

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.013

致密砂岩循环加载试验及能量演化分析

李浩^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 王苏生^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 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)

摘要: 为研究复杂应力路径下致密砂岩的力学行为, 采用多功能岩石三轴测试系统开展围压为 5 MPa、15 MPa 和 20 MPa 的三轴循环加卸载试验并进行能量演化分析。试验结果表明: 砂岩的抗压强度随着围压增加而增大, 围压 5 MPa、15 MPa、20 MPa 下的体积最大压缩点对应的轴向偏应力分别为 80.68 MPa、120.72 MPa、152.12 MPa; 加卸载过程中会有部分外荷载做功转化成内能和其他形式能量, 因而应力-应变曲线形成滞回环, 并且随着应力的增加滞回效应逐渐明显; 砂岩以剪切破坏形式为主, 同时产生轴向和侧向倾斜裂纹。能量演化分析表明: 岩石的破坏是弹性能积累到峰值突然释放的结果; 岩样破坏前的峰值弹性能会随围压线性增加, 围压对峰值弹性能的影响显著。

关键词: 岩石力学; 致密砂岩; 循环加卸载; 滞回环; 破坏形式; 能量演化

中图分类号: TU452 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)02-0176-06

Cyclic loading test and energy evolution analysis of tight sandstone

LI Hao^{1,2}, XU Weiya^{1,2}, WANG Susheng^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of tight sandstone under complex stress paths, the multi-function rock triaxial test system was used to carry out three-axis cyclic loading and unloading tests with confining pressures of 5 MPa, 15 MPa and 20 MPa, and then, energy evolution analysis was carried out. According to the results of the tests, the compressive strength of sandstone increases with the increase of confining pressure. The axial deviatoric stresses at the maximum compression point with confining pressures of 5 MPa, 15 MPa, and 20 MPa are 80.68 MPa, 120.72 MPa, and 152.12 MPa, respectively. During the loading and unloading process, some of the damage is converted into the internal energy and other forms of energy, so the unloading curve is lower than the loading curve and hysteresis loops appear. As the load increases, the hysteresis effect is getting gradually obvious. The failure of sandstone is dominated by shear failure and produces axial and lateral sloping cracks. Energy evolution analysis shows that the energy dissipation is the cause of damage to the rock mass. The peak elastic energy before the failure of rock sample increases linearly with the confining pressure, and the effect of confining pressure on peak elastic energy is significant as well.

Key words: rock mechanics; tight sandstone; cyclic loading-unloading; hysteresis loop; damage form; energy evolution analysis

水利工程建设中涉及大量岩石力学问题, 如何更好地描述岩石的力学行为关系到水利工程能否科学设计与安全运营。岩石作为一种地质材料, 矿物成分复杂且内部往往含有微裂纹和孔洞, 因此岩石的应力-应

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407005); 国家自然科学基金(11772118)
作者简介: 李浩(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学研究。E-mail: 625610600@qq.com
通信作者: 徐卫亚, 教授。E-mail: wyxu@hhu.edu.cn
引用本文: 李浩, 徐卫亚, 王苏生. 致密砂岩循环加载试验及能量演化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 176-181.
LI Hao, XU Weiya, WANG Susheng. Cyclic loading test and energy evolution analysis of tight sandstone [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2): 176-181.

变关系常表现出很强的非线性^[1]。同时,在实际工程中岩石所处的应力状态并非固定不变,而是随着外部荷载、地应力场等的变化而变化。特别在坝基、坝肩、隧洞和边坡等工程开挖过程中,复杂应力路径下的岩石变形和强度特性直接关系到工程的安全性。

国内外学者对不同种类岩石进行了大量的常规三轴试验,并从试验方法、围压影响、尺寸效应和应力路径等方面对岩石力学特性进行了探讨,为工程实践过程中的参数选择提供了重要依据^[2-8]。循环加卸载试验作为一种改变应力路径的三轴试验方法,可以得到更多的岩石强度及变形参数的变化规律。杨春和等^[9]通过循环加卸载试验获得盐岩复杂应力路径下的应力-应变关系。Yang 等^[10-11]发现在循环荷载下岩石的轴向和横向拉伸裂纹比简单荷载下更多、更复杂。岩石作为一种复杂的非均质地质材料,其强度破坏理论从力学角度研究十分困难,且在自然条件下的岩石边界条件和应力状态复杂,还受到热能、辐射能等环境的影响,因此一些学者从能量角度对岩石进行研究并取得进展。通常岩石的内能随着外力的增加而增大,从宏观角度上看还伴随有能量的耗散^[12]。谢和平等^[13]通过单轴压缩试验对岩石破坏进行能量分析,建立岩石的损伤演化方程。喻勇等^[14]研究了三峡工程中隔墩花岗岩在 4 种不同加载方式下的能耗特征,发现三轴压缩下岩石破坏耗能最大。许江等^[15]研究了煤在不同温度条件下循环荷载作用过程中的能量转化关系及应变能转化速率。邓华锋等^[16]研究了循环荷载作用下岩石的能量耗散特征,提出一种修正的能量参数计算方法。由此看来,岩石材料的能量研究向着更复杂应力状态的方向进展。

本文开展了不同围压不同偏应力条件下的致密砂岩循环加卸载试验,分析加卸载阶段的岩石力学特性及其破坏模式,研究能量演化规律,以期能得到更符合岩土工程实际情况的应力-应变变化规律。

1 试验条件及方案

1.1 岩样描述

试验选用质地均匀的细粒石英砂岩,无风化现象,完整性好。岩样构成主要是 64.4% (质量分数,下同) 的石英、30% 的碳酸盐、2.1% 的碎屑、1.4% 的长石、1.4% 的云母和 0.7% 的其他矿物。采用伺服试验机对岩样进行一组不同围压条件下的循环加卸载试验。试样按照国际岩石力学学会的建议方法,将取得的砂岩原样切割打磨,制备成上下端面水平,侧面光滑的 50 mm×100 mm 圆柱样,并在恒温恒湿的环境下保存,尽量减少外界对岩样的扰动。通过计算得到其平均孔隙率为 2.64%,平均密度约为 2.60 g/cm³。

1.2 试验设备和方案

砂岩循环加卸载试验在河海大学岩石力学实验室多功能岩石三轴测试系统上进行,该测试系统中控制围压和偏应力的高精度高压泵可以实现压力的自动补偿从而实现对围压和偏应力的精确控制,试验仪器详情参考文献[17]。

开展不同围压(5 MPa、15 MPa、20 MPa)条件下砂岩循环加卸载试验。岩石的损伤启动阈值可选定为岩样体积应变最大压缩所对应的偏应力^[8]。为了避免操作过程中的随意性和主观性,选取体积应变最大值处作为初始屈服点,单轴压缩试验体积应变最大值对应的轴向应力作为初始卸载偏应力(取 50 MPa)。然后按照偏应力每增加 10 MPa 或者 20 MPa 进行下一级加卸载。加载阶段采用轴向位移方式控制,加载速率为 0.02 mm/min;卸载阶段采用轴向应力控制,卸载速率为 18.75 MPa/min。为了防止卸载后轴向压头与岩样脱离,每次卸载至偏应力 5 MPa,并待轴向位移稳定后开始下一循环加载。进入残余阶段后,每次加载直至随着应变的增加应力不再变化,然后进行卸载。加载方式如图 1 所示,整个加卸载试验过程保持围压不变,数据采集记录时间间隔为 1 s。根据试验结果,分析应力-应变关系和损伤破坏规律。

具体试验步骤如下:(a) 增加静水压力到初始围压预定值。(b) 按位移加载方式进行加载轴向应力至第一级应力水平 50 MPa,加载速率为 0.02 mm/min,按应力方式卸载至偏应力为 5 MPa,卸载速率为 18.75 MPa/min;按位移方式进行加载到偏应力至下一应力水平,按应力方式卸载至偏应力为 4.875 MPa,加载和卸载速率与上述一致。(c) 按步骤(b)中的加卸载方式和速率至岩样峰后破

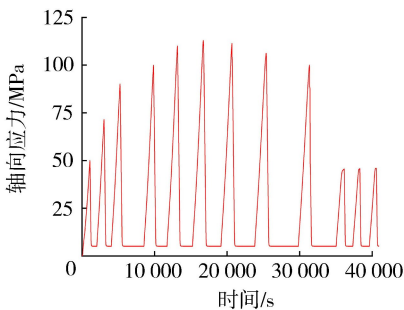


图 1 围压 5 MPa 循环加卸载试验加载方式
Fig. 1 Loading method under confining pressure of 5 MPa

坏,再进行2次或3次循环加载试验。

2 砂岩循环加卸载试验

2.1 砂岩应力-应变曲线

通过单轴压缩试验确定砂岩样的单轴强度为 57.18 MPa,并根据应力-应变关系确定最大体积压缩应变对应的轴向偏应力为 47.73 MPa,约为单轴强度的 83.5%。在轴向荷载加载过程中,从图 2 可看出初始阶段有一个压密过程,反映在应力-应变曲线上则是偏应力较低状态有一个较平缓的曲线,杨圣奇等^[18]研究得出类似现象。

由图 3 可以看出,不同围压下砂岩加载过程中均出现初始压密段,在后续的加载循环中以及随着围压的增加,初始压密段逐渐不显著。将体积最大压缩处的轴向应力作为初始屈服应力以及损伤阈值。通过单轴压缩试验确定砂岩样初始屈服应力为 47.73 MPa,因此将轴向偏应力 50 MPa 作为围压 5 MPa、15 MPa 和 20 MPa 循环加卸载试验的初始卸载点,即在岩石尚未发生塑性损伤时进行卸载。从应力-应变关系曲线可以测得围压 5 MPa、15 MPa、20 MPa 下的体积最大压缩点所对轴向偏应力分别为 80.68 MPa、120.72 MPa、152.12 MPa,分别对应其轴向压缩强度的 72.81%、72.90%、77.41%。而各围压下的残余强度分别为 50.45 MPa、91.02 MPa、106.13 MPa,分别对应其轴向压缩强度的 42.90%、48.91%、47.72%。在循环加卸载试验过程中,随着应力加载岩样产生塑性变形从而使应力-应变曲线形成滞回环,因此每次加卸载路径不能完全重复。在轴向应力较小时,滞回效应不明显,随着应力的增加,滞回效应逐渐明显,加卸载应力-应变曲线不一致且再加载和卸载阶段力学参数不同。从能量角度解释:加载曲线与应变轴围成的面积是外部荷载所做的功,卸载曲线与应变轴所围成面积是释放的弹性能,由于在加卸载的过程中会有一部分损伤转化成内能和其他形式能量,因而会出现卸载曲线低于加载曲线的现象。

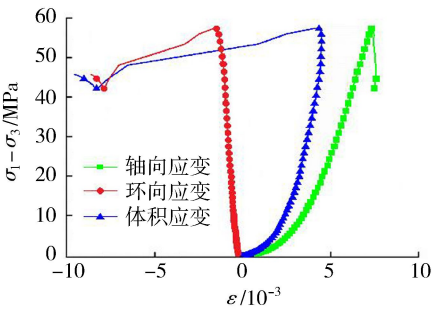


图 2 单轴压缩试验曲线
Fig. 2 Uniaxial compression test curve

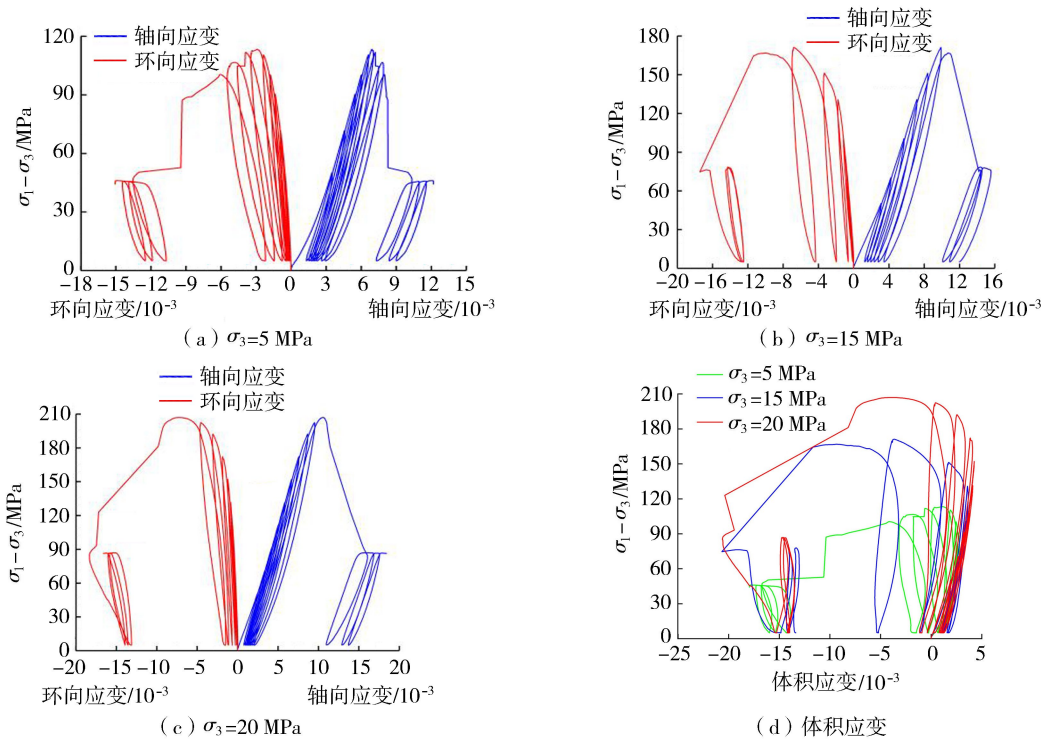


图 3 不同围压下砂岩循环加卸载应力-应变关系曲线
Fig. 3 Stress-strain curves of sandstone under different confining pressures

从图 3 还可以看出增大围压可以提高砂岩的抵抗变形能力和延性破坏特征,围压越大,峰值强度对应的轴向应变和环向应变也越大。从初始偏应力为零状态加卸载到峰值强度后,会发生应力突降并最终跌落在

残余强度面上;残余阶段的加卸载过程中,轴向所能达到的最大强度趋于稳定。

2.2 破坏模式

从单轴压缩试验破坏照片(图 4)可知,试样主要表现为轴向劈裂破坏,其微裂隙形成和发展平行于最大压缩应力方向,原因是岩石的非均匀性导致其局部产生拉应力。在有围压情况下,试验破坏模式以剪切破坏为主。不同围压下的循环加载试验破坏模式较为复杂,其破坏形式主要表现为剪切破坏并产生众多的轴向和侧向倾斜裂纹。主剪切面的破裂角在 60° 以上,围压为 15 MPa 时的剪切面破坏较为严重,这也说明岩石在低围压作用下体积扩容现象比较明显,与图 3 中体积应变曲线的表现相一致。

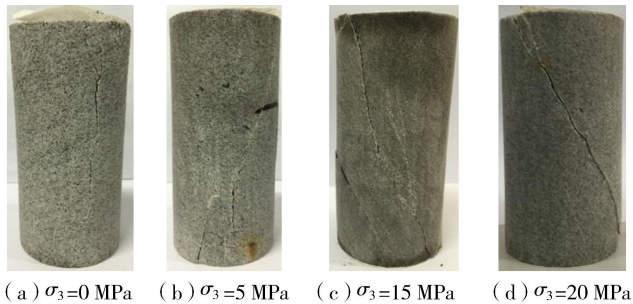


图 4 砂岩破坏照片
Fig.4 Failure photos of sandstone

3 能量演化分析

岩石在发生变形和破坏的同时,也伴随着能量的耗散和释放。为了研究岩石破坏时的能量演化规律,得出预测岩石破坏的能量变量,将致密砂岩循环加卸载试验的结果进行能量计算分析,本文只分析岩石变形破坏的弹性能和耗散能。

3.1 能量演化计算原理

岩体在围压作用下会因为外力作用而发生变形,假定这个过程系统不与外界发生热量交换,根据热力学第一定律得岩体的总输入能量 U 为

$$U = U_d + U_e + U_{e0} \tag{1}$$

其中
$$U_{e0} = \frac{1}{2} \sigma_3^2 \frac{1 - 2\nu}{E}$$

式中: U_d ——耗散能; U_e ——岩体卸载后可释放弹性应变能^[19]; U_{e0} ——围压作用产生的弹性应变能; σ_3 ——围压; ν ——泊松比; E ——弹性模量。

U_d 用于岩石材料内部损伤和塑性变形产生的耗散能,其变化满足热力学第二定律。由图 5 可知,当加载到某一荷载时卸载,卸载曲线不与加载曲线重合,而是低于加载曲线(图中 ε' 为 σ' 对应的应变, ε'' 为应力卸载到 0 时对应的应变)。加载曲线下的面积表征为外荷载所做的功,卸载曲线下的黑色面积则是岩石释放的弹性应变能。除此之外还应考虑围压做功,弹性应变能也应考虑围压作用。加载曲线与卸载曲线的不同说明,外荷载所做的总功除了引起岩体弹性应变能的增大以外,还存在一部分耗散掉的能量。耗散能可以由外荷载总功减去岩体的弹性应变能得出,即图 5 中加卸载曲线之间灰色区域的面积^[19]。

3.2 循环加载过程能量演化

通过计算加载曲线的外轮廓线下面积求得每次试验各加卸载转换点的外荷载做功,计算每级卸载曲线下的面积求得每级加载完毕后岩石的可释放弹性能,并由此得出总耗散能。根据循环加卸载试验数据分别计算不同围压作用下每一级加载终点的能量数据。围压 5 MPa 计算结果见表 1,其中岩石的耗散能不可逆,弹性能可逆。

由图 6 可见循环加卸载试验中,岩样的可释放弹性能随着轴向应变的增加而增大, U_e 在弹塑性变形阶段持续增长并达到峰值,经历脆性破坏后迅速降低并残余一定的弹性能。

由图 7 可知,随着围压增加,岩石破坏前的耗散能不会显著增加,但峰值弹性能有明显响应,所以岩石的破坏是弹性能不断积累到峰值后突然释放的结果,围压越高岩石破坏前达到的峰值弹性能越高。此外,围压越高岩石破坏后的残余弹性能越高。岩石破坏前的峰值弹性能和岩石破坏后的残余弹性能均与围压呈线性

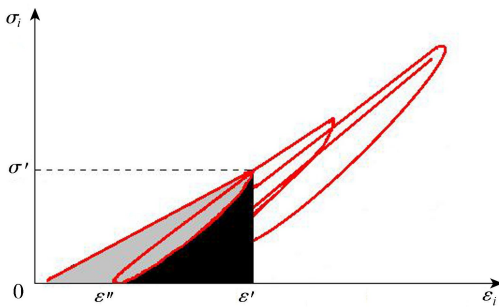


图 5 循环加卸载试验能量分析示意图
Fig.5 Energy analysis diagram in cyclic loading and unloading test

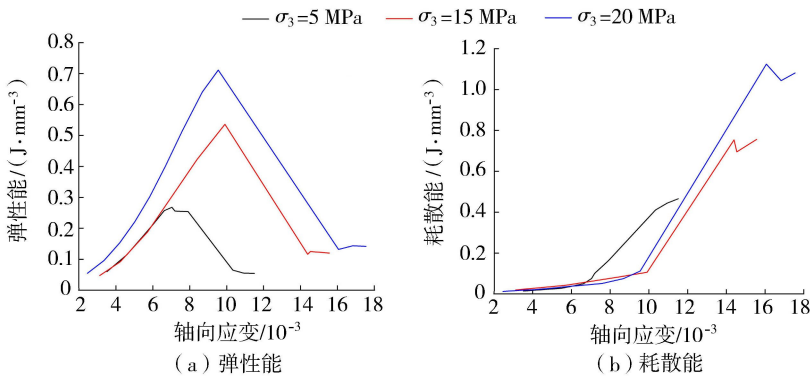


图6 不同围压下砂岩循环加卸载能量应变关系曲线

Fig.6 Energy-strain curves of sandstone under different confining pressures

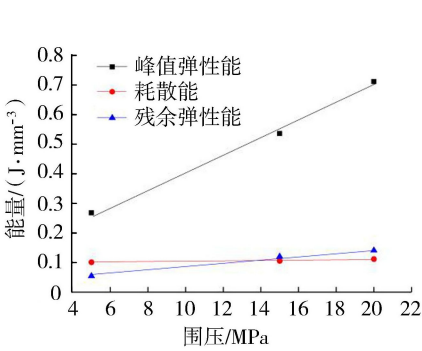


图7 砂岩能量与围压之间的关系

Fig.7 Energy-confining curves of sandstone

关系。同时,直线的倾斜程度能够看出,围压对岩石破坏前峰值弹性能的影响尤为显著,破坏前岩石弹性能的增加可视为岩石储能的过程,岩石的破坏可以理解为达到极限储能后的能量剧烈耗散的结果,围压越高岩石的极限储能越高,因此不同围压下岩石的破坏可根据弹性能的变化实现较好的预测。

4 结 论

- a. 不同围压条件下砂岩在加载过程中均会出现初始压密段,随着循环加载次数的增加以及围压的增加,初始压密段逐渐变得不显著。
- b. 砂岩在循环荷载下应力-应变曲线出现明显的滞回环,使得每次加卸载路径不能完全重复。在轴向应力较小时,滞回效应不明显,随着应力的增加,滞回效应逐渐明显。
- c. 有围压情况下,砂岩破坏模式以剪切破坏为主,同时产生众多的轴向和侧向倾斜裂纹,说明在低围压作用下体积扩容现象比较明显。增大围压可以提高砂岩抵抗变形能力和延性破坏特征,围压越大峰值强度对应的轴向应变和环向应变也越大。
- d. 从能量的角度对岩石的破坏进行了预测,破坏前岩石弹性能的增加可视为岩石储能的过程,岩石的破坏可以理解为达到极限储能后的能量剧烈耗散的结果,且围压越高岩石的极限储能越高。

参考文献:

[1] 徐志英. 岩石力学(高等学校教材)[M]. 3版. 北京:水利水电出版社,2007.

[2] 王伟,徐卫亚,王如宾,等. 低渗透岩石三轴压缩过程中的渗透性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(1): 40-47. (WANG Wei,XU Weiya,WANG Rubin,et al. Permeability of dense rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1): 40-47. (in Chinese))

[3] 罗崇亮,余云燕,包得祥,等. 基于三轴试验红层泥岩的邓肯-张模型参数研究[J]. 地震工程学报,2019,41(2):436-444. LUO Chongliang,YU Yunyan,BAO Dexiang,et al. Duncan-Zhang model parameters of red mudstonebased on triaxial tests[J]. China Earthquake Engineering Journal,2019,41(2):436-444. (in Chinese))

[4] 王智超,周丁,王维国,等. 岩石软化时效变形的弹黏塑性模型表征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):527-532. (WANG Zhichao,ZHOU Ding,WANG Weiguo,et al. Modelling the time-dependent strain softening behavior ofrock with an elasto-viscoplastic constitutive model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (6): 527-532. (in Chinese))

[5] 徐力群,陶韵成,刘得潭,等. 单轴压缩状态下类岩石材料水力劈裂试验[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):28-34. (XU Liqun,TAO Yuncheng,LIU Detan,et al. Hydraulic fracture test of rock-like materials under uniaxial compression[J]. Advances

表1 围压5 MPa 下循环加卸载试验能量计算结果

Table 1 Energy calculation results of sandstone under confining pressure of 5 MPa

循环 周次	轴向 应变/10 ⁻³	$U/(J \cdot mm^{-3})$	$U_e/(J \cdot mm^{-3})$	$U_d/(J \cdot mm^{-3})$
1	3.51	0.07	0.06	0.02
2	4.59	0.14	0.12	0.02
3	5.49	0.20	0.18	0.03
4	6.04	0.25	0.21	0.03
5	6.62	0.31	0.26	0.05
6	7.03	0.34	0.27	0.08
7	7.20	0.36	0.26	0.10
8	7.91	0.42	0.25	0.16
9	10.33	0.48	0.07	0.41
10	10.94	0.50	0.05	0.45
11	11.51	0.52	0.05	0.47

- in Science and Technology of Water Resources,2018,38(4):28-34. (in Chinese))
- [6] 梅胜尧,王伟,秦志军,等. 考虑裂隙塑性的岩石非线性分数阶蠕变模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):548-554. (MEI Shengyao,WANG Wei,QIN Zhijun, et al. A nonlinear creep model based on fractional order theory considering the plasticity of fissures for rocks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(6):548-554. (in Chinese))
- [7] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(3):475-478. (YANG Shengqi,SU Chengdong,XU Weiya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(3):475-478. (in Chinese))
- [8] 王伟,刘桃根,李雪浩,等. 化学腐蚀下花岗岩三轴压缩力学特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3801-3807. (WANG Wei,LIU Taogen,LI Xuehao,et al. Mechanical behaviour of granite in triaxial compression under chemical corrosion[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(10):3801-3807. (in Chinese))
- [9] 杨春和,马洪岭,刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3562-3568. (YANG Chunhe,MA Hongling,LIU Jianfeng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(12):3562-3568. (in Chinese))
- [10] YANG Shengqi,JING Hongwen. Evaluation on strength and deformation behavior of red sandstone under simple and complex loading paths[J]. Engineering Geology,2013,164(393):1-17.
- [11] YANG Shengqi,RANJITH P G,HUANG Yanhua, et al. Experimental investigation on mechanical damage characteristics of sandstone under triaxial cyclic loading[J]. Geophysical Journal International,2015,201(2):662-682.
- [12] 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2603-2608. (XIE Heping,PENG Ruidong,JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(15):2603-2608. (in Chinese))
- [13] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1729-1740. (XIE Heping,JU Yang,LI Liyun,et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(9):1729-1740. (in Chinese))
- [14] 喻勇,尹健民. 三峡花岗岩在不同加载方式下的能耗特征[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):205-208. (YU Yong,YIN Jianmin. Energy dissipation properties of Three Gorges granite under different loading modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(2):205-208. (in Chinese))
- [15] 许江,李波波,周婷,等. 循环荷载作用下煤变形与能量演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3563-3572. (XU Jiang,LI Bobo,ZHOU Ting,et al. Experimental study of deformation and energy evolution law of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(Sup2):3563-3572. (in Chinese))
- [16] 邓华锋,胡玉,李建林,等. 循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):2869-2875. (DENG Huafeng,HU Yu,LI Jianlin,et al. The evolution of sandstone energy dissipation under cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Sup1):2869-2875. (in Chinese))
- [17] 王苏生,徐卫亚,王伟,等. 岩石统计损伤本构模型与试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):464-470. (WANG Susheng,XU Weiya,WANG Wei,et al. The statistical damage constitutive model of rocks and its experiment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(5):464-470. (in Chinese))
- [18] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东. 大理岩三轴压缩变形破坏与能量特征研究[J]. 工程力学,2007,24(1):136-142. (YANG Shengqi,XU Weiya,SU Chengdong. Study on the deformation failure and energy properties of marble specimen under triaxial compression[J]. Engineering Mechanics,2007,24(1):136-142. (in Chinese))
- [19] 谢和平,彭瑞东,鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21):3565-3570. (XIE Heping,PENG Ruidong,JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(21):3565-3570. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-08 编辑:刘晓艳)