

DOI: 10.11779/CJGE2016S2054

# 孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩变形特性试验研究

胡少华<sup>1,2</sup>, 章光<sup>1</sup>, 赵顺利<sup>1</sup>, 姜秀玲<sup>1</sup>, 陈益峰<sup>2</sup>, 周创兵<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330033)

**摘要:** 为研究热-水-力耦合作用对岩石变形特性的影响, 利用岩石 THM 耦合试验系统, 对高温热处理后的岩石试样开展高孔隙水压力作用下三轴压缩试验, 研究了热处理北山花岗岩在水-力耦合作用下的应力-应变曲线、力学特性、破坏特征以及损伤演化过程。研究结果表明, 不同孔隙水压力作用下的  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线在微裂隙压密和线弹性变形阶段基本重合, 轴压增大到裂纹扩展阶段  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线开始明显偏离, 孔隙水压力越大,  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线向  $\varepsilon_1$  轴偏离得越快, 试样的峰值强度越低, 峰值轴向应变越小, 剪切破坏面倾角越陡, 损伤演化的速度越快。研究成果表明: 孔隙水压力对岩石损伤破坏的影响主要表现在加速岩石从裂纹不稳定扩展到宏观失稳的过程。

**关键词:** 北山花岗岩; 高温热处理; 孔隙水压力; 变形特性; 损伤演化

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0330-06

**作者简介:** 胡少华(1986-), 男, 讲师、博士, 主要从事裂隙岩体水-力耦合试验与数值模拟方面的教学和科研。E-mail: sh\_kxin@whu.edu.cn。

## Laboratory tests on deformation characteristics of thermally treated Beishan granite under high pore water pressure

HU Shao-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Guang<sup>1</sup>, ZHAO Shun-li<sup>1</sup>, JIANG Xiu-ling<sup>1</sup>, CHEN Yi-feng<sup>2</sup>, ZHOU Chuang-bing<sup>3</sup>

(1. School of Resource and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of

Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Civil Engineering and

Architecture, Nanchang University, Nanchang 330033, China)

**Abstract:** This study aims to examine the influence of coupled thermo-hydro-mechanical processes on the stress-strain curves, mechanical properties, failure mode and damage evolution process. Using THM coupling system, triaxial compression tests were performed on the thermally-treated Beishan granite under high pore water pressure. The  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  curves are basically in coincidence with each other under different pore water pressure in the preexisting micro-crack closure region and the linear elastic region, which gradually start to move towards the  $\varepsilon_1$  axis as the cracks were initiated and propagated. Moreover, with the increase of pore water pressure, the peak strength and the corresponding axial strain decrease, while the inclination of the shear failure surface increases and the damage process evolves more quickly. It was demonstrated that the influence of pore water pressure on the rock damage and failure is mainly manifested in accelerating the process from crack growth to macro instability.

**Key words:** Beishan granite; thermal treatment; pore water pressure; deformation characteristic; damage evolution

## 0 引言

近年来,随着西南地区水电工程建设、核废料深地质处置、地热资源开发、煤与油页岩现场气化及热能传输等深部岩石力学与工程的发展,岩体面临的地质条件越来越复杂,给岩石力学工程领域带来了许多挑战性的科学和技术问题<sup>[1]</sup>。以高放废料处置库围岩为例,其赋存于地应力高、渗透压力大的深部地质环境中,受岩体开挖、放射性同位素衰变放热、地下水运动的共同作用,围岩的应力场将受到强烈扰动,导致处置库近场围岩发生损伤、松动、脆裂、剥落以及

再压密等渐进变形破坏特征,从而引起围岩力学特性的强烈变化。因此,有必要深入开展高温和高孔隙水压力作用下岩石力学行为的影响研究,增强热-水-力耦合作用下岩石变形破坏机理的认识。

目前国内外对高温、高压及高渗透水压条件下岩石、裂隙及裂隙岩体的力学特性、损伤机理、渗透特

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579188); 中国博士后科学基金项目(2015M580672); 水资源与电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2015SGG02)

收稿日期: 2016-05-19

性、水-力耦合特性、热-力耦合特性的试验及理论研究成果极为丰富<sup>[2-6]</sup>。例如, 许江等<sup>[7]</sup>等开展了岩石水-力耦合的试验研究; 朱珍德等<sup>[8-9]</sup>分别探讨了高水压高围压、高温高围压对岩石变形特性的影响; 李鹏<sup>[10]</sup>等利用自行设计的热-水-力耦合断裂试验和扫描电镜试验, 研究了脆性岩石 THM 耦合断裂的宏微观特征; 陈益峰等<sup>[11]</sup>在热力学框架下, 采用细观力学方法, 建立热-水-力 (THM) 耦合条件下低渗饱水结晶岩的各向异性损伤模型, 进一步采用均匀化方法, 建立了各向异性损伤诱发的岩石有效渗透特性演化模型。

但现有的研究主要集中在渗流-损伤和热损伤的耦合机理和分析模型上, 有关岩石热-水-力耦合的试验成果并不多见, 而室内试验研究对于揭示岩石热-水-力耦合演化机制、建立并验证理论模型具有不可替代的作用。为此, 本文以中国高放废物处置库预选区甘肃北山花岗岩为研究对象, 通过开展不同热处理温度后北山花岗岩高孔隙水压力作用下的变形特性试验, 分析其强度与变形特性的变化规律, 同时通过热-水-力耦合作用下的损伤力学理论分析, 揭示热-水-力耦合作用下北山花岗岩宏观变形特性的演化机制。

## 1 试验方案

### 1.1 试样制备

试验所用岩样取自中国高放废料甘肃北山预选区花岗岩, 制备标准尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱状岩石试样, 加工的试样满足试件两端面不平整度位差不得大于  $0.05 \text{ mm}$ , 沿试件高度方向直径的误差不得大于  $0.3 \text{ mm}$ , 端面应垂直于试件轴线且最大偏差不得大于  $0.25^\circ$ 。同时, 采用中科院武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SY5 型智能声波检测仪, 进一步筛选出纵波波速在  $4350 \pm 0.5\%$  m/s 范围的试样 60 块 (如图 1), 从而确保试验结果的可靠与正确性。



图 1 制备的北山花岗岩试样

Fig. 1 Standard samples of Beishan granite

### 1.2 试验条件

采用程控马弗炉对北山花岗岩进行高温热处理, 本文共划分常温 ( $25^\circ\text{C}$ )、 $200^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$  5 个试验组。根据北山预选区 BS06 钻孔开展的现场地应力测试结果<sup>[12]</sup>, 埋深  $400 \sim 700 \text{ m}$  范围内的岩体

初始地应力水平为  $\sigma_v = 13.5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_H = 15 \pm 3 \text{ MPa}$  以及  $\sigma_h = 10 \pm 1.5 \text{ MPa}$ , 为反映场地地应力水平, 本文试验围压设定为  $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$ 。此外, 为分析孔隙水压力对岩石渐进破坏的影响, 本文孔隙水压力分别设定为  $P = 0.2\sigma_3$ ,  $0.4\sigma_3$ ,  $0.6\sigma_3$  和  $0.8\sigma_3$ 。

### 1.3 试验过程

高温热处理后的北山花岗岩变形特性试验在岩石 THM 耦合试验系统 (见图 2) 上完成, 试验过程如下:

(1) 将热处理饱水后的北山花岗岩试样放入特制的氟橡胶套中包裹绝油, 安装好应变测量装置和位移传感器, 其中环向应变通过环向电子应变计测量, 轴向应变通过 2 支线性位移传感器 (LVDT) 量测。

(2) 施加围压到  $10 \text{ MPa}$ , 向渗透水流进口端施加  $1 \text{ MPa}$  孔隙水压力, 同时在出口端排气, 直至进出口端孔隙水压力平衡, 之后施加孔隙水压力到预定值。

(3) 轴向应力在试样达到峰值强度之前采用压力控制方式 ( $1 \text{ MPa/min}$ ), 之后切换为油泵流量控制方式 ( $0.05 \text{ mL/min}$ ), 施加轴向应力直到试样残余强度。



图 2 三轴 THM 耦合试验系统

Fig. 2 Sketch of THM coupled test apparatus

## 2 试验结果

### 2.1 应力-应变曲线

图 3 分别给出了不同孔隙水压力作用下高温热处理北山花岗岩三轴压缩全过程应力-应变关系曲线。由图可见, 在同一热处理温度下, 不同孔隙水压力作用下的  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线在微裂隙压密和线弹性变形阶段基本重合, 这一特征在  $T = 200^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$  表现最为突出。这是因为此时水流无法渗入试样内部, 故水压仅作为外部荷载作用于试样两端, 因此对北山花岗岩  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线影响甚微。随着北山花岗岩进入裂纹扩展阶段, 试样在不同孔隙水压力作用下的  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线开始明显偏离, 孔隙水压力越大,  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  曲线向  $\varepsilon_1$  轴偏离的越快。上述结果表明, 随轴向应力萌生的裂纹导致试样两端的水流慢慢渗入其内部, 孔隙水压力一方面减小了试样的有效围压, 另一方面新萌生的裂纹在其

驱使下急剧扩展,最终导致北山花岗岩的力学特性弱化,承载力急剧下降,且孔隙水压力越大,这种弱化效应就越强烈。在不同孔隙水压力作用下, $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲线峰后都表现为急剧下降,这表明孔隙水压力对岩石变形特性的影响主要为物理劣化。此外,对比不同热处理温度作用下的 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲线可以发现,常温下峰值破坏后花岗岩的环向变形以几乎近水平趋势发展,而随着热处理温度的增加,环向变形的发展有逐渐变缓的趋势,这侧面证明了高温热处理使得北山花岗岩的破坏逐渐从脆性向延性转变。

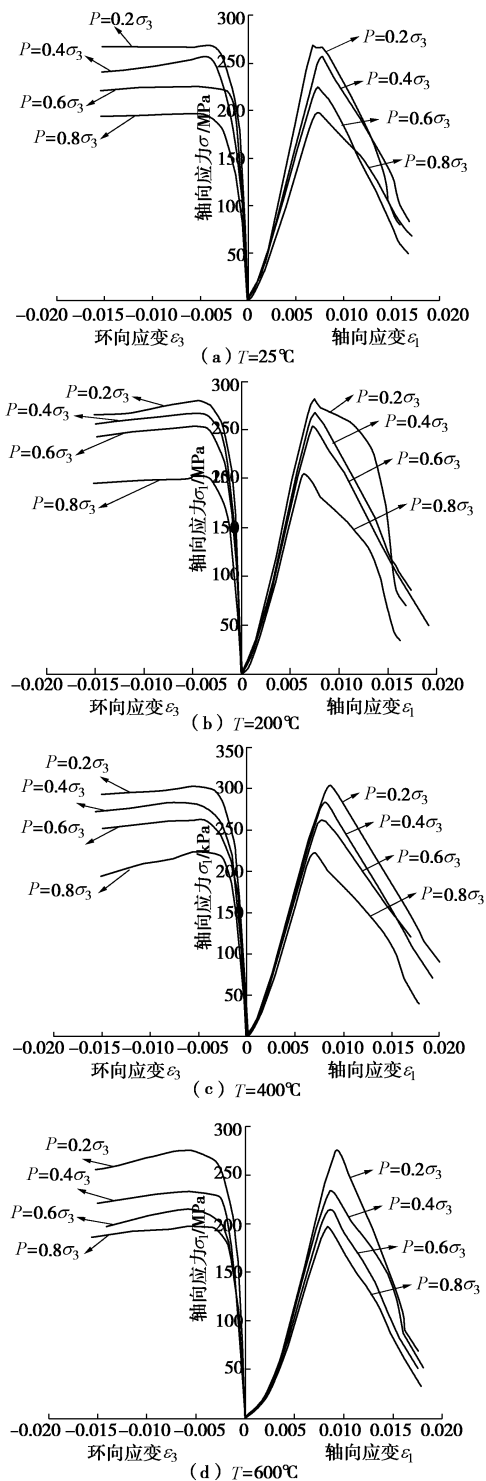


图3 不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of thermally treated Beishan granite samples under different water pressures

## 2.2 强度与变形特性

图4给出了不同孔隙水压力作用下北山花岗岩峰值强度及峰值轴向应变的变化曲线。由图4(a)可知,不同孔隙水压力作用下北山花岗岩的峰值强度随着热处理温度的升高呈现先上升后下降的趋势,其峰值强度均在 $T=400^{\circ}\text{C}$ 时达到最大。峰值强度上升的原因是在相对较低的热处理温度作用下,花岗岩内部矿物颗粒的热膨胀使花岗岩试样晶间微裂纹闭合,而新的裂纹还未产生,使得岩石变得更密实,岩石强度得到强化;而随着热处理温度的进一步上升,热膨胀导致矿物颗粒之间互相挤压,并且在热应力的作用下新的裂纹萌生、扩展,导致其峰值强度开始降低。峰值强度上升幅度在不同孔隙水压力作用下基本相当(10.5%~16.7%),但下降幅度相差较大(16.4%~33.3%),这进一步表明热-力损伤耦合作用产生的裂纹是水流进入试样内部的主要通道,此时水-力耦合效应开始逐步产生作用,导致北山花岗岩峰值强度的迅速下降。

由图4(b)可见,北山花岗岩的峰值轴向应变与热处理温度呈正相关, $400^{\circ}\text{C}$ 以前峰值轴向应变只有小幅变化(-2.8%~10.3%);但 $400^{\circ}\text{C}$ 以后,峰值轴向应变随温度升高迅速增长,在 $800^{\circ}\text{C}$ 时各孔隙水压力作用下的峰值应变分别增加了39.5%,39.2%,29.9%及42.9%,这表明高温热处理使得北山花岗岩内部发生物理、化学以及结构的变化,岩石的延性得到增强。此外,随着孔隙水压力的增大,同一热处理温度下峰值轴向应变逐渐变小,峰值轴向应变随热处理温度上升速度也逐渐变陡,这进一步表明,孔隙水压力对试样内部裂纹尖端的劈裂作用,并且随着孔隙水压力的增大,裂纹尖端的法向应力逐渐减小,这将加速裂纹扩展和贯通的过程,最终导致其更容易达到脆性破坏。

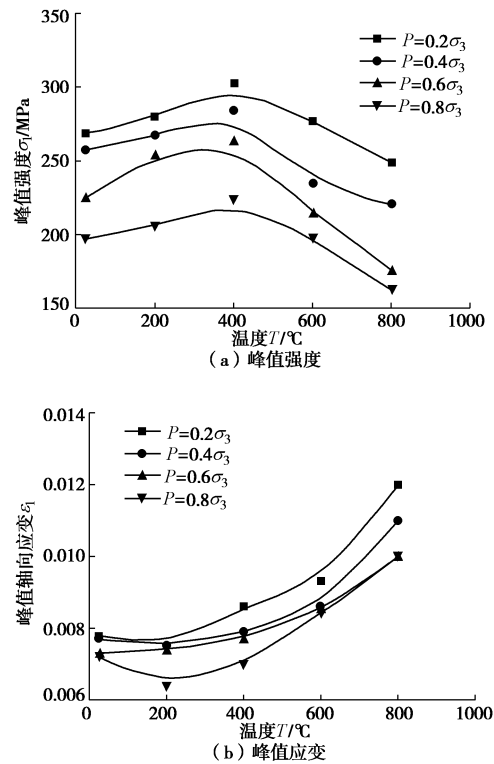


图 4 不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩强度特性  
Fig. 4 Strength properties of thermally treated Beishan granite samples under different water pressures

2.3 变形破坏特征

表 1 给出了经历不同高温热处理后在不同孔隙水压力作用下北山花岗岩试样破坏形态。由表 1 可知, 在  $P=0.2\sigma_3$  和  $T=25^\circ\text{C}$  时, 北山花岗岩表现为张拉劈裂和剪切复合型破坏形式, 随着孔隙水压力的增大和热处理温度的升高, 北山花岗岩整体表现为陡倾角的剪切破坏。随着孔隙水压力增大, 剪切破坏面倾角逐渐变陡, 这同样也说明了孔隙水压力对岩石破坏过程的影响主要表现在其加速岩石的破坏作用。此外, 尽管在破坏形态上北山花岗试样没有太大区别, 但在试验过程中, 随着热处理温度的增大, 岩石峰值破坏时的脆响声逐渐变弱, 这也说明北山花岗岩的脆性在减弱。

3 北山花岗岩损伤特性分析

3.1 热-水-力耦合作用下岩石损伤演化方程

热作用导致岩石宏观性质劣化的过程可由热损伤变量  $D_t$  表示, 其随温度的演化方程为

$$D_t = 1 - \frac{E_t}{E_0}, \quad (1)$$

式中,  $E_0$ ,  $E_t$  分别为常温及热处理后岩石的弹性模量。

假定岩石的微元强度服从 Weibull 分布, 根据岩石应力 - 应变的几何条件, 水-力耦合作用下岩石的损伤  $D_m$  服从如下的演化方程:

$$D_m = \int_0^F \varphi(F) dF = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right], \quad (2)$$

式中,  $m$  和  $F_0$  均为 Weibull 分布的参数,  $F$  表示岩石微元强度的分布。

表 1 不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩破坏形态

Table 1 Failure modes of thermally treated Beishan granite

温度/°C	$P=0.2\sigma_3$	$P=0.4\sigma_3$	$P=0.6\sigma_3$	$P=0.8\sigma_3$
25				
200				
400				
600				
800				

基于张全胜等<sup>[13]</sup>提出的广义应变等价原理, 可以得到热-水-力耦合作用下岩石的损伤演化方程:

$$D = 1 - \frac{E_t}{E_0} \exp \left[ - \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right]. \quad (3)$$

进一步假定岩石微元强度  $F$  可用 Mohr-Coulomb 强度准则进行描述, 可得

$$F = \frac{[\sigma_1 + (\sigma_1 + 2\sigma'_3) \sin \phi][E_T(\epsilon_1 - \Delta u) + (1 - 2\nu)\sigma'_3]}{\sigma_1 + (1 - 2\nu)\sigma'_3}, \quad (4)$$

式中,  $\Delta u$  为裂隙压缩闭合变形, 可根据 Bandis 模型确定,  $\sigma'_3 = \sigma_3 - P$  分别为试样的有效围压;  $\phi$  为岩石内摩擦角,  $\nu$  为岩石泊松比。

3.2 热-水-力耦合作用下北山花岗岩损伤演化

根据式 (3), 计算出不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩三轴压缩过程总损伤 (如图5所示)。由图可知, 北山花岗岩总损伤演化曲线在三轴压缩过程初始阶段基本保持不变, 随着轴向荷载的增加, 损伤曲线以陡倾角上升, 在达到峰值强度前开始变缓, 且最终总损伤趋近于1.0。对比同一温度下不同孔隙水压力作用下的损伤演化曲线, 可以发现, 损伤演化曲线初始阶段基本重合, 随着孔隙水压力增大, 损伤曲线

上升速度越快;对比不同温度下的损伤演化曲线上升过程可知, $T=400^{\circ}\text{C}$ 时北山花岗岩损伤演化速度最快,以近 $90^{\circ}$ 的倾角上升, $200^{\circ}\text{C}$ , $25^{\circ}\text{C}$ , $600^{\circ}\text{C}$ 和 $800^{\circ}\text{C}$ 上升速度依次递减。产生上述结果的原因是一方面高温热处理使得热损伤花岗岩的强度先上升后下降( $T=400^{\circ}\text{C}$ 时达到最大),导致其脆性先增加后下降;另一方面试样产生损伤后,水流在两端孔隙水压力作用下进入试样内部,在三轴加载过程中产生强烈的水-力耦合作用,导致裂纹萌生、扩展和贯通的速度加剧。

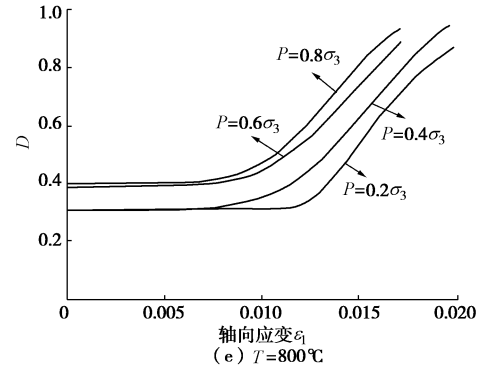
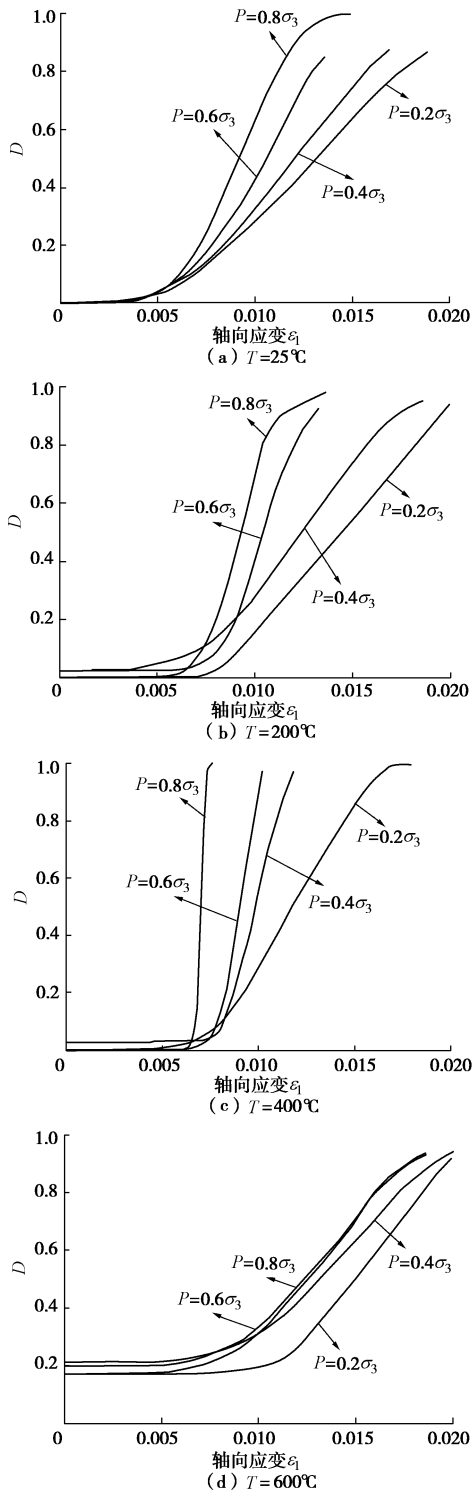


图5 不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩损伤演化过程

Fig. 5 Damage evolution of thermally treated Beishan granite samples under different water pressures

#### 4 结论与建议

本文通过开展不同孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩三轴压缩试验,结合损伤力学理论分析,得出的主要结论如下:

(1) 不同孔隙水压力作用下的 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲线在微裂隙压密和线弹性变形阶段基本重合,轴压增大到裂纹扩展阶段 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲线开始明显偏离,孔隙水压力越大, $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 曲线向 $\varepsilon_1$ 轴偏离得越快。

(2) 北山花岗岩的峰值强度随着热处理温度的升高呈现先上升后下降的趋势,峰值轴向应变随温度升高迅速增长,不同孔隙水压力作用下峰值强度上升幅度为 $10.5\% \sim 16.7\%$ ,下降幅度在 $16.4\% \sim 33.3\%$ 之间。

(3) 随着孔隙水压力增大,试样的剪切破坏面倾角逐渐变陡,损伤演化的速度加快,孔隙水压力对于岩石破坏过程的影响主要表现在其加速岩石从裂纹不稳定扩展到宏观失稳的过程。

#### 参考文献:

- [1] 朱维申, 赵成龙, 周浩, 等. 当前岩石力学研究中若干关键问题的思考与认识[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 2 - 10. (ZHU Wei-shen, ZHAO Cheng-long, ZHOU Hao, et al. Some consideration and recognition on several key issues of present study of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 2 - 10. (in Chinese))
- [2] 穆康, 俞缙, 李宏, 等. 水-力耦合条件下砂岩声发射和能量耗散的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1496 - 1504. (MU Kang, YU Jin, LI Hong, et al. Acoustic emission of sandstone with hydro-mechanical coupling and PFC-based modeling of energy dissipation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1496 - 1504. (in Chinese))



- [3] 李佳伟, 徐进, 王璐, 等. 砂板岩岩体力学特性的水岩耦合试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 599 - 604. (LI Jia-wei, XU Jin, WANG Lu, et al. Water-rock coupling tests on mechanical properties of sandy slate rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **35**(3): 599 - 604. (in Chinese))
- [4] TSANG C F, BARNICHON J D, BIRKHOLZER J, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical processes in the near field of a high-level radioactive waste repository in clay formations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **49**: 31 - 44.
- [5] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Modeling of damage, permeability changes and pressure responses during excavation of the TSX tunnel in granitic rock at URL, Canada[J]. Environmental Geology, 2009, **57**(6): 1263 - 1274.
- [6] SOULEY M, HOMAND F, PEPA S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, **38**(2): 297 - 310.
- [7] 许江, 杨红伟, 彭守建, 等. 孔隙水压力-围压作用下砂岩力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(8): 1618 - 1623. (XU Jiang, YANG Hong-wei, PENG Shou-jian, et al. Experimental study of mechanical property of sandstone under pore water pressure and confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **29**(8): 1618 - 1623. (in Chinese))
- [8] 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高水压条件下大理岩断口微观机理分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(1): 44 - 51. (ZHU Zhen-de, ZHANG Yong, XU Wei-ya, et al. Experimental studies and microcosmic mechanics analysis on marble rupture under high confining pressure and high hydraulic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(1): 44 - 51. (in Chinese))
- [9] 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. (ZHU Zhen-de, FANG Rong, ZHU Ming-li, et al. Study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(11): 2279 - 2283. (in Chinese))
- [10] 李鹏, 饶秋华, 马雯波, 等. 脆性岩石热-水-力耦合断裂的断口分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1179 - 1186. (LI Peng, RAO Qiu-hua, MA Wen-bo, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical fractographic analysis of brittle rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1179 - 1186. (in Chinese))
- [11] 陈益峰, 胡冉, 周创兵, 等. 热-水-力耦合作用下结晶岩渗透特性演化模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2185 - 2195. (A permeability evolution model for crystalline rocks subjected to coupled thermo-hydro-mechanical loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2185 - 2195. (in Chinese))
- [12] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. In-situ stress measurements and regional stress field assessment of the Beishan area, China[J]. Engineering Geology, 2013, **163**: 26 - 40.
- [13] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(1): 30 - 34. (ZHANG Quan-sheng, YANG Geng-she, REN Jian-xi, et al. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(1): 30 - 34. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)