

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.004

# 荷载与水共同作用对红砂岩蠕变特性的影响

于超云,唐世斌,唐春安

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在岩体工程中,岩石往往受到荷载和水的共同作用。为了研究岩石在荷载和水共同作用下的蠕变力学性质,将红砂岩试件浸没在水中并施加不同应力水平,进行单轴压缩蠕变试验。通过比较浸水试件和表面密封的饱和及干燥试件的蠕变力学参数,研究了荷载与水共同作用对红砂岩蠕变特性的影响。结果表明,浸水试件的长期强度最小,饱和试件次之,干燥试件最大;而且浸水试件稳态应变率最大,饱和试件次之,干燥试件最小。从损伤力学及裂纹扩展的角度来看,环境中的水分持续运移到由于蠕变变形产生的新裂隙中,加剧了水对岩石的物理力学作用是导致浸水试件的蠕变特性更加显著的原因。试验结果对岩体工程的监测及稳定性分析具有一定的指导意义。当对岩体工程进行稳定性计算分析时,建议依据荷载与水共同作用条件下的试验结果选取岩石力学参数。

**关键词:** 蠕变试验;水岩作用;应力水平;稳态应变率;长期强度

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0024-06

## Creep Behaviours of Red Sandstone Under Combined Action of Load and Water Environment

YU Chaoyun, TANG Shibin, TANG Chunan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** In rock engineering, rocks are often subjected to the load and water environment. In order to analyse the creep mechanical properties of rock under the combined action of load and water, red sandstone specimens were immersed in water and subjected to different stress levels for uniaxial compression creep test. The effects of load and water on the creep characteristics of red sandstone were analysed by comparing the creep mechanical parameters of submerged specimens to saturated and dry specimens. Results show that the long-term strength of submerged specimen is the smallest, followed by saturated specimens, and that of dry specimens is the highest. Moreover, the steady-state strain rate of submerged specimen is the highest, followed by that of saturated specimens, and that of dry specimens is the smallest. From the point of view of damage mechanics and crack propagation, the reason that the creep characteristics of submerged specimen are more significant is that the water in the environment is continuously transported into the new fractures caused by creep deformation, which further intensifies the physical and mechanical effect of water on the rock. The presented experimental results are beneficial for monitoring and estimating the long-term stability and safety of rock engineering. When the stability analysis of rock mass engineering is carried out, it is suggested to choose rock mechanics parameters obtained by the test under the combined action of load and water.

**Keywords:** creep test; water-rock interaction; stress level; steady state strain rate; long-term strength

水往往是导致岩体工程结构失稳破坏的重要原因。在水利工程中,库岸边坡失稳破坏发生在蓄水期约占40%~49%,发生在排水期约占30%<sup>[1-3]</sup>;

在采矿工程中,由于地下水位回升,废弃矿井的遗留矿柱发生蠕变失稳破坏,导致采空区顶板冒落及地表塌陷事故<sup>[4-5]</sup>;因此,开展水对岩石力学特性影响

收稿日期:2018-09-23

修稿日期:2018-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51627804)

作者简介:于超云(1989—),女,河南鹿邑人,博士研究生,研究方向为水对岩石流变特性的影响。E-mail: yuchaoyun1989@163.com

通讯作者:唐春安(1958—),男,湖南黔阳人,教授,博导,主要从事岩石破裂过程失稳的基础和应用基础性理论研究。

E-mail: tca@mail.neu.edu.cn

的研究对岩体工程的稳定性评价具有重要的指导意义<sup>[6]</sup>。

岩石遇水作用后呈现出更加显著的流变特性。比如, Lajtai 等<sup>[7]</sup>研究了水对花岗岩时效性变形特性的影响,表明干燥花岗岩遇水后其时效性变形显著增加。Kranz 等<sup>[8]</sup>通过试验研究表明饱和和花岗岩的蠕变失效时间比自然状态下缩短了三个数量级。朱合华等<sup>[9]</sup>通过对干燥和饱和状态下晶玻屑熔结凝灰岩进行单轴压缩蠕变试验发现两者的极限蠕变变形量相差 5~6 倍,且饱和岩样进入稳定蠕变阶段的时间明显延长。黄小兰等<sup>[10]</sup>对泥岩进行不同含水条件下的蠕变试验发现含水量的增加导致泥岩蠕变变形和稳态蠕变率的增加显著。

目前的研究侧重在不同饱和度或者含水状态下岩石的蠕变力学特性,但是对岩石与水直接接触,即岩石在持续荷载与水共同作用条件下的蠕变特性研究还比较少。在实际工程中,比如库岸岩质边坡在受荷载作用的同时还受到水的持续作用。因此,为了更加准确地分析和判断岩体工程的长期稳定性,有必要进一步开展真实水环境下的岩石蠕变力学试验,从而获得岩石试件在持续荷载与水环境共同作用下的蠕变力学参数。试验结果对岩体工程长期稳定性分析具有一定的参考价值。

本文以红砂岩为试验对象,分别对表面密封的干燥和饱和试件,以及饱和后持续浸水试件进行单轴压缩蠕变试验,通过对比不同水环境条件下红砂岩的蠕变力学参数,从而综合分析荷载与水共同作用对红砂岩力学特性的影响。最后通过分析饱和和红砂岩试件在持载前后吸水性能的变化情况,揭示持载与水共同作用对红砂岩蠕变性质的影响机理。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料及试件制备

试验所用岩石取自湖南地区的细粒红砂岩,无层理、条纹和裂纹,完整性及均匀性良好。利用 X 射线衍射仪对其进行矿物衍射图谱分析得知,该红砂岩主要由石英(75%~80%)、长石(10%~15%)、方解石(5%~10%)和菱铁矿(2%~3%)组成,黏土矿物极少。将现场取来的大块岩样经过钻孔取芯、切割、打磨加工成直径 50 mm,高度 100 mm 圆柱形标准试样。剔除外观上有明显层理和裂痕的岩样,再通过声波仪测定岩样波速,选取有代表性的岩样作为试验岩样。

首先将全部试件在 105℃ 的干燥箱中烘 24 h,冷

却至室温后,然后将试样分为 3 组,每组 8~12 个试样。一组干样直接进行表面蜡封,编号为“干燥-\*”,其中“\*”表示试件序号,比如 1、2、3……。一组干样在真空饱和装置中进行强制饱和,取出后表面蜡封,制成饱和和试件编号为“饱和-\*”；剩余一组干样先进行饱和,但是表面不作处理,然后直接浸于环境试验箱中(见图 1),编号为“浸水-\*”。

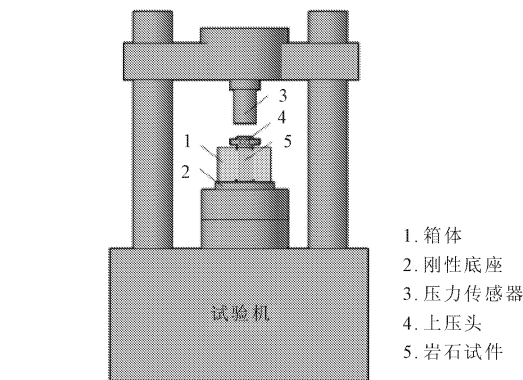


图 1 试验装置示意图

表 1 红砂岩试件的基本力学性质

含水状态	压缩强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	软化系数
干燥	106.7	16.9	0.26	—
饱和	55.5	10.9	0.38	0.52
浸水	53.7	9.1	—	0.50

### 1.2 试验设备

本次试验采用中科院武汉岩土所自主研发的 RMT-150 系列的岩石力学试验机。为真实反映岩石受到荷载与水共同作用的情况,本文设计一种环境试验箱,箱体筒壁选用透明的有机玻璃(PMMA)以便于观察岩样的破坏形态,箱体底座选用不锈钢板,用不溶于水的粘合剂将筒壁与底座粘合成一体。在对浸水试件进行单轴压缩蠕变试验时,将该环境试验箱与岩石力学试验机组合成为环境蠕变试验加载系统,如图 1 所示。

### 1.3 试验方案

(1) 为了考察荷载与水共同作用对红砂岩蠕变力学特性的影响,对浸水试件进行不同荷载等级下的蠕变试验,并同时对比表面密封的干燥和饱和和试件进行对比试验。本次蠕变试验采取单级加载的方式,大致分为 4~5 个荷载等级。为了得到完整的三阶段蠕变过程曲线,参照相应单轴压缩强度下的试验数据(见表 1),每级荷载的大小约为其单轴抗压

强度的 75%、80%、85%、90% 和 95%。具体施加给各组试件的荷载和应力水平见表 2。

表 2 浸水、饱和及干燥红砂岩试件的蠕变试验结果

试件状态	应力 /MPa	应力水平/%	稳态应变率/h <sup>-1</sup>	破坏时间/h	长期强度 /MPa
浸水	40.3	75	0.01184	48.72	40.58 (75.6% $\sigma_c$ )
	43.0	80	0.05022	17.79	
	45.6	85	0.22244	5.21	
	48.3	90	1.19442	0.58	
	51.0	95	6.28686	0.11	
饱和	43.0	77	0.01319	—	44.44 (80% $\sigma_c$ )
	44.4	80	0.03353	27.18	
	48.3	87	0.20244	3.84	
	51.0	92	0.86966	1.08	
	53.7	97	1.19466	0.57	
干燥	85.4	80	0.00800	51.43	83.03 (77.8% $\sigma_c$ )
	91.7	86	0.01769	20.94	
	96.0	90	0.10435	7.44	
	101.4	95	2.82527	0.22	

(2) 为了探讨荷载与水共同作用对红砂岩力学特性的影响机理,选取 4 个饱和试件,计算初始饱和含水率,在恒定的应力水平下(80%),即 44.4 MPa,分别持载 0 h、5 h、10 h 和 20 h,而后卸载将试件再次真空饱和,计算当下的饱和含水率。将持载前后的饱和含水率进行归一化处理。试验过程如图 2 所示。

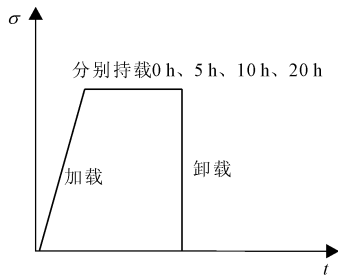


图 2 试验过程示意图

#### 1.4 单轴压缩蠕变试验

在进行单轴压缩蠕变试验时,启动试验机后采取力控制的方式加载,加载速率选择为 0.025 MPa/s,当施加轴压到预设值时,保持轴压稳定,直至岩样完全破坏。如果在低应力水平下,试验持续 48 h 后,试件仍未发生破坏,则终止试验,进行下一级试验。试验中,试验机自带的力传感器和位移传感器会自动记录不同时刻的荷载、轴向和侧向变形等数据。自动采集的数据可与计算机实时交换,完全实现全过程数字化成图。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 浸水、饱和及干燥红砂岩的蠕变特性

表 2 给出了浸水、饱和及干燥红砂岩试件的蠕变试验数据。

图 3 是浸水、饱和及干燥红砂岩试件的蠕变曲线。

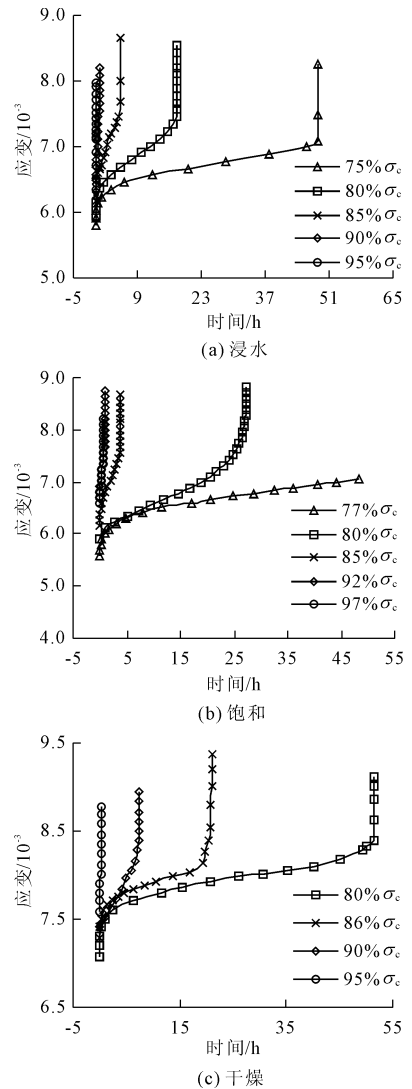


图 3 红砂岩试件的蠕变曲线

从图 3 可以看出,在恒定应力水平下,试件的轴向应变随时间而逐渐增大,最终发生失稳破坏。此外,试件的破坏时间随着应力水平的增大而减小。以浸水试件为例,在 40.3 MPa(75% $\sigma_c$ )作用下,破坏时间是 48.72 h,当增大到 45.6 MPa(85% $\sigma_c$ )时,破坏时间是 5.21 h,当增大到 51.0 MPa(95% $\sigma_c$ )时,破坏时间仅为 0.11 h,即试件在持载约 7 min 后发生破坏。在相同应力水平下,不同水环境下红砂岩试件的破坏时间不同,呈现出的趋势是浸水条件下的破

坏时间最小,饱和次之,干燥状态的最长。比如在 80%的应力水平下,浸水试件的破坏时间是 17.79 h,饱和试件的破坏时间是 21.87 h,干燥试件的破坏时间是 51.43 h。

图 4 是与图 3 对应的蠕变应变率曲线。从图 4 中可以看出,在各级应力水平下,蠕变应变率随时间的变化分为三个阶段<sup>[11-12]</sup>:衰减阶段,即应变率随时间减小阶段;趋于稳定阶段,即应变率基本恒定;急剧增大阶段,即应变率随时间增加而迅速增大。分别取浸水、饱和及干燥试件在第二稳定阶段应变率的最小值作为稳态应变率,各级应力水平对应的稳态应变率见表 2。

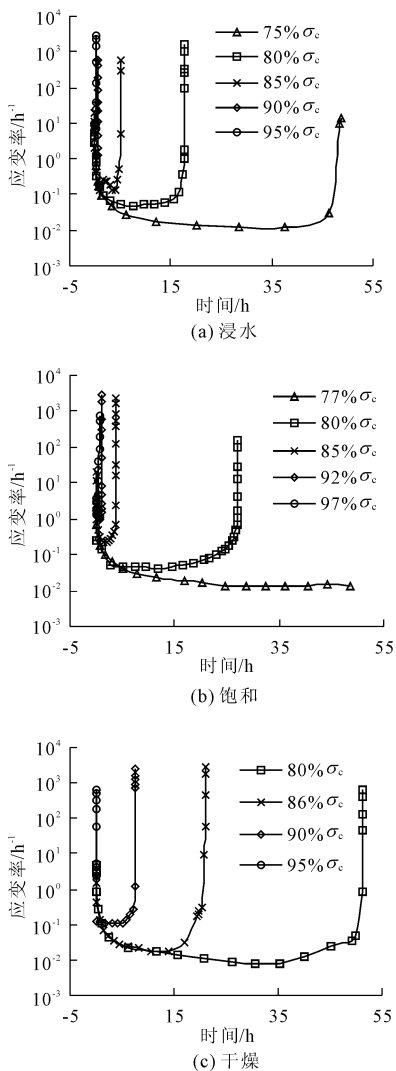


图 4 红砂岩试件的应变率曲线

图 5 给出了不同试件的稳态应变率与应力在半对数坐标下的关系。从图 5 中可以发现,试件的稳态应变率随着应力的增大而线性增大。以浸水试件为例,当应力为 40.3 MPa (75%  $\sigma_c$ ) 时,应变率为

0.01184/h,当增大到 45.6 MPa (85%  $\sigma_c$ ) 时,应变率为 0.22244/h,是前者的 18.8 倍,当增大到 51.0 MPa (95%  $\sigma_c$ ) 时,应变率增大为 6.28686/h,是前者的 28.3 倍。值得注意的是,在相同应力作用下,以 51.0 MPa 为例,浸水试件的应变率为 6.28686/h,饱和试件的应变率为 0.86966/h,前者是后者的 7.2 倍。而且在相同应力水平下,比如 80%,浸水试件的应变率是 0.05022/h,是饱和试件应变率 0.03353/h 的 1.5 倍,是干燥试件应变率 0.008/h 的 6.3 倍。

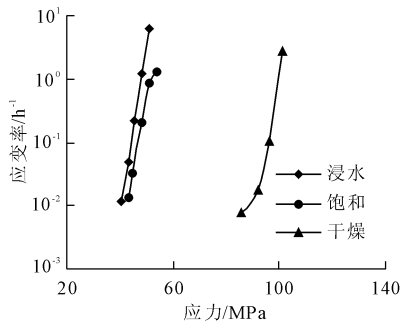


图 5 稳态应变率与应力的关系

表 2 给出了不同试件的破坏应力及其对应的破坏时间。从表 2 中可以看出,岩石的破坏应力具有随应力作用时间的延长而降低的性质。在岩石力学中,这种性质可用指数型经验方程<sup>[13]</sup>表示:

$$\sigma_t = A + Be^{-\alpha t} \tag{1}$$

式中:  $A, B$  和  $\alpha$  均为常数。

当  $t = 0$  时,  $\sigma_t = A + B$ , 令  $A + B = s_0$ , 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\sigma_t = A$ , 并且把此时的强度称为岩石的长期强度, 令  $A = s_\infty$ , 故有  $B = s_0 - s_\infty$ , 式(1) 方程可写为:

$$\sigma_t = s_\infty + (s_0 - s_\infty)e^{-\alpha t} \tag{2}$$

本文将有限时间内取得的蠕变试验结果,通过长期强度的经验公式(式(2))拟合进行时间上的延拓,从而获得不同水环境下红砂岩试件的长期强度,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,浸水、饱和及干燥红砂岩的长期强度分别是 40.58 MPa、44.44 MPa 和 83.03 MPa,分别是相应条件下单轴抗压强度的 75.6%、80% 和 77.8%。由此看出,浸水试件的长期强度最小。这说明在荷载与水共同作用下使得红砂岩的长期强度进一步弱化。

### 2.2 饱和红砂岩持载前后的吸水性能

从上述可知,与表面密封的饱和和干燥试件相比,在荷载与水共同作用下的红砂岩表现出更加显著的蠕变特征。为了揭示导致这种结果的原因,分别对 4 个饱和试件施加相同的应力水平和不同的持载时间,分析了持载前后饱和试件吸水性能的变化

情况,结果如图 7 所示。为了表述方便,这里将饱和含水率进行归一化处理,变量  $\alpha$  是持载前的饱和含水率与持载后饱和含水率的比值。从图 7 可以看出,持载较短的时间内, $\alpha$  值变化不大,但是当持载时间为 10 h 和 20 h 时,其变化非常显著。

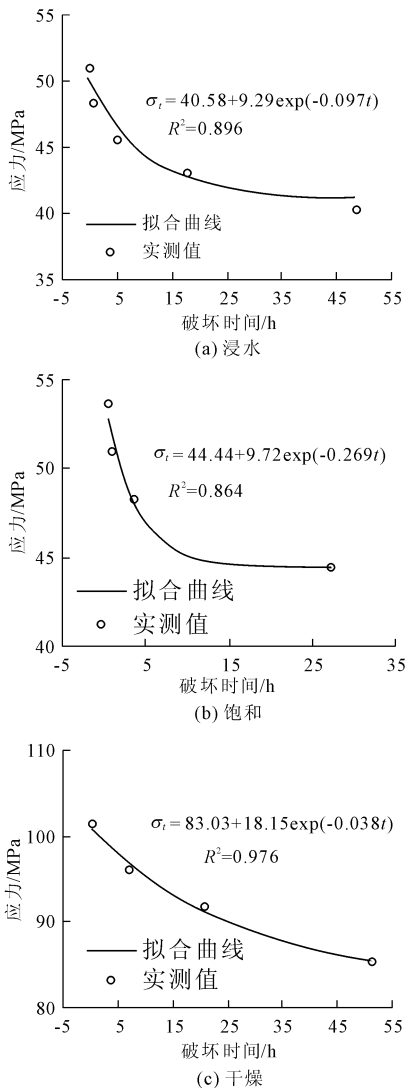


图 6 红砂岩试件的长期强度

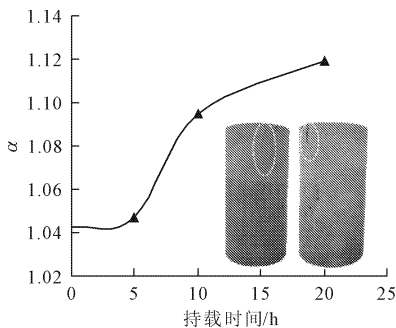


图 7 持载时间与归一化含水率( $\alpha$ )的关系

持载前后饱和红砂岩含水率的变化,说明在恒定荷载作用时间内岩石的吸水性能发生了改变。吸

水性能可间接反映岩石内部裂隙分布。吸水性能越强,含水率越大,说明岩石内部裂隙越发育。已有研究表明,脆性岩石在恒定应力下产生与时间相关的变形,即蠕变,其主要机制与岩石内部亚临界裂纹的扩展有关<sup>[14-16]</sup>。Heap 等<sup>[17]</sup>开展的实验研究已证实岩石蠕变实验中的声发射活动与蠕变各阶段的裂纹扩展存在对应关系。在第一蠕变阶段,裂纹趋于张开但没有扩展;岩石材料的蠕变裂纹扩展发生在蠕变过程的后两个阶段,即稳态蠕变阶段和加速蠕变阶段。裂纹稳定扩展发生在稳态蠕变阶段;不稳定的裂纹扩展发生在加速蠕变阶段。结合图 4(b)可知,在 80% 应力水平下,当持载时间  $t = 5$  h 时(第 1 个箭头所示),试件处在第一衰减蠕变阶段;当  $t = 10$  h 时(第 2 个箭头),岩石试件处在第二稳定蠕变阶段;当  $t = 20$  h 时(第 3 个箭头),试件进入第三加速蠕变阶段,卸载后除去其表面的密封套,发现岩石表面出现可见裂缝,裂缝方向与轴向应力一致(见图 7 虚线框)。从裂纹扩展的角度来看,这个结果与  $\alpha$  值变化十分一致。

对于浸水条件下的饱和试件来说,受到荷载和水的共同作用,在持载的过程中,裂纹不断增多导致产生与时间相关的变形,促使环境中的水不断迁移到新裂隙尖端,加剧了水的应力腐蚀作用,这是一个水分迁移、应力腐蚀以及损伤演化相互耦合作用的过程。这也是浸水试件的长期强度小于但应变率大于饱和试件的原因。这个结论在岩体工程中具有重要的指导意义。比如,有现场监测数据表明<sup>[18]</sup>,水库在蓄水完成一段时间后,库岸岩质边坡内仍会发生微震事件。结合本文的试验结果,作者认为导致这种现象的原因是,即便在水位线以下的饱和岩体长期受到浸水作用,其长期强度会进一步降低。因此,在进行岩体工程长期稳定性分析时,建议采用环境蠕变参数或者将饱水状态的蠕变力学参数进一步做适当折减。

### 3 结 论

本文通过对浸水、饱和及干燥试件开展单轴压缩蠕变试验,并且对比分析持载前后饱和试件的吸水性能的变化情况,得到了如下结论:

(1) 在恒定荷载与水共同作用下,红砂岩的蠕变力学特性显著增强,表现在长期强度降低,应变率增大,失效时间缩短。

(2) 岩石的蠕变变形伴随着新裂隙产生,浸浴在水中的岩石,水分持续运移到新裂隙中,进一步与

岩石介质结合,加剧了水对岩石的物理力学作用。这是浸水试件的蠕变特性比表面密封的饱和试件更加显著的原因。

(3) 在岩体工程长期稳定性分析时,建议通过开展环境蠕变试验获得长期力学参数,或者将常规试验得到的数据进行适当折减。

#### 参考文献:

- [1] 刘才华,陈从新,冯夏庭,等.地下水对库岸边坡稳定性的影响[J].岩土力学,2005,26(3):419-422.
- [2] 刘新荣,傅 晏,王永新,等.水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J].岩土力学,2009,30(3):613-616.
- [3] 邓华锋,李建林.库水位变化对库岸边坡变形稳定的影响机理研究[J].水利学报,2014,45(S2):45-51.
- [4] Bukowski P. Determining of safety pillars in the vicinity of water reservoirs in mine workings within abandoned mines in the Upper Silesian Coal Basin (USCB)[J]. Journal of Mining Science, 2010,46(3):298-310.
- [5] Genis M, Aydan Ö. Assessment of Dynamic Response and Stability of an Abandoned Room and Pillar underground Lignite Mine[C]//The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 2008:3899-3906.
- [6] 田 佳.深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):182-189.
- [7] Lajtai E Z, Schmidtke R H, Bielus L P. The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1987,24(4):247-255.
- [8] Kranz R L. Crack growth and development during creep of Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979,16(1):23-35.
- [9] 朱合华,叶 斌.饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12):1791-1796.
- [10] 黄小兰,杨春和,刘建军,等.不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3477-3482.
- [11] 刘 雄.岩石流变学概论[M].北京:地质出版社,1994:19-21.
- [12] 许 腾,任思玉,樊 成,等.基于 Norton 方程的岩石蠕变损伤曲线的测定[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):37-42.
- [13] 蔡美峰.岩石力学与工程.第 2 版[M].北京:科学出版社,2013:217-219.
- [14] Scholz C H. Mechanism of creep in brittle rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1968,73(10):3295-3302.
- [15] Kranz R L. Crack growth and development during creep of Barre granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979,16(1):23-35.
- [16] Brandt N, Heap M J, Meredith P G, et al. Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: A review[J]. Journal of Structural Geology, 2013,52(5):17-43.
- [17] Heap M J, Baud P, Meredith P G, et al. Time-dependent brittle creep in Darley Dale sandstone[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2009,114(B7):1-22.
- [18] Liu X, Tang C, Li L, et al. Microseismic monitoring and stability analysis of the right bank slope at Dagangshan hydropower station after the initial impoundment[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2018,108:128-141.