

刘圣,李树清,袁越.三轴压缩下红砂岩峰后蠕变力学特性试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):25-32.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.004

Liu S, Li S Q, Yuan Y, et al. Experimental Study of Post-peak Creep Mechanics Characteristics of Sandstone Under Triaxial Compression [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019,34(2):25-32.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.03.004

三轴压缩下红砂岩峰后蠕变力学特性试验

刘圣,李树清*,袁越,裴叶,刘诚,陈国豪

(湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;
湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;
湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究岩石峰后蠕变力学特性,利用 MTS815 电液伺服岩石力学试验系统,对红砂岩进行三轴压缩下峰后蠕变试验.分析了红砂岩峰后蠕变特征,估算了红砂岩峰后长期强度,采用改进的西原模型对峰后蠕变特性进行了描述,确定了模型参数.结果表明:红砂岩峰后蠕变破坏应力下并不直接进入加速蠕变阶段,而是由等速蠕变阶段逐渐向加速蠕变阶段转化.红砂岩峰后蠕变变形主要集中于加速蠕变阶段,加速蠕变阶段短时间内蠕变的剧烈变形是岩石失稳破坏的重要原因.随着荷载的加大,岩样的破坏形态由单一的剪切破坏与裂纹扩展等破坏形式逐渐向多剪切破坏演化,破坏块体增多,岩样更加破碎.本次试验红砂岩峰后长期强度仅为其峰值强度的 42.56%,长期强度折减量较大.红砂岩峰后蠕变特性可用改进的西原模型进行描述,各级应力水平下模型曲线与试验曲线拟合较好.研究结果为深部工程围岩峰后流变力学特性研究提供了一定的参考意义.

关键词:岩石力学;峰后蠕变;三轴压缩;长期强度;蠕变模型

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)03-0025-08

Experimental Study of Post-peak Creep Mechanics Characteristics of Sandstone Under Triaxial Compression

Liu Sheng, Li Shuqing, Yuan Yue, Pei Ye, Liu Cheng, Chen Guohao

(Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the post-peak creep mechanical characteristics of rock, the triaxial post-peak creep test of red sandstone was carried out by applying the MTS815 electro-hydraulic servo rock mechanics test system. The post-peak creep characteristics of red sandstone was analyzed, and the post-peak long-term strength of red sandstone was estimated based on creep test. The post-peak creep characteristics were described by the improved Nishihara model, and the model parameters were determined. The results show that the post-peak creep of red sandstone under failure stress is not directly into the accelerated creep stage, but the transition from the constant

收稿日期:2017-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374104);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2058);湖南省教育厅一般科研项目(15C0551)

*通信作者,E-mail:lsq-hnust@163.com

creep stage to the accelerated creep stage. The post-peak creep deformation of red sandstone is mainly concentrated in the accelerated creep stage, and the rapid deformation of creep during the accelerated creep stage is the important reason for the rock failure. With the increase of the load, the failure modes of rock samples are gradually evolved from multiple shear failure and crack propagation to multiple shear failure. Destruction of the block increases and tends to break. The post-peak long-term strength of red sandstone is only 42.56% of its peak intensity for the test, and the long-term strength significantly reduces. The post-peak creep characteristics of the red sandstone can be described by the improved Nishihara model, and the model curve is better fitted with the test curve under all the stress levels. The results provide a reference for the study of the post-peak rheological mechanical behavior of the surrounding rock in deep engineering.

Keywords: rock mechanics; post-peak creep; triaxial compression; long-term strength; creep model

深部高应力软岩巷道围岩中往往存在一定范围的破裂区,破裂围岩在持续高地应力作用下具有很强的时间效应^[1-2],其典型特征就是破裂围岩的长期蠕变,由此造成了深部工程围岩显著的流变变形破坏,给巷道围岩控制带来了极大的困难.因此,深入研究岩石峰后流变力学特性,对工程设计中维护巷道长期稳定有着十分重要的现实意义.

国内外基于岩石室内流变试验对完整岩石的蠕变特性开展了大量的研究,取得了很多成果^[3-7],但关于峰后蠕变力学特性研究相对较少.在岩石峰后蠕变试验方面,郭臣业等^[8]开展了砂岩各种应力水平下的峰后蠕变试验,表明破裂砂岩也存在长期强度并能通过应力-应变关系求得;S. S. Peng^[9]对大理岩、砂岩进行了峰后蠕变试验,发现常荷载作用下破裂岩石蠕变失稳时间较短,不足 10 min 完全失稳破坏;牛双建等^[10]研究了破裂岩样的单轴蠕变特性,结果显示总体上各级蠕变量随着应力水平的增大呈指数关系增大;刘传孝等^[11]通过深井泥岩峰后单轴短时蠕变试验对峰后蠕变曲线进行了 Boltzmann 函数拟合,得到了相关性较强的拟合函数;李晓等^[12]对砂岩进行了峰后蠕变试验,研究表明破裂岩石长期强度与围压有关,随着围压的增大,峰后蠕变由非稳定型向稳定型转化.上述研究对峰后蠕变力学特性进行了部分探索,但关于岩石峰后长期强度,寻求合适的蠕变模型对峰后蠕变力学特性规律进行描述等问题还有待进一步研究.鉴于此,本文利用 MTS815 电液伺服岩石力学试验系统,对红砂岩进行了峰后蠕变试验,分析了岩石峰后蠕变特征,基于蠕变试验估算岩石峰后长期强度,采用改进的西原模型对峰后蠕变特性进行描述,求解模型参数,为深部巷道破裂围岩控制研究提供了科学依据.

1 试验概述

1.1 试样制备与试验系统

本次试验取样为红砂岩,质地均匀无裂隙,完整性好,呈红褐色.按照岩石力学学会标准,制备成高度与直径为 100 mm×50 mm 圆柱体状标准试件.设备采用 MTS815 多功能电液伺服岩石力学试验系统,该试验机具有轴压、围压等 4 套独立的闭环伺服控制功能,能实现荷载、应变等多种控制方式.试验全程可由程序控制,自动完成数据的采集,具有自动化程度高、数据精度高和可操作性强等优点.

1.2 试验方法

试验采用单体分级加载方法,围压为 15 MPa.具体加载路径:位移加载→固定变形→分级加载蠕变,加载路径示意图见图 1.在位移加载阶段,以恒定应变速率施加轴压至峰前预设值如 OAB 段.在固定变形阶段,恒定轴向位移直至荷载基本稳定如 BC 段.在分级加载蠕变阶段,切换伺服机为荷载控制方式,进行分级加载蠕变如 CD 段.其中,加载分级水平由如下方法确定:以岩样峰值强度值的 70%~85%为参考,控制轴向应力水平差值为 1.0~2.5 MPa,由小向大逐级施加荷载.各级应力水平持续施加的时间依据轴向蠕变速率确定,岩石蠕变的稳定标准为蠕变增量<0.001 mm/h,即施加下一级荷载.试验中计算机自动采集数据,峰前至固定变形阶段采用时间采集,采集频率为每 5 s 一次,蠕变阶段采用位移采集,采集频率为轴向位移每变化 0.002 mm 采集一次.该

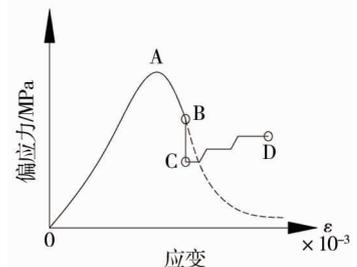


图 1 试验加载路径

分段采集方式采集数据较全面,在加速蠕变阶段效果良好.

2 试验结果及分析

2.1 岩石峰后蠕变特征

分别对3组岩样(HS3-1,HS4-1,HS5-1)进行了峰后蠕变试验.绘制了采用 Boltzmann 叠加原理处理后的分别加载峰后蠕变曲线见图2~图4,试验特征参数如表1.

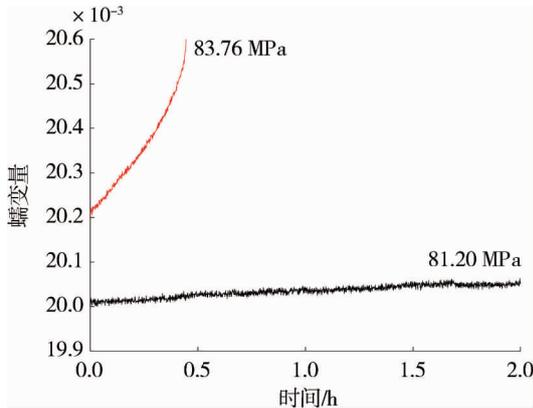


图2 HS3-1 分别加载峰后蠕变曲线

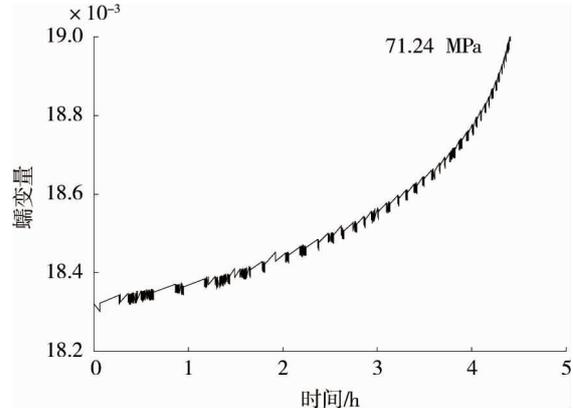


图3 HS4-1 分别加载峰后蠕变曲线

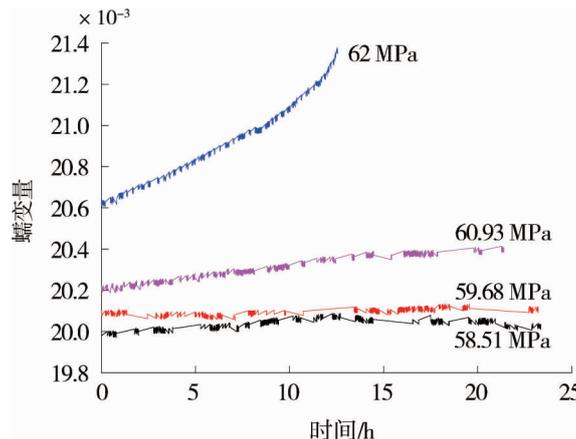


图4 HS5-1 分别加载峰后蠕变曲线

表1 峰后蠕变试验特征参数

试件编号	峰值强度 /Mpa	总蠕变量/ 10^{-3}	蠕变分级	应力水平 /Mpa	各级蠕变量/ 10^{-3}	应力水平与峰值强度比值/%	各级蠕变量与总蠕变量比值/%
HS3-1	141.14	0.606	第1级	81.20	0.044	57.53	7.26
			第2级	83.76	0.562	59.35	92.74
HS4-1	136.79	0.696	第1级	71.24	0.696	52.08	100.00
			第1级	58.51	0.017	42.57	1.77
			第2级	59.68	0.038	43.42	3.96
			第3级	60.93	0.166	44.33	17.31
HS5-1	137.46	0.959	第4级	62.00	0.738	45.10	76.96

分析分别加载峰后蠕变曲线可知:处于峰值后的红砂岩具有显著的蠕变特征.试验中3组红砂岩峰后蠕变曲线线型有所不同,这是峰后蠕变起始荷载的不同所致.由图2~图4可见:减小蠕变起始荷载,等速蠕变阶段将增多即延长了等速蠕变阶段的时长.在工程巷道开挖后,破裂围岩所受的荷载不尽相同,其不同应力水平下的蠕变特性也有所差异,试验结果在一定程度上反映了巷道周边破裂围岩在不同应力水平下的蠕变规律.曲线没有出现明显的衰减蠕变阶段,说明峰后蠕变曲线主要由等速蠕变阶段和加速蠕变阶段组成.3组岩样中,蠕变曲线出现加速蠕变阶段的应力水平分别为相应峰值强度的59.35%,52.08%和45.10%,尽管岩样的峰值强度较接近,但发生蠕变破坏的应力水平仍有一定差异.

在蠕变量上,对于 HS3-1,等速蠕变阶段蠕变量占总蠕变量的 7.26%,加速蠕变阶段蠕变量占总蠕变量的92.74%,加速蠕变阶段蠕变变形约为等速蠕变阶段蠕变变形的 12 倍;对于 HS5-1,等速蠕变阶段蠕变量占总蠕变量的 23.04%,加速蠕变阶段蠕变量占总蠕变量的 76.96%,加速蠕变阶段蠕变变形约为等速蠕变阶段蠕变变形的 3 倍.可见岩样峰后蠕变变形主要集中于加速蠕变阶段,加速蠕变阶段短时间内岩样蠕变的剧烈变形是岩石蠕变失稳破坏的重要原因.另一方面,根据各级应力水平与蠕变量,绘制了各级蠕变量与应力水平关系图见图 5,拟合了 HS5-1 各级蠕变量-应力水平回归曲线,其函数关系式为

$$\varepsilon = 0.01353 + 4.75279E-4e^{1.49299\sigma}, R^2 = 0.999. \tag{1}$$

式中: ε 为蠕变量; σ 为应力水平.

由图 5 可知:各级蠕变量随应力水平的增大而增大,且 HS5-1 各级蠕变量与应力水平呈指数函数关系.

对于最后一级应力水平(即破坏应力)下蠕变速率特征,绘制了 3 组岩样在不同破坏应力下的蠕变速率曲线如图 6 所示.总体上,破坏应力下蠕变曲线依次经历等速蠕变阶段和加速蠕变阶段,并不直接进入加速蠕变阶段.蠕变速率曲线以等速蠕变阶段为主,逐渐向加速蠕变转化.等速蠕变阶段蠕变速率较小,呈小范围波动;加速蠕变阶段蠕变速率短时间内急剧增大,直至岩样失稳.不同破坏应力下蠕变速率曲线特征也有所差异.随着破坏应力的增大,等速蠕变阶段速率波动范围小幅增大,等速蠕变阶段持续时间成倍数减小,分别为 12.0,4.0,0.4 h.由以上分析可知,岩样的蠕变变形随着应力水平的增大逐渐增大,蠕变速率逐渐增大.在等速蠕变阶段,蠕变速率较小,蠕变量小;在加速蠕变阶段,蠕变曲线逐渐由等速蠕变向加速蠕变转化,蠕变速率急剧增大,蠕变量增大.

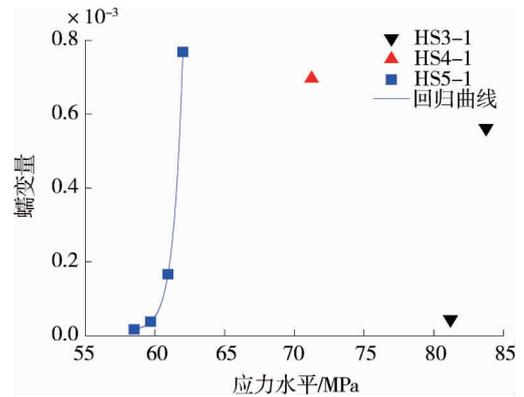


图 5 各级蠕变量与应力水平关系

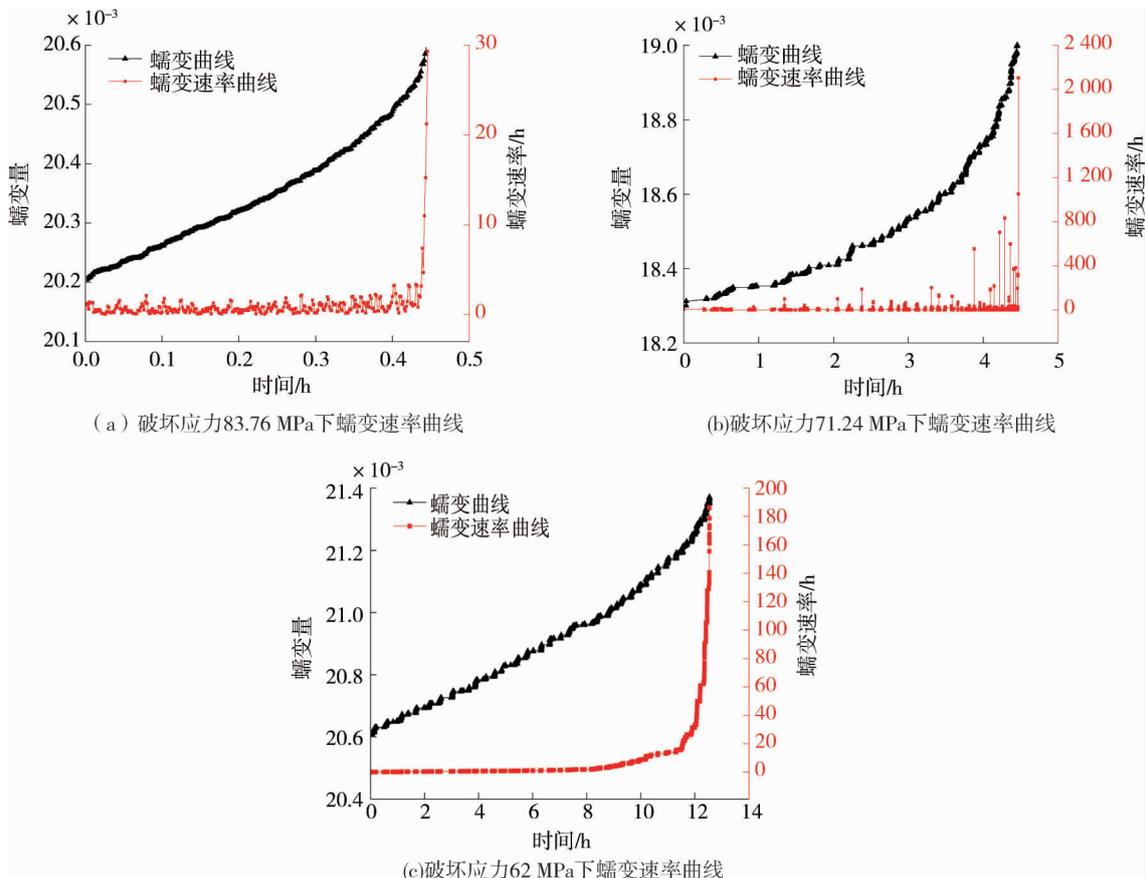


图 6 不同破坏应力下蠕变速率曲线

在岩样峰后蠕变破坏特征上,3组岩样破坏形态如图7所示.试验结果表明:岩石主要破坏形态为剪切破坏,不同破坏应力下,破坏形式存在一定差异.在破坏应力83.76 MPa下,岩样破坏形态呈一主剪切破坏面和若干支剪切破裂面,两者相交形成了X状的剪切破坏,与文献[13]的试验结果较一致;在破坏应力71.24 MPa下,岩样破坏形态呈单剪破坏并伴随着竖向劈裂破坏,可以看出破坏块体沿破裂面发生了滑移;在破坏应力62 MPa下,岩样破坏形态呈主剪切破坏,并在剪切破坏面周围产生了不同几何形式裂纹.可见,不同破坏应力对岩样峰后蠕变的破坏形态有着显著的影响.随着荷载的加大,岩样的破坏形态由单一的剪切破坏与裂纹扩展等破坏形式逐渐向多剪切破坏演化,使破坏块体增多,岩样更加破碎.



图7 不同破坏应力下峰后蠕变破坏形态

2.2 峰后长期强度特征

岩石的长期强度是衡量岩体工程长期稳定性的一项重要指标,而考察岩石峰后长期强度对深部巷道破裂围岩稳定性控制研究具有重要意义.估算其值可通过以下方法:一是根据定义求得,该方法工作量大,可操作性不强;二是根据岩石加载过程中的应力-应变关系通过理论方法得出^[8,14];三是通过岩石各种应力水平下的蠕变试验,拟合长期强度曲线经过理论计算求出^[15].基于试验结果,采用第3种方法估算该量值.由定义可知,岩石的强度随着外载作用时间的延长而降低,将时间 $t \rightarrow \infty$ 的强度(最低值) S_{∞} 作为岩石的长期强度.依据不同应力水平下恒载蠕变试验数据,绘制了不同破坏应力下的非衰减蠕变曲线簇如图8所示.根据岩样蠕变失稳时破坏应力和破坏时长拟合了长期强度曲线如图9所示.

对于长期强度曲线,采用指数型经验方程进行拟合,曲线方程为

$$\sigma = 58.93 + 26.96e^{-0.171t} \quad (2)$$

对应于长期强度曲线的水平渐近线在纵轴上的截距,即为长期强度 σ_{∞} .

对式(2)求 $t \rightarrow \infty$ 时 σ 的极限值:

$$\sigma_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma = 58.93 \text{ MPa} \quad (3)$$

岩石的流变特性与长期强度紧密相关,相关试验表明^[8,16-17]:若加载水平低于长期强度时,岩样仅发生第一水平的蠕变即衰减蠕变,包括减速蠕变阶段和等速蠕变阶段;若加载水平高于长期强度时,岩样往往出现加速蠕变直至失稳破坏.本次蠕变试验围压为15 MPa,该围压下岩石的长期强度约为58.93 MPa.在图4分别加载蠕变曲线中,第一级应力水平58.51 MPa下,岩样处于蠕变速率极小的等速蠕变段,应力水平大于58.51 MPa后,岩样的蠕变速率有所增加,直至应力水平增至62 MPa时,出现了加速蠕变导致岩样

失稳.可见,估算的长期强度较好地符合了试验中的长期强度规律.同时,15 MPa 围压下岩样的平均峰值强度为 138.46 MPa,长期强度仅为峰值强度的 42.56%,而完整岩石的长期强度约为峰值强度的 80%^[18],可见长期强度的折减量较大,工程实践中应考虑巷道周边破裂围岩的长期强度折减问题.

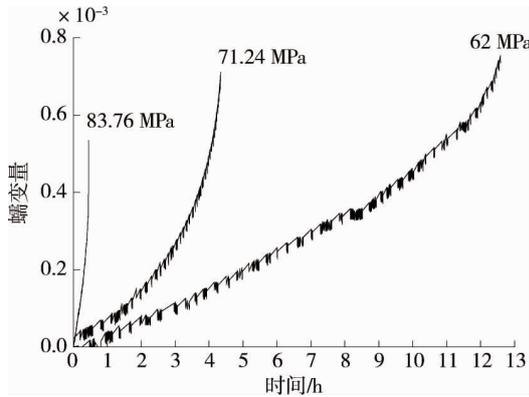


图8 不同破坏应力下非衰减蠕变曲线簇

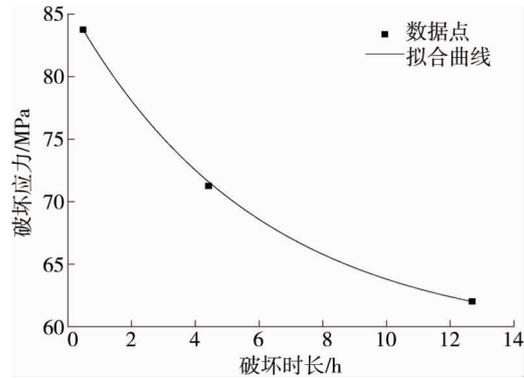


图9 长期强度曲线

2.3 红砂岩峰后蠕变模型

在众多组合模型中,以西原模型较适于描述岩石的蠕变三阶段特征,不足的是加速蠕变阶段速率恒定^[19].分析峰后蠕变曲线可知,加载水平低于屈服应力即近似于长期强度时发生稳定蠕变,加载水平高于屈服应力即近似于长期强度后逐渐转化为不稳定蠕变,该阶段内蠕变速率随时间逐渐增大.因此,可选用经过改进的西原模型来描述峰后蠕变全过程,改进的西原体力学模型如图 10 所示.

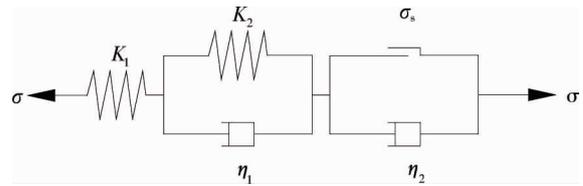


图10 改进的西原体力学模型

该模型中,依据岩石的黏性系数随时间的变化规律^[20],有

$$\eta'_2(t) = \frac{C\eta_2}{At^2 - Bt + C} \tag{4}$$

式中: η_2 为受载体的黏性系数; A, B, C 均为常数.

由叠加原理,在一维应力条件下,改进西原体的本构方程为

1)若 $\sigma < \sigma_s$,有

$$\frac{\eta_1}{K_1} \dot{\sigma} + \left(1 + \frac{K_2}{K_1}\right) \sigma = \eta_1 \dot{\varepsilon} + K_2 \varepsilon \tag{5}$$

式中: K_1, K_2 为弹性模量; η_1 为黏性系数.

2)若 $\sigma \geq \sigma_s$,有

$$\ddot{\sigma} + \left(\frac{K_2}{\eta_1} + \frac{K_2}{\eta_2} + \frac{K_1}{\eta_1}\right) \dot{\sigma} + \frac{K_2 K_2}{\eta_1 \eta_2} (\sigma - \sigma_s) = \frac{K_1 K_2}{\eta_1} \dot{\varepsilon} + K_2 \ddot{\varepsilon} \tag{6}$$

令 $\sigma = \sigma_0$,代入式(5)和式(6),结合式(4)解微分方程可得改进西原模型一维应力状态下的蠕变方程:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{K_1} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_1} t\right)\right], & \sigma < \sigma_s; \\ \frac{\sigma_0}{K_1} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2}{\eta_1} t\right)\right] + \frac{(\sigma_0 - \sigma_s)}{\eta_2} \left(\frac{A}{3} t^3 - \frac{B}{2} t^2 + Ct\right), & \sigma \geq \sigma_s. \end{cases} \tag{7}$$

就三维应力状态下的黏弹塑性体而言,假定蠕变过程中体积应变微小可忽略不计^[1].根据叠加原理,设 S_{ij} 为蠕变试验恒定偏应力, G_1, G_2 为剪切模量,用长期强度 σ_∞ 替代岩样的屈服应力 σ_s ,从式(7)可推得红砂岩三维蠕变方程:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{S_{ij}}{2G_1} + \frac{S_{ij}}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right], \sigma < \sigma_s; \\ \frac{S_{ij}}{2G_1} + \frac{S_{ij}}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right] + \frac{(S_{ij} - \sigma_\infty)}{\eta_2} \left(\frac{A}{3}t^3 - \frac{B}{2}t^2 + Ct \right), \sigma \geq \sigma_s. \end{cases} \quad (8)$$

对于峰后蠕变的减速蠕变与等速蠕变阶段,用式(8)中第一式进行描述.对于峰后蠕变出现加速蠕变阶段,用式(8)中第二式进行描述.试验中恒定偏应力可用 $\sigma_{11} - \sigma_{33}$ 代替,则等围压下三维蠕变方程为

$$\varepsilon_{11} = \begin{cases} \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2G_1} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right], \sigma < \sigma_s; \\ \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2G_1} + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1}t\right) \right] + \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{33} - \sigma_\infty)}{\eta_2} \left(\frac{A}{3}t^3 - \frac{B}{2}t^2 + Ct \right), \sigma \geq \sigma_s. \end{cases} \quad (9)$$

根据试验结果,采用 Origin 数据分析软件,基于 Levenberg-Marquardt + 通用全局优化法算法的最小二乘法对岩样的蠕变曲线进行拟合,求取了不同岩样蠕变模型各参数见表 2.绘制了不同岩样各级应力水平下改进的西原模型曲线与试验曲线对比图如图 11~图 13.可见,在各级应力水平下,模型曲线与试验曲线的拟合度较高,特别是加速蠕变阶段取得了良好的效果,说明改进的西原模型较好地描述了岩样峰后蠕变变形特征.

表 2 各级应力水平下改进西原模型参数拟合结果

岩样编号	σ /MPa	G_1 /GPa	G_2 /GPa	η_1 /(GPa·h)	η_2 /(GPa·h)	A	B	C
HS3-1	81.20	2.222	5.411	241.722				
	83.76	2.006	8.363	10.500	0.316	0.577	0.164	0.005
HS4-1	71.24	2.682	3.202	17.515	4.913	-0.097	-0.257	-0.001
	58.51	1.598	2.943	1 202.273				
HS5-1	59.68	1.389	4.472	2 502.825				
	60.93	1.866	2.580	224.903				
	62.00	1.515	3.857	450.645	26.646	-0.002	-0.021	-0.110

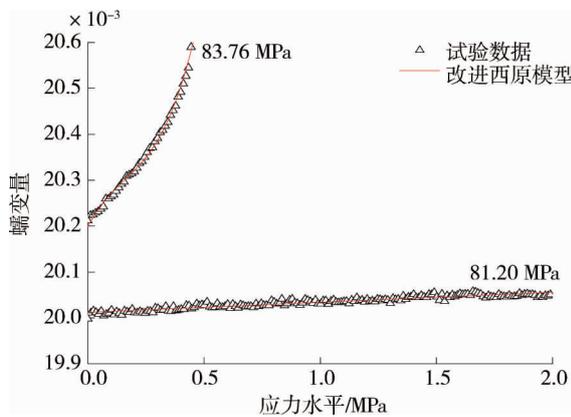


图 11 HS3-1 蠕变试验曲线与模型拟合曲线

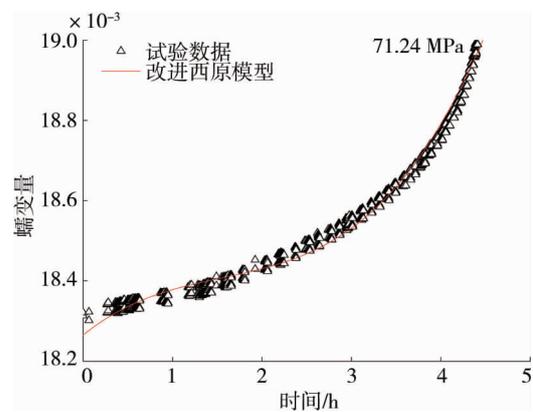


图 12 HS4-1 蠕变试验曲线与模型拟合曲线

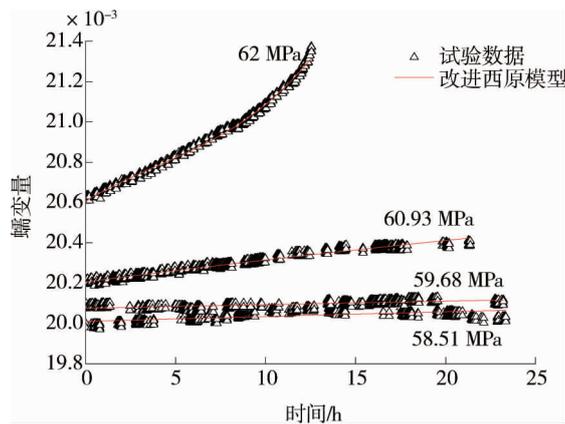


图 13 HS5-1 蠕变试验曲线与模型拟合曲线

3 结论

1) 红砂岩峰后蠕变破坏应力下并不直接进入加速蠕变阶段,而是由等速蠕变阶段逐渐向加速蠕变阶段转化.红砂岩峰后蠕变变形主要集中于加速蠕变阶段,加速蠕变阶段短时间内岩石蠕变的剧烈变形是岩石蠕变失稳破坏的重要原因.

2) 岩样的峰后蠕变变形随着应力水平的增大逐渐变大,蠕变速率逐渐增大.在等速蠕变阶段,蠕变速率较小,蠕变量小;在加速蠕变阶段,蠕变速率急剧增大,蠕变量增大.

3) 不同破坏应力对岩样峰后蠕变的破坏形态有着显著的影响.随着荷载的加大,岩样的破坏形态由单一的剪切破坏与裂纹扩展等破坏形式逐渐向多剪切破坏演化,使破坏块体增多,岩样更加破碎.

4) 依据蠕变试验拟合了长期强度曲线,结果表明本次试验红砂岩峰后长期强度仅为峰值强度的42.56%,长期强度折减量较大,工程实践中应考虑巷道周边破裂围岩的长期强度折减问题.

5) 采用改进的西原模型对峰后蠕变曲线进行描述,模型曲线与试验曲线的吻合较好,在加速蠕变阶段取得了良好的效果,改进的西原模型能较好地模拟红砂岩峰后蠕变特性.

参考文献:

- [1] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106.
- [2] 李树清.深部煤巷围岩控制内一外承载结构耦合稳定原理的研究[D].长沙:中南大学,2008:18-30.
- [3] 单仁亮,宋立伟,李东阳,等.冻结红砂岩非线性蠕变模型的研究[J].岩土力学,2014,35(6):1541-1546.
- [4] 宗义江.深部破裂围岩蠕变力学特性与本构模型研究[D].北京:中国矿业大学,2013.
- [5] Tsai L S, Hsieh Y M, Weng M C, et al. Time-dependent deformation behaviors of weak sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2008, 45 (2): 144-154.
- [6] 张玉,金培杰,徐卫亚,等.坝基碎屑岩三轴蠕变特性及长期强度试验研究[J].岩土力学,2016,37(5):1291-1300.
- [7] 刘钦,李术才,李利平,等.软弱破碎围岩隧道炭质页岩蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2012,33(s2):21-28.
- [8] 郭臣业,鲜学福,姜永东,等.破裂砂岩蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):990-995.
- [9] Peng S S. Time-dependent aspects of rock behavior as measured by a servocontrolled hydraulic testing machine [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1973, 10(3): 235-246.
- [10] 牛双建,党元恒,冯文林,等.损伤破裂砂岩单轴蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2016,37(5):1249-1258.
- [11] 刘传孝,黄东辰,张秀丽,等.深井泥岩峰前/峰后单轴蠕变特性实验研究[J].实验力学,2011,26(3):267-273.
- [12] 李晓,王思敬,李焯芬.破裂岩石的时效特性及长期强度[C]//中国岩石力学与工程学会第五次学术大会,北京,1998:214-219.
- [13] Jiang Y S. Post-Failure Rheological Properties of Rockmass - An Important Object of Study for Engineering Rockmass Mechanics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 10(2): 143-146.
- [14] 鲜学福.岩石蠕变断裂失稳研究中几个问题的探讨[R].2005.
- [15] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002:217-219.
- [16] 刘沐宇,徐长佑.硬石膏的流变特性及其长期强度的确定[J].中国矿业,2000,9(2):53-55.
- [17] 姜永东,鲜学福,熊德国,等.砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J].岩土工程学报,2005,27(12):1478-1481.
- [18] 山下秀,杉文男,今井忠南,等.岩石蠕变及疲劳破坏过程和破坏极限研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1999,18(5):452-455.
- [19] 曹树刚,边金,李鹏.岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):632-634.
- [20] 尹光志,王登科,张东明,等.含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(s1):2631-2636.