高温后花岗岩微观特征及其对强度影响规律研究

黄彦华[1, 2]，张坤博[1]，杨圣奇[1, 2, 3, 4]，田文岭[1, 2]，朱振南[1, 2]，印 昊[1]，李明旭[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 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室，江苏 徐州 221116；3. 绍兴文理学院 土木工程学院，浙江 绍兴 312000；4. 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室，浙江 绍兴 312000)

摘要：高温条件下岩石物理力学特性是深部干热岩地热开采的重要参数。为揭示高温作用后花岗岩微观孔隙特征及其对强度的影响规律，综合采用 CT 扫描、压汞测试及偏光显微观察，分析高温对花岗岩微裂纹密度、孔径组成以及粒径分布的影响，开展高温后花岗岩单轴压缩及巴西劈裂试验，探究花岗岩单轴压缩强度、弹性模量、拉伸强度及压拉强度比随温度的变化规律。试验结果表明：(1) 随着温度升高，花岗岩试样单轴抗压强度、弹性模量以及拉伸强度逐渐减小，而压拉强度比呈先增大后减小趋势。(2) 随着温度升高，花岗岩试样微裂纹从零星分散向交汇贯通转变，裂纹的开度及连通度增强。微裂纹面积及微裂纹密度呈增大趋势，而且较小孔逐渐向较大孔转化。(3) 高温作用下花岗岩首先产生沿晶裂纹，随温度升高，沿晶裂纹和穿晶裂纹数量增多，晶粒尺寸增大，内摩擦角呈先增大后减小，可能是引起花岗岩压拉强度比随温度变化的原因。研究结论有助于揭示岩石高温劣化机制，可为深部干热岩地热开采提供一定参考。

关键词：岩石力学；压拉强度比；微裂纹；孔径分布；晶粒尺寸

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2025)02－0359－14

Study on the microstructure characteristic and its influence on strength properties of granite specimens after high temperature treatment

HUANG Yanhua[1, 2]，ZHANG Kunbo[1]，YANG Shengqi[1, 2, 3, 4]，TIAN Wenling[1, 2]，ZHU Zhennan[1, 2]，YIN Hao[1]，LI Mingxu[1]

(1. *School of Mechanics and Civil Engineering*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*；2. *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221116，*China*；3. *School of Civil Engineering*，*Shaoxing University*，*Shaoxing*，*Zhejiang* 312000，*China*；4. *Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province*，*Shaoxing*，*Zhejiang* 312000，*China*)

Abstract：The physical and mechanical properties of rocks under high temperature conditions are the important parameters of geothermal exploitation of deep dry hot rock(DHR). To reveal the microstructure characteristic and its influence on strength properties of granite specimens after high temperature，the micro crack density，pore composition and grain size distribution were analyzed by using CT scanning，mercury intrusion porosimetry and thin section. Uniaxial compression and Brazilian splitting tests of granite after high temperature were carried out，and the evolution laws of uniaxial compression strength(*UCS*)，elastic modulus，Brazilian tensile strength(*BTS*)

收稿日期：2024－05－23；**修回日期：**2024－09－04

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC2905700)；江苏省自然科学基金项目(BK20221547)；国家自然科学基金资助项目(42107159)

Supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2022YFC2905700)，National Natural Science Foundation of Jiangsu Province(Grant No. BK20221547) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 42107159)

作者简介：黄彦华(1989－)，男，2018 年于中国矿业大学岩土工程专业获博士学位，现任副教授、博士生导师，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

DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2024.0373

and *UCS*/*BTS* ratio of granite specimens were explored. The experimental results show that：(1) as the temperature increases，the *UCS*，elastic modulus and *BTS* of granite specimens decrease，while the *UCS*/*BTS* ratio first increases and then decreases. (2) Microcracks in the thermally-treated granite specimen shift from scattered to intersecting and penetrating，and the opening and connectivity of the cracks increase with the increase of temperature. Furthermore，the microcrack area and density increase，and the smaller pores gradually transform into larger pores. (3) Intergranular cracks firstly appear in granite under high temperature，and the number of intergranular and transgranular cracks increases with increasing temperature. Moreover，the grain size increases，and internal friction angle first increases and then decreases，which is the reason for the evolution of *UCS*/*BTS* ratio of thermally-treated granite. The conclusions help to reveal the degradation mechanism of rock induced by high temperature and provide reference for geothermal exploitation of deep DHR.

Key words：rock mechanics；ratio of compression to tensile strength；microcracks；pore size；grain size

1　引　言

随着全球变暖和环境污染问题日益严重，人们对清洁、可再生能源的需求越来越大，地热能作为一种清洁可再生能源[1]，具有巨大的开发利用潜力，在国家能源结构转型和生态文明建设过程中扮演重要角色[2]。高温岩石物理力学特性是地热能开发的重要参数。因此，开展高温岩石微观结构及强度特性研究，可为地热资源开发利用提供参考。

微观结构分析主要是探究材料的形貌、物相等性质，方法包括 X 射线衍射[3]、显微镜观察[4]、压汞法[5]、核磁共振[6]和 CT 扫描[7]等。对于高温后岩石微观结构特征，众多学者采用上述测试手段开展了试验研究，如徐小丽等[8]通过压汞法测试得到花岗岩孔隙分布分形维数随温度升高而降低，认为非均匀弱化是分形维数变化的根本原因。赵怡晴等[9]利用 X 射线衍射分析高温后砂岩矿物成分变化规律，结果显示当温度较高时矿物的脱水及新相矿物的形成提高了砂岩试样的强度。谌伦建等[10]采用显微镜分析了升温过程砂岩表面裂纹演变，观察到砂岩在 400 ℃时出现裂纹。J. Hao 等[11]进行了高温后砂岩核磁共振试验，试验结果表明温度对砂岩内部微裂纹的影响先为闭合效应、后为拓宽效应。邓申缘等[12]结合 CT 扫描技术，对高温后花岗岩内部微观结构进行三维重构，讨论了花岗岩受热后微观结构的变化规律。由此可见，不同测试方法在高温后岩石微观结构分析上各具特点，显微镜观察具有高分辨率但限于表面裂纹，压汞法可测试不同尺度孔径但纳米级微孔测定不够准确，CT 扫描和三维重构技术可获得内部裂纹分布特征但依赖于扫描精度。

岩石压缩强度、拉伸强度、剪切强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角等力学特性，可通过单轴压缩[13]、巴西劈裂[14]、三轴压缩[15]和剪切试验[16]等试验方法获得。对于高温后岩石力学特性，国内外学者开展了相关试验以探究岩石力学特性与温度之间的关系，如吴 云等[17]单轴压缩试验结果显示，花岗岩单轴压缩强度随温度升高而降低，且温度超过 500 ℃时强度降幅较大。支乐鹏等[18]对高温后花岗岩进行了巴西劈裂试验，结果表明随着温度升高，热损伤增大，抗拉强度降低，当温度达到 1 000 ℃时拉伸强度下降 65%。杨圣奇等[19]开展了高温后花岗岩三轴压缩试验，发现不同围压下花岗岩三轴强度随温度升高呈先增大后降低，高围压抑制了高温对花岗岩峰值强度的影响。吴阳春等[20]进行了高温后花岗岩变角剪切试验，分析了花岗岩黏聚力、内摩擦角与温度之间的关系。蔡燕燕等[21]通过分析高温后三轴卸围压试验结果，认为应变围压增量比先增大后减小，在 300 ℃时达到最大值。此外，学者们还关注了高温后岩石循环加卸载力学特性[22]、声发射特征[23]、冲击压缩强度[24]和动态弹性模量[25]等性质。由此可见，目前对于高温后岩石强度特性进行大量研究，分析岩石峰值强度随温度的变化趋势，但是受岩性、矿物成分、胶结程度和晶粒尺寸等的影响，不同岩石的强度受温度影响程度不同，因此，岩石强度随温度升高的演化规律仍需深入探究。

综上所述，已有研究往往采用单一手段对高温后岩石孔隙结构进行了测试，但缺少对比验证；对高温后岩石压缩或拉伸强度进行了分析，但压拉强度比随温度的变化规律却鲜有涉及。因此，本文综合采用 CT 扫描、压汞测试和偏光显微观察方法，获得高温后花岗岩微观裂纹、孔径组成以及粒径分布特征，实现花岗岩表面到内部微裂纹的定量表征；并通过高温后花岗岩单轴压缩和巴西劈裂试验，分

析压缩强度、拉伸强度及压拉强度比与温度之间的关系，结合微观孔隙结构分析结果对压、拉强度及其比值的演化规律进行初步解释。

2　岩性特征及试验系统

本次试验选用花岗岩为研究对象，取自山东省济宁市某矿区。花岗岩表面呈灰白色，根据偏光显微结果，该花岗岩为中细粒花岗结构，块状构造，硬度大于小刀。XRD 测试结果(见图 1)显示，该花岗岩主要矿物成分为石英(12.1%)、钾长石(45.5%)、斜长石(7.8%)、黑云母(7.8%)以及少量方解石(1.8%)和绿泥石(1.3%)。

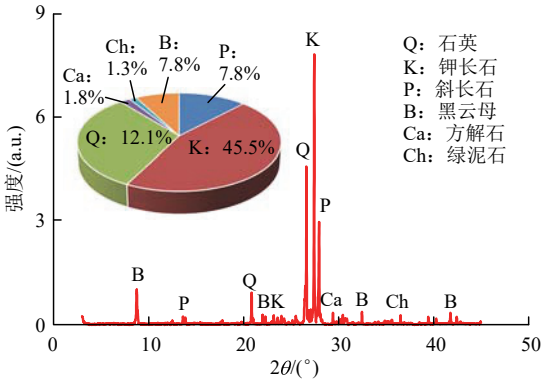
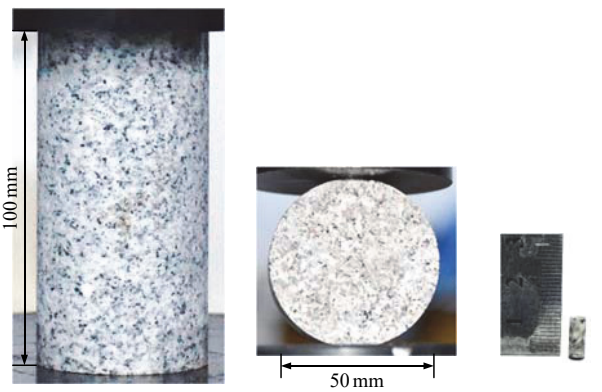


图 1　花岗岩矿物成分

Fig.1　Mineral composition of the tested granite

图 2 给出了本次试验中使用的不同尺寸花岗岩试样。为进行花岗岩单轴压缩试验和巴西劈裂试验，将现场取得的岩块分别加工成直径 50 mm，高度 100 mm 的标准圆柱试样(见图 2(a))以及直径 50 mm，高度 25 mm 的圆盘试样(见图 2(b))。同时，为得到高分辨率 CT 扫描图像，精加工直径 4 mm，高度 10 mm 的小尺寸圆柱试样(见图 2(c))。

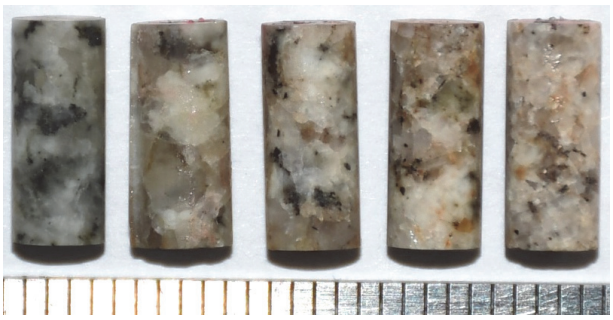


(a) 单轴压缩岩样　(b) 巴西劈裂岩样　(c) CT 扫描岩样

图 2　不同尺寸花岗岩试样

Fig.2　Granite specimens with different geometrical sizes

将加工好的不同尺寸(ϕ 50 mm×100 mm，ϕ 50 mm×25 mm，ϕ 4 mm×10 mm)花岗岩试样进行高温处理。加温设备为 XGM 系列箱式电阻炉，最高温度可到 1 200 ℃。采用 5 ℃/min 加温速度升温至目标温度(分别设置为 200 ℃，400 ℃，600 ℃和 800 ℃)，恒温 2 h 后在炉内自然冷却至室温。图 3 为不同温度作用后小尺寸花岗岩试样。可见，高温后花岗岩颜色发生了较明显变化，由灰白色向黄棕色变化，而且较高温度处理后产生了裂纹。



(a) 20 ℃　(b) 200 ℃　(c) 400 ℃　(d) 600 ℃　(e) 800 ℃

图 3　不同温度处理后花岗岩试样

Fig.3　Granite specimens after high temperature treatments

试验系统主要包括 CT 扫描仪、压汞仪、偏光显微镜以及岩石力学加载系统，如图 4 所示。其中，小尺寸试样采用岛津 inspeXio SMX－225CT 工业 CT 系统(见图 4(a))进行扫描，其 X 射线发生器的额定功率 135 W，最大管电压 225 kV，最大管电流 1 000 μA，图像分辨率 4 μm，可扫描样品尺寸为



(a) CT 扫描系统　(b) 压汞仪

(c) 偏光显微镜　(d) 力学加载系统

图 4　岩石微观测试和力学加载系统

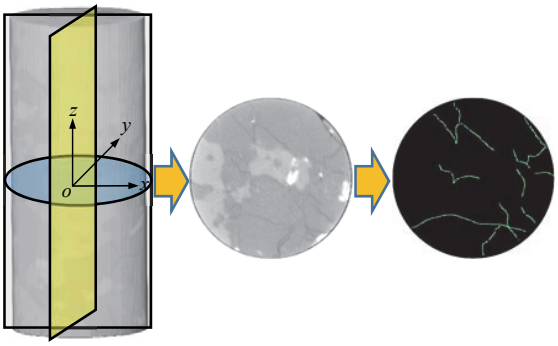
Fig.4　Microstructure measurement and rock loading systems

ϕ 360 mm×300 mm。将试样放置在 CT 载物台后，360° 缓慢恒速旋转实现试样的全周扫描，得到试样 x，y 和 z 三个方向的 CT 切片。采用 Micromeritics AutoPore IV 9510 型压汞仪(见图 4(b))对高温后花岗岩进行压汞测试，该系统可测孔径范围 5 nm～750 μm，最大压力可选择 33 000 或 60 000 psi，进而得到花岗岩内部不同孔径的孔隙分布特征。对高温后花岗岩进行显微观察，所用设备为 DYP－990 透反射偏光显微镜(见图 4(c))，利用光的偏振特性对具有双折射性物质进行鉴定，采用大视野平场目镜，视野范围 ϕ 22 mm，采用无应力平场消色差物镜，成像视野大，可实现单偏光、正交偏光观察。花岗岩试样单轴压缩及巴西劈裂试验均在 DDL－500 万能试验机(见图 4(d))上进行，轴向最大压力为 500 kN。花岗岩单轴压缩及巴西劈裂试验均采用位移控制模式，加载速率分别为 0.1 和 0.05 mm/min。由试验机自动采集位移和力，得到应力－应变曲线。

3　花岗岩微观结构分析

3.1　CT 扫描及重构分析

图 5 给出了花岗岩试样不同位置切片及图像处理过程示例。为分析高温后花岗岩内部微裂纹发育特征，对小尺寸花岗岩试样的 x，y 和 z 三个方向进行剖切，即分别为 yz，xz 和 xy 面(见图 5(a))。每个方向均取 3 个切片，剖切位置分别为试样尺寸的 25%，50%和 75%，如高度方向(即 z 轴)的－2.5，0 和 2.5 mm 位置。对不同位置原始 CT 图像进行阈值分割(见图 5(b))，获得微裂纹分布图像(见图 5(c))，其中，黑色区域为基质，绿色区域为裂纹，进一步统计得到微裂纹面积，将微裂纹面积与切片总面积的比值，定义为微裂纹密度。



(a) 切片位置　　(b) 原始 CT 图片　　(c) 处理后裂纹图片

图 5　不同位置切片及 CT 图像处理示意

Fig.5　Diagram of slices at different positions and CT image processing

图 6～8 分别为不同高温后花岗岩试样在 x，y 和 z 三个方向不同位置微裂纹分布图像。未经高温处理花岗岩试样结构致密，在本文采用的 CT 扫描

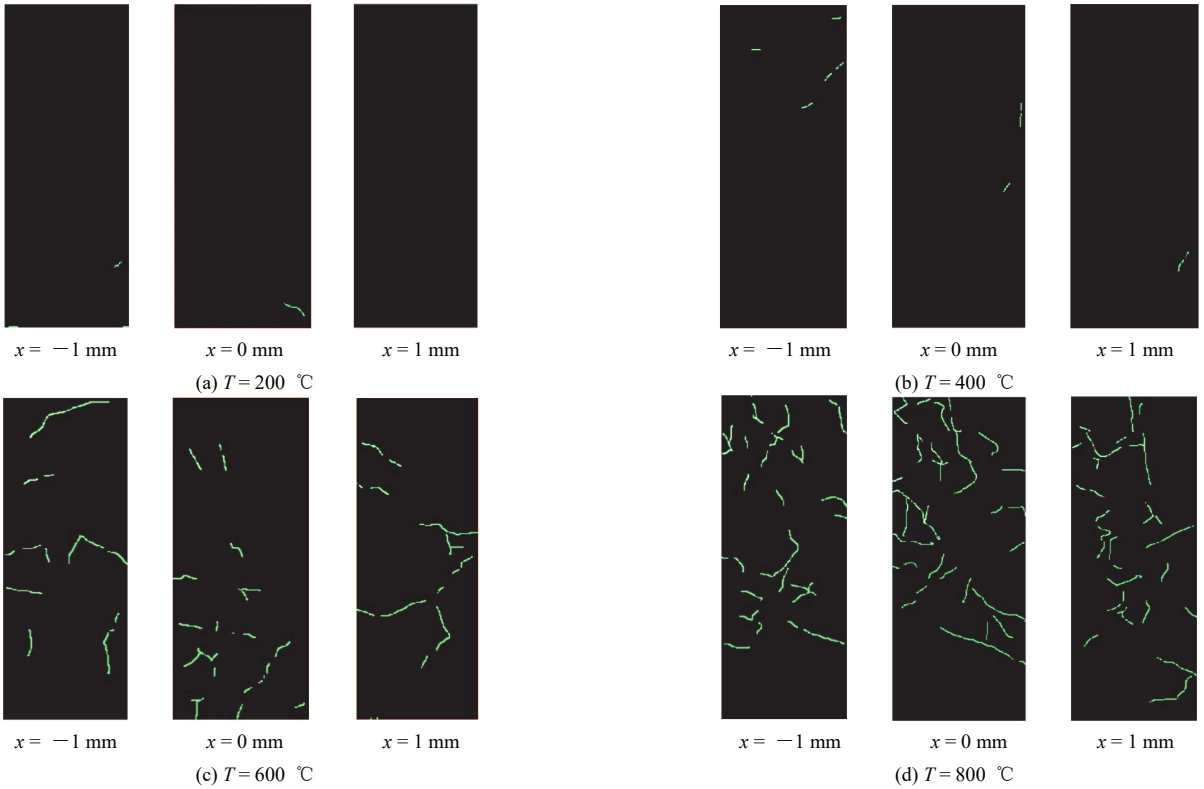


图 6　高温后花岗岩 x 方向热裂纹分布图像

Fig.6　Thermal cracking in thermally-treated granite along x direction

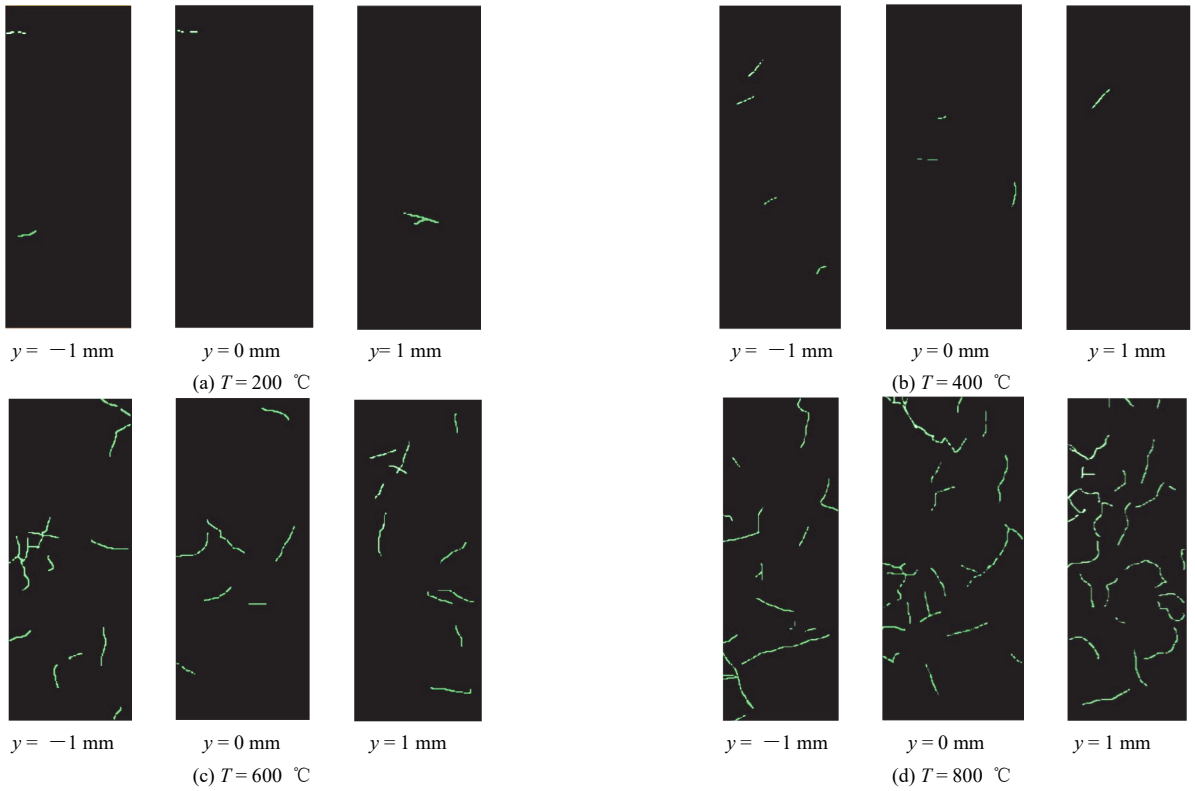


图 7　高温后花岗岩 y 方向热裂纹分布图像

Fig.7　Thermal cracking in thermally-treated granite along y direction

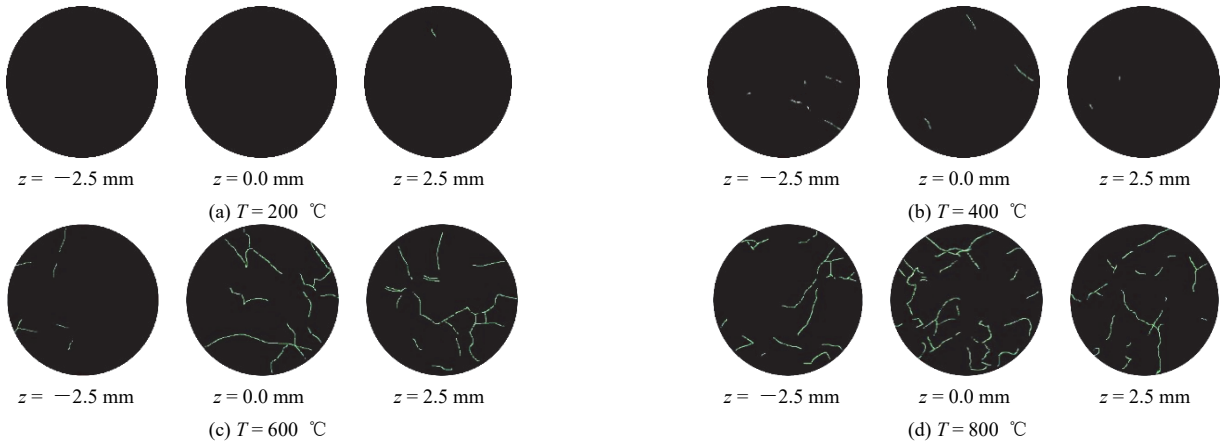


图 8　高温后花岗岩 z 方向热裂纹分布图像

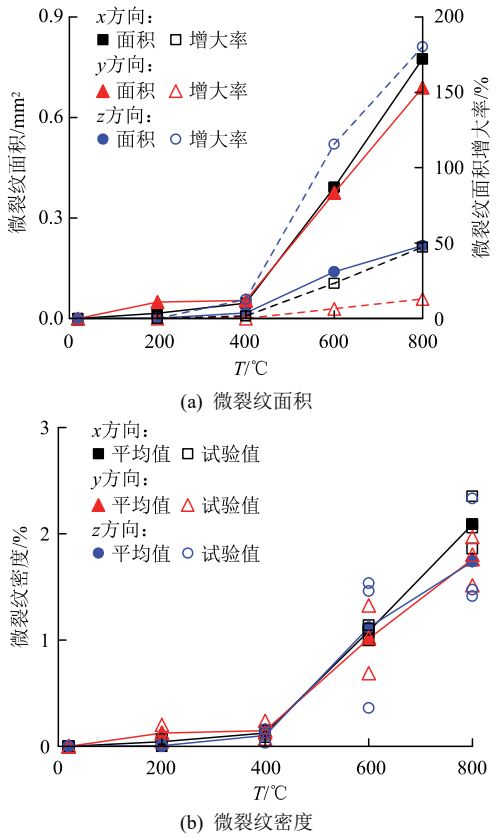
Fig.8　Thermal cracking in thermally-treated granite along z direction

系统分辨率下未观察到明显微裂纹，因此图中没有给出其图像。

对于 200 ℃高温处理后花岗岩，微裂纹数量很少，只能在部分切片中观察到个别微裂纹，且裂纹长度有限。对于 400 ℃高温处理后花岗岩，微裂纹数量依然较少，而且裂纹之间独立未连接在一起，但裂纹数量比 200 ℃高温处理后岩样有所增多。对于 600 ℃高温处理后花岗岩，微裂纹数量有了明显增加，而且裂纹也明显变长，能够观察到裂纹之间发生了交汇贯通。对于 800 ℃高温处理后花岗岩，微裂纹数量进一步增加，可观察到花岗岩试样内部已经形成了较为复杂的裂隙网络。

基于图 6～8 不同高温后花岗岩试样内部微裂纹分布结果，统计得到温度后花岗岩试样微裂纹面积及微裂纹密度 η，如图 9 所示。由图 9 可见，总体上，随着温度升高，花岗岩试样 x，y 和 z 三个方向的微裂纹面积、微裂纹面积增大率及微裂纹密度变化趋势相同。受切片总面积影响，z 方向微裂纹面积较小，但 x，y 和 z 三个方向的微裂纹密度相近。

进一步，由图 9(a)可见，200 ℃和 400 ℃温度处理后岩样微裂纹面积及微裂纹面积增大率变化较小，当温度增大至 600 ℃和 800 ℃时，花岗岩试样



(a) 微裂纹面积

(b) 微裂纹密度

图 9　高温后花岗岩试样微裂纹面积及微裂纹密度

Fig.9　Microcrack area and crack density of granite after high temperature treatment

微裂纹面积及微裂纹面积增大率明显增大，体现了较高温度作用对花岗岩内部孔隙结构的显著影响。由图 9(b)可见，在相对较低温度(200 ℃和 400 ℃)作用后，花岗岩微裂纹密度较小。当温度增大至 600 ℃时，花岗岩试样微裂纹密度明显增大，x，y 和 z 三个方向的平均微裂纹密度(为同一方向上的 3 个不同位置切片的平均值)分别为 400 ℃时的 8.8，6.9 和 10.8 倍。当温度升高至 800 ℃时，花岗岩微裂纹密度继续增大，x，y 和 z 三个方向的微裂纹密度分别为 400 ℃时的 16.9，12.1 和 16.8 倍。此外，图 9 也说明了在同一个方向不同位置以及同一位置不同方向切片中微裂纹面积和微裂纹密度数值存在一定差异，这可能是花岗岩非均质、各向异性导致的。因此，有必要对花岗岩内部微裂纹进行三维重构，获得微裂纹的空间分布特征，统计和分析微裂纹体积，以更准确反映温度对花岗岩微观结构的影响规律。

图 10 给出了基于 CT 扫描的高温后花岗岩微裂纹三维重构过程示例。三维重构采用的是高度方向的 CT 图片，每间隔 0.008 mm 一张图片，剔除上下两端质量不高的图片，共 1 200 张。通过阈值分割，识别出每一张图片中的微裂纹，通过图像堆叠，得到微裂纹的空间分布特征。

图 11 给出了不同高温作用后小尺寸花岗岩试样三维重构结果，其中黑色表示岩石基质，绿色表示裂纹。相比于二维图像(见图 6～8)，裂纹三维重构结果能够更清晰展示其空间分布特征。在本文采用的 CT 扫描分辨率下，未经高温处理花岗岩试样内无微裂纹，经 200 ℃和 400 ℃高温作用后花岗岩微裂纹零星分散，而经 600 ℃和 800 ℃高温作用后花岗岩微裂纹连通程度显著增强。可见，随着温度的升高，花岗岩内高温诱发的微裂纹逐步增加。

基于图 11 不同高温后花岗岩三维重构结果，计算得到高温后花岗岩试样微裂纹体积，结果如图 12 所示。随着温度的升高，花岗岩试样裂纹体积逐渐增大，与微裂纹面积演化趋势(见图 9)相似。本文花岗岩微裂纹体积演化规律与 B. L. Avanthi Isaka 等[7, 12, 26]的 CT 试验结果相近，从而也反映了本文 CT 图像处理方法的可靠性。需要说明的是，受 CT 扫描系统分辨率限制，采用阈值分割法对部分微小且离散裂纹难以准确识别，而图 6～8 中对每张 CT 图像均进行了精细处理，因而三维重构(见图 11)与二维图像中裂纹分布存在微小差异。

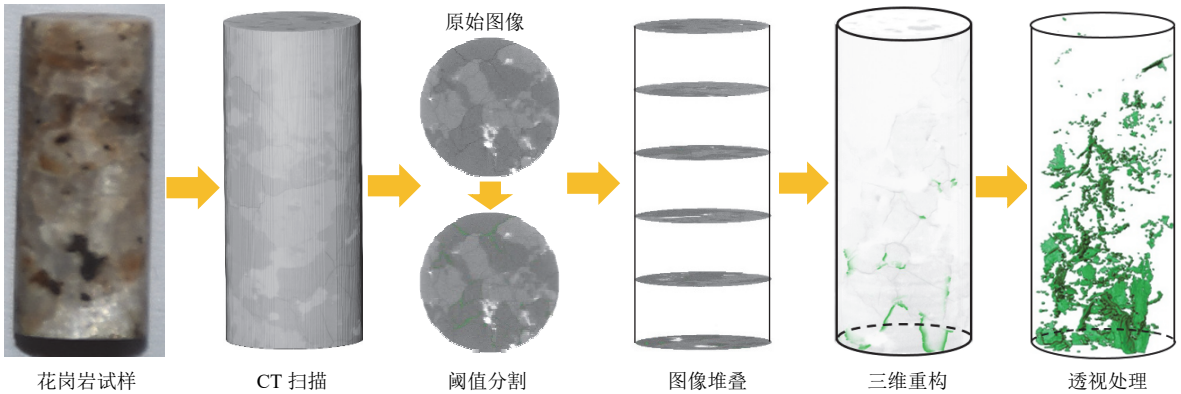
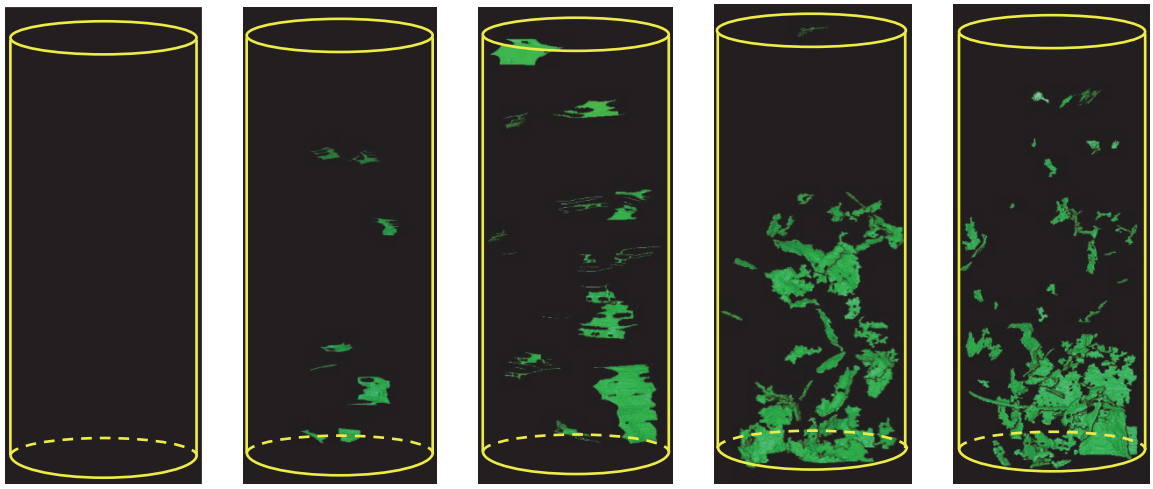


图 10　高温后花岗岩试样三维重构示意

Fig.10　Three-dimensional reconstruction process of granite specimen after thermal treatment



(a) T = 20 ℃　(b) T = 200 ℃　(c) T = 400 ℃　(d) T = 600 ℃　(e) T = 800 ℃

图 11　高温后花岗岩三维 CT 重构结果

Fig.11　3D CT reconstruction results of granite specimens after thermal treatment

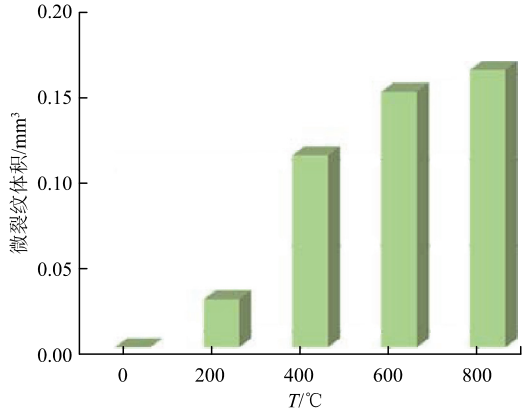
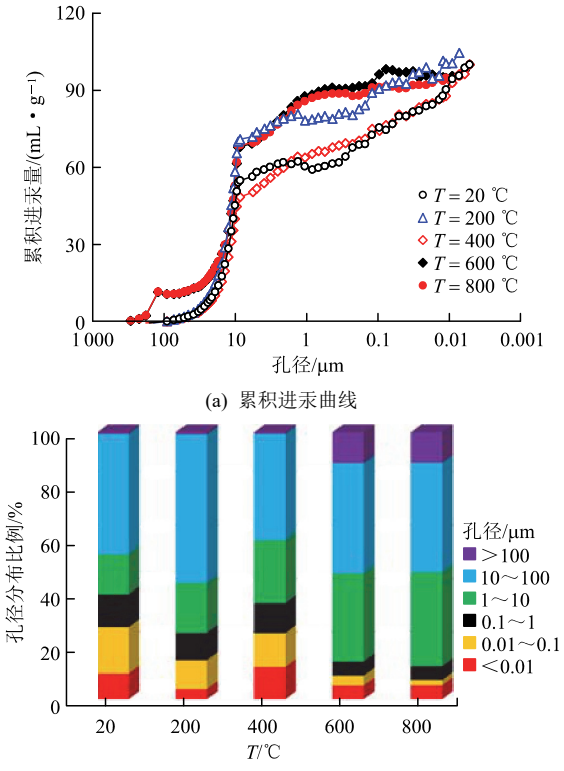


图 12　高温后花岗岩微裂纹体积演化

Fig.12　Evolution of microcrack volume in granite specimens after thermal treatment



(a) 累积进汞曲线

(b) 孔径分布比例

图 13　高温后花岗岩试样压汞试验结果

Fig.13　MIP results of granite specimens after thermal treatment

3.2　压汞结果分析

为了进一步探究温度对花岗岩孔隙特征的影响，对高温作用后花岗岩试样进行压汞测试。图 13 给出了不同温度作用后花岗岩试样累积进汞曲线及孔径分布范围。由图 13(a)可见，累积进汞量主要呈现为 3 个阶段演化，分别为缓慢增长、快速增长和稳定增长，整体上以小于 10 μm 孔为主要组成。根据陈向军等[27-28]的研究，将孔隙划分为 6 类，分别为超微孔(孔径小于 0.01 μm)、微孔(孔径为 0.01～0.1 μm)、小孔(孔径为 0.1～1 μm)、中孔(孔径为 1～10 μm)、大孔(孔径为 10～100 μm)和超大孔(孔径大于 100 μm)。基于累积进汞曲线，可以获得不同孔径分布比例，结果如图 13(b)所示。可以看出，随着温度的升高，花岗岩内部超微孔、微孔以及小孔比例整体呈现出减小趋势，中孔和超大孔比例呈增大趋势。更进一步，相对较小孔(＜1 μm)所占比例随温度升高而减小，而相对较大孔(＞1 μm)所占比例随温度升高而增大，说明温度升高使得较小孔逐渐向较大孔转化。特别地，超大孔在常温～400 ℃温度范围内所占比例极小，在 600 ℃～800 ℃温度范围内占比约 11.5%，充分体现了较高温度作用对花岗岩微裂纹开度及连通度的影响，与前述 CT 扫描结果相一致。

本文花岗岩孔径分布比例随温度的演化趋势与张志镇等[5, 29]的压汞试验以及 J. Hao 等[11]的核磁共振试验结果相似。花岗岩内部孔径变化的原因可能是由于岩石受热后矿物颗粒发生膨胀挤压原有孔隙，导致高温后花岗岩相对较小孔比例减小。岩石矿物晶体交界处的热应力 $\sigma_{\Delta T}$ 可表示[30]为

$$\sigma_{\Delta T}=(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T E_1 E_2/(E_1+E_2) \tag{1}$$

式中：α_1，α_2 分别为相邻 2 个晶体的热膨胀系数，E_1，E_2 分别为相邻两个晶体的弹性模量；ΔT 为温度差。当热应力大于矿物晶体交界处结合力时，便会产生热破裂现象[31]。因此，当温度超过阈值温度时，花岗岩试样孔隙增大，特别是在 600 ℃温度时出现较大幅度增大，这与 573 ℃温度附近 α-β 石英相变[32]引起体积急剧增大有关。

3.3 偏光显微分析

为了探究温度对花岗岩试样晶粒尺寸及表面微裂纹的影响规律，对不同高温处理后花岗岩试样进行偏光显微观察。图 14 给出了高温后花岗岩试样偏光显微结果。由图 14(a)可见，在常温及经 200 ℃和 400 ℃温度作用后花岗岩薄片中只能观察到少量微裂纹，且以沿晶裂纹为主，而经 600 ℃和 800 ℃温度作用后花岗岩薄片中能够观察到较多明显裂纹，且穿晶裂纹有了明显增加。总体上，随着温度升高，花岗岩薄片上裂纹数量增多，裂纹宽度增大，并逐渐交汇成裂隙网络。

同时，将花岗岩薄片中裂纹进行素描(见图 14(b))，

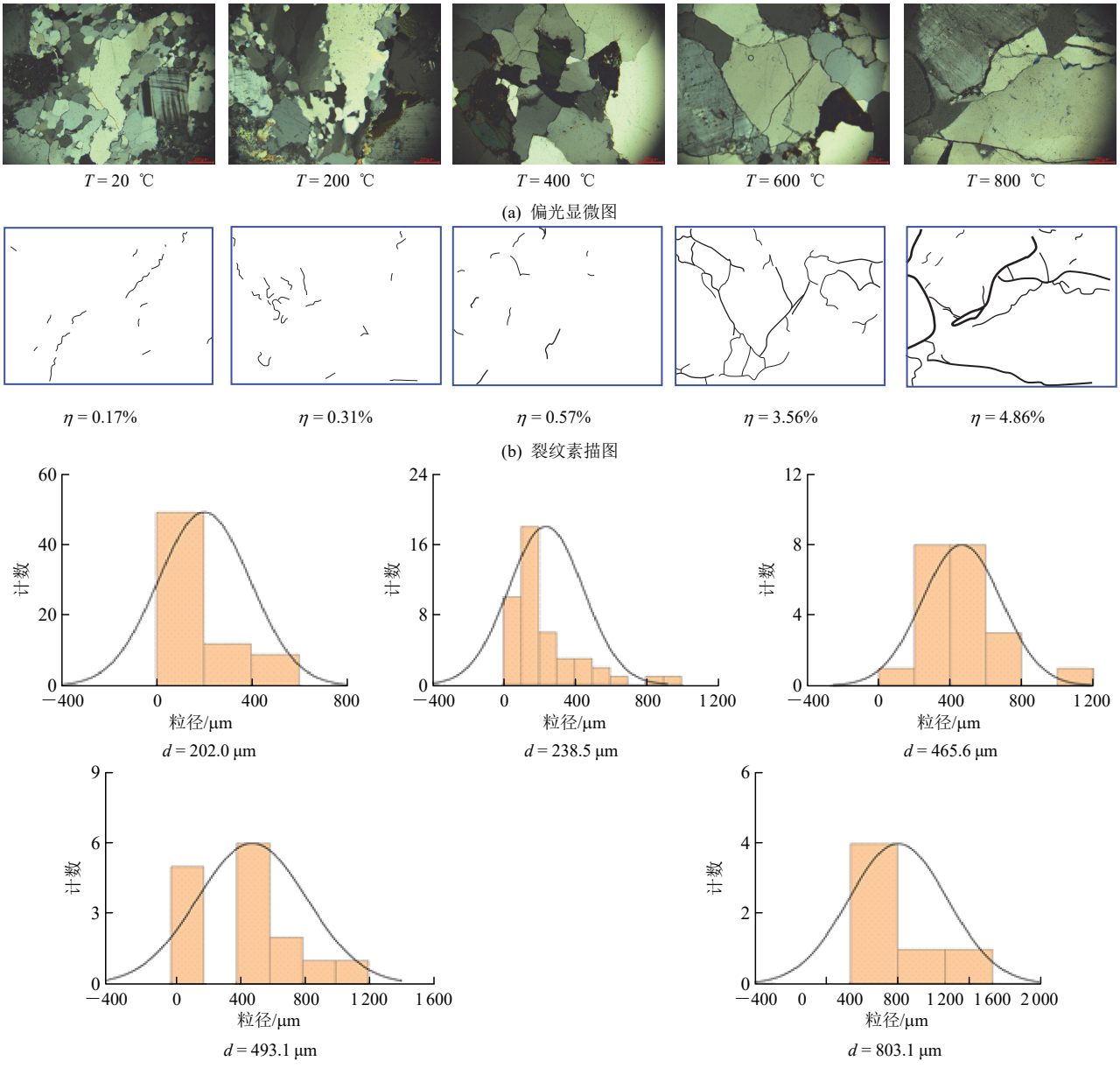


图 14　高温后花岗岩试样偏光显微结果

Fig.14　Polarized microscopy results of granite specimens after thermal treatment

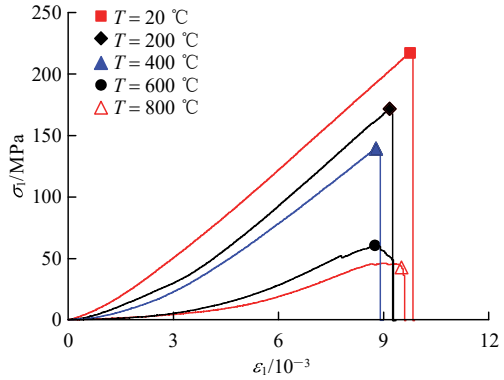
统计其微裂纹面积及微裂纹密度，可以发现当温度不高于 400 ℃时微裂纹密度较小，经 600 ℃温度处理后微裂纹密度约为 400 ℃时的 6.2 倍，增幅明显。高温后花岗岩偏光显微分析结果与 CT 图片统计结果(见图 9)相一致，而且与李 艳等[4, 24]对偏光显微图像处理结果相近。

此外，图中也能观察到温度对花岗岩晶粒大小有较为明显的影响。因此，通过对薄片内粒径进行统计，可以获得不同温度作用后花岗岩晶粒尺寸分布及平均粒径。由图 14(c)可见，随着温度升高，花岗岩矿物晶粒受热膨胀，平均粒径呈增大趋势。

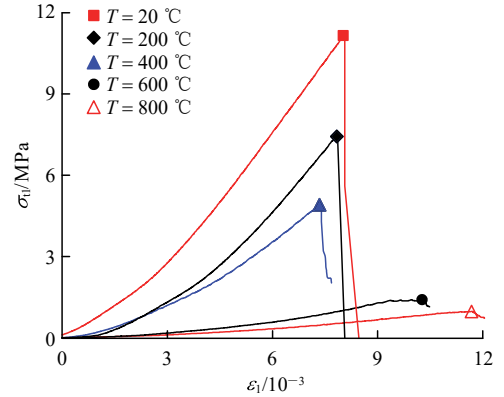
4　花岗岩力学特性分析

4.1　花岗岩强度变化规律

图 15 给出了高温后花岗岩试样单轴压缩及巴西劈裂应力－应变曲线。未经高温处理花岗岩试样峰后脆性特征显著，200 ℃～400 ℃范围花岗岩试样应力－应变曲线形状与常温条件结果类似。然而，当温度达到 600 ℃以上时，花岗岩试样峰前屈服及峰后延性特征明显，体现了高温作用对花岗岩试样内部微观结构的影响。需要说明的是，本次试验采样率为 10 Hz，导致应力－应变曲线峰后段采集数据较少，因此本文重点研究峰值应力随温度变化规律，不考虑峰后曲线特征。



(a) 单轴压缩结果



(b) 巴西劈裂结果

图 15　高温后花岗岩单轴压缩及巴西劈裂试验曲线

Fig.15　Experimental curves of thermally-treated granites under uniaxial compression and Brazilian tests

表 1 和 2 给出了高温后花岗岩试样单轴压缩强度、弹性模量以及拉伸强度。其中，单轴压缩试验每种条件重复测试 2 个岩样，巴西劈裂试验重复测试 3 个岩样。可见，同一试验条件下，重复试验结果接近，该花岗岩试样离散程度较小，可用于分析温度对花岗岩力学特性的影响规律。

表 1　高温后花岗岩单轴压缩力学特性

Table 1　Mechanical properties of thermally treated granite under uniaxial compression

温度/℃	岩样编号	σ_{1c} /MPa	E_s /GPa
20	U20－1	218.19	24.781
20	U20－2	200.33	24.294
200	U200－1	165.07	21.899
200	U200－2	171.97	23.896
400	U400－1	115.37	20.119
400	U400－2	139.50	20.523
600	U600－1	60.70	11.823
600	U600－2	72.05	13.896
800	U800－1	46.05	9.155
800	U800－2	53.50	10.129

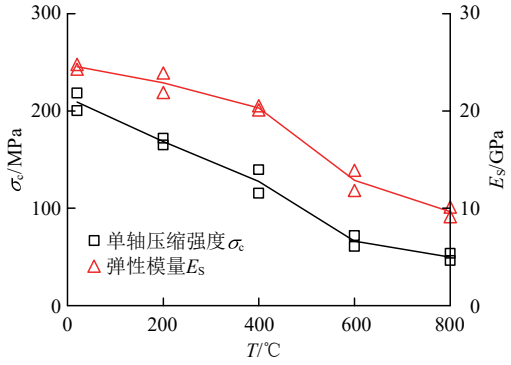
表 2　高温后花岗岩巴西劈裂力学特性

Table 2　Mechanical properties of thermally treated granite under Brazilian splitting

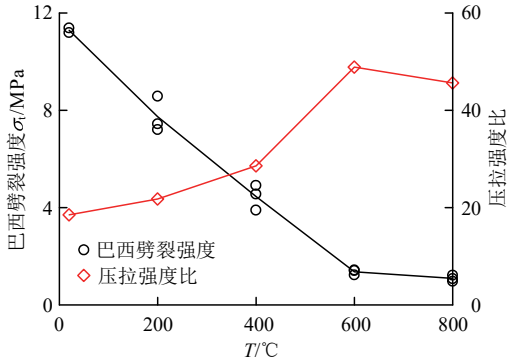
温度/℃	岩样编号	σ_t /MPa
20	B20－1	11.38
20	B20－2	11.19
200	B200－1	7.20
200	B200－2	7.44
200	B200－3	8.58
400	B400－1	4.55
400	B400－2	3.90
400	B400－3	4.91
600	B600－1	1.41
600	B600－2	1.43
600	B600－3	1.23
800	B800－1	1.23
800	B800－2	0.97
800	B800－3	1.08

基于表 1 和 2 试验数据，绘制了花岗岩力学特

性与温度之间的关系曲线，如图 16 所示。随着温度升高，花岗岩单轴抗压强度、弹性模量以及拉伸强度呈减小规律，而且 400 ℃～600 ℃范围单轴抗压强度、弹性模量以及拉伸强度的降幅显著大于其他温度区间。具体表现为：单轴抗压强度、弹性模量以及拉伸强度在 20 ℃～200 ℃降幅分别为 19.5%，6.7%，31.4%；200 ℃～400 ℃降幅分别为 24.4%，11.3%，42.5%；400 ℃～600 ℃降幅分别为 47.9%，36.7%，69.5%；600 ℃～800 ℃降幅分别为 25.0%，25.0%，19.6%，可见在本次试验温度范围内，当温度从 400 ℃增大至 600 ℃时，温度对花岗岩试样的力学特性弱化作用最大。本文花岗岩力学参数随温度的演化规律与古启雄等[6, 16, 23, 26]结果类似，但与杜守继等[13, 22, 25]呈现为先强化后弱化结果不同，这可能受矿物组分、胶结程度、层理及晶粒尺寸等影响，导致不同岩石力学特性随温度的变化规律不同。



(a) 单轴压缩强度及弹性模量



(b) 巴西劈裂强度及压拉比

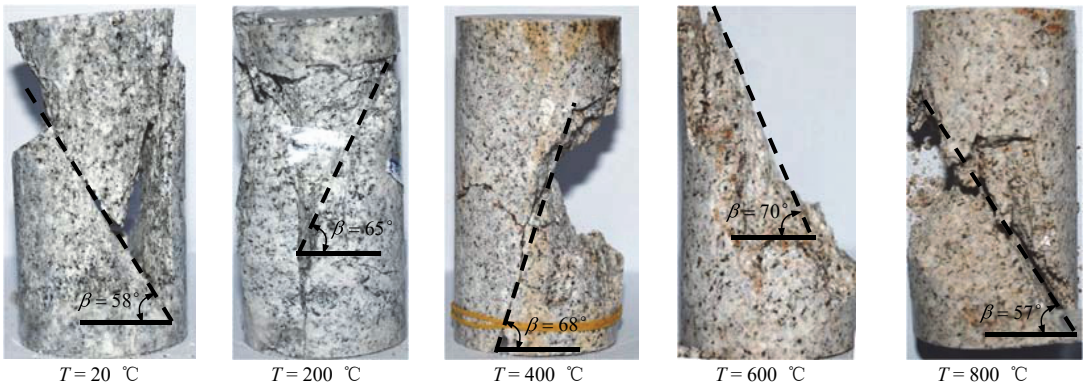
图 16　高温后花岗岩单轴压缩及巴西劈裂强度

Fig.16　Strengths of thermally-treated granite under uniaxial compression and Brazilian tests

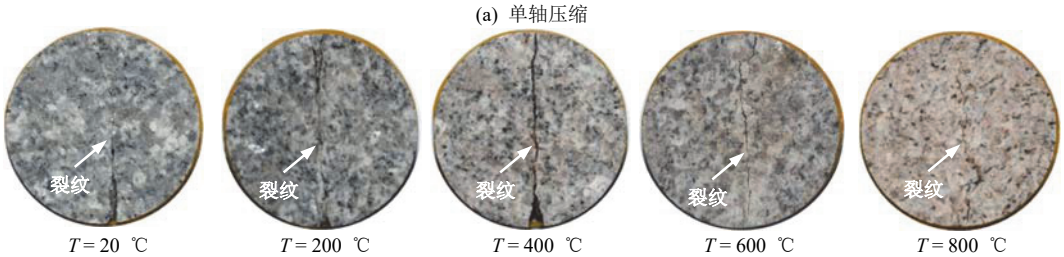
除此之外，花岗岩抗压强度与拉伸强度的比值也受到了试验温度的影响。未经高温处理花岗岩试样的压拉比为 18.5。当温度由 20 ℃增大至 600 ℃时，花岗岩压拉比呈增大趋势，由 18.5 增大至 48.9。当温度由 600 ℃增大至 800 ℃时，花岗岩压拉比减小，但是减小的程度有限，降幅仅为 6.7%。

4.2　高温后花岗岩破裂特征

图 17 给出了高温后花岗岩试样单轴压缩及巴西劈裂试验破裂形态。在单轴压缩作用下，花岗岩试样破裂模式随温度升高由拉剪混合破坏向剪切破坏转变。在常温及 200 ℃温度作用后花岗岩破裂呈块状，当温度达到 400 ℃以上时，花岗岩破坏时能观察到较多碎屑，说明在经历较高温度作用后花岗岩晶粒之间的胶结作用弱化，试样内部结构较为松



(a) 单轴压缩



(b) 巴西劈裂

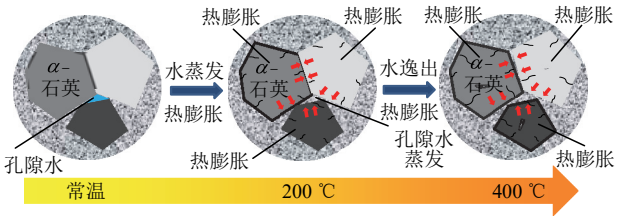
图 17　高温后花岗岩单轴压缩及巴西劈裂破裂模式

Fig.17　Failure modes of thermally-treated granite under uniaxial compression and Brazilian tests

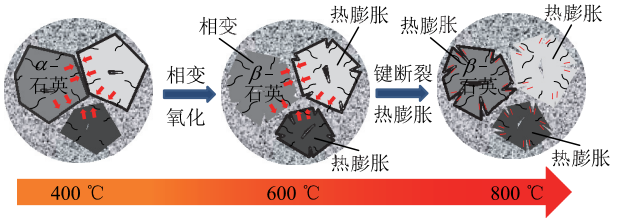
散。在巴西劈裂作用下，花岗岩试样均呈现为沿加载方向的劈裂破坏。但是，主裂纹与加载方向的偏离程度受到了温度的影响，表现为较高温度条件下主裂纹迹线更为曲折，且偏离加载中心距离更大，这主要是因为较高温度作用后花岗岩内部已经产生了较多热裂纹，裂纹易沿着热裂纹方向扩展。

4.3　高温后花岗岩强度劣化机制讨论

图 16(a)，(b)显示，随着温度的升高，花岗岩试样单轴抗压强度及拉伸强度均呈减小趋势。结合 CT 扫描、压汞试验以及偏光显微结果可知，花岗岩试样内小孔逐渐增大为大孔，且随着温度升高，花岗岩试样内微裂纹数量增多，开度增大。具体而言，在常温～400 ℃温度区间，花岗岩试样单轴压缩强度及拉伸强度降低，但降幅较小。这主要是因为在升温过程中，自由水从孔隙中蒸发[33]，结合水和构造水从矿物中逸出[34]，破坏了内部微观结构，同时岩石矿物膨胀系数差异较大，相邻矿物间产生热应力，萌生晶间和晶内微裂纹，且在温度达到 400 ℃时，黑云母的氧化及相变[19]加剧了内部结构损伤，如图 18(a)所示。在 400 ℃～800 ℃温度区间内，花岗岩试样单轴压缩强度及拉伸强度继续降低。这主要是因为岩石矿物的热膨胀系数以及不同矿物间热膨胀系数的差异随温度升高而增大[35]，晶粒间热应力增大引起微裂纹增多，微裂纹相互连接贯通形成裂隙网络。同时斜长石(氧化钙，K-O，Na-O，Al-O)、黑云母(Fe-O，Mg-O)发生金属键断裂[36]，而且石英相变引起石英体积增大 8%[37]，进一步加剧了岩石内部结构的变化，如图 18(b)所示。



(a) 常温升至 400 ℃



(b) 400 ℃升至 800 ℃

图 18　高温条件下花岗岩内部微观结构演化

Fig.18　Microstructural evolution of granite under high temperature condition

图 16(b)显示随着温度升高，花岗岩试样压拉强度比呈增大趋势，但是在 600 ℃～800 ℃时出现降低趋势。其原因可能是岩石压拉强度比是内摩擦角的函数，随内摩擦角增大而增大[38]。根据莫尔－库仑强度准则，岩石剪切破坏面法向方向与最大正应力方向的夹角 β 及内摩擦角 φ 之间的关系式可表述为

$$2\beta=\varphi+45^{\circ} \tag{2}$$

由不同高温后花岗岩试样单轴压缩破裂模式(见图 17(a))可见，破裂角 β 随温度升高呈现为先增大后减小，从而也反映了花岗岩内摩擦角呈先增大后减小趋势，与高温后花岗岩三轴压缩试验得到的内摩擦角变化规律[39]相似。因此，高温后花岗岩压拉强度比增大，但超过一定温度后减小。此外，本文花岗岩压拉强度比变化趋势也可以从数值模拟[40]以及砂岩试验[41]结果加以佐证，即随着粒径尺寸增大，岩石强度压拉比整体呈现增大趋势，但在某些粒径范围会出现减小。

需要指出的是，本文重点分析了高温后花岗岩微裂纹特征，发现高温后花岗岩强度随微裂纹数量增加而降低。根据格里菲斯强度理论，在外载作用下裂纹尖端产生显著的应力集中，促进裂纹扩展，降低岩石强度。可见，高温诱发微裂纹是花岗岩力学性质劣化的主要原因。因此，后续可通过定量分析微裂纹发育特征，建立岩石强度与微裂纹参数之间的函数关系，进而预测高温条件下岩石强度演化规律。此外，虽然本文通过 CT、偏光显微等手段探究了高温后花岗岩微裂纹发育特征，但是在高温岩石矿物组分以及微裂纹扩展方式(沿晶、穿晶)等方面仍有待加强研究，后续可采用图像识别技术，结合 XRD 或 SEM-EDS 等方法实现高温岩石微裂纹扩展方式、矿物组分和含量的判别与分析，以期更全面揭示高温条件下岩石强度劣化机制。

5　结　论

本文开展了 CT 扫描、压汞测试及偏光显微观察，获得了高温作用对微裂纹、孔径以及粒径的影响规律，进行了高温后花岗岩试样单轴压缩及巴西劈裂试验，分析了抗压强度、弹性模量、拉伸强度及压拉比随温度的变化规律，主要得到了如下结论：

(1) 花岗岩试样的力学特性受温度影响显著，表现为随着温度升高，花岗岩单轴抗压强度、弹性

模量以及拉伸强度呈减小规律，且 400 ℃～600 ℃范围降幅显著大于其他温度区间。然而，花岗岩压拉强度比随温度升高呈先增大后减小趋势。

(2) 花岗岩微观孔隙结构受温度影响，呈现为随着温度升高，花岗岩试样内微裂纹从零星分散向交汇贯通转变，微裂纹的开度及连通度增强。微裂纹面积及微裂纹密度呈增大趋势，而且较小孔逐渐向较大孔转化。

(3) 相对较低温度作用下花岗岩内首先产生沿晶裂纹，随温度升高，沿晶裂纹和穿晶裂纹数量增多，矿物受热膨胀，晶粒尺寸增大，内摩擦角呈先增大后减小，可能是引起花岗岩压拉强度比随温度变化的原因。

参考文献(References)：

[1] 汪集旸，胡圣标，庞忠和，等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报，2012，30(32)：25－31.(WANG Jiyang，HU Shengbiao，PANG Zhonghe，et al. Assessment of hot dry rock geothermal resource potential in mainland China[J]. Science and Technology Review，2012，30(32)：25－31.(in Chinese))

[2] 庞忠和，罗　霁，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 deep geothermal energy mining in China[J]. Earth Science Frontiers，2020，27(1)：134－151.(in Chinese))

[3] 王　刚，郑金叶，刘义鑫，等. 不同温度作用下砂岩微观结构变化与演化规律实验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(4)：600－610.(WANG Gang，ZHENG Jinye，LIU Yixin，et al. Experimental study on the microstructure change and evolution law of sandstone under different temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(3)：600－610.(in Chinese))

[4] 李　艳，程禹翰，翟　越，等. 高温后花岗岩微观结构演化特性与动态力学性能研究[J]. 岩土力学，2022，43(12)：3 316－3 326.(LI Yan，CHENG Yuhan，ZHAI Yue，et al. Study on microstructure evolution and dynamic mechanical properties of high temperature granite[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(12)：3 316－3 326.(in Chinese))

[5] 张志镇，高　峰，高亚楠，等. 高温影响下花岗岩孔径分布的分形结构及模型[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(12)：2 426－2 438.(ZHANG Zhizhen，GAO Feng，GAO Yannan，et al. Fractal structure and model of pore size distribution of granite under high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(12)：2 426－2 438.(in Chinese))

[6] 古启雄，黄　震，钟　文，等. 高温循环后花岗岩孔隙结构与物理力学特性演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(6)：1 450－1 465.(GU Qixiong，HUANG Zhen，ZHONG Wen，et al. Study on the variations of pore structure and physico-mechanical properties of granite after high temperature cycling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(6)：1 450－1 465.(in Chinese))

[7] AVANTHI ISAKA B L，RANJITH P G，RATHNAWEERA T D，et al. Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. Geothermics，2019，81：152－167.

[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)：1 752－1 758.(XU Xiaoli，GAO Feng，SHEN Xiaoming，et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(6)：1 752－1 758.(in Chinese))

[9] 赵怡晴，吴常贵，金爱兵，等. 热处理砂岩微观结构及力学性质试验研究[J]. 岩土力学，2020，41(7)：2 233－2 240.(ZHAO Yiqing，WU Changgui，JIN Aibing，et al. Experimental study of sandstone microstructure and mechanical properties under high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics，2020，41(7)：2 233－2 240.(in Chinese))

[10] 谌伦建，赵洪宝，顾海涛，等. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究[J]. 中国矿业大学学报，2005，34(4)：443－446.(CHEN Lunjian，ZHAO Hongbao，GU Haitao，et al. Study on microstructure change of sandstone in coal seam roof under high temperature[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2005，34(4)：443－446.(in Chinese))

[11] HAO J，QIAO L，LIU Z，et al. Effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of sandstone for thermal energy storage：a comprehensive experimental study[J]. Acta Geotechnica，2022，17：3 887－3 908.

[12] 邓申缘，姜清辉，商开卫，等. 高温对花岗岩微结构及渗透性演化机制影响分析[J]. 岩土力学，2021，42(6)：1 601－1 611.(DENG Shenyuan，JIANG Qinghui，SHANG Kaiwei，et al. Effect of high temperature on microstructure and permeability evolution mechanism of granite[J]. Rock and Soil Mechanics，2021，42(6)：1 601－1 611.(in Chinese))

[13] 杜守继，刘　华，职洪涛，等. 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)：2 359－2 364.(DU Shouji，LIU Hua，ZHI Hongtao，et al. Experimental study on mechanical properties of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(14)：2 359－2 364.(in Chinese))

[14] 方新宇，许金余，刘　石，等. 高温后花岗岩的劈裂试验及热损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016，35(增 1)：2 687－2 694.

(FANG Xinyu，XU Jinyu，LIU Shi，et al. Splitting test and thermal damage characteristics of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2016，35(Supp.1)：2 687－2 694.(in Chinese))

[15] 万志军，赵阳升，董付科，等. 高温及三轴应力下花岗岩体力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(1)：72－77.(WAN Zhijun，ZHAO Yangsheng，DONG Fuke，et al. Experimental study on physical properties of granite under high temperature and triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008，27(1)：72－77.(in Chinese))

[16] 郤保平，吴阳春，王 帅，等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(1)：69－83.(XI Baoping，WU Yangchun，WANG Shuai，et al. Experimental study on high temperature thermal damage mechanical properties of granite in Gonghe Basin，Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2019，39(1)：69－83.(in Chinese))

[17] 吴 云，李晓昭，黄 震，等. 高温作用后花岗岩单轴压缩下变形破坏特征研究[J]. 工程地质学报，2020，28(2)：240－245.(WU Yun，LI Xiaozhao，HUANG Zhen，et al. Deformation and failure characteristics of granite under uniaxial compression after high temperature[J]. Journal of Engineering Geology，2020，28(2)：240－245.(in Chinese))

[18] 支乐鹏，许金余，刘志群，等. 高温后花岗岩巴西劈裂抗拉实验及超声特性研究[J]. 岩土力学，2012，33(增 1)：61－66.(ZHI Lepeng，XU Jinyu，LIU Zhiqun，et al . Research on ultrasonic characteristics and Brazilian splitting-tensile test of granite under post-high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics，2012，33(Supp.1)：61－66.(in Chinese))

[19] 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 Jingpeng. 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))

[20] 吴阳春，郤保平，王 磊，等. 高温后花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. 中南大学学报：自然科学版，2020，51(1)：193－203.(WU Yangchun，XI Baoping，WANG Lei，et al. Experimental study on physico-mechanical properties of granite after high temperature[J]. Journal of Central South University：Science and Technology，2020，51(1)：193－203.(in Chinese))

[21] 蔡燕燕，罗承浩，俞 缙，等. 热损伤花岗岩三轴卸围压力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报，2015，37(7)：1 173－1 180.(CAI Yanyan，LUO Chenghao，YU Jin，et al. Experimental study on mechanical properties of thermal-damage granite rock under triaxial unloading confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2015，37(7)：1 173－1 180.(in Chinese))

[22] 胡跃飞，胡耀青，赵国凯，等. 温度和应力循环作用下花岗岩力学特性变化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(4)：705－714.(HU Yuefei，HU Yaoqing，ZHAO Guokai，et al. Experimental study on mechanical properties of granite subjected to temperature and stress cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2020，39(4)：705－714.(in Chinese))

[23] 李二兵，王永超，陈 亮，等. 北山花岗岩热损伤力学特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报，2018，47(4)：735－741.(LI Erbing，WANG Yongchao，CHEN Liang，et al. Experimental study of mechanical properties of Beishan granite’s thermal damage[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2018，47(4)：735－741.(in Chinese))

[24] 赵亚永，魏 凯，周佳庆，等. 三类岩石热损伤力学特性的试验研究与细观力学分析[J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(1)：142－151.(ZHAO Yayong，WEI Kai，ZHOU Jiaqing，et al. Laboratory study and micromechanical analysis of mechanical behaviors of three thermally damaged rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2017，36(1)：142－151.(in Chinese))

[25] 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.

[26] 王嘉敏，王守光，李向上，等. 热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微 CT 试验研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(8)：58－72.(WANG Jiamin，WANG Shouguang，LI Xiangshang，et al. Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning[J]. Coal Science and Technology，2023，51(8)：58－72.(in Chinese))

[27] 陈向军，刘 军，王 林，等. 不同变质程度煤的孔径分布及其对吸附常数的影响[J]. 煤炭学报，2013，38(2)：294－301.(CHEN Xiangjun，LIU Jun，WANG Lin，et al. Influence of pore size distribution of different metamorphic grade of coal on adsorption constant[J]. Journal of China Coal Society，2013，38(2)：294－301.(in Chinese))

[28] 吴恩江，韩宝平，王桂梁，等. 山东兖州煤矿区侏罗纪红层孔隙测试及其影响因素分析[J]. 高校地质学报，2005，11(3)：442－452.(WU Enjiang，HAN Baoping，WANG Guiliang，et al. Pore structure test of Jurassic red-bed in Yanzhou mining area，Shandong province，and its affecting factors[J]. Geological Journal of China Universities，2005，11(3)：442－452.(in Chinese))

[29] 蔚立元，武东阳，张 涛，等. 高温－水冷却花岗岩动态压缩力学特性的应变率效应研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(增 1)：

2 615－2 625.(YU Liyuan，WU Dongyang，ZHANG Tao，et al. Study on strain rate effect of dynamic compression mechanical properties of high-temperature granite after cooling with water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2022，41(Supp.1)：2 615－2 625. (in Chinese))

[30] 郤保平，赵阳升. 600 ℃内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(5)：892－898.(XI Baoping，ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures with 600 ℃[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010，29(5)：892－898 (in Chinese))

[31] 阴伟涛，赵阳升，冯子军. 高温三轴应力下粗、细粒花岗岩力学特性研究[J]. 太原理工大学学报，2020，51(5)：627－633.(YIN Weitao，ZHAO Yangsheng，FENG Zijun. Study on the mechanical properties of coarse-grained and fine-grained granite under high temperature triaxial stress[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2020，51(5)：627－633.(in Chinese))

[32] 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 Zhizhen，XUE Lei，et al. High-temperature phase transformation and physical and mechanical properties of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(5)：935－942.(in Chinese))

[33] 朱振南，王殿永，杨圣奇，等.不同冷却速率下干热花岗岩渗透率演化特征对比研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(2)：385－398.(ZHU Zhennan，WANG Dianyong，YANG Shengqi，et al. A comparative study on permeability evolution of hot dry granite under different cooling rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(2)：385－398.(in Chinese))

[34] ZHANG W，SUN Q，ZHANG Y. Effects of pre-existing cracks and temperature on failure mode of granite from Eastern China[J]. Journal of Structural Geology，2019，126(SEP.)：330－337.

[35] WINKLER E M. Stone in architecture：properties，durability[M]. 3rd ed. Berlin，Germany：Spring，1994：52－58.

[36] FANG X，XU J，LIU S，et al. Influence of heating on tensile physical-mechanical properties of granite[J]. High Temperature Materials and Processes，2019，38：505－515.

[37] 张广强. 不同初始状态的 SiO_2 在高温高压下的结构转变研究[博士学位论文][D]. 长春：吉林大学，2009.(ZHANG Guangqiang. Structural transformation of SiO_2 with different initial states under high temperature and high pressure[Ph. D. Thesis][D]. Changchun：Jilin University，2009.(in Chinese))

[38] 臧德胜，苏林王. 岩石的压拉比与强度准则之间关系的探讨[J]. 淮南工业学院学报，2001，21(3)：13－15.(ZANG Desheng，SU Linwang. The relation between ratio of rock′s compressive-tensile strength and strength criterion[J]. Journal of Huainan Institute of Technology，2001，21(3)：13－15.(in Chinese))

[39] 田文岭，杨圣奇，黄彦华，等. 花岗岩高温高压损伤破裂细观机制模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(9)：1 810－1 919.(TIAN Wenling，YANG Shengqi，HUANG Yanhua，et al. Meso-fracture mechanism of granite specimens under high temperature and confining pressure by numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2022，41(9)：1 810－1 919.(in Chinese))

[40] 孙　闯，敖云鹤，张家鸣，等. 花岗岩细观破裂特征及宏观尺度效应的颗粒流研究[J]. 岩土工程学报，2020，42(9)：1 687－1 695.(SUN Chuang，AO Yunhe，ZHANG Jiaming，et al. Particle flow of meso-fracture characteristics and macro-scale effect of granites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2020，42(9)：1 687－1 695.(in Chinese))

[41] LIU B，ZHANG T，ZHANG H W，et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of weakly cemented sandstone with different grain sizes[J]. Frontiers in Earth Science，2022，10：939372.