分级加卸载下红砂岩蠕变破坏能量耗散特征研究

赖荣辉，陈亚南，陈自海
（浙江省交通工程建设集团有限公司，浙江 杭州 310051）

摘 要：针对岩石蠕变引起的工程岩体破坏问题，分析研究了岩石蠕变过程中的能量耗散特征，并揭示岩石蠕变机理。通过分级加卸载条件下的蠕变试验，对比分析了红砂岩轴向、径向蠕变特征，研究各级加载过程中岩石弹性应变能与耗散能特征。试验结果表明：当加载应力小于岩石长期强度时，试件以轴向蠕变为主；当加载应力大于岩石长期强度时，径向等速蠕变阶段应变速率大于轴向应变速率。红砂岩在蠕变破坏过程中，总耗散能与岩石吸收总能量的比值约为0.35，并且加速蠕变阶段耗散能约为总耗散的12%，说明岩石吸收的能量大部分以弹性能的形式贮存于试件内，加速蠕变阶段的耗能远少于等速蠕变阶段的耗能。

关键词：岩石蠕变；分级加卸载；耗散能；弹性应变能
中图分类号：TD313 **文献标志码**：A **文章编号**：0253－2336(2016)06－0200－05

Study on energy dissipation features of red sandstone creep failure under step loading and unloading tests

Lai Ronghui，Chen Yanan，Chen Zihai
(*Zhejiang Transportation Engineering and Construction Group Corporation Limited*，*Hangzhou* 310051，*China*)

Abstract: According to the engineering rock failure problem caused by the rock creep，the paper analyzed and studied the energy dissipation features in the rock creep process and revealed the rock creep mechanism. With the creep test under the condition of the step loading and unloading tests，the axial and radial creep features of the red sandstone were compared and analyzed and the elastic strain energy and dissipation energy features of the rock in each step loading process were studied. The study results showed that when the loading stress was less than the long term strength，the samples would mainly have the axial creep. When the loading stress was higher than the long term strength，the strain rate at the radial constant creep stage would be higher than the axial strain rate. During the creep failure process of the red sandstone，a total dissipated energy and rock absorption energy value ratio would be about 0.35 and the dissipated energy at the accelerated creep stage would be 12% of the total dissipated energy. Thus the rock absorption energy would be mostly in the elastic energy mode stored in the sample and the energy dissipation at the accelerated creep stage would be less than the energy dissipation at the constant creep stage.

Key words: rock creep; step loading and unloading; dissipated energy; elastic strain energy

0 引 言

岩石的蠕变性质是深部巷道围岩产生大变形与破坏的重要原因之一。已有研究表明：不仅软岩具有蠕变特征[1]，硬岩同样具有蠕变性质[2－3]。目前，国内外对岩石蠕变的研究主要集中在不同应力条件下岩石的蠕变性质方面。张龙云等[4]对花岗岩进行三轴卸荷蠕变试验，发现岩石等速蠕变阶段应变速率与应力呈指数函数关系。蒋海飞等[5]对细砂岩进行了孔隙水压作用下的分级加卸载蠕变试验，研究了黏弹性模量与蠕变时间的关系。黄达等[6]开展了大理岩在分级卸荷条件下的蠕变试验，研究

收稿日期：2016－03－18；**责任编辑**：曾康生 **DOI**：10.13199/j.cnki.cst.2016.06.033
作者简介：赖荣辉(1971—)，男，福建永定人，高级工程师。Tel：18767192276，E－mail：564984258@qq.com
引用格式：赖荣辉，陈亚南，陈自海. 分级加卸载下红砂岩蠕变破坏能量耗散特征研究[J]. 煤炭科学技术，2016，44(6)：200－204.
Lai Ronghui，Chen Yanan，Chen Zihai. Study on energy dissipation features of red sandstone creep failure under step loading and unloading tests[J]. Coal Science and Technology，2016，44(6)：200－204.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

了分级卸荷量与岩石破裂形状之间的关系。陈亮等[7]研究了北山花岗岩在不同温度下的蠕变特征，认为温度对岩石应变速率及其破坏历时具有重要的影响。谌文武等[8]发现红层软岩蠕变量与稳定蠕变耗时随着含水率的增大而增大。龚囱等[9-10]对红砂岩进行分级加卸载条件下蠕变试验，建立岩石在等速蠕变阶段应变速率以及进入等速蠕变阶段历时与加载应力的关系，提出了基于声发射监测的岩石蠕变预测方法。范庆忠等[11]研究了红砂岩在单轴压缩蠕变过程中，岩石弹性模量和泊松比的变化特征。以上研究表明: 不同的岩石在不同的应力条件下，其蠕变特征具有相对明显的差异。为描述岩石的蠕变行为特征，国内外学者针对传统的流变模型不能较好表征岩石加速蠕变阶段的变形特征的问题，对岩石蠕变模型进行广泛的研究[12-13]。徐鹏等[14]建立了可表征岩石弹性蠕变、塑性蠕变特征的蠕变模型。宋勇军等[15]建立了可体现岩石硬化与损伤的非线性模型。王军保等[16]根据流变力学理论，将传统 Burgers 体中的线性黏滞体替换为非线性黏滞体，建立了可表征盐岩蠕变特征的模型。何志磊等[17]根据分数阶微积分理念，建立了基于分数阶导数的非定常蠕变模型。

岩石破坏实质为能量的耗散与释放的过程。目前，对岩石在不同载荷条件下的能量分布进行了相关的研究[18-20]。然而，在对岩石蠕变过程中的能量耗散特征的研究鲜有报道。笔者对红砂岩进行了分级加卸载蠕变试验，分析了不同加载应力条件下，岩石轴向与径向蠕变特征。在此基础上，研究了各级加、卸载过程中弹性应变能、耗散能的特点，研究成果对揭示岩石蠕变机理具有一定的理论意义。

1　试件制备与试验方案

试验所采用的岩石为红砂岩，岩石经钻取、切割、打磨后，共制得 24 个标准试件。试件两端面不平整度误差不大于 0.05 mm，直径误差不大于 0.3 mm。通过对其中 10 个试件进行单轴压缩试验，试件割线弹性模量约为 9.90 GPa，泊松比为 0.22，单轴抗压强度约为 75.8 MPa。红砂岩蠕变声发射由 RMT－150C 岩石力学试验系统与 BZ2005C 静态应变仪完成。其中，RMT－150C 岩石力学试验系统最大荷载为 1 000 kN，机架刚度 5×10^6 N/mm。BZ2005C 静态应变仪灵敏度系数为 2.0。岩石蠕变试验通常有单级加载与分级增量加载 2 种方式。笔者采用分级加卸载的方式，该加载方式不仅具有分级增量加载的优点，同时可得到岩石滞后变形等特征。根据岩石单轴压缩试验，红砂岩单轴抗压强度约为 80 MPa。因此，试验共分 5 级，加载应力分别为 30、40、50、60、70 MPa，其中，第 1 级与第 5 级加载应力分别约为单轴抗压强度的 40% 与 90%。试验中，共布置 2 组相互垂直的应变片用于采集试件的轴向与径向应变。试验加载方式如图 1 所示。

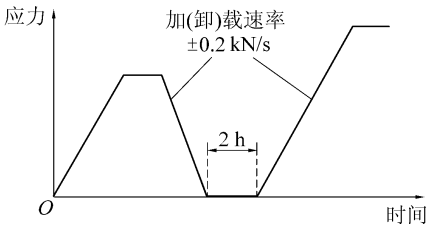

图 1　加载方式

Fig. 1　Load model

2　轴向径向蠕变对比分析

在本文中，定义岩石在压缩状态下的应变为正，在拉伸状态的应变为负，则岩石体积应变 ε_v 可表达为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2\varepsilon_h \tag{1}$$

式中: ε_z、ε_h 分别为岩石的轴向与径向应变。

图 2 显示在加载初期，试件径向应变不明显，试件体积应变处于随着轴向应力的增大而增大。当加载应力接近 50 MPa 时，体积应变随着轴向应力的增大而减小，试件进行扩容状态。因此，根据张强勇[21]的研究，红砂岩的长期强度约为 50 MPa。

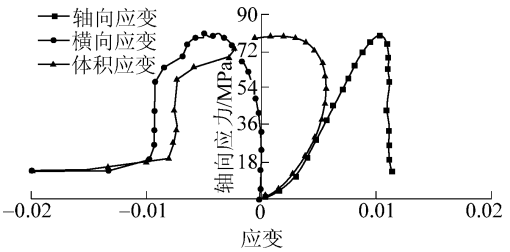

图 2　应力－应变曲线

Fig. 2　Stress－strain curves

岩石蠕变性质与加载应力大小密切相关，同时在不同方向上岩石蠕变性质也存在一定的差异。因此，通过对比分析在不同加载应力条件下轴向与径向蠕变特征，对认识红砂岩蠕变破坏过程具有重要意义。

由图 3 显示，在不同加载应力下，红砂岩轴向与径向蠕变特征具有一定的相似性，表现为当加载应力小于 50 MPa 时，试件只存在减速与等速蠕变 2 个

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

阶段，试件应变量随着时间的增大最终趋于恒定值，此时对应的等速蠕变阶段应变速率近似为 0。当加载应力大于 50 MPa 时，试件轴向与径向蠕变量随着时间的增大而增大，试件等速蠕变阶段的应变速率大于 0。从应变量来看，轴向与径向蠕变存在较为明显的差异。当加载应力小于 50 MPa 时，轴向应变量大于径向应变量，径向应变量几乎为 0。当加载应力大于 50 MPa 时，相对于轴向应变径向应变更为明显，并且等速蠕变阶段径向应变速率大于轴向应变速率。试件在蠕变破坏时，径向应变量大于轴向应变量。以上现象表明：当加载应力小于红砂岩长期强度时，试件以轴向蠕变为主；当加载应力大于红砂岩长期强度时，试件以径向蠕变为主。

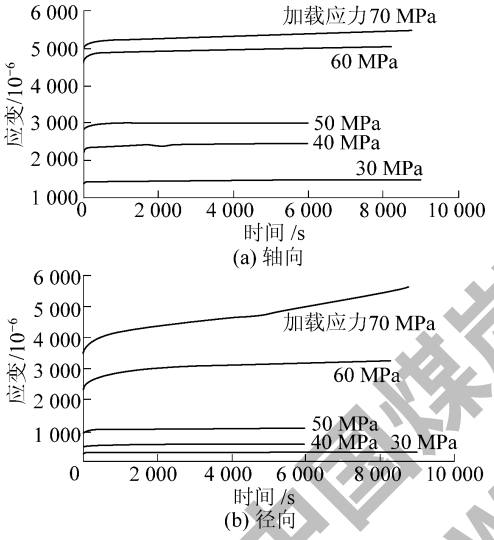

图 3　不同加载应力条件下蠕变曲线

Fig. 3　Creep curves under different loading stress

3　能量耗散特征

岩石的蠕变破坏实质为能量的耗散与释放的过程。在分级加卸载蠕变试验中，岩石所吸收的总能量 U 等于试件在加载与蠕变过程中，应力 - 应变曲线下方所围成的面积。当对试件进行卸载时，原先存储在试件内部的弹性应变能 U_e 将得到释放，并且其数值等于卸载应力 - 应变曲线下的面积；相应的耗散能 U_d 等于加载曲线、蠕变曲线与卸载曲线所围的面积，三者的关系如图 4 所示。

试验中，对于前 4 级加卸过程中的试件吸收的总能量 U 与弹性能 U_e 可由式(2)、式(3)计算得：

$$U=\frac{4\sum_{i=2}^{n}\frac{1}{2}(F_i+F_{i-1})(L_i-L_{i-1})}{\pi d^2 h} \tag{2}$$

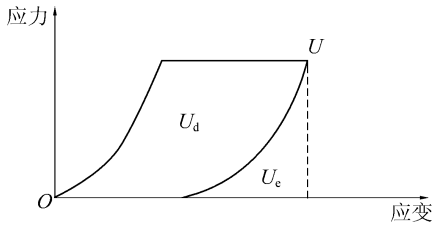

图 4　能量计算示意

Fig. 4　Schematic diagram of energy calculation

$$U_e=\frac{4\sum_{i=2}^{n}\frac{1}{2}(F'_i+F'_{i-1})(L'_{i-1}-L'_i)}{\pi d^2 h} \tag{3}$$

式中：F_i、F'_i 分别为加、卸荷载，N；L_i、L'_i 分别为加、卸荷载时试件变形量，m；d、h 分别为试件直径与高度，m；n 为加卸载循环总次数，$n=5$。根据能量守恒原理，试件蠕变中的耗散能 U_d 由式(4)得：

$$U_d=U-U_e \tag{4}$$

由于第 5 级加载试件发生蠕变破坏，耗散能 U_d 无法由上述方法计算得到。第 5 级加载过程中弹性应变能由加载阶段应力 - 应变曲线直线段下方的面积计算得到，而后由式(2)与式(4)对耗散能进行计算。

加载条件下的应力与能量关系如图 5 所示，图 5 表明岩石吸收的总能量 U、弹性能 U_e 与耗散能 U_d 随着加载应力的增大而增大，并且当加载应力大于长期强度 50 MPa 时，各能量增长的幅度大于前期加载。同时，弹性能曲线位于耗散能上方，说明在分级加卸载蠕变试验中，试件弹性能大于耗散能。例如，在加载应力为 60 MPa 时，耗散能为 0.24 J/cm³，弹性能为 0.47 J/cm³。

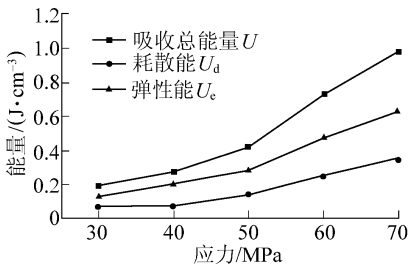

图 5　加载应力 - 能量曲线

Fig. 5　Curves between loading stress and energy

图 6 给出了各级加载条件下，耗散能 U_d 与弹性能 U_e 比值曲线，从图 6 中可以看出：当加载应力为 40 MPa，耗散能 U_d 与弹性能 U_e 比值最小，其原因是：①第 1 级加载过程中，先前存在的微孔洞、微裂隙被压密，岩石颗粒之间发生了相对错位，从而消耗了大量的能量。②第 2 级加载应力小于岩石的长期

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

强度,结合岩石轴向、径向蠕变值最终趋于恒定值,岩石在加载至蠕变过程中几乎不产生损伤,岩石吸收的总能量主要以弹性能的形式存储在试件内部。而后,耗散能 U_d 与弹性应变能 U_e 比值随着加载应力的增大而增大,岩石损伤在逐步积聚。

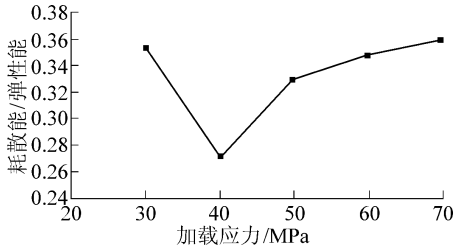

图 6　耗散能与弹性能比值曲线

Fig. 6　Curve of ratio between dissipated energy and elastic strain energy

通常根据应变速率的变化特征,可将岩石蠕变定性划分为减速蠕变阶段Ⅰ、等速蠕变阶段Ⅱ与加速蠕变阶段Ⅲ等 3 个阶段,如图 7 所示。

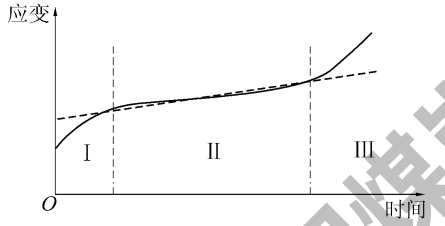

图 7　蠕变阶段划分

Fig. 7　Qualitative division of creep stage

将各级蠕变过程中岩石吸收的总能量 U 与耗散能 U_d 进行了累加,见表 1。

表 1　分级加卸载蠕变试验能量分布特征

Table 1　Energy distribution characteristics under step loading and unloading creep test

加载应力/MPa	吸收总能量 U/(J·cm^{-3})	耗散能 U_d/(J·cm^{-3})	弹性能 U_e/(J·cm^{-3})	耗散能 U_d 与吸收总能量 U 之比
30	0.193	0.068	0.125	0.351
40	0.274	0.074	0.200	0.271
50	0.419	0.138	0.281	0.330
60	0.728	0.253	0.475	0.348
70	0.976	0.351(0.105)	0.625	0.359
总计	2.590	0.884	1.706	0.341(0.119)

注: 表中括号数据为加速蠕变过程中,耗散能及其与总耗散能的比值。

由表 1 可见,岩石在蠕变破坏过程中,各试件岩石总耗散能 U_d 与岩石吸收的总能量 U 的比值趋于一恒值,其数值约为 0.35,说明岩石吸收的能量大部分以弹性能的形式贮存于试件内。在加速蠕变阶段,岩石应变速率随着时间的增大而增大,以塑性应变为主。因此,在加速蠕变阶段,岩石所吸收的总能量 U,几乎全部转化为耗散能 U_d。表 1 显示,岩石在加速蠕变阶段所对应的耗散能约占岩石在整个蠕变破坏过程中总耗散能的 12%。说明只有当耗散能累积到一定程度时,试件才会进入加速蠕变阶段,此阶段的耗能远小于等速蠕变阶段的耗能。其原因在于,耗散能的累积会导致岩石力学性能弱化,当存储在试件内部的弹性能足以承担微裂纹起裂所需的表面能时,弹性能才开始释放促使微裂纹扩展,从而加速岩石的蠕变破坏。

4　结　论

1) 当加载应力小于岩石长期强度时,试件径向蠕变不明显,试件以轴向蠕变为主。当加载应力大于岩石长期强度时,试件径向蠕变逐渐显现,并且在等速蠕变阶段径向应变速率大于轴向应变速率。试件发生蠕变破坏时,径向应变量大于轴向应变量。

2) 红砂岩在蠕变破坏过程中,岩石吸收的总能量、弹性能、耗散能随着加载应力的增大而增大,总耗散能与吸收的总能量的比值约为 0.35,试件在加速蠕变阶段所对应的耗散能占总耗散能的 12%。岩石吸收的能量大部分以弹性能的形式贮存于试件内,加速蠕变阶段的耗能远小于等速蠕变阶段的耗能。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

参考文献(References):

[1] Tomanovic Z. Rheological model of soft rock creep based on the tests on marl [J]. Mechanics of Time Dependent Materials,2006,10: 135 – 154.

[2] Fujii Y,Kiyama T,Ishijima Y,*et al*. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(3): 323 – 337.

[3] L Ma,J J K,Daemen. An experimental study on creep of welded tuff [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43(2): 282 – 291.

[4] 张龙云,张强勇,李术才,等. 硬脆性岩石卸荷流变试验及长期强度研究 [J]. 煤炭学报,2015,40(10): 2399 – 2407.
Zhang Longyun, Zhang Qiangyong, Li Shucai, *et al*. Unloading rheological tests of hard brittle rock and its long – term strength snalysis [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(10): 2399 – 2407.

[5] 蒋海飞,刘东燕,黄　伟,等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变

特性的影响[J]. 煤炭学报,2014,39(7):1248 - 1256.
Jiang Haifei,Liu Dongyan,Huang Wei,*et al*. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(7):1248 - 1256.

[6] 黄 达,杨 超,黄润秋,等. 分级卸荷量对大理岩三轴卸荷蠕变特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):2801 - 2807.
Huang Da,Yang Chao,Huang Runqiu,*et al*. Rheological characteristics of marble affected by different step on - loading values [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(S1):2801 - 2807.

[7] 陈 亮,刘建锋,王春萍,等. 不同温度及应力状态下北山花岗岩蠕变特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(6):1228 - 1235.
Chen Liang,Liu Jianfeng,Wang Chunping,*et al*. Creeping behavior of Beishan granite under different temperatures and stress conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(6):1228 - 1235.

[8] 谌文武,原鹏博,刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3076 - 3081.
Chen Wenwu,Yuna Pengbo,Liu Xiaowei. Study on Creep Properties of red - bed soft rock under step load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(S1):3076 - 3081.

[9] 龚 囱. 分级加卸载条件下红砂岩蠕变破坏声发射特性研究[D]. 北京:北京科技大学,2015:30 - 31.

[10] 龚 囱,李长洪,赵 奎. 红砂岩短时蠕变声发射 b 值特征[J]. 煤炭学报,2015,40(S1):85 - 92.
Gong Cong,Li Changhong,Zhao Kui. Study on b - value characteristics of acoustic emission of red sandstone during short - time creep process [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(S1):85 - 92.

[11] 范庆忠,高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(11):38 - 41.
Fan Qingzhong,Gao Yanfa. Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2005,27(11):38 - 41.

[12] Bhat H S,Sammis C C,Rosakis, *et al*. The micromechanics of westerly granite at large compressive loads [J]. Pure and Applied Geophysics,2011,168(12):1 - 18.

[13] Ashby M F,Sammis C C. The damage mechanic of brittle solids in compression [J]. Pure and Applied Geophysics,1990,33(3):489 - 521.

[14] 徐 鹏,杨圣奇. 循环加卸载下煤的黏弹塑性蠕变本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(3):537 - 545.
Xu Peng,Yang Shenqi. Study of visco - elasto - plastic constitutive model of coal under cycle loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(3):537 - 545.

[15] 宋勇军,雷胜友,刘向科. 基于硬化和损伤效应的岩石非线蠕变模型[J]. 煤炭学报,2012,37(S2):287 - 291.
Song Yongjun, Lei Shengyou, Liu Xiangke. Non - linear rock creep model based on hardening and damage effect [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(S2):287 - 291.

[16] 王军保,刘新荣,郭建强,等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. 煤炭学报,2014,39(3):445 - 451.
Wang Junbao,Liu Xinrong,Guo Jianqiang,*et al*. Creep properties of salt rock and itsnonlinear constitutive model [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(3):445 - 451.

[17] 何志磊,朱珍德,朱明礼,等. 基于分数阶导数的非定常蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2016,37(3):737 - 744.
He Zhilei,Zhu Zhende,Zhu Mingli,*et al*. An unsteady creep constitutive model based on fractional order derivatives [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(3):737 - 744.

[18] 刘少虹,毛德兵,齐庆新,等. 动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散[J]. 煤炭学报,2014,39(S1):15 - 22.
Liu Shaohong,Mao Debing,Qi Qingxin,*et al*. Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal - rock [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(S1): 15 - 22.

[19] 衡 帅,杨春和,李 芷,等. 基于能量耗散的页岩脆性特征[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(2):577 - 585.
Heng Shuai,Yang Chunhe,Li Zhi,*et al*. Shale brittleness estimation based on energy dissipation [J]. Journal of Central South University: Science and Technolgy,2016,47(2):577 - 585.

[20] 李天斌,陈子全,陈国庆,等. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学,2015,36(S2):229 - 236.
Li Tianbin,Chen Ziquan,Chen Guoqing,*et al*. An experimental study of energy mechanism of sandstone with different moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(S2):229 - 236.

[21] 张强勇,杨文东,陈 芳,等. 硬脆性岩石的流变长期强度及细观破裂机制分析研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1910 - 1918.
Zhang Qiangyong,Yang Wendong,Chen Fang,*et al*. Long - term strength and microscopic failure mechanism of hard brittle rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(12):1910 - 1918.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net