

三种岩石高温后纵波波速特性的试验研究

闫治国, 朱合华, 邓涛, 曾令军, 姚坚, 强健

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 对经受不同高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的波动特性进行了研究, 分析比较了三种岩石纵波波速、密度、弹性模量及峰值应力随经历温度的变化规律, 并研究了纵波波速与密度, 纵波波速与弹性模量, 纵波波速与峰值应力的关系。结果表明, 经历高温后三种岩石的纵波波速、密度、弹性模量及峰值应力均有不同程度的降低, 且随着经历温度的升高, 降低的幅度增大。此外, 纵波波速降低的幅度均大于密度降低的幅度; 而纵波波速与弹性模量、峰值应力的关系则依赖于不同的岩石而表现出不同的规律。

关键词: 岩石; 高温; 纵波波速; 密度; 弹性模量; 峰值应力

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-2010-05

作者简介: 闫治国(1977-), 男, 博士研究生, 现主要从事隧道与地下工程方面的研究。

Experimental study on longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia after high temperature

YAN Zhi-guo, ZHU He-hua, DENG Tao, ZENG Ling-jun, YAO Jian, QIANG Jian

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Experimental study was performed on the longitudinal wave characteristics of tuff, granite and breccia under different high temperatures. The longitudinal wave velocity, density, Young's modulus and peak stress of rocks were analyzed. Furthermore, relationship between longitudinal wave velocity and density, Young's modulus and peak stress were studied. It was shown that the velocity of longitudinal wave, density, Yong's modulus and peak stress decreases with temperature. The longitudinal wave velocity decreased more than density. However, the relationship among longitudinal wave velocity, Young's modulus and peak stress presented different variation according to the type of rock.

Key words: rock; high temperature; longitudinal wave velocity; density; Young's modulus; peak stress

0 引言

近年来, 随着地热发电、核废料地下贮存及深部地下空间的开发, 人们需要明确不同岩石在高温下及经历不同高温后的物理力学性能的变化, 为分析岩石工程的可靠性提供依据。此外, 对于遭受突发性高温(如火灾)影响的岩石工程, 也需要研究其经历高温后力学性能的变化, 以便为工程的安全性评估及灾后的修复、加固提供依据。

国内外对于岩石在高温高压下的物理力学性能诸如强度特性、变形特性、热特性、渗透特性等进行了广泛的研究^[1-6], 并取得了一系列的成果。而对于高温后岩石的物理力学性能的研究较少, 且以花岗岩、大理岩研究较多^[7-13]。本文通过对熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩的高温试验, 比较分析了经历不同高温后三种岩石的波动特性, 并比较了高温对三种岩石波动特性、密度、弹性模量及峰值强度的影响程度和相互关系。

1 试验概述

1.1 试样

试样均取自云南某隧道, 在实验室加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体试件, 试件上下表面的平行度在 0.05 mm 以内, 表面的平面度在 0.02 mm 以内。

试验包括三类岩石, 熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩。每组试验的试件个数不少于 3 个。

1.2 试验设备

试验加温设备采用上海意丰电炉厂生产的 SX30/13Q-YC 箱式电阻炉。该炉以硅碳棒为加热元件, 保温材料采用高性能纤维材料。与 KSY-16C 智能程序温度控制器配合使用, 可以实现对炉膛温度的自动测量、程序设定、指示及精确控制。炉内最高温度

基金项目: 上海市重大科技攻关项目 (04DZ12010)

收稿日期: 2005-09-13

可达 1300 °C, 炉温均匀度小于 10 °C, 最大升温速率为 60 °C/min (可调)。岩石纵波波速测试采用 U-sonic 超声波测试仪, 岩石单轴试验采用同济大学隧道及地下工程研究所 NYL-2000D 压力试验机。

1.3 试验方法

对每一组试件均以 30 °C/min 的升温速度升到设定温度后, 再恒温 4 h, 保证试件内外温度达到均匀, 然后在炉内冷却到常温后, 即进行试验。试验温度为 20 °C、200 °C、400 °C、600 °C 和 800 °C 五个等级。

高温前后试件的密度采用量积法测量。分别测量每个试件的直径 (两端部、中部并取平均值)、高度, 计算体积, 采用高精度电测天平称重, 并计算密度。

测完超声波后, 将试件正确安置在试验机上, 以不变的加载速率施加轴向荷载, 直至试件破坏, 同时测量试件的轴向位移, 得出高温后试件单轴试验的轴向荷载与轴向位移关系曲线。

2 试验结果及分析

2.1 高温后岩石纵波波速的变化

高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩纵波波速随温度的变化规律如图 1 所示。

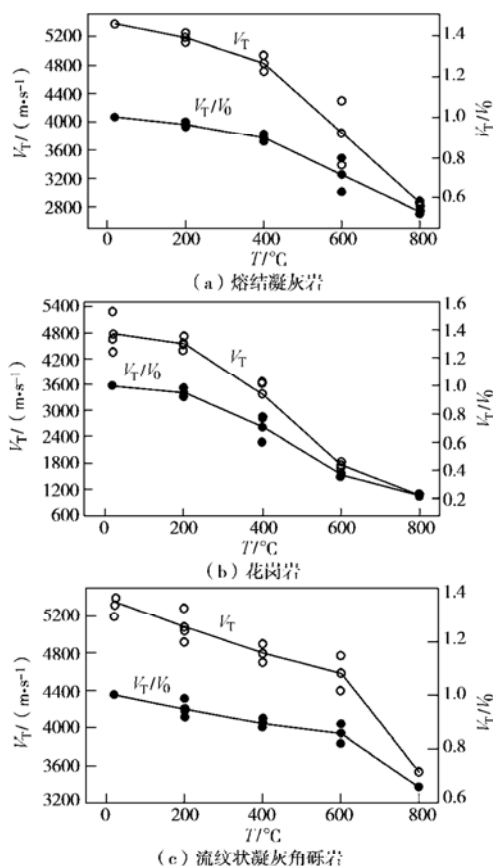


图 1 纵波波速与温度的关系

Fig. 1 V_T - T curves

可见, 随着受火温度的升高, 三种岩石的超声波

速都在降低, 而且经历的温度越高, 波速下降的幅度越大。其中, 熔结凝灰岩在温度低于 400 °C 时, 波速降低速率较小, 当温度超过 400 °C 后, 波速近似呈线性急速降低; 当经历 800 °C 高温后, 平均波速由常温时的 5385 m/s 降到了 2860 m/s, 降低的幅度达到了 47%。对于花岗岩, 在温度超过 200 °C 后, 波速即随着温度的升高而明显下降; 当经历 800 °C 高温后, 平均波速由常温时的 4768 m/s 降到了 1066 m/s, 降低的幅度达到了 78%。对于流纹状凝灰角砾岩, 当温度小于 600 °C 时, 波速随温度升高而下降得比较平缓, 而当温度超过 600 °C 后, 波速下降的速率急速增大。当经历 800 °C 高温后, 平均波速由常温时的 5359 m/s 降到了 3529 m/s, 降低的幅度约为 35%。

高温后岩石超声波速的下降可以解释为^[12-13]: 一方面高温下孔隙中的自由水蒸发为水蒸气, 同时孔隙体积的增大, 使得经受高温后波速明显下降; 另一方面加温后, 由于组成岩石的各种成分热膨胀率不同, 导致原生裂缝的扩展和新裂缝的产生。

图 2 给出了高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩平均相对纵波波速随温度的变化规律。

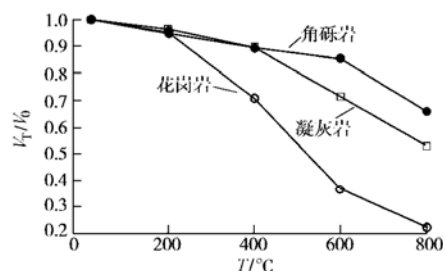


图 2 高温后平均相对纵波波速的比较

Fig. 2 Comparison of ρ_T/ρ_0 - T curves

可见, 当受火温度不超过 200 °C 时, 三种岩石纵波波速随温度降低的幅度基本一致。而当受火温度超过 200 °C 后, 花岗岩波速降低的速率与其他两种岩石相比显著增大。同时, 比较不同受火温度下波速降低的幅度可以发现, 花岗岩降低的幅度最大, 熔结凝灰岩次之, 流纹状凝灰角砾岩最小。

2.2 高温后岩石纵波波速与密度的关系

高温后熔结凝灰岩, 花岗岩及流纹状凝灰角砾岩密度随温度的变化规律如图 3 所示。

可见, 高温后由于试样体积增大、岩样内部水分的散失以及部分细屑的脱落, 岩石的密度与常温时相比, 均有不同程度的降低, 且随温度的增高, 密度减小幅度增大。经受同等的高温后, 流纹状凝灰角砾岩密度降低的幅度最大, 熔结凝灰岩次之, 花岗岩最小。如经历 800 °C 高温后, 熔结凝灰岩的密度比常温下降了约 4.5%, 花岗岩约 2.9%, 流纹状凝灰角砾岩约 6.1%。

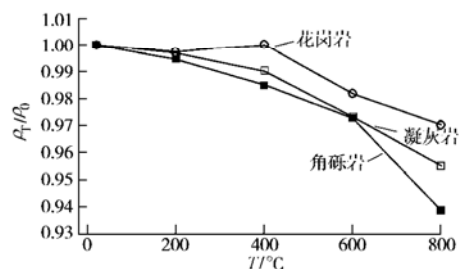


图3 高温后平均相对密度的比较

Fig. 3 Comparison of ρ_T/ρ_0 - T curves

图4给出了高温后熔结凝灰岩、花岗岩及流纹状凝灰角砾岩相对纵波波速与相对密度的关系。

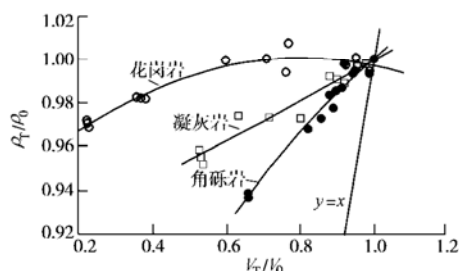


图4 高温后相对纵波波速与相对密度的关系

Fig. 4 ρ_T/ρ_0 - V_T/V_0 curves

可见,岩石经历高温后,随着纵波波速的减小,密度减小,但两者变化幅度不同。从常温到800 °C,相对密度变化为0.93~1.01,变化幅度约7%,相对波速变化的幅度约0.22~1.0,达到了78%。表明高温对于纵波波速的影响较密度影响大。对比可以发现,花岗岩相对纵波波速的变化幅度最大,约78%,熔结凝灰岩次之,约48%,流纹状凝灰角砾岩最小,约35%。

2.3 高温后岩石纵波波速与弹性模量的关系

根据弹性力学理论,岩石纵波波速和弹性模量之间存在一定的关系,根据实测的纵波波速计算的弹性模量可以表达为^[12]

$$E_d = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \rho v_p^2 \quad (1)$$

式中, ρ 为岩石密度, v_p 为岩石纵波波速, μ 为岩石泊松比。为与后述由应力-应变曲线得到的弹性模量区别,称 E_d 为动弹性模量,相应由应力-应变曲线上达到峰值应力前的近似直线段线性拟合而得到的弹性模量称为静弹性模量,用 E_c 表示。

图5为平均相对动弹性模量与温度的关系。总的来看,随着温度的升高,高温后动弹性模量下降,且温度越高,下降的幅度越大。如800 °C高温后,熔结凝灰岩与常温相比降低了约73%,流纹状凝灰角砾岩降低了约60%,花岗岩降低的幅度最大,达到了98%。说明高温对花岗岩的纵波波速的影响最为显著。

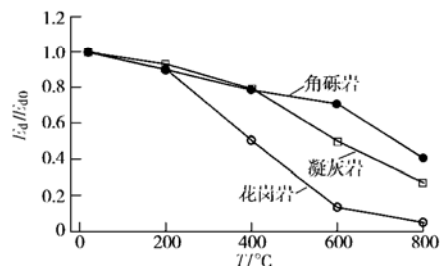


图5 高温后平均相对动弹性模量的比较

Fig. 5 Comparison of E_d/E_{d0} - T curves

此外,当温度不超过200 °C时,三种岩石的相对动弹性模量下降的幅度都比较平缓,且比较接近。而当温度超过200 °C后,花岗岩相对动弹性模量的下降幅度增大,而熔结凝灰岩和流纹状凝灰角砾岩下降的幅度则比较接近。当温度超过400 °C后,熔结凝灰岩相对弹性模量的下降幅度增大,并超过了流纹状凝灰角砾岩。另外,虽然相对动弹性模量随温度变化的规律与纵波波速变化的规律相同,但由于动弹性模量与纵波波速的平方成正比,所以动弹性模量的下降幅度比纵波波速更大。

图6为根据公式(1)计算的三种岩石平均动弹性模量与根据应力-应变曲线拟合的平均静弹性模量的比较。可见,不论动弹性模量还是静弹性模量,均随着温度的升高而降低,但动弹性模量下降的幅度要大于静弹性模量,特别是花岗岩。如800 °C高温后,熔结凝灰岩静弹性模量下降了约73%,动弹性模量下降了约65%;流纹状凝灰角砾静弹性模量下降了35%,动弹性模量下降了60%,而对于花岗岩,静弹性模量下降了51%,而动弹性模量下降的幅度则达到了98%。

图7给出了高温后三种岩石相对纵波波速与相对动弹性模量的关系。可见,不同高温后,相对动弹性模量与相对波速大致为二次方的关系,且高温对动弹性模量的影响较对波速的影响更为显著。

图8给出了高温后三种岩石相对纵波波速与相对静弹性模量的关系。由于应力-应变曲线的离散性,导致由此拟合的静弹性模量也表现出较大的离散性。总体上,三种岩石的纵波波速与静弹性模量随着温度的升高而同时降低。但是,对于流纹状凝灰角砾岩,高温对静弹性模量和纵波波速的影响幅度相当,其关系曲线大致与 $y=x$ 直线重合。对于熔结凝灰岩,高温对于静弹性模量的影响大于对纵波波速的影响,关系曲线位于 $y=x$ 直线的下方。而对于花岗岩,高温对纵波波速的影响明显大于对静弹性模量的影响,关系曲线的斜率小于1,且基本位于 $y=x$ 线的上方。这说明高温后,花岗岩物理性质的变化较力学性质的变化更为剧烈。

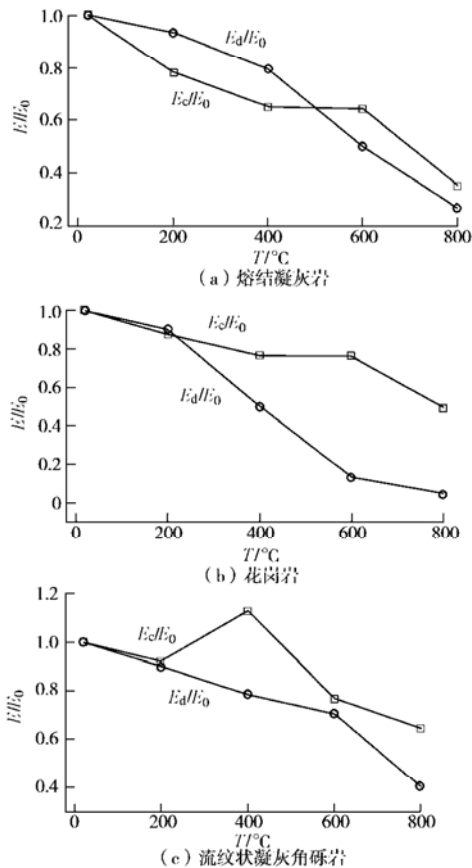


图 6 两种方法确定的平均弹性模量的比较

Fig. 6 Comparison of the dynamic and static Young's modulus

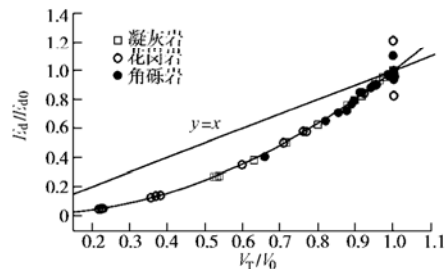


图 7 高温后相对纵波波速与相对动弹性模量的关系

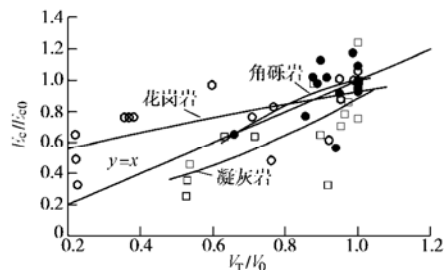
Fig. 7 $E_d/E_0 - V_T/V_0$ curves of tuff

图 8 高温后相对纵波波速与相对静弹性模量的关系

Fig. 8 $E_c/E_0 - V_T/V_0$ curves

2.4 高温后纵波波速与峰值应力的关系

高温后三种岩石平均相对峰值应力随温度的变化如图 9 所示。随着温度的升高, 三种岩石的相对峰值应力总体呈现逐渐降低的趋势。且熔结凝灰岩和流纹

状凝灰角砾岩随高温的降低幅度较接近, 且都大于花岗岩。如 600 $^\circ\text{C}$ 高温后, 熔结凝灰岩和流纹状凝灰角砾岩峰值应力降低的幅度约 29%, 而花岗岩降低的幅度约 19%。表明高温对熔结凝灰岩和流纹状凝灰角砾岩峰值应力的影响大于对花岗岩峰值应力的影响。

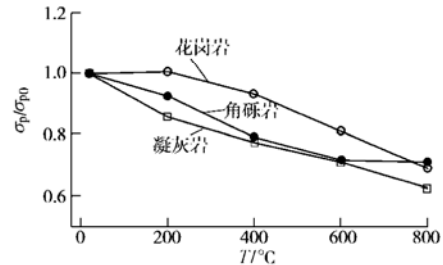


图 9 高温后平均相对峰值应力的比较

Fig. 9 Comparison of $\sigma_p/\sigma_{p0} - T$ curve

图 10 给出了高温后三种岩石相对纵波波速与相对峰值应力的关系。由于岩石自身结构的差异, 高温后各岩样的单轴抗压强度具有较大的离散性。总体上三种岩石的纵波波速与峰值应力随着温度的升高而同时降低。熔结凝灰岩和流纹状凝灰角砾岩峰值应力及纵波波速降低的幅度比较接近。花岗岩则表现为高温对纵波波速的影响远大于对峰值应力的影响, 其关系曲线的斜率小于 1, 且明显位于 $y=x$ 线上方。说明高温对花岗岩物理性能的影响大于对力学性质的影响。

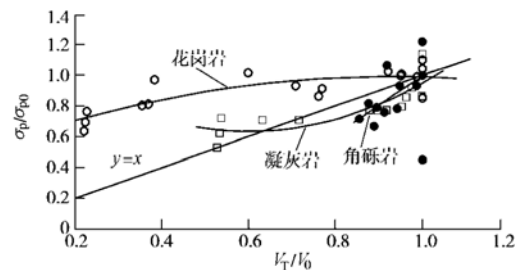


图 10 高温后相对纵波波速与相对峰值应力的关系

Fig. 10 $\sigma_p/\sigma_{p0} - V_T/V_0$ curves

3 结 论

(1) 经历高温后三种岩石的纵波波速与常温相比降低, 且温度越高, 降低的幅度越大。花岗岩降低的幅度最大, 熔结凝灰岩次之, 流纹状凝灰角砾岩最小。

(2) 经历高温后三种岩石的密度与常温时相比, 也均有不同程度的降低。且经历高温后, 纵波波速降低的幅度要大于密度降低的幅度。

(3) 经历高温后, 三种岩石根据纵波波速计算的动弹性模量和根据应力 - 应变曲线拟合的静弹性模量均下降, 温度越高, 下降的幅度越大。

(4) 高温对三种岩石动弹性模量的影响较对波速的影响更显著。静弹性模量方面, 高温对流纹状凝灰

角砾岩静弹性模量和纵波波速的影响幅度相当;对熔结凝灰岩静弹性模量的影响大于对纵波波速的影响;对花岗岩纵波波速的影响大于对静弹性模量的影响。

(5) 高温后,三种岩石的峰值应力与纵波波速均随着温度的升高而同时降低。对于熔结凝灰岩和流纹状凝灰角砾岩,峰值应力与纵波波速降低的幅度较接近。对于花岗岩,高温对纵波波速的影响远大于对峰值应力的影响。这说明,高温对花岗岩物理性能的影响要大于对力学性质的影响。

参考文献:

- [1] 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 S Z. High-temperature high-pressure rock mechanics: history, state-of-art and prospect [J]. Progress in Geophysics, 1995,10(4): 1 - 31.)
- [2] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000,22(3):332 - 335.(XU X C, LIU Q S. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(3):332 - 335.)
- [3] ARAÚJO R G S, SOUSA J L A O, BLOCH M. Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997,34(3): 459.
- [4] ZHANG Z X, YU J, KOU S Q, LINDQVIST P A. Effects of high temperatures on dynamic rock fracture [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001,38(2): 211 - 225.
- [5] DUCLOS R, PAQUET J. High-temperature behaviour of basalt—role of temperature and strain rate on compressive strength and K_{IC} toughness of partially glassy basalts at atmospheric pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991,28: 71 - 76.
- [6] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国. 240℃内盐岩物理力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(14):2365 - 2369.(LIANG W G, ZHAO Y S, XU S G. Testing study on physical and mechanical properties of heated salt rock within 240 °C [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(14):2365 - 2369.)
- [7] INADA Y, KINOSHITA N, EBISAWA A, GOMI S. Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1997,34(3):668.
- [8] 杜守继, 职洪涛. 经历高温后花岗岩与混凝土力学性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 482 - 485.(DU S J, ZHI H T. Experimental research on the mechanical properties of granite rock and concrete after high-temperature [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(4): 482 - 485.)
- [9] 夏小和, 陆雅萍, 黄醒春, 沈为平. 高温后大理岩在不同应力水平下超声波特性的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2004,38(7):1225 - 1228.(XIA X H, LU Y P, HUANG X C, SHEN W P. Experimental research on ultrasonic characteristic of marble under the action of high temperature[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(7):1225 - 1228.)
- [10] 夏小和, 王颖铁, 黄醒春, 沈为平. 高温作用对大理岩强度及变形特性影响的研究[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6):996 - 998.(XIA X H, WANG Y Y, HUANG X C, SHEN W P. Experimental study on high temperature effect's influence to the strength and deformation quality of marble[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004,38(6):996 - 998.)
- [11] 杜守继, 刘 华, 陈浩华, 邱一平. 高温后花岗岩密度及波动特性的试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(12):1900 - 1904.(DU S G, LIU H, CHEN H H, QIU Y P. Experimental research on the density and wave characteristics of granite rock after high temperature[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003,37(12):1900 - 904.)
- [12] 杜守继, 马 明, 陈浩华, 邱一平. 花岗岩经历不同高温后纵波波速分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1803 - 1806.(DU S G, MA M, CHEN H H, QIU Y P. Testing study on longitudinal wave characteristics of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1803 - 1806.)
- [13] 杜守继, 刘 华, 职洪涛, 陈浩华. 高温后花岗岩力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(14):2359 - 2364.(DU S G, LIU H, ZHI H T, CHEN H H. Testing study on mechanical properties of post-high-temperature granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(14):2359 - 2364.)