

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.008

不同围压下岩石广义应力松弛特性试验研究

许江, 马天宇, 大久保诚介, 彭守建, 汤杨, 陈灿灿, 王哲

(重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 实际工程中有些岩体发生的流变性既不是纯蠕变又不是纯应力松弛, 表现为应力和应变同时发生变化。利用可视化三轴压缩伺服控制试验系统, 研究了不同围压条件下岩石的广义应力松弛特性, 试验结果表明, 岩石存在应变及应力同时增大、应变增大而应力减小、应变及应力都减小的情况, 岩石蠕变和应力松弛行为属于岩石广义应力松弛现象的特例; 在不同情况下的广义应力松弛过程中围压对岩石广义应力松弛特性的影响不甚相同, 岩石轴向应变增大时围压越高岩石试件轴向变形越困难, 岩石应变减小时围压越高岩石试件变形越明显。采用广义应力松弛试验方法, 开展单轴及三轴压缩荷载作用下岩石广义应力松弛试验研究, 对不同情况下岩石广义应力松弛特性的围压效应进行对比分析, 以期对后期开展更深入的三轴广义应力松弛试验研究具有一定的指导和借鉴意义。

关键词: 田下凝灰岩; 广义应力松弛; 三轴试验; 围压效应

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)增2-0057-010

Experimental study of generalized stress relaxation characteristics of rock under different confining pressures

XU Jiang, MA Tian-yu, OKUBO Seisuke, PENG Shou-jian, TANG Yang, CHEN Can-can, WANG Zhe

(State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In practice, rock mass is neither subjected to pure creep of pure relaxation but to a stress-strain synchronously varies with the lapse of time. Using the visual triaxial compression servo-control test system, the generalized stress relaxation tests are carried out under different confining pressures in different regions including creep and relaxation. The experimental results show that there is different conditions of strain and stress in rock mass, which include strain and stress increase at the same time, strain increase but stress decrease, strain and stress decrease at the same time; creep and relaxation are special cases of generalized stress relaxation of rock. Confining pressure effects of rock mass depend on the condition of generalized stress relaxation; confining pressure curbs the deformation in the condition of axial deformation increasing; and confining pressure promotes the deformation in the condition of axial deformation decreasing. In this paper, the study of generalized relaxation test under triaxial stress is carried out using the generalized stress relaxation test. And the generalized stress relaxation characteristics of the rock under confining pressure are compared and analyzed, so as to provide some guiding and reference significance for the further study of triaxial generalized stress relaxation test.

Keywords: tuff; generalized stress relaxation; triaxial test; confining pressure effect

1 引言

岩石的流变性是指岩石在外荷载、环境温度等影响下呈现出与时间有关的变形损伤与破坏等方面属性^[1], 是造成岩土工程围岩变形损伤直至破坏的重要原因^[1-2]。国内外学者对岩石在单、三轴压缩荷载作用下的蠕变和松弛特性开展了大量的试验测

试, 并取得了丰硕的研究成果^[3-13], 但工程实践中岩体所表现的流变性可能既不是纯蠕变也不是纯应力松弛, 而是随着时间的增加应力和应变同时发生变化^[14-16]。Fukui 等^[17]将岩石表现出来的这种应力和应变同时发生变化的流变状态定义为广义应力松弛, 并开展了单轴压缩荷载作用下不同轴向应力水平时岩石的广义应力松弛特性试验研究。Okubo

收稿日期: 2007-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51474040)。

This work was supported by the General Project of the National Natural Science Foundation of China(51474040).

第一作者简介: 许江, 男, 1960年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

等^[18]对三城目安山岩在单轴压缩荷载作用下的广义应力松弛特性进行了非线性黏弹性模拟。Hashiba 等^[19]采用广义应力松弛控制方法开展了单轴压缩荷载作用下花岗岩的广义应力松弛试验,对比了不同 α 方向的岩石广义应力松弛特性。张海龙等^[20]阐述了岩石广义应力松弛特性及工程物理意义,并给出了广义应力松弛条件下可变模量岩石本构方程解析解。另一方面,Hashiba 等^[19]指出,岩石广义应力松弛可以根据广义应力松弛开始后应力及应变状态的演化过程分为 3 种不同状态(见图 1): (1) 在岩石广义应力松弛过程中随时间增长,应力与应变均增大(即图 1 中的区域 I); (2) 在岩石广义应力松弛过程中随时间增长应力减小但应变增大(即图 1 中的区域 II), (3) 在岩石广义应力松弛过程中随时间增长,应力与应变均减小(即图 1 中的区域 III)。

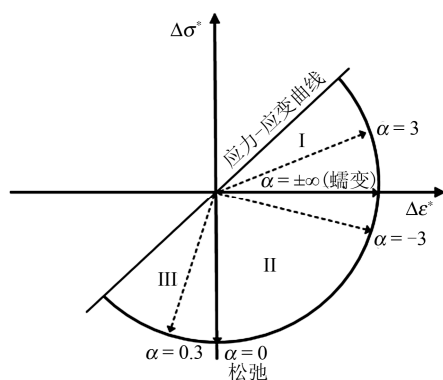


图 1 不同区域内广义应力松弛概略图

Fig.1 Sketch of generalized stress relaxation in different regions

基于此,同时考虑到岩石在三轴应力状态下广义应力松弛特性及其围压影响的试验研究成果鲜见报道,本次拟选取区域 I~III 及其处于交界线上的蠕变和应力松弛 5 种不同条件开展三轴应力状态下岩石广义应力松弛特性及其围压影响试验研究。

2 试验方法

2.1 试验设备

本试验所用设备为自主研发的可视化三轴压缩伺服控制试验系统,主要由轴压加载系统、围压加载系统、可视化三轴压力室、加载控制系统、数据采集系统和图像采集系统六部分组成,见图 2。轴压加载系统由油源系统和加载系统两部分构成,油源系统采用日本 NACHI 公司生产的液压泵,为保持输入压力的稳定,降低因液压泵延迟造成的压力波动,采用液压泵和囊式蓄能器组合的方式进行

稳压。加载系统主要有有机架液压缸、伺服阀、2 根反力支柱构成,为达到精确伺服控制目的,采用美国 MOOG 公司生产的精密伺服阀,精密伺服控制产生轴压的缸体动作。实际工作中轴压伺服加载系统实现了加载过程的连续性、稳定性和精确性。围压加载系统采用了手动泵与蓄能器组合方式,数据采集系统由计算机和数据记录仪组成,采用 Graphtec 公司的 GL-900 八通道数据记录仪采集数据,可采集并实时显示控制电压信号、位移反馈信号、应力反馈信号、误差信号等。

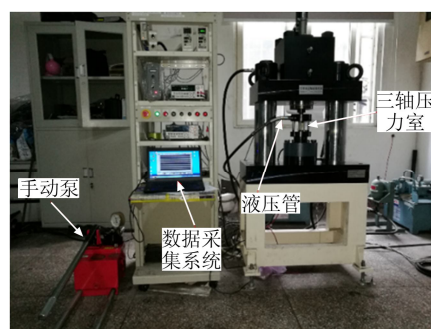


图 2 可视化三轴压缩伺服控制试验系统

Fig.2 Visual triaxial compression servo-control test system

2.2 试验控制方法

广义应力松弛试验采用应力归还法控制加载,这种控制是把应变和应力的线性组合作为控制变量反馈给伺服阀,其控制方程^[17]为

$$\varepsilon - \frac{\alpha \sigma}{E} = Ct = f(t) \quad (1)$$

式中: ε 为应变; σ 为应力; $f(t)$ 为时间的函数; C 为加载速率; t 为时间; α 为应力归还量; E 为岩石的弹性模量。

当轴向应力加载至预定应力值时开始进行广义应力松弛试验,通过改变应力归还量 α 的值实现岩石试件在不同区域内进行广义应力松弛试验。本次分别采用不同 α 实现岩石试件分别在区域 I 内、蠕变方向、区域 II 内、应力松弛方向和区域 III 内的广义应力松弛试验(见图 1)。关于应力归还法控制及广义应力松弛工程物理意义的介绍已有较多文章^[17-20],本文不再赘述。

2.3 岩样采集与加工

试验所用岩样取自日本栃木县宇都宫市大谷镇田下地区的田下凝灰岩,整体呈现蓝色,因含有一定的方解石,故其局部质地较为坚硬,岩石的孔隙率为 20%~30%,属多孔隙岩石。采取湿式加工法沿垂直于岩样层理面方向钻取后制作成 $\phi 25 \times 50$

mm 的圆柱体试件, 长度控制在 (50 ± 0.1) mm, 端面平整度控制在 0.05 mm 之内, 加工成形的岩石试件 (见图 3), 自然干燥 14 d 后备用。为尽量减少因试件个体差异导致的试验测试数据的离散性, 试验前对所有岩石试件依据其密度、波速等物理参数进行筛选分组。



图 3 岩石试件

Fig.3 Rock specimens

2.4 试验方案

本次开展了围压分别为 0、3、6、9 MPa 四种不同条件以及区域 I~III 及其处于交界线上的蠕变和应力松弛等 5 种不同试验条件下的岩石广义应力松弛特性试验。开始进行广义应力松弛时的轴向应力水平 (以下简称应力水平) 取相应围压状态条件下岩石三轴抗压强度的 50%, 围压 0、3、6、9 MPa 条件下岩石三轴抗压强度分别为 18.37、21.43、23.62、30.21 MPa, 试验方案见表 1。

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

岩石种类	轴向应力水平	区域	围压 /MPa
田下凝灰岩	50%	区域 I	0
			3
			6
			9
		蠕变	0
			3
			6
			9
		区域 II	0
			3
			6
			9
		应力松弛	0
			3
			6
			9
		区域 III	0
			3
			6
			9

3 试验结果及分析

3.1 岩石广义应力松弛应力-应变演化规律

为叙述方便, 将轴向应力加载至预定应力水平

的时刻记为 0 时刻, 岩石试件自 0 时刻起开始进行广义应力松弛, 此时刻轴向应力和轴向应变分别记为 σ_0 和 ε_0 , 将自 0 时刻起历时 t 时刻后的轴向应力和轴向应变分别记为 σ_t 和 ε_t 。为方便对比岩石试件在不同区域内轴向应力和应变增量的大小, 将自 0 时刻起历时 t 时刻后的轴向应力增量 (记为 $\Delta\sigma$) 及轴向应变增量 (记为 $\Delta\varepsilon$) 分别定义为

$$\Delta\sigma = \sigma_t - \sigma_0 \quad (2)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_t - \varepsilon_0 \quad (3)$$

此外, 定义轴向应变增量速率为单位时间内轴向应变变化量的绝对值 (记为 $\dot{\varepsilon}$), 轴向应力增量速率为单位时间内轴向应力变化量的绝对值 (记为 $\dot{\sigma}$)。定义初始轴向应变增量速率及初始轴向应力增量速率分别为广义应力松弛开始时的轴向应变增量速率 (记为 $\dot{\varepsilon}_0$) 和轴向应力增量速率 (记为 $\dot{\sigma}_0$)。

轴向应力加载至预定应力水平开始进行广义应力松弛试验, 图 4 为围压 3 MPa 条件下不同区域内的广义应力松弛 $\sigma - \varepsilon$ 曲线。

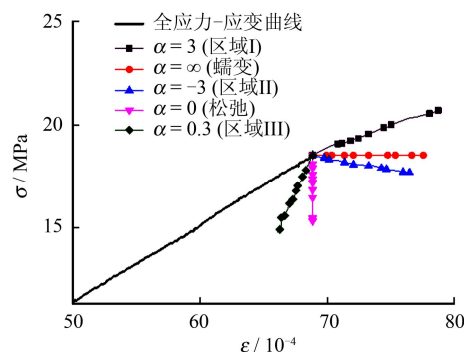


图 4 3 MPa 围压下不同区域内应变-应力曲线

Fig.4 Strain-stress curves in different regions under a confining pressure of 3 MPa

从图 4 中可以看出, 当轴向应力加载至预定应力水平时岩石试件开始分别在区域 I~III 内和蠕变、应力松弛方向上进行广义应力松弛。可将广义应力松弛过程中岩石试件轴向 ε 变化情况分为三类。第一类是在 0 时刻后 (广义应力松弛开始后) 轴向 ε 增加 (区域 I、蠕变和区域 II), 第二类是轴向 ε 保持相对恒定 (应力松弛), 第三类是在 0 时刻后轴向 ε 减小 (区域 III)。在区域 I、II 内和蠕变方向上, 岩石试件轴向 ε 逐渐增加而轴向 σ 随轴向 ε 的演化情况有所不同, 在区域 I 内轴向 σ 随着轴向 ε 的增加而增大; 在蠕变方向上轴向 ε 逐渐增加, 轴向 σ 保持相对稳定; 在区域 II 内轴向 σ 随着轴向 ε 的增加而减小。

3.2 区域 I 内岩石广义应力松弛特性

图 5 为岩石试件在区域 I 内不同围压条件下

$\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon$ 随时间 t 的演化规律, 为方便研究围压对岩石广义应力松弛特性的影响, 统一截取 0 时刻点后 10^5 s 的数据进行分析。

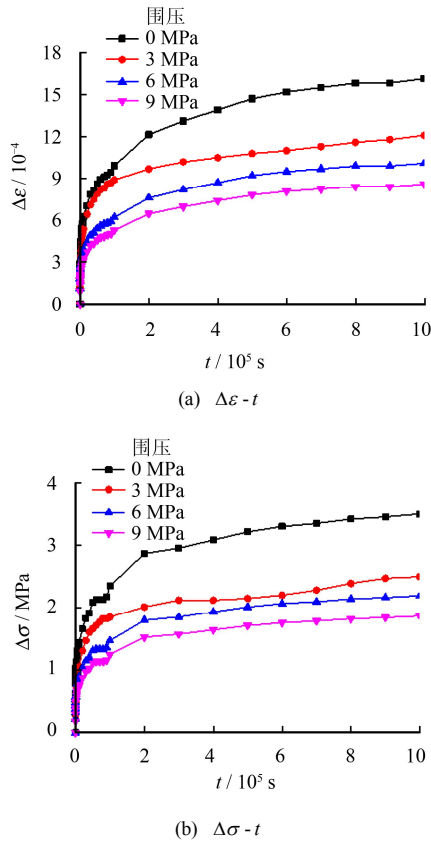


图5 区域 I 内 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 与时间 t 关系

Fig.5 Relationships between $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ and t in region I

从图 5 中可以看出, 在 0 时刻点 (广义应力松弛开始后) 后, 区域 I 内岩石试件的 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 均随 t 的增长而增大, 统计第 10^5 s 时刻岩石试件的 $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon$, 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\Delta\sigma$ 分别约为 3.51、2.50、2.19、1.86 MPa, $\Delta\sigma$ 随着围压的升高逐渐减小; 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\Delta\varepsilon$ 分别约为 16.134×10^{-4} 、 12.081×10^{-4} 、 10.084×10^{-4} 、 8.571×10^{-4} , $\Delta\varepsilon$ 也随着围压的升高逐渐减小。由于围压对岩石试件径向上存在着束缚作用, 围压越高则束缚作用越强, 岩石试件在轴向变形也就越困难, 岩石试件 $\Delta\sigma$ 与 $\Delta\varepsilon$ 均随着围压的升高而减小。图 6 为岩石试件在区域 I 内不同围压条件下 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\sigma}$ 随时间 t 的演化规律。从图中可以看出, $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\sigma}$ 均随 t 的增长而逐渐减小, 且最终达到某一较小值并保持相对稳定。对比不同围压条件下的 $\dot{\varepsilon}_0$ 、 $\dot{\sigma}_0$, 围压 0、3、6、9 MPa 条件下 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为 0.213×10^{-4} 、 0.133×10^{-4} 、 0.122×10^{-4} 、 0.102×10^{-4} /s, $\dot{\varepsilon}_0$ 随着围压的升高逐渐减小。围压 0、3、6、9 MPa 下 $\dot{\sigma}_0$ 分别为 6.76×10^{-2} 、 3.12×10^{-2} 、 2.42×10^{-2} 、 2.04×10^{-2} MPa/s, $\dot{\sigma}_0$ 也随着围压的升高

逐渐减小。

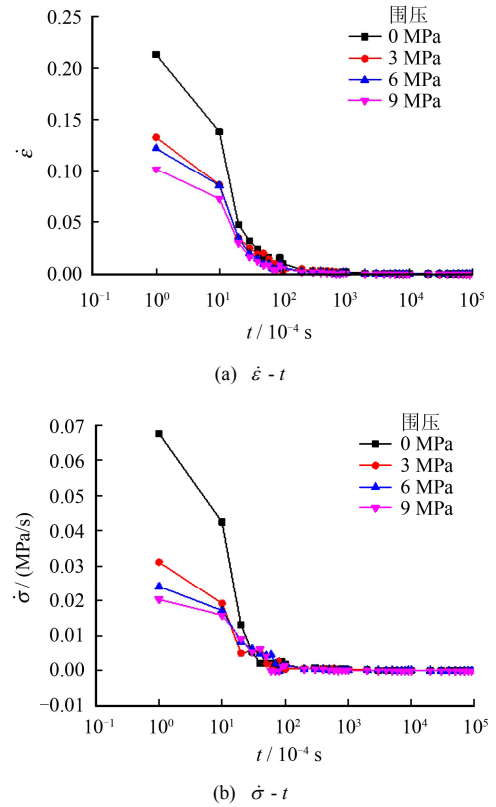


图6 区域 I 内 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 与时间 t 关系

Fig.6 Relationships between $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ and t in region I

由于岩石试件轴向 ε 与轴向 σ 在区域 I 内进行广义应力松弛的过程中均逐渐增大, 且作用于岩石试件的轴向 σ 与试验机压头位移处于同一方向上, 所以在岩石试件轴向 ε 增加的过程中试验机不断在对岩石试件做正功。

3.3 岩石蠕变特性

图 7(a)对比了岩石试件在蠕变方向上不同围压条件下 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的演化特性。从图中可以看出, 自 0 时刻起在蠕变方向上 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的增长而逐渐增加, 统计第 10^5 s 时刻岩石试件的 $\Delta\varepsilon$, 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\Delta\varepsilon$ 分别约为 13.265×10^{-4} 、 8.710×10^{-4} 、 7.159×10^{-4} 、 4.914×10^{-4} , $\Delta\varepsilon$ 随着围压的升高逐渐减小。在岩石蠕变的过程中围压的束缚作用阻碍了岩石的轴向变形, 围压越高岩石试件变形越困难。图 7(b)为岩石试件在蠕变方向上不同围压条件下 $\Delta\sigma$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自 0 时刻起 $\Delta\sigma$ 随着 t 的增长变化幅度很小, 在整个蠕变试验中试验机能很好地保持轴向应力保持相对恒定。

图 8(a)为岩石试件在蠕变方向上不同围压条件下 $\dot{\varepsilon}$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自 0 时刻起 $\dot{\varepsilon}$ 随着 t 的增长而逐渐减小, 且前期下降明显并最终达到某一较小值而后保持相对稳定。对比不同

围压条件下的 $\dot{\varepsilon}_0$, 围压 0、3、6、9 MPa 条件下 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为 0.047×10^{-4} 、 0.045×10^{-4} 、 0.029×10^{-4} 、 0.022×10^{-4} /s, $\dot{\varepsilon}_0$ 随着围压的升高逐渐减小。图 8(b)为岩石试件在应力松弛方向上不同围压条件下 $\dot{\sigma}$ 随 t 的演化规律。

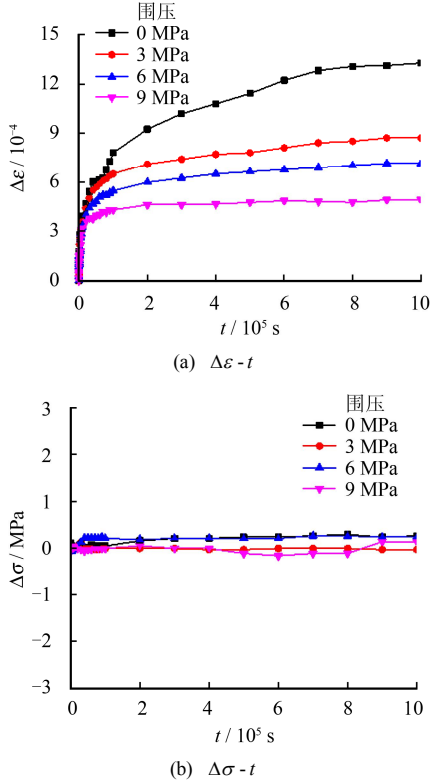


图 7 蠕变试验中 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 与时间 t 关系

Fig.7 Relationships between $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ and t in creep tests

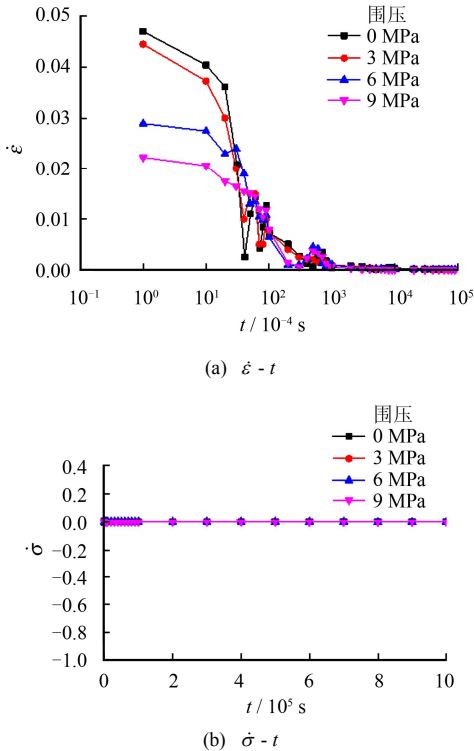


图 8 蠕变试验中 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 与时间 t 关系

Fig.8 Relationships between $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ and t in creep tests

从图 8(b)中可以看出, 自 0 时刻起 $\dot{\sigma}$ 随着 t 的增长在 0 值附近保持相对恒定, 岩石试件轴向应力保持相对恒定。

3.4 区域Ⅱ内岩石广义应力松弛特性

图 9 为岩石试件在区域Ⅱ内不同围压下 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自 0 时刻起在区域Ⅱ内 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的增长逐渐增加, $\Delta\sigma$ 随 t 的增长逐渐减小。统计第 10^5 s时刻岩石试件的 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon$, 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\Delta\sigma$ 分别约为-0.97、-0.76、-0.70、-0.45 MPa, $|\Delta\sigma|$ 随着围压的升高逐渐减小(围压越大, 轴向 σ 降低幅度越小); 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\Delta\varepsilon$ 分别约为 8.942×10^{-4} 、 7.621×10^{-4} 、 6.106×10^{-4} 和 4.994×10^{-4} , $\Delta\varepsilon$ 也随着围压的升高逐渐减小。

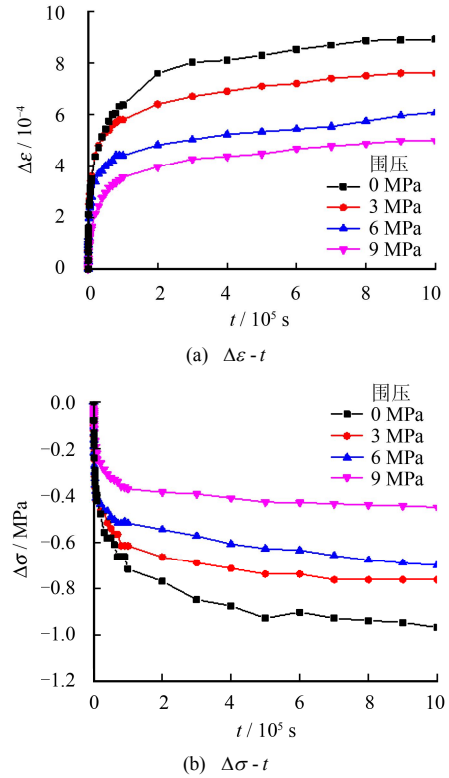


图 9 区域Ⅱ内 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 与时间 t 关系

Fig.9 Relationships between $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ and t in region II

图 10 为岩石试件在区域Ⅱ内不同围压下 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\sigma}$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 在区域Ⅱ内 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 均随 t 的增长而逐渐减小, 且最终达到某一较小值并保持相对稳定。对比不同围压下的 $\dot{\varepsilon}_0$ 和 $\dot{\sigma}_0$, 围压 0、3、6、9 MPa 下 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为 0.038×10^{-4} 、 0.033×10^{-4} 、 0.029×10^{-4} 、 0.017×10^{-4} /s, $\dot{\varepsilon}_0$ 随着围压的升高逐渐减小。围压 0、3、6、9 MPa 下 $\dot{\sigma}_0$ 分别为 8.85×10^{-3} 、 7.19×10^{-3} 、 6.58×10^{-3} 、 3.04×10^{-3} MPa/s, $\dot{\sigma}_0$ 随着围压的升高逐渐减小。

与区域Ⅰ及蠕变方向类似, 岩石试件在区域Ⅱ

内进行广义应力松弛过程中围压同样对其轴向变形存在较为明显的约束作用,围压越高变形越困难。区域II内岩石试件轴向 ε 增加的过程中,由于作用于岩石试件的轴向 σ 与试验机压头位移处于同一方向,试验机同样是在对岩石试件做正功。

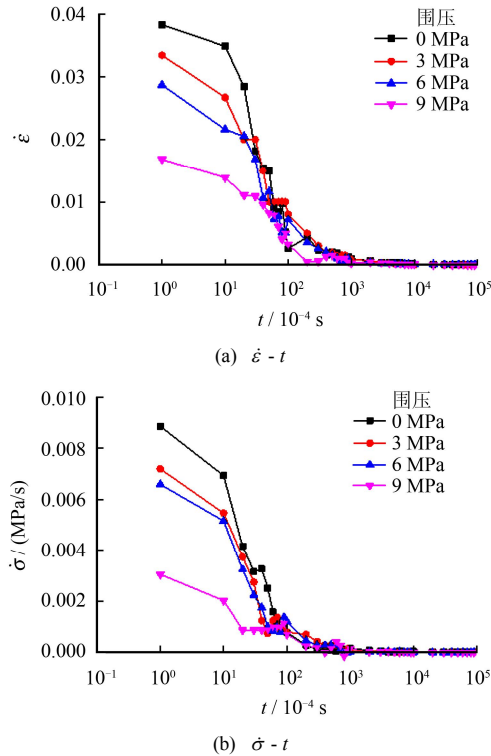


图10 区域II内 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 与时间 t 关系

Fig.10 Relationships between $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ and t in region II

3.5 区域III内岩石广义应力松弛特性

图11为岩石试件在区域III内不同围压下 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的演化特性对比。从图中可以看出,区域III内 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 均随 t 的增长逐渐降低,且前期变化快而后期变化慢。统计第 10^5 s时刻岩石试件的 $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon$,围压0、3、6、9 MPa下 $\Delta\sigma$ 分别约为-1.81、-3.76、-4.97、-5.81 MPa, $|\Delta\sigma|$ 随着围压的升高逐渐增大(围压越高,轴向 σ 降低幅度越大);围压0、3、6、9 MPa下 $\Delta\varepsilon$ 分别约为 -0.829×10^{-4} 、 -2.731×10^{-4} 、 -3.201×10^{-4} 、 -3.931×10^{-4} , $|\Delta\varepsilon|$ 也随着围压的升高逐渐增大(围压越高,轴向 ε 降低幅度越大)。图12为岩石试件在区域III内不同围压条件下 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\sigma}$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出,区域III内 $\dot{\varepsilon}$ 、 $\dot{\sigma}$ 均随 t 的增长而逐渐减小,且最终达到某一较小值并保持相对稳定。对比不同围压条件下的 $\dot{\varepsilon}_0$ 、 $\dot{\sigma}_0$,围压0、3、6、9 MPa下 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为 0.020×10^{-4} 、 0.056×10^{-4} 、 0.122×10^{-4} 、 0.133×10^{-4} /s, $\dot{\varepsilon}_0$ 随着围压的升高逐渐增加;围压0、3、6、9 MPa下 $\dot{\sigma}_0$ 分别为 6.27×10^{-2} 、 7.462×10^{-2} 、 17.61×10^{-2} 、 19.93×10^{-2} MPa/s, $\dot{\sigma}_0$ 随着围压的升高逐渐增大。

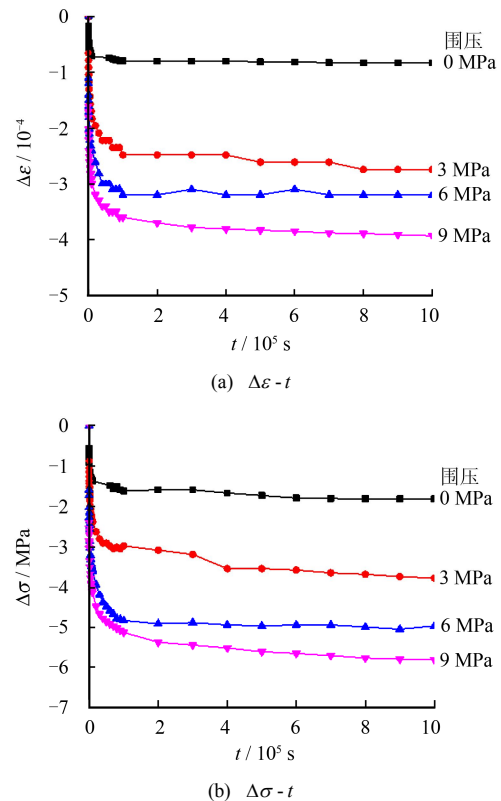


图11 区域III内 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 与时间 t 关系图

Fig.11 Relationships between $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ and t in region III

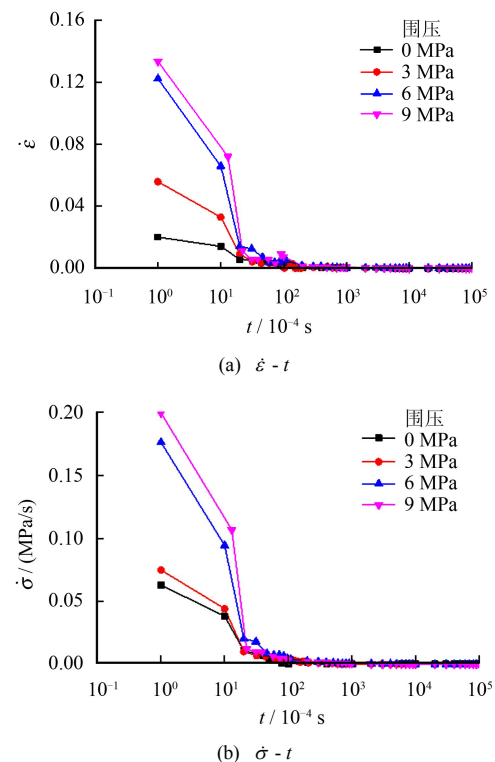


图12 区域III内 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 与时间 t 关系

Fig.12 Relationships between $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ and t in region III

区域III内岩石试件的轴向变形表现出了与区域I、II不同的规律,围压作用使得岩石试件轴向 ε 和轴向 σ 变化更加明显,围压越高,岩石试件轴向 ε 和轴向 σ 降低越明显, $\dot{\sigma}_0$ 、 $\dot{\varepsilon}_0$ 也越大。岩石试

件在区域Ⅲ内进行广义应力松弛过程中, 由于作用于岩石试件的轴向 σ 与试验机压头位移方向相反, 试验机在对岩石试件做负功, 即岩石试件在对试验机做正功, 与区域Ⅰ、Ⅱ及蠕变方向截然相反。自0时刻起岩石试件轴向 ε 是逐渐减小的, 围压的存在使得岩石试件轴向 ε 变化的更明显, 围压越高岩石试件轴向 ε 降低幅度越大。 $\Delta\sigma$ 随围压的变化规律与 $\Delta\varepsilon$ 一致, $\Delta\sigma$ 同样随围压的升高逐渐降低, 即围压越高岩石试件轴向 σ 降低越明显(见图9)。岩石试件在区域Ⅲ内的广义应力松弛过程说明在单轴或三轴压缩荷载作用下岩石除存在通过内部结构重组实现内部能量耗散这一种途径外, 还可以通过对外界做正工来实现其内部能量的释放。

3.6 岩石应力松弛特性

图13(a)为岩石试件在应力松弛方向上不同围压条件下 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的演化特性。

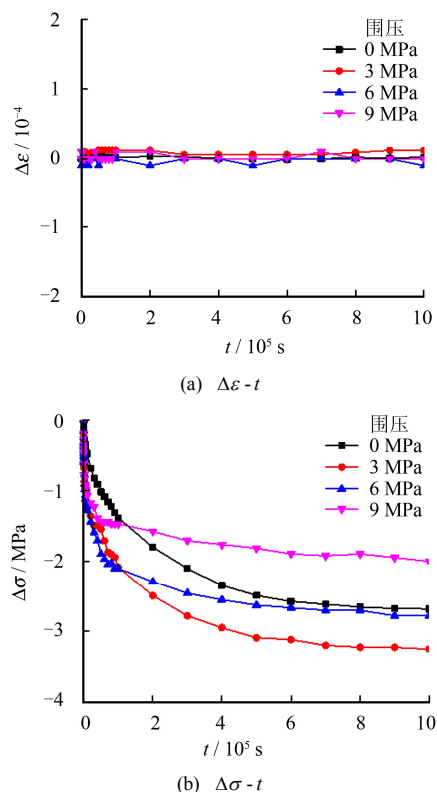


图13 应力松弛试验中 $\Delta\sigma$ 及 $\Delta\varepsilon$ 与时间 t 关系
Fig.13 Relationships between $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ and t in stress relaxation tests

从图13中可以看出, 自0时刻起 $\Delta\varepsilon$ 随 t 的增长保持相对恒定, 在试验过程中试验机处于较为稳定的状态。图13(b)为岩石试件在应力松弛方向上不同围压条件下 $\Delta\sigma$ 随 t 的演化特性。从图中可以看出, 自0时刻起 $\Delta\sigma$ 随 t 的增长而逐渐减小。统计第 10^5 s时刻岩石试件的 $\Delta\sigma$, 围压0、3、6、9 MPa条件下 $\Delta\sigma$ 分别约为-2.68、-3.25、-2.77、-2.00 MPa,

$\Delta\sigma$ 与围压之间并未展现出较为明晰的规律。

图14(a)为岩石试件在应力松弛方向上不同围压下 $\dot{\varepsilon}$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自0时刻起 $\dot{\varepsilon}$ 随着 t 的增长在0值附近保持相对恒定。图14(b)为岩石试件在应力松弛方向上不同围压下 $\dot{\sigma}$ 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自0时刻起 $\dot{\sigma}$ 随着 t 的增长而逐渐减小, 且前期降低较快并最终达到某一稳定值。对比不同围压条件下的 $\dot{\sigma}_0$, 围压0、3、6、9 MPa下 $\dot{\sigma}_0$ 分别为 4.79×10^{-3} 、 2.11×10^{-2} 、 2.38×10^{-2} 、 2.07×10^{-2} MPa/s, $\dot{\sigma}_0$ 同样未表现出与围压之间较为明确的规律。在岩石应力松弛的过程中岩石试件轴向 ε 保持相对恒定, 试验机对岩石试件不做功, 其轴向 σ 逐渐降低是内部结构不断调整, 能量逐渐耗散的结果。

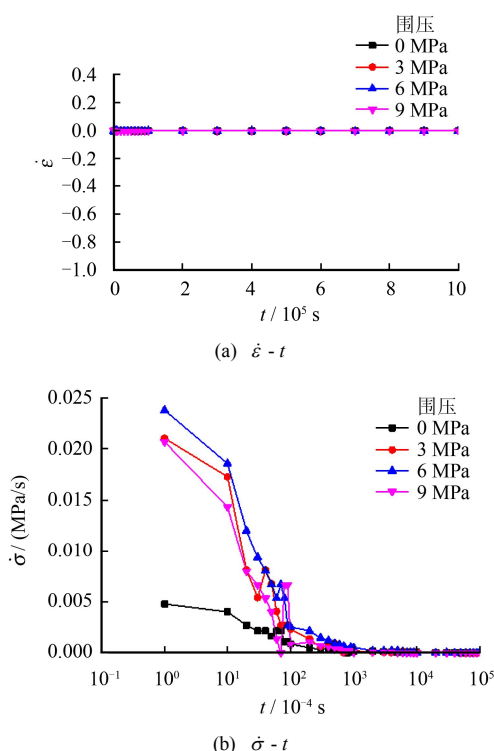


图14 应力松弛试验中 $\dot{\varepsilon}$ 及 $\dot{\sigma}$ 与时间 t 关系
Fig.14 Relationships between $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\sigma}$ and t in stress relaxation tests

3.7 不同区域内岩石广义应力松弛特性对比

图15(a)为围压3 MPa下岩石试件在不同区域内轴向 ε 随 t 的演化规律。从图中可以看出, 自0时刻起在区域Ⅰ、Ⅱ和蠕变方向上轴向 ε 随 t 的增长而逐渐增加, 在应力松弛方向上轴向 ε 保持相对恒定, 而区域Ⅲ内其轴向 ε 随 t 的增长逐渐减小。在轴向 ε 增加的两个区域中(包括蠕变), 区域Ⅰ内岩石试件的轴向 ε 变化最为迅速, 其次是蠕变方向, 区域Ⅱ内岩石试件的轴向 ε 变化最慢。统计第 10^5 s时刻岩石试件在区域Ⅰ、Ⅱ蠕变和区域Ⅱ内的 $\Delta\varepsilon$

分别约为 12.081×10^{-4} 、 8.710×10^{-4} 、 7.621×10^{-4} ，岩石试件 $\Delta \varepsilon$ 在区域 I 内最大，蠕变方向次之，区域 II 内最小。图 15(b) 为围压 3 MPa 下岩石试件在不同区域内轴向 σ 随 t 的演化规律。从图中可以看出，自 0 时刻起在区域 I 内轴向 σ 随 t 的增长而逐渐增加，在蠕变方向上轴向 σ 保持相对恒定，而在区域 III 内轴向 σ 随 t 的增长而逐渐减小。统计第 10^5 s 时刻岩石试件在区域 II 内、应力松弛方向和区域 III 内的 $\Delta \sigma$ 分别约为 -0.85 、 -3.25 、 -3.76 MPa，岩石试件 $|\Delta \sigma|$ 在区域 III 内最大，在应力松弛方向次之，在区域 II 内最小，即岩石试件轴向 σ 在区域 III 内降低幅度最大，在应力松弛方向次之，在区域 II 内降低幅度最小。

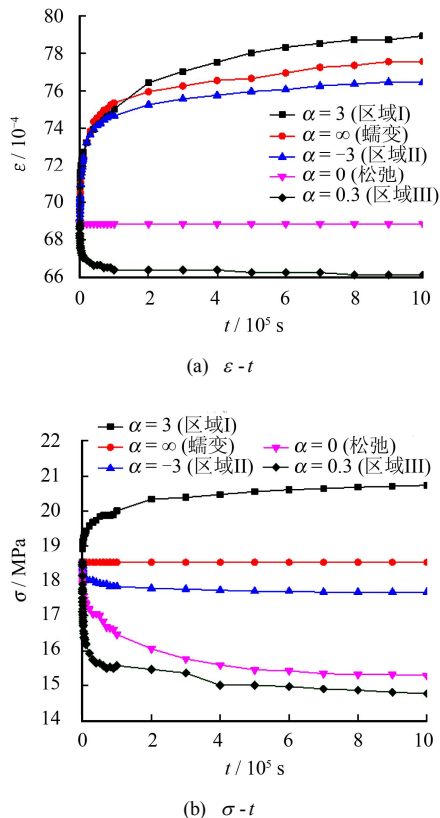


图 15 不同区域内 σ 及 ε 时间 t 关系

Fig.15 Relationships between σ , ε and t in different regions

由于在区域 I、II 内和蠕变方向上，岩石试件轴向 σ 随 t 的演化规律不尽相同，广义应力松弛过程中岩石试件在各区域内轴向 ε 变化快慢也有所不同。在轴向 ε 增加的区域中（区域 I、蠕变、区域 II），由于岩石试件在区域 I 内其轴向 σ 随 t 的增长逐渐增加，在蠕变方向上轴向 σ 保持相对恒定，而在区域 II 内轴向 σ 随 t 的增长逐渐减小，所以使得轴向 ε 在区域 I 内增加最多，在蠕变方向次之，在区域 II 内增加最小。在应力松弛方向上，0 时刻后岩石试件轴向 σ 不断减小， ε 保持相对恒定。岩石

试件的应力松弛主要是由于在 ε 保持相对恒定的限制条件下，其微裂纹及微裂隙的扩展使得岩石试件内部结构趋向于更稳定的位势发展以消耗自身储存的能量，表现为岩石试件内部应力不断降低。在区域 III 内，由于广义应力松弛开始后岩石试件轴向 ε 逐渐减小，岩石试件对外界（试验机）做正功而主动耗散其内部能量，相对于应力松弛而言，区域 III 内岩石的轴向 σ 变化会更加明显，总体表现出轴向 σ 在区域 III 内降低幅度最大，在应力松弛方向次之，而在区域 II 内降低幅度最小。

4 结 论

(1) 岩石试件在不同区域内进行广义应力松弛时，外界（试验机）对岩石试件做功的情况不尽相同。在岩石试件应变增大的情况下（区域 I、II 内和蠕变方向上），试验机对岩石试件做正功；在应力松弛方向上，试验机对岩石试件不做功，岩石试件通过内部组构重新排列来消耗内部能量；而在岩石试件应变减小的情况下（区域 III 内），岩石试件通过对外界（试验机）做正功而释放能量过程。

(2) 在区域 I、II 内和蠕变方向上，岩石试件轴向应变增量和初始轴向应变增量速率都随着围压的升高逐渐减小，且在区域 I、II 内岩石试件轴向应力增量的绝对值、初始轴向应力增量速率同样随着围压的升高逐渐降低。在应力松弛方向上，广义应力松弛开始后岩样的轴向应力增量和初始轴向应力增量速率与围压之间并未展现出较为明确的规律。

(3) 区域 III 内岩石试件轴向应变增量的绝对值和轴向应力增量的绝对值都随着围压的升高逐渐增大，且初始轴向应变增量速率和初始轴向应力增量速率同样随着围压的升高逐渐增大。围压的存在明显促进了岩石试件的轴向变形，与区域 I、II 及蠕变方向规律不甚相同。

本文依托可视化三轴压缩伺服控制系统，采用广义应力松弛试验方法成功进行了单轴及三轴压缩荷载作用下岩石的广义应力松弛试验，对比了不同情况下岩石广义应力松弛特性的围压效应，通过研究发现在广义应力松弛的不同区域内，围压对岩石广义应力松弛特性的影响并不完全相同，这对于后期开展更深层次的广义应力松弛试验研究具有一定指导及借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 孙均. 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. Rheological mechanics of geo-materials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [2] 杨圣奇. 岩石流变力学特性研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 20006.
- YANG Sheng-qi. Study on rheological mechanical properties of rock and its engineering applications[D]. Nanjing: HoHai University, 20006.
- [3] 孙均, 王贵君. 岩石流变力学的若干进展[C]//中国岩石力学与工程——世纪成就. 南京: 河海大学出版社, 2004: 123—146.
- SUN Jun, WANG Gui-jun. Some progress on study of rock rheological mechanics[C]//Rock Mechanics and Engineering in China—the Centurial Achievements. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 123—146.
- [4] 尹光志, 何兵, 王浩, 等. 深部采动影响下覆岩蠕变损伤破坏规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1390—1395.
- YIN Guang-zhi, HE Bing, WANG Hao, et al. Damage law of overlying rock induced by mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(6): 1390—1395.
- [5] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531—537.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): Experimental results[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 531—537.
- [6] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693—698.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, XIE Shou-yi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(II): Model analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(5): 693—698.
- [7] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩蠕变特性和本构关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1267—1271.
- LIU Jiang, YANG Chun-he, WU Wen, et al. Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1267—1271.
- [8] 赵旭峰, 孙均. 海底隧道风化花岗岩流变试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 403—406.
- ZHAO Xu-feng, SUN Jun. Testing study of rheological characteristics of weathered granite in undersea tunnel project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 403—406.
- [9] 王登科, 刘建, 尹光志, 等. 三轴压缩下含瓦斯煤样蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 349—357.
- WANG Deng-ke, LIU Jian, YIN Guang-zhi, et al. Test study of creep properties of gas-bearing coal specimens under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 349—357.
- [10] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 132—140.
- ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in xiangjiaba hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 132—140.
- [11] 于怀昌, 董金玉, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩峰前、峰后应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2663—2672.
- YU Huai-chang, DONG Jin-yu, LIU Han-dong, et al. Experimental study of pre-peak stress relaxation behavior of silty mudstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Supp.1): 2663—2672.
- [12] 王保军, 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 Bao-jun, LIU Xin-rong, GUO Jian-qiang, et al. Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(3):

- 445—451.
- [13] 于怀昌, 周敏, 刘汉东, 等. 粉砂质泥岩三轴压缩应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 803—811.
- YU Huai-chang, ZHOU Min, LIU Han-dong, et al. Experimental investigation on stress relaxation properties of silty mudstone under triaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 803—811.
- [14] 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 1): 49—55.
- WANG Ying-chong, WANG Ding, HAO Sheng-wang. Creep-stress relaxation coupling failure in concrete and its critical power-law behavior[J]. **Engineering Mechanics**, 2016, 33(Supp.1): 49—55.
- [15] 熊军民, 李作勤. 黏土的蠕变—松弛试验耦合[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 17—24.
- XIONG Jun-min, LI Zuo-qin. Creep-stress relaxation coupling experimental study in clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 14(4): 17—24.
- [16] 李军世. 黏土蠕变—应力松弛耦合效应的数值探讨[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 294—297.
- LI Jun-shi. Numerical discussion on coupled effects of creep and stress relaxation of clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 294—297.
- [17] FUKUI K, OKUBO S, NISHIMATSU Y. Generalized relaxation behaviour of rock under uniaxial compression[J]. **Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan**, 1992, 108(7): 543—548.
- [18] OKUBO S, ZHANG Hai-long, XU Jiang. Numerical simulation on generalized relaxation of sanjome andesite[J]. **Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan**, 2014, 130(8): 428—433.
- [19] HASHIBA K, FUKUI K. Time-dependent behaviors of granite: Loading-rate dependence, creep, and relaxation[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(7): 2569—2580.
- [20] 张海龙, 许江, 大久保诚介, 等. 河津凝灰岩广义应力松弛特性及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1—8.
- ZHANG Hai-long, XU Jiang, OKUBO Seisuke, et al. Generalized relaxation properties and numerical simulation of Kawazu tuff[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 1—8.

桩基工程技术进展 2017

著译者: 高文生 主编 版次: 第一版 出版时间: 2017-09 开本: 国际 16 开①
 出版单位: 中国建筑工业出版社 装帧: 平膜 标准书号: 978-7-112-21119-7 页数: 594

【内容简介】由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会与中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会主办的第十三届全国桩基工程学会会议定于 2017 年 10 月在合肥召开, 会议主题包括桩基理论与试验研究、桩基工程设计研究与实践、桩基施工技术与质量控制、高铁(路桥、码头)工程中的桩基技术、特殊岩土中的桩基工程、桩基工程事故处理与典型案例、桩基检测与桩基风险评估、桩基工程技术标准有关问题。为筹备本次学术会议成立了学术委员会和论文编辑委员会, 负责论文集的审阅和出版工作。

【读者对象】从事桩基设计、施工、检测技术人员和科研人员。

【目录】一、桩基工程理论研究 二、桩基工程设计与施工 三、桩基检测与试验 四、桩基工程其他相关研究与应用

(信息来源: 中国建筑书店网站)