

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.10

红层砂岩高温后效蠕变试验研究

李 畅¹, 任光明¹, 孟陆波¹, 代 晗¹, 张晓东², 李 科¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 成都新时代天诚置业有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 温度是影响岩石变形、稳定的重要因素。通过对红层砂岩开展高温后的蠕变试验, 揭示了温度对红层砂岩蠕变特性的影响规律, 并基于 Burgers 模型建立考虑温度效应的蠕变损伤模型, 分析了温度对模型参数的影响规律。研究表明: 510 ~ 550 °C 是红层砂岩力学性质转变的节点温度区间, 低于该温度区间时, 温度升高, 试样的峰值强度增加, 延性增强, 长期强度减小; 高于该温度区间时, 温度升高, 试样的峰值强度、峰值应变减小, 长期强度增加; 瞬时应变随温度的升高而线性增大。相同应力条件下, 随着经历温度的升高, 试样瞬时应变、稳态蠕变速率以及进入稳定蠕变阶段的时间增加, 进入加速蠕变阶段的时间减小, 加速蠕变曲线变陡。

关键词: 红层砂岩; 蠕变试验; 热损伤元件; 蠕变损伤模型

中图分类号: TU458⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0071-08

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

LI Chang¹, REN Guangming¹, MENG Lubo¹, DAI Han¹, ZHANG Xiaodong², LI Ke¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University

of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Chengdu New Era Tiancheng Real

Estate Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Temperature is an important factor affecting rock deformation and stability. The influence of temperature on the creep characteristics of red-bed sandstone is revealed through the creep test of red-bed sandstone after different high temperatures, and a creep damage model considering the temperature effect based on the Burgers model is established to analyze the influence rule of temperature on model parameters. The research results indicate that 510 ~ 550 °C is the nodal temperature range for the change in mechanical properties of red-bed sandstone. Below this temperature range, with the temperature increases, the peak strength of specimen increase, ductility increases, and the long-term strength decreases. Above this temperature range, with the temperature increases, the peak strength and peak strain of specimen decrease, and the long-term strength increases. The instantaneous strain increases linearly with the increasing temperature. Under the same stress conditions, with the temperature increases, the instantaneous strain of specimen, the steady-state creep rate and the time to enter the stable creep stage increase, the time to enter the accelerated creep stage decreases, and the acceleration creep curve becomes steeper.

Keywords: red-bed sandstone; creep test; thermal damage element; creep damage model

随着国家经济的发展以及重大工程的建设, 地下空间的开发利用以及地下资源的开采规模逐渐增大, 大量

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-07-18

基金项目: 成都理工大学大学生课外科技作品立项项目资助(2014KL121)

第一作者: 李畅(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土体稳定性及工程环境效应研究。E-mail: 2578583735@qq.com

通讯作者: 任光明(1964-), 男, 硕士生导师, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程教学与科研工作。E-mail: rengmgcr@163.com

地下工程已经深入地下数千米,如高温核废料的处理,地热、油气、煤层的开发与利用,大型地下厂房、交通隧道的建设等^[1-2],而地下工程温度环境的变化将是影响众多地下工程施工、建设以及稳定性的重要因素。在应力场与温度场的作用下,岩石(体)的应力应变状态、物理力学特性、变形破坏特征等将随着时间而发生变化,并表现出显著的流变特性^[3],其对工程的稳定性不利,因此开展温度、应力环境下的流变特性试验具有重要的研究价值。

迄今为止,国内外学者在温度对岩石流变特性影响方面进行了大量的研究。如 Chopra P N^[4]在高温高压条件下对纯橄榄岩展开了初始蠕变试验,并运用 Burgers 模型描述了纯橄榄岩在高温高压下的蠕变行为;Kinoshita N 等^[5]对花岗岩开展 20 ~ 100 °C 下的单轴蠕变试验,结果表明温度加速了花岗岩的蠕变破坏;Shibata K 等^[6]对不同温度下的凝灰岩进行压缩试验,结果表明随着温度的升高凝灰岩的破坏时间减小,最小应变率增加;曾晋^[7]对黏土岩在温度、渗流、应力耦合条件下的损伤及声发射特征进行了研究;周广磊等^[8]建立了脆性岩石的热-力耦合时效蠕变数学模型,并对模型中的参数进行了有限元求解;王春萍等^[9]通过分析北山花岗岩在不同温度下的蠕变特征,基于西原模型构建了高温蠕变模型;张强勇^[10]根据不同温度与应力下片麻状花岗岩的蠕变试验,建立了热-力耦合作用下的热黏弹塑性蠕变损伤模型。曹丽丽等^[11]、曹文贵等^[12]分别从函数阶微分理论与岩石弹性模量的变化入手建立了岩石的流变模型。

综上所述,岩石在热-力耦合作用下的流变特性以及流变模型研究已取得了较为丰硕的成果,但在实际工程中,如井下煤与瓦斯爆炸、岩石地下工程火灾后重建等涉及到岩石高温后的强度、变形特性方面的研究却鲜见报道。鉴于此,本文选取红层砂岩开展不同高温作用后的单轴压缩蠕变试验,通过与常温条件下砂岩蠕变特性的对比,从岩石损伤的角度出发,构建了一种考虑温度效应的加速蠕变损伤元件,并基于组合元件模型的思想建立了蠕变全过程损伤模型,揭示了不同高温作用后红层砂岩蠕变力学特性的变化规律,相关研究成果具有一定的理论与实际意义。

1 蠕变试验概述

1.1 试验试样及试验系统

本次试验选取川东地区典型的红层砂岩作为研究对象,按照国际岩石力学学会(ISRM)建议的规范要求,沿垂直层理方向制作成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱

体标准试样(图 1a),试样无明显的节理及裂纹缺陷,天然重度 25.04 kN/m³。单轴压缩蠕变试验采用成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研发的岩石三轴蠕(徐)变试验仪器(图 1b),其主要由控制系统、加载系统以及数据采集系统组成。

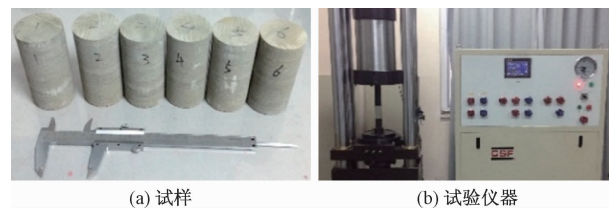


图 1 试样及试验仪器

Fig.1 Specimen and test instrument

1.2 试验方法

首先对试样进行高温处理。为保证试样受热均匀,以 10 °C/min 的速度加热,到达预定温度后保持恒温 4 h,而后自然冷却至室温,从而制成经历不同温度后的砂岩试样。在蠕变试验前先测定天然状态下砂岩试样的单轴抗压强度,而后分别对常温(25 °C)、经历 200,400,600,800 °C 高温处理的砂岩采用单体分级加载的方式进行单轴蠕变试验,荷载增量为 20 kN (10.72 MPa),每级荷载持续时间为 4 ~ 5 d,而后施加下一级,直至试样破坏,试验加载曲线如图 2 所示。

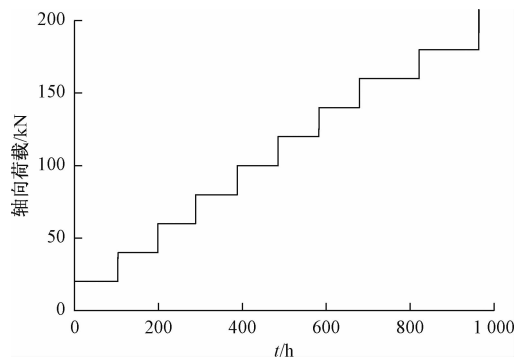


图 2 试验加载曲线

Fig.2 Test loading curve

2 蠕变特征分析

本次单轴蠕变试验成果如图 3 所示,由于试验加载方式为分级加载,故对试验成果需进行叠加处理^[13],以获取各级荷载下的蠕变试验曲线,其结果如图 4 所示。限于文章篇幅,图中仅以经历 600 °C 高温作用后的蠕变试验成果为例。

从图 3、图 4 中可以看出,红层砂岩在各级荷载施加瞬间均产生了瞬时变形。在分级加载过程中,随着荷载

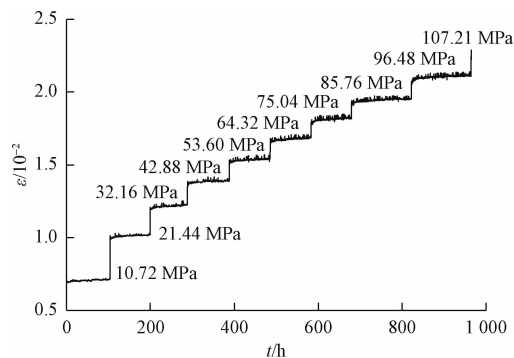


图3 典型轴向蠕变试验曲线

Fig.3 Typical axial creep test curve

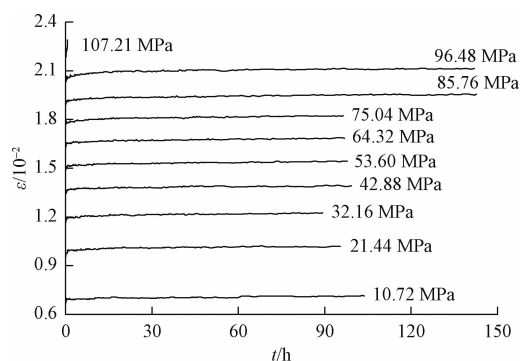


图4 叠加处理后的蠕变试验曲线

Fig.4 Creep test curves processed by superposition

的增加,瞬时变形量逐渐减小;当加载到预定的荷载时,试样瞬时变形结束,随后产生随时间逐渐增长的蠕变变形,其包含减速蠕变变形阶段与等速蠕变变形阶段。在初始低应力水平下,等速蠕变速率为近于零的较小数值,试验曲线与横坐标轴近似平行;在高应力水平下,等速蠕变速率可视作某一定值,试验曲线近似为一条具有一定斜率的直线。在最后一级荷载作用下,试样在很短的时间内迅速产生破坏,加速蠕变变形阶段不甚明显。

2.1 峰值强度与峰值应变变化规律

绘制各试验试样的峰值强度 σ_c 以及峰值应变 ε_c 与经历温度 T 的关系曲线,如图5所示。由图5可知,随着经历温度的增加,红层砂岩的峰值强度与峰值应变均表现为先增大后减小的变化趋势,其转折温度530~550℃,由此可以看出,在530~550℃之前,随着温度的升高,砂岩的强度增加,延性增强;在530~550℃之后,温度升高对岩样产生了热损伤,岩样产生裂纹,劣化了岩体的完整性,峰值强度与峰值应变随之减小。

2.2 长期强度变化规律

长期强度是岩石蠕变试验所能反映的最重要的参数,笔者以李良权等学者^[14]所提出的,通过设置稳态

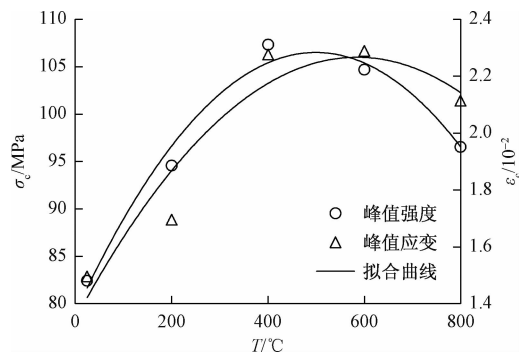


图5 峰值强度、峰值应变与温度的关系曲线

Fig.5 The relationship of peak strength, peak strain and temperature

蠕变速率阈值并结合稳态蠕变速率与应力的指数拟合函数确定长期强度的方法来计算经历不同温度后红层砂岩的长期强度 σ_s 。通过对经历不同温度后试样稳态蠕变速率的分析,确定计算长期强度的稳态蠕变速率阈值为 $1 \times 10^{-6}/h$,绘制计算得到的长期强度与经历温度的关系曲线(图6)。

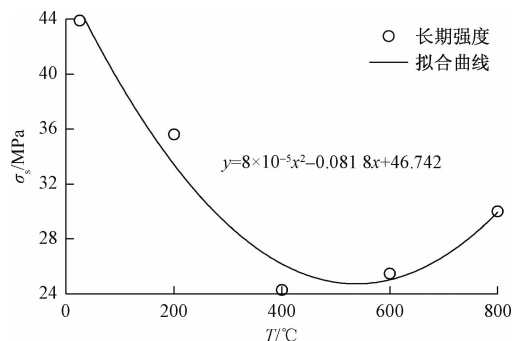


图6 长期强度-温度关系曲线

Fig.6 Long-term strengths-temperature curves

由图6可知,经历不同高温后的红层砂岩其长期强度随着温度的增加呈现先减小后增大的趋势,通过曲线拟合得到长期强度最小值约为25.83 MPa,对应的温度约为510℃,该温度值与峰值强度与峰值应变的转折温度值相近。

2.3 瞬时应变与瞬时模量变化规律

绘制通过叠加处理后的各试验成果在各级应力作用下的瞬时应变 ε_1 与荷载 σ 、温度 T 的关系曲线(图7、图8)。

由图7可知,各温度下岩石试样的瞬时应变随着荷载的增大以幂函数形式增长,在600℃及以下的温度范围内试样瞬时应变的增长变化趋势近似相同,800℃时的瞬时应变增长趋势增大。图8揭示了在相同应力条件下,随着经历温度的升高,岩石瞬时应变呈

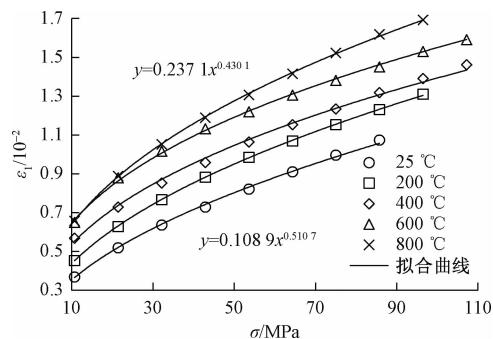


图 7 各温度下瞬时应变-应力关系曲线

Fig. 7 Instantaneous strain-stress curves at each temperature

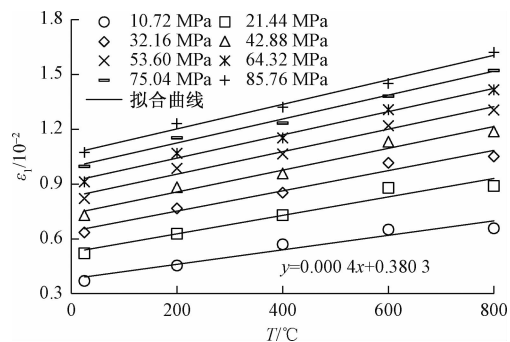


图 8 各级应力下瞬时应变-温度关系曲线

Fig. 8 Instantaneous strain-temperature curves at each stress

线性增加,随着荷载的增加,线性拟合的直线斜率也不断增加。由此表明,温度与应力对岩石的瞬时应变具有显著的影响,温度与应力增加,岩石的瞬时应变增大。

如前所述,在分级加载过程中,施加荷载的瞬间便产生了瞬时变形,且瞬时变形随着荷载的增加而不断减小,因此引入瞬时弹性模量的概念来更加全面地描述试样在分级加载过程中瞬时变形的变化特征,即定义每级荷载下的瞬时应力增量与瞬时应变增量的比值为瞬时弹性模量 $E^{[15]}$,绘制经历不同温度后的试样在分级加载过程中瞬时弹性模量随荷载的变化关系曲线(图 9)。

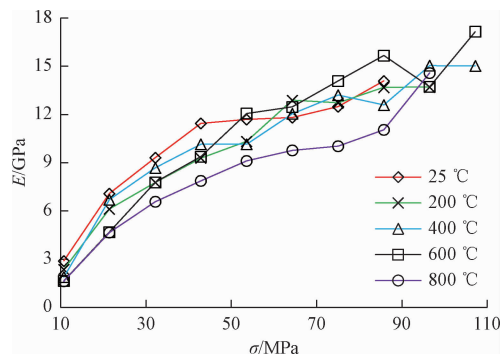


图 9 各温度下瞬时弹性模量-应力关系曲线

Fig. 9 Instantaneous elastic modulus-stress curves at each temperature

由图 9 可知,经历不同温度后的红层砂岩在分级加载蠕变试验过程中瞬时弹性模量整体表现出随应力增长而增加的趋势。由此表明,在分级加载试验过程中,红层砂岩抵抗瞬时变形的能力随着荷载的增加而逐渐增强,表现出了明显的硬化特征。同时,在初始低应力阶段,瞬时弹性模量增量较大,对应着岩石全应力-应变曲线的裂隙压密阶段;而后随着应力的增加,瞬时弹性模量的增长趋缓,其对应着岩石全应力-应变曲线的弹塑性变形阶段^[15]。

综合上述分析可以看出,红层砂岩的力学性质随着温度的改变而发生了较大的变化,其中 510 ~ 550 °C 可视为红层砂岩力学性质变化的节点温度区间,在低于该温度区间值时,温度升高,试样的峰值强度、峰值应变增加,长期强度减小;高于该温度区间值时,温度升高,试样的峰值强度、峰值应变减小,长期强度有所增加;对于瞬时变形而言,其随经历温度的升高而线性增大。

3 考虑温度效应的蠕变损伤模型

3.1 考虑温度效应的加速蠕变损伤元件

吴刚等^[16]通过对高温后砂岩力学特性的研究,揭示了在高温作用下,砂岩中吸附水脱失、矿物晶体晶型的转变、重结晶以及结构水的逸出是影响砂岩力学性质与高温劣化的根本原因。因此,在高温作用后,表征岩石力学特征的各项参数,包括弹性模量 E 、黏滞系数 η 必然会随着温度的变化而改变,即 $E = E(T)$, $\eta = \eta(T)$ 。同时在蠕变过程中,试样产生蠕变破坏是岩石内部产生微裂纹并不断扩展,岩石抵抗变形和破坏的能力逐渐降低而引起损伤直至破坏的过程,而当岩石所承受的荷载超过了岩石的长期强度时,岩石便在有限的时间内产生蠕变变形,并最终破坏^[17]。鉴于上述分析,构建了如下考虑温度效应的加速损伤元件(图 10)。

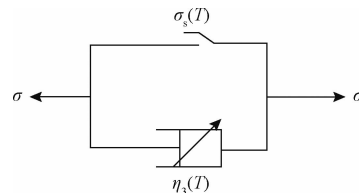


图 10 热损伤软化黏塑性元件

Fig. 10 Thermo-damage to soften visco-plastic element

按照能量损伤的方法,将损伤变量定义为:

$$D(T, \sigma, t) = 1 - \frac{E(T, \sigma, t)}{E_1(T)} \quad (1)$$

式中: $E_1(T)$ ——温度 T 条件下的初始弹性模量;

$E(T, \sigma, t)$ ——在温度 T 、应力 σ 条件下任意时

刻的弹性模量。

结合文献[18]的研究成果,定义 $E(T, \sigma, t)$ 为:

$$E(T, \sigma, t) = E_1(T) \cdot e^{-\alpha(T)t} \quad (2)$$

式中: $\alpha(T)$ ——温度 T 条件下试样的材料系数。

将式(2)代入式(1),得:

$$D(T, \sigma, t) = 1 - e^{-\alpha(T)t} \quad (3)$$

引入 Kachanov 定义的有效应力:

$$\tilde{\sigma}(T) = \frac{\sigma}{1 - D(T, \sigma, t)} \quad (4)$$

式中: $\tilde{\sigma}(T)$ ——温度 T 条件下的有效应力;

σ ——温度 T 条件下的 Cauchy 应力。

将式(3)代入式(4)可得:

$$\tilde{\sigma}(T) = \sigma \cdot e^{\alpha(T)t} \quad (5)$$

对于图 10 中所建立的热损伤软化黏塑性元件,其应变速率表达式为:

$$\dot{\varepsilon}_4(T) = \frac{\tilde{\sigma}(T) - \sigma_s(T)}{\eta_3(T)} = \frac{\sigma \cdot e^{\alpha(T)t} - \sigma_s(T)}{\eta_3(T)} \quad (6)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_4(T)$ ——温度 T 条件下热损伤软化黏塑性元件的应变速率;

$\sigma_s(T)$ ——温度 T 条件下的长期强度;

$\eta_3(T)$ ——温度 T 条件下热损伤软化黏塑性元件的黏滞系数。

在初始条件下: $t=0, \varepsilon_4(T)=0$ 对式(6)进行积分便得到了热损伤软化黏塑性元件的本构关系:

$$\varepsilon_4(T) = \frac{\sigma}{\alpha(T)\eta_3(T)} [e^{\alpha(T)t} - 1] - \frac{\sigma_s(T)}{\eta_3(T)} t \quad (7)$$

通过控制变量,设置两组假设对热损伤软化黏塑性元件中的参数 $\alpha(T)$ 与 $\eta_3(T)$ 进行敏感性分析。假定在温度 T 条件下 $\sigma = 40$ MPa, $\sigma_s = 20$ MPa; (1) $\eta_3 = 2 \times 10^7$ MPa·h; $\alpha = 0.05, 0.08, 0.1$; (2) $\alpha = 0.05$; $\eta_3 = 1 \times 10^6, 1 \times 10^7, 1 \times 10^8$ MPa·h, 得到如图 11 所示的蠕变曲线。

由图 11 可知,在控制其他参数不变的条件下,试样进入加速蠕变阶段的时间随着 α 增大而减小,随着 η_3 增大而增加,且 α 越大,加速蠕变曲线越陡;同时 η_3 的变化程度大于 α ,但其影响程度却不及 α ,因此在加速蠕变阶段 α 的敏感性大于 η_3 。同时也可看出,热损伤软化黏塑性元件能够很好地反映岩石的加速蠕变过程。

3.2 考虑温度效应的蠕变损伤模型

通过前述对经历不同温度后红层砂岩蠕变特征的分析发现,红层砂岩的蠕变曲线具有典型的蠕变四阶段特征,即瞬时变形阶段、减速蠕变阶段、等速蠕变阶段与加速蠕变阶段。而 Burgers 模型(图 12)已被学者

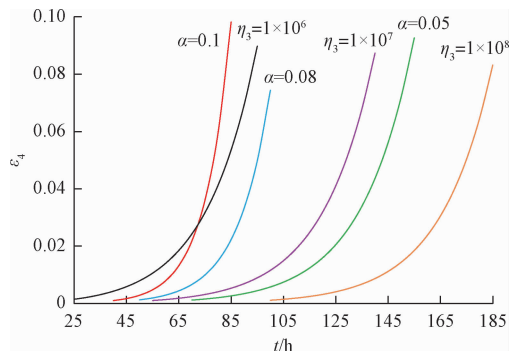


图 11 热损伤软化黏塑性元件蠕变曲线

Fig. 11 Creep curves of thermo-damage to soften visco-plastic element

证明能够很好地描述红层软岩在蠕变试验过程中前三个阶段的变形特征^[19-20]。鉴于此,笔者参考组合元件模型的思想,以 Burgers 模型为基础,将新建的描述加速蠕变变形的热损伤软化黏塑性元件与之串联,并将组合模型中的各项参数均视为随温度变化的函数,由此便构建了考虑温度效应且能反映岩石蠕变全过程的蠕变损伤模型(图 13),其蠕变方程如下:

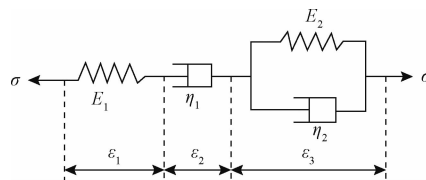


图 12 Burgers 模型

Fig. 12 Burgers model

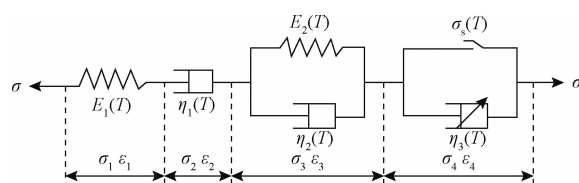


图 13 考虑温度效应的蠕变损伤模型

Fig. 13 Creep damage model considered the thermal effect

(1) 当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时,串联的热损伤软化黏塑性元件失效,该模型即为考虑温度效应的 Burgers 模型,其状态方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \sigma_1 = E_1(T) \varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1(T) \dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2(T) \varepsilon_3 + \eta_2(T) \dot{\varepsilon}_3 \end{cases} \quad (8)$$

相应的蠕变方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1(T)} + \frac{\sigma}{\eta_1(T)}t + \frac{\sigma}{E_2(T)}[1 - e^{-\frac{E_2(T)}{\eta_2(T)}t}] \quad (9)$$

(2) 当 $\sigma > \sigma_s$ 时,串联的热损伤软化黏塑性元件发挥作用,其状态方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \\ \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 \\ \sigma_1 = E_1(T)\varepsilon_1 \\ \sigma_2 = \eta_1(T)\dot{\varepsilon}_2 \\ \sigma_3 = E_2(T)\varepsilon_3 + \eta_2(T)\dot{\varepsilon}_3 \\ \sigma_4 = \sigma_s(T) + \eta_3(T)\dot{\varepsilon}_4 \end{cases} \quad (10)$$

相应的蠕变方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1(T)} + \frac{\sigma}{\eta_1(T)}t + \frac{\sigma}{E_2(T)}[1 - e^{-\frac{E_2(T)}{\eta_2(T)}t}] + \frac{\sigma}{\alpha(T)\eta_3(T)}[e^{\alpha(T)t} - 1] - \frac{\sigma_s(T)}{\eta_3(T)}t \quad (11)$$

3.3 模型参数识别与参数分析

为验证新建模型的正确性与合理性,利用数学优化分析软件 1st-Opt,采用 L-M 算法结合通用全局优化算法来辨识模型中的参数,结果见表 1。限于文章篇幅,表中仅罗列了在轴向应力为 75.04 MPa 时经历不同高温后的红层砂岩蠕变试验模型识别参数,以及采集到的具有较好加速蠕变阶段的蠕变试验模型识别参数,效果对比如图 14 所示。

由表 1、图 14 可知,试验曲线与模型拟合曲线能够较好地吻合,曲线拟合的 R^2 平均值为 0.955,由此说明新建立的考虑温度效应的蠕变损伤模型能较好地反映红层砂岩在高温作用后的蠕变特征,同时也验证了新建模型的正确性与合理性。

为了探究温度对红层砂岩蠕变特征的影响,现对表 1 中反演得到的表征岩石蠕变特征的各项参数与温度的关系进行简要分析(图 15),并建立相应的经验关系:

表 1 蠕变模型参数

Table 1 Creep model parameters

$T/^\circ\text{C}$	σ/MPa	E_1/GPa	$\eta_1/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	E_2/GPa	$\eta_2/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	$\eta_3/(\text{GPa}\cdot\text{h})$	α	R^2
25	75.04	5.911	70 016.268	507.583	1 121.228			0.941
200	75.04	5.455	37 946.404	342.023	1 243.018			0.924
400	75.04	5.100	28 433.359	243.810	1 397.601			0.941
600	75.04	4.226	26 276.926	228.217	1 859.270			0.972
800	75.04	4.369	26 240.813	195.518	2 985.268			0.963
25	85.76	6.269	927.950	427.743	123.215	3.973×10^5	4.142	0.971
200	107.21	5.884	146.833	692.450	19.271	9.118×10^4	20.403	0.967
800	96.48	4.830	152.404	896.798	12.654	2.774×10^4	60.051	0.958

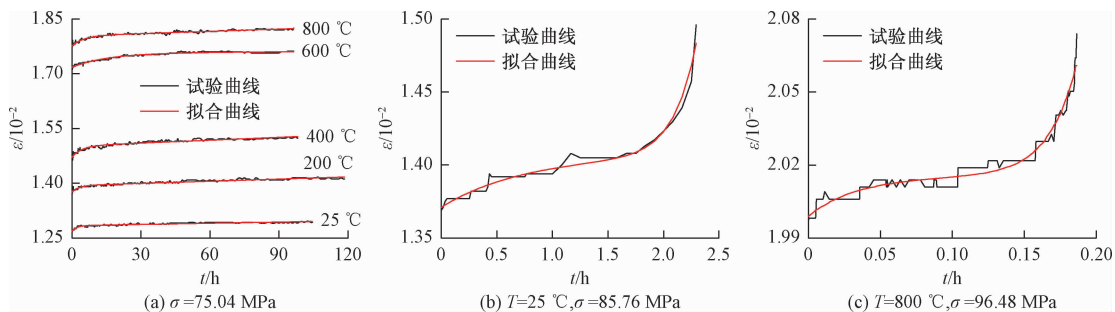


图 14 试验曲线与模型拟合曲线对比

Fig. 14 Comparisons between test curves and the filling ones obtained from models

$$\begin{cases} E_1(T) = -0.0021T + 5.9048, R^2 = 0.958 \\ \eta_1(T) = 181715T^{-0.299}, R^2 = 0.987 \\ E_2(T) = 1264.77T^{-0.27}, R^2 = 0.962 \\ \eta_2(T) = 983.25e^{0.0012T}, R^2 = 0.910 \\ \eta_3(T) = 5 \times 10^6 T^{-0.763}, R^2 = 0.997 \\ \alpha(T) = 0.0706T + 4.083, R^2 = 0.995 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)便得到了在经历 800 °C 以内高温后红层砂岩考虑温度效应的蠕变损伤模型。结合图 15 与式(12)可分析得到:

(1) 随着经历温度的升高, E_1 线性减小, η_1 呈幂律型减小, 在相同应力条件下岩石的瞬时变形与稳态蠕变速率将随着经历温度的升高而增大。

(2) 随着经历温度的升高, E_2 呈幂律型减小, η_2

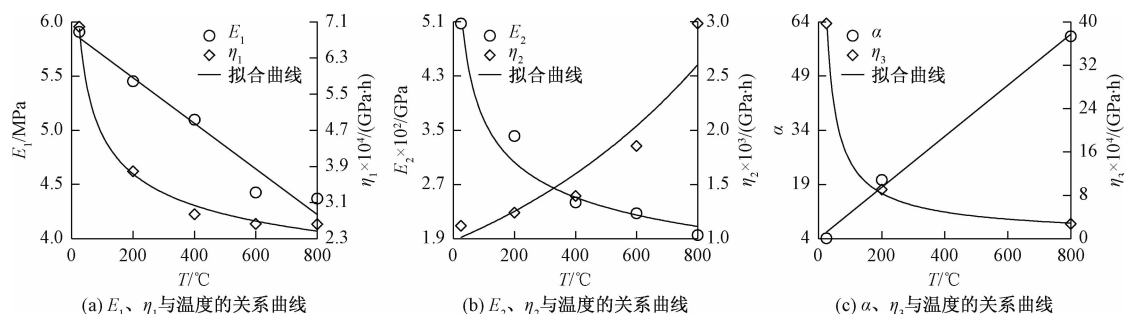


图15 蠕变模型特征参数与温度的关系曲线

Fig. 15 Relationship between creep model characteristic parameters and temperature

呈指数型增加,在相同应力条件下随着温度的升高岩石进入稳定蠕变阶段的时间增加。

(3)随着经历温度的升高, η_3 呈幂律型减小, α 线性增加,结合前述对 η_3 与 α 的分析可知,在相同应力条件下随着温度的升高岩石进入加速蠕变阶段的时间越短,加入蠕变曲线越陡、曲率越大。

4 结论

(1)温度对岩石性质具有显著的影响,主要表现为:随着经历温度的升高,岩石的峰值强度与峰值应变呈现先增大后减小的趋势,岩石的长期强度呈现先减小后增大的趋势,转折温度为510~550℃;随着经历温度的升高,岩石瞬时应变线性增大。

(2)按照能量损伤的方法,结合温度效应对岩石的影响,构建了考虑温度效应的热损伤软化黏塑性元件,并对元件中的参数进行了敏感性分析,结果表明:岩石的材料系数 α 的敏感性大于黏滞系数 η_3 ,元件能够很好地反映岩石的加速蠕变特征。

(3)基于Burgers模型,将新建元件与之串联建立了考虑温度效应的蠕变损伤模型,并采用L-M+通用全局优化算法对模型参数进行了求解,结果表明:试验曲线与拟合曲线吻合程度较好,曲线拟合的 R^2 平均值为0.955,反映了新建模型的正确性与合理性。

(4)通过对考虑温度效应的蠕变损伤模型识别参数进行分析,揭示了模型中各主要参数随温度的变化情况,反映了模型参数对经历高温后岩石蠕变变形的影响规律,结果表明:在相同应力条件下,随着经历温度的升高,岩石瞬时变形、稳态蠕变速率、进入稳定蠕变阶段的时间增加,进入加速蠕变阶段的时间减小,加速蠕变曲线变陡。

参考文献:

[1] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深

部”的界定[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2004, 27(1): 1-5. [QIAN Q H. The character scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness [J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2004, 27(1): 1-5. (in Chinese)]

- [2] WAI R S C, LO K Y, ROWE R K. Thermal stress analysis in rocks with nonlinear properties [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1982, 19(5): 211-220.
- [3] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [ZHAO Y S, WAN Z J, KANG J R. Introduction of geothermal development of high temperature rock mass [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)]
- [4] CHOPRA P N. High-temperature transient creep in olivine rocks [J]. Tectonophysics, 1997, 279(1-4): 93-111.
- [5] KINOSHITA N, INADA Y. Effects of high temperature on strength, deformation, thermal properties and creep of rocks [J]. Journal of the Society of Materials Science Japan, 2006, 55(5): 489-494.
- [6] SHIBATA K, TANI K, OKADA T. Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test [J]. Soils and Foundations-Tokyo-, 2011, 47(1): 1-10.
- [7] 曾晋. 温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤及声发射特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 69-74. [ZENG J. A study of the rick damage and AE characteristics under the coupling of temperature, seep and stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 69-74. (in Chinese)]

- [8] 周广磊,徐涛,朱万成,等. 基于温度-应力耦合作用的岩石时效蠕变模型[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 1-9. [ZHOU G L, XU T, ZHU W C, *et al.* A time-dependent thermo-mechanical creep model of rock[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 1-9. (in Chinese)]
- [9] 王春萍,陈亮,梁家玮,等. 考虑温度影响的花岗岩蠕变全过程本构模型研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2493-2500. [WANG C P, CHEN L, LIANG J W, *et al.* Creep constitutive model for full creep process of granite considering thermal effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2493-2500. (in Chinese)]
- [10] 张强勇,向文,江力宇,等. 片麻状花岗岩热黏弹塑性损伤蠕变模型及应用研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(8): 88-97. [ZHANG Q Y, XIANG W, JIANG L Y, *et al.* A thermal-visco-elastoplastic damage creep model for gneissic granite and its practical application [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(8): 88-97. (in Chinese)]
- [11] 曹丽丽,浦海,仇陆涛,等. 基于函数阶微积分的泥岩高温蠕变特性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 148-154. [CAO L L, PU H, QIU P T, *et al.* Analyzing creeping properties of mudstone at high temperature based on variable-order fractional calculus [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(1): 148-154. (in Chinese)]
- [12] 曹文贵,杨尚,张超. 考虑弹性模量变化的岩石统计损伤本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 42-48. [CAO W G, YANG S, ZHANG C. A statistical damage constitutive model of rocks considering the variation of the elastic modulus[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 42-48. (in Chinese)]
- [13] 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 W D, ZHANG Q Y, CHEN F, *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)]
- [14] 李良权,徐卫亚,王伟,等. 基于流变试验的向家坝砂岩长期强度评价[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 127-136. [LI L Q, XU W Y, WANG W, *et al.* Estimation of long-term strength for Xiangjiaba sandstone based on creep tests [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 127-136. (in Chinese)]
- [15] 范庆忠,高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1273-1276. [FAN Q Z, GAO Y F. Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1273-1276. (in Chinese)]
- [16] 吴刚,邢爱国,张磊. 砂岩高温后的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2110-2116. [WU G, XING A G, ZHANG L. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2110-2116. (in Chinese)]
- [17] 宋勇军,雷胜友,刘向科. 基于硬化和损伤效应的岩石非线性蠕变模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊2): 287-292. [SONG Y J, LEI S Y, LIU X K. Non-linear rock creep model based on hardening and damage effect [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Sup 2): 287-292. (in Chinese)]
- [18] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246-251. [XU H F. Time dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 246-251. (in Chinese)]
- [19] 王志俭,殷坤龙,简文星,等. 三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 840-847. [WANG Z J, YIN K L, JIAN W X, *et al.* Experimental study on rheological behaviors of Wanzhou red sandstone in Three Gorges Reservoir area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 840-847. (in Chinese)]
- [20] 湛文武,原鹏博,刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3076-3081. [CHEN W W, YUAN P B, LIU X W. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 1): 3076-3081. (in Chinese)]

编辑:张明霞