

文章编号: 1006-4710(2014)03-0309-06

砂岩单向压缩条件下的变形特性及破坏模式研究

夏洪春^{1,2}, 朱训国^{1,2}

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622;

2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与控制辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要: 以晋华官煤矿某巷道顶板砂岩为研究对象, 利用 MTS815.03 型岩石材料试验机对试样进行单轴压缩试验。分析和研究了砂岩在单向抗压荷载作用下的变形特性和破坏模式, 得到以下结论: ① 岩石试样在单向压缩条件下的破坏模式主要有劈裂模式、剪(主)+拉(次)模式、劈+剪共存等三种模式。具体表现为单裂纹劈裂贯通、多裂纹劈裂贯通以及剪切破坏等; ② 根据能量耗散理论, 提出了单向压缩条件下试样破坏模式与耗散能之间的关系, 认为试样破裂模式与试样破裂前后的能量指标关系不大, 而与试样破裂前后的耗散能比值有直接的关系, 比值越小, 试样破裂的块体越小, 比值越大, 试样破裂的块体越大。

关键词: 岩石力学; 单轴压缩试验; 能量耗散理论; 破坏模式

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A

Research on the deformation characteristics and failure mode of sandstone under the condition of uniaxial compression test

XIA Hongchun^{1,2}, ZHU Xunguo^{1,2}

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Provincial Key Laboratory for Disaster Predicting and Controlling of Complex Structural System, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: With roof sandstone of one mine funnel of Jinhuaogong coal mine as the study object, MTS815.03 type rock material test machine is used to carry out the uniaxial compression test of test specimens. This paper analyzes and studies deformation characteristics and destruction mode of sandstone specimens under the condition of uniaxial compression so as to obtain the following conclusions: ① the main failure modes of the rock specimens are splitting failure, splitting shear joint damage, and single shear failure modes under the condition of uniaxial compression. The Specific performances show that a single crack splitting through, multiple cracks splitting through and shear failure mode. ② According to the energy dissipation theory, the new conclusion points out the relationship between failure modes and energy dissipation under uniaxial compression conditions. It is considered that there is no relation between the energy index and the sample failure mode before and after the sample is broken. But it has a direct relationship with the sample failure mode to the ratio of the dissipation of energy before and after the sample is broken. The smaller the ratio is, the smaller the sample ruptured block is, the larger the ratio is, the larger sample ruptured block is.

Key words: rock mechanics; uniaxial compression test; energy dissipation theory; failure mode

在荷载作用下, 岩石首先会发生变形, 随后, 当 作用的荷载不断增大, 或者在荷载超过某一数值而

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374045, 51274051); 辽宁省教育厅基金资助项目(L2012450); 大连大学博士专项基金资助项目(08-6)。

作者简介: 夏洪春, 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为巷道稳定性。E-mail: zhu_xunguo@hotmail.com。

保持恒定时,随着这个恒定荷载作用时间的增长,均可导致岩石的破坏。

因此,岩石的变形和破坏,是在荷载作用下岩石性能变化过程中的两个不同阶段。在变形阶段中也包含有岩石破坏的因素,而岩石破坏阶段也可以看作是变形不断发展的结果。

地下工程,如隧道、巷道等构筑物上的岩石压力是由于岩石变形和破坏而产生的。因此,研究岩石的变形特性和破坏模式对地下工程的安全而言就有重大意义。

多年来,国内外众多专家学者对此问题进行了大量的研究。牛双建等^[1]采用 MTS815 刚性伺服试验机,研究了不同加载路径下砂岩的破坏模式;韩铁林等^[2]采用 WDT-1500 多功能材料试验机,通过三轴试验研究了不同应力路径下砂岩力学特性。杨圣奇等^[3]采用岩石力学伺服试验机与声发射仪,对含孔洞裂隙砂岩的力学特性进行单轴压缩试验。苏承东等^[4]利用自制装置在 RMT-150B 电液伺服岩石力学试验系统,对义马新安煤层顶板砂岩、砂质泥岩和泥岩等煤层顶板破碎岩石压实特征进行了试验研究。宋义敏等^[5]以白光数字散斑相关方法作为试验观测手段,通过单轴压缩试验对一种红砂岩变形破坏全过程的变形场和能量演化特征进行研究;张艳博等^[6]通过对含水砂岩进行单轴加载声发射试验,获取声发射信号,深入研究了砂岩在破坏过程中的频谱特性;邓华锋等^[7]通过巴西盘试验,研究了其对岩石劈裂抗拉强度的影响;赵宝云等^[8]以重庆市典型的红砂岩为研究对象,应用自行设计加工的岩石单轴直接拉伸装置进行该红砂岩的单轴直接拉伸蠕变试验。基于试验结果,研究红砂岩在单轴直接拉伸作用下的轴向蠕变、侧向蠕变以及卸荷蠕变规律,并探讨红砂岩蠕变断裂特征。郭臣业等^[9]利用 MTS815 岩石力学试验系统,对永川煤矿砂岩样进行三轴等围压试验,深入研究了砂岩在不同加载条件下的峰后变形、破坏和应变能特征。沈明荣第^[10]通过对完整红砂岩在 CSS-2950 岩石双轴流变试验机上进行的单轴压缩蠕变试验,利用过渡蠕变法、等时曲线法探讨了这些方法确定岩石长期强度在理论上的正确性和试验方法的可操作性;张志镇等^[11]利用 MTS815.02 试验系统,研究了不同加载速率下红砂岩能量演化及分配规律。刘东燕等^[12]应用自行研制的岩石直接拉伸装置对红砂岩进行了单轴直接拉伸蠕变试验,得到了在低应力状态和高应力状态下的蠕变规律,并据此对 Burgers 蠕变模型进行了改进。

本文在上述研究成果的基础上,利用 MTS815 刚性伺服试验系统,对同煤集团晋华宫煤矿 402 盘区 5210 巷道顶板砂岩的变形特性进行深入研究,以期获得砂岩在无侧限单轴抗压荷载作用下的破坏特征和变形规律,为回采巷道围岩稳定性分类及支护设计等技术问题提供科学依据。

1 试验设备与试验试样

1.1 试验设备

本次试验采用图 1 所示 MTS815.03 岩石伺服试验机进行试验。该试验机最大加载荷载为 2 800 kN,最大围压为 80 MPa,可进行常规和高温条件下的各种加卸载和渗流试验,是目前研究岩石特性的主要仪器之一。



图 1 MTS815.03 伺服试验系统
Fig.1 The MTS815.03 servo test system

1.2 试验试样

进行试验的岩石试块采自 402 盘区 8210 工作面,取样位置分别位于距开切眼 1 030 m 和 1 400 m 处。在现场采用钻孔取芯,取得岩样后即密封,以保证与现场有相同的湿度和含水率。岩样有三种,分别为粉细互层岩、细砂岩、中粗砂岩。取样后运抵实验室,根据岩石力学试验规程在实验室加工成标准岩石试件。

关于单轴抗压强度试验试样,加工后为圆柱状标准试件(见图 2),其高径比为 2:1。试件尺寸如表 1 所示。



图 2 试验加载岩石试样图
Fig.2 The chart of rock samples

表 1 单轴抗压强度试验试样尺寸
Tab.1 The size of samples for uniaxial compression test

取芯位置	岩性	试件编号	直径/mm	高度/mm
距开切眼 1 030 m	粉细互层	1#	50.88	99.84
		2#	51.24	99.32
		3#	51.20	99.18
	细砂岩	1#	51.20	99.62
		2#	51.22	99.28
		3#	51.20	100.0
	中粗砂岩	1#	51.22	99.92
		2#	51.10	98.48
		3#	51.18	99.84
距开切眼 1 400 m	粉细互层	1#	51.28	99.74
		2#	51.16	99.10
		3#	51.22	99.80
	细砂岩	1#	51.32	99.46
		2#	51.30	98.88
		3#	51.34	99.60
	中粗砂岩	1#	51.32	99.56
		2#	51.38	98.34
		3#	51.20	98.70

2 单轴压缩试验结果分析

2.1 单轴压缩试样破坏模式分析

压缩试样采用图 2 试样,试验在 MTS 电液伺服岩石试验机上进行,对试样加载方式采用自动控制系统,可以避免压力达到试件极限强度后迅速破坏而得不到压力峰值后的应力应变曲线,峰前加载速度采用 0.1 mm/s,峰后加载速度采用 0.2 mm/s。图 3 为部分中粗砂岩试样破坏后的试件典型照片。

文献[1]通过试验,提出了岩石试样破坏形式主要有劈裂破坏和剪切破坏。但本文通过试验发现,岩石试样的破坏形式还包括其他类型。从宏观角度分析,图 3 中岩石试样的破坏形式包括文献[1]

中所提到的劈裂破坏,如试样 1400-3# 主要是单贯通劈裂破坏,试样 1030-2# 则是多裂纹贯通劈裂破坏;除了劈裂破坏外,还存在以剪切破坏为主,局部张拉破坏的破坏模式,如试样 1030-3#、1400-2#。除上述两种破坏模式外,本文作者通过试验还发现了一种破坏模式,即试样 1030-1#、1400-1# 所表现的剪切与劈裂共存的破坏类型。因此,综合上述分析,本次试验中试样的破坏模式包括三种,劈裂模式、剪(主)+拉(次)模式、劈+剪共存模式。

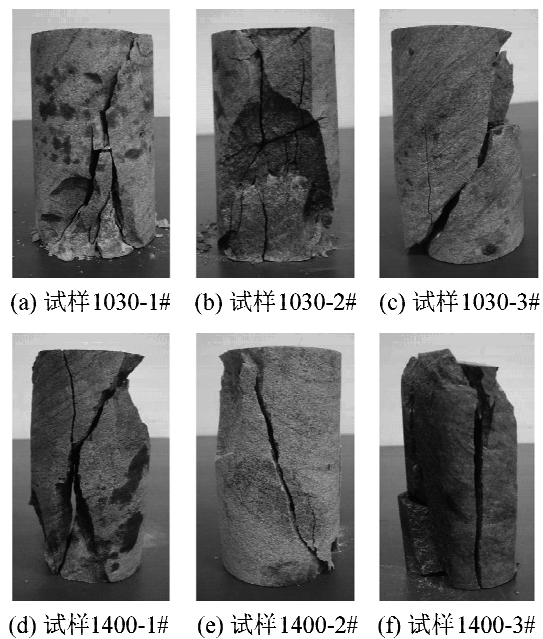


图 3 岩石单轴压缩破坏典型照片
Fig.3 The typical damage photos after uniaxial compression tests

2.2 单轴压缩试验力学参数结果分析

表 2 为通过岩石试验机所获得岩石试样的各种力学参数,图 4 为应力-应变曲线。

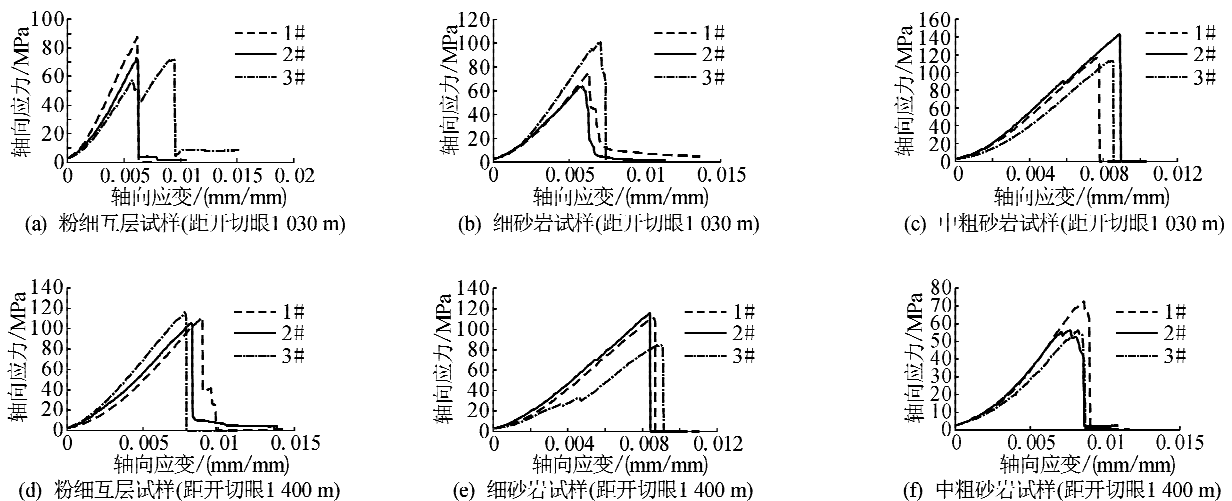


图 4 岩石试样应力-应变曲线
Fig.4 The stress-strain curves for the rock sample

表2 岩石试样单轴压缩试验结果
Tab. 2 The uniaxial compression tests results of test specimen

取芯位置	岩性	试件编号	破坏载荷/ kN	单轴抗压 强度/MPa	普氏系数	弹性模量/ MPa	泊松比
距开切眼 1 030 m	粉细互层	1#	178.721	87.900	8.79	17 424.85	0.225 9
		2#	149.802	72.646	7.26	15 410.92	0.203 2
		3#	149.597	72.660	7.27	11 670.14	0.198 4
		平均值		77.735	7.77	14 835.30	0.209 2
	细砂岩	1#	155.701	75.624	7.56	15 272.71	0.218 6
		2#	130.565	63.366	6.34	12 273.66	0.178 7
		3#	208.508	101.273	10.13	18 806.51	0.201 4
		平均值		80.088	8.01	15 450.96	0.199 6
	中粗砂岩	1#	239.491	116.230	11.62	18 780.84	0.218 3
		2#	293.812	143.264	14.32	19 756.32	0.206 4
		3#	232.824	113.172	11.32	18 084.41	0.239 8
		平均值		124.222	12.42	18 873.86	0.221 5
距开切眼 1 400 m	粉细互层	1#	229.729	111.232	11.12	16 630.84	0.201 9
		2#	217.440	105.777	10.58	15 850.36	0.202 6
		3#	238.303	115.654	11.56	18 043.11	0.206 9
		平均值		110.888	11.09	16 841.44	0.203 8
	细砂岩	1#	229.139	110.774	11.08	15 685.62	0.206 8
		2#	238.993	115.628	11.56	14 224.55	0.193 5
		3#	175.441	84.748	8.47	14 946.57	0.238 4
		平均值		103.717	10.37	14 952.25	0.212 9
	中粗砂岩	1#	149.672	72.356	7.24	12 384.87	0.211 9
		2#	116.786	56.326	5.63	10 723.43	0.224 2
		3#	115.731	56.211	5.62	8 750.468	0.261 3
		平均值		61.631	6.16	10 619.59	0.232 5

从图4可以看出,砂岩单轴压缩试验条件下,其变形特征可以分为两大阶段,应力增长阶段和应力跌落阶段。而应力增长阶段又可进一步分为初始裂纹压密阶段和线性变形阶段。在图4(f)中,2#试样的变形特征除呈现初始裂纹压密阶段、线性变形阶段外,还有一定的非线性变形特性。总体而言,对于本次试验,砂岩单轴压缩条件下的变形大体可以分为以下几个阶段:初始裂纹压密阶段→线性变形阶段→应力跌落阶段。同时,从图中还可以看出,在应力跌落阶段,大部分试样不具有残余强度,只有极少数试样在发生破裂后还具有一定的残余强度,说明这些试样发生的破坏模式应该是多裂纹贯通破坏模式。

2.3 破坏模式因素分析

近年来,大量的研究表明,仅仅从应力/应变全过程曲线已经无法解释发生多种破坏模式的原因了。因此,必须从其他角度对此问题进行分析研究,能量演化分析就是目前应用较多的理论和方法^[1,11]。因此,本文应用文献^[13]和文献^[1]所提出的方法对本次试验试样的破坏模式进行分析

研究。

文献^[1]中提出,假定岩样与外界没有能量交换,即没有能量损失。那么外力功 U 即为岩样受力所吸收的能量 U_0 ,那么试样所吸收的能量就包括两部分,一部分是单位岩样所存储的可释放的弹性应变能 U_e ,另一部分则是单位岩样在加载变形过程中耗散掉的耗散能 U_d 。其关系为:

$$U_0 = U_e + U_d \quad (1)$$

其中:

$$U_0 = \int \sigma_1 d\epsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1i} + \sigma_{1i-1}) (\epsilon_{1i} + \epsilon_{1i-1}) \quad (2)$$

式中, σ_{1i} 、 ϵ_{1i} 分别为轴向应力-应变曲线上每一点的应力和应变值,且初始应力和初始应变均为0。

由式(2)可知, U_0 实际为应力-应变曲线下方所包含的面积;对于可释放弹性应变能 U_e ,假设岩样在应力-应变曲线上卸载曲线和再加载曲线基本一致,卸载弹性模量 E_i 可采用峰值前弹性段的弹性模量 E 代替,计算曲线上任意一点的可释放弹性应变能时,均可根据该点的应力值和峰值前弹性模量确

定,即:

$$U_e = \sigma_1^2 / (2E) \quad (3)$$

将试验数据代入式(1)~(3)可计算出单轴压缩

试验中砂岩岩样破坏前(峰值点处)、后(残余段起始点)的各能量指标。以中粗砂岩试样为例进行分析,具体结果见表3。

表3 单轴压缩条件下中粗砂岩试样破坏前后能量指标

Tab.3 Energy indices of sandstone specimens before and after failure in uniaxial compression tests

试样编号	破坏前(峰值点)			破坏后(残余段起始点)			二者比值(破坏后/破坏前)		
	U_0 /MPa	U_e /MPa	U_d /MPa	U'_0 /MPa	U'_e /MPa	U'_d /MPa	U'_0/U_0	U'_e/U_e	U'_d/U_d
1030-1#	0.453 297	0.359 659	0.093 638	0.453 297	0	0.453 297	1	0	4.840 95
1030-2#	0.644 688	0.519 443	0.125 245	0.644 688	0	0.644 688	1	0	5.147 42
1030-3#	0.480 981	0.354 114	0.126 867	0.480 981	0	0.480 981	1	0	3.791 22
1400-1#	0.289 424	0.211 362	0.077 762	0.289 424	0	0.289 424	1	0	3.721 92
1400-2#	0.197 141	0.147 929	0.049 212	0.201 141	0.000 047	0.201 094	1.020 290	0.000 318	10.467 1
1400-3#	0.196 739	0.180 543	0.016 196	0.196 739	0	0.196 739	1	0	12.147 4

文献[1]认为试样破坏模式与试样破裂前后的能量指标大小有直接关系,但通过对表3与图3的分析,笔者认为:试样破裂模式与试样破裂前后的能量指标关系不大,而与试样破裂前后的耗散能比值有直接的关系。比值越小,试样破裂的块体越小,比值越大,试样破裂的块体越大。以此结论对文献[1]中单轴压缩试验试样破裂模式进行分析:文献[1]表2中U05的耗散能比值最小,试样发生完全破裂,其破裂模式表现为剪切破坏为主,附带局部张拉破裂的破坏模式。随着比值的增大,试样的破裂模式表现为多裂纹劈裂贯通,单裂纹劈裂贯通。这样就比较合理的解释了文献[1]中图3岩石试样的破裂模式。

以本文所提出的结论对本文试验结果进行分析。从表3中耗散能比值的计算结果,加之对比图2岩石试样试验结果,再次验证了本文所提出的通过试样破坏前后耗散能比值确定试样破坏模式的结论。即通过表3中的计算结果,可以确定试样1400-3#主要是单贯通劈裂破坏,试样1030-2#是多裂纹贯通劈裂破坏;试样1030-3#、1400-2#则是以剪切破坏为主,局部张拉破坏的破坏模式。试样1030-1#、1400-1#所表现的剪切与劈裂共存的破坏类型。

3 结论

本文以晋华宫煤矿某巷道顶板砂岩为研究对象,通过对试样进行单轴压缩试验,分析和研究了砂岩在单向压缩条件下的变形特性和破坏模式。通过分析研究,本文得到以下结论:

1) 砂岩受压时表现出很强的脆断性,当荷载达到最大时,应力突然出现一个跌落现象。另外,不同岩性岩样出现脆断的时间也不尽相同。

2) 根据能量耗散理论,本文重新提出了单向压缩条件下试样破坏模式与耗散能之间关系的新结论:认为试样破裂模式与试样破裂前后的能量指标关系不大,而与试样破裂前后的耗散能比值有直接的关系。比值越小,试样破裂的块体越小,比值越大,试样破裂的块体越大。并根据此结论重新对文献[1]与本文试验结果进行了分析,验证了本文所提出的结论的正确性。

参考文献:

- [1] 牛双建,靖洪文,梁军起. 不同加载路径下砂岩破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 3966-3975.
Niu Shuangjian, Jing Hongwen, Liang Junqi. Experimental study of failure mode of sandstone under different loading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3966-3975.
- [2] 韩铁林,陈蕴生,宋勇军,等. 不同应力路径下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3960-3968.
Han Tielin, Chen Yunsheng, Song Yongjun, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone under different loading paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3960-3968.
- [3] 杨圣奇,刘相如,李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3539-3547.
Yang Shengqi, Liu Xiangru, Li Yushou. Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3539-3547.
- [4] 苏承东,顾明,唐旭. 煤层顶板破碎岩石压实特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 18-27.

- Su Chengdong, Gu Ming, Tang Xu. Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1):18-27.
- [5] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352-1358.
Song Yimin, Jiang Yaodong, Ma Shaopeng, et al. Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1352-1358.
- [6] 张艳博, 黄晓红, 李莎莎, 等. 含水砂岩在破坏过程中的频谱特性分析[J]. 岩土力学, 2013, 33(6):1574-1579.
Zhang Yanbo, Huang Xiaohong, Li Shasha, et al. Spectral character analysis of sandstone under saturation condition in rupture procedure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 33(6):1574-1579.
- [7] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 圆盘厚径比对岩石劈裂抗拉强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4):792-799.
Deng Huafeng, Li Jianlin, Zhu Min, et al. Research on effect of disc thickness-to-diameter ratio on splitting tensile strength of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4):792-799.
- [8] 赵宝云, 刘东燕, 朱可善. 重庆红砂岩单轴直接拉伸蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2):3960-3966.
Zhao Baoyun, Liu Dongyan, Zhu Keshan. Experimental research on creep characteristics of Chongqing red sandstone under direct tension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2):3960-3966.
- [9] 郭臣业, 鲜学福, 姜永东, 等. 砂岩加载试验峰后变形、破坏与应变能特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2):3892-3899.
Guo Chenye, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, et al. Characteristics of deformation, failure and strain energy of sandstone under cycling loading in post-peak [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2):3892-3899.
- [10] 沈明荣, 谌洪菊. 红砂岩长期强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11):3301-3306.
Shen Mingrong, Chen Hongju. Testing study of long-term strength characteristics of red sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11):3301-3306.
- [11] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5):953-963.
Zhang Zhizhen, Gao Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-963.
- [12] 刘东燕, 赵宝云, 朱可善, 等. 砂岩直接拉伸蠕变特性及 Burgers 模型的改进与应用[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11):1740-1745.
Liu Dongyan, Zhao Baoyun, Zhu Keshan, et al. Direct tension creep behaviors of sandstone and improvement and application of Burgers model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1740-1745.
- [13] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17):3003-3010.
Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010.

(责任编辑 王卫勋)