

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.25

乌江流域含炭质钙质页岩三轴流变力学特性分析

朱赛楠^{1,2}, 李 滨², 冯 振²

(1. 长安大学地测学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国地质科学院地质力学研究所国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081)

摘要: 通过岩石三轴压缩流变试验, 研究了含炭质钙质页岩在天然和饱和两种状态下的流变力学特性。获得了这两种状态下含炭质钙质页岩的流变试验曲线, 分析并对比了分级加载条件下应变随时间的变化规律以及破裂应力水平下应变和应变速率随时间的变化规律, 探讨了天然和饱和状态下含炭质钙质页岩流变破坏形式的异同, 并得到了其长期强度值。同时, 采用改进的非线性 Burgers 损伤流变模型对含炭质钙质页岩的流变全程曲线进行拟合, 并对模型参数进行了辨识。通过对比可知, 模型的拟合优度较高, 能够较好的反映出天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的流变变形特性。

关键词: 岩石力学; 含炭质钙质页岩; 三轴流变; 非线性流变模型; 加速流变

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)04-0144-08

Analysis of triaxial rheological mechanical properties of carbonaceous and calcareous shale in Wujiang river basin

ZHU Sainan^{1,2}, LI Bin², FENG Zhen²

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Key Laboratory of Neotectonic Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: The paper studies the rheological mechanical properties of carbonaceous and calcareous shale under natural and saturated state through the rock triaxial rheological test. The rheological test curve in natural and saturated state are obtained from the test. The change of strain and strain rate over time are analyzed and compared under stepped loading and failure stress level condition. The differences and similarities of the rheological failure form of carbonaceous and calcareous shale between natural and saturated state are discussed, and obtained the long-term strength values through the test. At the same time, the rheological curve of carbonaceous and calcareous shale is fitted through a improved Burgers nonlinear damage rheological model. The paper also identified the feasibility of model parameters. The results show that the model can reflect well about the rheological deformation properties, and its fitting goodness is higher.

Keywords: rock mechanics; carbonaceous and calcareous shale; triaxial rheological; nonlinear rheological model; accelerating rheological

0 引言

大量的现场量测和室内试验都表明, 对于坚硬岩

体中含有的夹层剪切带和泥质充填物的岩体, 其流变特性都是非常显著的^[1-4]。在层状岩质自然斜坡中经常会遇到岩体的变形随时间持续增长的现象, 而控制

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302246、41472295); 中国地质调查局项目(1212011220140、12120114079101)

第一作者: 朱赛楠(1984-), 男, 博士, 主要从事地质灾害等方面的研究工作。E-mail: zsn105@163.com

层状斜坡稳定性的结构面往往是坚硬岩体中物理力学性质相对较差的岩层^[5-8]。位于我国重庆市境内的乌江流域地区二叠系坚硬的灰岩中,普遍发育有4~6层与灰岩岩层产状一致的含炭质钙质页岩夹层,层厚一般为0.1~0.8 m。该夹层岩体的力学强度相对灰岩较低,钙质含量较高,胶结程度较差,变形量大,具有显著的时间效应,在长期地质历史演化过程中,经过构造运动与地下水的长期作用会逐渐演化为软弱夹层,直接影响斜坡岩体的长期稳定性。据作者调查,区内多数崩滑体的压裂带的孕育产生与该层有关。例如,位于该区内的鸡尾山滑坡滑坡体为二叠系灰岩,滑带由含炭质钙质页岩夹层构成,在上覆岩体自重及地下水的长期作用下,其抗剪强度不断降低。自上世纪60年代对该滑坡体变形有监测记录以来,直到2009年6月5日滑坡发生,经历了漫长的蠕变变形历史^[9-12]。因此,了解此类控制层状斜坡稳定性的结构面岩体的流变特性,对于分析自然滑坡的失效变形机理和长期稳定性的评价具有重要意义。

自20世纪30年代至今,国内外对于岩石的流变力学特性的研究方面,已经取得了一些成果^[13-19]。诸多学者通过流变试验研究,揭示了岩石在不同应力水平条件下的流变力学特性,得到了岩石流变的长期强度,并且通过试验结果建立了合理的流变本构模型,为实际工程岩体进行流变数值分析提供了相关流变参数。然而,由于岩石赋存环境各不相同,且有着特殊的矿物组成和微观结构,构成岩石的矿物,特别是亲水矿物在水的长期物理化学作用下,加速了岩石内部损伤的扩展和积累,使岩石的流变力学性质在天然状态下和饱水状态下表现出显著的差别^[20-21]。

目前,对于乌江流域地区二叠系灰岩中的这套含炭质钙质页岩夹层的研究仍有很多不足之处,而流变力学特性作为该层岩石的重要性质,关系到区域内斜坡岩体的长期稳定性问题。本文选取鸡尾山的含炭质钙质页岩为研究对象,分别进行天然和饱和两种状态下的三轴压缩流变试验,获得含炭质钙质页岩在这两种状态不同应力水平条件下的流变曲线。分析其长期流变特性与破坏规律,建立了岩石非线性流变损伤模型并确定其材料流变参数,为乌江地区地质灾害机理研究及防治提供可靠的依据。

1 试验条件及试验方案设计

1.1 试样岩性特征

试验所用含炭质钙质页岩试样取自鸡尾山,按试

验相关规程制成φ50×100 mm圆柱试样。天然状态下,含炭质钙质页岩为黑色,薄片状层理构造,松软易剥离,手摸之可变黑,密度为2.60 g/cm³,泊松比为0.23,饱水后结构易破坏、软化膨胀,密度为2.62 g/cm³,泊松比为0.24。在中科院武汉岩土力学所完成岩石矿物成分分析和SEM微观结构分析试验。试样主要矿物成分为方解石、石英和滑石,黏土矿物有少量绿泥石,含炭质钙质页岩矿物成分试验结果见表1。

表 1 利用 ZK16 前半段潮汐效应计算含水层参数结果
Table 1 Results of mineral composition test of carbonaceous and calcareous shale

编号	矿物成分及含量/%			
	方解石	石英	滑石	绿泥石
TZ 1-1	63.87	12.53	23.60	-
TZ 1-2	72.71	15.28	12.01	-
TZ 1-3	82.34	13.48	-	4.18
TZ 1-4	81.51	7.95	10.54	-
TZ 1-5	84.44	9.49	6.07	-
TZ 1-6	77.32	12.90	2.56	7.22
TZ 1-7	64.36	11.29	13.38	10.88
TZ 1-8	68.52	13.92	15.75	1.81

岩石在 SEM 电镜下呈不规则细粒状及隐晶质结构,部分为细粒状鳞片变晶结构,方解石脉穿插发育,黏土矿物定向排列性较好,矿物颗粒间有明显的原生微裂隙和溶蚀微孔洞,图1为选取的典型含炭质钙质页岩 SEM 微观结构照片。

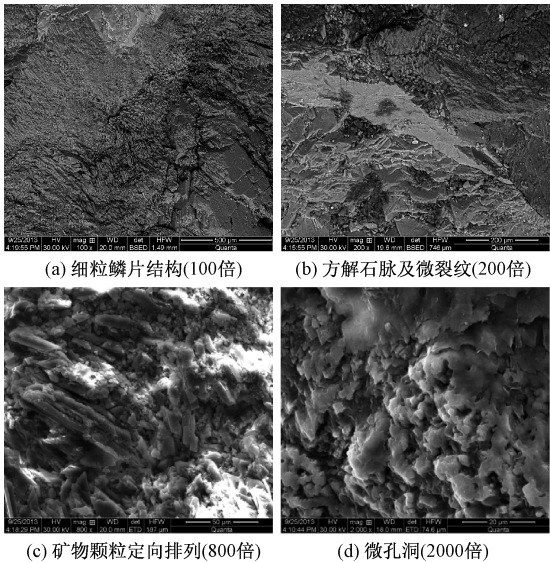


图 1 含炭质钙质页岩的微观结构
Fig.1 Microstructure of carbonaceous and calcareous shale

1.2 试验设备

含炭质钙质页岩的三轴压缩流变试验在长江科

学院岩土重点实验室的 TLW - 2000 型岩石三轴流变仪上进行。该设备采用先进的伺服控制、滚珠丝杠和液压等技术组合,具备高压流变试验功能。围压施加范围为 0 ~ 70MPa,最大轴向荷载可达到 2000 kN,且稳压效果良好,稳压系统轴向荷载 24h 内压力波动变化小于 0.025%,围压在 24h 内波动变化小于 0.009%。试验过程中严格控制实验室温度与湿度保持恒定,使流变试验所处环境保持相对密封。

1.3 试验方案设计

含炭质钙质页岩的三轴压缩流变试验分为天然和饱和两种状态进行,根据乌江地区二叠系灰岩中含炭质钙质页岩夹层的区域地应力资料及鸡尾山该夹层埋深综合考虑,确定流变试验围压为 10MPa。采用分级加载的方式施加轴压应力,为确定流变试验加载的初始轴向应力水平,先通过常规三轴压缩试验测定在同等围压(10MPa)、天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的三轴抗压强度峰值,分别为 85MPa 和 65MPa。流变试验在天然和饱和状态下初始轴向应力水平分别取常规三轴抗压强度峰值的 40% ~ 70%,应力水平分级按等差逐级递加。具体试验设计方案见表 2。

表 2 三轴压缩流变试验轴向加载等级						
Table 2 Axial loading level of triaxial compression rheological test						
状态	围压/MPa	轴向应力水平/MPa				历时/h
		第一级	第二级	第三级	第四级	
天然	10	35	45	65	75	218.5
饱和		45	55	65	70	215.7

2 三轴流变力学试验

2.1 流变试验结果分析

天然和饱和状态下含炭质钙质页岩三轴流变试验曲线见图 2。图中横坐标为时间,单位为 h;纵坐标为应变,数量级为 10^{-3} ;曲线上方括号外数字为轴向应力水平,单位为 MPa,括号内数字为该级流变持续时长,单位为 h。可以看出,随着时间推移,在长期荷载作用下,含炭质钙质页岩表现出明显的流变现象,且在饱和状态下表现出的流变变形特性比天然状态下更为显著。当应力水平较低时岩石流变变形量相差不大,随着应力水平升高,饱和状态流变变形量逐渐大于天然状态。例如,当应力水平同为 45MPa 时,天然状态平均流变应变量为 $2658\mu\varepsilon$,饱和状态平均流变应变量为 $2711\mu\varepsilon$,差值为 $53\mu\varepsilon$;当应力水平增加到 65MPa

时,天然和饱和状态平均流变应变量为 $3557\mu\varepsilon$ 和 $5494\mu\varepsilon$,差值为 $1937\mu\varepsilon$ 。

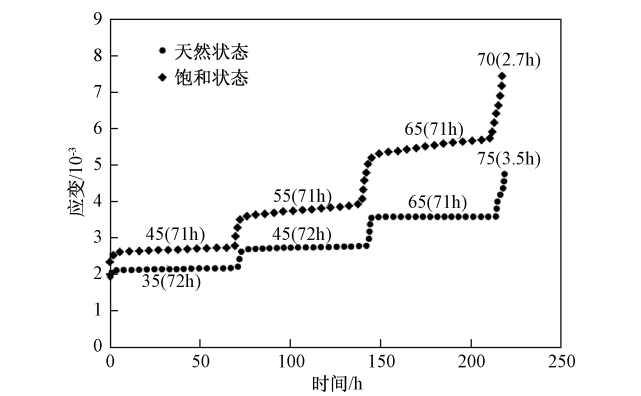


图 2 含炭质钙质页岩流变试验曲线

Fig. 2 Rheological testing curves of carbonaceous and calcareous shale under natural and saturated state

表 3 给出了天然和饱和状态下岩石的应变增量,由加载应力水平后产生的瞬时应变增量与长期流变应变增量可知,同等应力水平下,饱和状态应变增量均大于天然状态应变增量。在加载最后一级应力水平时,岩样出现了加速流变现象,天然状态下破裂应力为 75MPa,历时 3.5h,饱和状态下破裂应力为 70MPa,历时 2.7h,并最终发生流变破坏,流变曲线呈现出非线性黏弹塑性特征。

表 3 含炭质钙质页岩的应变增量				
Table 3 Strain increment of carbonaceous and calcareous shale under natural and saturated state				
状态	应力水平/MPa	历时/h	瞬时应变量/ $\mu\varepsilon$	流变应变量/ $\mu\varepsilon$
天然	35	72	1980	175
	45	72	401	195
	65	71	624	182
	75	3.5	464	974
	45	71	2379	353
饱和	55	71	631	641
	65	71	687	1068
	70	2.7	511	1327

2.2 破裂应力水平阶段流变规律分析

由含炭质钙质页岩流变试验曲线可以看出,加载最后一级应力水平时,岩样最终发生破坏,该应力水平称之为破裂应力水平。由图 3 含炭质钙质页岩应变及应变速率与时间关系曲线可以看出,在加载破裂应力水平条件下,流变曲线表现出完整的流变变形的三个阶段,即:初始流变衰减阶段 OA、稳态流变阶段 AB 和加速流变阶段 BC;而相应的流变速率 - 时间曲线也表现出三个阶段,即:初始流变速率衰减阶段 O_1A_1 、稳态

流变速率阶段 A_1B_1 和加速流变速率阶段 B_1C_1 。图 3 中横坐标为时间,单位为 h;主纵坐标为应变,数量级为 10^{-3} ;次纵坐标为应变速率,单位为 mm/h。

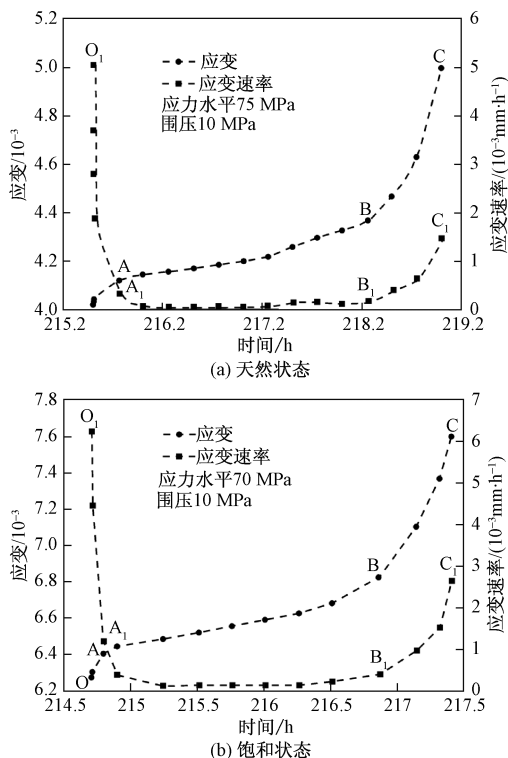


图 3 含炭质钙质页岩应变及应变速率与时间关系
Fig. 3 Relationship between strain and rate with time

天然和饱和状态下,岩石初始流变衰减阶段分别经历了 0.26h 和 0.19h,占整个流变阶段时间的 7.3% 和 7.0%,流变速率分别衰减了 4.727×10^{-3} mm/h 和 5.886×10^{-3} mm/h;稳态流变阶段分别历时 2.25h 和 1.61h,占整个流变阶段时间的 64.2% 和 59.6%,流变速率基本都恒定为一个大于零的常数;经过长时间外荷载作用,岩石内部损伤慢慢积累,微缺陷逐渐扩展汇合,使流变进入非线性加速流变阶段,流变速率迅速加快,分别增长了 1.346×10^{-3} mm/h 和 2.434×10^{-3} mm/h,该阶段分别历时 1.0h 和 0.90h,占整个流变阶段时间的 28.5% 和 33.4%。表 4 给出了天然和饱和状态含炭质钙质页岩在破裂应力水平下流变特征的对比,表中“比值”为饱和岩样的量值/天然岩样的量值。可以看出,水对含炭质钙质页岩在破裂应力水平下流变特性的影响是非常明显的。相比之下,饱和状态在流变各阶段的历时较天然状态有所减少,饱和状态流变各阶段的应变量与平均流变速率均大于天然状态。

2.3 流变破坏特征分析

大量试验结果表明,三轴压缩流变试验与常规三轴压缩试验岩样破坏的形式基本相似,主要表现为剪切破坏^[1]。图 4 为天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的流变破裂形式。可以看出,水对岩样流变破裂形式影响存在明显的差异性。在天然状态下,岩样破裂形式为“X”型共轭的剪切破坏,断口不平直,呈阶梯状,并伴随有碎裂化现象;饱和状态下,岩样破裂形式为单一的剪切破坏,剪切面近乎水平,岩样断面粉碎化现象严重。

表 4 天然和饱和状态下流变特征对比
Table 4 Comparison of rheological characteristics under natural and saturated state

阶段	历时/ μs			平均流变速率/ ($\times 10^{-3}$ mm/h)			应变量/ μs		
	天然	饱和	比值	天然	饱和	比值	天然	饱和	比值
初始	0.26	0.19	0.731	3.409	3.970	1.165	102	171	1.676
稳态	2.25	1.61	0.716	0.097	0.183	1.887	202	240	1.188
加速	1.00	0.90	0.900	0.840	1.396	1.662	670	916	1.367

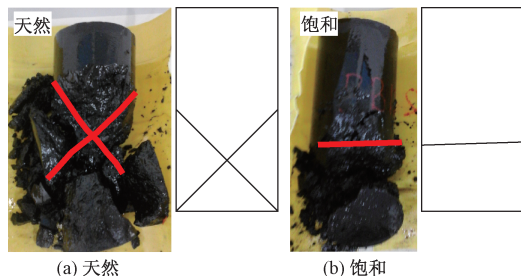


图 4 含炭质钙质页岩的流变破裂形式
Fig. 4 Rheological failure of carbonaceous and calcareous shale under natural and saturated state

岩样在轴向荷载压缩过程中,内部微裂隙、孔洞及微缺陷等引起局部应力集中,当荷载达到屈服应力后,致使岩石内部强度较低的地方发生屈服弱化变形,岩石内大量新微裂纹产生、扩展并与原始裂纹汇合,岩石颗粒间的连结力、咬合力逐步降低,进而促使岩样内部发生塑性变形。水的长期浸泡对含炭质钙质页岩起到软化作用,改变了岩石的矿物组成与微细观结构,降低了矿物颗粒间的连结力,岩石中的黏土矿物与水发生物理化学作用,使矿物颗粒间距增大,促进了更多微裂纹的产生,在长期荷载共同作用下,岩石材料内部强度较低地方的主裂隙逐渐贯通,形成潜在剪切面,剪切面周围的物质由于岩样压剪破坏产生了粉碎化现象。

2.4 流变长期强度研究

岩石的长期强度是时效强度的一种,是指岩石

在长期的荷载作用下能保持岩体稳定的最大应力,即在这一应力值,材料将产生潜在破坏面但并未发生宏观破坏^[22]。由岩石流变特性可知,对于长期受载的岩石而言,其强度实际上是随时间推移而逐渐降低的,因此,对于不同加载的时间,将有不同的强度包络线,岩石的长期强度包络线是其中值最低的一条包络线,岩石强度从 $t=0$ 的包络线降低到近于 $t=\infty$ 的包络线。

基于岩石在不同轴向应力水平条件下应变与时间的关系,绘出对应轴向应力水平与应变的等时簇曲线,确定各历时包络线的屈服极限点,各屈服极限点组成的曲线的水平渐近线所对应的轴向应力水平即为长期强度(图5)。

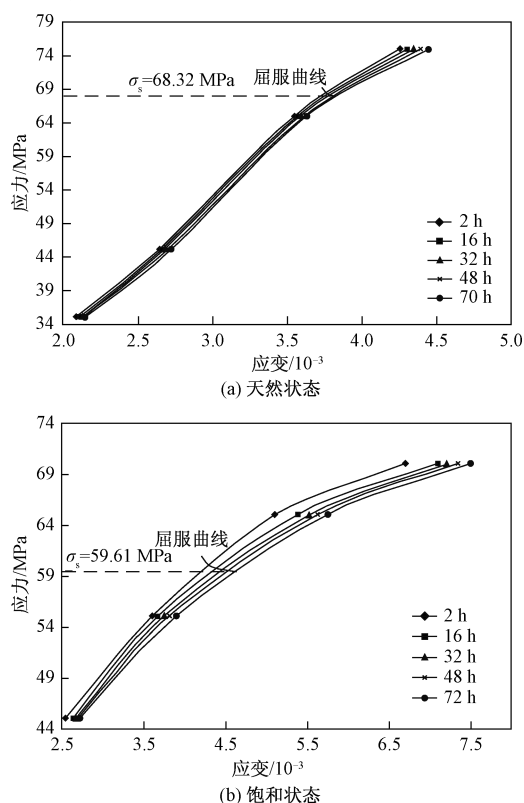


图5 应力-应变等时簇曲线

Fig.5 Isochronal curves of stress and strain under natural and saturated state

由图5天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的应力-应变等时簇曲线可以确定出,含炭质钙质页岩的长期强度分别为 68.32MPa 和 59.61MPa,饱和状态长期强度为天然状态的 87.25%。

3 岩石非线性黏弹塑性流变模型研究

3.1 流变本构模型研究

岩石材料是非均质、各向异性和不连续的黏弹塑

性体,产生黏性流变时效的主要因素是岩石内部的点缺陷扩散、线缺陷移动,以及晶粒间界滑动等等。值得注意的是,在岩体流变变形的同时,材料的变形性态也随之发生非线性规律的变化。岩石产生非线性流变的主要原因是由于岩石材料中的各种初始损伤在恒定应力水平的作用下,经历了一种演化扩展过程,同时岩石内部矿物颗粒介质本身也将发生晶粒滑移等等,这样岩石内部材料损伤的几何组构特征随之发生动态变化,从而使岩石的变形与强度发生非线性规律性变化。因此岩石的非线性流变与岩石内部损伤的产生以及扩展密切相关。

通过对图2和图3中天然和饱和状态下含炭质钙质页岩流变试验曲线进行分析,不难发现,岩石在初始流变衰减阶段和稳态流变阶段表现出线性黏弹性特征,而进入加速流变阶段以后则表现出非线性黏弹塑性流变特征,流变曲线有如下的几个特点:(1)在加载各级应力水平后,岩石立即产生瞬时弹性变形,表明流变变形具有弹性特征;(2)岩石在恒定应力水平下,应变随时间有增大的趋势,可知流变变形还具有黏性特征;(3)在进入加速流变阶段之前,应变与应变速率随时间变化趋于某一恒定值;(4)岩石在进入加速流变阶段后,应变与应变速率随时间推移并不收敛于某一恒定值,而是急剧增大,因此流变变形具有塑性特征。

通过以上分析可知,含炭质钙质页岩的流变过程具有非线性黏弹塑性特征。建立岩石非线性流变模型一般有两种方法:一种是采用非线性流变元件,将其与常规线性流变元件相组合,建立岩石的非线性流变模型;另一种是采用内时理论、断裂及损伤力学理论等,建立能描述加速流变阶段的非线性流变模型。本文采用以上二者相结合的方法,将损伤变量 D 引入到经典的 *Burgers* 线性流变模型中,构成一个改进的非线性 *Burgers* 损伤流变模型,使其能完整的描述岩石的流变全过程。

假设损伤变量为

$$D = \begin{cases} 1 - e^{-(t-t^*)^n} & (t > t^*) \\ 0 & (t \leq t^*) \end{cases} \quad n > 0 \quad (1)$$

式中, D 为损伤变量, t 为蠕变时间, n 为常数, t^* 为岩石材料进入非线性流变阶段的起始时刻。

将此损伤元件加入到 *Burgers* 流变模型中,得到改进的非线性 *Burgers* 损伤流变模型(图6)。

模型中, σ 表示总偏应力, ε_K 、 ε_M 分别为 *Kelvin* 模

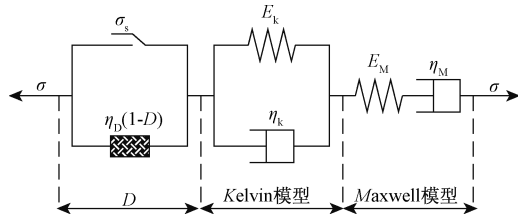


图 6 改进的非线性 Burgers 损伤流变模型

Fig. 6 Improved nonlinear damage rheological model

型和 Maxwell 模型的应变; E_K 、 E_M 、 η_K 、 η_M 、 η_D 分别表示岩石材料的弹性模量及黏滞系数; σ_s 为岩石的长期强度。

当应力 $0 < \sigma < \sigma_s$ 时,模型中只有 K 、 M 部分起作用,模型就退化为 Burgers 流变模型,相应的流变本构方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) + \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t \quad (2)$$

当应力 $0 < \sigma_s < \sigma$, 且 $t \leq t^*$ 时,模型中非线性损伤变量不起作用,相应的流变本构方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) + \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_D} t \quad (3)$$

当应力 $0 < \sigma_s < \sigma$, 且 $t > t^*$ 时,模型中各部分及非线性损伤变量均起作用,相应的流变本构方程为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K} t} \right) + \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M} t + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_D} t \cdot e^{-(t-t^*)^n} \quad (4)$$

式(3)和式(4)即为改进的非线性 Burgers 损伤流变模型本构方程。

3.2 流变模型参数辨识

利用含炭质钙质页岩流变试验数据对改进的非线性 Burgers 损伤流变模型的合理性进行验证。首先,采用 Boltzmann 叠加原理对分级加载条件下的流变试验数据进行处理,得到叠加后的流变试验曲线(图 7)。然后利用非线性流变模型对试验曲线进行拟合,并通过 Levenberg-Marquardt 非线性优化最小二乘法对模型参数进行辨识,计算得出流变模型的辨识参数如下表 5。并将该模型的拟合曲线与流变试验曲线做对比分析,结果见图 7。

由表 5 可以看出,在天然和饱和状态下,前三级应力水平的弹性模量参数 E_K 和 E_M 的数量级相同,加载最后一级应力水平时由于出现了加速阶段岩石发生破坏,所以参数数量级有所减小;而黏滞系数 η_M 和 η_D 值的数量级相差均在 $1 \sim 10^1$ 之间,而且除个别突变值外,可以看出其整体有随加载应力水平增高而减小的

趋势,这反映了岩石由低应力水平作用下的衰减型蠕变变形向高应力水平作用下的加速型蠕变变形发展的整个过程。结合表 5 参数和图 7 非线性 Burgers 损伤流变模型与试验数据的对比可以看出,模型曲线的拟合优度较高,均大于 0.950。这表明改进的非线性 Burgers 损伤流变模型能够很好的描述含炭质钙质页岩流变 3 个阶段的变形特征,也验证了该模型的合理性。

表 5 改进的 Burgers 模型参数辨识表

Table 5 Parameter identification of improved Burgers model

状态	应力水平/MPa	E_K /GPa	E_M /GPa	η_K /(GPa·h)	η_M /(GPa·h)	η_D /(GPa·h)	n	拟合优度
天然	35	228	12.50	266	38500	—	—	0.962
	45	301	13.57	1070	41200	—	—	0.978
	65	259	16.41	113	22000	—	—	0.973
	75	692	16.17	88	1120	$1.17E+21$	2.90	0.987
	45	209	14.30	600	20300	—	—	0.983
饱和	55	264	13.22	457	8100	—	—	0.980
	65	143	11.21	697	8020	—	—	0.988
	70	807	8.39	53	6565	$8.46E+21$	1.41	0.987

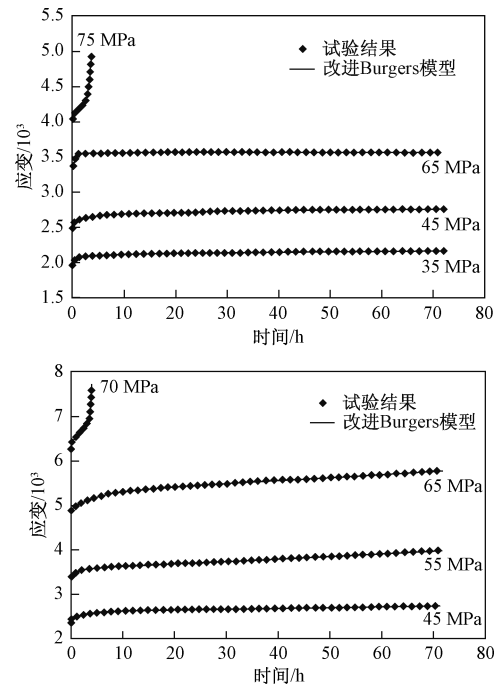


图 7 改进 Burgers 模型与试验结果对比

Fig. 7 Comparison between improved model and test results

4 结论

通过三轴压缩流变试验,研究在天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的流变力学特性,得到以下几点

认识:

(1) 饱和状态下含炭质钙质页岩的流变变形特性比天然状态下更为显著。同等应力水平下,饱和状态应变增量均大于天然状态。随着应力水平升高,饱和状态与天然状态的流变变形量差值逐渐增大。在加载最后一级破裂应力水平时发生流变破坏,流变曲线呈现出非线性黏弹塑性特征。

(2) 水对含炭质钙质页岩破裂应力水平下的流变特性影响是非常明显的。在饱和状态下,各流变阶段历时较天然状态有所减少,而各流变阶段的应变量与平均流变速率均大于天然状态。

(3) 天然和饱和状态下,虽然含炭质钙质页岩流变破坏均为剪切破坏,但是其剪切面形式不同,粉碎程度也不同。究其原因,是因为水的长期浸泡对含炭质钙质页岩起到软化作用,岩石中的黏土矿物与水发生物理化学作用,使矿物颗粒间距增大,促进了更多微裂纹的产生。

(4) 获得了天然和饱和状态下含炭质钙质页岩的长期强度,饱和状态长期强度为天然状态的 87.25%,该结果为乌江地区地质灾害机理研究及防治提供了可靠的试验资料。

(5) 岩石的非线性流变与损伤的产生以及扩展密切相关,利用改进的非线性 *Burgers* 损伤流变模型完整的描述了天然和饱和状态下含炭质钙质页岩流变的全程曲线,并对模型参数进行辨识。通过与试验结果对比分析得知,该模型具有很好的适用性。

参考文献:

- [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.
SUN Jun. Rheology of geo-material and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1999.
- [2] 孙钧. 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.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [3] SUN Jun, HU Y Y. Time-dependent effects on the tensile strength of saturated granite at the three gorges project in China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 323-337.
- [4] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990.
ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990.
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
SUN Guangzhong. Rock mass structure mechanics[M]. Science Press, 1988.
- [6] 刘雄. 新滩大滑坡机制探讨[J]. 岩土力学, 1986, 7(2): 53-60.
LIU Xiong. Discussion of the mechanism for Xintan beach landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(2): 53-60.
- [7] 李守定, 李晓, 吴疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2473-2480.
LI Shouding, LI Xiao, WU Jiang et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2473-2480.
- [8] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 含层间错动带岩体的破坏模式及其剪切特性研究方法探讨[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 129-136.
XU Dingping, FENG Xiating, CUI Yujun, et al. On failure mode and shear behavior of rock mass with interlayer staggered zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 129-136.
- [9] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究 - 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 19(2): 217-226.
YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide-a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 19(2): 217-226.
- [10] 冯振. 斜倾厚层岩质滑坡视向滑动机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
FENG Zhen. Research on mechanism of apparent dip slide from oblique inclined thick layered rock slope failure[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Chinese Academy of Geologic Sciences, 2012.
- [11] 刘传正. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 297-304.
LIU Chuansheng. Mechanism analysis on the Jiweishan rock fall disaster happened in Wulong,

- Chongqing, June 5, 2009 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 297 - 304.
- [12] 高杨, 殷跃平, 邢爱国, 等. 鸡尾山高速远程滑坡 - 碎屑流动力学特征分析 [J]. 中国地质灾害防治学报, 2013, 24(4): 46 - 51.
- GAO Yang, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 46 - 51.
- [13] Griggs. Creep of rock [J]. Journal of Geology, 1939, 47: 225 - 251.
- [14] 张奇华, 彭光忠. 链子崖危岩体软弱夹层的蠕变性质研究 [J]. 岩土力学, 1997, 18(1): 60 - 64.
- ZHANG Qihua, PENG Guangzhong. Research on creep behavior of the weak intercalated bed in the dangerous rock body of Lianzi cliff [J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(1): 60 - 64.
- [15] 金丰年. 岩石的非线性流变 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1998.
- JIN Fengnian. Nonlinear rheological behavior of rocks [M]. Nanjing: Hehai University Press, 1998.
- [16] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究 (I): 试验结果 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531 - 537.
- XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (I): experimental results [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531 - 537.
- [17] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究 (II): 模型分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693 - 698.
- XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (I): model analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693 - 698.
- [18] 何玉荣, 李建中. 网状红土分级加载与分别加载蠕变试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 62 - 67.
- HE Yurong, LI Jianzhong. Research on creep of reticulate red clay under stepped-load and constant-load [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2014, 41(2): 62 - 67.
- [19] 王志荣, 张利民, 韩中阳, 等. 平顶山盐田互层状盐岩蠕变特性与试验模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 125 - 130.
- WANG Zhirong, ZHANG Limin, HAN Zhongyang, et al. A study of the creep properties and the test model of the inter bedded salt rock in the Pingdingshan salt field [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2014, 41(5): 125 - 130.
- [20] 李鹏, 刘建. 不同含水率软弱结构面剪切蠕变试验及模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 49 - 53.
- LI Peng, LIU Jian. Experimental and theoretical studies on the effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(6): 49 - 53.
- [21] 宋勇军. 干燥和饱水状态下炭质板岩流变力学特性与模型研究 [博士学位论文] [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- SONG Yongjun. Study on rheological mechanical properties and model of carbonaceous slates under dry and saturated states [Ph. D. Thesis] [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [22] 刘雄. 岩石流变学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- LIU Xiong. Introduction of rock rheological [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1994.