

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202212027



# 水-力耦合作用下砂岩松弛 特性试验与本构模型

李昂, 俞缙, 刘士雨, 涂兵雄, 常方强

(华侨大学 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 采用电液伺服三轴试验系统, 对不同围压和水压条件下的红砂岩进行分级加载应力松弛试验. 分析砂岩水-力耦合作用下全应力-应变过程的应力松弛量、应力松弛速率的变化规律. 将含水开关与西原模型串联, 实现应力松弛和水压在本构关系上的耦合, 建立非线性砂岩松弛模型. 结果表明: 同一围压下, 砂岩松弛量随着应变水平的提高而增加, 砂岩松弛量在软化阶段达到最大; 同一围压、同一应变水平下, 砂岩松弛量随着水压的增加而降低, 表现出水压对砂岩应力松弛具有抑制作用; 改进的西原模型能较好描述砂岩应力松弛各阶段的力学行为, 模型参数  $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, \eta_3$  在软化阶段之前随应变水平的提高呈现非线性增长; 各阶段砂岩松弛速率呈“L”形, 松弛速率快速下降为减速松弛阶段, 松弛速率平稳下降为稳定松弛阶段.

**关键词:** 岩石力学; 应力松弛; 水-力耦合; 西原模型; 三轴压缩; 全应力-应变过程

**中图分类号:** TU 452; U 459.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2023)04-0469-08

## Experiment and Constitutive Model of Relaxation Behavior of Sandstone Under Water-Force Coupling Action

LI Ang, YU Jin, LIU Shiyu, TU Bingxiong, CHANG Fangqiang

(Fujian Engineering Technology Research Center of Tunnel and Urban Underground Space,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The step loading stress relaxation experiment of red sandstone under different confining pressure and water pressure are carried out by electrohydraulic servo triaxial experiment system. The variation of stress relaxation amount and stress relaxation rate of sandstone in the whole stress-strain process under the water-force coupling action is analyzed. Connecting the water switch with Nishihara model in series, the coupling of stress relaxation and water pressure in constitutive relation is realized, and a nonlinear sandstone relaxation model is established. The results show that, under the same confining pressure, the amount of sandstone relaxation increases with the increase of strain level, and the relaxation amount reaches the maximum at the softening stage. Under the same confining pressure and strain level, the relaxation amount of sandstone decreases with the increase of water pressure, which shows that water pressure has a restraining effect on the stress relaxation of sandstone. The improved Nishihara model can well describe the mechanical behavior of sandstone stress relaxation in each stage. The parameters  $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, \eta_3$  of the model increase nonlinearly with the increase of strain level before the softening stage. The relaxation rate of each stage presents "L" shape, the rapid decrease of the relaxation rate is a slow relaxation stage, and the steady decrease of the relaxation rate is a sta-

收稿日期: 2022-12-22

通信作者: 俞缙(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土力学与地下工程的研究. E-mail: bugyu0717@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42077254); 福建省科技计划引导性项目(2020H0014)

ble relaxation stage.

**Keywords:** rock mechanics; stress relaxation; water-force coupling; Nishihara model; triaxial compression; whole stress-strain process

岩石应力松弛是岩石流变现象中一种典型力学行为,岩石在恒定应变条件下,岩体应力随时间推移而不断衰减<sup>[1]</sup>. 在高应力深埋隧道中岩石流变效应明显,目前,隧道采用新奥方法施工,围岩采用“强支硬顶”方法支护<sup>[2]</sup>,岩体将形成持续的应力松弛,过度的松弛会导致松动圈进一步扩大. 在 2 次衬砌施工后,衬砌结构承担的变形压力随着时间的推移不断增加,最终支护体系失稳. 特别在富水环境下,岩石内部的孔隙、缺陷等在水的物理、化学及力学作用下,岩石流变现象更加明显,对工程长期稳定产生重要影响<sup>[3]</sup>. 因此,开展水对岩石应力松弛特性影响的研究具有重要理论意义和工程价值.

许多学者对岩石应力松弛特性进行了相关研究,唐礼忠等<sup>[4]</sup>发现岩石应力松弛曲线呈阶梯式下降特征. Zhu 等<sup>[5]</sup>认为循环扰动荷载作用下的松弛特性均大于常规松弛特性. Yang 等<sup>[6]</sup>发现围压卸荷速率越低,应力松弛越明显. Yu 等<sup>[7]</sup>提出弱扰动影响因子,并对岩石峰前、峰后松弛特性进行系统研究. 田洪铭等<sup>[8]</sup>将损伤因子引入到西原模型中,建立非线性的松弛损伤模型. 刘志勇等<sup>[9]</sup>对片岩开展单轴松弛试验,将 Bingham 模型流变中的黏性元件改进为考虑损伤的黏性元件. 针对岩石流变特性<sup>[10]</sup>,较多的学者对干燥、饱水及孔隙水压作用下的大理岩<sup>[11-12]</sup>、变质板岩<sup>[13]</sup>等岩石蠕变特性,以及水-力耦合损伤蠕变模型<sup>[14-17]</sup>进行了系统的研究. 陈灿灿等<sup>[18]</sup>指出孔隙水压能显著提高岩石的径向应变变化量. 刘泉声等<sup>[19]</sup>发现水能极大增强岩石时效特征,改变粉砂质泥岩的应力松弛特性.

以上研究大多集中在软岩、低围压和峰前阶段,对孔隙水压作用下岩石全应力-应变阶段的应力松弛行为有待深入研究. 基于此,本文采用分级加载的方式,对红砂岩进行水-力耦合作用下三轴压缩应力松弛试验,并建立改进的西原松弛本构模型.

1 试验条件及方案

1.1 试验设备与岩样

采用 TFD-2000/D 型动态扰动电液伺服三轴试验系统,试验设备,如图 1 所示. 试验设备可提供的最大围压为 200 MPa,最大轴压为 2 000 kN,负荷传感器精度为 0.01 kN,最大工作水压为 40 MPa,精度为 0.01 MPa. 轴向应变引伸计、环向应变引伸计均采用线性可变差动变压器(LVDT),环向应变引伸计量程为 0~3 mm,轴向应变引伸计量程为 0~10 mm,数据测量精度为±0.5%,测量分辨率可达 0.000 1 mm,控制系统采用德国 DOLI 公司的柴油喷射电子控制(EDC)全数字伺服控制器,轴向变形速率为 0.001~2.000 mm·min<sup>-1</sup>.

岩样为红砂岩,质地均匀、无天然裂纹,平均密度为 2.28 g·cm<sup>-3</sup>,且试验之前已剔除波速差异过大的岩样,尽可能地降低岩样之间的离散性差异. 按国际岩石力学学会试验规程建议方法,制备尺寸为 50 mm×100 mm (直径×高度)的标准圆柱试样. 红砂岩试样,如图 2 所示. 图 2 中:端面平整度控制在 0.02 mm 内;直径误差控制在 0.30 mm 内.

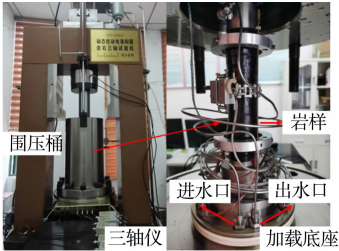


图 1 试验设备

Fig. 1 Test equipment



图 2 红砂岩试样

Fig. 2 Red sandstone samples

1.2 试验方案

对围压为 7,10,15,20 MPa 的砂岩分别进行水压为 0,1,3,5 MPa 的耦合试验,共计 16 组试验. 具

体步骤如下:1) 真空抽气砂岩,饱水 24 h;2) 安装试样和传感器;3) 按  $0.500\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度施加围压至设定围压;4) 在驱替管道空气后,按  $0.250\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  的速度施加水压至设定值,使试样两端有相同的水压稳定水压在设定值;5) 采用应变控制加载轴压,轴向变形加载速率为  $0.03\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,在进行应力松弛试验之前,对每一组岩样进行水-力耦合下单调加载试验,从而测得峰前最大轴向应变(峰值应变),将其作为分级依据;6) 依据渐变破坏理论<sup>[19]</sup>,选择裂纹稳定扩展阶段作为应力松弛的起始阶段,取峰值应变的 60%进行第 1 级应力松弛,后续每一级按照峰值应变的 20%递增,对岩石的弹性阶段、屈服阶段、峰值阶段、软化阶段和残余阶段进行应力松弛试验.保持每一级应变恒定,当应力松弛速率( $v_i$ )小于  $0.001\text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  时,认为应力松弛达到稳定阶段,可进行下一级的应力松弛,重复此操作直至岩样破坏.

水-力耦合砂岩逐级加载应力松弛示意图,如图 3 所示.图 3 中: $\sigma$  为应力; $\sigma_3$  为围压; $p_w$  为水压; $\epsilon$  为应变; $\epsilon_1$  为轴向应变; $v_a$  为砂岩的轴向变形加载速率; $t$  为时间.

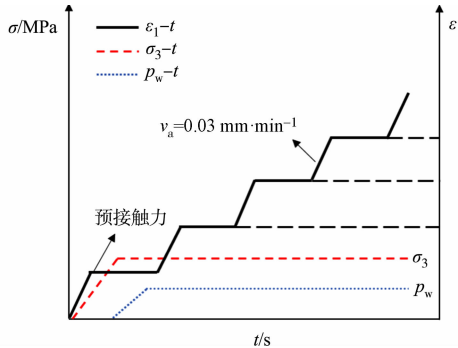
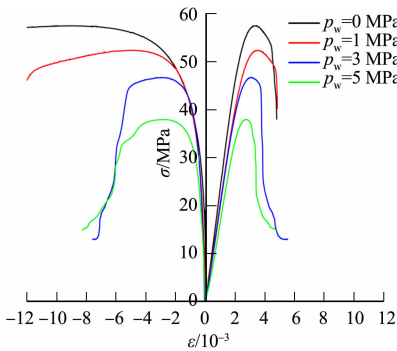


图 3 水-力耦合砂岩逐级加载应力松弛示意图  
Fig. 3 Stress relaxation of water-force coupling sandstone under step loading

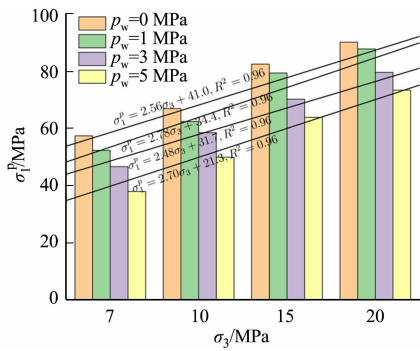
## 2 试验结果与分析

### 2.1 松弛试验结果

水-力耦合作用下砂岩单调加载曲线及峰值应力拟合关系,如图 4 所示.图 4 中: $\sigma_p^0$  为砂岩峰值强度; $R$  为相关系数.15 MPa 围压下砂岩水-力耦合逐级加载应力松弛曲线,如图 5 所示.



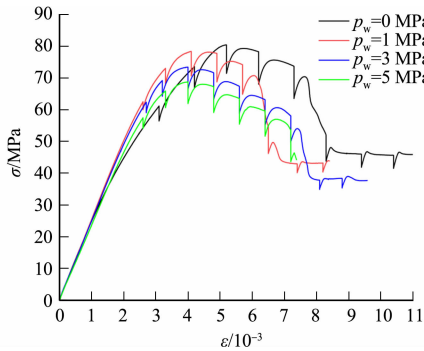
(a) 砂岩单调加载曲线



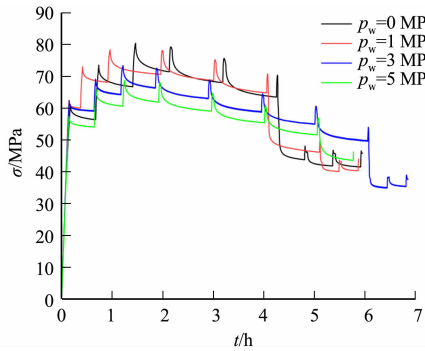
(b) 峰值应力拟合关系

图 4 水-力耦合作用下砂岩单调加载曲线及峰值应力拟合关系

Fig. 4 Sandstone monotone loading curves and peak stress fitting relationship under water-force coupling action



(a) 应力-应变松弛曲线



(b) 应力-时间松弛曲线

图 5 15 MPa 围压下砂岩水-力耦合逐级加载应力松弛曲线

Fig. 5 Stress relaxation curves of water-force coupling under hierarchical load at 15 MPa confining pressure

由图 5(a)可知:应力-应变松弛曲线为平行于纵轴的直线,当应力松弛稳定并进行下一级松弛加载时,应力曲线并不会沿原路径恢复至初始松弛时刻的应力水平,而是与松弛曲线有一定的偏移角度(上

升). 由图 5(b)可知:应力-时间松弛曲线为连续、光滑且随时间逐渐衰减的曲线,没有呈现出阶梯式下降的特征. 砂岩极易在软化阶段,尤其是软化阶段的中后期松弛结束后进行下一级松弛加载时出现急剧的应力跌落,造成砂岩失稳破坏,故工程实践中应避免在软化阶段进行支护加固.

2.2 应力松弛特性

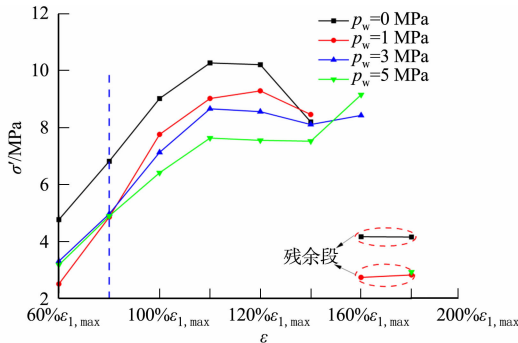
应力松弛量表示松弛稳定后轴向应力衰减量,衰减  
值越大应力松弛量越大,应力松弛量  $\sigma'$  为

$$\sigma' = \sigma_0 - \sigma_s. \tag{1}$$

式(1)中: $\sigma_0$  为应力松弛初始时刻的轴向应力; $\sigma_s$  为应力  
松弛稳定时刻的轴向应力.

根据渐变破坏理论<sup>[19]</sup>,砂岩渐变破坏阶段划分及  
特征强度示意图,如图 6 所示. 图 6 中: $\sigma_{cc}$  为砂岩压密强  
度; $\sigma_{ci}$  为起裂强度; $\sigma_{cd}$  为损伤强度; $\sigma_c$  为峰值强度; $\epsilon_3$  为  
径向应变. 砂岩应力松弛量变化规律,如图 7 所示. 图 7  
中: $\epsilon_{1,max}$  为峰值应变.

由图 7(a)可知:水压对砂岩应力松弛量的影响集中



(a)  $\sigma_3 = 15 \text{ MPa}$

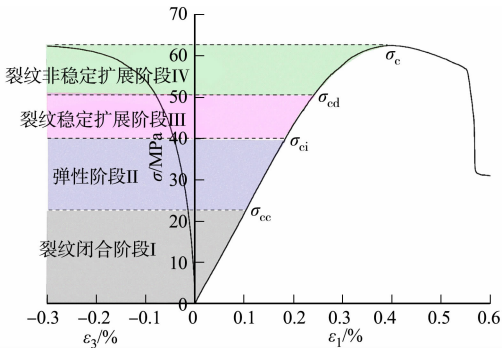
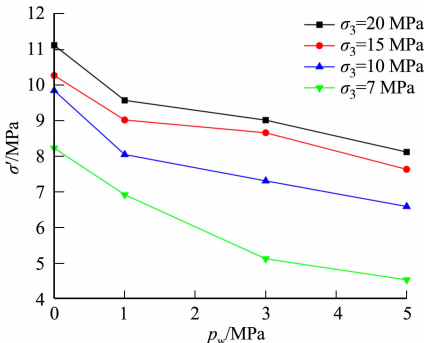


图 6 砂岩渐变式破坏阶段划分与特征强度示意图

Fig. 6 Gradual fracture phase division and  
characteristic intensity of sandstone



(b) 峰值应变的 120% 处

图 7 砂岩应力松弛量变化规律

Fig. 7 Variation of sandstone relaxation quantity

在裂纹非稳定扩展阶段和内部裂纹贯通之间(即峰值应变的 80%~160%);在达到砂岩损伤强度  $\sigma_{cd}$  之前,砂岩总体处于弹性变形阶段,内部只有少量微裂隙发展,整体属于致密状态,这就形成在砂岩的裂纹  
闭合阶段 I、弹性阶段 II 和裂纹稳定扩展阶段 III(即图 6 中的阶段 I, II 和 III 裂纹扩展较少),而水压是  
在砂岩内部孔隙形成,故在裂纹稳定扩展之前水压对砂岩松弛影响较小. 因此,工程岩体载荷应变也应  
保持在砂岩峰值应变的 80%之前;在达到砂岩损伤强度之后,裂纹体积应变快速增加,裂纹进入不稳定  
扩展阶段 IV,此阶段孔隙水压对砂岩松弛影响较为明显.

由图 7(b)可知:在相同围压下,砂岩应力松弛量随水压增大而减少;在相同水压下,砂岩松弛量随  
围压增加而增加,且围压越大,砂岩松弛量增加幅度越小;在达到峰值应变的 160%时,砂岩进入软化阶  
段后期,此时,砂岩内部裂纹完全贯通,孔隙水压对砂岩松弛的影响减弱;在此阶段应变分级,砂岩极易  
出现应力急剧跌落从而失稳破坏,工程也要避免在软化阶段后期进行支护任务;对进入残余段的岩石进  
行松弛,发现砂岩残余段松弛量大幅下降,且残余段的松弛量基本保持稳定,不会随应变分级的增大而  
有明显变化.

应力松弛速率  $v_i$  为

$$v_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta t}. \tag{2}$$

式(2)中: $\Delta t$  为松弛时间间隔; $\Delta \sigma_i$  为  $\Delta t$  时间内应力松弛幅度.

当围压为 15 MPa 时,应力松弛速率与水压的关系,如图 8 所示. 由图 8 可知:在应力松弛初始时  
刻,砂岩内部微裂纹发育最快,此时,应力松弛速率最大,然后,迅速衰减,最后,趋于一个稳定值;曲线整  
体呈现“L”形,曲线符合指数衰减规律,应力松弛速率为  $v_i = a \exp(-bt) + c$ ,其中, $a, b, c$  为拟合参数. 根



据应力松弛速率变化规律, 可以将应力松弛分为两个阶段: 第一松弛阶段为减速松弛阶段, 在该阶段应力松弛速率随时间增加而减小; 第二阶段为稳定松弛阶段, 该阶段应力松弛速率基本保持不变.

初始应力松弛速率与水压的关系, 如图 9 所示. 图 9 中:  $v_{i,0}$  为初始应力松弛速率.

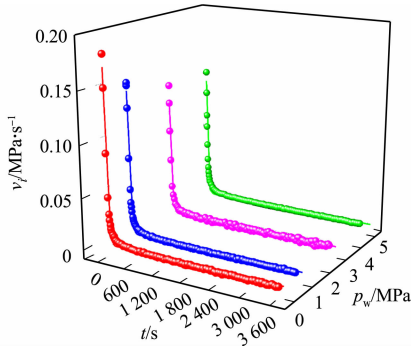


图 8 应力松弛速率与水压的关系

Fig. 8 Relationship between stress relaxation rate and water pressure

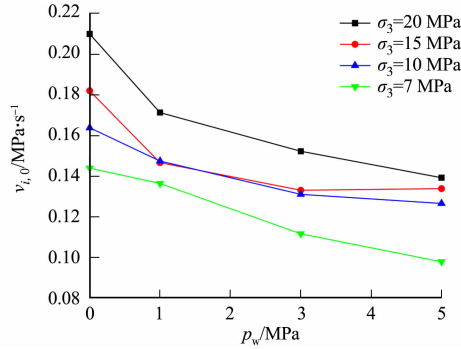


图 9 初始应力松弛速率与水压的关系

Fig. 9 Relationship between initial stress relaxation rate and water pressure

由图 9 可知: 在相同围压下, 随着水压的增大, 初始应力松弛速率有下降的趋势, 这与松弛量随水压变化规律一致; 在相同水压下一定时, 较大的围压会有更大的初始松弛速率. 在应力松弛过程中, 孔隙水压和砂岩颗粒骨架共同承受应力, 当孔隙水压增加时, 砂岩颗粒骨架承受应力降低, 微裂纹延伸和发育变缓, 在宏观上反映为应力松弛速率有所降低; 较大的初始应力松弛速率意味着岩石最终会有较大的松弛量, 故随着水压的逐渐增大, 砂岩初始应力松弛速率逐渐降低, 砂岩松弛量也逐渐降低, 表现出水压对砂岩应力松弛的抑制作用.

3 砂岩非线性松弛本构模型

3.1 本构模型

流变模型可用理想化的具有基本性能(包括弹性、黏性和塑性)的元件组合而成, 不同形式元件的串联和并联即可得到流变模型体, 因此, 元件模型通常用来反映岩土流变特性<sup>[20]</sup>. 传统西原模型由弹性体、开尔文体和理想黏塑性体串联而成, 能够反映岩石的弹-黏弹-黏塑特性, 在此基础上串联一个含水开关组成改进的西原模型, 如图 10 所示. 图 10 中: A, B, C, D 为组件;  $E_1, E_2$  为弹性元件的弹性系数;  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  为黏性元件的牛顿黏性系数;  $\omega$  为开关水压.

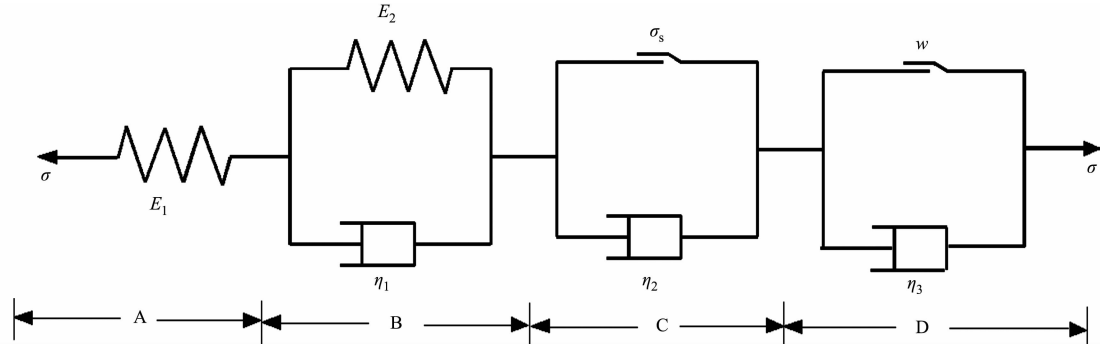


图 10 改进的西原模型

Fig. 10 Improved Nishihara model

由图 10 可知: 组件 D 是一个含水开关与一个黏性元件并联而成, 当岩石含水时, 含水开关将开启, 模型组件 D 产生岩石因水压影响的松弛变化量, 将因水压变化产生的松弛变化量与松弛总量分组件模拟, 无须讨论水压对  $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2$  的影响, 减少非定常参数数量, 避免同时讨论含水损伤对模型参数的影响, 降低模型复杂性.

当  $\omega=0, \sigma>\sigma_s$  时, 本构方程为

$$\ddot{\sigma} + \left( \frac{E_2}{\eta_1} + \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} (\sigma - \sigma_s) = E_2 \ddot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon}. \tag{4}$$

松弛过程中,保持应变值  $\epsilon_0$  恒定(恒常数),那么,  $\dot{\epsilon}, \ddot{\epsilon}$  恒为 0,故松弛过程中,有

$$\ddot{\sigma} + \left( \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_1} + \frac{E_1}{\eta_2} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_1} \sigma = 0. \tag{5}$$

由微分方程,可得松弛方程为

$$\sigma_t = \sigma_s + C_1 \exp\left(\frac{1}{2} p_1 t\right) + C_2 \exp\left(\frac{1}{2} p_2 t\right). \tag{6}$$

当  $\omega > 0, \sigma > \sigma_2$  时,本构方程为

$$\ddot{\sigma} + \dot{\sigma} \left( \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_3} + \frac{E_2}{\eta_1} \right) + (\sigma - \sigma_2) \left( \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_3} \right) = E_1 \ddot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon}. \tag{7}$$

同理,  $\sigma_t$  为松弛进行到  $t$  时刻岩石的轴向应力为

$$\sigma_t = \sigma_s + C_1 \exp\left(\frac{1}{2} p_3 t\right) + C_2 \exp\left(\frac{1}{2} p_4 t\right). \tag{8}$$

当  $t = 0$  时,由式(6),(8),有

$$\sigma_0 = \sigma_e + C_1 + C_2. \tag{9}$$

式(6)~(9)中:  $p_1 = -\frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1} - \frac{E_1}{\eta_2} - \sqrt{-\frac{4E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} + \frac{(E_2 \eta_1 + E_1 \eta_2 + E_2 \eta_2)^2}{\eta_1^2 \eta_2^2}}$ ;  $p_2 = -\frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1} - \frac{E_1}{\eta_2} - \sqrt{-\frac{4E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} + \frac{(E_2 \eta_1 + E_1 \eta_2 + E_2 \eta_2)^2}{\eta_1^2 \eta_2^2}}$ ;  $p_3 = -\frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1} - \frac{E_1}{\eta_2} - \frac{E_1}{\eta_3} - \sqrt{-\frac{4(E_1 E_2 \eta_2 + E_1 E_2 \eta_3)}{\eta_1 \eta_2 \eta_3} + \frac{(E_1 \eta_1 \eta_2 + E_1 \eta_1 \eta_3 + E_1 \eta_2 \eta_2 + E_2 \eta_2 \eta_3)^2}{\eta_2^2 \eta_2^2 \eta_3^2}}$ ;  $p_4 = -\frac{E_1}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1} - \frac{E_1}{\eta_2} - \frac{E_1}{\eta_3} - \sqrt{-\frac{4(E_1 E_2 \eta_2 + E_1 E_2 \eta_3)}{\eta_1 \eta_2 \eta_3} + \frac{(E_1 \eta_1 \eta_2 + E_1 \eta_1 \eta_3 + E_1 \eta_2 \eta_2 + E_2 \eta_2 \eta_3)^2}{\eta_2^2 \eta_2^2 \eta_3^2}}$ ;  $\sigma_0$  为初始轴向应力.

3.2 模型参数辨识

采用 Levenberg-Marquardt (LM)法+通用全局优化算法(UGO)对数据进行分析,并拟合反演出模型各参数值的变化特征.该优化算法最大特点是克服在优化计算领域中使用迭代法必须给出合适初始值的难题,即用户无需给出参数初始值,而是通过全局优化算法,最终找出最优解<sup>[15]</sup>.首先,将无水压时的松弛数据代入式(6)中,反演出无水压条件下模型中  $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2$ .  $E_1, \eta_1$  的变化规律,如图 11 所示.由图 11 可知:同一围压下,模型的弹性系数、黏性系数随着轴向应变的增加呈现非线性增长;同一轴向应变水平下,模型的弹性系数、黏性系数随着围压的增加而增加.

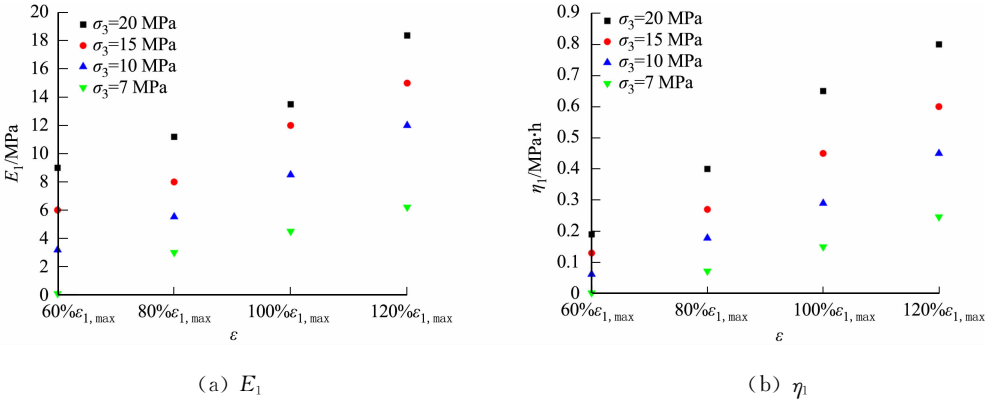


图 11  $E_1, \eta_1$  的变化规律

Fig. 11 Variation of  $E_1, \eta_1$

将反演出的  $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2$  代入式(8)中,求出不同水压条件下的  $C_1, \eta_3$ .  $C_1, \eta_3$  的变化规律,如图 12 所示.由图 12 可知:在每一应变水平下,随着水压的增加,应力松弛量降低,  $C_1$  也呈现指数函数下降;同一围压下,  $\eta_3$  在岩石到达软化阶段前随岩石应变水平的提高而非线性增长.

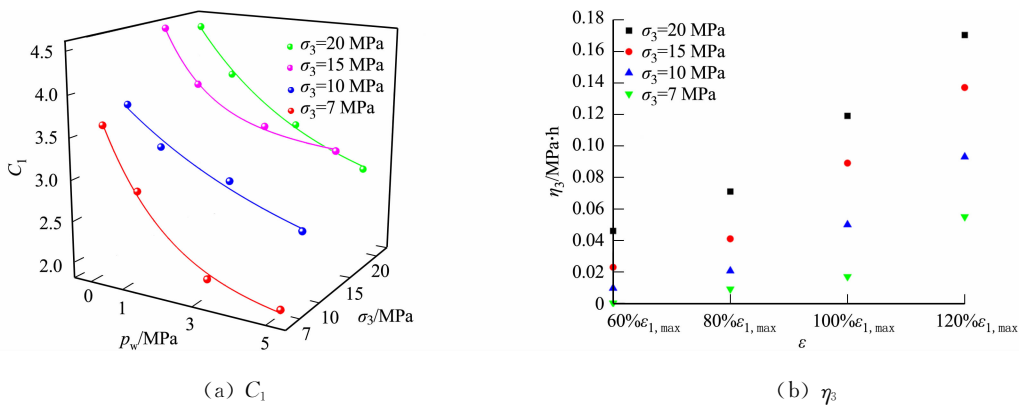


图 12  $C_1, \eta_3$  的变化规律  
Fig. 12 Variation of  $C_1, \eta_3$

3.3 非线性模型验证

为了验证非线性模型的合理性,对水-力耦合三轴松弛试验曲线进行分析,限于篇幅,选取 15 MPa 围压和 3 MPa 水压,改进西原模型拟合值与试验结果对比,如图 13 所示.由图 13 可知:模型曲线模拟值与试验值拟合效果较好,且相关系数  $R$  在 0.98 以上,说明改进西原模型能很好反映红砂岩的非线性应力松弛特征.

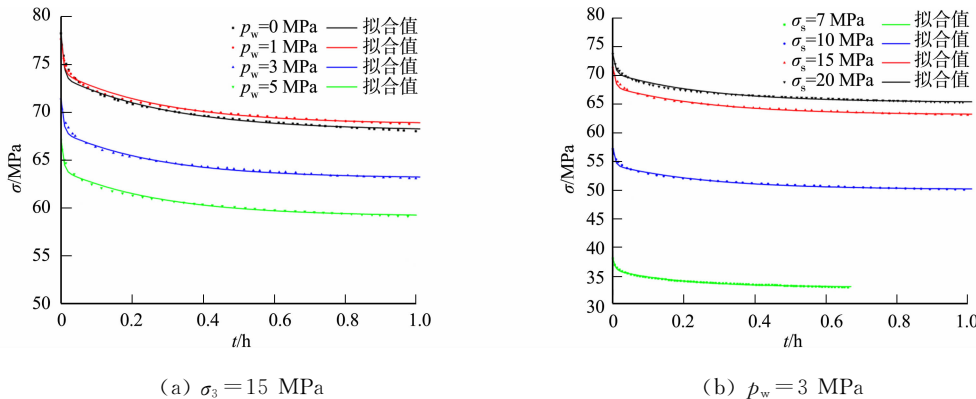


图 13 改进西原模型拟合值与试验结果对比

Fig. 13 Comparison of fitting values of improved Nishihara model and experimental results

4 结论

利用 TFD-2000/D 型动态扰动电液伺服三轴仪,采用分级加载的方式进行了水-力耦合下砂岩应力松弛特性试验,建立改进的西原松弛模型,并对模型参数进行辨识,得到以下 3 个结论.

1) 水-力耦合下砂岩松弛效应明显,松弛曲线表现整体为连续光滑的衰减曲线,松弛速率呈现“L”形,第一阶段为衰减减速松弛阶段,该阶段松弛速率随时间增加而迅速降低;第二阶段为稳定松弛阶段,该阶段松弛速率随时间增加而平稳降低,且逐渐趋于稳定值.

2) 同一围压下,岩石松弛量随着应变水平的提高而增加,松弛量在软化阶段达到最大;同一应变水平下,岩石松弛量随着围压的增加而增加;即同一围压、同一应变水平下,砂岩松弛量随着水压的增加而降低,表现出水压对岩石应力松弛的具有抑制作用.

3) 采用改进的西原模型对砂岩的松弛行为进行描述,通过 LM+UGO 优化算法对模型参数进行辨识,模型参数值随着应变水平的提高非线性增长,通过与试验曲线的对比分析,可以很好地反映岩石各阶段应力松弛规律.

参考文献:

[1] 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.

[2] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 970-978. DOI: 10. 13247/j. cnki. jcumt. 000660.

[3] 于怀昌, 赵阳, 刘汉东, 等. 三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 313-322. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 02. 010.

[4] 唐礼忠, 潘长良. 岩石在峰值荷载变形条件下的松弛试验研究[J]. 岩土力学, 2003(6): 940-942. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2003. 06. 015.

[5] ZHU Yaoliang, YU Jin, ZHOU Xianqi, *et al.* Uniaxial stress relaxation behavior of marble after cyclic disturbance loads[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2020, 25(4): 1-25. DOI: 10. 1007/s11043-020-09458-w.

[6] YANG Haiqing, LIU Junfeng, ZHOU Xiaoping. Effects of the loading and unloading conditions on the stress relaxation behavior of pre-cracked granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1157-1169. DOI: 10. 1007/s00603-016-1161-3.

[7] YU Jin, ZHU Yaoliang, YAO Wei, *et al.* Stress relaxation behaviour of marble under cyclic weak disturbance and confining pressures[J]. Measurement, 2021, 182: 109777. DOI: 10. 1016/j. measurement. 2021. 109777.

[8] 田洪铭, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 宜-巴高速公路泥质红砂岩三轴应力松弛特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 981-986. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2013. 04. 029.

[9] 刘志勇, 肖明砾, 谢红强, 等. 基于损伤演化的片岩应力松弛特性[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 101-107. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2016. S1. 013.

[10] 赵立财. 含水砂岩蠕变损伤模型的二次开发及工程应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 105-112, 120. DOI: 10. 11988/ckyyb. 20200650.

[11] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441-3446, 3451. DOI: 10. 16285/j. rsm. 2010. 11. 051.

[12] 余成学, 崔旋. 高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1603-1609.

[13] 刘小军, 刘新荣, 王铁行, 等. 考虑含水劣化效应的浅变质板岩蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2384-2389. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2014. 12. 002.

[14] ZHOU Cuiying, YU Lei, YOU Fanfan, *et al.* Coupled seepage and stress model and experiment verification for creep behavior of soft rock[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(9): 04020146. DOI: 10. 1061/(ASCE)GM. 1943-5622. 0001774.

[15] 陈陆望, 李圣杰, 陈逸飞, 等. 岩石含水蠕变损伤模型的开发与应用[J]. 固体力学学报, 2018, 39(6): 642-651. DOI: 10. 19636 /j. cnki. cjsm42-1250/o3. 2018. 018.

[16] 孙晓明, 缪澄宇, 姜铭, 等. 基于改进西原模型的不同含水率砂岩蠕变实验及理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2411-2420. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0302.

[17] 于怀昌, 赵阳, 刘汉东, 等. 三轴应力作用下水对岩石应力松弛特性影响作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 313-322. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 02. 010.

[18] 陈灿灿, 彭守建, 许江, 等. 水压 - 应力耦合作用下砂岩应力松弛特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1193-1207. DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2021. 0941.

[19] 刘泉声, 魏莱, 雷广峰, 等. 砂岩裂纹起裂损伤强度及脆性参数演化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1782-1789. DOI: 10. 11779/CJGE201810004.

[20] 李元松. 高等岩土力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 方德平)