

高温作用下花岗岩的脆延性转化温度点

徐小丽^{1,2}, 高峰², 张志镇²

(1. 南通大学建筑工程学院, 江苏 南通 226019;

2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要:为了探讨在高温作用下花岗岩的脆延性转化温度点,进行了高温力学试验和扫描电镜试验,分析了温度对花岗岩屈服应变、破坏应变、延性系数和应力-应变关系的影响。试验结果表明:在实时高温作用下及高温作用冷却后花岗岩的脆延性转化温度点均在800℃左右,此时花岗岩晶体中出现穿晶裂纹、解理台阶、滑移带和浅表初窝等共存特征,岩样呈现延性破坏特征;随着温度的升高,花岗岩破坏方式由突发式的脆性破裂逐渐向渐进式的半脆性剪切破坏转化。

关键词:花岗岩;屈服应变;破坏应变;延性系数;脆延性转换

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2014)01-0043-06

Temperature of brittle-ductile transition of granite under high temperature//XU Xiaoli^{1,2}, GAO Feng², ZHANG Zhizhen² (1. Nantong University of Engineering and Architecture, Nantong 226019; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to probe the temperature of brittle-ductile transition of granite under high temperature, high-temperature mechanical experiments and SEM experiments were conducted. The influence of temperature on the yield strain, the failure strain, the ductility factor, and the stress-strain curves of granite was also analyzed. The test results show that the temperature of brittle-ductile transition of granite under high temperature or after the high temperature cools is about 800℃. In the meantime, there occurs some coexistence of transcrystalline cracks, the cleavage step, the slip band, and superficial dimple in granite crystal and the granite presents characteristics of ductile failure. With the rise of temperature, the failure form of granite changes from abrupt brittle fractures to gradual semi-brittle shear fractures.

Key words: granite; yield strain; failure strain; ductility factor; brittle-ductile transition

处理高温环境中或高温作用下的岩石工程问题是岩石力学的新课题。高放射性核废料的地层深埋处置、地热资源开发等工程地质环境均可能产生一定的高温,这就需要考虑岩石在高温作用下或高温作用冷却后的物理力学性质^[1-9]。20世纪70年代以来,人们研究了温度对岩石材料力学性质的影响,取得了丰硕成果。Brede^[10]研究了温度对材料韧脆转变的影响,发现韧脆转变温度随着位移加载率的升高而升高;Alshayea等^[11]利用声发射来考察加热时岩石的损伤过程,测量了Westerly花岗岩在20~50℃时的断裂韧性;周永胜等^[12]对不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳形式进行了试验研究,结果表明当温度小于300℃时花岗岩为脆性破裂,大于800℃时为塑性变形,在300~600℃时为半

脆性破裂和碎裂流动,在600~800℃时为半脆性流动;桑祖南等^[13]进行了辉长岩脆塑性转化及其影响因素的高温高压试验研究,认为辉长岩的脆塑性转化温度为700~900℃,主要影响因素为温度、围压和应变速率;左建平等^[14]通过岛津全数字液压高温疲劳试验系统,实时观察不同温度下北山花岗岩的热开裂过程,获得北山花岗岩的热开裂临界温度为68~88℃。

由于花岗岩具有致密、强度高、渗透性小等特点,其热破裂温度点以及脆延性转化温度点较高,但国内外研究的加载温度大多在800℃以内,不能得到有效的脆延性转化温度点,影响了花岗岩脆延性转换机制的研究^[15-17]。本文对实时高温作用下和高温作用冷却后的花岗岩试件进行单轴受压破坏试

基金项目:国家自然科学基金(11202108);南通大学前期预研科研项目(11ZY006);中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDUK1204)

作者简介:徐小丽(1981—),女,江苏如皋人,副教授,博士,主要从事岩石热力学、岩石热损伤等研究。E-mail:xuxiaoli2002_ren@163.com

验,并利用扫描电镜技术(SEM)对不同温度作用下花岗岩断口的微观破坏特性进行分析,研究其微观破坏力学机理,分别运用力学理论和微观理论分析花岗岩在高温作用力学性能劣化及发生脆延性转化的重要原因,为今后正确分析岩石破坏和建立力学模型提供依据。

1 试验概况

1.1 高温力学试验

试验所用的花岗岩岩样为圆柱体,直径 25 mm,高 50 mm,岩样平均单轴抗压强度为 191.9 MPa。高温力学试验主要分为实时高温作用下以及高温作用冷却后两种情况下岩石的单轴压缩试验。

实时高温作用岩石单轴压缩试验采用中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室的 MTS810 电液伺服试验系统以及与之配套的高温炉 MTS652.02。试验以 3 块岩样为 1 组,共有 12 组,以 2℃/s 的升温速率分别升温至 25℃、75℃、100℃、125℃、300℃、400℃、550℃、600℃、800℃ 和 850℃,每组岩样加热后保持恒温 20 min,确保岩样内外受热均匀。在均匀温度场中采用电液伺服位移控制方式对岩样实施加载,直至岩样破坏为止,位移加载速率为 0.0015 mm/s。加载过程中利用 TeststarII 控制程序按预定的要求完成试验过程,同时记录相关物理量的值,如轴向载荷、轴向位移、轴向应力及应变等,试验系统如图 1 所示。

高温作用冷却后岩石单轴压缩试验采用 MTS815.02 电液伺服试验系统。试验以 3 块岩样为 1 组,共有 15 组。由 25℃ 分别升温至 50℃、100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃、900℃、1000℃、1100℃ 和 1200℃,共 13 个温度点,保持恒温 20 min 后自然冷却至常温状态。将降温后的岩样进行单轴压缩试验,试验过程中测量岩石的荷载、变形及时间等参数,试验系统如图 2 所示。



图1 MTS810 电液
伺服试验系统



图2 MTS815.02 电液
伺服试验系统

1.2 扫描电镜试验

采用 S250MK III 扫描电子显微镜进行扫描电镜

试验,其技术指标为:分辨率 60Å,放大倍数 20 万倍,加速电压 40 kV。主要附件有 AN10000 能谱仪和 WDX-2A 波谱仪。试验主要对岩样断口进行微观结构形态和脆延性特征进行观测,分别对 25℃、100℃、200℃、300℃、500℃、800℃、1000℃ 和 1200℃ 共 8 个温度点的岩样断口进行扫描试验,每个温度点各用 1 块试样,共 8 块试样。

2 试验结果与分析

2.1 实时高温作用下试验结果与分析

温度是影响岩石材料脆延性断裂的一个十分重要的因素,当温度低于脆延性转化温度点时,岩石发生脆性断裂,否则发生延性断裂。花岗岩属于致密岩样,张连英^[18]认为当轴向应力达到峰值应力的 80% 时,岩样开始屈服,此时的应变为屈服应变。将岩石破坏应变与屈服时应变的比值定义为岩石的延性系数,对于完全脆性材料,延性系数可达 1.25。试验得到的实时高温作用下花岗岩的屈服应变与破坏应变随温度的变化规律分别如图 3 和图 4 所示。

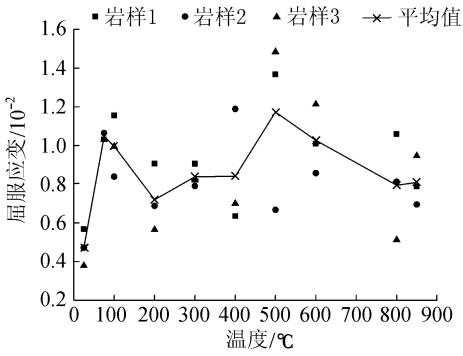


图3 实时高温作用下屈服应变随温度的变化

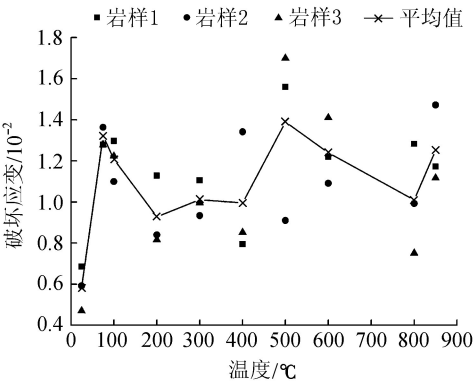


图4 实时高温作用下破坏应变随温度的变化

由图 3 可知,各个温度点岩样的屈服应变离散性较大,25℃ 时岩样的屈服应变平均值为 0.473×10^{-2} ,100℃ 时为 0.996×10^{-2} ,200℃ 为 0.720×10^{-2} ,此后随着温度的升高,屈服应变平均值呈上升趋势,500℃ 时达到最大值 1.173×10^{-2} ,是 25℃ 时的 2.48 倍,随后又有所下降,850℃ 时为 0.810×10^{-2} 。由

图4可以看出,花岗岩的破坏应变与屈服应变的变化规律相似,整个升温过程中岩样屈服应变和破坏应变随温度变化的规律不明显,所以由屈服应变和破坏应变来判断岩样的脆延性转化不是很合理。

实时高温作用下花岗岩延性系数随温度的变化如图5所示,轴向应力-应变关系曲线如图6所示。由图5可以看出,实时高温作用下,在800℃之前花岗岩的延性系数无明显变化,其平均值为1.25左右,体现了脆性破坏特性;温度升高到850℃时,延性系数迅速增大到1.547,是25℃时的1.25倍,体现了延性破坏特性,延性系数与温度的拟合曲线呈指数增长关系。由图6可以看出,实时高温作用下花岗岩不同温度点的应力-应变关系曲线极其相似,塑性变形过程相对较短,当应力达到峰值时,岩样迅速破裂,呈脆性破坏;温度升高,直线段的斜率降低,表明弹性模量随着温度的升高而降低;温度超过550℃以后,应力峰值明显减小,轴向应变呈现增大的趋势,主要是因为岩样的脆性减弱而延性增强,但仍属脆性破断。从热力学的角度分析,当温度升高时,岩石晶体质点的热运动增强,质点间的结合力相对减弱,质点容易位移,故延性增强而脆性减弱。由图5和图6可以推断花岗岩脆延性转化温度点大约在800℃。

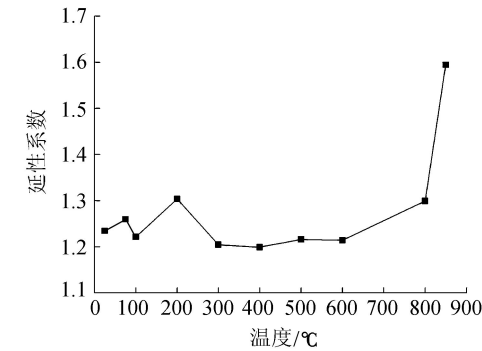


图5 实时高温作用下延性系数随温度的变化

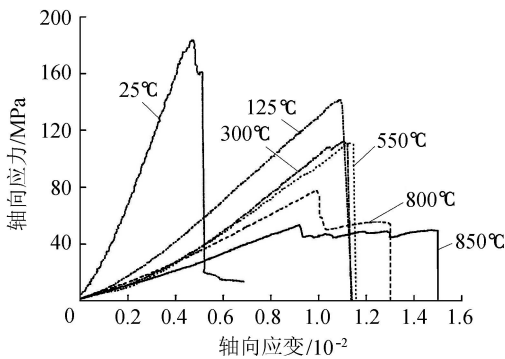


图6 实时高温作用下轴向应力-应变关系曲线

2.2 高温作用冷却后试验结果与分析

试验得到的高温作用冷却后花岗岩屈服应变与破坏应变随温度的变化规律分别如图7和图8所示。

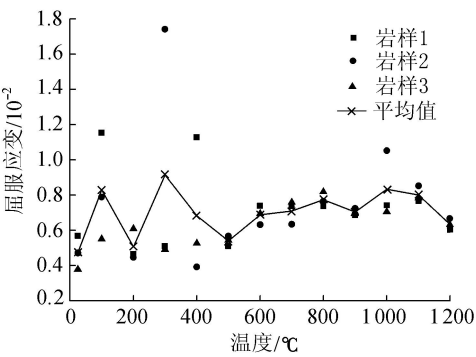


图7 高温作用冷却后屈服应变随温度的变化

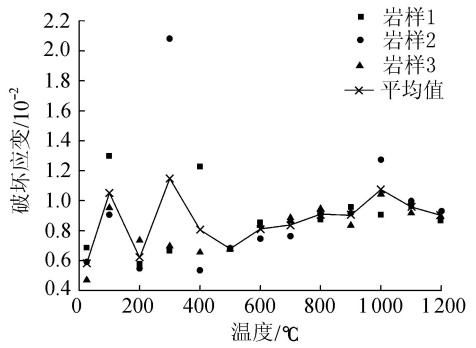


图8 高温作用冷却后破坏应变随温度的变化

由图7可知,高温作用冷却后,花岗岩的屈服应变平均值在25~1000℃之间总体呈现增大趋势,在1000℃时达到 0.833×10^{-2} ,是25℃时的1.76倍。随着温度的不断升高,屈服应变有所下降,在1200℃时减小至 0.634×10^{-2} ,是25℃时的1.34倍。由图8可以看出,花岗岩破坏应变与屈服应变的变化规律相似。

高温作用冷却后花岗岩延性系数随温度的变化规律如图9所示,轴向应力-应变关系曲线如图10所示。由图9可以看出,高温作用冷却后,随着温度的不断升高,花岗岩延性系数总体呈现先减小后增大的趋势,拟合曲线呈多项式关系。在800℃时,延性系数为最小值1.177,是25℃时的95.38%;在1200℃时达到最大值1.424,是25℃时的1.15倍。由图10可以看出,在常温下花岗岩从压密阶段过渡到线弹性阶段的应变很小,弱化阶段不明显;随着温度的升高,压密阶段所占的应变逐渐增大,线弹性阶段所占的应变区间逐渐减小,温度达到800℃以后,

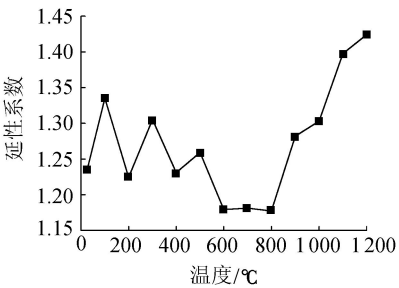


图9 高温作用冷却后延性系数随温度的变化

压密阶段的应变占了应力峰值前应变的大部分;弱化阶段也具有了明显的应力-应变平滑过渡段。在800℃之前,岩样破坏形式表现为强烈的脆性破坏特征,超过800℃,应力-应变曲线趋于平缓,破坏形式具有塑性剪切破坏的特点。由此可以推断,花岗岩脆延性转化温度点在800℃左右,这与实时高温作用下的结论相吻合。

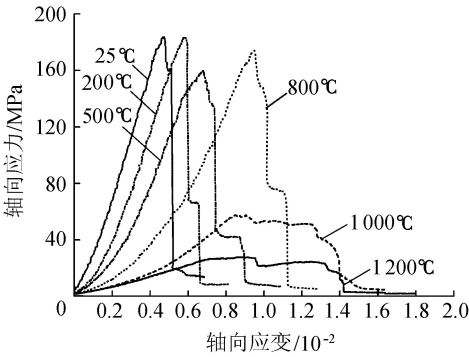


图 10 高温作用冷却后轴向应力-应变关系曲线

3 花岗岩破坏特性分析

花岗岩属于典型的脆性岩石,在常温和低温下显示典型的脆性破坏,当温度超过800℃时,破坏形式开始由脆性向延性转化,不同温度作用下花岗岩断口的微观破坏形态如图11所示。

岩石是由多种矿物组成的天然材料,这些成分基本上由不同尺寸的晶体颗粒构成,在力学和热学性质等方面,各种矿物一般都表现为各向异性,因此对岩样的加热往往会在其内部产生一个三维拉应力状态,加热产生的拉应力极易在岩石内部形成沿晶和穿晶断裂,由本次扫描电镜的试验观察结果可知,当热处理温度低于200℃时,沿晶断裂是主要的热开裂形式,随着热处理温度的继续升高,穿晶裂纹明显增多,此外,微空洞和较大的沿晶裂纹可能会成为

新的热开裂损伤源。不同温度作用下花岗岩断口的宏观与微观特破坏性对比如表1所示。

表 1 不同温度作用下花岗岩断口的宏观与微观破坏特性对比

温度/ ℃	宏观破坏特性		微观破坏特性		破坏机理
	破坏形态	破坏方式	破坏形态	断裂形式	
25	剪切滑移破坏	突发失稳	冰糖状、河流状	沿晶断裂、解理断裂	张拉破坏
100	剪切滑移破坏	突发失稳	河流状	解理断裂	张拉破坏
200	轴向劈裂	突发失稳	解理台阶状	解理断裂	张拉破坏
300	轴向劈裂	突发失稳	河流状、解理台阶状	解理断裂	张拉破坏
500	轴向劈裂,破坏面呈沙粒状	突发失稳	解理台阶状、晶粒破碎	解理断裂、穿晶断裂	张拉破坏
800	锥裂,伴随轴向劈裂	准突发失稳	穿晶裂纹、剪切滑移带	解理断裂、剪切断裂	张拉破坏、剪切破坏
1000	锥裂	渐进失稳	粗糙晶体表面、韧窝及热破裂	剪切断裂	剪切破坏
1200	锥裂,破坏面呈粉状	渐进失稳	韧窝、热熔融、微孔穴	剪切断裂	剪切破坏

由表1和图11可知,当温度低于800℃时,花岗岩的断裂为张拉脆性断裂,属于一种低能量吸收断裂形式,这种断裂的裂纹萌生临界应力通常大于或等于裂纹扩展的临界应力,因此一般由1个主裂纹高速扩展,有时还诱导产生二次裂纹,最终断裂。由于沿解理而开裂所消耗的应变能最小,故断裂形式多表现为穿晶解理断裂和沿晶脆性断裂,宏观破坏方式为突发失稳。

当温度达到800℃时,断裂面表现为既有穿晶裂纹又存在剪切滑移带的混合断裂特征,破坏机理为张拉破坏与剪切破坏共存,破坏方式由脆性向塑性转化,矿物晶体的晶型发生转变,宏观破坏方式表现为准突发失稳,这表明花岗岩在800℃后岩样强

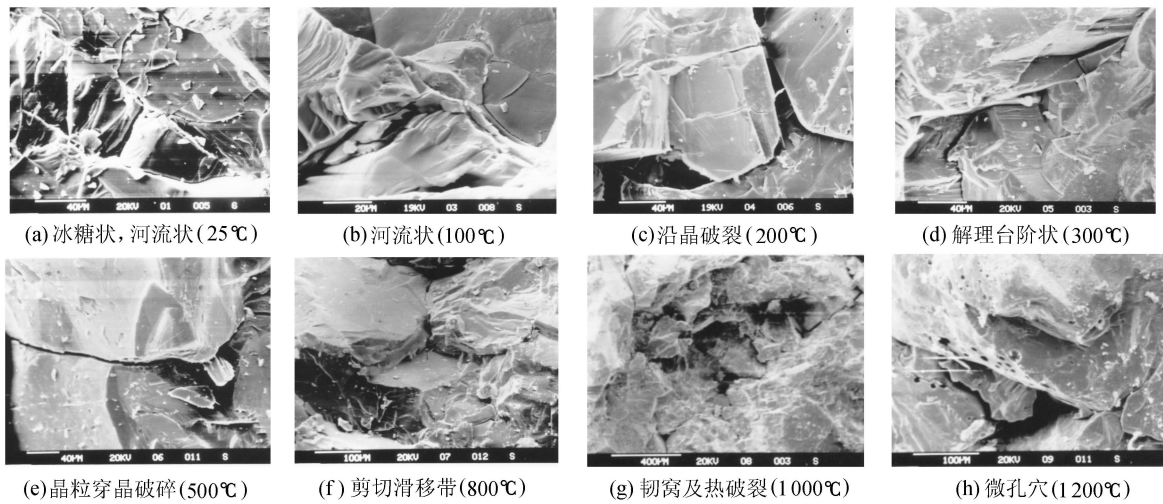


图 11 不同温度作用下花岗岩断口的微观破坏形态

度突然降低,呈现出明显的塑性行为,由此可以推断花岗岩脆延性转化温度在 800℃ 左右,这与上述的结论相一致。

当温度继续升高,岩样断裂前发生明显的塑性变形,达到 1 200℃ 时断口出现许多韧窝和微孔穴,并出现热熔融,破坏机理为剪切破坏,属于一种高能量断裂,通常其裂纹扩展的临界应力大于裂纹萌生的临界应力,裂纹扩展时仍有一定程度的塑性变形,宏观破坏方式为渐进失稳。由扫描电镜观察发现,花岗岩中的有机物在加热过程中以气态和液态形式析出,存在大量的气孔。显然,有机物的析出必然在岩石中形成或存在析出通道,如果加热过程中岩石的矿物晶体破裂形成微裂隙,这些微裂隙可能就是有机物析出的通道,同时,有机物的析出又可能加剧微裂隙的扩展和岩石的破坏,这也导致花岗岩在 1 200℃ 时承载能力急剧下降。

4 结 论

a. 实时高温作用下,随着温度的不断升高,花岗岩的屈服应变先增大、后减小,然后再增大、再减小,延性系数与温度的拟合曲线呈指数增长关系,花岗岩脆延性化换温度点在 800℃ 左右。

b. 高温作用冷却后,随着温度的不断升高,花岗岩延性系数总体呈现先减小后增大趋势,其与温度的拟合曲线呈多项式关系,花岗岩脆延性转换温度点在 800℃ 左右,这与实时高温作用下的结论相吻合。

c. 当温度低于 800℃ 时,花岗岩断裂面平整,显示冰糖状、河流状花样,具有明显的沿晶、穿晶裂纹,是典型的脆性破坏,断裂机理为张拉破坏;当温度高于 800℃ 时,断裂面表现为既有穿晶裂纹又存在剪切滑移带的混合断裂特征,破坏方式由脆性向延性转化,由此可以推断花岗岩脆延性转化温度在 800℃ 左右。

参考文献:

[1] HEUZE F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks: a review [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20 (1): 3-10.

[2] 王绳祖. 高温高压岩石力学: 历史、现状、展望 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10 (4): 1-31. (WANG Shengzu. High-temperature/high-pressure rock mechanics: history, state-of-art and prospect [J]. Progress in Geophysics, 1995, 10 (4): 1-31. (in Chinese))

[3] 井兰如, 冯夏庭. 放射性废物地质处置中主要岩石力学问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (4): 833-841.

(JING Lanru, FENG Xiating. Main rock mechanics issues in geological disposal of radioactive wastes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (4): 833-841. (in Chinese))

[4] 张渊, 曲方, 赵阳升. 岩石热破裂的声发射现象 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (1): 73-75. (ZHANG Yuan, QU Fang, ZHAO Yangsheng. Acoustic emission phenomena of thermal cracking of sandstone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (1): 73-75. (in Chinese))

[5] 刘泉声, 许锡昌, 山口勉, 等. 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (5): 715-719. (LIU Quansheng, XU Xichang, YAMAGUCHI T, et al. Testing study on mechanical properties of the three gorges granite concerning temperature and time [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (5): 715-719. (in Chinese))

[6] 左建平, 谢和平, 周宏伟. 温度压力耦合作用下的岩石屈服破坏研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16): 2917-2921. (ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei. Study on failure behavior of rock under coupling effects of temperature and confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16): 2917-2921. (in Chinese))

[7] 夏小和, 王颖轶, 黄醒春, 等. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的试验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38 (6): 996-1002. (XIA Xiaohe, WANG Yingyi, HUANG Xingchun, et al. Experimental study on high temperature effect ' s influence on the strength and deformation properties of marble [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38 (6): 996-1002. (in Chinese))

[8] 闫治国, 朱合华, 邓涛, 等. 三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (11): 2010-2014. (YAN Zhiguo, ZHU Hehua, DENG Tao, et al. Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia after high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (11): 2010-2014. (in Chinese))

[9] 左建平, 谢和平, 周宏伟, 等. 不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (4): 1150-1155. (ZUO Jianping, XIE Heping, ZHOU Hongwei, et al. Experimental research on thermal cracking of sandstone under different temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (4): 1150-1155. (in Chinese))

[10] BREDE M. Brittle-to-ductile transition in silicon [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41 (1): 211-228.

[11] ALSHAYEA N A, KHAN K, ABDULJAUWARD S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining

- Sciences,2000,37(4): 629-643.
- [12] 周永胜,蒋海昆,何昌荣. 不同温压条件下居庸关花岗岩脆塑性转化与失稳型式的实验研究[J]. 中国地震, 2002, 18 (4): 389-400. (ZHOU Yongsheng, JIANG Haikun, HE Changrong. Experiments of brittle-plastic transition, modes of instability of juyongguan granite at different T-P condition [J]. Earthquake Research in China,2002,18(4):389-400. (in Chinese))
- [13] 桑祖南,周永胜,何昌容,等. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究[J]. 地质力学学报, 2001,7(2):130-137. (SANG Zunan,ZHOU Yongsheng, HE Changrong,et al. An experimental study on the brittle-plastic transition in gabbro[J]. Journal of Geomechanics, 2001,7(2):130-137. (in Chinese))
- [14] 左建平,周宏伟,方园,等. 甘肃北山地区深部花岗岩的热开裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30 (6):1107-1115. (ZUO Jianping,ZHOU Hongwei,FANG Yuan,et al. Experimental research on thermal cracking of deep granite in beishan region, Gansu Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(6):1107-1115. (in Chinese))
- [15] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2008.
- [16] 徐小丽,高峰,高亚楠,等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. 中国矿业大学学报,2008, 37 (3): 402-406. (XU Xiaoli,GAO Feng,GAO Yanan,et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of granite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37 (3): 402-406. (in Chinese))
- [17] 高峰,徐小丽,杨效军,等. 岩石热黏弹塑性模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):74-80. (GAO Feng, XU Xiaoli, YANG Xiaojun, et al. Research on thermo-visco-elastoplastic model of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (1):74-80. (in Chinese))
- [18] 张连英. 高温作用下泥岩的损伤演化及破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2012.
- (收稿日期:2013-05-06 编辑:周红梅)
-
- (上接第 19 页)
- [36] TORFI F,FARAHANI R Z,REZAPOUR S. Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives[J]. Applied Soft Computing,2010,10(2):520-528.
- [37] 陈艳萍,吴凤平,吴丹. 基于模糊优选和 TOPSIS 法的流域初始水权分配模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2009,37(4):467-471. (CHEN Yanping, WU Fengping, WU Dan. Initial water rights allocation model for basins based on fuzzy optimization and TOPSIS methods [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37 (4):467-471. (in Chinese))
- [38] 傅湘,纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价:主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(2): 168-173. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive evaluation of the regional water resources carrying capacity-application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999,8(2):168-173. (in Chinese))
- [39] 王俭,孙铁珩,李培军,等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志,2007, 26(1):139-144. (WANG Jian,SUN Tieheng,LI Peijun, et al. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on artificial neural network and its application in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology,2007,26(1):139-144. (in Chinese))
- [40] 董哲仁. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 2007,9(1):1-7. (DONG Zheren. Exploring eco-hydraulic engineering[J]. Engineering Science, 2007, 9 (1): 1-7. (in Chinese))
- [41] BROOKES A,SHIELDS F D. River channel restoration: guiding principles for sustainable projects [M]. Chichester:Wiley,1996.
- [42] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报,2003, 34(1):1-6. (DONG Zheren. Theoretical framework for eco-hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(1):1-6. (in Chinese))
- [43] 董哲仁,孙东亚. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2007.
- [44] 孙宗凤. 生态水利的理论与实践[J]. 水利水电技术, 2003,34(4):53-55. (SUN Zongfeng. The theory and practice of ecological water conservancy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2003,34(4):53-55. (in Chinese))
- [45] 董哲仁,孙东亚,王俊娜,等. 河流生态学相关交叉学科进展[J]. 水利水电技术,2009,40(8):36-43. (DONG Zheren,SUN Dongya, WANG Junna, et al. Progresses of interdisciplines related to river ecology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(8):36-43. (in Chinese))
- [46] 陈求稳,欧阳志云. 生态水力学耦合模型及其应用[J]. 水利学报,2005,36(11):1273-1279. (CHEN Qiuwen, OUYANG Zhiyun. Integrated ecohydraulics model and the application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11):1273-1279. (in Chinese))
- (收稿日期:2013-02-28 编辑:周红梅)