

基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型

王军保¹, 刘新荣², 宋战平¹, 赵宝云³, 蒋斌³, 黄天柱³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331)

摘要: 为了研究盐岩的蠕变特性, 对盐岩试件开展不同轴向应力下的单轴压缩蠕变试验。试验结果显示, 盐岩稳态蠕变率和相同时刻的蠕变应变均随轴向应力增大而非线性增大, 两者随轴向应力的变化规律均可用指数函数描述; 盐岩蠕变过程具有非线性特征, 且轴向应力越大、蠕变时间越长, 非线性特征越明显。为了确定盐岩长期强度, 提出一种改进的稳态蠕变率拐点法, 该法确定的盐岩长期强度值与等时应力-应变曲线拐点法确定的结果非常接近, 可为类似研究提供一定的借鉴。从唯象学的角度出发, 通过对 S 形函数求反函数的方法, 提出一种新的岩石单轴压缩全过程蠕变模型, 并利用盐岩蠕变试验结果对模型合理性进行验证。结果表明, 该模型不仅能够描述盐岩在低应力水平下的衰减蠕变和稳态蠕变, 还能反映高应力水平下盐岩单轴压缩蠕变破坏全过程, 特别是能够反映加速蠕变。模型以一个统一的表达式即可描述盐岩单轴压缩蠕变全过程的 3 个阶段, 克服了元件组合模型需要分段处理的缺点; 同时, 该模型表达式非常简单, 方便应用。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 蠕变特性; 稳态蠕变率; 长期强度; 反 S 函数; 蠕变模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)11 - 2446 - 14

A whole process creeping model of salt rock under uniaxial compression based on inverse S function

WANG Junbao¹, LIU Xinrong², SONG Zhanping¹, ZHAO Baoyun³, JIANG Bin³, HUANG Tianzhu³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Department of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to study the creeping properties of salt rock, uniaxial compression creeping tests under different axial stresses were carried out on salt rock specimens. The test results indicate that the creep strain and the steady creeping rate of salt rock both increase gradually and exponentially with the increasing of axial stress. The creeping process of salt rock is nonlinear with respect to the axial stress and creeping time. The higher the axial stress level and the longer the creeping time, the more obvious the nonlinear characteristic. To determine the long term strength of salt rock, an improved inflection point method for steady creeping rate-stress curve was proposed. The long term strength of salt rock determined with the method is very close to that obtained from the inflection point method for isochronous stress-strain curves. The new method can provide some insight into the similar

收稿日期: 2018 - 06 - 07; **修回日期:** 2018 - 07 - 23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404184); 陕西省青年科技新星项目(2018KJXX - 061); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JQ4009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51404184), Youth Science and Technology Nova Program of Shaanxi Province (Grant No. 2018KJXX - 061) and Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province(Grant No. 2016JQ4009)

作者简介: 王军保(1982 -), 男, 2012 年于重庆大学土木工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石力学及地下工程方面的研究工作。E-mail: xajdwangjunbao@163.com。通讯作者: 宋战平(1974 -), 男, 2006 年于西安理工大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事岩石力学及地下工程方面的研究工作。E-mail: songzhp@xauat.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0670

studies. A new whole process creeping model for rocks under uniaxial compression was established by taking the inverse of S shaped function. The creeping test results of salt rock were used to evaluate the reasonability of the creeping model. The comparison of prediction curves and the test results shows that not only the primary creeping stage and steady creeping stage under the low stress level, but also the whole creep process(the primary creep stage, steady creep stage and accelerated creep stage) under the high stress level of salt rock can be described by this model. The new creeping model can accurately reflect the three stages of rock creeping with a unified expression, and overcome the shortcomings of the combined component model which is segmented. In addition, the expression of the model is very simple and convenient for application.

Key words: rock mechanics; salt rock; creep properties; steady creep rate; long-term strength; inverse S function; creep model

1 引言

利用地下盐岩洞穴进行能源储备是国际上广泛认可的能源储备方式,也是我国实施能源战略储备计划的重点部署方向^[1-4]。蠕变特性作为盐岩最为典型的力学性质之一,直接关系到储存库的长期稳定性和安全性,国外也已报道了多起由于盐岩蠕变行为导致储库溶腔报废的案例。因此,对盐岩蠕变特性进行研究具有重要意义。

由于盐岩在能源地下储存方面的重要地位,近年来国内外学者对盐岩蠕变行为进行了较多研究。G. J. Wang 等^[5]基于不同应力水平下的盐岩蠕变试验结果,分析了盐岩蠕变全过程的损伤演化规律。R. M. Günther 等^[6]开展了不同温度下的盐岩蠕变试验,发现盐岩蠕变速率随温度升高而不断增大,并给出了一种估算稳态蠕变率的方法。L. A. Roberts 等^[7]试验研究了循环荷载对盐岩蠕变性的影响规律。杜超等^[8]通过对江苏金坛和湖北云应盐岩蠕变试验结果的分析,指出盐岩的蠕变变形是应变硬化和回复效应等内部变形机制共同作用的结果。陈锋等^[9]研究了云应盐矿 2 种盐岩在不同围压及偏应力水平下的蠕变特性,分析了盐岩稳态蠕变率与偏应力和围压的关系。H. Özgen 等^[10]基于盐岩蠕变试验结果,提出了一个可以描述盐岩初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变等三阶段的数学模型。S. N. Moghadama 等^[11]建立了一个黏弹塑性模型来描述盐岩在初始蠕变及稳态蠕变段的扩容、短期及长期破坏行为。H. W. Zhou 等^[12-14]通过将分数阶黏壶代替西原模型中的经典牛顿黏壶,建立了改进的西原模型,并用该模型模拟了盐岩的蠕变过程。易其康等^[15]以弹性模量的折减表征循环荷载下盐岩损伤劣化,考虑损伤因子的频率和时间效应,得到了统

一的损伤演化方程,并建立了考虑频率影响的变参数 Burgers 模型。梁卫国等^[16]对盐岩开展了溶浸-应力耦合作用下的蠕变试验,发现广义 Kelvin 模型能够较好地描述溶浸渗透加载作用下盐岩三维压缩蠕变力学特性。王军保等^[17]提出了一种非线性黏滞体,其黏滞系数是应力和时间的函数,通过将非线性黏滞体替换 Burgers 模型中的线性黏滞体,建立了改进的 Burgers 模型。张华宾等^[18]基于损伤力学理论,建立了可描述盐岩加速蠕变的损伤 Burgers 模型。

从已建立的盐岩蠕变本构模型来看,元件组合模型由于能够直观的反映岩石复杂的力学性质,且参数物理意义明确,因而得到了广泛应用。岩石完整的蠕变过程通常包含 3 个阶段,即衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变。传统的元件组合模型中,由于模型参数是固定不变的常量,因此无论将基本元件如何组合整个模型都只能反映岩石的衰减及稳态蠕变,而无法描述加速蠕变。为了描述岩石加速蠕变行为,目前常用的方法是假定岩石黏滞系数或弹性模量在加速蠕变阶段随时间不断减小。基于上述思路建立的蠕变模型尽管能够描述岩石蠕变全过程,但这种模型的缺点是要将岩石本来连续的蠕变过程人为划分为 3 个阶段,并用 3 个不同的函数来分别描述岩石不同阶段的蠕变行为(如用 Kelvin 体描述衰减蠕变阶段,用黏滞体描述稳态蠕变阶段,用随时间劣化的黏滞体描述加速蠕变阶段等),且岩石力学参数(黏滞系数或弹性模量)随时间的变化规律只是为了使理论结果更好的吻合试验数据而人为假定的,缺乏必要的依据^[19]。

本文对盐岩试件开展了不同轴向应力下的单轴压缩蠕变试验,在对试验结果进行分析的基础上,提出了一种基于反 S 函数的盐岩蠕变模型,并用盐岩蠕变试验结果对模型合理性进行了验证。分析表

明, 该模型无需人为分段, 以一个统一的函数即可描述盐岩单轴压缩蠕变全过程。

2 盐岩单轴压缩蠕变试验

2.1 试件加工

试验所用盐岩试样纯度较高, NaCl 含量大于 95%, 外观颜色呈白色及浅红色, 平均天然密度为 2.14 g/cm³。由于盐岩遇水后会溶解, 因此采用干式锯磨法将岩样加工成高度 100 mm、直径 50 mm(高径比 2:1)的圆柱形试件。同时, 为了减小试件端部不平对试验结果的影响, 对试件两端部进行仔细打磨, 试件端部平整度控制在 ±0.03mm 以内。试件加工完成后, 立即用保鲜膜包裹, 防止盐岩吸附空气中的水分而潮解。加工好的部分盐岩试件如图 1 所示。



图1 部分盐岩试件

Fig.1 Salt rock specimens

2.2 试验方法

本次试验的目的在于研究轴向应力对盐岩单轴压缩蠕变过程的影响规律, 根据该目的, 对 8 个试件进行了不同轴向应力下的单轴压缩蠕变试验, 加载方式采用单级加载(对单个试件只施加一级荷载)。各个试件所施加的轴向应力 σ 分别为: 6.5, 9.5, 12.5, 14, 17.5, 21, 24 和 26 MPa, 所施加轴向应力 σ 与盐岩单轴抗压强度 σ_s 的比值 (σ/σ_s) 分别为 0.21, 0.30, 0.40, 0.45, 0.56, 0.67, 0.77 和 0.83(盐岩平均单轴抗压强度 $\sigma_s = 31.28$ MPa)。

试验过程包括如下步骤: (1) 安装试件; (2) 以 0.5 MPa/s 的速度施加轴向应力至各试件设定的轴向应力值; (3) 保持轴向应力不变, 记录盐岩变形随时间的变化过程, 直至轴向应力持续作用时间达

到 120 h 左右或试件破坏。需要说明的是, 为了防止盐岩试件吸附空气中的水分而潮解, 试验过程中试件侧面始终用保鲜膜包裹。此外, 试验过程中实验室内温度保持在 25±1 °C。

2.3 试验结果及分析

图 2 给出了通过试验获得的 8 个盐岩试件在不同轴向应力下的单轴压缩蠕变曲线。从图 2 可以看出, 当轴向应力不超过 21 MPa($\sigma \leq 21$ MPa)时, 在试验持续时间内盐岩蠕变过程仅包括蠕变速率不断减小的衰减蠕变和蠕变速率近似保持不变的稳态蠕变 2 个阶段; 当轴向应力为 24 和 26 MPa 时, 试验时间内盐岩蠕变过程经历了完整的 3 个阶段, 即衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变, 盐岩最终发生了蠕变破坏。

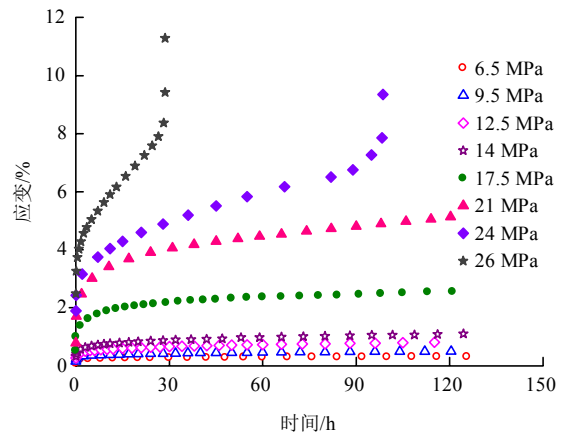


图2 盐岩蠕变曲线

Fig.2 Creep curves of salt rock

2.3.1 蠕变应变

当轴向应力为 24 和 26 MPa 时, 由于盐岩发生了蠕变破坏, 因而这 2 个试件的试验持续时间与其余 6 个试件有较大差别, 为了方便对比, 下面以轴向应力 $\sigma \leq 21$ MPa 的 6 个试件为例分析应力水平对盐岩蠕变变形的影响规律。

从图 2 可见, 当 $\sigma \leq 21$ MPa 时, 随着轴向应力增大, 盐岩在相同时间的蠕变应变量也不断增大, 以时间 $t = 115$ h 时的蠕变应变量为例进行定量分析。当轴向应力分别为 6.5, 9.5, 12.5, 14, 17.5 和 21 MPa 时, 经过 115 h 蠕变后, 这 6 个试件所产生的蠕变应变分别为 0.222 7%, 0.348 4%, 0.536 5%, 0.739 7%, 2.016 7%和 4.277 8%。图 3 给出了 $t = 115$ h 时这 6 个试件的蠕变应变量随轴向应力的变化规律。从图 3 可以直观地看出, 当轴向应力 $\sigma \leq 14$ MPa 时, 随应力增大, 盐岩蠕变应变量虽不断增大, 但增大的幅度相对较小, 且基本呈线性规律增大; 而当

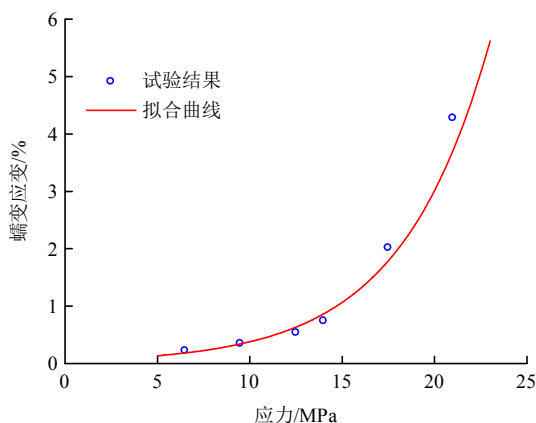


图 3 $t = 115$ h 时盐岩蠕变应变随轴向应力的变化规律

Fig.3 Variation in creep strains($t = 115$ h) of salt rock with respect to axial stress

轴向应力超过 14 MPa 以后，盐岩蠕变应变随应力增大呈非线性快速增大趋势。经过拟合分析， $t = 115$ h 时盐岩蠕变应变随轴向应力的变化规律可用指数函数很好的描述，计算式为

$$\varepsilon = 0.047 \exp(0.208\sigma) \quad (1)$$

式中： ε 为蠕变应变， σ 为轴向应力。相关系数为 0.990 0。图 3 中给出了拟合曲线和试验结果的对比情况，可以看出两者吻合良好。

2.3.2 稳态蠕变率

对图 2 中蠕变曲线进行处理，可得到当轴向应力分别为 6.5, 9.5, 12.5, 14, 17.5, 21, 24 和 26 MPa 时，盐岩稳态蠕变阶段的蠕变速率分别为 3×10^{-6} , 5×10^{-6} , 1.3×10^{-5} , 1.7×10^{-5} , 3.6×10^{-5} , 1.05×10^{-4} , 3.01×10^{-4} 和 $1.26 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ 。

在盐岩储存库长期运行过程中，考虑到大部分时间内围岩变形都处于稳态蠕变阶段，因此国内外学者对盐岩稳态蠕变率的影响因素进行较多研究。研究表明，偏应力对盐岩稳态蠕变率的影响可用幂函数、指数函数及双曲正弦函数等形式的函数来描述^[8, 20]。分别利用这 3 种函数对本文试验结果进行拟合分析，发现用下式表示的指数函数拟合曲线与试验结果的吻合度最高：

$$\dot{\varepsilon}_s = 1.27 \times 10^{-9} \exp(0.53\sigma) \quad (2)$$

式中： $\dot{\varepsilon}_s$ 为稳态蠕变率。式(2)的相关系数为 0.999 0。指数函数拟合曲线与试验结果的对比情况如图 4 所示。可以看出，盐岩稳态蠕变率随轴向应力的变化规律可以很好地用式(2)进行描述。

2.3.3 长期强度

(1) 等时应力 - 应变曲线拐点法

通常而言，岩石的强度会随外荷载作用时间延

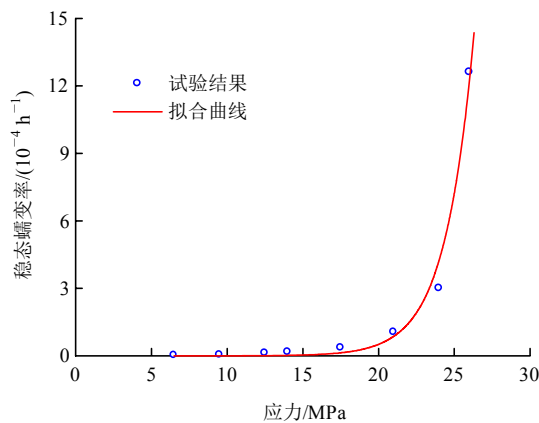


图 4 盐岩稳态蠕变率随轴向应力的变化规律

Fig.4 Variation in steady creep rate of salt rock with respect to axial stress

长而不断降低，荷载作用时间趋向于无穷大时的强度称之为长期强度。岩石长期强度的确定方法种类繁多，其中应用最为广泛的是等时应力 - 应变曲线拐点法^[14]。

图 5 给出了对图 2 中试验结果进行处理后得到的当时时间 $t = 5, 10, 20, 50, 80$ 和 115 h 时的盐岩等时应力 - 应变曲线簇。从图 5 可以看出：① 对于某一时间的应力 - 应变曲线来说，当轴向应力不超过 9.5 MPa 时，曲线近似为直线；当轴向应力超过 9.5 MPa 后，随应力增大，应力 - 应变曲线逐渐向应变轴偏转；当时间为 5, 10 和 20 h 且轴向应力从 21 MPa 增大到 24 MPa 时，3 条曲线均出现了向应力轴偏转的情况(图中菱形区域)，这主要是由于轴向应力为 24 MPa 的试件的离散性造成的。但从总体趋势来看，轴向应力越大，应力 - 应变曲线向应变轴偏转越明显。② 随着时间延长，盐岩等时应力 - 应变曲线也逐渐向应变轴偏转。以上分析表明，盐岩蠕变过程存在非线性特征，轴向应力越大，时间越长，非线性特征越明显。

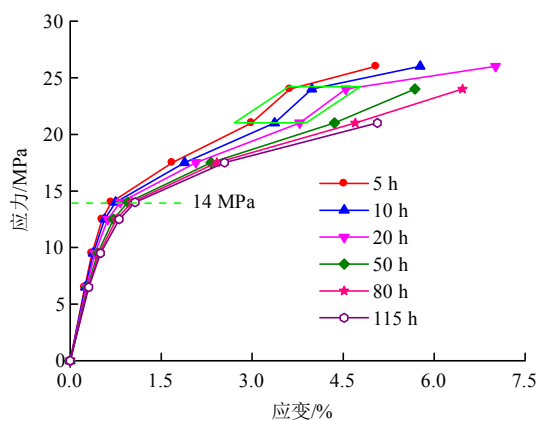


图 5 盐岩等时应力 - 应变曲线

Fig.5 Isochronous stress-strain curves of salt rock

利用等时曲线拐点法确定岩石长期强度，首先需要确定应力 - 应变曲线由直线向曲线过渡的拐点(偏转点)，该法认为拐点对应的应力即为岩石长期强度。从图 5 可见，当轴向应力超过 14 MPa 以后，盐岩等时应力 - 应变曲线向应变轴发生了明显偏转。因此，可将轴向应力为 14 MPa 的数据点视为盐岩等时应力 - 应变曲线由直线向曲线过渡的拐点，由此可确定盐岩长期强度为 14 MPa。

需要说明的是，利用等时曲线拐点法确定长期强度时首先需要根据蠕变试验结果做出岩石在不同蠕变时间下的应力 - 应变曲线，当荷载级数较多，试验数据量较大时，该方法在操作上稍显复杂^[21]。

(2) 稳态蠕变率拐点法

蒋昱州等^[22-23]提出了一种根据稳态蠕变率 - 应力水平关系曲线拐点确定岩石长期强度的方法，该方法建议分别用 2 个线性函数拟合应力水平较低和较高时岩石稳态蠕变率 - 应力水平实测数据，则 2 条直线的交点即为稳态蠕变率 - 应力水平关系曲线的拐点，该拐点对应的应力即为岩石长期强度。

按照该方法分别用 2 个线性函数对图 4 中轴向应力较低(6.5, 9.5 和 12.5 MPa)和轴向应力较高(21, 24 和 26 MPa)时盐岩稳态蠕变率和轴向应力的关系进行拟合分析，可得 2 个线性函数的表达式分别为

$$\dot{\epsilon}_s = 1.67 \times 10^{-6} \sigma - 8.83 \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_s = 2.18 \times 10^{-4} \sigma - 4.61 \times 10^{-3} \quad (4)$$

式(3)和(4)的相关系数分别为 0.994 9 和 0.887 2。

图 6 给出了利用稳态蠕变率拐点法确定盐岩长期强度的过程。根据式(3)和(4)可确定本文试验所用盐岩试件的长期强度(图 6 中两直线交点对应的轴向应力)为 21.27 MPa。从图 6 可以看出，当轴向应力为 21.27 MPa 时，盐岩等时应力 - 应变曲线已经向应变轴发生了明显的偏转，因而根据稳态蠕变率拐点法确定的盐岩长期强度明显偏大。因此，该方法对于本文盐岩是不适用的。

(3) 改进的稳态蠕变率拐点法

鉴于等时应力 - 应变曲线拐点法操作复杂，而稳态蠕变率拐点法适应性差的缺点，本文在稳态蠕变率拐点法的基础上提出了一种新的岩石长期强度确定方法，该方法包括以下步骤：① 对岩石试件开展一系列不同应力水平下的蠕变试验，通过处理试验数据获得岩石在不同应力水平下的稳态蠕变率；② 将不同应力水平下的稳态蠕变率取倒数，并以应力水平为自变量、稳态蠕变率的倒数为因变量在

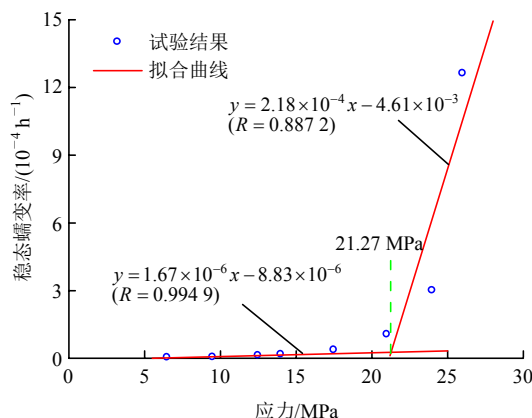


图 6 稳态蠕变率拐点法确定盐岩长期强度

Fig.6 Long-term strength of salt rock determined with the inflection point method for steady creep rate-stress curve

直角坐标系中绘制岩石稳态蠕变率的倒数和应力水平的对应关系；③ 分别用 2 个线性函数拟合应力水平较低和应力水平较高时岩石稳态蠕变率的倒数和应力水平的关系；④ 将 2 条拟合曲(直)线延长并相交，该交点对应的应力即为岩石长期强度。

按照上述方法，对图 4 中盐岩稳态蠕变率取倒数后将其与轴向应力的对应关系绘制于直角坐标系中，如图 7 所示。从图 7 可以看出，当轴向应力较低(6.5, 9.5 和 12.5 MPa)和较高(21, 24 和 26 MPa)时，盐岩稳态蠕变率的倒数均随轴向应力基本呈线性规律变化。分别用 2 个线性函数拟合轴向应力较低(6.5, 9.5 和 12.5 MPa)和较高(21, 24 和 26 MPa)时盐岩稳态蠕变率的倒数和轴向应力的关系，相关系数分别为 0.999 8 和 0.992 4。这 2 个线性函数的表达式分别为

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -42\ 735\sigma + 609\ 402 \quad (5)$$

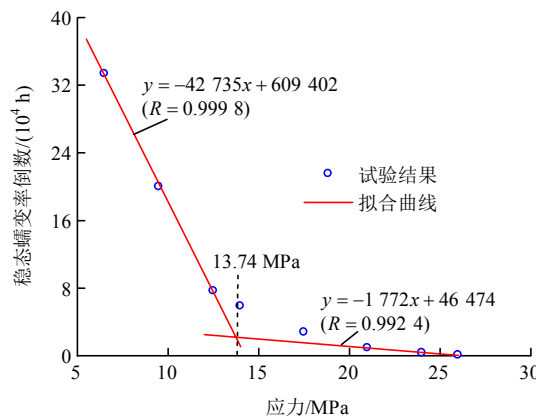


图 7 改进的稳态蠕变率拐点法确定盐岩长期强度

Fig.7 Long-term strength of salt rock determined with the improved inflection point method for steady creep rate-stress curve

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -1\,772\sigma + 46\,474 \quad (6)$$

根据式(5)和(6)可确定盐岩长期强度(图 7 中两直线交点对应的轴向应力)为 13.74 MPa。通过对比可以发现,改进的稳态蠕变率拐点法确定的盐岩长期强度值要明显低于稳态蠕变率拐点法,且该法确定的结果与等时应力-应变曲线拐点法确定的结果(14 MPa)非常接近。若以等时曲线拐点法确定的长期强度值(14 MPa)为基准,则改进稳态蠕变率拐点法确定结果的相对误差仅为 1.86%。可以看出,误差非常小,说明该方法是可行的。同时,从数据处理过程可以看出,该方法操作简单,方便实用,可为类似研究提供一定的参考和借鉴。

(4) 蠕变破坏时间

Kachanov 对材料蠕变损伤问题进行了深入研究,并给出了材料蠕变损伤率演化方程^[19]为

$$\dot{\omega} = A \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^\nu \quad (7)$$

式中: ω 为损伤变量; $\dot{\omega}$ 为损伤率; A, ν 均为材料常数。

对式(7)积分,可得蠕变损伤破坏时间 t_F 为

$$t_F = \frac{1}{A(\nu+1)\sigma^\nu} \quad (8)$$

从式(8)可以看出,要确定岩石在某一应力水平下的蠕变破坏时间,首先需要确定材料常数 A 和 ν 。从图 2 可知,当轴向应力为 24 和 26 MPa 时,盐岩在蠕变试验过程中发生了蠕变破坏,对应的破坏时间分别为 98.60 和 28.62 h。将这 2 组试验数据代入式(8),可解得 $A = 2.89 \times 10^{-25}$, $\nu = 15.45$ 。将 A 和 ν 的数值代入式(8),可得

$$t_F = \frac{1}{4.75 \times 10^{-24} \sigma^{15.45}} \quad (9)$$

利用式(9)可计算任意轴向应力下盐岩的蠕变破坏时间,计算结果如表 1 所示。从表 1 可以看出:
① 当轴向应力为 6.5 MPa 时,盐岩发生蠕变破坏的时间为 6 672 396 a。需要注意的是,这个时间值只存在理论上的意义,其意味着当应力较低时盐岩不会发生蠕变破坏。
② 随轴向应力增大,盐岩发生蠕变破坏的时间快速缩短;当轴向应力为 14 MPa(长期强度附近)时,破坏时间为 47.298 0 a。对于盐岩地下储存库工程而言,其设计使用年限一般为 50 a。因此,从工程角度而言,当盐岩承受的荷载不超过长期强度时,可认为其蠕变破坏时间为无穷大,即不会发生蠕变破坏,这与岩石长期强度的定义相符合。

表 1 不同轴向应力下盐岩蠕变破坏时间

Table 1 Creep failure times of salt rock under different axial stresses

轴向应力/MPa	破坏时间/a
6.5	6 672 396
9.5	18 938
12.5	272.551 8
14.0	47.298 0
17.5	1.503 9
21.0	0.089 9
24.0	0.011 4
26.0	0.003 3

3 盐岩蠕变模型

3.1 模型的建立

从整个岩石力学流变领域来看,元件组合模型由于参数物理意义明确,且能够直观反映岩石复杂的力学性质,因而得到了广泛应用。但传统的元件组合模型中,通常假定模型参数是固定不变的常量,因此无论将基本元件如何组合整个模型都只能反映岩石的衰减及稳态蠕变,而无法描述加速蠕变。为了描述加速蠕变行为,目前常用的方法是假定岩石黏滞系数或弹性模量在加速蠕变阶段随时间不断劣化减小。基于上述思路建立的蠕变模型存在以下缺点:
(1) 需要将岩石本来连续的蠕变过程人为划分为 3 个阶段,并用 3 个不同的函数来分别描述岩石不同阶段的蠕变行为(如用 Kelvin 体描述衰减蠕变阶段,用黏滞体描述稳态蠕变阶段,用随时间劣化的黏滞体描述加速蠕变阶段等)。因此,总的蠕变方程是 3 个函数的叠加,而无法用一个统一的函数来表示。
(2) 岩石力学参数(黏滞系数或弹性模量)随时间的变化规律只是为了使理论结果更好地吻合试验数据而人为假定的,缺乏必要的依据^[19]。

开展岩石蠕变试验时,如果应力水平较高,试验过程中通常能够观察到岩石蠕变的 3 个阶段,即衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变,蠕变曲线示意图见图 8 中曲线 1(该曲线不包含加载过程产生的与时间无关的瞬时变形)。如果将曲线 1 沿直线 $\epsilon = t$ 做一条对称曲线,可得图 8 中曲线 2。根据数学知识可知,曲线 1 和 2 的表达式互为反函数。因此,只要能够确定曲线 2 的表达式,通过求反函数即可确定曲线 1 的表达式,即岩石全过程蠕变方程。

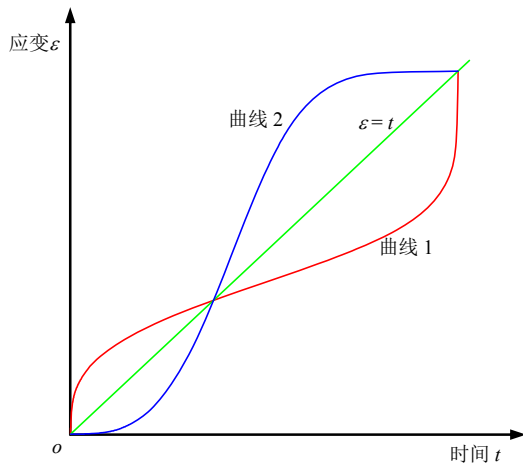


图 8 岩石全过程蠕变曲线的反函数示意图

Fig.8 Demonstration of the inverse function of whole process creep curve

图 8 表明,从形态上来说,曲线 2 属于 S 型生长曲线,因而其表达式可用 S 型函数来表示。S 型函数的种类众多,如 Logistic 函数、Gompertz 函数、Weibull 函数及 MMF(Morgan-Mercer-Flodin)函数等^[24-25]。其中,Weibull 函数的应用最为广泛。因此,本文拟从唯象学的角度采用对 Weibull 函数求反函数的方法建立盐岩单轴压缩全过程蠕变模型。

Weibull 函数的表达式^[25]为

$$y = a[1 - \exp(-bx^c)] \quad (10)$$

式中: x 为自变量; y 为因变量; a , b 和 c 为模型参数,且 a 代表因变量 y 的最大值, $c > 1$ 。

对式(10)求反函数可得

$$x = \left[-\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{y}{a} \right) \right]^{\frac{1}{c}} \quad (11)$$

蠕变曲线中,自变量为时间 t ,因变量为蠕变应变 ε ,分别用 t 和 ε 替换式(11)中的 y 和 x 可得

$$\varepsilon = \left[-\frac{1}{b} \ln \left(1 - \frac{t}{a} \right) \right]^{\frac{1}{c}} \quad (12)$$

由于式(11)中参数 a 代表了自变量 y 的最大值,则式(12)中参数 a 代表的是时间 t 的最大值,即岩石发生蠕变破坏的时间 t_F ;同时,为了表达方便,可令式(12)中 $1/b = m$, $1/c = n$,则式(12)可进一步写为

$$\varepsilon = \left[-m \ln \left(1 - \frac{t}{t_F} \right) \right]^n \quad (13)$$

式(13)即为本文建立的基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型的表达式。需要注意的是,由于式(10)中 $c > 1$,则式(13)中 $n < 1$ 。

下面对模型特性进行分析。

将式(13)对时间 t 求一阶导数,可得岩石蠕变速率的表达式为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{mn \left[-m \ln \left(1 - \frac{t}{t_F} \right) \right]^{n-1}}{t_F - t} \quad (14)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为蠕变速率。

从式(14)可以看出,在 $0 < t < t_F$ 范围内, $\dot{\varepsilon} > 0$,这说明式(13)单调递增。

将式(14)对时间 t 求一阶导数,可得岩石蠕变加速度的表达式为

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{m^2 n \left[-m \ln \left(1 - \frac{t}{t_F} \right) \right]^{n-2} \left[n - 1 - \ln \left(1 - \frac{t}{t_F} \right) \right]}{(t_F - t)^2} \quad (15)$$

式中: $\ddot{\varepsilon}$ 为蠕变加速度。

根据式(15),若令 $\ddot{\varepsilon} = 0$,则可解得

$$t = (1 - e^{-n})t_F \quad (16)$$

从式(15)可以看出,在 $0 < t < (1 - e^{-n})t_F$ 范围内, $\ddot{\varepsilon} < 0$,说明在该范围内蠕变速率 $\dot{\varepsilon}$ 逐渐减小;在 $(1 - e^{-n})t_F < t < t_F$ 范围内, $\ddot{\varepsilon} > 0$,说明在该范围内蠕变速率 $\dot{\varepsilon}$ 逐渐增大;当 $t = (1 - e^{-n})t_F$ 时,由于 $\ddot{\varepsilon} = 0$,此时蠕变速率 $\dot{\varepsilon}$ 达到了最小值。也就是说,在 $0 < t < t_F$ 范围内,式(14)描述的岩石蠕变速率的变化过程为,随着时间延长蠕变速率逐渐减小,当 $t = (1 - e^{-n})t_F$ 时,蠕变速率达到最小,之后又逐渐增大。因此, $(1 - e^{-n})t_F$ 代表了加速蠕变起始点的时间。由以上分析可知,式(14)表示的岩石蠕变速率曲线实际上无法描述严格意义上的稳态蠕变,但这并不意味着利用式(13)描述岩石蠕变全过程不可行。

图 9 给出了图 2 中轴向应力为 26 MPa 的盐岩试件在时间范围为 9~24.5 h 的蠕变曲线和对应的蠕变速率曲线(该试件经过 28.62 h 后发生破坏)。从蠕变应变的变化过程来看,随着时间延长,盐岩蠕变应变变量基本呈线性规律增大(线性相关系数达 0.999 0)。因此,可认为在该时间范围内盐岩处于稳态蠕变阶段。但从蠕变速率来看,该时间范围内盐岩的蠕变速率并非常数,而是随着时间延长不断减小,待减小到某一最小值后又逐渐增大,只是在该时间范围内蠕变速率变化幅度比较小。因此,所谓稳态蠕变并非是蠕变速率严格保持不变,只是变化幅度比较小而已。范庆忠等^[19]对泥岩开展的蠕变试验结果也有类似的规律。因而,利用式(13)描述岩石蠕变全过程是可行的。

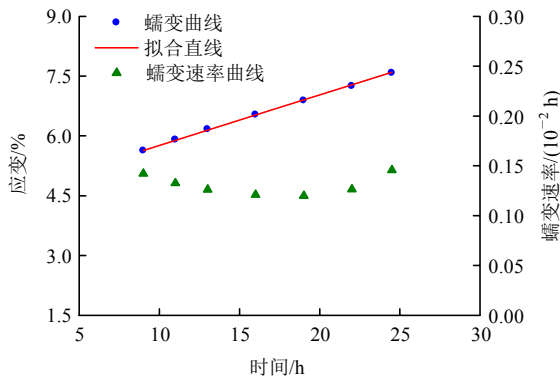


图 9 盐岩稳态蠕变曲线及蠕变速率曲线($\sigma=26\text{ MPa}$)
Fig.9 Steady creep curve and creep rate curve of salt rock ($\sigma=26\text{ MPa}$)

式(13)中岩石蠕变破坏时间 t_F 由式(8)确定, 则将式(8)代入式(13)可得

$$\varepsilon = \{-m \ln[1 - A(\nu + 1)\sigma^\nu t]\}^n \quad (17)$$

式(17)即为本文提出的基于反 S 函数的盐岩单轴压缩全过程蠕变模型的最终表达式。需要注意的是, 式(17)中不包含岩石加载过程产生的瞬时应变。由于本文研究的重点在于盐岩的时效变形特性, 而瞬时应变与时间无关, 因此本文在建立蠕变模型时暂不考虑该瞬时应变。

3.2 模型参数确定

由式(17)可以看出, 该模型中共有 A , ν , m 和 n 这 4 个参数需要确定。其中, A 和 ν 可根据两级荷载下岩石对应的蠕变破坏时间及式(8)确定, 下面主要介绍参数 m 和 n 的确定方法。

(1) 解析法

假设岩石蠕变过程中蠕变应变随时间的发展过程符合式(13), 则其蠕变速率和蠕变加速度随时间的变化分别符合式(14), (15); 假设岩石蠕变过程中蠕变速率达到最小时(加速蠕变起始点)对应的时间为 t_C , 此时岩石所产生的蠕变应变为 ε_C 。由于岩石蠕变速率达到最小值时其蠕变加速度为 0, 则结合式(15)和(16)可知:

$$t_C = (1 - e^{-n})t_F \quad (18)$$

根据式(18), 可得

$$n = 1 + \ln\left(1 - \frac{t_C}{t_F}\right) \quad (19)$$

由于岩石蠕变过程中蠕变应变随时间的发展过程符合式(13), 且当 $t = t_C$ 时, $\varepsilon = \varepsilon_C$, 根据式(13)则有

$$\varepsilon_C = \left[-m \ln\left(1 - \frac{t_C}{t_F}\right)\right]^n \quad (20)$$

由式(20)可得

$$m = -\frac{\varepsilon_C^{\frac{1}{n}}}{\ln\left(1 - \frac{t_C}{t_F}\right)} \quad (21)$$

因此, 在 t_C 和 ε_C 已知的情况下, 可根据式(19)和(21)确定参数 n 和 m 。

(2) 拟合法

利用式(19)和(21)计算参数 n 和 m 时, 首先需要根据试验结果确定岩石蠕变过程中蠕变速率达到最小值时的时间 t_C 及其对应的蠕变应变 ε_C 。 t_C 和 ε_C 实际为加速蠕变起始点对应的时间和蠕变应变, 因而该方法只适用于岩石出现加速蠕变的情况。

当应力水平相对较低时, 由于岩石发生加速蠕变需要的时间很长, 受试验条件限制, 室内蠕变试验往往还没有进入到加速蠕变阶段就已提前终止, 此时无法通过试验获得加速蠕变起始点对应的 t_C 和 ε_C , 也就无法利用上述方法确定参数 m 和 n 。

曲线拟合法是确定岩石蠕变参数常用的一种方法, 该方法充分利用已有的全部试验数据, 能够从整体上保证理论曲线和试验结果的误差达到最小, 且操作简便, 因而广受研究人员青睐。因此, 对于未出现加速蠕变的情况, 可利用相关数学优化分析软件, 采用曲线拟合法反演本文模型参数 m 和 n 。具体过程和方法如下:

① 以待反演的参数 m 和 n 作为设计变量 X , 即

$$X = \{m, n\} \quad (22)$$

② 取设计变量如式(22), 建立目标函数 Q , 即

$$Q = \sum_{i=1}^N [\omega_i(X, t_i) - \omega_i]^2 \quad (23)$$

式中: N 为试验数据组数, $\omega_i(X, t_i)$ 为 t 时刻计算变形值, ω_i 为 t 时刻试验实测变形值。

③ 设定目标函数的控制精度并进行参数迭代求解。若目标函数满足精度要求, 则停止迭代, 输出计算结果; 若不满足, 则继续迭代, 直到满足精度要求为止。

4 模型验证

为了说明本文建立的基于反 S 函数的岩石蠕变

模型的合理性和适用性, 利用图 2 中扣除加载过程产生的瞬时应变后的盐岩蠕变试验结果对其进行了验证。

式(17)中, 参数 A 和 ν 在节 2 中已根据轴向应力为 24 和 26 MPa 下的盐岩蠕变破坏时间确定为 $A = 2.89 \times 10^{-25}$, $\nu = 15.45$ 。对于未出现加速蠕变的情况(轴向应力分别为 6.5, 9.5, 12.5, 14, 17.5 和 21 MPa), 参数 m 和 n 采用曲线拟合法确定; 对于出现加速蠕变的情况(轴向应力为 24 和 26 MPa), 参数 m 和 n 可根据式(19)和(21)采用解析法确定, 但考虑到利用解析法确定参数时, 由于只利用了加速蠕变起始点的试验数据, 因而无法保证理论曲线和试验结果的整体误差达到最小, 这里为了提高拟合精度, 对于出现加速蠕变的情况也采用曲线拟合法确定参数 m 和 n 。

基于试验结果, 利用 1stopt 数学优化分析软件, 采用曲线拟合法, 按照节 3 介绍的步骤反演了盐岩在不同轴向应力下的蠕变参数, 如表 2 所示。

表 2 参数反演结果

Table 2 Inversion results of model parameters

轴向应力/MPa	参数			
	A	ν	m	n
6.5	2.89×10^{-25}	15.45	8 828	0.136
9.5			5 367	0.188
12.5			1 692	0.238
14.0			1 189	0.255
17.5			1 207	0.274
21.0			948	0.278
24.0			118	0.283
26.0			134	0.289

从表 2 可以看出, 不同轴向应力下参数 m 和 n 并非常数, 其取值随轴向应力增大而不断发生变化, 且从总体规律来说, 随轴向应力增大, 参数 m 逐渐减小, 而参数 n 逐渐增大。由于这两个参数均与轴向应力水平有关, 因此若能建立其随应力水平变化的定量关系表达式^[26], 则对于预测盐岩在任意轴向应力下的蠕变行为具有重要意义。

经过拟合分析, 参数 m 和 n 随轴向应力的变化过程可分别用指数函数和 Logistic 函数来描述, 计算式分别为

$$m(\sigma) = 37\,724 \exp(-0.221\sigma) \quad (24)$$

$$n(\sigma) = \frac{0.288}{1 + 7.071 \exp(-0.280\sigma)} \quad (25)$$

式(24)和(25)的相关系数分别为 0.985 9 和 0.998 5。图 10 给出了拟合曲线和不同轴向应力下参数反演结果的对比情况。可以看出, 拟合曲线能够较好的反映轴向应力对这 2 个参数的影响规律。

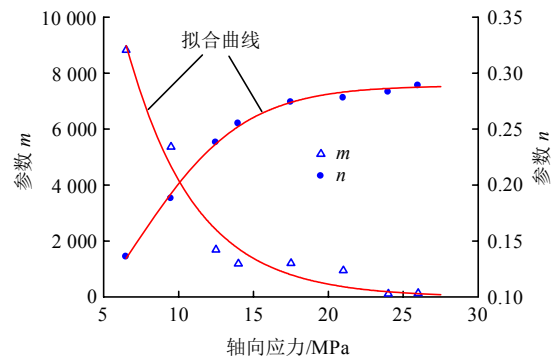
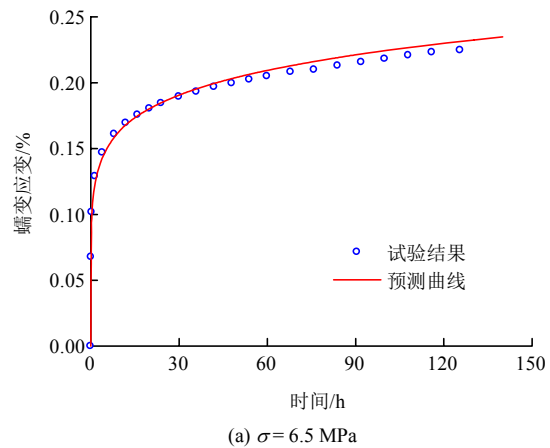


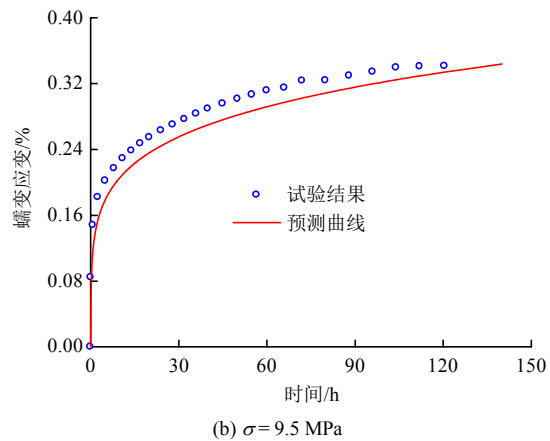
图 10 参数 m 和 n 随轴向应力的变化规律

Fig.10 Variation in the values of parameters m and n

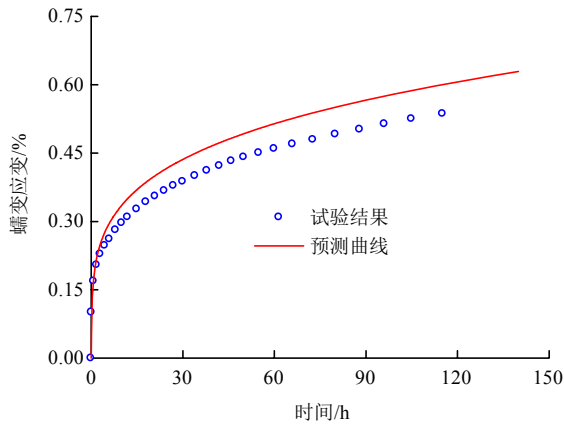
将 $A = 2.89 \times 10^{-25}$, $\nu = 15.45$ 以及式(24)和(25)代入式(17), 即可预测盐岩在不同轴向应力下的蠕变行为。图 11 给出了轴向应力分别为 6.5, 9.5, 12.5, 14, 17.5, 21, 24 和 26 MPa 时预测曲线和试验结果的对比情况。从图 11 可以看出, 本文提出的基于反 S 函数的蠕变模型不仅能够描述盐岩在低应力水平下的衰减和稳态蠕变, 还能反映高应力水平



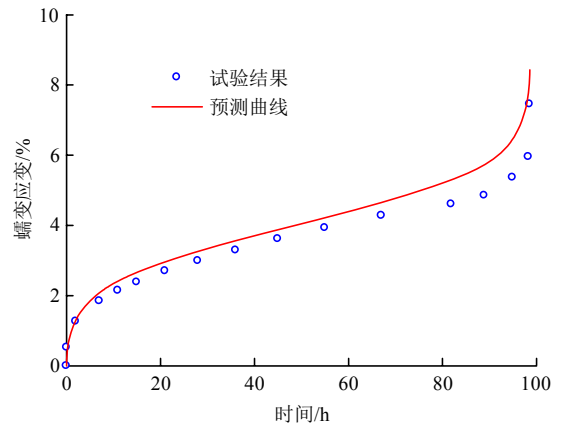
(a) $\sigma = 6.5$ MPa



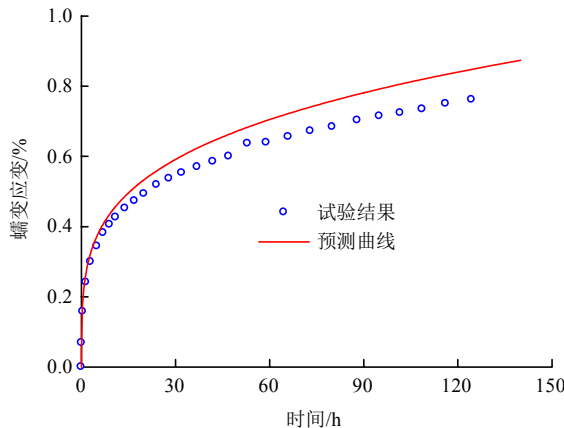
(b) $\sigma = 9.5$ MPa



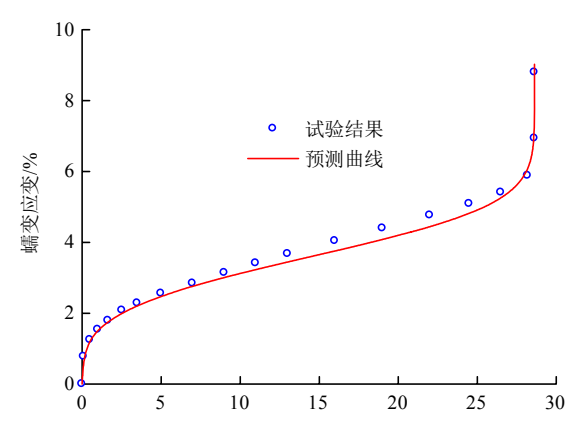
(c) $\sigma = 12.5$ MPa



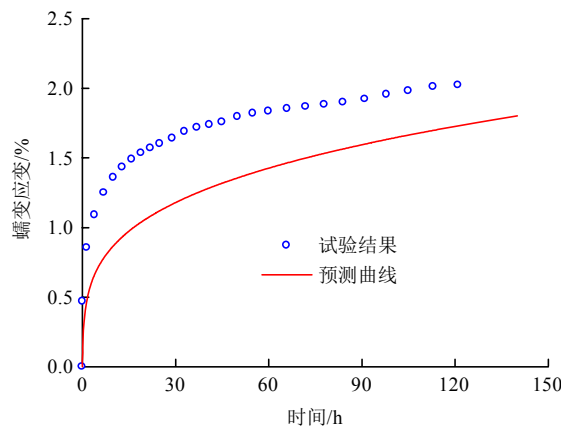
(g) $\sigma = 24$ MPa



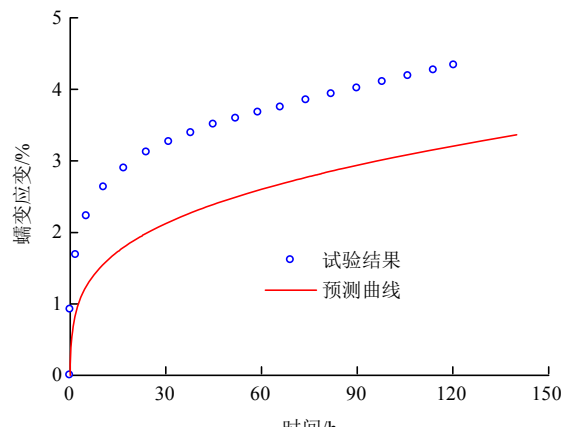
(d) $\sigma = 14$ MPa



(h) $\sigma = 26$ MPa



(e) $\sigma = 17.5$ MPa



(f) $\sigma = 21$ MPa

图 11 预测曲线和试验结果的对比

Fig.11 Comparison of prediction curves and test results

下盐岩单轴压缩蠕变破坏全过程，特别是能够反映加速蠕变。从预测曲线和试验结果的吻合程度来说，轴向应力 17.5 和 21 MPa 下误差相对较大，其余轴向应力下两者吻合良好，误差较小。但总体而言，该模型能够较好的反映不同轴向应力下盐岩蠕变应变随时间的变化趋势。此外，从式(17)可以看出，本文模型以一个统一的表达式即可描述盐岩单轴压缩蠕变全过程的 3 个阶段，从而克服了元件组合模型需要分段处理的缺点。同时，该模型表达式非常简单，方便应用。

5 讨论

5.1 改进稳态蠕变率拐点法的稳定性

众多试验结果表明，当应力水平较高时，岩石稳态蠕变率随应力水平增加呈非线性增大趋势。因此，稳态蠕变率拐点法中用线性函数拟合高应力水平下岩石稳态蠕变率和应力水平的关系时，所选用的试验数据点数量会对长期强度的确定结果产生较

大影响，以本文图4中盐岩稳态蠕变率试验结果为例进行说明。选用2个数据点(轴向应力为24和26 MPa)进行拟合分析时，所确定的高应力水平下盐岩稳态蠕变率和轴向应力的线性关系式为 $\dot{\epsilon}_s = 4.81 \times 10^{-4} \sigma - 1.12 \times 10^{-2}$ ，结合低应力水平下稳态蠕变率和轴向应力之间的线性关系表达式(式(3))，可确定盐岩长期强度为23.35 MPa。选用3个数据点(轴向应力为21, 24和26 MPa)进行拟合时，确定的长期强度为21.27 MPa，选用4个数据点(轴向应力为17.5, 21, 24和26 MPa)时，长期强度为18.83 MPa。由此可以看出，与等时曲线拐点法的结果(14 MPa)相比，该方法确定的结果明显偏大，且不稳定，易受人为因素(选用的试验数据点数量)的影响。

对于本文改进的稳态蠕变率拐点法，选用2个数据点(轴向应力为24和26 MPa)对高应力水平下盐岩稳态蠕变率的倒数和轴向应力的线性关系进行拟合分析时，所确定的长期强度为13.88 MPa；选用3个数据点(轴向应力为21, 24和26 MPa)时，确定的长期强度为13.74 MPa；选用4个数据点(轴向应力为17.5, 21, 24和26 MPa)时，长期强度为13.37 MPa。可以看出，本文方法确定的盐岩长期强度值与等时曲线拐点法的结果(14 MPa)非常接近。此外，选用的数据点数量虽然对该法的结果有一定影响，但影响非常小(选用2个数据点和4个数据点时确定的长期强度值仅相差0.51 MPa)。因此，该法确定的结果较为稳定，不易受人为因素的影响。

5.2 改进稳态蠕变率拐点法适用性的进一步验证

为了进一步说明改进稳态蠕变率拐点法的适用性，这里利用闫云明等^[27]泥岩和张玉等^[28]中碎屑岩的试验结果对其进行了验证。

根据闫云明等^[27]紫红色泥岩在围压2 MPa、轴向偏应力分别为4, 8, 12, 16, 20, 24和28 MPa下的稳态蠕变率试验结果，按照改进稳态蠕变率拐点法确定岩石长期强度的步骤，将该泥岩稳态蠕变率的倒数与轴向偏应力的对应关系绘制于直角坐标系中(见图12)，并分别用2个线性函数拟合低偏应力水平(4, 8和12 MPa)和高偏应力水平(20, 24和28 MPa)下泥岩稳态蠕变率倒数与轴向偏应力的关系。经拟合分析，这2个线性函数的表达式分别为

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -13\ 393\Delta\sigma + 304\ 762 \quad (26)$$

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -3\ 230\Delta\sigma + 91\ 049 \quad (27)$$

式中： $\Delta\sigma$ 为偏应力。式(26)和(27)的相关系数分别

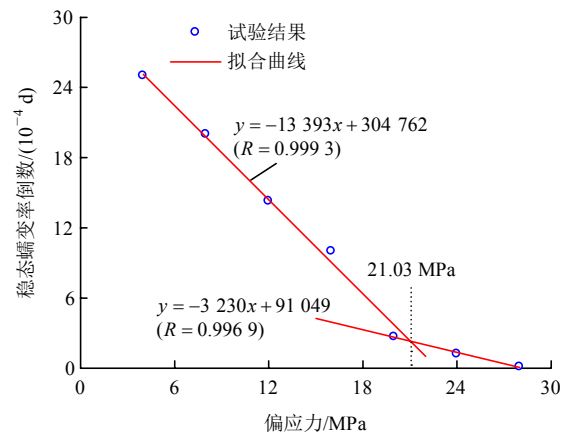


图12 改进的稳态蠕变率拐点法确定泥岩长期强度
Fig.12 Long-term strength of mudstone determined with the improved inflection point method for steady creep rate-stress curve

为0.999 3和0.996 9。根据式(26)和(27)可确定该泥岩在围压2 MPa下的长期强度为21.03 MPa。闫云明等^[27]根据等时应力-应变曲线拐点法给出了其长期强度为22.5 MPa。若以等时曲线拐点法确定的结果(22.5 MPa)为基准，则本文方法确定结果的误差为6.5%。

此外，图13中给出了张玉等^[28]碎屑岩在围压为2 MPa、轴向偏应力分别为1, 1.75, 2.5, 3.25和4 MPa下稳态蠕变率的倒数和轴向偏应力的对应关系。分别用2个线性函数拟合低偏应力水平(1和1.75 MPa)和高偏应力水平(3.25和4 MPa)下碎屑岩稳态蠕变率的倒数与轴向偏应力的关系，可得这2个线性函数的表达式分别为

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -426\Delta\sigma + 1\ 765 \quad (28)$$

$$\frac{1}{\dot{\epsilon}_s} = -311\Delta\sigma + 1\ 426 \quad (29)$$

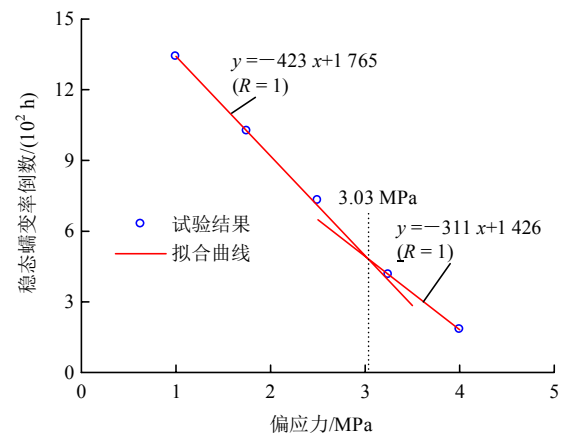


图13 改进的稳态蠕变率拐点法确定碎屑岩长期强度
Fig.13 Long-term strength of clastic rock determined with the improved inflection point method for steady creep rate-stress curve

根据式(28)和(29)可确定该碎屑岩在围压 2 MPa 下的长期强度为 3.03 MPa。张 玉等^[28]根据等时应力 - 应变曲线拐点法给出了其长期强度为 3.28 MPa。同样，若以等时曲线拐点法确定的结果(3.28 MPa)为基准，则本文方法确定结果的误差为 7.7%。

基于以上分析，并结合本文盐岩长期强度的确定结果可以看出，本文提出的改进稳态蠕变率拐点法确定的岩石长期强度值与等时曲线拐点法的确定结果非常接近，误差较小，说明该方法具有一定的适用性。同时，从该方法数据处理过程可以看出，该法操作简单，方便实用，可为类似研究提供一定的参考和借鉴。

5.3 蠕变模型参数 m 和 n 的敏感性分析

取 $\sigma = 24 \text{ MPa}$, $A = 2.89 \times 10^{-25}$, $\nu = 15.45$, $n = 0.2$, 图 14 给出了参数 m 取值变化对本文模型蠕变曲线的影响规律。

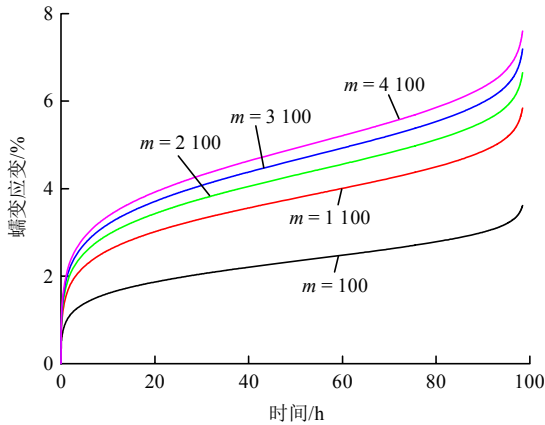


图 14 参数 m 对模型蠕变曲线的影响
Fig.14 Influence of parameter m on creep curves

图 14 表明， m 的变化对模型蠕变曲线的形状影响不大，但随着 m 增加，相同时刻的蠕变应变逐渐增大。此外，从图中还可看出，在相同 m 值增量情况下，相同时刻的蠕变应变增量逐渐减小，即按照由下到上(m 值由小到大)顺序，模型蠕变曲线由稀疏变得越来越密集。这说明当 m 值较小时，其取值变化对模型蠕变应变的影响较大；而当 m 值较大时，其取值变化对蠕变应变的影响较小。根据表 2 中参数反演结果，随轴向应力增加， m 值总体上呈减小的趋势。综合以上分析可知，轴向应力越大，盐岩蠕变应变预测结果对 m 的取值越敏感。

取 $\sigma = 24 \text{ MPa}$, $A = 2.89 \times 10^{-25}$, $\nu = 15.45$, $m = 100$, 图 15 给出了参数 n 取值变化对本文模型蠕变曲线的影响规律。

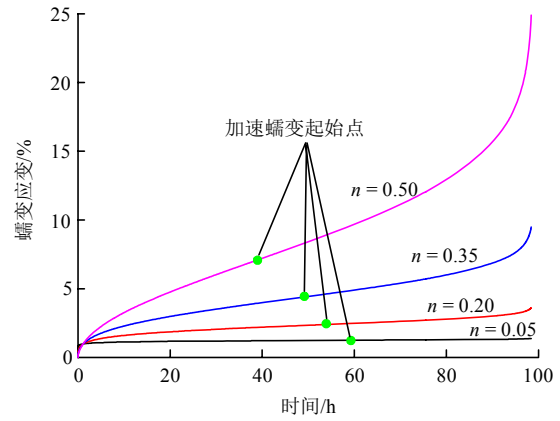


图 15 参数 n 对模型蠕变曲线的影响
Fig.15 Influence of parameter n on creep curves

从图 15 可以看出，参数 n 对模型蠕变曲线的形状有较大影响。随着 n 增大(相同 n 值增量)，相同时刻的蠕变应变呈非线性增大特征，即按照由下到上(n 值由小到大)顺序，模型蠕变曲线变得越来越稀疏；同时，相同时刻的蠕变速率也越来越大，加速蠕变特征越来越明显，加速蠕变起始点出现的越来越早。

式(19)表明，参数 n 与加速蠕变起始点对应的的时间 t_c 及岩石蠕变破坏时间 t_f 有关。不考虑温度等其他因素的影响，根据式(8)，蠕变破坏时间 t_f 仅与应力水平有关，因而在给定的应力水平下，蠕变破坏时间 t_f 是固定的，此时参数 n 仅与加速蠕变起始点对应的的时间 t_c 有关。因此，可以认为参数 n 的物理意义为代表了岩石加速蠕变出现的早晚。 n 越大， t_c 越小，加速蠕变出现的越早； n 越小， t_c 越大，加速蠕变出现的越晚。根据表 2 中参数反演结果，随轴向应力增加， n 值逐渐增大。综合以上分析可知，轴向应力越大，加速蠕变出现的越早，这与实际情况相符合。

5.4 蠕变模型的适用性

众多试验结果表明，岩石蠕变曲线的形态通常表现为 3 种类型，如图 16 所示。当岩石承受的应力水平较低时，其蠕变应变增大到一定程度后将达到稳定值，蠕变曲线仅出现衰减蠕变阶段(曲线①)，此情况称之为稳定蠕变^[29]；当应力水平较高时，岩石蠕变应变将随时间延长而持续增大，试验过程中通常能观察到其蠕变曲线包含衰减蠕变和稳态蠕变两阶段(曲线②)或衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三阶段(曲线③)，这 2 种情况统称为非稳定蠕变^[29]。对于曲线②的情况，随着时间延长，蠕变应变持续增大，岩石终将会出现加速蠕变并发生破坏，即曲线②终将会演变为曲线③的形式，只是由于受试验

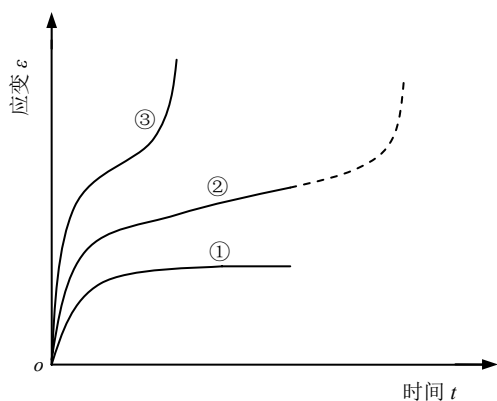


图 16 岩石蠕变曲线形态示意图

Fig.16 The shape of rock creep curve

条件限制, 试验时间不可能持续太久, 导致岩石蠕变尚未进入到加速阶段试验便已提前终止。因此, 曲线②的后半段以虚线来表示。

对于本文模型来说, 从式(13)或(17)可以看出, 只要有应力存在, 模型蠕变应变将会随时间延长持续增大。因此, 该模型不能描述稳定蠕变(曲线①), 只能反映非稳定蠕变(曲线②或③), 这是其不足之处。从性能上来说, 本文模型与元件组合模型中的 Burgers 模型较为相似, 但 Burgers 模型不能模拟岩石加速蠕变。对于盐岩来说, 由于其强度低、蠕变性强, 即便在非常小的偏应力作用下随着时间延长也会发生比较大的蠕变变形, 试验过程中很难观察到盐岩仅发生稳定蠕变的情况^[8]。因此, 本文模型适合于描述盐岩等软岩的蠕变行为, 而对硬岩在低应力水平下的稳定蠕变特性是不适用的。

6 结 论

(1) 不同轴向应力下的盐岩单轴压缩蠕变试验结果显示, 盐岩稳态蠕变率和相同时刻的蠕变应变均随轴向应力增大而非线性增大, 且两者随轴向应力的变化规律均可用指数函数描述。

(2) 提出了一种新的岩石长期强度确定方法——改进的稳态蠕变率拐点法, 该法确定的盐岩长期强度值与等时应力-应变曲线拐点法确定的结果非常接近, 可为类似研究提供一定的借鉴和参考。

(3) 鉴于高应力水平下岩石全过程蠕变曲线与反 S 形函数曲线的相似性, 从唯象学的角度出发, 通过对 S 形函数求反函数的方法, 提出了一种新的岩石全过程蠕变模型。

(4) 利用盐岩蠕变试验结果对模型合理性进行了验证, 结果表明, 该模型不仅能够描述盐岩在低应力水平下的衰减蠕变和稳态蠕变, 还能反映高应

力水平下盐岩单轴压缩蠕变破坏全过程, 特别是能够反映加速蠕变。

(5) 本文模型以一个统一的表达式即可描述盐岩单轴压缩蠕变全过程的 3 个阶段, 克服了元件组合模型需要分段处理的缺点。同时, 该模型表达式非常简单, 方便应用。

需要说明的是, 尽管用改进稳态蠕变率拐点法确定的本文盐岩及相关文献泥岩和碎屑岩的长期强度值均与等时应力-应变曲线拐点法的确定结果较为接近, 但由于岩石种类的多样性及其力学性质的复杂性, 要建立一种普适性的适用于所有岩石的长期强度确定方法是非常困难的。因此, 对于本文提出的改进稳态蠕变率拐点法的普适性, 需要用大量的试验数据做进一步验证, 还需进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 杨春和, 梁卫国, 魏东吼, 等. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(YANG Chunhe, LIANG Weigu, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energies storage in salt rock in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 409 - 4 417.(in Chinese))
- [2] 王军保, 刘新荣, 黄明, 等. 低频循环荷载下盐岩轴向蠕变的 Burgers 模型分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 933 - 942.(WANG Junbao, LIU Xinrong, HUANG Ming, et al. Analysis of axial creep properties of salt rock under low frequency cyclic loading using Burgers model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 933 - 942.(in Chinese))
- [3] 刘伟, 李银平, 杨春和, 等. 层状盐岩能源储库典型夹层渗透特性及其密闭性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 500 - 506.(LIU Wei, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Investigation on permeable characteristics and tightness evaluation of typical interlayers of energy storage caverns in bedded salt rock formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 500 - 506.(in Chinese))
- [4] 陈结, 范金洋, 姜德义, 等. 盐岩应变硬化自弱化现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1 612 - 1 618.(CHEN Jie, FAN Jinyang, JIANG Deyi, et al. Study on phenomenon of self-weakening of strain hardening of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1 612 - 1 618.(in Chinese))
- [5] WANG G J, ZHANG L, ZHANG Y W, et al. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behaviour of rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66(1): 181 - 187.
- [6] GÜNTHER R M, SALZER K, POPP T, et al. Steady-state creep of rock salt: improved approaches for lab determination and modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2 603 - 2 613.
- [7] ROBERTS L A, BUCHHOLZ S A, MELLEGARD K D. Cyclic loading effects on the creep and dilation of salt rock[J]. Rock

- Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2 581 - 2 590.
- [8] 杜超, 杨春和, 马洪岭, 等. 深部盐岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2 451 - 2 456.(DU Chao, YANG Chunhe, MA Hongling, et al. Study of creep characteristics of deep rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2 451 - 2 456.(in Chinese))
- [9] 陈锋, 李银平, 杨春和, 等. 云应盐矿盐岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 022 - 3 027.(CHEN Feng, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Experimental study on creep behaviors of rock salt in Yunying salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 022 - 3 027.(in Chinese))
- [10] ÖZŞEN H, ÖZKAN İ, ŞENSÖĞÜT C. Measurement and mathematical modelling of the creep behaviour of Tuzköy rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 66(1): 128 - 135.
- [11] MOGHADAMA S N, MIRZABOZORG H, NOORZAD A. Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 171 - 185.
- [12] ZHOU H W, WANG C P, HAN B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 116 - 121.
- [13] 丁靖洋, 周宏伟, 陈琼, 等. 盐岩流变损伤特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 769 - 776.(DING Jingyang, ZHOU Hongwei, CHEN Qiong, et al. Characters of rheological damage and constitutive model of salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 769 - 776.(in Chinese))
- [14] 吴斐, 谢和平, 刘建锋, 等. 分数阶黏弹塑性蠕变模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 964 - 970.(WU Fei, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study of fractional viscoelastic-plastic creep model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 964 - 970.(in Chinese))
- [15] 易其康, 马林建, 刘新宇, 等. 考虑频率影响的盐岩变参数蠕变损伤模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(增 1): 93 - 99.(YI Qikang, MA Linjian, LIU Xinyu, et al. A variable parameters-based creep damage model considering the effect of frequency for rock salt[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(Supp.1): 93 - 99.(in Chinese))
- [16] 梁卫国, 曹孟涛, 杨晓琴, 等. 溶浸-应力耦合作用下钙芒硝盐岩蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2 461 - 2 470.(LIANG Weiguo, CAO Mengtao, YANG Xiaojin, et al. Experimental study on creep of glauberite salt rock under coupled compression and dissolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2 461 - 2 470.(in Chinese))
- [17] 王军保, 刘新荣, 郭建强, 等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 445 - 451.(WANG Junbao, LIU Xinrong, GUO Jianqiang, et al. Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 445 - 451.(in Chinese))
- [18] 张华宾, 王芝银, 赵艳杰, 等. 盐岩全过程蠕变试验及模型参数辨识[J]. 石油学报, 2012, 9(5): 904 - 908.(ZHANG Huabin, WANG Zhiyin, ZHAO Yanjie, et al. The whole process experiment of salt rocks creep and identification of model parameters[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 9(5): 904 - 908.(in Chinese))
- [19] 范庆忠, 高延法, 崔希海, 等. 软岩非线性蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 505 - 509.(FAN Qingzhong, GAO Yanfa, CUI Xihai, et al. Study on nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 505 - 509.(in Chinese))
- [20] 王军保, 刘新荣, 张倩倩, 等. 芒硝蠕变特性及本构模型研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47(5): 78 - 85.(WANG Junbao, LIU Xinrong, ZHANG Qianqian, et al. Study on creep properties and constitutive model of thenardite[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(5): 78 - 85.(in Chinese))
- [21] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增 1): 183 - 191.(WU Dongsheng, MENG Lubo, LI Tianbin, et al. Study of triaxial rheological property and long-term strength of limestone after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp. 1): 183 - 191.(in Chinese))
- [22] 蒋昱州, 徐卫亚, 王瑞红. 角闪斜长片麻岩流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增 1): 339 - 345.(JIANG Yuzhou, XU Weiya, WANG Ruihong. Investigation on rheological mechanical properties of hornblende plagioclase gneiss[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supp.1): 339 - 345.(in Chinese))
- [23] 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 Liangquan, XU Weiya, WANG Wei, et al. Estimation of long-term strength for Xiangjiaba sandstone based on creep tests[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 127 - 136.(in Chinese))
- [24] 王军保, 刘新荣, 李鹏, 等. MMF 模型在采空区地表沉降预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 411 - 415.(WANG Junbao, LIU Xinrong, LI Peng, et al. Study on prediction of surface subsidence in mined-out region with the MMF model[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 411 - 415.(in Chinese))
- [25] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 可描述地表沉降动态过程的时间函数模型探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 925 - 931.(LIU Yucheng, CAO Shugang, LIU Yanbao. Discussion on some time functions for describing dynamic course of surface subsidence due to mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 925 - 931.(in Chinese))
- [26] 王军保, 刘新荣, 刘俊, 等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2 388 - 2 397.(WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Jun, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2 388 - 2 397.(in Chinese))
- [27] 闫云明, 李恒乐, 郭士礼. 紫红色泥岩三轴蠕变力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 88 - 92.(YAN Yunming, LI Hengle, GUO Shili. Experimental study on creep mechanical characteristics of aubergine mudstone under three-dimensional stress conditions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 88 - 92.(in Chinese))
- [28] 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): 1 291 - 1 300.(ZHANG Yu, JIN Peijie, XU Weiya, et al. Experimental study of triaxial creep behavior and long-term strength of clastic rock in dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1 291 - 1 300.(in Chinese))
- [29] 张治亮, 徐卫亚, 王如宾, 等. 含弱面砂岩非线性黏弹塑性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 1): 2 634 - 2 639.(ZHANG Zhiliang, XU Weiya, WANG Rubin, et al. Study of nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of sandstone with weak plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp.1): 2 634 - 2 639.(in Chinese))