

文章编号:1001-4888(2018)03-0451-10

片麻岩蠕变特性试验研究^{*}

梁冰¹, 张涛², 王俊光¹, 李刚², 武鹏飞²

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了对红透山铜矿片麻岩蠕变特性及深部采场(—467、—827中段)出现时效性片帮破坏问题进行研究,采用室内蠕变试验和理论分析相结合的方式对片麻岩的蠕变特性进行了分析。结果表明:随着应力水平的不断提高,岩样蠕变经历衰减蠕变、稳态蠕变、加速蠕变三个阶段。其中,稳态蠕变阶段持续时间最长,加速蠕变阶段变形速率波动最大,且以非线性方式逐渐增加。试样P-4与P-8在围压10MPa条件下的起始蠕变应力阈值分别为50MPa及80MPa,长期强度分别为90~100MPa及170~180MPa,加速蠕变启动时间分别为34.68h及2.4h;最后基于模式搜索(PS)改进非线性最小二乘法,并结合岩石蠕变试验结果,对蠕变模型参数进行反演。通过反演得到的理论曲线与试验曲线的吻合效果较好,由此证明了蠕变模型的正确性和合理性。

关键词: 岩石试验; 蠕变; 蠕变模型; 参数识别

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-035

0 引言

近年来,随着地下采矿工程规模的不断扩大,深部岩体逐渐被开采,由于高应力和较强的时效性等诸多因素的作用,使得与岩石力学相关的工程灾害时有发生,如岩爆、时效性片帮等灾害,但坚硬岩石在深部复杂环境下可能表现出软岩特征,因此对岩石的蠕变规律研究越来越得到国内外广大学者的重视,并针对岩石的蠕变特性进行了广泛的研究^[1,2]。1936年Griggs^[3]对粉砂岩等进行了岩石蠕变试验,得到第一条完整的蠕变曲线。Maranini和Yamaguchi^[4]以花岗岩为试验材料进行三轴蠕变试验,提出了一个广义黏塑性本构模型。张治亮等^[5]对向家坝水电站坝基挤压破碎带砂岩开展了蠕变试验,分析了岩石轴向和侧向蠕变规律,根据岩石破坏阶段的蠕变特征,提出了加速蠕变启动元件,通过与试验曲线的比较,对蠕变参数辨识方法进行了研究。杨文东等^[6]研究了辉绿岩的长期变形特性对拱坝边坡造成的影响,并在辉绿岩三轴流变试验基础上引入非线性黏塑性体,通过非线性黏弹塑性流变模型对试验数据进行了分析。杨逾等^[7]对西原模型时间参数进行改变,得出了西原加速模型,并对煤样的单轴压缩蠕变试验所得数据与理论结果进行拟合分析,证明了模型的合理性,弥补了西原模型不能描述蠕变第三阶段的不足。王青元等^[8]建立了能够描述岩石蠕变全过程的非线性蠕变损伤模型,采用所提出的模型对不同尺寸的岩样进行了单轴压缩蠕变数值模拟,进而对岩石长期强度尺寸效应进行了分析。余成学^[9]通过岩石时效强度理论及Kachanov损伤理论建立了以时间变量表示的岩石损伤表达式,并将其引入黏塑性流变参数,综合反映了应力水平与加载时间的影响。夏才初等^[10]总结了参数非线性理论流变力学模型的建立方法,并针对存在的问题提出了改正方法。以上研究总结了岩石的蠕变特征在不同的应

^{*} 收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51404130)、(51774165)、(5157041488)资助; 国家重点研发计划项目(2016YFC0600704)资助

通讯作者: 梁冰(1962—),女,博士,教授,博士生导师。主要从事矿山压力及其控制等研究工作。Email: lbwqx@163.com

力作用下存在的差异,对蠕变模型进行了研究,克服了加速蠕变取值困难等问题,但是缺乏纵向对比性,因此对具体工程条件下的岩石蠕变特性对比试验及蠕变模型辨识等问题有待于做进一步研究。

红透山铜矿是经海底火山喷发—沉积—经区域变质作用逐渐形成的块状硫化物矿床,开采深度超过了 1200m,是当前中国开采深度最深的金属矿山之一。红透山铜矿片麻岩是具有明显流变门槛值的硬脆岩石,超过其长期强度后,非线性加速蠕变的流变特征明显。本文以该矿—467、—827 中段采场片麻岩进行室内蠕变试验研究并绘制蠕变曲线,基于试验成果建立了能描述片麻岩加速流变特征的非线性损伤蠕变模型,并对模型参数进行了辨识。研究结果对深部岩体开采巷道围岩体时效性破坏问题具有一定的理论意义和工程应用价值^[11]。

1 片麻岩蠕变试验

1.1 试验设备

蠕变试验采用自制三轴压缩蠕变试验装置,如图 1、图 2 所示。试验装置的加压系统通过水压加载装置实现,并采用增压泵补充压力,以满足试验要求;通过联通阀门控制调节施压通道,带气囊的稳压灌保持压力恒定,起到压力补偿作用,具有操作方便等优点;横纵应变量用应变灵敏度系数为 2.0 ± 0.1 的应变片测量,并用精确度小于 0.5% 的 TST5915 动态数据采集仪记录数据,同时通过精度可达 0.001mm 的千分表测定轴向变形。



图 1 自制三轴蠕变试验装置

Fig. 1 The self-made triaxial creep test device

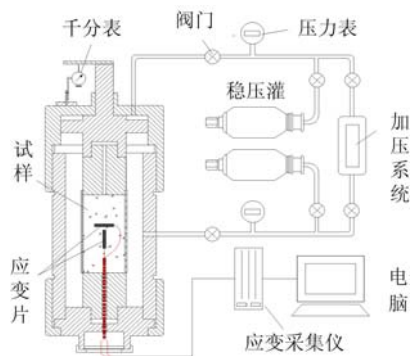


图 2 自制三轴蠕变试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a self-made triaxial creep test device



图 3 岩石试样

Fig. 3 Rock specimen

1.2 试样设计与制备

试验所用岩样取自红透山铜矿—467、—827 中段采场围岩体上,埋深约 720m、1140m。依据国际岩石力学学会(ISRM)试验规程加工成 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准圆柱形试样,两端平整度为 $\pm 0.05\text{mm}$,端面与轴线的偏差不超过 0.25° ,分别编号为 P-4、P-8,限于篇幅,本文仅对不同水平的一组试样进行对比分析,如图 3 所示。考虑到自然因素给本试验带来的误差,蠕变试验在温度变化较小的室内进行;在蠕变试验进行之前,对取自相同位置的岩石进行了软化试验和基本力学试验,并得到饱和试样的平均单轴抗压强度为 60.5MPa、108MPa,自然状态下试样的平均单轴抗压强度为 62.7MPa、111MPa,软化系数为 0.965、0.973,可见含水量对

坚硬岩石强度的影响不明显,因此在进行蠕变试验时可忽略水对片麻岩蠕变的强度影响。基本物理力学参数见表 1。

表 1 基本物理力学参数表
Tab. 1 Basic physical and mechanical parameters

试样 编号	岩石试 样名称	岩石试 样类型	视密度 /(g·cm ⁻³)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	内聚力 /GPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /GPa	泊松比
P-4	片麻岩	风干	2.665	62.7	7.98	15.2	48.8	64.3	0.26
		饱和	2.679	60.5	7.35	13.9	49.3	52.5	0.29
P-8	片麻岩	风干	2.761	111	12.94	23.9	49.5	78.3	0.22
		饱和	2.778	108	12.41	23.5	50.1	70.6	0.24

1.3 试验方案

根据文献[14—16],通过应力解除法对红透山铜矿不同水平进行了原岩应力测量,测试结果表明矿区深部以水平应力为主,其中-467、-827 水平最大主应力分别为 20.4MPa、29.2MPa,中间主应力分别为 9.7MPa、11MPa,最小主应力分别为 5.9MPa、7.1MPa。蠕变试验之前,以取自同块岩石试样的单轴抗压强度试验数据、红透山铜矿地质资料以及前人对红透山铜矿地应力研究成果为依据,估算施加载荷的大小。蠕变试验采用恒定围压分级增轴压加载的方式(见图 4),在加载过程中保持围压恒定不变,试验围压为 10MPa,轴压分别以 30MPa、50MPa 起并以 10MPa 为增量分级增加,用此加载方式模拟应力逐渐升高的情况,直到岩样出现加速蠕变阶段为止;每增加一级压力,立即读取瞬时位移和所对应的轴向应力值,观测该级试样轴向应力下变形随时间变化的规律,并记录数据。每一级的荷载持续时间以岩石蠕变变形增量不超过 0.001mm/d 时视为进入稳态蠕变阶段的依据,变形状态稳定后再施加下一级载荷,依次类推,逐级进行加载,直至岩石试样发生加速蠕变破坏。分级加载的方法是常用的试验加载方式,避免了试样的不均匀性导致试验数据离散性对流变变形的影响,同时节省了试验研究所需试样和试验设备数量^[9],因此对分级加载下岩石蠕变特性的研究具有一定的理论和实践意义。

1.4 试验步骤

试验分为如下四个步骤:

- (1) 将加工好的试件放入三轴压力室内中心位置,试件轴向垂直于三轴压力室底面,试件放好后盖上缸盖,并检查气密性;
- (2) 将稳压灌与压力室连接装置的开关打开,采用水压加载装置向压力室内注水,直至压力室内无空气后关闭开关;
- (3) 打开数据采集仪并调试安装千分表,施加围压到所需值;
- (4) 将轴压加载到所需值,在加载后立即读取并记录数据。

2 试验结果及分析

图 5 给出了取自红透山铜矿-467、-827 中段的片麻岩蠕变试验应力—应变—时间关系曲线。该蠕变试验选取了轴向变形进行分析,并以此为基础来分析片麻岩的蠕变变形规律。

岩石试样轴向蠕变应力—应变—时间变化规律具有如下特征:

由图 5(a)可知,岩样 P-4 在围压 10MPa,偏应力水平小于 50MPa 时,岩石试样呈现出的蠕变现象不明显,偏应力水平大于 50MPa 时,岩石试样呈现出明显的蠕变现象,因此可视 50MPa 为围压 10MPa 时的蠕变门槛值,但在应力水平为 50MPa、80MPa 时应变出现了微小突变后保持恒定,这是因为片麻岩

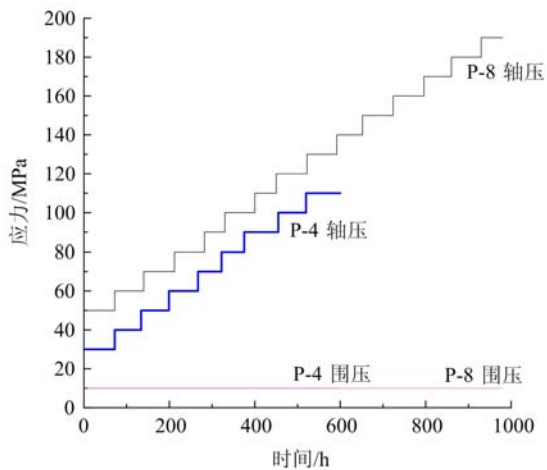


图 4 分级加载示意图
Fig. 4 Schematic diagram of step loading

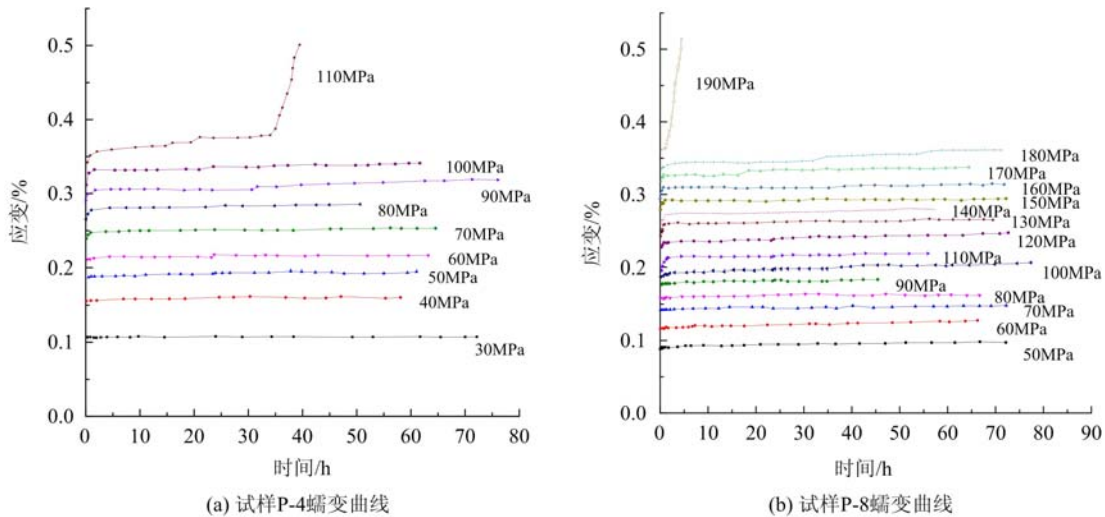


图 5 轴向应变—时间曲线

Fig. 5 Axial strain-time curves

脆性较强,产生可局部破裂,未对岩石整体变形规律造成影响;偏应力为 50MPa 时,历时 64.53h,轴向蠕变应变为 142.09×10^{-6} ,偏应力为 80MPa 时,历时 76.04h,轴向蠕变应变为 255.61×10^{-6} ,当应力水平高于长期强度(90~100MPa),偏应力水平 100MPa 作用下,历时 34.68h 轴向蠕变应变为 387.84×10^{-6} 后进入加速蠕变阶段,最终破裂。

由图 5(b)可知,岩样 P-8 在围压 10MPa,偏应力水平小于 80MPa 时,岩石试样基本没有蠕变变形,偏应力水平大于 80MPa 时,岩石试样逐级产生蠕变变形,因此可视 80MPa 为围压 10MPa 时的蠕变门槛值;偏应力为 90MPa 时,历时 77.37h,轴向蠕变应变为 185.68×10^{-6} ,偏应力为 110MPa 时,历时 72.66h,轴向蠕变应变为 200.22×10^{-6} ;偏应力为 160MPa 时,历时 64.43h,轴向蠕变应变为 194.78×10^{-6} ;偏应力为 170MPa 时,历时 71.13h,轴向蠕变应变为 264.61×10^{-6} 。当应力水平高于长期强度(170~180MPa),偏应力水平 180MPa 作用下,历时 2.4h 轴向产生微小蠕变后,进入加速蠕变阶段并最终破裂。

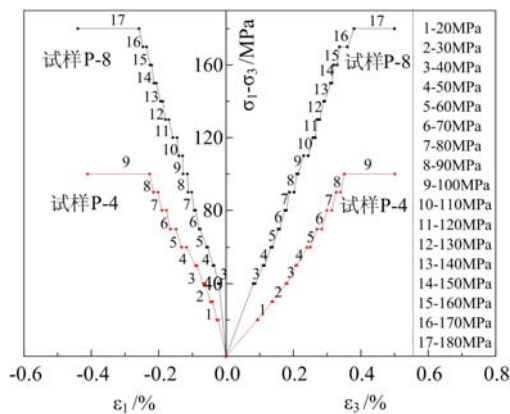


图 6 各试样蠕变应力—应变曲线

Fig. 6 Creep stress-strain curves for each sample

图 6 给出了试样蠕变应力—应变曲线。每级应力加载过程中,应力—应变接近线性,但不同等级的应力—应变曲线斜率不同,可以判断,片麻岩蠕变试验在整个加载过程中弹性模量为变化值。整体曲线趋势分析可知,试样 P-8 弹性模量大于试样 P-4 弹性模量。

岩石蠕变速率是指岩石流变试验中单位时间内的蠕变变形,即给定时间内的流变试验曲线的斜率^[17]。图 7 为岩石试样在每级加载后的轴向蠕变速率—时间变化曲线。蠕变速率随时间增长逐渐减小,初始阶段减速最快,最终趋于 0,稳态蠕变速率在应力水平下接近为 0,但在应力水平作用下,蠕变速率在趋于 0 的数值上下浮动。

从图 7(a)可知,瞬时蠕变速率随应力水平的增大相应增加,蠕变速率在经过 2.5h 的急剧下降后随时间的发展缓慢减小到一恒定值附近上下微小浮动,这是由于岩石内部存在微裂隙,在应力作用下逐渐压密,不影响整体规律,最终试样产生瞬时应变后缓慢达到稳定。岩石蠕变进入稳态蠕变阶段后,蠕变速率大小基本维持在 $30.3 \mu\epsilon/h$ 上下浮动。偏应力水平增加到 100MPa 的过程中,岩石蠕变损伤不断累积,当历时 34.68h 蠕变损伤累积到一定程度后,岩样进入加速蠕变阶段,此时蠕变速率急剧增大。

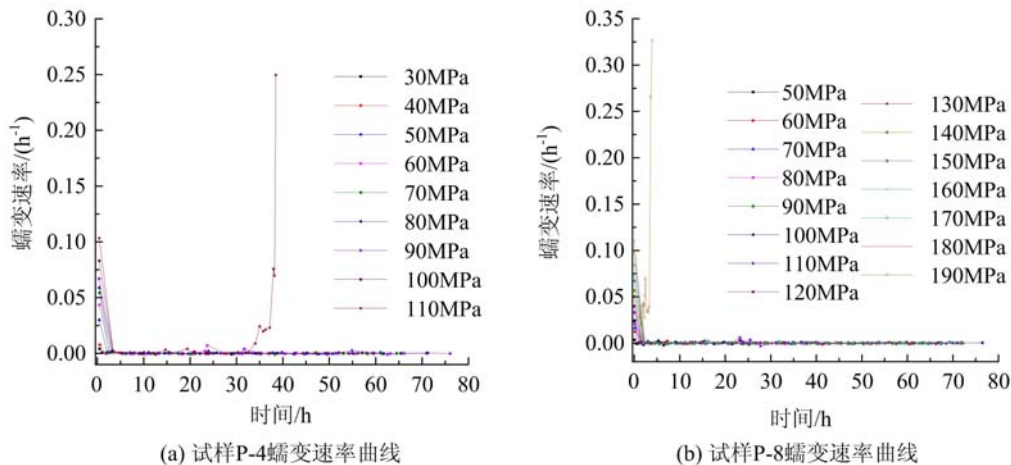


图7 蠕变速率曲线

Fig.7 Creep rate curves

从图7(b)可知,试样P-8轴向蠕变速率—时间变化曲线趋势与试样P-4曲线趋势一致,每级加载后进入稳态蠕变,蠕变速率大小基本维持在 $34.7\mu\epsilon/h$ 上下浮动,比试样P-4蠕变达到稳定后的浮动值增加了 $4.4\mu\epsilon/h$ 。进入加速蠕变阶段,在偏应力水平180MPa恒定载荷作用后2.4h蠕变速率急剧增加,且波动程度。

根据以上分析可看出,片麻岩的蠕变速率变化规律受应力水平的影响较大,在最后一级应力水平作用下,试样P-4、P-8轴向蠕变速率表现为明显不同的特征,试样P-4轴向蠕变速率进入加速蠕变阶段历时较长;试样P-8轴向蠕变速率波动相对较大,表明—827水平围岩破坏较剧烈。总之,片麻岩表现出较为明显的加速蠕变特性,但由于选择试样蠕变全程时间相差很大,因此建立蠕变模型时必须将蠕变全程时间给予考虑。

3 蠕变模型选择及参数的确定

3.1 蠕变模型选择

由岩石蠕变试验曲线可知:

- (1) 岩石试件在加载瞬时都有一定的弹性应变,因此在蠕变模型中应包括弹性元件。
- (2) 在瞬时弹性变形之后,应变有随时间增大而增大的趋势,但应力差较小,蠕变很小,最后趋于一不为零的恒定值,蠕变曲线很快趋于水平,因此,蠕变模型中应包括有黏性元件。
- (3) 随着应力的增加,当应力差超出长期强度时,蠕变变形速率随时间增长无限增加,应变随时间增加不收敛于某一稳定值,而是逐渐增大,直至岩石发生破坏,此时岩石呈现出不可恢复的塑性变形。因此,蠕变模型中应包含塑性元件。

根据以上分析,应力水平施加后,片麻岩具有明显的瞬时变形,经历了衰减蠕变和稳态蠕变,稳态蠕变速率为不为0的恒定值,变形增量不为0,蠕变特征与Burgers模型特征相近。与广义Kelvin相比,Burgers模型能够更加精确地描述稳态蠕变变形量随时间的微小增长。考虑到片麻岩具有显著的瞬时变形,因此,参考罗润林等^[12]的研究思路,引入类似于圣维南体的开关广义K体,即开关元件与广义K体并联的组合模型。该元件的 σ_f 是一个蠕变应力门槛值,即为初始蠕变应力阈值,不分担荷载,且始终 $\sigma_f < \sigma$ 。当 $\sigma < \sigma_f$ 时,开关关闭,应变量为0;当 $\sigma_f < \sigma$ 时,开关元件打开,应变值为一恒定的任意值。

本文根据张治亮等^[5]的研究成果,考虑蠕变全程时间效应影响显著,将稳态蠕变向加速蠕变转变的临界时间点定义为加速蠕变启动点。并将这种新的非线性黏塑性蠕变元件(NAV PB)引入Burgers蠕变模型中,从而能够更好地描述岩石蠕变的全过程。非线性黏塑性蠕变元件(NAV PB)如8图所示。

非线性蠕变元件(NAV PB)在应力 σ 的作用下满足下式:

$$\epsilon = \begin{cases} 0 & (\sigma \leq \sigma_s) \\ \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta} H(t - t_F) & (\sigma_s < \sigma) \end{cases} \quad (1)$$

其中算子 $H(t)$ 满足关系式:

$$H(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ t^n & (t > 0) \end{cases}$$

式中, σ_s 为应力阈值; η 为塑性参数; t_F 为加速蠕变启动时间; n 为蠕变指数。 $\sigma_s < \sigma$ 时, 不同取值的非线性加速蠕变启动元件蠕变特征曲线如图 9 所示。

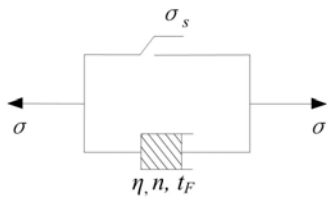


图 8 岩石非线性加速蠕变启动元件示意图

Fig. 8 Schematic diagram of non-linear accelerating creep starting element of rock

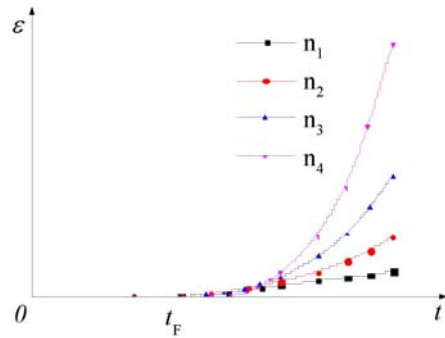


图 9 加速蠕变启动元件蠕变特征曲线

Fig. 9 Creep characteristic curves of accelerated creep startup component of rock

当 $\sigma \leq \sigma_s$, $t < t_F$ 时, NAVPB 不起作用。当 $\sigma_s < \sigma$, $t_F < t$ 时, 应变量为 0。当 $\sigma_s \geq \sigma$, $t_F \geq t$ 时, 随着时间的增长, 应变呈非线性增长, 可以清楚地描述岩石加速蠕变特征。

按照文献[11, 13], 岩石加速蠕变过程中的损伤演化方程为:

$$D = 1 - (a\sigma)^{-b(t-t_F)} \quad (2)$$

式中, D 为损伤因子; a, b 为岩石材料参数; t 为蠕变时间; t_F 为加速蠕变启动时间; σ 为应力水平, 其值为偏压值。

3.2 非线性黏弹塑性蠕变模型

为了能够更好地描述岩石瞬时弹性变形、衰减与稳态、加速蠕变变形特征, 将改进后的 Burgers 蠕变模型、非线性黏塑性蠕变元件 (NAVPB) 与损伤元件串联, 八元件组成的蠕变模型如图 10 所示。图中 1、2 和 3 部分分别对瞬时弹性变形、衰减与稳态蠕变变形和加速蠕变变形进行描述, 损伤元件 D 表示加速蠕变阶段产生明显损伤。

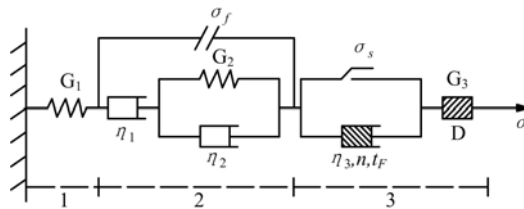


图 10 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型

Fig. 10 Non-linear viscoelastic-plastic creep model of rock

(1) 当 $\sigma < \sigma_s$, $t < t_F$ 时, 蠕变方程为:

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} + F(S_{ij} - S_f) \left\{ \frac{S_{ij} - S_f}{2\eta_1} t + \frac{S_{ij} - S_f}{2G_2} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{G_2}{\eta_2} t \right\} \right] \right\} \quad (3)$$

(2) 当 $\sigma_s < \sigma$, $t < t_F$ 时, 蠕变方程为:

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} + F(S_{ij} - S_f) \left\{ \frac{S_{ij} - S_f}{2\eta_1} t + \frac{S_{ij} - S_f}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} + \frac{S_{ij} - S_s}{2\eta_3} H(t - t_F) \quad (4)$$

(3) 当 $\sigma_s \leq \sigma$, $t_F \leq t$ 时, 岩石内部损伤, 蠕变模型偏量行为可表示为:

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} + F(S_{ij} - S_f) \left\{ \frac{S_{ij} - S_f}{2\eta_1} t + \frac{S_{ij} - S_f}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} + \frac{S_{ij} - S_s}{2\eta_3} H(t - t_F) + \frac{S_{ij}}{2G_3} (aS_{ij}) \exp[b(t - t_F)] \quad (5)$$

式中, $F(S_{ij} - S_f) = \begin{cases} 0, & S_{ij} < S_f \\ 1, & S_{ij} \geq S_f \end{cases}$; $H(t - t_F) = \begin{cases} 0, & t < t_F \\ (t - t_F)^n, & t_F \leq t \end{cases}$

三维应力状态下, 可对岩石内一点应力张量进行分解, 应力偏张量 S_{ij} 和应变偏张量 e_{ij} :

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma' \delta_{ij} \quad (6)$$

$$e_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon' \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\text{即} \quad \sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma' \delta_{ij} \quad (8)$$

$$\epsilon_{ij} = e_{ij} + \epsilon' \delta_{ij} \quad (9)$$

式中, $\sigma' = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$; $\epsilon' = \frac{1}{3}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) = \frac{1}{3}\epsilon_{kk}$ 。

围压相等时三轴应力状态下的岩石轴向蠕变方程为:

$$\begin{cases} \epsilon_1(t) = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + F[(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_f] \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\}, & \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_s \\ \epsilon_1(t) = \frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_1} + F[(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_f] \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_1} t + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \\ \quad + \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s}{3\eta_3} H(t - t_F) + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_3} [a(\sigma_1 - \sigma_3)] \exp[b(t - t_F)], & \sigma_1 - \sigma_3 > \sigma_s \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\sigma_f < \sigma_s$; $F[(\sigma_1 - \sigma_3) - \sigma_f] = \begin{cases} 0, & (\sigma_1 - \sigma_3) < \sigma_f \\ 1, & \sigma_f \leq (\sigma_1 - \sigma_3) \end{cases}$; $H(t - t_F) = \begin{cases} 0, & t < t_F \\ (t - t_F)^n, & t_F \leq t \end{cases}$; K 为体积模量, K

$= \frac{E}{3(1-2\mu)}$; G_1, G_2 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$; η_1, η_2 为模型参数。

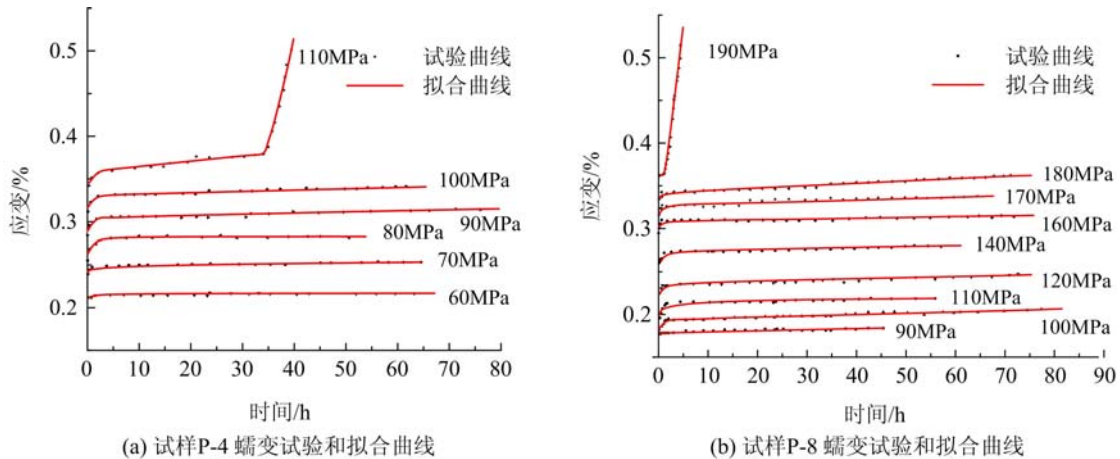


图 11 蠕变试验和拟合曲线

Fig. 11 Creep test and fitting curves

3.3 蠕变模型力学参数辨识

根据蠕变试验曲线及数据, 可对蠕变曲线进行分解, 并选择适合的数学模型辨识方法计算出模型参数。目前, 确定蠕变模型参数的方法主要包括: 回归分析法、位移反分析法、最小二乘法等。其中最小二乘法最为常用, 但初值不易选取, 容易导致迭代的发散^[11]。为此, 本文选取了基于模式搜索(PS)的改进非线性最小二乘法^[18]。图 11 给出了试验曲线与本文所建模型参数识别所得的拟合曲线对比, 表 2、

表 3 给出了岩石试样蠕变参数辨识结果,由图 11 可知,拟合曲线与试验数据较为吻合。

表 2 试样 P-4 蠕变参数

Tab. 2 Sample P-4 creep parameters

轴压 /MPa	K /GPa	G_1 /GPa	G_2 /GPa	G_3 /GPa	a	b	η /(GPa · h)	η /(GPa · h)	η /(GPa · h)	t_F /h	n
40	90.58	28.45	108.96				2723.10	360.76			
60	89.26	31.73	124.48				2910.35	388.19			
80	105.18	22.41	117.85				1503.02	401.37			
90	95.62	29.86	156.43				3898.76	425.38			
100	131.79	30.12	134.29				1699.38	528.04			
110	169.91	28.44	112.64	11.92	1.31e-3	8.39e-2	2263.25	128.90	11327.45	34.48	3.89

表 3 试样 P-8 蠕变参数

Tab. 3 Sample P-8 creep parameters

轴 压 /MPa	K /GPa	G_1 /GPa	G_2 /GPa	G_3 /GPa	a	b	η /(GPa · h)	η /(GPa · h)	η /(GPa · h)	t_F /h	n
60	37.04	19.44	134.56				2336.69	526.39			
80	45.19	20.23	107.44				2368.59	513.54			
100	39.26	20.91	153.79				1497.33	488.50			
120	37.55	34.85	151.73				1858.21	693.15			
140	39.79	21.86	104.53				3523.16	432.86			
160	40.58	20.87	121.06				2497.20	512.37			
170	48.92	18.34	124.68				2072.53	521.12			
180	36.41	21.50	164.89				1377.96	411.04.			
190	42.62	23.11	132.96	13.81	9.8e-2	6.64e-2	5012.04	196.12	15264.6	2.38	3.56

4 结 论

对红透山铜矿片麻岩进行了三轴蠕变试验,基于试验结果分析了不同水平片麻岩的蠕变特性,主要研究结论如下:

(1) 随着应力水平的不断提高,岩样蠕变经历的三个阶段(衰减蠕变、稳态蠕变、加速蠕变)中衰减蠕变随应力水平增加持续时间增长,稳态蠕变阶段时间延续最长,应变随时间呈近似等速变化,加速蠕变阶段变形速率以非线性方式逐渐增加,最终蠕变损伤不断累积,岩样出现非均匀的变形和破坏。

(2) 蠕变试验过程中,不同水平的岩样起始蠕变应力阈值存在差异,试样 P-4 为 50MPa,试样 P-8 为 80MPa;不同水平的岩样围压 10MPa 作用下,长期强度分别为 90~100MPa、170~180MPa,应力水平超过长期强度时,岩石均出现蠕变破坏;加速蠕变启动时间差别较大,试样 P-4 为 34.68h, P-8 为 2.4h,建立岩石蠕变模型时对时间因素给予了考虑。

(3) 本文引用了开关元件和损伤块体,以一种带有加速蠕变启动点的组合元件与 Burgers 蠕变模型相结合为基础,建立并推导了非线性损伤蠕变方程和等围压条件下的蠕变方程。

(4) 利用岩石蠕变试验曲线,采用基于模式搜索(PS)改进非线性最小二乘法理论进行参数辨识,不同应力水平下的蠕变试验数据与模型的理论曲线比较吻合,证明了所建模型的合理性;根据参数拟合结果,表明所建的模型能够较好地描述不同水平围岩体(片麻岩)的蠕变特性。

参考文献:

- [1] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石粘弹塑性本构关系及改进的 Burgers 蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6):796—799 (YUAN Haiping, CAO Ping, XU Wanzhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6):796—799 (in Chinese))
- [2] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1):16—21 (LV Aizhong, DING Zhikun, JIAO Chunmao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1):16—21 (in Chinese))
- [3] Griggs D. Creep of rocks[M]. The Journal of Geology, 1939, 47(3):225—251.
- [4] Maranini E, Yamaguchi T. A non-associated viscoplastic model for the behaviour of granite in triaxial compression [J]. Mechanics of Materials, 2001, 33(5):283—293.
- [5] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1):132—140 (ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in xiang jia ba hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1):132—140 (in Chinese))
- [6] 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 diabase and treatment for creep loading history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7):1405—1413. (in Chinese))
- [7] 杨逾, 李盈, 周小科. 基于西原加速模型的煤岩蠕变试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11):2190—2194 (YANG Yu, LI Ying, ZHOU Xiaoke. Study on the coal creep test based on the improved Nishihara model[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11):2190—2194 (in Chinese))
- [8] 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4):981—990 (WANG Qingyuan, ZHU Wancheng, LIU Honglei, et al. Size effect of long-term strength of sandstone under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4):981—990 (in Chinese))
- [9] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10):2006—2011 (SHE Chengxue. Research on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10):2006—2011 (in Chinese))
- [10] 夏才初, 金磊, 郭锐. 参数非线性理论流变力学模型研究进展及存在的问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3):454—463 (XIA Caichu, JIN Lei, GUO Rui. Nonlinear theoretical rheological model for rock: a review and some problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3):454—463 (in Chinese))
- [11] 胡波, 王宗林, 梁冰, 等. 岩石蠕变特性试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):438—445 (HU Bo, WANG Zonglin, LIANG Bing, et al. Experimental study of Rock creep properties [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4) 438—445 (in Chinese))
- [12] 罗润林, 阮怀宁, 孙运强, 等. 一种非定常参数的岩石蠕变本构模型[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(2):200—203 (LUO Runlin, RUAN Huaining, SUN Yunqiang, et al. Non-stationary parameter creep constitutive model of rocks[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2007, 27(2):200—203 (in Chinese))
- [13] 王俊光, 梁冰, 田蜜. 含水状态下油页岩非线性损伤蠕变特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(1):112—118 (WANG Junguang, LIANG Bing, TIAN Mi. Study of creep characteristics produced by nonlinear damage of oil shale in hydrous state[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1):112—118 (in Chinese))
- [14] 张希巍, 杨成祥, 张束, 等. 红透山铜矿深部片麻岩力学行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2):3228—3237 (ZHANG Xiwei, YANG Chengxiang, ZHANG Jian, et al. Experimental study of mechanical behavior of deep gneiss in Hongtoushan copper mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2):3228—3237 (in Chinese))
- [15] 石长岩. 红透山铜矿深部开采岩爆倾向性及监测控制研究[D]. 东北大学, 2008:34—53 (SHI Changyan. Study on rock burst tendentiousness and monitoring control in Hongtoushan copper mine[D]. Dongbei University, 2008:

34—53 (in Chinese))

- [16] 刘泽鹏. 片麻岩流变力学特性及模型研究[D]. 东北大学, 2014:13—41 (LIU Zepeng. Rheological mechanical properties and model research of gneiss[D]. Dongbei University, 2014:13—41 (in Chinese))
- [17] 王如宾, 徐卫亚, 王伟, 等. 坝基硬岩蠕变特性试验及其蠕变全过程中的渗流规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5):961—969 (WANG Rubin, XU Weiya, WANG Wei, et al. Experimental investigation on creep behaviors of hard rock in dam foundation and its seepage laws during complete process of rock creep[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5):961—969 (in Chinese))
- [18] 陈炳瑞, 冯夏庭, 丁秀丽, 等. 基于模式搜索的岩石流变模型参数识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2):207—211 (CHEN Bingrui, FENG Xiating, DING Xiuli, et al. Rheological model and parameters identification of rock based on pattern search and least-square techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2):207—211 (in Chinese))

Experimental study of gneiss creep properties

LIANG Bing¹, ZHANG Tao², WANG Jun-guang¹, LI Gang², WU Peng-fei²

(1. Institute of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Mining Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the creep characteristics of gneiss taken from copper mine at Red Mountain and aging wall caving failure problem in deep slope (—467 and —827 middle piece), the creep characteristics of gneiss were systematically analyzed by the combination of indoor creep experiment and theoretical analysis. Results show that with the increase of stress level, gneiss specimen creep undergoes following three stages: attenuation creep stage, steady state creep stage and accelerated creep stage. Among which, the steady state creep stage has the longest duration, and during accelerated creep stage, the deformation rate fluctuates most and gradually increases in a nonlinear way; The initial creep stress thresholds of specimens P-4 and P-8 under confining pressure of 10MPa were 50MPa and 80MPa, respectively, and the long-term strengths were 90~100MPa and 170~180MPa, respectively, and the starting time of accelerated creep is 34.68 hours and 2.4 hours, respectively. Finally, nonlinear least squares method was improved based on pattern search (PS), and combined with gneiss creep experimental results, the creep model parameters of the are inverted. The theoretical curves obtained by inversion are in good agreement with the experimental curves, which proves the correctness and rationality of the creep model.

Keywords: rock experiment; creep; creep model; parameter identification