

文章编号: 1000-4750(2017)10-0001-09

基于温度-应力耦合作用的岩石时效蠕变模型

周广磊, 徐 涛, 朱万成, 陈崇枫, 杨天鸿

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110819)

摘 要: 基于岩石变形与热力学基本理论, 建立了温度-应力耦合作用下脆性岩石时效蠕变损伤模型。根据此模型, 在有限元数值软件 COMSOL 的基础上进行二次开发, 考虑岩石介质的非均匀性, 并以最大拉应力准则以及摩尔库仑准则为岩石单元的破坏准则, 给出了温度-应力耦合作用下岩石时效蠕变损伤模型的数值求解方法。并结合室内实验结果验证了该模型方法的可行性和合理性。数值模拟结果表明该模型能准确描述不同温度条件下花岗岩典型蠕变全过程三个阶段, 即初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段。数值模拟也表明声发射累计数和岩石轴向应变的演化趋势整体上具有一致性, 且在初始蠕变阶段和加速蠕变阶段出现较多的声发射现象。

关键词: 岩石力学; 温度-应力耦合; 蠕变; 数值模拟; 热损伤

中图分类号: TU452 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0376

A TIME-DEPENDENT THERMO-MECHANICAL CREEP MODEL OF ROCK

ZHOU Guang-lei, XU Tao, ZHU Wan-cheng, CHEN Chong-feng, YANG Tian-hong

(Centre for Rock Instability & Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A coupled thermo-mechanical creep model of brittle rocks under constant temperatures is proposed based on the theory of rock deformation and thermodynamics. In the model, the heterogeneity of the rock is incorporated. Both the maximum tensile stress criterion and Mohr-Coulomb criterion are used to control tensile damage and shear damage in brittle rocks, and finite element formulation is implemented into COMSOL Multiphysics. A series of numerical simulations are performed and the numerical model is validated against experimental data. Numerical simulations show that the proposed model well captures the typical three creep stages, i.e., primary creep, secondary creep, and tertiary creep of rocks under different constant temperatures. Moreover, numerically simulated cumulative AE counts is consistent with the trend in axial strain of rock, and there are clusters of AE counts during the initial primary creep stage and the tertiary creep stage.

Key words: rock mechanics; coupled thermo-mechanical; creep; computer modeling; thermal damage

随着深部开采油井、气井、矿井, 高放废物的深埋处置以及高温岩体地热的开发等深部地下工程的开展, 这些工程由于复杂的赋存环境产生比浅部岩体更为强烈的力学响应。一方面由于埋深的增加, 岩体处于高地温和高地应力这样复杂的环境

中, 而且高放废物中的放射性核素还会不断释放热量, 导致周围岩体温度升高; 另一方面, 这些工程岩体长期处于高温高压的环境中, 尽管初始阶段呈稳定状态, 经过一段时间后会发生失稳破坏。因此研究岩石在温度应力耦合作用下蠕变力学行为的长

收稿日期: 2016-05-17; 修改日期: 2016-11-11

基金项目: 国家 973 计划项目(2014CB047100); 国家自然科学基金项目(41672301, 51474051); 中央高校基本科研业务费项目(N150102002); 中法蔡元培项目(36605ZB)

通讯作者: 徐 涛(1975—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩石破裂失稳研究工作(E-mail: xutao@mail.neu.edu.cn).

作者简介: 周广磊(1990—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事岩石损伤力学研究(E-mail: guangleizhou@qq.com);

朱万成(1974—), 男, 新疆人, 国家杰青、长江学者特聘教授, 博士, 主要从事岩石损伤断裂研究(E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn);

陈崇枫(1991—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事岩石力学研究(E-mail: 871330060@qq.com);

杨天鸿(1968—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩体渗流及边坡稳定性研究(E-mail: yangtianhong@mail.neu.edu.cn).

期演化规律已成为岩石力学领域研究的热点问题。

普通意义上的蠕变问题一般不探讨岩体的损伤,实际上岩体的损伤直接造成岩体结构的改变,对于其力学性质、热学特性都产生显著的影响。岩石由于受到长期的地质构造运动,存在随机分布、形态各异的微观孔隙和裂纹,岩石或岩体结构在荷载作用下的宏观断裂、破坏与失稳实际上是其内部微观孔隙和微观裂纹变化和发展为宏观裂纹的过程。因此,基于损伤力学理论的本构模型来表示岩石在温度和应力耦合作用下长期蠕变力学行为的演化过程更具合理性和科学性。目前温度应力耦合作用下的岩石蠕变本构模型已有较多的研究^[1-13]。朱元广等^[1]基于不同温度(20℃~300℃)下花岗岩单轴抗压蠕变试验,分析温度对花岗岩整个蠕变损伤过程的影响特征,认为温度对花岗岩的瞬时弹性模量产生热损伤并加速花岗岩的后续蠕变损伤过程;陈亮等^[2]基于不同温度及应力状态下的蠕变特征试验,结合三维声发射实时监测信息,开展北山花岗岩的蠕变变形特征以及加载条件对其蠕变破坏过程的影响研究;王春萍等^[3]以北山花岗岩为研究对象开展了不同温度条件下的蠕变特征试验研究,并结合岩石蠕变破坏过程中的损伤演化规律,提出了一种新的高温损伤流变元件;胡其志等^[4]根据统计力学原理,对盐岩度应力耦合作用下蠕变特性进行了研究,导出了考虑围压效应的损伤变量表达式,并综合前人的成果,推导出温度-应力耦合作用下的盐岩损伤方程。综合而言,温度应力耦合作用下的岩石蠕变机理研究多集中在物理试验方面,而且高温作用下的岩石蠕变试验复杂且耗时长,而对于温度应力耦合作用下的岩石蠕变本构模型研究以及数值模拟,尚未见报道。

基于此,本文以岩石损伤为主线,建立温度应力耦合作用下脆性岩石的时效蠕变损伤模型,以温度和位移为基本求解量,以最大拉应力法则以及摩尔库仑法则为判断准则,基于多物理场耦合分析有限元系统 COMSOL Multiphysics,通过 MATLAB 的编程实现此模型的有限元求解。然后开展温度应力耦合作用的岩石时效蠕变的数值模拟研究,本文研究对深部地下工程、高放废料处置及地热能开发等具有重要的意义。

1 岩石温度应力耦合蠕变模型

岩石温度-应力耦合蠕变模型包含变形场方程、

热传导方程、耦合方程及细观损伤演化方程。

1.1 岩石材料非均质性表征

岩石是一种天然非均质材料,其细观尺度上破坏可用统计的方法来描述。假设岩石细观基元的非均匀性服从 Weibull 统计分布^[14],即:

$$\varphi(u) = (\phi / u_0) \cdot (u / u_0)^{\phi-1} \cdot \exp[-(u / u_0)^\phi] \quad (1)$$

式中: u 为岩石介质基元体力学性质参数(强度、弹性模量等); u_0 为基元体力学性质的平均值; ϕ 为均匀性系数,反映了岩石介质的均质性; $\varphi(u)$ 是岩石基元体力学性质 u 的统计分布密度。式(1)反映了岩石细观力学特性参数的非均匀性分布情况。随着均匀性系数 ϕ 的增加,基元体的力学性质将集中于一个狭窄的范围之内,表明岩石介质的性质较均匀;而当均匀性系数 ϕ 值减小时,则基元体的力学性质分布范围变宽,表明岩石介质的性质趋于非均匀的。图 1 给出了不同均匀性系数时岩石介质细观基元单轴抗压强度 σ 的 Weibull 分布图。

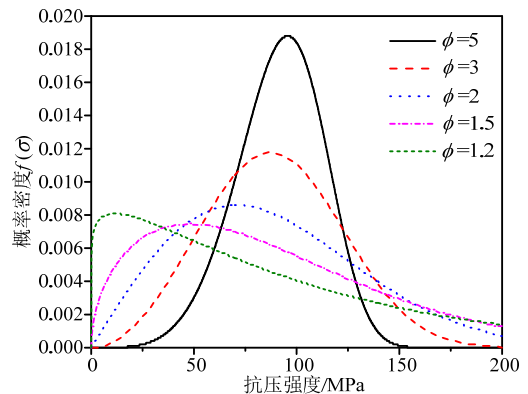


图 1 不同均匀性系数岩石介质细观基元强度的 Weibull 分布图

Fig.1 Distribution density function of parameters of elements with different homogeneity index

1.2 岩石变形场方程

岩石总的应变 ε 包括弹性应变 ε_e 、温度引起的应变 ε_T 以及蠕变应变 ε_c , 即:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_c + \varepsilon_T \quad (2)$$

弹性应变可由虎克定律得到。

热应变表示为:

$$\varepsilon_T = \alpha T \delta_{ij} \quad (3)$$

蠕变应变为:

$$\varepsilon_c = A \sigma^m t^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

考虑到蠕变问题具有不同于弹性问题应力与应变之间一一对应的路径依赖性,采用率律理论来描述蠕变问题。假定蠕变应变率可以用下式表示:

$$\dot{\varepsilon}_e = nA\sigma^m t^{n-1} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

对于多轴应力状态，蠕变应变率可表示为：

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} An S_{ij} \sigma_e^{m-1} t^{n-1} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(2\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{33}) & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \frac{1}{3}(2\sigma_{22} - \sigma_{11} - \sigma_{33}) & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \frac{1}{3}(2\sigma_{33} - \sigma_{22} - \sigma_{11}) \end{bmatrix};$$

σ_e 是有效应力张量，

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

当简化为三向主应力状态(即 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，且 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时)，有：

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}(\sigma_3 - \sigma_1) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}(\sigma_3 - \sigma_1) \end{bmatrix},$$

$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3$ ，此时，蠕变应变率可表示为：

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} An S_{ij} \sigma_e^{m-1} t^{n-1} = \frac{3}{2} An S_{ij} (\sigma_1 - \sigma_3)^{m-1} t^{n-1} \quad (8)$$

对于轴向蠕变应变率：

$$\dot{\varepsilon}_1^c = \frac{3}{2} An \frac{2}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) (\sigma_1 - \sigma_3)^{m-1} t^{n-1} = An (\sigma_1 - \sigma_3)^m t^{n-1} \quad (9)$$

现定义有效应力 σ_e ，有效应力为：

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (10)$$

同时定义有效蠕变应变率 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{-c}$ ，有效蠕变应变率

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{-c} = \sqrt{\frac{4I_2}{3}}, \text{ 其中 } I_2 = \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}^c \dot{\varepsilon}_{ij}^c.$$

应力平衡微分方程以有效应力^[4]表示为：

$$\sigma'_{ij,j} + f_i = 0 \quad (11)$$

式中： σ'_{ij} /MPa 为有效应力($i, j=1, 2, 3$)； f_j /MPa 为体力。

几何方程为：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (12)$$

式中： A 为材料相关系数； m 为应力指数； n 为时间硬化指数； E 为蠕变激活能； A 、 m 、 n 是依赖于温度和应力的系数，通过对实验数据拟合得到； t 是蠕变时间； S_{ij} 是偏应力张量，

式中： ε_{ij} 为应变分量($i, j=1, 2, 3$)； u 为变形位移。

对于各向同性煤岩材料，弹性变形本构方程可表示为：

$$\sigma'_{ij} = \kappa \delta_{ij} \varepsilon_v + 2G \varepsilon_{ij} - 3K \alpha T \delta_{ij} \quad (13)$$

式中： G 、 κ 为剪切模量和拉梅常数； ε_v 为体积应变， $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ ； K 为体积变形模量； α 是介质的线热膨胀系数，在测量技术上，介质的体热膨胀系数比较难测，因此此处使用体热膨胀系数 $\alpha = 3\beta$ 来估算，已足够精确。

综合式(11)、式(12)和式(13)，可得到以位移表示的温度应力耦合作用下的岩石变形场方程^[4]：

$$(\kappa + G) \cdot u_{j,ji} + Gu_{i,jj} + f_i - 3K \alpha T_{,i} = 0 \quad (14)$$

1.3 热传导方程

热传导的本构方程可有傅里叶定律表示为：

$$q_i = -k_{ij} \nabla T \quad (15)$$

式中： q_i /(m/d) 为通过固体介质传导的热量($i=1, 2, 3$)； k_{ij} /(W/(m·K)) 为导热系数张量($i, j=1, 2, 3$)。

岩体的热量平衡方程可表示为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q_0 + 3\alpha T_0 \dot{\varepsilon}_{kk} = -\nabla \cdot q_i \quad (16)$$

式中： c /(J/(kg·°C)) 为岩石的比热容； Q_0 为热量源汇项。

式(16)左边第三项为应变对温度分布产生的影响，其值非常小，此处忽略不计。联立上述方程，可得到温度应力耦合作用下岩石的热传导方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + Q_0 + 3\alpha T_0 \dot{\varepsilon}_{kk} \quad (17)$$

1.4 细观单元损伤耦合方程

当岩体细观单元的应力状态或者应变状态满足某个给定的损伤阈值时单元开始损伤，损伤单元

的弹性模量有下式表达^[15-20]:

$$E = (1 - D)E_0 \quad (18)$$

式中: D 损伤变量; E 和 E_0 分别是损伤单元和无损伤单元的弹性模量, 这些参数假定都是标量。

如图 2 所示, 在受力的初始阶段介质是弹性的, 根据广义胡克定律, 介质满足位移和温度的改变 T 表示的本构方程为:

$$(\kappa + G) \cdot u_{j,j} + Gu_{i,jj} + f_i - 3K\alpha T_i = 0 \quad (19)$$

$$\text{取 } f_1 \equiv -\sigma_3 - f_{t0} \text{ 和 } f_2 \equiv \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - f_{c0},$$

则当介质的应力状态满足了最大拉应力准则和莫尔库仑准则时, 其分别发生拉伸损伤和剪切损伤:

$$f_1 = 0 \text{ 或 } f_2 = 0 \quad (20)$$

其中, f_{t0} 和 f_{c0} 分别为单元的单轴抗拉和单轴抗压强度。 f_1 和 f_2 为两个表示应力状态的函数, 其数值等于 0 表示介质分别发生了拉伸和剪切损伤。这里需要说明的是, 在任何受力条件下, 拉伸损伤是优先判断的。当如式(20)满足时, 单元的损伤变量 D 按照如下关系给出:

$$D = \begin{cases} 0, & f_1 < 0, f_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_1} \right|^n, & f_1 = 0, df_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_3} \right|^n, & f_2 = 0, df_2 > 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: ε_{t0} 和 ε_{c0} 分别为当单元发生拉伸损伤和剪切损伤时对应的最大拉伸主应变和最大压缩主应变; n 为单元损伤演化的一个系数, 这里取 $n=2$; $df_1 > 0$ 和 $df_2 > 0$ 分别为两种损伤后的继续加载状态, 可引起损伤变量的增加。当 $df_1 < 0$ 和 $df_2 < 0$ 则表示卸载状态, 不产生新的损伤, 损伤变量保持上一个加载步(或时间步)的数值。

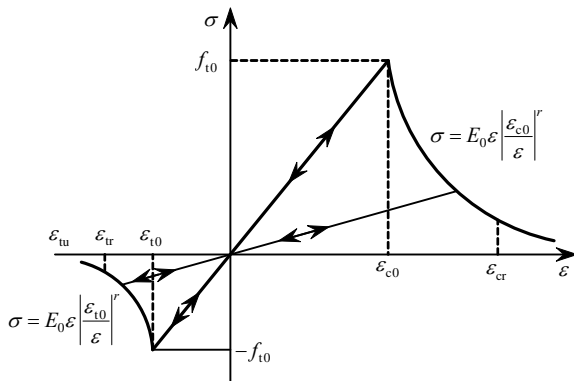


图 2 单轴拉伸和压缩下细观单元损伤本构模型

Fig.2 The uniaxial constitutive law of rock

2 蠕变模型数值解法

温度-应力耦合蠕变数学模型是一个高度非线性的抛物型偏微分方程组, 对具体的岩石工程问题而言, 即使是在简单的一维情况下, 要想获得这一方程组的解析解也是很困难的, 甚至是不可能的。因此, 必须借助于计算机来寻求这一数学模型的数值解法。其总体思路是: 首先将热传导方程与岩石变形场方程分别视为两大系统, 并考虑到岩石变形破裂过程中热传导系数的变化, 耦合进行求解。

针对本文提出的岩石蠕变模型, 基于 COMSOL Multiphysics 二次开发平台, 实现温度-应力耦合作用下蠕变模型的数值求解^[18-19]。具体步骤为:

1) 选择物理场, 选择固体力学模块以及热传导模块, 蠕变方程采用自定义 PDE, 写入蠕变方程。建立模型, 划分网格, 设定模型的边界条件。设定初始值以及计算误差。然后生成弹性模量以及抗压强度的初始分布。

2) 根据热传导方程计算温度分布 $T(x, y)$ 。

3) 调用生成的不均匀分布, 根据温度应力耦合作用下的岩石时效蠕变模型计算应力状态。

4) 根据每一步每一个单元计算得到的应力状态, 首先根据最大拉应力法则, 判断单元是否发生拉伸破坏, 如果破坏, 则对该单元的弹性模量以及抗压强度进行折减。如果不满足最大拉应力法则, 则根据摩尔库仑法则判断单元是否出现压缩破坏, 如果破坏, 则对该单元的弹性模量以及抗压强度进行折减。然后判断单元是否破坏, 如果已经破坏则移除已经破坏的单元并记录声发射数据。

5) 每一步计算完成, 判断模型是否已经破坏, 模型破坏则运行停止, 否则重复步骤 2)步~5)步。

在耦合模型中, 采用三角形等参单元。热传导方程离散后的代数方程组为:

$$[[K]\Delta t + [S]]\{P\}_{t_{j-1} + \Delta t} = [S]\{P\}_{t_{j-1}} \quad (22)$$

温度-应力耦合数学模型中岩石固体变形场方程离散后的方程可表示为:

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (23)$$

对温度场及岩石固体变形场的离散方程式(22)、式(23)进行耦合求解的程序计算框图如图 3 所示。

3 模型验证

为了验证温度和应力耦合作用下含损伤脆性岩石的蠕变模型, 结合已发表文献[11]中不同温度应力作用下花岗岩蠕变的实验数据来验证本模型。

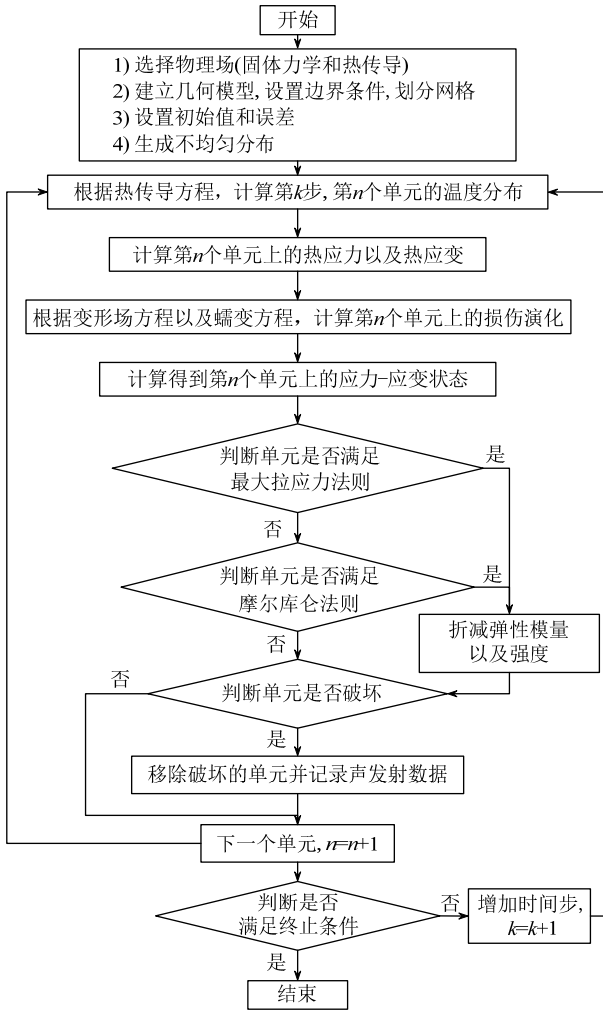


图3 温度-应力耦合蠕变模型计算流程图

Fig.3 Flow chart of coupled numerical model

3.1 数值模型

数值模型按文献[11]中实验所述尺寸建立, 模型的尺寸为 50 mm×100 mm, 划分 100×200=20000 个单元, 每个单元的力学参数根据式(1)所表示的韦伯分布随机生成。在进行温度-应力耦合作用下脆性岩石的蠕变数值模拟之前, 需要先通过标准的单轴压缩数值模拟来确定模拟岩样的细观力学参数及蠕变应力水平。模型的尺寸为 50 mm×100 mm 的矩形区域, 划分 100×200=20000 个单元。模型的边界条件为上端施加固定位移 $v=0.02$ mm/步, 下端垂直位移约束, 左右两边不施加边界条件。单轴压缩数值模型的力学参数见表 1。

图 4 所示为标准单轴压缩应力-应变曲线以及轴向应变与声发射数关系图。由应力-应变曲线可以得出该岩石试件的单轴抗压强度为 173.7 MPa, 温度应力耦合作用下的含损伤脆性岩石蠕变数值模拟所施加的恒应力为 150 MPa, 为单轴抗压强度的

86.3%, 应力比介于脆性岩石发生蠕变的范围内^[11-12]。从图 4 中声发射随应变的变化曲线可以看出, 在初始压密阶段, 试件就已经出现了声发射事件, 随着加载步数的增加, 声发射事件也不断增加。在岩石试件达到峰值强度之前, 声发射事件平稳增加, 声发射数的大量爆发发生在峰值强度之后。

表 1 单轴压缩模型参数

Table 1 Model parameters of uniaxial compression

参数	值
均匀性系数	5
平均单轴抗压强度/MPa	350
平均弹性模量/GPa	43
泊松比	0.3
压拉比	10
内摩擦角/(°)	30

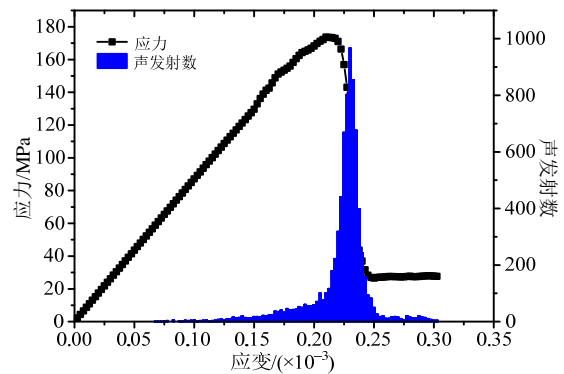


图 4 单轴压缩应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of uniaxial compression

在上述花岗岩细观力学参数确定的基础上, 进一步考虑不同温度应力作用下的模型验证, 数值模型尺寸不变, 如图 5 所示。

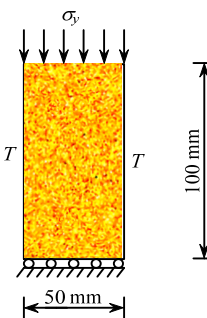


图 5 温度-应力耦合作用下数值计算模型

Fig.5 Numerical model of TM coupled rock creep test

数值模型力学参数引用文献[11]中的数据并基于宏观岩石的物理力学性质以及单元在细观尺度的物理力学性质与宏观岩石物理力学性质的统计分布关系, 利用反分析的方法得到, 所获得的数值模型基本物理及力学参数见表 2。数值模型的温度

场边界条件为：上下边界为温度绝缘边界，即上下边界热通量为零，左右边界施加温度边界条件。变形场的边界条件为：上边界施加固定应力，下边界为垂直位移约束。

表 2 数值模型参数

Table 2 Numerical model parameters

均匀性系数	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	泊松比	轴向应力/MPa	比热容/(J/(kg·K))
5	43	350	0.3	150	900
线热膨胀系数/(1/K)	导热系数/(W/(m·K))	A	n	m	Q
4.6×10^{-6}	3.48	0.68×10^{-12}	1.75	0.39	3000

3.2 模拟结果

数值模拟的恒应力作用下的蠕变曲线(轴向应变和时间的关系曲线)如图 6 所示。从图中可以看出模拟得到的蠕变曲线和实验曲线很好地相吻合，而且模拟得到的曲线准确地显示出了蠕变曲线的 3 个阶段：1) 初始蠕变阶段，此阶段蠕变速率随时间延长逐渐衰减；2) 稳定蠕变阶段，该阶段蠕变速率基本保持不变并持续较长时间；3) 加速蠕变阶段，这一阶段岩石蠕变速率不断增加并最终失稳破坏。数值模拟所反映的岩石蠕变总体特征和实验结果较好地相吻合。由此可见该模型可以用来研究温度应力耦合作用下含损伤脆性岩石的时效蠕变特性。

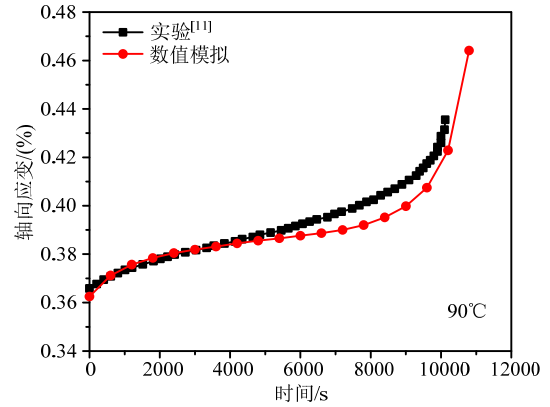
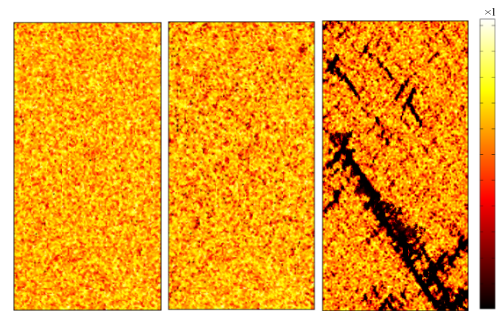
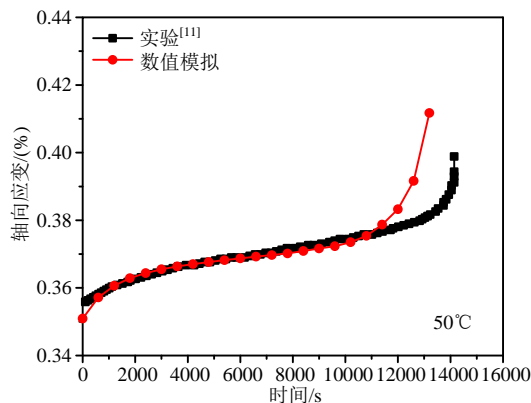
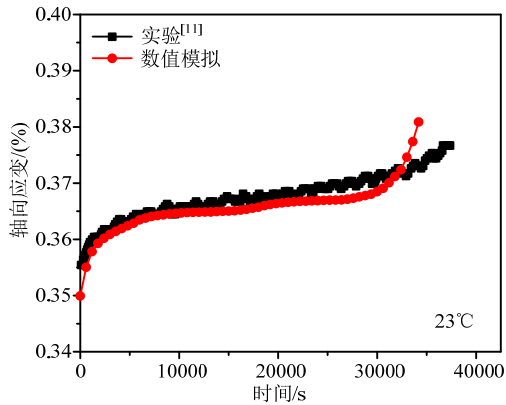


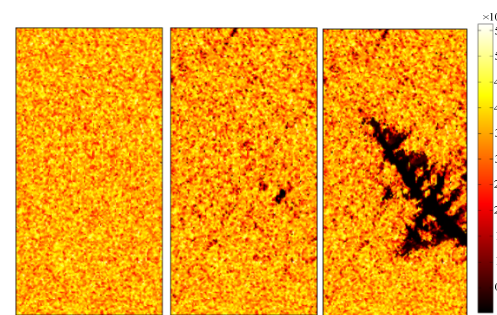
图 6 不同温度下数值模拟结果与实验曲线对比

Fig.6 Numerical and experimental creep curves

图 7 给出了不同温度条件下蠕变破坏过程图，图中不同颜色代表不同弹性模量的大小，颜色的深浅代表弹性模量的大小，颜色越浅，表示弹性模量值也越大。在温度场和应力场的作用下，由图 7 可以看出，在蠕变初期($t=0$ 时)，由于岩石的非均质性，岩石内部的强度呈现出随机分布的特征，试件内部存在大量的强度较小的单元；随着时间的推移($t=9000$ s 时)，试件内部的损伤进一步发展，出现一些离散分布的破坏单元，形成岩石试件的蠕变损伤局部化；在最后阶段，试件中产生的损伤局部化进一步累积发展，且这些破坏单元的弱化引起应力集中，局部化的损伤不断演化扩展贯通形成剪切破坏带，该阶段的岩石试件表现出加速蠕变破坏失稳的特征。由此可见，岩石内部的时效损伤累积是造成蠕变损伤破坏的根本原因。



23°C(时间 0 s, 9000 s 和 42000 s)



50°C(时间 0 s, 9000 s 和 15600 s)

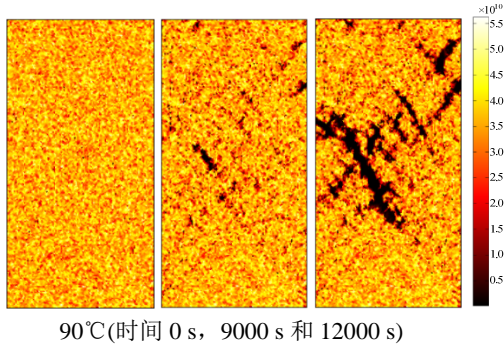


图 7 不同温度下模型破坏过程图

Fig.7 Failure process at various constant temperatures

4 温度作用下岩石蠕变数值模拟

4.1 不同温度及不同应力下岩石的蠕变

在上述模型验证的基础上,进一步考虑了 40°C 以及 75°C 作用下岩石蠕变数值模拟,模拟参数见表 2。模拟结果见图 8。从模拟结果(图 8)可以看出,在不同的温度条件下,蠕变变形呈现出典型的蠕变三个阶段。温度对岩石试件蠕变的影响主要表现在两个方面^[1]:一是温度的改变引起了瞬时蠕变的热损伤,提高了瞬时弹性模量的损伤程度,引起在蠕变初始阶段瞬时应变随温度升高而增加;二是温度的上升加速了岩石试件的蠕变损伤过程,如图 8 中,随着温度的上升岩石试件的稳定蠕变速率,加速蠕变速率皆增加,稳定蠕变速率缩短。

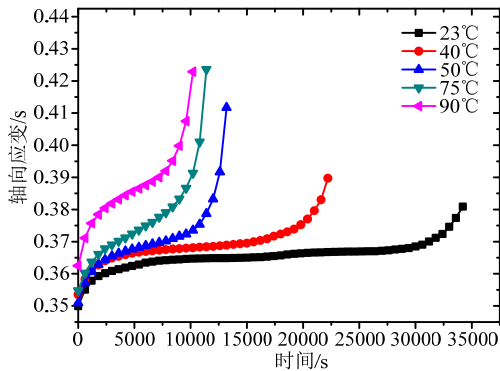


图 8 不同温度下的蠕变曲线

Fig.8 Creep curve under different temperature

图 9 为温度为 50°C,不同轴向应力作用下的岩石试件轴向应变随蠕变时间的变化规律,除轴向应力大小不同其余参数皆相同,具体参数见表 2,轴向应力分别为 140 MPa、146.2 MPa、150 MPa、155 MPa、160 MPa(即为试件强度的 80.5%、84.2%、86.4%、89.2%以及 92.1%等五种情况)。从图 9 可以看出,在不同的应力水平下岩石试件表现出不同的蠕变特性。在较低的应力水平下($\sigma_y=140$ MPa 时),

岩石试件的瞬时弹性应变较小,岩石试件蠕变曲线很快趋于平稳,在有限的时间内没有发生加速蠕变过程;当在较高的应力水平下($\sigma_y=150$ MPa 和 $\sigma_y=155$ MPa 时),岩石的稳定蠕变速率变大,且较低应力水平发生明显的加速蠕变阶段;当在高应力水平时($\sigma_y=160$ MPa 时),岩石试件初始蠕变阶段后很快进去加速蠕变阶段,稳定蠕变阶段很短。

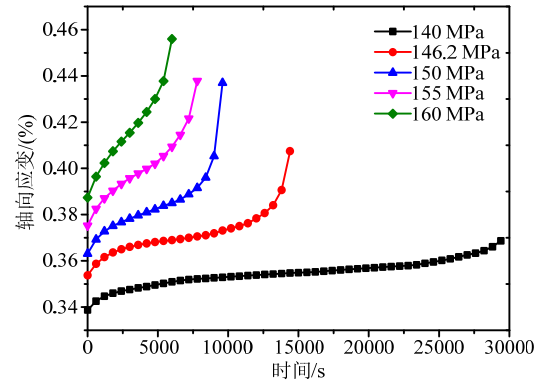


图 9 不同应力下的蠕变曲线

Fig.9 Creep curve under different stress

4.2 声发射以及蠕变参数分析

在进行不同温度下的蠕变数值模拟的过程中,同时统计了声发射数据。声发射数以及轴向应变与时间的关系见图 10。从图中可以看出声发射主要发生在初始蠕变阶段以及加速蠕变阶段,稳定蠕变阶段出现较少且保持较稳定数的声发射现象。图 11 为声发射累计数以及声发射数与时间的关系。图 11 反映出声发射累计数与时间的关系曲线和轴向应变与时间的蠕变曲线类似的呈现出蠕变三阶段(初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段)。

从图 10 和图 11 岩石蠕变全过程中的声发射事件随时间的演化曲线中可以看出,岩石试件的蠕变行为和岩石内部的损伤演化过程密切相关^[20]。一个声发射事件代表一个单元的损伤破坏。从图 10 可以看出,在初始蠕变阶段,岩石试件内部存在许多强度较低的单元,在恒定外载荷作用的初始蠕变阶段,这些低强度的单元在瞬时压缩的作用下大量破坏,有较强的弹性能释放,随着时间的增加,低强度的单元逐渐减少,此时的岩石开始趋于硬化阶段。随之岩石试件进入稳定蠕变阶段,该阶段岩石试件的内部损伤保持稳定的速率,逐渐累积。当试件内部的损伤累积到一定程度,岩石试件开始出现宏观破坏,岩石试件进入加速蠕变阶段,大量的单元损伤破坏,最终岩石试件失稳破裂。

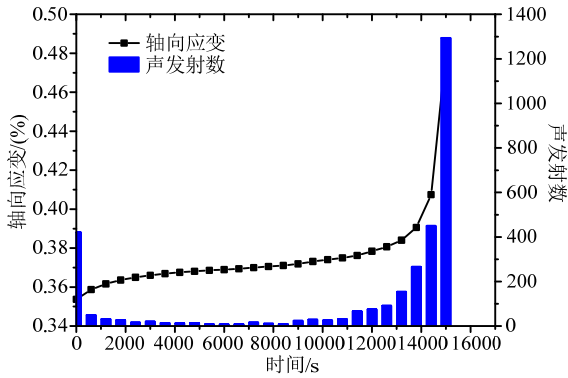


图 10 50°C下轴向应变及声发射数与时间关系曲线
Fig.10 Axial strain and AE counts curves at 50°C

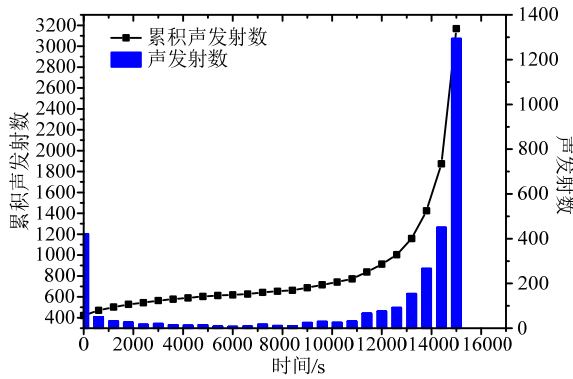


图 11 50°C下累积声发射数及声发射数与时间关系曲线
Fig.11 Cumulative AE counts and AE counts as functions of time at 50°C

图 12 进一步给出了不同温度与岩石蠕变破坏时间的关系，其中方形点为数值模拟结果，实线为对数值模拟结果拟合的曲线。从图中可以看出，岩石的蠕变破坏时间与温度存在着明显的负指数关系，这说明岩石的蠕变破坏时间随着温度的升高，以负指数函数的形式显著减小。图 12 所示数值模拟结果和文献[1]的实验结果是吻合的。

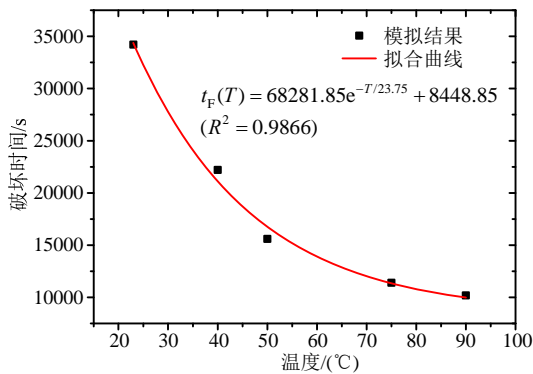


图 12 不同温度下破坏时间与温度的关系曲线
Fig.12 Variation in time-to-failure with temperature under different temperature

图 13 给出了不同温度与岩石稳定蠕变速率的

关系，由图可见在一定的温度范围内岩石的稳定蠕变速率和温度呈近似的线性关系。由图 12 和图 13 不难发现，岩石试件所处的温度越高，岩石试件的蠕变损伤和变形速率就会越快，岩石试件的稳定蠕变时间越短，越容易进入加速蠕变阶段而造成试件的失稳破坏。

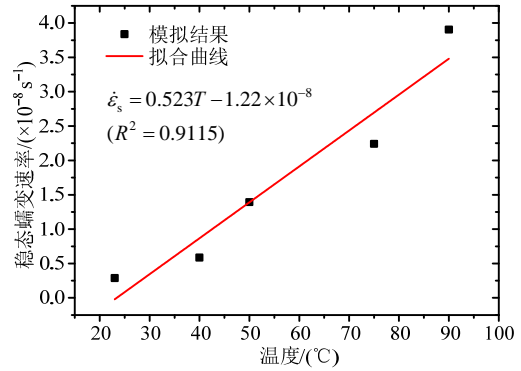


图 13 不同温度下稳态蠕变速率与温度的关系曲线
Fig.13 Variation in steady strain rate with temperature under different temperature

综合以上数值模拟结果可以看出，本文模型较好地反映了岩石典型的蠕变三阶段特征，并和实验结果较好地相吻合，验证了该模型以及该数值模拟的有效性。通过岩石试件的破坏过程图以及声发射数据与蠕变曲线的对比图，揭示了岩石的蠕变是其内部细观单元时效损伤演化的结果，赋予了该数值模拟更清晰的物理意义。通过不同温度以及应力作用下的岩石蠕变数值模拟，更深刻地展示了温度和应力对岩石试件蠕变过程的影响，为进一步研究深部采矿、高放废料的处置等复杂环境下的工程问题的预测预报提供了一种可行的途径和方法。

5 结论

本文基于不同温度作用下岩石抗压蠕变数值模拟的研究结果，分析了温度对岩石蠕变损伤特性的影响，建立了反映温度效应的岩石蠕变损伤本构模型。得到以下几点结论：

(1) 运用热传导方程、岩体的变形方程(包括蠕变方程)、耦合方程以及细观损伤演化方程，建立了含损伤岩石温度-应力耦合作用下的岩石时效蠕变模型。在有限元数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 的基础上，运用 MATLAB 编程二次开发，考虑岩石的非均质特征，给出了温度-应力耦合作用下岩石时效蠕变模型的数值求解方法。

(2) 运用该模型进行数值模拟，并和已发表文

献的实验结果对比验证了模型的有效性及其合理性。且模拟结果显示该模拟能较好地描述不同温度条件下岩石典型蠕变全过程三个阶段,包括初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段。模型结果和试验结果吻合较好,说明本文建立的蠕变损伤模型能够合理准确地反映不同温度下花岗岩的蠕变特征。

(3) 不同温度应力作用下岩石试件蠕变损伤失稳破坏过程的模拟表明,温度对岩石的蠕变损伤主要表现为两个方面:一是温度的改变引起了瞬时蠕变的热损伤;二是温度的上升加速了花岗岩的蠕变过程。温度越高岩石蠕变损伤越严重、蠕变变形速率就会越快,岩石试件的稳定蠕变时间越短,越容易进入加速蠕变阶段并发生失稳破坏。温度应力作用下岩石蠕变失稳的破坏是由岩石试样内部单元的蠕变损伤累积所造成。

参考文献:

- [1] 朱元广, 刘泉声, 康永水, 等. 考虑温度效应的花岗岩蠕变损伤本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1882—1888.
Zhu Yuanguang, Liu Quansheng, Kang Yongshui, et al. Study of creep damage constitutive relation of granite considering thermal effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1882—1888. (in Chinese)
- [2] 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 不同温度及应力状态下北山花岗岩蠕变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1228—1235.
Chen Liang, Liu Jianfeng, Wang Chunping, et al. Creeping behavior of Beishan granite under different temperatures and stress conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1228—1235. (in Chinese)
- [3] 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, 2506.
Wang Chunping, Chen Liang, Liang Jiawei, et al. Creep constitutive model for full creep process of granite considering thermal effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2493—2500, 2506. (in Chinese)
- [4] 胡其志, 冯夏庭, 周辉. 考虑温度损伤的盐岩蠕变本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2245—2248.
Hu Qizhi, Feng Xiating, Zhou Hui. Study of creep model of rock salt with thermal damage considered [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2245—2248. (in Chinese)
- [5] Zhang S, Nakano H, Xiong Y, et al. Temperature-controlled triaxial compression/creep test device for thermodynamic properties of soft sedimentary rock and corresponding theoretical prediction [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 255—261.
- [6] Ye G, Nishimura T, Zhang F. Experimental study on shear and creep behaviour of green tuff at high temperatures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 79: 19—28.
- [7] 高小平, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性温度效应的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2054—2059.
Gao Xiaoping, Yang Chunhe, Wu Wen, et al. Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2054—2059. (in Chinese)
- [8] 邵保平, 赵阳升, 赵金昌, 等. 层状盐岩温度应力耦合作用蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 90—96.
Xi Baoping, Zhao Yangsheng, Zhao Jinchang, et al. Study on coupled thermos-mechanical creep properties of bedded rock salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 90—96. (in Chinese)
- [9] 李剑光, 王永岩. 软岩蠕变的温度效应及实验分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 1): 81—85.
Li Jianguang, Wang Yongyan. Experimental analysis of temperature effect in creep of soft rock [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Suppl 1): 81—85. (in Chinese)
- [10] 张宁, 赵阳升, 万志军, 等. 高温三维应力下花岗岩三维蠕变的模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 875—881.
Zhang Ning, Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, et al. Model study of three-dimensional granite creep properties under high temperature [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 875—881. (in Chinese)
- [11] Chen L, Wang C P, Liu J F, et al. A damage-mechanism-based creep model considering temperature effect in granite [J]. Mechanics Research Communications, 2014, 56: 76—82.
- [12] Heap M J, Baud P, Meredith P G. Influence of temperature on brittle creep in sandstones [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19): 1—6.
- [13] Heap M J, Baud P, Meredith P G, et al. Time-dependent brittle creep in darley dale sandstone [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114(B7): 1—22.
- [14] Weibull, W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293—297.

(参考文献[15]—[20]转第 25 页)

雪粒总数、平均跃移层高度、平均摩擦速度和平均质量浓度的变化幅度在-40%~-10%之间。风速越高,计算域中雪粒总数的减少幅度越大。

(2) 考虑摩擦速度修正后,立方体附近马蹄形区域内的颗粒质量浓度增大,摩擦速度随之减小。

(3) 考虑摩擦速度修正后,低风速时雪层表面的侵蚀沉积现象不明显;高风速时计算域中的侵蚀或沉积的区域分布变化不大,但风速越高侵蚀或沉积的质量通量也越大。

参考文献:

- [1] Sugiura K, Maeno N. Wind-tunnel measurements of restitution coefficients and ejection number of snow particles in drifting snow: determination of splash functions [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 95(1): 123-143.
- [2] Huang N, Sang J, Han K. A numerical simulation of the effects of snow particle shapes on blowing snow development [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D22): 10.1029/2011JD016657.
- [3] Lü X H, Huang N, Ding T. Wind tunnel experiments on natural snow drift [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(4): 927-938.
- [4] Kok J F, Parteli E J, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust.[J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society*, 2012, 75(10): 1660-1669.
- [5] Zwaafink C D Groot, Diebold M, Horender S, et al. Modelling small-scale drifting snow with a Lagrangian stochastic model based on Large-Eddy simulations [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2014, 153(1): 117-139.

- [6] Huang N, Wang Z. A 3-D simulation of drifting snow in the turbulent boundary layer [J]. *Cryosphere Discussions*, 2015, 9(1): 301-331.
- [7] 周晖毅,刘长卿,顾明,谭敏海.拉格朗日方法在风雪运动模拟中的应用[J].*工程力学*, 2015, 32(1): 36-42. Zhou Xuanyi, Liu Changqing, Gu Ming, Tan Minhai. Application of Lagrangian method to snowdrift model [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(1): 36-42. (in Chinese)
- [8] 周晖毅,谭敏海,晏克勤,顾明,胡学富.风致积雪重分布的拉格朗日方法与现场实测研究[J].*工程力学*, 2017, 34(2): 21-27. Zhou Xuanyi, Tan Minhai, Yan Keqin, Gu Ming, Hu Xuefu. Lagrangian method modeling and field measurement on snowdrift [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(2): 21-27. (in Chinese)
- [9] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes [M]. London: Methuen, 1941.
- [10] Naaïm M, Naaïmbouvet F, Martinez H. Numerical simulation of drifting snow: erosion and deposition models [J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 26: 191-196.
- [11] Ungar J E, Haff P K. Steady state saltation in air [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289-299.
- [12] Anderson R S, Hallet B. Sediment transport by wind: Toward a general mode [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1986, 97(5): 523.
- [13] Pomeroy J W, Gray D M. Saltation of snow [J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1583-1594.
- [14] Nishimura K, Hunt J C R. Saltation and incipient suspension above a flat particle bed below a turbulent boundary layer [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 417: 77-102.

(上接第9页)

- [15] 傅强,谢友均,龙广成,等.混凝土三轴蠕变统计损伤模型研究[J].*工程力学*, 2013, 30(10): 205-210, 218. Fu Qiang, Xie Youjun, Long Guangcheng, et al. Study on statistical damage model of triaxial creep of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(10): 205-210, 218. (in Chinese)
- [16] 曾国伟,杨新华,白凡,尹安毅.沥青砂粘弹塑蠕变损伤本构模型实验研究[J].*工程力学*, 2013, 30(4): 249-253. Zeng Guowei, Yang Xinhua, Bai Fan, Yin Anyi. Experimental researches on a visco-elastoplastic creep damage constitutive model of asphalt mastic [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 249-253. (in Chinese)
- [17] 王影冲,王鼎,郝圣旺.混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临界幂律行为[J].*工程力学*, 2016, 33(增刊): 49-55.

- Wang Yingchong, Wang Ding, Hao Shengwang. Creep-stress relaxation coupling failure in concrete and its critical power-law behavior [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(Suppl): 49-55. (in Chinese)
- [18] Lu Y, Elsworth D, Wang L. A dual-scale approach to model time-dependent deformation, creep and fracturing of brittle rocks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 60: 61-76.
- [19] Brantut N, Heap M J, Meredith P G, et al. Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 52(1): 17-43.
- [20] Xu T, Tang C, Zhao J, Li L, Heap M J. Modelling the time-dependent rheological behaviour of heterogeneous brittle rocks [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(3): 1781-1796.