

文章编号:0253-9993(2012)11-1829-05

# 高温作用下围压对页岩力学特性影响的试验研究

孟陆波<sup>1</sup>,李天斌<sup>1</sup>,徐 进<sup>2</sup>,马宏敏<sup>1</sup>,阴红宇<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059;2. 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610000)

**摘 要:**利用 MTS815 型程控伺服刚性试验机对页岩开展高温常规三轴压缩试验,基于试验结果分析围压与页岩应力-应变曲线特征、峰值强度、弹性模量、泊松比、峰值应变的关系。结果表明,按体积应变特征,应力-应变曲线可归为 3 类:扩张型、压缩-扩张过渡型和压缩型,围压对页岩具有较明显的扩容作用。在同一温度时,在 5~25 MPa 围压范围内,页岩峰值强度( $\sigma_1 - \sigma_3$ )较低,表现出较强的塑性变形破坏特征,峰值强度和弹性模量具有随围压增加而增大的趋势。围压小于 15 MPa 时,页岩泊松比随围压增大而增大,而峰值轴向应变和峰值横向应变均随围压增加而逐渐降低;围压大于 15 MPa 后,泊松比随围压增加呈小幅下降,峰值轴向应变和峰值横向应变随围压增加而略有增大。

**关键词:**围压;页岩;力学性质;高温常规三轴压缩试验;体积应变

**中图分类号:**TU458

**文献标志码:**A

## Experimental study on influence of confining pressure on shale mechanical properties under high temperature condition

MENG Lu-bo<sup>1</sup>, LI Tian-bin<sup>1</sup>, XU Jin<sup>2</sup>, MA Hong-min<sup>1</sup>, YIN Hong-yu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenviroment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of Water Resource &amp; Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** High temperature conventional triaxial compression test of shale were carried out by using the MTS815 servo-controlled testing machine, based on the results of the tests, the relationships between confining pressure and the characteristic of shale stress-strain curve, peak strength, elastic modulus, Poisson's ratio, peak strain were investigated, and the general regulation is obvious. According to the characteristics of volumetric strain, the stress-strain curves were classified into three types. They are dilatation type, compression-dilatation type, compression type, and the confining pressure has conspicuous dilatation effect on shale. At the same temperature, when confining pressure rises from 5 MPa to 25 MPa, shale peak strength ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) is comparatively lower, indicating stronger plastic deformation, and peak strength and elastic modulus increase with uprising confining pressure. When confining pressure is lower than 15 MPa, shale Poisson's ratio increases with increasing confining pressure while peak axial strain and peak circle strain decreases with increasing confining pressure. When confining pressure is higher than 15 MPa, shale Poisson's ratio decreases slightly with the increasing confining pressure, while peak axial strain and peak circle strain increase slightly with the increasing confining pressure.

**Key words:** confining pressure; shale; mechanical properties; high temperature conventional triaxial compression test; volumetric strain

在中国西南地区,铁路、公路、水电等大型基础建设工程以及采矿工程经常遇到地层为软岩的深埋隧

收稿日期:2011-10-13 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41102189);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室人才培养课题资助项目(SKLG2009Z012);成都理工大学优秀创新团队培育计划资助项目(HY0084)

作者简介:孟陆波(1978—),男,浙江上虞人,博士。E-mail:menglubo@163.com

洞,其地质条件越来越复杂,不仅处于高地应力环境,而且可能处于高地热环境下,因此迫切需要研究软岩在高围压、高温作用下的物理力学特性,为隧洞围岩稳定性评价以及软岩大变形等地质灾害防治提供基础资料。

许多学者对温度、高压作用下岩石的物理力学特性进行了大量试验研究,如 Lau J S O 等<sup>[1]</sup>、万志军等<sup>[2]</sup>研究了常规三轴压缩条件下花岗岩等硬质岩主要力学参数随温度、围压的变化规律;郭富利<sup>[3]</sup>、解廷堃等<sup>[4]</sup>研究了常温下炭质页岩等软质岩三轴压缩力学特性及与围压的关系;李建林<sup>[5]</sup>、尹光志<sup>[6]</sup>、梁爱莉等<sup>[7]</sup>研究高温前与高温后力学特性的变化;朱珍德<sup>[8]</sup>、赵金昌<sup>[9]</sup>、肖乃友<sup>[10]</sup>、颜丙峰等<sup>[11]</sup>研究高温高压下花岗岩、煤浆的影响规律;吴诗勇<sup>[12]</sup>、秦本东等<sup>[13-14]</sup>研究高温下煤焦、石灰岩的理化、膨胀特性,但是对高温作用过程中软岩三轴压缩力学特性与围压关系研究甚少。由此本文选择页岩开展了高温常规三轴压缩试验,分析在高温作用过程中,围压对页岩力学特性的影响。

## 1 试 验

采用页岩作为本次试验的试件,在高温常规三轴压缩试验之前先进行了矿物成分测试,经3组页岩样本的X射线测试(表1、图1),表明页岩主要矿物成分为高岭石,其次为伊利石和石英,高岭石和伊利石两者总含量约达85%。

表1 页岩主要矿物含量

试样	伊利石	高岭石	石英
1号样本	41	45	14
2号样本	32	54	14
3号样本	26	58	16
平均值	33	52	15

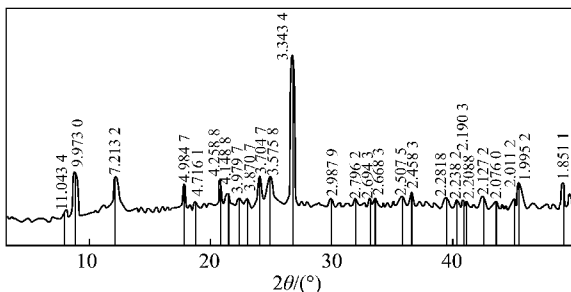


图1 页岩1号样本X射线衍射图谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of No. 1 shale sample

页岩层理明显,沿垂直层理方向加工成

φ50 mm、长100 mm的圆柱体试样,试件端部平面磨平到0.02 mm,高度精确到1 mm,试样无明显节理及裂纹等缺陷。

试验仪器采用美国生产的MTS815型程控伺服刚性试验机。试验温度设置为25,40,80,120℃四个等级,每个温度等级为1组,每组5个试样,围压分别控制在5,10,15,20,25 MPa(表2)。为了保证对试样加温均匀,按2℃/min的升温速度加热到预定温度后保持恒温5 h。

表2 试验的温度、围压方案

Table 2 Scheme of temperature and confining pressure test

T/℃	$\sigma_3$ /MPa
25	5,10,15,20,25
40	5,10,15,20,25
80	5,10,15,20,25
120	5,10,15,20,25

本次试验采用位移控制方式,以0.005 mm/s的加荷速度同时施加围压和轴向压力至预定围压值,并使围压在试验过程中始终保持为常数,采用5 mm位移传感器测量试样的轴向位移,以0.005 mm/s的加荷速度施加轴向荷载,直至试件完全破坏。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 应力-应变曲线特征

设体积应变 $\varepsilon_V = \varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ ,压缩时应变为正值,膨胀(扩容)时应变为负值。页岩高温常规三轴压缩试验共20个,按体积应变特征,归纳应力-应变曲线形态共有3类,如图2所示。

(1)第1类:扩张型。

共9个页岩试样的体积应变特征属此类(图2(a)),试验时围压/温度分别为10 MPa/25℃,10 MPa/80℃,15 MPa/40℃,15 MPa/80℃,15 MPa/120℃,20 MPa/25℃,20 MPa/40℃,25 MPa/25℃,25 MPa/80℃,其应力-应变曲线特征为:轴向加载初始阶段为岩石的孔隙压密阶段,轴向荷载逐渐增大的过程中,体积应变( $\varepsilon_V$ )几乎为0;当轴向荷载增大至一定大小时,体积应变( $\varepsilon_V$ )变为负值,开始出现扩容现象;当岩石进入屈服阶段时,体积应变( $\varepsilon_V$ )急剧增大,扩容强烈;当达到峰值强度后,岩石发生破坏,应力急剧减小到残余强度后保持不变,体积应变( $\varepsilon_V$ )仍继续增大,表现为扩张。

(2)第2类:压缩-扩张过渡型。

共7个试样属此类(图2(b)),试验时围压/温

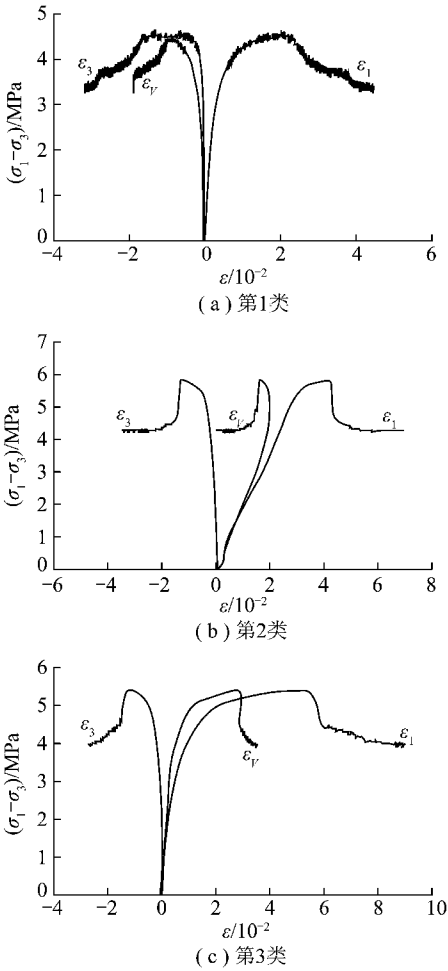


图 2 页岩三轴压缩应力-应变曲线类型

Fig. 2 Types of stress-strain curves

度分别为 5 MPa/40 °C, 5 MPa/80 °C, 5 MPa/120 °C, 10 MPa/40 °C, 10 MPa /120 °C, 20 MPa/120 °C, 25 MPa/120 °C, 其应力-应变曲线特征为:轴向加载初始阶段为岩石的孔隙压密阶段,体积应变( $\varepsilon_V$ )变为正值,表现为岩石压缩,体积变小。随着轴向荷载逐渐增大, $\varepsilon_V$ 缓慢增大;当岩石进入弹性变形阶段后, $\varepsilon_V$ 与 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 基本呈线性增长关系;当岩石变形进入屈服阶段时,体积应变( $\varepsilon_V$ )基本保持不变,并逐步减小;岩石破坏后,应力急剧减小到残余强度后保持不变,体积应变( $\varepsilon_V$ )急剧减小,并存在由正值向负值转化的趋势,即体积由压缩转变为扩张。

(3)第 3 类:压缩型。

共 4 个试样属此类(图 2(c)),试验时围压/温度分别为 5 MPa/25 °C, 15 MPa/25 °C, 20 MPa/80 °C, 25 MPa/40 °C, 其应力-应变曲线特征为:轴向加载初始阶段为岩石的孔隙压密阶段,体积应变( $\varepsilon_V$ )变为正值,表现为岩石压缩。随着轴向荷载逐渐增大, $\varepsilon_V$ 缓慢增大;当岩石进入弹性变形阶段后, $\varepsilon_V$ 与 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 基本呈线性增长关系;当岩石变形进入屈服阶段

时,体积应变( $\varepsilon_V$ )急速增大;岩石破坏后,应力急剧减小到残余强度后保持不变,体积应变( $\varepsilon_V$ )继续增大,表现为强烈压缩。

页岩体积应变特征为扩张型(第 1 类)的数量最多,有 9 个,主要产生于中高围压(10 ~ 25 MPa)条件下;压缩-扩张过渡型(第 2 类)有 7 个,主要产生于中低围压(5 ~ 10 MPa),压缩型(第 3 类)数量最少,仅有 4 个。由此可见,围压对页岩具有较明显的扩容作用。

2.2 围压与峰值强度的关系

各围压、各温度下的页岩峰值强度( $\sigma_1-\sigma_3$ )与围压的关系如图 3 所示。由图 3 可知,温度为 25 °C 时,各围压下的页岩峰值强度均非常低,为 5 ~ 7 MPa。温度为 40 °C 时,峰值强度随围压增加而增大,仅在围压为 15 MPa 时,峰值强度略有降低。温度为 80 °C 时,各围压下的峰值强度均很低,为 4 ~ 5 MPa,围压 25 MPa 时,峰值强度稍高,为 8 MPa 左右。温度为 120 °C 时,峰值强度随围压增加而增大,在围压为 15 MPa 和 25 MPa 时,峰值强度略有降低。虽然页岩峰值强度离散性较大,但仍有一定规律性。围压 5, 10, 15, 20, 25 MPa 时,峰值强度的平均值分别为 8.76, 8.88, 7.19, 15.20, 23.20 MPa。由此可见,页岩峰值强度值整体均小,表现出较强的塑性变形破坏特征,页岩峰值强度( $\sigma_1-\sigma_3$ )除在 15 MPa 围压时略有降低外,总体上具有随围压增加而增大的趋势。

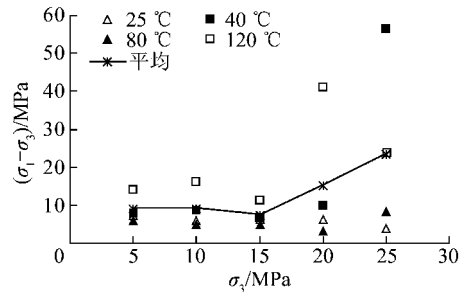


图 3 温度一定时峰值强度与围压关系

Fig. 3 Relationship between peak strength and confining pressure at constant temperature

2.3 围压与弹性模量的关系

本次试验的弹性模量和泊松比利用下列公式<sup>[15]</sup>计算:

$$B = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{B\sigma_1 - \sigma_3}{(2B - 1)\sigma_3 - \sigma_1} \tag{2}$$

$$E = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{\varepsilon_1} \tag{3}$$

式中,  $E$  为三轴状态下应力差为抗压强度 50% 时的割线弹性模量;  $\varepsilon_1, \sigma_1$  分别为轴向应变与应力;  $\sigma_3$  为围压;  $\varepsilon_3$  为横向应变。

通过计算, 各温度下的弹性模量与围压的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 在温度为 25 °C 时, 围压在 10 MPa 之前, 弹性模量随围压的增加而增加, 在 10 ~ 15 MPa, 弹性模量随围压的增加而减小, 在 20 MPa, 弹性模量有所增加, 在 25 MPa, 弹性模量有所减小。温度为 40 °C 时, 围压在 20 MPa 之前, 弹性模量随围压的增加而增加, 在 25 MPa, 弹性模量有所减小。温度为 80 °C 时, 围压在 10 MPa 之前, 弹性模量随围压的增加而增加, 在 10 ~ 20 MPa, 弹性模量随围压的增加而减小, 在 25 MPa, 弹性模量增大较大。温度为 120 °C 时, 围压在 15 MPa 以前, 弹性模量随围压的增加而增加, 在 20 MPa, 弹性模量有所减小, 在 25 MPa, 弹性模量继续增大。围压 5, 10, 15, 20, 25 MPa 时, 页岩的平均弹性模量分别为 208, 1 375, 1 695, 1 631, 1 823 MPa。由此可见, 虽然页岩弹性模量数据的离散性较大, 但仍有一定规律性。总体上, 在温度一定时, 页岩的弹性模量随围压增加而增大。说明页岩具有较多的空隙, 在围压作用下, 空隙闭合而使页岩刚度升高、弹性模量增大。

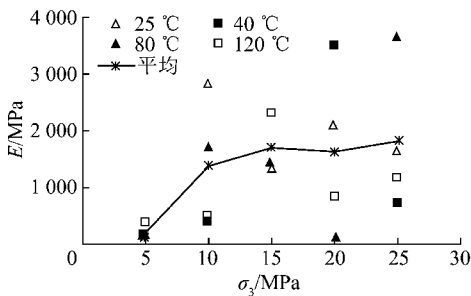


图 4 温度一定时弹性模量与围压的关系

Fig. 4 Relationship between elastic modulus and confining pressure at constant temperature

## 2.4 围压与泊松比的关系

采用式(1)~(3)计算泊松比, 通过计算, 各温度下的泊松比与围压的关系如图 5 所示。由图 5 可知, 温度为 25 °C 时, 围压在 10 MPa 之前, 泊松比随围压的增加而增加, 在 10 ~ 15 MPa, 泊松比随围压的增加而减小, 在 15 ~ 25 MPa, 泊松比随围压的增加而小幅增加。温度为 40 °C 时, 围压在 15 MPa 之前, 泊松比随围压的增加而增加, 在 15 ~ 25 MPa, 泊松比随围压的增加而减小。温度为 80 °C 时, 围压在 10 MPa 之前, 泊松比随围压的增加而增加, 在 10 MPa 以后, 泊松比随围压的增加而减小。温度为 120 °C 时, 围压在 15 MPa 之前, 泊松比随围压的增加而增加, 在 15 ~

25 MPa, 泊松比随围压的增加而减小。围压为 5, 10, 15, 20, 25 MPa 时, 页岩的平均泊松比分别为 0.38, 0.49, 0.49, 0.48, 0.46。可见, 总体趋势是, 15 MPa 围压前, 泊松比随围压增大而上升, 围压超过 15 MPa 后, 泊松比随围压增加呈小幅下降趋势。

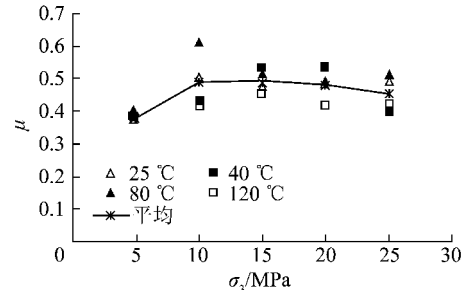


图 5 温度一定时泊松比与围压的关系

Fig. 5 Relationship between Poisson's ratio and confining pressure at constant temperature

## 2.5 围压与峰值应变的关系

试样达到峰值强度时对应的轴向应变和径向应变为峰值轴向应变和横向应变。不同围压与平均峰值轴向应变、平均峰值横向应变的关系如图 6 所示。围压为 5, 10, 15, 20, 25 MPa 时, 页岩 4 种温度下的平均峰值轴向应变分别为  $6.2 \times 10^{-2}$ ,  $3.3 \times 10^{-2}$ ,  $2.5 \times 10^{-2}$ ,  $3.7 \times 10^{-2}$ ,  $4.8 \times 10^{-2}$ 。可见围压小于 15 MPa 时, 页岩峰值轴向应变随围压增加而降低; 围压大于 15 MPa 后, 峰值轴向应变随围压增加而增大。页岩 4 种温度的平均峰值横向应变分别为  $-1.50 \times 10^{-2}$ ,  $-1.44 \times 10^{-2}$ ,  $-0.92 \times 10^{-2}$ ,  $-1.23 \times 10^{-2}$ ,  $-1.40 \times 10^{-2}$ 。可见围压小于 15 MPa 时, 页岩峰值横向应变随围压增加而逐渐降低; 围压大于 15 MPa 后, 峰值横向应变随围压增加而略有增大。这与峰值强度与围压之间的关系(图 3)类似, 在围压为 15 MPa 时其值较低。

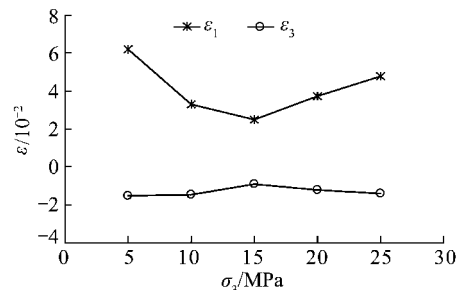


图 6 峰值应变与围压的关系

Fig. 6 Relationship between peak strain and confining pressure at constant temperature

## 3 结 论

(1) 按体积应变特征, 应力-应变曲线可归为 3



类;扩张型、压缩-扩张过渡型和压缩型,围压对页岩具有较明显的扩容作用。

(2)页岩峰值强度( $\sigma_1-\sigma_3$ )较低,表现出较强的塑性变形破坏特征,并具有随围压增加而增大的趋势。

(3)在温度一定时,页岩的弹性模量随围压增加而增大。页岩具有较多的空隙,在围压作用下,空隙闭合而使页岩刚度升高、弹性模量增大。

(4)围压小于 15 MPa 时,页岩泊松比随围压增大而增大,而峰值轴向应变和峰值横向应变均随围压增加而逐渐降低;围压大于 15 MPa 后,泊松比随围压增加呈小幅下降,峰值轴向应变和峰值横向应变随围压增加而略有增大。

### 参考文献:

- [1] Lau J S O, Gorski B, Jackson R. The effects of temperature and water-saturational on mechanical properties of lac du bonnet pink granite[A]. 8th Int. Con. on Rock Mech. [C]. Tokyo, 1995.
- [2] 万志军, 赵阳升, 董付科, 等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 72-77.  
Wan Zhijun, Zhao Yangsheng, Dong Fuke, et al. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 72-77.
- [3] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2324-2332.  
Guo Fuli, Zhang Dingli, Su Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2324-2332.
- [4] 解廷堃, 李二利, 刘如成. 炭质页岩常规三轴试验和本构方程的研究[J]. 露天采矿技术, 2008(6): 7-10.  
Xie Tingkun, Li Erli, Liu Rucheng. Research on carbonaceous shale general triaxial test and constitutive equation[J]. Opencast Mining Technology, 2008(6): 7-10.
- [5] 李建林, 陈星, 党莉, 等. 高温后砂岩三轴卸荷试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1587-1595.  
Li Jianlin, Chen Xing, Dang Li, et al. Triaxial unloading test of sandstone after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1587-1595.
- [6] 尹光志, 李小双, 赵洪宝. 高温后粗砂岩常规三轴压缩条件下力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 598-604.  
Yin Guangzhi, Li Xiaoshuang, Zhao Hongbao. Experimental investigation on mechanical properties of coarse sandstone after high temperature under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 598-604.
- [7] 梁爱莉, 张倩茜, 袁广林, 等. 混凝土高温后抗压强度的影响因素研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2049-2052.  
Liang Aili, Zhang Qianqian, Yuan Guanglin, et al. Study on the influencing factors of concrete compressive strength after elevated temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2049-2052.
- [8] 朱珍德, 方荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2279-2283, 2290.  
Zhu Zhende, Fang Rong, Zhu Mingli, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2279-2283, 2290.
- [9] 赵金昌, 李义, 赵阳升, 等. 花岗岩高温高压条件下冲击凿岩规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 904-909.  
Zhao Jinchang, Li Yi, Zhao Yangsheng, et al. Study on impact grinding law of granite under the conditions of high temperature and high pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 904-909.
- [10] 肖乃友, 张荣曾. 黑山煤制油煤浆高温高压条件下的黏度变化[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1354-1358.  
Xiao Naiyou, Zhang Rongzeng. Viscosity changes of Heishan coal-oil slurry at coal direct liquefaction condition[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1354-1358.
- [11] 颜丙峰, 史士东, 李文博. 高温高压下油煤浆黏度的变化及影响因素[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1379-1382.  
Yan Bingfeng, Shi Shidong, Li Wenbo. The changes and influence factors of viscosity of coal-oil slurry in high temperature and high pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1379-1382.
- [12] 吴诗勇, 顾菁, 李莉, 等. 高温下快速和慢速热解神府煤焦的理化性质[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4): 492-496.  
Wu Shiyong, Gu Jing, Li Li, et al. Physical and chemical properties of slow and rapid heating chars at elevated temperatures[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 492-496.
- [13] 秦本东, 罗运军, 门玉明, 等. 高温下石灰岩和砂岩膨胀特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 417-422, 473.  
Qin Bendong, Luo Yunjun, Men Yuming, et al. Experimental research on swelling properties of limestone and sandstone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 417-422, 473.
- [14] 秦本东, 谌伦建, 晁俊奇, 等. 高温石灰岩膨胀应力的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 325-330.  
Qin Bendong, Chen Lunjian, Chao Junqi, et al. Experimental research on the swelling stresses in limestone at high temperatures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(3): 325-330.
- [15] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456-460.  
Gao Chunyu, Xu Jin, He Peng, et al. Study on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456-460.