

干湿循环对深部粉砂岩蠕变特性影响的试验研究

马芹永¹, 郁培阳¹, 袁 璞^{1, 2}

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培养基地, 山东 青岛 266590)

摘要: 为探究围岩含水率变化对深部岩体长期稳定性的影响, 以朱集东煤矿-906 m 处粉砂岩为研究对象, 借助 ZYSS2000 型岩石高温高压蠕变仪, 采用分级加载方式, 对不同干湿循环次数粉砂岩试件开展单轴压缩蠕变试验。试验结果表明, 随干湿循环次数增多, 粉砂岩轴向蠕变应变和轴向稳态蠕变速率呈非线性增大, 瞬时变形模量呈对数降低, 且轴向蠕变应变和轴向稳态蠕变速率在 1 次干湿循环后出现较大增幅, 瞬时变形模量在干湿循环 0~1 次阶段劣化度最大, 为 10.06%; 不同干湿循环作用后的粉砂岩试件在最后一级应力作用下发生蠕变破坏的规律基本一致, 且在相同的破坏应力下, 随干湿循环次数的增多, 粉砂岩试件蠕变破坏全程历时逐渐减小, 减速蠕变段和加速蠕变段占全程历时的比例逐渐升高; 粉砂岩的长期强度随干湿循环次数的增多逐渐降低, 且在 1 次循环以后出现较大的降幅; 粉砂岩的蠕变破坏特征随干湿循环次数增多呈现出由张拉破坏向剪切破坏转化。

关键词: 岩石力学; 干湿循环; 分级加载; 单轴压缩蠕变; 破坏形态

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)03 - 0593 - 08

Experimental study on creep properties of deep siltstone under cyclic wetting and drying

MA Qinyong¹, YU Peiyang¹, YUAN Pu^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to investigate the influence of moisture content on the long-term stability of deep rock, the siltstone from -906 m of Zhujidong coalmine was studied. A series of uniaxial compressive creep tests of cyclic wetting and drying on the siltstone were carried out in stepped loading on the rock creep testing machine ZYSS2000 under high temperature and high pressure. The test results show that with increasing of wetting and drying cycles, the axial creep strain and axial steady creep rate of siltstone increase nonlinearly, while the instantaneous deformation modulus decreases logarithmically. The axial creep strain and axial steady creep rate increase significantly after the first wetting and drying cycle. The degree of deterioration of the instantaneous deformation modulus from 0 to 1 stage is the biggest which is 10.06%. The creep failure curve of siltstone under

收稿日期: 2017 - 06 - 05; **修回日期:** 2017 - 12 - 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774011); 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放课题基金项目(MDPC201603) Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51774011) and Opening Project Fund of State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology(Grant No. MDPC201603)

作者简介: 马芹永(1964 -), 男, 2005 年于北京科技大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事深部岩石力学特性及爆破技术方面的教学与研究工作。E-mail: qymaah@126.com。通讯作者: 郁培阳(1992 -), 男, 现为硕士研究生, 主要从事深部岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: pyyu2016@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0711

various wetting and drying cycles present similar regularities under the last level of stress. With the increasing of the number of wetting and drying cycles, the whole time for creep failure of siltstone decrease gradually under the certain failure stress, while the proportion of transient creep stage and accelerated creep stage in the whole time increase gradually. The long-term strength of siltstone decreases gradually with the increasing of the number of wetting and drying cycles. The largest reduction occurs after the first wetting and drying cycle. The creep failure characteristics of siltstone present a transformation from tension failure to shear failure.

Key words: rock mechanics; cyclic wetting and drying; step-loading; uniaxial compressive creep; failure modes

1 引言

由于在深部地下工程开挖与支护的过程中,围岩的含水率会发生改变,这将对深部岩体的长期稳定性产生不利影响。在室内以干湿循环作用来模拟含水率变化,并通过对不同干湿循环条件下岩石开展蠕变试验,探究围岩含水率变化对深部岩体长期稳定性的影响。

近年来,针对干湿循环对岩石性能的影响,学者们开展了大量的试验研究。姚华彦等^[1]对干湿循环下的红砂岩开展单轴和三轴压缩试验,分析了其变形破坏特征,发现岩石的各项力学特性在第1次饱水之后下降幅度较大;邓华锋等^[2-3]对浸泡-风干循环下的砂岩进行单轴压缩试验、三轴压缩试验和单轴循环加卸载试验,发现浸泡-风干循环对岩石造成了不可逆的渐进性损伤;李克钢等^[4]对砂岩进行了吸水性、单轴压缩和直剪试验,系统地探究了干湿循环作用对砂岩吸水率、抗压强度、抗剪参数以及破坏形式的影响;袁璞和马芹永^[5]借助 SHPB 试验装置从动态的角度分析了干湿循环对煤矿砂岩的影响;刘新荣等^[6-8]分别从宏观和微观的角度探讨了三峡库区砂岩在酸性干湿循环条件下的劣化机制。

然而已有研究主要集中于强度特性方面,如单轴抗压强度、三轴抗压强度和抗剪强度,较少涉及变形特性。蠕变是评价岩体工程的长期稳定性和安全性的重要指标^[9-14],研究表明,水对岩石的蠕变性质具有非常显著地影响,目前对水岩作用下岩石蠕变特性的研究仅限于不同含水状态,而对干湿循环作用下岩石蠕变特性研究鲜有报道。李鹏等^[15]对4种含水率下的砂岩软弱结构面进行剪切蠕变试验,分析了含水率差异对软弱结构面剪切蠕变的影响;李男等^[16]通过对干燥和饱水状态下砂岩开展剪切蠕变试验,探究了水对砂岩剪切蠕变特性的影响;张春阳等^[17]对自然和饱水状态下的深部角闪岩开展单轴压缩蠕变试验研究,对比分析了2种状态下角闪岩的蠕变变形特征。

以朱集东煤矿深部粉砂岩为研究对象,借助 ZYSS200 型岩石高温高压蠕变仪,采用分级加载方式,对不同干湿循环条件下粉砂岩试件开展单轴压缩蠕变试验,分析干湿循环作用下粉砂岩的轴向蠕变变形、瞬时变形模量、长期强度和破坏形态的变化,并探讨干湿循环的影响机制。

2 干湿循环试验设计

2.1 蠕变试验设备及试件

试验采用长春机械研究院研制 ZYSS2000 型岩石高温高压蠕变仪(见图1)。该设备最大轴向载荷为 2 000 kN,最大围压为 60 MPa,最高温度为 50 ℃,最大孔隙水压力为 30 MPa。



图1 ZYSS2000 型岩石高温高压蠕变仪

Fig.1 Rock creep testing machine ZYSS2000 with high temperature and high pressure

试样取自淮南矿业集团朱集东煤矿西-13-1煤底板轨道大巷(南),埋深为-906 m,岩性为粉砂岩,呈浅灰色,无层理和裂纹,表现完整性良好,严格按照规程^[18]加工成标准圆柱体,直径为 50 mm,高度为 100 mm。采用称重及超声波测试,剔除离散性较大的试件。所选试件如图2所示,其密度为 2.44~2.65 g/cm³,平均密度为 2.61 g/cm³,纵波波速为 4 077~4 241 m/s,平均波速为 4 153 m/s。



图 2 粉砂岩试件
Fig.2 Siltstone samples

2.2 干湿循环蠕变试验方案

将粉砂岩试件放入烘箱中干燥 24 h 后，取出冷却 30 min 后放入盛水容器中自由吸水 24 h，即为 1 次干湿循环。粉砂岩试件第一次烘干温度为 110 °C，以后每次温度设为 60 °C^[5]。将粉砂岩试件分为 5 组，分别进行 $n = 0$ (干燥状态)，1 (饱水状态)，3，6，12 次干湿循环作用，每组包含 2 个试件。

蠕变试验在恒温恒湿条件下进行，采用分级加载方式，以自然状态下粉砂岩的单轴抗压强度作为蠕变试验分级加载的依据，确定初始应力为单轴抗压强度的 40%，分级加载应力增量为 10.10 MPa，每级应力持续 24 h，加载期间采样间隔为 0.1 s，恒载期间采样间隔为 30 min。轴向分级应力水平见表 1。

表 1 轴向分级应力
Table 1 Axial stepped stress

加载级数	轴向分级应力/MPa				
	0 次	1 次	3 次	6 次	12 次
1	45.46	45.46	45.46	45.46	45.46
2	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56
3	65.66	65.66	65.66	65.66	65.66
4	75.76	75.76	75.76	75.76	75.76
5	85.86	85.86	85.86	85.86	85.86
6	95.96	95.96	95.96	95.96	95.96
7	106.06	106.06	-	-	-

3 不同干湿循环次数下粉砂岩蠕变试验结果及分析

在岩石蠕变过程中，当所施加的分级应力超过岩石的长期强度时，岩石将发生蠕变破坏，其变形量、变形速率较其他应力作用下均有较大变化。因此，仅探究破坏应力之前干湿循环对深部粉砂岩轴向蠕变应变、轴向稳态蠕变速率、瞬时变形模量的影响。

3.1 轴向蠕变变形分析

不同干湿循环次数下粉砂岩试件蠕变曲线如图 3 所示，对试验数据采用 Boltzmann 叠加处理。

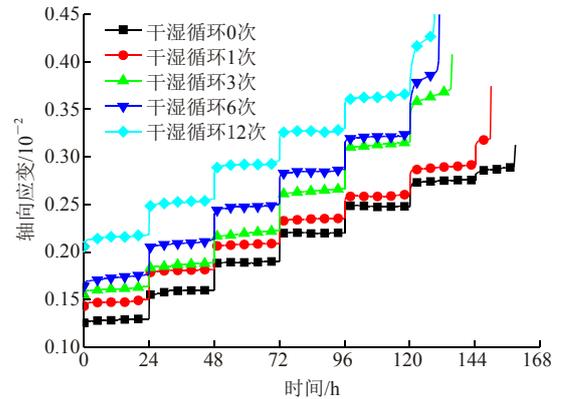


图 3 不同干湿循环次数下粉砂岩单轴压缩蠕变试验曲线
Fig.3 Uniaxial compressive creep curves of deep siltstone under various wetting and drying cycles

(1) 粉砂岩蠕变曲线分析

粉砂岩试件在应力施加的瞬间产生轴向瞬时变形，在长期应力作用下发生蠕变。在第一级加载应力作用下，试件的蠕变变形较为明显，之后随应力的逐级增加，蠕变曲线的斜率增大，主要表现出减速蠕变和等速蠕变，轴向蠕变速率随时间逐渐趋于一恒定值；继续施加应力，试件的蠕变特性越来越明显，加载至最后一级时，试件的轴向变形随时间的发展逐渐增大，表现出岩石蠕变的三阶段特征，即减速蠕变段、等速蠕变段和加速蠕变段，并最终在加速蠕变段破坏。在相同应力水平下，随干湿循环次数的增多，粉砂岩试件的瞬时变形量、蠕变变形量增大，蠕变曲线由缓变陡。

(2) 干湿循环对粉砂岩轴向蠕变应变的影响

相邻干湿循环次数下粉砂岩试件蠕变变形参数的平均增幅 $\Delta\varepsilon$ ，具体可表示为

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\varepsilon_n - \varepsilon_m) / \varepsilon_m}{n - m} \times 100\% \quad (1)$$

式中： ε_n ， ε_m 分别为粉砂岩干湿循环 n ， m 次后蠕变变形参数值，当 $n = 1, 3, 6, 12$ 时， m 依次取 0, 1, 3, 6。

绘制各分级应力水平下粉砂岩试件轴向蠕变应变与干湿循环次数的关系曲线，如图 4 所示。可以看出，不同应力水平下，粉砂岩试件的轴向蠕变应变变化趋势基本一致。但在第一级应力水平下蠕变现象较为明显，主要是由于试件内部存在大量的原生微裂纹等缺陷，在第一级应力作用下，这些微裂纹逐渐闭合，从而致使轴向蠕变应变较大。

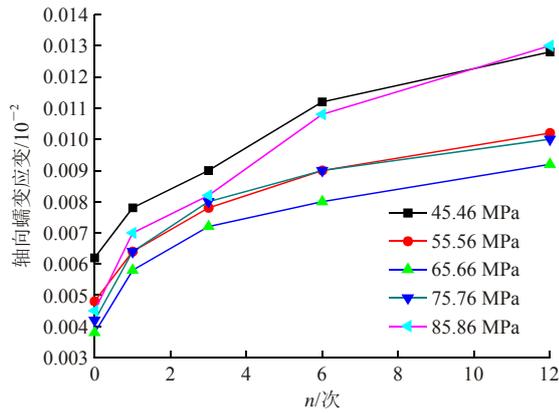


图4 不同干湿循环次数下粉砂岩轴向蠕变应变

Fig.4 Axial creep strains of siltstone under various wetting and drying cycles

为进一步探究相邻干湿循环次数下粉砂岩轴向蠕变应变具体变化趋势, 绘制相邻干湿循环次数下轴向蠕变应变平均增幅(见表2), 随干湿循环次数的增多, 粉砂岩轴向蠕变应变呈非线性增长, 且相邻干湿循环次数下平均增幅由大到小依次为: 0~1, 1~3, 3~6, 6~12次, 其中0~1次轴向蠕变应变平均增幅最高达55.56%, 最低为25.81%, 远远超过其他相邻干湿循环段的平均增幅, 表明1次干湿循环后粉砂岩试件的轴向蠕变应变增幅较大。

表2 相邻干湿循环次数下粉砂岩轴向蠕变应变平均增幅
Table 2 Average rate of axial creep strain increments of deep siltstone under adjacent cycles

应力水平/ MPa	轴向蠕变应变平均增幅/%			
	0~1次	1~3次	3~6次	6~12次
45.46	25.81	7.69	8.15	2.38
55.56	33.33	10.94	5.13	2.24
65.66	52.63	12.07	3.33	2.50
75.76	52.38	12.50	4.17	1.85
85.86	55.56	8.57	10.57	3.40

此外, 经历不同干湿循环作用后的粉砂岩在各分级应力作用下轴向蠕变应变的最大值与最小值的差值随干湿循环次数的增多而明显增大。干湿循环0次差值为 1.8×10^{-5} , 1, 3, 6和12次后差值依次为 2.0×10^{-5} , 2.2×10^{-5} , 3.2×10^{-5} 和 3.6×10^{-5} , 表明随干湿循环次数的增多, 岩石内部非水稳定性物质逐渐溶解, 且其与岩石颗粒之间的胶结作用逐渐下降, 在长期应力的作用下, 颗粒排列发生调整, 岩石结构不断劣化, 变形逐渐增大。

(3) 干湿循环对粉砂岩轴向稳态蠕变速率的影响

粉砂岩轴向稳态蠕变速率与干湿循环次数的关系曲线(见图5), 在不同分级应力水平下, 粉砂岩试件的轴向稳态蠕变速率变化规律基本一致, 均表现为随干湿循环次数的增多, 粉砂岩轴向稳态蠕变速率呈现非线性增大。对比相邻干湿循环次数下粉砂岩轴向稳态蠕变速率具体变化趋势(见表3), 各相邻干湿循环段内粉砂岩轴向稳态蠕变速率的平均增幅呈现不同程度的变化, 其中在0~1次平均增幅最为明显, 其次是1~3次循环, 但在3~6次循环内急剧下降, 而在6~12次循环内逐步增大。

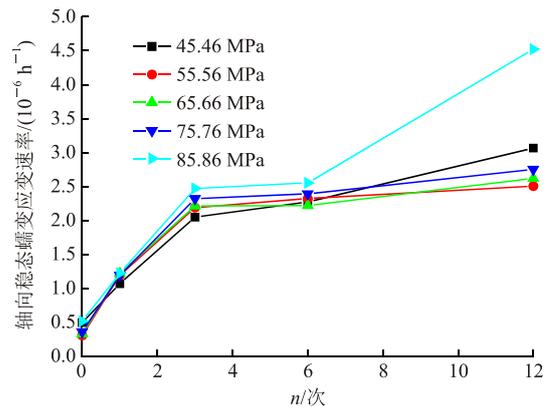


图5 不同干湿循环次数下粉砂岩轴向稳态蠕变速率

Fig.5 Axial steady creep rates of siltstone under various wetting and drying cycles

表3 相邻干湿循环次数下粉砂岩轴向稳态蠕变速率平均增幅
Table 3 Average rates of axial steady creep rate increment of siltstone under adjacent cycles

应力水平/ MPa	轴向稳态蠕变速率平均增幅/%			
	0~1次	1~3次	3~6次	6~12次
45.46	114.29	45.72	3.60	6.66
55.56	284.50	41.77	3.00	1.32
65.66	270.93	40.49	0.08	3.01
75.76	228.10	47.22	1.04	2.49
85.86	136.70	49.20	1.11	12.82

此外, 不同干湿循环次数下粉砂岩试件的轴向稳态蠕变速率波动范围随干湿循环次数的增多逐渐变大, 干湿循环0次后粉砂岩试件在各分级应力作用下轴向稳态蠕变速率范围为 $0.31 \times 10^{-6} \sim 0.52 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 12次循环后轴向稳态蠕变速率变化范围为 $2.51 \times 10^{-6} \sim 4.52 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, 原因在于反复的“干燥-饱水”作用导致粉砂岩内部局部弱化区域的范围不断增大, 在应力的长期作用下, 试件内部弱化区域产生局部非均匀性破坏, 在宏观上表现为蠕变速率波动范围增大。

3.2 加速蠕变阶段分析

在最后一级应力作用下，不同干湿循环作用后的粉砂岩试件发生蠕变破坏，粉砂岩在最后一级应力下的轴向应变及应变速率随时间的变化曲线(见图 6)。

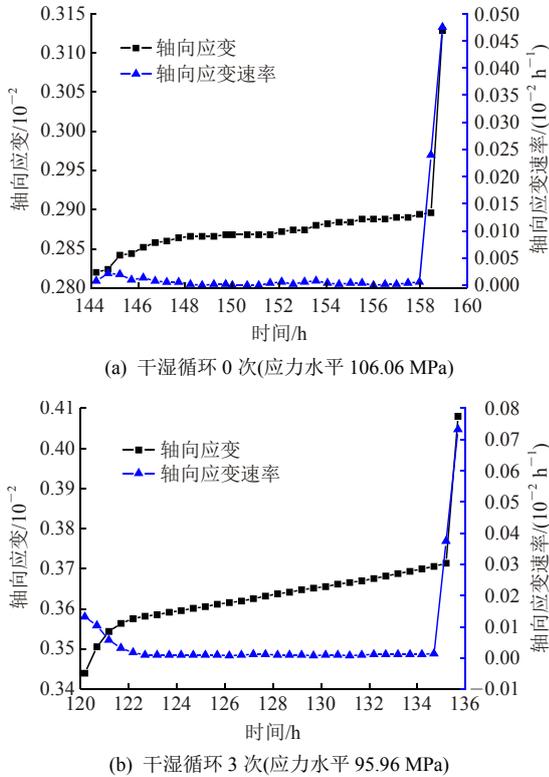


图 6 不同干湿循环次数下粉砂岩加速蠕变阶段应变及应变速率与时间关系

Fig.6 Relations among strains, rate and time at accelerated creep stage of siltstone under various wetting and drying cycles

不同干湿循环作用后的粉砂岩试件在最后一级应力作用下发生蠕变破坏的规律基本一致，均由减速蠕变段经等速蠕变段发展到加速蠕变段，试件在加速蠕变段发生破坏；其中减速蠕变段和加速蠕变段历时较短，等速蠕变段历时较长。

对比不同干湿循环作用后的粉砂岩试件发生蠕

变破坏的应力水平及应变曲线发现，试件发生破坏的应力水平及蠕变破坏的总历时不同，具体的对比结果见表 4。干湿循环 0 和 1 次的粉砂岩试件在 106.06 MPa 时发生蠕变破坏，而干湿循环 3, 6 和 12 次的粉砂岩试件破坏时的应力为 95.96 MPa；在相同的破坏应力水平下，随干湿循环次数的增多，粉砂岩试件蠕变全程历时逐渐减小，减速蠕变段和加速蠕变段历时占全程历时的比例逐渐升高，最高达 42.24%和 15.52%，而等速蠕变段历时占全程历时比例逐渐减小。

3.3 干湿循环对粉砂岩瞬时变形模量的影响

将各分级应力及其对应的轴向瞬时应变比值定义为瞬时变形模量 E_0 ，对比分析不同应力水平下干湿循环 0, 1, 3, 6 和 12 次后粉砂岩的瞬时变形模量 E_0 结果。以粉砂岩的瞬时变形模量 E_0 为纵坐标，干湿循环次数 n 为横坐标，按对数关系对其进行拟合(见图 7)，发现不同应力水平下粉砂岩的瞬时变形模量 E_0 和干湿循环次数 n 符合以下关系：

$$E_0 = 35.90 - 4.73 \ln(n + 1) \quad (R^2 = 0.97) \quad (2)$$

在应力水平未达破坏应力之前，粉砂岩试件的瞬时变形模量在不同应力水平的作用下，其值在一定范围内波动，故取其平均值 \bar{E}_0 为研究对象，探究干湿循环次数对粉砂岩瞬时变形模量的影响，参照刘新荣等^[6]的研究，定义粉砂岩试件在经历不同干湿循环作用后平均瞬时变形模量的降幅为总劣化度 S_n ，每相邻干湿循环作用后平均瞬时变形模量的平均降幅为阶段劣化度 ΔS ，则

$$S_n = \frac{\bar{E}_{00} - \bar{E}_{0n}}{\bar{E}_{00}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta S = \frac{S_n - S_m}{n - m} \quad (4)$$

式中： \bar{E}_{00} 为干湿循环 0 次时粉砂岩试件的平均瞬时变形模量， \bar{E}_{0n} 为干湿循环 n 次时粉砂岩试件的平均瞬时变形模量。当 $n = 1, 3, 6, 12$ 时， m 依次取 0, 1, 3, 6。

表 4 破坏应力水平下粉砂岩蠕变历时统计

Table 4 Durations of creep for siltstone under failure stress

干湿循环次数	破坏应力/MPa	全程历时/h	减速蠕变段		等速蠕变段		加速蠕变段	
			减速蠕变历时/h	占全程历时比例/%	等速蠕变历时/h	占全程历时比例/%	加速蠕变历时/h	占全程历时比例/%
0	106.06	14.42	3.50	24.27	10.5	72.82	0.42	2.91
1	106.06	5.28	2.00	37.88	3.0	56.82	0.28	5.30
3	95.96	15.48	2.50	16.15	12.5	80.75	0.48	3.10
6	95.96	10.74	3.00	27.93	6.5	60.52	1.24	11.55
12	95.96	9.47	4.00	42.24	4.0	42.24	1.47	15.52

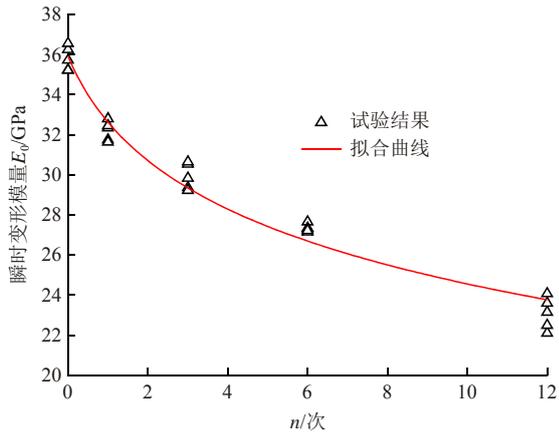


图7 不同干湿循环次数下粉砂岩瞬时变形模量

Fig.7 Instantaneous deformation modulus of siltstone under various wetting and drying cycles

根据式(3), (4)可得, 不同干湿循环次数下粉砂岩试件平均瞬时变形模量总劣化度 S_n 及其阶段劣化度 ΔS 变化趋势(见图8)。

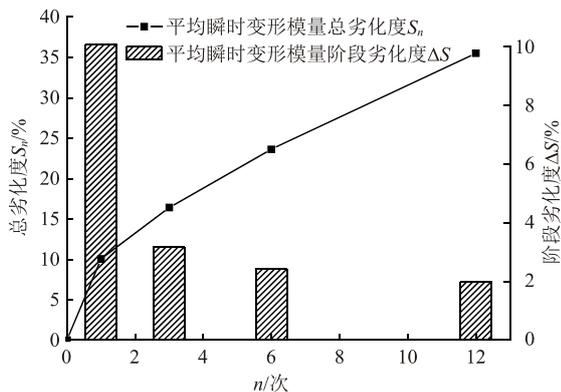


图8 不同干湿循环次数下粉砂岩平均瞬时变形模量总劣化度及其阶段劣化度趋势

Fig.8 Total deterioration degree of average instantaneous deformation modulus and trend of phase deterioration degree of siltstone under various wetting and drying cycles

由图7, 8可知, 随干湿循环次数增多, 粉砂岩瞬时变形模量随之降低, 其总劣化度逐渐增大。干湿循环1次后粉砂岩的总劣化度为10.06%, 之后随干湿循环次数的增加, 其总劣化度依次为16.41%, 23.63%和35.50%, 但是在此过程中各阶段劣化度却逐渐降低, 其中0~1次阶段劣化度最大达10.06%, 6~12次阶段劣化度最低, 仅为1.98%, 表明干湿循环作用对粉砂岩的劣化是一个渐进的过程。

3.4 不同干湿循环次数下粉砂岩长期强度确定

岩体的长期强度是考虑时效特性条件下岩体工程长期稳定性和安全性的重要指标。对于长期强度的确定, 目前广泛使用的方法有等时应力-应变曲

线法、过度蠕变法和稳态蠕变速率法。考虑到本次试验所采用的深部粉砂岩蠕变量较小, 其应力-应变曲线较为集中, 难以判断拐点, 在试验过程中难以获得稳态蠕变速率为零的蠕变曲线, 因而采用稳态蠕变速率法进行数据分析。

不同干湿循环条件下轴向稳态蠕变速率与应力的关系曲线(见图9), 发现曲线存在明显的拐点, 分别绘制拐点前后曲线的切线, 其交点A所对应的应力即为岩石的长期强度^[19]。经历干湿循环0, 1, 3, 6和12次后粉砂岩试件的长期强度依次为100.40, 99.10, 93.40, 91.50和90.20 MPa。如图10所示, 粉砂岩试件的长期强度随干湿循环次数的增多而逐渐降低, 干湿循环1次后, 粉砂岩的长期强度下降了1.29%, 3, 6和12次循环后其下降幅度依次为6.97%, 8.86%和10.16%。由此可见, 1次循环以后粉砂岩长期强度出现较大的降幅。

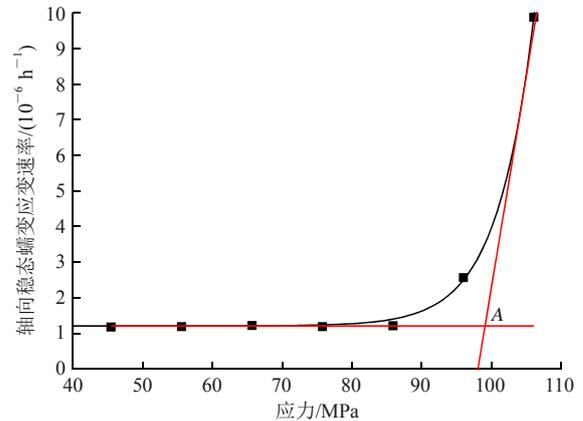


图9 不同分级应力作用下粉砂岩轴向稳态蠕变速率(n=1)

Fig.9 Axial steady creep rates of siltstone under different stepped stresses(n=1)

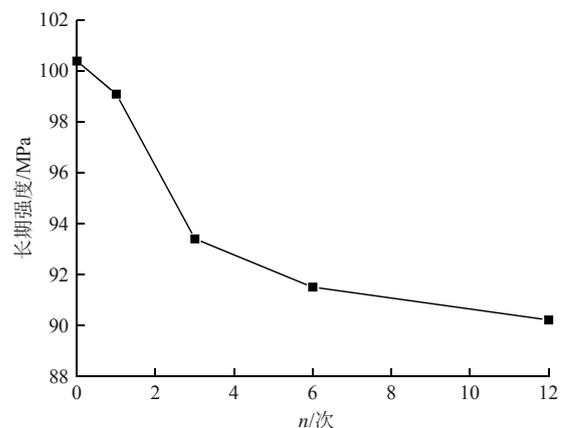


图10 不同干湿循环次数下粉砂岩长期强度

Fig.10 Long-term strengths of siltstone under various wetting and drying cycles

3.5 干湿循环对粉砂岩蠕变破坏形态的影响

经历不同干湿循环作用后的粉砂岩试件发生蠕

变破坏时, 其破坏形态呈现出一定特征(见图 11)。干燥状态下的粉砂岩试件破坏时, 2 条近似平行的宏观破坏面贯穿整个试件, 并伴随着大量的碎块, 表现出张拉脆性破坏的特点; 而经历干湿循环 1 次的粉砂岩, 其宏观破坏面发生一定偏转, 表现出剪切破坏的特征; 随干湿循环次数的增多, 宏观破坏面与纵轴的夹角逐渐增大。以上分析表明, 干湿循环作用对粉砂岩蠕变破坏形态有显著影响, 随干湿循环效应的增强, 岩石的破坏形态表现出由张拉破坏向剪切破坏转化, 这与李克钢等^[4]得出的试验结果相一致。



图 11 不同干湿循环次数下粉砂岩破坏形态

Fig.11 Failure modes of siltstone under various wetting and drying cycles

4 不同干湿循环作用下粉砂岩蠕变机制分析

由于水的存在, 粉砂岩中非水稳定性胶结物质遇水发生溶解, 导致其与岩石颗粒之间的胶结作用下降。试验表明, 在 1 次干湿循环后粉砂岩的瞬时变形模量、蠕变应变和稳态蠕变速率出现了较大的变化。

由于岩石内部存在开口和闭口 2 种孔隙, 水无法进入闭口孔隙, 但在岩石干燥的过程中, 颗粒膨胀, 导致颗粒接触处产生压应力; 在进行饱水处理时, 岩石颗粒遇水冷却收缩, 导致颗粒接触处的压应力转变为拉应力。在这种反复膨胀收缩的过程中, 岩石颗粒接触处产生裂隙, 使闭口孔隙贯通变成开

孔隙, 进而水可以进入岩石内部更深的区域^[5, 20]。在经历反复的“干燥-饱水”交替作用之后, 岩石内部形成了一种自由水由内向外再由外向内的内外往复运动^[21]。在应力长期作用下岩石变形越来越大, 劣化程度不断加剧, 因此随干湿循环次数的增多, 粉砂岩的瞬时变形模量逐渐降低, 蠕变应变和稳态蠕变速率逐渐增大。但经历多次循环以后, 水岩作用逐渐减弱^[2], 从而导致粉砂岩蠕变变形参数的变化趋势在后期逐渐放缓。

5 结 论

(1) 由于水的存在, 干湿循环 1 次后粉砂岩的蠕变应变和稳态蠕变速率出现明显变化; 随干湿循环次数的增多, 岩石内部裂隙不断发育, 劣化程度逐渐加深, 岩石的蠕变变形能力增强, 长期强度降低。

(2) 不同干湿循环作用后的粉砂岩试件在最后一级应力作用下发生蠕变破坏的规律基本一致, 在相同的破坏应力水平下, 随干湿循环次数的增多, 粉砂岩试件蠕变破坏全程历时时逐渐减小, 减速蠕变段和加速蠕变段占全程历时的比例逐渐升高, 最高分别达 42.24% 和 15.52%。

(3) 粉砂岩瞬时变形模量随干湿循环次数呈对数关系降低, 其总劣化度逐渐增大, 表明干湿循环作用对粉砂岩的劣化是一个渐进过程。

(4) 对比不同干湿循环次数下粉砂岩试件的破坏形态, 发现粉砂岩的蠕变破坏特征随干湿循环次数增多呈现出由张拉破坏向剪切破坏转化, 表明干湿循环作用对粉砂岩的破坏特征具有明显影响。

参考文献(References):

- [1] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3 704 - 3 708.(YAO Huayan, ZHANG Zhenhua, ZHU Chaohui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3 704 - 3 708.(in Chinese))
- [2] 邓华锋, 李建林, 刘 杰, 等. 浸泡-风干循环作用对砂岩变形及破坏特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1 620 - 1 626.(DENG Huafeng, LI Jianlin, LIU Jie, et al. Influence of immersion-air dry circulation function on deformation and fracture features of sandstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1 620 - 1 626.(in Chinese))
- [3] 邓华锋, 罗 蹇, 李建林, 等. 浸泡-风干循环作用下砂岩动力特性劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2 468 - 2 474.(DENG

- Huafeng, LUO Qian, LI Jianlin, et al. Dynamic characteristics deterioration laws of sandstone under cyclic saturation-air drying[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2 468 - 2 474.(in Chinese))
- [4] 李克钢, 吴勇, 郑东普. 砂岩力学特性对干湿循环效应规律试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(10): 1 010 - 1 014. (LI Kegang, WU Yong, ZHENG Dongpu. Mechanical properties response of sandstone to cyclic drying-wetting effect[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(10): 1 010 - 1 014.(in Chinese))
- [5] 袁璞, 马芹永. 干湿循环条件下煤矸砂岩分离式霍普金森压杆试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2 557 - 2 562.(YUAN Pu, MA Qinyong. Split Hopkinson pressure bar tests on sandstone in coalmine under cyclic wetting and drying[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2 557 - 2 562.(in Chinese))
- [6] 刘新荣, 李栋梁, 王震, 等. 酸性干湿循环对泥质砂岩强度特性劣化影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1 543 - 1 554.(LIU Xinrong, LI Dongliang, WANG Zhen, et al. The effect of dry-wet cycles with acidic wetting fluid on strength deterioration of shaly sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1 543 - 1 554.(in Chinese))
- [7] 王子娟, 刘新荣, 傅晏, 等. 酸性环境干湿循环作用对泥质砂岩力学参数的劣化研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1 152 - 1 159.(WANG Zijuan, LIU Xinrong, FU Yan, et al. Deterioration of mechanical parameters of argillaceous sandstone under wetting-drying cycles in acidic environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1 152 - 1 159.(in Chinese))
- [8] 王子娟, 刘新荣, 傅晏, 等. 两种 pH 水环境干、湿循环作用对泥质砂岩的侵蚀研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3 231 - 3 239. (WANG Zijuan, LIU Xinrong, FU Yan, et al. Erosion analysis of argillaceous sandstone under dry-wet cycle in two pH conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3 231 - 3 239.(in Chinese))
- [9] 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(6): 1 081 - 1 106.(SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 081 - 1 106.(in Chinese))
- [10] 杜超, 杨春和, 马洪岭, 等. 深部盐岩蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2 451 - 2 456.(DU Chao, YANG Chunhe, MA Hongling, et al. Study of creep characteristics of deep rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2 451 - 2 456.(in Chinese))
- [11] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下不同孔隙水压作用时岩石蠕变特性及改进西原模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 443 - 451.(JIANG Haifei, LIU Dongyan, HUANG Wei, et al. Creep properties of rock under high confining pressure and different pore water pressures and a modified Nishihara model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 443 - 451.(in Chinese))
- [12] 杨红伟, 许江, 聂闻, 等. 渗透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): 1 613 - 1 619.(YANG Hongwei, 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): 1 613 - 1 619.(in Chinese))
- [13] 蒋昱州, 王瑞红, 朱杰兵, 等. 砂岩的蠕变与弹性后效特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2 010 - 2 017.(JIANG Yuzhou, WANG Ruihong, ZHU Jiebing, et al. Experimental study of creep and elastic aftereffect of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2 010 - 2 017.(in Chinese))
- [14] 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等. 砂质泥岩三轴卸荷流变力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 315 - 322.(DENG Huafeng, ZHOU Meiling, LI Jianlin, et al. Experimental research on unloading triaxial rheological mechanical properties of sandy mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 315 - 322.(in Chinese))
- [15] 李鹏, 刘健, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1 865 - 1 871.(LI Peng, LIU Jian, ZHU Jiebing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1 865 - 1 871.(in Chinese))
- [16] 李男, 徐辉, 胡斌. 干燥与饱水状态下砂岩的剪切蠕变特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 439 - 443.(LI Nan, XU Hui, HU Bin. Shear creep characteristics of sandstone under dry and saturated states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 439 - 443.(in Chinese))
- [17] 张春阳, 曹平, 汪亦显. 自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(4): 1 587 - 1 595. (ZHANG Chunyang, CAO Ping, WANG Yixian. Creep characteristics of plagioclase hornblende rock under natural and water-saturated conditions in deep underground[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(4): 1 587 - 1 595.(in Chinese))
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [19] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增1): 183 - 191.(WU Dongsheng, MENG Lubo, LI Tianbin, et al. Study of triaxial property and long-term strength of limestone after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp.1): 183 - 191.(in Chinese))
- [20] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机制研究[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2010.(FU Yan. Study on water-interaction with the cyclic drying-wetting effect on rock[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.(in Chinese))
- [21] 李克钢. 水岩物理作用下岩石力学特性研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 43 - 68.(LI Kegang. Study on rock mechanical properties under physical interaction of water-rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016: 43 - 68.(in Chinese))