

DOI: 10.11779/CJGE20220125

高温后花岗岩断裂特性及热裂纹演化规律研究

黄彦华^{1,2}, 陶然¹, 陈笑³, 罗一鸣¹, 韩媛媛¹

(1. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 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 221116;
3. 中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 在深部地热能开发中高温岩体会经历不同速率降温过程, 研究高温作用后岩石力学行为对深部地下工程具有重要意义。然而, 不同冷却方式下高温花岗岩断裂特性演化规律及作用机制尚不清晰。基于此, 进行了不同冷却方式下花岗岩半圆盘试样三点弯曲试验, 分析了高温后花岗岩荷载-位移曲线、断裂韧度以及破裂特征, 探讨了微裂纹分布及矿物含量演化规律。试验结果表明: ①随着温度的升高, 花岗岩断裂韧度呈减小趋势, 遇水冷却方式下断裂韧度低于自然降温条件; ②三点弯曲作用下花岗岩半圆盘试样裂纹首先萌生于切槽尖端, 逐渐向加载点方向扩展并将岩样劈裂。随着温度的升高, 花岗岩试样的断裂痕迹曲折程度、与中心线之间的距离有所增大; ③随着温度的升高, 花岗岩矿物成分未明显变化, 基于图像处理技术获得的微裂纹密度逐渐上升, 遇水冷却方式下微裂纹密度大于自然降温方式, 表明高温引起的微观结构劣化降低了花岗岩断裂韧度。

关键词: 岩石力学; 花岗岩; 高温; 断裂韧度; 图像处理

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)04-0739-09

作者简介: 黄彦华(1989—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事深部岩石力学与地下工程方面的研究工作。
E-mail: huangyh1219@163.com。

Fracture behavior and thermal cracking evolution law of granite specimens after high-temperature treatment

HUANG Yanhua^{1,2}, TAO Ran¹, CHEN Xiao³, LUO Yiming¹, HAN Yuanyuan¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: During the exploitation of deep geothermal energy, the thermal rocks will cool with different cooling rates. A comprehensive understanding of mechanical behavior of the thermal-treated rock is very important for deep underground engineering. However, the fracture behavior and influence mechanism of thermal granite specimens under different cooling ways are unclear at present. Therefore, in this study, the three-point bedding tests are carried out on the semicircular bend granite specimens after high-temperature treatment. The load-displacement curves, fracture toughnesses and failure patterns of the post-heated granite specimens are analyzed, and the evolution laws of micro-cracks and mineral components are discussed. The experimental results show that: (1) As the temperature increases, the fracture toughness of the granite specimens decreases. The fracture toughness of the specimens after quenching in water is lower than that after cooling down naturally in the furnace. (2) The crack initiated from the tip of notch propagates toward the loading point and splits the specimen into two parts. As the temperature increases, the tortuosity degree and deviation of fracture trace of the semicircular bend granite specimens increase. (3) The mineral components of granite are not significantly changed after high-temperature treatment. The micro-crack rate identified by the image processing increases with the increase of high temperature, and that of the specimen after quenching in water is higher than that after cooling down naturally in the furnace, which indicates that the deterioration of micro-structure of rock induced by high-temperature treatment reduces the fracture toughness of granite.

Key words: rock mechanics; granite; high temperature; fracture toughness; image processing

0 引言

在当前“双碳目标”背景下, 干热岩地热作为前

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20221547); 中国博士后科学基金项目(2021M693424); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110290017Z)

收稿日期: 2022-02-08

景可期的清洁能源，在国家能源结构调整中作用愈加凸显^[1]。目前干热岩开发的基本原理是通过水力压裂等激发技术形成裂隙网络，注入的低温流体经过储层热交换后提升到地面^[2]，在此过程中高温岩体快速降温^[3]。此外，地热能开发过程中井壁围岩与常温钻井液接触，高温岩体同样会发生温度降低过程。因此，研究高温作用后岩石物理力学特性演化规律以及高温作用机制，对深部地热能开发具有重要意义。

针对高温冷却后岩石力学参数演化规律，国内外学者通过室内试验研究取得了一系列成果。贾蓬等^[4]开展了高温花岗岩水冷却后单轴压缩试验，发现高温后花岗岩峰值强度和弹性模量随温度增大而减小。朱振南等^[5]对水冷却后花岗岩进行了单轴压缩试验，结果表明花岗岩抗压强度和弹性模量均随着温度的升高呈减小趋势。邵保平等^[6]分析了 20~600℃ 温度范围内自然降温和遇水急剧冷却条件下花岗岩单轴抗压强度。邓龙传等^[7]测试了自然降温和遇水冷却花岗岩巴西劈裂强度，表明随着温度的升高，遇水冷却花岗岩拉伸强度降幅更大且均低于自然降温试样。朱要亮等^[8]通过试验观察到水冷却后花岗岩的强度低于自然降温，弹性模量高于自然降温。此外，学者对不同冷却方式下岩石波速、导热能力和孔隙度演化规律进行了探索^[9-11]。断裂韧度作为岩石材料的重要参数之一，反映了岩石抵抗断裂失效的能力^[12]，然而目前对于不同冷却方式下高温岩石断裂韧度的研究尚不多见。

通过微观结构图像分析岩石微裂纹演化特征，是探究高温作用机制的常用方法之一。李春等^[13]基于高温后花岗岩偏光显微图像，分析了温度升高过程中沿晶微裂纹和穿晶微裂纹变化趋势。平琦等^[14]观察了不同温度条件下岩石扫描电镜（SEM）图像，探讨了岩石颗粒尺寸变化与温度之间的关系。Huang 等^[15]通过光学显微观察，探究了自然降温和遇水冷却花岗岩表面热裂纹分布规律，结果表明水冷却条件下微裂纹数量和尺寸均大于自然降温。Yang 等^[16]采用 CT 扫描获得高温后花岗岩微裂纹图像，分析了不同温度后花岗岩试样裂纹分布特征。上述研究主要基于岩石微观图像分析了温度对岩石微观裂纹影响的定性规律，然而高温后岩石微观结构劣化的定量表征还有待进一步探究。随着图像处理技术的发展与应用^[17]，可通过图像处理获得高温后岩石热裂纹数量、面积等定量信息，以揭示高温及冷却方式对岩石微观结构的作用机制。

综上所述，不同冷却方式下高温岩石断裂韧度及其与岩石微观结构劣化之间的关系还有待深入研究。因此，本文以花岗岩为试验对象，对不同高温岩样分别进行炉内自然降温和遇水冷却处理，分析不同冷却

方式对花岗岩断裂韧度的影响规律。基于高温后花岗岩微观图像，采用图像处理技术分析花岗岩热裂纹演化特征，结合矿物成分 X 射线衍射（XRD）及含量分析，揭示高温后花岗岩劣化机理。

1 试验准备

1.1 岩性特征与岩样制作

试验岩石取自山东省济宁市。考虑到晶粒对岩石热-力耦合特性有明显影响^[18]，本文选取了两种不同晶粒花岗岩。两组岩石均为细-中晶块状结构花岗岩，相对而言 A 组岩石晶粒较细，B 组岩石晶粒较粗，如图 1 所示。结合 XRD 结果可知，A 组花岗岩矿物成分及含量为石英（20.5%）、斜长石（27.8%）、正长石（42.6%）和黑云母（9.1%），B 组花岗岩为石英（20.8%）、斜长石（58.5%）、正长石（16.3%）和黑云母（4.4%）。压汞试验结果表明，A 组花岗岩孔隙率为 0.62%，平均孔径为 33 nm；B 组花岗岩孔隙率为 1.3%，平均孔径为 242 nm。

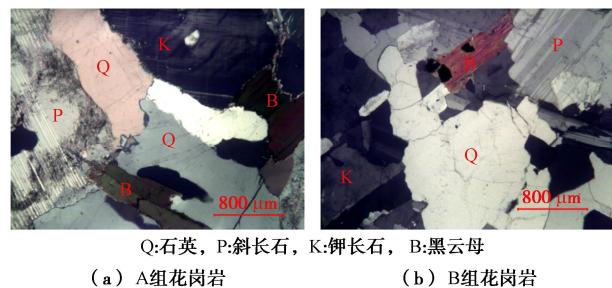


图 1 不同晶粒花岗岩偏光显微图像
Fig. 1 Thin-section observation of granites with different grains

根据岩石断裂韧度测试推荐方法^[19]，将现场取得的花岗岩加工成半圆盘试样，如图 2 所示。半圆盘试样的几何参数为：切槽高度 $a=11.5$ mm，半圆盘直径 $2R=50$ mm，厚度 $B=25$ mm。

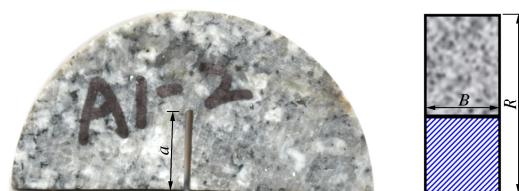


图 2 花岗岩半圆盘试样几何尺寸
Fig. 2 Geometrical parameters of semicircular bend granite

1.2 高温处理程序

加温设备为 SGM 系列高温炉，最高温度可达 1200℃。首先将花岗岩半圆盘试样放入高温炉内，以 5℃/min 的速率增大至目标温度（分别为 200℃，400℃，600℃ 和 800℃）后，试样在炉内恒温 2 h。然后，迅速取出一部分岩样置于准备好的蒸馏水中快

速冷却, 另一部分岩样则留在炉内自然降温至室温。为保证两种冷却方式下的可比性, 对遇水冷却岩样干燥以后再进行力学试验。

1.3 试验系统

花岗岩半圆盘试样三点弯曲试验在中国矿业大学 CSS-88020 电子万能试验机上进行, 如图 3 所示。该试验系统轴向最大加载力为 20 kN。首先安装好三点弯曲夹具, 调节下部两个加载点之间的水平距离为 36 mm。将半圆盘试样放置在三点弯曲夹具上, 施加初始压力使上部加载点与试样接触。对岩样施加轴向力直至岩样发生破坏, 采用位移控制模式, 加载速率为 0.05 mm/min。试验过程由计算机自动采集时间、位移和力等数据。



图 3 试验系统及岩石三点弯曲试验

Fig. 3 Testing system and three-point bedding tests for rock

2 试验结果

2.1 荷载-位移曲线

图 4 给出了高温后花岗岩半圆盘试样荷载-位移曲线。由图 4 可见, 未经高温处理花岗岩试样三点弯曲下峰后荷载-位移曲线均快速跌落, 说明常温下两种花岗岩均呈脆性。然而, 当花岗岩经过高温处理后, 其荷载-位移曲线与常温条件下有所不同, 且变化趋势与温度密切相关。

当花岗岩经过 200°C 和 400°C 温度处理后, 不管是自然降温还是遇水冷却 A 组花岗岩试样的峰后均呈现出延性特征, 如图 4 (a), (b) 所示; 然而, 自然降温与遇水冷却 B 组花岗岩试样的峰后依然呈现明显的脆性特征, 如图 4 (c), (d) 所示, 体现了不同晶粒结构在抵抗温度诱发岩石力学特性变化所起到的作用程度不同。当花岗岩经过 600°C 和 800°C 温度处理后, A 组花岗岩和 B 组花岗岩在不同冷却方式下均出现了较明显的峰前屈服阶段和峰后延性特征, 说明当温度达到一定程度后矿物颗粒之间结合力较弱, 使得花岗岩由脆性向延性转化, 而且相同条件下 B 组花岗

岩的变形更为显著。

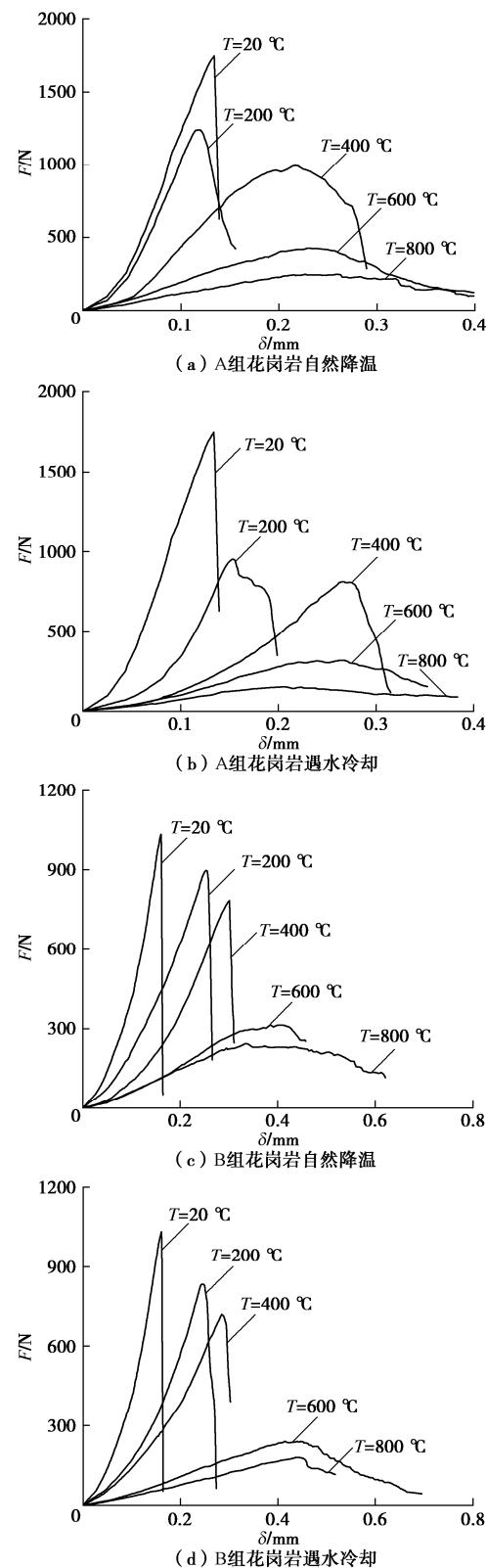


图 4 高温后花岗岩试样荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of granite specimens after high-temperature treatment

2.2 断裂韧度

图 5 给出了花岗岩试样断裂韧度与温度之间的关系。由图 5 (a) 可见, 未经高温处理 A 组花岗岩半圆

盘试样断裂韧度为 $1.25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。随着温度的升高, A 组花岗岩断裂韧度呈减小趋势。与常温条件相比, 200°C , 400°C , 600°C 和 800°C 自然降温 A 组花岗岩断裂韧度降幅分别为 27.7%, 38.7%, 74.6% 和 85.7%, 遇水冷却试样降幅分别为 43.5%, 51.4%, 82.2% 和 90.5%。比较可见, 相同温度作用下 A 组花岗岩遇水冷却处理引起的断裂韧度降幅大于自然降温条件, 即遇水冷却花岗岩断裂韧度弱于炉内自然降温花岗岩。同时, 200°C , 400°C , 600°C 和 800°C 遇水冷却和自然降温条件下花岗岩断裂韧度降幅差异分别为 15.8%, 12.7%, 7.6% 和 4.8%, 即两种降温方式之间的差异逐渐减小, 说明随着温度的升高, 由遇水冷却导致的断裂韧度弱化程度呈降低趋势。

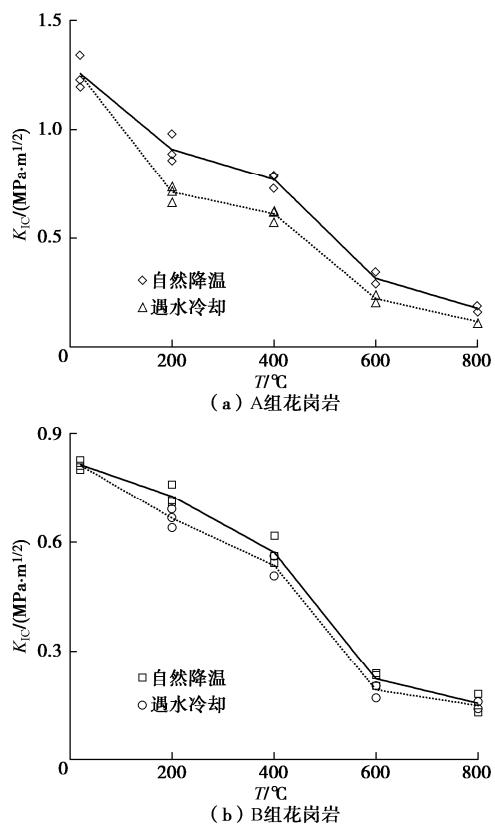


图 5 高温后花岗岩试样断裂韧度

Fig. 5 Fracture toughnesses of granite specimens after high-temperature treatment

由图 5 (b) 可见, 未经高温处理 B 组花岗岩断裂韧度为 $0.81 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 仅为 A 组花岗岩的 64.8%。与常温条件相比, 200°C , 400°C , 600°C 和 800°C 自然降温 B 组花岗岩断裂韧度降幅分别为 10.6%, 29.6%, 72.5% 和 80.9%, 遇水冷却试样降幅分别为 18.1%, 34.2%, 76.3% 和 81.6%, 两种冷却方式下降幅差异分别为 7.5%, 4.6%, 3.9% 和 0.7%。可见, B 组花岗岩断裂韧度受温度影响的变化趋势与 A 组花岗岩相似, 但是对温度的敏感程度要略低于 A 组花岗岩。

2.3 宏微观破裂特征

岩石破断面中蕴含丰富的力学信息, 通过分析高温后花岗岩半圆盘试样破裂模式以进一步认识高温及冷却方式对花岗岩变形破裂特征的影响。图 6 给出了三点弯曲作用下花岗岩半圆盘试样典型破裂模式。在试验过程中观察到, 裂纹首先萌生于直切槽尖端, 并逐渐向上端加载点方向扩展, 最终将岩样劈裂为两大块。花岗岩半圆盘试样的破裂面的总体特征为切槽尖端萌生的向上扩展的裂纹, 但是在局部特征上受晶粒随机分布和初始微观裂纹影响呈曲折扩展。为分析温度和冷却方式对花岗岩试样破裂特征的影响, 把岩样正面和背面的破裂痕迹描绘出来^[20], 如图 6 (b) 所示。

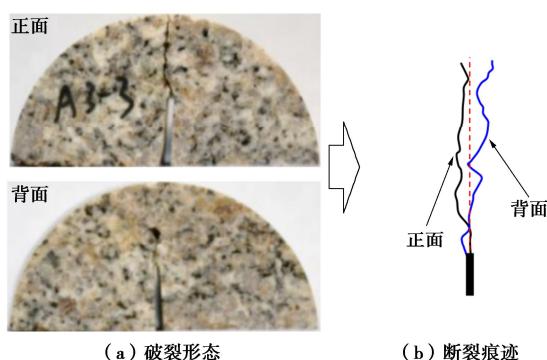


图 6 高温后花岗岩典型破裂模式及断裂痕迹示意

Fig. 6 Typical failure patterns of granite specimen after high-temperature treatment and schematic traces of fracture

表 1 给出了高温后花岗岩半圆盘试样断裂痕迹。比较可见, 在温度相对较低 (如 200°C) 时, 三点弯曲作用下花岗岩半圆盘试样的断裂痕迹相对较直, 与中心线的距离相对较小; 随着温度的升高, 花岗岩半圆盘试样的断裂痕迹曲折程度增大, 与中心线的距离也有所增大, 该现象与液氮冷却花岗岩试样^[21]变化趋势相同。根据最小能耗原理, 岩石在断裂时, 裂纹会沿着最薄弱面向前扩展。在较高温度作用下岩样内部产生热开裂, 提高了岩样的非均质性和非连续性^[22], 宏观裂纹易沿着这些热开裂扩展, 因而破裂面更为曲折。然而, 在本次试验范围内, 冷却方式对断裂痕迹的影响并不明显, 可能是因为自然降温与遇水冷却方式下产生的热裂纹数量和尺度虽然有一定差异, 但是差异程度有限 (将在第 3 节详细分析), 因而冷却方式对宏观裂纹曲折程度的影响难以体现出来。

岩石宏观裂纹是由于内部微裂纹不断萌生、扩展和贯通形成的, 归根结底是岩石矿物颗粒晶体的破坏, 而矿物晶体的破裂主要有 3 类: 沿晶断裂、穿晶断裂以及沿晶穿晶耦合断裂^[23]。为分析不同高温及冷却方式下花岗岩试样的断裂机理, 对高温后花岗岩破裂面进行了 SEM 观察。以 A 组花岗岩试样为例, 如图 7

所示。

表1 高温后花岗岩试样断裂痕迹

Table 1 Traces of fracture of granite after high temperature

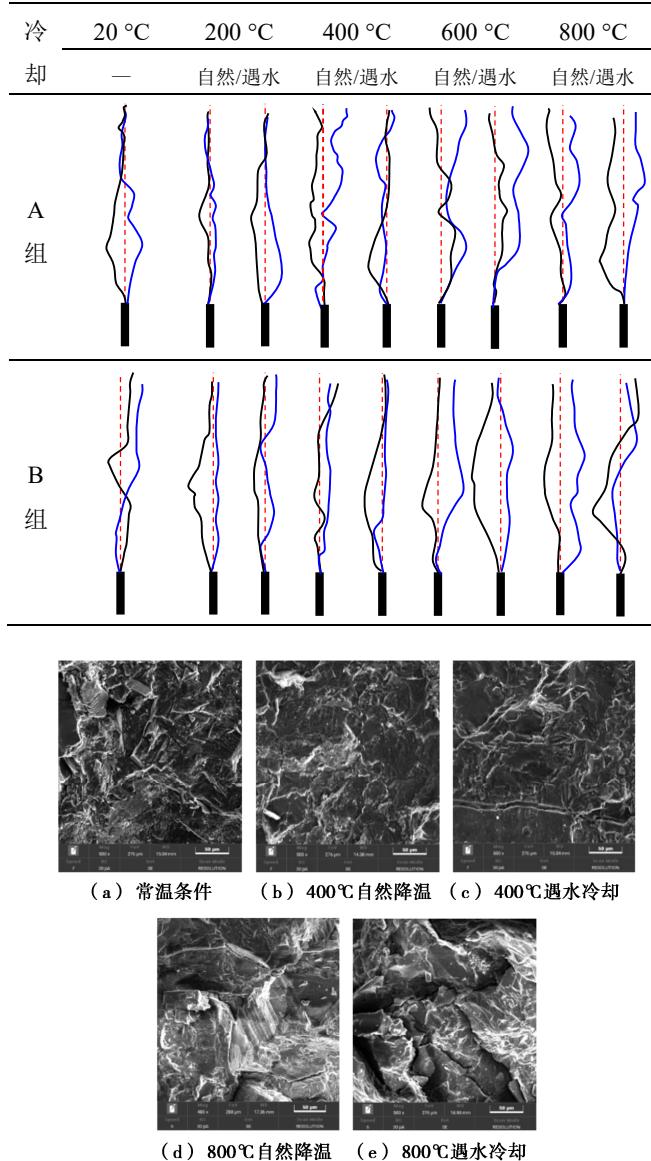


图7 高温后A组花岗岩试样破裂面SEM图像

Fig. 7 SEM images of fracture of group A granite specimens after high temperature

由图7可见, 在常温条件下花岗岩一部分颗粒表面光滑, 无明显棱角, 即断面颗粒保持较为完整, 呈现为沿晶断裂, 但是另一部分颗粒表面有明显被切割或撕裂痕迹, 呈现为穿晶断裂(图7(a)); 而随着温度的升高, 400°C作用后花岗岩以沿晶断裂为主, 同时能观察到少量裂纹(图7(b), (c)); 当温度增大至800°C时, 花岗岩的破裂程度明显加剧, 而且遇水冷却试样裂纹数量较多(图7(d), (e))。这主要是因为常温下花岗岩矿物颗粒之间结合密实, 以穿晶断裂破坏为主; 而高温后花岗岩在加载前已经产生了微破裂, 呈现为沿晶断裂为主^[24], 沿晶断裂所需的能量

较小, 因此高温后花岗岩断裂韧度降低。

3 高温作用机制分析

3.1 基于图像处理的热裂纹

为比较分析两组花岗岩在不同温度及冷却方式下热裂纹差异, 对高温后花岗岩进行扫描电镜观察。图8给出了高温后花岗岩试样SEM图像, 其观察对象为高温后未加载试样。由图8可见, 未经高温处理花岗岩结构致密, 在该放大倍率下, 两组花岗岩中均难以观察到明显的微观裂纹。当A组花岗岩经过200°C作用并自然降温后, 可观察到一条细长裂纹; 当温度为400°C时, 能够观察到3条不规则裂纹; 当温度增大至600°C时, 裂纹数量明显增多, 裂纹之间交汇贯通, 形成裂隙网络; 当温度继续增大至800°C时, 岩样中不仅裂纹数量增加了, 而且裂纹宽度也明显变大, 如图8(a)所示。与自然降温相比, 遇水冷却花岗岩试样在相同温度条件下裂纹数量较多, 裂纹宽度较大, 如图8(b)所示。B组花岗岩中裂纹分布规律与A组花岗岩类似, 整体表现为随着温度的升高, 岩样中裂纹数量增加, 裂纹宽度增大, 逐渐形成裂隙网络, 而且遇水冷却条件下花岗岩微观结构劣化程度比自然降温条件更高。

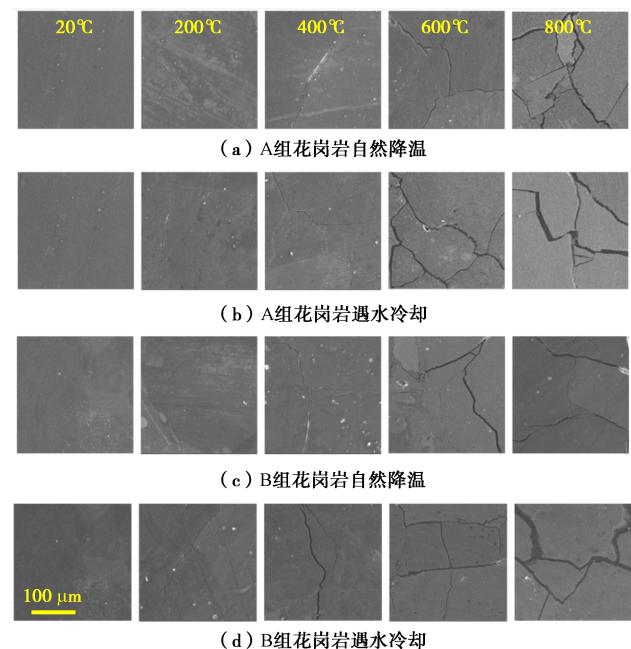


图8 高温后花岗岩SEM图像

Fig. 8 SEM images of granite after high-temperature treatment

通过对SEM图像的观察, 定性分析了高温后花岗岩试样热裂纹分布特征, 然而不同冷却方式下花岗岩热裂纹之间的细微差别难以直接从SEM原始图像中观察得到。因此, 利用图像处理技术, 统计高温后花岗岩SEM图像中微裂纹面积, 计算高温后花岗岩微裂纹密度(定义为微裂纹面积与图像总面积的比

值),定量分析不同温度和冷却方式对花岗岩热裂纹的影响规律。本文图像处理流程为:采用 Matlab 对 SEM 原始图像进行二值化处理,通过设置阈值区分图像中微裂纹和岩石基质,从而识别图像中的微裂纹;进一步,通过编写程序统计微裂纹像素点,获得微裂纹面积和图像总面积,计算得到微裂纹密度。

对不同高温及冷却方式下花岗岩试样 SEM 图像进行处理,结果如图 9 所示。图中白色区域为裂纹,黑色区域为岩石基质。与图 8 比较可见,二值化处理结果与花岗岩表面真实裂纹相吻合,通过处理后的图像能够更清晰地分辨微裂纹的数量、长度、尺寸和分布形态。

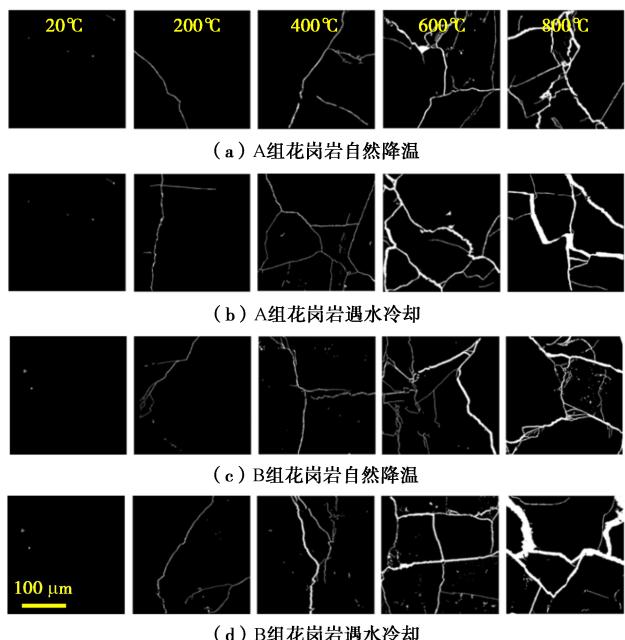


图 9 基于图像处理的高温后花岗岩微裂纹分布

Fig. 9 Micro-crack distribution of granite specimens after high temperature based on image processing

计算得到不同温度和冷却条件下花岗岩试样微裂纹密度,如图 10 所示。由图 10 可见,在本次试验观察倍率下(500 倍),未经高温处理的致密花岗岩中几乎没有微观裂纹,此时微裂纹密度接近于零。当温度为 800°C 时,A 组花岗岩自然降温、A 组花岗岩遇水冷却、B 组花岗岩自然降温、B 组花岗岩遇水冷却微裂纹密度分别为 200°C 时的 16.1, 11.0, 11.1 和 13.3 倍。可以看出,随着温度的升高,花岗岩试样中微裂纹密度逐渐上升,遇水冷却方式下微裂纹密度大于自然降温方式,相同条件下 B 组花岗岩的微裂纹密度略高于 A 组岩样,说明对于本次试验花岗岩微观结构随温度升高而劣化,遇水冷却条件下劣化程度更高,而且 B 组花岗岩劣化程度比 A 组略高。结合图 5 可知,基于图像处理技术统计的微裂纹密度在一定程度上解

释了花岗岩断裂韧度演化规律,即高温作用导致的微观结构劣化,降低了花岗岩试样的断裂韧度。

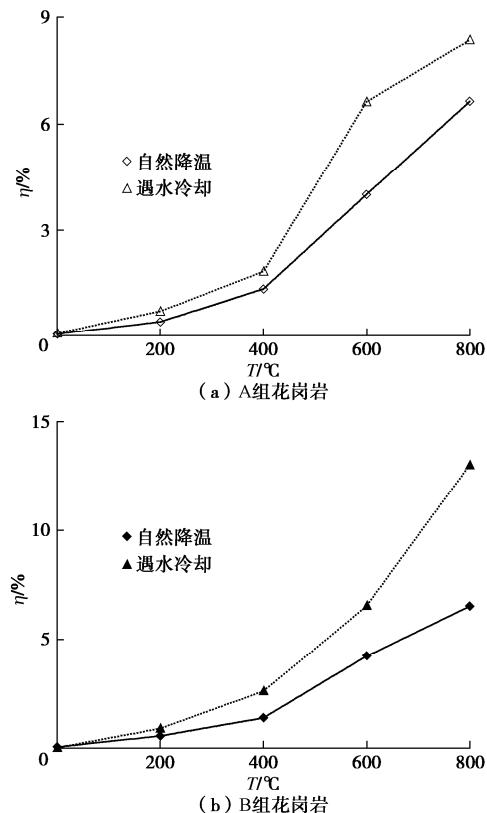


图 10 花岗岩热裂纹密度随温度演化曲线

Fig. 10 Evolution of thermal crack rate of granite with test temperature

3.2 矿物成分及含量

图 11 给出了高温后 A 组花岗岩 X 射线衍射图谱。常温条件下,该花岗岩主要矿物成分为石英、斜长石、正长石和黑云母。经历不同高温作用后花岗岩的主要矿物成分与未经高温处理花岗岩的成分相同,而且各矿物的衍射角未发生明显变化,说明本试验范围内高温作用并未明显影响该花岗岩的矿物组分。但是,矿物在不同温度条件下对应的最大衍射强度有所变化,这可能与岩石矿物相变相关。高温下岩石矿物相变通常会造成矿物体积发生变化,引起岩样内部结构局部损伤,在一定程度上造成了花岗岩宏观力学参数的劣化^[25]。

不同温度及冷却方式下花岗岩矿物含量,如图 12 所示。当温度低于 600°C 时,花岗岩各矿物含量变化较小,当温度超过 600°C 后,矿物含量变化相对较大。在本次试验温度范围内,A 组花岗岩试样石英含量整体呈增大趋势,长石(斜长石和正长石)含量整体呈减小趋势,与文献[26, 27]试验结果相类似,而黑云母含量相对稳定。然而,在试验温度范围内,自然降温和遇水冷却两种冷却方式对本文花岗岩矿物含

量的影响不明显。

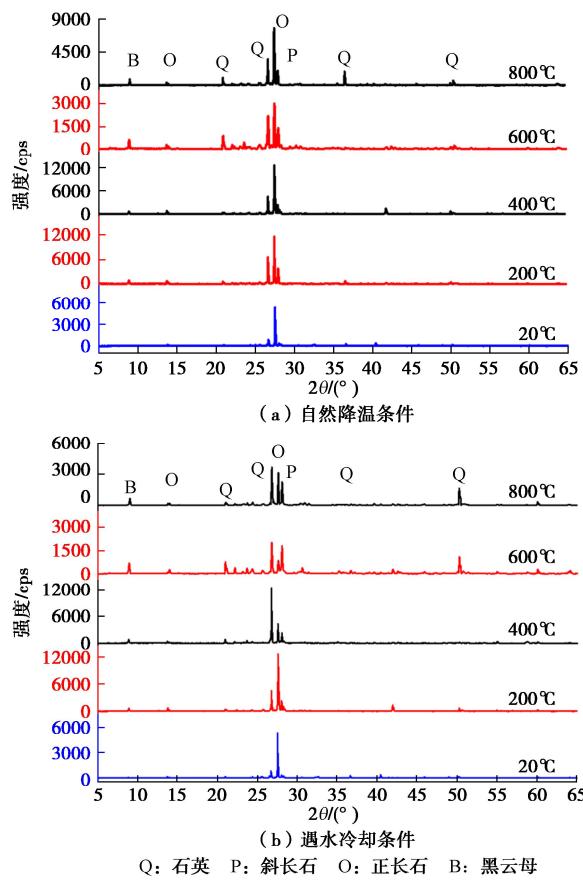


图 11 高温后 A 组花岗岩试样 X 射线衍射图谱

Fig. 11 XRD spectra of group A granite after high-temperature treatment

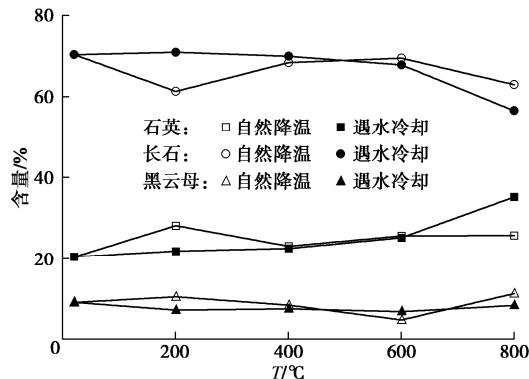


图 12 不同高温作用后 A 组花岗岩矿物含量

Fig. 12 Mineral components of group A granite after high-temperature treatment

除岩石热开裂、矿物含量变化外, 高温对岩石结构的影响还体现在水分丧失等方面。结合 Wong 等^[28]和邓龙传等^[7]研究结论, 温度升高过程岩石内部结构主要变化如图 13 所示。高温作用下岩石矿物颗粒发生膨胀, 因各类矿物的热膨胀系数不同, 岩石发生不均匀膨胀。当矿物颗粒受到的热应力超过极限时, 岩石内部产生微观裂纹^[15-17]。同时, 岩石内不同形式水分

逐渐丧失, 加剧岩石矿物晶格骨架损伤。当温度达到一定程度后, 矿物发生相变和分解等作用, 进一步导致了岩石内部结构的劣化。因而, 高温后花岗岩试样断裂韧度降低。此外, 试样在遇水冷却条件下高温花岗岩表面降温速率较快, 而内部降温速率较慢, 试样内部和表面产生的剧烈温差产生较大热应力, 导致试样内部结构进一步恶化^[29], 因此遇水冷却条件下花岗岩断裂韧度低于自然降温条件。

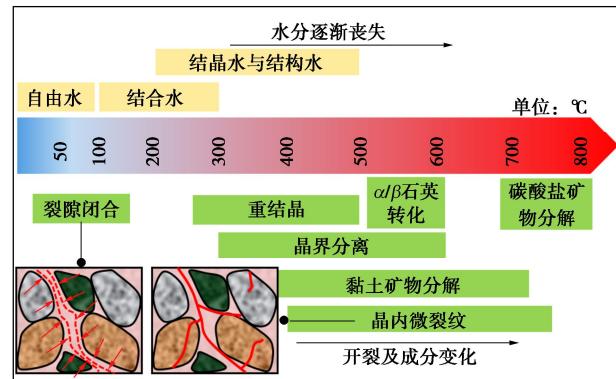


图 13 升温过程岩石内部结构主要变化

Fig. 13 Major changes in rock at elevated temperature

4 结 论

(1) 随着温度的升高, 花岗岩试样的断裂韧度呈减小趋势, 遇水冷却方式下花岗岩断裂韧度低于自然降温条件, 而且随着温度的升高, 由遇水冷却导致的断裂韧度弱化程度呈降低趋势, B 组花岗岩对温度的敏感程度略低于 A 组花岗岩。

(2) 三点弯曲作用下花岗岩半圆盘试样裂纹首先萌生于切槽尖端, 逐渐向加载点方向扩展并将岩样劈裂。当温度较低时, 花岗岩断裂痕迹相对较直, 与中心线的距离相对较小; 随着温度的升高, 花岗岩半圆盘试样的断裂痕迹曲折程度增大, 与中心线的距离也有所增大。

(3) 随着温度的升高, 花岗岩矿物成分未明显变化, 但基于图像处理获得的花岗岩微裂纹密度逐渐上升, 而且遇水冷却方式下微裂纹密度大于自然降温方式。高温导致的岩石内部微观结构劣化, 降低了花岗岩的断裂韧度。

参考文献:

- [1] 庞忠和, 罗 雾, 程远志, 等. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 134-151. (PANG Zhonghe, LUO Ji, CHENG Yuanzhi, et al. Evaluation of geological conditions for the development of deep

- geothermal energy in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, **27**(1): 134-151. (in Chinese))
- [2] 亢方超, 唐春安. 基于开挖的增强型地热系统概述[J]. *地学前缘*, 2020, **27**(1): 185-193. (KANG Fangchao, TANG Chun'an. Overview of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, **27**(1): 185-193. (in Chinese))
- [3] 张洪伟, 万志军, 周长冰, 等. 干热岩高温力学特性及热冲击效应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, **38**(1): 138-145. (ZHANG Hongwei, WAN Zhijun, ZHOU Changbing, et al. High temperature mechanical properties and thermal shock effect of hot dry rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, **38**(1): 138-145. (in Chinese))
- [4] 贾蓬, 杨其要, 刘冬桥, 等. 高温花岗岩水冷却后物理力学特性及微观破裂特征[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(6): 1568-1578. (JIA Peng, YANG Qiyo, LIU Dongqiao, et al. Physical and mechanical properties and related microscopic characteristics of high-temperature granite after water-cooling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(6): 1568-1578. (in Chinese))
- [5] 朱振南, 田红, 董楠楠, 等. 高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(增刊 2): 169-176. (ZHU Zhennan, TIAN Hong, DONG Nannan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(S2): 169-176. (in Chinese))
- [6] 邵保平, 吴阳春, 赵阳升, 等. 不同冷却模式下花岗岩强度对比与热破坏能力表征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(2): 286-300. (XIAO Baoping, WU Yangchun, ZHAO Yangsheng, et al. Experimental investigations of compressive strength and thermal damage capacity characterization of granite under different cooling modes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(2): 286-300. (in Chinese))
- [7] 邓龙传, 李晓昭, 吴云, 等. 不同冷却方式对花岗岩力学损伤特征影响[J]. *煤炭学报*, 2021, **46**(增刊 1): 187-199. (DENG Longchuan, LI Xiaozhao, WU Yun, et al. Mechanical damage characteristics of granite with different cooling methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46**(S1): 187-199. (in Chinese))
- [8] 朱要亮, 俞缙, 高海东, 等. 水冷却对高温花岗岩的细观损伤及动力学性能影响[J]. *爆炸与冲击*, 2019, **39**(8): 84-95. (ZHU Yaoliang, YU Jin, GAO Haidong, et al. Effect of water cooling on microscopic damage and dynamic properties of high-temperature granite[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, **39**(8): 84-95. (in Chinese))
- [9] 吴星辉, 蔡美峰, 任奋华, 等. 不同热处理作用下花岗岩纵波波速和导热能力的演化规律分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, **41**(3): 457-467. (WU Xinghui, CAI Meifeng, REN Fenhu, et al. P-wave evolution and thermal conductivity characteristics in granite under different thermal treatment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, **41**(3): 457-467. (in Chinese))
- [10] 崔翰博, 唐巨鹏, 姜昕彤. 自然冷却和遇水冷却后高温花岗岩力-声特性试验研究[J]. *固体力学学报*, 2019, **40**(6): 571-582. (CUI Hanbo, TANG Jupeng, JIANG Xintong. Experimental study on mechanical and acoustic characteristics of high-temperature granite after natural cooling and water cooling[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, **40**(6): 571-582. (in Chinese))
- [11] 金爱兵, 王树亮, 魏余栋, 等. 不同冷却条件对高温砂岩物理力学性质的影响[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(11): 3531-3539, 3603. (JIN Aibing, WANG Shuliang, WEI Yudong, et al. Effect of different cooling conditions on physical and mechanical properties of high-temperature sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(11): 3531-3539, 3603. (in Chinese))
- [12] FUNATSU T, KURUPPU M, MATSUI K. Effects of temperature and confining pressure on mixed-mode (I-II) and mode II fracture toughness of Kimachi sandstone[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, **67**: 1-8.
- [13] 李春, 胡耀青, 张纯旺, 等. 不同温度循环冷却作用后花岗岩巴西劈裂特征及其物理力学特性演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, **39**(9): 1797-1807. (LI Chun, HU Yaoqing, ZHANG Chunwang, et al. Brazilian split characteristics and mechanical property evolution of granite after cyclic cooling at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, **39**(9): 1797-1807. (in Chinese))
- [14] 平琦, 苏海鹏, 马冬冬, 等. 不同高温作用后石灰岩物理与动力特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(4): 932-942, 953. (PING Qi, SU Haipeng, MA Dongdong, et al. Experimental study on physical and dynamic mechanical properties of limestone after different high temperature treatments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(4): 932-942, 953. (in Chinese))

- [15] HUANG Y H, YANG S Q, BU Y S. Effect of thermal shock on the strength and fracture behavior of pre-flawed granite specimens under uniaxial compression[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, **106**: 102474.
- [16] YANG S Q, RANJITH P G, JING H W, et al. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments[J]. *Geothermics*, 2017, **65**: 180-197.
- [17] FAN L F, WU Z J, WAN Z, et al. Experimental investigation of thermal effects on dynamic behavior of granite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **125**: 94-103.
- [18] 杨圣奇, 田文岭, 董晋鹏. 高温后两种晶粒花岗岩破坏力学特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(2): 281-289. (YANG Shengqi, TIAN Wenling, DONG Jinpeng. Experimental study on failure mechanical properties of granite with two grain sizes after thermal treatment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(2): 281-289. (in Chinese))
- [19] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, **47**(1): 267-274.
- [20] FENG G, KANG Y, MENG T, et al. The influence of temperature on mode I fracture toughness and fracture characteristics of sandstone[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(8): 2007-2019.
- [21] SHAO Z L, TANG X H, WANG X G. The influence of liquid nitrogen cooling on fracture toughness of granite rocks at elevated temperatures: an experimental study[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, **246**: 107628.
- [22] PENG K, LV H, YAN F Z, et al. Effects of temperature on mechanical properties of granite under different fracture modes[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, **226**: 106838.
- [23] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (XIE Heping. *Introduction to Fractal-Rock Mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [24] 周磊, 董玉清, 朱哲明, 等. 高温对花岗岩细观及宏观力学断裂特性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, **53**(4): 1381-1391. (ZHOU Lei, DONG Yuqing, ZHU Zheming, et al. Influence of high temperature on micro and macro mechanical fracture characteristics of granite[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, **53**(4): 1381-1391. (in Chinese))
- [25] WU X G, HUANG Z W, CHENG Z, et al. Effects of cyclic heating and LN₂-cooling on the physical and mechanical properties of granite[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **156**: 99-110.
- [26] HAO J W, QIAO L, LIU Z Y, et al. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of sandstone for thermal energy storage: a comprehensive experimental study[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, **17**(9): 3887-3908.
- [27] YANG S Q, XU P, LI Y B, et al. Experimental investigation on triaxial mechanical and permeability behavior of sandstone after exposure to different high temperature treatments[J]. *Geothermics*, 2017, **69**: 93-109.
- [28] WONG L N Y, ZHANG Y H, WU Z J. Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range[J]. *Engineering Geology*, 2020, **272**: 105619.
- [29] ZHUANG D D, YIN T B, LI Q, et al. Effect of injection flow rate on fracture toughness during hydraulic fracturing of hot dry rock (HDR)[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, **260**: 108207.