

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1819

考虑水化学损伤的砂岩流变损伤本构模型

冯晓伟^{1,2}, 王 伟^{1,2}, 王如宾^{1,2}, 袁双双^{1,2}, 朱其志^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京, 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京, 210098)

摘 要: 通过对已有的水化学溶液腐蚀作用后红砂岩三轴蠕变试验结果的分析, 可知水化学作用能够加快岩石损伤的发展, 增强红砂岩的蠕变效应。根据水岩化学作用的动力学理论, 将红砂岩中可溶解胶结物的流失作为水化学腐蚀作用下岩石力学性能劣化的根本原因。通过化学反应速率方程和测定浸泡过程中溶液 pH 值的变化, 定义了考虑初始 pH 值和时间的化学损伤因子。考虑流变过程中的应力损伤, 基于广义 Kelvin 模型, 提出了考虑水化学作用的砂岩流变损伤本构模型。通过对水化学作用下红砂岩流变试验结果进行模拟, 对该模型进行了参数辨识和验证。结果表明, 所提出的模型能够较好地反映水化学作用下砂岩的流变特性, 具有有效性和合理性。

关 键 词: 砂岩; 化学腐蚀; 广义 Kelvin 模型; 化学损伤; 流变损伤模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018) 09—3340—08

A rheological damage model of sandstone under water-rock chemical interaction

FENG Xiao-wei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, WANG Ru-bin^{1,2}, YUAN Shuang-shuang^{1,2}, ZHU Qi-zhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geomechanical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Through the analysis of existed triaxial creep test results of red sandstone under the chemical corrosion, it is known that water-rock chemical interaction can accelerate the development of damage and enhance the creep properties of red sandstones. In this paper, based on the chemical kinetic theory of water-rock chemical interaction, the loss of the soluble cement in red sandstone is the key reason for the deterioration of rock mechanical properties under the interaction of chemical corrosion. The chemical damage factor considering the initial pH value and the time is defined by the chemical reaction rate equation and the change of pH value of solution during the immersion process. Meanwhile, based on the generalized Kelvin model, the rheological damage constitutive model of sandstone considering chemical corrosion is proposed. The parameters of the model are identified and verified by the creep results of red sandstone under chemical corrosion. Results show that the proposed model is valid and reasonable, which can well describe the creep properties of sandstones under chemical corrosion.

Keywords: sandstone; chemical corrosion; generalized Kelvin model; chemical damage; rheological damage model

1 引 言

岩石的流变是指岩石的应力-应变-时间三者之间的相互关系, 流变特性与岩体工程长期稳定性和安全性密切相关, 是岩石重要的力学特性之一。工程实践和理论研究显示, 岩土工程的破坏和失稳大部分是在工程运营期间, 在岩体的变形和应力不断

变化调整过程中发生的^[1-3]。近些年来, 研究人员在岩石的流变本构模型建立方面取得了较为丰富的成果。Geist^[4]建立了经验流变本构模型, 其主要通过对岩石进行一系列的流变力学试验, 运用数理统计的方法对试验曲线进行拟合, 然后获得相应的数学表达式; 徐卫亚等^[5]建立了基于基本元件模型的岩石流变模型, 元件模型运用一些具有基本特性的元件通过串联或并联的方式组合在一起来模拟复杂的

收稿日期: 2017-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFC1501100); 国家自然科学基金资助项目 (No. 11672343, No. 51679069); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 2016B20214)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFC1501100), the National Natural Science Foundation of China (11672343, 51679069) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016B20214).

第一作者简介: 冯晓伟, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石力学相关试验与本构模型的研究工作。E-mail: njfengxiaowei@163.com

通讯作者: 王伟, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程的教学与研究。E-mail: wwang@hhu.edu.cn

岩石流变力学特性；Shao 等^[6]建立了基于热力学理论的黏弹塑性流变模型，此类模型建立的关键是确定屈服函数和塑性势函数；此外，赵延林^[7]、王来贵^[8]等从损伤的角度出发，结合能量损伤和几何损伤等损伤理论，研究了损伤对流变变形破坏的影响效应，提出了基于损伤和断裂力学的流变模型。前人所提出的这些流变本构模型都能较好地模拟所研究岩体的流变力学特性。

水作为地质环境中较为活跃的成分，对岩体工程的安全性有着重要影响。而且在实际的岩体工程中，与岩体相互作用的水体是离子成分和赋存状态较为复杂的水化学溶液。这种水体具有不同的化学组成、离子浓度、酸碱度和流动状态，一方面水能够改变岩体介质中的孔隙水压力，进而影响岩体的强度和变形；另一方面，水对岩体介质产生物理作用（包括冲刷作用、润滑作用、软化和泥化作用等）和化学作用（包括水解作用、溶解作用、吸附沉淀作用和离子交换作用等）。因此，在砂岩流变过程中，水化学腐蚀作用对其力学特性的影响不可忽视。水化学作用能够加快岩石损伤的发展，王伟^[9-11]、陈四利^[12]等对岩石开展水化学环境下的相关试验，通过分析试验结果对化学腐蚀损伤机制进行了相关研究，Xie^[13]、Yurtdas^[14]、李光雷^[15]等分析了化学腐蚀对岩石强度的影响。不过这些研究大多数集中于化学腐蚀对岩石瞬时力学特性方面的试验研究和相关模型的建立，针对水化学腐蚀作用下岩石流变损伤本构模型的研究尚比较缺乏。

红砂岩中含有较多的黏土矿物和氧化物，具有结构疏松、强度低和渗透性大的特点，水化学溶液能够使红砂岩的物理力学性质发生显著的变化，对处在水化学环境中砂岩流变损伤本构模型的研究具有重要的研究价值。本文在前人的研究基础之上，定义了考虑初始pH值和时间效应的化学损伤因子。同时考虑岩石在流变过程中发生的应力损伤，基于广义 Kelvin 模型，提出了考虑水化学作用的砂岩流变损伤本构模型。通过水化学腐蚀作用下红砂岩的蠕变试验结果对模型进行参数识别和验证。结果表明，本文所提出的模型能够较好地反映水化学腐蚀作用下砂岩的流变力学特性，具有一定的有效性和合理性。

2 蠕变损伤本构模型

2.1 损伤分析

岩石损伤发展的过程实际是指岩石内部的微裂纹与孔隙萌生到逐渐扩展的过程。处在水化学环境

作用下的岩体工程，一方面受到应力加载过程中应力造成的损伤，另一方面经过化学溶液作用的岩石，内部微观结构发生了变化，尤其是一些碎屑物和胶结物质的溶蚀使得岩石内部的孔隙增大，微裂纹扩展，产生化学损伤。同时考虑化学损伤和应力损伤的岩石综合损伤表达式表示如下^[16]：

$$D = 1 - (1 - D_m)(1 - D_c) \quad (1)$$

式中： D_c 和 D_m 分别为由化学腐蚀造成的化学损伤和由应力加载造成的应力损伤。

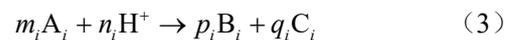
化学作用引起岩石内部缺陷的扩大会进一步影响到岩石的宏观变形性能。假设岩石由不可溶基质、可溶胶结物和骨架之隙组成，化学损伤引起岩石内部的缺陷主要是由于可溶胶结物的流失使得不可溶基质颗粒间的接触减少所导致。根据 Li 等^[17]的前期研究，基于细观结构的损伤变量可以表示为如下形式：

$$D_c = \frac{\Delta S^d}{(S^d)_0} = \left[\frac{\Delta \omega^d}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

式中： $(S^d)_0$ 和 $(\omega^d)_0$ 分别为未受到化学腐蚀的岩石颗粒初始接触面积和初始可溶胶结物的摩尔数； ΔS^d 、 $\Delta \omega^d$ 分别为化学腐蚀时间 t 内岩石损失的接触面积和可溶胶结物的摩尔数。

根据已有试验资料分析，水化学环境下岩石矿物成分的流失主要由化学反应导致，其中包括岩石中可溶解胶结物与酸或碱反应和岩石中可溶解胶结物与水直接发生反应。本文着重讨论酸性条件下岩石发生的化学腐蚀，将岩石中可溶解胶结物与酸以及水发生化学反应造成的流失作为化学损伤的主要来源。

一方面岩石矿物组成中的 M 个物质与溶液中酸发生反应，其一般化学方程式为



式中： A_i 和 H^+ 为反应物； B_i 和 C_i 为生成物； m_i 、 n_i 、 p_i 和 q_i 均为化学方程式的配平系数。

由于存在多个反应，反应机制复杂，不同反应的反应热不同，对其他化学反应的速率会产生一定的影响。如果考虑这些因素，进行定量计算会非常困难，假定忽略各个反应的相互干扰，由化学动力学方程得到以溶液中 H^+ 的浓度变化率表示各个化学反应的瞬时速率表达式：

$$v^i(H^+) = kc^x(H^+)c^y(A_i) \quad (4)$$

式中: $v^i(\text{H}^+)$ 为与 A_i 反应的氢离子的反应速率; $c(\text{H}^+)$ 和 $c(A_i)$ 分别为某时刻 H^+ 和反应物 A_i 的瞬时浓度; 比例常数 k 为速率参数; x_i 、 y_i 分别为反应物的浓度参数。

反应物 A_i 难溶于水, 其浓度视为常数。实际上, 溶液里 H^+ 消耗的快慢反映了溶液里各个化学反应的综合反应速率。以 H^+ 的综合反应速率来反映综合反应的快慢。 H^+ 的综合反应速率表达式简化如下:

$$v_{\text{H}^+} = \lambda c^x(\text{H}^+) \quad (5)$$

式中: 比例常数 λ 为综合反应速率参数。

由上式可得

$$-\frac{dc(\text{H}^+)}{dt} = \lambda c^x(\text{H}^+) \quad (6)$$

根据一阶线性微分方程解法, 结合反应浓度初始条件得到 H^+ 浓度随时间变化的关系式为

$$c_{\text{H}^+}(t) = \left[(c_{\text{H}^+}^0)^{1-x} - (1-x)\lambda t \right]^{\frac{1}{1-x}} \quad (7)$$

式中: $c_{\text{H}^+}^0$ 为某时刻化学溶液的初始浓度值。

又因为

$$\text{pH} = -\lg c(\text{H}^+) \quad (8)$$

联立式 (7) 和式 (8), 得到溶液 pH 值与时间的关系式:

$$\text{pH}(t) = -\lg \left[10^{\text{pH}_0(x-1)} + (x-1)\lambda t \right]^{\frac{1}{1-x}} \quad (9)$$

式中: $\text{pH}(t)$ 、 pH_0 分别表示某时刻化学溶液的 pH 值和化学溶液初始 pH 值。

不考虑化学反应的先后顺序, 由反应前后 H^+ 浓度变化, 结合化学方程式 (3) 以及各反应物含量关系, 推导得到某时刻与酸发生化学反应损失的可溶胶结物的摩尔数为

$$\Delta\omega_1^d = \sum_{i=1}^M \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (c_{\text{H}^+}(t) - c_{\text{H}^+}^0) V_{\text{cs}} \quad (10)$$

式中: V_{cs} 为浸泡化学溶液的体积; α_i 为反应物 A_i 的初始摩尔数占所有可与 H^+ 反应的反应物摩尔数的百分数。

另一方面, 溶液中水能够与岩石中的 N 个相关物质 D_i 发生反应。由于反应物水足量, 此反应很短时间内反应完全, 忽略时间效应的影响。由此所损

失的可溶胶结物的摩尔数为

$$\Delta\omega_2^d = \sum_{i=1}^N \frac{m_{D_i}}{M_i} \quad (11)$$

式中: m_{D_i} 、 M_i 分别表示可溶胶结物 D_i 的质量和 D_i 的摩尔质量。

结合式 (2)、(8)、(10)、(11), 可以得到考虑初始 pH 值、时间 t 的化学损伤因子, 其表达式如下:

$$D_c = \left[\frac{\sum_{i=1}^M \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-\text{pH}_0} - 10^{-\text{pH}(t)}) V_{\text{cs}} + \sum_{i=1}^N \frac{m_{D_i}}{M_i}}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

假定在加速蠕变阶段发生之前, 岩石的应力损伤值为 0。考虑加速蠕变阶段时岩石的损伤加剧, 根据杨春和^[18]、徐卫亚^[5]等推导出一维条件下的岩石流变损伤变量, 三维条件下岩石流变过程中的应力损伤变量定义为

$$D_m = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{\text{equ}} < \varepsilon_{\text{thr}} \\ 1 - \exp(1 - \beta |\varepsilon_{\text{equ}}^2 - \varepsilon_{\text{thr}}^2|^{\frac{1}{n}}), & \varepsilon_{\text{equ}} \geq \varepsilon_{\text{thr}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ε_{equ} 和 ε_{thr} 分别为某时刻的等效应变和初始加速流变时的等效应变值; β 和 n 均为材料参数, 其中 ε_{equ} 按下式计算:

$$\varepsilon_{\text{equ}} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \quad (14)$$

将式 (12)、(13) 代入式 (1) 中, 得到综合损伤因子如下:

当 $\varepsilon_{\text{equ}} < \varepsilon_{\text{thr}}$ 时, 有

$$D_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^M \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-\text{pH}_0} - 10^{-\text{pH}(t)}) V_{\text{cs}} + \sum_{i=1}^N \frac{m_{D_i}}{M_i}}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

当 $\varepsilon_{\text{equ}} \geq \varepsilon_{\text{thr}}$ 时, 有

$$D_2 = 1 - \exp \left(1 - \beta |\varepsilon_{\text{equ}}^2 - \varepsilon_{\text{thr}}^2|^{\frac{1}{n}} \right) \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^M \frac{m_i \alpha_i}{n_i} (10^{-\text{pH}_0} - 10^{-\text{pH}(t)}) V_{\text{cs}} + \sum_{i=1}^N \frac{m_{D_i}}{M_i}}{(\omega^d)_0} \right]^{\frac{2}{3}} \right\} \quad (16)$$

2.2 岩石流变损伤关系建立

岩石流变模型大致包括经验模型、元件模型、基于损伤力学的流变模型和基于热力学理论的流变模型。本文提出的水化学作用下砂岩流变损伤本构模型是以元件模型为基础。元件模型通过一些能够反映岩石弹性、塑性、黏弹性、黏塑性的线性和非线性基本元件，以串联或并联的方式来模拟复杂的岩石流变力学特性，具有简单、直观、易编程等特点，是一种用于描述岩石流变力学行为的有效方法。但是，传统的元件模型不能很好地反映岩石流变的非线性特征，尤其是在模拟加速蠕变阶段时存在一定的困难。本文以广义 Kelvin 模型为基础，基于损伤理论，从而建立了岩石的流变损伤本构模型，能够较好地模拟岩石流变过程中的线性及非线性特性。图 1 是三维状态下的广义 Kelvin 模型。图中 G_c 、 G_K 、 H_K 分别为虎克体的剪切模量、Kelvin 体的剪切模量和黏滞系数； S_{ij} 为偏应力张量，相应的偏应变张量为 e_{ij} 。

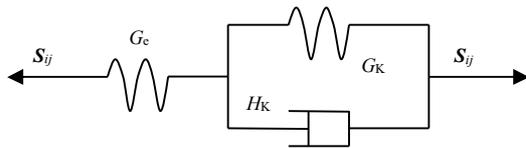


图 1 三维广义开尔文本构模型

Fig.1 Three-dimensional generalized Kelvin rheological constitutive model

广义 Kelvin 模型应变率满足：

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^K + \dot{e}_{ij}^e \quad (17)$$

对于虎克体，有

$$S_{ij}^e = 2G_c e_{ij}^e \quad (18)$$

对于 Kelvin 体：

$$S_{ij}^K = 2H_K \dot{e}_{ij}^K + 2G_K e_{ij}^K \quad (19)$$

根据王伟^[19]、李良权^[20]等对 Burgers 模型三维化的推导方法，用广义 Kelvin 模型推导得到常规三轴压缩条件下的轴向应变（不考虑围压产生的应变）的表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \left[\frac{1}{G_K} \left(1 - e^{-\frac{G_K t}{H_K}} \right) + \frac{1}{G_c} + \frac{1}{3K} \right] \quad (20)$$

式中： K 为岩石的体积模量。

岩石在三轴压缩过程中其破坏形式主要为沿着破坏面滑动的压剪破坏，由于岩石内部裂纹的生成和进一步发展和内部孔隙的扩大，岩石的黏滞系数会受到影响，故考虑损伤主要对剪切模量和黏滞系数造成的影响，忽略其对体积模量的影响^[18]，因此有

$$\left. \begin{aligned} G_K(t) &= G_K(1-D) \\ G_c(t) &= G_c(1-D) \\ H_K(t) &= H_K(1-D) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

考虑流变过程中发生的化学损伤和应力损伤，得到考虑化学损伤的砂岩流变损伤本构模型如下：

当 $\varepsilon_{equ} < \varepsilon_{thr}$ 时，有

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \left[\frac{1}{G_K(1-D_1)} \left(1 - e^{-\frac{G_K t}{H_K}} \right) + \frac{1}{G_c(1-D_1)} + \frac{1}{3K} \right] \quad (22)$$

当 $\varepsilon_{equ} \geq \varepsilon_{thr}$ 时，有

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3} \left[\frac{1}{G_K(1-D_2)} \left(1 - e^{-\frac{G_K t}{H_K}} \right) + \frac{1}{G_c(1-D_2)} + \frac{1}{3K} \right] \quad (23)$$

3 模型参数确定和模型验证

水岩相互作用具有时间效应，但是与自然界中长年累月的荷载作用相比，其作用时间还是相对较短的。实际上，在没有新的酸性或碱性溶液（如酸雨，或者工厂排放的化学废液）补充的情况下，岩体内部矿物成分和水化学溶液则会处于一种平衡状态。化学损伤不会随着应力损伤的发展而进一步发展。本文提出的流变损伤本构模型不仅可以模拟经过化学腐蚀后岩体的流变力学行为，对于化学损伤和应力损伤同时发展的特殊情况（如我国西南部酸雨区的岩体边坡长期稳定和安全性问题）同样可以模拟。由于化学损伤和应力损伤同时发展的相关室内流变试验数据缺乏，本文利用水化学溶液腐蚀后的岩石的流变试验成果对所提出的模型进行参数确定和验证。

Wang 等^[21]对水化学腐蚀作用下砂岩的流变力学特性开展了相关试验研究，其经过 1 L 初始 pH=3 和 pH=4 的溶液浸泡后溶液 pH 值随岩石浸泡时间关系曲线（见图 2）被用来验证式（9）的正确性。

从图 2 可以看出，关系曲线不但包含 pH 值随时间上升阶段的关系，同时包含了 pH 稳定阶段（即

化学反应完成阶段)的关系,而式(9)是通过化学反应方程推导得到,只能反映化学反应过程中溶液pH值的变化。所以,本文取pH值稳定前的数据来验证式(9)的正确性。两种溶液下pH值稳定前的试验数据和拟合曲线的比较结果分别见图3和图4。

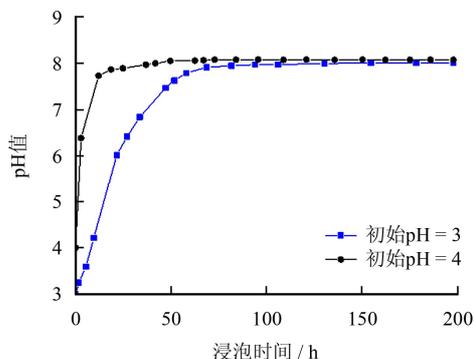


图2 溶液pH值随岩石浸泡时间关系曲线
Fig.2 Relationships between pH value of solution and soaking time of sandstone

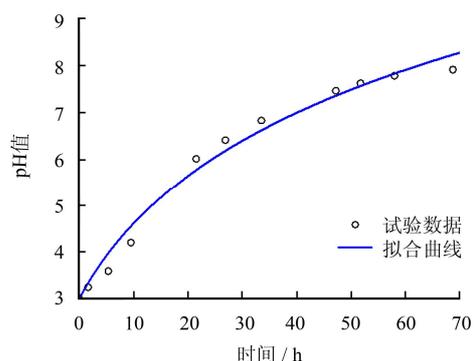


图3 溶液pH值模拟结果与试验数据对比(初始pH=3)
Fig.3 Comparison between model prediction and test results for pH values (initial pH=3)

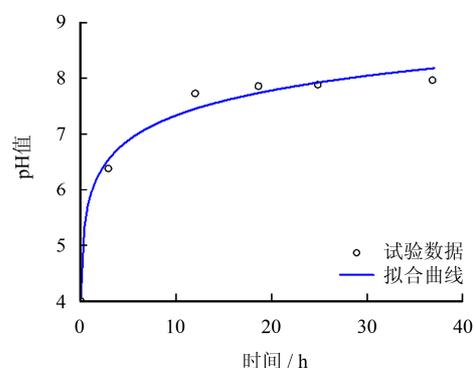


图4 溶液pH值模拟结果与试验数据对比(初始pH=4)
Fig.4 Comparison between model prediction and test results for pH values (initial pH=4)

从图3和图4可以看出,推导得到的pH随时

间变化的公式能够较好地模拟化学反应过程中溶液pH值的变化趋势,具有一定的合理性。同样,选用Wang等^[21]文中经过1L初始pH=3的化学溶液浸泡后砂岩的流变试验结果来进行流变损伤模型参数确定及验证。分析本文建立的化学溶液作用下砂岩的流变损伤本构模型可知,该模型含9个参数。其中 x 和 λ 可以根据pH值随岩石浸泡时间关系曲线拟合结果求得,分别为1.15和1.42。化学损伤因子 D_c 可以结合红砂岩的矿物组成和式(12)得到。

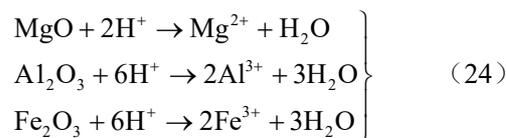
红砂岩中含有丰富的氧化物呈深红色,胶结物以泥质胶结物为主,主要矿物成分有石英、长石、金属氧化物和岩屑等^[22]。其含有的黏土矿物具有水敏性高及钙质、铁质胶结物在水化学场中不稳定的特点。试验红砂岩的矿物组成如表1所示。

表1 红砂岩矿物组成

Table 1 Mineralogical compositions of red sandstone

矿物	SiO ₂	K(Na)AlSi ₃ O ₈	Fe ₂ O ₃	CaO	其他
含量/%	72	25	1.8	0.4	0.8

表中, SiO₂不溶于水,也难与酸性溶液反应,已有资料表明^[23],常温下长石中KAlSi₃O₈、NaAlSi₃O₈在酸性溶液中的溶解很小,可忽略长石溶解对损伤发展的影响,把长石当作不可溶基质。与酸发生反应的可溶胶结物主要为红砂岩里Fe₂O₃、MgO和Al₂O₃,与水发生化学反应的可溶胶结物主要为红砂岩里的CaO。红砂岩里黏土矿物与酸性溶液主要发生的化学反应方程式如下:



根据表1中的红砂岩的矿物组成,可以计算出试验所用红砂岩的可溶胶结物总的摩尔数为0.0831。要注意的是,由于式(9)只能反映化学反应过程中溶液pH值的变化,不能反映化学反应结束后溶液pH值稳定的趋势。在通过式(12)计算化学损伤因子 D_c 的过程中,式(12)中的 t 应选取图2中pH达到初步稳定时的浸泡时间70h,而不是整个浸泡时间200h。经过统计得到被1L初始pH=3的化学溶液浸泡后的红砂岩与H⁺反应所损伤的可溶胶结物摩尔数为0.0002,与水反应所损伤的可溶胶结物摩尔数为0.0304,最终得到化学损伤因子 $D_c = 0.368$ 。

分析损伤统计计算过程可知,由于水化学浸泡

溶液体积为 1 L，所含 H⁺ 摩尔数较少，与之发生化学反应流失的可溶胶结物也相应较少。H⁺ 的存在在一定程度上溶蚀可溶胶结物，扩大岩石内部裂纹，增加可溶胶结物与化学溶液的接触面积，从而加速损伤的发展。但对该试验计算分析可得，由 H⁺ 造成的化学损伤却相对较小。该试验岩样在水化学溶液中损伤发展的主要原因是岩样中 CaO 与水发生反应造成可溶胶物的流失。pH 值反映的是化学溶液中的 H⁺ 的浓度，化学溶液中 H⁺ 的数目除了与溶液 pH 值有关，与化学溶液的体积也密切相关。因此，试验中要分析岩石的化学损伤不能只考虑所处水溶液的 pH 值和浸泡时间，还要考虑岩石自身的矿物组成以及浸泡岩石所使用水化学溶液的体积。

将得到的化学损伤因子代入式 (15)、(16) 中得到综合损伤因子。所提出的本构模型 (式 (22)、(23)) 还有 G_c、G_k、H_k、K、n、β 共 6 个参数，模型中初始加速流变时的等效应变值 ε_{thr} 取 17.65×10⁻³。采用 L-M 算法对水化学作用后红砂岩的三轴流变试验结果进行拟合，从而确定模型参数。表 2 为考虑化学损伤的广义 Kelvin 模型下红砂岩流变模型参数值，图 5 为考虑化学损伤的广义 Kelvin 模型流变模型结果与试验结果对比。

表 2 考虑化学损伤的砂岩广义 Kelvin 模型流变模型参数
Table 2 Rheological parameters of red sandstone using the generalized Kelvin model considering chemical damage

(σ ₁ -σ ₃) /MPa	G _k /GPa	H _k /GPa·h	G _c /GPa	K /GPa	n	β
11.5	3.91	92	0.96	3.13	/	/
17.2	3.17	82	1.35	3.30	/	/
22.8	3.28	145	1.54	3.33	/	/
26.6	1.39	180	2.40	3.20	/	/
30.4	1.58	93	0.54	3.27	0.8	6.16×10 ⁻⁵

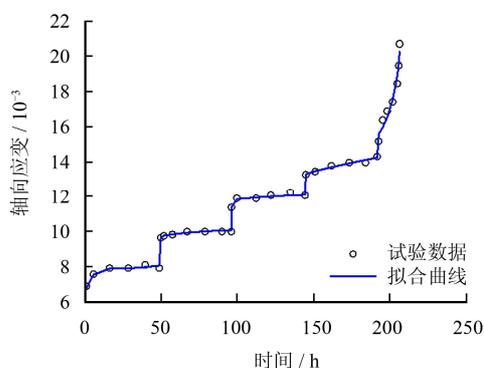


图 5 考虑化学损伤的广义 Kelvin 模型流变模型结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison between generalized Kelvin model prediction considering chemical damage and test result

对比分析试验数据和模型拟合曲线，可以看出本文所提出的水化学作用下砂岩的流变损伤本构模型与不同偏应力荷载作用下的各级蠕变试验数据能够较为相符，不但能够很好地反映岩石的衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段，对于广义 Kelvin 模型不能描述的岩石加速蠕变阶段也能够很好的描述，说明在广义 Kelvin 模型中考虑化学损伤和蠕变过程中的应力损伤是合理的，本文所提出的流变损伤模型具有一定的正确性和适用性。

4 结 论

本文以受水化学溶液作用的红砂岩为研究对象，对已有的试验数据分析，将红砂岩中可溶解胶结物的流失作为水化学腐蚀作用下岩石力学性能劣化的根本原因，并且定量统计了岩石的化学损伤。基于损伤理论，建立了水化学作用下砂岩流变损伤本构模型，得到以下结论：

(1) 通过化学反应速率方程推导得到溶液 pH 值随时间变化的公式，能够很好地反映水化学浸泡过程中溶液 pH 值的变化趋势。基于该公式，定义了考虑初始 pH 值和时间的化学损伤。同时考虑流变过程中的应力损伤，基于广义 Kelvin 模型，提出了考虑化学腐蚀作用的砂岩流变损伤本构模型。拟合结果表明，该模型具有一定的合理性和适用性。

(2) 根据红砂岩化学损伤计算过程分析，岩石的化学损伤因子不但与所处水环境的 pH 值和浸泡时间有关系，与自身的矿物组成以及水化学溶液的体积也有密切联系。

(3) 下一步的工作将本文提出的考虑水化学作用的砂岩流变损伤模型应用到工程实际，进一步检验该模型的适用性。

参 考 文 献

[1] WANG Wei, LI Liang-quan, XU Wei-ya, et al. Creep failure mode and criterion of Xiangjiaba sandstone[J]. **Journal of Central South University**, 2012, 12(19): 3572—3581.

[2] WANG Ru-bin, XU Wei-ya, ZHANG Jiu-chang, et al. Study on accelerated creep properties and creep damage constitutive relation for volcanic breccias[C]// *Constitutive Modeling of Geomaterials*. [S.l.]: Springer, 2013: 633—639.

[3] 张玉, 徐卫亚, 赵海斌, 等. 碎屑砂岩三轴压缩下强度和变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(3): 666—674.

- ZHANG Yu, XU Wei-ya, ZHAO Hai-bin, et al. Experimental investigation on strength and deformation properties of clastic sandstone under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 666—674.
- [4] GEIST R. Four-stage model for predicting creep behavior[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, 124(1): 118—120.
- [5] 徐卫亚, 周家文, 杨圣奇, 等. 绿片岩蠕变损伤本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3093—3097.
- XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, YANG Sheng-qi, et al. Study on creep damage constitutive relation of greenschist specimen[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 3093—3097.
- [6] SHAO J F, ZHU Q Z, SU K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. **Computers & Geotechnics**, 2003, 30(7): 549—555.
- [7] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1297—1308.
- ZHAO Yan-ling, TANG Jin-zhou, FU Cheng-cheng, et al. Rheological test of separation between viscoelastic-plastic strains and creep damage model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(7): 1297—1308.
- [8] 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.
- [9] 王伟, 刘桃根, 李雪浩, 等. 化学腐蚀下花岗岩三轴压缩力学特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3801—3807.
- WANG Wei, LIU Tao-gen, LI Xue-hao, et al. Mechanical behaviour of granite in triaxial compression under chemical corrosion[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2015, 46(10): 3801—3807.
- [10] 王伟, 刘桃根, 吕军, 等. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3607—3617.
- WANG Wei, LIU Tao-gen, LÜ Jun, et al. Experimental study of influence of water-rock chemical interaction on mechanical characteristics of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.2): 3607—3617.
- [11] 王伟, 李雪浩, 朱其志, 等. 水化学腐蚀对砂板岩力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2559—2566.
- WANG Wei, LI Xue-hao, ZHU Qi-zhi, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandy slate under chemical corrosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2559—2566.
- [12] 陈四利, 冯夏庭, 周辉. 化学腐蚀下砂岩三轴细观损伤机理及损伤变量分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1363—1367.
- CHEN Si-li, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Study on triaxial meo-failure mechanism and damage variables of sandstone under chemical erosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1363—1367.
- [13] XIE S Y, SHAO J F, XU W Y. Influences of chemical degradation on mechanical behaviour of a limestone[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2011, 48(5): 741—747.
- [14] YURTDAS I, XIE S Y, BURLION N, et al. Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste[J]. **Cement & Concrete Research**, 2011, 41(4): 412—421.
- [15] 李光雷, 蔚立元, 靖洪文, 等. 酸腐蚀后灰岩动态压缩力学性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3247—3254.
- LI Guang-lei, WEI Li-yuan, JIN Hong-wen, et al. Experimental study of dynamic compressive mechanical properties of limestone after acid corrosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3247—3254.
- [16] 姜立春, 温勇. AMD 蚀化下砂岩的损伤本构模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(11): 3502—3506.
- JIANG Li-chun, WEN Yong. Damage constitutive model of sandstone during corrosion by AMD[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2011, 42(11): 3502—3506.
- [17] LI N, ZHU Y, SU B, et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2003, 40(2): 243—249.