

# 饱水与干燥状态下横观各向同性板岩蠕变特性<sup>\*</sup>

李江腾<sup>†</sup>,常瑞芹,黄旻鹏

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙 410083)

**摘要:**为研究水对横观各向同性板岩蠕变特性的影响,采用 RYL-600 微机控制岩石流变仪,以分级增量加载方式对饱水与干燥状态下具有横观各向同性特性的板岩进行蠕变试验。试验结果表明:饱水板岩试样和干燥板岩试样在蠕变试验中均出现瞬时弹性变形阶段、初始蠕变阶段、等速蠕变阶段及短暂的加速蠕变阶段。在相同加载条件下,饱水板岩试样的瞬时弹性模量小于干燥板岩试样的瞬时弹性模量。低应力状态下,饱水及干燥试样的蠕变速率都稳定,且相差不大;在高应力状态下,两种情况的蠕变速率都随载荷的增加而快速增长,且相差较大。饱水试样的破坏应力小于干燥试样的破坏应力,且随着层理角的增加都呈 U 形分布。

**关键词:**板岩;干燥;饱水;蠕变;层理面

**中图分类号:**TU452

**文献标志码:**A

## Creep Properties of Transversely Isotropic Slate under Water-saturated and Dry Conditions

LI Jiangteng<sup>†</sup>, CHANG Ruiqin, HUANG Minpeng

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to study the effect of saturation on the creep characteristics of transversely isotropic rock, creep experiments were conducted on transversely isotropic slate under saturated and dry state employing the RYL-600 microcomputer control rock rheometer by means of hierarchical incremental loading method. Some conclusions are drawn from these experiments as follows: There are four deformation stages, i. e., instantaneous elastic deformation stage, initial creep stage, constant creep stage and accelerated creep stage, under water-saturated and dry conditions. The instantaneous elastic modulus of water-saturated slate samples is less than that of dry samples under the same loading condition. Creep rate is steady, and there is no remarkable difference of the creep rate between water-saturated and the dry at low stress level. However, creep rate increases rapidly with the increasing load, and there is the opposite situation in two cases at high stress state level. The failure stress of water-saturated slate specimen is less than that of dry slate samples, and failure stress curves both present U-shape with the increase of bedding angle.

**Key words:** slate; drying; saturation; creep; bedding plane

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-04-17

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51374246, 51304240, 51404309), National Natural Science Foundation of China(51374246, 51304240, 51404309);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017zzts630), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University(2017zzts630)

**作者简介:**李江腾(1964-),女,湖南株洲人,中南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: ljtsu@163.com

相关研究表明,诸多岩体工程的变形和失稳与其介质材料的蠕变特性有关<sup>[1-6]</sup>.岩石蠕变的实质是其在载荷长期作用下,内部矿物构造(骨架)随着时间的增长而不断调整,导致结晶材料内部裂隙或杂质的扩散.岩石是经过漫长地质作用所形成的各种矿物的天然集合体,具有不同的结构构造.随着越来越多的岩石工程逐渐向地下深处发展,地下水对岩石工程的长期稳定性的影响愈加突出<sup>[7]</sup>.因此,研究水对内部固有各向异性岩石蠕变特性的影响具有十分重要的意义.

目前,国内外学者对各向同性岩石蠕变特性已开展了大量研究,曹文贵等<sup>[8]</sup>在深入研究岩石蠕变机理及蠕变过程阶段性特征的基础上,引入损伤理论,构建了弹塑性损伤体元模型;Dubey等<sup>[9]</sup>对盐岩进行了蠕变特性试验,对瞬时应变、衰减蠕变阶段持续时间和稳态蠕变速率等方面进行了研究;Liu等<sup>[10]</sup>对泥质岩进行三轴蠕变试验,研究了偏应力和结构各向异性对泥质岩蠕变特性的影响;熊良宵等<sup>[11]</sup>对绿片岩进行了单轴压缩蠕变特性试验,将载荷与层理之间的关系分为垂直和平行2种,针对2种情况下试样的瞬时应变、衰减蠕变持续时间进行了分析,同时对蠕变破坏机制进行了研究;孙金山等<sup>[12]</sup>对大理岩的蠕变损伤和断裂的细观力学机制进行了分析;邹建超等<sup>[13]</sup>对红砂岩进行单轴分级加载蠕变试验,得到了红砂岩蠕变特性;Mishra等<sup>[14]</sup>对页岩进行三轴蠕变试验,结果表明,随着时间的增加页岩发生变形,导致潜在的故障,轴向应力分阶段递增.以上多是对自然状态下各向同性岩石进行的蠕变研究,而关于水对横观各向同性板岩蠕变特性影响的试验研究尚未见报道.

基于此,本文采用RYL-600微机控制岩石流变仪,以分级增量加载方式,对饱水与干燥状态下的板岩进行蠕变试验.基于试验结果探讨水对横观各向同性板岩蠕变特性的影响.

## 1 蠕变试验分析

### 1.1 试样制备

本试验所采用板岩试样,具有很明显的层理面,加工成直径50 mm、高100 mm的标准圆柱试样(如图1所示).试样高度和直径允许偏差为±3 mm,端面的平整度和侧面平整度控制在0.03 mm范围内,中心线与端面的垂直度误差小于0.25°.依据《工程岩体试样方法标准》(GB/T 50266—2013)制备试样.干燥试样:将试样放入烘干机内,在105~110℃恒温下烘烤24 h;饱水试样:先将试样逐步浸

水,初期淹没试样高度的1/4,然后每隔2 h分别升高水面至试样高度的1/3和1/2处,6 h后全部浸没试样,再浸泡24 h.试样的分组情况见表1.

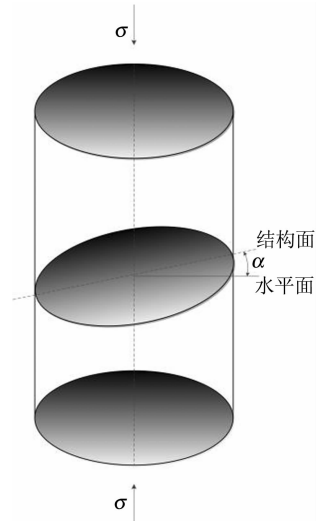


图1 试样制备示意图

Fig. 1 Sample preparation schematic

表1 板岩试样参数

Tab. 1 Slate sample parameters

试样编号	直径/mm	高度/mm	层理面倾角 $\alpha/(\circ)$	试样类型
1-7	51.49	100.48	0	干燥
1-8	50.91	102.14		饱水
2-7	51.87	102.86	45	干燥
2-8	51.85	101.37		饱水
3-7	51.23	101.67	90	干燥
3-8	50.37	101.52		饱水

### 1.2 试验方法

本试验采用中南大学岩土力学试验室RYL-600微机控制岩石流变仪(如图2所示).在恒温恒湿的标准状态下,以分级增量加载的方式进行试验,加载方法如图3所示.试样类型及其分级加载载荷见表2.每个级别的载荷加载速率为100 N/s.



图2 试验装置图

Fig. 2 Experimental device

表 2 蠕变试验分组  
Tab. 2 Creep test grouping

试样编号	$\alpha/(\circ)$	试样类型	单轴抗压强度/MPa	应力/MPa						
				1	2	3	4	5	6	7
1-7	0	饱水	94.97	15.30	25.51	35.74	45.91	56.12	66.32	—
1-8		干燥	121.29	15.30	25.51	35.74	45.91	56.12	66.32	76.54
2-7	45	饱水	57.66	15.30	25.51	35.74	—	—	—	—
2-8		干燥	70.01	15.30	25.51	35.74	45.91	—	—	—
3-7	90	饱水	91.99	15.30	25.51	35.74	45.91	56.12	66.32	—
3-8		干燥	112.27	15.30	25.51	35.74	45.91	56.12	66.32	76.54

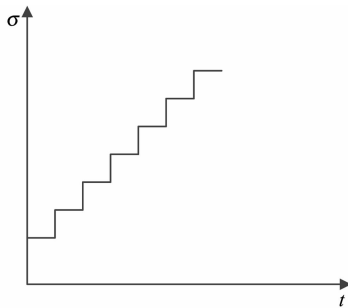


图 3 分级加载方式  
Fig. 3 Hierarchical load

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

#### 2.1.1 轴向应变与时间的关系

图 4 所示为板岩试样在每一载荷状态下的轴向应变图。从图中可看出,每级载荷加载时,试样均出现瞬时弹性应变,经历很短的初始蠕变阶段后很快进入等速蠕变阶段,到达短暂的加速蠕变阶段时板岩试样即发生破坏,90°干燥试样出现明显的加速蠕变阶段;饱水试样的曲线均处于干燥试样上方,即饱水试样的轴向应变比干燥试样的轴向应变大;45°试样蠕变时间小于其0°试样,原因为:岩石单轴压缩的破坏载荷,随着层理角的增加均呈“U”形分布<sup>[15]</sup>,45°试样单轴压缩强度明显小于其0°与90°试样。

#### 2.1.2 总瞬时弹性轴向应变与应力的关系

在蠕变试验过程中,试样均会产生一定量的轴向瞬时弹性应变。试样在各级载荷下的轴向瞬时弹性应变、轴向总瞬时弹性应变和瞬时弹性模量的具体数值见表 3。总瞬时弹性应变与试验载荷的关系如图 5 所示;瞬时弹性模量与试验载荷的关系如图 6 所示。

从图 5 可知,随着加载载荷的增大,试样总瞬时

弹性应变逐渐增加。45°饱水试样总瞬时弹性应变最大,90°干燥试样的总瞬时应变最小,且相同层理角度饱水试样曲线都处于其干燥试样曲线的上方,即饱水试样的总瞬时弹性应变大于干燥试样的总瞬时弹性应变。

#### 2.1.3 瞬时弹性模量与应力的关系

图 6 为各试样瞬时弹性模量与应力关系曲线。由图 6 可知,随着载荷的增加,试样在各级载荷水平下瞬时弹性模量逐渐增大。在开始几级加载时,瞬时弹性模量增加的效果比较明显,随着载荷进一步增加,试样在压应力作用下内部微裂隙压密闭合,其瞬时弹性模量最终趋于稳定。同角度饱水试样的曲线处于其干燥试样的下方,即各级加载条件下,干燥板岩试样的瞬时弹性模量大于饱水板岩试样的瞬时弹性模量。

#### 2.1.4 蠕变速率与应力的关系

各级载荷下试样的蠕变速率关系曲线如图 7 所示。从图 7 可知,在低应力水平状态下,试样的蠕变速率处于稳定的状态,饱水试样和干燥试样的蠕变速率相差不大;在高应力状态下,饱水及干燥试样的蠕变速率均随载荷的增加而快速增长,且蠕变速率相差比较大;饱水试样蠕变速率曲线均处于干燥试样曲线的上方,即在相同的载荷下,饱水试样的蠕变速率大于干燥试样的蠕变速率。

#### 2.1.5 层理面与破坏应力的关系

图 8 所示为不同层理面倾角与破坏应力的关系。由图 8 可看出:随着层理面倾角的增大,板岩试样的破坏应力呈先减小后增大的“U”形,层理面倾角为 45°板岩试样的破坏应力最小。3 种类型干燥试样的拟合曲线处于饱水试样的曲线上方,即饱水板岩试样的破坏应力小于干燥板岩试样的破坏应力。

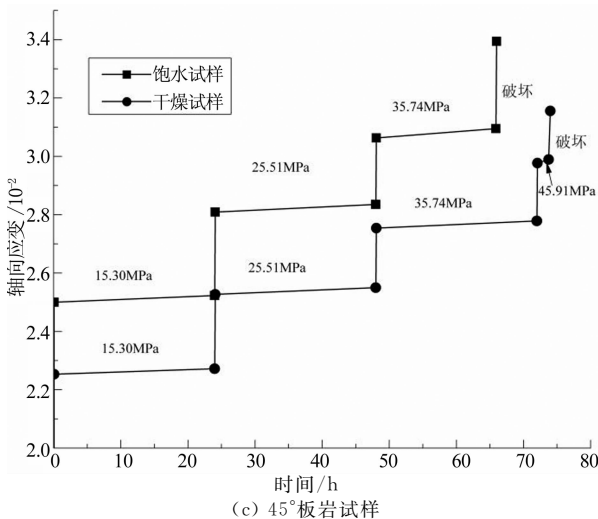
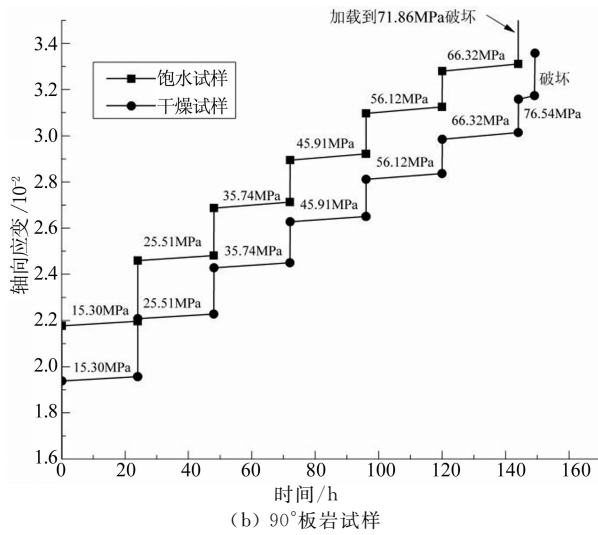
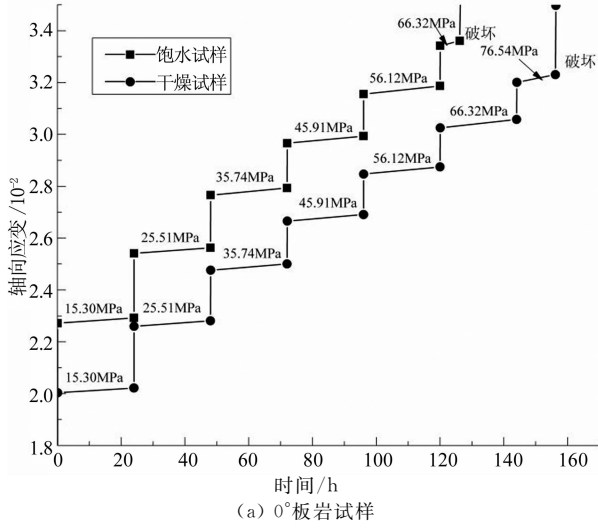


图4 轴向应变-时间关系图  
Fig. 4 Axial strain-time diagram

表3 各级载荷状态下的轴向应变  
Tab. 3 Axial strain under load status levels

试样编号	应力水平 /MPa	瞬时弹性应变 /10 <sup>-2</sup>	总瞬时弹性应变 /10 <sup>-2</sup>	瞬时弹性模量 /GPa
1-7	15.30	1.430	1.430	1.070
	25.51	0.249	1.679	4.100
	35.74	0.203	1.882	5.039
	45.91	0.173	2.055	5.878
	56.12	0.161	2.216	6.342
1-8	66.32	0.155	2.371	6.581
	15.30	1.237	1.237	1.236
	25.51	0.238	1.475	4.290
	35.74	0.195	1.670	5.247
	45.91	0.166	1.836	6.126
2-7	56.12	0.156	1.992	6.545
	66.32	0.150	2.142	6.799
	76.54	0.143	2.285	7.147
	15.30	1.553	1.553	0.985
	25.51	0.286	1.839	3.569
2-8	35.74	0.228	2.067	4.486
	15.30	1.443	1.443	1.060
	25.51	0.255	1.698	4.003
	35.74	0.204	1.902	5.014
	45.91	0.198	2.100	5.137
3-7	15.30	1.118	1.118	1.368
	25.51	0.263	1.381	3.882
	35.74	0.206	1.587	4.966
	45.91	0.182	1.769	5.587
	56.12	0.175	1.944	5.834
3-8	66.32	0.155	2.099	6.580
	15.30	1.075	1.075	1.423
	25.51	0.251	1.326	4.067
	35.74	0.201	1.527	5.089
	45.91	0.178	1.705	5.713
	56.12	0.161	1.866	6.341
	66.32	0.148	2.014	6.891
	76.54	0.144	2.158	7.098

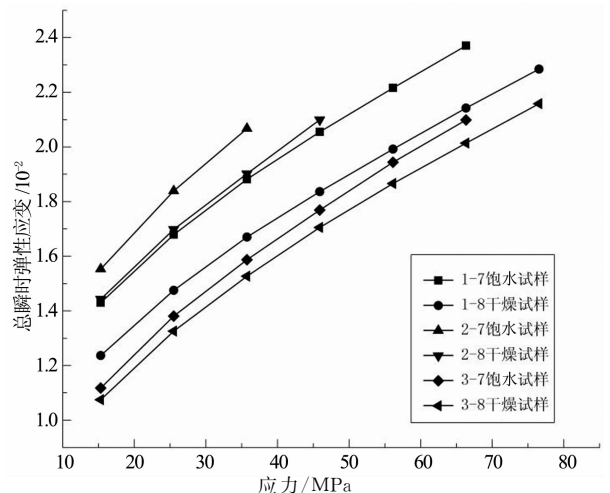


图5 总瞬时弹性轴向应变-应力曲线  
Fig. 5 Curves of total instantaneous elastic axial strains-stress

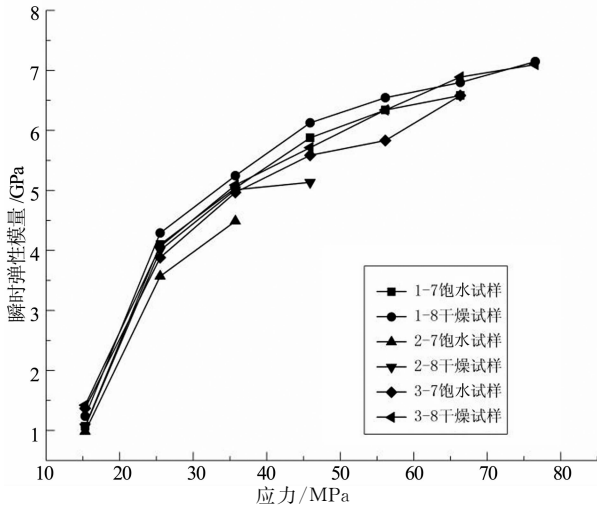
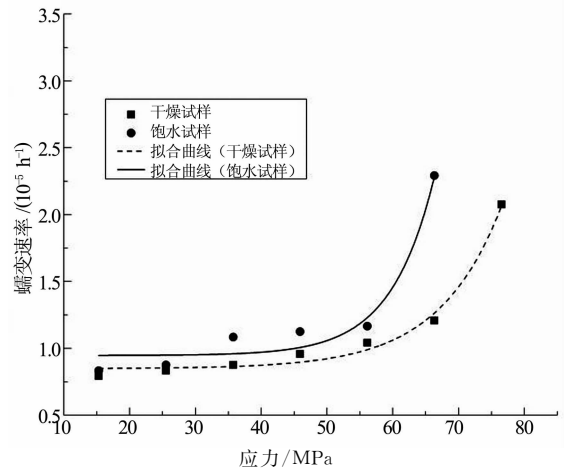


图 6 瞬时弹性模量-应力曲线

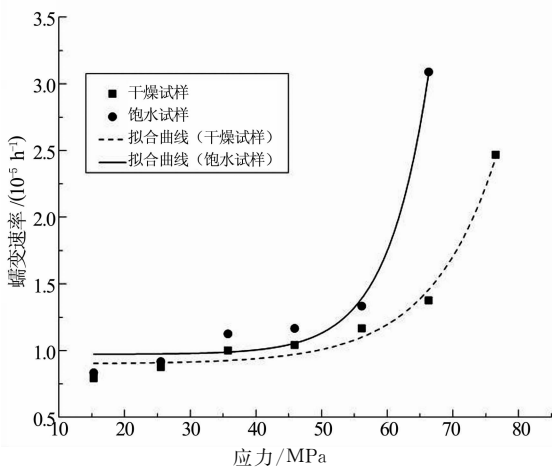
Fig. 6 Curves of instantaneous elastic modulus-stress



(c) 90°板岩试样

图 7 蠕变速率-应力的关系

Fig. 7 Relationship of creep rate-stress



(a) 0°板岩试样

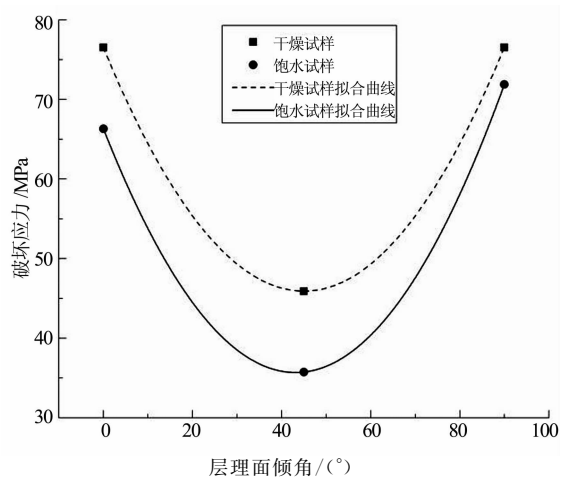
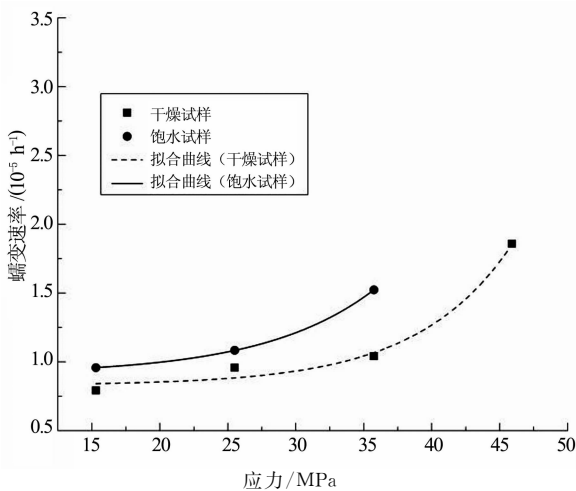


图 8 层理面-破坏应力的关系

Fig. 8 Relationship between bedding plane and failure stress



(b) 45°板岩试样

## 2.2 试验结果分析

从试验结果可知,在轴向应变-时间曲线、总瞬时弹性轴向应变-应力曲线及蠕变速率-应力曲线图中,同类型饱水试样均处于其干燥试样上方,其原因是:一方面饱水试样中水与内部岩石颗粒发生一系列的物理化学作用,水溶解了试样内部可溶性物质并与层理面上的亲水性物质相结合,产生一定量的孔隙,试样的内部结构发生改变,饱水试样发生软化,使其强度降低,抗破坏能力减弱.另一方面试样内部由母体板岩和层理面石灰岩组成,当其饱水后导致层理面周围的矿物颗粒间的连结力减弱,摩擦力减小,连结这两种岩体的连结物发生稀释,层理面强度变弱,导致两者的蠕变变形不一致.随着载荷增加与时间增长,试样内部层理面附近岩体产生微观

裂纹,之后逐渐扩展,最终使得饱水状态下的板岩试样比其干燥状态下的板岩试样更容易发生沿层层面的滑移剪切破坏。

纵观以上试验结果及分析可知:水对横观各向同性板岩蠕变特性的影响很大。

### 3 结 论

1)饱水板岩试样和干燥板岩试样在蠕变试验中均出现瞬时弹性变形阶段、初始蠕变阶段、等速蠕变阶段和短暂的加速蠕变阶段。

2)水影响板岩试样的瞬时弹性应变和瞬时弹性模量。在相同载荷条件下,饱水试样的瞬时弹性模量均小于干燥试样的瞬时弹性模量。

3)在同等应力状态下,饱水试样的蠕变速率大于干燥试样的蠕变速率。低应力状态下,两者的蠕变速率相差不大;高应力状态下,两者的蠕变速率均随载荷的增加而快速增长,且蠕变速率相差较大。

4)水影响板岩试样的破坏应力。在同等条件下,饱水试样的破坏载荷均小于干燥试样的破坏载荷,且随着层理角的增加破坏应力曲线均呈U形分布。

### 参考文献

- [1] SALIM A. Mechanisms of rockmass behaviour associated with slope instability[D]. Johannesburg: School of Architectural Environment and Engineering, University of the Witwatersrand, 2011:2-15.
- [2] MARKETOS G, SPIERS C J, GOVERS R. Impact of rock salt creep law choice on subsidence calculations for hydrocarbon reservoirs overlain by evaporite caprocks[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2016, 121(6): 4249-4267.
- [3] 赵衡,曹文贵,李翔.考虑应变率影响的单轴受压岩石动态变形过程模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(8):14-18.  
ZHAO H, CAO W G, LI X. Simulation of dynamic deformation process of rock under uniaxial compression considering strain rate[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(8): 14-18. (In Chinese)
- [4] ZHAO Y, FENG Z, XI B, *et al.* Deformation and instability failure of borehole at high temperature and high pressure in Hot Dry Rock exploitation[J]. Renewable Energy, 2015, 77(1): 159-165.
- [5] ZHENG J, LI M, SU J X, *et al.* Research on deformation failure mode of slope diseases caused by earthquake[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(9): 7-14.
- [6] 钱七虎,周小平.岩体非协调变形对围岩中的应力和破坏的影响[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):649-656.  
QIAN Q H, ZHOU X P. Effects of incompatible deformation on failure mode and stress field of surrounding rock mass [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 649-656. (In Chinese)
- [7] 朱翔,朱云,翟海波,等.长株潭地区水环境生态安全评价[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(1):72-77.  
ZHU X, ZHU Y, ZHAI Y B, *et al.* Ecological security assessment of water environment in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan area[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(1): 72-77. (In Chinese)
- [8] 曹文贵,袁靖周,王江营,等.考虑加速蠕变的岩石蠕变过程损伤模拟方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(2):15-20.  
CAO W G, YUAN J Z, WANG J Y, *et al.* Consider accelerating creep of rock creep damage simulation method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(2): 15-20. (In Chinese)
- [9] DUBEY R K, GAIROLA V K. Influence of structural anisotropy on creep of rocksalt from Simla Himalaya, India: an experimental approach[J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(6): 710-718.
- [10] LIU Z B, XIE S Y, SHAO J F, *et al.* Effects of deviatoric stress and structural anisotropy on compressive creep behavior of a clayey rock[J]. Applied Clay Science, 2015, 114: 491-496.
- [11] 熊良宵,李天斌,杨林德.考虑试样宽度影响的绿片岩双轴压缩蠕变试验[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3385-3390.  
XIONG L X, LI T B, YANG L D. Considering the effects of specimen width of green schist biaxial compression creep test [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3385-3390. (In Chinese)
- [12] 孙金山,陈明,姜清辉,等.锦屏大理岩蠕变损伤演化细观力学特征的数值模拟研究[J].岩土力学,2013,34(12):3601-3608.  
SUN J S, CHEN M, JIANG Q H, *et al.* Kam screen marble creep damage evolution of mesoscopic mechanics characteristics of the numerical simulation study [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3601-3608. (In Chinese)
- [13] 邹建超,赵同彬,房凯,等.分级加载蠕变全过程岩石硬化及损伤机制[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(6):58-67.  
ZOU J C, ZHAO T B, FANG K, *et al.* Hierarchical load creep process of rock hardening and damage mechanism [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(6): 58-67. (In Chinese)
- [14] MISHRA B, VERMA P. Uniaxial and triaxial single and multistage creep tests on coal-measure shale rocks[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 137: 55-65.
- [15] 王聪聪,李江腾,林杭,等.板岩单轴压缩各向异性力学特征[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3759-3764.  
WANG C C, LI J T, LIN H, *et al.* Anisotropic mechanical characteristics of slate in uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(11): 3759-3764. (In Chinese)