纹(放大 1 000 倍)

Fig.6 The apparent cracks in the process of test (magnified 1 000 times)

2.2 限制性剪切蠕变的渐进特性分析

试样的限制性剪切蠕变也可以从不同角度表明试样的渐进式破坏发育模式。根据图 4 选取的限制性剪切蠕变载荷水平, 进行了红砂岩试样的限制性剪切蠕变试验研究。试验时, 以同一试样分别进行各载荷水平的限制性剪切蠕变试验研究, 直至试样破坏。通过进行的试验, 得到了可表征其限制性剪切蠕变试验特性的规律曲线, 如图 7 所示。

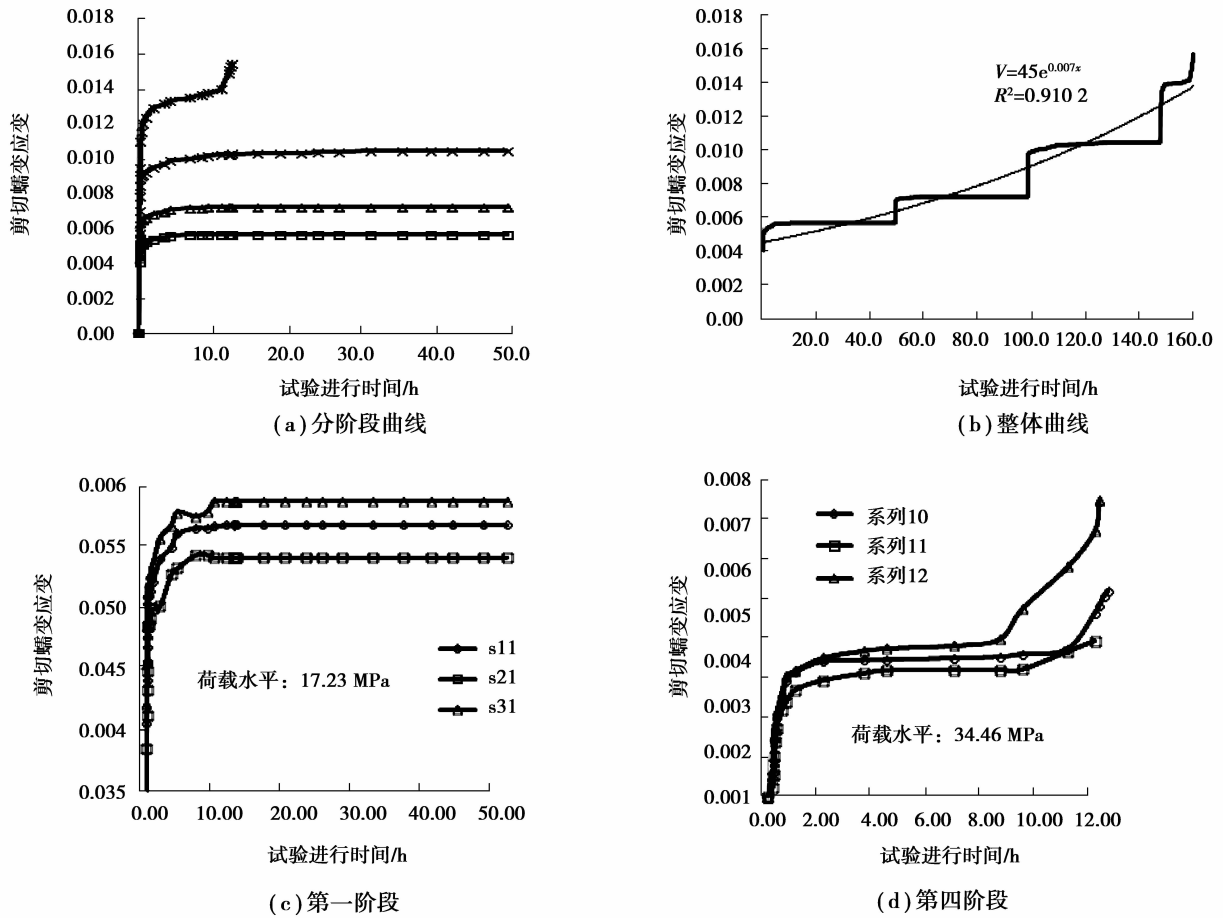


图 7 限制性剪切蠕变试验特性曲线

Fig.7 The characteristic curve under restrictive shear creep

分析图 7 可知：

1) 限制性剪切蠕变过程中, 尽管剪切蠕变载荷不同, 试样产生的蠕变变形均有初始蠕变应变和剪切蠕变应变组成, 但剪切蠕变应变所占比例非常小。这表明试样在限制性剪切蠕变过程中, 由载荷增加导致的变形较大, 超声波检测试验表明这一“较大变形”实际也很小; 而进入剪切蠕变阶段时其内产生的结构调整相对缓和, 由此导致的试样变形更小。

2) 限制性剪切蠕变过程中, 剪切蠕变载荷增加相同幅度, 试样内产生的初始应变增加不均匀, 但进入蠕变阶段后产生的剪切蠕变变形增加量却基本一致。这表明剪切蠕变载荷大小对试样变形具有较大影响, 而剪切蠕变试验进行时间(剪切蠕变作用)对试样的影响相对缓和, 说明剪切蠕变阶段试样失稳破坏的发展模式为较稳定的渐进式。

3) 限制性剪切蠕变过程中, 各个稳定剪切蠕变曲线相对光滑、平直; 仅在能使试样产生破坏的剪切蠕变载荷作用下得到的稳定剪切蠕变曲线呈不断增加趋势, 但此趋势的增加梯度也保持恒定, 直至试样破坏。光滑、平直的剪切蠕变变形曲线表明试样在稳定剪切蠕变阶段的内部结构调整较缓和; 呈恒速增加的剪切蠕变曲线则表明试样内部结构的发展较均一, 尽管不断向着试样破坏发展。

4) 限制性剪切蠕变过程中, 进行完毕各试验载荷水平作用下的试验后, 试样破坏前产生的总剪切蠕变变形很小, 约为试样尺寸的 1.4%。产生的剪切蠕变变形值很小、剪切蠕变变形曲线的光滑、平直, 均表明试样在试验过程中内部结构调整是缓和的渐进式, 正是这种不断地稳定累计, 导致了试样的最终剪切破坏。

5) 将试样各阶段产生的变形看作一个整体, 不考虑各阶段产生的初始应变并进行数学拟合, 如图 7 所

示,可得到剪切蠕变变形与试验时间的拟合关系为

$$\epsilon = 45e^{0.007t}, \quad R^2 = 0.9102, \quad (1)$$

式中, ϵ 为剪切蠕变应变, t 为试验进行时间, R 为拟合度。

2.3 限制性剪切蠕变的渐进式破坏

为了更直观地观察限制性剪切蠕变的渐进式破坏发育模式,利用自行编制的“煤岩细观力学特性测控软件”配合放大 1 000 倍显微镜,对限制性剪切蠕变过程中试样表面裂隙发育过程进行动态观测,得到了试样破坏主控破裂面的发展演化过程,如图 8 所示。

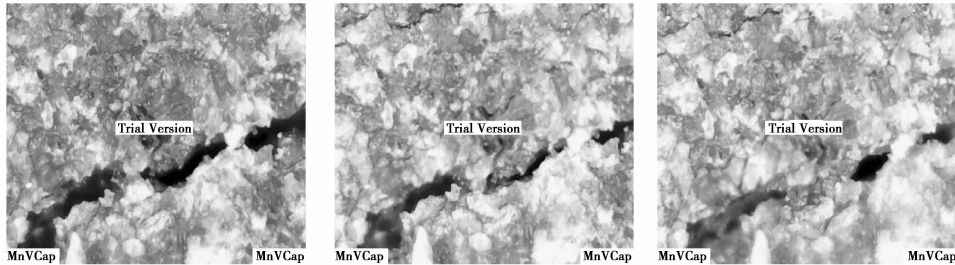


图 8 试样破坏主控破裂面的发展过程

Fig.8 The developing process of failure in the main control fracture surface

分析图 8 可知:

- 1) 试样的破坏过程实际是先形成主控破坏裂纹,然后形成次生裂纹分布带,并最终克服限制性剪切面上正应力导致的摩擦力而最终破坏的过程。
- 2) 主控裂纹形成后,克服限制性剪切面上正应力导致摩擦力的过程中产生的次级裂纹,优先出现在主控裂纹上方附近的软弱区。
- 3) 试样最终的主控破坏面实际上是一个由主控裂纹和逐渐形成的次级裂纹共同构成的破坏带,这些次级裂纹与主控裂纹的不断贯通,最终导致了试样的破坏。
- 4) 限制性剪切破坏发育过程,是一个不断累积、渐进式发展的过程,导致此规律出现的主要原因则是限制性剪切蠕变中的正应力作用。

3 限制性剪切蠕变的本构模型

3.1 本构模型建立

根据上述实验研究和分析,认为限制性剪切蠕变破坏的发育过程呈现一种渐进式模式,其变形特点可由下述的本构模型描述,如图 9 所示。

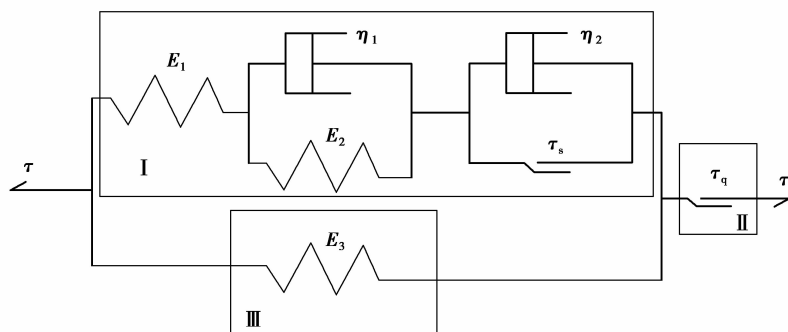


图 9 建立的本构模型

Fig.9 The constitutive model

该模型由 3 部分组成,即 I、II、III 3 个部分,其中 I 部分为广义西元模型,与胡克体 III 并联后,再与塑性体 II 串联。试样限制性剪切蠕变过程的初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段特性可由 I 部分表征,并联的胡克体 III 表征限制性剪切蠕变过程中产生的正应力对试样变形的影响,然后串联的塑性体 II 则控制着试样的最终破坏。上述模型的主要特点可归纳为:

- 1) 限制性剪切蠕变的初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段均可由模型准确表征,克服了以前模型不能表征加速蠕变阶段的不足;
- 2) 将限制性剪切蠕变过程中产生的正应力对试样变形的影响等效为剪切应力的减小作用,即有效应力原理,体现了对限制性剪切蠕变的限制性作用考虑。
- 3) 将限制性剪切蠕变的加速蠕变阶段用塑性体 II 表征,并可由它确定试样最终破坏所需的剪切应力值。
- 4) 模型能够体现出限制性剪切蠕变的渐进式破坏模式。

3.2 本构方程求解

模型: $\tau_s < \tau_q, \tau_1 + \tau_3 = \tau$ 。

1) 当 $\tau_1 < \tau_s$ 且 $\tau_1 + \tau_3 < \tau_q$ 时,广义西元模型退化为开尔文模型,本构方程为

$$\gamma = \frac{\tau_1}{E_1} + \frac{\tau_1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}), \text{ 即: } \tau_1 = \frac{\gamma E_1 E_2}{(E_2 + E_1 (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}))} \quad (2)$$

对于 III, $\tau_3 = \gamma E_3$, 则此时模型的本构方程为

$$\tau = \tau_1 + \tau_3 = \frac{\gamma E_1 E_2}{(E_2 + E_1 (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}))} + \gamma E_3 \quad (3)$$

2) 当 $\tau_s < \tau_1$ 且 $\tau_1 + \tau_3 < \tau_q$ 时,对于广义西元模型为

$$\gamma = \frac{\tau_1}{E_1} + \frac{\tau_1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{(\tau_1 - \tau_s)}{\eta_1} t, \text{ 即: } \tau_1 = \frac{\gamma + \frac{\tau_s}{\eta_1} t}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{t}{\eta_1}\right)} \quad (4)$$

对于 III, $\tau_3 = \gamma E_3$, 则此时模型的本构方程为

$$\tau = \frac{\gamma + \frac{\tau_s}{\eta_1} t}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{t}{\eta_1}\right)} + \gamma E_3 \quad (5)$$

3) 当 $\tau_1 > \tau_s$, 且 $\tau_1 + \tau_3 > \tau_q$ 时,对于广义西元模型为

$$\gamma = \frac{\tau_1}{E_1} + \frac{\tau_1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{(\tau_1 - \tau_s)}{\eta_1} t, \text{ 即: } \tau_1 = \frac{\gamma + \frac{\tau_s}{\eta_1} t}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) + \frac{t}{\eta_1}\right)} \quad (6)$$

对于 III, $\tau_3 = \gamma E_3$;

对于 I, $\gamma \rightarrow \infty$, 则此时模型本构方程为: $\gamma \rightarrow \infty$ 。

4 结 论

1) 限制性剪切过程中,试样内超声波传播变化规律可分为缓慢减小阶段和急剧减低阶段,且缓慢减小阶段占据绝大部分,仅在试样破坏附近出现明显超声波速减小。

2) 限制性剪切蠕变过程中,试样初始蠕变值占总蠕变值得比例较大,稳定蠕变阶段曲线光滑、平直;试样破坏前产生的总蠕变值较小,仅为试样几何尺寸的 1.4%。

3) 试样破坏的发育过程实际是先形成主控破坏裂纹,然后在其周围形成次级裂纹区域,并克服限制性剪切面上正应力导致的摩擦力而最终破坏的过程。

4) 制性剪切、限制性剪切蠕变过程表现出的变形特点表明:试样破坏发育过程是一个不断累积、渐进式发展的过程。

5) 建立了一种以广义西元模型为基础、并联胡克体、再与塑性体 II 串联构成的本构模型,该模型可以较好地表征限制性剪切蠕变的渐进式破坏发育模式。

参考文献:

- [1] Lacroix P, Amitrano D. Long-term dynamics of rockslides and damage propagation inferred from mechanical modeling[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2013, 118(4): 2292-2307.
- [2] Pellet F L, Keshavarz M, Boulon M. Influence of humidity conditions on shear strength of clay rock discontinuities[J]. *Engineering Geology*, 2013, 157(2): 33-38.
- [3] Goren L, Aharonov E. On the stability of landslides: A thermo-poro-elastic approach[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3): 365-372.
- [4] 郑颖人,叶海林,黄润秋.地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1714-1723.
ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1714-1723. (in Chinese)
- [5] 赵洪宝,潘卫东.开挖对岩质边坡稳定性影响的数值模拟[J]. *金属矿山*, 2011, 40(7): 32-35.
ZHAO Hongbao, PAN Weidong. Numerical simulation of the impact of excavation on stability of rock slope[J]. *Metal Mine*, 2011, 40(7): 32-35. (in Chinese)
- [6] Kalatehjari R, Ali N B, Ashrafi E. Finding the critical slip surface of a soil slope with the aid of particle swarm optimization[C]//11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2011, Albena, Bulgaria. [S.l.]: SEMG, 459-466.
- [7] Hajiazizi M, Tavana H. Determining three-dimensional non-spherical critical slip surface in earth slopes using an optimization method[J]. *Engineering Geology*, 2013, 153(1): 114-124.
- [8] Mendjel D, Messast S. Development of limit equilibrium method as optimization in slope stability analysis[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2012, 41(3): 339-348.
- [9] 芮勇勤,贺春宁,王惠勇,等.开挖引起大规模倾倒滑移边坡变形、破坏分析[J]. *长沙交通学院学报*, 2001, 17(4): 8-12.
RUI Yongqin, HE Chunqing, WANG Huiyong, et al. Analysis of deformation and failure development of the large-scale toppling-sliding slope under mining[J]. *Journal of Changsha Communications University*, 2001, 17(4): 8-12. (in Chinese)
- [10] 尹光志,李小红,魏作安,等.边坡和采场围岩变形破裂响应特征的相似模拟试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(s1): 2913-2923.
YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, WEI Zuohan, et al. Similar simulation study of deformation and failure response features of slope and stope rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(s1): 2913-2923. (in Chinese)
- [11] 戴自航,卢才金.边坡失稳机理的力学解释[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(10): 1191-1197.
DAI Zihang, LU Caijin. Mechanical explanations on mechanism of slope stability[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1191-1197. (in Chinese)
- [12] 陈有亮.岩体高边坡滑移与失稳的力学分析[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(6): 598-603.
CHEN Youliang. Mechanical analysis of slipping of rock slope[J]. *Journal of Coal Society*, 2000, 25(6): 598-603. (in Chinese)
- [13] 才庆祥,周伟,舒继森,等.大型近水平露天煤矿端帮边坡时效性分析及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(6): 740-744.
CAI Qingxiang, ZHOU Wei, SHU Jisen, et al. Analysis and application on end-slope timeliness of internal dumping under flat dipping ore body in large surface coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(6): 740-744. (in Chinese)
- [14] 陈仕阔,杨天鸿,张华兴.平朔安家岭露天矿地下采动条件下的边坡稳定性[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(2): 148-152.
CHEN Shikuo, YANG Tianhong, ZHANG Huaxing. The slope stability under underground mining of Anjialing open-pit mine Pingshuo[J]. *Journal of Coal Society*, 2008, 33(2): 148-152. (in Chinese)