

某地区花岗岩三轴蠕变试验及其损伤分岔特性研究

韩 冰^{1,2}, 王芝银¹, 郝庆泽³

(1. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油管道公司科技中心 河北 廊坊 065000;
3. 长春市朝阳试验仪器有限公司, 吉林 长春 130052)

摘要: 以某地区花岗岩为例, 在分级加载条件下对岩石的蠕变特性进行三轴压缩蠕变试验研究, 试验结果表明: 岩石变形从稳态蠕变进入加速蠕变阶段存在一个应力阈值, 当应力低于该阈值时, 岩石内部的原始裂隙和孔隙在低应力水平下挤压密实, 产生微细观的线黏弹性变形, 蠕变变形以平缓的速率增长并最终趋于稳定, 此时岩石的流变参数保持恒定; 当应力超过该阈值时, 在较高应力水平的持续作用下, 岩石内部有大量细观分布裂纹产生并且迅速发展, 损伤急剧演化累积, 导致岩石流变参数发生突变。采用 FLAC^{3D} 对花岗岩三轴蠕变试验进行三维数值模拟, 得到岩石蠕变进入加速阶段的应力阈值。最后结合固体力学的分岔理论, 从流变参数的角度考虑, 对广义开尔文模型引入损伤变量, 建立能够反映岩石加速蠕变阶段的损伤演化方程, 对岩石进入加速蠕变阶段后由于参数突变引发的分岔力学特性进行分析, 确定引起岩石发生分岔行为的流变参数以及岩石蠕变变形的分岔点。计算结果表明, 基于考虑损伤影响的有效初始弹性模量得到的计算曲线与试验曲线的吻合情况较为理想。

关键词: 岩石力学; 三轴蠕变试验; 流变参数; 应力阈值; 损伤; 分岔

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4123 - 07

STUDY ON DAMAGE AND BIFURCATION PROPERTIES OF SOME GRANITES BASED ON TRIAXIAL CREEP EXPERIMENT

HAN Bing^{1, 2}, WANG Zhiyin¹, HAO Qingze³

(1. *Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;*
2. *R&D Center of PetroChina Pipeline Company, Langfang, Hebei 065000, China;*
3. *Changchun Chaoyang Testing Equipment Limited Company, Changchun, Jilin 130052, China*)

Abstract: The creep properties of granite specimen are studied under triaxial compression creep experiment with the method of step loading, and the experimental results show that there exists a stress threshold in the creep deformation of rock from stable creep phase to accelerating creep phase. If the applied load is lower than the threshold, the initial microcracks and pores in rock are compacted under the lower stress level and the microcosmic linear visco-elastic deformation will come into being in the microstructure of rock, so the creep rate of rock is uniform and the deformation will tend towards a steady value, and the rheological parameters are invariable under the lower stress level; when the applied load is bigger enough to exceed the threshold, a mass of microcracks come into being, grow quickly, and the damage evolvement is rapid, this will induce the change of rheological parameters of rock. To obtain the value of this stress threshold, the triaxial compression creep experiment of rock is simulated with the method of three-dimensional numerical simulation and the stress threshold is obtained. The damage variables are introduced into the generalized Kelvin model, and the corresponding damage evolution

收稿日期: 2006 - 08 - 21; **修回日期:** 2006 - 12 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374049)

作者简介: 韩 冰(1979 -), 男, 博士, 2002 年毕业于山东理工大学机械工程学院机电专业, 主要从事岩石力学与管道完整性方面的研究工作。
E-mail: kjhanbing@petrochina.com.cn

equations which are able to reflect the characteristics of the accelerating creep phase of rock are set up. Furthermore, by applying the bifurcation theory of solid mechanics, the bifurcation behavior of rock due to the change of rheological parameters after the deformation turning into the accelerating creep phase is studied, the rheological parameters, which cause the creep bifurcation behavior of rock, are determined and the bifurcation points are obtained. The results show that the calculated curve based on the effective initial elastic modulus considering damage factor agrees well with the experiment curve.

Key words: rock mechanics; triaxial creep experiment; rheological parameters; stress threshold; damage; bifurcation

1 引言

弹塑性材料的分岔力学特性已成为近年来固体力学最热门的研究课题之一，尤其是对金属材料局部变形引起的力学失稳、结构屈曲等分岔现象的研究，已取得了较好的成果。将分岔理论应用于岩土力学领域的研究也相当活跃。Mandel 最早采用非关联流动库仑模型研究了岩土材料的分岔问题；D. Bigoni^[1]分析了岩石在平面应变条件下的弹塑性本构模型，在此基础上采用分岔理论对岩石在平面应变条件下变形局部化及剪切带的形成和方向进行了分岔分析，得出了剪切带产生的条件以及剪切带倾角的表达式；W. Y. Zhou 等^[2]基于节理岩体的局部化理论，以多势能原理为基本构架，提出了节理岩体的非连续性分岔模型，并通过数值方法对该模型的特征值问题进行求解；F. Varas 等^[3]对应软化岩体由于应力卸载所导致的岩石分岔现象进行了研究，并结合某隧道开挖实例，采用有限差分方法对岩石分岔和局部化现象引起的隧道围岩反应曲线的变化进行数值模拟；杨 强等^[4]根据非关联弹塑性材料发生不连续分岔的临界硬化模量和局部化方向的解析解，给出了 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 准则的临界硬化模量和局部化方向，并对二者单轴受压时的局部化方向进行了比较；缪协兴等^[5]用谱截断方法建立了 Ahmed-Sunada 型非 Darcy 渗流系统的降阶动力学方程，并通过变量代换得到平衡态附近的演化方程，分析了系统的分岔条件；徐松林和吴文^[6]应用塑性可膨胀本构关系，结合对称性群论方法和反对称变形分岔理论，进行峰后分岔分析以及率相关和动态加卸载过程分岔的分析。

以上对岩石材料分岔行为的研究多是基于弹塑性理论，通过采用不同的强度准则，对岩石达到临界屈服或破坏状态时的力学特性进行定性分析，而没有考虑岩石的黏弹性特征。已有的研究成果^[7~9]

表明，多数岩石在不同的应力水平下都表现出一定的流变性。运用分岔理论对岩石进入流变阶段后产生的分岔行为进行研究，目前国内外在这方面开展的工作还较少。为研究不同流变参数的变化对岩石类材料分岔力学特性的影响，本文基于室内岩石三轴蠕变试验和固体力学分岔理论，对某地区花岗岩的流变分岔现象进行初步探讨。

2 岩石三轴蠕变试验研究

岩石蠕变试验是研究岩石流变力学特性的重要手段，试验成果是流变本构模型研究的基础，利用实测的试验资料反演已知流变模型参数，以及对未知流变模型的辨识等均具有重要的意义。为了对某地区花岗岩的流变力学特性进行研究，本文开展了室内岩石三轴蠕变试验。

2.1 试验设备和试验方法

室内蠕变试验采用 RLW - 2000 岩石三轴流变试验机，该试验装置由轴向加载系统、围压加载系统、伺服系统、控制系统、数据采集和自动绘图系统等部分组成，试验装置如图 1 所示。

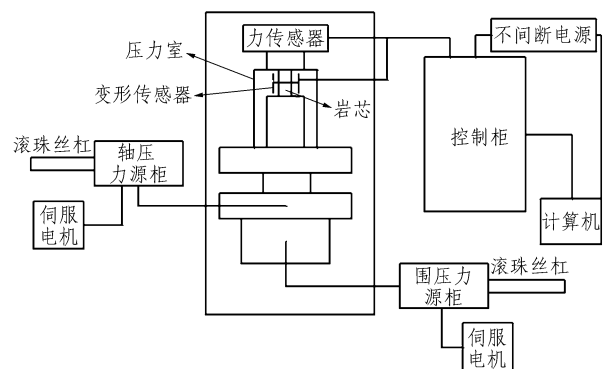


图 1 RLW - 2000 岩石三轴流变试验装置
Fig.1 RLW - 2000 triaxial rheological test system of rock

其中，轴向、围压加载系统的控制部分采用全数字伺服控制器(EDC)，可采用力控制或变形控制，

也可在试验过程中进行控制方式的平滑切换; 稳压系统采用交流伺服电机进行自动稳压, 变形测量装置采用美国泰瑞泰克公司技术生产的位移引伸计, 包括轴向和径向两套, 相对误差在 $\pm 0.5\%$ 之间。

试验所采用的岩芯取自于某沿海地区拟建地下储库围岩, 统一加工成圆柱体标准试件, 尺寸为 $\phi 55 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$, 采用三轴压缩蠕变试验方法进行恒温长时测试。由于花岗岩属于坚硬的脆性岩石, 在低应力水平下其流变特性不明显, 因此试验轴压采用分级加载方式, 即首先按常规压缩试验所获得的单轴抗压强度(见表 1), 将拟施加的最大载荷分成若干等级, 然后在同一试件上由小到大逐级施加荷载, 试验中初级荷载定为 42 MPa, 荷载增量为 10 MPa, 各级荷载所持续时间根据试件的应变速率变化情况予以确定, 基本上控制在 40 h 左右, 试验期间围压恒定为 5 MPa, 室内温度严格控制在 $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验过程中计算机自动采集载荷、变形和时间等数据, 实时显示应力 - 应变、应变 - 时间关系曲线。

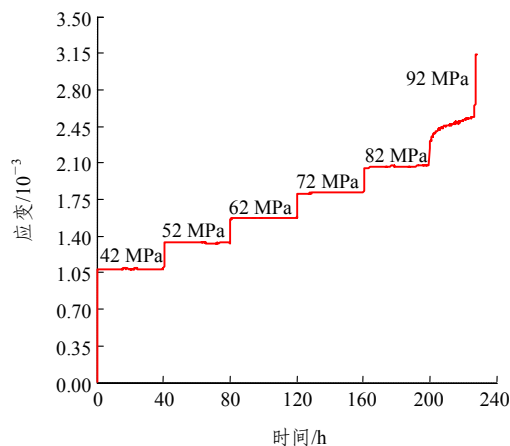
表 1 花岗岩的基本力学参数

Table 1 Mechanical parameters of granites

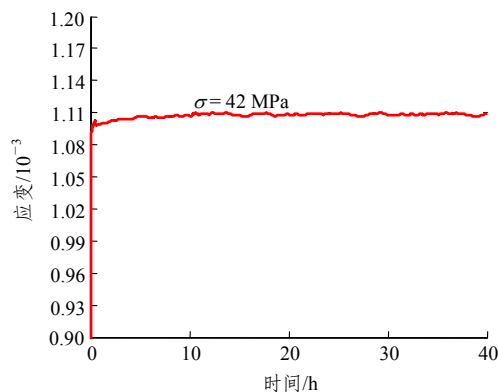
试件编号	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa
1 - 33	46.53	0.22	75.32
1 - 15	53.70	0.19	66.48
1 - 17	48.22	0.24	74.13
3 - 31	44.16	0.26	80.26
3 - 22	47.39	0.27	69.38
3 - 14	52.55	0.18	77.41
均值	48.76	0.23	73.83

2.2 试验结果分析

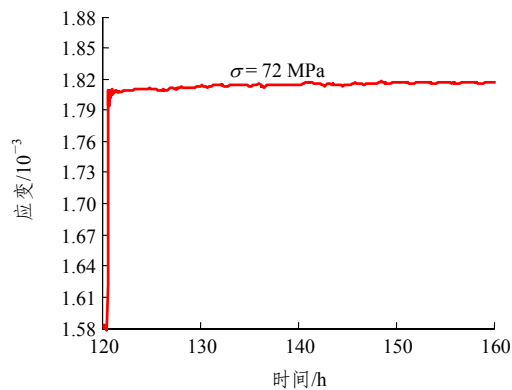
图 2 是 3 - 26 试件在三轴应力状态下轴向应变和时间的关系曲线, 为了便于观察, 将初级、第 4 和 6 级荷载(破坏)水平下的蠕变曲线单独画出(图 2(b)~(d))。图 2(b)的流变试验曲线表明, 岩石在较低应力水平下的轴向变形相对较小, 难以观察到流变现象, 此时岩石内部仅存在原始裂隙和孔隙在低应力水平下的挤压密实以及孔洞闭合等局部结构的调整, 仅产生微细观的线黏弹性变形, 岩石整体变形基本不受流变的影响, 因而可以认为, 当应力水平较低时, 花岗岩一般没有流变变形。随着应力水平的逐级增加, 在荷载作用下, 岩石内部微裂隙开始发展, 岩石组构随时间不断变化, 在流变过程中有大量细观裂纹产生与扩展, 当应力增加至第 4



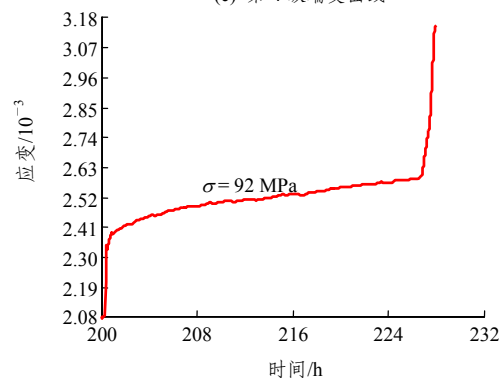
(a) 分级荷载蠕变曲线



(b) 初级蠕变曲线



(c) 第 4 级蠕变曲线



(d) 第 6 级蠕变曲线

图 2 分级荷载下岩石三轴蠕变曲线

Fig.2 Triaxial creep curves of rock under step loadings

级荷载水平时($\sigma = 72 \text{ MPa}$)，流变现象已经比较易于观察，从图 2(c)中可以看出，经过短时间的初期蠕变后，除瞬时弹性应变和较明显的第一阶段蠕变外，还产生了一定的第二阶段蠕变，即稳态蠕变，蠕变变形以平缓的速率增长并最终趋于稳定，稳定期的流变速率约为 $0.05 \mu\text{m/h}$ 。当荷载水平增加至 92 MPa 时，岩石蠕变速率突然增大，形变急剧增加，进入加速蠕变阶段，如图 2(d)所示，此时的应力水平已经达到岩石的极限抗压强度，岩石内部有大量细观分布裂纹产生并且迅速发展，损伤急剧演化累积，岩石的各项流变参数将不再保持恒定，而是随着岩石内部组构的剧烈变化而发生连续变动，经过短时间的加速蠕变之后，内部细观主裂纹迅速发展成为贯通性裂面，形成宏观主裂纹，并且出现沿宏观主裂纹的剪切错移，最终导致岩石的蠕变破坏。因此，岩石变形从稳态蠕变进入加速蠕变阶段的应力阈值 σ_{th} ，应该介于第 5 和 6 级应力水平之间，即 $82 \text{ MPa} \leq \sigma_{th} \leq 92 \text{ MPa}$ ，该阈值应力即为岩石流变的长期强度。

2.3 蠕变应力阈值的确定

为了得到应力阈值 σ_{th} 的确切值，本文采用岩土工程分析软件 FLAC^{3D} 对花岗岩三轴压缩蠕变试验进行计算机仿真模拟，通过数值计算方法来确定 σ_{th} 的大小。计算模型严格按照真实岩芯的尺寸大小设计，如图 3 所示，在试件的上端面处沿竖直向下的方向施加均匀分布的轴向荷载，边界条件采用底面法向约束，侧面施加均匀围压，网格剖分规模为 5 760 个八节点单元，节点总数为 12 117 个，每一级荷载的作用时间与真实的试验时间保持一致。

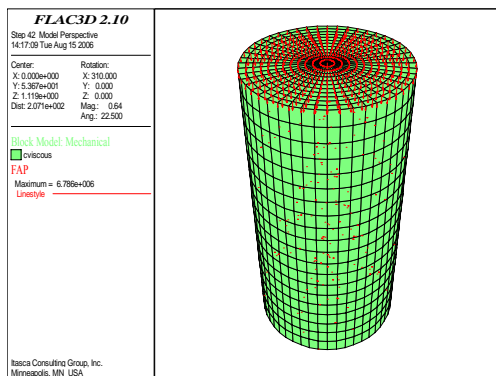


图 3 计算模型及网格剖分
Fig.3 Simulated model and element mesh

为了确定加速蠕变应力阈值 σ_{th} 的大小，在第五级荷载 $\sigma = 82 \text{ MPa}$ 作用结束之后，将最后两级荷载水平 82, 92 MPa 再细分为若干个小的应力区间，

以蠕变曲线呈现加速趋势为计算满足条件，通过反复计算，逐步缩小应力阈值所在区间的范围。当轴向施加的荷载水平为 85.8 MPa 时，计算模型的蠕变变形速率开始迅速增加，如图 4 所示，图中给出了计算模型表面中心点的轴向应变 - 时间曲线，该曲线已经呈现出比较明显的加速蠕变趋势，因此可以确定此时施加的荷载水平 $\sigma = 85.8 \text{ MPa}$ 就是岩石流变的长期强度，也就是变形由稳态蠕变进入加速蠕变的应力阈值。

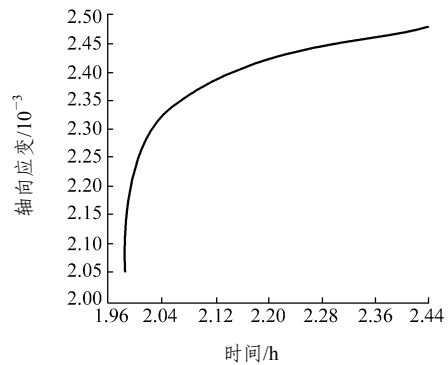


图 4 达到应力阈值时的蠕变曲线
Fig.4 Accelerating creep curve

2.4 流变本构模型及参数辨识

根据室内岩石蠕变试验资料，选取合适的流变模型，通过参数反演或曲线拟合等方法确定相应的流变参数是岩石流变学研究的一项重要内容。岩石的流变本构模型通常可分为 3 类：经验公式、组合模型和积分形式的模型，其中以弹、黏、塑性基本元件构成的组合模型应用最为广泛。

对花岗岩这样强度较高的岩石材料，在低应力水平下其流变特性不明显，从图 2 中可以看出，在大多数应力水平下，应变均随时间增长而逐渐趋于收敛状态；在卸载时不仅有瞬时恢复的弹性应变，还具有弹性后效，其流变性状较符合广义开尔文模型所反映的特征。因此选择三参量广义开尔文模型对其力学特性进行描述，如图 5 所示，其本构方程如下：

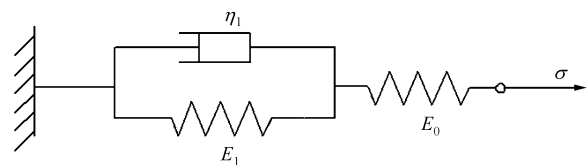


图 5 广义开尔文模型
Fig.5 Generalized H-K rheological model

$$\varepsilon = \frac{E_0 + E_1}{E_0 E_1} \sigma - \frac{\eta_1}{E_0} \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1}{E_0 E_1} \dot{\sigma} \quad (1)$$

式中: E_0 , E_1 分别为初始弹性模量和黏弹性模量; η_1 为黏性系数。

目前, 根据室内试验数据及曲线确定流变参数的方法主要有取点法、绘图法、回归分析法、优化分离法、最小二乘法以及曲线分解法等。这里采用王芝银和李云鹏^[10]提出的黏弹性参数优化分离法求取流变参数。首先给出设计变量与目标函数, 以待反演的参数为设计变量, 根据蠕变试验资料所给的 n 个试验数据 ε 和计算应变残差平方和取最小值作为目标函数进行参数优化分离。因此, 设计变量为

$$X = (E_0, E_1, \eta_1) = (X_1, X_2, X_3) \quad (2)$$

目标函数为

$$f(X) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon(t_i)_c - \varepsilon(t_i)_m]^2 \quad (3)$$

式中: $\varepsilon(t_i)_c$, $\varepsilon(t_i)_m$ 分别为 t_i 时刻通过计算和试验所得的应变值。

对广义开尔文模型, 目标函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t_i\right) \right] - \varepsilon(t_i)_m \right\}^2 \quad (4)$$

为了使上述优化问题得以简化, 可根据工程经验类比给出设计变量的可能上、下限估计值, 从而建立约束条件:

$$a_i \leq X_i \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

式中: X_i 为第 i 个设计变量; b_i , a_i 分别为 X_i 的上、下限值。由式(2), (4), (5)所建立的数学模型, 可用多约束优化法, 逐步逼近最优解 $X^1 = (E_1, E_2, \eta_1, \eta_2)$, 求解目标函数的极小化问题, 这时的 X^1 即为待求的岩体特征参数向量。按照上述方法, 确定流变参数如表 2 所示。

表 2 流变参数

Table 2 Rheological parameters

试件编号	应力阈值/MPa	流变参数		
		E_0 /GPa	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·h)
1-27	86.00	49.72	385.62	16 440.25
3-32	103.00	43.60	326.08	9 280.80
3-26	92.00	52.14	394.43	24 720.19
均值	93.67	48.49	368.71	16 813.75

3 岩石蠕变损伤的分岔行为分析

3.1 分岔系统建立

对广义开尔文模型, 在蠕变条件下, 其轴向荷载 σ 为一常数, 即 $\dot{\sigma} = 0$, 因此式(1)可简化为一阶非线性微分方程, 如下:

$$\varepsilon = \frac{E_0 + E_1}{E_0 E_1} \sigma - \frac{\eta_1}{E_0} \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

式(6)可看作是一维三参量动态系统, 其中 ε 是系统的状态变量, 3 个流变参数 E_0 , E_1 , η_1 可看作系统参量。对其进行整理归一, 得如下形式:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x, \tilde{\mu}) \quad (7)$$

式中: $x = \varepsilon$, $\tilde{\mu} = \{E_0, E_1, \eta_1\}^T$, $f(x, \tilde{\mu})$ 为状态变量 x 和参数 $\tilde{\mu}$ 的光滑函数。

3.2 分岔点的数值计算

系统建立后, 运用数值方法对所关注的节点进行解支延拓, 沿解支曲线对系统的 Jacobian 矩阵进行动态跟踪计算, 计算出可能发生分岔的临界参数值。设点 $(x^*, \tilde{\mu}^*)$ 为动态系统式(7)的一个平衡点, 则它满足下列方程:

$$f(x, \tilde{\mu}) = 0 \quad (8)$$

式(8)在空间 $(x, \tilde{\mu})$ 上至少确定了一条过点 $(x^*, \tilde{\mu}^*)$ 的一维光滑广义曲线 M , 称之为平衡点解流形。对于解流形 M 的计算, 目前应用较为广泛的是平衡点延拓算法^[11], 即用从初始点 (x^0, μ^0) 出发的一点 (x^i, μ^i) 来逼近该光滑曲线 M 。

设 $(x, \tilde{\mu}) = y$, 采用切线预估法对曲线 M 上的下一个点 y^{j+1} 进行预测。假设已求得解流形 M 上的点 y^j , 则 M 上的下一个点 y^{j+1} 的预测值 \hat{y}^{j+1} 可通过过点 y^j 且与曲线 M 相切的切线方向来获得。在得到预测值 \hat{y}^{j+1} 后, 采用拟弧长修正法对该预测点进行修正, 以求得满足精度要求的曲线 M 上的下一点 y^{j+1} 。

利用分岔函数可检测与确定系统的分岔点。构造某一定义在解流形 M 上的连续光滑函数 $\phi(y)$, 使得系统的平衡点分岔值为函数 $\phi(y)$ 的正则零点。如果在解流形 M 的两个连续点 y^j 和 y^{j+1} 上有

$$\phi(y^j)\phi(y^{j+1}) < 0 \quad (9)$$

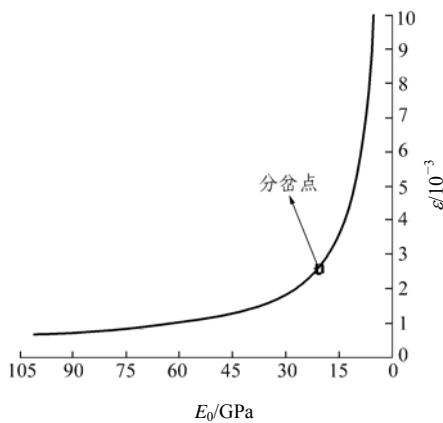
那么在点 y^j 和 y^{j+1} 之间必定有平衡点分岔值存在。

综上所述, 运用数值延拓算法确定动态系统平衡点分岔值的主要步骤如下:

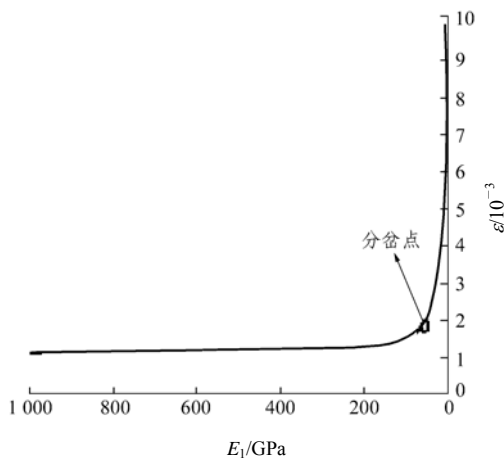
- (1) 设置迭代初始值 $j = 0$;
- (2) 从点 (x^j, μ^j) 出发给出曲线 M 上的下一点 (x^{j+1}, μ^{j+1}) 的预测值 $(\hat{x}^{j+1}, \hat{\mu}^{j+1})$;
- (3) 采用拟弧长法对预测值修正;
- (4) 检测解流形 M 在区间 $[y^j, y^{j+1}]$ 上是否有平衡点分岔现象。如有, 用插值法确定更高精度的参数分岔值, 否则, 令迭代次数 $j = j + 1$, 返回步骤(2)。

3.3 计算结果分析

分别考虑岩石 3 个流变参数的连续变化时对系统稳定性的影响。首先以初始弹性模量 E_0 为变化参量, 保持黏弹性模量 E_1 和黏性系数 η_1 初始值不变, 对系统方程先求取一个正则稳态解, 再用延拓法求出穿过分岔点的解支曲线。同理, 分别考虑 E_1, η_1 作为变化参量, 对系统的稳定性进行分析。图 6 中给出了试件 3-21 的应变 ε 分别相对于流变参数 E_0, E_1 的变化所描绘的轨迹曲线。对于黏性系数 η_1 , 其变化对系统稳定性的影响较小, 因此, η_1 作为变化参量时对系统稳定性的影响可以忽略不计。



(a) ε - E_0 曲线



(b) ε - E_1 曲线

图 6 流变参数分岔曲线

Fig.6 Bifurcation curves of rheological parameters

从图 6(a), (b)可以看出, 当分别以初始弹性模量 E_0 和黏弹性模量 E_1 作为变化参量时, 系统中均存在较明显的分岔点, 经计算得分岔值为 $E_0 = 20.72$ GPa, $E_1 = 73.89$ GPa。当 E_0, E_1 从大到小连续变化时, 岩石的蠕变变形初期增长较为缓慢, 此时岩石变形尚处于稳态蠕变阶段, 但在分岔点处随着 E_0, E_1 的微小变化, 岩石的蠕变变形急剧增大, 岩石变形进入加速蠕变阶段。与表 2 中二者的平均值比较, 其分岔值分别为初始值的 42.73%和 20.04%。

3.4 损伤演化方程及分岔参数

当分级施加的荷载水平达到蠕变应力阈值 σ_{th} 时, 岩石变形从稳态蠕变进入加速蠕变阶段, 变形曲线急速增加, 显然用常规的广义开尔文模型无法对其力学行为进行描述, 因为此时岩石内部的微裂隙已经充分发育, 损伤急剧演化累积, 岩石的各项流变参数将不再为恒定不变的常数, 而是随着岩石内部微裂纹快速扩展、晶体颗粒滑移等细观力学特性的变化而连续变动。因此, 对广义开尔文模型, 其本构方程式(1)将不再适用, 为了考虑加速蠕变阶段岩石各项流变参数的变化, 本文引入损伤的定义, 根据 Z. Y. Wang 等^[12]中提出的蠕变损伤演化方程:

$$D_0 = 1 - \frac{\tilde{E}_0(\varepsilon)}{E_0} \quad (10)$$

式中: D_0 为损伤因子; $\tilde{E}_0(\varepsilon)$ 为初始弹性模量 E_0 的有效模量, 可以通过试验数据的曲线拟合确定如下:

$$\tilde{E}_0(\varepsilon) = \frac{a \ln \varepsilon + b}{\varepsilon} \quad (11)$$

式中: a, b 为材料常数, 由试验确定。将式(11)代入式(10), 即得 D_0 随应变 ε 的变化关系。同理, 对于黏弹性模量 E_1 , 其相应的有效模量 $\tilde{E}_1(\varepsilon)$ 和损伤因子 D_1 也可以同样确定。将 E_0, E_1 的有效模量 $\tilde{E}_0(\varepsilon)$ 和 $\tilde{E}_1(\varepsilon)$ 分别代入式(1), 即可得到岩石在加速蠕变阶段的蠕变损伤演化方程:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{E}_0(\varepsilon) + E_1}{\tilde{E}_0(\varepsilon)E_1} \sigma - \frac{\eta_1}{\tilde{E}_0(\varepsilon)} \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1}{\tilde{E}_0(\varepsilon)E_1} \dot{\sigma} \quad (12)$$

或

$$\varepsilon = \frac{E_0 + \tilde{E}_1(\varepsilon)}{E_0 \tilde{E}_1(\varepsilon)} \sigma - \frac{\eta_1}{E_0} \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1}{E_0 \tilde{E}_1(\varepsilon)} \dot{\sigma} \quad (13)$$

基于式(12), (13), 分别可以得到考虑 E_0 为变量的损伤曲线 1 和考虑 E_1 为变量的损伤曲线 2, 将该理论计算值与试验中的第 6 级蠕变曲线进行对比 (见图 7), 可以发现, 基于式(12)的损伤曲线 1 与实

际的试验曲线吻合较好, 而基于式(13)损伤曲线 2 的拟合精度则较不理想。因此可以确定, 当荷载水平达到蠕变应力阈值 σ_{th} 时, 初始弹性模量 E_0 不再为恒定不变的常量, 而是随着岩石内部损伤的演化累积发生连续变动, 并最终导致了岩石的蠕变分岔行为。

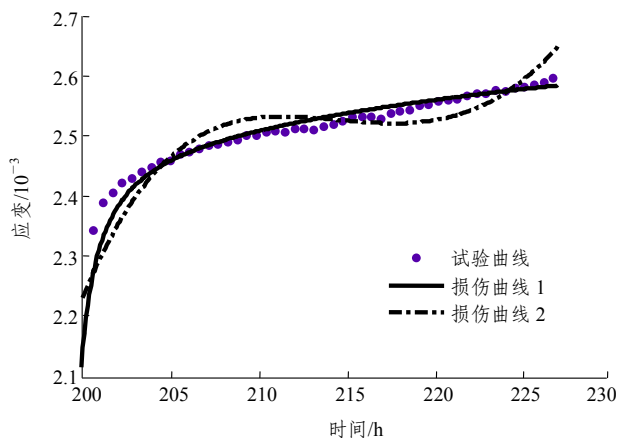


图 7 理论计算与试验结果比较

Fig.7 Comparison between the calculated and experimental results

4 结 论

(1) 本文以室内岩石三轴蠕变试验为基础, 采用固体力学的分岔理论, 从流变参数的角度分析, 研究了流变参数的变化对岩石变形以及长期力学稳定性的影响, 可望对岩石类材料的蠕变破坏机制、从稳态蠕变进入加速蠕变阶段的分析及预测提供新的思路。

(2) 流变参数变化引发岩石的蠕变分岔行为存在一个应力阈值, 在较低应力水平下岩石的各流变参数保持恒定, 当应力超过该阈值时, 在较短的时间里岩石内部的微裂纹扩展速度加快, 损伤急剧演化累积, 导致岩石各项流变参数发生突变, 并且在参数分岔点处岩石的蠕变变形发生分岔行为。

(3) 对广义开尔文模型引入损伤变量, 建立了能够反映岩石加速蠕变阶段的损伤演化方程, 对岩石进入加速蠕变阶段后由于参数突变引发的分岔力学特性进行研究。计算结果表明, 考虑损伤影响的有效初始弹性模量 E_0 的连续变化对岩石的蠕变变形存在临界效应, 其临界值就是岩石蠕变失稳的分岔值, 在分岔点处岩石变形由稳态蠕变进入加速蠕变阶段。

参考文献(References):

- [1] BIGONI D. Bifurcation and instability of non-associative elastoplastic solids[C]// Material Instabilities in Elastic and Plastic Solids. New York: Springer, 2000: 66 - 72.
- [2] ZHOU W Y, LIU Y G, ZHAO J D. Multi-potential based discontinuous bifurcation model for jointed rock masses and its application[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2003, 192(4): 3 569 - 3 584.
- [3] VARAS F, ALONSO E, ALEJANO L R, et al. Study of bifurcation in the problem of unloading a circular excavation in a strain-softening material[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 311 - 322.
- [4] 杨 强, 陈 新, 周维垣. 岩石类材料的分岔分析及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 403 - 406.(YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Weiyuan. Analysis of discontinuous bifurcation of rocklike materials and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 403 - 406.(in Chinese))
- [5] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分岔行为研究[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 660 - 667.(MIU Xiexing, CHEN Zhanqing, MAO Xianbiao, et al. The bifurcation of non-Darcy flow in post-failure rock[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(6): 660 - 667.(in Chinese))
- [6] 徐松林, 吴 文. 岩土材料局部化变形分岔分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 430 - 3 438.(XU Songlin, WU Wen. Bifurcation analysis on deformation localization of geomaterial[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 430 - 3 438.(in Chinese))
- [7] 孙 钧. 岩土材料流变及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(SUN Jun. Rheology of geomaterials and its application to engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [8] HOXHA D, GIRAUD A, HOMAND F. Modelling long-term behaviour of a natural gypsum rock[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(4): 1 223 - 1 241.
- [9] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43: 950 - 960.
- [10] 王芝银, 李云鹏. 地下工程位移反分析法及程序[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993.(WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Program and back analysis method in underground engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1993.(in Chinese))
- [11] KELLER H B. Lectures on numerical methods in bifurcation problems[M]. New York: Springer-Verlag, 1987.
- [12] WANG Z Y, HAN B, LI Y P, et al. A rheological damage model for coupled thermo-hydro-mechanical analysis for rock mass[C]// XU Weiya, TAN Xiaolong, YANG Shengqi, et al ed. Advances on Coupled Thermo-hydro-mechanical-chemical Processes in Geosystems and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 537 - 542.