

DOI: 10.11779/CJGE201710011

加卸载条件下石英岩蠕变 - 渗流耦合规律试验研究

江宗斌¹, 姜谔男¹, 李宏², 王善勇³

(1. 大连海事大学道桥研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 大连理工大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116026; 3. 澳大利亚纽卡斯尔大学土木系)

摘要: 以大东山隧道的石英岩为研究对象, 进行循环加卸载条件下岩石蠕变 - 渗流耦合试验, 分析了岩石加卸载过程中的蠕变、渗透性变化规律和渗流 - 蠕变耦合机理, 得到压密阶段、裂纹扩展阶段和裂纹贯通阶段岩石体积应变的发展规律, 总结了渗透率与体积应变之间的关系。试验表明: 轴向荷载 0~50 MPa 为压密阶段, 继续加载则产生不可恢复变形, 当达到 160 MPa 时蠕变曲线进入加速段; 随着轴向荷载水平的提高, 渗透率总体趋势先降低后增高, 最小值出现在最大压密点, 蠕变过程进入加速段以后渗透率急剧增大。采用 FLAC^{3D} 中的 Cvisc 模型为蓝本, 以体积应变为桥梁建立 ZSI (zone state index) 与渗透率的关系, 自主开发了基于应变软化的改进非线性蠕变西原模型, 对试验结果进行验证。数值模拟表明: 靠近进水端的渗透率比出水端变化快, 不同应力下 ZSI 值云图的破损区与试验中岩样的“V”型剪切带破坏模式基本一致, 渗透率的理论曲线与计算曲线吻合较好。说明提出的模型能够很好地反映加卸载条件下岩石蠕变 - 渗流耦合特性和局部破坏规律。

关键词: 循环加卸载; 蠕变 - 渗流耦合; 渗透率; 体积应变; 单元安全指标

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2017)10 - 1832 - 10

作者简介: 江宗斌(1987 -), 男, 博士, 主要从事岩土地下工程岩石流变方面的研究工作。E-mail: jzb1987@126.com。

Creep-seepage coupling laws of quartzite under cyclic loading-unloading conditions

JIANG Zong-bin¹, JIANG An-nan¹, LI Hong², WANG Shan-yong³

(1. Highway and Bridge Institute of Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Center of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116026, China; 3. The University of Newcastle, NSW 2308, Australia)

Abstract: The quartzite of Dadongshan Tunnel is taken as the research object to carry out rock creep and seepage coupling experiments under cyclic loading-unloading conditions. The creep characteristics, permeability and seepage-creep coupling mechanism are analyzed. The development laws of volumetric strain in the phase of densification, crack propagation and crack coalescence are acquired. The relationship between permeability and volumetric strain is summarized. It is indicated that the axial loads between 0 and 50 MPa are in compression phase. If the loads increase, the unrecoverable deformation will be generated. When the loads reach up to 160 MPa, the creep curve enters into the accelerating period. With the increase of axial load level, the general tendency of permeability first decreases and then increases, and the minimum value appears at the largest densification points. After the creep process enters into accelerating period, the permeability sharply increases. Using the Cvisc model from FLAC^{3D} as the basis and by introducing the zone state index (ZSI) into the volumetric strain, the relationship between ZSI and permeability is established. Numerical simulations are conducted to verify experimental results by adopting a nonlinear creep Nishihara model based on the strain softening. The results show that the permeability along with the development of the time in the process of loading near the inlet side of the permeability changes quickly. The damaged area of ZSI contours is coincided basically with the failure mode of the test samples in the "V"-typed shear zone. The theoretical curves are in good agreement with the numerical ones. The proposed model can reflect the creep-seepage coupling characteristics and the local failure rules of rock under loading-unloading conditions.

Key words: cyclic loading-unloading; creep-seepage coupling; permeability; volumetric strain; ZSI

0 引 言

大量岩体工程中的失稳、破坏并非是因为围岩的强度不足, 而是由于围岩随时间推移发生了过大的流变变形, 进而导致其失稳、破坏^[1]。地下工程围岩处

在极为复杂的环境和应力状态下, 通常会伴随流变和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678101); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (3132014326); 国家基础研究计划 (“973” 计划) 项目 (2011CB013503)

收稿日期: 2016 - 07 - 01

渗流的耦合作用。在开挖过程中则表现为加载、卸载和渗流的综合作用, 透水压力影响围岩应力分布, 应力重分布导致渗透性变化。如此往复的作用, 在工程上容易引起开挖面的涌突水。

王者超等^[2]通过讨论蠕变势与塑性势之间的关系, 分析了等效变形过程的微观机制, 研究了蠕变速率和时间与不可恢复应变之间的关系; 后通过循环加卸载试验系统研究了花岗岩的疲劳力学特性, 提出内变量理论的岩石疲劳模型^[3]。乔丽苹等^[4]指出了复杂加卸载条件下的蠕变模型局限性, 提出采用不可恢复应变作为内变量来描述复杂条件下岩石蠕变性质, 并据此提出了岩石的内变量蠕变模型。徐鹏等^[5]基于岩石三轴循环加卸载蠕变试验, 引入损伤参数建立了相应的黏弹塑性蠕变模型, 该模型能较好地描述加速蠕变特性。江力宇等^[6]针对花岗岩分别进行了卸轴压和卸围压的三轴蠕变试验, 分析了花岗岩的变形特征、蠕变速率和破坏强度的变化规律, 揭示了蠕变破坏模式。但未考虑水 - 力耦合的作用。

Wang 等^[7]对沉积岩全应力 - 应变过程中渗透规律进行了测定。发现在峰值强度之前, 渗透率随轴向应力的增加而增加, 在应变软化阶段, 渗透率显著降低。Stormont 等^[8]研究了盐岩变形过程中渗透性特性, 分析了盐岩在剪缩和剪胀区内渗透性的变化规律。胡大伟等^[9]、许江等^[10]分别开展了三轴全应力应变条件下岩石渗透特征的试验研究。但并未涉及岩石长期时间效应的影响。

许多学者对渗流 - 蠕变耦合规律进行了研究。如: 阎岩等^[11-12]通过数值模拟对渗流场中岩石的流变特性进行了研究, 之后利用自主改进和研制的设备开展了岩石渗流 - 流变耦合试验, 研究了不同应力及水压作用下岩石试样的流变力学特性, 最后给出了体积应变、渗透系数等变化规律。杨红伟等^[13-14]以砂岩为研究对象开展了渗流水压力下的分级加载蠕变试验, 得出了岩石空隙通道具有记忆性特征的结论。何峰等^[15]通过不同围压、孔压条件下蠕变破裂过程中的渗透性试验, 拟合出相应的蠕变 - 渗透率曲线, 揭示了渗透率和煤岩蠕变损伤变化规律的一致性。

开展循环加卸载的蠕变 - 渗流试验对于模拟岩体开挖过程中的扰动, 更符合实际工程情况。但目前仅见潘荣锷等^[16]采用卸围压的方式进行煤岩渗透 - 力学试验, 研究了不同荷载条件下煤体的气体渗透演化规律。针对此条件下水渗流的试验研究鲜见报道。因此, 本文以大东山隧道的石英岩为研究对象, 开展水渗流 - 蠕变耦合加卸载试验。研究结果可以为海底隧道和沿海地铁等富水区岩体工程的海水入侵、涌突水

防治提供一定的理论指导。

1 渗流 - 蠕变耦合加卸载试验

1.1 试验仪器

本次蠕变 - 渗流耦合加卸载试验采用大连海事大学与长春朝阳试验机厂联合研制的多功能 RLW-2000 岩石三轴仪, 试验设备如图 1 所示。该设备可进行高低温、高孔隙压、渗透环境下的全应力应变试验和流变试验。采用德国 DOLI 公司生产的全数字伺服控制、滚珠丝杠和液压技术能很稳定的控制渗透压、围压和轴压。最高围压可达 80 MPa, 最高渗透压可达 60 MPa, 控制精度在 ±0.01% 以内。



图 1 RLW-2000 岩石三轴流变仪及渗流装置

Fig. 1 RLW-2000 rock rheological triaxial apparatus and seepage device

1.2 试样制备

试验所选岩样取自大连普兰店湾南侧的大东山隧道。石英岩的结构致密, 颗粒细腻, 硬度较大, 节理发育不明显。主要矿物成分为石英、云母和赤铁矿等, 其中石英含量 85.7%。岩样呈灰白色相间, 表面无明显裂痕, 由密度测试和强制饱和试验得知, 此石英岩属于低渗透性硬岩材料, 平均干密度为 2789.24 kg/m³, 孔隙度为 0.63%。按照国际岩石力学学会 (ISRM) 试验规程加工, 剔除破损和目测差异大的试样, 共制成 5 个 Φ50 mm × 100 mm 的圆柱状标准试件, 编号为 S1~S5, 试样均取自同一块岩体。

1.3 试验原理

为了便于分析和测试岩石渗透率, 做如下几点假设: ①渗透水为不可压缩的流体; ②岩体内部初始孔隙和微裂纹分布较均匀, 可视为孔隙介质; ③恒定稳定渗流视为连续渗流; ④石英岩为低渗透岩石, 蠕变试验过程中流体渗流速度较小, 可假定符合达西定律。

根据达西定律推导出渗透率计算公式^[17]为

$$k = \frac{\mu LV}{A \Delta P \Delta t} \quad (1)$$

式中 k 为岩样的渗透率 (m²); V 为时刻渗流流体流入体积 (m³); μ 为水的动力黏滞系数, $\mu=1 \times 10^{-3}$

$\text{Pa}\cdot\text{s}$ ($T=20^\circ\text{C}$)； L 为试样沿渗流方向的长度 (m)； Δt 为时间 (s)； A 为试样的截面积 (m^2)； ΔP 为试样两端的压力水头 (Pa)。

1.4 试验方法

试验过程中，实验室内温度始终保持在 25°C 。考虑到蠕变、渗流试验可能会受到来自周围机器和环境的振动干扰，在本试验过程中，其他振动性试验不同时进行，试验环境的振幅、频率可以忽略。

试验前对石英岩进行了常规三轴压缩试验，选择 2 个试样 S1 和 S2 在围压 10 MPa 下进行三轴压缩试验，获取平均瞬时抗压强度为 165 MPa。根据该强度确定出加卸载过程中的轴向偏应力水平。

表 1 加卸载蠕变 - 渗流试验方案

轴向应力水平	加载时长/h	渗透压/MPa	围压/MPa
加载至 10 MPa	6	5	10
卸载至 5 MPa	2	5	10
加载至 20 MPa	6	5	10
卸载至 5 MPa	2	5	10
加载至 30 MPa	6	5	10
卸载至 5 MPa	2	5	10
... (破坏)

试验前先将制备好的岩样在清水中进行抽真空强制饱和 8 h。渗流试验过程采用稳态法进行，岩样进口端施加稳定水压 5 MPa，出口端和大气相连通，保持恒定压差，记录稳定后的渗流量。整个过程采用定围压，即围压始终保持为 10 MPa。然后按照表 1 进行，具体试验操作步骤为：

(1) 将饱和的标准样放入压力室内，调整轴向和径向引伸计位置，初始应变清零。

(2) 蠕变试验开始时，首先，施加 2 kN 荷载保证试样两端被压头挤紧。然后，以围压系统滚珠丝杠轴承加载速率为 25 mm/min 施加围压至预定值。

(3) 采用水压系统滚珠丝杠轴承为 20 mm/min 的移动速率，将试样进口端施加预定的渗透压差，另一端外接大气压，稳定保持 12 h。

(4) 采用轴压系统滚珠丝杠轴承为 1 mm/min 的移动速率，将试样施加至预定的轴向应力水平。在此条件下蠕变 6 h 后，仍然以滚珠丝杠 1 mm/min 的移动速率卸载至预定轴向应力值，蠕变 2 h。然后进行下一级荷载的施加，按表 1 方案加载至岩样破坏。

(5) 岩样破坏后，先卸载水压到 0，然后卸载轴压到 0，最后卸围压到 0，导出试验数据进行整理。

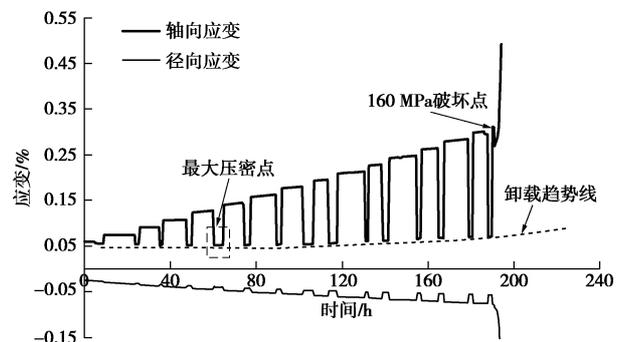
2 试验结果及分析

2.1 循环加卸载过程的渗流 - 蠕变曲线分析

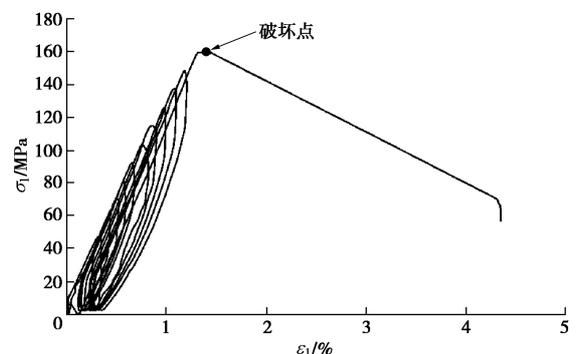
选择 S3~S5 3 个试件进行试验，获得的试验过程曲线类似。采用上述试验步骤得到石英岩的加卸载蠕变曲线和应力 - 应变全过程曲线，取最具代表性的编号为 S3 的试样进行分析，如图 2 所示。

从图 2 (a) 中的蠕变曲线中可以看出，随着逐级加载和卸载，石英岩的应变表现出增涨→回落→再增涨的变化规律逐级递增，最终在轴向偏应力达到 160 MPa 时，岩样经过短暂的应变调整后，进入加速段。整个过程的总应变较小，轴向应变达到 0.3%、径向应变达到 -0.075% 时就发生破坏，而且破坏速率较快，有明显的脆性特征。

加载开始时，首先产生瞬时变形，随后进入蠕变阶段，而且随着加载应力水平的增大，蠕变变形速率加快。当轴向偏应力卸载到固定水平 5 MPa 后，轴向应变重新跌落到卸载趋势线附近。趋势线呈先减小后增大的走趋，从加载开始到应变最低点之前的时间内，岩样处于压密阶段，此时的应力 - 应变关系主要表现为明显的黏弹性特征，并无明显的不可恢复变形。受荷试件在到达最大压密点之后，逐渐产生了不可恢复变形。此时岩样的蠕变特性主要表现为黏弹塑性特征，这是由于孔隙水压和外部循环荷载导致岩石内部结构产生明显损伤所致。



(a) 加卸载全过程的蠕变曲线



(b) 加卸载过程的应力 - 应变滞回曲线

图 2 蠕变 - 渗流耦合加卸载全过程的试验曲线

Fig. 2 Test curves under loading-unloading of creep-seepage coupling

从图 2 (b) 中可以看出，循环加卸载曲线并不闭合，岩样的应力 - 应变曲线出现了明显的塑性滞回环，

且滞回环随轴向偏应力的增大逐渐增大, 当轴向偏应力达到 160 MPa 时, 岩样破坏。

2.2 渗透率在循环加卸载过程中的变化规律分析

通过式 (1) 计算获得循环加载过程中的渗透率的演化规律, 如图 3 所示。由图 3 (a) 可知, 试验开始后 0 时刻的渗透率为 $2.11 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 施加轴向荷载导致渗透率瞬时降低, 卸载后渗透率反而瞬时升高。这是由于轴向荷载的施加打破原有平衡, 岩粒、骨架在外力作用下受到挤压, 填实了颗粒之间的部分空隙, 排布更加紧密, 透水性降低; 当轴向应力卸回至 5 MPa 时, 岩体在前一步加载过程中贮存的势能得到释放, 岩体变形弹回, 内部岩粒在孔压和应力的作用下趋于返回原位置。前 60 h 为压密阶段, 渗透率表现出减小的趋势。60 h 之后, 渗透率逐渐增大。当轴向应力达到 160 MPa 时, 蠕变进入加速阶段, 标志着岩样破坏, 此时渗透率突然急剧增大。

从图 3 (b) 中可以看出, 轴压 40 MPa 下, 前 5 个小时蠕变曲线处于初始段, 蠕变速率为 $2.2 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 进入稳定段的蠕变速率为 $9.09 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$, 整体蠕变量和速率较小, 该轴压下岩样处于压密阶段, 蠕变过程中的渗透率也以 $0.02 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{h}$ 的速率降低。从图 3 (c) 中的蠕变曲线可以看出, 初始段所持续的时间比图 (a) 中明显减少, 蠕变速率增大, 约 $6.75 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。稳定段蠕变速率也增大到 $2.65 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 。轴压 100 MPa 下渗透率随蠕变时间呈现出增大的趋势, 平均速率为 $0.0168 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{h}$ 。此时岩粒之间产生滑移、错位, 新生微裂纹增多, 孔隙水压的有效应力和湿润作用促使空隙的扩张和萌生, 同时岩石内部材料的劣化又促进了蠕变速率的增加。

2.3 加载后渗透率与体积应变的规律分析

岩石变形过程中体积应变经历了压密和扩容阶段, 岩石体积应变按照以下公式计算:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_D + 2\varepsilon_R \quad (2)$$

式中, ε_v , ε_D 和 ε_R 分别为体积应变, 轴向应变和径向应变。

图 4 分别给出了 S3、S4 和 S5 的轴向应力和渗透率随体积应变的变化规律, 可分为以下几个阶段阐述:

(1) 压密阶段。岩石是由不同形状与尺寸的矿物颗粒组成的多孔材料, 在低应力水平作用下, 岩石试件主要表现为原生裂隙压密和孔洞的闭合等局部调整。随着蠕变时间的推移, 试件的发生体积剪缩, 体积应变增大(体积应变的值增大为剪缩, 减小为剪胀), 液体主要通过岩石内部晶粒骨架连通的孔隙渗流, 渗透率表现为减小的趋势, 渗透率最小值出现在体积应变拐点之前。

(2) 裂纹扩展阶段。渗透率随着体积应变的增大而增大。随着轴向应力的增大, 使得微孔洞体积扩展和成长, 孔隙水压力逐渐渗入并填充到形成的微孔洞内, 随着蠕变时间的增长, 微孔洞周围产生不可恢复的塑性变形。循环加卸载产生的外界不平衡力、渗流力以及水的润湿作用更加大了对岩石内部晶粒之间排布位置的扰动, 这种扰动具有部分不可恢复性, 渗透性也逐渐增强。

(3) 裂纹贯通阶段。随着微孔洞的增多, 它们之间贯通、连接形成了微裂纹, 当微裂纹周围的材料达到临界破坏强度后, 微裂纹汇合形成明显剪切带, 孔隙水迅速充填破裂带。本阶段, 体积应变达到最大值后(拐点处)试样开始出现剪胀, 随后体积应变急剧减小, 渗透率迅速增大, 最终破坏。

2.4 卸载后渗透率与体积应变的变化规律分析

按照试验条件, 每逐级加载一次后, 要卸载至 5 MPa 蠕变 2 h。根据试验结果, 获得了卸载后的渗透

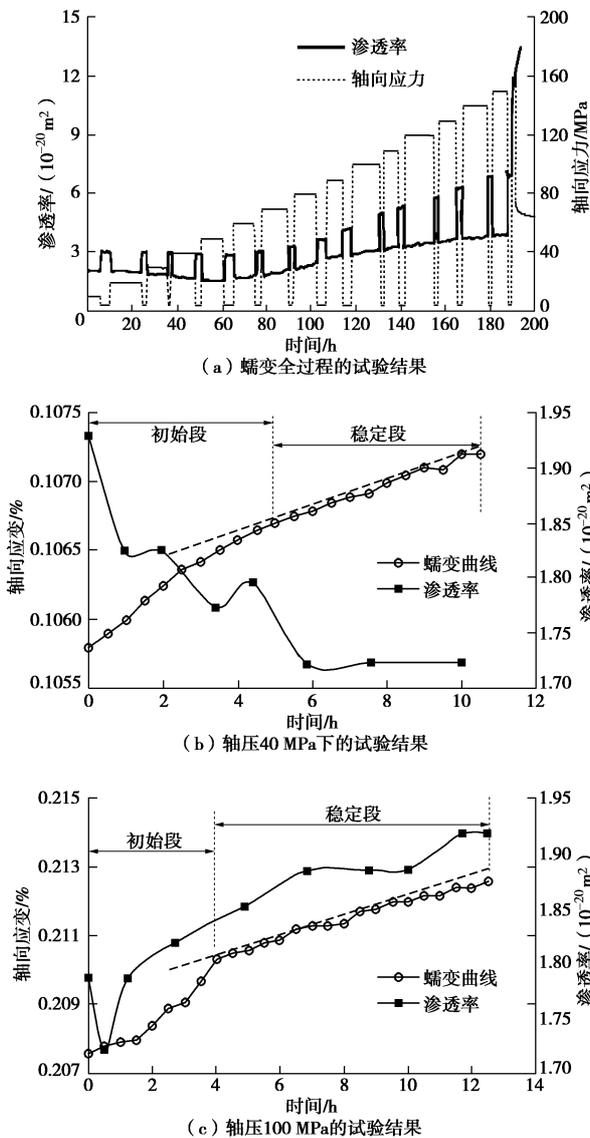


图 3 渗透率随轴向应力和加载时间的变化规律

Fig. 3 Changing laws of k with axial stress and loading time

率和体积应变与加卸载次数(卸载完成后为一个周期)的关系并进行拟合,关系如图5所示,拟合结果见表2。

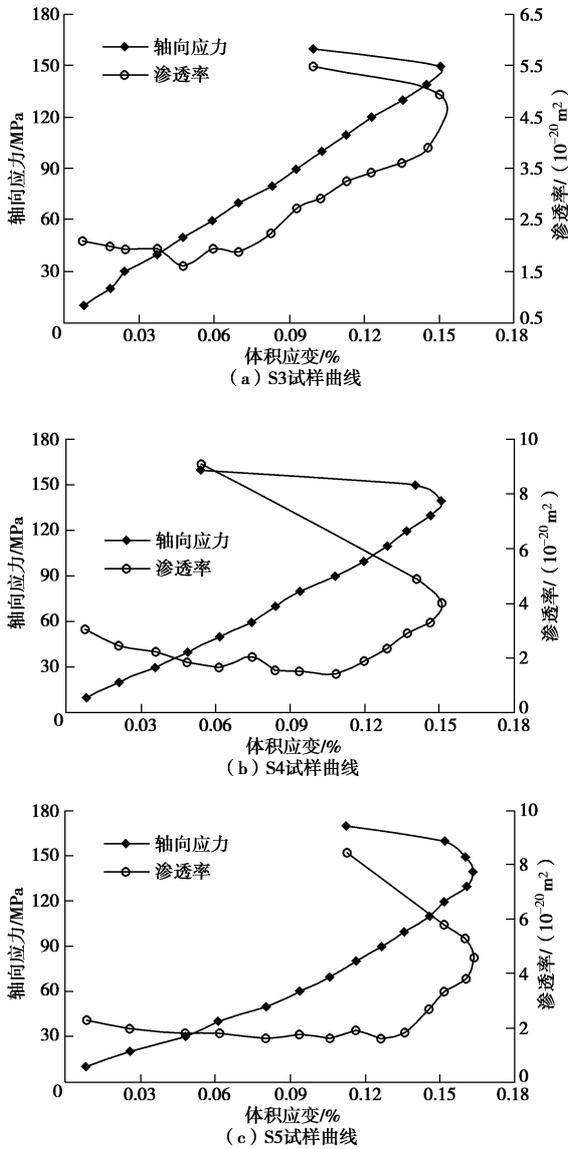


图4 加载过程中渗透率和体积应变的关系

Fig. 4 Relationship between permeability and volumetric strain in loading process

表2 拟合结果

Table 2 Fitting results

参数	拟合公式	R ²
渗透率	$k = 0.0285x^2 - 0.1953x + 3.264$	0.98
体积应变(无渗流)	$\varepsilon_v = 0.0004x^2 - 0.0097x + 0.026$	0.99
体积应变(有渗流)	$\varepsilon_v = 0.0003x^2 - 0.0095x + 0.018$	0.99

注:表中 k 为渗透率, ε_v 为体积应变, x 为加卸载次数 ($0 \leq x \leq 16$)。

由图5可知,随着加卸载次数的增加,渗透率(当 $n \leq 6$ 次)略有降低,从 $3.11 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 降至 $2.92 \times 10^{-20} \text{ m}^2$,随后逐渐增大,经过拟合其符合二次多项式变化

规律。施加渗流的体积应变随着加载次数的增加而非线性减小。与不施加渗流的同条件蠕变试验对比发现,两者变化规律基本相同,施加渗流的试样(初始体应变为 0.0108%) 体积应变曲线在无渗流(初始体应变为 0.0159%) 的曲线下方。将3条曲线按照二次多项式拟合, R^2 都在 0.98 之上,拟合效果理想。

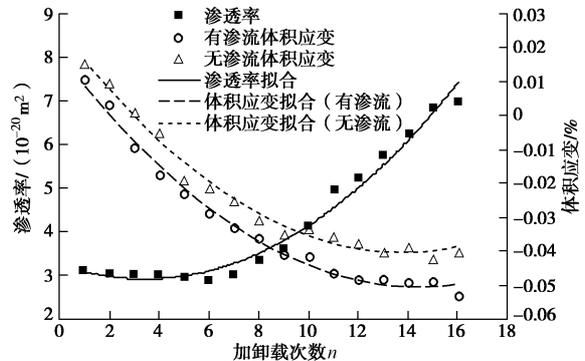


图5 渗透率和体积应变随加卸载次数的变化曲线(卸回到 5 MPa 后)

Fig. 5 Change of volumetric strain and permeability with loading-unloading times (unloading back to 5 MPa)

3 基于 ZSI 的渗流 - 蠕变耦合原理

由试验结果分析可知,渗流 - 蠕变耦合过程中,渗透率和体积应变存在密切的关系。通过体积应变引入单元安全指标 ZSI 值,建立 ZSI 值与渗透率的关系,对试验结果进行验证。

3.1 单元安全指标 ZSI 原理

通过统一的指标建立岩土材料从弹性到破坏全过程的定量评价方法,将岩体划分为单元,提取单元的应力应变状态,以单元状态指标 ZSI 值表征岩体单元的安全或危险程度。主应力符号以拉应力为正,压应力为负,且 $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$, ZSI 推导如下:

(1) 弹性阶段 ($\varepsilon^{ps} = 0, \varepsilon^{pt} = 0$)

ε^{ps} , ε^{pt} 分别为塑性剪切应变和塑性拉伸应变。在弹性阶段单元的塑性应变为 0,此时根据单元实际的应力状态点 P 计算材料单元的安全指标。当 $\sigma_1 \leq 0$ 时,由于没有拉应力存在,按照单元处于弹性剪切状态来考虑。ZSI 值可取为剪切与拉伸同时考虑的情况下的较小值。弹性段的 ZSI 可表达式为

$$ZSI = \begin{cases} \frac{\frac{I_1 \sin \varphi}{3} - c \cos \varphi}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi - \cos \theta_\sigma\right) \sqrt{J_2}} & (\sigma_1 \leq 0) \\ \min \left(\frac{\frac{I_1 \sin \varphi}{3} - c \cos \varphi}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi - \cos \theta_\sigma\right) \sqrt{J_2}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_1} \right) & (\sigma_1 > 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 I_1 为应力张量第一不变量; J_2 为偏应力张量第二不变量; θ_σ 为应力罗德角; σ_t 为抗拉强度; φ 为内摩擦角。

弹性阶段 $ZSI \in [1, +\infty)$, ZSI 大于 1 时, 单元处于弹性阶段, ZSI 值越大, 安全性越高, 当 $ZSI=1$ 时, 单元开始进入屈服阶段。

(2) 屈服阶段 ($0 < \varepsilon^{ps} \leq \bar{\varepsilon}^{ps}$, $\varepsilon^{pt}=0$; $\varepsilon^{ps}=0$, $0 < \varepsilon^{pt} \leq \bar{\varepsilon}^{pt}$; $0 < \varepsilon^{ps} \leq \bar{\varepsilon}^{ps}$, $0 < \varepsilon^{pt} \leq \bar{\varepsilon}^{pt}$)

当应力超过了屈服应力认为材料进入塑性软化的阶段, 此时岩石出现了塑性变形, 等效塑性应变大于 0。对岩体而言, 等效塑性应变可以表示材料的累计损伤程度。因此可将破坏临界点的等效塑性应变值为破坏的判据。 $\varepsilon^{ps} / \bar{\varepsilon}^{ps}$ 可以表示材料在剪切屈服段距离破坏段的接近程度, 取 $\varepsilon^{ps} / \bar{\varepsilon}^{ps}$ 的相补参量 ZSI 作为剪切屈服状态的相对于破坏状态指标, 这样处理的优点是可将屈服阶段的值域与弹性阶段明显的区分开来, 并且仍然保持值越小, 安全性越低的趋势, 即

$$ZSI = 1 - \frac{\varepsilon^{ps}}{\bar{\varepsilon}^{ps}} \quad (4)$$

同理, 当材料处于拉伸屈服段时, 公式如下:

$$ZSI = 1 - \frac{\varepsilon^{pt}}{\bar{\varepsilon}^{pt}} \quad (5)$$

值得注意的是, 当 $0 < \varepsilon^{ps} \leq \bar{\varepsilon}^{ps}$, $0 < \varepsilon^{pt} \leq \bar{\varepsilon}^{pt}$ 时表示单元剪切和拉伸状态均达到了屈服, ZSI 值取两种情况中的较小值。

$$ZSI = \min\left(1 - \frac{\varepsilon^{ps}}{\bar{\varepsilon}^{ps}}, 1 - \frac{\varepsilon^{pt}}{\bar{\varepsilon}^{pt}}\right) \quad (6)$$

(3) 破坏阶段

当等效塑性应变变量超过极限等效塑性应变时, 材料进入破坏状态, $\varepsilon^{ps} > \bar{\varepsilon}^{ps}$ 单元发生剪切破坏, $\varepsilon^{pt} > \bar{\varepsilon}^{pt}$ 单元发生拉伸破坏。此时剪切与拉伸状态的 ZSI 表达式与式 (6) 相同。随着等效塑性应变增大, ZSI 持续减小, 破坏阶段的 $ZSI \in (-\infty, 0)$, ZSI 越小, 表示破坏程度越高。

3.2 渗流-蠕变耦合原理

关于渗透率与应力、应变关系的方程有很多, 推导方法包括经验公式^[18], 间接公式^[19]和理论模型^[20]等方法。但大多数方程参数较多, 适应性不好。体积应变能更好的反映单元屈服、软化和破坏过程中渗透率的变化。

通过第 2 节中的研究得知渗透率 k 与体积应变 ε_v 在蠕变过程中不同阶段 (压密段、屈服段、破坏段) 的关系紧密, 结合 ZSI 基于 Kozeny-Carman 公式^[19, 21]建立了渗透率与体积应变的关系式:

$$k = \begin{cases} k_0 \frac{(1 + \varepsilon_v / n_0)^3}{1 + \varepsilon_v} & (ZSI \geq 1) \\ \xi k_0 \frac{(1 + \varepsilon_v / n_0)^3}{1 + \varepsilon_v} & (0 \leq ZSI < 1) \\ \xi' k_0 \frac{(1 + \varepsilon_v / n_0)^3}{1 + \varepsilon_v} & (ZSI < 0) \end{cases} \quad (7)$$

其中孔隙度的演化方程为

$$n = \frac{n_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v} \quad (8)$$

式中 n_0 为初始孔隙度; ε_v 是体积应变; k_0 是初始渗透率, m^2 。屈服阶段和破坏阶段分别用突跳系数 ξ , ξ' 来表征。 ξ , ξ' 由试验拟合获得。

编制 FISH 程序, 调用 whilestepping 命令, 计算不同状态下单元的渗透率, 更新单元渗透参数并赋予到每个单元上。

4 基于应变软化的非线性蠕变模型及计算验证

4.1 基于应变软化的非线性蠕变模型

非线性西原应变软化模型是在西原模型的基础上, 将原有的黏塑性体上的线性黏壶元件替换为非线性黏壶元件, 并串联一个基于 Mohr-Coulomb 准则的应变软化塑性元件, 其一维元件模型如图 6。

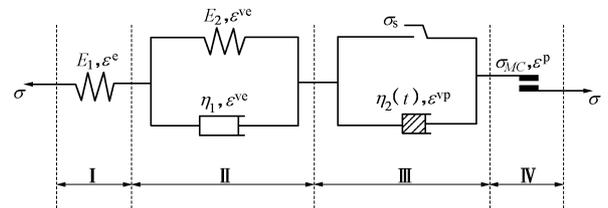


图 6 一维条件下的非线性西原应变软化模型

Fig. 6 Nonlinear Nishihara strain-softening model in one-dimensional space

其中 E_1 为 Hooke 弹簧的弹性模量, E_2 为 Kelvin 体中弹簧的弹性模量, η_1 为 Kelvin 体中黏壶的黏滞系数, σ_s 是基于 Mohr-Coulomb 准则的长期屈服应力, σ_{M-C} 为 Mohr-Coulomb 准则短期加载屈服应力。 ε^e , ε^{ve} , ε^{vp} , ε^p 分别为 Hooke 体弹性应变, Kelvin 体黏弹性应变, Binham 体中的黏塑性应变, 应变软化塑性元件的塑性应变。

以往的研究成果^[22]指出岩石的损伤变量 D 与时间 t 呈指数型关系, 因此可以假定 $\eta_2(t)$ 的衰减趋势同样呈指数型关系,

$$\eta_2(t) = \begin{cases} \eta_2 & (\varepsilon^{ps} \leq \varepsilon^{ps} \text{ 且 } \varepsilon_c^{ps} \leq \varepsilon_c^{pt}) \\ \eta_2 e^{\alpha(t-t_c)} & (\varepsilon^{ps} > \varepsilon^{ps} \text{ 或 } \varepsilon_c^{ps} > \varepsilon_c^{pt}) \end{cases} \quad (9)$$

式中 t_c 为进入加速蠕变阶段的起始时间; α 为调节

时间量纲的拟合参数。

加速段非线性黏塑性体蠕变速率：

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2 e^{\alpha(t-t_c)}} \quad (10)$$

两端进行积分得到非线性黏塑性体蠕变方程：

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} e^{\alpha(t-t_c)} \quad (11)$$

则模型的蠕变方程为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}\right) & (\sigma \leq \sigma_s), \\ \varepsilon(t) &= \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t & (\sigma > \sigma_s, t \leq t_c), \\ \varepsilon(t) &= \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}\right) + \frac{1}{\alpha} \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} e^{\alpha(t-t_c)} & (\sigma > \sigma_s, t > t_c). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

当 $\sigma \leq \sigma_s$ 时，材料只发生衰减蠕变；当应力 σ 超过长期屈服应力 σ_s ，等效塑性应变未超过加速段阈值，即 $t < t_c$ 时，材料只发生等速蠕变；当应力 σ 超过长期屈服应力 σ_s ，等效塑性应变超过加速段阈值时，材料发生加速蠕变。

由蠕变长期强度屈服面和瞬时强度屈服面将整个应力空间分为 3 个区域（如图 7），当应力水平位于长期强度屈服面以内时只发生衰减蠕变，由于长期强度参数略小于瞬时强度参数，因此长期强度屈服面在瞬时强度屈服面内部，瞬时强度屈服面对应的单元状态指标为 1，则长期强度屈服面对应的单元状态指标 ZSI_s 为大于 1 的数值。而当材料的应力状态超过长期屈服强度，且等效塑性应变未达到蠕变加速段的应变阈值时，材料发生等速蠕变，蠕变加速段的应变阈值对应的 ZSI_c 可通过下式求得

$$ZSI_c = \min \left(1 - \frac{\varepsilon_c^{ps}}{\bar{\varepsilon}^{ps}}, 1 - \frac{\varepsilon_c^{pt}}{\bar{\varepsilon}^{pt}} \right) \quad (13)$$

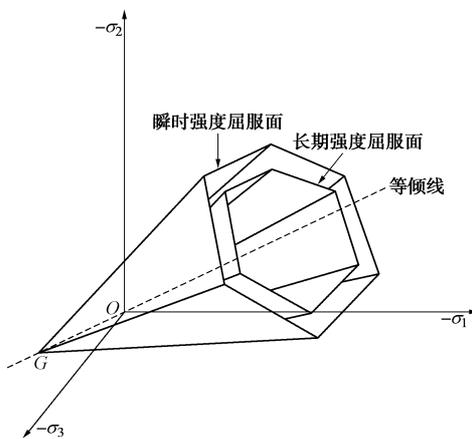


图 7 长期强度屈服面

Fig. 7 Long-term strength yield surface

由于 $0 < \varepsilon_c^{ps} < \bar{\varepsilon}^{ps}$ ， $0 < \varepsilon_c^{pt} < \bar{\varepsilon}^{pt}$ ，因此 ZSI_c 为值域 $(0, 1)$ 的数值。

当材料的应力状态超过长期屈服强度，且等效塑性应变超过蠕变加速段的应变阈值时，材料进入加速蠕变段，直至应变达到极限等效塑性应变，材料发生破坏，因此，根据单元状态指标建立蠕变方程的分段函数如下式：

$$\left. \begin{aligned} e_{ij} &= \frac{S_{ij}}{2G_0} + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}}\right) & (ZSI \geq ZSI_s), \\ e_{ij} &= \frac{S_{ij}}{2G_0} + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}}\right) + \frac{S_{ij} - S_s}{2\eta_2} t & (ZSI_c < ZSI \leq ZSI_s), \\ e_{ij} &= \frac{S_{ij}}{2G_0} + \frac{S_{ij}}{2G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}}\right) + \frac{S_{ij} - S_s}{2\eta_2} t + \frac{1}{\alpha} \frac{S_{ij} - S_s}{2\eta_2} e^{\alpha(t-t_c)} & (ZSI < ZSI_c). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 $ZSI_s > 1$ ，为长期强度对应的单元状态指标， $0 < ZSI_c < 1$ ，为加速段应变阈值对应的单元状态指标，长期强度 S_s 是通过 Mohr-Coulomb 准则确定的。用长期黏聚力 c_∞ 和长期内摩擦角 φ_∞ 来确定。

模型中的应变软化塑性元件则是根据材料在蠕变过程中等效塑性应变的变化，使岩土材料的抗剪强度参数发生衰减，同时对应力进行修正的作用，随着等效塑性应变的逐渐增大，抗剪强度参数逐渐减小并最终变为 0，导致试件破坏。采用 ZSI 分段函数的表达式方便对 3 个阶段进行量化控制，通过两个参数便可以将其区分开来。

4.2 计算验证结果分析

对于失稳破坏问题，采用理想弹塑性或应变硬化模型无法真实反应岩石峰后的软化行为，将应变软化模型结合到非线性蠕变模型中可更好的表达岩石破坏过程。因此，基于上文提出的渗流-蠕变耦合演化方程，以 FLAC^{3D} 软件提供的 Cvisc 模型为蓝本，进行二次开发。

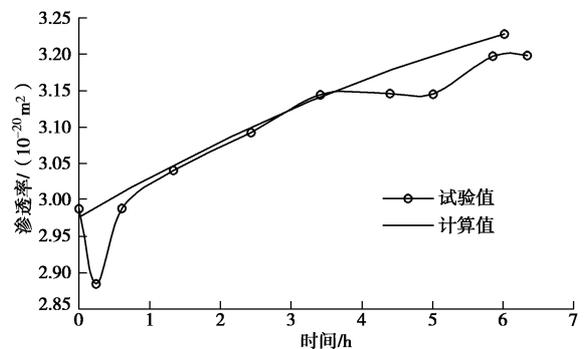


图 8 轴压 100 MPa 下的试验曲线与计算曲线对比

Fig. 8 Comparison between test and calculated curves under 100 MPa

由于篇幅限制，本节只给出了轴压水平为 100 MPa 时蠕变过程中的渗透率演化结果。图 8 是渗透率

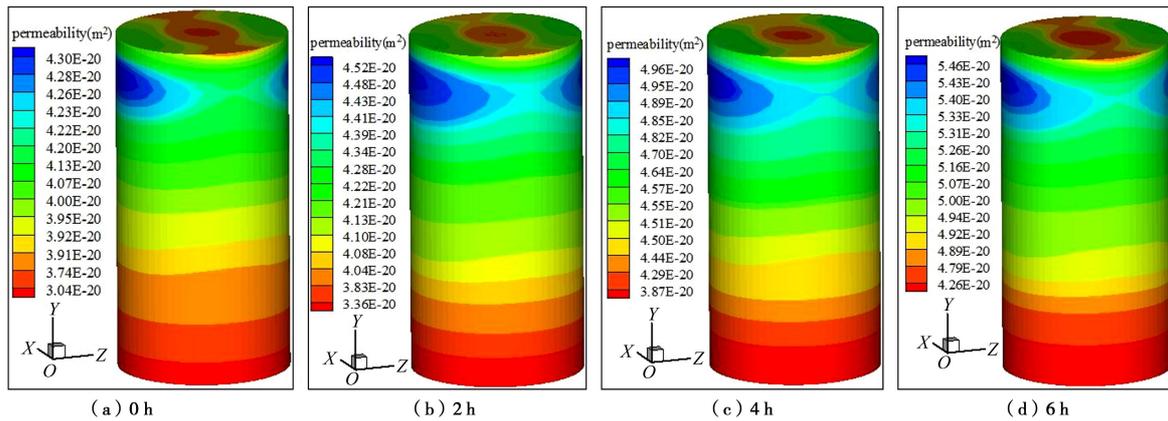


图 9 轴压 100 MPa 下蠕变过程中的渗透率演化

Fig. 9 Change of permeability under axial compression of 100 MPa in creep process

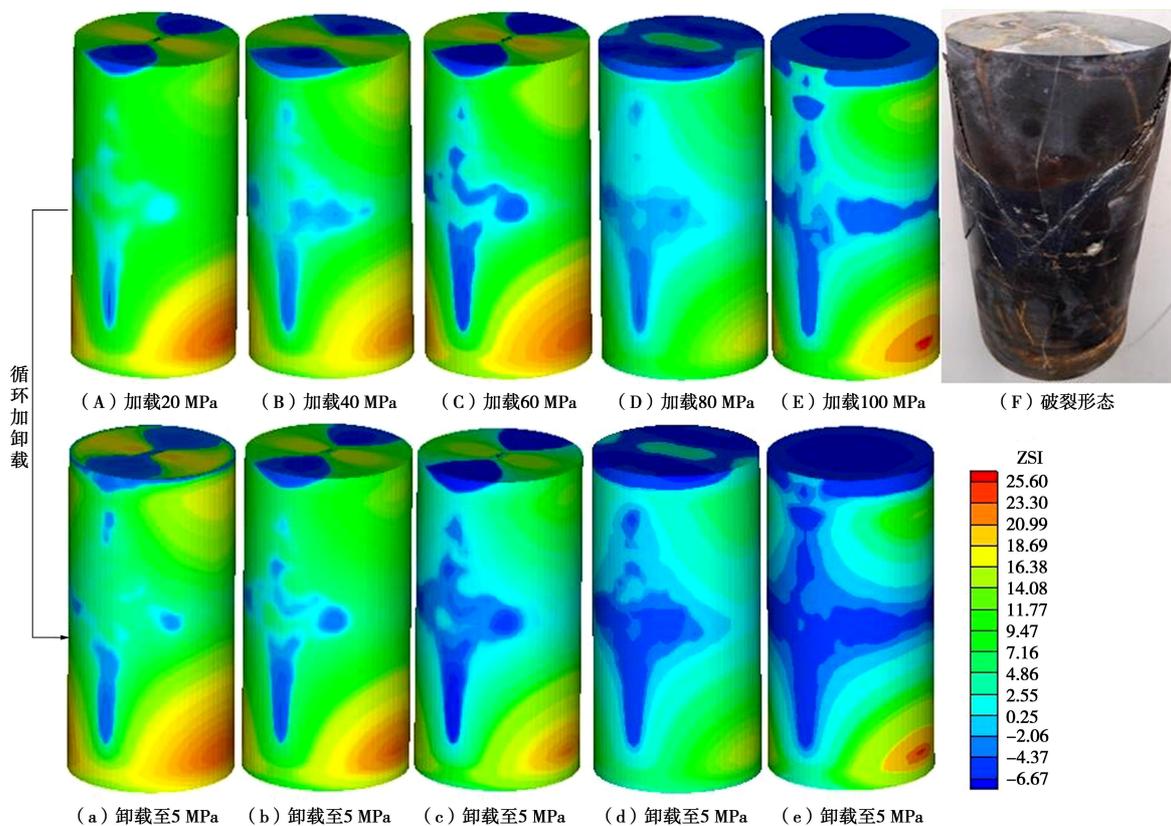


图 10 循环加卸载过程中的 ZSI 演化规律

Fig. 10 Evolution laws of ZSI under cyclic loading-unloading

的计算曲线与试验曲线对比的变化规律, 其中渗透率皆采用渗流量计算获得。由图可见, 渗透率随加载时间的变化趋势吻合较好。

图 9 为轴压 100 MPa 下蠕变过程中的渗透率演化云图。由图可见, 在此级荷载水平下的蠕变过程中, 试样整体的渗透率随着时间的推移而逐渐增大。这说明岩石在此外部常应力作用下, 岩粒之间产生了错位、滑移、流动, 空隙逐渐扩大。试样的渗透率局部最大区域产生在靠近试样进水端 (上端面为进水端) 1/3 处的两侧边缘, 渗透率局部化特征明显。这是由于上

部岩体具有较高的孔隙水压力, 水压与循环加卸载之间的耦合作用更加显著地促进了空隙扩展和剪切带萌生。距离出口端越近, 渗流 - 应力的耦合作用越不明显, 可以看出试样下端面 2/3 的渗透率基本呈层状均匀分布。

单元安全指标 ZSI 值能够显示局部化破坏效果, 如图 10 所示, 单从加卸载过程 ZSI 值的云图可以看出, 试样的破坏区域 (蓝色区域) 主要集中在试样的进水端面和圆柱四周剪切带附近。随着轴向荷载和蠕变时间的增加, 破坏范围逐渐扩张, 安全性降低。模拟结

果充分揭示了渗流-蠕变与循环加卸载的共同耦合作用对岩石扰动的显著影响。

卸载后试样的局部 ZSI 值又有所降低,这是由于卸荷后弹性变形回弹,空隙率增大,水-力耦合的影响范围增大所致。表明该本构模型能很好地模拟岩石的变形可恢复性。从图 10(F)中试样的破裂形态明显看出破裂后的两条滑移迹线呈“V”形剪切带分布,裂纹部位也与模拟结果的渗透率最大部位基本相符,试验现象与模拟结果具有较好的一致性。

本文在改进的西原模型中增加了非线性元件和莫尔库伦摩擦片等元件。将长期强度引入到状态方程中,在判断塑性力学中屈服面的问题上提出了单元状态指标 ZSI (zone state index)。改进后的蠕变模型可适用于模拟三维受力状态下的各类岩体蠕变过程,能够很好的描述岩石的非线性黏弹塑性特征和受载过程中的局部化,弥补了西原模型只能描述加速段以前蠕变的缺陷。不足之处是本模型涉及到的参数较多,包括岩石的常规蠕变参数、长期强度参数、调节时间量纲参数、软化参数等。试算确定参数的取值需要花费较多时间,需要通过参数辨识的方法获取参数。

5 结 论

(1) 循环加卸载过程中,蠕变曲线经历了增涨→回落→再增涨的变化规律。压密阶段主要表现为黏弹性特征,并无明显的不可恢复变形。受荷历史在最大压密点之后的时间逐渐产生了不可恢复变形,出现明显损伤,主要表现为黏弹塑性特征。

(2) 岩样破坏之前,荷载施加导致渗透率减小,卸载导致渗透率的增大。从试验开始到最大压密点的阶段,渗透率总体呈减小趋势,此时岩石内部空隙受外荷载的挤压变密实。到达压密点之后,渗透率逐渐增大,岩石内部出现不可恢复空隙且逐渐扩展。直至蠕变过程进入加速段,渗透率突然增大,标志着岩样的破坏。

(3) 分别对压密阶段、裂纹扩展阶段、裂纹贯通阶段的渗透率与体积应变的演化规律进行了理论分析;拟合了加卸载次数 n (卸载完成后为一个周期)对渗透率及体积应变的影响公式。研究表明,渗透率随着 n 的增加先降低后逐渐增大,体积应变随着加载次数的增加呈非线性减小的趋势,施加渗流的体积应变曲线在无渗流的曲线下方,经过拟合,3 条曲线都符合二次多项式的变化规律。

(4) 根据试验结果,采用基于应变软化的非线性西原蠕变模型进行模拟。分析了蠕变过程中的渗透系数演化规律,云图显示试样渗透率最大的区域分布在进水端两侧的剪切带附近。渗透率的试验值和计算值

吻合度较高;模拟了加卸载过程中的 ZSI 云图变化规律,对比发现,破损最严重的区域与实际试样的“V”型破裂形态基本相符。表明该本构模型能较好地模拟岩石循环加卸载条件下的蠕变-渗流耦合特性与局部破坏规律。

参考文献:

- [1] YANG S Q, CHENG L. Non-stationary and nonlinear visco-elastic shear creep model for shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, **48**(6): 1011 - 1020.
- [2] 王者超, WONG Ron, 乔丽苹. 油砂的蠕变特性与本构模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(8): 1412 - 1424. (WANG Zhe-chao, WONG Ron, QIAO Li-ping. Creep behavior of oil sand and its constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(8): 1412 - 1424. (in Chinese))
- [3] 王者超, 赵建纲, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(9): 1888 - 1900. (WANG Zhe-chao, ZHAO Jian-gang, LI Shu-cai, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(9): 1888 - 1900. (in Chinese))
- [4] 乔丽苹, 王者超, 李术才, 等. 岩石内变量蠕变模型研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(12): 3529 - 3603. (QIAO Li-ping, WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, et al. An internal-variable creep model for rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(12): 3529 - 3603. (in Chinese))
- [5] 徐 鹏, 杨圣奇. 循环加卸载下煤的黏弹塑性蠕变本构关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(3): 537 - 545. (XU Peng, YANG Sheng-qi. Study of visco-elasto-plastic constitutive model of coal under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(3): 537 - 545. (in Chinese))
- [6] 江力宇, 张强勇, 张龙云, 等. 不同加卸载条件下孟底沟水电站花岗岩蠕变特性研究[J]. *水电能源科学*, 2016, **34**(2): 124 - 128. (JIANG Li-yu, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Long-yun, et al. Experimental study of creep mechanical properties of granite at Mengdigou hydropower station under different loading-unloading conditions[J]. *Water Resources and Power*, 2016, **34**(2): 124 - 128. (in Chinese))
- [7] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. *Engineering Geology*, 2002, **63**(3/4): 291 - 300.

- [8] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1992, **29**: 323 - 342.
- [9] 胡大伟, 周 辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (in Chinese))
- [10] 许 江, 李波波, 周 婷, 等. 加卸载条件下煤岩变形特性与渗透特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2012, **37**(9): 1493 - 1498. (XU Jiang, LI Bo-bo, ZHOU Ting, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics under loading-unloading conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(9): 1493 - 1498. (in Chinese))
- [11] 阎 岩, 王恩志, 王思敬. 渗流场中岩石流变特性的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(6): 1943 - 1949. (YAN Yan, WANG En-zhi, WANG Si-jing. Numerical simulation of rheological properties of rocks in seepage field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(6): 1943 - 1949. (in Chinese))
- [12] 阎 岩, 王恩志, 王思敬, 等. 岩石渗流-流变耦合的试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(7): 2095 - 2103. (YAN Yan, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(7): 2095 - 2103. (in Chinese))
- [13] 杨红伟, 许 江, 聂 闻, 等. 渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(9): 1613 - 1619. (YANG Hong-wei, XU Jiang, NIE Wen, et al. Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(9): 1613 - 1619. (in Chinese))
- [14] 杨红伟, 许 江, 彭守建, 等. 孔隙水压力分级加载砂岩蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(增刊 2): 365 - 370. (YANG Hong-wei, XU Jiang, PENG Shou-jian, et al. Study of sandstone creep characteristics under stepwise loading pore water pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S2): 365 - 370. (in Chinese))
- [15] 何 峰, 王来贵, 王振伟, 等. 煤岩蠕变-渗流耦合规律实验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, **36**(6): 930 - 933. (HE Feng, WANG Lai-gui, WANG Zhen-wei, et al. Experimental study on creep-seepage coupling law of coal(rock)[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, **36**(6): 930 - 933. (in Chinese))
- [16] 潘荣锟, 程远平, 董 骏, 等. 不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J]. *煤炭学报*, 2014, **39**(3): 473 - 477. (PAN Rong-kun, CHENG Yuan-ping, DONG Jun, et al. Research on permeability characteristics of layered natural coal under different loading and unloading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, **39**(3): 473 - 477. (in Chinese))
- [17] 王 伟, 徐卫亚, 王如宾, 等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(1): 40 - 47. (WANG Wei, XU Wei-ya, WANG Ru-bin, et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(1): 40 - 47. (in Chinese))
- [18] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, **3**(1): 81 - 91.
- [19] 王军祥, 姜谔男, 宋战平. 岩石弹塑性应力-渗流-损伤耦合模型研究(I): 模型建立及其数值求解程序[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(增刊 2): 626 - 637, 644. (WANG Jun-xiang, JIANG An-nan, SONG Zhan-ping. Study of the coupling model of rock elastoplastic stress-seepage-damage (I): Modelling and its numerical solution procedure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(S2): 626 - 637, 644. (in Chinese))
- [20] 陈祖安, 伍向阳, 孙德明, 等. 砂岩渗透率随静压力变化的关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, **14**(2): 155 - 159. (CHEN Zu-an, WU Xiang-yang, SUN De-ming, et al. Study on relationship between permeability of sandstone and hydrostatic pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, **14**(2): 155 - 159. (in Chinese))
- [21] 王春波, 丁文其, 刘书斌, 等. 各向异性渗透系数随应变场动态变化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(增刊 1): 3015 - 3021. (WANG Chun-bo, DING Wen-qi, LIU Shu-bin, et al. Analysis of dynamic changes of anisotropic permeability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(S1): 3015 - 3021. (in Chinese))
- [22] 杨文东, 张强勇, 张建国, 等. 基于 FLAC3D 的改进 Burgers 蠕变损伤模型的二次开发研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(6): 1956 - 1964. (YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, ZHANG Jian-guo, et al. Second development of improved Burgers creep damage constitutive model of rock based on FLAC3D[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(6): 1956 - 1964. (in Chinese))