

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1541-06

冻结红砂岩非线性蠕变模型的研究

单仁亮, 宋立伟, 李东阳, 黄宝龙, 刘 念, 赵文峰

(中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对 -10°C 的冻结红砂岩进行了单轴蠕变试验, 应力水平依次为 0.36、0.45 和 0.54, 发现当应力水平为 0.36 和 0.45 时, 红砂岩蠕变为稳定蠕变, 当应力水平为 0.54 时, 蠕变为不稳定蠕变。应力水平越高, 蠕变达到稳定的时间越长。对蠕变曲线的导函数进行分析, 发现红砂岩不稳定蠕变的加速阶段门槛值为 13 h。通过对实测数据的拟合, 得到了 3 个应力水平下红砂岩蠕变的经验方程。由开尔文体、改进麦克斯韦尔体和改进陈沅江体串联组成了理论模型, 并得到了模型参数, 理论曲线与实测曲线吻合较好, 能够较好地反映冻结红砂岩的蠕变规律。试验结果为采用冻结法施工的矿井评价冻结壁的稳定性的提供了相应的参考。

关 键 词: 冻结红砂岩; 蠕变特性; 经验方程; 理论模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study of nonlinear creep model of frozen red sandstone

SHAN Ren-liang, SONG Li-wei, LI Dong-yang, HUANG Bao-long, LIU Nian, ZHAO Wen-feng

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: An uniaxial creep test of frozen red sandstone is conducted under -10°C , and stress levels are 0.36, 0.45 and 0.54 separately. The result shows that the red sandstone creep is stable when the stress levels are 0.36 and 0.45, but the rock creep is unstable when the stress level is 0.54. The higher the stress level is, the longer it will take for the creep reaches stability. From the analysis of derivative function of test data, it is found that the threshold value of acceleration stage in unstable creep is the 13rd hour. Three empirical equations of the red sandstone creep are gained by fitting the test data. A creep model is established which installs Kelvin body, modified Maxwell body and modified CYJ body in series and gains the parameters of the model. The model curves are consistent with test data better; so the model reveals creep discipline of frozen red sandstone. The result of creep test provides some valuable references for the evaluation of frozen rock's stability in the mines that are being constructed by freezing method.

Key words: frozen red sandstone; creep properties; empirical equation; theoretical model

1 引 言

岩石的蠕变特性对岩石工程的安全性、稳定性有着重要意义。岩石的蠕变特性随着岩性以及环境的差异而区别明显。在一系列岩石流变试验的基础上建立反映岩石流变性质的流变方程, 通常有经验方程法和模型理论法^[1]。余成学等^[2]在西原模型的基础上建立了一种新的岩石非线性蠕变模型, 提出了蠕变参数变化率的概念, 统一建立了等速蠕变和加速蠕变阶段的岩石蠕变参数变化公式, 建立了岩石的非线性-黏弹-黏塑性蠕变模型。丁志坤等^[3]在页岩蠕变试验数据的基础上, 分析了岩石黏弹性变

形随应力水平不同和时间发展的变化规律, 建立了一维情况下非定常黏弹性模型的蠕变方程, 发现非定常黏弹性蠕变模型比定常黏弹性模型更为准确地反映了岩石的黏弹性变形性能。此外, 王来贵等^[4-11]学者对岩石蠕变的特性也进行了深入的研究和探讨。但从上述情况看, 研究蠕变行为后期加速蠕变特性的不多, 曹平等^[12]建立了一种改进的能够描述岩石黏弹塑性加速蠕变的力学模型, 很好地解释了岩石的加速蠕变特性。在国外, 岩石蠕变也是一个研究热点, Kinoshita^[13]对常温和高温下的岩石蠕变特性进行了对比, 发现温度影响岩石单轴压缩蠕变特性。

收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(No.U1261126)。

第一作者简介: 单仁亮, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: srl@cumt.edu.cn

目前国内外对于冻结条件下岩石蠕变特性的研究较少, Ladanyi^[14]对冰岩混合物和冰-岩界面处温度及应力条件变化的影响进行了研究, 得到了一些重要结论。随着冻结法凿井在我国煤矿中应用越来越多, 需要对采用冻结法凿井工程中的岩石蠕变特性进行深入的分析 and 探讨, 研究不同类型冻结岩石的蠕变特性, 更好地为工程提供技术支持, 在此背景下, 以内蒙古梅林庙矿中厚度较大的红砂岩为研究对象, 展开了低温蠕变试验, 建立了红砂岩在低温条件下的经验方程和理论模型结构。

2 红砂岩低温蠕变试验方案设计

试验是在中国矿业大学(北京)城市地下工程实验室的冻三轴试验机上完成的, 试验用岩石取自内蒙古梅林庙矿 563~600 m 深度处, 将新鲜完整的大块红砂岩岩石从矿井取出后立即送到试件加工厂, 垂直于岩石沉积方向钻取 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的圆柱体试件, 用抽气装置将试件孔隙中的空气抽掉, 然后浸水 7 d, 取出放进低温控制箱冷却至 -10°C , 并保持 24 h。

为分析煤矿竖井临空面井壁岩石的稳定性, 本次进行的是单轴分级加载蠕变试验, 参考《人工冻土物理力学性能试验》^[15]并考虑冻结法凿井中岩石温度场的实际分布, 试验温度设置为 -10°C 。将试件包裹在橡皮套内, 然后在端部加上平整的钢制压头, 并将传感器安置于压头和试件中部, 用于测试岩样的变形量, 如图 1(a)所示。然后将试件放入压力室内, 如图 1(b)所示。之后将事先冷却至 -10°C 的航空硅油打进压力室, 为试件提供稳定的低温环境, 最后将压力室用保温隔热罩密封, 减少能量损失。当油温稳定在目标温度上, 连续 2 h 波动幅度小于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 时, 开始加载。通过低温单轴抗压强度试验确定红砂岩瞬时单轴强度为 40.93 MPa。根据参考文献^[15]确定蠕变应力水平 α 分别为 0.36、0.45 和 0.54。启动加载系统, 给试件迅速加载至所需荷载, 记录此刻的变形量, 之后不间断记录试件变形量, 试验过程中保持轴压波动幅度不超过 $\pm 10 \text{ kPa}$ 。当试样变形稳定 ($d\varepsilon/dt \leq 0.0003 \text{ h}^{-1}$, I类蠕变)以后, 本级加载蠕变试验结束, 随即进行下一级蠕变试验, 直到岩石试件趋于破坏(II类蠕变)时, 停止试验。

3 红砂岩低温蠕变结果及拟合经验方程

红砂岩蠕变试验曲线如图 2 所示, 分别为不同

应力水平下轴向应变 ε_t 与时间 t 的关系曲线。



图 1 试样安装及低温压力室

Fig.1 Sample installation and freezing pressure chamber

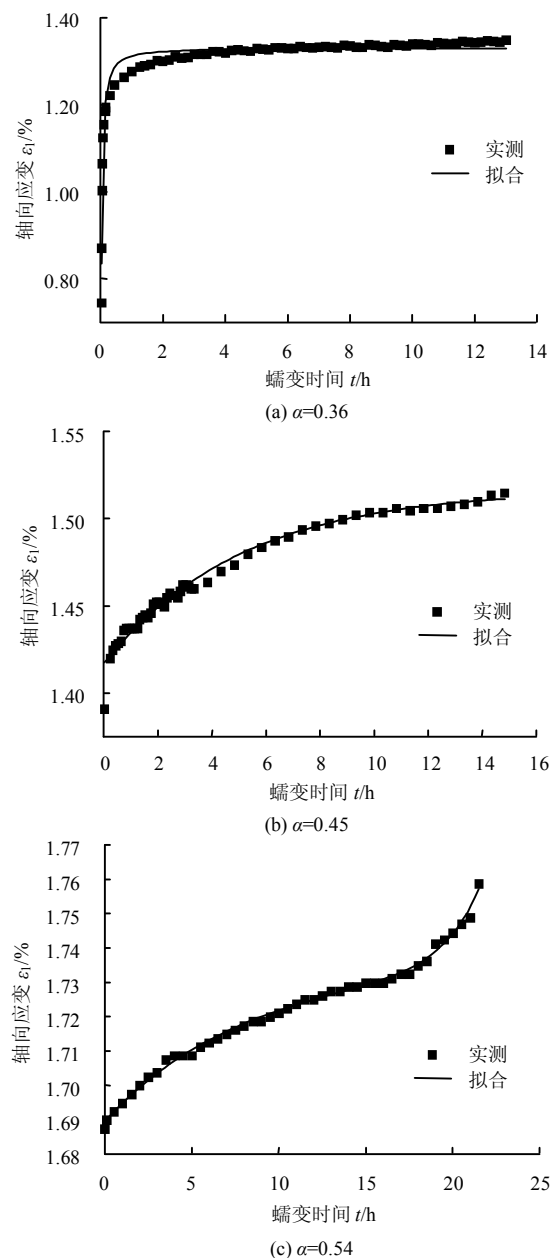


图 2 岩石蠕变曲线

Fig.2 Creep curves of rock

根据蠕变试验结果, 用回归拟合的方法建立红砂岩蠕变规律的经验方程, 即式 (1)、(2)、(4)。典型的岩石蠕变方程类型主要包括幂函数方程、指数方程、以及幂函数、指数、对数函数的混合方程^[1], 但采取哪一类经验方程, 要根据实测试验曲线的特点来确定。

根据图 2(a)中的实测蠕变曲线, 确定拟合函数类型为 Growth/Sigmodial 中的 Hill 函数, 具体表达式为

$$\varepsilon_1 = \frac{0.013 t^{1.075}}{0.015 + t^{1.075}} \quad (1)$$

式中: ε_1 为岩石轴向应变; t 为蠕变时间(h)。

决定系数 $R^2 = 0.953$ 。

当温度在 -10°C 时, 在应力水平为 0.36 时, 岩石的轴向应变随着时间增长, 最后变形趋于一个稳定值, 如图 2(a)所示。根据实测数据画出岩石蠕变速率曲线, 如图 3 所示。

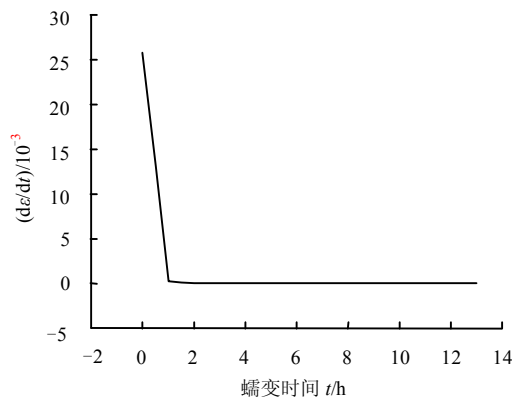


图3 $\alpha=0.36$ 时蠕变速率曲线
Fig.3 Creep rate curve while $\alpha=0.36$

从图 3 可以看出, 当应力水平取 0.36 时, 在蠕变试验开始的 1 h 内, 蠕变速率以直线急剧下降, 在 1~2 h 之间, 蠕变速率下降逐渐趋于平稳, 说明蠕变在 1~2 h 范围内仍旧在增长, 但增长速度已经很小, 在 2 h 以后, 速率曲线基本保持为 0, 说明岩石的蠕变基本停止, 变形结束, 变形量最终保持在 1.075 mm。

根据图 2(b)中的实测蠕变曲线, 确定拟合函数类型为 Growth/Sigmodial 中的 Slogistic 函数, 具体表达式为:

$$\varepsilon_1 = \frac{0.015}{1 + e^{-0.206(t+12.866)}} \quad (2)$$

决定系数 $R^2 = 0.978$ 。

从图 4 可以看出, 当应力水平取 0.45 时, 蠕变速率曲线在 0~15 h 范围内沿曲线快速下降, 15 h 以后, 蠕变速率逐渐收敛于 0。随着应力水平的增

大, 岩石蠕变趋于稳定的时间不断增加。在应力水平为 0.45 的条件下, 岩石蠕变仍属于稳定蠕变, 岩样不会发生破坏。岩样轴向变形量最终保持在 1.205 mm。岩石垂直方向的应力可由下式计算:

$$\sigma = \gamma H \quad (3)$$

式中: γ 为岩石重度(kN/m^3); H 为岩石埋深(m)。

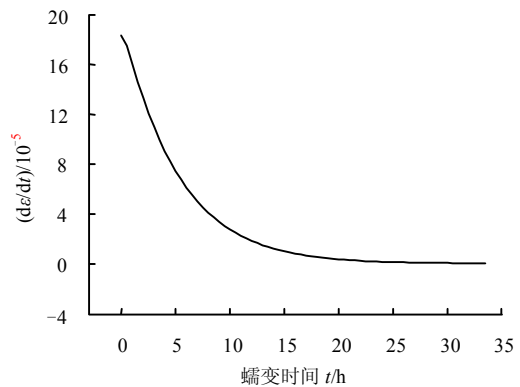


图4 $\alpha=0.45$ 时蠕变速率曲线
Fig.4 Creep rate curve while $\alpha=0.45$

假设岩层的平均重度为 $25 \text{ kN}/\text{m}^3$, 当应力水平取 0.45 时, 岩石蠕变试验所加荷载为 18.4 MPa, 按照式 (3) 计算的岩石埋置深度为 736 m, 也就是在该深度范围内的完整红砂岩冻结井壁, 可以认为其蠕变是稳定型蠕变, 在施工过程中可以有充分的时间进行支护。

根据图 2(c)中的实测蠕变曲线, 确定拟合函数类型为 Growth/Sigmodial 中的 BiDoseResp 函数, 具体表达式为

$$\varepsilon_1 = -0.001 + 0.004 \times \left(\frac{0.702}{1 + 10^{-1.596 - 0.053t}} + \frac{0.298}{1 + 10^{5.746 - 0.198t}} \right) \quad (4)$$

决定系数 $R^2 = 0.995$ 。

式 (1)、(2)、(4) 的决定系数均在 0.95 以上, 拟合效果较好。

从图 5 可以看出, 当应力水平取 0.54 时, 岩石蠕变速率曲线与之前的速率曲线区别明显, 在 0~13 h 范围内, 蠕变速率逐渐降低, 在 13 h 达到最低点, 之后蠕变速率曲线开始加速上升, 此时岩石的变形量开始大幅增长, 最后导致岩石破坏, 这种蠕变是不稳定蠕变。从蠕变速率最低值到岩石最终发生破坏还有 9 h 的变形加速过程。建议取蠕变速率最低值对应的时间点为岩石不稳定蠕变的破坏起始点, 即蠕变加速度曲线上 y 值为 0 时对应的横坐标值, 如图 6 所示, 曲线上纵坐标为 0 的点对应的横坐标为 13 h。

根据式(3)可以算出,当深度超过884 m时,煤矿竖井中的冻结红砂岩岩壁支护工作要及时进行,建议支护工作在13 h内完成,否则井壁可能会由于红砂岩不稳定蠕变而引起破坏。

一种岩石可以发生稳定蠕变也可以发生不稳定蠕变,这取决于岩石应力大小。超过某一临界应力时,蠕变向不稳定蠕变发展,小于此临界应力时,蠕变按稳定蠕变发展,这个临界应力成为岩石的长期强度^[1]。

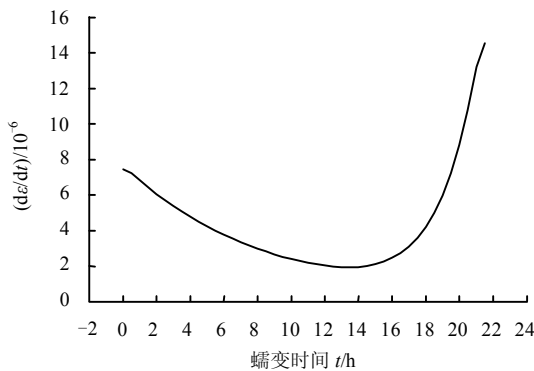


图5 $\alpha=0.54$ 时蠕变速率曲线
Fig.5 Creep rate curve while $\alpha=0.54$

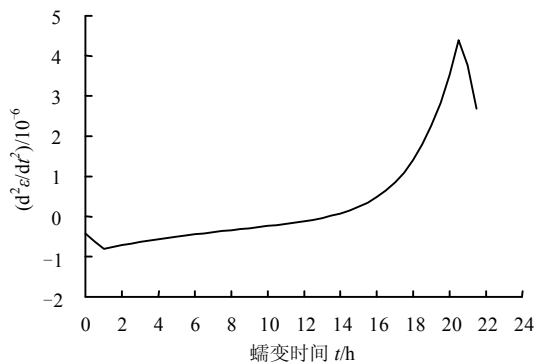


图6 $\alpha=0.54$ 时蠕变加速度曲线
Fig.6 Creep acceleration curve while $\alpha=0.54$

在 -10°C 的低温条件下,该红砂岩的蠕变强度为 $40.93 \times 0.54 = 22.1 \text{ MPa}$,即为红砂岩瞬时强度的0.54倍。

4 冻结红砂岩蠕变理论模型参数的确定

4.1 理论模型的建立

岩石蠕变特征复杂,反映了岩石的弹性、塑性以及黏性3种性质。弹性元件、塑性元件以及黏性元件通过一定的规则进行组合,用组合体描述岩石的蠕变规律。比较常见的有圣维南体、马克斯威尔体、开尔文体、伯格斯体等众多模型结构,但这些模型都不能很好地反映冻结红砂岩的蠕变特性,因

此,笔者提出了一种新的模型,其组成结构如图7所示:模型分为a、b、c3部分,其中a部分是开尔文体,b部分是改进的马克斯威尔体,c部分是改进的陈沅江体^[16],3部分单元体相互串联,组成低温红砂岩蠕变的理论模型。

当 $\sigma < \sigma_{s2}$ 时,b、c两部分不发生变形,图7退化为典型的开尔文体:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) \quad (5)$$

当 $\sigma_{s2} \leq \sigma < \sigma_{s3}$ 时,元件a、b发生蠕变,c不发生变形,图7化为改进的伯格斯体:

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{\eta_2} t + \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) \quad (6)$$

当 $\sigma \geq \sigma_{s3}$ 时,a、b、c3部分都参与工作,岩样开始加速蠕变的门槛值为

$$t_c = \frac{\eta_c \varepsilon_c}{\sigma - \sigma_{s3}} \quad (7)$$

当 $0 < t \leq t_c$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) + \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{\eta_2} t + \frac{\sigma - \sigma_{s3}}{\eta_c} t \quad (8)$$

当 $t > t_c$ 时,

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) + \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{E_2} + \frac{\sigma - \sigma_{s2}}{\eta_2} t + e^{\frac{\sigma - \sigma_{s3}}{\varepsilon_c \eta_c} t + \ln \varepsilon_c - 1} \quad (9)$$

式中: ε 为总蠕变应变量; E_1 、 E_2 分别为弹性参数; η_1 、 η_2 为黏性系数; η'_c 、 η_c 为蠕变体的黏滞系数; ε_c 为改进陈沅江体模型的蠕变参数; σ_{s2} 为b部分发生蠕变的临界应力值; σ_{s3} 为c部分发生蠕变的临界应力值。

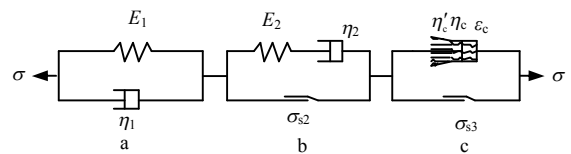


图7 岩石黏弹塑性流变模型

Fig.7 Rheological mechanical model with viscoelastic plasticity of rock

4.2 理论模型中参数的确定

低温条件下岩石蠕变模型共包含 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 、 η'_c 、 η_c 、 ε_c 、 σ_{s2} 、 σ_{s3} 共计9个参数,从图6可以看出,在第3级蠕变过程中,在13 h是试件加速蠕变的开始时间。各级应力水平下实测蠕变曲线及对应理论曲线如图8所示。根据图中不同应力水平下的实测曲线,用Origin对式(5)、(6)、(8)、(9)进行参数计算,所得参数结果列于表1。

由表 1 可知, 建立的低温岩石蠕变理论模型具有较高的决定系数, 图 8 中不同应力水平下理论模型的解析曲线和实测曲线吻合良好, 理论模型比较

好地反映了红砂岩的蠕变特性。由式 (7) 及表 1 中的相关参数计算出 $t_c = 13 \text{ h}$, 与图 2(c) 的实测蠕变曲线中加速蠕变的开始时间点吻合。

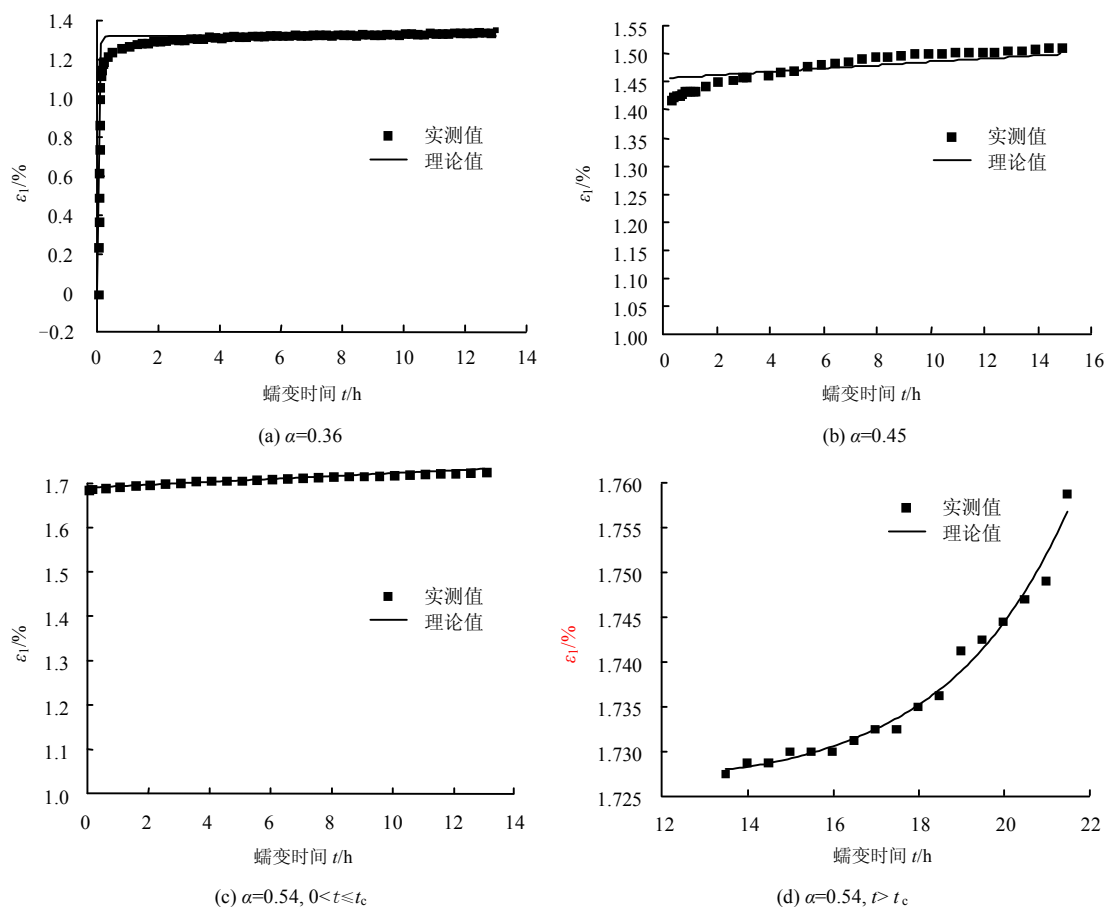


图 8 岩石蠕变实测及理论曲线

Fig.8 Practical creep curves and theoretical creep curves

表 1 岩石蠕变模型参数

Table 1 Parameters of rock creep model

加载 系数	E_1 /MPa	η_1 /(MPa·s)	E_2 /MPa	η_2 /(MPa·s)	η_c/η'_c /(MPa·s)	ε_c	σ_{s2} /MPa	σ_{s3} /MPa	决定系数 R^2
0.36	1 113.6	113.7							0.99
0.45	1 314	113.7	6 392	123 333			16		0.82
0.54, $0 < t < t_c$	1 398.7	113.7	6 392	123 333	23.8		16	22.03	0.92
0.54, $t \geq t_c$	1 398.7	113.7	6 392	123 333	536 464	1.766×10^{-6}	16	22.03	0.98

5 结 论

(1) 应力水平为 0.36 和 0.45 时冻结红砂岩发生稳定蠕变, 应力水平越高, 蠕变稳定的时间越长。应力水平为 0.54 时, 红砂岩发生不稳定蠕变, 蠕变速率先降后升, 最后岩样破坏。

(2) 冻结红砂岩蠕变强度仅为瞬时强度的 0.54 倍, 蠕变加速的开始时刻为 13 h, 建议矿井掘进到 884 m 后对冻结壁及时进行支护, 防止蠕变引起事故。

(3) 得到红砂岩在 -10°C 条件下的蠕变经验公式, 建立了由开尔文体、改进马克斯维尔体和改进陈沅江体串联组成的理论模型, 比较准确地反映了冻结红砂岩的蠕变特性。

参 考 文 献

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 余成学, 崔璇. 岩石非线性蠕变模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 25-28.

- SHE Cheng-xue, CUI Xuan. Research on nonlinear creep model of rock[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2009, 42(1): 25—28.
- [3] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数识别[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 37—40.
- DING Zhi-kun, LÜ Ai-zhong. Parameter identification of non-stationary creep equation of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.): 37—40.
- [4] 王来贵, 赵娜, 何峰, 等. 岩石蠕变损伤模型及其稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 64—68.
- WANG Lai-gui, ZHAO Na, HE Feng, et al. Rock creep damage model and its stability analysis[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(1): 64—68.
- [5] 王来贵, 何峰, 刘向峰, 等. 岩石试件非线性蠕变模型及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1640—1642.
- WANG Lai-gui, HE Feng, LIU Xiang-feng, et al. Non-linear creep model and stability analysis of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1640—1642.
- [6] 刘传孝, 黄东辰, 王龙, 等. 岩石蠕变破坏实验曲线的微观阶段特性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 219—223.
- LIU Chuan-xiao, HUANG Dong-chen, WANG Long, et al. New recognition to microcosmic cracks' properties evolving with different creep phases of rock mechanical testing curves[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(Supp.2): 219—223.
- [7] 袁海平, 曹平, 徐万忠, 等. 岩石黏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 Hai-ping, CAO Ping, XU Wan-zhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(6): 796—799.
- [8] 蒋昱州, 张明鸣, 李良权. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究及其参数识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 832—839.
- JIANG Yu-zhou, ZHANG Ming-ming, LI Liang-quan. Study on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rock and its parameter identification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(4): 832—839.
- [9] 刘传孝, 张秀丽, 黄东辰, 等. 坚硬岩石弱蠕变特性实验曲线的初级函数拟合[J]. 矿冶, 2011, 20(1): 11—15.
- LIU Chuan-xiao, ZHANG Xiu-li, HUANG Dong-chen, et al. Elementary functions to fit test curves of hard rock's weaker creep properties[J]. **Mining & Metallurgy**, 2011, 20(1): 11—15.
- [10] 何锦龙, 袁海平. 某矿区岩石蠕变特性试验研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(5): 67—70.
- HE Jin-long, YUAN Hai-ping. Testing study on creep characteristic of ore-rock at a mine[J]. **China Mining Magazine**, 2011, 20(5): 67—70.
- [11] 孙强, 秦四清, 马平. 岩石蠕变的应力-应变比分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(1): 66—70.
- SUN Qiang, QIN Si-qing, MA Ping. Analysis of stress-strain ratio for rock creep[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 66—70.
- [12] 曹平, 刘业科, 蒲成志, 等. 一种改进的岩石黏弹塑性加速蠕变力学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(1): 142—146.
- CAO Ping, LIU Ye-ke, PU Cheng-zhi, et al. An improved accelerated creep mechanical model of viscoelasto-plastic rock[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2011, 42(1): 142—146.
- [13] KINOSHITA. Effects of high temperature on strength, deformation, thermal properties and creep of rocks[J]. **Journal of the Society of Materials Science**, 2006, 55(9): 489—494.
- [14] LADANYI B. Creep of frozen slopes and ice-filled rock joints under temperature variation [J]. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 2006, 33(6): 719—725.
- [15] 国家安全生产监督管理总局. MT/T 593.1—2011 人工冻土物理力学性能试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [16] 陈沅江, 潘长良, 曹平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209—214.
- CHEN Yuan-jiang, PAN Chang-liang, CAO Ping, et al. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 2209—214.