

文章编号:1673-9469(2022)01-0038-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.006

不同状态灰砂岩应力松弛特性试验及本构模型研究

朱其志^{1,2}, 陈毓栋^{1,2*}, 余健³, 张璠^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 岩石的应力松弛现象涉及到各类岩体工程的长期稳定性, 且工程中水的影响不容忽视。开展干燥与饱和两种状态下灰砂岩单级应力松弛试验与循环应力松弛试验, 对比分析了两种状态试样的松弛行为差异, 并采用四单元广义 Maxwell 应力松弛本构模型对试验结果进行数值模拟验证。结果表明: (1) 两种状态下的灰砂岩都表现为非完全衰减的应力松弛形式; (2) 相同应变比条件下饱和状态试样的最终应力松弛量略高, 差异主要表现在应力松弛的发展趋势上, 深受水弱化作用的影响; (3) 峰值应力循环松弛试验中, 由于水的弱化及内部耗能导致饱和试样延性增高, 虽然干燥试样的应力松弛程度高于饱和试样, 但对于循环次数以及最终破坏时的轴向应变, 结果正相反; (4) 四单元广义 Maxwell 应力松弛本构模型能以极高的精度准确完整地描述灰砂岩单级应力松弛全过程及趋势。

关键词: 灰砂岩; 应力松弛; 峰值应力循环; 应力松弛本构模型; 岩石流变

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Experimental and Constitutive Modeling Study on Stress Relaxation Properties of Sandstone in Different States

ZHU Qizhi^{1,2}, CHEN Yudong^{1,2*}, YU Jian³, ZHANG Jin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Huadong Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: The stress relaxation of rock is related to the long-term stability in all kinds of rock engineering, and the influence of water cannot be ignored. The tests of single-stage stress relaxation and cyclic stress relaxation for dry and saturated sandstone were conducted, and the differences of relaxation behavior between the two states of samples were analyzed contrastively. The generalized Maxwell relaxation constitutive model with four elements was adopted for the implementation of numerical verifications. The results show that: 1) The sandstone in both states represents the typical incomplete attenuation characteristic; 2) under the same strain ratio, the final stress relaxation degrees in saturation state are slightly higher. The difference is mainly reflected in the development of stress relaxation, which is deeply affected by the weakening of water; 3) in the peak stress cyclic relaxation tests, the ductility of saturated samples increase due to water weakening and internal energy dissipation. Although the stress relaxation degree of dry samples is higher than that of saturated samples, the results are opposite for the number of cycles and axial strain at final failure; 4) the constitutive model of four-element generalized Maxwell stress relaxation can completely describe the whole process and the trend of single-stage stress relaxation for sandstone with high accuracy.

收稿日期: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679068, 11902111); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501100)

作者简介: 朱其志(1979-), 男, 江苏泗洪人, 博士, 教授, 从事多尺度多场耦合岩石本构理论、细观损伤力学及数值方法的研究。

* 通讯作者: 陈毓栋(1997-), 男, 安徽池州人, 硕士研究生, 从事岩石力学与岩土工程方面的研究。

Key words: sandstone; stress relaxation; peak stress cycle; stress relaxation constitutive model; rock rheological

应力松弛作为岩石重要的流变行为,指在应力恒定情况下,岩体内部应力随时间衰减的变化过程,是工程岩体长期运营下失稳破坏的重要原因之一,也是岩体开挖后产生各类岩爆的重要原因^[1-3]。国内外学者通过一系列不同等级、不同路径下的岩石应力松弛试验研究,得到了在不同阶段、不同地区岩石的应力松弛特性规律及其影响因素,取得了一系列成果^[4-10]。此外,通过模拟天然岩体内部结构面来研究岩石的剪切应力松弛性质^[11-12]。因此,研究岩石的松弛特性对深部岩石工程的长期强度和稳定性具有重要意义。

岩土工程往往容易受到水的影响,因此有必要研究干燥与饱和试样松弛特性的差异。由于砂岩对水的作用十分敏感,故本文以灰砂岩为研究对象,开展相同围压不同初始偏压条件下干燥与饱和砂岩的单级应力松弛试验及峰值应力循环松弛试验,从应力松弛程度等方面对比两种状态下灰砂岩应力松弛特性的规律,探究水对岩石松弛特性的作用机理。另外,根据松弛特性,利用广义 Maxwell 本构模型对试验数据进行数值模拟与验证。本研究可以揭示出干燥与饱和状态下灰砂岩应力松弛的特征和规律,为相关工程提供理论参考。

1 试验准备

1.1 试样制备

本文所用灰砂岩试样取自云南某水电站硐室围岩工程,由石英、长石、白云母、硅质等胶结而成。岩石表面呈灰青色,颗粒粗糙,具有良好表现均质性,无明显节理裂隙。根据 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》,试样加工成尺寸为 50 mm×100 mm 圆柱形标准试件。对饱和砂岩的处理则根据上述标准中关于真空抽气法饱和试样的方法进行饱水试验。

1.2 试验方案及仪器

本试验类型分为单级松弛与多级循环松弛,均选定相同围压(20 MPa),同一加载速率(0.02 MPa/min):(1)分别对干燥与饱和试样进行不同初始偏应力下单级松弛试验,松弛时间设定为 36 h;(2)分别对干燥与饱和试样进行峰值应力循环松弛试验,每次松弛前均加载至试样当前峰值,循环直至试样发生破坏,每次循环时间

为 12 h。具体试验方案见表 1。本试验在全应力多场耦合三轴试验系统上进行,可监测并实时反馈试验数据变化情况。

表 1 试验方案

Tab. 1 Experiment scheme

编号	围压值 /MPa	初始偏应力值/MPa	试验类型
GS-1	20	119	干燥单级应力松弛
GS-2	20	128	干燥单级应力松弛
GS-3	20	136	干燥单级应力松弛
GS-4	20	144	干燥单级应力松弛
GS-5	20	152	干燥单级应力松弛
GS-6	20	167	干燥单级应力松弛
GS-7	20	175(峰值)	干燥单级应力松弛
BS-1	20	111	饱和单级应力松弛
BS-2	20	120	饱和单级应力松弛
BS-3	20	131	饱和单级应力松弛
BS-4	20	150(峰值)	饱和单级应力松弛
GF-1	20	175(峰值)	干燥峰值应力循环松弛
BF-1	20	150(峰值)	饱和峰值应力循环松弛

在单级松弛试验中,由于两种状态试样在相同轴向应变水平下内部损伤不同,应力松弛程度也不同,故引入饱和试样的轴向应变比 ζ (试样轴向应变与峰值轴向应变的比值)来对比分析干燥和饱和试样松弛试验特性的差异。两种状态初始偏应力的对应关系如表 2。

表 2 干燥与饱和试样初始偏应力的对应关系

Tab. 2 The corresponding relationship between the initial deviational stress of dry and saturated samples

饱和试样的轴向应变比 ζ /%	初始偏应力对应关系/MPa	
	饱和试样	干燥试样
57	110.76	128.21
63	120.29	144.16
69	130.61	152.27
100	150.03	175.06

2 试验结果与分析

2.1 单级应力松弛试验

图 1 为干燥和饱和单级松弛试验中偏应力随时间变化的曲线,图中黑色虚线为趋势轨迹线。将达到设定偏应力值的时间记为 $t=0$ (之前加载至初始偏应力的时间忽略不计)。图 2 为相同轴向应变比条件下的干燥与饱和试样单级松弛试验曲线对比图。

从图1可以看出,干燥与饱和试样均具有明显的应力松弛性质,各级应力水平下的应力松弛曲线形态和趋势相似,具有非完全衰减特性,包含了快速松弛、减速松弛和稳态松弛三个阶段。而在图2中,两状态的曲线在应力衰减幅度上似中存异:(1)各阶段时间及速率不同。饱和试样的快速松弛时间较短,相同轴向应变比下能更快进入减速松弛,且减速松弛时间较长,稳态松弛时应力松弛速率较干燥试样更高。(2)曲线特征不同,饱和试样曲线波动显著高于干燥试样。这可能是来自于环境温度与伺服系统周期性的综合波动;另外饱和和岩样中的水对岩石具有弱化作用,流动在岩

石裂隙中的水也影响着松弛趋势与特性。

2.1.1 应力松弛程度分析

引入应力松弛量 σ' 定量分析试验的应力松弛程度,来描述试样的偏应力衰减性质。定义 t 时刻应力松弛量为

$$\sigma'_t = \sigma_0 - \sigma_t \quad (1)$$

式中, σ_0 为初始偏应力, σ_t 与 σ'_t 分别为 t 时刻的剩余偏应力和应力松弛量,单位均为MPa。

所有单级松弛试验结果见表3。由于松弛过程中,在12h时偏应力逐渐趋于平稳进入稳态阶段,故间隔相等时间(12、24、36h)来进行结果分析。由表3可知,在此试验中,干燥与饱和试样在

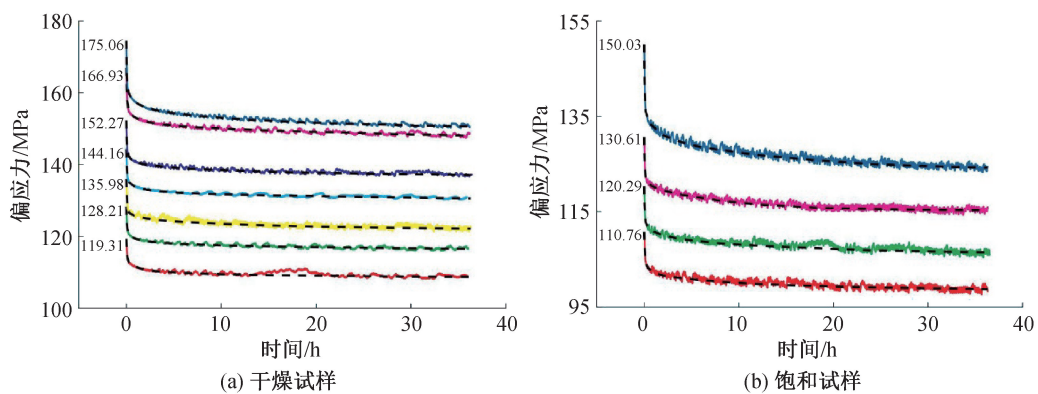


图1 单级应力松弛曲线汇总

Fig. 1 Summary of single-stage stress relaxation curves

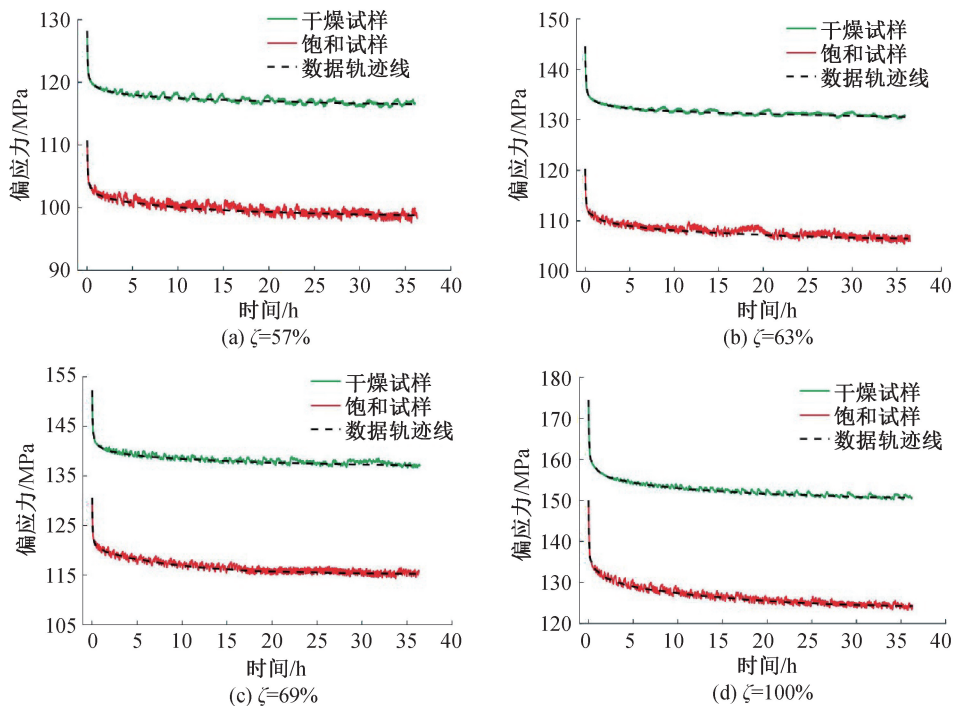


图2 各轴向应变比下干燥试样与饱和试样单级松弛曲线对比

Fig. 2 Comparison of single-stage relaxation curves of dry and saturated samples under different axial strain ratios

表 3 单级应力松弛试验结果

Tab. 3 Results of single-stage stress relaxation test

类型及编号	初始偏应力 σ_0/MPa	轴向应变 $\varepsilon_0/\%$	12 h 应力松弛量 $\sigma_{12\text{h}}/\text{MPa}$	12 h 剩余偏应力 $\sigma'_{12\text{h}}/\text{MPa}$	24 h 应力松弛量 $\sigma_{24\text{h}}/\text{MPa}$	24 h 剩余偏应力 $\sigma'_{24\text{h}}/\text{MPa}$	36 h 应力松弛量 $\sigma_{36\text{h}}/\text{MPa}$	36 h 剩余偏应力 $\sigma'_{36\text{h}}/\text{MPa}$	
干燥 试样	GS-1	119.31	0.57	109.32	9.99	108.93	10.38	108.72	10.59
	GS-2	128.21	0.63	117.45	10.76	116.84	11.37	116.55	11.66
	GS-3	135.98	0.67	123.30	12.68	122.55	13.43	122.21	13.77
	GS-4	144.16	0.69	131.50	12.66	131.13	13.03	130.55	13.61
	GS-5	152.27	0.76	138.38	13.89	137.49	14.78	137.13	15.14
	GS-6	166.93	0.88	149.51	17.42	148.64	18.29	148.09	18.84
	GS-7	175.06	1.10	152.64	22.42	151.31	23.75	150.65	24.41
饱和 试样	BS-1	110.76	0.60	99.82	10.94	99.12	11.64	98.75	12.01
	BS-2	120.29	0.67	107.85	12.44	106.88	13.41	106.45	13.84
	BS-3	130.61	0.73	116.50	14.11	115.55	15.06	115.25	15.36
	BS-4	150.03	1.06	126.85	23.18	124.97	25.06	124.20	25.83

各时刻应力松弛量以及三个时刻应力松弛量的变化趋势均随着初始偏应力的增大而增大,表现为非线性正相关。而从两状态应力松弛量的对比结果(图 3)来看,在相同轴向应变比下,饱和试样的最终应力松弛量均大于干燥试样,且两者差值随着应变水平的升高而增大。这可能是因为岩石在屈服后塑性增大,裂隙出现非稳定扩展,饱和岩样内部的水在松弛过程中与内部萌生裂隙接触并扩散,致使弱化作用随应变水平由低到高,从而在最终松弛量上反映出一定的差距^[13]。

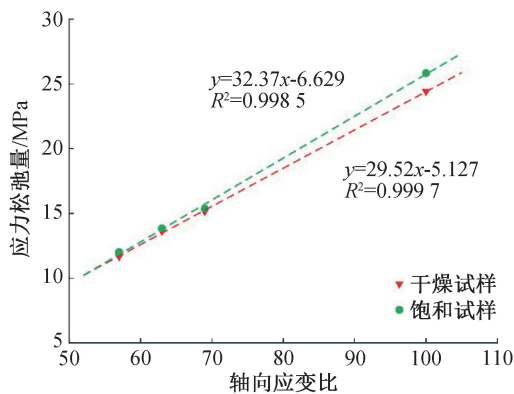


图 3 两种状态试样最终应力松弛量与轴向应变比拟合结果对比

Fig. 3 Comparison between the final stress relaxation amount and axial strain of samples in two states

2. 1. 2 应力松弛趋势分析

由于前文选取三个时刻(12、24、36 h)存在一定局限性,故对两种状态下全过程应力松弛量(或应力松弛趋势)进行研究,如图 4 所示。

由图 4 可知,在相同轴向应变比下,饱和试样的最终松弛应力均略大于干燥试样。另外,饱和

试样快速松弛较快,减速松弛持续时间更长,应力衰减速率较慢;而干燥试样正相反。两状态试样在减速松弛阶段时松弛应力发展的差异很大程度上造成了最终结果的不同。

2. 1. 3 初始应力松弛速率分析

两状态试样在快速松弛阶段差异的主要依据为初始应力松弛速率,表 4 即为两状态试样在相同轴向应变比下该指标的对比。由表可知,两状态试样的初始应力松弛速率均与轴向应变呈正相关,说明随着轴向应变的增大,初始动能更高,导致初始应力衰减速率变高。在各等级轴向应变比下,干燥试样的初始应力松弛速率均比饱和试样高,也说明了在快速松弛阶段干燥试样的应力衰减程度高于饱和试样,故快速松弛时间更长,与前文结论相一致。

表 4 相同轴向应变比下两种状态试样初始应力松弛速率对比

Tab. 4 Comparison of initial stress relaxation rates of samples in two states under the same axial strain ratios

轴向应变比例/%	初始应力松弛速率/(MPa·h ⁻¹)		
	干燥	饱和	差值
57	88.38	59.33	29.05
63	104.75	91.94	12.81
69	120.95	109.02	11.93
100	197.01	185.07	11.94

2. 2 峰值应力循环松弛试验

图 5 为干燥与饱和试样峰值应力循环松弛试验曲线,图中黑色虚线为轨迹线。由图可得,两种状态下试样在每次循环后的峰值均会下降,各循环中曲线形态相似且均为非完全衰减型松

弛。随着循环次数的增加,应力衰减幅度变化不明显,循环超过一定次数后,试样均在加载过程中破坏。

表5为干燥与饱和试样峰值应力循环松弛试

验结果。随着循环次数的增加,每次循环的初始应力、剩余偏应力以及各应力松弛特征均发生变化。此外,干燥试样共经历3次循环,而饱和试样为5次,后文将对此差异予以分析。

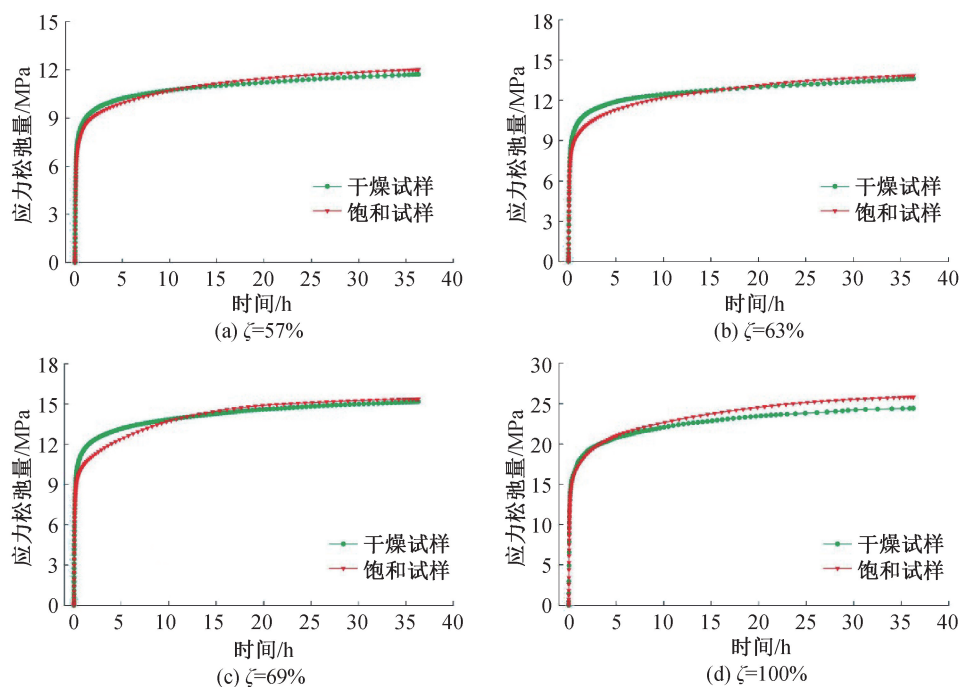


图4 干燥与饱和砂岩全过程松弛应力对比

Fig. 4 Comparison of relaxation stress in whole process for dry and saturated samples

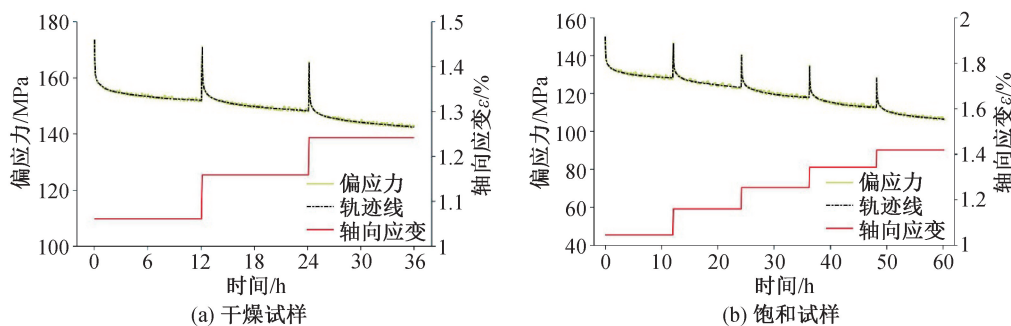


图5 峰值应力循环松弛试验曲线

Fig. 5 Curves of peak stress cyclic relaxation test

表5 峰值应力循环松弛试验结果

Tab. 5 Results of peak stress cyclic relaxation tests

试样类型及编号	循环次数	初始偏应力 σ_0/MPa	轴向应变 $\varepsilon_0/\%$	12 h 应力松弛量 $\sigma_{12\text{h}}/\text{MPa}$	12 h 剩余偏应力 $\sigma'_{12\text{h}}/\text{MPa}$	初始应力松弛速率 $u_0/(\text{MPa}\cdot\text{h}^{-1})$
干燥试样 GF-1	1	173.64	1.061	152.00	21.64	168.88
	2	171.15	1.159	148.30	22.85	186.36
	3	165.50	1.242	142.50	23.00	221.39
饱和试样 BF-1	1	150.01	1.046	128.20	21.81	160.93
	2	146.30	1.160	123.20	23.10	176.25
	3	140.50	1.254	117.95	22.55	164.44
	4	134.55	1.343	112.75	21.80	150.36
	5	128.26	1.419	106.50	21.76	168.54

2.2.1 应力松弛程度及变形特性对比分析

图 6 为两种状态应力松弛量随循环次数的变化对比。随着循环次数的增加,两种状态试样的应力松弛特征及变化趋势相似,应力松弛量基本相同伴随小幅变化,干燥与饱和试样平均值分别为 22.50、22.20 MPa,说明此试验中干燥试样的应力松弛程度高于饱和试样。

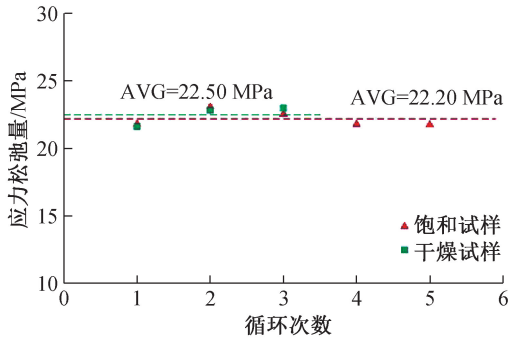


图 6 干燥与饱和砂岩峰值应力循环应力松弛量对比
Fig. 6 Comparison of stress relaxation in peak stress cyclic relaxation between dry and saturated sandstones

变形特性是分析岩样在试验过程中变化的重要指标。图 7 为峰值应力循环松弛中干燥与饱和试样的轴向应变随循环次数的变化情况,可以看出每次循环前加载至峰值应力所对应的轴向应变与循环次数呈线性正相关,拟合精度极高,且干燥试样最终破坏时轴向应变低于饱和试样 20.62%,说明循环松弛过程中饱和试样的延性略高。

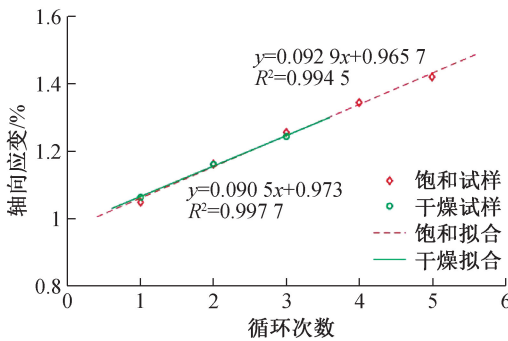


图 7 干燥与饱和砂岩峰值应力循环松弛轴向应变对比
Fig. 7 Comparison of axial strain in peak stress cyclic relaxation between dry and saturated sandstones

2.2.2 微观机制分析原因

基于蠕变加载过程中能量演化^[14]及其与松弛的趋同性,若无外部能量交换,由能量守恒可知,加载松弛的体积应变能为弹性应变能(U_e)与耗散能(U_d)之和。基于能量演化曲线(图 8)可知,每一循环中耗散能包括岩石新裂隙的产生及之后岩石内部颗粒间的转动、摩擦等。故每次循环的松

弛过程无外部能量输入,主要使内部初始应变能耗散,材料内克服摩擦进行微观重组。另外,水能够参与材料弱化过程,在结构中能有效扩散并起到软化作用,使得岩石延性增加,从而导致饱和试样循环次数以及破坏时轴向应变均高于干燥试样,由此也解释了循环松弛试验中所展现出的差异。

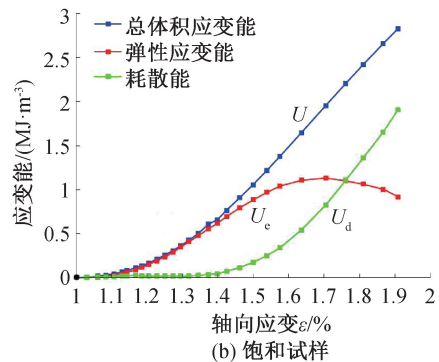
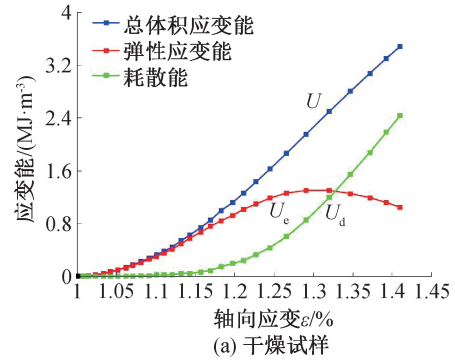


图 8 峰值应力循环松弛能量演化过程

Fig. 8 Stress-strain curve of peak stress cyclic relaxation test

3 灰砂岩应力松弛本构模型

弹性与黏性特征在灰砂岩的应力松弛特性中表现显著,而广义 Maxwell 岩石流变元件模型对描述岩石黏弹性力学特性较为适合,其模型参数明确、整体架构简单。为了提升模拟效果,利用四单元广义 Maxwell 应力松弛模型对于干燥与饱和状态灰砂岩单级应力松弛结果开展参数辨识与验证^[15]。四单元广义 Maxwell 应力松弛模型如图 9 所示。

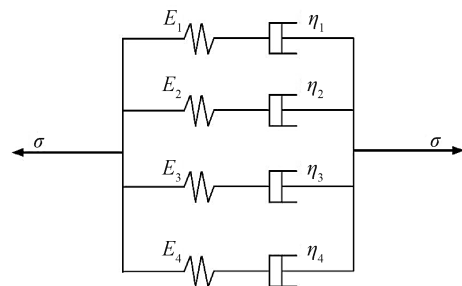


图 9 松弛本构模型

Fig. 9 The constitutive model of four-element generalized Maxwell stress relaxation

3.1 模型应力松弛方程的建立

广义 Maxwell 本构模型是由一定数量相同的 Maxwell 单元体通过并联形成的复合元件模型。对于四单元 Maxwell 应力松弛本构模型,其由四个独立 Maxwell 体并联形成,受力状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{(\sigma)_1}{E_1} + \frac{(\dot{\sigma})_1}{\eta_1} = \dot{\varepsilon}_1 \\ \frac{(\sigma)_2}{E_2} + \frac{(\dot{\sigma})_2}{\eta_2} = \dot{\varepsilon}_2 \\ \frac{(\sigma)_3}{E_3} + \frac{(\dot{\sigma})_3}{\eta_3} = \dot{\varepsilon}_3 \\ \frac{(\sigma)_4}{E_4} + \frac{(\dot{\sigma})_4}{\eta_4} = \dot{\varepsilon}_4 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 \\ \sigma = \sum_{i=1}^4 (\sigma)_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, $(\sigma)_n (n=1,2,3,4)$ 分别为各并联部分 Maxwell 体所受的应力; $(\varepsilon)_n (n=1,2,3,4)$ 分别为各并联部分 Maxwell 体在外力作用下的应变; $\dot{\varepsilon}_n (n=1,2,3,4)$ 为各并联部分 Maxwell 体的应变率; $(E)_n (n=1,2,3,4)$ 分别为各并联部分 Maxwell 体中弹性元件的弹性系数; $(\eta)_n (n=1,2,3,4)$ 分别为各并联部分 Maxwell 体中黏性元件的粘滞系数。

在应力松弛试验中,加载至预定初始偏压后试样的轴向应变可认为保持恒定,则有:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \text{const} \quad (3)$$

当松弛初始时刻 $t=0$ 时,广义 Maxwell 体各并联部分初始轴向应变均相等,数值等于试样初始轴向应变:

$$(\varepsilon_1)_0 = (\varepsilon_2)_0 = (\varepsilon_3)_0 = (\varepsilon_4)_0 = \varepsilon_0 \quad (4)$$

将式(2)结合初始条件式(3)与式(4)进行 Laplace 正逆变换可得出:

$$\begin{cases} (\sigma)_1 = E_1(\varepsilon_1)_0 \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1}t\right) \\ (\sigma)_2 = E_2(\varepsilon_2)_0 \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2}t\right) \\ (\sigma)_3 = E_3(\varepsilon_3)_0 \exp\left(-\frac{E_3}{\eta_3}t\right) \\ (\sigma)_4 = E_4(\varepsilon_4)_0 \exp\left(-\frac{E_4}{\eta_4}t\right) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)经整理,可得出广义 Maxwell 本构模型的应力松弛方程为

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{i=1}^4 E_i \exp\left(-\frac{E_i}{\eta_i}t\right) \quad (6)$$

3.2 模拟验证结果

为解决本构模型参数识别中存在迭代发散或收敛速度缓慢等问题,选用非线性曲线拟合软件 1stOpt,使用麦夸特法结合全局优化法,进行参数识别。该法不依赖初始参数的选取,且迭代速度快、稳定性高,以准确高效地使用于本构模型中。

四单元广义 Maxwell 应力松弛本构模型包含 8 个模型参数,反应了本构模型的黏弹性特征。下文选用轨迹数据进行模型参数辨识以避免原始数据点过多且波动大的问题。首先使用 1stOpt 软件采用 LM-UGO 算法,编制四单元广义 Maxwell 应力松弛模型程序,然后对一系列干燥与饱和状态灰砂岩试样单级应力松弛试验的修正轨迹数据进行参数辨识与验证。四单元广义 Maxwell 应力松弛模型拟合参数见表 6,拟合结果如图 10 所示。

由图 10 可知,四单元广义 Maxwell 应力松弛本构模型对干燥与饱和状态灰砂岩在单级应力松弛试验中的模拟效果极好,精度极高。因此,该模型能够以极高的精度准确完整地描述干燥与饱和状态灰砂岩的应力松弛全过程趋势,能够极好体现砂岩非完全衰减松弛特性的黏弹性特征,也验证了广义 Maxwell 应力松弛本构模型精度随单元

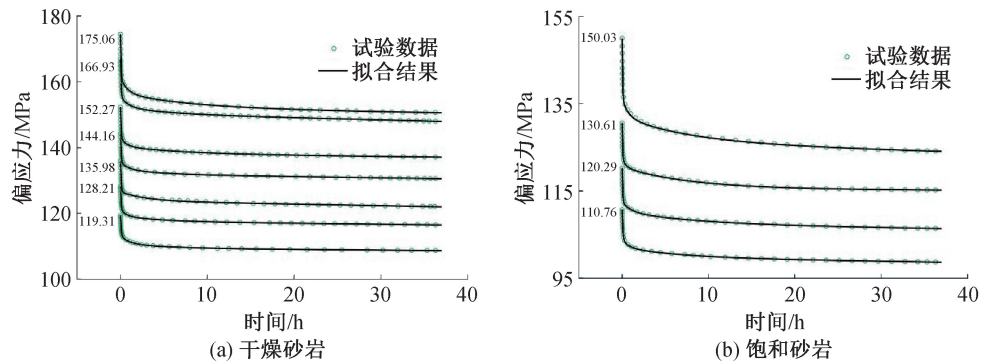


图 10 模拟结果

Fig. 10 The simulation results

表 6 模型拟合参数

Tab. 6 Model fitting parameters

试样类型	初始偏应力 σ_0/MPa	弹性系数 $E_1/(\times 10^4 \text{MPa})$	粘滞系数 $\eta_1/(\times 10^7 \text{MPa}\cdot\text{h})$	弹性系数 $E_2/(\times 10^3 \text{MPa})$	粘滞系数 $\eta_2/(\times 10^2 \text{MPa}\cdot\text{h})$	弹性系数 $E_3/(\times 10^2 \text{MPa})$	粘滞系数 $\eta_3/(\times 10^3 \text{MPa}\cdot\text{h})$	弹性系数 $E_4/(\times 10^2 \text{MPa})$	粘滞系数 $\eta_4/(\times 10^2 \text{MPa}\cdot\text{h})$	拟合方差 R^2
干燥试样	119.31	1.92	10.34	1.08	0.82	2.63	1.40	3.97	3.82	0.998 7
	128.21	1.87	7.05	1.12	0.73	2.73	1.19	2.96	1.78	0.997 8
	135.98	1.85	4.62	1.74	1.19	4.09	1.22	3.26	0.49	0.999 1
	144.16	1.91	6.64	1.25	0.86	2.36	1.02	2.91	2.51	0.998 5
	152.27	1.82	8.35	1.23	0.73	3.02	2.10	3.41	2.21	0.998 9
	166.93	1.71	4.02	1.32	0.86	2.27	1.32	3.63	3.45	0.999 0
	175.06	1.38	5.27	1.21	0.63	4.18	3.55	4.22	3.37	0.998 1
饱和试样	110.76	1.66	5.86	1.13	0.90	4.00	2.83	3.12	2.24	0.998 4
	120.29	1.60	5.81	1.16	0.71	4.30	3.80	3.28	3.24	0.997 9
	130.61	1.58	23.57	1.13	0.63	6.95	5.55	2.52	1.14	0.998 6
	150.03	1.19	2.70	1.29	0.67	5.75	4.54	3.92	2.60	0.998 8

数目增加而提高的推测。

4 结论

1) 干燥与饱和灰砂岩均具有明显的非完全衰减形式的应力松弛特性,包含三个松弛阶段。在单级应力松弛试验中,相同轴向应变比条件下,饱和试样的最终松弛量略大于干燥试样。与干燥试样相比,饱和试样的快速松弛阶段较短,减速松弛阶段较长,曲线存在交叉点。而两类试样的初始应力松弛速率均与初始偏压和应变水平呈正相关,但在数值上干燥高于饱和。经分析,造成两种状态松弛差异的原因主要是由于水的弱化作用与裂隙的非稳定扩展。

2) 在峰值应力循环松弛试验中,两状态的曲线形态及应力松弛量变化趋势基本一致,初始偏压随循环次数增加而减小,干燥试样的应力松弛程度高于饱和试样;各循环的轴向应变与循环次数呈线性正相关,最终破坏时干燥试样轴向应变以及循环次数均小于饱和试样。从微观机理角度分析是由于松弛消耗内部应变能致使岩石微观重组,加上水的弱化作用,导致饱和试样延性更高造成此现象。进而,在工程中应注意水对于岩体稳定性的影响。

3) 利用四单元广义 Maxwell 应力松弛本构模型能够以极高的精度准确完整地描述干燥与饱和状态灰砂岩单级应力松弛全过程趋势与各时刻应力松弛程度,可以极好体现砂岩非完全衰减松弛特性的黏弹性特征。

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
 [2] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(06):6-31.

- [3] 谢和平,陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京:科学出版社,2004.
 [4] 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(S1):2663-2672.
 [5] 冯涛,王文星,潘长良. 岩石应力松弛试验及两类岩爆研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2000,36(01):25-29.
 [6] 许江,马天宇,大久保诚介,等. 不同围压下岩石广义应力松弛特性试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(S2):57-66.
 [7] 徐慧宁,刘建锋,任浩楠,等. 大理岩裂隙岩体流变特性试验研究[J]. 实验科学与技术,2018,16(02):18-24.
 [8] 田洪铭,陈卫忠,肖正龙,等. 泥质粉砂岩高围压三轴压缩松弛试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(08):1433-1439.
 [9] 陈方明,胡泉光,宁光忠. 三轴应力条件下粉砂质泥岩分级松弛特性[J]. 山东大学学报:工学版,2017,47(03):125-129.
 [10] 李帅,朱万成,牛雷雷,等. 动态扰动对应力松弛岩石变形行为影响的试验研究[J]. 岩土力学,2018,39(08):2795-2804.
 [11] 周文锋,沈明荣. 规则齿型结构面的应力松弛特性试验研究[J]. 土工基础,2014,28(02):138-141.
 [12] 刘昂,沈明荣,蒋景彩,等. 基于应力松弛试验的结构面长期强度确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(09):1916-1924.
 [13] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005(01):33-38.
 [14] 辛亚军,李梦远. 岩石分级加载蠕变的能量耗散与变形机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S1):2883-2897.
 [15] WANG Junbao, LIU Xinrong, SONG Zhanping, et al. An Improved Maxwell Creep Model for Salt Rock[J]. Geomechanics and Engineering, 2015, 9(04):499-511.

(责任编辑 王利君)