

高温三维应力下鲁灰花岗岩蠕变本构关系的研究

张 宁¹, 赵阳升^{1,2}, 万志军², 董付科², 冯子军²

(1. 太原理工大学采矿工艺研究所, 山西 太原 030024; 2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 采用中国矿业大学的 20 MN 高温高压岩体三轴试验机进行了高温三维应力下大尺寸 $\Phi 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 鲁灰花岗岩蠕变特性的实验研究, 温度最高达到了 600°C , 轴向应力最高达到了 175 MPa 。通过对实验数据的分析, 发现高温三维应力条件下静水应力引发鲁灰花岗岩发生蠕变变形, 提出了考虑静水应力作用时稳态蠕变率的本构方程, 得到了鲁灰花岗岩蠕变本构方程的参数 A_1 , A_2 , ΔQ , m , n 。研究还发现静水应力下的蠕变和差应力下的蠕变曲线特征相同, 同样可以划分为初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段三个阶段, 鲁灰花岗岩的蠕变变形是温度, 差应力和静水压力的函数, 温度、差应力和静水压力的升高都会加速鲁灰花岗岩的蠕变变形。

关键词: 高温; 蠕变; 静水应力; 本构方程; 花岗岩

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2009)11-1757-06

作者简介: 张 宁(1983-), 男, 湖北公安人, 博士, 从事高温岩体地热研究与开发。E-mail: daoningzhang@163.com。

Creep constitutive relationship of lu gray granite under high temperature and three-dimensional stress

ZHANG Ning¹, ZHAO Yang-sheng^{1,2}, WAN Zhi-jun², DONG Fu-ke², FENG Zi-jun²

(1. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: By use of the 20 MN servo-controlled triaxial rock testing machine with high temperature and high pressure in China University of Mining and Technology, an experimental study is carried out on creep properties of large size granite specimens of $\Phi 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ with temperature up to 600°C and axial stress up to 175 MPa . Through the analysis of experimental data, it is discovered that hydrostatic stress can cause creep formulation of lu gray granite. A constitutive equation of stable-state creep rate considering hydrostatic stress is thus proposed. The creep constitutive equation parameters of lu gray granite A_1 , A_2 , ΔQ , m , n are obtained. It is discovered that the creep properties caused by hydrostatic stress are the same as those caused by the differential stress in lu gray granite. It can also be divided into three stages: transient creep, stable-state creep and accelerating creep. The creep formulation of lu gray granite is a function of temperature, differential stress and hydrostatic stress. Increase of temperature, differential stress and hydrostatic stress can accelerate the creep formulation of lu gray granite.

Key words: high temperature; creep; hydrostatic stress; constitutive equation; granite

0 引 言

在岩石力学领域中, 岩石的流变特性特别是蠕变特性是大家十分关注的一个方向。花岗岩在高温下的物理力学特性是核废料处置, 高温岩体地热开发, 大陆深钻技术及其相关科学研究的热点问题。花岗岩在常温下具有强度高, 结构致密渗透性低, 蠕变性能低的优点。因此国外从上世纪 50 年代开始考虑把花岗岩做为核废料深埋地下处置的母岩, 但是核废料长期衰变放热, 加热母岩使其温度升高, 最高高达 240°C ^[1], 在这样高的温度下, 花岗岩的蠕变变形规律如何, 放置核废料的地下洞室是否稳定是值得研究的问题。高

温地热开发^[2]时, 注水井和生产井深度一般在 $3000 \sim 6000 \text{ m}$, 经过的地层岩体绝大部分是花岗岩, 出力寿命长达 100 a , 这些花岗岩的温度最高达 400°C , 在如此高的温度和深度的地层应力的作用下在持续百年的时间里, 这些井壁的花岗岩是否会出现蠕变造成的膨胀性破坏, 地热储层的长期变形特性这些都是值得深入考虑的。众所周知, 在高温环境下, 花岗岩的蠕变特性对于地震的形成机制和大陆科学钻探同样具有重

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50534030)

收稿日期: 2008-09-18

要的意义。

由于高温三轴流变实验装置的研制难度和实验的复杂性,目前国内的实验研究主要集中在常温下的单轴蠕变和三轴蠕变实验研究,高温下的三轴蠕变实验研究极为罕见。王子潮^[3]采用高温高压岩石三轴蠕变实验系统,从浅源地震形成机制的角度对 $\Phi 10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 居庸关花岗岩,迁安石英岩和济南辉长岩进行了高温蠕变特性的实验研究,实验模拟了中下地壳温度和压力,发现了地壳岩石的半脆性蠕变的基本规律,并在温度,围压和差应力坐标系中给出了岩石半脆性蠕变的分区。陈宗基^[4]采用多功能流变三轴仪对尺寸 $\Phi 40\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的房山花岗岩进行了温度 100°C 围压 100 MPa ,和温度 200°C 围压 200 MPa 下各种梯级载荷下的蠕变实验。实验发现花岗岩的体积变形具有明显时间效应,在偏应力为单轴抗压强度的 $41\%\sim 50\%$ 时,体积蠕变出现扩容。花岗岩扩容随温度的增加而增加,随围压的增加而受到抑制。杨春和^[5]从地下空间的利用出发对凝灰岩加热到 204°C 进行了蠕变试验,提出了一个新的依赖时间的损伤模型和两个应力强度因子的定义。高小平^[6]研究了在温度和差应力作用下盐岩稳态蠕变的本构方程。

国外开展岩石高温蠕变研究较早,实验成果颇多。Brown^[7]为了研究核废料的处置研制了一种新的岩石高温三轴蠕变测试系统,试验温度能在 204°C 保持数月之久;Martin^[1]将toppah sping凝灰岩加热到 250°C ,保持围压 5 MPa ,初始轴压 50 MPa ,进行了蠕变试验,试验过程中只改变轴压,试验验证了应力腐蚀破裂机制,结果表明凝灰岩的强度和蠕变变形是温度,饱和度和施加载荷的函数,岩石的强度随温度的升高而降低,蠕变变形随温度的升高增大。Deviwed^[8]等研究了印度粉花岗岩在 $30\sim 160^\circ\text{C}$ 时的蠕变变形特征,由于温度较低并未发现蠕变变形出现极大改变。

高温三轴应力下岩石的蠕变特性的实验研究目前普遍采用小尺寸试样^[1, 3-4]进行,试样尺寸一般不超过 $\Phi 40\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 。试件越大意味着实验设备越大,实验条件更加复杂,实验准备时间会拖得越长,实验的难度和耗费会成倍增加。本文选定山东平邑的 $\Phi 200\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的大尺寸鲁灰花岗岩试件进行高温三轴应力下的蠕变实验研究。

1 高温三轴应力下鲁灰花岗岩蠕变实验概述

试样采自山东平邑的鲁灰花岗岩,颜色灰白色,粒度均匀,颗粒致密,岩样完整胶结良好无裂隙。实验采用中国矿业大学 20 MN 高温高压岩体三轴试验

机^[9](图1),为四立柱结构且总体刚度不小于 $9\times 10^{10}\text{ N/m}$,轴压载荷、围压载荷计算机每两分钟自动记录一次,精确到 1 kN ,全部参数计算机实时显示。

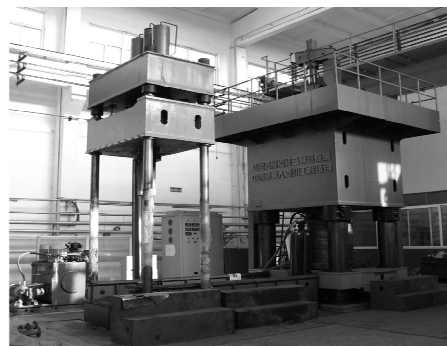


图1 20 MN 高温高压岩体三轴试验机

Fig. 1 20 MN servo-controlled triaxial rock testing machine with high temperature and high pressure

装样方式如图2所示,温度采用热电偶测量,轴压采用H13压头传递,侧压通过高温压力室下部的环形压头挤压叶腊石粉和盐来对试样进行作用;采用电阻片进行加热,压力室外采用缠绕的铜管进行冷却;使用散体结构的盐和粉末状的叶腊石粉进行传压。为了保证实验的温度准确性,采用了热电偶传输进入主控制计算机自动记录和手动记录相结合的方式,期间手动控制升降温,温度控制误差不大于 $\pm 0.3\%$ 。为了避免温度对试验机本身的影响,试验机和高温压力室之间采用隔热较好的材料进行隔离。

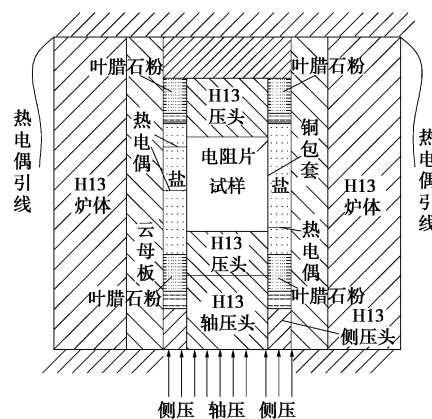


图2 高温压力室剖面图

Fig. 2 Chamber with high temperature and pressure

2 实验结果及分析

鲁灰花岗岩由岩浆结晶而成,具有极高的单轴抗压强度,在常温条件下对较小的差应力蠕变特性不明显,在高温条件下,较小的差应力是否能产生明显的蠕变行为,是值得探索的,蠕变是一种长期行为,常温下鲁灰花岗岩的蠕变包括三个特征阶段:初始蠕变,

稳态蠕变和加速蠕变。对于特定的鲁灰花岗岩, 研究其高温蠕变特性即为确定高温条件下蠕变曲线的阶段特征和稳态蠕变率与温度和应力状态的变化关系, 即蠕变方程。

鲁灰花岗岩蠕变特性实验共进行了不同温度, 不同轴压围压下的 8 组高温三轴实验, 实验结果见表 1。

表 1 表明了 300~600℃, 静水应力条件下, 鲁灰花岗岩的稳态蠕变性质随温度的升高而变得提高, 温度每升高 100℃时, 稳态蠕变率的增加均在一个数量级之内, 没有出现大的变化, 这与孙天泽^[10]的结果不一样, 很可能是因为采用的是大尺寸 $\Phi 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 试件, 试样的力学和物理性质接近于岩体, 反映的是温度对岩体的蠕变变形特性的影响, 而孙天泽采用的是小尺寸的岩石试件, 更接近岩石的物理力学性质的缘故。

2.1 静水应力的蠕变效应

将实验结果整理绘得鲁灰花岗岩蠕变的变化规律曲线, 图 3 为各温度和静水应力条件下, 鲁灰花岗岩的轴向应变随时间的变化关系曲线。

图 3 (a) 表明 300℃75 MPa 静水应力条件下, 鲁灰花岗岩蠕变曲线只有初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段。图 3 (b) 表明了 400℃100 MPa 静水应力条件下, 鲁灰花岗岩蠕变曲线, 减速蠕变阶段不明显, 稳态蠕变阶段明显。图 3 (c) 表明了 500℃125MPa 静水应力时鲁灰花岗岩的蠕变曲线只有稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段, 在稳态蠕变期间蠕变变形变小。从图 3 (d) 可以发现, 鲁灰花岗岩在 600℃125MPa 静水应力条件下, 表现出蠕变变形的典型三个阶段。由图 3 可知, 静水应力条件下, 花岗岩的轴向蠕变曲线和常温下一样都可以划分成三个阶段: 初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段。

图 3 (a) ~ (b) 清晰表明了静水应力条件下, 花岗岩的蠕变特征对于温度的影响非常敏感, 花岗岩的蠕变特征的转变存在一个温度门槛值, 这个门槛值在 300~400℃, 温度低于这个门槛值时, 鲁灰花岗岩蠕变变形只有初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 花岗岩的变形逐渐趋于停滞, 岩样不会发生破坏。如果温度达到这个门槛值, 内部晶粒之间表现为滑动变形, 蠕

表 1 鲁灰花岗岩的高温蠕变结果

Table 1 Creep results of lu gray granite under high temperature

序号	轴压/MPa	围压/MPa	温度/℃	蠕变时间/Min	瞬时蠕变/‰	蠕变量/‰	稳态蠕变率/(10 ⁻⁸ s ⁻¹)
1	75	75	300	248	3.329	0.835	1.868
2	100	100	400	2796	2.469	0.762	1.896
3	125	125	500	5782	4.558	0.872	2.125
4	175	125	500	694	5.147	0.319	12.798
5	125	125	600	259	6.339	0.356	4.606
6	94	75	300	3253	2.015	1.775	3.438
7	100	100	400	5456	1.832	0.355	1.855
8	125	100	400	3179	2.780	0.517	4.190

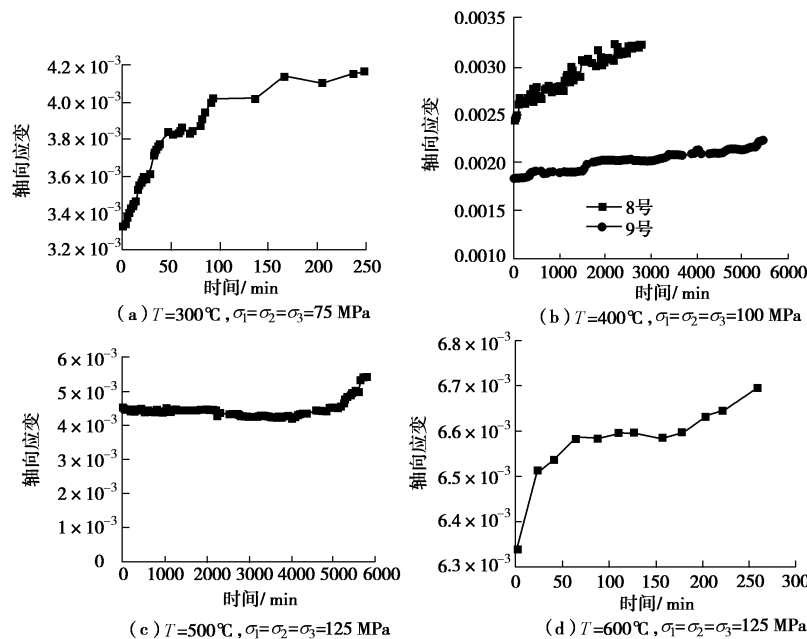


图 3 鲁灰花岗岩的轴向应变随时间的变化

Fig. 3 Variation of axial strain with time for lu gray granite

变变形以黏性变形为主, 鲁灰花岗岩的蠕变表现为稳态蠕变和加速蠕变, 变形不断增长, 鲁灰花岗岩最终破坏。

图3清楚表明了静水应力条件下, 鲁灰花岗岩的应力随时间的变化曲线清晰表明静水应力同样能造成岩样的蠕变变形, 产生这种现象的原因, 本文认为这可能是由于花岗岩体的非均质性。

2.2 差应力的蠕变效应

图4(a)所示为400℃, 鲁灰花岗岩轴向应变随时间的变化曲线图, 图4(b)所示为500℃, 轴压175 MPa 围压125 MPa时, 鲁灰花岗岩轴向应变随时间的变化曲线图。

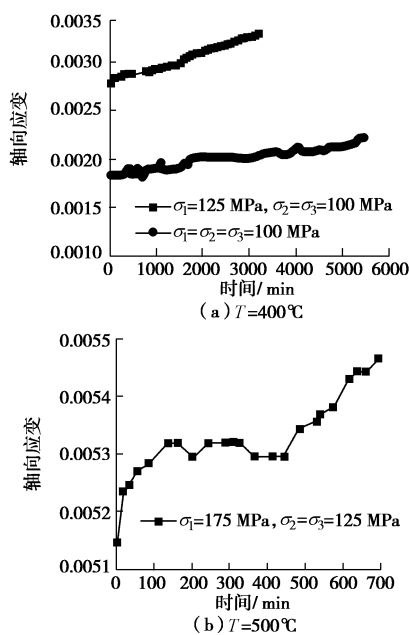


图4 鲁灰花岗岩的轴向应变随时间的变化

Fig. 4 Variation of axial strain with time for lu gray granite

由图4(a)可知, 温度400℃, 100 MPa 静水应力时, 蠕变实验进行了5456 min, 这是目前国内外在这个温度上进行的最长时间的蠕变实验。鲁灰花岗岩的瞬时弹性变形量是0.001832, 稳态蠕变率是 $1.855 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 温度400℃, 轴压125 MPa 围压100 MPa时, 蠕变实验进行了3179 min, 此时鲁灰花岗岩的瞬时弹性变形量是0.002786, 稳态蠕变率是 $4.19 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 图3(b)和4(a)清晰表明了400℃差应力为25 MPa的试件要比静水应力下拥有更大的稳态蠕变率和瞬时弹性变形, 差应力加速了蠕变变形。

由图4(b)可知, 温度500℃, 轴压175 MPa 围压125 MPa时, 蠕变实验进行了694 min, 鲁灰花岗岩的瞬时弹性变形量是0.005147, 稳态蠕变率是 $12.7983 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 。由于高温蠕变实验本身的难度, 目前国内外高温下的蠕变实验普遍只有稳态蠕变阶段的

结果, 加速蠕变阶段的结果几乎没有, 图4(b)清晰表明了温度500℃, 轴压175 MPa 围压125 MPa时, 鲁灰花岗岩的蠕变曲线表现为初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段。

2.3 温度效应

由图3(c)可知温度500℃, 125 MPa 静水应力条件下, 鲁灰花岗岩的瞬时弹性变形0.004558, 稳态蠕变率是 $2.125 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 。从图3(d)可以发现, 在温度600℃, 125 MPa 静水应力条件下, 蠕变实验进行了259 min, 瞬时弹性变形0.006339, 稳态蠕变率是 $4.6066 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 。由图3(c)和3(d)可知, 125 MPa 静水应力条件下, 600℃和500℃比较可知, 温度的升高加速了鲁灰花岗岩的稳态蠕变变形, 而且温度升高瞬时弹性变形变大。

鲁灰花岗岩是由长石、石英和云母等多种矿物组成的结晶岩石, 这几种矿物的热膨胀系数各不相同以及他们自身不同结晶方向热弹性性质不同, 在温度作用下, 必然会引发同种矿物颗粒边界之间和不同矿物颗粒边界之间热膨胀性不协调, 然而鲁灰花岗岩作为一个连续体, 长石、石英、云母和胶结物不可能按各自固有的热膨胀系数自由变形。因此, 矿物颗粒之间相互约束, 变形大的受压缩, 变形小的受拉伸, 由此在花岗岩内形成一种由温度引起的热应力。应力在坚硬的石英矿物构成的受力骨架之间传递形成应力集中, 在矿物颗粒的边界处往往出现裂纹, 随着温度的升高, 这些裂纹逐渐发展连通形成网络, 宏观上表现为鲁灰花岗岩蠕变变形的增强。

3 鲁灰花岗岩蠕变本构方程

目前国内外的流变理论^[11-13]均假设轴向蠕变和侧向蠕变均由且只由差应力引起, 静水应力是不会引起蠕变的, 这种假设只是一种猜想缺乏实际实验的验证。在进行高温下的蠕变实验时, 进行了静水应力下的实验研究, 实验结果如图3(b)~(d), 4(a)所示, 静水应力同样引起花岗岩的蠕变, 证明了国际上的上述假设是不正确的。因此, 在鲁灰花岗岩的蠕变本构方程中首次考虑了静水应力的影响。

根据高温三维应力下鲁灰花岗岩蠕变实验结果的分析, 鲁灰花岗岩的蠕变变形不仅与实验施加的差应力和试样的温度有关, 还与静水应力有关。也就是说鲁灰花岗岩的蠕变应变或应变率不仅是差应力和试样温度的函数, 而且是试样所受的静水应力的函数。温度, 应力水平与鲁灰花岗岩的蠕变特性密切相关, 温度的升高, 差应力和静水应力的升高都会使得鲁灰花岗岩的蠕变速率增强; 在给定轴压和围压的条件下,

岩石蠕变各阶段的特征和转化条件与温度条件密切相关。不同应力水平和温度条件下, 鲁灰花岗岩的蠕变规律取决于不同的变形机制; 鲁灰花岗岩本构关系式中的激活能与温度有关是温度的函数, 温度的增加会促使激活能连续或非连续增加, 矿物的成分和胶结物对激活能的影响十分复杂^[6]。Webster^[14]充分考虑这些变形机制, 得到岩石稳态蠕变率本构方程是作用在岩样上的差应力的幂次函数和能量与温度的指数函数。类比 Webster^[14]等式的形式, 考虑静水应力影响下的稳定蠕变率本构方程为

$$\dot{\varepsilon}_s' = \exp\left(-\frac{\Delta Q}{RT}\right) \left[A_1 \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_0} \right)^m + A_2 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_0} \right)^n \right] \quad (1)$$

式中 $\dot{\varepsilon}_s'$ 为稳态蠕变率; A_1 , A_2 为实验常数, 反映了岩样的微观结构, 组分对稳态蠕变率的影响; ΔQ 为激活自由能, 反映温度对稳态蠕变率的影响; σ_0 为单位应力 (MPa); $R=8.3143$ kJ/mol 为普适气体常数; T 为实验时的温度 ($^{\circ}\text{C}$); $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为差应力 (MPa); $\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 为静水应力 (MPa); m , n 为应力指数常数, 反映了应力对蠕变速率的影响程度; A_1 , A_2 , ΔQ , m , n 可通过蠕变实验的数据通过拟合方法得到。

采用最小二乘法对鲁灰花岗岩高温蠕变的实验数据进行拟合, 发现蠕变方程能较好地拟合实验数据, 得到实验拟合参数为: $A_1=2.344 \times 10^{-11}$ $\text{MPa}^{-7}\text{s}^{-1}$, $A_2=1.323 \times 10^{-6}$ $\text{MPa}^{-3}\text{s}^{-1}$, $\Delta Q=63.6$ kJ/mol, $m=7$, $n=3$ 。

4 结 论

采用中国矿业大学研制的 20 MN 高温高压岩体三轴试验机进行了高温高压条件下鲁灰花岗岩的蠕变实验, 通过对蠕变实验结果和数据进行分析, 可以得到如下结论:

(1) 高温条件下, 静水应力引发的鲁灰花岗岩蠕变同常温下差应力引发蠕变的特征相同, 蠕变特征均分为三个阶段: 初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段。

(2) 实验还发现温度和差应力对蠕变变形规律的影响, 相同的静水应力条件下, 实验的温度越高, 鲁灰花岗岩的稳态蠕变速率越快; 在实验的温度和侧向应力都相同时, 差应力的增加加速了鲁灰花岗岩的蠕变变形。

(3) 通过对影响鲁灰花岗岩蠕变变形的因素的分析, 发现鲁灰花岗岩的稳态蠕变率是静水应力, 差应力和温度的函数。温度的升高, 差应力和静水应力的增高都会使稳态蠕变率增加。

(4) 考虑高温条件下静水应力对蠕变变形规律的

影响, 提出了鲁灰花岗岩的稳态蠕变率的本构方程。通过对实验数据的拟合分析得到了 $A_1=2.344 \times 10^{-11}$ $\text{MPa}^{-7}\text{s}^{-1}$, $A_2=1.323 \times 10^{-6}$ $\text{MPa}^{-3}\text{s}^{-1}$, $\Delta Q=63.6$ kJ/mol, $m=7$, $n=3$ 。

参考文献:

- [1] MARTIN R J Iii, BOYD P J. Creep in topopah spring member welded tuff. yucca mountain site characterization project[R]. 1995.
- [2] 赵阳升, 万志军, 康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, KANG Jian-rong. Introduction to geothermal extraction in hot dry rock[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 王子潮, 王绳祖. 中下地壳温度压力条件下岩石半脆性蠕变的实验研究[J]. 地震地质, 1990, 12(4): 335 - 343. (WANG Zi-chao, WANG Sheng-zu. Experimental study on semi-brittle behavior of rocks at temperature and pressure corresponding to middle-lower crust[J]. Seismology and Geology, 1990, 12(4): 335 - 343. (in Chinese))
- [4] 陈宗基, 石泽全. 用 8000 kN 多功能三轴仪测量脆性岩石的扩容、蠕变和松弛[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(2): 87 - 117. (CHEN Zong-ji, SHI Ze-quan. Measurement of volume expansion, creep and relax of brittle rock by 8000 kN universal triaxial test machine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989, 8(2): 87 - 117. (in Chinese))
- [5] YANG C H, DAEMEN J J. Temperature effects on creep of tuff and its time-dependent damage analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3-4): 383 - 384.
- [6] 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 Xiao-ping, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Experimental studies on temperature dependent properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2054 - 2059. (in Chinese))
- [7] BROWN T A, HEUZE F E. New system for high temperature triaxial creep testing of rocks[C]// US Symposium on Rock Mechanics, 2000.
- [8] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3): 303 - 315.
- [9] 赵阳升, 万志军, 张 渊, 等. 20 MN 伺服控制高温高压岩体三轴试验机的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008,

- 27(1): 1 - 8. (ZHAO Yang-sheng, WAN Zhi-jun, ZHANG Yuan, et al. Research and development of 20 MN servo-controlled rock triaxial testing system with high temperature and high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 1 - 8. (in chinese))
- [10] 孙天泽. 高围压条件下岩石力学性质的温度效应[J]. 地球物理学进展, 1996. 11(4): 63 - 71. (SUN Tian-ze. Temperature effect of rock mechanics under high confining pressure[J]. Progress in Geophysics, 1996, 11(4): 63 - 71. (in Chinese))
- [11] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社. 1990. (ZHOU Wei-yuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press. 1990. (in Chinese))
- [12] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheology and its engineering application of rock and soil materials[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [13] 周德培. 流变力学原理及其在岩土工程中的应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995. (ZHOU De-pei. Principle of rheology mechanics and its application in rock and soil engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese))
- [14] WEBSTER G A, COX A P D, DORN J E. A relationship between transient and steady state creep at elevated temperature[J]. Met Sci J, 1969(3): 221 - 225.

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会组团参加 第十七届国际土力学及岩土工程会议

2009年10月5~9日在埃及的亚历山大城市召开了第十七届国际土力学及岩土工程会议(17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, October 5-9, 2009)。国际土力学与岩土工程会议是国际土力学与岩土工程学会(ISSMGE)主办的系列大会之一,每四年举办一次,本届大会是由埃及岩土工程学会主办(Egyptian Geotechnical Society),也是第一次在非洲举办。同时有十四个ISSMGE下属的技术委员会(Technical Committee)和联合技术委员会(Joint Technical Committee)召开了会议。截至大会开幕式为止,共有1050代表参加本次大会,会议规模较大、文化特色浓厚。

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会向这次会议选送了11篇论文。这次会议创下四项历史记录:(1)土力学分会理事长陈祖煜院士正式当选为国际土力学与岩土工程学会副主席;(2)土力学分会常务理事王卫东做了关于深基坑与地基处理专题的综述报告(General Report);(3)土力学分会组织了70人出席了本次国际会议,参会代表人数在参加本次大会的国家中名列第二,也是历届中国参会代表最多的一次;(4)中国代表团代表黄宏伟、施建勇、朱合华、侯瑜京、詹良通等参加了多个技术委员会组织的学术交流活动,达到了展示成果、加强交流、扩大影响的良好效果。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)