

DOI: 10.11779/CJGE201708017

热损伤后北山花岗岩裂隙演化及渗透率试验研究

陈世万¹, 杨春和^{1, 2}, 刘鹏君³, 魏翔¹

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

3. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 以高放废物重点预选场址甘肃北山花岗岩为研究对象, 开展了不同温度和不同加热速率高温损伤后岩石压缩全过程渗透率试验。研究发现: ①饱水率、波速、弹模、峰值强度等物理力学性质及渗透率突变温度阈值均在 500℃~600℃之间; 低于 500℃处理后试件的初始渗透率无明显变化, 600℃处理后, 晶内裂纹的大量出现使裂纹连成网络, 岩石的初始渗透率急剧增长, 增长幅度达 2~3 个量级。②低于 5℃/min, 岩石的损伤主要由造岩矿物颗粒热膨胀系数和弹性模量的不同导致在颗粒间形成热应力造成的; 高于 5℃/min, 温度梯度导致的热应力将诱发裂纹。③电镜扫描显微图像显示 100℃~573℃处理后裂纹主要集中在晶粒边界, 高于 573℃处理后长石和石英晶体内相继出现穿晶裂纹, 晶内破裂均贯通整个晶粒, 与周围裂隙网络连接。④热处理后试件渗透率出现 2 种不同的渗透类型: 600℃以下处理后试件在压缩全过程随应力增加渗透率分为下降段、水平段、稳定增长段和急剧上升段; 600℃以上高温处理后, 渗透率在压缩全过程持续降低。⑤弹性阶段前渗透率与裂隙体积应变呈现良好的线性关系, 随裂隙体积的减小, 渗透率降低。

关键词: 热损伤; 渗透率; 加热速率; 渗透类型; 裂隙体积应变

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)08-1493-08

作者简介: 陈世万 (1990-), 男, 博士研究生, 主要从事高放废物地质处置岩石力学方面研究工作。E-mail: chswan01@163.com。

Evolution of cracks and permeability of granites suffering from different thermal damages

CHEN Shi-wan¹, YANG Chun-he^{1, 2}, LIU Peng-jun³, WEI Xiang¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of

Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Faculty of Engineering, China University of

Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Beishan granite, the host rock of the pre-selected site of high-level radioactive waste geological repository in China, was used to study the evolution of permeability after thermal treatment under compressive condition. The main results are summarized as follows: (1) The temperature threshold existed in the range of 500℃ to 600℃. The physical and mechanical properties of granite suffered the temperature higher than the threshold changed rapidly. (2) The threshold of heating rate was identified as 5℃/min. The temperature gradient caused by heating rate higher than 5℃/min induced high thermal-stress to form cracks for standard samples. (3) The scanning electron microscope images revealed that the cracks concentrated around the grain boundary of samples subjected to temperature lower than 573℃, while the trans-granular cracks were observed in the granite samples heated to temperature higher than 573℃. The cracks in feldspar developed along the cleavage plane, so they were all smooth, however the cracks in quartz were rough due to no cleavage plane in it. (4) The permeability of samples suffering the temperature higher than 600℃ was much greater than that suffering the temperature lower than 600℃, which demonstrated the existence of temperature threshold for permeability. (5) Two typical stress-permeability curves were observed for the whole compression tests. For the specimens treated below 500℃, the stress-permeability can be characterized as three sequential stages, i.e., falling stage, maintaining low permeability during successive volume compaction, rapid growth when approaching the peak stress. However, the permeability almost decreased during the whole loading process for samples after thermal treatment, higher than 500℃. (6) The crack volumetric strain was applied to analyze the evolution of permeability. Good linear relationship was found between the permeability

基金项目: 高放废物地质处置地下实验室安全技术评价研究(FZ1402);

国家自然科学基金重点项目(51234004)

收稿日期: 2016-03-29

and the crack volumetric strain.

Key words: thermal damage; permeability; heating rate; permeability pattern; crack volumetric strain

0 引言

高放废物地质处置、地热能开发、国防工程、三次采油等工程中均需研究高温对岩石性质的影响。高温作用下,由于不同造岩矿物热膨胀系数和弹性模量的差异,矿物颗粒间会形成拉、压应力;矿物的相变及温度梯度引起的不均匀热膨胀也会诱发的热应力,激活岩石内部缺陷,诱导新裂纹,改变岩石的物理力学性质和流体输运特性。研究热损伤对岩石性质的影响有重要意义。

近年来国内外关于高温对岩石物理力学性质的影响做了大量的研究^[1-5]。赵阳升等^[6]采用高精度显微 CT 观测了花岗岩从常温到 500℃ 高温下细观破裂,揭示了花岗岩热破裂的空间特征。梁冰等^[7]从理论上推导岩石渗透率存在突变的温度阈值。徐小丽等^[8]分析了高温后花岗岩宏观力学性质及微孔隙结构特征,认为 800℃ 是孔隙率突变的阈值,超微孔向微孔隙转化,裂纹的连通性增加。冯子军等^[9]研究了花岗岩热破裂渗透率变化的临界温度。Menendez 等^[10]对比了应力诱导裂纹和热诱导裂纹,发现热破裂无明显的各向异性,而应力诱导的裂纹具有明显的优势方向。Dwivedi 等^[11]研究了印度花岗岩 30℃~160℃ 温度范围内岩石物理力学性质、渗透率、裂纹演化规律,并总结了国际上核废料预选场址花岗岩的热力学性质。陈颢等^[12]研究了 Westerly 花岗岩声发射特性和碳酸盐岩高温后渗透率特性,认为热开裂在岩石内部形成的新的裂纹网络,改变岩石中的流体的输运特性,但由于试验温度较低(200℃),并未得到花岗岩渗透率突变的温度阈值。

韩国锋等^[13]分析了大量岩石全应力应变过程渗透性试验的成果,总结出目前岩石破损过程渗透性变化的 4 种类型。陈亮等^[14]分析了不同围压下北山花岗岩加载全过程损伤及渗透率演化特征。胡少华等^[15]开展了北山花岗岩渗透特性试验与细观力学分析,将渗透率曲线随着偏应力增加总体分为下降段、水平段、稳定增长段以及急剧上升段。Chaki 等^[16]通过测试热损伤后花岗岩孔隙度、渗透率和波速衰减研究岩石内开型孔隙、连通孔隙和总体孔隙的演化特征,并以此量化高温对岩石造成的热损伤。

加热速率是影响热破裂演化的重要因素^[17]。Todd^[17]研究了不同加热速率下岩石的声发射特征,研究认为,加热速率存在阈值,高于此阈值,温度梯度引起的热应力将引起宏观破裂。

可见针对热损伤对岩石物理力学性质的影响和压缩条件下岩石渗透率的演化规律已开展了较多的研究。但高温损伤后岩石压缩全过程中渗透率演化特征的研究鲜见报道,且多数岩石热破裂试验未考虑加热速率对岩石热损伤的影响。为研究不同温度和不同加热速率对花岗岩物理力学性质的影响及高温损伤后花岗岩的压缩破坏全过程渗透率变化特征,以中国高放废物重点预选场址甘肃北山花岗岩为研究对象,开展不同温度和不同加热速率高温损伤后岩石压缩全过程渗透率试验,研究结果为中国高放废物地质处置工程提供参考。

1 试验准备及试验方法

1.1 试样准备及试验设备

为保证试样的均质性和试验结果的可比性,试样均取自甘肃北山芨芨槽采石场的同一块岩石。按照标准^[18]的规定,制成 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的标准试样,如图 1 所示。通过 XRD 衍射分析获得试件的矿物成分:长石 60.59%,石英 34.09%,黑云母 5.32%。



图 1 部分试件照片

Fig. 1 Photo of granite samples

加热设备采用 GR.TF 真空管式高温炉,温度控制系统采用人工智能调节技术,控温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$,可按照试验要求编制升温程序。三轴压缩全过程的渗透率测试采用 MTS815 岩石力学试验系统。

1.2 试验原理和方法

(1) 试件加热处理及物理试验

根据研究目,加热试验分两批进行。第一批试件用以研究加热速率对岩石损伤的影响,分别按 1, 3, 5, 8, 12, 15℃/min,对各试件加热至 800℃。第二批试件用以研究不同温度对花岗岩的损伤,对各试件以 4℃/min 分别加热至 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700℃。为确保岩样内部受热均匀,试件加热至预设温度后保温 1 h。试验步骤如下:

- 测定试件初始质量、体积、波速等物理参数。
- 对试件按上述加热要求加热。
- 测定加热损伤后岩石的质量、体积、吸水率、饱水率及波速等物理参数。

(2) 渗透率试验

本次试验采用瞬态法测试热损伤后花岗岩压缩过程中渗透率的演化规律。该方法的基本原理是对试件上下部产生稳定水压差,通过压差的改变测试岩石的渗透性。岩石渗透率按下式计算:

$$K = \mu \beta V \frac{\ln(\Delta p_i / \Delta p_f)}{2 \Delta t (A_s / L_s)} \quad (1)$$

式中 V 为参照体积, $V=309 \text{ cm}^3$; $\Delta p_i / \Delta p_f$ 为初始压差与终止压差的比值; A_s , L_s 分别为试件的试件横截面积 (cm^2) 及长度 (cm), Δt 为渗透率测试持续时间 (s), μ 为水的黏滞系数, $\mu=1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; β 为水的体积压缩系数,取值为 $4.53 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 。

试验过程中,围压为 5 MPa ; 预先设置多个应变值,采用轴向位移控制加载,以 0.02 mm/min 的加载速率至预设的应变值;保持岩样的轴向位移不变,采用瞬态法测定岩样在该应变下渗透率;释放孔隙压力后对岩样加载到下一预设的应变值,进行下一应变下渗透特性的测量,按此加载方式直到预设应变的最大值为止。

2 试验结果

2.1 热损伤后岩石的物理性质

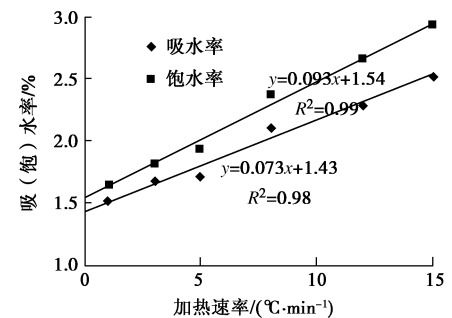
(1) 温度处理后岩石物理性质

岩石的吸水率、饱水率反映了岩石内总的张开型孔隙和裂隙的发育程度。岩石的波速反映了试件内整体孔隙率发育程度。

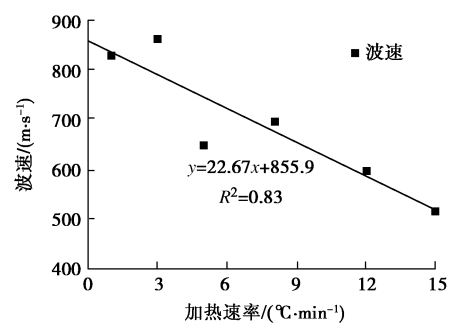
如图2所示, 800°C 处理后岩石的吸水率、饱水率随加热速率升高而线性增大,线性相关程度高;自 1°C/min 加热处理后为原岩的3倍增长到 15°C/min 处理后达原岩的6倍。波速随加热速率升高线性降低,降为原岩的 $15\% \sim 25\%$ 。以上结果表明在试验的加热速率范围内,热损伤诱导开型孔隙体积和孔隙总体积随加热速率增长而线性增长。加热速率越大,孔隙率越高,对岩石损伤越严重。

图3为不同温度处理后岩石吸水率、饱水率与波速的变化规律。吸、饱水率和波速都在 $500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 之间存在加速拐点, 500°C 之前吸、饱水率和波速随着温度上升变化缓慢, 500°C 后斜率绝对值显著增大,饱水率和波速随温度变化的线性拟合的斜率分别为 500°C 之前的13倍和4倍,拐点后试件内开型孔隙体积和孔隙总体积显著增大。分析认为,这是由于花岗岩主

要造岩矿物石英在 573°C 由 α 相变为 β 相,岩石体积增大,微裂隙大量增加,在 573°C 附近形成孔隙率上升和波速下降的加速拐点。



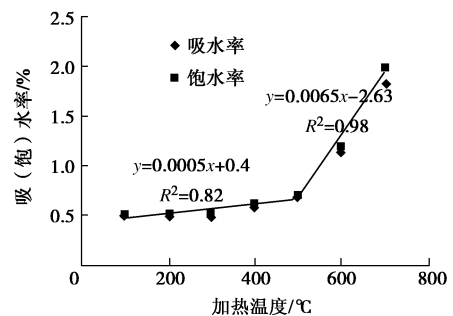
(a) 不同加热速率处理后试件吸水率和饱水率



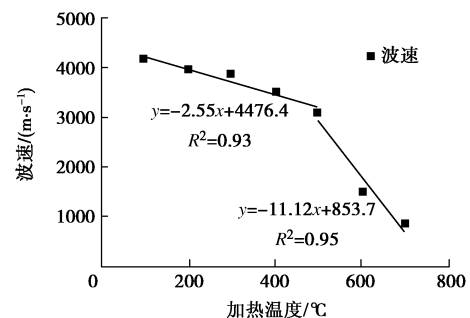
(b) 不同加热速率处理后试件波速

图2 吸水率、饱水率及波速与加热速率的关系

Fig. 2 Evolution of ultrasonic wave velocity, water content and saturation ratio with heating rate



(a) 不同温度处理后试件的吸水率、饱水率



(b) 不同温度处理后试件的波速

图3 吸水率、饱水率及波速与温度的关系

Fig. 3 Evolution of ultrasonic wave velocity, water content and saturation ratio with heating temperature

2.2 热损伤后岩石的力学性质

不同方式热处理后试件三轴压缩试验典型应力-应变曲线如图 4 所示。图 4 (a) 为不同加热速率处理后试件应力-应变曲线, 其中以 1, 3, 5°C/min 加热至 800°C 处理后试件的应力-应变曲线形态相似; 12°C/min 和 15°C/min 加热至 800°C 处理后试件的应力-应变形态有明显变化, 表现为更长的压密段, 更明显的延性, 峰值强度明显降低。在保持一定应变测渗透率过程中, 各试件均出现应力松弛, 12°C/min 和 15°C/min 处理后试件的峰前应力松弛相较于 1, 3, 5°C/min 处理后的试件出现的更早, 更明显。认为 1°C/min、3, 5°C/min 加热处理对岩石力学性质影响基本相同, 北山花岗岩标准试件在 5°C/min 加热速率前后存在阈值, 此阈值以下的加热速率诱发岩石的损伤主要由岩石内不同造岩矿物颗粒热膨胀的差异造成, 高于此阈值加热速率, 由温度梯度导致的热应力对裂纹的发展将起较为明显的作用。

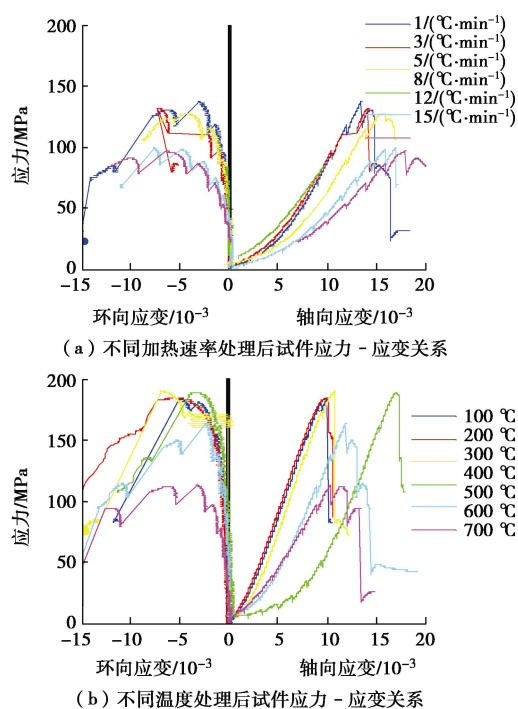


图 4 不同加热方式处理后试件应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain curves of granite samples after different thermal treatments

不同加热速率处理后试件的峰值强度和弹模如图 5 (a) 所示, 岩石强度和弹模随加热速率的增长而降低, 呈现良好的线性关系。15°C/min 处理后试件的强度和弹模分别降为 1°C/min 处理后的 70% 和 48%。

图 4 (b) 为不同温度处理后试件应力-应变曲线。100°C~300°C 处理后试件应力应变曲线基本重合, 峰前无应力松弛, 该范围内温度对岩石力学性质影响轻

微, 500°C 处理后试件应力-应变曲线出现较长的孔隙压密段和峰后变形段, 试件开始由脆性向延性转化, 保持应变不变时开始出现应力松弛; 600°C 及 700°C 处理后试件强度出现显著降低。100°C~300°C 处理后岩石的弹模和峰值强度变化不明显, 略呈上升趋势 (如图 5 (b)), 以 500°C 为拐点, 之后试件的峰值强度和弹模随温度增加显著降低, 800°C 处理后试件峰值强度和弹模分别降为未处理试件的 60% 和 56%。认为在 500°C~600°C 之间存在一个温度阈值, 低于此温度, 花岗岩主要表现为脆性, 岩石的强度和弹模均无显著改变; 高于此温度, 花岗岩向延性转化, 强度和弹模随温度升高急剧降低。

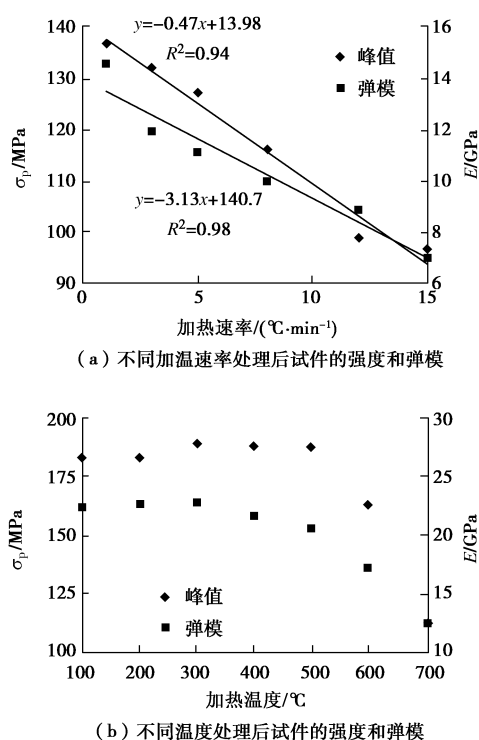


图 5 不同加热方式处理后试件弹模及峰值强度

Fig. 5 Compressive strength and Young's modulus of granites after different thermal treatments

2.3 热损伤后岩石的渗透率

图 6 为不同热处理方式后各试件的在围压 5 MPa, 轴压 10 MPa 时初始渗透率。图 6 (a) 为不同加热速率加热至 800°C 处理后试件的初始渗透率, 与饱水率变化规律一致, 随加热速率升高渗透率线性增大, 12°C/min 加热速率的渗透率约为 1°C/min 加热速率的 10 倍。图 6 (b) 为不同温度处理后试件的初始渗透率, 以 500°C 为拐点, 500°C 之前试件初始渗透率无显著的改变, 高于 500°C 处理后试件渗透率随着温度升高急剧升高, 达低于 500°C 处理后试件平均初始渗透率的 200~500 倍。

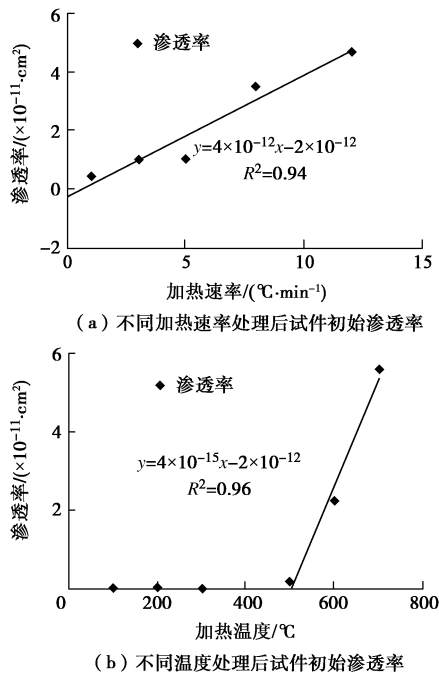


图 6 不同方式热处理后试件初始渗透率

Fig. 6 Initial permeability of granites after different thermal treatments

初始渗透率反映了热损伤后连通孔隙的发育程度, 渗透率随加热速率线性增长反映了高加热速率处理后试件内更高的裂隙连通率; 渗透率在 500 $^{\circ}\text{C}$ 的突变反映了 500 $^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 之间存在热损伤孔隙类型突变的温度阈值。岩石渗透率随升温温度变化的突变性用逾渗模型来描述是合适的^[12]: 100 $^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 处理后, 随温度升高, 饱水率的增长和波速的降低表明热开裂造成岩石内部裂纹随着温度的升高不断增加, 而岩石的渗透率却没有明显变化, 试件内部裂纹的连通性并未显著改变。高于 500 $^{\circ}\text{C}$ 处理后, 热开裂形成的裂纹连成网络, 裂纹的连通性急剧增大, 岩石的渗透率显著增加。试验中渗透率在 500 $^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 范围的突变证实花岗岩渗透率变化的温度阈值在 500 $^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 之间。

2.4 不同方式热处理后微观特征

为研究不同方式热处理后北山花岗岩的微观孔隙(裂隙)特征, 分析花岗岩物理力学性质改变和渗透率在温度阈值突变的微观机制。按前述的热处理方式对新鲜断面花岗岩进行热处理外, 增加了 573 $^{\circ}\text{C}$ 石英相变点的热处理试样。通过电镜扫描获得不同方式热处理后试件断面的裂隙发育特征, 如图 7 所示。

100 $^{\circ}\text{C} \sim 573^{\circ}\text{C}$ 处理后裂纹主要集中在晶粒边界, 随温度升高, 热破裂逐渐发展, 沿花岗岩弱面包围花岗岩晶体颗粒(如图 7(a)~7(e))。由于不同矿物颗粒热膨胀系数和弹性模量的差异以及岩石中水(吸附水、层间水等)的变化, 在各晶体交界处形成

热应力, 激活了岩石中原始缺陷, 诱导了新的裂纹^[19]; 随温度升高, 微裂纹程度加深, 逐步形成包围花岗岩晶体颗粒的裂隙网络。600 $^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ 处理后沿长石的两组解理面出现微裂纹(如图 7(f)), 同时晶粒边界裂纹进一步扩展, 长度和宽度均明显增大; 800 $^{\circ}\text{C}$ 处理后试件石英晶体内部观察到穿晶裂纹(如图 7(g)、7(h))。由于长石存在两组完全解理, 长石晶内热破裂沿解理面, 破裂平直; 石英晶内无解理, 晶内破裂不平整。花岗岩内石英含量高, 石英在 573 $^{\circ}\text{C}$ 附近相变, 石英体积增大 5%^[20], 导致颗粒间热应力显著增大; 同时高温作用过程中矿物脱水、晶格重组、矿物收缩和分解等共同作用下花岗岩内开始出现晶内裂纹^[8]。晶内破裂均贯通整个晶粒, 与周围裂隙网络连接, 试件内裂纹的连通程度明显提高。因此石英相变温度点 573 $^{\circ}\text{C}$ 是花岗岩内裂纹发生质变的拐点。

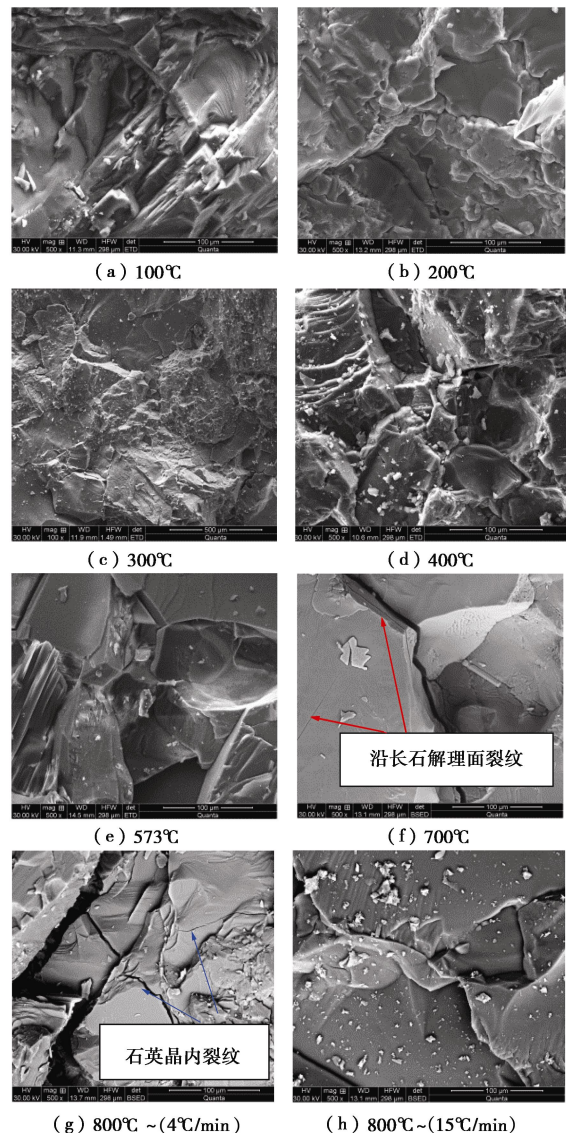


图 7 不同方式热处理后扫描电镜图像

Fig. 7 Microcosmic images of granites after different heating thermal treatments

3 分 析

3.1 渗透类型的转变

韩国锋等^[13]总结了岩石破损过程渗透性质变化主要有4种类型。本试验中发现不同温度损伤后试件压缩破坏过程中渗透率出现2种不同的渗透类型,图8为本次试验获得的2种具有代表性渗透率的演化曲线。

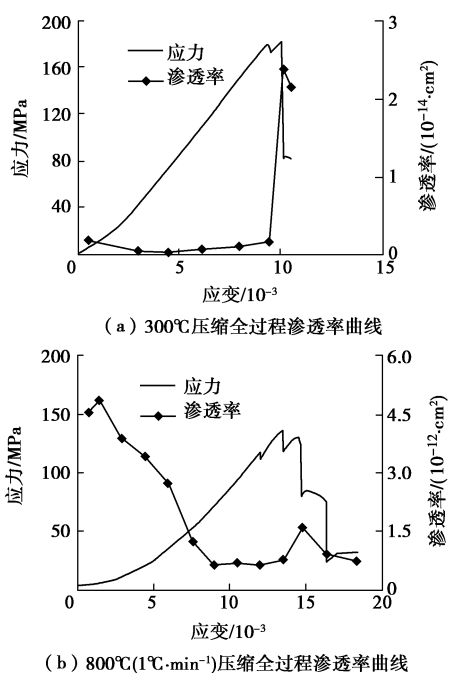


图8 压缩过程中渗透率变化曲线

Fig. 8 Permeability evolution curves of granite after different thermal treatments during compression test

100℃~500℃处理后试件的渗透率曲线为第1种类型(图8(a)),与胡少华等^[15]获得的未经热处理北山花岗岩三轴压缩过程中渗透率演化规律相同,其渗透率曲线随着应变增长分为下降段、水平段、稳定增长段和急剧上升段:孔隙压密段岩石原有的微孔隙被压密,渗透性降低;弹性阶段微孔隙继续被压缩,渗透性稳定在较低水平;随着应力的进一步增加,岩石微裂隙开始扩展,渗透性开始稳定增长;峰值点附近,微裂隙的相互贯通,渗透性急剧增大。渗透率的演化规律与岩石的脆性和孔隙度有关,如前所述,100℃~500℃处理后试件脆性明显,孔隙率随温度的升高增长缓慢,压缩全过程渗透率演化规律改变并不显著。

500℃~600℃之间存在试件由脆性向延性转化的温度阈值,高于阈值温度处理后岩石内孔隙率剧烈增长,压缩全过程渗透率主要由热损伤产生的孔隙(裂隙)控制,渗透性显著提高。压缩全过程渗透率类型

向第2种类型转化,如图8(b)所示,这种类型渗透率通常出现在高孔隙度软岩的试验中^[13]:由于峰值前变形过程中孔隙一直压缩,微裂隙开度减小,渗透率持续降低。峰后部分裂纹继续扩展,但部分裂纹由于承载面积的降低,裂纹面有效应力增加,发生闭合;同时轴向应力的减小,某些部分开始回弹,也造成裂纹闭合。因此,峰值前孔隙的压缩和峰值后裂纹的闭合使得高于阈值温度处理后渗透率在整个加载过程中均呈降低趋势,试件的渗透率转化为第2种类型。

岩石渗透性变化本质上是岩石内部孔隙结构变化和裂隙扩展的结果。分析认为573℃石英相变点之后,由于长石、石英的晶内破裂的出现显著提高了试件内裂隙的连通率,岩石内孔隙率剧增,改变了热破裂的裂隙网络,从本质上改变了压缩全过程渗透率的演化规律,使压缩过程中渗透率随应变的演化规律发生转变。

3.2 渗透率与裂纹体积应变关系

Martin^[21]研究了加拿大核废料处置库围岩LB花岗岩压缩破坏过程,将岩石压缩过程岩石的体积应变分为岩石材料的弹性体积应变和岩石中裂隙的体积应变。计算如下式:

$$\varepsilon_v^e = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$\varepsilon_v^c = \varepsilon_v - \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中, σ_1 , σ_2 , σ_3 为3个主应力, ε_v , ε_v^e , ε_v^c 分别为岩样体积应变、弹性体积应变和裂隙体积应变, E , μ 分别为岩样弹性阶段的弹性模量和切线泊松比。

按式(3)计算压缩全过程裂隙体积应变,如图9所示。可见,裂隙(孔隙)体积应变与渗透率演化存在明显的相关关系:在闭合应力 σ_{cc} 之前,试件被逐渐压密,2种类型渗透率曲线都随裂隙(孔隙)体积应变的减小而降低;在 σ_{cc} 和 σ_{ci} 之间弹性阶段,渗透率维持在最低的水平。第1种渗透类型在峰后裂隙体积显著增大时,渗透率也出现明显的上升。

图10为孔隙压密段裂纹体积应变与渗透率的关系。随着裂隙体积的减小,渗透率降低,两者线性相关性明显,证实采用裂纹体积应变表征压缩过程中渗透率演化规律的有效性。1~5℃/min加热速率处理后,渗透率随裂隙体积的变化斜率相近;5℃/min以上的加热速率处理后试件裂隙体积应变与渗透率的线性关系明显改变,认为更高加热速率造成孔隙类型的改变,形成了宏观裂隙,改变渗透率与裂隙体积的关系。再一次证实了5℃/min的加热速率是花岗岩渗透率改变的加热速率阈值。

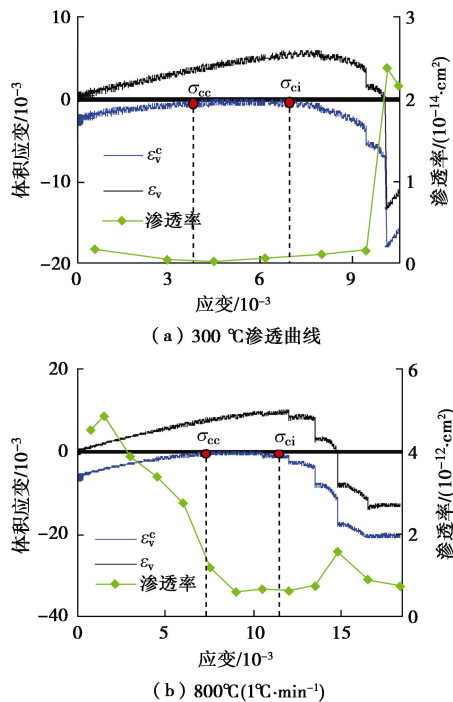


图9 两类渗透率曲线中裂纹体积应变与渗透率的关系
Fig. 9 Relationship of crack volumetric strain and permeability for different permeability curves

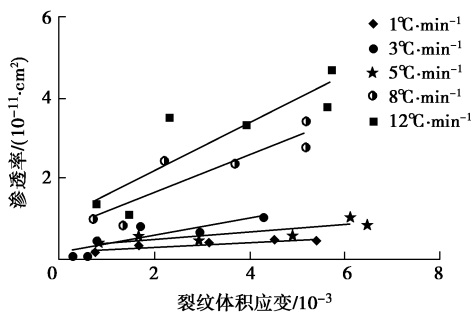


图10 渗透率与裂纹体积的关系
Fig. 10 Relationship of permeability and crack volumetric strain

峰值强度后, 裂隙体积应变与渗透率之间的关系较复杂, 由于宏观裂纹的出现使控制渗透率由孔隙(微裂隙)控制转变为裂纹和孔隙共同控制, 宏观裂纹的出现对峰后渗透率影响存在两种形式: 若形成贯通试件上下断面的宏观裂纹, 将导致峰后试件渗透率显著升高; 若未形成贯通试件上下端面的宏观裂纹, 试件的渗透率仍由孔隙和微裂隙决定, 宏观裂纹的出现对渗透率的影响并不显著。峰后渗透率与裂隙应变规律性值得进一步研究。

4 结 论

(1) 饱水率、波速、弹模、峰值强度等岩石物理力学性质及渗透率突变温度阈值均在 $500^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 之间。高于阈值温度处理后岩石各性质改变显著, 岩石由脆性向延性转化; 低于 500°C 处理后试件的初始渗透率无明显变化, 600°C 处理后, 晶内裂纹的大量出

现使裂纹连成网络, 岩石的初始渗透率急剧增长, 达低于 600°C 处理后试件的 $200\sim 500$ 倍。

(2) $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 是北山花岗岩标准试件物理力学性质和孔隙改变的加热速率阈值。低于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 岩石的损伤主要由造岩矿物颗粒热膨胀系数和弹性模量的不同导致在颗粒间形成热应力造成的; 高于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 温度梯度导致的热应力将诱发裂纹。

(3) $100^{\circ}\text{C}\sim 573^{\circ}\text{C}$ 处理后裂纹主要集中在晶粒边界, 高于 573°C 处理后花岗岩内长石和石英内相继出现穿晶裂纹: 长石晶内破裂平直, 沿着解理面扩展; 石英晶内破裂不平整; 晶内破裂均贯通整个晶粒, 与周围裂隙网络连接。

(4) 热处理后试件渗透率出现 2 种不同的渗透类型: 600°C 以下处理后试件在压缩全过程中随应力增加, 渗透率分为下降段、水平段、稳定增长段及急剧上升段; 600°C 以上高温处理后, 由于长石、石英的晶内破裂的出现, 孔隙率显著增大, 渗透率在压缩全过程持续降低。

(5) 采用裂隙体积应变分析了试件渗透率在压缩过程中演化规律, 弹性阶段前, 随着裂隙体积的减小, 渗透率降低, 渗透率与裂隙体积应变呈现良好的线性关系。

参考文献:

- [1] 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 Quan-sheng, XU Xi-chang, 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))
- [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 Xi-chang, LIU Quan-sheng. A preliminary study on basic mechanical properties for granite at high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332 - 335. (in Chinese))
- [3] 孙 强, 张志镇, 薛 雷, 等. 岩石高温相变与物理力学性质变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 935 - 942. (SUN Qiang, ZHANG Zhi-zhen, XUE Lei, et al. Physico-mechanical properties variation of rock with phase transformation under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 935 - 942. (in Chinese))
- [4] 张志镇, 高 峰, 刘治军. 温度影响下花岗岩冲击倾向及其微细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1591 - 1602. (ZHANG Zhi-zhen, GAO Feng, LIU Zhi-jun.

- Research on rockburst proneness and its microcosmic mechanism of granite considering temperature effect[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2010, **29**(8): 1591 – 1602. (in Chinese))
- [5] 徐小丽, 高峰, 张志镇. 高温后围压对花岗岩变形和强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2246 – 2252. (XU Xiao-li, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen. Influence of confining pressure on deformation and strength properties of granite after high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2014, **36**(12): 2246 – 2252. (in Chinese))
- [6] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 28 – 34. (ZHAO Yang-sheng, MENG Qiao-rong, KANG Tian-he, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 28 – 34. (in Chinese))
- [7] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2009 – 2012. (LIANG Bin, GAO Hong-mei, LAN Yong-wei. Theoretical analysis and experimental study on relation between rock permeability and temperature[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2009 – 2012. (in Chinese))
- [8] 徐小丽, 高峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(6): 1752 – 1758. (XU Xiao-li GAO Feng, SHEN Xiao-ming, et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(6): 1752 – 1758. (in Chinese))
- [9] 冯子军, 赵阳升, 张渊, 等. 热破裂花岗岩渗透率变化的临界温度[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(10): 1987 – 1992. (FENG Zi-jun, ZHAO Yang-sheng, ZHANG yuan, et al. Critical temperature of permeability change in thermally cracked granite[J]. Journal of China Coal Society, 2014, **39**(10): 1987 – 1992. (in Chinese))
- [10] MENÉNDEZ B, DAVID C, DAROT M. A study of the crack network in thermally and mechanically cracked granite samples using confocal scanning laser microscopy[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 1999, **24**(7): 627 – 632.
- [11] DWIVEDI R D, GOEL R K, PRASAD V V R, et al. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, **45**(3): 303 – 315.
- [12] 陈颀, 吴晓东, 张福勤. 岩石热开裂的实验研究[J]. 科学通报, 1999, **44**(8): 880 – 883. (CHEN Yon, WU Xiao-dong, ZHANG Fu-qing. Experiment study on thermal cracking[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, **44**(8): 880 – 883. (in Chinese))
- [13] 韩国锋, 王恩志, 刘晓丽. 岩石损伤过程中的渗流特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(5): 41 – 50. (HAN Guo-feng, WANG En-zhi, LIU Xiao-li. Seepage characteristics of rock during process[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, **33**(5): 41 – 50. (in Chinese))
- [14] 陈亮, 刘建峰, 王春萍, 等. 压缩应力条件下花岗岩损伤演化特征及其对渗透性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 287 – 295. (CHEN Liang, LIU Jian-feng, WANG Chun-ping, et al. Investigation on damage evolution characteristic of granite under compressive stress condition and its impact on permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 287 – 295. (in Chinese))
- [15] 胡少华, 陈益峰, 周创兵. 北山花岗岩渗透特性试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(11): 2200 – 2209. (HU Shao-hua, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. Laboratory test and mesomechanical analysis of permeability variation of beishan granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(11): 2200 – 2209. (in Chinese))
- [16] CHAKI S, TAKARLI M, AGBODJAN W P. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions[J]. Construction and Building Materials, 2008, **22**: 1456 – 1461.
- [17] TODD T P. Effect of cracks on elastic properties of low porosity rocks[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [18] GB/T 50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 1999. (GB/T 50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. (in Chinese))
- [19] 张宗贤. 岩石的热损伤效应[J]. 有色金属工程, 1993, **45**(3): 1 – 6. (ZHANG Zong-xian. Effect of heating damage on rock[J]. Nonferrous Metals, 1993, **45**(3): 1 – 6. (in Chinese))
- [20] 席道瑛. 花岗岩中矿物相变的物性特征[J]. 矿物学报, 1994, **14**(3): 223 – 227. (XI Dao-ying. Physical characteristics of mineral phase transition in the granite[J]. Acta Mineralogical Sinica, 1994, **14**(3): 223 – 227. (in Chinese))
- [21] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings[D]. Manitoba: University of Manitoba, 1993.